

# 超高速衝突における圧電性薄膜センサからの出力信号周波数分析

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

Signal Frequency Analysis of Piezoelectric Film Sensors at Hypervelocity Microparticle Impacts

Kosuke Kando (Hosei University), Takayuki Hirai (Chiba Institute of Technology), Haruki Nakano (Hosei University),  
Sunao Hasegawa (JAXA), Kazuyoshi Arai (Hosei University), and Hajime Yano (JAXA)

## 1. 緒論

宇宙空間で微粒子の衝突を検知するその場計測は、衝突した粒子のサイズや速度などの物理量だけでなく、検出した際の軌道上の位置や時刻もわかるという利点があり、地上から観測が困難な微小なスペースデブリや宇宙塵の分布把握に有効な手段である。

その場計測についての研究は、宇宙開発史の比較的初期から始められ、半世紀以上の歴史がある。微粒子サイズの検出範囲の拡大や統計精度の向上のために、検出面積を大きくすることが望まれるが、従来の検出器は機器質量が重たいため、衛星リソースを圧迫してしまうことが課題となってきた。そこで、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と法政大学は共同で、圧電性ポリフッ化ビニリデン (PolyVinylidene Fluoride, PVDF) フィルムを使った微粒子衝突検出器を開発している<sup>1)2)</sup>。この検出器は、フィルム表面に生じるひずみに応じた電圧信号を出力する、圧電性 PVDF フィルムの特性を利用し、微粒子の衝突を検出する。PVDF フィルムは軽量であるため、質量リソースを抑えながらもセンサの大面积化が可能であり、従来の検出器と同一検出期間中でも、より大型微粒子の衝突が多数検出できるという利点がある<sup>2)</sup>。

本研究では、ソーラー電力セイル探査機 “Outsized Kitecraft for Exploration and AstroNautics in the Outer Solar system (OKEANOS)” に搭載を予定しているダスト検出器 Arrayed Large-Area Dust Detectors in INterplanetary space 2 (ALADDIN2) をはじめとした、PVDF フィルムを用いたダストその場検出器の開発を目的とする。なお、OKEANOS プロジェクトは 2019 年度に選抜された ISAS 次期中型計画に選定されなかったことから、本研究では ALADDIN2 の校正・開発だけでなく、より幅広い搭載機会を視野に入れた

圧電材料センサの基礎的研究にも取り組んでいく。5 カ年計画の初年度にあたる本年度は、以下の 4 つに取り組んだ。

1. OKEANOS-ALADDIN2 開発に向けた実験データ取得
2. EQUULEUS-CLOTH フライトモデル較正のための実験データ取得
3. PVDF フィルムセンサ用プリアンプ開発のための予備実験データ取得
4. 表面波センサ技術実証のための実験データ取得

本稿では紙面の制約から、3 と 4 について報告する。具体的には、信号処理回路のバンドパスフィルタ抽出周波数に注目した質量推定精度の改善と、従来と異なる測定原理を併用した衝突粒子の質量独立推定方法の確立について検討を行った。

## 2. 信号処理回路の構成

PVDF フィルムを使用した微粒子衝突検出器は、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。本研究で扱ったデータでは、検出部が 50 cm×25 cm の PVDF フィルムセンサからの出力信号を対象としている。この寸法は、IKAROS-ALADDIN<sup>2)</sup>に搭載されたセンサと同等である。信号処理過程は、まず、微粒子が PVDF フィルムセンサに衝突すると、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。プリアンプ波形の一例を図 1 に示す。増幅された信号は、ノイズを取り除く為、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。本研究が改良を試みる IKAROS-ALADDIN の信号処理回路では、

32 kHz から 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回路で読み取られる。このようなプロセスで、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。

