

ポリイミド膜と圧電素子を利用した大面積ダストセンサーの開発： 衝突角度依存性の研究

小林正規¹, 奥平修¹, 石丸亮¹, 黒澤耕介¹, 平井隆之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 a polyimide film and piezoelectric elements

Masanori Kobayashi¹, Osamu Okudaira¹, Ryo Ishimaru¹, Kosuke Kurosawa¹, Takayuki Hirai¹,
Haruhisa Matsumoto², Sunao Hasegawa²

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology,

²The Japan Aerospace Exploration Agency

1. 研究の背景

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¹⁾, ALADDIN²⁾や SDM³⁾など大面積のダストセンサーはわずかな例しかない。

これ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、ポリイミド膜に小型の圧電素子を貼り付けたものに微粒子を衝突させる実験を行ってきた(図1)。微粒子の衝突によってポリイミド膜中に波動が励起され、圧電素子の位置まで伝播してきた波動(アコースティックエミッション, AE)を計測することで微粒子の衝突の検出とその微粒子の

衝突運動量を求めることができることがわかっていて、ダストセンサーとして機能することがわかっている⁴⁾。この仕組みを使って、火星のダストリングを直接観測することを目的とした軽量で大きな有感面積(1m^2)を持つダストセンサーが火星衛星探査機MMXに搭載されることが決まっている⁴⁾。

2. 本年度の目標

本研究では、ポリイミド膜に小型の圧電素子を貼り付けたものを大きな有感面積($\sim 1\text{m}^2$)のダストセンサーとしてさらに高機能化することを目的としている。ここでは、本年度いくつかの実験を行ったうち、衝突角度の測定ができないか調べるために膜中に発生するAE波の衝突角度依存性を測定する実験につ

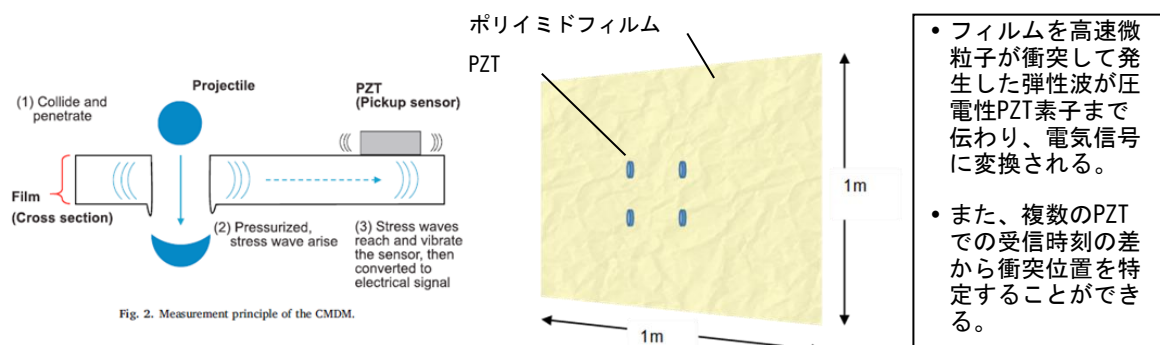


図1. 衝突弾性波型ダストセンサーの原理図(左)とセンサー概念図(右)(Kobayashi et al. (2018) PSS から抜粋および加筆)

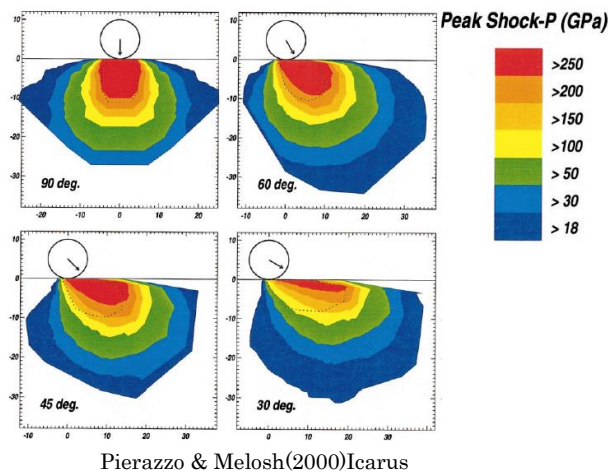


図2. 本研究で実証しようとしている衝突角度を測定する原理

いて紹介する. 図2に示すように, 衝突体が斜めに衝突する時にターゲット側に発生する圧力分布は異方性を持っていることがクレータ生成の研究でわかっている. この性質を利用すると, フィルム上に PZT を多数配置して弾性波の強弱を調べれば衝突角度が分かるはずである. 実はこれまでも MMX 用のセンサー開発のための実験で斜め衝突時に異方性を確認しているが, MMX 用のダストセンサーでは圧電素子の数が 4 つしかないために詳細は確認できていない. ここで紹介する実験ではポリイミド膜に貼り付ける圧電素子の数を増やして, 衝突によって発生する AE 波の異方性を調べた.

