

複層薄膜貫通型微粒子衝突センサの信号処理回路に関する性能評価 Calibration of an impact signal processing circuit for the microparticle penetration sensor within multi-layered thin films

○望月 悠行¹, 平井 隆之², 實川 律子¹, 石岡 英悟¹,
長谷川 直², 柳沢 俊史² 新井 和吉¹, 矢野 創²

Hiroyuki Mochizuki¹, Takayuki Hirai², Jitsukawa Ritsuko¹, Ishioka Eigo¹,
Sunao Hasegawa², Toshifumi Yanagisawa², Kazuyoshi Arai¹, Hajime Yano²

¹法政大学, ²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、その分布は精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不確定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 NASA の SDS¹⁾ (Space Debris Sensor) や、太陽電池パネルのセンサ化をコンセプトとする ESA の SOLID²⁾ (Solar panel based Space Debris Impact Detector) 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、小天体同士の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。しかし従来のダスト検出器は検出面積が小さく、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、衛星の構成部品と、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 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“EQUULEUS” (EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft) 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“CLOTH” (Cis-Lunar Object Detector within THERmal Insulation) を開発している。

本研究の目的は、前年度開発した複層薄膜貫通型微小デブリ衝突センサの信号検出回路³⁾を CLOTH へ適用し、数ミクロンから数十ミクロンの微粒子を検出するのに適した回路を開発することである。

2. CLOTH

CLOTH は、衛星の構成部材と圧電性 PVDF フィルムを組み合わせた微粒子衝突センサである。

衝突粒子の検出・質量推定は以下のように行う。

- ① 微粒子が CLOTH の PVDF フィルムセンサ部に衝突することで電圧信号が出力される。
- ② 出力信号を整形回路に通し、複数ピークを持つパルス波を生成する。
- ③ 生成されたパルス波の波高値や時間幅等により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プラディックダストと EML2 (Earth-moon Lagrange point 2) ダストに大別できる。スプ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 1 km/s と見積られる。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、三つの評価を行っている。一つ目は、出力電圧のセンサ面積依存性の評価である。CLOTH のセンサ面積は設計途中であり、今後も変更される可能性があるため、出力信号の強度をセンサ面積により正規化できるようにする。二つ目は、測定できる粒径範囲の評価である。CLOTH で検出されるダストの速度・質量をあらかじめ想定し、信号処理回路の時定数や増幅率といったパラメータを決定する。三つ目は、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プ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. 回路シミュレータによる積分回路設計と回路試作

ALADDIN の地上校正実験により、生成される複数ピークパルス波の各ピーク値の積算値を測定パラメータとして使用することで、衝突粒子の質量推定精度が向上することがわかった⁴⁾。そこで、機上で複数ピークパルス波の積算値を取得できるよう、信号積分回路を追加実装した。

ここで、積分回路の出力波形から取得する測定パラメータを二通り定義する。一つは、積分波形の波高値 dV 値を測定パラメータとするもの (dV 回路)。もう一つは積分波形が飽和している時間幅 dt 値を測定パラメータとするもの (dt 回路) である。CLOTH では、 dV 値をノミナルのパラメータとしている。

設計した抵抗・コンデンサ型 (RC 型) 積分回路の回路図を図 1 に示す。前年度、回路構成の簡素さから採用した RC 型積分回路をベースに CLOTH 用積分回路を設計し、信号処理回路の時定数や増幅率を調整することで、CLOTH のセンサ面積に衝突すると想定される数ミクロンから数十ミクロンの微粒子を検出可能とすることを目標とする。

4. 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 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, 7 km/s とした。まず、出力電圧のセンサ面積依存性を評価した。センサ面積ごとの出力電圧値を図 2 に示す。本評価では、衝突速度を 4 km/s に統一した。図 2 よりセンサ面積が大きいと出力電圧値が小さくなることを確認した。また、衝突条件により近似線の傾きが異なっている。これは、データ数が少ないことにより、ばらつきの影響を受けていると考えられる。この評価によりセンサ面積が異なる場合でも正規化し解析可能となった。今回

