

極薄ペロブスカイト太陽電池の気球飛翔実験

JAXA 金谷 周朔, 宮澤 優, 福家 英之, 豊田 裕之, 廣瀬 和之

(株)RICOH 堀内 保

桐蔭横浜大学 池上 和志

1. はじめに

我々は、塗布によって簡易に作成可能な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。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を報告する。

2. ペロブスカイト太陽電池の研究動向と本研究のゴール

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、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、2019年には最高効率25.2%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]。

そして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100kW~1MW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。通常、ペロブスカイト太陽電池はガラス上に成膜されるため、最大の課題は気球膜として使用可能な程度の柔軟な膜上への成膜方法の確立であり、世界初の試みとなる。以降に詳細を述べる。

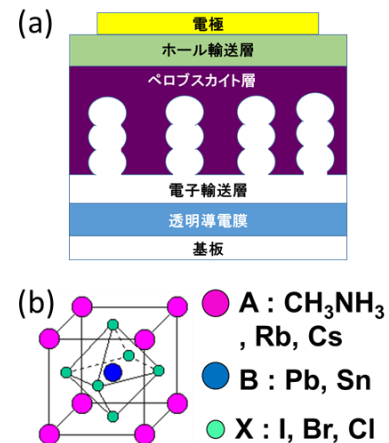


図1：ペロブスカイト太陽電池の基本構成要素

3. 極薄ペロブスカイト太陽電池の開発

ペロブスカイト層とキャリア輸送層の厚みは合計 1 μm 以下と十分に薄いため[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、(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 (LDPE: low-density polyethylene、典型的には 20 μm 厚) 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]が十分ではなく、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している。また、PET 20 μm 厚、PEN 125 μm 厚を基板とした薄膜フィルム上への成膜は報告されている[8, 9]が、気球膜として利用するにはより薄く柔軟な構造が必要であり、LDPE のような極薄膜上への成膜の報告例はない。

2019 年度の開発では、LDPE フィルム上への透明導電膜が成膜可能であることを明らかにしたが (図 2)、効率が 7% 程度と低く、成膜工程で必要な支持材から透明導電膜成膜後の LDPE フィルムを剥がすことで太陽電池としての特性が評価できなくなることが分かった。これは、透明導電膜として LDPE 上に成膜している酸化物が損傷し、電荷が取り出せないことに由来していると考えている。一方で、透明導電膜のシート抵抗は 100 Ω 程度を達成できれば抵抗のような直線になることなく IV カーブが確認できることが判明したため、2020 年度の実験に向けては柔軟性の点で有利な金属製の導電膜の利用の検討も進めている。また、試作レベルでは LDPE 上のペロブスカイト太陽電池の成膜が可能であることは判明したものの、現時点では成膜温度が 100°C を超える工程があるため太陽電池としての電気性能が低く、LDPE の耐熱温度以下での作製法も開発中である。気球のような複合環境で性能を維持するには、封止や電極取り出し方法の検討が重要であり、封止材の選定や接着方法の最適化検討も進めている。

2019 年度の大気球飛行実験では、現状では LDPE 上に成膜したペロブスカイト太陽電池では電気性能が低く、気球飛行環境での特性評価が困難であると判断し、ガラス上に成膜したペロブスカイト太陽電池を飛行させ、環境耐性を評価した。その AM0 (Air Mass 0) 光下における電流電圧 (IV) 特性を図 3 に示す。

