

# 惑星・彗星探査用質量分析計の開発

豊田岐聡<sup>1</sup>, 奥村大輔<sup>1</sup>, 山口真一<sup>1</sup>, 石原盛男<sup>1</sup>, 交久瀬五雄<sup>1</sup>, 松尾武清<sup>1</sup>

## 1. はじめに

これまでにバイキング計画をはじめとしたさまざまな惑星・彗星探査において、質量分析装置は元素組成分析・同位体比測定・有機物の検出などに用いられ、非常に重要な役割を果たしてきている。惑星・彗星表面での「その場観測」を行う場合、地上での測定のように十分な精製・前処理を行えない。そのため、分析精度を上げるには、質量分析計に高い質量分解能が要求される。一方、惑星・彗星探査機においては、大きさ・重量の制限が非常に厳しい。例えば、2003年にヨーロッパ宇宙機関（ESA）が打ち上げを予定している彗星探査ロゼッタミッションの彗星着陸船に搭載する質量分析計に要求されている性能は、サイズが350mm×300mm×80mm、重量が1.85kg（電源込み）、分解能が3000である。そこで、小型・軽量でありながら高い質量分解能が得られる質量分析計の開発が必要となる。

これまでの惑星・彗星探査に用いられた質量分析計には、磁場型、四重極型、飛行時間型などがある。一般的に、磁場型質量分析計は、高分解能が得られ、かつ定量性に優れているため同位体比測定などに適しているが、磁石を用いるため重くなるという欠点がある。四重極型質量分析計は、小型・軽量化しやすくカッシーニミッションをはじめとし最近の探査計画でよく用いられているが、分解能が悪いという欠点がある。また、飛行

時間型質量分析計は、軽量化は容易であるが、分解能が飛行距離に比例するため、小型で高分解能を得るのは難しいとされてきた。しかし、最近の高速パルス技術の進歩および後ほど述べる分解能向上のためのさまざまな改善により、飛行時間型質量分析計がさまざまな探査計画で用いられるようになってきている。

我々は、ロゼッタミッションに搭載する質量分析計の検討を行い、上記のサイズ・重量制限のもとで要求される性能を満たすことのできるマルチターン飛行時間型質量分析計を提案した。同一飛行空間を複数回周回させることにより、小型でありながら高分解能を得ることができるからである。この提案をもとに、ラボラトリーモデルを設計・製作し、性能評価を行った。本論文では、装置概要および性能評価の結果について述べる。

## 2. マルチターン飛行時間型質量分析計

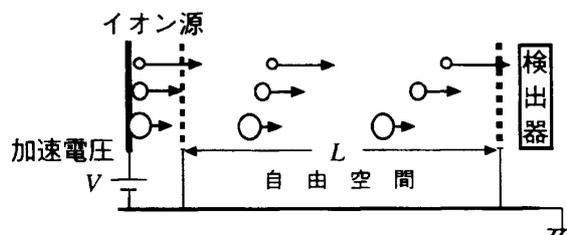


図1 飛行時間型質量分析計の概略図

飛行時間型質量分析計の概略図を図1に示す。

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

イオン源で一定の加速電圧 $V[V]$ で加速されたイオン（質量 $m [u]$ ，価数 $z$ ）が，飛行距離 $L[m]$ を飛行した場合の飛行時間 $T[s]$ は，

$$T = L\sqrt{\frac{m}{2zeV}}$$

となる。ここで， $e[C]$ は素電荷。したがって，飛行時間を測定することにより，イオンの質量電荷比 $m/z$ を測定することが出来る。実際には，イオン源でイオンをパルス化し，検出器に到着するイオン強度と飛行時間との関係（飛行時間スペクトル）を測定する。また，質量分解能 $m/\Delta m$ は，飛行時間スペクトルのピーク幅 $\Delta t$ （すなわち，到着時間の広がり。飛行時間型の場合，通常半値幅をとる。）と

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{T}{2\Delta t}$$

の関係にあり，分解能を向上させるためには，ピーク幅 $\Delta t$ を小さくする（広がらないようにする）か，または飛行時間 $T$ をのばす（飛行距離を伸ばす）

