

放射観測に関する歴史的経緯

早坂忠裕

(東北大学・大学院理学研究科)

内容

- 19世紀以前から20世紀初めまで
 - Pyrheliometer, Pyranometer, Pyrgeometer, Actinometer
- 空洞黒体絶対放射計
- サーモパイル型日射計
- 国際日射スケール1956 (IPS-1956)
- 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
- BSRN等

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。

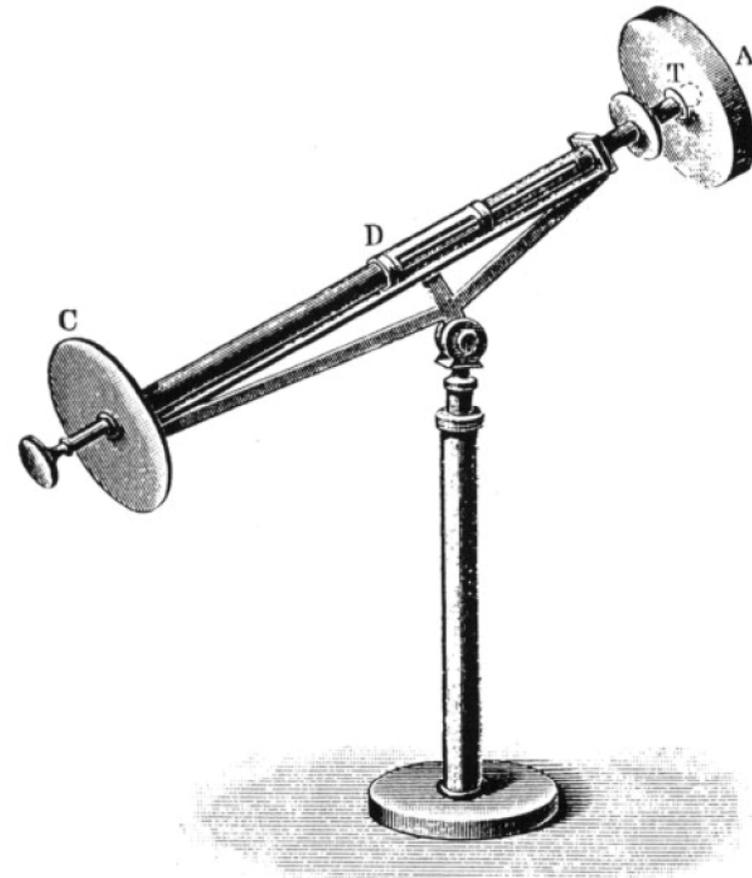


Figure 1. Pouillet's pyrheliometer. A : blackened receiver (metallic container filled with water); T : bulb of thermometer; D, C : alignment check.

