

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, 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 polyimide film and piezoelectric element

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

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 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。

2. 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 (0.8~3 $\text{mm}\phi$) 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⁾。

これらの性質は、1 m^2 以上の大面積の有感面積を持ちながら宇宙機システムに対するリソース要求 (特にセンサーの重量要求) が小さいダストセンサ

一の実現を可能にすると考えている。

さらに昨年度は、 $\phi 200\sim 1000\mu\text{m}$ 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ことを確認した。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。

3. 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。

これまでの実験では、2 段式軽ガス銃を利用した $200\mu\text{m}$ 以上の微粒子と静電加速器を利用して $1\mu\text{m}$ 以下の微粒子の実験を行ったが、最終目標としている $10\mu\text{m}$ 台のサイズの微粒子衝突は模擬できていない。フライトセンサーの校正などのためには、観測対象となるダストと同じサイズでの試験が必要である。

そこで今年度は、火星周回ダストの観測を念頭に置いた、 $1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ のサイズ領域の微粒子加速・衝突をする実験手法の確立を目標に置き、その手法について実験的に検討を行った。

4. 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手法について考えた。

4. 1. $10\mu\text{m}$ サイズ微粒子の単弾撃ち手法

$200\mu\text{m}$ 以上の微粒子を単弾撃ちするには、サボに微粒子を一個だけこめて撃ち出し、ターゲットに微粒子一個だけ衝突させた。しかしながら、 $100\mu\text{m}$ よりも小さな粒子を一個だけサボに込めるという作業は、静電気などの付着力が相対的に大きくなることで、それよりも大きな微粒子に比べて困難になってくる。そのため、マスキングをした上で散弾サボ撃ち、

一発だけをターゲットに当てるという方法を試した。

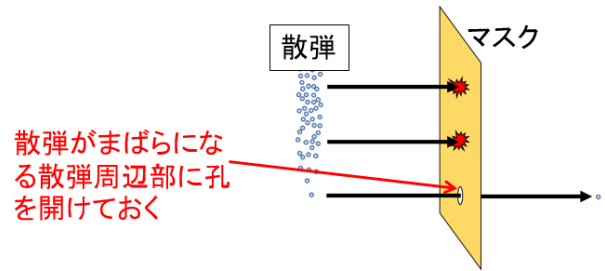


図 1 微粒子散弾撃ち、単発当ての概念図

5. 実験

5. 1. 衝突体として使用した微粒子

散弾撃ちをする微粒子として使用したのは、多孔質シリカビーズ (製品名 micromod sicaster-redF) で、密度 1.8g/cm^3 、直径 $10 \pm 2.5\mu\text{m}$ 、多孔質 (孔径が 60\AA) のものである。このビーズを採用したのは、実際に宇宙空間で観測されるかもしれない低密度ダスト粒子の模擬を考えていたからである。しかしながら、多孔質であるために粒子表面が粗いため付着力が小さく⁹⁾、ダマになりやすく、後述するように、結果的にはこの実験の目的として良い結果を得るポイントとなった。

このビーズを、宇宙科学研究所超高速衝突実験施設で通常利用している散弾撃ち用のサボに摺り切り詰めて使用した。

5. 2. マスク

散弾撃ちした微粒子のうち、一個だけの微粒子が通過するように位置と大きさを決めるために予備実験を行い、マスクの代わりに穴を開けていないフィルムを置いて散弾撃ちしたビーズの着弾状況を調べた (2018 年 8 月 22 日~27 日)。

図 2 に $10\mu\text{m}$ 散弾衝突実験で散弾撃ちをした後の供試体 (ポリイミド膜) の顕微鏡写真を示す。多孔質シリカ $10\mu\text{m}$ 散弾を衝突させたポリイミド膜の衝突痕 (クレータ) を顕微鏡で観察し、およそ 1 発のみが通過する場所とサイズを把握した。

