

## MLI-PVDF 一体型大面積スペースデブリその場検出器の開発・校正実験

○望月 悠行 (法政大学), 平井 隆之, 東出 真澄, 長谷川 直, 柳沢 俊史 (宇宙航空研究開発機構)  
新井 和吉 (法政大学), 矢野 創 (宇宙航空研究開発機構)

Development and calibration experiment of the large-area in-situ space debris detector  
based on PVDF-film sensor integrated with multi layer insulation

Hiroyuki Mochizuki (Hosei University), Takayuki Hirai, Masumi Higashide, Sunao Hasegawa  
Toshifumi Yanagisawa (JAXA), Kazuyoshi Arai (Hosei University) and Hajime Yano (JAXA)

### 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、さまざまな人工物に由来するごみ、“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うるにも関わらず、地上からの観測は困難で、軌道上観測による実測データも不十分である。そのため、欧米の持つデブリ分布モデルにおいても不確定性が大きいのが現状である。

微小デブリ衝突から衛星を守る防護設計を効率的に行うには、高い統計精度で微小デブリ分布を理解することが必要となる。そこで我々は、センサ面積を拡大し高い統計精度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、大面積スペースデブリその場検出器を提案している。本研究の目的は、同衝突センサの技術シーズである宇宙塵検出器 ALADDIN<sup>1)</sup>をベースとした、信号検出回路の改良であり、数十マイクロンからミリメートルオーダーのデブリを検出するのに適した回路を開発する。

### 2. PVDF フィルムを用いた大面積スペースデブリその場検出器

衝突デブリの検出・質量推定は以下の様に行われる。

- ① デブリが PVDF フィルムに衝突することで、電圧信号が出力される。
- ② 出力信号を整形回路に通し、複数の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形の波高値・時間幅等により衝突デブリの質量を推定する。

衝突デブリの質量推定には以下の校正式<sup>2)</sup>を用いる。

$$N = cm^a v^b \quad (1)$$

$N$  が測定パラメータ,  $m$  がデブリの質量[kg],  $v$  が衝突速度[km/s],  $a$ ,  $b$ ,  $c$  が校正係数である。仮定した速度

と測定パラメータから質量を推定できる。

### 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の積算値を測定パラメータとして使用することで、質量推定精度が向上することがわかった。そこで、機上で複数ピークの積算値を取得できるように、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、ピーク電圧値  $dV$  値を測定パラメータとするもの ( $dV$  回路)。もう一つは、積分信号を飽和させ時間幅  $dt$  値を測定パラメータとするもの ( $dt$  回路) である。 $dt$  回路は原理的にダイナミックレンジの上限を持たないという特長がある。

試作した積分回路は 3 つで、積分回路にチャージアンプ回路 (CA 型) を使用した  $dV$  回路、積分回路に抵抗・コンデンサ回路 (RC 型) を用いた、 $dV$  回路と  $dt$  回路である。三通りの内、今回は回路構成が CA 型よりも簡素な RC 型を採用し、RC 型  $dV$  回路、RC 型  $dt$  回路について、回路シミュレータ LTspice<sup>®</sup>を用いて評価した。設計した RC 型  $dV$  回路の回路図を図 1 に示す。また、ブレッドボード上に試作した同回路を図 2 に示す。RC 型  $dt$  回路の回路構成は RC 型  $dV$  回路と同様であるが、時定数と増幅率が異なる。

設計した RC 型  $dV$  回路による、積分前後のシミュレーション波形を図 3 に示す。入力パルスを正常に積分可能であることを確認した。また RC 型  $dt$  回路についても同様に、入力パルスを正常に積分可能であることを確認した。

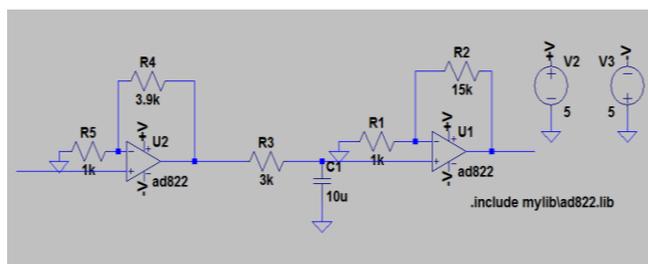


Fig.1 Integration circuit diagram (RC-type dV circuit).

