

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### **A study on the analysis method of waveform signal for the development of large area cosmic dust detector using piezoelectric lead-zirconate-titanate (PZT)**

(圧電性 PZT 素子型宇宙塵検出器の新規解析方法を用いた検出面積拡大化の研究)

氏名 服部真季

#### はじめに

宇宙空間に存在する高速ダスト微粒子のその場計測は 1960 年代初めのロケット実験に始まり、地球周回の人工衛星、さらに地球周回軌道を離れて月周回軌道、惑星間の航行軌道での観測へと進んでいった[1]. 様々な検出器の中で圧電セラミックである PZT (チタン酸ジルコン酸鉛:  $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ ) 素子 (以下 PZT) はコンパクトで高圧電源が不要、キュリー点が約 320 度付近にありキュリー点の半分の 150 度くらいまでならば、脱分極する事なく安定して使用できる. そのため、太陽光およびプラズマの影響を受けずに観測できるという優れた特徴から今後、惑星間塵、星間塵、惑星周辺塵などの観測に重要な検出器である. 最近では BepiColombo mission の Mercury Magnetospheric Orbiter 衛星に PZT 素子を使用した宇宙塵検出器 Mercury Dust Monitor (MDM) が採用されている [2].

近年、小型ソーラーセイル実証機 IKAROS に搭載されている PVDF (ポリフッ化ビニルデン) を使用した大面積のダスト計測器 Arrayed Large-Area Dust Detection in Interplanetary space (ALADDIN) が打上げられた. ALADDIN の特徴は  $0.54 \text{ m}^2$  の大面積の検出面積を持つため、空間密度の低い宇宙塵の空間密度 flux 計測を 0.72 から 1.08AU にて効率よく計測を行った [3]. 空間密度が低い宇宙塵の空間分布を計測するには、大面積で人工衛星に容易に搭載できる検出器が必要と考えられる.

PVDF では個数のみの計測しか出来ないため、運動量の計測ができ熱環境にも強い PZT 素子型宇宙塵検出器の大面積化を踏まえた研究を提案した. しかし、PZT は比誘電率が非常に大きいため (1300-1700)、板状の PZT 素子の静電容量は非常に大きくなる. そのため電氣的と機械的との変換能力を表す係数である電気機械結合係数が大きな PZT であっても、読み出しの回路に気をつけないと S/N 比が小さくなり、信号を読み出せない可能性がある. そのため読み出し電極を PZT 検出器の有効面積よりも小さくして読み出しアンプの負荷を軽減して S/N 比を向上させる. 読み出し電極の面積を小さくすることで、電極に衝突する場合とそうでない場合のイベントが発生し、衝突位置依存性の問題が示唆される.

本研究では、衝突位置依存性を実験的に確認し、衝突位置依存による PZT 素子からの出力応答の変化の問題を解決する. 本論文では、第一章では PZT 素子を用いた宇宙塵検出器

の背景を述べる。第二章及び第四章で、衝突位置依存性の実験を YAG-laser と Van de Graaff 型静電加速器実験[4]で行った結果及び、第二章では新規解析方法を用いた分析法を述べる。第三章では MDM と同様の PZT 素子を用いて Van de Graaff 型静電加速器を用いた実験結果を述べる。第五章では第二章から第四章とは異なる解析方法を用いた結果を述べる。最後に第六章で本研究の総括を述べる。

## 第一章 Introduction

本章では 1960 年代から使用されている PZT 素子を用いた宇宙塵検出器の背景を述べている。また、近年打上げが行われ宇宙塵計測をしている IKAROS の ALADDIN について述べ、大面積で計測する意義を述べ、本研究の目的を述べる。

## 第二章 Van de Graaff を用いた衝突位置依存性の実験

本研究では、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻 重照射研究設備(HIT)の Van de Graaff 型静電加速器を使用して微粒子(直径 0.01 から 10  $\mu\text{m}$ )を加速し、衝突位置依存性の実験を行った。

図 1 に示す PZT 素子を使用した。静電加速器からの微粒子のビームラインを PZT の中心と中心から 10 mm 離れた位置に設定し微粒子を照射した(ビーム径は直径 10 mm[5])。これまでは出力波形の振幅電圧を目視で読みとっていたが(例えば [6]), 本研究では波形信号の FFT スペクトルにおいて、2 mm 厚の PZT 素子の共振周波数のピーク値を採用

