

極薄ペロブスカイト太陽電池と搭載用太陽電池測定系の開発と課題

JAXA 金谷 周朔, 宮澤 優, 福家 英之, 豊田 裕之, 廣瀬 和之
 桐蔭横浜大学 池上 和志 紀州技研工業 船山 遼斗

1. はじめに

我々は、塗布による製造で軽量・柔軟な薄膜構造を実現可能というペロブスカイト太陽電池の特徴に注目し、気球やインフレータブル構造上での発電、またウェアラブル発電への適用を目指した研究開発を行っている。ペロブスカイト太陽電池は2009年に宮坂力教授（桐蔭横浜大学）らが開発した、日本発の新しい太陽電池であり[1]、塗布により簡易・低コストに製造可能、光吸収係数が高いため発電層を薄くでき軽量化が可能、150°C以下の低温成膜が可能、高効率化を実現可能などの優れた特徴をもつことから、次世代太陽電池として世界中で注目されている。2009年に開発されて以降、2013年頃から世界中で高効率化、高耐久化に向けた研究が加速し、2020年には最高効率25.5%が達成されている[2]。

図1(a)にペロブスカイト太陽電池の基本的な構造を示す。ペロブスカイト太陽電池は、基板の上に、透明導電膜、電子輸送層、ペロブスカイト層（発電層）、ホール輸送層、電極、を様々な方法で積層し、作製される。発電層であるペロブスカイト層は ABX_3 で表される3つの構成要素を有するペロブスカイト結晶によって構成される（図1(b)）。ペロブスカイト層（発電層）を含む各層の材料・組合せ・製造方法の自由度は高く、耐久性の強化や変換効率の更なる向上に向けて材料・構成・製造方法の最適化を目指した研究開発が盛んに行われている[3]。JAXAでは宮澤らが放射線耐性の高さを世界に先駆けて明らかにし、宇宙応用の可能性を示した[4]。更に、2017年度からは宇宙探査イノベーションハブ事業にて、温度や湿気・光に対する耐久性向上やモジュール化技術の向上などに、大学・国内メーカーと共同で取り組んでいる[5]。

本稿では、気球膜としての利用を目指した極薄ペロブスカイト太陽電池の開発状況と気球実験に搭載する小型太陽電池測定系の開発と課題について報告する。

2. 本研究のゴールと実験概要

2017年から福家の呼びかけにより、気球の高度化に向けた気球膜として使用可能な極薄ペロブスカイト太陽電池の開発と大気球飛行実験を開始した。大気球で使用されている薄膜フィルム（LDPE：Low-Density PolyEthylene、典型的には20 μm厚）にペロブスカイト太陽電池を成膜した、発電可能な気球膜の実現を目指している。大気球は直径が数10~100 mで表面積が大きく、全面に太陽電池を塗布できれば100 kW~1 MW級の発電が可能となる。従来の典型的な気球実験より3桁程度も大きな電力源を持つことで、たとえばパワードバルーン[6]の推進機など既存の枠を超えた次世代型技術に道が拓け、気球実験の高度化に大きく貢献できる。

上記目標の実現に向け、気球飛行実験で継続的な太陽電池の評価が可能となるよう、インハウス開発の小型太陽電池測定回路を搭載した測定ボックスとボックス側面搭載の太陽電池（リファレンス用シリコン太陽電池と評価用ペロブスカイト太陽電池）で構成されたゴンドラを開発

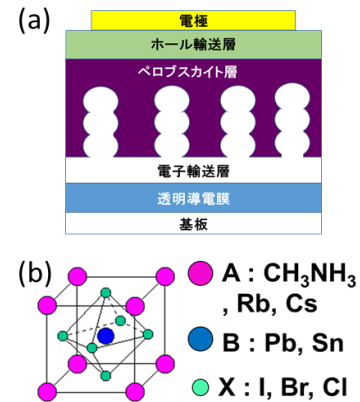


図1：ペロブスカイト太陽電池の基本構成要素

した(図2(a)(b))。電気特性を取得するペロブスカイト太陽電池は2面(A, B面)に、短絡電流のみ取得するリファレンス用シリコン太陽電池は4面(A, B, C, D面)に搭載した。(図2(c))太陽電池測定系は太陽電池測定回路とその制御のための他プロジェクトで実績のあるFPGAモジュール「U-TeCS」[7]によって構成される。測定系は電源を接続した時点から太陽電池の測定を開始し、ペロブスカイト太陽電池を搭載している2面の測定を交互に行う仕様となっており、コマンドを必要としない構成とした。

