

平成22年12月20日 放射観測機器の較正に関する専門家会合

気象庁における放射観測

気象庁・高層気象台 観測第三課
大河原 望

内容

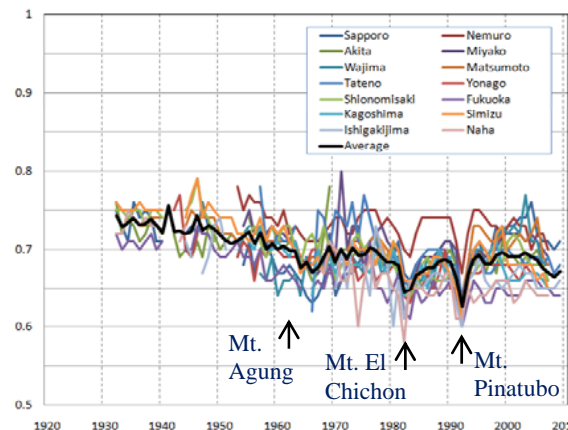
- 気象庁における放射観測
 - 歴史
 - 日射観測(短波放射)
 - 赤外放射観測(長波放射)
 - 現状
 - 精密な日射放射観測網の整備
 - 精密な日射放射観測網の観測要素および観測データの要求精度
 - 基準地上放射観測網 (Baseline Surface Radiation Network)
- 放射計の較正
 - 日射計の較正
 - 国際的な日射観測基準の変遷
 - WMOの枠組みにおける日射計の校正体系
 - 気象庁における較正手順
 - 赤外放射計の較正
 - 国際的な赤外放射観測基準の確立
 - WMOの枠組みにおける赤外放射計の校正体系
 - 気象庁における較正手順
 - 較正結果

気象庁における放射観測

1. 歴史

• 日射観測(短波放射)

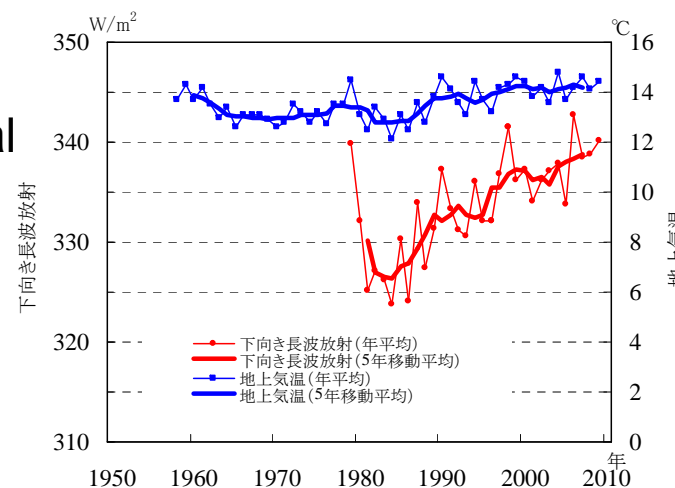
- 第2極年(IPY (International Polar Year), 1932) を契機に開始 (全天日射:1931-, 直達日射:1932-)
- 観測所数の増減(戦時中最大(機密情報?))
- 測器、日射観測基準の変遷
- サンフォトメータによる波長別直達日射観測も実施



日本における大気透過率の長期変動
(年平均, 直達日射データから算出)

• 赤外放射観測(長波放射)

- 国際地球観測年(IGY (International Geophysical Year), 1957-1958)を契機に開始
- 開始当初は、全波放射—短波放射により観測
- 1990年代前半から、赤外放射計による観測 (赤外放射を直接観測→精度の向上)
- 連続的な観測は、高層気象台の研究観測のみ



つくばにおける下向き赤外放射と地上気温の
長期変動(年平均と5年移動平均)

2. 現状

精密な日射放射観測網の整備

直達日射観測網の見直しを受け、地球環境の変化(特に長期的な変化)を検出するため、観測要素を拡充して国内5地点に整備

→ その抽出を目的に構築されたWCRP/GCOSの基準地上放射観測網(BSRN)の観測精度に準拠

(BSRN operation manual ver.2.1, WMO-TD-No.1274, 2004)

精密な日射放射観測網の観測要素および観測データの要求精度

- 直達日射: 0.5%または $1.5\text{W}/\text{m}^2$
 - 散乱日射: 2%または $3\text{W}/\text{m}^2$
 - 全天日射: 2%または $5\text{W}/\text{m}^2$
 - 下向き赤外放射: 2%または $3\text{W}/\text{m}^2$
- 散乱日射、下向き赤外放射も定常観測に

