

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740327

研究課題名（和文）

惑星圏プラズマの同位体計測を目的とした高分解能TOF型質量分析器の開発

研究課題名（英文）

Development of TOF mass analyzer for isotope analysis of planetary plasma

研究代表者

横田勝一郎 (YOKOTA SHOICHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：40435798

研究成果の概要（和文）：将来惑星探査において惑星起源イオンの同位体分析を目的とした高分解能 TOF 型質量分析器の開発を行った。線形 2 段階加速とリフレクトロンの原理を基に衛星搭載を考慮した小型軽量の分析器を数値シミュレーションによって設計し、その結果を基に分析器を実際に製作し性能試験を行った。数値モデルと実際の試験結果を比較し性能の妥当性を確認した。

研究成果の概要（英文）：I have developed a high-resolution mass analyzer for isotope analyses in future planetary missions. I designed a linear-type with a two-stage accelerator and a reflectron-type time-of-flight mass spectrometer by using a numerical model. I also fabricated a test model and measured the characteristics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
H20 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
H21 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：質量分析、同位体、惑星プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

惑星圏プラズマの大きな課題として惑星上層からの大気の散逸があり、そのメカニズムと大気進化への影響を解明することは大きなテーマである。最近のモデル計算からは、火星の大気進化を探る方法としてイオン化して流出する大気同位体組成比を計測することが有効であると報告された。今後の惑星探査計画において流出イオンの同位体計

測が求められるのは確実である。一方で我々は、月周辺に存在するナトリウムやカリウムなどの質量を弁別することを目的とした月周回衛星かぐや搭載 TOF 型イオン質量分析器を開発し、比較的高い質量分解能 ( $m/\Delta m \sim 20$ ) を持たせることに成功している。この分解能は惑星探査における通常のプラズマ観測としては十分なもので、共同開発者として参加している水星探査計画ベッピ・コロ

ンボ搭載イオン分析器でも同型のものが採用されている。以上より、これまでの質量分析器開発の経験を生かして次世代惑星探査用の分析器開発を行う必要があると判断した。

## 2. 研究の目的

最近では分析器内での粒子の飛行時間計測から粒子の速さを求める **Time Of Flight (TOF)**法が、低リソースや高感度などの利点から質量分析器として盛んに採用されている。これら質量分析器の分解能は  $m/\Delta m < 10$  程度であるが、上記の火星流失イオン同位体計測に要求される質量分解能は遥かに高い  $m/\Delta m > 100$  である。一方で我々は、月周辺に存在するナトリウムやカリウムなどの質量を弁別することを目的とした月周回衛星かぐや搭載 **TOF** 型イオン質量分析器を開発し、比較的高い質量分解能 ( $m/\Delta m \sim 20$ ) を持たせることに成功している。この分解能は惑星探査における通常のプラズマ観測としては十分なもので、水星探査計画ベッピ・コロombo搭載イオン分析器でも同型のものが採用されていて、私も共同開発者として参加している。本研究の目的は、かぐや衛星用に開発した **TOF** 型質量分析器の開発成果を土台に、同位体計測用にこれまでに無い高い質量分解能 ( $m/\Delta m > 100$ ) を目指すものである。

## 3. 研究の方法

本研究は2年計画によって、同位体計測可能な高質量分解能 **TOF** 型質量分析器の開発を行うもので、大きく2つの事項からなる。

- 1) 数値計算による **TOF** 型質量分析器の設計
- 2) 試作モデルを用いた性能試験

通常の実験室用 **TOF** 型質量分析器を参考に、宇宙機搭載に適した小型・軽量の分析器の形状を様々な形状パラメータを用いた計算から求めた。申請時はマルチターン型 **TOF** 質量分析器を検討していたが、設計時の数値計算の結果、目標とする質量分解能  $m/\Delta m > 100$  に対して、線形2段加速法やリフレクトロン法がより小型軽量で実現が可能であることが分かったため、後者の手法を組み合わせたものを最終的に採用した。

宇宙科学研究本部の粒子計測器実験室を利用して、試作モデルの性能試験を行い、計算で求めた性能と比較した。

## 4. 研究成果

1) 質量分析の原理として線形2段加速法とリフレクトロン法を組み合わせた手法を採用した。両者共に理論的には質量分解能  $m/\Delta m > 10000$  が達成可能である。この二つの手法

