

離散光波長型 LED ソーラシミュレータの原理実験

学生員 公楽省吾 (東京農工大学)

会員 黒川浩助 (東京農工大学)

A method for solar cell measurement using LED and results of the measurement of mono-crystalline Si solar cell

Shogo KOHRAKU and Kosuke KUROKAWA

Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, JAPAN
Tel & Fax: +81-42-388-7445, E-mail: kohraku@cc.tuat.ac.jp

ABSTRACT

A method for solar cell is important for R. & D., pricing and PV system maintenance and so on. At present, in measuring solar cells, a solar simulator with Xenon and Halogen lamps is used at most laboratories, but the facility is so large and so expensive. Therefore, a measuring device using LED lamps is proposed. That has the advantage of small, low-cost and portable. The main objective of this study is to evaluate the capability of LED's measuring device by experiment.

キーワード: 太陽電池, 測定法, 発光ダイオード

Keywords: Solar Cell, Measuring Method, LED(Light Emitting Diode)

1. はじめに

太陽電池の性能評価は、太陽電池セルの研究開発だけでなく価格決定や太陽光発電システムの保守管理においても重要である。現在は、キセノンランプやハロゲンランプを使って自然太陽光を模擬したソーラシミュレータでの測定が一般的だが、これらはランプ寿命が短いことや消費電力が多いことで測定コストがかかってしまう。また、光学系や放熱対策が必要となるために設備全体が大きくなることにより測定できる場所が限られてしまう、といった問題がある。

本研究では、近年、照明用や信号機などにも使われるようになってきた発光ダイオード(LED)を用いた太陽電池測定方法の提案を行っている。LEDを光源として用いることで、発光効率が高く省エネルギーであることや、測定装置の小型化により場所を選ばずに測定が可能となること、寿命が長くコストの低い簡易な測定装置として利用できることが期待される。また、LEDの技術発達が目覚ましく、年々高輝度のLEDが開発されていくと考えられるため、今後、ソーラシミュレータに代わる基準測定器としての可能性についても検討をしていく。今回は、測定方法の概要と試作器による実測結果について報告を行う。

2. 研究概要

太陽電池の性能評価は、基準状態(AM1.5全天放射スペクトル(AM1.5G), $100[\text{mW}/\text{cm}^2]$, $25[^\circ\text{C}]$)において測定が行われるのが一般的であり、ソーラシミュレータでは自然太陽光スペクトルに近い特性を持つキセノンランプやハロゲンランプを組み合わせることにより、基準状態を再現するような設計が成されている。これらのランプと比べ、LEDは放射照度が十分小さいことや、発光波長幅が狭い輝線スペクトルを持つため、AM1.5Gの再現ではない別の太陽電池評価方法を提案する。

太陽電池の発電には照射光の分光放射照度特性と測定セル側の分光感度特性が関わっている。通常の測定においては自然太陽光に十分近い分光放射照度分布を持ったソーラシミュレータで照射を行うため、分光感度について考慮する必要がなく、得られた出力の良し悪しそのまま太陽電池の評価となる。そこで、LEDが単色光発光であることを活かし、分光感度を推定することにより太陽電池の発電量評価を行うこととした。

3. LED 測定器の概要

3.1 使用する LED の選別

LEDを用いた測定装置では分光感度の推定を行うために異なる波長のLEDを複数備えることとした。また、バイアス光として白色LEDを用いるものとする。波長の異なるLEDを同一面上に並べて照射を行う場合、どの波長においても照度むらがないように照射面積や照射距離、LED設置間隔を決定する必要がある。照度シミュレーションにより⁽¹⁾最適なLEDの配置を算出した。種類は4色(青(ピーク波長: $\lambda_p=470[\text{nm}]$), 赤($\lambda_p=646[\text{nm}]$), 赤外($\lambda_p=950[\text{nm}]$), 白)とし、指向角度が $30 \sim 35[\text{deg}]$ の砲弾型LEDを用いた。白色LEDのみ 3のものを使用し、その他のLEDは 5を使用した。測定装置全体を図1に示す。