また、後述するように気球に搭載可能な小型軽量の評価システムを新たに構築し、あわせて機能性能確認を行った。

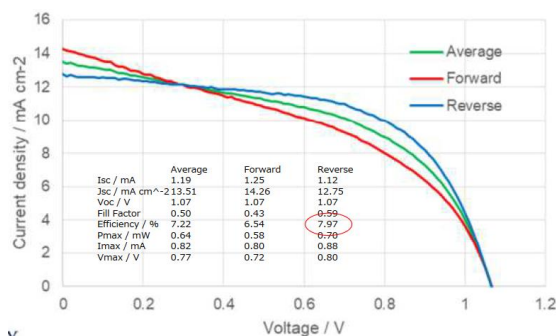


図 2: LDPE 上ペロブスカイト太陽電池の AM1.5 (Air Mass 1.5) 光下電流電圧特性

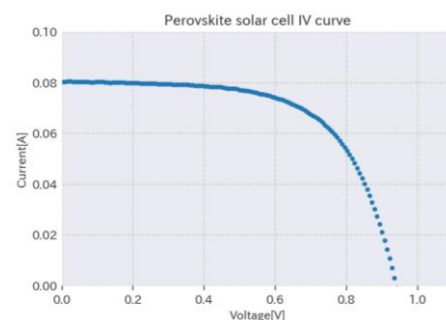


図 3: 大気球実験に使用したガラス上ペロブスカイト太陽電池の AM0 光下電流電圧特性

4. 2019 年度気球飛翔実験

上述し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、気球に搭載可能な小型軽量の太陽電池評価システムを開発した。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。小型軽量化のため姿勢制御機構は備えず、代わりに太陽電池に接続した負荷抵抗の値を周波数 9 Hz でサイクリックに切り替えて IV 特性を取得し続ける仕組みとし、コマンド不要の設計とした。回路の制御には他プロジェクトで実績のある FPGA モジュール「U-TeCS」[10]を採用した。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。

2019 年度の実験は、ゴム気球での BS19-02 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、2019 年 8 月 1 日に放球され、現在は取得データの解析を進めている。解析の速報を以下に記す。

BS19-02 の放球以降の緯度経度履歴を図 5 に示した。放球～15 分後を青色で、その後 15 分ごとに異なる色で示し、90 分後から 105 分後までを表している。大樹航空宇宙実験場から放球された後に上昇を続け、放球から約 45 分後まで(地上～高度 20 km)は西風で東向きに流され 1 時間 15 分時点までは西向きに流されている。放球時刻を 0 秒とした海拔高度履歴を図 6 に示す。

次にゴンドラの姿勢に関して述べる。簡易な姿勢解析を実施し、その結果を図 7 に示す。z 軸周りに絶えず回転しており、太陽正対している時間は限定的と考えられる。また、気球飛翔中の代表的なペロブスカイト太陽電池の IV カーブを図 8 に示す。

2019 年度気球飛翔実験を通して、気球環境での太陽電池評価プラットフォームの構築を達成し、気球飛翔中のデータ収集ができた。さらなる課題としてゴム気球実験では z 軸周りに予想以上の角速度でゴンドラが回転していることが分かったため、今後は太陽に正対する時間を長くする工夫が必要である。

