

# 簡易積算全天日射計

Simple Recording Film for Measurement of  
Integrated Global Solar Radiation

吉 村 登 雄\*  
Takao YOSHIMURA

小 宮 山 桂\*\*  
Katsura KOMIYAMA

石 川 敏 雄\*\*\*  
Toshio ISHIKAWA

## Abstract

Fading of color acetate films impregnated with several azo-dyes was applied to measure conveniently the global solar radiation. The dye-remaining percentage was measured at  $\lambda$  max of the films after fading on different exposure. In the case of the film impregnated with Oil Red O, the logarithm value of the percentage of each film presents a linear relationship to the amounts of the solar energy which irradiated to the films. This film can be used to measure the global solar radiation for a day to a few days. As for PAN, Sudan I and Sudan IV, the relationship between dye-remaining percentage and irradiated energy was more complicated than the line of Oil Red O and present the higher order curves. These films can be applied by using of the calibration curves on each dye. The fading rates of each dye were depend on the temperature but not depend on the moisture of the films. The simple recording film can be used with the calibration curves on each temperature in every season. The merits of these films compared with usual measurement are to be ; (1) unnecessary of any electric sources, (2) cheap and mass-productive easily, (3) suitable to integrate solar energy for long time, (4) easy dealing in out-door or underwater conditions, (5) possible to use on leaves of any plant because a piece of the film (12mm×35mm) is very light (70mg), (6) possible to use in many points at the same time.

**Key Words :** global solar radiation, solar radiation sensor, solar energy, dye film, dye-fading, azo-dye

## 1. はじめに

全天日射量の精密測定は、気象観測の一要素として気象関係の測器により各地で行われているが<sup>(1)-(9)</sup>、植物の光成長、建築物による日射量の変化などを、簡便かつ広域的に積算全天日射として測定する必要性はかなり多く、高価な計測機器を使用しない簡易測定法が求められている。また、短時間の日射量以外に、数日以上長期にわたる積算全天日射の測定もかなりの必要性があると考えられる。従来この種の測定には計器測定による瞬間値から推定する方法とか、一ヶ所ないし数ヶ所に設置した測器の数値から多数点の数値を推測する方法などが行われて来たが、いずれも、目的によって時には都合の悪い場合がある。

著者らは、色素フィルムの退色を利用した全天日射の簡易積算測定材料を開発し、その性質と二、三の応

用について検討したので報告する。ここに報告する材料フィルムによれば、精度的には計測器測定に劣るとしても、一日ないし数日間の積算全天日射量を水平面あるいは傾斜面などについて、広域的に多数点同時に測定することができて、費用も低廉である。今回の報告には、温度依存性などについてさらに検討の余地は残されているが、このような簡便な日射量測定方法が確立すれば、気象学的研究において、積算全天日射量の測定が全国いたる所で容易に、しかも安価で実施で

\* 千葉大学映像隔測研究センター 助手  
Image & Remote Sensing Research Center, Chiba University, Assistant

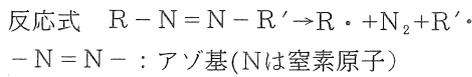
\*\* 千葉大学大学院学生 (現 京セラ株)  
Graduate Student, Kyocera Co., Ltd.

\*\*\* 千葉大学映像隔測研究センター 教授  
Image & Remote Sensing Research Center, Chiba University, Professor

きることになり、小中規模気象の研究に有用と考える。また農業気象ないし植物生体の研究において<sup>(10)</sup><sup>(11)</sup>、個々の葉面での実測は困難であり、さらにその長期にわたる実測は全く不可能に近かったが、本材料ではそれもかなり容易に実施できるものと期待される。

この材料は写真用のトリアセチルセルロース フィルムベース中に色素を含浸させたものであり、計測の原理は色素の光退色から予めつくられた検量線、または計算式によって積算全天日射量を求めるものである。今回は主にアゾ色素材料について検討した。

アゾ色素の光分解反応は単純に進めば<sup>(12)</sup><sup>(13)</sup>、次の反応式で示される。



R, R'：芳香族基

R·, R'·：芳香族性ラジカル

(R·, R'·のこの先の変化は複雑である。)

