

日射観測について

On the Observation of solar Radiation.

池田 弘
Hiroshi IKEDA

§ まえがき

高層気象台(注1)で行っている日射観測は1957年7月に発足している。最初はエブリー日射計による全天日射量および銀盤日射計による直達日射量の観測であったが、その後地面反射量および天空散乱日射量の観測が追加され、また自記直達日射計による直達日射量の連続観測も行われている。

本稿では現用全天日射計の問題点と、高層気象台で行っている日射観測の現状を概説する。

§ 2. 全天日射計の一般的特性

地上に到達する太陽エネルギーは、太陽直射光成分と天空散乱光に分けて考えることができる。いま地上付近に水平に置かれた単位面積上に入射する太陽エネルギーのフラックス、すなわち全天日射量を F_g 、そのうちの直射光成分を F_D 、天空散乱光成分を F_d とすると、

$$F_g = F_D + F_d \quad (1)$$

のようにあらわされる。太陽天頂角を Z_0 とすると、直射光成分は、

$$F_D = F_P \cos Z_0 \quad (2)$$

のようにあらわされる。 F_P は直射光の法線面フラックス、すなわち直達日射量である。また天空散乱光成分については

$$F_d = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(Z, \theta) \sin Z \cos \theta dZ d\theta \quad (3)$$

のようにあらわれる。 $I(Z, \theta)$ は天頂角 Z 、方位角 θ の方向から到達する散乱光の強度である。

全天日射計は、地上に到達する太陽エネルギーのフラックス F_g を測定する目的のものである。日射計は、その感部に光があたることによって、その部分の温度が上昇し、その温度上昇が入射した太陽エネルギーのフラックスに比例することを利用するもので、温度上昇は感部に取り付けた熱電堆起電力によって検知される。すなわちこの関係は、

$$F_g = k V \quad (4)$$

であらわされる。 k は熱電堆起電力を測定して F_g を求めるための器械定数である。この値は準器となる全天日射計との比較観測によって求められる。気象庁(注2)においては全国の日射観測が統一された基準のもとに実施されるように日射計の検定業務を行っており、検定を受けた日射計に交付される検定証には k の値が $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{mV}$ の単位で与えられている。

気象庁には国際比較観測によって地区準器⁽¹⁾として認められた1台のオングストローム電気補償式直達日射計があって、準器となる全天日射計の器械定数を次の方法で決定している。すなわち(1)(2)(4)式から、

$$F_P \cos Z_0 + F_d = k V \quad (5)$$

が与えられ、そこで全天日射計に入射する直射光を適当な方法で、しゃへいしてやったときの全天日射計の出力起電力が ΔV だけ変わったとすると、その間 F_d が一定であると仮定することによって、

$$k = \frac{F_P \cos Z_0}{\Delta V} \quad (6)$$

のようにあらわされる。このときの F_P は同時観測した準器オングストローム日射計の測定値である。

全天日射計の型式は、感部の温度上昇を測定するための熱電堆の温度基準点をどこに取るかによって、いろいろの変形が考えられ、補償型とヒート・シンク型⁽²⁾に大別される。補償型は感部が白と黒に塗られた受光面に分かれている、白と黒の面の温度差を測るように熱電堆が張られているのに対し、ヒート・シンク型のものは、黒色の受光面と日射計内部の大熱容量金属との温度差を測定するものである。これら全天日射

(注1) 所在地：茨城県筑波郡谷田部町大字館野番外9番地
位 置：東経 $140^{\circ}08'$ 、北緯 $36^{\circ}03'$
地名：館野 (TATENO)

(注2) 気象庁観測部測候課日射計検定室

現在、茨城県筑波郡谷田部町大字館野番外9番地、
気象測器工場内に駐在している。

*高層気象台観測第三課長
Aerological Observatory, Chief of 3rd Section.

表 1 Classification of Pyranometer

	1 st class	2 nd class	3 rd class
Sensitivity (mW cm^{-2})	± 0.1	± 0.5	± 1.0
Stability (% change per year)	± 1	± 2	± 5
Temperature (maximum error due to change of ambient temperature-%)	± 1	± 2	± 5
Selectivity (maximum error due to departure from assumed spectral response-%)	± 1	± 2	± 5
Linearity (maximum error due to nonlinearity not accounted for-%)	± 1	± 2	± 3
Time constant (maximum)	25 sec	1 min	4 min
Cosine response (deviation from that assumed, taken at Sun elevation 10° on clear day-%)	± 3	$\pm 5-7$	± 10
Azimuth response (deviation from that assumed, taken on clear day-%)	± 3	$\pm 5-7$	± 10

計の構造の相違による特性の優劣を一概に論じることは困難である。

世界気象機関（WMO）では、これら全天日射計を、その精度、性能によって表1⁽³⁾のように分類している。われわれが気象観測のために使用している汎用全天日射計は第2級に属するものであって、これにはモル・ゴルチ NSキー日射計、エプリー180°日射計、エプリー白黒日射計などがこれに属すると考えられている。国産のものにも、これらに類似したものが商品化され広く使用されている。

