

Si フォトダイオード型直達日射計の試作とその性能評価

Trial Manufacture of Si Photodiode Pyrheliometer and its Performance Estimation

桶 真一郎 *1 松崎洋三 *2 福重直行 *2 見目喜重 *3
Shinichiro OKE Yozo MATSUZAKI Naoyuki FUKUSHIGE Yoshishige KEMMOKU

滝川浩史 *4 荒木建次 *5 椎原建樹 *6
Hirofumi TAKIGAWA Kenji ARAKI Tateki SAKAKIBARA

Abstract

Direct irradiance has to be measured precisely to calculate the efficiency of a concentrator PV system. So far, the direct irradiance has been measured using a thermopile pyrheliometer. The thermopile pyrheliometer is expensive and its response is slow. A Si photodiode pyrheliometer is cheaper and its response is fast. However, the Si photodiode pyrheliometer has problems that the wavelength range of spectrum sensitivity is narrow and the spectrum sensitivity is not uniform. In this study, the response time of the Si photodiode pyrheliometer is compared with that of the thermopile pyrheliometer and the influence of spectrum distribution on the Si photodiode pyrheliometer output is analyzed. The results show that the Si photodiode pyrheliometer is able to measure the direct irradiance precisely even when it changes rapidly. And, the measurement accuracy of the Si photodiode pyrheliometer is equivalent to that of the thermopile pyrheliometer. And it is cleared from the analysis of the spectrum distribution that the ratio of the direct irradiance integrated over 900~1000 nm to that of over 400~2500 nm is constant from morning till night.

キーワード：直達日射計，直達日射強度，Si フォトダイオード，応答速度，スペクトル分布

Key Words : Pyrheliometer, Direct Irradiance, Si Photodiode, Response Time, Spectrum Distribution

1. はじめに

現在、太陽光発電システムの普及のために、発電コストの低減を目的として集光式太陽光発電システムの開発が進められている [1-4]。集光式太陽光発電システムでは全天日射ではなく直達日射を取り込むため、その性能を評価するには直達日射強度を精確に計測する必要がある。これまで、直達日射強度はセンサ部分に熱電堆を用いた熱電堆型直達日射計により計測してきた。しかし、熱電堆は直達日

射強度が急激に変動する場合にはそれに応答できないという問題がある。また、比較的高価である[5, 6]。一方、われわれの研究室で開発を進めている Si フォトダイオード型直達日射計は、応答速度が速く、低コスト化が可能である。しかし、Si フォトダイオードには、感度波長範囲が狭いことや、分光感度が均一でないことなどの問題がある。また、直達日射のスペクトル分布は、エアマスにより変化するため[7-10]、Si フォトダイオード型直達日射計では、長時間に渡って直達日射強度を精確に計測することは困難であると考えられてきた。

本研究では、Si フォトダイオード型直達日射計を試作し、その計測性能を検証する。まず、Si フォトダイオード型直達日射計の出力電流、熱電堆型直達日射計の出力、集光式太陽電池の短絡電流および直達日射のスペクトル分布を数日間に渡り同時計測する。次に、直達日射強度が緩慢に変動する日において、Si フォトダイオード型直達日射計の出力電流を熱電堆型直達日射計の出力で校正する。更に、

*1 豊橋技術科学大学教務職員
(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
e-mail: oke@eee.tut.ac.jp

*2 豊橋技術科学大学工学研究科大学院生

*3 豊橋創造大学助教授

*4 豊橋技術科学大学助教授

*5 大同特殊鋼(株)

*6 豊橋技術科学大学教授

(原稿受付: 2005年12月15日)

Si フォトダイオード型直達日射計の出力と熱電堆型直達日射計の出力と一致する理由を解明するために、直達日射のスペクトル分布の計測結果を解析する。最後に、スペクトル分布と Si フォトダイオードの分光感度特性とを用いて、Si フォトダイオード型直達日射計の出力電流を計算する。

2. 直達日射計

2.1 热電堆型直達日射計

热電堆型直達日射計は、受光部で太陽エネルギーを热エネルギーに変換し、热電対の集合体である热電堆の热起電力を输出する[11]。本研究で用いた热電堆型直達日射計は、

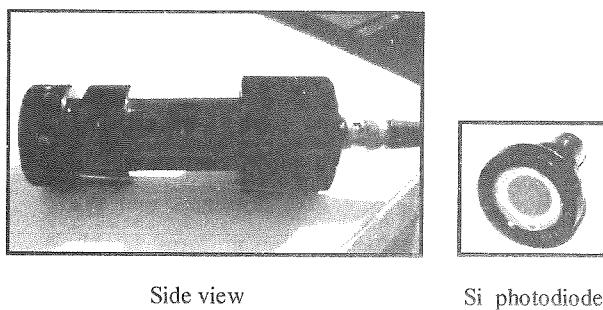


Fig.1 Si photodiode pyrheliometer.