ようにすればよい。ピーク幅 $\Delta t$ が大きくなる原因としては，イオン源内での初期位置・エネルギーの広がり，およびイオン源出射条件の広がり，すなわちエネルギー・位置・角度の広がりなどがある。これらの影響をできるだけ小さくするために，以下に述べるような方法が開発されてきた。

- (a) イオン源内での初期条件の違いによる飛行時間の広がりを収束させるために，二段加速型イオン源[1]，time-lag収束型イオン源[1]，orthogonal acceleration型イオン源[2]を用いる。
- (b) イオン源出射時のエネルギーの広がりを収束させるために，イオンミラーを用いる[3]。
- (c) イオン源出射条件（エネルギー・位置・角度）により生じる飛行時間および空間の広がりを収束させるために，扇形電場を用いる[4]。
- (d) 飛行距離を伸ばすために，複数の扇形電場・イオンミラーを用いて同一飛行空間を複数回周回させる[4,5,6,7,8]。なおこの場合，上記（b），（c）についても同時に満足することが可能である。

探査機の限られた空間で高分解能を得るには，

- (d) のマルチターン（多重周回）型が唯一の解で

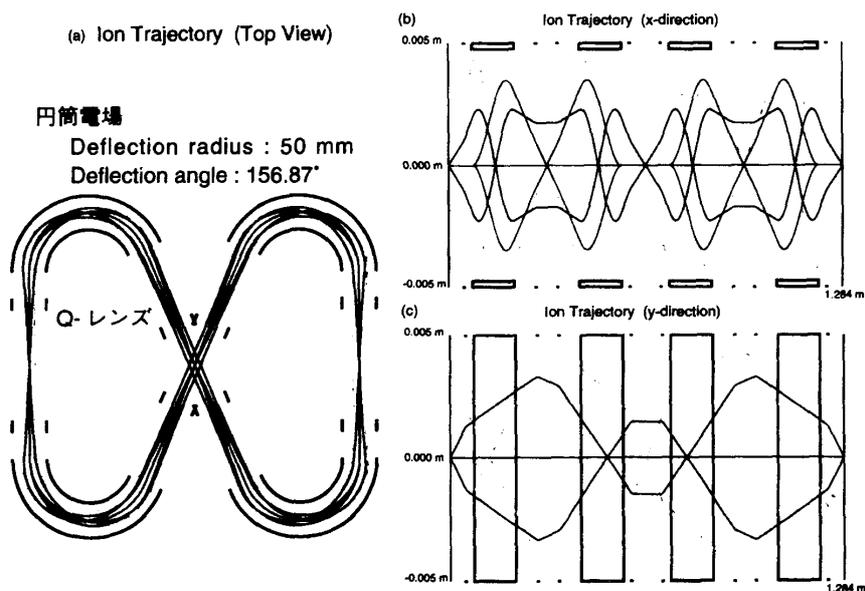


図2 「TRIO-DRAW」[10]によるイオン光学系「MULTUM」のイオン軌道シュミレーション結果。(a) 上から見た図，(b) x方向，(c) y方向。

あると考え、扇形電場を用いたマルチターン飛行時間型質量分析計の開発を行った。マルチターン飛行時間型質量分析計の場合、周回を重ねるごとにイオンビームが発散して感度が低下してしまうことが考えられる。また、周回させるごとに収差が増大し、イオンが広がっていくことにより、かえって分解能が低下してしまうことも考えられる。したがって、イオンが周回後に周回前と全く同じ状態で戻ってくる必要がある。我々は、これを「完全空間・時間収束」[9]と呼んでいる。

我々は、完全空間・時間収束条件を満たす光学系を探し、図2に示すような円筒電場4個と静電四重極レンズ（Qレンズ）8個からなる光学系「MULTUM」を見つけだした。図2は、我々が開発したイオン軌道シミュレーションプログラム「TRIO-DRAW」[10]を用いてシミュレーションしたイオン軌道であり、さまざまな初期位置・角度・エネルギーを持ったイオンは、周回後には出発した状態と全く同じ状態で戻ってきていることがわかる。飛行時間についても、さまざまな初期条件を持ち同時に出発したイオンは、周回後、同時刻に到着する。この光学系については、半周でも完全収束条件を満たしているため、一周および半周単位での測定が可能である。

