

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400302

研究課題名(和文) 圧電性PZT素子を使った宇宙塵検出器の大面积化および高機能化の研究

研究課題名(英文) Experimental research of the advanced functionalization and the enlargement of sensitive area of cosmic dust instrumentation using piezoelectric PZT element

研究代表者

小林 正規 (Kobayashi, Masanori)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号：70312080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、圧電性PZT素子を使った宇宙ダストを検出するための観測装置について高機能化および有感面積の大型化の実験的な研究を行った。その結果、(1)高機能化という点で速度が1km/s以上、サイズが数ミクロン未満の微小ダストを検出するときの真イベントと偽イベントを区別する手法、(2)大面积化という点でポリイミド膜と圧電素子を利用した大面积ダスト検出器の手法についての具体的な成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We implemented an experimental research of the advanced functionalization and the enlargement of sensitive area for the instrumentation that detects cosmic dusts by the use of piezoelectricity PZT element. As a result, the following concrete results were achieved; (1) a technique for distinguishing true event and false event when dust with a speed of >1km/s and a size of less than several microns is detected for advanced functionalization, and (2) a technique of the polyimide membrane with the piezoelectric element as pick up sensor for the enlargement of sensitive area.

研究分野：惑星探査

キーワード：宇宙ダスト観測 大面积化 真偽判定 装置開発 圧電素子

1. 研究開始当初の背景

宇宙塵(惑星間塵、星間塵など、ここでは質が 10^{-14} - 10^{-9} g、速度は 1km/s 以上のものを指す)は、宇宙空間の基本的な構成要素であり、例えば惑星間塵だと小惑星や彗星などの天体からの流出や別の天体へ流入して、太陽系の進化の過程で重要な役割を担っていると考えられている。

1960年代から宇宙探査機によるその場観測が行われているが、例えば、惑星間塵は小惑星や彗星を主な起源であることは分かっているが、供給の割合には定説が無い。一方、星間塵は太陽系内を星間風と同じ速度で流入しているが、空間密度が低いため観測データは限られている。そもそも惑星間の塵はどこからどのくらいの割合が来ているのか、その単純な問いに答えるためには、とにかく大面積で観測する必要がある。

研究代表者らは、宇宙機への搭載のリソース要求が比較的小さい圧電素子を利用した宇宙ダスト検出器を提案してきた。ただし、このタイプの検出器では、ダストが検出器に衝突した時の真の信号とそれ以外の機械振動による偽信号の区別がつきにくく、データの信頼性にも関わる問題があった。

2. 研究の目的

板状の圧電性 PZT 素子による宇宙塵検出器は、その検出面に衝突した高速微粒子の運動量が、圧電信号として出力される衝突振動の波形の振幅に比例すること分かっている。PZT 素子は高温まで動作可能(<150℃)、コンパクト、さらに高電圧不使用と、リソース要求が小さいことは、宇宙機搭載には有利な特徴である。そのため、水星探査機 BepiColombo の宇宙塵検出器 MDM にも採用されている。

研究代表者らは MDM 検出器 (PZT を利用) を開発してきたが、その開発の過程で得た知見をさらに深めて衝突振動型の検出器の素過程をひとつずつ明らかにすることで、今後の宇宙ミッションへの利用を広めていきたいと考え、それまでの研究実績を進展させて、次のような目的を掲げた。

- (1) 微粒子衝突圧電信号の周波数解析を行って衝突振動型の検出器の素過程を明らかにする。
- (2) PZT 検出器の信号読み出しの工夫による高機能化を試みる。

3. 研究の方法

前項の目的のために、PZT 検出器の試作および実験施設の整備と、それらを使った実験を行った。試作した検出器に微粒子を衝突させて励起される信号を調べる、または微粒子衝突を模擬したパルスレーザー照射による応力波励起による信号の挙動を調べる方法をとった。具体的には次の通りである。

- (1) 真偽判定のための研究：静電気加速器による実験
静電加速器は、従来東大の施設を利用して

いたが、震災の影響でいまだに利用できないため、ドイツ・マックスプランク核物理研究所の静電加速器を利用した。平成 25 年に実験を行い、次年度以降そのデータの解析を行った。

静電加速器の利用は、海外での利用ということもあって事前の準備が重要であるが、実験セットアップの確認や動作確認のために、研究代表者の実験室にあるパルスレーザーを利用した。パルスレーザーを使うと、光圧によって PZT 検出器内部に応力波を励起することができ、微粒子(数ミクロン)が高速衝突した時の信号励起を模擬することができる。厳密にいえば現象の時間スケールが違うが(パルスレーザーは 5ns、微粒子衝突は 1ns 以下)、実験セットアップの確認などには十分である。効率的な研究のためには必須の実験設備である。

