

## 斜面日射量の研究—第1報 筑波における斜面日射量および日射障害の 実験観測(高品質データの整備)<sup>\*</sup>

STUDY OF SOLAR RADIATION ON AN INCLINED SURFACE IN JAPAN.....1st Report. Experimental Measurements of Solar Radiation on Inclined Surfaces and of Influence of Obstacles to Solar Radiation in Tsukuba Science City.

篠木 誓一\*  
Seiichi SHINOKI  
吉田 作松\*\*  
Sakumatsu YOSHIDA

### Abstract

An experimental measurement of solar radiation was carried out to obtain data of high accuracy for study of the model of solar radiation on inclined surfaces and of influence of obstacles on solar radiation from Sept. 1984 to Dec. 1985 in Tsukuba Science City ( $140^{\circ} 08' E$ ,  $36^{\circ} 03' N$ , 26.0 m a.s.l.). Observed items in the experiment were solar radiation on the inclined surfaces with seven orientations, solar radiation affected by the artificial obstacles, global radiation, direct-normal solar radiation, diffuse sky radiation by shadow-ring method, ground-reflected radiation and cloud by sky photographing. Correction of the characteristics of the instruments, that is, the temperature response, the cosine response, etc. was made for all the hourly data obtained by each of 15 pyranometers used for the measurement. For calibration of the pyrheliometers and the pyranometers used for the measurement, the comparisons were carried out with the reference instruments of Japan Meteorological Agency equipped in the Radiation Center of JMA which was located only 400 m apart from the experimental site, during the whole period of observation. Through the above processing, the errors for the pyrheliometers and the pyranometers were evaluated to have been kept within one percent and two percents respectively in the present measurement.

**Key Words:** solar radiation on inclined surfaces, obstructed solar radiation, global solar radiation, diffuse-sky radiation, direct-normal solar radiation, ground-reflected radiation, experimental measurement

### 1. まえがき

太陽エネルギー利用の研究および実用設計に際して、斜面日射量データは不可欠である。そのため、これまでに多くの斜面日射量推定モデルが提案された。しかし、精度の高い全天日射量および斜面日射量の実測値を得ることが、一般に困難であるため、各モデルの適用の精度を正確に評価することができないことが大きな問題である。

また、太陽エネルギー利用予定地の全天日射量や斜面日射量が、周囲の地形地物によって障害を受けることがしばしばある。この障害日射量を推定するモデルの開発が重要であるが、このために必要な、信頼できる実測データが、まだ得られていない。

\* 日本太陽エネルギー学会第12回研究発表会(1986-12)にて発表<sup>6)</sup>

以上の必要性に応じるため、今回、現在最も高い品質と考えられるデータを得るための実験観測が行なわれた。すなわち、①全天日射計(斜面日射量の測定もこれによる)の定数の諸特性(温度特性、入射角特性など)の補正、②準器による頻繁なキャリブレーション、および③日射専門家による毎日の保守・点検を行なうことにより、直達日射量については1%程度、全天および斜面日射量については2%程度の誤差のデータが得られた(全天日射計によるデータには、通常5%位の誤差がある)。

このように、本実験観測で得られたデータは、研究用にふさわしいデータと考えられるので、今後各方面で利用されることを期待して、ここに実験観測の内容

\* (財)日本気象協会 技師  
Japan Weather Association Engineer  
\*\* (財)日本気象協会 相談役  
Japan Weather Association Senior Advisor

