



## ソーラトロン 光電気化学測定システム による 太陽光発電の研究事例の紹介

Application Note: 2023/12

このアプリケーションノートでは、Solartron Analytical ブランドの光電気化学測定システムである SolarLab XM および ModuLab XM PhotoEchem の有用性と太陽光発電の研究事例の紹介をします。SolarLab XM は、光源、ポテンシostat、および電気化学インピーダンス分光法を統合して、太陽電池セルの正確な特性評価を可能にします。ModuLab XM PhotoEchem は、SolarLab XM の性能と機能に加え、モジュール式にボードを追加することで、二次電池や腐食などに対応できる拡張性を備えています。

### はじめに

太陽光発電の研究は、クリーンで持続可能なエネルギー源の開発において重要な役割を果たしています。太陽電池の効率と耐久性を向上させるには、太陽電池の電気化学な挙動と光電気化学な挙動の両方を理解することが重要です。SolarLab XM および ModuLab XM PhotoEchem は、包括的な太陽光発電の研究のために設計された、高度な光電気化学測定システムです。このアプリケーション ノートでは、SolarLab XM および ModuLab XM PhotoEchem の機能の紹介や研究事例をご紹介します。

### SolarLab XM および ModuLab XM PhotoEchem の概要

SolarLab XM は、ポテンシostat/ガルバノスタット、光源、電気化学インピーダンス分光法 (EIS) システムの機能を組み合わせた光電気化学測定システムです。これは、色素増感太陽電池 (DSSC)、ペロブスカイト太陽電池 (PSV)、有機薄膜太陽電池 (OPV) などの太陽電池セルの特性評価向けに特別に調整されています。SolarLab XM の主な機能は次のとおりです。

**光源:** 波長 365~660 nm の単色 LED 光源や、冷白色・温白色の白色 LED 光源を提供し、研究者がさまざまな照明条件下での太陽電池の性能を評価できるようにします。

**電気化学インピーダンス分光法 (EIS):** インピーダンス測定により、太陽電池内の電荷移動の動的な挙動についての洞察が得られます。

**高精度:** 電位と電流を正確に測定・制御できるため、太陽電池の太陽光発電パラメータを評価できます。例えば、J-V 曲線を測定し、形状因子 (FF)、開放電圧 ( $V_{oc}$ )、短絡電流 ( $I_{sc}$ ) などの評価が可能です。

ModuLab XM PhotoEchem は、幅広い実験用に構成できる多用途のモジュール式光電気化学測定システムです。太陽光発電研究の特定のニーズを満たすようにシステムを構成できます。ModuLab XM PhotoEchem は、SolarLab XM の機能に加えて、次のような機能を持ちます。

**モジュール性:**最大電流を 2A に拡張するブースターボードや、最大電圧を 100V に拡張する高電圧ボードを追加して、二次電池や腐食・防食研究向けに機能を拡張することができます。また、既設の ModuLab XM ECS に、光源制御ボードを追加して、光電気化学向けのシステムとして拡張することができます。

**マルチチャンネル対応:** 8 スロットシャーシを使用している場合には、最大 2 チャンネルまで拡張することができます。2チャンネルにすることで、スペースを節約しながら、効率的に実験を進めることが可能になります。



図 1 ModuLab XM PhotoEchem および SolarLab XM の概観

## 研究事例の紹介

Abate ら<sup>1</sup>は、最近の研究で、平面型ペロブスカイト太陽電池の劣化メカニズムが、イオンのマイグレーション(イオンの拡散)による非晶質化と相分離であることを発表しました(図 2a)。 self-doping 効果により、ペロブスカイトの開回路電圧 (VOC) が増加する一方で、電流密度 (JSC) と形状因子 (FF) の低下により電力変換効率 (PCE) が悪化します。

