

宇宙塵計測と微粒子の超高速加速

大阪大学産業科学研究所 柴田 裕実*

In situ measurement of cosmic dust particles in space is important to investigate the origins of dust particles, the solar system and life. We have been developing three types of instruments onboard spacecrafts to measure cosmic dust. 1) a piezoelectric ceramic and polymer film detector, 2) a lightweight and large-area impact ionization detector, and 3) a time-of-flight mass spectrometric dust analyzer with an impact ionization ion source.

To calibrate these developing instruments and to simulate hypervelocity impact phenomena, a microparticle (dust) ion source has been installed to the high voltage terminal of the 3.75 MV single ended Van de Graaff electrostatic accelerator and a beam line for microparticle experiments has been built at High Fluence Irradiation Facility (HIT) of Research Center for Nuclear Science and Technology (Department of Nuclear Professional School, Graduate School of Engineering at present), the University of Tokyo in 1998. Microparticle acceleration has been successful in obtaining expected velocities of 1 km/s–20 km/s or more for micron or submicron sized particles.

Keywords: cosmic dust, hypervelocity dust acceleration, piezoelectric detector, impact ionization detector, TOF-MS

1 はじめに

微粒子とは、はっきりした定義はないが、クラスター（原子が数個から 10^5 個程度）より大きいもので、

直径が $0.01 \mu\text{m}$ – $100 \mu\text{m}$ くらいのをいい、今はやりのナノ粒子も一部含まれる。そのような微粒子が宇宙から地球へ推定で年間 4 万トンも降り注いでいるという。この量は、6500 万年前に恐竜絶滅のきっかけになったと考えられている 10 km 級の小惑星や彗星の衝突をも含めて、地球へ降下する宇宙物質の年間総質量の 99.9% を占めている。このような宇宙にある微粒子を宇宙塵あるいは宇宙ダストと呼んでいる。宇宙を飛び交っている $1 \mu\text{m}$ 程度の微粒子は数 km/s から約 100 km/s と広範な速度を持っている。このような宇宙塵が固体に衝突したらどのような現象が起こるのであろう。小惑星や隕石の衝突と同じようなことが小さな領域で起こっているのだろうか。それともイオンビームのとてつもない塊が衝突したのと同じであらうか。まだクラスター衝突の全貌も解明されていない状況では、この問いに答えるのは難しい。宇宙塵の運動エネルギーは数 100 GeV –数 TeV と途方もなく大きく、物質と衝突した際に、その全エネルギーがフェムト秒からナノ秒くらいの極めて短い時間で放出される。例えば、直径 $1 \mu\text{m}$ 位の微粒子が 10 km/s 位の速度で固体に衝突すると固体内に衝撃波が生じ、圧力は 100 万気圧以上に、局所温度は 1 万度近くに達し、衝突近傍はプラズマ状態になったり、蒸発したりしてクレーター状の衝突痕ができる。そこでは色々な反応が進むと考えられる¹⁾ が、その詳細についてはまだ十分には理解されていない。このような劇的な衝突は新しい材料の創製や改質が可能になると考えられ、材料科学や物性科学から見ても興味あるテーマを提供するので、その衝突機構の解明が急がれる。

宇宙塵の研究を進めるには地上からの天体観測、探査機による観測と同時に地上の研究室での衝突実験が欠かせない。 $100 \mu\text{m}$ くらいまでの宇宙塵の研究には MV 級の静電加速器が適しており、超高速に加速した微粒子を用いて探査機に搭載する宇宙塵検出器の開発や衝突科学の研究に利用されている。また、ロケットや地球周辺の人工衛星など人工物の残骸（スペース・

In Situ Measurement of Cosmic Dust and Hypervelocity Dust Acceleration

Hiroshi SHIBATA* (*The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University*),

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1 大阪大学 産業科学研究所 産業科学ナノテクノロジーセンター

TEL:06-6879-4285, FAX:06-6879-4287,

E-mail: shibadanuki@mac.com

デブリ)には多くの微粒子が含まれていて、頻繁にスペースシャトルや人工衛星に衝突しており、その衝突痕が確認されている (Fig. 1) . 今日、このスペース・デブリが宇宙探査や宇宙活動などに与える影響が大きな問題となっており、早急な対策が必要になってきている . このデブリの衝突速度が 10 km/s–20 km/s 位であり、静電加速器で加速した微粒子の速度と同じ位なので、地上でシミュレーション実験が行われている .

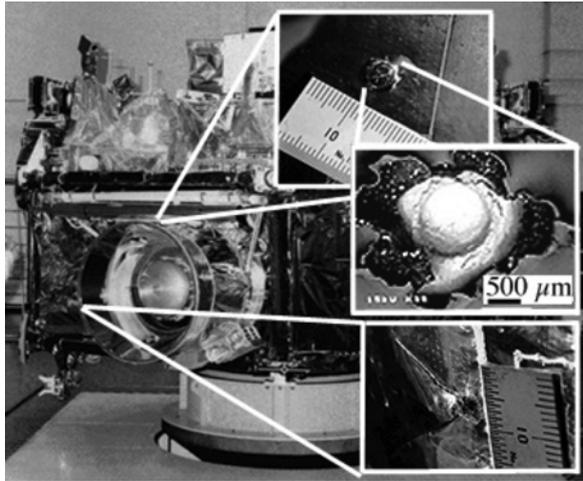


Figure 1. Impact craters created on a surface of the first Japanese retrievable satellite "SFU: Space Flyer Unit". Photo by H.Yano.

以下、2章では宇宙塵とその観測について、3章では日本で唯一稼働している東京大学の静電加速器による微粒子の超高速加速について、4章では探査機に搭載可能な宇宙塵計測器の開発について紹介する .

2 宇宙塵とその観測

宇宙塵の解説は参考文献 2) および 3) に詳しく、一部は Web からダウンロードできるので、ここでは宇宙にはどのような種類の宇宙塵があるのかについて簡単に述べる .

宇宙塵研究の歴史は、17 世紀の彗星と流星群の関係 (流星群のほとんどは太陽系地球軌道内に残った彗星の尾の残りである微粒子 (ダストトレイル) と地球が衝突し発光している) についての研究から始まり、黄道光の発見、19 世紀中頃のイギリスの海洋探査船チャレンジャーによる深海底からの球状微粒子 (スフェール) の発見、そして 20 世紀の人工衛星での観測へと引き継がれる . 微粒子観測は、超高速衝突の危険

性評価という観点から、軌道上での最初の科学観測対象の一つとなり、「ジェミニ」、「スカイラブ」、「スペースシャトル」、「ミール宇宙基地」などの有人ミッションにおける計測・捕集実験や、「LDEF」、「EuReCa」、「SFU (Fig. 1)」など無人長期曝露衛星の地上回収後の微小衝突痕検査によって、その物理的・化学的特性が調べられてきた .

