

部分照射法による各種太陽電池モジュールの 分光感度測定方法

A Method for Spectral Response Measurements of Various PV Modules by
Using Partial Irradiation Method

津野 裕紀^{*1,2}

Yuki Tsuno

菱川 善博^{*2}

Yoshihiro Hishikawa

上 迫 浩 一^{*3}

Koichi Kamisako

黒川 浩 助^{*4}

Kosuke Kurokawa

Abstract

Precise characterization of the spectral response (SR) or the quantum efficiency of the series connected PV modules has been investigated. As the cells in PV modules are series connected, measurements of the spectral responses of the modules and their component cells are not straightforward. In this study, various factors to affect the measurement of the module spectral response are discussed, based on theoretical analysis of the measurement principle. Measurement conditions to yield accurate spectral response results are described. Measurement results of the SR are demonstrated for various kinds of modules including crystalline Si, and multi-junction structures. The procedure is based on the measurement of each constituent cell in the module, in which chopped monochromatic light and white or color bias light are irradiated on the target cell, and supplemental bias light is applied on other cells. Measurement of the SR's of modules has demonstrated the practical usefulness of the procedure and apparatus.

キーワード：太陽電池モジュール，分光感度，I-V 特性，部分照射法

Key Words : Photovoltaic module, Spectral response, I-V curve, Partial irradiation method

1. はじめに

太陽電池の分光感度特性は、基準セルの校正をはじめ、太陽電池セルや太陽電池モジュールの基準状態での性能評価などに用いられ、基準太陽光とソーラシミュレータの分光放射照度の差(スペクトルミスマッチ)を補正するために必要不可欠である。近年は様々な分光感度を持った太陽電池モジュールが量産・市販されており、分光感度特性を正確に測定する技術の重要性が高まっている。

太陽電池モジュールの分光感度を測定するには、パッケージされた太陽電池モジュールから太陽電池セルを切り出して測定するか、モジュール内の太陽電池セルと同等の太陽電池セルの分光感度を測定し、これを代用することが従来は一般的であった。しかし、いくつかの機関より、太陽電池モジュールの分光感度特性を直接かつ非破壊で測定するための技術開発が報告されている。技術的には、モジュール全面に単色光を照射する方法^(1,2)(以下全面照射法)と、モジュールの一部に単色光を照射し、モジュール内部のセルの分光感度を測定する方法⁽³⁻⁷⁾(以下部分照射法)が考え

られる。全面照射法は、基本的に太陽電池セルと同様の手順で測定可能である。しかしバイアス光が必要な a-Si 太陽電池や多接合太陽電池の分光感度を測定するには、太陽電池モジュール全面に照射可能な光源がさらに必要であるため、大規模な設備が必要で、光学設計も複雑になることが問題である。さらに、ソーラシミュレータと同等の、大面積に照射可能な光源を必要とするため、市販サイズの太陽電池モジュール用の装置はサイズ・価格的に非現実的に大きくなることが予測され、照度の不均一性や位相の点から測定精度の低下が懸念される。

一方、部分照射法は、全面照射法に比べ単色光の均一な照射が可能で、バイアス光の照射も容易なため、モジュールの種類・サイズに関係なく適用可能である。しかしながら、精度良く測定するために必要な基本的な測定原理は明確化されていないのが現状である。部分照射法による分光感度の測定原理を明らかにし、測定方法を確立することで、基準状態での太陽電池モジュールの出力測定におけるスペクトルミスマッチ補正の精度向上の他、分光感度の場所ムラの把握や、劣化状況の確認など様々な用途に適用できると考えられる。

本研究では、様々な太陽電池モジュールに適用できる可能性のある部分照射法の、基本的な測定原理を明らかにし、実験的にその測定精度を検討した結果を報告する。

*1 (独) 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 つくば中央第二)
e-mail: yu-ki.1111-tsuno@aist.go.jp

*2 東京農工大学
(原稿受付：2008年10月23日)

2. モジュール分光感度測定の概要

Fig.1 に本研究で用いるモジュール分光感度測定装置のブロック図を、Fig.2 にその概観を示す。補助バイアス光（ハロゲンランプ）を追加した点以外、光源や分光器、測定機器は基本的にセルの分光感度測定に用いられる装置とはほぼ同様のものを使用している。測定対象のセル（以下、測定対象セル）には、太陽電池セルの測定と同様に、チョップパによって間欠光とした単色光を、また、必要に応じてバイアス光を照射する。部分照射法では、これに追加して、測定対象外の複数のセル（以下、測定対象外セル）に補助バイアス光を照射し、モジュールの出力端にバイアス電圧を印加する。補助バイアス光は、測定対象セルに比べ十分放射照度の高い光を測定対象外セルに照射することで、測定対象セルによって電流を律速させる目的で用いる。バイアス電圧は、動作点を制御することで測定対象セルを短絡状態にさせる目的で用いる。モジュールから出力される電流は、間欠光とした単色光による間欠電流の他に、バイアス光と補助バイアス光による直流電流、外乱光などの影響による雑音の和となるが、ロックインアンプを用いて、直流電流と雑音を除去し、単色光による間欠電流のみを測定することにより分光感度を測定する。

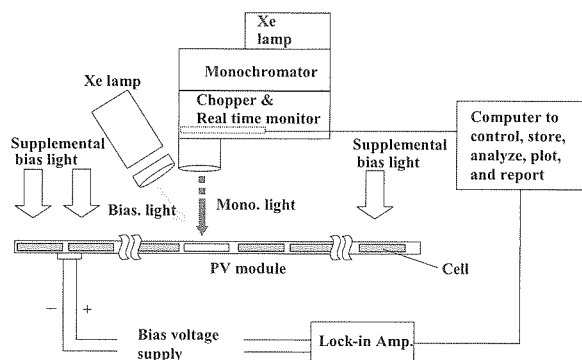


Fig. 1 Block diagram of the module spectral response (SR) measurement apparatus.

