

ポリイミド膜と圧電性 PZT を利用した衝突弾性波型ダストセンサー： 5 年間の研究のまとめ

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

Impact acoustic emission dust sensor utilizing a polyimide film and piezoelectric elements: A Summary of Five Years of Research

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. はじめに

それまでに実用化されているダストセンサーはサイズが $1\mu\text{m}$ あるいはそれより小さいものを観測対象としているものがほとんどで、 $10\mu\text{m}$ 以上のダストの直接観測に必要な大面積 ($>1\text{m}^2$) を実現した宇宙ミッションは、アポロ計画前のペガサスミッション¹⁾のみである。しかしながら、そのような大きな有感面積を実現するためには搭載する宇宙機に対するリソース要求（電力、重量など）が膨大となる。

2015 年頃、宇宙科学研究所と千葉工業大学の 2 段式衝突銃を使って、ポリイミドフィルム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のではないかと考えた。この測定原理を利用すれば、特殊な材料を使うことなく宇宙機を覆っている MLI の最外層のフィルムに圧電素子を貼り付けるだけでセンサーを実現できることになる。ただし、2015 年の時点では、フィルムに衝突体が衝突すると弾性波が発生して貼り付けた圧電素子によって検出可能である、ということだけが分かっていただけで、ダストセンサーとして実用化するためには、ダストセンサーとしての機能を果たすかどうか、また宇宙環境での耐環境性を考慮した場合でも搭載する宇宙機のリソースにインパクトは十分小さいか、調べる必要があった。

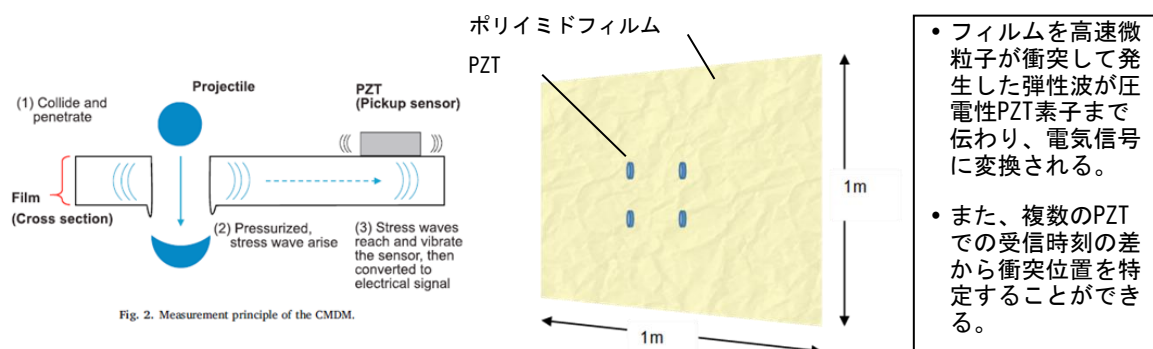


図 1 衝突弾性波型ダストセンサーの原理図（左）とセンサー概念図（右）(Kobayashi et al.(2018)PSS から抜粋および加筆)

本研究では、二段式軽ガス銃や静電加速器を使ってダストセンサーとしての性能検証を目標として行った5年間の研究、特に感度測定についてまとめる。

2. 測定原理：薄いフィルム中の衝突弾性波

薄いポリイミドフィルム（25 μm 厚）に圧電素子を貼り付けて、微粒子を衝突させたときに、衝突点から圧電素子までの距離だけ遅延した信号が得られる。これは、フィルム中を伝播するラム波（Lamb wave）と呼ばれるガイド波の一種であり、25 μm 厚のポリイミドフィルム中の弾性波の伝播速度の分散関係を調べたところ、伝播モードは周波数に依存しない速度を持つS0モードのみであることが分かった。つまり、速度分散がなく波動伝播速度は単一の値（実験に使った宇部興産のユープレックス®では約2.9km/s）である。この性質は、非常に重要で信号受信のタイミングから波動発信源（衝突位置）を同定できる。波動は物質中を伝播することで減衰するが、波動発信源を同定できれば、波動受信位置までの距離が分かる。そしてその距離で規格化することで波動発生の原因である微粒子の衝突撃力を正しく推定することができる。もし、複数の伝播モードが存在して異なる伝播速度の弾性波が衝突によって発生した場合、元の衝突撃力を推定するのは極めて困難になるだろう。