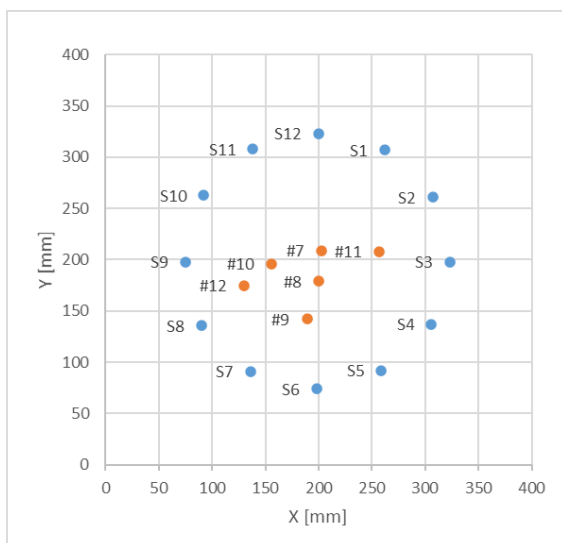
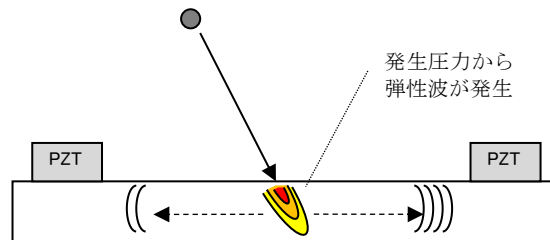


図3. 実験につかったダストセンサー (40cm × 40cm) の上の PZT の位置 (青、S1~S12) および衝突位置 (オレンジ).



斜め衝突の場合, 発生する弾性波に異方性が生まれる. PZT をより多く配置することでこの異方性を詳細に調べれば衝突角度が分かる.

(左) Pierazzo & Melosh(2000)から抜粋の斜め衝突による圧力分布の図
(右)斜め衝突時のフィルム内での弾性波発生の様子

3. 実験

3.1. 実験のセットアップ

実験につかったダストセンサーは, 宇部興産のユーピレックス (UPILEX, 25 μ m 厚) を 40cm × 40cm に切り出したものに本多電子製 PZT 素子(ソフト材, ϕ 10mm × 2mm) 12 個を時計の時字の位置にエポキシ系接着剤で貼り付けたものを使った. 図3にポリイミド膜に貼り付けた PZT の位置と後述の衝突位置を示す. それぞれの PZT に同軸ケーブルをはんだ付けして, 衝突銃のチャンバーのフィードスルーから信号を引き出してオシロスコープで読み出し・記録した. 信号の記録に使ったオシロスコープは LeCroy の 12bit デジタルオシロスコープで, 4ch のものを 3 台用意して 12 チャンネルの信号を記録した. 衝突銃からのトリガー信号を衝突のタイミングに遅らせた信号を信号記録のトリガーに使った. ダストセンサーに衝突させる衝突体には, サボを使った単発撃ちとしては非常に高い歩留まりであるこ

ショット番号 通し番号	衝突角度[°]	備考
#7	0	
#8	45	オシロ設定ミス
#9	30	
#10	0	
#11	0	
#12	45	
#13	30	ミスショット

表1. 本実験のショットの概要.

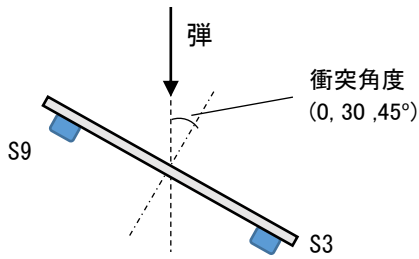


図 4. 衝突角度のセットアップ(上からの図).

