

地球温暖化観測における連携の促進を目指して —雲・エアロゾル・放射および温暖化影響評価に関する観測—

(地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書 第2号)

平成22年3月

地球温暖化観測推進ワーキンググループ

(地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁)

刊行にあたって

地球観測連携拠点（温暖化分野）は平成18年度に設置されて以来、地球温暖化関連のニーズの取りまとめ、文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会（以下、推進部会）に関係する資料の取りまとめ、国内ワークショップの開催、国際シンポジウムへの参画等の活動を行ってきた。

事務局の下に設置された地球温暖化観測推進ワーキンググループ（以下、WG）における活動の最も重要なものが、地球温暖化観測における関係機関の連携の促進に資するための、地球温暖化に関連した観測ニーズについての議論とその報告書の作成である。本報告書は、このWGの第2号となる報告書である。

地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書（以下、WG報告書）第1号については、平成20年3月に、「地球温暖化観測における連携の促進を目指して－温室効果ガス・炭素循環および温暖化影響評価に係わる観測－」として刊行し、その概要版（日本語版、英語版）についても刊行した。地球温暖化問題の対応に関しての観測データの重要性については、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次評価報告書において指摘されており、WG報告書第1号においても、モデルによる将来予測と並んで、観測データによる実態把握とモデル結果の検証が非常に重要であることを指摘している。また、WG報告書第1号は、推進部会の基礎的な資料として活用されている。さらに、WG報告書に述べられている各種連携についても、そのいくつかについては、具体的な活動として取り組まれている。

WG 報告書第 2 号においては、地球温暖化の観測において重点的な取組みが求められている分野で、WG 報告書第 1 号では取り扱わなかった、雲・エアロゾル・放射ならびに対流圏オゾンに関する観測、およびWG 報告書第 1 号では概括的に取り扱った温暖化影響評価に係わる観測について、報告書を作成することとした。影響評価に係わる観測項目については、社会的に重要な影響を与える水循環分野、ならびに温暖化の影響が顕著に現れる脆弱な地域等での生態系や雪氷圏等の観測項目を取り上げた。さらに影響検出・影響予測に係わる社会・経済データの整備・共有の促進についても触れることとした。

このため、新たなメンバーによる地球温暖化観測推進ワーキンググループを発足させ、以来、約2年間にわたって検討を行った。検討にあたっては、「雲・エアロゾル・放射」ならびに「影響評価」の2つのサブワーキンググループを設置した。その検討の結果、地球温暖化の観測に関して「データ標準化の促進」、「データ流通の促進」、「観測施設等の相互利用の促進」、「地球システムモデル開発の視点から見た観測ニーズ」、ならびに「時空間的観測空白の改善および観測項目の充実」の観点から各分野の専門家が執筆を担当した。このたびWG報告書第2号を上梓するにあたり、種々の適切なアドバイスを頂いた地球観測推進委員会（温暖化分野）の小池勲夫委員長以下の先生方、お忙しいなか原稿を執筆されたワーキンググループの委員ならびに執筆協力者の方々に感謝するとともに、サブワーキンググループでの議論をリードしていただいた早坂委員ならびに高橋委員に感謝する次第である。

平成22年3月

地球温暖化観測推進ワーキンググループ
主査 鬼頭 昭雄

地球温暖化観測における連携の促進を目指して
— 雲・エアロゾル・放射および温暖化影響評価に関する観測 —
目 次

第Ⅰ部 はじめに

1 報告書作成の経緯.....	1
2 報告書の目的.....	1
3 報告事項の選定.....	1
4 報告書の構成.....	2

第Ⅱ部 地球温暖化に関する観測

第1章 雲・エアロゾル・放射に関する観測.....	3
1.1 はじめに.....	3
1.1.1 科学的背景.....	3
1.1.2 観測の現状.....	4
1.2 データ標準化およびデータ流通の促進.....	5
1.2.1 放射観測.....	5
1.2.2 ライダー観測.....	8
1.2.3 全球大気監視（GAW）計画.....	9
1.2.4 衛星観測.....	11
1.3 観測施設等の相互利用の促進.....	17
1.3.1 アジアの地表ステーションにおける観測強化.....	17
1.3.2 極域における観測強化（北極・南極）.....	19
1.4 地球システムモデル開発の視点から見た観測ニーズ.....	20
1.4.1 はじめに.....	20
1.4.2 地球システムモデルにおける観測データの利用状況.....	20
1.4.3 地球システムモデルの視点からの今後の観測推進の必要性.....	21
1.5 時空間的観測空白の改善および観測項目の充実.....	22
1.5.1 雲・エアロゾル・放射に関する新観測手法の開発.....	22
1.5.2 船舶搭載型システムの開発と配備.....	24
1.5.3 雲・エアロゾル・放射観測用航空機の導入.....	25
1.5.4 雲・エアロゾル・放射・降水に関する衛星観測システムの研究開発.....	26
1.5.5 データ同化.....	30
1.6 まとめ.....	30
第2章 対流圏オゾンに関する観測.....	35
2.1 はじめに.....	35
2.1.1 対流圏オゾン観測の大気化学的意義.....	35
2.1.2 現状と課題.....	35
2.1.3 今後の展望.....	36
2.2 データ標準化の促進.....	36
2.2.1 測定法標準化のための国際・国内活動.....	36
2.2.2 全球大気監視（GAW）計画における観測手法標準化活動.....	37
2.3 データ流通の促進.....	38
2.3.1 温室効果ガス世界資料センター.....	38
2.3.2 国内機関の観測におけるデータ流通.....	39
2.3.3 衛星および上空の観測データ.....	39
2.4 観測施設等の相互利用の促進.....	40

2.4.1	国内の観測施設.....	40
2.4.2	アジア大陸への観測の展開.....	41
2.4.3	極域における観測強化.....	43
2.5	地球システムモデル開発の視点から見た観測ニーズ.....	44
2.6	時空間的観測空白の改善および観測項目の充実.....	44
2.6.1	船舶設置型システムの開発と配備.....	44
2.6.2	定期航空機観測への導入.....	45
2.6.3	衛星観測システムの研究開発.....	46
2.6.4	光化学オキシダント関連情報高度化のための観測.....	48
2.7	まとめ.....	49

第Ⅲ部 温暖化影響評価に関する観測

第3章	水循環分野.....	53
3.1	はじめに.....	53
3.2	必要とする観測項目とそのデータ共有状況.....	56
3.2.1	降水.....	56
3.2.2	河川流量.....	57
3.2.3	土壌水分.....	57
3.2.4	積雪.....	58
3.2.5	地下水.....	58
3.2.6	蒸発・蒸発散.....	59
3.2.7	水の安定同位体.....	60
3.3	衛星観測.....	60
3.3.1	衛星観測の必要性.....	60
3.3.2	現状.....	61
3.3.3	課題と展望.....	61
3.4	観測手法・技術の開発.....	63
3.4.1	衛星による降水観測に関わる技術開発.....	63
3.4.2	衛星による陸域水循環量観測に関わる技術開発.....	64
3.4.3	地上降水レーダーを用いた降雨観測の高精度化.....	65
3.4.4	設置型流速計を用いた現地での連続的な河川流量観測データ収集.....	66
3.4.5	GPSを用いた全球規模の気温・水蒸気プロファイルの取得.....	67
3.4.6	安定同位体を用いた水循環観測に関わる研究開発.....	68
3.5	国際観測計画の推進.....	69
3.5.1	必要性および現状.....	69
3.5.2	課題と展望（データ流通および国際的な観測のあり方についての今後の方向性）.....	70
3.6	モデル開発の視点から見た観測ニーズ.....	71
第4章	雪氷分野.....	77
4.1	はじめに.....	77
4.1.1	地球温暖化影響における雪氷観測の必要性.....	77
4.1.2	世界的な動向と日本の現状.....	77
4.1.3	日本の雪氷研究・観測の特徴と現状.....	79
4.1.4	日本の雪氷分野の課題と展望.....	80
4.2	海水.....	81
4.2.1	必要性.....	81
4.2.2	現状.....	82
4.2.3	課題と展望.....	83

4.3	凍土	84
4.3.1	必要性	84
4.3.2	現状	85
4.3.3	課題と展望	85
4.4	極域の氷床と氷河	86
4.4.1	南極における観測	86
4.4.2	北極における観測	88
4.5	中低緯度の氷河	89
4.5.1	アジア地域の氷河	90
4.5.2	パタゴニアの氷河	91
4.6	降積雪	93
4.6.1	必要性	93
4.6.2	現状	94
4.6.3	課題と展望	95
4.7	衛星による雪氷圏の観測	95
4.7.1	必要性	95
4.7.2	現状	96
4.7.3	課題と展望	96
4.8	モデル開発の視点から見たニーズ	98
4.8.1	必要性	98
4.8.2	現状	98
4.8.3	課題と展望	99
4.9	雪氷データアーカイブの現状と課題	100
4.9.1	必要性	100
4.9.2	現状	100
4.9.3	今後の展望	102
第5章 生態系分野		109
5.1	はじめに	109
5.2	沿岸域	109
5.2.1	サンゴ礁	109
5.2.2	藻場	113
5.2.3	潮間帯・湿地（マングローブ・干潟・汽水域を含む）	118
5.3	陸域	120
5.3.1	高山	120
5.3.2	周極域	122
5.3.3	冷温帯および暖温帯	124
5.3.4	熱帯林	125
5.4	観測・研究ネットワーク	128
5.4.1	国際観測計画の推進	128
5.4.2	日本長期生態学研究ネットワーク（JaLTER）	130
5.4.3	モニタリングサイト1000	130
5.4.4	生物季節観測（植物フェノロジー観測）	131
5.5	衛星による生態系観測	134
5.5.1	衛星観測システムの必要性・現状と課題	134
5.5.2	今後の展望	135
5.6	モデル開発の視点から見た観測ニーズ	135
5.6.1	観測データ利用の概要	135

5.6.2	データ利用の実際.....	136
5.6.3	最近の動向（データの統合化・同化）.....	136
5.6.4	温暖化影響評価と不確実性低減に向けて.....	137
5.7	まとめ.....	137
第6章 社会経済データに関する取組み.....		143
6.1	はじめに.....	143
6.2	人間環境への温暖化影響の検出に関わる社会・経済データ.....	143
6.2.1	農業.....	144
6.2.2	人の健康.....	144
6.2.3	災害（経済的損失と保険損失）.....	146
6.2.4	社会経済的指標.....	147
6.3	影響評価手法開発と影響予測に関わる社会・経済データ.....	147
6.3.1	農業.....	148
6.3.2	人の健康.....	148
6.3.3	沿岸システム.....	149
6.3.4	産業・居住・社会.....	157
6.4	温暖化影響検出・予測に関わる社会経済データの整備・共有.....	159
6.4.1	社会・経済データの広域整備と空間情報化.....	159
6.4.2	地域固有の情報の整備・流通.....	160
6.4.3	将来シナリオの整備と流通.....	164
6.5	まとめ.....	165
6.5.1	社会・経済データの広域整備と空間情報化.....	166
6.5.2	地域固有の情報の整備・流通.....	166
6.5.3	将来シナリオの整備と流通.....	166

第IV部 地球温暖化観測に関する横断的課題

第7章 地上観測と衛星観測の統合に関する課題.....		169
7.1	はじめに.....	169
7.2	長期的な統合観測システムの構築・維持.....	170
7.2.1	雲・エアロゾル観測と水循環・炭素循環・雪氷・生態系観測サイトの共同利用.....	170
7.2.2	大気化学観測と水循環・炭素循環・雪氷・生態系観測サイトの共同利用.....	172
7.2.3	日本およびアジア・ユーラシア地域における分野間連携スーパーサイトの整備.....	172
7.2.4	長期継続を前提とした衛星ミッションの構築.....	174
7.3	データ精度・相互利用性の向上.....	174
7.3.1	大気・放射収支および分野共通の課題.....	174
7.3.2	雪氷分野のデータ精度の向上と新たなパラメーターの推定.....	175
7.3.3	生態系・水循環・雪氷分野における特に改善の必要のある観測項目.....	176
7.4	統合利用技術の向上と人材の育成.....	177
7.4.1	統合利用技術の向上.....	177
7.4.2	人材の育成.....	178
7.5	まとめと今後の展望.....	178
7.5.1	地上と衛星観測の統合における課題.....	178
7.5.2	今後の展望.....	179

第V部 まとめ

第8章 課題と展望.....		181
8.1	雲・エアロゾル・放射に関する観測.....	181

8.2 対流圏オゾンに関する観測.....	181
8.3 水循環分野.....	182
8.4 雪氷分野.....	182
8.5 生態系分野.....	183
8.6 社会経済データ分野.....	183
8.7 地上と衛星観測の統合.....	184
第9章 優先的に取り組むべき課題.....	185
略語一覧.....	189
用語集.....	193
委員一覧.....	205
審議経過.....	208

(注) 本報告書の編集にあたって、参考文献欄および略号について、以下のようにした。

①参考文献欄の標記

筆者が5名以上の場合は第1著者名のあとに「et al.」または「他」をつけて標記した。

②略語の標記

- ・ 各章にわたって、および特定の章において、頻度高く出現する略号を略語一覧に掲載した。
- ・ 略語一覧に掲載されている略号については、各章の初出の箇所で、日本語標記（略号）として掲載した。
- ・ 出現頻度の少ない略号および特定の節のみに出現する略号は、初出の箇所で、日本語表記のある場合は日本語標記（略号：英語表記）、日本語表記のない場合は略号（英語表記）とし、以降の本文では略号のみを使用し、別の節・章で出現する場合には再掲した。
- ・ 周知の略号については、そのまま略号のみを使用した。
- ・ 地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第1号にも抽出されており、本報告書にも出現する略語・用語はそのまま略語一覧・用語集に掲載した。

第Ⅰ部 はじめに

1 報告書作成の経緯

深刻化する地球温暖化問題は、国として喫緊の対応と早急な対策の実施が求められている。地球温暖化問題を解決するためには、包括的で統合された地球観測を長期的・継続的に推進することが必要不可欠である。特に、ポスト京都議定書に関連する施策に対応するためには、地球温暖化の実態把握の観測のみならず、適応・緩和の課題に資するための温暖化影響等に係わる観測の推進も、今後一層重要となってくる。

2004年（平成16年）に策定された「地球観測の推進戦略」（以下、推進戦略）に基づいて2006年（平成18年）に設置された「地球観測連携拠点（温暖化分野）」（以下、連携拠点）においては、連携拠点の事務を担当する地球温暖化観測推進事務局（以下、「事務局」）の下に設置された「地球温暖化観測推進ワーキンググループ」（以下、WG）において、地球温暖化観測に関連する課題について、現状や問題点、今後の展望等について取りまとめるを行うこととし、2008年（平成20年）3月に地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書（以下、WG報告書）第1号を刊行した（日本語および英語の概要版についても2008年7月および11月に刊行）。

WG報告書第1号においては、地球温暖化において重点的な取組みが求められている課題のうち、特に炭素循環（陸域・海洋・大気）および影響評価の2つの項目について、「データ標準化の促進」、「データ流通の促進」、「観測施設等の相互利用の促進」、ならびに「時空間的観測空白の改善および観測項目の充実」の観点から検討を行った結果について取りまとめられている。

WG報告書第1号は、文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会（以下、推進部会）に正式資料として提出され、推進部会等における各種の検討に際して、その基礎的な資料として活用されている。また、事務局においては、報告書に述べられている連携に関する要望等に基づいて、2008年（平成20年）より連携施策について検討を開始し、2009年（平成21年）以降、具体的な連携施策の構築を進めている。

2009年度（平成21年度）においては、地球温暖化において重点的な取組みが求められている分野で、WG報告書第1号では取り扱わなかった、雲・エアロゾル・放射ならびに対流圏オゾンに関する観測、およびWG報告書第1号では概括的に取り扱った、温暖化影響評価に関する観測についてWGで検討を行い、WG報告書第2号を作成することとなった。

このため、関連する分野の研究者の方々にご参加いただき、新たなWGを発足させ（巻末委員一覧参照）、さらに多数の執筆協力者（巻末執筆協力者一覧参照）にもご参加頂き、数次の会合、さらには地球観測推進委員会（温暖化分野）（以下、推進委員会）との合同会合等を経て本報告書が作成された。

2 報告書の目的

本報告書の目的は、地球温暖化の研究等において重点的な取組みが求められている、雲・エアロゾル・放射ならびに対流圏オゾンに関する観測、および、今後ますます重要性が増す温暖化影響評価に係わる観測について、統合された地球温暖化観測システムを構築するために必要不可欠な項目に関して、その現状、課題および今後の展望を明らかにし、推進部会ならびに関係府省・機関における今後の施策等の検討に資することを目的としている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次評価報告書（以下、IPCC-AR4: IPCC, 2007）でも指摘されているように、観測された温暖化とその影響との関係について、より広範囲かつより確信度の高い評価が可能となっており、観測された変化とモデル化された変化の整合性から、人類起源の温暖化が多くの物理・生物システムに対して識別可能な影響をすでに及ぼしている可能性が高いと述べられている。このことから、影響を受ける多くの個別の要素を統合することにより、より確実に影響評価を行うことが可能になるものと考えられる。

このため本報告書では、上述の観測分野について、特に、連携拠点の設置によって進展が期待される、①「データ標準化の促進」、②「データ流通の促進」、③「観測施設等の相互利用の促進」、④「時空間的観測空白の改善および観測項目の充実」の各項目を実現する方策について、機関間・分野間連携および長期継続観測の視点から検討を行っている。

3 報告事項の選定

IPCC-AR4においても指摘されているように、地球温暖化を解明するためには、雲・エアロゾル、ならびに大気放射に関する観測が非常に重要であることから、今回の報告書において集中的に検討を行うこととした。また、

あわせて、対流圏オゾンに関する観測についても検討を行うこととした。さらに、影響評価に係わる観測項目については、社会的に重要な影響を与える水循環分野、ならびに温暖化の影響が顕著に現れる脆弱な地域等での観測項目に絞って、検討を行うこととし、さらに、影響検出・影響予測に係わる社会・経済データの整備・共有の促進についても触れることとした。

本報告書に記述されている具体的な各項目は、推進委員会委員ならびにWG 委員および関係府省・機関から提示された事項等から、推進委員会およびWG での検討を経て選定されたものである。

なお、本報告書の作成にあたっては、今後の連携施策等の検討に資することを目的としていることから、必ずしも各事項について網羅的なレビューは行っていない。

4 報告書の構成

本報告書は5部から構成される。まず、第Ⅰ部において、本報告書の作成の経緯、目的、事項の選定、報告書の構成等が説明されている。第Ⅱ部「地球温暖化に関する観測」を構成する第1章と第2章では、雲・エアロゾル・放射ならびに対流圏オゾンに関する観測を取り扱う。第Ⅲ部「温暖化影響評価に関する観測」では、第3章において「水循環分野」、第4章において「雪氷分野」、第5章において「生態系分野」、第6章において「社会経済データに関する取組み」を取り扱っている。第Ⅳ部「地球温暖化観測に関する横断的課題」では、統合的な観測に不可欠である衛星観測を取り扱っており、第7章「地上観測と衛星観測の統合に関する課題」となっている。さらに第Ⅴ部「まとめ」においては、それまでの各章で述べられた観測について、第8章において「課題と展望」を示すとともに、第9章において「優先的に取り組むべき課題」を示している。

(事務局)

第Ⅱ部 地球温暖化に関する観測

第1章 雲・エアロゾル・放射に関する観測

1.1 はじめに

1.1.1 科学的背景

地球温暖化問題は、現在、人類が直面している様々な問題の中で最も重要かつ複雑なものの1つである。それは、この問題が単に自然科学の分野だけでなく、社会経済学、さらには哲学や倫理学のような人文科学の分野にも関係するからである。様々な学問分野や文化、経済力、政治体制の異なる国家や地域と密接に関係するがゆえに地球温暖化問題の捉え方は多様であり、その対策は容易ではない。

このような状況においても、最近の気候変動の科学の進展や、国際的な政治経済の分野における努力により、地球温暖化問題は、化石燃料の消費や土地利用の改変などの人間活動がグローバルスケールの気候変動に影響を及ぼし、その結果、農業や経済、さらには日々の生活など広範囲の人間活動にフィードバックされる問題であるという認識はかなりコンセンサスを得るようになってきた。

気候変動の科学に関わる研究においては、気候変動のメカニズムを理解し、将来予測の確度を向上させることが急務である。気候システムの中で、エアロゾルと雲は放射収支・水循環と密接に関係しており、最も重要な要素であると同時に不確定要素の最たるものの1つでもある。

人為起源のエアロゾルは、温室効果ガスと同様に石炭を中心とする化石燃料の燃焼により排出される硫酸や硫酸塩のほか、森林伐採や焼き畑などバイオマス燃焼によるブラックカーボン (BC)、間接的には砂漠化による土壌エアロゾルの増加など多岐にわたっている。これらのエアロゾルの多くは自然起源でも発生するので、その区別が容易でないことが地球温暖化問題をさらに複雑にしている。

エアロゾルの増加は、太陽放射を散乱して地球のアルベドを増加させる直接効果、逆にBCなど光吸収の強い粒子が太陽放射を吸収して雲を減少させる準直接効果、あるいは雲凝結核として機能することにより雲のアルベドを増加させる第一種間接効果、そして雲凝結核としての機能が水循環に影響する第二種間接効果として、気候変動に影響を及ぼす (IPCC, 2007)。エアロゾルが気候に及ぼす影響の様々なメカニズムが解明されつつあるが、気候変動の科学はすぐれて定量的なものである点に注意しなければならない。

エアロゾルの直接効果に関するパラメーターは、光学的厚さ・一次散乱アルベドであるが、これらのパラメーターはエアロゾルの粒径分布と複素屈折率によって決まる。また、大気中の加熱・冷却の鉛直分布を評価するためには、これらの鉛直分布も必要となる。さらに、エアロゾルの光学特性、特に一次散乱アルベドが大気-地表系の放射収支に及ぼす影響を推定する場合には、地表面アルベドも考慮する必要がある。すなわち、ある程度光を吸収するエアロゾルを考えた場合、アルベドの小さい海面上に分布する場合とアルベドの大きい雪氷面上に分布する場合では大気上端におけるアルベドへの影響は逆になる。

他方、エアロゾルの間接効果の評価はより複雑である。エアロゾルが雲凝結核になることは100年以上も前から知られていることであり、雲凝結核が例えば硫酸のような純粋な物質から構成されている場合には理論計算が容易で、周りの湿度 (過飽和度) と粒子の大きさによって雲粒が成長するのか蒸発するのかということが決まる。これは教科書に載っている話である。ところが、現実のエアロゾルは様々な化学組成のエアロゾルが外部混合していたり、またはくっついていたり (内部混合) するために、理論計算による定量的評価は極めて困難で、従って観測が不可欠になる。例えば、0.3%の過飽和度で凝結するエアロゾル粒子が0.2%の過飽和度で凝結するエアロゾルと混在した場合、前者のエアロゾルは雲凝結核としてはあまり働かないということになる。ところが、逆に0.4%の過飽和度で凝結するエアロゾルと混合していれば、十分雲凝結核として機能することになる。土壌粒子やBC粒子は氷晶核として機能することが知られているが、その雲に及ぼす影響は定量的には解明されていない。最近ではこれらの粒子に硫酸や硫酸塩などの親水性の物質が付着することにより、雲凝結核として機能することが明らかになってきた。また、同じだけエアロゾル濃度が増加しても、すでに大気汚染の激しい、従って雲凝結核濃度が高い地域における影響と、大陸から離れた清浄な地域における影響では、その効果が大きく違ってくる (Rosenfeld *et al.*, 2008)。

以上のようなエアロゾルの直接効果・間接効果を気候システム全体の中で考える際に、温室効果ガスと比べてエアロゾルと雲の時空間変動が極めて大きいという点に注意する必要がある。エアロゾルの生成・消滅のメカニズムは複雑で、大気中の滞留時間はおおむね一週間程度と推定されている。従って、エアロゾルの放射強制力を評価する場合、全球平均値の議論では極めて不十分である。特に東アジア・東南アジアのエアロゾルは土壌粒子・

工業起源粒子・バイオマス燃焼起源粒子・海塩粒子などが複雑に混合して変動しており、エアロゾル濃度や光学特性の定量的評価も不十分であると言わざるを得ない。その結果、地球大気―地表面系の放射収支、ひいてはエネルギー収支もいまだ解明されているとは言えない。例えば大気―地表系のエネルギー収支は、教科書にも記載されているため、すでによく知られているかのような印象を与えるが、実際のところはよくわかっていない。最近になって放射収支を高精度で観測する衛星データが得られるようになったこともあり、その値は改訂されている (Trenberth *et al.*, 2009)。一例を挙げると、大気による太陽放射エネルギーの吸収は全球年平均値で、気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書 (IPCC-AR4) において 68W/m^2 であったものが最新の値では 78W/m^2 となっている。これに対して、地球温暖化問題においては、0. 数〜数 W/m^2 の放射強制力が議論されている。従って、放射強制力の評価を考える際に今一度、我々は基本的なことをどこまで把握しているのかということを再検討する必要もあろう。

近年、エアロゾルの太陽放射への影響の例として、日射量 (地表面での下向き短波放射フラックス) の長期変動が議論されている。すなわち、様々な地域における日射量の観測は 1957/58 年の国際地球観測年 (IGY) を契機として開始されたが、その後 1980 年代後半から 1990 年頃まで日射量の長期減少傾向が見られた。ところが、その後は、アフリカやインドなど一部の地域を除き、日射量はおおむね増加に転じている。これは GDB (Global Dimming and Brightening) と呼ばれている。その値は、例えば減少率では数 $\text{W/m}^2/\text{decade}$ であり、無視し得ないものである。これだけの変化があれば、当然、地表気温にも影響を及ぼすことが予想される。ところが、気候モデルは、観測された気温はほぼ再現しているものの、この日射量の長期変動をほとんど説明できていない。GDB のメカニズムの解明は現在進行中であるが、エアロゾルの直接効果と間接効果の組合せで説明できる可能性があることが指摘されている (Wild, 2009)。

ところで、二酸化炭素やメタンなどの長寿命温室効果ガスと比べて、対流圏オゾンなどの短寿命ガスはエアロゾルと同様に時空間変動が大きい。従って、その研究においては長寿命の温室効果ガスとは同様に扱うことが難しい。また、最近では、オゾンに加えて亜硫酸ガスなどのエアロゾル前駆気体やエアロゾルそのものなども含めて、人間活動に伴うローカルな大気汚染と気候変動の関係を調べる重要性が強まっており、国際的な研究の枠組みの構築も進められている (Ramanathan *et al.*, 2007)。

1.1.2 観測の現状

エアロゾルの地上観測に関しては、以前から世界各地の気象官署において視程観測が実施されてきた。また、直達日射計を用いた大気混濁度の観測も長年にわたって実施されている。その後、サンフォトメーターによるエアロゾルの波長別光学的厚さの観測が進められ、現在では、例えばアメリカ航空宇宙局 (NASA) による大気エアロゾル観測ネットワーク (AERONET) の構築によってサン・スカイラジオメーターの観測網が展開されるに至った (Holben *et al.*, 1998)。現在では世界中に 300 以上の観測点を展開している。

我が国においても、SKYNET と称する独自のスカイラジオメーターの観測網が、アジアも含めて展開されているほか、ミー散乱ライダーの観測網もある。スカイラジオメーターとライダー観測の組合せにより、エアロゾルの粒径分布と鉛直分布の相補的な観測が可能となった。さらに最近では、沖縄県辺戸岬や長崎県福江島のように SKYNET のいくつかの観測サイトで、雲・エアロゾル・放射の総合かつ継続的な観測が実施されている。これらの総合観測サイトは黄砂などの集中観測にも用いられ、エアロゾルに関する光学特性と化学特性の同時観測が行われるようになってきた。

エアロゾルの観測に比べて雲の地上観測は困難な点が多い。雲は通常地面には接していないので、地上からの観測は基本的にマイクロ波放射計やライダー・レーダーを用いたリモートセンシング観測が主流となる。また、可視・近赤外域の放射計による観測や、全天カメラによる雲状況の把握も自動的に行われている。雲はエアロゾルに比べて時空間変動がさらに大きく、放射計算と観測データを比較して雲微物理量を求める際に、平行平板状の大気モデルを仮定できない場合も多い。また、レーダーやライダーなどの能動型センサーは放射計に比べて絶対値の較正が難しい。従って定量的なリモートセンシングにはいまだ課題も多い。

雲・エアロゾル・放射に関する衛星観測は、気候変動の研究に用いることが可能なレベルですでに 20 年以上の実績がある。エアロゾルに関しては全球エアロゾル気候計画 (GACP: Global Aerosol Climatology Project) が、また雲に関しては国際衛星雲気候計画 (ISCCP) が長期データのアーカイブ・解析を行っている (Geogdzhayev *et al.*, 2005; Rossow and Schiffer, 1999)。エアロゾルの衛星観測においては、ある仮定の下におおまかな粒径分布や化学組成の判別も可能になりつつある。また、雲に関しては、光学的厚さや鉛直積算雲水量・雲粒有効

半径が定常的に求められるようになり、水と氷の区別もできるようになっている。さらに近年では、衛星搭載能動型センサー（ライダー・レーダー）による観測から、グローバルスケールで雲とエアロゾルの実際の鉛直分布が明らかにされるようになるとともに、衛星搭載放射計による観測と併せて、より定量的な解析が行われつつある。その結果、これを基に放射収支の評価も3次元でできるようになりつつある。

以上のように地上観測や衛星観測は大きく進展したが、それぞれ観測可能な時空間スケールには特徴・限界があり、従って、これらの観測データをより活かすためには、当然のことながら比較検証、データの相補的な利用が重要となる。近年においては、新しい能動型センサーに加えて従来型の各種放射計を用いた衛星観測と地上観測をどのように組み合わせるのかということが重要な課題の1つになっている。他方、エアロゾルと雲を再現する数値シミュレーションも格段に進歩したが、上記の各種観測結果はモデルの計算結果を単に比較検証するだけでなく、各種モデルを用いた解析やデータ同化が行われつつある。

最後に、航空機や船舶を用いた観測について簡単に触れておく。欧米の動向に合わせるように、我が国では中層大気国際共同観測計画(MAP: Middle Atmosphere Program)や世界気候研究計画(WCRP)の枠組みの中で、雲・エアロゾル・放射の航空機観測が1980年代半ばから10年間程度積極的に行われた。その結果、例えば火山噴火による成層圏エアロゾルの変動や雲の太陽放射の異常吸収の解明に関する研究に貢献した。しかしながら、その後はそれほど進展していない。また、二酸化炭素やメタンなどの長寿命温室効果ガスの航空機観測は長期にわたり実施されているが、短寿命気体の航空機観測は頻繁には行われていない。他方、船舶を用いた観測は、観測船「みらい」に搭載されたライダー・スカイラジオメーター・雲レーダーによる雲・エアロゾルの観測が漸続的に行われている。これらのデータについても、地上観測と同様に、各種モデルや衛星観測の解析結果も併せて総合的な解析を行うようになっている。

以上の科学的背景と観測の現状を踏まえ、第1章においては、雲・エアロゾル・放射に関する観測のレビューと我が国の特徴を活かした今後のこの分野における観測研究の在り方を取りまとめる。

(早坂)

1.2 データ標準化およびデータ流通の促進

1.2.1 放射観測

(1) 必要性

放射収支は地球の気候を決定するうえで基本的な要素の1つである。1950年代後半から定量的に測定がなされるようになり、1990年頃まで多くの文献で地上での下向き短波放射量が減少傾向(dimming)にあることが示されていたが、その後基準地上放射観測網(BSRN)による観測が展開され、1990年代以降増加傾向(brightening)になっている(Wild *et al.*, 2005)。この傾向と対応し、地表面の気温の上昇率・日変化の振幅の変化傾向が変わっていることが指摘されているが、IPCC-AR4で使われたモデルでは短波放射量は再現されていない(Wild, 2009)。

このように継続的な観測を行うことで地球の放射収支の現状を知ると同時に、エアロゾルや雲などほかの観測と併せて解析することにより放射量の変化が何によって引き起こされているのかを知ることができる。従って、正確な放射観測を今後も継続していくことが是非とも必要である。ひいては、このことが気候システムの理解や気候変動モデルの改善につながり、より良い予測を可能にする。

(2) 現状

ここでは、観測項目、既存の観測網、日射計・赤外放射計の較正、その他の測器の現状の順に述べる。雲・エアロゾル・放射の地上観測網に関わる放射の観測は、放射収支の測定と、観測される様々な種類の放射から雲・エアロゾルの物理・化学特性を推定するための測定がある。また、太陽や大気からの放射ではなく、レーザーやランプ等を光源として、雲やエアロゾルの物理・化学特性を現場で直接測定するための観測が行われており、本節においてはこれらの測定についても述べることにする。

① 観測項目

現在、地上での放射観測として測定されている項目には以下のものがある。受動型の放射観測として、広帯域の上下向き赤外放射フラックス、狭帯域の上・下赤外放射輝度(輝度温度)(10 μ m帯)、連続スペクトル下向き赤外放射輝度、広帯域の上・下向き可視・近赤外散乱日射フラックス、広帯域の可視・近赤外直達日射フラックス、狭帯域の可視・近赤外散乱日射輝度分布、狭帯域の可視・近赤外直達日射フラックス、連続スペクトル可視・近赤外散乱日射フラックス、連続スペクトル可視・近赤外直達日射、連続スペクトル可視・近赤外散乱日射

輝度分布、マイクロ波放射などがある。

エアロゾルの微物理・化学特性としては、エアロゾル量（質量・体積）・数密度・粒径分布・成分（BCを含む）・混合状態、・状・吸湿特性、雲核（CCN:Cloud Condensation Nuclei）などがある。エアロゾルの光学・放射特性については、光吸収・散乱・消散係数（多波長）、一次散乱アルベド（多波長）、光学的厚さ（多波長）などがある。雲の特性としては、雲頂・雲底高度、雲量、雲の光学的厚さ、雲水量、雲氷量、雲の相（水・氷・混合）などがある。これらと同時に、大気状態の把握のため、気温（鉛直分布）、湿度（鉛直分布）、気圧、風向・風速、降水量なども測定されている。

データ標準化、流通の促進には、多くの観測点で共通のデータを取得することが望ましいが、上記のすべてを測定している観測点は、後述の大気放射観測計画(ARM)の観測サイトぐらいしかないのが現状である。また、それぞれの項目を測定するための測器も多種多様にあり、精度も異なる。

② 既存の観測網

現在、放射に関係した観測網・観測研究計画として、BSRN・SKYNET、・AERONET・ARM などがある。このほか、世界気象機関(WMO)の枠組みによる観測網もあるが、これは1.2.3で記述する。

BSRNは、WCRP・全球エネルギー・水循環観測計画(GEWEX)¹のプロジェクトの1つであり、もともとは衛星観測による地表面放射の推定の検証のために計画されたが、現在は気候変化に関係する地球表面での放射場の変動を検出することを目的としている。このため地表面での放射フラックスの測定に重点が置かれている。また、観測点は、気候を代表する地点をカバーするようになっているが、精度を重視するためそれほど多くの観測点はなく現在約40点の観測点からなっている。BSRNの観測は、BSRN Operations Manual (Version 2.1) (McArthur, 2004)に、測定の仕方・設置場所・保守の仕方・校正の仕方について、こと細かく記述されている。現状では、BSRNの手順に従うことで最も精度良く放射フラックスの観測を継続することができる。

AERONETは、放射収支に影響を与えるエアロゾルの特性を地上からリモートセンシングで測定するためのNASAによって管理されている観測網である。観測網へは個人の研究者・研究機関・気象業務機関も参加可能であるが、データの管理はNASAが一元的に行っている。使われている測器はCimel社のサンフォトメーターである。このサンフォトメーターは太陽直達光の減衰量だけでなく、天空の輝度も測定する。AERONETからの成果物は、光学的厚さ・解析値（一次散乱アルベド・粒径分布など）・可降水量である。成果物は、処理法によりデータのレベルを示して提供されている。サンフォトメーターの校正は、マウナ・ロア観測所(MLO)で校正された機器を準器としてNASA/GSFC (Goddard Space Flight Center)で比較校正される。校正は、6～12ヶ月ごとに行われる。準器の校正は2～3ヶ月おきに、MLOでLangley法でなされる。放射輝度の校正は、校正された積分球を使ってNASA Goddard Calibration Facilityで6～12ヶ月ごとになされる。

SKYNETは、雲・エアロゾル・放射の相互作用を解明することを目的にした日本の観測網である。観測サイトは、スカイラジオメーター・日射計・赤外放射計からなる基本観測点と、さらに直達日射計、マイクロ波放射計、ライダー、全天カメラ、エアロゾル散乱・吸収率計、気象要素観測測器が整備されたスーパーサイトからなっている。これ以外にスカイラジオメーターの所有者からデータの提供を受けている観測点もある。SKYNETの観測点は、主に東アジア域に展開されている。スーパーサイトのデータは千葉大学環境リモートセンシングセンターに集約されデータ処理されている。スカイラジオメーターの解析データは、AERONETに準じた処理レベルで管理されている。校正は、スーパーサイトに関しては手順を定めて実施している。直達日射計・全天日射計については、WMOの枠組みにより維持されている気象庁が保有する国家準器と比較（検定）を行ったものをSKYNET準器としている。赤外放射計は、WMOの世界放射センター(WRC)の準器と比較したものをSKYNET準器としている。スカイラジオメーター・サンフォトメーターは、MLOでLangley法による校正を行ったものをSKYNET準器としている。それぞれの測器は、これらの準器と気象研究所または各観測サイトで1年に一度比較観測を行っている。

ARMは、もともとは1980年代のICRCCM (Intercomparison of Radiation Codes in Climate Models) から始まり、SPECTRE (Spectral Radiance Experiment) を経て1989年にアメリカエネルギー省(DOE)の支援を受けて始まった巨大なプロジェクトである(2009年度予算で\$55M、このうち研究費が約\$14Mである)。ARMの目的は、雲と放射の過程の相互作用に関係した基礎的物理過程の科学的な理解を深めることである。このために地上での連続観測・集中観測・データ解析・プロセスモデルの開発・領域モデルの開発・全球モデルのパラメタリゼーシ

¹ <http://www.gewex.org> (参照日：2010/02/16)

ョンを行っている。主要な観測サイトは3か所あり、広い気候域をカバーするためにSGP (Southern Great Plains) site、North Slope of Alaska、Tropical Western Pacific が選ばれた。これに加えて、ARM Mobile Facility と呼ばれる、固定観測サイトとほぼ同じ測器からなる観測システムが作られ、以下の地点に設置された (Point Reyes National Seashore : California (2005) ・ Niamey, Niger : West Africa (2006) ・ Black Forest : Germany (2007) ・ Shouxian : China (2008) ・ Graciosa Island : Azores (2009~2010))。放射計の較正は、SGP サイトに比較観測を行うための施設がある。日射計は、WRC の絶対放射計群と比較された絶対放射計を用いて行われている。赤外放射計は、BSRN に準拠した手順で、基準となる赤外放射計との比較観測と黒体の測定で行われている。

上記のように既存の観測網は、特定の項目に絞ったものから、大きな研究プロジェクトの下で行われているものまである。雲・エアロゾル・放射の観測網としては最低限、地球観測システム構築推進プランによる SKYNET のスーパーサイトのような総合的な施設が必要である。

③ 放射計の較正

データの標準化を図るうえでは、放射計の較正が重要になる。広帯域の全天日射計・直達日射計・赤外放射計は下記のようになっている。

日射計は、WMO が行っている放射計の基準システム (較正体系) がある。WRC で維持されている絶対放射器群 (7 台) を基準 (World Radiometric Reference) として、5 年ごとに地区準機器の比較を行い、各地区ではこの地区準器との比較観測から値を転写している。Working Standard としても絶対放射計を使えない場合は、SKYNET のように比較的安定で経年変化の小さい直達日射計を Working Standard として値を転写することになる。

赤外放射計は、2004 年から WMO の枠組みの下、WRC で較正ができるようになっている。WRC では4 台の赤外放射計 (PIR が2 台、CG-4 が2 台、太陽光遮蔽、通風有りで測定) を比較較正用に使用している。

赤外放射計の較正には空間走査型の絶対放射計と黒体が利用されるが、比較観測は、安定な晴天日の夜間にしかできないなどの制約がある。

④ 他の測器

マイクロ波放射計による地上観測は、放射に影響を与える水蒸気量・水蒸気量の分布・気温分布・雲水量に関する情報を得ることができるので、観測項目として重要である。マイクロ波放射計を複数台用いて同一の雲を走査して測定し、トモグラフィの手法で雲水量の分布を推定する方法も開発されている。

能動型センサーは、鉛直・水平分布の情報を反射波を利用して得ることができる。ミリ波レーダーによって、雲底・雲頂がわかり、また、反射率は、雲粒のサイズ・形状に依存しているので、雲の微物理特性の情報が得られる。

地表付近に限られるが、エアロゾルの光学特性を測定し監視することは、直接エアロゾル光学特性の変動とその放射フラックスへの影響を評価できるので、放射観測と併せて実施されている。SKYNET ではネフェロメーターによる散乱係数の測定、粒子吸収率測定器 (PSAP) による吸収係数の測定が行われているが、ネフェロメーターは原理的に散乱光をすべて測定しているわけでないので過小評価する。また、PSAP のようなフィルター上に粒子を採取して透過率を測定する方法では正確な測定が難しい、などの問題点がある。PSAP が透過光しか測定していないのに対して、反射光を測定して吸収係数を推定する測器、マルチアングル吸光光度計 (MAAP) も開発されている。また、光音響法を用いる測器もあるが、揮発性物質を含んだり、液滴粒子では蒸発による潜熱が誤差の原因となるなど、吸収係数を正確に測定できる測器はない。これらのエアロゾル吸収係数の測定から BC 濃度を推定する手法もあるが、フィルターサンプリングから燃焼温度を決めて Elemental Carbon と Organic Carbon の濃度を推定するようなほかの手法と比較した結果からは、不確実性が大きいことが示唆されている。そもそも BC に関しては厳密な定義づけが難しく、エアロゾルの中でも重要な位置を占めているにもかかわらずデータの標準化は進んでいない。さらに、エアロゾル粒子は吸湿性がある場合、湿度によって大きさが変わるため、湿度を制御した測定が必要であるが、現状では乾燥させて測定する程度である。

エアロゾルの粒径分布は、光散乱を利用した測器 (光散乱式粒子計数器 : OPC) が使われることが多いが、光散乱強度は屈折率・粒子形状に依存するため定性的にしか使えない。また、通常は、 $0.3\mu\text{m}$ 程度より大きな粒子しか測定できない。光散乱を利用しない方法としては、TOF (Time of Flight) を利用する測器もあるが、測定できる粒径範囲は OPC と同程度である。小さな粒径に対しては DMA (Differential Mobility Analyzer) が使用される。DMA と CPC (Condensation Particle Counter) を組み合わせることによって $10\sim 500\text{nm}$ くらいまで測定できる測器もある。雲粒の大きさまで含めて単一の測器で粒径分布を測定することができず、複数の測器が必要である。

(3) 今後の展望

雲・エアロゾル・放射の地上観測では、放射収支の測定、放射に影響を与える要素の推定のための放射観測、放射に影響を与える要素の直接測定やそれらの光学・放射特性の測定を行わなければならない。そのためには SKYNET（地球観測システム構築推進プラン）のスーパーサイト程度の観測を行う必要がある。

放射フラックスを測定する測器の校正のうち日射計観測に関しては、気象庁が WMO の枠組みで維持している地区準器から値づけられた国家準器による比較検定を定期的に行うことによって、国際的なトレーサビリティの確保ができる。

赤外放射計については、現時点で、WMO の枠組みで地区準器が確立しておらず、世界準器を保有する WRC で比較校正を行って値づけを行う。

太陽直達分光日射計の ML0 等における定期的な校正作業は、現在は各研究機関が各々の予算で行っているが、今後は系統的な校正体制の確立を図る必要がある。精度の確保のためには、作業用準器も用意して最低 3 台程度で運用する必要がある。また、比較観測による転写は、天候に作用され計画的な校正が難しい場合があるので、光源を利用した方法の可能性も検討する必要がある。

日射観測・地球放射観測ともに、放射フラックスのみならず何がその放射フラックスを決定しているか知ることが重要である。このためには、観測放射の解釈をし易くするために分光データの取得を行うべきである。また、併せて分光データの校正手法についても確立する必要がある。また、マイクロ波放射計のように雲の特性の情報を含む波長域の測定も同時に行うことが重要である。

エアロゾル散乱係数計、吸収係数計、消散係数計の精度のよい測定がなされていないが、放射過程の理解のために正確な測定が必要である。また、これらの量は湿度に大きく依存するので、湿度を制御した下での測定が望まれる。また、散乱の位相関数を含めた測定が必要である。

エアロゾル特性・雲物理特性は、直接測定においても放射観測からの推定においても複数の方法がある。それぞれの測定は、長所・短所があるため総合的に判断するためには、同一種目を複数の機器で測定することが望ましい。スーパーサイトのように複数の機関が多種の測器を持ち込み、観測を行う観測点が望ましい。

多くの観測計画では、取得し解析したデータは、公開されている。また、世界気象機関全球大気監視 (WMO/GAW) の枠組みで世界放射データセンター (WRDC) が設置されており、気象業務機関のみならず研究観測によるデータも対象としているので、GAW のデータセンターへデータを提供することが望ましい。

(内山)

1.2.2 ライダー観測

(1) 必要性・特徴

ライダーはエアロゾルの高度分布を時間的に連続して測定できる極めて有用な測器である。多波長の後方散乱や偏光解消度、さらにラマン散乱やレイリー散乱を利用した消散係数の測定により、エアロゾルの詳細な光学特性やエアロゾル種の推定が可能である。また、ライダーをネットワーク展開することにより、人為起源の大気汚染性エアロゾルや森林火災の煙、ミネラルダストなどの領域規模・地球規模の立体的な動態を捉えることができる。適正に配置されたライダーネットワークによる時間的に連続した高度分布データは、例えばエアロゾルのデータ同化の観点からも、地上の放射計のネットワークや衛星観測からは得られないユニークかつ重要な情報を与える。

(2) 現状と課題

エアロゾル観測を目的とするライダーネットワークは、現在、世界各地域で展開されている。東アジアの ADNet (Asian Dust Network)、ヨーロッパの EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology)²、旧ソビエト圏の CISLiNet (Commonwealth of Independent States Lidar Network)、北アメリカ、南アメリカのネットワークなどである。また、NASA は、放射観測を目的とするマイクロパルスライダーのネットワーク (MPLNET: Micropulse Lidar Network) を世界に展開している。

(独) 国立環境研究所 (NIES) を中心に運用している東アジアのネットワーク (NIES Lidar network/ADNet) では、黄砂と東アジアの大気汚染エアロゾルの動態解明を目的に、日本・韓国・中国・モンゴル・タイの計 22 地点において 2 波長 (1064nm・532nm) 偏光 (532nm) ライダーによる連続自動観測を行っている (Sugimoto *et al.*,

² <http://www.earlinet.org/> (参照日: 2009/12/14)

2006)。ネットワークのいくつかの地点は、SKYNET にも位置づけられている。測定データは、一部の地点を除いてリアルタイムでNIESに転送され、自動で解析処理される。自動解析では偏光解消度のデータを用いて、非球形粒子（黄砂）と球形エアロゾル（主に大気汚染性エアロゾル）の消散係数の鉛直分布を分離して推定する。解析結果は、黄砂と大気汚染の動態解明研究や輸送モデルの同化の研究（Yumimoto *et al.*, 2008; Uno *et al.*, 2008; Hara *et al.*, 2009）に用いられている。また、観測データのクイックルックと一部の解析結果はweb上で公開している。

EARLINETは、ライダー研究グループのネットワークという趣が強く、多波長ラマンライダーのような高度なライダー装置（1064nm・532nm・355nmの後方散乱と532nm・355nmの消散係数を測定）が用いられている。しかし、観測は週2回以上といった具合で、必ずしも連続観測は行われていない。EARLINETの主目的はエアロゾルの気候学的研究で、多チャンネルのライダーデータを用いたエアロゾル光学特性の解析が行われている。

CISLiNetもEARLINETと近い考え方で運用されているようである。

MPLNETは、基本的には、AERONETの放射計の解析に高度分布情報を与えるという考えに基づくものと思われる。ライダー装置（MPL）は1波長（523nm）で偏光解消度の測定機能も持たないが、自動連続観測が行われている。

最近、WMO/GAWのcontributing networkとして、既存のライダーネットワークを連携したGAWエアロゾルライダー観測ネットワーク（GALION：GAW Aerosol Lidar Observation Network）が承認された（Bösenberg *et al.*, 2007）。上に挙げたネットワークは、いずれもGALIONへ参加する計画である。今後、GALIONでデータの標準化の議論が行われることになるが、考え方の異なるネットワークのネットワークであるので困難も予想される。今後の地球規模のエアロゾル研究の重要な方向の1つはデータ同化であるが、そのためには観測データの解析は、モデルの持つエアロゾル光学モデルと整合した手法で行われることが望ましい。従って、観測ネットワークからは、距離補正信号など、生データに近い形でデータを提供することが必要である。これは、放射計などとの複合解析の観点からも必要である。いずれにしても、GALIONにおけるデータの標準化は重要な課題である。

(3) 今後の展望

地球規模のエアロゾル観測において、高度分布情報を与える観測として、地上ライダーネットワークと衛星搭載ライダーの両方が重要である。地上ライダーネットワークでは、例えばデータ同化の観点から考えて有効な地点配置で、有用なパラメーターを高い精度で測定することが求められる。当面、GALIONの活動に期待されるが、中国や南半球の空白域の改善も望まれる。中国については、法律上の問題のためデータが得られない状況であるが、ライダー観測分野の研究者は育っており、中国が独自にライダーネットワークを構築してGALIONに参加することが期待される。また、ライダー装置の観点からは、既存のライダーの高精度化とともに、消散係数プロファイルを昼夜を問わず高感度で測定できる高スペクトル分解ライダー方式の多波長ライダーの実現が期待される。

（杉本）

1.2.3 全球大気監視(GAW)計画

(1) GAW計画の概要・枠組み

WMOでは、地球環境に関する現状および変化を科学的見地から正確に把握するため、GAW計画の下、全球的で統一的な組織的観測を推進している。GAWは、全球気候観測システム（GCOS）の大気化学成分の観測を担当することによって、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）に定められた研究および組織的観測を支援している。また、統合地球観測戦略（IGOS）の大気化学に関するテーマ、統合地球大気化学観測（IGACO：Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations）に沿うことを実施方針としており、地上・航空機・衛星による観測や予測モデルデータ同化等の活動を通じて、全球地球観測システム（GEOSS）に貢献している。

GAWでは、主な科学的分野ごとに科学諮問部会（SAG）が設置されており、科学的・技術的な側面から分野ごとの活動について指導・助言している。観測データの品質および統一化を確保するため、観測要素や測器ごとに観測基準およびこれを維持する中央校正施設（CCL）を定め、同基準に対するトレーサビリティの確保のための世界校正センター（WCC）および地域校正センター（RCC）や、データ品質確保のための技術的活動を行う品質保証科学センター（QA/SAC）を設置している。観測データは、世界データセンター（WDC）により保管・提供されている。GAWの観測所は、幅広い観測を実施する全球観測所、一部の観測項目についてGAWの基準に沿った観測

を行う地域観測所などがあり、それらの位置や観測項目はGAW 観測所情報システム (GAWSIS) ³⁾に掲載されている。

(2) エアロゾルに関する活動

エアロゾルの観測は、エアロゾルに関する科学助言部会が指導・助言しており、多波長の光学的厚さ・大小粒子の重量濃度・大小粒子の主要化学成分濃度・光吸収係数・多波長の光散乱係数をコア要素と定めている (WMO, 2003)。2009年8月19日現在、世界で169か所がエアロゾルの観測所としてGAWSISに掲載されており、観測データはイタリアにあるヨーロッパ合同研究センターが運営するエアロゾル世界データセンター (WDCA) ⁴⁾に報告されることになっている (なお、WDCAは近くノルウェー大気研究所 (NILU) に移転する予定)。2009年8月19日現在、WDCAでは、世界で15か所 (綾里・南鳥島・与那国島を含む) での光学的厚さ、14か所での光散乱係数、11か所での光吸収係数、62か所での化学成分などの観測データをそれぞれ公開している。

GAWのエアロゾル観測の中で、精密フィルター放射計 (PFR) による光学的厚さの観測ネットワーク (GAW-PFR) の構築が進められている。2009年8月19日現在、同ネットワークの下で綾里を含む12か所のGAW 観測所においてPFRによる観測が行われており、スイスのダボスにある物理気象観測所 (PMOD) が世界光学的厚さ研究校正センター (WORCC) として、基準器の維持および各観測所で使用するPFRの校正を行っている。また、エアロゾル鉛直分布の長期監視を目指すGALIONの構築に向けた取組みが進められている。

2008～2015年までを対象としたGAW戦略計画 (WMO, 2007) では、エアロゾルの観測に関し、観測手順の統一化、観測ネットワークの設立、衛星・航空機・地上での観測の統合とともに、観測データの提出および利用の拡大や準リアルタイムでのデータ交換が課題として挙げられており、実施戦略として、光学的厚さのデータの品質保証・統合・提供・利用手順の作成、GALIONを通じた長期的かつ高品質のライダーネットワークの構築、データセンターへのデータ提出の迅速化などが定められている。

このように、GAWでは、特にエアロゾルの光学的厚さおよび鉛直分布について、観測手順の統一化および観測のネットワーク化に対する取組みが進められている。このうち最も取組みが進んでいる光学的厚さについては、GAW-PFRにおいて校正センターを通じてデータが標準化され、品質管理されたデータがWDCAを通じて流通している。その一方で、ヨーロッパにおけるエアロゾル化学成分データなど一部の地域および観測要素を除き、WDCAにおいて収集・公開されている観測データは、時間的・空間的にもかなり限定されたものとどまっている。特に我が国を含むアジア地域ではデータの流通が進んでいない。GAW 観測ネットワークにおけるエアロゾル観測所および観測項目の特定、観測基準に対するトレーサビリティの確保、観測期間全体にわたる観測データの流通、ならびにほかの地域観測ネットワークとのデータ交換の促進が必要とされる。

今後、光学的厚さについては、観測データの流通および利用の拡大や準リアルタイムでのデータ交換を引き続き促進し、世界規模でのプロダクトの作成やモデルでの利用が期待される。特にWORCCを中心とした校正・データ品質管理体制のさらなる強化が必要とされる。また、鉛直分布について、GALIONを通じて、ライダー観測のネットワーク化および標準化、ならびに観測データ流通の促進が期待される。我が国のGAW 観測所は、光学的厚さ観測データのWDCAへの報告を継続するとともに、ライダー観測データの報告に向け関係機関と協力・調整する。また、GAWのエアロゾルデータの利用を促進するため、国内外のほかのネットワークと協力し、共同研究の促進およびGAW 関連活動の周知等が求められる。

(3) 放射に関する活動

放射の観測については、WMO加盟国による全球地上放射観測網 (GSRN) において長期継続的な観測が行われている。スイスのPMODがWMO世界放射センターとして、直達日射計の世界基準器群による世界放射基準を維持するとともに、5年ごとに各地区や各国の基準器を校正する国際日射比較を通じて観測スケールを各々の測器に伝達している。我が国は、WMO第II地区 (アジア) 放射センターに指名されており、第II地区内の各国の国家基準器と我が国の地区基準器の相互比較観測を実施し、地区内日射観測の精度維持に貢献している。放射に関する観測データは、ロシアのサンクトペテルブルクにあるロシア水文気象局中央地球物理観測所が運営するWRDC⁵⁾に報告されている。GAW 観測所については、29か所の放射観測データがWRDCから公開されている。

放射 (日射) 観測は、WMOではGAWのほか世界気象監視 (WWW: World Weather Watch) 計画が関係しており、

³⁾ <http://gaw.empa.ch/gawsis/> (参照日: 2009/08/09)

⁴⁾ <http://wdca.jrc.ec.europa.eu/> (参照日: 2009/08/19)

⁵⁾ <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (参照日: 2009/08/19)

組織横断的な科学助言グループの設立がGAW戦略計画の実施戦略の1つとして記述されている。また、GCOSを構成する観測網の1つであるとともに、WCRPのGEWEXの下に設立されたBSRNと連携しており、WRDCから提供されるデータのトレーサビリティの確保、利用者に配慮したデータ提供形態での協力などが掲げられている。

気象庁では、直達日射量の観測所を、2007年10月にそれまでの14か所から札幌、つくば（館野）、福岡、石垣島の4か所に集約した。なお、2009年度中に、この4か所に南鳥島を加え、散乱日射量および赤外放射量も観測するなど能力を向上させる予定である。このことにより、BSRNへの参加およびエアロゾル観測との連携を強化し、さらにGAW計画に貢献することが期待される。

放射収支がGCOSの必須気候観測要素（Essential Climate Variables）の1つになっており、GCOSのそれぞれ大気組成および地表面放射収支測定を担当するGAWおよびBSRNが連携・協力してGCOSへの貢献を強化することが必要であり、特にこれらのネットワークの間でのデータ標準化およびデータ流通の促進が期待される。

また、放射（日射）観測について、WRDCで保管・提供されるデータの充実および利用性向上とともに、地上観測と衛星観測の統合に向けた取組みが期待される。我が国においては、気象庁による観測データを引き続きWRDCに提供するとともに、国内外のほかのネットワーク、特にBSRNとの連携・協力を強化することが必要である。また、データ標準化のさらなる促進のため、WMO世界放射センターおよび地区放射センターにおける相互比較の継続・強化が求められる。

（須田）

1.2.4 衛星観測

（1）衛星観測の有効性について

地球温暖化研究における衛星観測は、いわば総合的な地球の健康診断に該当する。雲やエアロゾルは全球規模で分布するため、それらの観測には広域を短時間インターバルで観測することができる地球観測衛星の活用が極めて有効である。地球観測衛星の軌道には大きく分けて静止衛星（軌道高度36,000 km。例：気象衛星「ひまわり」）と低軌道衛星（軌道高度350～1,500 km程度。例：地球環境観測衛星「みどり」「みどりII」）がある。「ひまわり」を代表とする静止軌道は赤道上で24時間で地球を周回する軌道である。地球の自転と同期した衛星軌道であるため、観測領域は衛星が地球と正対する特定の大陸規模あるいは大洋規模の領域である（図1-1）。観測領域が特定の場所に固定される代わりに30分ごと、1時間ごとのような「高頻度」観測が可能であり、雲やエアロゾルの連続観測を行うことができる。一方、「みどりII」のような低軌道衛星は、地球をおおよそ100分で周回する軌道である。観測領域は常時変化するため全地球規模の観測が可能、かつ画像解像度などの点で有利になるため、雲やエアロゾルの「高精度」観測に適している（図1-2）。

衛星の軌道は、観測頻度・解像度・観測範囲などの要求項目に対して合理的かつ整合的な軌道が選ばれる。例えば、低軌道衛星イメージャー型のセンサーを例にすると、陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）搭載の高性能可視赤外放射計2型（AVNIR2）のように、狭い領域（観測幅70 km）を高解像度（直下視10m）で観測するセンサーと、地球観測プラットフォーム技術衛星「みどりII」（ADEOS-II）搭載のグローバル・イメージャ（GLI）のように、広い領域（観測幅1,600 km）を中程度解像度（250m～1 km）で観測するセンサーがある。AVNIR2は主に陸域沿岸域の地域環境の把握や災害監視、GLIは全地球規模での地球物理量の把握とその変動にそれぞれ最適化された結果の仕様である。以下の項目では、雲エアロゾル観測を念頭におき、衛星観測データの標準化と流通促進について述べる。

（2）安定的な衛星計画とデータ流通の関係

地球観測衛星計画の安定度や新規性はデータ流通の活性度と密接な関係がある。ここでは雲・エアロゾル観測における、2つのデータ利用形態別に論じてみる。1つ目の利用形態は、事象、すなわち雲やエアロゾルの分布や物理特性の長期観測である。このような観測においては、観測システム全体の信頼性が高く十分ながい期間、例えば10年を超える長期にわたって安定的に供給される観測データが歓迎される。可視赤外イメージャーを例にすると、1970年代の終盤から現在まで継続運用を行っているアメリカTIROS-N/NOAA衛星シリーズの改良型高分解能可視赤外放射計（AVHRR）⁶は、搭載チャンネル数こそ5～6と現在においては小規模であるが、数十年にわたる連続的観測データの存在ゆえに、その利用例が非常に多くなっている。我が国においては、1996年、2002年にそれぞれ打上げられた「みどり」「みどりII」衛星、そしてこれらに続く地球環境変動観測ミッション（GCOM）

⁶ <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>（参照日：2009/12/14）

の衛星による10年超規模での観測データのアーカイブ計画⁷が、このような長期モニタリングに資する重要な観測計画である。例えば、気候変動観測衛星（GCOM-C）に搭載される多波長光学放射計（SGLI）は、先に述べたAVHRRセンサーの4倍に相当する約20波長を保有しており、観測項目や観測精度が飛躍的に高められているため、長期運用で得られたデータの価値は非常に大きい。このように、長期モニタリングに資する衛星データの流通を促進するためには、まず長期安定的な運用が必須であり、さらにアクセシビリティやデータ定義の統一も含めた積極的なデータ標準化を併せて進めるべきである。

2つ目の利用形態は、地球温暖化予測に不確定性をもたらしているプロセスの解明における衛星データの利用である（「プロセス研究」）。例えば、IPCC-AR4が指摘しているように、エアロゾルと雲は、地球温暖化に対するこれらの応答メカニズムとプロセスの理解に大きな不確定性を持つために、温暖化予測における曖昧さを大きくしている主要因となっている。このようなプロセスの解明には主としてモデルによるシミュレーションが使用されるが、そのモデルが実装する各種モデル（力学モデル・物理モデル）の妥当性を診断するために衛星データが必要不可欠となる。例えば、エアロゾル粒子の発生・種類・個数濃度、雲粒子の成長から消滅にいたるプロセスの解明には、これら微粒子の時空間変動を3次的に捉えた観測データセットが必要となる。すなわち、プロセス研究の観点からは、サイエンスのニーズに適した新しいプロダクトの提供が、データ流通の活性度に影響すると言える。例えば、最近の衛星観測では、全球モデルでの衛星データ利用を想定し、可視赤外イメージャーやマイクロ波放射計のような受動センサーによる2次元観測に、降雨レーダーや雲レーダーなどの能動センサーによる鉛直探査を加えた3次元観測システムが提案されている。我が国では、雲・エアロゾルの3次元構造を明らかにすることを目的とした「雲・エアロゾル・放射ミッション」（EarthCARE）（日欧共同ミッション）⁸という先進技術の結晶である衛星観測システムが計画されている。本システムでは、雲粒のドップラー観測が世界で初めて可能になるため、雲の発生から消滅過程の観測を通じたモデル改善への貢献が期待できる。以上のように、プロセス研究に資する衛星観測データの流通を促進するためには、まずはデータ利用者のニーズにあったチャレンジかつ新規性のある衛星計画から新しいデータセットが提供されることが重要である。

(3) 雲エアロゾル衛星観測データの標準化の現状と展望

日本では、東京大学気候システム研究センター・東北大学大気海洋変動観測研究センター・近畿大学理工学部・東海大学情報技術センター・NIES・（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）などが緩やかな連携の下に、雲・エアロゾルの衛星観測データのアーカイブを行っている。これらのアーカイブの衛星データソースは、AVHRR・海面水温走査放射計（OCTS）・GLI・表面反射偏光計（POLDER）・中分解能分光放射計（MODIS）などである。我が国では、2011年度を予定している水循環変動観測衛星（GCOM-W）の打上げを皮切りにGCOMプロジェクトがスタートし、10年超規模の雲・エアロゾルの連続データが得られようとしており、データ標準化への早急な取り組みが必要となっている。そのような中で、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の基幹要素整備の1つとして、データ統合・解析システム（DIAS）における一元的なデータアーカイブへの準備が始まった⁹。世界に目を向けると、1980年代から現在まで続いているISCCP¹⁰が整備するデータセットは、現在において世界中で最も多く使われている雲の衛星観測データの1つである。ISCCPでは、NASA/GISS（Goddard Institute for Space Studies）、NASA/GSFC・NASA/LaRC（Langley Research Center）・アメリカ海洋大気庁（NOAA）・ウィスコンシン大学・コロラド州立大学などのアメリカ合衆国の研究教育機関、ヨーロッパ気象衛星機関（EUMETSAT）・フランス気象局（Météo-France）などのヨーロッパの研究機関、日本からは気象庁がデータセットの作成に協力している。なお、雲やエアロゾルのデータ解析手法は現在も改善作業が続いており、すなわち解析アルゴリズムが数年に一度程度の頻度で更新されることに留意したい。エアロゾルの例でいえば、1990年代はエアロゾル種別を問わない物理量、すなわちただ1組のエアロゾル光学的厚さと粒子サイズ指数のデータを算出していたが（Higurashi *et al.*, 2000）、2000年代中盤頃からはエアロゾルの種別判定へと発展しており（Higurashi and Nakajima 2002）、アーカイブすべきプロダクトが細分化され増加している。雲の例では、2000年代前半までは単波長による雲粒子サイズの推定値であったが（Nakajima and Nakajima 1995）、2000年代中頃以降は多波長による雲粒子サイズの推定が提案されており（Platnick *et al.*, 2003; Nakajima *et al.*, 2009 accepted）、これも算出プロダクトの増

⁷ http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM/index_j.html（参照日：2009/12/14）

⁸ http://www.eorc.jaxa.jp/EARTH/CARE/ja/index_j.html（参照日：2009/12/14）

⁹ <http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/project.html>（参照日：2009/12/14）

¹⁰ <http://isccp.giss.nasa.gov/>（参照日：2009/12/14）

大をもたらしている。2000 年代中頃からの CloudSat・CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) などのアクティブセンサーの登場は、近い将来、観測データが 2 次元から 3 次元データへ拡張されることを意味している (Stephens *et al.*, 2008; Winker *et al.*, 2007)。すなわち、雲・エアロゾルデータの標準化を計画するうえでは、数年に一度程度発生し得る解析アルゴリズムの更新に伴う精度向上やプロダクト項目の増加に備え、すべての観測データを全量再解析して格納するに耐え得るだけの冗長システムが必要であることに留意すべきである。

(4) データ検索取得手法およびプロダクトにおけるデータ標準化の現状と展望

地球を包括的に観測するために、過去から現在まで、多くの衛星搭載センサーが打ち上げられ、それぞれが何千何万という貴重な観測データファイルを生産してきた。これらの無数のファイルからユーザーの目的にかなうデータが含まれているファイルを特定し、そのファイルから目的の情報を取り出すのは、思いのほかストレスのかかる作業である。データ流通促進においてはデータファイルへのアクセシビリティが留意すべき重要事項の 1 つである。

ユーザーが目的のファイルを特定する場合に指標とするのは、日付・時間・場所そしてデータ種別であろう。しかし、これらの情報すべてをファイル名に含めるのは認識性の観点からも必ずしも適していない。そこで、ファイル名を記号の羅列とし、その代わりにファイル検索システムが用意されることが多い。ファイル検索システムは、ファイル名あるいはファイル内に書き込まれているメタ情報を頼りに、ユーザーが必要とするファイルを同定する作業を担う。ファイル内部には多くの情報が含まれている。例えば可視赤外イメージャーが観測した輝度データ（各観測チャンネルの明るさや反射率のデータ）の場合、ファイル内には各画素のデータのほかにも、時刻情報・位置情報・センサー較正情報等、メタ情報と呼ばれる多くの情報が整理格納されている。以下に、現状におけるデータ検索（取得）システムについて、そしてデータ形式の標準化の現状について記述する。なお、この節では観測対象を雲・エアロゾルに限定せず、すべての衛星観測データに共通的な事項もある。

① データ検索取得手法

データ検索／注文／取得の作業は衛星データの利用における最初の作業である。データ検索取得システムにはいくつか参考となるモデルが出来ているが、基本的には観測プロジェクトごとにシステムが設計されており、標準化が進んでいるとは言い難い。標準化が進まない主な理由は、衛星データのユーザーには全地球規模における数万シーンのうちの数シーンを利用するような小口ユーザーから、全地球規模の全シーンを利用する大口ユーザーまで多岐にわたり、それぞれ適切なシステムが異なることが挙げられる。また、ユーザーが行う研究の性質によって、必要とするデータが観測領域重視であったり、時間軸重視であったりすることも事情を複雑にしている。現状では、データ検索取得の方法には大きく分けて次の 3 ケースがある。まず、インターネットの Web 画面から、日時・緯度経度（の範囲）・雲の有無、などを入力してデータカタログを検索し、注文を行う、いわゆるショッピングカート方式（あるいはシーンオーダー方式）である。次に、ある特定の地域の観測データを連続的・継続的に注文するスタンディングオーダー方式がある。最後は、巨大なファイル転送プロトコル (FTP: File Transfer Protocol) サーバにユーザーがログインし、該当データをダウンロードする方式（データプール方式）である。ユーザーによるデータアクセシビリティを向上させるために、それぞれ様々な方法が考えられている。まずショッピングカート方式であるが、これは比較的小規模なデータ取得に適した方法といえる。例えば、特定の日の特定の場所の画像を数シーンだけ取得する場合、何万というファイルから該当ファイルを探し出す作業を、データ提供側が用意した Web インターフェースと検索エンジンが代行してくれる。多くの場合、ユーザーが指定した日時や場所などの検索項目の範囲に該当するデータファイルが絞り込まれ、候補がリストで提示される。ユーザーは提示されたリストから必要なファイルにチェックしてオーダー操作を行う。多くの場合、データファイルはデータ提供者が用意した一時的なデータストレージ領域に用意され、ユーザーはインターネット経由でダウンロードするという方式であるが、DVD 等への媒体による提供が用意されている場合もある。概して本方式で注文されるデータ総量が小規模であることや（注文容量に上限が設けられている）、検索→受注→発送までの作業が完全自動化されているため、事前登録のみ必要な MODIS データ提供システムのように、ユーザーアクセス制限がかなり緩やかなシステムも見られる。次に述べるスタンディングオーダーは、比較的大規模なデータユーザーに適したオーダー方式である。ユーザーは、データ提供機関に対して、例えば日本の関東地方が観測範囲に含まれるファイルを長期にわたって連続注文したい、という要望を伝える。多くの場合、注文は紙の申込書をベースに行われる。データ提供機関は、オーダーおよびデータ容量の規模を元に提供の可否を個別に決定する。提供するデータ総量が 대규모になり、かつ注文の内容がユーザーごとに特化されるため、このオーダー方式が可能なユーザー

は、例えばデータ提供機関との研究契約が締結された主要なユーザーに限定されるのが普通である。最後のデータプール方式は、小規模から大規模までに対応できる方法の1つである。ユーザー認証については、事前登録が必要なものから、匿名認証を認めるところまで多様である。この方式では、観測データファイルは常に大規模データストレージシステム（FTP サーバ）上に展開されており、ユーザーはWeb ブラウザやコマンドラインのFTP コマンドなどで同システムにアクセスし、クリック操作やコマンド操作によって目的のファイルを自分で探し出してからダウンロードすることになる。多くの場合、データの取得日時や種別ごとにディレクトリ構造が設けられ、一定の知識があれば該当ファイルを短時間で探し出せるように工夫されているが、ディレクトリ名なども記号の羅列であるから、やや上級者向けのデータ配布システムと言える。データプール方式では該当ディレクトリのファイルをまとめてダウンロードすることも容易であるから、全地球規模の解析を行う大規模ユーザーにも適している。では、将来的に上記の3種類のデータ注文取得システムは統合し得るかという問題について検討してみる。前述のように、データ注文取得方式は異なるユーザー像に最適化されたシステムであるから、いたずらな統合はかえって不便をもたらす可能性があるので慎重を要する。DIAS のような超巨大アーカイブを用いた一元的なデータを管理は、複数の衛星観測プロジェクトを横断するような検索が可能になるため、例えば、衛星データから推定された地球物理量をダウンロードするようなエンドユーザーには有効なシステムである。このようなものはJAXAにおけるデータ検索取得システムでも部分的に実現されているので、これらのシステムをひな形として徐々に最適なスタイルに収斂してゆくと思われる。データ検索システムにおいて、ユーザーが最もストレスを感じるのは、データ検索速度が相当に遅い場合、検索項目をどのように設定しても該当ファイルが1つも見つからないという場合である。前者は検索エンジンの高性能化により対応が可能である。後者については多くの場合、プロジェクト初期やバージョン切り替え時期に見られる現象で、得られた観測データ全数に対して解析済提供可能ファイル数が非常に少ない場合である。例えば、ファイル全量に対する解析済みファイルの比率を示すことで検索行為を行う前に「確かにデータは存在する」ことをユーザーに知らしめるような工夫や、ある検索項目を入力するごとに該当ファイル数が動的かつ瞬時に更新されるような、いわゆるインクリメント検索システムが有効である。

衛星データの流通を考えるうえでの検討事項の1つに、データ提供を有償とするか無償とするかという議論がある。例えば、世界的に活用事例が多く、重要な研究成果が多数でているMODISのデータは無償であり、匿名でのデータ取得も可能となっている。実際、MODISは研究教育のみならず新聞雑誌などメディアでの利用も非常に多い。地球環境観測データは、利益を目的としない研究あるいは教育で使用されることが多いため、この種のアクセシビリティについてデータ提供者とプロジェクト関係者は検討を行う価値があろう。もっとも、衛星センサープロジェクトに主体的に貢献した研究者や技術者へのインセンティブの確保、そして衛星観測データの精度はセンサーの打上げ後の様々な調整を経て徐々に向上してくることを考慮し、ある程度の期間を経たデータから無償提供対象にするという視点が必要であろう。

② データ処理レベル

衛星観測データの処理レベルに関する標準化は比較的進んでいる。衛星観測データは処理レベルが進むに従ってLevel 0・1・2・3と分類されて呼ばれる（表1-1）。さらに細かく分類するために、1A・1Bのような分類がなされることがある。一般的な分類では、Level 0はセンサーが出力した電気信号そのままの出力である。衛星から地上基地に転送されたデータはLevel 0としてデータ格納される。次のレベルであるLevel 1Aは、Level 0にセンサーの軌道上での状態パラメータ・観測時刻・幾何補正に必要な衛星姿勢データや、ラジオメトリック補正に必要な校正データを関連情報として付加したデータである。Level 1Bは1Aに対して幾何補正とラジオメトリック補正を施した後のデータである。例えば、可視赤外イメージャーであれば、Level 1Bを適切に可視化することで写真のような画像を得ることができる。Level 2は、Level 1Bを入力としてアルゴリズムを介して得られた各種物理量である。雲エアロゾルの光学的厚さや粒子半径などのプロダクトはLevel 2である。Level 3は、Level 2に各種統計処理（マッピング・空間的平均・時間的平均）を施したものや、異なる種類のLevel 2の結果から新たに生み出されたような複合的成果物である。それぞれのレベルデータの大雑把なユーザー像であるが、Level 0と1はセンサー開発技術者、Level 1Bは物理量推定アルゴリズムを開発するリモートセンシング研究者や技術者、Level 2は地球物理量を使ってサイエンスを行う研究者である。なお、ユーザーへの便宜のために、衛星輝度データあるいは地球物理量データを適切に可視化した確認画像（QuickLook と呼ばれる）がJPEGやPNGフォーマットで別途用意されることがある。現在、地球観測分野でよく使われるデータフォーマットはNetCDFとHDFである。どちらもファイル内に自分自身の情報が記述されている自己記述フォーマットであるた

め、ファイルの取扱いに慣れることで、センサー輝度データ等のみならず、位置情報や時刻情報、そしてプロジェクトに関するメタ情報なども含めた多くの情報を正確に読み出すことができる。Fortran やC のような開発言語、あるいはIDL (Interface Definition Language) やMATLAB (Matrix Laboratory) のような衛星リモートセンシングでよく使われる開発環境には、ネットワーク共通データフォーマット (NetCDF: Network Common Data Form) や階層型データフォーマット (HDF: Hierarchical Data Format) ファイルに容易にアクセスするためのライブラリーが用意されている。処理済みデータファイルにおける標準化で必要な改善事項がいくつかある。まずは、ファイル内のどこかに書き込まれるデータ素性に関するメタ情報の統一的な取扱いである。HDF フォーマットのような場合、これらメタ情報はタグと呼ばれる見出しを頼りに詳細な記述内容を読み出されるため、このタグ見出しを標準化することによってメタ情報の読み出しが容易になる。次に物理量プロダクトの定義の問題がある。例えば、雲やエアロゾルの光学的厚さプロダクトには、その定義波長として $0.5\mu\text{m} \cdot 0.55\mu\text{m} \cdot 0.66\mu\text{m}$ などが用いられ、衛星観測プロジェクトによって異なっている。現在のところ、定義波長を統一するという動きは見られていないが、エンドユーザーの混乱を避けるためにも、基準の統一あるいはメタ情報への定義の記述を必須とするなどの工夫が是非もと必要である。最後に、可視化ソフトウェアの充実がある。多くの衛星データは、数値の羅列であり、しかも多くの場合はバイナリ形式となっており、人間が目で見ても内容が判るものではない。HDF には数種類のビューアーが無償で提供されており、簡素なレベルでの可視化は可能になっている。しかしながら、可視化ソフトをもう少し発展させ、マッピングやチャンネル合成が簡単な操作で可能になるような工夫があれば、衛星データ利用のハードルが低くなる。プログラミング言語を利用する場合でも、内部データの読み出しを記述したルーチン群が提供されていれば、データユーザーの負担が大きく軽減される。データ提供機関はこのようなデータアクセシビリティの向上にも留意すべきである。

(中島 (孝))

表 1-1 衛星データのプロダクトレベル分類。

レベル	特徴	主なユーザー
Level 0	センサーの電気信号	センサー開発者
Level 1A	Level 0 にセンサーの状態パラメーター、観測時刻、姿勢データ、較正データが付加されたもの	センサー開発者
Level 1B	Level 1A に幾何補正とラジオメトリック補正が施されたもの	リモートセンシング研究者と技術者
Level 2	Level 1B から算出された地球物理量	Level 2 の地球物理量を使ってサイエンスを行う研究者
Level 3	Level 2 の統計処理、あるいは複数の Level 2 から得られた複合成果物など	

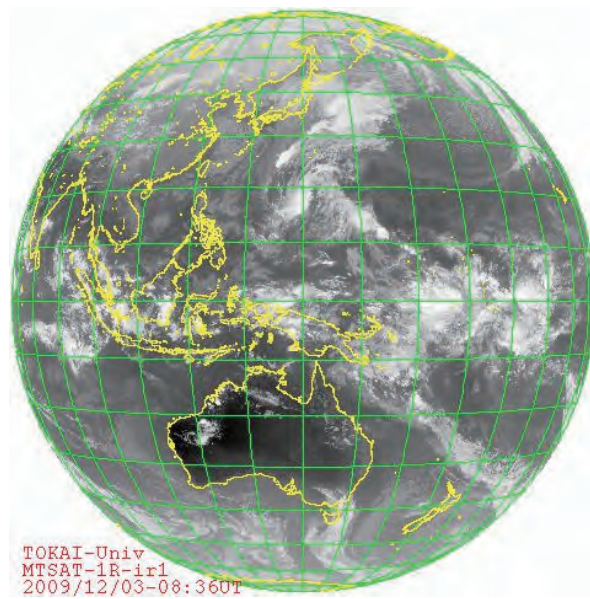


図 1-1 ひまわり 6 号の熱チャンネル画像の例 (2009 年 12 月 3 日 東海大学 TSIC 受信)
(<http://www.tric.u-tokai.ac.jp/tsic/jgmsglobe.html>)。

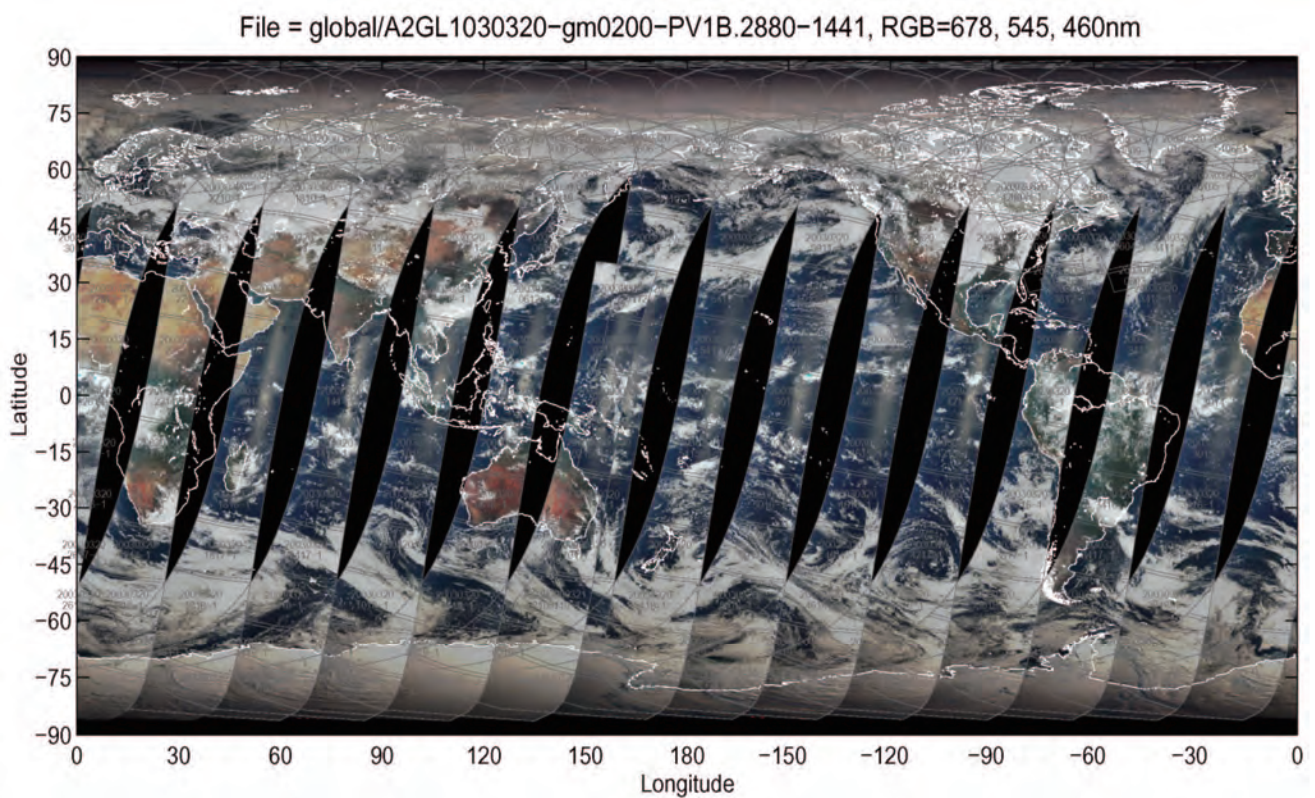


図 1-2 みどり II 搭載 GLI センサーによる 1 日分の観測範囲(JAXA 提供)
(<http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/cal/browse/index.html>)。

1.3 観測施設等の相互利用の促進

1.3.1 アジアの地表ステーションにおける観測強化

(1) ABC計画

① 我が国のスーパーサイトとSKYNET

エアロゾルは地域による違いが大きく、時空間分布も粒径や化学組成に大きく依存するため、観測によってデータを蓄積することが不可欠である。特に、アジア域は、人為起源の硫酸塩・硝酸塩・有機エアロゾル、自然起源の黄砂粒子・海塩粒子、バイオマス燃焼のBCなど、多様なエアロゾルが混在しているため、観測によって時空間分布や化学組成情報を明らかにする必要がある。さらに、放射観測と同期し、エアロゾルの光学特性と物理特性、化学組成情報を関連づける研究が必要である。近年では、衛星観測からもこれらの情報のある程度推定することが可能になりつつあり、また、大気化学輸送モデルの発展も目覚ましいものがあるが、それらの手法の時空間分解能の限界や、解析あるいは計算を行う際に仮定すべき点が依然として存在することなどを考えると、地上における総合的な観測はほかの手法では代替できない重要な情報をもたらすといえる。

アジア地域における地上観測網としてはSKYNET・AERONET・国連環境計画(UNEP)アジア褐色雲計画(ABC-Asia)・東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)などがある。その中でもUNEP ABC-Asiaは日本・韓国・中国・インド・タイ・ネパール・モルディブなどを含む各国が連携して、微粒子の気候や健康影響を評価するための基礎的データ取得を目指し、長期観測データの蓄積を行っている。今後とも、経済発展の著しいアジア地域において観測を継続することが必要である。

② 辺戸ステーション

国内の代表的なエアロゾル・放射観測施設としてNIES沖縄辺戸岬大気・エアロゾル観測ステーション(辺戸ステーション)¹¹がある。同ステーションはUNEPの国際プロジェクトであるABC-Asiaプロジェクトの拠点となる観測ステーションとして位置づけられている。辺戸ステーションは、NIESアジア広域大気研究室の下で運営され、2005年以来約4年間、国内の大学や研究機関の研究者の利用を促進し、エアロゾルの化学組成・物理的・光学的性質・放射関連の観測を継続している。通年の観測のほか、短期の集中観測も行い、例えば2008年・2009年の春季には航空機観測と地上観測を同期し、エアロゾル・放射・雲の総合的な観測を行った。主な参加機関は、NIESのアジア・大気・化学領域、千葉大学、大阪府立大学、東京農工大学、北海道大学、東京大学、琉球大学、(独)産業技術総合研究所(AIST)、(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)、環境省などである。測定器の一覧を表1-2に示した。

長期的な安定運用のための課題としては、人材の育成・確保と運営費である。現在はNIESの中期計画に組み込まれているが、5年ごとの見直しがあるため、人材や運営費が流動的であり長期的には不安定な要素となっている。

③ 福江島ステーション

長崎県福江島にもエアロゾル・放射観測施設があり、千葉大(もともとは総合地球環境学研究所と北海道大学)、NIES・NIES/AIST・JAMSTECの4つの観測施設がある。こちらも近年観測機器が充実し、エアロゾルの化学組成・物理的・光学的性質・放射関連の観測を行っている。この施設は、それぞれの研究機関の独自の研究費で維持運営されている。個別の研究費で独立に維持運営されているため、リスクは分散されているが、一体的運用ではないため、重複観測や個別事情で観測が中止になる可能性がある。また、定期的に観測機器や施設をメンテナンスする人材がいないため、不測の事態(停電等)の対応が困難である。

④ SKYNETとその他の国内ステーション

辺戸岬や福江島のような総合的な観測施設ではないが、スカイラジオメーターを中心に、ミー散乱ライダーや日射計などほかの測器を組み合わせたエアロゾル・放射の観測サイトが日本国内に多数存在する。辺戸岬や福江島の施設にこれらを加えた観測ネットワークをSKYNETと称して千葉大学や富山大学などが中心となって管理・運営を行っている。このほか、国内には能登半島(金沢大学)や天草(熊本県立大学)などにも観測ステーションがあり、観測を行っている。

⑤ 外国のステーション

外国の施設としては上記UNEP ABC-Asia以外にSKYNET、AERONET、EANETなどがある。

EANETは、日本の環境省が主導して、2001年1月よりアジア地域の10ヶ国が参加し、酸性物質の沈着をモニター

¹¹ <http://www.nies.go.jp/asia/hedomisaki/home-j.html> (参照日: 2009/12/14)

している。当初の参加国は中国・インドネシア・日本・マレーシア・モンゴル・フィリピン・韓国・ロシア（極東地区）・タイ・ベトナムであった。その後2001年からカンボジアが、2002年からラオスが、2005年からミャンマーが参加しており、現在は13ヶ国が参加している。

EANETサイトでは、乾性沈着・湿性沈着物質の観測が行われており、エアロゾルの組成としてはフィルターパック法により2週間に一度の頻度で、 SO_4^{2-} ・ NO_3^- ・ Cl^- ・ NH_4^+ ・ Na^+ ・ K^+ ・ Mg^{2+} ・ Ca^{2+} の分析が行われている。結果はData Reportとして1年に一度データ集が発行されている（ADORC, 2008）。

現在、観測に携わることのできる人員が減少している。観測的研究への研究資金の投入とともに、長期モニタリングに対応した人材育成システム（長期観測の専門職職員の配置）などが望まれる。また行政側と協力して、辺戸ステーションで行っているような、データ相互利用促進も望まれる。

（高見）

表1-2 辺戸岬大気・エアロゾル観測ステーションの測定機器リスト。

放射・雲特性の測定	化学組成分析測定	物理的／光学的特性の測定
スカイラジオメーター 直達日射計 全天日射計 赤外放射計 マイクロ波放射計 雲カメラ *雲レーダー	エアロゾル質量分析計（AMS） 粒子状有機・元素炭素計（ECOC） 全反応性窒素計（NO _y ） ナイトレート（粒子状NO ₃ ）モニター 形態別水銀測定器 フィルターサンプリング （有機、無機、重金属、多環芳香族の分析） 降水中の重金属分析 炭化水素計（GC） *飛行時間型レーザー蒸発エアロゾル質量分析計（ToF-AMS） *炭化水素計（GC-MS）， *ガス状アンモニア計	ライダー 光散乱式粒子計数器（OPC） TEOM ブラックカーボン測定 粒子吸収率測定器（PSAP） エサロメーター マルチアングル吸光光度計（MAAP） COSMOS ネフェロメーター MAX-DOAS *走査型粒子移動度測定器（SMPS） *雲凝結核計測器（CCN） *Tandem-DMA

*印は集中観測時のみ使用した測定器を示す。

（2）気象庁による観測

気象庁では、サンフォトメーターによるエアロゾル光学的厚さの観測を綾里（岩手県大船渡市：大気環境観測所）、南鳥島（東京都小笠原村：南鳥島気象観測所）および与那国島（沖縄県与那国町：与那国島特別地域気象観測所）で、エアロゾルライダーによる高度約25 kmまでのエアロゾル鉛直分布（散乱比・偏光解消度）の観測を綾里で行っている。また、直達日射計を用いた直達日射量の観測を札幌（札幌市中央区：札幌管区気象台）、つくば／館野（茨城県つくば市：高層気象台）、福岡（福岡市中央区：福岡管区気象台）および石垣島（沖縄県石垣市：石垣島地方気象台）で行っている。

これらの観測所では、世界気象機関全球大気監視（WMO/GAW）計画およびBSRNなどの国際計画と連携して、気象庁（高層気象台および気象研究所を含む）が長期継続観測および研究観測を行っている。

気象研究所ではまた、研究観測の一環として、南鳥島でスカイラジオメーター・全天日射計・赤外放射計・ネフェロメーター（Radiance Research M903）・PSAP（Radiance Research）による観測を行い、SKYNETにも貢献している。

南鳥島は、渡航や観測機器の輸送・保守・修理の困難さがあり、また、波のしぶきから観測機器を守るための防塩対策が必要ではあるものの、人為起源・大陸起源から十分に離れた観測点としての重要性を考えると、できるだけ堅固で保守が必要ない測器を開発し、観測を継続できるよう工夫する必要がある。

また、エアロゾルの光学特性観測をより正確に測定するためには、空気取り入れ配管まで含めた温湿度制御を行った観測システムの開発も必要である。

（内山・須田）

1.3.2 極域における観測強化（北極・南極）

(1) 必要性

グローバルな地球温暖化問題における極域の役割を解明するうえで、極域における観測は極めて重要である。地球全体の放射エネルギー収支を見ると、低緯度域で日射エネルギーは過剰となり高緯度域において赤外放射の射出により失われる。その際、極域での雲の振る舞いは放射エネルギー収支を左右する重要な要因となっている。極域のエアロゾルは中低緯度に比べて極めて低濃度であることから、その直接効果は小さいことが予想されるが、間接効果による雲の特性の変化や降水過程に及ぼす影響を考えるとその存在は無視できず、さらにその効果は両極で大きく異なることも予想される。また、極域の高い地表面反射率（アルベド）は雲・エアロゾルの影響を増幅する作用を持つため、極域では特に中低緯度と比較して精密なアルベド観測の重要性が高い。

雲の観測ではリモートセンシングが主要な観測手法となる。これまで主流だった受動型センサーを搭載した衛星観測による極域の雲の抽出は、海氷や氷床の高い日射反射率により極めて困難なことから、雲抽出アルゴリズムの開発・改良によって、極域での検証観測は欠かせないものであった。能動型センサーが主流となりつつある今日でも、地上検証観測の重要性は変わらない。地球を構成する一領域として極域観測は不可欠であるにもかかわらず、極域の観測サイトは少なく、観測データも少ない現状では、特に観測施設の国際的な相互利用の促進が強く望まれる。

(2) 現状と課題

北極と南極とはその地理的条件や歴史的・政治的背景が異なることから、結果として両極での観測体制も異なる。北極圏は北極海を取り囲むように、ロシア・アメリカ・カナダ、および北欧諸国の領土として構成されるため、北極での観測はいずれかの国土において行われるのに対して、南極域では、南極条約に基づき各国の領土権の主張が凍結され、南極域での活動は南極条約ならびに南極環境保護議定書に基づき強く制限されている。このため、その枠内で観測基地が建設され、観測が行われることになる（国立極地研究所編，2004）。

① 北極

北極域で国際的に開かれた観測拠点としては、アメリカアラスカ北岸のバーロー（Barrow）やノルウェー北方のスバルバル諸島に位置するニーオルスン（Ny-Alesund）が挙げられる。バーローはBSRN・GAW・ARMの観測サイトとして、NOAAおよびARMコミュニティにより充実した雲・エアロゾル・放射観測が維持されている。アメリカの観測施設ではあるが、実質的に国際共同利用が図られている。ニーオルスンではスバルバル条約の加盟国に同等な研究活動が保証され、現在、ノルウェー・スウェーデン・ドイツ・フランスイギリス・イタリア・オランダ・インド・中国・韓国・日本の11ヶ国が、独自にあるいは共同で各々の観測施設を維持している。日本が維持する観測施設は、国立極地研究所の北極観測センターを通じて施設利用が可能となっている。ニーオルスンはBSRNならびにGAWの観測サイトになっており、その観測は主にドイツが担当している。極地研究所がドイツ基地と共同で維持しているマイクロパルスライダー観測は、MPLNETの一サイトとしてNASAのウェブサイトを通じてデータが公開されている。また、スカイラジオメーター観測も極地研究所により維持され、SKYNETに準拠する形でデータ解析・データ公開がなされている。

雲・エアロゾル・放射に関する北極大気研究のトピックスとして、北極ヘイズ、混合相雲、エアロゾル輸送・変質過程、雪氷圏相互作用などの問題などが取り上げられてきた。これらの問題解明には観測施設のさらなる拡充と相互利用による国際共同研究が欠かせないが、いまだ十分とは言えない。極地という厳しい自然環境の下で観測施設をどのような形で維持し相互利用を図るべきか国際共同のあり方について課題が残る。

② 南極

南極大陸およびその周辺を含む南極域における越冬観測は、20ヶ国の40基地で行われているが、雲・エアロゾル・放射に関する観測を継続的に行っている観測基地は多くはない。BSRNの観測サイトを有するのは南極点基地（アメリカ）・ノイマイヤ基地（ドイツ）・ドームC基地（イタリア・フランス共同）・昭和基地（日本）の4基地のみである。昭和基地ではGAWおよびBSRNサイトとしての放射観測は、定常観測の一環として気象庁により維持されている。また、地上ベースのエアロゾル観測（CPC：Condensation Particle Counter）によるエアロゾル粒径別濃度測定）やスカイラジオメーター観測、全天カメラ観測は、モニタリング観測という位置づけで継続的に実施され、マイクロパルスライダー観測もMPLNETの一サイトとしてデータ提供を行っている。南極基地での観測データは原則としてすべて公開され、観測データの共有が図られている。

南極は基本的に人為汚染のない遠隔地であることから、バックグランド・エアロゾルや南大洋でのエアロゾル生成、エアロゾルの長距離輸送等に関する研究に適した領域である。これらの研究を進めるうえで、南極の広い

領域をカバーするためには、南極で観測を行う諸外国との連携や国際共同が欠かせない。しかし、現状では観測施設の相互利用は地理的要因からだけでなく、各国の南極観測事業体制の違いから容易ではない。すなわち、南極は国境がないにもかかわらず、真の国際共同研究が十分行われていないとの印象を拭えない。今後、国際的な枠組みの中で、各国の観測施設の相互利用や交換研究者制度をさらに推進することが肝要である。それと同時に、各国の観測基地・観測施設・観測データに関する情報交換システムの構築が今後の課題である。

(3) 今後の展望

地球温暖化問題において、地球の気候の形成における極域の役割の解明という観点から、極域観測やその国際協力は今後さらに重要性を増し、各国の観測施設の相互利用はさらに促進されるであろう。シベリアのティクシ(Tiksi)ではロシアとアメリカとの共同により新たな大気観測施設が立ち上がり、雲・エアロゾル・放射観測が実施される。ロシアの国情の変化により後退した、シベリア域の観測網を補ううえでも重要な観測拠点となるもので、このような国際協力による観測拠点の北極域での拡充が強く望まれる。一方、南極観測はこれまで半世紀の活動を経て、各国の観測基地は施設の規模や観測体制も多様である。日本の南極観測体制は、現在、広く内外の研究者に開かれた観測基地を目指して、研究計画の公募体制が整いつつある。観測施設の相互利用の点からも、南極観測基地での研究環境の整備は強く望まれるところであり、南極へのアクセスを容易にする努力とともに、今後一層の推進が大きく期待される。

(塩原)

1.4 地球システムモデル開発の視点から見た観測ニーズ

1.4.1 はじめに

放射過程や雲微物理過程を通じたエアロゾルの気候に対する影響は、過去の気候変動の理解および将来の気候変動の定量的予測を行ううえで非常に重要である。東京大学気候システム研究センター・NIES・JAMSTECを中心とした研究チームがIPCC第3次評価報告書(以下IPCC-TAR: IPCC, 2001)およびIPCC-AR4へ貢献するために、気候モデルMIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate)を用いて気候変動シミュレーションを行った。その際、エアロゾルの効果を考慮するために、全球エアロゾル気候モデルSPRINTARS(Takemura *et al.*, 2000, 2002, 2005, 2009)を開発し、世界に先駆けて詳細なエアロゾルの気候影響を組み込んだ。その研究成果は、IPCCによる放射強制力の見積りおよび気候変動評価に直接貢献している。しかし、IPCC-AR4でも示されている通り、エアロゾルの気候影響に関する定量的評価には依然として大きな不確定性が存在し、人為的な気候変動を評価するうえで鍵となっている。また、雲特性(雲量・光学特性・微物理特性など)の変動は、放射収支および水循環の変化を通して、地球の気候を大きく左右する。そのため、気候変動に伴う雲特性の変動を、フィードバック効果を含めていかに適切に数値モデルで表現するかも、定量的な将来の気候変動予測の鍵となる。人・自然・地球共生プロジェクト(2002~2006年度)や21世紀気候変動予測革新プログラム(2007年度~)により、次世代モデルの1つである大気・海洋・エアロゾル・大気化学・海洋化学・生態系の各モデルを結合した地球システムモデルの開発も進められており、各コンポーネントの複雑な相互作用を表現し得る数値モデルが発展しつつある。統合的な地球システムモデルにおいて、雲とエアロゾルの分布や気候に対する影響を地球規模で適切に表現することは喫緊の課題である。

1.4.2 地球システムモデルにおける観測データの利用状況

一般的に、気候モデルによる再現性を評価するためには、観測データを用いた検証が必要であることは言うまでもない。特に、エアロゾルおよび雲は、代表的な温室効果ガスと比較して大気中での寿命が短いことから、気候モデルによる過去の気候再現と将来の気候変動予測の信頼度向上、および地球システムモデル構築には、時空間的に密で詳細な観測データが不可欠である。

