

シンポジウム | イノベーション共創プログラム (CIP) : 実用化に近づく次世代太陽電池とさらなる基盤技術開発

📅 2025年3月26日(水) 13:00 ~ 15:40 📍 [E]F403(第2学舎 4号館 [4階] F403)

[[E]F403-1pm] 実用化に近づく次世代太陽電池とさらなる基盤技術開発

座長、シンポジウム関係者：宮坂 力、村岡 梓

次世代太陽電池の開発は、カーボンニュートラル社会実現、エネルギー自給率の向上、沿岸部里ガフ排中担制対応の鍵となる技術として注目されています。このセッションでは、次世代太陽電池の最新の研究動向とその実用化に向けた取り組み、およびさらなる基盤技術の開発について紹介します。材料開発や基本物理の開拓から、耐久性向上、製造プロセスのスケールアップなど、基盤および実用化に向けて古睨すべき課題に焦点を当てます。さらに、現在進行中の実証実験や商業化の進展状況について具体的な事例を紹介し、将来の展望を示します。

本セッションは**午前**、**午後**に実施されます。

聴講後の[アンケート](#)へのご協力をお願いいたします。

🇯🇵 日本語 🎤 基調講演

13:00 ~ 13:50

[[E]F403-1pm-01]

カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーに貢献する次世代太陽電池

○瀬川 浩司^{1,2} (1. 東京大学、2. 有機系太陽電池技術研究組合)

🇯🇵 日本語 🎤 依頼講演

13:50 ~ 14:20

[[E]F403-1pm-02]

ガラス建材一体型ペロブスカイト太陽電池の開発

○松井 太佑¹ (1. パナソニックホールディングス株式会社)

🇯🇵 日本語 🎤 依頼講演

14:20 ~ 14:50

[[E]F403-1pm-03]

ペロブスカイトシリコンタンデム太陽電池

○石川 亮佑¹ (1. 東京都市大学)

🇯🇵 日本語 🎤 依頼講演

14:50 ~ 15:20

[[E]F403-1pm-04]

CNT電極を用いた高耐久性ペロブスカイト太陽電池

○上岡 直樹¹、Achmad Hidayat¹、大島 久純²、土方 啓暢³、松尾 豊^{1,2} (1. 名古屋大学大学院工学研究科、2. 名古屋大学未来社会創造機構マテリアルイノベーション研究所、3. 株式会社デンソー)

15:20 ~ 15:40

[1E_F40306-09-5add]

パネルディスカッション

カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーに貢献する次世代太陽電池

(東大院総合¹・有機系太陽電池技術研究組合²) ○瀬川 浩司^{1,2}

Next generation solar cells contributing to carbon neutral and circular economy (¹*Dep. of General Systems Studies, Grad. School of Arts and Sciences, The Univ. of Tokyo*, ²*Research Association for Technology Innovation of Organic Photovoltaics*) ○Hiroshi Segawa^{1,2}

The studies of the next-generation high-performance solar cells have been mainly conducted about the perovskite solar cells (PSCs). The power conversion efficiency (PCE) over 26% was achieved about twelve years from the advent of the PSCs. At the next stage, it is demanded that these photovoltaics contribute to the carbon neutral as well as circular economy. In this lecture, the current situation and the future prospects of the next generation solar cells will be reviewed based on the state-of-the-art technology trend of the PSCs.

Keywords : Organometal Halide Perovskite; Perovskite Solar Cell; Next Generation Photovoltaics; Carbon Neutral; Circular Economy

有機金属ハライドペロブスカイトを光吸収層に用いた太陽電池は「ペロブスカイト太陽電池 (PSC)」と総称され、現在では社会の認知度も上がってきた。その変換効率は、小面積セルでは既に 26%を超えており、次世代高性能太陽電池として確固たる地位を固めている。2024 年 12 月に政府が発表した第 7 次エネルギー基本計画の原案にも、PSC の社会実装を進めることが明記され、その目標値は 2040 年に 20GW (2000 万 kW) となっている。日本のカーボンニュートラルの達成には、さまざまな場所に設置可能な太陽電池が不可欠であり、日本企業が進めている PSC 軽量モジュールや PSC シースルー型建材などの実用化を目前に控え PSC が国の目標の一角を占めることになったのである。加えて経済安全保障の観点でも、PSC の光吸収層の重量の約 6 割を占めるヨウ素が国産 (世界生産量 2 位でシェアは約 3 割) である点など強みがある。さらに、発電層の厚さが 1 ミクロン程度と極めて省資源でもあり、日本にとっては大きなアドバンテージがある。塗布製造による大量生産が進めば、原理的には劇的な低コスト化も期待できる。課題は大面積化した場合の高い変換効率の維持と長寿命化である。また、主要な原料に鉛を含むため、回収プロセスなどを含めたサーキュラーエコノミー対応も求められる。

