

## 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, 實平 義隆

### 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長に注目し、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]。

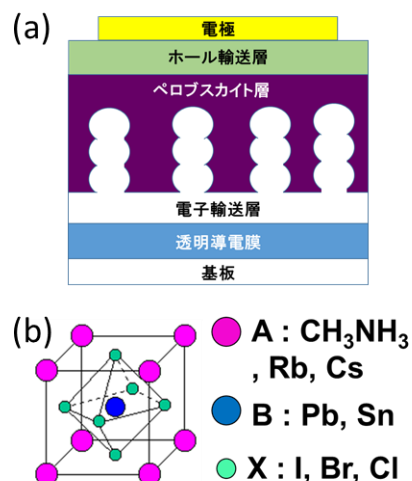


図 1: ペロブスカイト太陽電池の基本構成要素

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ゴム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. 本研究のゴールとこれまでの実験で得られた成果

2017 年から福家の呼びかけにより、気球の高度化を目指して、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翔実験を開始した。大気球は直径が数 10~100m 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、2019 年度にゴム気球による第 1 回気球実験を、インハウスで開発した小型軽量の太陽電池特性測定回路とガラス上ペロブスカイト太陽電池を搭載して実施した。

これにより、太陽電池基本特性の測定回路の骨格を構築したと共に 1mm 厚のガラス上ではあるものの、地上では模擬の難しい気球飛翔環境（低気圧、低温、高照度の複合環境）におけるペロブスカイト太陽電池の特性取得に成功した。また、これまでゴム気球搭載ゴンドラの飛翔中の姿勢に関する知見は得られていなかったが、2019 年度の飛翔で得た姿勢データから、上昇中は絶えず 10-20rpm で回転しており、大きな振り子運動も継続されることを明らかにした（図 2）。2019 年度の実験ではゴンドラの能動的な制御や安定化を行っておらず、また、立て上げ放球法ではなくダイナミック放球法が採用されたことで、放球時に大きな初期擾乱が与えられた。そのため、気球上昇中に約 2200 組、降下中は約 900 組のデータを取得したが、姿勢が準安定で太陽電池が太陽にほぼ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。その一例を図 3 に示す（高度は約 28.9km、太陽電池の温度は約-20°C、太陽入射角は約 10° であった）。シリコン太陽電池の電流電圧 (IV) 曲線は地上での校正値と一致しており、測定システムが正常に動作していることを確認できた。一方、ペロブスカイト太陽電池の性能は地上測定時から低下していることが判明した。放球時から連続的に評価できる IV 曲線を取得できていないため、劣化要因は不明であり、今後の研究で明らかにする必要がある。

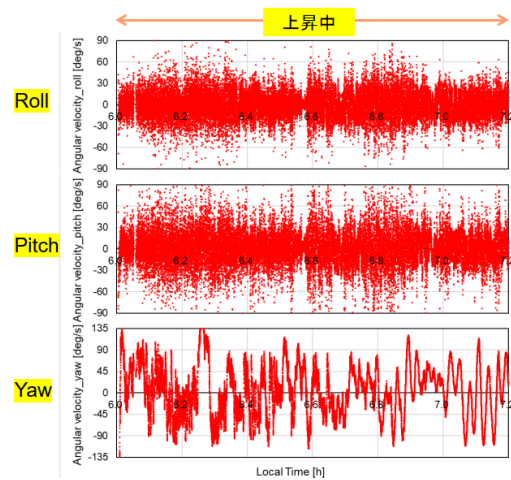


図 2: ゴム気球の上昇中の姿勢データ

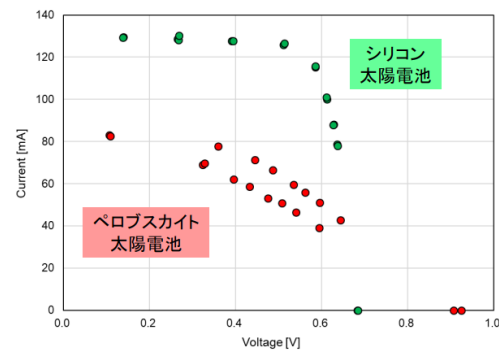


図 3: 気球飛翔環境における姿勢準安定、太陽正対時の搭載太陽電池の IV カーブ

### 3. 極薄ペロブスカイト太陽電池と実験ゴンドラの開発状況

本研究で目指すのは、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である。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 度以下と低く、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。ペロブスカイト太陽電池の一般的な成膜方法では、透明導電膜や電子輸送層の成膜時に高温処理が必要とされ、スピコート法では平らな基板を用いた成膜が必要とされる。したがって、LDPE 上ペロブスカイト太陽電池を実現するには、80 度以下の低温成膜方法と柔軟構造上に成膜する方法の確立が課題となる。低温成膜法に関しては、最大の課題であった透明導電膜成膜法を検討し、シート抵抗値要求を緩和し、

スパッタリング時間を短くすることにより成膜できることを見出している。他の層については現状 100°C以下での製法を確立しており、LDPE 上ペロブスカイト太陽電池で 10%の効率を実現した。しかしながら、前述の太陽電池は作業性確保のために LDPE フィルムがガラスの支持基板に取り付けられた状態であった。最終形態とするため、ガラス支持基板から LDPE フィルムを剥がすと、ペロブスカイト太陽電池に負荷がかかり、太陽電池として評価できなくなるという課題が残されている。原因は、LDPE フィルムを支持基板からはがす際の急激な曲げによるショート故障と考えており、支持基板を用いない成膜法、もしくは急激な曲げを回避する支持材からの剥がす方法の検討を進めている。更に現状 100°Cの成膜温度を LDPE の耐熱温度である 80 度以下に下げる検討も進めている。

