

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03889

研究課題名（和文）アコースティックエミッションを利用した大面積宇宙ダストセンサーの高機能化

研究課題名（英文）Development of advanced large-area space dust sensor using acoustic emission.

研究代表者

小林 正規（Kobayashi, Masanori）

千葉工業大学・惑星探査研究センター・主席研究員

研究者番号：70312080

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究で得られた成果は、観測装置として実用化するための初期開発段階に移行できると考えており、宇宙科学において太陽系内の黄道光ダストと呼ばれる10ミクロン程度の宇宙ダスト粒子の定量化につながると考えている。それ以外にも固体ロケット燃料の燃えカスや人工衛星などから放出される微小デブリなど、活発になっている人類の宇宙への進出によって増え続けて変化する宇宙環境をモニターすることにも役立つと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は宇宙ダスト粒子の観測を主眼に置いているが、宇宙ゴミの一部である微小宇宙デブリの観測にも大いに役立つ。現在、低軌道（～400km）での微小デブリの状況は回収実験などで比較的把握されているが、人工衛星が多く運用されている、あるいはすでに廃棄されている静止軌道上、また月面基地の建設など国際的な宇宙開発の将来計画においてさらに遠い軌道での人工物の建設が予定されている。このような軌道上での人工構造物からは宇宙ダストの衝突による微小デブリの発生が予想されていて本研究の成果はそのような微小デブリと宇宙ダストや流星群ダストと区別して観測することで正味の微小デブリの監視に役立つと考えている。

研究成果の概要（英文）：We think that the results obtained in this research can be moved to the initial development stage for practical use as an observation device, and will lead to the quantification of space dust particles of about 10 μm in diameter, called ecliptic light dust, in the solar system in space science. In addition, we think it will be useful for monitoring the space environment of space microdebris, which is continuously increasing and changing due to the increasingly active human presence in space, such as microparticles from solid rocket fuel and ones emitted from satellites and other objects.

研究分野：宇宙観測装置科学

キーワード：宇宙ダスト 質量・速度分離測定 アコースティックエミッション 圧電性PZT 宇宙微小デブリ 超高速衝突

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

本研究の背景として、惑星間空間で観測されるダスト粒子のうち数 μm 以下のものは観測例が多数あるものの、サイズの大きなもの ($>10\mu\text{m}$) の観測例が非常に限られているということがある。 $>10\mu\text{m}$ の宇宙ダストは地球近傍で 1m^2 あたり 2 個/day 程度の数であるため、科学的な議論を行うために有意なイベント数を得るためには 1m^2 以上の検出面積が必要である。歴史的には、アポロ計画が進められている宇宙開発黎明期には宇宙飛行士の安全を確保するために、探査機全体を宇宙ダスト観測装置 (検出面積は 250m^2) にしたような大規模な宇宙ミッションが実行されたが、基本的にはダストがセンサーに衝突する運動エネルギーがあるしきい値を超えたかどうかを調べる装置であり、衝突速度を仮定した上での衝突ダストの質量分布の導出であった。

最近の例では、冥王星とカイパーベルトを目指すニュー・ホライズンズ・ミッションに搭載された Venetia Burney Student Dust Counter (SDC) は、それぞれが約 0.1m^2 の感度面積を持つ 14 個の独立した圧電ポリイミド PVDF (PolyVinylidene DiFluoride) フィルムインパクトセンサーで構成されており、そのうちの 12 個は宇宙空間に露出し、残りの 2 個のリファレンスセンサーはシールドされて装置の下側に配置されている。また、IKAROS に搭載された大面積ダストセンサーを開発 ALADDIN が、 0.54m^2 の検出面積を持つ PVDF を使用し、惑星間空間での観測に成功した。軽量な材料である PVDF を利用したセンサーは、入射したダスト粒子衝突による衝撃を電気信号に変換し、後続の電子回路がダスト粒子の衝撃として信号を読み取る仕組みになっている。しかし、PVDF は誘電率が大きいため面積を大きくすると静電容量も大きくなる。信号読み出しのためのアンプでは信号帯域を広く持つことが難しく、S/N 比が低下してダスト粒子衝突として誤検出する割合が高くなる。