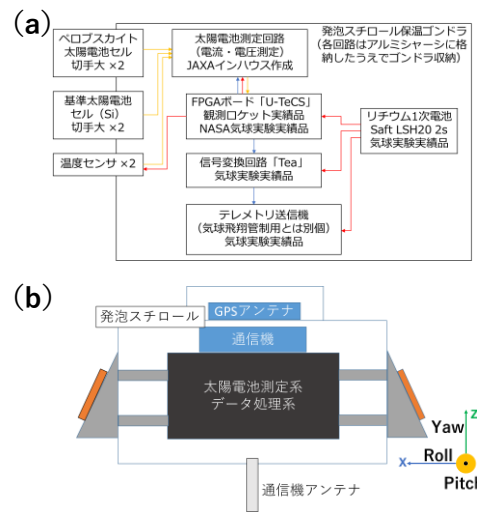


図 4：評価システム図

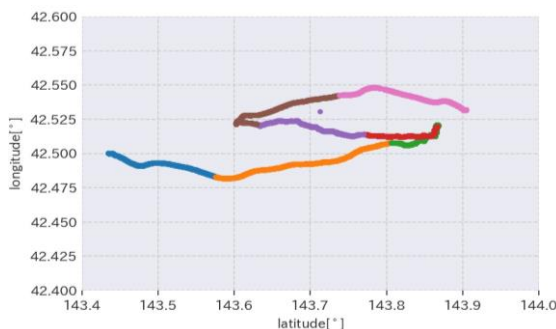


図 5：ゴム気球の緯度経度履歴

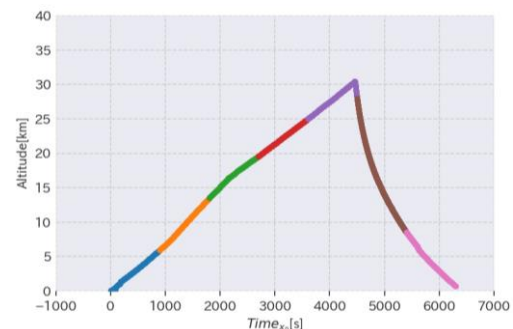


図 6：ゴム気球の海拔高度履歴

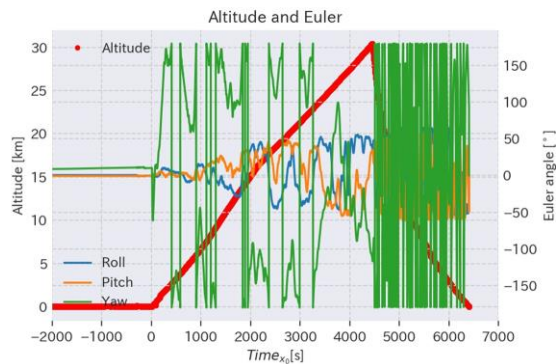


図 7: 海拔高度とゴンドラの姿勢

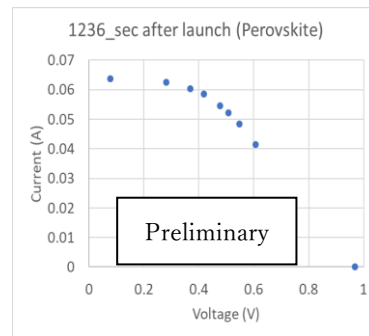


図 8: ペロブスカイト太陽電池の飛行中の代表的な IV カーブ

5. 2020 年気球飛行実験計画概要

2019 年度の気球飛行実験では、サンプル準備の都合からガラス上に成膜したペロブスカイト太陽電池を用いたが、2020 年度の気球飛行実験では、フレキシブルな膜上に成膜したものを飛行させ評価を行う計画である。現状で、LDPE 上に成膜したペロブスカイト太陽電池は、7%程度と低効率ながらも発電を確認している。一方で、実用化のためには、さらなる低温成膜化の検討、および封止材や取り出し電極に関する技術的検討が必要なことも課題として洗い出している。低温成膜化は、電子輸送層成膜時の温度が LDPE の耐熱温度をわずかに超えることに伴うフィルムの伸縮が課題となっており、現在、さらなる低温での成膜法を検討している。封止材、取り出し電極については透明導電膜だけでなく、金属薄膜の全面コーティングも考えており、金属薄膜（金、銅、チタン）の成膜も視野に入れて、課題の解決を目指している。また、気球のゴンドラ姿勢解析から、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たので、回転を抑制する機構を追加する必要がある、スイベルの追加などの検討も進めている。

6. まとめ

塗布により簡易に成膜可能な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を報告した。高性能な極薄ペロブスカイト太陽電池の実現にはまだ多くの課題があるが、継続的に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、開発を進めてゆきたい。

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] 井筒直樹 他、平成 25 年度大気球シンポジウム (2013) isas13-sbs-014.
- [7] Hong Jiang, *Adv.Sci.*, (2018) 18011.
- [8] A. Kogo et al., *Chem. Com.*, 52, (2016) 8119-8122.
- [9] Z. Liu et al., *Nano Energy*, 28, (2016) 151-15.
- [10] 森吉貴大 他、第 62 回宇宙科学技術連合講演会 (2018) 2L21.