太陽放射エネルギー観測の現状と課題

早坂忠裕
（東北大学・大学院理学研究科）

謝辞：下記の方々の図をお借りしました。
高村民雄（千葉大学）
内山明博（気象研究所）
三枝信子（国立環境研究所）

内容

- 太陽放射エネルギー観測の歴史
  - １９世紀以前から２０世紀初めまで
  - 空洞黒体絶対放射計
  - サーモパイル型日射計
  - 世界放射基準(WRR)と世界放射センター(WRC)
  - 国際地球観測年による世界展開
  - Baseline Surface Radiation Network (BSRN)
- 現在の気候変動研究における日射量の観測
  - 日射量の全球マップ図
  - Global Dimming and Brightening
  - 日照時間や雲量を用いた日射量の推定
- 分光放射計による太陽放射観測の現状
  - 検定の重要性
  - 多様な使われ方
- まとめ
  - 観測機器固有の課題
  - 観測目的に応じた測器、検定、オペレーション

太陽放射エネルギー観測の歴史

１９世紀以前から２０世紀初めまで

Pouilletの直達日射計

- イギリスの天文学者 J. F. W. Herschelによる無気黒色温度計を応用―太陽放射の吸収熱を温度変化に代えて計測。
- １８３７年、フランス人Pouilletによる太陽定数の推定。
- 現在の太陽定数よりも１３％小さい値を得た。
- その後の流水式日射計や銀盤日射計の原型となった。

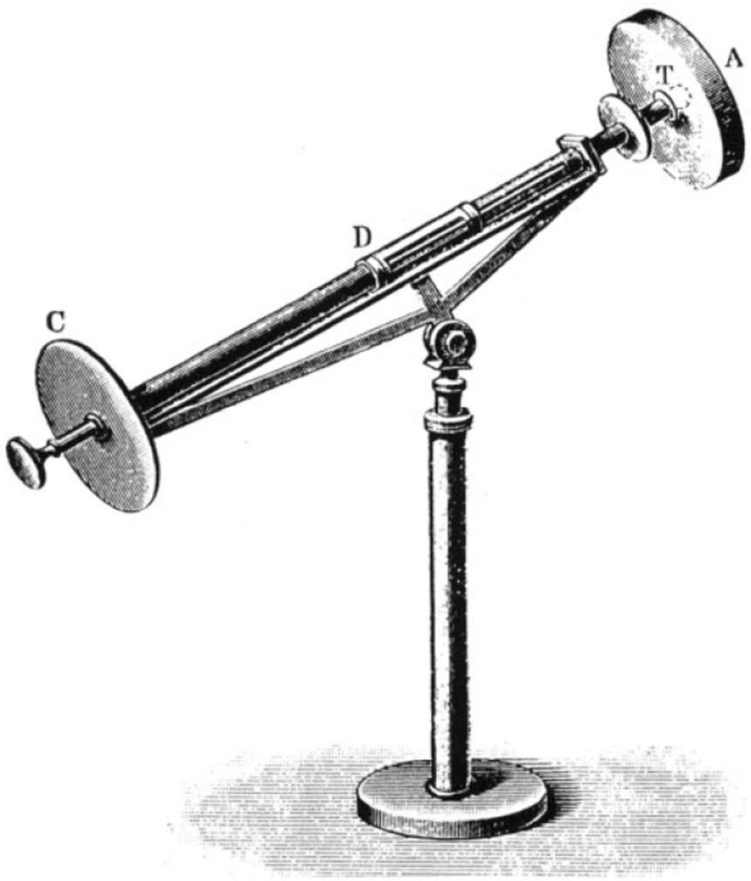


Figure 1. Pouillet's pyrheliometer. A : blackened receiver (metallic container filled with water) ; T : bulb of thermometer ; D, C : alignment check.

（Fröhlich, 1991）

銀盤日射計

- 1908年にスミソニアン天体物理研究所で開発
- 日本では1932年に中央気象台で開発、その後1981年まで使用
- 黒色塗装された銀盤の温度変化を水銀温度計を用いて測定

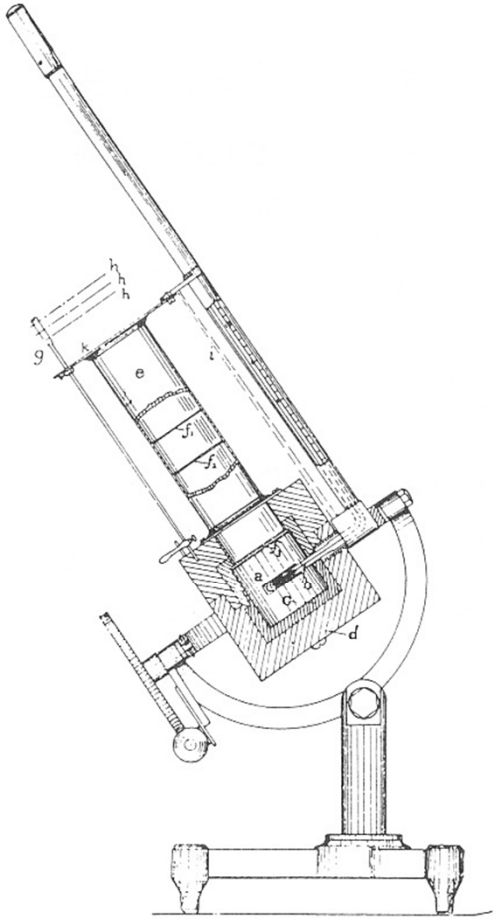


図 7.7　銀盤日射計の構造
a：銀盤　b：水銀温度計　c：銅の円筒容器
d：木製容器　e：筒　f：隔壁　h：シャッター
i：太陽直射光　k：温度計支持板

（気象研究ノート185号、1996より）

オングストロームの電気補償式直達日射計

- １８９３年、K. Ångströmにより開発された。
- 薄い黒色マンガニン板２枚の１枚に受光、もう１枚に電流を流してジュール熱を発生させる。同じ温度になるように調整して受光した太陽放射エネルギーを推定する。
- 現在の絶対放射計に繋がった。

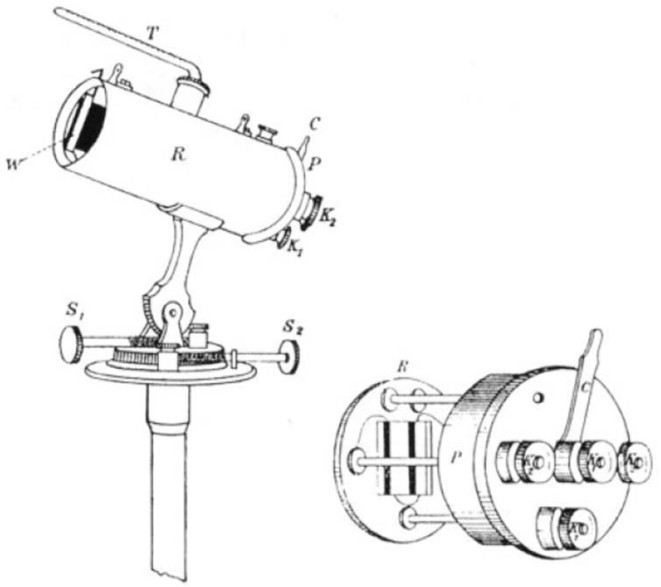


Figure 2. Ångström compensation pyrheliometer. Left, general view ; right, detector. $S_{1,2}$ adjustment for alignment on the sun ; W : shutter for shading left- or right-hand strip ; R : detector tube ; T : thermometer ; K_1 : current connection ; K_2 : thermoelement connection ; C : current switch for selecting left- or right-hand strip heating.

（Fröhlich, 1991）

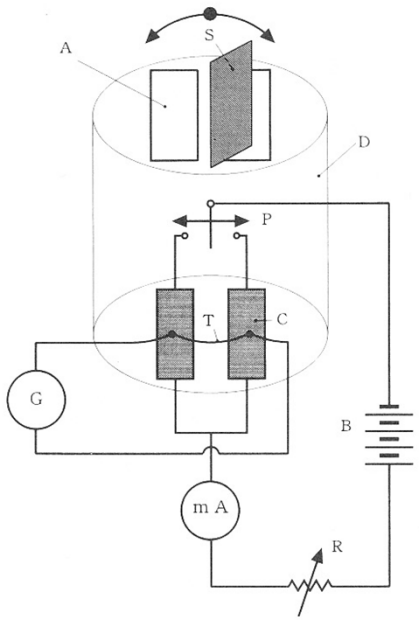
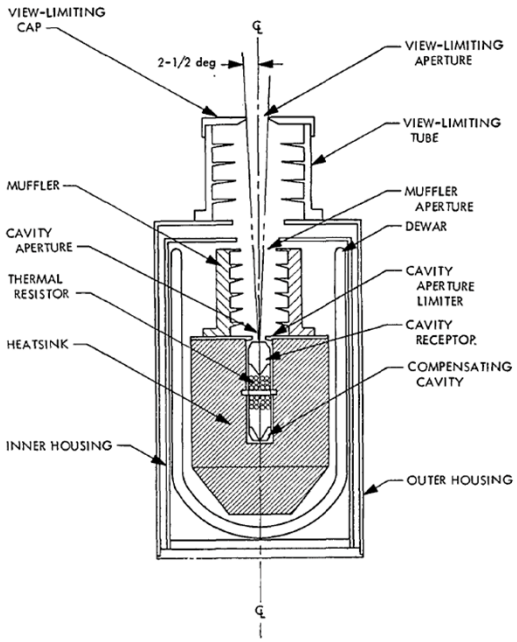


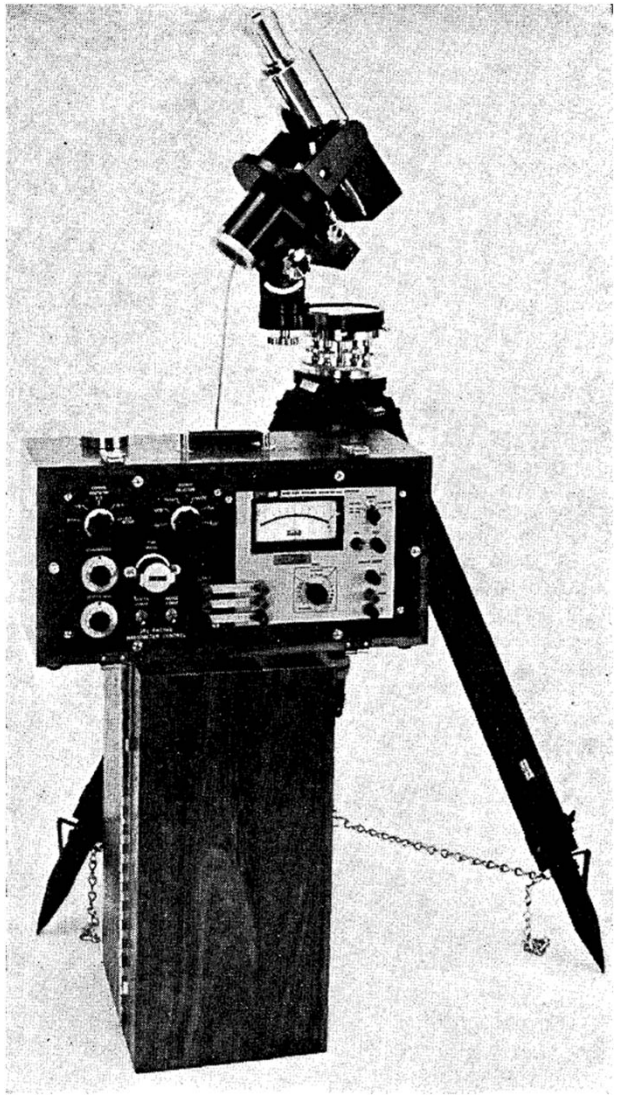
図７.６　オングストローム補償日射計の構造
Ａ：開口　Ｂ：バッテリー　Ｃ：受光板　Ｄ：金属筒
Ｐ：切替スイッチ　Ｒ：可変抵抗　Ｓ：シャッター
Ｔ：熱電対　Ｇ：検流計　mA：電流計