一方、JAXA が開発したスペースデブリモニター (SDM) は、PI フィルムの表面に幅が $50\mu\text{m}$ の帯状の電極を $100\mu\text{m}$ 間隔で形成した貫通型のセンサーである。衝突したダスト粒子がセンサーフィルムを貫通して電極を破断した場合、電流を流すことで破壊した電極を検出し、破壊した電極の数から入射したダスト粒子の大きさを推定することができる。SDM は HTV-5 (H-IIA ロケット 5 号機) に搭載されて技術実証が行われ非常によく機能した。しかし、搭載電子機器には多くのリソースが必要である。

本研究実施者は、ポリイミドフィルム (PI) に圧電性 PZT 素子を貼り付けただけのシンプルな構成のダストセンサーを考案した (図 1)。このダストセンサーでは、高速衝突による弾性波 (アコースティックエミッション、AE 波) が PZT の位置まで伝播して、弾性波によるひずみが電気信号として出力され、この信号の振幅は衝突ダスト粒子からフィルムへの移行運動量として計測される。このタイプのセンサーは、軽量かつシンプルな電気信号処理をするだけで装置を構成できるので、JAXA の火星衛星探査機 MMX へ火星周辺ダストモニター (Circum-Martian Dust Monitor, CMDM、検出面積は 1m^2) として搭載が決まり、千葉工業大学が開発する超小型衛星に搭載するダストセンサーとしても採用された。ただし、これらのダストセンサーは衝突してきたダスト粒子のカウントをして、衝突運動量を測定する機能だけを有していた。

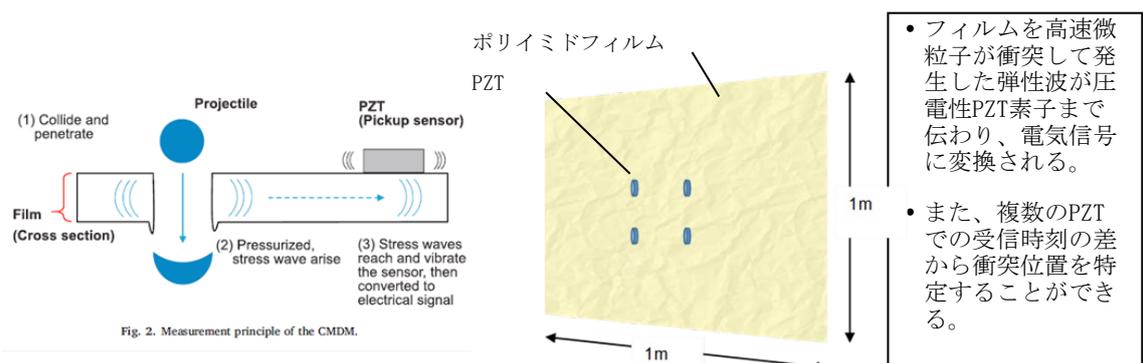


図 1. 衝突弾性波型ダストセンサーの原理図 (左) とセンサー概念図 (右) (Kobayashi et al. (2018) PSS から抜粋および加筆)

2. 研究の目的

前項で述べたように、頻度が小さいためにこれまでほとんど調べられていないサイズの大きなダスト ($>10\mu\text{m}$) を直接観測できるダストセンサーを開発するのが、本研究の目的である。目指すダストセンサーの特徴をまとめると次のようになる。

(1) 大きな検出面積 ($>1\text{m}^2$) 持つこと

太陽系探査機 Ulysses に搭載されたダストセンサーは検出面積が 0.1m^2 で、有効な観測期間約 3 年間で約 $10\mu\text{m}$ の星間ダストを 1 個だけ観測した。惑星間ダストは地球近傍だと 1 年に 2~3 個程度である。統計的に有意な数を観測するためには少なくとも 1m^2 の検出面積を持