一般的に、高性能の半導体デバイスは高純度の原料を用いて高度な蒸着や結晶成長などのプロセスを経て欠陥なく作成するのが普通だが、ペロブスカイト太陽電池はこの常識を完全に覆している。その理由は、有機金属ハライドペロブスカイトの特殊なバンド構造にある[1]。最も基本的な構造の $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の場合、伝導帯だけでなく価電子帯も反結合性の軌道から構成されている。このため、ハロゲンや金属が物理的に脱落してできた欠陥準位は禁制帯の中に現れにくく、伝導帯のすぐ下の浅い位置が価電子帯の中に埋もれてしまう。このため、塗布プロセスでハロゲンや金属が脱落した構造欠陥ができて禁制帯の中に電子状態としての不純物準位が現れにくいのである。このことが、塗布によって構造欠陥のある薄膜でも高性能太陽電池ができる理由になっている。また、有機金属ハライドペロブスカイトは直接遷移型で吸収係数が高

く、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の厚さでも100%可視光を吸収する。さらに電子とホールを同時に移動させることができる性格を持ち、バンド計算から求められる電子やホールの有効質量は0.2~0.3程度と非常に軽いうえ、実験的には電子とホールの結合エネルギーが極めて小さく、光吸収によって生じた励起子が簡単に解離して電荷分離が起こり電子輸送層とホール輸送層に移動できるのである。有機金属ハライドペロブスカイトは、太陽電池材料としてはまさに理想的な材料と言えよう。

これまでに報告されたペロブスカイト太陽電池は、①透明導電電極基板/酸化物半導体緻密層/酸化物半導体多孔質層/ペロブスカイト層/正孔輸送層/対極という層構造の「ナノ構造型(mesoscopic)」、②透明導電電極基板/酸化物半導体緻密層/ペロブスカイト層/正孔輸送層/対極という層構造の「平面ヘテロ接合型(planar hetero-junction)」、③透明導電電極基板/正孔輸送層/ペロブスカイト層/電子輸送層/対極という層構造の「逆構造型(inverted)」の3種に大別できる。現在までに発表された論文中的変換効率最高値を概観すると、2021年頃まではナノ構造型が変換効率トップにあることが多かったが、最近では SnO_2 緻密層を用いた平面ヘテロ接合型や逆構造型のほうが優位となっている。効率23%以上を報告した例のうち、 SnO_2 平面ヘテロ接合型が約6割、ナノ構造型が約2割、 TiO_2 平面ヘテロ接合型と逆構造型がそれぞれ約1割となっている。太陽電池出力は、開放電圧(Voc)、短絡電流密度(Jsc)、曲線因子(FF)の積で与えられるが、最近報告例が目立ち始めた逆構造型はFFの高さがPCE向上に寄与している。逆構造型デバイスでは、正孔輸送層としてカルバゾール系化合物の末端にホスホン酸のついた低分子の自己組織化単分子膜(SAM)を用いたものが報告されたのをきっかけに性能向上が進んでいる。従来、順構造型に比べて逆構造型の性能が低い理由として正孔輸送層が入射光の一部を吸収してしまうこと、ペロブスカイト層内での電子と正孔の移動度に違いがあること、透明導電電極や対極材料のフェルミ準位との組み合わせで不利になること、などが指摘されていたが、実は検討数が不足していただけであった可能性も高い。さまざまな材料の長所・短所をうまく組み合わせることでデバイス全体の性能向上を図る検討が今後も期待される。

以上の構造の区別は、研究開発の上では重要であるが、社会実装の観点では、基板がフィルムであるかガラスであるか、ワットあたりの重量がどれくらいであるかの方が重要なファクターとなる。また、建材一体型の場合は、発電性能よりもデザイン性や施工性のほうが重要なファクターとなる。これらについては、現在進みつつある様々な実証事業の中で、よりよい活用方法が見いだされていくことになるだろう。本講演では、PSCの最新の研究開発動向に基づいて、カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーへの対応についても言及する。

謝辞：本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援により行われたものである。

文 献

- [1] G. Giorgi, J. Fujisawa, H. Segawa, K. Yamashita, J. Phys. Chem. Lett., 4, 4213-4216 (2013).