図1 太陽電池モジュール分光感度測定装置のブロック図。

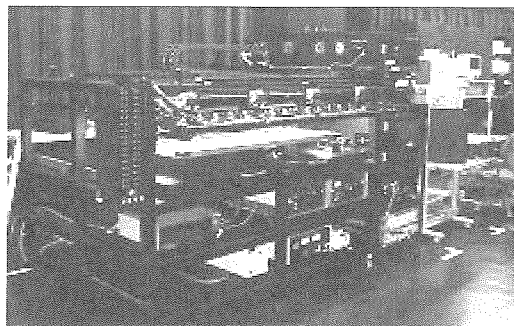


Fig.2 Photograph of the module SR measurement apparatus.

図2 太陽電池モジュール分光感度測定装置の概観。

3. バイアス電圧の印加

3.1 最適バイアス電圧の算出方法

部分照射法を用いて太陽電池モジュールの分光感度を測定する場合、測定対象セルの動作電圧を制御するためにバイアス電圧を印加する必要がある。通常測定対象セルの動作電圧は短絡状態、すなわち 0 [V] にする必要がある。Emeryらは、バイアス電圧の設定は以下の式で行うと報告している⁽³⁾。

$$V_{bias} = V_{oc} \times (n-1)/n \quad (1)$$

ここで、 V_{bias} ；バイアス電圧、 V_{oc} ；補助バイアス光を全面に照射したときのモジュールの開放電圧、 n ；モジュール内のセル数である。

この式は測定対象セルにバイアス光を照射せず、暗状態でのみ成立するため、バイアス光を照射した場合は測定対象セルに印加される電圧は 0 [V] とはならず、最適なバイアス電圧が決定できない。バイアス電圧の設定によっては測定対象セルに逆電圧が印加され、セルを破壊する恐れがある。また、a-Si 太陽電池などは、分光感度にバイアス電圧依存性を持つことが知られている。従って最適なバイアス電圧の値を知ることは測定対象セルの分光感度を正確に測定する上で重要である。そこで本章では部分照射法によるバイアス電圧の設定値の決定方法について検討する。

太陽電池モジュールは通常全てのセルが直列に接続されている。このとき、測定対象セルと測定対象外セルからなる太陽電池モジュールの I-V 特性は以下の式で表される。

$$V_{module}(I) = V_{target}(I) + V_{others}(I) \quad (2)$$

ここで、 $V_{module}(I)$ ；モジュールの I-V 特性（電流値 I のときの電圧値）、 $V_{target}(I)$ ；測定対象セルの I-V 特性、 $V_{others}(I)$ ；測定対象外セルの I-V 特性、 I ；動作電流である。なお、I-V 特性は、通常は電流を電圧の関数として表す場合が多いが、本論文では電圧を電流の関数として表している。

バイアス電圧をモジュールの出力端に印加し、補助バイアス光を測定対象外セルに照射したとき、式(2)は以下となる。

$$V_{bias} = V_{module}(I) = V_{target}(I) + V_{others}(I) \quad (3)$$

式(3)はバイアス電圧の値によって動作点を制御することを示している。測定対象セルが短絡状態の場合、 $V_{target}(I)=0$ となるため、式(3)は以下となる。

$$V_{bias} = V_{module}(I) = V_{others}(I) \quad (4)$$

上式より、測定対象セルが短絡状態のときの動作点は、 $V_{module}(I)$ と $V_{others}(I)$ の交点であることがわかる。逆に言えば、バイアス光、補助バイアス光を照射した状態で、モジュール全体の出力電圧と測定対象外セルの出力電圧が等しくなるようなバイアス電圧をモジュールに印加することにより、測定対象セルのバイアス電圧を短絡状態に設定することができる。Fig. 3 にその一例を示す。太陽電池セルが24個直列接続されたモジュールにおいて、そのうちの1つのセルの分光感度を測定する場合を想定している。測定対象セル(1セル)にはバイアス光が照射され、測定対象外セル(23セル)には補助バイアス光が照射されている。測定対象セルの出力電流でモジュール全体の出力電流を律速させるために“バイアス光の放射照度<補助バイアス光の放射照度”としている。これらの関係は式(2)で表される。

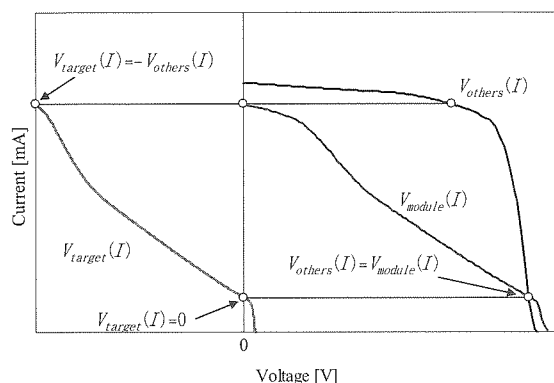


Fig. 3 Example of $V_{target}(I)$, $V_{others}(I)$, $V_{module}(I)$.
 図3 測定対象セル、測定対象外セル、モジュール全体のI-V特性($V_{target}(I)$, $V_{others}(I)$, $V_{module}(I)$)の一例。

$V_{module}(I)$ と $V_{others}(I)$ の交点で動作するようにバイアス電圧を設定した場合、 $V_{target}(I)=0$ [V]となり、測定対象セルは短絡状態となることがわかる。もし、バイアス電圧を通常の太陽電池セルの分光感度測定時と同様に、サンプルであるモジュール全体のバイアス電圧を0 [V]とした場合、測定対象セルには式(2)より

$$V_{target} = -V_{others}(I) \quad (5)$$

となり、短絡状態でないばかりか、全ての測定対象外セルの電圧が測定対象セルに印加されることになり、モジュールやセルの構造によっては測定対象セルが破壊される恐れがある。