（気象研究ノート185号、1996より）

空洞黒体絶対放射計

- １９６０年代にアメリカ・ジェット推進研究所（JPL）等が開発。
- 受光部と補償空洞にヒーターを巻き、電気的に加熱して受光時と遮蔽時の両者の温度差を電気的に補償して測る（能動型）。または、遮蔽時に受光部が受光時と同じ温度になるように加熱して電気的に熱量を測る（受動型）。





(Kendall and Berdahl, 1970)

サーモパイル型全天日射計

- 熱電堆（thermopile）を用いて受光部とヒートシンクの温度差から生じる起電力により測定。
- または、大きさや色（白・黒）を代えて2種類の熱電堆受光部を用い、その温度差から日射量を測定。
- 熱電堆には一般に銅・コンスタンタンが用いられる。

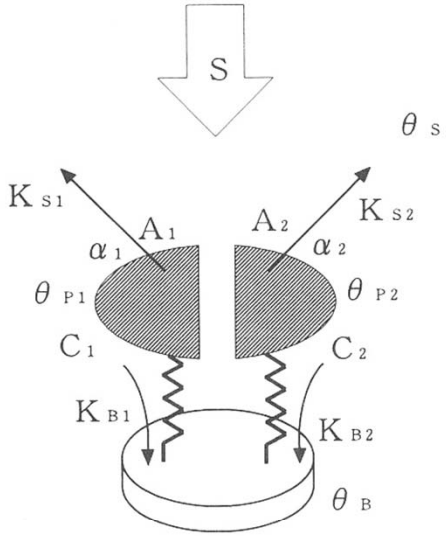


図 7.13　2 枚の受光板を持つ全天日射計受光部の単純化された構造

$$\theta_{P2}-\theta_{P1}=S\cdot\left\{\frac{\alpha_2\cdot A_2}{K_{B2}+K_{S2}}-\frac{\alpha_1\cdot A_1}{K_{B1}+K_{S1}}\right\} \tag{7.31}$$

$$\theta_{P2}-\theta_{P1}=\frac{S\cdot A}{K_B+K_S}\cdot\{\alpha_2-\alpha_1\} \tag{7.32}$$

（気象研究ノート185号、1996より）

世界放射基準(WRR)と世界放射センター(WRC)

- WRRは１９７７年に５台の空洞黒体絶対放射計の平均値として定義。
- スイス・ダヴォスの世界放射センター（WRC）で維持。精度は±０．３％以下。
- かつてのÅngström Scale 1905（主にヨーロッパで使用）とSmithsonian Scale 1913（主にアメリカで使用）の差は５．０％であったことが判明。
- その結果、
  - WRR/Ångström Scale 1905=1.026
  - WRR/Smithsonian Scale 1913=0.977
  - WRR/IPS-1956=1.022
- 我が国では１９５６年までSmithsonian Scale 1913、その後１９８０年まではIPS-1956、その後はWRR。

Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos (PMOD) / World Radiation Center (WRC)

・もともとは結核の療養所として１９０７年に設立。
・１９０９年から太陽直達光の観測を開始。
・１９２６年にSFI（Schweizerisches Forschungsinstitut für Hochgebirgsklima und Medizin：高山気候と医療に関するスイス研究所）の一部となった。
・１９７１年に世界気象機関（WMO）がWRCに指定。

国際地球観測年（International Geopysical Year, IGY1957-1958）

“One of the principal aims of the IGY was to learn more about the relations of our planet to the sun. The meteorological programs in all parts of the world were reinforced with solar radiation measurements.” (Landsberg, 1961)

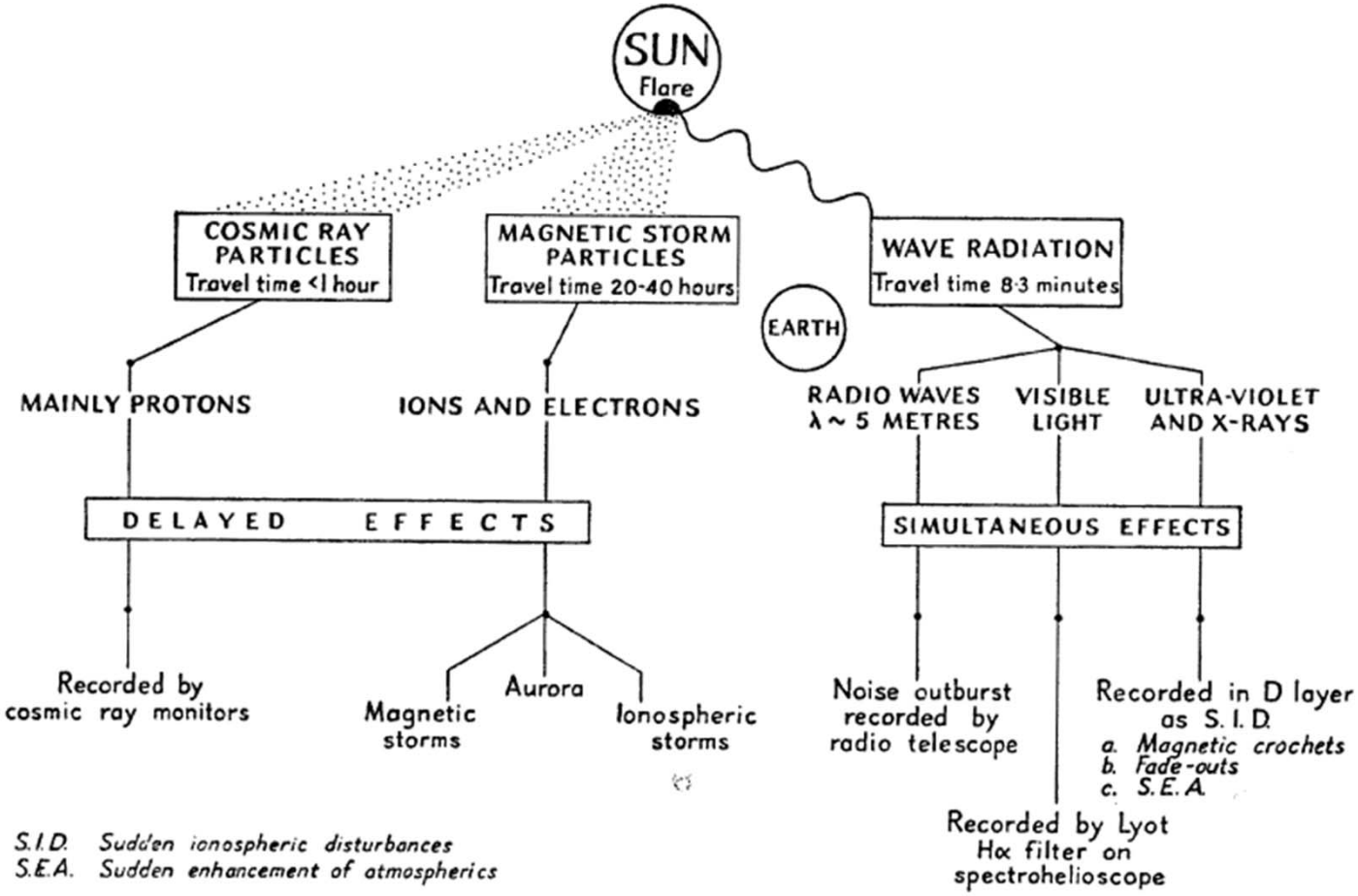
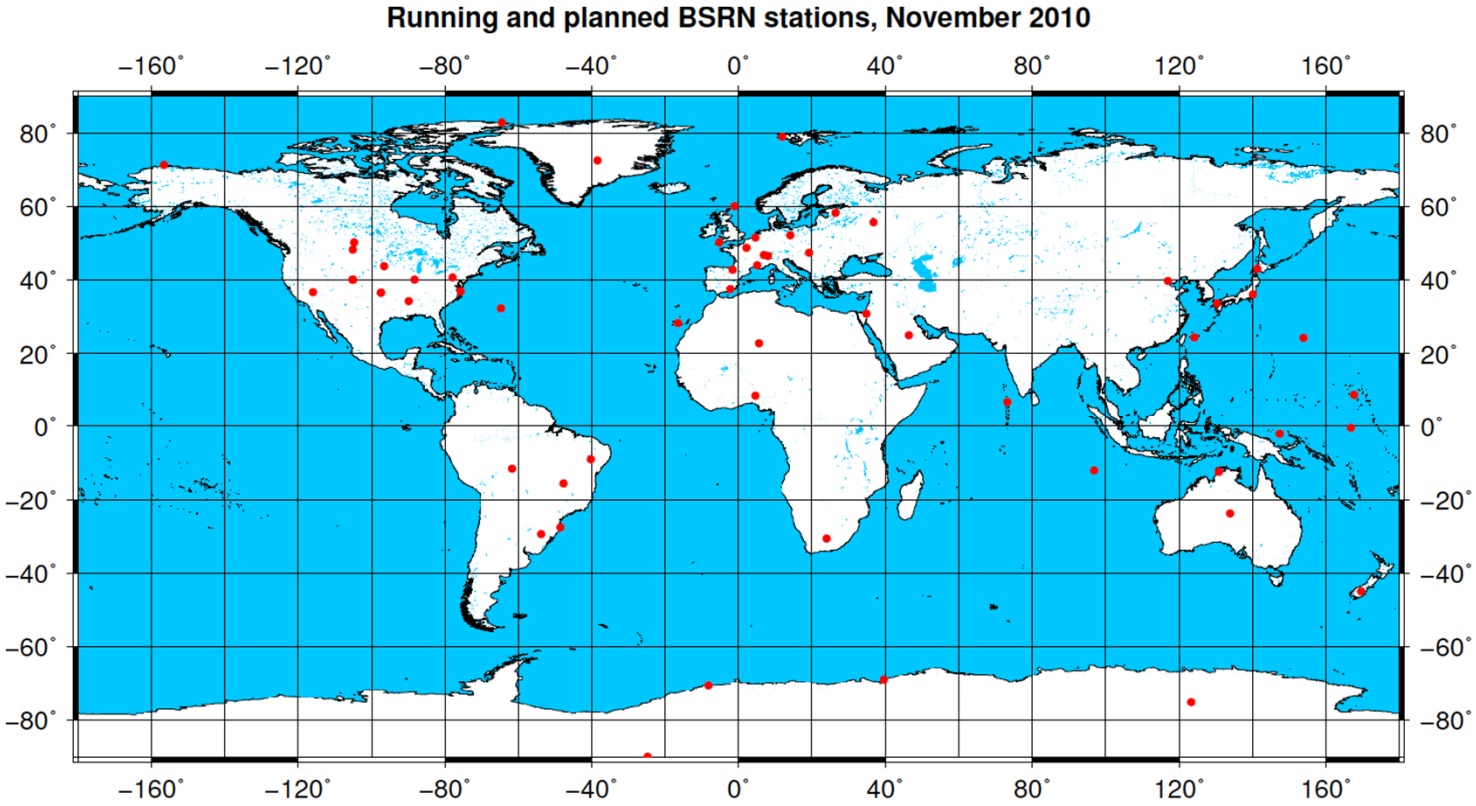


Fig. 1. Terrestrial effects of solar flares (reproduced by courtesy of Dr. M. A. Ellison)

(Martin, 1958)

Baseline Surface Radiation Network (BSRN)

- WCRP/GEWEX の一環として１９９２年にスタート。２００７年まではスイス連邦工科大学（PI=大村纂）で維持。その後はドイツのAlfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI)が維持。
- 精密な放射測定システムを備え、気象データ等も近くで観測されていることなど、厳しい条件を満たした観測ステーションのネットワーク。現在５９箇所。