Figure 2 は地球近傍で採集された宇宙塵の写真で、(a) 深海底堆積物、(b) 南極氷床、(c) 成層圏、(d) 地球低軌道上の回収型衛星より採取されたもので、大きさは直径 10 μm–500 μm 程度で縮尺は全て異なっている . 実際に宇宙を飛び交っている微粒子は右下のようないびつで壊れやすそうなものと推測されるが、壊さずに直接採取することが甚だ難しく、採取されたのは数例にしか過ぎない .

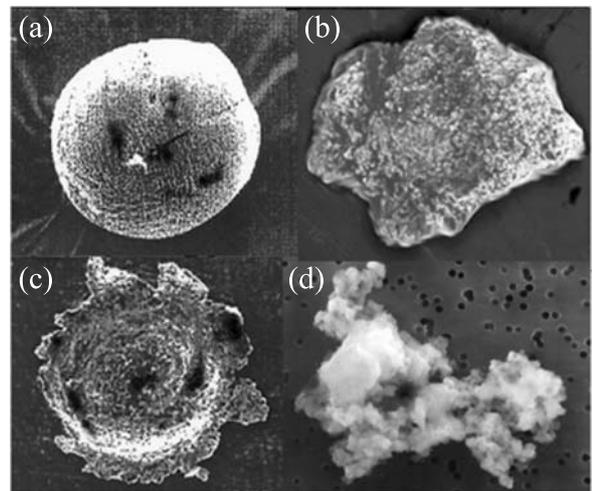


Figure 2. Cosmic dusts collected around the Earth; (a) from the deep sea sediment, (b) from the Antarctic ice, (c) from the stratosphere, and (d) by the LEO (Low Earth Orbit) retrievable satellite. Sizes are from 10 μm to 500 μm in diameter. Photo by H.Yano.

20 世紀後半には、宇宙塵は、惑星探査機による宇宙での計測や理論計算により、Fig. 3 のように多様な起源を持つことがわかってきた . 太陽系内においては彗星、小惑星、固体惑星、固体衛星から放出された微粒子、Poynting-Robertson 効果によって太陽に向かって落ち込む微粒子、太陽光圧によって押し戻されるベータメテオロイド、カイパーベルト天体やオールの雲を源とする微粒子、そして太陽系外から流入してくる星間塵などがあり、そのフラックスや空間分布は太陽

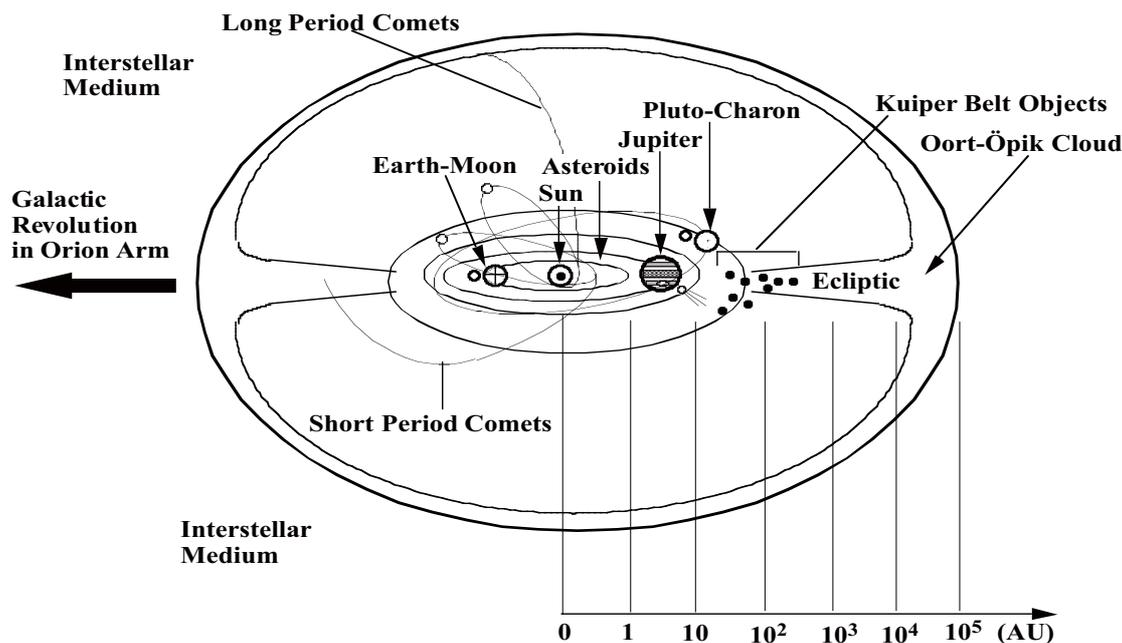


Figure 3. Origins of cosmic dust (© H. Yano).

系の様々な領域で一様でないこともわかってきた。更に、宇宙塵は原始の地球において生命の発生に不可欠な水や有機物をもたらしたという説が次第に有力になっていて、宇宙塵が太陽系のみならず、宇宙の起源と進化、そして生命の起源と進化を研究する際の非常に重要な共通の宇宙物質であると考えられるようになってきた。しかし、宇宙の全体像をつかむには物質科学的な分析データが著しく乏しいのが現状である。

このような状況において、日本の宇宙探査計画の中で宇宙塵の「その場」観測を試みる提案が取り上げられ、国産の火星探査機「のぞみ」や小型ソーラー電力セイル「IKAROS」に宇宙塵観測器が搭載され計測を行った。「のぞみ」には日独で開発した宇宙塵計測器が搭載されていて、1998年7月に打ち上げられ火星周回には失敗したものの、火星への航行中に宇宙塵を観測しデータを送り続けた⁴⁾。「IKAROS」は金星探査機「あかつき」とともに2010年5月に打ち上げられた惑星間航行を目指す世界初の小型ソーラー電力セイル実証機でセイルにPVDF(ピエゾ効果を持つ高分子材料)宇宙塵計測器が貼り付けられ航行中に宇宙塵計測を行った⁵⁾。

今後の計画としては、日欧共同水星探査ミッション「BepiColombo」や国際宇宙ステーション(ISS)への宇宙塵計測器や宇宙塵捕集器の搭載が採用され、現在打ち上げあるいは観測に向け準備中である。Bepi-

Colombo ミッションでは日本側探査機「MMO」にPZTピエゾ検出器が搭載され2017年に仏領ギアナから打ち上げ予定で、水星周回軌道上で宇宙塵観測を行う⁶⁾。国際宇宙ステーション(ISS)へは「たんぼぼ」計画として、エアロジェルを用いた宇宙塵捕集器をISS-JEM(日本実験棟)暴露部に設置し、長期にわたり宇宙塵や微生物を捕獲し、地上に持ち帰り分析を行う予定である⁷⁾。その他、月探査、小惑星探査に宇宙塵分析器の搭載が検討されるなど、わが国における宇宙塵の研究が新展開を迎えている。