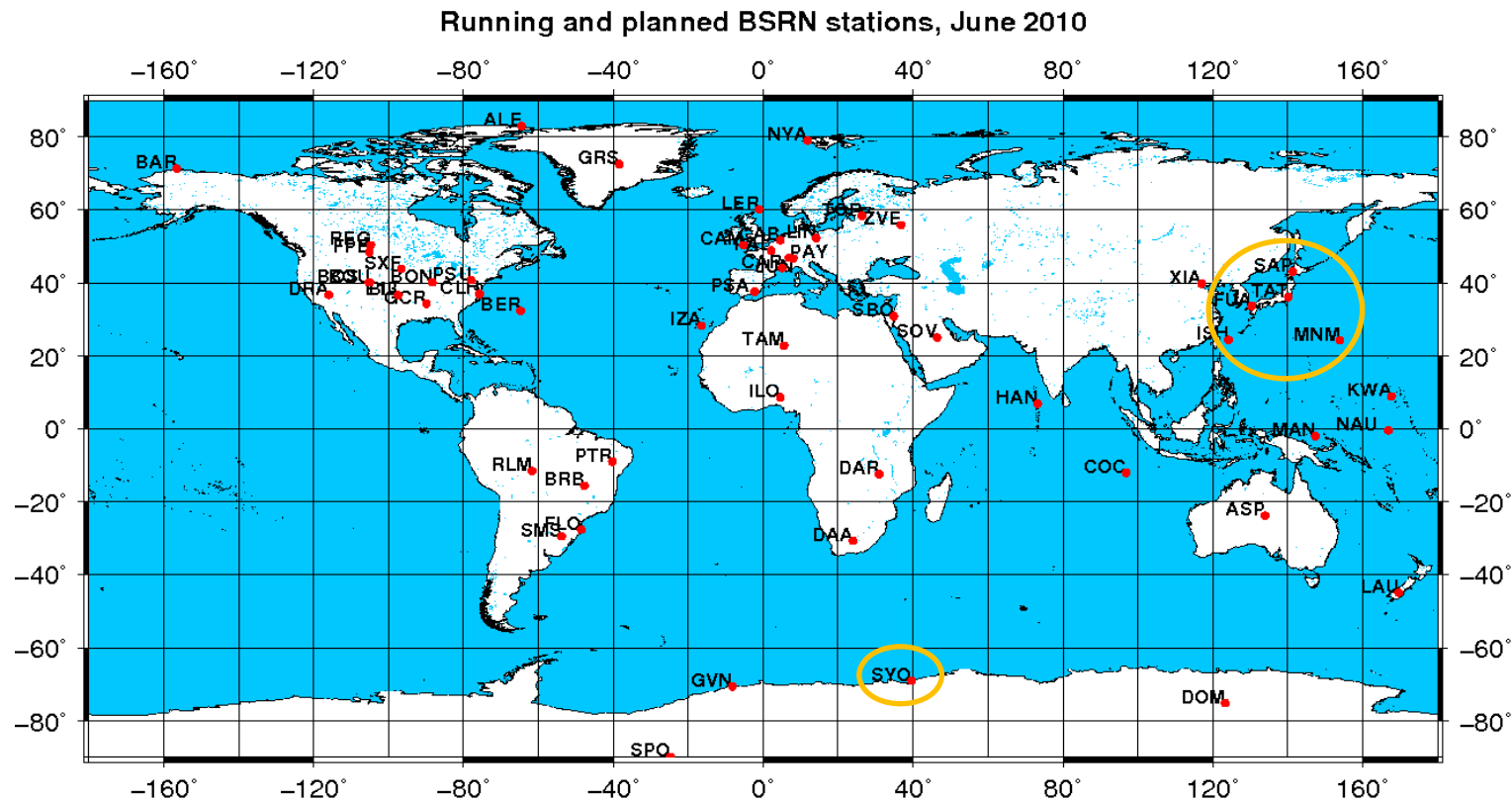
(参考)

95型地上気象観測装置での測器精度

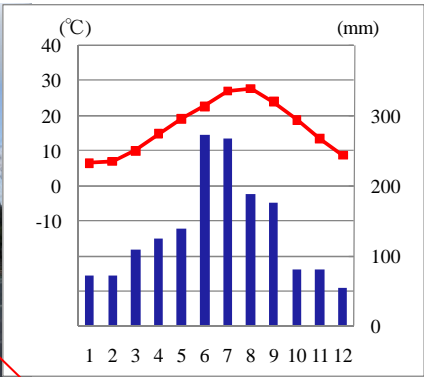
・ 日射: $0.03\text{kW}/\text{m}^2=30\text{W}/\text{m}^2$

(地上気象観測指針, 2002)

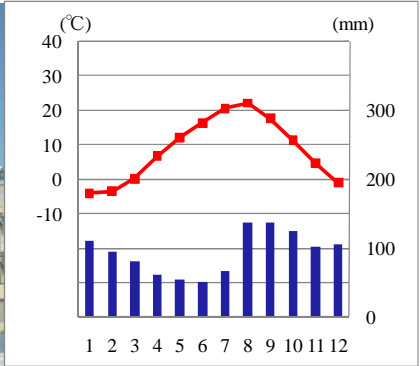
基準地上放射観測網 (Baseline Surface Radiation Network)



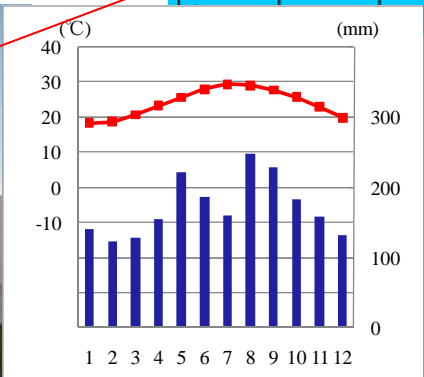
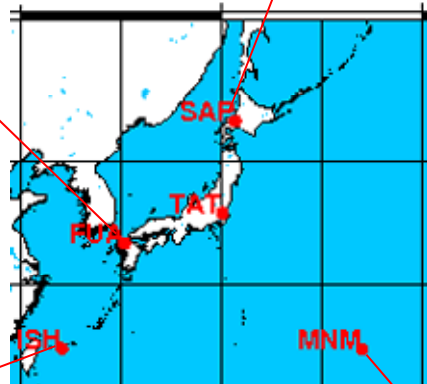
- 世界気候研究計画/全球エネルギー・水循環観測計画 (WCRP/GEWEX) および 全球気候観測システム(GCOS) の地上放射観測網
- 最高精度の地上放射観測網(約50地点)
- 気象庁は6地点を運用 → アジア、北西太平洋地域における観測網の充実に貢献 (昭和基地(1994/01-, 極地研究所と協力), 館野(1996/01-), 札幌・福岡・石垣島・南鳥島(2010/04-))
- 観測データは、研究者に無償で提供 (ドイツ・AWI; <http://www.bsrn.awi.de/>)



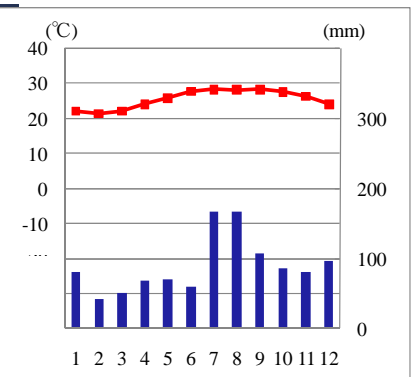
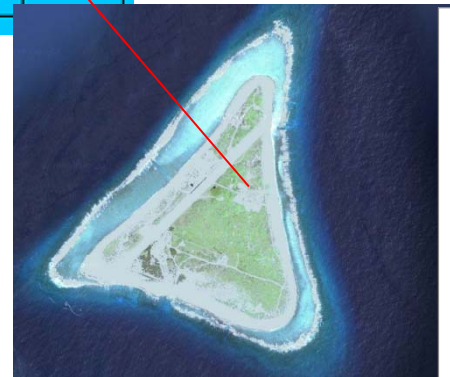
福岡: Humid Subtropical climate (Cfa)