### 3. プリアンプ出力波形の周波数分析

上述のバンドパス周波数帯 32～320 kHz は、IKAROS-ALADDIN の開発時に設定されたが、詳細な周波数解析に基づいたものではない<sup>3)</sup>。従来回路のバンドパスフィルタが抽出している帯域幅は広く、衝突と関連した成分だけでなく、衝突に関連していない周波数成分も多分に抽出していると考えられる。そこで、衝突に関連した成分をより適切に抽出するため、衝突強度の変化に最も敏感な周波数帯域を探索した。探索に用いる信号波形は、宇宙での微粒子衝突を模擬した地上実験で取得した。宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) 所有の二段式軽ガス銃および英国ケント大学所有の二段式軽ガス銃を用い、粒径 100 μm から 1200 μm のソーダ石灰ガラス球 (密度 2.53 g/cm<sup>3</sup>) およびステンレス球 (密度 7.8 g/cm<sup>3</sup>) を、衝突速度 3 km/s から 7 km/s で PVDF フィルムセンサに衝突させ、信号波形をオシロスコープで記録した。まず、感度のよい周波数帯を探索するための予備解析として、FFT を用いてプリアンプ出力波形を周波数分析し、周波数分布を調べた。周波数分解能は約 60 Hz と

した。その結果、2.2 kHz 付近にピークが見られ、その振幅は衝突比例することが分かった。2.2 kHz 付近のピークは、実験条件に依らず顕著に表れていたことから、機械的振動やノイズではなく、衝突現象に由来する可能性があると考えられる。2.2 kHz は従来抽出していた 32 kHz～320 kHz の周波数帯域より低く、高周波側よりも低周波側に着目することで、検出感度を高めることができると考えられる。

### 4. 抽出周波数帯域の検討

従来のバンドパスフィルタは 32 kHz から 320 kHz を抽出しているが、前章で見られた 2.2 kHz ピークのように、それ以外の周波数帯で衝突現象に由来した信号成分が存在することが示唆される。また、予備解析でピークが現れなかった周波数にも衝突強度と相関がある可能性がある。そこで、より適切な抽出周波数帯域を把握するため、0 kHz から 350 kHz の範囲で任意の周波数帯を抽出した際に得られる校正曲線を比較し、各周波数帯での衝突強度に対する質量推定精度を評価した。

校正曲線の式は PVDF フィルムに対する微粒子の超高速衝突の分野で用いられる、次の関係式とした<sup>4)</sup>。

$$dV_{fft} = cm^a v^b \quad (1)$$

ここで、 $dV_m$  は FFT で得られた振幅値の積算値[V]、 $m$  は粒子質量[kg]、 $v$  は衝突速度[km/s]、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は校正係数[-]である。式(1)に、FFT 分析対象の超高速衝突実験データの衝突粒子の質量  $m$  と衝突粒子の速度  $v$ 、FFT 分析結果から得られる振幅値  $dV_m$  を代入し、James, et al. (2010)<sup>4)</sup>で提案された方法で校正係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  を算出した。 $dV_m$  は、FFT で得られた任意の周波数帯域での振幅値の積算値とする。積算範囲は、対象周波数帯域 0 kHz から 350 kHz において、5 kHz 未満は 3 章の予備解析で確認できた 2.2 kHz 付近のピークを評価するために 1 kHz 刻みとした。予備解析からおおよそ 20 kHz 未満の振幅値が 20 kHz 以上に比べて大きく、出力波形への寄与が大きいことがわかったため、5 kHz から 20 kHz では 5 kHz 刻みとし、20 kHz 以上では 10 kHz 刻みとした。

表 1 に、各周波数帯域において算出した校正係数の計算結果と、従来回路での抽出周波数帯域 32 kHz から 320 kHz での校正係数 (最下段) を示す。校正係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  が大きいほど質量、衝突速度に対する応答性がよく、検出感度も高くなる。今回は質量推定精度に関連する校正係数  $a$  に注目する。100 kHz 以降の周波数帯では、校正係数  $a$  が極めて小