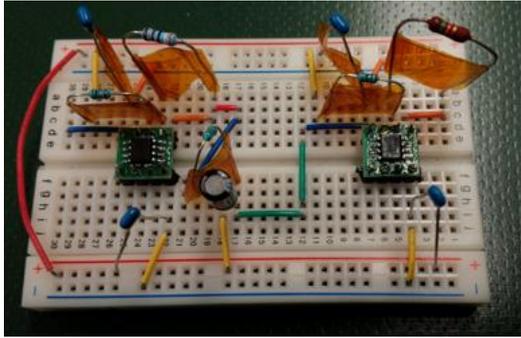


Fig.2 Integration circuit (RC-type dV circuit).

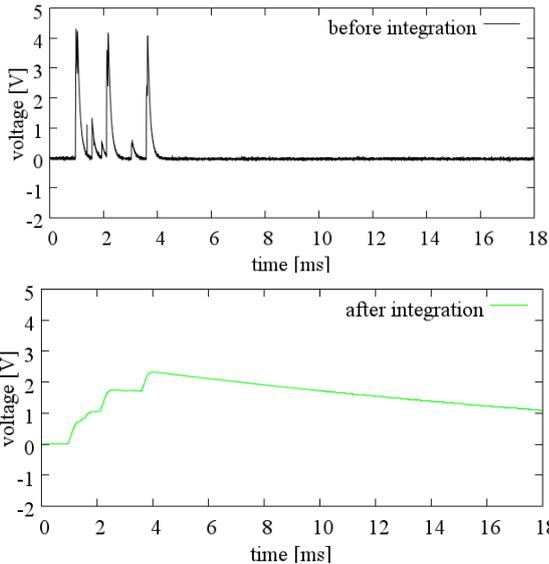


Fig.3 (upper) Waveform before integration at simulation.  
(lower) Waveform after integration at simulation.

#### 4. 超高速衝突実験によるデブリ検出性能の評価

二段式軽ガス銃を用い、デブリの超高速衝突模擬実験を行った。飛翔体は直径 0.3 mm, 0.5 mm, 1 mm のアルミナ球を用い、それぞれ単発で速度を 4 km/s, 5.5 km/s, 7 km/s に設定し実験した。ターゲットとして、面積が 75 mm×150 mm のセンサを用意し、その背面に衛星構体を模擬するため、厚さ 3 mm の A2024 板を設置した。衝突角度は、センサ面に対し垂直とした。

衝突実験で得られた積分前後の波形を図 4 に示す。シミュレーションと同様、衝突実験においても dV 回路 dt 回路ともに積分機能が正常に動作することを確認した。

また、衝突条件と測定パラメータから、式 (1) の校正係数を導出し、図 5 に示す校正曲線を得た。ALADDIN の校正曲線に比べて出力と衝突強度の相関が弱いことがわかる。この原因として、今回の実験で使用した PVDF センサの面積 75 mm×150 mm では ALADDIN の同センサ 1 チャンネルの面積 250 mm×500 mm よりも静電容量が小さいため、サブミリサイズ球の衝突に対して出力が飽和していたことが考えられる。以上から、面積が 75 mm×150 mm のセンサでは質量推定は困難であったが、一方で 1 mm 以下の微小デブリの衝突を検出する“衝突検出器”としては機能するといえる。

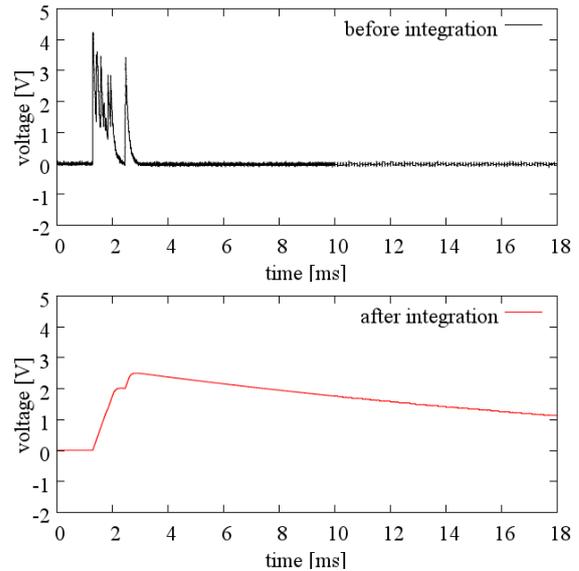


Fig.4 (upper) Waveform before integration at experiment.  
(lower) Waveform after integration at experiment.