気候モデル内の雲やエアロゾルは、質量保存の観点から、質量混合比を予報変数として扱うのが一般的である。つまり、大気密度が正しく計算されていれば、雲やエアロゾルの質量濃度(質量混合比×大気密度)は一次的なモデル出力変数であると言える。よって、地上・船舶・航空機からの雲とエアロゾルの質量濃度の観測は、数値モデルの定量的不確定性を低減するためにも非常に重要である。また、雲・エアロゾル相互作用を定量的に理解するうえでは、それぞれの数濃度が直接的なパラメーターとなるため、数濃度の観測も重要である。ただし、モデル内で質量混合比を数濃度へ変換するには、粒径分布を仮定する必要がある。いずれにしても、これらの現場観測を一層充実させ、雲やエアロゾルを直接サンプルして解析することにより、エアロゾルの物性および雲・エ

エアロゾル相互作用をより適切かつ詳細に数値モデルへ組み込むことが可能となることが期待できる。

しかし、直接サンプルの定常観測を全球規模で密に展開するのは、現実的ではない。そこで、人工衛星や地上観測網からのリモートセンシングを用いた観測が重要となってくる。これらは広域的・定常的な観測が可能であるため、分布の時空間変動が大きいエアロゾルや雲には非常に適している。広域的な把握のみであれば人工衛星のみで十分であるかもしれないが、エアロゾルは下部対流圏に集中しているため、定量化のためには地上からのリモートセンシング観測網も不可欠である。リモートセンシングのデータを解析して得られるのは、光学的厚さ・消散係数・吸収係数・一次散乱アルベド・エアロゾルオンゲストローム指数（粒径の指標）などといった、雲やエアロゾルの光学特性である。気候変動を理解するうえにおいては、質量濃度よりも光学特性の方が直接的な指標である。ただし、数値モデルでは雲・エアロゾルを質量ベースで扱っているため、これらの光学パラメータは、複素屈折率・粒径分布・吸湿成長率などを仮定して導出しなければならず、間接的な変数であることに注意が必要である。

世界の各研究機関の全球エアロゾルモデルの相互比較プロジェクトとして AeroCom がある（例えば Kinne *et al.*, 2006; Schulz *et al.*, 2006）。AeroCom は、IPCC 評価報告書におけるエアロゾルの気候影響評価を実質的に取りまとめるという重要な役割を担っており、アジアからは SPRINTARS が唯一参加している。AeroCom では、モデル間の相互比較以外に、モデルと観測との比較や、異なる観測間の比較も行っており、数値モデル側からの観測ニーズを統合的に体现している場でもある。しかし、現在のところ、欧米の人工衛星搭載センサーや地上観測網から得られたデータのみでの利用であり、日本の研究グループによる観測データは利用されていない。IPCC への直接的な貢献へつながるプロジェクトでもあることから、日本の観測グループによるデータも利用されるように、早急に対処すべきである。また、SPRINTARS は、大気汚染物質半球規模輸送調査委員会 (TF HTAP) のモデル相互比較プロジェクトにも参加している（例えば Shindell *et al.*, 2008）。

1.4.3 地球システムモデルの視点からの今後の観測推進の必要性

国内外の雲・エアロゾル観測態勢は、ここ約 10 年間で急速に整備され、広域的な動態を把握できるようになってきた。一方、エアロゾルモデルも、様々な種類のエアロゾルのより詳細なプロセスを扱えるようになるなど、急速に発展してきており、その開発過程において、観測データを参照しながら定量的なモデル構築を行ってきた。また、地球全体を 3.5 km メッシュにしてパラメタリゼーションなしに雲を表現する「雲解像モデル」という次世代のモデルの開発も、観測データを参照しながら進められている (Sato *et al.*, 2008)。しかし、数値モデル開発の視点からは、さらなる観測データの充実が望まれる。ここでは、2 つの大きな課題を挙げておく。

1 つは、シミュレーションによるエアロゾルの気候影響評価を検証するためには、数年～数十年スケールの継続的な観測データの蓄積が必要ということである。例えば、世界の多くの地域で、1950 年代から 1980 年代まで地表に届く太陽放射量は減少し続け (global dimming)、その後増加に転じている (global brightening) ことが知られているが (例えば Wild, 2009)、これは数十年スケールの質の高い観測データにより解明できたことである。この太陽放射量の増減はエアロゾルが大きく関わっていると推測されているが、数十年前からの地球規模でのエアロゾルの直接的な継続観測は存在しないことから、今となっては観測のみで確認することはできない。しかし、今後は、近年整備されてきたエアロゾル観測態勢を継続することにより、気候を大きく左右する太陽放射量の増減に関わる雲・エアロゾルの長期データを取得し、数値モデルによる過去の気候の再現および将来の気候変動予測の精度向上に貢献することが期待される。

もう 1 つは、比較的新しい観測技術であるレーダーやライダーといった能動センサーを用いて、雲・エアロゾルの高度分布のデータを蓄積していくことである。一般的に、低層雲は正味として地球を冷却する効果がある一方、高層雲は地球を暖める効果があると言われているため、雲の高度分布を定量的に把握することは非常に重要である。また、エアロゾルと雲の相対的な高度差は、エアロゾル間接効果だけではなく、直接効果にも大きな影響を及ぼすと考えられている (例えば Takemura *et al.*, 2002)。日本においては、NIES による地上ライダーネットワークがアジア域に展開されているほか、人工衛星搭載のレーダー・ライダーのプロジェクト EarthCARE が進行している。能動センサーによる雲とエアロゾルの観測データは、数値モデルによるシミュレーション結果の新しい検証材料となり、その結果として気候変動の評価の不確定性を大きく低減するものと期待される。

(竹村)

1.5 時空間的観測空白の改善および観測項目の充実

1.5.1 雲・エアロゾル・放射に関する新観測手法の開発

(1) 地上観測

① 必要性

放射収支を通して気候への影響を正確に見積もろうとしたとき、エアロゾル特性（組成・混合状態・形状など）と光学特性（一次散乱量・屈折率）や雲物理特性（過飽和度スペクトル）の関係を明らかにする必要がある。また、衛星データの検証、モデル検証として、比較的精度のよい地上からの観測データの必要性は高い。

② 現状と課題

現場での光学特性の測定的重要性から、エアロゾル散乱係数・吸収係数の測定がなされているが、測定精度が悪い。また、測定波長も1波長しかない場合が多い。さらに、放射伝達を理解するには一次散乱光の散乱パターン（phase function）の情報も必要である。

現在、気候モデルで使われるエアロゾルモデルは、現実には存在するエアロゾルと比べるとかなり簡略化されたものである。エアロゾルは様々な過程を経て存在しており、その経歴によって、形状・成分組成が単純なものから複雑なものがある。気候モデルなどで使われているエアロゾルモデルの適用範囲を明らかにするためにも、今後さらに精緻なものにしていくためにも、現実のエアロゾルの特性を調べる必要がある。そのために、個々の粒子の形状・組成・相（固体か液滴か）・混合状態を知ると同時に、それらの粒子がどのような光学特性や吸湿特性を持っているかを測定する必要がある。

大気中にあるエアロゾルや雲の特性を推定するために太陽直達光と散乱光を測定する装置が使われる。現在のものは、太陽方向から3度より大きな角度しか測定できないが、さらに小さな角度まで測定できるようにすることで、大きな粒子に対する感度が上がると思われる。また、太陽追尾の精度が悪いため、直達光測定の精度を落としており、太陽追尾精度の改善も必要である。

前述のように、放射量の変化を監視するのは重要であるが、それと同時に何が原因で変化しているかわかる情報を取ることも重要である。このためには、高分解能の連続スペクトルデータの放射観測が役に立つ。また、太陽光を利用したエアロゾル観測では、日中のエアロゾルについては推定できるが、夜間のエアロゾルについては情報を得ることができない。夜間のエアロゾルを測定する手段の開発が望まれる。

地球放射収支にとっては、赤外放射も重要である。地上での下向き赤外放射にとって雲の存在は重要であるが、夜間の全天の雲分布は測定されていない。夜間の雲分布の測定、あるいは赤外線天空輝度分布の測定が必要である。地球放射の測定においても、太陽放射同様に、高分解能の連続スペクトルの観測が必要である。エアロゾルは、夜間には赤外放射を通して放射収支に影響を与える。赤外域のエアロゾルの光学特性の測定も行う必要がある。

③ 今後の展望

雲・エアロゾル・放射の観測は、それぞれ単独で監視を行っても利用目的が限られてしまう。このため、観測は、SKYNETのスーパーサイトやARMの観測点のような各種測器を揃えたものである必要がある。特にエアロゾル組成においては、BCの評価をどのように行うのか、データの標準化が図られていないなど課題が多く、今後の進展が望まれる。また、エアロゾルの光学特性については、その光吸収特性（一次散乱アルベドなど）の定量的評価の精度向上が必要である。

各種測器そのものについても、引き続き開発・改良を行っていかなければならないが、予算が限られていることを考えても、1つの研究プロジェクト、研究グループだけで観測サイトを充実させていくことは困難である。このような状況では、相互利用できる観測点を増やし、測器を持ち寄り測定し、データはお互いに公開して研究を促進するシステムを作ることによって、少ない予算で、充実した観測点を作ることが肝要である。そのためにもデータの標準化や、ホームページの本来の意義に立ち返った有効的活用を推進する必要がある。

(内山)

(2) エアロゾル観測用ライダーの高機能化

① 必要性

ライダーによるエアロゾルの自動連続観測では、ミー散乱ライダー、偏光解消度測定機能を持つミー散乱ライダーが広く用いられている。しかし、エアロゾルの光学特性やエアロゾル種ごとの分布を解析するためには、複数の波長で、後方散乱に加えて、消散係数を測定することが必要とされる。消散係数の測定ではラマン散乱ライダーが知られているが、ラマン散乱は散乱断面積が非常に小さいため太陽光による背景光雑音の多い昼間の測定

は困難である。そこで、レイリー散乱を利用する高スペクトル分解ライダー方式の多波長ライダーが期待されている。

② 現状と課題

高スペクトル分解ライダー(HSRL)では、狭帯域のレーザーを送信し、散乱光のミー散乱成分(スペクトル幅が狭い)とレイリー散乱成分(分子運動のためスペクトル幅が広い)を高分解能の分光素子で分離して測定する。レイリー散乱成分の減衰から消散係数が求められる。分光素子として、ヨウ素などの分子フィルターを用いる手法とファブリペロ干涉計などを用いる手法がある。Nd:YAG レーザーの第2高調波ではヨウ素セルが利用できる。

これまでに、波長 532nm の HSRL がアメリカ (Eloranta, 2005) や NIES (Liu *et al.*, 1999; Tatarov *et al.*, 2006) で開発され観測研究に利用されてきた。アメリカでは、北極域での自動連続観測のための HSRL が開発され観測が行われている。また、Nd:YAG レーザーの第3高調波の 355nm では、ファブリペロエタロンを用いた HSRL が福井大学で開発された (Imaki *et al.*, 2005)。最近、衛星搭載ライダー CALIPSO の検証等を目的として、航空機搭載の HSRL が NASA やドイツの DLR、フランスなどで開発されている。

地上ライダーネットワークの次世代のライダーとしては、自動連続観測が可能な多波長の HSRL (1064nm・532nm・355nm の後方散乱、532nm・355nm の消散係数、1064nm・532nm の偏光解消度を測定)が必要とされる。現在、NIES では、ヨウ素セルとファブリペロエタロンの両方の手法を合わせて、これに応える多波長 HSRL を開発中である (Nishizawa *et al.*, 2008; Sugimoto *et al.*, 2008)。

③ 今後の展望

多波長 HSRL 装置は、現在 NIES が展開するネットワークの2波長 (1064nm・532nm) 偏光 (532nm) ライダーと比べて大型でコストも高いが、ネットワークの主要な地点に多波長 HSRL を配置することによってエアロゾル種ごとの特性や分布に関する極めて有効な観測が実現できる。また、従来、ヨーロッパのネットワーク EARLINET などで用いられている多波長ラマンライダーに取って代わる標準的な装置となる可能性を持っている。

(杉本)

(3) 混合状態・前駆物質等の観測

光学的厚さや一次散乱アルベドを計算する場合、エアロゾルの組成と混合状態の解明が必要となっている。しかし、現状では一次散乱アルベドなどの観測と、化学組成から計算した一次散乱アルベドが必ずしも一致していないので、化学組成、エアロゾルの混合状態と一次散乱アルベドを結びつける研究が必要である。

現状では、特に、BCとそのほかの人為起源エアロゾル(硫酸塩・硝酸塩・有機エアロゾルなど)、および自然起源であり東アジアに特有の黄砂も含めたエアロゾルの混合状態の解明が必要とされている。化学組成についてはフィルターサンプリングや、エアロゾル質量分析計、ブラックカーボン計などで測定できるが、それらの混合状態については、サンプルを採取し、電子顕微鏡写真を取り、例えば黄砂上のどこにBCが吸着しているかを観察する必要がある。また粒子状に吸着したBCや硫酸塩などの同定と同時に、その位置を特定するためにはPIXE

(Particle Induced X-Ray Emission) などの活用も必要であろう。しかし電顕写真などは手作業で数多くの粒子を観察する必要があるため、習熟した人材、観察するための時間などが必要であり、実現には困難が伴う。

気相の前駆物質が化学変化を起こして蒸気圧が低くなり、既存の粒子へ吸着するプロセスの解明も混合状態を理解するうえでは重要である。

中国など新興国の経済発展等により、東アジアにおける排出量は増加し、それに伴いエアロゾルの負荷量も増加していると考えられる。対流圏におけるエアロゾルの空間的分布を把握するには、観測点が少ないアジア地域において観測が必要である。

(高見)

(4) ABC-Asia・EANET のアジア域におけるエアロゾルの観測

ABC-AsiaはUNEPのプロジェクトである。参加国は中国・インド・日本・モルディヴ・ネパール・パキスタン・韓国・タイであり、南アジア域やヒマラヤの山岳地域にまで観測拠点が広がっている。ABC-AsiaではBCや人為起源の硫酸塩や硝酸塩など微小粒子の観測が主である。観測方法については様々であり、日本のようにエアロゾル質量分析計をはじめ先端的な装置を整備しているところもあれば、フィルターサンプリングのみの場所もある。

先にも述べたが、EANETサイトでは、乾性沈着・湿性沈着物質の観測が行われており、エアロゾルの組成としてはフィルターパック法により2週間に一度の頻度で、 SO_4^{2-} ・ NO_3^- ・ Cl^- ・ NH_4^+ ・ Na^+ ・ K^+ ・ Mg^{2+} ・ Ca^{2+} の分析が行われている。EANET参加国は中国・インドネシア・日本・マレーシア・モンゴル・フィリピン・韓国・ロシア(極東地区)・タイ・ベトナム・カンボジア・ラオス・ミャンマーが参加しており、現在は13ヶ国となっている。

ABC-AsiaとEANETはお互い補完的な場所に観測サイトを構築しており、両者の観測地点においてエアロゾル・放射観測が行われれば空間的な空白は解消されていくと思われる。ただしEANETは環境省が主導し酸性雨観測を主目的としているため、短期間で観測項目を増やすことは難しいと予測されるが、将来的には、観測空白を埋めるべく項目の増加を行っていくことが望まれる。

中国などでは公表されている資料が少なく、個々の研究者の取り組みでは、それぞれの国の国内事情や法令のためデータの取得や公表などに制限がある場合があり、データの利用やそれを用いた解析に大きな支障が出ている。EANETのような国と国との条約に基づいた施策が必要である。

(高見)

1.5.2 船舶搭載型システムの開発と配備

(1) 必要性

雲やエアロゾルは放射収支過程を通じて地球の気候形成に影響をおよぼす。雲・エアロゾルを気候影響という観点で捉え、その影響を定量的に評価するためには、それらの物理・化学的特性や光学的性質の地域特性や季節変化など地球規模での分布や振る舞いの詳細を知る必要がある。そのため、雲・エアロゾル・放射観測等の全球的なネットワークが展開されている。しかし、これらは主に陸域に偏在していることから、地球表面の7割を占める海洋上の観測データを取得する手段として、船舶による洋上観測が必要である。また、全球データの蓄積には衛星観測が最も有効であると言えるが、一方で、衛星観測リトリバルの精度向上には地上検証観測が不可欠であり、船舶観測は洋上の検証観測として重要な役割を持つ。

(2) 現状と課題

時空間的観測空白の改善という点で、広域観測のプラットフォームとしての船舶の利用は極めて有効である。雲・エアロゾル・放射に関する船舶観測は日本ではこれまで、みらい・白鳳丸・海鷹丸・しらせなどの研究観測船のほか、商船も利用して行われてきた。しかし、船舶観測の場合、地上観測のようなネットワークを展開し、長期的な観測の維持やデータの蓄積を行うことは困難である。そのため、船舶観測のノウハウが研究者や研究グループの間で共有される機会が少なく、船舶観測用の観測機器や観測データの標準化も進んでいないのが現状である。

装置の作動に影響を与える船舶動揺や振動、海塩による装置の腐蝕の問題など、船舶での観測環境は地上観測に比べて格段に悪い。そういった環境で高度な観測を維持することは極めて困難であるが、研究対象としての雲・エアロゾル・放射観測に求められる観測項目や観測精度は基本的に地上観測と同じであることを考慮すると、船上においても、以下に示すような受動型・能動型のリモートセンシングと in-situ 測定を組み合わせた総合的な船舶観測システムが必要である。また、これらの物理計測と同期した化学成分の高時間分解能を持ち、低濃度である外洋域でも測定できる高感度リアルタイム化学分析装置の開発も必要となるであろう。

○受動型機器—スカイラジオメーター・全天カメラ：エアロゾル光学特性、雲の分布

○能動型機器—ライダー・シーロメーター：雲の鉛直構造、雲底雲頂境界層高度

○in-situ 光学機器—ネフエロメーター・エサロメーター・OPC・CPC (Condensation Particle Counter)：エアロゾル散乱・吸収係数、粒径分布

また、エアロゾルの光学特性はエアロゾルの化学成分と密接に関係していることから、各発生源からの寄与や混合状態、時空間分布をモデルにより再現・予測する必要がある。さらに、エアロゾルの生成、ひいては雲の生成過程において、海洋域に発生源を持つ前駆気体の存在が重要であることから、これらの物理計測と同期してエアロゾルやガス成分の化学組成を高時間分解能で、しかも低濃度である外洋域でも測定できるような高感度のリアルタイム化学分析装置の開発も必要となるであろう。具体的には、エアロゾル質量分析計 (AMS) や単一エアロゾル質量分析装置 (ATOFMS) のほか、洋上大気中の窒素酸化物 (NOX)・硫黄酸化物 (SOX) 濃度の高感度測定装置や微量有機ガス測定のための陽子移動反応質量分析計 (PTR-MS) などが挙げられる。

このような船舶観測システムの開発においてハード面では次のような仕様が要求される。

- ・長期観測可能なメンテナンスフリー (停電後の自動復帰なども含め) の測定システムの開発。
- ・船舶搭載のための耐振性があり、海塩などによる腐蝕に耐える装置の開発。
- ・気温・湿度・積雪などの気象条件が大きく異なる観測点で標準化したサンプリング手法と標準装置の運用が可能となる工夫。
- ・船舶上でのエアロゾル等のサンプリングで、船自体からの汚染等を避ける、あるいはデータ棄却できる測定シ

システムの構築。

- ・データの自動転送システムの構築。

また、より良い環境で船舶観測を行うためには、装置搭載のための船舶改造だけでなく、新造船の計画段階から換気システムやエンジンからの排ガス対策等について配慮した船舶設計ができるような体制が肝要である。

(3) 今後の展望

地上観測網と異なり、船舶観測に基づく国際的観測網は極めて少ない。そのような現状において、NASA のグループが地上ベースの AERONET を補うために展開し始めた船舶ベースの観測網である MAN (Maritime Aerosol Network) は、雲・エアロゾル・放射に関する数少ない海洋観測網の 1 つとして、今後ますますその重要性を増すであろう。AERONET が Cime1 社の自動追尾型サンフォトメーターを主要測器として採用しているのに対して、MAN では Microtops 社の簡易型サンフォトメーターを用い、エアロゾルの波長別光学的厚さを測定することを目的としている (Smirnov *et al.*, 2009)。このサンフォトメーターは、観測者が本体に取り付けられた照準を用いて太陽を捉え、手動で測定を行うものである。そのため、精度の良い観測を行うためには技術的に相当の熟練を要する。これに対応するものとして、日本では船舶搭載型のスカイラジオメーターを用いてエアロゾルの光学観測を行ってきた。船舶搭載型スカイラジオメーターは船舶動揺に対して太陽を自動追尾しながら光学的厚さを測定する測器であるが、これまでのモデルは太陽追尾性能が十分でなく、動揺の大きい海域では高精度の観測を行うことができなかった。これらの問題点を解消した新たなモデルが最近開発されており、今後の船舶観測に期待が持たれると同時に、MAN への貢献も期待される。

さらに、気体成分の鉛直分布を測定可能とする MAX-DOAS (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopes) を、船上大気多成分観測システムとして船舶へ搭載する具体策の検討を進め、国際的にも標準測定法として確立していく必要がある。

(塩原・植松)

1.5.3 雲・エアロゾル・放射観測用航空機の導入

(1) 必要性

地上からの放射観測は、衛星観測と比べると保守を常に行えること、問題が起こったときに対処できることのため精度の高い測定ができる。しかし、その場合においても、地上観測データを利用した解析では、測定値の解釈、リーモーターとセンシングで推定した物理量の検証のためには、上空での直接測定した情報が必要である。

エアロゾルを含む気塊が上昇する過程で、温度変化により過飽和度が増加し、雲が生成する。エアロゾルの組成・粒径に依存して雲が生成する臨界過飽和度が増加する。また、エアロゾルの個数に依存して生成する雲の数にも差ができると予想される。これらの関係を観測から解明するためには、雲の下部、雲中、雲の上部でのエアロゾル・雲・水分量の観測が必要不可欠である。さらにエアロゾルや雲がもたらす放射への影響を観測するためには、鉛直方向のデータが必要である。これらの観測は航空機や気球、飛行船など、高度 10 km 程度まで飛行できる観測プラットフォームを用いる必要がある。特に雲は地上からの観測に大きな制約があり、航空機等の飛翔体を用いた観測は極めて重要である。

(2) 現状と課題

日本国内では、雲・エアロゾル・放射の航空機観測は、1980 年代から民間の小型航空機を借り上げて細々と航空機観測がなされてきた。1990 年代に、2 機の航空機を用いて、雲と放射、雲層の放射収支を同期して測定するシステムが開発され、雲の放射収支 (異常吸収) の解明につながる観測が行われた。その後、航空機観測の予算が打ち切りとなり、放射収支と結びつける航空機観測はほとんどできない状況になっている。現在、雲・エアロゾル・放射に関する観測は APEX (Asian Atmospheric Particle Environmental Change Studies) ・A-FORCE (Aerosol Radiative Forcing in East Asia) などのプロジェクトで断片的に行われているが、定期的な観測は行われていない。また、観測用航空機も制限があり、現状では必要な測器をすべて搭載できるわけではない。雲・エアロゾル・放射観測を同時に行うためには、ある程度大型の飛行機が必要であり、日本では民間航空機の借り上げについても、経費だけでなく使用できる航空機そのものの数も限られる。

アジア域における代表的な雲・エアロゾルの観測として APEX、ACE Asia (Aerosol Characterization Experiment in Asian Region) が挙げられる。APEX ではセスナに SO₂ 計・雲粒子観測計を載せ、もう 1 機のビーチクラフトに CAPS など雲観測測器や放射観測測器を搭載し、同期観測を試みた。さらに Gulfstream-II にライダーなどの測器を搭載し、高度 10 km 程度での広域の観測を行った。一方、ACE-Asia ではアメリカの研究者が日本の岩国

を基地として、C-130・King Air・Twin Otter (CIRPAS: Centre for Interdisciplinary Remotely-Piloted Aircraft Studies) などを用いて観測を行った。例えば、Twin Otter にエアロゾル質量分析計など大型の測器を搭載し、日本、韓国、その周辺域で上空のエアロゾル化学組成観測を行った。イギリスでは MetOffice・NERC/NCAS が BAEs146 regional jet aircraft を運用し、イギリスの研究者のために航空機観測を行っている。

以上のように、雲・エアロゾルの観測には特殊な測器が用いられるため、保守や据付調整に要する手間を考えると、定期航路の航空機を利用した観測はほとんど不可能である。現在、国公立の研究機関、大学とも観測に用いる航空機を持っていないので、航空機観測は民間航空機を借り上げて実施している。観測専用の航空機がないため、観測のたびに測器を搭載し、撤収しなければならない。また、測器を航空機に搭載する場合、航空機の改造が必要となり、改修を行い検査を受けることになる。このために多くの費用がかかること、また、航空機の借料が外国に比べて高いことのため航空機観測には大きな予算が必要となる。

航空機観測において良質なデータを取るためには経験に裏づけされた特殊な技術が必要であるが、現状では予算の制約から飛行時間を確保できず多くの経験を積むこともできない。特に雲・エアロゾルの観測に使用する測器は外国製品が多く、細かな調整や較正はメーカーに送り返して行っている。しかし、メーカーにおいても万全の較正システムを持っているわけでないので、十分な調整・較正ができるわけではない。かつてドイツ雲物理測定グループが測器に熟知した技術者を持ち、独自の較正技術を開発していたように、日本国内でも、測器に熟知し、きちんと較正できる技術者の養成が必要である。

(3) 今後の展望

今まで、雲・エアロゾル・放射に関する国内の航空機観測は、主として下層大気を対象に行われてきた。巻雲の地球放射収支への重要性を考えると、今後、巻雲を観測できる氷雲用のプローブを搭載した高高度を飛行できる航空機の整備が必要である。また、航空機観測の大きな利点として、短時間で長距離を移動できることが挙げられる。その特性を利用して、輸送途上の変質、数千kmスケールの空間変動などを調べるための航空機も必要である。さらに、雲・エアロゾルの放射影響を航空機で調べようとする場合、雲・エアロゾルの測定と放射の測定の同時性を確保しなければならない。複数の航空機による同期観測ができる体制が必要である。

予算上の制約、利用可能な航空機が少ない。研究機関で観測用航空機を持たないなどの制約が多いが、研究観測で定期的な観測を行っていくことからまず始める必要がある。独立行政法人や大学で観測用航空機を維持するのは非常に困難であるため、当面は民間の航空会社の航空機を利用する方策が現実的である。これまでは個別の研究者が科学研究費等で予算を確保し観測を行ってきたが、散発的な観測にならざるを得ない。定期的な観測を目指すには、何らかの予算を確保することが必要である。

理想的には、雲・エアロゾル・放射の観測グループで共通に使える測器を搭載した観測用航空機を共同で持つ必要がある。このような航空機を使って定期的に決められた飛行航路を飛ぶような観測を行うことによって、較正法の改良、測器の改良が可能になる。

(内山・高見)

1.5.4 雲・エアロゾル・放射・降水に関する衛星観測システムの研究開発

(1) 概要

雲・エアロゾル・放射・降水は、地球温暖化との関連性が大きい地球物理量である。例えば、放射とはすなわち地球システムへの光と熱の出入りであり、全地球規模での変化モニタリングは温暖化研究における必須項目といえる。雲・エアロゾル・降水は放射を変化させる地球物理量として重要である。これらの地球物理量は、地球上での分布のみならず、これらの発生消滅過程のプロセスが地球温暖化研究において非常に大きな意味を持つ。例えば、エアロゾルを核に雲粒が凝結成長するとき、その成長効率はエアロゾルの種類や大きさ、そして水蒸気等の大気場に影響する。降水は雲粒が衝突併合過程によって巨大化した結果、水滴となって地上に落下する現象である、雲粒の衝突併合の効率もまたエアロゾルの存在や、大気場に影響する。これまでに、静止衛星による雲観測は30年近くの歴史を持ち、国際的なプロジェクト ISCCP が、雲の全球分布を把握する目的で1983年に設立されている。ISCCPでは複数の静止衛星を組み合わせることで、水平解像度30km、時間分解能3時間の全球の放射輝度や雲物理のデータを提供している (Rossow and Schiffer, 1999)。これらのデータセットは気候モデルの長期間の検証に非常に有益なものとなっている。

次に、日欧米で行われている現行あるいは将来の主な衛星観測システムの概要を記す。日本の現行の運輸多目的衛星 (MTSAT) は雲や水蒸気の動きを短い時間間隔 (30分) で把握し、主に気象予報に役立てられている。これ

までの静止気象衛星 (GMS) の頃からすでに雲・エアロゾルの観測への適用も試みられている (Takenaka *et al.*, 2009)。特に MTSAT では搭載チャンネル数が増加したことから、今後は静止気象衛星の気候変動研究への利用が活発化してくるであろう。ただし、MTSAT 搭載センサーはセンサー装置関数や較正值等のセンサー固有の情報が不十分な場合があり、雲・エアロゾル物理量の解析時に較正值が決まらない場合がある。今後の静止気象衛星の開発においては、低軌道衛星センサーと同程度のセンサー仕様と較正值の管理等が必要である。

2006 年 6 月に 95GHz (波長 3.16 mm) のレーダーを搭載した CloudSat と、可視と近赤外波長のライダーを搭載した CALIPSO が打ち上げられた。これらはアクティブセンサーと呼ばれ、自ら電磁波を照射し、散乱体からの反射を観測する測器であることから、散乱体まで距離を高い精度で求めることができる点が、従来の受動型センサーと異なる大きな特徴である。CloudSat と CALIPSO では雲と降水、雲とエアロゾルの 3 次元分布をそれぞれ検出できる (Okamoto and Sugimoto, 2008)。

2011 年度に 1 号機 (GCOM-W) の打上げが予定されている GCOM シリーズは、地球上の雲・エアロゾル・水蒸気量・海面水温・地表面温度・雪氷面特性・植生等の地表面キャラクタリゼーションの把握に活躍する、主として長期モニタリングの役割を担った衛星観測システムである。GCOM には高性能マイクロ波放射計 2 (AMSR2) が搭載された GCOM-W と、SGLI が搭載された GCOM-C がある。衛星システムの小型化という時代の要請の結果、2 つの衛星に分けて搭載されているが、マイクロ波と可視赤外チャンネルの複合利用によって雲の内部構造の把握が行われた事例 (Masunaga *et al.*, 2002; Nakajima *et al.*, 2009) があるように、可視光からマイクロ波までを網羅する複合センサー観測システムとして、センサーの同時搭載あるいは後述の A-Train システムのように同一軌道に複数の衛星を周回させるという考え方も検討事項の 1 つである。また、亜大陸スケールでの温室効果ガスの観測を目的として 2009 年 1 月に打上げられた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) には雲・エアロゾルイメージャ (TANSO-CAI) が搭載されており、雲とエアロゾルの観測が可能である。

2013 年度の打上げを予定している日欧共同ミッション EarthCARE は、雲とエアロゾルの相互作用メカニズム、雲・エアロゾルの輸送過程と放射の影響の解明が主な目的である。EarthCARE には能動・受動型センサーがバランス良く同時搭載されており、雲・エアロゾルに関するプロセス研究への貢献が期待される。2013 年度の実現を目指している日米共同ミッション全球降水観測 (GPM) は、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) の成功を受けて企画された降水観測プロジェクトである。TRMM 後継機となる主衛星と、マイクロ波放射計を搭載した副衛星群により、全球規模における降水現象を高頻度で観測する。EarthCARE と GPM から得られた観測データの複合利用による、エアロゾル～雲粒～降雨にいたるプロセス解明も重要研究の 1 つであるため、両衛星観測システムを同時期に移乗させることには大きな意義がある。NASA と CNES (フランス国立宇宙研究センター (NASA-: Centre National d' Etudes Spaciales)) による A-Train は、異なるセンサーが搭載された複数の衛星をほぼ同一の衛星軌道上を周回させ、多波長、多方式による準同時地球観測を実現させた観測システムである。現在、Aqua・CloudSat・CALIPSO・PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences Coupled with Observations from a Lidar)・Aura 等の衛星が観測を行っている。この中では、Aqua 搭載 MODIS・CloudSat 搭載 CPR・CALIPSO 搭載 Lidar・PARASOL 搭載 POLDER が雲・エアロゾルの観測に活躍している。

(2) 雲特性解析に利用される衛星観測システムの現状と将来展望

今後 5～10 年のスパンにおける雲特性解析においては、受動型可視赤外イメージャによる、雲光学的厚さ・雲粒有効半径・雲頂温度・鉛直積算雲水量の推定をベースに、さらなる多波長を用いた雲粒有効半径の鉛直探査や、雲レーダーなどの能動型センサーとの複合的な活用が主な改善発展事項である。実際、GCOM 衛星のセンサーによる長期モニタリングの継続、および A-Train の衛星センサー群や EarthCARE に搭載された可視赤外イメージャと雲レーダーによる、プロセス研究を主目的とした雲の鉛直構造と水平広がりとの同時観測が予定されている。

(1) でも述べたが、CloudSat には雲レーダーが搭載されており、雲と降水の 3 次元分布が得られる。従来受動型センサーでは、雲の上部の情報しか得ることができなかったため、中層や下層に大きな不確定性を抱えていた。これが CloudSat のように雲レーダーを利用することで、深い対流域などでも雲の全領域を検出可能であるため、気候モデルとの詳細な比較検証が可能となると期待される。レーダーは測器自らが、ある決まった周波数の電磁波を送信し、それをある細かい時間間隔で受信する。また受信機の時間分解能は、レーダーの鉛直分解能に相当することになる。実際にレーダーデータを解析するためには、受信強度を散乱体の後方散乱断面積と、散乱体とレーダーとの距離等を結ぶレーダー方程式が必要となる。

ライダー搭載の CALIPSO でも雲の検出は可能であるが、雲レーダーとの違いは上層の sub visual cirrus 等の

ように非常に薄い雲にも感度があること、下層の水雲にも感度があること等が挙げられる。小粒子に感度を持つため、エアロゾルも検出できる。このため、雲とエアロゾルの識別も大きなテーマとなる (Okamoto *et al.*, 2007)。雲からのレーダーやライダーの受信信号の強度は、雲の粒子サイズ・形状・個数密度などに依存する。このため、レーダーとライダーを組み合わせて雲の微物理特性を抽出する試みがある (Okamoto *et al.*, 2003)。レーダー信号が単位氷粒子の体積あたり半径の3乗に比例するのに対し、ライダーでは半径の1乗に逆比例することを利用して、雲粒子の微物理特性を求める手法であり、航空機による現場観測データによる検証などから、氷粒子の解析では現在最も精度の高い手法であるとされる (Heymsfield *et al.*, 2008)。また、実際にCloudSat と CALIPSO のデータに対して適用されている (Okamoto *et al.*, 2008)。この手法では、レーダーとライダーの両方で同時に検出可能な雲のみを対象としているため、レーダーのみ、もしくはライダーのみで検出できる雲の解析には課題が残っている。このため、CloudSat・CALIPSO 等に加え、MODIS センサーを付加した統合的な解析が望まれている。

2013 年度打上げを目標としている EarthCARE の時代からは、ドップラー観測機能による雲粒モーションの直接観測が可能になり、大気力学場を含めた雲成長プロセスの解明が期待される。CloudSat ではレーダー反射因子のみが観測されたが、EarthCARE ではこれに加えドップラー速度の情報を加えることで、ライダーでは減衰して、レーダーでしか観測されないような光学的に厚い雲域に対しても、高い精度で雲の微物理特性を抽出できると期待される (Sato *et al.*, 2009)。またこのほか、ドップラー機能からは、鉛直流の情報も取得することが期待される。EarthCARE では紫外線の高分解能ライダーが搭載される予定である。これによって、CALIPSO では減衰の影響を受けた後方散乱強度しか取得できなかったのが、直接消散係数の鉛直分布を得ることができることも、雲物理解析としては重要な点である。NASA の将来構想には、雲・エアロゾルと海洋エコシステムの観測を目的とした ACE (Aerosol, Cloud, Ecosystem) Mission (2010 年代中頃の打上げ目標)¹²がある。ACE には2波長雲レーダーや偏光イメージャー、ライダーなど5種類のセンサーが搭載され、エアロゾル・雲粒子・降雨までの総合的な観測に資する。以上のような世界的な観測展望において、日本の衛星観測システムが期待されていることは言うまでもない。

雲特性観測においては、長期モニタリングとプロセス研究の2本立ての衛星計画が必要である。プロセス研究に投入された斬新かつ新規性のある衛星観測システムは、その妥当性が検証された後に、長期モニタリングに資する観測システムの1つとして継続発展させることになる。例えば、現在計画が進められている日欧の EarthCARE や NASA の ACE における受動+能動センサーによる衛星観測システムは、初号機こそ主にプロセス研究に用いられるが、近い将来に継続衛星が定期的に打上げられ、長期モニタリングの中核を担う存在になることは十分に想定される。

(3) エアロゾル特性解析に利用される衛星観測システムの現状と将来展望

エアロゾルは大気微粒子として一括りされているが、粒子径は数10nm～数10 μ mと幅広い。当然、生成過程も種々多様である。気候変動予測等では自然起源と人為起源に大別し、前者は海塩・土壌、後者は硫酸塩・炭素系の4種類の粒子を類型例として採用している。さらに、雲と同様にエアロゾルの生成・輸送・変質・消滅のライフサイクルの変容多様性がエアロゾル研究を一層複雑にしている。エアロゾル自身が放射収支に与える影響評価はもちろん、雲生成に関わるメカニズムの解明は重要課題である。にもかかわらず時空間変動が大きいので、エアロゾルの確定的な把握は非常に難しい。衛星リモートセンシングによる広域かつ継続的な大気エアロゾル観測が重要となる所以である。

衛星からのエアロゾルリモートセンシングの原理を簡単に紹介する。エアロゾル粒子を微視的な観点から観ると、粒子径・形状・構造などの微物理特性と内部組成を表す化学特性で表現できる。地球大気に入射した太陽光は大気粒子と相互作用する。大気エアロゾルは(その大きさから)紫外・可視・近赤外波長の入射光に強く反応し散乱光を生じる。このエアロゾルによる光散乱過程に注目すると、波長別の衛星観測データから大気エアロゾルの光学特性・微物理特性・化学特性が推定できる。大気粒子による多重回光散乱、すなわち大気中の放射伝達過程の記述において、大気エアロゾルによる光学的厚さ(τ)と一回光散乱過程における生き残り確率(一次散乱アルベド: ω_0)が重要なパラメーターとなる。さらにこれらのパラメーターの波長変化も重要である。

エアロゾルリモートセンシングは1970年代～1980年代の基礎研究を経て、ようやく1990年代に入り衛星データから全球規模のエアロゾル分布を推定するに至った。当初はエアロゾル向けにセンサーが設計されていたわ

¹² <http://dsm.gsfc.nasa.gov/ace/index.html> (参照日: 2009/12/14)

けではない。そういう悪条件の下で、NOAA 衛星搭載 AVHRR センサーが海洋上空エアロゾル分布を、NIMBUS 衛星の全オゾン測定放射計 (TOMS) センサーが吸収性エアロゾル分布を導出した。1990 年代中盤以降になると、エアロゾル探査を設計段階から考慮に入れたセンサー (OCTS・POLDER・SeaWiFS・MODIS・多角度画像スペクトル放射計 (MISR)・GLI など) が開発・稼働を開始した。今でも POLDER・MODIS・MISR が継続して全球規模エアロゾル情報を提供している。しかし、これらのエアロゾル専用センサーをもってしても、必要十分なエアロゾル情報が得られているわけではない。特に陸域上空エアロゾルの推定精度が劣る。多様な陸面構造を放射伝達過程に組み込む解析的困難さと、活発な人間活動に由来する複雑な陸域エアロゾル特性が起因している。この欠点を克服してエアロゾル推定精度の向上を図る試みが進められている。アメリカ・フランスなどは、従来の散乱光輝度を捉えるイメージャタイプのセンサーだけではなく、光の状態をより正確に把握できる偏光情報・観測角度・多波長を兼ね備えた新型センサー (アメリカ: APS (Aerosol Polarimetry Sensor)、フランス: OCAPI (Carbonaceous and anthropogenic Aerosols Pathfinder Instrument)) を計画している。特に APS は衛星搭載ライダーと同様に観測角度は狭いが、全ストークスパラメーター (I, Q, U, V) を多方向かつ可視・短波長赤外まで観測できる機構を備えている。OCAPI は従来の POLDER を発展させ、短波長赤外でも偏光情報を取得可能である。偏光情報に基づくリモートセンシングの優位点は、陸面偏光が無視できる程に小さいので、複雑な陸面構造を考慮しなくてもよいという点にある。結果として、陸域上空エアロゾル特性推定精度が向上する。さらに、APS や OCAPI などは短波長赤外を利用して、微小な陸面偏光をキャンセルできるよう設定されているので、従来の偏光センサー POLDER を越える精密な陸域エアロゾル推定が期待できる。また、多方向偏光データを利用した非球形形状エアロゾル研究への応用発展も可能となる。

日本でも GCOM-C 計画において環境観測技術衛星「みどり II」(ADEOS-II) に搭載された GLI の計測波長をベースとして、スリム化と同時に偏光測光機構を加えた SGLI が搭載予定である。SGLI の特徴は、APS・OCAPI と同様に偏光測光を近赤外 2 波長で実施する。また、最適な観測角度でデータを取得するため、前方・後方 45 度まで可変可能なチルト機構を備えている。これらの機構により得られる大気からの偏光状態を計測し、エアロゾルの光学的厚さや粒径などを全球規模で同定する。また、一次散乱アルベドに関しても、SGLI が持つ特徴的な近紫外および可視波長のデータを用いて推定可能である。前述した他国の偏光センサー APS や OCAPI などが装備している多方向観測や短波長赤外バンドなどが欠落しているという弱点は否めない。しかし、逆に同時期に稼働するこれらの他国が取得する衛星データと、SGLI の高解像度データを併用複合利用することで、高精度エアロゾル情報を 2-4 km 高解像度で取得することが期待できる。さらに GCOM-C 計画は、3 衛星を継続的に稼働させて 13 年間の連続観測を計画している。長期間にわたるエアロゾル情報の取得と提供は国際的にも注目されている。GCOM の後も、長期衛星計測計画の続行が期待される。

CALIPSO では、可視と近赤外の 2 波長を利用でき、さらに可視では偏光解消度の情報も取得可能である。このような 2 波長偏光ライダーを用いたエアロゾルの解析はすでに地上型ライダーで実績があり (Nishizawa *et al.*, 2007)、CALIPSO への応用が期待される。これによって、エアロゾルの種類ごとの消散係数の鉛直分布が得られるようになる。受動型センサーでは観測できなかった雲域の上のエアロゾルについても解析可能な点が優れている点である。

同じく ATLID (Atmospheric Lidar) ライダーを搭載する EarthCARE では、1 波長ではあるが、高分解能であるため、エアロゾルの紫外波長での消散係数が直接仮定なしに得られ、また偏光解消度が取得できるため、エアロゾルの種類ごとの消散係数の鉛直分布に言及できると期待されている。

衛星からのエアロゾル推定の検証として地上放射計ネットワークが整備されている。特に NASA やフランス・リール大学が中心となり AERONET と呼ばれる放射計が世界各地において展開・稼働している。AERONET 放射計は SKYNET で用いられる放射計とはほぼ同原理に基づくが、僻地でも観測できるように太陽電池で稼働可能である。データ収集も静止気象衛星を介しており、観測データはほぼ瞬時に NASA のデータベースへ格納される。観測可能なエアロゾル特性は、紫外～短波長赤外における光学的厚さ (τ) であり、これらは定期的に実施する較正作業により、0.01 が保証されている。また、放射伝達計算に基づくインバージョンにより、粒径分布・一次散乱アルベド (ω_0) などが導出され、衛星からのエアロゾル推定結果の検証データとして非常に有用である。世界各地における地上観測網維持は非常に困難なため、日本が独自に構築する SKYNET 網を含めて、各ネットワーク間の解析手法の再検討、協力体制を敷いてゆく必要がある。

(戸田・岡本・中島(孝)・佐野)

1.5.5 データ同化

データ同化とは、数値モデルと観測データとを「融合」し、時間変化する大気の状態を高精度で推定することである。数値モデルにおける観測データの従来の利用法は、数値モデルから出力されるある物理量を、同地点・同時刻・同物理量の観測値と単純に比較して、数値モデルの改良に活用する、というものであった。しかし、データ同化では、数値モデルにより計算されたある時刻の大気の状態を、観測データで直接修正して最適な推定値を求める。データ同化は、気象予報・海況予測に積極的に用いられているが、大気中の物質輸送の分野ではその応用例はまだ少ない（例えば Dubovik *et al.*, 2008; Yumimoto *et al.*, 2008）。しかし、大気中での寿命が比較的短いエアロゾルにデータ同化を適用することは、時空間的観測空白域を補間する観点からも有用であると考えられる。また、データ同化の大きな特徴の1つとして、基本的に物理法則にのっとって構築されている数値モデルを介することにより、直接観測されない物理量を推定することが可能であることが挙げられる。この特徴を用いると、例えば、数値モデルによる物質の輸送シミュレーションおよびその気候影響評価の大きな不確定要素の1つである物質の排出量インベントリを、データ同化手法を用いて高精度で推定することが期待される。人為起源エアロゾルの排出量は、主にエネルギー消費量や人口分布などの多岐にわたる統計量をベースに作成されるが、それぞれの統計データ・作成プロセスで用いられる仮定や係数に誤差や不確実性が含まれているため、最終プロダクトである排出量に誤差が積算されることになる。その誤差は、場合によって2倍～数倍になるという指摘もあり、これが数値モデルによるエアロゾルの気候影響評価の不確定性の主要因の1つとなっている。つまり、データ同化手法を用いることにより、時空間的観測空白域の補間やエアロゾル排出量推定の改善を通して、気候変動の評価の高精度化につながることを期待できる。

気象分野で用いられるデータ同化手法として、主にアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF: Ensemble Kalman Filter）と4次元変分法（4D-VAR: 4-Dimensional Variational Method）がある。EnKFは、4次元変分法と比較すると容易に実装でき、モデルの非線形過程も取り扱いやすいという長所がある。EnKFは次の式に集約することができる。

$$\mathbf{C}^a = \mathbf{C}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H(\mathbf{C}^f))$$

ここで、 $\mathbf{C}$ はモデル変数、 $\mathbf{y}$ は観測データ、 H はモデル空間から観測空間への投影を表し、 $\mathbf{K}$ はカルマンゲインと呼ばれるモデルと観測の誤差情報を含んだ行列である。添え字の f と a はそれぞれデータ同化前・同化後を示す。この式から、EnKFが観測データとモデル結果からカルマンゲインを重みにモデル変数を修正していることがわかる。一方、4次元変分法は、アジョイントモデルを構築し、次のような評価関数 J を定義して、 J が最小となるようにモデル変数 x を最適化する。

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \sum \frac{1}{2}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y})$$

ここで、 x はモデル変数、 y は観測データ、 H はモデル空間から観測空間への投影を表す観測演算子（モデルによる時間発展を含む）、 $\mathbf{B} \cdot \mathbf{R}$ はそれぞれ背景誤差・観測誤差である。右辺第2項は、数値モデルの結果と観測データとの間の差の2乗和を表している。

データ同化を高精度で行うためには、数値モデルが相応の質を保持している必要があるほか、適用する観測データの品質保証および品質管理も重要となる。データ同化にはあらゆる観測データの利用が原理的に可能であるが、統計的手法や変分法の理論を応用した手法を用いるほか、複数の観測データの相互比較を通して、観測データの誤差・バイアス評価を行う必要がある。

(竹村)

1.6 まとめ

気候変動の科学に関わる研究においては、気候変動のメカニズムを理解し、将来予測の確度を向上させることが急務である。気候システムの中で、エアロゾルと雲は放射収支・水循環と密接に関係しており、最も重要な要素であると同時に不確定要素の最たるものの1つでもある。本章においては、雲・エアロゾル・放射に関する観測のレビューと我が国の特徴を活かした今後のこの分野における観測研究の在り方を取りまとめた。以下に特に重

要な課題等について、まとめる。

放射収支の観測においては、特に国内において赤外放射計の較正を行う必要がある。太陽直達分光日射計の較正は、現在は各研究機関が各々の予算で行っているが、今後は系統的な較正体制の確立を図る必要がある。また、精度の確保のためには、作業用準器も用意して最低3台程度で運用すべきである。さらに、比較観測による転写は、天候に作用され計画的な較正が難しい場合があるので、光源を利用した方法の可能性も検討すべきである。

我が国は世界でも有数のライダー観測ネットワークを有するが、これらの観測データのさらなる高精度化や有効活用を図るとともに、消散係数プロファイルを昼夜を問わず高感度で測定できる高スペクトル分解ライダー方式の多波長ライダーの実現が期待される。

気象庁は、放射観測等のデータを GAW のデータセンターに送り、同計画に貢献している。また、BSRN との連携を強化しつつある。各研究機関は、互いに連携して、観測データの統合的な利用の推進強化を検討する必要がある。

エアロゾルの地上観測においては、その散乱係数・吸収係数・消散係数に関する測定の高度化が放射過程の理解や気候変動の解明のために必要である。国内の観測サイトはもとより、北極・南極における雲・エアロゾル、雲・放射の観測を強化するほか、アジアやその他関係各国との協力の強化が望まれる。現在、これらの観測に携わることのできる、特に若手の人材が減少している。観測的研究への研究資金の投入とともに、長期モニタリングに対応した人材育成システム（長期観測の専門職職員の配置）などが望まれる。また行政側と協力して、辺戸ステーションで行っているような、データ相互利用を促進することも望まれる。

船舶観測においては、今までの実績を活かし、ライダー・レーダー・スカイラジオメーターなどのさらなる精度向上を図るとともに、MAX-DOAS などの新たな観測技術を船舶へ搭載する具体的検討を進め、国際的にも標準測定法として確立していく必要がある。他方、雲・エアロゾル・放射の航空機観測は、以前と比べて衰退しているような状況にある。雲・エアロゾル・放射の観測グループで共通に使える測器を搭載した観測用航空機を共同で持つ必要がある。このような航空機を使って定期的に決められた飛行航路を飛ぶような観測から始めることによって、較正法の改良、測器の改良が可能になる。

雲・エアロゾルの衛星観測においては、長期モニタリングとプロセス研究の2本立ての衛星計画が必要である。プロセス研究に投入された斬新かつ新規性のある衛星観測システムは、その妥当性が検証された後に、長期モニタリングに資する観測システムの1つとして継続発展させることになる。例えば、現在計画が進められている日欧の EarthCARE や NASA の ACE における受動+能動センサーによる衛星観測システムは、近い将来に継続衛星が定期的に打上げられ長期モニタリングの中核を担う可能性がある。

地上から衛星に至るまで、様々なプラットフォームから観測されるデータは、今日では数値モデルによる計算値と併用して解析することが一般的になりつつある。さらに、近年では様々な形でエアロゾルや雲のデータ同化も行われるようになってきている。データ同化を高精度で行うためには、数値モデルが相応の質を保持している必要があるほか、適用する観測データの品質保証および品質管理も重要となる。データ同化にはあらゆる観測データの利用が原理的に可能であるが、統計的手法や変分法の理論を応用した手法を用いるほか、複数の観測データの相互比較を通して、観測データの誤差・バイアス評価を行う必要がある。

(早坂)

参考文献 (第1章)

- 宇宙航空研究開発機構 : <http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/cal/browse/index.html> (参考日 : 2010/02/23)
- 岡本 創, 杉本伸夫, 2008 : アクティブセンシングで見るエアロゾルと雲, 中島映至, 早坂忠裕編: 気象研究ノート 218 号, エアロゾルの気候と大気環境への影響, 日本気象学会, 178pp.
- 国立極地研究所編, 2004 : 南極・北極の百科事典, 丸善株式会社, 518pp.
- 東海大学情報技術センター : <http://www.tric.u-tokai.ac.jp/tsic/jgmsglobe.html> (参考日 : 2010/02/23)
- ADORC, 2008 : Data Report 2007, Network Center for EANET.
- Bösenberg, J., et al., 2007 : Plan for the implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION, GAW Report No. 178, 45pp.
- Dubovik, O. et al., 2008 : Retrieving global aerosol sources from satellites using inverse modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 209–251.
- Eloranta, E. E., 2005 : High Spectral Resolution Lidar, Weitkamp, C., ed. : LIDAR: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere, in the Springer Series in Optical Sciences Vol. 102, Springer Science + Business Media Inc., 455pp.
- Geogdzhayev, I. V. et al., 2005 : Regional advanced very high resolution radiometer-derived climatology of aerosol optical thickness and size, *J. Geophys. Res.*, **110**, D23205, doi:10.1029/2005JD006170.
- Hara, Y. et al., 2009 : Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1277–1239.
- Heymsfield, A. et al., 2008 : Testing IWC Retrieval Methods Using Radar and Ancillary Measurements with In Situ Data, *J. Appl. Meteor.*, **47**, 135–163.
- Higurashi, A. et al., 2000 : A study of global aerosol optical climatology with two-channel AVHRR remote sensing, *Journal of Climate*, **13**, 2011–2027.
- Higurashi, A. and T. Nakajima, 2002 : Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data, *Geophysical Research Letters*, **29**, doi:10.1029/2002GL015357.
- Holben, B. N. et al., 1998 : AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, **66**, 1–16.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Imaki, M., Y. Takegoshi and T. Kobayashi, 2005 : Ultraviolet High-Spectral-Resolution Lidar with Fabry-Perot Filter for Accurate Measurement of Extinction and Lidar Ratio, *Jpn. J. App. Phys.*, **44**, 3063–3067.
- Kinne, S. et al., 2006 : An AeroCom initial assessment – optical properties in aerosol component modules of global models, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 1815–1834.
- Liu, Z., I. Matsui and N. Sugimoto, 1999 : High-Spectral-Resolution Lidar Using an Iodine Absorption Filter for Atmospheric Measurements, *Optical Engineering*, **38**, 1661–1670.
- Masunaga, H. et al., 2002 : Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner 2. Climatology of warm clouds and rain, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **107**, doi:10.1029/2001JD001269.
- McArthur, L. J. B., 2004 : Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations Manual, WMO/TD-No. 879, WCRP/WMO. 176.
- Nakajima, T. Y., and T. Nakajima, 1995 : Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **52**, 4043–4059.
- Nakajima, T. Y., H. Masunaga and T. Nakajima, 2009 : Near-global scale retrievals of the cloud optical and microphysical properties from the Midori-II GLI and AMSR data, *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, **29**, 29–39.
- Nakajima, T. Y., K. Suzuki, and G. L. Stephens, 2009 : Droplet growth in warm water clouds observed by

- the A-Train. Part II: A Multi-sensor view, *J. Atmos. Sci.*, accepted.
- Nishizawa, T. et al., 2007: An algorithm that retrieves aerosol properties from dual-wavelength polarized lidar measurements, *J. Geophys. Res.*, **112**, D06212, doi:10.1029/2006JD007435.
- Nishizawa, T., N. Sugimoto, and I. Matsui, 2008: Development of Multi-Wavelength High-Spectral-Resolution Lidar and Application of Spheroid Models to Aerosol Retrieval from Lidar Measurements, 24th ILRC (ISBN 978-0-615-21489-4), 361-364.
- Okamoto, H. et al., 2003: An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95-GHz cloud radar and lidar, *J. Geophys. Res.*, **108** (D7), 4226, doi:10.1029/2001JD001225.
- Okamoto, H. et al., 2007: Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: Midlatitude case study during the MR01/K02 cruise of the research vessel Mirai, *J. Geophys. Res.*, **112**, D08216, doi:10.1029/2006JD007628.
- Okamoto, H., K. Sato and Y. Hagihara, 2008: Retrieval of ice cloud microphysics by synergy use of CloudSat and CALIPSO data, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, Foz do Igassu, Brazil, **3-8** August 2008, (2009), 412-415.
- Platnick, S. et al., 2003: The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 459-473.
- Ramanathan, V. et al., 2007: Atmospheric brown clouds: Hemispherical and regional variations in long-range transport, absorption, and radiative forcing, *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S21, doi:10.1029/2006JD008124.
- Rosenfeld, D. et al., 2008: Flood or drought: How do aerosols affect precipitation, *Science*, **321**, 1309-1313.
- Rossow, W. B. and R. A. Schiffer, 1999: Advances in understanding clouds from ISCCP, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 2261-2287.
- Sato, M. et al., 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations, *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- Sato, K. et al., 2009: 95-GHz Doppler radar and lidar synergy for simultaneous ice microphysics and in-cloud vertical air motion retrieval, *J. Geophys. Res.*, **114**, D03203, doi:10.1029/2008JD010222.
- Schulz, M. et al., 2006: Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 5225-5246.
- Shindell, D. T. et al., 2008: A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 5353-5372.
- Smirnov, A. et al., 2009: Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network, *J. Geophys. Res.*, **114**, D06204, doi:10.1029/2008JD011257.
- Stephens, G. L. et al., 2008: CloudSat mission: Performance and early science after the first year of operation, *J. Geophys. Res.*, **113**, D00A18, doi:10.1029/2008JD009982.
- Sugimoto, N., T. Nishizawa, I. Matsui and T. Kobayashi, 2008: Multi-Wavelength High-Spectral-Resolution Lidar ($2\alpha + 3\beta + 2\delta$) for the Next Generation Lidar Network, 24th ILRC (ISBN 978-0-615-21489-4), 192-195.
- Sugimoto, N. et al., 2006: Network Observations of Asian Dust and Air Pollution Aerosols Using Two-Wavelength Polarization Lidars, 23rd ILRC (ISBN 4-9902916-0-3), 851-854.
(<http://www-lidar.nies.go.jp/> 参考日: 2009/12/14)
- Takemura, T. et al., 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873.
- Takemura, T. et al., 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *J. Climate*, **15**, 333-352.
- Takemura, T. et al., 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Takemura, T. et al., 2009: A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3061-3073.
- Takenaka, H. et al., 2009: Cloud optical thickness estimation from GMS-5/SVISSR, *Journal of the Remote*

- Sensing Society of Japan, **29**, 392–397.
- Tatarov, B., N. Sugimoto, I. Matsui and A. Shimizu, 2006 : Two-Year– Observations of Optical Properties of the Tropospheric Aerosol and Clouds by a High-Spectral-Resolution Lidar over Tsukuba, Japan, 23rd ILRC (ISBN 4-9902916-0-3), 451–454.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo and J. Kiehl, 2009 : Earth’ s global energy budget, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **110**, 311–323.
- Uno, I. et al., 2008 : 3D Structure of Asian Dust Transport revealed by CALIPSO Lidar and a 4DVAR Dust Model, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06803, doi:10.1029/2007GL032329.
- Wild, M. et al., 2005 : From dimming to brightening: Decadal changes in surface solar radiation, *Science*, **308**, 847–850.
- Wild, M., 2009 : Global dimming and brightening: A review, *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.
- Winker, D. M., W. H. Hunt and M. J. McGill, 2007 : Initial performance assessment of CALIOP, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi:10.1029/2007GL030135.
- WMO, 2003 : WMO/GAW Aerosol Measurement procedures guidelines and recommendations, GAW Report No. 153, WMO TD No. 1178, 67pp.
- WMO, 2007 : WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan: 2008–2015, GAW Report No. 172, WMO TD No. 1384, 104pp.
- Yumimoto, K. et al., 2008 : Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2869–2884.

第2章 対流圏オゾンに関する観測

2.1 はじめに

2.1.1 対流圏オゾン観測の大気化学的意義

対流圏オゾンの分布や変動を正確に把握し、その時空間変動のメカニズムを解明することは、近年の地球環境問題における気候変動の理解と大気汚染評価、およびそれらの短期・長期の予測精度の向上において、地球観測として取り組むべき重要な課題の1つとなっている。対流圏オゾンは、大気化学環境の変動に対して重要な2つの役割を担っている。1つは、オゾンが温室効果ガスであることから、今後の地球温暖化を促進する微量気体成分の1つとして重要であることが挙げられる。もう1つの側面としては、光化学オキシダント発生とその影響の観点から、地域的な大気汚染としてクローズアップされている越境汚染問題に関連していることである。これら2つの点から、地球温暖化予測の高度化と同時に、健康被害・農業生産・地域気候等の影響評価のためにも、対流圏オゾン観測による実態把握を通じた科学的知見の蓄積が不可欠となっている。

気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書 (IPCC-AR4) によれば、将来の温暖化予測の指標としての対流圏オゾンの放射強制力は $+0.35\text{W/m}^2$ と見積もられているが、依然としてその評価には $-0.1\sim+0.3\text{W/m}^2$ の大きな不確実性が含まれている。成層圏オゾンについてはその回復の決定的な結論は得られていないものの、その放射強制力は $-0.05\pm 0.10\text{W/m}^2$ と再評価されている。従って、オゾン全体としては温暖化を促進する方向に働くと言える。対流圏オゾン濃度の歴史的な推移に関する観測とモデルによる評価によると、19世紀末にはおよそ10～20ppb程度であったが、近年の北半球では産業革命以前の2倍以上に急激に増加してきたことが明らかになってきた (秋元, 2006)。その増加傾向は最近でも継続しており、特に、急速な経済発展を遂げている東アジア地域でのオゾン増加が顕著であることが指摘されている。しかしながら、対流圏オゾンの増加速度は地域的に大きく異なると同時に、その増加を正確に把握するための長期的な観測データの蓄積が不足している。このため、全球規模でのトレンドを見積もるには、さらに精密かつ高密度な長期観測が不可欠である。対流圏オゾン増加による直接的な温暖化への寄与以外に、オゾン増加による陸上植物の二酸化炭素の吸収への影響も指摘されている

(Heimann and Reichstein, 2008)。このようなオゾン増加の間接効果による温暖化の加速については、環境変化のフィードバック機構の1つとして今後その定量的な解明が必要となる。

光化学大気汚染の主成分である光化学オゾン・オキシダントは窒素酸化物 (NOx) と揮発性有機化合物 (VOC: Volatile Organic Compounds) から生成する二次汚染物質である。これらオゾン前駆体物質の発生源の増大がオゾン濃度の上昇を決める重要な要因となっている (Ohara *et al.*, 2007)。日本では1970年代以降のオキシダント抑止戦略による政策対応によって、都市域における夏季の高濃度オキシダント現象を抑制することに成功してきたが、近年、オキシダント注意報の発令日数が急速に増加し、再び対流圏オゾン濃度の増加現象が顕在化するようになってきた。特に、日本は、急速な社会経済活動の発展を遂げている北東アジア諸国の風下側に位置するため、アジア大陸からの越境汚染の影響を直接受ける (Akimoto, 2003)。このため、環境基準値 (60ppb) を越える短周期の濃度上昇現象が大きな社会問題となってきた。一方、オゾンの光化学生成には、東アジアを取り巻くモンスーンによる地域的な気候・気象の変動も大きく関係していると考えられ、将来の気候変化に伴うオゾン濃度の変動を解明することも必要とされている。さらに、アジア地域の汚染は大陸間の長距離輸送を通して北アメリカへ影響を与えると同時にヨーロッパの汚染がアジア地域へと飛来するような、半球規模の大規模汚染拡散の問題として科学的知見を収集することが重要となってきた (秋元, 2006)。このため、上空を通じた輸送についての理解も必要であり、地上から上空を含めた対流圏全層の観測の充実が求められている。

2.1.2 現状と課題

対流圏オゾンの長期的なトレンドを把握するためには、人為的汚染の少ない地域を代表するデータが得られる地上の大気観測所における連続測定が最も適している。日本国内における地上の長期モニタリングは、歴史的には光化学スモッグの問題として、古くは1976年ごろから地方自治体によって数多く行われてきた。その後、環境省の国設のモニタリング局、気象庁の世界気象機関全球大気監視 (WMO/GAW) の観測サイト、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) および(独)国立環境研究所 (NIES) のモニタリング研究等を中心に、地上付近のオゾン濃度の定常的な長期観測が実施されている。

一方、研究観測プロジェクトによって、沖縄の辺戸岬、中国の山岳地帯、中央アジア、南極昭和基地等にも日本の観測網が展開されている。また、アジア太平洋地域の広域分布の観測には、商船を利用した観測も実施されている。これら地上付近の観測に対して、オゾンゾンデやオゾンライダーおよび航空機観測では、データの少な

いオゾンの鉛直分布が観測できる。このような様々な観測プラットフォームや測定手法を利用した観測が展開されているが、現状の観測を継続するための予算的・人的支援は極めて脆弱であり、長期観測に対する改善と強化が最も重要な課題となっている。特に、オゾン濃度は温室効果ガスに比べると時空間的に激しく濃度が変動し、地域的な違いも大きいことから、長期の観測拠点を増やすなど観測ネットワークの拡充を図ることが今後の取り組むべき課題となっている。

対流圏オゾン観測の全球的な解析を進展させるためには、収集されている様々な観測データの統合が不可欠である。データ統合には、関係府省・機関・大学などのすべての観測機関で得られる観測結果が、相互に比較可能となるデータの標準化が必要である。また、異なる測定機器や手法によって得られるデータが、同じ基準によって相互に比較できることが望まれ、それによって貴重な観測データが有効に活用される。このような観測データの標準化は、国内外を含めた全世界の観測実施機関が連携・協力して取り組むことによって、初めてその目的が達成されるため、国際標準に準じた観測データのトレーサビリティを確保することが不可欠である (Tanimoto *et al.*, 2005)。このためには、オゾン濃度測定と比較実験を定期的かつ長期的に実施するためのオールジャパンの協力体制を整えることが、早急に取り組むべき重要な課題の1つと言える。

2.1.3 今後の展望

本章では、以上の科学的背景と観測の現状・課題を踏まえて、対流圏オゾンに関する観測のレビューと、我が国の特徴を活かして推進すべき観測研究とその相互連携の在り方をまとめる。特に、今後の長期観測の継続と発展のために必要な具体的方策を考慮して、「データ標準化の促進」、「データ流通の促進」、「国内外の観測施設とその相互利用の促進」、「地球システムモデル開発の視点からみた観測ニーズ」、「時空間敵観測空白の改善および観測項目の充実」の5つの視点から以下に詳しく述べる。

(松枝・向井)

2.2 データ標準化の促進

2.2.1 測定法標準化のための国際・国内活動

(1) 必要性

オゾンの濃度の決定方法は歴史的には中性ヨウ化カリウム (KI) 法と UV 法、GPT (Gas Phase Titration) 法などが挙げられる。国内では歴史的にオキシダントとしての測定が古くから行われたために、JIS としてもオゾンの濃度決定を KI 法に準拠していた。しかし、KI 法は原理的にも複雑な化学反応を含んでおり、高い精度を求めることが難しい方法である。一方では、国際的には UV 法をもとにオゾン濃度を決定するという方法を用いており、国際的に温室効果を議論する場合には、方法的にオゾン測定に齟齬が生じる可能性がある。

おそらく日本だけがアメリカでもなく、ヨーロッパでもない独自の標準化を行っており、しかも合理的な精度が求められない方法を用いていることには問題があると考えられる。長期間、日本でのオゾンの濃度の較正は、自治体はほぼ KI 法、その他研究機関や大学はメーカーの値づけをそのまま使うか、ごく少数のメーカーは GPT 法での値づけを行うなど、各種ばらばらの状態であった。さらに、アメリカのメーカーから購入した場合は、UV 法基準になっていると想定される等、各種のスケールが同時に国内に存在していると考えられ、非常に複雑な状況が続いている。

従って、日本各地で測定されているオゾン濃度のスケールを、今後統一することは非常に重要な課題と言える。同時に、温室効果ガスとしてのオゾン濃度の変動は極めて小さく、長期間での濃度スケールの安定性が求められている。

(2) 現状

① 国際的な観測基準の体系

国際的な標準機関である世界度量衡局 (BIPM) は、大気レベルのオゾン濃度の国際比較実験を行っている。ここでの方法は UV 吸収が基になっており、標準器としてアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) の開発した標準参照光度計 (SRP: Standard Reference Photometer) を用いることになっている。BIPM には基準器の SRP があるが、これは、NIST の基準器 SRP No. 2 に対して、相対感度が確かめられている。通常、すべての SRP は SRP No. 2 に対して値がずれていないことが確かめられている。ここで用いられているオゾンの吸収係数は 1.147×10^{-17} cm^2/mol であり、セルの長さ、圧力の値からオゾン濃度が計算される。

日本では、計量機関としての(独)産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ: National Metrological

Institute Japan) が対応を行うことが通常であるが、NMIJにおいてはオゾン計測の基準器がない。一方、NIESはSRP No. 35をこの間に購入し、そのパフォーマンスを確かめており、BIPMの行った国際比較実験の予備実験に参加した。その結果として、SRP No. 35の世界からのずれは、100ppbのレベルで0.1ppb程度と考えられ、その比較可能性の高さが証明されている。現在、日本としての基準をNIESが受け持つかは未定であるが、標準器であるSRPがNIESで維持されていることで、実際上は世界基準が日本にも存在するということになる。

② 国内における標準体系

JIS法や環境省の常時監視マニュアルに規定されているKI法による日本のオゾン（またはオキシダント）濃度基準は、その精度を保つことが難しいことや、そのために他の自治体との間でのスケールの違いが生まれるなど問題を抱えてきた。そこで、近年環境省は、各自治体のKI法でのオゾンスケールの相互比較などを、NIESとともにに行った。その結果、KI法でのオゾン濃度のスケールの幅は25%程度あることがわかり、その精度を現場で実際保つことが困難であることがわかった。

これを受けて環境省では、KI法によるオゾン濃度スケール較正を廃止し、UV法による国際的な濃度スケールに変更することが検討されている。JIS法はすでにオゾンの濃度較正法をISOにおける方法を取り入れて、KI法からUV法に変更している。これにより、日本での公式的な基準も、UV法という流れになっている。環境省としても、常時監視マニュアルを改正しつつ、国内の自治体でのオゾン濃度のスケールを国際基準に合わせていくことを検討している。そのために、NIESにあるSRP No. 35を基本に体系化を図ることを考えている。

③ 機関間の比較

GAWにおいては、NISTが中央較正施設（CCL）として世界準器となるオゾンSRPを保有しており、スイス連邦材料試験研究所（EMPA: Materials Science & Technology）が世界較正センター（WCC）として世界各国のGAW観測所で使用される基準器を較正する役割を担っている。NISTが保有するSRP No. 2は、BIPMに対してトレーサブルなものであり、また、EMPAは、NISTで較正されたSRP No. 15に基づきWCCの活動を行っている。

気象庁は、保有する基準器を定期的にNISTに送って較正するとともに、EMPAによる巡回比較も受けており、これら3機関の間で比較可能になっている。また、2005年に韓国済州島で行われた東アジア地域実験（EAREX, 2005）において、NIESの保有するSRP No. 35とも比較を行っている。

(3) 課題と今後の展望

対流圏オゾンの観測については、GAW内外の多くの観測施設において、それぞれNISTのSRPを基準にした観測が行われているが、較正のタイミングや機関間相互の比較などについて体系化されていない。これらについて連携をとることで、観測基準の安定性の検証や観測精度の向上などに寄与するものと思われる。

また、国内機関および東アジア地域の関係機関の協力で、同地域における国際比較観測を推進することで、観測データの利用率向上が期待される。

(向井・松枝・須田)

2.2.2 全球大気監視（GAW）計画における観測手法標準化活動

(1) GAW計画の概要・枠組み

GAW計画の概要・枠組みについては、第1章の1.2.3(1)に詳しく述べられているので、そちらを参照されたい。

(2) 対流圏オゾンに関する活動

対流圏オゾンの観測は、2009年10月9日現在、世界150か所（図2-1）がGAW観測所情報システム（GGAWSIS）に掲載されており、観測データは気象庁が運営する温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）に報告されることになっている。NISTがCCLとして世界準器となるオゾンSRPを保有している。また、EMPAが、WCCとして世界各国のGAW観測所で使用される基準器を較正する役割を担うとともに、品質保証科学センター（QA/SAC）として世界の主要観測所を巡回訪問して技術指導等を行っている。

対流圏オゾンの観測所、特にWDCGGにデータを報告している観測所の多くは、ヨーロッパモニタリング評価プログラム（EMEP）の下で観測を行っており、このような地域的なネットワークとの協力が欠かせない。また、ヨーロッパ中期気象予報センター（ECMWF）などの協力で、モデルによる地上・衛星観測データの同化技術を開発するGEMSプロジェクトに対する準リアルタイムでのデータ提供などの協力も行われている。

このように、GAWにおける対流圏オゾンの観測がヨーロッパ地域に偏っており、アジア地域をはじめとする世界のほかの地域での観測データの取得および流通が大きな課題になっている。

GAW戦略計画では、データの流通およびトレーサビリティの向上、準リアルタイムでのデータ報告などが今後

の目標として記載されており、そのための実施戦略として地域ネットワークとのデータ交換、航空機観測データの収集の促進などが挙げられている。また、対流圏オゾンのデータは、成層圏のオゾンやエアロゾルとともに、数値天気予報での利用が見込まれており、WMO ではこれらの観測データの準リアルタイムでのデータ流通を目指すパイロットプロジェクトを実施している。今後は、特に地域ネットワークとのデータ交換を促進し、準リアルタイムでのデータ流通を通じたデータ利用の向上などのため、データ標準化の促進およびトレーサビリティの確保に向けた活動の進展が望まれる。

(須田)

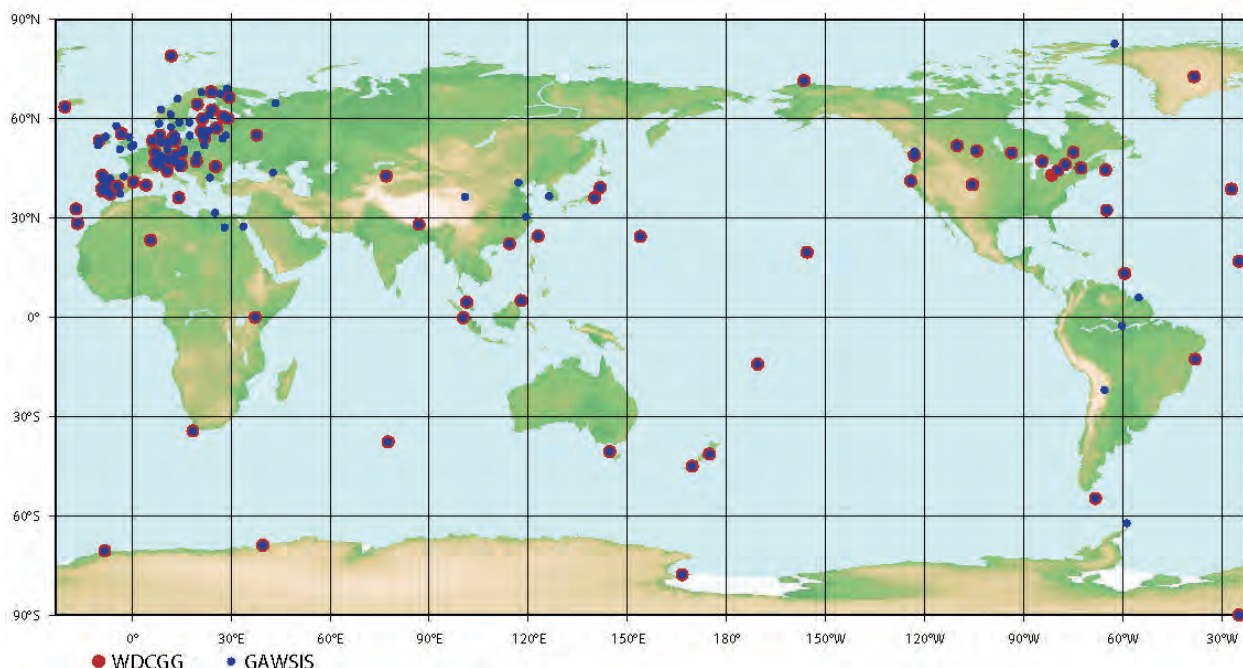


図 2-1 GAWSIS に登録されているまたは WDCGG にデータを報告している対流圏オゾン観測点。

2.3 データ流通の促進

2.3.1 温室効果ガス世界資料センター

気象庁が運営している WDCGG は、1990 年 10 月に活動を開始し、温室効果ガスおよび反応性ガスのデータを収集・提供しているが、地上オゾンに限っては、地上オゾンのデータセンターを務めていたノルウェー大気研究所 (NILU) から運営を引き継いだ 2002 年が始まりである。2009 年 10 月 9 日現在、40 ヶ国 97 地点 (図 2-1) から地上オゾンデータが報告されており、報告されたデータは、DVD に収録されて登録利用者に毎年配布されるとともに、ウェブサイトを通じて一般利用者に随時提供されている。また、WDCGG では報告されたデータを解析し、全球的な傾向や特徴などを WMO WDCGG Data Summary として毎年刊行している。

WDCGG では、国際会議などの場でデータ提供を呼びかけるほか、観測者に個別にコンタクトするなどして、データ報告を促してきた。また、データ報告のフォーマットなどを記述した WDCGG データ報告・配布ガイドを作成したほか、データおよび関連情報の提供方法を多様化するなどして、データ報告を支援してきた。このこともあり、取り扱っている地上オゾンのデータ量は着実に増えており、2003 年から 2008 年までの 5 年間に約 1.7 倍になっている。

WDCGG ではまた、GAW の下に設置されたほかのデータセンターや GAWSIS と協力して、データの提供形態の共通化などに取り組んでいる。さらに、WMO のイニシアティブの下、対流圏オゾンをはじめとする大気化学データと気象データなどを統合し、共通のシステムの下でデータを流通させる情報システムの構築を目指している。

WDCGG では、データ流通を促進するため、地域ネットワークとの協力を強化するとともに、新たなデータ利用形態を探るため、準リアルタイムでのデータ流通などを目指す WMO のパイロットプロジェクトにも関与しつつ、データの収集・提供形態の一層の多様化が望まれる。

(須田)

2.3.2 国内機関の観測におけるデータ流通

環境省・地方公共団体・NIESが「環境省大気汚染物質広域監視システム」（通称「そらまめ君」¹³）を構築し、光化学オキシダントの速報値を出している。例えば、福島、新潟、長野、山梨、静岡および関東を含む地域では、オキシダント濃度は約400か所で測定されている。そらまめ君データは研究者であればNIESから入手できる。

環境省では昭和58年度（1983年度）から、国内における酸性雨対策調査を実施しているが、国内には乾性沈着をモニタリングしている測定局があり、オゾンについては国内21地点で観測が行われている（EANET局を含む）

（観測地点については「越境大気汚染・酸性雨、長期モニタリング計画」（環境省, 2009）を参照のこと）。モニタリングデータについては環境省から「平成19年度酸性雨調査結果」などとして公表されている。

EANETはデータ確定後Data Reportとして月平均値を冊子体で公表している。また酸性雨センターにリクエストを出せば1時間値データを入手できる。しかし、課題としては、確定するまでにいろいろな手続きを踏む必要があるため、データの開示が最長で約1年半後であることや、1時間値などは公表資料に含まれていないことが挙げられる。一方、気象庁における3サイトのデータは、約3ヶ月後にはWDCGGに報告されているので、非常に早い回覧が可能である。

NIESの観測サイトである波照間・落石岬でのデータは1時間値としてアーカイブされている。現在そのデータは広く流通していないが、落石岬のデータはEANETとして部分的に公開されている。検討段階であるが、速報値としてのオゾンの値を毎日WEBから公表できるようなシステムが現在考えられており、二酸化炭素などとともに、早いサーキュレーションが期待できる。

今後、これらの国内データのデータベース化なども考慮すべきと思われる。

（高見・向井）

2.3.3 衛星および上空の観測データ

（1）オゾンライダー

① 必要性・特徴

オゾンライダーは、オゾンの高度分布を時間的に連続して測定できる点に、ほかの手法にはない特徴がある。上空を輸送される大気汚染起源のオゾンや、対流圏界面フォールディングに伴って成層圏から下降するオゾンなどの分布構造を捉えるための有効な観測手法である。

② 現状と課題

オゾンのライダー測定では、紫外レーザーのオゾンによる吸収と大気エアロゾルによる散乱を組み合わせた、差分吸収ライダー方式（DIAL: Differential Absorption Lidar）が用いられる。対流圏のオゾンを測定するDIALは、1980年代にアメリカ航空宇宙局（NASA）ラングレー研究センターで航空機搭載システムが開発され、数多くの観測が行われた（Browell *et al.*, 1983）。その後、成層圏オゾン層破壊の問題に関連して、対流圏観測システムもいくつかの機関で開発された。現在、ライダーによる対流圏オゾン観測の研究が継続されているのは、日本の気象研究所（Nakazato *et al.*, 2007）や、アメリカ海洋大気庁（NOAA）（Machol *et al.*, 2009）、NDACC（Network for the Detection of Atmospheric Composition Change）のフランス・オートプロバンス局、アメリカカリフォルニア・テーブルマウンテン局などに限られている。特に気象研究所では、Nd:YAGレーザーの第4高調波と炭酸ガスを封入したラマンシフターを用いた比較的簡便な手法が開発され観測に応用されている。近年、越境大気汚染の問題で、ライダーによる対流圏オゾン観測は再び注目され、地域規模のネットワーク観測が期待されている。現在、NIESでは、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）の検証に関連して、エアロゾルおよび対流圏オゾンを測定するライダーが開発されている。

③ 今後の展望

対流圏オゾンは、エアロゾルと並んで、ライダーによるネットワーク観測が有効な観測項目である。エアロゾルライダーに比べると装置は大型で運用も難しいが、主要地点でネットワーク的な継続観測が行われることが期待される。エアロゾルと同様、ライダーで得られる時間的に連続した高度分布データは、現象の解析やモデルの検証・同化に非常に有用であると考えられる。

（杉本）

¹³ <http://soramame.taiki.go.jp/>（参照日：2010/02/16）

(2) オゾンゾンデ

対流圏を含むオゾンの高度分布を観測するため、WMO/GAW 計画の下でオゾンゾンデの観測が行われており、観測データはカナダ気象局が運営している世界オゾン・紫外線データセンター (WOUDC) に報告されている。2009 年 8 月 17 日現在、世界で 192 か所の観測所がオゾン鉛直分布を観測している、または観測していた、と GAW SIS に登録されており、140 か所からのオゾンゾンデ観測データが WOUDC に報告されている。オゾンゾンデのデータについても、準リアルタイムでのデータ流通を目指す WMO のパイロットプロジェクトの対象になっており、気象庁のオゾンゾンデ観測データを準リアルタイムで通報すべく検討が進められている。

ライダーで得られる高度分布データなどとも組み合わせることにより、現象の解析やモデルの検証・同化にさらに有効に活用されることが望まれる。

(須田)

2.4 観測施設等の相互利用の促進

2.4.1 国内の観測施設

(1) 地方自治体・国設サイト・EANET

光化学スモッグの問題としてのオゾンの観測が、古くは 1976 年ごろから地方自治体（都道府県ならびに政令指定都市）によって数多く行われ、2007 年での測定点は全国に 1,173 局ある。この中には、その地域を代表すると考えられる地点に設置された一般局 1,143 局と、沿道での汚染の度合いを監視するために設置された自動車排ガス測定局 30 局がある。また、環境省による国設大気測定所なども 1976 年から全国の主要な場所（都市域＋地域的バックグラウンド）に整備されている（現在 9 か所）。

また、越境大気汚染の監視のために国設酸性雨測定所が設置され、現在 EANET 局として国内の 12 か所での観測を行っている。EANET 局は東アジアの観測ネットワークとして、その他東アジアの国々の 31 か所の地点での観測を行っている（2.4.2 参照）。

国内のネットワークはこのように、自治体を中心に密度の高い観測がおこなわれている。観測点の配置はこれまで都市域を中心に展開されているが、地域を代表する場所（八方尾根など）も含まれている。これらのデータから 20～30 年の長期的なトレンドについて近年議論が展開されている。その中でオゾンは国内の問題という当初の光化学オゾン生成の見方から、アジアを含めた地域的なバックグラウンドの濃度の変化という点が強く意識されており、今後のデータ解析などが望まれている。

問題点として、オゾン濃度基準が各自治体の KI 法に依存しており、必ずしも濃度の基準が精度高くそろっていないと言えない状況がある（2.2.1 参照）。このため、現在、環境省では常時監視局や国設局でのオゾン濃度基準を NIST の SRP（実際には、NIES にある SRP No. 35）での UV 法での値を基準にするように制度の改正を急いでいる。

(2) WMO/GAW 観測所（気象庁）

気象庁では、大気環境観測所（岩手県大船渡市綾里）（1990～）、南鳥島気象観測所（1994～）、与那国島特別地域気象観測所（1997～）および高層気象台（つくば）において、地上オゾン等の観測を行い、観測データを WDCGG に報告している。現在、これらの観測所では、気象庁・高層気象台・気象研究所による業務観測または研究観測が行われているが、気象庁以外の機関による観測は行われていない。

気象庁とその他の機関との共同研究等を通じて、気象庁が運営する GAW 観測所における観測施設の相互利用を促進することができる。その一方で、南鳥島ではアクセスに大きな制約があり、観測施設の相互利用が困難になっている。

(3) 研究サイト（NIES・大学・富士山など）

NIES でも、沖縄県波照間島や北海道の落石岬での観測を行っている。落石岬の観測データは EANET のデータの 1 つとしても活用されている。

気象研究所では、古くは富士山のオゾン観測も行われていたが、富士山での観測所業務が停止されたために、定常的観測は現在行われていない。現在は夏の期間のみ、大学や（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC）などのオゾン観測が行われている。

(向井・須田)

2.4.2 アジア大陸への観測の展開

中国など新興国の経済発展等により、東アジアにおける地域スケールの大気汚染は深刻さを増している。大気化学および放射に関して重要とされているオゾンについては、IPCC-AR4においても発展途上国が多い地域においては、オゾンの前駆体の排出量が著しく増加していると報告されている（IPCC-AR4, Chap. 2, p150）。さらに、国内のオゾン濃度を議論する場合でも、越境大気汚染や北半球規模大気汚染の観点での考察が不可欠となってきた。対流圏におけるオゾン濃度の分布を把握するには、観測点が少ないアジア地域において、発生源付近でのオゾンやオゾン前駆物質の観測が必要である。

(1) EANET・ABC-Asiaのアジア域におけるオゾン観測

EANETとはThe Acid Deposition Monitoring Network in East Asiaの略称であり、日本の環境省が主導して、2001年1月よりアジア地域の10ヶ国が参加し、酸性物質の沈着をモニターしている。当初の参加国は中国・インドネシア・日本・マレーシア・モンゴル・フィリピン・韓国・ロシア（極東地区）・タイ・ベトナムであった。その後2001年からカンボジアが、2002年からラオスが、2005年からミャンマーが参加しており、現在は13ヶ国が参加している。

EANETでは乾性沈着（空気中の濃度）の測定項目としてSO₂・NO_xとともにオゾンが挙げられており、オゾンの乾性沈着をUltraviolet Photometric法で自動観測している。例えば、日本の沖縄辺戸岬にある国設酸性雨局ではHoriba製の自動オゾン測定器を用いて通年観測が行われている。しかしながら、上記参加国すべてが観測を行っているわけではなく、2007年の報告書では、日本（10か所）・マレーシア（1か所）・韓国（3か所）・ロシア（1か所）・タイ（3か所）でオゾンの自動観測が行われている（ADORC, 2008）。観測地点に偏りがあることは明白であり、また、アジア域の広さに対して観測の空白域があることも明らかであるので、オゾンの自動観測地点の増加が望まれる。

ABC-AsiaとはAtmospheric Brown Clouds Asiaの略であり、国連環境計画（UNEP）のプロジェクトである。参加国は中国・インド・日本・モルディヴ・ネパール・パキスタン・韓国・タイであり、南アジア域やヒマラヤの山岳地域にまで観測拠点が広がっている。ABC-AsiaではBCなど微小粒子の観測が主であり、オゾン観測を行っている場所は少ない。しかしながら、ABC-Asiaの観測拠点はインドやモルディヴまで観測拠点が広がっているため、働きかけを行うことでオゾン観測も展開できると思われる。例えば、国内では、ABC-Asiaに参加している辺戸ステーションとEANETサイトの辺戸酸性雨測定局が隣接しており、辺戸ステーションは粒子を、辺戸酸性雨測定局はオゾンなどガス成分を主に観測し、NIESを仲介役として相互のデータ利用を行っている。

将来的な課題としては、これまで観測拠点があまりながら観測を行っていない地点において、積極的にオゾンの観測を各国が推進していくことが重要である。また、各国への働きかけは環境省や酸性雨研究センターが中心となって推進することが必要である。個々の研究者の取組みでは、それぞれの国の国内事情や法令のためデータの取得や公表などに制限がある場合があり、データの利用やそれを用いた解析に大きな支障が出ている。EANETのような国と国との条約に基づいた施策が必要である。

（高見）

(2) アジア大陸でのオゾンと関連気体の通年観測

JAMSTECのグループでは、中国華中東部を中心とした地域スケールでのオゾン等の大気汚染について解明を進めるため、地域代表性の高い山岳地点での観測を複数地点で実施してきた（図2-2）。北京と上海の間に存在する唯一の山岳地域に位置する泰山（北緯36.26度・東経117.11度・1,534m）や、中国華中東部汚染地域のそれぞれ西端・南端付近に位置する華山（北緯34.48度・東経110.08度・2,065m）・黄山（北緯30.13度・東経118.16度・1,841m）では、それぞれ2004～2007年・2004～2007年・2004～2008年にかけてオゾンの通年観測を実施し、季節変化の特徴を明らかにした。国内のデータやバックグランド大気での値と比較すると、3か所ともにオゾン濃度が高く、初夏の5～6月に最大値をとり、秋に第2の極大が見られ、真夏は東アジアのモンスーンによりオゾン濃度が下がる傾向がある。3か所の中で毎年最も高いオゾン濃度が記録されるのは泰山で、極大となる6月の3年（2004～2006年）平均値は82ppbであったほか、日平均値が100ppbを超える日も高頻度で観測された。黄山での極大は早めに5月に起こったが、比較的緯度が低いいため夏季にはモンスーンの影響を受ける期間が長く、オゾン濃度が比較的低い清浄な海洋性大気の影響を最も強く受けるためと考えられた。これらの濃度データは、全球/地域スケール化学輸送モデルの検証に有効に活用された（Li *et al.*, 2007）。

中国西部の天池（北緯43.90度・東経88.12度・1,925m）や中央アジア・キルギスのVostochnaya East（北

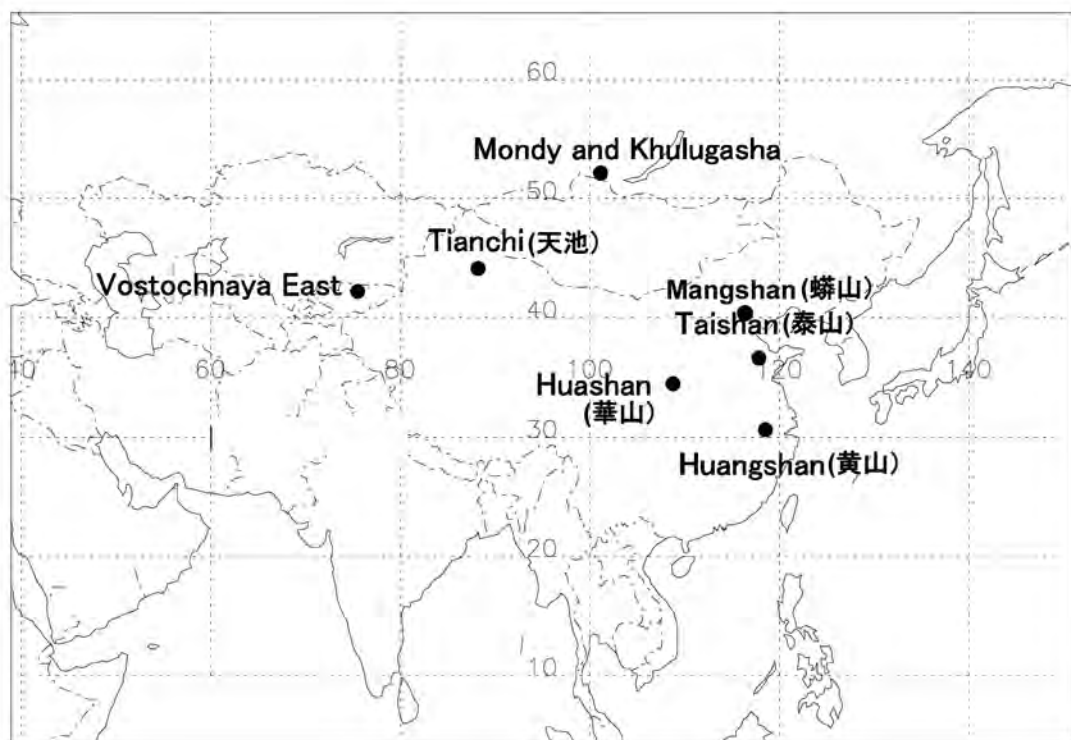


図 2-2 海洋研究開発機構が中心となり、オゾン測定を実施したアジア大陸での地点。

緯 42.58 度・東経 76.07 度・3,592m) でもオゾンの観測を、それぞれ 2005～2008 年、2006～2007 年に実施し、中国華中東部の影響をほとんど受けていない大陸性気塊での代表的なオゾン濃度変動を捉えた。これらのデータは北半球規模大気汚染の実態を解明するのに貴重な観測空白域でのデータと言える。東部シベリアのロシア・モンディ（北緯 51.62 度・東経 100.91 度・2,018m）では 1996 年以降 10 年以上にわたりオゾン観測が継続されており、中国華中東部や日本での観測データの解釈の際に、清浄気塊での参照値として比較に用いられるなど、有効に活用されている (Pochanart *et al.*, 2003)。現在では EANET の 1 局として観測データを提供している。

これらのサイトのうち、泰山・黄山・華山・モンディではオゾンに加えて、一酸化炭素の通年観測も実施された。泰山・黄山・華山のデータは、中国華中東部地域の一次発生源強度を推定するために、またオゾン濃度との関係を解明するために用いられた。また、モンディでのデータは、シベリアでのバックグラウンド濃度変動を解析するために用いられてきた。

観測施設の相互利用の観点では困難な点が多い。特に中国での観測に関しては、現在では許可を持たない外国人による大気環境観測は禁止とされ、観測地点に自由に装置を持ち込むことなどは全くできない状況にある。また、泰山・黄山については観測サイトからの撤収を余儀なくされ、観測が終了している。その他、観測機器の故障などの起きた華山も合わせて、中国での観測は全面的に一時停止状態にある。データの公開・共有に関しても困難が大きい。中国気象局の指令により、許可のある課題等以外では生データは入手困難であり、データの公開はできないのが通常である。これらのことから、今後当面は、許可を得た課題内において、また現地共同研究機関との相互信頼関係において、大気環境の共同観測を実施することがデータ取得の唯一の道である。近い将来には、各機関や個人による個別取組みだけでなく、既存あるいは新規の国際的枠組みの中に共同観測等を位置づけて実施し、データ共有を目指すことが強く求められる。このことにより、中国などでのオゾン観測データを継続的に取得することがようやく可能となり、東アジアの地域スケールでの大気汚染の実態や過程、変容を明らかにするための基盤が初めて整うといっても過言ではない。

また、オゾンそのものだけでなく、オゾンの前駆物質についてもアジア大陸での観測は限られており、観測強化が求められる。2006 年 6 月には JAMSTEC が中心となり、泰山においてオゾン前駆気体の総合観測を行った

(Kanaya *et al.*, 2009 など) が、この地域でのオゾン光化学を明らかにするためには、今後も同様に、NOx・VOC 等の精密観測データを収集するような集中観測を実施することが重要である。一方で、より簡便かつ通年運

転可能なオゾン前駆物質測定装置の開発・運用も重要である。1つの取組みとして、JAMSTECでは、太陽光散乱光を複数の仰角で分光測定し、その差分吸収解析に基づいてNO₂等の対流圏カラム濃度、高度分布を導出できるMAX-DOAS (Multi Axis-Differential Optical Absorption Spectroscopy) 法を用いた小型観測装置を開発し、2007年以降、国内の横須賀・沖縄江戸岬に加え、アジア～ロシア (韓国光州・中国合肥・Zvenigorod (モスクワ郊外)・Toms (中央シベリア)) に観測網を展開している。衛星データや対流圏化学輸送モデルの検証を通じ、地域～大陸スケールでのオゾン動態解明に重要な役割を果たすものを期待されている。

(金谷)

2.4.3 極域における観測強化

極域における地上オゾン濃度の観測は、WMO/GAW や NOAA/CMDL (現 ESRL) などのグローバルな観測網の一環として開始され、現在も継続されている (Oltmans and Komhyr, 1986; Oltmans *et al.*, 1998)。南極において、我が国は1988年より昭和基地で観測を開始し (青木, 1997)、マクマード基地 (アメリカ)、アムンゼン・スコット極点基地 (アメリカ)、ハリー基地 (イギリス)、ノイマイヤ基地 (ドイツ)、サナエ基地 (南アフリカ) とならび、貴重な南極大陸における長期観測点となっている。また、北極圏ではツェッペリン山 (スバールバル諸島)、アラート (カナダ)、バーロー (アメリカ)、サミット (グリーンランド) の4点において長期連続観測が行われている。

南極昭和基地で定常気象観測を行う気象庁も、1997年1月から紫外線吸収式オゾン濃度計により地上オゾン濃度の連続観測を行っている。観測を行うに当たっては、観測の前後に較正を行い、また、観測後に品質管理および統計処理を経たうえで、大気・海洋環境観測報告などの刊行物のほか、WDCGG にも報告されており、一般に公開されている。このデータは、現在、WMO/GAW 計画の地上オゾン濃度の基準として採用されている NIST のオゾン SRP に対してトレーサブルなものになっている。

このような極域の観測点における、地上オゾン濃度のおよそ10年にわたる連続観測の結果として、1990年代前半には北半球中高緯度における増加傾向 (Logan, 1985; Oltmans and Komhyr, 1986; Voltz and Kley, 1988)、南極点における減少傾向の可能性が報告されていた (Oltmans and Levy, 1994; Schnell *et al.*, 1991; Fishman *et al.*, 1979)。しかしながら、その後、2005年までの結果に基づく包括的なレビューによれば、一次回帰分析からは増加・減少ともに有意な傾向は見いだされていない (Helmig *et al.*, 2007c)。

極域における地上オゾン濃度の季節変化は、光化学反応による生成・消滅と大気輸送の季節性に起因する。このこと自体は中高緯度と変わらないが、前者において、北極域では人為起源物質の影響を受けやすく、他方、南極域では皆無である点において大きく異なる。南極域ではこの性質を利用して、対流圏オゾン濃度を成層圏あるいは中低緯度起源空気塊のトレーサーとして用いることが試みられている (Murayama *et al.*, 1992)。

短期不規則変動に関して最も議論の対象となっているのは、地上オゾン破壊現象 (ODEs: Ozone Depletion Events) である。ODEs は、北極域で発見され (Bottenheim *et al.*, 1986; Barrie *et al.*, 1988)、南極域でも確認されている (青木, 1997; Wessel *et al.*, 1998)。海洋・海氷を起源とするハロゲンを含む無機ガスを介する反応が、オゾン消失の有力な原因と考えられている (Simpson *et al.*, 2007)。ODEs の発生時期が冬季であり、なおかつ海氷域であることから、北極域ではキャンペーン観測が精力的に行われたのに対し、南極域での観測には大きな制限があった。しかし、近年の全球オゾン監視実験 (GOME) および SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) による衛星リモートセンシングにより、ODEs に密接に関与すると目されてきた BrO の観測が可能となり、流跡線解析と組み合わせたアプローチもなされている (Jones *et al.*, 2009)。また、MAX-DOAS を用いた極域海洋上での直接観測 (Wagner *et al.*, 2007) も実施され、定量的な議論が始められた。さらに、近年、地表面 (雪面) および境界層内の光化学反応過程に関する新たな知見が得られ (Helmig *et al.*, 2007a, b)、複雑とされていた極域の生成・消滅プロセスが解き明かされつつある。

ODEs のようなイベントや季節変化において、どの生成・消滅過程が主として寄与したのか、あるいは、観測地点と現象発生地点の間における輸送がどの程度関与したのかを定量的に評価するには、全球化学・気候結合モデル (CHASER) (Sudo *et al.*, 2002a, b) のような化学・気候モデルによるシミュレーションと、現場観測との相補的な研究の進展が必要であり、その理解は、当然、対流圏オゾン濃度の長期変化傾向の予測に資する。この点において、極域における観測は極めて有効と考えられる。