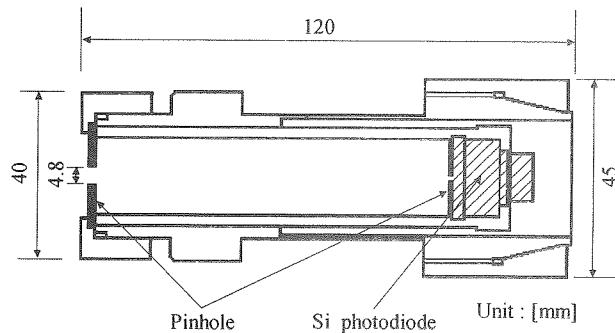


Fig.2 Cross section of Si photodiode pyrheliometer.

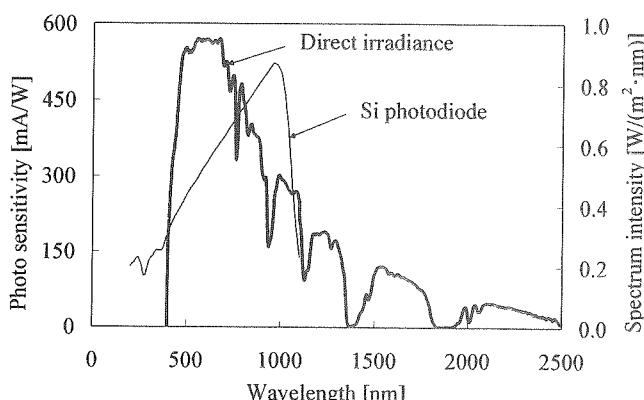


Fig.3 Photo sensitivity of Si photodiode and a typical spectrum distribution of direct irradiance.

プリード製 CH-1 で、その感度波長範囲は 200~4000 nm で、応答時間は 7 s (95% 応答)、ゼロオフセットは $\pm 3 \text{ W/m}^2$ である。また、出力電圧を直達日射強度に変換するための感度定数は $10.78 \text{ mV/(kW/m}^2)$ である[12]。

2.2 Si フォトダイオード型直達日射計

Si フォトダイオードは、半導体の pn 接合部に光を照射することにより光電流を発生させる受光素子である[11]。本研究室で開発を進めている Si フォトダイオード型直達日射計の外観を Fig.1 に、その断面図を Fig.2 に示す。世界気象機関 (WMO) の勧告に準拠させるため、開口角が 5° となるように長さ 120 mm の円筒型容器の上端に直径 4.8 mm のピンホールを、下端に直径 0.5 mm のピンホールを穿った。その円筒型容器の底辺に、受光素子として Si フォトダイオード (浜松ホトニクス製 S2281) を取り付けた。その感度波長範囲は 190~1100 nm、最大感度波長は 960 nm である[13]。Fig.3 に Si フォトダイオードの分光感度特性および直達日射の典型的なスペクトル分布を示す。

3. 直達日射強度およびスペクトル分布の計測

計測は豊橋技術科学大学自然エネルギー実験棟屋上（豊橋市）において、2004 年 8 月～2005 年 12 月に行った。Fig.4 に、計測システムの外観を示す。太陽追尾装置に Si フォトダイオード型直達日射計および熱電堆型直達日射計を取り付けた。また、集光用太陽電池（InGaP/InGaAs/Ge、7 mm × 7 mm）を取り付けた。さらに、同装置には近赤外分析計（OL-6500、ニレコ）のプローブも取り付けた。その計測可能な波長範囲は 400~2500 nm であり、分解能は 2 nm である。なお、近赤外分析計の出力（全波長成分の積分値）はその計測可能波長範囲が 400~2500 nm であるため、熱電堆型直達日射計の出力より約 3% 小さい。Fig.5 に、計測システムの構成を示す。各直達日射計および太陽電池の出力は 1 s ごとに、スペクトル分布は 1 min ごとに、パソコンに記録した。

