

火星大気散逸探査ミッション用イオン同位体分析器の開発

齋藤義文、横田勝一郎(宇宙研)

1. はじめに

本研究では、将来惑星探査での同位体計測を目的とした高分解能質量分析器の開発を行っている。科学的観測目標の一つとして、現在火星大気散逸ミッションワーキンググループ(WG)にて検討している「火星の大気散逸・進化過程の解明」を想定している。惑星起源粒子の同位体計測には少なくとも $m/\Delta m > 100$ という非常に高い質量分解能が必要だが、火星大気散逸観測では C、N、O の散逸量算出という要請があり、火星電離圏にて主要元素である CNO の単体及び分子について同位体計測を行わなければならない。この場合、質量数がほとんど同じ N_2^+ と CO^+ の分別が質量分析器にとって最大の課題となる。 N_2^+ と CO^+ の分別に必要な質量分解能は $m/\Delta m > 3,000$ という極めて高いものである。

衛星搭載用の質量分析器としては超薄膜カーボンを使った TOF(Time Of Flight)型が最も一般的であり、月探査衛星 KAGUYA や水星探査計画 BepiColombo でも採用している。このような通常の TOF 型質量分析器では、超薄膜カーボンの使用により質量分解能がせいぜい $m/\Delta m = 5 \sim 10$ に制限される。KAGUYA 用質量分析器では特殊な電場を用いることで質量分解能を $m/\Delta m \sim 20$ まで達成していて、BepiColombo 用質量分析器では特殊電場に加えてイオン光学系を大きくすることで $m/\Delta m \sim 40$ まで達成している。しかしながら、これらの手法の延長では機器の大きさや重量を衛星搭載用として現実的な値に収めつつ、 $m/\Delta m > 100$ や $m/\Delta m > 3,000$ という質量分解能を実現することは容易ではない。

そこで本研究では、産業用質量分析・同位体計測技術として実績のあるマルチターン型 TOF 質量分析技術を宇宙機搭載品へ利用することを試みている。大きな開発要素は下記の二つであり、これまでにそれぞれ試作モデルを製作した。

- 1) 小型化したマルチターン型質量分析器イオン光学系 (23 年度に試作モデル製作)
- 2) 小型化・低電力化したマルチターン制御用のスイッチング高圧電源(24 年度に電子基板製作)

治具を用いることで上記のイオン光学系試作モデル及びマルチターン制御用スイッチング高圧電源基板を組み合わせ、制御基板を更に加えて一つの質量分析装置を構成する総合モデルを準備した。ストップ信号を得る粒子検出器は別途チャンネルトロンを用意した。本年度はこの質量分析装置総合モデルを用いて、目標とする質量分解能の達成を検証した。

2. マルチターン TOF 質量分析器の原理

図1に本研究で開発しているマルチターン型 TOF 質量分析器を模式的に示す。イオン光学系は中央の大部分を占める周回部及び導入・導出部の電極に相当する。マルチターン法とは、 ∞ 字の周回部電極の中で入射イオンを半永久的な周回させることで長大な飛行経路を作り出す TOF 型質量分析手法である。スイッチング電源(El_Float)から与えられる加速電圧がスタート信号にもなり、ストップ信号は多重周回後の入射イオンを検出器で捕えることで獲得する。スタート信号とストップ信号の時間差から飛行時間(TOF)を計測して質量を導出する。現時点では試験用にインレット部がある部分にはフィラメントを備えたイオン源が設置されている。