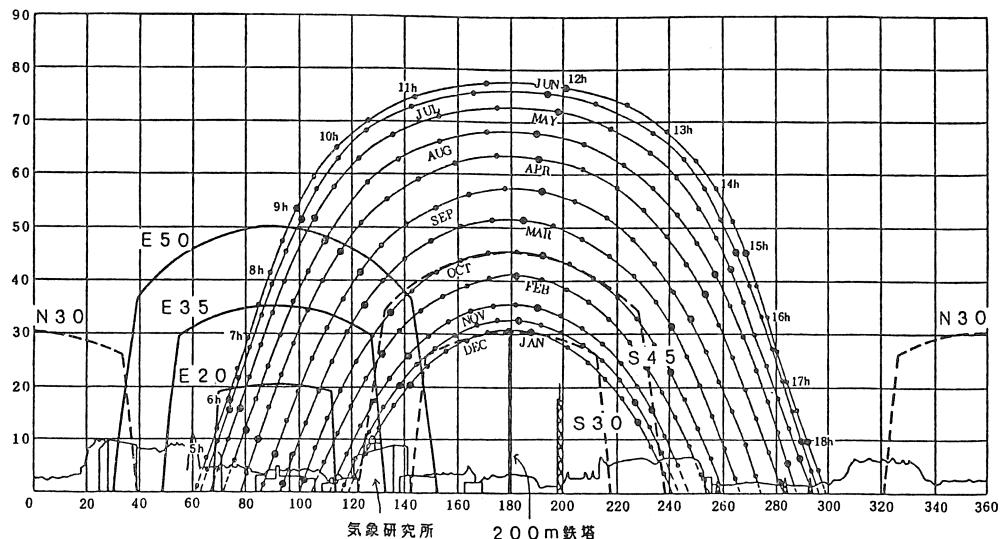


図1 実験観測場所から見た周囲地形アウトライン、日射障害実験観測用日射計から見た実験用障害物のアウトライン、および各月15日の太陽経路図。横座標は方位角（北が $0^{\circ}$ で東回り）、縦座標は高度角。

を報告する。なお、著者らがこのデータを用いて行なった研究結果については、続報として報告の予定である。

## 2. 実験観測の概況

### (1) 観測地点

観測地点は、筑波研究学園都市内の気象庁高層気象台構内（茨城県筑波郡谷田部町長峰1—2、北緯 $36^{\circ}03'$ 、東経 $140^{\circ}08'$ 、海拔26.0m）で、周囲の地物のアウトラインは、図1からわかるように、一部に高度角 $10^{\circ}$ のところがあるが、大半は $5^{\circ}$ 以下である。

### (2) 観測期間

1984年9月7日～1986年1月12日

### (3) 観測項目と使用測器

観測項目と使用測器は表1のとおりである。このうち日射計温度は、全天日射計の温度特性の補正用である。これら測器の配置は図2のとおりで、特に障害日射量観測のための障害物と日射計の配置を図3に示す。この人工障害物の表面には、濃い緑色の人工芝を張ってあり、そのアルベド（反射率）をスガ試験機KKの分光測色計で測定した結果、可視域の平均3.5%であった。

以上の観測状況を写真1に示す。

### (4) 保守・点検・調整

日曜を除く毎日、チェックシートにもとづいて、日射計ガラス面の清掃、直達日射計としゃへいリングの赤緯調整、各記録状況など、念入りな保守・点検・

表1 観測項目と使用測器

観測項目	測器型式名	
方位 傾斜角		
斜面日射量 S 15°	全天日射計	MS-801
〃 S 30°	〃	〃
〃 S 45°	〃	〃
〃 S 60°	〃	〃
〃 S 90°	〃	〃
〃 SW 30°	〃	〃
〃 SW 60°	〃	〃
全天日射量1（水平面）	〃	〃
同 2（比較チェック用）	〃	〃
同 3（〃）	〃	〃
法線面直達日射量1	自記直達日射計	MS-52
同 2（比較チェック用）	〃	〃
天空散乱日射量	全天日射計	MS-801
地面反射日射量	およびしゃへいバンド	
日射計温度	全天日射計	MS-801
全天空写真（雲量・雲形）	白金測温センサー	
障害日射量 1*	全天空撮影装置	
同 2*	（魚眼レンズ付きカメラ）	
同 3*	全天日射計	MS-801
	〃	〃
	〃	〃

\* ) 日射障害の実験観測用で、実験用日射障害物との位置関係により3種。図3参照。

調整が行なわれた。この業務を、現地在住の日射専門家に委託できることにより、異常の発見、その対策などが適切に行われ、データの質の維持と欠測の減少に有効であった。

### (5) データ収録装置と取得データ

全天空写真（昼間、3時間ごとに自動撮影）を除く全データは、データロガーを通してパーソナルコンピューターに送られ、1分値がフロッピーディスクに収納され、また、監視用として、アナログおよびデジタル記録もとられた。