現在の気候変動研究における日射量の観測

日射量の全球分布図の例

(Budyko, 1956)

$$S = S_0\left[1-(1-k)n\right]$$

S : 日射量
S_0 : 晴天日の日射量
n : 雲量

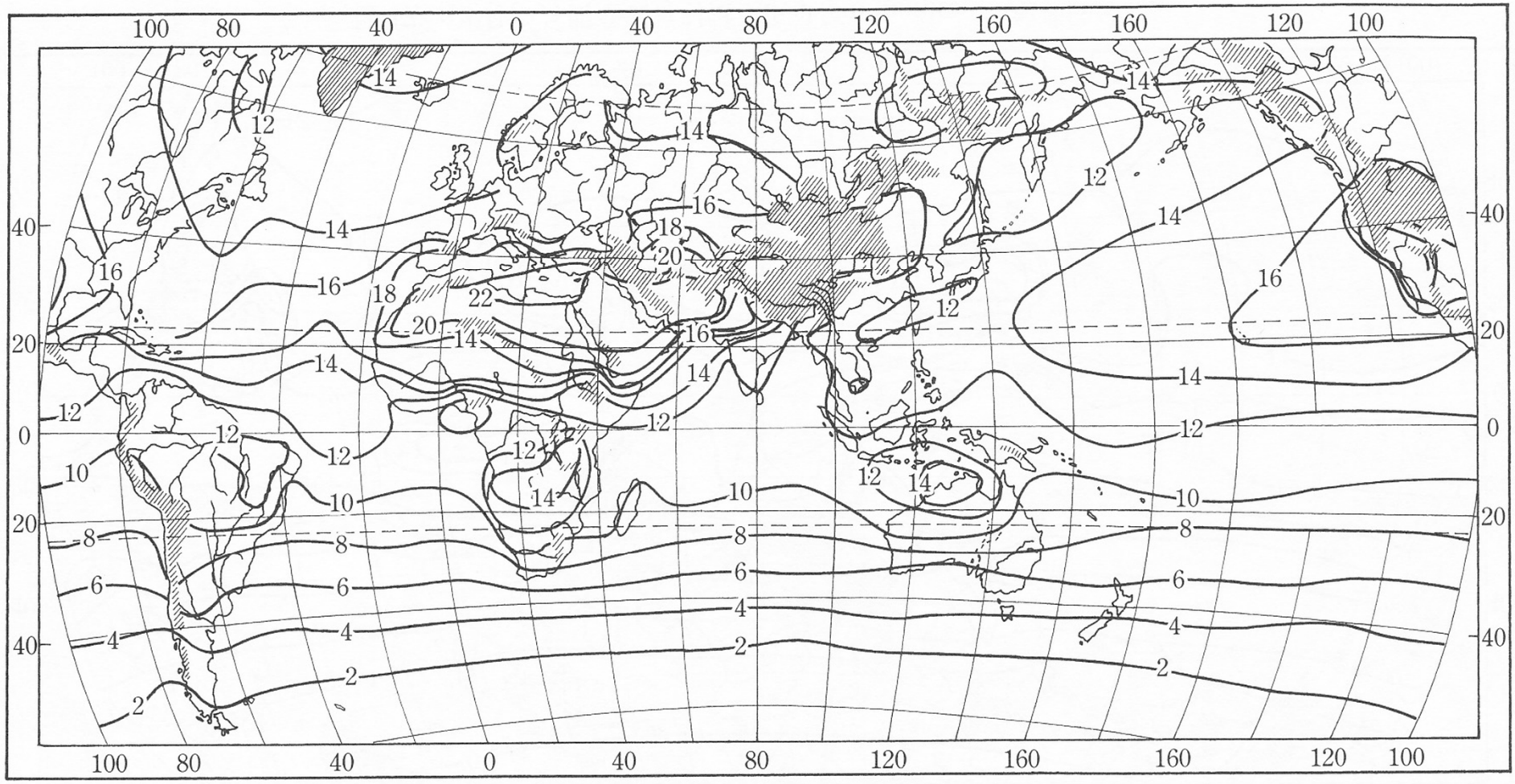
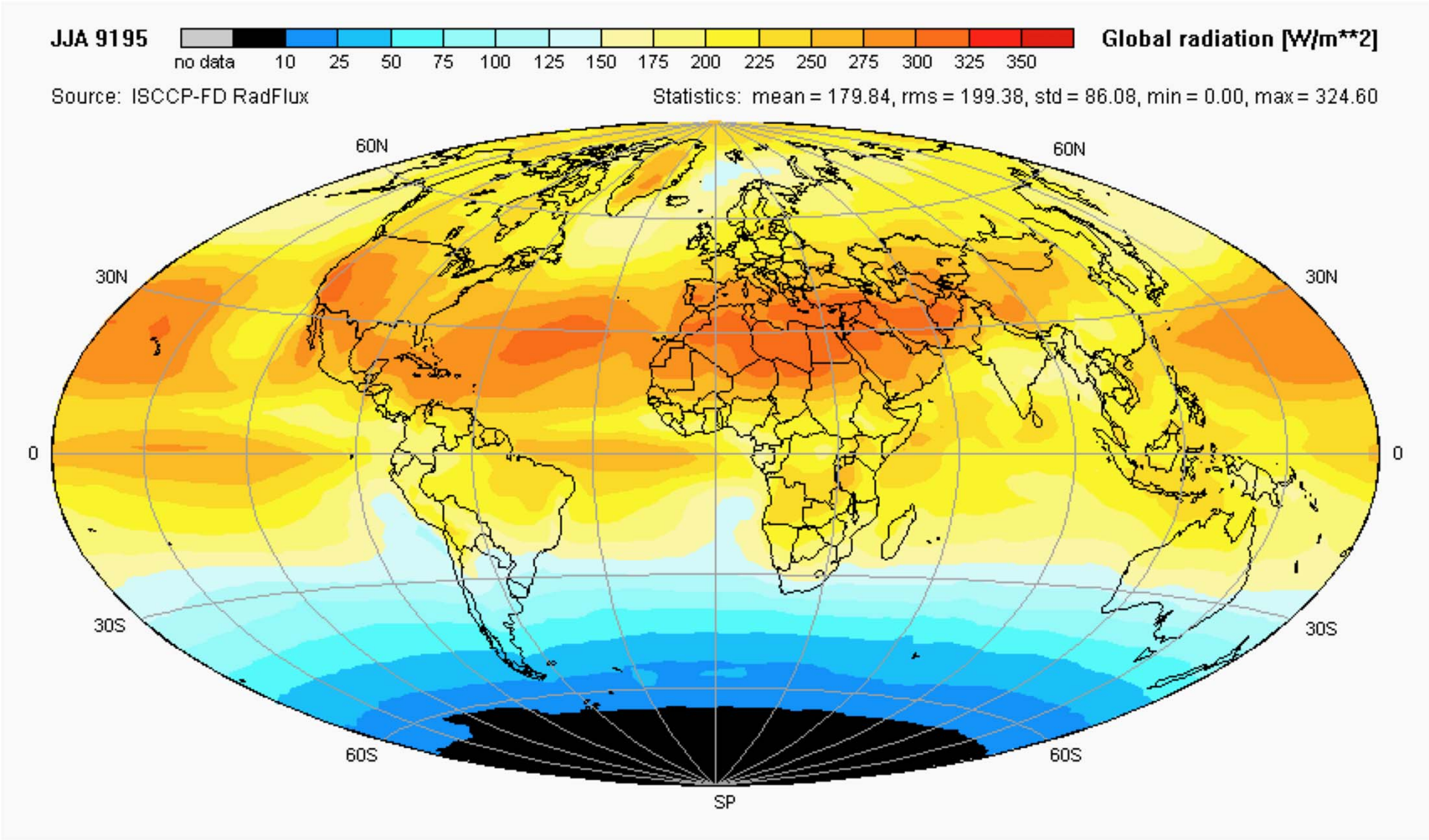


図 18　6 月の月間全天日射量（kcal/cm²month）の地理的分布

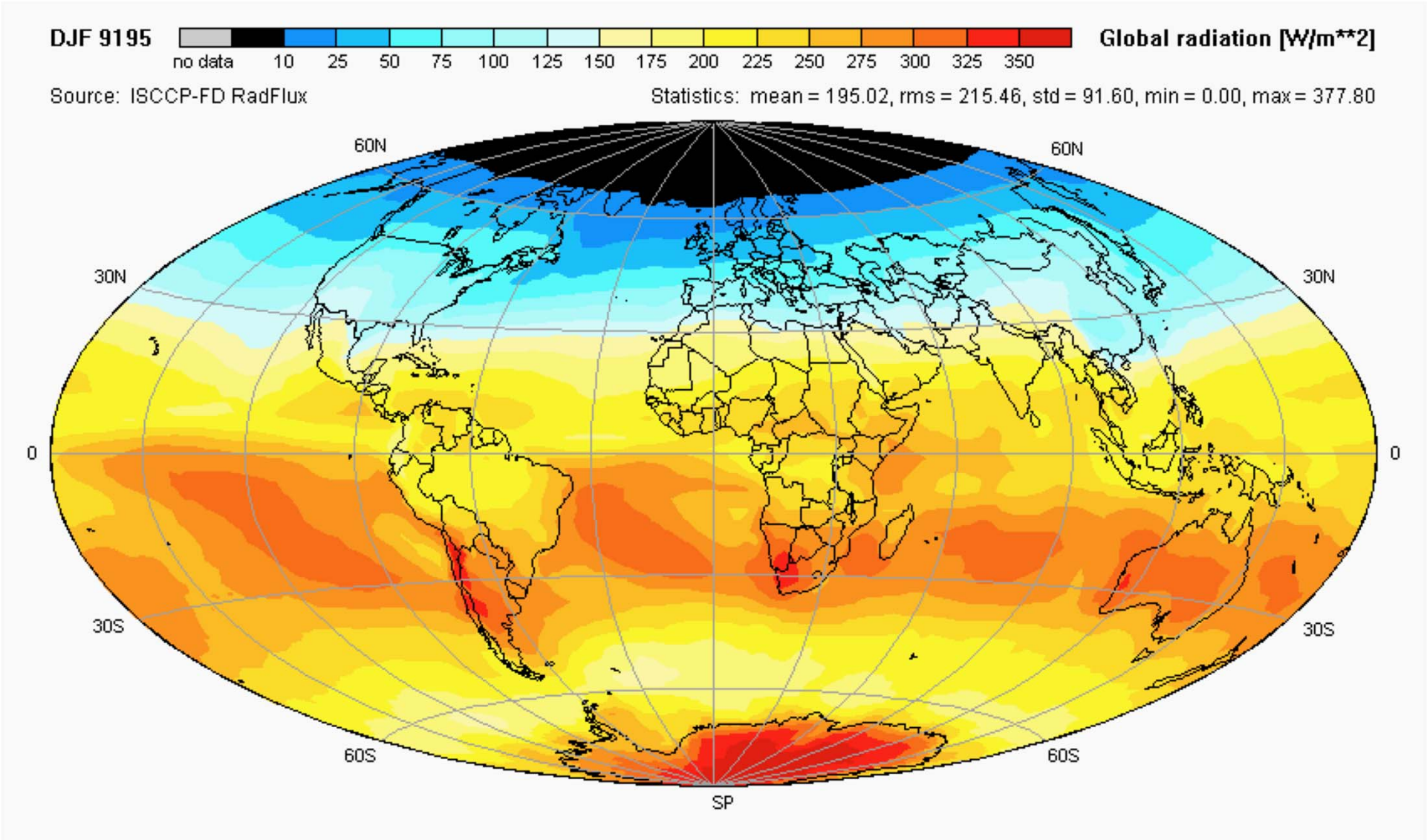
(1 kcal/cm^2/month = 16.15 W/m^2)

夏の日平均日射量（地表における下向き短波放射量）



(Raschke, 2004)

冬の日平均日射量（地表における下向き短波放射量）



(Raschke, 2004)