この反応式は一分子反応であり、一般に次の反応式に従う。

$$-\frac{d[D]}{dt} = k[D] \quad (1)$$

$$\therefore \int_{D_0}^D \frac{d[D]}{D} = - \int_0^t k dt \quad (2)$$

$$\ln \frac{D}{D_0} = -kt \quad (3)$$

[D]：色素濃度，t：反応時間，k：反応速度定数  
(1)式は温度、光の強さなどが一定の場合の反応速度がその時点で存在する色素の濃度に比例することを意味する。また(3)式によれば退色率(D/D<sub>0</sub>)の対数値は光強度一定の場合の時間、換言すれば照射エネルギー量と直線関係にあることになる。後述するように今回検討した4種のアゾ色素の中で、見かけ上ほぼ完全に(3)式に一致したものはオイルレッド・Oただ一つで、他の色素はもっと複雑な分解過程を通過している模様である。

色素の光退色の速度は温度依存性があり、一般的にはアレニウスの(4)式に従うと考えられる。

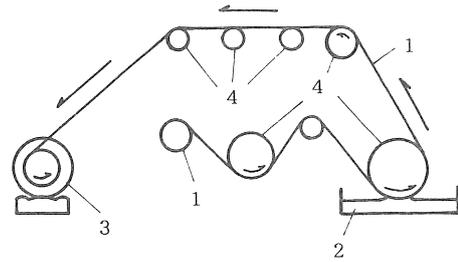
$$k = A e^{-E/RT} \quad (4)$$

k：反応速度定数，A：頻度定数，

R：気体定数，T：絶対温度

E：活性化エネルギー

(4)式によれば、反応速度定数kの対数が1/Tと直線



1. フィルムベース
2. 色素溶液
3. 巻き取りモーター
4. ローラー

図1 含浸用小型塗布装置

関係にあることになる。

## 2. 色素フィルムの作製と計測方法

### 2.1 色素フィルムの作製

色素のアセトン溶液に写真用トリアセチルセルロース(通称TACベース)フィルムを接触させて、色素をフィルム中に含浸させる。フィルム中の色素の光学濃度が吸収極大波長(λ<sub>max</sub>)においてほぼ2程度になるように接触時間や色素の溶液濃度を加減する。図1は含浸塗布装置の略図である。TACベースは溶液に接触している間に膨潤して色素をベース内に取り込むので、使用する色素はアセトン溶媒にかなりの溶解度を持っていることが必要である。溶媒としてはアセトンのほか、2-ブタノン(別名メチルエチルケトン)が使用可能である。この報告に使用した色素は、主にオイルレッド・O(以下OR-Oと記す)とピリジリアゾー2-ナフトール(以下PANと記す)の2種であるが、ほかにスーダンIとスーダンIVについても検討した。いずれもアゾ色素である。アゾ色素を選んだ理由は、退色速度が日射量計測に適していることのほか、光分解によって生じる分解物がほとんど無色(可視域に光の吸収がない)で別の色を生じないと考えられたためである。図2にこの4種の色素の吸収スペクトルを示す。色素の含浸には色素濃度、含浸溶媒の種類、含浸時における室温、フィルムの溶媒中の深さ、フィルムの移動速度などの要因があり、これらの条件を一定にした場合は色素の含浸層の厚みや光学濃度の再現性がよく、またフィルム全体もかなり均質なものとなった。

作製した色素フィルムは保存時に色素濃度が若干変化することがあるため、約60℃で2時間以上加熱して、予め温度変化を起こさせて安定化しておく。この変化の理由はおそらく色素のフィルム内での分散状態

色素名	構造式	分光特性
PAN		
Sudan I		
Sudan IV		
Oil Red O		

図2 色素の構造式と分光特性

が変化するためと考えられるが、正確な原因は不明である。実用的にはこの加温操作で安定した濃度の色素フィルムを得ることができる。加温を60℃以上で行うとフィルムベースが反ってしまうので好ましくない。