つ必要がある。

- (2) ダスト粒子の質量、速度と到来方向を測定可能であること
検出したダスト粒子の軌道情報を得て起源を推定するために、速度と到来方向をそれぞれ <math><10\%</math>、<math><10^\circ</math> の精度で測定できること。
- (3) 宇宙機搭載が容易であること
(1)で述べたように、$>1\text{m}^2$以上の検出面積を宇宙で確保するためには、軽量で打ち上げ時はコンパクトで、宇宙空間で展開できるような構造であることがのぞましい。

以上のようなダストセンサーを、研究代表者が開発してきたポリイミドと圧電性 PZT を利用した大面積ダストセンサーを高機能化すること（到来方向を測定可能にすること、質量と速度を分離して測定すること）で実現するというのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

前項で述べた目的のために、図1で示したセンサーの機能を拡張して高機能化するアイデアを実験的に検証する。まずは、高機能化するアイデアを説明する。

(1) 到来方向の測定（衝突 AE 波信号の角度依存性）

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、センサーの数が 4 つしかないために詳細は確認できていない。

研究の方法として、センサーに使う PI フィルムに対して様々な角度で模擬ダスト粒子を高速で衝突させて、発生する AE 波の強度の異方性を詳細に調べる。この実験のために圧電性 PZT 素子 12 個を PI フィルムに貼り付けたものを実験用センサーとして準備した。模擬ダスト粒子は JAXA 超高速衝突実験施設の二段式軽ガス銃を利用して 1mm 以下の微粒子をこの実験用センサーの PI フィルムに衝突させて、各 PZT 素子からの電気信号出力をオシロスコープで記録し、信号の強弱から PI フィルム上の衝突位置から放出される AE 波の強弱を調べた。

(2) 質量と速度の分離測定

図3に示すように、センサーのフィルムを多層にして、衝突したダスト粒子が何層目まで貫通するか、そしてそれぞれの層で落とす運動量を測定することでそのダスト粒子の質量と速度を分けて測定することができる。各層で得られる信号の関係から質量と速度をそれぞれ分離して測定する方法について調べた。各層のフィルムでダスト粒子の衝突・貫通で放出される AE 波は他の層に混入させないようにする必要がある。本研究では民生品で普及しているフレキシブル基板技術を使って多層のダストセンサーを構成することを想定していた。この想定は、模擬ダスト粒子が最上層の層のみ貫通して 2 層目で止まることを前提としている。各層が数十 μm のフィルム中で止まる微粒子としては、同等のサイズである $\sim 10\mu\text{m}$ 程度の模擬ダスト微粒子を実験用センサーに衝突させる必要がある。そのような小さな微粒子を超高速まで加速して衝突させる方法は、本研究を開始するまでに実験技術として確立していたものの（平成 30 年度 宇宙科学に関する室内実験シンポジウムで報告済み）、本研究を実施するためには衝突成功の歩留まりが悪いため、断念した。その代替法としては次項の研究成果で述べる。

