

極薄ペロブスカイト太陽電池の気球飛翔実験計画

JAXA 金谷 周朔, 宮澤 優, 福家 英之, 豊田 裕之, 廣瀬 和之

1. はじめに

我々は、気球の膜上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適用可能な、塗布によって簡易に作製できる「極薄ペロブスカイト太陽電池」の開発を目指している。そこで、適用先の一つとして考えている気球膜状発電の実現に向けて気球飛翔環境での極薄ペロブスカイト太陽電池動作試験を世界に先駆けて行うと共に、今後の本格的な開発に向けたテストベンチを構築することを目指して2019年度気球実験の申し込みを行った。本稿では、本実験の背景、計画、期待される成果、実験概要について述べる。

2. 極薄ペロブスカイト太陽電池の研究背景

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、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度的に盛んになっている。以降、変換効率の記録も急上昇し、2018年には最高効率23.3%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成要素を示す。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）、正孔輸送層、電極、をスプレー熱分解法、スピコート法、スパッタ法、など様々な方法によって積層することで太陽電池を作製する。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）や電荷輸送層の材料・構成・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、宮澤を中心に2014年度から宮坂教授らと共同でペロブスカイト太陽電池の研究に着手し、宇宙機への応用適用可能性を追求する研究を実施して、宇宙応用時に最大の課題となる放射線耐性が現在の宇宙用太陽電池として主流である3接合化合物太陽電池に比べて高いことを世界に先駆けて明らかにした[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「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」を開始し、低照度下でも高効率を維持する特徴を生かしたIoT発電デバイス用としての実用化、更にその先には宇宙応用を目指して、課題である温度や湿気・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]。

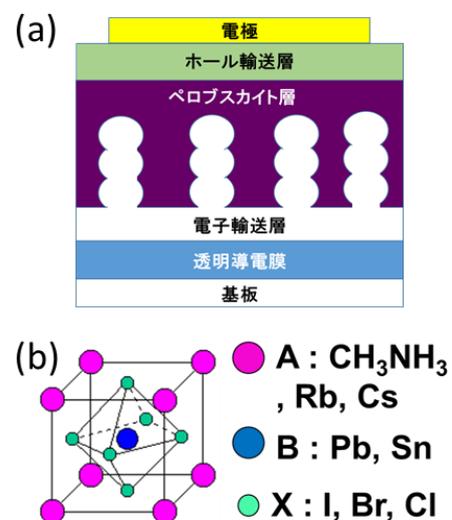


図 1: ペロブスカイト太陽電池の基本構成要素

また、2017年福家の呼びかけにより、気球の高度化を目指して気球膜上発電のために気球飛翔環境でのペロブスカイト太陽電池の動作試験を行うこととした。

地上での太陽光発電やIoT用発電デバイスに向けて開発しているペロブスカイト太陽電池は、ガラスやPET/PENフィルム上に成膜している[6]。特に、150°C程度以下の低温で成膜しなければいけないPET/PENフィルム上に成膜できることは、ペロブスカイト太陽電池の優れた特徴の一つである。しかし、更なる薄膜化、また、PET/PENより柔軟なフィルムへの成膜が実現できれば、気球の膜上発電のみならず、インフレーター構造上での発電、ウェアラブル発電など革新的な発電が可能となり、イノベーションを起こすことができる。そこで、我々は極薄ペロブスカイト太陽電池の開発を最終ゴールとし、来年度の気球飛翔試験では、極薄ペロブスカイト太陽電池の適用先の一つとして考えている気球膜上発電のために気球飛翔環境での動作試験を世界に先駆けて行う。

3. 極薄ペロブスカイト太陽電池の研究計画

極薄ペロブスカイト太陽電池の気球飛翔実験に供する極薄ペロブスカイト太陽電池の検討状況について述べる。基板、透明導電膜を除く他の太陽電池膜は厚みが計 $1\mu\text{m}$ 以下であるため[3]、極薄ペロブスカイト太陽電池開発のキーとなるのは基板の選定と透明導電膜の成膜である。基板に求められる条件は、(1)柔軟で曲げに強いこと、また(2)ペロブスカイト層成膜時の熱に耐えられること、である。(1)の条件を満たす極薄ペロブスカイト太陽電池の基板として気球用薄膜フィルム(典型的には $20\mu\text{m}$ 厚、LDPE: low density polyethylene)に着目した。気球用薄膜フィルムに透明導電膜を成膜できれば、適用先の気球膜上発電に大きく近づく。(2)については 120°C 以下での低温成膜が報告されている[7]が、我々は気球用薄膜フィルムが耐えられる 80°C 以下での低温成膜の実現を目指す。