### 2.2 日射量の計測

フィルムによる日射量計測のためには予め、吸収極大波長での吸光度を測定しておき、フィルム露光後の吸光度との比で色素退色率（色素残存率）を計算する。退色率と全天日射量の関係を検量線として作製しておき、これから日射量(MJ/m<sup>2</sup>)を求めることができる。フィルムの吸光度は日立自記分光光度計(330型)により色素の吸収極大波長において測定した。この場合測定に使用するフィルムは幅12mm、長さ35mm(約70mg)程度である。濃度測定が可能であれば、さらに小面積でもよい。

本実験での標準となる日射量計測には最初スガ試験機株式会社の積算照度計PH-11VT(可視)を用いたがのちには気象関係に汎用されている英弘精機株式会社のネオ日射計MS-42型を使用した。

## 3. 日射フィルムの諸特性

### 3.1 作成したOR-Oフィルムの性質と検量線の検討

千葉大学映像隔測研究センター(4階)屋上に積算照度計およびネオ日射計を水平に設置し、その側に色

素フィルムを添付して、1日ないし数日間放置露光して、その間の積算全天日射量とフィルムの色素退色率を測定した。積算日射量の読み取りとフィルムの交換は夜間に行った。両測定値の関係をほぼ一ヶ月毎に集計して図示したものの一例を図3に示す。縦軸はフィルムの1日ないし数日間の退色率の実測値、横軸はそれぞれの期間の日射量測定値である。一ヶ月間のデータはかなりよく一本の曲線上に載っており、色素退色率から検量線によって積算日射量を算出することは可能であると推測された。

さらに図3の縦軸を対数変換すると、この曲線は直線となりその勾配は季節によって変化している。本実験では日射計およびフィルムは水平面での日射を比較しているので、太陽高度の季節変化を考慮する必要がなく、検量線の季節変化の主な原因としては気温およ

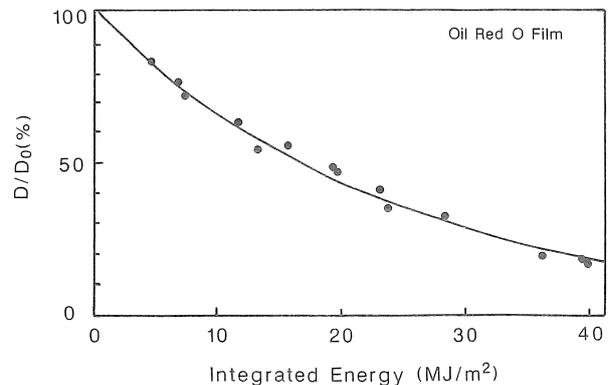


図3 OR-O色素フィルムの退色曲線

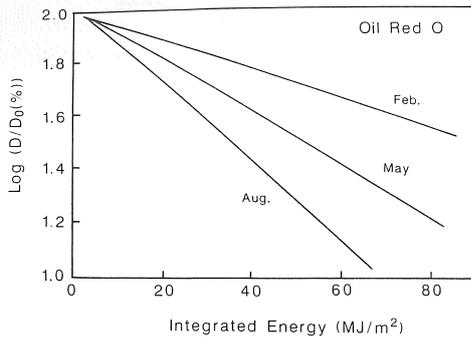


図4 OR-O色素フィルムの退色の季節変化

湿度などの気象条件によるものと思われる。(図4) 実測値の直線からのばらつきをまとめたものの一例を表1に示す。簡易測定法としては満足すべきものとする。

### 3.2 フィルム退色に及ぼす湿度・水分および温度の影響

湿度の影響をみるため、水を張ったシャーレの裏蓋にフィルムを添付し、水を張らないシャーレのフィルムと退色量を比較したが、有意の差はなく、特に湿度の影響は考慮する必要がないことが判った。