国産日射計の一般的特性については、関根(1960)⁽⁴⁾、⁽⁵⁾、(1972)⁽⁶⁾、鈴木(1977)⁽⁷⁾等の報告がある。また関根(1972)⁽⁶⁾は人工光源を用いた積分球方式の全天日射計検定装置によって、準器との比較から求めた器械定数が、自然光（よく晴れた日の）のもとで求めた器械定数と少し異なることを指摘している。自然光の場合には直達日射が優勢なのに対し、積分球内の場合は等方に近い散乱光であることを考えると、これら二つの方法による器械定数の差は、準器と被検定日射計とのあいだの高度角特性の差異によって生じたものと言うことができる。また志村・鈴木(1973)⁽⁸⁾は試作した高度角、方位角特性試験装置および温度特性試験装置について述べ、それ等による国産全天日射計の試験結果を報告している。また一木・鈴木(1977)⁽⁹⁾は太陽面しゃへい方式によって全天日射計の器械定数を求めるときの諸問題を述べている。

うえの事象を含めて、現用全天日射計の問題点は次のように要約される。全天日射計の第1の問題点は、感部に塗られる塗料吸収率の入射角特性にあると考えられる。感部の塗料吸収率 α が入射角によらない理想的な場合を考えると、感部に吸収される太陽エネルギーのフラックスは簡単に、

のようにあらわされる。しかしながら、吸収率が入射角に依存しないような塗料は現存しない。すなわち、

$\alpha = \alpha$ (Z または Z_0) であって、これが全天日射計の高度特性に大きな影響を与えると考えられている。

第2の問題点はガラスドームの問題である。全天日射計の感部は半球または全球のガラスドームに覆われている。ガラスドームの波長選択吸収の問題はガラスの質を選びことで、 $0.3 \sim 3 \mu$ の波長域で十分解決される。一方長波長域から見ればガラスドームは実質上黒体であることを考えると、ドームの温度の影響⁽¹⁴⁾は無視できない。ガラスドームの厚さが不均一のために、受光面に縞模様が投影されたりするのは論外である。ガラスドームの内面反射の問題は意外に見逃されていることであるが、高度角、方位角特性に与える影響は無視できない。感部の大きさに相対的なガラスドームの大きさは慎重に考慮されるべきである。

第3の問題点は温度特性である。受光面に吸収された熱エネルギーは内部の金属部分や空気を介して最後には外気中に伝達することで、日射計感部内の温度分布が平衡している⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この過程で、熱電堆をふくめた金属類の熱伝導度、空気の分子熱伝導度または対流熱伝達率などが、もし温度で変われば感部内の平衡温度分布が変わり、それに応じて熱電堆起電力が変わり、見掛け上 k が変わることになる。熱電堆自身の温度係数も一因である。感部のどの部分が温度係数に影響するかを知ることは困難なことである。表1の第1級に属するもので温度係数を減らすような電気補償回路を持つものがあるが、第2級に属するもので温度補償を行ったものは現存しない。

第4の問題点に時定数の問題がある。気象観測の目的には、あまり早い応答速度は必要ないけれども、最初の立上がりが十分速いものであっても、あるところからの応答が非常に緩慢になって99%応答に長時間要する⁽⁶⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾ものがあるので注意する必要がある。これは不十分な整設計に起因する。

日射計の誤差となるものには、このほかにも種々の要因が考えられるが、上述した問題点に限っても、物

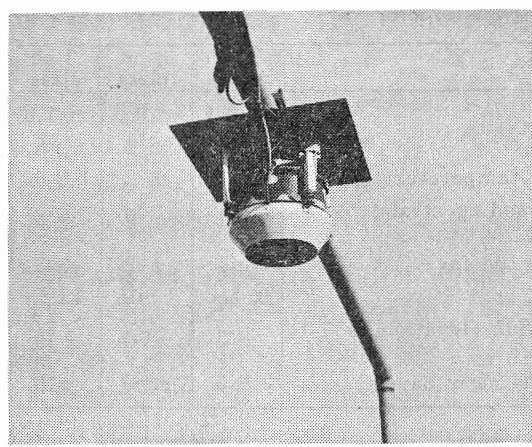


Fig. 1 Installation of a pyranometer for the measurement of ground reflected radiation

表2 Relative sensitivities of Eppley type 180° pyrheliometers according to enclosed air pressure and installed positions, sensor are shown in Fig. 1.

Enclosed air pressure	Sensor faced	Types of sensor	
		No.1	No.2
1 atm. pressure	upward	100%	100%
	sideward	96	89
	downward	99	92
10 mmHg	upward	99	95
	sideward		
	downward		

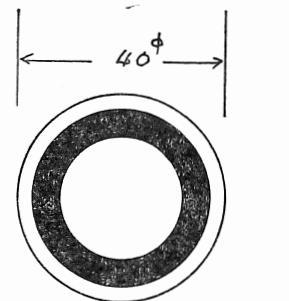
理的、技術的に解決困難な問題が多い。

§2. 地面反射日射量の測定

地面反射日射量は、高さ 2 m の鉄製支柱に全天日射計を図1に示すように下向きに設置して測定している。

エッブリー日射計（180°型）によって地面反射の測定を行う場合に二つの問題が指摘された⁽¹⁰⁾。第1の問題は日射計の背面から射し込む日射が、ガラスドームの内面反射により感部に集光し影響を与えることである。これは適当なしゃへい板を取り付けることで解決される。第2の問題は、日射計を倒立または横方向に向けることによって感度(注)が変わることである。