(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

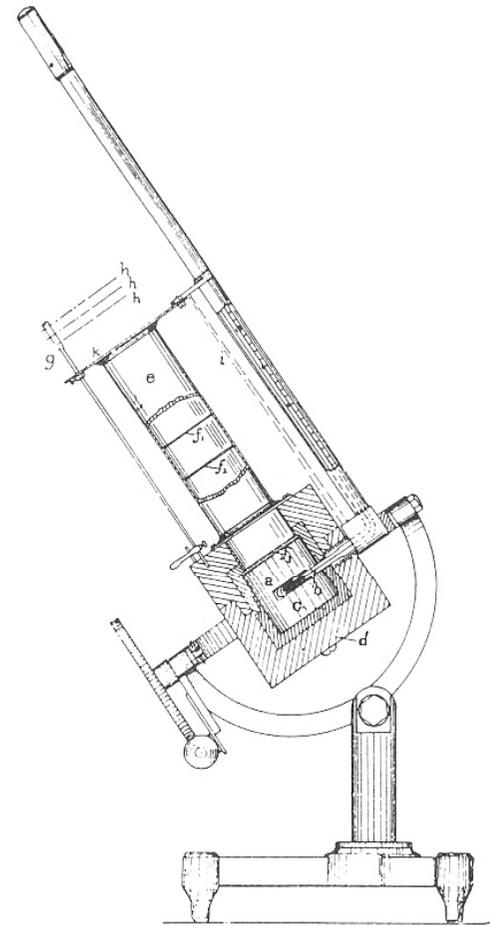


図 7.7 銀盤日射計の構造

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

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。

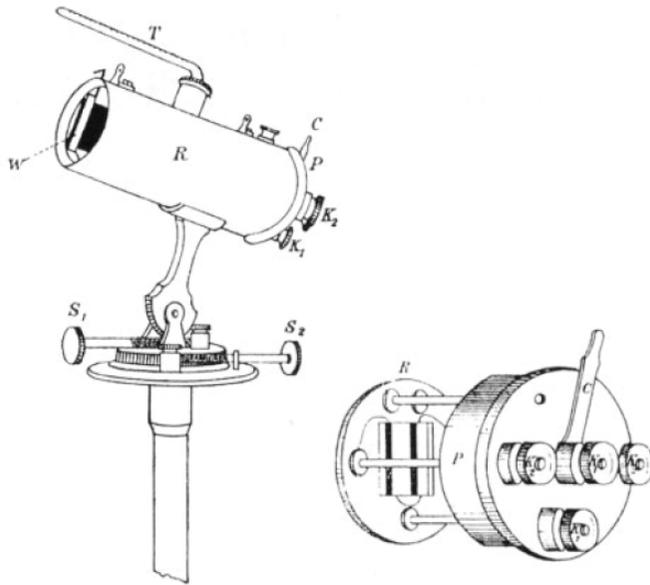


Figure 2. Ångström compensation pyrheliometer. Left, general view; right, detector. $S_{1,2}$ adjustment for alignment on the sun; W : shutter for shading left- or right-hand strip; R : detector tube; T : thermometer; K_1 : current connection; K_2 : thermoclement connection; C : current switch for selecting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

(Fröhlich, 1991)

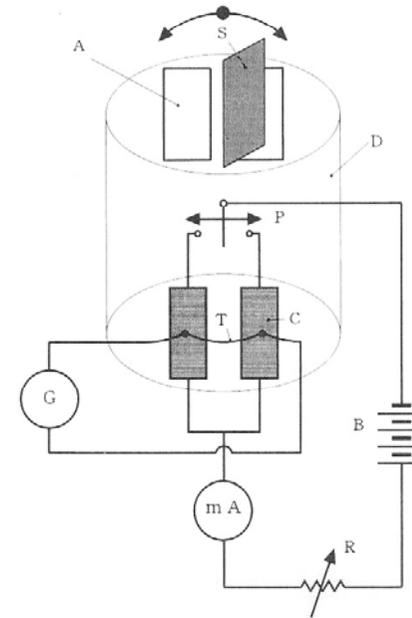


図7.6 オングストローム補償日射計の構造
 A: 開口 B: バッテリー C: 受光板 D: 金属筒
 P: 切替スイッチ R: 可変抵抗 S: シャッター
 T: 熱電対 G: 検流計 mA: 電流計

(気象研究ノート185号、1996より)