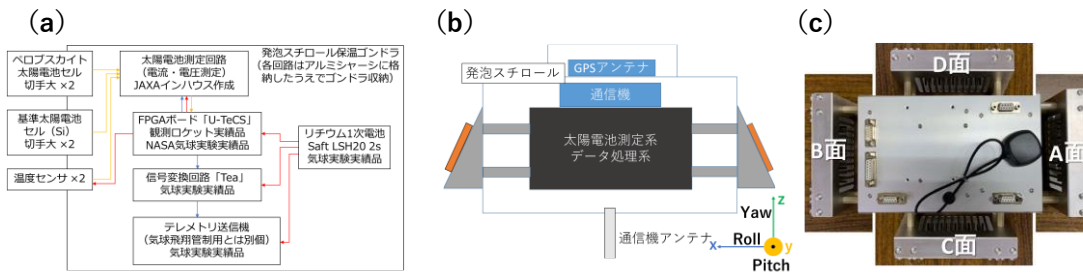


図2: 評価システム・ゴンドラ概略図

このゴンドラを用いて、ゴム気球もしくは大型気球実験のピギーバック飛行環境で太陽電池の特性を取得・評価する。2019年度にゴム気球による第1回気球実験を実施し、ゴム気球ゴンドラの飛行中の姿勢データを得た。解析の結果、上昇中は絶えず10-20 rpmで回転しており、大きな振り子運動も継続されることが明らかになった(図3)。それゆえ、気球上昇中に約2200組、降下中は約900組のガラス上に成膜したペロブスカイト太陽電池IVデータを取得したが、姿勢が準安定で太陽電池が太陽に正対していた瞬間は限られており、評価データの取得には成功したものの、その頻度は非常に限定的であった。

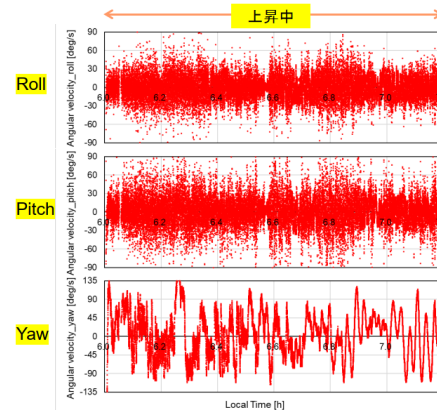


図3: ゴム気球上昇中姿勢データ

3. 実験ゴンドラと極薄ペロブスカイト太陽電池の開発状況

2019年度のゴム気球飛行データを踏まえて、姿勢攪乱を抑制する効果が見込まれるスイベルの導入や、太陽電池IV特性の測定速度などの改善を目指して開発を進めた。

2項で述べた通り、太陽電池の高精度な気球環境上での発電特性の評価に必要な改良として、回転の抑制、振り子運動の抑制、太陽正対する時間を長くする工夫、が必要であると考えられる。IVスイープ中の太陽光入射条件の変化が小さくなるよう、以下の3つの対策を実行した。飛行中のゴンドラ回転、振り子運動を抑制する機構として荷姿にスイベルを追加し、微風時の立て上げ放球法を採用した。2020年度時点でスイベル搭載に必要な耐荷重などの検証を完了している。さらに、太陽正対する短い時間でIVスイープを完了させるため、2019年度の1秒間かけて1つのIV特性を取得するという測定から、スイープ速度を最大で10倍まで高速化させた。また、測定の高精度化のため、測定点数を10倍以上まで増加させた。2020年度気球実験では、測定回路がテレメトリRF無線の影響を受ける事象が発覚して実験実施を断念したが、2021年度にはこれを解決し、実験に臨んだ。

