

エレクトロルミネセンス法による太陽電池モジュールの屋外評価

石河 泰明

太陽光発電の発電部分を担う太陽電池モジュールの発電性能評価の重要性が増している。本稿では、発電性能評価法の1つであるエレクトロルミネセンス (EL) 法を屋外環境でも利用可能とする技術を紹介する。結晶 Si 太陽電池からの EL を検出するイ

メージセンサの露光と注入電流の同期を行い、適切な光学バンドパスフィルタを用いることで、高照度環境下でも EL 像取得が可能となる。また、EL 強度による太陽電池特性の定量化として、開放電圧値の推定結果を紹介する。

1. まえがき

太陽光発電 (Photovoltaics: PV) の導入が世界的に進んでいる。世界年間導入量は、2020 年には 760 GW に達し、我が国の年間導入量は、8.2 GW と見積もられている¹⁾。導入された太陽光発電設備は、20 年以上の安定的な稼働が期待されるが、その出力管理法としては、日々の出力変動や発電部分を担う太陽電池モジュールの目視検査が主であり、発電性能異常の積極的検知はあまり進んでいない。異物の付着や何らかの物理的衝撃で発生する太陽電池モジュールの破損 (表面強化ガラスの割れなど)、落雷などで発生するモジュール裏バックシートの焦げなどは外観で判別でき、これら太陽電池モジュールの破損は安全性に直結するため早急な交換が必要となる。一方、メガソーラー発電所で見られる電圧誘起劣化現象 (Potential Induced Degradation: PID) のような急激に出力低下が進む劣化モードなど、目視検査では判別できない発電性能の劣化も存在する。製造過程や屋外への設置過程等で入る太陽電池内のマイクロクラックは、長期信頼性にも影響する²⁾。世界的に太陽光発電の重要性が高まる時代において、一般的な検査手法に加え、より精密に発電性能を検査する方法の必要性が増している。太陽電池モジュールを設置場所から移動させずに“その場”検査する手法の開発も重要である。

太陽電池の発電性能評価方法の1つにエレクトロルミネセンス (Electroluminescence: EL) 法がある。多くの太陽電池は PN 接合により正孔・電子を分離して発電する機構を採っているが、素子構造は LED (Light Emitting Diode) と同様である。太陽電池に正方向に電流を注入することで、LED のように発光させることができる。一般的な太陽電池の場合、結晶 Si を光吸収層に利用しているため、波長 1100 nm 近傍の発光が得られる。電極の不良や素子内に欠陥が存在すると、発光が効率良く行われず、欠陥が少ないなど良好な部分は効果的に発光する。これをイメージセンサ (カメラ) で撮像する

と、明暗像として素子の発電性能を簡便に評価できる。冬木隆先生の研究グループが 2006 年に本手法を報告して以来³⁾、太陽電池および太陽電池モジュールの製造工程の管理法として活用が広く進んでいる。

EL 法に加えて、その他の太陽電池発電性能診断に用いられている手法例を表 1 に紹介する。太陽光を光源として利用し、電流電圧特性を評価する方法が一般的である。日々の出力変化がモニタできるメリットもあるが、ストリング単位で評価している場合は、特性変化が発生しているモジュールの特定はできない。また、出力特性から読み取れるパラメータだけでは素子内部で発生している劣化モードを判断するのは困難であり、他手法との組み合わせが必要である。更に、ある程度の太陽光強度がないと出力特性が得られないため、常に利用できる方法ではない。サーモグラフィ法は、太陽光照射により太陽電池モジュール内で発生した電流による発熱分布を

表 1 各種評価方法の特徴。

| 手法 | 特徴 |
|------------------------------|--|
| 電流電圧特性評価 | 太陽光を光源として利用し、特性評価。一般的な手法。ある程度の太陽光強度が必要。 |
| サーモグラフィ法 | 太陽光照射で発生する電流による発熱分布評価。簡便な評価。ある程度の太陽光強度が必要。 |
| エレクトロルミネセンス法 ^{2~5)} | 太陽電池へ電流注入して、太陽電池からの発光を画像化。素子材料・評価環境によっては像取得に工夫が必要。 |
| フォトルミネセンス法 ^{6~8)} | 太陽光を光源として利用し、光吸収層の発光を画像化。素子材料・評価環境によっては像取得に工夫が必要。電気的特性との比較も必要。 |