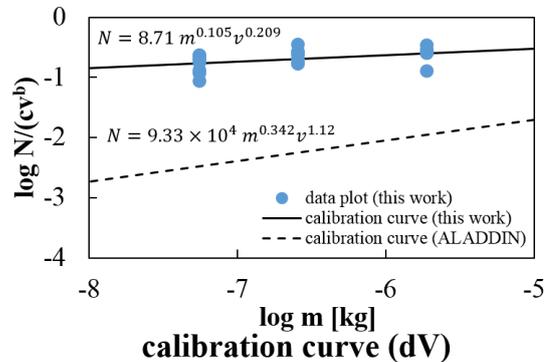


Fig. 5 Calibration curve (RC-type dV circuit).

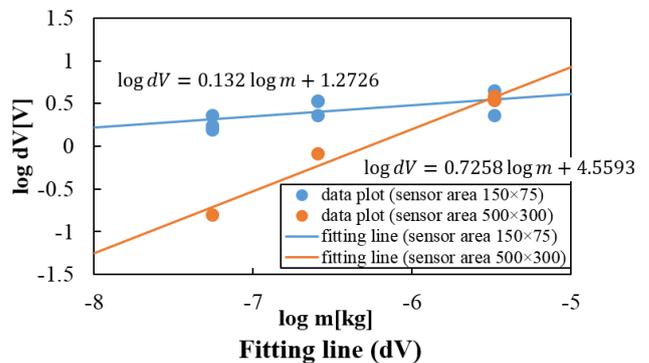


Fig.6 Fitting line (RC-type dV circuit).

次に、実機相当である面積 300 mm×500 mm のセンサを用い衝突実験を行った。衝突条件として、同様の飛翔体を用い、速度は 7 km/s に設定した。簡易解析の結果を図 6 に示す。速度は 7 km/s で一定のため、飛翔体の質量と測定パラメータ（ここでは dV 値）の相関を示している。比較対象である面積 75 mm×150 mm のセンサについても、7 km/s で取得したデータのみをプロットし、それぞれ最小二乗法で近似線を引いている。センサ面積を実機サイズに拡大した結果、出力と衝突強度の相関を確認できた。センサの面積を拡大したことで

静電容量が大きくなり、サブミリサイズ球の衝突に対しても出力が飽和していないためと考えられる。

今後は、実機で予定している 100°Cでのエイジング処理も実施し、衝突実験により較正データを拡充していく。

## 5. 結論と今後の課題

超高速衝突模擬実験の結果、以下の結論を得た。

- PVDF の出力信号から生成された複数ピークパルス波を積分する回路を作製した。

- 75 mm×150 mm のセンサでは、サブミリサイズ球の衝突に対し出力が飽和するために、質量推定は困難であった。

- 75 mm×150 mm のセンサで質量推定はできなかったが、直径 1 mm 以下の微小デブリの衝突検出器としては機能するといえる。

- 実機面積相当の 300 mm×500 mm センサを用いて実験した結果、出力が衝突強度と相関を持つことが確認できた。

また、以下の課題を認識した。

- これまで dV 回路と dt 回路で異なる回路として開発

を進めてきたが、dV 値と dt 値を一つの回路から得ることで、ダイナミックレンジを拡大できる可能性があることがわかった。衝突強度が小さい場合は dV 値を、衝突強度が大きい場合は dt 値を用いることで、測定可能な質量範囲の拡大を期待できるハイブリッド回路を開発する。

- PVDF フィルムに対して、100°Cでのエイジング処理を施す。

- 実機面積で、熱エイジング処理を施したセンサを用い衝突実験を実施し、較正データを拡充する。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) James, D., et al., Polyvinylidene fluoride dust detector response to particle impacts , SCIENTIFIC INSTRUMENTS 81, 034501, 2010.