極域における対流圏オゾンの観測は、大気現象および地表面の特殊性から科学的な重要性を増している。その一方で、特殊な環境および地理的な制約からそれを長期間維持することは必ずしも容易でない。グローバルな国

際的観測網との連携を図りつつ高精度の長期観測を継続するとともに、衛星リモートセンシングデータと組み合わせ、モデルによるシミュレーションと補完しあうことによって、極域のみならず、広く全球規模の対流圏オゾンに関係する現象および長期変化傾向の解明に貢献することが求められる。

(橋田・須田)

2.5 地球システムモデル開発の視点から見た観測ニーズ

対流圏オゾンは大気汚染物質であると同時に温室効果ガスであるため、気候モデルによる過去の気候再現と将来の気候変動予測の信頼度向上のためには、オゾンの気候に対する影響を定量的に考慮する必要がある。日本においては、地球規模の化学輸送モデルとして、東京大学気候システム研究センター・NIES・JAMSTECの気候モデルMIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) をベースとしたCHASER (Sudo *et al.*, 2002a, b; Sudo and Akimoto, 2007) や、気象研究所が開発しているものが存在する。CHASERによる対流圏オゾンの放射強制力の評価は、IPCC-AR4へ直接貢献した(Forster *et al.*, 2007)。CHASERは、人・自然・地球共生プロジェクト(2002~2006年度)や21世紀気候変動予測革新プログラム(2007年度~)における地球システムモデル開発の一環として改良が進められており、大気・海洋・エアロゾル・大気化学・海洋化学・生態系の各コンポーネントの、複雑な相互作用を表現し得る数値モデルが発展しつつある。また、CHASERは、モデル相互比較プロジェクトとして、ACCENT-MIP (Atmospheric Composition Change and European Network of Excellence Model Intercomparison Project)・TF HTAP (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution)・ACCMIP (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project)へ参加、もしくは参加予定である。

気候モデル内のオゾンをはじめとする気体は、質量保存の観点から、質量混合比を予報変数として扱うのが一般的である。従って、気温や気圧が正しく計算されていれば、各物質の分子量やアボガドロ数などの定数を用いて、一般的に観測で得られる体積濃度や大気全量へ変換することができる。エアロゾル(1.4参照)とは異なり、気体は大きさを考慮する必要がないため、物理量換算は比較的容易である。

人為起源オゾンの放射強制力は、主に化学輸送モデルと大気大循環モデルとを結合した数値モデルで評価されている。IPCC-AR4において、人為起源オゾンの放射強制力の科学的理解度は中程度とされており、二酸化炭素をはじめとする長寿命の温室効果ガスと比較して理解度は低い。その主な原因として、対流圏オゾンの大気中での寿命は短く、時空間分布の変動が大きいことが挙げられる。数値モデルのシミュレーション結果を定量的に検証し、オゾンの気候影響評価の定量的不確定性を低減するためには、人工衛星や地上観測網などから得られる時空間的に密で詳細な観測データがより一層必要とされている。さらに、シミュレーションによる対流圏オゾンの気候影響評価を検証するためには、人為起源の気候変動スケールである数年~数十年の継続的な観測データの蓄積が必要である。

(竹村)

2.6 時空間的観測空白の改善および観測項目の充実

2.6.1 船舶設置型システムの開発と配備

(1) 必要性

観測点を増やして空間的な分布を描くために、移動体にオゾン計を設置することが有効であり、移動体としてのプラットフォームとして船舶は、海上のバックグラウンド大気や比較的良く攪拌された地域的なオゾン濃度の代表値を得るのに最適と考えられる。海上では自船の排気ガスをさけることができれば、地上のようにあらゆる場所で走る自動車の排気ガスの影響を考慮する必要がない。また、地表面にある植物やその他の物質の表面で反応してしまうオゾンの消滅も、海洋の方が比較的少ないと考えられる。

大気の性質上、緯度帯が異なる場所での濃度変動が重要であるので、太平洋を南北に走る船舶が重要と考えられるほか、大陸からの影響などを調べるために、大陸の縁辺での航海も重要になっている。季節変化などを考えるためには、定期的な航路を持っている船舶に搭載し、定常的なデータを得ることが必要であろう。

(2) 現状と課題

NIESでは、定期的な航路を確保してオゾン濃度を測定している。航路としては日本―北アメリカ間を2ヶ月程度で往復する航路での北緯55度までのオゾンが観測されるほか、日本―オーストラリア―ニュージーランド―日本間の45日の航路では、中緯度から南緯40度近くまでの緯度分布観測が行われている。いずれも年に10回程度の緯度分布が測定できている。2007年からはタイシンガポール―インドネシア―マレーシア―フィリピン

ンなどを1月でまわるアジア航路にもオゾン計を設置して、東南アジア域のデータの採取も行われている。

その他、各研究所や大学での観測船での個々の観測は行われている。しかし系統的なデータ取得やデータの流通は行われていない。

機械的には、船舶に設置する場合の結露の問題や温度や振動の問題も経験されている。洋上の大気は湿度が高いため結露や水分の体積補正への考慮が必要である。これらは取り込み口に膜式の除湿装置を設置することで解消することが可能である。装置によっては、それが組み込まれているものもある。これまでオゾン濃度に対する水分の体積補正は考慮されてこなかったが、一般の温室効果ガスのように乾燥空気を基準にすることで、より精度高く濃度を規定することも可能である。乾燥空気基準にすると、場合によっては3%程度の見かけの濃度上昇が起こることになる。

温度に関しては、通常の実験室より大きく温度変化が起こることも考える必要があり、多くの機械は温度補正ができるものの、実際には温度影響が出る可能性がある。それを防ぐためには、セルを温度調節する方法が有効と考えられている。船舶特有の振動に関しても考慮が必要であり、セルブロックが振動によって動かないようなレイアウトになっているか、ボードなどが振動に対して堅牢であるか、など基本的な強度が必要である。同時に採取口からの海水の浸入に対するトラップやフィルターを設置する必要がある。

(3) 今後の展望

日本全体での船舶観測を総合化すると、日本を含む地域や緯度帯での空間分布に関する情報が長距離輸送の影響の情報なども含めて増加すると考えられる。そのためには、濃度基準を確立したり、船での仕様などを基準化したり、共同で使えるデータベースを開発したりすることが有効となると考えられる。

(向井)

2.6.2 定期航空機観測への導入

(1) 定期航空機観測の必要性

対流圏オゾンの観測網は主に地上に展開されており、それに比べると上空の観測は少なくデータの空白域となっている。オゾンの3次元的な動態の解明は、大気化学輸送モデルやリモートセンシング観測の検証に不可欠である。特に、対流圏オゾンの半球規模輸送には、上空のオゾンの振る舞いを明らかにすることが重要となってきた。

航空機は、広範囲の上空を短時間に観測できる最も機動的な観測プラットフォームである。分析計を搭載した航空機観測は、ほかの方法に比べてより正確な鉛直分布の観測データを収集するために有効である。また、航空機では約10 km以上の飛行高度までカバーできることから、成層圏/対流圏の交換過程の理解にとって極めて有効な情報を得ることができる。現状では、対流圏界面を通した成層圏から対流圏へのオゾン流入量の見積りには大きな不確実性があり、対流圏オゾンの収支を理解するうえでも航空機による観測が必要とされている。

定期航空機を利用した上空のオゾン観測の最大の利点は、観測専用機に比べて低コストで観測が実施できる点にある。これによって、高頻度かつ広域の観測を長期にわたって実施することが可能になり、飛躍的に観測データを増やすことができる上空の観測ネットワークを確立できる。従って、定期航空機を利用した観測を推進することによって、これまで不明な点が多く残されていた上空の分布や変動に対する理解が大きく進展すると考えられる。

(2) 現状と課題

定期航空機を利用した本格的な上空のオゾン観測は、1977年にアメリカのGASP (Global Atmospheric Sampling Program) 計画で実施されたが、長期の継続はアメリカでは実現しなかった。一方、ヨーロッパでは、1990年代に入って定期航空機を利用した3つの観測計画が開始された。その1つは、フランスが中心となって進めているMOZAIC (Measurement of Ozone and Water Vapour by Airbus In-service Aircraft) 計画で、複数の航空機会社が運航しているエアバス機 (A340) にオゾン計を取付け、全球のオゾン濃度の膨大なデータの収集を始めた

(Cammas and Volz-Thomas, 2007)。このMOZAIC計画は、IAGOS-ERI (In-service Aircraft for a Global Observing System-European Research Infrastructure) に引き継がれ、さらに、観測を拡大・発展させている (Volz-Thomas and IAGOS, 2007)。2つ目は、ドイツが主導しているCARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrument Container) 計画で、オゾン計のほかにも多くの観測機器を貨物コンテナに搭載し、オゾンの前駆物質を含めた総合的な観測を定期航空機 (B767・A340) で実施してきた

(Brenninkmeijer *et al.*, 2007)。この観測計画は、現在、IAGOS-ERI計画と協同で進める方向となり、ヨーロ

ッパ連合の強力なオゾン観測網が構築されつつある。3つ目は、スイスで実施された NOXAR (Nitrogen Oxides and Ozone along Air Routes) 計画で、オゾンと同時に、NOX の精密測定機器が定期航空機観測 (B747) に搭載され、1995～1996 年の 2 年間に観測が実施された (Brunner *et al.*, 2001)。

日本では、これまで観測専用機による上空のオゾン観測が活発に実施されてきたが、残念ながら、定期航空機を利用したオゾンの観測はいまだ実現していない。その大きな要因は、定期航空機に観測機器を搭載するためには、大きな制約があるためである。例えば、機体に空気取り入れのインレットを新設する改造や、機器搭載のための耐空性試験による安全証明を航空局から取得する必要がある。ヨーロッパでは、航空機製造メーカーのエアバス社の全面的な理解と協力により、定期航空機観測が活発に進められている。このような日本とヨーロッパとの開発の技術環境の違いはあるが、航空機改造には莫大な予算が必要であり、この分野の発展には初期研究費の集中投入が不可欠である。従って、産官学一体となった国家プロジェクトとしてオールジャパン体制で臨む巨大プロジェクトの推進が必要である。

(3) 今後の展望

上空のオゾン濃度の観測は、特に、アジア太平洋域で不足している。日本では、JAL 機による CO₂ 連続観測が CONTRAIL 計画 (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner) ですでに実現しており、定期航空機による温室効果ガスの観測分野では世界をリードしている (Matsueda *et al.*, 2008; Machida *et al.*, 2007)。この観測で蓄積された航空機観測技術を活用・応用して、日本独自のオゾン観測システムを構築することが期待される。一方で、IAGOS-ERL で開発された観測システムは、全世界で使用できるライセンスが取得されているため、そのシステムを日本の定期航空機に導入する方法も考えられる。台湾の PGGM (Pacific Greenhouse Gases Measurement) 計画では、IAGOS と協同観測を実施するための技術連携を行い、アジア太平洋地域の観測を開始する準備をすでに始めている。従って、この分野では国際競争と協調を図りつつ、国際貢献の立場から、日本における定期航空機のオゾン観測計画に早期に着手することが望まれる。

(松枝・向井)

2.6.3 衛星観測システムの研究開発

(1) 衛星観測システム開発とその必要性

人間活動によって地球大気の組成が変化してきたことは、地上や衛星の長期観測によって明確に示されてきている。衛星観測は、極域のオゾン層の破壊の様子をオゾンホールというわかりやすい画像で提供してきた。この変化しやすい大気の全体像を、高い信頼性で得るためには、衛星観測だけでなく、地上観測など様々な手に入るデータを有効に使用することが重要である。さらに、化学輸送モデルや気候モデルなどの様々なモデルと測定結果の組合せが重要である (IGOS Atmospheric Chemistry Theme Report, 2004)。

また、衛星観測で対流圏の化学組成に関するデータが導出できるようになってきていることから、モデルによるデータ同化技術とともに使用され、大気質のモニタリングおよびその予測に使用されてきている。衛星観測は、グローバルに、かつ長期間にわたって同一測器でデータが提供できることから、重要な位置を占めるに至っており、今後も衛星観測が必要不可欠である。

宇宙機関は、国際的な枠組み等を通して、地上観測など様々な活動と連携を取っている。地球観測衛星委員会 (CEOS : Committee on Earth Observation Satellites) は、宇宙機関を中心として、地球の観測・研究を目的とする宇宙からの観測ミッションの国際的な調整を行っている。CEOS は、統合地球観測戦略 (IGOS) の partner (IGOS-P) であり、IGOS-P は、CEOS による宇宙からの全球観測と、国際研究グループ等による地上観測システムの計画調整を行うため、CEOS のほか、関係国際機関が 1998 年設立したものである。オゾンなど大気微量成分に関係の深い IGOS のテーマの 1 つである総合地球大気化学観測 (IGACO : Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations) に基づいて活動を進めている (図 2-3)¹⁴。また、CEOS では、地球観測に関する政府間会合 (GEO : Group on Earth Observations) への貢献として、大気組成のバーチャルコンステレーション (ACC : Atmospheric Composition Constellation) は、仮想的なコンステレーションのフレームワーク作りを行っている。このため、ACC は、全球地球観測システム (GEOSS) の社会的利益分野である災害・健康・エネルギー・気候・生態系に関し直接的に取り組んでいる。

¹⁴ <http://www.igaco-o3.fi/introduction/index.html> (参照日 : 2010/02/16)

(2) 現状と課題

アメリカの地球観測衛星によるオゾン全量データは、NIMBUS-7 および Earth Probe の全オゾン測定放射計 (TOMS) によって、1978 年 11 月から 2005 年 11 月まで継続された。現在は、NASA Aura/OMI (Ozone Monitoring Instrument) に引き継がれ、2004 年 10 月から現在まで観測が続いている。TOMS は、NASA/GSFC (NASA Goddard Space Flight Center) で開発されたセンサーであるが、Aura に搭載されている OMI は、オランダとフィンランドの協力により開発されたオゾン観測センサーである。2011 年以降は、アメリカの次世代の実用極軌道気象衛星である NPOESS シリーズの OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) の観測継続が期待される。

ヨーロッパでは、ERS-2/GOME によるオゾン全量の観測が 1995 年から実施された。2002 年に打ち上げられた地球観測衛星である ENVISAT の SCIAMACHY でオゾンや CO₂ などの大気微量成分の観測が継続されている。一方、現在は、MetOp-A/GOME-2 として、周回気象衛星に搭載され、オペレーショナルにオゾンなどのデータ提供が行われている。極軌道気象衛星 (MetOp-A) に搭載された大気サウンディング赤外干渉計 (IASI) は、2006 年 10 月から観測を開始し、気象機関向けの気温・水蒸気のプロファイルに加えて、オゾンや CO 等の微量気体のプロファイルデータをオペレーショナルに提供している (Clerbaux *et al.*, 2009)。なお、MetOp シリーズとして 2020 年までの 3 世代にわたって観測が続けられる予定である。

それらのセンサーからは、オゾン全量に加えて対流圏のオゾン量を導出する試みが行われている。TOMS のオゾン全量は、オゾンの吸収がありオゾンに感度がある 312.6・317.6・322.4nm とオゾンに感度がない 331.3nm や地表面反射率に感度のある 360.4nm の組合せで導出している。OMI は、TOMS で用いた方法と、差分吸収分光 (DOAS) 法による方法の 2 種類でオゾン全量を求めている。対流圏オゾンを導出する最初の試みは、Fishman *et al.* (1987) により TOMS から求められたオゾン全量を、SAGE 等から求められた成層圏オゾンを差し引いた残り (residual) である、対流圏オゾン (TOR: Tropospheric ozone residual) である。OMI は、2 種類の方法で対流圏オゾンを導出する試みが行われている。1 つは、Fishman 等の方法を発展させ、トラジェクトリ解析と組み合わせた Schoeberl *et al.* (2007) による方法と、Liu *et al.* (2006) による 270-330 nm の OMI の観測スペクトルから直接オゾン量をリトリバールする方法である。ほかに、Zienke *et al.* (1998) は、熱帯の高い雲を利用した対流圏オゾンの導出を試みている。また、Eremenko *et al.* (2008) によると、MetOp-A/IASI のデータから、ヨーロッパの都市上空の対流圏オゾン量を導出し、オゾンゾンデ観測から求めた 0-6 km の部分的なカラム量と比較したところ 5% 以内で一致した結果が得られた。まだ、対流圏オゾン導出は、研究的な様相が強いと考えられるため、精度向上への努力が必要であると考えられるが、IASI データで、大気質研究に適したレベルで対流圏オゾンに関する情報を導出することができることを示したことはこの分野にとって朗報であろう。

衛星データからは、オゾンだけではなく、例えば ERS-2/GOME・ENVISAT/SCIAMACHY から、二酸化窒素 (NO₂) カラム量が導出されている。1996 年から 2002 年の GOME のデータを用いて、中国で対流圏 NO₂ が年々増加しており、1996 年と比較して、2002 年で 1.4 倍になっていたことが衛星データから示された (Richter *et al.*, 2005)。また、2008 年の中国で開催されたオリンピック期間前後で、北京における工場の一時的操業停止、車の規制等の様々方策の結果を、衛星データから北京の NO₂ の明確な減少として捉えることができている (Yu *et al.*, 2009)。

ENVISAT・Aura・MetOp 等の地球観測衛星や気象衛星が、大気組成分布や大気汚染物質の長距離輸送について、グローバルな様相とリージョナルな様相を提供してきている。現在、これら極軌道衛星に搭載されたセンサーは、対流圏カラムオゾン、エアロゾルの光学的厚さ、オゾンとエアロゾルのプレカーサ (CO・NO₂・HCHO・SO₂) の観測データを毎日提供している。オゾンとそのプレカーサの鉛直分解能は限られているが、非常に汚染がひどいところの対流圏の化学種のトレンドを出せるのに十分なデータが集められてきたところである。また、それらの化学種の測定されたトレンドは、都市域での規制の効果や、対流圏気体や気候と結合したモデルの検証ができるようになってきている。しかし、対流圏のトレンドを抽出するための十分なデータはあるが、多くのミッションから必要なデータセットを取り出す必要があり、データ利用の点からはまだ工夫すべき点があると考ええる。さらに、現在は、NOAA GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) や MSG (Meteosat Second Generation)、MTSAT の静止軌道衛星からは、大規模な火災の位置やある種のエアロゾルなど非常に限られた情報しか利用できないが、静止軌道からの測定と周回衛星の観測とを協調して実施していくようにすべきだと考える (4th ACC, 2009)。

(3) 今後の展望

国際的に低軌道衛星のデータ利用が活発になされてきている状況を考えると、次のステップとして観測頻度の視点で、静止軌道からの観測を考えることは自然であろう。2010 年春に、韓国航空宇宙研究院 (KARI: Korea

Aerospace Research Institute) により開発された静止衛星で、静止通信・海洋・気象衛星「COMS-1」が打上予定になっている。静止軌道から世界初の海洋の観測がGOCI (Geostationary Ocean Color Imager) センサーによる始まる。これにより静止軌道から、気象・通信以外の目的で観測が始まり、今後大気組成に関しても観測の実施が期待される。現在、各国で次々と構想が発表されている。2015～2020年を目指して、アメリカのGEO-CAPE (Geostationary Coastal and Air Pollution Events)、ヨーロッパのSentinel-4、MTG-S (Meteosat Third Generation) という静止衛星が計画されている。GEO-CAPEは、紫外・可視・近赤外のバンドを用いた3つのセンサーで、大気質および海色を静止軌道から観測する計画である。Sentinel-4は、全地球的環境・安全モニタリング (GMES: Global Monitoring of Environment and Security) 計画において、紫外可視センサー (UV/VIS) と熱赤外 (TIR) センサーをもつ静止衛星である。MTG-Sは、2008年の終わりにヨーロッパ気象衛星機関 (EUMETSAT) が、UV/VIS と TIR のセンサーを採択し、2017年打ち上げることを決め、現在開発が進行している。MTGの衛星シリーズは少なくとも15年続く予定である。さらに、韓国の2014年の打上げを目指した2機目になる多目的静止衛星にも、大気質に関する観測が計画されている。一方、(独)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、大都市域を含む東アジアにて、その大気質に関するいわゆる大気汚染物質 (オゾン・二酸化窒素等) の1時間ごとの高頻度観測を行い、大気質の状況を把握し、その分布の予測に資するために、2017年以降の静止軌道上からの観測を目指して計画を策定中である。このため大学・国立研究所等の有識者を中心に静止大気観測ミッション検討委員会を立ち上げ、ミッション要求の設定、センサー概念検討や感度解析を実施している。

以上のように様々な計画が立案されつつあるが、その協調がグローバルな継続した観測には必要であろう。¹⁵第4回ACCワークショップにて、低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) 衛星とGEOのミッションを含む各国の宇宙機関の衛星計画の継続性とその協調性が必要だと強調され、また、アジア、ヨーロッパ、アメリカにおいてGEOミッションが計画されているが、近々その協調を図るために会合を持つ予定である (4th ACC, 2009)。

(戸田)

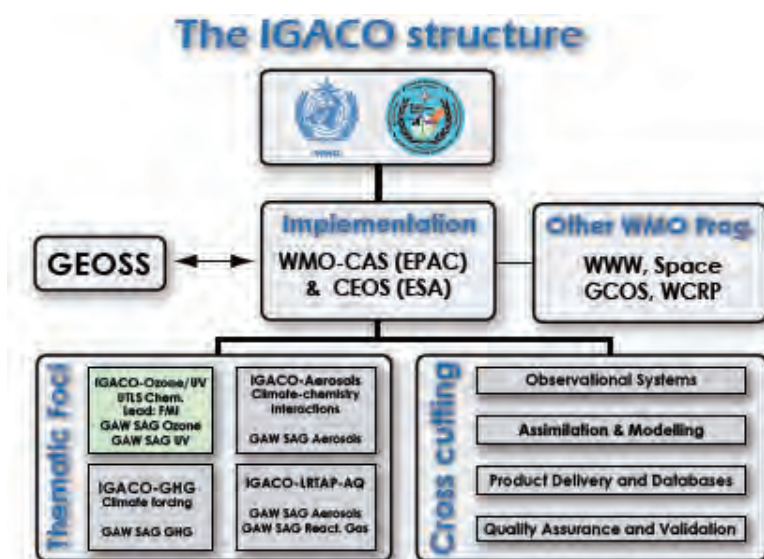


図2-2 IGACO組織図 (<http://www.igaco-o3.fi/introduction/index.html>)。

2.6.4 光化学オキシダント関連情報高度化のための観測

大気汚染について、近年、東アジアの工業活動の活発化の影響により、これまで光化学スモッグの発生がなかった地域を含めて広域に高濃度の光化学オキシダントが発生して社会問題になってきている。

気象庁では、都道府県からの大気汚染物質濃度の通報および気象状況の予測をもとに、オキシダント大気汚染気象ポテンシャルを予測し、ポテンシャル等の情報を都道府県へ通報するとともに、ポテンシャルが基準以上 (光化学スモッグ注意報基準相当) の場合にはスモッグ気象情報を発表している。また、関東地方南部については、メソ移流拡散モデルを用いてオキシダント濃度分布の時間変化を予測し、光化学オキシダントが発生しやすい地

¹⁵ <http://www.ceos.org/> (参照日: 2010/02/16)

域と時間帯を指定してスモッグ気象情報を発表している。

気象研究所では、光化学スモッグ気象予測モデルの開発を進めており、そのモデルを用いて、全世界および東アジアを対象として、明後日までの光化学スモッグ（地上オゾン濃度）等の予測情報をウェブ上で試験公開している。NIES、JAMSTEC および九州大学においても、大気汚染の予測情報を試験公開しており、これらは、地方公共団体等における光化学オキシダント関連情報の研究および利活用の促進を目的として、環境省と気象庁が共同で設けた光化学オキシダント関連情報提供ホームページ¹⁶を通じて提供されている。

環境省では、全国の大気汚染の状況（光化学オキシダントなどの大気汚染物質濃度の1時間ごとの測定値）と光化学オキシダント注意報等の発令状況を、大気汚染物質広域監視システム（愛称「そらまめ君」）を通じて、リアルタイムで一般に提供している。

広域かつ詳細な大気汚染物質濃度監視およびスモッグ気象情報改善などのための数値予報モデルの評価検証などのために、光化学オキシダントなど大気汚染物質の観測をさらに充実・強化することが必要であり、光化学オキシダント関連の観測および予測を行っている機関間の連携協力を一層推進することが重要である。

（須田）

2.7 まとめ

対流圏オゾンは、温室効果ガスであること、越境大気汚染問題に関連していることから、地球観測として取り組むべき課題としての重要度を増している。増加速度が地域的に大きく異なり、特に経済発展が著しい東アジア地域での濃度増加が顕著であることを踏まえ、全球規模での長期的なトレンドを見積もるためには、精密かつ高密度の長期観測が不可欠である。また、大陸間の長距離輸送に関する科学的知見を収集するためにも、地上から上空を含めた対流圏全層の観測の充実が求められる。

これらのため、以下のことを推進する必要がある。

- (1) 国内におけるオゾン濃度の観測スケール統一化のため、NIES の SRP No. 35 をはじめ、国際体系に基づく UV 法によるスケールで体系化する。また、関係する観測施設において、較正のタイミングや機関間相互の比較などについて連携をとり、観測データの利用性向上を図る。そのため、機関間の比較観測を定期的・継続的に実施する。
- (2) オゾン濃度観測データの準リアルタイムでの流通、国内の観測施設で観測されたデータの共同で使えるデータベース化を含め、観測データの収集・提供形態の一層の多様化を図る。特に、WMO/GAW の下で設立され気象庁で運営している WDCGG は、GAW 以外の枠組みで観測された対流圏オゾン観測データも扱っており、WDCGG を通じた観測データの流通促進を図る。
- (3) 地上における対流圏オゾンの現場観測のみならず、航空機・船舶による移動観測、オゾンライダーおよびオゾンゾンデによるオゾンの高度分布観測、ならびに人工衛星による観測をオールジャパン体制でネットワーク化し、様々な観測データを統合して時空間的に密で詳細な 3 次元観測データを得ることにより、現象の解析やモデルの検証・同化に関する活動を推進する。極域の地上観測点における対流圏オゾンの長期連続観測を継続する必要がある。
- (4) 北半球規模、あるいは東アジアの地域スケール越境大気汚染の実態・過程・変容を明らかにするための基盤として、発生源付近でのオゾンやオゾン前駆物質の観測をはじめ、アジア大陸での観測強化に向けた国際協力を推進する。また、関係国相互間の観測データの流通・利用を促進することが必須であり、関係国の国内事情や法令のためデータの取得や公表に制限がある場合には、国内関係機関による連携を図りつつ、WMO などの国際機関、または EANET などの政府間の枠組みを通じて、または現地共同研究機関との相互信頼関係の醸成を通じて、データの取得に努める。

以上を実現するためには、長期観測ネットワークの拡大のために必要な機器等の整備・運用、専門家会合・ワークショップや、標準化のための比較実験の実施のための予算確保が不可欠であり、さらには、これらに対応できる人材の確保・育成が必要である。特に、国内のみならず国外の観測ネットワークとの協力が不可欠であることから、国際会合参加・人材交流・能力強化のための研修等の予算を十分に確保する必要がある。

（松枝）

¹⁶ <http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/oxidant/index.html>（参照日：2010/02/16）

参考文献 (第2章)

- 青木周司, 1997: 昭和基地および「しらせ」船上における地上オゾン濃度の連続観測, 南極資料, **41**, 231-247.
- 秋元肇, 2006: 大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染, 大気環境学会誌, **41**, A1-A8.
- 環境省, 2009: 「越境大気汚染・酸性雨・長期モニタリング計画」(平成14年3月, 平成21年3月改訂)。
- 4th ACC, 2009: Report of the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) Atmospheric Composition Constellation (ACC) Workshop on Air Quality, 9pp. (<http://www.ceos.org/images/ACC-4Reportfinal.pdf> (参考日: 2010/02/16))
- ADORC, 2008: Data Report 2007, Acid Deposition and Oxidant Research Center.
- Akimoto, H., 2003: Global air quality and pollution, Science, **302**, 1716-1719.
- Barrie, L. A. et al., 1988: Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic troposphere, Nature, **334**, 138-141.
- Bottenheim, Jan. W., Gallant, A. G. Gallant and K. A. Brice, 1986: Measurements of NO_y species and O₃ at 82°N latitude, Geophys. Res. Lett., **13**, 113-116.
- Brenninkmeijer, C. A. M. and the CARIBIC Team, 2007: The CARIBIC aircraft system for detailed, long-term, global-scale measurement of trace gases and aerosol in a changing atmosphere, IGAC Newsletter, **37**, 2-9.
- Browell, E. V. et al., 1983: NASA Multipurpose Airborne DIAL System and Measurements of Ozone and Aerosol Profiles, Appl. Opt., **22**, 522-534.
- Brunner, D. et al., 2001: Nitrogen oxides and ozone in the tropopause region of the Northern Hemisphere: Measurements from commercial aircraft in 1995/1996 and 1997, J. Geophys. Res., **106**, 27673-27699.
- Cammas, J. P. and A. Volz-Thomas, 2007: The MOZAIC program (1994-2007), IGAC Newsletter, **37**, 10-17.
- Clerbaux, C. et al., 2009: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, Atmos. Chem. Phys., **9**, 6041-6054.
- Eremenko, M. et al., 2008: Tropospheric ozone distributions over Europe during the heat wave in July 2007 observed from infrared nadir spectra recorded by IASI, Geophys. Res. Lett., **35**, L18805, doi:10.1029/2008GL034803.
- Fishman, J., V. Ramanathan, P. J. Crutzen and S. C. Liu, 1979: Tropospheric ozone and climate, Nature, **282**, 818-820.
- Fishman, J., and J. C. Larsen, 1987: Distribution of total ozone and stratospheric ozone in the tropics: Implications for the distribution of tropospheric ozone, J. Geophys. Res., **92**, 6627-6634.
- Forster, P. et al., 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., et al., (eds)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 129-234.
- Heimann, M. and M. Reichstein, 2008: Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks, Nature, **451**, 289-292.
- Helmig, D., F. Bocquet, L. Cohen and S. J. Oltmans, 2007a: Ozone uptake to the polar snowpack at Summit, Greenland, Atmospheric Environment, **41**, 5061-5076.
- Helmig, D. et al., 2007b: Elevated ozone in the boundary layer at South Pole, Atmospheric Environment, **42**, doi:10.1016/j.atmosenv. 2006.12.032, 2788-2803.
- Helmig, D. et al., 2007c: A review of surface ozone in the polar regions, Atmospheric Environment, **41**, 5138-5161.
- IGACO: <http://www.igaco-o3.fi/introduction/index.html> (参考日: 2010/02/23)
- IGOS Atmospheric Chemistry Theme Report, 2004: The changing atmosphere, An integrated global atmospheric chemistry observation theme for the IGOS partnership, Report GAW No. 159 (WMO TD No. 1235), 54pp.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., et al., (eds)].

- Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Jones, A. E. et al., 2009 : BrO, blizzards, and drivers of polar tropospheric ozone depletion events, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **9**, 8903–8941.
- Kanaya, Y. et al., 2009 : Rates and regimes of photochemical ozone production over Central East China in June 2006: a box model analysis using comprehensive measurements of ozone precursors, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **9**, 12965–12997.
- Li, J. et al., 2007 : Modeling study of ozone seasonal cycle in lower troposphere over east Asia, *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S25, doi:10.1029/2006JD008209.
- Liu, X., et al., 2006 : First directly-retrieved global distribution of tropospheric column ozone from GOME: Comparison with the GEOS-CHEM model, *J. Geophys. Res.*, **111**, D02308, doi:10.1029/2005JD006564.
- Logan, J. A., 1985 : Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends and anthropogenic influence, *J. Geophys. Res.*, **90**, 10463–10482.
- Machida, T., H. Matsueda and Y. Sawa, 2007 : A new JAL project: CONTRAIL Comprehensive Observation Network for Trace gases by AirLiner, *IGAC Newsletter*, **37**, 23–30.
- Machol, J. L. et al., 2009 : Scanning tropospheric ozone and aerosol lidar with double-gated photomultipliers, *Appl. Opt.*, **48**, 512–524.
- Matsueda, H. et al., 2008 : Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask air sampling of JAL airliner observations, *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 1–17.
- Murayama, S. et al., 1992 : Variations of tropospheric ozone concentration over Syowa Station, Antarctica, *Tellus*, **44B**, 262–272.
- Nakazato, M., T. Nagai, T. Sakai and Y. Hirose, 2007 : Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide, *Appl. Opt.*, **46**, 2269–2279.
- NDACC home page (<http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/> (参考日 : 2010/02/16))
- Ohara, T. et al., 2007 : An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 4419–4444.
- Oltmans, S. J. and W.D. Komhyr, 1986 : Surface ozone distributions and variations from 1973–1984 measurements at the NOAA geophysical monitoring for climate change baseline observatories, *J. Geophys. Res.*, **91**(D4), 5229–5236.
- Oltmans, S. J. and H. Levy II, 1994 : Surface ozone measurements from a global network, *Atmospheric Environment*, **28**, 9–24.
- Oltmans, S. J. et al., 1998 : Trends of ozone in the troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, **25**(2), 139–142.
- Pochanart, P. et al., 2003 : Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/East Asia, *J. Geophys. Res.*, **108**(D1), 4028, doi:10.1029/2001JD001412.
- Richter, A. et al., 2005 : Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, **437**, 129–132.
- Schnell, R. C. et al., 1991 : Decrease of summer tropospheric ozone concentrations in Antarctica, *Nature*, **351**, 726–729.
- Schoeberl, M. R. et al., 2007 : A trajectory-based estimate of the tropospheric ozone column using the residual method, *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S49, doi:10.1029/2007JD008773.
- Simpson, W. R. et al., 2007 : Halogens and their role in polar boundary-layer ozone depletion, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **7**, 4285–4403.
- Sudo K., and H. Akimoto, 2007 : Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *J. Geophys. Res.*, **112**, D12302, doi:10.1029/2006JD007992.
- Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa and H. Akimoto, 2002a : CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, **107**(D17), 4339, doi:10.1029/2001JD001113.
- Sudo, K., M. Takahashi and H. Akimoto, 2002b : CHASER: A global chemical model of the troposphere 2. Model results and evaluation, *J. Geophys. Res.*, **107**(D21), 4586, doi:10.1029/2001JD001114.
- Tanimoto H. et al., 2007 : Direct assessment of international consistency of standards for ground-level

- ozone: Strategy and implementation toward metrological traceability network in Asia, *J. Environ. Monit.*, **9**, 1183–1193.
- Tanimoto, H. et al., 2005: Significant latitudinal gradient in the surface ozone spring maximum over East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L21805, doi:10.1029/2005GL023514.
- Volz, A. and D. Kley, 1988: Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century, *Nature*, **332**, 240–242.
- Volz-Thomas, A. and the IAGOS Team, 2007 : In-service aircraft for global observations – the future, *IGAC Newsletter*, **37**, 18–22.
- Wagner, T. et al., 2007 : Enhanced tropospheric BrO over Antarctic sea ice in mid winter observed by MAX-DOAS on board the research vessel Polarstern, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3129–3142.
- Wessel, S. et al., 1998 : Tropospheric ozone depletion in polar regions – a comparison of observations in the Arctic and Antarctic, *Tellus*, **50B**, 34–50.
- Yu, H. et al., 2009 : Change of NO₂ column density over Beijing from satellite measurement during the Beijing 2008 Olympic Games., *Chinese Sci Bull*, doi:10.1007/s11434-009-0375-0.
- Ziemke, J. R., S. Chandra, and P. K. Bhartia, 1998 : Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: The assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques, *J. Geophys. Res.*, **103**, 22115–22127.

第Ⅲ部 温暖化影響評価に関する観測

第3章 水循環分野

3.1 はじめに

(1) 地球温暖化影響における水循環観測の必要性

地球温暖化による人間社会や生態系への影響のかかなりの部分は水循環の変化に関連して現れる (Kanae, 2009)。代表的なものとしては、大雨や洪水の激化 (Hirabayashi and Kanae, 2009)、干ばつの深刻化や土壌水分の長期的な乾燥化 (Burke *et al.*, 2006)、氷河や万年雪の融解による水資源の変化 (Barnett *et al.*, 2005)、海面上昇に起因する様々な災厄 (Syvitski *et al.*, 2009) などが挙げられる。地球温暖化の影響評価においては、水循環の変化こそが最も重要な対象項目であると言っても過言ではないだろう。そのため、地球温暖化の影響評価のために水循環の観測を継続するとともに高度化することは、単に科学的な側面からの要請にとどまらず、必須の社会的要請に応えることであるといえる。

地球の水循環の全貌は図3-1に示す通りである。これらの中では、例えば、水蒸気が主要な温室効果ガスの1つであり雲が気候予測の不確実性の主要な要因であるなど、大気中の H_2O が果たす役割も無視し得ない。しかしながら、それらのすべてを本章で扱うのは不可能であるし、適切でもない。雲やエアロゾル、雪氷に関してはほかの章で扱う。海面上昇についても、その主要な部分は本章の範囲外とする。本章で扱うのは図3-1の中でも陸上の水循環についてであり、水文学 (hydrology) が通常、対象とするものとする。すなわち、ここでは降水、河川流量、土壌水分、地下水、蒸発などを対象とした。陸上への降水は、この範疇に含めた。



図 3-1 地球上の水文循環量($1,000 \text{ km}^3/\text{year}$)と貯留量($1,000 \text{ km}^3$)。自然の循環と人工的な循環を様々なデータソースから統合した。大きな矢印は陸上と海洋上における年総降水量と年総蒸発散量(km^3/year)を示し、陸上の総降水量や総蒸発散量には小さな矢印で主要な土地利用ごとに示した年降水量や年蒸発散量を含む。()は主要な土地利用の陸上の総面積(100 万 km^2)を示す。河川流出量の約10%と推定されている地下水から海洋への直接流出量は河川流出量に含まれている。Oki and Kanae (2006)より抜粋。

(2) 現状

上記のそれぞれの水循環要素に関する詳細な記述は以降の各節に譲るが、ここでは地球温暖化影響評価に関わる水循環の観測とそのデータ共有における共通の事情や特徴について記しておきたい。

まず、他の地球温暖化に関わる観測とは異なる特徴として、各国の防災や農業、水資源管理などを担当する比較的身近な公的現業機関が、長年にわたり水循環に関わる観測データを収集してきた母体であるということが挙げられる。代表的な水循環要素である河川流量や降水量の観測は、公的現業機関によって実行されていることがほとんどである。それだけ日常と密着した観測要素であるとも言えよう。そのため、ほかの分野の観測と比べ、特に降水量や河川流量に関しては、比較的長期のデータが存在する。一方で、そのような公的機関がデータの収集・管理を行っているがゆえに、データの共有や公開には各国の政府機関等の承認が必要となることが多いが、その承認は必ずしもスムーズに進まない。また、途上国などでは、地方の現場の帳簿に観測データが埋もれたままであることも多い(Yatagai *et al.*, 2009)。温暖化影響評価の精度向上のためには、そのような埋もれたデータを掘り起こさねばならない。このように、水循環の観測データの連携利用においては、研究者間の比較的身軽なネットワークによるデータ収集や交換、データ公開だけでは不十分となりがちであり、国家間の連携を含んだ組織的なネットワークの構成が必須である。また、あまり強調して書くべきではないが、いわゆる研究者的な専門家が継続して観測を行っているわけではないため、クオリティチェックなどの面で問題のあるデータも多い。今後の観測の充実も、いわゆる研究機関だけではなく、現業機関や行政機関にかかっている。そのため、途上国のこれら観測機関を支援することの重要性も忘れてはならない。過去のデータの再クオリティチェックも重要である。

また、大気データなどのように全球分布を比較的滑らかに観測できるものではなく、時空間方向の分布、特に地理的な分布が著しいことにも注意を払うべきである。陸上のそれぞれの場所での観測が重要な役割を果たすところが降水量や河川流量のような基礎的な水循環項目についてであっても、発展途上国などでは観測密度がまばらであったり、観測されていてもデータの保管や流通が不十分であったりしがちである。砂漠や熱帯雨林の中など、そもそも降水量の観測さえ行われていない陸上地域も多い。すなわち、降水量や河川流量のような代表的な水循環データについてでさえ、その精度や存在可能性には大いに問題があると言える。また、土壌水分量や蒸発量など、そもそも観測データの存在が限られている水循環要素もある。そのような水循環要素は、例えば衛星観測や数値モデルなどを応用して間接的に推測せねばならない。つまり図3-1に記載されている各々の数字は、かなりの不確実性や誤差を含んでいる。

時間方向の分布にも問題がある。例えば、災害をもたらすような極値を含んだ短い時間解像度のデータは、なかなか得られない。加えて、近年の水循環の変化には温暖化以外の人間活動の影響が大きいことも忘れてはならない。例えば、ダム建設や取水が河川流量に与えている影響などが典型的な例である。そのため、正確な水循環要素の観測データが存在していたとしても、そこから温暖化シグナルだけを取り出すのは容易ではない。

これらの時空間領域での欠損を補う有力なツールの1つは人工衛星によるリモートセンシング観測である。近年の衛星観測の水循環分野での活躍については、他分野と同様あるいはそれ以上に顕著である。その中での日本の衛星あるいは衛星センサーの果たした役割は大きく、今後の継続、発展も大いに期待される。ただし、長期観測の欠如、定量面での誤差、時空間分解能、使いやすいデータの流通などに関する弱点もある。

このように観測データの利用可能性には限界があるため、地上観測値と数値モデルと衛星観測データとを統合的・融合的に利用することによる準観測値（プロダクト）の生成が強く期待される。この水循環についての準観測値（プロダクト）は、観測密度や質の異なる過去から現在への移行に配慮したシームレスなものであることが望ましい。過去25年の大気の水循環を再現した大気再解析値 JRA25 (Onogi *et al.*, 2007) は、その先行例の1つであるといえよう。陸面の水文量に関しても同様に再解析的なプロダクトを作る試みはいくつか存在した (Hirabayashi *et al.*, 2005; Dirmeyer *et al.*, 2006)。しかし、これらは精度の面においても、時空間解像度の面においても、期間の面においても、不十分であり、温暖化影響評価のための水循環に関わる新たな準観測値（プロダクト）の生成が必須である。

ところで、地球温暖化という枠組みの中では、観測データ、および、それを用いた影響評価のためのモデル（ツール）開発は適応策の検討と切り離せない密接な関係がある。どちらかと言うと理学的な分野においては、観測や影響評価が必ずしも実社会での適応策とは連動していないこともあろう。しかし、洪水や渇水などを含む水循環という分野においては、影響評価と適応策は不可分であり、影響評価のための観測・モデル開発と適応策のための観測・モデル開発とは不可分である。しかし、その連携は、これまでのところ必ずしも順調ではない。

このような中、日本の科学コミュニティは水循環分野の影響評価に関わる観測において、国際的なリーダーシップを発揮してきた。気候変動による水循環の変化を研究する国際研究コミュニティとして最も代表的なものは世界気候研究計画（WCRP）の中の全球エネルギー・水循環観測計画（GEWEX）である。日本はまずアジアをリードする形で GEWEX の地域研究の 1 つとして GEWEX アジアモンスーン実験計画（GAME）を立ち上げ、アジア地域での水循環観測研究を主体的に牽引した（1996～2004 年度）。GAME は、その後継プロジェクトである MAHASRI（Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative）へと引き継がれている。同じく WCRP の下で GEWEX を主体とした形で始まった統合地球水循環強化観測計画（CEOP）も、その開始（2001 年）から日本がリードした（Koike, 2004）。CEOP は少々形を変えつつも現在まで続いている。全球地球観測システム（GEOSS）に関わる水循環の観測についてもアジア水循環イニシアティブ（AWCI）をはじめとして日本は国際的なリーダーシップを発揮している。このように水循環分野の観測は、日本が国際科学コミュニティをリードし続けている稀有な分野である。

ただし、これまでは日本が国際的なリーダーシップを発揮してきたものの、このような日本のリーダーシップの足元は少しばかり脆弱である。個々の地上観測は各国の各現業機関、あるいは各プロジェクトなどに依存せざるを得ないだろうが、長期にわたる均質な観測データの収集・管理、クオリティチェック、検索、配布、グリッド化や数値モデルデータとの同化などを含めた高度化、さらには可視化技術など、何らかの恒常的な機関によって安定したサービスとして提供されるべきであろう。例えば、アメリカではアメリカ航空宇宙局（NASA）やアメリカ海洋大気庁（NOAA）、あるいはアメリカ地質調査所（USGS）などが、そういった役割を担っている。しかし、日本およびアジアには、観測データに関して安定かつ高度なサービスを提供する機関はない。

(3) 課題と展望

ここまで述べてきた課題のうち主たるものを整理すると、

- データの時空間解像度が必ずしも十分ではない。例えば、途上国や山岳域、熱帯林の中などの観測不足地域が多い。また、短時間解像度データを必要とする極値に関する情報も限られている。
- 各国、各機関に眠ったままのデータもあり、長期間の観測値が利用可能なケースは必ずしも多くない。また、統一したフォーマットで容易に利用できるデータが国際的に流通しているわけではない。
- 現時点での観測研究は、温暖化適応策との関連が強いとは言えない。
- これまでの日本の国際的リーダーシップには顕著なものがあるが、今後の継続は必ずしも容易ではない。などとなる。

温暖化影響評価に係わる水循環分野の研究および実務の飛躍的な推進のためには、これらの問題点を順次、乗り越えていかねばならない。

考えられる今後の方向性としては、

- 地上観測と数値モデルと衛星観測データとを統合的・融合的に利用することによる準観測値（プロダクト）の生成。
 - 途上国での観測の支援と途上国の過去のデータのレスキュー・そのアーカイブ。
 - 各国の定常観測データ、衛星データおよび研究プロジェクトベースのデータの統一フォーマットでの流通。世界中の人が容易にアクセスし、データ取得できるシステム。
 - 極端現象と災害に関する情報の整理。適応策へと応用可能な情報・評価モデルの生成。
 - これらを通しての日本の国際的リーダーシップの確保。
- が挙げられる。

これらを実現し、日本が世界において、少なくともアジアにおいてリーダーシップを確固たるものとし、平和な世界の持続発展に貢献するためには、期間限定のプロジェクトに頼るばかりではなく、NASA や NOAA のように研究機関として安定したサービスを提供する水循環観測データ統融合マネジメント機関（仮称）の設立が必要である。もちろん、この機関は本章で扱う限定的な意味での水循環だけではなく雪氷なども扱うのが自然であろう。このような機関の設立なくしては、アメリカ一極集中や米欧二極集中から抜け出せず、さらには近い将来、アジアにおける主導権をも失うであろう。また、その設立は 2009 年 9 月に開催された World Climate Conference 3 の Recommendation に適うものでもある。

（鼎・深見）

3.2 必要とする観測項目とそのデータ共有状況

3.2.1 降水

(1) 必要性

降水量そのものが直接的な水資源の指標や洪水の指標ではないが、広域・長期においてデータが利用可能であるため、数値シミュレーションなどによって降水量から河川流量・土壌水分・蒸発量などを求めることが多い。あるいは単純に、洪水や渇水を表す（河川流量等の代わりの）代替指標として用いられることも多い。比較的容易に入手可能、利用可能であり、長期データも存在することから、水循環の代表的資料の1つとされている。

(2) 現状

① 地点データ

アメリカ NOAA の気候データセンター (NCDC) が世界全体のデータを収集・配付しており、これが一般に利用可能なものとして挙げられる。ただし、収集され配付されているデータの時空間密度や精度について問題がないわけではない。日本国内のものについては、地域気象観測システム (AMeDAS) データを含めた気象庁によるデータが一般に利用可能である。国内において河川管理などの目的のために収集された気象庁以外（国土交通省河川局や地方自治体など）による観測データは、かつては必ずしも流通性や利用可能性が高くなかったが、近年では「水文水質データベース」として Web 上で速報公開されるなど、近年では改善されつつある。諸外国においても各国の気象庁あるいは類する機関がデータを収集しているが、その利用可能性は一律の条件下にはなく、グローバルスケールや国際河川スケールでの水循環解析に十分な環境は整っていない。

② グリッド化データ

グローバルあるいは大陸規模でのグリッド化データとしては、ドイツの全球降水気候センター (GPCC: Global Precipitation Climatology Centre) が作成・配付している。それをもとにアメリカ NASA で衛星などと組み合わせた全球降水気候計画 (GPCP)、類似の手法で NOAA が作成している CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation)、イギリスのイーストアングリア大学による CRU データセット、日本においてプロジェクトベースで作成された APHRODITE (Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation) (Yatagai *et al.*, 2009)、日本の（独）宇宙航空研究開発機構 (JAXA) などが衛星データを中心に作成した GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) (Aonashi *et al.*, 2009) などがある。これらの多くはインターネットでのダウンロードが可能であり、国内外で一般に利用されている。時間解像度は日あるいは月であり、空間解像度は 0.5 度程度であることが多い。衛星観測情報だけから作られたグリッド化データ以外は、上述したような地点データを基礎として作成されたものであるが、この基礎となる地点データの収集具合はプロダクトごとにまちまちであり、時間方向にも空間方向にも一律ではない。地点データをグリッド化する内挿方法も異なり、結果としてこれらの様々なグリッド化降水量データの作り出す水文量は必ずしも一致しない (Kim, 2010)。

日本やアメリカなどの一部の地域では、降雨レーダーによる観測データがグリッド化され、利用に供されていることがある。これらのデータの観測範囲は空間的に限定されているが、時空間解像度は高い。

(3) 課題と展望

長期・広域データの入手可能性、利用可能性についてはほかの水循環要素と比べた場合、それほど悪くはない。それどころか、たぶん一番良好である。それでも、地点データについては広範に流通し利用可能性が高い状態にあるとは言えず、グリッド化データについてはプロジェクト研究ベースのものも多いため、安定的なデータセットの作成と供給の面で問題がある。また、雨量計の時空間密度は河川流量等の陸面水文量の推定精度を左右するが (Oki *et al.*, 1999)、現時点で利用可能なデータでは、河川流域スケールでの水災害・水資源管理のために必要となる時空間密度が必ずしも確保できていないケースが多い。加えて、細かい時間スケール（日や時間）のデータ、特に極値に関する情報は重要だが、入手可能性は低い。山岳地や熱帯林の中などはデータが限られている。降雪の計測はそもそも難しいため、データの信頼性に問題がある。また、水文・水資源への応用のためには降水量、特に降雪量の風速による捕捉損失の補正が必要である (Hirabayashi *et al.*, 2008)。これらの問題を克服するようなデータセンターおよびプロダクトを、日本が中心となって作成するかどうかは判断が分かれるところかもしれないが、少なくともアジア域でのイニシアティブを継続、強化すべきではなかろうか。

衛星からの推測は、精度・頻度・解像度・長期継続性などに問題がある。精度に関しては、固体降水観測、陸上の降雨観測に問題が多い。後者については、特に地形性降雨に起因するような低層で生成される降雨の観測に課題がある。雨域移動情報と組み合わせることでマイクロ波による降雨観測精度を改善する手法が提案されて

いる(白石他, 2009)が、現状ではまだ一部地域での検証にとどまっている。しかし、今後の研究の継続と発展が大いに期待される。海上も計測できる点は大きい。

地上レーダーは、通常の地上観測雨量を時空間方向に補強するものとして期待される。しかし、現在広く使われている単偏波レーダーでは、地上テレメータ雨量によるオンライン補正が定量的精度確保のために必須であり、特に発展途上国における運用において問題が多い。途上国のレーダーデータについては、管理と流通の不備も大きな問題である。これらの打破には、日本が貢献する余地がある。

3.2.2 河川流量

(1) 必要性

洪水・水害・渇水、水資源・水利用への影響評価において最重要な水循環要素である。

(2) 現状

① 地点データ

ドイツの全球流出量データセンター (GRDC: Global Runoff Data Centre) が収集し、配付しているものが、世界全体をカバーするものとしては、ほぼ唯一のものである。日本については国土交通省河川局による観測データが流量年表により公開されている。諸外国においても、それぞれの政府機関がそれぞれデータを蓄積していることが多いが、流通性や公開性は悪い。また、日本では大学や研究機関の水文学・林学に関する演習林等における流出試験地で長期の観測が行われていることが多い。その一部は全国大学演習林協議会水文データベースという形で公開されている。

② グリッド化データ

世界のいくつかの大学や研究機関が、上記の GRDC の観測データと陸面・河川の数値シミュレーション結果とを組み合わせることによって、グリッド化された世界の河川流量データセットを作っている (例えば Dai *et al.*, 2009)。水平解像度は 0.5 度程度であり、時間解像度は月程度である。現時点では、これらのデータは降水量のグリッド化データのように半ば公的なデータとしての扱いを受けておらず、それぞれの大学や研究機関の個別の試みによるプロダクトの域を出ていない。

(3) 課題と展望

温暖化の影響評価のためには、人間社会における水資源・水利用や水関連災害リスクに直結する河川流量データについても長期・広域アーカイブが重要である。しかし通常利用可能な、あるいは流通しているデータは、ごく一部の国・地域のものに偏っている。また、日流量データが得られる地域・時代は限られる。都市河川・山地・地上流域等における Flash Flood への影響評価を考えると時間流量データも必要となるが、先進国も含めて必要な河川の数に比べてさらにデータの利用可能性は小さくなる。また、年間を通じた流量データが存在する場合でも、実際には現地において洪水流量観測が実施されず、低水時の水位流量曲線を外挿している場合があり、データの信頼性が低い場合がある。そもそも長期的な河川流量観測地点は減りつつあるのも問題である。特にモンスーン気候区では、洪水時と低水時の流量比が一般に大きくなるため、洪水流量データの誤差は、短期的な極端現象の分析のみならず、水文年単位での長期的な水収支解析にも決定的な悪影響を及ぼす。このことから、洪水時の流量観測データの確保は喫緊の課題である。

流量がダムや人為取水の影響を受けている点は、データ利用の際の障害となっている。衛星からのデータ取得は研究段階である。

降水に関するデータと同様であるが、河川流量データの収集・高度化・配布などの体制確保における技術的支援について、特にアジアにおいては日本が中核的な役割を果たすことができる。

3.2.3 土壌水分

(1) 必要性

土壌水分量は、蒸発量、ひいては地表面の水・熱収支を支配する重要なパラメーターであり、水循環と気候システムの相互作用が行われる場である。また、世界の大半の農耕地は非灌漑農地であるが、そこでは土壌水分量がそのまま水資源量であり、食料生産の観点からも、干ばつの監視という観点からも、土壌水分の監視は重要である。

(2) 現状

農業関係の業務の一部としての観測は多々あるかもしれないが、一般に流通しているデータセットは多くない。

長期間のデータを含むもので最も代表的なものは、Rutgers 大学が構築している Global Soil Moisture Databank (Robock *et al.*, 2000) である。ここにはアメリカ・イリノイ州や旧共産圏の土壤水分データセットが収納されており、インターネット上でダウンロード可能である¹⁷。

ほかでは、CEOP や FLUXNET のデータベースにも土壤水分情報が収納されている。ただし、それらの多くは観測を始めてから日が浅く、現時点では長期間のデータではないことが多い。

グリッド化されたデータとしては、GEWEX の下で行われた全球土壤水分プロジェクト (GSWP: Global Soil Wetness Project) および GSWP2 (Dirmeyer *et al.*, 2006) のプロダクトが利用可能である。これらは 1 度あるいは 0.5 度の全球陸面水循環モデルの出力であり、いわゆる観測データそのものではない。GSWP や GSWP2 とは空間解像度や対象期間が少々異なる類似のプロダクトも、世界のいくつかの研究機関が作成している。衛星リモートセンシングデータについては他の項目において記述する。

(3) 課題と展望

河川流量と類似の問題点を持つものであるが、時空間的偏りは一層ひどい。観測地点が大幅に増加することも見込まれない。また、データ内容（深さ・体積含水率か飽和度か）などが必ずしも統一されていないことも問題である。我が国では、農業関連研究機関による土壤水分観測が行われているが、これらのデータは、通常、アクセス不可能であり、観測のネットワーク化・データのアーカイブ化が必要である。また、これらの観測は、上記と同様に観測内容もまちまちであり、項目の標準化が必要である。

衛星観測は精度（特に植生下の量）・深さ方向の情報取得・観測頻度・長期継続性などに問題を抱えており、降水の衛星観測と比較した場合まだ発展途上ではあるが、今後の進展に期待が持たれる。衛星観測の検証、モデル計算の検証のために、継続的な地上観測拠点の持続が必要である。また、モデル開発において、土壌の特性パラメーターは重要な情報となるが、我が国においては、一部を除いてはデータの流通が進んでいない。ネットワーク化・データベース化によって、広域的な土壌特性パラメーターの分布を明らかにしておくことは、水循環モデルの開発において、必要なタスクである。

3.2.4 積雪

(1) 必要性

積雪量は、特に温暖化によって大きな影響を受けると考えられる。すなわち、降水量総量として仮に影響がなかったとしても、気温上昇の影響が直接加わるためである。積雪は特に半乾燥～乾燥地域を流れる河川の涵養源、すなわち水資源として非常に重要である。また、融雪期においてしばしば融雪洪水の原因ともなる。これらへの温暖化影響評価を行ううえでも、重要である。

(2) 現状

詳細については、第 4 章で述べる。

(3) 課題と展望

河川上流域・山岳域に多く存在する積雪の観測データは、特に発展途上国においては極めて限定されている。また、積雪深データはあっても、密度と組み合わせた相当水量としてのデータはさらに少なく、水循環・水資源評価のネックとなる。このため、河川流域全体での積雪水量評価は、融雪期のトータルでの水収支評価を通して間接的に行われることが多い。地上観測データのみでは難しく、衛星画像による積雪面積などの情報を活用した推定が必要となる。やはり、詳細については、第 4 章で述べる。

3.2.5 地下水

(1) 必要性

現在、全世界人口の 3 分の 1 以上が地下水に依存しており、特に発展途上国において地下水依存度は高い。人口増加と気候変動による水資源の不安定化の中で、地下水は誰でも安価に利用できる水資源として過剰に利用されることが懸念される。しかし、地下水循環の時定数（滞留期間）は極めて長く、一旦過剰に消耗すればそれを涵養することは容易ではない。そのため、地下水資源の評価・観測を行うことは、現在および将来の社会にとって緊急の課題である。例えば、メガデルタや島嶼における塩水の浸入も大きな問題であるが情報は限られている。世界の地下水の動向と、それによる食料生産の動向が日本に影響を与えられ、観測が必要

¹⁷ http://climate.envsci.rutgers.edu/soil_moisture/ (参照日：2010/02/16)

である理由の1つである。

(2) 現状

グローバルな地下水資源評価のプロジェクト・データベースには、IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Center)、WHYMAP (World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme)、GRAPHIC (Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change) などがある。

(3) 課題と展望

上記のデータベース等はそれぞれ国際組織化されているが、組織化して5年程度のもが多く、これからの成果が期待される段階である。水文関連の国際組織の各国代表者は地表水関係者が多く、国単位での情報収集に限界があるのが現状である。

今後は、全球地下水貯留変動量の評価、土壌水分量と地下水量の分離、水質評価、気候変動の影響評価などを進めていくべきであろう。地下水涵養モデルを用いて気候変動の影響評価を行なった例は、まだ数少なく(例えばDoll, 2009)、今後の発展が期待される。モデル開発面からのリクエストとしては、土壌水と地下水の分離の検証、河川流出モデルと地下水流動モデルのリンクの必要性が挙げられる。新技術としては、2002年に打ち上げられた衛星GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)の活用が期待されている。GRACEは近年のインドの過剰な地下水揚水を検出することにも成功しつつある(Rodell *et al.*, 2009)。

国内外の連携促進により得られる効果としては、グローバルマッピングによるホットスポットの特定、共同測定・評価技術の共有が挙げられる。関係機関に対する要望はモニタリングの継続性である。地下水位などのモニタリングの継続による長期データは、今後の科学技術の発展と社会の持続性にとって、欠くことのできない項目であり、万難を排して継続が途切れないよう要望したい。これらの観測モニタリングをネットワーク化し、アジア・世界のモニタリングネットワークの拠点となることで、日本が地下水研究のイニシアティブを取ることが可能となる。

3.2.6 蒸発・蒸発散

(1) 必要性

降水量から蒸発量を引いた残りが、地下水涵養や河川流出となる。水資源量の正確な把握にとって、蒸発量の観測は降水量とともに重要なタスクである。また、農耕地における蒸発量は、食料生産に伴う水資源の利用量であり、特に乾燥・半乾燥地域における水資源の効率利用において、重要なモニタリングの対象である。また、降水量から蒸発量を引いた量が、水循環モデルや地下水モデルの入力となるため、経験的な水資源予測モデルにおいても、蒸発量は重要な入力情報である。

(2) 現状

陸面からの蒸発量の地上観測データをアーカイブを行っているものとして、以下のようなプロジェクトがある。

- CEOP¹⁸
- FLUXNET¹⁹
- AsiaFlux²⁰

また、モデル出力のアーカイブとしては、以下のようなものがある。

- LDAS (GLDAS, NLDAS)²¹

ヨーロッパ中期気象予報センター (ECMWF) やアメリカ環境予測センター (NCEP) などの再解析データには、大気大循環モデル (GCM) の陸面モデルによって計算された蒸発量が含まれているが、非現実な値を含んでおり、利用には注意が必要である。

(3) 課題と展望

蒸発量は水蒸気の移動であり、水循環の中で観測が難しいコンポーネントの1つである。歴史的には、気象データなどを用いた半経験式や、熱収支や水収支などから間接的に推定していたのが実情である。直接的でかつ

¹⁸ <http://www.ceop.net> (参照日: 2010/02/16)

¹⁹ <http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/index.cfm> (参照日: 2010/02/16)

²⁰ <http://www.asiaflux.net> (参照日: 2010/02/16)

²¹ <http://ldas.gsfc.nasa.gov/> (参照日: 2010/02/16)

信頼度の高い蒸発量観測が行われるようになったのは、1990年代の半ば頃からであり、その歴史はいまだに浅く、今日においてもその観測は、業務上の定常観測は非常に限られており、大学や研究機関による研究観測が主である。

これらの研究観測は、短期間のプロジェクト予算によるものが多く、継続性に問題がある。温暖化の水循環影響を把握するには、今後の長期的視点に立った観測の継続が必要である。また、FLUXNET (AsiaFlux) や日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER) などの二酸化炭素観測、生態観測においても蒸発量観測が行われているが、これまで横の連携が少なく、これらのデータを水循環観測として活かしてきていない。また、各研究機関が実施する蒸発量観測のネットワーク化とともに、これらの他プロジェクトとの連携が重要である。

また、蒸発量は土地利用・被覆や植生などに強く依存することから、地上観測値は広域代表性に乏しく、流域や広域スケールの蒸発量推定は、モデルによる推定に頼らざるを得ない。モデルによる推定の際には衛星データとの結合が重要である。一方で、蒸発を衛星から直接計測することは不可能で、何らかの仮定を挟んだ推測となる。すなわち、モデルと衛星の組合せにより広域の推測が可能となる。河川流域スケールもしくはそれより大きな空間スケールでの蒸発散量評価においては、今後の主流になり得る手法と期待され、今後の検証の進展が期待される。このためにも、長期的な定常観測が必要である。

3.2.7 水の安定同位体

(1) 必要性

水の安定同位体とは、水分子を構成する原子のうち1つが重酸素 (^{18}O : ^{16}O に対して0.2%存在) もしくは重水素 (D: 同じく H に対して0.015%存在) で置き換わった水分子のことを指す。それらの「重い水」は、水の相変化の際に気相よりも液相に、液相よりも固相により濃縮される性質を持ち、水の循環中の相変化の履歴がその濃度 (同位体比) に反映される。従って、水の同位体比を観測することによって、その水が経てきた相変化と循環過程の逆推定が可能となる。これらの原理から、雲中の微物理過程から地球規模大循環までの幅広い時空間スケールの水循環過程を解明する手立てとなり得る。

また、有史以前の気候復元には様々な物質の同位体比が利用されるが、水の安定同位体が大きく影響していることが多い (例えば、アイスコアの同位体比、樹木セルロースの同位体比、サンゴや鍾乳石中の炭酸化合物の同位体比など)。そのような気候復元の精度を高めるためにも、現在の水循環と同位体循環を詳細に知る必要がある。

(2) 現状

観測データを収集・管理するネットワークとして、以下のようなものがある。

○ GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation)

1960年代からの世界600地点の降水同位体比の観測ネットワーク。国際原子力機関 (IAEA) /世界気象機関 (WMO) によって管理・運営されている。

○ GNIR (Global Network of Isotopes in River)

河川水の同位体比の観測ネットワーク。IAEA/WMOによって管理・運営されている。

○ MIBA (Moisture Isotopes in the Biosphere and Atmosphere)

水蒸気や土壌水、植生内水などの同位体比の観測ネットワーク。IAEA/WMOによって管理・運営されている。

その他、技術開発的な面については3.4.6 (2) を参照のこと。

(3) 課題と展望

急速に発展中の技術、研究手段であり、今後の発展の方向性については3.4.6の中で述べる。

(浅沼・谷口・芳村・深見・鼎)

3.3 衛星観測

3.3.1 衛星観測の必要性

水は人間生活に不可欠であると同時に、台風や洪水などの風水害を通じて我々に直接影響を与える存在でもある。加えて、固体・液体・気体の相変化に伴い熱やエネルギーを運搬し、地球全体のバランスを保つ役割を果たしていることから、その循環メカニズムの理解や長期変動把握は、気候変動の理解と人間生活への影響を知るうえで重要となっている。特に、水循環の中でも重要な要素の1つである「降水」は人間社会に大きな影響を与えており、例えば、過小な降水は、ダム貯水量や食料生産の減少だけでなく、長く続けば干ばつとなって生態系の変化を招き砂漠化を進行させ、逆に豪雨や台風などによる過度の降水は、河川流量の増加によって洪水が引き

起こされるだけでなく土砂災害に結び付くことも多々あり、我々の社会生活に大きな被害をもたらす。さらに、気候変動モデルによる予測では、温暖化に伴い、水循環が加速し、降水分布の変化や集中化をもたらすなどの影響が考えられている。

このように、温暖化の影響を評価するためには降水をはじめとする水循環の観測が重要であるが、水循環は時間的にも空間的にも変動性が大きいので、地上観測点のみでは全球の状況が十分には把握できない。広い範囲を均質に観測可能な衛星観測は、全球的な水循環観測を実現するための唯一有効な手段であり、また、観測されたデータは気象・気候・災害・生態系農業など様々な分野における基礎情報となることから、衛星観測の活用が特に期待されている。

3.3.2 現状

マイクロ波放射計は、観測対象が自然に放射する電波の強度を1~100GHz程度の周波数範囲で測定し、対象物の状態を推定するための観測機器である。マイクロ波放射計は水の観測に適しており、関連する様々な状態量を推定することが可能である。人工衛星搭載マイクロ波放射計による地球観測は1970年代から開始され、現在ではアメリカ軍事気象衛星プログラム(DMSP)搭載のSSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)や熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載マイクロ波観測装置(TMI:TRMM Microwave Imager)の観測データが広く利用されている。また、我が国でも1987年に海洋観測衛星(MOS-1: Marine Observation Satellite-1)にマイクロ波放射計(MSR)を搭載して以来、地球観測プラットフォーム技術衛星「みどりII」(ADEOS-II)搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR)、ならびにアメリカAqua衛星搭載の改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)の開発・運用を行ってきた。AMSRはADEOS-II衛星本体の運用異常で1年足らずで観測を終えたものの、2002年5月に打上げられたAqua AMSR-Eは設計寿命の3年を超えて今なお観測を継続し、そのデータは幅広く利用されている。

マイクロ波放射計による降水推定、特に陸上での降水推定は当初は精度が十分ではなかったと考えられていたが、アルゴリズムの改良研究が精力的に行われた結果、現在では大きく改善してきている。この精度向上において大きな役割を果たしたのが我が国が開発した世界初の衛星搭載降雨レーダー(PR: Precipitation Radar)を搭載したTRMMである。PRによる降雨測定の原理は、レーダーから発射した電波が雨滴によって散乱され、その一部がレーダー方向に戻る(後方散乱)を利用するものであり、散乱波のエコー強度(受信電力強度)と降雨強度との間に成立する関係を用いて降雨量が推定される。また、電波を出してから降雨エコーが返ってくるまでの時間の遅れを利用して高度別の降雨強度が測定できる点が大きな特徴である。観測幅は狭いが、水平分解能が約5kmでマイクロ波放射計に比べて良く、距離分解能は直下方向で約250mと降雨鉛直構造の把握に十分で、分解能が非常に良い。また、能動型センサーであるため背景にほとんど影響されず、海上・陸上を問わず同じようにデータが取得できる点が、マイクロ波放射計のような受動型センサーと比較した場合の利点である。TRMMは1997年に打上げられて以来10年以上にわたり観測を続けており、降水システムを解析する等の雨の気候学的な研究のみならず、数値天気予報や洪水災害の予測等の分野においても衛星データの実利用化が進んでいる。

衛星観測の登場までは、全球的な降雨分布を海陸の偏りなく作成することは困難であったが、衛星による降水観測が進むにつれ、複数の衛星搭載センサーによる降水観測データを利用した全球降水マップが作成されるようになった。我が国においてもGSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)プロジェクトにおいて、TRMM・Aqua AMSR-E・DMSP SSM/I等の衛星観測データを総合的に利用して、全球の高精度高分解能全球降水マップを作成するためのアルゴリズム開発が進められた。この成果を活用して、JAXAでは「世界の雨分布速報」として、緯度・経度0.1度格子の高空間分解能の世界の雨分布を、準リアルタイム(観測から約4時間遅れ)で、1時間ごとに作成・公開している(図3-2)。

以上で述べたように、衛星観測データが10~20年規模で蓄積され、水循環メカニズムの理解や気候変動監視への適用、洪水災害の予測等の温暖化影響評価の分野での利用が進んでいるが、長期の地球環境変動を理解するためには、今後もこれらの観測を長期にわたって継続する必要がある。特に、Aqua AMSR-E・TRMMとも当初の設計寿命を大幅に超えて運用されていることを考えると、早急に後継の衛星による観測を開始する必要がある。

3.3.3 課題と展望

現在、我が国では水循環に関する観測を長期的かつ継続的に遂行していくための計画として、2つの衛星計画が進められている。その1つがJAXAの地球環境変動観測ミッション(GCOM)であり、もう1つが日本とアメリカを中心に国際的な協力の下に進められている全球降水観測(GPM)計画である。GCOMは、地球規模での気候変

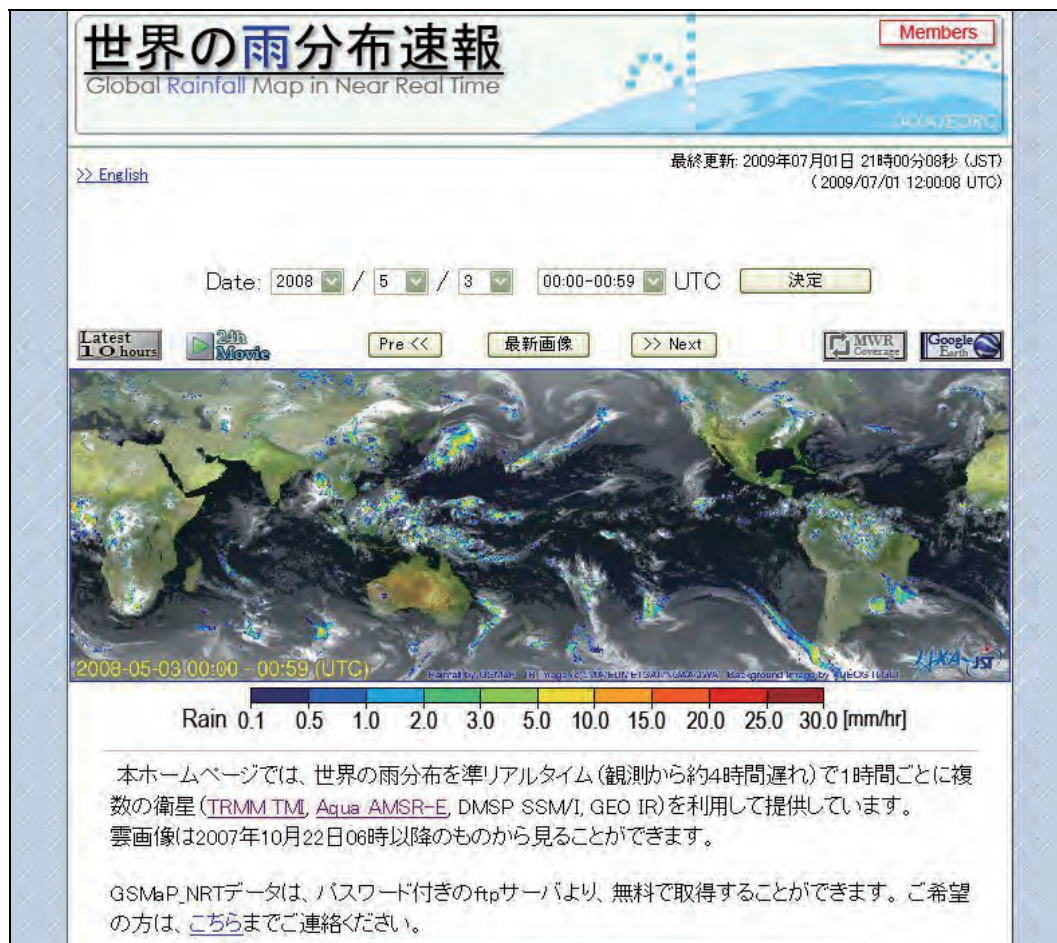


図3-2 世界の雨分布速報 (http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm)。

動・水循環メカニズムを解明するため、水循環変動観測衛星 (GCOM-W) および気候変動観測衛星 (GCOM-C) という2機の衛星を複数世代打上げ・運用することで、全球規模で長期間 (10~15 年程度) の継続観測を目指すミッションである。GCOM-W は、GCOM の目的である気候変動の監視・理解の中で、極域を含む全球規模での水・エネルギー循環に関わる観測に主な目的を置く。具体的には、地球温暖化の兆候がいち早く、最も顕著に現れるとされる海氷・氷床・積雪などの雪氷圏変動、エルニーニョに代表される大気・海洋相互作用に伴う海面水温・降水量・水蒸気量などの変動観測を行うほか、海上風や土壌水分などの観測を行う。GCOM-W の初号機である GCOM-W1 は2011 年度の打上げを目指しており、ADEOS-II/AMSR および Aqua/AMSR-E の後継センサーである高性能マイクロ波放射計2 (AMSR2) を搭載する。AMSR2 は、AMSR-E の観測継続を最優先として主要な機能・性能は AMSR-E を踏襲しつつ、空間分解能向上のため展開型アンテナを2.0m 口径に大型化すること、信頼性の高い輝度温度算出のため較正システムを改善すること、人工電波干渉低減のため7.3GHz 帯チャンネルを追加するなど、重要な改善を施している。

GPM 計画は、TRMM の成果を引き継ぎつつ、その拡大・拡張ミッションとして計画されたもので、TRMM では熱帯に限られていた観測範囲を高緯度まで広げ、より高精度・高頻度な降水の観測を目指している。また、TRMM は衛星1機による観測であったが、GPM 計画は2周波降水レーダー (DPR: Dual-frequency Precipitation Radar) とマイクロ波放射計を搭載した主衛星と、国内外の機関が開発するマイクロ波放射計またはマイクロ波サウンダを搭載した複数機のコンステレーション衛星 (副衛星群) からなる観測計画であり、JAXA と NASA が中心となり国際協力により実現している。日本が開発を担当する DPR は、TRMM に搭載された降雨レーダーの後継である Ku バンド (13.6GHz) のレーダーに、より高感度な観測を実現するための Ka バンド (35.55GHz) のレーダーを追加し、2つの周波数により降水を観測するセンサーである。高感度化を目的とした Ka バンドレーダーは、Ku バンドレーダーでは測れない弱い雨や雪の検出に有効であり、強い雨の検出が可能な Ku バンドレーダーと同時に観測することによって、熱帯の強い雨から高緯度の弱い降雪までの降水量を高精度で観測することができるように

なる。これらの情報を用いて主衛星および副衛星群に搭載されるマイクロ波放射計およびマイクロ波サウンダからの推定降水量の精度を向上させることにより、高精度・高頻度な全球降水観測が可能になり、前述の全球降水マップも GPM 時代にはより高い精度で提供されることが期待される。また、GPM 計画によって提供される精度の高い降水量データは、気候変動や水循環変動の解明などの研究分野への貢献だけでなく、洪水予測・数値天気予報精度向上・台風予測精度向上等の実利用および現業利用、風水害防災への利用等が期待されている。

これら衛星観測をより確実なものにするためには、我が国による観測のみではなく、国際的な協力が必要である。GPM 計画は当然この国際協力を実現する計画であるが、GCOM-W についてもアメリカの次世代気象衛星システムである NPOESS と適切な補完関係となるよう観測軌道（降交点通過地方太陽時）を選択することにより、国際的な観測協調体制を構築している。

(戸田)

3.4 観測手法・技術の開発

水循環の観測においては、新技術に頼ることだけが重要というわけではなく、定常観測の維持や拡大、連携の充実こそが重要である水循環の観測要素も多い。そのため、この節では必ずしも 3.2 で述べた水循環の全観測項目を網羅せず、新たな観測手法・技術の開発に関係する内容だけを記述する。また、新技術の芽はどこから現れるか常に予測不能であり、すべての将来技術を網羅できない点も了解いただきたい。

3.4.1 衛星による降水観測に関わる技術開発

(1) 必要性

衛星による降水観測の必要性については、3.2.1(1)および3.3.1を参照のこと。

(2) 現状

上述の通り、衛星による降水観測技術は、TRMM の成功を受けて、近年大きな進歩を遂げた。従来、衛星による降水観測には、マイクロ波放射計や静止気象衛星の雲画像などが使われていたが、いずれも鉛直分解能を持たず降水強度の推定精度は十分とは言えなかった。TRMM に搭載された PR により、鉛直構造の観測が可能となり、陸上でも海上とほぼ同精度で降水強度の推定を行えるようになった。PR 自体のサンプリングは数日に 1 回程度と少ないが、サンプリングの多いマイクロ波放射計・雲画像による観測に、PR の観測から得られる情報を組み合わせることで、高精度かつ高解像度の衛星降水マップを全球スケールで作成することが可能となった。例えば、日本の研究チームが開発した GSMap (Global Satellite Mapping of Precipitation) (Okamoto *et al.*, 2005) は、1 時間・0.1 度の分解能を持っており、観測から約 4 時間以内に降水マップが作成され GSMap_nRT と呼ばれる準リアルタイム版を含め JAXA のウェブサイトで公開されている²²。定量性の高いマイクロ波放射計由来の衛星観測雨量として、世界最高レベルの時空間分解能を有する本プロダクトへの注目度は高く、日本の(社)国際建設技術協会が事務局を務める国際洪水ネットワーク(IFNet: International Flood Network)が首唱し、WMO 水文委員会においてその推進が決議された GFAS (Global Flood Alert System) 構想においては、降水観測が貧弱な発展途上国においても洪水リスクに備えることができるように、衛星雨量を活用した大雨警報情報(GFAS - Rainfall)や洪水予警報システム構築手法(GFAS - Streamflow)が提案され、洪水災害低減への貢献が期待されている(Sugiura *et al.*, 2009)。

(3) 課題と展望

このように、衛星降水観測技術は大きく進歩し、期待も高まっているが、温暖化研究への直接的な貢献はいまだ十分とは言えない。気候変動に関する政府間パネル第 4 次評価報告書(IPCC-AR4)において、TRMM に関する記述はわずかであり、衛星降水マップについても 1 世代前の GPCP や CMAP が引用されているのみである。衛星降水マップの多くは 2000 年以降を対象としており、現時点では長くても 10 年程度の蓄積しかないため、これだけを用いて温暖化について議論することはもちろん困難である。

上記の事項を鑑み、衛星降水マップを過去と将来に対して延長する努力が求められる。過去については、精度は低下するが、SSM/I シリーズが運用を開始した 1987 年まではさかのぼることができるであろう。一方、将来も降水マップを引き続き作成するために、今後 5 年以内に予定されている TRMM の後継ミッションである GPM 主衛星と AMSR2 を搭載する GCOM-W の打ち上げと運用を確実に行うこと、さらにそれに続く降水観測ミッション

²² http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMap/index_j.htm (参照日: 2010/02/16)

の計画を遅滞なく進めることが求められる。これらに関わる新アルゴリズム開発も求められている。

日本の GSMaP と似た目的を持つ衛星降水マップは、アメリカなどの複数の研究機関で作成されており、その多くは GSMaP nRT と同様に準実時間の処理と公開を行っている。また、PEHRPP (Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products) (Turk *et al.*, 2008) というプロジェクトにおいて、衛星降水マップの相互比較が行われており、各国の地上観測データによる準実時間の検証結果をウェブ²³から見る事ができる。上述の IFNet による GFAS-Rainfall の Web サイト²⁴も、発展途上国を中心とした河川・水資源管理者といったエンドユーザーへのわかりやすい衛星情報提供の試みの1つである。こうした試みは、データの信頼性を高めるために、またデータの流通の観点から見ても重要であり、今後も引き続き行われるべきである。

今後、衛星降水マップを引き続き着実に作成していくことで、温暖化による降水の変化を監視する重要な役割を担うことが期待される。特に、衛星降水マップの高い時間分解能を活かして、温暖化による強い雨の強度・頻度変化を調べる事が期待される。これまで、降水マップを検証する際には、平均降水量に着目することが多かったが、今後は強い雨に特化した検証も重視するべきである。これは温暖化研究のみならず、衛星降水マップの水災害監視への応用推進などのためにも必要である。

温暖化により降雪の量と降水に占める比率がどう変化するか興味深い問題である。降雪は降雨に比べて推定精度が低いため、多くの衛星降水マップは高緯度帯を対象としておらず、GSMaP においても地表面が低温で降雪が予想される場合は対象外としている。GPM 主衛星は緯度 70 度までをカバーし、搭載される DPR は Ka 帯を用いることで降雪についても高精度な推定を行えると考えられている。衛星降雪マップとしての役割にも大いに期待し、推進すべきである。

3.4.2 衛星による陸域水循環量観測に関わる技術開発

(1) 必要性

降水量以外の、土壌水分・積雪などの水循環項の面的な分布についても、今後の衛星観測の発展にかかる期待は大きい。これら各水循環項目の観測の必要性については 3.2 を参照のこと。

(2) 現状

マイクロ波放射計の AMSR および AMSR-E からは、地面表層の土壌水分量 (例えば Kuria *et al.*, 2007) や積雪深についてアルゴリズムが開発され、ほぼ全球をカバーするプロダクトが作成されている。植生の多い場所では推定精度が低下する、また、特定の地域でしか検証されていないなど精度向上の余地はあるものの、JAXA のデータセンター等においてプロダクトが公開されており (図 3-3)、様々な用途に利用されている。

温暖化による影響を受ける陸面水文量のうち最も関心の高いのは河川流量かもしれないが、河川流量を衛星観測から直接推定することは依然困難である。

衛星データから蒸発量 (蒸発散量) を推測する研究も、これまで数々行われてきており、さらに発展しようとしている分野である。蒸発は直接観測できる水循環要素ではない。そのため、土地被覆や気温・湿度・放射などを衛星から計測し、それらと何らかの陸面蒸発推定モデルとを組み合わせることによって蒸発が推定される。例えば、土地被覆は中分解能分光放射計 (MODIS) によって計測し、気温や湿度を大気赤外サウンダ (AIRS: Atmospheric Infrared Sounder) によって計測するという手法が実行されている (Fisher *et al.*, 2008)。また、JAXA は直達ならびに散乱光合成有効放射量 (direct PAR・indirect PAR) を MODIS データから推定する試みに成功しており、これは蒸発の推定に役立つであろう。

(3) 課題と展望

表層の土壌水分量や積雪深については、温暖化の影響を検出するためには絶対値の精度にこだわるよりも、継続的に長期のデータを得ることで変動を検出できるようにすることが重要であるとも言える。地道な研究分野ではあるが、今後運用予定の GCOM 搭載の AMSR2 などについても、引き続き土壌水分・積雪などに関するプロダクトが作成されることを期待したい。植生の影響を緩和するためには、より低い周波数を使うことが有利であるが、ほとんどのマイクロ波放射計は、大気観測などを含む多目的センサーであるため、一番低くても約 6GHz (C バンド) の周波数を用いていた。しかし、ヨーロッパから近く打ち上げ予定の SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) は土壌水分を観測の主対象として、約 1GHz (L バンド) の周波数を用いる。今後、日本でも陸域観測

²³ <http://www.radar.aero.osakafu-u.ac.jp/~gsmmap/IPWG/index.html> (参照日: 2010/02/16)

²⁴ <http://gfas.internationalfloodnetwork.org/gfas-web/> (参照日: 2010/02/16)

に特化したマイクロ波放射計を導入することが期待される。また、継続が重要であると記したわけではあるが、精度の向上、そのためのアルゴリズム開発や検証の進展も忘れてはならない。

河川流量については、重力場の変動から陸水貯留量の変動を推定できる GRACE をデータ同化手法に用いて、河川流量の推定精度を向上させる研究 (Kim *et al.*, 2009) や、NASA が打ち上げを企画している SWOT (Surface Water Ocean Topography) によって河川水面高さを計測し流量へと変換する試みも始まっている。日本に大河川がないせいか、これらについての試みは日本では盛んではないが、世界の水循環・水利用が仮想水を通じてもつながっていることを考えると、日本でも何らかの推進をすべき研究分野である。

蒸発量の推定に関わる技術開発についても、一層の日本からの貢献が期待される。

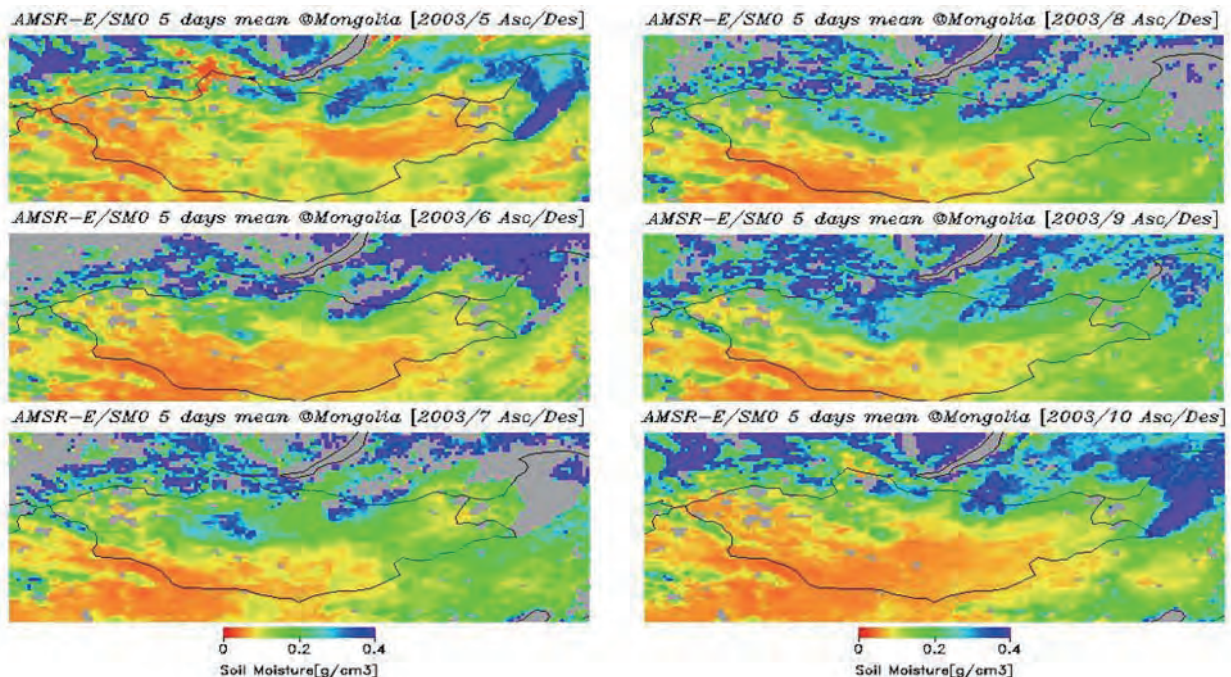


図 3-3 JAXA から公開されている AMSR/AMSR-E 土壌水分プロダクトの例
(<http://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/topics/2004/tp040324.html>)。

3.4.3 地上降水レーダーを用いた降雨観測の高精度化

(1) 必要性

先進国・発展途上国を問わず都市へ人口と資産が集中する傾向は増大し、一方で親水型のレジャーが普及してきていることもあり、局地型集中豪雨の被害が増加している。局地型集中豪雨では、総雨量や被害を受ける面積は大きくはないものの、警報や避難に対する時間を与えない短時間の豪雨によってもたらされるために人的被害や被害額が大きくなる傾向にある。国土交通省河川局と気象庁が開発してきた従来型のレーダーネットワークでは、局地型集中豪雨に対して十分ではないことから、最先端レーダーによる降雨観測の機能向上が求められている。

(2) 現状

従来型のレーダーでは以下の点を克服する必要がある。

- 定量性の確保
レーダーによって得られるデータは降雨強度とユニバーサルな 1 対 1 関係を持つものではないため、レーダー情報から確実に降雨情報を算出する手法を開発する必要がある。
- 解像度と減衰のトレードオフ
局地型豪雨を捉えるためにレーダーの解像度を上げることは周波数を高くすることを意味する。それは、同時に電波減衰が増大することを意味する。電波減衰の影響を受けない観測手法を開発する必要がある。
- 上空の降水粒子判別方法の開発
降水粒子は上空の 0°C 層より上では固体粒子になっており、それが霰状であるか、雪状であるかなどの種類の違いによって地上にもたらす雨の性状が異なると考えられる。従って局地型豪雨の予測のためには上

空の降水粒子の種別判別にレーダーが用いられる必要がある。

(3) 課題と展望

従来型レーダーで研究開発が必要であるとされる項目はマルチパラメーター（偏波）レーダーによって達成可能であると考えられている（Brangi and Chandrasekar, 2005）。マルチパラメーターレーダーを用いた研究のうち、特に波長が短いX帯を用いた研究では日本は一步進んでいる（Maki *et al.*, 2005）と言える。この特性を活用するためには、以下のような研究開発が必要である。

レーダーによる降雨観測の定量性の確保と降水粒子判別方法の開発については *in situ* な実験（中北他, 2009）が必須であり、地上降雨観測・地上雨滴観測・上空雨滴観測などを含めた種々の観測手法による同期観測実験が求められている。特にビデオゾンデ（Takahashi, 1995）やドロップビデオゾンデを用いた上空雨滴観測が期待されるが、陸上定点型観測では観測期間に対して取得できるデータに限界があり、船舶や航空機を用いて海上で降水をねらい打ち（鈴木・重藤, 2008）するような観測が効果的である。

偏波パラメーターを用いて得られる高解像度の降雨強度や降水物理特性は、電波の散乱に伴う位相特性を電波工学的に解明することが求められる。その理論構築のためには地球観測における電波工学の専門家層を増強させる必要がある。

3.4.4 設置型流速計を用いた現地での連続的な河川流量観測データ収集

(1) 必要性

河川流量データは、水関連災害、水資源・水利用をはじめ、水循環と人間社会との関わりを考えるうえで最も重要な要素と考えることができる。また、ある地点で精度よく図ることができる、その1点のデータでそれより上流側の河川流域全体の水循環を代表する指標と捉えることのできる点は、例えば広域での面的分布の観測が必ずしも容易ではない降水量と大きく異なる特長である。このことから、世界各国の河川・水資源管理機関では、主要河川の重要地点（洪水や水資源管理の基準点など）において必須の観測項目である。しかしながら、その1点において高精度を確保することは決して容易ではない。従来技術（可搬型流速計等を用いた流速断面積法）では、低水から高水に至るまで大きく変動する流量規模に一貫して対処できる観測手法がなかったためである。この点は、特に洪水と渇水の流量規模の比が大きくなるモンスーン地帯の河川において典型的に現れる。

(2) 現状

モンスーン地帯や融雪洪水が発生する急峻な山地河川等では、ヨーロッパ等の穏やかな気候区にある大陸河川と異なり、洪水時と低水時の流量規模が大きく異なる。このため、低水流量観測で従来から用いられてきた可搬型流速計による流速断面積法をそのまま用いることが困難であり、流況の激しい高水専用の観測手法を別途検討する必要がある。日本では、浮子流下速度を計測する流速断面積法（浮子測法）が近代化以降長年にわたり伝統的に用いられてきた。センサー技術が低かった時代から洪水のデータを長期にわたって確実に収集・蓄積するのに貢献し、大きな役割を果たしてきた。しかし、大きなマンパワーを必要とすることから、最近では、観測体制の迅速な構築が困難で洪水立ち上がりの観測に間に合わない、観測に危険が伴う場合があるなどの問題が一部で見られ、日本でも精度管理が今後難しくなることも予想される。また、日本以外のアジアモンスーン地帯でも、浮子測法を活用しなければならぬ状況は本来は多いと想定されるにも関わらず、この浮子測法を採用する体制確保が困難であるため、結局、洪水観測を適切に行うことができていない状況が見受けられる。このため、国内外において、より安全・確実に安定した精度で洪水流量観測を行うことのできる手法の開発が喫緊の課題となりつつある。

また、従来の流量観測手法は、ある時刻（時間帯）における流量を把握するための手法であり、時々刻々の連続的な流量観測データを得る手法としては、水理学的に等流状態を仮定することで適用可能な水位流量曲線法により、間接的に求める手法が用いられてきた。しかし、潮汐の影響を受ける河川下流部や、本川との合流の影響を受ける支川上流側等では、下流水位境界条件の変化の影響を受けるため一般に水位流量曲線法を用いることが困難となる。また、特に河床勾配の緩い河川では、洪水波による非定常効果が無視できず、洪水ピーク付近の流量評価の誤差の原因になることがある。

(3) 課題と展望

従来法よりもはるかに短時間で効率的な流量観測法として、超音波ドップラー流向流速計（ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler）をボート等に搭載することで河川断面内の3次元流速分布を効率的に収集する手法が提案され、欧米を中心に普及しつつある。流況が洪水時でも比較的緩やかな大陸スケールの緩河川ではアジア

域でも普及しつつあるが、急激な増水を伴う洪水（Flash Flood）が発生するような中小規模の河川では、人がボートに乗ってセンサーを直接操作することが困難であるため、普及が進んでいない。そこで、無人のラジコンボートを活用する方法（木下，1998）や、橋桁から係留したボートを活用する方法（Yorozuya *et al.*，2008）が提案され、より厳しい流況条件（フルード数やレイノルズ数が大きい水力条件）への観測範囲の拡大の試みが進みつつある。

また、ある時刻の個別の流量観測作業を効率化・安定精度化を図る手法だけではなく、ADCP と同様の原理のセンサーを水平方向に川岸付近に取り付けることで、河川断面の流速場を計測しようという、設置型の超音波流速計（H-ADCP: Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler）なども海外の都市河川などで実用化の例がある。我が国では、特に広幅河川での洪水観測に課題が残っているが、観測範囲外の流速分布を水力モデルによって補完するシステムが提案され（二瓶・木水，2007）、今後の濁度や気泡条件が厳しい洪水流況条件下での観測実績の拡大が望まれる。

さらに、流水に直接接触することなく、水面上に設置した非接触型のセンサー（電波ドップラーセンサー・超音波ドップラーセンサー・水面の波紋を追跡する画像センサー等）により河川表面の流速分布を連続的にモニタリングし、断面平均流速に変換するための適切な係数を乗じることで河川断面全体の流量を得ようとする非接触型流速計のシステムも近年注目されている（深見他，2008）。安全確実に無人で自動計測が可能であり、洪水到達時間の短い河川や、重要観測所におけるバックアップシステムとして、今後有効に活用されるべき、と考えられる。断面変化の激しい河川での適切な精度確保・メンテナンス体制の確立が大きな課題である。

これらの設置型の流速計は、従来、連続流量観測データを得るほとんど唯一の選択肢であった水位流量曲線法によって変わるポテンシャルも秘めている。初期設置コストが大きいことも課題であり、今後の広範な普及とコストの低下に期待したい。

なお、これらの設置型流速計を発展途上国に適用するにあたっては、精度管理を含めた維持管理に投入できる人的・予算的資源を十分に考慮したうえで、導入の是非を検討する必要があるだろう。低コストでいかなる流況においても着実に洪水流量観測データを確保していく観点からは、浮子測法をまず適用して洪水観測体制を早急に整備し、データの確保・蓄積を開始していく選択肢が、現時点ではより現実的とも言える。短期的な課題としての流量データ収集体制の確保と、長期的な課題としての高度化手法の開発の両面を、バランス良く推進していく必要がある。

3.4.5 GPS を用いた全球規模の気温・水蒸気プロファイルの取得

(1) 必要性

地球規模の水循環に関連する要素のうち、気温や水蒸気量などは最も基本的な物理量であるにもかかわらず、全球規模の情報は限られている。特にその鉛直プロファイル情報の源はラジオゾンデ観測に限定されてきた。ラジオゾンデ観測は1回に数百メートル程度の消耗品費を必要とする高価な観測手法であるため、低緯度や南半球での観測情報は極めて限られている。

(2) 現状

全球測位システム（GPS）、特にGPS掩蔽法（Wicker *et al.*，2001 など）は全球規模での詳細な気温・水蒸気プロファイル取得のための有力なツールである。GPS 掩蔽法は複数のGPS 衛星からの電波を低軌道（LEO）衛星で受信する方法や、標高が高い地点からGPS 電波を発射して標高の低い位置で受信するダウンルッキング掩蔽観測がある。ともに電波の位相情報などから気温・水蒸気プロファイルを取得する方法（Tsuda and Hocke，2004）であるが、実用にはまだ研究開発が必要である。

その項目を以下に示す。

- 観測機器そのものの開発
特にダウンルッキング掩蔽観測では、観測機器の開発が必要である。
- 同化手法の開発
大規模な気象関連災害の予測のためには取得されるデータを全球モデルや局地モデルに同化する必要がある。
- 同化による予測結果向上効果に関する研究

(3) 課題と展望

LEO 衛星（EQUARS: Equatorial Atmosphere Research Satellite・COSMIC: Constellation Observing System

for Meteorology Ionosphere & Climate) を用いた掩蔽観測を行うことによって、熱帯域を中心とした水蒸気・温度プロファイルの計測が可能になる。その結果を全球モデルへ同化することによって、水蒸気プロファイルの広域推定値の精度向上が可能になると考えられる。そのため、適切なデータ同化手法の開発は肝要である。

定期路線航空機からのダウンルッキング掩蔽観測による稠密な水蒸気情報の収集が可能になれば、対流圏の水蒸気プロファイル情報を入手することができるようになる。その情報を適切な形でデータ同化できれば、これまでにない詳細かつ精度の高い観測情報が得られることになり、短時間気象予測精度も向上すると言える。

3.4.6 安定同位体を用いた水循環観測に関わる研究開発

(1) 必要性

3.2.7(1)を参照のこと。

(2) 現状

従来は実験室設置型の質量分析計を用いていたため水の採取が必要であったが、新たな分光分析技術を用いた測器の開発により、水蒸気同位体比が非採取で測定可能になってきた。そのため、近年では特に水蒸気同位体比について爆発的に観測データが増えている。また最近では、NASA の Aura 衛星に搭載された対流圏放射スペクトル計 (TES: Troposphere Emission Spectrometer) と、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の ENVISAT 衛星に搭載された SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) から水蒸気同位体比 (dD) が観測されている (それぞれ Worden *et al.*, 2007; Frankenberg *et al.*, 2009)。TES では遠赤外の放射強度をリトリブするため対流圏中層が観測されるが、SCIAMACHY では短波赤外の反射強度をリトリブするため大気下層を観測できることが特徴である。