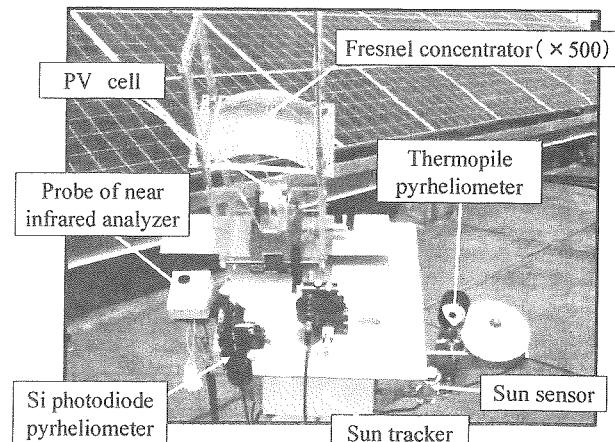


Fig.4 Overview of measurement system.

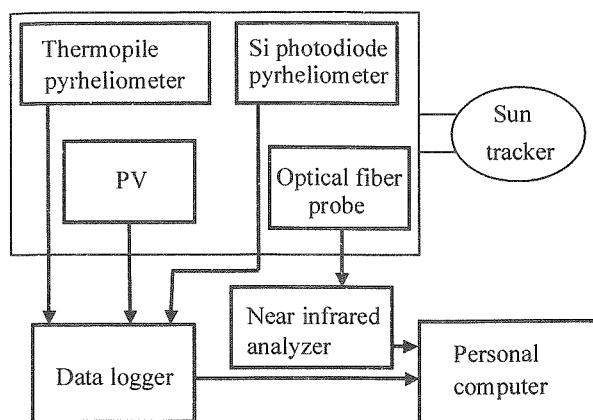


Fig.5 Composition of measurement system.

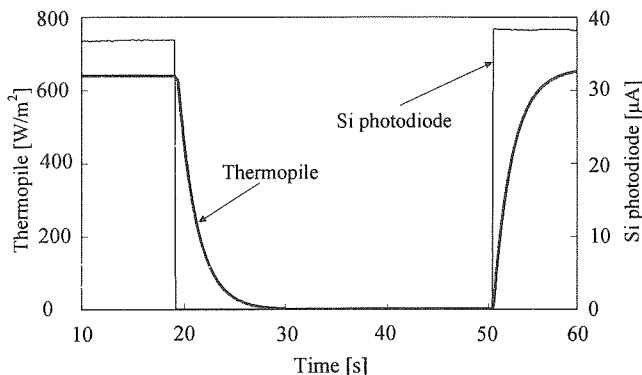


Fig.6 Step response of outputs measured by thermopile, Si photodiode pyrheliometers (2004/8/28).

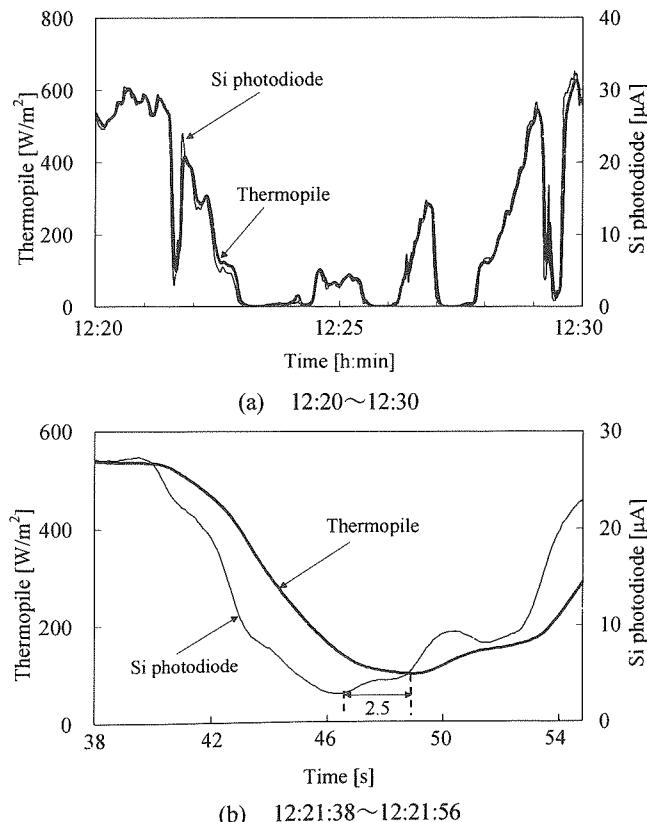


Fig.7 Time series of outputs by Si photodiode and thermopile pyrheliometers (2004/8/24).