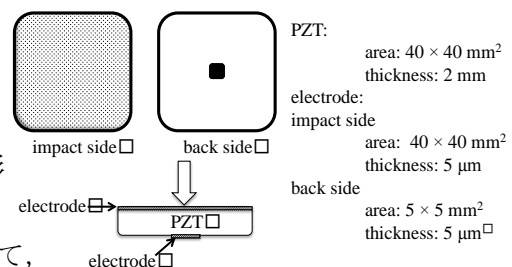


図 1. PZT 素子の構成

して分析を行った。その結果、集電極(図 1 の backside の electrode)上に衝突する場合、集電極から外れた領域よりも出力が一桁大きい事が判明した。また、ビームラインを中心に設置した場合、5 × 5 mm<sup>2</sup>の電極よりも直径 10 mm のビーム径の方が広いため、電極に衝突した場合としていない場合がある。その場合、出力された波形の FFT スペクトル中の共振周波数の高調波に着目した。その高調波に着目した解析の結果、電極に衝突した場合としない場合の分別が可能になった。つまり、宇宙空間で実際に計測した場合宇宙塵の衝突位置が分らないが、この方法を使用する事で衝突位置を判別することが可能になり宇宙塵の運動量を計測する事が可能である事を示すことができた。

## 第三章 熱対策のために PZT 表面に塗布されたポリイミド製塗料の影響

人工衛星が地球よりも内惑星を探索する場合は太陽に近づくため、宇宙塵検出器のように太陽光に曝される機器は高温の環境下におかれる。PZT素子のキュリー点は約320度付近にありキュリー点の半分の150度くらいまでならば、脱分極する事なく安定して使用できる。水星探査ミッションBepiColomboでは、PZT素子の表面に60  $\mu\text{m}$ のポリイミド製の白色塗料を塗布し[6]、温度上昇や急激な熱環境変化を防ぐ熱設計になっている。

しかし、白色塗料を塗布した場合のPZT素子からの出力応答の影響はこれまでほとんど知られていない。そのため第二章で述べた静電加速器を用いて、衝突位置依存の実験を行った。実験方法は第二章と同じである。出力された波形のFFTスペクトルの、2 mm厚のPZT素子の共振周波数(1.1MHz)のピークを用いて解析を行った。図2の中のIは白色塗料を塗布し中心にビームラインを設定した実験結果を示し、IIは白色塗料を塗布し中心から10 mm離れた位置にビーム

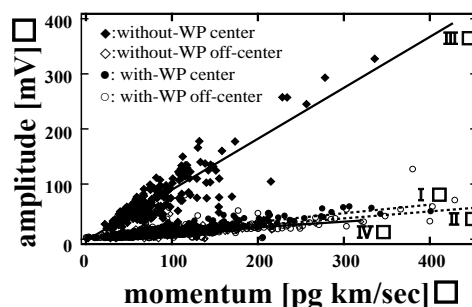


図 2 共振周波数のピーク値 vs. 運動量

ラインを設定した実験結果を示している。IIIとIVは第二章の実験結果で、IIIは中心にビームラインを設定した場合、IVは中心から10 mm離れた位置にビームラインを設定した場合の実験結果である。電極上に照射した場合、白色塗料無しの実験(III)に比べて白色塗料有りの実験(I)では、感度は約一桁下がっていた。さらに、白色塗料有りの場合、衝突位置依存は顕著に現れなかった。白色塗料を塗布する事で感度が低下するが、読み取り電極が小さくなったにも関わらず衝突位置依存がなくなり利便性が良くなった事を示すことができた。

#### 第四章 YAG-laser を用いた衝突位置依存性の実験

微粒子の超高速衝突実験は宇宙塵検出器の開発には欠かせない実験である。しかし、Van de Graaff 型静電加速器はマシンタイムの関係があり、常時使用が出来ないため、室内実験を行える環境が必要であった。そこで YAG-laser を使用した実験を行った。微粒子が衝突した時に発生する衝突応力を模擬するために、パルスレーザーを検出器の検出面に照射して光圧によって圧力を発生させた。厳密には、運動エネルギーによる圧力と、物質が熱によって蒸発して膨張するときに発生する圧力は異なるものではあるが、微粒子衝突を模擬する程度の圧力ならば、0.050 mJ 程度のパルスレーザーを照射することで、電荷有感型増幅器を介して PZT 素子からの出力は約 1 V の出力があった。また、パルスレーザーのビーム径は 0.1 mm 程度で、正確な位置に照射することが可能なのも特徴である。静電加速器では粒子の照射スポットを絞る事ができず、広がりを持つため、正確に位置依存性を調べる事はできない。そのため YAG-laser を使用して衝突位置依存性の実験を行った。その結果、電極にパルスレーザーを照射した出力電圧と、電極から約 5 mm 離れた照射位置の出力電圧が約一桁減少する事が判明した。また、電極から約 5 mm 離れた所から PZT の出力電圧が顕著に変わらなくなった事がわかった(図 3)。第二章で示した静電加速器の位置依存性の実験結果から、中心に照射した場合と中心から 10 mm 離れた位置で照射した場合も約一桁の感度差があった。また、パルスレーザーの発生時