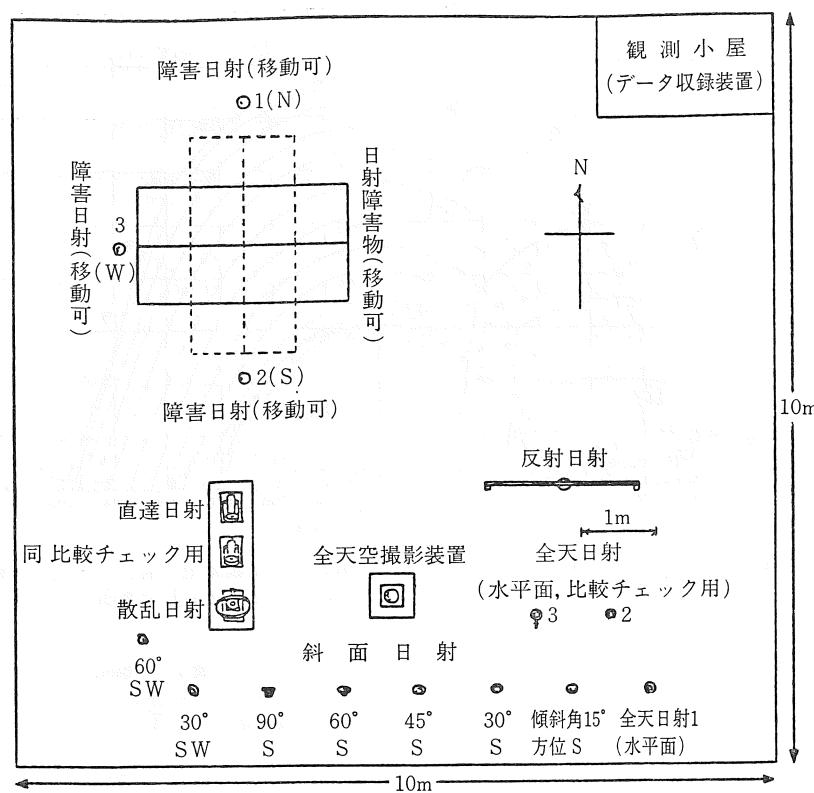


図2 測器配置図

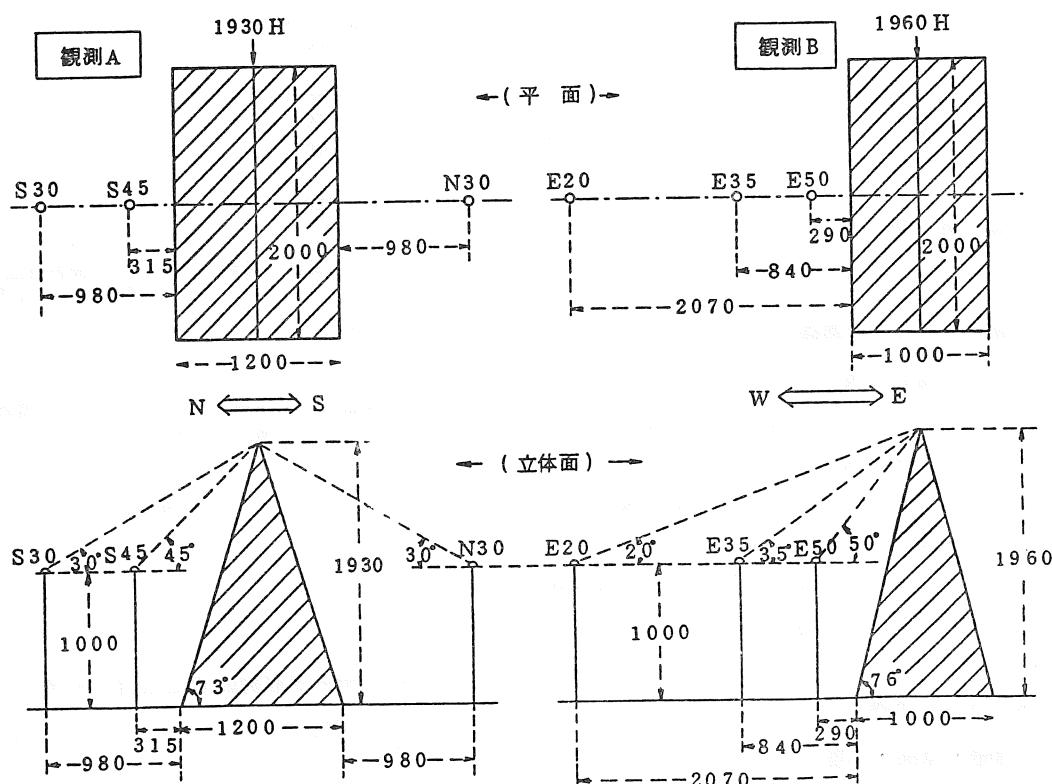


図3 実験用障害物（斜線）による日射減少量を測定するための全天日射計の配置。例えばS30は、その日射計から見た南側の障害物の最大仰角が30°であることを示す。

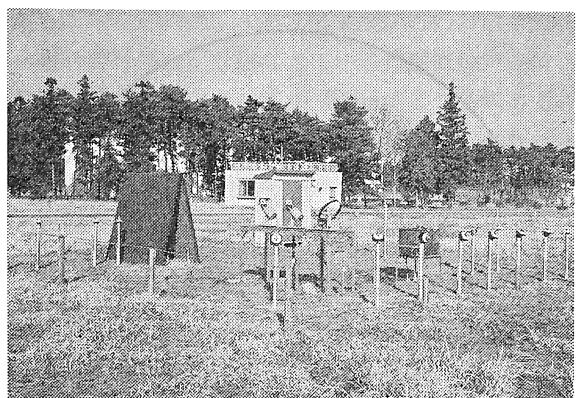
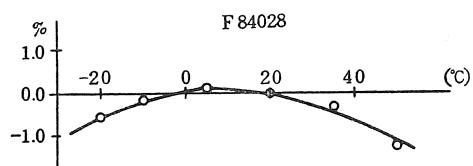
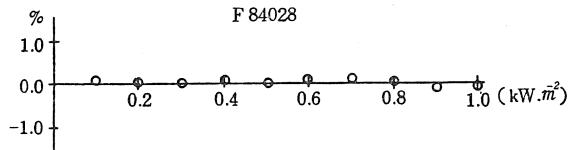


写真1 各種日射量の実験観測の実施状況

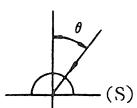
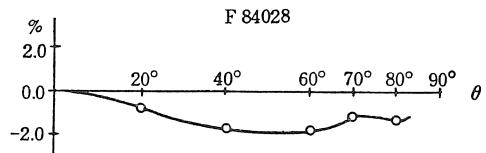
(a) 温度特性 (20°C基準、入射角0°)



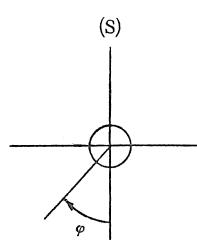
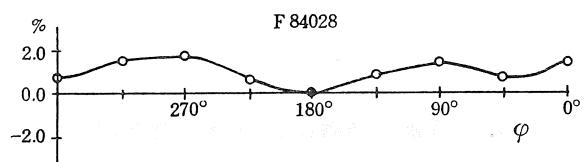
(b) 直線性 (0.8 kW·m⁻²基準、入射角0°)



(c) 入射角特性 (0°基準、方位角180°(S))



(d) 方位角特性 (180°基準、入射角75°)



(e) 傾斜特性 (0°(水平)基準、傾斜方向方位角180°(S))

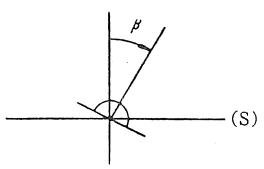
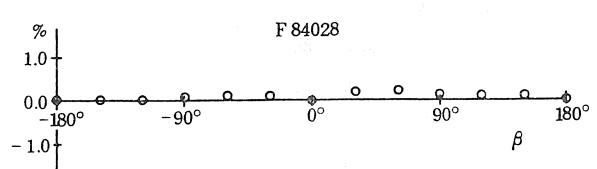


