

研究ノート

## マルチターン飛行時間型質量分析計の開発

豊田 岐 聡\*

Development of a Multi-turn Time-of-Flight Mass Spectrometer

Key Words : multi-turn time-of-flight mass spectrometer, ion optics, high resolution

## 1. はじめに

これまでにパイキングミッションをはじめとしたさまざまな惑星・彗星探査において、質量分析装置が元素組成分析・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・彗星探査機においては、搭載機器に対する大きさ・重量の制限が非常に厳しい。そこで、小型・軽量でありながら高分解能が得られる質量分析計の開発が必要となる。

筆者らは、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予定の質量分析計の開発にたずさわってきた。ロゼッタミッションの場合、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1.9kg(電源込み)、分解能が3000以上である。この性能を満たすには、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マルチターン飛行時間型質量分析計を用いるのが最適である。実際にラボラトリーモデル「MULTUM Linear plus」を設計・製作し、性能評価を行ったので、装置概要および性能評価実験の結果について紹介する。

## 2. マルチターン飛行時間型質量分析計

「MULTUM Linear plus」のイオン光学系

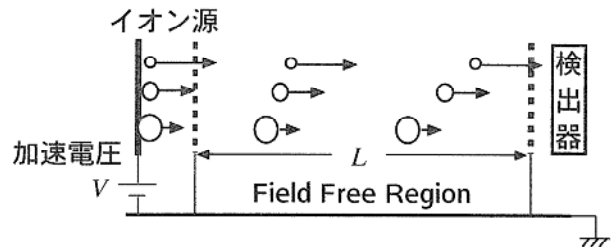
飛行時間型質量分析計<sup>[1]</sup>の概略図を図1に示す。

図1 飛行時間型質量分析計の概略図。

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、

$$T = L \sqrt{\frac{m}{2zeV}} \quad (1)$$

となる。ここで、 $e$ [C]は素電荷である。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。質量分解能 $m/\Delta m$ は、飛行時間スペクトルのピーク幅 $\Delta t$ (飛行時間型の場合、通常半値幅をとる)と

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{T}{2\Delta t} \quad (2)$$

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。

探査機の限られた空間で飛行距離を伸ばすには、同一飛行空間を複数回飛行させることが唯一の解である。このようなタイプの飛行時間型質量分析計と

\*Michisato TOYODA

1972年1月18日生

1996年大阪大学大学院理学研究科前期課程物理学専攻修了, 同年, 同後期課程中途退学

現在, 大阪大学大学院・理学研究科・物理学専攻・物性物理学講座, 助手, 理学博士, 質量分析

TEL 06-6850-5748

FAX 06-6850-5764

E-Mail toyodam@phys.wani.

osaka-u.ac.jp



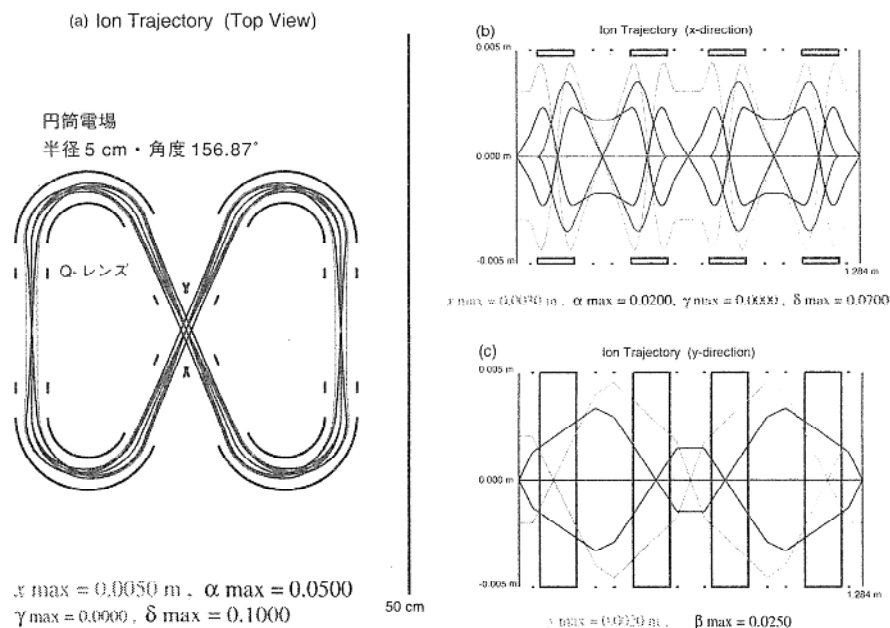


図 2 TRIO-DRAW によるイオン光学系「MULTUM」のイオン軌道シミュレーション結果。(a) 上から見た図, (b) x方向, (c) y方向。

して、Poschenriederが扇形電場を用いた多重周回(マルチターン)型の可能性を提案した<sup>[2]</sup>が、イオンの入出射・高速パルス回路系などの問題から実際に製作するには至っていない。