並行して、同位体を組み込んだ大気大循環モデル・領域気候モデルの開発も急ピッチで進んでおり、増加した観測データとの比較により対流降水過程における雨滴からの再蒸発過程の評価 (Worden *et al.*, 2007; Yoshimura *et al.*, 2009) やモンスーン・ハドレー循環による中高層水蒸気輸送の評価 (Schneider *et al.*, 2009) など、これまであまり注目されてこなかった過程に対して新たな発見が起きつつある。

これらのリモートセンシングデータと数値シミュレーションとを組み合わせ、数値モデルの水循環過程の改善および気候変動に関するメカニズムの解明につなげていくことが期待される。

このような状況下において、以下のような国際連携が進行している。

まず、SWING (Stable Water isotope modeling Intercomparison Group) による、同位体を組み込んだ大気大循環モデルの相互比較研究プロジェクトが進行中である。2008 年から第 2 フェーズになり、10 の同位体大気大循環モデルが参加して、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を用いたデータ同化や、統計情報を用いた空間内挿手法を利用することによって、マルチモデルシミュレーション結果と観測データを「融合」した、四次元同位体データを作り出すことを目的の 1 つとしている。そのほか、ICCS (Isotope Cross Cut Study: CEOP の各研究コンポーネントを同位体という面から横断的につなぐ枠組み) や BASIN (Biogeosphere - Atmosphere Stable Isotope Network: 生物生態系研究の同位体観測研究ネットワーク)、iPILPS (Isotopes in Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes: 同位体を組み込んだ陸面モデルの相互比較研究プロジェクト) などが進行中 (一部休止中) である。

このような国内外の連携を進めることの利点は大きい。各国における同位体コミュニティは小さいが、その分世界的な協働体制はすでに比較的築かれている。衛星や設置型の分光分析の専門家は、必ずしも同位体に関する専門的知識を持っておらず、双方にとってのメリットになる。

(3) 課題と展望

特に観測と数値シミュレーションとの連携が重要であるが、そのためには衛星リトリバルの適切な補正、精度向上が強く望まれる。そのためには質量分析装置と分光分析装置の両方を用いた地上観測と連携した精密な校正が必要である。この観点から、すでにある地上観測拠点を横断的につなぐ ICCS のような枠組みに期待している。また、北カリフォルニアでの高頻度降水同位体比観測に示されたような (Coplen *et al.*, 2008)、一般的な集中気象観測とともに行う同位体比の観測は、モデルの改良に非常に有用であり、その推進が期待される。

ここまで主に大気中の水循環に対する同位体の利用について記述してきたが、地中の水循環の解明のためにも同位体は数多く利用されてきた (例えば Brooks *et al.*, 2010)。これまでは温暖化影響評価との関連での利用例は少ないものの、今後の発展が大いに期待される。

(瀬戸・大石・芳村・深見・鼎)

3.5 国際観測計画の推進

3.5.1 必要性および現状

地球水循環に関する研究を推進するうえでは国際観測計画の推進が欠かせない。国際的なフレームワークでは、陸域の水・エネルギー循環を取り扱うのが WCRP 傘下の GEWEX である。アジア域では日本がリーダーシップをとり、GAME が 2005 年まで実施された。これと時期を重ね、より統合された地球観測を目指し、当初は集中観測期間を示していた CEOP が、東京大学小池俊雄教授の強いリーダーシップの下で運営された。CEOP は GEWEX 組織再編の中で性格が変わり、大陸スケールでの観測計画も取りまとめる役割を担うこととなった。これらを踏まえ、ここでは主としてアジアに焦点を置いて記述を進める。

アジアモンスーンは、大気・海洋相互作用の影響も強く受けることから、気候・海洋研究の国際フレームワークである気候変動性・予測可能性研究計画 (CLIVAR) でも重要性が増しており、CLIVAR/AAMP (Asian-Australian Monsoon Panel) として活動している。言い換えればモンスーンアジア地域の水循環研究は大気・海洋、大気・陸面の両側面から見ても国際的に最重要課題であり、国際的な枠組みで研究を推進しなくてはならないことを示している。

翻って我が国では GAME 終了後、後継プログラムとして MAHASRI (松本, 2009) が立ち上がり、戦略的創造研究推進事業 (CREST) 水循環領域による研究推進 (RAISE : The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia [モンゴル、筑波大学 (Sugita *et al.*, 2007)]、LAPS : Lower Atmosphere and Precipitation Study [中国、名古屋大学]、熱帯雨林 [タイ・インドネシア、東京大学]、北方林 [シベリア、名古屋大学] 等)、および GEOSS に対応するための 地球観測構築推進プラン (JEPP : Japan Earth Observation System Promotion Program, [Tibet、京都大学]、[SE Asia、東京大学]、[Thailand、東京大学 (小森他, 2007)]、[HARIMAU (Hydrometeorological Array for ISV-Monsoon Automonitoring、JAMSTEC (Yamanaka *et al.*, 2008))] による国際観測研究が推進されたが、これらの多くは競争的研究資金をベースとしており、3~5 年間程度の研究期間で終了している。

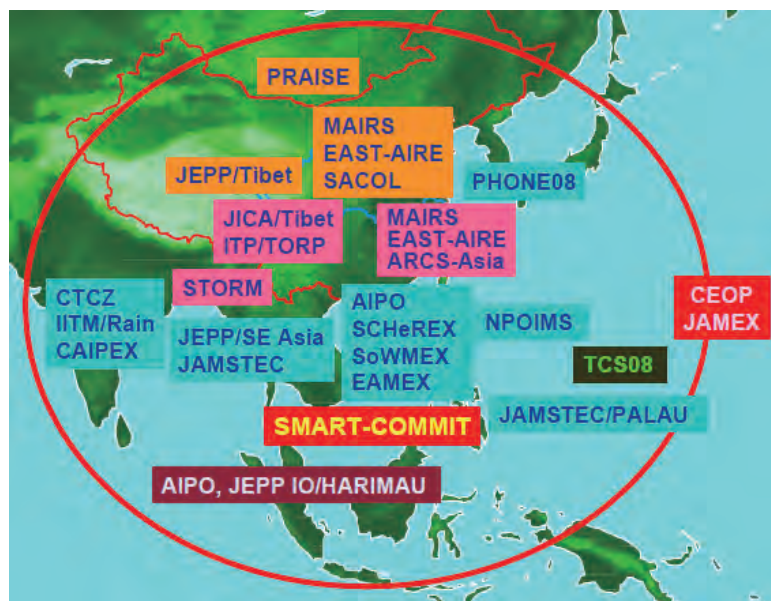


図 3-4 AMY に参画する各国プロジェクト (<http://www.wcrp-amy.org>)。

一方、アジア各国の経済成長は著しく、地球温暖化に関連する観測プロジェクトが多く立ち上がっている。これらを緩やかに束ねる形で各国の観測結果を有機的に結びつけようとするものが アジアモンスーン観測年 (AMY: Asian Monsoon Year) (図 3-4) であり、国際事務局は中国の大気物理研究所にある。前述した GAME でも集中観測 (GAME-IOP) を実施したが、GAME 時とは状況が大きく異なり、各国の資金で実施するプロジェクトを調整する場が AMY である。研究機関が主導して進められていることから、関係各国の現業機関との連携がやや弱く、データ流通 (データポリシーの明文化) については、現段階でも議論を行っている段階となっている。競

争的研究費をベースとする我が国の AMY への貢献は、共同議長役を務め、国内で現在進行形のプロジェクト参加による貢献、CEOP・データ統合・解析システム(DIAS)で構築したデータ統合システムの活用、再解析の実行、モデル共同研究への参画およびGAMEのノウハウ、これまで培ってきた関係各国機関との人的交流網の活用、など多岐にわたる。

他方で、アジアにおける広域かつ急速な経済発展によるアジアモンスーンへの影響も懸念されており、国際的には地球システム科学パートナーシップ(ESSP: Earth System Science Partnership)の下でMAIRS(Monsoon Asia Integrated Regional Study)が行われている。MAIRSも中国の大気物理学研究所に国際事務局がおかれて主導しているが、日本も副議長・科学委員を出しており、MAHASRIとMAIRSはアジアモンスーンへの人間活動の影響解明という点で、協調的に研究を推進している。GEOSSの一環としての地域活動として位置づけられるAWCIの枠組みの下でも、地球観測データを洪水や渇水の管理、気候変動への適応策を含めた統合的な水資源管理に役立てるための国際的な研究活動と地球観測データの共有を推進している。その中で、日本は各種分野のWGやアドバイザーに最も多くの人材を提供し、我が国での高度な知識・技術や経験を途上国に伝えるための人材育成の面でも大きな役割を果たしてきており、今後の共同での調査・研究成果の発展が期待される。

3.5.2 課題と展望(データ流通および国際的な観測のあり方についての今後の方向性)

これまでの経緯説明から、我が国ではアメリカ並みの競争的研究費偏重傾向が見られる。アメリカの場合は、競争的研究経費とほぼ同額か、それ以上の定常経費があり、現業機関による観測態勢はそれによってなされている。各国の社会保障に直結する観測計画、科学目的に特化した計画等、水循環に関わる国際観測研究には階層性があり、それぞれの階層に合わせ、柔軟に対応できる体制が望まれる。

まず、科学的目的に特化した観測研究は、これまで同様、競争的資金によるプロジェクト研究による推進が妥当であろう。ただし、プロジェクトが終了した後の計測機の有効活用については、実施機関を超えた利用枠組みを設けることが国の有効利用の観点から必要である。さらに、大学共同利用機関、旧国立研究機関が継続している国際観測サイトはスーパーサイト化し、スーパーサイトを中心に有機的な連携、共同研究が継続される仕組みを設けることにより、観測の長期継続をより容易に実施できることが必要である。その際に、今後より重要度を増す衛星観測の検証サイトとして国内外から認証される枠組みを持つことにより、データ流通・公開が促進されるであろう。CEOPの観測サイト(reference site)はこうした側面ももっており、CEOPをパイロットケースと位置づけることで、多様な観測がより有機的なつながりを持つことが可能になろう。気候は絶え間なく変化しており、それに伴う変化を長期的にモニタリングすること自体が、貴重な科学的知見を与えることを十分に認識しておく必要がある。

一方、社会貢献、関係各国の利益ともなり得る観測計画である水循環研究の場合には、社会的要請も高いことから、データのリアルタイム転送およびモニタリングが必須である(小森他, 2007)。これはタイの小流域で具現化しており、この後継観測も(独)科学技術振興機構(JST)/(独)国際協力機構(JICA)で実施予定である。国際的な観測は、対象国にも有益であるべきで、データ収集・公開とリアルタイム性は同程度の重要性を持つ。少なくとも、高層ゾンデデータや地上気圧・降水量・気温などの基礎的な気象要素のデータは、リアルタイムにGTSによって各国現業機関に転送される計画が、今後は望ましい。陸上の水文要素のデータ共有については、さらにハードルが高いであろうが、最大限の努力が望まれる。CEOPやAWCI、アジア・太平洋水フォーラムなどが、そのきっかけとなることが望まれる。

国際観測計画が有効性を最大限に発揮するのは、各国で観測したデータを束ね、同化により均質なデータセット(再解析データ)が提供できることにある。GAME時には集中観測データを収集し、気象研究所・気象庁がGAME再解析データを提供し、その後のJRA-25の技術ベースともなっている。MAHASRIでも気象研究所はAMY再解析を計画しており、データ収集および品質チェックは喫急の課題である。これらの一連の作業で収集され品質管理された観測データは、GAME時にはCD-ROMで公開(あるいはCD-ROMイメージファイルをインターネット公開)しており、これらの公開もアジアの水循環研究の発展に寄与している。しかし、これらの観測プロジェクトや観測計画で得られるデータを緩やかに束ねる機構(1センター・研究所にデータセンター機能を持たせることは現実的ではない)・枠組みが欠落しており、そのようなものを設置することが最優先検討事項である。アメリカでは国際観測計画が実施されると同時に分散型活動記録センター(DAAC: Distributed Active Archive Center)が設立され、データ公開が有機的に実施される。我が国ではこれまでデータ公開は各機関の努力(特に一部の研究者)により支えられていたのが現状である。研究に特化したデータ統合の試みはCEOP・DIASで実施

されているが、いまだ十分であるとは言い難い。AMY でのデータポリシーと併せ、機関を連携した機構の実質的な設立・稼働が求められる。さらに、各プロジェクト終了後の取得データの半永久的な公開・活用方策についても前述した機構を中心に検討されるべきではなかろうか。

ここまで、我が国がリーダーシップを発揮して率先して取り組むべき研究・観測活動を中心に列記してきたが、しかし、それらの活動が地球温暖化の緩和や被害軽減への適応策の実現に真に結びつくためには、世界全体での共通の目的意識の下での取組みが鍵になることは言うまでもない。そのことは発展途上国も例外ではないが、実際には、温暖化モニタリングや影響評価・適応策検討の基礎となる観測データの重要性や、それぞれの自然・社会条件に適した観測・モデリングならびに解析技術についての知識・能力や経験が、十分でないことが多いのが実態である。世界中のローカルな地域も含めて温暖化のモニタリング・影響評価や適応策検討を進めていくためにも、途上国自らそれらの観測・評価・検討を行う技術を持つための人材育成を行うことが重要である。我が国は特にアジア域を中心としてこの分野で重要な役割を果たすべきであろう。もちろん、国内においても、そのような人材が数の上で豊富ということはない。地球温暖化という新しく発生した広域的な問題に対して国内の組織構成が対応しておらず、一部の専門家に過大な負担がかかっている。大学院教育の充実や上述の水循環観測データ統融合マネジメント機関（仮称）などを通して、国内の人材育成も一層促進すべきである。

（樋口・深見）

3.6 モデル開発の視点から見た観測ニーズ

地上での水循環は、基本的に河川流域において様々な過程が連関し合いながら生起していることから、水文過程間の関連性を考慮に入れながら定量的に変化を捉える観点、および、人間社会との関係（水資源や水災害としての評価）で捉える観点の両者から、河川流域スケールで考えるのが適切であろう。特に、水資源・水災害への影響評価の観点からは、河川流量への影響評価を捉えることが重要となる。このことから、水資源・水災害評価の観点から特に重要な地点における河川流量データについて、温暖化の影響を直接捉えるための長期的な継続モニタリングの重要性は言うまでもない。さらにモンスーン地域のデルタ地帯等で頻発する洪水氾濫は、水災害の観点のみならず水循環評価の観点からも大きな unknown 要素となっており、洪水氾濫のボリュームの評価を含む実態把握とその動向の継続モニタリングが重要と言える。

さらに、上述のように水資源・水災害の観点からは、人間社会としての関係性を分析することが必要不可欠であり、それらの人間社会指標を河川流域において定量化するために必要な地理情報システム (GIS) データ（人口、土地利用、経済活動・資産、インフラ等）の整備と更新も重要である。

以上の議論をベースに、以下、河川流量・降水量・洪水氾濫、および人間社会指標に関する影響評価について、さらに考察を行う。また、それらの評価に共通で必要となるモデル（ツール）開発そのものの必要性についても議論を行う。

(1) 河川流量

温暖化時における河川流量への影響評価は、降水量や蒸発散量への影響評価をベースにして、流域水循環解析（降雨流出解析）から評価する必要がある。この場合、蒸発散量は流域水循環解析モデル（物理的分布定数型モデルが必要）の内部で評価することが可能であることから、降水量の影響評価が最も重要となる。さらに、分布定数型モデルを構築・検証するために、河川流量の観測データが必要である。低水から高水に至るまで安定した精度で流量を評価できるように、様々な水位に対応した流量観測データの確保を基盤とした水位流量曲線の作成・更新が重要となる。特に洪水時の流量観測データの重要性は強調しておく必要がある。一方、モデル構築に必要な GIS データ（地形標高・土地利用・土壤物理特性値等）の確保・モニタリングも必要である。

河川流量を通じて水資源を評価する観点からは、水利用に関するデータ（灌漑用水・都市用水・工業用水等）や、土地利用のデータ、特に灌漑地データや耕作データが重要である。灌漑水路網・ポンプの分布についての情報、作付けや灌漑のタイミングについての情報も農業のための水資源を評価するうえで必要である。しかし、現時点で入手可能なデータは限られており、世界レベルでのこれらのデータ整備が必要とされている。

(2) 降水量

降水量については、将来予測値としては GCM 計算値をベースとして評価することになるが、現時点では粗すぎる空間スケールとバイアスの存在から、GCM 計算結果をそのまま流域水循環解析モデルに与えることはできない。何らかのダウンスケール技術もしくはバイアス補正技術によって、GCM 計算値を流域スケールでの将来降水量分布に適切に変換する手法をあらかじめ準備しておくことが必要である。

その際、そこで用いるダウンスケール技術もしくはバイアス補正技術の有効性を検証するためにも、流域スケールでの最も確からしい降水量分布観測値を得ることが必要不可欠である。残念ながら、特に発展途上国域を中心として、一般に地上雨量観測の密度が、流域スケールの降水量分布を定量的に推定するために十分なレベルにない。このため、衛星や地上レーダーデータとの組み合わせによる評価が現時点で最も現実的かつ有効と期待され、そのための観測体制の維持・強化が望まれる。

しかしながら、現状では、衛星やレーダー観測値は、地上観測値を内挿補間するための補完的データと理解すべきであり、衛星からの降雨観測の重要性が認知されつつある現在・将来においても、地上観測体制の維持管理と発展は極めて重要である。気象・河川・水資源管理機関の継続的努力が求められる。しかし、発展途上国の多くではリアルタイムデータ伝送が可能なテレメータシステムは普及しておらず、電話やメール等による通報によるデータ収集が一般的であり、Flash Flood 予測において重要となる数時間単位といった短時間豪雨の変化を迅速に把握することが難しい。また、そもそも現業機関における雨量計設置密度が特に途上国において低い。このことから、繰り返しになるが、衛星もしくはレーダー観測による補完が極めて重要であることも併せて強調しなければならない。衛星雨量データは、静止気象衛星画像による雨域移動ベクトル情報等と組み合わせることで、現在、観測の時空間密度の低さを埋め合わせる方法がとられているが、本来は、衛星観測の密度そのものを高める必要がある。河川流域スケールで必要とされる、5~10km 以下の空間分解能、Flash Flood 解析を可能とするためにも1時間程度の時間分解能を可能とする衛星観測の頻度が必要である。そして、その定量性を高めるために地上雨量データとの補正合成処理を行うことになる。

(3) 洪水氾濫

温暖化時における洪水氾濫への影響評価については、その前提条件として流量への影響評価が必要であり、流量想定のための課題についてはすでに述べた通りである。さらに、将来のインフラ整備・土地利用変化等の影響を考慮できる洪水氾濫シミュレーションモデルが、洪水氾濫の将来予測のために必要となる。そのために、河川流量を水位に変換するために必要な河道水理データ（河道断面・粗度係数等）や、氾濫解析に耐える高精度の数値標高データが必要不可欠であり、土地利用や氾濫を制約する堤防や道路等の盛土構造物を含むインフラ等のGISデータの整備も重要である。発展途上国では、これらの情報入手が困難であることが多く、衛星リモートセンシング情報の活用が必要である。SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) データや陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) のパンクロマチック立体視センサ (PRISM: Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) データ等はそのために重要な役割を担うべきであり、今後の検証とプロダクト公開を期待したい。

(4) 人間社会指標

河道を含むインフラや水利用・土地利用・人口・社会資産等に関するGISデータが、水循環変化が人間社会に与える影響を評価するうえで必要であることは、これまでも触れてきた通りである。国レベルでこれらのデータ整備を進めることはもちろんのこと、さらに、それらのデータを河川流域スケールでの水循環・水資源・水災害解析に使うための分布データとして整備することも重要である。その意味で、国・自治体レベルでの調査データを、衛星リモートセンシングデータや社会動態モデルと組み合わせることで、時空間的に補間・分布させる手法の確立が必要であり、今後の研究の進展に期待したい。

(5) 水循環・水資源・水災害影響評価のためのモデル（ツール）開発の必要性

人間社会との関わりから水循環への影響評価を考えるうえで、気候変化が水関連災害に直結するハザードへの影響を評価することのできる流域水循環モデルの必要性は、これまで再三強調してきたとおりである。また、特に洪水氾濫・水災害への影響評価という意味で、洪水氾濫モデルも必要である。また、人間社会指標に係る分布データと組み合わせた洪水・渇水等の水関連災害リスクを評価するためのモデルも併せて重要である。

影響を世界的に比較評価する観点からは、これらの影響評価のためのモデル（ツール）は世界共通であることが望ましい。実際には、それらの評価手法・モデリングツールとして世界的に評価の固まったものがあるわけではない。従って、今後もしばらくは、複数の研究機関等による提案・研究が並行して切磋琢磨しつつ、発展途上国も含めて評価に使えるツールの研究開発を進めていく必要がある。

なお、水循環や水災害のハザードの評価に関連するモデリングツールについては、現場実務分野への普及も進みつつあるという意味で、水災害全体でのリスクや人間社会への影響を評価するモデルの開発よりも先行している。例えば、降雨流出関係をベースに水災害ハザードを評価するモデリングツールとして、水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM: International Centre for Water Hazard and Risk Management)が開発したIFAS (Integrated Flood Analysis System) と呼ばれる総合洪水解析システム(図3-5)がある(Sugiura *et al.*, 2009)。

全球で入手可能な衛星雨量データやGIS データを入力・解析するツールを内部に実装し、Web サイトから Ver. 1²⁵ の無料配布を行うなど、特に、発展途上国が自ら洪水解析を実行できるようにすることに焦点を当てて開発されており、GFAS - Streamflow イニシアティブを実現するツールとして普及活動にはWMOの支援も得ている。また、河川水理解析ツールとして、(財)北海道河川防災研究センターと北海道大学が共同開発を進めている iRIC-Nays があり、2次元・3次元の流れ解析を支援するグラフィカルなユーザーインターフェースを備えたモデリングツールとして同様に無料配布が行われている²⁶。これらのツールは、先進的な衛星・GIS 情報や水理水文解析技術を、現場の実務技術者にも使いやすくして広く普及させようとする試みであり、我が国の先進的な技術を世界に普及させ貢献するためのプラットフォームとしても注目される。ただし、高度な水理水文解析モデルそのものについては、国内外においてさらに多くの研究開発事例があるため、それらの資産の有効活用も課題である。このことから国内外において、それらの成果を効率的に取り込むための「モデリング共通基盤」の提案が行われている。EU が推進する OpenMI (Open Modelling Interface and Environment)²⁷や国土交通省等が推進する CommonMP²⁸ といった例がある。

これらの途上国を含めた現地での管理・評価に役立つツール・共通基盤の開発・普及をさらに進めるとともに、温暖化が水関連災害等のリスクを通じて人間社会に与える影響を総合的に評価するための総合的なモデル(ツール) 開発において、日本が十分な役割を發揮し貢献することは、途上国を含む世界規模での気候変化の影響評価・適応策シナリオ作成において我が国がリーダーシップを發揮するうえで、重要な要件の1つと考える。(深見・鼎)



図 3-5 人工衛星観測雨量情報と総合洪水解析システム (IFAS) を基盤とした発展途上国における洪水予警報体制整備促進の概念図。

²⁵ <http://www.icharm.pwri.go.jp/research/ifas/index.html> (参照日：2010/02/16)

²⁶ <http://www.i-ric.org/nays/ja/index.html> (参照日：2010/02/16)

²⁷ <http://www.openmi.org/reloaded/> (参照日：2010/02/16)

²⁸ <http://framework.nilim.go.jp/index.html> (参照日：2010/02/16)

参考文献 (第3章)

- 宇宙航空研究開発機構 : <http://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/topics/2004/tp040324.html> (参考日 : 2010/02/23)
- 宇宙航空研究開発機構 : http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm (参考日 : 2010/02/23)
- 木下良作, 1998 : 河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案、水文・水資源学会誌, **11**, 460-471.
- 小森大輔他, 2007 : 全球地球観測システム(GEOSS) 採択研究「地球観測による水管理の先導的実現」に基づくタイ国 Mae Wang 流域におけるリアルタイム水文気象観測データモニタリングシステムの展開, 水文・水資源学会誌, **20**, 235-241.
- 白石芳樹, 深見和彦, 猪股広典, 2009 : 雨域移動情報を活用した衛星降雨データ補正方法の提案—吉野川流域の事例解析—, 水工学論文集, **53**, 385-390.
- 鈴木賢士・重藤峻介, 2008 : ビデオゾンデで観測された霰粒子の雲物理学的特徴、気象学会九州支部講演会予稿集
- 中北英一他, 2009 : 偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測および降水粒子タイプ判別、土木学会水工学論文集, **53**, 361-366.
- 二瓶泰雄・木水啓, 2007 : H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集B, **64**(4), 295-310.
- 深見和彦他, 2008 : ドップラー式非接触型流速計(電波・超音波)を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証—浮子測法との比較—, 河川技術論文集, **14**, 307-312.
- 松本淳, 2009 : アジアモンスーン気候の解明に向けて - 国際共同研究 MAHASRI -, 日本地球惑星科学連合ニュースレター, **5** (1), 14-16.
- Aonashi, K. et al., 2009 : GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation, J. Meteor. Soc. Japan, **87A**, 119-136.
- Barnett, T. P. et al., 2005 : Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, Nature, **438**, 303-309.
- Bringi, V. N. and V. Chandrasekar, 2005 : Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications, Cambridge University Press, 664pp.
- Brooks, J. R. et al., 2010 : Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate, Nature Geoscience, **3**, 100-104.
- Burke, E. J. et al. 2006 : Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model, J. Hydrometeorology, **7**, 1113-1125.
- Coplen, T. B. et al., 2008 : Extreme changes in stable hydrogen isotope and precipitation characteristics in a landfalling Pacific storm, Geophys. Res. Lett., **35** L211808, doi:10.1029/2008GL035481.
- Dai, A. et al., 2009 : Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004, J. Climate, **22**, 2773-2792.
- Dirmeyer, P. A. et al., 2006 : GSWP-2: Multimodel analysis and implications for our perception of the Land Surface, Bulletin of American Meteorological Society, **87**, 1381-1397.
- Döll, P., 2009 : Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment, Environ. Res. Lett., **4**, 036006 (12pp). doi:10.1088/1748-9326/4/3/035006.
- Fisher, J. B., K. P. Tu and D. D. Baldocchi, 2008 : Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites, Remote Sensing of Environment, **112**, 901-919.
- Frankenberg, C. et al., 2009 : Dynamic processes governing the isotopic composition of water vapor as observed from space and ground, Science, **325**, 1372-1377.
- Hirabayashi, Y., S. Kanae, I. Struthers and T. Oki, 2005 : A 100-year (1901-2000) Global retrospective estimation of terrestrial water cycle, J. Geophys. Res., **110**, D1910110, doi 10.1029/2004JD005492.
- Hirabayashi, Y. and S. Kanae, 2009 : First estimate of the future global population at risk of flooding, Hydro. Res. Lett., **3**, 6-9.
- Hirabayashi, Y. et al., 2008 : A 59-year (1948-2006) global meteorological forcing data set for land surface models. Part II: Global snowfall estimation, Hydro. Res. Lett., **2**, 65-69.

- ICHARM : http://www.icharm.pwri.go.jp/research/research_topic_3_j.html#paper (参考日 : 2010/02/23)
- Kanae, S., 2009 : Global warming and the water crisis, *J. Health Science*, **55**, 860–864.
- Kim, H., 2010 : Role of Rivers in the Spatiotemporal Variations of Terrestrial Hydrological Circulation, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo.
- Kim, H., P. J. F. Yeh, T. Oki, and S. Kanae, 2009 : Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17402, doi:10.1029/2009GL039006.
- Koike, T., 2004 : The coordinated enhanced observing period, an initial step for integrated global water cycle observation, *WMO Bulletin*, **53**, No.2, 2–8.
- Kuria, D. N. et al., 2007 : Field-supported verification and improvement of a passive microwave surface emission model for rough, bare, and wet soil surfaces by incorporating shadowing effects, *IEEE Tran. Geoscience and Remote Sensing*, **45**, 1207–1216.
- Maki, M., S. G. Park, and V. N. Bringi, 2005 : Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3cm wavelength polarimetric radar, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **83**, 871–983.
- Okamoto, K. et al., 2005 : The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project, 25th IGARSS Proceedings, 3414–3416.
- Oki, T. and S. Kanae, 2006 : Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, **313**, 1068–1072.
- Oki, T., T. Nishimura, and P. Dirmeyer, 1999 : Assessment of annual runoff from land surface models using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP), *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 235–255.
- Onogi, K. et al., 2007 : The JRA-25 reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Robock, A. et al., 2000 : The Global Soil Moisture Data Bank. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **81**, 1281–1299.
- Rodell, M., I. Velicogna and J. S. Famiglietti, 2009 : Satellite-based estimates of groundwater depletion in India, *Nature*, **460**, 999–1002.
- Schneider, M., K. Yoshimura, F. Hase and T. Blumenstock, 2009 : Validating tropospheric water vapour isotopologue simulations by a multi-annual ground-based FTIR dataset, submitted to *Atmos. Chem. Phys.*
- Sugita, M. et al., 2007 : An overview of the rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment in northeastern asia (RAISE). *J. Hydrol.*, **333**, 3–20.
- Sugiura, T. et al., 2009 : Development of Integrated Flood Analysis System (IFAS) and its applications, Proceedings of the 8th International Conference on Hydroinformatics, January 12–16, 2009, Concepción, Chile.
- Syvitski J. P. et al., 2009 : Sinking deltas due to human activities, *Nature Geoscience*, **2**, 681–686.
- Takahashi, T. et al., 1995 : Videosonde observations of precipitation processes in equatorial cloud clusters, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **73**, 509–534.
- Tsuda, T. and K. Hocke, 2004 : Application of GPS radio occultation data for studies atmospheric waves in the middle atmosphere and ionosphere, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **82**, 419–426.
- Turk, F. J., P. Arkin, E. E. Ebert, M. R. P. Sapiano, 2008 : Evaluating high-resolution precipitation products, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **89**, 1911–1916.
- WCRP : <http://www.wcrp-amy.org> (参考日 : 2010/02/23)
- Wickert, J. et al., 2001 : Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3263–3266.
- Worden, J., D. Noone, K. Bowman, 2007 : Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle, *Nature*, **445**, doi:10.1038/nature05508.
- Yamanaka, M. D. et al., 2008 : HARIMAU radar-profiler network over the Indonesian maritime continent: A GEOSS early achievement for hydrological cycle and disaster prevention, *J. Disaster Res.*, **3**, 78–88.
- Yatagai, A. et al., 2009 : A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges, *SOLA*, **5**, 137–140.
- Yorozuya, A. et al., 2008 : Flow characteristics in actual rivers based on field observations using ADCP, Proceedings of the 2nd International Symposium on Shallow Flows, December 10–12, Hong Kong.

Yoshimura, K., M. Kanamitsu and M. Dettinger, 2009 : Regional downscaling for stable water isotopes: A case study of an Atmospheric River event, submitted to J. Geophys. Res.

第4章 雪氷分野

4.1 はじめに

4.1.1 地球温暖化影響における雪氷観測の必要性

地球上の雪氷は温暖化の進行によると考えられる影響で大きく変化しており、またこの要素が温暖化を加速する可能性を持っている。地球環境変動の重要要素の1つとして認定されてきている（IPCC, 2007）。以下が、重要なプロセスと考えられる。

- 地球温暖化の進行に関し、積雪や海水のアルベドフィードバックなどを通じてエネルギー面で多大な影響を引き起こす。
- 海洋に対する淡水供給・海面上昇など温暖化・地球変動に関わる重要な諸地球現象に影響する。
- 地表下の凍土の地温・水分変化などを通じて温室効果ガス放出などに影響を及ぼす。
- 陸域水貯留変化・斜面崩壊・海氷減少などを通じて水資源・災害・交通など人間活動に多大な影響を及ぼす。

現在発生している顕著な現象としては、北極海の海氷面積の縮小や、氷河の急速な後退が挙げられる。またグリーンランド氷床なども徐々に変化が見られてきている。積雪や凍土なども変動を繰り返しながら、変化の兆候が見られてきている。極端な将来予測としては、2013年の夏季には北極海の海氷が見られなくなるというものもある。

雪氷要素はIPCC-TARではあまり着目されなかったが、気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書（IPCC-AR4）に現状が詳述され、社会の関心を集めた。変動が大きくなっていることが指摘されているが、その不正確性が指摘されている要素でもあるため、より精度の高い現状把握と変動監視を行う持続的観測が求められている要素である。図4-1に各要素の空間スケールと時間スケールを示した。

雪氷要素は以下に分類できる。

- 海氷
- 氷河
- 氷床
- 季節積雪
- 凍土
- 河川氷・湖氷

それらの基本的性格については大畑（1997）を見ていただきたい。

4.1.2 世界的な動向と日本の現状

(1) 国際研究・観測推進の構造

2007年に最大の国際学術団体である国際科学会議（ICSU）の国際測地学・地球物理学連合（IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics）傘下の国際水文科学協会（IAHS: International Association of Hydrological Sciences）から、雪氷関係が国際雪氷圏科学協会（IACS: International Association of Cryospheric Sciences）として独立し、ICSUの中でも雪氷圏を重視する傾向が見られている。歴史的経緯の関係で水文関連課題はIAHSに残り、また凍土関係は国際永久凍土協会（IPA: International Permafrost Association）の下で推進が進められることになったようである。地球温暖化の中で総合的に雪氷の変化を研究する動きにとっては良い状態とは言えないが、仕方ない面があろう。協会・団体・団体間の連携を維持する必要がある。

学術研究を伴う国際計画としては世界気候研究計画（WCRP）と地球圏・生物圏国際協同研究計画（IGBP）がある。WCRPでは雪氷圏を対象としたCliC（Climate and Cryosphere）がコアプロジェクトとして進められているのに対し、IGBPには雪氷圏が関係する課題も多々あるが、雪氷圏を直接対象としたプロジェクトはない。

一方、世界気象機関（WMO）などが進めている活動として全球気候観測システム（GCOS）というものがある。これは、「気候関連問題への対処に必要な観測と情報の取得と、それらの情報等のあらゆる潜在的なユーザーを確実にすること」が目的である。この中に雪氷関連の氷河のための全球陸域ネットワーク（GTN-G: Global Terrestrial Network for Glaciers）、永久凍土層のための全球陸域ネットワーク（GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost）があり、ネットワーク関連の議論をしている。

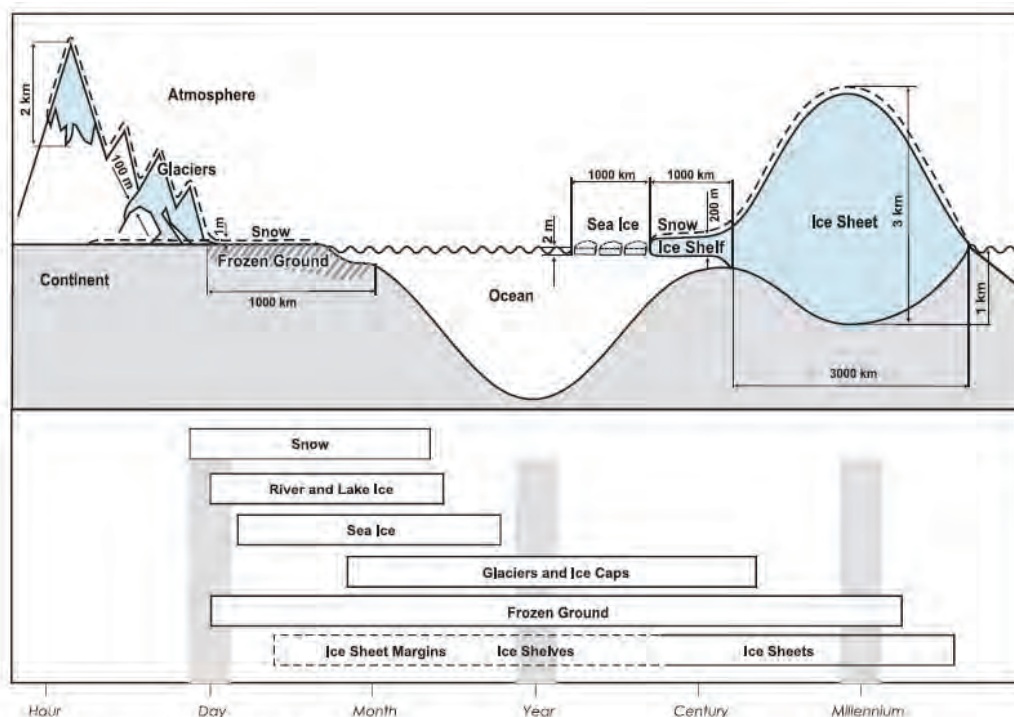


Figure 4.1. Components of the cryosphere and their time scales.

図 4-1 各雪氷要素の空間規模と時間スケール (IPCC, 2007)。

いわゆる世界の衛星観測機関が構成している地球観測衛星委員会 (CEOS) において、統合地球観測戦略 (IGOS) 作成の作業が行われ、cryosphere の観測が独立して議論された、IGOS-P Cryosphere という「雪氷圏に関する総合地球観測戦略」という文書が 2007 年にできた (浮田・西尾, 2007)。また、IPY Legacy として WMO では国際雪氷圏監視 (GCW: Global Cryosphere Watch) が検討されている。これがどうなるかは、注目するところである。

また、雪氷の多い地域を対象とした国際的な地域研究推進組織がある。北極を対象とした政府間組織北極評議会 (AC: Arctic Council) という組織があり、社会面とともに科学面も視野に入れている。南極地域を対象とした研究面での国際協力団体の 1 つが南極研究科学委員会 (SCAR: Scientific Committee on Antarctic Research) であり、もう 1 つが北極地域を対象とした北極圏国際科学委員会 (IASC: International Arctic Science Committee) である。これらの計画の中では、雪氷因子が重視されている。IASC は 2009 年の段階で科学研究推進を強化するために、4 科学課題を再設定し、課題の再構築と委員を増強する方向に進んでいる。AC では、SWIPA (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic) という雪氷変動のより精度良い把握に関する作業が、加盟国間で進められている。DAMOCLES (Developing Arctic Modeling and Observing Capabilities for Long-term Environmental Studies) というヨーロッパ諸国を中心とした、海氷に力点を置いた北極海変動のプロジェクトも進行している。北極域研究における日本の体制は、大畑 (2009) に記述されている。

雪氷要素は地理的分布・性格が多様であるため、監視を行う国際的プログラム・プロジェクトがそれぞれの要素について一定程度、でき上がっている。GTN-P・GTN-G・国際北極ブイ計画 (IABP: International Arctic Buoy Programme)・世界氷河モニタリングサービス (WGMS)²⁹などがある。また、データアーカイブ機能が一定程度でき上がっているが (例えば、世界データセンター (WDC) としてのアメリカ雪氷データセンター (NSIDC))、埋もれているデータも多くレスキューする作業も含めデータアーカイブが雪氷分野では重要となっている。

このように、雪氷分野では地球規模で監視する国際的な体制が徐々に整備されており、それに基づく分担、そして情報・成果の集約の推進が各国・各グループに求められている。しかしながら、欠落している部分も多く、観測態勢を整備する必要のある箇所は多く残っている。

(2) 雪氷要素観測の特殊性

ほかの地球物理要素と比較した場合の雪氷要素の特徴を考えてみる。大畑 (1997) を参考にしていきたい。

²⁹ <http://www.geo.uzh.ch/wgms/> (参照日: 2010/02/16)

- 具体的な個々の観測は、各国の現業機関や研究グループなどが、各国の資金援助を得て実施している。全体として雪氷要素の観測は、衛星観測と地上観測に二分されている。衛星で計測可能な要素の観測は飛躍的に進み、グローバルデータセットが逐次的に提供されている。一方、衛星で計測不能な地表下の凍土や氷厚などの要素に関しては、いまだ地上観測が重要な部分を占める。衛星によって一定の計測ができるが、誤差の大きい積雪水量分布などの要素は、アルゴリズム開発のためにも、地上観測はいまだ不可欠である。
 - 地球・気候システムの理解・表現にとって重要な寒冷圏での水・エネルギー・物質の流れの議論の際に、雪氷要素が重要因子となるが、それは大気ないし海洋や土壌・植生・水循環と複雑に絡み合っているのが現実である。雪氷要素の観測を単独で考え計測することもあるが、複合現象の一部として把握計測することも非常に重要となる。凍土・積雪などはこのような視点が重要であろう。
 - 観測を計画する場合の留意事項として、雪氷変動の時定数が要素によって、大きく異なることが挙げられる。海氷・積雪の時定数は短い、氷河・凍土そして氷床となると時定数が1桁から3〜4桁増える(大畑, 1997)。図4-1からもそれが読み取れる。このため、観測体制・手法は大きく異なる。また、分布している地域も異なるゆえ、研究グループが分散しやすい、議論が発散しやすいのも雪氷分野の特徴である。
- しかしながら、0℃付近で融解し、それ以下でしか形成されないのが雪氷の共通の特徴であり、現在の温暖化での諸変化はこれに基づくものが多いため、地球温暖化の影響評価という視点では、協同による、より連携し集中した観測・研究体制は意味があり、必要であると考えられる。上記のGCWの提唱などもそれが背景にあると言える。

4.1.3 日本の雪氷研究・観測の特徴と現状

(1) 特徴

日本における雪氷研究は歴史的に物理・応用物理の一環として、結晶物理などの分野で発展してきた経緯がある。世界的な多雪地域であることから実生活に対しても影響を及ぼし続けてきたため、積雪災害(雪崩・道路雪氷等)の分野も発展してきた。一方、地質学や地理学(気候学・地貌学)の延長として、また気候システム関連の諸雪氷研究(氷河・氷床・凍土)として、1960年代から徐々に手がけられ1970年代以降発展してきた。特に氷河・氷床関係の観測研究は、南極観測やヒマラヤ探査など探検的性格を伴い世界各地を対象として行われてきた。日本の雪氷分野の特徴として、現場観測を重視する風潮が強いが、これは現場観測が依然として必要な雪氷分野では強い面でもあり、温暖化評価という空間的にそして時間的に拡張しなければいけない状況・時期においては、弱点ともなっていると言える。

現業機関による雪氷要素の観測は時定数の短い雪氷要素を対象としており、プロセス研究や時定数の長い現象などは大学や一部の研究機関などにゆだねられてきた。

現在の日本の雪氷分野の研究面では、氷床・氷河コア研究が強いのが特徴である。過去の地球の歴史を振り返ることにより学ぶところは多いが、現在の温暖化に関する過去および将来の十年、数十年、百年の変化に関する理解を深める場合は、場と手法を選択する必要がある。

(2) 克服すべき課題

国際的推進状況と比較した場合の日本の弱点をいくつか指摘しておきたい。

第一に、衛星観測との連携が弱いことである。アルゴリズム開発、衛星センサー提案などがあまり行われていない。そのような要望が弱いゆえ、活用できるデータがあるにもかかわらず、この部分が発展していない。温暖化影響を議論する場合には、ネックとなる。

第二がデータアーカイブに関して、比較的無頓着な面があることである。日本の場合、雪氷分野のみならず地球環境分野で多く見られることであるが、研究機関および現業機関で取得されたデータは国民および世界の財産であるにもかかわらず、データが整備され、利活用されているとはいえない面があり、その克服が必要となっている。

第三が他分野との連携が弱いことである。このような視点を持った人材が段々と育ってはいるが、今後交流を深め、発展させる必要がある。陸面過程にとって重要な積雪と凍土のみならず、氷河・海氷要素でも必要であろう。モデル研究においても同じ問題がある。研究が小スケールに偏り大スケールがおろそかにされ、グローバルモデルとの連携が弱い。むしろ、気候・気象・海洋分野の研究グループがこの領域に参加し、研究を行っている。

第四が研究・観測課題におけるギャップの問題である。国際的研究動向と比較すると、地球温暖化の影響研究

の問題の中でも一部のみを扱っていて、例えば、地球規模問題で重要となる雪氷面積・質量変化に関する研究が少ない。

第五は、観測が重要である雪氷分野において監視体制が保障されていないことである。現業機関における観測を除いて、個人レベルでの短期的競争的資金による研究が多いため、持続的な観測の実行は難しい。国立極地研究所の氷床・氷河コア研究を中心とした研究事業、(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)の北半球の雪氷圏の変動・水循環の研究事業、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の諸衛星対応の研究・開発事業などはあるが、全体の状況が日本として妥当であるか、また、十分であるかを検討する必要があるだろう。

(3) 国際的な推進状況との関係

雪氷分野の温暖化影響の研究・観測は、徐々に国際規模で行われる傾向にある。4.1.2で国際状況に触れたが、それらに対する日本の関わり方を検討する。それぞれの国際団体に国内機関・国内研究者は関与し、何らかの関わりを持っている。専門家という形で参加する場合、あるいは、日本の委員という形をとる場合もある。多くの場合が関係している一研究者で閉じており、日本の他機関・研究者との相互作用が少ない。国際団体に個別には貢献しているが、その活動を通じて当該分野の国内推進に寄与・貢献している度合いは少ない。つまり、国際団体を国内的に活用する行動が少ない。上手に利用すれば、国内研究・観測の環境の改善につながる事が考えられる。実行されていない理由としては、その多くが研究機関の研究者(一部は現業機関を代表した研究者・技術者)であることが挙げられる。国内連携を通じた推進に結び付けるには労力がかかるため、研究者としてそれにあまり時間をかけられない事情がある。現業機関の関係者にとっては、国内連携は当該機関の主要な仕事ではないという面もある。このような状況では、連携機能を果たす国内推進の場を形成することや、また、国内の状況の改善につなげる仕組みもできていない。

幸いGEOにおいて「全球地球観測システム(GEOSS)10年実施計画」が採択され、また、国内では総合科学技術会議において「地球観測の推進戦略」が策定されるなど、温暖化問題に関係した連携を支援する動きのある現況において、このような状態の改善を今一度考えるべきであろう。

雪氷要素を多く含む「北極域環境」に関する国際・国内関係、国内体制の分析に関しては大畑(2009)を参考にしたい。雪氷分野を俯瞰する際にも参考になるであろう。

4.1.4 日本の雪氷分野の課題と展望

温暖化が進行している中で、雪氷分野が分野内で、また他分野と協力して連携すべき具体的施策を考えてみる。早急に強力に推進する研究観測事業の要件は以下であろう。

(a) 国内的意義

- ・対象となる諸因子・現象の把握の向上が、グローバル気候および地域気候の予測精度を向上。
- ・資源関係(水資源・エネルギー)、生活関係(食料・安全・生態・交通)などが日本にとって重要。

(b) 国際的意義

- ・監視体制構築に関する緊急性(今なぜ必要であるかの説明が可能)。
- ・国際的な計画・観測プランなどとの関連があり国際的に認知され、必要性が言われている事項。

(c) 実行性・効果性

- ・日本の研究コミュニティの強み(実績)を生かす計画。
- ・いずれかの機関・グループが実行主体となり得る課題。
- ・連携を必要とする課題についての体制の整備の有無。
- ・5年以内に開始が可能であり、人的資源があるもの。

(d) その他の考慮すべき点

- ・現在はほとんど行われていないが、日本として推進する必要のある課題。
- ・他研究分野の観測・観測網との連携。
- ・長期的な現場観測・監視実施に不可欠である、キャパシティビルディング。
- ・持続的監視のために国内での教育体制の検討。

○具体的課題

現段階で考えられる具体的課題は以下のとおりである。

(a) 地球雪氷監視ネットワークへの貢献

- ・雪氷要素としては、現業機関で取得しているものに加え、衛星観測が困難である要素を主な対象。

- ・ 既存観測・新規観測を含め、各種国際観測プログラムにおいて国内機関・研究者が安定してデータ取得を続けられるような体制の構築。
- ・ 日本の蓄積・貢献が多く、現在実施されているものの整備・強化と、日本に期待されている新たな観測の実施。安定した資金の確保が重要。

(b) データの整備

- ・ 既存地上データや衛星データを整備・活用し、新たに取得されるデータを効果的に利用できるようなデータアーカイブ・流通・活用の体制作り。
- ・ 公開されていないデータの公開化。

(c) 連携組織の構築

- ・ 国際的な枠組みの中で国内推進を発展させるための連携組織の構築。
- ・ 情報交換から始まり、観測事業の優先度の選択、人材育成の議論を含めた施策文書への取りまとめ。

(大畑)

4.2 海氷

4.2.1 必要性

海氷域は温暖化の影響が出やすい地域だと言われている。近年、北極海の夏季の海氷面積の減少が著しく、特に2007年は北極海の海氷面積は、衛星観測が始まってから最小の面積が記録された。これはIPCCなどの気候変動に関する予測を大幅に上回る速いペースでの減少であった(Zhang *et al.*, 2008; Comiso, 2009)。ダイナミックな変化がおきている海氷域について、より正確な現状把握と変化プロセスの解明、モデル計算の評価のために観測データが重要である。

(1) 北極海

北極海では夏季海氷域の面積については2000年以降の減少が顕著であるが、その原因として大気・海洋の影響が確認されている。さらに、海氷自体の強度が脆弱になっていることも予想されている。多年氷が広域を占めてきた北極海では、いったん広域で消滅した海氷域は、その後面的に海氷域が回復した場合でも、それが1年氷であるため大気・海洋の変化を受けやすいことが予想される。1年氷は厚さが薄く破壊されやすく、さらに破壊された氷盤は移動しやすい。薄い氷は反射率も低く、また氷を通しての熱交換も多く生じる(Inoue *et al.*, 2008)。このため、海氷域では面積の監視とともに海氷厚にも注意が必要である。海氷変動にはこのようなフィードバック過程がはたらいっているため精度の良い観測とともに、この過程の理解が必要である。

海氷変動は面積変化だけでは把握できず、それに先行する可能性があり、さらに面積変化を増幅することの多い厚さ変化の観測が求められている(Tateyama *et al.*, 2006)。雪氷圏を構成する雪氷体の中で、海氷変動はその場での生成消滅以上に、移流による影響が大きい現象である。面積・厚さとともに移動の観測も重要である。

(2) 南極海

一方南極海では、わずかに増加傾向を示している。陸地に囲まれた北極海と違い南極圏は周囲が海洋であり、生成した海氷は大気および海洋の場により発散する状況にある。このため海氷域の拡大は結氷の増加によるものか、力学的に拡大する傾向が増えた状態にあるかを確認することが必要である。また、近年注目されている大規模な棚氷の崩壊には、大陸沿岸の海氷の影響があると言われている。日本の南極観測がカバーする地域の、沿岸定着氷・棚氷・冰山流出と、沿岸での海氷の消長も重要な観測対象である。

南極大陸周辺の活発な低気圧活動および大陸から吹き降りる強風により、沿岸部の海氷が沖に流され、沿岸ポリニアとよばれる、水面、または薄氷域が生じる。この海域では、海洋から大気への熱や水蒸気の輸送、海水の冷却、活発な海氷生成が行われたため、海氷の生成と海洋-大気間の変化プロセスを知ることが必要になる(Tamura *et al.*, 2006)。

(3) 北半球季節海氷域の変動

夏季の変化が注目されているが、冬期の変化についても注意が必要である。冬季の変化が顕著に起きているのは、オホーツク海など季節海氷域である。オホーツク海は北緯60度から44度に広がり、北半球で最も低緯度で凍る海として知られている。オホーツク海は海氷では、過去30年におけるゆっくりとした減少傾向を示しており、2006年は最大海氷面積が過去最小となった。長期の減少傾向とともに、オホーツク海は10年程度の周期を持つ増減が重なっている。オホーツク海は海氷変動は、統計的なフィルターをかけずとも確認できる顕著な10年周期が見られる。すでに3サイクルが過ぎたが、原因解明が出来ていない。

オホーツク海の水氷面積は年々変動の振幅が増加している。特に最近 10 年間における増減の変動幅は大きく、2000 年代に入ってからほぼ最大と最小の両極端な変動を示した（拡大 2001 年。縮小 1996・1997・2006・2009 年）。大きな変化が観測され、急激な環境への影響も危惧されている。この大きな振幅は、気候システムの中での相互作用、社会システムへのインパクトの可能性等について注目すべきものである。

網走では 100 年以上の目視観測が蓄積されているが、日本沿岸に見られる変化はオホーツク全体の変化をある程度反映しているものの、オホーツク海全体の海水変動のどのような特徴を反映しているか、確認が必要である。北極圏では変化が夏期に顕在化しているが、冬期の状況の変化はこれから起きる可能性がある。その北極圏の冬季の変化のさがけが、オホーツク海など環北極の地域で冬期に起きる可能性がある。

4.2.2 現状

海水の重要な観測データは衛星観測・船舶観測・係留系観測・漂流ブイ観測・海氷上での現場観測・航空機観測などで得られている。広域データとしては衛星観測データが主力である。JAXA によって開発された高性能マイクロ波放射計（AMSR）・改良型高性能マイクロ波放射計（AMSR-E）は現在もアメリカ航空宇宙局（NASA）の Aqua 衛星で運用が継続され、世界の海水モニターにとって重要な貢献をしている。その観測結果は、アラスカの国際北極圏研究センター（IARC）経由で、北極海の海水情報の主力として世界の研究者に利用されている。ただし、このセンサーもすでに予定されていた運用期間を超えて運用されており、後継機による観測の継続が早急に必要である。JAXA の水循環変動観測衛星（GCOM-W）計画により衛星とセンサーの準備が進められているが、遅延のない運用の開始が望まれる。ここで使用されている衛星データは、マイクロ波放射計による海水密度（観測域における被覆率）であり、空間分解能 10–20 km 程度の粗い空間分解能のデータであり、観測回数は 1 日 2 回である。この程度の空間スケールの海水面積の変化は、1 日 2 回の観測頻度で観測できる。しかし、夏季の融解期には表面の融解水による誤差が多いことがわかっている。

2007 年の北極海の海水急減で顕著であった氷盤の破壊や移動の観測には、同センサーの 5 km 分解能センサーが有効である。この分解能のセンサーの活用、有効なアルゴリズムの開発はまだ開発途上である。

北極海の現場観測では、海外の限られた砕氷船の運航に依存して観測が実施されている場合が多い。海水域の周辺域、海水が減った後の海洋の観測には、JAMSTEC の観測船「みらい」による観測が継続されており、重要な海洋観測結果が蓄積されつつある。ただし、日本の「みらい」による観測域が海水のない海域に限られるため、海水の観測には日本以外の砕氷船の観測計画に依存することになる。これまで研究者の努力や成果・実績により、海外の砕氷船への乗船の機会を維持している。日本の海水観測者が乗船した砕氷船は、アメリカ・中国・カナダのものであり、さらに可能性として韓国・ロシアがあるが、いずれも乗船の可否・観測時期・地域はそれぞれの国の観測計画に左右されている。また、海洋・海水観測の係留系も、国際的な観測の枠組みの中で観測が維持されている。日本が国際的な協力体制に参画する活動を維持することが重要である。

海水の厚さの変動については、約 10 年間隔で、潜水艦による北極海中央部の海水厚が計測され、薄くなっていることが報告されていた。近年、衛星搭載のレーダー高度計を使った、北極海の広域の海水観測結果が発表された。従来の潜水艦上向きソナーの観測結果（北極海中央部の長期の減少傾向）と対比して、近年可能になった衛星高度計の観測結果（多年氷域全体の海水厚さと大きな年々変動）、さらに観測データを増やしつつある電磁氷厚計の観測（観測ラインにおける詳細な分布）により、データ取得が難しかった氷厚についてもデータが収集されつつある（Shirasawa *et al.*, 2008）。上向きソナーを利用した氷厚計測装置も、北極海・オホーツク海に設置され、データの蓄積が行われつつあるが、まだまだ観測点が少ない。長期モニターの開始と、変動の起きているところに機動性のある投入が必要である。

オホーツク海の観測の現状としては、気象庁の網走・稚内・釧路各地方気象台における目視観測がある。これは古くは 100 年以上の長期観測データの蓄積がある。また、気象庁では、衛星解析によるオホーツク海全域の観測と、海水予報が実施されている。海上保安庁では、第一管区海上保安本部海水情報センターによる、砕氷船「そうや」と航空機によるアイスパトロールにおいて目視観測が行われている。また、衛星観測データを用いたサハリン以南～北海道沿岸の観測が実施されている。気象庁・海上保安庁が利用している合成開口レーダーを用いた衛星観測は、詳細な海水状況を示すことができる。海上保安庁は日本の陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）による衛星レーダー画像を使用し、海上交通の資料として活用している。これまでのところ主に沿岸海上交通の安全のために使用されているが、このデータはさらに海水研究者や海水・気象相互作用研究分野の資料として活用できるものである。

JAXA は AMSR-E・ALOS などの衛星データの配信を行っており、海水の基本情報として欠かすことができない。ま

た各大学では、氷厚計・流水レーダー・衛星データベース（面積・氷厚）・沿岸の監視カメラのネットワークなどの観測体制、流水数値モデルの開発が行われている。また、(独) 海上技術安全研究所では、海水状況とそこにおける人間の産業活動・海上交通の増加を見越した油流出に対する環境保護や航行安全指標の検討を行っており、基本情報の収集活動として、海上保安庁や各大学と協力した情報交換も行われている。

南極観測には砕氷艦「しらせ」が就航しているが、南極海ではさらに海外の砕氷船を傭船として使用することが可能である。北極海に関しても、新造された最新鋭の砕氷艦「しらせ」が北極圏の国際観測に参加できる仕組みを考えることも重要である。

4.2.3 課題と展望

(1) データ標準化

海水の基本情報である衛星による海水密度情報は、関係機関により公開されている。ただし、各海域ごとの海水データは、担当国の気象海洋観測機関から公開されているものの、交互に組み合わせたり比較するなど、統合した利用には使用しやすい状態になっていない。日本が作成している北極海の観測データ、オホーツク海の観測データも、各国に公開するとともに、アルゴリズムや公開フォーマットの情報交換、性能比較、互換性などの検討が望まれる。

衛星による海水観測データの精度を下げている夏期の融解期の観測データ、海水縁辺部の海水不可視域の改善が必要である。また、温暖化時の海水データとしては、海水成長に関わる厚さ、さらに海水の力学的強度の低下、移動性の増加が考えられるため、移動情報は重要になる。海水変動は生成消滅項だけでは理解できず、移流項の把握も必要である (Inoue and Kikuchi, 2007)。

現場データの取得については、これまで個別の研究者、機関による観測計画に依っていたので、期間・領域の連続性に問題があった。研究コミュニティ主導で組織的な観測計画を練る必要がある。北極海は北極を囲む国による北極委員会が科学活動の中心となっているが、日本も 2009 年にオブザーバー国としての参加を表明し、活動が検討されている。北極委員会の観測計画と調和し、効果的な国際観測態勢の整備が至急必要である。

(2) データ流通の促進

北極海・南極海など国際的な海洋情報を交換できる枠組みが必要である。広域の海水データは衛星データによる海水分布情報が、アメリカ NSIDC・NASA、日本 JAXA により公開されている。データの内容は海水密度度である。密度度データは 10-25% 程度の誤差を含むが、誤差が大きくなるのは夏期の融解期の海水の観測であり改善が望まれる。

船舶観測の実施とそのデータ流通は研究者間の個人的な交流に依っている所が大きい。オホーツク海では、気象庁・海上保安庁・(独) 海上技術安全研究所・JAXA・大学による連携をさらに協力し、継続することが必要である。個別の研究者レベルでの観測が多く実施されていたが、観測項目・観測場所・観測期間に調和が取れていないため、断片的な理解になってしまっている。より大きなグループでの総合的な計画が望まれている。特に急速な変動の予測されている雪氷域では、即時の開始が重要である。

変化が急速な雪氷圏のリアルタイムモニターは有効である。即時性のある情報の公開や解析結果の公開が研究推進に有効である。

(3) 観測施設等の相互利用の促進

各国の衛星利用計画だけでなく、国際的にデータの切れ目がないような国際的に見て継続する衛星（センサーを含む）の準備が必要である。

海水域に入れる観測船は少ない。各国共同の観測の機会を捉え、日本の研究者が海水船舶観測に定常的に参加できる研究計画の実施（支援）が重要である。係留系・ブイなども、国際計画の中で各国ができることを分担している。海洋観測・係留系・船舶観測は、個別の研究機関や研究グループにより実施されている。国際的にも調和した観測が必要であり、また国内的にも調和した観測計画の策定により、安定したデータ取得の継続が求められる。

砕氷船による観測では、各国で得意とする観測技術・観測装置を持ち寄って、共同観測を実施している。共同観測とはいえ、成果の取りまとめは個別のグループごとである。個別のテーマを総合させる次のステップの取組みも必要である。また、それらの観測機器の操作に習熟した技術者は不足状態にある。海水観測については、国内の研究グループは、海水厚の遠隔観測技術の開発と運用に関して、国際的に見ても優れた活動を行っており、

国際観測活動の中で貢献することが期待できる。国際的な観測現場に活動を拡大していくことが望まれる。

オホーツク海においても、衛星観測データの取得・公開、船舶観測のための船舶の運航と観測者の参加・観測機の持ち込み、データ整理（氷厚計・流氷レーダー・衛星データベース・沿岸監視カメラ）やモデル計算など、個別の研究者レベルで短期の研究計画と予算によって行っていることが多い。国際的な観測計画への参画により、長期の安定した観測が維持できるような観測体制を維持することは重要である。

海氷域を観測するために、海外の砕氷船を傭船として使用すること、新造された最新鋭の砕氷艦「しらせ」が、南極だけでなく北極圏の国際観測に参加できる仕組みを考えることも重要である。

(4) 時空間的把握の改善および観測項目の充実

観測項目の改善としては、夏季の融解の実態を正確に捉えることが、融解によって熱収支や海氷の動力学がどう変わるのかを考える基本情報である。また海氷の厚さを知るために、船舶観測・係留系観測・衛星観測による時空間で連続したデータの収集による、稠密な情報の作成（薄氷形成・成長、表面融解、海氷厚、海氷の移動）が必要である。

国内の観測装置の開発能力や運用能力は高いので、これらを活用することで、国際的な観測現場での貢献が期待できる。海氷観測システム（係留系、海氷マスバランスブイ、マイクロ波放射計、沿岸海洋（海氷）レーダー、海氷新センサー（日本が開発または運用している電磁波利用の海氷新センサーは国際的にも評価されている。その維持や開発が国際的な観測で貢献する可能性が高い）等の観測機器を使用できる観測技術者の育成と、いつでも海氷変化域での国際観測に参加できる機動性が必要となる。

北極海の海氷変動観測は、予測に対しどれだけ実際変化しているリアルタイムに観測し、予測と比較することが望まれている。衛星がカバーする広域のリアルタイム海氷情報の精度を高めるために、またその時間・空間分解能の狭間を埋めるためには、効果的な定点観測機器からの観測データ送信システムの開発と展開が必要である。

これまでの長期データ取得方法は主にロガータイプの記録計を使用しており、継続した取得は困難であり、雪氷圏の記録蓄積の弱点となっている。機器不調の際のリカバリーも問題で、データの欠如や改良の遅れなど、観測データ欠如やその繰り返しなどの状況が多い。衛星通信を利用したデータ転送システムを利用して、グローバルに展開している雪氷圏の観測活動・モニタリングのデータを取得を利用することにより、変動する現象を把握することができるようになる。南極での結氷過程を観測するために、沿岸の気象観測がわずかな沿岸基地周辺に限られているため、変動中心域に近い沿岸に自動観測機器の展開が望まれる。

海氷域に船舶が入れる時期や地域は限られているので、近傍の陸上や海氷上に長期観測機器を整備することも重要である。砕氷船の相互利用システムをしっかりとしたものにすることも重要である。航空機も有効な観測手段であるが、国内のグループによる実施は難しい。すでに北極・南極域で実績を上げつつある比較的運用が可能な小型無人機による観測が有効である。

リアルタイム現地データの増加、データ同化の取組みにより、未知の海氷変動プロセスの早期発見、モデルに十分入っていないプロセスの検出・改良、予測データ不確定性の評価も可能になると考えられる。

温暖化進行後の海氷情報については、今後、北極海で海氷域が減少し、結氷期間が短縮すると北極海に入る船舶が増加すると予想されることから、定期的な観測、船舶からの通報なども近い将来増えることが予想される。船舶運行と提携したデータを集約していくことは有効である (Kitagawa *et al.*, 2008; Circum-Arctic Resource Appraisal Assessment Team, 2008)。

(榎本)

4.3 凍土

4.3.1 必要性

高緯度の陸域では、大河川流量や湖沼面積の経年的増加 (Peterson *et al.*, 2002; Smith *et al.*, 2005)、湖底からのメタンガス放出 (Walter *et al.*, 2006) など、地球規模の水熱物質循環過程や気候にも影響し得る重要な現象が報告され、その要因の1つとして凍土の衰退が指摘されている。凍土層の空隙は氷で充填され、透水性は極めて低い。この機能は、凍土帯での特有な陸面水循環過程や、森林や湿原形成の主要因である。また、高緯度の地下に貯蔵されたメタンをはじめとする大量の温室効果ガスを制御する凍土の衰退が及ぼす影響は、甚大であることは想像に難くない。

他方、凍土の変動実態の理解は大きく立ち遅れている。その理由として挙げられるのは、1) 地上から視認で

きないため、リモートセンシングをはじめとする広域観測の適用が困難であること、2) 凍土の温度は地殻熱や気象に加え、土壌物性、地表面状態（積雪、植生）など様々な因子に影響されるため（石川・斉藤, 2006）、精度の高い実用的なモデル化があまり進んでいないこと、3) 変動の時間規模は日から数万年までに及ぶが、この時間スケールを網羅するのは困難である。しかも、短期的にみえる変動にも過去の履歴が反映されている場合が多く、モデル化の困難さも加わり、変動要因の同定が困難であること、などである。

IPCC-AR4 は、凍土変動に関してこれまでに多く頁数を割いているが、観測結果とモデル出力の両者が入り混じった記述になっている。その背景には、観測的知見が絶対的に不足しており、それだけでは結論を導くことができず、現状未成熟のモデルによる出力結果を併用せざるを得ないという事情がある。観測体制を拡充させ、実証データのみに基づいた凍土の時空間的変動特性の解明が必要となる。

4.3.2 現状

凍土の変動は、一般に活動層の厚さや深層地温などの時系列変化によって表される。これらを監視する国際的な観測網として 1990 年代初めから環北極域活動層観測網（CALM: Circumpolar Active Layer Monitoring）や、永久凍土層のための全球陸域ネットワーク（GTN-P）などが稼働している（Brown *et al.*, 2000）が、説得力のある実証的なデータを示している研究例は決して多くない。アラスカやカナダでは、1980 年代から現在に至るまで継続的に観測されているが、これまでに数年規模では夏期の気温－活動層厚、積雪深－永久凍土温度などに相関があること、連続的永久凍土帯では永久凍土温度の上昇が顕著であるが不連続帯ではあまり変化していないこと、十年規模の永久凍土変動は気温に追従していることなどが示されている（Osterkamp, 2007; Romanovsky *et al.*, 2007）。

北アメリカ以外で継続観測が実施されているのは旧共産圏のロシアである。ここでは比較的浅層部（活動層・季節凍土）の地温が 1990 年代以前の数十年間、継続的に測候所の観測として取得されたデータがあり、それによると平均で 20 cm 程度活動層が厚くなっている（Frauenfeld *et al.*, 2004）。モンゴルでも同程度の期間の測候所データがあるが信頼性が低く、長期変動の議論に耐え得るようなものではない。同国では永久凍土の深層地温が 1960 年代に多地点で観測されているが、1990 年代初めの国家体制の変革に伴いデータが散逸してしまった。このデータをレスキューするとともに、新たな観測網の展開が日本の研究機関（JAMSTEC および北海道大学）と協同で進行している。

中緯度高山帯では山岳永久凍土を対象とした観測研究が実施されている。ヨーロッパでは 2000 年代初めに 100m に達する深層地温孔が南北横断的に掘削され、観測が継続されている（Harris *et al.*, 2003）。国内では、北海道大学・筑波大学・信州大学などにより北海道大雪山や富士山などで永久凍土と地上気象の観測体制が整いつつある（Iwahana *et al.*, 2008）。

浅層部の地温や土壌水分値は活動層過程のモデル化や検証に大きく資する。これらの観測は容易であるため、凍土研究に限らず生態・地形・水文・物質循環研究の一環として観測されたり、各地の気象観測所の基本観測項目に含まれていたりするなど、膨大なデータが存在するにも関わらず、データは多方面に散在しており、研究分野間で横断的に利用されることは少ない。他方、土壌の熱・水物性値や地殻熱などもモデル研究に重要であるが、実測値の蓄積はほとんど進んでいない。ほとんどのモデル研究では教科書的な一般値を用いているが、値のとり方によっては結果が大きく変わることが感度実験によって示されている。

氷に富む凍土の融解により、地表面が陥没したり湖沼が伸縮したりするなど、地形の変化が現れる。西シベリア低地では湖沼の伸縮傾向が、永久凍土の分布様式（連続的・不連続的）の違いにより異なること（Smith *et al.*, 2005）、アラスカやカナダのツンドラでは、流路沿いの崩壊地形が近年急激に増えてきたこと（Lantz and Kokelj, 2008; Jorgenson and Shur, 2008）などがリモートセンシングの解析で明らかになっている。

4.3.3 課題と展望

凍土の時空間的変動特性を、国際的な枠組みの中で解明していくことが課題となる。リモートセンシングが有効な手法となり得ないため、観測的知見を蓄積しつつモデルの高精度化・汎用化を図るという古典的アプローチによらざるを得ない。特に急務とすべきは、不備が目立つ観測体制を拡充したり、観測網の偏在を改善したりすることなどである。国際的な動向を考慮したうえで、日本が集中すべき地域としては、これまで日本の研究者が観測を先導してきた地域（シベリア・モンゴル・北海道大雪山・富士山）、他国との協力で維持してきた地域（スバルバル・スイス・アラスカ）、また研究基盤は脆弱だがデータの空白域である地域（中央アジア）などを挙

げたい。

日本の研究者は生態学・水文気象学・気候学・地形学など多様な分野において、多くの凍土帯（西シベリア・アラスカ・スバールバル・スイスアルプス・モンゴル・南極など）をフィールドとした観測研究を実施している。これらについて、研究対象（研究分野）によって異なる観測仕様（地温観測の深度や頻度）を統一し、データの流通を促伸するとともに、深層地温や土壌熱・水物性などを観測項目として新規に加える。

緩慢な凍土変動を捉えるために、GTN-P や CALM 観測は 20 年近くに及ぶ継続観測を実施してきた。一部ではあるが、ようやく気候変動と凍土変動の対応を議論する実証的なデータが得られ始めたことを考慮すると、これから展開・改良する観測も、長期的に観測を維持することが必須となる。研究者世代を超えるような長期観測が求められることから、現地研究者の教育や、現地と協同した維持管理体制の構築なども併せて考える必要がある。これには、現地の留学生を戦略的に受け入れ、育成していくなど大学の役割が大きい。

凍土の温度は気候や土壌物性のほかに、積雪や植生機能など地表面状態にも大きな影響を受けるため、これらを対象とする研究者との連携が重要であり、これにより凍土動態を予測するモデルの確度も向上する。CALM 観測の結果から、活動層の厚さは狭い範囲でも大きく異なり、それは地表面状態に依存していることが示されている。

凍土の観測研究におけるリモートセンシングデータの積極的な利用として、凍土融解に伴う地形変化の把握について述べる。近年では、高精度なデジタル標高モデル（DEM: Digital Elevation Model）の作成を可能とするリモートセンシングデータ（例えば、ALOS-PRISM、CartoSat（Cartography Satellite）など）が利用できるようになった。同時に、アメリカの過去の軍事偵察衛星であった CORONA 衛星の画像や、古い航空写真などを解析し、ピング・サーモカルスト湖・アイスウェッジ構造土・海岸線・斜面などの地形の変遷、気候や凍土温度との対応を理解することも行われている。凍土中の氷量の変化を捉える衛星データとして全球的な重力場を観測する GRACE が有望視されている。

(石川)

4.4 極域の氷床と氷河

4.4.1 南極における観測

(1) 必要性

南極大陸に広がる氷床は、地球上の氷の体積の約 9 割を占める巨大な氷塊であり、温暖化によって南極氷床が変動すれば、地球の気候や海面変動に大きな影響を与えることが予測される。実際、南極半島では過去数十年の間に著しい温暖化が観測されており、その影響による棚氷の大規模流出が観測されている。また、南極半島では棚氷の流出によって氷床流動が加速され、それが棚氷の流出を加速するという正のフィードバックが生じている証拠も観測されている。巨大な面積を持つロス海の棚氷も、今後温暖化が進行すれば崩壊する可能性があることが指摘されており、もし、実際に崩壊が起これば、南極半島の棚氷崩壊を上回る大規模なものになることが予想され、海面変動にも影響を及ぼすと考えられる。このように、温暖化が南極氷床に及ぼす影響、さらに南極氷床の変動が気候変動や海面変動に及ぼす影響は、従来考えられていた以上に大きい可能性が高い。

将来の気候・環境変動を予測するには、南極における温暖化の実態と影響を正しく評価することが不可欠である。しかし、南極における観測地点はほかの地域に比べて極端に少なく、また、長期の観測データも乏しいため、温暖化の実態や影響はよくわかっていない。特に、広大な面積を持つ東南極は、内陸部に観測基地がほとんどなく、観測データが欠如している。最近まで、南極における温暖化は南極半島のみで顕著であり、東南極ではほとんど生じていないと考えられていたが、Steig *et al.* (2009) により、東南極でも温暖化が進行しているという報告がなされ、注目を集めた。しかし、Steig *et al.* の報告に対する異論もあり、東南極における温暖化の実態はまだ明らかになっていない。また、温暖化が南極氷床に及ぼす影響についても、議論がある。一般的には、温暖化による海洋からの蒸発量の増大、氷床への降雪量の増大、氷床の表面質量収支の増大というシナリオが考えられており、IPCC-AR4 では、様々な排出シナリオに基づく海面変動予測において、南極氷床が海面低下に作用すると予測されている。しかし、一方では、近年の温暖化によって南極氷床の融解が予想以上に進行しているとの報告もなされている。南極における温暖化の実態とその影響を正しく評価するため、これまで東南極で観測を実施してきた日本は、観測を一層強化する必要がある。

(2) 現状

南極における氷床・氷河観測は、文部科学省南極地域観測統合推進本部の下で、国立極地研究所が取りまとめ

役となり、関係省庁、大学等の連携の下で実施されている。気候変動および氷床変動に関する観測としては、昭和基地からドームふじ観測拠点に至るトラバース・ルート上で、雪尺による表面質量収支の観測、積雪の化学物質濃度の観測、気象観測、全地球測位システム（GPS）による氷床流動観測、アイスレーダーによる氷厚および氷床内部構造の観測が実施されている他、過去数十年～数十万年の気候・環境変動の実態解明とその影響評価を目的とした氷床コア掘削・解析が実施されている（Watanabe *et al.*, 2003; Kawamura *et al.*, 2007）。これらの観測データの一部は、JARE Data Report として国立極地研究所から出版されている。気象観測については、トラバース旅行実施中の観測だけでなく、2009 年現在、トラバース・ルート上の 5 地点に自動気象観測装置が設置され、連続観測が実施されている。また、そのうち 4 地点では、アメリカ・ウィスコンシン大学との共同研究により設置された自動気象観測装置から衛星回線によってデータがアメリカに転送され、リアルタイムで気象観測データを入手することができる。しかし、いずれの観測も広大な南極の一部をカバーしているに過ぎず、南極においては観測の空白域が大きい。

氷床氷縁部は、温暖化による変動が最も顕著に現れる場所であると考えられ、国際協力により、南極全域における観測を実施することが必要である。日本は、日本の観測基地である昭和基地の周辺で観測を実施する責務があるが、実際は十分な観測が実施されていない。2004 年まで日本の越冬隊が持ち込んだ航空機により、夏だけでなく春にも氷床氷縁観測が実施されていたが、航空機廃止のため、2005 年以降は観測が実施されていない。

温暖化による棚氷の崩壊、棚氷の崩壊による氷床流動加速という正のフィードバック機構に関する観測は、南極のごく一部でしか実施されていない。日本の南極観測隊は 30 年以上前に東南極の白瀬流域において、氷厚の減少を観測し（Mae and Naruse, 1978）、その原因は氷床の底面滑りであると推定されたが、これは現在の温暖化によるものではなく、数千年という時間スケールの現象である可能性が指摘されている。白瀬流域の氷厚変動に関する観測は、その後継続されておらず、氷厚減少がいつ始まったのか、今後の温暖化によって大規模な変化が生じ得るのかが未解明である。

南極における観測は中国および韓国から数名のオブザーバーを受け入れた以外、従来は日本単独で行っていたが、2007/2008 のシーズンには、スウェーデンとの共同による国際トラバース観測が実施された。また、2005/2006 年の夏期には、ドイツとの共同により、ドイツの航空機を用いた昭和基地周辺のアイスレーダー観測が実施された。

(3) 課題と展望

これまで温暖化していないと言われていた東南極でも温暖化が進んでいるという報告（Steig *et al.*, 2009）が社会に大きな警鐘を鳴らしたことを重く受け止め、今後、温暖化の実態と影響を評価するための観測を実施する必要がある。そして、温暖化とその影響が南極で現れた場合、それを直ちに検知できる観測体制を整備することが急務である。南極氷床は広大であり、全域にわたる観測データを取得するためには国際協力と国際分担が不可欠である。同時に、国内における連携を強化する必要があるが、最近の各省庁の定員削減や大学の法人化に伴って、南極観測隊への人員派遣を停止する機関が出てきているという状況がある。国内の機関間の連携を強化し、この状況を改善する必要がある。

日本は、これまで観測を行ってきた白瀬流域、セールロンダーネ山地周辺域等を中心に、従来実施してきた観測（雪尺による表面質量収支の観測、積雪の化学物質濃度の観測、気象観測、GPS による氷床流動観測、アイスレーダーによる氷厚および氷床内部構造の観測等）を継続・強化する必要がある。特に、温暖化の実態と影響を評価するうえで不可欠な、気温・降水量変動に関する長期の観測データを広域で取得することが重要である。さらに、氷床変動の重要なメカニズムとして提唱されている、底面滑りによる流速の増大、流速増大による氷床底面の摩擦増大、摩擦増大による底面融解という正のフィードバックメカニズムが、実際に白瀬流域でも生じているのかどうか、解明する必要がある。このため、アイスレーダーを用いて氷床底面の状態と氷床厚・氷床内部構造の観測を長期にわたって実施するとともに、熱水ドリルを用いた掘削孔の観測によって、氷床流動を観測する必要がある。

温暖化検知に不可欠な気象データを多点で得るため、自動気象観測装置のネットワークを増強する必要がある。ウィスコンシン大学と共同で設置された、衛星によるデータ転送システムを有する自動気象観測装置の維持・保守に加えて、日本独自でも、これまで観測点がなかった地域に、同様の観測装置のネットワークを早急に整備する必要がある。これらの観測、さらに観測機器の設置、観測に必要な人員・物資の輸送を迅速かつ効率的に行うために、航空機利用を促進する必要がある。航空機利用に関しては、日本の観測隊独自の航空機の保有、民間チャーター機の利用、航空機を有する国との共同研究等の選択肢がある。どの観測にどの方法が最適であるかの検

討も含め、航空機の利用を強力に推進する必要がある。

上記のトラバース・ルート上での観測を実施する一方、観測データのない、過去数十年の気温・降水量変動を調べるために、氷床コア掘削と掘削孔の温度測定を実施する必要がある。従来の掘削地点は限られており、また、温暖化が顕著になる以前に掘削された地点も多いので、最近の温暖化の影響評価を行うために、多点において数10mの深さの浅層コアを新たに掘削する必要がある。氷床コア研究については、IPICS (International Partnerships in Ice Core Sciences) に積極的に参加し、設営を国際共同で行うことにより、観測を効率化する必要がある。

南極氷床の変動に関わる観測として、南極海における海水中の水の安定同位体の変動を観測した結果から、近年、南極氷床の融解量が増大したことが原因で、南極海への淡水流入量が増大したとの報告がされている (Aoki *et al.*, 2005) が、この観測を今後も南極海で長期にわたって継続する必要がある。同時に、氷床氷縁部付近における氷床変動・氷床流動にかかる観測を再開する必要がある。また、近年中断されていた白瀬流域の不安定性の問題にも改めて取り組む必要があり、氷厚変動・流速変動・アイスレーダーの観測のほか、白瀬中流域で深層コアを掘削し、水の安定同位体と含有空気量の分析によって、氷厚変動がいつから、どのようなメカニズムで生じていたのか明らかにする必要がある。温暖化に伴う氷床変動を予測するためには、温暖化に伴う氷床の融解や氷床の流動とともに、降雪量の変化を予測する必要があるが、そのためには、南極氷床への水蒸気輸送に関する情報を得ることが不可欠である。最近、雪や氷だけでなく、水蒸気中の水の安定同位体を分析できる技術が確立し、南極に到達する水蒸気の起源や輸送に関する情報が得られるようになった。このような新技術を利用した観測をトラバース・ルート上で新たに実施する必要がある。

南極において様々な観測を実施する拠点として、昭和基地およびドームふじ観測拠点は観測施設として共同利用することができる。ドームふじ観測拠点は、アクセスが困難であり、設営に多大な労力と経費を要するため、現状では簡単には利用できないが、異なる分野間の連携を促進し、内陸の観測拠点として有効利用できると考えられる。

南極における観測データは、一部が JARE Data Report として出版されているものの、データの多くは観測を実施した研究者が個別に管理しているのが現状であり、データ標準化・データ流通は立ち後れている。明確なデータポリシーがないこと、データの集積・加工・管理を行う技術者がいないことが、その主な原因である。現在、国立極地研究所は「学術データベース」という名称のデータベース³⁰でメタデータを整備中であるが、実際のデータの集積はまだ行っていない。国立極地研究所は、実際のデータの集積と公開を目指して、その方法を検討中であるが、これを早急に実現する必要がある。

4.4.2 北極における観測

(1) 必要性

北極域は温暖化が最も顕著に生じる地域であるとともに、グリーンランドをはじめとする北極域の氷床・氷河の変動は、地球の気候や海面変動にも大きな影響を与えると考えられる。最近、温暖化によるグリーンランド氷床の縮小が予想以上に進行していること (Rignot *et al.*, 2008; Velicogna and Wahr, 2006)、氷床の流出速度が増加していること (Alley *et al.*, 2008) などが、問題になっている。また、約1万年継続している現在の間氷期(完新世)において、気温がほぼ一定で、氷床の状態も安定していたと考えられていたグリーンランドが、最近の研究により、完新世初期には北半球のほかの地域と同様に温暖な時期があり、現在よりも気温が2~3℃高かったこと、完新世初期から現在までの間に氷床の厚さが200~600mも減少したことが、明らかになった (Vinther *et al.*, 2009)。これらの研究は、温暖化によるグリーンランド氷床の変動と海面変動への影響が、予想以上に大きいことを示唆しており、将来の気候・環境変動を予測するには、北極域における温暖化の実態と氷床・氷河の変動を正しく評価することが不可欠である。しかし、地域差が大きいと考えられている北極域において、観測地点および観測データはいまだ不十分であり、温暖化の実態や影響はまだよくわかっていない。温暖化とその影響が発生した場合、それをすぐに検知し、影響を評価できる体制を整えることが急務であり、組織的・系統的、かつ長期にわたる観測が必要である。

(2) 現状

北極における氷床・氷河で、日本はこれまで雪氷コア掘削、氷床や氷河に生息する雪氷微生物の観測、雪質調

³⁰ <http://polaris.nipr.ac.jp/~dbase/> (参照日：2010/02/16)

査を中心に研究を実施してきた。北極域での観測は、北極域に領土を持つ諸国との共同研究が不可欠であり、これまで、ノルウェー・デンマーク・カナダ・アメリカ・ロシア等との国際共同研究として実施してきた。雪氷コア掘削については、ICAPP (Ice-Core Circum Arctic Paleoclimate Programme) の下で、環北極域での雪氷コア掘削を実施し、環北極域における過去 100~200 年の温暖化の実態とその影響を研究してきた。気象観測、質量収支観測など長期間のモニタリングを必要とする観測は、断片的・短期的な実施に留まっている。定常的な予算措置がなく、各研究機関や大学が科学研究費等の競争的資金を利用して個別に研究を実施しているため、系統的・組織的・長期的な観測は実施できていない。北極域の温暖化は IPCC の予測を上回る速度で進行していることが最近報告され、氷床・氷河の融解、海洋への流出速度の増加が社会の注目を浴びているにもかかわらず、氷床・氷河観測のための長期的な観測を実施する体制が整っていないのは、大きな問題である。今後の北極域の変化には注意深い監視が必要であり、系統的・長期的・戦略的な観測が望まれる。

(3) 課題と展望

グリーンランド氷床やアラスカの氷河の変動に関わる観測は、デンマークやアメリカを中心とする欧米諸国が実施しているため、日本が独自に観測を開始する必要はないと考えられる。しかし、太陽光を吸収することにより、氷床や氷河の融解に大きな影響を及ぼすことが最近明らかになった雪氷微生物やブラックカーボン (BC) については、外国でも観測が不十分である。これは、日本が得意とする観測分野であることから、外国と共同で、多点で定期的に積雪を採取し、その変化をモニタリングする必要がある。また、ロシアやカナダなど広大で重要な地域であるにもかかわらず、観測点が少ない地域においては、日本の協力が求められている。

過去数十年から数百年の気候・環境変動を復元するために必要な、数 10m から数 100m の雪氷コアは、北極域では比較的容易に掘削することができ、定常的な観測地点のない氷床・氷河において長期的なデータを得る手段として非常に有効である。雪氷コアの掘削は、1990 年代に実施されたものがほとんどで、それ以後のデータはアラスカ・カムチャツカに限られている。以前、掘削を実施した地点 (スバルバル諸島・カナダ・ロシア、グリーンランド) で、数 10m 程度の浅層コアを掘削し、掘削孔温度の測定と、水の安定同位体、イオン、含有空気の希ガス等の分析によって、気温と降水量の変動を復元し、1990 年代中盤以降の急激な温暖化とその影響を明らかにする必要がある。

IPICS 計画の一環として、日本は 2008 年から 5 年計画で、グリーンランドにおける国際深層コア掘削計画 (NEEM : North Greenland Ice Coring Project) に参加し、現在よりも数度気温が高かったと考えられている最終間氷期の気候変動とその影響を解明する計画である。最終間氷期は、温室効果ガスによって温暖化した将来の地球のアナロジーとして重要であり、温暖化影響評価にとって重要な位置づけを持つことから、今後、観測を強化していく必要がある。

北極域に領土を有する欧米諸国、ロシアとの共同研究をさらに発展させ、効率的に国際協力を行うことにより、広大な北極域における観測の空白を埋める必要がある。また、欧米諸国だけでなく、アジア諸国との連携も重要であり、スバルバル諸島において提案されている日中韓印共同掘削プロジェクトも実現する必要がある。国際連携の強化とともに、国内の関連機関の連携を推進する必要がある。

北極域においては、国立極地研究所がスバルバル諸島のニーオルスンとロングイェールビーンに観測基地を保有しており、ほかの研究機関や大学の研究者の共同利用施設として利用されている。スバルバル諸島以外にも、共同利用可能な観測基地を設置する必要がある。

北極における観測データは、観測やデータの取りまとめを実施する組織がなく、観測を実施した研究者が個別に管理しているのが現状であり、データ標準化・データ流通は立ち後れている。南極と同様、明確なデータポリシーがないこと、データの集積・加工・管理を行う技術者がいない組織がないことが、その主な原因である。現在、国立極地研究所が南極のデータと同様、「学術データベース」というメタデータを整備中であるが、実際のデータの集積はまだ行っていない。国立極地研究所は、今後、実際のデータを集積することを検討しているが、その早急な実現が望まれる。

(東)

4.5 中低緯度の氷河

地球上に存在する陸氷の存在量は、気候変動に伴って大きく変動するとともに、海水量の変動を通して気候自体にも強いフィードバックを及ぼしていることが知られている。その一方で、南極・グリーンランド氷床を除くと、存在量としては全陸氷の 1% にも満たない世界の氷河・氷帽は、数十年スケールの比較的短期間の海水準変

動へ影響していると見積もられている (Meier *et al.*, 2007)。氷河の、特にその質量変化 (質量収支) の観測は、継続性が重要であるが、その存在が遠隔地域に偏在しているために、40 年以上の継続観測が行われているのは、アルプス・スカンディナヴィア・ロッキーなど、欧米を中心とした 39 の氷河に限られ、特に旧ソ連邦に属していた国々での観測の中断が相次いでいる (図 4-2)。日本の研究者による継続的な氷河質量収支の観測は行われていないが、観測データ自体が希少なアジア (全氷河面積に対して 18%)・パタゴニア (同 5%) での活動が目立っており、これらの地域について以下に詳述する。

4.5.1 アジア地域の氷河

(1) 必要性

ヒマラヤから北ユーラシアにかけてのアジア地域の氷河は、南極・グリーンランド氷床を除いた世界の全氷河域の約 18% を占めている上に、その全体的な縮小傾向もほかの地域に比べて進んでいるために、氷河縮小が海水準の上昇に占めるこの地域の寄与は、極域やアラスカに次いで大きいとされている (Dyrugerov and Meier, 2005)。しかしながら、こういった見積りの元となっているデータは、極めて限られた氷河での観測によるものであり、様々な気候下にあつて、その変化の程度が様でない氷河を代表しているとは言いがたい。このため、地域的・気候的に偏りのない氷河変動の観測データが必要とされる。

(2) 現状

中国に属するチベット高原・天山山脈では、中国科学院・チベット高原研究所 (北京) および寒区旱区環境と工程研究所 (蘭州) がそれぞれ観測網を展開し、継続的な氷河質量収支の観測が行われているが、国際的なデータベース (WGMS) へ提供されているのはわずか 1 つの氷河についてのみであり、最近になって一部の氷河の結果が公表されつつあるものの、今後のデータ公開が期待されている。インドヒマラヤではフランスの協力により 2002 年から観測が始まっており (Wagnon *et al.*, 2007)、今後の継続に期待がかかっている。ブータンヒマラヤでは日本人研究者により、これまで数か所の氷河で表面高度の測量が行われたものの (Fujita *et al.*, 2008)、より実質的な問題である氷河湖決壊洪水に注目が集まっており (後述)、温暖化の監視といった意味合いでの観測実施に対しては現地政府・研究機関の理解・協力が得られにくい状況にある。ネパールヒマラヤにおける氷河縮小は 1970 年代より断片的な測量観測が行われ (Fujita *et al.*, 1997, 1998, 2001)、ヒマラヤにおける急速な氷河縮小の実態が報告されている。気候的にユニークな地域でもあるため、年々の質量収支の観測の必要性が訴えられているものの (Shroder *et al.*, 2008)、実現には至っていない。旧ソ連邦に属する中央アジア諸国には、天山山脈・パミール高原という、広大な氷河域を有する山域があるが、ソ連崩壊後、継続的な氷河観測は途絶えたままであり、治安悪化という要因もあり、再開の目処は立っていない。このため、改善の策とも言える、衛星データを用いた研究が盛んに行われている (4.7 参照)。ヒマラヤ山脈とパミール高原の間に位置するカラコルム山脈は気候の変遷域に位置しており、巨大氷河が数多くあるユニークな地域であるが、パキスタンの治安情勢があまりに悪く、継続的な観測はおこなわれていない。シベリア南部と中央アジアを分かちアルタイ山脈には、4 ヶ国にまたがる氷河域があり、ロシア側では、持続的な観測がおこなわれている (Surazakov *et al.*, 2007)。モンゴル側に関しては 2000 年代に入ってから調査が始まり、初期的結果から、氷河の変化量が大きいことが示されている (Kadota and Davaa, 2007)。

ヒマラヤにおいて近年注目を集めている雪氷現象として、氷河湖とその決壊洪水 (GLOF: Glacial Lake Outburst Flood) の問題がある。ヒマラヤにおける GLOF は 1960 年代から頻発しており、河川沿いに大きな被害が出ている。近年の氷河湖の拡大は、地球温暖化とともに語られることが多いが、湖を堰き止めている土砂堆積物 (モレーン) は、小氷期と呼ばれる 17~19 世紀中頃にかけての寒冷な時期に拡大した氷河によって運ばれてきたものである。地図や衛星画像の解析により、多くの氷河湖は 1960 年代頃から拡大し始め、湖ができた後はその拡大速度がほぼ一定であることが知られている (Komori *et al.*, 2004)。従って、氷河湖の多くは 20 世紀前半の温暖化によってその発生が決定づけられていると言え、1980 年代以降のそれをいわゆる地球温暖化と呼ぶのであれば、それが氷河湖形成の直接の引き金になっているとは言えない。

消失しつつある氷河から、古環境の情報が含まれるアイスコアを掘削、保存すべきという動きは、組織だつてはいないものの、中国・アメリカ・スイス・日本を中心に進められており、特にチベット高原とアルタイ山域で得られたアイスコアからは多くの研究成果が発信されている (Thompson *et al.*, 1997, 2000; Olivier *et al.*, 2003; Kaspari *et al.*, 2007; Eichler *et al.*, 2009)。現在、アメリカを中心として、中央アジア・パミール高原にて 1,000m 近い深層アイスコアを掘削する計画が進められている。

(3) 課題と展望

ヒマラヤから北ユーラシアにかけてのアジア地域の氷河は総体的に縮小傾向にあるが、様々な気候の影響を受け、その変化の程度は様でなく、衛星や直接の観測による監視が求められている。しかしながら、旧ソ連邦諸国と中国以外の国々では、氷河変動研究の基礎となるインベントリーが整備されておらず、1つの課題となっている（矢吹，2009）。中国およびインドにおいては、データ公開が遅れ気味である問題はあるものの、現地観測実施の体制ができており、それぞれの国の取組みによって、今後継続的なデータが蓄積されていくことが期待できる。一方、継続的観測のポテンシャルが高い国としては、ロシア・中央アジア諸国・ネパールおよびモンゴルが挙げられ、地球規模の氷河変動評価の一環として、国際・国内レベルでの分担・連携のもとに我が国からの支援が期待されている。

また、氷河湖の成因はともあれ、氷河湖の決壊の可能性が流域住民の生活を脅かしていることは紛れもない事実であり、災害対策に関する取組みは、研究成果の現地へのフィードバックという面でも推進すべき課題と言える（図4-3）。特に、先に述べた事実は、近年の温暖化の影響が氷河湖拡大速度の加速、もしくは新たな氷河湖の発生として現れてくるのは、むしろこれからである、ということの意味しており、衛星による継続的な観測が重要な役割を担うであろう。氷河湖の拡大過程については、氷河流動について議論したもの（Quincey *et al.*, 2007）や、氷河上に堆積している土砂堆積物の厚さについて議論したもの（Suzuki *et al.*, 2007）など、様々なアプローチが試みられており、今後、これらを統合した研究の促進が期待される。氷河湖のインベントリーは、国際山岳開発研究センター（ICIMOD: International Centre for Integrated Mountain Development）によってまとめられているが（Mool *et al.*, 2001a, b）、位置情報の管理が悪く、氷河湖の位置同定に使えないなど問題が多い。このインベントリーの更新に加え、それぞれの氷河湖がこれまでどのような拡大履歴をたどってきたか、という拡大履歴の情報を含めることで、前述した氷河湖拡大のメカニズムを解明していくうえで、非常に価値の高い基礎情報となるであろう。

国際的なアイスコア研究に関するパートナーシップである IPICS では、アジア高山域でのアイスコア掘削がメインテーマの1つとして挙げられているが、先行する主な研究グループ（中国・アメリカ・日本）の関与が少なく、機能しているとは言い難い。しかしながら、アイスコアが取得できる場所は極めて限られており、さらにその領域も温暖化によって次々に減りつつあると言われており（Kehrwald *et al.*, 2008）、連携した掘削計画の立案と実施が重要と言える。

（藤田）

4.5.2 パタゴニアの氷河

(1) 必要性

パタゴニアは温暖な気候にもかかわらず大量の降雪によって維持されている。この地域の多降水は南半球の偏西風帯および南太平洋の亜熱帯収束帯（subtropical convergence zone）の影響を反映したものであり、南半球・南太平洋といった広域の降水システムと、太平洋から標高2,000m付近まで山域の地形による強制上昇に起因するものである。

温暖化により予想される降水量増加が降雪で起きる場合は、上流の涵養域から下流の消耗域への質量輸送を増やす。しかし、広大な涵養域となっている高原状の雪原は標高1,000mを少し超えた程度であり、気温上昇が起こればこの地域に降る降水が雪から雨になることで、融解量の増加のみならず、涵養量の減少をも通して劇的な水量減少をもたらす可能性がある。

また、パタゴニアの氷河の特徴は温暖な気候のために大量の融解が起きていることであり、それゆえに大量の融解水が氷河表面・底面に存在している。底面の融解水は氷河流速に直接的に影響することが予想されている。特にパタゴニアでは末端が氷河湖やフィヨルドになっていて、カービングによる崩壊が起きている氷河が多く、このタイプの氷河の質量変化がこの地域全体の氷河損失量に大きく寄与していることが指摘されている（Rignot *et al.*, 2003）。このカービングのメカニズムが気温変化とどのような関係にあるかについては、温暖化と氷河変動を考えるうえで明らかにする必要がある。温暖化と氷河特性によるそれぞれの変動の分離は観測の焦点と考えられる。

