

火星衛星探査機 MMX 搭載低エネルギーイオン質量分析器(MSA)の開発

横田勝一郎, 出口雅樹(大阪大学), 齋藤義文, 浅村和史 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)

Development of an ion energy mass spectrometer for the MMX mission

S. Yokota, M. Deguchi (Osaka University), Y. Saito, K. Asamura (ISAS/JAXA)

1. はじめに

火星衛星探査機 MMX 計画とはサンプルリターンを含めた科学観測を行い、火星衛星の起源及び表層環境・周辺環境を明らかにすることが主な目的である。イオンエネルギー質量分析器(MSA)はリモートセンシングを行う探査機搭載観測器の一つであり、火星衛星起源イオンを第一の観測対象とする。MSA は火星から流出する(加速されている)大気起源イオンの分析も同時に行い、火星大気流出機構の解明という全く別の科学目標に対しても貢献が期待されている。本研究では、火星衛星探査機 MMX 計画を始めとする将来惑星探査において同位体計測まで視野に入れた高い質量分解能 $M/\Delta M \sim 100$ を有した質量分析器の開発を行うことを目的としている。

プラズマ観測を目的としたイオン質量分析器は広範なエネルギー領域を包括する一方で、比較的低い質量分解能で十分であるとされてきた。プラズマ観測では同位体計測まで要求されることが無かったが、比較的軽量の C/N/O/Ne/Ar などの単原子イオンであれば $M/\Delta M \sim 100$ 程度の質量分析器でも十分に可能である。これまで私たちは BepiColombo /MIO 用分析器において $M/\Delta M \sim 50$ を達成していて、その開発経験を元に MMX 用分析器では $M/\Delta M \sim 100$ 程度の性能を目指している。

2024年打ち上げ予定の MMX 計画において2019年度は予備設計期間であり、今回は試作モデルを用いた技術実証までを行ったのでここに報告する。

2. イオン質量分析器(MSA)

図1に本研究で開発を目指すイオン質量分析器 MSA のイオン光学系を示す。MSA は KAGUYA 及び MMO 搭載イオンエネルギー質量分析器と測定原理は同一とする後継機である。上半部に球殻電極に印加する電圧を掃引するトップハット型静電分析器を有し、数 eV/q から数 10keV/q までの範囲において入射イオンのエネルギー分別を行う。下半部では飛行時間を計測する Time-Of-Flight(TOF)法により質量分析を行う。本観測器は三軸制御衛星への搭載であるため最上部に上下一対の視野角掃引電極を備え、交互に電圧を掃引することで半球(2π sr)以上の視野を獲得する。下半部の質量分析器入口にある薄膜カーボンを入射イオンが通過する際に二次電子が放出され、これらがスタート信号として MCP に検出される。スタート信号は位置検出アノードによって入射イオンの侵入方向を示す信号としても使用され、視野角掃引と合わせて3次元の入射方向情報が得られる。その後入射イオンは下部 MCP にて質量分析に必要なストップ信号を発生させる。スタート信号とストップ信号の時間差を計測することで、入射イオンの v (速度)が導出される。上半部エネルギー分析器により E/q が選別されているため、 M/q が得られる。薄膜カーボンの透過率を上げるため負電位によって入射イオンを加速させる。また、質量分解能を向上させるため、質量分析器内には線型に増大する電場

Linear Electric Field(LEF)を配位している。最下部付近には正電位を印加した反射メッシュがあり、これによって入射イオンを TOF 装置上部に衝突して二次電子を放出させる。この二次電子は最下部の MCP にてストップ信号として検出される。入射イオンは薄膜カーボンにより電荷が変換される。中性化した場合は最下部の MCP でストップ信号を生成する。正イオンのままであれば LEF によって上部MCPに誘導され、高分解能の質量分析を受ける。本観測器では TOF 部の全長を 200mm にして $M/\Delta M \sim 100$ の質量分析を行う。