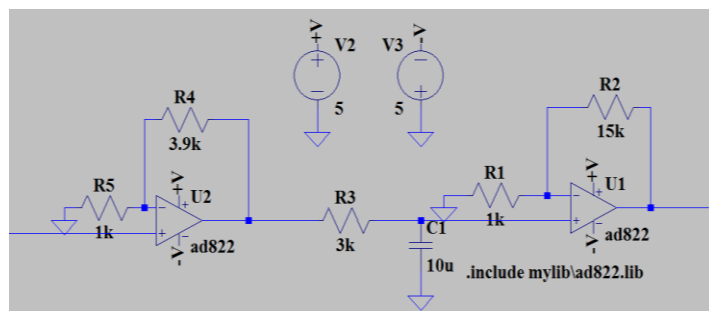


Fig. 1 Integration circuit diagram.

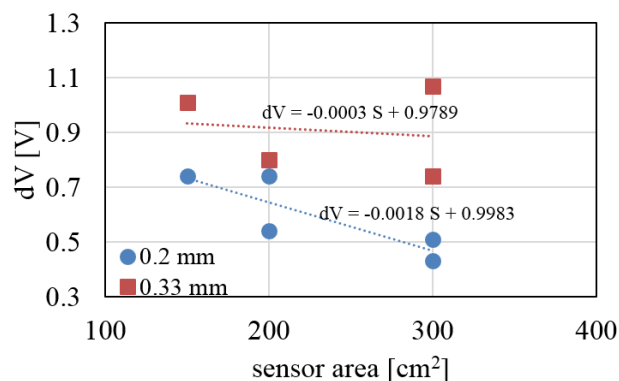


Fig. 2 Output voltage (dV) with each sensor area.

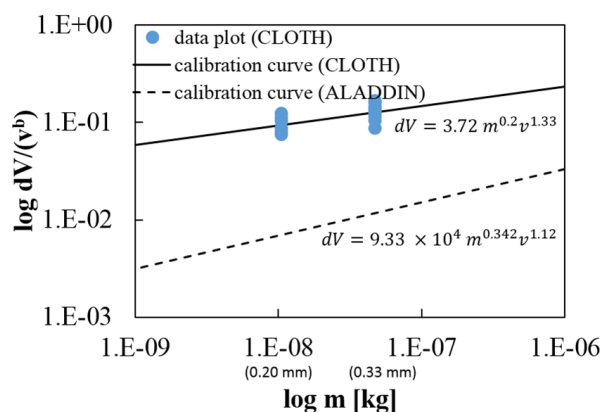


Fig. 3 Calibration curve.

は飛翔体直径 0.20 mm および 0.33 mm で得られた近似線の傾きの平均値をとり、センサ面積は CLOTH の 1 チャンネル分の面積と同等である 200 cm² として正規化した。

次に、今回使用した積分回路で検出できる粒径の範囲を見積もった。今回の衝突実験で得られたデータに、センサ面積が異なる過去の衝突実験のデータを加えて得られた校正曲線を図 3 に示す。実環境では衝突速度や密度の異なる粒子が衝突する。ここでは一例として、スプラディックダストの衝突を想定し、密度 2.53 g/cm³ のダストが 12 km/s で衝突した場合について述べる。校正曲線を外挿することで、今回開発した回路では 0.2 μm ~ 605 μm の粒子を検出可能と見積もられた。一方、実際に検出される粒径の範囲は、複層構造である CLOTH の最外層を貫通し 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 のセンサ面積に衝突しうる最大粒径で決まる。粒径下限は、数値解析による CLOTH および PVDF フィルムの損傷評価から、 $2.0 \mu\text{m}$ と見積もられた⁵⁾。また、上限は 1AU のダストフラックスをモデル化した Grün モデル⁶⁾から $30 \mu\text{m}$ と見積もられる。そこで、積分回路の後段増幅回路の増幅率のみ変更すればよいと仮定し、CLOTH で検出対象とする $2.0 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ の微粒子を検出するために適当な増幅率を見積もった。現状の 5.75 倍の増幅率であれば、 $0.01 \mu\text{m} \sim 32.8 \mu\text{m}$ の微粒子を検出できるため検出対象とする $2.0 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ の微粒子を適当な測定範囲で検出可能と考えられる。