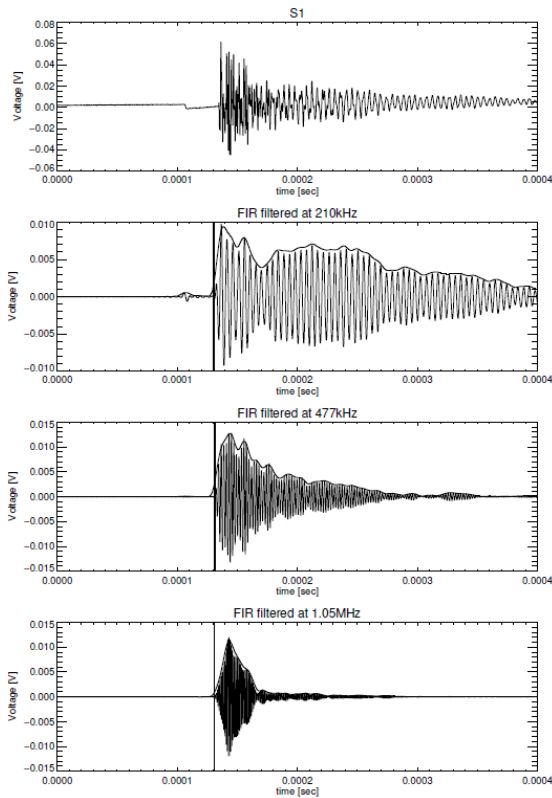


図 5. Shot#7 の S1 で受信した AE 波の波形. 一番上から元の波形, $270 \pm 50\text{kHz}$, $470 \pm 50\text{kHz}$ そして 1050kHz でバンドパスフィルタを適用した波形を示す.

とから $\phi 0.5\text{mm}$ の SUS の微粒子を使った. また, 衝突速度も安定した単発撃ちが期待できる 5km/s とした. 衝突体が $\phi 0.5\text{mm}$ もあり PZT 素子からの信号は十分大きいと予想されたため, プリアンプは使わず, オシロスコープでの入力は $1\text{M}\Omega$ で終端した.

3.2. 実験内容

ショットは全部で 7 回行った. 表 1 にショットの内容を示し, 衝突位置は図 3 に示す. 斜め衝突について調べるために比較の対象として垂直衝突のデータを念のため 3 回, 斜め衝突は 30° 衝突を 2 ショッ

ト, 45° 衝突を 2 ショット行った. このうち, ショット#12 はミスショットのためにデータを得ることができなかった. ショット#8 についてショット自体は成功したものの, オシロスコープのサンプリングレートの設定ミスのため他のショットと同様に扱うことができないため, ここでは解析に含めない.

前項で述べたように, プリアンプを使用していない. PZT の信号を物理量に換算するために, オシロスコープに接続しているケーブルおよび PZT 素子の静電容量をそれぞれの信号系統について測定した.

図 4 に斜め衝突のショットの時のセンサーを上から見た図を示す.

3.3. 実験結果

図 5 に Shot#7 の S1 の信号を測定結果の例として示す. 一番上が元の波形で, 2 番目に $210 \pm 50\text{kHz}$ (径方向の軸対称振動), 3 番目に $470 \pm 50\text{kHz}$ (おそらく電極形状に関する周波数), 一番下の図が $1050 \pm 50\text{kHz}$ (厚み方向の振動) でバンドパスフィルタを適用した後の波形である.

それぞれの周波数成分の波形の図で, 縦軸に平行な実線は波が立ち上がる瞬間(常在している信号(ノイズ)に比べて振幅が大きくなり始める最初のゼロクロスタイミング)の時刻を示している. すべてのショット(斜め衝突を含む)および PZT で周波数による到達時刻の変化はなく, 速度の周波数依存性はなく約 2.95km/s となっている. これは板波(ラム波)と呼ばれるガイド波を伝わる S モードの波動であることと矛盾しない.