札幌: Warm Summer Continental climate (Dfb)



石垣島: Tropical rainforest climate (Af)



南鳥島: Tropical wet and dry (savanna) climate (Aw)

2010年に登録された4つのBSRN観測点の気候学的な特徴



精密な日射放射観測網の感部（石垣島）

放射計の較正

1. 日射計の較正

国際的な日射観測基準の変遷

① オングストローム日射スケール (Ångström scale 1905)

- International Meteorological Conference (Innsbruck, 1905)において承認された日射観測の最初の基準

② スミソニアン日射スケール (Smithsonian scale 1913)

- 1913年に米国スミソニアン天体物理観測所において確立

問題点: 両者には系統的な差 (3.5%) が存在



③ 国際日射スケール (IPS-1956: International Pyrheliometer Scale 1956)

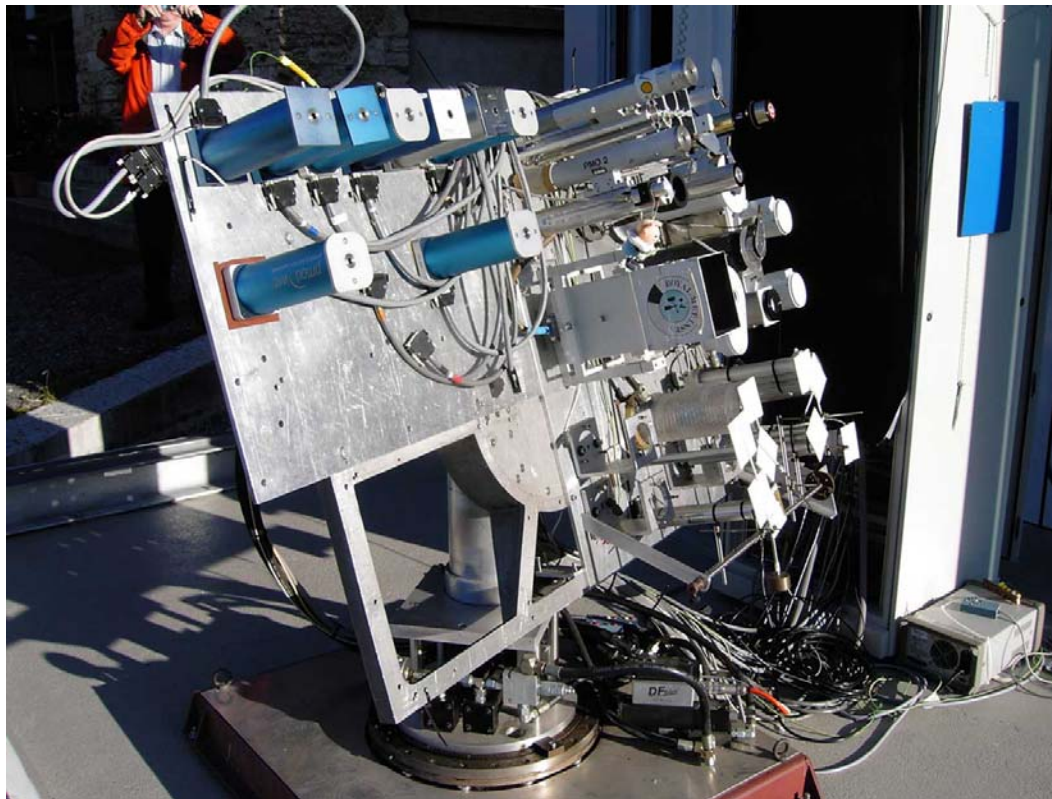
- International Radiation Conference (Davos, 1956)において承認(1957より採用)
- 5年に一度、国際日射計比較 (IPC: International Pyrheliometer Comparison) を実施することを決定

$$\text{IPS-1956} = 1.015 \times \text{Ångström scale 1905} = 0.98 \times \text{Smithsonian scale 1913}$$

④ 世界放射基準 (WRR: World Radiometric Reference)

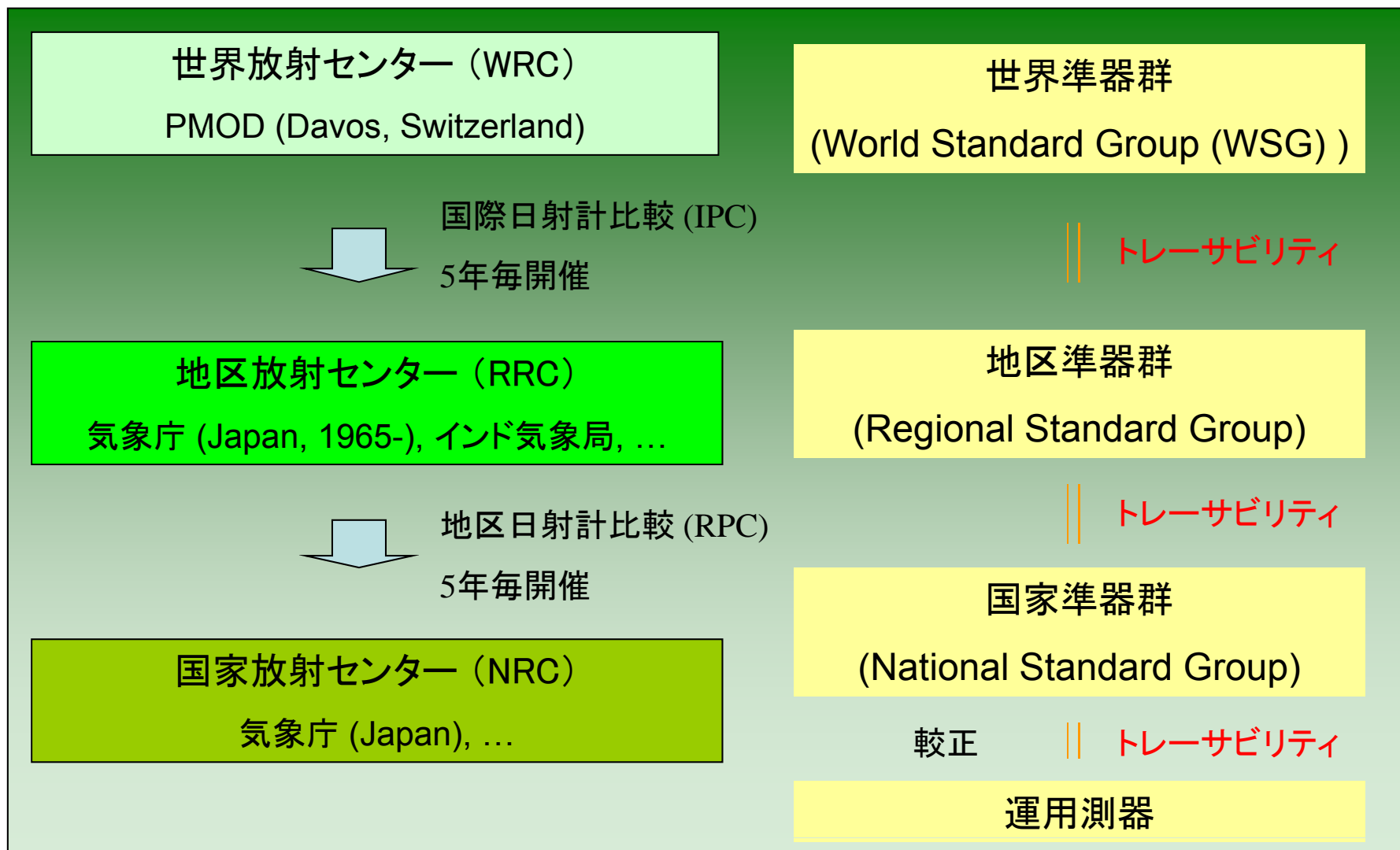
- 1977年に確立(安定した複数台の絶対放射計の平均値)
- 1981年からWMOの基準として採用
- 気象分野のみならず、エネルギー分野も含めた全ての日射観測の基準

