

再エネ拡大への貢献を目指す タンデム型ペロブスカイト太陽電池

Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells Contributing to Expansion of Renewable Energy Use

平野 樹 HIRANO Itsuki 塩川 美雪 SHIOKAWA Miyuki 五反田 武志 GOTANDA Takeshi

再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）は、将来の主力電源として期待されている。特に太陽電池は導入量が増えており、これまで以上に高効率化と長寿命化への要望も高まっている。

東芝のタンデム型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：以下、タンデム太陽電池と略記）は、発電層の電流整合を含むデバイス設計と、パッシベーション（不動態化処理）により、エネルギー変換効率（PCE）において、2025年に、主流の単結晶シリコン太陽電池を上回る性能である約31.3%を達成した。また、透明電極の成膜条件を最適化することで劣化を抑制して、長時間の光照射試験及び屋外試験において、優れた安定動作を実証した。更に、壁面・高架下など多様な日射条件での評価や、ガラス破損時に鉛が溶出するリスクに関する評価解析やフィールド実証を進めている。

Renewable energy generation, such as photovoltaic (PV) power generation, is a focus of high expectations as a future major power source. In particular, demand has arisen for solar cells with higher efficiency and longer lifetimes than ever before in line with the widespread adoption of PV systems.

In response to this market demand, Toshiba Corporation is vigorously promoting the practical realization of perovskite/silicon tandem solar cells. In 2025, we developed a tandem solar cell achieving a power conversion efficiency (PCE) of 31.3%, higher than that of dominant monocrystalline silicon solar cells, by optimizing the device design, including current matching between perovskite and silicon layers, as well as the passivation process. We have conducted long-term light soaking tests and outdoor tests, verifying that the cell exhibits highly stable performance by suppressing degradation through optimization of transparent electrode sputtering conditions. We are continuously engaged in development through evaluations under a wide variety of solar irradiation conditions, such as those associated with building facades and elevated structures, as well as analyses and field tests related to the risk of lead leakage in the event of glass breakage.

1. まえがき

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向け、再エネは主力電源として期待されている。その中でも太陽光発電は導入が進んでいるが、再エネを社会の主力電源とするためには、これまで以上に高効率・高耐久の太陽電池が求められている。太陽電池のPCEの向上と長寿命化は、発電コストを低減して社会への普及を促進するためには欠かせない。東芝は、これに応える技術として、2端子型のタンデム太陽電池の開発を進めている。

ここで取り上げるタンデム太陽電池は、シリコンとペロブスカイトから成り、太陽光を各発電材料で分担して吸収することで、太陽光のエネルギーを効率的に電力に変換する（図1）。

その結果、タンデム太陽電池は、従来の単接合太陽電池を超える高いPCEを実現する。特に、2端子型タンデム太陽電池は、現在主流であるシリコン太陽電池と同じシステムを利用できるため、比較的容易にシリコン太陽電池から置き換えられる。置き換えが進むだけで、国内の太陽光発電の発

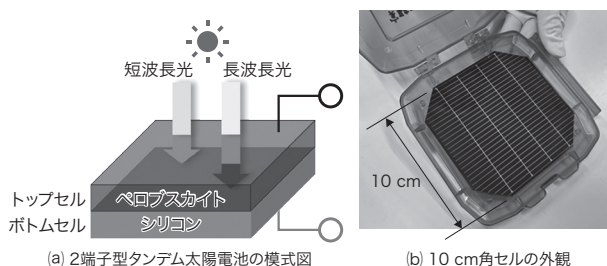


図1. 2端子型タンデム太陽電池の模式図と10 cm角セルの外観

ペロブスカイトが短波長光を吸収し、シリコンが長波長光を吸収する。これまでに10 cm角サイズでのタンデム太陽電池を試作した。

Basic principle of two-terminal perovskite/silicon tandem solar cell and tandem solar cell with dimensions of 10 x 10 cm

電量を増強できる。また、2端子型タンデム太陽電池の製造にはシリコン太陽電池と同じプロセス基盤を利用できるため、実用化への適応性が高い。

一方、社会実装を実現するためには、シリコン太陽電池と同等の20～30年の寿命が望まれている。ここで、タンデム太陽電池を構成するペロブスカイトは、水分・酸素・熱・UV