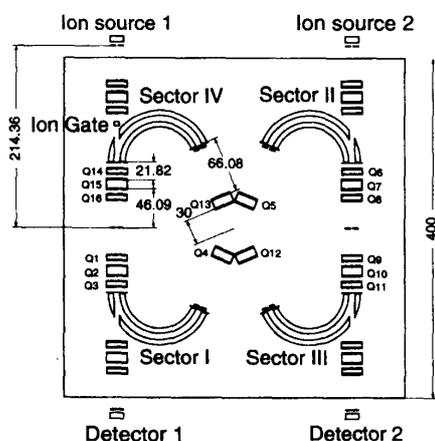


図3 「MULTUM Linear plus」の装置全体図。

さらに、イオンの入出射を容易にするために、図3に示すように円筒電場に穴をあけ、「MULTUM」に直線型を組み合わせたイオン光学系「MULTUM Linear plus」をラボラトリーモデルの光学系として採用した。直線部においてもイオン軌道の広がりを抑えるため、Qレンズトリプレット（Qレンズ3個を一組として用いる）を4組用いている。

### 3. 「MULTUM Linear plus」の装置概要

前述の光学系に基づきラボラトリーモデル「MULTUM Linear plus」を設計・製作した[6]。図3に装置の全体図を、図4に真空容器に納めた装置の写真を示す。円筒電場は、半径5cm・角度156.87°で、周回部1周の飛行距離は1.284mである。

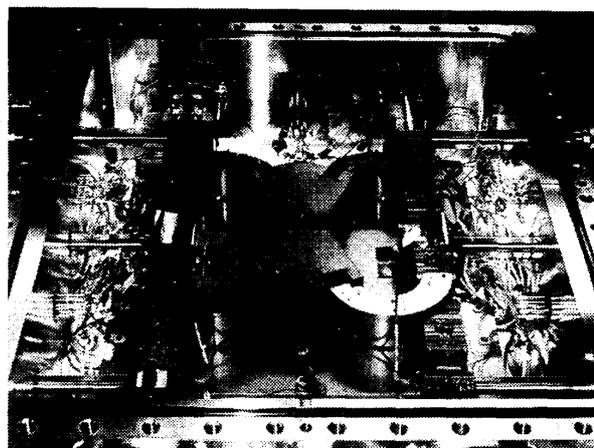


図4 真空容器に納められた「MULTUM Linear plus」の装置写真。

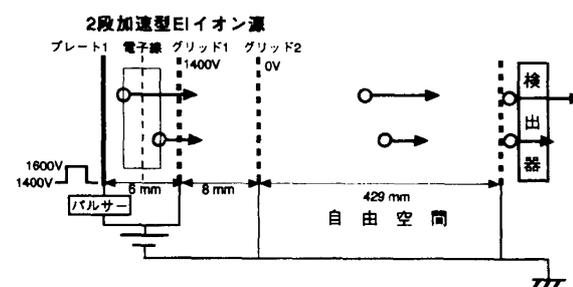


図5 Wiley-McLarenタイプの二段加速型Eイオン源の模式図。図中の寸法・電圧値は、今回の実験に用いた値である。

また、直線部の飛行距離は0.429mである。電場・Qレンズ等は、40cm×40cmのベースプレート上に固定され、60cm×70cm×20cmの真空容器に納められている。

直線部を組み合わせたことにより、直線部に関する飛行時間に関するエネルギー収束条件は満たされていない。初期エネルギーの広がりによる主要な原因は、イオン化された位置の広がりによるポテンシャルエネルギーの広がり（イオンの速度の違い）である。エネルギー収束条件が満たされていないため、速度の違うイオンは、検出器に違った時間に到着することになる。我々は、Wiley-McLarenタイプの二段加速型EIイオン源[1]を用いることで、イオン源内の位置の広がりにより獲得するポテンシャルエネルギーが違うイオンを、検出器に同時に到着させるようにした。図5に二段加速型イオン源の模式図を示す。プレート1にパルス電圧が印加された時、検出器から遠い位置でイオン化されたイオンほど高いエネルギーで加速されることになり、同時に加速されたイオンはある特定の場所に同時に到着することになる。図5のように2段に加速する場合は、加速場の強さを選ぶことで、その場所を任意の位置にすることが可能となる。