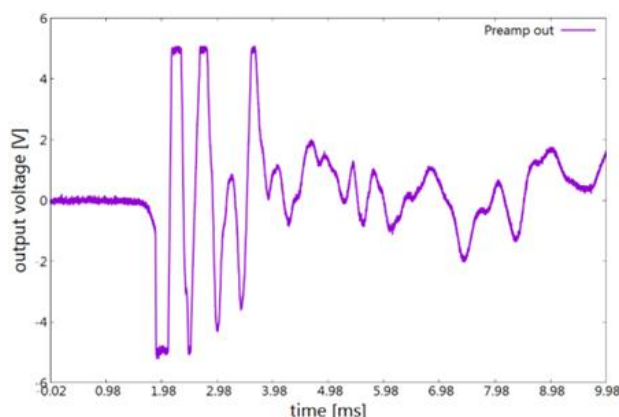


図 1 プリアンプからの出力信号の一例  
(粒径 800 μm, 衝突速度 5.57 km/s)

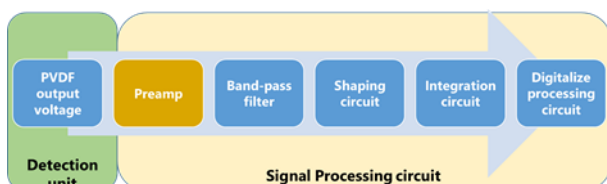


図 2 PVDF センサの信号処理プロセス

表 1 0-100 kHz において導出した校正係数

Frequency[kHz]	a[-]	b[-]	c[-]
0-1	0.054	0.761	12.42
1-2	0.118	0.287	24.55
2-3	0.211	0.000	150.0
3-4	0.160	0.239	18.03
4-5	0.155	0.668	6.501
5-10	0.184	0.524	38.99
10-15	0.201	0.578	16.41
15-20	0.248	0.843	11.72
20-30	0.230	0.694	12.65
30-40	0.201	0.721	4.667
40-50	0.165	0.763	1.879
50-60	0.150	0.667	1.406
60-70	0.126	0.550	1.000
70-80	0.126	0.458	1.000
80-90	0.113	0.280	1.000
90-100	0.112	0.208	1.000
32-320	0.052	0.409	8.147

さくなり、衝突強度に対する感度が低いとわかったため、ここでは省略する。更に、抽出周波数帯 32 kHz から 320 kHz と 15 kHz から 20 kHz での校正曲線を図 3 に示す。この結果、従来よりも低い 15 kHz 付近の周波数帯を抽出した方が、質量  $m$  のべき数である校正係数  $a$  が大きく、図 3 の校正曲線の傾きが従来に比べて大きくなることが分かった。従来の抽出帯域では、校正係数  $a$  が小さく、校正曲線の傾きが小さかったため、質量の推定は難しかったが、校正曲線の傾きがより大きくなったことで、質量推定精度が最大でも 2 桁程度の誤差に収まるようになり、質量推定精度が向上した。このことから、低周波数帯(15 kHz 付近)に着目することで衝突強度に対する感度を高めることができると分かった。また、2 kHz から 3 kHz では出力が質量の変化にのみ応答することが示唆された。横軸に衝突速度、縦軸に  $dV_{fft}$  を  $m^a$  で除した値をとったグラフを図 4 に示す。従来回

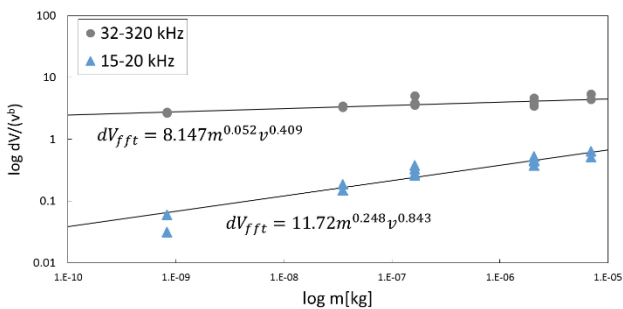


図 3 従来抽出していた 32-320 kHz の  $dV_{fft}$  で導出した校正曲線と、15-20 kHz の  $dV_{fft}$  で導出した校正曲線の比較