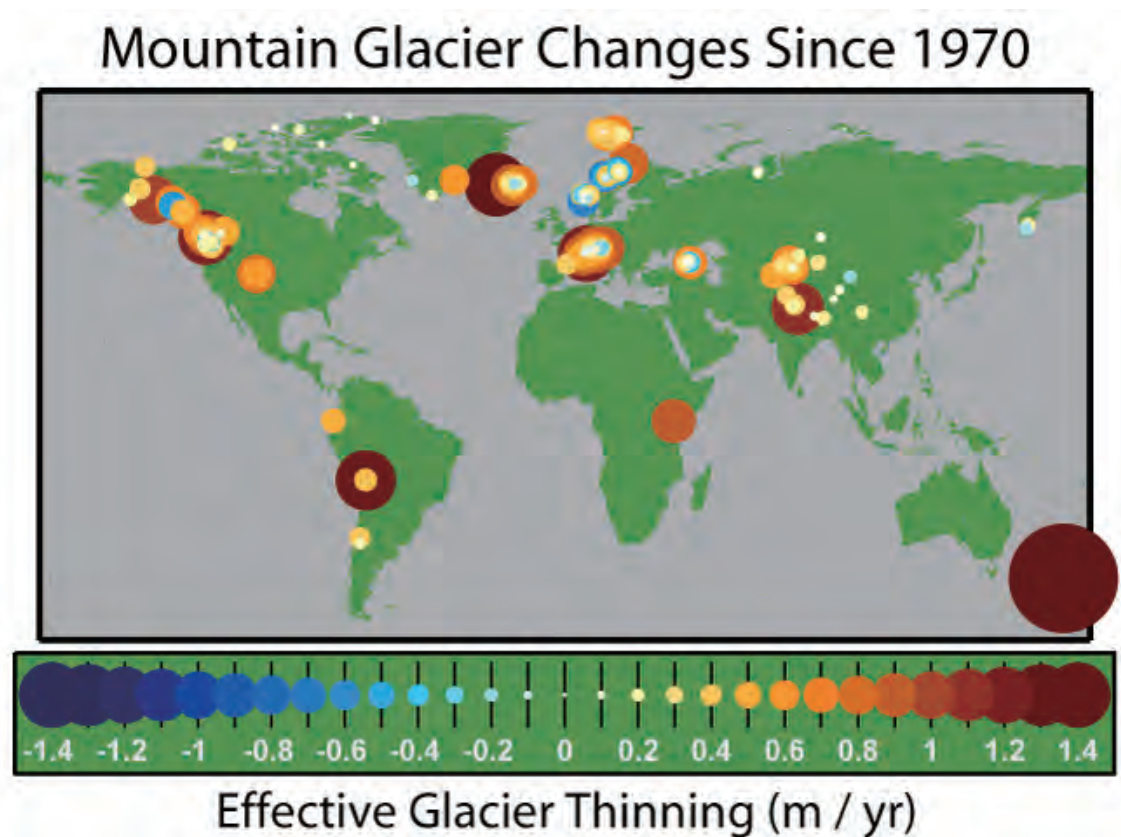


図 4-2 1970 年以降に世界の 173 の氷河で観測された変動量 (Dyurgerov and Meier, 2005)。

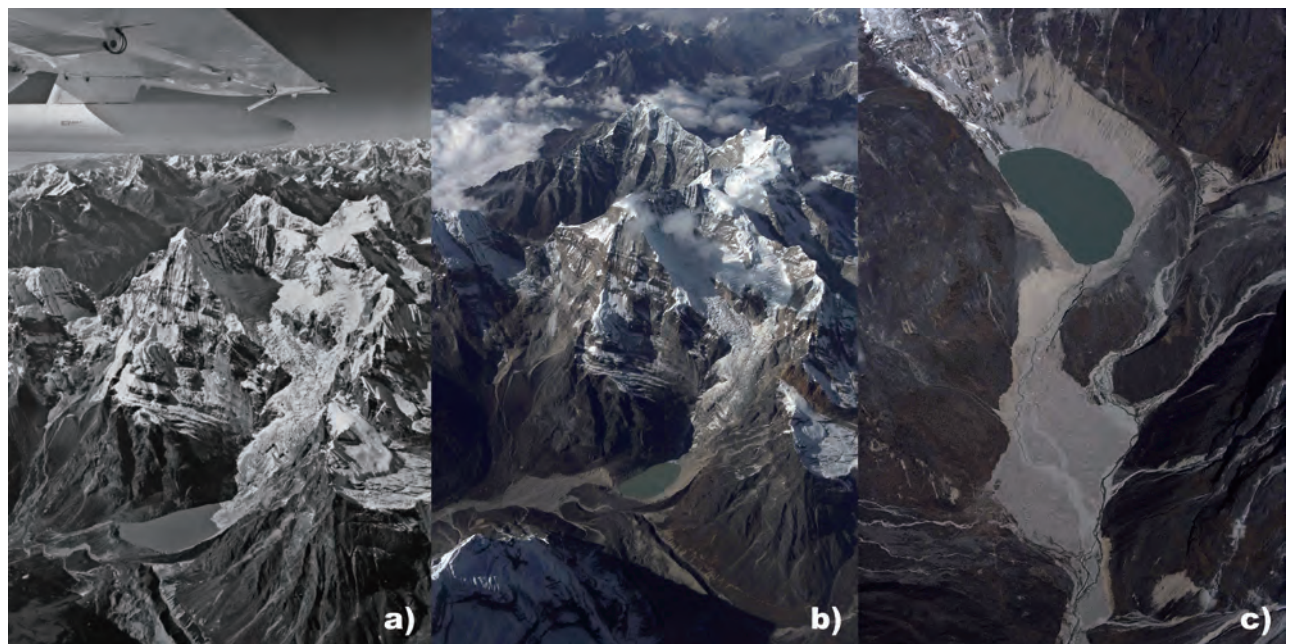


図 4-3 1998 年 9 月に決壊した、ネパール・クンブ地域のサバイ氷河湖。a: 1974 年 12 月撮影 (名古屋大学、日本雪氷学会)、b: 2007 年 11 月撮影 (朝日新聞)。c: 氷河湖の規模としては比較的小規模であるが、決壊の影響は大きい (2007 年 11 月撮影、朝日新聞)。

(2) 現状

南半球の氷河については、アンデス山脈の南端のパタゴニア氷原で、1975～1995年の20年間に20mに及ぶ厚さの減少が衛星観測データにより観測されている (Rignot *et al.*, 2003)。顕著な氷河表面の低下は1995～2000年のデータより0.105mm/年の海面上昇に寄与するとしているが、このパタゴニア氷原の氷河変動は降水量減少や融解量増加だけでは説明できず、氷河の力学と併せての検討が必要としている。氷河流動による湖のせき止めと氷河崩壊の繰り返しなど、気候と氷河の動力学の関係が調べられている (Skvarca *et al.*, 2004)。

パタゴニア氷原はこれまで日本が長期観測による現地調査結果を蓄積しており、多くの氷河の縮小と氷河湖の分布が調査され (Aniya *et al.*, 2005)、氷河末端部の崩壊 (カービング) などの関連が議論されている (Aniya *et al.*, 2007)。

大量の涵養量が予想されているパタゴニア氷原であるが、涵養域の観測がほとんど行われていない。温暖な地域であるため顕著な融解、大量の融解水、その氷河動力学への影響が未知である。気温上昇が進めば融解水の影響をさらに正確に知る必要がある。氷河流動や末端のカービングプロセスと関連する。

氷河質量の涵養・消耗・流動・崩壊といった過程が急速に展開されている点からも、温暖化の影響評価のモニターとしての観測とともに、末端崩壊に関わる温暖化—氷河変動のプロセスを考える地域としても重要である (Skvarca and Naruse, 2006; Stueffer *et al.*, 2007)。

(3) 課題と展望

① データ標準化

氷河研究は個別のグループが個別の氷河について、詳細にまた長期に観測を行っているケースが多い。パタゴニアでの氷河観測は下流の消耗と流動速度、氷河地形に限定されている。パタゴニアの氷河では、消耗域のデータしか得られていない。この地域の氷河維持の特徴である多量の涵養についてはほとんど未知のままである。氷河上部の涵養・気象情報の取得が必要である。

② データ流通の促進

個別のグループによる観測成果を、ALOS 衛星などによる衛星マッピングをベースにして、その上に氷河情報を重ねる GIS 技術を用いたデータ統合が有効であると考えられる。

③ 観測施設等の相互利用の促進

パタゴニア氷原の特徴は同じ涵養高原域とそこから多方向に溢流する氷河群である。観測はほとんどの場合、個別の氷河について行われている。上部涵養域はアルゼンチン・チリにまたがっているところもある。共通する上流涵養域の情報共有と、下流部の変動の比較は広域の氷原の理解に有効である。

④ 時空間的観測空白の改善および観測項目の充実

上流の涵養域の積雪量の観測と、下流の消耗域の融解水の観測が必要である。変動の原因が温度であるか降水量の変動であるかを調査するためには、氷原内陸における観測が必要である。無人観測計や衛星観測の利用が望まれる。涵養量の推定の可能な方法は、氷原での掘削調査、無人自動観測装置の設置が挙げられる。氷原の涵養域はチリ・アルゼンチンの国境に係わることもあり、両国との共同研究体制、またヘリコプターなどの輸送手段への支援が必要である。また、自動気象雪氷観測装置は近年衛星通信を用いた送信システムが開発されてきており、多降雪域に対応した特別なシステムの開発が望まれる。

融解水やカービングを含む氷河モデルの開発や検証に有効な地域である。氷河底面における融解水の状態を調べるために、熱水ドリルによる底面までの掘削とモニターが有効である。

氷原域全域の質量変化を知る方法としては衛星重力測定が期待されるが、海洋変動や多数の氷河湖の水位変化の影響などを除去する必要がある。

パタゴニアの氷河観測は、チリ・アルゼンチンの国境付近、分水嶺付近、などという条件から両国との共同が必要である。日本が観測機器を準備し、これらの国にロジスティックスを依頼するなどの体制が不可欠である。
(榎本)

4.6 降積雪

4.6.1 必要性

降積雪は、地表のエネルギー収支・水循環・大気循環パターン・凍土の消長・温室効果ガスの放出や植生生育といったほかのプロセスと相互に作用している基本的な気象要素の1つであり、地球温暖化研究では、降積雪量が非常に重要な指標となっている。

積雪の表面アルベドや積雪内部への熱の伝導率といった降積雪の物理量を正確に把握することは、全球気候モデルの予測精度向上にとって重要である。また、地上において降積雪の量や時空間変動を把握することは、レーダーや衛星観測による広域降積雪分布の精度向上のための検証のみならず、雪崩などの雪氷災害対策といった観点からも重要である。さらに、山岳域にある積雪は、融雪水として安定した地表水および地下水を供給する天然のダムの役割を果たしており、生活用水はもちろん農業や工業用水として生活を支えている。そのため、地上における降積雪観測は、貴重な水資源の供給や農作物の生産管理といった観点からも非常に重要である。

4.6.2 現状

降積雪観測に関しては、各国で古くから実施されてきた。日本では、気象庁が約 1,300 か所の地域気象観測システム (AMeDAS) 降水量観測点、約 290 か所³¹の積雪深の観測点を全国に配置している。しかし水資源や雪氷災害対策に重要である積雪水量や積雪密度などは観測されていない。各自治体や道路管理用に展開されている道路テレメータでも降積雪を観測しているが、精度や手法などが統一されておらず、また欠測期間があるなど問題も多い。上記の観測点で降雪量を測定する際に使用されている降水量計は、降水すべてを捕捉できるわけではなく、気象条件によって捕捉損失が生じることがわかっている。そこで降水量計の捕捉損失を定量化する試みが各国関係研究機関により国際的に実施され、降水量計の種類によって異なるものの、風速 6m/s では 20% から 70% もの捕捉損失が生じ、また雨と比べ雪は捕捉損失が大きいことが報告されている (Goodison *et al.*, 1998 ; 横山他, 2003 ; Sugiura *et al.*, 2006)。また、現在気象庁が発表している AMeDAS 降水量は捕捉損失が考慮されていないため、降雪の多い地域の冬期降水量に関してかなりの過小評価の可能性がある (Yamaguchi *et al.*, 2009)。さらに、風除けの助炭の有無によって降水量計の捕捉率が大きく異なるために、降水量計の種類や測器の変更時期などのメタデータを明示して残しておかないと、測定データの品質に不連続が生じる可能性が指摘されている (中井・横山, 2009)。

一方、水資源として重要であり、雪崩などの雪氷災害を誘発する山岳域の積雪に関しては、いくつかの省庁・研究機関が、北海道・東北・北陸・山陰などに観測点を展開しており、なかでも (独) 防災科学技術研究所は積雪深・積雪水量・気温などの系統だった観測を継続している (Shimizu and Abe, 2001)。しかしながら、日本国内の山岳域全体の積雪水量や長期変動傾向を正確に把握するには至っていない。

また、海外の積雪地帯でも降水量や積雪深について観測が実施されているものの、例えば GTS で配信されている積雪深観測の分布を見ると、特に標高が高い地域や高緯度地域に降積雪観測の空白域が広がっている。これは、一般的に日本も含めて山岳域は平地に比べて気象条件が厳しく、観測点の維持管理が難しいためである。

山岳域など観測点のない地域の積雪分布を知るために、衛星やレーダーを利用した降積雪量分布を求めるアルゴリズムの開発が近年進められてきている。しかし現在のアルゴリズムでは、凍結土壌域、森林域や起伏の大きい地域の積雪、さらに、しもぎらめ雪、ぬれ雪などに関しては誤差が大きいことが知られている (例えば AMSR/AMSR-E プロダクト精度は積雪深で 20% または 5cm、積雪水量で 20% または 10mm³²)。また、日本では平地の気象データから山岳域の積雪状況を予測するという試みもなされているが (Motoya *et al.*, 2001)、平地と山岳域の積雪水量の変動は必ずしも一致しないことに加え (Yamaguchi *et al.*, 2007)、検証となる山岳域のデータが少ないために、定量的な議論をするにはまだ課題が多い。

温暖化が積雪の特性に与える影響を知るうえで重要な基礎データとなる積雪の構造や物性などに関して、北海道大学・(独) 防災科学技術研究所・(独) 森林総合研究所などで長期的に系統だった定点観測が行われているが、近年、定点観測を行う研究機関が減少していることもあり、広範囲にわたっては行われていない。

世界的な研究活動の流れとしては、IGOS-Cryosphere では国内レベルから国際レベルでの積雪観測網を展開する必要性を認識しており (IGOS, 2007)、また IPY Legacy の一部として WMO/GCW (Goodison, 2009) では積雪 (Extent・Depth・SWE (Snow Water Equivalent)) が Pilot Project の 1 つとなっている。一方、積雪データセットの活用・流通促進のため、WCRP/CliC の Asia CliC では積雪データを収集するワーキンググループが形成されている (WCRP Report, 2007)。

³¹ <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (参照日 : 2010/02/16)

³² <http://www.jaxa.jp/> (参照日 : 2010/02/16)

4.6.3 課題と展望

降積雪に対する温暖化の影響を定量的に評価するためには、一定以上の質を持つ継続的な地上観測により降積雪量の時空間変動の実態を把握することが求められる。そのために、これまで雪氷研究分野、水文研究分野や気候研究分野などで個別に実施されてきた降積雪観測点の分布状況を把握して、希薄な観測域を抽出し、選択的な観測配置を実施することが必要である。特に、国内では観測の少ない山岳域での観測網を充実することが望まれ、国外では、温暖化の影響をうけやすく、日本に影響を及ぼす積雪南限域（モンゴルなど）や高緯度沿岸域（シベリア・アラスカなど）で地上降積雪観測を継続かつ充実させるための協力が日本に求められており（JAMSTEC など）、また観測事例の少ない高山に観測網を設置することが期待される。一方、観測点は一度廃止してしまうとデータの連続性や質などに問題が生じて利用が困難となるために、長期間安定して観測点を維持できるような体制が必要である。

そのためには組織的な取組みが必要であり、各研究分野にまたがる連携体制構築が望まれる。次期 GCOM-W および気候変動観測衛星（GCOM-C）など衛星活用による高精度の降積雪把握のために、雪氷研究分野、水文研究や気候研究分野のみならず、リモートセンシング研究分野と観測施設の相互利用を促進するなどの連携体制とともに、地上検証観測と一体となったアルゴリズム開発の推進が期待される。具体的には、上述の山岳域での観測網を充実させる一方で、すでに観測網が設置されている平野部では各分野と連携して降積雪の観測を実施することが期待される。これにより、時空間的観測網の配置を分担でき、また分野が異なると降水量や積雪深といった共通の必須観測項目のみならず、積雪水量・雪質・粒径・密度・降雪形状・強度やアルベドなど、単一分野で特に必要とされる項目が付加されるため、取得観測項目を効率よく充実させることができる（JAMSTEC・JAXA・気象研究所・東京大学・北海道大学など）。

加えて、国内外を問わず、様々な物理法則を組み込んだ降積雪モデルが発表され、改良されてきている。温暖化の影響を考える場合には単年度の積雪を再現するだけでは不十分であり、長期積分可能なモデルの開発が必要であることから（山崎・杉浦, 2006）、各研究分野の連携観測体制は、そのようなモデル開発・改良に対しても貢献が期待される。

さらに、温暖化研究の進展とともに、これまで各研究分野で個別に取得されてきた降積雪データの利用方法が、近年、変化してきている。降積雪に対する温暖化の影響を定量的に評価するには、各分野の相互連携を通じて国内外に蓄積されている降積雪データの流通を図り、長期かつ高精度の降積雪に関するデータセットを構築することが必要である。また AMeDAS 以前に取得された気象データや各自治体などが観測している降積雪データなど、貴重なデータであると認識されながら予算の関係でデジタル化されていないデータが数多くある。得られた降積雪データを共有化し流通をさらに促進するために、過去に実施された降積雪データで紙媒体などにより保存されているものを電子情報化することにより、効率のよい多目的再利用が可能となる。

一方、よりよい降積雪データを得るための方策という観点から、これまでの測定値を真値に近づけるための測器を開発・改良することに加えて、最近では降水量計の捕捉特性を評価するという点に関心が払われてきている。今後の高精度な地上降積雪量観測のためには、降水量計の捕捉特性の評価結果を活用すること、および従来利用されていなかった他分野で進む技術を産官学共同によって降積雪観測へ応用すること（非破壊・非接触の測定技術など）も期待される。

（杉浦・山口）

4.7 衛星による雪氷圏の観測

4.7.1 必要性

温暖化の影響は北極圏や高緯度地域や高山などの雪氷圏で顕著に現れると考えられている。これまでのところ顕著な変化が検出されていないところでも、変動が始まるとフィードバックシステムによる変化加速が考えられるので、衛星による広域モニターが重要である。南極圏でもこれまでのところ顕著な変化が検出されていないが、将来変化が顕著になる可能性がある。

雪氷の観測項目としては雪氷域の面積・積雪深や海水域の面積がある。積雪面積・氷河面積（主に末端変動）・海水面積ともに減少傾向が報告されており継続した監視が必要である。

積雪深の観測網が整っていないところでは衛星観測が利用されているが、まだ観測精度に問題が残っている。しかし、時間・空間変動の指標としては利用されている。

現在運用されている衛星のデータについて、途切れることのない連続データ取得が望まれる。また現場観測と

の効果的な連携が望まれる。

4.7.2 現状

現在稼働中の雪氷観測衛星としては、Aqua・ALOS・ICESAT (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)・GRACE・中分解能分光放射計 (MODIS)・アメリカ軍事気象衛星プログラム (DMSP)・LANDSAT ほかの高分解能可視観測衛星が運用されており、雪氷観測でも成果を挙げている。JAXA によるマイクロ波センサー AMSR・AMSR-E を用いた観測結果は、アラスカの IARC 経由で北極海の海水情報の主力として世界の研究者に利用されている。すでに予定されていた耐用年数をこえているため、次期衛星として計画されている GCOM-W の遅延のない運用が望まれる。

海水変動モニターのうち海水面積は継続的に観測されている。積雪変動モニターとして、面積と積雪深が観測されている。

北半球の積雪域の変動は人工衛星によるデータの蓄積が行われ、過去 30 年の変化が議論できるようになっているが、積雪深はまだ誤差が多く改良が必要である。融解・粒径・不純物 (アルベド・放射強制力と関連) などのデータの拡張も取り組まれている。

衛星による氷河マップ、広域 GIS 化も個々の研究グループで行われている。衛星からの重力測定による氷床や山域規模での雪氷質量監視 (重力観測および表面高度) は成果を挙げている。後継衛星の計画が重要である。NASA の ICESAT 衛星のレーザー高度計は、氷床表面高度の短期変化に成果を挙げており、涵養や消耗、氷床下湖の水圧変化に表面高度の短期変化の観測にも成果を出している。国内でもこれらのデータを使用し始めている。

南極半島のラルセン棚氷では、大規模な崩壊は気温上昇による融解水の増加が棚氷を不安定にしていると言われている。グリーンランドでも表面融解が増加していると言われている。昭和基地周辺ではリュツォホルム湾を覆う沿岸定着氷の不安定が調べられ、湾内定着氷の崩壊・流出の頻発期となったことが調べられている。また、沿岸部の定着氷での融解日数が、年により大きな変動を示すことや近年のわずかな増加が観測されている。このような棚氷や氷床縁辺域などの温暖化影響の出やすい地域の観測に、最近の衛星センサーによる監視が可能である。

世界中に存在する氷河に対し、衛星観測が極めて有効な手法であることは言うまでもない。近年、高空間分解能の衛星データ (主に可視領域) を用いて氷河の面積変化を求める研究が、チベット高原や旧ソ連に属する中央アジアで盛んに行われつつある (Khromova *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2003; Surazakov and Aizen, 2006; Ye *et al.*, 2006a, b; Bolch, 2007)。「比較対象の古い地図が利用かどうか」がこの種の研究の成立を制限しており、「古い地図」の入手が難しいヒマラヤ地域ではやや立ち後れている感がある。1950 年代に広くヒマラヤ地域の地図を作成しているインド測量局が当時の地図の元データを公開すれば、研究が大いに発展する可能性を秘めているものの、現状では困難であろう。

4.7.3 課題と展望

(1) データ標準化

現在稼働しているマイクロ波観測は、雪氷観測野の長期の基盤データとして重要であり、継続観測が望まれる。また、現在の時空間分解能がさらに向上すると、現在の海水や広域積雪だけでなく、複雑な地形の雪氷も観測対象となる。

① 積雪

現在、広域の積雪観測資料として活用されている可視・近赤外データは整備されつつある。長期変化を検討するために、過去のデータにさかのぼって、より良い解析法で再解析することが必要である。積雪面積に加え、積雪深の情報も精度向上が望まれる。これまで作成されていたマイクロ波による衛星積雪観測データでは森林が大きな誤差を与えるので、森林被覆面積や植生の違い、葉面積など、衛星積雪観測の補正のために植生の情報が必要である。逆に積雪深により、冬季の積雪下の地表面温度や植生のおかれている状況が変化する。積雪量は融解水を通して水文に、さらに地面の乾燥状態へとつながっていく。

複数の衛星を使って全地球の降水 (降雨・降雪) を高精度に観測する全球降水観測 (GPM) が計画されている。全球の雪氷圏を網羅する範囲ではないものの (北緯約 68 度～南緯約 68 度)、雪氷圏がある程度含まれていることから、GCOM-W および GCOM-C の衛星データの活用による高精度積雪把握とともに、GPM による高精度降雪把握に向けて、リモートセンシング研究分野との観測施設の相互利用を促進するなどの連携体制を構築して、地上検

証観測と一体となったアルゴリズム開発・検証・改良を推進することができると考えられる。また、斜面の向きや傾斜など地形データの整備も重要である。

② 氷河・氷床

1970 年以降、LANDSAT シリーズの継続と衛星画像の空間分解能の格段の進歩があり、個々の氷河の形状を記載することが可能になってきた。それに伴い次世代の氷河インベントリー計画 GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) の立案が 1995 年に行われた(Raup *et al.*, 2000)。GLIMS プロジェクトは 1999 年に打ち上げられた Terra-Aster のサイエンスチームとして開始され、このプロジェクトの目標は個々の氷河の変動を測定できる GIS データベース (GLIMS Glacier Database (GGD)) を作成することであり、2005 年以降にデータを公開し始めている。衛星観測が継続される限りデータは蓄積するので、今後の変化を監視することは可能であるが、このための基礎情報となる氷河台帳 (インベントリー) が、特にヒマラヤ地域で作成されておらず(矢吹, 2009)、整備が望まれる。

海水準変動との関連では、上記の面積に加え、体積の変化を広域で把握することが望ましく、衛星データを基にした DEM は有力な手法と言える。しかし、その精度は短期間の氷河の標高変化を求めるにはいまだ十分とは言えず(Fujita *et al.*, 2008)、標高変化を求めた先行研究においても、現地観測による検証なしで比較する研究となり、試行段階の域を出ていない(Berthier *et al.*, 2007; Bolch *et al.*, 2008)。ALOS のような高精度な衛星データを利用した継続的な監視が、今後ますます重要になってくるとともに、現地観測による検証を併せて行う研究も必要となろう。

しかしながら、ALOS は氷河モニタリングに特化した衛星センサーではなく、雲と雪氷域を識別することが困難とされている。地球温暖化に伴う氷河融解に伴う海水準変動への寄与を正確に見積るためには、座標・標高・面積を記載した高精度な 3 次元氷河インベントリーが必要である。今後、可視域から中間赤外域の観測が可能なセンサーでかつ、地表面の標高が計測できる立体視センサーを持つ高空間分解能の氷河モニタリングに特化したセンサーを開発することも必要である。

南極氷床の観測においても ICESAT による表面の高度変化のデータ、衛星重力データと組み合わせての質量の変動の解析が、南極大陸の最近の質量の変化を明らかにしている。

③ 海氷

海氷観測では、海氷域の面積に加え、海氷移動、さらに夏期の海氷表面融解や結氷期初頭の結氷成長、海氷厚の情報取得が望まれる。さらに海氷移動情報と併せて、海氷生成消滅・輸送の評価が必要である。

時間・空間変化が急速な雪氷圏において衛星による、変化のリアルタイムモニターは有効である。即時性のある情報の公開や解析結果の公開で、変化の厳しい雪氷圏の情報を更新することができる。このためには衛星データそのものの公開とともに、検証に使える現場データの取得が必要となる。自動観測装置からの観測データ転送の展開が衛星データの信頼性・即時性といった有効性を高める。

④ 凍土

凍土観測研究におけるリモートセンシングデータの積極的な利用として、マイクロ波衛星データと数値モデルを組み合わせた表層土壌の凍結融解の推定、近年の高精度 DEM と過去の CORONA 画像との比較による凍土融解に伴う地形変化の把握などが挙げられる。

(2) 複合データの使用

過去の衛星観測データによる雪氷圏の観測を再解析することにより、モデルを用いた未観測域の補填などの手法も検討すべきである。同様な方法で、過去 50 年の南極氷床の温度変化の再解析などが最近行われている。

複数の衛星を同じ軌道上で連続して周回させる観測案が検討されている。多くのセンサーによる集中観測により総合的な情報取得が可能である。

最後に、新しい衛星の打ち上げの際には、衛星観測推進の委員会が開かれ、異なる衛星を用いる研究情報の交換や将来計画への提言、若手研究者への指導が行われたが、近年、そのような検討会が減っている。衛星観測技術とともに研究者の将来展望や解析技術を維持するために、盛んな研究交流のワークショップやトレーニングセミナーを増やすことが必要である。

(榎本・藤田)

4.8 モデル開発の視点から見たニーズ

4.8.1 必要性

気候系の理解や、気候の将来予測（いわゆる地球温暖化予測）において、気候モデルは欠かすことができない道具である。これまで気候モデルは、大気海洋結合モデルにはじまり、物理過程の精緻化・高精度化が進められてきた。そしてその結果は、気候系における雪氷・アルベドフィードバックの重要性を裏づけ、全球平均気温をはじめとする将来予測結果を評価し、地上気温・海氷密接度・積雪面積等の変化の形で極域をはじめとする雪氷圏の温暖化シグナルが顕著であることを示してきた。近年ではそうした物理過程に化学反応や生態系といった化学・生物過程が加わり、また、氷床のような時定数が極めて長い系も含むようになってきている。凍土におけるメタンの動向や、氷床の融解と海水準変動の関係についても、今後気候モデルは定性的・定量的な将来予測情報を出していくだろう。

観測が過去から現在の実況監視目的に欠くべからざるものであることは言うまでもない。しかし、より良い将来予測をするためにはより良い気候モデルが必要であり、また観測を含む気候研究で得られてきた知識を統合したものが気候モデルと考えることもできる。観測的研究は気候モデルの開発・改良にも寄与するべきであろう。

このように、気候変動・地球温暖化に関する予測に欠かせず、またこれまで重要な知見を示してきた気候モデルではあるが、その最新のものにおいても組み込まれていない過程は数多く残されている。また、気候モデルに含まれるパラメーター（定数）の中には不確定性が大きいものも少なくない。

この背景には、観測の量ならびに精度の不足や、空間的な非一様性等に伴う観測データの不確定性があるのは否めない。今後、気候モデルの感度が大きい過程を中心に、より信頼できる良好な観測データが望まれる。

ただしモデル側にも、現在の気候モデルによる温暖化予測計算では高速のスーパーコンピュータを用いるとはいえず、計算コストを節約するために比較的簡易なサブモデルを使わざるを得ない事情がある。扱う現象は限られるが高精度のプロセスモデルを、そのような気候モデル用のスキームと観測データとを結びつけるツールとして用いながら、より適切な気候モデルを開発するような体制も必要である。気候モデルと直接結びつく観測のほか、プロセスモデルと対応のつくものもまた必要であることを意味する。

4.8.2 現状

(1) 海氷モデル

気候モデルに用いられている海氷モデルは、海流や風により移動する、熱収支を表現可能な氷や雪の板として取り扱うものから始まった。その後リード（開水部）が導入され、海氷の力学を考慮したモデルによる運動の評価を扱うものへと進み、近年は海氷の層の厚さの格子内非一様を考慮したマルチカテゴリーのモデルも増えつつある。

このように精緻化が進んでいっているが、海氷モデルにおいて最も重要となる熱収支に関わる観測すら、十分とはいえない。例えば、アルベドのような、気候モデルの感度が大きいパラメーターについても不確実性が大きいのが現状である。精緻化・高精度化に寄与する長期・高品質の観測データセットとしては、北極海表面プロジェクト（SHEBA: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean）などに限られている。雲の観測も含め、今後に期待する。例えば熱収支では海氷厚も重要であり、モデルの初期値作りが重視されている。これについては古くからある潜水艦観測に加えて、近年は衛星観測に基づくデータが現われ始めており、今後の面的な高精度データの作成に期待したい。海氷厚の延長として、断熱性の高い海氷上の積雪の厚さなどの観測も望まれる。

(2) 陸面モデル

気候モデルに用いられる現在の陸面モデルの多くは、簡単な植生を含み、砂漠等の乾燥域や常緑広葉樹からなる熱帯域なども統一的なプログラムで表現するものである。雪氷圏のモデル化としては、例えば、葉面積指数（LAI）や植生被覆率などの植生パラメーター（季節変化等をする定数）に極域・雪氷圏での値を与え、また、積雪スキームや凍土過程（土壌中の水の相変化・凍結）を含めることで対応されてきた。観測データは熱や水に関する諸量の地点観測が主であり、陸面モデルはその観測を説明するように検証・開発されてきた経緯がある。

ただし、地点観測では、観測者の興味ある物理量のみに限られたり、陸面モデルを駆動・検証するのに十分な物理量や、観測地点の物質の物性（植生パラメーター・土壌の物理特性）の情報が不足している場合も少なくない。陸面観測地点は僻地であることが多く、一般に観測サイトの維持が困難であり、特に雪氷圏を含む地域では機器を設置して継続観測できる地点は限られる。その限られた観測点で、できればスーパーサイトを構築し、陸面の熱・水収支を解析・評価できる要素を継続的に長期観測して、陸面モデルの開発・検証に使えるデータセッ

トが整備されることを切に希望する。なお、サイトの環境を示す写真などの情報は有用なので、諸パラメーター同様の開示を希望する。

衛星による広域の観測は、気候モデルの結果を直接検証するために重要であり、積雪量等に関する精度の高い観測システムや推定手法が望まれる。最近では積雪面のアルベドも利用可能になってきたが、積雪量は特に森林域等において、定量的な問題が残されている。凍土については、広域データとして定性的な情報（季節／永久凍土、連続／不連続凍土などの分布）は公開されているが、定量的な広域データはまだなく、衛星データなどから推定する手法の開発が望まれる。

(3) 氷床モデル

気候予測での氷床の寄与は、氷床の融解が海水準に与える影響にほぼ限られている印象があり、予測においても表面の熱収支（氷の涵養量・融解量）の評価に重きが置かれてきた。近年は氷床の運動の効果も考慮するため、表面での熱・水フラックスを入力として与え、氷床内部の運動を表現するモデルが組み込まれ始め、進展している。ただし、これらのモデルでも、氷床下部の液水層の表現や、底面すべり、棚氷の表現などがきちんとモデル化されていないほか、表面に見られる融解水のアルベドなども十分な精度があるとは言えない。

4.8.3 課題と展望

(1) 海氷モデル

熱収支に関わる観測については前項で述べたとおりである。海氷モデルの運動（力学）は、弾粘塑性体モデルなど連続体近似して扱われているが、実際の観測に基づいてモデル化されたものではない。詳細な漂流ベクトルの時系列データなどがあれば、内部応力モデルの精緻化を図ることが可能になろう。また、マルチカテゴリーの海氷モデルでは、海氷の乗り上げ等も考慮されており、そうした過程に関わる観測データも必要になる。また南極域の海洋では、棚氷とその周りに存在する海水との相互作用による水塊変質過程が底層水の生成に重要となる。

また温暖化に伴う夏季の海氷激減がとりざたされているが、そのような状況では植物プランクトンの増加など、海洋生態系も大きく変わることが予想される。気候モデルは海洋生態系を含むが、そのような環境はこれまでに起こったことがないため検証データがないのが実情である。このように、極域では年々変動が大きく、シグナルが顕著に表れる場合がしばしば見られる。そういった現象をいち早く捉えるために、例えばその年の海氷分布をもとに観測船の経路を変えるなど、機動性のある機敏な観測ができる体制をさらに整備し、実施してほしい。

(2) 陸面モデル

陸域の観測およびモデルで問題となることに、空間非一様性等に起因する地点と広域のスケールギャップが挙げられる。地点観測では代表性が問題になり、衛星観測では広域量しか測定できない。他方モデルは、地点の観測をベースに開発されてきたが、気候モデルの格子は広域であり、非一様性をどのようにモデルに組み込むかが問題となっている。そのスケールギャップを埋めるための、観測とモデルが連携した研究活動が今後必要になると思われる。例えば、吹雪による雪移動等が積雪量や積雪被覆率の非一様性を作っており、気候モデルではそれを考慮するのが難しい。この場合であれば、吹雪の広がりをもった観測をもとに吹雪を陽に表現するプロセスモデルを作成し、その研究結果をもとに、気候モデルでは吹雪の寄与を広域（格子点）の情報で表現するようなスキーム（パラメタリゼーション）を開発することが考えられる。こうした研究活動は、気候モデルの精度の向上のみならず、小規模スケールの現象等の解明等にも役立つだろう。

また、観測による長期モニタリングは実況監視のみならず気候モデルの検証にも極めて重要である。現地観測において従来、ロシア・中国などで長期にわたる陸域水文過程や凍土に関する観測が行われてきた。しかし近年、中国ではデータの秘匿が、ロシアでは観測点の減少の問題がある。近年、衛星データとそのアルゴリズム開発の進展が目まじしいが、それらとうまく融合した長期データの作成にも期待したい。

(3) 氷床モデル

気候モデルでは、前述したように、熱収支に加えて運動を考慮したモデルへの移行が進められてはいるが、十分な精度があるとは言えない。実際気候モデルでは、南極氷床は将来において降水増加が融解の増加を上回り、海水準の低下に寄与するとしているが、衛星データによる氷床質量の観測的研究は、南極氷床の融解は早まっていると指摘している。今後は、まだ表現が不十分な過程のモデル化・精度向上が必要な段階にあり、それに役立つ観測データの取得が期待されている。

（保坂・高田）

4.9 雪氷データアーカイブの現状と課題

4.9.1 必要性

雪氷圏は地球気候システムの1つの重要要素であり、氷河・凍土・積雪など近年変動が大きな要素であり、これらのデータのアーカイブを行うことは、地球温暖化の現状をモニタリングするだけでなく、現象の理解を深めるためにも有用である。IPCC-AR4でも数多くの雪氷圏変動の記述がなされており、雪氷圏の変動は特に社会的影響に関する懸念が大きいとされている。大気・陸・水圏を含む雪氷圏は国境にかかわらず続いており、広域の雪氷圏に関する情報を国単位で閉じることなく、広い地域でデータを共有することで、地域全体さらには地球全体として雪氷圏の変動の理解を進めることが、地球温暖化の中で雪氷圏変動のより良い理解のためには重要である。現在、世界的には雪氷データに関してはNCDCやNSIDC等のアメリカのデータセンターが中心となっており、世界的なデータの整備を進めているが、WMO等のようなデータに関する国際的組織がなく、国際的・組織的なデータアーカイブが非常に弱体であるため、現状把握・変動研究がままならないのが実態である。特にアジア雪氷圏には複数の国が存在し、広域での雪氷圏変動の把握を行うためには国際的・組織的なデータマネージメントが必要とされている。

4.9.2 現状

(1) 観測データ

① 海氷

オホーツク海のデータは、気象庁のオホーツク海沿岸の気象官署における目視観測資料がある。これは古くは100年以上の長期観測データの蓄積がある。大学および各研究機関による観測も行われているが、観測自体の詳細およびデータに関しては公開されていないものが多い。

一方、北極海や南極海などの広域の海氷データは衛星データによる海氷分布情報がアメリカNSIDC・NASA、日本ではJAXAにより公開が行われており、これらの情報は海氷の基本情報として欠かすことができないものである。

② 凍土

凍土に関しては日本には一部の高山地域（大雪山・富士山等）にのみ存在しており、大学等による観測が行われており、一部の観測データは国際永久凍土協会（IPA: International Permafrost Association）の年次報告書に各国レポートとしてその一部が報告されている。その他にも日本の大学および国内研究機関等が行っている海外の凍土地域の観測は多数あると考えられる（4.3.2参照）。これらの観測のほとんどのデータは論文として使用されているものもあるが、データそのものに関しては、個々の大学および機関で管理・保管されているところがほとんどである。また国際的な枠組みでは、永久凍土層のための全球陸域ネットワーク（GTN-P）によるデータの公開が行われている。観測サイトの情報と一部データはすでに公開済みである。これらのデータはNSIDCのサイトよりリンクがなされている。

JAMSTECは、1990年代初めの旧共産圏の国家体制の変革に伴い散逸してしまったロシアやモンゴルにおいて取得された1990年以前の数十年間の比較的浅層部（活動層・季節凍土）の地温データに関してデータレスキューを行っている。

③ 極域の氷床と氷河

日本における南極における一部の観測データは、国立極地研究所がJARE Data Reportとして出版しているものの、データの多くは観測を実施した研究者が個別に管理しているのが現状であり、データ標準化・データ流通は立ち後れている。

現在、国立極地研究所は「学術データベース」という名称のデータベース³³でメタデータを整備中であるが、実際のデータの集積はまだ行っていない。

日本における北極における観測データは、観測やデータの取りまとめを実施する組織がなく、観測を実施した研究者が個別に管理しているのが現状であり、データ標準化・データ流通は立ち後れている。また、国立極地研究所・北極センターが2000年以降、北極地域の観測情報の収集を行っており北極圏科学観測ディレクトリ³⁴として公開を行っているが、日本における北極観測のすべてを網羅されてはおらず一部の情報に留まっている。

³³ <http://polaris.nipr.ac.jp/~dbase/>（参照日：2010/02/16）

³⁴ <http://www-arctic.nipr.ac.jp/J-direct.html>（参照日：2010/02/16）

④ 中低緯度の氷河データ

氷河データに関しては日本に氷河が存在しないことから日本に関するデータは存在しない。しかし、海外の氷河は個別の大学および国内研究機関により詳細にかつ長期的に観測されている。それらの観測の詳細は日本雪氷学会氷河情報センターが年度ごとに調査し、インターネットを用いて各地域の観測情報の公開を行っている。しかし観測データに関しては、その一部はデータレポートの形として公開を行っているものもあるが、多くのデータは個々の機関で管理・保管されているところがほとんどである。

⑤ 積雪データ

日本国内の積雪データセットを独自に有しているところは気象庁のほか、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター、(独)森林総合研究所十日町試験地、国土交通省水文水質データベース、国土交通省各地方整備局、各地方自治体等が挙げられる。これらのデータのうちで気象庁は過去のデータを数値またはグラフとしてインターネットを用いて公開しているところもあるが、ほとんどの観測データは、個々の機関で管理され、データベースとして紙媒体として保管されているのがほとんどである。日本国内の積雪データは主として防災を目的として取得されており、リアルタイムでの公開またはそれを防災情報につなげるために使用されており、過去のデータについてアーカイブされていないものが多数ある状態である。そのほか大学等で期間の限られた積雪観測等の観測データもあるが、それらの情報に関してはWeb等での公開もなく不明である。

海外のデータに関しては、大学および国内研究機関等による、シベリア地域(国立極地研究所・JAMSTEC等)アラスカ地域(国立極地研究所・北見工業大学・JAMSTEC等)の観測データがあるとされているが、その観測詳細等に関しては一部科学研究費報告書等で報告されているが、ほとんどのデータに関しては公開されていない。

(2) データアーカイブス

① 世界における雪氷データアーカイブ

雪氷分野における世界各地のデータアーカイブは、NSIDCが多くのデータを受け入れてきている。近年においては下記のプロジェクまたは研究機関の雪氷分野のデータセットを統合した形で受け入れてデータセンターを運営している。

- Antarctic Glaciological Data Center (AGDC)
- GLIMS Glacier Database
- IARC Frozen Ground Data Center
- The International Polar Year Data and Information Service (IPYDIS)
- NOAA-supported Data Management Activities
- NASA Distributed Active Archive Center (DAAC)
- The Roger G. Barry Resource Office for Cryospheric Studies (ROCS)
- WDC for Glaciology

このように、アメリカを中心とした雪氷分野におけるデータセンターはNSIDCに統一されているが、アジア地域のデータセットは現状では少ない。一方中国の雪氷分野のデータに関しては世界データセンター(WDC for Glaciology and Geocryology, Lanzhou)があり、積雪・氷河・凍土や、リモートセンシングデータ、Game-Tibet プロジェクト等のデータをアーカイブしているのが現状である。

また、各データセンターはこれまでWDCとして運営されてきたが、現在WDCを母体としてWorld Data System(WDS)として改組が進み、今後10年間をかけてWDCの相互的な利用を目的としたシステムとして確立されることになっている。

GCW³⁵は雪氷分野のデータをWMO情報システム(WIS)を用いてリアルタイムのデータアーカイブを行うとともに、それらのデータを用いて社会有用データへの変換を行い、政策等への提言を行うことを目的としている。またGCWはWMOの気象関係で使われている全球通信システム(GTS)の雪氷圏版としての役割を果たすとしている。

② メタデータ

NASAが運営する地球変動マスターディレクトリ(GCMD: Global Change Master Directory)は雪氷分野を含む地球環境データセットのメタデータの検索を目的として作成されたサイトである。この中ではISO19115に則したメタデータの記載を行い、DIF(Directory Interchange Format)でのメタデータの統一化が行われている。GCMDでは各データに3レベルの統一されたキーワード付加することで、分野を超えてそれぞれのデータが検索

³⁵ ftp://ftp.wmo.int/Documents/SESSIONS/EC-PORS-1/INF04_GCW.pdf (参照日: 2010/02/16)

できるようになっている。現在多くのデータセンターが GCMD にポータルサイトをもち、GCMD 上でのキーワードを用いたデータ検索が可能になってきている。しかしあくまでも GCMD のメタデータのポータルサイトでしかなく、データそのものにたどり着くのに労力を要する場合もあれば、実際のデータが登録されていないことも多い。NSIDC のデータセットも DIF 形式でのメタデータの統一がなされている。

③ 日本における雪氷のデータアーカイブ

日本における雪氷分野におけるデータは、上述したように、観測を行っている研究機関および大学等が独自に一部公開を行っているところもあるが、雪氷分野における統合的なデータセンターは存在していない。

日本の大学および研究機関が取得する観測するデータは、観測後のデータ補正、解析等に多くの時間や労力がかかる。また観測を行った研究者に対するデータ使用の優先権の確保からデータ公開が遅れがちになる。早期にデータを公開することによって生じる、観測に携わる者や大学および研究機関が享受できる観測者のメリットについて、これを損なわないように十分配慮する必要がある。現在、日本の大学および研究機関の観測データセットのアーカイブの重要性が増す中、観測者および研究者へのデータセット構築およびデータアーカイブ作業への負担が増えている。しかしデータを使った研究に関する評価はその結果次第であるが、そのデータアーカイブを進める研究者への研究コミュニティもしくは各研究機関による評価がなされず、その業務に携わる人員の確保が困難になりつつあるのも現状である。

4.9.3 今後の展望

地球温暖化の実態を把握するためには世界各地に存在するデータを収集・統合することが必要不可欠である。

しかし、現状ではデータは研究グループごとに別々の品質管理がなされ、異なるフォーマットで整理されており、統一的な収集管理がされておらず、データをすぐに統合化することは不可能である。さらにはデータを収集する以前に、どのような観測データがどの程度あるかという基本情報も不足していることも問題点と考えられる。

現状では現業機関によるデータセットの構築・公開は進んでいるが、個々の大学および研究機関による実験的な観測データ、中でもアジア地域のデータの公開が遅れていることは上述したとおりである。

また、現時点でデータセットの公開を行っている機関では防災への情報提供が主たる目的となっている場合もあり、地球温暖化のための解析に重要な過去のデータが公開されていないところもある。また、データ公開を行っている大学および機関でも各組織のアウトリーチ活動の一環として行われている場合には、実質的に地球温暖化の解析に使えるデータが公開されていない場合もある（図4-4（現状））。

地球温暖化の実態を把握するためのデータの収集・統合・公開を行うためにはまず現状の整理として、下記のことが必要になる（図4-4（今後））。

- ・ 現状で分散されて保管されているデータがどのようなフォーマットで保管されているか、メタデータの有無に関する情報の収集。
- ・ 統一的なデータの品質管理、メタデータの構築、統一フォーマットの作成。
- ・ データの収集・統合・公開を促進するために、特に重要なアジア地域の積雪・凍土・氷河の実験的な観測データの収集・統合・公開。
- ・ 各機関のデータセットのメタデータおよびフォーマットの統一化を通じた、データアーカイブ間の相互の利用推進。
- ・ これらのデータを収集・統合・公開を行うデータセンターの設立。

これらのことを通して各大学および機関によって行われてきた観測のデータの相互利用が可能になり、これらのデータすべてを使った地球温暖化の実態解明の統一的な解析が可能になる。

これらのデータ統合により作成される全球規模のデータセットは重要な共有財産である。それらをアーカイブすることはより詳細な雪氷圏の理解、さらには温暖化の実態の解明につながる。

日本におけるデータアーカイブにおける問題点の1つは、研究コミュニティもしくは各研究機関においてデータアーカイブを実施している研究者への評価が十分になされていないことである。

これを解決するためには、

- ・ 研究コミュニティもしくは各研究機関における、データアーカイブを実施している研究者および技術者の適切な評価。

が必要である。

さらに、大学および各研究機関におけるデータアーカイブ・公開を促進するためには、

- ・ より開かれたデータポリシーの確立と、国家予算を使った研究等において得られた観測データについては一定の期間経過後、全公開するという方向に誘導する国の施策。

が重要である。

最終的には、

- ・ 雪氷データを受け入れる、長期安定的なデータセンターの設立。

も考える必要がある。ただし、上記で述べた長期安定的なデータセンターは、現在 WDC が改組される新しい枠組み（WDS）が構築されることから、世界的な枠組の中でデータアーカイブする仕組みを作る必要がある。日本国内でデータセンターを計画する場合においては、現在の大容量化・多様化するデータセットを取り扱ううえで、NSIDC 等の国際的なデータセンターと単なる連携ではなくシステムの連携が必要である。

(矢吹)

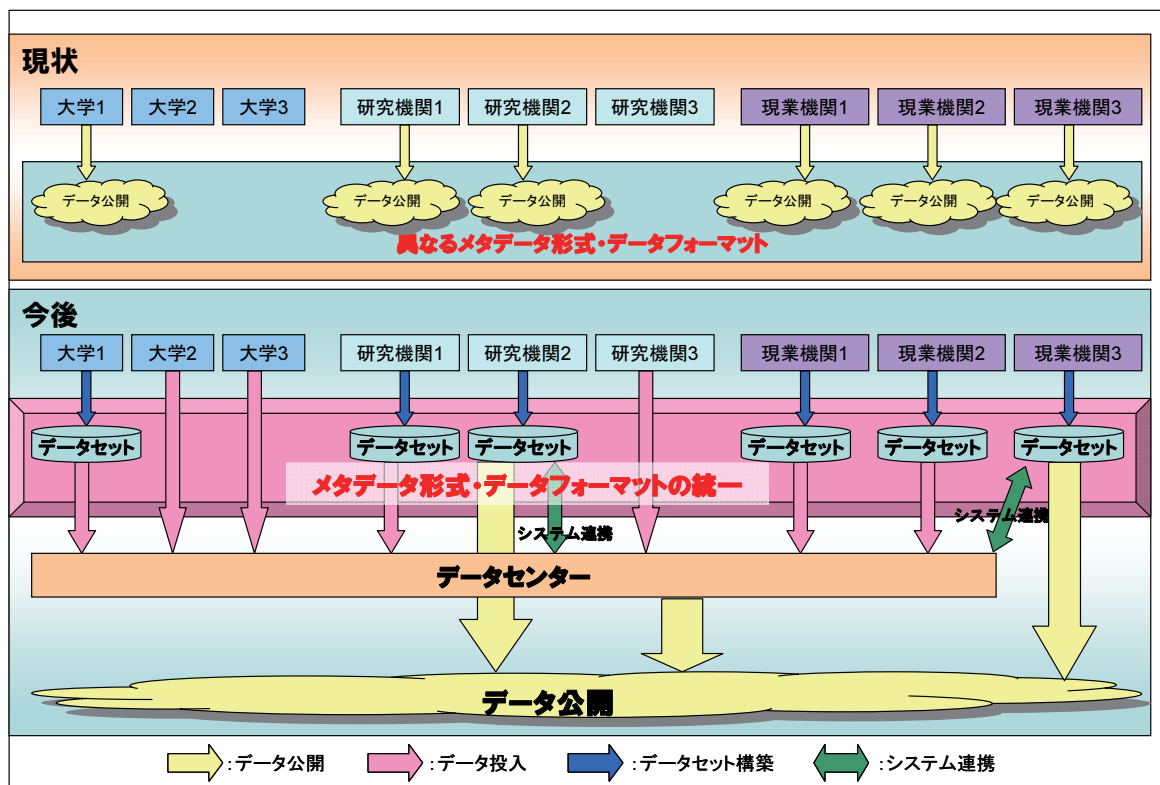


図 4-4 データアーカイブの現状と、今後の展望。

参考文献 (第4章)

- 石川 守・斉藤和之, 2006: 気候・水循環に関わる凍土研究—現状と展望—. 雪氷, **68**, 636-656.
- 大畑哲夫, 1997: 雪氷圏と気候, 運輸省認定船員通信教育教科書(高等科), 運輸省, 73.
- 大畑哲夫, 2009: 北極域環境の研究体制における日本の課題, 科学技術動向, 2009年8月号(8月28日発行).
- 大畑哲夫, 1993: 局地雪氷域における大気雪氷相互作用, 気象研究ノート, **177**, 1-39.
- 浮田甚郎・西尾文彦, 2007: 雪氷圏の衛星観測—日本発の研究に向けての提言—IGOS-P Cryosphere(雪氷圏に関する総合地球観測戦略)から学ぶ, 雪氷, **69**(2), 273-278.
- 中井専人・横山宏太郎, 2009: 降水量計の捕捉損失補正の重要性—測器メタデータ整備の必要性—, 天気, **56**, 69-74.
- 矢吹裕伯, 2009: 氷河インベントリーの現状と問題点—グローバルインベントリとアジアインベントリ—, 雪氷, **72**(6).
- 山崎剛・杉浦幸之助, 2006: 積雪モデル, 雪氷, **68**, 607-612.
- 横山宏太郎他, 2003: 冬期における降水量の捕捉特性, 雪氷, **65**, 303-316.
- Alley, R. B., M. Fahnestock, J. Joughin, 2008: Understanding glacier flow in changing times, Science, **322**, 1061-1062.
- Aoki, S. et al., 2005: Freshening of the Adélie Land Bottom Water near 140°E, Geophys. Res. Lett., **32**, doi:10.1029/2005GL024246.
- Aniya, M. H. et al., 2007: Glaciological and Geomorphological studies at Glacier Exploradores, Hielo Patagónico Norte, and Glaciar Perito Moreno, Hielo Patagónico Sur, South America, during 2003-2005 (GRPP03-05) BGR, **24**, 95-107.
- Aniya, M. et al., 2005: Overview of Glaciological Research Project in Patagonia 2003, Bulletin of Glaciological Research, **22**, 109-119.
- Berthier, E. et al., 2007: Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India), Remote Sensing Environment, **108**, 327-338.
- Bolch, T., M. Buchroithner, T. Pieczonka and A. Kunert, 2008: Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal, Nepal, since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER data, Journal of Glaciology, **54**, 592-600.
- Bolch, T., 2007: Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data, Global and Planetary Change, **56**, 1-12.
- Brown, J., K. M. Hinkel and F. E. Nelson, 2000: The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results, Polar Geography., **24**, 163-258.
- Circum-Arctic Resource Appraisal Assessment Team, 2008: Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle, <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf> (参考日: 2010/02/15)
- Comiso, J. C., 2009: Enhanced sea ice concentrations and ice areas from AMSR-E data, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, **29**, 199-215.
- Dyrgerov, M. B., and M. F. Meier, 2005: Glaciers and the changing Earth system: A 2004 snapshot, Occas. Pap., **58**, 117, http://instaar.colorado.edu/other/occ_papers.html (参考日: 2010/02/15)
- Eichler, A. et al., 2009: Temperature response in the Altai region lags solar forcing, Geophys. Res. Lett., **36**, L01808.
- Frauenfeld, O. W., T. Zhang, R. G. Barry and D. Gilichinsky, 2004: Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia, Journal of Geophysical Research, **109**, D5101, doi:10.1029/2003JD004245.
- Fujita, K. et al., 2001: Shrinkage of Glacier AX010 in Shorong region, Nepal Himalayas in the 1990s, Bulletin of Glaciological Research, **18**, 51-54.
- Fujita, K., M. Nakawo, T. Fujii, P. Paudyal, 1997: Changes in glaciers in Hidden Valley, Mukut Himal, Nepal Himalayas, from 1974 to 1994, Journal of Glaciology, **43**, 583-588.
- Fujita, K., R. Suzuki, T. Nuimura and A. Sakai, 2008: Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacier lakes in the Lunana region, Bhutan Himalayas, Journal of Glaciology,

- Fujita, K., N. Takeuchi and K. Seko, 1998 : Glaciological observations of Yala Glacier in Langtang Valley, Nepal Himalayas, 1994 and 1996, *Bulletin of Glacier Research*, **16**, 75–81.
- Goodison, B. E., 2009 : WMO GLOBAL CRYOSPHERE WATCH (GCW) Background, Concept, Status, Next Steps, WMO, Ottawa, 15pp.
- Goodison, B. E., P. Y. T. Louie and D. Yang, 1998 : WMO solid precipitation measurement intercomparison final report, WMO, Geneva, 299pp.
- Harris, C. et al., 2003 : Warming permafrost in European mountains, *Global and Planetary Change*, **39**, 215–225.
- IGOS, 2007 : Integrated Global Observing Strategy Cryosphere Theme Report – For the Monitoring of our Environment from Space and from Earth. Geneva: World Meteorological Organization, WMO/TD, **1405**, 100 pp.
- Inoue, J., J. A. Curry and J. A. Maslanik, 2008 : Application of aerosondes to melt-pond observation over Arctic sea ice, *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, **25**, 327–334.
- Inoue, J. and T. Kikuchi, 2007 : Outflows of summertime Arctic sea ice observed by ice drifting buoys and their linkage with atmospheric circulations, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **85**(6), 1–7.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., et al., (eds)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Iwahana, G., Y. Sawada and M. Ishikawa, 2008 : Micrometeorological measurements on mountain permafrost in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan, *Proceedings of 9th International Conference on Permafrost*, Fairbanks, 808–815.
- Jorgenson, M. T., Y. L. Shur and E. R. Pullman, 2008 : Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02503, doi:10.1029/2005GL024960.
- Kadota, T. and G. Davaa, 2007 : Recent glacier variations in Mongolia, *Annals of Glaciology*, **46**, 185–188.
- Kaspari, S. et al., 2007 : Reduction in northward incursions of the South Asian monsoon since approximate to 1400 AD inferred from a Mt. Everest ice core, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L16701.
- Kawamura, K. et al., 2007 : Northern Hemisphere forcing of climatic cycles over the past 360,000 years implied by accurately dated Antarctic ice cores, *Nature*, **448**, 912–916.
- Kehrwald, N. M. et al., 2008 : Mass loss on Himalayan glacier endangers water resources, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22503.
- Khromova, T. E., M. B. Dyurgerov and R. G. Barry, 2003 : Late-twentieth century changes in glacier extent in the Ak-shirak Range, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1863.
- Kitagawa, H. et al., 2000 : The Northern Sea Route, the shortest sea route linking East Asia and Europe, *Ship & Ocean Foundation*, 241.
- Komori, J., D. R. Gurung, S. Iwata and H. Yabuki, 2004 : Variation and lake expansion of Chubda Glacier, Bhutan Himalayas, during the last 35 years, *Bulletin of Glaciological Research*, **21**, 49–55.
- Lantz, T. C., and S. V. Kokeij, 2008 : Increasing rates of retrogressive thaw slump activity in the Mackenzie Delta region, N.W.T., Canada, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/GL032433.
- Liu, S. Y., W. X. Sun, Y. P. Shen and G. Li, 2003 : Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply, *Journal of Glaciology*, **49**, 117–124.
- Mae, S., and R. Naruse, 1978 : Possible causes of ice sheet thinning in the Mizuho Plateau, *Nature*, **273**, 291–292.
- Meier, M. F. et al., 2007 : Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st Century, *Science*, **317**, 1064–1067.
- Mool, P. K., S. R. Bajracharya and S. P. Joshi, 2001a : Inventory of Glaciers, Glacial Lakes, and Glacial

- Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region – Nepal. Kathmandu: ICIMOD.
- Mool, P. K., S. R. Bajracharya and S. P. Joshi, 2001b : Inventory of Glaciers, Glacial Lakes, and Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region – Bhutan. Kathmandu: ICIMOD.
- Motoya, K., T. Yamazaki and N. Yasuda, 2001 : Evaluating the spatial and temporal distribution of snow accumulation, snowmelts and discharge in a multi basin scale: An application to Tohoku Region, Japan. *Hydrological Process*, **15**, 2101–2129.
- Olivier, S. et al., 2003 : Glaciochemical investigation of an ice core from Belukha glacier, Siberian Altai, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(19), 2019, doi:10.1029/2003GL018290.
- Osterkamp, T. E., 2007 : Characteristics of the warming of permafrost in Alaska, *Journal of Geophysical Research*, **112**, doi:10.1029/2006JF000578.
- Peterson, B. J. et al., 2002 : Increasing River Discharge to the Arctic Ocean, *Global Coastal Change, Science*, **298**, 2171–2173.
- Quincey, D. J. et al., 2007 : Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets, *Global and Planetary Change*, **56**, 137–152.
- Raup, B. H., H. H. Kieffer, T. M. Hare and J. S. Kargel, 2000 : "Generation of Data Acquisition Requests for the ASTER Satellite Instrument for Monitoring a Globally Distributed Target: Glaciers." *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, **38**, 1105–1112.
- Rignot, E. A., A. Rivera and G. Casassa, 2003 : Contribution of the Patagonian Icefields of South America to sea level rise, *Science*, **302**(5644), 434–437.
- Rignot, E., J. E. Box, E. Burgess and E. Hanna, 2008 : Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007, *Geophys. Res. Lett.*, L20502, doi:10.1029/2008GL035417
- Romanovsky, V. E. et al., 2007 : Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia, *Global and Planetary Change*, **56**, 399–413.
- Shimizu, M. and O. Abe, 2001 : Recent fluctuation of snow cover on mountainous areas in Japan, *Annals of Glaciology*, **32**, 97–101.
- Shirasawa, K. et al., 2008 : Sea-ice thickness variability in the Chukchi Sea, spring and summer 2002–2004. *Proceedings of the 23rd International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, Mombetsu, Japan, 16–22 February 2008, The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association*, 142–148.
- Shroder, J. F., M. P. Bishop and U. Haritashy, 2008 : Glacier and permafrost problems in high south Asia, *Eos Transaction AGU* 89.
- Skvarca, P., and R. Naruse, 2006 : Overview of the ice-dam formation and collapse of Glacier Perito Moreno, southern Patagonia, in 2003/04, *J. Glaciol.*, **52**(177), 318–320.
- Skvarca, P., R. Naruse and H. de Angelis, 2004 : Recent thickening trend of Glacier Moreno, southern Patagonia, *Bulletin of Glaciological Research*, **21**, 45–48.
- Smith, L. C. et al., 2005 : Disappearing arctic lakes, *Science*, **308**, 1429.
- Steig, E. J. et al., 2009 : Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year, *Nature*, **457**, 459–463.
- Stueffer, M. et al., 2007 : Glacier Perito Moreno, Patagonia: climate sensitivities and glacier characteristics preceding the 2003/04 and 2005/06 damming events. *J. Glaciol.*, **53**(180), 3–16.
- Sugiura, K., T. Ohata, D. Yang, 2006 : Catch characteristics of precipitation gauges in high-latitude regions with high winds, *Journal of Hydrometeorology*, **7**, 984–994.
- Surazakov, A. B. et al., 2007 : Glacier changes in the Siberian Altai Mountains, Ob river basin, (1952–2006) estimated with high resolution imagery, *Environ. Res. Lett.*, **2**, 045017, 7pp, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045017.
- Surazakov, A. B., and V. B. Aizen, 2006 : Estimating volume change of mountain glaciers using SRTM and map-based topographic data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 2991–2995.

- Suzuki, R., K. Fujita and Y. Ageta, 2007 : Spatial distribution of thermal properties on debris-covered glaciers in the Himalayas derived from ASTER data, *Bulletin of Glaciological Research*, **24**, 13-22.
- Tamura, T. et al., 2006 : Estimation of thin sea-ice thickness from NOAA AVHRR data in a polynya off the Wilkes Land coast, East Antarctica, *Annals of Glaciology*, **44**, 269-274.
- Tateyama, K. et al., 2006 : Standardization of electromagnetic-induction measurements of sea-ice thickness in polar and sub-polar seas, *Annals of Glaciology*, **44**, 240-246.
- Thompson, L. G. et al., 1997 : Tropical Climate Instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice cores. *Science*, **276**, 1821-1825.
- Thompson, L. G. et al., 2000 : A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores, *Science*, **289**, 1916-1919.
- Velicogna, I., and J. Wahr, 2006 : Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004, *Nature*, **443**, 329-331.
- Vinther, V. M. et al., 2009 : Holocene thinning of the Greenland ice sheet, *Nature*, **461**, 385-388.
- Wagnon, P. et al., 2007 : Four years of mass balance on Chhota Shigri Glacier, Himachal Pradesh, India, a new benchmark glacier in the western Himalaya, *Journal of Glaciology*, **53**, 603-611.
- Walter, K. M. et al., 2006 : Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming, *Nature*, **443**, doi:10.1038/nature05040.
- Watanabe, O. et al., 2003 : Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles, *Nature*, **422**, 509-512.
- WCRP Report, 2007 : Asia-CLIC Workshop on Large-scale Hydrometeorology of Asian Cryosphere. WCRP Inf. 14.
- Yamaguchi, S., O. Abe, S. Nakai and A. Sato, 2007 : Recent snow cover fluctuations in the mountainous areas of Japan. P. Gino and J. E. Sicart (eds), *Glacier Mass Balance Changes and Meltwater Discharge*, IAHS, Redbook, **318**, 116-125.
- Yamaguchi, S., S. Nakai, K. Iwamoto and A. Sato, 2009 : Influence of anomalous warmer winter on statistics of measured winter precipitation data, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 2403-2409.
- Ye, Q. H. et al., 2006b : Glacier variations in the Naimona' nyi region, western Himalaya, in the last three decades, *Annals of Glaciology*, **43**, 385-389.
- Ye, Q. H., S. C. Kang, F. Chen and J. H. Wang, 2006a : Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies, *Journal of Glaciology*, **52**, 537-545.
- Zhang, J., R. Lindsay, M. Steele and A. Schweiger, 2008 : What drove the dramatic retreat of arctic sea ice during summer 2007, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L11505, doi:10.1029/2008GL034005.

第5章 生態系分野

5.1 はじめに

東アジア地域は極域から温帯・熱帯という気候帯に森林・草原・湖沼・海洋といった様々な生態系が組み合わさり、独特の生態系モザイクをなしている。各生態系は非常に多くの要因が作用して維持・変動しているため、様々な研究対象の場をある程度固定し、情報を集約したうえでこれを長期間にわたって維持し続けることが、生態系の長期変動やそのメカニズムの解明につながるだろう。温暖化に対する生態系の影響評価を行ううえでも、サイトを多分野の研究者が共有することが最も効率的である。生物多様性研究にとっても、生物自身だけでなく生物以外のパラメーター群を並行して観測することや、生態系レベルの大規模操作実験を行うことで、生物と環境の相互作用系としての生態系を包括的に理解可能となるだろう。これら各生態系すべての研究を基にネットワークを構築して初めて、地球レベルでの生物多様性と生態系機能を語ることが可能となる。そのためにフィールドステーションを積極的に整備することで、温暖化の影響評価をはじめとした野外研究のレベルは飛躍的に高まると期待される。

また、気候変動に対する生態系や生物多様性の応答などを明らかにするためには、大面積長期の観測だけではなく、要因を分離してメカニズムを解析するための実験を野外で大規模に行う必要がある。これに加えて、これまでに蓄積されてきた各生態系に関するデータを有効に利用し、メタ解析などによってトレンドを明らかにすることが有効である。日本では近年日本長期生態学研究ネットワーク（JaLTER）³⁶が組織され、各生態系での観測網整備に向けた準備が始まった。また、JaLTER によって国際長期生態学研究ネットワーク（ILTER）³⁷に準拠した生態系データベースが構築された。今後はこれらを基盤に、JapanFlux³⁸やモニタリングサイト1000³⁹とのサイト重複など、ほかのネットワークやプロジェクトとの連携を推し進めることで、スーパーサイトと呼ばれる、様々な観測や野外実験を同時並行して行うフィールドステーションを、各生態系ごとに複数整備し、生態系・生物多様性の統合的観測体制を確立させる必要がある。そのうえで、リモートセンシングによる広域観測やモデリングによるアウトプットとの整合性のチェックや高度化を図ることが重要である。以下の各節で東アジアを中心として、生態系ごとの観測・研究の現状と課題を展望する。

(日浦)

5.2 沿岸域

5.2.1 サンゴ礁

(1) 地球温暖化とサンゴ礁

サンゴ礁は、様々な階層で生物が相互作用する共生系である。サンゴとその体内の微細藻類との共生関係に基づいて、高い光合成生産と石灰化生産が維持されている。光合成生産は食物連鎖の基礎となり、石灰化生産によって作られたサンゴ礁地形は生息場の多様性を創出し、サンゴ礁には海洋で最も多様性の高い生態系が展開している。人にとっても、多様な生物群集は豊富な水産資源・観光資源となり、サンゴ礁地形は天然の防波堤と居住の場を提供してきた。資源利用という人の利益に基づく片利的なものであったとはいえ、人とサンゴ礁は持続的な共生・共存系を維持してきた。

しかしながら最近数十年間に、熱帯・亜熱帯海岸域への人口集中と開発に伴うローカルな環境ストレスによって、サンゴ礁は劣化し破壊されている。土地改変によって、生態系の基盤であるサンゴ礁地形が破壊され、生息場が断片化してしまった。陸からの栄養塩や土砂の流入と魚介類の乱獲によって、サンゴと生物群集が劣化している。生態系レベルの共生系が崩壊して藻場にシフトしてしまい、多様性や地形形成能力を失ってしまったサンゴ礁も多い。

こうしたローカルな環境ストレスに加えて、地球温暖化によるグローバルなストレスが作用している。地球温暖化のシナリオは、二酸化炭素濃度上昇→温暖化→海面上昇であるが、サンゴ礁はそのすべての要因と密接に関わっている。二酸化炭素濃度上昇によって海洋が酸性化し石灰化が抑制される。温暖化によってサンゴは体内の

³⁶ <http://www.jalter.org/> (参照日：2010/02/16)

³⁷ <http://www.ilternet.edu/> (参照日：2010/02/16)

³⁸ <http://www.japanflux.org/> (参照日：2010/02/16)

³⁹ <http://www.biodic.go.jp/moni1000/index.html> (参照日：2009/08/30)

共生藻を放出して白化してしまい、やがて死に至る。海面上昇によって、サンゴ礁は水没してしまう。

酸性化による石灰化抑制は、最近になってその生態系に対する影響が指摘されたもので、温暖化影響の中では最もホットなテーマである。1997～1998年に世界中の海域で白化が起こったが、これはこの期間の高水温異常によるものであった。この白化は、地球温暖化が生態系スケールで影響を顕在化させた最初の例であるとされる。海面上昇の影響が最も深刻なのは、島の標高が1～3m程度の環礁である。人とサンゴ礁の関係はもはや共生・共存的とは言えず、人による一方的な破壊が進んでいる。サンゴ礁が劣化・破壊されると、サンゴ礁が本来持っていた資源としての多様な価値は喪失し、環境変化に対する脆弱性も高まる。

(2) サンゴ礁モニタリングの現状

サンゴ礁は、ローカル・グローバルな環境ストレスに対して極めて敏感な地形生態系である。そうした点でサンゴ礁は、複合した環境ストレス、特に我々がまた経験したことがない地球温暖化に対する生態系の応答を予測するうえでの「指標生態系」と言える。複合ストレスに対する劣化は、最近20～30年の間に特に顕著になっている。しかし、それ以前からのサンゴ礁の状態のモニタリングは、決して多いとは言えない。図5-1は、過去40年間のサンゴ被度変化を、カリブ海とオーストラリアのグレートバリアリーフのいくつかの観測ステーションで得られた調査結果を、メタ解析によって標準化したものである。サンゴ被度は、1980年代になって急激に減少している様子が現れている。

我が国においては、(財)串本海中公園センターが、1969年紀伊半島南端の串本に、1973年に石垣島と西表島にはさまれた石西礁湖の黒島に研究所を開設し、サンゴ群集のモニタリングを継続してきた。1970年代から1980年代にかけて八重山海域にオニヒトデが大発生してサンゴが壊滅的な打撃を受けた際には、そのモニタリング拠点として、またサンゴ群集の復元のための活動を続けてきた。しかしながら環境省(センター開設当時は環境庁)所管の同センターは、特殊法人見直しのため2002年に解散され、運営母体が民間に移ってしまった。八重山海域におけるモニタリングは、同省が2000年に石垣島に設立した国際サンゴ礁研究・モニタリングセンターが継続しているが、串本と黒島というサンゴ礁モニタリングで最も重要な両地点に拠点を失ったことは残念である。石西礁湖における過去30年間のサンゴ被度の変化をまとめた結果は、オニヒトデによる食害と地球温暖化による白化が、サンゴ群集の被度に大きな影響を与えていることを示している(図5-2)。国際サンゴ礁研究・モニタリングセンターでは、1998年より石垣島周辺と石西礁湖においてモニタリング調査を継続しており、サンゴの被度や白化状況、オニヒトデの発生、水温などの情報をデータベースとしてまとめ、公開している。

大学関係では、琉球大学が、沖縄本島瀬底に臨海実験所を1972年に設立し、その後熱帯海洋科学センターを経て、1994年には熱帯生物圏研究センター瀬底実験所として、サンゴとサンゴ礁の生物・生態学的研究を進めている。また東海大学は、1976年には西表島網取に東海大学海洋研究所西表分室を開設、1981年には沖縄地域研究センターとして改組され、サンゴ礁に関する調査・研究を進めてきた。国立の研究所では、1994年には水産庁西海区水産研究所(現在、(独)水産総合研究センター)が石垣島に支所を開設し、亜熱帯の水産資源とサンゴ礁生態系の研究を進めている。民間では、1989年に阿嘉島臨海研究所が慶良間諸島に、2000年には世界自然保護基金(WWF: World Wide Fund for Nature)サンゴ礁保護研究センター「しらほサンゴ村」が石垣島白保に開設され、前者ではサンゴの産卵に関する研究を、後者では白保サンゴ礁を中心に人為影響とその修復について、研究・モニタリングを進めている。

こうした研究拠点は、いずれも主にそれぞれの研究目的で設立されたもので、サンゴ群集などの分布に関する基礎データは、研究のベースとして取得されてはいても、標準的なデータベースとしては整理されていない。大学や研究機関においては、研究に予算が出ても数年単位であり、長期的に基本的なモニタリングを行うための予算は継続的には維持しにくいという事情もある。

こうした研究拠点とは別に、生物学・地学の研究者が、1970年代以降様々なかたちでサンゴ礁の測線調査を実施してきた。石垣島の白保では、幅1kmほどのサンゴ礁礁原に直交して設定された5本の定測線(総延長3.2km)に沿って、1998年の白化直前から白化後現在までのサンゴ群集の分布が繰り返し記録されている。このモニタリングは、特に白化によるサンゴ群集のダメージとその後の回復・劣化過程を明らかにした。その結果、白化に対する応答はサンゴの種によって異なること、無性生殖による白化後のサンゴの回復には2年以上かかることが明らかになった。さらに、1998年の白化後、石垣島では数年に1回白化が起こっているため、サンゴ群集が回復できずにこの10年度大幅に減少していることを明らかにした。

国内ではないが、2001年に政府開発援助(ODA)の無償資金援助によってパラオにパラオ国際サンゴ礁研究センターが設立された。パラオには1934～1943年まで日本学術振興会によって設立されたパラオ熱帯生物研究所

が、当時としてはサンゴ礁に常設された世界でも唯一の研究所として、サンゴとサンゴ礁に関する貴重なデータを記録している。現在センターで得られているモニタリング結果を、この戦前のデータと比較することによって、長期的なサンゴ礁の変化に関する解析ができるであろう。

生物多様性におけるサンゴ礁の重要性と資源としての価値、地球温暖化に最も敏感であるという特徴から、こうした長期モニタリングを今後継続するために、環境省生物多様性センターのモニタリングサイト 1000 では、サンゴ礁を主要な調査項目とするサイトを本州・四国・九州から、奄美諸島・琉球諸島の 20 か所以上に設けて、観測態勢を整えている。

(3) 今後の展望

① 長期モニタリングの重要性

ローカル・グローバルなストレスによるサンゴ礁の劣化状態を把握するためには、長期にわたる標準的な方法によるサンゴ群集などの基礎的なデータのモニタリングが必須である。我が国では、最も古いサンゴ礁モニタリングデータは、1970 年代以降のものである（パラオでは 1930 年代）。1990 年代以降は、様々な研究機関で研究の基礎情報としてサンゴ群集の分布などのデータがとられている。そうしたデータのメタ解析を行ってデータの標準化を行い、サンゴ礁の状態の長期変化と空間的差異を明らかにすることができる。これまでに定点・定測線データが得られている地点を、今後も継続的にモニタリングするとともに、温暖化応答を記載するうえで重要な地点を新たに設定することも必要である。

② 温暖化による北上

今後さらに温暖化が進行すると、サンゴの分布が北上することが予測される。すでに本州の館山や串本、五島列島などでは、それまで分布していなかった南方系のサンゴが新たに定着したことが認められている。今後は、北上を記録できるようにこうしたサンゴの定着状態や群集変化の定量的把握を進める必要がある。

③ 温暖化応答メカニズムと複合ストレス

モニタリング結果に基づいて、すでに現れた温暖化・酸性化・海面上昇の影響を、サンゴ群集やサンゴ礁生態系スケールで検出し、温暖化に対するサンゴ礁の応答を評価する。そのために、現在および過去の環境要因の変化に対する群集変化をモニタリング結果に基づいて明らかにするとともに、飼育実験によって応答過程を明らかにして、地球温暖化の様々なシナリオに対するサンゴ礁の非線形応答を評価・予測する。その際に、ローカルなストレスによる複合影響をきちんと区別する必要がある。野外におけるモニタリングと実験では、pH・水温・海水位など温暖化に関わるパラメーターと、栄養塩・濁度などローカルなストレスに関わるパラメーターを同時に測定し、これら複数のパラメーターに対する応答過程を切り分けて、さらには複合した場合の応答について議論する必要がある。

④ サンゴ礁の状態

サンゴ礁の状態を示す指標としては、最も基本的な量として「サンゴ被度」が使われてきた。しかしこれはサンゴ群集の構成や、サンゴ以外の生物を含む生態系の状態について情報を持っていない。サンゴの種構成や、サンゴ以外のサンゴ礁生態系の鍵になる生物の分布や量についての情報も、基本データとしてとっていく必要がある。

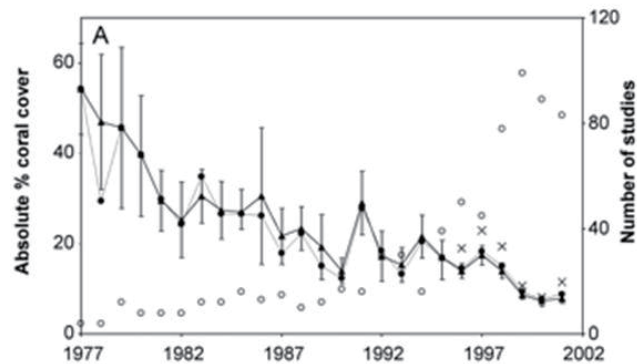
徐々に進むストレスに対して、ある閾値を越えるとサンゴ群集が急激に藻場に代わってしまう、フェーズシフトが報告されている。外部擾乱に対して復元力が高かったサンゴ礁が、閾値近くなると復元力が減退すること、閾値までストレスを戻してもサンゴ群集に戻ることがないヒステリシスなども、観測・理論的に明らかにされている。カリブ海では、こうしたフェーズシフトには、藻食魚類の存在が大きいことが指摘されている。フェーズシフトを記載し、予測するために必要なパラメーターをモニタリングすることも必要である。

⑤ 再生のためのモニタリング

言うまでもないことであるが、こうしたモニタリングは単なる記載に終わってはならない。モニタリングの結果に基づいて、ストレスに対するサンゴ礁の応答を予測し、サンゴ礁を維持・再生するために必要なストレスの閾値を示すとともに、サンゴ礁の復元力を強化するための方策に結びつけなければならない。

(茅根)

カリブ海
サンゴ被度変化
Gardner et al (2003)



グレートバリアリーフ
サンゴ被度変化
Bellwood et al (2004)

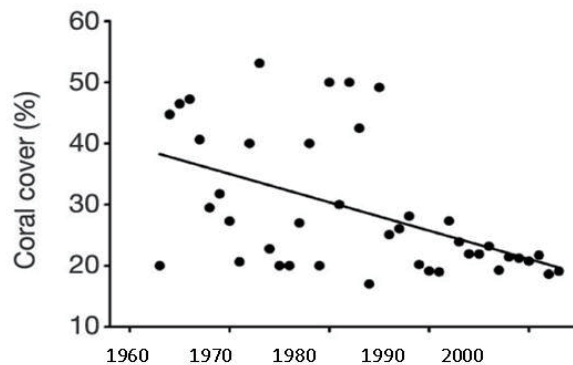


図 5-1 カリブ海とグレートバリアリーフの定点モニタリング結果に基づく、過去 30～40 年間のサンゴ被度の変化 (Gardner, 2003; Bellwood, 2004)。

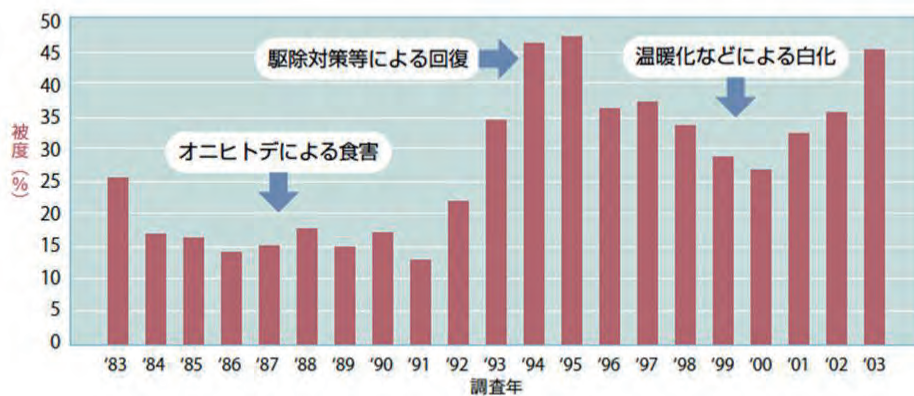


図 5-2 過去 30 年間の石西礁湖におけるサンゴの平均被度の変化 (<http://www.biodic.go.jp/>)。

5.2.2 藻場

(1) はじめに

日本の沿岸浅海域の主に潮下帯では、陸上の森林や草原と同じように大型の海藻や海草が群生して広がる植物群落があり、これらを「藻場」と呼んでいる。藻場にはその主要構成種により、ホンダワラ類が優占するガラモ場、アラメやカジメが優占するアラメ・カジメ場、コンブが優占するコンブ場がある。また、水中顕花植物である海草が優占する群落は日本ではアマモが多いことからアマモ場と総称されている。ガラモ場は、主に日本海側、アラメ・カジメ場は本州の南岸、コンブ場は北海道と東北沿岸に分布する。全国の藻場の分布面積では、これらが全体の約3/4を占めている（環境庁，1994）。

藻場が沿岸生態系に果たす役割として、陸上の森林や草原のように環境形成作用がある。二酸化炭素を吸収し、酸素を発生する、その結果pHの分布に影響を及ぼす栄養塩を吸収する、流れを弱める、底質を変化させる、日陰をつくり水温分布に影響を及ぼす、といった環境形成作用がある（小松他，1990）。また、付着生物やベントスの生活場所となる甲殻類・軟体動物・魚類などの産卵基質となる。また、豊富な餌生物と藻場が物理的に大型の捕食者の侵入を防ぐため多くの仔稚魚や幼生の生育場となるウニやアワビ、サザエなどの生息場となるなど生物多様性上からも水産上からも重要である（新崎・新崎，1978）。

(2) 藻場分布と過去の調査

水産試験場、例えば岡山県水産試験場は1920年代に県下の主要なアマモ場の分布を調査した（Komatsu，1997）。1960年代の高度経済成長期には、浅い海が広がる瀬戸内海で埋め立てや工場の廃水や都市下水の影響で藻場は衰退していった（星野，1972）ため、藻場衰退に危機を感じた水産庁の内海区水産研究所は、瀬戸内海に面する各県の水産試験場とともに藻場分布に関する総合的な調査を実施した（内海区水産研究所資源部，1967）。その後、およそ5年の間隔で調査が継続され、1971年度（南西海区水産研究所内海資源部，1974）、1976～77年度（斉藤，1979）の報告が出版された。1976～1977年度の調査では、空中写真も用いる調査定線を設置し、潜水目視調査を実施するとともに、潜水して坪刈調査も行うなど調査方法が統一された。これらの藻場の分布面積と埋め立て面積の経年変化を比較した研究によると（Komatsu，1997）、両者の間に強い関係がある（図5-3）。

その後、環境庁自然保護局による1980年の第2回基礎調査（環境庁，1981）においては、おおむね20m以浅の沿岸において、現存するか、1973年までに存在していた面積1ha以上の藻場について調査を実施した。1991年度の第4回基礎調査においては、最新の分布状況と前回調査時以降の消滅状況を把握した（環境庁，1994）。1997～2001年度に行われた第5回基礎調査においては、既存調査の結果および地元漁業者からの聞き取りなど、現状の海藻・海草群落の位置、面積等を確認し、潜水目視観察で群落の種構成、規模などを把握した。これは環境省生物多様性センター（BIODIC）⁴⁰においてデータが管理されている。

(3) 温暖化による藻場生態系への影響

九州の長崎や四国の高知県などのガラモ場では、過去に報告がなかった亜熱帯性のホンダワラ類が近年分布を広げている。長崎県では、亜熱帯性ホンダワラ類の分布の北上が1992～2005年の間に起こったと推定されている（桐山他，2006）。1980年代と2000年代と比較して、従来分布していたホンダワラ類の種数の減少も確認されており（表5-1）、減少した種はアイゴの摂食選択性の高い種と一致しており、種類数の減少は秋から冬の海水温の上昇に伴う摂食期間の長期化などの摂食圧の増大と推定されている（桐山他，2002）。

また、長崎市見崎町地先には春にのみ藻場の景観を呈する亜熱帯性ホンダワラ類3種（キレバモク・ツクシモク・マジリモク）と温帯性2種（マメタワラ・ヤツマタモク）が優占する藻場（春藻場）が形成されるようになり、3～7月に垂直・水平方向ともに比較的規模の大きな藻場を形成するが、いずれも7月には成熟した主枝がすべて流失する（吉村他，2009）。春藻場が形成される水域は高水温にさらされる時間が長く、従来の藻場を形成する海藻種に生理的に適していない可能性があることが指摘されている（吉村他，2009）。

(4) 海洋の酸性化が藻場に及ぼす影響

気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書（IPCC-AR4）によれば、二酸化炭素の世界的な大気中濃度の増加に伴い海洋の酸性化が進行し、全球平均の海面pHは、工業化以前の時代から21世紀末には0.14～0.35減少すると予測されている。海洋酸性化が海草のアマモに及ぼす影響についてCO₂を海水に添加した実験の結果によると、45日間の実験では光量不足のところでも海水中の二酸化炭素濃度上昇により生育可能になり、分布域の拡大が考えられると報告された（Zimmerman *et al.*，1997）が、1年間の実験では二酸化炭素濃度の上昇は光

⁴⁰ <http://www.biodic.go.jp/>（参照日：2009/08/17）

条件などが整った特定のエリアの海草群落の生産力のみを増加させた (Palacios and Zimmerman, 2007)。イタリア Ischia 島周辺の火山性の二酸化炭素排出孔が海底に分布する海域における排出孔周辺の海草藻場海域では pH が低くなるにつれ、海草 (*Posedonia oceanica*) のシュート密度の増加と葉上の炭酸カルシウムの減少、pH7.8 程度よりも低い所では石灰藻やウニが分布しないということが報告されている (Hall-Spencer *et al.*, 2008)。

(5) 日本における藻場分布調査の現状

複数の都道府県にわたる広域的な分布調査や都道府県レベルの調査事例が多くある。全国的なものは環境庁のものがあり、一部データベース化されており、その後 BIODIC がこの調査を引き継ぎ、5 年間隔での全国調査が予定されている。BIODIC により 2002～2006 年度に行われた第 6 回自然環境保全基礎調査においては、全国の藻場約 130 か所の点で、シュノーケルやスキューバで現場に潜り、出現種を記録、重点調査地点での調査区内に設定した枠内の海藻・草を刈り取り、重量を測定などが行われている。2008 年度からモニタリングサイト 1000 の中で潮下帯の藻場の長期にわたる継続的調査が始められ、水産研究所、大学など複数の機関から参加している。

(6) 広域モニタリング手法の研究動向

藻場を広域に調べる場合には、リモートセンシングが効率的である。リモートセンシングは音響と光学のリモートセンシングに分けることができる (Komatsu *et al.*, 2002)。音響リモートセンシングの特長は水中の濁りの影響を受けないことである。音響測深機は、鉛直方向の海産大型植物の草丈の分布、水深を計測できる (図 5-4) が、調査定線間を補間する必要がある。サイドスキャンソナーは、船から曳航する超音波の送受波器の両舷の海底反射強度を 30m から 100m の幅で取得できる (Komatsu *et al.*, 2003)。しかし、砂地上の海草については検出可能であるが、岩礁域の大型海藻については判別が困難である。ナローマルチビームソナーは海底の藻場分布を 3 次元的に把握できる (図 5-5)。サイドスキャンソナーよりも探索幅は狭くなるが、ホンダワラ類については繁茂期と衰退期の比較を行うことでマッピングが可能である (Komatsu *et al.*, 2007)。

光学的な藻場マッピングには空中写真・衛星画像を用いる方法がある。光学的に海底をマッピングする場合には、水中での透過率の高い可視域の波長帯を観測できる受動センサーが必要である。沿岸海域の研究に地上分解能の高い衛星画像が使われている。海底を分類するには水中での光の透過率の高い可視域に多くのバンドがあることが望ましいが、これらの衛星センサーの可視域のバンド数は 3 つである。直径数 m 規模のパッチを対象とする時には、4m 以下の地上分解能のマルチバンド衛星画像が海草藻場解析に適している。Komatsu *et al.* (2009) は地上分解能 10m の ALOS のマルチバンド画像で、大規模に分布する藻場分布解析を行い、亜寒帯域・温帯域・熱帯域の海草藻場のマッピングが可能であることを示した (図 5-6)。衛星の光学センサーで受信したデータのばらつきに対する新しい放射量補正を Sagwa *et al.* (in press) は開発し、海草藻場マッピングの精度を著しく向上させることに成功した (図 5-7)。なお、マッピングの結果を海草藻場などの沿岸海域の生態系の経時的変化を調べるモニタリングという目的に衛星画像解析を利用するためには、全体精度で約 90% 程度のマッピング精度が必要である (Mumby and Green, 2000)。

(7) 世界の藻場生態系モニタリング

海草をマッピングするというプロジェクトに、アメリカを主体とした Seagrass Watch (2009) とオーストラリアを主体とした Seagrass Net (2009) がある。前者はアメリカのイニシアティブであり、かつ北西太平洋も含む世界的なデータベースを構築しようとしている。後者はオーストラリア政府の支援を受けており、同じく北西太平洋を積極的に含もうとしている。後者は調査者のトレーニングを課すなどデータの質の管理を厳しくしている点が Seagrass Watch と異なっている。アメリカのスローン財団の後援の世界の沿岸の海洋生物多様性の調査を行おうというなぎさプロジェクト (NaGISA) ⁴¹ では藻場も対象となっており、調査方法のプロトコルが出版されている。また、国連環境計画 (UNEP) ⁴² でも Web ベースでデータ提供が行われている。

(8) 日本における観測、データの流通と課題

日本における藻場分布の調査は、今後も環境省・水産庁・各県の水産試験研究機関が行っていくことになる。過去のデータをもつ研究機関では時間的な比較を行うためには、調査方法を変更することは得策でない。研究機関が藻場調査を行う場合に、実行可能な最小限の共通計測項目 (例えば、種組成など) を決めておくと全国的な比較が可能になるだろう。水産庁関連では、水産研究所、各県の水産試験研究機関において藻場調査が行われており、水産分野で行われた藻場分布調査データの整理・保存と公開が望まれる。

⁴¹ <http://www.nagisa.coml.org/> (参照日：2009/8/30)

⁴² <http://www.unep-wcmc.org/marine/seagrassatlas/index.htm> (参照日：2009/08/17)

環境省関連のBIODICは今後も5年後ごとに統一的な方法で全国調査を行うことになっている。これらの取得データはWebを通じて公開される予定である。モニタリングサイト1000の藻場調査では、出現種、優占する海藻の種、および被度を毎年調査し記録する。前者は主に広域の分布を、後者は定点の種レベルでの分布データを収集する。収集された情報はBIODICにおいて蓄積・管理し、逐次公開するとなっているが、終了した調査データをWebからすべて取得することは現状ではできない。早期のデータ公開が求められている。

(9) 今後の方向性

温暖化以外の人間活動による影響によって藻場生態系も変化している。海藻藻場の減少も、北海道ではイカの内臓を海に捨てることがなくなったため、ウニによるコンブ類に対する摂食圧が大きくなったことや、河川からの鉄の供給が原因であるという説もある。また、長崎ではガラモ場の面積に変化はないが、亜熱帯性ホンダワラ類が増加し、水温上昇を反映していると考えられている。このように藻場の空間分布面積を計測しても、温暖化の影響を特定することはなかなか困難である。温暖化を捉えることを目的とする場合には、定点を決めて種とその密度を継続して計測することが適しているのではないかと考えられる。LANDSATの運用が終了した現在、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)で取得した高性能可視赤外放射計2型(AVNIR2)マルチバンド画像を世界に提供する(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の貢献は大きい。今後、現在の商業衛星程度の地上分解能を持ち、可視域でバンドの感度域が狭く、バンド数が多く、量子化分解能の高いハイパースペクトルのデータを提供するALOS2衛星をJAXAが打ち上げることにより、日本として沿岸域マッピングの分野でさらに国際貢献できるものと期待している。

(小松)

表 5-1 長崎県大瀬戸地先に設定された9測線のうち、ホンダワラ類の種ごとの観察された側線の数(桐山他(2006), を改変)。

種類	1981 年 11 月	2004 年 2 月
アカモク	4	4
イソモク	3	6
ウミトラノオ	2	3
オオバモク	3	0
シダモク	1	0
ジョロモク	2	0
トゲモク	3	0
ノコギリモク	5	0
ヒジキ	5	7
ホンダワラ	5	0
マメタワラ	4	3
ヤツマタモク	5	0
ヨレモク	6	0
亜熱帯性ホンダワラ類	0	4
出現種総数	13	6

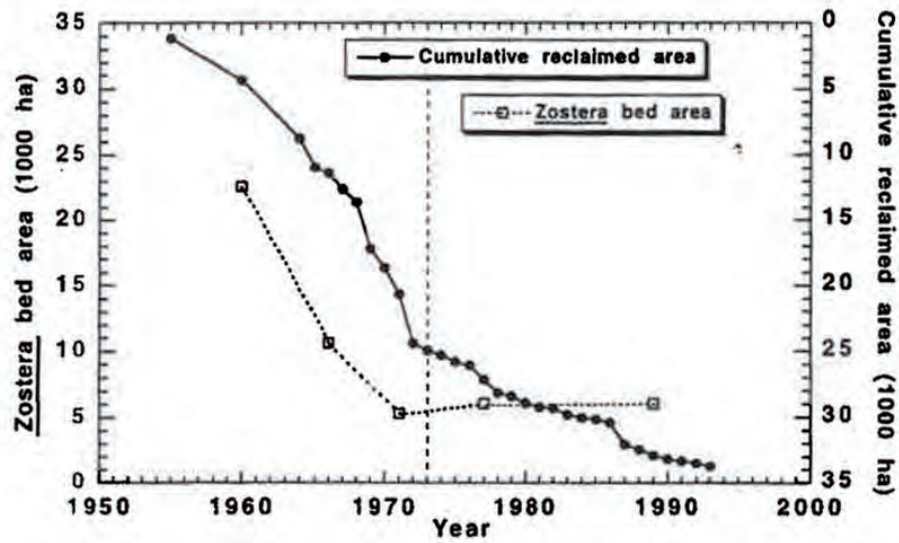


図5-3 瀬戸内海におけるアマモ場面積と累積埋立面積の変化。累積埋立面積の軸は下向き。鉛直方向の破線は、瀬戸内海環境保全特別措置法の制定された年を示し、この年以降、埋立の速度が減少 (Komatsu, 1997)。

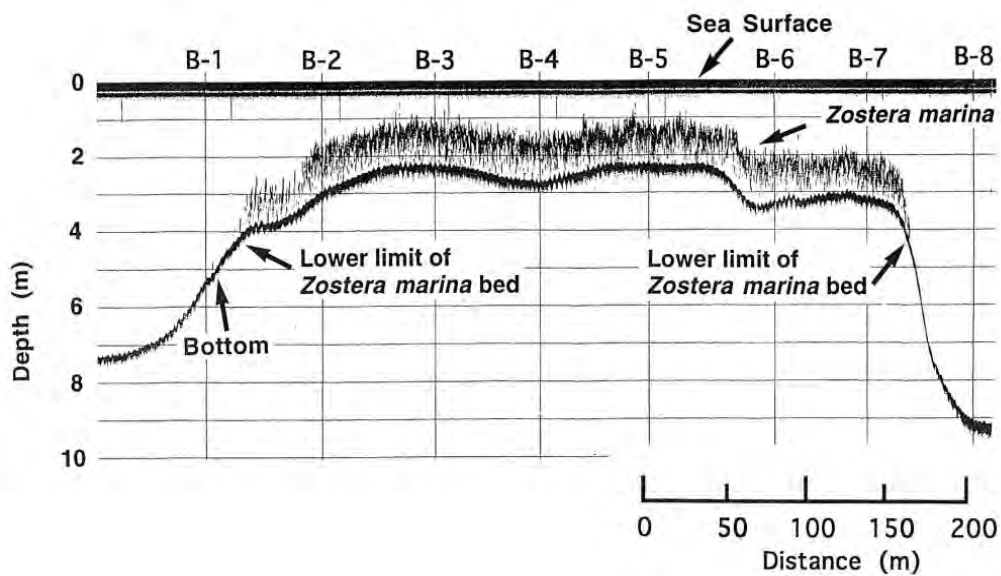


図5-4 瀬戸内海、味野湾における音響測深機によるアマモ場の計測記録。アマモの鉛直分布が明瞭にわかる (Komatsu and Tatsukawa, 1998)。

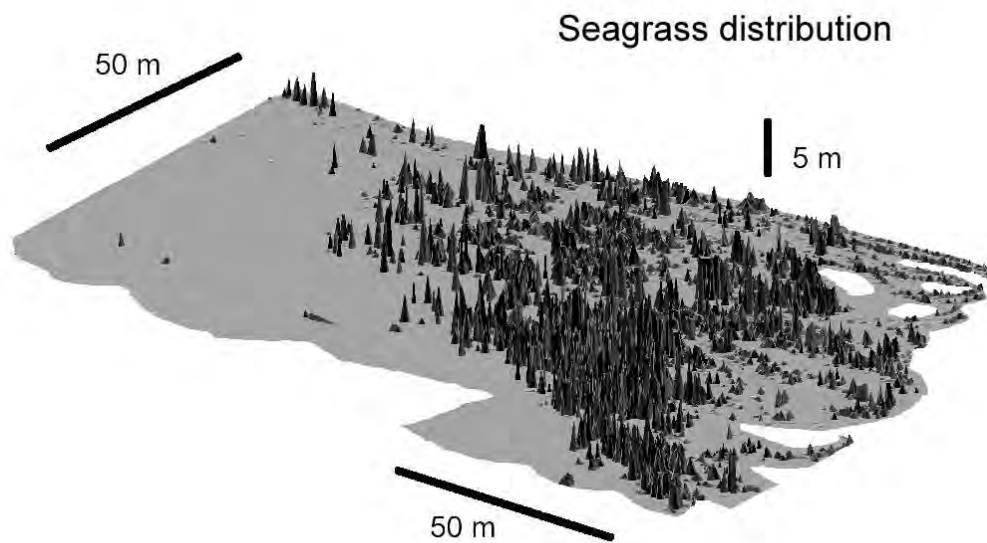


図 5-5 ナローマルチビームソナーにより岩手県大槌湾の海草（タチアマモ）藻場をマッピングし、繁茂状態を 3 次元で表示した図 (Komatsu *et al.*, 2002)。

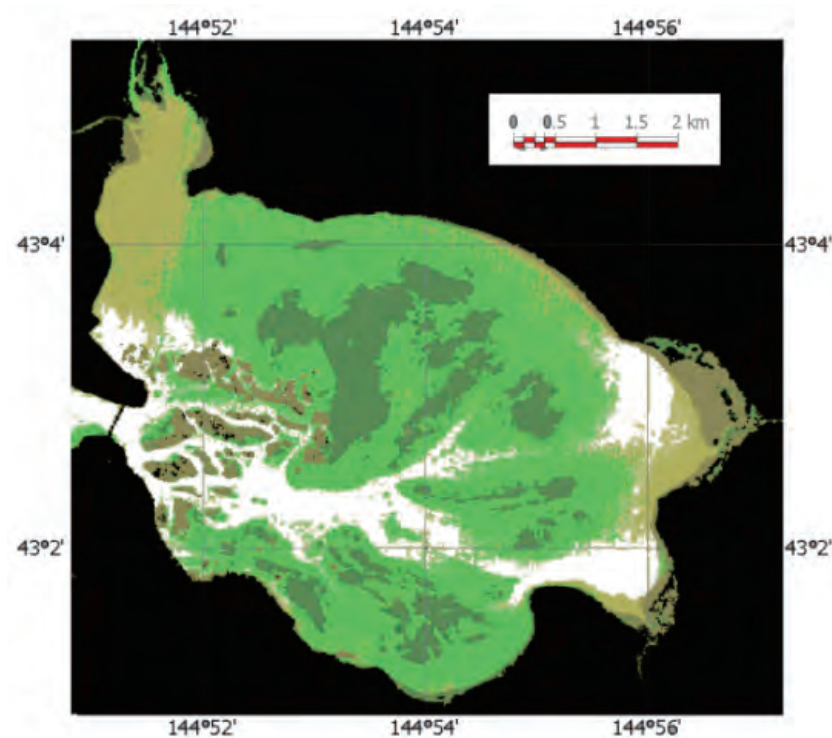


図 5-6 ALOS 衛星のマルチバンド画像をもとに教師つき分類によりマッピングした北海道厚岸湖におけるアマモの分布。濃緑色、薄緑色、黄土色、焦げ茶色、肌色、黒色は、それぞれ、高密度海草藻場、低密度海草藻場、濁水、干潟、砂地、陸地 (Komatsu *et al.*, 2009)。

