

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14493

研究課題名（和文）圧電PVDFフィルムセンサを用いた惑星間ダスト検出器の質量独立推定法の確立

研究課題名（英文）Development of independent mass determination method for interplanetary dust detector with piezoelectric PVDF film

研究代表者

平井 隆之（Hirai, Takayuki）

千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員

研究者番号：30737888

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：結果的に研究開始当初掲げた圧電PVDFフィルムセンサを用いたダスト検出器の質量独立推定法の確立という目標には達しなかったが、本研究課題を進める中で、10ミクロンサイズの微粒子の単発衝突手法や、圧電PVDFフィルムセンサと宇宙機用多層断熱材を組み合わせたダスト検出器の開発技術といった、重要な成果を得ることができた。特に後者は、宇宙機表面の相当部分を覆う多層断熱材にダスト検出機能を与えることで、従来よりもダスト検出効率を大幅に改善することができる革新的技術といえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星探査機などの宇宙機に搭載されるダスト検出器は、目的地（惑星など）に到達後はもちろんのこと、到着まで相当期間にわたる惑星間空間航行中にも科学観測・環境計測が可能な装置として、宇宙開発黎明期から現在にいたるまで多数の搭載実績がある。本研究の成果は、圧電PVDFフィルムセンサを用いるダスト検出器の搭載性、検出効率（センサ面積）を大幅に向上させるものであり、科学研究のみならず、今後益々活発となるであろう人類の宇宙活動・進出においても、例えば環境計測の観点などで貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In conclusion, it was not achieved to develop an independent method for estimating mass of dust particle on dust detectors using piezoelectric PVDF film sensors, which was the original purpose of this research project set at the beginning of the research. However, some important achievements were obtained during the course of this research project, such as a single impact method for 10 micron-sized particles and a technique for developing dust detectors combining a piezoelectric PVDF film sensor and multi-layer insulation for spacecraft. The latter, in particular, is an innovative technology that significantly improves the dust detection efficiency compared to conventional methods by providing a dust detection function to the multi-layer insulation covering a significant part of the spacecraft surface.

研究分野：惑星科学、宇宙工学

キーワード：圧電性PVDFフィルム 固体微粒子 宇宙塵（ダスト） 超高速衝突

1. 研究開始当初の背景

宇宙機を目標天体に送り込み、その場で詳細に調べる太陽系探査では、天体にたどり着くまでに短くても半年、長い場合は10年以上におよぶ惑星間クルージング期間を伴う。また、天体周回軌道への投入失敗など、目的地にたどり着けないリスクもつきまとう。それゆえに、打ち上げ後早い時期に観測を開始でき、目標天体にたどり着くまでの間に科学成果を生み出せる惑星間クルージングサイエンスを掲げることは、大規模な時間的・金銭的リソースを投じる太陽系探査において、純粋な学術的意義のみならず費用対効果やリスクマネジメントという観点からも重要といえる。

惑星間クルージング中に科学成果創出が可能な科学観測機器として、惑星間ダスト等の分布を観測可能なダスト検出器がある。ダスト検出器には、ダストの超高速衝突に伴う様々な物理現象を利用した複数の検出方式があり、特に圧電 PVDF フィルムセンサを用いたダスト検出器は、軽量かつ大面積化が比較的容易といった特長をもち、宇宙機への搭載実績も多数ある。

PVDF フィルムセンサを用いたダスト検出器では、センサの出力信号強度をあらかじめ地上衝突実験で得られた較正式に当てはめることで、センサに衝突したダストの質量と衝突速度がカップリングした“衝突強度”を推定できる。したがって検出したダストの質量決定においては、ダスト分布モデルや探査機の軌道・姿勢などから衝突速度を仮定する必要がある、一桁以上の不確定性が伴うことが課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、PVDF フィルムセンサの出力信号の周波数特性に着目し、ダスト微粒子の質量と衝突速度を独立推定できる信号処理方法を確立することを当初の目的としていた。具体的には、本研究開始以前の予備解析段階でその存在が示唆されていた、微粒子の質量にのみ依存する周波数成分を明らかにし、信号処理回路基板の作成まで完了することを目指していた。

3. 研究の方法

国内外の各種微粒子加速装置を用いた地上衝突実験を実施し、質量・速度を独立推定可能な周波数成分を抽出できるか、またセンサの面積・積層構成、微粒子の衝突条件(直径、密度、衝突速度)によって、出力信号の周波数特性がどのように変化するかを把握する予定であった。しかし、新型コロナウイルス感染症(COVID19)の世界的流行と、国外装置(レーザー加速銃)における微粒子加速技術の継承が海外渡航が困難であった2年間のうちに途切れてしまったこと、さらに別プロジェクトのエフォート増大も重なり、当初計画したような研究活動を行うことは困難な状況となった。また、国内の微粒子加速装置である二段式軽ガス銃において、10~100ミクロンの微粒子を安定して単発で超高速(1 km/s以上)まで加速し、衝突させる技術を確認することが、当初想定していたよりも困難を伴う課題であることが明らかになり、その課題解決に相当量の時間的リソースを必要とした。さらに、並行して研究開発を進めていた宇宙機用多層断熱材とPVDF フィルムセンサを組み合わせた新しいダスト検出技術の地上較正実験で取得された実験データについても、本研究課題への応用を試みた。

4. 研究成果

予備解析段階で微粒子の質量にのみ依存すると示唆されていた周波数成分については、衝突実験データの拡充とともに、出力信号の周波数分布がセンサの積層構成や形状により、極めて複雑な応答になりうるということが示唆され、これまでに得られた実験データの範囲では、残念ながら再現性を確認することができなかった。

