

# 宇宙応用に向けたペロブスカイト太陽電池の放射線耐性評価

Evaluation of radiation tolerance of perovskite solar cells for space use

宮澤 優\*, 廣瀬和之\*\*

## 1. まえがき

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  に代表される有機無機ペロブスカイト結晶を光吸収層に用いたペロブスカイト太陽電池は、2009年に桐蔭横浜大学宮坂教授が色素増感太陽電池の色素の代わりにペロブスカイト結晶で発電できることを発見した<sup>1)</sup>ことを始まりとして、2012年に変換効率が10%を超える<sup>2)</sup>と爆発的に研究が盛んになり、現在次世代太陽電池として世界的に大きく注目されている。ペロブスカイト太陽電池が大きく注目される理由は、単結晶シリコン太陽電池に迫る高い変換効率の軽量薄膜な太陽電池を低コストで実現できることにある。

高変換効率を実現できる理由は、光吸収層に使用されるペロブスカイト結晶が、その特有の電子軌道から、(a) キャリアの有効質量が小さい、(b) キャリア拡散長が十分長い、(c) 電氣的に影響を及ぼす欠陥を生じにくい、という特徴を有すること<sup>3)</sup>であり、そのため最高効率23.3%が中国(CAS)で達成<sup>4)</sup>されている。また、軽量薄膜化を実現できる理由は、ペロブスカイト結晶の光学吸収係数が大きい( $\sim 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ )<sup>5)</sup>ためペロブスカイト層が薄膜( $\sim 400 \text{ nm}$ )でも十分に光を吸収できること、かつ、低温製法にてフィルム上に成膜できること<sup>6)</sup>であり、そのため基板を含めて軽量薄膜化を実現できる。最後に、低コスト化を実現できる理由は、真空環境を必要としない簡易な塗布プロセスで製造可能であることやRoll-to-Rollの一括製造が可能であることであり、そのため価格はシリコン太陽電池の1/2程度を実現できる見込みである<sup>7)</sup>。

我々は、ペロブスカイト太陽電池の変換効率が15%を超えて急成長中であった2014年に、上述した優れた特徴、特に、光学吸収係数が高く軽量薄膜化が可能であることとキャリア拡散長が十分長いこ

とに着目して桐蔭横浜大学と共同で宇宙応用に向けた研究開発を開始し、ペロブスカイト太陽電池が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放射線耐性を有することを世界で初めて明らかにした<sup>8)</sup>。本稿では、ペロブスカイト太陽電池の宇宙応用に着目した背景、また、ペロブスカイト太陽電池の放射線耐性の研究状況について述べる。

## 2. ペロブスカイト太陽電池の宇宙応用に着目した背景

宇宙と地上では、太陽電池が晒される環境が大きく異なる。例えば、日陰と日照の繰り返しによる $-100^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ 程度の温度サイクル、 $10^{-6} \text{ Pa}$ 以下の高真空環境、そして高い放射線量に晒される。また、入射する太陽光スペクトルはAM0であるため、紫外光を多く含む。このような特殊な宇宙環境全てに耐性を有する必要があるが、その中でも宇宙用太陽電池を比較する際に使われる主な要求性能は、(1) 高変換効率、(2) 高放射線耐性、(3) 軽量薄膜性である。

人工衛星や宇宙ステーション等の宇宙機の電力は、日照中は太陽電池で発電した電力によって賄われ、日陰中は二次電池に蓄えられた(日照中に太陽電池で発電した電力で二次電池を充電)電力によって賄われる。宇宙機に太陽電池を搭載できる面積は限られているため、特に宇宙用では(1) 高変換効率が求められる。そして、地上用との最大の違いが、(2) 高放射線耐性を求められることである。宇宙空間にはさまざまな種類の放射線が多く存在し、太陽電池は主に電子線と陽子線によって損傷する。損傷のメカニズムは、電子線や陽子線によって半導体中