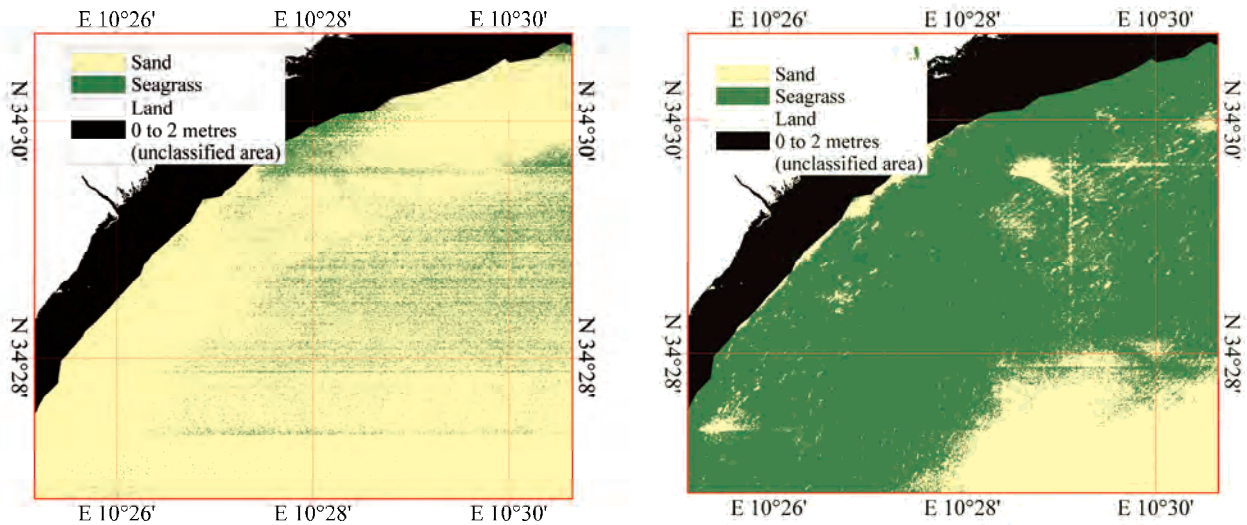


図 5-7 チュニジア共和国マハレス地先ポシドニア藻場を撮影した IKONOS マルチバンド画像の解析結果。Lyzenga の Depth Invariant Index (DI) (左図) と Sagawa *et al.* (2010) の Bottom Reflectance Index (BR) (右図) とによる放射量補正をもとに教師つき分類した結果の図。海草 (緑色) と砂 (肌色) に分類した全体の精度は、DI が 54%、BR が 90% (Sagawa *et al.*, 2010)。

5.2.3 潮間帯・湿地 (マングローブ・干潟・汽水域を含む)

(1) 観測の必要性

潮間帯・汽水域 (塩性湿地を含む) は、陸域と海域の境に形成され、両者の影響を強く受けて環境が大きな変動する場所である。ここには、マングローブ・干潟・岩礁・転石帯・砂浜などの特徴的な生態系が形成される。

これらの生態系は、生態系機能 (生産性・物質循環機能・水質浄化機能など) や生態系サービスが高い場所であり、その経済的価値は熱帯雨林の数倍～十数倍になると見積られている (Costanza *et al.*, 1997)。しかし、人間活動の拡大に伴い、面積の減少や生態系機能の劣化が著しい。例えばマングローブは、最近 50 年で約 3 分の 1 が世界の海岸から消失している (Alongi, 2002)。また、日本の干潟も 20 世紀後半の高度経済成長期に著しく減少した (環境庁, 1994)。減少の主要な原因は、人間の開発活動や水質汚染などであるが、気候変動に伴う海面上昇や陸域からの物質供給パターンの変化も関与していると思われる。

潮間帯や汽水域は、今後の温暖化の進行に非常に脆弱であることが指摘されている (仲岡, 2008)。海面上昇、気象の変化 (降雨パターンの変化など) に伴う河川水・土砂の供給量および時間的パターンの変化などが、潮間帯や汽水域の分布を大きく変化させると予想される。例えば北アメリカでは、今後進行する海面上昇により、生態学的に重要な潮間帯の湿地が 20～70% 減少すると試算されている (Galbraith *et al.*, 2002)。その結果、潮間帯や汽水域生態系の機能の低下のみならず、これらの生息域に分布する海洋生物の絶滅や、潮間帯を利用するシギやチドリなどの渡り鳥への影響が心配されている。

これらの理由により、これらの生態系の監視においては、干潟や海岸線の物理的・地形的な変動の観測だけでなく、生態系の変動の観測の推進・標準化、データの流通・公開が早急に求められている。

(2) 現状と課題

以上のような状況に対して、標準化された方法で沿岸域の生態系および生物多様性の観測を長期間継続する取り組みが 1990～2000 年代以降開始されている。詳細については、5.4.1 に説明する。特に、干潟を利用する鳥類 (シギ・チドリ類) については、複数の国際モニタリングプログラムが行われている (例えば、ISS (International Shorebird Surveys) ⁴³ や、「東アジア・オーストラリア地域フライウェイ・パートナーシップ」⁴⁴ など)。

日本における潮間帯・汽水域の生態系のこれまでの観測調査の多くは、各地域における研究者や地元 NPO 団体

⁴³ <http://www.shorebirdworld.org/> (参照日: 2010/02/16)

⁴⁴ <http://www.sizenken.biodic.go.jp/flyway/> (参照日: 2010/02/16)

などによる個別的な取組みにゆだねられてきてきた。方法や範囲・解像度も観測の目的に応じて個別に設定されており、標準化された方法は少なかった。長期観測の例では、大阪湾や和歌山県田辺湾の岩礁潮間帯で過去数十年間にわたり長期的な調査が行われており、その結果、各海域において、南方に分布中心域を持つ種(南方種)が増え、北方種が減少していることが確認されている(Ohgaki *et al.*, 1997; 大阪湾海岸生物研究会, 2002)。また、マングローブを対象としたものでは、沖縄から東南アジア、太平洋諸国の複数の地域を対象に、海面上昇の影響のモニタリングや、それに基づく炭素蓄積機能評価が行われている(環境省自然環境局, 2001; Fujimoto, 2004; Tabuchi, 2006)。これらの研究は、いずれも個人および有志のグループ主体で行われているものである。

標準化された方法による全国レベルの調査としては、環境省が、「自然環境保全基礎調査(緑の国勢調査)」の一環として、全国の主要な干潟や砂浜などを対象に、分布面積や種構成などを1970年代より調査している⁴⁵。この情報は自然環境情報GISとして、BIODICの生物多様性情報システムで公開されている⁴⁶。

環境省はこのほかに「重要湿地調査(干潟、藻場)」で2002~2006年にかけて全国の主要な干潟の種構成や生物量を、統一した方法で調査し解析している(報告書情報)。また、(独)国立環境研究所(NIES)は、「干潟等湿地生態系の管理に関する国際共同研究」を行い、全国の干潟14か所で生態系における生産、分解など生態系機能の評価とベントス・付着藻類に関する生物多様性との関係を調査した(古賀他, 2005)。

以上の調査の多くは、短期的に行われるものがほとんどであり、経時的に行われているものに関しても、調査間隔が長かったり、調査回ごとに項目や方法が変わったりするなど、生態系や生物多様性の長期変動を解析する目的では必ずしも設計されていなかった。

このような状況を踏まえ、日本の主要な生態系の長期変動を明らかにすることを目的とした重要生態系監視地域モニタリング推進事業(モニタリングサイト1000)が2003年度より開始されている(全体の概要については4.2.3も参照)。2007年度から開始された沿岸域生態系調査においては、磯(岩礁潮間帯)と干潟も対象になっている。磯の調査では、北海道・千葉・和歌山・大阪・熊本・沖縄に設置された6サイトにおいて、25cm四方の永久方形枠を30個設置し、毎年枠内の写真を撮影・分析することにより、固着性生物の被度を調査するとともに、5年ごとに移動性動物の個体数を記録することになっている。干潟については、北海道・福島・千葉・愛知・和歌山・大分・熊本・沖縄に設置された8サイトにおいて、潮間帯上部(岸)から潮間帯下部(汀線)にかけて複数のエリアを設定し、50cm×50cmの方形枠を用いて、表在性ベントスと埋在性ベントスの定量と種多様性の調査を行う。また、沿岸域調査とは別に、砂浜におけるウミガメの調査が、全国41か所の海岸で2003年より実施されている。さらに、汽水域については、モニタリングサイト1000陸水域調査の中で対象生態系とされることになり、2009年度に予備調査が開始されている。

(3) 広域モニタリング手法の研究動向

サンゴ礁・藻場と同じく、潮間帯および汽水域もリモートセンシングとGISを用いた広域モニタリングは有効な手法となる。潮間帯でも、特にマングローブや汽水域の塩性湿地は浸水することがないため、陸上の森林や草地と同様な方法で識別可能であり、これまで多くの研究が行われている。世界のマングローブにおけるこれまでの主要な成果は、世界マングローブ情報・データベース(GLOMIS: Global Mangrove Database & Information System)⁴⁷に登録、公開されているが、干潟や磯、汽水域において、国内外の研究例を網羅するようなデータベースは構築されていない。

リモートセンシングとGISによる面的な広域観測と、水質や生物多様性、生態系機能(生物量や生産量など)の現地観測を統合的に解析することにより、生態系の広域評価や今後の変動予測を行うことが可能になると思われる。汽水域においては、中海・宍道湖を対象に、生態系モニタリングとリモートセンシングとのリンク法の確立に向けた取組みが行われている(國井, 2008)。

(4) データの管理・公開・交流

上記で紹介したこれまでの国内事業の成果の多くは、紙媒体あるいはポータルサイトからダウンロードができる形で公開されている。また、GISベースの成果の一部についてはWebでも公開されている。例えば、前述の「自然環境保全基礎調査」で行われた干潟調査・湿地調査の結果については、環境省の生物多様性情報システムに

⁴⁵ http://www.biodic.go.jp/kiso/fnd_f.html (参照日: 2010/02/16)

⁴⁶ http://www.biodic.go.jp/kiso/map/mov_map_f.html (参照日: 2010/02/16)

⁴⁷ <http://www.glovis.com> (参照日: 2010/02/16)

GIS データベースの形で公開されている⁴⁸。ただし、データベースの形式や公開方法はそれぞれが独自に決められており、それらの標準化や相互リンクの整備はこれからの課題である。

前述の通り、潮間帯・汽水域におけるこれまでの長期生態系観測の多くは、研究者や事業団体の個別な活動に基づくものが多く、データの管理、フォーマット、公開の可否も各実施者の判断に委ねられているのが現状である。様々なデータベースの相互流通を促進するための仕組みづくりが強く求められる。

(5) 今後の展望・課題

干潟・汽水域の生態系観測については、モニタリングサイト 1000 のように、標準化された方法で広域な比較を行う事業が実施されるようになってきたが、このような取組みは日本においてはまだ少数であり、観測点も限られている。気候・地形地質・環境条件・人為的な影響の度合いが異なる日本沿岸を網羅するように観測サイトを設置したうえで、モニタリングを実施できる体制を確立することが急務である。そのような取組みを実現する方法の 1 つとして、JaLTER の沿岸サイトを利用した統一的な観測研究計画の立案などが考えられる(5.4.2 に詳述)。

生態系観測の調査点数や観測態勢が不十分である最大の要因は、生態系観測に対する予算および人材の不足である。前者については国からのさらなる支援が必要であり、後者については人材育成のための教育やキャパシティビルディングの推進が必要であろう。特に、沿岸生態系の現地観測に携われる科学者の数は陸域よりもはるかに少ないので、専門家以外でも参加可能な方法の検討が求められる。例えば、地域住民や自然愛好家などが手軽にできる簡易モニタリングの方法の開発や実施などが望まれる。

一方、これまで国や地方自治体が全国の沿岸域で行った事業の環境アセスメントに伴う調査結果は莫大なものである。これらを科学的に有効利用することは国民の財産にもなり得る。従来は、これらの結果の多くが紙媒体の報告書に掲載されてきたため、5 年間の保存期間以降は廃棄されている場合も多い。現在は電子化されている資料も増えてきたので、これらを積極的に一般公開できるようにする仕組み作りや施策の整備等が必要である。

干潟や湿原を対象とした多くのモニタリングプロジェクトは、生物多様性の調査に重点がおかれており、物質循環を含めた生態系動態自身のモニタリングは十分に行われているとはいえない。近年の研究の進展により、生物多様性と生態系の変動は密接にかかわっていることが明らかになってきた。例えば、種多様性は、生産性や安定性などの生態系機能と正の相関を示す(Hooper *et al.*, 2005)。また、遺伝的多様性が高い沿岸生物は、生産性や、攪乱に対する抵抗性や回復能力が高いことなどが示されている(Williams, 2001; Hughes and Stachowicz, 2004; Reusch *et al.*, 2005)。今後は、このような生物多様性と生態系機能の関連性に着目したモニタリング計画の立案を進めることも重要であろう。

ただし、調査網が充実したとしても、現地モニタリングが提供するデータはあくまでも点や線のデータである。干潟や汽水域全体の面的な評価を長期的に可能にするには、前述したように現地観測とタイアップしたリモートセンシング観測体制を構築することや、陸域で行われているようなデータロガーや設置型カメラによる無人観測システム(フィールドサーバー等)の整備などを検討することが有効であろう。

(仲岡)

5.3 陸域

5.3.1 高山

(1) はじめに

高山帯は、地球温暖化による気候変動に対して非常に脆弱な生態系である。陸域全体の中で高山生態系の占める割合は約 3% に満たないが、高山生態系は独特の生物相からなる多様性のホットスポットである。最終氷期以降高山帯に取り残された残存種や、高山環境で独自の進化を遂げて来た生物相が局所的に隔離分布しており、希少種や固有種が豊富なことが特徴として挙げられる。例えば、我が国には約 440 種の高山植物が生育しており、そのうち約半数は固有種であるといわれている。近年、世界各地の山岳地域で氷河の消失や雪渓の縮小が急速に進行している。このような変化は高山生態系の水収支を変化させ、土壤乾燥化を引き起こすなど、高山植生や動物相に重大な影響を及ぼすと懸念される。高山域には大量の積雪が蓄積されており、周辺地域や流域への涵養効果が高い。そのため、周辺の生態系や人間社会への影響も強いと予測される。多くの山岳域は国立公園等に指定されており、観光資源としての価値が高い。そのため、高山生態系の景観変化は、経済的にも打撃をもたらすと

⁴⁸ <http://www.biodic.go.jp/J-IBIS.html> (参照日: 2010/02/16)

予測される。一方で、高山生態系は陸域生態系の中で最も人間活動の影響が少ない場所であり、人為的影響を排除して地球環境変化を診断できるセンサー機能として優れている。この利点を活かして、地球温暖化のモニタリングサイトとして積極的に利用しようという動きが高まっている。

(2) 観測による温暖化影響評価

高緯度地域や高山域では、温暖化に伴う気温の上昇速度が中低緯度地域に比べて速く、動植物の分布域は急速に変化すると考えられる。高山植生は、標高や土壌水分傾度に沿ってモザイク状に配列されており、わずかな環境変化に対して敏感に反応するものが多い。ヨーロッパアルプスでは、過去の植生調査記録と現在の植生との比較により、多くの高山植物の分布域上限が過去70～90年の間に上昇している事実が報告されている (Grabherr *et al.*, 1994)。しかし、観察された上昇速度 (最大4m/10年) は、この間の気温上昇から推定される理論的上昇速度 (8-10 m/10年) に比べかなり遅いものであった。また、世界各地の山岳域で森林限界の上昇や森林性植物の分布域の上昇が報告されている (Lenoir *et al.*, 2008)。このような植生変化は、高山帯の縮小と高山植物相の急速な変化、絶滅、種多様性の減少を導くものであり、高山生態系全体に深刻な影響をもたらすと懸念される。

近年、衛星データを用いたリモートセンシングによる、広域的な植生変化や環境変化の解析手法の研究が行われるようになってきた。分光反射率の解析により、植生指数による植生判読や、植物の生理活性評価などが可能になってきた。しかし、衛星データが利用できるようになったのは比較的最近のことであり、過去数十年スケールの植生変化を定量化するには、過去の航空写真との比較が有効である。

気温上昇は生物の季節性 (フェノロジー) にも強く影響する。多くの生物は温度変化に反応して季節的に行動を変化させる。例えば、多くの高山植物は平均気温の上昇に対して開葉時期や開花時期を早め、紅葉時期が遅くなる傾向がある。このようなフェノロジー変化は、生育開始時期に霜害の危険性を高めることが報告されている (Inouye *et al.*, 2000)。また、動物の休眠時期や標高に沿った移動時期も変化すると予測され、生態系へのフェノロジー攪乱の影響を予測・評価するためのフェノロジーセンサスの動きが高まっている。

(3) 温暖化実験に基づく予測

地球温暖化は気温上昇のみならず、降水量や雪解け時期の変化に伴う水分収支、土壌分解速度の変化に伴う養分状態の変化、積雪期間の変化に伴う生育期間の変化など、様々な間接効果をもたらすと考えられる。これら個々の要因がもたらす影響を評価するには、環境操作実験が有効である。寒冷生態系における環境操作実験は、主にアラスカなど高緯度地域で1980年代より行われてきたが、中緯度高山帯においても北アメリカ、北欧諸国、中央アジア、日本などで行われている。高山帯を含めたツンドラ地域での国際的な環境操作実験として、国際ツンドラ実験プロジェクト (ITEX: International tundra experiment) ⁴⁹がある。ITEXでは、同一規格の開放型温室 (オープントップチャンバー) を野外に設置し、人為的に温度上昇を引き起こすことにより、個々の植物のフェノロジー、生理活性、成長や植生構造変化を経年的にモニタリングする。さらに、施肥処理や被陰処理などを組み合わせることにより、複合要因に対する植物の応答を解析することも行われている。これまでの解析により、植物の成長応答は生育形態に基づく機能型 (functional type) に特異的であり、温暖化によりイネ科草本植物などの禾本類や低木植物の生長が促進され、蘚類苔類や地衣類が減少し、植物群集の多様性が急速に低下して行く傾向が示されている (Walker *et al.*, 2006)。このような変化は、実際のツンドラ生態系で報告されている長期的な植生変化様式と類似した傾向である。これ以外にも、電熱線を用いた土壌温度操作実験や、スノーフェンスを用いた積雪操作実験等が高山地域で行われている。

生育環境の変化に対する個々の生物の応答に加え、生物間相互作用の変化が引き起こす生態系攪乱の重要性も操作実験により明らかになってきた。高山生態系では、温暖化により気候的制約が緩和されると、同所的な生物種間関係が協同的關係 (facilitative) から競合的關係 (competitive) に変化すると予測されており、その結果少数の競合種が優占し、生物多様性は低下して行くことが示されている (Callaway *et al.*, 2002)。我が国の高山帯でも高山植物群落にチシマザサの侵入が急速に進んでおり、高山植物群落の衰退と種多様性の低下が懸念されている。

(4) 長期モニタリング計画と今後の課題

高山生態系が有する優れた環境変化センサー機能を活用すべく、世界各地の高山域で同一の手法で植生変化を長期的にモニタリングして行こうとする国際プロジェクト、国際高山環境長期モニタリング計画 (GLORIA:

⁴⁹ <http://www.geog.ubc.ca/itex/> (参照日: 2010/02/16)

Global Observation Research Initiative in Alpine Environments)⁵⁰が行われている。我が国においても、高山域における長期モニタリングサイトの設置と登録が求められている。このような状況に対応すべく、環境省生物多様性センターによるモニタリング1000でも高山帯サイトの設立が2009年より始まった。現時点で、北海道大雪山系、本州中部山岳域の南アルプス、北アルプス、白山ならびに富士山が高山帯サイトとして登録が決まっている。本格的なモニタリング事業は、2010年より始まる予定である。

今後の高山生態系における温暖化影響評価に際して考慮すべき課題として、以下の項目が挙げられる。

(1) 生物地理学的背景と遺伝的多様性の地域特性を考慮した高山生態系理解：我が国の高山動植物の多くは、第四紀の気候変動に伴う地理的分布域変動の影響を強く残している。特に、本州中部山岳域は間氷期にレフュージアが多数存在していたと考えられ、生物集団の遺伝構造が北海道と比べて複雑であることがわかってきた。各山域に特有な生物集団の遺伝構造の理解と、気候変動に対する遺伝的多様性の減少に着目する必要がある。

(2) 高山植物の生理学的応答と植生変動の関連性：生態系の基盤を構成している高山植物は、気候変動によってどのような生理的応答を示すのかを明らかにすることは、植生変化メカニズムの解明と植生動態予測に重要である。

(3) 高山帯への移入生物の侵入による生態系攪乱：高山環境の変化に伴い、これまで高山生態系で生育できなかった低地性の生物や帰化生物の侵入が加速される危険性がある。例えば、本州中部山岳域ではニホンジカやニホンザルが高山帯に入り込み、高山植生や高山動物に深刻な影響を及ぼしている。また、北海道では帰化生物であるセイヨウマルハナバチの高山帯への定着が危惧されている。

(4) 雪解けの早期化が引き起こす生態系攪乱：近年温暖化に伴う雪解け時期の早期化が進行している。雪解け時期の変化は、高山生態系における季節性を改変し、フェノロジー変動を引き起こす。フェノロジー攪乱は、現存する生物間相互作用を攪乱する可能性がある。さらに、植物群落や個体群の開花時期の改変は、花粉散布を介した遺伝子流動を変化させ、遺伝構造の攪乱を引き起こす可能性もある。

高山生態系の構造については、ほかの陸域生態系と比較してまだ不明点が多く、生態系構造の解明に向けた研究推進が急務である。

(工藤)

5.3.2 周極域

(1) 周極域の植物生態系

周極域は、おおよそ北緯50度以北の北方林と、北極圏に広がる森林ツンドラ、ツンドラ、極沙漠等を含む地域である。海流の影響によってかなり高緯度地域でも比較的気候条件がそれほど厳しくない地域もあるが、大陸内部では気候条件は酷暑・極寒で厳しく、降水量は総じて少ない。

周極域は永久凍土の分布域でもあり、連続分布する永久凍土上にはツンドラ植生が成立すると言われているが、北東ユーラシアの連続永久凍土地帯には広大なカラマツ林生態系が成立しているという具合に、周極域にも植物生態系と土壌の多様な組み合わせが存在している。また、ユーラシア大陸の西シベリアと北アメリカ大陸中北部には湿地帯と湿地林が広域に分布している。周極域の生態系では地上部現存量に蓄積している炭素は熱帯林の半分と言われているが、これらの永久凍土地帯と湿地林を含む周極域生態系には、未分解腐植と土壌有機物のかたちで地下部に蓄積する炭素量は膨大な量になると推定されている（例えばTarnocai *et al.*, 2009など）。

このような炭素蓄積の場として重要な周極域生態系は、気候の温暖化によって植物生態系が炭素をさらに固定する場として機能するのか、それとも蓄積している有機物の分解速度が加速して二酸化炭素放出の場になるのか、注目されている。

(2) ツンドラ植生の長期施肥実験

周極域の気候が温暖化した場合に、植物の反応として考えられるのは生育期間の長期化による現存量の増加（炭素固定量の増加）であり、植物と土壌をめぐる物質循環量の増加である。北アメリカの長期生態系観測拠点の1つである、アラスカ北部、ブルックス山脈北面のトゥーリック湖周辺では、様々な植生タイプを含むツンドラで、1980年代初頭から野外の施肥実験が開始された。その四半世紀以上に渡る長期野外施肥実験の結果は、気候の温暖化がツンドラ植生と炭素収支にもたらす影響について、多くの知見を与えている（Mack *et al.*, 2004など）。

⁵⁰ <http://www.gloria.ac.at/>（参照日：2010/02/16）

ツンドラ植生地上部の年間純生産速度 (ANPP: Annual Net Primary Productivity) は、施肥区では無施肥区のほぼ倍になった一方で、地下部に蓄積した炭素量は施肥区では無施肥区の7割程度にまで減少していた。施肥区の炭素蓄積部位で最も大きく減少したのは、表面の有機物層から5 cm以深の有機質土壌と鉱質土壌の部位であった。このことから、ツンドラ植生に施肥という形で与えられた養分環境の変化は植物の生育を促進したが、有機物分解をさらに促進したため、系としては炭素放出に転じたと結論づけている。未分解有機物、土壌有機物の分解系については、未知のプロセスと北方林やツンドラに特有の養分吸収経路があるといわれており (Jones and Kielland, 2002)、温暖化の影響評価には分解生物群の生態と機能解明が不可欠の要素であろう。

(3) 永久凍土融解、森林火災が炭素収支に与える影響

永久凍土それ自体についての温暖化影響評価は、4.3に詳細が報告されているので、ここでは周極域のツンドラ生態系で観測されている炭素収支に、融解した永久凍土中の「古い」炭素が寄与しているという事例を報告する (Schurr *et al.*, 2009)。

通常の気候条件では、永久凍土地帯の表層数十cmから数mが、夏季に融解する (これを活動層という)。地表面に蓄積する有機物が分解されて、一部は土壌有機物として蓄積していくが、活動層より深い凍土層に蓄積している土壌有機物は、数百年～数千年のオーダーで蓄積した炭素である。アラスカ山脈のツンドラにおける観測結果では、深くまで永久凍土が融解して形成された凹地形の池沼ほど、放出される炭素に「古い炭素」の占める割合が高くなっているという結果が得られた (Schurr *et al.*, 2009)。周極域の永久凍土中にいわば「凍結封入」されている炭素は、大気中に存在する量の2倍に匹敵するという推定もあり (Zimov *et al.*, 2006)、周極域の植物生態系による炭素固定と永久凍土の融解による炭素放出の長期観測は、温暖化影響評価に大きく貢献するだろう。

北方林生態系では、数十年～百数十年の間隔で大規模な森林火災が発生し、それを契機として新たな森林群落の発達が始まるのが常態である。長い期間をとれば、火災で焼失する際に放出された炭素とその後の森林再生過程で蓄積する炭素はおおよそ平衡状態にあるが、夏季の小雨傾向や乾燥化が強まって、火災頻度と火災規模がこれまでとは異なるレジームになった場合には、森林の炭素固定速度に鈍化が生じることも懸念されている。アラスカ内陸部の森林火災研究によれば、火災によって放出される炭素は平均して1ha当たり21.4tである

(Kasischke and Stocks, 2000)。

(4) ユーラシア北東部・永久凍土地帯のカラマツ林における炭素収支観測

周極域の森林生態系については、北欧からヨーロッパ・ロシア、アラスカとカナダの亜寒帯針葉樹林がこれまで研究の中心であった。これらはマツ類・トウヒ類などの常緑針葉樹を優占樹種とする森林タイプである。一方、エニセイ側以東の中央シベリアと東シベリアには、カラマツ一種がほぼ優占する永久凍土上の落葉針葉樹林帯が広く成立している。この北東ユーラシア地域のカラマツ林生態系では、日本とロシアの共同研究が展開されてきた。北東ユーラシアは旧ソ連時代にも生態学的調査がほとんど行われていないため、永久凍土上に成立する地球上で唯一の森林生態系として、注目すべき生態系である。

レナ川流域を対象にした水循環と炭素循環プロセスの研究成果は、CREST/WECNoFのホームページ⁵¹で成果の閲覧が可能である。また、永久凍土上に成立したカラマツ林生態系の生態学的な共同研究の成果も、取りまとめられている (Osawa *et al.*, in press)。北東ユーラシアの永久凍土上に成立するカラマツ林生態系の平均的な森林では、生態系全体の炭素蓄積量の7～8割が鉱質土壌の土壌有機物として蓄積しており、炭素収支は0.8tの吸収が観測されたという (Osawa *et al.*, in press)。

(5) 国際共同研究の枠組みと日本の果たすべき役割

亜熱帯から冷温帯域まで南北に長い国土を持つ日本には、周極域に属する地域はないが、周極域の北極振動などの気候変動は、日本の冷夏／猛暑、暖冬／豪雪にも影響しているという。その周極域の陸域生態系、とりわけ炭素収支に大きく寄与する森林、膨大な有機炭素を永久凍土について、日本が国際的な共同研究を進める意義は大きい。距離的にも、北東ユーラシアとアラスカ、カナダ北西準州地域を両翼に置くように位置する日本は、大陸レベルの地域比較研究が可能である。

国際的な共同研究に向けた観測拠点、例えば、アラスカ大学フェアバンクス校に設立された国際北極圏研究センター (IARC) などを有効利用して、さらに周極域の観測研究に貢献すべきである。

(松浦)

⁵¹ <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~wecnof/jp/index.html> (参照日: 2010/02/16)

5.3.3 冷温帯および暖温帯

(1) はじめに

東アジアにおける冷温帯は、人為攪乱の比較的に少ない場所では落葉広葉樹を中心として構成される森林地帯に属する。日本では九州の山岳地帯から北海道の低山帯まで最も広い面積をカバーする。一方暖温帯は、沿岸部の降水量の多い地域では常緑広葉樹を主体とする森林となり、この地域独特の生態系である。冷温帯林と暖温帯林を合わせた地域は日本の面積の大部分を占め、生態系機能の広域評価や森林生態系の温暖化影響を評価するために重要である。

(2) 温暖化影響の検出とその評価

温暖化など環境変動に対する森林生態系の影響を評価するには、これまで蓄積されてきたデータのメタ解析によるトレンド分析や野外観測、野外実験およびこれらの結果を用いたモデリングを併用していくことが肝要である。

樹木を中心とする植物フェノロジーの変化は生育期間の変化につながり、森林全体の生産量に影響を与える。特に落葉樹林の場合着葉期間と落葉期間は陸面状態が大きく異なるために、この区分は気象モデル・生態系モデルなどの多くのモデルを実行する際に必要であり、生態系の炭素収支にも強い影響を与えるものと考えられている。冷温帯・暖温帯林には非常に多様な種が含まれるが、森林性の樹木では気温が1℃上昇すると、開葉が平均3.4日、落葉が平均6.2日遅れると予測されている(藤本, 2008)。実際にカエデでは1953~2004年の間に落葉が9日遅くなっており(気象庁, 2005)、気温が1℃上昇するとカエデで12日落葉が遅くなったことになる。今後は冷温帯・暖温帯の主要構成種について近接センシングなどを用いてより定量的な観測を行うため、陸上植生の季節変動・長期変動に関する長期観測網(PEN)⁵²のような観測網をより充実させていくことが必要である。

二酸化炭素濃度の上昇に対する森林生態系の応答を明らかにする目的で行われた実験は、北アメリカデューク大学のマツ林での開放大気系高濃度二酸化炭素実験(FACE: Free Air Carbon dioxide Enrichment)やスイスバーゼル大学の落葉広葉樹林でのwebFACE実験などこれまでにいくつか存在する。しかしこれらの実験は二酸化炭素濃度を上昇させているものの、温度にはほとんど変化を起こせていないため、温度上昇に対する生態系の応答を分離して明らかにすることが必要である。森林生態系で温度を直接上昇させた野外実験は、落葉広葉樹林で電熱線を地下埋設した実験(Peterjohn *et al.*, 1993)、いくつかの森林の土壌表面を赤外ヒーターで小規模に暖める実験と落葉広葉樹林で地下部、地上部ともに電熱線で暖める実験(中村他, 2008)にほぼ限定される。地下部の温暖化が土壌生物を活発にし、それに伴う土壌呼吸で二酸化炭素放出量が増え、温暖化が助長されるガス交換プロセスに注目しているのは各実験に共通している。しかし地上部温暖化の影響を樹木の光合成能力やフェノロジー、植食者への波及効果なども含めて検証している実験はさらに限定される。この実験で地上部温暖化は、1) ミズナラ樹木の展葉を早めたり落葉を遅らせる、2) 光合成窒素利用効率が高まる、3) 葉の食害が増加する、4) 結実量が増加する、ことなどがこれまでに確認されており、さらなる検証が求められる。

超長期的には温暖化によって、植物種の局所的な絶滅と分散に伴う分布域の変動も起こる。例えば、冷温帯林の主要構成樹種であるブナの分布域は2090年には減少し、特に九州、四国および本州太平洋側の個体群は大幅に減少する確率が高いことが予測されている(Matsui *et al.*, 2004)。このような優占種の交代によって生物多様性の変化だけでなく、生態系機能の変化が引き起こされることも十分想定される。このような変化が実際に起こるのかを明らかにするためには、省庁レベルでの超長期的なモニタリングプログラムが必要となる。WG 報告書第1号で述べたように、日本全域での森林のバイオマス量や種多様性の変化などを明らかにする目的で1999年から林野庁による「森林資源モニタリング調査」、2004年から環境省による「モニタリングサイト1000: 森林分野」が開始された。「森林資源モニタリング調査」は5年間で全地点を一巡することとなっており、日本全体について4kmメッシュの格子点において森林が存在している地点すべてを対象とし、15,700点あまりになる。統一的な手法で全国の森林モニタリングが開始された意義は大きく、今後データ公開が望まれる。「モニタリングサイト1000: 森林分野」は地点数は少ないものの、毎年1haの毎木調査や毎月のリター・種子トラップ調査、年4回のピットホールトラップ調査が行われており、第一次生産量(NPP)の算出や種子生産量、腐食連鎖に関わる多様性の変化なども捉えられるデザインとなっている。データは近々公開予定であり、これらを利用することで広域での温暖化影響を明らかにすることが可能であろう。

⁵² <http://pen.agbi.tsukuba.ac.jp/> (参照日: 2010/02/16)

(3) 遺伝的変異と機能の変異

国内の天然性の単一樹種で最も大きなバイオマスをしめるのはブナ、分布域が最も広いのはコナラ・シナノキといずれも落葉広葉樹となっている。このように地理的に広い範囲に分布する植物は各地域の環境条件に適応し、遺伝的に固定された独自の形質を持っていることが多い。日本列島のような生産力勾配の広い範囲にわたって異なる個体群がある場合、同じタイプに属する森林でも、多様性と生態系機能の関係や生物間相互作用のあり方が地理的に異なる可能性がある。実際、ブナの場合光合成能力や水・窒素の利用様式、植食性昆虫との相互作用が地理的に大きく異なり、これらの形質は遺伝的にも固定されていることが明らかになりつつある。このような場合は、大規模な環境変動に対する森林生態系機能や群集の応答予測も、地域ごとに評価していく必要がある。従って、冷温帯・暖温帯林の温暖化影響評価を行うには、各地に存在する JaLTER サイトや JapanFlux サイトなどを有効に利用し、遺伝的変異を考慮した生態系のプロセス観測を行うとともに、多地点多種の植物の機能的性質（葉の面積密度、炭素・窒素比、リグニン含量など）に関するデータベースを充実させこれらを利用することで、生態系炭素収支や水収支、物質循環など生態系機能に与える影響とその広域評価を同時に行っていくことが今後重要になるだろう。

(4) 観測体制の現状と課題

冷温帯林生態系ではタワー観測による炭素収支が継続的に観測されているサイトも国内で数か所あり⁵³、この生態系に属する JaLTER サイトも比較的に多く、さらにモニタリングサイト 1000 のコアサイトとも重複しているサイトも少数ながら存在する。このような生態系観測ネットワークが重複するサイトをスーパーサイトと位置づけ、より高度な観測体制を確立することが望ましい。

暖温帯林は低山域に分布するため古くから人間活動の場利用され、発達した森林が残る地域は少ない。加えてタワー観測による暖温帯照葉樹林生態系の炭素収支が継続的に観測されているサイトは日本を含めたアジアで皆無であり、日本の中でもこの生態系に属する JaLTER サイトはわずかである。近接センシングによるフェノロジー観測と生理機能の評価は落葉樹を対象に進歩してきたが、常緑広葉樹では研究例も少なくまだ多くの課題が残されている。生態系機能の広域比較や温暖化に対する影響を評価するうえでも、観測の空白域となっているこの生態系に充実した観測サイトが整備されることが望ましい。

(日浦)

5.3.4 熱帯林

世界の森林面積の半分を占める熱帯林は、気象等の環境条件、種組成、生態系としての構造や機能が多様であり、陸上植物種の半数以上が生息する生物の宝庫と言われる (Chapin *et al.*, 2001)。しかしほとんどの熱帯林は人口増加が著しい開発途上国にあって、木材利用のための伐採や焼畑など農地への転換を契機として、年間 1,000 万 ha 以上の速度で減少しつつある。こうした人為影響の下では泥炭湿地林をはじめとする熱帯林の乾燥化が進行し、さらにエルニーニョ等の地球環境変化が相まって、大規模な森林火災の発生や土壌流亡等に伴って草地化が進行するなど、世界各地の熱帯林では生態学的意味で、不可逆的とも言える変化が現れつつある。

現在の生態系が、将来にわたって現状を維持し続けるのか、あるいは衰退しつつあるのか、それを見きわめることは非常にむずかしい。ある環境条件の下で十分に時間が経過しているのであれば、その生態系が定常状態に達することもあり得るかも知れないが、実際には、自然あるいは人為的な様々な攪乱が発生するため、生態系内部での営みにも変化を来す。それに加えて生態系を取り巻く環境条件も絶えず変化しているのであるから、この問題への解答をさらに困難にしている。

人間の生活の場でもあり、また生活の糧を提供する場でもある熱帯林では、様々な人為影響と地球規模の環境変化がもたらす。そうした相乗効果とともに各種生物の生息環境が変貌することになる。

近年、特定の生態系を対象とした、長期間にわたる土地利用変化の把握や生態系のモニタリングを通じて、熱帯林における生物種の急速な減少が報告され、また熱帯林の将来予測も行われるようになってきた (Malhi and Phillips, 2005; Jordan, 2005)。しかし、熱帯林の実態とその変化に関する科学的なデータや情報は極めて限定的である。熱帯林は生物の生息域として重要であるが、同時に、人間活動が盛んな地域でもあるため、熱帯林の変動が及ぼす生物的・社会的・経済的な影響は大きい。そのため、世界各地の熱帯林で発生している様々な変化の規模や方向性を早急に解明する必要がある、熱帯林の観測手法や調査体制を整備することが求められる。

⁵³ http://asiaflux.yonsei.kr/sf_fareast.html (参照日：2010/02/16)

以下、熱帯林の特性を踏まえた問題点を整理するとともに、今後対応すべき観測研究に関する課題と方向性について概観する。

(1) 熱帯林の分布・面積

熱帯林（熱帯季節林を含む）は世界の森林の 47%を占める（FAO, 2000）。それに対して、亜熱帯林を含む温帯林の面積割合は約 20%で、北アメリカ・ヨーロッパ・中国・日本などに分布し、古くから人間活動の影響によってその面積は大きく縮小してきたが、近年は植林や保護活動等により、分布面積は増加に転じている。一方、熱帯林はアマゾン川流域・東南アジア・中部アフリカ等に広く分布し、その面積は 17.6 億 ha（IPCC, 2000）に達する。しかし、熱帯林では、木材の利用や農地への転換などによって伐採が進みその面積は急速に減少しており、減少速度は年間約 1,290 万 ha に達するとされる（FAO, 2000）。

(2) 熱帯林の減少速度と原因

熱帯林減少の最も大きな原因は、森林伐採と土地利用転換である。なかでも森林の伐採・焼き払いを伴う焼畑耕作は全体の 45%を占める。しかし、焼畑だけが問題なのではなく、熱帯木材の伐採搬出の後に農民が侵入してさらに違法伐採や焼畑を繰り返す、あるいは集団移住政策の失敗などでさらに周囲の森林を開墾するなど、様々な事情が交錯している。より根本的な問題としては、熱帯地域にある途上国での、貧困や人口増加、紛争などの社会的、経済的要因に加えて、異常気象といった自然要因が複合的に作用して森林が減少していると考えられている。

熱帯林の減少をもたらす要因の 1 つとして、森林火災がある。熱帯乾燥地域におけるサバンナや灌木林、あるいは北方針葉樹林等の自然火災は、その生態系を維持・更新するためのメカニズムとして機能している場合がある。しかし多くの熱帯林で発生する大規模な森林火災は、自然攪乱として機能するものではなく、農地などへの転換を図るための森林伐採や火入れに付随して発生する。熱帯地域の湿地林は泥炭地に成立しているため、エルニーニョによる長期的な乾燥条件や森林伐採等に伴う湿地からの排水によって、地下水位が低下すると泥炭層は可燃物となり、人力では消火困難な泥炭火災が数ヶ月にわたって続くこともある（高橋, 2008; 平野, 2008）。こうした人為起源を含めた森林火災の実態を明らかにするような統計データは存在しないが、森林火災によって年間 600 万～1,400 万 ha の熱帯林が消失しているという報告もある（WWF *et al.*, 2003）。

(3) 熱帯林の生物多様性

生態系における生物多様性は長い時間を経過して実現されてきたものである。生態系の特性は気象条件や土壌条件などの環境とそこに生息する生物との相互作用で形成されてきた。現在の生物多様性はそうした条件下で実現してきたものであるが、それが現状で安定的に存在しているかどうかは明らかではない。しかし、様々な種は現状でもある程度のバランスを維持して生存しているはずであり、生物多様性が減少するということは、現在の生態系を維持している機能的なバランスが崩れることを意味する。生態系によっては、その機能に大きく影響しないこともあり得るであろうが、どういう生態系であればその問題が大きいのかあるいは小さいのかを判断する術を今のところ我々は知らない。

熱帯林は陸域面積の 7-8%に過ぎないが、熱帯雨林には地球上の全植物種の半数以上が生息し、南アメリカには 9 万種、東南アジアには 4 万種、アフリカには 3 万種が存在している。しかし熱帯林は、上述したように森林伐採や農地開発等に伴って、極めて早い速度で減少しつつある。これに並行して熱帯林を生息域とする生物が減少しているとされる（福田他, 2008）。IPCC-AR4 では、地球の平均気温の上昇が 1.5～2.5℃を超えた場合、これまでに評価対象となった動物種の約 2～3 割は絶滅のリスクが高まる可能性が高いと指摘している。ブラジル・アマゾンの熱帯雨林の将来予測によると、農地の拡大によって 2050 年までに熱帯雨林の 40%に相当する 200 万 km²が消失し、それとともに約 100 種のほ乳類が危機的状況に陥るとされる（Soares-Filho *et al.*, 2006）。このような森林減少に伴う生物多様性の減少がどの程度の大きさを生態系の存立バランスを崩すのか、そしてそのことがわれわれの生活にどのような影響を及ぼすのか、今後の重要な課題である。

人間の生活は、生物が作り出す生産物を利用することによって支えられている。それは単なる物量だけで満たされるのではなく、多様な生物資源によるところが大きい。食糧だけではなく産業活動に必要な様々な原料も提供しているのであり、生物の多様性は人間活動の基盤と直結する側面があることを忘れてはならない。

(4) 熱帯林と人間活動

国連によると、現在 60 億人と推定される世界の人口は、2050 年には 90 億人にまで増加すると予想されている。人口増加は開発途上国で顕著であり、そのための食糧や経済活動を維持するためには農耕地の確保と森林等の資源利用が不可欠であり、開発途上国に広く分布する熱帯林への影響が懸念される。

国連食糧農業機関 (FAO) などの評価では、地球の陸地面積 150 億 ha に対して現在の耕作地は 15 億 ha と推定されるが、今後、多少なりとも生産性が見込まれる耕作可能な地域 19 億 ha を加えた 33 億 ha を耕作可能地と見積もっている (佐々木, 2008)。しかし耕作地には養分や有機物の供給が不可欠であり、それが見込めない土地は生産性が低下するため、放棄されるのが通例である。地域住民は、有機物の蓄積が多い森林に侵入・開墾し、無秩序な森林伐採を行って、焼畑を行い、それに伴う森林火災などは、土壌を含めて、熱帯林を劣化させる。

地球観測衛星などによって検出される熱帯林消失の原因は、アマゾンなどで行われる大規模プランテーションの開発、焼畑移動耕作、湿地林の排水に伴う林地の乾燥化、それに伴う森林火災の頻発と考えられている。現実問題として、農地確保は地域住民にとっては死活問題である。かつてインドネシアが推進した移住政策のように、政府が積極的に農地開発を奨励することもある。そのため、熱帯林に及ぼすこうした様々な影響とそれに伴って変化せざるを得ない生態的な機能を解明・評価するためには、社会経済的な要素を抜きに考えることはできない。広大とも言える熱帯林であるがゆえに、無秩序に開発・劣化していく熱帯林の実態を正確に把握することは困難である。だが熱帯各地で生じている熱帯林変動の規模や速度、あるいはその地球規模の分布をモニター (監視) する必要がある、同時にそれらがもたらす様々な熱帯林の生態的機能を評価して、社会経済的側面も考慮しながら観測研究を行うことが求められる。

(5) 熱帯林研究の課題

地球温暖化等の環境変化が熱帯林にもたらす影響を明らかにするためには、生態系としての熱帯林に内在する、あるいはそれを支配するメカニズムを解明しなければならない。それは、熱帯林の生態的な営みとしての動態であり、そこ生息する生物の多様性にも関係する。そのため、熱帯林の種組成や複雑な森林構造とその面的広がり、生物群集の空間占有様式、生態系内の微気象条件や土壌条件など、生態系を構成する様々な要因とそれらが複合的に作用するプロセスを、長期観測データに裏づけつつ解明することが必然的に求められる。

熱帯林の動態を解明するうえで、その巨大で複雑かつ不均質な構造を理解することは、生物的多様性や炭素収支などの物理的プロセスを解明するためにも重要な意味を持っている (Aber and Melillo, 2001)。衛星リモートセンシングによる植被分類、NPP の推定、フェノロジー観測等のほか、航空機搭載のレーザースキャナーによる 3 次元的な森林構造の解析、樹高やバイオマスの推定等が、熱帯林を含めた様々な生態系で実施されている。しかし生態系の存続を左右する大きな要素として、生態系の構造とそれを生息環境としている多様な生物の存在、それらのネットワークがある。熱帯生態系では、その森林だけではなく周辺域の環境変化が当該生態系の環境に影響を及ぼし、生物間のネットワークが分断される場合がある。逆に言うと、そうした生態系内部における生物的变化をセンサーとして、熱帯地域の環境変化を評価することも考えられる。そのためには、上述したモニタリング手法と併せて、熱帯林生態系の動態・持続性・環境応答、生態系としての劣化や脆弱性に関する生態系観測研究が求められる。

熱帯林には熱帯降雨林や熱帯季節林、あるいは低湿地林などがあり、その構造や機能は変化に富む。そのため、こうした熱帯林の営みを解明するための長期生態モニタリングでは、生態系で生じる攪乱の頻度や大きさ、それに伴う林冠木の枯死や下層個体の更新・成長など、数十年～数百年という時間スケールで営まれる変動プロセスを明らかにすることを目的としている (Clark, 2007; Chave *et al.*, 2008)。現在熱帯林で実施されている代表的な長期モニタリングサイトとしては、マレーシア・パソーの低地フタバガキ林、タイ・カンチャナブリの熱帯季節林、パナマ・バロコロラド島などがあり、一部では、長期生態系研究 (LTER) として国際的な研究ネットワークも形成されている。熱帯降雨林では、分類群の多様性は一般に劣化程度に応じて変化することが知られており、このことは熱帯林生態系の長期観測で注意する必要がある、劣化程度に応じた熱帯林の面的な把握が不可欠である。そうした点も考慮して、LTER では観測手法の統一を図るとともに、動態解析の空間スケールをあげるなどの取組みが行われつつあり、生態系としての脆弱性を測る尺度としての遺伝的多様性に関する研究も重要である。

多様性は生態系の持続性と深く関わっている。生態系の様々な機能のうち、人間が与える生態系サービスとして木材生産・炭素固定・水資源確保などがあり、すでに報告されているように、熱帯降雨林や熱帯泥炭湿地林でも炭素収支に関するフラックス観測が行われている。一方、現在の世界的温暖化ガス排出の約 20% は森林減少および劣化に起因するという報告もあり、そのほとんどは発展途上国、熱帯林で発生するものと言ってよい。しかも熱帯で進行している森林の減少や劣化は、単に地球規模の環境変化に起因するだけでなく、人間活動にも大きく依存する事象である。従って、地球環境に大きな影響を及ぼす熱帯林の生態的変動を明らかにするためには、人間活動を含めた社会的経済的なプロセスを考慮して、生物多様性等の生態的プロセスと炭素フラックス等の物

理的プロセスを観測・評価しなければならない。

(千葉)

5.4 観測・研究ネットワーク

5.4.1 国際観測計画の推進

(1) 統合地球観測戦略パートナーシップ (IGOS-P)

IGOS-P は、宇宙からの地球観測と地表での観測システムの計画を調和させることを目的として 1998 年に結成された国際的・総合的な枠組みである。特に、地球観測衛星を開発・運用する宇宙機関と、全球規模で展開している地表での観測システムの協力を強化することにより、「統合的地球観測」を実現するための計画策定に取り組んだ。IGOS パートナーのうち、生態系分野と関連の深い観測および研究プログラムには以下のようなものがある。

○全球規模での観測システム：

全球気候観測システム (GCOS)、全球陸上観測システム (GTOS)、全球海洋観測システム (GOOS)

○気候変動研究プログラム：

世界気候研究計画 (WCRP)、地球圏－生物圏国際協同研究計画 (IGBP)

沿岸を含む陸上分野の観測システムである GTOS を例に挙げると、GTOS には以下の 4 つのメインパネルが含まれる。

○気候のための陸域観測パネル (TOPC: Terrestrial Observation Panel for Climate)：

気候変化に影響する陸域の物理・化学・生物学的パラメーターの同定

○陸域炭素観測 (TCO: Terrestrial Carbon Observations)：

陸域における炭素放出量と吸収量の時間・空間分布の把握

○森林および土地被覆動態に関する全球観測 (GOF-C-GOLD: Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics)：

森林と土地被覆に関する一貫性のあるデータおよび情報の収集

○GTOS 沿岸イニシアティブ (C-GTOS: Coastal GTOS)：

人間活動の影響を強く受ける沿岸生態系の監視

陸域の観測は、大気や海洋の観測に比べると、分野ごとにフォーマットも精度も異なる複雑で多様なデータを扱うことが特徴である。さらに、陸域のデータは時間・空間的に不連続的である場合が多い。そこで GTOS は、全球規模で一貫性のある衛星観測および地上観測データの収集と提供をどのように実現することができるかという課題に取り組んだ。

統合地球観測戦略パートナーシップ (IGOS-P) の結成以前、地上観測と衛星観測を融合させた定常観測や国際的な取組みは、各国気象機関の観測を除けばほとんど存在しなかった。IGOS-P も主に宇宙機関の呼びかけにより始まったため、衛星観測主体の傾向はあったが、地上観測システムを重視し、調和を目指した点は意義深い。IGOS-P 結成から数年後に、全球地球観測システム (GEOSS) 実施計画策定の作業が開始され、2005 年に 10 年実施計画が承認された。IGOS-P の成果は、GEOSS 10 年実施計画のインプットとなり、利用ニーズ主導の地球観測システム構築の取組みにつながっている。

(2) 地球圏－生物圏国際協同研究計画 (IGBP)

IGBP は、ICSU の下に 1986 年に設立された学際的な国際研究計画であり、現在、第 2 期 10 年計画の中盤に差しかかっている。活動中の 6 つのコアプロジェクトは、地球の重要な要素である大気・海洋・陸域と、それらの要素の間の関係 (大気－海洋、海洋－陸域、陸域－大気) に関する研究をカバーする。本節では、特に沿岸を含む陸域の生態系分野に関係のある 2 つのコアプロジェクト [全球陸域プロジェクト (GLP: Global Land Project)、および統合的陸域生態系－大気プロセス研究 (iLEAPS: Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Process Study)] の国内外での活動について報告する。

GLP は、IGBP と地球環境変化の人間社会側面に関する国際研究計画 (IHDP: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change) の 2 つの国際研究計画が共同で立ち上げたコアプロジェクトである。GLP は、IGBP 第 1 期の 2 つのコアプロジェクト地球変化と陸域生態系研究計画 (GCTE: Global Change and

Terrestrial Ecosystems)、および土地利用・土地被覆変化 LUCC (Land-Use and Land-Cover Change) を受け継ぎ、第2期に活動を開始した。GLP の目標は、陸域を人間と自然環境の相互作用によって成り立つ系と捉え、人間社会の問題が土地利用変化などを介して自然環境に及ぼす影響を把握すると同時に、自然環境から人間社会へのフィードバックの仕組みを明らかにすることである。

国内では、世界各国の研究機関・組織との連携により GLP 関連研究を進めることを目的として、北海道大学が2005年にGLP札幌拠点オフィスを開設した。GLP札幌拠点オフィスは、特に陸域システムの「脆弱性・復元力・持続可能性」の解明を目的としており、GLPに関連する研究の振興と研究者コミュニティの組織化を推進している。国内の研究グループが先導するGLP関連研究としては、アムール・オホーツク地域における自然・生物・人間圏のシステムの把握、インドネシアの火災と炭素管理、里山里海の生態系アセスメントなどの課題が挙げられる。

次に、大気-陸域の要素間の研究をカバーする iLEAPS は、GLP と同様、IGBP 第2期に活動を開始したコアプロジェクトである。第1期のコアプロジェクトである水循環の生物学的側面研究計画 (BAHC: Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle)、GCTE、地球大気化学国際協同研究計画 (IGAC: International Global Atmospheric Chemistry) の一部を再編して2004年に組織された。iLEAPS の焦点は、陸面-大気間の多岐にわたる相互作用の理解と、陸域によるフィードバックメカニズムの解明である。特に、陸域生態系を介したエネルギーと水循環過程 (旧 BAHC) に加え、火災や人為による土地被覆の変化が物質循環に与える影響 (旧 GCTE)、生態系を介した各種温室効果ガス (CO_2 ・ CH_4 ・ NO_x 等) の交換や生物起源揮発性有機化合物 (BVOC: Biogenic Volatile Organic Compound)、の交換過程 (IGAC の一分野) を、気象学・水文学・大気化学・生物学などの分野間連携に基づき総合的に理解することを目標としている。

代表的な研究プログラムとして、ESA との連携で進める大気-陸面統合研究 (ALANIS: Atmosphere-Land Integrated Study)、アマゾン熱帯林地域での生物圏-大気圏大規模相互作用実験 (LBA: Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia)、世界の各種陸域生態系における熱・水・ CO_2 収支の全球観測ネットワーク (FLUXNET) などが挙げられる。iLEAPS は、生物起源の各種微量物質がオゾンやエアロゾルの生成過程に及ぼす影響、加えて大気境界層での物質輸送を通して降水過程に及ぼす影響を解明することも目指しており、ヨーロッパでの野外実験プログラムやLBAではこの困難な課題に果敢に挑戦している。国内では、陸域生態系プロセスを組み込んだ全球モデルによる植生フィードバックの研究、火災を含む生物起源のエアロゾルのもつ気候への直接・間接効果の研究、地上観測点での分野横断的な取組みに基づく各種物質 (BVOC を含む) の交換過程の研究などが進行中である。

(3) 海洋生態系における国際観測計画

海洋における国際的な観測計画およびデータベース構築・運営には、前述の IGBP、国連教育科学文化機関 (UNESCO) の政府間海洋学委員会 (IOC)、国際海洋探査委員会 (ICES) など複数の国際機関が関与している。このうち生態系分野と関連の深い観測計画としては、前述の GOOS がある。

このほか地域レベルの国際海洋生態系観測計画では、北太平洋海洋科学機関 (PICES) が、北太平洋における気象変動と海洋環境の関係、海洋と陸地と大気との相互作用、海洋利用、海洋資源等についての調査、研究を行っている。

一方、生物多様性を含む海洋生態系の構造およびその変化の観測については、複数の国際的なプロジェクトが進行している。これらは、国際的な科学者組織が運営しているものが多い。なかでも、「海洋生命のセンサス (CoML: Census of Marine Life)」は、海洋における生物多様性モニタリングプロジェクトとして最大のものである。沿岸・外洋・深海などの異なる生態系ごとに、海洋生物の多様性や分布などに関する地球規模のモニタリングを行うとともに、過去の生物多様性の変動パターンの解明や今後の予測を行うことも目的としている。得られたデータは、CoML の統合的データベースである OBIS (Ocean Biogeographic Information System) に収納され、公開されている。OBIS に収納された生物多様性のデータは同時に地球生物多様性に関する情報推進 (GBIF) にも登録されている。現在、OBIS は GBIF の最大のデータ供給源となっている。

CoML が世界中の海洋における生物多様性を網羅的に把握しようとしているのに対し、沿岸域の特定の生態系を対象を絞ってより詳細な野外観測を実施しているプログラムもある。例えば、アマモ場を対象としたものでは、シーグラスネット (SeagrassNet) とシーグラスウォッチ (Seagrass Watch) が国際的なモニタリングを行っている。前者は研究者主体のプログラムであり、統一された方法で各地のアマモ場の分布・種構成・現存量・繁殖状況などの調査を行っている。現在では、20ヶ国以上が参加している。一方、シーグラスウォッチは市民参加型のモ

ニタリングプログラムであり、太平洋西部の熱帯～亜熱帯海域を中心に 15 ヶ国以上にまたがる 250 以上のサイトで行われている。同様の市民参加型モニタリングはサンゴ礁でも国際的に実施されている。リーフチェック (Reef Check) は、日本を含む 80 ヶ国以上で、サンゴ礁の被度、魚類・無脊椎動物の種多様性と生物量の変化をモニタリングしている。また、コラルウォッチ (Coral Watch) は、一般のスキューバダイバーでも簡単にサンゴの白化の進行状況を識別できる方法を開発することにより、サンゴ礁の健康状態を世界中の 500 以上の場所でモニタリングしている。

(三枝・仲岡)

5.4.2 日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER)

生態学や水文学・陸水学などは生態現象の変動スケールが時空間的に非常に大きいものを対象とする。それは単独の研究者や小規模のチームでは対応が難しい。また、個々のグループが仮に数十年単位のデータを得たとしても、調査手法がほかのサイトと異なっていれば互いの比較は難しい。これら大規模野外研究の持つ問題点に組織的に対処し、研究の効率を最大限に高めるのが LTER である。LTER はアメリカで 1980 年に設立された組織 (U.S.-LTER) であり、2009 年 9 月現在で、陸域から海域に至る 26 サイトから構成されている。NSF からの資金 (年間 US \$ 30 million) により運営されている。なお、LTER は 1993 年に U.S.-LTER (United States Long Term Ecological Research Network) から独立する形で設立され、現在 40 ヶ国が加盟している。

日本では研究者からのボトムアップで 2006 年 11 月に JaLTER が正式発足した。JaLTER の目的は、人間社会的側面を含む生態学的研究に関する学際的な長期、大規模な調査・観測を推進することにより、社会に対して自然環境・生物多様性・生物生産・生態系サービスの保全や向上・持続可能性に寄与する適切な科学的知見を提供することである。JaLTER は 2007 年に ILTER に加盟し、国際的な連携研究活動も開始している。JaLTER は省庁の枠を超えた学際的なネットワークで、森林・草地・湖沼・沿岸といった様々な生態系を含む。2009 年 4 月時点で 18 のコアサイトと 28 の準サイトが登録されている。また、次節のモニタリングサイト 1000 や JapanFlux のサイトとも数多く重複しており、生物多様性と生態系機能を同じ場所で観測できるという大きな利点を持つ。

JaLTER では「気候変動下における生物多様性・生態系機能の応答とフィードバック」といった温暖化の影響評価をはじめ、「陸域から海洋生態系にまたがる水文・生物地球化学過程と生態系相互作用」、「多次元スケールでの生態系観測網構築と観測技術開発」等の研究テーマを掲げ積極的な研究活動を展開しつつある。生態学に関するデータは数値データ以外に種名・群集タイプなど実に様々な属性データが含まれるため、データベース構築やデータ標準化も単純ではない。JaLTER によって ILTER 標準となりつつある Ecological Meta Language を用いたデータベースが構築され、現在データを集積しつつある。また、GBIF データベースとの連携を強め、両者が相互に利用することを可能にするインターフェースの整備も進行しつつある。また、現在設立準備中の GEO-BON・J-BON のデータベースの主要な部分を構成することが求められている。

しかし、JaLTER の運営には、U.S.-LTER のような政府科学機関等による長期的な資金面でのサポートがなく、観測体制やデータベース管理も含めすべて参加研究者の自助努力 (短期的な競争的資金への応募等) に負っているのが現状であり、早急な改善が求められる。

(日浦・仲岡)

5.4.3 モニタリングサイト 1000

モニタリングサイト 1000 は環境省生物多様性センターが中心となって開始された、生物多様性に関するモニタリングプログラムである。わが国の代表的な生態系の状態を定量的かつ長期的にモニタリングすることにより、生態系の異変をいち早く捉え、生態系および生物多様性の保全施策につなげるため、約 1,000 か所で 100 年以上継続して実施することを標榜している。対象生態系タイプは、陸域 (森林・草原・里地)、陸水域 (湖沼・湿原)、海域 (サンゴ礁・砂浜・磯・アマモ場・海藻藻場・干潟・小島嶼) など。特定の指標種 (鳥類・ウミガメなど) のみを対象とする場合と、それぞれの生態系の優占種、キーストン種を含めた生物群集全体および部分群集を対照とする場合がある。調査主体は研究者・研究機関・NPO・市民ボランティア等である。モニタリングサイト 1000 のうち特に生態系観測と密接に関連するのは森林域・沿岸域・陸水域の取組みである。

森林域では 2008 年度までに 19 のコアサイトと 24 の準コアサイト (5 年ごとの毎木調査)、約 300 の一般サイト (鳥類センサス) が設定されている。統一されたプロトコルにより、コアサイトでは毎年 1 ヘクタールの毎木調査や毎月のリター・種子トラップ調査、年 4 回のピットホールトラップ調査が行われており、NPP の算出や

種子生産量、腐食連鎖に関わる多様性の変化なども捉えられるデザインとなっている。

海域のうち沿岸域については、主要生態系（磯・干潟・アマモ場・海藻藻場）を対象に、2008 年より開始された。調査サイトは合計 26 サイト設定されており、生態系タイプごとに統一されたプロトコルにより、優占種やキーストン種の分布、生物量、種構成などを毎年調査するとともに、生物多様性のより詳細な定量的調査を 5 年に 1 度行う。これにより、環境の長期変化に伴う生態系変動の速やかな察知するとともに、地域や環境による変動様式の変異について解明することを目指している。

陸水域については、日本全国の 20 の湖沼（汽水湖沼を含む）と 10 の湿原を対象とした調査が 2009 年度から開始された。透明度・水温・クロロフィル量・沿岸帯の植生や動植物プランクトンの組成変化などを標準化された方法でモニタリングする予定である。

モニタリングサイト 1000 で得られた標本およびデータについては、前者が GBIF、後者が JALTEr のデータベースを利用して情報管理を行うことになっている。これを効果的・効率的に行うためには、管理主体となるデータセンターを設置して運営するための、人材および資金のサポートが必要である。

モニタリングサイト 1000 の実施は国際的にも高く評価されているが、調査箇所・調査項目・データ管理に対して、予算が圧倒的に不足している。調査担当者のボランティア（資金と労力の持ち出し）に依存して進められているのが現状であり、持続的な長期観測体制の構築は不十分である。資金面を含めた長期的かつ安定な観測計画の立案と実施が急務である。

（仲岡・日浦）

5.4.4 生物季節観測(植物フェノロジー観測)

(1) 直接観測

気象庁では、生物に及ぼす気象の影響を知るとともに、その観測結果から季節の遅れ進みや気候の違いなど総合的な気象状況の推移を知ることが目的として、生物季節観測を実施している。全国の気象台等で統一した基準により観測を実施しているため過去の観測値との比較が可能であり、近年、地球温暖化分野に利用できる観測値の重要性や必要性に対する認識が高まってきている。

生物季節観測は 1953 年に開始し、現在では植物 12 種目と動物 11 種目を対象に全国 61 の気象台等で観測を実施している（図 5-8、表 5-2）。植物では開花日・黄葉日・紅葉日等を、動物では初見日・初鳴日を観測している。観測は気象台等の敷地内またはその周辺で行い、植物に関しては観測対象の木を定めて実施している。このようにして得られた観測データは、環境省等関係機関にも提供するとともに、解析結果を「異常気象レポート 2005（気象庁、2005）」等において公表している。

これらの観測データを見ると、地球温暖化による長期的な気温の上昇に加え、特に大都市に所在している気象台では、近年、都市化現象のため気温の上昇が顕著になっており、この影響が現れている種目もみられる。例えば、さくらの開花は春先の気温の変化に伴って早まってきており、大都市は中小規模の都市に比べ開花がより早くなっている（気象庁、2005）。また、動物の観測においては、観測場所によっては環境の変化により個体数が減少し、ホタルやトノサマガエルは特に観測の報告が少なくなっている。

（横井）

(2) 近接センシング観測

現在、日本のみならず世界各国において、植物を対象としたフェノロジー観測が多地点で実施されており、その方法としては、直接目視観測で観察する手法から、定点カメラで撮影した画像、人工衛星による分光画像や熱画像を使った解析まで様々な手法が存在する。その中でも定点カメラを用いたフェノロジー観察研究は近年広まる傾向にあり、地表面付近において対象を撮影することから、人工衛星による『リモートセンシング』と区別して『近接センシング』と呼ばれることが多い。

目視による手法は観測の記録も古く情報量の蓄積はほかの手法より多い利点があるものの、限られた植物種・地域での観察であることが多い。我が国では、桜の開花に関する記録が 1300 年以上前から継続されており世界最古であるが、その観測地点や個体数は限られている。ドイツなどでは、半世紀以上前から 2,000 か所を超える調査地点を策定し野生種から農作物に至る多くの植物種のフェノロジー観察が継続されているが（Menzel *et al.*, 2001）、このような大規模な観測網は世界的にもまだ多くはない。

一方、広範囲における観測が可能な人工衛星画像を利用した手法では、植生からの分光反射率から得られる NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) や NDWI (Normalized Difference Water Index) などの植生指

表 5-2 生物季節観測種目（気象庁資料より作成）。

種 類	現 象 種 目	発 芽 日	開 花 日	満 開 日	紅 (黄) 葉 日	落 葉 日	種 類	現 象 種 目	初 鳴 日	初 見 日
植 物 季 節 観 測	ウ メ		○				動 物 季 節 観 測	ヒ バ リ	○	
	ツバキ		○					ウ グ イ ス	○	
	タンポポ		○					ツ バ メ		○
	サ ク ラ		○	○				モンシロチョウ		○
	ヤマツツジ		○					キ ア ゲ ハ		○
	ノダフジ		○					トノサマガエル		○
	ヤマハギ		○					シオカラトンボ		○
	アジサイ		○					ホ タ ル		○
	サルスベリ		○					アブラゼミ	○	
	ス ス キ		○					ヒ グ ラ シ	○	
	イチヨウ	○			○	○		モ ズ	○	
	カ エ デ				○	○				

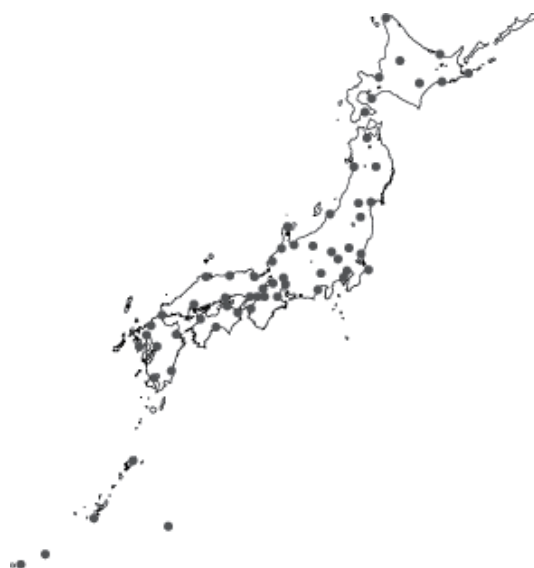


図 5-8 生物季節観測点（2009 年 10 月現在）（気象庁資料より作成）。

標の季節変動を用いてフェノロジーの推定が行われる (Delbart *et al.*, 2005)。植生指標は植物葉の生理生態的な変化を可視～短波長赤外における反射率から算出したものであるが、その広域利用のためにはあらかじめ地上で実測したフェノロジーとの検証が必要になる。また、人工衛星画像では、その空間解像度にも限界があるため、特定種のフェノロジー評価や、温暖化などの環境変動に対する植物応答の種間差異などを議論するには課題も残る。

近接センシングによる地上観測網の整備と長期観測の実施は、上述のような従来の目視観察と衛星による広域観測の間をつなぐ有効な温暖化影響調査方法である。近年の小型デジタルカメラの解像度は非常に高く、数10mの距離から撮影した画像であっても、目視と同様に植物の芽や葉を観察することができ、開芽や展葉、落葉時期などの算出も可能である。また、撮影画像の多くはデジタル情報であるため、判定基準や数値解析手法の開発にあわせた過去データの再解析なども容易である。デジタル画像の色調情報を基にした解析手法としては、可視域のRGB情報を基にした2G_RBi (Richardson *et al.*, 2007) やGRVI (Motooka *et al.*, 2008) などの指数が提案されている。また、可視域だけでなく、近赤外領域にも感度を持つ小型カメラも市販されており、NDVIなどの衛星観測で用いられる植生指標の算出も可能になっている。さらに、近年では、太陽光発電パネルによる電力供給やインターネットを経由した自動データ転送なども行える全天候型デジタルカメラも市販されており、高山などの観測困難な遠隔地での無人観測への応用も期待される。

このように、近接センシングでは、客観的な数値情報と高解像度をあわせもつ観測が可能であり、長期観測を多地点で展開することで、群落から個々の植物種までの温暖化応答を評価することも可能である。

日本の研究者を中心にした植物フェノロジーの近接センシングは、PENを中心に2002年から展開しており、現在までの主な観測地点は、国内では北海道と本州の森林・草地・水田を含む10地点、海外ではイギリス・韓国などで3地点存在する (Nishida, 2007)。これらの地点では、定点カメラによる近接画像撮影だけでなく、植生表面の連続分光反射率と大気エアロゾルも同時に計測しており、人工衛星データの地上検証や、植物の生理生態情報を光学的に評価するための手法研究も行われている。

海外では、FLUXNETの中でWebcam Networkが立ち上がっており、北アメリカ、中央ヨーロッパを中心に多数のフラックス観測サイトで画像解析が進められている (Wingate *et al.*, 2008、図5-9)。特にアメリカではUSGSやニューハンプシャー大学の研究者を中心に、PhenoCam Network⁵⁴として緯度8度・平均気温10℃ごとに約12地点でのカメラ観測網を整備しており、FLUXNETやLTER・アメリカ海洋大気庁 (NOAA) などとの連携を通して、近接センシングー衛星観測ー生態系情報の相互関係を網羅したフェノロジー観測研究を開始している。

観測全体の課題としては、まず、生理生態学研究と近接センシングの連携を基盤にした観測ネットワークの維持が挙げられる。JaLTERやフラックスネットワーク (JapanFlux) などの既存研究ネットワークでは、フェノロジーと関連した植物の生長量や物質循環が計測されている。従って、これらのネットワークの中に近接センシングを戦略的に展開し、相互協力の下に長期運営することが、研究の連携のみならず運営面での効率化も含めて有用な方法であろうと思われる。実際に、一部の観測サイトでは、JaLTER・JapanFlux・PENの実施が重複し、基盤研究としての成果も挙げていることから、その観測技術をそれぞれのネットワークに所属する多様な野外サイトに適用させて広域観測に展開することが期待される。なお、近接センシングの多地点・長期観測データは人工衛星による広域評価における地上検証としても不可欠であるため、人工衛星観測において重要視される検証サイトに重点的・戦略的に展開することも重要であろう。

次に、基本的な点ではあるが、FLUXNETのPhenological phase definitionsなど海外ネットワークのプロトコルや気象庁の観測基準を参考に、世界的な議論も可能、かつ我が国の生態系にも合致したフェノロジー評価手法の検討が必要と思われる。植物観測の面から見た定義はもちろん、近接センシングの画像解析においても、各種分光植生指標の有効性や、フェノロジーステージとの合致などに検討課題が残る。また、落葉性植物の展開時期に関する報告は多いが、常緑性の植生や落葉期におけるフェノロジーの画像観測手法はまだ不確実であり、今後はこれらの対象も積極的に取り組むことが重要である。例えば、常緑針葉樹林での研究例では、NDVIのような緑葉量に関する分光指標だけでは光合成機能を十分に反映せず、ほかの波長を利用したPRI (Photochemical Reflectance Index) が有効であることも示唆されており (Nakaji *et al.*, 2008)、植生タイプごとの分光観測手法の有効性確認やそれを加味した近接センシング技術の発展が望まれる。

(中路)

⁵⁴ <http://phenocam.unh.edu/info.html> (参照日：2010/02/16)



図5-9 フラックスネットにおけるWebCamの展開地点 (Wingate *et al.*, 2008)。

5.5 衛星による生態系観測

5.5.1 衛星観測システムの必要性・現状と課題

生態系に対する温暖化・気候変動の影響はすでに顕在化しており、また今後はその影響が加速することが懸念されていることから、その影響変化をできるだけ時系列的に把握し対策をとるとともに、その対策の有効性を監視することが求められている。また、地球温暖化とそれによる気候変動を予測し、適応策を立案するためには、地球表層での水・熱エネルギー循環に加え、陸域植生や海洋の光合成などの炭素循環のメカニズムを理解し、気候変動予測モデルを精緻化する必要がある。このように、生態系の観測は地球温暖化の予測・影響評価・適応のすべての面で重要な課題であることから、対象とする現象や領域に応じて様々な観測の取組みが進められているが、特に広域の生態系監視においては、広い範囲を均質に観測可能な衛星観測は非常に有効な手段であり、現在までに様々な衛星による観測が行われてきている。

地球規模の海洋生態系観測においては可視～赤外放射計を搭載した海色観測衛星が広く用いられており、海外の衛星では、海洋広域観測センサー (SeaWiFS: Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, 1997年9月から全球観測を実施。) や中分解能分光放射計 (MODIS) (1999年と2002年から運用中のアメリカ Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載) などがある。我が国においても、地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) 搭載の海色海温走査放射計 (OCTS)、および ADEOS-II 搭載のグローバル・イメジャ (GLI) による観測を行ったが、残念ながら衛星本体の運用異常でいずれも1年足らずで観測を終えている。なお、これらの衛星の運用終了後も衛星海色観測の利用を推進するため、JAXA では MODIS データによる海色推定処理を行い、海洋研究者や水産ユーザー等への配布を継続して実施している。

地表面の植生活動などの陸域生態系観測においては、NOAA 衛星搭載の改良型高分解能可視赤外放射計 (AVHRR) や LANDSAT 衛星搭載のセマティックマッパー (TM: Thematic Mapper) などが利用されており、現在ではより高分解能のセンサーである Terra MODIS や Aqua MODIS の 250m～1km 分解能データが広く用いられている。我が国においても前述の通り約1年間で観測を終えたものの、ADEOS-II GLI により、MODIS とほぼ同じ分解能で可視近赤外の波長域を増強するなど、多種多様なデータを観測する取組みが行われている。また、より高分解能 (10m 級) の観測データを提供する ALOS 搭載の AVNIR2 は、環境省生物多様性センターが進める2万5千分の1の植生図作成やサンゴ礁マッピングにおける利用が始まっており、同衛星搭載のフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダー (PALSAR: Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) は二酸化炭素吸収源となる森林観測における利用が進められている。

以上で述べたように、現在まで様々な衛星による観測データが蓄積され、生態系に対する温暖化の影響評価な

どの分野で利用が進んでいるが、今後もその影響変化をできるだけ長期間時系列的に把握するためには、今後もこれらの衛星観測を長期に渡って継続する必要がある。特に、我が国の衛星による観測が中断している 250m 程度の空間分解能を持つ可視赤外放射計については、早急に後継の衛星により観測を再開する必要がある。

5.5.2 今後の展望

現在、我が国で進められている生態系に関する観測を長期的かつ継続的に遂行していくための衛星計画の中心となるのが JAXA の地球環境変動観測ミッション (GCOM) 計画である。

GCOM は、地球規模での気候変動・水循環メカニズムを解明するため、気候変動観測衛星 (GCOM-C) および水循環変動観測衛星 (GCOM-W) という 2 機の衛星を複数世代打上げ、運用することで、全球規模で長期間 (10~15 年程度) の継続観測を目指すミッションである。GCOM-C は、GCOM の目的である気候変動の監視・理解の中で、全球規模での放射収支と炭素循環に関わる地表・大気・沿岸・雪氷の広い範囲での長期継続変動観測、人間活動の気候変動への影響の観測に重点を置く。具体的には、近紫外～熱赤外までの広波長帯を使って人間活動と広域環境の結び付きを一貫して把握できる 250m の空間分解能を持つ放射計を用い、陸圏では多方向観測を利用した高精度な植生物理量の把握、海洋圏では変化の激しい沿岸域の詳細観測、雪氷圏では気候変動による影響が著しい雪氷域の観測などを行い、全球気候変動の監視等に貢献する。GCOM-C1 搭載センサーの多波長光学放射計

(SGLI) は、可視・近赤外放射計部 (VNR: Visible and Near-infrared Radiometer) および赤外走査放射計部 (IRS: Infrared Spectrograph) から構成されるシステムであり、全 19 チャンネル、走査幅 1,150km (可視近赤外) および 1,400km (短波長赤外～熱赤外) で観測を行う。GLI の主要空間分解能 1km に対し、SGLI では 250m に高分解能化を図ったこと、および偏光・多方向観測機能を新規装備した点が特徴である。GCOM-C1/SGLI では、250m の空間分解能を活かした陸域や沿岸海洋の詳細観測が可能となり、海洋域炭素固定量 (基礎生産量) 推定や水産資源管理 (生産力の推定・生育予測)、温暖化による海洋生態系の応答評価や、植生季節変動、陸域炭素循環等、様々な生態系観測において活用することが期待されている。また、同時期に観測を行うアメリカ NPOESS 計画、ヨーロッパ METOP 計画と適切な補完関係となるよう観測軌道 (降交点通過地方太陽時) を選択することにより、国際的な観測協調体制を構築している。

ALOS による高分解能の陸域観測については、Lバンド合成開口レーダーによる観測を継続する ALOS-2 の開発、および光学センサーによる観測を継続する ALOS-3 の検討が進められている。いずれの衛星も ALOS から性能を高めることを目指しており、様々な生態系観測において活用されることが期待されている。例えば、ALOS-3 搭載光学センサーにおいては ALOS 搭載光学センサーから空間分解能や量子化ビット数を向上することを目指しており、藻場等の沿岸域生態系の観測において有用なデータを提供することが可能になる。これらの衛星を可能な限り早期に打上げ、ALOS による観測を途切れなく継続することが期待される。

なお、衛星による生態系観測においては、衛星推定値の検証に現場観測データを活用することが必須である。また、逆に衛星データを用いて現場観測を補完することにより広域の生態系監視が可能になる。しかし地上観測の規模は数ヘクタール以下と衛星と比べて極めて小さなスケールで行われることがほとんどであり、このような地上観測と衛星観測の連携のためには、アルゴリズムの開発とともに、将来的には超高分解能 (時空間・波長) をもつ衛星センサーの開発を推進する必要もある。

(戸田)

5.6 モデル開発の視点から見た観測ニーズ

5.6.1 観測データ利用の概要

生態系モデルは、生物-環境相互作用および生物間相互作用に基づいて、生態系の空間構造や時間変化を解析し予測することを目的としている。生態系は複雑多様であり、主とする視点 (例: 個体群動態・進化生態・物質循環) によっても、構築されるモデルは大きく異なる。そのため「生態モデリング」は生態学の一分野を成しており、様々な数理的あるいは数値的手法を用いたモデルが開発されている。地球変動研究において、生態系モデルによるシミュレーションは、観測データの統合と整合性の検証、感度分析による重点要素の明確化、広域スケールリング、そして影響の検出・評価および将来予測に不可欠なツールとなっている。広域を対象とした生態系モデルの多くは、空間分解能が数 km から数 10km と粗く、観測が行われる空間スケールとのギャップが問題とされていた。最近では、空間分解能 1km といった詳細なモデル (例えば Ito, 2008) も開発されているが、個葉特性や土壌呼吸のチャンバー観測といった局所的な観測とのスケールギャップはなおも大きい点には注意が必要で

ある。

どのような観測データを使用するかは、モデルの種類やモデル研究者の間で共通の見解があるわけではない。一般的には、①モデルを開発する段階での基礎情報、②シミュレーションを実行するための初期条件や駆動データ、③計算出力の妥当性を調べるための検証データ、が必要とされる。実際には、それらが順番に実行される訳ではなく、検証を行いつつさらにモデルを改良する、といったふうに同時並行的に行われる場合も多い。また当然ながら、ほかで開発されたモデルをユーザーとして利用する限りにおいては、入力データと検証データさえあればよいことになる。それでも、サイトの位置や生態系タイプ・土壌タイプ・温度や降水などの気象要素は、大多数のモデルに必要な基礎情報と言える。地球温暖化に関係して重要性が高まっている陸域生態系の炭素循環モデルの場合は、人間による利用を含めた土地被覆・土地利用のデータも必要である。

5.6.2 データ利用の実際

個別のサイトにおいて、実験調査を行うとともに数理解析を実施する生態学的なモデル研究は1930年代（以前）から行われてきたが、より広域を対象としてデータを収集し大規模なシミュレーションを行う研究が始まったのは1970年代の国際生物学事業計画（IBP）からである。さらに、地球環境問題に対応した過去の再構築や将来予測が始まったのは1980年代からである。このような研究の歴史の浅さや地域的な偏りにより、生態モデルに利用可能なデータは十分に蓄積され、またそれが公開されて利用可能な状況になっているとは言い難い。特に地域からグローバルなモデル研究を行う場合、研究者自身で必要なデータをゼロから網羅的に収集するのは不可能に近く、何らかのデータベースを利用するのが現実的である。その初期のものとして国連環境計画（UNEP）が運営していたGRID データセンター（Global and Regional Integrated Data Centres）が挙げられ、気候・植生・土壌・人間活動に関する広域データセットを収集し提供していた。しかし、磁気メディアでのデータ提供、各データの解像度やフォーマットの不統一、更新頻度の低さなど、利便性にやや問題があったのも事実である。

さらに重要なのは、近年のインターネット技術の飛躍的な進歩により、世界中にデータを配布するサイトを容易に構築できるようになった点である。これは、オンラインでデータを取得できるためモデル研究者には利便性が高まった反面、データが多数のサイトに分散して集約されにくくなる点や、信頼性が不確実なデータが広まる危険性、といった問題があると考えられる。それでも、多数のデータを収集し配布するデータベースが構築されており、モデル研究者の利便に供している。その代表的なものにアメリカオークリッジ国立研究所などが提供するDAAC⁵⁵がある。ここではプロジェクト単位（例：BOREASやLBA）で取得されたデータを提供するほか、NPPなどのテーマに沿った情報を各種ソースより収集し、登録ユーザーに無料で提供している。また、研究者がデータを登録して配布することも可能である。多種のデータから変数やキーワードで横断的に検索することもでき、モデル研究者は必要なデータを探して利用するうえで利便性が非常に高い。

すべてのデータを網羅したデータベースが構築されるのが理想的だが、当面はインターネットでリンクされた個別の提供サイトからデータを収集するのが現実的と考えられる。特に、衛星観測データのように容量が膨大なものや、フラックス観測データ（FLUXNET/AsiaFluxやLTER）のようにコミュニティ性が強いデータは、多くの場合で個別のデータソースを照会することになる。モデル研究者への利便という点では、データができるだけ部外者にもオープンであり、オンラインで取得可能なことが望ましい。上記のDAACのように、データのフォーマットや説明ドキュメントを整備する体制をもった、データベース組織の確立が強く望まれる。モデル研究の場合、どのようなデータが利用可能かが研究の方向性を左右する場合があるため、利用可能なデータのカタログやリンク集を提供することが有効と考えられる。特に、データの所在が整理されていることは、生態系の広域モデル研究を新しく始める研究者への便宜になるはずである。

5.6.3 最近の動向（データの統合化・同化）

生態系モデルは構造が複雑化するにつれ、より多くのデータを必要とするようになってきている。特に、生態系の構造やプロセスを特徴づけるパラメーターは、ほとんどが大スケールでの直接測定から決定することは困難であり、何らかの観測データに基づいて制約条件を付けることになる。その範囲内で、モデル研究者はパラメーター値の調節（チューニング）を行い、検証を通じてより妥当に観測事実を再現し説明することを目指す。パラメーター値の調節だけではどうしても齟齬が残る場合は、モデル構造の改変も含めた修正が必要となる。これまでの

⁵⁵ <http://daac.ornl.gov/>（参照日：2010/02/16）

モデル研究では、このような一連の流れを通じて観測データを利用してきたが、より最近の動向としてデータ同化手法によるモデルの最適化が試みられている。

データ同化は、天気予報を行う大気・海洋モデルなどで発展してきた、観測データを随時モデルに取り込んで一貫性のある連続したデータセットを作成する手法である。点在する観測サイトの情報から、物理的に整合性のあるデータを客観的に作成できるため、気象モデルの初期値作成などに利用されている。そして、より高精度なデータ同化法の開発が進められており、大気・海洋モデルではナッジング、最適内挿法や変分法といった手法が用いられてきた。生態系モデルは、物理法則に支配される大気・海洋モデルと異なり、構造が変則的で非線形性が顕著なため、同様なデータ同化手法を適用できるか不明であった。しかし、最近ではより数値的な手法であるアンサンブルカルマンフィルター（EnKF: Ensemble Kalman Filter）を生態系モデルに適用し、例えば、観測サイトで得られた正味CO₂フラックスデータを用いて、モデルをEnKFによって最適化する試みが行われている。データ同化はモデルパラメーターの最適化だけでなく、観測データを連続かつ平滑化することで、観測研究者にも扱いやすいデータセットを提供できる可能性がある。その意味で、単なるモデル研究者による一方向のデータ利用を超えた、双方向のデータ-モデル統合化につながると期待される。さらに、このようなデータ-モデル統合化からより有用な知見を引き出せることを示すことで、観測網の充実や長期モニタリングによるデータ取得の必要性を明確にすることもできるだろう。

このようなデータ同化は、観測サイトのCO₂フラックスデータだけでなく、衛星観測データや大気CO₂観測データにも適用可能であり、これまで困難であった広域モデルの最適化を大幅に進展させると期待される。実際に、ヨーロッパの炭素循環モデル研究者を中心として、炭素循環に関するデータ同化（CCDAS: Carbon Cycle Data Assimilation System）の開発が試みられている。このような方向性は、生態系モデリングが研究フェーズから応用フェーズに移行しつつあることを示すのかもしれない。データ同化を促進するためには、モデルのパラメーター値を最適化するための、生態系モデルの出力（例：正味CO₂フラックス、バイオマス、LAI、光合成有効放射吸収率など）に対応した観測データをより大量に集積するシステムが必要であろう。データ同化は現状の再構築には極めて有効だが、将来予測を行ううえでは、生態系モデルの基礎的プロセスに関する精緻化を同時に進めることが必要である。

5.6.4 温暖化影響評価と不確実性低減に向けて

同じ対象を異なるモデルでシミュレートし、結果を比較する「モデル相互比較プロジェクト（MIP: Model Intercomparison Projects）」が試みられている。多くの場合、モデル間で推定結果に大幅な差があること、つまり不確実性の存在が示唆されている。つまり、ある1つのモデルを用いた再現や解析は、そのモデルに固有の結果に過ぎず、一般性に疑問符が付く恐れがある訳である。同様に、温暖化に関する将来予測についても、同じ条件を設定した複数のモデルが大幅に異なる結果を与えるという解析例がある（Friedlingstein *et al.*, 2006）。このような不確実性は、モデルによる解析研究だけでなく、影響評価や生態系管理といった応用において極めて重大な問題となる。そこで、観測データをモデルパラメーターの制約に用いることで、モデル間のバラつき幅を縮小させようという試みも行われている（例えば Ichii *et al.*, submitted）。

GEOSsをはじめとする地球観測網の充実に伴い、より多種かつ大量の観測データが利用可能になることが期待される。温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)やGCOMに代表される新しい衛星観測、FLUXNET/AsiaFluxやLTERなどの地上観測は、ますます長期かつ広域の生態系情報を提供するはずである。それに伴い、大量のデータをいかにして効率的に管理し活用するか、という別な問題が深刻化する可能性は高い。現在においてすら観測されたデータが100%利用されているわけではなく、利用制限や容量などの問題で埋もれたままになっているデータも多いと考えられる。そのため、生態系モデル研究者は観測サイドと密に連携をとり、データ統合・解析システム(DIAS)の利用を含めて、既存データに加えて将来予想される新たなデータの有効利用について議論を重ねる必要がある。

(伊藤)

5.7 まとめ

生態系の地上観測の観測項目のスケールは数cmのチャンバースケールからせいぜい100m程度のプロットスケールであることが多いのに対し、衛星の空間分解能は10m—数100mがほとんどである。また広域を対象とした生態系モデルの多くは、空間分解能が数kmから数10kmと粗い。このように地上観測・衛星観測・広域モデルの

間にはいまだ大きなスケールギャップが存在する。この3者間のスケールギャップをいかに埋めていき整合性を持たせるかが今後の大きな課題である。そのためにも、陸域・沿岸域にかかわらず JaLTER や JapanFlux、モニタリングサイト 1000 などの複数の生態系観測ネットワークが重複するサイトをスーパーサイトと位置づけ、大規模野外実験も積極的に取り入れたより高度な観測体制を確立し、長期的に維持していくことが望ましい。またこれらの観測サイトの情報をスケールアップするためには、東アジア地域をカバーする静止衛星も含めて考慮した超高分解能（時空間、波長）を持つ衛星センサーを開発するとともに、生態系観測との密接な連携を促進していくことが重要である。さらに生態系の地上観測データや衛星観測データを用いたモデリングを推進するために、データを公開し、フォーマットや説明ドキュメントを整備する体制をもった、データベース組織の確立が望まれる。

生態系の観測は生物多様性そのものと直接関わる部分も多く、センサーによる観測が可能な項目はごく限定されている。このような観測は自動化そのものが困難な場合が多く、ほかの分野と比較して自動化やデータ同化が立ち遅れている。このような観測に対する技術開発の促進や、キャパシティビルディングが強く望まれる。一方、ほとんどの生態系観測ネットワークの運営には、U. S. -LTER のような政府科学機関等による長期的な資金面でのサポートがなく、観測体制やデータベース管理も含めすべて参加研究者の自助努力（短期的な競争的資金への応募等）に負っているのが現状であり、早急な改善が求められる。

（日浦）

参考文献 (第5章)

- 新崎盛敏, 新崎輝子, 1978: 海藻のはなし, 東海大学出版会, 228pp.
- 内海区水産研究所資源部, 1967: 瀬戸内海における藻場の現状, 内水研刊行物C輯, **5**, 21-38.
- 大阪湾海岸生物研究会, 2002: 大阪湾南東部の岩礁海岸生物相—1996~2000年の調査結果—自然史研究, **3**(1), 1-14.
- 環境省自然環境局, 2001: 平成12年度サンゴ礁研究・モニタリング活動推進事業業務報告書.
- 環境省自然環境局生物多様性センター (BIODIC): <http://www.biodic.go.jp/> (参考日: 2009/08/17)
- 環境庁, 1981: 第2回自然環境保全基礎調査, 海岸調査, 干潟・藻場・サンゴ礁分布調査, 海域環境調査全国版, 154pp.
- 環境庁, 1994: 第4回自然環境保全基礎調査, 海域生物環境調査報告書全国版, 349.
- 気象庁, 2005: 異常気象レポート 2005, 近年における世界の異常気象と気候変動, 平成17年10月, 383.
- 桐山隆哉, 藤井明彦, 藤田雄二, 2002: 長崎県内で広く認められたヒジキの生長阻害の原因, 水産増殖, **50**, 295-300.
- 桐山隆哉他, 2006: 長崎県沿岸に出現するホンダワラ類と2005年に西彼杵半島沿岸でみられた大量の流れ藻, 月刊海洋, **38**, 583-589.
- 國井秀伸, 2008: 汽水域の自然・環境再生の研究拠点形成に向けた取組みについて, 環境技術, **37**, 762-765.
- 古賀備憲, 佐竹潔, 矢部徹, 2005: マクロベントス相における種の豊富さ, 現存量, 多様度指数, 絶滅危惧種を用いた干潟の評価, 保全生態学研究, **10**, 35-45.
- 小松輝久, 川合英夫, 坂本亘, 1990: 海洋環境に及ぼす藻場の影響, 沿岸海洋研究ノート, **27**, 115-126.
- 斉藤雄之助, 1979: 瀬戸内海関係沿岸海域の藻場調査, 沿岸海域藻場調査瀬戸内海関係海域藻場分布調査報告, 南西海区水産研究所, 375-419.
- 佐々木恵彦, 2008: いつまでも続く森林減少問題: 森林の保護と荒廃地の修復, 海外の森林と林業, **72**, 2-8.
- 高橋英紀, 2008: 熱帯泥炭湿地における泥炭火災とそれに伴う地球環境問題, 海外の森林と林業, **72**, 1520.
- 仲岡雅裕, 2008: 気候変動にともなう沿岸生態系の変化—生物群集から考える. (大串隆之, 近藤倫生, 仲岡雅裕 編) シリーズ群集生態学4 生態系と群集をむすぶ, 京都大学学術出版会, 京都, 179-204.
- 中村誠宏・奥田篤志・日浦勉, 2008: 地球温暖化研究における野外操作実験の現状と課題, 保全生態学研究, **13**, 111-120.
- 南西海区水産研究所内海資源部, 1974: 瀬戸内海の藻場: 昭和46年の現状, 南西海区水産研究所, 39.
- 平野高司, 2008: 熱帯泥炭湿地の炭素収支に関する研究の紹介, 海外の森林と林業, **73**, 2-7.
- 福山研二他, 2008: CDM植林が生物多様性に与える影響評価と予測技術の開発, 地球環境保全試験研究費平成19年度研究成果報告集, 52-81.
- 藤本 征司, 2008: 気候変動が暖温帯域の樹木の葉フェノロジーに与える影響の予測, 保全生態学研究, **13**, 75-87.
- 星野芳郎, 1972: 瀬戸内海汚染, 岩波書店, 202.
- モニタリング 1000: <http://www.biodic.go.jp/moni1000/index.html> (参考日: 2009/08/30)
- 吉村拓, 清本節夫, 八谷光介, 中島泰, 2009: 長崎市沿岸に広がる“春藻場”の現状と課題について, 藻場研究の今—分布・生態から磯焼け対策・利用まで, 東京大学海洋研究所共同利用シンポジウム講演要旨集, 2009年3月24日, 10-11.
- Aber, J. D. and J. M. Melillo, 2001: Terrestrial ecosystems, Harcourt Academic Press, San Diego, 556pp.
- Alongi, D. M., 2002: Present state and future of the world's mangrove forests, Environmental Conservation, **29**, 331-349.
- Bellwood, D. R., T. P. Hughes, C. Folke and M. Nyström, 2004: Confronting the coral reef crisis, Nature, **429**, 827-833.
- Callaway, R. M. et al., 2002: Positive interactions among alpine plants increase with stress, Nature, **417**, 844-848.
- Chapin, F. S. et al., 2001: Global biodiversity in a changing environment. Springer Verlag, Berlin, 376.
- Chave, J. et al., 2008: Assessing evidence for a pervasive alteration in tropical tree communities, PlosBiology, **6**, 455-462.

- Clark, D. A., 2007 : Detecting tropical forest's responses to global climatic and atmospheric change: current challenges and a way forward, *Biotropica*, **39**, 4–19.
- Costanza, R. et al., 1997 : The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, **397**, 253–280.
- Delbart, N. et al., 2005 : Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index, *Remote Sensing of Environment*, **97**, 26–38.
- FAO, 2000 : Global forest resources assessment 2000, FAO Forestry Paper, 147.
- Friedlingstein, P. et al., 2006 : Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP Model Intercomparison, *J. Clim.*, **19**, 3337–3353.
- Fujimoto, K., 2004 : Below-ground carbon sequestration of mangrove forests in the Asia-Pacific region. Vannucci, M. ed. : *Mangrove management & conservation—present & future—*, United Nations University Press, 138–146.
- Galbraith, H. et al., 2002 : Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitat for shorebirds, *Waterbirds*, **25**, 173–183.
- Gardner, T. A. et al., 2003 : Long-term region-wide declines in Caribbean corals, *Science*, **301**, 958–960.
- Grabherr, G., M. Gottfried and H. Pauli, 1994 : Climate effects on mountain plants, *Nature*, **369**, 448.
- Hall-Spencer, J. et al., 2008 : Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification, *Nat. Let.*, **454**, 96–99.
- Hooper, D. U. et al., 2005 : Effects on biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge, *Ecological Monographs*, **75**, 3–35.
- Hughes, A. R. and J. J. Stachowicz, 2004 : Genetic diversity enhances the resistance of a seagrass ecosystem to disturbance, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **101**, 8998–9002.
- Ichii, K. et al., 2000 : Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan: Reducing uncertainties in model outputs among different terrestrial biosphere models using flux observations. (submitted)
- Inouye, D. W., 2000 : The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change, *Ecology Letters*, **3**, 457–463.
- IPCC, 2007 : Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18.
- Ito, A., 2008 : The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data, *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 738–747.
- Jones, D. L. and K. Kielland, 2002 : Soil amino acid turnover dominates the nitrogen flux in permafrost-dominated taiga forest soils, *Soil Biology and Biochemistry*, **34**, 209–219.
- Jordan, C. F., 2005 : *Tropical forest ecology*. Springer Verlag, Berlin, 295.
- Kasischke, E. S. and B. J. Stocks, (eds.) 2000 : *Fire, Climate, and Carbon Cycling in the boreal forest*, *Ecological Studies*, **138**, Springer-Verlag, 461.
- Komatsu, T., 1997 : Long-term changes in the *Zostera* bed area in the Seto Inland Sea (Japan), especially along the coast of the Okayama Prefecture, *Oceanol. Acta*, **20**, 209–216.
- Komatsu, T. et al., 2002 : Mapping of seagrass and seaweed beds using hydro-acoustic methods, *Fish. Sci.*, **68**, sup. I, 580–583.
- Komatsu, T. et al., 2003 : Hydro-acoustic methods as a practical tool for cartography of seagrass beds, *Otsuchi Mar. Sci.*, **28**, 72–79.
- Komatsu, T. et al., 2003 : Use of multi-beam sonar to map seagrass beds in Otsuchi Bay, on the Sanriku Coast of Japan, *Aquat. Living Resour.*, **16**, 223–230.
- Komatsu, T. et al., 2007 : Mapping and quantifying a *Sargassum* forest off Osaka (Toyama Bay, the Sea of Japan) by using narrow multibeam sonar and GIS. In *GIS/spatial analyses in fisheries and aquatic sciences*, Nishida T., P. J. Kaiola, A. E. Caton (eds.), Fishery-Aquatic GIS Research Group, Saitama,

- Komatsu, T. et al., 2009 : Utilization of ALOS AVNIR-2 data for mapping coastal habitats: Examples of seagrass beds from boreal to tropical waters, Proceedings of the ALOS PI 2008 Symposium, 3-7 November 2008, Island of Rhodes, Greece, SP-664, European Space Agency, January 2009.
- Komatsu, T. and T. Tatsukawa, 1998 : Mapping of *Zostera marina* L. beds in Ajino Bay, Seto Inland Sea, Japan, by using echo-sounder and global positioning systems, J. Rech. Oceanogr., **23**, 39-46.
- Lenoir, J. et al., 2008 : A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century, Science, **320**, 1768-1771.
- Mack, M. C. et al., 2004 : Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization, Nature, **431**, 440-443.
- Malhi, Y. and O. Phillips, 2005 : Tropical forests and global atmospheric change, Oxford University Press, 260.
- Matsui, T. et al., 2004 : Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate changes in Japan, Journal of Vegetation Science, **15**, 605-614.
- Menzel, A., N. Estrella and P. Fabian, 2001 : Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996, Global Change Biology, **7**, 657-666.
- Motohka, T., T. Koyanagi and K. N. Nasahara, 2008 : Monitoring vegetation phenology in Japan using satellite remote sensing, 2nd International Symposium of 21st Century COE Program "Satellite Ecology" at Gifu University, 31 July 2008.
- Mumby, P. J. and E. P. Green, 2000 : Field Survey: Building the link between image and reality, A. J. Edwards (eds.), Remote sensing handbook for tropical coastal management, UNESCO, Paris, 57-66.
- NaGISA International Office : <http://www.nagisa.coml.org/> (参考日 : 2009/08/30)
- Nakaji, T. et al., 2008 : Utility of spectral vegetation indices for estimation of light conversion efficiency in managed coniferous forests in Japan, Agricultural and Forest Meteorology, **148**, 776-787.
- Nishida, K., 2007 : Phenological Eyes Network (PEN): A validation network for remote sensing of the terrestrial ecosystems, AsiaFlux Newsletter, **21**, 9-13.
- Ohgaki, S., R. Yamanishi, Y. Nabeshima and K. Wada, 1997 : Distribution of intertidal macrobenthos around Hatakejima Island, central Japan, compared with 1969 and 1983-84, Benthos Research, **52**, 89-102.
- Osawa, A. et al., (eds.) (in press) : Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological Studies, Springer-Verlag, 542.
- Palacios, S. and R. Zimmerman, 2007 : Response of eelgrass *Zostera marina* to CO₂ enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats, Mar. Ecol. Prog. Ser., **344**, 1-13.
- Peterjohn, W. T., J. M. Melillo, F. P. Bowles and P. A. Steudler, 1993 : Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results, Oecologia, **93**, 18-24.
- Reusch, T. B. H., A. Ehlers, A. Hämmerli and B. Worm, 2005 : Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity, Proceedings of the National Academy of Sciences, **102**, 2826-2831.
- Richardson, A. D. et al., 2007 : Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest, Oecologia, **152**, 323-334.
- Sagawa, T. et al., 2010 : Using bottom surface reflectance to map coastal marine areas: a new application method for Lyzenga's model. Int. J. Remote Sens., doi: 10. 1080/01431160903154341.
- Schuur, E. A. G. et al., 2009 : The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra, Nature, **459**, 556-559.
- Seagrass Net : <http://www.seagrassnet.org/> (参考日 : 2009/08/17)
- Seagrass Watch : <http://www.seagrasswatch.org/home.html> (参考日 : 2009/08/17)
- Soares-Fiho, B. S. et al., 2006 : Modelling conservation in the Amazon basin, Nature, 520-523.
- Tabuchi, R. (ed.), 2006 : Evaluation of the carbon fixation and organic matter decomposition functions in natural mangrove forests. Final report of study supported by Grant-in Aid for Scientific Research,

- A(2), Japan Society for the Promotion of Science.
- Tarnocai, C. et al., 2009 : Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region, *Global Biogeochemical Cycles*, **232**, GB2023, doi: 10. 1029/2008GB003327.
- UNEP : <http://www.unep-wcmc.org/marine/seagrassatlas/index.htm> (参考日 : 2009/08/17)
- Walker, M. D. et al., 2006: Plant community responses to experimental warming across the tundra biome, *PNAS*, **103**, 1342–1346.
- Williams, S. L., 2001 : Reduced genetic diversity in eelgrass transplantations affects both population growth and individual fitness, *Ecological Applications*, **11**, 1472–1488.
- Wingate, L. et al., 2008: Keeping an eye on the carbon balance: linking canopy development and net ecosystem exchange using a webcam, *FluxLetter*, **1**(2), 14–17.
- WWF, IUCN, TNC, 2003 :
<http://www.fire.uni-freiburg.de/programmes/ngo/IUCN-TNC-WWF%20firepartnership%2010%20Sep%202003.pdf> (参考日 : 2010/02/16)
- Zimmerman, R., D. Kohrs, D. Steller, and R. Alberte, 1997 : Impacts of CO₂ Enrichment on Productivity and Light Requirements of Eelgrass, *Plant Physi.*, **115**, 599–607.
- Zimov, S. A., E. A. G. Schuur, and F. S. Chapin, 2006 : Permafrost and the global carbon budget, *Science*, **312**, 1612–1613.