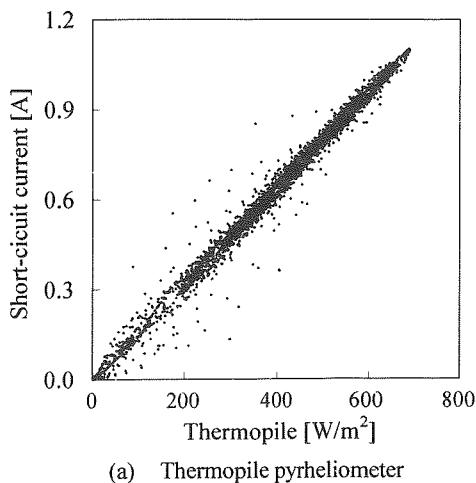
4. 計測結果

4.1 応答速度

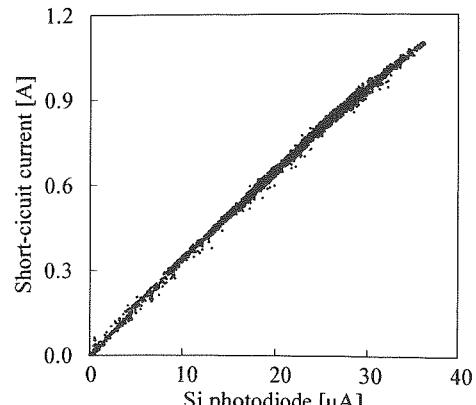
Fig.6に、約30 sの間、人工的に急激に遮光したときの熱電堆型直達日射計およびSiフォトダイオード型直達日射計のステップ応答(0.1 sごとに計測)を示す。熱電堆型直達日射計の立ち上がりおよび立ち下りの時定数は共に2.0 sである。これに対して、Siフォトダイオード型直達日射計の応答速度は非常に速いことが分かる。その時定数は、計測波形からは求められないが、等価回路による理論計算によれば2.86 μsである。Fig.7に、自然光の下で直達日射強度が急激に変化したときの計測結果(0.1 sごとに計測)を示す。同図(b)は同図(a)の12時21分38秒～12時21分56秒を拡大したものである。同図(b)から、熱電堆型直達日射計の出力はSiフォトダイオード型直達日射計の出力より約2.5 s程度遅れていることが分かる。

4.2 太陽電池短絡電流との関係

Fig.8に、日射の変動が激しい2004年8月24日12時10分～14時10分に1 sごとに計測した太陽電池短絡電流と



(a) Thermopile pyrheliometer



(b) Si photodiode pyrheliometer

Fig.8 Relation between short-circuit current of PV cell and outputs of pyrheliometers measured during direct irradiance changing abruptly.

直達日射強度との関係を示す。同図(a)は熱電堆型直達日射計を、同図(b)はSiフォトダイオード型直達日射計を用いた場合である。同図(b)は(a)に比べて直線からの偏差がかなり小さい。これは、Siフォトダイオードの出力電流は太陽電池の短絡電流の変化によく追従していることを意味している。したがって、日射の変動が激しいとき、Siフォトダイオード型直達日射計が適していると言える。

4.3 直達日射強度

Fig.9に、2005年8月27日6時15分～17時26分のそれぞれの直達日射計の出力の時系列結果(1sごとに計測)を示す。同図から、それぞれの直達日射計の出力には変動がほとんどなく日射が比較的に安定していることが分かる。また、時間的変化の様相もほぼ一致している。Fig.10に、2005年8月27日を含む2005年3月～9月の日射が比較的に安定した日(7日間)のそれぞれの直達日射計の出力の散布図を示す。同図から、それぞれの直達日射計の出力の相関が非常に強いことが分かる。その相関係数は0.999である。ただし、すべてが重なっていない。これは、試作段階のSiフォトダイオード型直達日射計には十分な防水加工を施していなかったため、毎日の夕方には追尾装置から取り外さなければならず、そのくり返しにより取り付けに若干の狂いが生じたものと考えられる。ここで、Siフォトダイオード型直達日射計の出力を直達日射強度に変換するために、回帰直線を用いてその出力を校正した。その結果をFig.11に示す。Siフォトダイオード型直達日射計と熱電堆型直達日射計とにより計測した直達日射強度の平均計測差を式(1)により計算した。その値は8月27日では0.55%であった。したがって、Siフォトダイオード型直達日射計は熱電堆型直達日射計と同等の精度で直達日射強度を計測できていると言える。

$$D = \frac{1}{t_e - t_s} \sum_{t=t_s}^{t_e} \left| \frac{I_{Si}(t) - I_{Th}(t)}{I_{Th}(t)} \right| \times 100 \quad (1)$$

