

超高速衝突実験による CLOTH 信号処理回路部の検出可能微粒子直径評価 Calibration of detectable microparticle diameter at a signal process unit of CLOTH by hypervelocity impact experiments

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

Haruki Nakano¹, Takayuki Hirai², Eigo Ishioka¹, Ritsuko Jitsukawa¹, Masayuki Fujii³,
Sunao Hasegawa⁴, Kazuyoshi Arai¹, Hajime Yano⁴

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

1. 緒論

現在, 地球周辺の宇宙環境には, 運用終了した衛星やロケットの部品・破片といった大小さまざまなスペースデブリが多量に存在している. これらは宇宙機に衝突する危険性があり, 人類の持続的な宇宙活動において問題となっている. 直径 1 mm の微小なデブリでも宇宙機に致命的損傷を与えうるにもかかわらず, 地上からの観測が困難である. 安全な宇宙活動のためには, 宇宙空間で微小デブリをその場計測し, 高い統計精度で微小デブリ分布を明らかにすることが非常に重要である.

また, 宇宙空間には人工物由来であるスペースデブリの他に, 天然物由来のダスト(宇宙塵)が存在する. ダストとは直径 1 mm 以下の地球外起源物質のことをさす. ダストは地上にも 2~6 万 t/年程度が降り注いでいる¹⁾. そのため, 地上でもダストは計測できるが, 宇宙空間での“その場計測”をすることで, 地上では得ることができない情報を取得できる. 例えば, 太陽系内でダスト分布を把握できれば, 太陽系だけでなく惑星系一般のダストと惑星の力学特性を理解することができる. これは, 宇宙空間に存在するダストのうち, 直径 10 μm 以上のものは惑星との力学的作用によって分布に非対称性を生じる²⁾ためである. しかし, 従来のダスト検出器は検出面積が小さく, 大きなダストほどフラックスも小さくなるため 10 μm 以上のダストがほとんど検出できなかった.

以上のように衝突センサによる“その場計測”の重要性が高まっている. そこで, 我々は, 圧電性ポリフッ化ビニリデン(Poly Vinylidene DiFluoride, PVDF)フィルムを使

った微粒子衝突センサを開発している. PVDF センサは, 従来のセンサと比べて, 軽量かつ大面積化が容易であるという利点がある. PVDF センサの宇宙実績は, PVDF センサ単体(単体型センサ)での搭載例が豊富にあり, 前述の利点を活かし, 衛星表面の大部分を占める多層断熱材に PVDF を組み合わせ, 大面積微粒子衝突センサとする構想もある^{3),4)}. 現在, 技術実証の機会として, 東京大学と JAXA が共同で提案した(20 cm \times 30 cm \times 10 cm)の深宇宙探査用キューブサット“EQUULEUS”(EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft)の MLI を微粒子検出器化する“CLOTH”(Cis-Lunar Object Detector within Thermal Insulation)を開発している⁵⁾.

本研究では, 前年度から引き続き複層薄膜貫通型微粒子衝突センサの信号処理回路において抽出する周波数帯域に注目し, 衝突強度に対するセンサの応答特性を改善するための, 回路の最適設計を提案する. また, PVDF センサの出力波形から質量の独立推定ができる可能性が前年度の成果から確認された. この可能性についても検証する. 本年度は 4 年計画で進めてきた本研究課題の最終年度にあたる. なお, CLOTH の較正に関する論文投稿前のため, 本稿では詳細な設計値等は伏せる.

2. CLOTH

CLOTH は, ソーラー電力セイル技術実証機 IKAROS に搭載したダスト検出器 ALADDIN を技術シーズとし, 多層断熱材 MLI と圧電性 PVDF フィルムを組み合わせ

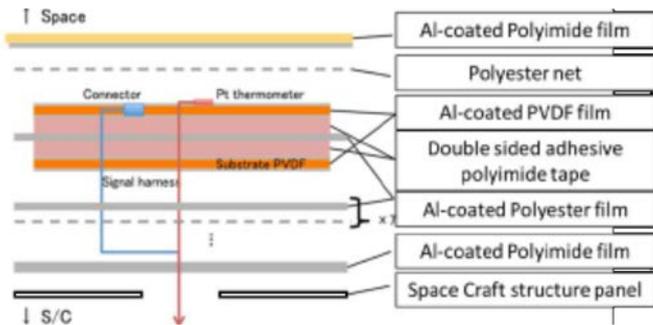


Fig.1 Layered structure of CLOTH

微粒子衝突センサである。積層構造の概念図を図 1 に示す。三層目は基材となる両面アルミ蒸着ポリエステル膜の両面に PVDF フィルムを貼り付けており、宇宙側のフィルムが PVDF センサ部である。これは熱による変形を抑制するために貼り付けている。また層間には接触伝熱防止のためにポリエステルネットを挿入している。一層目の MLI を貫通してセンサ部に衝突することダストを検出できる。

CLOTH が検出対象とするダストはスポラディックダストと EML2(Earth-moon Lagrange point 2)ダストの 2 種類である。スポラディックダストは深宇宙から地球一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、一時的に地球一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粒子である。CLOTH への平均相対速度は約 1 km/s と見積もられる。これらのダストの衝突を検出できる信号処理回路を開発しており、二つの機能・性能評価をしている。一つ目は、測定できる粒径範囲の評価である。これにより観測に必要な増幅率を決定する。二つ目は、ダストの起源を識別する方法の検討である。これは、CLOTH に衝突したダストがスポラディックダストか EML2 ダストかを識別するためである。