エッブリー型日射計（180°型）の模型について実験した結果⁽¹¹⁾⁽¹²⁾では、感部内外の空気熱伝達の模様が日射の取付姿勢によって変わることが確かめられた。また受感部の構造を変えることによって、その特性が変わることが確かめられた。表2は図2に示す二つの型の感部についての実験結果である。構造を少し変えることによる特性改善の余地はあるが、完全にこの特性を除去することは困難である。一方ガラスグローブ



No.1
↓
No.2
↓
↑

Fig. 2 Sensors of Eppley type 180° pyrheliometer used for experiment.

内の空気を 10 mmHg の程度に減圧すればよいことが確かめられたが製作技術の面で実現困難である。

一方モル・ゴルチニスキ日射計については、取付姿勢による感度変化が非常に小さい（1%以下）が確かめられた⁽¹³⁾。この日射計（図3）の場合は感部で吸収した熱の大部分が金属を通してヒートシンクに逃げる構造になっていて、感部から空気を通して伝達する割合が比較的少ないと関係があると考えられる。

高層気象台では現在地面反射日射量の測定にモル・ゴルチニスキ型の日射計を図4のように通風装置により付けたもの⁽¹⁴⁾を使用している。

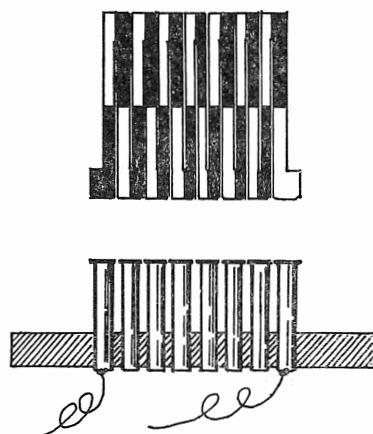
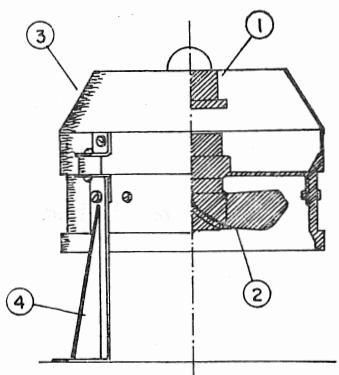


Fig. 3 Sensors of Moll-Gorczyński type pyranometer.

(注) 感度 S は器械定数 k の逆数とする。すなわち $S=1/k$ 。



1. Moll-Gorczyński pyranometer.
2. Fan blade.
3. Tapered ventilation duct.
4. Supporting arm.
Fig. 4 Ventilated pyranometer.

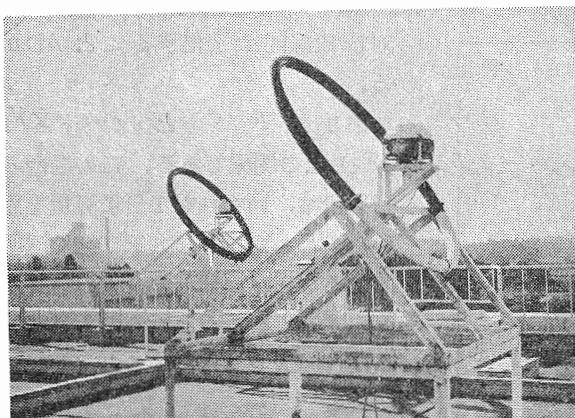


Fig. 5 Installation of a pyranometer and shadow ring for the measurement of diffuse sky radiation.

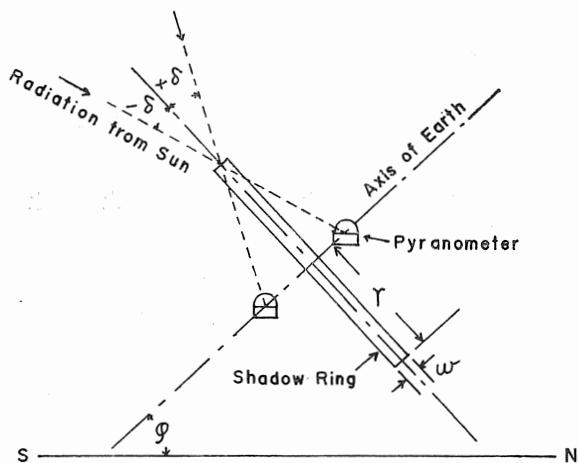


Fig. 6 Geometry of the shadow-ring installation.