フィルム中の波動伝播での波動の振幅 A の減衰は、波動発信源からの距離を r とした場合、

$$A(r) = \frac{A_0 e^{-\alpha r}}{\sqrt{r}} \quad (1)$$

ただし、 A_0 は係数、 α は物質の粘性による減衰係数

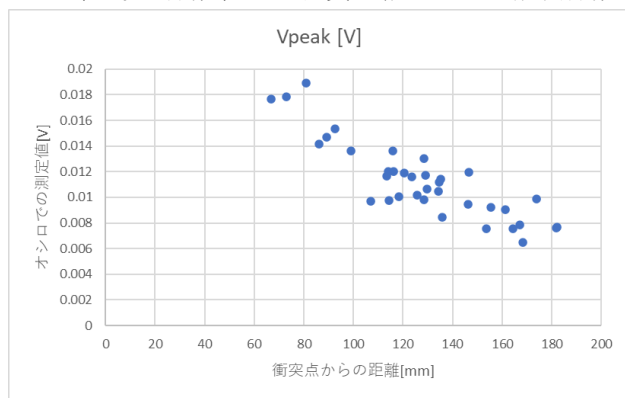


図2 衝突点からの距離と検出された信号振幅の関係

である。ダストセンサーとしての感度測定を行う場合、この減衰係数を求めることが必須である。

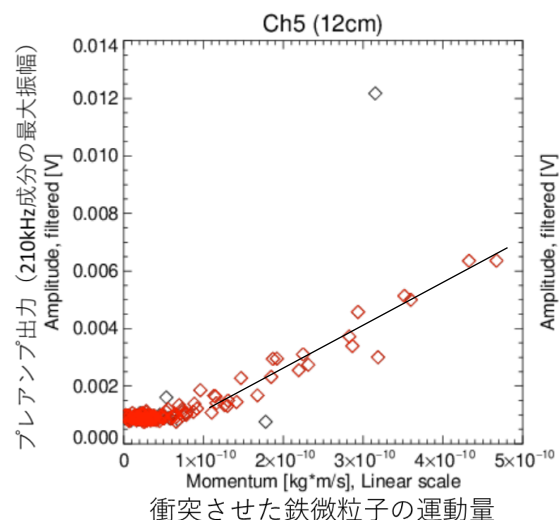
3. フィルム中を伝播する波動の減衰

数式(1)の減衰係数 α は実験で求める必要がある。この実験は、JAXA の二段式軽ガス銃を使って行った。エラー! 参照元が見つかりません。には、2019年に行った、ユープレックス®25 μm 厚のフィルムに対して垂直に球形SUS、 ϕ 500 μm を単発撃ち（いずれも衝突速度は約5kmで弾は貫通している）した結果を示している。縦軸は、試作したプレアンプ（電荷有感型増幅器）で読み出した信号波形を210kHzの周波数成分についてバンドパスしてその振幅を求めた。210kHzというのはフィルムに貼り付けた圧電素子（PZT）が円盤状で、径方向の共振周波数の値に相当する。空気結合であるため圧電素子自体の共振周波数で強い感度が得られる。

エラー! 参照元が見つかりません。のデータについて、エラー! 参照元が見つかりません。数式(1)を回帰曲線として最小二乗法で減衰係数 α を求めたところ、 $\alpha=0.003423$ であった。

