

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）

○中村徹哉，豊田裕之，住田泰史，金谷周朔，西山和孝，高島健（宇宙航空研究開発機構）
平井隆之（千葉工業大学）

Evaluation of debris collision impact on lightweight solar paddle
using thin-film solar cells for DESTINY⁺ -Part 3-

Tetsuya Nakamura, Hiroyuki Toyota, Taishi Sumita, Shusaku Kanaya, Kazutaka Nishiyama,
and Takeshi Takashima (Japan Aerospace Exploration Agency)
Takayuki Hirai (Chiba Institute of Technology)

Key Words: Lightweight solar array paddle, DESTINY⁺, Debris, MMOD

Abstract

New type lightweight solar array paddle using thin-film solar cells is being developed for DESTINY⁺. In previous study, we conducted debris collision experiments on the solar cells and clarified the failure modes due to thin-film structure. In this paper, we report the failure mechanism for sizing the paddle.

1. 目的および背景

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所は、理工一体の深宇宙探査技術実証ミッション DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUst Science) を計画している¹⁾。DESTINY⁺探査機は小型のイプシロンロケットにより地球周回軌道に打ち上げられ、探査機に搭載された電気推進器により加速して軌道高度を上げ、月スイングバイにより惑星間空間に至る。電気推進器は大電力を必要とするため、小型の DESTINY⁺探査機では世界最高水準の出力質量比を有する新型の薄膜軽量太陽電池パドル (SAP)²⁻³⁾を採用している。この薄膜軽量 SAP は図 1 に示す通り従来の SAP とは太陽電池セルから大きく異なるため、マイクロメテオロイドや軌道上デブリ (Micrometeoroid, Orbital Debris, MMOD) 衝突の影響を改めて実験的に評価する必要がある。そこで筆者らは 2018 年度より薄膜軽量 SAP を構成するガラスシート⁴⁾ (図 1(b)) に対する超高速衝突実験を実施しており、これまでに新規開発の薄膜太陽電池セル⁵⁾ (図 1(a)) 特有と思われる故障モード (短絡故障) を示している⁶⁻⁷⁾。しかし、その故障メカニズムや発生条件等は明らかではなかった。そこで 2020 年度は、ミッション期間中の電力損失量を予測するため、短絡故障の発生メカニズムの解明 (目的 1) と短絡故障

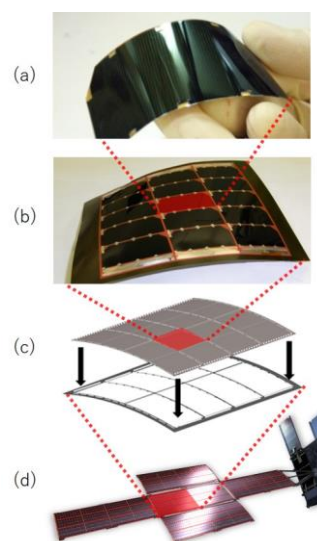


図 1：薄膜軽量 SAP の構造 (a)薄膜太陽電池セル，
(b)ガラスシート，(c)曲面フレーム，(d)パドル

の発生条件の一般化 (目的 2) を目指し、実験を行った。

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た。目的 1 ではガラスシートだけでなく構造が異なるカバーガラス付薄膜太陽電池セルおよびカバーガラス付薄膜太陽電池セルを搭載したアル