ガラス建材一体型ペロブスカイト太陽電池の開発

(パナソニックホールディングス株式会社) ○松井太佑

Development of Building Integrated Perovskite Photovoltaic Glass (Panasonic Holdings Corporation) ○Taisuke Matsui

We Achieved world's highest level energy conversion efficiency of 18.1% in a practical size of 804cm² by our unique material composition and process innovations. Using the unique inkjet printing technology that we have cultivated over the years, we are able to directly print perovskite solar cells on building glass materials which has unevenness and undulation. This enables us to improve reliability, rigidity and flexibility in size and design. This product is able to generate electricity with harmonizing our lives integrated with windows, walls, or wherever glass is used.

Keywords : Perovskite Solar Cell; BIPV

当社独自の材料組成やプロセスの工夫により、大面積でも高効率を保つことに成功しており、実用サイズの 804cm² にて世界最高レベルの発電効率 (18.1%) を有するペロブスカイト太陽電池を実現しています。また、当社でこれまで培った独自のインクジェット技術を用いて、凹凸やうねりを有する建材ガラス上にペロブスカイト太陽電池を直接、均一に塗布・形成することができ、太陽電池としての信頼性向上と建材としての剛性を確保することを目指しています。これにより、水・酸素に弱いペロブスカイト太陽電池の弱点を克服しつつ、透過率の制御やグラデーション加工等のデザインの自由度やサイズの自由度を高め、建材一体型太陽電池として求められる性能の達成が可能となります。現在、実用化に向けて、1.0×1.8m サイズのガラス基板に作製可能な試作ラインを立ち上げ、大面積プロセスの確立と建材一体型太陽電池としての品質確保を推進しています。この技術を活用することで、従来設置が困難とされていた 窓・壁 等 ガラスが利用されるあらゆる個所に意匠性を害することなく、まち・くらしに調和しながら発電することを目指しています。



(a)グラデーション加工した 30cm モジュールの写真

(b)ガラス建材一体化ペロブスカイト太陽電池の構造 (CG)

(c)CEATEC 2024 に出展した 1.0×1.8m サイズのペロブスカイト太陽電池

(d)CES2025 に出展した 1.0×1.8m サイズのペロブスカイト太陽電池

ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池

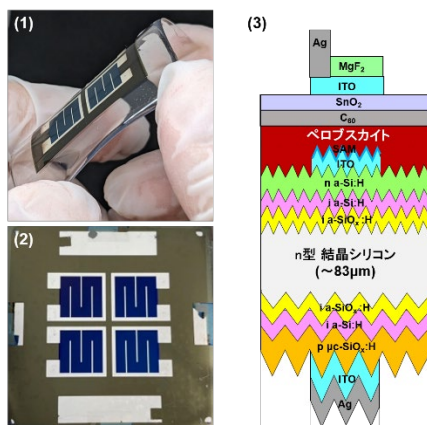
(東京都市大学) ○石川亮右

Perovskite/silicon tandem solar cells (*Department of Electrical and Electronic Communication Engineering, Tokyo City University*) ○Ryousuke Ishikawa

In recent years, the development of "tandem solar cells," which generate electricity by stacking different types of solar cells, has accelerated worldwide in order to improve conversion efficiency, and a conversion efficiency of over 30% has been reported for the combination of perovskite and silicon. Normally, this combination uses a silicon wafer with a thickness of about 200 μm for the bottom cell, which does not take advantage of the thin and flexible characteristics of perovskite. Therefore, by making the bottom cell, a silicon heterojunction solar cell, thin enough to bend, the "perovskite/silicon tandem solar cell" is given flexibility and is also lightweight, aiming to enable installation in places where it was difficult to install conventional solar cells. So far, a conversion efficiency of 26.8% has been achieved with a tandem structure with an 80 μm thick silicon heterojunction solar cell.