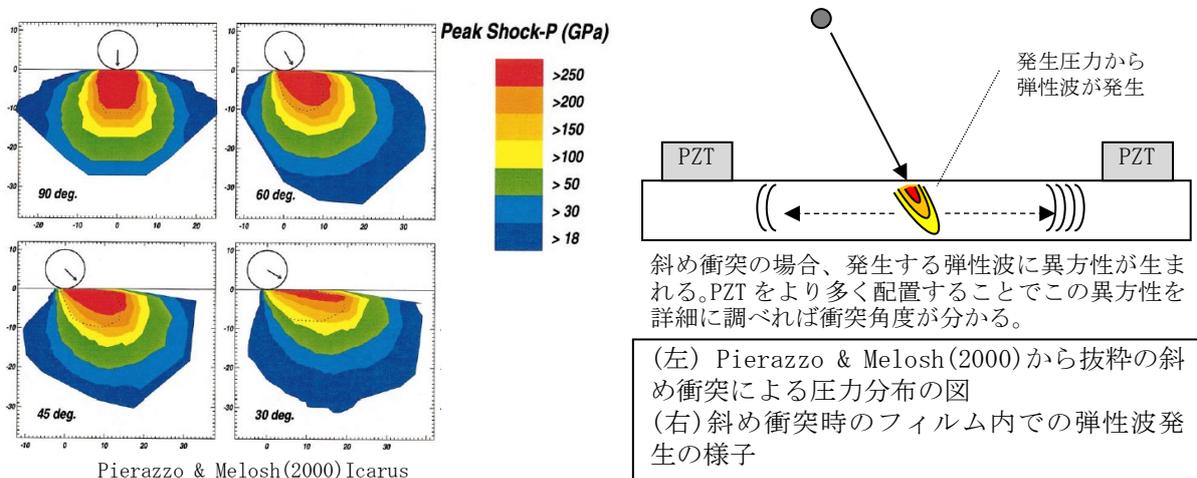
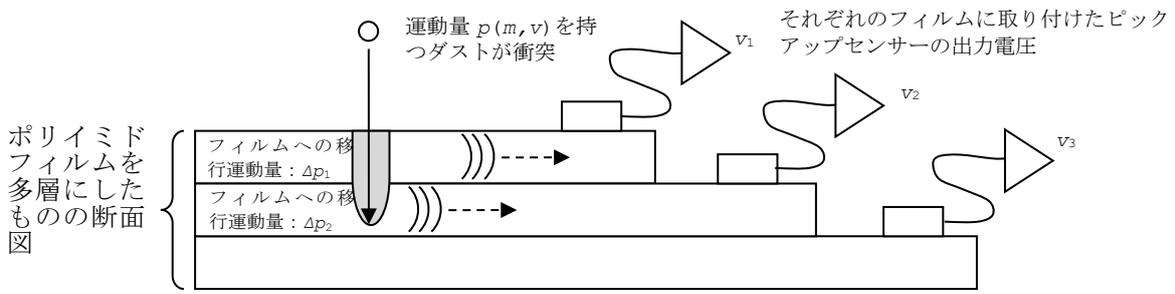


図2. 本研究で実証しようとしている衝突角度を測定する原理



- 星間ダストが2層目で止まるように厚さを決める。
- 各層から他の層に接着剤などで信号が漏れないようにする。
- 3層目は、2層目で止まったか突き抜けたかを調べるための層

図3. 大面積ダストセンサーの高機能化のイメージ

4. 研究成果

(1) 到来方向の測定 (衝突 AE 波信号の角度依存性)

図4に示すように実験用センサーのフィルムに時計の時字の位置(図中の青い丸の位置、S1~S12)に圧電性PZTを貼り付けて、中心付近に模擬ダスト粒子を衝突させた(図中のオレンジ色の丸)。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て記録した。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。この実験では、図5に示すように、模擬ダスト粒子を実験用センサーの面に対して垂直衝突(0°)と斜め衝突(30°および45°)させた時の各PZT素子からの電気信号の振幅を信号強度として読み取った。ここでは詳細を述べないが、センサーに使うPIフィルム中をAE波が伝播するときの強度の減衰効果とAE波を電気信号に変換するPZTの個体差で補正した(この実験のデータの考察のために、センサーフィルム中のAE波の伝播に関する理解がとても進んだ)。ただし、この実験中にサゴ撃ちに失敗して一部大きな孔が開いてしまい、その周辺部分でAE波伝播に影響が出てしまった。

図6に結果を示す。この図は各PZTでの信号強度を示しているのではなく、図の原点部分が衝突位置として、衝突銃の下流から上流を見た方向を座標で示していて、原点から各プロットの方角へ伝播するAE波の強度の分布を、原点からプロットまでの距離で示している。多少のばらつきはあるが、それは実験用フィルムに開いた孔によるものと考えていて、結論として角度依存性はないということが分かった。これによって、本研究の申請時に考えていた図2のようなフィルム中に発生するAE波は微粒子衝突による異方性はなく、このアイデアで衝突角度を求めるのは不可能だということが分かった。ただしこれも一つの成果であり、後述する別の方法による衝突角度の測定しかないことが分かった。

