

次世代宇宙用太陽電池へのデブリ衝突の影響評価

○中村徹哉, 金谷周朔, 豊田裕之, 住田泰史 (宇宙航空研究開発機構)

Evaluation of debris collision impact on next-generation space solar cells
Tetsuya Nakamura, Shusaku Kanaya, Hiroyuki Toyota, and Taishi Sumita
(Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words: Space solar cell, Debris, MMOD

Abstract

To evaluate the impact of the micrometeoroids and orbital debris (MMOD) collision on the next-generation space solar cells, we conducted hypervelocity impact experiments under conditions of various particle sizes, collision velocities, and collision angles. Furthermore, in order to clarify the effect of the structure, the conventional space solar cells were also evaluated for comparison.

1. 目的および背景

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では, 軌道上デブリやマイクロメテオロイド(MMOD)衝突による宇宙用太陽電池への影響評価を行っている¹⁻³⁾. 特に軌道上実績のない新規開発の宇宙用太陽電池は, 従来型の宇宙用太陽電池と材料だけでなく構造も大きく異なることから, 予め地上実験を行いその影響を評価することが重要である.

現在, 宇宙用太陽電池の主流は InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池である (図 1(a)). 対して, SHARP 株式会社と JAXA が新規開発した InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池⁴⁾は更なる高効率化だけでなく, 薄膜化も実現した (図 1(b)). 従来品と比べ厚さが 10 分の 1 程度と薄く, 太陽電池パドルの大幅な軽量化が可能である⁵⁻⁷⁾. また, 低コストかつ高効率を実現できると期待されているペロブスカイト太陽電池⁸⁾の発電層は InGaP/GaAs/ InGaAs 3 接合太陽電池よりも更に薄い (図 1(c)). このように新型太陽電池は薄膜化の傾向にある. 言い換えると, 新型太陽電池は従来型と比べ表面電極と裏面電極の距離が近づいてきており, MMOD 衝突で太陽電池が物理的に破壊された際に, 表面電極と裏面電極が短絡するおそれがある.

本研究では, 新型太陽電池の MMOD 衝突耐性を評価するため, InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池, ペロブスカイト太陽電池, および, 比較用の InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池に対して超高速衝突実験を行ったので, その結果について報告する.

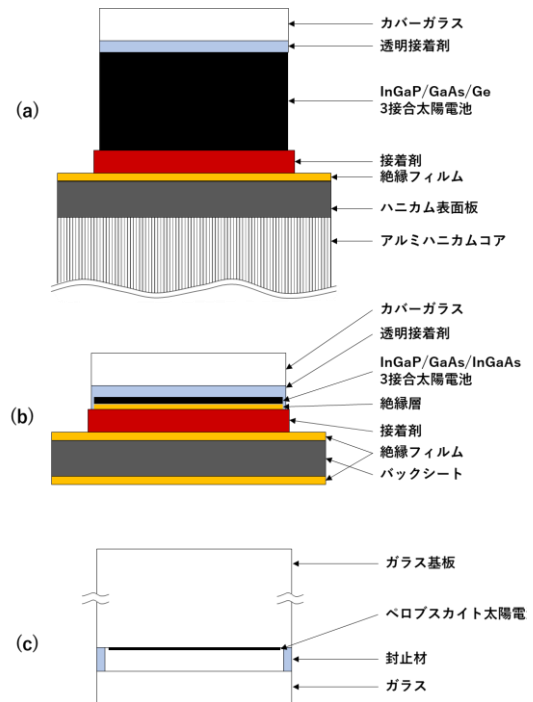


図 1 : 供試体の断面模式図 (a)InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池, (b)InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池, (c)ペロブスカイト太陽電池

2. 実験条件

超高速衝突実験は宇宙科学研究所内の 2 段式軽ガス銃を用いて実施した. 図 1 は各供試体の断面模式図を示している. InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池および InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池は実際の太陽電池パドル搭載方法を模擬した. 一般的に InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池は図 1(a)に示すように

アルミハニカムパネルに搭載される。一方、InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池については、アルミハニカムパネルへの搭載だけでなく、図 1(b)に示すように、カバーガラスとバックシートでラミネートした構造体(ガラスアレイシート)をフレームに取り付けることも想定している⁵⁻⁷⁾。ペロブスカイト太陽電池に関しては、まだ搭載方法を検討中の段階であるため、まずは太陽電池単体の MMOD 衝突耐性について評価した(図 1(c))。