図4 全天日射計諸特性測定例。MS-801型、No.84028 (15台のうちの基準日射計として全天日射測定に使用したもの)。

## (6) データ処理

上記で得られた1分値段階で各種データチェック（異常値チェック、霜・露・積雪の影響など）のうえ、1時間積算値が計算された。さらに、この1時間値に対して、次に述べる全天日射計1台ごとの特性補正を実施した後、法線面直達日射量から水平面直達日射量への換算、全天日射量と氷平面直達日射量の差としての天空散乱日射量の計算などが行なわれた。

## 3. 全天日射計の特性補正

日射計の出力電圧  $V$  [mV] と入射日射強度  $I$  [ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ] との間に完全な比例関係がある、すなわち感度定数  $K$  [mV/(\text{kW}·\text{m}⁻²)] を用いて  $V=KI$  と表わせることが理想的である。

しかし、現実の日射計では  $K$  は定数ではなく、種々の条件で変化する。これを日射計特性といい、温度特性、直線性（入射日射強度と出力の比例性）、入射角特性、方位角特性、傾斜特性などがある<sup>3)</sup>。本研究で使用した MS-801 型全天日射計の特性は、使用前にシミュレーターを用いてメーカーにより測定された。その例を図4に示す（従来よく使用されている MS-42型の特性はもっと変化が大きい）。

つまり  $K$  は、1日の中でも、また季節によっても変化する。しかし通常は、検定時に決定された  $K$  が年間を通して使用される。これが、全天日射計による観測値の誤差が大きい最大の原因である。