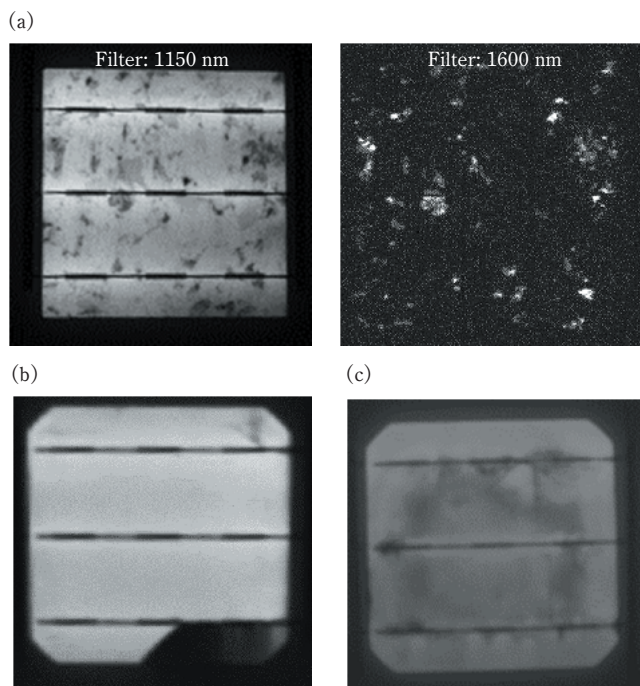


図1 結晶 Si 太陽電池に対する各種 EL 分析例。(a)多結晶 Si 太陽電池の結晶欠陥分析、(b)モジュール化後のクラック、断線の様子、(c)電圧誘起劣化分析。

サーモグラフィカメラにより分析するものである。配線不良やセル割れによる発熱箇所が特定でき、簡便に撮像できるため利用が進みつつある。一方、ある程度の電流量が検査には必要なため、太陽光強度が低いときは利用できない。近年、研究例としてフォトルミネセンス (Photoluminescence: PL) 法の報告が増えている。太陽光を光源として利用し、光吸収層からの発光を画像化するものである^{6~8)}。しかし、PL 像と太陽電池の電気的特性は直結していないことが多く、あらかじめ比較検討しデータを蓄積しておく必要がある。EL 法との組み合わせや撮像方法を工夫して、抵抗特性の評価も検討されている⁹⁾。

ここで、PV 市場の大多数を占める結晶 Si 太陽電池の場合、EL・PL の発光スペクトルは近赤外領域となる。太陽電池モジュールが設置されている屋外では、日中の屋外光は幅広いスペクトルを持ち、また、その強度も結晶 Si 太陽電池からの EL・PL 強度より極めて強いいため、通常は暗室など屋外光を制御できる環境で撮像する。また、評価装置導入コストや利便性から Si 材料をベースとしたイメージセンサが用いられることが多いが、上記近赤外領域の分光感度はあまり高くないため、長い露光時間が必要となる。つまり、従来 EL・PL 法は屋内での限られた環境でのみ利用可能であり、太陽電池モジュールが設置されている屋外での利用展開は困難である⁵⁾。

本稿では、太陽電池の電気的特性をより強く反映した評価法である EL 法において、太陽電池モジュールの発電性能評価を屋外環境でも実現する手法の研究開発状況を紹介する。

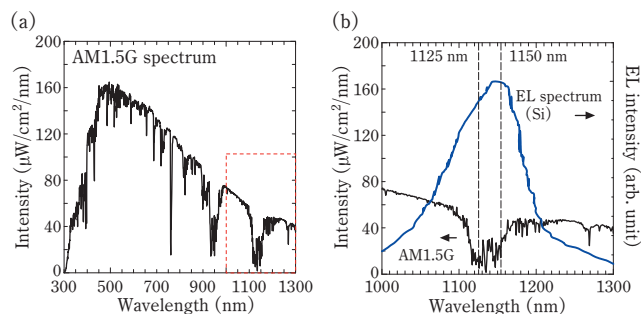


図2 (a)太陽光スペクトル、(b)結晶 Si 太陽電池からの EL スペクトル。

2. 屋外 EL 評価

2.1 EL 法について

EL 評価装置は、太陽電池に電流を注入するための電流源、EL 像を撮像するカメラ、これらを制御する装置で構成されている。カメラに取り付けるレンズを変更することで、モジュールをつなげたストリングからの EL 像やモジュール全体、モジュール内の部分的な EL 像と、幅広いスケール変化にも対応できる。図 1 に結晶 Si 太陽電池の EL 像の例を示す。利用するカメラを InGaAs など波長 1600 nm 近傍の近赤外領域まで分光感度が高いカメラおよび適切なバンドパス光学フィルタを用意することで、図 1(a)に示すように、多結晶 Si 太陽電池の結晶粒内からの発光および欠陥部からの発光状況を 2 次元像化することができる。また、図 1(b)に示すように、太陽電池モジュール作製時に発生するセル割れや断線も明確に可視化することができる。更に、PID 現象による特性劣化も分析できる。図 1(c)は、PID 加速劣化試験後の単結晶 Si 太陽電池モジュールの EL 像で、漏れ電流成分が増加した部分の暗化が確認できる。屋内環境であれば InGaAs カメラを用いることで 1 秒もかからずこのような EL 像取得が可能となるが、屋外環境では EL 像取得は難しい。