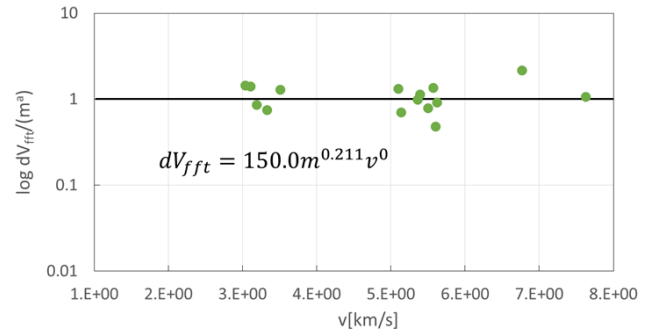


図 4 2-3 kHz の  $dV_{fft}$  を使った校正曲線。  $dV_{fft}$  が衝突速度に依存していないことがわかる。

路では速度を仮定して衝突粒子の質量を推定していたが、従来回路に新たに 2 kHz から 3 kHz の周波数帯で抽出する回路を追加することで、質量を独立に推定できる可能性があることが分かった。

## 5. 表面波センサの開発

従来の PVDF フィルムセンサは圧電信号のみを用いており、質量と速度を独立に推定することができない。そこで、質量・速度分離法の確立を目指して、ベースフィルムとする PVDF フィルムセンサ（以下、衝突圧電センサ）表面に小型の PVDF フィルムセンサ（以下、表面波センサ）を追加で取り付け付けた。表面波センサは衝突圧電センサの表面上の振動を読み取る。衝突圧電センサの出力と表面波センサの出力の 2 つから質量と速度の独立推定方法を検討した。

実験で使用した衝突圧電センサは、面積が 25 cm×95 cm で、構造は OKEANOS-ALADDIN2 のセンサ部と同様である。表面波センサは面積が 1 チャンネル当たり 1 cm×0.5 cm であり、そのうち 0.5 cm×0.5 cm は信号取得のための端子を設置するために銅箔テープを張り付けている。そのた

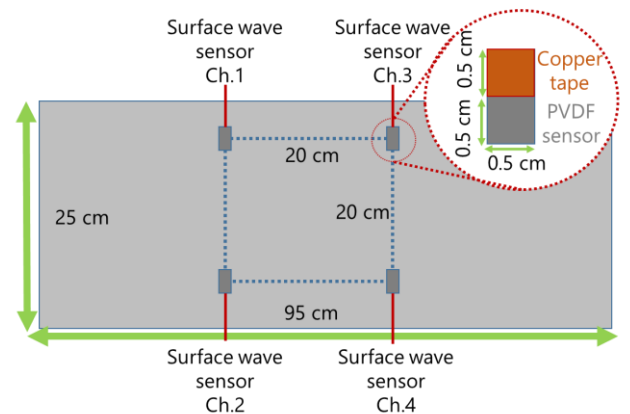


図 5 表面波センサの衝突圧電センサへの設置図。表面波センサは両面カプトンテープで衝突圧電センサに取り付けられている。

め、表面波を読み取るセンサの有効面積は  $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$  となっている。表面波センサの衝突圧電センサへの貼り付けには両面カプトンテープを使用し、図 5 のように衝突圧電センサ 1 枚当たり 4 チャンネル分を設置した。表面波センサの信号処理回路は衝突圧電センサものと異なる設計をしており、微小な信号を読み取れるよう設計した。

信号取得には宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) 所有の二段式軽ガス銃を使用した。飛翔体には直径  $330\text{ }\mu\text{m}$  および  $550\text{ }\mu\text{m}$  のソーダライムガラスを使用し、 $3\text{ km/s}$  周辺で単発衝突させた。表面波センサからの出力波形の例を図 6 に示す。図 6 において飛翔体は表面波センサが設置されている  $20\text{ cm}$  四方の真ん中やや上に衝突した。そのため、衝突位置から近い距離に設置されていた Ch.1 と Ch.3 からの出力信号の波高値が大きく出ている。

図 7 に超高速衝突実験の前段階として実施した、自由落下による低速衝突実験から得られた表面波センサの出力波形を示す。図 6 で示した波形と図 7 で示した波形を比較すると明確な違いがみられた。前者ではマイナス側にパルス波のような波形が得られ、後者では振動波形が得られた。超高速衝突では衝突圧電センサに対して局所的かつ瞬間的に応力が発生するため、振動波形でなくパルス波のような

