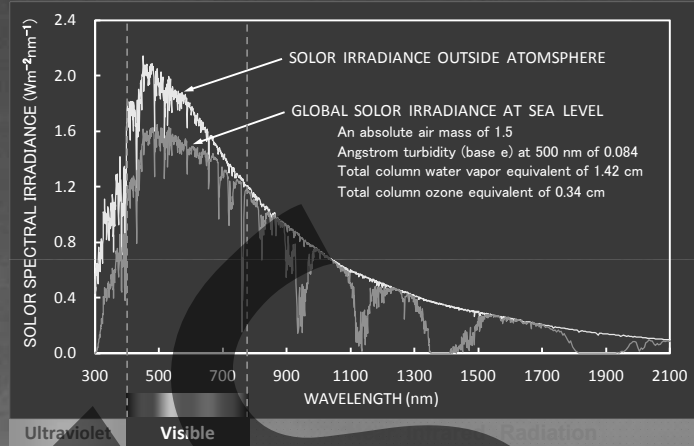


国際日射基準と国内観測網の体制



気象庁高層気象台 居島 修

Contents

- 日射計基準器と日射スケールの変遷
- 世界気象機関における日射計の校正体系
- 気象庁における日射観測網
- 太陽光スペクトルの試験観測（高層気象台）

日射計基準器と日射スケールの変遷

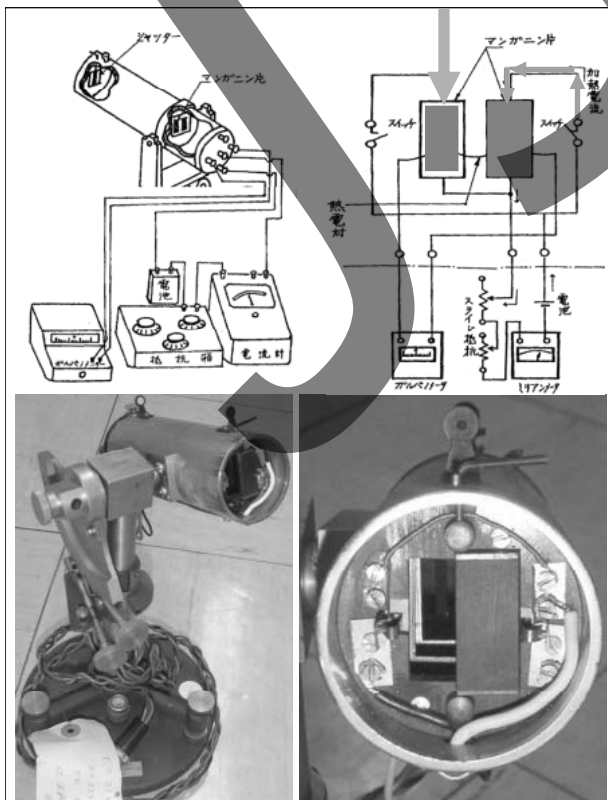
【日射計基準器】

- ▶ 1893年 電気補償式日射計（オングストローム日射計）
K.Angstrom（スウェーデン：プサラ大学）
（オングストローム日射スケール：Ångström scale 1905）
- ▶ 1905年 流水式日射計
C.G.Abbot（アメリカ：スミソニアン天体物理観測所）
⇒ 1908年 銀盤式日射計（可搬型）
（スミソニアン日射スケール：Smithsonian scale 1913）
- ▶ 1962年 絶対放射計
Kendall他（アメリカ：ジェット推進研究所：JPL）
（世界放射基準：World Radiometric Reference 1981年～）

3

① オングストローム日射スケール：Ångström scale 1905

電気補償式日射計(オングストローム日射計)



【観測の手順】

- 1枚のマンガン片に日射を当て、もう1枚をシャッターで遮蔽する。
- 遮蔽したマンガン片に電流を流し、日射を受けているマンガン片と同じ温度になるようにスライド抵抗で調整する。（熱伝対で温度差を検知）
- 加熱電流から日射量を計算する。

【問題点：周辺効果】

日射を当てるマンガン片の端は絞りによって影になる。一方、遮蔽したマンガン片には全面電流で加熱される。

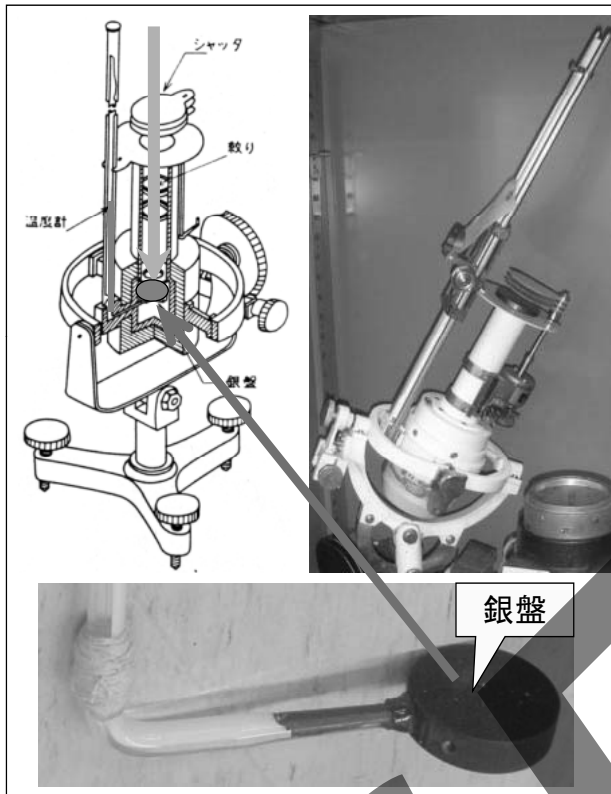


- ✓測定値は真の値よりも過小に測定
- ✓誤差の補正值として+2%が適当

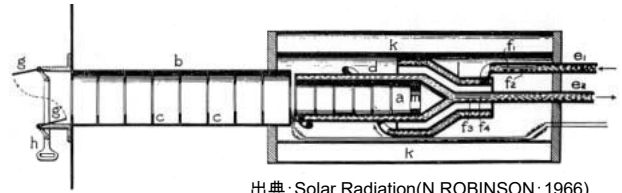
4

②スミソニアン日射スケール：Smithsonian scale 1913

流水式日射計、銀盤式日射計



【流水式日射計】



出典：Solar Radiation(N.ROBINSON：1966)

【銀盤式日射計】

日射を銀盤に当て、t時間後の銀盤の温度変化量から日射量を測定

計算式

$$I = C/A t * (T1-T0)$$

I: 日射量 C: 銀盤の熱容量

A: 銀盤の表面積

t: 日射を当てている時間

T0: 日射を当てる前の銀盤温度

T1: t 時間後の銀盤温度

5

国際的な日射スケールの誕生 (IPS-1956)