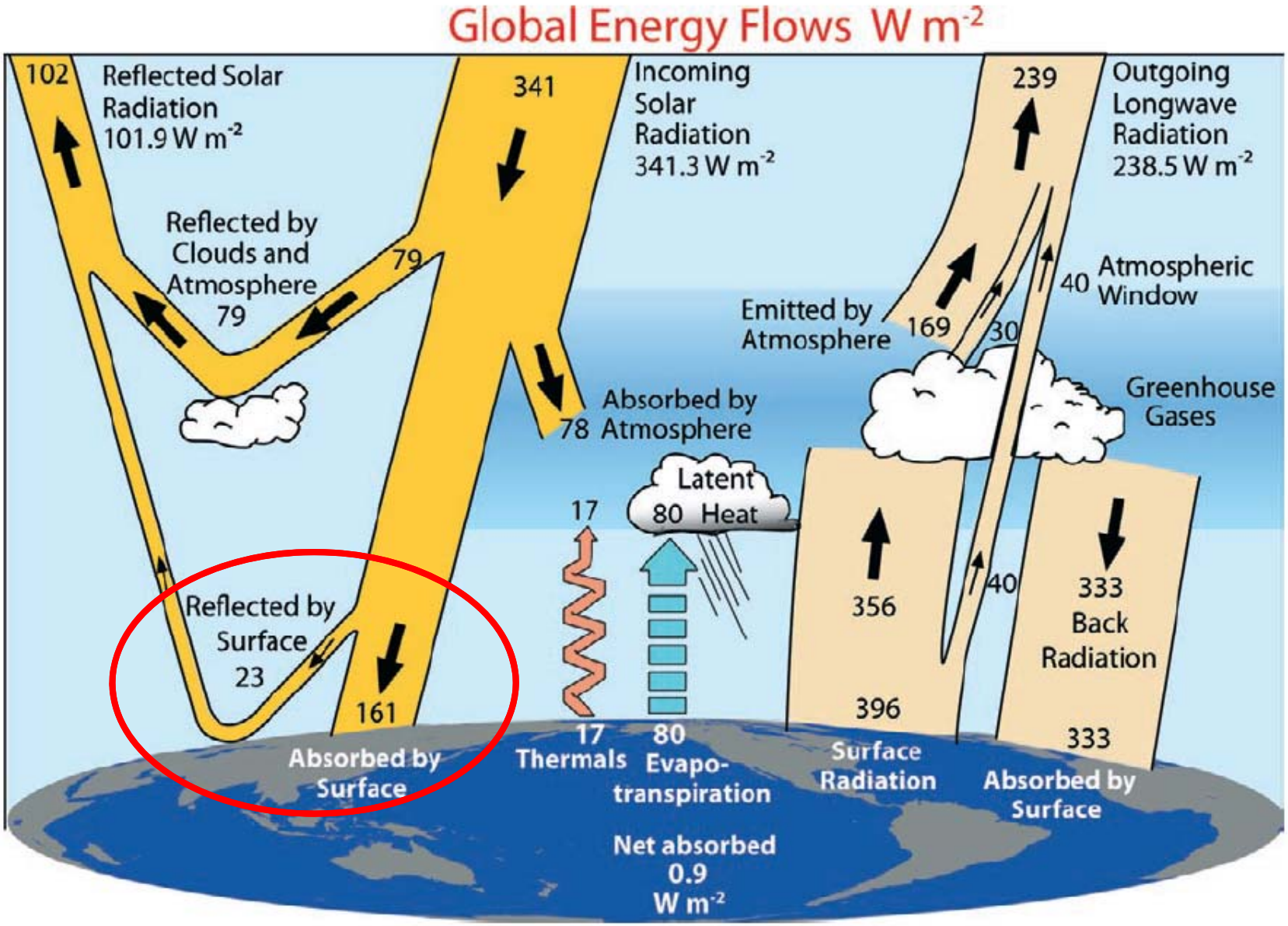
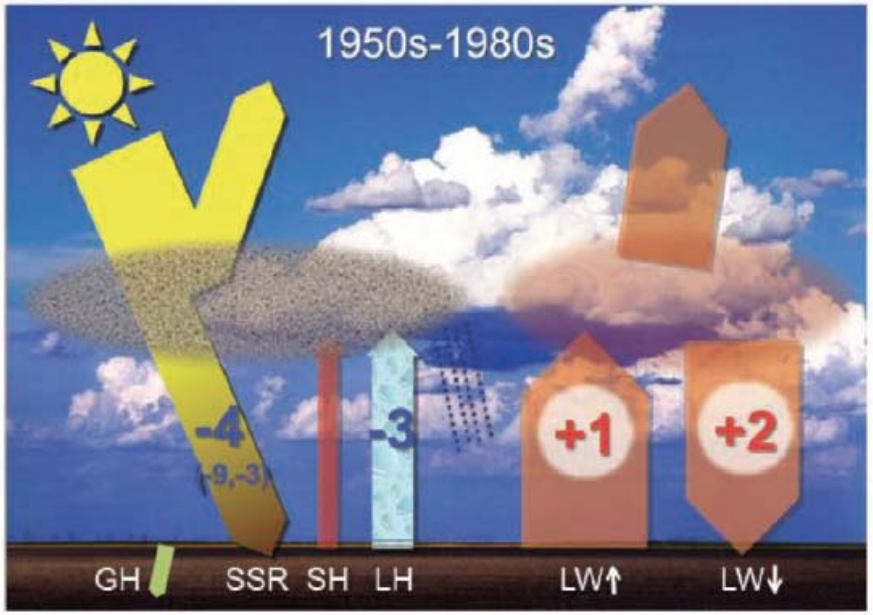


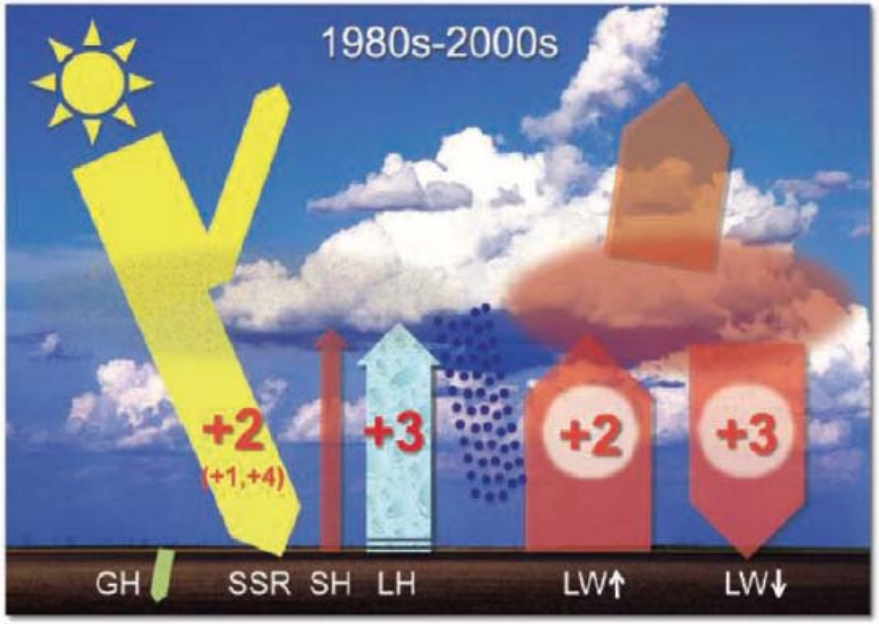
FIG. 1. The global annual mean Earth's energy budget for the Mar 2000 to May 2004 period (W m^{-2}). The broad arrows indicate the schematic flow of energy in proportion to their importance.

(Trenberth et al., 2009)

DIMMING



BRIGHTENING



Observed tendencies in surface solar radiation (W/m^2/decade)

	1950s-1980s	1980s-2000	after 2000
USA	-6	5	8
Europe	-3	2	3
China/Mongolia	-7	3	-4
Japan	-5	8	0
India	-3	-8	-10

(Wild, 2012)

中国における日射量の長期変動

(Shi, Hayasaka et al., 2008)

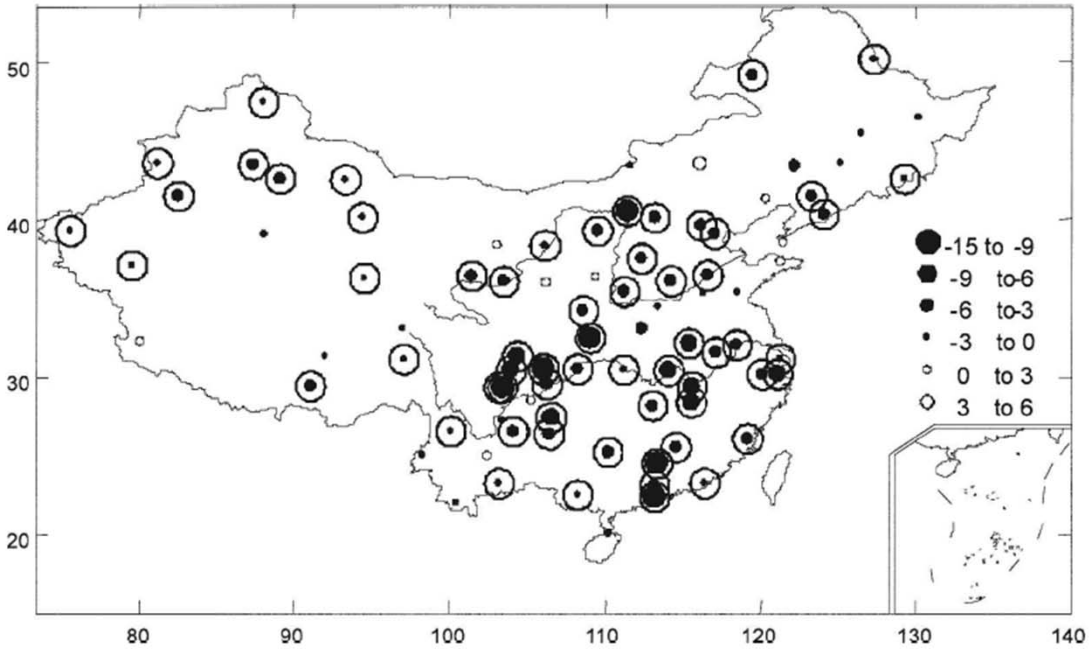


FIG. 5. Distribution of long-term [% (10 yr)$^{-1}$] variations in annual mean global solar radiation in China. Station trend indicators with circles around them are significant at the 95% confidence level.

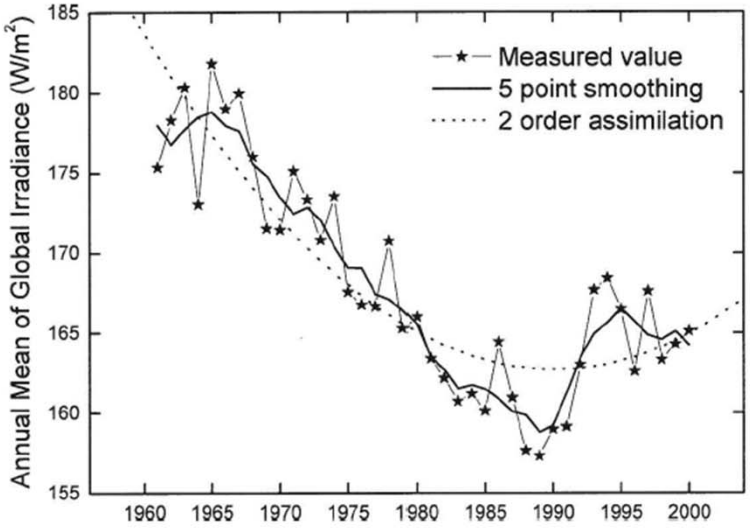


FIG. 3. Time series of annually averaged global solar radiation at all stations.