ミハニカムパネルも用いることで、短絡故障メカニズムを考察した。各供試体の断面模式図を図 2 に示す。目的 2 ではガラスシートのみを用いた。カバーガラス厚はいずれの供試体も 100 μm である。衝突体は主にソーダ石灰ガラス（密度 2.5g/cm³）を用いた。衝突体粒径は 50~200 μm 、衝突体速度は 2.6~7km/s とした。チャンバーの真空度は 1.5Pa 以下とした。太陽電池セルは太陽光による発生電流の 2 倍相当の電流を順方向に通電して発電状態を模擬、またバックシートあるいはハニカム表面板に対して約 100V の正バイアスをかけて発電状態を模擬した。実験は複数の衝突体を同時に射出させる散弾方式で行った。衝突時の供試体の様子は高速度カメラで撮影し、衝突実験前後で模擬太陽光照射時の電流電圧 (LIV) 特性およびエレクトロルミネッセンス (EL) 画像を取得した。短絡故障が発生した場合は、電流注入時の温度分布をサーモグラフィで観察することで短絡箇所を特定した。また、衝突痕断面の顕微鏡観察を行い、特性変化の要因を推定した。

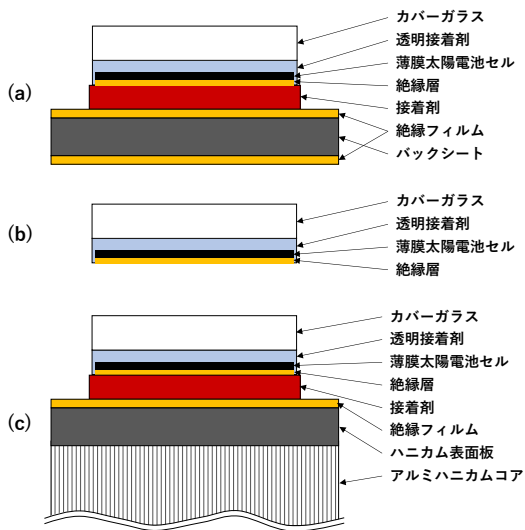
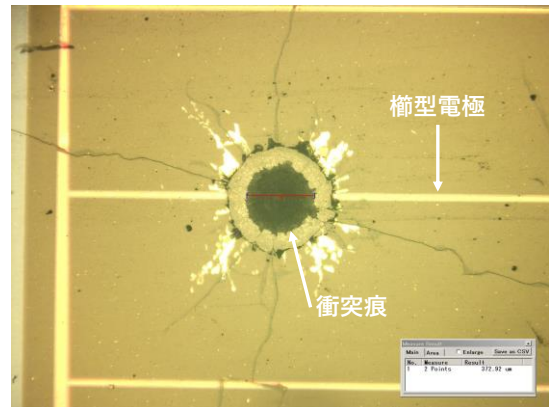


図 2: 供試体断面模式図 (a)ガラスシート, (b)カバーガラス付薄膜太陽電池セル, (c) カバーガラス付薄膜太陽電池セル搭載アルミハニカムパネル

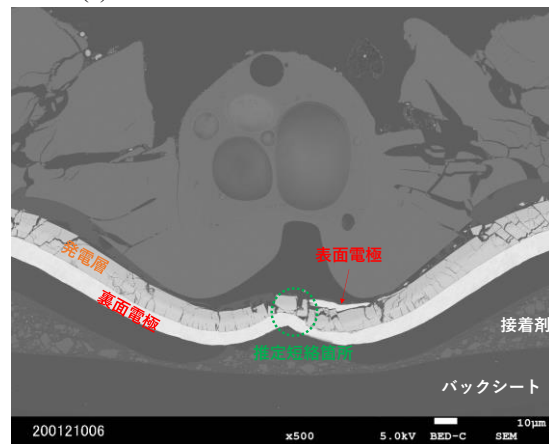
3. 実験結果と考察

3.1. 目的 1: 短絡故障の発生メカニズムの解明

図 3(a)はガラスシートに対して受光面から粒径 80 μm 、速度 6km/s のソーダ石灰ガラスを衝突させたときの衝突痕の顕微鏡写真である。一度の実験で衝突体は太陽電池セルに数十個着弾した。この衝突条件では 9 回の実験のうち 3 回で短絡故障が発生した。太陽電池に電流を注入したときの温度分布から、図