【 Ångström scale 1905 】

基準器：オングストローム日射計

【 Smithsonian scale 1913 】

基準器：流水式・銀盤式日射計

+1.5%

3.5%の系統差

-2.0%

③ 1956年国際日射スケール (IPS-1956)

(International Pyrheliometric Scale of 1956)

【1956年国際放射会議】

両者の統一を図るために新しい国際日射スケールを採用

(1957年の国際地球観測年(IGY)に先立ち各国の日射基準を統一)

⇒ 5年に1度、国際日射計比較観測を実施

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

6

国際日射計比較観測の開催と IPS-1956 の問題点

- ▶ 1959年 第1回国際日射計比較観測(東北大学教授参加)
1台のオグストロム日射計を基準として比較を実施 (IPS-1956)
- ▶ 1964年 第2回国際日射計比較観測(日本不参加)
1台のオグストロム日射計を基準として比較を実施 (IPS-1956)
- ▶ 1970年 第3回国際日射計比較観測(日本参加：合計34台)
第2回まで基準としてきた測器の電流計に問題があり、測器
常数が安定していると認められた7台のオグストロム日射計の
平均値を改めて“IPS-1956”とした。
(IPS-1956と区別するため“”を付加)
アメリカで開発された絶対放射計(PACRAD)2台が参加。
(PACRAD：Primary Absolute Cavity Radiometer)

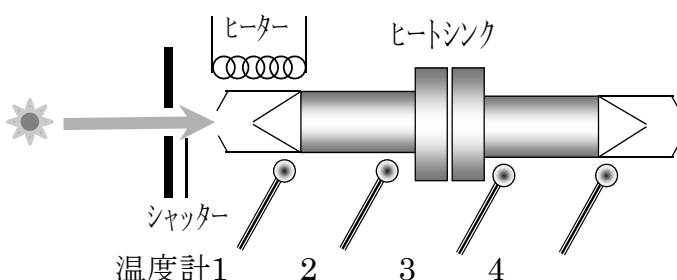
7

絶対放射計の開発

1960年代に開発。あらゆる誤差要因を理論的・実験的に評価してあり、この測器単体で日射の絶対値を測定できることから絶対放射計と呼ばれている。



測定空洞黒体 補償空洞黒体



PMO6の空洞黒体

8

IPS-1956基準器群と絶対放射計の比較

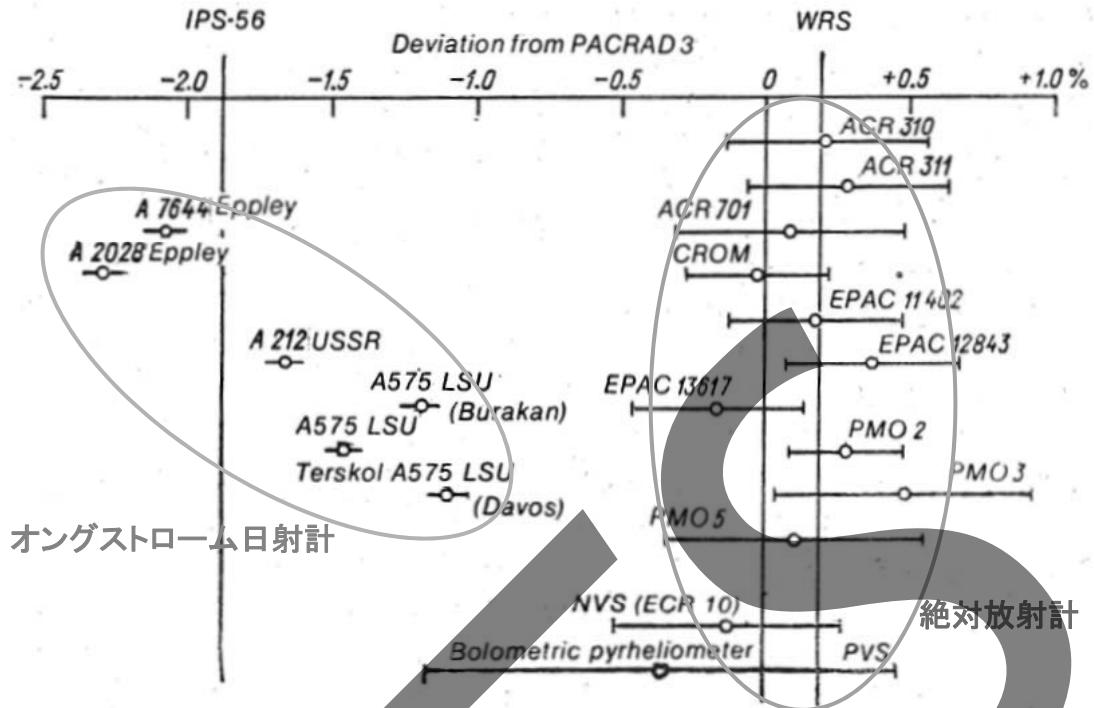


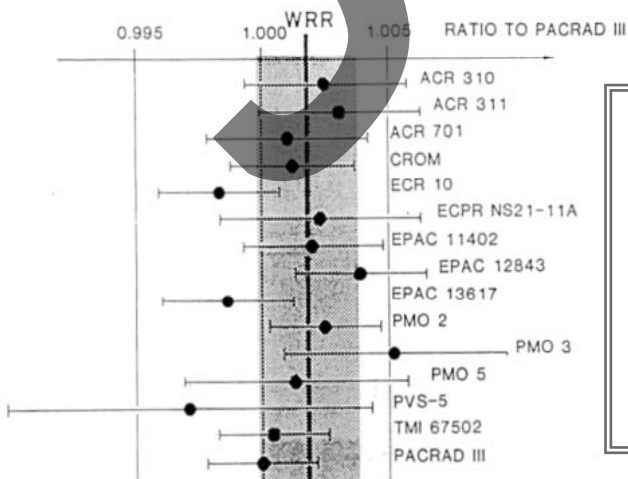
Fig. 4.20. Compendium of readings of different pyrheliometers according to conditions existing in 1975.