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、すなわち空間および飛行時間に関して完全収束<sup>[3]</sup>している必要がある。

筆者らは、イオン光学的手法により、完全収束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Qレンズ8個からなる光学系「MULTUM」を見つけだした。図2は「TRIO-DRAW」<sup>[4]</sup>を用いてシミュレーションしたイオン軌道である。

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-トリプレットを4組用いている。

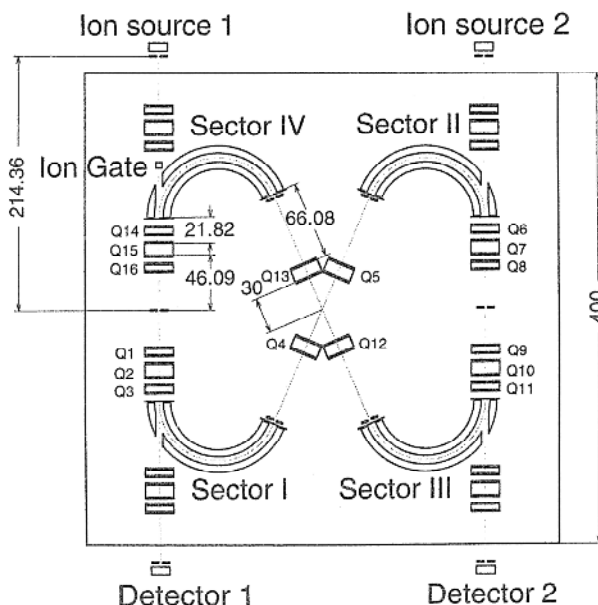


図 3 「MULTUM Linear plus」の装置全体図。

### 3. 「MULTUM Linear plus」の装置概要

前述の光学系に基づき、ロゼッタミッションのラボラトリモデルとして、「MULTUM Linear plus」を設計・製作した<sup>[5]</sup>。図3に装置の全体図を、図4に真空容器(60cm×70cm×20cm)に納めた装置の写真を示す。周回部1周の飛行距離は1.284mである。また、直線部の飛行距離は0.429mである。

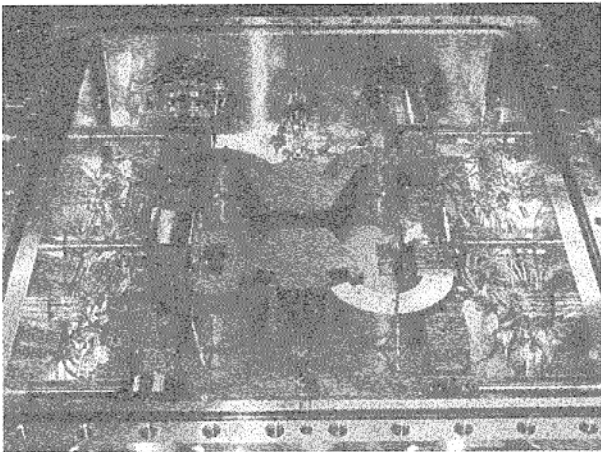


図4 真空容器に納められた「MULTUM Linear plus」の装置写真.

イオン源は、Wiley-McLarenタイプの二段加速型E1イオン源<sup>[6]</sup>を用いた。また、検出器はマイクロチャンネルプレート(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5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を周回させた後、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、飛行時間スペクトルを得る。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

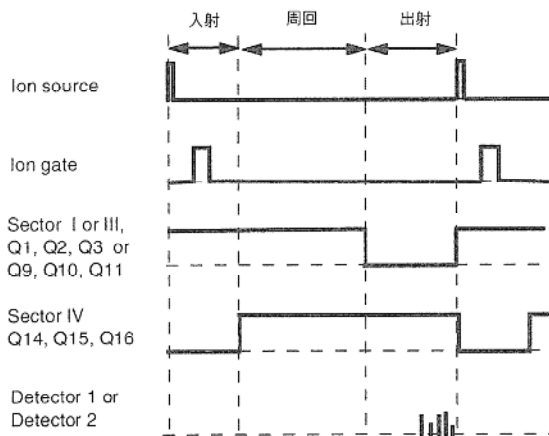


図5 「MULTUM Linear plus」のタイムチャート.