検出器からの信号は、デジタルオシロスコープで記録して、FFT 処理などを行って解析を行った。

- (2) 大面積化に向けた信号読み出しの工夫：衝突銃による実験

衝突銃は、JAXA 宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃と千葉工業大学所有の二段式軽ガス銃を利用した。平成 26 年度および平成 27 年度に実験を行った。それぞれの衝突銃は、弾丸が直径 7mm、4mm であるが、ポリカーボネイト製の弾丸をサボとしてその中に小さいサイズの鋼球あるいはアルミナ球 (<1mm) を入れて、ターゲットである試作検出器に衝突する直前にポリカーボネイト弾丸が割れて中の球だけが被試験体に衝突するという実績のある方法をとった。

これらの実験は、マシンタイムも限られるため、事前の実験として研究代表者の実験室で簡易的な予備実験を行った。方法としては、手製の空気銃で、上記二段式軽ガス銃と同様に、サボによって鋼球を飛ばして被試験体に衝突させるものである。法令の範囲内での使用の為、通常のコンプレッサによる 8 気圧以下の空気での弾丸加速で、撃ちだす速度は 100~200m/s であるが、予備実験としては十分であり、効率的な実験準備を進めるにあたって重要な設備である。

検出器からの信号は、デジタルオシロスコープで記録して、FFT 処理などを行って解析を行った。

4. 研究成果

前章に関連付けた内容として、研究成果をまとめる。

- (1) 真偽判定のための研究：静電気加速器による実験

真のイベントというのは、センサーの検出面に衝突することで、機械的振動を発生させるイベントで、偽イベントはそれ以外の要因による信号を発生させるものと定義すると、PZT センサーの出力信号を解析することで両者の区別する方法が必要である。

今回、ドイツ・マックスプランク核物理研究所にあるヴァンデグラフ静電加速器を利用して、微粒子衝突実験を行った。用いたセンサーはFig. 1に示す、40mm × 40mm × 2mmのPZT素子である。Fig. 2に、衝突させた微粒子の質量 速度分布を示す。加速した微粒子は鉄である。



Fig. 1 実験に使用した PZT センサー

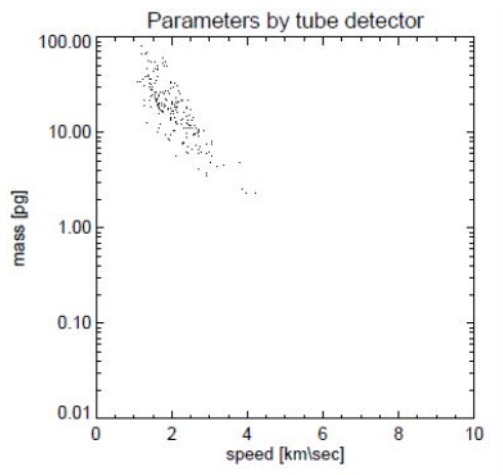


Fig. 2 MPIK での実験で PZT 素子に衝突させた鉄微粒子の質量 速度分布

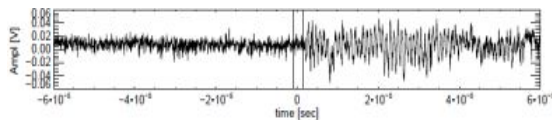


Fig. 3 高速微粒子が PZT 素子に衝突して出力した信号

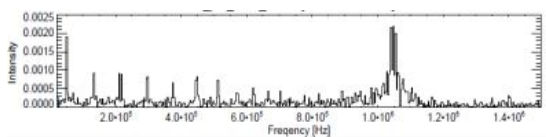


Fig. 4 Fig. の信号波形の FFT スペクトル

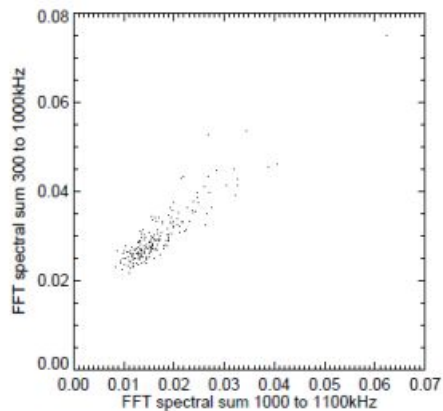


Fig. 5 PZT 素子の面外振動成分と面内振動成分の相関関係

Fig. 3 に、衝突時の PZT 素子からの信号波形を示し、Fig. 4 にはその波形を FFT 解析した結果を示す。この図からわかるように、ピークになって表れている共振周波数はもっとも強度が強いのは 1MHz 付近の成分であるが、そのほかにも多数のピークが示されている。ここで示されているもっとも低い周波数は約 50kHz で、その高調波と考えられるピークが多数表れている。