以上のような宇宙塵計測・分析器の開発、較正実験、宇宙開発に適する材料の研究、スペース・デブリの研究などを行うためには地上での超高速微粒子の衝突シミュレーション実験が必要であり、MV級静電加速器を用いた超高速加速の研究が、海外では1960年代から始められたが、日本でも遅ればせながら1980年代後半に開始された。日本では新材料開発を目的に京大工学部で開始され、1998年に漸く超高速宇宙塵の衝突シミュレーション実験が東大で開始された。

3 微粒子の超高速加速

微粒子の超高速加速はそれほど一般的ではないので、以下では、現在日本で唯一、微粒子のMV領域での加速および衝突シミュレーション実験を行っている

東京大学工学系研究科原子力専攻重照射研究設備（通称 HIT，茨城県東海村，開始当時は原子力研究総合センター）の微粒子加速システムを紹介する．HIT では 3.75 MV ヴァン・デ・グラーフ静電加速器を用いて微粒子を 3.2 MV で加速し，世界最高速の微粒子を生成した⁸⁾．この章では世界の微粒子加速器と原理・特徴および加速結果について紹介する．

1960 年に最初の微粒子加速が行われて以来⁹⁾，世界各地で微粒子加速が行われてきたが，電子線やイオン加速器などに比べれば，その普及は遅々たるものである．1960 年代には TRW，ロッキード等で，また，80 年代には米国で行われたスター・ウォーズのためのプログラム (Strategic Defense Initiative Program) の中に微粒子加速も入っており，ロス・アラモス研究所でも研究が行われた．日本でも 1985 年頃から 1990 年頃にかけて京都大学・工学部のコッククロフト・ウォルトン型静電加速器（重イオンリニアック入射器）やヴァン・デ・グラーフ加速器で炭素微粒子の加速が行われていた¹⁰⁻¹⁷⁾．このように微粒子を加速した施設は古くからあるものの，現在でも MV 級の加速を行っている施設は世界で十指に満たない．その中でもマックス・プランク核物理学研究所（ドイツ）¹⁰⁾ とコロラド大学（アメリカ）¹⁷⁾ の加速器は宇宙塵計測機器の開発や較正実験専用器として活躍している．最近では材料科学からの注目もあり，微粒子衝突の効果が工学的に利用されるようになれば，微粒子専用の加速器が一気に増える可能性もある．

マイクロサイズの微粒子は静電加速器で加速するのが最も簡単であるが，シングル・エンド器では 5 MV 以上の昇圧は難しい．タンデム型加速器が利用できれば，数 10 MV の加速が可能になるが，荷電変換に難点がある．しかし，微粒子の速度が 1000 km/s 位になると慣性核融合が起こるようになるので^{18,19)}，そのような目的としての加速器も考えられており，リニアック，サイクロトロンや最近開発されたデジタル加速器で加速して微粒子の速度を現在の 10 倍以上にしようというアイデアも出されている²⁰⁻²²⁾．Table 1 に 100 kV 以上の静電加速器で微粒子加速をしている国内外の施設を掲げる．

3.1 静電加速器による微粒子の加速原理と特徴

静電加速器の加速原理は (1) 式で表わされる．

$$mv^2/2 = QU_{acc} \quad (1)$$

ここで， m は粒子の質量， v は粒子の速度， Q は微粒子に帯電した電荷， U_{acc} は微粒子イオン源と標的間の

電位差（加速電圧）である．

(1) 式のような静電気力を使用した粒子加速器はガス・火薬銃と違って加速速度の制限なしに粒子を加速できることが利点であるが，現在ある加速器では粒子がマイクロサイズ程度の質量のものでないと km/s 領域への加速は困難である．重要な利点としてガス・火薬銃でみられる不純物の混入がなく清浄な環境で加速が行えること，多量の微粒子を個別に加速・識別できるということが挙げられる．欠点としては接触帯電で粒子を帯電させているために導電性粒子しか加速できないという点がある．しかし最近では，導電性高分子のような軽い物質を用いて絶縁体の表面を処理できるようになってきたので，この欠点は克服されたといってもよい．

3.2 微粒子超高速加速システム

微粒子超高速加速システムは微粒子イオン源，静電加速器，ビーム計測用ビームライン，衝突実験用チャンパーから成る．HIT ではヴァン・デ・グラーフ加速器の 0°（直線）コースに微粒子ビームラインを設置した．Figure 4 に微粒子ビームラインと微粒子の電荷・速度計測システム及び速度による微粒子選別回路系を示す．

微粒子の形態はアモルファス，多結晶，単結晶と色々あるが，静電加速器で用いられているものは導電性でアモルファスや多結晶のものが多く，最近では高分子やセラミックスなどの絶縁物の周りを金属や導電性高分子で蒸着あるいはコーティングして加速する方法も開発されている²³⁻²⁵⁾．微粒子イオン源は加速器の高電圧部に搭載してあり，直径 0.01 μm –10 μm の導電性微粒子を帯電させ，加速管へと引き出す．イオン源の構造は Fig. 5 のように微粒子を入れておくリザーバ，微粒子を揺動させる舌状電極板 (Tongue) および最終的に微粒子に電荷を与える針状電極 (Needle tip) からなっている．リザーバ (Fig. 5 の舌状電極板の真下にある) に +10 kV–15 kV，舌状電極板に +10 kV–15 kV の高電圧パルス（パルス幅 10 ms，繰り返し 20 Hz）が印加される．そうするとリザーバと舌状電極板間の電界で，少し電荷を得た微粒子は揺さぶられる．これらの一部がリザーバ壁の微小穴を通り，常に高電界がかかっている針状電極のある空間に入り，針状電極に接触するか，近づくかして帯電した後，針とは反対方向へ加速され，加速管へと引き出される．針状電極と標的間の電位差が U_{acc} となるため，粒子は U_{acc} の電圧で加速される．使用する微粒子が質量（球径）分布を持っているため，イオン源で帯電される電荷量も分布

Table 1. Microparticle acceleration facilities of various countries.

