

CLOTH 信号処理回路部における検出可能微粒子直径の評価

Calibration of detectable microparticle diameter of the signal processing unit of CLOTH

○石岡 英悟¹, 平井 隆之², 望月 悠行¹, 實川 律子¹, 中野 晴貴¹, 藤井 雅之³
長谷川 直⁴, 柳沢 俊史⁴, 新井 和吉¹, 矢野 創⁴

Ishioka Eigo¹, Takayuki Hirai², Hiroyuki Mochizuki¹, Jitsukawa Ritsuko¹, Haruki Nakano¹,
Masayuki Fujii³, Sunao Hasegawa⁴, Toshifumi Yanagisawa⁴, Kazuyoshi Arai¹, Hajime Yano⁴

¹法政大学, ²千葉工業大学, ³ファムサイエンス, ⁴宇宙航空研究開発機構

1. 序論

地球周辺の宇宙環境には、運用を終了した衛星やロケットの部品・破片等の大きなものから、宇宙機からはがれ落ちた塗料や固体燃料の燃焼クズといった小さなものまで、人工物に由来するさまざまなごみ、“スペースデブリ”が無数に存在している。これらは、運用中の衛星に平均 10 km/s の超高速で衝突する危険性があり、人類の持続的宇宙活動において問題となっている。特に、1 mm 以下の“微小デブリ”は、衛星に致命的損傷を与えるにも関わらず、その分布は正確に把握できていない。微小デブリ衝突に対する衛星の防護設計で用いられる欧米のデブリ分布モデルも、地上からの観測が困難であること、軌道上観測も行われるが検出面積が最大でも 0.1 m² 程度であり実測データが不十分であることを原因に分布把握の不確実性が大きいのが現状である。今日では、微小デブリ観測のために 1 m² のセンサ面積を持つアメリカ航空宇宙局 (NASA) の Space Debris Sensor (SDS)¹⁾ や、太陽電池パネルのセンサ化をコンセプトとする欧州宇宙機関 (ESA) の Solal panel based Space Debris Impact Detector (SOLID)²⁾ の開発が行われている。

また、宇宙空間には人工物由来の物体であるスペースデブリに対して、小天体の地質的活動やそれらの相互衝突等を原因に発生する自然物由来の微粒子、“ダスト”も存在する。特に 10 μm 以上のダストは、惑星との力学的作用により空間分布に非対称性を生じる。そのため、太陽系内でダスト分布を把握できれば、ダストと惑星の力学特性を理解することができる。さらに、得られた知見を太陽系外の惑星系に適用することで、ダスト円盤に隠された惑星の力学特性を推定できると考えられる³⁾。しかし従来のダスト検出器は、主に搭載質量の制約から検出面積が小さく、比例して大きなダストほどフラックスも小さくなるため 10 μm 以上のダストをほとん

ど検出できなかった。

以上で述べたように、スペースデブリとダストの軌道上観測において検出面積の拡大が課題となっている。そこで我々は、センサ面積を拡大し高い統計精度での微粒子分布計測を実現する方策として、多層断熱材(Multi Layer Insulation, 以下 MLI)と、圧電性ポリフッ化ビニリデン (Polyvinylidene Fluoride, 以下 PVDF) フィルムを組み合わせた、“複層薄膜貫通型微粒子衝突センサ”を提案している。現在、東京大学と宇宙航空研究開発機構(以下, JAXA)が共同提案した 6U サイズ (20 cm×30 cm×10 cm) の深宇宙探査用キューブサット EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft (以下, EQUULEUS) プロジェクトに参画し、微粒子衝突センサの技術実証機である Cis-Lunar Object Detector within Thermal Insulation (以下, CLOTH) を開発している。

本研究では、今回、質量推定精度を向上させた信号処理回路を CLOTH に適用し、検出目標の数ミクロンから数十ミクロンの微粒子を検出するために適した回路を開発することを目的とする。

2. CLOTH

CLOTH は、MLI と圧電性 PVDF フィルムを組み合わせたセンサ部(以下 CLOTH-S)とセンサ部の出力を増幅、整形する信号処理回路部(以下 CLOTH-E)で構成される。

CLOTH では衝突粒子の検出・質量推定を以下の通りを行う。

- ① 微粒子が CLOTH の最外層を貫通し PVDF フィルムセンサ部に衝突することで電気信号が出力される。
- ② この出力信号を測定可能な信号強度に増幅する。
- ③ 増幅した出力を整形回路に通し、複数ピークを持つパルス波を生成する。

