

# ポリイミド膜と圧電素子を利用した大面積センサーの開発

小林正規<sup>1</sup>, 奥平修<sup>1</sup>, 黒澤耕介<sup>1</sup>, 岡本尚也<sup>1</sup>, 松本晴久<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

## 1. イントロダクション

これまで宇宙機搭載装置による惑星間ダストの直接観測の例は多くあるが、 $10\mu\text{m}$ 以上の大きなサイズのダストを観測するための大面積の観測装置による観測例は、アポロ計画前のペガサスミッション<sup>1)</sup>など、わずかな例を除くとほとんどない。大きなサイズのダストは頻度が小さく、その観測のためには、単純に検出面積を大きくする必要があり、一つの目安として $1\text{m}\times 1\text{m}$ 程度の検出面積が必要である。惑星間空間での直接観測の方法は、ダストが検出媒体に衝突して発生するプラズマや振動励起などの物理現象をセンサーで検出するのが一般的である。検出

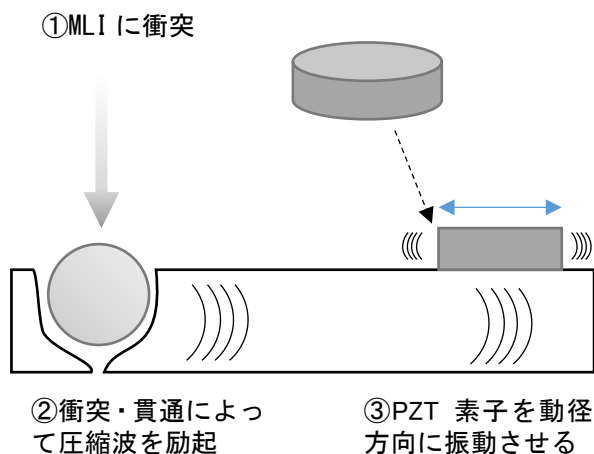


図1 ダスト衝突および振動励起の様子

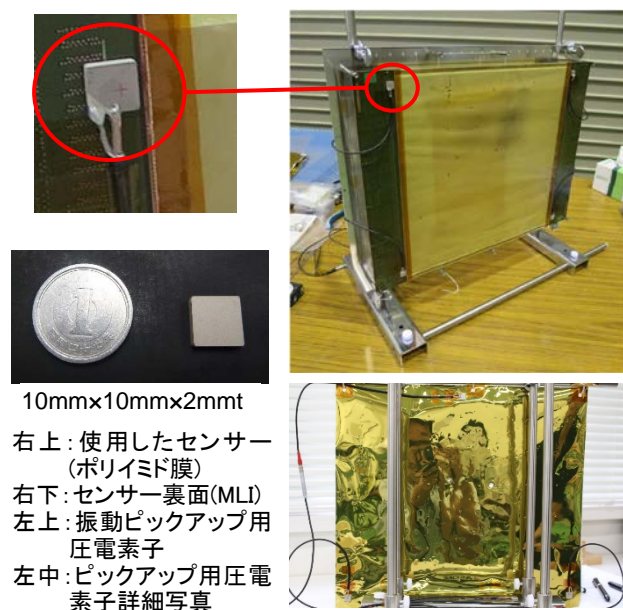


図2 使用した検出媒体としてのポリイミド膜と振動ピックアップ用圧電素子

媒体が金属板だとすると、厚み $1\text{mm}$ だとしても $1\text{m}\times 1\text{m}$ で約 $2.7\text{kg}$ となり、かなり大きな重量となる。

本研究では、検出媒体に金属板以外にポリイミドなどのフィルムを使って、ダスト衝突による励起振動の検出によるダストの直接観測の可能性を調べた。

## 2. 検出器原理

高速で衝突するダストが励起する固体中の音波を検出することで、ダストを検出する。検出媒体にダストを衝突させて、その衝突によって励起された振動を圧電素子 (ピックアップセンサー) などで検出する方法はこれまでに使われたダスト観測装置にもあるが、なんらかの要因でダスト衝突以外の信号が多く検出されるなど信頼性が低かった。

