

衝突実験および数値解析による CLOTH 検出部の検出性能評価

Detection performance of CLOTH sensor validated by impact experiments and computer simulations

○實川 律子¹, 平井 隆之², 石岡 英悟¹, 中野 晴貴¹, David Veysset³,
Mostafa Hassani-Gangaraj³, Steven E. Kooi³, Christopher A. Schuh³, Keith A. Nelson³,
長谷川 直⁴, 新井 和吉¹, 矢野 創⁴

Ritsuko Jitsukawa¹, Takayuki Hirai², Hiroyuki Mochizuki¹, Eigo Ishioka¹, Haruki Nakano¹,
Sunao Hasegawa³, Toshifumi Yanagisawa³, Kazuyoshi Arai¹, Hajime Yano³

¹法政大学, ²千葉工業大学, ³マサチューセッツ工科大学, ⁴宇宙航空研究開発機構

1. 緒論

宇宙空間に存在するスペースデブリや宇宙塵（ダスト）などの微粒子のその場計測は、これまで人工衛星や探査機に搭載した衝突センサによって進められてきたが、従来の衝突センサは搭載質量と曝露面積の制約から、特に直径数~数十 μm 以上の大径粒子について統計的に十分な数の検出ができなかった¹⁾。そこで、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）と法政大学では、宇宙機表面の大部分を占める多層断熱材（Multi-Layer Insulation, MLI）に、圧電性 Polyvinylidene fluoride (PVDF) フィルムを挟み込むことで、特別な熱制御が不要な軽量かつ大面積の微粒子衝突センサの開発を進めている。「Cis-Lunar Object detector within Thermal Insulation (CLOTH)」と命名されたこの多層断熱材一体型微粒子衝突センサの宇宙実証機は、超小型深宇宙探査機「EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft (EQUULEUS)²⁾」に搭載され、2019 年度末に打ち上げ予定である³⁾。

本研究では、EQUULEUS の MLI と一体化した CLOTH の検出部構造と、それらの貫通・損傷に着目し、CLOTH の微粒子衝突検出性能を評価する。特に本年度は、衝突速度~2 km/s 程度と予測されるダストの衝突現象について検討し、衝突実験と数

値解析から得られた結果について報告する。

2. CLOTH

地球-月系のラグランジュ L2 点（Earth-Moon Lagrange point 2, EML2）領域への航行・滞在を目指す EQUULEUS において、CLOTH は航行期間中、連続的にダスト観測を行う予定である。特に EML2 領域でのダスト分布その場計測はこれまでに例がなく、将来の地球-月ラグランジュ点宇宙港の建設や運用に不可欠な、ラグランジュ点近傍の固体物質環境を把握することにつながるなど、重要な意味を持つ。CLOTH の検出機構およびサブシステム構成は Fig. 1 に示すとおりである。CLOTH の検出部は 10 層のフィルム積層体であり、PVDF フィルムセンサ層が MLI の 2 層目に挟み込まれた構造である。PVDF フィルムセンサ層ではソーラ

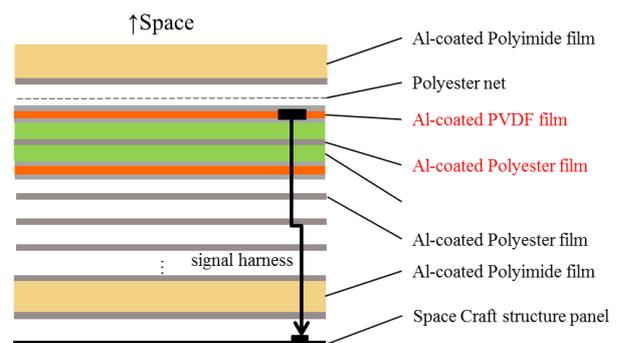


Fig. 1 CLOTH 検出部の積層構造。

一電力セイル実証機 IKAROS に搭載されたダスト
その場計測器 ALADDIN⁵⁾で実績のある構造を採用した。宇宙側の PVDF フィルムセンサの表裏には、信号伝送用ハーネスが接続され、信号処理回路部へつながる。

微粒子が検出部の最外層を貫通し、PVDF フィルムセンサ層へ到達すると PVDF フィルムの圧電効果によって電荷が発生する。これを信号処理回路部で処理し、地上較正実験で得られる感度較正式を用いることで、衝突したダストの質量を推測することが可能である⁶⁾。