(a) 衝突痕 (短絡箇所) の顕微鏡写真



(b) 衝突痕 (短絡箇所) の断面 SEM 像

図 3: 粒径 80 μm 、速度 6km/s のソーダ石灰ガラスによる衝突痕

3(a)の様に表面の楕型電極上に衝突体が着弾している箇所短絡していることが分かった。特定した短絡箇所の断面を電子顕微鏡 (SEM) にて観察した。結果を図 3(b)に示す。白く描写している箇所が電極および発電層で、受光面側 (画像では上側) がカバーガラス、反受光面側 (画像では下側) が接着剤とバックシートである。衝突によって太陽電池セルが接着剤の領域まで押し込まれている様子が分かる。衝突痕中央に着目すると、裏面電極と発電層の隆起が見られる。また発電層は半導体結晶であるため、特に変位の大きい隆起箇所では多数のクラックが見られる。このことから、裏面電極の隆起と発電層のクラックによって、裏面電極が表面に露出する可能性が考えられる。図 3 のケースでは表面の楕型電極上に着弾しているため、表面電極下の裏面電極が表面に露出し、表面電極と裏面電極が接触し、短絡に至ったと推定している。このような故障は従来の太陽電池セルでは見られず、新型の薄膜太陽電池セルのみで発生

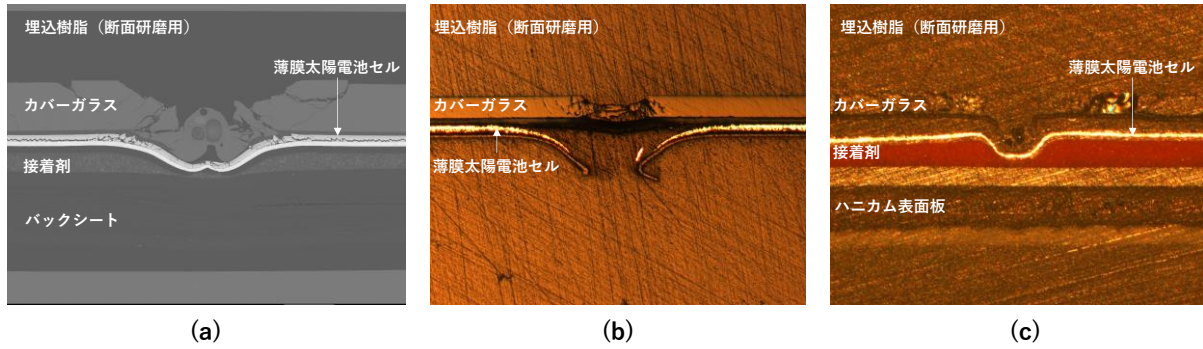


図4：粒径 80 μm ，速度 6km/s のソーダ石灰ガラスによる衝突痕断面 (a)ガラスシート，(b)カバーガラス付薄膜太陽電池セル，(c)カバーガラス付薄膜太陽電池セル搭載アルミハニカムパネル

している．これは薄膜太陽電池セルの厚みが従来品よりも 7 分の 1 程度しかなく表面電極と裏面電極の間隔が狭いことに起因していると考えられる．

衝突痕中央の隆起について考察を深めるため，カバーガラス付太陽電池セル (図 2(b)) およびカバーガラス付太陽電池セル搭載アルミハニカムパネル (図 2(c)) に対しても粒径 80 μm ，速度 6km/s のソーダ石灰ガラスを衝突させた．衝突痕の断面を図 4 に示す．ガラスシート (図 4(a)) とパネル (図 4(c)) では衝突体によって太陽電池セルが接着剤の領域まで押し込まれており類似した変形が確認できる．一方，裏面に何も無いカバーガラス付薄膜太陽電池セル (図 4(b)) では，衝突体は太陽電池セルを貫通した．この結果から，粒径 80 μm ，速度 6km/s のソーダ石灰ガラスは本来カバーガラス及び太陽電池セルを貫通するだけのエネルギーがあるが，太陽電池セル裏面に接着剤やバックシートなどが存在する場合，それらによって衝撃が分散，あるいは反跳し，その過程で薄膜太陽電池セルが短絡するような特異な変形をすると考えられる．