従来、衝突微粒子の運動量と相関があるのは、センサーの厚み方向の共振周波数の成分（2mm 厚のセンサーの場合、約 1MHz）だと考えてきたが、開発の過程で面内方向の共振周波数成分も衝突微粒子の運動量に相関があることが分かった。これは、1MHz の共振周波数の成分はセンサーの厚み方向の縦波によって引き起こされるが、衝突によって発生する応力波は、厚さ方向のみでなく、面内方向も伝播する。このような波も面内方向を往復することで共振している。

Fig. 5 には、面外（厚み方向）の振動である 1MHz の共振成分と面内方向の振動である 50kHz の高調波成分の相関関係をしめしている。図中で面内振動として示しているのは 300kHz 以上であるが、これは、50kHz 付近の周波数帯域は、環境からと思われる振動が加わっているためである。センサーの検出面に衝突した微粒子イベントは実線で示す直線付近に分布する。一方、周辺からの真空ポンプや電磁ノイズと思われるノイズイベントについては、この図の範囲外になっている。つまり、PZT 素子の検出面に微粒子が衝突して誘発した応力波が持つ周波数の分布は、そうでないものに比べてユニークであり、他のイベントと区別ができると思われる。単純に、面内振動である低周波成分（50kHz）と面外振動による高周波（1MHz）の比をとって、ある一定の値になるものが、真のイベントで、そうでないものは偽イベントつまり、衝突面に固体である微粒子が衝突することによって誘発される信号以外のものといえるだろう。

以上で述べたことは、さらに実験で検証を深める必要があるが、軌道上でのメテオロイ

ド・スペースデブリの微粒子成分をその場観測するためのセンサーとしての可能性を示すものと考えている。

(2) 大面積化に向けた信号読み出しの工夫：衝突銃による実験

サイズの大きなダストを観測するためには、検出面積を大きくする必要がある。PZT 検出器の面積を大きくするのは、重量の問題もあるが、読み出しのための回路にも限界があるため、検出媒体に PZT をピックアップセンサとして取り付けて、その検出媒体に衝突した時の振動を拾う方法を検討した。

検出媒体を金属板だとすると、厚み 1mm だとしても 1m×1m で約 2.7 kg となり、現実的ではない。そこで、軽量の素材として金属板以外にポリイミドなどのフィルムで実験を行い、検出媒体として有望であることがわかった。実験に至った経緯も含めて以下に説明する。

JAXA は、地球周回軌道上での 0.1~数 mm のサイズ領域の微小デブリ（以下、デブリ）の観測をするために、フィルム貫通型微小デブリセンサを開発した。これは、絶縁性薄膜上に直線状の導線を等間隔に細かく形成して、それがデブリの衝突貫通によって導線が切断されることを、導線に通電することで検出するという手法である。同時に切断された隣接検出線の数からデブリの大きさを推定する。導線の幅は 50 μm、間隔は 100 μm でフィルム厚は 20 μm 未満となっている。

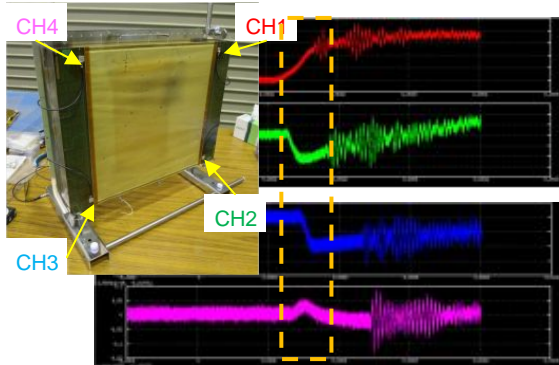


Fig. 6 フィルム貫通型 SDM 微小デブリ検出器 SDM の BBM と軽ガス銃によるフィルムに貼り付けた PZT からの信号。オレンジ点線内の部分は、銃のガスが弾丸より先に到達したもの、もしくは弾丸着弾時に発生したプラズマによる電磁的な作用と考えられる。

このフィルム貫通型検出器は、0.1~数 mm のデブリを観測対象としていて、そのために軌道上での実証用として開発されたモデルは 30cm×33cm という有感領域を持ち、検出する導線の本数は 3300 本におよぶ。一本一本の導通を調べるためには大きな電力も必要となり、衝突頻度が非常に小さなイベントのために常時 ON することは効率的ではないという問題があった。もし、フィルムをデブリが貫通した時刻が分かれば、そのタイミングで導線に導通をすれば良いため電力的に

