

SmartMLI コンセプトモデルおよび宇宙実証機 CLOTH の 検出下限条件の地上較正データ取得

平井 隆之（千葉工大），神門 宏祐（法政大），長谷川 直（JAXA），新井 和吉（法政大），矢野 創（JAXA）

1. はじめに

我々の研究グループでは、圧電性 PVDF フィルムセンサを用いたダスト衝突センサの研究開発を行っている。我々が発明した人工衛星の多層断熱材 MLI と PVDF フィルムセンサを一体化した SmartMLI コンセプト¹は、従来のダストセンサの 10 倍以上の検出面積を 10 分の 1 程度の機器質量で実現可能なアイデアとして発案され、その宇宙実証機である CLOTH は 2021 年打ち上げ予定の 6U クラス深宇宙探査機 EQUULEUS に搭載されている²。今年度の ISAS 超高速衝突実験施設共同利用では、SmartMLI コンセプトモデルおよび CLOTH の検出性能評価として、特に検出下限に相当する粒径・速度での地上較正データ取得を目的として実験を行った。なお、論文発表前の内容のため、結果に関する図表、詳細は本稿では省略し概要のみ報告する。

2. SmartMLI コンセプトモデルの較正データ取得

SmartMLI コンセプトモデルの地上較正については粒径 10 μm 、20 μm 、100 μm のソーダ石灰ガラス粒子を 5 km/s に加速し、センサに衝突させ信号読み出し回路の出力信号を取得した。

本研究で扱う PVDF フィルムセンサおよび信号読み出し回路では、複数の微粒子がごく短時間 ($<10\text{ ms}$) に同時に衝突すると、振動波形の位相の強めあいや打ち消しあいが発生することで、衝突強度 (\propto 粒子質量および衝突速度) と信号強度の相関が崩れるため、地上の衝突実験では単発で衝突することが求められる。しかし、粒径 10、20 μm の単発撃ちは技術的に実現困難なため、ターゲットである SmartMLI センサの前面に直径 1.2 mm または 2.4 mm の穴を開けたストッププレート（ショットに伴うガスの吹き付け緩和も兼ねている）を設置し、散弾撃ちで撃ち出された粒子のうち 1 粒だけが通過しセンサに衝突することを狙った。SmartMLI センサの最外層フィルム厚は 50 μm で、一般的な MLI に用いられる厚さである。SmartMLI 内部の PVDF フィルムセンサの

大きさは 470 mm \times 265 mm でおおよそ IKAROS に搭載した大面積ダストセンサ ALADDIN^{3,4} と同等である。信号読み出し回路は CLOTH のフライトスベアを使用しプレアンプ出力を取得した。

結果として直径 20 μm と直径 100 μm の単発衝突に成功し、期待していた検出下限域での較正データを取得することができた。直径 20 μm 、衝突速度 5 km/s で約 1 V のプレアンプ出力を得られ、SmartMLI コンセプトが実際の人工衛星でもダストセンサとして十分機能することが期待される。今回の実験により、論文出版に向けた SmartMLI コンセプトモデルの地上較正データ取得は完了の予定である。

3. CLOTH の較正データ取得

SmartMLI の宇宙実証機である CLOTH についても、検出下限域かつ実際の観測においても検出が期待される直径 10 μm 程度の微粒子衝突時の検出性能を評価するため、ストッププレートと併用した散弾撃ちを中心に実験を行った。衝突速度は約 6 km/s とした。また、CLOTH については地球-月ラグランジュ点 (EML2) で検出される可能性のある TCO (Temporarily Captured Objects) 由来の低速ダストの検出可能性を評価するため、1 km/s での衝突実験も行った。こちらについて単発撃ち可能な直径 80 μm 、100 μm 、200 μm のソーダ石灰ガラス粒子を使用した。実験に用いたセンサはフライトモデルと同様の積層構成で、面積は 312.5 cm² で CLOTH の実際の面積とは異なるが、これまでに確立した面積補正式を用いて信号出力強度を補正可能である。

検出下限域の検出性能評価について、CLOTH についても SmartMLI 同様、直径 20 μm の単発衝突に成功したが、出力信号には有意なピークが見られなかった。これは最外層と PVDF フィルムセンサの間にあるポリエステルネットに衝突した可能性が示唆される。ポリエステルネットは太さ 10 μm 程度のポリエステル製の糸を十数本より合わせたもので、メーカーカタログ値として約

140 μm の太さを持つ。これまでの直径 100 μm オーダーの微粒子衝突ではネットの影響は有意には見られなかったが、検出下限域では検出可能性に大きく影響することがわかった。今後は、まずはネットの影響を排除するため、ネットを抜いたセンサを用い同様の実験を行う必要があることがわかった。

TCO 由来ダストの検出性能を評価するため実施した衝突速度 1 km/s の実験では、現在まで直径 80 μm と直径 100 μm の信号波形を解析し、過去に筆者らがマサチューセッツ工科大学 (MIT) の LIPIT で取得した衝突速度 1 km/s、粒径数十 μm の時の信号強度と比較したところ、今回の直径 80 μm , 100 μm の出力信号は、より粒径の小さい MIT-LIPIT で取得した信号で得られた信号出力-質量相関から予測されるよりも高い出力を示すことがわかった。これは今回の条件では粒子が最外層を貫通している一方で、MIT-LIPIT 実験では非貫通であったことに起因していると考えられる。衝突粒子が同じ運動量、運動エネルギーを持っている場合でも、最外層を貫通するか否かで出力が変化することを意味しており、詳細なメカニズムを解明するには今後の較正データ拡充が求められる。

4. 今後の課題

CLOTH についてはポリエステルネットの検出性能への影響を評価するため、ネットを除いたセンサ供試体を用いた実験の実施が求められる。また、ネット衝突を常に再現可能な実験構成を考案する必要もあると考えている。また、最外層の貫通・非貫通時の出力信号強度の変化を評価するため、幅広い粒径・衝突速度範囲でのさらなる較正データの取得が求められる。

参考文献

- 1) 国内特許：特開 2019-111936, 特願 2017-246925, “多層断熱材、宇宙機、損傷診断装置、及び被検出物の検出方法”, 発明者: 平井隆之・矢野創, 出願日 2017 年 12 月 22 日, 公知日 2019 年 07 月 11 日.
- 2) Funase, R. et al., "Mission to Earth-Moon Lagrange Point by a 6U CubeSat: EQUULEUS", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine Vol. 35 Special Issue on Exploration Mission-1 and Deep Space CubeSats, pp. 30-44, 2020.
- 3) H. Yano et al., Cosmic dust detection by the IKAROS-

Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary Space (ALADDIN) from the Earth to Venus, 42nd Lunar and Planetary Science Conference, 2647, 2011

- 4) T. Hirai et al., Microparticle Impact Calibration of the Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary Space (ALADDIN) onboard the Solar Power Sail Demonstrator IKAROS, Planetary and Space Science, Vol. 100, 87-97, 2014