(紫外線)などの外部環境に対して化学的に不安定なため、結晶構造が変質しやすく、長寿命化が難しい。

これに対し、独自に発電コストの試算を行った結果、例えばタンデム太陽電池のPCEが27 %の場合、寿命がシリコン太陽電池と同等に30年であれば、我が国が目指している発電コスト(7円/kWh)を達成できることが分かった。このように、目指している発電コストの達成には、高効率化と長寿命化は至上命題である。

ここでは、当社のタンデム太陽電池のPCE向上に向けた取り組みと、耐久性評価及び屋外試験に関して述べる。

2. PCE向上に向けた取り組み

太陽電池のPCEは、短絡電流密度(Short Circuit Current Density) J_{sc} 、開放電圧(Open Circuit Voltage) V_{oc} 、曲線因子(FF: Fill Factor)の積から求められる。当社は複数の要素技術によってそれぞれのパラメータの改善に取り組み、2025年にPCE 約31.3 %を達成した(図2)⁽¹⁾。PCE 30 %を超える数値は、現在主流の単結晶シリコン太陽電池のPCEよりも優れており、タンデム太陽電池の実用化に向けた一つの節目と考えられている。以下ではそれぞれの要素技術について述べる。

2.1 デバイス全体の最適設計

2端子型のタンデム太陽電池では、トップセルのペロブスカイトと、ボトムセルのシリコンが電氣的に直列に接続されている。2端子構造は従来の太陽電池と同様に配線できるため、モジュール化が容易である。一方で、タンデム太陽電池は、いわゆる二つの太陽電池が直列接続していると言えるため、タンデム太陽電池として取り出せる電流は、二つの太陽電池のうち、小さい方に律速される。そのため、ペロブスカイトとシリコンの電流をそろえることで、タンデム太陽電池のPCEを

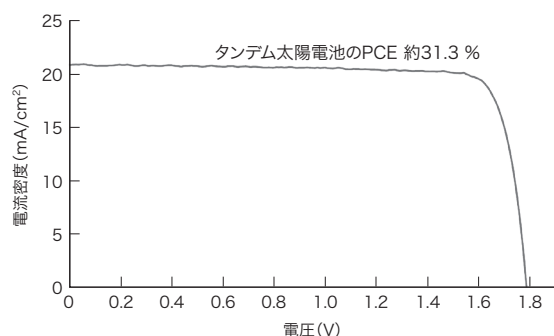


図2. 2端子型タンデム太陽電池のPCE(東芝測定)

セルサイズ6.25 cm²、アクティブエリア1 cm²のタンデム太陽電池の、電圧に対する電流密度の特性を測定した結果、PCE 約31.3 %を得た。

Result of measurement of PCE of tandem solar cell

最大化できる。

外部量子効率(EQE: External Quantum Efficiency)を測定すると、ペロブスカイトとシリコンの光生成電流密度(Photo-Generated Current Density) J_{ph} を明らかにすることができる。図3に作製環境、成膜条件が異なるタンデム太陽電池のEQEを示した。作製環境、成膜条件が異なると、ペロブスカイトのEQEが大きく変化することが分かる。前述の作製環境以外にも、当社は、ペロブスカイトの構成材料を改善するとともに、デバイス全体を光学的に最適化することで、ペロブスカイトとシリコンの J_{ph} が同等になるようにタンデム太陽電池を作製した。