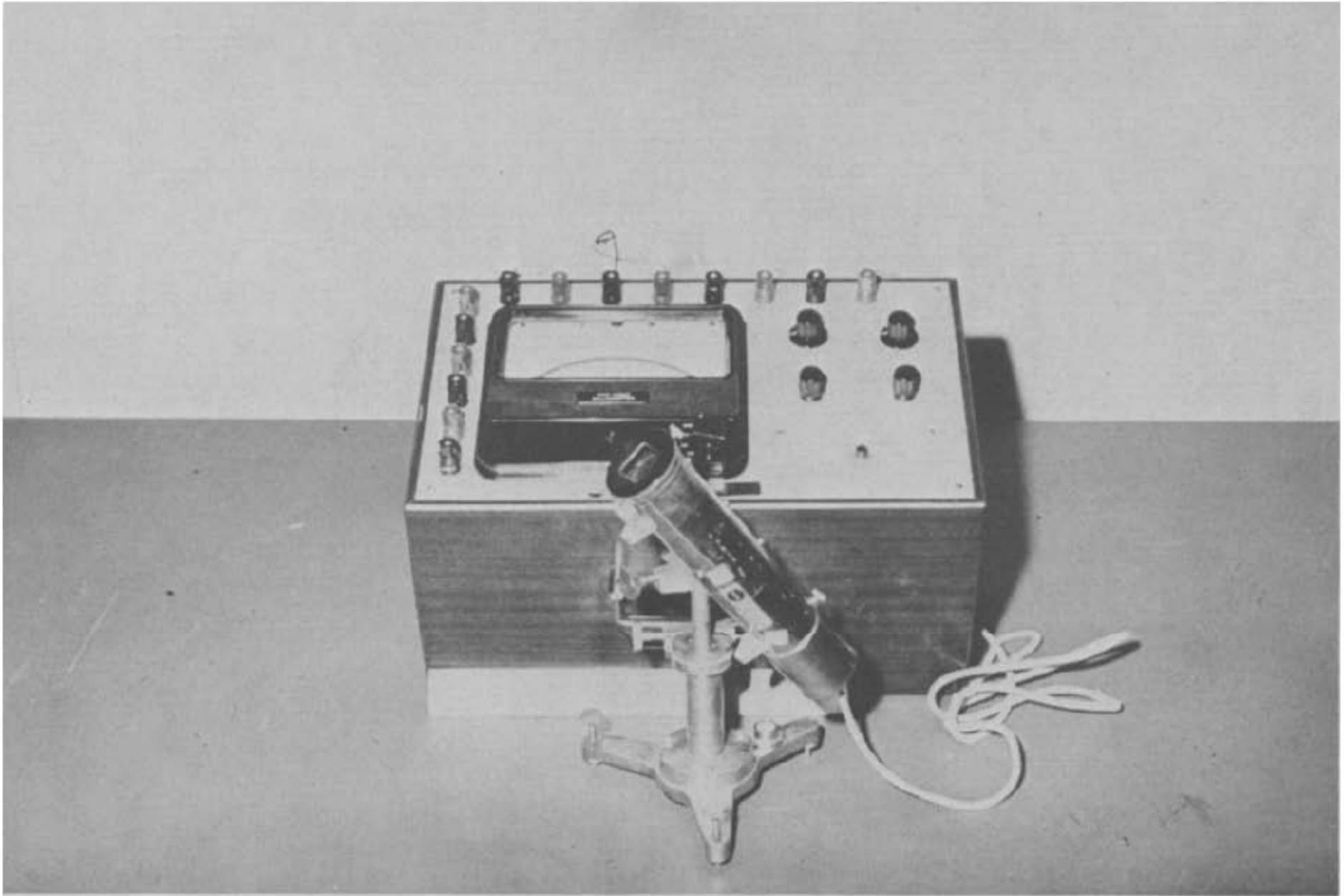
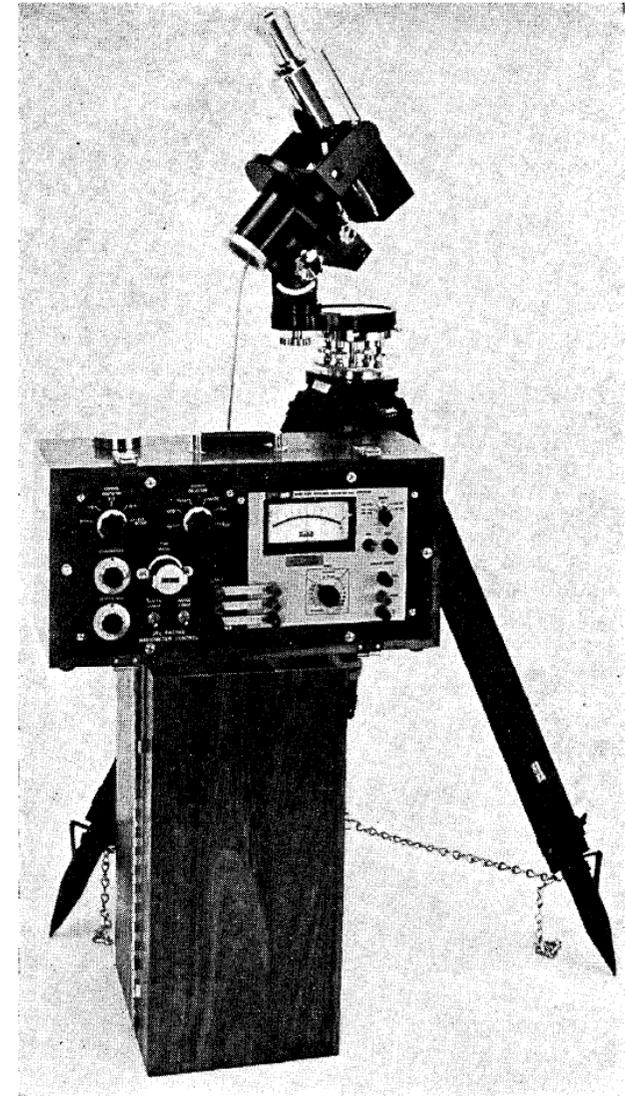
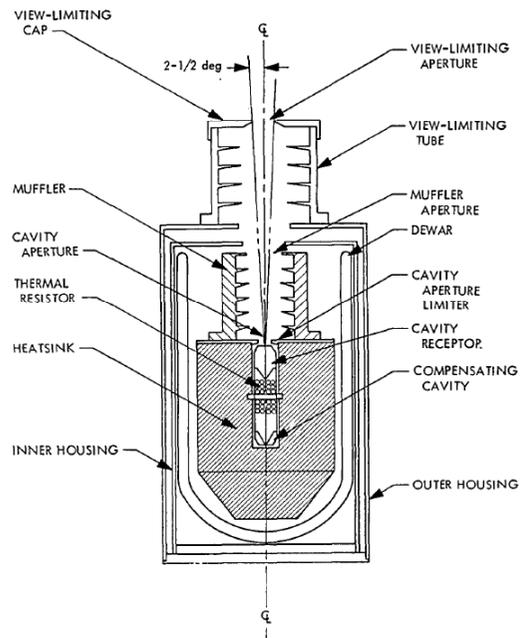


Fig. 13. Ångström electrical compensation pyrhelimeter (Eppley, No. 6618) with its electrical control unit.

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)

サーモパイル型直達日射計

- 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する。

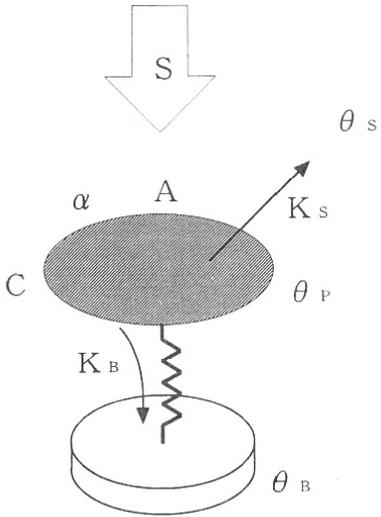


図 7.11 サーモパイル型直達日射計受光部の単純化された構造

(気象研究ノート185号、1996より)