衝突体はソーダ石灰ガラス(密度 2.5g/cm³)を用いた。衝突体粒径は 50~330 μ m、衝突体速度は 2.6~7km/s とした。衝突角度は太陽電池面の法線方向を 0 $^{\circ}$ とし、0, 30, 60 $^{\circ}$ と変化させた。衝突面は、受光面および反受光面とした。衝突実験前後で電流電圧特性およびエレクトロルミネッセンス(EL)像を取得し、また衝突痕断面を顕微鏡観察することで、特性変化の要因を考察した。

3. 実験結果と考察

3.1. InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池(受光面)

図 2 は InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池に対して、受光面から粒径 140 μ m、速度 6km/s のソーダ石灰ガラスを衝突させた後の EL 像を示している。衝突箇所を中心は暗く、その周囲は明るく光っていることから、衝突箇所ですべての層を貫通していると考えられる。しかし、衝突による致命的な短絡故障は確認されなかった。図 3 は同条件の衝突痕の断面顕微鏡写真である。裏面電極が残っているが表面電極や発電層は消失していることから、このような衝突条件においては、表面電極と裏面電極が接触し短絡するような故障モードは考えにくい。また、発電層が消失しないような衝突条件では発電層が短絡防止の役割を果たし、全ての層を貫通する衝突条件においては表面電極と裏面電極のいずれも消失することから、いずれのケースにおいても InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池が一回の衝突によって短絡する確率は非常に低いと考えられる。

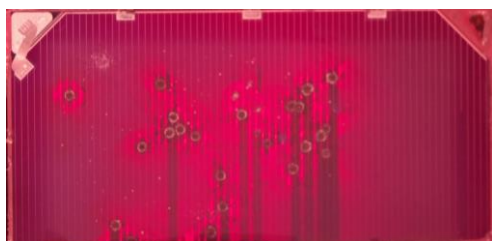


図 2 : 衝突実験後の InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池の EL 像 ($\phi=140\mu\text{m}$, 6km/s, 0deg)

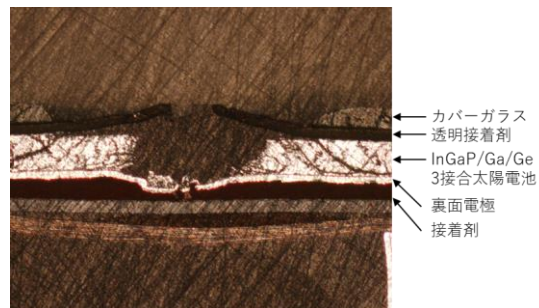


図 3 : InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池(受光面からの衝突)の顕微鏡断面写真 ($\phi=140\mu\text{m}$, 6km/s, 0deg)

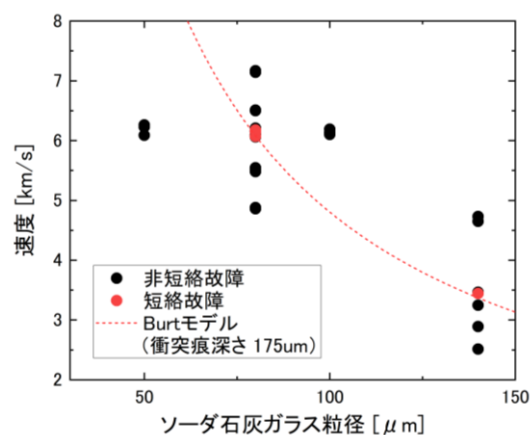


図 4 : 衝突条件と InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池太陽電池への影響の相関(衝突体はソーダ石灰ガラス、衝突角度は 0 $^{\circ}$ とした。また、ガラスアレイシート全層を貫通するケースは除外した)

3.2. InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池(受光面)

ガラスアレイシートに対する受光面(衝突角度 0 $^{\circ}$)からの衝突実験の結果は既に報告済みである¹⁻³⁾。InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の場合、先述した従来品とは異なり薄く柔軟性があるため、図 5(a)に示すように、衝突によって太陽電池が大きく湾曲する可能性がある。この湾曲によって、一回の衝突で表面電極と裏面電極が短絡する可能性があることを確認している。本紙では、改めて衝突体の粒径、速度、および、太陽電池への衝突の影響を整理した(図 4)。図中の赤いシンボルは短絡故障した条件を表しており、ある限られた衝突条件においてのみ短絡故障が発生していることがわかる。図中の破線は式 1 に示す Burt モデル⁹⁾から求めたガラスの衝突痕深さが 175 μ m となる衝突条件を示している。

$$P = 0.266\rho^{0.595}d^{1.05}V^{0.995}\cos\theta^{0.496} \quad \text{式 1}$$

P はガラス衝突痕深さ[cm], ρ は衝突体密度[g/cm³], d は衝突体直径[cm], V は衝突体速度[km/s], θ は衝突角度[deg]である。衝突体の粒径によらず、Burt モデルから算出されるガラスの衝突痕深さによって短絡故障の発生条件を表せている。