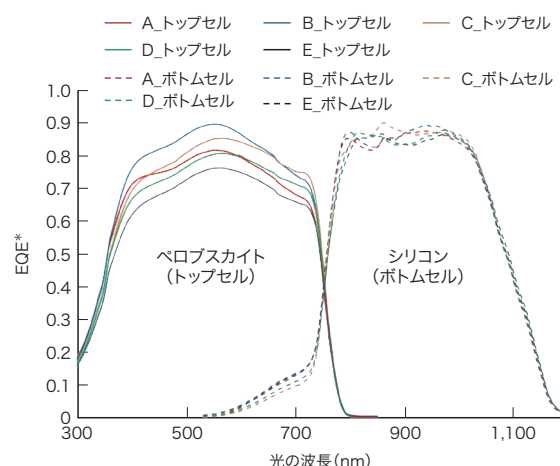
2.2 パッシベーションによる改善

ペロブスカイト結晶の表面やバルク中には欠陥が存在しやすく、欠陥準位を介して電子・正孔の再結合が増加すると、 V_{oc} やFFが低下する。パッシベーションは、ペロブスカイト結晶の表面の欠陥を低減又は不活性化し、再結合を抑制する役割を担う。

当社は、パッシベーションの最適化により、シリコン太陽電池並みの高いFFを持つペロブスカイト太陽電池を開発した。

3. 耐久性の評価

タンデム太陽電池では、ペロブスカイトを成膜した後に透明電極をスパッタ成膜するが、スパッタ成膜の際に、ペロブスカイトにダメージが加わることがあった。ペロブスカイトにダメージを与えにくい成膜条件を見いだすことで、劣化原因を



A, B, C, D, E: 作製環境、成膜条件が異なる個別のタンデム太陽電池

*タンデム太陽電池に入射した光子(光子)数に対して、外部に取り出せる電子数の割合

図3. ペロブスカイトとシリコンのEQE

作製環境や成膜条件の違いにより、ペロブスカイトのEQEが大きく変化することが示されている。

Results of measurements of external quantum efficiency (EQE) of perovskite and silicon layers in different tandem solar cells

抑えることができた。

2022年には、ガラスで封止したタンデム太陽電池に、疑似太陽光(100 mW/cm², AM1.5G(エアマス1.5グローバル), UVカットフィルター不使用)による1,000時間の光照射試験を行い、PCEの劣化率が10 %以内であることを確認した(図4)⁽²⁾。2022年当時の世界の光耐久性の報告例は、最長600時間であったことから、一気に約2倍になった。この成果は、応用物理学会の注目講演に選ばれ⁽³⁾、Nature Photonics誌の論文でも広く成果が紹介された⁽⁴⁾。以降、タンデム太陽電池の試験品作製において、ここで得られた成果を反映している。

また、寿命のボトルネックであるトップセルを模擬して、正負両極が透明電極になるようにガラス基板上にシースルーペロブスカイト太陽電池を作製し、夏季を含む4か月間の

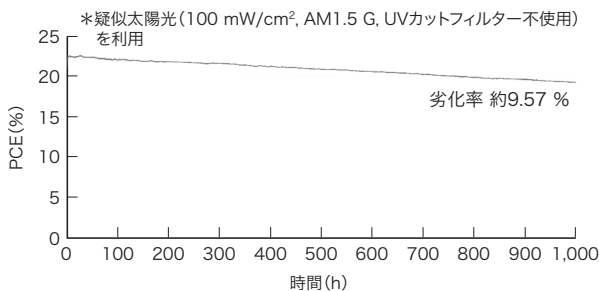


図4. 2端子型タンデム太陽電池の光照射試験

2022年に実施した光照射試験で、疑似太陽光の照射を開始して最初に安定したPCE 約21.2 %に対し、1,000時間後にPCE 約19.2 %を得た。以降、タンデム太陽電池の試験品作製においては、この成果を反映している。

Changes in PCE during light soaking tests for tandem solar cell developed in 2022

屋外運転試験を実施した(図5)。1日分の日射量は0.39～6.44 kWh/m²、晴天時のモジュール温度は最大59 °Cに達した。1日分の日射量に対する発電量から変換効率を算出した後、日々の変換効率に対する近似直線を求めた結果、傾きがほぼゼロであった。夏季の屋外で安定動作することを確認できた⁽⁵⁾。

4. 屋外試験

新型の太陽電池では、劣化現象の理解が十分ではないため、実際の屋外環境にさす試験が不可欠となる。当社では屋外試験を三つの観点から実施している。

4.1 理想的な環境での屋外試験

はじめに、太陽光の直達光が十分に得られる、いわば理想的な環境での評価である。これは住宅屋根や産業用太陽光発電所に近い従来型の設置環境であり、大学や公的研究機関に整備された試験設備を活用し、各機関の協力を得ながら取り組みを進めている(図6(a))。