3. 信号処理回路の構成

本研究が対象とする微粒子衝突センサは、PVDF フィルムからなる検出部と信号処理回路から構成される。両者は同軸ケーブルなどの信号ハーネスで接続されている。信号処理過程は、まず、微粒子が検出部(PVDF フィルム)に衝突すると、信号ハーネスを介して信号処理回

路へと電荷が流れる。次に、前置増幅回路(プリアンプ)で出力信号として検出できる電圧レベルまで増幅される。増幅された信号は、ノイズ等を取り除く為、バンドパスフィルタで特定の周波数帯の信号が抽出される。本研究が対象とする PVDF フィルムを用いた微粒子衝突センサでは、32~320 kHz の周波数帯の信号を抽出している。その後、整形回路に通して、複数ピークを持つ波形が生成される。最後に、生成した波形を積分回路で積分し、波高値やパルス幅がデジタル処理系で読み取られる。このようなプロセスで、数ミクロン~数十ミクロンオーダーの微粒子の質量を推定することが可能な信号波形データを得る。以上の回路構成の模式図を図 2 に示す。

4. CLOTH 信号処理回路部の改良

前章で述べたバンドパス周波数帯 32~320 kHz は、ALADDIN の開発時に決められたもの⁶⁾であるが、詳細な周波数解析に基づいたものではない。そこで、昨年度の成果で、より衝突強度の変化に敏感な周波数帯域を検討した。その結果、従来の抽出帯域よりも低い帯域を抽出したほうが、飛翔体質量に対する応答特性が良いことが分かった。そこで、CLOTH の信号処理回路部(以下 CLOTH-E)におけるバンドパスフィルタ回路を改良し、フライトモデル(Flight model, 以下 FM)の設計を確定した。

まず、バンドパスフィルタ(Band pass filter, BPF)の抽出帯域を任意で設定し、それぞれの抽出帯域で飛翔体質量に対する応答特性を評価した。評価方法は、PVDF フィルムを微粒子の超高速衝突検知に用いる以下の関係式(1)⁷⁾に超高速衝突実験の衝突粒子の質量・速度、積分回路出力で得られる波高値を代入し、James2010 で提案されている方法で較正係数 a, b, c を算出した⁷⁾。

$$dV = cm^a v^b \dots(1)$$

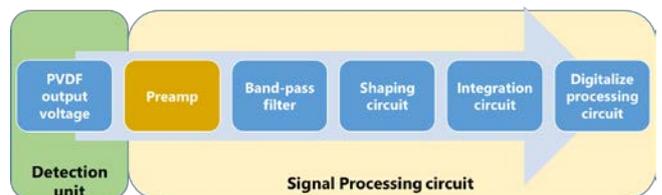


Fig.2 The signal processing of PVDF sensor.

ここで、 dV は積分回路出力の波高値[V]、 m は粒子質量[kg]、 v は衝突速度[km/s]、 a, b, c は較正係数[-]である。計算した結果、質量 m のべき数である較正係数 a が一番大きくなるようにFMのBPFの抽出帯域を設定した。

次に、積分回路設計の修正をした。積分回路では回路部品の特性上、信号が5Vを超えると飽和してしまう。そのため、検出対象とする粒子が衝突したときに波高値が5V以内になるよう、増幅率を調整する必要がある。CLOTHが対象としている直径4 μ m~14 μ mの粒子を計測できるよう、積分回路の増幅率を設定した。

5. 超高速衝突実験による微粒子検出性能の評価

JAXA/ISAS 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80 μ m, 100 μ m, 140 μ m, 200 μ m, 330 μ m球をそれぞれ単発で撃ち出した。衝突速度は、4km/s, 5.5km/s, 6km/sとした。実験結果に基づきFM回路の微小粒子検出性能を評価した。シミュレーション値と実験値は良い一致を示し、FMは設計通りの性能を有していると考えられる。

次に、これまで衝突実験で得られた出力データに基づいて、CLOTHの微粒子検出可能粒径を見積もった。EML2ダストの速度、粒径域では積分回路の検出範囲から外れていたが、新しく実装される高感度 preamp 回路で検出される。すなわち、高感度 preamp 回路、積分回路両方で信号が確認できればスプラディックダスト、高感度 preamp 回路のみで信号が確認されれば EML2 ダストと区別できるといえる。

6. 結論

- preamp 波形を周波数分析することで BPF 回路を最適化し、飛翔体質量に対する応答特性を向上させた。
- CLOTH-E 運用中に衝突されるとされる EML2 ダストと sporadic ダスト、2 種類のダストを区別することが可能であると考えられる。

7. 今後の予定

- ① 昨年度の成果で、preamp 波形を FFT 分析した結果、

ピーク周波数が確認された。このピークは質量に独立に依存している可能性があり、質量独立推定の可能性検証を進める。

- ② 現在、著者らが共同で開発中のマサチューセッツ工科大学のレーザー加速銃を用いて、従来 LGG などでは実現できなかった速度域、粒径で CLOTH-E の較正をする。

参考文献

- 1) S.G.Love and D.E.Brownlee-A Direct Measurement of the Terrestrial Mass Accretion Rate of Cosmic Dust, Science Vol. 262 No.26133, pp550-553,1993
- 2) Christopher C. Stark and Mark J. Kuchner, The detectability of Exo-Earths and Super-Earths Via Resonant signatures of Exozodiacal clouds, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 2008
- 3) 望月 悠行, 複層薄膜貫通型微粒子衝突センサの信号積分回路付与による質量推定精度の向上, 2017年度法政大学大学院修士論文, 2018.
- 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) R.Funase 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, 2018
- 6) Hirai, T. 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, Cosmic Dust VI, pp. 87-97, 2014
- 7) D. James, V. Hoxie, and M.Horanyi, Polyvinylidene fluoride dust detector response to particle impacts, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 81 034501, 2010