出典: Pyrheliometry (A.A. Kimito et al: 1981)

9

④ 世界放射基準 (WRR) の確立 (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)
- 基準器: 絶対放射計 ⇒ SI単位系で表記【W/m²】
- 1981年から世界気象機関(WMO)の日射観測の基準として採用



【各日射スケールの換算係数】

$$\text{WRR} / \text{Angstrom 1905} = 1.026$$

$$\text{WRR} / \text{Smithsonian 1913} = 0.977$$

$$\text{WRR} / \text{"IPS-1956"} = 1.022$$

日本における日射スケールの変遷

期間	観測基準	WRRへの変換係数
1932- 1956	JMA(1932-1956) = Smithsonian(JMA) $= \text{Ångström}1905 \times 1.035$ $\text{Ångström}1905 = \text{JMA}(1932-1956) / 1.035$ WRR/Ångström1905 = 1.026 WRR = 1.026 × Ångström1905 $= \text{JMA}(1932-1956) \times 1.026 / 1.035$	$1.026 / 1.035$ $= \underline{\underline{0.9913}}$ [瞬間値 (cal/cm ² /min ⇒ kW/m ²)] $0.9913 \times (1/1.433) = 0.6918$ [積算値 (cal/cm ² ⇒ MJ/m ²)] $0.9913 \times (1/23.89) = 0.04149$
1957- 1970	IPS-1956 = Smithsonian1913 × 0.98 JMA(1957-1970) = Smithsonian(JMA) × 0.98 $= \text{Ångström}1905 \times 1.035 \times 0.98$ $\text{Ångström}1905 = \text{JMA}(1957-1970) / (1.035 \times 0.98)$ WRR = JMA(1957-1970) × 1.026 / (1.035 × 0.98)	$1.026 / (1.035 \times 0.98)$ $= \underline{\underline{1.012}}$ [瞬間値 (cal/cm ² /min ⇒ kW/m ²)] $1.012 \times (1/1.433) = 0.7062$ [積算値 (cal/cm ² ⇒ MJ/m ²)] $1.012 \times (1/23.89) = 0.04236$
1971- 1980	“IPS-1956”	$\underline{\underline{1.022}}$ [瞬間値 (cal/cm ² /min ⇒ kW/m ²)] $1.022 \times (1/1.433) = 0.7132$ [積算値 (cal/cm ² ⇒ MJ/m ²)] $1.022 \times (1/23.89) = 0.04278$
1981-	WRR	$\underline{\underline{1.000}}$

- 1970年までは、輸入したオングストローム日射計を基準とし、国産の銀盤式日射計を基準器として校正。
- 1971年以降は、国際日射計比較観測において世界準器群との相互比較観測により、国際的な観測基準を伝達された国内準器を使用。 【注意】 過去資料利用時には、WRRへの変換が必要。

世界気象機関における日射計の校正体系

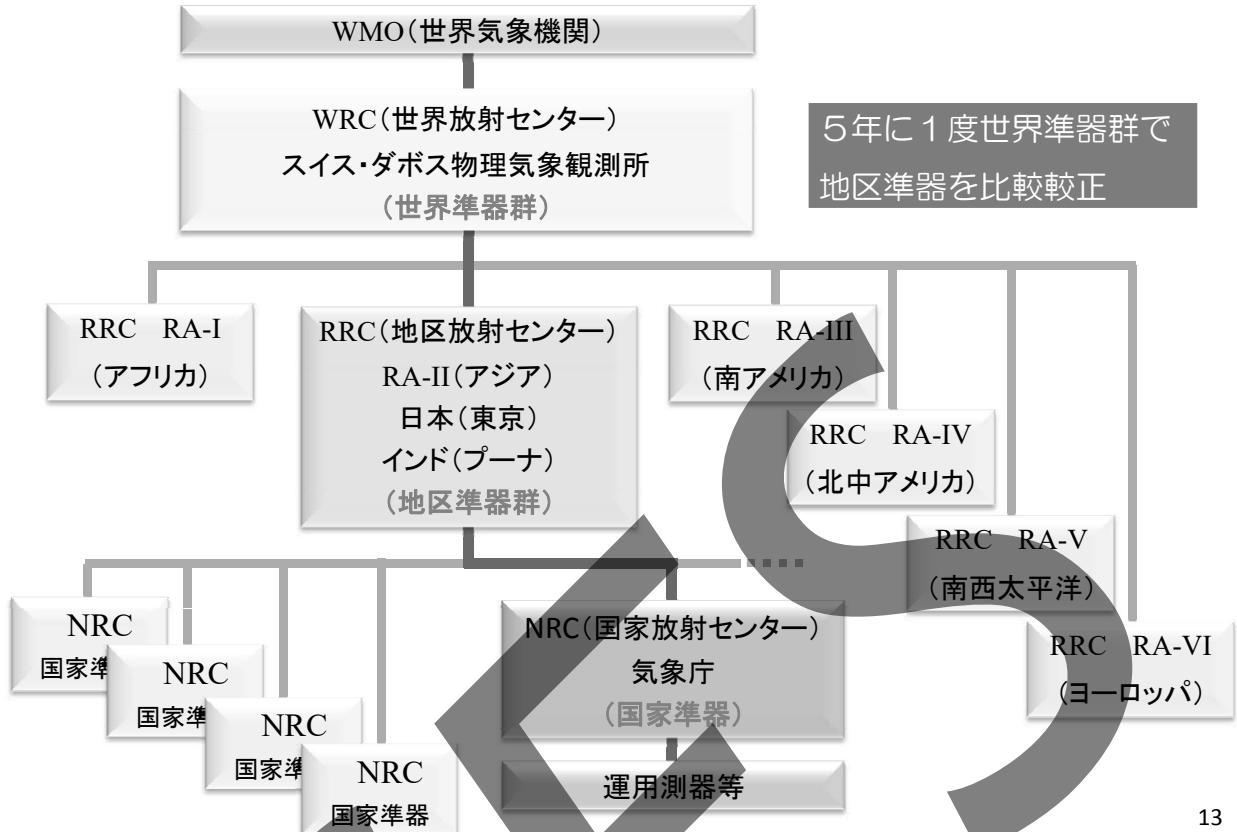
世界放射センターの設立 (World Radiation Center : WRC)

- 1957年 WMO測器観測法委員会(CIMO)第2回会議
日射観測の信頼性と均質性の確立、及び IPS-1956 を維持するため、放射センターの設立を勧告 ⇒ 放射作業委員会が各地区に設立
- 1965年 CIMO第4回会議
世界放射センターを早急に設立すべきことが決議
- 1965年 WMO第4回第Ⅱ地区(アジア)会議
日本とインドが第Ⅱ地区放射センターに指定
- 1971年
ダボス物理気象観測所が「世界放射センター」としてWMOから指定