式(4)より最適なバイアス電圧をI-V特性から求めることが可能であるが、現実には、市販の太陽電池モジュールの出力端から直接補助バイアス光照射下の $V_{others}(I)$ を直接測定することは不可能である。そこで、補助バイアス光を全てのセルに照射したときのI-V特性 $V_n(I)$ から、測定

対象外セルのI-V特性を、式(6)を用いて近似的に計算する。

$$V_{others}(I) = V_{(n-b)}(I) = V_n(I) \times (n-b)/n \quad (6)$$

ただし、 b は測定対象のセル数、 n はモジュール内のセル数である。この式を用いて測定対象外セルのI-V特性を推測する場合、全てのセルが同程度の性能であるとの仮定を用いているため、補助バイアス光の照度ムラや個々のセルの温度差、測定中の温度変化によって測定対象セルの動作点が移動する恐れがあるため注意が必要である。

3.2 実験と結果

3.1で示したバイアス電圧の算出方法の精度検証のために太陽電池モジュールの分光感度測定を行った。測定には結晶Si太陽電池モジュール(24直列)を用いた。また、測定対象セルの分光感度及び測定時の動作電圧を測定するために、測定対象セルから独立に電極を取り出した特注のモジュールを使用している。

補助バイアス光とバイアス光の光源にはハロゲンランプを使用した。実効放射照度は基準セルで測定し、補助バイアス光とバイアス光共に32 [% SUN]である。実効放射照度は、下式によって求める。

$$G_{mea} = I_{sc_mea} / I_{sc_STC} \times 100 \quad [\% \text{ SUN}] \quad (7)$$

ここで、 G_{mea} は照射面での実効放射照度(この場合はモジュール表面)、 I_{sc_mea} は照射面での基準太陽電池セルの短絡電流、 I_{sc_STC} は基準太陽電池セルの基準状態での短絡電流である。通常、放射照度は、熱型放射計で測定し、その単位には[mW/cm²]を用いるが、補助バイアス光の光源として用いたハロゲンランプは太陽光と分光放射照度が大きく異なるため、例えば同じ放射照度下におけるハロゲン光下での太陽電池の短絡電流と太陽光下での太陽電池の短絡電流は異なる。そこで、実験に用いた太陽電池と同等の分光感度を有する基準太陽電池セルを用い、その短絡電流の比で表すことで、光源が太陽光と異なるものの、太陽光下と仮定したときの実効的な放射照度とし、熱型放射計で測定した場合と区別するために単位を [% SUN]とした。

単色光とバイアス光の照射面積は40mm×40mmとし、測定対象セルにおいて単色光を照射しない部分はマスクを設置し、不要な補助バイアス光、バイアス光の入射を防いだ。マスクを設置したことで、測定対象セルの照射面積が測定対象外セルの照射面積に比べ小さくなるため、モジュール全体の出力電流は測定対象セルによって律速されることになる。なお、単色光の放射照度は各波長において50 [μW/cm²]とした。

測定は①測定対象セルの分光感度を独立に取り出した電極から直接測定(太陽電池セルの分光感度測定と同等の方

法)②式(3)及び式(6)より算出した最適バイアス電圧を印加し部分照射法により測定③モジュール全体にバイアス電圧 0 [V]を印加し部分照射法により測定, の3種類の測定を行った。

なお, 実験②での最適バイアス電圧は, 3.1 節で示したように, 補助バイアス光を全てのセルに照射したときの I-V 特性 $V_n(I)$ から $V_{others}(I)$ を計算し, これと $V_{target}(I)$ の交点の電圧 11.69 [V] を印加バイアス電圧とした (Fig. 4). 測定結果を Fig. 5 に示す。

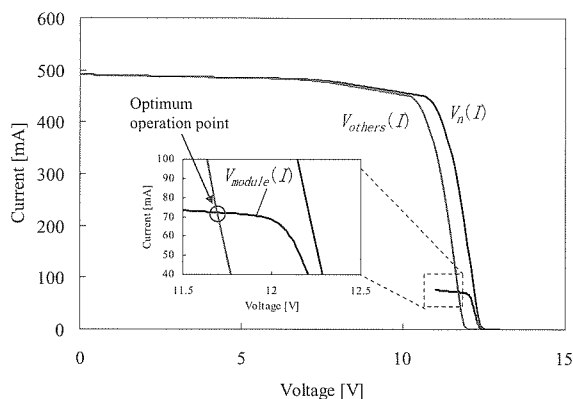


Fig. 4 $V_{module}(I)$, $V_{others}(I)$ and $V_n(I)$ under 32 [% SUN] supplemental bias light and bias light intensities.

図4 実効放射照度 32 [% SUN] の補助バイアス光, バイアス光を照射したときの $V_{module}(I)$, $V_{others}(I)$, $V_n(I)$.

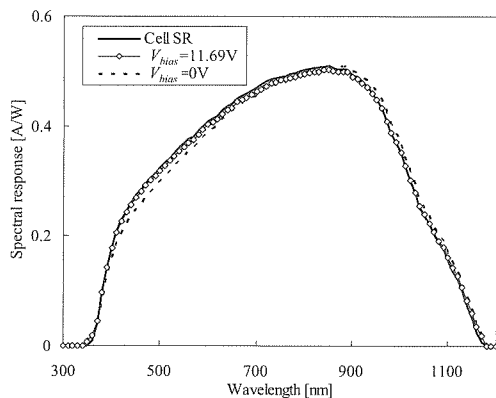


Fig. 5 The SR measured by partial irradiation method under optimum bias voltage, the SR measured under bias voltage=0 [V] and the SR at the same cell with individual contact.