Keywords : Perovskite; Silicon; Tandem; Solar Cells

近年、変換効率の向上に向け、異なる種類の太陽電池を重ね合わせて発電する「タンデム型太陽電池」の開発が世界的に加速しており、ペロブスカイトとシリコンの組み合わせでは、30%以上の変換効率が報告されている。通常この組み合わせでは、ボトムセルに200 μm 程度の厚さがあるシリコンウェハーを用いるため、ペロブスカイトの特徴である薄くて曲がるという特性が活かされない。そこでボトムセルであるシリコンヘテロ接合太陽電池の厚さを曲がるほど薄くすることで「ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池」にフレキシブル性を付加するとともに、軽量化も実現し、従来の太陽電池では設置困難だった場所への設置を可能にすることを目指した。これまでに80 μm 厚さのシリコンヘテロ接合太陽電池とのタンデム構造で変換効率26.8%を達成している¹⁾。



1) Saito, K.; Shishido, H.; Ishikawa, R. Fabrication of Thin Silicon-Heterojunction Solar Cells for Bendable Perovskite/c-Si Tandem Solar Cells. *Proc. EUPVSEC2023* **2023**, 10.4229 (1AO.6.6).

CNT 電極を用いた高耐久性ペロブスカイト太陽電池

(名古屋大学工学研究科¹・名古屋大学未来社会創造機構マテリアルイノベーション研究所²・株式会社デンソー³) ○上岡 直樹¹・Achmad Syarif Hidayat¹・大島 久純²・土方 啓暢³・松尾 豊^{1,2}

Durable Perovskite Solar Cells Using CNT Electrodes (¹Graduate School of Engineering, Nagoya University, ²Institute of Materials Innovation, Institutes for Future Society, Nagoya University, ³DENSO CORPORATION) ○Naoki Ueoka,¹ Achmad Syarif Hidayat,¹ Hisayoshi Oshima,² Yoshimasa Hijikata,³ Yutaka Matsuo^{1,2}

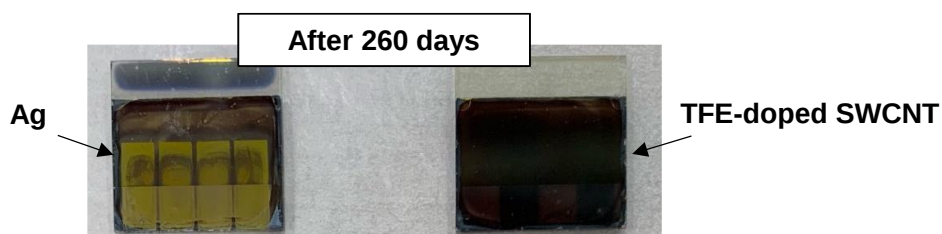
Carbon nanotubes (CNTs) exhibit excellent durability due to their chemical stability and resistance to oxidation and corrosion. As a p-dopant material, nitric acid can p-type dope CNT electrodes, enhancing their performance. However, it can easily damage the perovskite layer, preventing direct solution application, and requires careful handling. In this study, we found that using 2,2,2-trifluoroethanol (TFE) as a p-dopant allowed for easy doping of CNT electrodes without damaging the perovskite layer, significantly improving the durability of perovskite solar cells¹⁾.

In practice, perovskite decomposed and generated almost no electricity after 30 days of storage under ambient conditions without encapsulation when using a silver electrode. In contrast, with TFE-doped CNT electrodes, electricity generation was still observed even after 260 days under the same conditions. Additionally, the appearance of the device indicated that the TFE-doped CNT electrode suppressed the decomposition of the perovskite layer.

Keywords : Carbon nanotube; Perovskite solar cell; 2,2,2- Trifluoroethanol; p-dopant

カーボンナノチューブ(CNT)は、化学的に安定しており、酸化や腐食に強いいため優れた耐久性を発揮する。p-ドーパント材料として硝酸は CNT 電極を p 型化として、その性能を向上させることができる。ところが、ペロブスカイト層を容易に破壊し、直接溶液を塗布することができず、取り扱いにも注意が必要である。本研究では、2,2,2-トリフルオロエタノール(TFE)を p-ドーパント材料として用いたところ、ペロブスカイト層を損傷させることなく容易に CNT 電極へのドーピングが可能であり、ペロブスカイト太陽電池の耐久性を向上させることを発見した¹⁾。

実際に、銀電極の場合では、未封止・大気下で 30 日間保管した時点でペロブスカイトが分解し、ほとんど発電しなかった。一方、TFE をドーピングした CNT 電極では、260 日後も同様の条件で保管した結果、発電を確認し、その見た目からもペロブスカイト層の分解を抑制していることがわかった。



1) N. Ueoka, A. S. Hidayat, H. Oshima, Y. Hijikata, and Y. Matsuo, *Photochem.* **2024**, 4, 319.