第6章 社会経済データに関する取組み

6.1 はじめに

温暖化の影響は自然環境のみに現れるのではなく、人間環境にも現れる。自然環境への影響を検出するために長期・広域にわたる観測が必要なのと同様に、人間環境への影響の検出のためには社会・経済活動に関する「観測」とそのデータの蓄積が必要である。例えば、保険金支払額（自然災害）、作物収量（農業・食料）、救急搬送者数・疾病別死亡数（人間健康）などは、人間環境に対する温暖化影響の現れ方を検出するために必要な社会・経済データと言える。

一方、温暖化の影響は、気候条件のみでは決まらず、影響を受ける人間側の状況（気候変化への脆弱性）も大きく作用する。そのため、影響評価手法の開発・改良の観点から見ても、気候変化への脆弱性に関わる社会・経済データが必要となる。また、現実性を伴った影響予測のためには、現状の社会・経済状況を基礎として、それと整合した将来見通しについても用意する必要がある。例えば、人口・所得・資産分布・土地利用などは温暖化の人間環境への影響との関わりが特に深い基礎的な社会・経済データである。これらは、温暖化に対する脆弱性を特徴づけて影響被害の大小を左右する因子であると同時に、他方では現在から将来にわたり生ずる温暖化影響を直接的・間接的に受けて時間変化し得る要素でもある。特に、温暖化影響を軽減するための適応策の実施状況などは、明らかに影響の大小を左右するとともに、影響の発現（もしくは将来の発現への懸念）に応じてその実施の度合いが調整される側面もある。

一般的には、人間環境への影響は、地域性の高い多様なメカニズム・社会条件を反映して生ずる。その影響を適切に評価して対応策を検討するためには、地域詳細な気候変化観測・予測情報の整備と同時に、各地域の特質を反映した社会・経済データの整備が重要となる。しかし現時点では、まだその取組みは明らかに不足している。

本章では、人間環境への温暖化影響の検出・予測・対策を支援するための社会・経済データの整備について述べる。6.1では、社会・経済データの整備・普及の重要性について述べた。次の6.2では、人間環境への影響検出の前進に向けて今後充実させるべき社会・経済データについて理解を深めるため、分野別に影響検出事例を挙げ、その検出に際して考慮された社会・経済データについて概観する。6.3では、影響予測研究の発展に向けた社会・経済データの整備について理解を深めるため、人間環境への影響の予測研究における社会・経済データの利用事例について分野別に概観する。最後に6.4では、6.2・6.3での整理を踏まえ、影響検出・影響予測に関わる社会・経済データの整備・共有の促進について議論する。

6.2 人間環境への温暖化影響の検出に関わる社会・経済データ

気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書第2作業部会報告書（IPCC-AR4-WG2）が示した主なメッセージの1つは「すべての大陸およびほとんどの海洋での観測によって得られた証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変動、とりわけ気温上昇の影響を受けつつあることを示している」というものである。しかし、人間環境への影響に関しては、「多くは適応や気候によらない要因のために識別することが困難であるものの、地域的な気候変動が自然・人間環境に及ぼすその他の影響が現われていることは、確信度が中程度である」との記述にとどまっている。

社会・経済分野に関しても、例えば作物収量・疾病報告数・災害被害額など、過去長期にわたる統計情報が利用可能な地域・事象が存在しており、時間的な変化を見出すことは可能であるが、自然システムと比較して気候以外の多様な諸因子が複雑に関係するため、各事象の変化に関して地域的な気候変化をその主因であると識別することは一般的に困難である。しかし、そのような一般的制約がありながらも、最近では、北半球高緯度地域における農作物の春の植え付け時期の早期化、ヨーロッパにおける熱ストレスに関連した死亡数増加、北極圏居住者の生活様式の変化、標高の低い山岳地域でのスポーツ産業への影響など、気温上昇の影響が現れているとの知見も次第に示されつつある。

本節では、IPCC-AR4-WG2 第1章（自然および人為システムにおける観測された変化と応答の評価；Rosenzweig *et al.*, 2007）を参照し、これまでに報告された人間環境への影響検出の事例を分野別に挙げ、そこから人間環境への影響検出の前進のために充実が必要な社会・経済データについて理解を深めることを目指す。なお、全分野に共通した問題点として、自然および人間システムの観測された変化に関するデータ・文献の地理的バランスが著しく欠如しており、開発途上国からのデータ・文献が際立って不足しているということについてはここで触れておく。

6.2.1 農業

農業は気候条件に強く依存していることが知られているが、地域的気候変動に関連づけられた観察された変化について、2001 年公表の気候変動に関する政府間パネル第 3 次評価報告書（IPCC-TAR）まではほとんど言及されなかった。このことは、非気候要因、特に管理慣行と技術的变化、そして市場価格と補助金に関する政策が、農業に強い影響を与えるためと考えられる。過去 40 年間にわたる作物の収量向上の世界的傾向の大部分は、主に育種、害虫駆除と病害制御、施肥、機械化における技術進歩に起因しているが、それが作物収量の履歴の中の気候変動シグナルの同定を困難にしている。しかし、IPCC-AR4-WG2 では、農業に関しても気候変動への応答に関する報告がなされている。

作物収量の過去の変化に関しては、上述のように技術進歩に帰する部分が大きく、直接に気候変動が原因と特定できる変化の報告は示されていないが、気候因子と作物収量の年々変動性に関する分析により、気候の年々変動性への作物収量の応答を観測データから見出した研究は存在している（表 6-1）。

作物生物季節の変化に関しては、最近の地域規模の気候変動への応答が見出されている。作物生物季節の変化は果樹などの多年生作物において明白であるが、それらは農業従事者による毎年の管理意思決定に一年生作物ほど依存しておらず、また観察がより容易なことが背景にある。なお、生物季節変化に関しては、農業従事者による管理慣行の変化とつながりをもって観測されることが多い。成長期間の長期化と作物サイクルにおける生育度日の増加など、特に気温に直接的関係がある農業気候指標にも気候変動への応答が見られる。

以上のような検出研究の現状を考慮すると、農業に関しては収量・品質に関する集計的な統計情報の記録・蓄積を着実に継続する一方で、農業従事者の管理慣行の面からも変化・影響を検出できるように、農事暦や施肥記録といった農業管理を把握するためのデータ整備することも重要である。また、収量変化に関する気候変動シグナルの同定のためには、育種・害虫駆除・施肥・機械化といった非気候因子に関する時系列的なデータの整備が望まれる。

6.2.2 人の健康

人間健康に関する観測された気候変動影響の証拠は、(1) 長期間の疫学的データ・健康関連データの不足、(2) 人間の病気の分布と強度を決定する非気候因子の重要性、のためにほとんど存在していない。表 6-2 は IPCC-AR4-WG2 で整理された、気候あるいは気象の健康関連への影響を定量化した研究である。各研究において考慮された非気候の駆動力に関しても併せて記されている。

動物媒介性感染症は気温と降雨に対して感度が高いことで知られている。媒介動物となる昆虫とダニは、ほかの冷血陸生生物種のように気候の変化に応答することが予想される。現在、いくつかの病原媒介動物について北方に生息範囲が変化しているという十分な証拠があり、アレルギーを引き起こす花粉の季節的パターンの変化に関しても同様である。しかし、気候変化が人の動物媒介性疾病の発生率に影響していることを示す明確な証拠はまだない。明確な証拠が得られない背景の 1 つには、これらの疾病のシステムが極めて複雑であることが挙げられる。

マラリアに関しては、観測された地理的分布の変化とアフリカ高地地域における感染力の変化に関して、気候変動の寄与を調べる研究が行われてきたが、証拠はいまだ明瞭でない。何例かの研究が、いくつかの高地で長期の気温上昇傾向がマラリアに及ぼした影響を示しているが、ほかの研究では、マラリア寄生動物の薬剤耐性向上、媒介動物制御プログラムの低下、生態学的変化が、近年のマラリア再流行の背後にある原動力である可能性が最も高いことを示している。このように、気候がマラリアの時空間的分布において主要な制限要因である一方で、多くの非気候要因（薬剤耐性と人免疫不全ウイルス（HIV）の蔓延、二次的には、国境を越えた人々の移動、農業活動、殺虫剤耐性の出現、屋内残留噴霧用 DDT の使用）が、気候変化影響により強く作用する可能性もある。

極端な熱暑または寒冷な時期は死亡率の上昇を伴ってきた。地域ごとに変化の程度は異なるが、近年の平均地上気温の上昇と高気温日数の増加の証拠がある。2003 年のヨーロッパ熱波が原因とされる 25,000 人から 30,000 人の死者は、ヨーロッパで 20 世紀に観測された熱波死者数を上回る。ヨーロッパにおける 2003 年熱波期間中には、高気温が過剰死亡率と関連があった。一般的に、高収入な母集団は、暑さと寒さの両方に対して脆弱でなくなってきた。冬季死亡率の減少は多くの温帯の国々で明らかであり、これは主に寒気に対する適応の増加によるものである。しかしながら、極端な熱波に関連した死亡率は低下していない。熱波に起因する死亡率の長期変化傾向の分析はまだ行われていない。

以上の人間健康分野における長期変化傾向に関する研究の現状を考慮すると、研究の進展のためには、長期の

疫学的データに加えて、移住を含む人口変化、収入、居住施設・空調利用、健康・栄養状態の指標、公衆衛生状況（例：水供給インフラ、一般インフラ、廃棄物管理、媒介動物制御プログラム）、農業活動・土地利用、薬剤・殺虫剤利用量、といった多様な社会・経済に関わるデータの整備・普及が同時に必要である。

表 6-1 農作物と家畜における観測された変化 (Rosenzweig *et al.*, 2007)。

農業測定基準	観測された変化	場所	期間	参考文献
生物季節	冬ライ麦の茎の早期伸長 (10 日) およびトウモロコシの早期発芽 (12 日)	ドイツ	1961-2000	Chmielewski <i>et al.</i> , 2004
	3 月/4 月の気温上昇に応答 (-5 日/°C) した、サクラの木の早期開花 (0.9 日/10 年) とリンゴの木の早期開花 (1.1 日/10 年)		1951-2000	Menzel, 2003
	年間 1.4°C の気温上昇と合致する、果樹の成長期間の開始の早期化 (2.3 日/10 年)、サクラの木の早期開花 (2.0 日/10 年)、リンゴの木の早期開花 (2.2 日/10 年)		1961-1990	Chmielewski <i>et al.</i> , 2004
	アンズとモモの果樹開花時期の 1~3 週間の早期化、春季の降霜の危険性の増加、敏感なアンズ種の芽の落下または壊死の発生頻度の増加	フランス南部	1970-2001	Seguin <i>et al.</i> , 2004
管 理 慣 行、 害虫と 病害	トウモロコシとテンサイの播種時期の繰り上げ (10 日)	ドイツ	1961-2000	Chmielewski <i>et al.</i> , 2004
	4 つの INRA 実験農場におけるトウモロコシ播種時期の 20 日の繰り上げ	フランス	1974-2003	Benoit and Torre, 2004
	ジャガイモの植え付け時期の 5 日の繰り上げ、春穀物には変化なし	フィンランド	1965-1999	Hilden <i>et al.</i> , 2005
	コドリグリリングガの 2~3 世代での生息地の部分的移動	フランス南部	1984-2003	Sauphanor and Boivin, 2004
収量	暑い夏に関係した干草の収量低下	英国ローサムステッド	1965-1998	Cannell <i>et al.</i> , 1999
	成長期間における最近の冷涼さに起因する全体的な収量増加の一部：トウモロコシで 25%、大豆で 33%	アメリカの郡レベル	1982-1998	Lobell and Asner, 2003
	気温上昇に関係した米の収量の減少 (1979~2003 年の間に最高気温と最低気温がそれぞれ 0.35°C と 1.13°C 上昇)	フィリピン	1992-2003	Peng <i>et al.</i> , 2004
家畜	計測された牧草地バイオマスの 20~30% の減少	モンゴル	1970-2002	Batimaa, 2005
	7 月下旬 10 日間の NDVI が領土全体で 69% 低下		1982-2002	Erdenetuya, 2004
	夏季および年間気温の上昇に関連した家畜生産量の観測された増加	チベット	1978-2002	Du <i>et al.</i> , 2004

表 6-2 人の健康に対する気象と気候の影響に関する研究 (Rosenzweig *et al.*, 2007)。

健康影響	健康への気候の影響	その他の駆動力	参考文献
暑熱と寒気の直接的影響	夏季の気温に関係する死亡	空調使用による夏季死亡率の低下	Diaz <i>et al.</i> , 2002; Davis <i>et al.</i> , 2003b; Beniston, 2004; Kysely, 2004
動物媒介性疾病	温暖な気候によるスウェーデンでのダニ媒介性脳炎(TBE)の増加 スウェーデンとチェコ共和国における暖冬による、ライム病を引き起こす病原媒介動物であるダニの高緯度地域への拡大	TBE の増加はおそらく人間と動物の行動の変化による	Randolph, 2001 Lindgren <i>et al.</i> , 2000; Danielová <i>et al.</i> , 2006
食品性および水媒介性疾病	気温上昇に関連するオーストラリアのサルモネラ感染症	大腸菌 (<i>E. coli</i>) とクリプトスポリジウム (<i>Cryptosporidium</i>) 原虫の発生は、気候変動が原因とは特定できないであろう	D' Souza <i>et al.</i> , 2004 Charron <i>et al.</i> , 2004
花粉および粉塵に関連する疾病	花粉の存在量とアレルギー誘発性の増大は温暖化と関係している	花粉の存在量は土地利用の変化にも影響される	Levetin, 2001; Beggs, 2004

6.2.3 災害（経済的損失と保険損失）

地球規模の損害額から、1970 年代以降、極端な気象関連事象に起因するコストが急激に増大しつつあることが明らかになっている。リスクに対する曝露の大幅な上昇が支配的因子だが、損失を曝露に対して規格化しても、依然として基調をなすコストの上昇傾向が残ることを見出した研究もある。

自然災害に起因する経済的損失は、1960 年代の 755 億 US ドルから 1990 年代の 6,599 億ドルに増加した（年複利成長率 8%）。保険コストに関する民間部門のデータもまた、同様の期間における保険が支払われた損害の増加を示している。災害への曝露の大幅な増加が支配的な原因である。

アメリカのハリケーンや洪水を対象とした研究では、富と人口の変化に対する経済損失の規格化が行われている。これらのアメリカの全国的評価では、長期にわたる損失額の有意な上昇傾向が示されないが、これは 2004 年・2005 年のハリケーンによる顕著な損害が生ずる前の研究であることには注意が必要である。

また、資産変動により生ずる変化ならびに大災害の経路にあった財産数と価値により生ずる変化を補正する規格化を行い、大災害による損害に関する世界的な目録が作成された。世界規模の調査は、1970～2005 年にかけて、大災害の損害情報が集中的にあり、様々な災害のタイプ、すなわち熱帯低気圧・熱帯外低気圧・雷を伴う嵐・雹を伴う嵐・山火事・洪水を含み、高緯度から低緯度まで広がる国と地域（オーストラリア・カナダ・ヨーロッパ・日本・韓国・アメリカ・カリブ海・中央アメリカ・中国・インド・フィリピン）を対象としており、包括的である。データ正規化の結果、1970 年以降の年間大災害損失額について、年当たり 2% 増加という、小さいが統計的に有意なトレンドが示された。ただし、オーストラリアやインドなどの多くの地域について、1970 年以降、正規化された損失額が統計的に有意な減少を示している。上昇トレンドの有意性は 2004 年・2005 年のアメリカとカリブ海における損害の影響を受けていること、また特にインドと比較して際立つアメリカの相対的な豊かさについて考慮する必要があることなど、依然議論の余地がある。

以上の災害分野（経済的損失）における長期変化傾向に関する研究の現状を考慮すると、研究進展のためには、災害データの充実（観測空白地域の是正・過去の記録の再整理・小規模災害の記録対象化・記録事項の拡張）に加えて、その時間・空間的正規化のために必要な人口・経済・資産等の社会・経済データに関する改善も同時に目指す必要があることがわかる。

6.2.4 社会経済的指標

近年の気候変動に応答した社会経済的指標の観測された変化に関する文献数は少ない。IPCC-AR4-WG2 では、エネルギー需要および観光に関連した事例と、気候トレンドへの地域的適応についてのいくつかの研究が総括された。

(1) 建築物のエネルギー需要

建築物は、全エネルギー利用の相当な部分、一部の先進国では最高で50%を占めており、建築物の設計とエネルギー性能は気候に関連がある。エネルギーと気候に関連する一例は、暑い気象時の冷房である。しかしながら、気温上昇が建物内の冷暖房のためのエネルギー利用にどの程度影響を与えてきたかははっきりしていない。適応戦略とその実行は、エネルギーコストが強い動機になる。さらに、温度快適性に関して人間は温暖化に適応するかどうかという問題がある。

(2) 観光

気候は観光客による目的地選択の主要因であり、観光客や観光業は、気象と気候の短期変動に敏感である。いくつかの統計的分析とシミュレーション研究は、気候要因が、経済と政治状況、流行、メディアの注目、環境の質に次いで、観光客の需要決定要因として関与することを示した。観光・気候システム・環境・社会の間に存在する相互作用の複雑さゆえに、観光活動に対する気候変動の直接観測された影響を分離することは困難である。いかなるスケールでもこの関係についての文献はわずかしかない。スイス・オーストリア・アメリカ東部・チリでは、スキー産業における応答が示されている。

(3) 地域的適応

社会が乾燥化や気温上昇などの気候変動にすでに適応していることを示す研究がいくつか存在している。例を挙げると、アフリカ南部の4地点における近年の気候変化への応答から、人々が長期化した乾季と従来に比べて確実になくなった降雨などの気候変化を大いに認識しており、作物の切替えによる短期的対処と植樹などの長期的適応の両方、そして生計の営利化と多様化を含む集団的および個別的行動によって変化に適応していることが示された。同時に、適応に着手し支援する際の地方機関や農業組合など社会資本の重要性についても示された。ウェスタンオーストラリア州では、長期間の干ばつ中における水管理の適応に際して、気候科学が利用されたことが示されている。

ヨーロッパでもまた、観測された変化に対応して、あるいは予想される変化を見越して、住民が気候変動に適応しているという証拠が蓄積している。例えば、イギリスでは、より極端な気象現象を想定した洪水管理ガイドラインの変更、気候変動管理者の雇用、自然保護および災害計画の変更、気候耐性建築物、様々な作物と樹木の植え付け、スコットランドでのスキー場からウォーキング施設への転換などを含む、数多くの適応が確認されている。

6.3 影響評価手法開発と影響予測に関わる社会・経済データ

各部門の温暖化影響について将来の見通しを得るためには、影響評価モデルを準備し、それに気候・非気候因子の将来変化を与えて将来を予見する「モデルアプローチ」が一般的にとられる。人間社会への影響予測では、社会・経済データの利用可能性が、モデル開発・改良の観点からも、またモデルを用いた将来予測の観点からも鍵となる。

影響評価モデルの開発・改良に際しては、対象影響自体の現在までの推移を示す社会・経済データに加えて、対象影響の原因となる社会経済的な諸条件に関する推移についても、影響発現のメカニズム理解、モデルの構築と検証、モデルパラメーターの調整などのために必要となる。人間社会への影響に関しては、(過去の比較的気候条件の安定した時期にあつては特に) 非気候因子が支配的な場合が多く、対策検討に有益な予測情報を提示できる影響評価モデルの構築のためには、非気候因子をいかに取り扱うかがポイントとなる。

一方、影響評価モデルを用いた将来予測の実施に際しては、観測された社会・経済統計との整合性を維持しつつ、将来動向に関するシナリオを想定する必要がある、その点においてもやはり社会・経済データの整備が重要課題である。

しかしながら、社会・経済データの整備・流通の不足も一因となり、多くの温暖化影響評価が物理・生物学的な影響の把握にとどまり、その社会的影響を把握する取組みが不足している現状がある。また、評価手法自体は社会・経済的な因子の変化を考慮できる形で用意されていても、各因子の将来変化に関して裏づけのある想定が困難なことから、社会・経済的因子について将来にわたり現状不変という非現実的な想定での影響評価を実施す

る研究も多かった。

本節では、IPCC-AR4 の各章本文 (Confalonieri *et al.*, 2007; Easterling *et al.*, 2007; Nicholls *et al.*, 2007; Wilbanks *et al.*, 2007) を基にして温暖化影響評価の代表的な研究事例を分野別に挙げ、それを踏まえて各分野の影響評価をより有用なものにするための社会・経済データの整備について考察する。ただし、便宜的に分野別に整理しているが、多くの点で分野間の重複・関係があることについては注意が必要である。

6.3.1 農業

農作物収量の変化に関しては、気温・降水・日射といった気候因子と、施肥効果に関わる大気中 CO₂ 濃度に焦点が当てられがちだが、将来予測のためには管理慣行と技術的变化に関しても同時に考慮できる評価手法が必要となる。時系列的な収量変化を説明可能な農作物収量の評価手法の確立のためには、収量・農地面積の統計や気候データに加えて、播種日・収穫日、灌漑、施肥、害虫駆除、病害制御といった管理慣行や、育種、機械化といった技術進歩に関わる過去の変遷を示すデータが求められる。この種のデータは、長期間について面的な整備は十分に行われておらず、また利用可能なデータの地域差も大きい。現存する記録を集散的に整理し、適切な方法で空間的・時間的な補間・外挿を実施し、長期の面的なデータセットを開発する試みも重要だろう。さらに、将来予測の実施に際しては、これら諸要素の多くについてシナリオを置くことになるが、非現実的な想定とならないように各因子間で整合的なシナリオを用意することが求められる。一部の因子に関しては、状況に合わせて判断・制御が可能な適応策に相当するが、実施可能な適応策は将来の技術・経済等の社会的な諸条件にも左右されるため、妥当な適応シナリオの構築が重要となる。

食料安全保障に関しては、気候変動影響よりも社会・経済発展の影響が支配的であることから、より社会・経済データにその評価の精度が依存する。具体的には、各国の食料輸入依存度、グローバル化に伴う制度的・経済的な変革 (例：補助金の撤廃、貿易協定)、世界人口増加の鈍化速度、所得変化、都市化、所得構成における農業シェアの変化、食料需要量に関わる消費パターンの変化、技術の普及速度、備蓄政策、食料援助政策などに左右される。これらの因子に関して現実的なモデルでの取扱いと将来想定を実現するためには、関連する過去の社会・経済データの系統的整備と、整合性を有した将来シナリオの開発が重要課題となる。

6.3.2 人の健康

様々な気候シナリオと社会経済シナリオの下で気候変動が人間健康に及ぼす影響を予測する、気候－健康影響モデルの開発が進んできている。ただしモデル開発・影響予測は、疫学的証拠が十分得られているいくつかの感染症、異常高温、大気汚染に限られており、各々に異なるアプローチがとられている。

例えば、マラリアとデング熱の場合、一般に分布可能域の変化が地図の形で示される。モデルの多くは媒介動物や寄生虫の成長への気候制約に基づき構築されているが、人口予測等の非気候因子を考慮する場合もある。表 6-3 は気候変動がマラリア、デング熱、その他感染症の発生率と地理的分布範囲に及ぼす影響を予測した研究をまとめている。排出量シナリオに関する特別報告 (SRES) に対応した気候シナリオを利用したモデル研究がいくつかあるが、人口シナリオを利用したものはほとんどなく、経済シナリオを組み込んだものは 1 つもない。適応能力に関する十分な想定を組み込んだ研究はほとんど存在しない。人間の罹患と死亡に影響を及ぼす気候以外の要因のトレンドについて不確実性があるため、媒介動物の地理的分布範囲の変化予測の確信度は、疾病発生率の変化予測の確信度よりも高いものとなる。疾病発生率の検討のためには、人口・土地利用分布のみならず、監視プログラム・保健医療サービス等の疾病対策措置に関する情報も整備・活用してメカニズム理解とモデル改良を進める必要がある。

熱波が人間健康に及ぼす影響についても多くの予測研究が行われている。表 6-4 は気候変化が暑熱と寒気に関連した死亡率に及ぼす影響の予測をまとめている。先進国以外では熱ストレスが死亡率に及ぼす影響についての情報は不足している。暑熱に関連した罹患率と死亡率は上昇すると予測されている。モデルに順応・適応に関する想定が組み込まれている場合、気候変動に起因する暑熱に関連した死亡率負担の推定値は減少するが、完全にはなくなる。ほかの因子と整合的な順応・適応に関する想定を用意する必要がある。なお、高齢者人口の増加によりリスクにさらされる人口の比率は今後上昇するものと見込まれている。リスクにさらされる人口、集団の年齢構成、居住密度はどの予測でも重要な変数である。特に高齢者は若い年齢群に比べて熱波・暴風雨・洪水などの極端な気象に起因する傷害に対してより脆弱であるため、特に高齢化の速度は重要な変数である。また、屋外労働者に高い死亡率が見られるとの知見を踏まえると、産業構造や労働環境の変化なども重要な社会経済的

な因子と言える。

メタン・一酸化炭素・窒素酸化物（NOX）の排出量増加により、地表面オゾンのバックグラウンドレベルは工業化以前に比べて上昇してきた。このトレンドは今後 50 年にわたり継続すると予想されている。ヨーロッパ・北アメリカに関して、地表面オゾン濃度の変化が将来の排出および気象パターンのシナリオによって予測されてきた。これらの大気汚染物質の将来排出は不確かであり、人口増加、経済開発、規制措置、エネルギー利用についての想定に左右される。表 6-5 は予測されるオゾン濃度に現在の曝露－死亡関係を適用することで得られた将来的な罹患率と死亡率の予測をまとめている。中・低所得の都市に関しては住民の汚染負担はより大きいにも関わらず、予測はない。

6.3.3 沿岸システム

20 世紀を通じて、人間活動が沿岸地帯に与えた直接的影響は、観測された気候変動に直接起因した影響よりはるかに大きい。人為の直接的影響には、沿岸湿地の乾燥化、森林伐採と開拓、下水・肥料・汚染物質の沿岸水域への排出、砂の採掘、水産、侵入生物種の導入、護岸設備やその他の構造物の建設などが含まれる。さらに、ダム、水路、沿岸水路の迂回路などの構造物の建設は、循環パターンを変化させるとともに、淡水、土砂、そして栄養塩の供給を変化させてきた。養浜などの軽度な工学的解決策を講じた場合でも、自然システムは直接的あるいは間接的に変化してしまうことが多い。沿岸域への生態系サービスも、人間活動によって乱されることが少なくない。例えば、熱帯地域や亜熱帯地域のマングローブ林と温帯地域の塩性湿地は、栄養塩を蓄積・変換し、波と暴風雨を減衰させ、土砂を保持し、豊かな生態系のコミュニティを支えているが、それらは、農業、産業・都市開発、水産養殖業のための生態系の大規模な変換によって減少している。沿岸域における局所的な開発に加えて、河川上流域での土地利用の変化、とりわけ森林伐採と水理的な改造は、下流に影響を与えてきた。

以上を考慮すると、沿岸システムにおける影響予測の高度化を目指すには、気候・海水位の変化のみならず、沿岸周辺および上流陸域での非気候の人為的因子についても同時に捉える必要があることは明らかであり、そのための社会・経済データの整備が求められる。

表 6-6 には、自然要因と社会的要因の組合せによって出現する脆弱性の主要なホットスポットがまとめられている。気候変動が沿岸域に及ぼす影響は人為的な圧力の増大によっていっそう悪化する。沿岸域の利用は 20 世紀中に劇的に増加したが、この傾向が 21 世紀も続くことはほぼ確実である。沿岸域でリスクにさらされている人々と資産は増加しており、沿岸域への土砂の供給を減らすダムを含む、集水域における土地利用と水文学的变化によって、追加的なストレスを受けている。人口の多いデルタ（特にアジアのメガデルタ）、低平な沿岸都市地域、および環礁は、沿岸域の脆弱性に関する主要な社会的ホットスポットであり、自然システムへのストレスが人間の低い適応能力および高い曝露と重なる場所にある。地域的には、南アジア、東南アジア、東アジア、アフリカ、小島嶼が最も脆弱である。

高潮による沿岸洪水に関しては全球を対象地域とした予測研究が実施されている。同研究では、将来の海面上昇量に加え、人口分布変化、経済発展に関連づけた防護水準の向上などの社会・経済的な因子についてもシナリオとして考慮している。表 6-7 は将来の適応について仮定した、高潮による沿岸洪水の推定を示している。それによると、アジアとアフリカが最も大きな影響を受けることになる。海面上昇がなければ、沿岸洪水は減少すると予測されている。一方、海面上昇があると、特に A2 シナリオ下では、沿岸洪水の問題は 2080 年代までに増大する。

政策分析のために、各国沿岸の社会・経済的なシナリオが、気候変動シナリオと関連づけて開発されている。洪水・沿岸防護の見通し（イギリス）、ナショナルアセスメント（アメリカ）が例として挙げられる。しかし、沿岸地域の社会経済的なシナリオは、気候や海面上昇のシナリオに比べると未発達であると言える。予測研究の共通基盤として地域固有の特性を記述したシナリオの整備が望まれる。

表 6-3 気候変動がマラリア、デング熱、その他の感染症に及ぼす影響の予測 (Confalonieri *et al.*, 2007)。

健康への影響	測定基準	モデル	気候シナリオと時間区分	気温上昇と基準	人口予測とその他の仮定	主な結果	参考文献
マラリア、 全球と地域	気候条件がマラリアの流行に適した地域におけるリスクに曝される人数	熱帯熱マラリアに関して、実験室データとフィールドデータから構築された生物学的モデル、	HadCM3。SRES A1FI, A2, B1シナリオで実験。時間区分は2020年代、2050年代、2080年代		SRES人口シナリオ；現在のマラリア対策の状況が適応能力の指標として用いられた	流行期間が1ヶ月を超える場合のリスクに曝される人口増加の推定値は、気候と人口増加が組み込まれている場合、2億2,000万超（A1FI）から4億超（A2）。年間継続3ヶ月以上の流行リスクを考慮すると、全球の推定値は大幅に低下し、A2シナリオとB1シナリオでは全球のリスクに曝される人口は正味マイナスになる。	Van Lieshout <i>et al.</i> , 2004
マラリア、 アフリカ	定常的な熱帯熱マラリア〈の流行〉のリスクに曝されている人月	定常的な熱帯熱マラリア〈の流行〉の気候適合性についての MARA/ARMA ^a モデル	HadCM3。SRES A1FI, A2a, B1シナリオで実験。時間区分は2020年代、2050年代、2080年代	2020年代に1.1～1.3℃；2050年代に1.9～3.0℃；2080年代に2.6～5.3℃	1995年の人口に基づく推定値	全てのシナリオに跨る曝露の人月は、5から7%の（主に高地への）分布の拡大など、2100年までに16～28%増大するが、緯度範囲の拡大は限られる。流行の気候閾値に近い地域が広い国はすべてのシナリオにおいて大きく増大し得る。	Tanser <i>et al.</i> , 2003
マラリア、 アフリカ	定常的な熱帯熱マラリア〈の流行〉に関する気候適合性地図	定常的な熱帯熱マラリア〈の流行〉の気候適合性についての MARA/ARMA ^a モデル	排出が中・高程度の HadCM2 のアンサンブル平均。時間区分は2020年代、2050年代、2080年代		気候要因のみ（月間平均気温と月間最低気温及び月間降雨量）	南東アフリカでは2020年代に流行が減少する。2050年代と2080年代までに、高原と高地で局地的に増加し、サハラと南中アフリカ周辺では減少する。	Thomas <i>et al.</i> , 2004

マラリア、ジンバブエ、アフリカ	流行の気候適合性	定常的な熱帯熱マラリア〈の流行〉の気候適合性についての MARA/ARMA ^a モデル	COSMIC からの 16 の気候予測。1.4℃と 4.5℃の気候感度；2100 年の CO2 等価換算 350ppm と 750ppm		なし	高地で流行の適合性が高まる。低地と降雨量の少ない地域では、気候感度、排出シナリオ、GCM に応じて変化にばらつきがある。	Ebi et al., 2005
マラリア、ブリテン島	マラリア流行の確率	歴史的分布、土地の被覆、農業要因、気候決定要因に基づく、統計的多変量回帰	2050 年代に平均気温が 1～2.5℃の上昇	1～2.5℃の平均気温上昇	なし。土地被覆と農業要因は変化なし。	局地的なマラリア流行リスクは 8～15% 上昇する；土着マラリアが再定着するであろう可能性がかなり低い。	Kuhn et al., 2002
マラリア、ポルトガル	疾病の流行に適した気温の年間日数の割合	公表された閾値に基づく流行リスク	2040 年代に関しては PROMES。2090 年代に関しては HadRM2。	2040 年代は 1981–1990 年より 3.3℃、2090 年代は 2006–2036 年より 5.8℃平均年間気温が上昇。	媒介動物の分布及び／又は移入に関するいくつかの仮定	マラリア媒介蚊の生存に適した日数は大幅に増加する。ただし、感染した媒介蚊がいない場合には、三日熱マラリアによる流行リスクは非常に低く、熱帯熱マラリアによる流行リスクはごくわずかである。	Casimiro and Calheiros, 2002
マラリア、オーストラリア	媒介動物の生存に適した／適していない地理的地域	主なマラリア媒介蚊の現在の分布、相対的量、生物季節に基づく経験的・統計的モデル (CLIMEX)	CSIROMk2 と ECHAM4。SRES 排出シナリオ B1, A1B, A1FI で実験。時間区分は 2020 年、2050 年	1990 年と比較して年間平均気温が 2030 年代には 0.4℃～2.0℃。2070 年代には 1.0℃～6.0℃上昇 (CSIRO)	適応能力を想定；オーストラリアの人口予測を利用	「マラリア受容区域」は南に拡大し、2050 年までに一部の地方都市が含まれる。再移入の絶対的リスクは非常に低い。	McMichael et al., 2003b

^aThe Mapping Malaria Risk in Africa/Atlas du Risque de la Malaria en Afrique Project (アフリカにおけるマラリアリスク地図プロジェクト)

健康への影響	測定基準	モデル	気候シナリオと時間区分	気温上昇と基準	人口予測とその他の仮定	主な結果	参考文献
マラリア、インド、全州	熱帯熱マラリアと三日熱マラリアの流行に対する気候適合性	気温とマラリア症例数との観測された関連性に基づく流行至適期間	HadRM2。排出シナリオ IS92aで実験。	現在の気候より2～4℃上昇	なし	2050年代までに、地理的分布範囲は中央地域から南西と北部の州に移動すると予測される。流行期間の長さは、北部と西部の州では長くなり、南部の州では短くなる可能性が高い。	Bhattacharya et al., 2006
デング熱、全球	リスクに曝される人口	蒸気圧に基づく統計モデル。リスクに曝される基準人口は15億人。	ECHAM4、HadCM2、CCSR/NIES、CGCM2、CGCM1。排出シナリオ IS92aで実験		特定地域予測に基づく人口増加	人口増加と気候変動の両方が起きる場合、2085年までに全球のリスクに曝される人口は50億から60億人になる。気候変動のみが起きる場合には35億人になる。	Hales et al., 2002
デング熱、ニュージーランド	媒介蚊「ホトスポット」地図；現在ニュージーランドにデング熱はない	降雨と気温に基づく閾値モデル	DARLAM GCM。排出シナリオA2及びB2で実験。時間区分2050年、2010年		なし	現在の気候下で一部の地域でデング熱の急激な発生の潜在リスクがある。気候変動により、より多くの地域でデング熱のリスクが増大すると予測される。	De Wet et al., 2001
デング熱、オーストラリア	デング熱の流行に適した気候の地域地図	経験モデル (Hales et al., 2002)	CSIROMk2、ECHAM4、GFDL。高排出シナリオ (A2)、低排出シナリオ (B2)、2100年に450ppmで安定化のシナリオで実験	1961-1990年より全球の平均気温が1.8～2.8℃上昇	なし	気候が適した地域が南に拡大する；適した地域の大きさはシナリオにより異なる。高排出シナリオでは、南はシドニーまで気候が適した地域となり得る。	Woodruff et al., 2005
ライム病、カナダ	ライム病を媒介する鹿ダニ (Ixodes scapularis) の地理的分布範囲と存在数	観測された関係に基づく統計モデル；ダニ存在数モデル	CGCM2とHADCM2。排出シナリオ SRES A2とB2で実験。時間区分2020年代、2050年代、2080年代		なし	両方のシナリオで2020年代までに北にほぼ200キロ拡大し、A2で2080年代までにほぼ1000キロ拡大する。A2シナリオの下では、ダニの存在数は2020年代までに30～	Ogden et al., 2006

						100%増加し、20280年代までに2～4倍になる。季節性が変化する。	
ダニ媒介性脳炎、ヨーロッパ	地理的分布範囲	現在の分布に基づく統計モデル	HadCM2。小程度、中の小程度、中の大程度及び大程度(それ以上は定められていない)で実験。時間区分2020年代、2050年代、2080年代	程度が大きいシナリオ下で2050年代に平均気温が3.45℃上昇、基準は定められていない	なし	小程度から大程度までの気候変動で、ダニ媒介性脳炎の分布範囲は現在よりもさらに北東に広がる。西方には南スカンディナヴィアまでのみの移動。小程度シナリオと中の小程度シナリオの場合のみ、ダニ媒介性脳炎は2050年代まで中央ヨーロッパと東ヨーロッパに留まる。	Randolph and Rogers, 2000
下痢性疾患、全球、世界の14の地域	下痢性疾患の発生(死亡)	年平均気温、給水・衛生設備の範囲、一人当たりGDPを含む、分野横断的研究による統計モデル	排出シナリオSRES A1B、A2、B1、B2。時間区分2025年、2055年		SRES人口増加	結果は地域とシナリオにより異なる。一般に、下痢性疾患は気温上昇と共に増加する。	Hijoka et al., 2002

健康への影響	測定基準	モデル	気候シナリオと時間区分	気温上昇と基準	人口予測とその他の仮定	主な結果	参考文献
下痢性疾患、アボリジニ・コミュニティ、中央オーストラリア（アリス・スプリングス）	10歳未満の子ども の入院	公表された研究に基づく曝露・反応関係	CSIROMk2とECHAM4。排出シナリオSRES B1、A1B、A1FIで実験。時間区分2020年、2050年	1990年と比較して年間平均気温が2030年代には0.4℃から2.0℃、2070年代には1.0℃から6.0℃上昇（CSIRO）	なし	基準と比較して、2020年までには顕著な増加はなく、2050年までの年間増加率は5～18%。	McMichael et al. 2003b
食中毒、インフルエンザとウェールズ	食中毒の届け出件数（不特定）	観測された気温との関係に基づく統計モデル	UKCIPシナリオ。2020年代、2050年代、2080年代	1961-1990年の基準より2020年代には0.57～1.38℃、2050年代には0.89～2.44℃、2080年代には1.13～3.47℃気温が上昇	なし	食中毒の届け出件数は気温が1℃上昇すると約4,000件、2℃上昇すると約9,000件、3℃上昇すると約14,000件絶対数が増加する。	Department of Health and Expert Group on Climate Change and Health in the UK, 2001s

表 6-4 気候変動が暑熱と寒気に関連した死亡率に及ぼす影響の予測 (Confalonieri *et al.*, 2007)。

場所	健康への影響	モデル	気候シナリオ、時間区分	気温上昇と基準	人口予測とその他の仮定	主な結果	参考文献
英国	暑熱と寒気に関連した死亡率	観測された死亡率から導かれた経験・統計モデル	UKCIPシナリオ。時間区分2020年代、2050年代、2080年代	1961～1990年の基準より2020年代には0.57～1.38℃、2050年代には0.89～2.44℃、2080年代には1.13～3.47℃上昇	人口は1996年レベルを維持。いかなる順応も仮定されていない。	中の高シナリオのもとでは暑熱に関連した年間死亡者は1990年代の798人から2050年には2,793人、2080年代には3,519人に増加する。中の高シナリオのもとでは寒気に関連した年間死亡者は1990年代の80,313人から2050年代には60,021人、2080年代には51,243人に減少する。	DonaIdson et al., 2001
ドイツ、バーデンビュルデンベルグ	暑熱と寒気に関連した死亡率	適応の概念モデルと組み合わせた熱・生理学的モデル	ECHAM4-OPYC3。排出シナリオ SRES A1Bで実験。1951～2001年と比較した2001～2055年		人口増加と高齢化および短期的な適応と順応	暑熱に関連した死亡率の約20%上昇。この上昇は寒気に関連した死亡率の減少によって相殺されない可能性が高い。	Kopp e, 2005
リスボン、ポルトガル	暑熱に関連した死亡率	観測された夏季の死亡率から導かれた経験的・統計的モデル	PROMES およびHadRM2。2020年代、2050年代、2080年代	1968～1998年の基準より2020年代には1.4～1.8℃、2050年代には2.8～3.5℃、2080年代には5.6～7.1℃上昇	SRES人口シナリオ。ある程度の順応を仮定。	暑熱に関連した死亡率が基準の100,000人当たり5.4～6人/10万人から2020年代までに5.8～15.1人/10万人、2050年代までに7.3～35.9人/10万人、2080年代までに19.5～248.4人/10万人に増加	Dessai, 2003
アメリカのカリフォルニアの4都市（ロサンゼルス、サクラメント、フレズノ、シャスタダム）	熱波の年間日数、熱波シーズンの長さ、暑熱に関連した死亡率	観測された夏季の死亡率から導かれた経験的・統計的モデル	PCM と HadCM3。排出シナリオ SRES B1およびA1FIで実験。2030年代、2080年代	1961～1990年の基準より2030年代には1.35～2.0℃、2080年代には2.3～5.8℃上昇	SRES人口シナリオ。ある程度の適応を仮定。	熱波条件として分類された年間日数の増加。2080年代までにロサンゼルスで、熱波日数はB1のもとでは4倍、A1FIのもとでは8倍に増加する。ロサンゼルスの暑熱に関連した年間死亡者は1990年代の約165人から、シナリオに応じて319から1,182人に増加する。	Hayhoe, 2004
オーストラリアの主要な都市（アデレード、ブリスベン、キャンベラ、ダーウィン、ホバート、メルボルン、パース、シドニー）	65歳以上の暑熱に関連した死亡率	観測された日死亡率から導かれた経験的・統計的モデル	CSIROMk2、ECHAM4、HADCM2。排出シナリオ SRES A2およびB2と2100年に450ppmで安定化のシナリオで実験。	主要な都市の年間最高気温が1961～1990年の基準より0.8～5.5℃上昇	人口の増加と人口の高齢化。順応はなし。	すべての都市で気温に起因する死亡率が現在の気候のもとでの82人/10万人から2100年には246人/10万人に増加；GHG緩和政策が実施されると死亡率は低下する。	McMichael et al., 2003b

表6-5 気候変動がオゾンに関連した健康に及ぼす影響の予測 (Confalonieri *et al.*, 2007)。

場所	健康への影響	モデル	気候シナリオ、時間区分	気温上昇と基準	人口予測とその他の仮定	主な結果	参考文献
ニューヨーク都市部、アメリカ	郡ごとのオゾンに関連した死亡	公表された疫学文献からの濃度応答関数、CMAQ (Community Multiscale Air Quality Model) による格子に区切られたオゾン濃度	SRES A2排出シナリオで実行したGISS MM5を用いてダウンスケール。時間区分2050年代	1990年代と比較して2050年代には1.6～3.2℃上昇	人口と年齢構造は2000年のままで維持される。アメリカ環境保護庁 (USEPA) の1996年の国別排出目録から変化がなく、2050年代までにNOxと揮発性有機化合物が一貫して増加するA2シナリオを仮定。	A2気候のみ：オゾンに関連した死亡の4.5%の増加。すべての郡でオゾンが上昇。A2気候および前駆物質；オゾンに関連した死亡の4.4%の上昇。(NOx相互作用によりいずれの場所でもオゾンは上昇しない。)	Knowlton <i>et al.</i> , 2004
50都市、アメリカ東部	オゾンに関連した入院と死亡	公表された疫学文献からの濃度影響関数、CMAQによる格子に区切られたオゾン濃度	SRES A2排出シナリオで実行したGISS MM5を用いてダウンスケール。2050年代	1990年代と比較して2050年代には1.6～3.2℃上昇	人口と年齢構造は2000年のままで維持される。USEPAの1996年の国別排出目録から変化がなく、2050年代までにNOxと揮発性有機化合物が一貫して増加するA2シナリオを仮定。	すべての都市で最大オゾン濃度が上昇し、現在濃度がより高い都市において、最も大きく上昇する。8時間規制値を超えるひと夏の平均日数の増加は、事故以外の死亡率を0.11～0.27%上昇させ、心血管系疾患による死亡率を平均0.31%上昇させる。	Bell <i>et al.</i> , 2007
イングランドとウェールズ	超過日数 (オゾン、微粒子、NOx)	高汚染物質の日に関する気象上の要因に基づいた統計的モデル (気温、風速)	UKCIPシナリオ。2020年代、2050年代、2080年代	1961～1990年の基準と比較して2020年代には0.57～1.38℃、2050年代には0.89～2.44℃、2080年代には1.13～3.47℃上昇	排出は変わらない。	期間全体を通して、高微粒子、高SO ₂ の日が大幅に減少する。オゾンを除くその他の汚染物質はわずかに減少する。オゾンは上昇するかもしれない。	Ander son <i>et al.</i> , 2001

表 6-6 沿岸地帯における社会的脆弱性の主要なホットスポット (Nicholls *et al.*, 2007)。

制御因子	本章における事例
適応に対する（経済的、制度的、環境的、技術的などの）重大な障害が存在する沿岸地域	ベニス、アジアのメガデルタ、環礁と小さな島々、ニューオーリンズ
地盤沈下や自然の防護物の減少などの、自然および人間による複合的ストレスにさらされている沿岸地域	ミシシッピ、ナイルとアジアのメガデルタ、オランダ、地中海地域、モルディヴ
気温上昇による悪影響を既に受けている沿岸地域	サンゴ礁、北極地方の海岸（アメリカ、カナダ、ロシア）、南極半島
氾濫原の人口がきわめて多く、高潮の重大な危険にさらされている沿岸地域	ベンガル湾、メキシコ湾／カリブ海地域、ラプラタ／パラナ川デルタ、北海
気候変動によって淡水資源が減少する可能性が高い沿岸地域	西アフリカ、西オーストラリア、環礁と小島嶼
観光に大きな悪影響が発生する可能性が高い、経済が観光に依存している沿岸地域	カリブ海地域、地中海地域、フロリダ、タイ、モルディヴ
内陸での移動範囲が制限されている、感度が高い沿岸システム	多くの発達した河口沿岸域、海拔の低い小島嶼、バングラデシュ

6.3.4 産業・居住・社会

気候変動が産業、居住、社会にどのように影響し得るかを予測する能力は、比較的小さい地理的スケールでの気候変動自体の不確実性と、非気候の人間システムの変化傾向の不確実性により制限されている。技術進歩や制度変化といった社会経済的要因についての不確実性が大きいために、気候変動の大小に応じた影響の違いについて検討比較できない場合すらある。従って、特に長期的予測を行う場合には、時間発展する社会経済システムに気候変動が及ぼす影響の予測ではなく、気候変動影響に対する脆弱性に焦点を合わせることが多い。表 6-8 では、産業・居住・社会の主要な脆弱性がまとめられている。人口密度、土地利用、洪水防護、制度的能力、排水インフラ、給水システム、水資源競合、エネルギー需要、沿岸開発などが脆弱性に関わる社会・経済的なプロセス・ストレスとして取り扱われており、将来予測の改善のためにはそれら因子に関するデータ・シナリオを改善することが求められることがわかる。

表 6-7 海面上昇による沿岸洪水の犠牲者の年平均人数の推定（単位は百万人）。熱帯低気圧の強度と徐々に進歩させていく防護には変化がないと仮定**。Base =海面上昇なしのベースライン、aSLR =海面上昇による追加の影響（Nicholls *et al.*, 2007）。

地域	ケース	年代、SRES の社会経済シナリオ（および海面上昇のシナリオ（m））											
		2020 年代				2050 年代				2080 年代			
		A1FI (0.05)	A2 (0.05)	B1 (0.05)	B2 (0.06)	A1FI (0.16)	A2 (0.14)	B1 (0.13)	B2 (0.14)	A1FI (0.34)	A2 (0.28)	B1 (0.22)	B2 (0.25)
オーストラリア	Base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	aSLR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ヨーロッパ	Base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	aSLR	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
アジア	Base	9/12	14/20	12/17	9/13	0	15/24	2	1/2	0	11/18	0	0/1
	aSLR	0	0	0	0	0	1/2	0	0	1	4/7	0	0/1
北米	Base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	aSLR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ラテンアメリカ	Base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	aSLR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0/1	0	0
アフリカ	Base	1	2/4	1	3/4	0	1/2	0	1/2	0	0/1	0	0
	aSLR	0	0	0	0	0	1	0	0/1	2/5	4/7	1	2/4
世界合計	Base	10/14	17/24	13/18	12/17	0/1	16/26	2	3/4	0	11/19	0	1
	aSLR	0	0	0	0	0	2/3	0	0/1	6/10	9/15	2/3	3/5

**防護の水準は一人当たりの GDP の増加とともに改善する。しかし、海面上昇については追加的な適応はない。

6.4 温暖化影響検出・予測に関わる社会経済データの整備・共有

地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第1号（以下、WG 報告書第1号）では、社会経済データに関して、データ標準化と流通促進の観点に重点を置いて現状把握が行われ、緊急に取り組むべき課題の提言が行われた。その一環として、各国国情を表すデータ、エネルギー使用量・温室効果ガス排出量データ、土地利用・土地被覆データ、温室効果ガス排出将来シナリオ、影響被害・対策のコスト情報について、情報源情報の整理が行われた。また、それらの社会経済データの収集と配布に関する国際的拠点・動向に関する情報整理も実施され（表6-9：WG 報告書第1号からの再掲）、現状把握に基づき情報源情報の収集促進の方法と課題が提示された。さらに、データ整備の中の重点的課題として、特にデータ統合化・デジタル化（可視化含む）と、途上国におけるデータ利用の能力開発に関して、現状整理と課題の提示が行われた。

W 報告書第1号以降に社会・経済データの標準化・流通促進に関連して大きな状況変化は生じていないとの認識から、WG 報告書第1号と同様の観点での情報源情報の網羅的整理を再度行うことはせず、6.4 では6.2、6.3での検討をふまえた影響検出・予測に関わる社会・経済データの整備について課題を整理する。WG 報告書第1号以降の新たな個別の動向については、その中で紹介するにとどめる。

6.4.1 社会・経済データの広域整備と空間情報化

人間社会への影響に関して、広域を対象とした包括的分析を実施し、その結果に基づいて特に脆弱な地域・分野を特定するような用途のためには、人口分布データについて典型的に実施されているように、広域をカバーした空間・地理情報としてデータが整備・提供されることが望ましい。気候情報や土壌情報などの自然科学的なデータに関しては、衛星観測データと地上観測データの組合せによって広域の比較的均質なデータの利用率が高まりつつある。人間社会への影響を分析する場合、自然科学的なデータと社会・経済データを統合・連関させる必要があり、社会・経済データについても空間・地理情報化されることで、分析に大幅な改善が見込まれる。

取組みの事例としては、国連をはじめとした国際機関や各国公的機関が整備する国別もしくは、より空間詳細な統計情報の包括的整備を典型例として挙げることができる。行政境界コードの標準化など、地理情報システムを効果的に利用可能な形でデジタルデータとして整備・提供する流れが出来上がりつつある。また、研究レベルでも新たな取組みが進められつつある。例えば、エール大学のG-ECONプロジェクト⁵⁶では、様々なスケールの経済統計を整備・按分することで、1度×1度のメッシュごとの総生産（Gross Cell Product）を整備し、提供している。

災害に関する長期・広域のデータベースの整備も進展めざましい。災害記録に関しては、25,000件を超す災害について記録するMunich Re社のNatCatSERVICE（企業の独占情報であり一般には公開されていない）がよく知られているが、公的機関が整備する無償公開の災害記録データベースも存在している（表6-10）。各データベースが記録する数値については、収録された災害記録の種類やデータ処理の違いなどのために、無視できない差異があることについては注意が必要である。

将来の社会・経済シナリオに関しても、広域の空間情報を開発・共有する動きがある。典型的には、IPCC-SRESシナリオが示す複数の将来発展経路に関して、現状データの空間分布等を用いて按分する便宜的なものであり、その手法は発展途上といえるが、例えば人口分布や総生産分布などについては、6.3でも見たように各分野の影響評価研究が共通して必要とする情報であり、開発されたデータの共有が進んでいる状況と理解できる（6.4.3）。なお、IPCC第5次評価報告書（IPCC-AR5）に集約される研究での統一的前提として利用すべくSRESシナリオの後継となる「新シナリオ」開発も進められている（6.4.3）。そこでも、気候予測での利用を直近の目的として空間詳細なGHG排出データ・土地利用データ等の開発が行われているが、これはIPCC-AR5に向けて影響予測・適応評価研究での将来想定としても用いられるものと予想される。

さらに、人間社会への影響予測研究では、自然環境への影響の予測情報が外力シナリオとして取り扱われる場合もある。その種の高次の加工情報に関して、従来は研究論文等で地域集計された情報として示されるにとどまっていたものが、空間・地理情報として提供できるように、収集・整備する取組みが新たに行われつつある。例えば、Resource for the Future（アメリカ）において実施されているThe Global Adaptation Atlas⁵⁷では、脆弱性・温暖化影響評価結果の空間的情報の集約・共有に取り組んでいる。

⁵⁶ <http://gecon.yale.edu/>（参照日：2010/02/16）

⁵⁷ http://www.rff.org/NEWS/CLIMATEADAPTATION/Pages/international_home.aspx（参照日：2010/02/16）

6.4.2 地域固有の情報の整備・流通

人間社会への影響は、地域固有の社会・経済条件に大きく左右される。それゆえ、影響の詳細な分析とそれに基づく適応策検討のためには、広域について面的に整備された人口・資産分布・土地利用などの社会・経済データに加えて、その他の地域固有の諸条件に関する情報が求められる。

地域固有の情報には、他地点との比較が容易に可能な定量的情報に限らず、例えば地域住民の過去の災害経験や伝統的対策の有無といった定性的情報も含まれる。適応策検討に関連しては、各地域での関係者会合等の記録や、地域行政計画といったものまで、有効に活用すべき情報とみなされる場合もあろう。

人口・資産などの定型的なデータに関しては、その収集・整理のフォーマットは自明であるが、上述のような定性的情報に関しては統一的・画一的なフォーマットの提案は困難であり、またデータの品質管理にも困難が伴う。それゆえ、既存の情報に関してもデジタル化されずに分散している傾向がある。しかし、地域固有の情報・経験を地域内で埋もれさせず、各地域間で共有しながらリスク評価・管理を進めていく必要があり、さらに工夫を重ねる必要があろう。

なお、前述の新シナリオ（6.4.3 参照）の開発計画でも、地域的なボトムアップシナリオの開発・共有が視野に入っている。現在までのところ、地域シナリオ開発の動きは活発であるとはいえないが、開発されたデータプロダクトについて情報共有できる場があることで、プロダクトの品質向上にもつながり、また開発の動きが活発化することが期待できる。

表 6-8 気候変動が産業、居住、社会に及ぼす現在の影響および将来予測される影響の例と、それらの影響とほかのプロセスとの相互作用の例 (Wilbanks *et al.*, 2007)。

気候変動がもたらす現象	現在の影響／脆弱性の証拠	その他のプロセス／ストレス	将来予測される影響／脆弱性	影響を受ける地域、集団
a) 極端現象の変化				
熱帯低気圧、高潮	洪水と風による犠牲者と損害；経済損失：輸送、観光、インフラ（例えばエネルギー、輸送）、保険（7.4.2；7.4.3；Box 7.3；7.5）	洪水のおきやすい地域の土地利用／人口密度；洪水防護；制度的能力	暴風雨が起きやすい地域の脆弱性の増大；居住、健康、観光、経済・輸送システム、建物、インフラに影響が及ぶ可能性	沿岸の地域、居住地および活動；能力および資源が限られた地域および人々；固定インフラ；保険部門
極端な降雨、河川洪水	侵食／地滑り；内陸洪水；居住地；輸送システム（7.4.2）（地域別の章を参照）	熱帯低気圧および高潮の項に同じ、加えて排水インフラ	熱帯低気圧および高潮の項に同じ、加えて排水インフラ	熱帯低気圧および高潮の項に同じ、加えて氾濫原
熱波または寒波	人間の健康への影響；社会の安定；エネルギー、水、その他のサービス（例えば、水や食料の備蓄）に対する需要、インフラ（例えば、エネルギー輸送）（7.2；Box 7.1；7.4.2.2；7.4.2.3）	建築設計と屋内の温度調節；社会的背景；制度的能力	一部の地域・住民の脆弱性の増大；健康への影響；エネルギー需要の変化	中緯度地域；高齢者、乳幼児、病人および／または非常に貧しい人々
干ばつ	水の利用可能量、生計；エネルギーの生成；移住；水域での輸送（7.4.2.2；7.4.2.3；7.4.2.5）	給水システム；水の利用を巡る競争；エネルギー需要；水需要の制約	影響を受ける地域の水資源問題；人口と経済活動の場の移動；給水への追加的投資	半乾燥・乾燥地域；貧困地域と貧困者；人為的理由による水不足の地域
b) 平均値の変化				
気温	エネルギー需要およびコスト；都市の大気質；永久凍土の融解；観光およびレクリエーション；小売消費；生計；融水の損失（7.4.2.1；7.4.2.2；7.4.2.4；7.4.2.5）	人口構成と経済の変化；土地利用の変化；技術革新；大気汚染；制度的能力	エネルギー需要のシフト；大気質の悪化；融水に依存している居住地と生計への影響；一部の地域において永久凍土融解による居住地／インフラへの脅威	適応能力と適応のための資源が比較的限られた場所と住民の、非常に多様であるが、より高い脆弱性
降雨	農業による生計；塩水の浸入；観光；水インフラ；エネルギー供給（7.4.2.1；7.4.2.2；7.4.2.3）	他の地域／部門との競争 水資源の割り当て	地域により、降雨量の増加の影響（例えば洪水。ただしよい影響になる場合もある）に対して脆弱な地域もあれば、減少の影響に対して脆弱な地域もある（上記干ばつを参照のこと）	貧しい地域と人々
塩水の浸入	水インフラへの影響（7.4.2.3）	地下水揚水のトレンド	沿岸地域での脆弱性増大	低平地沿岸地域、特に能力と資源が限られた地域
海面上昇	沿岸域の土地利用；洪水リスク、浸水；水インフラ（7.4.2.3；7.4.2.4）	沿岸域での開発、居住、土地利用のトレンド	低平地沿岸地域の脆弱性の長期的な増大	塩水の浸入の項に同じ
c) 急激な気候変動				
	可能性の分析	人口構成、経済、技術の変化；制度的発展	少なくとも短期間、世界の大半の場所、住民に多大な影響を及ぼす可能性がある	ほとんどの地域と集団

オレンジ色の部分は、一部の地域および／または部門で非常に著しいことを示す。黄色は著しいことを示す。白は重要性がそれほどはっきりとは立証されていないことを示す。

表6-9 地球規模のデータ・情報システム（社会経済データ）（WG 報告書第1号）。

データ・情報システム	実施機関 (支援機関)	概 要	データ種類	備 考
ASFIS(養殖, 漁業情報システム)1971～ Aquatic Science and Fisheries Information System	FAO, IOC, UN/D OA - LOS/OLA	養殖, 水産, 沿岸域, 海洋環境, 海洋学, 水質汚濁などの情報, 基準を提供	関連分野の文献情報 など	国, 地域レベルでは特定の 情報ニーズを把握して対処
AGRIS(農業科学技術情報システム)1974～ Agricultural Information System for Agricultural Science and Technology	FAO	国、国際機関等240機関より 農業関連データ収集	農学, 農業関連文献 情報	CD-ROMで利用可
CC:INFO(気候変動に関する情報交換システム) Information Exchange System on Country Activity on Climate Change	UNFCCC/UNEP	気象変動枠組条約に関する情 報交換を促進する各国の気候 変動に関する活動, プロジェ クトの策定支援	財政, 人間, 科学・技 術資源情報	
CDIAC(二酸化炭素情報分析センター)1982～ Carbon Dioxide Information Analysis Center	ORNL, アメリ カ	USDOEによる二酸化炭素研究 計画(CDRP)を支援するため に, 気候変動を含む大気中の CO2濃度上昇に關した国際研 究, 意思決定, 環境問題の評価 を支援するための情報提供	モデルパッケージ (CO ₂ モデル)と数値 のパッケージ	毎年CO2研究, 観測結果を集 約したTREND' 93等の出版
CIESIN(国際地球科学情報ネットワークコン ソーシアム)1989～ Consortium for International Earth Science Information Network	CIESIN事務局	地球環境変動の学際的研究の 推進, 地球, 社会, 健康に關する 情報源情報の整備	人口など社会経済 データと情報源情報	IHDP, GRIDなどとの協 力, NASA-EDSとの協力
EOSDIS(地球観測システム・データ情報システ ム) Earth Observing System - Data and Information Systems	NASA	NASAの地球科学研究, 衛星か ら得たデータの管理と学際的 研究の推進, 支援	各種衛星データ, 情 報源情報	USGCRPとNASA/GCDISの中核 的要素
EROS(EROSデータセンター) Earth Resources Observation and Science	USGS	USGSのデータ管理, 情報シス テム開発, 研究支援	AVHRRのデータアー カイブ, EOS-DISの分 散DBの一つ	GLIS(1991-), NASA, USAIDが 協力, UNEP/GRIDを支援
GCMD(地球変動マスターディレクトリ) Global Change Master Directory	NASA/GSFC	衛星観測および現地観測によ る気圏, 水圏, 岩石圏及び生命 圏に關するデータ及び情報の 収集と提供	情報源情報(メタ データ)の提供	CEOS-IDNの米国ノードの一 部, GCDISの一部を担う. 米 国環境変動研究(GCRP)に も参画
GED(地球生態系データベース)1990～ Global Ecosystem Database	NGDC	地球変動研究のための生態系 に係るデータを収集し、提供	全球・地域の環境・ 生態系に係るデータ	USGCRPを支援するために NGDC, EPAなどが協力して 作成
GRID(地球資源情報データベース)1985～ Global Resource Information Database	UNEP	GEMS等の収集, 加工したデー タの統合と, 研究者, 行政担当 者への提供など	全球メッシュデー タ, 地理情報デー タ	1991年5月にUNEP直轄のプ ロジェクトとなる
GRID-つくば1991～	国立環境研 究所地球環境 研究センター, つくば	GRIDデータ提供, 社会・経済 データの作成, データ処理技 術の開発と途上国への移転	GRID地球環境デー タ, 環境モニタリ ングデータ	CGER-地球環境データベー ス
GLIS(地球陸域情報システム) Global Land Information System	USGS/アメリ カ	USGSにより開発された地球表 面に關する数々の情報を提供 する対話型コンピューターシ ステム	土地利用, 土地被覆 と土壤データ, 植 生・地理データ, 衛 生データと航空デー タ	ディレクトリ, 利用ガイド, イベントリをもつ, 広域 ネットワーク
ISRIC(国際土壤照会情報センター)1966～ International Soil Reference Information Center	オランダ	世界, とくに開発途上国にお ける土壤資源に關する情報セ ンター, ICSUの土壤, 分類の WDC (ICSUの土壤に關する WDC-C)	土壤劣化図などの土 壤関連地図, 土壤関 連文献, 書籍等	ISRIC土壤情報システム
INFOTERRA(国際環境情報照会システム) International Referral System for Sources of Environmental Information	UNEP	環境情報源と専門機関情報の 交換を支援	環境情報源, 専門機 関情報	各国にフォーカスポイン と, 国際的な情報源ディレ クトリ, 世界環境専門ディ レクトリ
IPCC DDC (IPCCデータ配布センター) IPCC Data Distribution Center	IPCC	気候将来予測、影響評価、排 出シナリオの關する情報や知 見を提供	気候現状・予測、排 出シナリオ関連情報 など	IPCCの評価報告書の作成や 温暖化の予測、影響、対策 研究を促進するための情報 提供
IUC(条約情報ユニット) 1991(IUCC), IUC(1996 ～) Information Unit on Conventions	UNEP	環境関係の条約および協定な どの一般情報やメディアなど の提供	条約関連, COP関連の ドキュメント	UNFCCC, IPCCなどとも協力 関係
MARC(モニタリング評価研究センター)1975～ Monitoring and Assessment Research Center	UNEP	環境情報の収集, 蓄積, UNEPの 環境報告(EDR)を隔年に出 版	UNED/GEMSのモニ タリングデータの評価	WRI, UK, DoEと協力
MENRIS(山岳環境・自然資源情報サービス) Mountain Environment and Natural Resource Information Service	ICIMOD	ヒンドクシ・ヒマラヤ地域 の情報センター	山岳地GIS, リモセン データ, 定期報告 書, GISデータベース	ADB, UNEP/GRIDの支援によ る
WDC(世界資料センター)1957～ World Data Center	ICSU	地球関連の分野ごとのデータ を収集・提供		

表6-10 インターネットでアクセスできる4つの災害データベースの比較 (Gall *et al.*, 2009)。

	EM-DAT	NATHAN	SHELDUS	Storm Events
対象地域	全球	全球	US (グアム、プエルトリコ、 その他米領を除く)	US (米領含む)
空間解像度	国別	国別	州別	州別・地域別・予報 区域別
対象利用者	人道援助団体	保険産業	危機管理・危険緩和団体	気候・気象の専門家
損失の種類	負傷者数、死亡者数、被害者数、住 居損壊、保険支払被害、復興費用、 全被害	経済的損害、死亡者数	資産・作物への直接被害、負 傷者数、死亡者数	資産・作物への直接 被害、負傷者数、死 亡者数
データ収録 期間	1990 年- 現在	1811 年- 現在	1960 年- 現在	1950 年- 現在
データ報告 の時間遅れ	90 日	n/a	180 - 600 日	90 - 120 日
更新頻度	毎四半期	随時	毎年	毎月
収録データ 件数	>16000	>2600	>400000	>1000000 (推定)
収録の基準	10 人以上の死亡者、100 人以上の被 害者、非常事態宣言、国際援助要請	主たる自然災害	1960 年～1995 年: 50000 ドル 以上の作物・資産被害 1996 年以降: 1 ドル以上の被 害もしくは一人以上の死亡者	基準無し
アクセシビ リティ	ダウンロード (xls ファイル)	ネット閲覧	ダウンロード (txt ファイル)	ネット閲覧
データソー ス	国連機関、各国政府、赤十字、世銀、 再保険企業、AP 通信、他	MR NatCatSERVICE、各 国保険協会、各国気象 サービス	NCDC Storm Data, USGS	NWS、NCDC Storm Data、NOAA' s Storm Prediction Center
被害のタイ プ				
地滑り	○	○	○	
冬季の気象	○	○	○	○
熱波	○	○	○	○
旱ばつ	○	○	○	○
天候攪乱	○	○	○	○
強風害			○	○
洪水	○	○	○	○
竜巻	○	○	○	○
台風	○	○	○	○
火災	○	○	○	○
地震	○	○	○	
火山	○	○	○	
津波	○	○	○	○
技術的危害	○			
生物的危害	○			
DB の所有者	Center for Research on the Epidemiology of disaster, Catholic University of Louvain	Munich Re Group	Hazards and Vulnerability Research Institute, University of South Carolina	NCDC (NOAA)
URL	www.emdat.be	mrnathan.munichre.c om	www.sheldus.org	www4.ncdc.noaa.gov .cgi-win/wwwcgi.dll ?wwEvent~Storms

6.4.3 将来シナリオの整備と流通

6.3の冒頭でも触れたように、影響の将来予測のためには、影響評価モデルを準備し、そのモデルに気候・非気候因子の将来変化を与えて将来予測を実施する、モデルアプローチが一般的にとられる。人間社会への影響を予測するためには、想定する気候変化シナリオと整合性のある適切な社会・経済シナリオを置くことが重要であるが、実際に影響評価研究で社会・経済状況の変化に関するシナリオが積極的に考慮されるようになってきたのは最近になってからである。以下では、Carter *et al.* (2007)に基づいて、温暖化影響・適応評価研究における社会・経済シナリオの取り扱われ方の現況を整理した後、今後の整備・共有の改善に向けた取組みを提示する。

国際連合開発計画(UNDP)適応政策フレームワークの一部に、社会・経済状況分析のためのガイドライン(Malone and La Rovere, 2005)が含まれており、そこでは社会経済の状況と見込みを特徴描写するために5つのカテゴリー(人口、経済、天然資源の利用、ガバナンスと政策、および文化)の指標を使用することを推奨している。実際には、最近の研究のほとんどは、このうちの最初の2つのみに焦点を当てている。

影響・適応評価では、概して国別よりも空間詳細な情報を必要とするが、シナリオの多くがそれより広いスケールで開発されるため、集計的社会経済的シナリオ情報のダウンスケーリングを必要とする。例えば、SRESシナリオは、国スケールや、国より下位のスケールでの筋書きおよび定量的シナリオを開発するための土台として用いられてきている。対照的に、多地域や多分野における気候変動の影響および適応に関する評価(AIACC: Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change)の研究プログラムにおけるほとんどの地域研究は、主要な社会経済指標の現在のトレンドおよびステークホルダー間の協議を利用しながら、社会経済シナリオを開発するために、参加型アプローチを採用した。

定量的な社会経済情報をダウンスケールするための手法は、人口と国内総生産(GDP)に焦点が当てられてきた。人口増加のダウンスケーリングは、人口変化の割合が世界の全地域にわたって均一であるという非現実的な想定を時として行う初期の単純な運用を超えて発展してきている。新しい手法は、国レベルで異なる人口状況と展望を考慮している(Grübler *et al.*, 2006; van Vuuren *et al.*, 2007)。国より下位のレベルにダウンスケールする新しい手法には、沿岸域の優先的発展に対する単純な規則を適用(Nicholls, 2004)、地方の土地レベルでの最近のトレンドの外挿(Hachadoorian *et al.*, 2007)、都市部の優先的成長を招くアルゴリズム(Grübler *et al.*, 2006; Reginster and Rounsevell, 2006)などがある。

GDPのダウンスケーリング手法もまた発展しつつある。最初にダウンスケールされたSRESのGDPの想定は、当初状況や成長予想における各国固有の違いを考慮することなしに、同地域のすべての諸国に地域成長率を一律に適用した。新しい手法は、シナリオに応じて諸国間における収束の様々な度合いを想定する。これは、開発途上地域内の豊かな国についてもっともらしくない高成長率を回避する手法である(Grübler *et al.*, 2006; van Vuuren *et al.*, 2007)。GDPシナリオもまた、個々のグリッドセル内でのGDPの一定の割り当てを想定すること(Gaffin *et al.*, 2004; van Vuuren *et al.*, 2007)、または都市部と農村部で所得を区別するアルゴリズムを通じて(Grübler *et al.*, 2006)、国より下位のレベルまでダウンスケールされてきている。

技術変化に関するシナリオも重要度が高い。技術変化は、経済システムに対する外生的要因として扱われることもあり得るし、また経済的および政治的インセンティブによって内生的に駆動されることもあり得る。全球規模での分析においては、技術開発の速度と大きさは、多くの場合、エキスパートジャッジに基づいている。続いて、筋書きの想定が環境モデルの入力パラメーター(例えば、生態系、土地利用、または気候に関する)を修正するのに用いられ、その後モデルシミュレーションが実施される。そうしたアプローチは、技術変化への様々なシステムの相対的感度を示すのに役立つものの、技術の役割は依然として将来の特徴描写における主要な不確実性のままである。

将来の適応の代替的な経路の特徴描写には、限られた注意しか払われてきていない。シナリオに含まれた叙述的情報は、気候変動への潜在的な適応応答を特徴描写する際に役立ち得る。例えば、ヨーロッパに関して適応能力の決定要因とその指標が質問票調査を通じて特定されてきている(Schröter *et al.*, 2005b)。これらの指標と1960~2000年までの人口およびGDPとの実証的關係もまた構築され、適応能力のシナリオを導出するために、ダウンスケールされたSRESに基づくGDP予測と人口予測に適用された。SRESの筋書きはまた、ある研究では気候変動下での人間集団の将来の沿岸防護基準に基づいた沿岸洪水に対する曝露を推定するために(Nicholls, 2004)、また別の研究では下痢の発生率に関連する安全な水へのアクセスを推定するために(Hijioka *et al.*, 2002)、一人当たりGDPのシナリオを用いて解釈されてきている。農業分野に関しては、技術革新導入の代替的シナリオを用いて、気候変動への適応の速度が分析された(Easterling *et al.*, 2003)。

社会経済シナリオに関しては、個別の影響評価研究用にアドホックに作成して、利用後は埋没させるというのではなく、適切なメタデータの記述ルールを確立し、不確実性情報等も付与できる形でプロダクトを広く共有できる仕組みを作り出していくことが、影響予測研究の加速のためには重要であろう。なお、過去約10年にわたり温暖化研究の共通前提として用いられてきた社会経済と温室効果ガス排出の将来想定（SRES シナリオ）は、地域区分の粗さ、想定の実現との乖離等、最新研究での利用には不十分となってきた。IPCC-AR5 に集約される研究に資するよう、将来の社会・気候・自然の予測をするための統一的前提となる将来シナリオ（新シナリオ）の開発が進められつつある。新シナリオ開発プロセスにおいては、気候・影響・排出の各研究コミュニティが連携してシナリオの仕様検討・開発分担を行っており、最終的には気候・影響・排出の間で一貫性が維持された統合的シナリオの提示が期待されている。

6.5 まとめ

温暖化の影響は自然環境のみに現れるのではなく、人間環境にも現れる。自然環境への影響を検出するために長期・広域にわたる観測が必要なのと同様に、人間環境への影響の検出のためには社会・経済活動に関する「観測」とそのデータの蓄積が必要である。例えば、保険金支払額（自然災害）、作物収量（農業・食料）、救急搬送者数・疾病別死亡数（人間健康）などは、人間環境に対する温暖化影響の現れ方を検出するために必要な社会・経済データと言える。

一方、温暖化の影響は、気候条件のみでは決まらず、影響を受ける人間側の状況（気候変化への脆弱性）も大きく作用する。そのため、影響評価手法の開発・改良の観点から見ても、気候変化への脆弱性に関わる社会・経済データが必要となる。また、現実性を伴った影響予測のためには、現状の社会・経済状況を基礎として、それと整合した将来見通しについても用意する必要がある。例えば、人口、所得、資産分布、土地利用などは温暖化の人間環境への影響との関わりが特に深い基礎的な社会・経済データである。これらは、温暖化に対する脆弱性を特徴づけて影響被害の大小を左右する因子であると同時に、他方では現在から将来にわたり生ずる温暖化影響を直接的・間接的に受けて時間変化し得る要素でもある。特に、温暖化影響を軽減するための適応策の実施状況などは、明らかに影響の大小を左右するとともに、影響の発現（もしくは将来の発現への懸念）に対して反射的側面を持つ。

一般的には、人間環境への影響は、地域性の高い多様なメカニズム・社会条件を反映して生ずる。その影響を適切に評価して対応策を検討するためには、地域詳細な気候変化観測・予測情報の整備と同時に、各地域の特質を反映した社会・経済データの整備が重要となる。しかし現時点では、まだその取組みは明らかに不足している。多くの社会・経済データは温暖化問題での利用を想定して整備されてはおらず、その所在についても情報共有が不十分である。効果的・効率的な整備に向け、関係省庁間での情報交換・仕分け・連携を促進する必要がある。

社会経済データに関して、ワーキンググループ報告書第1号では、データ標準化と流通促進の観点に重点を置いて現状把握が行われ、緊急に取り組むべき課題の提言が行われた。ワーキンググループ報告書第1号で提言された課題は、本報告書の作成時点においても依然として重要であるため、ここで再掲する。

- ・社会経済データについては、情報源情報の収集促進、多様なデータの統合化と過去のデータのデジタル化、途上国におけるデータ利用の能力開発などが必要であり、各分野から得られた観測データと社会経済データを有効活用して、炭素循環などの現象解明、気候変動（現象や影響）のモデル化、影響の検出や監視、種々の適応策、緩和策の効果評価などに活用することが重要である。
- ・国際機関・各国機関が多種多様な情報・データを作製し、蓄積してデータベースを構築しているが、アメリカのマスターディレクトリなどがそれらの情報源情報を管理・検索するうえで重要な役割を果たしている。日本の情報についても、温暖化に限定した独自の情報源情報システム（利用促進の点から、日本語のシステム）が必要であるが、併せて情報源情報および情報・データをこうした国際的なディレクトリに登録して、活用を促進することも重要である。

加えて、本報告書では、影響検出・予測研究の現状把握を通じて、それらの研究の発展を促進することを目指す観点から、社会・経済データの整備についての課題検討をさらに進めた。本報告書では以下の事項が取り組むべき課題として新たに挙げられた。

6.5.1 社会・経済データの広域整備と空間情報化

人間社会への影響に関して、広域を対象とした包括的分析を実施し、その結果に基づいて特に脆弱な地域・分野を特定するような用途のためには、人口分布データについて典型的に実施されているように、広域をカバーした空間・地理情報としてデータが整備・提供されることが望ましい。気候情報や土壌情報などの自然科学的なデータに関しては、衛星観測データと地上観測データの組合せによって広域の比較的均質なデータの利用度が高まりつつある。人間社会への影響を分析する場合、自然科学的データと社会・経済データを統合・連関させる必要があり、社会・経済データについても空間・地理情報化されることで、分析に大幅な改善が見込まれる。

なお、対象とすべき社会・経済データは、過去から現在までの観測された統計情報に限らず、それとシームレスに接続する将来のシナリオまで含めて考えるべきである。

6.5.2 地域固有の情報の整備・流通

人間社会への影響は、地域固有の社会・経済条件に大きく左右される。それゆえ、影響の詳細な分析とそれに基づく適応策検討のためには、広域について面的に整備された人口等の社会・経済データに加えて、その他の地域固有の諸条件に関する情報が求められる。

地域固有の情報には、他地点との比較が容易に可能な定量的情報に限らず、例えば地域住民の過去の災害経験や伝統的対策の有無といった定性的情報も含まれる。適応策検討に関連しては、各地域での関係者会合等の記録や、地域行政計画といったものまで、有効に活用すべき情報とみなされる場合もある。

人口・資産などの定型的なデータに関しては、その収集・整理のフォーマットは自明であるが、定性的情報に関しては統一的・画一的なフォーマットの提案は困難であり、またデータの品質管理にも困難が伴う。それゆえ、既存の情報に関してもデジタル化されずに分散している傾向がある。しかし、地域固有の情報・経験を地域内で埋もれさせず、各地域間で共有しながらリスク評価・管理を進めていく必要があり、さらに工夫を重ねる必要がある。

6.5.3 将来シナリオの整備と流通

影響の将来予測のためには、影響評価モデルを準備し、そのモデルに気候・非気候因子の将来変化を与えて将来予測を実施する、モデルアプローチが一般的にとられる。人間社会への影響を予測するためには、想定する気候変化シナリオと整合性のある適切な社会・経済シナリオを置くことが重要であるが、実際に影響評価研究で社会・経済状況の変化に関するシナリオが積極的に考慮されるようになってきたのは最近になってからである。社会経済シナリオに関しては、個別の影響評価研究用にアドホックに作成して、利用後は埋没させるというのではなく、適切なメタデータの記述ルールを確立し、不確実性情報等も付与できる形でプロダクトを広く共有できる仕組みを作り出していくことが、影響予測研究の加速のためには重要であろう。

(高橋)

参考文献 (第6章)

地球温暖化観測における連携の促進を目指して－温室効果ガス・炭素循環および温暖化影響評価に係わる観測－
(地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第1号) 地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁、地球
温暖化観測推進ワーキンググループ。

Carter, T. R. et al., 2007 : New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions. Climate Change 2007:Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 133-171. (和訳: 高橋潔, 長谷川安代 訳, 2009: “気候変動2007: 影響, 適応と脆弱性”, 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第2章 新たな評価手法および将来状況の特徴描写, (独) 国立環境研究所 (<http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html> (参考日 2010/02/16)))

Confalonieri, U. et al., 2007 : Human health. Climate Change 2007:Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 391-431. (和訳: 小野雅司, 長谷川安代 訳, 2009: “気候変動2007: 影響, 適応と脆弱性”, 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第8章 人の健康, (独) 国立環境研究所 (<http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html> (参考日 2010/02/16)))

Easterling, W. E. et al., 2007 : Food, fibre and forest products. Climate Change 2007:Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273-313. (和訳: 増富祐司, 松久幸敬 訳, 2009: “気候変動2007: 影響, 適応と脆弱性”, 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第5章 食料, 繊維, 林産物, (独) 国立環境研究所 (<http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html> (参考日 2010/02/16)))

Easterling, W. E., N. Chhetri and X. Niu, 2003 : Improving the realism of modeling agronomic adaptation to climate change: simulating technological substitution. Climatic Change, **60**, 149-173.

Gaffin, S. R., C. Rosenzweig, X. Xing and G. Yetman, 2004 : Downscaling and geospatial gridding of socio-economic projections from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Global Environmental Change, **14**, 105-123.

Gall, M., K. A. Borden and S. L. Cutter, 2009 : When Do Losses Count?, Bulletin of American Meteorological Society, **90**, 799-809, DOI: 10.1175/2008BAMS2721.1.

Grübler, A. et al., 2006 : Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES. Technological Forecasting and Social Change, doi:10.1016/j.techfore.2006.05.023

Hachadoorian, L., S. R. Gaffin and R. Engleman, 2007 : Projecting a gridded population of the world using ratio methods of trend extrapolation. Human Population: The Demography and Geography of Homo Sapiens and their Implications for Biological Diversity, R. P. Cincotta, L. Gorenflo and D. Mageean, Eds., Springer-Verlag, Berlin, in press.

Hijioka, Y., K. Takahashi, Y. Matsuoka and H. Harasawa, 2002 : Impact of global warming on waterborne diseases. Journal of Japan Society on Water Environment, **25**, 647-652.

Malone, E. L. and E. L. La Rovere, 2005 : Assessing current and changing socioeconomic conditions. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Strategies, Policies and Measures, B. Lim, E. Spanger-Siegfried, I. Burton, E. Malone and S. Huq, Eds., Cambridge University Press, Cambridge and New York, 145-163.

Nicholls, R. J., 2004 : Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. Global Environmental Change, **14**, 69-86.