検出器は、マイクロチャンネルプレート (MCP) (F4655-10, 浜松ホトニクス (株)) を用い、シグナルはデジタルオシロスコープ (LC564A, レクロイ・ジャパン (株)) にて加算平均をとった。

測定は、図6に示すようなタイムチャートで電場電圧をスイッチすることで行った。Ion Source 1 でパルス化されたイオン群は、アース電位の Sector IVの穴を通り抜けて周回部に入る。イオンが周回し戻ってくるまでにSector IVの電圧を印加する。希望の周回数イオンが周回した後、Sector I (または半周単位の場合はSector III) をアース電位にし、イオンを検出器の方へ出射し、飛行時間ス

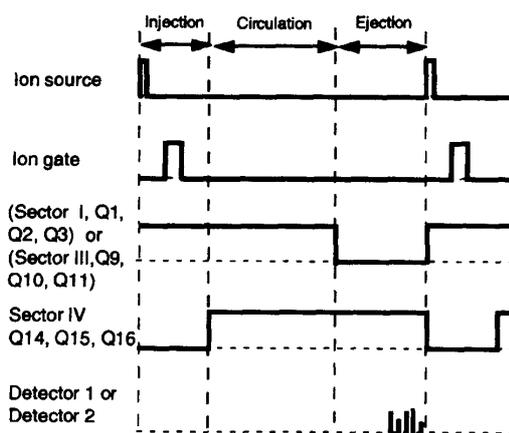


図6 「MULUTUM Linear plus」のタイムチャート。タイムチャート中の記号「Sector I」等は、図3の記号と対応している。

ペクトルを得た。周回を重ねると、軽いイオンが周回遅れの重いイオンを追い越し、測定結果が煩雑になることがある。これを防ぐため、周回部の前においたイオンゲートで、追い越しが起こらない質量範囲のイオンのみを通すようにした。

## 4. 実験

大気と一酸化炭素の混合ガスをリークバルブを通してイオン源に導入し、測定を行った。電子の加速電圧は70V、イオンの加速電圧は1.5kV、サンプルガス導入時の真空容器内の真空度は $6.8 \times 10^{-6}$  Paであった。飛行時間スペクトルは、デジタルオシロスコープにて、サンプリングレート4 GS/sで測定し、5000回の加算平均をとった。

0.5周、50.5周、100.5周、150.5周の  $m/z = 28$  付近の飛行時間スペクトルを図7に示す。これらのピークは $\text{CO}^+$ と $\text{N}_2^+$ のダブルレットであり、これを分解するには、質量分解能 $m/Dm=5000$  (半値幅で定義)が必要である。半周 (飛行距離1.071m) では、分解能が400程度であり $\text{CO}^+$ と $\text{N}_2^+$ は分解できていない。50.5周 (65.251 m) では分解能25000が得られ、二本のピークに分解できている。さらに周回数が増える (飛行距離が伸びる) につれて、ピーク幅