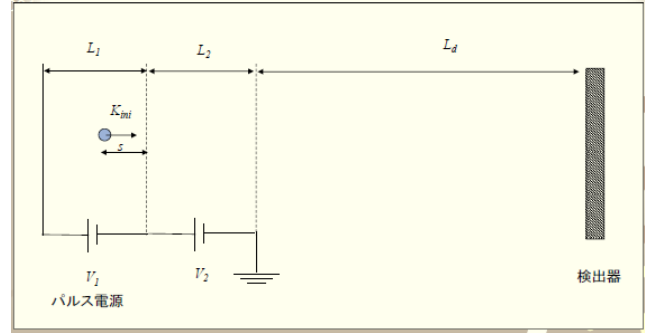


図1：線形2段加速法。

表1：線形2段加速法の最適解。

$$T = L_0 \sqrt{\frac{m}{2K_0}} g(\varepsilon, \delta, a_2, a_1) \quad \text{飛行時間}$$

$$g(\varepsilon, \delta, a_2, a_1) \equiv \pm 2 \frac{l_1}{a_1} \sqrt{\delta} + \frac{l_d}{\sqrt{1+\varepsilon}} + 2 \frac{l_2}{a_2} \sqrt{1+\varepsilon} + 2 \left( \frac{l_1}{a_1} - \frac{l_2}{a_2} \right) \sqrt{1+\varepsilon - a_2}$$

$$K_0 \equiv \langle K_{mi} \rangle + \frac{\langle s \rangle}{L_1} qV_1 + qV_2$$

$$\delta \equiv \frac{K_{mi} - \langle K_{mi} \rangle}{K_0}$$

$$\varepsilon \equiv \delta + \frac{s - \langle s \rangle}{L_1} a_1$$

$$L_0 \equiv L_1 + L_2 + L_d, \quad l_i \equiv \frac{L_i}{L_0} \quad (i = 1, 2, d)$$

$$a_1 \equiv \frac{qV_1}{K_0}, \quad a_2 \equiv \frac{qV_2}{K_0}$$

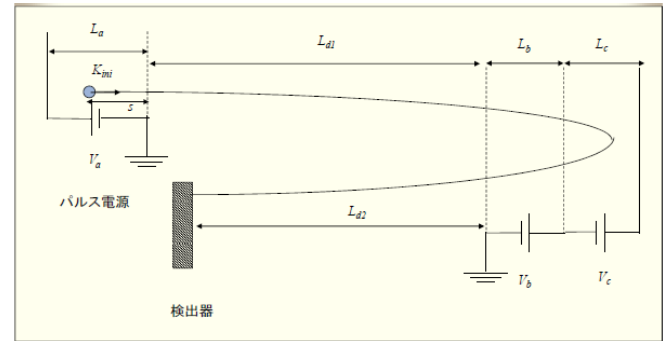


図2：リフレクトロン法。

表2：リフレクトロン法の最適パラメータ

$$T = L_0 \sqrt{\frac{m}{2K_0}} f(\varepsilon, \delta, b, c) \quad \text{飛行時間}$$

$$f(\varepsilon, \delta, b, c) \equiv \pm 2 \frac{l_a}{a} \sqrt{\delta} + \frac{2l_d}{\sqrt{1+\varepsilon}} + 2 \left( \frac{2l_a}{a} - \frac{4l_b}{b} \right) \sqrt{1+\varepsilon} + 4 \left( \frac{l_c}{c} - \frac{l_b}{b} \right) \sqrt{1+\varepsilon - b}$$

$$K_0 \equiv \langle K_{mi} \rangle + \frac{\langle s \rangle}{L_a} qV_a$$

$$\delta \equiv \frac{K_{mi} - \langle K_{mi} \rangle}{K_0}$$

$$\varepsilon \equiv \delta + \frac{s - \langle s \rangle}{L_a} V_a$$

$$L_0 \equiv L_a + \frac{L_{d1} + L_{d2}}{2} + L_b + L_c, \quad l_i \equiv \frac{L_i}{L_0} \quad (i = a, d1, d2, b, c)$$

$$l_d \equiv \frac{l_{d1} + l_{d2}}{2}$$

$$a \equiv \frac{qV_a}{K_0}, b \equiv \frac{qV_b}{K_0}, c \equiv \frac{qV_c}{K_0}$$

はそれぞれ解析的に質量分解能が最適になるパラメータを解くことが出来る。まず初めに解析解を用いて分析器の形状を大きく決定した。図1と2及び表1と2に線形2段加速法とリフレクトロン法の形状を決定するパラメータ、解析的に得られる最適なパラメータ条件を示す。