\* 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発員

\*\* 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 教授

の構成原子が格子点からはじき出され、欠陥が導入されることによる。その欠陥が直接、ないし幾段かの欠陥反応を経た後に形成される欠陥が、主として電子-正孔の非輻射再結合中心として働き、少数キャリア寿命や少数キャリア拡散長を低下させることで太陽電池に劣化が生じ、出力が低下する<sup>9)</sup>。よって、軌道上での電子線と陽子線による太陽電池の出力低下を考慮し、打ち上げ直後にとっては過剰分の太陽電池を人工衛星に搭載する必要があるため、宇宙用太陽電池には高い放射線耐性が求められる。また、宇宙機を宇宙空間まで運ぶロケットの搭載重量には制限があり、太陽電池を含むバス機器（宇宙機の基本機能に必要な機器）を小型軽量化することは、観測機器などミッション機器の搭載重量の増加、すなわち宇宙機の高度化に繋がる。そのため、宇宙用太陽電池には(3)軽量薄膜性が求められるのである。

1957年に打ち上げられた世界初の人工衛星であるスプートニク1号は化学電池のみで電力が賄われたため、衛星の動作期間は22日間であった。1958年に打ち上げられたヴァンガード1号に太陽電池が初めて搭載され、衛星の動作期間は2200日へと大きく飛躍した。搭載された太陽電池は、アメリカのベル研究所で開発されたシリコン太陽電池であり、ヴァンガード1号への搭載が太陽電池の初の実用化事例であった。以降、人工衛星に太陽電池が搭載されることは一般的となり、長い間シリコン太陽電池が人工衛星の発電源として使われ、この間、シリコン太陽電池は、高変換効率化・高放射線耐性化・軽量薄膜化を目指した技術開発が行われてきた<sup>10)</sup>。1995年に宇宙開発事業団（当時）とシャープにより開発された宇宙用シリコン太陽電池の変換効率は約17%<sup>10)</sup>であった。本太陽電池は、軽量薄膜性、高放射線耐性にも優れていたため、当時、海外の商業衛星にも多数採用され、大きな世界シェアを獲得した。1990年代後半に入ると、人工衛星の更なる電力要求の高まりを背景として、先ずアメリカで3接合化合物太陽電池が人工衛星に搭載されるようになり、我が国では2003年に打ち上げられた「はやぶさ」に初めて、変換効率26.0%の3接合化合物太陽電池が搭載された。3接合化合物太陽電池は、バンドギャップが異なる3種類の半導体材料を接合させることで、それぞれの材料が分割で光を吸収するため、シリコン太陽電池のような単接合太陽電池に比べて熱エネルギー損失が少なく、高変換効率を実現できる<sup>11)</sup>。JAXAとシャープにより開発されたInGaP/GaAs/Ge型3接合化合物太陽電池の変換効

率は28.5%である。3接合化合物太陽電池は、高効率であるゆえ太陽電池搭載面積を少なくできることや直接遷移半導体を用いるためシリコン太陽電池より薄くできること（前者が主に寄与）で軽量薄膜化を実現、更には後述する理由から高放射線耐性も兼ね備えるため、現在も宇宙用太陽電池の中心である。ただし、高度な製造技術や高品質な単結晶材料を必要とすることからコストが高いため、地上用太陽電池としては普及しておらず、宇宙機が主な用途である。近年は、3接合化合物太陽電池を更に軽量薄膜化、または接合数を増やすことで宇宙用として高性能化を目指す技術開発が盛んに行われている<sup>12)</sup>。JAXAとシャープでは、変換効率32.0%のInGaP/GaAs/InGaAs型薄膜3接合化合物太陽電池<sup>13)</sup>を2015年に世界に先駆けて実用化しており、薄膜3接合化合物太陽電池を用いた太陽電池パドルは、従来の3接合化合物太陽電池を用いたパドルに比べて質量出力比が3倍向上する見込みである<sup>14)</sup>。

従来、世界中の宇宙開発は国が主体となった官需主導で行われてきたが、近年、欧米を中心として民需を中心とした宇宙開発が活発になってきており、世界の宇宙産業の市場規模は拡大を続けている<sup>15)</sup>。我が国に目を向けると、依然国内官需が約9割を占め、事業規模も欧米に比べて小さく海外に比べて十分な国際競争力を有していないが、今後、国際的な宇宙産業市場の成長に伴い海外市場を獲得することで、さらなる宇宙産業の成長を図ることが期待されている<sup>15)</sup>。それらを背景とし、我々は、宇宙用太陽電池への要求として、(1)高変換効率、(2)高放射線耐性、(3)軽量薄膜性に加えて、市場競争力のために低コストが求められると考え、低コストで(1)高変換効率、(2)高放射線耐性、(3)軽量薄膜性を実現できる可能性があるペロブスカイト太陽電池の宇宙応用に着目した。