図 3 にマスクの概要を示す。マスクとして厚さ $125\mu\text{m}$ のポリイミド膜を使用し、微粒子を通す穴は

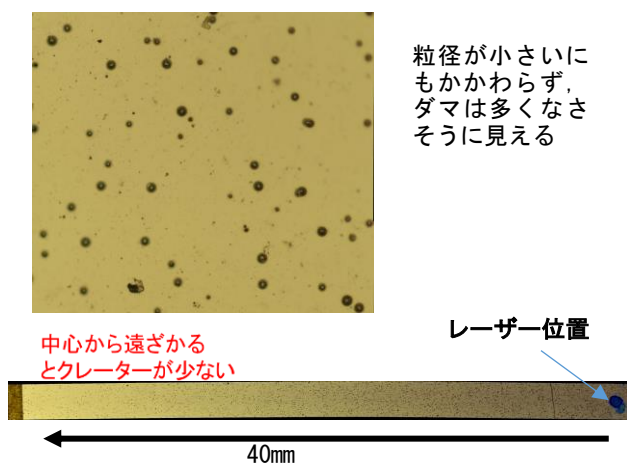


図 2 10μm 散弾衝突実験の供試体（ポリイミド膜）の顕微鏡写真

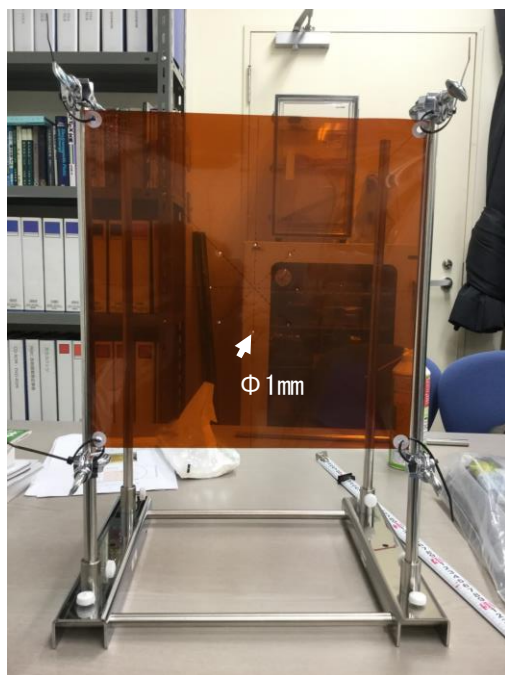
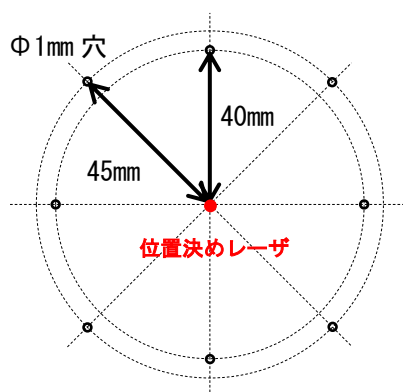


図 3 製作したマスクの穴の位置およびサイズ（上）と写真（下）。マスクには 125μm のポリイミド膜を使用した。

図 3 の上図に示すように衝突銃の位置決めのための照準用レーザーのスポットから 40mm の位置に $\phi 1\text{mm}$ の穴を開けた。 $\phi 1\text{mm}$ としたのは、125μm のポリイミドフィルムに穴あけポンチで簡単に開けられるサイズのうち最も小さなサイズであるからである。

5. 3. 検証

散弾マスクを使って、10μm ビーズを散弾撃ち、着想した手法について検証を行った。

今回、2018 年 9 月 28 日、10 月 1 日、10 月 2 日の日程で宇宙研 2 段式軽ガス銃を使って検証実験を行った。ターゲットは膜型センサ（12.5μm 厚ポリイミド膜 Upilex® に圧電素子を接着）であり、10μm の微粒子に対する信号応答を調べた。