商業ベースにある総べての日射計について、取付姿勢による感度変化を調べることは困難であり、また同型のものであっても個々の日射計によって特性が異なることが考えられるので、もしこれに類した測定を行うに際しては、個々のユーザーによって確かめる必要がある。

§ 3. 天空散乱日射量の測定

天空散乱日射量は図5に示すように、しゃへい環の方法で測定される。すなわち全天日射計に入射する太陽エネルギーのフラックス中、太陽直射光成分を、しゃへい環によってさえぎることによって散乱光成分だけを測定する。しゃへい環と全天日射計との幾何学的関係を図6に示す。しゃへい環は赤道面に平行に設置され、全天日射計は環の中心軸にそってスライドするようになっている。外国⁽³⁾では、しゃへい環を動かして調整する方法が一般であるようだが、この日射計をスライドする方法は、いろいろの点で優れていると思われる。この方式は齋田・福田(1962)⁽¹⁵⁾の考案によるものである。

しゃへい環を用いた場合、環が天空の一部をさえぎるためにリング補正が必要になる。しゃへい環が円管の場合の補正量は、

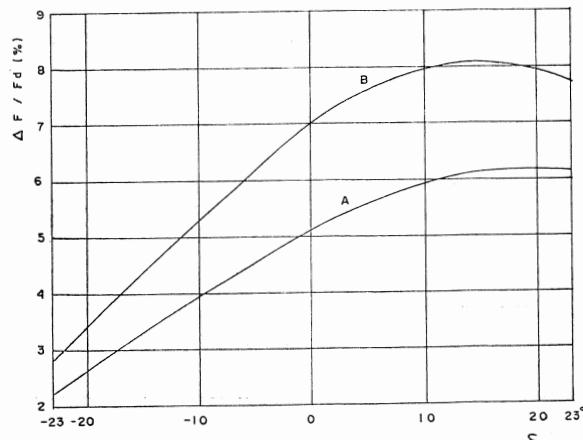
$$\frac{\Delta F}{F_d} = \frac{1}{\pi} (w/r) \cos^2 \delta \int_{-h_0}^h (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t) dt \quad (7)$$

また、しゃへい環が帯状の場合は、

$$\frac{\Delta F}{F_d} = \frac{1}{\pi} (w/r) \cos^3 \delta \int_{-h_0}^h (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t) dt \quad (8)$$

で与えられる。 ϕ は観測地点の緯度、 δ は日赤緯、 t は太陽時角、 h_0 は日没時の時角である。 r はしゃへい環の曲率半径、 w は、しゃへい環が円管で作られた場合には円管の直径であり、環が帯状の場合は帯の幅である。図7に上式により計算した2例を示す。

上式は散乱光が等方性であると仮定している。しかし実際には等方でないための誤差が生ずる。そのよう



Curve A obtained from Eq. (7) in the case of $r=500$ mm and $w=50$ mm.

Curve B obtained from Eq. (8) in the case of $r=735$ mm and $w=100$ mm.

Fig. 7 Factors for correcting the measured diffused sky radiation as a function of solar declination (δ).

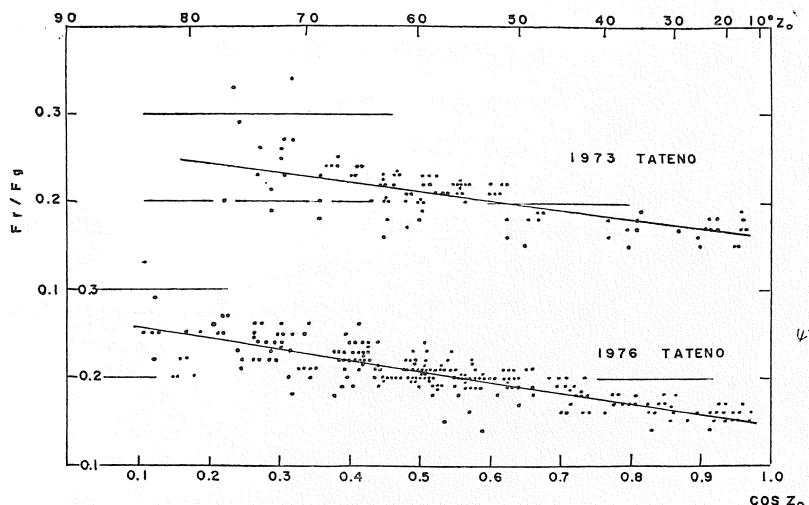


Fig. 8 Dependence of the albedo (F_r/F_g) on the solar zenith angle(or $\cos Z_0$) under cloudless skies. F_r is the flux of ground reflected radiation and F_g is the flux of global solar radiation.

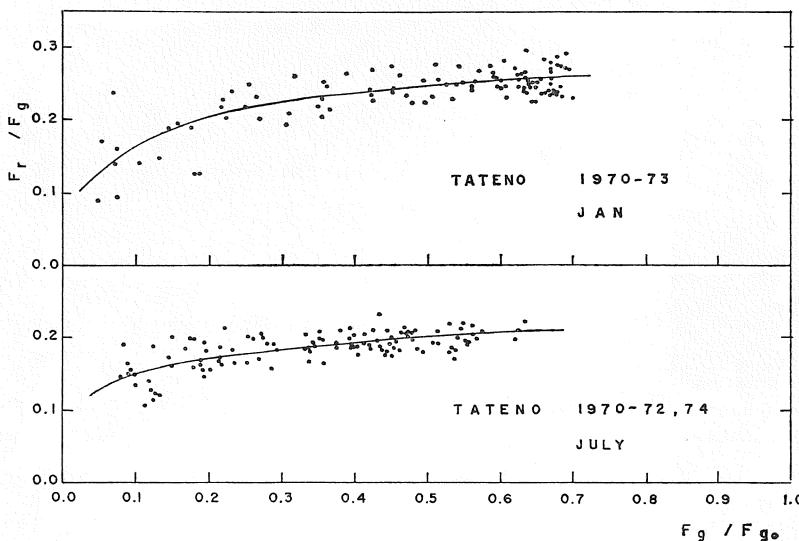


Fig. 9 Relationships between albedo (F_r/F_g) and clearness index (F_g/F_{g0}). F_{g0} is the flux of solar radiation under a completely transparent atmosphere. Each ratios obtained from diurnal total of radiation fluxes.