PMOD : Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos

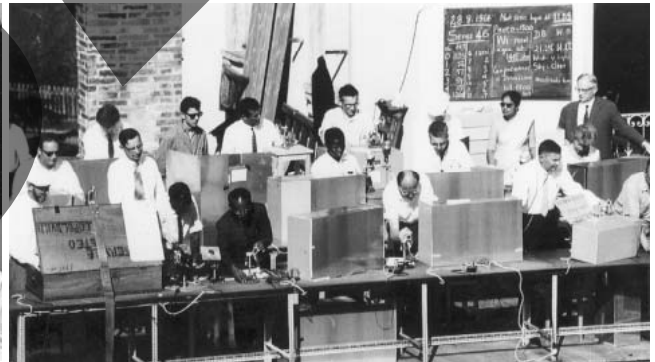
日射計の校正体系



過去の国際日射計比較観測



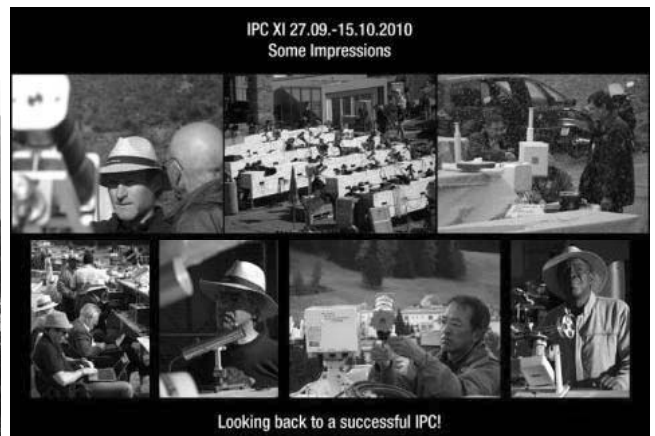
【IPC-I(1959)】 気象庁準器を持参し、東北大学・山本義一教授が参加



【IPC-II(1964)】(日本不参加)



【IPC-III(1970)】(これ以降、毎回参加)

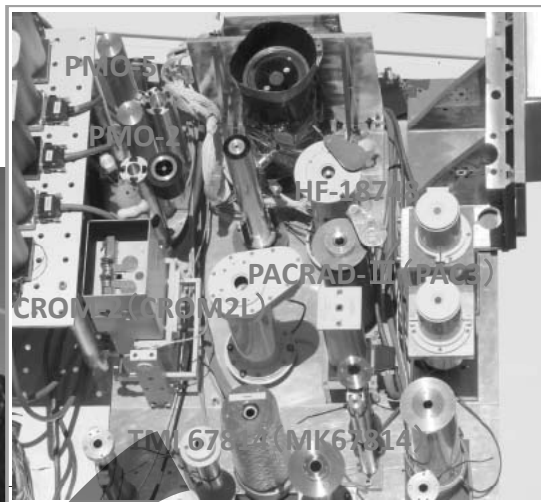


IPC XI 27.09.-15.10.2010
Some Impressions

Looking back to a successful IPC!

【IPC-XI(2010)】

世界準器群 (World Standard Group)




WSG (IPC-XI)

IPC-XI report

International Pyrheliometer Comparison

pmod wrc

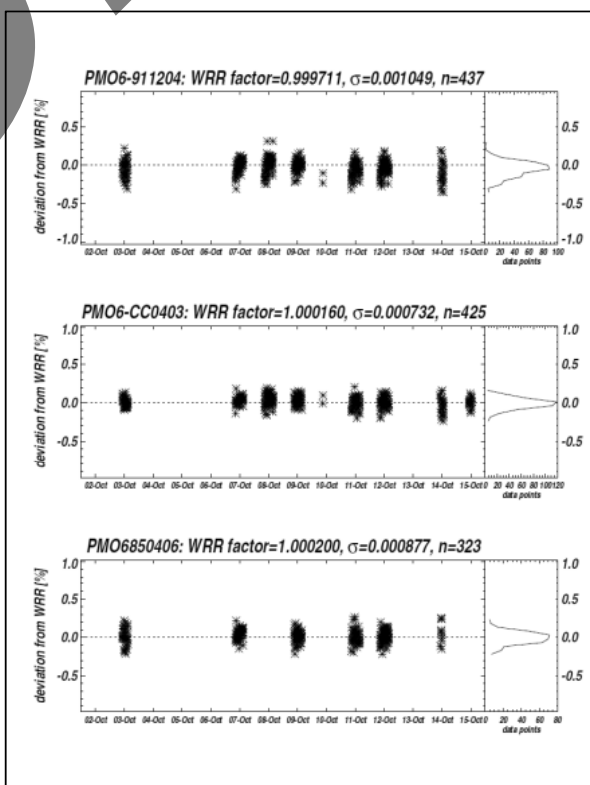


WMO

IPC-XI

27. Sep - 15. Oct 2010
Davos, Switzerland

WMO KOM Report No. 108
2011



第Ⅱ地区(アジア)日射計比較観測

(WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II)

【期 間】 2012年1月23日～2月3日

【開催地】 筑波山

【参加国】 韓国、香港、タイ、スイス(WRC)

Third WMO Regional Pyrheliometer Comparison
of RA II

(Tokyo, 23 January – 3 February 2012)