ここで述べる検出方法は、衝突によって励起される固体物質中の音波 (縦波弾性波) を圧電素子で読み出す方法であり、検出媒体がたわんだり、ゆがんだりするなどの低い周波数の振動では発生しない周波数の振動を検出するため、ノイズが少ない。

さらに、複数 (3つ以上) のピックアップセンサーで音波を検出するため、それぞれのセンサーに到達する音波の時間差から、衝突位置としての音源の位置を求めることができ、1点に決定できない振動源はその検出媒体の1点で発生した音波ではないと考えられるため、ダスト衝突ではないと判断できる。真のイベントかどうか、真偽判定が容易にできる。上で述べたようにこの観測装置の特徴は、ダスト衝突で励起される固体中の音波の検出と、衝突位置の同定である。

図1に、ダストが、PZT素子が貼りつけられたMLIに衝突してPZT素子でその衝撃振動を検出する様子を示している。まず、ダストがMLIに衝突して固体圧縮波 (音波) が励起され (①)、衝突位置から離れるように固体圧縮波 (音波) が伝播し (②)、MLIに貼りつけられたPZT素子に伝わって振動が励起する (③)。この時に励起される振動の周波数は、PZT素子の形状で決まる共振周波数であり、約 $200\text{kHz}$ を想定している。

## 3. 実験

2段階式軽ガス銃を使ってポリイミド膜に微粒子を衝突させる実験をこれまでに2回行った。1回目はJAXA宇宙科学研究所の2段階式軽ガス銃 (2015年2月16日~20日)、2回目は千葉工業大学の2段階式軽ガス銃 (2015年9月14日~18日) を使って行った。以下に詳細を述べる。

### 3.1. 1回目: JAXAの2段階式軽ガス銃による実験

この実験は、JAXAが開発したフィルム貫通型微小デブリセンサSDMの実験に相乗りの形で行った。JAXAは、地球周回軌道上での $0.1\sim$ 数 $\text{mm}$ 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

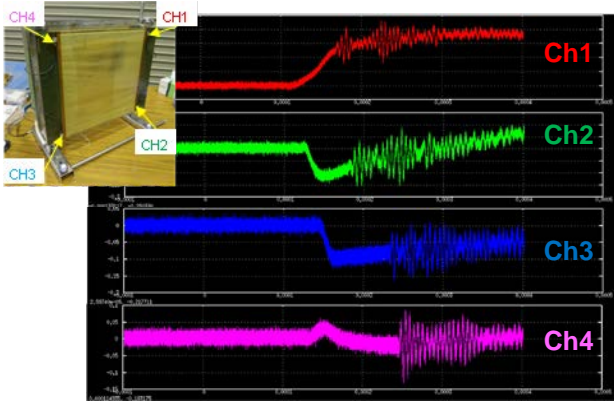


図 3 フィルムセンサに貼りつけられた圧電素子によるピックアップセンサーからの信号の例

表 1 宇宙研実験の実績

Shot No.	Projectile	Diameter [mm]	Velocity [km/s]	Shot	Impact Region	Note
1	SUS304	0.3	5.396	Multiple	①	Back plateのクレータが1個?
2	SUS304	0.3	6.641	Multiple	②	
3	SUS304	0.8	5.629	Single	④	貫通
4	SUS304	0.8	5.407	Single	⑤	貫通
5	SUS304	0.3	5.238	Multiple	⑦	45度入射
6	SUS304	1.6	5.507	Single	③	Back plate/MLIなし
7	SUS304	3.2	5.144	Single	⑥	Back plate/MLIなし (チャンバ後方から2次デブリあり)
8	(サボのみ)	—	5.496	—	?	Back plate/MLIなし 信号取れず(原因不明)

表 2 千葉工大実験の実績

ID	実施日	速度 [km/s]	弾丸	ターゲット	備考
#122	9/15	4.34	アルミナ, 1mmφ	SDM+MLI	
#123	9/16	4.39	アルミナ, 1mmφ	SDM+MLI	
#124	9/17	4.96	アルミナ, 1mmφ	SDM+MLI	
#125	9/17	---	アルミナ, 1mmφ	SDM+MLI	
#126	9/18	4.55	アルミナ, 1mmφ	SDM+MLI	
#127	9/18	4.35	アルミナ, 1mmφ	MLI	
#128	9/18	---	アルミナ, 1mmφ	MLI	
#129	9/18	4.48	アルミナ, 1mmφ	MLI	弾丸の破片が衝突

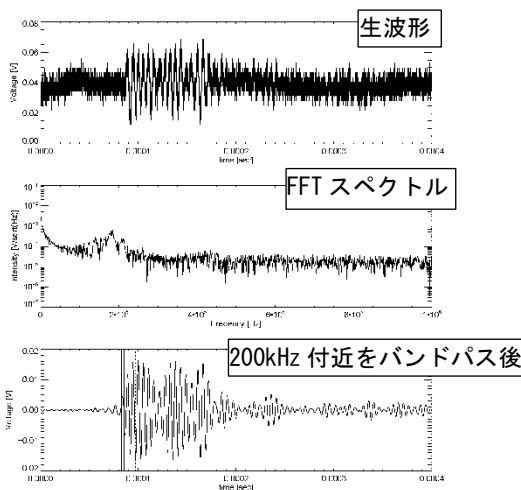


図 4 宇宙研実験の Shot122 の Ch4 の例

線状の導線を等間隔に細かく成形して、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  $50\mu\text{m}$ 、間隔は  $100\mu\text{m}$  でフィルム厚は  $20\mu\text{m}$  未満となっている。

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、図 2 に示すように、SDM の四隅に  $10\text{mm}$  角の PZT を貼り付け、デジタルオシロスコープで直接信号を記録した。  $0.3\text{mm}\phi\sim 3.6\text{mm}\phi$  の微小球を微小デブリに見立てて  $5\sim 6\text{km/sec}$  まで加速した。サボを利用して微小球を衝突させた実験の実績を表 1 に示す。何度かの試行錯誤の後、図 3 のような信号が得られた<sup>3)</sup>。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。

### 3.2. 2 回目: 千葉工大の 2 段式軽ガス銃による実験

この実験では、前項で述べた宇宙研での実験を検証するための追試験の目的で行った。1 回目の宇宙研での実験では、SDM のセンサーのみで検出を試みた。前項で述べたように、SDM センサーはポリイミド膜上に直線状の導線が形成されているもので、実験で得られた結果が、この導線に影響を受けたものかどうかを調べるために、2 回目では、通常のサーマルインシュレータに使われるポリイミド膜（導線などの加工なし）に、1 回目と同じ圧電素子を貼りつけたもので実験を行った。

図 2 の右下に、ピックアップ用の圧電素子センサーを MLI の 3 か所に貼りつけた写真を示す。表 2 には千葉工大の 2 段式軽ガス銃による実験の実績を示す。この実験では、使用したのは全てアルミナで  $1\text{mm}\phi$  微小球である。

### 3.3. 実験結果まとめ

図 4 および図 5 では、それぞれの実験において、微小球がフィルムを貫通したタイミングで、ピックアップセンサーが検出した信号と、その FFT スペクトルを示している。ピックアップセンサーによって検出された信号は、いずれも周波数が約  $200\text{kHz}$  のところにピークを持つ信号で、その帯域の信号のみを調べると、振幅が振動しているのがわかる。

$200\text{Hz}$  周辺のバンドパスフィルタでフィルタリングした信号の立ち上がりのタイミングを調べた。バックグラウンドレベル（ノイズレベル）の 3 倍以上になるタイミングとした。今回の実験では、微小球がフィルムを貫通した正確な時刻は記録されていないが、軽ガス銃の発射のタイミングに基づいたトリガー信号を受けてオシロスコープで信号を記録した。

図 6 では、宇宙研での実験の結果を使って、トリガーからの時間と、貫通穴の位置からそれぞれのピックアップセンサーまでの距離の関係を図に示した。2 つ異なるオフセットの直線で近似できるプロットになっているが、これは軽ガス銃からのトリガー信号のオフセットによるものと考えられる。傾きは大体同じで、速度にすると、約  $2.6\text{km/s}$  であり、ポリイミドの固体中応力波の速度に概ね一致する。

一方図 7 では、千葉工大での実験結果を使った図

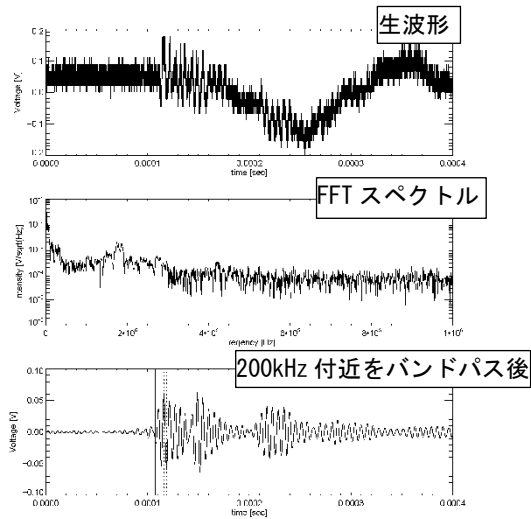


図 5 千葉工大実験の Shot129 の Ch2 の例

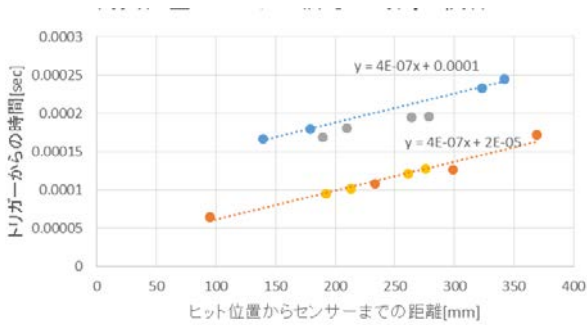


図 7 貫通穴からの距離と固体波到達時刻の関係 (宇宙研実験結果による)

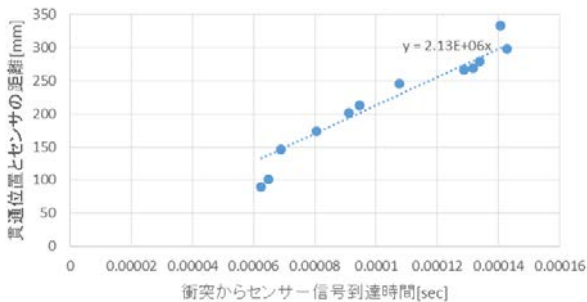


図 6 貫通穴からの距離と固体波到達時刻の関係 (千葉工大実験による)

で、同じく貫通穴からのピックアップセンサーの距離と、トリガー時刻からの時間をプロットしている。こちらは、トリガー時刻のオフセットが非常に小さいので、一本の線として線形フィッティングを行った。傾きから速度を求めると、約 2.1km/s で、ポリイミドの固体中応力波に概ね一致する。

## 4. データ解析・考察

### 4.1. 音源位置同定

上で述べたそれぞれ 2 つの実験の結果を用いて、音源、つまり、衝突による応力波発生位置 (貫通穴) の同定を行った。方法は、到達時間差法と呼ばれる次のような一般的なアルゴリズムを用いた。2 点で受信した時刻の差に応力波の速度を乗じて距離の差としたとき、受信した 2 点からの距離の差が同じになるような点を結ぶと双曲線になる。そして、音源はその曲線上にあると推定される。受信した位置が 3 点以上あれば、双曲線は 3 本以上描けることになり、全ての曲線が交わる 1 点を求めることができる。

図 8 と図 9 に、実際の貫通穴の位置と、計算で算出した貫通穴の位置を比較した図を示す。宇宙研の実験も千葉工大の実験も 1cm~数 cm の精度で一致していることがわかる。

これらの結果でいえることは、ピックアップセンサーで検出している振動の信号は、貫通穴から到達しているもので、フィルム中を一定の速度で伝播しているということである。

### 4.2. 信号強度

前項では、ピックアップセンサーの信号の時刻差から、微小球の衝突貫通位置求められることが実験によってわかったことを示した。一方、信号強度からはフィルムの貫通エネルギーに関係する値が得られるだろうと期待していたが、明確な関係は見つけることはできなかった。

一つの解釈として、ピックアップセンサーに用いた圧電素子が角型のため、応力波の到達方向によって受信感度に変化した可能性が考えられる。これについては、丸形のセンサーを使って次の実験で検証する予定である。

### 4.3. 衝突から電気信号までの過程

ピックアップセンサーで発生する電荷を  $Q$  とすると、

$$Q = f \cdot g \cdot h \cdot i \cdot j$$

ただし、

- $f$ : 膜を貫通するときのエネルギー
- $g$ :  $f$  の内、応力波になるエネルギーの割合
- $h$ : 膜の面内を伝播する過程(距離と共に減衰?)
- $i$ : 応力波が PZT センサーを揺らす過程
- $j$ : 圧電定数(機械電気変換係数)

となっていると考えている。今後、それぞれの伝達関数について調べたい。

## 5. まとめ

- 小型の圧電素子を貼りつけたポリイミドフィルム (厚さ約 20  $\mu$  m, 圧電性無し) に微粒子 (0.3 ~ 3mm  $\phi$ ) を衝突銃を使って衝突貫通させる (4 ~ 5km/s) 実験を実施した。
- 衝突によって発生した音波 (衝突励起振動波) が、薄いフィルムの面内方向に伝播し、圧電素子を振動させたことを実験に確認した。
- 複数の圧電素子の信号から、衝突貫通した位置の同定ができることも確認した。
- この性質を利用すると、人工衛星の表面を覆う



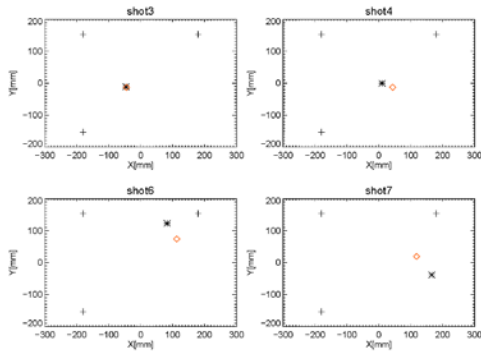


図 9 貫通穴の位置同定(宇宙研実験結果による) +はピックアップセンサの位置, \*は計算で算出した位置, ◇は実際の貫通穴の位置

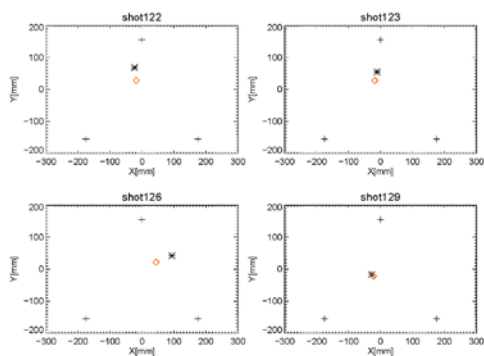


図 8 貫通穴の位置同定(千葉工大実験結果による) +はピックアップセンサの位置, \*は計算で算出した位置, ◇は実際の貫通穴の位置

サーマルインシュレータ(ポリイミドフィルムを重ねたもの)の表面に圧電素子を貼りつけることで、衛星システムへの影響を最小限にする大面積ダストセンサの実現につながると期待している。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 25400302 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- 1) Naumann, R. J. "Pegasus satellite measurements of meteoroid penetration (February 16 - July 20, 1965)", NASA-TM-X-1192
- 2) Maki Nakamura, Yukihito Kitazawa, Haruhisa Matsumoto, Osamu Okudaira, Toshiya Hanada, Akira Sakurai, Kunihiko Funakoshi, Tetsuo Yasaka, Sunao Hasegawa, Masanori Kobayashi: "Development of In-Situ Micro-Debris Measurement System", *Advances in Space Research*, Volume 56, Issue 3, 1 August 2015, Pages 436-448 (2015)
- 3) 松本晴久, 奥平修, 北澤幸人, 上野遥, 長谷川直, 小林正規: 宇宙機搭載用デブリセンサ衝突試験結果,