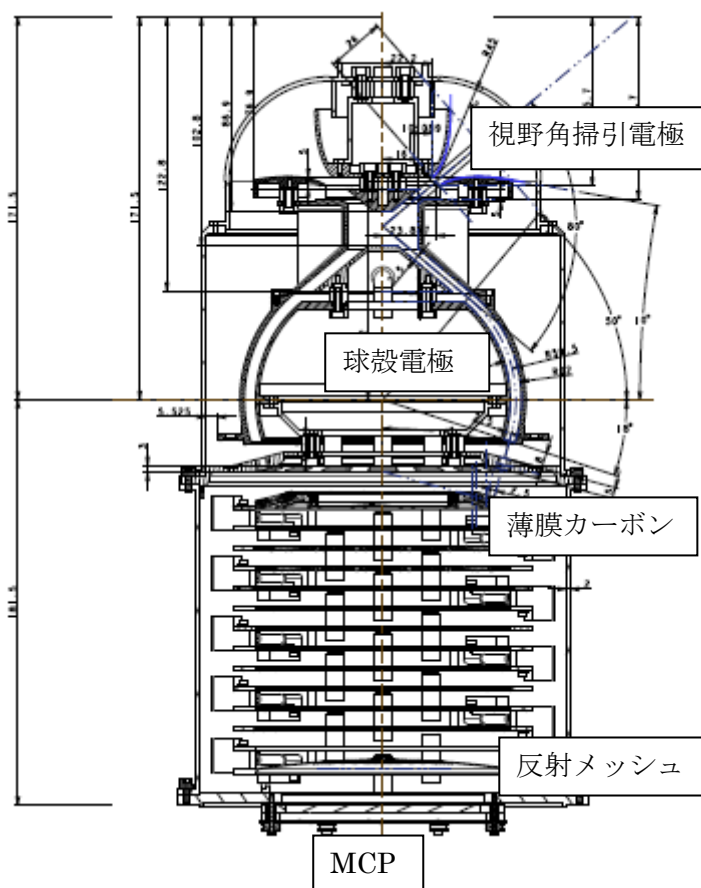


図1:MSA イオン光学系の断面図

3. 質量分析器試作モデル(BBM)の性能試験

前年度までに数値モデルを用いた設計作業結果を元に MSA 下半部の質量分析器 BBM を製作していたので、2019年度は様々なイオン種のビームを BBM に照射して特性を計測する性能試験を実施した。写真1は BBM のうち TOF 装置内部の LEF を発生させる多重リング状電極構造と、性能試験時に BBM を真空槽内のターンテーブル上に設置した状態を示している。この試験は宇宙研の低エネルギー荷電粒子計測器較正装置を利用して行っている。

図2左は数値モデルによって多重リング状電極が TOF 装置内につくる TOF を示している。また図2右には LEF 内を飛行する入射イオンの軌跡(黒線)と、入射イオンによって発生したスタート電子とストップ電子の飛行路も図示されている。入射イオンは角度散乱が無い場合は TOF 装置上部に衝突することや、スタート電子とストップ電子は最下部の MCP 上では十分離れた位置に到来して分別が容易いことが分かる。

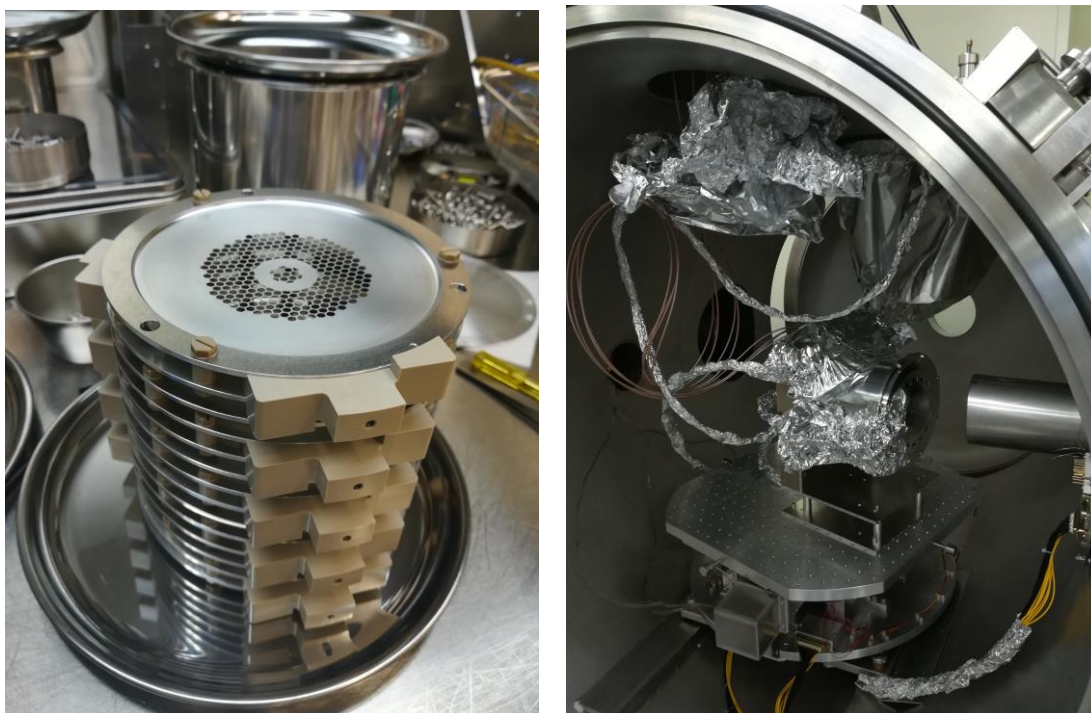


写真 1: MSA 質量分析部の内部電極 (左) と性能試験の真空槽設置状況 (右)