測定システムの改良と並行して、極薄ペロブスカイト太陽電池の開発を行ってきた。ペロブスカイト太陽電池は、ペロブスカイト層と電子・正孔輸送層の厚みが合計1 μm以下と十分に薄く

[3]、軽量かつ柔軟、塗布によって作製可能という特徴から LDPE 上に成膜する太陽電池に適していると考えられる。しかしながら、LDPE は耐熱温度が 80°C 以下と低く、特に 20 μm 程度の厚さのものは柔軟性も高いため、耐熱要求を満たした成膜方法の確立が難しく、LDPE 上ペロブスカイト太陽電池はこれまで報告されていない。これまでの研究開発によって、90°C 以下での成膜に成功し、変換効率が 6% の LDPE 上ペロブスカイト太陽電池の開発に成功した。しかし、LDPE 上太陽電池の封止技術が確立していないこと、更には、測定システムの精度を考慮すると性能が十分に高くないことから、気球飛翔実験への採用には至らなかった。変換効率が低い原因は、LDPE 上ペロブスカイト太陽電池の各層間の密着性の低さ、またはペロブスカイト成膜時の焼結温度の低さと考えられ、太陽電池セル製作条件や材料の最適化により改良を進めていく。また 2020 年度までの開発で課題として挙げた LDPE の支持基板(ガラス)から剥離する際の LDPE へのストレスは、支持板-LDPE 間の粘着剤の粘着性の検討により低減されたものの、剥離の際に LDPE の伸びストレスは残っており、さらなる改善が必要である。

また、LDPE 上ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けては、封止方法や電力線取り付け方法の確立も課題であり、上記と並行して取り組んでいる。LDPE より耐熱性に優れる PEN や PET 基板では低温成膜方法や封止方法の検討が進んでいる[8,9]。PEN や PET 基板上のペロブスカイト太陽電池を LDPE と並行して開発し、LDPE 上ペロブスカイト太陽電池の開発が遅れた場合のリスク対策とすると共に、低温成膜法の技術を LDPE 上での成膜に流用することで LDPE 上ペロブスカイト太陽電池の研究開発を加速させる。

2021 年度には、問題を解決した測定回路を搭載したゴンドラに 125 μm 厚 PET 基板上ペロブスカイト太陽電池を搭載し、気球飛翔実験を行った。次項で 2021 年度気球飛翔実験結果の解析状況を報告する。

4. 2021 年度気球飛翔実験結果速報

2021 年度の実験は、ゴム気球での BS21-07 実験として採択された宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が提供する大気球による飛翔機会をいただき、2021 年 7 月 4 日に放球され、現在は取得データの解析を進めている。解析結果の速報を以下に記す。

ゴム気球は放球～約 4900 秒上昇し、その後約 2200 秒かけて下降した。その際、上昇中 17252 組、下降中は 7026 組のデータを取得した。2019 年度実験では、上昇中 10-20 rpm で吊り紐周りに回転していたが、2021 年度実験では 4 面に搭載したシリコン太陽電池短絡電流の挙動解析から、上昇中は 5～10 rpm 程度となっており、気球-ゴンドラ間に導入したスイベルの効果、または放球法を立て上げ法に変えたことで吊り紐周りの回転が抑制されたと考えられる。次に、取得したデータ解析を実施し、ジャイロセンサと基準シリコン太陽電池の短絡電流出力から得られた、姿勢が準安定かつ太陽正対した瞬間の高度、緯度経度を図 4 に示す。測定回路は着水まで動作したことが分かる。次に、B 面搭載ペロブスカイト太陽電池のフライト中太陽正対時と、同太陽電池の地上で取得した短絡電流と開放電圧の温度特性を図 5 に示す。発電層が $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ で構成される一般的なペロブスカイト太陽電池では、常温～-60°C 付