図 4 に宇宙衝突銃のチャンバー内の写真を示す。散弾マスクとターゲットの距離は 70cm とした。散弾マスクは図 3 のものを使用し、弾を通す穴は 1 つを除いて他はテープでふさいだ。ショット数は全日程で、穴の位置を変えるなどして、9 ショットであった（衝突速度 5km/s, 6km/s, 7km/s）。

5. 4. 結果

ダストセンサ信号波形から明らかに着弾したと推定されるのがショット番号で #1, 3, 4, 7, 8, 9 であった。そのうち、ターゲットとしておいた膜型センサーからの出力信号波形が単発に見える #1 と #4 について、供試体の衝突場所衝突位置（マスクの穴がある位置）を顕微鏡で観察した。

図 5 にショット #1 の写真を示す。左側に実体顕微鏡によるもの、右側が蛍光顕微鏡（330-380nm で励起、420nm 以上の光を撮像）によるものを示している。右側のものでは、クレータのみがはっきりと見えているが、左側の実体顕微鏡の画像では写真上端に見えるようにゴミのようなものまで写っていてクレータを識別しにくい。衝突体として使ったビーズには蛍光剤が含まれていたため、クレータを探す際の目印になると考えて蛍光顕微鏡でクレータ探索をしたが、結果的に含まれていた蛍光剤はすべて蒸発してしまったのか反応はなく、それと異なる波長でよ

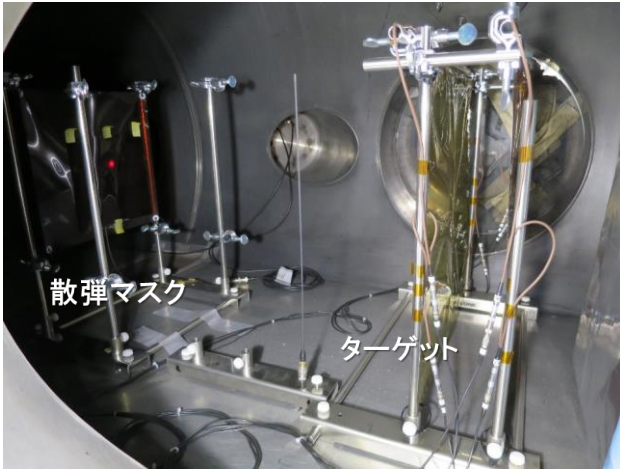


図 4 宇宙研衝突銃での散弾マスクをつかった実験の様子

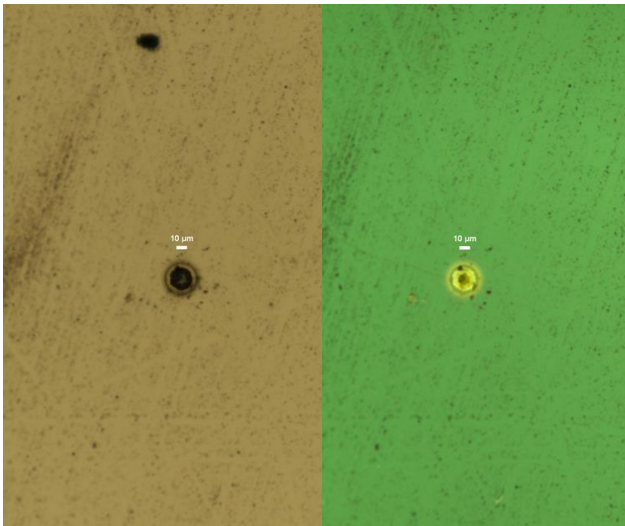


図 5 shot#1 (衝突速度 5.068km/s) のクレータ顕微鏡画像、左が実体顕微鏡によるもの、右側が蛍光顕微鏡によるもの。右側のもものでは、クレータのみがはっきりと見えているが、左側の実体顕微鏡の画像では写真上端に見えるようにゴミのようなものまで写っていてクレータを識別しにくい。