「(2)高放射線耐性」を持つ可能性はどのようにして予測できるだろうか。各種太陽電池材料の光学吸収係数、1MeV電子線照射後の変換効率の保存率と損傷係数の関係を表すグラフを図1<sup>16)</sup>に示す。曲線に添えられているのが損傷係数( $K_L$ )の大きさであり、 $K_L$ を式1で定義する。

$$\Delta(1/L^2) = 1/L^2(\phi) - 1/L_0^2 = K_L \phi \cdots \text{式1}$$

ここでLは少数キャリア拡散長であり、 $L_0$ が放射線照射前、 $L(\phi)$ がフルエンス量 $\phi$ 照射後の少数キャリア拡散長である。損傷係数が小さいことは、放射線による少数キャリア拡散長の低下が小さいことを

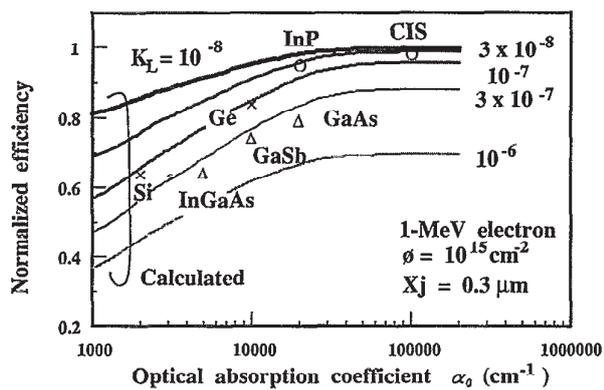


図1 各種太陽電池材料の光学吸収係数、1MeV電子線照射後の変換効率の保存率と損傷係数の関係<sup>14)</sup>。

示す。また、図中にプロットされているのが、各種太陽電池の光学吸収係数を横軸とした1MeV電子線 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 照射後の変換効率の保存率である。光学吸収係数が大きい太陽電池ほど、1MeV電子線照射後の変換効率の保存率が高くなり、放射線耐性が高い傾向があることがわかる。これは、光学吸収係数が大きいほど、光吸収層の厚みを薄くすることができキャリアの移動距離が短くてすむため、放射線被曝による拡散長低下の影響が小さいためと考えられる。3接合化合物太陽電池を構成するInGaP, GaAs, GeはSiより光学吸収係数が高く薄膜化が可能であることから、3接合化合物太陽電池はシリコン太陽電池より放射線耐性が高いのである<sup>11)</sup>。同じ光学吸収係数でも損傷係数が異なる値を持つのは、太陽電池の材料によって拡散長や欠陥の性質、例えば、再結合欠陥導入率、欠陥の正孔あるいは電子の捕獲断面積、アニール（回復）特性、が異なるためである。

我々は、ペロブスカイト結晶の光学吸収係数が $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ と3接合化合物太陽電池を構成する半導体材料より十分大きく<sup>5)</sup>、電子とホールの拡散長がそれぞれ $1 \mu\text{m}$ 程と十分長いため<sup>17)</sup>、ペロブスカイト太陽電池が高い放射線耐性を有する可能性があることに着目した。ただし、損傷係数は、上述した通り拡散長だけでなく放射線により導入される欠陥の性質から決まるため、これを明らかにするには、放射線照射試験が必要であった。次項以降にペロブスカイト太陽電池の放射線照射試験状況について述べる。

### 3. ペロブスカイト太陽電池の放射線耐性評価<sup>18)</sup>

太陽電池の放射線耐性評価試験としては、放射線

劣化前の状態をBOL (Beginning of Life)、放射線による劣化後の状態をEOL (End of Life)とした時の、EOLにおける出力をBOLにおける出力で除した値を保存率として、放射線照射後の保存率の大きさを評価する方法が広く使われている<sup>19,20)</sup>。我々は、桐蔭横浜大学で作製したペロブスカイト太陽電池に太陽電池の主な劣化要因である陽子線と電子線をそれぞれ照射し、照射後の保存率の評価を行った。