Facility	Accelerator type	Accelerating voltage Projectile	Period	Main use
Univ. Tokyo → Kyoto Univ. → Osaka Univ. ¹⁴⁾	Cockcroft-Walton	100 kV Microparticle only	1999–	Space science
Wakasa Wan Energy Research Center (Fukui) ¹⁵⁾	Cockcroft-Walton	200 kV Microparticle only	2001 ^{*)} –closed	Material science
Kyoto Univ. ¹²⁾	Cockcroft-Walton	250 kV Ion, Microparticle	1985 ^{*)} –1990 ^{*)}	Material science
Kyoto Univ. ¹²⁾	2.0 MV Van de Graaff	1.0 MV Electron, Microparticle	1985 ^{*)} –1990 ^{*)}	Material science
Univ. Tokyo • HIT (Tokai-mura, Ibaraki) ⁸⁾	3.75 MV Van de Graaff	3.2 MV Ion, Microparticle	1998–	Space science Material science
Institute of Nuclear Physics, Moscow State University (Russia)	Cockcroft-Walton	400 kV ^{*)}	2000 ^{*)} –	Material science
Univ. Kent (Canterbury, UK) ¹³⁾	2.0 MV Van de Graaff	1.8 MV Microparticle only	1974–2001	Space science
Open Univ. (Milton Keynes, UK)	2.0 MV Van de Graaff 2 sets	2.0 MV Microparticle only	2002–	Space science
Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg, Germany) ¹⁰⁾	2.0 MV Van de Graaff	2.0 MV Microparticle only	1962–	Space science
Concordia College (Moorhead, U.S.A.) ¹⁶⁾	2.0 MV Van de Graaff	2.0 MV Microparticle only	1975–	Space science
Institute of Nuclear Physics, Moscow State University (Russia)	3.0 MV Van de Graaff	2.0 MV ^{*)}	2000 ^{*)} –	Material science
Cororodo Univ. (Boulder, U.S.A.) ¹⁷⁾	3.0 MV Pelletron	3.0 MV Microparticle only	2011–	Space science
Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, U.S.A.) ¹¹⁾	6.0 MV Van de Graaff	5.0 MV ^{*)} Ion, Microparticle	1985–closed	Space science
Stuttgart Univ. (Stuttgart, Germany)	In preparation	Microparticle only	^{*)}	Space science

^{*)} Details are unknown.

を持ち、加速後の微粒子も電荷と速度に関して分布を持っている。電荷と速度を測定するために円筒コンデンサー型の荷電粒子モニターを3台用いている。電荷を帯びた粒子がモニターを通過したとき、金属円筒に電荷が誘起され、その電荷量を電荷感応型前置増幅器 (Charge Sensitive Amplifier: CSA) によって測定するとともに、3台のモニターの間を飛行時間を測定し速度を算定する。これらのモニターにより1 fC 程度までの電荷が計測できる。加速電圧はわかっているので、(1) 式により粒子の質量を求めることができる。これらの測定によって必要とする電荷と速度を持った微粒子だけを平行平板型静電偏向器を用いて弁別し、衝突実験用チャンパーに導き、実験に用いる。チャンパーは実際に探査機に搭載する宇宙塵計測器をそのまま真空中に入れ、様々な角度からの照射が可能のように設計されている。現状では加速された粒子の数が少ないので(1分間に数10個位)速度弁別は行わず、全ての

粒子を計測に用いている。

3.3 微粒子加速の結果

Figure 6 に銀及び炭素微粒子の加速結果を示す。Figure 6(a) は微粒子の質量と速度の相関を示しており、マックス・プランク核物理研究所及びケント大学 (イギリス) における鉄微粒子の加速結果と共に HIT で得られた結果を示す。質量は測定された電荷と速度の値を (1) 式に当てはめて計算された。2 MV–3 MV で加速された微粒子は約 1 km/s–100 km/s の速度を持っていることがわかる。Figure 6(a) は微粒子イオン源で帯電し加速された後、測定された単位質量当たりの電荷 (比電荷) と質量の関係を示す。同じ密度の物質の場合、帯電する電荷量が同じであれば質量が小さい方が大きな速度を持つことになるが、質量が小さいと表面積も小さくなるので、そこに帯電する量も小さくなる。微粒子に帯電する比電荷は微粒子の大きさとイオ

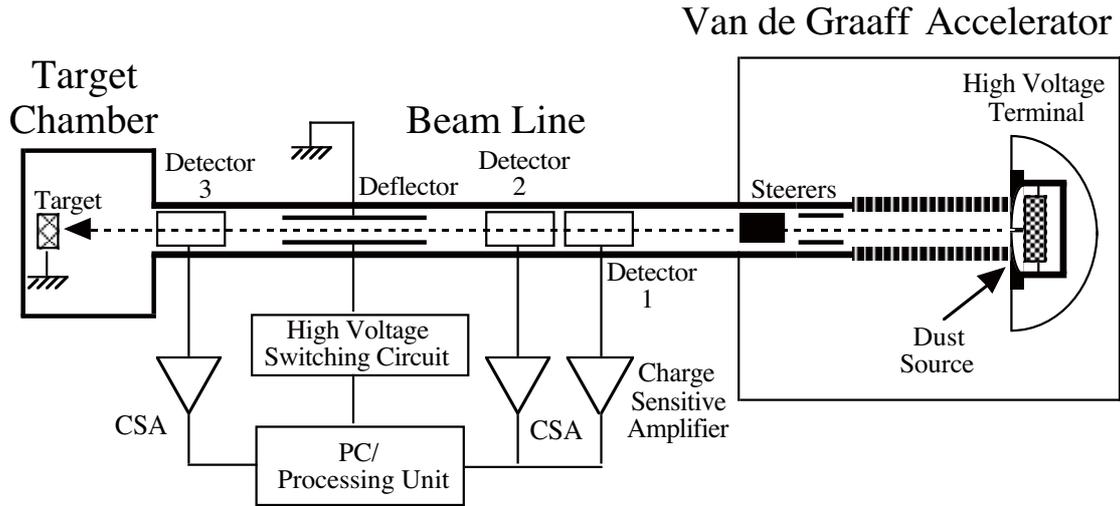


Figure 4. Schematic view of the accelerator system of HIT, the university of Tokyo. Detector 1, 2, and 3 are the cylindrical condenser type charge detectors. CSA is the charge sensitive amplifier.

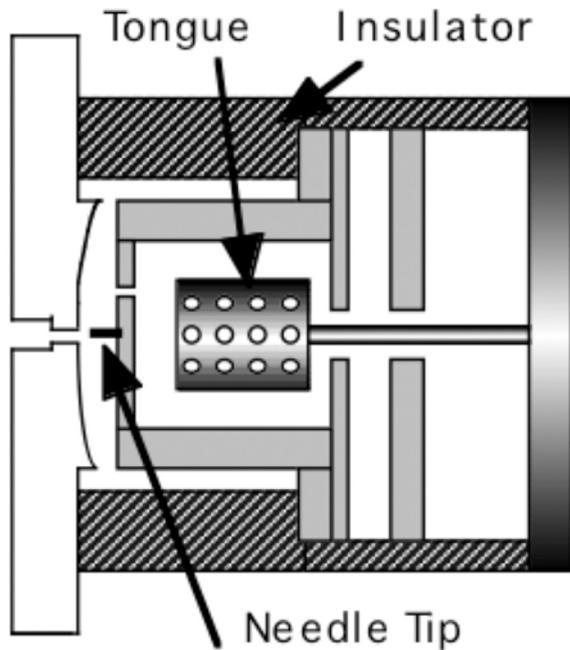


Figure 5. The top view of microparticle ion source/reservoir.