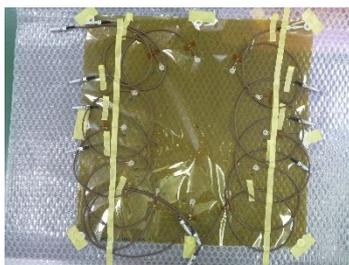
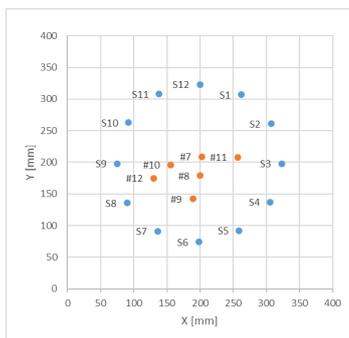


図4. 角度依存性実験用センサー。各PZT素子の位置(上)と実験に使ったもの実験用センサーの写真(下)

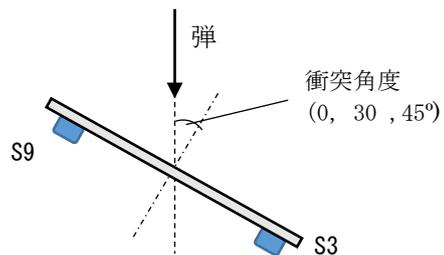


図5. 衝突角度のセットアップ(上からの図)。

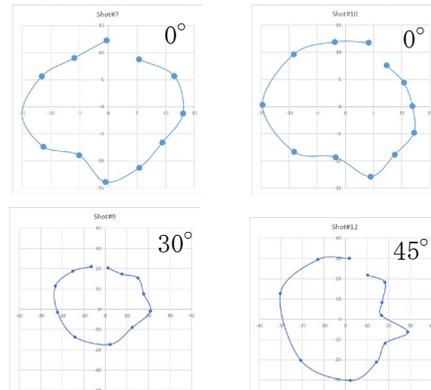


図6. 垂直衝突の例(上)と斜め衝突の例(下)。

(2) 質量と速度の分離測定

この研究については、本研究の提案時の $\Delta p \times p$ 法の定式化を行い、それを実験的に検証するという方法をとった。

① $\Delta p \times p$ 法の定式化

2枚のフィルムによる $\Delta p \times p$ 方式のダストセンサーの概念図を図7に示す。基本的には図3と同じでフィルムの上に空間を設けているだけである。このような構成のセンサーの場合、1枚目のフィルムを貫通するとき衝突体が持っていた運動量 p の一部 Δp に比例する信号が一枚目のフィルムに発生し、残りの運動量 p_r を持った衝突体が2枚目のフィルムに p_r に比例する信号が発生する。1枚目での貫通時にフィルムに伝わる移行運動量 Δp は

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

となる。 m_{pen} はある速度で衝突体がある厚さのフィルムを貫通する直前の最大質量、 γ は実験から求められる定数で、これまでの我々の実験で使ったポリイミドフィルムの場合、0.31という値が得られている。この他に、PI フィルムを貫通する深さを求める貫通方程式

$$F_{max} = 0.37d_p^{1.056} \rho_p^{0.519} (V)^{0.875}$$

をある厚さのフィルムを貫通する直前の質量を求めてやり、移行運動量の式に代入すると、元の衝突体の運動量 p が mv だとして

$$m = \left(\frac{\alpha'' \Delta p}{p^{0.26}} \right)^{2.32} \quad V = \left(\frac{\alpha' p^{0.69}}{\Delta p} \right)^{2.17}$$

のように、 Δp と p だけで質量と速度を表わすことができた。つまり、 Δp と p だけで質量と速度が求められる。詳しい内容は、第65回宇宙科学技術講演会の講演集と令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウムの講演集で述べている。