二枚のアルミ板に添付したOR-Oフィルムを、一枚は恒温水槽に浮かべ、一枚は水面直下に置いて、日射による退色率を比較した。乾所のフィルムに比して水中のフィルムは、水温25℃において僅かに退色率が小さく、水温50℃ではかなりの退色率が大きいことが判った。(表2) 水中フィルムの場合、水の表面反射が存在するので、25℃においては水分の影響はかなり少ないか、あるいは全くないと考えられる。水温50℃において水中での退色率は大きい、暗所で50℃の温水中に浸したフィルムでは脱色が見られなかったことから、水分により色素の光分解反応が促進されるためと考えられる。いずれにせよ、50℃といった気温は日本の気象条件としてはほとんど考えられないので、実用上の支障はないといえる。なお低温域については、約20℃で水中でも水上でもほとんど同じ退色速度

表1 退色曲線の傾きとネオ日射計実測値との相関(1987年1月から12月までの季節変化)

測定年月	傾き (1/MJ)	相関係数 r	標準誤差 (MJ/r <sup>2</sup> )
87. 1	0. 0071	0. 9851	0. 561
2	0. 0063	0. 9721	0. 597
3	0. 0074	0. 9831	1. 388
4	0. 0092	0. 9934	0. 769
5	0. 0103	0. 9946	1. 100
6	0. 0108	0. 9520	1. 314
7	0. 0131	0. 9555	1. 460
8	0. 0151	0. 9907	1. 158
9	0. 0131	0. 9807	0. 739
10	0. 0113	0. 9836	1. 009
11	0. 0142	0. 9859	0. 555
12	0. 0053	0. 9591	0. 742

であることが上記と同様の実験で認められている。気温とフィルムの退色率の関係については理論的には前記(4)式の通り反応速度定数の対数と絶対温度の逆数(1/T)の間には直線関係が成立する。また一分子反応の場合には反応速度定数はその直線の傾斜から求めることができる。温度と退色率の関係については、現在さらに検討を重ねている。

### 3.3 添付板バックグラウンドの材質と色彩の影響

日射の実測において色素含浸フィルムを添付する物体の材質および色彩が色素の退色にどう影響するかを実験し、フィルム濃度のばらつきについても検討した。

まず、フィルムの温度が退色率に影響するとすれば、添付する物体の熱伝導率の大小に関係があると考え、熱伝導率の大きいアルミ板と熱伝導率が小さい木板(ラワン合板)の二種について退色率を比較した。この結果(表3)二種の間には同一材料上のフィルムのばらつき以上の誤差は認められなかった。さらに、アルミ板に種々の着色塗装を行って比較したが、表4のように着色の相違による差は同一着色板上の5枚のフィルムの計測誤差の範囲内であることが判る。すなわち、各色についてのフィルムの退色率の標準誤差は表の通り、最高0.992、最低0.359であるが、各色の退色率の平均値についての標準誤差は0.569であり、各色ごとのフィルムの退色率の標準誤差のほぼ中間の値

表2 水中と水上における退色比較

日射量 (MJ)	2. 31	5. 57	8. 24	11. 91	17. 42	19. 09
温度						
25°						
(水上)	89. 9	83. 3	72. 2	66. 4	55. 6	50. 0
(水中)	91. 0	87. 8	75. 7	71. 4	65. 2	65. 6
水中/水上	1. 01	1. 05	1. 05	1. 08	1. 17	1. 30
40°						
(水上)	85. 0	78. 2	65. 2	60. 7	46. 0	40. 0
(水中)	80. 1	72. 6	52. 8	41. 9	40. 1	39. 0
水中/水上	0. 94	0. 93	0. 81	0. 69	0. 87	0. 98
50°						
(水上)	84. 1	75. 7	61. 4	49. 7	41. 1	35. 8
(水中)	79. 4	71. 6	49. 1	45. 8	38. 4	38. 6
水中/水上	0. 94	0. 95	0. 80	0. 92	0. 93	1. 08

表3 フィルム添付板の材質による退色への影響

日射量	5.61MJ		14.06MJ		22.30MJ	
材質						
ラワン (白)	87.47	(%)	65.15	(%)	48.97	(%)
	87.20	87.33	64.74	65.44	48.86	49.27
	87.32		66.43		49.97	
(黒)	88.86	(%)	66.35	(%)	52.05	(%)
	89.19	88.73	66.44	65.78	52.12	51.28
	88.13		64.55		49.66	
アルミ (生地)	89.29	(%)	65.09	(%)	49.31	(%)
	89.19	89.30	65.29	64.77	49.98	49.01
	89.41		63.92		47.74	

