

Cosmic dust simulation by microparticle acceleration using an electrostatic accelerator

Takeo Iwai^{1,A)}, Takao Omata^{A)}, Hiromi Shibata^{B)} and Sunao Hasegawa^{C)}

^{A)}Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo
2-22 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Ibaraki 319-1188

^{B)}Department of Nuclear Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

^{C)}Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency
3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510

Abstract

Solid microparticles have been accelerated for cosmic dust simulation since 1998 in High Fluence Irradiation Facility, The University of Tokyo (HIT). An ion source for solid fine particles is attached to the terminal of our 3.75MV Van de Graaff accelerator. Solid fine particles with around 0.1-10 micron are shaken in the reservoir and are positively charged at the tip of a needle. Then they jumped into the acceleration tube to be accelerate to km/s order. The beam line and experiment chamber is on the extension line from the acceleration tube. The electric charge of fine particles is measured by electrostatic induction when fine particles pass two cylinder-type electrodes, and the velocity can be determined by the time-of-flight. These accelerated microparticles have been used for development of cosmic dust detectors on various orbiters and explorers.

静電加速器を用いた固体微粒子加速による宇宙塵シミュレーション

1. はじめに

宇宙塵 (cosmic dust) は、宇宙空間に存在する固体の微粒子で、大きさは、 $0.01 \mu\text{m}$ から 1mm 程度である。宇宙塵は、言わば宇宙における最小の固体物質であるので、太陽系や宇宙の起源を解明する上で大きな手がかりとなる。したがって、その化学組成や大きさ、飛来方向、速度などをいかにして知るか、ということは宇宙科学においてきわめて重要な研究対象である。よって探査機に宇宙塵計測器を搭載して宇宙空間に打ち上げ、計測器に入射する宇宙塵をリアルタイム計測する試みが太陽探査機ユリシーズ^[1]や惑星探査機ガリレオ^[2]、ハレー彗星探査機^[3]、土星探査機カッシーニ^[4]などで実施されてきた。

こうした探査機搭載用宇宙塵計測器を開発するには、地上において宇宙塵を模擬するような高速固体微粒子による較正実験が不可欠である。宇宙塵は速い粒子では約 100km/s にまで達するものもあると考えられているが、比較的寸法が大きく低速の粒子に関しては、ガス銃やレールガンなどで模擬できる。しかしながらこの手法では 8km/s 程度が限界と言われており、これ以上の速度を実現するには静電加速

器による加速が現在の主流である。この方法は 1960 年代にまず Shelton らが帯電針に微粒子を接触させることにより 100kV の加速に成功し^[5]、その後ドイツ・ハイデルベルクのマックスプランク研究所 2MV バンデグラーフ^[6]や米国^[7]、英国^[8]でも 2MV バンデグラーフによる微粒子の加速が行われ、日本でも京都大学 2MV バンデグラーフにおいて一時期微粒子加速が行われていたことがある^[9]。1990 年代後半に至り、宇宙塵計測器開発に携わる国内の研究者から、「日本独自の宇宙塵計測器開発のため是非微粒子加速器施設を国内に」との強い要望を受け、茨城県東海村にある東京大学重照射研究設備 (HIT) において、既設の 3.75MV バンデグラーフにハイデルベルクと同型の微粒子イオン源を設置し、加速された微粒子の観測に成功した (1998 年)^[10,11,12]。現時点で東大 HIT の加速電圧は世界最高に位置付けられる。本稿では、東大 HIT における微粒子加速装置の現状と、進行中の研究内容について紹介する。

2. 微粒子加速実験体系

2.1 微粒子イオン源

微粒子イオン源は基本的には 1960 年代の基本設計を踏襲している^[5,6]。イオン源のほぼ中央部の空洞に加速する固体微粒子をためておき、その空洞の中に置いた板状電極に 10 kV 程度のパルス電場を印加し、微粒子を帯電させてクーロン力により運動させる。細い穴を通して空洞から外に出てきた微粒子のうち、いくつかは帯電針の先端に接触することにより正に帯電し、加速管に入射される。HIT では当初はハイデルベルクと全く同型の微粒子イオン源を使用していたが、加速微粒子を変更するのに 1 週間近くかかり非効率なため、4 種類の微粒子を遠隔操作で切り替えられるものに改良を行った (図 1)。つまり、1 つのイオン源に 4 つの空洞部と 4 本の棒状電極を組み込み、加速したい粒子をためている空洞の棒状電極にのみパルス電場を印加する、という方式である。この導入により 4 種類までの微粒子を加速器タンクを開けることなく数分で切り替えることができるようになり、実験効率が大きく向上した。