図5 部分照射法により最適バイアス電圧を印加し測定した分光感度, バイアス電圧を 0 [V]としたときの分光感度, 測定対象セルから独立に電極を取り出し直接測定した分光感度。

最適バイアス電圧 (11.69 [V]) を印加した場合, モジュール内のセルから独立に電極を取り出し測定した結果と一致

していることがわかる。このとき, 測定対象セルに印加された電圧を測定した結果は 0.01 [V] で, ほぼ短絡状態であることが確認できた。一方, モジュール全体にバイアス電圧 0 [V] を印加し測定した場合, 測定対象セルに印加された電圧を測定した結果は -11.2 [V] となり, 大きな逆電圧が印加された。また, 直接測定した分光感度と比べ, 特に短波長側の感度に差が生じていることがわかる。この感度の差の原因は, 現状では不明である。

以上の結果より, モジュールの I-V 特性 $V_{module}(I)$ と測定対象外セルの I-V 特性 $V_{others}(I)$ の交点が最適バイアス点であり, 測定対象セルにバイアス光を照射した状態でも最適なバイアス電圧を印加することが可能であることが示された。

4. 補助バイアス光, バイアス光の照射

4.1 概要

補助バイアス光は, 測定対象外セルに照射し, 測定対象セルに比べ十分放射照度の高い光を照射することで, 測定対象セルによって電流を律速させる目的がある。このため, 補助バイアス光の放射照度は, 高いほど良いが, 放射照度が高いほど装置も大型化し, モジュールを加熱するため温度調整が困難になる等の問題も発生する。従来の報告では, 補助バイアス光の実効放射照度を 1/5 [SUN] とした例や⁽⁴⁾, 3-7 [% SUN]⁽³⁾ とした例がある程度で, 詳細な検討はいままで行われていなかった。様々なサイズ, 種類の太陽電池モジュールの分光感度を精度良く測定するためには, 必要な補助バイアス光の照度を明らかにする必要がある。そこで, 本章では, 補助バイアス光及びバイアス光が測定結果に及ぼす影響について定量的に検討した。

4.2 実験と結果

3章の実験と同じ結晶 Si 太陽電池モジュールを用いて実験を行った。実験は, 補助バイアス光, バイアス光を 32 [% SUN], 7.6 [% SUN], 1.2 [% SUN] と変化させ, 3章で述べた方法により, 分光感度を測定した。これらの測定において, 測定中の測定対象セルに印加される電圧はほぼ 0 [V] であることを確認している。測定結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 から, 補助バイアス光とバイアス光の放射照度の減少に従って, 分光感度測定値の絶対値が減少していることがわかる。分光感度の形状の変化を調べるために測定値の最大値で規格化した相対分光感度を Fig. 7 に示す。図から, 相対値はほとんど変化がないことがわかる。

通常, 基準状態での I-V 特性を測定するときに用いるスペクトルミスマッチ補正には, 相対分光感度を用いるが, モジュール内のセルのムラを調べる場合など他の用途に用いる場合には, ある程度正確な絶対値を知る必要があるため, 補助バイアス光とバイアス光が分光感度の測定値に及ぼす影響を検討する必要がある。

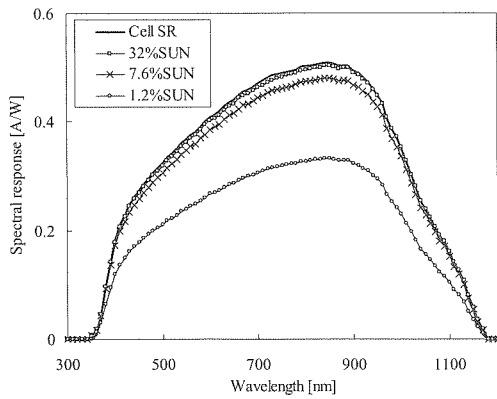


Fig.6 The SR under varying supplemental bias light and bias light intensities (32, 7.6, 1.2 [% SUN]) and the SR at the same cell with individual contact (Cell SR).

図6 補助バイアス光、バイアス電光の実効放射照度を 32, 7.6, 1.2 [% SUN]と変化させた場合の分光感度と、測定対象セルから独立に電極を取り出し直接測定した分光感度(Cell SR)。

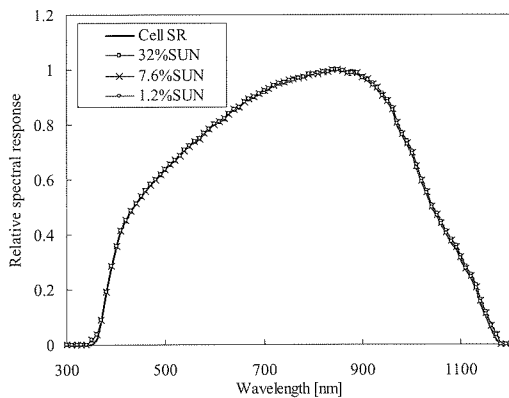


Fig.7 The relative SR under varying supplemental bias light and bias light intensities (32, 7.6, 1.2 [% SUN]) and the relative SR at the same cell with individual contact (Cell SR).

図7 補助バイアス光、バイアス電光の実効放射照度を 32, 7.6, 1.2 [% SUN]と変化させた場合の相対分光感度と、測定対象セルから独立に電極を取り出し直接測定した相対分光感度(Cell SR)。

4.3 考察

2章で述べたように、分光感度は、単色光による間欠電流のみをロックインアンプを用いて測定するため、Fig.6のように、補助バイアス光、バイアス電光の照度変化によって分光感度の絶対値が変化することは、太陽電池セルの場合では考えられない現象である。この原因を調べるために分光感度測定時の動作点の I-V 特性を詳細に検討した。Fig.8 に実効放射照度 7.6 [% SUN]の補助バイアス光とバイ

アス光を照射したときの $V_{module}(I)$ と $V_{others}(I)$ を、Fig.9 に Fig.8 の動作点付近の拡大図を示す。

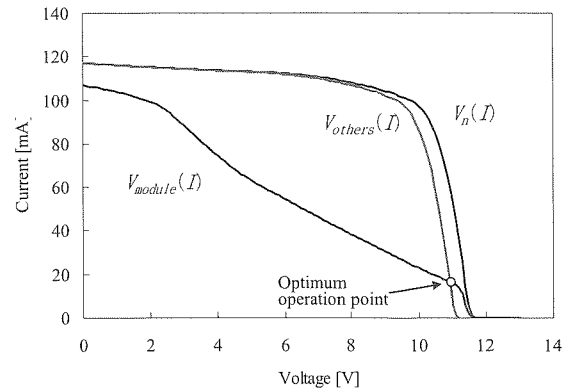


Fig.8 $V_{module}(I)$, $V_{others}(I)$ and $V_n(I)$ under 7.6 [% SUN] supplemental bias light and bias light intensities.