放射線試験用サンプルには、放射線により劣化が生じる懸念がある封止材を用いることができないことを考慮する必要があり、照射前後の評価を含む試験期間中（約2週間）の経時劣化が小さい、すなわち、性能の安定性が高いサンプルを選定した。セルの構造は、＜ガラス基板/透明導電膜/ブロッキング層：c-TiO<sub>2</sub>/電子輸送層：meso-TiO<sub>2</sub>/ペロブスカイト層/ホール輸送層：p3HT/電極：Au＞である。図2にサンプルのSEM断面像を示す。ガラス基板/透明導電膜は、陽子線照射試験には一般的に使用されるソーダガラス/FTO、電子線照射試験には電子線によるガラスの着色による透過率低下を防ぐため石英ガラス/ITOを用いた。ペロブスカイト層には、典型的なMAPbI<sub>3</sub>(MA：CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>)と、より熱耐久性が高いFAMAPb(IBr)<sub>3</sub>(FA：CH<sub>3</sub>(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)を用いた。ホール輸送材には、前述した性能の安定性を考慮して耐酸素安定性や耐熱性が高いと言われるpoly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)(P3HT)<sup>21)</sup>を用いた。

陽子線は侵入長近傍で結晶に大きな損傷を与えるため、太陽電池への損傷の程度は陽子が停止するエネルギーにより大きく異なる。そのため、最大の劣化を与える陽子線エネルギーは太陽電池構成材料や厚みに依存する。本試験では、ペロブスカイト太陽電池の宇宙応用の可能性を明らかにすることを目的

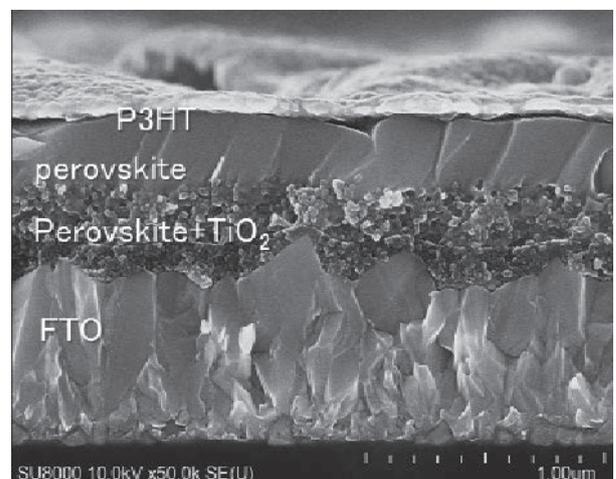


図2 放射線試験に用いたサンプルのSEM断面像<sup>18)</sup>。

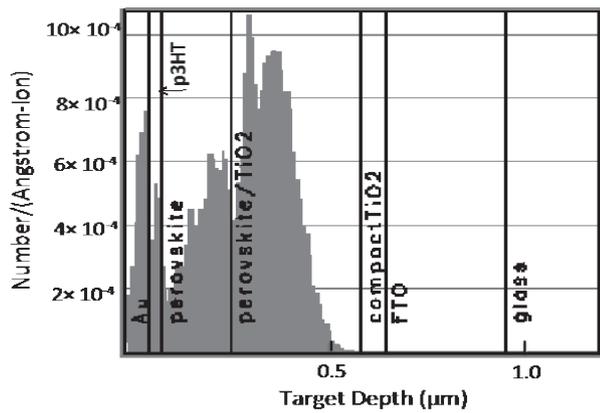


図3 ペロブスカイト太陽電池へのTRIM50keV陽子線照射シミュレーション結果. 変位損傷量の深さ方向分布を示す<sup>18)</sup>.

としたため、電極側から入射した場合にペロブスカイト太陽電池にとって最も厳しい条件になる陽子線エネルギーをTRIMを用いて計算した。その結果、図3に示す通り、50keVの陽子線がペロブスカイト層中で停止、すなわち、ペロブスカイト層に大きな劣化を与えると考えられたため、入射する陽子線エネルギーは50keVとした。また、照射するフルエンス量は $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ とした。宇宙空間には様々なエネルギーを持つ放射線が存在し、図4に示すように宇宙機が飛翔する軌道によって被曝するトータルフルエンス（各放射線エネルギーでのフルエンス量の総和）は異なる。宇宙用太陽電池は放射線による損傷を防ぐため、光入射面に厚み $50 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ 程のカバーガラスを貼付けることで放射線を遮蔽しており、宇宙機の軌道と寿命から算出するトータルフルエンスと放射線照射試験から求める太陽電池の放射線耐性を考慮して、カバーガラスの厚みを選定する。カバーガラスが厚いほど質量は重くなるため、カバーガラスによる質量増加と放射線劣化を考慮して搭載する太陽電池質量のトレードオフが必要である。