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 $6.8 \times 10^{-5}$  Paであった。飛行時間スペクトルは、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6に示す。これらのピークはCOとN<sub>2</sub>のダブルレットであり、これを分解するには、質量分解能  $m/\Delta m = 5000$  (半値幅で定義)が必要である。半周では、分解能が400であり、CO

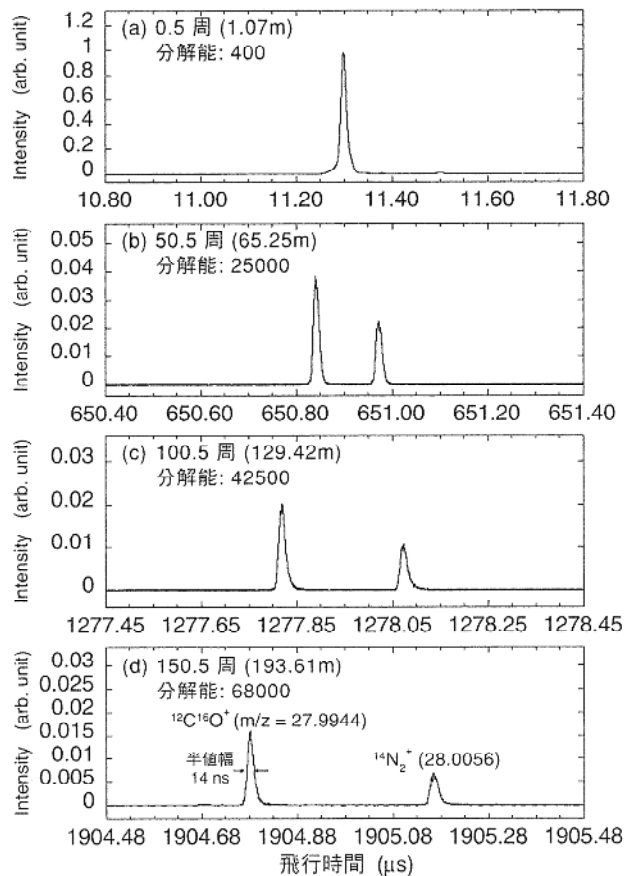


図6  $m/z = 28$  付近の飛行時間スペクトル。(a) 0.5周。飛行距離: 1.07 m, 分解能(半値幅で定義): 400。(b) 50.5周。飛行距離: 65.25 m, 分解能: 25000。(c) 100.5周。飛行距離: 129.42 m, 分解能: 42500。(d) 150.5周。飛行距離: 193.61 m, 分解能: 68000。縦軸は半周のピーク(CO<sup>+</sup>とN<sub>2</sub><sup>+</sup>)のイオン強度が1になるように規格化してある。

と $N_2$ は分解出来ていない。50.5周では分解能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につれて、ピーク幅は12~14nsのまま、COと $N_2$ 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. お わ り に

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り、Qレンズを用いない4個のトロイダル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

本研究は、以下の方々(敬称略)との共同研究である。故松尾武清・石原盛男・山口真一・奥村大輔

(阪大理), H. Rosenbauer, R. Roll(ドイツマックスプランク研究所)。「MULTUM Linear plus」本体は、マックスプランク研究所において製作していただきました。交久瀬五雄教授・伊藤啓行助手(阪大理)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。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、文部省科学研究費補助金(09559012, 国10044085, 11559012), 平成9-10年度山田科学振興財団から助成を得ている。

## 参 考 文 献

- [1] 早川滋雄, *質量分析*, 41 (1993), 121-158.
- [2] W.P. Poschenrieder, *Int. J. Mass Spectrom. and Ion Phys.*, 9 (1972), 357-373.
- [3] M. Ishihara, M. Toyoda and T. Matsuo, *Int. J. Mass spectrom. and Ion Proc.*, 197 (2000), 179-189.
- [4] M. Toyoda and T. Matsuo, *Nucl. Instrum. Methods A*, 427 (1999), 375-381.
- [5] M. Toyoda, M. Ishihara, S. Yamaguchi, H. Ito, T. Matsuo, R. Roll and H. Rosenbauer, *J. Mass Spectrom.*, 35 (2000), 163-167.
- [6] W. C. Wiley and I. H. McLaren, *Rev. Sci. Instrum.*, 26 (1955), 1150-1157.