$$\text{WRR} = 1.022 \times \text{IPS-1956}$$



WMO世界放射センター(スイス・ダボス)の世界準器群(WSG: World Standard Group)

WMOの枠組みにおける日射計の較正体系



WMOの枠組みにおける日射計較正体系の概念図

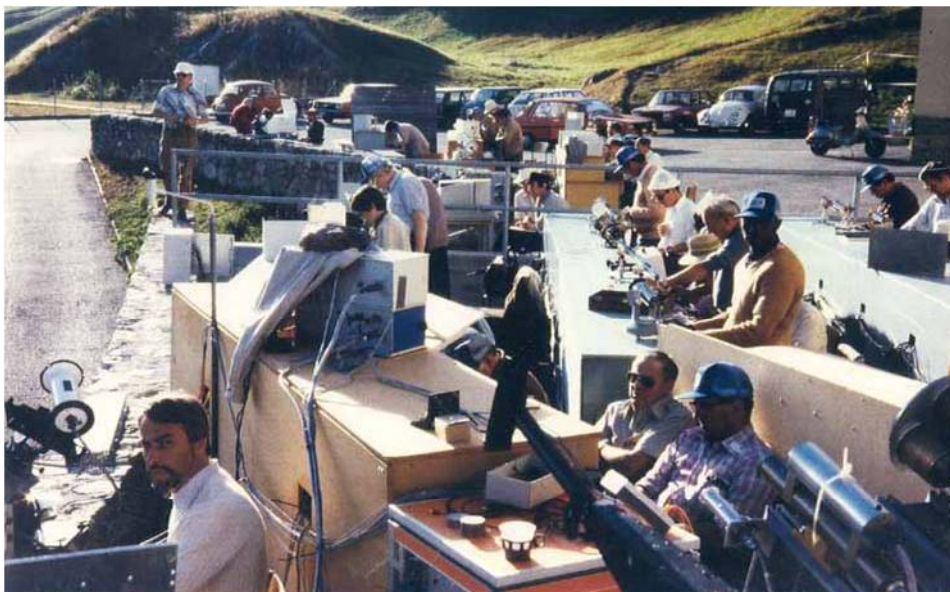
国際日射計比較 (IPC, 於ダボス物理気象観測所;PMOD)



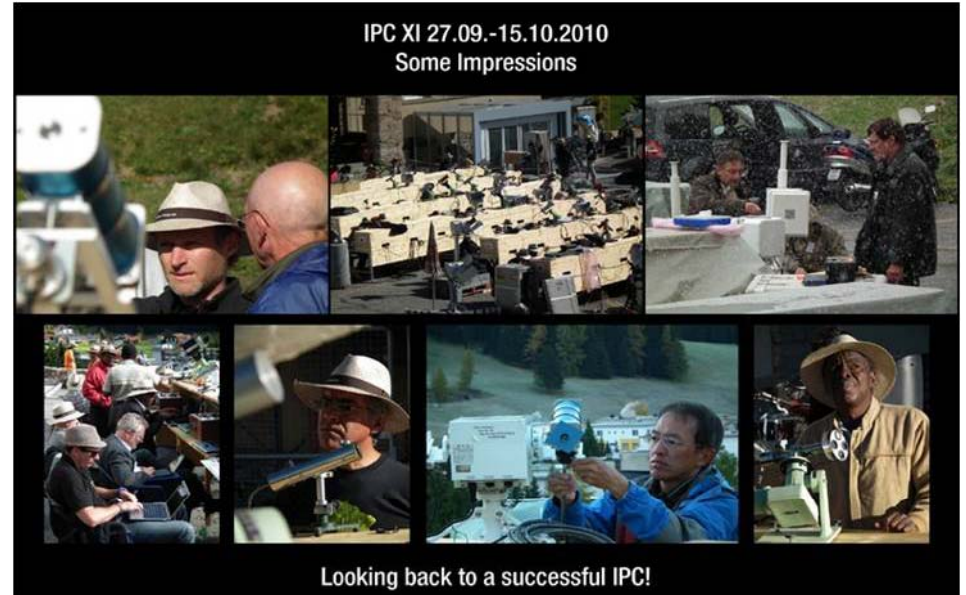
【IPC-I(1959)】 気象庁準器を持参し、東北大学・山本義一教授が参加



【IPC-III(1970)】 これ以降、気象庁は毎回参加



【IPC-V(1980)】



【IPC-XI(2010)】

気象庁における較正手順

① 国内準器との比較観測

→ 感度定数の決定

$$E = U / C$$

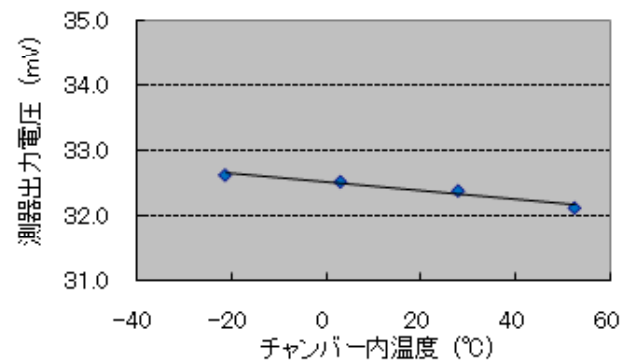
E:放射照度 (W/m²)
U:測器の出力電圧 (mV)
C:感度 (mV/W/m²)