3.2. 目的 2：短絡故障の発生条件の一般化

パドルの設計においては，短絡故障の発生条件の一般化が必要である．本検討では，ガラスシートの中でも比較的厚く，また衝突の影響を最も受けると考えられる最表面のカバーガラスの衝突痕深さに着目した．カバーガラスの衝突痕深さは以下の Burt モデル⁸⁾を用いて算出した．

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

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．Burt モデルから算出されるガラス

の衝突痕深さと短絡故障の関連を調べるため，衝突体粒径 140 μm ，速度 3.3km/s と衝突体粒径 140 μm ，速度 2.6km/s の超高速衝突実験を行った．前者は式(1)を用いて導出したガラスの衝突痕深さが衝突体粒径 80 μm ，速度 6km/s と同じとなる条件である．後者は比較用として衝突体の運動エネルギーが衝突体粒径 80 μm ，速度 6km/s と同じとなる条件である．実験の結果，前者の実験のみで短絡故障が再現した．また衝突痕断面も粒径 80 μm ，速度 6km/s と酷似していた (図 5)．このことから，短絡故障の発生条件は運動エネルギーではなくガラスの衝突痕深さで一般化できると考えられる．

次に，ガラスの衝突痕深さと薄膜太陽電池セルの変形の相関を取得するため，様々な条件で超高速衝突実験を行った．衝突痕深さを調整するため，一部の実験では衝突体にアルミナ (密度 3.95g/cm³) を使用した．図 5 では式(1)より算出したガラスの衝突痕深さ順に，断面写真を並べている．図 5 の①および②は衝突によって太陽電池セルが接着剤の領域に押し込まれているが，図 3(b)にみられるような太陽電池セルの隆起は見られない．この条件の衝突実験は計 8 回実施したが，短絡故障は発生しなかった．図 5 の③，④および⑤では衝突痕中央に太陽電池セルの隆起が確認できる．図 5 の⑥および⑦では衝突箇所のカバーガラス，太陽電池セルおよび接着剤が消失しているように見える．絶縁フィルムおよびバックシートは残されていることから，消失した材料の破片は受光面側から反跳飛散したと考えられる．この条件の衝突実験は計 3 回実施したが，短絡故障は発生しなかった．図 5 の⑧では衝突体がシート全てを貫通していることから，破片は受光面側だけでなく，反受光面側にも飛散していると考えられる．この条件の衝突実験は計 2 回実施したが，短絡故障は発生しなかった．なお⑧以外でシート全てを貫通する条件