4.2 道路用途の実証試験

次に、太陽電池の導入を更に拡大するためには、多様な日射条件下でも高い性能を示すことを実証する必要がある。当社では、その具体例として道路用途に着目し、タンデム太陽電池として国内初となる実証試験を開始した⁽⁶⁾。

図6(b), (c)に示すように、阪神高速道路(株)との共同研究により、建築物の壁面や高架下などを実証フィールドとして活用した。直達光、反射光、光量変動など、複雑な光環境が混在する屋外条件下で太陽電池の性能評価を行った。

4.3 環境調和の実証試験

最後に、環境との調和を重視した技術開発にも取り組ん

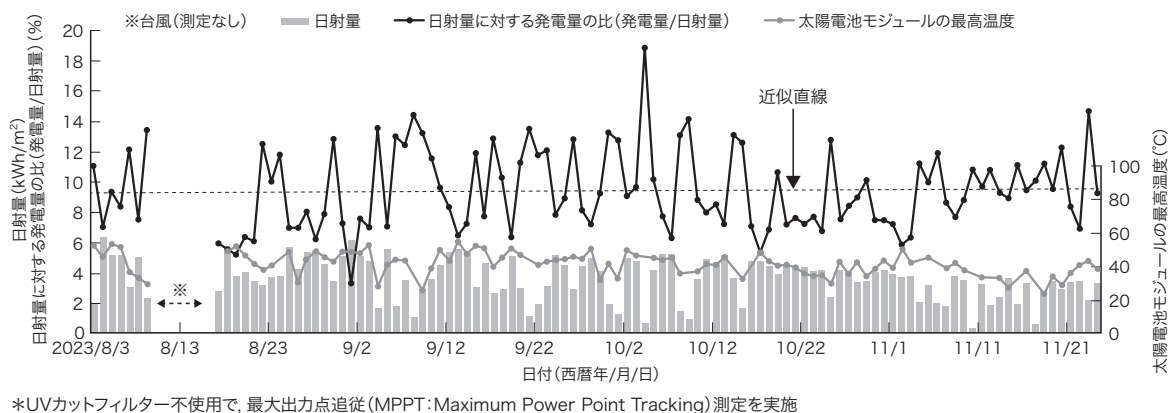


図5. シースルーペロブスカイト太陽電池の屋外運転試験

タンデム太陽電池のトップセルを模擬した“ガラス封止したペロブスカイト太陽電池”モジュールを屋外に設置し、最大出力点追従測定を実施した結果、劣化が少なかった。

Results of outdoor tests using see-through perovskite solar cells

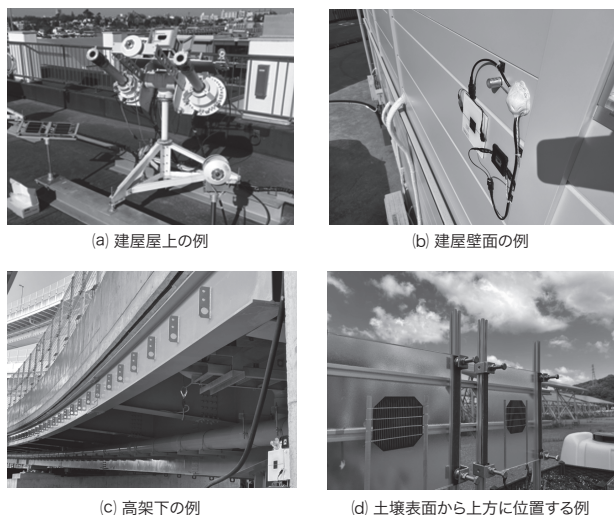


図6. 屋外試験環境の例

理想的な条件に対して、低照度条件での屋外運転試験や、土壌に鉛が溶出しないことを実証する試験を実施している。

Examples of outdoor test environments

でいる⁽⁷⁾。ペロブスカイト太陽電池には微量の鉛が含まれるが、フィルム型は柔軟な封止構造を採用しているため、BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) のような管理された用途で使用する場合には鉛に関する懸念はほとんどない。