図 2(a)に一般的な太陽光スペクトル (AM1.5 G)、(b)に結晶 Si 太陽電池の EL スペクトルとその領域の太陽光スペクトルを示す。波長 1100 nm 近傍の近赤外領域でも太陽光強度は数十 $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ ある。波長 1150 nm 近傍に大気中の水蒸気成分の吸収による“くぼみ”がある。結晶 Si 太陽電池の EL スペクトルは、波長 1150 nm をピークとしたスペクトルなので、太陽光強度が最も低い波長 1125 nm を中心とした狭帯域バンドパスフィルタ (FWHM : 10 nm) か EL スペクトル強度が最も高い波長 1150 nm を中心とした狭帯域バンドパスフィルタ (FWHM : 10 nm) を用意することで太陽光の影響を抑制できる。

2.2 差分型 EL 法

上記に示した光学フィルタを用意しても、太陽光強度は EL 強度より十分高いため、追加の対応が必要である。その 1 つとして、EL 像とバックグラウンドの差分を取り、更に差分像を加算する差分型 EL 法がある。この様子を図 3(a)に示す。パルス電流に同期したカメラ制御となる。1 回の差分像では

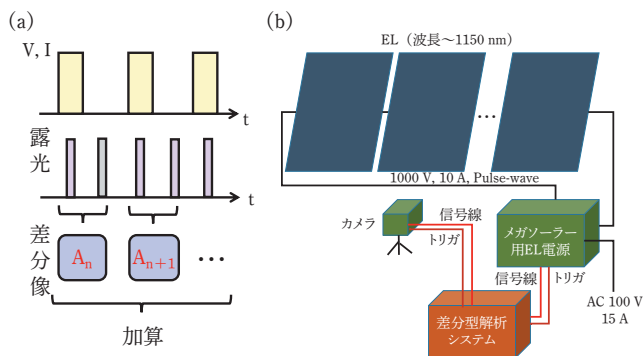


図3 (a)差分EL像の取得方法、(b)差分型EL評価装置の概要。

明瞭なEL像を得ることはできないが、複数回繰り返しEL像を加算することで明瞭なEL像となる。図3(b)に、開発した差分型EL評価装置の概要図を示す(テクノス(株)と共同開発)。カメラはInGaAsカメラを利用している。なお、本装置を構成する電流源は、屋外に設置された太陽電池モジュールに対するEL評価を想定しているため、容量1000V級のメガソーラー発電所でも利用できるパルス電流源である((株)栗田製作所と共同開発)。

3. 差分型EL法の効果実証

実際に屋外に設置した結晶Si太陽電池モジュールに対する差分型EL法によるEL像を図4(a)に示す。注入電流量、パルス周波数、Duty比、カメラの露光時間など各種測定パラメータを調整することで、屋外照度が9.92klxと高い照度環境下であっても、明瞭なEL像が取得できた。本EL像は、中心波長1150nmの狭帯域バンドパスフィルタを用いたものであるが、中心波長1125nmであっても同様なEL像が得られている。他機関からも屋外EL法については報告されており^{9,10)}、評価装置として入手することも可能である。

本研究で示したように、極めて高い照度環境でのEL像取得が可能であるが、雲などの影がEL像に与える影響はほとんどないことも確認できている。ここで、屋外に設置の太陽電池モジュール温度は、気温や設置環境、季節などにより変化する。結晶Si太陽電池のELスペクトルも温度により変化するため、発光量の経時変化をモニタするには、これらの特徴を理解しておく必要がある¹¹⁾。図4(b)に単結晶Si太陽電池からのELスペクトルの温度の影響を示す。温度上昇とともに、ELスペクトルのピーク波長が長波長側にシフトし、全体的に強度が増加する。発電性能の変化によるEL強度の変化なのか、モジュール温度の変化によるものなのか、発電性能診断にはこのようなさまざまな特徴をあらかじめ捉えておく必要がある。