今回の実験観測においては、できるだけ誤差の小さいデータを得るために、用いた15台の全天日射計のそれぞれについて諸特性を事前に測定し、諸条件の変化に応じて毎時の  $K$  を計算し、日射量を算出した。

その方法は、次のとおりである。

標準状態における $K$ を  $K_0$  とすると、近似的に次のように表わされる。

$$K(t, I, \beta, \theta, \varphi) \doteq K_0 \cdot f_1(t) \cdot f_2(I) \cdot f_3(\beta) \cdot g(\theta, \varphi)$$

$f_1(t)$ : 温度特性     $f_2(I)$ : 直線性     $f_3(\beta)$ : 傾斜特性  
 $g(\theta, \varphi)$ : 入射角・方位角特性  
 $t$ : 日射計温度 (°C)     $I$ : 入射日射強度 (kW/m<sup>2</sup>)     $\beta$ : 日射計感部に対する日射の入射角(deg)     $\theta$ : 日射計感部から見た日射の方位角(deg)

上の式を厳密に計算することは不可能ではないが、そのためには、各日射計に入射する直達、天空散乱、および地面反射の各成分の区別のほかに、天空散乱成分、地面反射成分の方向別強度分布を考慮することが必要である<sup>4)</sup>。しかし、特性補正の目的で各成分の強度分布まで測定することは実際的でないので、次のように簡略化して扱う。

日射計に入射する直達成分を  $I_b$ , 天空散乱成分を  $I_d$ , 地面反射成分を  $I_r$  とすれば(図5), 全日射強度  $I$  は, それらの和として, 次のように表わされる.

天空散乱および地面反射成分の方向分布を均一(isotropic)と仮定し、このような仮定のもとでの全日射強度に対する平均感度を $\bar{K}$ とすれば

$$\bar{K} = K_b \frac{I_b}{I} + K_d \frac{I_d}{I} + K_r \frac{I_r}{I} \dots \dots \dots \quad (3)$$

と表わすことができる。 $K_b$ ,  $K_d$ ,  $K_r$  は、それぞれ直達、天空散乱および地面反射各成分別感度に相当し、次の式で表わされる（式の導き方の詳細は文献 2 の 47 ~51 ページ参照）。

$$K_r = K_1 \frac{k'_0 - k'_\beta}{1 - k_\beta} \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= K_0 f_1(t) f_2(I) f_3(\beta), \quad k_\beta = (1 + \cos \beta)/2 \\ k'_{\beta} &= \int_{\text{天}} g(\theta, \varphi) \cos \theta \, d\Omega/\pi, \\ k'_{\text{o}} &= \int_{\text{地}} g(\theta, \varphi) \cos \theta \, d\Omega/\pi \end{aligned} \right\} (5)$$

$\theta_s$ ,  $\varphi_s$ : 日射計に対する直達日射の入射角と方位角(deg)

$\int_{\text{天}} \int_{2\pi}$ : 日射計視野半球内の天空部分および全部についての積分

$\Omega$ : 日射計から見た立体角 (sterad)

その他の記号は式(1)と同じ

これらの実際計算に当っては、各日射計の温度特性  $f_i(t)$  を  $t$  の 2 次式

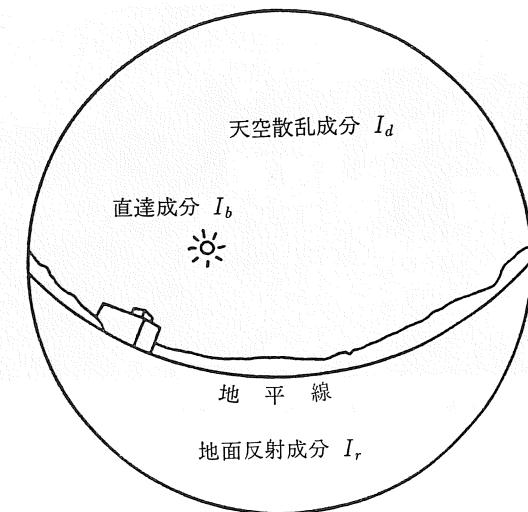


図5 斜面日射強度の概念（日射計視野）

で近似し、直線性  $f_2(I)$  や傾斜特性  $f_3(\beta)$  については、使用した全天日射計15台とも、図4の例と同様、1からの偏差が最大 0.4%で、他の特性に比べて非常に小さいので、 $f_2(I)=f_3(\beta)=1$  とみなした。

また、入射角・方位角特性  $g(\theta, \varphi)$  については、積分の都合上、 $g(\theta, \varphi) = f_4(\theta) \cdot f_5(\varphi)$  とし、