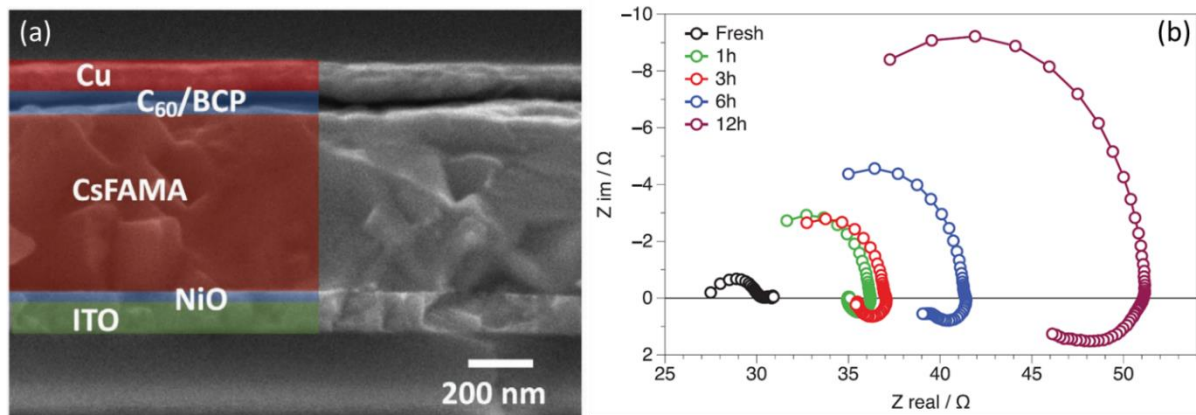


図 2 (a) ペロブスカイト型太陽電池の断面 SEM 像。CsFAMA は  $Cs_{0.05}(FAPbI_3)_{0.83}(MAPbBr_3)_{0.17}0.95$  を表します。(b) 暗条件下でバイアス電圧 1.2 V 印加した試料のインピーダンスの経時的変化

SolarLab XM を使用して、in-situ にてバイアス電圧印加状態でインピーダンス測定を実施し、界面品質の劣化を検証しました(図 2b)。バイアス電圧印加前のインピーダンス測定結果(黒丸のプロット)は、ペロブスカイト太陽電池で頻繁に観察される 2 つの円弧を示しました。バイアス電圧を印加すると、印加時間に応じて高周波帯の抵抗(左側の円弧の直径)が増加していることが分かります。これは、過去の研究報告と一致しており、再結合抵抗と電荷輸送/移動抵抗の増加を示唆しています。また、同時に、低周波帯では負性容量が観察されました。負性容量の原因は、イオンの拡散によりペロブスカイト/輸送層界面のエネルギー準位の変調(乱れ)との報告があり、Abate ら<sup>1</sup>は、バイアス電圧印加によるイオンのマイグレーションによりペロブスカイト/輸送層界面が非結晶化してエネルギー準位が変調したことが原因であると説明しています。

電気化学インピーダンス分光法が太陽光発電の研究で重要な役割を果たし、太陽電池の電氣的挙動について貴重な洞察を提供することはよく知られています。太陽電池のインピーダンスが周波数とともにどのように変化するかを分析することで、太陽電池内の電荷輸送、再結合、界面効果を評価できます。これにより、太陽電池内の電氣的な挙動の知見が得られ、より効率的で耐久性のある太陽光発電技術につながります。Bekeleら<sup>2</sup>は、光連続照射試験前後の電荷キャリアの動的な挙動とペロブスカイトの長期的な安定性の関係を構築するために、ペロブスカイト太陽電池のインピーダンス測定により詳細な研究を実施しました。

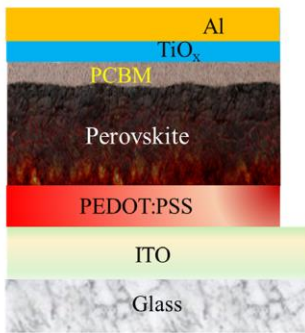


図 3 ペロブスカイト太陽電池の概略図

SolarLab XMと測定ソフトウェアXM-Studio PhotoEchemを使用して、最大電力点追従制御による光連続照射試験(大気中、照度 1Sun、エアマス AM1.5 にて 48 時間) を実施する前後での、ペロブスカイト太陽電池のインピーダンス測定を実施しました。インピーダンス測定条件は、LED 光源(波長 590nm)の強度を 3.2、6.4、および 8 mWcm<sup>-2</sup> に変化させ、インピーダンス測定の周波数範囲は 1 MHz ~ 0.02 Hz です。また、インピーダンス測定結果は、2 つの時定数を持つ等価回路モデルを使用して解析されました。

インピーダンス測定結果は、デバイスが連続的に動作するにつれて、界面での電荷の蓄積に関連する電荷輸送抵抗と界面容量 の両方が上昇していることを示唆しています。これは、光活性ペロブスカイト層から電荷輸送層の界面に向かってイオンの拡散(イオンのマイグレーション)が進行しており、バルク内に欠陥が生じることを示唆しています。その結果、連続動作中に観察されたデバイス性能の低下は、主に光活性ペロブスカイト膜のバルク内の変化とイオンのマイグレーションに関係していると考えられます。