電子線は、結晶に入射した後、散乱され広がりを持って侵入するため、結晶に一樣に欠陥を導入する。すなわち、電子線による太陽電池への損傷の程度は、太陽電池の種類に依らず電子線エネルギーに比例するため、特定のエネルギーでの太陽電池の損傷の程度を比較することで、異なる太陽電池の放射線耐性を比較することが可能である。我々は、ペロブスカイト太陽電池の放射線耐性を他の太陽電池と比較し易いよう、他太陽電池で実験が多く行なわれている1MeV電子線にて照射試験を行った。照射したフルエンス量は $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ である。

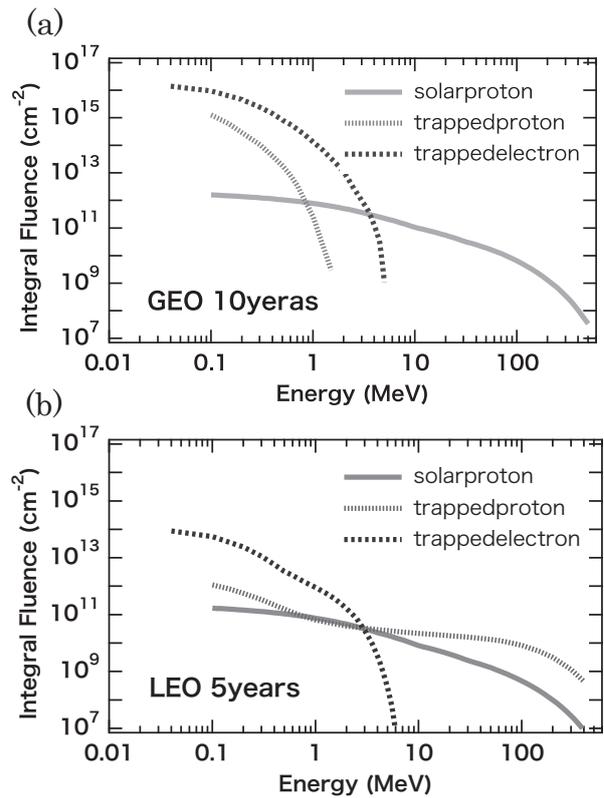


図4 SPENVISを用いて計算した(a)静止軌道(GEO)10年分と(b)地球周回低軌道(LEO)5年分のフルエンスカーブの例。

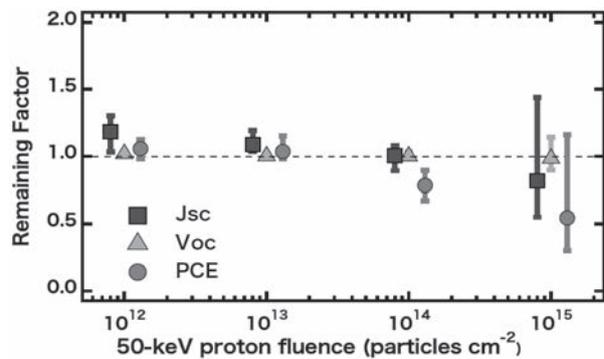


図5 50keV陽子線照射後の短絡電流密度(Jsc)、開放電圧(Voc)、発電効率(PCE)の保存率の照射量依存性<sup>18)</sup>。

図5に、ペロブスカイト層にFAMAPb(I<sub>2</sub>Br)<sub>3</sub>を用いたサンプルに50keV陽子線照射後の短絡電流密度(Jsc)、開放電圧(Voc)、発電効率(PCE)の保存率の照射量依存性を示す。 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の照射量までは、全てのパラメータが劣化せず、 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の照射量から効率の低下が見られ、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ において短絡電流密度の低下がみられた。一方、3接合化合物太陽電池では、InGaAsトップ層付近で停止するエネルギーである30keV照射時においては $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の照射量で最大出力

(Pmax) の保存率が 0.7 以下に低下, GaAs ミドル層付近で停止するエネルギーである 250keV 照射時においては  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-1}$  の照射量で最大出力の保存率が 0.2 程度に大きく低下する<sup>22)</sup> ことと比較すると, ペロブスカイト太陽電池の放射線耐性が驚くほど高いことがわかる。