非常に効率的になる。

このフィルムをデブリが貫通した時刻を検出するための試みとして、Fig. 6 に示すように、このフィルムセンサーの四隅に 1cm 角の PZT を貼り付けて、JAXA 宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を利用して 0.3mm~3.6mm の微小球デブリに見立てて 5~6km/sec まで加速して貫通実験を行ったところ、何度かの試行錯誤の後、Fig. 6 のような信号が得られた。これは、微小球がフィルムを貫通した時に生じた応力がフィルムを伝わって PZT まで到達したものを検出したものと考えている。フィルム上の微小球の貫通位置から 4 つの PZT センサーまでの距離に応じた時間差が測定されていて、約 2km/sec の伝播速度ということがわかった。これは、ポリイミド中の応力波の伝搬速度にほぼ一致する。

上記実験の追試として千葉工業大学の二段式軽ガス銃による実験も行った。JAXA での実験と同じ内容の実験に加えて、単なるポリイミド膜を使った実験も行った。前述の例では、PZT の信号をフィルム貫通型のセンサーのイベントトリガーとして活用しているが、厚さ数十 μm のポリイミドでの衝突応力を伝えとすれば、その性質を大面積のダストセンサーに活用できる。人工衛星や宇宙探査機の表面は、必ずと言っていいほど熱を遮断する MLI (Multi-Layer Insulator) で覆われていて、その一部に PZT センサーを貼り付けることで、MLI に衝突してある一定の力積を生じるダストの検出をすることができる。

千葉工業大学での実験では、JAXA での実験と同様の結果が得られて、ポリイミド膜の場合でも、検出信号が得られることがわかった。さらに、JAXA での実験の結果と併せて、複数の PZT 検出器の検出信号の時間差から衝突した微粒子が衝突した位置（貫通孔）を推定できることがわかった。これは、音源位置を同定する単純なアルゴリズムを用いることで可能である。宇宙機搭載を考えた場合、さまざまなノイズが考えられるが、実際に検出媒体に衝突した信号なのか、それ以外のものなのかを判別するためにも重要な情報が得られる方法だと考えている。

ポリイミドフィルムと PZT の組み合わせでダストの衝突を検出する方法はこれまでほとんど行われてこなかった。地球からはなれた深宇宙においてサブミリ以上のダストの観測はほとんど行われていない。太陽系を航行する探査機の表面に小さな PZT センサーを貼り付けるだけで、探査機サイズのダスト観測装置にできる可能性を含んでいる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

小林正規, 千秋博紀, 宮地孝, 木村宏, 奥平修, 藤井雅之, スラマ ラルフ, 庄

電性PZTを利用した月惑星表面探査用ハイブリッドダスト検出器, 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集, 論文番号JSASS-2015-4069(6ページ), (2015) (査読無)

小林正規, 宮地孝, 武智誠次, 奥平修, 中村真季, 宇宙探査での圧電センサーによる微粒子検出, 日本実験力学会講演論文集, No.15, Page163-168, (2015) (2015年度年次講演会) (査読無)

Kobayashi, M., Miyachi, T., Hattori, M., Okudaira, O., Fujii, M., Okada, N., and Srama, R., "Frequency Analysis of Dust Signal from Piezoelectric PZT Sensor", 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p.2027-2028, 45 (2014). (査読無)

Kobayashi M., Ishimaru R., Dust Monitoring Instrument on CubeSat for Small Body Mission, 2nd International Workshop of Instrumentation for Planetary Mission, (IPM-2014), Greenbelt, Maryland, Abstract No.1071 (2ページ), 2014. (査読無)

〔学会発表〕(計 4 件)

小林正規, 千秋博紀, 宮地孝, 木村宏, 奥平修, 藤井雅之, スラマラルフ, 圧電性PZTを利用した月惑星表面探査用ハイブリッドダスト検出器, 第59回宇宙科学技術連合講演会、2015年10月7日~9日、かごしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市)

小林正規, 宮地孝, 武智誠次, 奥平修, 中村真季, 宇宙探査での圧電センサーによる微粒子検出, 日本実験力学会 2015年次講演会、2015年8月28日~29日、新潟大学工学部(新潟県新潟市)

Kobayashi M., Ishimaru R., Dust Monitoring Instrument on CubeSat for Small Body Mission, 2nd International Workshop of Instrumentation for Planetary Mission, (IPM-2014), Greenbelt, Maryland, USA, November 4-7, 2014.

Kobayashi, M., Miyachi, T., Hattori, M., Okudaira, O., Fujii, M., Okada, N., and Srama, R., "Frequency Analysis of Dust Signal from Piezoelectric PZT Sensor", 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014 at The Woodlands, Texas, USA, March 17 - 21, 2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

<http://www.perc.it-chiba.ac.jp/~masanori/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 正規 (KOBAYASHI, Masanori)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・首席研究員

研究者番号: 70312080

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

宮地 孝 (MIYACHI, Takashi)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員

研究者番号: 20013401