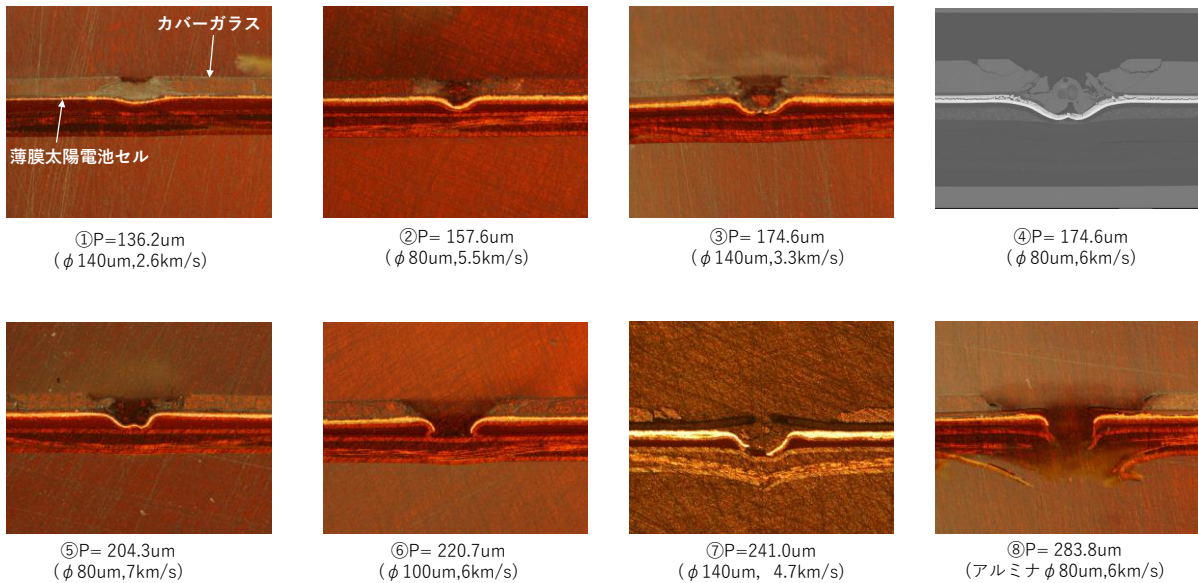


図5：衝突痕の断面顕微鏡写真（ P は式(1)によって計算した衝突痕深さ）

の実験は計6回実施したが、衝突体が衝突前に砕けて粒径 $80\mu\text{m}$ 、速度 6km/s 相当となって短絡故障に至るケース³⁾とインターコネクタに衝突して短絡故障に至るケース^{3,4)}を除き短絡故障は発生していない。

最後に、図5に示す断面図より、短絡故障が発生する範囲について議論する。先述のBurtモデルから算出されるガラスの衝突痕深さをを用いて一般化した。速度は測定結果の平均値を用いた。短絡故障が発生する範囲は、衝突痕中心に太陽電池セルの隆起が発生する条件として求めた。実験からは少なくとも、粒径 $80\mu\text{m}$ 、速度 5.5km/s に相当する衝突痕深さ $157.6\mu\text{m}$ から、粒径 $100\mu\text{m}$ 、速度 6.0km/s に相当する衝突痕深さ $220.7\mu\text{m}$ までの間に短絡故障の発生する範囲があると考えられる。なお、インターコネクタ上に衝突して短絡故障^{3,4)}に至る場合についても同様にガラスの衝突痕深さをを用いて発生範囲を $241.0\mu\text{m}$ 以上と求めた。このような衝突痕を生成するMMODのフラックスをMMODモデルから算出することで、短絡故障する太陽電池セルの枚数を予測することが可能と考えられる。

4. まとめ

DESTINY+探査機で採用されている薄膜軽量SAPへの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。薄膜太陽電池セル特有の短絡故障は、衝突の衝撃が接着剤やバックシートなどによって分散・反跳する過程で薄膜太陽電池セルが変形することによって発生していると考えられる。また短絡故障が発生する条件は、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、またその範囲を導出した。これによって、MMOD衝突によるミッション期間中の電力損失量の予測が可能と考えている。

謝辞

本検討を行うにあたり、ご協力頂いたシャープ株式会社ならびに日本電気株式会社の関係各位に感謝いたします。また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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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, T. Ohshima, “Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple-junction Cells”, Proc. 42nd

- IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2015, pp.1-5.
- 5) T. Takamoto, T. Agui, A. Yoshida, K. Nakaido, H. Juso, K. Sasaki, K. Nakamura, H. Yamaguchi, T. Kodama, H. Washio, M. Imaizumi, and M. Takahashi, “World’s Highest Efficiency Triple-junction Solar Cells Fabricated by Inverted Layers Transfer Process”, Proc. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, Hawaii U.S.A., 2010, pp.412-417.
 - 6) 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
 - 7) 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
 - 8) R. R. Burt, and E. L. Christiansen, “Hypervelocity Impact Testing of Transparent Spacecraft Materials”, International Journal of Impact Engineering 29, 2003, pp. 153-166.