表4 フィルム添付板の色調の退色への影響

添付板の色	Film No.	退色率(%)	Log(D/D <sub>0</sub> )
黒	810	86.327	1.936
	816	86.813	1.939
	822	85.808	1.934
	828	85.863	1.933
	834	85.924	1.934
	平均	86.105	1.935
赤	811	87.656	1.943
	817	87.486	1.942
	823	87.204	1.941
	829	86.767	1.938
	835	87.561	1.942
	平均	87.335	1.941
青	812	86.945	1.939
	818	87.752	1.943
	824	85.838	1.934
	830	86.771	1.938
	836	86.642	1.938
	平均	86.791	1.938
白	813	88.207	1.946
	819	87.261	1.941
	825	86.614	1.938
	831	85.653	1.933
	837	86.171	1.935
	平均	86.781	1.938
緑	814	88.616	1.948
	820	87.552	1.942
	826	87.101	1.940
	832	87.576	1.942
	838	88.243	1.946
	平均	87.817	1.944
アルミ	815	87.830	1.944
	821	87.308	1.941
	827	86.687	1.938
	833	87.256	1.941
	839	86.590	1.937
	平均	87.134	1.940

表5 PANフィルムによる葉面日射量測定

PAN (露光期間 10月8日-11月4日)				
地上1.5m	東	南	西	北
試料数	10	10	10	10
日射最大値 (MJ)	71.7	73.2	46.8	47.8
最小値	13.9	40.3	12.9	19.5
平均値	52.9	56.5	32.4	29.6
標準偏差	17.0	9.3	11.6	7.5
地上3m	東	南	西	北
試料数	10	10	10	10
日射最大値 (MJ)	80.2	77.9	64.8	62.7
最小値	11.8	48.3	18.7	19.5
平均値	51.9	28.2	56.5	42.1
標準偏差	21.8	9.5	8.7	14.6

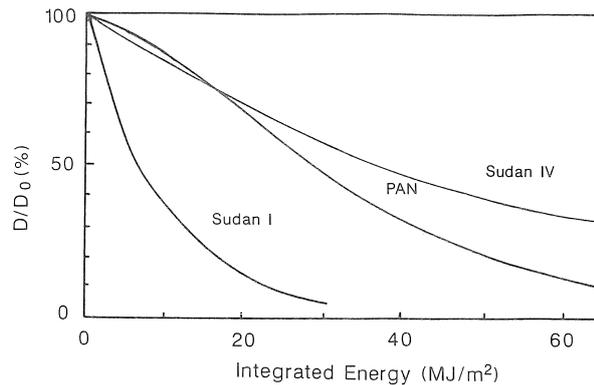


図5 PANおよびスーダンIの退色曲線

になっており、有意の差は認められなかった。

### 3.4 PAN, スーダンIおよびスーダンIV色素含浸フィルムの性質

PAN色素含浸フィルムはOR-Oに比してかなり退色速度が遅いため、数日ないし十数日程度の積算日射の測定に利用できる。またPAN含浸フィルムでは図5に見られるように、退色曲線は緩いS字状曲線を示し、初期には退色が遅く、中期に退色が最も速くなる。従ってOR-Oの場合のように、退色率の対数値と日射量の関係が直線とはならず、実用的には三次曲線として近似式を考えるのがよい。スーダンIの場合

はOR-Oより退色が速く、より短期間の測定に適する。スーダンIVの場合はOR-O、やPANより退色が遅く、単純な退色曲線を示した。しかし退色率の対数値で図示してもOR-Oのように直線にはならなかった。

## 4. フィルムによる日射測定の実例

### 4.1 植物生態系における応用

光合成の研究、植物群落の受光態勢の解析など植物学分野において、葉面の受ける光量を長期間積算して計測するセンサーが熱望されている。この色素フィルムの実用的計測実験として、独立して立つマテバシイ(樹高約4m)の東西南北の方向の葉面に各方向10枚ずつのPANフィルムを貼りつけ、積算日射量を測定した。フィルムを貼りつけた葉は地上約1.5mと3m