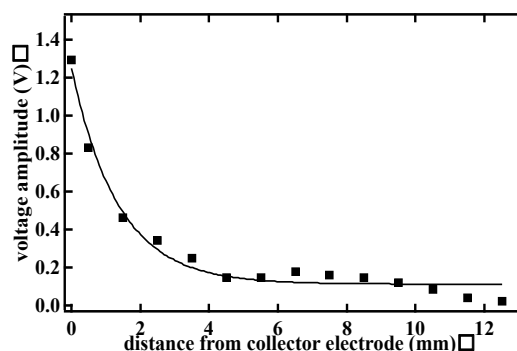


図 3 出力電圧 vs. 電極からの距離

また、電極から約 5 mm 離れた所から PZT の出力電圧が顕著に変わらなくなった事がわかった(図 3)。第二章で示した静電加速器の位置依存性の実験結果から、中心に照射した場合と中心から 10 mm 離れた位置で照射した場合も約一桁の感度差があった。また、パルスレーザーの発生時

刻と PZT から出力した信号時刻の遅延時刻を計測した結果、PZT 内での信号伝播速度が 4.7 km/s という事が分った。

本実験の結果から YAG-laser を用いて、衝突位置依存による PZT からの出力応答のメカニズムを示す事が出来た。

### 第五章 縦波の共振周波数以外の領域を用いた分析法

第二章および第三章では、2 mm 厚の PZT の共振周波数を使用して解析を行ってきた。しかし、第二章では衝突位置による出力の変化が現れた事が報告された。本章では、PZT 素子の横方向の振動の基本周波数に着目し、第二章と第三章で取得した実験データを用いて解析を行った。出力波形を FFT 解析し、横方向の振動の基本周波数に着目した。横方向の振動の基本周波数に着目する際に注意する点がある。本研究で使用した PZT 素子は  $40 \times 40 \times 2$  mm<sup>3</sup> の正方形で中心から横方向を考えると最短 20 mm、最長 28 mm と伝播距離が変化するため、波形を解析しても大きな 1 つのピークは存在しなかった。先行研究[5]から横方向の音速は 3km/s と求められている。これを元に、横方向の振動の基本周波数を算出した。基本周波数に加え、それらの高調波も視野に入れ、0.1 MHz から 1.0 MHz の範囲の連続スペクトル成分の総和を解析に採用した。この値は感度の顕著な位置依存性を示さなかった。

この研究の結果は PZT 素子の大面積化をするにあたり、読み取り電極が小さくても衝突位置依存によらず運動量を導出する事が可能になった事を示した。

### まとめ

読み出し電極を PZT 検出器の有効面積よりも小さくすることは、読み出しアンプの負荷を軽減し S/N 比が向上する。しかし、読み出し電極を小さくすることで、PZT 検出器の出力応答が衝突位置に依存するということが実験的に分かった。その現象の検証をするため YAG-laser を用いた実験で衝突位置依存性をより正確に明らかにした。さらに、これまで着目されなかった出力信号の周波数成分は衝突位置に依存しないことがわかり、PZT 検出器の大面積化に道筋をつけることができた。

### Reference:

- [1]向井正:「宇宙における固体微粒子」, J. Plasma and Fusion Res., Vol.82. No.2,pp77 (2006)
- [2] K. Nogami, M. Fujii, H. Ohashi, T. Miyachi, S. Sasaki, S. Hasegawa, H. Yano, H. Shibata, T. Iwai, S. Minami, S. Takechi, E. Gruen, and R. Srama: Planet. and Space Sci. **58**. (2010) 108.
- [3] Yano H., T. Hirai, C. Okamoto, N. Ogawao, M. Tanaka, and The IKAROS-ALADDIN Team, “In-situ Dust Flux Measurement Inside 1 AU Heliocentric Distance by the IKAROS Solar Sail Spacecraft”, 8th Annual Meeting AOGS 2011, Taipei, August 8 to 12, 2001, Article number PS02-A047
- [4] S. Hasegawa, Y. Hamabe, A. Fujiwara, H. Yano, S. Sasaki, H. Ohashi, T. Kawamura, K. Nogami, K. Kobayashi, T. Iwai, and H. Shibata: International Journal of Impact Engineering. 26 (2001) 299.
- [5] T. Miyachi, G. Kuraza, A. Nagashima, M. Fujii, N. Hasebe, N. Yamashita, K. Nogami, T. Iwai, H. Ohashi, H. Shibata, S. Minami, S. Takechi, T. Onishi, E. Grün, R. Srama, and N. Okada: Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 3772
- [6] T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, M.N.Kobayashi, G.Kuraza, A.Nagashima, Y.Nakamura, K.Nogami, T.Iwai, S.Sasaki, H.Ohashi, S.Hasegawa, H.Yano, and H.Shibata: Adv. Space Res. **35** (2005) 1263.
- [7] UBE Ltd.: Private Tech. Report (2006)