図8 実効放射照度 7.6 [% SUN]の補助バイアス光、バイアス光を照射したときの $V_{module}(I)$, $V_{others}(I)$, $V_n(I)$ 。

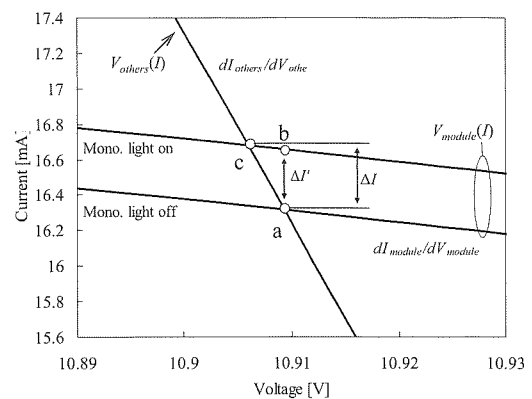


Fig.9 Enlargement view of the I-V curves of Fig. 8 around the operation point.

図9 図8の動作点付近の拡大図。

3章で示した手法を用いてバイアス電圧を決定すると 10.91[V]となり、このときの動作点はFig.9の点aとなる。単色光を測定対象セルに照射すると、 $V_{module}(I)$ は測定対象セルの I-V 特性によって律速されているため、電流が上昇する。測定中のモジュール全体に印加するバイアス電圧 V_{bias} は外部電源で固定されているため、単色光を照射したときの動作点はFig.9の点bとなる。このときの分光感度測定値 SR_{mea} は点aと点b間の電流増加量 $\Delta I'$ と単色光の放射照度 E を用いて下式で表される。

$$SR_{mea} = \Delta I' / E \quad (8)$$

ここで重要なのは、式(8)で表される分光感度測定値

SR_{mea} は、測定対象セルの“真”の分光感度とは異なる、ということである。単色光を照射したときの測定対象セルが短絡状態の動作電圧は、式(4)から、 $V_{module}(I)$ と $V_{others}(I)$ の交点となるため、点cが最適バイアス電圧値となる。従って“真”の分光感度は点aと点c間の電流増加量 ΔI を用いて下式で表される。

$$SR_{mea} = \Delta I / E \quad (9)$$

式(8)、(9)から、Fig.6で示した補助バイアス光、バイアス電圧の放射照度による分光感度の測定値の変化は、 $\Delta I'$ と ΔI の差によって発生したと推測される。そこで、 ΔI と $\Delta I'$ の関係について調べる。

単色光を照射したときの動作点の変化は微小のため、動作点付近のI-V特性を点aを原点とした直線と仮定すると、 $V_{module}(I)$ と $V_{others}(I)$ はそれぞれ、

$$I = dI_{module} / dV_{module} \times V \quad (10)$$

$$I = dI_{others} / dV_{others} \times V \quad (11)$$

となる。便宜上、電圧を電流の関数としている。ここで、 $dI_{others} / dV_{others}$ と $dI_{module} / dV_{module}$ はそれぞれ測定対象外セルとモジュールの動作点付近のI-V特性の傾きである。また、単色光を照射したときのモジュールのI-V特性は、 $\Delta I'$ だけ増加するため、

$$I = dI_{module} / dV_{module} \times V + \Delta I' \quad (12)$$

となる。また、点cの電流値 I は、点aを原点と仮定したため、式(11)と式(12)の I を ΔI とし、2式を用いて ΔI について解くと、 ΔI と $\Delta I'$ の関係は下式で示される。

$$\Delta I = \Delta I' \frac{\frac{dI_{others}}{dV_{others}}}{\frac{dI_{others}}{dV_{others}} - \frac{dI_{module}}{dV_{module}}} \quad (13)$$

式(8)、(9)、(13)から、“真”の分光感度と測定値との関係は式(14)で示される。

$$SR = SR_{mea} \frac{\frac{dI_{others}}{dV_{others}}}{\frac{dI_{others}}{dV_{others}} - \frac{dI_{module}}{dV_{module}}} = SR_{mea} \times \alpha \quad (14)$$

ここで α を律速率と呼ぶことにする。式(14)を用いて、

各条件でのI-V特性の傾きを求め、律速率を計算した結果をTable1に示す。放射照度の低下に従って律速率が増加していることがわかる。この律速率を用いて、式(14)より分光感度測定値を補正した結果をFig.10に示す。補正後の各補助バイアス光とバイアス光で測定したときの分光感度は、直接測定した分光感度と各波長で±2%以内の差ではほぼ一致した。この結果から、分光感度を測定する際に生じる絶対値の変化は、I-V特性の傾きに起因するものであり、実験結果を基に補正することでモジュール分光感度の絶対値を計算できることが示された。

Table 1 Slope and α of measured conditions.