ここで、

D : 直達日射強度の平均計測差 [%]

$I_{Si}(t)$: Siフォトダイオード型直達日射計の計測値 [W/m^2]

$I_{Th}(t)$: 热電堆型直達日射計の計測値 [W/m^2]

t : 計測時刻 [s]

t_s : 計測開始時刻 [s]

t_e : 計測終了時刻 [s]

5. 直達日射のスペクトル分布の解析

Fig.13は、近赤外分析計を用いて計測した2005年3月8日の11時00分、15時30分および16時30分(Fig.12参照)の直達日射のスペクトル分布である。同図から、直達日射強度が小さくなるにつれて、約1000 nm以下の短帯域のスペクトル強度の減少の程度が、約1000 nm以上の長帯域のそれに比べて大きくなっていることが分かる。したが

つて、Fig.10においてSiフォトダイオード型直達日射計の出力を校正した際に、直達日射強度が小さくなる時間帯で、熱電堆型直達日射計により計測した直達日射強度と差が生じる可能性がある。なぜなら、Siフォトダイオードの分光感度特性はFig.3に示すようにその感度波長範囲は190～1100 nmであるからである。しかしながら、実際の計測結

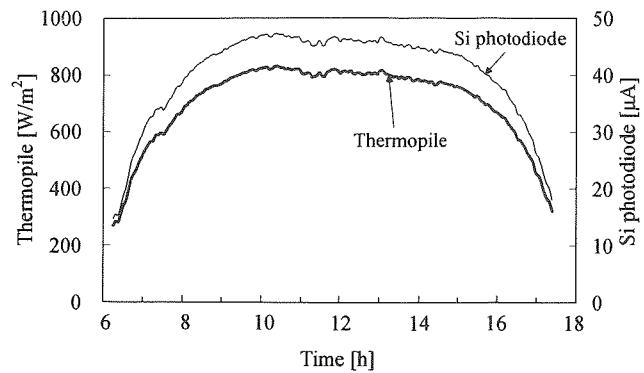


Fig.9 Measurement result of outputs measured by Si photodiode and thermopile pyrheliometers (2005/8/27).

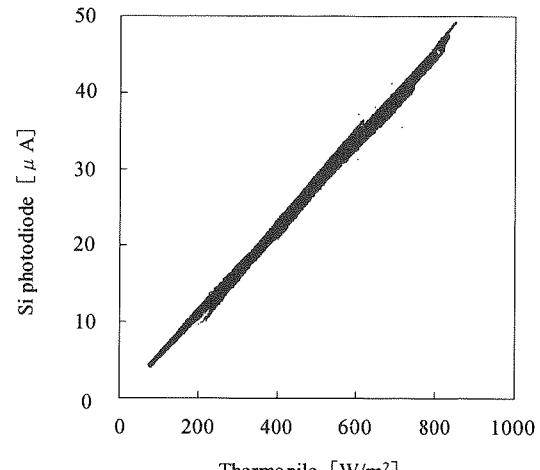


Fig.10 Relation between by Si photodiode and thermopile pyrheliometers (2005/3~9).

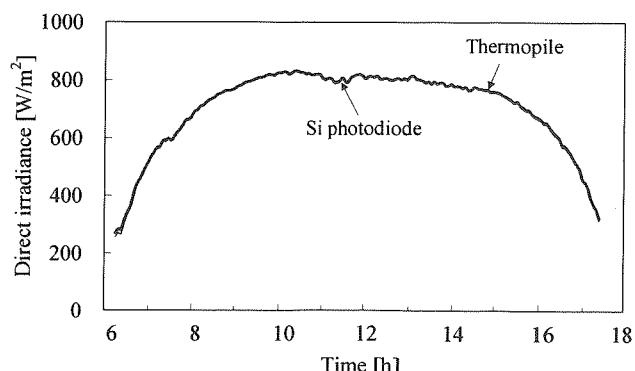


Fig.11 Measurement result of direct irradiances measured by Si photodiode and thermopile pyrheliometers (2005/8/27).