4. EL強度分析による太陽電池特性抽出

EL像から、クラックや断線などの視認やその経時変化の分析によるPID評価など、劣化モードの推定は可能だが、EL

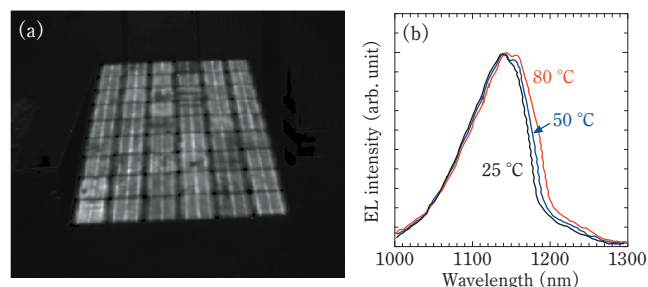


図4 (a)屋外照度環境下におけるEL像、(b)一般的な結晶Si太陽電池からのELスペクトルの温度依存性。

強度から太陽電池特性を抽出することもできる。そもそもELは、半導体に注入されたキャリアが発光再結合により基底状態に遷移する際の発光現象であるが、発光強度は、注入電流量や発光再結合と非発光再結合の割合に強く依存する。非発光再結合となる表面再結合や欠陥などによる界面再結合が増加すると、半導体のキャリア寿命が短くなり、EL強度も低下する。すなわち、EL強度と半導体のキャリア寿命は正の相関があり、また同じく太陽電池の光吸収層のキャリア寿命は太陽電池特性と正の相関がある。特にダイオードの式から分かるように、太陽電池の開放電圧値(Open circuit voltage: V_{oc})はキャリア寿命値と強い相関関係を有しており、ダイオード因子が1に近い良いダイオード特性の領域もしくは注入電流状態であれば、EL像は V_{oc} 像と捉えることができる。ここで、ソーラーシミュレータで V_{oc} を測定した太陽電池のEL像をあらかじめ取得し、それを参照試料として利用するとともに V_{oc} が不明な太陽電池を同EL撮像条件で取得すると、以下式(1)から不明であった V_{oc} を推定することができる。詳細は、参考文献を参照されたい⁴⁾。

$$\ln \left\{ \frac{I(A)}{I(B)} \right\} = \frac{e}{kT} \{ V_{oc}(A) - V_{oc}(B) \} \quad (1)$$

ここで、 $I(A)$ 、 $V_{oc}(A)$ は特性が既知の太陽電池のEL強度および V_{oc} 、 $I(B)$ 、 $V_{oc}(B)$ は特性が不明な太陽電池のEL強度と V_{oc} である。また e 、 k 、 T は、それぞれ電気素量、ボルツマン定数、絶対温度である。なお、式(1)から分かるように、参照試料と被測定試料のモジュール温度は同じである必要がある。しかし、 V_{oc} の温度特性は各種太陽電池である程度決まってくるため、それらをあらかじめ確認し、それぞれ補正することで参照試料と被測定試料の温度が異なっても V_{oc} を推定することが可能である。

EL像を用いた太陽電池特性の定量的評価において、利用するEL像は、RAWデータの必要がある。コントラストやブライトネスを自動で変更するような画像処理をしないことが重要である。きれいな画像を得るのが目的ではなく、イメージセンサの各ピクセルの光量を評価するためである。精度よく定量化するため、本研究では16bitのRAWイメージデータを用いている。

差分型EL評価装置を用いて屋外環境に設置した結晶Si

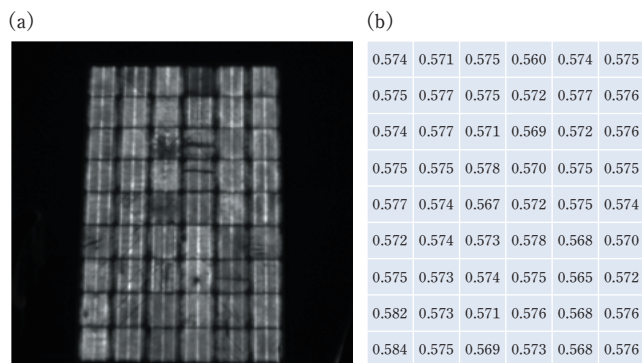


図5 (a)結晶 Si 太陽電池モジュールの EL 像、(b)EL 強度から算出した各太陽電池の開放電圧値 (右) (単位: V)。

太陽電池モジュールの EL 像を取得し、 V_{oc} を算出した例を図5に示す¹²⁾。なお、本例では、 V_{oc} は各太陽電池 (セル) ごとの値として算出している。参照試料の $I(A)$ には、セル領域の EL 強度を平均化した値を用い、被測定試料となる太陽電池モジュールでは各セル領域の EL 強度を平均化した値を $I(B)$ とし $V_{oc}(B)$ を算出している。ソーラーシミュレータによる電流電圧特性を用い、推定された V_{oc} 値の精度を検証したところ、太陽電池モジュールとしての V_{oc} 推定誤差は、1% 以内であった。高い屋外照度環境でも非常に高い精度で V_{oc} の分布が可視化できることを示している。本例の評価時のモジュール温度は 60.4℃であった。温度係数による補正をすれば標準状態 (25℃) で評価する必要があることを示している。