Fig.1 Measuring device using LED

3.2 測定器の仕様

測定器の設計においては面積 100×100 [mm²]の太陽電池を対象とした。各色LEDを7.62 [mm]間隔で正方形に配置したものを1単位としてそれぞれ15.24 [mm]間隔になるようにし、どの色についても等間隔に配置した。光源の総面積は約 205×205 [mm²]となり、LEDの使用数は一色あたり196個、合計784個となった。配置図を図2に示す。照射高さはスペーサを用いて調節するものとする。

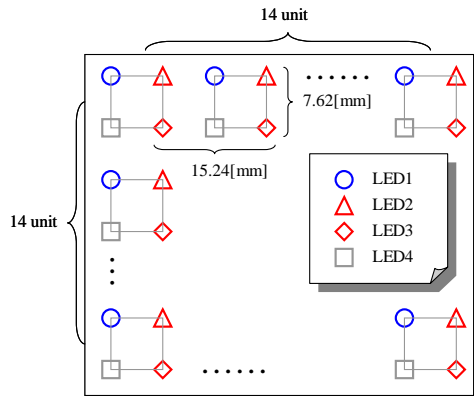


Fig.2 Arrangement of LED

4. LED測定器の性能評価

試作した測定器の照射特性を把握するため、各色ごとの照度むらと、入力に対する放射照度を分光器を用いて測定した。

4.1 照度むらの測定

太陽電池の測定においては、測定面全体に対して均一に光を照射させる必要があることから、JISによっても照度むらの規定がされている。試作光源についても、照度シミュレーションにより十分ばらつきの少ない照射が行えるように設計したが、測定を行う前に実際の光源における照度むらを把握する必要がある。測定面を25点に分割し、照度計を用いて各点での放射照度を測定した。LEDの各波長ごとの照度むらと照射高さを変化させた時の関係を図3～図6に、照度むらの算出結果を表1に示す。

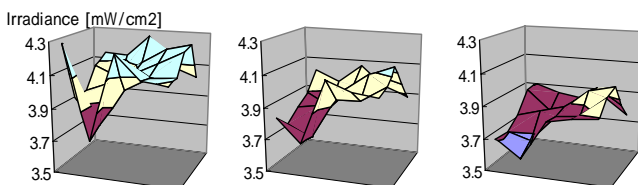


Fig.3 Irradiation unevenness of Blue LED
(Irradiation height=64,79,94 [mm] from the left)

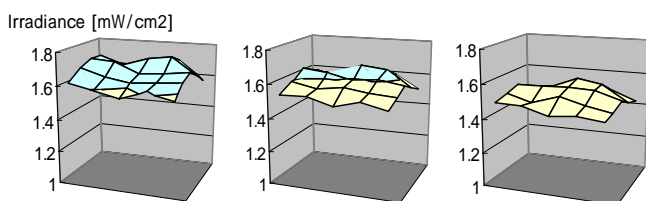


Fig.4 Irradiation unevenness of Red LED
(Irradiation height=64,79,94 [mm] from the left)

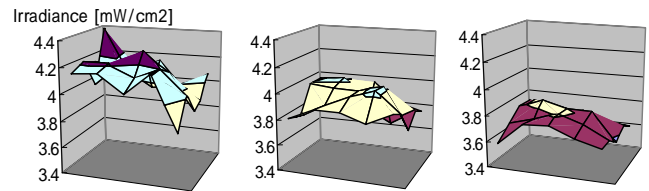


Fig.5 Irradiation unevenness of Infrared LED
(Irradiation height=64,79,94 [mm] from the left)

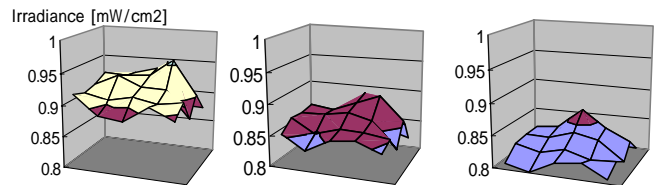


Fig.6 Irradiation unevenness of White LED
(Irradiation height=64,79,94 [mm] from the left)

Table 1 Irradiation unevenness by each color of LED

Irradiation height [mm]	64	79	94
Blue	7.14%	5.71%	5.35%
Red	5.17%	4.86%	5.08%
Infrared	7.26%	4.57%	4.67%
White	4.70%	4.67%	4.58%