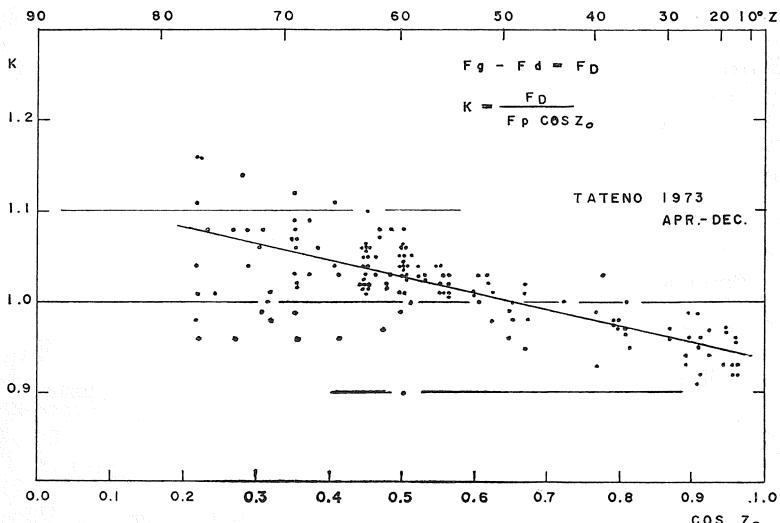


Fig. 10 Dependence of the $K (= F_D/F_p \cos Z)$ on the solar zenith angle (or $\cos Z_0$) under cloudless skies. $F_D = F_g - F_d$ and F_p is the flux of direct radiation normal to the solar beam.

な意味でリング補正量は少ない方がよい。我々の場合には受感面の小さいモル・ゴルチスキー日射計を使用している。

§4. 観測結果

図8は、快晴日におけるアルベド(F_r/F_g)と太陽天頂角(または $\cos Z_0$)との関係である。 F_r は地面反射日射量、 F_g は全天日射量であり、この場合は、いずれも1時間積算量から求めた。これによるとアルベドは太陽天頂角が大きくなるにしたがって増大し、また $\cos Z_0$ に対し直線的に変化することがわかる。

図9は、 F_g/F_{g0} とアルベド(F_r/F_g)との関係である。この場合の日射量は、いずれも1日積算量を用いた。 F_{g0} を、もし大気が全く透明であるならば、地上の全天日射計が測定するであろうところの1日積算全天日射量であるとするとき、

$$F_{g0} = \int_{-h_0}^{h_0} F_{P0} (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t) dt \quad (9)$$

であらわされる。 F_{P0} は、もし大気が全く透明であるならば地上の直達日射計が測定するであろうところのエネルギー・フラックスで、大気外日射量とも言われ、太陽と地球との平均距離における値を1.98 cal cm⁻² min⁻¹(注)としている。毎日の F_{P0} の値は気象庁地上気象常用表⁽¹⁸⁾に載っている。 h_0 は日没時の時角である。 F_g/F_{g0} は曇天・雨天には0に近づき、晴天日には増加するが、地球大気による減衰があるので1に達することはない。 F_g/F_{g0} は晴れ指数(Clearness index)とも呼ばれ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、全天日射量を取り扱う上で一つの便利な指標である。図9からアルベドは良く晴れた日程

(注) 1956年国際日射スケール

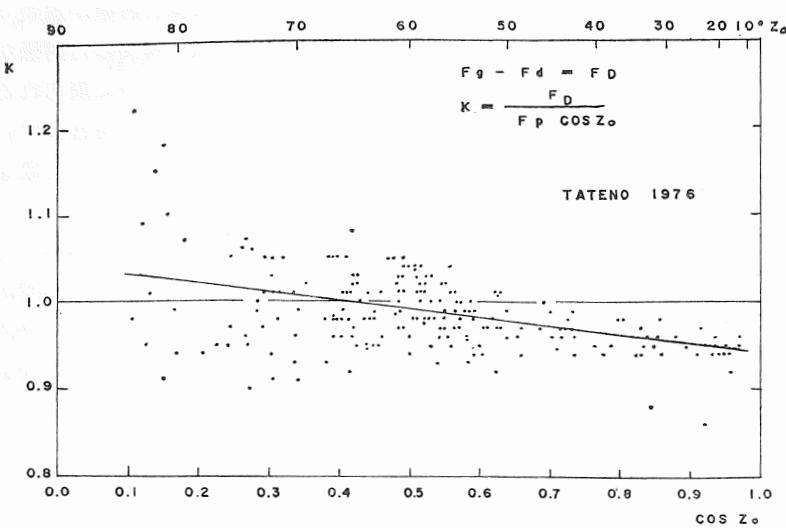


Fig. 11 Dependence of the K on the solar zenith angle (or $\cos Z_0$) under cloudless skies.