N. Okumura (Japan)
H. Tamura (Japan)
O. Sima Lukens
H. Kozel (Japan)
D. Yamada (Japan)

Instruments and Cleaning Methods
Report No. 113



17

国内における日射計の校正

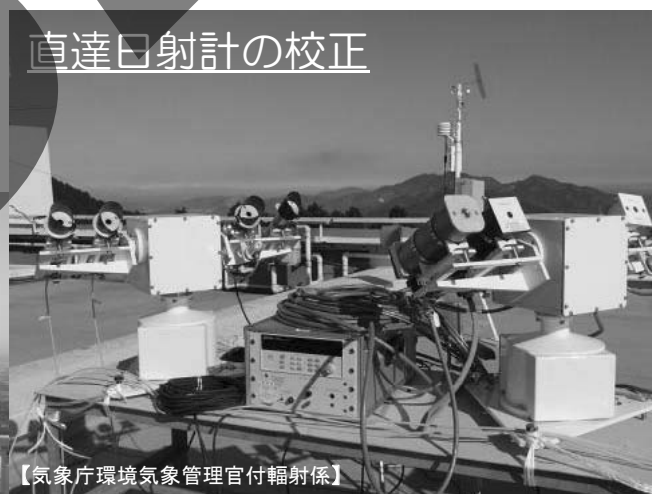
全天日射計(準器)の校正

年に一度、筑波山において校正を実施。

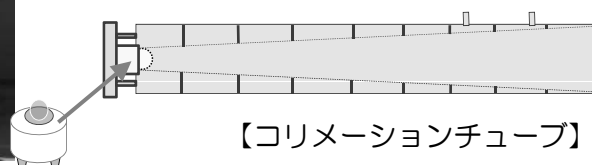


【気象測器検定試験センター】

直達日射計の校正



【気象庁環境気象管理官付輻射係】



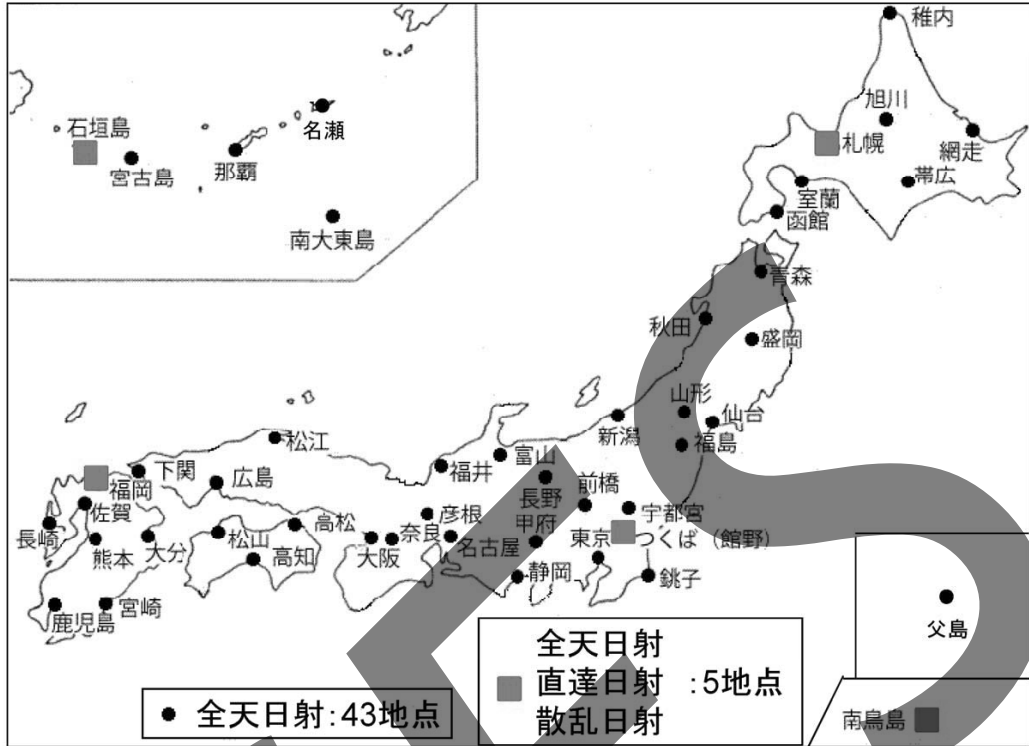
【コリメーションチューブ】

全天日射計を直達日射計に見立てて、直達光で検査を行う。直達日射計の開口角に合うように、全天日射計の受光部の面積に合わせた開口角にしている。筒の終端に全天日射計を取り付け、自動太陽追尾装置に搭載して、直達日射計と比較校正する。

18

気象庁における日射観測網

● 全天日射観測 ■ 精密な日射放射観測

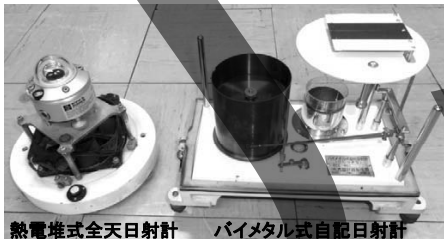


観測地点数(H25年12月1日現在)

【全天日射観測】

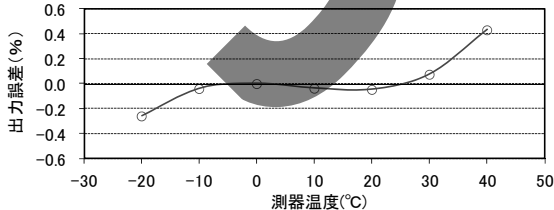
測器: 熱電堆式全天日射計

日射を熱に変換し、さらに熱電堆を用いて電気信号に変換して測定。

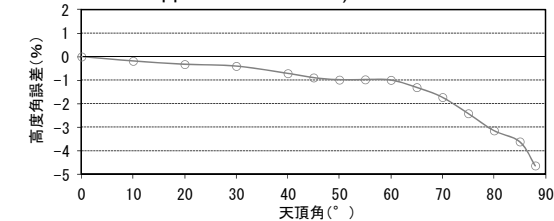


熱電堆式全天日射計 パイタル式自記日射計

【温度特性】(kipp&zonen CMP-21)



【高度角特性】(kipp&zonen CMP-21)

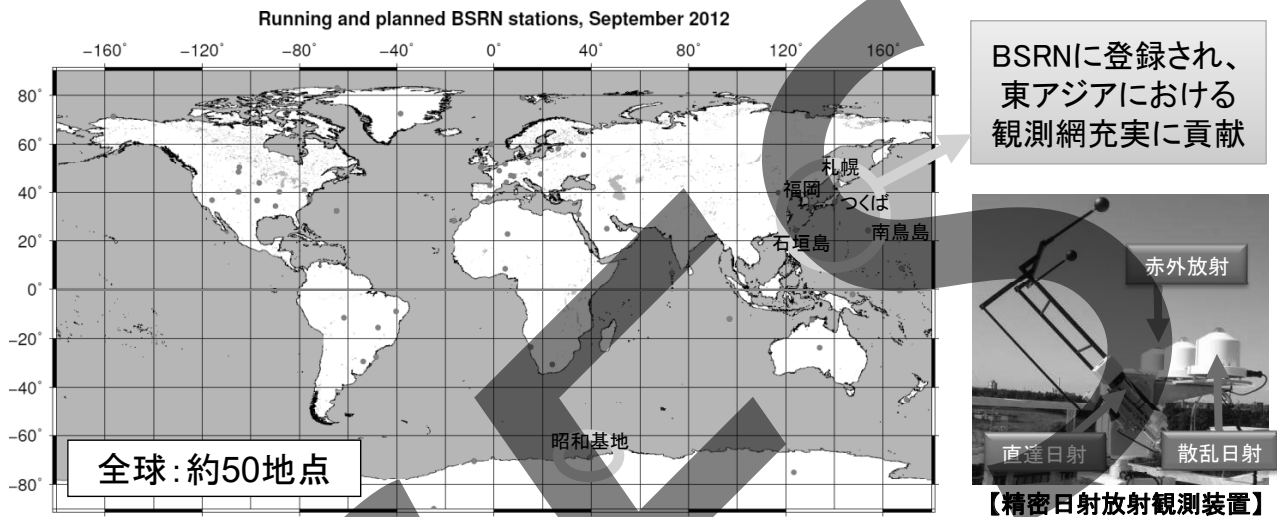


【各官署における全天日射計の種類】(合成全天日射は除く)