表1 各条件での傾きと律速率。

Effective irradiance of bias light and supplemental bias light	32 [%SUN]	7.6 [%SUN]	1.2 [%SUN]
dI_{others}/dV_{others} [mA/V]	-422.09	-107.27	-11.91
dI_{module}/dV_{module} [mA/V]	-6.25	-6.60	-4.23
α	1.02	1.07	1.55

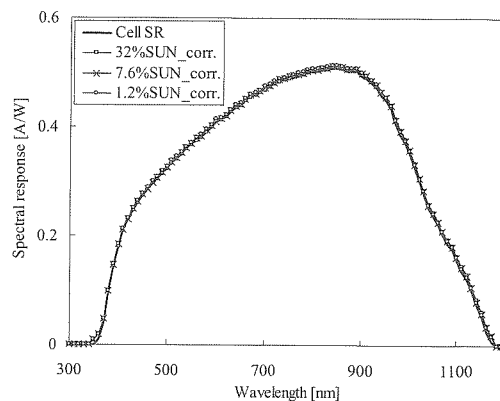


Fig.10 Corrected SR and SR at the same cell with individual contact.

図10 分光感度の絶対値を補正した分光感度と、測定対象セルから独立に電極を取り出し直接測定した分光感度(Cell SR)。

動作点付近のI-V特性の傾きが電圧や照度に対して非線形である場合や、I-V特性が入射光の波長によって変化する場合は、単色光がONの場合とOFFの場合の dI_{others}/dV_{others} と dI_{module}/dV_{module} は、単色光の放射照度や波長によって変化するため、律速率 α は一定ではなくなる。この場合、分光感度の絶対値だけでなく、相対値も変化する。Fig.11は補助バイアス光の実効放射照度が0.05 [%SUN]と非常に低く、動作点付近のI-V特性の傾きが電圧や照度に対して非線形である場合の分光感度測定結果である⁽⁸⁾。直接セル

の分光感度を測定した場合と比べて絶対値、相対値ともに大きく異なることがわかる。この場合、式(14)による補正はできない。これは、補助バイアス光の実効放射照度が低いときだけでなく、測定対象セルに高い実効放射照度のバイアス光を照射した場合においても起こり得る現象である。従ってモジュールの分光感度を正確に測定するためには、補助バイアス光の放射照度を高くするか、測定対象セルの照射面積を調整することで、動作点付近のI-V特性の傾きを線形とする必要がある。

以上より、補助バイアス光及びバイアス光は、その放射照度によってI-V特性の傾きを変化させ、測定値を増減させる要因となることが明らかになった。

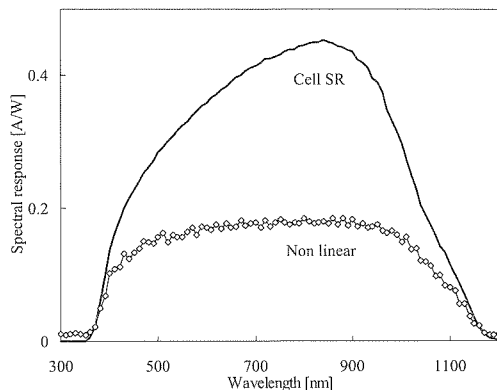


Fig. 11 The SR of the module when $V_{others}(I)$ is nonlinear (Nonlinear) and the SR at the same cell with individual contact (Cell SR).

図11 動作点付近のI-V特性が非線形なときの分光感度測定結果(Non linear)と、測定対象セルから独立に電極を取り出し直接測定した分光感度(Cell SR)⁽⁸⁾。

5. 薄膜多接合太陽電池モジュールの分光感度測定

5.1 概要

本章では本研究の手法による薄膜多接合太陽電池モジュールの分光感度測定について検討する。Fig. 12に薄膜太陽電池モジュールの分光感度測定の概要を示す。薄膜太陽電池は、結晶Si太陽電池モジュールと異なり、集積型構造をとっていることが一般的である。従って細長い形状の測定対象セルの全面に単色光を照射することは困難である。そこで、セルの一部に単色光を照射し、単色光を照射しない部分はマスクを用いて補助バイアス光の入射を防ぐようにした。このマスクは、3章で述べたように測定対象セルを暗状態にする必要がないため、このマスクで補助バイアス光を完全に遮る必要はなく、測定対象セルで電流律速するように調整する程度で十分である。

5.2 実験

a-Si/ μ c-Si タンデム太陽電池モジュールを用いて測定

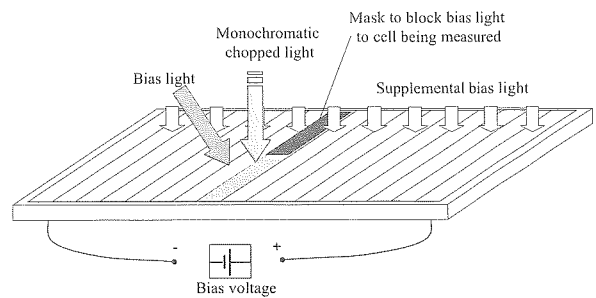


Fig. 12 Schematic setup of SR measurements for thin film modules.

図12 薄膜太陽電池モジュール分光感度測定の概要。

を行った。用いた太陽電池モジュールは、通常のモジュールの各セルから電極を独立に取り出した特注のモジュールを使用した。比較のため、①測定対象セルの分光感度を独立に取り出した電極から直接測定(太陽電池セルの分光感度測定と同等の方法)②式(3)及び式(6)より算出した最適バイアス電圧を印加し部分照射法により測定③モジュール全体にバイアス電圧0[V]を印加し部分照射法により測定、の3種類の測定を行った。

補助バイアス光としてピーク波長470[nm]と660[nm]の2色のLEDからなる光源を用いた。これは細長い形状のセルに均一に補助バイアス光を照射するためである。また、2色用いることで、トップセル、ボトムセル両方のセルを発電させることが可能である。この光源の実効放射照度は、各色約12[% SUN]である。単色光及びバイアス光の照射面積は40mm×9mmとし、セルの一部の分光感度を測定した。多接合太陽電池モジュールの分光感度測定では、測定対象セルのトップセルの分光感度を測定するかボトムセルの分光感度を測定するかを、カラーバイアス光の分光スペクトルによって選択する。トップセルを測定する場合にはトップセルの光電流<ボトムセルの光電流となるようなカラーバイアス光を照射し、ボトムセルを測定する場合にはその逆にする必要がある。本研究では、バイアス光の光源には、キセノンランプを用い、放射照度は100[mW/cm²]とした。カラーバイアス光として、トップセルの測定にはR72(HOYA製)を、ボトムセルの測定にはB390(HOYA製の光学フィルタを用いた。測定手順は前章までの内容と同様である。なお、多接合太陽電池における分光感度の基本的な測定方法については文献⁽⁹⁻¹²⁾に従っている。