国内準器と被校正測器(直達日射計)との比較観測 (於筑波山)

② 温度特性検査

→ 温度補正係数の決定



日射計温度特性検査装置

2. 赤外放射計の較正

国際的な赤外放射観測基準の確立

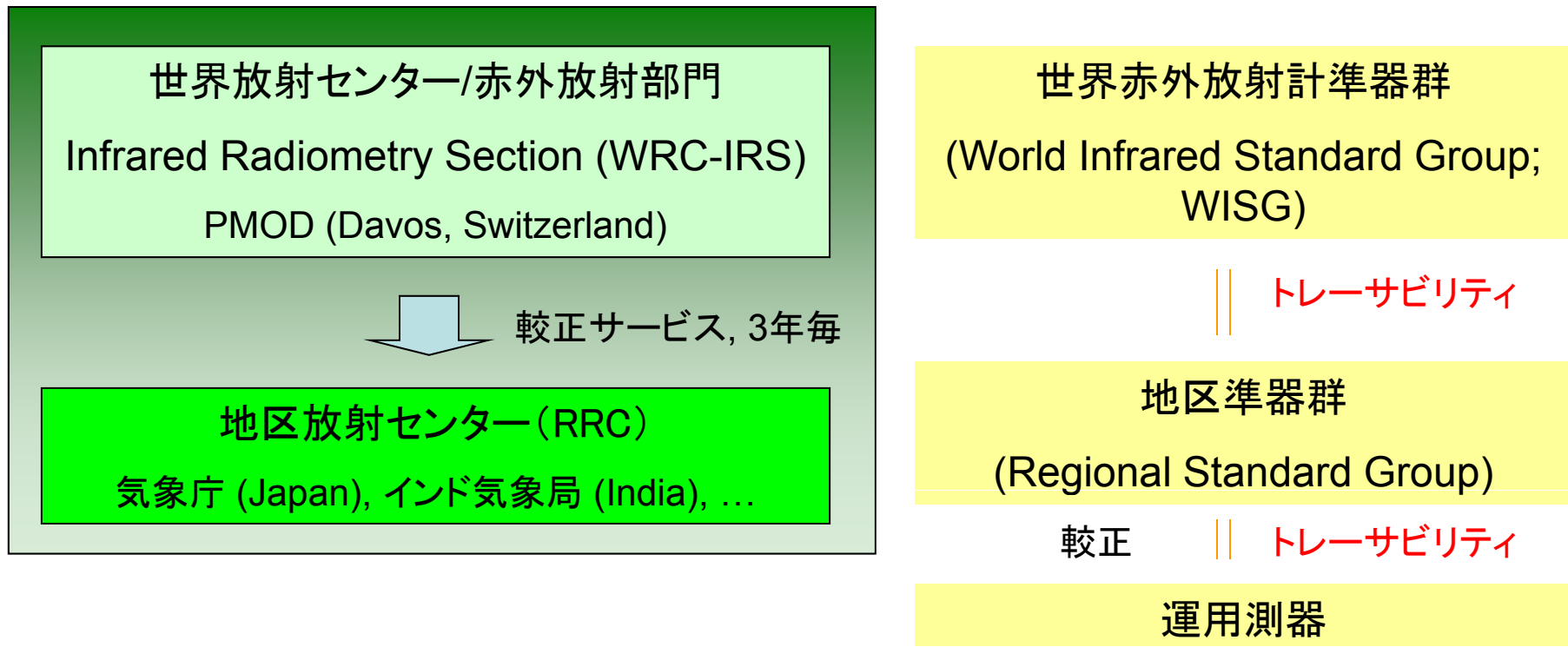
- 赤外放射計と天空走査型絶対放射計との国際比較 (IPASRC-I (米オクラホマ, 1999) and -II (米アラスカ, 2001)、高層気象台の赤外放射計 (Eppley社製PIR型) も参加)
→ 現行の技術で長波長放射がかなり正確に測定できることを確認
- 2004年、WMO世界放射センター(WRC)において、世界赤外準器群(WISG)に基づいた世界赤外放射基準が確立



世界赤外放射計準器群(WISG: World Infrared Standard Group of pyrgeometers)

WMOの枠組みにおける赤外放射計の較正体系

- WMO世界放射センター(WRC)の赤外放射部門(IRS)は、世界赤外準器群(WISG)を維持し、較正サービスを実施
- WMO地区放射センターは、赤外放射計の地区準器を整備し、WRC-IRSにおいて3年ごとに較正を行う



WMOの枠組みにおける赤外放射計の較正体系(現状)

気象庁における較正手順

WRCにおける手順と同様

① 温度特性検査

→ 黒体炉を用いて温度係数を決定
(後述)