次に、衝突角度 0° 以外についても Burt モデルの適用が妥当か、評価を行った。衝突角度を 0° と 30° とし、Burt モデルから算出されるガラスの衝突痕深さが同じになるように衝突体の粒径と速度を設定した (図 5 のキャプション参照)。図 5 に衝突痕の断面顕微鏡写真を示す。いずれの衝突条件についても太陽電池は非貫通で、また大きな湾曲が確認された。このように、InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の受光面からの衝突に関しては、衝突角度を含め Burt モデルのガラスの衝突痕深さを指標にして太陽電池への影響、つまり、短絡故障の発生条件の一般化が可能であると考えられる。

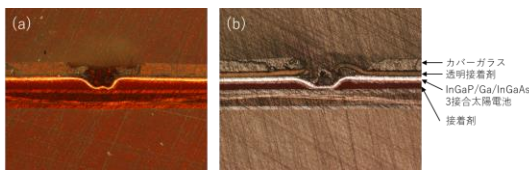


図 5 : InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池 (受光面からの衝突) の顕微鏡断面写真

- (a) $P=204\mu\text{m}$ ($\phi=80\mu\text{m}$, 7km/s, 0deg),
- (b) $P=206\mu\text{m}$ ($\phi=100\mu\text{m}$, 6km/s, 30deg)

3.3. InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池 (反受光面)

ガラスアレイシート構造の場合、反受光面にアルミハニカムパネルが存在しないため、反受光面から MMOD が衝突した際にも太陽電池への影響が懸念される。そこで、反受光面からの超高速衝突実験を実施した。結果としては、ガラスアレイシート全層貫通時に地絡故障と短絡故障が発生した。まず地絡故障について述べる。衝突によってバックシートと太陽電池の間の絶縁破壊が起き、太陽電池とバックシート間に印加していた 100V によって放電したことが地絡故障の原因と考えられる。ただ、図 6 の断面顕微鏡写真が示すように、太陽電池とバックシート間に絶縁層が存在していることから、地絡故障の発生確率は低いと考えられる。実際、同様に地絡故障を引き起こす可能性がある衝突痕は全部で 318 箇所あったが、放電を起こしたのは 1 か所のみであった。次

に短絡故障について述べる。短絡故障は複数確認され、いずれも表面電極上の衝突で発生した。断面顕微鏡観察で裏面電極を含む太陽電池が衝突により反り返り表面電極に接触していたことが確認された。このことから、反受光面から表面電極が存在する箇所に対してシートを全層貫通するような比較的高いエネルギーを持った MMOD が衝突した際に、短絡故障が発生する可能性があることがわかった。反受光面からの短絡故障に関してはまだ一般化には至っていないが、バックシートの貫通限界式によって一般化が可能と考えている。

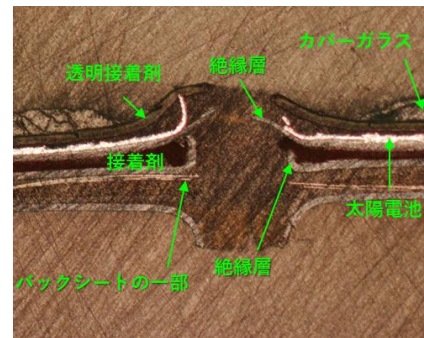


図 6 : InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池 (反受光面からの衝突) の顕微鏡断面写真 ($\phi=140\mu\text{m}$, 5km/s, 0deg)

3.4. ペロブスカイト太陽電池 (受光面)

