

論文内容の要旨

論文題目 **Study of time-of-flight mass spectrometry for
in-situ analysis of dust particles in space**

(宇宙塵のその場分析用飛行時間型質量分析法の研究)

濱邊 好美

現在太陽系内に存在する宇宙塵は、小惑星帯や彗星などの太陽系内に起源を持つものだけでなく、太陽系外から高速で流入する星間塵も観測されている。このため、宇宙塵は太陽系内だけでなく、宇宙空間のより始源的な物質情報を持ち、太陽系の進化を解明する手がかりを持っていると考えられる。宇宙塵のサイズ・空間分布、その起源と進化、母天体との関係を明らかにするには、宇宙塵の検出位置、飛来方向、組成情報などが重要であり、惑星探査による直接計測が最も効果的である。これまで搭載されたダスト計測器では、主に宇宙塵の存在と質量・速度が計測されてきたが、化学組成のその場分析は Helios, Vega1/2, Giotto, Stardust, Cassini に搭載された衝突電離型ダスト分析器のみに留まっている。また、これらの分析器は彗星や土星などの天体を対象としており、惑星間空間での化学組成情報や星間塵に関する組成情報はほとんど得られておらず、物理量と化学組成の同時計測も行なわれていない。これらを同時計測することにより、物理量と化学組成という2つの視点から宇宙塵の起源・進化に関する情報を得ることができる。また、宇宙空間でより多くの宇宙塵のその場分析を行なうには、より大きな開口径（ターゲット）が必要である。しかし、大開口径と高質量分解能とは相反する要素であり、これまでに高質量分解能・小開口径タイプ（リフレクトロン方式）と大開口径・低質量分解能タイプ（直線型分析器）が搭載されてきたが、双方を同時に満たす分析器はない。そこで、本研究ではその2つの要素を相補するイオン光学系を考察・検証し、大開口径かつ高質量分解能を備えた宇宙塵のその場分析用質量分析器を開発することを目的とした。

宇宙塵の質量分析器の開発において、注目すべきは以下の3点である。

1. 高質量分解能と広い有効面積を両立させるイオン光学系の開発
2. 宇宙塵の高速衝突による宇宙塵自身のイオン化の模擬実験
3. 物理量と化学組成情報の同時測定法の確立

1. 飛行時間型質量分析器の分解能を低下させる要因として、イオン生成時に生じる初期エネルギーのばらつきによる飛行時間の広がり（時間的広がり）と、イオンの空間的広がりがあげられる。高い質量分解能を得るには、この2点を同時に克服するイオン光学系の開発が必要不可欠である。時間的広がりを抑える手法として、自由空間を飛行するイオンを一度反射させることにより、同じ質量/電荷比のイオンが持つ初期エネルギーのばらつきを打ち消す方法が提唱されてきた（リフレクトロン型質量分析器）。一方、空間的広がりを抑えるための手法に関する研究は、ほとんど行なわれていない。そこで、本研究では、イオンの空間的な広がりを抑えるために、反射領域の電場の形状に注目し、イオンの反射面を曲面にすることにより、イオンを時間的・空間的に収束させることが可能であることを示した。また、この曲面を形成するための手法を開発し、イオン光学シミュレーションソフト SIMION を用いてイオンの軌道を計算し、時間的・空間的に収束した場合に、質量分解能が 1000 を超えることを示した。

次に、広い有効面積を持つ分析器の開発に着手した。広い有効面積と高い質量分解能という相反する要素を相補するイオン光学系を SIMION により導き出し、イオンの到達時間から質量分解能を計算した。この場合、小面積ターゲット時の質量分解能より低下するが、300 以上の分解能を備え、約 8 倍の有効面積を持つ質量分析器が実現可能であることを示した。

2. シミュレーションにより導き出したイオン光学系を備えた質量分析器を設計・製作し、その性能を確かめるため、以下の2つの手法を用いて、宇宙塵の高速衝突を模擬した実験を行なった。

1) パルスレーザー照射

Nd-YAG パルスレーザー（波長：1064nm, パルス幅：6-8ns, 最大エネルギー：50mJ）をスリットとレンズに通すことによってビ

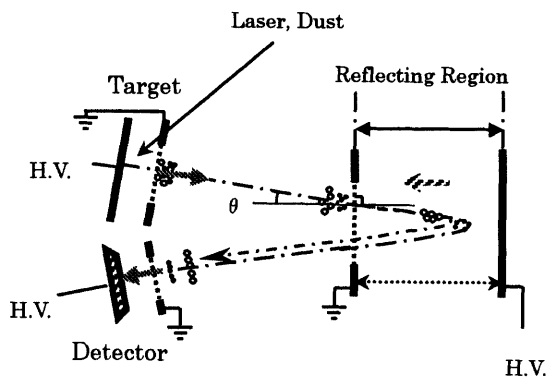


図1. リフレクトロン方式質量分析器

ーム径を $200\mu\text{m}$ 以下に絞った（強度： $\sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ ）。この場合、 $1\mu\text{m}$ 粒子が 3km/s 程度の速度で衝突した場合と同等のプラズマを発生させることができると考えられていた。しかし、個々のイオンが持つ初期エネルギーを測定することにより、本研究で用いたレーザーエネルギーは、衝突速度 $15\text{-}20\text{km}$ に匹敵することが示された。金属ターゲットからイオン (Au^+ や Ag^+ など) を生成させるためにはさらにレーザー出力を上げる必要があるが、今回は分析器の性能を確かめることを目的としているため、再現性の良い Na^+ や K^+ のピークを用いて、新しい光学系の有効性を検証した。 Na^+ や K^+ は金属ターゲット中に不純物として混入しており、これらは低いイオン化エネルギーを持っているため、低エネルギー衝突でも高い確率でイオン化し、検出される。