ン源の帯電方法とによって決まると考えられ、微粒子の質量と一定の相関を持っている。ここで用いられたイオン源には先端が半球状（直径数 μm ）の帯電針が使われており、そこに微粒子が接触する（あるいは近

づく）時に誘起される電荷と針先からの強電場による電界放出の釣り合いで帯電電荷量が決まる。加速微粒子の数と電荷量を増やすこと、速度や個数を制御すること、イオン源を長持ちさせることなど、がこれからのイオン源設計の課題である。東大では加速器のタンクを開けずに4種類の微粒子を加速できるようにイオン源を改良したので、同じ種類の微粒子を用いれば少なくともイオン源の寿命（これまでのものは1週間位）は4倍延ばすことができるようになった。最近ではドロプレットやエレクトロ・スプレーを用いた新しい発想の微粒子イオン源が開発されているので²⁶⁾、今後の発展が期待される。

これまでに HIT で加速された微粒子はグラファイト、銀、鉄、ニッケルで直径 $0.01 \mu\text{m}$ – $5 \mu\text{m}$ 程度（質量で 10^{-18} kg – 10^{-13} kg ）で、帯電する電荷量は直径約 $1 \mu\text{m}$ （粒子の種類で違うが大体 10^{-15} kg ）の微粒子で約 $5 \times 10^{-14} \text{ C}$ （価数 3×10^5 ）であり、Fig. 6(a) からわかるように 3 MV で加速すると約 10 km/s の速度に達する。この時の運動エネルギーは約 1 TeV 近くになる。

4 探査機に搭載する宇宙塵測定器の開発

宇宙塵の物理・化学計測を宇宙で直接試みようとして測定器が開発され、古くは1962年の「Explorer16」を初めとして、これまでに20機以上の探査機に宇宙塵計測器や質量分析器が搭載されてきた。

宇宙塵を「その場」で観測する装置が搭載されてい

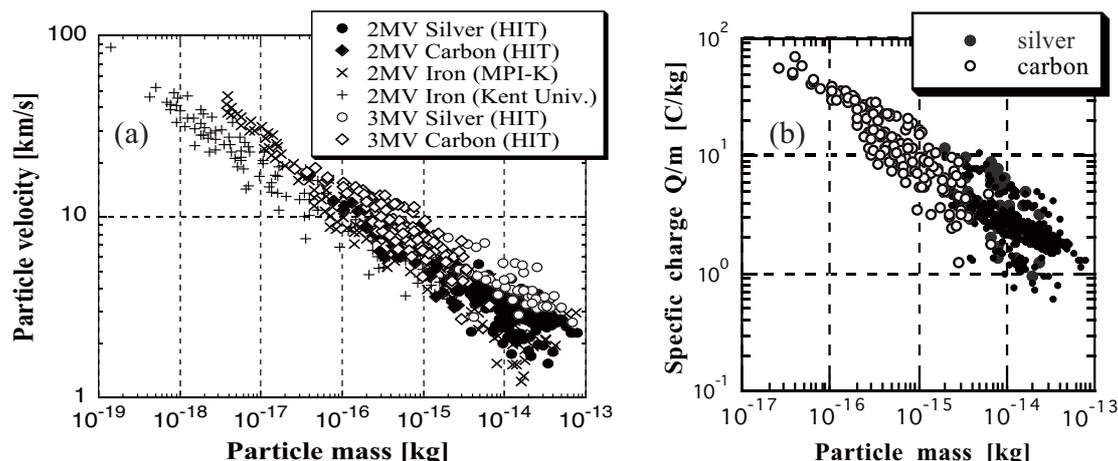


Figure 6. (a) The particle velocity as a function of the particle mass. The experimental results of 3.75 MV Van de Graaff accelerator of HIT and 2 MV Van de Graaff accelerators of Max-Planck-Institut and Kent University. (b) Relation between the specific charge and the mass of accelerated microparticles.

る海外の最近の探査機を挙げておこう。「Cassini」は2004年7月土星の周回軌道に入り、現在も計測を続けていて、土星の輪やエンケラドスで氷微粒子を発見するなど多大な成果を上げているので、ニュースでご存じの方も多いと思う。「STARDAUST」は2004年1月Wild2 彗星の236 km 付近を通過して微粒子をエアロジェル捕集器で集め、2006年1月に試料を持ち帰り、現在も分析が進行中である。「Rosetta」が2014年8月にChuryumov-Gerasimenko 彗星に到着し、「Rosetta」にはCOSIMA というTOF質量分析器が、着陸機「Philae」にはDIM という2種類のダスト測定器が搭載されていて彗星からのダストを計測する。

我が国でも宇宙探査機に搭載可能な小型で軽量な宇宙塵計測・捕集装置の開発を、超高速微粒子を用いて、行っている。その開発においては、宇宙塵が検出器に衝突した時に起こる現象を模擬するために、色々な種類、サイズの微粒子を加速し標的の金属板や検出器である piezo 素子などに衝突させて、誘起される様々な信号（電荷、光、イオン、電子等）を測定し、微粒子の衝突前の持っていた電荷、速度、質量分析による微粒子の化学的成分などの情報を得ている。

探査機に搭載する宇宙塵計測器には、限られた搭載スペース、重量、消費電力等の制約があり、できる限り軽量で単純な検出器構造と単純な電子回路系が要求される。さらに過酷な温度環境、放射線環境、超高真空環境といった極限環境での確実な動作が保証されねばならない。機器開発においては地上の研究室で使用する

測定器とは違った仕様が要求されるが、まずは一般的な機器開発と同じ仕様の試作基板モデル (Bread Board Model: BBM) から初めて、工学モデル (Engineering Model: EM) などを経て打ち上げ用の最も仕様が厳しいモデル (Flight Model: FM) に到達する。

以下に私たちのグループで開発している宇宙塵計測器について少し詳しく紹介する。piezo 圧電素子型宇宙塵計測器、衝突電離型宇宙塵計測器、大口径衝突電離を用いた飛行時間型質量分析器など放射線検出器や質量分析器と似てはいるがひと味違ったものであることに注目して頂きたい。

4.1 piezo 圧電素子を用いた宇宙塵計測器

piezo 圧電素子を用いた宇宙塵計測器には、検出器に PZT (lead zirconate titanate) 圧電セラミックスや PVDF (PolyVinilidene DiFluoride) 高分子フィルムが用いられており、いずれもこれまでに幾つかの探査機に搭載されている。この検出器の特徴としてバイアス電源が不要、検出器形状の自由度の高さ、優れた温度耐性や放射線耐性、廉価な材料・製作費などの利点がある。特に piezo 圧電高分子フィルムは軽量かつ大面積の検出器が作製可能で今後の開発が期待される。