ペロブスカイト太陽電池は現在世界中で研究開発が非常に盛んに行われており、宇宙応用も検討されている。JAXA でも、軌道上実証に向けて開発を進めている¹⁰⁾。先述の通り、ペロブスカイト太陽電池の発電層は非常に薄いため、衝突による致命的な故障が懸念される。そこで、試作品を用いて超高速衝突実験を行った。試作品のペロブスカイト太陽電池は受光面に厚いガラス基板を持つため、比較的大きな衝突体を用いた。図 7 は衝突実験後のペロブスカイト太陽電池の EL 像を示す。衝突箇所は発光していないことから、表面電極もしくは発電層が消失して電流が流れなくなったと考えられる。しかし、衝突箇所以外は、問題なく、短絡故障には至らなかった。致命的な故障モードは今のところ確認されておらず、軌道上実証に対しても MMOD の影響は軽微と考えているが、継続して評価を実施する予定である。

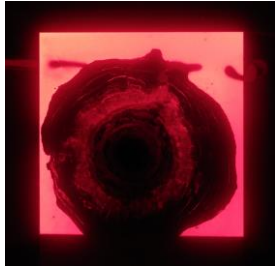


図7：衝突実験後のペロブスカイト太陽電池のEL像 ($\phi=330\mu\text{m}$, 5km/s , 0deg)

4. まとめ

新型の InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池とペロブスカイト太陽電池に対して、MMOD 衝突の影響を評価するため、超高速衝突実験を実施した。比較用の従来型 InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池では、発電層が十分に厚いことから短絡故障は確認されなかったが、薄膜の InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池では、受光面だけでなく反受光面からの衝突によって短絡故障に至る可能性があることが分かった。短絡故障が発生する条件は、受光面からの衝突に関しては衝突角度の影響を含め、Burt モデルで記述されるガラスの衝突痕深さによって一般化できることを示した。反受光面からの衝突に関してはまだ一般化には至っておらず今後の課題である。ペロブスカイト太陽電池については、衝突箇所に電流が流れなくなる現象が確認されたものの、一回の衝突によって全損に至るような致命的な故障モードは確認されなかった。

謝辞

本試験実施にあたり、ご協力頂いた長谷川直様をはじめとする ISAS 大学共同利用実験調整グループの関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 中村徹哉, 豊田裕之, 平井隆之, 金谷周朔, 西山和孝, 高島健:「深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺用薄膜軽量太陽電池パドルへのデブリ衝突の影響評価」, 平成 30 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
- 2) 豊田裕之, 中村徹哉, 住田泰史, 金谷周朔, 奥村哲平, 西山和孝, 高島健, 奥平修, 平井隆之:「深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺用薄膜軽量太陽電池パドルへのデブリ衝突の影響評価 (その 2)」, 令和元年度宇宙科学に関する室内実験シンポジ

ウム

- 3) 中村徹哉, 豊田裕之, 住田泰史, 金谷周朔, 西山和孝, 高島健, 平井隆之:「深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺用薄膜軽量太陽電池パドルへのデブリ衝突の影響評価 (その 3)」, 令和 2 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
- 4) 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, “Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple-junction Cells”, Proceedings of 42nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) (2015).
- 5) 高島健, 西山和孝, 豊田裕之, 山本高行, 餅原義孝, 佐藤峻介, 川勝康弘, 荒井朋子, DESTINY⁺準備チーム, 第 20 回宇宙科学シンポジウム, S1-003.
- 6) 中村徹哉, 柴田優一, 住田泰史, 今泉充, 豊田裕之, 川勝康弘:「DESTINY 用薄膜軽量太陽電池パドルの開発」, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2D06.
- 7) 住田泰史, 柴田優一, 中村徹哉, 今泉充:「150W/kg 軽量太陽電池パドル機構の軌道上展開実証」, 第 60 回宇宙科学技術連合会, 4F08.
- 8) Y. Miyazawa, G. M. Kim, A. Ishii, M. Ikegami, T. Miyasaka, Y. Suzuki, T. Yamamoto, T. Ohshima, S. Kanaya, H. Toyota, and K. Hirose, “Evaluation of Damage Coefficient for Minority-Carrier Diffusion Length of Triple-Cation Perovskite Solar Cells under 1 MeV Electron Irradiation for Space Applications”, J. Phys. Chem. C, 125, 13131 (2021).
- 9) R. R. Burt, and E. L. Christiansen, “Hypervelocity Impact Testing of Transparent Spacecraft Materials”, International Journal of Impact Engineering 29, 2003, pp. 153-166.
- 10) 奥村哲平, 住田泰史, 今泉充:「HTV-X における次世代太陽電池の実証計画」, 第 17 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, PA-1.