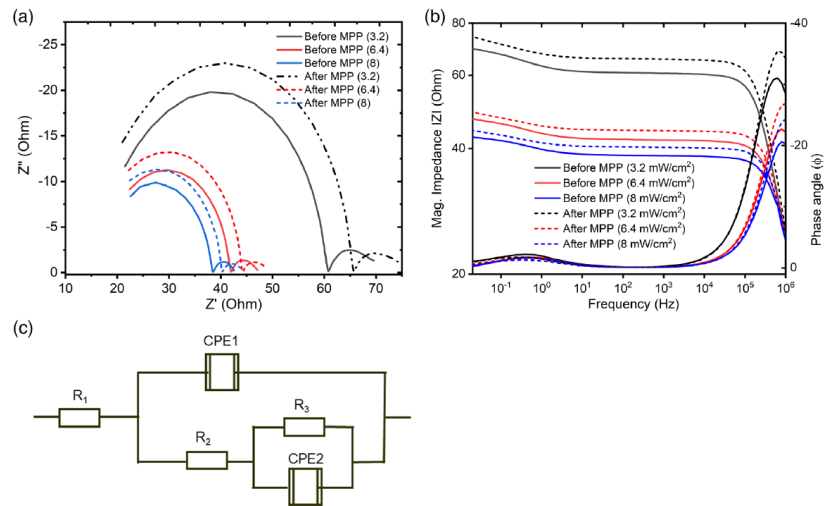


図 4 a) 異なる光強度下での最大電力点追従制御による光連続照射試験前(実線)と後(破線)のデバイスの EIS 特性のナイキスト線図と b) ボード線図 c) 太陽電池の等価回路モデル

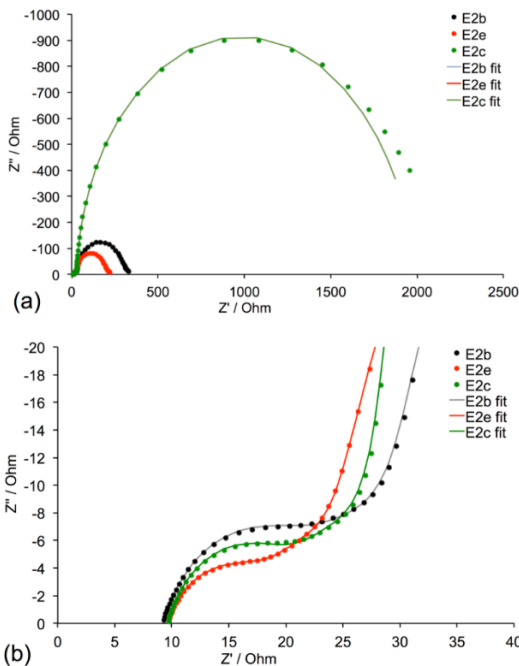


図 5 E2b、E2e、および E2c の電解質を使用した色素増感太陽電池のナイキストプロット。(a) ではプロット全体を、(b) では高周波領域の拡大図を表示しています。<sup>3</sup>

スイスのバーゼル大学の Mariia ら<sup>3</sup> は、色素増感太陽電池の性能を向上させることに取り組みました。具体的には、溶媒の選択とイオン液体の存在に注目し、N-ヘテロ環状カルベン鉄(II)錯体色素とケノデオキシコール酸共吸着剤を用いて電解質組成を調整することです。ModuLab XM PhotoEchem を使用して、インピーダンス測定 (振幅 10 mV、周波数範囲 100 kHz ~ 0.05 Hz、光強度 22 mWcm<sup>-2</sup> (590 nm) ) と等価回路フィッティングを実施しました。また、確かな傾向を確認するために、同条件で作成した複数のサンプルで測定を実施しました。インピーダンス測定結果を等価回路フィッティングすることで、定量的に比較検証しています。

## まとめ

SolarLab XM および ModuLab XM PhotoEchem は、包括的な太陽光発電研究のソリューションです。電気化学インピーダンス分光法、多様な光源のサポート、モジュール性などにより、さまざまな種類の太陽電池の特性評価に対応できます。研究対象が色素増感太陽電池 (DSSC)、ペロブスカイト太陽電池 (PSV)、有機薄膜太陽電池 (OPV)のいずれの場合にも使用できますが、今回はペロブスカイト太陽電池を中心に事例を紹介しました。SolarLab XM および ModuLab XM PhotoEchem は太陽光発電技術の理解と発展の一助となる装置です。

## 参考文献

1. D.D. Girolamo, N. Phung, F.U. Kosasih, F.D. Giacomo, F. Matteocci, J.A. Smith, M.A. Flatken, H. Köbler, S.H. Turren Cruz, A. Mattoni, L. Cinà, B. Rech, A. Latini, G. Divitini, C. Ducati, A.D. Carlo, D. Dini, and A. Abate, Ion Migration-Induced Amorphization and Phase Segregation as a Degradation Mechanism in Planar Perovskite Solar Cells, *Adv. Energy Mater.* 2020, 10, 2000310. <https://doi.org/10.1002/aenm.202000310>
2. Bekele Hailegnaw, Niyazi Serdar Sariciftci, and Markus Clark Scharber, Impedance Spectroscopy of Perovskite Solar Cells: Studying the Dynamics of Charge Carriers Before and After Continuous Operation, *Phys. Status Solidi A* 2020, 217, 2000291. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000291>
3. M. Karpacheva, C. E. Housecroft, E. C. Constable, Electrolyte tuning in dye-sensitized solar cells with N-heterocyclic carbene (NHC) iron(II) sensitizers, *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018, 9, 3069–3078. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.285>