- S: 受光面上の放射照度 ($W \cdot m^{-2}$)
- A: 受光面の面積 (m^2)
- α : 受光面の放射吸収率
- K_S : 受光板と周囲の間の熱伝達率 ($W \cdot ^\circ C^{-1}$)
- K_B : 受光板とヒートシンクの間の熱伝達率 ($W \cdot ^\circ C^{-1}$)
- θ_P : 受光板の温度 ($^\circ C$)
- θ_S : 周囲の温度 ($^\circ C$)
- θ_B : ヒートシンクの温度 ($^\circ C$)
- C: 受光板の熱容量 ($J \cdot ^\circ C^{-1}$)
- t: 時間 (s)

とすると、次式が成り立つ。

$$S \cdot \alpha \cdot A = K_B \cdot (\theta_P - \theta_B) + K_S \cdot (\theta_P - \theta_S) + C \cdot \left(\frac{d\theta_P}{dt} \right) \quad (7.25)$$

で $\theta_S = \theta_B = \text{一定}$, $K_B = \text{一定}$, $K_S = \text{一定}$, $S = \text{一定}$ として式 (7.25) を解くと

$$\theta_P - \theta_B = \frac{S \cdot \alpha \cdot A}{K_B + K_S} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{K_B + K_S}{C} \cdot t \right) \right\}$$

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。

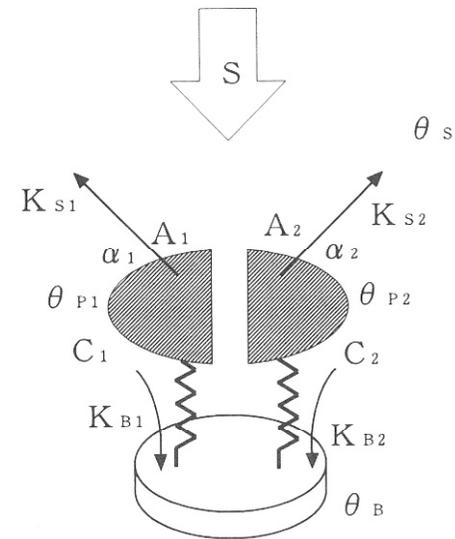


図 7.13 2枚の受光板を持つ全天日射計受光部の単純化された構造

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

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

(気象研究ノート185号、1996より)

国際日射スケール1956 (IPS-1956)

- Ångström Scale 1905
 - 1905年、インスブルックの放射委員会でオングストロームの電気補償式日射計を準器として承認。主にヨーロッパで使用。
- Smithsonian Scale 1913
 - スミソニアン天体物理研究所の流水式直達日射計および銀盤日射計により1913年に確立された基準。主にアメリカで使用。
- IPS-1956
 - 国際地球観測年 (IGY, 1957-1958) に先立ち、世界中の日射測定値の整合性を図るために制定。
 - Ångström Scale と Smithsonian Scale に 3.5% の差がある。これを解消するために Ångström Scale を 1.5% 大きく、Smithsonian Scale を 2% 小さくした。しかしながら Ångström 日射計の不安定さが指摘され、1970年に機械定数が安定している7台の Ångström 日射計の平均値により改めて IPS-1956 が定義された。

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とSmithsonian Scale 1913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。

国際地球観測年 (International Geophysical 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)