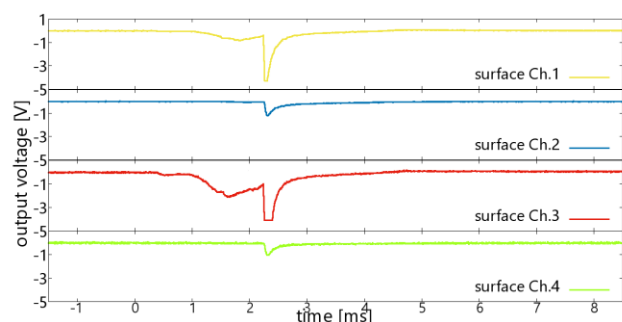


図 6 超高速衝突実験から得られた表面波センサからの出力波形 (ソーダライムガラス 粒径  $550\text{ }\mu\text{m}$ , 衝突速度  $3.070\text{ km/s}$ )。パルス波のような波形が得られた。

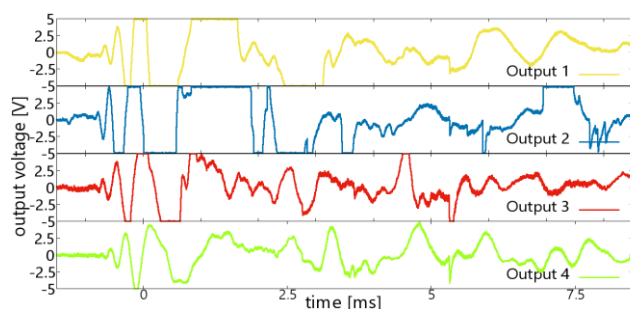


図 7 低速衝突実験から得られた表面波センサからの出力波形 (SUS 球 粒径  $5\text{ mm}$ , 衝突速度  $4.21\text{ m/s}$ )。振動波形が得られた。

波形が出力されたと考えられる。

以上の実験結果から超高速衝突と低速衝突で衝突圧電センサの表面上の振動が異なる可能性が示唆された。現在は有効データが少ないため定量的な評価に至っていないが、今後衝突圧電センサに表面波センサを設置した構成のセンサの実験データを拡充することで、質量の独立推定法の適用可能な衝突速度範囲の拡大および信頼性の向上、さらに PVDF フィルムセンサの信号発生メカニズムを明らかにできる可能性があることが分かった。

## 6. 結論

PVDF フィルムを使った ALADDIN 方式の微粒子衝突検出器の信号処理回路のプリアンプから得られる衝突信号波形を FFT 分析した。その結果、従来抽出していた周波数帯よりも低い帯域の方が、衝突由来の周波数がより多く含まれる可能性があることが分かった。低周波数帯を抽出して校正曲線を導出したところ、従来の信号処理回路のバンドパスフィルタで抽出していた  $32\sim 320\text{ kHz}$  の周波数帯よりも、 $15\text{ kHz}$  付近の周波数帯を抽出した方が衝突強度に対する感度が向上することが分かった。さらに、 $2\text{ k}\sim 3\text{ kHz}$  を抽出周波数帯にすると、校正曲線は衝突粒子の質量が支配的にするため、回路の抽出する周波数帯を変更することで、衝突粒子の質量を独立推定できる可能性があることが分かった。

また、センサ表面の表面波を検出する表面波センサを新たに開発し、今後の宇宙機に向けた新しい検出方法を検討した。実験の結果、低速衝突と超高速衝突でセンサ表面の振動が大きく異なることがわかった。2020 年 2 月時点ではまだ有効データが少ないが、今後データを拡充することで質量の独立推定法の信頼性向上だけでなく PVDF フィルムセンサの信号発生メカニズムの定量的な解明につながる可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) T. Hirai et al., EQUULEUS-CLOTH Flight Model Development and Integration Tests, 32nd ISTS & 9th NSAT, 2019-k-38, 2019
- 2) 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
- 3) 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

- 4) D. James et al., Polyvinylidene Fluoride Dust Detector  
Response to Particle Impacts, Review of Scientific  
Instruments 81 034501, 2010