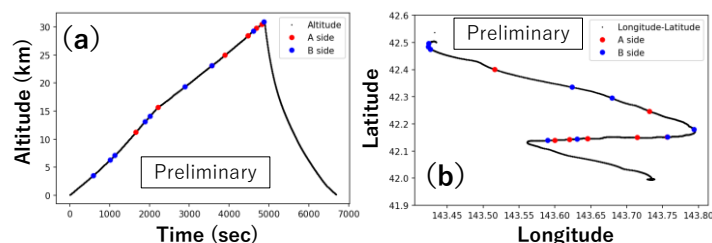


図 4: 太陽電池太陽正対時の(a)高度(b)緯度経度

す。発電層が $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ で構成される一般的なペロブスカイト太陽電池では、常温～-60°C 付

近で短絡電流は一定、開放電圧は上昇傾向にある[10]が、本実験で搭載した発電層が $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{CsPb}(\text{I}_x\text{Br}_{1-x})_3$ で構成されるペロブスカイト太陽電池は同様の挙動を示さない。しかしながら、今回搭載したセルでは、フライトデータと地上データの両方において、短絡電流の -30°C 以下の低温領域で急激に低下する傾向が見えており、本セル特有の挙動であることが考えられる。今後、この温度特性の理解のため、同セル構造での低温による機械的な変化や、複数材料で構成されている電極の抵抗の温度変化など詳細な検討とデータ解析が必要である。

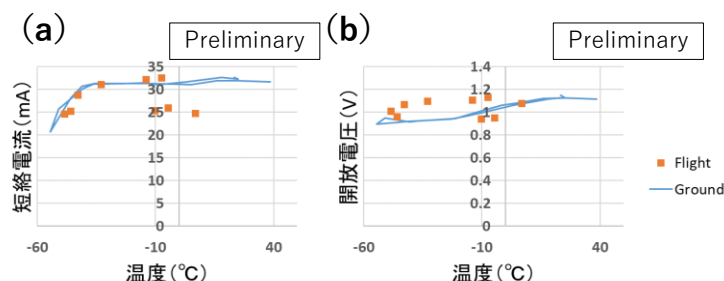


図 5: フライトデータと地上取得データの比較、ペロブスカイト太陽電池温度特性(a)短絡電流(b)開放電圧

5. まとめ

ペロブスカイト太陽電池を気球膜上に成膜し、気球の高度化に寄与することをゴールとした、極薄ペロブスカイト太陽電池の開発状況と 2021 年度気球飛行実験の結果速報について報告した。2019 年度から測定掃引速度や精度の向上、RF ノイズ対策など、測定システムの改良が進み、テストベンチの開発は完了したと考える。また、2019 年度のゴンドラから改良を進め、スイベルの導入や測定回路の高速化、RF ノイズ対策を実施し、2021 年度には飛行実験を行うことができた。気球飛行環境でのペロブスカイト太陽電池特性の取得ができたが、さらなる解析を実施することで、本太陽電池の理解を進めたい。そして、最終目標である極薄ペロブスカイト太陽電池の実現には、柔軟構造への低温成膜など多くの課題があるが、気球飛行実験を実施しフィードバックを得ることでこれらを段階的に解決していきたい。

謝辞

本研究の一部は、JST イノベーションハブ構造支援事業に基づく JAXA 宇宙探査イノベーションハブ共同研究「高効率・低コスト・軽量薄膜ペロブスカイト太陽電池デバイスの高耐久化開発」として支援を受けたものである。

桐蔭横浜大学の榎一真さんには、本研究にご尽力いただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Kojima et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 131, (2009) 6050-6051.
- [2] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [3] M. Saliba et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 57, (2018) 2554-2569.
- [4] Y. Miyazawa et al., *iScience*, 2, (2018) 148-155.
- [5] 宮澤優 他、第 62 回宇宙科学技術連合講演会 (2018) 1B14.
- [6] 井筒直樹 他、平成 25 年度大気球シンポジウム (2013) isas13-sbs-014.
- [7] 森吉貴大 他、第 62 回宇宙科学技術連合講演会 (2018) 2L21.
- [8] A. Kogo et al., *Chem. Com.*, 52, (2016) 8119-8122.
- [9] Z. Liu et al., *Nano Energy.*, 28, (2016) 151-15.
- [10] Yihua Chen et al., *Joule*, 4, (2020) 1961-1976.