線形2段加速法とリフレクトロン法を組み合わせた場合の装置形状の最適解は、以下のように考える。 $g(\epsilon, \delta, a_1, a_2), f(\epsilon, \delta, b, c)$ は無次元の実効的飛行時間である。エネルギーの分布  $e$  に関係なく高い質量分解能を得るには、 $e$  に関する収束が得られるような装置形状パラメータを選択すればよい。また、これらの2つの方式を併用した場合の実行的飛行時間は以下ようになる。

$$gf(\epsilon, \delta, a_1, a_2, b, c) \equiv \pm 2 \frac{l_1}{a_1} \sqrt{\delta} + \frac{2l_2}{\sqrt{1+\epsilon}} + 2 \left( \frac{l_1}{a_1} - \frac{l_2}{a_2} \right) \sqrt{1+\epsilon - a_2} + \left( \frac{2l_2}{a_2} - \frac{4l_1}{b} \right) \sqrt{1+\epsilon} + 4 \left( \frac{l_1}{c} - \frac{l_2}{b} \right) \sqrt{1+\epsilon - b}$$

以上のように解析解から得た装置形状を基に値モデルを作成し、詳細にパラメータの検討を行った。パルス電源以外の電場は、ラプラス方程式を過緩和法によって数値的に求めたポテンシャル場から解いた。パルス電源の作る電場は、静電的に解いた複数のポテンシャル場を時間によって入れ替えることで表現した。装置内を飛び交う粒子の軌道はルンゲクッタを2次の精度で解くことで得た。解析解では装置内に印加する電場を理想的に設定しているが、この数値モデルでは装置の入射口などにやむを得ず発生してしまう電場の漏れや歪みなども含まれていて、より現実を反映している。図1と2にある形状パラメータを走査して、より質量分解能の高い形状を求めた。

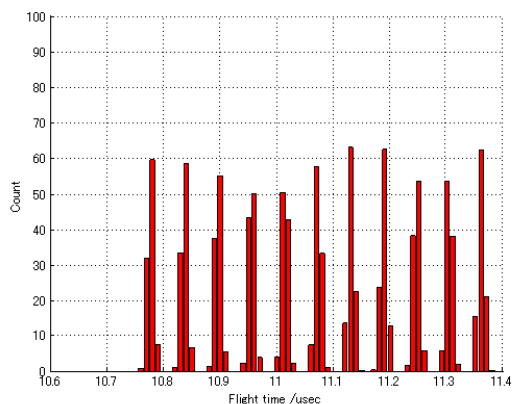


図3: 飛行時間 (TOF) 分布 (m=90, 91, ..., 100)

数値計算結果から TOF 型質量分析器の設計を行った。図3に数値モデルから得られた性能を示す。ここでは数値モデル中で計測される質量数が90から100までの粒子の飛行時間の分布が示されており、それぞれの分布がはっきりと分離していることが分かる。設計した分析器が質量数100程度の粒子を明確に分別することが可能であり、このことは、目標としていた高い質量分解能 ( $m/\Delta m > 100$ ) を実現していることを示している。

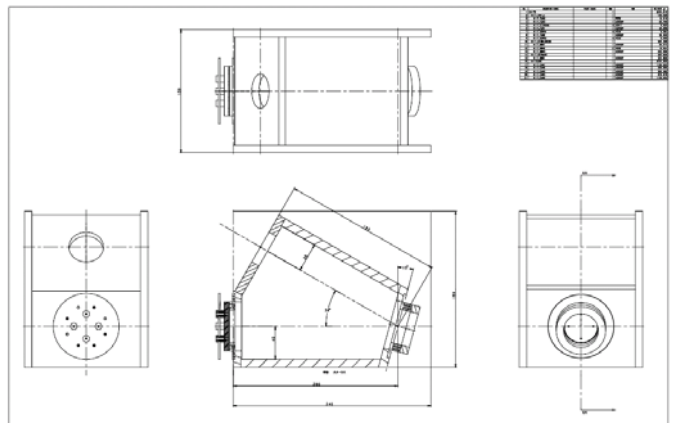


図4: 質量分析器試作モデル

2)次に数値モデルによって設計した TOF 型質量分析器の試作モデルを実際に製作した。図4は製作した質量分析器の断面図である。

性能試験を行う前に試験環境の整備を行った。性能試験は宇宙科学研究本部にある粒子計測器試験室で行ったため、必要となる真空系やイオンビーム系などは既に供えられてある。装置に高圧を印加する電源や、測定したデータの処理を行う計測系は別途こちらで準備を行った。また、分析器に取り付けるマイクロチャンネルプレート (MCP) と呼ばれる粒子検出器は長く大気中に放置すると破損してしまうため、分析器ごと真空保管する容器も整備した。