5.3 結果

トップセル測定時の $V_{module}(I)$ と $V_{others}(I)$ 、 $V_n(I)$ をFig. 13に、及び動作点付近の拡大図をFig. 14に示す。図から最適バイアス電圧は、12.014[V]とした。

Fig. 15に測定結果を示す。比較を容易にするため、太陽電池セルの分光感度を独立の電極から直接測定した値の最大値を1とした相対分光感度で示している。最適バイアス電圧を印加した場合、直接測定した分光感度に比べ絶対値

が減少していることがわかる。このとき、測定対象セルに印加された電圧は -60 [mV]でほぼ短絡状態であることを確認している。また、 0 [V]を印加した場合は絶対値は大きく減少し、正しく測定できなかった。

Table 2 に Fig. 14 の I-V 特性の傾きから計算した律速率の計算結果を示す。結晶 Si に比べ dI_{others}/dV_{others} が小さいことがわかる。これは、太陽電池の材料の特性によるものの他に、集積型太陽電池モジュールの構造上の都合から、補助バイアス光をセル全面ではなく一部に照射したため、放射照度が低かったことによるものである。しかしながら Fig. 14 より、動作点付近の I-V 特性はほぼ線形であるため、相対分光感度の誤差はほとんどない (Fig. 16)。

次に、式 (14) を用いて測定値の補正を行った結果を Fig. 17 に示す。補正後の分光感度は、直接測定した分光感度と各波長で $\pm 2\%$ 以内の差でほぼ一致した。この結果から、提案手法は結晶 Si 太陽電池モジュールだけでなく、薄膜太陽電池モジュールにも適用可能であると言える。

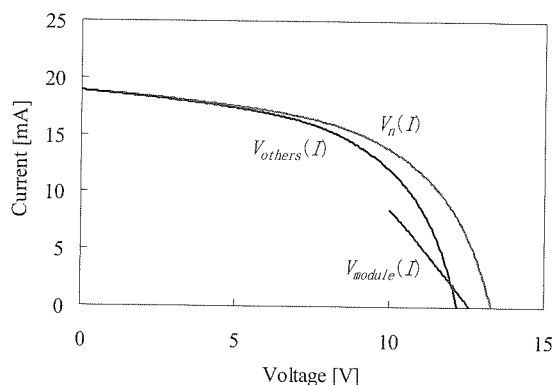


Fig.13 $V_{module}(I)$, $V_{others}(I)$ and $V_n(I)$ for top cell measurements.

図 13 トップセル測定時の $V_{module}(I)$, $V_{others}(I)$, $V_n(I)$ 。

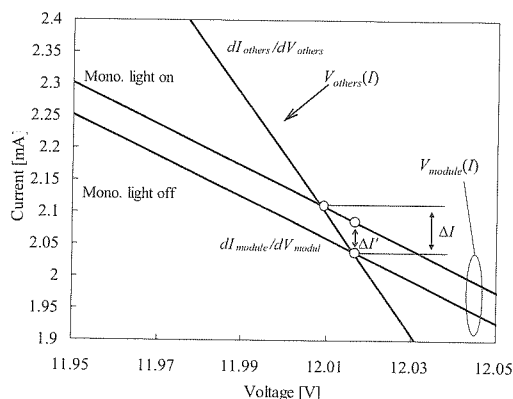


Fig.14 Enlargement view of the I-V curves of Fig. 13 around the operation point.

図 14 図 13 の動作点付近の拡大図。

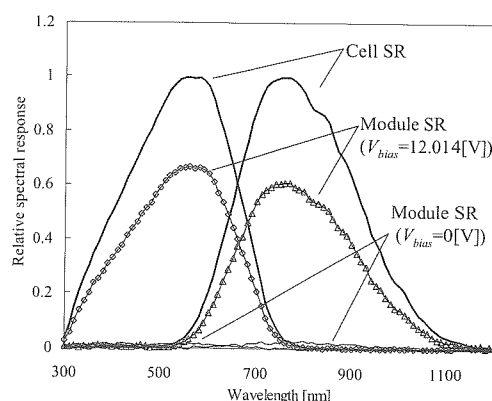


Fig.15 The SR measured by partial irradiation method under optimum bias voltage, the SR measured under bias voltage=0 [V] and the SR at the same cell with individual contact.

図 15 部分照射法により最適バイアス電圧を印加し測定した分光感度、バイアス電圧を 0 [V] としたときの分光感度、測定対象セルから独立に電極を取り出し直接測定した分光感度。

Table 2 Slope and α of the measured conditions.

表 2 各条件での傾きと律速率。

Measured cell	Top cell	Bottom cell
dI_{others}/dV_{others} [mA/V]	-9.53	-8.27
dI_{module}/dV_{module} [mA/V]	-3.26	-3.20
α	1.52	1.63

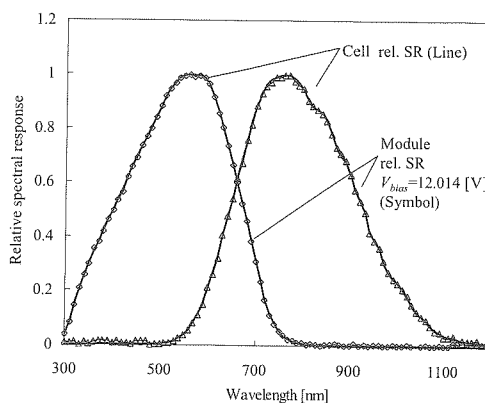


Fig.16 Relative SR measured by partial irradiation method and the relative SR at the same cell with individual contact.