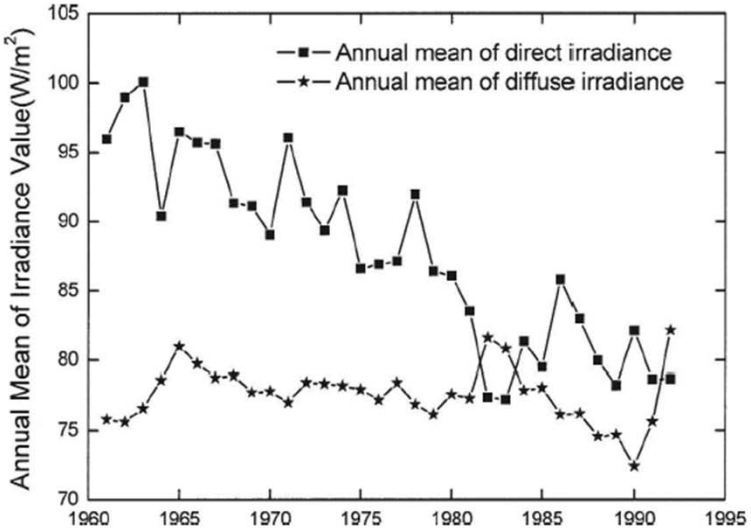
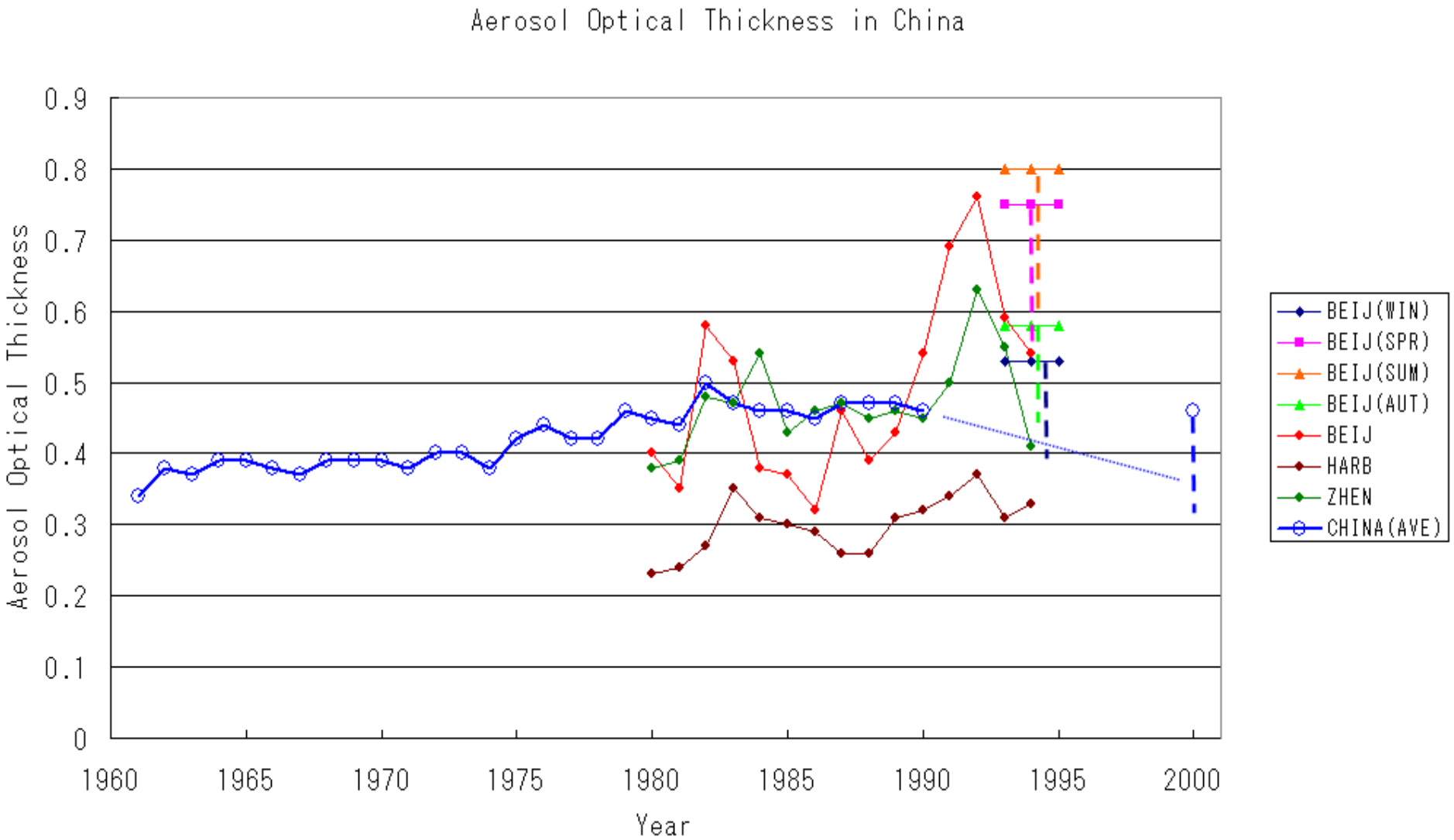
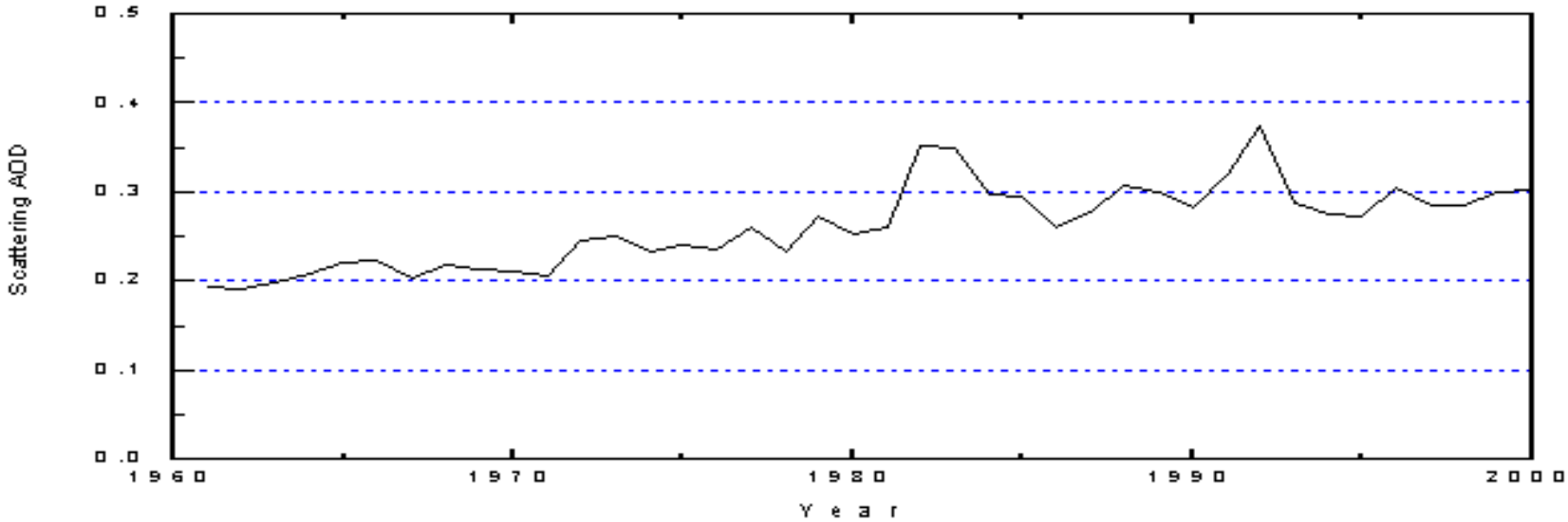


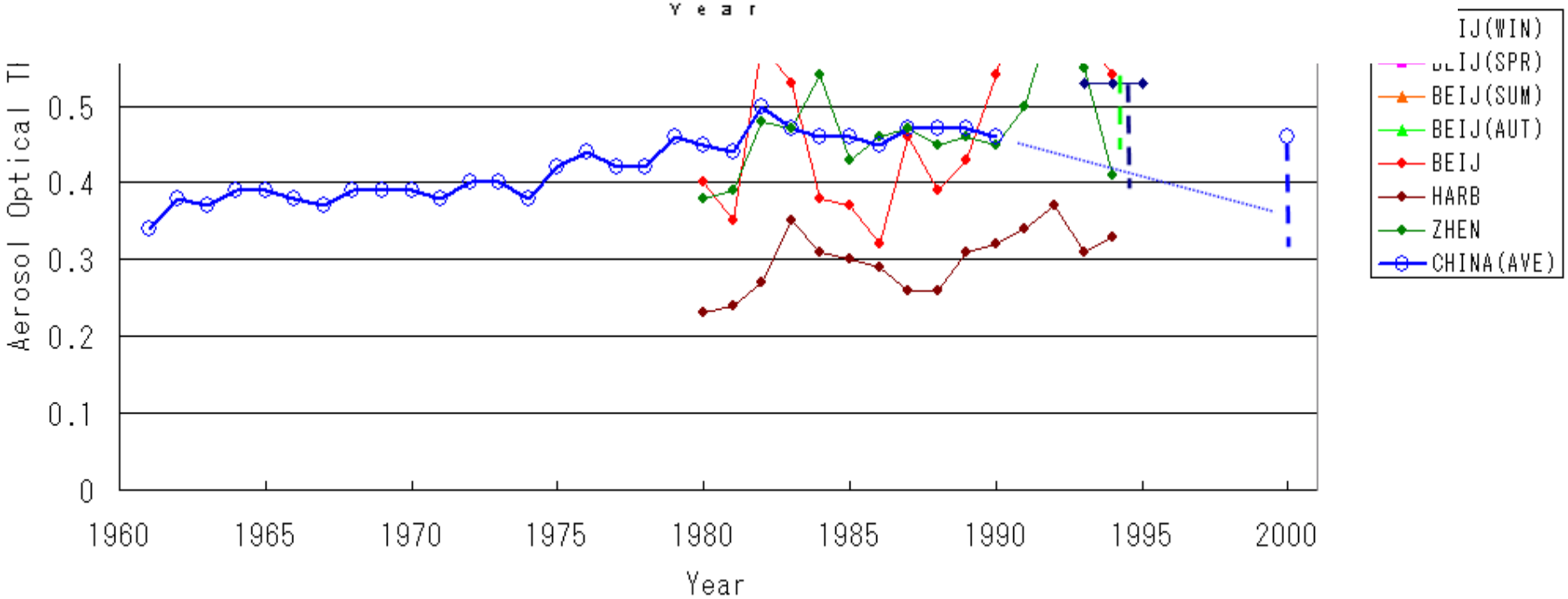
FIG. 4. Long-term variations of direct and diffuse solar radiation.



From Qiu et al. (2000), Luo et al. (2001), Chu et al. (2003)

Scattering AOD by Wang (2006)





From Qiu et al. (2000), Luo et al. (2001), Chu et al. (2003)