PET $20\mu\text{m}$ 厚、PEN $125\mu\text{m}$ 厚を基板とした薄膜フィルム上への成膜はすでに報告されている[6, 8]が、PET/PENより柔軟なLDPE上への成膜の報告はなく、世界初の試みである。直径が数 $10\sim 100\text{m}$ の大気球の表面積は大きく、その全面に太陽電池を塗布できれば、たとえ変換効率が10%程度と低くても 100kW 級~ 1MW 級の発電が可能となる。従来の気球実験より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[9]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。さらには気球膜上発電のみならずウェアラブル発電、インフレーター構造物上での発電も実現可能と考えられ、空間・重量の制約を大幅に緩和させる革新的な発電の実現が可能となる。

現状では、先述した通り、LDPEフィルムの耐熱温度とフィルム上にペロブスカイト太陽電池を成膜するのに必要な温度に乖離があるため、透明導電膜層を中心に低温成膜化方法の検討を進めている。今後は、作製した太陽電池の性能や耐久性評価結果を製造プロセスへフィードバックし、このサイクルを繰り返すことで、最終ゴールとして極薄($20\mu\text{m}$ 厚程度のポリエチレン上の)ペロブスカイト太陽電池の開発を目指す。

今回我々が提案した2019年度の飛翔実験では、今後の本格的な開発に向けたテストベンチを構築することで膜上発電用極薄ペロブスカイト太陽電池開発の一里塚とし、気球実験の高度化に貢献することを目指している。第4項では気球飛翔試験で期待される成果、第5項ではテストベンチを含めた気球飛翔実験の全体概要を述べる。

4. 今回の気球飛翔により期待される成果

2019年の気球実験により期待される成果は次に示す通りである。小型の太陽電池を気球

で飛翔させて発電特性を計測する小型の評価システム（ピギーバックを念頭に置いたテストベンチ）を構築しフライト実証することで、今後の本格的な極薄ペロブスカイト太陽電池開発において、評価システム開発不要による開発時間・開発コスト削減の低リソース化、並びに高頻度での気球実証実験を可能にし、気球の膜上発電に向けた開発を加速する。

また、地上では模擬が難しい気球飛翔の複合環境（低い気圧、低い環境温度、および太陽光入射）にてペロブスカイト太陽電池のプロトタイプを実際に飛翔させ発電特性データを取得することにより、気球フライト実環境における極薄ペロブスカイト太陽電池の基本動作を確認し性能を評価する。

尚、高度約 20km 以上の高空での太陽電池性能評価は ISO15387 で定められた 1 次基準の校正環境条件に相当し、ソーラーシミュレータなどの 2 次基準よりも高信頼度な評価を行える点でも意義がある。

5. 2019 年気球飛翔実験概要

ペロブスカイト太陽電池は技術的に発展途上であり、性能・耐久性の向上が年々急速に進み、毎年新しい構成のペロブスカイト太陽電池が台頭している。本研究の最終目的達成のためには、気球実証を 1~2 年に 1 回程度の頻度で実施し、改良（薄膜化、高効率化、高耐久性化）を重ねた極薄ペロブスカイト太陽電池を都度搭載することを計画している。高頻度で定期的に行う必要があるため、ピギーバック実験を前提とし、主ミッションへの影響を最小限に留める取り付け方（取り付け場所、インターフェース等）を取ることで、可能な限り多くのフライト機会を得る計画である。供試体は太陽光が入射する必要があるため、ゴンドラ外壁の視界が開けた場所への搭載を希望している。

実験装置の概念図を図 2、システムブロック図を図 3 に示す。今回目指す初フライトでは、実験装置はペロブスカイト太陽電池（供試体）、シリコン太陽電池（リファレンス、環境計測用）、データ収集系（FPGA モジュール、電池を含む）で構成する。FPGA モジュールには他プロジェクトで開発され飛翔実績のある「U-TeCS」を採用し[10]、インハウスで開発中の太陽電池測定回路で太陽電池の評価を行う。ペロブスカイト太陽電池は温度、湿度、光に対する耐久性の低さが課題とされていることから、本実験では、作製したモジュールの地上保管中の劣化を防ぐため、封止を施すことで湿気による劣化を防ぎ、気球飛翔の直前まで暗所状態で室温保管することで、温度・光による劣化も防ぐ。更には、2019 年 3 月時点で耐環境性に最も優れると考えられるペロブスカイト材料を搭載することを検討しており、現状では発電層材料は(MAFACsRb)Pb(I Br)₃ から構成されるペロブスカイト太陽電池[11]を有力候補としている。