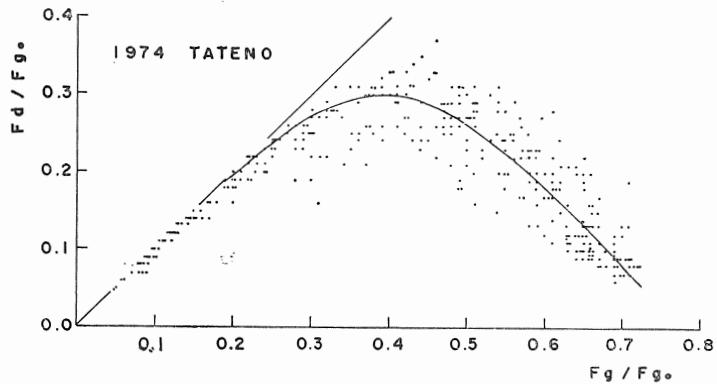


Fig. 12 Relationship between F_d/F_{g0} and clearness index (F_d/F_{g0}).

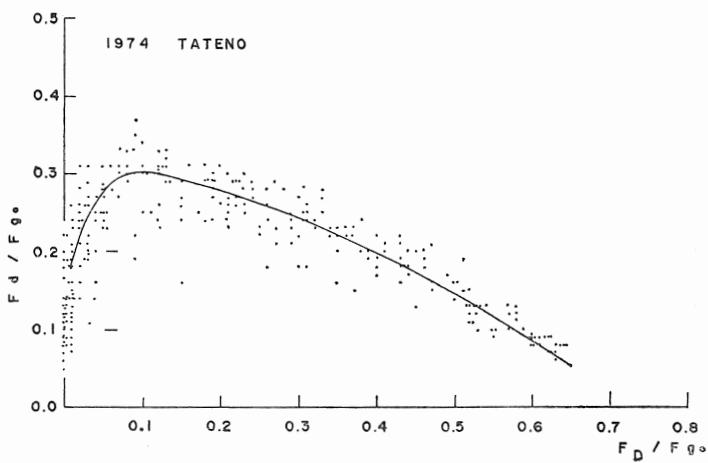


Fig. 13 Relationshp between F_d/F_{g0} and F_D/F_{g0}

大きく、曇天、雨天になるにしたがって減少することがわかる。冬期に比べて夏期のアルベドが小さいのは露場の芝の色とも関係がある。冬期積雪があった日のデータは除外した。

図10および図11は全天日射量 F_g と天空散乱日射量 F_d の測定値から $F_D = F_g - F_d$ によって求めた直射

光水平成分と、直達日射量 F_p から求めた直射光水平成分、 $F_p \cos Z_0$ との比 $K = F_D / (F_p \cos Z_0)$ と太陽天頂角との関係である。それぞれの日射量は1時間積算量を用いた。これによると、 K と $\cos Z_0$ とはほぼ直線関係にあり、 K は太陽天頂角が小さくなる程小さくなり、太陽天頂角が大きくなるにしたがって大きくなることがわかる。理想的な全天日射計については K は常に1であるべきであることを考えると、この傾向は二つの全天日射計の高度角特性によって生じたものである。

図12は、 F_d/F_{g0} と晴れ指数 (F_g/F_{g0}) との関係である。それぞれの日射量は1日積算量である。 F_d/F_{g0} 晴れ指数0.2位までは45°の直線にのるが、0.3位から45°の直線より小さい値となり、晴れ指数0.4位で最大となり、それより大きい晴れ指数では逆に下降している。 F_d/F_{g0} が最大になるのは雲からの散乱が大きく寄与していると考えられる。

図13は、毎日の F_d/F_{g0} と F_D/F_{g0} との関係である。 F_d/F_{g0} の最大は F_D/F_{g0} が0.1位のところにある。

図14は、毎日の F_D/F_{g0} と晴れ指数 (F_g/F_{g0}) との関係である。晴れ指数0.4以上については、ほぼ直線関係がある。

図15は、毎日の F_d/F_g と晴れ指数 (F_g/F_{g0}) との関係である。 F_d/F_g は散乱比 (Diffuse ratio) とも呼ばれる。晴れ指数0.3~0.4以上では両者のあいだに直線関係がみられる。Tuller (1976)⁽¹⁷⁾は、この関係を直線近似して地域による差を調べた。池田・一木⁽¹⁶⁾は1970~1974年の館野の資料から同様の直線近似を行った上で季節変化を調べている。

図16は毎日の日照率 H/H_0 と晴れ指数 (F_g/F_{g0}) との関係である。 H は日照時数、 H_0 は可照時数である。晴れ指数0.2以上について両者はほぼ直線関係にある。この関係は、日射観測網の不備を日照の観測から補う目的でよく使用される。