図 16 測定対象セルから独立の電極を取り出し直接測定した相対分光感度と、最適バイアス電圧を印加した場合の相対分光感度。

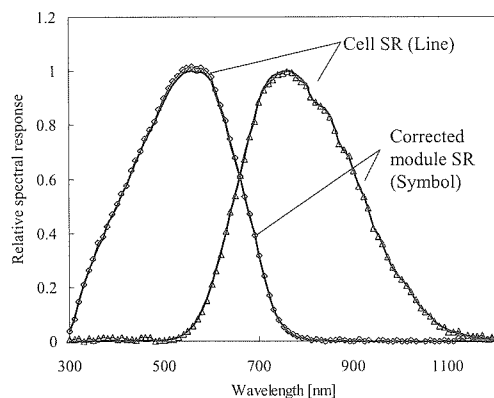


Fig.17 Corrected SR and the SR at the same cell with individual contact.

図 17 式(14)を用いて分光感度を補正したときの分光感度と測定対象セルから独立の電極を取り出し直接測定した分光感度。

6. まとめと今後の課題

本研究では、部分照射法による太陽電池モジュールの分光感度測定に関する基本的な原理を検討し、実験的にその測定精度を検証した。

まず、部分照射法に必要なバイアス電圧について最適なバイアス電圧の設定方法を検討した。バイアス電圧は、測定セルを短絡状態等の希望の動作状態にするためにモジュールの出力端に印加するものであるが、本報告ではその値の実験的な算出方法を具体的に提案した。結晶 Si 太陽電池モジュール、薄膜多接合太陽電池モジュールを用いた実験によりほぼ希望の動作状態に設定可能であることを確認した。

次に補助バイアス光、バイアス光が測定結果に及ぼす影響を検討した。実験では、補助バイアス光、バイアス光の放射照度を低くすると、モジュール状態で測定した分光感度の絶対値が低下する傾向があることが確認された。そこで、動作点付近の I-V 特性に着目したところ、モジュール全体の I-V 特性と測定対象外セルの I-V 特性の傾きの比率が分光感度測定値に影響していることを I-V 特性の理論的な計算により示し、これを実験的に確認した。さらにその検討結果を用いて測定した分光感度を補正して測定精度を改善できる方法を明らかにした。また、補助バイアス光の照度が不足すること等により動作点付近の I-V 特性が非線形の場合、測定値は相対値、絶対値共に“真”の分光感度とは異なるため、注意が必要であることも明らかとなった。

最後に、本提案手法の集積型の薄膜太陽電池モジュール及び多接合太陽電池モジュールへの適用性を検討した。a-Si/ μ c-Si タンデム太陽電池を用いて測定を行ったところ、上記の補正後の分光感度は直接測定値とほぼ等しく、本研究のモジュール分光感度測定方法が、これらのモジュールにも適用可能であることを確認した。

以上より、部分照射法の測定原理と具体的な測定方法、測

定条件を明確化し、太陽電池モジュール内の一部の分光感度を、出力端から非破壊で測定可能であることを明らかにした。今後は、他の種類の太陽電池モジュールの分光感度測定についても測定精度の検証を行う予定である。

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託され実施したものである。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) U. Bahrs, W. Zaiman, M. Mertens and H. A. Ossensbrink, AUTOMATIC LARGE AREA SPECTRAL RESPONSE FACILITY, 14th EUPVSEC Barcelona, (1997)
- (2) H. Mulleijans, T. Wagner, F. Merli, A. Jager-Waldau, and E.D. Dunlop, Changes in spectral response with temperature and irradiance intensity, *Thin Solid Films* **451-452** (2004) 145-151
- (3) K. Emery, D. Dunlavy, H. Field, and T. Moriarty, Photovoltaic Spectral Responsivity Measurements, *Proceedings of the 2nd WCPEC*, Vienna, (1998) 6-10.
- (4) J. Hohl-Ebinger and W. Warta, Investigation of Large Area Cell and Module Spectral Response Measurement, 19th EUPVSEC, Paris, France (2004) 2611.
- (5) S. Janki, F. P. Baumgartner, J. Meier, A. Huegli, A. Büchel, Spectral Photocurrent Measurement Techniques for Thin Film Modules, 19th EUPVSEC Paris (2004)
- (6) J. Sutterluti, S. Jankil, A. Hugli, J. Meier, F. P. Baumgartner, Mapping of the Local Spectral Photocurrent of Monolithic Series Connected a-Si:H pin Thin Film Solar Modules, 21st EUPVSEC Dresden (2006) 1749-1752
- (7) 太陽光発電技術研究組合, (株)鐘淵化学工業, 平成 12 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書「太陽光発電システム実用化技術開発 薄膜太陽電池の製造技術開発」(2001)
- (8) 津野, 菱川, 黒川, 部分照射による太陽電池モジュールの分光感度測定原理の検討, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (2007)
- (9) M. Meusel, C. Baur, G. Letay et al, Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: measurement artifacts and their explanation, *Prog. Photovol: Res. Appl.* **11** (2003) 499-514.
- (10) Y. Hishikawa and S. Igari, Characterization of the I-V curves of multi-junction solar cells/modules by high-fidelity solar simulators and their irradiance dependence, *Proceedings of the 19th EUPVSEC* (2004) Paris.
- (11) J. Burdick and T. Glatfelter, Spectral response and I-V measurements of tandem amorphous-silicon alloy solar cells, *Solar Cells*, **18** (1986) 301-314.
- (12) Y. Hishikawa, Characterization of The Silicon-Based Thin Film Multi-Junction Solar Cells, *MRS Symposia Proceedings* **862** (2005) 579-590.