4. ダストセンサーとしての感度測定

このダストセンサーは、衝突弾性波を検出するため、信号の大きさと衝突した微粒子の衝突撃力（概ね微粒子が衝突する直前の運動量に比例）が比例する



と考えられる。ここではセンサーとしての感度 S は、

図3 静電加速器による実験結果の例

そのセンサーに衝突させる微粒子の運動量に対する信号出力の大きさとして定義する。

このフィルムセンサーの感度を決めるのは次の要素である。

- フィルムの材料：衝突圧力発生、波動減衰率
- 圧電素子：電気機械結合係数、形状、静電容量
- 接着剤：波動伝達率
- プレアンプ：ゲイン、帯域

波動の減衰率については、前項で示した通り実験的に独立的に求めることができる。また、プレアンプのゲイン、帯域、圧電素子の変換係数などは個別に測定することができる。しかしながら、衝突によるフィルム中での圧力発生、フィルムから接着層を通じて圧電素子に波動が伝達する効率は個々の特性値を測定するのは困難であるため、質量および速度が既知な微粒子を衝突させて、その応答信号を測定することで実験的に感度を決定する。

感度測定のためには、衝突させる微粒子は $25\mu\text{m}$ 厚のポリイミドフィルム（ユーピレックス®）を貫通しない程度のサイズと速度のものである必要がある。貫通した場合に衝突体からターゲットへの移行運動量は Wallis の式²⁾のようなモデルによって求める必要があり、不確定性が大きいためである。

ここでの感度測定は、静電加速器を使って微粒子を加速してターゲットであるダストセンサーに衝突させる実験によって行った。実験は、2018年2月にコロラド大学大気・宇宙物理学研究所の静電加速器を（3MV）を利用して行った。衝突体は、鉄の粉粒（ $<1\mu\text{m}$ ）で、高電圧を印加した加速管で加速して、フィルムセンサーをターゲットとして衝突させた。衝突速度は約 $1\sim 10\text{km/s}$ で、 $25\mu\text{m}$ 厚のポリイミドフィルムは貫通しない。

エラー！ 参照元が見つかりません。は、ユーピレックス® $25\mu\text{m}$ 厚のフィルムに鉄の微粒子を衝突させた実験の結果の一例である。黒いプロットは、加速器側でサイズや速度の測定がうまくいっていないイベントであり、赤いプロットのみが実験結果として有効である。黒い実線はプレアンプのノイズを上回る

信号レベルのものについて衝突させた微粒子の運動量とプレアンプ出力の関係を線形近似した回帰直線であり、感度 S はこの回帰直線の傾きに等しい。感度 S は衝突位置から検出する位置までの距離に依存する。つまり、波動を受信する圧電素子の近くであればより小さな衝突撃力も検出可能であるが、遠くなれば検出限界の信号レベルが高くなる。ここで、その距離を 50cm と定義すると、数式(1)と**エラー！ 参照元が見つかりません。**の回帰直線の傾きから $S_{50\text{cm}} = 6.45 \times 10^6 [\text{V}/(\text{kg m/s})]$ となる。 50cm としたのは、 1m^2 のセンサーの中心付近に圧電素子を貼り付けておけば、センサー面上のどこに衝突してもその信号が圧電素子に到達する距離を想定したからである。ここで得られた感度だと、例えば、MMX が火星周回軌道にあるときにダイモス起源の微粒子の衝突力積 $3.4 \times 10^{-8} \text{Ns}$ に対しては十分大きな信号出力（試作したプレアンプで 20mV 以上）があることが分かった。フォボス起源のダストの場合さらに大きなサイズのダスト粒子が予想されているので、MMX 用のダストセンサーとしては十分な感度を持っているといえる。ただし、MMX 用のセンサーの場合、宇宙環境の観点でセンサー材料が変更になっているので、本稿で紹介したような方法で実際の材料で作られたセンサーをつかって感度測定をする必要がある。

4. まとめ

ポリイミドフィルムに圧電素子を貼り付けただけでダストセンサーとして使えるか、性能検証として行った感度測定についてまとめた。これまで5年間の研究の一部を紹介しただけなので、他に得られた知見についても適宜論文などで報告していきたい。

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る。

参考文献

- 1) Naumann, R. J., NASA-TM-X-1192.
- 2) Wallis, M.K.: Hypervelocity dust impulses on

the comet Halley probes, Planetary and Space
Science, 34 (1986) 11, pp.1087-1089

3) Kobayashi et al., PSS 156, 41-46 (2018).