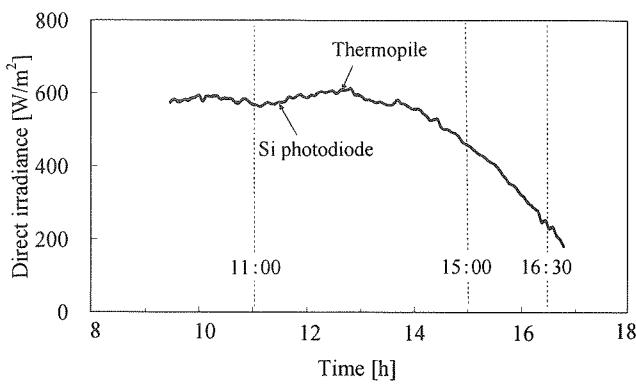


Fig.12 Measurement result of direct irradiances measured by Si photodiode and thermopile pyrheliometers (2005/3/8).

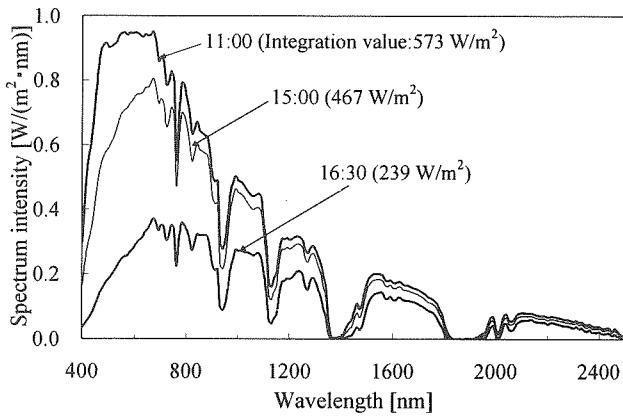


Fig.13 Spectrum distribution of direct irradiance (2005/3/8).

果ではFig.11 および Fig.12 に示すようにほとんど差が生じていない。そこで、その原因を検討してみる。

まず、Si フォトダイオードの感度波長範囲と近い 400~1100 nm の帯域において 100 nm ごとのスペクトル強度の比率を求めてみる。式(2)を用いて計算した時系列結果を Fig.14 に示す。同図(a)は短波長成分 (400~700 nm)、同図(b)は長波長成分 (700~1100 nm) の場合である。同図(a)から、Si フォトダイオードの分光感度が比較的に小さい短波長成分 (Fig.3 参照) では直達日射強度が小さくなる時間帯 (14 時以降) では、 $S_{\lambda i}$ の値が大きく減少していることが分かる。それに対して、同図(b)から、Si フォトダイオードの分光感度が比較的に大きい長波長成分では $S_{\lambda i}$ の値は一定ないし増加していることが分かる。この原因是レイリー散乱によるものである。レイリー散乱の特徴は、散乱の強さが入射電磁波の波長の 4 乗に反比例することである。したがって、太陽光が空気分子で散乱される場合、短波長成分は長波長成分よりも強く散乱される。また、朝方や夕方、エアマスが大きくなると全波長に渡って散乱は多くなるが、短波長成分は長波長成分よりも強く散乱を受ける。その結果、短波長成分のスペクトル強度は長波長成分のスペクトル強度よりも多く減少する。このように、朝方や夕方において、全波長に渡ってスペクトル強度は低下するが、短波

長成分のスペクトル強度の低下は全波長の低下に比べて低下の程度がより大きく、長波長成分のスペクトル強度の低下はより小さくなる。その結果、100 nm ごとの積分値の全波長に対する比率は、短波長成分では減少し、長波長成分では増加することになる。この境界の波長が約 700 nm である。また、レイリー散乱は季節や天候によらない現象であるので、Si フォトダイオード型直達日射計と熱電堆型直達日射計との計測結果が一致するのは、一般的な結果であると考えられる。