それぞれの波長ごとに照射高さに因らない照度むらが見られたが、これらはLEDの個体差や設置の際の光軸のずれなどが原因であると考えられる。今後、光源作製の際にはLEDを光度別を選別する必要がある。照度むらは約5%程度存在し、JISにおけるソーラシミュレータ基準では等級Cを満たしている。

4.2 LED順電流と放射照度

太陽電池は照射する放射照度の強度、波長によって発電量が異なる分光感度特性を持っている。光源がどれだけの放射照度で太陽電池を照射しているかを把握するため、LED順電流に対する放射照度を分光器を用いて測定を行った(図7～図10)。いずれのLEDにおいても入力電圧に比例した放射照度であることから、これらの関係を一次関数に近似し、以後の放射照度算出に用いた。LEDの放射照度は、順電流以外にもケース温度による依存性を持っている。発光による温度上昇を防ぐため、長時間の照射は行わず、短い点灯時間で測定を行った。

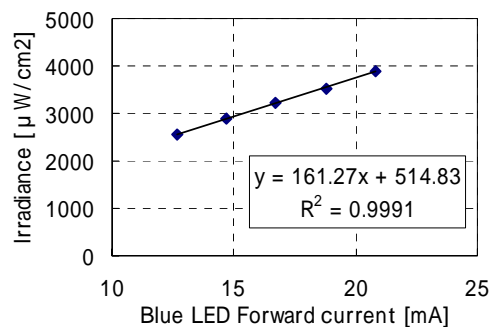


Fig.7 Function of Blue LED I_f and Irradiance

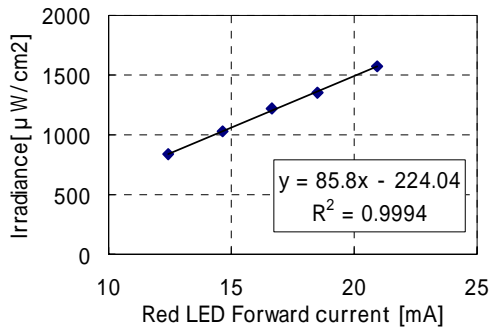


Fig.8 Function of Red LED I_F and Irradiance

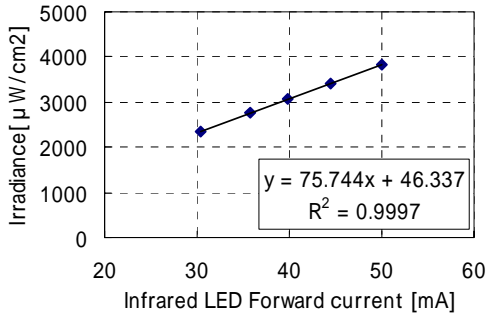


Fig.9 Function of Infrared LED I_F and Irradiance

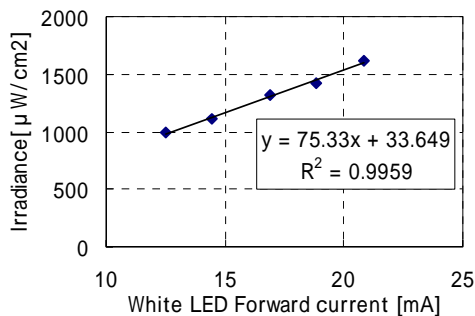


Fig.10 Function of White LED I_F and Irradiance

5. 単結晶Si 太陽電池の測定

セル面積 100×50 [mm²] が2直列の単結晶Si 太陽電池を用いて、IV特性ならびに分光感度特性の測定を行った。照射高さは84 [mm] とした。

5.1 IV特性の測定

単結晶Si 太陽電池においては照射光波長の依存性がないものとし、放射照度を変化させた時のIV特性の測定を行った。青色LEDの放射照度を変化させた時のIV特性を図11に示す。