② 実験による検証

当初図3のような実験用センサーで実験を行おうとしたが、実験の効率化のためには、衝突させる模擬ダスト粒子を $300\mu\text{m}$ 以上にする必要があり、簡単に手に入る市販のPIフィルムは $200\mu\text{m}$ 厚なので衝突銃実験では2枚目以降も簡単に貫通してしまう。そこで、1枚目と2枚目の距離を10cm程度に間隔をあけることでWhippleシールドの効果で衝突体の2枚目フィルムでの貫通力を弱めて止める方法をとった。

図8はJAXA衝突銃で行った実験の様子を示す写真である。実際に宇宙ダストを観測するときには、ダスト粒子が2枚目で止まったのか貫通したのかを判断するために反同時計数用のフィルムを3枚目に配置する必要がある。今年度実施した実験では、前述の $225\mu\text{m}$ 厚のポリイミドフィルムを4枚、10cm間隔で配置してセンサーとした。4枚目は3枚目を貫通したかどうかの判定用である。このセットアップで2022年度は3回実験を行った(2022年5月、7月、11月)。衝突体である模擬ダスト粒子はガラス、アルミナ、SUS製の $300\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ の範囲の微小球を、 $3 \sim 5\text{km/s}$ で衝突させた。実験の詳細については、令和4年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウムの講演集で述べている。

Whippleシールドの効果によって2枚目フィルムの出力が弱まるものの、①で述べた $\Delta p \times p$ 法を検証するデータは取得できたと考えている。残念ながらまだデータの解析中であるが、 $\Delta p \times p$ 法については論文で成果を報告する予定である。

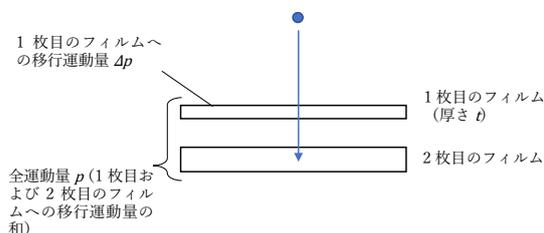


図7. フィルム2枚による $\Delta p \times p$ 方式のダストセンサー

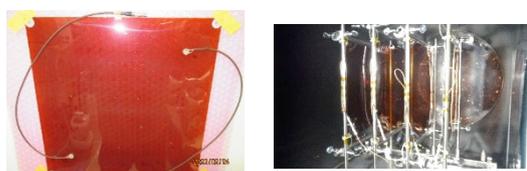


図8. JAXA衝突銃の実験に使用したセンサーフィルム(上)と衝突銃チャンバー内のセットアップの様子(下).

以上の様に、本研究提案時当初の想定からは少し方法が変わったが、AE波を利用したダストセンサーの高機能化の研究は一定の成果を得ることができたと考えている。本研究の目的として(1)到来方向の測定と(2)質量・速度分離測定であったが、(1)は考えていた方法がうまく行かないことが分かった。しかしながら、(2)の検証の目的で便宜上2枚のフィルムの間隔を開けることで、2枚のフィルム上の衝突位置の関係から到来方向を求める方法(恐らくそれ以外にはない)を想定して実用化のための開発を行う必要があることが分かった。(2)については、ここでは詳しい結果を述べていないが、衝突体の材質、質量、速度によって明らかな信号の差があり、 $\Delta p \times p$ 法は有効な方法だということが分かった。

この手法を使うことで、軌道上の宇宙ダストと微小デブリを速度で区別することが期待され、そのための共同研究を別途JAXAと開始する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林正規、奥平 修、石丸 亮、長谷川直
2. 発表標題 フィルムを使ったダストセンサーによる質量・速度の分離測定の研究その1
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林正規、奥平 修、石丸 亮、長谷川直
2. 発表標題 ポリイミド膜と圧電性 PZT を利用した 衝突 AE 波型ダストセンサー：質量と速度分離測定の研究1
3. 学会等名 令和3年度 宇宙科学のための室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林正規、奥平修、平井隆之、石丸亮、松本晴久、長谷川直
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和2年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林正規、奥平修、石丸亮、黒澤耕介、平井隆之、松本晴久、長谷川直
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和元年度 宇宙科学のための室内実験シンポジウム（書面発表）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------