一方、タンデム太陽電池は従来のシリコン太陽電池の代替として利用される可能性が高く、より自然環境に近い場所で使用されるケースも想定される。そのため、シリコン太陽電池と同様にガラス板で封止されるが、大規模地震などの想定外の外力によりガラスが破損し、雨水が浸入した場合には、鉛が自然環境へ流出する懸念が生じる。

この懸念に対し、環境省の委託事業「地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業／タンデム型ペロブスカイト太陽電池向け鉛安定化技術の開発・実証」において、鉛溶出を防止する技術開発や、自然環境に近い条件下で鉛が溶出しないことを実証する取り組みを進めている(図6(d))。

5. あとがき

2024年度に閣議決定された第7次エネルギー基本計画では、国内の電源構成に占める太陽光発電の比率を、2040年度に23～29 %程度とする見通しが示された。これは、太陽光発電量を従来の2倍以上に拡大することを意味する。これを実現するためには、高いエネルギー変換効率と長寿命を両立したタンデム太陽電池が不可欠であると考えている。更に、国内には必ずしも日照条件に恵まれていない地域も多いことに着目し、低照度特性に優れたタンデム太陽電池を開発

することで、総発電量の増加を目指す。これにより、全国各地への太陽光発電の導入を後押しし、我が国における再生エネルギーの主力電源化に貢献する。

この研究の一部は、環境省の地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業、NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の補助事業「太陽光発電導入拡大等技術開発事業／次世代型太陽電池技術開発」(JPNP25011)で実施した。

文 献

- (1) 東芝, “ペロブスカイトとシリコンの2端子タンデム型太陽電池でエネルギー変換効率31.3%を実現”, トップページ 再生可能エネルギー・VPP 製品・技術サービス 太陽光発電, <<https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/renewable-energy/topics/energy-aggregation/smartgrid20242.html>>, (参照 2026-04-01).
- (2) 塩川美雪, ほか, “ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の1000時間光耐久性”, 第70回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 東京, 2023-03, 応用物理学会, 2023, 18p-A408-2.
- (3) 応用物理学会, “応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース”, 応用物理学会春季学術講演会 14件の注目講演プレスリリース, <<https://www.jsap.or.jp/docs/pressrelease/JSAP-2023spring-chumoku-12.pdf>>, (参照 2026-04-08).
- (4) Horiuchi, N. "Photonics blossoms in Japan". Nature Photonics Meeting Reports. <<https://www.nature.com/articles/s41566-023-01219-8>>, (accessed 2026-04-16).
- (5) 五反田武志, ほか, “ペロブスカイト/SiタンデムPVのシースルートップセルの長寿命化”, 第71回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 東京, 2024-03, 応用物理学会, 2024, 25p-22C-6.
- (6) 東芝, “国内初、タンデム型ペロブスカイト太陽電池の実証実験を開始”, トップページ 再生可能エネルギー・VPP 製品・技術サービス 太陽光発電, <<https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/renewable-energy/topics/energy-aggregation/smartgrid202421.html>>, (参照 2026-04-01).
- (7) 東芝, “環境省委託事業においてタンデム型ペロブスカイト太陽電池のフィールド試験を開始”, トップページ 再生可能エネルギー・VPP 製品・技術サービス 太陽光発電, <<https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/renewable-energy/topics/energy-aggregation/perosili11.html>>, (参照 2026-04-01).



平野 樹 HIRANO Itsuki

エネルギーアグリゲーション事業部 次世代太陽電池開発部
応用物理学会会員
High-Performance Photovoltaics Development Dept.



塩川 美雪 SHIOKAWA Miyuki

エネルギーアグリゲーション事業部 次世代太陽電池開発部
応用物理学会会員
High-Performance Photovoltaics Development Dept.



五反田 武志 GOTANDA Takeshi, D.Eng.

エネルギーアグリゲーション事業部 次世代太陽電池開発部
博士(工学)
応用物理学会会員
High-Performance Photovoltaics Development Dept.