② 国内準器との比較観測

→ 感度定数の決定



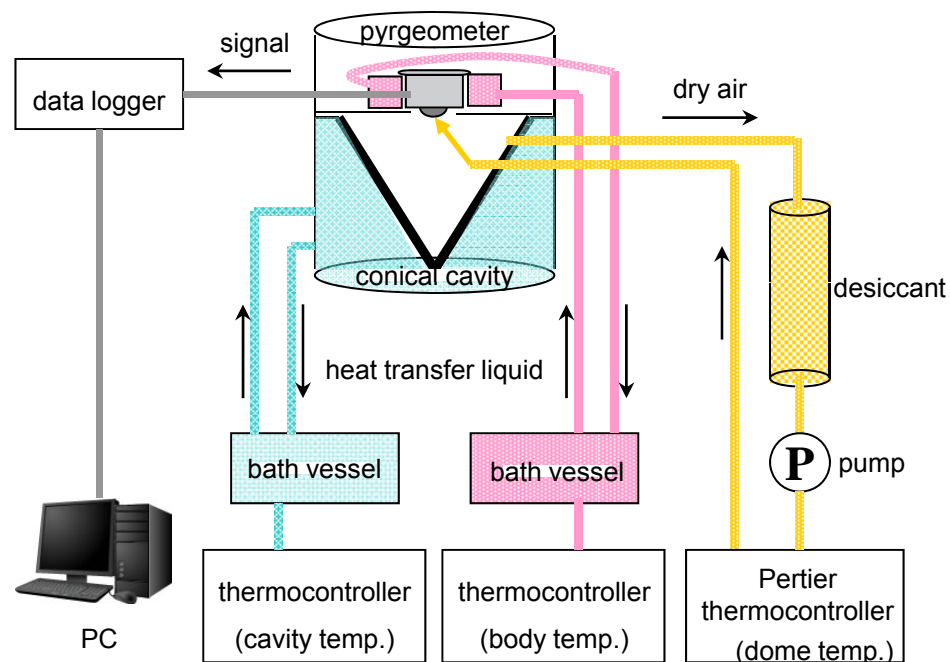
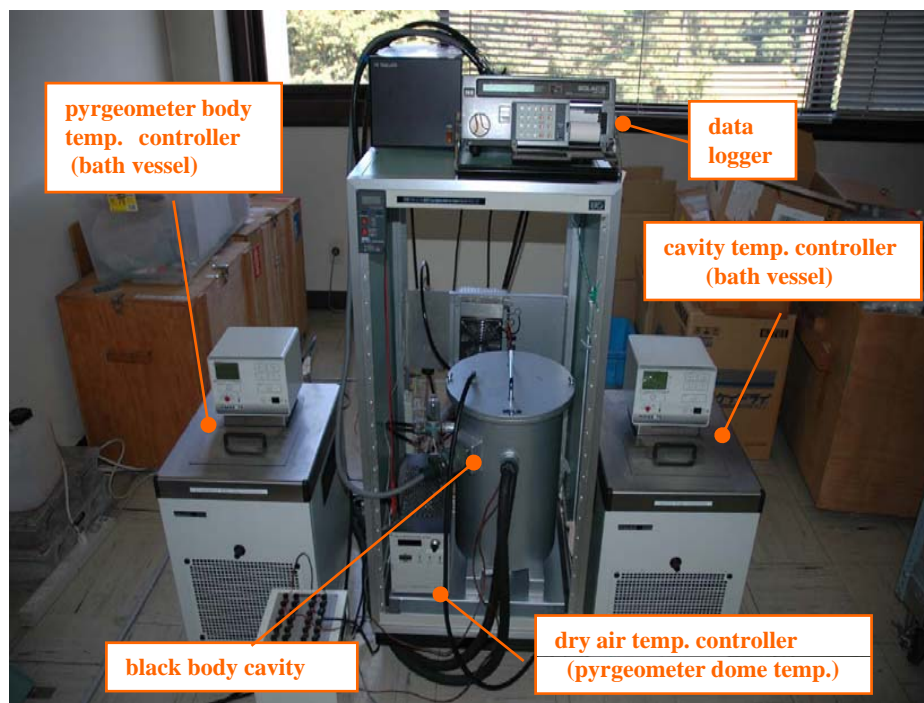
$$F = U/C(1+k_1\sigma T_b^3) + k_2\sigma T_b^4 - k_3\sigma(T_d^4 - T_b^4)$$

(ただし、Kipp&Zonen社製CG4/CGR4型では右辺3項は無視できる)

F: 赤外放射照度 (W/m²)
U: 出力電圧 (mV)
C: 測器の感度定数 (mV/W/m²)
 σ : シュテファンボルツマン定数
(=5.670400*10⁻⁸ W/m²/K⁴)
T_b: 測器のボディー温度 (K)
T_d: 測器のドーム温度 (K)
k₁, k₂, k₃: 温度係数

高層気象台の黒体炉

- 較正の基準放射源となる空洞黒体および測器温度は独立に制御され、それぞれ一定の温度に保たれる
- 一般的に高精度な赤外放射観測に使用される2種類の測器の温度特性検査が可能
 - Kipp&Zonen社製CG4/CGR4型
 - Eppley社製PIR型



高層気象台黒体炉の写真と概念図

校正結果

① Eppley社製PIR型赤外放射 (s/n:32205F3)

1) WRCの校正と高層気象台の黒体炉で得られた感度定数、温度係数の比較

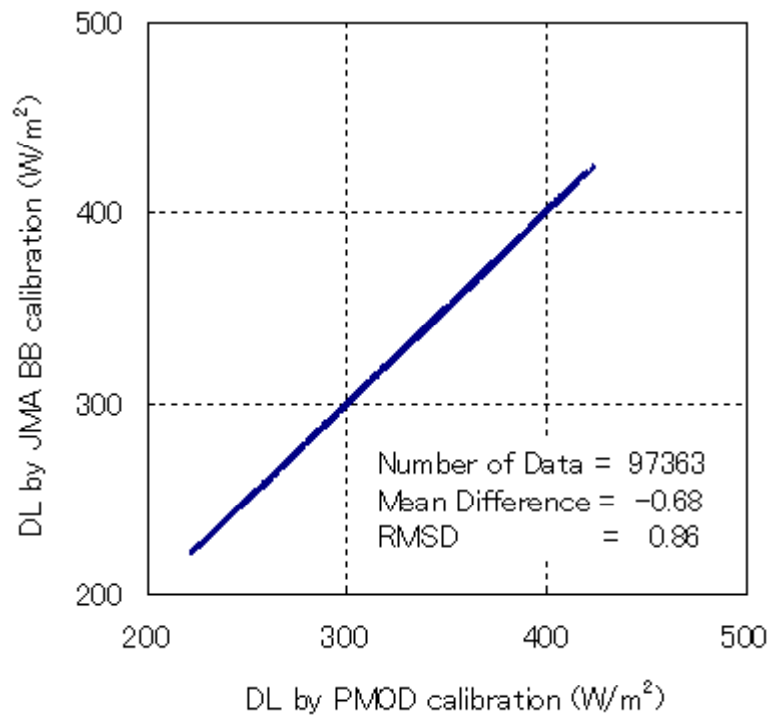
係数	WRC (2006年12月)	高層気象台 (2004年6月)	高層気象台 (2007年1月)
感度定数 (C)	3.91	3.9647	3.9328
温度係数 (k_1)	0.01	0.0146	0.0143
温度係数 (k_2)	1.0024	1.0025	1.0028
温度係数 (k_3)	3.2	2.8752	2.9012