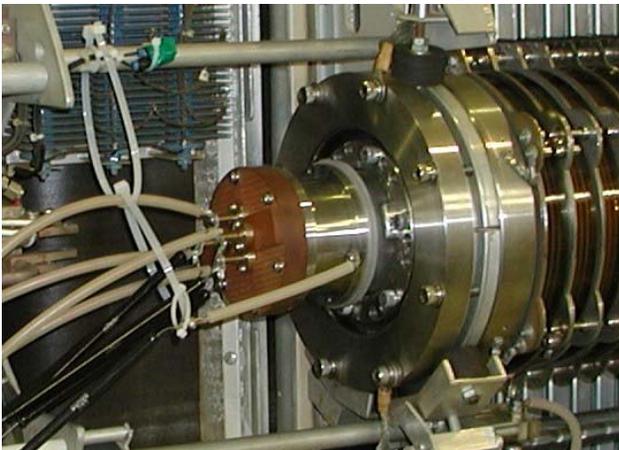


図 1 4 粒子切り替え式微粒子イオン源

2.2 ビームライン

加速管に入射した帯電微粒子 (電荷:q) は、加速電圧 V_{acc} により加速され、加速管出口での運動エネルギーは qV_{acc} となる。 m/q が大きいので分析電磁石による分析は不可能であるため、ビームラインは加速管の延長線上に設置され、加速された微粒子は全てビームラインに入射される。

図 2 に示すようにビームラインには 2 個～3 個の円筒型電極 (内径 10mm) が微粒子の飛行コースに並べられ、電極を帯電微粒子が通過したときの静電誘導による電位変化を電荷敏感増幅器 (ORTEC 142A) で増幅し、オシロスコープで観測する。複数の電極を通過する信号の時間差から微粒子個々の速度 v は決定される。また、通過する際に引き起こす静電誘導は $q = cV$ の関係が成り立つことから、オシロ

スコープで観測されるパルス波高から微粒子の帯電量も評価できる。こうして微粒子個々の電荷と速度が決定されれば、 $\frac{1}{2}mv^2 = qV_{acc}$ の関係から質量も決定できる。図 3 に観測された粒子の速度-質量分布を表し、マックスプランク研究所ハイデルベルクやケント大学の観測結果と比較した^[11] (●◆が東大 HIT での 3 MV 加速による粒子)。この図から明らかなように、同程度の質量の粒子で比較した場合、加速電圧が大きい分東大 HIT の 3 MV 加速粒子は他の 2 施設などの 2 MV 加速よりも大きい速度が得られていることがわかる。

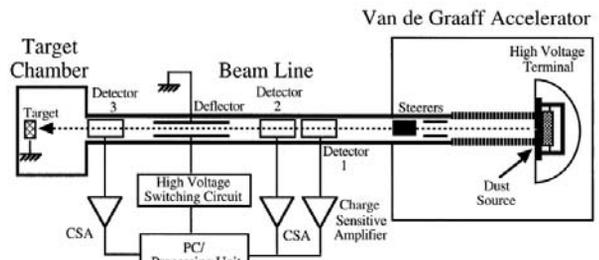


図 2 微粒子加速ビームラインの構成^[10]

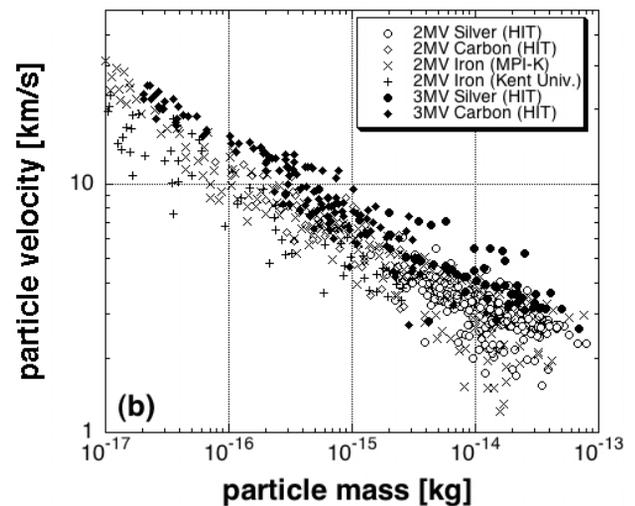


図 3 微粒子速度対質量のプロット (東大 HIT, マックスプランク研究所、ケント大学の比較)^[11]