3. CLOTH の検出対象となるダスト

EML2 領域にも地球一月周辺環境と同様にダストが分布していると仮定すると、既往の研究から次に述べる二種類の起源が異なるダストが CLOTH に衝突すると考えられる⁴⁾。彗星および小惑星を起源とする惑星間ダストと、一時的に地球一月系に捕獲された小天体 (Temporary Captured Orbiters, TCOs) からの二次放出ダスト (以下 EML2 ダスト) である。本項では詳細は省くが、それぞれのダストの EQUULEUS 探査機との平均相対衝突速度は 12 ± 5 km/s (1σ) と、 ~ 2 km/s であると算出される。

また、これらのダストの衝突する粒径範囲について、Fig. 2 に示す 1 AU におけるダストフラックスモデル⁷⁾が、EML2 領域でも適応できると仮定すると、惑星間ダストが EQUULEUS のノミナル

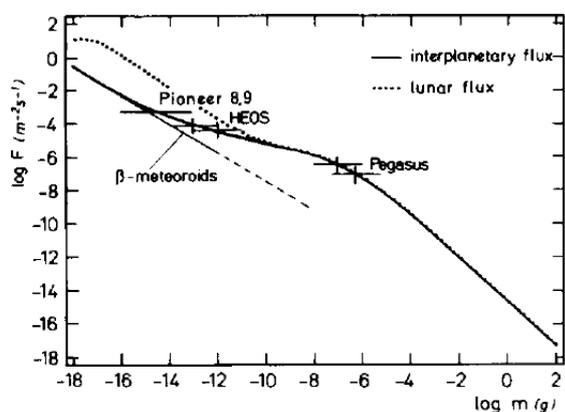


Fig. 2 ダストフラックスモデル (1 AU) ⁷⁾.

ミッション期間、6 ヶ月間に、CLOTH センサ面積 437 cm^2 に確率的に 1 回以上衝突するダストは粒径 $14 \mu\text{m}$ 以下と予測される。

4. EML2 ダスト衝突実験

EML2 ダストの衝突模擬実験には、マサチューセッツ工科大学所有のレーザー加速式銃(Laser-Induced Particle Impact Test, LIPIT)⁸⁾を用いた。LIPIT はレーザー照射で発生する金のアブレーションプラズマでポリウレタンフィルムに付着した粒子を一つずつはじく機構であるが、本実験ではポリウレタンフィルムは用いず、金蒸着に直接粒子を付着させて加速した。この機構によって大気開放下ではあるが、数ミクロン程度の微小粒子を数キロメートル毎秒で単発衝突させることができることが LIPIT の特徴である。実験は、飛翔体に粒径 $4, 7 \mu\text{m}$ の石英ガラス (密度 1.85 g/cm^3) と粒径 $5, 10, 20 \mu\text{m}$ のホウケイ酸ガラス (密度 2.55 g/cm^3 の微粒子を用い、衝突速度： $0.4\text{--}2.4 \text{ km/s}$ の範囲とした。標的には CLOTH 検出部および CLOTH 検出部最外層 $12.5 \mu\text{m}$ 厚の片面アルミニウム蒸着ポリイミドフィルムを供し、微粒子の貫通、損傷を評価した。

5. 衝突実験結果

LIPIT を用いた衝突実験で得られた代表的な衝突痕を Fig. 3 に示す。EML2 ダストの衝突では、比較的低速衝突現象となるため、標的には、ユゴニオ圧力未満で脆性的な破壊を起こしているようにみられる。これは、前年度までの二段式軽ガス銃を

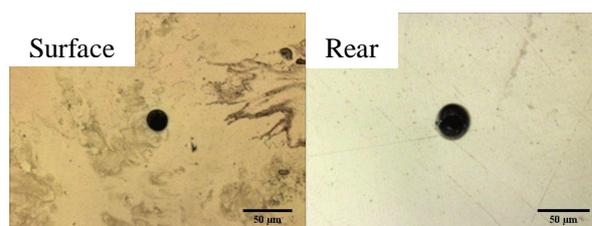


Fig. 3 LIPIT 衝突実験から得られた CLOTH 最外層の衝突痕画像 (衝突条件：粒径 $20 \mu\text{m}$ 、衝突速度 1140 m/s) .

