

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

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半径が 15~30 μm 以上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 1m² 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。

これまでの成果

前年度までに、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 (0.8~3mm ϕ) を衝突銃を使って衝突貫通させ 4~5km/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。

今年度の目標

最終的な目的は、火星周回ダストの観測である。火星周回のダストは、 $20\mu\text{m}$ (半径) および 0.5km/s 程度であると予想されているので、そのようなダストが衝突した時の移行運動量 ($3.4 \times 10^{-8} \text{Ns}$) を検出する必要がある。

今年度は、火星周回ダストの観測を念頭に置いた、センサー感度(センサーに対する入力、つまり移行運動量に対するセンサー出力)を測定し、定量的な考察をして、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)の取得を行った。

研究の方法

観測の目標としている、半径が $20\mu\text{m}$ 、衝突速度 0.5km/s の微粒子に対するセンサーの感度を調べるために、そのような微粒子を1個ずつ加速してセンサーに衝突させる実験装置が無いため、

- ① 宇宙研二段式軽ガス銃によるサイズを大きな粒子 ($\geq \phi 200\mu\text{m}$) (衝突運動量は $> 1.7 \times 10^{-6} [\text{Ns}]$ の範囲)
- ② コロラド大学大気・宇宙物理学研究所 (LASP) の静電加速器による微粒子 ($\leq 1\mu\text{m}$) (衝突運動量は $< 10^{-10} [\text{Ns}]$ の範囲)

を利用した実験を行い、それぞれの実験の結果を内挿して感度を求めることにした。

センサーの感度は、移行運動量 Pt に対して $Q_{D=50\text{cm}}$ (PZT センサーから 50cm 離れた位置で微粒子が衝突したときの電荷出力) で評価する。これは、最終目標である火星周回ダスト観測のためのセンサーの有感面積を $1\text{m} \times 1\text{m}$ として想定していて、衝突位置から 50cm 離れた位置で十分な信号が得られれば、フィルムのどこに衝突した場合でも、移行運動量を発生させる微粒子の衝突を検出できると考えるためである。

実験

実験概要

今回、2017年11月25~27日および2018年3月7~9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の微粒子を衝突させる実験を行った。

衝突体は、球状の soda-lime glass ($\phi 200 \sim 1000\mu\text{m}$) を単発サボ撃ちにして、速度は約 5km/s とした。ターゲットは、宇宙興産の Upilex というポリイミド素材のフィルムで、 $25\mu\text{m}$ 厚のもとを使用した。フィルムに貼り付けた圧電素子は $\phi 10\text{mm} \times 2\text{mm}$ のものである。

一方、静電加速器による実験は、2018年2月14~21日にコロラド大学大気・宇宙物理研究所 (LASP) の IMPACT グループが所有する静電加速器 (3MV) を利用した。数 μm 未満の鉄の微粒子を $> 1\text{km/s}$ に加速して試作したセンサーに衝突させてピックアップセンサーからの応答信号の波形をデータとして取得した。本報告では、データ解析が済んでいる2017年11月の宇宙研衝突銃の結果を使って解析を行い、プレリミナリな検討結果として示す。表1に本報告で使用するデータの実験の実績を示す。

表 1. 2 段式軽ガス銃によるショット実績

Shot #	月日	サイズ [μm]	材質	速度 [km/s]	フィルム種類	成否
1	2/20	200	ケイ酸ガラス	5.16	Upilex, 25 μm	失敗
2		1000	ケイ酸ガラス	5.22	Upilex, 25 μm	成功
3		800	ケイ酸ガラス	5.22	Upilex, 25 μm	成功
4		550	ケイ酸ガラス	5.26	Upilex, 25 μm	成功
5	2/21	330	ケイ酸ガラス	5.20	Upilex, 25 μm	成功
6		200	ケイ酸ガラス	5.18	Upilex, 25 μm	成功

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個貼り付けた。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 $1M\Omega$ 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 $940pF$ であった。サンプリングレートを $500MSPS$ で記録した。