官署名	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
稚内	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
網走	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
旭川	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
札幌	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	合成全天日射(直達日射水平面成分+散乱日射)					
室蘭	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
函館	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
仙台	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
青森	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
秋田	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
盛岡	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
山形	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
福島	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
東京	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
宇都宮	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
前橋	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
銚子	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
甲府	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
名古屋	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
静岡	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
新潟	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
富山	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
福井	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
長野				B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
大阪	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
奈良	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
彦根	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
松山	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
高松	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
高知	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
福岡	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
福岡	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	合成全天日射(直達日射水平面成分+散乱日射)					
下関	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
長崎	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
大分	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
佐賀	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
熊本	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
鹿儿島	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	A社-2	A社-2	A社-2	
南大東島	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	
宮古島	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	
石垣島	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	B社-1	合成全天日射(直達日射水平面成分+散乱日射)					
父島	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-1	A社-2	A社-2	A社-2	
南鳥島	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	B社-2	合成全天日射(直達日射水平面成分+散乱日射)					
つくば	合成全天日射(直達日射水平面成分+散乱日射)										

【精密な日射放射観測】

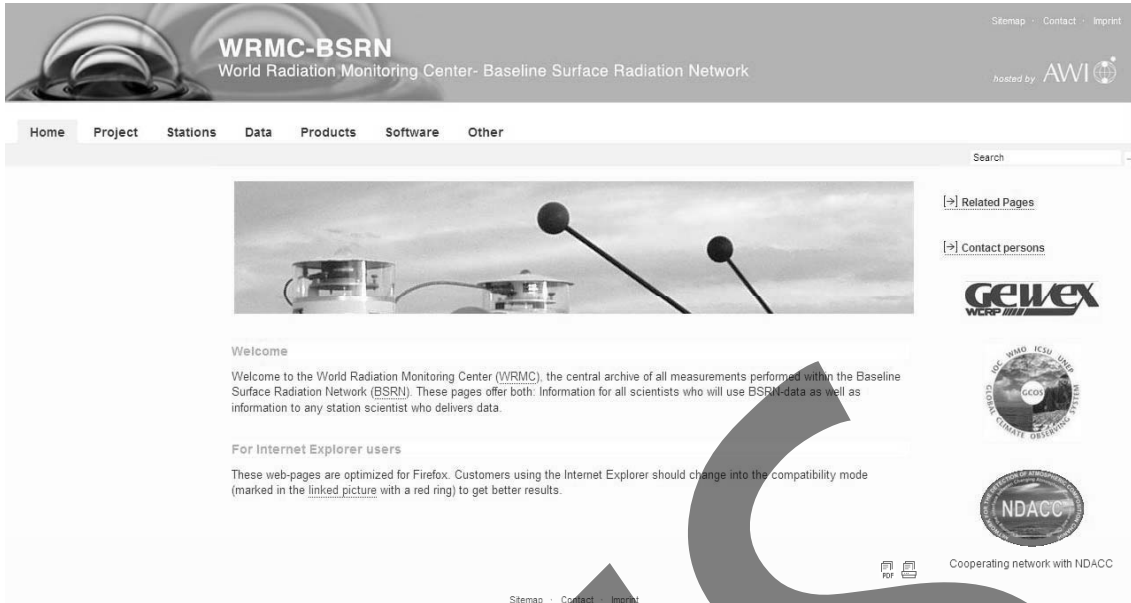
- 全球的な地球環境変化監視のため、高精度な日射放射観測を2010年3月より開始。
- 国際的な気候監視のための地上放射観測網(BSRN: Baseline Surface Radiation Network)の観測地点として登録。
- ⇒ 観測データは、BSRN世界放射モニタリングセンター(WRMC)を通じて研究者に無償で提供。 URL: <http://www.bsrn.awi.de/>



日射放射観測データの提供（気象庁HP）

要素	地点数	データの 間隔	データ提供URL
全天日射量	48	1時間ごと	http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php
直達日射量	5	1時間ごと	http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/radiation/data_rad.html
散乱日射量	5	1時間ごと	http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/radiation/data_rad.html
日照時間	約840	1時間ごと	http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php

データの提供：BSRN/WRMC (独・AWI) のHP

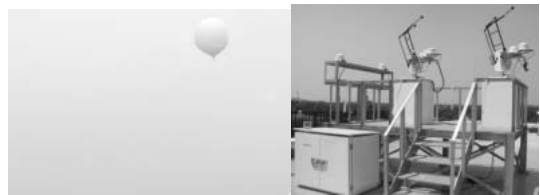
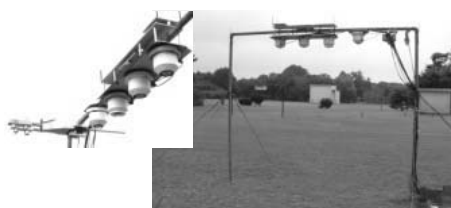
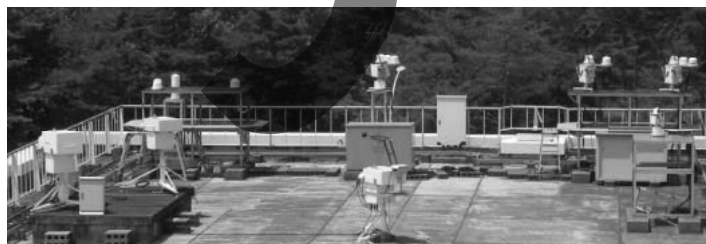


要素	地点数 (日本国内)	データの間隔	データ提供URL
全天日射量	5	1分ごと	http://www.bsrn.awi.de/
直達日射量	5	1分ごと	http://www.bsrn.awi.de/
散乱日射量	5	1分ごと	http://www.bsrn.awi.de/

23

太陽光スペクトルの試験観測(高層気象台)

Tateno (Aerological Observatory) BSRN:1996.2 -



(1) 測器の概要：仕様



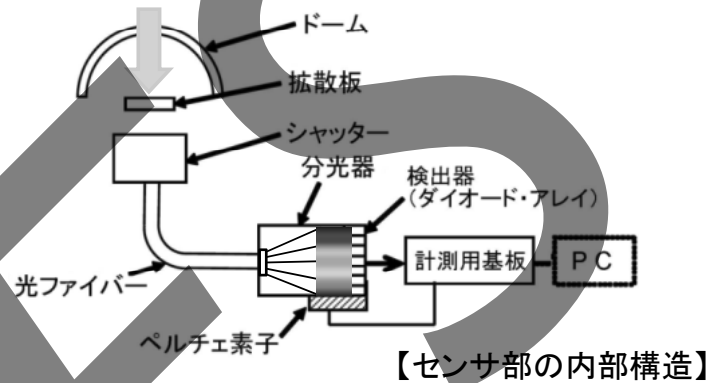
分光型全天日射計 (MS-710)

仕様

- ✓ 波長範囲: 350~1000nm
【参考】可視光400~780nm、近赤外780~2500nm
- ✓ 波長間隔: 約0.73nm
- ✓ 波長分解能: <8nm (半値全幅)
- ✓ 波長精度: $\pm 1.5\text{nm}$
- ✓ 温度依存性: $\pm 5\%$ ($-10\sim+40^{\circ}\text{C}$)
- ✓ 温度制御: $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($-10\sim+40^{\circ}\text{C}$)