この PZT piezo 圧電素子を用いた宇宙塵計測器 MDM (Mercury Dust Monitor) がヨーロッパの ESA と日本の JAXA との共同水星探査計画 BepiColombo において、JAXA 側の MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) 探査機に搭載される。この計画では ESA 側の

MPO (Mercury Planetary Orbiter) と MMO の 2 機の探査機が 2017 年打ち上げられ、2024 年 1 月に水星周回軌道に入り最低 1 年間の観測を行う予定である。Figure 7 に搭載される MDM の PZT ピエゾ検出器と測定用電子回路の写真を表示する。水星に行くので太陽熱をできるだけ低減するために検出器の表面には太陽光反射用のポリイミド樹脂がコーティングされている。Figure 8 に静電加速器、軽ガス銃、微小ボールの落下試験で得られた PZT ピエゾ検出器の出力（電荷量に対応）と検出器にぶつかる微粒子の運動量との関係を示す⁶⁾。



Figure 7. Mercury Dust Monitor (MDM) on-board BepiColombo MMO, which is composed of PZT piezo ceramic detector (40 mm × 40 mm × t2 mm × 4 pieces) coated with white paint reflecting the solar light, and electronics.

また PVDF 高分子膜を用いた宇宙塵計測器 ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detector in INterplanetary space) が小型ソーラー電力セイル「IKAROS」に搭載された。ALADDIN は総面積 0.54 m² という宇宙探査史上最大規模の有効検出面積を持つ宇宙塵検出器であり、2010 年 5 月打ち上げられ、既に観測を終えた。1 AU–0.7 AU における航行期間中に宇宙塵観測を行い、現在データを解析中である⁵⁾。

これらの piezo 圧電素子の評価を行うため、微粒子を加速して衝突させ、粒子速度、質量、圧電信号の関連性を系統的に調べてきた。これまでの実験から、得られる信号強度と衝突粒子の運動量の間 Fig. 8 のような相関関係が見出されているが、微粒子の質量や速度などの情報も得られないか研究中である。

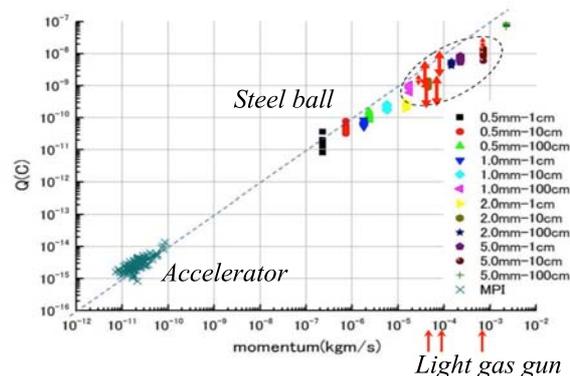


Figure 8. Relation between charges of impact signals obtained from PZT detector and momenta of microparticles accelerated with electrostatic accelerators, a light gas gun and free falls.

4.2 衝突電離型宇宙塵計測器

衝突電離型宇宙塵計測器 (Impact Ionization Detector) は、微粒子の金属への衝突による電離現象を用い、衝突で生じるプラズマが発生する波形を解析して宇宙塵の検出器に入射してくる速度や質量を推定するものである。Figure 9 に測定原理を示す。金の板にぶつかった宇宙塵はイオン化され電子やイオンとなって周りの電極やグリッドに流れ込む。それぞれの出力波形を解析することで宇宙塵の速度、質量、電荷等を計測することができる。この方式の宇宙塵計測器をドイツのグループが開発し、日本の探査機である月探査機「ひてん」や火星探査機「のぞみ」⁴⁾ に搭載して宇宙塵の観測に成功した。現在は軽量化、大口径化に向けて開発が進められている。これまでに宇宙塵の検出領域の直径が 5 cm の初代、15 cm の第二代と赤外レーザー照射や加速器を用いた微粒子照射の基礎実験を重ね、直径 30 cm の第三号機に至ってほぼ初期の目的を達成することができ、現在では一辺 30 cm の四角形の大口径衝突電離型宇宙塵計測器²⁷⁾ が完成し (Fig. 10)、月探査や宇宙ステーションへの搭載を提案している。

4.3 飛行時間型 (TOF) 質量分析法を用いた宇宙塵計測器

飛行時間型質量分析器 (Time-Of-Flight Mass Spectrometer: TOF-MS) は、宇宙塵の質量や速度といった物理量だけでなく、宇宙空間で宇宙塵が固体に高速衝突した時に入射粒子がプラズマ化される現象を

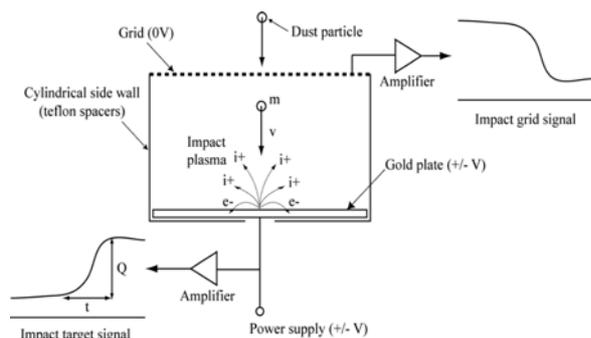


Figure 9. Schematic diagram of an impact ionization type cosmic dust detector⁴⁾.

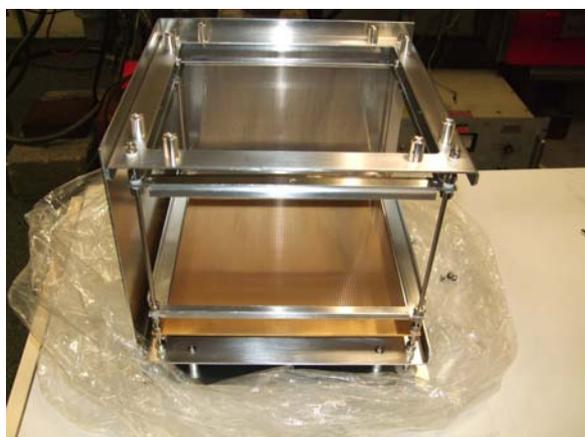


Figure 10. Impact ionization type cosmic dust detector with a large impact area (30 cm x 30 cm).