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。尚、LDPE より耐熱性が少し高い 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 [7, 8]。PEN 基板や 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。尚、2020 年度の気球飛翔実験に向けては、フレキシブル基板上ペロブスカイト太陽電池の気球飛翔実験の第一歩として、125 μm 厚の PEN 基板上に高耐久化が見込める Cs を発電層に添加した太陽電池を開発した。

また、極薄ペロブスカイト太陽電池の開発と並行して、気球実験プラットフォームを利用した継続的な太陽電池の評価を可能にするために開発した太陽電池評価システムの詳細について述べる。大型気球実験のピギーバックに加え、小型ゴム気球での飛翔も視野に入れ、質量 2 kg 以下のシステム構築を目指した。評価システムのブロック図を図 4 (a)、

ゴンドラの模式図を図 4 (b) に示す。搭載用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」[9]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、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なっている。リファレンスとして、温度特性・照度特性が既知のシリコン太陽電池を評価対象のペロブスカイト太陽電池の隣に搭載し、太陽光入射角などのデータ補正に利用した。

2 項で述べた通り、ゴム気球のゴンドラ

姿勢解析から、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、が必要であることが判明している。回転を抑制する機構として荷姿にスイベルの追加を検討し、2020 年度時点で搭載に必要な耐荷重などの検証を完了している。次に振り子運動の抑制案として微風時の立て上げ放球法の採用を検討している。さらに太陽電池が太陽正対する一瞬をとらえて電気特性を取得するため、2019 年度の、太陽電池に接続した負荷抵抗値をサイクリックに切り替え

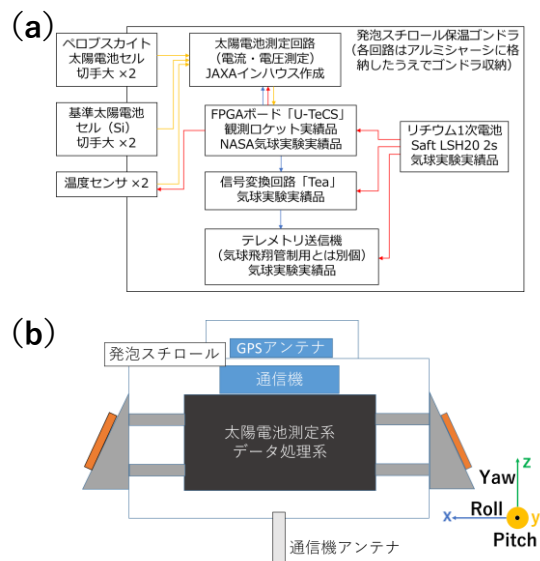


図 4：評価システム図

てIV特性を取得するという測定から、測定掃引速度を6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。しかし、2020年度気球実験では、測定回路がテレメトリRF無線の影響を受けて回路内のアンプが正しい値を出力しなくなる問題が発覚して実験実施を断念した。これは、測定の感度向上のため2019年度の回路からアンプ増幅率を大幅に増加させたことや、それにもかかわらず事前の無線RF影響評価が不十分であったことが原因と考えている。

2021年度の実験では、問題を解決した測定回路を用い、薄膜化を推し進めたペロブスカイト太陽電池の特性を気球飛翔環境で取得し、環境耐性を評価する。

#### 4. 2021年度気球実験計画概要

2021年度気球飛翔実験に向けて、気球膜として使用されるLDPE上へのさらなる低温成膜検討と封止方法、電極取り出し方法の検討を進める。また、現状ペロブスカイト層(発電層)は湿度に対する耐久性が低いため、 $ABX_3$ のAサイト(図1(b))への導入によって高耐久化が報告されているRb、Kを添加した発電材料などを候補として研究開発を進めている。PETやPEN基板上の太陽電池はLDPE上太陽電池が評価できる段階に達しなかった場合のバックアップとして開発する計画である。

ゴンドラについて、2020年度でフライトを予定していた構成での実験実施を計画している。先述の「荷姿へのスイベル実装によるゴンドラ姿勢安定化」「測定回路の高速化」という二重の対策により、姿勢変動の影響は大幅に緩和される見込みである。それに加え、評価基準として搭載予定のシリコン太陽電池を4面に搭載し、短絡電流を測定する構成とすることで、太陽方向と不安定なゴンドラ姿勢の正確な把握を目指す。

また、2020年度に発覚した回路のRF無線問題については、回路の増幅率やGND設計の見直しにより解消する。

#### 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搭載用太陽電池測定系の課題と対策について報告した。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、気球飛翔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ゆきたい。また、搭載用太陽電池測定系について、ゴム気球に搭載可能な小型軽量、高精度な測定系の実現のため、ゴンドラの姿勢安定度向上やRF対策の施工などの残された課題を着実に解決し、気球実験プラットフォームを利用した継続的な太陽電池の評価が可能となるよう開発を推し進めていく。

#### 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] A. Kogo et al., *Chem. Com.*, 52, (2016) 8119-8122.
- [8] Z. Liu et al., *Nano Energy.*, 28, (2016) 151-15.
- [9] 森吉貴大 他、第62回宇宙科学技術連合講演会(2018)2L21.