Total cloud amount trend for 1951 - 1994

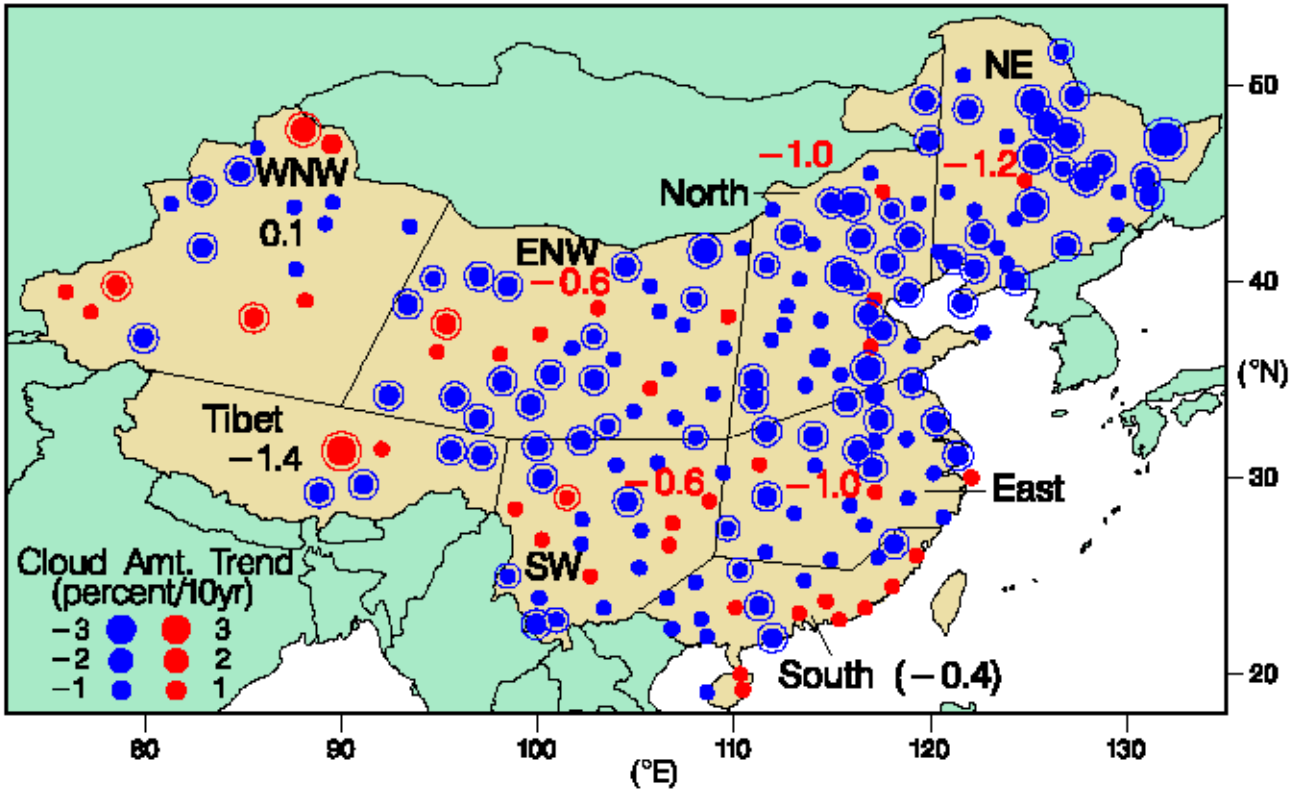
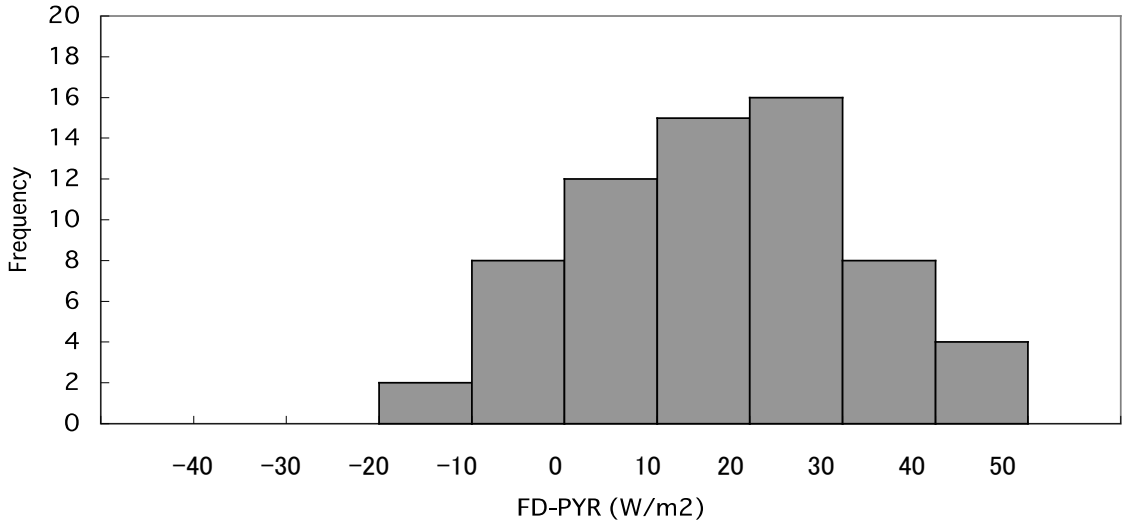


Figure 1. Trends in annual mean midday cloud amount for 1951-1994 (percent sky cover per decade). Station trend indicators with circles around them are significant at the 95% confidence level, as are regional trend values in red.

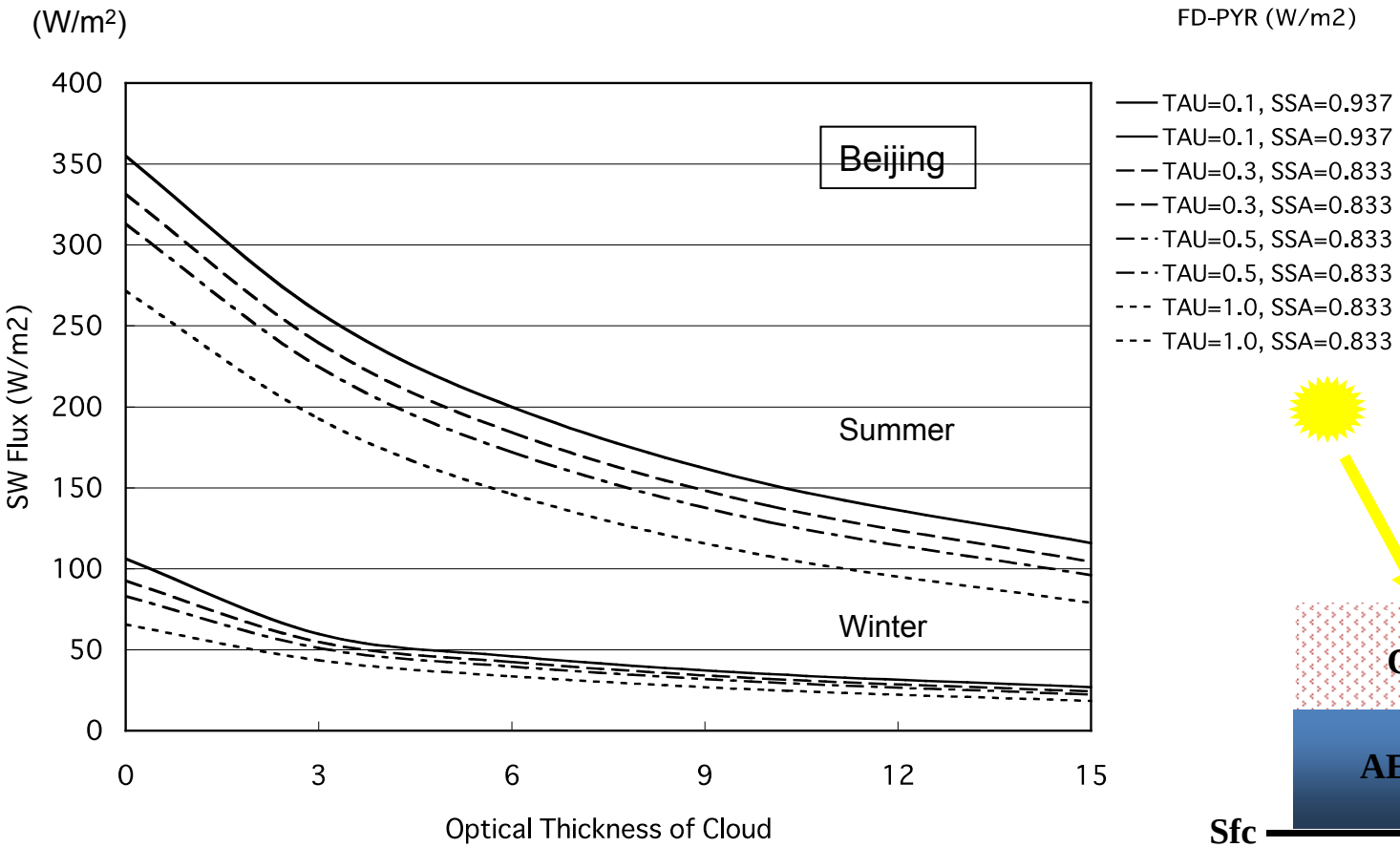
Kaiser (1998, GRL)

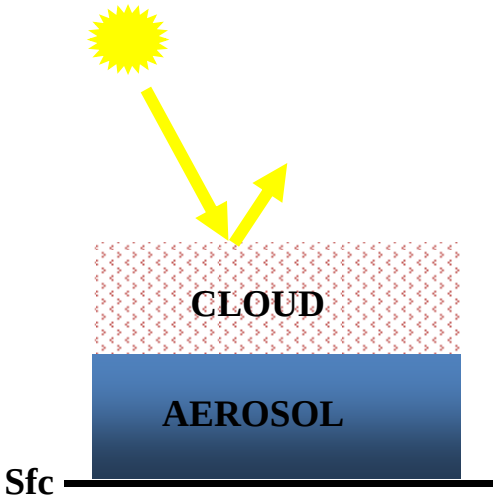
中国における日射量の観測値
（衛星観測−日射計）

(Hayasaka et al., 2006)



境界層内の光吸収特性の強い
エアロゾルの存在で説明できる。





Parameterizations for SW radiation (1)

For clear sky condition, downward SW flux is estimated by using basic meteorological data,

$$\frac{S_{df}}{S_{0d}} = (C_1 + 0.7 \times 10^{-m_d F_1})(1 - i_3)(1 + j_1)$$

$$C_1 = 0.21 - 0.2\beta_{DUST}, \qquad \beta_{DUST} < 0.3$$

$$= 0.15, \qquad \beta_{DUST} \geq 0.3$$

$$F_1 = 0.056 + 0.16(\beta_{DUST})^{0.5}$$

$$i_3 = 0.014(m_d + 7 + 2\log_{10} w)\log_{10} w$$

$$j_1 = \left[0.066 + 0.34(\beta_{DUST})^{0.5}\right](ref - 0.15)$$

S_{df}: average downward SW flux on the Earth's surface,
S_{0d}: SW flux at the top of atmosphere,
β_{DUST}: turbidity factor, m_d: daily mean optical airmass,
w: precipitable water, ref: surface albedo

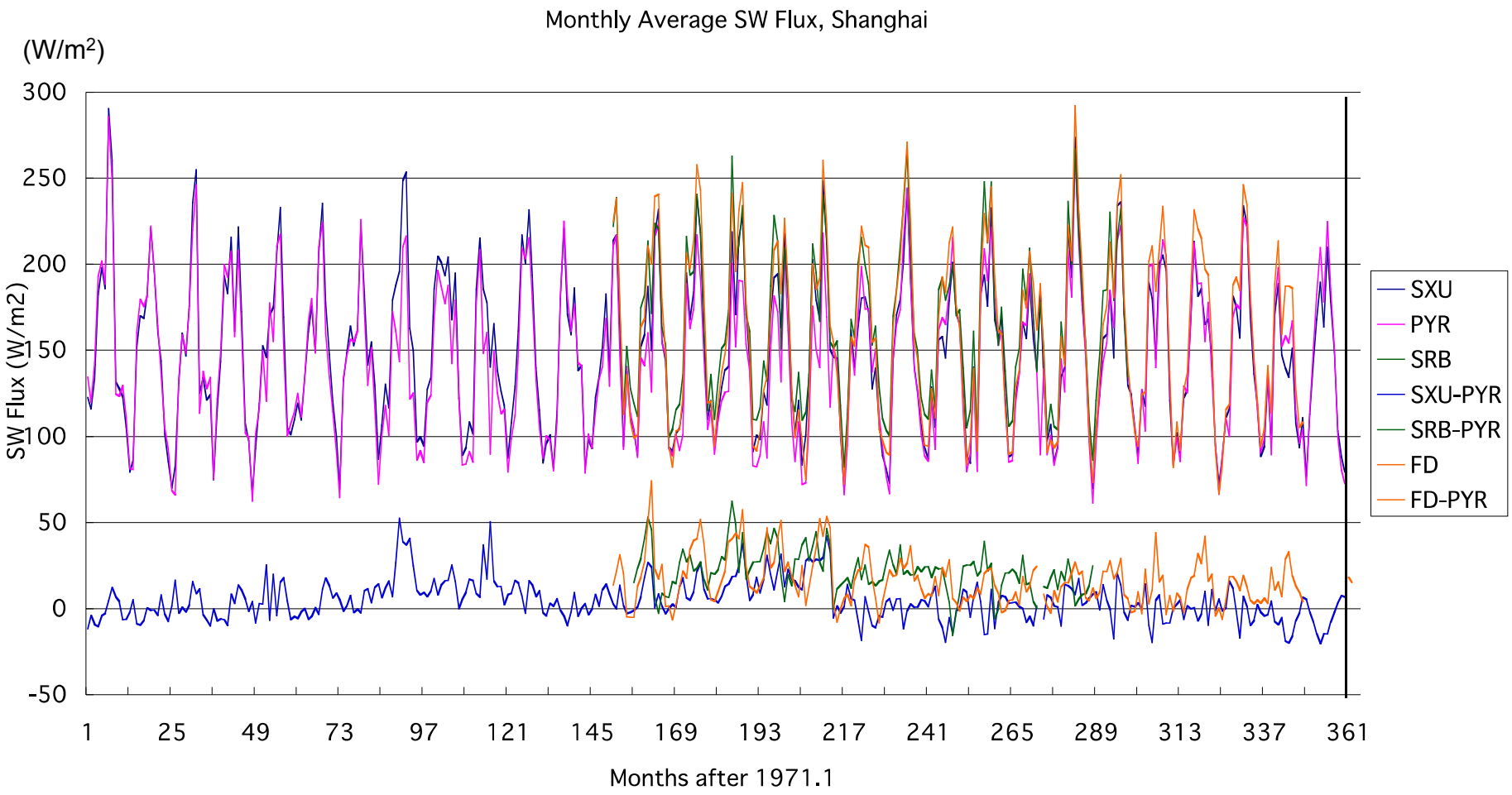
Parameterizations for SW radiation (2)