特長

- 全天候型
長期間の野外観測が可能
- 長期安定性
駆動部がなく故障が少ない

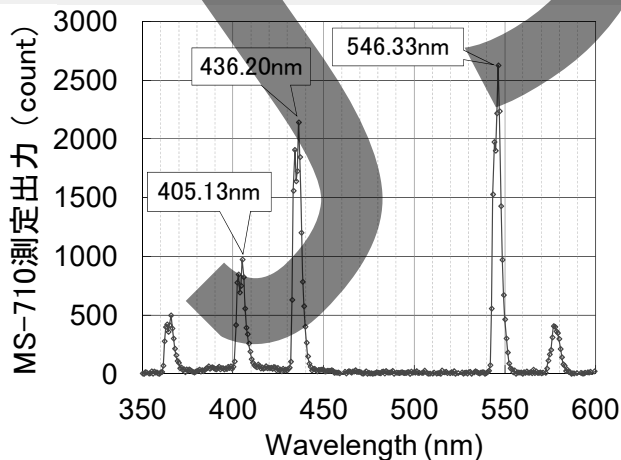


(2) 測器の概要：精度

波長精度

仕様: $\pm 1.5\text{nm}$

【水銀ランプによる波長点検】

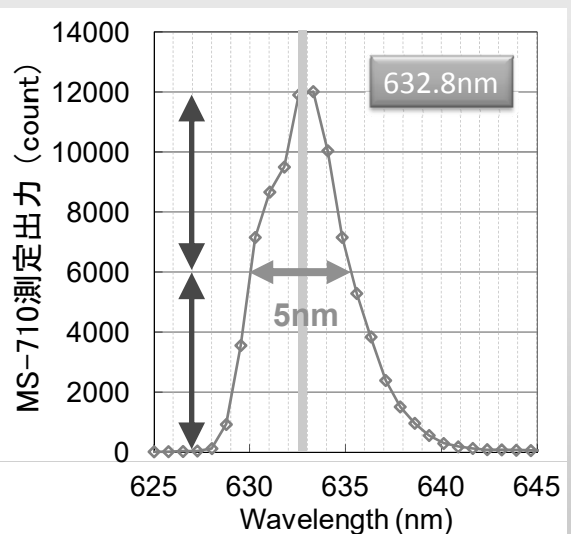


測定結果	水銀ランプ輝線 波長(理科年表)	測定と輝線の差
405.13 nm	404.66 nm	0.47 nm
436.20 nm	435.84 nm	0.36 nm
546.33 nm	546.07 nm	0.26 nm

波長分解能

仕様: 8nm

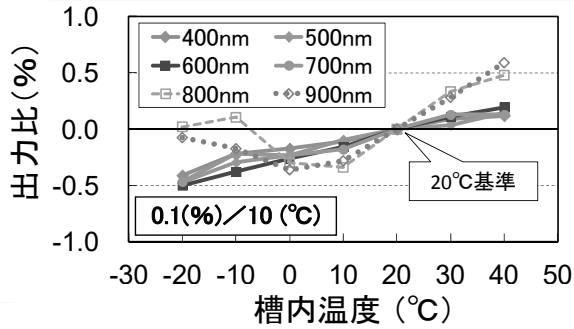
【He-Neレーザー光による半値全幅】



(3) 測器の概要：特性

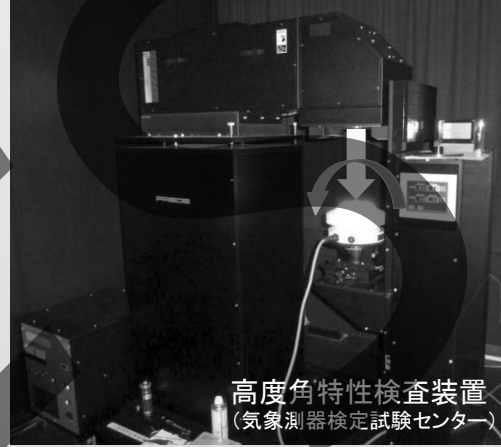
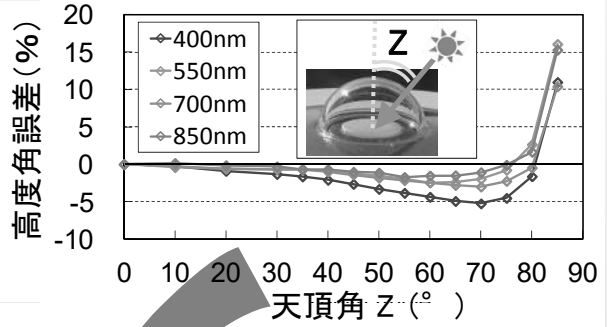
温度特性

仕様：±5%



温度特性検査装置

高度角特性

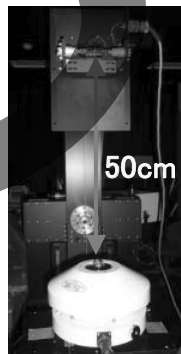


(4) 校正方法：NISTランプによる校正

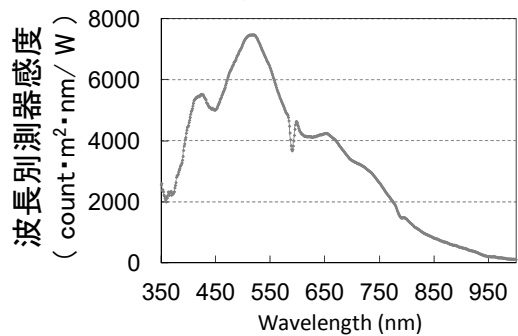
NIST (National Institute of Standards and Technology: 米国国立標準技術研究所)

波長別測器感度の校正

$$\text{波長別測器感度} = \frac{\text{MS710 波長別count値}}{\text{NISTランプ 波長別放射照度}} \quad [\text{count} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{nm} / \text{W}]$$