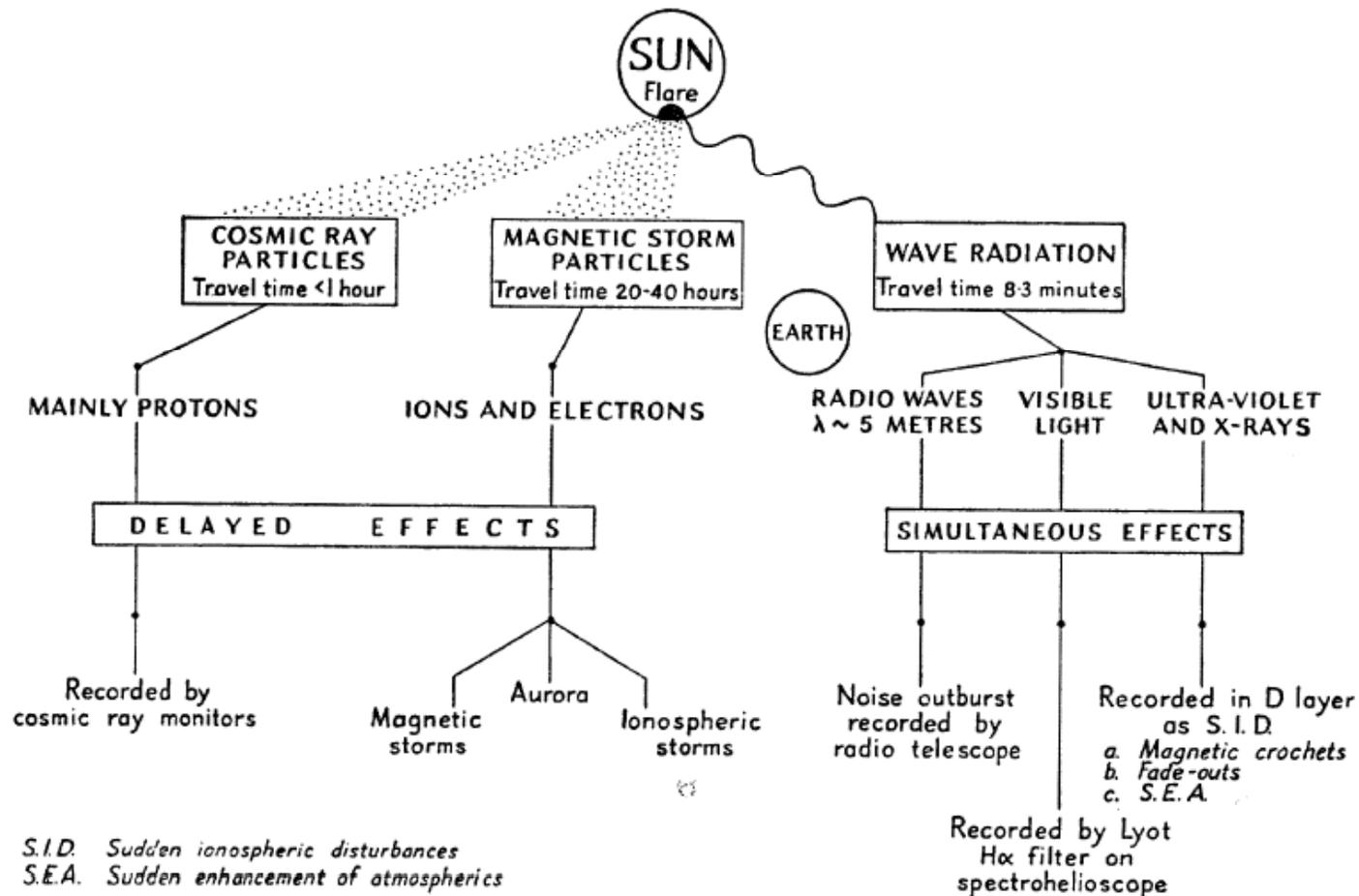


Fig. 1. Terrestrial effects of solar flares (reproduced by courtesy of Dr. M. A. Ellison)

(Martin, 1958)

日射量の全球分布

GENERALIZED ISOLINES OF GLOBAL RADIATION, SURFACE
kg. cal. / cm.² / yr.