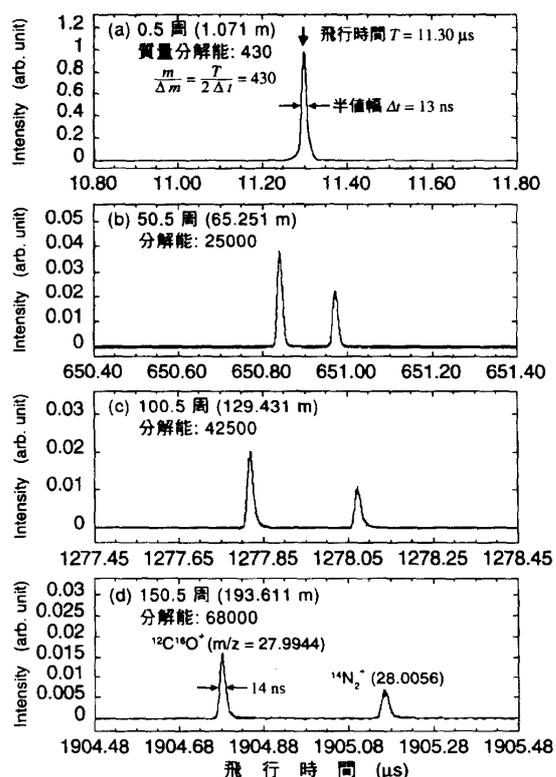


図7  $m/z=28$ 付近の飛行時間スペクトル。(a) 0.5周。飛行距離：1.071m、分解能 (FWHM)：430。(b) 50.5周。飛行距離：65.251m、分解能：25000。(c) 100.5周。飛行距離：129.431m、分解能：42500。(d) 150.5周。飛行距離：193.611m、分解能：68000。縦軸は半周のピーク ( $\text{CO}^+$ と  $\text{N}_2^+$ ) のイオン強度が1になるように規格化してある。

は12~14 nsのままで、 $\text{CO}^+$ と $\text{N}_2^+$ のピーク間隔が広がっていき、分解能が向上している。150.5周 (193.611m) で分解能68000を得ることができた。イオン強度は、最初の10周で約1/5になる。これは、入射時に大きな広がりを持ったイオンが電場等と衝突して失われるためである。その後は、一周あたり95%以上のイオンが周回している。

## 5. 「MULTUM Linear plus」の評価

ロゼッタミッションの彗星着陸船に搭載する質量分析計のラボラトリーモデルとして、マルチターン飛行時間型質量分析計「MULTUM Linear plus」

を設計・製作した。残念ながら時間的な制約で、マルチターン飛行時間型質量分析計のロゼッタミッションへの搭載は見送られることになったが、「MULTUM Linear plus」は割り当てられたサイズ内で要求される分解能3000を十分満足できる装置であることを実験で示すことが出来た。探査機へ搭載するには、部品点数を減らし、軽量化を図る必要がある。我々は、「MULTUM Linear plus」の実験結果を踏まえ、Qレンズを用いない4個のトロイダル電場 (y方向に対する収束作用も持つ電場) のみからなる光学系について試作を開始している。

## 謝辞

本装置を製作するにあたり、H. Rosenbauer, R. Roll両博士 (Max Planck Institute for Aeronomy), A. Ghielmetti 博士 (Lockheed Martin Advanced Research Center) には、多大なご協力をいただきました。装置本体は、ロゼッタミッションのラボラトリーモデルとしてマックスプランク研究所において製作されました。また、伊藤啓行助手 (大阪大学) には、本研究を進めるにあたり貴重なコメントをいただきました。鶴田浩一郎教授 (宇宙科学研究所) には、ご助言・ご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。また本研究は、平成9年度宇宙科学研究所科学衛星及びロケット観測経費 (基礎開発実験)、文部省科学研究費補助金平成9-10年度基盤研究 (B) (09559012)、同平成10-11年度基盤研究 (B) (国10044085)、同平成11-12年度基盤研究 (B) (11559012)、平成9-10年度山田科学振興財団によりました。

## 参考文献

- [1] Wiley, W.C. and McLaren, I.H., 1955, *Rev. Sci. Instrum.* 26, 1150.
- [2] Dawson, J.H.J. and Guilhaus, M., 1989, *Rapid. Commun. Mass Spectrom.* 3, 155.
- [3] Mamyrin, B.A. et al., 1973, *Sov. Phys. JETP* 37, 45.
- [4] Poschenrieder, W.P., 1972, *Int. J. Mass Spectrom. and Ion Phys.* 9, 357.
- [5] Matsuo, T. et al., 1997, *J. Mass Spectrom.* 32, 1179.
- [6] Toyoda, M. et al., 2000, *J. Mass Spectrom.* 35, 163.
- [7] Sakurai, T. et al., 1999, *Nucl. Instrum. Methods A* 427, 182.
- [8] Wollnik, H. and Przewloka, M., 1990, *Int. J. Mass Spectrom. and Ion Proc.* 96, 267.
- [9] Ishihara, M. et al., 2000, *Int. J. Mass Spectrom. and Ion Proc.* 197, 179.
- [10] Toyoda, M. and Matsuo, T., 1999, *NIM A* 427, 375.