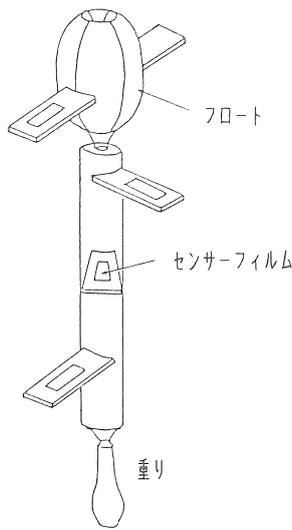


図6 水中日射量測定装置

とした。(表5)

この表からは次のようなことが判る。

- (1) 地上3mの葉の全天日射は地上1.5mの葉の日射よりも10%ないし数10%多く、その差は東や南より西と北で大きい。
- (2) 10枚の葉の日射量のばらつき(標準偏差)は東側が一番多い。
- (3) この実験における葉の受ける全天日射の最大値でも水平日射の約80%程度である。(この実験では樹頂の葉については計測していない。)

この計測は予備的な実験であり、樹形、樹種などによる相違などの研究には、さらに綿密な計測が必要である。

つぎに、三方を建物に囲まれ、東側に高木数本をもつ中庭にある月桂樹についても地上1.5mでの計測を行ったところ、水平日射に対し、最大値でも61%、最小値では12%強しか日射を受けていないことが判った。この実験では同時に月桂樹の周囲の地表面での計測を行い、最大値41%、最小値26%の結果を得ており、建築による日射量の変化については、模型を使えば容易に日射量を計測できることを示唆する。

#### 4.2 水中日射の計測

千葉県では手賀沼、印旛沼といった水質汚濁の進んだ沼があり、沼水中の日射量の計測を行った。前記の通りこの色素フィルムは水中においても、よほどの高温でない限り大気中と同様の計測ができるので、図6のようなフロートのついた器具を使用し、水面からの

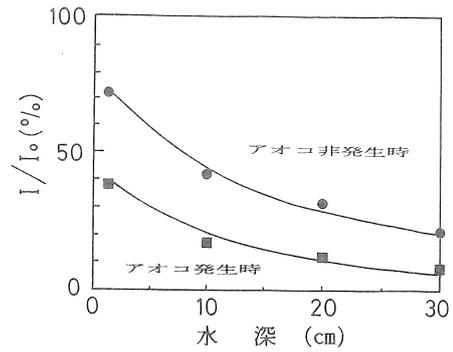


図7 手賀沼における水中日射量測定

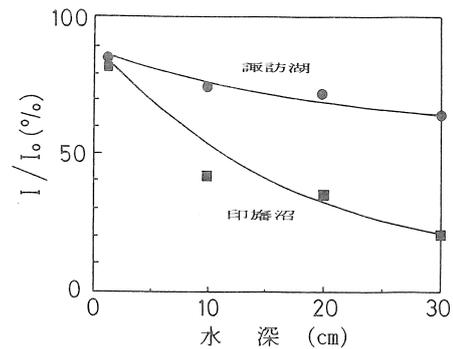


図8 印旛沼と諏訪湖の水中日射量比較

深さを一定(直下、水深10cm、20cm、30cm)にして色素フィルムの退色実験を行い、それぞれ2日間の積算日射量を求めた。測定点付近における陸上の全天積算日射量Iを同時に測定し、水中日射量Iとの比で検討を行った。つまりI/Iの値が小さいほど水中日射減衰率は大きくなる。図7は手賀沼におけるアオコの発生時と非発生時の日射減衰率の比較をしたもので、水中の日射減衰率はアオコ等によって日射がさえぎられたり、乱反射するので各水深において70%程度になっている。次に異なる水系での比較のため、アオコ非発生時の印旛沼と透明度が2m程度あった諏訪湖との比較を行った。この結果、透明度が30cm~40cm程度の印旛沼に比して透明度2mの諏訪湖ではかなり日射減衰率が小さいことが判った。(図8)