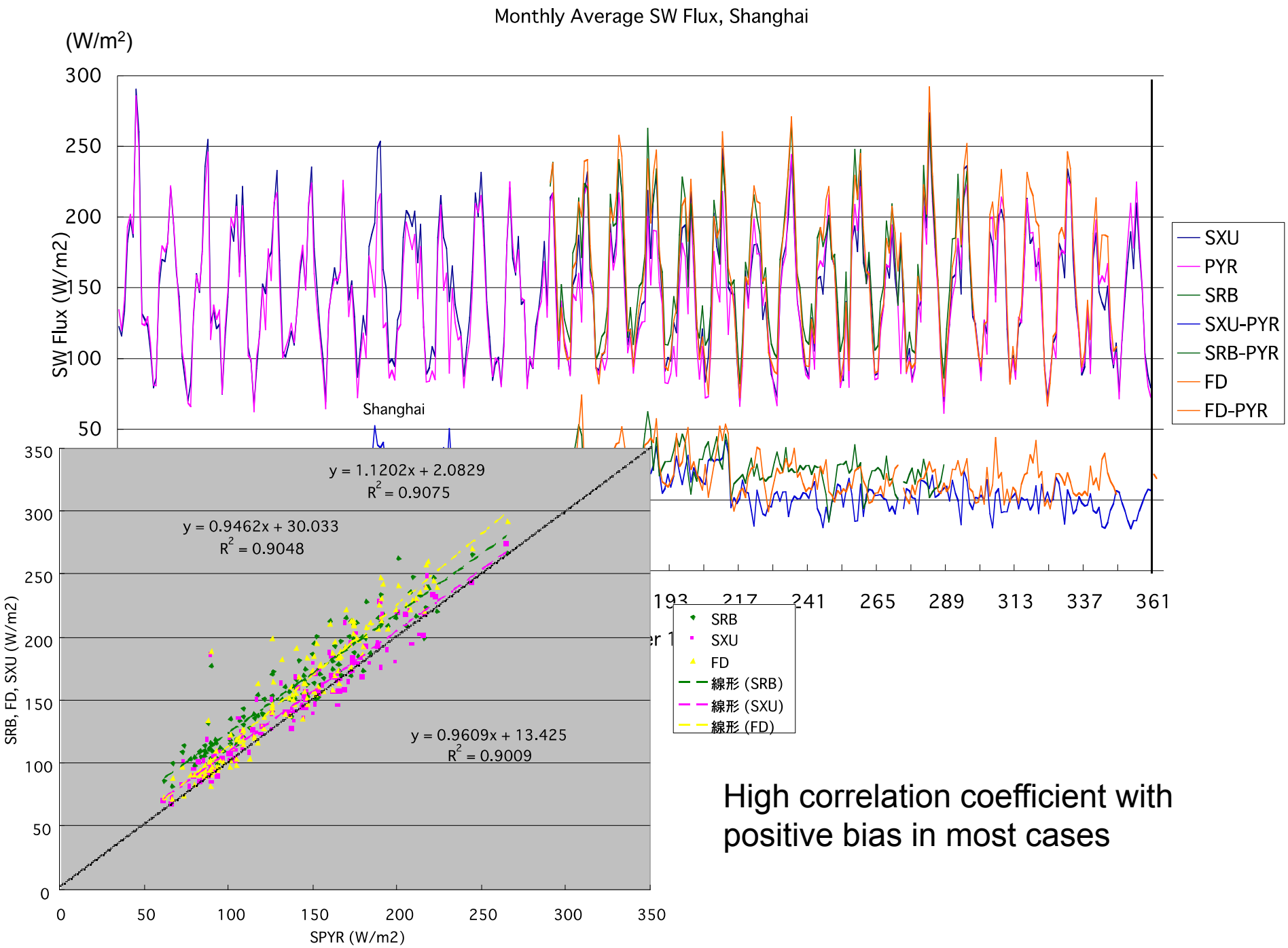
For cloudy sky condition, downward SW flux is estimated from sunshine duration,

$$\frac{S_d}{S_{0d}} = a + b\frac{N + \Delta N}{N_0} \quad \text{for} \quad 0 < \frac{N}{N_0} \leq 1$$

$$= c \quad \text{for} \quad \frac{N}{N_0} = 0$$

S_d: average downward SW flux on the Earth's surface,
S_{0d}: SW flux at the top of atmosphere,
N: sunshine duration, N_0: maximum sunshine duration,
$a, b, c, \Delta N$: parameters depending on the instrument type


Monthly Average SW Flux, Shanghai
(W/m2)
300
250
200
150
100
50
0
-50
SW Flux (W/m2)
1
25
49
73
97
121
145
169
193
217
241
265
289
313
337
361
Months after 1971.1
SXU
PYR
SRB
SXU-PYR
SRB-PYR
FD
FD-PYR

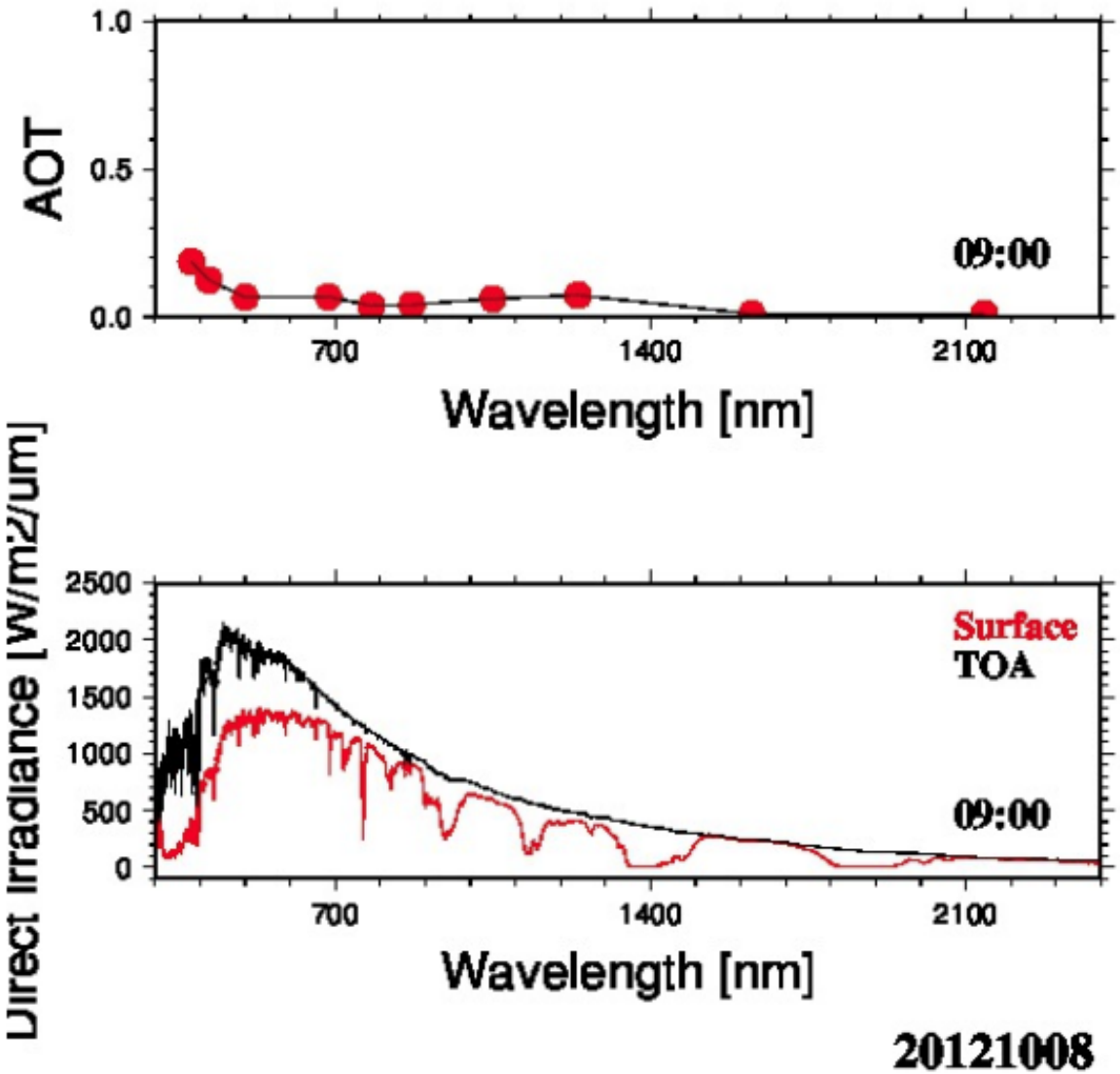


High correlation coefficient with positive bias in most cases

分光放射計による太陽放射観測の現状

太陽直達光の分光観測によるエアロゾル光学的厚さの推定

（2012.10.08 仙台）

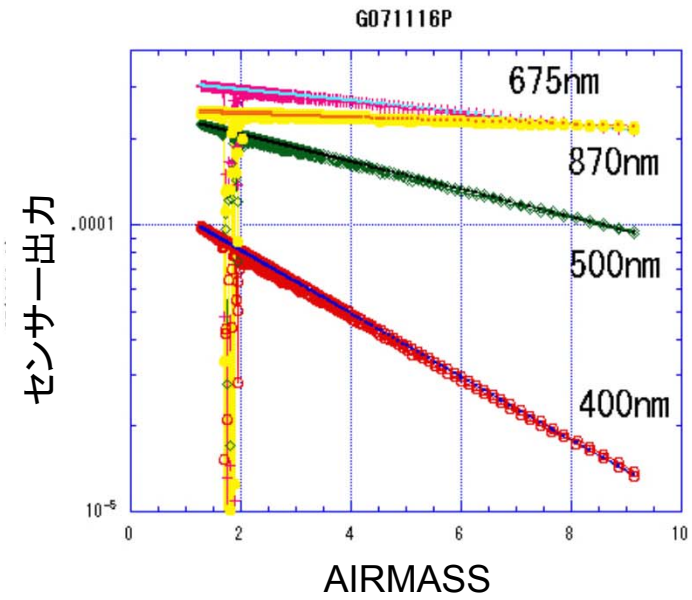


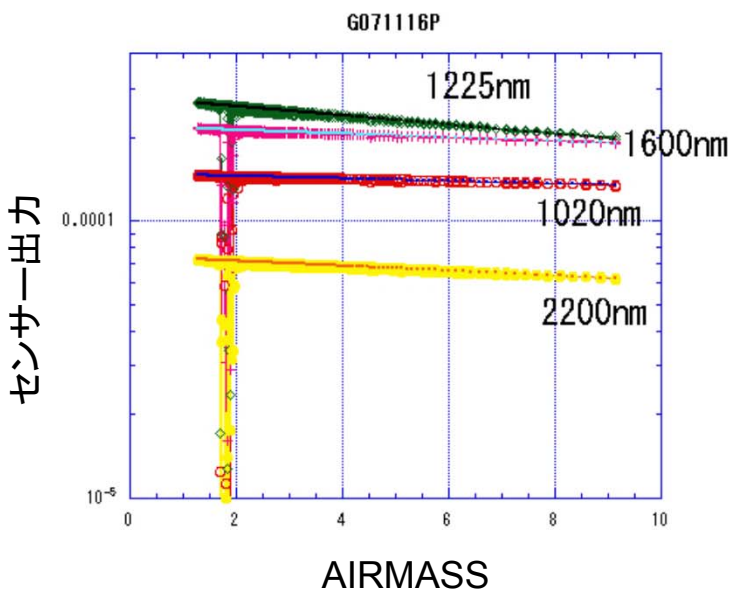
マウナ・ロア観測所での太陽直達分光検定観測

（気象研・内山による）

・標高：3400m （下層雲の上）
・大気が安定（亜熱帯高気圧帯）
・他の観測データが利用できる（水蒸気量、オゾン量、
エアロゾル散乱・吸収係数、CCN個数、ライダー、ゾンデ）