とし、 $f_5(\varphi)=1$  とおいて、方位角特性の補正を省略せざるを得なかった。

なお、式(3)の  $I$  (実測),  $I_b$  (直達日射の実測値から計算),  $I_d$  (水平面天空散乱日射の実測値から、均一分布モデルを用いて推算) および  $I_r (=I-I_b-I_d)$  は、毎時の無補正日射量から求め、 $\theta_s$  は毎時 30 分の値を、日射計温度  $t$  は 1 時間平均値を用いた。また、式(5)の  $K_1$  の式の  $K_0$  については、第 1 近似としてメーカーの社内検定による定数を用い、最終的には、次節で述べる気象庁準器によるキャリブレーションにより決定した。

#### 4. 気象庁準器による各日射計の キャリブレーション

前節で述べた日射計特性の補正は、時々刻々変化する感度定数の相対値を求めるものである。次に、標準状態における感度定数  $K_0$  を定めなければならない。これは、感度定数の絶対値を定めることであり、本来のキャリブレーションである。このキャリブレーションは、日射計の感度定数の経年変化の監視の意味があるので、年に数回実施されることが理想的である。

今回の実験観測におけるキャリブレーションは、次

のように行なわれた。なお、気象庁が部内および部外の日射計の野外検定を行なっている日射計検定室は、実験観測場所の北東、わずか400mのところにあるので、気象庁検定のため準器による観測が行なわれたときのデータにより、実験観測日射計のキャリブレーションを行なうことができる。

### (1) 直達日射計のキャリブレーション

直達日射計については、日射計特性の補正が非常に小さく、実際上不要である。

実験観測用に用いた2台の直達日射計については、事前に気象庁検定を受け、感度定数が決定されていた。しかし、その定数のチェックと変化の監視のため、実験観測期間中に行なわれた気象庁準器による観測データ10回分(10日分)と比較検討した。その結果、平均1%未満の定数の不規則変化がみられたが、これは、この日射計の精度以内の変化、すなわち見かけ上の変化と考えられる。従って、2台の直達日射計とも、はじめの検定定数を修正する必要はないとした。

### (2) 全天日射計のキャリブレーション

実験観測用全天日射計の感度定数のキャリブレーションは、次の手順により行なわれた(図6)。

#### a. 基準日射計のキャリブレーション

実験観測用全天日射計15台のうちの1台を基準日射計(全天1と呼ぶ)とし、これと気象庁準器による観測値と比較して(両者とも特性補正を行なって)、 $K_0$ を決定した。この際、比較に必要な日射量の暫定値の算出には、メーカーのキャリブレーションによる $K_0$ の暫定値を用いた。

なお、気象庁準器の全天日射計による観測日数が多く、今回の実験観測期間中、317日分のデータが得られた。これを用いて、実験観測用基準日射計のキャリブレーションが行なわれた。

#### b. 他の全天日射計のキャリブレーション

斜面、天空散乱、地面反射、障害の各日射量測定用の14台の全天日射計については、一定期間ごとに(実験観測期間中、半月づつ3回)基準日射計との比較を行ない、各日射計の $K_0$ を次のようにして求めた。

$$(K_0 \text{ 確定値}) = (K_0 \text{ 暫定値}) \times (\text{各日射計} / \text{基準日射計}) \times (\text{基準日射計} / \text{気象庁準器})$$