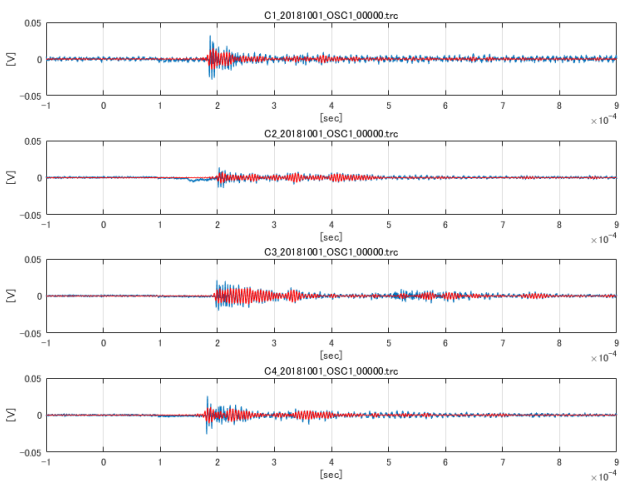


図 6 ショット#1の信号波形

く撮像できることが分かった。10 μ m の粒子によるクレータを通常の顕微鏡で探すのは困難だが、蛍光 (UV) 顕微鏡で比較的容易に探索可能であることが分かったことは大きな成果であった。

結果として、ショット#1 は衝突穴が 1 つだけあるのを発見できた。#1 は衝突速度 5.068km/s、散弾マスクは 6 時方向の穴を用いた場合であった。ショット#4 は衝突穴が 2 つだった。しかしながら、歩留まりの問題があるものの、散弾撃ちをした微粒子をマスクを使ってスクリーニングすることで、ターゲットに単発だけ当てる方法は再現性も高く、実用的であることが分かった。

まとめ

本報告では、 ϕ 10 μ m の多孔質シリカビーズを衝突体としてターゲットに単発衝突される手法について検討し、歩留まりの問題はあるが、実用的であることを実験的に示すことができた。手法としては非常に単純なものであるが、うまくいったポイントとしては、

- 多孔質ビーズを使ったことで付着力が小さく、サボ離れがよくてダメにならないため、再現性よくビーズが飛んだ
- 小さな衝突体 (ϕ 10 μ m) によるクレータを探すのは困難であるが、蛍光顕微鏡によって簡単に探すことができた

ということが挙げられる。今後は他のサイズのビーズも使って単発衝突の実験を行い、1 μ m~100 μ m サイズ領域の微粒子衝突に対するセンサー校正試験の手法として歩留まりの向上などを工夫していきたい。

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」を利用しました。ここに記して謝意を表します。

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, SHI-NO: SA6000095029, (2017)
- 6) Kobayashi, Masanori, Krüger, Harald, Senshu, Hiroki, Wada, Koji, Okudaira, Osamu, Sasaki, Sho, and Kimura, Hiroshi, "In situ observations of dust particles in Martian dust belts using a large-sensitive-area dust sensor", *Planetary and Space Science*, Volume 156, p. 41-46., 156 (2018), pp.41-46 (doi: 10.1016/j.pss.2017.12.011)
- 7) Masanori KOBAYASHI, Osamu OKUDAIRA, Kosuke KUROSAWA, Takaya OKAMOTO, Takafumi MATSUI, Dust Sensor with Large Sensitive Area Using Multi-Layer Insulation and Piezoelectric Elements, *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN*, 2018, Volume 16, Issue 7, Pages 691-697, Released November 04, 2018, Online ISSN 1884-0485, <https://doi.org/10.2322/tastj.16.691>
- 8) 近沢 正敏, 武井 孝, 粉粒体の表面化学と付着現象, *日本海水学会誌*, 1987-1988, 41 巻, 4 号, p. 168-180, 公開日 2013/02/19, Online ISSN 2185-9213, Print ISSN 0369-4550, <https://doi.org/10.11457/swsj1965.41.168>,