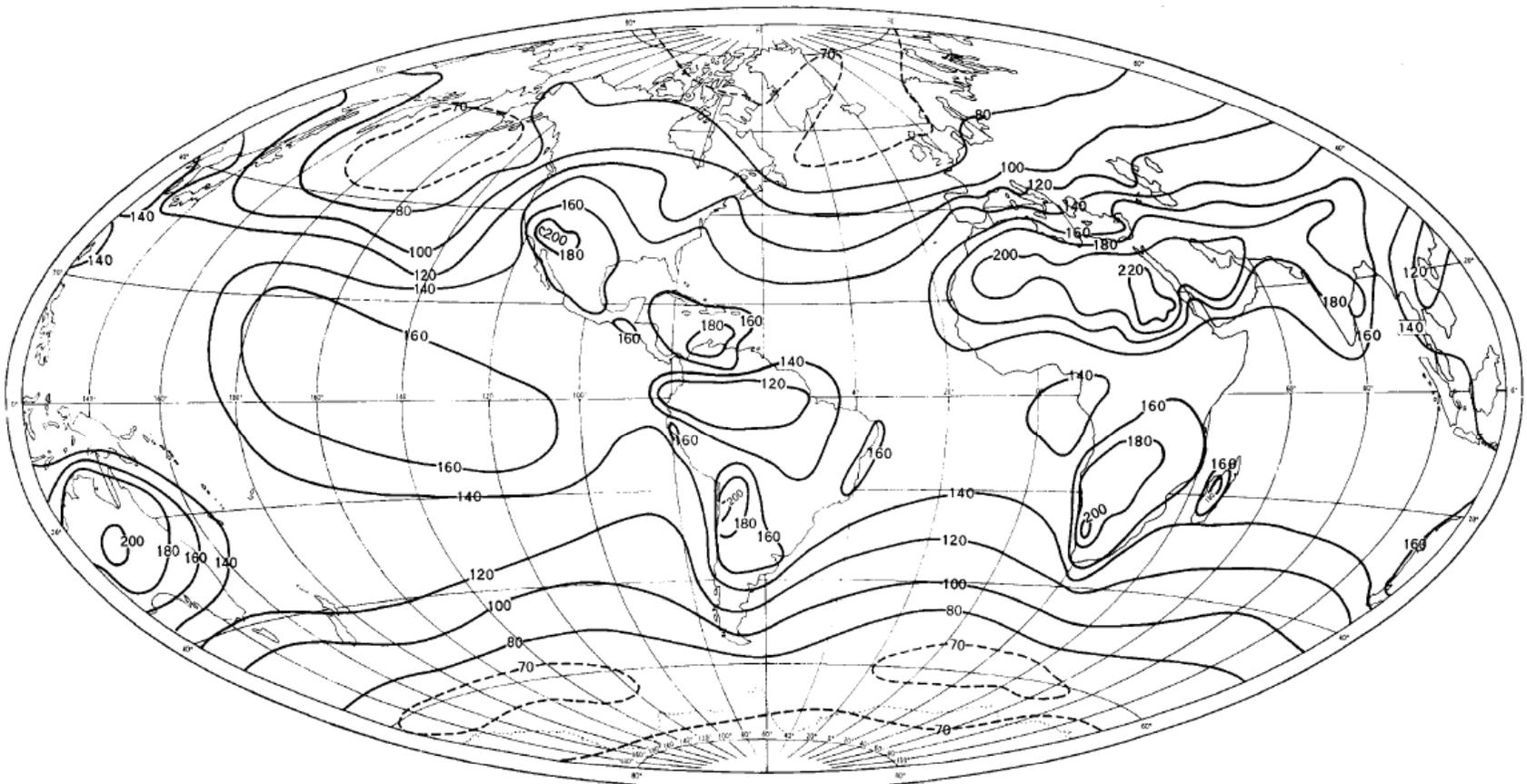


FIG. 1—Generalized isolines of global radiation, surface (kcal/cm²/yr)

(Landsberg, 1961)

中国における日射量の長期変動

(Shi, Hayasaka et al., 2008)

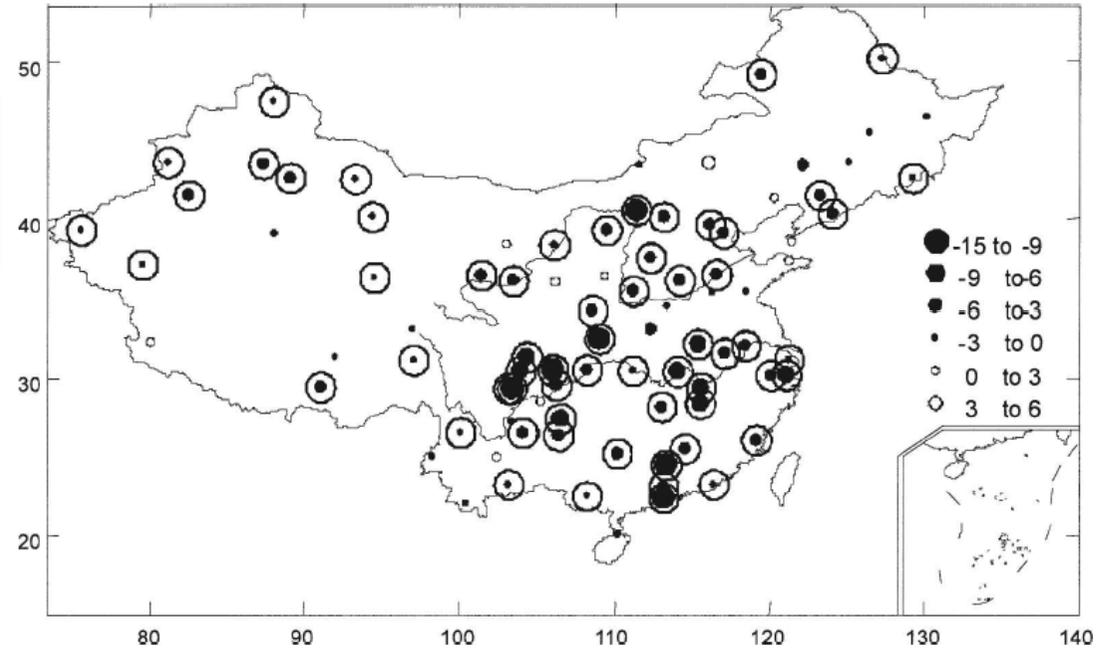


FIG. 5. Distribution of long-term [% (10 yr)⁻¹] variations in annual mean global solar radiation in China. Station trend indicators with circles around them are significant at the 95% confidence level.

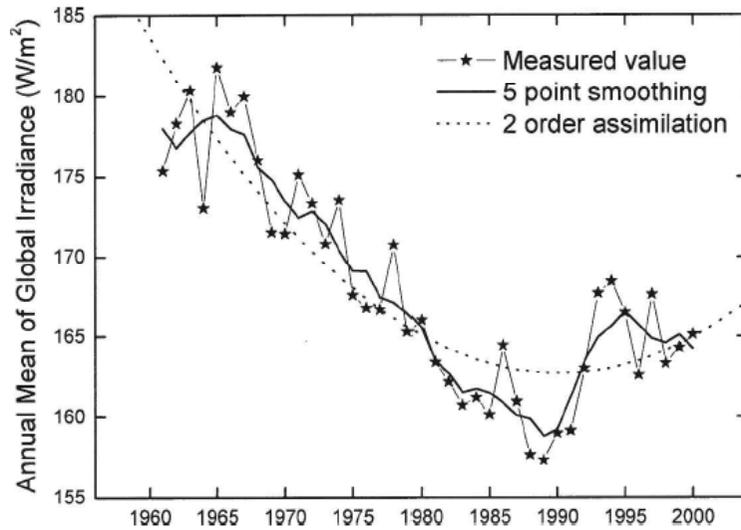


FIG. 3. Time series of annually averaged global solar radiation at all stations.