5. 質量推定精度の向上

積分回路で複数ピークパルス波を積分する直前に同波形を増幅する(図 1 左側の非反転増幅回路)。この時、増幅後の波形が飽和する場合としない場合で校正曲線を比較したところ、衝突粒子の質量推定精度が異なることが分かった。図 4 に増幅後の複数ピークパルス波を、図 5 に質量推定誤差を見積もったグラフを示す。図 5 より、増幅後の複数ピークパルス波が飽和しない場合のほうが、飽和する場合に比べて質量推定精度が一桁向上することがわかる。よって今後は、積分回路前段に設けた増幅回路の増幅率を最適化していく。

6. 衝突粒子識別方法の検討

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を利用し識別する。識別できる一例を表 1 に示す。表の数値は、校正曲線を外挿し見積もった、今回開発した回路が検出できるダスト直径を示している。本章において、衝突するダスト直径が CLOTH 最外層を貫通し PVDF センサ部に衝突しうる最小粒径以上であり、フラックス計算より衝突しうると見積もった最大粒径以下の場合“検出できる”，それ以外を“検出できない”と定義し、表 1 には検出できない領域を網掛けで示した。スポラディックダストの場合、回路の感度上、出力信号の電圧値が 0.9 V 未満となる直径では、CLOTH 最外層を貫通しえないため、スポラディックダストが衝突した場合の電圧値は、 0.94 V 以上と見積もられる。一方、EML2 ダストの場合、電圧値が 0.47 V 以上の直径では、フラックス上衝突しえないため、EML2 ダストが衝突した場合の電圧値は 0.43 V 以下と見積もられる。以上から出力信号の電圧値によりスポラディックダストと EML2 ダストを識別可能と推定される。ただし、ここでは衝突速度のばらつきおよび校正曲線の誤差を考慮していない。

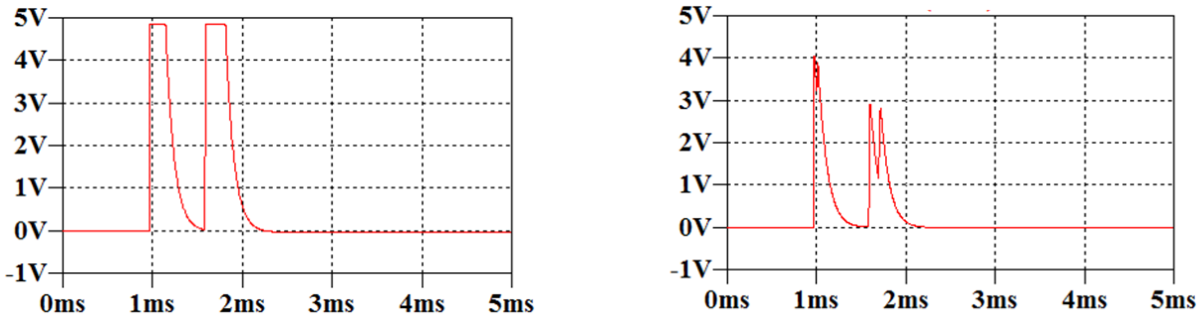


Fig. 4 Waveforms at pre-integration in saturated case (left) and unsaturated case (right).