ターゲット金属の違いによって質量分解能は異なるものの、加速・反射領域に印加する電圧を変化させた場合には、イオン到達時間のずれ（広がり）が観測され、直線型から平行反射型、曲面電場型にした時には、質量分解能およびイオン検出効率の向上が見られた。これはシミュレーションで導いた質量分解能より幾分低い値だが、宇宙空間におけるダスト分析するのに必要な値は満たしている。また、曲面電場では平行電場よりもイオンの検出効率が約 10 倍高いことを示した。

2) 高速微粒子衝突実験

Van de Graaff 静電加速器を用いて、銀粒子（直径 $0.5\text{-}2 \mu\text{m}$ ）、鉄粒子（ $0.4\text{-}3 \mu\text{m}$ ）、炭素粒子（直径 $0.3\text{-}2 \mu\text{m}$ ）ラテックス粒子（ $0.2\text{-}2 \mu\text{m}$ ）を高速加速させ、レーザー照射と同じ条件でスペクトル変化を観察した。銀、鉄粒子の衝突速度は 10km/s 以下であったため、衝突粒子自身のイオン化は観測されなかったが、鉄粒子の場合、レーザー照射と同様に再現性の良い Na^+ と K^+ のピークが得られたので、これらのピークを分析器の性能確認に用いた。

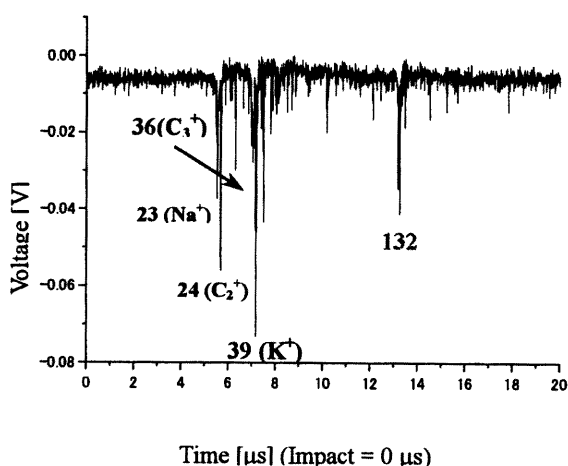


図 2. 高速微粒子衝突実験の結果

(炭素 → 金)

さらに、本研究では、衝突粒子からのイオン生成、質量分析を目的としており、 15km/s 以上に加速可能な炭素粒子とラテックス粒子を用いた衝突実験も行なった。炭素粒子の衝突で得られた 20 個以上のスペクトルを重ねて得られたスペクトルを図 2 に示す。 C^+ は形成されても不安定でこの状態では検出されないが、 C_2^+ 、 C_3^+ が検出された。ここでのスペクトルが示した質量分解能は 500 を超えた。

3. 大開口径を備えた質量分析器

これまで、約 4cm² という小さなターゲットを用いて実験を行ってきたが、現実験状況で可能な限り大きくしたターゲットを新たに作製し、パルスレーザー照射と微粒子の高速衝突によるキャリブレーションを行なった。ラテックス粒子の高速衝突により得られたスペクトル

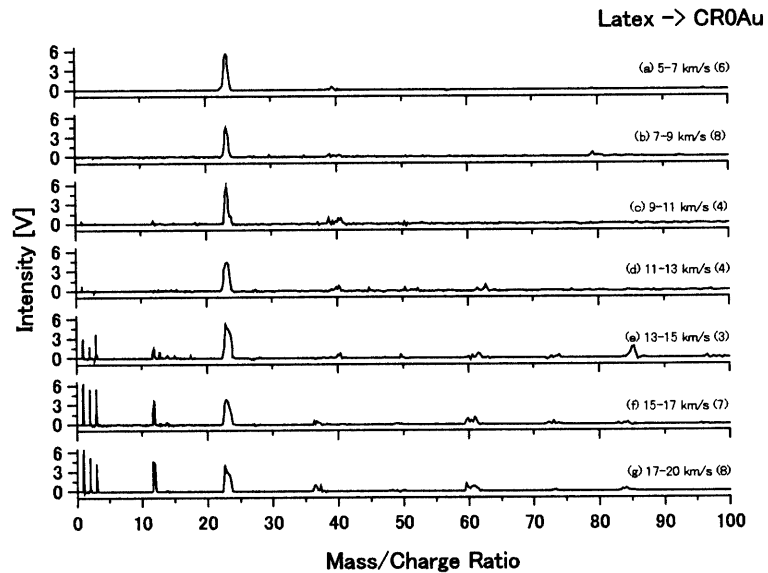


図 3. TOF スペクトル (ラテックス粒子 → 金)

を図 3 に示す。ラテックス粒子は広い速度レンジを持っており、生成されるイオンの速度依存性が確認された。小面積ターゲットに比べて、質量分解能はやや低下したが、再現性のよいスペクトルが得られた。

3. 衝突粒子の物理量測定

これまでのダスト用質量分析器では、衝突粒子の物理量（質量や速度）を同時計測することができなかった。本研究では、ターゲットシグナルの立ち上がり時間 t とその高さ C から速度・質量を求めるキャリブレーションラインを求めた。

$$t = 6 \times 10^{-5} v^{-1.098}$$

$$CM = 0.007 v^{3.440}$$

[v, M : 衝突粒子の速度・質量]

	レーザー照射	微粒子衝突
直線型	< 100	< 80
平行反射型	~ 220	~ 250
曲面反射型	~ 500	~ 550
大開口径型	~ 380	> 210

表 1. 質量分解能の比較

以上のことから、高質量分解能と大開口径をもち、かつ衝突粒子の物理量と化学組成を同時計測できる分析器の開発に成功したと言える。