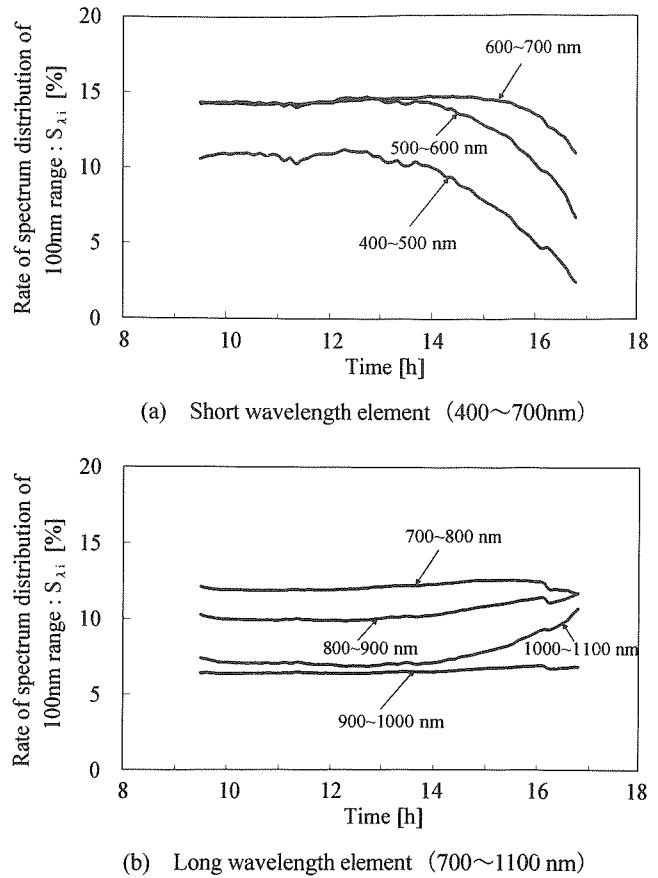


Fig.14 Rate of integration value of spectrum distribution of each 100 nm interval to that of 400~2500 nm (2005/3/8).

$$S_{\lambda i}(t) = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_i+100} I_s(t, \lambda) d\lambda}{\int_{400}^{2500} I_s(t, \lambda) d\lambda} \times 100 \quad (2)$$

ここで、

$S_{\lambda i}(t)$: 帯域 100 nm ごとのスペクトル分布の積分値の比率 [%]

$I_s(t, \lambda)$: 直達日射のスペクトル強度 [W/(m²·nm)]

λ : 波長 [nm]

λ_i : 100 nm ごとの波長 (400, 500, ..., 1100) [nm]

6. Si フォトダイオードの出力電流の計算

前節で述べたことを確認するため、Si フォトダイオード型直達日射計の出力電流を式 (3) [14, 15] を用いて計算した。その時系列結果を Fig.15 に示す。計算値と実測値とはほぼ一致している。

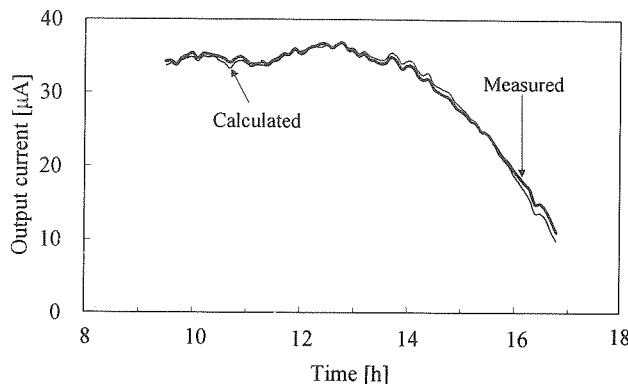


Fig.15 Time series of output currents measured and calculated for Si photodiode pyrheliometer (2005/3/8).

$$E(t) = S \int_{400}^{2500} K(\lambda) \cdot I_s(t, \lambda) d\lambda \quad (3)$$

ここで、

$E(t)$: Si フォトダイオードの出力電流 [μA]

S : 受光面積 [m^2]

$K(\lambda)$: 受光感度 [mA/W]

7. 検討

Fig.14(b)をじっと見てみると、時々刻々変化する直達日射スペクトルにおいて、900~1000 nm の波長成分の積分値と全波長成分の積分値との比率が常に一定である。これは、900~1000 nm の帯域は、レイリー散乱の影響を受ける波長の長波長成分になり、エアマスが増加するとその積分値の比率は増加する。しかし、その増加が顕著になるのは 1000 nm 以上の長波長成分であり、900~1000 nm の帯域ではその増加程度はまだ顕著ではないことによる。加えて、この帯域は水蒸気の吸収帯であるため、積分値の比率の値自体は小さくなる。ただし、このことを定量的に説明するにはさらなる計測データの蓄積が必要である。