3. 研究開発の内容

HIT において微粒子加速を始めて以来、様々な形式の宇宙塵検出器の開発に利用されてきたが、そのうちの代表例 2 例について紹介する。

3.1 P Z T 圧電素子によるリアルタイム検出 (水星探査機ミッション「BepiColombo」)

チタン酸ジルコン酸鉛 (P Z T) に代表される圧電素子は、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、廉価な材料費や製作費、等々様々な制約条件の課せられる探査機において利点があるので、P Z Tを超高速微粒子のリアルタイム検出器として活用することに着目し、開発中である^[13]。東大H I Tおよびマックスプランク研究所ハイデルベルクの加速器を用いて、微粒子を加速してP Z Tセンサーに衝突させ、粒子速度、質量、圧電信号の関連性を系統的に調べている。これまでの較正実験から、微粒子衝突時の圧電効果により得られる波形は衝突速度が大きくなるにつれて振動型の波形から単一パルス状波形に変わっていくこと^[14]、振動型波形においては粒子の運動量と第一周期の振幅との間に良好な相関関係があること^[15]がわかっている。これらの開発成果が認められ、日本が欧州宇宙機構と共同して探査機を打ち上げる水星探査計画 BepiColombo において、開発中のP Z T圧電素子型軽量ダスト計測器が探査機に搭載されることが決定し、2013年の打ち上げに向けてフライトモデル完成に向けた作業が続けられている。

3.2 衝突電離型軽量宇宙塵計測器

超高速衝突に伴う電離現象を利用する衝突電離型宇宙塵計測器において、軽量かつ大開口径を実現する形状を有する宇宙塵計測器の妥当性の実験的検証を行いつつ、ターゲットグリッド間距離と電圧の関係を追求め、衝突電離型計測器が満たすべき構造条件の最適化を図っている^[16]。現在は月探査衛星 SELENE-2 への搭載を目指し開発が続いている。

4. 結言

静電加速器を用いた超高速微粒子の衝突実験は加速器のユニークな応用として宇宙科学分野を中心に宇宙塵計測器開発に利用され、成果として探査機に搭載されることが決まったものも生まれつつある。速度や質量によるリアルタイムでの粒子選別機能などアップグレード課題もあるが、今後も日本の中心的施設として機能するよう継続して努力していきたい。また、宇宙塵分野だけでなく、スペースデブリや機能性材料開発など新たな分野へいかにして応用を広げていくか、これが今後の大きな課題と言えよう。

参考文献

[1] E. Grün et al., "The Ulysses dust experiment", *Astronomy & Astrophysics, Supplement Series* 92 (1992) 411-423.
 [2] E. Grün et al., "The Galileo dust detector", *Space Science Reviews* 60 (1992) 317-340.
 [3] J. Kissel et al., "Composition of Comet Halley dust

particles from Vega observations", *Nature (London)* 321 (1986) 280-282.
 [4] P.R. Ratcliff et al., "The Cosmic Dust Analyzer", *J. British Interplanetary Soc.*, 45 (1992) 375-380.
 [5] H. Shelton et al., "Electrostatic acceleration of microparticles to hypervelocities". *J Appl. Phys.* 31 (1960) 1243-1246.
 [6] J. F. Friichtenicht, "Two-million-volt electrostatic accelerator for hypervelocity research", *Review of Scientific Instruments*, 33 (1962) 209-212.
 [7] E. A. Austin, "IMPACT-IONIZATION MASS SPECTROMETRY OF COSMIC DUST", カリフォルニア工科大学博士論文, (2003).
 [8] M.J. Burchell et al., "Hypervelocity impact studies using the 2 MV Van de Graaff accelerator and two-stage light gas gun of the University of Kent at Canterbury", *Meas. Sci. Technol.* 10 (1999) 41-50.
 [9] 福沢文雄, 「微粒子イオンビーム(マクロンビーム)」, *応用物理* 60 (1991) 720-721.
 [10] H. Shibata et al., "Microparticle acceleration by a van de Graaff accelerator and application to space and material sciences", *Rad. Phys. and Chem.* 60 (2001) 277-282.
 [11] S. Hasegawa et al., "Microparticle Acceleration for Hypervelocity Experiments by a 3.75MV Van de Graaff Accelerator and a 100kV Electrostatic Accelerator in Japan", *Int. J. Impact Eng.* 26 (2001) 299-308
 [12] 柴田裕実, 「微粒子イオンの生成と高速加速」、*放射線* 27 (2001) 57-66.
 [13] K. Nogami et al., "Development of the Mercury Dust Monitor (MDM) on board BepiColombo mission", *Planet. Space Sci.* (2009) in press (available online).
 [14] T. Miyachi et al., "Velocity-dependent wave forms of piezoelectric elements undergoing collisions with iron particles having velocities ranging from 5 to 63 km/s", *Appl. Phys. Lett.* 86 (2005) 234102.
 [15] T. Miyachi et al., "Response from piezoelectric elements appearing immediately after collisions with silver particles", *J. Appl. Phys.* (2005) 014110.
 [16] S. Sasaki et al., "Developments of a symmetric and large-area dust detector of impact ionization type for in-site space measurements", *Proc. 36th ISAS Lunar and Planet. Symp.* (2003) 274-277.