$$F = U/C(1+k_1\sigma T_b^3) + k_2\sigma T_b^4 - k_3\sigma(T_d^4-T_b^4)$$

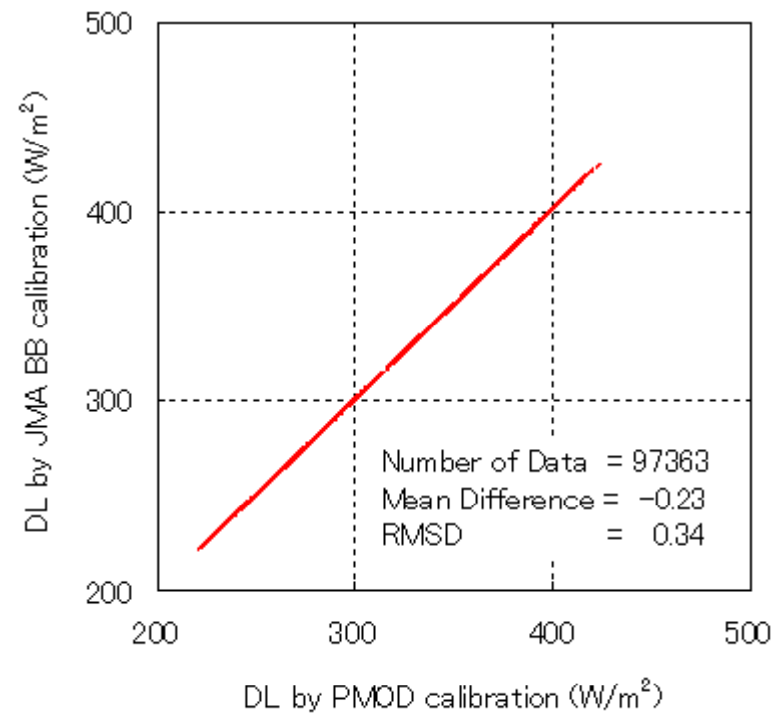
① Eppley社製PIR型赤外放射計 (s/n:32205F3) (つづき)

2) WRCの較正と高層気象台の黒体炉で得られた測器感度、温度係数を用いた放射照度の比較
(横軸:WRC, 縦軸:高層気象台)

(a) 2004年6月実施の較正結果



(b) 2007年1月実施の較正結果



① Eppley社製PIR型赤外放射計 (s/n:32205F3) (つづき)

3) 放射照度の階級によるWRCとの偏差

(a) 高層気象台(2004) – WRC(2006)

DL (W/m ²)	Number of Data	Mean Diff. (W/m ²)	RMSD (W/m ²)
200 - 300	36502	-1.05	1.08
300 - 400	59032	-0.48	0.70
400 -	1829	0.11	0.28
Total	97363	-0.68	0.86

(b) 高層気象台(2007) – WRC(2006)

DL (W/m ²)	Number of Data	Mean Diff. (W/m ²)	RMSD (W/m ²)
200 - 300	36502	-0.38	0.41
300 - 400	59032	-0.14	0.29
400 -	1829	0.12	0.20
Total	97363	-0.23	0.34

4) 測器ボディー温度の階級によるWRCとの偏差

(a) 高層気象台(2004) – WRC(2006)

Pyrgeometer Body Temp. (°C)	Number of Data	Mean Diff. (W/m ²)	RMSD (W/m ²)
- 0	200	-0.79	0.80
0 - 10	24807	-0.75	0.85
10 - 20	61695	-0.60	0.81
20 - 30	10661	-1.02	1.12
Total	97363	-0.68	0.86

(b) 高層気象台(2007) – WRC(2006)

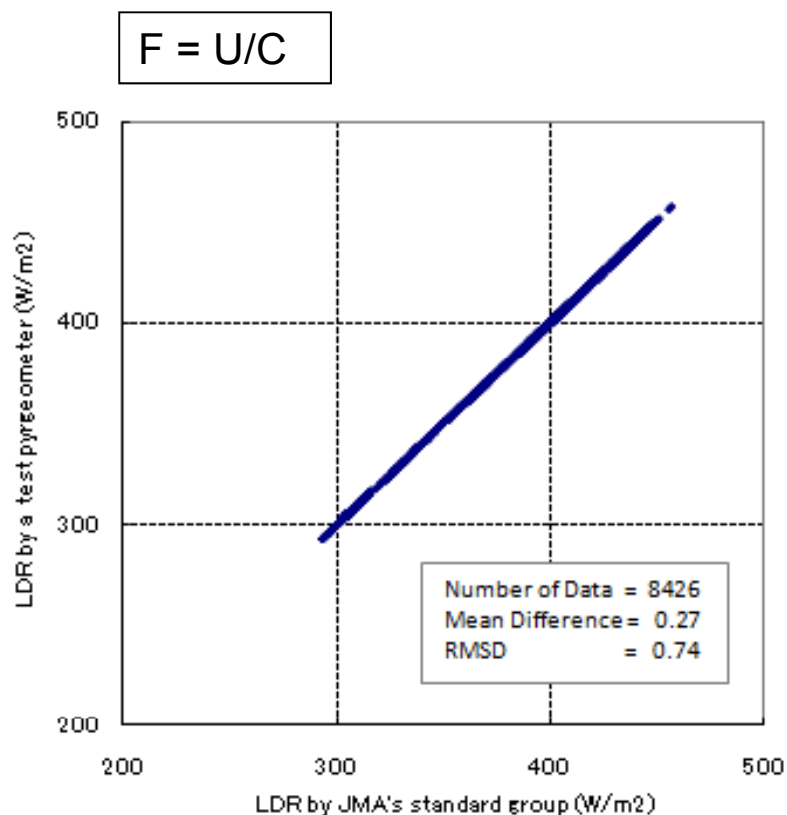
Pyrgeometer Body Temp. (°C)	Number of Data	Mean Diff. (W/m ²)	RMSD (W/m ²)
- 0	200	-0.29	0.30
0 - 10	24807	-0.25	0.31
10 - 20	61695	-0.18	0.32
20 - 30	10661	-0.42	0.48
Total	97363	-0.23	0.34