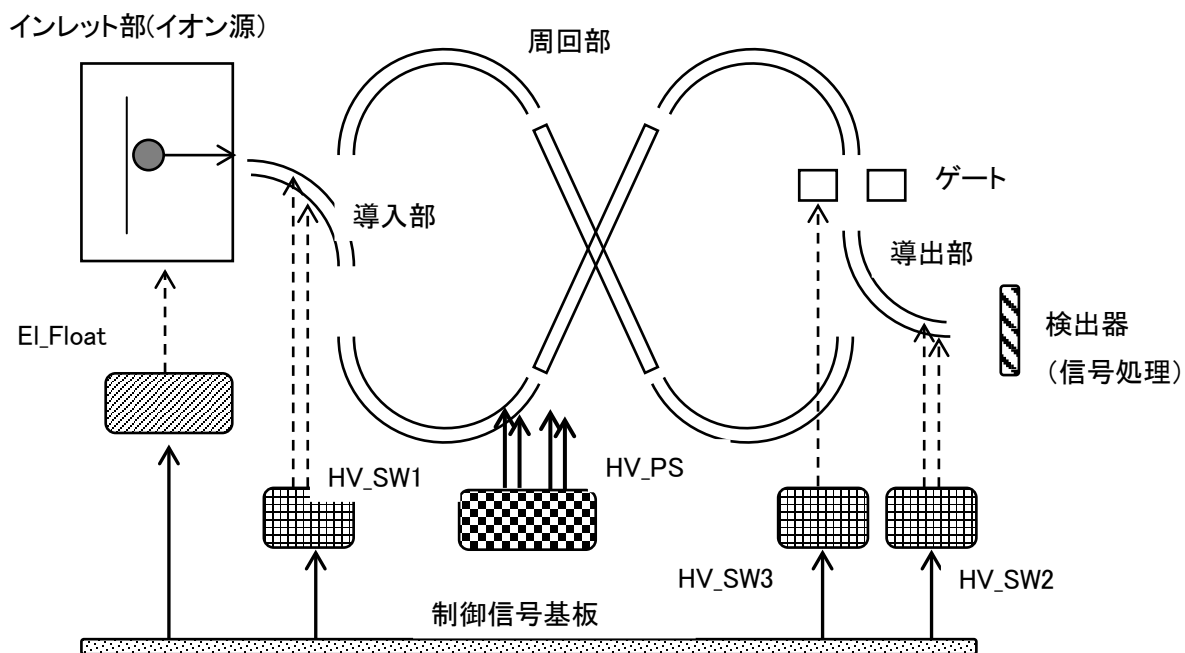


図1:マルチターン型 TOF 質量分析器の模式図

図 1 の最下部の制御信号基板は、これまで市販品(CONTEC 製)を準備した。しかしながら、スイッチング高圧電源基板に対する制御信号の遅延や歪をより少なくするため、専用の制御基板を準備し、スイッチング高圧電源基板の近傍に設置した。

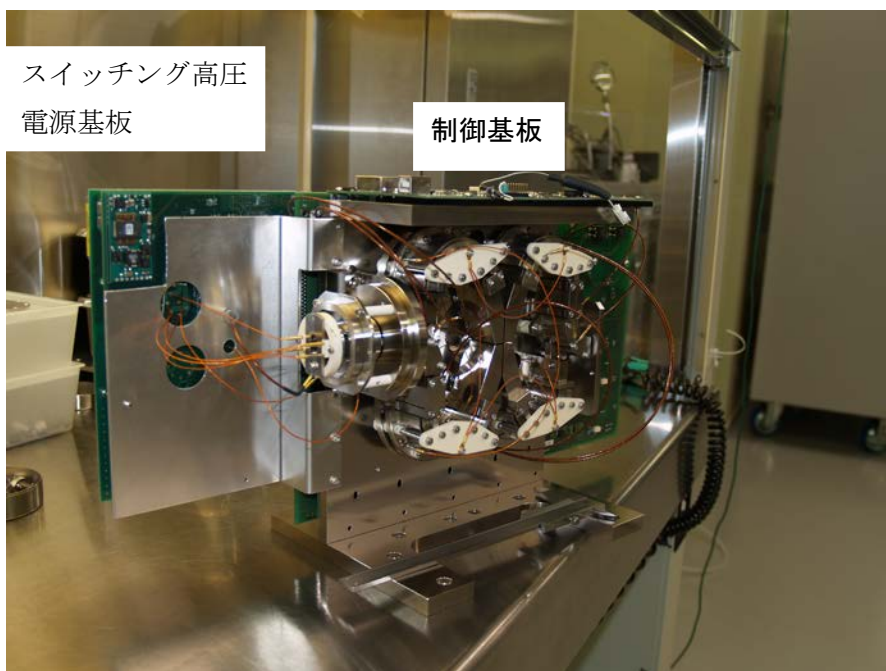


写真 1 : 質量分析器総合モデル

写真 1 は質量分析器の総合モデルを示していて、中央にイオン光学系が位置し、左にイオン源が位置している。スイッチング高圧電源基板は高速で昇圧・降圧を行うため、イオン光学系の背面に隣接