上記のことから、直達日射強度を計測する際、全波長帯に感度波長を有するセンサを使用しなくとも、900~1000 nm の帯域にのみ感度波長を有するセンサを使用してもよいと言える。更にいえば、900~1000 nm の帯域のバンドパスフィルタを介して直達日射強度を計測すれば、少なくともこの帯域に感度波長を有するセンサならばなんであってもよいことになる。

8. まとめ

本研究では、Si フォトダイオード型直達日射計を試作し、その計測性能を検証した。まず、Si フォトダイオード型直達日射計の出力電流、熱電堆型直達日射計の出力、集光式太陽電池の短絡電流および直達日射のスペクトル分布を数日間に渡り同時計測した。

計測の結果、Si フォトダイオード型直達日射計は熱電堆型直達日射計に比べて、応答速度が桁違いに速いため、直達日射が急激に変動する際も、直達日射強度を精確に計測でき、太陽電池の短絡電流の変動ともよく追従した。次に、直達日射強度が緩慢に変動する日において、Si フォトダイオード型直達日射計の出力電流を熱電堆型直達日射計の出力で校正したところ、校正後の Si フォトダイオード型直達日射計の出力は熱電堆型直達日射計の出力とほぼ一致した。

更に、Si フォトダイオードの分光感度が均一でなく、かつ、その感度波長範囲が 190~1100 nm とに限られているにもかかわらず、Si フォトダイオード型直達日射計の出力と熱電堆型直達日射計の出力とが一致した原因を解明するために、直達日射のスペクトル分布の計測結果を解析した。その結果、直達日射のスペクトル分布において、全波長に渡る積分値に対する 900~1000 nm の積分値の比率が直達日射が変動してもほぼ一定であることに加えて、Si フォトダイオードの最大感度波長が 960 nm にあることが一致の原因であることが判明した。

以上の結果は、高速で安価な Si フォトダイオード型直達日射計の開発に結びつくものと信じる。

なお、時間帯によらず 900~1000 nm の波長成分の積分値と全波長成分の積分値との比率が常に一定であることの定量的な説明を今後の課題とし、継続して直達日射のスペクトル分布の計測を行う。

参考文献

- (1) K. Araki, M. Yamaguchi, Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells, Solar Energy Materials & Solar cells, Vol.75, pp.707-714, 2003
- (2) K. Araki, M. Yamaguchi, Sunset environment and spectrum analysis for concentrator PV systems in Japan, Solar Energy Materials & Solar cells, Vol.75, pp.715-721, 2003
- (3) 見目 他 :「集光型太陽光発電システムのモジュール温度への日射・外気温の影響」, 太陽／風力エネルギー講演論文集2003, pp.201-204, 2003
- (4) 見目 他 :「集光型太陽光発電システムのフィールドテスト」, 太陽エネルギー, Vol.29 No.5, pp.20-25, 2003
- (5) 篠田 他 :「光センサの組み合わせによる日射量の測定」, 福岡工業大学研究論集, pp.113-119, 1995
- (6) 田村 他 :「光電簡易センサ測定値の熱型放射計測定値への感度補正法の検討」, 照明学会誌, Vol.87 No.2, pp.113-118, 2003

- (7) 福重 他 :「直達日射のスペクトル分布の日変化の計測」,
太陽／風力エネルギー講演論文集 2004 , pp.25-28, 2004
- (8) 福重 他 :「直達日射強度およびそのスペクトル分布の1分ごとの計測」, 平成 17 年電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集, pp.31.1-31.2, 2005
- (9) 福重 他 :「直達日射のスペクトル分布に与える湿度の影響」,
平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集
CD-ROM, O - 483, 2005
- (10) 福重 他 :「直達日射スペクトルの波長ごとの強度に及ぼす日射変動の影響」, 太陽／風力エネルギー講演論文集 2005 ,
pp.291-294, 2005
- (11) 南任靖雄 :「センサと基礎技術」, pp.57-58, 121-123, 工学図書
1994
- (12) プリード資料 : 直達日射計 CH-1, 2004
- (13) 浜松ホトニクス資料 : Si フォトダイオード - S2281 シリーズ -,
2003
- (14) 桑野幸徳 :「太陽電池とその応用」, pp.158-159, パワー社, 1994
- (15) 三宅行美 :「日射計の種類と精度」, 太陽エネルギー, Vol.9 No.4,
pp.2-7, 1983