実験装置は放球前に手動で電源を ON にした後は自動的に計測を開始し、太陽電池出力の負荷抵抗を 10Hz でサイクリックに切り替えて電流—電圧特性を取得し続ける。温度特性・照度特性が既知のシリコン太陽電池も搭載することで、ペロブスカイト太陽電池への太陽光入射角などの補正に必要なデータも取得する。10Hz でのサンプリングによりゴンドラの回転に伴う照度や温度等の環境変化の影響を抑制できると見込んでいる。計測データは気球実験の標準テレメトリ（親実験と共有）を用いて地上局に無線伝送する。放球前に測定した IV 特性、また、今後実施予定の個別環境特性（真空度特性、温度特性、照度特性、入射角特性）とフライト中の IV 特性を比較することによって、複合環境での劣化特性を評価する。

搭載するペロブスカイト太陽電池の供試体は、2019 年 3 月の時点で基板材料の厚み、太

陽電池電気特性、耐環境特性を考慮して最良のものを選定する。第 2 項で述べたように極薄ペロブスカイト太陽電池開発に向けて 20 μm 厚 LDPE 上のペロブスカイト太陽電池開発が最終ゴールであることから、LDPE 上の成膜方法最適化後の極薄ペロブスカイト太陽電池を搭載すべく尽力している。尚、バックアップ案としてガラス基板上のペロブスカイト太陽電池モジュールを確保している。

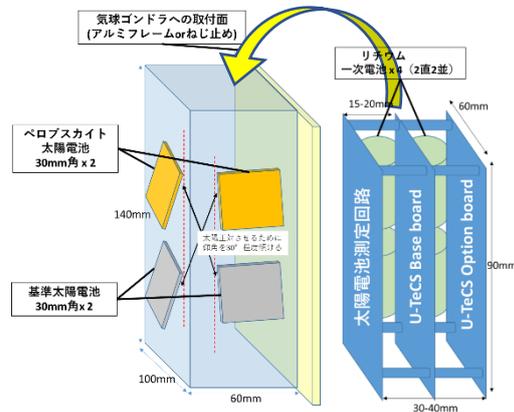


図 2： 本申込実験の搭載実験装置の概要
(左図は外観、右図は格納される計測系)

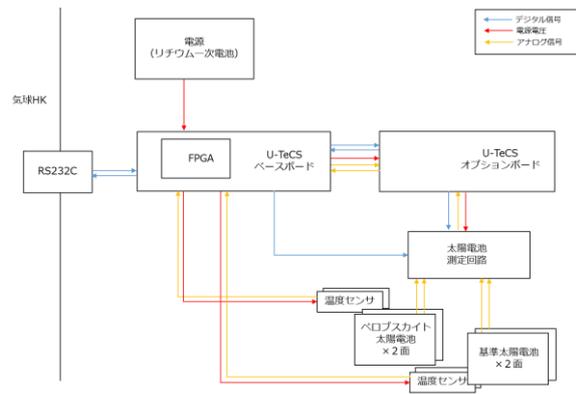


図 3： システムブロック

6. まとめ

近年注目されているペロブスカイト太陽電池を気球の膜上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適用することを目的とした極薄ペロブスカイト太陽電池の開発計画、特に気球の高度化に向けて来年度計画している極薄ペロブスカイト太陽電池の気球飛行実験計画について報告した。提案する飛行実験でピギーバックを想定した小型の評価装置を構築することは、最終目的である極薄ペロブスカイト太陽電池の開発に向けた大きな一歩となる。2019 年度気球飛行実験に向けて、小型太陽電池評価装置の構築と極薄ペロブスカイト太陽電池開発を進めていく。

参考文献

- [1] A. Kojima et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 131, (2009) 6050-6051.
- [2] National Renewable Energy Laboratory, Best Research-Cell Efficiencies chart; www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- [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] A. Kogo et al., *Chem. Com.*, 52, (2016) 8119-8122.
- [7] Hong Jiang, *Adv.Sci.*, (2018) 18011.
- [8] Z. Liu et al., *Nano Energy*, 28, (2016) 151-15.
- [9] 井筒直樹 他、平成 25 年度大気球シンポジウム (2013) isas13-sbs-014.
- [10] 森吉貴大 他、第 62 回宇宙科学技術連合講演会 (2018) 2L21.
- [11] M. Saliba, et al., *Science*, 10, (2016) 1126.