して取り付けられていて、イオン光学系に対して最短距離にて電圧を供給できるようになっている。上部には制御基板が位置し、これも最短距離でスイッチング高圧電源基板に対してタイミング信号を送る形がとられている。真空槽内への設置を考慮して逆 T 字の治具に全てが取り付けられている。

3. 性能試験

写真 2 に真空槽に設置した質量分析器総合モデルを示す。上部に位置する制御基板は左から来ている USB ケーブルによって外部の PC に接続され、この PC によって各電圧等のパラメータが制御される。検出器としてチャンネルトロン(CT)を別途用意し、中央にあるイオン光学系の右側に取り付けた。スタート信号は、制御基板からスイッチング高圧電源基板へのタイミング信号と同時に供給される。ストップ信号は CT によって入射イオンを検出した際に CT から供給される。写真 2 の状態で真空引きを行った後に、イオン源内部にあるフィラメントによるイオン化によって残留ガスの計測を行っている。現時点では、オシロスコープを用いてスタート信号と等価であるタイミング信号と CT からのストップ信号を確認し、質量分析器総合モデルの動作の健全性を確認している。タイミング信号は周期 200us で動作しており、また各高圧電源は所定の電圧を供給していることをモニタ値などから確認している。各電圧等のパラメータを微調整しながらストップ信号検出が効率良く取得出来るようにパラメータ走査を行っている。現在の問題点として、試験用に取り付けているイオン源で得られるイオンビームの流量が不十分であることが挙げられる。電流容量の大きなフィラメントへの交換やイオン源へのガス導入を検討している。総合モデルの動作が十分に確認出来た後には、実験室設備の一つである CAMAC 計測系の TDC を用いて質量分解能等を評価する予定である。

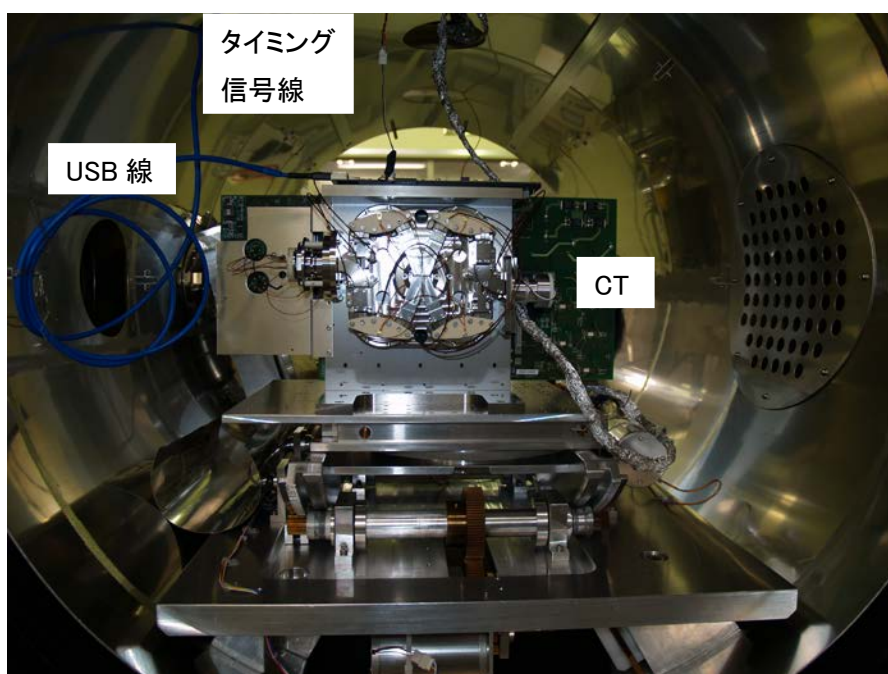


写真 2 : 真空槽内に設置した質量分析器総合モデル

4. まとめ

本年度は、各開発要素を組み合わせた質量分析装置を構成する総合モデルを準備し、機能の健全性を確認しつつ性能試験を行った。引き続き性能試験を行い最終的な目標である質量分解能 $m/\Delta m > 3,000$ を達成すべく開発作業を進める予定である。

学会発表

1. 横田他., 月・惑星圏プラズマ観測を目的とした質量/同位体分析器の開発, 第 62 回質量分析総合討論会, 2014 年 5 月, 吹田.
2. 横田、大竹, 月・惑星モニタリング, 「先進質量分析で拓く地球惑星生態圏科学の新地平」の研究会, 2015 年 3 月, 大阪大学