図 6 に, ペロブスカイト層に MAPbI<sub>3</sub> を用いたサンプルに 1MeV 電子線  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$  を照射した結果として, 外部量子効率と電流密度-電圧特性の照射前後の比較を示す。外部量子効率はわずかに低下した。一方, 電流密度-電圧特性は, 短絡電流密度はわずかに低下したものの, 開放電圧は低下しなかった。ここで, 曲線因子の顕著な低下は見られるが, 測定により電極である Au が削れ, 直列抵抗が上昇したことが原因と推測している。表 1 に, ペロブスカイト太陽電池と宇宙用シリコン太陽電池, 3 接合化合物太陽電池の 1MeV 電子線  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$  照射量照射後の各パラメータの保存率と BOL, EOL での変換効率の比較を示す。宇宙用シリコン太陽電池, 3 接合化合物太陽電池より各パラメータのペロブスカイト太陽電池の保存率が高く, 電子線

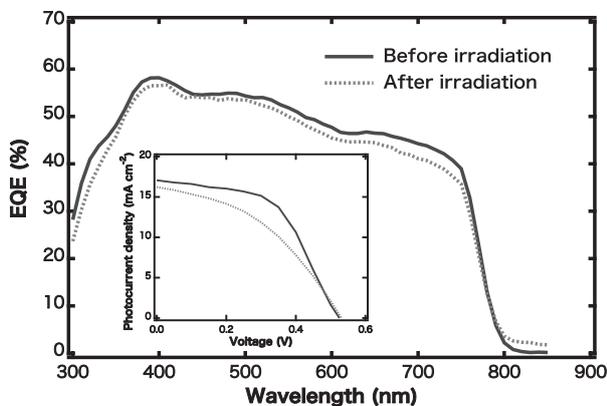


図 6 1MeV 電子線, 照射量  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$  照射前後の外部量子効率と電流密度-電圧特性<sup>18)</sup>。

照射試験からもペロブスカイト太陽電池の高い放射線耐性を支持する結果が得られた。また, ペロブスカイト太陽電池の BOL 変換効率を実用化時に期待される 15% と仮定し, BOL と EOL での変換効率を比較すると, BOL 変換効率ではペロブスカイト太陽電池は 3 接合化合物太陽電池の 53% であるが, EOL 変換効率では 78% まで差が小さくなる。宇宙機では EOL 変換効率を考慮して太陽電池搭載量を決めるため, BOL よりも EOL での変換効率が重要である。そのため, 放射線耐性が高いペロブスカイト太陽電池は, 軽量薄膜性やコストが低いという利点を考慮すると, 宇宙用として使用する利点が十分あると考えられる。

本実験からペロブスカイト太陽電池の放射線耐性が高いということが初めて明らかになった。前述した通り, ペロブスカイト結晶の光学吸収係数が大きくペロブスカイト層膜厚を十分に薄くできるため, キャリア拡散長低下の影響が小さいことが放射線耐性が高い理由の一つと考えられる。また, 本実験結果とペロブスカイト太陽電池の光学吸収係数を考慮すると, 図 1 からペロブスカイト太陽電池の損傷係数が十分小さい ( $1 \times 10^{-7}$  程度以下, 本試験の照射量は  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$  であるため図中にはプロット不可) ということが明らかになった。損傷係数が小さいことは, 前述した通り拡散長が長いことが理由の一つと考えているが, ペロブスカイト結晶の欠陥の性質も影響していると考えられる。我々が明らかにしたペロブスカイト太陽電池の放射線耐性が高いことを支持する結果が, その後いくつか報告<sup>25~27)</sup> されている。その中には, 結晶欠陥の性質について言及する, 低下した効率が放射線劣化後に回復するアニール現象が見られる, という報告<sup>25,27)</sup> もある。例えば, F. Lang 氏らは, 68MeV 陽子線を  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-1}$  の照射量だけ照射し, 照射終了した直後から

表 1 太陽電池間の 1MeV 電子線  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$  照射後の各パラメータの保存率と BOL, EOL の変換効率の比較。ただし, ペロブスカイト太陽電池の BOL 効率 15% は仮定である。

	ペロブスカイト太陽電池	シリコン太陽電池	3 接合化合物太陽電池
Jsc 保存率	0.98	0.80 <sup>23)</sup>	0.82 <sup>24)</sup>
Voc 保存率	0.97	0.80 <sup>23)</sup>	0.82 <sup>24)</sup>
Pmax 保存率	0.92	0.60 <sup>23)</sup>	0.62 <sup>24)</sup>
BOL 変換効率	15.0%	17.0%	28.5%
EOL 変換効率	13.8%	10.2%	17.7%