このように、差分型 EL 法により屋外環境下での発電性能診断が実現しつつある。今回は V_{oc} の推定を紹介したが、直列抵抗成分など他の太陽電池特性の推定も可能である。また、太陽電池の特性劣化に関わる EL 像の変化とその劣化メカニズムの解明研究など (過渡吸収分光法やマイクロ波光電流減衰法を用いた太陽電池内でのキャリア減衰分析^{13~15)})、本評価の定性的・定量的精度を更に高めることで、長期信頼性のある太陽光発電の促進に寄与するものと考えらる。

5. むすび

屋外に設置された状態での“その場”発電性能診断技術として屋外 EL 評価法を紹介した。EL 像による定性的な診断が一般的には行われているが、本研究では、EL 強度による太陽電池特性の定量的な評価についても紹介した。今回は紹介しなかったが、注入電流と EL 強度の関係から PID 現象をいち早く検出する手法も検討されており、屋外 EL 評価技術

の更なる発展が期待できる。屋外 EL 評価だけではなく、電流電圧特性評価のような簡便な発電性能診断と組み合わせることが太陽光発電の性能診断としては重要である。

謝 辞

本研究の一部は、(国研)科学技術振興機構 (JST) スーパークラスタープログラム (京都地域)、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 受託研究「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発」の支援により行われた。

文 献

- 1) Snapshot of Global PV Markets 2021, IEA-PVPS T1-39 (<https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2021>).
- 2) D.C. Nguyen, Y. Ishikawa, and Y. Uraoka: Prog. Photovolt. **29**, 423 (2021).
- 3) T. Fuyuki, Y. Kaji, A. Ogane, and Y. Takahashi: Proc. IEEE 4th World Conf. Photovoltaic Energy, p. 905 (2006).
- 4) T. Fuyuki, H. Kondo, Y. Kaji, A. Ogane, and Y. Takahashi: J. Appl. Phys. **101**, 023711 (2007).
- 5) T. Fuyuki, T. Tomimoto, A. Tani, and Y. Ishikawa: Proc. IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conf., p. 1090 (2015).
- 6) T. Trupke, B. Mitchell, J.W. Weber, W. McMillan, R.A. Bardos, and R. Kroeze: Energy Procedia **15**, 135 (2012).
- 7) O. Breitenstein, H. Höfller, and J. Haunschild: Sol. Energy Mater. Sol. Cells **128**, 296 (2014).
- 8) Y. Zhu, M.K. Juhl, T. Trupke, and Z. Hameiri: IEEE J. Photovolt. **7**, 1087 (2017).
- 9) L. Stoicescu, M. Reuter, and J.H. Werner: Proc. NREL Photovoltaic Reliability Workshops, p. 341 (2014).
- 10) L. Stoicescu and M. Reuter: Proc. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhib., 5CV.3.29 (2015).
- 11) K. Noguchi, T. Oshima, M. Aminul Islam, Y. Ishikawa, and Y. Uraoka: Abstr. Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf., 4_3-0022 (2016).
- 12) 佐藤滉太, 浜田雅也, 石河泰明: 第1回日本太陽光発電学会学術講演会予稿集, A-8 (2021).
- 13) M. Aminul Islam, H. Matsuzaki, Y. Okabayashi, and Y. Ishikawa: Prog. Photovolt. **27**, 682 (2019).
- 14) M. Aminul Islam, D.C. Nguyen, and Y. Ishikawa: Jpn J. Appl. Phys. **58**, 106507 (2019).
- 15) D.C. Nguyen, Y. Ishikawa, S. Jonai, K. Nakamura, A. Masuda, and Y. Uraoka: Sol. Energy **199**, 55 (2020).

(2022年3月30日受付; 2022年4月12日受理)

Profile



石河 泰明 (いしかわ やすあき)

青山学院大学理工学部准教授。2003年博士 (工学) (奈良先端科学技術大学院大学)。ドイツ・シュトゥットガルト大学博士研究員。米国トレド大学博士研究員。シャープ株式会社。奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科准教授を経て、20年より現職。主に太陽電池の研究・開発に従事。