図17は日照率 H/H_0 と F_D/F_{g0} との関係である。

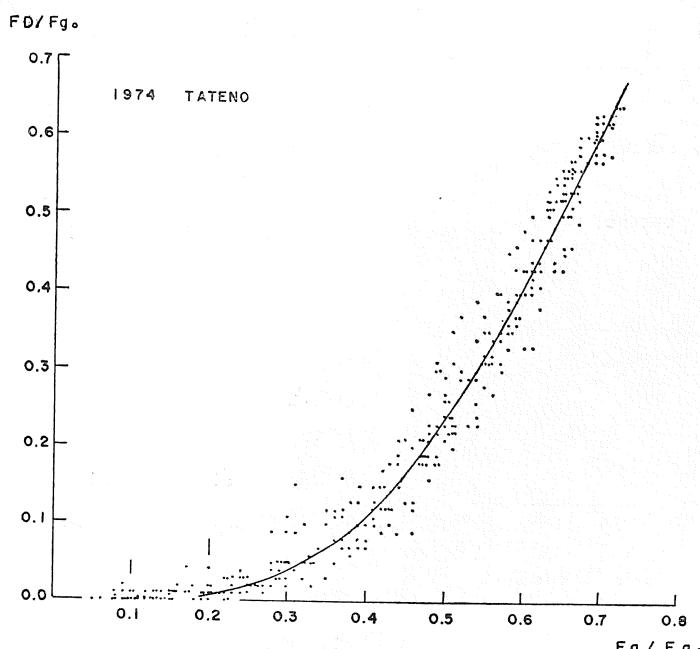
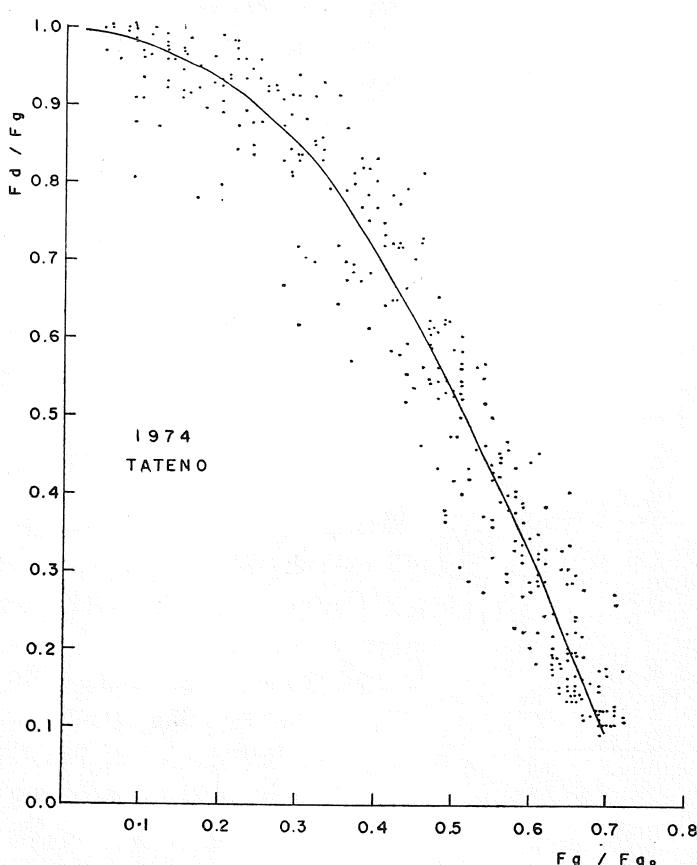
Fig. 14 Relationship between F_D/F_{g0} and clearness index (F_g/F_{g0}).Fig. 15 Relationship between F_d/F_g and clearness index (F_g/F_{g0}).

図18は日照率 H/H_0 と F_d/F_{g0} との関係である。

§5. むすび

気象観測の一要素としての全天日射量については、

日、月、年単位での積算日射量が重要であって、1時間積算量、瞬間の日射量などの必要性は極く特殊の場合に限られることもある。従来日射計の特性について、あまりやかましく言われることはなかった。

最近太陽エネルギーの問題に関連して全天日射計を用いた、いろいろの観測が行われるようになったが、それらの場合の全天日射計の特性・性能に対する要望はかなり厳しいものとなっている。しかしながら個々の要望を十分満足させ得る万能の全天日射計は、いまのところ存在しないと言える。したがってユーザーは個々の日射計の特性を良く知った上で使用することが重要であると考える。そのような意味で本稿が何かの役に立つことがあれば幸いである。

最後に本稿の発表にあたり、高層気象台長関原彌博士のご指導とご校閲を得たことを感謝する。

参考文献

- (1) 関根正幸(1971)：太陽放射エネルギーの測定—測定器と検定方法の概要、測候時報、38, 121~133.
- (2) A. R. Karoli, A. K. Ångström, and A. S. Drummond(1960) : Dependence on the Atmospheric Pressure of the Response Characteristics of Thermopile Radiant Energy Detectors., J. Opt. Soc. Amer., 50, 758~763.
- (3) K. L. Coulson(1975) : Solar and Terrestrial Radiation (Methods and Measurements). New York, Academic Press, PP. 322.
- (4) 関根正幸(1960)：差温熱電対日射計(エプリー型)について(1), 测候時報, 27, 53~59.
- (5) 関根正幸(1960)：差温熱電対日射計(エプリー型)について(2), 测候時報, 27, 87~88.
- (6) 関根正幸(1972)：人工光源による日射計検定装置(積分球法), 测候時報, 39, 113~120.