つまり、実験観測用各全天日射計は、期間中に計3回のキャリブレーションを受けたことになる。

## 5. 得られたデータ・ファイル

この実験観測により得られた各日射量の毎日の各時

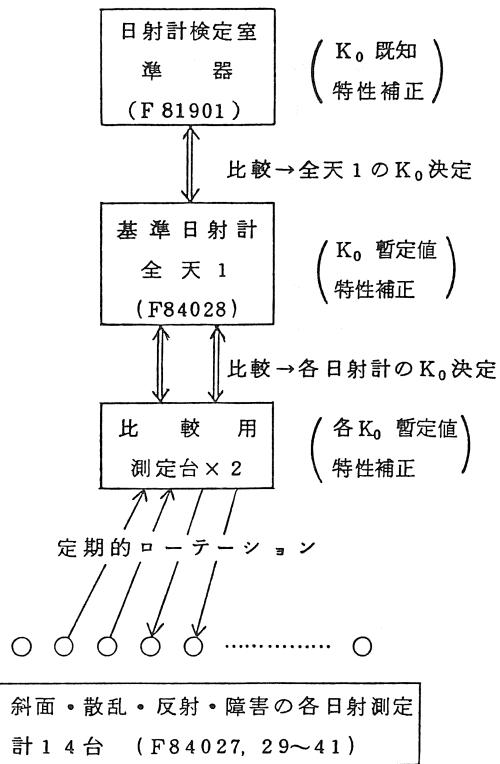


図6 実験観測用全天日射計のキャリブレーションの手順

間積算値、日積算値および月平均値は、すべて文献2に掲載されている。このうち、月平均値を表2に示す。

表2において、『統計日数』は、露や霜などによりデータが不備な日を除いた日数である。また『天空散乱(2)』は、しゃへいリングによる天空散乱日射量測定方法の研究のため観測したもので、幾何学的リング補正<sup>5)</sup>のみを行なった値である。天空散乱日射量の確定値としては、『天空散乱(1)』を用いる方がよい。

## 6. あとがき

通常、全天日射計による測定誤差は5%位といわれているが、1年4か月にわたる本実験観測においては、十分な保守点検を行なうとともに、日射計特性の補正および頻繁なキャリブレーションを実施することにより、全天日射量、天空散乱日射量、地面反射日射量、7種の斜面日射量および障害日射量を2%程度の誤差で取得できた。なお、今回は方位角特性の補正を無視したが、これは今後に残された問題であり、将来この補正ができれば、全天日射計の測定誤差を1%位に減らすことができると思われる。

本研究は、新エネルギー総合開発機構委託によるサ

表2 觀測期間の月平均日射量

年 月	斜面日射量 (MJ/m <sup>2</sup> d)						日射量 (MJ/m <sup>2</sup> d)						太陽赤緯と均時差						統計 日数	
	S15°	S30°	S45°	S60°	S90°	SW30°	SW60°	全 天	法線面 直 達	水 平 面 直 達	天 空(1) 散 乱	天 空(2) 散 乱	地 面 反 射	障 害 日 射	障 害 日 射	大 氣 外 水 平 面	太 陽 赤 緯 度	均 時 差 度		
1984.9	12.87	13.15	12.73	11.57	7.96	12.67	11.16	12.06	7.23	4.42	7.63	7.30	1.79	(S45) 11.68 (N30) 11.72	3.167	2.02	0.095	21		
10	10.40	10.29	11.01	10.40	7.86	10.71	10.22	9.30	5.58	3.01	6.29	6.06	1.42	8.93	8.90	6.61	25.57	-8.45	0.228	16
11	9.10	10.15	10.80	10.60	8.64	9.20	9.14	7.56	7.20	3.40	4.16	4.03	1.17	7.14	7.39	3.47	19.66	-17.90	0.255	20
12	9.28	10.80	11.97	12.15	10.48	9.72	10.32	7.19	9.68	4.01	3.18	3.18	0.93	(E50) 5.63 (E20) 6.11 (E35) 6.40	16.26	-23.21	0.071	13		
1985.1	11.75	13.78	15.11	15.29	13.08	12.33	13.12	9.07	13.10	5.76	3.31	3.38	1.60	7.86	8.52	9.10	18.19	-20.37	-0.169	19
2	11.79	13.15	13.76	13.34	10.65	11.75	11.51	9.94	10.70	5.40	4.54	4.41	1.37	8.15	9.05	9.92	23.20	-12.95	-0.231	22
3	8.56	8.66	8.36	7.56	5.31	8.44	7.39	8.16	3.31	2.09	6.07	5.85	0.86	6.95	7.55	8.04	29.68	-2.20	-0.148	24
4	14.97	14.90	14.05	12.41	7.65	14.43	12.00	14.34	9.49	6.56	7.78	7.71	1.79	12.00	13.22	14.17	3.606	9.43	-0.008	23
5	16.93	16.29	14.84	12.65	7.22	15.98	12.87	16.88	9.85	7.29	9.59	9.19	2.62	14.13	15.69	16.65	40.47	18.93	0.056	28
6	12.68	11.99	10.73	9.06	5.30	11.91	9.42	13.01	4.75	3.48	9.53	8.94	1.71	10.83	11.90	12.77	42.09	23.10	-0.007	28
7	17.10	16.29	14.65	12.46	6.96	16.27	12.98	17.12	10.43	7.87	9.25	8.84	2.63	14.38	15.95	16.86	41.12	21.16	-0.095	29
8	19.94	19.65	18.16	16.09	9.71	19.44	16.28	19.43	15.57	10.64	8.78	8.57	3.19	15.95	17.78	18.92	37.67	13.60	-0.065	29
9	11.16	11.20	10.64	9.73	6.59	10.95	9.37	10.59	5.87	3.95	6.64	6.53	1.55	8.99	9.99	10.47	32.01	2.62	0.085	27
10	11.93	12.90	13.35	12.96	10.02	12.12	11.46	10.35	10.45	5.69	4.65	4.55	1.46	8.59	9.59	10.20	25.30	-8.88	0.233	28
11	11.70	13.52	14.78	15.08	12.92	12.13	12.12	9.22	13.01	5.82	3.40	3.38	1.33	7.75	8.80	9.26	19.23	-18.56	0.247	28
12	11.27	13.49	15.14	15.86	13.97	11.86	12.40	8.42	14.06	5.66	2.76	2.80	1.17	7.26	8.77	8.40	16.33	-2.311	0.070	29