利用し、そこで発生したイオン（宇宙塵の構成元素）を分析し、その化学組成を推定するものである。私たちが開発している小型で高性能のイオン反射方式飛行時間型質量分析器について少し詳しく紹介する¹⁷⁾。この分析器は1986年にハレー彗星探査のために搭載された分析器と同じ原理のものであるが、さらなる小型化、軽量化、高性能化を目指している。実験室での質量分析器と大きく違う点は、宇宙塵がぶつかる標的金属の面積をできるだけ大きくしたいが、大きくすると収束条件が悪くなり、分解能が落ちることである。また標的からのイオンは極力避けたいので金などの貴金属を使う場合が多い。また探査機では高電圧のリソースが限られているため、地上で利用できるような高電

圧を利用することができない点も分解能向上の難点となっている。

Figure 11 に新しい概念で開発した反射型 TOF-MS の概略図と実験に用いた装置を示す。TOF-MS の質量分解能 R は (2) 式のように表される。

$$R = \frac{M}{\Delta M} = \frac{T}{2\Delta T} \quad (2)$$

ここで M はイオンの質量、 T は標的から引き出されたイオンの飛行時間、 ΔT はイオンの初期速度分布による飛行時間の揺らぎで、 ΔM はその飛行時間の揺らぎによる質量スペクトルの広がりを示す。直線型 TOF-MS ではイオンの持つ初期速度の分布が到達時間に大きく影響するため、質量分解能 R の向上が困難である。自由飛行空間が長くなると、それぞれのイオンの到達時間差が大きくなり分解能が高くなる。これらの短所、長所を考慮したのが反射型 TOF-MS である。

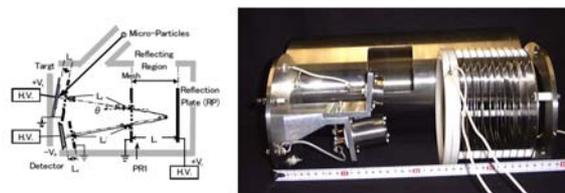


Figure 11. Schematic diagram of a reflection type Time-Of-Flight (TOF) mass spectrometer and a photograph of a prototype instrument.

反射型 TOF-MS はイオンの反射領域を設けることで、分析器本体の大きさを変えずにイオンの飛行距離を長くできる。飛行距離が伸びただけ質量が異なるイオンの到達時間の間隔が大きくなるため、質量分解能は向上する。更にイオン生成時の初期速度のばらつきによって、速度に広がりを持った同じ質量のイオンのうち、速度が速いものは反射領域の奥の方まで進入してその飛行距離が伸びる一方、速度が遅いイオンは反射領域のより手前側で反射するので、初期速度の広がりが相殺され直線型 TOF-MS よりも質量分解能が向上する。この反射領域の電場を平行電場とすることでイオンの持つ初期速度分布による到達時間のばらつきは抑えられるが、衝突生成時に空間的に広がったイオンを十分に収束することはできない (Fig. 12 左)。以前の探査機に搭載された宇宙塵計測器も標的の面からほぼ垂直 ($\pm 2^\circ$) に飛び出したイオンしか検出できていない。しかし、微粒子の入射角度や速度の違いによって生成されるイオンの飛び出す方向や速度が異

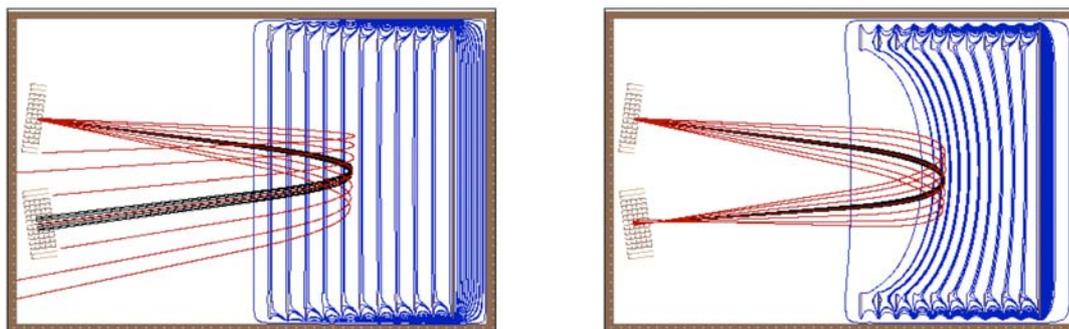


Figure 12. The results of the simulations of particle tracks inside TOF-MS with parallel (left hand side) and curved (right hand side) electric fields.

なるので、質量分解能を高くするためにはイオンの時間的収束だけでなく、空間的収束を可能とする方式が必要となる。TOF-MS 内でのイオンの軌道シミュレーション計算により、反射領域の電場を曲面とすることでイオンの時間的・空間的収束が可能となり飛躍的に質量分解能を高くできることが分かった (Fig. 12 右)。この計算では 1000 以上の質量分解能を可能とする光学系があることが示されている。

実験の結果、質量分解能は衝突微粒子の物性、速度の違いや標的物質との組み合わせによって多少幅があるが、直線型の場合、 $R = 20$ 程度であったが平行電場反射型では 70 以上が得られた。また、曲面電場反射型では炭素微粒子の衝突実験において 200 以上の質量分解能が得られている。この値は 1986 年にハレー彗星を対象とした宇宙塵計測器の質量分解能以上のものになった²⁸⁾。今後は標的面積を大きくし、かつ、コンパクトな TOF-MS の開発を目指していく。

4.4 宇宙塵捕集器

上記に挙げたものの他、比較的遅い衝突速度(10 km/s 程度まで)の宇宙塵を非破壊捕集して地球に持ち帰ることができる捕集剤をテストしている。捕集剤には極低密度素材エアロジェル(シリカゲル)が世界的に用いられており、日本では KEK の素粒子実験計測用に開発された材料を「たんぼぼ」計画⁷⁾で使用している。

さらに、衝突発光による軌道・物理情報と分光による大まかな組成情報をリアルタイムで取得しつつ、衝突物を捕集することができれば格段に宇宙塵情報を得ることができるので、フォトマルと捕集材を組み合わせたハイブリッド型宇宙塵捕集・計測器の開発も始めている。

5 おわりに

地球近傍から深宇宙という太陽系の隅々まで探査機が飛行する時代になって、宇宙塵が果たしてきた役割が次第に明らかになりつつある。太陽系が誕生した頃の情報がその小さな物質中に秘められていて、太陽系の起源や生命の起源が解明される日もそう遠くないかもしれない。そうした物質を宇宙の「その場」で計測することは必然の成り行きであり、初期の科学衛星に宇宙塵・デブリ検出器が搭載されていたことからその重要性がうかがわれる。現在では多くの惑星・小惑星探査機に宇宙塵計測器が搭載されていて、その開発やキャリブレーション試験を行うのに、地上でも宇宙で飛び交う宇宙塵と同じ位の速度の微粒子を作り出すことは絶対不可欠な要素であり、静電加速器を用いた微粒子の超高速加速の研究の進展を期待する。日本では 1998 年に東大で最初の加速が行われてから宇宙・惑星科学のみならず物質科学でも利用されてきた。宇宙塵測定器ではピエゾ効果を利用した検出器、衝突電離を利用した検出器、宇宙塵の化学組成を調べる飛行時間型質量分析器と幅広い開発研究が行われてきて、その中には既に宇宙に行ったものもあれば、これから旅立つものもある。これからは日本から宇宙へ宇宙塵観測器を積んだ探査機がたくさん打ち上げられんことを願いつつ筆を置く。