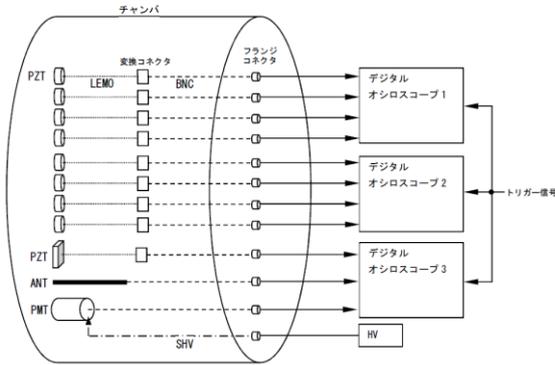


図 1. 宇宙研 2 段式軽ガス銃の実験セットアップ

実験結果

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 $200kHz$ ($200kHz \pm 50kHz$) 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。

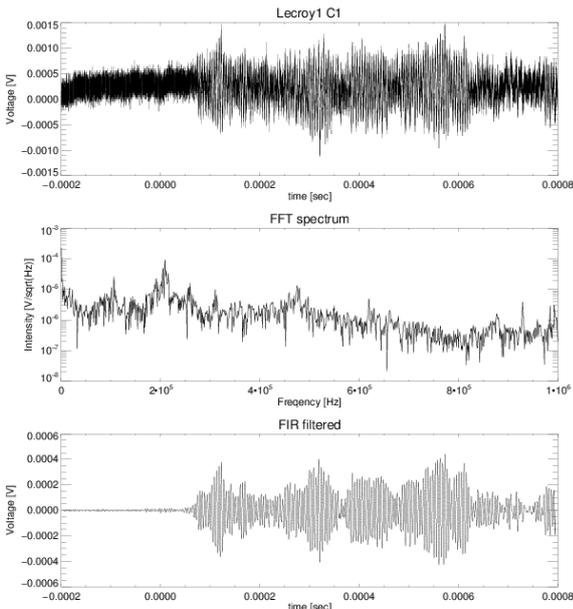


図 2. Shot#6 の Upilex フィルムに貼り付けた PZT センサーの信号

表 2 に、各ショットでの、PZT センサーからの信号波形の最大振幅を示した。 $V_{D=50cm}$ はフィルムに貼り付けた PZT センサー (ch1~ch4) からの出力信号のオシロスコープでの波形の読み値[V] (最大振幅値) から、衝突位置からセンサー位置までの距離でスケールリングして 50 cm の伝播距離に換算した値である (元の信号は、PZT センサーから約 35 cm 離れた位置を貫通して発生した弾性波が伝播してきたものを測定した)。 $Q_{D=50cm}$ は、電圧値に PZT センサーおよび同軸ケーブルの静電容量 $940pF$ を乗じた値である。

表 2 宇宙研衝突銃実験(2017年11月)でのショット実績

Shot#	プロジェクトイル		センサー出力	
	サイズ [μm]	速度 [km/s]	$V_{D=50cm}$ [V]	$Q_{D=50cm}$ [C]
1	200	5.16	---	---
2	1000	5.22	0.0166	1.56×10^{-11}
3	800	5.22	0.0108	1.02×10^{-11}
4	550	5.26	0.00407	3.82×10^{-12}
5	330	5.20	0.00206	1.93×10^{-12}
6	200	5.18	0.00054	5.08×10^{-13}

考察

移行運動量の計算

この宇宙研での衝突銃実験では、衝突体のサイズが $\phi 200\mu\text{m}$ 以上、衝突速度が約 5km/s であるため、ターゲットであるポリイミドフィルム ($25\mu\text{m}$ 厚) を貫通し、元の運動量の一部だけがポリイミドフィルムに移行する。このターゲットであるフィルムに移行した運動量に比例する強度の弾性波がフィルム中に発生する。Wallis (1986)⁶⁾によると、ある厚さの物質を貫通した時の移行運動量 p_t は、

$$p_t = p \left(\frac{m_{pen}}{m} \right)^\gamma \quad (1)$$

と表される。ここで p は衝突体の運動量、 m は衝突体の質量、 m_{pen} はある速度において貫通する最小質量である。 γ は実験から求められる値で、Perry (1990)⁷⁾では、アルミのターゲットの実験で、 $\gamma=0.40$