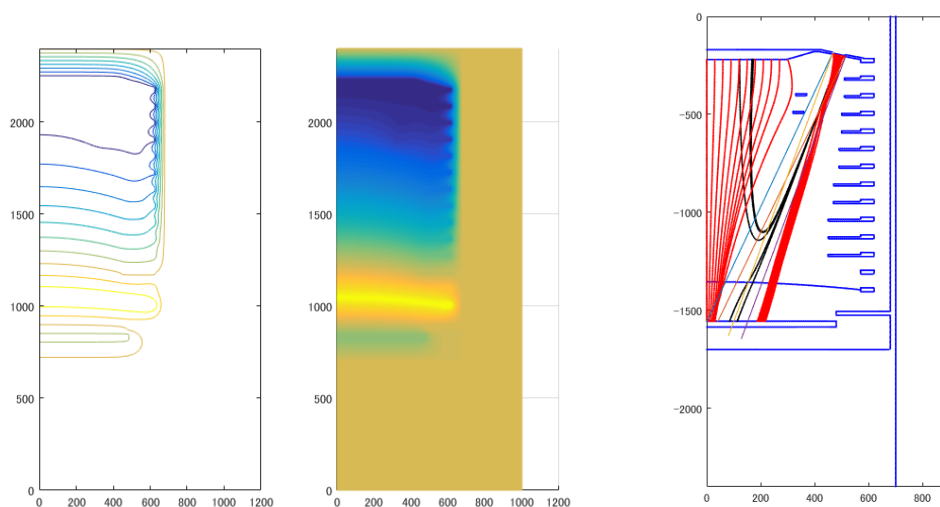


図 2 : 2keV の O+ビーム照射時の質量分析器における飛行時間(TOF)特性. 数値モデルの結果(左)と BBM による性能試験結果(右).

数値モデルに対して 2keV の O+ビームを照射した場合の TOF 特性と、性能試験において BBM に 2keV の O+ビームを照射した際に得られた TOF 特性を図 3 にて比較する. TOF の絶対値の較正が精度良く求めていないため多少違いはあるが、相対値に得られる分布の形・幅は概ね一致していることが見て取れる. よって、数値モデルにて設計した質量分析器は開発可能であると言える.

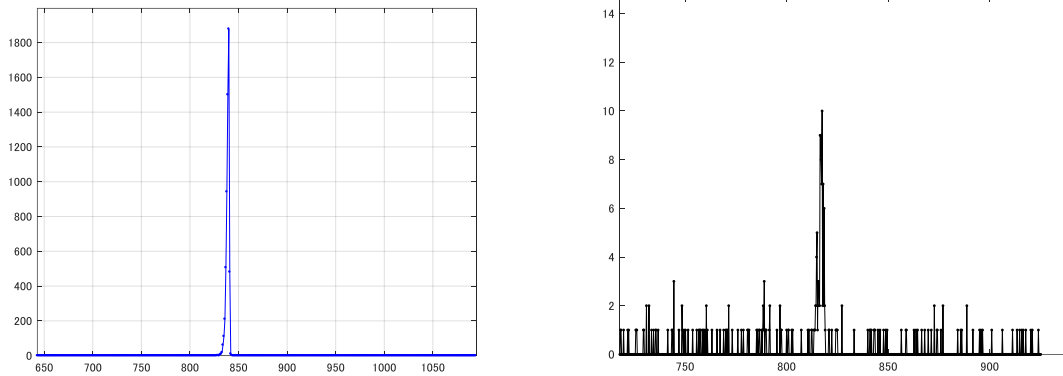


図 3 : 2keV の O+ビーム照射時の質量分析器における飛行時間(TOF)特性. 数値モデルの結果(左)と BBM による性能試験結果(右).

4. まとめ

2019 年度は製作した BBM を用いた性能試験を行い、目標とする質量分解能 $M/\Delta M \sim 100$ を実証した。MSA における唯一の開発要素である高い質量分解能が達成可能であることが分かり、次のエンジニアリングモデル(EM)開発は十分可能であることが示された。本報告では割愛しているが BBM 試験では複数の不具合に直面し、その度に構造や部品を変更することで今回の結果まで達することが出来た。今回の BBM 試験で得られた知見は 2020 年度以降の EM 開発における設計から反映させる予定である。

【成果発表】

- 出口雅樹, 横田勝一郎, 寺田直樹, 松岡彩子, 齋藤義文, 火星衛星探査計画 MMX 探査機搭載用イオンエネルギー質量分析器 MSA の設計, 日本惑星科学会 2019 年 秋季講演会, 京産大, 2019.10/7
- 横田勝一郎, 寺田健太郎, 齋藤義文, 西野真木, 清水久芳, 高橋太, 太陽風イオンによるスパッタリングを利用した小型天体の遠隔質量分析, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 146 回総会・講演会, 熊本, 2019.10/23
- 横田勝一郎 & 寺田健太郎, 太陽系探査における質量分析の利用, プラズマ・核融合学会誌, 95(6), 277-281, 2019.
- 横田勝一郎, 宇宙機搭載用の質量分析装置, J. Mass Spectrom. Soc. Jpn., 67(3), 93-95, 2019.
- 横田勝一郎, 齋藤 義文, 西野 真木, 浅村 和史, 松岡 彩子, Secondary Ion Observations of Small Bodies for Remote SIMS Analyses, Symposium on Planetary Sciences 2020, 東北大, 2020. 2/18
- 横田勝一郎, 月周回及び月面での質量分析, 衛星系研究会 2020, 東北大, 2020. 2/20