これらの結果から、水中日射量からある程度の水質の評価が行えるのではないかと推測され、色素フィルムはこの測定に大変有効である。今後は日射量の測定値と透明度、BOD、COD、SS等との相関も求まるものと期待できる。

#### 5. ま と め

アゾ色素を含浸したトリアセチルセルロース フィルムの退色率から日射量を計測することを試みた。OR-Oの場合は退色率の対数値が日射量とほぼ直線

関係を示し、1日ないし数日間の日射を計測できる。PAN, スーダン I, スーダン IV の場合は OR-O ほど単純な直線関係にはならないが、それぞれの検量線を用いて日射量を計測することができる。いずれの場合もフィルムの退色には温度依存性があるが、湿度については常温付近では影響がほとんどない。退色の温度依存性については、気温との関係など、さらに検討すべき問題が残されている

本フィルムの特徴として次のようなことが挙げられる。

- (1) 電源を必要としない。
- (2) 安価、均質で再現性が高い。
- (3) 屋外及び水中などにおける測定が容易にできる。
- (4) 比較的長時間の積算量の測定に適している。
- (5) センサーは非常に軽く(約70mg)、小単位面積(植物葉上など)の測定が可能である。
- (6) 同時多地点測定が容易かつ安価に行うことができる。

以上のことから、今後これらの特徴を生かして植物学、環境学、気象学、リモートセンシング解析など、多方面での応用が期待される。

## 6. 謝 辞

この研究の端緒を示唆して下さった本学理学部生物学科の大賀宣彦氏、本研究に当り種々の助言を頂いた本学映像隔測研究センターの三輪卓司教授、土屋清教授、および工学部画像工学科の阪口富弥教授に御礼申し上げます。また、実験に協力して頂いた奥山崇、石毛俊史、天野雅志の三君に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 鈴木宣直, 熱電堆式全天日射(A型)の構造・特性並びに精度, 測候時報, Vol.44, No. 6 (1977), pp 207-213
- (2) 関根正幸, 日射の観測資料とその利用について, 太陽エネルギー, Vol.5, No. 2 (1979), pp 42-57
- (3) 三宅行美, 青島武, 栗本敏雄, 日射計の特性と測定誤差, 太陽エネルギー, Vol. 5, No. 2 (1979), pp 58-66
- (4) 三宅行美, 日射計の種類と精度, 太陽エネルギー, Vol. 9, No. 4 (1983), pp 2-7
- (5) 吉田作松, ソーラーシステムのための日射データ, 太陽エネルギー, Vol. 9, No. 4 (1983), pp 14-19
- (6) 田中授, HASP標準気象データにおける日射データ, 太陽エネルギー Vol. 9, No. 4 (1983), pp 20-28
- (7) 山内豊太郎, 気象庁における日照・日射観測について, 太陽エネルギー, Vol. 9, No. 4 (1983), pp 8-13
- (8) 廣瀬保雄, 全天日射の特性を考慮した全天日射強度の算出の試みについて, 気象研究時報, Vol.38, No. 3 (1986), pp 23-32
- (9) 三宅行美, 日射計測の最近の動向, 太陽エネルギー, Vol.14, No. 5 (1988), pp 34-40
- (10) 柴田和雄, 内嶋善兵衛, 太陽エネルギーの分布と測定, 学会出版センター (1987)
- (11) ア・イ・シュルギン著, 内嶋善兵衛訳, 太陽光と植物, 東京大学出版会 (1976)
- (12) 蔵本暢浩, 北尾弟次郎, 1-アリルアゾ-2-ナフトール系染料の溶液中における光退色, 日本化学会誌, No. 2 (1977) pp 258-263
- (13) H. Mustroph, J. Marx und J. Epperlein, Untersuchungen zum photochemischen Ausbleichverhalten von tautomeriefähigen Azofarbstoffen, Acta Polymerica, Vol.34, No6 (1983), pp 336-339

(平成元年4月5日 原稿受理)