- ④ 複数ピークパルス波を積分回路に入力し、出力された積分波形の波高値から衝突粒子の質量を推定する。

CLOTH が検出対象とするダストはスポラディックダストと Earth-moon Lagrange point 2 (EML2) ダストに大別できる。スポラディックダストは深宇宙から地球-月圏に飛来した微粒子である。CLOTH への平均相対速度は約 12 km/s と見積もられる。一方 EML2 ダストは、一時的に地球-月圏に捕獲された小天体にダストが衝突し放出された二次イジェクタである。CLOTH への平均相対速度は約 2 km/s と見積もられる。

CLOTH が検出可能な粒径の範囲は CLOTH 最外層を貫通し PVDF フィルムに衝突する最小粒径とダストフラックスモデルに基づいた CLOTH センサに衝突しうる最大粒径で決まる。最小粒径は粒子密度を 2.53 g/cm³ と設定した数値解析により、衝突速度 12 km/s の場合 0.6 μm、衝突速度 2 km/s の場合 6.9 μm であれば CLOTH 最外層を貫通可能であり検出できると見積もられた⁴⁾。また 1 AU のダストフラックスをモデル化した Grün モデル⁵⁾から CLOTH の有効検出面積にミッション期間である半年間に一個以上衝突するダスト粒径は 17 μm と見積もられた。よって、直径 0.6~17 μm のダストを検出できるように EM を設計した。製作した CLOTH-E EM の外観を図 1 に示す。

3. 超高速衝突実験による微粒子検出性能の評価

JAXA/宇宙科学研究所所有の二段式軽ガス銃を用い、ダスト衝突を模擬する超高速衝突実験を行った。飛翔体にソーダライムガラス球を用い、直径 0.10 mm, 0.14 mm, 0.20 mm, 0.33 mm 球をそれぞれ単発で撃ち出した。衝突速度は、4 km/s, 5.5 km/s, 6 km/s, 7 km/s とした。

まず、CLOTH-E の微粒子検出性能を評価した。EM は回路シミュレーター LTspice[®]を用いて設計した。試作試験用のブレッドボードモデル (Breadboard model, 以下 BBM)の実験結果に基づき、LTspice 上で EM の検出性能をシミュレートした。



Fig. 1 CLOTH-E (EM).

また、このシミュレート結果に、EM を用いた実験データおよび実験データから得られた校正曲線を追加したグラフを図 2 に示す。図 2 より、EM の予測性能校正曲線と実際の性能校正曲線の傾きがおおよそ一致していることがわかる。信号処理回路の衝突微粒子質量推定精度は校正曲線の傾きに依存するため、設計通りの性能を有しているといえる。

次に実験データを基に実際に宇宙で検出するダスト質量まで外挿した校正曲線を図 3 に示す。回路の特性上制限される出力電圧範囲である 0.1~5 V で検出可能な粒径を見積もった。その結果、衝突速度 12 km/s では粒径 0.01 μm~52.2 μm、衝突速度 2 km/s では粒径 0.3 μm~1456 μm を検出できると見積もられた。よって設計した CLOTH-E EM は検出可能な粒径範囲に CLOTH が検出対象とする粒径 0.6~17 μm を含み、検出対象のダストを検出可能といえる。

4. ダストの起源識別法の検討

CLOTH に衝突した粒子がスポラディックダストか EML2 ダストかを識別する方法を検討した。両ダストのサイズごとの衝突フラックスは同様と仮定し、両者の平均衝突速度が一桁異なること、およびそれにより CLOTH-S の最外層を貫通可能な粒径サイズが大きく異なることを利用し識別する。スポラディックダストは平均 12 km/s、EML2 ダストは平均 2 km/s で衝突すると予測される。衝突しうる速度での出力電圧範囲を図 4 に示す。図 4 より 0.66 V 以上の出力電圧値であれば、Grün モデルに基づいたフラックス計算上 EML2 ダストは衝突し得ないと予想されるため、スポラディックダストであると推定できる可能性がある。一方出力電圧値が 0.31 V 以下であればスポラディックダストは粒径が小さく、CLOTH 最外層を貫通しないため、EML2 ダストであると推定できる可能性がある。以上より出力電圧が 0.66 V 以上の場合にはスポラディックダストが、0.31 V 以下の場合には EML2 ダストが衝突し