二段式軽ガス銃を使った衝突実験において、10~100ミクロンサイズの微粒子の単発衝突方法を確立する課題については、実験系を構成する治具を伝播する微小な振動ノイズを、PVDF フィルムセンサが有意に検出することが研究期間の途中で判明したが、センサの設置方法を変更する改善策を考案、その有効性を確認し、50%程度の比較的高い確率で10~100ミクロンサイズの微粒子を低ノイズ環境で単発衝突させることが可能となった。図1に改善した実験系の模式図と、図2に改善前後の信号波形を示す[1]。これは将来のPVDF フィルムセンサを用いたダスト検出器を開発する際にも必要となる極めて重要な成果であると考えられる。

本研究課題の過程で確立した、圧電PVDF フィルムセンサと多層断熱材を組み合わせたダスト検出器は、宇宙機表面の大部分を覆う多層断熱材にダスト検出機能を与えることで、宇宙機そのものをダスト検出器にする革新的技術である[2]。その宇宙実証機であるダスト検出器「CLOTH」は、NASAの新型ロケット「SLS」により2022年11月16日に打ち上げられ、半年間に多数のダスト衝突と思われるイベントを検出した。現在、成果論文の発表に向けて、データ解析を進めている。

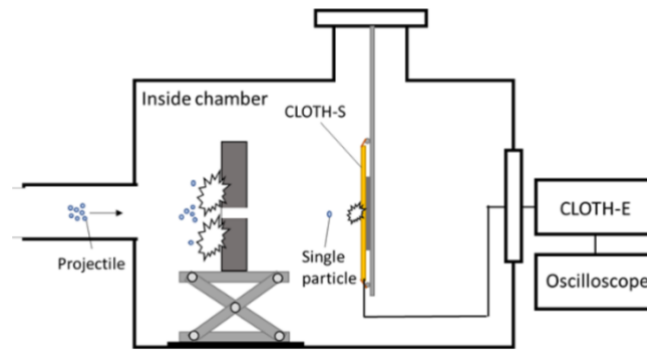


図 1. ノイズ低減のために改善された実験系構成. 図中「CLOTH-S」が PVDF フィルムセンサ.

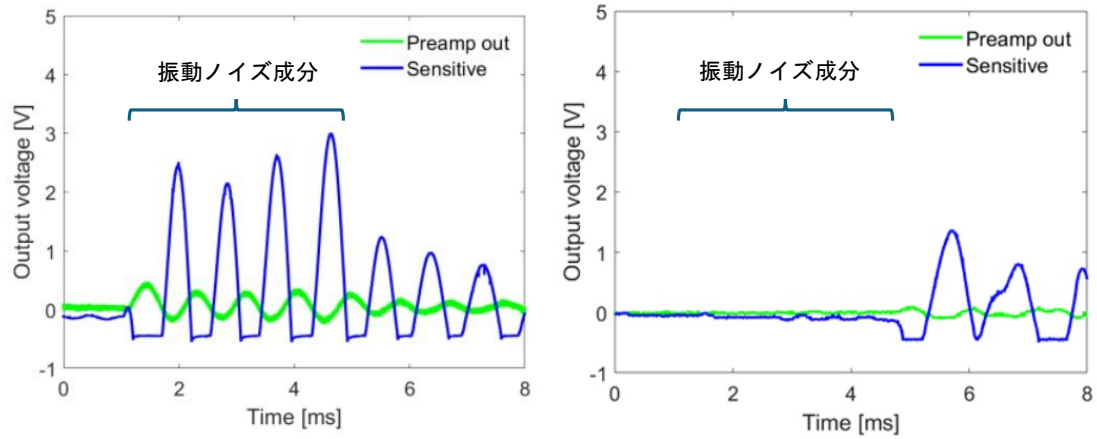


図 2. 実験系構成改善前後の出力信号 (左: 改善前、右: 改善後).

- [1] 岩田ら, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 4B05 (2023).
- [2] 平井ら, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 3M03 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 平井隆之 |
| 2. 発表標題 6Uクラス超小型深宇宙探査機EQUULEUSに搭載する多層断熱材一体型ダスト計測器CLOTHIによる月 - 地球圏ダスト環境計測 |
| 3. 学会等名 月 - 地球圏ダスト環境ワークショップ |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 平井隆之, 矢野創, 長谷川直, 新井和吉, 岩田翔也, 中澤淳一郎 |
| 2. 発表標題 超小型深宇宙探査機EQUULEUSに搭載する多層断熱材一体型ダスト計測器CLOTHの開発状況2022 |
| 3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岩田翔也, 平井隆之, 中澤淳一郎, 長谷川直, 新井和吉, 矢野創 |
| 2. 発表標題 EQUULEUSへ搭載のダスト検出器CLOTHIにおける地上校正実験: センサ部内部のPETネット層による影響評価 |
| 3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 矢野 創, 平井 隆之, 岩田 翔也, 中澤 淳一郎, 藤井 雅之, 新井 和吉, 藤原 正寛, 布施 綾太, 五十里 哲, 石川 晃寛, 川端 洋輔, 近藤 宙貴, 三好 航太, 中島 晋太郎, 船瀬 龍 |
| 2. 発表標題 超小型探査機EQUULEUS搭載宇宙塵検出器「CLOTH」の初期運用と観測計画 |
| 3. 学会等名 第23回宇宙科学シンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平井隆之, 矢野創, 長谷川直, 新井和吉, 岩田翔也, 中澤淳一郎 |
| 2. 発表標題 超小型深宇宙探査機EQUULEUSに搭載する多層断熱材一体型ガス計測器CLOTHの開発状況2021 |
| 3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |