

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

Large sensitive area dust sensor utilizing polyimide film and piezoelectric element

Masanori Kobayashi¹, Osamu Okudaira¹, Kosuke Kurosawa¹, Takaya Okamoto¹,
Haruhisa Matsumoto², Sunao Hasegawa²

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology,

²The Japan Aerospace Exploration Agency

研究の背景

本研究では、火星のダストリングを直接観測することを目的として、大面積のダストセンサーを開発する。先行研究の理論的予測では、火星衛星のフォボスとダイモスの軌道上に10~20 μm のダストを主な成分としたダストリングが存在すると考えられている¹⁾。未発見のダストリングを検出するために大きなリソースは割けないので、低リソース要求の大面積ダストセンサーが必要である。

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 μm 以上の大きなサイズのダストをリアルタイムで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²⁾など、最近では、ALADDIN³⁾やSDM⁴⁾など大面積のダストセンサーはわずかな例しかない。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検出面積を大きくする必要がある。火星ダストリングの有無を確かめるには、バックグラウンドとして存在する惑星間ダストに比べて、フォボス/ダイモスの軌道上のダストフラックスの増加の有無を調べる必要がある。そのためには一つの目安として10 μm 以上の惑星間ダストを1日当たり一個以上観測することができる1 m^2 程度の検出面積が必要だと考えている。

本研究では、ポリイミドフィルムに圧電素子を貼りつけて、ダストが超高速でフィルムに衝突して発

生する固体中の弾性波をその圧電素子で読み取る方法で大面積ダストセンサーを実現しようとしている。ポリイミドフィルムは宇宙機の熱制御に使われるサーマルインシュレータ (MLI) の材料である。MLI最外層に圧電素子を貼りつけて、そこに衝突するダストによって生じる弾性波を検出することでダストを検出するセンサーを構成できる可能性がある。大面積を確保しても宇宙機の熱設計などに与える影響は小さくすることができるのではないかと考えている。ここでは、その実現に向けた実験とその予備解析結果を報告する。

前年度までの研究のまとめ

前年度までに、宇宙科学研究所と千葉工業大学の2段階式衝突銃を使って実験を行った⁵⁾。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 μm , 圧電性無し)に微粒子(0.8~3 $\text{mm}\phi$)を衝突銃を使って衝突貫通させ4~5 km/s 、衝突によって発生した音波(弾性波)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的に確認した。

さらに、複数の圧電素子の信号が圧電素子に到達する時刻差から、音源同定の手法を用いて衝突貫通した位置の同定ができることも確認した⁵⁾。これらの性質を利用すると、宇宙機システムに対する重量などのリソース要求を小さくできる可能性がある。人工衛星の表面を覆う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たものをセンサーとすることで、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ーの実現につながると期待している。

本研究の目標

火星ダストリングの直接検出をするための装置とすることを念頭に、ダストがポリイミドフィルムに衝突した時に励起される弾性波の検出によるダストセンサーの実用化に向けた取り組みを行う。

- ▶ ダストサイズの最小検出限界 (そもそも 10 μ m ダストは検出できるか)
- ▶ センサー性能の最適化のための基礎データの取得 (フィルム厚, 衝突角度など)
- ▶ 信号を読み出すアンプへの要求仕様を決めるためのデータ (信号周波数帯域, ダイナミックレンジなど) の取得

実験

実験概要

今回, 2017年1月25日~27日の日程で, 宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を利用して, フィルムセンサーをターゲットとしてガラス微粒子を衝突させる実験を行った。ショットの実績を表1に示す。

衝突体は, 球状の soda-lime glass (100 μ m ϕ , 200 μ m ϕ) を単発サボ撃ちにして, 速度は約 4km/s とした。ターゲットは, ポリイミドフィルムの厚さとアルミ蒸着の有無の違いで 3種類 (A:12.5 μ m, B: A:12.5 μ m+Al 蒸着, C:25 μ m) のポリイミドフィルムを用意した。フィルムに貼り付けた圧電素子は 10mm ϕ ×2mm のものである。

表 1. 2 段式軽ガス銃によるショット実績

Shot#	月日	プロジェクトイル		ターゲット	
		サイズ [μ m ϕ]	速度 [km/s]	フィルム 種類	貫通孔
1	2月25	200	4.31	A, 0deg	丸穴あり
2		200	4.296	A, 0deg	丸穴見つからない
3	2月26	200	4.237	B, 0deg	丸穴あり
4		200	4.009	C, 0deg	丸穴あり
5		200	4.156	C, 45deg	楕円穴あり
6		200	4.196	A, 上下反転, 0deg	丸穴見つからない

7		100	4.258	C, 上下反転, 0deg	丸穴あり
8	2月27	200	4.063	C, 上下反転, 67.5deg	楕円穴あり
9		100	4.21	C, 上下反転, 0deg	丸穴見つからない
10		200	3.735	TOF(上流 A+ 下流 B)	A で丸穴あり
11		blank	4.006	B, 上下反転, 0deg	N/A

実験セットアップ

図1に実験セットアップの概要を示す。1枚のポリイミドフィルムには PZT センサーを 8 個貼りつけた。それぞれの PZT センサーには同軸ケーブルをはんだ付けして, アンプは使わず, 直接オシロスコープ 2 台に入力して 1M Ω で終端した。PZT センサーからの信号ケーブルは, チャンバーのフィードスルーを経てオシロスコープまで全チャンネル 6m にそろえた。ケーブルも含めた静電容量は約 1nF であった。サンプリングレートを 500MSPS で記録した。

衝突のタイミングを記録するために, 1本の光電子増倍管 (PMT), そして 2本のアマチュア無線用アンテナをターゲットの上流と下流に設置して信号を記録した。これらは, 衝突体であるガラス微粒子が超高速でポリイミドフィルムに衝突・貫通した時に発生する衝突電離ガスによる発光や電磁波を検出するために使い, 衝突の瞬間を記録した。

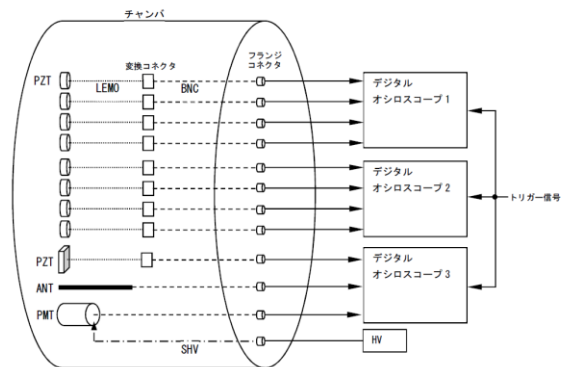


図 1. 宇宙研 2 段式軽ガス銃の実験セットアップ

実験結果・データ解析

実際にポリイミドフィルムにガラス微粒子が衝突した時に発生した弾性波を PZT センサーで測定した例を図2に示す。この図の上段は, 元の信号波形で, 中段は FFT スペクトルを示し, 下段は生の波形信号

を 200kHz (200kHz±50kHz) のバンドパスフィルタ (FIR デジタルフィルタ) を適用した波形である。

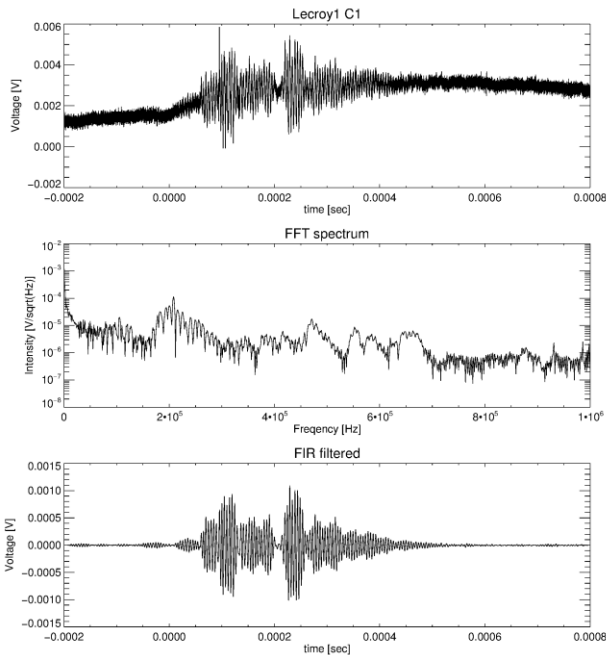


図 2. Shot#4 のポリイミドフィルムに貼り付けた PZT センサーの信号

衝突位置で発生したフィルム中の弾性波が各ピックアップセンサーに到達するタイミングは、この FIR フィルタを適用した波形に対して、信号強度が変化する前をバックグラウンドとして、標準偏差 σ の 3 倍以上に変化した時のタイミングを到達時刻とした。衝突貫通した貫通孔が判明したショットについては、その位置から各 PZT センサーまでの距離と到達時刻の関係を調べると、ポリイミドフィルム中の弾性波の音速は約 1.8km/s ということがわかった。

一方、信号強度は最大振幅の電圧値とした。Shot#4 を例にとって、衝突位置と各 PZT センサーまでの距離の逆数と信号強度の関係を図 3 に示す。両者は線形の関係があるようなので、信号はフィルムを伝播しながら距離に反比例して強度が弱まることがわかった。このプロットの傾きは音波発生源 (貫通孔) から単位距離 (1mm) 進んだ時の振幅に相当し、信号の減衰を表す値である。実際にダストセンサーを設計する時にはこの減衰係数を基に PZT センサーを貼り付ける位置などを決めることができる。

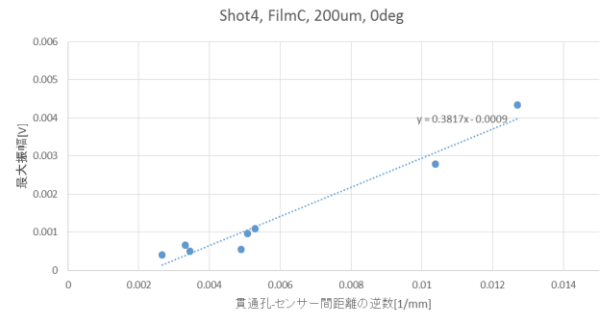


図 3. 衝突位置と各 PZT センサーまでの距離の逆数と信号強度の関係

図 4 は異なるポリイミドフィルムでの衝突位置と各 PZT センサーまでの距離の逆数と信号強度の関係を示している。前述のように、これらの関係の傾きはフィルム中の弾性波の減衰率に相当する。つまり、減衰率が一番小さいのはフィルム C (25 μ m) で、減衰が一番大きいのがフィルム A (12.5 μ m+Al 蒸着) であった。これらの結果からいえるのは、Al 蒸着があることで減衰が大きくなること、そして Al 蒸着が無いものでは厚みの違いがあっても減衰率は大きく変わらないということである。

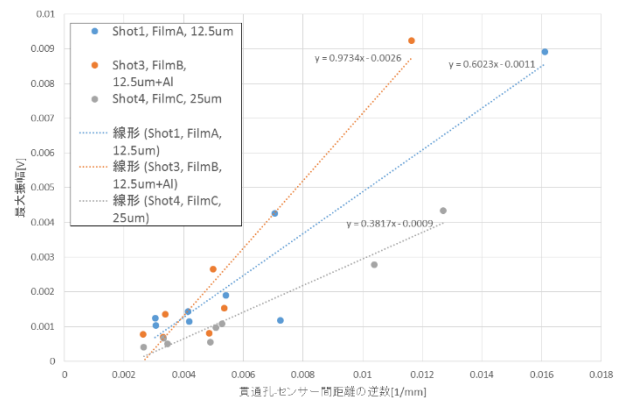


図 4. フィルムの種類による信号強度の違い

次に、弾サイズの違いによる信号強度の違いを調べるために Shot#4 (200 μ m ϕ) と Shot#7 (100 μ m ϕ) を比較した。図 5 にその結果を示す。これで見ると、100 μ m ϕ と 200 μ m ϕ では大きな違いは無い。両者の衝突速度はほぼ同じか Shot#7 の方が若干大きい。衝突時にフィルムに発生する圧力は速度に依存する。図 5 では Shot#7 の信号の方が若干大きく見えるのは速度の差が影響しているのかもしれないが、衝突体のサイズの依存性はあまり大きくないともいえる。発生する信号強度の、衝突体サイズ依存性と衝突速