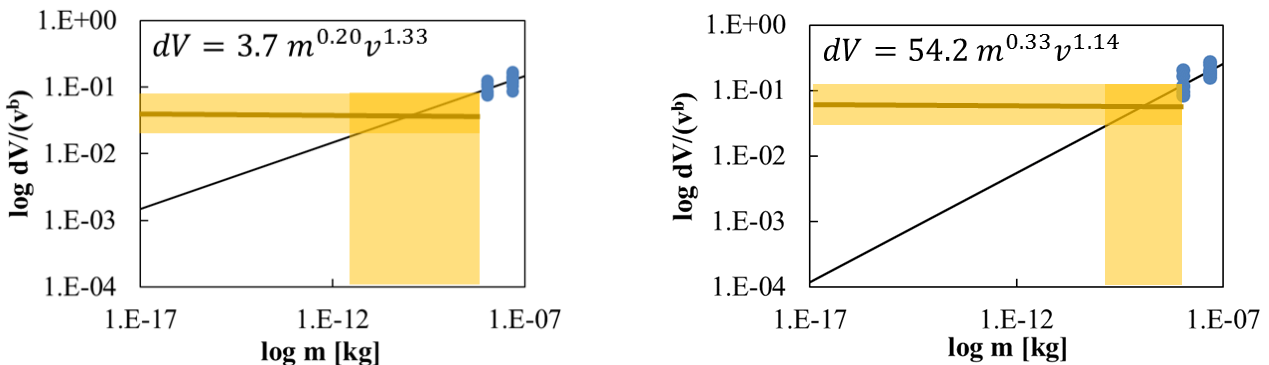


Fig. 5 Calibration curve obtained by the saturated pre-integration waveforms (left) and by the unsaturated ones (right). Horizontal yellow band means the error of velocity, $\pm 5 \text{ km/s}$, and vertical band shows the error of mass corresponding to the error of velocity. The mass error of unsaturated case (2 orders) shows more precise than that of saturated case (3 orders).

Table1 Diameter of dust particles estimated by extrapolating the obtained calibration curve with each impact condition. Shaded cells show the undetectable case.

	velocity	Density	Voltage						
			0.29 V	0.43 V	0.47 V	0.70 V	0.94 V	2.50 V	4.73 V
Sporadic dust	12 km/s	2.5 g/cm ³	0.29 μm	0.55 μm	0.63 μm	1.2 μm	2.0 μm	10.3 μm	30.0 μm
EML2 dust	2 km/s		15.4 μm	29.1 μm	33.7 μm	66.2 μm	106 μm	548 μm	1585 μm

7. まとめ

結論と今後の予定を以下に示す。

○結論

・センサ面積と出力電圧値の関係を評価したことで150 cm²～300 cm²の面積であれば、センサ面積が異なる場合でも取得データを正規化し解析可能となった。

・現状の積分回路では、0.2 μm～605 μmの微粒子を検出可能であると見積もられた。また同回路の後段増幅回路の増幅率を5.75倍とすれば回路としては0.01 μm～32.8 μmの微粒子を検出可能となる。これは、一層目の貫通閾値およびフラックス予測も考慮し見積もった粒径範囲2.0 μm～30 μmを適切なダイナミックレンジでカバーできる。

・出力電圧値が0.94 V以上の場合スプラディックダストが、出力電圧値が0.43 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

・直径0.20 mm, 0.33 mmの粒子を用いた実験データを拡充する。

・また、直径0.10 mmの粒子の単発撃ちに挑戦する。

・衝突実験データを解析し、積分回路の増幅率を決定する。

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) 望月 悠行, 複層薄膜貫通型微小デブリ衝突センサの信号検出回路の改良, 2015年度法政大学卒業論文, 2016.
- 4) 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.
- 5) 實川 律子, 複層薄膜貫通型微粒子衝突検出器のセンサ部に着目した検出感度評価, 2016年度新井研究室年末報告会, 2016.
- 6) Grün, E., et al.: Collisional Balance of the Meteoritic Complex, Icarus, Vol.62, pp. 244-272, 198.