校正結果

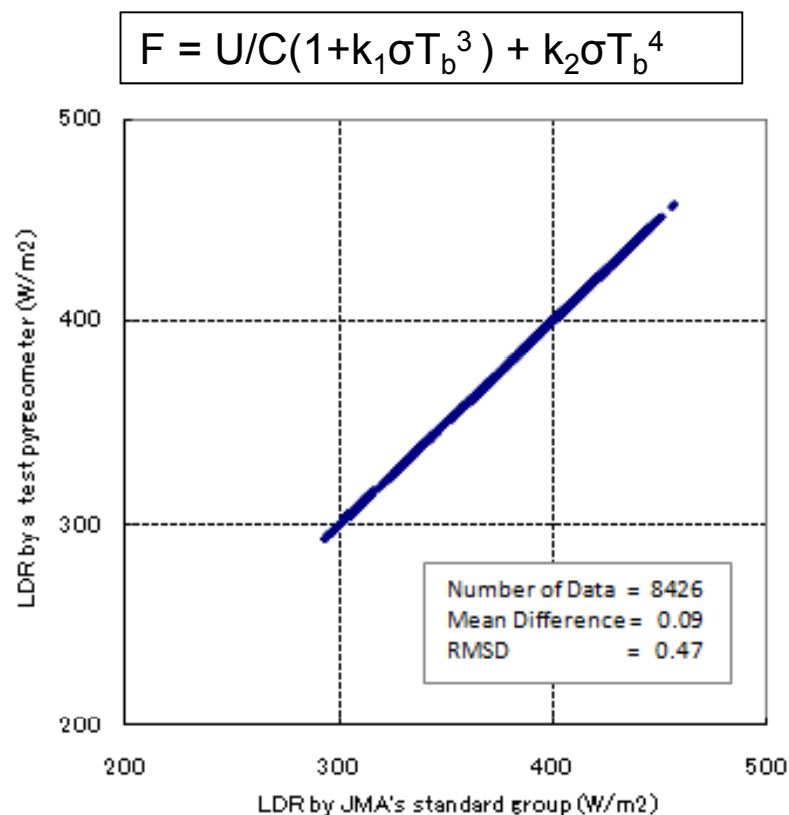
② Kipp&Zonen社製CG4/CGR4型赤外放射計 (CG4, s/n:010565)

1) 被校正測器と国内準器群との放射照度の比較 (横軸:国内準器群, 縦軸:被校正測器)

(a) 温度係数なし
(比較観測のみ)



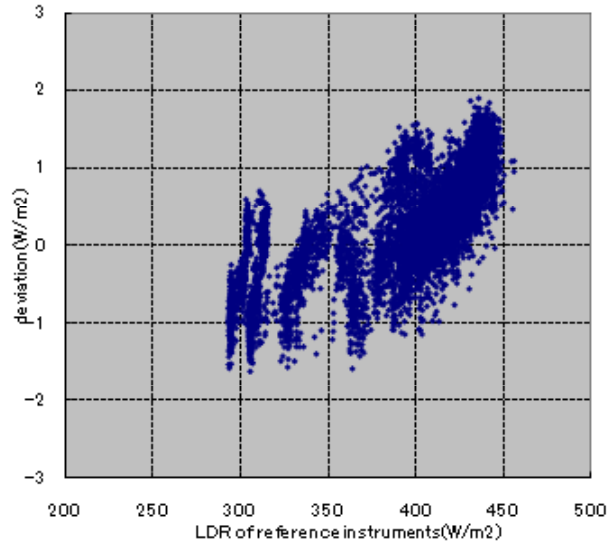
(b) 温度係数あり
(比較観測 + 温度特性検査)



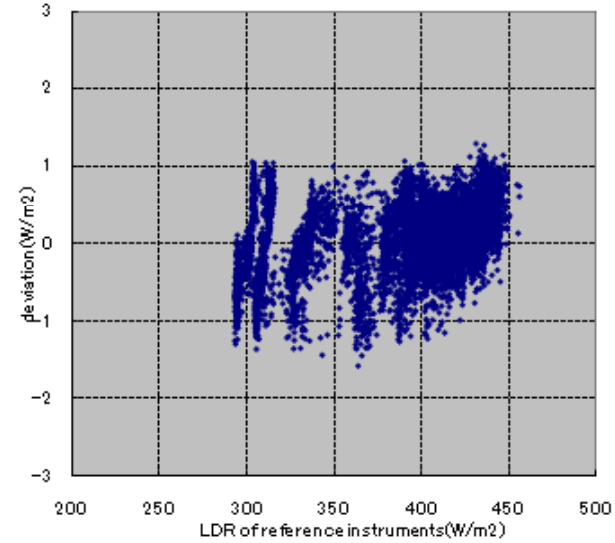
② Kipp&Zonen社製CG4/CGR4型赤外放射計 (CG4, s/n:010565) (つづき)

2) 放射照度の階級による国内準器群との偏差 (横軸:国内準器群の放射照度, 縦軸:偏差)

(a) 温度係数なし



(b) 温度係数あり



DL (W/m ²)	Number of Data	Mean Diff. (W/m ²)	RMSD (W/m ²)
250 - 300	301	-0.90	0.94
300 - 350	1453	-0.39	0.63
350 - 400	1597	0.01	0.60
400 -	5075	0.61	0.79
Total	8426	0.27	0.74

DL (W/m ²)	Number of Data	Mean Diff. (W/m ²)	RMSD (W/m ²)
250 - 300	301	-0.59	0.65
300 - 350	1453	-0.07	0.55
350 - 400	1597	-0.05	0.49
400 -	5075	0.22	0.42
Total	8426	0.09	0.47

まとめ

- 気象庁は、1930年代の初めから、長期にわたり国際的な日射観測基準に基づいた日射観測を実施している。
- 2010年からは、地球環境変化の検出を目的とした精密な日射放射観測網を展開し、WCRP/GCOSのBSRN観測点として全球的な地上放射観測網の充実に貢献している。
- WMOの放射観測測器較正の枠組みの中でアジア地区の放射センターを務めており、日射計および赤外放射計の地区基準器の維持ならびに地区内測器の較正を通じて、放射観測精度向上に貢献している。
- 日射計および赤外放射計の較正技術を有しており、その較正精度の高さは確認されている。