波長別測器感度

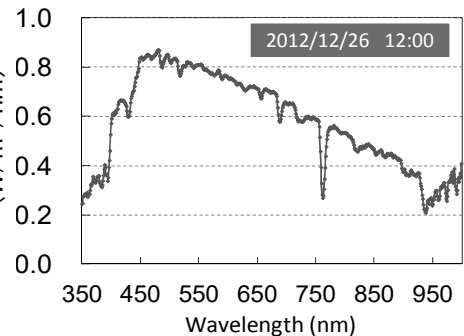


自然光の波長別放射照度の算出

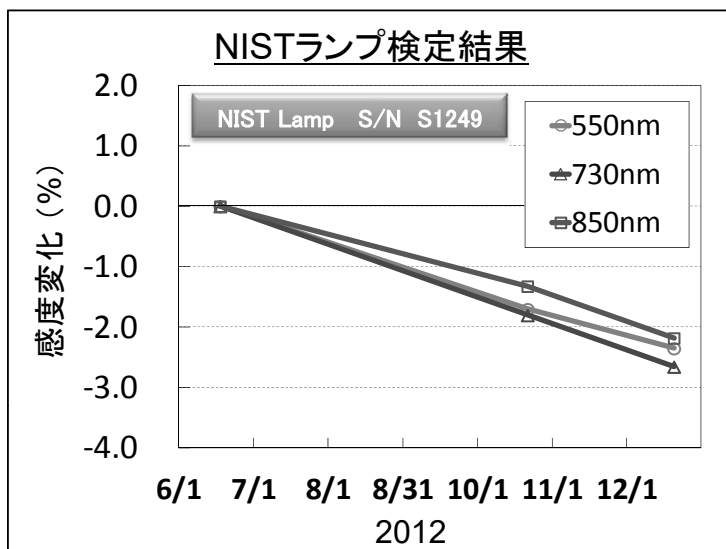
$$\text{波長別放射照度} = \frac{\text{MS710 波長別count値}}{\text{波長別測器感度}} \quad [\text{W} / \text{m}^2 / \text{nm}]$$

波長別放射照度
(W/m²/nm)

自然光の波長別放射照度

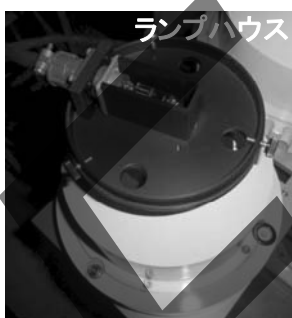


(5) 測器の感度変化

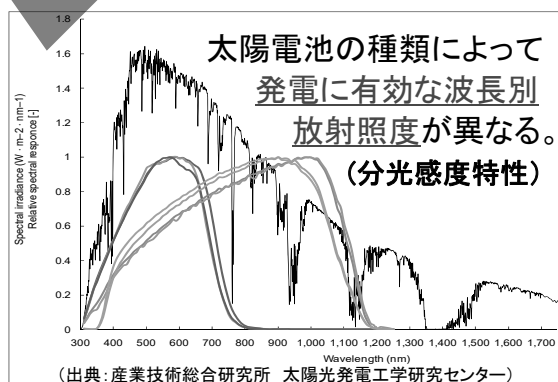


【定期的な測器感度の点検】

外部ランプ点検装置を用いて定期的に点検し、感度変化を監視。
当装置は、高層気象台において広帯域紫外線計の点検用に開発され、分光型全天日射計用にランプハウスを製作した。



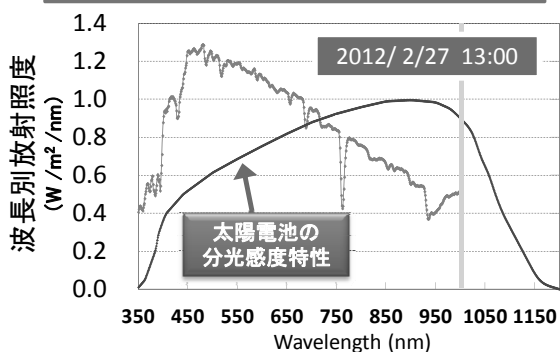
(6) 観測値の利用: 太陽光発電の評価



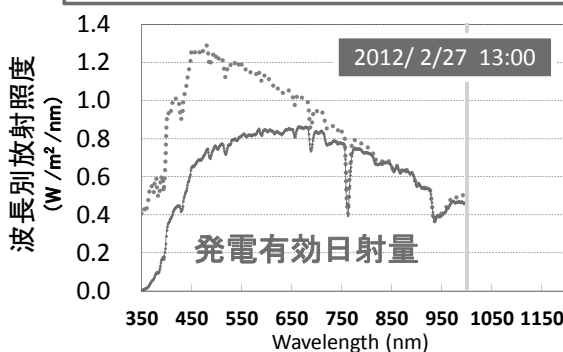
350~1000nm波長別放射照度
積算値: 554 (W/m²)

-25%

発電に有効な波長別放射照度
積算値: 413 (W/m²)

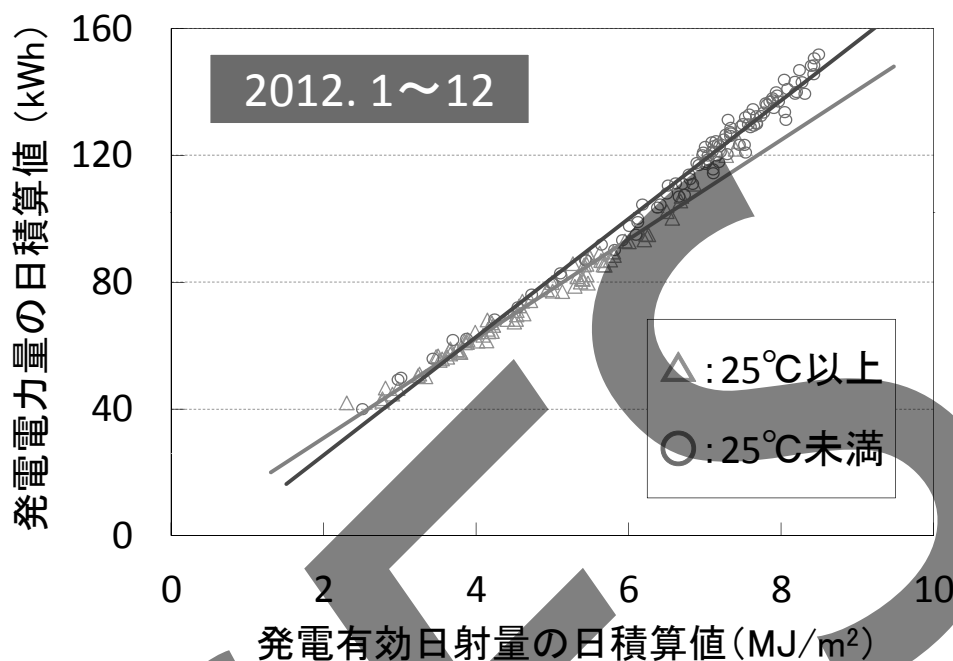


分光感度特性



発電電力量と発電有効日射量の比較

➡ 25°C以上では、発電効率が下がる



31

まとめ

- 日射計の校正体系は、世界気象機関(WMO)を頂点として確立されており、世界放射基準(WRR)によって世界均一の日射観測が行われている。
- 日射スケールは、基準器とともに変更されており、過去の日射観測資料を利用する場合、使用された日射スケールの確認およびWRRへの換算係数が必要となる。
- 分光型全天日射計の感度変化については、十分に把握されていないため、定期的に点検を行い、感度変化を監視する必要がある。

32