度依存性を今後調べる必要がある。

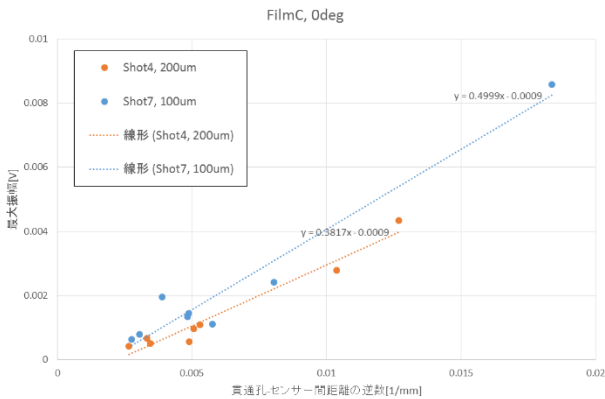


図 5. 衝突体のサイズの違いによる信号強度の差

図 6 に、同じフィルム C を使って、同じサイズの衝突体、大体同じ衝突速度での信号強度の衝突角度依存性 (0° , 45° , 67.5°) を示した。衝突角度が大きくなるにしたがって信号強度は大きくなっているように見えるが、一方で 67.5° のショットではフィルム中の減衰率が非常に大きくなっている。また、 67.5° のショットでは、貫通孔からの距離がほぼ同じ距離の PZT センサーでも受信した信号強度が大きくばらついている様子も見とれる。これは、貫通孔で発生した弾性波が伝播する方向に対して強弱を持っている可能性があるが、今後の検討が必要である。

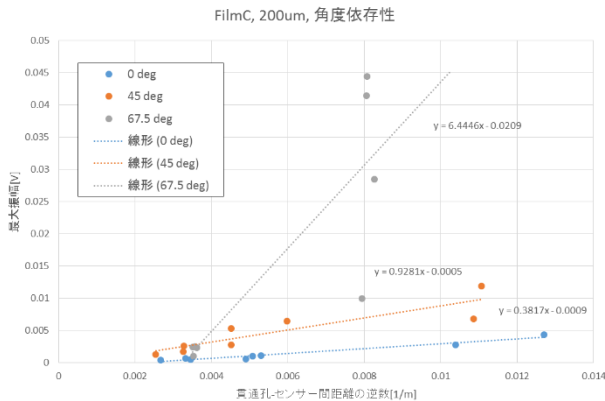


図 6. 信号強度の衝突角度依存性

まとめ・今後の展望

本実験では、 $100\mu\text{m}\phi$, $200\mu\text{m}\phi$ の衝突体に対するフィルム中の弾性波の信号強度について調べた。前回実験⁵⁾で得られた結果と比べて、 $1\text{mm}\phi$ の衝突体による信号強度に対して大体 2 ケタ小さいが検出できた。貫通孔-PZT センサー間が 300mm 程度でも、アンプ無しで信号を検出できたので、さらに小さい

衝突体に対してもアンプを使えば信号を検出することができると考えている。

今回の実験の成果をまとめると次のようになる。

- 貫通孔から弾性波がフィルム中を伝播する時、信号強度の減衰はその距離の逆数と線形の関係がある。
- フィルムは厚いと減衰率が小さい。また、Al 蒸着をすると減衰率が大きくなる。
- $100\mu\text{m}\phi$, $200\mu\text{m}\phi$ の衝突体を使った実験を行ったが、両者に信号強度の明確な差はなかった。信号強度の読み取りは信号振幅の最大値としたか、別の指標についても検討する必要があるかもしれない。
- 発生信号強度について、衝突体の速度およびサイズ依存性を調べる必要がある。

ここでは詳しく記していないが、銃からの加速ガスによる信号 (ノイズ) が、衝突体による信号サイズに比べて 3 分の 1 程度のレベルで発生している。このバックグラウンドの影響を取り除く必要があるかもしれない。

謝辞

本実験の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部スペースプラズマ共同研究設備を利用しました。ここに記して謝意を表します。また、微小ガラス粒子のサゴ撃ちについてご指導頂いた JAXA の平井隆之博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) Krivov and Hamilton, “Martian Dust Belts: Waiting for Discovery”, ICARUS 128, 335–353 (1997).
- 2) Naumann, R. J. “Pegasus satellite measurements of meteoroid penetration (February 16 - July 20, 1965)”, NASA-TM-X-1192.
- 3) Takayuki Hirai, Michael J. Cole, Masayuki Fujii, Sunao Hasegawa, Takeo Iwai, Masanori Kobayashi, Ralf Srama, Hajime Yano, “Microparticle impact calibration of the

Arrayed Large-Area Dust Detectors in INTERplanetary space (ALADDIN) onboard the solar power sail demonstrator IKAROS”, *Advances in Space Research*, Vol.100, Pages 87–97, 2014.

- 4) Maki Nakamura, Yukihiro Kitazawa, Haruhisa Matsumoto, Osamu Okudaira, Toshiya Hanada, Akira Sakurai, Kunihiro 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).
- 5) 小林正規, 奥平修, 黒澤耕介, 岡本尚也, 松本晴久, 長谷川直, 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, 平成 27 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム 講演集, SHI-NO: SA6000055045, (2016)