Langley plot の例(2007/11/16，POM-02)　（気象研・内山による）

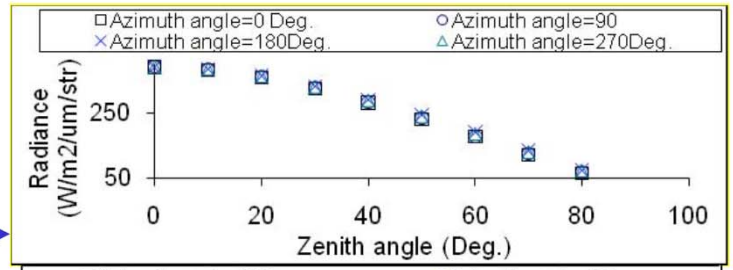




2007年11月16日のデータをLangleyプロットした。
データが、直線に乗っている（一部ずれているデータは、
センサー出力の線形性テストを行った時間帯のデータ）。
マウナ・ロア観測所では、この例のように非常に良いデータが
取れる。

Cosine characteristics of MS-700 sensor and correction factor only for direct radiance （千葉大・高村による）

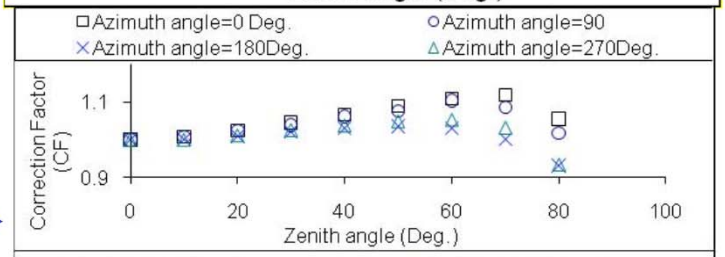
EKO provided data



Original Data calibrated by EKO

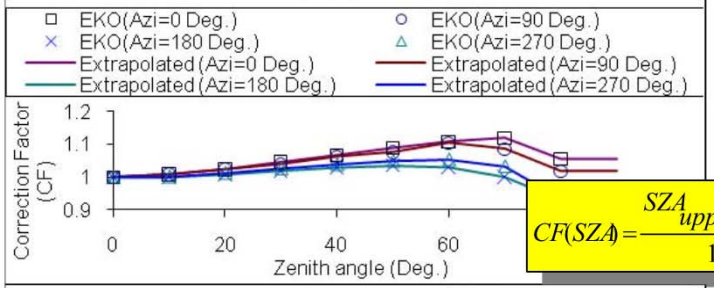
Radiance data at 4 azimuth and 9 zenith angles

Calculation of correction factors



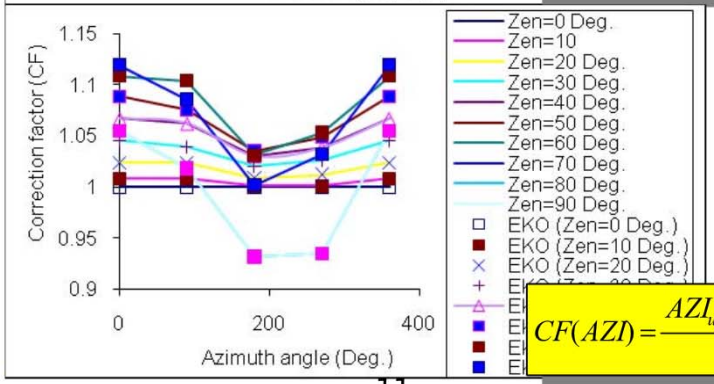
$$CF = \frac{E_{dir}(\theta = 0).\cos(\theta)}{E_{dir}(\theta)}$$

Extrapolation and Interpolation



$$CF(SZA) = \frac{SZA_{upper} - SZA}{10} * CF_{SZA,lower} + \frac{SZA - SZA_{lower}}{10} * CF_{SZA,upper}$$

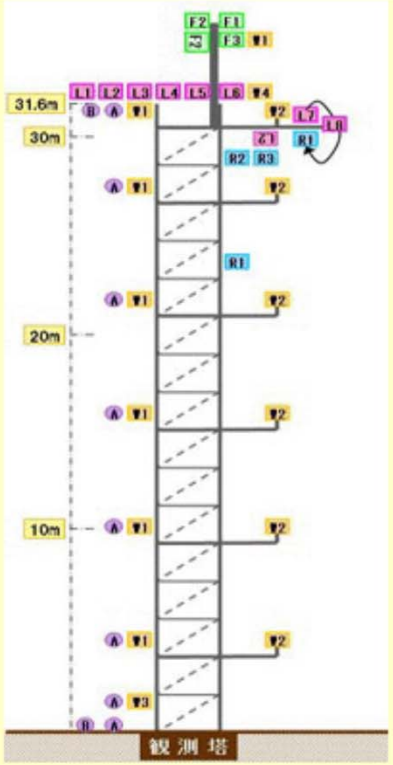
Interpolation for full zenith and azimuth angles

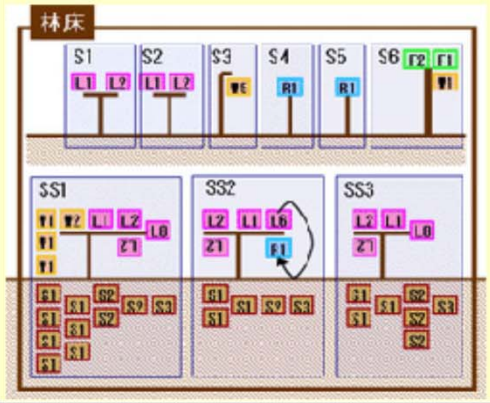


$$CF(AZI) = \frac{AZI_{upper} - AZI}{90} * CF_{AZI,lower} + \frac{AZI - AZI_{lower}}{90} * CF_{AZI,upper}$$

AsiaFlux "Science Frontier"

（国立環境研究所・三枝による）





記号・測定項目		数	設置場所・備考・詳細	
F1	3成分風向・風速	1台	塔頂1	
F2	CO_2/H_2O濃度変動(オープンパス)	1台	塔頂1	
F3	CO_2/H_2O濃度変動(クローズドパス)	1式	塔頂1	
A	CO_2濃度プロファイル	1式	8高度	詳細
B	-	-	-	
L1	全天日射	6台	塔上1、林床5	
L2	光合成有効放射(PPFD)	2台 4式	林床2 上下設置:塔上1、林床3	
L3	-	-	-	
L4	-	-	-	
L5	直達／散乱日射	1台	塔上1 ※シャドーバンド	
L6	分光放射	2式	上下回転式:塔上1、林床1	
L7	直達放射スペクトル	1式	塔上1 ※スカイラジオメータ	
L8	放射収支	3台	塔上1、林床3	
W1	気温・湿度	11台	塔頂1、塔6、林床4	
W2	2成分風向・風速	7台	塔6、林床1	
W3	気圧	1台	地上1	
W4	降水	1台	塔上1	
W5	積雪深	1台	地上1	
R1	魚眼カメラ	5台	上下回転式:林床1 固定式:塔上2、塔1、林床	
R2	-	-	-	
R3	レーザープロファイラー	1台	塔上1	
S1	地温	13台	林床3地点、7深度	
S2	土壌水分	7台	林床3地点、3深度	
S3	地熱流量	3式	林床3地点	

観測項目

顕熱・水蒸気・CO_2フラックス

（富士北麓フラックス観測サイトの例）

放射観測

その他一般気象要素

生物季節・群落構造

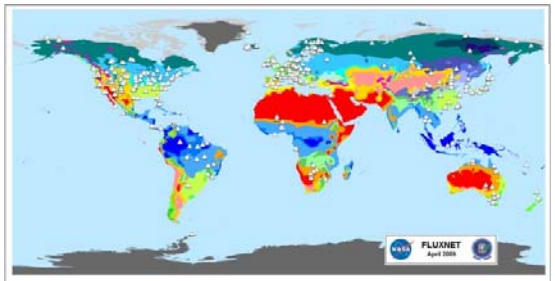
土壌環境

観測手法の標準化は分野毎のネットワークで各々必要

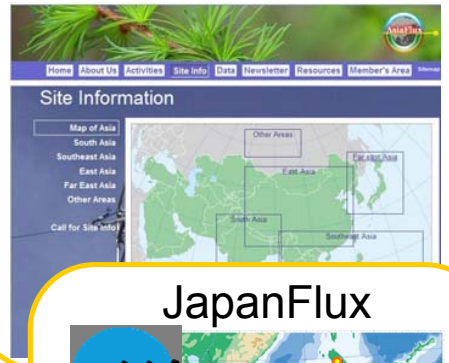
（国立環境研究所・三枝による）

Energy, water, CO_2 budget

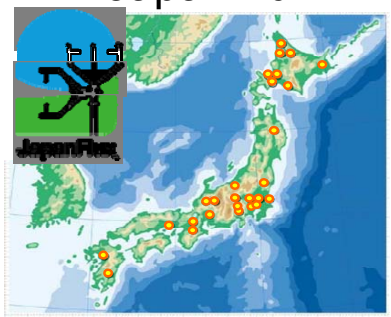
FLUXNET



AsiaFlux



JapanFlux

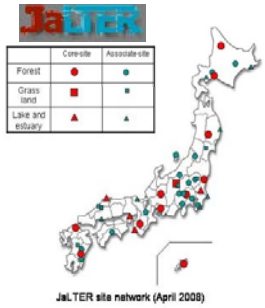


Long Term Ecological Research

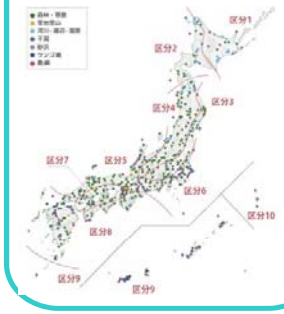
ILTER

国際長期生態学研究
East Asia Pacific
ILTER-EAP

JaLTER



Monitoring sites
1000 (MOE, Japan)



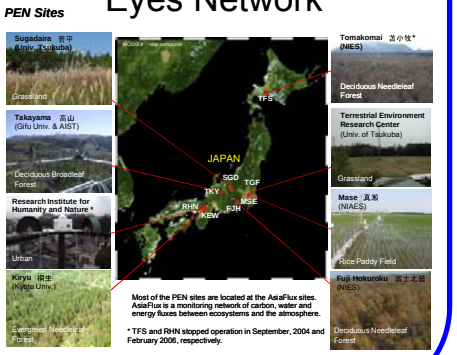
Aerosol, Cloud, Radiation

SKYNET

http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/

PEN

Phenological
Eyes Network



http://pen.agbi.tsukuba.ac.jp/

まとめ

- 観測機器固有の課題
  - 全天日射計・直達日射計の原理、検定方法はほぼ確立。
  - 干渉フィルターによる分光放射計の安定性は近年改善された。
  - 回折格子による分光放射計は比較的安定している。
  - 分光日射計（紫外線計、光量子センサー等を含む）においては、入射角特性（COS特性）及び受光センサー感度の波長依存性で改良が必要。
- 観測目的に応じた測器、検定、オペレーション
  - 現在の気候変動研究における日射量の観測
    - 長期間のデータが必要、精度は現状（～5W/m^2）で可。
    - 全自動化は難しい。日射計のガラスドームのクリーニング等が必要。
    - 日照時間等を用いた日射量の推定も有用。
    - 全球を高時空間分解能でカバーするには衛星データの利用が不可欠。
  - 分光放射計による太陽放射観測
    - 各種波長別（分光）放射計の検定方法の確立が必要。
    - 研究分野、目的によって必要な時空間分解能や測定精度が異なるので、それに合わせた観測方法を選択することが重要。

➡ 関連研究者における情報の共有と協力により、放射観測を活用することが重要