という値が得られている。 m_{pen} は Neish and Kibe (2001)⁸⁾に示された実験による経験式に基づいて、秒速 5 km/s の微粒子がポリイミドフィルムであるカプトンシート (25 μ m 厚) を貫通する時の最小質量を計算し、 3.5×10^{-12} kg という値を得た。

感度計算

この移行運動量 p_t によって衝突点で発生した弾性波が等方的に伝播して拡がり、PZT センサーに到達して、圧電性によってそこで発生した応力に比例した電荷量 Q として電気信号になる。フィルム中を伝播する弾性波は、その距離 D に反比例して強度が減少するので⁹⁾、 D を一定の値として換算すると、その位置での電荷量は、衝突体の衝突による移行運動量 p_t に比例するはずである。つまり、

$$Q = a \times p_t = a \times p \left(\frac{m_{pen}}{m} \right)^\gamma \quad (2)$$

となる。 Q 、 p は実験結果からそれぞれ $Q_{D=50cm}$ の値と衝突体の元の運動量とし、 m_{pen} は Neish⁸⁾の式によって、衝突速度 5km/s の時には 3.5×10^{-12} kg と得られているので、 a と γ をフィッティングして求めると、 $a = 1.127 \times 10^{-7}$ 、 $\gamma = 0.29$ となった。つまり、衝突点から距離 D が 50cm 離れた位置にある PZT センサーで発生する電荷量 $Q_{D=50cm}$ [C] と、衝突点への移行運動量 p_t [Ns] の関係は、

$$Q_{D=50cm} = 1.127 \cdot 10^{-7} \times p_t \quad (3)$$

となる。

先行理論研究によって予想されている火星周回ダストが衝突したときの運動量はフォボスの軌道位置にあるダストトーラスの場合 1.5×10^{-7} [Ns] 程度 (>30 μ m, 0.68km/s, 2000kg/m³)、またデイモスの位置にあるダストトーラスでは 2.3×10^{-8} [Ns] 程度 (>15 μ m, 0.83km/s, 2000kg/m³) と予想されている¹⁾。式(3)によると、この目標に対するセンサー出力電荷量 $Q_{D=50cm}$ は 1.7×10^{-14} [C] および 2.5×10^{-15} [C] (それぞれフォボスおよびデイモスの場合) である。この電荷信号が、検出限界を十分上回れば火星周回ダストを検出できる。つまり、このレベルの信号が読み出せるようなプリアンプが必要となる。

プリアンプ性能への要求

微小な電荷信号をチャージセンシティブアンプ (フィードバック 1pF) を使って信号を読み出すと、出力電圧は、フォボスおよびデイモスのダストに対して約 17mV および 2.5mV となる。上記信号検出のために、ノイズレベルは 0.5mV (帯域幅は 200kHz) 以下に抑えたい。これまでにプリアンプの試作を行っていて、これらの要求は満たせると考えている。

まとめ

本報告では、 $\phi 200 \sim 1000 \mu$ m 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、観測目標としている火星周回ダストに対する感度を持つかどうか考察を行った。宇宙研衝突銃の実験のデータを使って火星周回ダストが衝突する時の感度まで外挿し、観測対象である火星周回ダストを検出できることをプレリミナリな解析ながら示すことができた。今後、すでに実施した静電加速器による実験の結果も使って、実験結果を内挿することで火星周回ダストに対する感度を詳細に調べる予定である。

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ボ撃ちについてご指導頂いた JAXA (現・千葉工業大学) 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 28 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム 講演集, SHINO: SA6000095029, (2017)
- 6) Wallis, M.K., “Hypervelocity dust impulses on the comet Halley probes”, *Planetary and Space Science*, Vol.34, No.11, pp.1087-1089, 1986.
- 7) Perry, C.H., “In-situ Dust Mass Distribution Measurements from the Giotto encounter with Comet P/Halley”, PhD Dissertation, University of Kent at Canterbury, UK, 1990.
- 8) Neish, M. J., Kibe, S., “Hypervelocity impact damage equations for Kapton multi-layered insulation and Teflon second-surface mirrors”, In: *Proceedings of the Third European Conference on Space Debris*, 19 - 21 March 2001, Darmstadt, Germany. Ed.: Huguette Sawaya-Lacoste. ESA SP-473, Vol. 2, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-733-X, 2001, p. 577 - 582.