6 謝辞

長年にわたり本研究に共同研究者として携わって頂いた皆様に感謝いたします。小林紘一、岩井岳夫、尾亦孝男、濱邊好美、佐々木 晶、中村真季、工藤久明(東

京大学), 長谷川直, 奥平恭子, 矢野創, 藤原顕 (宇宙科学研究所), 村永和哉, 平井隆之, 大橋英雄 (東京水産大学, 東京海洋大学), 永島敦, 蔵座元英, 大西俊之, 藤井雅之, 宮地孝, 長谷部信行 (早稲田大学), 河村亨, 野上謙一 (獨協医科大学), 小林正規 (千葉工業大学), 河内祐也, 篠原悠紀, 武智誠次, 南繁行 (大阪市大), 木村宏 (神戸大), 池田卓也 (京大), Ralf Srama, Eberhard Grün (Max-Planck-Institute for Nuclear Physics) (所属・氏名は参加当時)

参考文献

- 1) J. Kissel, F. R. Krueger, Appl. Phys. A, 42 (1987) 69.
- 2) 佐々木晶, 山本哲夫, 他, 日本惑星科学会誌, 6 (1997) 291.
- 3) 向井正, 日本プラズマ核融合学会誌 82 (2006) 77. http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2006_02/jspf2006_02-77.pdf
- 4) E. Igenbergs, S. Sasaki, R. Munzenmayer et al., Earth Planets Space, 50 (1998) 241.
- 5) H. Yano, M. Tanaka, C. Okamoto, T. Hirai, N. Ogawa, S. Hasegawa, T. Iwai, K. Okudaira, Abstract of the 42nd-Lunar and Planetary Science Conference, Houston, TX, U.S.A., (2011).
- 6) K. Nogami, M. Fujii, H. Ohashi, T. Miyachi, S. Sasaki, S. Hasegawa, H. Yano, H. Shibata, T. Iwai, S. Minami, S. Takechi, E. Gruen, R. Srama, Planet. Space Sci., 58 (2010) 108.
- 7) 山岸明彦, 日本惑星科学会誌, 20 (2011) 117.
- 8) H. Shibata, K. Kobayashi, T. Iwai, Y. Hamabe, S. Sasaki, S. Hasegawa, H. Yano, A. Fujiwara, H. Ohashi, T. Kawamura, K. Nogami, Radat. Phys. Chem., 60 (2001) 277.
- 9) H. Shelton, C. D. Hendricks Jr., R. F. Wuerker, J. Appl. Phys., 31 (1960) 1243.
- 10) H. Fechtig, E. Grün, J. Kissel, Laboratory simulation, in: J. A. M. McDonnell (Ed.) "Cosmic Dust", Wiley-Interscience Publications, (1978) 607.
- 11) P. W. Keaton, G. C. Idzorek, L. J. Rowton, Sr., J. D. Seagrave, G. L. Stradling, S. D. Bergeson, M. T. Collopy, H. L. Curling Jr., D. B. McColl, J. D. Smith, Int. J. Impact Eng., 10 (1990) 295.
- 12) 福澤文男, 応用物理, 60 (1991) 21.
- 13) M. J. Burchell, Cole, J. A. M. McDonnell, J. C. Zarnecki, Meas. Sci. Technol., 10 (1999) 41.
- 14) S. Hasegawa, Y. Hamabe, H. Yano, A. Fujiwara, S. Sasaki, H. Ohashi, T. Kawamura, K. Nogami, K. Kobayashi, T. Iwai, H. Shibata, Int. J. Impact Eng., 26 (2001) 299.
- 15) Y. Enokido, M. Kondo, J. Goto, J. Nucl. Sci. Tech., 35 (1998) 82.
- 16) H. L. K. Manning, J. M. Gregorie, Int. J. Impact Eng., 33 (2006) 402.
- 17) A. Shu, A. Collette, K. Drake et al., Rev. Sci. Instrum., 83 (2012) 075108.
- 18) E. R. Harisson, Nature, 291 (1981) 472.
- 19) R. Timmermann, R. Plaga, Phys. Rev. A, 44 (1991) 4412.
- 20) A. E. Pozwolski, Nucl. Instrum. Meth. A, 356 (1995) 153.
- 21) A. E. Pozwolski, Nucl. Instrum. Meth. A, 385 (1997) 191.
- 22) T. Iwashita, T. Adachi, K. Takayama et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 14 (2011) 071301.
- 23) M. J. Burchell, M. J. Cole, S. F. Lascelles, M. A. Khan, C. Barthet, S. A. Wilson, D. B. Cairns, S. P. Armes, J. Phys. D-Appl. Phys., 32 (1999) 1719.
- 24) M. J. Burchell, M. Willis, S. P. Armes, M. A. Khan, M. J. Percy, C. Perruchot, Planet. Space Sci., 50 (2002) 1025.
- 25) M. Stübig, G. Schäfer, T. Ho, R. Srama, E. Grün, Planet. Space Sci., 49 (2001) 853.
- 26) J. D. Kerby, R. Terik Daly, D. E. Austin, Earth Planets Space, 65 (2013) 157.
- 27) T. Hirai, H. Ohashi, S. Sasaki, H. Shibata, K. Nogami, T. Iwai, R. Srama, Advances in Geosciences, 19 (2010) 295.
- 28) Y. Hamabe, S. Sasaki, H. Ohashi, T. Kawamura, K. Nogami, H. Yano, S. Hasegawa, H. Shibata, Proc. Meteoroids 2001 Conf., ESA SP-495 (2001) 621.

著者略歴

柴田 裕実: 大阪大学産業科学研究所産業科学ナノテクノロジーセンター・特任研究員(非常勤)。電気通信大学物理工学科卒業, 東京工業大学大学院原子核工学専攻博士課程修了。理化学研究所流動研究員, 東京大学原子力研究総合センター重照射管理部門教務職員, 助手, 助教授, 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻助教授, 准教授を経て2013年3月定年退職。学生時代から原子・分子過程を基礎としたmeVからGeVまでの幅広いエネルギー領域での放射線物理・化学を,

主にイオンビーム，電子ビーム，放射光など加速器を利用した研究を行ってきた．最近では静電加速器を用いた微粒子加速に関する研究，ダストやクラスターイオンが関わる惑星・宇宙科学，宇宙での生命の起源などの研究を行っている．現在は2017年に打ち上げら

れる日欧共同水星探査プロジェクト BepiColombo の日本側衛星に搭載されるダスト計測の責任者として力を注いでいる．趣味はアマチュア無線，街（特に歴史ある街）のぶらぶら歩き．