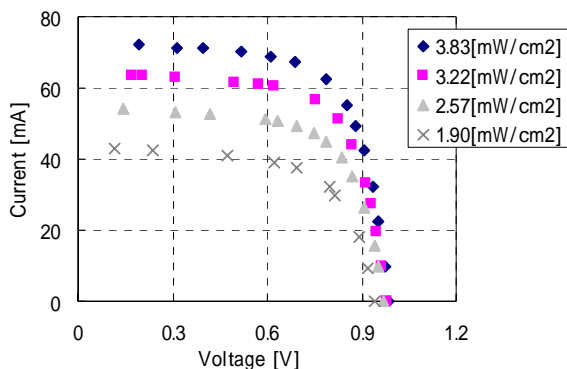


Fig.11 IV characteristics of a crystalline Si solar cell by Blue LED

5.2 分光感度の測定

太陽電池は照射光波長によって発生する光電流が異なる分光感度特性を持っており、LEDが固有の輝線スペクトルを持つ光源であることを利用し、分光感度を推定した。

5.2.1 離散分光感度の測定

始めに、白色光を照射した時の短絡電流 $I_{sc,w}$ を測定し、任意の単色光を重畳した時の $I_{sc,w+color}$ との差を照射単色光によって発生した光電流とする。得られた光電流を入射した単色光の放射照度で除することにより、照射光波長における絶対分光感度を算出するものとする(式(1))。ここで、LEDの波長特性は半値幅が約20~50 [nm]であったが、今回はピーク波長における分光感度とした。放射照度を変化させた時の分光感度の実測結果を図12に示す。測定時のLEDの放射照度は0.9~6.0 [mW/cm²] の範囲であった。

単色光とバイアス光強度を変化させた場合も、ほぼ等しい結果となった。単結晶Siでは分光感度の照射光強度依存性がほとんどないため、LEDのような微弱光によっても分光感度を算出することができた。

分光感度: $SR(\lambda)$ [A/W]

$$= \frac{(\text{単色} + \text{バイアス光照射時の } I_{sc} [\text{mA}]) - (\text{バイアス光のみ照射時の } I_{sc} [\text{mA}])}{\text{単色光の放射照度} [\text{mW} / \text{cm}^2] * \text{照射面積} [\text{cm}^2]} \dots (1)$$

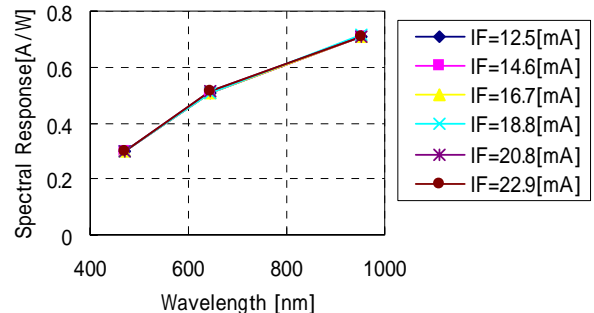


Fig.12 Discrete spectral response of a crystalline Si solar cell by several I_F

5.2.2 分光感度曲線の推定

5.2.1より得られた離散分光感度を用いて分光感度曲線全体の推定を行う。少数キャリア連続の方程式⁽²⁾より導出される光電流の式と実験値をフィッティングさせることにより、離散点間の分光感度の補完を行った。推定した分光感度曲線を図13に示す。

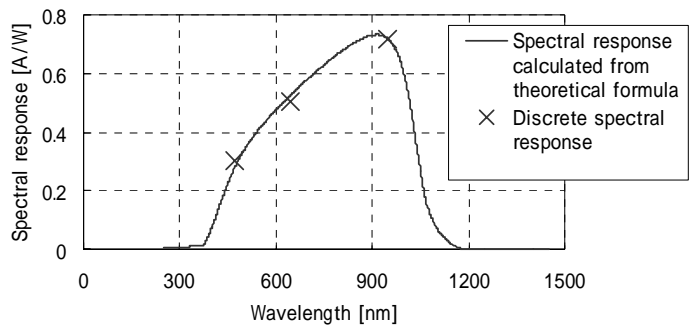


Fig.13 Discrete spectral response and spectral response calculated from theoretical formula