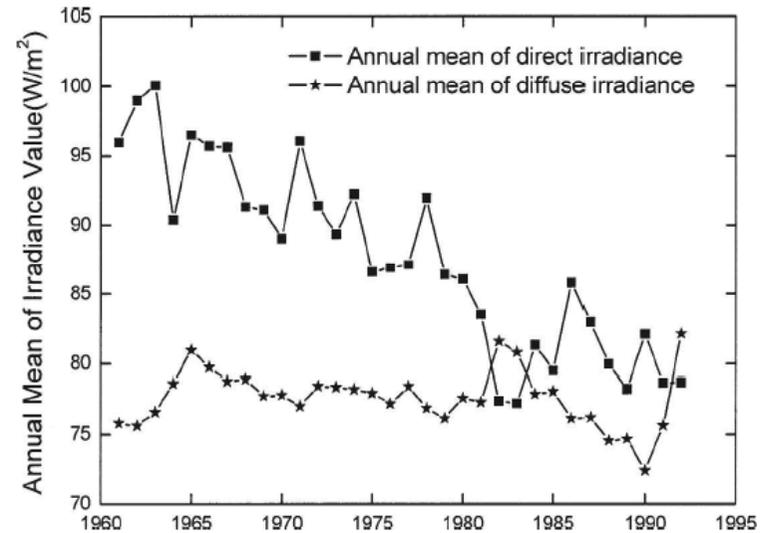
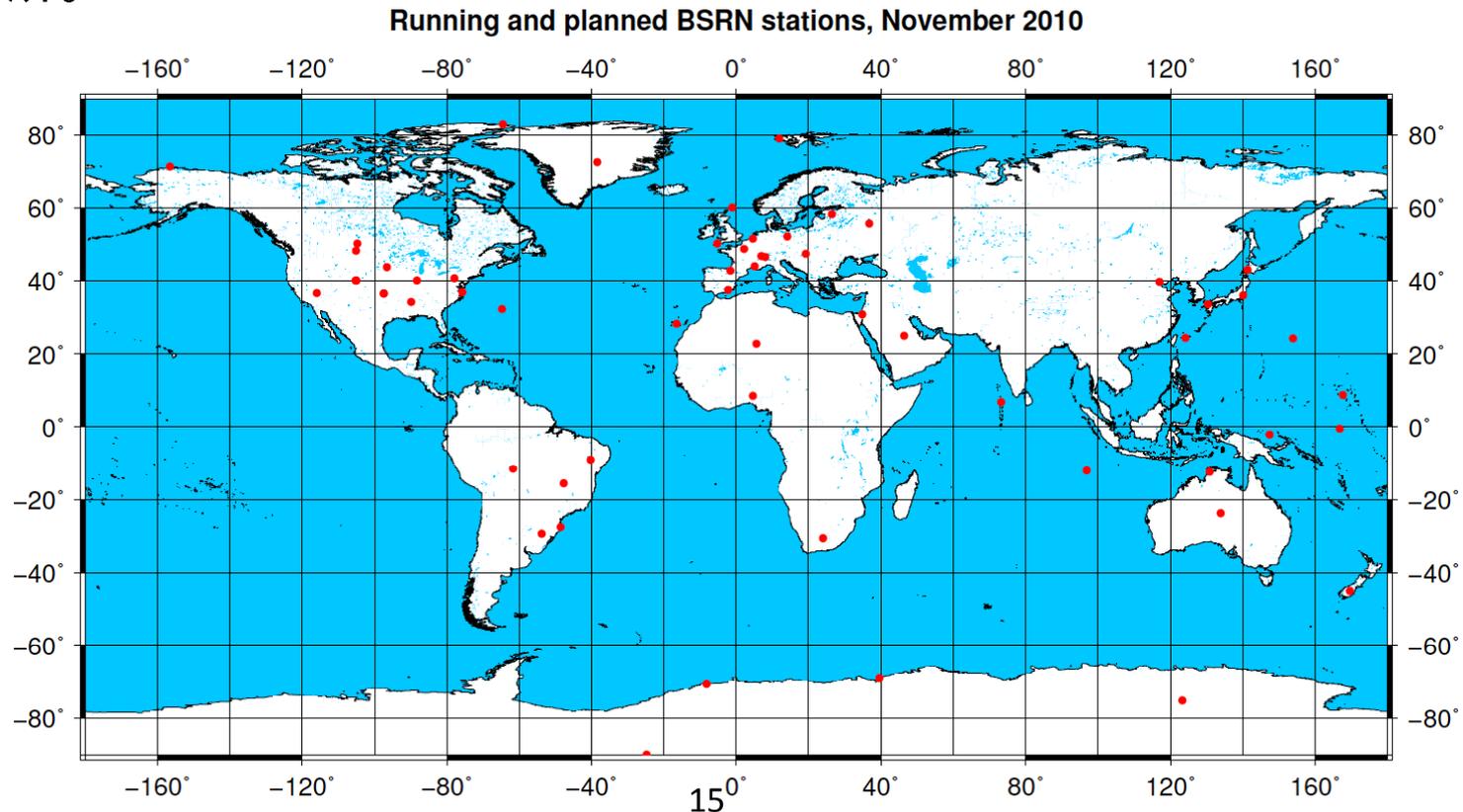