Nicholls, R. J. et al., 2007 : Coastal systems and low-lying areas. Climate Change 2007:Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356. (和訳: 山野博哉, 松久幸敬 訳, 2009: “気候変動2007: 影響、適応と脆弱性”, 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第6章 沿岸システムおよび低平地, (独) 国立環境研究所 (<http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html> (参考日 2010/02/16)))
- Reginster, I. and M. D. A. Rounsevell, 2006: Future scenarios of urban land use in Europe. *Environ. Plan. B*, **33**, 619-636.
- Rosenzweig, C. et al., 2007: Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131. (和訳: 野尻幸宏, 松久幸敬 訳, 2009: “気候変動2007: 影響、適応と脆弱性”, 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第1章 自然および人為システムにおける観測された変化と応答の評価, (独) 国立環境研究所 (<http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html> (参考日 2010/02/16)))
- Schröter, D. et al., 2005b: Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe, *Science*, **310**, 1333-1337.
- Van Vuuren, D. P., P. Lucas and H. Hilderink, 2007: Downscaling drivers of global environmental change scenarios: enabling use of the IPCC SRES scenarios at the national and grid level. *Global Environ. Change.*, **17**, 114-130.
- Wilbanks, T. J. et al., 2007: Industry, settlement and society. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 357-390. (和訳: 脇岡靖明, 松久幸敬 訳, 2009: “気候変動2007: 影響、適応と脆弱性”, 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第7章 産業, 居住, および社会, (独) 国立環境研究所 (<http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html> (参考日 2010/02/16)))

第IV部 地球温暖化観測に関する横断的課題

第7章 地上観測と衛星観測の統合に関する課題

7.1 はじめに

様々な要因が関係し合う地球規模の環境変化や温暖化の問題に対応するためには、適切な地球環境の診断（例えば観測と将来予測）と処方（例えば温暖化緩和・対応策）を持続的に実施する必要がある。また、その実施には、変化していく地球環境の実態や対策後の経過を社会に継続的に周知すると同時に、どのような対策をどのような優先度で行うべきかといった点についての社会的コンセンサスを形成することが重要である。そのためには、これまで各分野で推進されてきた研究の先進化という観点に加え、「地球環境という共通の対象に対して様々な手段を統合して長期的に診断する」といった観点に重きを置き、研究・教育の推進、観測手段や領域の選択を行うことが求められる。

この“様々な手段を統合”することとは、地上観測や衛星等によるリモートセンシングといった多分野の手法を、ある観測対象に対して集中的に適用し、得られた種々のデータセットに基づいて単独の手法では得られない総合的な理解や解釈を得ることである。地球環境は広範な科学・社会分野にまたがる様々な要因が複雑に関係しながら形成されるため、この統合的なアプローチ（統合的な観測と解析）が必須であると言える。しかし、これを実施するためには、現在は以下の(a)～(c)のようなギャップがある。

(a) 長期観測を支える観測リソースの不足

各分野の研究を先進化するという従来の観点では、新たな観測手法や新たな知識の取得に重点が置かれ、長期的モニタリングを支える観測システムのリソースは必ずしも十分ではなかった。しかし温暖化等の地球環境変動は数十年～数百年のスケールで起こるため、そのような長期的な変動を検出するには長期観測を前提としたシステムを構築することが必要不可欠である。長期観測システムを維持するために効果的な手段としては、長期観測への安定した人的・資金的支援を行うことが重要であるが、それに加えて、多分野で構築された既存の観測システムをネットワーク化し、各ネットワークの観測データの公開と観測サイトの共同利用を進める（多分野の観測を行うスーパーサイトとして整備する）ことが挙げられる。これによって既存の観測機能（設備・観測技術、人材、パラメーター・精度・時空間のカバレッジ）を最大限に活かすだけでなく、多分野の現場データや衛星データを統合的に解析することが可能となる。

(b) データ精度・相互利用性の問題

観測データを統合的に利用するためには、個々のデータが十分な精度を持つとともに、種々のデータを複合的に利用できること、十分な種類のパラメーターが観測されていること、データが広く利用可能な状態であることが必要である。このうち、データを複合的に利用可能にするためには、観測パラメーターの定義・測定法・測定機器の較正法などの標準化を進めることが不可欠であるが、現時点ではそれが十分に確立していない。特に、地球環境のような複合領域の観測に対しては、分野横断的な観点で観測パラメーターを網羅することが必要であるが、現実には各分野の観測者コミュニティがパラメーターの定義や測定項目の検討を個別に進めているのが現状である。データを広く利用可能にすることは、多くの研究者の参加をもたらすとともに、多くの目に触れることでデータ自体の信頼性が検証されるという点でも効果的である。そのためにはWeb等でのデータの公開と、利用に必要な補足情報の整備、適切でわかりやすいデータフォーマットを採用するといった考慮も求められる。

(c) 統合利用技術・人材の不足

地上および衛星観測のデータを有効に利用して気候や地球環境の変動を監視し、将来の変化を予測するためには、大気・海洋・陸域における水・エネルギー循環・炭素循環、雪氷や生態系の動態といった様々な分野の知見を統合する必要がある。この統合を実現するためには、様々なデータセットの特徴（観測データの定義や誤差・時空間カバレッジ・データフォーマットなど）を十分理解し、多量なデータを処理・解析し、統合的な観点でデータを解釈し、数値モデル等に知見を集約するといったデータの利用技術が必須である。さらに、衛星等のリモートセンシングデータと地上の現場データを、可視・赤外やマイクロ波の放射伝達過程を介して結びつけることができれば、さらに効果的に観測データを統合利用することも期待できる。これまでは、各研究分野を究めるための技術開発と人材育成が主であり、上記のような統合技術やそれを持つ人材が極端に不足している。今後統合的な観測・データ利用とそれによる地球環境の実態把握・予測を十分に進めていくためには、基礎科学に基づく広範な観点と専門的な深い知見を併せ持つ人材の育成に真剣に取り組むことが必要不可欠である。

現状の課題を抽出するうえで、地球温暖化の現象解明と影響評価に関する地上観測および衛星観測については、分野・手法・観測項目の数が膨大であるため、本報告書ですべての課題を網羅的に取り上げることはできない。そこで、本報告書の第1～5章で取り上げられた分野（雲・エアロゾル・放射、対流圏オゾン、水循環・雪氷・生態系への温暖化影響評価）において特に重要な課題であり、かつ、ほかの分野にとっても共通であるものについて抽出して議論する。

以下では、7.2で長期的な観測システムの構築・維持について、7.3でデータ精度・相互利用性の向上について、7.4で統合利用技術・人材の不足における現状の課題事例を記し、7.5でまとめと将来への展望を述べる。

7.2 長期的な統合観測システムの構築・維持

7.2.1 雲・エアロゾル観測と水循環・炭素循環・雪氷・生態系観測サイトの共同利用

SKYNETのような雲・エアロゾル・放射分野の観測ネットワークの観測項目には、統合地球水循環強化観測計画（CEOP）やAsiaFlux等の水循環・雪氷・生態系等の分野の観測ネットワークと同一の項目が含まれており、これらの観測サイトをできる限り重ねることにより、観測機能を効率化し、長期的にデータを相互利用する仕組みを促進することが可能になるはずである。SKYNETで推奨される観測項目は、地上における全天日射・大気放射（赤外放射）・気温・大気湿度・光学的厚さやエアロゾルのサイズ分布である。一方、水循環・雪氷・生態系影響評価の各分野の研究者が個々の研究課題として、または業務の一環として国内・海外に展開している熱・水収支観測やフラックスネットの多くの観測点でも、放射収支を含む基本的な気象観測を標準的に実施している。こうした現状を見ると、異なる分野の観測ネットワークの間で必要とされる観測項目が重複するケースが増加しており、複数の観測ネットワークがデータの相互利用や観測点の維持について協力することによって得られる相互支援効果が近年急速に高まってきたとすることができる。

例えば、我が国が主導してきた水循環に関する統合観測の多くはGEWEX アジアモンスーン実験計画（GAME）とCEOPの一部として、あるいはそれらの後継プロジェクトとして行われてきた。典型的な代表例の1つはCEOPによって現在も継続的に行われているチベット高原での観測である。チベット高原はアジアモンスーン水循環の大きな鍵を握る地域での観測であり、そこでの水循環が日本の気候の変動にも大きな影響を与えていると考えられる。しかし、文字通り人里離れた地域であるため水循環の観測は長い間空白域であった。1990年代に入り、GAMEでのチベット観測が始まって以来、数多くの地上水循環観測設備（例えば、雨量計・土壌水分計・超音波蒸発フラックス計測システム・降雨レーダー・ウィンドプロファイラなど）が設置・維持され、ネットワーク化が進められてきた。しかし、チベット域は広大であり、このような現地地上観測ネットワークをもってしても情報が得られる地域は限られている。そこで、衛星リモートセンシングを活用し、さらには衛星リモートセンシングデータを水循環数値モデルへと同化することによって、広域の水循環を推定することに成功している。例えば改良型高性能マイクロ波放射計（AMSR-E）を同化することによって、チベットにおける広域の土壌水分量や蒸発量の推定に成功している。類似の水循環統合観測は、タイのチャオプラヤ流域・インドネシア・モンゴル・シベリアなどでも行われており、それぞれ先進的な成果を挙げてきた。また、ベトナムやバングラデシュでの観測など、新たに始まりつつあるものもある。このようにすでにアジア諸国に展開され水循環や降水過程の研究に成果を挙げている観測プラットフォームについて、複数の研究分野におけるサイトの共同利用やデータ流通の促進をはかることにより、観測点の維持やデータの統合的解析についていっそうの相互支援効果を期待することが可能である。

一方、FLUXNETおよびAsiaFluxに参加する多くの観測サイトは、最初から長期連続観測を前提として設置されたサイトが多く、熱・水・CO₂フラックスに加えて全天日射・赤外放射・光合成有効放射量の収支（入射・反射・植物群落における透過）に関する長期データが比較的安定に収集されている（図7-1）。さらに、生態系影響評価の分野では、光合成の推定に重要な直達／散乱日射および分光放射観測、全天カメラを用いた雲や植生の画像データ取得、およびエアロゾル光学特性の観測などが長期的に行われるケースも増えている（図7-2、図7-3）。そこで、近年ではスカイラジオメーターを有するAsiaFluxのいくつかの観測サイトがSKYNETに参加し、雲・エアロゾル・放射観測分野と連携しようとする取組みが始まっている。これらのサイトではSKYNETで標準化されたデータを公開すると同時に、様々な生態系の機能を同一観測点で実測することにより、地上・衛星観測を用いた生態系機能の広域評価を高精度で実現するための研究を目指している。こうした共同利用サイトにおいて、大気の大波長放射量観測に加え、ある空間スケール（例えば、500m×500m、1km×1kmなど）における代表的な地表面反射率の地上計測や、あるいはサイト周辺の土地被覆とそれに対応する地表面反射率データの整備が

進めば、これまで衛星からの地表と大気情報の分離（大気補正）が難しかった陸上についても、新たなアルゴリズム開発や大幅な精度向上が可能になるはずである。そのためには、地上観測ネットワークを意識的に重複させることによって、これまで気象学・水文学・農学・林学といった異なる分野でばらばらに行われていた陸面放射率計測の相互連携とデータの相互利用を推進することが効率的である。

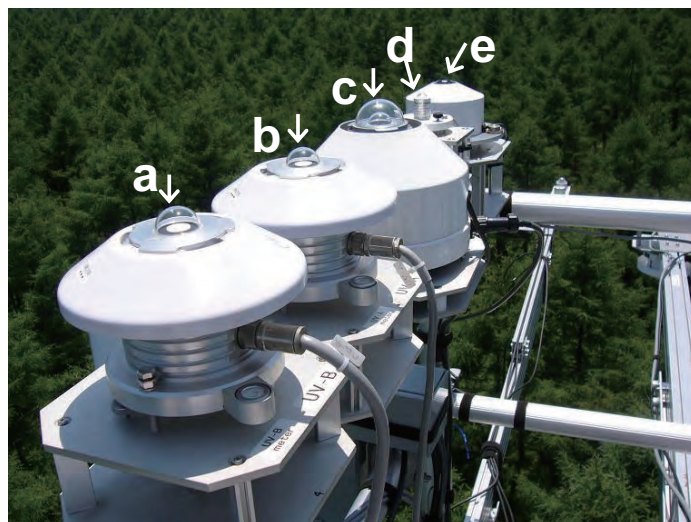


図 7-1 (独)国立環境研究所富士北麓フラックスリサーチサイトに設置された各種放射計。
a: B 領域紫外放射計、b: A 領域紫外放射計、c: 全天日射計、d: 光量子計、e: 光量子計。



図 7-2 直達・散乱成分を分離するシャドウバンドを設置した分光放射計
(f: シャドウバンド、g: 分光放射計) (富士北麓サイト)。



図7-3 タワー上に設置されたスカイラジオメーター（協力 産業技術総合研究所）（富士北麓サイト）。

7.2.2 大気化学観測と水循環・炭素循環・雪氷・生態系観測サイトの共同利用

対流圏オゾン濃度については、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）の一部・世界気象機関全球大気監視（WMO/GAW）・EMEPといった地上観測ネットワークにおいて観測されている。近年では、衛星観測による対流圏オゾンのカラム密度の推定や、アジア地域における領域化学輸送モデルの開発が進み、対流圏オゾンの濃度変動のメカニズム解明に貢献している。これらの対流圏大気化学に関する地上観測ネットワークと水循環・炭素循環・雪氷・生態系観測の拠点を共同利用し、データの相互利用を促進することが有効である。

特に、対流圏オゾンをはじめとした光化学オキシダントの前駆物質である窒素酸化物（NOX）や揮発性有機化合物（VOC）については、人為起源だけではなく陸上生態系に起源をもつものも多く含まれている。そこで、陸域生態系起源のVOC等の発生過程の解明、および発生量推定に含まれる不確実性の低減を目指して、森林・草原・農耕地・湿地等の様々な生態系に設置された水循環や生態系の観測点において、微気象学的方法やチャンバー等を用いた方法により、NOXやVOCの動態を観測する取組みが進められている。これらの観測は、CH₄やN₂O等の温室効果ガスとして重要な物質の発生量を推定する取組みの一環でもある。現在のところ、NOXやVOCの発生量を無人で長期連続観測することは困難と考えられているが、今後こうした取組みによって新規観測技術の開発が進み、CO₂以外の微量気体の収支についても長期連続観測のネットワーク構築が可能になれば、対流圏オゾン濃度の推定や長距離輸送量の推定精度向上に大きく貢献することが期待される。

さらに、2009年1月には本格的な温室効果ガス観測衛星である温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）が打ち上げられ、CO₂やCH₄のカラム濃度の全球分布が高頻度で観測されるようになった。そのデータの蓄積が進み、地上観測や航空機観測等との比較によってデータの検証と精度向上が進めば、気候の変化による陸域生態系の炭素収支変化を地球規模で定量的に評価できることが期待される。

7.2.3 日本およびアジア・ユーラシア地域における分野間連携スーパーサイトの整備

日本およびアジアの気象や生態系、人間社会への地球温暖化の影響を評価するためには、地球表層における雪氷域や各種生態系を介したエネルギー循環・水循環・炭素循環等の変動を正確に把握し、予測することが必要である。同時に気候変動に伴う雪氷や生態系のフィードバックを長期観測によって確認し、その観測データをもとにして将来予測の精度向上を図ることが是非とも必要である。

こうした課題を解決するために必要な取組みの1つが、大気・水循環・炭素循環・雪氷に加え、生態系および生物多様性に関する観測、衛星地上検証のための観測等を総合的かつ長期的に行う観測点もしくはある広がり

もつエリア（スーパーサイトと呼ぶ：図7-4）を、日本およびアジア・ユーラシア地域に整備することである。ここでいうスーパーサイトとは、例えば、複数の研究分野がカバーする様々な項目の観測を同時に同一地点で行うサイト、1つの研究機関のみならず国内外の複数の研究機関・大学などが観測に参加できる施設であって総合的な共同観測研究を進めていく拠点となるサイトなどである。

このようなスーパーサイトは、すでに一部の地域で構築が進められている。例えば、ある地域（または流域）を対象として、一般気象観測、大気化学観測、陸域炭素・水収支観測、生物多様性観測、リモートセンシングと融合した広域評価などを同時に進めるサイトであり、国内では JapanFlux・日本長期生態学研究ネットワーク（JaLTER）・（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）・（独）海洋研究開発機構（JAMSTEC）が協力して推進する、地上・衛星観測に基づく多スケールでの総合的な長期生態系観測の構想などが挙げられる（1つの例を図7-5に示す）。国外においては、アジアモンスーン水循環と降水過程をターゲットとし、地上・衛星観測、水循環モデルへのデータ同化のシステムを含む水循環統合観測サイト、東アジア域の広域大気環境を監視するための観測ネットワークとその総合的観測サイトなどが挙げられるだろう。こうした分野間連携のスーパーサイトを拠点として、多分野の統合的なデータの取得・研究連携の促進・統合利用技術の向上と、それを担う人材の育成を促進することが期待される。

日本およびアジア・ユーラシア地域において、衛星観測を十分に活用し得る統合観測プロジェクトを行うことは、大いなる科学的な発展をもたらす可能性があるだけでなく、観測データや観測サイトが新たな社会的な利用価値を創造する可能性を秘めている。例えば、各府省や研究機関による観測ネットワークや様々な衛星観測データなどを統合的に用いることによって、日本域をスーパーサイト（エリア）とした統合観測も可能であるはずである。また、地球温暖化が世界政治の最優先のトピックである今、このようなスーパーサイトをアジア等の発展途上国に設置し育成すれば、発展途上国における有力な地球温暖化適応策支援の1つとなると考えられる。

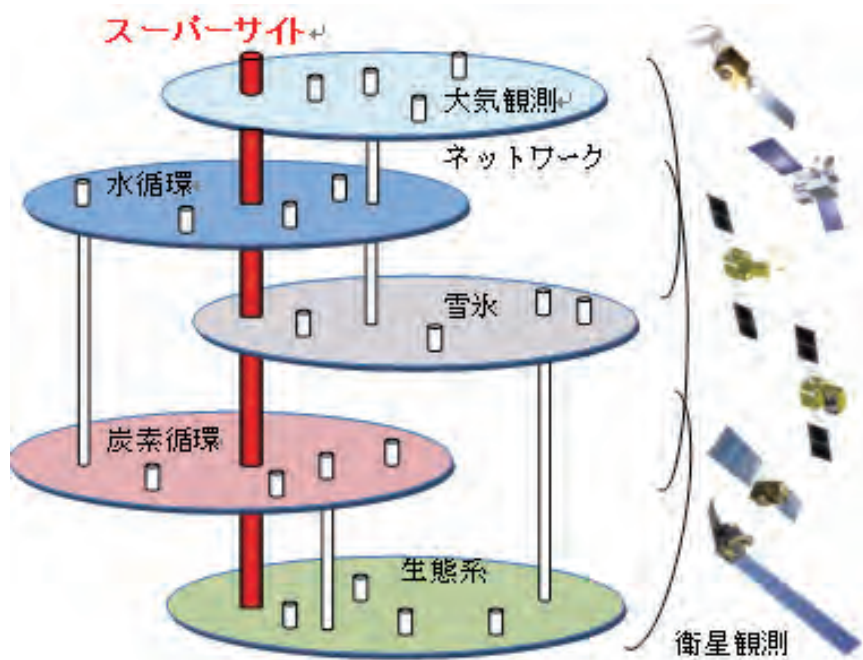


図7-4 複数の観測ネットワークが重なる地点で様々な分野の観測を行うスーパーサイトの概念図。

高山スーパーサイト（長期・複合的観測拠点）

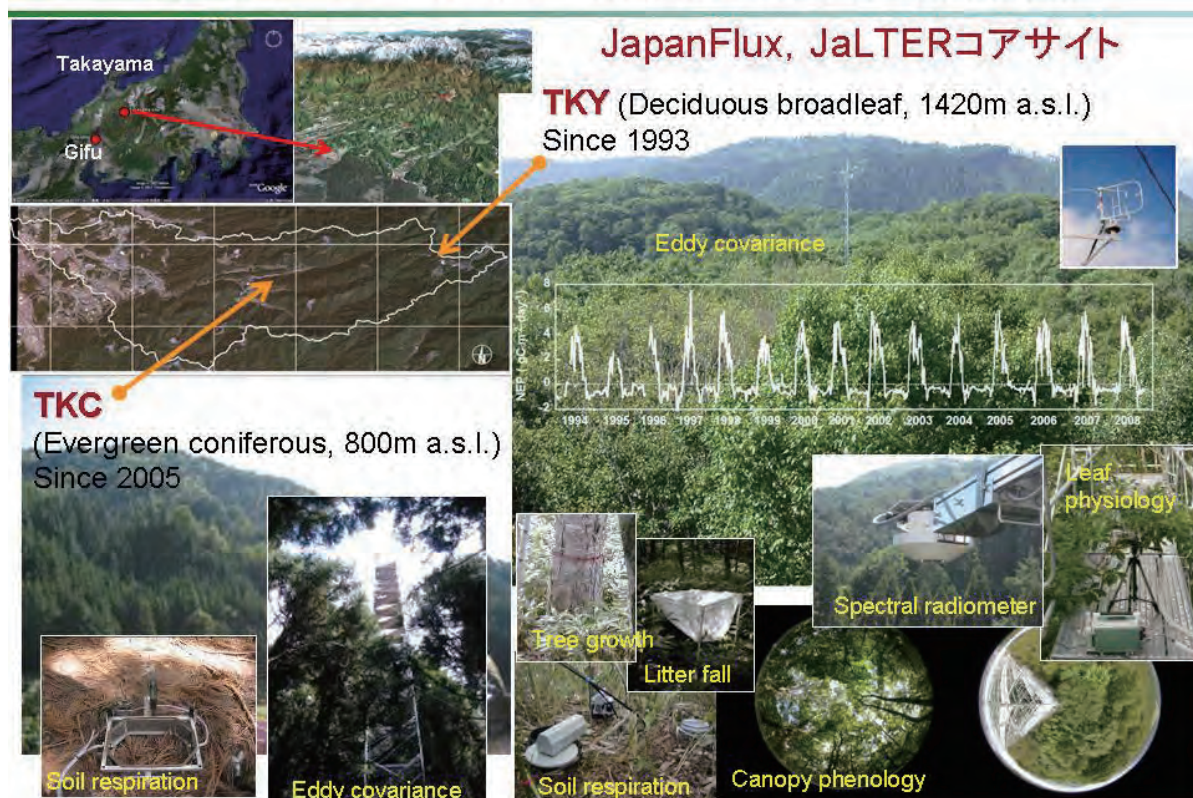


図 7-5 陸域炭素循環観測、生態系観測、衛星リモートセンシングの分野間連携によるスーパーサイトの例（岐阜県、高山サイト）（岐阜大学提供）。

7.2.4 長期継続を前提とした衛星ミッションの構築

従来の衛星ミッションは気象衛星を除き宇宙技術の開発が主目的とされてきており、地球観測衛星も同様であった。しかし、地球温暖化や環境変動が社会の主要課題となる昨今の情勢において、地球全体を観測し得る衛星観測ミッションは、その課題に対する手段の1つとして捉えられ、長期的な地球環境監視の観点で整備されるべきである。現在運用されている日本の衛星・センサーは、陸域の高解像度観測を行う陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）やセンサー（ASTER：Terra 衛星搭載）、大気中の温室効果ガスを観測する温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）、降水と水循環を観測するセンサー（衛星搭載降雨レーダー（PR：TRMM 衛星搭載）や改良型高性能マイクロ波放射計（AMSR-E：Aqua 衛星搭載）などがあり、今後、水循環においては水循環変動観測衛星（GCOM-W）、広域の雲・エアロゾル・植生観測では気候変動観測衛星（GCOM-C）等で10年以上の観測継続を目指して計画が進んでいるが、現時点では必ずしも継続機の開発や運用が保障されているわけではない。今からは、地球を長期監視・診断するという観点で、新規の観測技術開発と長期の継続観測のバランスを考えた開発・研究を進めることが強く望まれる。

7.3 データ精度・相互利用性の向上

7.3.1 大気・放射収支および分野共通の課題

地表面と大気の放射収支を地上観測と衛星観測に基づいて高い精度で広域推定することは、地球全体のエネルギーや水の循環を正確に評価し将来の気候変化を予測するためにも、また陸上植生や海洋の光合成等の炭素循環プロセスを把握するうえでも、最も基本的かつ最重要の課題である。従って、放射観測に関する雲・エアロゾル観測分野の課題は、同時に、水循環・雪氷・生態系に対する温暖化影響評価分野と密接に共有される課題である。

衛星データから地表面と大気の放射収支に関する各種パラメーターを推定し、地上でそれらを同時に観測して比較検証することにより、衛星観測手法の高精度化を進めることができる。この考え方はどの分野においても共通である。こうした地上検証を多地点で行うため、雲・エアロゾル・放射分野では気エアロゾル観測ネットワーク (AERONET)、SKYNET、WMO/GAW、基準地上放射観測網 (BSRN) 等の地上観測ネットワークが構築されている。

(1) 波長別放射観測機器の校正手法確立に関する課題

放射観測の地上観測ネットワークが抱える課題のうち、分野間共通の最重要課題として、各種放射観測機器の校正に関する問題を挙げることができる。例えば、全天日射量・赤外放射量の基準 (校正手法) は WMO や気象庁によりほぼ確立されているが、紫外放射・光合成有効放射・分光放射等の観測については国際基準が確立されていない。一方、最近の衛星観測ではより多くの波長を利用する観測が増えてきていることから、アルゴリズムの開発や校正・検証の観点からも、波長別放射観測の精度検証の重要性が増している。地球温暖化に関わる放射収支の長期変動を高精度で監視し、衛星による広域量推定の開発・検証に利用するため、気象庁、経済産業省、環境省その他の各機関が、国際基準も考慮しながらこの課題に積極的に取り組み、波長別放射量観測の校正システムを早急に確立することを強く期待する。

(2) 現場観測の長期的な品質管理に関する課題

地上観測においては、放射収支の観測も、水循環・雪氷・生態系影響評価の分野でも、観測現場で定期的かつ適切な機器のメンテナンスを長期的に継続することは容易なことではない。研究活動の一環としてデータを収集している観測点では、人的・予算的な理由からメンテナンスの頻度や内容について制限を受ける場合がある。また、研究期間の終了とともに適切なメンテナンスが実施できなくなる場合もある。特に海外の観測点では、メンテナンスの頻度と内容がしばしばデータの品質を左右する重要な要因になることがある。このため、各種のネットワークがばらばらに観測点を展開して維持管理を行うより、複数のネットワークができる限り情報を共有し、協力して観測点の適正配置の検討を行い、長期観測を行う拠点を可能な限り重ねていく方が効率的である。こうした分野間連携の結果、複数のネットワークによって総合的な観測を行う拠点を確保し、良質のメンテナンスを長期間継続し、データを共同利用する仕組みを作る取り組みを早期に開始することが望まれる。

(3) 衛星観測の長期的な品質管理に関する課題

衛星観測では、衛星やそのセンサーの寿命は一般に3~7年程度であり、気候変動のような長期変動の監視・評価に利用するためには、複数の衛星センサーを途切れることなく運用し、その間のセンサー感度時間変動の補正や複数の衛星センサー間の相互校正することが必須である。衛星光学センサーの校正には、一般に衛星搭載の校正源が用いられるが、校正源の軌道上変化の課題があり、地上観測データを利用した校正 (代替校正) と併せて精度評価することが重要となる。一般に代替校正では、衛星・地上放射量観測データの比較や、衛星・地上それぞれから二次的に推定されたエアロゾル量などのデータの比較を行う。この場合、校正手法の間で一貫した結果を得るためには、衛星と地上放射量観測測器が同じ校正基準で校正されていることが重要である。

7.3.2 雪氷分野のデータ精度の向上と新たなパラメーターの推定

積雪情報は、冬季の積雪下の土壌面温度や植生に影響するとともに、融解水として水文に、さらにその後の地面の湿潤・乾燥状態とつながっていく重要な要素である。衛星による積雪観測は積雪域の面的な分布と積雪水量の分布の2つがあるが、両者とも植生被覆が観測の妨げとなって精度の低下の原因となっている。マイクロ波放射計による観測では積雪面積だけでなく積雪水量を観測することが可能であるが、植生があると積雪水量は過小に見積もられ、逆にツンドラなどでは過大に見積もられる誤差が発生している。森林の分布の影響を補正することが衛星による積雪観測にとって重要である。補正するための植生情報として、植生指標である NDVI や LAI、さらに木の種類などといった情報がこれまで用いられてきた。さらに斜面の傾斜や向きなどの地形も観測に影響する。

衛星による積雪分布観測の精度向上には、これら植生被覆の影響を補正することが重要である。さらに地面が低温または凍結しているときもマイクロ波観測では積雪と似たシグナルを観測してしまう。降水などの気象の影響もある。この改善のためには、これらの環境下における雪氷域におけるリモートセンシングで使われる電磁波の放射伝達過程の研究が重要である。

雪氷圏の観測の一部である凍土の観測においては、正確な地形情報があることが有効である。リモートセンシングデータの積極的な利用として、マイクロ波衛星データと数値モデルを組み合わせた表層土壌の凍結融解の推定、近年の高精度 DEM と過去の画像の比較による凍土融解に伴う地形変化の把握、重力観測衛星 GRACE による凍

土氷量変化のモニタリングなどが挙げられる。GRACE による凍土の観測の際には、積雪、地下水などの質量変化の補正を行う。

時間・空間変化が急速な雪氷圏においては、衛星によるリアルタイムモニターが有効である。このためには衛星データそのものの公開とともに、検証に使える現場データが取得されているかが適時チェックされていることが望ましい。その基本観測点での比較地表情報として、気象や積雪に関する自動観測装置の開発と使用が望まれている。

複数の衛星を使って全地球の降水（降雨・降雪）を高精度かつ高頻度に観測する全球降水観測（GPM）が計画されている。観測域は北緯および南緯約 68 度より低緯度側に限られるため、全球雪氷圏を網羅する範囲ではないものの、広域雪氷圏の観測が可能になる。例えばシベリア、アラスカの南半分が十分観測範囲に入る。ほかの衛星観測である GCOM-W および GCOM-C の衛星活用による高精度積雪把握とともに、GPM による高精度降雪把握という、積雪と降雪の両方の観測は画期的である。しかし、地表での検証観測サイトはやはり不可欠である。降雪、積雪特性の違う地域、森林域と平原、ツンドラなどに展開した観測点が重要である。

以上の課題を考慮し、リモートセンシングによる研究と地上観測施設のデータを利用した多分野連携体制を構築することにより、アルゴリズム開発・検証・改良を推進することができると考えられる。

7.3.3 生態系・水循環・雪氷分野における特に改善の必要のある観測項目

(1) 広域化のための多スケールでの土地被覆推定

各種の現場観測によって得られた知見から、衛星観測を利用して大陸規模・全球規模で広域評価するために土地被覆を高精度で把握すること必要不可欠である。これまでに開発されてきた各種の土地被覆推定の精度を大幅に向上し、高い分解能で、かつ長期連続的に土地被覆の変化を把握するためには、高性能可視赤外放射計 2 型（AVNIR-2）のような 10m スケールの衛星センサーと、中分解能分光放射計（MODIS）や多波長光学放射計（SGLI）のような数 100m～1km スケールの全球観測センサーを段階的に利用し、現場観測周辺の土地被覆とそれを全球規模に広げるための、より広域の土地被覆の推定を行うことが効果的である。

同時に、衛星土地被覆推定アルゴリズムの開発と精度向上には現場による検証データ（被覆状態や光学特性の観測）が重要である。土地被覆データは、しばしば衛星処理アルゴリズムや数値モデルの中で、植生や熱収支過程のパラメーターを領域ごとに決める条件として用いられるが、このパラメーターの切り替えと被覆分類の分け方は常に整合していなければならない。そのために、分類結果だけでなく分類を導く過程で利用された地表面の特性情報（植生や光学特性等）が同時に整備され、様々な分類結果の相互関係がトレースできるようになっていることが望ましい。

しかし、土地被覆推定結果の検証を、全球規模で正確に、かつ継続的に行う仕組みは、今のところ適切なものが存在しないと言わざるを得ない。近年では、Degree Confluence Project（整数の緯度経度の交点を訪問し、その場の状態を画像と文章で記録するボランティアベースのプロジェクト）⁵⁸ のような活動と連携して、全球規模で土地被覆の検証を行う研究も行われており、こうした研究の発展が期待される。

一方、あえて国内に限って高精度の検証データを長期連続的に収集する仕組みを作り、それらのデータに基づき次世代の土地被覆推定手法を集中的に構築するという戦略もあり得る。その場合、他の諸国（地域）には追従することのできない高精度の検証データを長期的に整備することを目指すべきである。例えば、高精度かつ長期連続的な土地被覆検証データを取得するため、高い空間分解能で国内に定点カメラ等を設置し、それらの画像を系統的に収集・解析する手法を開発することにより、国内の土地被覆の変化を長期モニタリングする取組みも効果的であろう。今後は、環境省をはじめ各機関の有する植生データ、土地被覆データ等を最大限活用のうえ、土地被覆推定結果を長期継続的に検証するための新規的手法に基づく計画を策定し、実現に向けた取組みを開始することが望まれる。

(2) 陸上植生の葉面積指数とバイオマスの推定

LAI とバイオマス（現存量）は、光合成・蒸散量・遮断蒸発等の推定に必要不可欠であることから、水循環と生態系分野では言うまでもなく重要な項目である。一方、雪氷分野においても、現状では難しい森林地帯の林床の積雪や積雪深の推定といった新しい課題を克服するために重要な項目である。

1980 年代より、衛星観測によって LAI の季節変化パターンに関する情報が得られることはわかっていたが、

⁵⁸ <http://www.confluence.org/>（参照日：2010/02/16）

地上での葉面積の実測との詳細な比較検証が行われるようになったのは2000年以降である。地上での各種植生におけるLAIやバイオマスの計測は、生物学、農学、林学などの様々な分野の研究者により行われており、様々な手法・精度のものを合わせれば膨大なデータが存在する。しかし、地球観測に寄与する長期連続観測としてのデータが、衛星観測のフットプリントに合った空間スケールの代表値として得られており、多点比較を可能にする標準化に準拠している観測点という条件を課すと、それを満足する観測点は極めて限られていると言わざるを得ない。今後は、既存の単独の観測点のデータ、各種機関の所有するデータを収集・公開する仕組みをつくることに加え、JaLTER・モニタリングサイト1000・PlotNetをはじめとする各種生態系観測ネットワークが衛星観測との連携を強化することにより、地球観測に寄与する生態系の基礎データを長期にわたって安定供給することのできる仕組みを確立することが強く求められる。

(3) 降水量や積雪深の推定

水循環・雪氷・生態系影響評価分野の共通の項目として降水量や積雪深の高精度化が重要な課題である。例えば、地球温暖化が陸域の土壌水分量・降水量・積雪深・蒸発散量・地下水位等に与える影響の検出は水循環分野がカバーするが、これらは同時に雪氷分野、生態系分野の影響評価にも必要不可欠な項目であり、データを分野間で共同利用することによって大きな相互支援効果を生む。

水循環分野で開発されているマイクロ波放射計を使った降水量推定には近年大きな進展があったものの、陸域においてはまだ精度向上が必要である。また、温暖化影響評価には積雪深、積雪量、積雪面積等の広域かつ長期的な観測データが必要不可欠であるが、現在のところ特に積雪深や植生地における林床の積雪面積を衛星観測で正確に求めることはいまだ困難である。そこで、例えば各種生態系のネットワークで観測されている植生地の積雪関連のデータを共同利用したり、植生の影響を受けた積雪の評価精度向上のための地表面光学モデルの技術開発を共同で行うことにより、温暖化影響評価の重要指標としての積雪関連のデータの利用可能性を大きく向上することに貢献することが期待できる。

以上のような取組みにより、温暖化影響下での水循環・雪氷・生態系の様々な機能の変化とフィードバックを実測によって検出することができ、それによって地球規模での気候変化予測の精度を向上させることができる。また、こうした観測データは、生物多様性や生態系サービスの脆弱性の新たな評価軸の構築にも貢献する。

(4) 光化学オキシダントの前駆物質 (NO_x や VOC) の推定

領域化学輸送モデルを用いた輸送過程や濃度変動の推定精度向上を図るために、光化学オキシダントの前駆物質に関する地上観測データや、日本およびアジア地域での前駆物質の発生量推定、モデルの計算結果を地上観測データに基づいて検証する手法の開発等が必要とされている。特に、NO_x や VOC 等の微量気体の収支についても将来長期連続観測のネットワーク構築が可能になれば、対流圏オゾン濃度の推定や数値モデルによる長距離輸送量の推定精度向上に大きく貢献することが期待される。

7.4 統合利用技術の向上と人材の育成

7.4.1 統合利用技術の向上

個々の観測技術の向上や利用可能な観測パラメーターの増加だけでは、目的とする温暖化・地球環境変動の解明に到達することはできない。それらを有効に統合利用する技術と、観測および技術開発を長期間支える人材が不可欠である。例えば、前述の多分野観測サイトにおいて地表直達光・散乱光・分光観測（各波長・方向性・偏光等）、地表植生等の透過光・反射光観測、それに関わる気象・生物要素の観測、衛星による鉛直プロファイル観測・広域観測・分光観測等の様々な手段による観測が整備できた場合、そこから十分な情報を得るためには、各分野のデータを効果的に組み合わせ、エアロゾルの発生・成長・消失、雲の形成、地表・生態系とエアロゾルの関わりや放射強制力のフィードバック等の理解へ繋げるための利用技術を確立させておく必要がある。特に、観測対象物の放射伝達過程は、衛星観測と現場観測をより直接的に統合するための効果的な手段であり、放射過程の研究やその応用技術を向上させることが重要である。

様々な知見を統合する手段の1つとして数値モデルがある。これまで大気・大気化学・海洋・陸域生態系等でそれぞれ発展してきたモデルが気候モデルの一部として融合し、将来の地球環境変動予測に利用されてきている。特に地表面・水中・大気の放射伝達と現場観測パラメーターを結びつけることによって、リモートセンシングによる多量の情報を、より直接的に数値モデルに取り込むことが可能となる。

7.4.2 人材の育成

今後さらに複雑化するこれらのモデルを正しく活用・理解し、長期観測データを用いて将来にわたって改善を続けていくためには、地球環境に対する広範な知見と深い洞察力を持つ人材が必要不可欠である。これらの必要な能力は、数学・物理学といった基礎学問の上に成り立つものであり、地球環境のような複雑な対象が重要になる昨今こそ基礎学力を着実に教育することが大学（教養・学部期間）に必要とされている。

地上・衛星による多分野の観測を行うスーパーサイトは、多分野の知見が集約される拠点ともなり、統合観測を支える人材の育成に最適な場となる。研究をリードするエキスパートだけでなく、次世代を担う学生や若手研究者をスーパーサイトや分野間連携サイトへ積極的に参加させるような枠組みが是非必要である。

また、衛星観測推進のワークショップなどの研究情報の交換や将来計画への提言、若手研究者への指導の検討会などの機会も十分とは言えない。観測技術とともに研究者の将来展望や解析技術を向上・維持するためには、基礎科学に基づく広範な観点による教育に加え、研究交流のワークショップやトレーニングセミナーを増やすことが必要である。

7.5 まとめと今後の展望

7.5.1 地上と衛星観測の統合における課題

(1) 長期安定した観測の運用

○日本およびアジア・ユーラシア地域における総合的かつ長期的に行う現場観測拠点の整備

地球環境の観測には長期安定した運用と精度管理が必要である。長期観測の観点からの観測システムの強化・維持の必要性は言うまでもないが、多くの場合現場観測サイトの人的・資金のリソースが限られていることから、水循環・炭素循環・雪氷・生態系・大気化学・衛星校正検証サイト等の複数の観測ネットワークを共同利用することによって、効果的に観測サイトを設置・維持することが効果的である。また、取得された観測データの相互利用、分野共通的な観点でのサイトの適正配置や衛星センサー選定、衛星-現場比較のためのサイト周辺の被覆情報の整備を推進し、その価値を高めていくことが必要である。

(2) データの精度向上と相互利用性の向上

○複数世代の衛星センサーの継続運用と世代間相互校正

地球環境変動の監視や過程の研究のためには、衛星センサーも長期に継続して運用することが必要である。また、1機3〜7年程度の寿命の衛星センサーを長期的につないで利用するためには、地上観測データを含めた複数の手段により、異なる世代間の測器を精度よく相互校正することが必須である。

○波長別放射量観測の校正システムの確立

現場観測による物理・生物・化学量とリモートセンシングデータの統一的な理解には、衛星で用いられる各波長での放射量を現場でも観測し、観測対象物の放射伝達過程をモデル化することが必須である。しかし地上の波長別放射量観測の精度維持に現在課題があることから、今後校正手段・体制を整えることが必要である。また種々のデータを複合的に利用するためには、衛星測器と地上放射量観測測器を同じ校正基準によって校正することが重要である。

○温暖化予測・環境影響評価において、現在特に以下のようなパラメーターの観測技術の改善が必要である

- ・土地被覆分類（モデルでのパラメーターを切り替える基準として利用）
- ・LAI（蒸発散や光合成過程で利用）
- ・バイオマス（現存量）（炭素固定量や燃焼・利用による炭素放出で利用）
- ・降水量と積雪深（水循環や植生ストレス、アルベド、乾燥（火災危険度）等で利用）
- ・NO_x や VOC（対流圏オゾン濃度の推定や長距離輸送量の推定精度向上に利用）

(3) 地上・衛星観測の効果的な複合利用技術の確立と人材育成

○地表面と大気の放射伝達過程についての理解の向上

観測対象物の放射伝達過程は、衛星観測と現場観測をより直接的に統合するための効果的な手段であり、開発を推進する必要がある。このためには、現場の物理・生物・化学量の計測と、地表・大気の光学観測（各波長の反射率・方向性・偏光等）を併せて実施することが効果的である。また、この放射伝達過程をモデルに取り込むことで、衛星観測の直接の情報（観測輝度）を気候モデルへ同化することにつながると期待される。

○統合的な環境監視やモデル研究における分野間の連携の推進

現場・衛星観測データを有効利用して気候や地球環境の変動を監視し、モデル化するためには、水循環・炭

素循環・雪氷・生態系・大気化学といった様々な分野の知見を統合する必要がある。

○地上・衛星観測データに基づいたモデル計算結果の検証手法の開発

モデルで検証対象とする変数の整合性や観測データの誤差や時空間カバレージなどを正しく理解し、効果的に利用できるよう、観測とモデル研究が密に連携する必要がある。

○広範な観点と専門的な深い知見を併せ持つ人材の継続的な育成

今後統合的な観測・データ利用とそれによる地球環境の実態把握・予測を十分に進めるためには、基礎科学に基づく広範な観点と専門的な深い知見を併せ持つ人材の育成を大学（教養・学部期間）で着実に行うことが必要である。

7.5.2 今後の展望

(1) 地上観測と衛星観測の連携によるデータ流通の促進

多くの研究者が参加して統合解析を進めるためには、以下のようなデータの使い易さとデータの入手のし易さを改善し、データを多くの人が容易に使えるようにする必要がある。観測サイトの共同運用や複合利用の発展を通じてこれらの問題点が改善され、将来のデータ利用者は目的に応じて衛星と現場データを区別することなく利用できるようになることが期待される。

○データの使い易さの改善

データを使い易くするために、(a) 観測パラメーターの定義の衛星・現場観測間の共通化、(b) 現場観測手法の標準化、(c) 観測測器の校正手法の標準化、(d) データの品質情報の整備、(e) 参考となり得る利用事例の蓄積、が必要となる。これは全球地球観測システム（GEOSS）で挙げられているデータの相互利用性（interoperability）にも貢献することになる。

○データの入手のし易さの改善

データの公開と入手し易さの改善は、衛星観測では TRMM、ADEOS-II、GOSAT、MODIS、LANDSAT 等多くのミッションで進展している。一方現場観測においては、観測出資機関のポリシーや観測者の処理・整理の遅延等の理由により、データ公開と流通促進は国際的に見ても極めて遅れていると言わざるを得ない。特に現場観測におけるこの重大な問題を解決するためには、標準化された手法で観測・解析し、観測後速やかにデータ公開できるよう、観測機関および出資機関が率先してデータ公開を推進することが強く望まれる。

(2) 広域推定のための効果的な観測補完

観測サイトの共同運用や複合利用の発展を通じ、衛星と現場観測の統合利用を前提とした現場サイトの位置選定、衛星センサーの選定、時空間カバレージ不足やパラメーター不足の補完が進むことが望まれる。例えば、これまで不足していた数 10 日以下×数 100m 時空間スケールの観測や、精度良い土地被覆や LAI 観測・推定等が、高度化・詳細化するモデル研究と連動して整備されていくことが期待される。これらの実現のためには、多分野の観測者が現状の課題（達成できていない観測機能および観測空白域など）について共通認識を持ち、協力してその課題を解決する取り組む体制が必要である。

(3) 分野横断領域の統合研究の発展

分野横断的な観測が特に要求される領域として沿岸域の物質循環を例に挙げると、陸からの化学物質の流入、地形の影響を受けた複雑な循環の物理場、そこに形成される複雑な生物動態があり、この分野はモデル化も予測も現状では特に難しい。一方でこのような領域は、人間活動の環境への影響や、逆に環境が人間生活に与える影響が強く現れる重要な領域であることも多い。今後現場・衛星・モデルの統合利用や、物理・生物・化学等の分野間連携が進むことによって、沿岸域のような分野横断領域でのモデル化と予測が実現し、持続的で豊かな環境を維持するための指針を提供できるようになることが期待される。

（三枝・村上・戸田）

第V部 まとめ

第8章 課題と展望

地球温暖化問題を解決するためには、包括的で統合された地球観測を長期的・継続的に推進することが必要不可欠である。特に、ポスト京都議定書に関連する施策に対応するためには、地球温暖化の実態把握の観測のみならず、適応・緩和の課題に資するための温暖化影響等に関する観測の推進が重要となってくる。

報告書第2号においては、地球温暖化において重点的な取組みが求められている、雲・エアロゾル・放射ならびに対流圏オゾンに関する観測、および温暖化影響評価に関する観測について、その現状、課題および今後の展望について、各分野の専門家による詳細に検討された結果が示されている。

報告書の各章において述べられているように、多くの分野において、人的・予算的制約があるにもかかわらず、多くの取組みが行われている。各章において、今後も継続すべき観測、今後新たに実施すべき観測等について詳細に述べられるとともに、多くの提言がなされている。

今後、観測を推進し、一層発展させるためには、多くの施策の実施が必要である。本章では、各章で詳細に述べられている観測等に関する課題と展望について、そのまとめを示す。

8.1 雲・エアロゾル・放射に関する観測

放射収支の観測に関しては、地表面での短波・長波放射の定量的評価が不十分であり、特に国際的にも確立されていない赤外放射計の較正を行う体制を我が国で早急に構築する必要がある。また、太陽直達分光日射計の準器の維持も重要である。さらに、光源を利用した方法の可能性も検討する必要がある。他方、気象庁は各研究機関で得られる放射収支観測データを統合的に集めることや基準地上放射観測網（BSRN）との連携強化を推進する必要がある。

エアロゾルの地上観測においては、その散乱係数・吸収係数・消散係数に関する測定の高度化が放射過程の理解や気候変動の解明のために必要である。また、エアロゾルの化学組成や混合状態と光学特性の関係の解明も重要である。我が国は世界でも有数のライダー観測ネットワークを有するが、エアロゾルの種類別に消散係数を推定するなど、これらの観測データのさらなる高精度化や有効活用を図るとともに、消散係数プロファイルを昼夜を問わず高感度で測定できる高スペクトル分解ライダー方式の多波長ライダーの実現が期待される。国内の観測サイトはもとより、北極・南極における雲・エアロゾル・放射の観測を強化するほか、アジアやその他関係各国との協力の強化が望まれる。特にアジア域では、今後の人口増加とそれに伴う農業活動の増加が予測されており、農業活動由来のエアロゾルやブラックカーボン（BC）等の物質の発生量もまた増加すると予測されるため、アジア域におけるエアロゾル研究の推進が必要である。現在、これらの観測に携わることのできる、特に若手の人材が減少している。観測的研究への研究資金の投入とともに、長期モニタリングに対応した人材育成システム（長期観測の専門職職員の配置）などが望まれる。またデータ相互利用を促進することも望まれる。さらに、航空機観測を推進するため、観測用航空機を共同で持つ必要がある。

雲・エアロゾルの衛星観測においては、長期モニタリングとプロセス研究の2本立ての衛星計画が必要である。現在計画が進められている日欧の「雲・エアロゾル・放射ミッション」(EarthCARE) やアメリカ航空宇宙局 (NASA) のACEにおける受動型センサー+能動型センサーによる衛星観測システムは、将来、長期モニタリングの中核を担う可能性がある。

地上から衛星に至るまで、様々なプラットフォームから観測されるデータは、今日では数値モデルによる計算値と比較することによりモデルの改良に資することはもとより、インバージョン法を用いてエアロゾルや前駆物質の発生源を推定することも進められつつある。さらに、近年では様々な形でエアロゾルや雲のデータ同化も行われるようになってきている。データ同化を高精度で行うためには、数値モデルが相応の質を保持している必要があるほか、適用する観測データの品質保証および品質管理も重要となる。

8.2 対流圏オゾンに関する観測

対流圏オゾンは、温室効果ガスであると同時に、越境大気汚染問題にも関連していることから、地球観測として取り組むべき課題としての重要度を増している。

オゾン濃度観測データの標準化にあたっては、国内におけるオゾン濃度の国際体系に基づくUV法によるスケールでの統一化および、機関間の相互比較の定期的・継続的な実施を通じた観測データの統合化をさらに進めて

いくことが必要である。それを踏まえて、観測データの準リアルタイムでの流通や国内の観測施設で観測されたデータを共同で利用するためのデータベース化を含めた観測データの収集と、提供形態の一層の多様化による利便性を図り、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）を通じた観測データの流通をさらに促進することが重要である。地上・航空機・船舶・ライダー・ゾンデ・人工衛星など様々な観測データをネットワーク化し、それらを統合して時空間的に密で詳細な3次元観測データを得ると同時に、地球規模の現象解析やモデルの検証・同化のために極域における対流圏オゾンの長期連続観測を継続することが必要である。今後、東アジアの地域スケールでの越境大気汚染の実態と動向をより正確に把握するために、アジア大陸での観測強化に向けた国際協力および世界気象機関（WMO）や東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）の枠組みなどを通じた関係国相互間の緊密な観測の連携がさらに求められる。

以上の実現にあたっては、長期観測の継続とそのネットワークの拡大のために必要な観測機器等の整備・運用、専門家会合・ワークショップや標準化のための比較実験の実施のために、予算確保と人材育成が不可欠である。

8.3 水循環分野

地球温暖化による人間社会や生態系への影響のかかなりの部分は水循環の変化に関連して現れるため水循環の観測は重要であるが、水循環分野の観測と観測データには以下の課題がある。

まず、利用可能なデータの時空間分布および解像度が必ずしも十分ではない。例えば、途上国や山岳域、熱帯林の中などの観測不足地域が多く、極値に関する情報も限られており、必要十分な観測データが利用可能なケースは必ずしも多くない。この原因としては、そもそも観測が行われていない場合もあるが、各国や各機関にデータが眠ったままという場合もある。また、統一したフォーマットで容易に利用できるデータが流通していないことも水循環に関するデータの欠点である。そのような中、我が国はこれまで、ある程度の国際的リーダーシップを発揮してきたが、継続は必ずしも容易ではない。

これらの課題を乗り越えるための今後の対策としては以下のようなものが考えられる。

まず、世界の多くの面積を占める発展途上国を含め、地上観測を長期にわたって継続実施できる体制を確保することの重要性を再確認し、技術的支援を行う必要がある。一方、地上観測の時空間の分布と解像度の不足を補うために、地上観測と数値モデルと衛星観測データとを統合的・融合的に利用することによる準観測値を生成することが重要である。そのためにも、途上国での観測の支援と途上国の過去のデータのレスキュー・そのアーカイブを行うことが必要である。また、各国の地上観測データおよび衛星観測データの統一フォーマットでの流通を進め、日本および世界中の人が容易にアクセスし、データ取得できるシステムを構築するべきであろう。これらを通して日本の国際的リーダーシップは確保されると考えられる。

これらの実現のためには、期間限定のプロジェクトに頼るばかりではなく、NASA やアメリカ海洋大気庁（NOAA）のように研究機関として安定したサービスを提供する水循環観測データ統融合マネジメント機関（仮称）の設立が必要である。

ところで、これからの水循環に関する広域観測を長期的かつ継続的に遂行し、上記のような課題の解決を遂行していくための重要な手段の1つは衛星観測であるが、我が国では2つの衛星計画が進められている。その1つが（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）の地球環境変動観測ミッション（GCOM）計画であり、もう1つが日本とアメリカを中心に国際的な協力の下に進められている全球降水観測（GPM）計画である。これらの衛星観測を国際的な協力の下、着実に進めることは極めて重要である。加えて、単に衛星によって観測データを取得することに留まらず、アメリカおよびNASAあるいはヨーロッパおよびESAが行っているように、衛星観測から新たな科学的知見を発見し、あるいは社会福祉の向上につながるプロダクトを生成するような活動を、我が国はこれまで以上に拡充すべきである。上記機関の設立は、このような衛星観測とその利用の一層の発展においても中心的な役割を果たすことであろう。

次世代の観測をより良きものとするために、衛星観測および地上観測に関わる新たな観測技術の開発を着実に継続、発展させねばならないことは言うまでもない。

8.4 雪氷分野

地球上の雪氷は温暖化の進行によって大きく変化し、またこの変化が温暖化を加速する懸念が持たれている。特にここ数十年から半世紀の間に顕著な変化を示しているのは凍土・氷河および北半球の海氷であり、積雪も地域性を持ちながらも減少傾向が見られる。氷床もグリーンランドについては融解面積の増加が見られる一方、変

化によるインパクトの大きい南極氷床の挙動は不明確なところが多い。雪氷の特徴は、時定数の比較的短い因子とともに、数十から数千年の時定数を持つ因子が存在し、監視体制の構築により変動把握、応答機構の明確化が急務となっている。

地球環境変動で雪氷が重要となるプロセスとしては、アルベドフィードバック、海洋を含む水循環・海面上昇、温室効果ガス放出など物質循環、そして地域的な人間活動に対する影響などが上げられる。これらに関する理解を深め、評価し対応策へつなげるためには、雪氷分野に関して以下の施策を推進することが必要である。

(1) 雪氷圏変動監視観測ネットワークを強化し持続性監視体制を構築する： 国際・国内連携の下で全球・地域的な監視体制および当該地域でのプロセス研究が求められている。現在実施している地域における観測態勢を整備・高度化し、共同利用などで連携強化を行い、効率的で安定した体制の下、データを確保することが重要である。地域としては、日本コミュニティ実績があり国際分担の期待がある北極域、ヒマラヤを中心としたアジア高山帯、国内山岳地帯、南米のパタゴニア、それと南極氷床域が中心となる。陸域におけるスーパーサイト・分布型観測網・トラバース観測、海洋における船舶・自動観測などの観測手段・要素の充実と機器開発が求められている。

(2) 衛星および地上観測のデータ整備・品質管理を通じて統合解析を実施できる体制を確立する： 雪氷データは、いわゆる個別のプロセス研究上で扱われることが多く、また担当機関がないため、研究者および一般社会が使える形でのデータセット化が遅れている。過去から現在まで取得した衛星および地上観測のデータプロダクトをアーカイブ、管理、流通させる機能が必要とされている。その際、衛星導出手法の改良によるプロダクトの高度化、および統合解析ができることが求められている。

(3) 雪氷圏の持続的監視体制、データの利活用を推進し、温暖化影響評価・予測貢献を行う中核組織を形成する： 雪氷因子はデータの蓄積・利活用が遅れ、持続的観測が困難な状況におかれているが、温暖化での変化およびその潜在的影響力は、この状況を改善することを求めている。このためには、効率的・系統的に雪氷変動を総合的に扱い、他分野との連携を図る中核組織の形成が急務であると言える。

8.5 生態系分野

生態系の地上観測、衛星観測、広域モデルの間にはいまだ大きなスケールギャップが存在する。この3者間のスケールギャップをいかに埋めていき整合性を持たせるかが今後の大きな課題である。そのためにも陸域・沿岸域にかかわらず日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER) や JapanFlux、モニタリングサイト 1000 などの複数の生態系観測ネットワークが重複するサイトをスーパーサイトと位置づけ、大規模野外実験も積極的に取り入れたより高度な観測体制を確立し、長期的に維持していくことが必要である。また、より広域な観測をカバーするために国内における高山帯、暖温帯などの観測空白域やアジア・ユーラシア地域における現場観測拠点の整備と長期的な維持も求められる。

生態系の観測は生物多様性そのものと直接関わる部分も多く、センサーによる観測が可能な項目は現在の技術ではごく限定されている。このような観測は機械化そのものが現状では困難な場合が多く、ほかの分野と比較して自動化やデータ同化が立ち遅れている。このような観測に対する技術開発の促進やキャパシティビルディングが強く望まれる。

これら観測サイトの情報をスケールアップするためには、超高分解能を持つ衛星センサーを開発し、日本を中心とする東アジア地域を対象とした静止衛星も視野に入れた衛星観測体制を確立するとともに、生態系観測との密接な連携を促進していくことが重要である。

さらに、生態系の地上観測データや衛星観測データを用いたモデリングを推進するためにも、データを公開しフォーマットや説明ドキュメントを整備する体制をもった、データベース組織と様々な観測データを統合解析する拠点の確立が必要である。

一方、ほとんどの生態系観測ネットワークの運営には、U. S. -LTER のような政府科学機関等による長期的な資金面でのサポートがなく、観測体制やデータベース管理も含めすべて参加研究者の短期的な競争的資金への応募等の自助努力に負っているのが現状であり、早急な改善が求められる。

8.6 社会経済データ分野

一般的に、人間環境への影響は、地域性の高い多様なメカニズム・社会条件を反映して生ずる。その影響を適切に評価し対応策を検討するためには、地域詳細な気候変化観測・予測情報の整備と同時に、各地域の特質を

反映した社会・経済データの整備が重要となる。しかし現時点では、まだその取組みは明らかに不足している。多くの社会・経済データは温暖化問題での利用を想定して整備されてはおらず、その所在についても情報共有が不十分である。効果的・効率的な整備に向け、関係省庁間での情報交換・仕分け・連携を促進する必要がある。

人間社会への影響に関して、広域を対象とした包括的分析を実施し、その結果に基づいて特に脆弱な地域・分野を特定するような用途のためには、人口分布データについて典型的に実施されているように、広域をカバーした空間・地理情報として社会・経済データが整備・提供されることが望ましい。なお、対象とすべき社会・経済データは、過去から現在までの観測された統計情報に限らず、それとシームレスに接続する将来のシナリオまで含めて考えるべきである。

人間社会への影響の詳細な分析とそれに基づく適応策検討のためには、広域について面的に整備された人口等の社会・経済データに加えて、その他の地域固有の諸条件に関する情報も求められる。地域固有の情報には、他地点との比較が容易に可能な定量的情報に限らず、例えば地域住民の過去の災害経験や伝統的対策の有無といった定性的情報も含まれる。適応策検討に関連しては、各地域での関係者会合等の記録や、地域行政計画といったもので、有効に活用すべき情報とみなされる場合もあろう。定性的情報に関しては統一的・画一的なフォーマットの提案は困難であり、またデータの品質管理にも困難が伴う。それゆえ、既存の情報に関してもデジタル化されずに分散している傾向がある。しかし、地域固有の情報・経験を地域内で埋もれさせず、各地域間で共有しながらリスク評価・管理を進めていく必要がある。

人間社会への影響を予測するためには、想定する気候変化シナリオと整合性のある適切な社会・経済シナリオを置くことが重要である。個別の影響評価研究用にアドホックにシナリオ作成して、利用後は埋没させるというのではなく、適切なメタデータの記述ルールを確立し、不確実性情報等も付与できる形でプロダクトを広く共有できる仕組みを作り出していくことが、影響予測研究の加速のためには重要である。

8.7 地上と衛星観測の統合

各種の地上観測と衛星観測を統合したアプローチ(統合的な観測と解析)に基づく地球観測を実現するうえで、現時点で我が国の関連研究分野が抱える最も深刻な弱点は、

- (1)長期的に安定した地球観測を支える人的・資金的リソースの不足、
 - (2)観測データの精度上の問題と相互利用性の問題、
 - (3)分野間連携によって得られる統合的なデータの利用技術とその技術開発を担う人材の不足、
- にある。

これらの弱点を克服するために特に必要とされる取組みはそれぞれ以下のとおりである。まず、地球観測に資する観測を長期的に安定運用するためには、個々の観測点や観測者のグループの有する限られた人的・資金的リソースを最大限に有効利用するための取組みが重要である。これを実現するために、炭素循環・水循環・雪氷・生態系・大気化学・衛星校正検証等の機能をもつ複数の観測ネットワークをできる限り重複させた観測サイトまたはエリア(スーパーサイト)を共同運用することにより、観測サイトの適正配置と長期的な維持を分野間連携によって実施することが強く望まれる。

次にデータの精度向上と相互利用性の向上については、長期に及ぶ地球観測を支えるため複数世代にわたる衛星センサーの継続運用と、その観測精度を維持するための世代間相互校正の取組みが必要不可欠である。また、地上観測と衛星観測における波長別放射量観測の校正システムの確立を早期に実現することにより、放射量観測の精度向上と長期的な精度管理を保証することが求められる。同時に、土地被覆分類やバイオマス、降水量・積雪深量といった複数の分野において共通かつ必要不可欠なパラメーターの観測技術を向上させる取組みが重要である。

最後に、統合的な地上・衛星観測によって得られる観測データの効果的な複合利用技術の確立とそれを担う人材育成については、基礎科学に基づく広範な観点と専門的な深い知見を併せ持つ人材を、大学等の教育機関で育成するのみならず、分野間連携のスーパーサイトで展開される観測や研究活動を通して、長期的かつ着実に育てる取組みを継続することが強く求められる。こうした取組みにより、地上・衛星による統合的な観測とデータ解析に基づく地球環境の診断(観測・予測)と処方(緩和・対策)の実践、およびそれにより得られる知見の社会への還元を持続的に行うことが可能になる。

第9章 優先的に取り組むべき課題

地球温暖化問題を解決するためには、包括的で統合された地球観測を長期的・継続的に推進することが必要不可欠である。このため、第Ⅰ部の報告書の目的にも述べられているように、連携拠点的設置によって進展が期待される、①「データ標準化の促進」、②「データ流通の促進」、③「観測施設等の相互利用の促進」、④「時空間的観測空白の改善および観測項目の充実」の各項目、さらに、これらの項目を実現する基盤となる、⑤「観測技術の開発」、⑥「人材育成」の6つの項目の視点に準拠して、報告書に記述された内容を精査し、特に優先的に取り組むべき課題等を抽出し、その課題名を具体的な実施内容とともに以下に示す。

なお、各課題には参照すべき本文各章の項番が付記されている。

1. データ標準化の促進

○高精度放射観測体制の確立とデータアーカイブ (1.2.1、1.2.3、7.3.1、7.5.1)

地表面における放射量は気候システムにおける最も基本的な要素であるにもかかわらずいまだ十分な精度で観測・評価されていない。特に長波放射量や分光放射量について、地上観測と衛星観測双方の較正方法を確立し、長期的な維持管理を可能にする体制を整える。また、基準地上放射観測網 (BSRN)、全球大気監視 (GAW) や世界放射センター (WRC) などの国際的なプログラムや機関と連携して複数の安定した観測体制を確立するとともに、長期データのアーカイブの面でも世界をリードする。

○オゾン濃度の観測スケールの統一化および機関間比較観測の定期的・継続的实施 (2.2)

(独)国立環境研究所 (NIES) の標準参照光度計 (SRP) No. 35 をはじめ、国際体系に基づく UV 法によるスケールで国内におけるオゾン濃度を体系化することにより、観測データの利用性向上を図る。また、機関間相互の比較観測を定期的・継続的に実施する。

○データ整備・品質管理を通じた統合解析の実施体制の確立 (4.7、4.9) (データ流通の促進にも関連)

雪氷関係のデータが存在しているにもかかわらず、統合解析の実施体制が整備されていないことにより、種々の研究や社会的利益のための利活用が遅れている。衛星および地上観測のデータ整備・品質管理を通じて統合解析が実施できる体制を確立する。

2. データ流通の促進

○対流圏オゾン観測データの収集・提供形態の多様化と観測データの流通促進 (2.3.1、2.3.2)

オゾン濃度観測データの準リアルタイムでの流通など観測データの収集・提供形態を多様化するとともに、世界気象機関全球大気監視 (WMO/GAW) の下で設立され気象庁で運営している温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) を通じてデータ流通を促進する。

○アジア大陸でのオゾン観測の強化および観測データの流通・利用の促進 (2.4.2)

北半球規模または東アジアの地域スケール越境大気汚染の実態・過程・変容を明らかにするための基盤として、発生源付近でのオゾンおよびオゾン前駆物質の観測を強化し、さらに、関係国相互間の観測データの流通・利用を促進する。

○水循環観測データ統融合マネジメント機関 (仮称) の設立 (3.1、3.5)

様々な水循環の地上観測データや衛星観測データ、さらにはレスキューされたデータや統融合によって生成された準観測値などを統一形式でアーカイブし、世界のどこからでも容易にアクセスできるようにするシステムが求められている。このために、恒久的に安定したサービスを提供する水循環観測データ統融合マネジメント機関 (仮称) を設立する。

○雪氷圏の温暖化影響評価・予測貢献を行う中核組織の形成 (4.1~4.9) (ほかのすべての項目にも関連)

雪氷圏の温暖化影響評価・予測貢献を行うため、持続的監視体制、データの利活用、統合解析等を推進する中核的組織を設立する。

○生態系のデータ統合解析拠点の整備 (5.6.4)

生態系の地上観測データや衛星観測データを用いたモデリングを推進するため、データを公開しフォーマットや説明ドキュメントを整備する体制をもった、データベース組織と、様々な観測データを統合解析する拠点を確立する。

○社会経済データの広域統合化・デジタル化による利用性向上 (6.4)

社会経済データについては、過去に記録されたデータのデジタル化や空間・地理情報化といった整備をすすめ、影響の検出・評価や適応策検討での利用性を向上させ、その流通促進を図る。なお、対策検討の観点からは、過去から現在までの観測された統計情報に限らず、それとシームレスに接続する将来のシナリオまで含めた情報を整備する。

○省庁連携を前提とした、ニーズに沿った社会経済データ情報源情報の整理・配信 (6.4、6.5)

温暖化影響の検出・評価と適応策検討に要する社会・経済データの多くは、必ずしも温暖化問題での利用を当初から想定して整備されてはおらず、その所在についても情報共有が不十分である。関係省庁間で連携し、国内外の既存の社会経済データ情報源について網羅的に情報収集するとともに、利用者（影響研究者・適応政策に関わる行政担当者）のニーズに合わせてその収集した情報源情報を整理・配信する。

○衛星観測データのアーカイブの推進

長期かつ広範囲にわたる地球観測を実現するためには、衛星による観測が不可欠であり、特に得られた観測データのアーカイブが重要である。

3. 観測施設等の相互利用の促進

○エアロゾル・雲・放射の地上観測ネットワークの長期運用体制の確立 (1.3、1.5.1)

スカイラジオメーターを中心に、ライダーや多様なエアロゾル・雲・放射観測用測器を整備した SKYNET 等の地上観測ネットワークが東アジアにおける重要なデータを提供している。国際的にも重要なこれらの観測ネットワークを恒久的に安定して運用できる体制を確立する。

○生態系観測のスーパーサイトの整備 (5.4.2)

陸域、沿岸域にかかわらず日本長期生態学研究ネットワーク (JaLTER) や JapanFlux、モニタリングサイト 1000 などの複数の生態系観測ネットワークが重複するサイトをスーパーサイトと位置づけ、大規模野外実験も積極的に取り入れたより高度な観測体制を確立し、長期的に維持していく。

○日本およびアジア・ユーラシア地域における総合的かつ長期的な観測拠点の整備 (7.2.3)

既存の観測機能（設備・観測技術、人材、パラメーター・精度・時空間のカバレッジ）を最大限に生かし、各種地上観測データや衛星データを統合的に解析するため、複数の分野で構築された観測システムをネットワーク化し、分野間連携に基づく観測サイトの共同運用と、各ネットワークが収集する観測データの公開および相互利用を促進する。

4. 時空間的観測空白の改善および観測項目の充実

○雲・エアロゾル・放射観測衛星の継続的な打ち上げ (1.2.4、1.5.4)

グローバルな気候モデルと大気化学輸送モデルの発展や地上観測データの有効活用のために、全球をカバーできる衛星観測は極めて重要な観測手段である。長期モニタリングとプロセス研究の観点から、近年、成果を挙げてきた我が国の衛星観測を、国際的な協力の下、今後も着実に推進する。

○対流圏全層の観測の充実および長期連続観測の継続とモデルの検証・同化 (2.3.3、2.4.3、2.6)

極域を含む地上観測点における地上から上空までの対流圏オゾンの長期連続観測を継続するとともに、地上・航空機・船舶・オゾンライダー・オゾンゾンデ・人工衛星など時空間的に密で詳細な様々な観測データを統合した 3 次元観測データを得る。また、これらの観測データを使用して、現象の解析やモデルの検証・同化に関する

活動を推進する。

○水循環に関わる地上観測体制の持続可能性の確保・強化と過去の観測データのレスキューとアーカイブ (3. 1、3. 2、3. 5)

地球温暖化による水循環の変化を的確にモニタリングするとともに、衛星データや気候モデル等を校正・検証するためには、地上での長期にわたる高品質な観測データが必要である。このために、発展途上国における水循環に関わる地上観測体制の品質と持続可能性の確保・強化のために必要な技術的支援を行う。また、途上国を中心として眠ったままのデータを救い出し、専門家や政策決定者等が利用可能とする。

○我が国の水循環に関わる衛星観測とその利用の充実・拡大 (3. 3、3. 4)

地上観測のみでは十分な確保が難しい空間網羅性を補完しつつ、長期的かつ継続的に水循環の観測を遂行していくための重要な手段の1つは、衛星観測である。我が国が進めている2つの水循環に関する衛星観測計画（地球環境変動観測ミッション（GCOM）計画と全球降水観測（GPM）計画）を国際的な協力の下、着実に進める。加えて、衛星観測から新たな科学的知見を発見し、あるいは社会福祉の向上につながるプロダクトを生成するような活動を、これまで以上に拡充する。

○雪氷圏変動監視観測ネットワークの強化および持続性監視体制の構築 (4. 2～4. 6) (観測施設等の相互利用の促進にも関連)

現在変化している現象を精度良く持続的に監視し、応答機構を解明することが地球環境との関わり、影響を評価するうえで不可欠である。そのため、雪氷圏においては、雪氷圏変動監視ネットワークを強化することにより、持続的な監視体制を構築する。

○高山帯、暖温帯などの観測空白域の改善 (5. 3. 1、5. 3. 3)

脆弱な生態系である高山帯やフラックス観測が行われていない暖温帯などが観測空白域である。生態系機能の広域比較や温暖化に対する影響を評価するうえでも、観測の空白域に充実した観測サイトを整備する。

5. 観測技術の開発

○高スペクトル分解ライダー方式の多波長ライダーの実現 (1. 2. 2、1. 5. 1)

我が国は世界でも有数のライダー観測ネットワークを有し、国際的にもこの分野の研究をリードしているが、エアロゾルの種類別消散係数の鉛直分布を昼夜問わず高感度で測定できるようにするため、多波長・高スペクトル分解ライダーを早期に実現する。

○雲・エアロゾル・放射観測測器を搭載した観測用航空機の整備 (1. 5. 3)

我が国では1980～1990年代に雲・エアロゾル・放射に関する航空機観測を実施し、成果を挙げてきた。近年、これらの3次元構造の解明がますます重要になりつつあるにもかかわらず、その後の航空機観測の技術開発や体制の整備は進んでいない。観測による研究の新たなブレークスルーのためにも、航空機を用いた観測体制の整備を図る。

○地上観測と数値モデルと衛星観測データを統合的・融合的に利用することによる準観測値の生成 (3. 1、3. 2、3. 4) (時空間的観測空白の改善および観測項目の充実にも関連)

地球温暖化による水循環の変化に取り組むためには広域かつ長期のデータが必要であるが、たとえ途上国等からすべての過去のデータをレスキューしても、それでも過去の観測データには空白域が残る。この空白域を埋める手段としては、高度な科学技術の運用および新開発となるが、地上観測と数値モデルと衛星観測データとを統合的・融合的に利用することによる準観測値の生成が最も適切なものである。このため、気候データの「再解析値」の作成の継続、発展および高度化を図る。

○超高分解能を持つ衛星センサーの開発と生態系観測への連携 (5. 5. 2)

観測サイトの情報をスケールアップするため、超高分解能を持つ衛星センサーを開発し、日本を中心とするア

ジア・ユーラシア地域を対象とした静止衛星も視野に入れた衛星観測体制を確立するとともに、生態系観測との密接な連携を促進する。

○複数世代の衛星センサーの継続運用と世代間相互校正（7.3.1、7.5.1）

長期的な地球観測を実現するためには、衛星センサーを長期に継続して運用することが必要である。1機3～7年程度の寿命をもつ衛星センサーによる観測の連続性を保証し、データの精度を長期的に維持管理するため、地上観測との比較を含む複数の手段で、世代の異なる測器を高い精度で相互校正する。

6. 人材育成

各分野における検討において、観測の実施とそのデータ管理・応用を担う次世代の人材育成の重要性が指摘されている。人材育成に関しては、初等・中等教育における理科離れ、高等教育における博士課程進学者の減少、研究現場におけるポストクの雇用問題など、地球温暖化分野に限定されない、我が国の科学技術分野全体に関わる重要な課題が多数存在しているが、ここでは、本報告書で検討を実施している各分野に共通する課題に限定して、課題等を抽出している。

○長期的視野に立った人材開発

地球温暖化に関係する観測においては、遠隔地で持続的な観測を実施し、そのデータを利活用することが求められており、このような能力を有する人材を、国内外において育成・確保する。

○観測・解析技術の向上と研究交流による人材育成

観測技術とともに研究者の解析技術や将来展望を向上・維持するために、基礎科学に基づく広範な観点による着実な教育を充実させ、ワークショップやトレーニングセミナー等により研究情報の交換、将来計画への提言、若手研究者への指導の機会を増やす。

○統合的なデータ利用技術の向上と人材育成

地上・衛星観測によって得られた多様化したデータセットの特徴（観測データの定義や誤差、時空間カバレッジ、データフォーマットなど）を十分に理解し、多量なデータを処理・解析し、統合的な観点でデータを解釈し、数値計算モデル等に知見を集約するといったデータの複合的な利用技術の向上を図る。同時にその技術開発を行う人材の育成を推進する。

○地球温暖化観測と影響評価・適応策への応用のための人材育成

地球温暖化という新たに発生した学際的な問題に対して、一部の専門家に過大な負担がかかっているのが現状であり、大学院教育の充実や観測データの統合的解析を実施する機関の設立などを通して、国内外の人材育成を一層促進する。

略語一覧

【A】

ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) : 地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」
ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite II) : 環境観測技術衛星「みどり II」
AERONET (Aerosol Robotic Network) : 大気エアロゾル観測ネットワーク
AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) : (独) 産業技術総合研究所
ALOS (Advanced Land Observing Satellite) : 陸域観測技術衛星「だいち」
AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) : 高性能マイクロ波放射計
AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) : 高性能マイクロ波放射計2
AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System) : 改良型高性能マイクロ波放射計
AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) : アメダス (地域気象観測システム)
ARM (Atmospheric Radiation Measurement) : 大気放射観測計画
AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) : 改良型超高分解能可視赤外放射計
AVNIR2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2) : 高性能可視赤外放射計2型
AWCI (Asia Water Cycle Initiative) : アジア水循環イニシアティブ

【B】

BC (Black Carbon) : 黒色炭素 (ブラックカーボン)
BIODIC (Biodiversity Center of Japan) : 環境省生物多様性センター
BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) : 国際度量衡局
BSRN (Baseline Surface Radiation Network) : 基準地上放射観測網

【C】

CCL (Central Calibration Laboratory) : 中央校正施設
CEOP (Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project) : 統合地球水循環強化観測計画
CHASER (Chemical AGCM for Studies of Atmospheric Environment and Radiative Forcing) : 全球化学・気候結合モデル
CLIVAR (Climate Variability and Predictability Programme) : 気候変動性・予測可能性研究計画
CREST (Core Research for Evolutional Science and Technology) : 戦略的創造研究推進事業

【D】

DAAC (Distributed Active Archive Center) : 分散型活動記録センター
DIAS (Data Integration & Analysis System) : データ統合・解析システム
DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) : 軍事気象衛星プログラム

【E】

EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia) : 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク
EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) : 雲・エアロゾル・放射ミッション
ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) : ヨーロッパ中期気象予報センター
EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) : ヨーロッパモニタリング評価プログラム
ENVISAT (Environment Satellite) : 環境観測衛星
ESA (European Space Agency) : ヨーロッパ宇宙機関
EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological satellites) : ヨーロッパ気象衛星機関

【G】

GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) : GEWEX アジアモンスーン実験計画
GAW (Global Atmosphere Watch) : 全球大気監視
GAWSYS (Global Atmosphere Watch Station Information System) : GAW観測所情報システム
GBIF (Global Biodiversity Information Facility) : 地球生物多様性に関する情報推進
GCM (General Circulation Model) : 大気大循環モデル
GCOM (Global Change Observation Mission) : 地球環境変動観測ミッション
GCOM-C (Global Change Observation Mission-Climate) : 気候変動観測衛星
GCOM-W (Global Change Observation Mission-Water) : 水循環変動観測衛星
GCOS (Global Climate Observing System) : 全球気候観測システム
GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) : 全球地球観測システム
GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) : 全球エネルギー・水循環観測計画
GIS (Geographic Information System) : 地理情報システム
GLI (Global Imager) : グローバル・イメージャ
GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) : 全球オゾン監視実験
GOOS (Global Ocean Observing System) : 全球海洋観測システム
GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) : 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」
GPCP (Global Precipitation Climatology Project) : 全球降水気候計画
GPM (Global Precipitation Measurement) : 全球降水観測計画
GPS (Global Positioning System) : 全地球測位システム
GTOS (Global Terrestrial Observing System) : 全球陸上観測システム

【I】

IAEA (International Atomic Energy Agency) : 国際原子力機関
IARC (International Arctic Research Center and National Science Foundation) : 国際北極圏研究センター
IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) : 大気サウンディング赤外干渉計
IBP (International Biological Program) : 国際生物学事業計画
ICES (International Council for the Exploration of the Sea) : 国際海洋探査委員会
ICSU (International Council of Scientific Unions) : 国際科学会議
IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) : 地球圏－生物圏国際共同研究計画
IGOS (Integrated Global Observing Strategy) : 統合地球観測戦略
IGOS-P (Integrated Global Observing Strategy Partnership) : 統合地球観測戦略パートナーシップ
ILTER (International Long Term Ecological Research) : 国際長期生態学研究ネットワーク
IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) : 政府間海洋学委員会
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : 気候変動に関する政府間パネル
IPY (International Polar Year) : 国際極年
ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) : 国際衛星雲気候計画
IUCN (International Union for Conservation of Nature) : 国際自然保護連合

【J】

JaLTER (Japan Long-Term Ecological Research Network) : 日本長期生態学研究ネットワーク
JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) : (独) 海洋研究開発機構
JARE (Japan Antarctic Research Expedition) : 日本南極地域観測隊
JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) : (独) 宇宙航空研究開発機構
JICA (Japan International Cooperation Agency) : (独) 国際協力機構
JMA (Japan Meteorological Agency) : 気象庁
JST (Japan Science and Technology Agency) : (独) 科学技術振興機構

【L】

LANDSAT (Land Satellite) : ランドサット衛星

LTER (Long-Term Ecological Research) : 長期生態系研究

【M】

MetOp (Meteorological Operational Satellite Programme) : 極軌道気象衛星

MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer) : 多角度画像スペクトル放射計

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) : 中分解能分光放射計

MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) : 運輸多目的衛星

【N】

NaGISA (Natural Geography In Shore Areas) : なぎさプロジェクト

NASA (National Aeronautics and Space Administration) : アメリカ航空宇宙局

NCAS (National Centre for Atmospheric Science) : 国立大気科学センター

NCDC (National Climatic Data Center) : アメリカ気候データセンター

NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) : 大気組成変化検出のためのネットワーク

NERC (Natural Environment Research Council) : イギリス自然環境研究協議会

NIES (National Institute for Environmental Studies) : (独) 国立環境研究所

NIST (National Institute of Standards and Technology) : 国立標準技術研究所

NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) : アメリカ海洋大気庁

NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) : アメリカ極軌道環境観測衛星システム

NPP (Net Primary Production) : 純一次生産量

NSIDC (National Snow and Ice Data Center) : アメリカ雪氷データセンター

【O】

OCTS (Ocean Color and Temperature Sensor) : 海色海温走査放射計

【P】

PEN (Phenological Eyes Network) : 陸上植生の季節変動・長期変動に関する長期観測網

PICES (Pacific International Council for the Exploration of the Sea : Pacific ICES) : 北太平洋海洋科学機関

POLDER (Polarization and Directionality of the Earth' s Reflectances) : 表面反射偏光計

【Q】

QA/SAC (Quality Assurance and Scientific Activity Centre) : 品質保証科学センター

【S】

SGLI (Second-generation GLI) : 多波長光学放射計

SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) : 全球エアロゾル輸送・気候モデル

SRES (Special Report on Emissions Scenarios) : 排出量シナリオに関する特別報告

SRP (Standard Reference Photometer) : 標準参照光度計

【T】

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) : 全オゾン測定放射計

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) : 熱帯降雨観測衛星

【U】

UNDP (United Nations Development Programme) : 国際連合開発計画

UNEP (United Nations Environment Programme) : 国際連合環境計画

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) : 気候変動に関する国際連合枠組条約

USGS (United States Geological Survey) : アメリカ地質調査所

【V】

VOC (Volatile Organic Compounds) : 揮発性有機化合物

【W】

WCC (World Calibration Centre) : 世界較正センター

WCRP (World Climate Research Programme) : 世界気候研究計画

WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases) : 温室効果ガス世界資料センター

WGMS (World Glacier Monitoring Service) : 世界氷河モニタリングサービス

WMO (World Meteorological Organization) : 世界気象機関

WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) : 世界オゾン・紫外線データセンター

WRC (World Radiation Centre) : 世界放射センター

用語集

【ア】

Aqua 衛星

解説：地球規模の水循環に関する情報を取得し、地球規模の水とエネルギー循環のメカニズムの解明を通して地球環境問題解決への貢献を目指す NASA の衛星。取得する水に関する情報としては、海洋からの蒸発量、大気中の水蒸気・雲・降水・土壌水分・海氷・陸氷・雪などがある。また、放射エネルギー量・エアロゾル・植生被覆・植物プランクトン・陸海面の温度のデータも取得する。

出典：http://www.aero.osakafu-u.ac.jp/as/okamoto/okamoto_new/tango/a_6.htm（参考日：2009/11/30）

アルゴリズム

解説：有限回の演算により問題の回答を得ることができるよう、厳密に記述された計算手順。

出典：相磯秀夫監修，2001：情報技術用語大辞典，オーム社。

アルベド

解説：太陽放射が地表あるいは物体によって反射される率であり、普通はパーセントで表現される。地球のアルベドは、主として雲量、雪、氷、葉面積、土地被覆状況の変動で変化する。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

ALOS (Advanced Land Observing Satellite: 陸域観測技術衛星「だいち」)

解説：2006 年に打ち上げられた世界最大級の地球観測技術衛星で、3 つの地球観測センサーを搭載し、高分解能による立体視可能な画像、面的な地殻変動や土地被覆を捉えることができる。

出典：<http://www.gsi.go.jp/johosystem/johosystem40077.html>（参考日：2009/11/19）

【エ】

エアロゾル (Aerosol)

解説：大気中に浮遊している個体あるいは液体の微粒子。地表や海洋から舞い上がるものや工業活動によって排出される煤煙などがある。太陽光の吸収・散乱や雲の生成などに影響する。

出典：気象庁，2007：気象業務はいま 2007 情報から始まる防災 正しい知識 確かな情報があなたを守る。

エアロゾルオングストローム指数

解説：エアロゾルの光学的厚さの波長依存性を表す指数。エアロゾルの粒径分布密接に関係しており、値が大きいほど小粒子が多い粒径分布であることを示す。

出典：http://157.82.240.167/subjects/aerosol/aerosol3_j.html（参考日：2009/10/30）

エアロゾルの光学的厚さ

解説：エアロゾルの消散係数（散乱計数と吸収係数を合わせたもの）を大気柱全体（大気上端から地表まで）について積分した値。エアロゾルの粒径分布、複素屈折率とそれらの鉛直分布によって決まる。

出典：<http://www.eorc.jaxa.jp/imgdata/topics/2004/tp041026.html>（参考日：2009/08/10）

永久凍土

解説：少なくとも一夏をはさむ、二冬以上の間、継続して 0℃以下の凍結状態を保った土壌、または岩石や地層。

出典：日下哉編，2002：図解日本地形用語辞典，東洋書店。

（気候変動の）影響評価

解説：貨幣価値と非貨幣価値の両方またはいずれか一方について、自然および人間システムにおける気候変動の影響を特定および評価する方法。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

A-Train

解説：NASA が行っている、同地点で観測を行う地球観測衛星隊列（Aqua, CALIPSO, CloudSat, Parosol, Aura）で、先頭と最後尾の衛星の頭文字をとって A-Train と呼ぶ。

出典：<http://www2niet.go.jp/y/y222/SMILES/MACS/8/note/Schoeberl/ss5.html>（参考日：2009/11/28）

栄養塩

解説：生物の生命を維持する栄養分として必須の無機塩類。有機物の主要構成要素（炭素・水素・酸素）を除く、リン・窒素・カリウム・ケイ素・マンガンなどの微量元素を含む。

出典：日本陸水学会編，2006：陸水の事典，株式会社講談社サイエンティフィック。

エルニーニョ

解説：太平洋赤道域の日付変更線付近から南米のペルー沿岸域にかけて海面水温が平年に比べて高くなり、その状態が1年以上続く現象。太平洋熱帯域において、平常時より弱まった東風の影響で西部の暖かい海水が東方へ広がるとともに東部で冷たい水の湧き上がりが弱まることが原因。

出典：<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/learning/faq/whatiselnino.html>（参考日：2009/11/18）

【オ】

Aura 衛星

解説：地球のオゾン、大気質および気候について研究する NASA の衛星。4 種類の観測装置を搭載しており、互いに補完しあって地球大気の大気質および主要な気候パラメーターの観測を行う。

出典：http://www.aero.osakafu-u.ac.jp/as/okamoto/okamoto_new/tango/a_6.htm（参考日：2009/11/30）

【カ】

海面上昇

解説：海洋の平均水位の上昇。海洋の体積増加によって引き起こされる海水の熱膨張や、氷河・氷帽・氷床の融解によって増加した流出量が海面水位に大きな影響を与えられている。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/knowledge/sl_trend/sl_cont.html（参考日：2010/02/16）

海洋の酸性化

解説：測定可能な酸性度上昇（海洋の pH 低下）を引き起こす海水中の CO₂ 濃度の増加。石灰化生物の石灰化速度の低下をもたらす可能性がある。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

可降水量

解説：大気中にある水蒸気をすべて液体の水にした場合、どれだけの厚みになるかを表した量のこと。

出典：日本陸水学会編，2006：陸水の事典，株式会社講談社サイエンティフィック。

河川流量

解説：河道における流水量。河川流出量ともいう。流量は、流量観測結果から求められた水位と流量の関係を用いて、水位観測値から算出される。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

<http://www1.river.go.jp/workbook.html>（参考日：2009/11/19）

カルマンフィルタ

解説：あらかじめ求めておいた予測式の係数を直近の観測値により最適に補正する、ガイダンスの作成手法の1つ。

出典：http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/shiryo.html#P22（参考日：2009/11/05）

乾性沈着

解説：大気中の浮遊物質が、物理的あるいは化学的プロセスによって大気から除去され、乾燥した状態で地表や植生、水面などにとりこまれる現象。

出典：http://www.env.go.jp/earth/dss/report/02/05_2.pdf（参考日：2009/11/05）

涵養域

解説：氷河の年間質量収支（増減量）がゼロになる標高を境とした上流部分。涵養域では、氷河が厚くなるために、質量収支はプラスになる。

出典：<http://premium.nikkeibp.co.jp/em/column/oki/03/index.shtml>（参考日：2009/10/26）

【キ】

帰化生物

解説：本来の自生地から人為的な原因でほかの地域に入り、その後に自力で生存できるようになった動植物。

出典：八杉貞雄，可知直毅監修，1971：生物事典，旺文社

気候値 (Climatology)

解説：気候要素（気温、風、海面水温、積雪量など気候を表現する各種の物理量）の長年の観測データの平均値。

出典：http://www.science.aster.ersdac.or.jp/jp/glossary/jp/ki/climatic_val.html（参考日：2009/11/10）

季節凍土

解説：1年の内でも限られた期間にできる凍土。

出典：国立環境研究所，「南極・北極の百科事典」委員会編，2004：南極・北極の百科事典，丸善株式会社

輝度

解説：単位面積あたりの発光体の明るさを示す言葉。

出典：長倉三郎，井口洋夫，江沢洋，岩村秀，佐藤文隆，久保亮五編，2006：岩波理化学辞典 第5版，岩波書店。

揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)

解説：浮遊粒子状物質および光化学オキシダントの原因の1つで、揮発性を有し、大気中で気体状となる有機化合物の総称。トルエン、キシレン、酢酸エチルなど。

出典：<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/voc.html>（参考日：2009/11/05）

吸収係数

解説：光や放射線が物質に吸収されて減衰する割合を表す定数。

出典：(財) 国際科学振興財団編，2005：科学大辞典第2版，丸善株式会社

【ク】

雲凝結核(CCN: Cloud Condensation Nuclei)

解説：凝結核は水蒸気が凝結するときに芯になる液体または固体粒子で、エートケン核(直径が $0.2\mu\text{m}$ 以下)、大核 ($0.2\sim 1.0\mu\text{m}$)、巨大核 ($1\mu\text{m}$ 以上) に分けられ、雲核には大核以上の吸湿性粒子になる。

出典：(財) 国際科学振興財団編，2005：科学大辞典第2版，株式会社丸善。

CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 衛星

解説：雲・エアロゾルおよび赤外放射輝度の観測を目的としたNASAの衛星で、2006年から観測を開始している。

出典：<http://www2nict.go.jp/y/y222/SMILES/MACS/8/note/Schoeberl/ss5.html>（参考日：2009/11/28）

CloudSat 衛星

解説：94GHz 帯で雲を観測するレーダーを搭載したNASAの衛星で、2006年から観測を開始している。

出典：http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2009/image/0226_proc/1-1.pdf（参考日：2010/02/16）

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星

解説：太陽極大期に併せて同一軌道上に数百 km の間隔をあけて2002年に打ち上げられた「GRACE-A」と「GRACE-B」の2つの衛星で、それぞれの位置と衛星間の距離の測定によって互いの衛星の速度変化を測定し、その揺るぎから精密な重力場を測定をすることを目的としている。

出典：<http://www.satnavi.jaxa.jp/basic/glossary/g.html>（参考日：2006/12/03）

<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/simosato/Japanese/articles/20020625.htm>（参考日：2010/01/12）

グローバル・イメージャ (Global Imager: GLI)

解説：陸域、海域、地球表面および雲からの太陽反射光・赤外放射光を観測し、表面温度、植生分布、雪氷アルベドなどの物理量を測定するための光学センサーで、地球の大気から地表面を同時かつ高精度に観測することが可能。

出典：http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/ov/sensor_j.html（参考日：2010/02/16）

【ケ】

決壊洪水 (GLOF: Glacial Lake Outburst Flood)

解説：氷河湖（氷河の浸食・堆積作用によって形成された凹地に湛水したもの）が小氷期のモレーンを破って決壊した、氷河湖決壊洪水。

出典：<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/newsletter/no8/yamada.html>（参考日：2009/10/30）

<http://www.chikyu.ac.jp/shiraiwa/glaciology/Terminology.htm>（参考日：2009/10/30）

【コ】

光化学オキシダント (Ox)

解説：大気中に排出された窒素酸化物と炭化水素が、紫外線により光化学反応を起こし、オゾンを中心として酸化性物質（オキシダント）が生成される。オキシダントのうち、二酸化窒素を除いたものを光化学オキシダントといい、光化学スモッグの原因となる。

出典：<http://www.city.yokohama.jp/me/kankyuu/mamoru/kanshi/worda/ox.html>（参考日：2009/11/05）

光合成窒素利用効率

解説：窒素あたりの光合成能力のことで、種を特殊づける性質の1つとして利用されている。

出典：巖佐庸，松本忠夫，菊沢喜八郎，日本生態学会編，2003：生態学事典，共立出版株式会社。

光合成有効放射 (Photosynthetically Active Radiation)

解説：緑色植物の光合成に有効な波長範囲（およそ400～700nm）に含まれる放射のことで、この波長範囲の光子のフラックスで示される。

出典：日本陸水学会編，2006：陸水の事典，株式会社講談社サイエンティフィック。

後方散乱

解説：最初の運動方向に対して 90 度以上の角をなす散乱過程による粒子または放射の偏向。

出典：太田次郎監訳，1999：科学・技術大百科事典〈上〉，株式会社朝倉書店。

【サ】

サンゴ

解説：Scleractinia 目生物の一般的な呼び名で、硬い石灰石のからを持っており、造礁と非造礁、冷水性と暖水性のサンゴに分けられる。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

サンゴ礁

解説：サンゴによって作られた炭酸カルシウムで作られた岩のような石灰石の構造体で、海岸線に沿ってできる裾礁、浅く水に浸かった斜面の上部あるいは陸棚面にできる堡礁・環礁がある。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

サンゴの白化

解説：サンゴがエネルギーを提供してくれる共生生物を失った場合に、結果として色がなくなること。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

【シ】

CISLiNet (Commonwealth of Independent States Lidar Network)

解説：独立国家共同体域においてエアロゾルとオゾンの観測技術の向上とライダーネットワークの構築を目的として作られたネットワーク。

出典：<http://www.cis-linet.basnet.by/>（参考日：2009/12/04）

閾値

解説：あるシステムのプロセスにおいて、それを越えると突然にあるいは急激に変化が生じる水準。生態学的、経済学的、あるいはその他のシステムにおいて、新しい特性が出現し、それまでの低い水準では適用できた数学的関係に基づく推測が意味をなさなくなる点または水準。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

湿性沈着

解説：大気中の浮遊物質が、物理的あるいは化学的プロセスによって大気から除去され、雲核になったり雨粒に取り込まれた後沈着したりする現象。

出典：http://www.env.go.jp/earth/dss/report/02/05_2.pdf（参考日：2009/11/05）

JapanFlux

解説：日本の陸域炭素収支観測網。AsiaFlux（アジア域での二酸化炭素収支観測ネットワーク）の国内サブネットワークとして 2006 年 12 月に発足。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/cger-j/c-news/vol18-1/vol18-1.pdf#page=4>（参考日：2009/11/28）

植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index)

解説：衛星リモートセンシングでは植生の持つ特性（植物の緑葉は赤・青領域の波長を吸収し、近赤外線領域の波長を強く反射する）を生かし、植生指数を以下のように計算する。

植生指数 = (近赤外波長 - 赤波長) / (近赤外波長 + 赤波長)

出典：http://www.agri.pref.hokkaido.jp/center/syuppan/a_rimosen/sld008.htm（参考日：2009/11/10）

蒸発散

解説：地表面からの水の蒸発と植生からの蒸散が合わさった過程。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

消耗域

解説：年間の氷河の質量収支（増減量）がゼロになる標高を境に、下流部分のこと。消耗域では氷河が融けるため、氷河の年間質量収支はマイナスとなる。

出典：<http://premium.nikkeibp.co.jp/em/column/oki/03/index.shtml>（参考日：2009/10/26）

純一次生産量(NPP: Net Primary Production)

解説：光合成により生産される有機物生産を総一次生産、それから植物の呼吸量を差し引いた量を純一次生産量という。

出典：巖佐庸，松本忠夫，菊沢喜八郎，日本生態学会編，2003：生態学事典，共立出版株式会社。

【ス】

水位流量曲線

解説：観測地点の水位（H）と流量（Q）の関係をグラフ化したもので、観測した水位に対する流量を算出するために用いられ、水文データ整理、流出解析、危機管理の資料として活用される。

出典：<http://www.skr.mlit.go.jp/kasen/mizu/yougo/sect07.htm>（参考日：2009/10/26）

SKYNET

解説：大気におけるエアロゾル(大気浮遊微粒子)－雲－放射の相互作用の観測ネットワーク。モンゴルからタイまでの日本を含む東アジア域に観測点がある。

出典：<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>（参考日：2009/12/07）

スペクトル

解説：可視光線をプリズムに当てた際にできる、各色に分かれた光の帯のことで、通常横軸に波長や周波数を取り、縦軸に電磁波の強さをとって表される。

出典：http://www.j.vsopt.isas.jaxa.jp/yougo/k02_spectral.html（参考日：2009/11/05）

【セ】

正規化水指数 (NDWI: Normalized Difference Water Index)

解説：地表面における水の存在と深い関連をもつ指標の1つで、赤波長（R）と中間赤外波長（SWIR）を用いて、 $(R-SWIR)/(R+SWIR)$ で計算される。NDWIが高いときは表面が帯水状況にあると判断される。

出典：http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_nogyo/remote/r-8.pdf（参考日：2009/10/30）

生態系純生産量 (Net Ecosystem Production)

解説：NEPは純一次生産量NPPから生態系の従属栄養生物の呼吸Rhを差し引いたものと定義されている。

$$NEP = NPP - Rh$$

出典：<http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=2844>（参考日：2010/02/19）

生物多様性

解説：すべての生物体と様々な空間的スケールの生態系の総多様性（遺伝子レベルからバイオーム全体まで）のこと。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

積雪水量

解説：ある特定の雪あるいは氷の塊が溶けて生じ得る水に相当する体積、質量。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

雪氷圏 (Cryosphere)

解説：地表・地中および海面・海中におけるすべての雪と氷（永久凍土を含む）により構成される気候システムの要素。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

【タ】

大気混濁係数

解説：空気分子のみの仮想的な大気の光学的厚さに対する実際の大气の比率を表わす指標で、直達日射瞬間値から算出する。

出典：<http://www.data.kishou.go.jp/obs->（参考日：2009/10/30）

【チ】

窒素酸化物 (NOx)

解説：窒素の酸化物の総称で、光化学オキシダントの原因物質であり、酸性雨の原因にもなっている。一酸化窒素、二酸化窒素、一酸化二窒素、三酸化二窒素、五酸化二窒素などが含まれる。

出典：<http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&ecoword=%C3%E2%C1%C7%BB%C0%B2%BD%CA%AA>（参考日：2009/11/19）

中分解能分光放射計 (MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectrometer)

解説：NASAの地球観測衛星 Terra/Aqua に搭載されている NASA/GSFC により開発された光学センサーの名称。

出典：http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/sendata/modis_j.html（参考日：2009/11/10）

【テ】

適応

解説：実際のもしくは予想される気候による刺激あるいはその影響に対する自然界もしくは人間システムの調整作用で、これにより被害を軽減もしくは便益の機会を活用する。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

適応能力 (気候変動に対する)

解説：気候変動に適応し、被害の可能性を軽減し、機会を生かし、影響に対処するシステムの能力。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

Terra 衛星

解説：地球環境システムのメカニズムの解明を目的として、NASAによって開発された地球観測衛星で、MODISが搭載されている。

出典：http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/satdata/eos-pm1_j.htm（参考日：2009/11/28）

デング熱

解説：カによって広がるウイルス感染症で、関節と背中 of 激しい痛みが特徴であるため、しばしば骨折熱とよばれる。それに引き続きウイルス感染は、致命的になり得るデング出血熱およびデング熱ショック症候群に進むこともある。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

【ニ】

NIMBUS 衛星

解説：1964年に初めて打ち上げられた気象衛星のシリーズで、大気のリモートセンシングをテストするため

に作られた。

出典：<http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/history/nimbus1.html>（参考日：2009/12/03）

【ハ】

ppm (parts per million)

解説：体積の百万分率。

出典：<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/co2/knowledge/observation.html>（参考日：2009/11/04）

ppb(parts per billion)

解説：体積の十億分率。1ppm = 1000ppb。大気中のメタン濃度など、濃度レベルが低い場合に用いられる。

出典：http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/cdrom/report/html/2_2.html（参考日：2009/11/04）

バイオマス（現存量）

解説：一定の面積もしくは体積における生物体の総量。バイオマスの量は乾燥重量またはエネルギー量、炭素や窒素量で表される。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

【ヒ】

ヒステリシス

解説：2つの物理量が互いに関連していて、一方の増減が他方の増減に依存している場合に見られる現象。

出典：山崎昶訳，2009：オックスフォード科学辞典，株式会社朝倉書店。

必須気候観測要素(ECVs: Essential Climate Variables)

解説：技術的にも経済的にも総合観測においては実行可能な項目で、気象分野では気温、放射収支、エアロゾル特性等、海洋分野では海面温度、塩分濃度、二酸化炭素分圧等、陸域分野では河川流量、アルベド、LAI等、44項目と新項目としての土壌水分量からなる。

出典：<http://www.wmo.ch/pages/prog/gcos/index.php?name=EssentialClimateVariables>
（参考日：2009/11/19）

氷晶核

解説：氷晶の形成の元となる粒子のことで、大きさ0.2～0.7 μm の粘土鉱物等が主な成分である。

出典：日本陸水学会編，2006：陸水の事典，株式会社講談社サイエンティフィック。

【フ】

フィードバック

解説：プロセス間の相互作用メカニズム。最初の過程が次の過程の変化を引き起こした時に、それが今度は最初の過程に影響を与える。正のフィードバックは最初の過程を強め、負のフィードバックはそれを弱める。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

フェーズシフト

解説：ここでは、環境ストレスにより、サンゴ礁が藻場になってしまうこと（生態系の相転移）。

出典：<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~coral/profile/profile02.html>（参考日：2009/10/30）

フェノロジー（生物季節、生物季節学）

解説：周期的にくり返し起こる自然現象とその気候や季節変化との関係についての研究。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

複素屈折率

解説：吸収を伴う媒質の屈折率で、電磁気学における複素誘電率に対応する。複素屈折率虚数部の値が大きいほど光の吸収が強い。

出典：http://www.env.go.jp/earth/dss/report/02/05_2.pdf（参考日：2009/11/05）

腐食連鎖

解説：生物体の破片、死骸、排出物ならびにそれらの分解物の摂食から始まる食物連鎖。

出典：日本陸水学会編、2006：陸水の事典、株式会社講談社サイエンティフィック。

ブラックカーボン（BC：黒色炭素）

解説：石炭やディーゼルエンジン、薪などの生物燃料、バイオマスバーニングなどの不完全燃焼から放出される、すすの一種のエアロゾル。

出典：http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/cdrom/report/html/4_0bis.html（参考日：2009/10/30）

プロトコル（Protocol）

解説：ここでは衛星観測データの解析手順のこと。

出典：<http://e-words.jp/>（参考日：2009/11/10）

【ヘ】

偏光解消度

解説：偏光（光の振動ベクトルの方向が規則的なもの）が散乱により変わる割合。球形の散乱の場合、偏光は変わらないので、エアロゾルの非球形の指標となる。

出典：http://www.env.go.jp/earth/dss/report/02/05_2.pdf（参考日：2009/11/05）

ベントス

解説：水底に生息する生物、すなわち底生生物の総称。基質表面に生息する表在性ベントスと内部に生息する埋性ベントスに分けられる。

出典：[http://nrifs.fra.affrc.go.jp/yokosuka/higata/guide_line/HigataGL071211/3-1-4-1Bentos\(071214\).doc](http://nrifs.fra.affrc.go.jp/yokosuka/higata/guide_line/HigataGL071211/3-1-4-1Bentos(071214).doc)（参考日：2009/10/27）

【ホ】

放射強制力

解説：対流圏界面における正味鉛直放射量の変化で、二酸化炭素濃度やエアロゾル、太陽出力の変化など気候システムの強制力の内的あるいは外的な変化に由来する。 m^2 当たりのワット数で表される (W/m^2)。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

北極振動

解説：冬季北半球大気循環場の変動に卓越するパターンであり、北緯約 60 度を境に、南北に気圧場が逆相関をもつもの。

出典：http://www-arctic.nipr.ac.jp/news1t06/060110n1_5/060110n1_5.html（参考日：2009/10/27）

【マ】

毎木調査

解説：調査区域内のすべての木について行う樹種や樹高、直径などの調査。

出典：<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/dyr/doyurinka/goroku.htm>（参考日：2009/10/30）

マラリア

解説：Plasmodium 属（原虫）のいくつかの種が原因となって発生し、Anopheles 属の蚊によって伝染する風

土性もしくは流行性の寄生虫病；高熱発作と全身性疾患を引き起こす。毎年、世界で約3億人が罹患し、約200万人が死亡している。

出典：<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc-ar4-wg2/index.html>（参考日：2009/11/30）

【ミ】

ミー散乱

解説：球形の微粒子による光の散乱現象で、空気中のエアロゾルや雲による光の散乱がこの例である。微粒子の直径が光の波長に比して十分小さいときは、レイリー散乱と一致する。

出典：(財)国際科学振興財団編，2005：科学大辞典第2版，丸善株式会社

【メ】

メタデータ (Meta Data)

解説：データの意味を記述あるいは代表するデータ。

出典：長尾 真，稲垣 康善，辻井 潤一，中田 育男，石田 晴久，田中 英彦，所真理雄，米沢 明憲編，1990：岩波情報科学事典，岩波書店。

【モ】

モニタリングサイト1000 (Monitoring site 1000)

解説：「新・生物多様性国家戦略」に基づいて実施される長期的な生態系モニタリング。環境省自然環境局生物多様性センターが担当している。

出典：<http://www.biodic.go.jp/moni1000.html>（参考日：2009/11/05）

【ヨ】

ヨウ化カリウム法 (KI 法)

解説：オゾン含有量を測定する方法。ヨウ化カリウム水溶液中にオゾンを吹き込み、遊離して黄色く着色した液中に滴定したチオ硫酸ナトリウムの滴定量からオゾン含有量が定量的に測定できる。

出典：http://jstore.jst.go.jp/cgi-bin/patent/advanced/pat/detail_pat.cgi?patid=13326&detail_id=15351（参考日：2009/11/05）

葉面積指数 (Leaf Area Index)

解説：単位土地面積ごとの全葉面積の合計値。

出典：日本陸水学会編，2006：陸水の事典，株式会社講談社サイエンティフィック。

【ラ】

ラマン散乱

解説：単色光を物質に入射したとき物質中の分子振動あるいは固体の格子振動を励起あるいは吸収して、そのエネルギーの分だけ周波数が低くあるいは高くなった散乱光を生じる現象。

出典：(財)国際科学振興財団編，2005：科学大辞典第2版，丸善株式会社

【リ】

リグニン

解説：木材、タケ、ワラなどの木化した植物体を構成する主成分の1つ。

出典：(財)国際科学振興財団編，2005：科学大辞典第2版，丸善株式会社

リモートセンシング (Remote Sensing)

解説：直接的に対象物に触れることなく、受動、能動方式を問わず、何らかの方法で対象物からの電磁波の反射、放射、散乱等を観測することにより対象物に関する情報を収集すること。

出典：<http://www.science.aster.ersdac.or.jp/index.html>（参考日：2009/12/07）

【レ】

レイリー散乱

解説：入射光によって誘起される散乱体中の分極変化が、1つの電気双極子をみなせるときの光散乱現象。空気分子、水分子、極めて小さいエアロゾルによって発現する散乱現象で、分子散乱とも呼ばれており、青空、夕焼け、水の青さなど自然における光学現象の発生原因となっている。

出典：(財) 国際科学振興財団編，2005：科学大辞典第2版，丸善株式会社

レフュージア

解説：生物の避難場所・環境

出典：http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/report/part2chpt4.pdf（参考日：2009/11/19）

委員一覧

地球温暖化観測推進ワーキンググループ

鬼頭 昭雄 気象庁気象研究所気候研究部 部長(主査)

雲・エアロゾル・放射サブワーキンググループ

早坂 忠裕 国立大学法人東北大学大学院理学研究科 教授 (SWG 主査)
内山 明博 気象庁気象研究所気候研究部第三研究室 室長
塩原 匡貴 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所 准教授
杉本 伸夫 (独) 国立環境研究所大気圏環境研究領域遠隔計測研究室 室長
須田 一人 気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付 全球大気監視調整官
高見 昭憲 (独) 国立環境研究所アジア自然共生研究グループアジア広域大気研究室 室長
竹村 俊彦 国立大学法人九州大学応用力学研究所 准教授
戸田 謙一 (独) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター 計画マネージャ
松枝 秀和 気象庁気象研究所地球化学研究部第一研究室 室長
向井 人史 (独) 国立環境研究所地球環境研究センター炭素循環研究室 室長

影響評価サブワーキンググループ

高橋 潔 (独) 国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室 主任研究員 (SWG 主査)
東 久美子 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所 准教授
榎本 浩之 国立大学法人北見工業大学工学部社会環境工学科 教授
大畑 哲夫 (独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域 プログラムディレクター
鼎 信次郎 国立大学法人東京工業大学大学院情報理工学研究科 准教授
茅根 創 国立大学法人東京大学大学院理学系研究科 教授
小松 輝久 国立大学法人東京大学海洋研究所 准教授
三枝 信子 (独) 国立環境研究所地球環境研究センター陸域モニタリング推進室 室長
千葉 幸弘 (独) 森林総合研究所植物生態研究領域物質生産研究室 室長
仲岡 雅裕 国立大学法人北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 教授
日浦 勉 国立大学法人北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 教授
深見 和彦 (独) 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター 上席研究員
藤田 耕史 国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科 准教授
松浦陽次郎 (独) 森林総合研究所立地環境研究領域土壌資源研究室 室長

(平成22年3月現在)

執筆協力者

浅沼 順	国立大学法人筑波大学大学院生命環境科学研究科 准教授
石川 守	国立大学法人北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授
伊藤 昭彦	(独) 国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室 研究員
植松 光夫	国立大学法人東京大学海洋研究所 教授
大石 哲	国立大学法人神戸大学都市安全研究センター 教授
岡本 創	国立大学法人東北大学大学院理学研究科 准教授
金谷 有剛	(独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域 チームリーダー (主任研究員)
工藤 岳	国立大学法人北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授
佐野 到	近畿大学理工学部情報学科 准教授
杉浦幸之助	(独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域 主任研究員
瀬戸 心太	国立大学法人東京大学生産技術研究所 講師
高田久美子	(独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域 主任研究員
谷口 真人	大学共同利用機関法人人間文化研究機構総合地球環境学研究所 教授
中路 達郎	国立大学法人北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 助教
中島 孝	東海大学情報デザイン工学部情報システム学科 准教授
橋田 元	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所 助教
樋口 篤志	国立大学法人千葉大学環境リモートセンシング研究センター 准教授
保坂 征宏	気象庁気象研究所気候研究部第四研究室 主任研究官
村上 浩	(独) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター 主任研究員
矢吹 裕伯	(独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域 技術研究副主幹
山口 悟	(独) 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 主任研究員
横井 貴子	気象庁観測部情報管理室 応用気象情報係長
芳村 圭	カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所 研究員

(平成22年3月現在)

地球観測推進委員会（温暖化分野）

小池 勲夫	国立大学法人琉球大学 監事（委員長）
井上 元	大学共同利用機関法人人間文化研究機構総合地球環境学研究所 教授
沖 大幹	国立大学法人東京大学生産技術研究所 教授
近藤 洋輝	(独)海洋研究開発機構 IPCC 貢献地球環境予測プロジェクト 特任上席研究員
櫻井 尚武	日本大学生物資源科学部森林資源科学科 教授
田中 佐	国立大学法人山口大学大学院理工学研究科 教授
中尾 正義	大学共同利用機関法人人間文化研究機構 理事
中澤 高清	国立大学法人東北大学大学院理学研究科 教授
中静 透	国立大学法人東北大学大学院生命科学研究科 教授
中島 映至	国立大学法人東京大学気候システム研究センター センター長 教授
野尻 幸宏	(独) 国立環境研究所地球環境研究センター 副センター長
陽 捷行	北里大学 副学長
三村 信男	国立大学法人茨城大学 学長特別補佐 地球変動適応科学研究機関機関長 教授
山本 晋	国立大学法人岡山大学環境管理センター センター長 教授

(平成 22 年 3 月現在)

審議経過

平成20年度

平成20年6月13日

地球観測推進委員会(温暖化分野)第1回会合

○報告書第2号で扱うテーマについて審議。

平成20年9月26日

地球観測推進委員会(温暖化分野)第2回会合

○報告書第2号(案)における検討項目について審議。

平成20年10月7日

地球温暖化観測推進ワーキンググループ第1回会合

○報告書第2号作成の目的、方向性、および執筆項目について審議。

平成21年1月30日

地球温暖化観測推進ワーキンググループ第2回会合

○報告書第2号の全体構成、執筆項目の詳細について審議。執筆項目と執筆者の決定、および各章の詳細な内容について審議。

平成21年3月12日

地球観測推進委員会(温暖化分野)・地球温暖化観測推進ワーキンググループ合同会合

○報告書第2号概要案について審議。

平成21年3月12日

地球温暖化観測推進ワーキンググループ第4回会合

○合同会合での検討を受けて、報告書第2号概要案を審議。

平成21年度

平成21年6月25日

地球温暖化観測推進ワーキンググループ第1回会合

○報告書第2号骨子案について審議。

平成21年9月25日

地球観測推進委員会(温暖化分野)・地球温暖化観測推進ワーキンググループ合同会合

○報告書第2号第1次ドラフトについて審議。

平成21年12月18日

地球観測推進委員会(温暖化分野)・地球温暖化観測推進ワーキンググループ合同会合

○報告書第2号第2次ドラフトについて審議。

平成22年2月19日

地球観測推進委員会(温暖化分野)・地球温暖化観測推進ワーキンググループ合同会合

○報告書第2号最終案について審議。

編集事務担当

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

(独) 国立環境研究所地球環境センター内

地球温暖化観測推進事務局／環境省・気象庁

藤谷 徳之助

新明 雄

内田 エミ

伊藤 玲子

伊藤 智夏

坂野 たまき