(1) 全天日射量から水平面直達日射量を差引いた値 (2) 全天日射量にしやへハリンクを付けて測定した値 「」は統計日数が異なる参考値

太陽赤緯と均時差は統計日数の平均値

ンシャイン計画研究の一環として実施されたものである。実験観測に便宜を図ってくださった高層気象台関係者、貴重なご意見および資料を提供してくださった気象庁日射計検定室の恩房寿夫（現気象庁測器工場）および廣瀬保雄（現気象庁測候課）の各氏、ならびに実験観測の保守・点検に尽力してくださった池田弘および岩井秀夫の諸氏に心からお礼申しあげる。

## 文 献

- 1) 日本気象協会、太陽光発電システム実用化技術開発『発電量基礎調査』、昭和59年度新エネルギー総合開発機構委託業務成果報告書（1985）、1—62。
- 2) 日本気象協会、同、昭和60年度報告書（1986）、1—63 および 249—385. (日本気象協会普及課 T E)

- L 03-295-1521 より入手可)
- 3) 三宅行美、日射計の種類と精度、太陽エネルギー、9—4 (1983), 2.
  - 4) 広瀬保雄、全天日射計の特性を考慮した全天日射強度の算出の試みについて、気象庁研究時報、38—3 (1986), 141.
  - 5) Drummond, A. J., On the measurement of sky radiation, Arch. Meteor. Wien, B.7 (1956), 413.
  - 6) 篠木薈一・吉田作松、筑波における斜面日射量および日射障害に関する実験観測について（研究用高品質データの整備），日本太陽エネルギー学会第12回研究発表会講演論文集，5 (1986), 17.

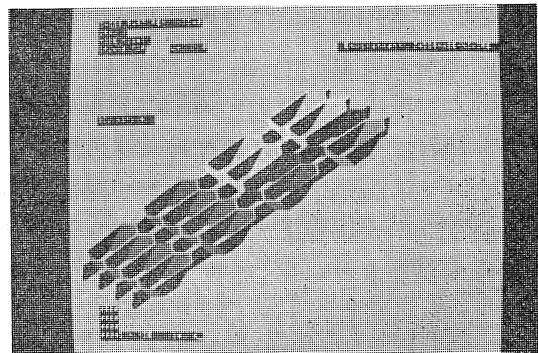
(昭和62年8月11日 原稿受理)

## 製品情報

### 蜂の巣構造の熱可塑性プレート

このプレートは、特殊な構造を持っており、従来のハニカム構造材にとって代わるものである。六角形の網目は、板の表面に対して垂直な面と、傾斜している面から成る（写真では黒い部分が垂直な面、他の部分が傾斜面）。垂直な面は、従来のハニカム構造材で見られたのと同じ役割を果たしている。傾斜面は、せん断応力を吸収するのに特に適している。押し出し成形によって、完成品の厚さと大きさを備えたものがそのまま製造されるので、望みどおりの寸法（厚さ、幅、長さ）のものを得ることができる。また、蜂の巣構造の大きさ、長さの割合を変えることもできる。

熱可塑性の材料としては、ポリプロピレン、ポリスチレン、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン樹脂、ポリメタクリル酸メチル、ポリカーボネートなどを使用。蜂の巣プレートを心材としてハニカムサンドイッチ構造の板を作る場合は、外皮も心材と一緒に押



し出し成形で製造することができる。ほかに、圧縮して強化した蜂の巣プレートや、複数の材料を使ってさまざまな色や硬さのプレートを作ることもできる。網目の片側がふさがっている気密性プレート、透明なプレート、蜂の巣構造のチューブやパイプを直接製造する方法も実現する見通しである。

問合せ先 : TROTIGNON, 13 LA ROSERAIE  
114, avenue de Paris 78000

VERSAILLES, FRANCE

TEL : (33) 1 39 51 57 52 または (33) 1 43 36 49 55,

担当者 : Mr. Jean Pierre