10 分間（10 分間以降のデータはなし）室温下で短絡電流密度と変換効率がそれぞれ約 3% 回復したと報告している。アニール現象は、地上放射線照射試験より低ドーズレートである宇宙空間の軌道上での太陽電池の性能維持において重要な現象である。アニールが起こる条件や回復メカニズム、長時間保管時の回復の挙動などは明らかではないため、アニール現象の詳細を含めて損傷係数が小さい理由、放射線で導入される欠陥の性質の解明には更なる研究が必要である。

#### 4. おわりに

次世代太陽電池として大きく注目されているペロブスカイト太陽電池の放射線耐性の研究状況について報告した。我々は、高変換効率、高放射線耐性、軽量薄膜な太陽電池を低コストで実現でき宇宙への応用に適している可能性があるとして着目したペロブスカイト太陽電池が、宇宙での最大の劣化要因である放射線に強い耐性を示すことを明らかにした。

宇宙用太陽電池において放射線耐性が高いことは、軌道上での放射線劣化を考慮して搭載する太陽電池を削減可能であるため軽量・低コスト化に繋がること、放射線を遮蔽するためのカバーガラスの厚みを削減できるためフレキシブル性を維持したまま搭載でき宇宙機設計の自由度が高まること、など優れたメリットがあるため、放射線耐性は宇宙機の太陽電池を選定する際の重要な指標である。放射線耐性が高く、軽量薄膜性や低コストの利点を持つペロブスカイト太陽電池は、宇宙用途に十分適していると考えられる。

現状、ペロブスカイト太陽電池を宇宙機に搭載するには、光耐久性や高温耐久性などが十分ではなく、これはペロブスカイト太陽電池の地上での実用化にとっても大きな課題である。JAXA では、将来宇宙開発に使いたい革新的な技術を民間企業や大学と JAXA の共同で開発し、民間企業で技術を成熟させた後に宇宙開発に応用することを主旨とした宇宙探査イノベーションハブ（探査ハブ）事業を 2015 年度から行っている。我々は、ペロブスカイト太陽電池の開発が探査ハブ事業の主旨に合致すると考え、2017 年度より探査ハブ事業にて「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」をスタート（3 年間で予定）し、桐蔭横浜大学、兵庫県立大学、リコー、紀州技研工業、ペクセル・テクノロジーズと共同で IoT デバイスの発電源としての実用化、その先には宇宙応用を目指し

て、ペロブスカイト太陽電池の開発に取り組んでいる<sup>28)</sup>。ペロブスカイト太陽電池は、電気的影響を及ぼす欠陥を生じにくいいため、低照度でも高い電圧を維持できる<sup>7)</sup>ことから、屋内・屋外両方で使える IoT デバイスの発電源としての用途に最適であると考えている。

今後は、IoT デバイス発電源としての実用化した先のペロブスカイト太陽電池の宇宙応用に向けて、損傷係数が小さい理由の解明を通して宇宙用に適したペロブスカイト太陽電池の開発に貢献することを目指していく。

#### 5. 謝辞

本研究は、桐蔭横浜大学宮坂研究室と共同で行ったものです。宮坂先生、池上先生をはじめとする宮坂研究室の皆様へ深く感謝致します。

#### 文献

- 1) A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 6050, 2009.
- 2) M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, and H. J. Snaith, *Science*, 338, 643 - 647, 2012.
- 3) T. Miyasaka, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 91, 1058 - 1068, 2018.
- 4) Best research-cell efficiencies, NREL homepage, URL : <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>.
- 5) M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, *Nat. Photonics*, 8, 506, 2014.
- 6) A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, and T. Miyasaka, *Chem. Lett.*, 45, 143 - 145, 2016.
- 7) 宮坂力, 太陽エネルギー, Vol43. No2, 2017.
- 8) Y. Miyazawa, M. Ikegami, T. Miyasaka, T. Ohshima, M. Imaizumi, and K. Hirose, 42th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2015.
- 9) 例えば, 今泉充, *isotope News*, 2013 年 12 月号 No.716, 12 - 17, 2012.
- 10) 上村邦夫, 佐賀達男, 松谷壽信, *シャープ技法*, No.70, 59-64, 1998.
- 11) 兼岩実, 上村邦夫, *シャープ技法*, No.83, 54-57, 2002.
- 12) P. Patel, D. Aiken, A. Boca, B. Cho, D. Chumney, M. B. Clevenger, A. Cornfeld, N. Fatemi, Y. Lin, J. McCarty, F. Newman, P. Sharps, J. Spann, M.