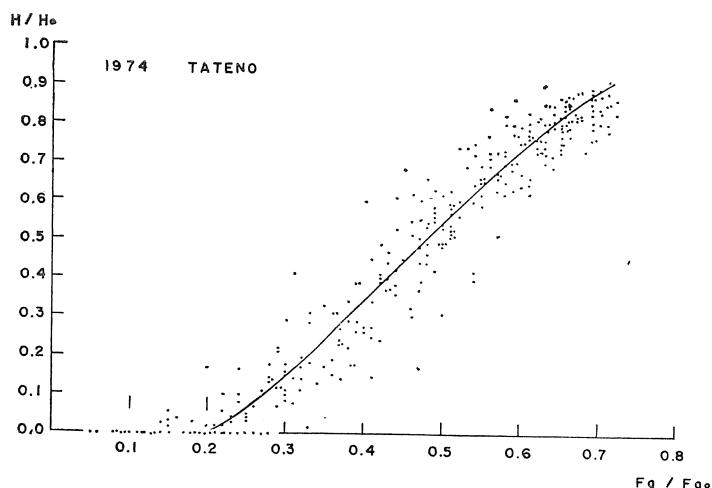


Fig. 16 Relationship between H/H_0 and Clearness index (F_g/F_{g0}). H is the duration of sunshine and H_0 is the possible duration.

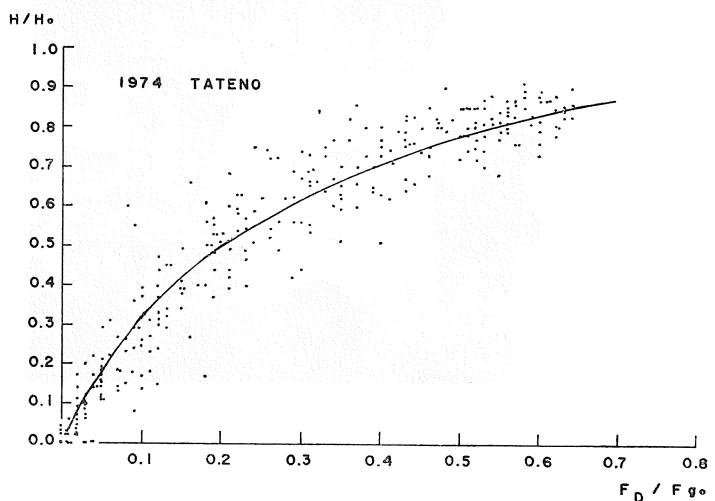


Fig. 17 Relationship between H/H_0 and F_d/F_{g0} .

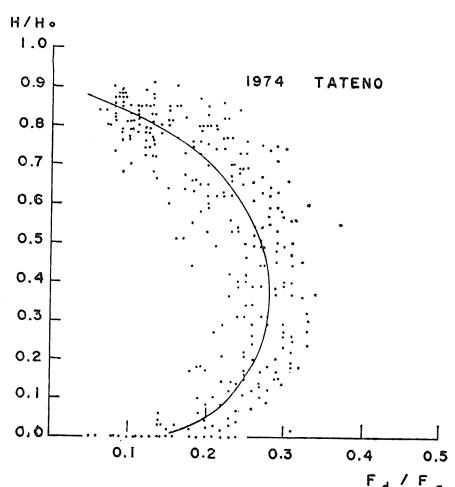


Fig. 18 Relationship between H/H_0 and F_d/F_{g0}

- (7) 鈴木宣直(1977)：熱電堆式全天日射計（A型）の構造・特性並びに精度、測候時報、44, 6~7.
- (8) 志村英洋・鈴木宣直(1973)：全天日射計検査装置、測候時報、40, 146~153.
- (9) 一木明紀・鈴木宣直(1977)：散乱光の測定と全天日射計の散乱光に対する感度について、研究時報、29, 127~134.
- (10) D. Fuquay and K. Buettner (1957) : Laboratory Investigation of some Characteristics of the Eppley Pyrheliometer. Trans. Amer. Geophys. Un., 38, 38~43.
- (11) 池田弘(1962) : エブリー型日射計の特性について、研究時報、14, 806~815.
- (12) 池田弘(1967) : エブリー型日射計の特性について(2), 研究時報、18, 501~510.
- (13) 龜田巖(1967) : JMA風防型放射計の特性について、研究時報、18, 511~514.
- (14) 池田弘, 龜田巖(1972) : 通風式日射計について、一おもに着霜防止のための、研究時報、24, 165~168.
- (15) 龜田巖, 福田寿彦(1962) : 散乱光の測定、研究時報、14, 817~821.
- (16) 池田弘, 一木明紀(1977) : 晴れ指数と全天、散乱、地面反射日射との関係、研究時報、29, 117~125.
- (17) S. E. Tuller(1976) : The Relationship between Diffuse, Total and Extraterrestrial Solar Radiation. J. Solar Energy Sci. and Tech. 18, 259~263.
- (18) 気象庁(1957) : 地上気象常用表 P. 132~133