また, それぞれの周波数成分の波形について包絡線を実線にて示している. 立ち上がりのタイミングは同じであるが, ピークになってからの継続時間を比べると, 210kHz の波形は非常に長くなっている. これは, 衝突によって発生した AE 波自体が長い継続時間を持っているとか PZT 素子自体の減衰時定数のためなどではなく, 衝突位置から波紋状に広がる AE 波が S1 を通過してフィルムの端で反射して再度 S1 を通過しているためである. 図 5 では S1 に複数

の反射波が短時間のうちに到達しているようすがわかる。一方、470kHz と 1050kHz の成分については継続時間が短いが高周波数が高いと物質中の減衰が大きいと考えられる。図3のような PZT の配置と衝突位置では PZT で受信した AE 波の最初のピークが衝突によって発生してその PZT に直接到達した AE 波を示している。

図5に各 PZT で受信した AE 波の最初のピーク電圧値を電荷量にして衝突位置からの距離を 100mm に規格化した値を衝突角度ごとに示す。上の図では垂直衝突(Shot#7, Shot#10, Shot#11)の平均値を示している。特に S6 と S7 など、ばらつきはあるものの概ね 2 割以内に収まっている。ばらつきはシステムティックであるようなので、PZT の貼り付けに関係している可能性がある。

Shot#9(衝突角度は 30°)では S9 が一番大きく、S3 の方向に伸びるような信号の分布になっている。弾は S9 から S3 の方に抜けているので(図4参照)、S3 が最も大きいように思っていたがそうではなかった。もっと角度が大きい Shot#12(衝突角度は 45°)ではやはり S9 が大きい Shot#9 のような分布ではない。原因は不明だが、同じフィルムにショットを重ねているので銃デブリなどで穴が多く空いたことも関係している可能性がある。

4. まとめ

ポリイミド膜と圧電素子を利用した大面積ダストセンサーの高機能化のために微粒子衝突の角度依存性を調べた。斜め衝突の時の信号強度の異方性はあったが明確な角度依存性は確認できなかった。今後測定精度を高めてより詳細に調べたい。また AE 波信号の継続時間など信号強度以外の異方性がないか調べるための実験コンフィグレーションを工夫していく予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、「宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所超高速衝突実験共同利用施設」を利用した。本研究は JSPS 科研費 JP 19K03889 の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Naumann, R. J., NASA-TM-X-1192.
- 2) Takayuki Hirai et al., ASR 100, 87-97 (2014).
- 3) Nakamura et al., ASR, 56, 3, 436-448 (2015).
- 4) Kobayashi et al., PSS 156, 41-46 (2018).

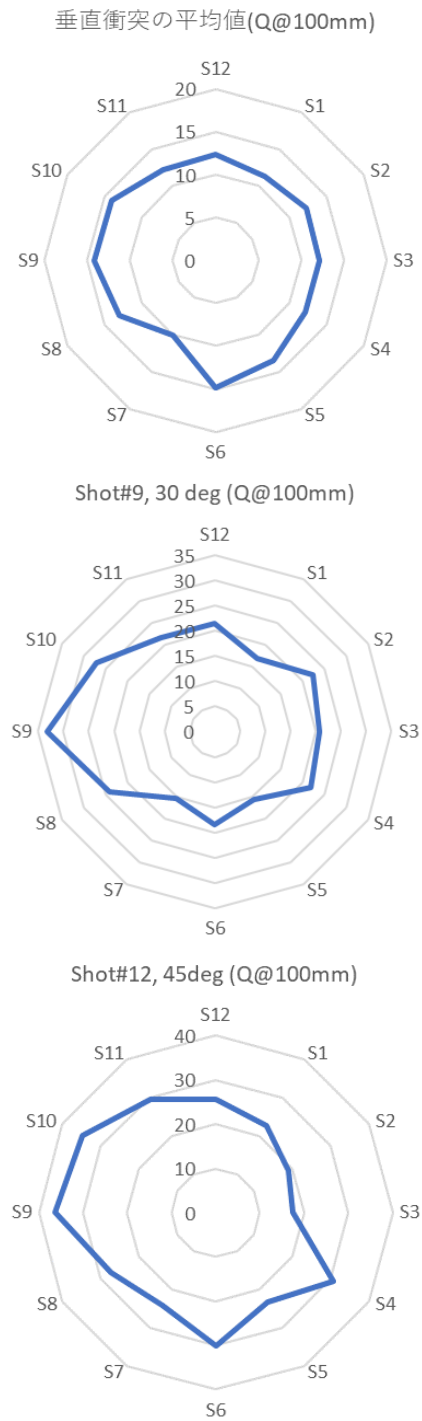


図6. 各 PZT で受信した AE 波の最初のピーク電圧値を電荷量にして衝突位置からの距離を 100mm に規格化した値を衝突角度ごとに示す。