- Stan, J. Steinfeldt, C. Strautin, and T. Varghese, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 2, 377 - 381, 2012.
- 13) H. Yamaguchi, R. Ijichi, Y. Suzuki, S. Ooka, K. Shimada, N. Takahashi, H. Washio, K. Nakamura, T. Takamoto, M. Imaizumi, T. Sumita, K. Shimazaki, T. Nakamura, and T. Ohshima, 42th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2015.
- 14) 住田泰史, 柴田優一, 中村徹哉, 塩見裕, 岡本篤, 内田英樹, 今泉充, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2F05, 2018.
- 15) 宇宙産業ビジョン 2010, 内閣府, URL : [http://www8.cao.go.jp/space/public\\_comment/vision2030.pdf](http://www8.cao.go.jp/space/public_comment/vision2030.pdf).
- 16) M. Yamaguchi, J. Appl. Phys., 78 (3) , 1476-1480, 1995.
- 17) S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, H. J. Snaith, Science, 342, 231, 2013.
- 18) Y. Miyazawa, M. Ikegami, H. -W. Chen, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Hirose, and T. Miyasaka, iScience, 2, 148 - 155, 2018.
- 19) M. Imaizumi, T. Nakamura, T. Takamoto, T. Ohshima, and M. Tajima, Prog. Photovolt : Res. Appl., 25, 161 - 174, 2017.
- 20) P. R. Sharps, D. J. Aiken, M. A. Stan, C. H. Thang and Navid Fatemi, Prog. Photovolt : Res. Appl., 10, 383 - 390, 2002.
- 21) H. -W. Chen, T. -Y. Huang, T. -H. Chang, Y. Sanehira, C. -W. Kung, C. -W. Chu, M. Ikegami, T. Miyasaka, and K. -C. Ho, Sci. Rep., 6, 34319, 2016.
- 22) T. Sumita, M. Imaizumi, S. Matsuda, T. Ohshima, A. Ohi, and H. Itoh, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., B 206, 448 - 451, 2003.
- 23) M. Yamaguchi, J. T. Stephen, S. Matsuda, and O. Kawasaki, Appl. Phys. Lett., 68, 3141, 1996.
- 24) ZTJ Space Solar Cell data, SolAero Technologies Co., URL : <http://solaerotech.com/wp-content/uploads/2015/03/ZTJ-Datasheet.pdf>.
- 25) F. Lang, N. H. Nickel, J. Bundesmann, S. Seidel, A. Denker, S. Albrecht, V. V. Brus, J. Rappich, B. Rech, G. Landi, and H. C. Neitzert, Adv. Mater., 28, 8726 - 8731, 2016.
- 26) P. E. Gonzalez, M. Kelzenberg, N. Vaidya, Q. Yang, R. Saive, S. Loke, A. Naqavi, J. Shun, and H. Atwater, 2018 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix, 2018.
- 27) 今泉充, オルガマリンキビッチ, 大島武, 2018 年第 79 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-432-1, 2018.
- 28) 宮澤優, 宮坂力, Kim Gyumin, 堀内保, 池上和志, 伊藤省吾, 遠藤聡人, 廣瀬和之, 今泉充, 豊田裕之, 金谷周朔, 星野健, 嶋田貴信, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 1B14, 2018.

#### 略歴

宮澤優 (みやざわ ゆう)



国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 第一研究ユニット 研究開発員. 2012 年筑波大学数理解物質科学研究科修士課程修了. 同年航空宇宙研究開発機構入構. 太陽電池の研究や宇宙機の電源系開発に従事.

廣瀬和之 (ひろせ かずゆき)



国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 教授. 東京大学大学院工学系研究科教授.

1983 年早稲田大学大学院理工学研究科前期博士課程修了. 90 年工学博士. 83 年日本電気 (株) (NEC) 基礎研究所入社. 95 年文部省宇宙科学研究所助教授. 2013 年より現職. 半導体界面物性・耐放射線性デバイスの研究と宇宙機の部品・電源系の開発に従事.