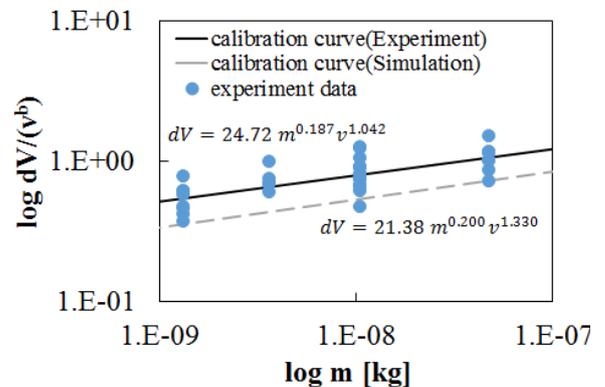


Fig. 2 Calibration curves of EM obtained by simulation and experiment data.

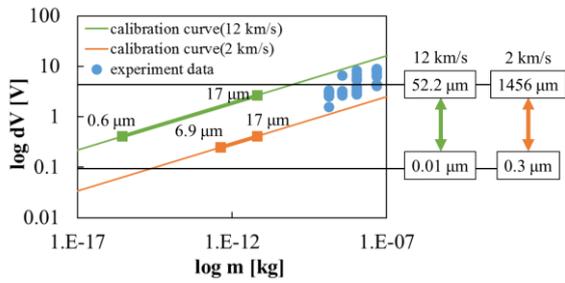


Fig.3 Calibration curves of EM and detectable diameter ranges of sporadic dust and EML2 dust.

たと判断できると考えることができる。ただしここでは測定誤差を考慮していない。0.31 V 以上 0.66 V 以下の電圧値が出力された場合のダスト識別方法は今後検討する。

5. まとめ

結論と今後の予定を以下に示す。

○結論

- ・ CLOTH-E EM の微粒子衝突検出性能を検証し、スプラディックダストが速度 12 km/s で衝突する場合は、直径 0.01 μm～52.2 μm の粒子を、EML2 ダストが速度 2 km/s で衝突する場合は直径 0.3 μm～1456 μm の粒子を検出可能と見積もられた。
- ・ よって、積分回路を付与し衝突微粒子の質量推定精度を向上させた信号処理回路を用いて、EQUULEUS/CLOTH のミッション期間である半年間に、検出対象とする直径～20 μm のダストが CLOTH に衝突すれば検出可能と予想される。
- ・ さらに、出力電圧値が 0.66 V 以上の場合スプラディックダストが、出力電圧値が 0.31 V 以下の場合 EML2 ダストが衝突したと識別できる可能性があることがわかった。

○今後の予定

- ・ EM の実験データに基づき設計する FM を用いて超高速衝突実験を行い、FM の微粒子衝突検出性能を検証する。

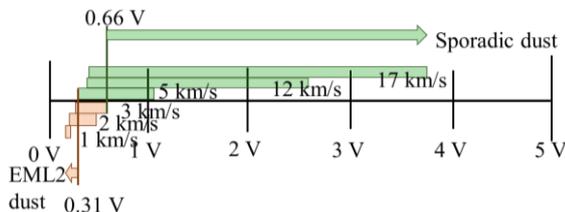


Fig.4 Output voltage range at each impact velocity.

参考文献

- 1) NASA Orbital Debris Program Office, Orbital Debris Quarterly News, Vol.21 (1), 2017.
- 2) Bauer, W et al., DEBRIS IN-SITU IMPACT DETECTION BY UTILIZATION OF CUBE-SAT SOLAR PANELS, The 4S Symposium 2016.
- 3) Kate Y. L. Su, et al., ASTEROID BELTS IN DEBRIS DISK TWINS: VEGA AND FOMALHAUT, The Astrophysical Journal, Volume 763, Number 2, 2013.
- 4) 實川 律子ら, 超高速衝突実験による CLOTH 検出部の微粒子衝突検出性能評価, 2017 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム後刷り, 2018.
- 5) Grün, E., et al.: Collisional Balance of the Meteoritic Complex, Icarus, Vol.62, pp. 244-272, 198.
- 6) リニアテクノロジー ソフトウェア : <http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software/>.