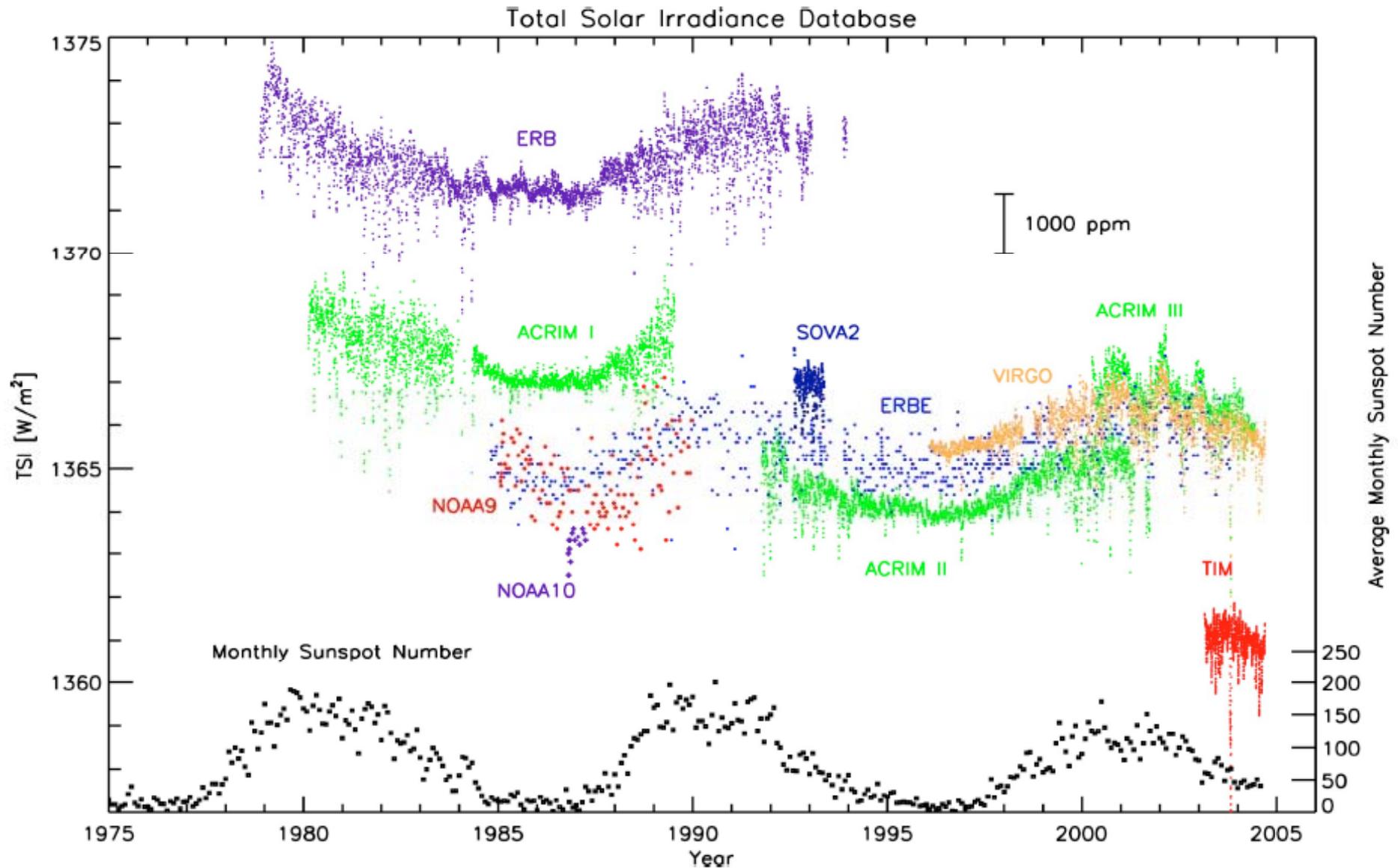
FIG. 4. Long-term variations of direct and diffuse solar radiation.

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。



太陽放射(太陽定数)の変化と黒点の11年周期



(Kopp, Lawrence, and Rottman, 2005)

まとめ

- 昔は天文学者が地上での太陽放射観測に深く関係
- 太陽放射エネルギーを計測する方法
 - 温度計を利用して太陽放射エネルギーを計測
 - 太陽放射エネルギーを電氣的に補償して等価な熱を計測
 - 熱電堆 (thermopile) を用いて計測
- 放射計スケールとWRR
 - Ångström Scale 1905, Smithsonian Scale 1913, IPS-1956
- 国際地球観測年 (IGY) を契機として世界中の気象官署で放射観測を展開
- 近年はBSRN等による高精度放射観測網を展開
- 衛星搭載放射計による太陽定数の絶対値測定