5.3 基準太陽光照射時の IV 特性補正

以上の手順により得られた IV 特性と分光感度特性を用いて、基準太陽光照射下における IV 曲線の推定を行う。LED の照射光強度は基準太陽光と比べて 1/10 と弱いため、照度補正を行った⁽³⁾。補正の式は、

$$V_2 = V_1 (= V_3)$$

$$I_2 = I_1 + (E_2 - E_1) \cdot \frac{I_3 - I_1}{E_3 - E_1} \dots (2)$$

ただし、 E_1, V_1, I_1 および E_3, V_3, I_3 は既知の IV 特性の放射照度、電圧および電流であり、 E_2, V_2, I_2 は未知の IV 特性の放射照度、電圧および電流である。なお、LED の放射照度 E_1, E_3 で測定を行った IV 特性から、基準太陽光分光放射照度 E_{sun} で照射を行った場合の IV 特性を推定するため、次の式 (3) を満たすような E_2 を導出したうえで照度補正を行った。

$$\int_0^{1200} E_{sun}(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} A \cdot E_{R,LED}(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda = I_{sc,1-Sun}$$

$$A \cdot \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_{R,LED}(\lambda) d\lambda = E_2 \dots (3)$$

ただし、 $E_{sun}(\lambda)$ 、 $E_{R,LED}(\lambda)$ 、 $SR(\lambda)$ 、 A 、 $I_{sc,1-Sun}$ はそれぞれ基準太陽光分光放射照度分布、LED の相対分光放射照度分布、5.2.2 で推定した分光感度、LED 放射照度係数、基準太陽光照射下での短絡電流とし、 λ_1, λ_2 は照射単色光の最大、最小波長とする。なお、単結晶 Si 太陽電池においては、放射光の波長・強度依存性はないものとした。

次に、実験で得られた IV 特性を太陽電池の等価回路⁽⁴⁾による IV 特性式 (4) にフィッティングさせ、式 (2) を用いて補正を行った。

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right\}$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left\{ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{nk_B T}\right) - 1 \right\}} \dots (4)$$

ただし、 I_{sc}, I_0, V_{oc} はそれぞれ太陽電池セル短絡電流、ダイオード飽和電流、太陽電池セル開放電圧、 q, k_B, T は電子の電荷量 ($=1.6 \cdot 10^{-19}$ [C])、ボルツマン定数 ($=1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K])、セル温度 [K] とし、 n を変数としてフィッティングを行った。基準太陽光照射時の IV 特性の補正結果を図 14 に示す。

推定した分光感度曲線を用いて、基準太陽光照射下の IV 特性 (太線) を予測することができた。測定セルの定格と補正による値を表 2 に示す。定格値と比べて低い推定値となったが、LED の微弱光を利用した照度補正による IV 特性推定方法を示すことができた。

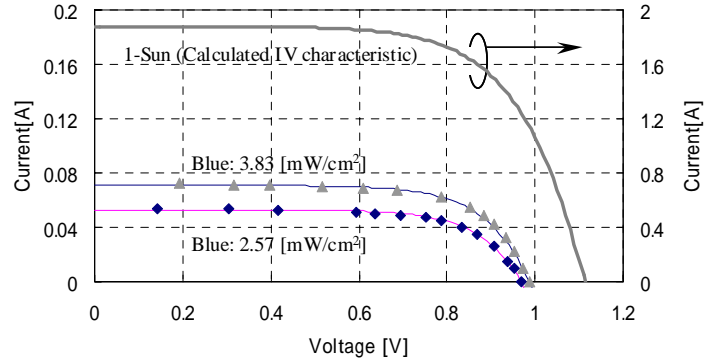


Fig.14 Results of experimental and calculated under 1-Sun IV characteristics

Table 2 Rated and calculated value

	Rated value	Calculated value
Isc [A]	1.95	1.88
Voc [V]	1.20	1.11
F.F.		0.67

6. 結論

4 つの異なる波長を持つ LED を用いて、太陽電池の IV 特性、分光感度特性の測定を行い、太陽電池測定の手順、測定精度について検討した。従来のような自然太陽光を模擬した測定法ではなく、LED の輝線スペクトル特性を利用した手法により、1/10-Sun 程度の微弱光照射下においても太陽電池出力の評価が行えることが明らかになった。

謝辞

本研究において、産業総合技術研究所の菱川善博博士にアドバイスを頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 公衆：「LED ソーラシミュレータによる太陽電池新測定法」平成 15 年電気学会全国大会 (2003) 227
- (2) 小長井：『半導体物性』倍風館 (1992) 239
- (3) 菱川、井村、大城：「結晶 Si 太陽電池の IV 特性における照度依存性および照度補正」平成 12 年電気学会全国大会 (2000) 3440
- (4) 浜川、桑野：『太陽エネルギー工学』倍風館 (1994) 26