用いた同一衝突条件の散弾衝突実験で見られた衝突痕と相違ない結果を示している。

また、衝突実験中、CLOTH 検出部の最外層を貫通しない場合に PVDF フィルムセンサから出力が得られることがわかった。本研究では、CLOTH 検出部の最外層を貫通した場合に検出できると定義しているが、今後の検討課題であるといえる。

6. CLOTH のダスト検出数予測

これまでの衝突実験と数値解析結果から、粒径 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $14\ \mu\text{m}$ 以下のダストが検出対象である。この時、惑星間ダストは平均衝突速度の $12\ \text{km/s}$ で衝突することから粒径 $4\text{--}14\ \mu\text{m}$ が検出範囲であり、EML2 ダストは $2\ \text{km/s}$ で衝突することから、検出下限曲線から粒径 $9\text{--}14\ \mu\text{m}$ であるとわかった。

ダストの衝突頻度予測には、Fig. 2 の 1 AU におけるダスト分布モデルを用いた。ダストが衝突するミッション期間を 6 ヶ月間、CLOTH の検出面積を $347\ \text{cm}^2$ とすると、CLOTH への衝突頻度は、惑星間ダスト（衝突速度 $12\ \text{km/s}$ ）が 4 回、そして EML2 ダスト（衝突速度 $2\ \text{km/s}$ ）が 2 回と予測される。これまで、本研究ではダストフラックスモデルにグリュンらによって構築された惑星間ダストの分布モデル⁷⁾を用いてきた。宇宙科学業界においても広く議論の前提として用いられているモデルであるが、このモデルにおいても、フラックスの不確定性 1σ ($\pm\sqrt{n}$, n : 検出数) はファクター 1 桁である。フラックス ($=F$ [number/ m^2/year]) の不確定性 1σ は、平均値の分散から検出数 n [number]を用いて

$$F \pm 1\sigma = (n \pm \sqrt{n}) / (A \times t) \quad [\text{number}/\text{m}^2/\text{year}]$$

で表すことができる。ここで、 $A=0.04\ \text{m}^2$ とすると、CLOTH でミッション期間中に 4 回 ($n=4$) の惑星間ダストが検出できうることは、 $\log(1\sigma)=0.48$ であり、検討に用いたフラックスモデルの不確定性

を $1/2$ 以下にできると予測される。よって CLOTH は十分なダスト検出性能を有すると期待される。

7. 結論と今後の課題

これまでの進捗と今後の課題について示す。

- LIPIT を用いて、EML2 領域において $\sim 2\ \text{km/s}$ 程度で衝突すると予測されるダストの衝突模擬実験を実施した。LIPIT を用いることで、大気開放下ではあるが、数ミクロン程度の粒子を単発衝突させることが可能となった。
- 衝突実験と数値解析から、衝突が予測される起源の異なる二つのダストの典型的な衝突速度における検出回数を見積もった。最外層を貫通する場合、惑星間ダストは 4 回、EML2 ダストは 2 回と算出され、科学的有意な数の衝突を検出しようとした。
- LIPIT を用いた衝突実験では、非貫通の場合にも出力信号が取得されることがわかった。すなわち、貫通後の飛翔体および標的の損傷形態と PVDF からの出力信号に相関が得られると考えられる。LIPIT では真空チェンバを導入中であり、追加実験によって検討する予定である。

参考文献

- 1) Krisko, P. H. et al.: ORDEM 3.0 and MASTER-2009 modeled debris population comparison, Acta Astronautica, Vol. 113, pp. 204–211, 2015.
- 2) Funase, R. et al.: Flight Model Design and Development Status of the Earth—Moon Lagrange Point Exploration CubeSat EQUULEUS Onboard SLS EM-1, 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, abstract id. SSC18-VII-05, 2018.
- 3) NASA | Space Launch System, International Partners Provide Science Satellites for America's Space Launch System Maiden Flight: <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/inter>

[national-partners-provide-cubesats-for-sls-maiden-flight](#) (2019.3.閲覧).

- 4) 實川律子ら：EQUULEUS-CLOTH の検出部検出性能評価，第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集，2C16，2018.
- 5) Hirai, T. et al.: Data screening and reduction in interplanetary dust measurement by IKAROS-ALADDIN, *Advances in Space Research*, Vol.59, pp. 1450–1459, 2017.
- 6) Mochizuki, H. et al.: Development of a signal processing circuit of the micrometeoroid impact sensor within a multi-layered insulation (CLOTH) on the exterior the 6U spacecraft EQUULEUS, 12th Low-Cost Planetary Missions Conference, SESS03-12, 2017.
- 7) Grün, E., et al.: Collisional Balance of the Meteoritic Complex, *Icarus*, Vol.62, pp.244–272, 1985.
- 8) Veysset, D. et al.: High-velocity Micro-particle Impact on Gelatin and Synthetic Hydrogel. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol.86, pp.71–76, 2018.