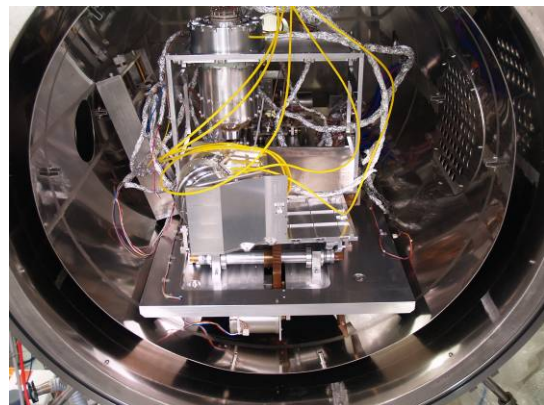


図5: 真空チャンバー中の分析器

計測に先立ち、試作モデルを用いて高電圧に対する耐圧試験を行った。設計時に十分なクリアランスを確保することを考慮しており、実際の試験に必要な高電圧電源を24時間連続で印加しても問題がないことを確認した。図5は試作モデルを真空チャンバー内に設置した際の写真である。センサーから高圧線がフランジ部に延びていて、そこから外部にある高電圧電源に接続している。性能試験もほぼ同じような設置状況で行って、イオンビームは写真の左から入射することになる。

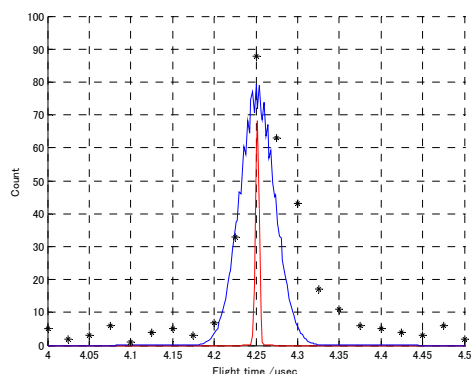


図6：質量分析器の性能試験結果

最後に、試作モデルを用いて性能試験を行った。試験の際にマスゲートとして必要なパルス電源は、100V立ち上がり時間100nsのものが使用可能な状況であった。数値モデル上で想定した2kV立ち上がり時間100nsには及ばないため、質量分解能は数値モデルのものより劣る結果となった( $m/\Delta m \sim 30$ )。図6にその結果を示す。黒の点の実験結果を示して、赤と青の線は数値モデルによって得た結果である。赤い線は2kV立ち上がり時間100nsのパルス電源をマスゲートに使用することを想定した計算結果である。ここでは窒素分子の陽イオンビームを用いた。ビームのエネルギーは100eV以下である。青い線は、100V立ち上がり時間100nsのパルス電源の使用を想定した計算結果で、実際の試験状況により近いものを再現したものである。実験結果である黒の点と数値モデルで得た分析器の性能はおおよそ一致していて、計算結果と試験結果の整合性は得られたと云える。即ち、計算で想定した高速なパルス電源を使用すれば、目標とした質量分解能( $m/\Delta m > 100$ )達成可能であることが期待出来る。

高速なパルス電源は性能試験を行った実験室設備には無く、非常に高価なものであるため今回の性能試験では使用することをあきらめたが、今後より立ち上がり時間の短い電源を使った試験を行うことは課題として

残った。加えて、将来の惑星探査での利用を考える場合、今回開発を行ったTOF型質量分析器のみでなく、マスゲートとして不可欠な小型軽量なパルス電源の開発も今後の課題として挙げられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

1. 横田勝一郎他6名, 月・惑星起源イオン観測を目的とした質量分析器の開発, 太陽系シンポジウム, 2009年12月
2. 横田勝一郎, 齋藤義文, 火星周辺での同位体計測用TOF型質量分析器の開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会第124回講演会, 2009年9月
3. 横田勝一郎, 齋藤義文, 惑星圏プラズマの同位体計測を目的とした高分解能TOF型質量分析器の開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会第123回講演会, 2008年10月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田勝一郎 (YOKOTA SHOICHIRO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙  
科学研究本部・助教  
研究者番号：40435798

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：