

## 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

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火星衛星探査機 MMX 計画に対して、搭載機器の一つであるイオンエネルギー質量分析器(MSA)の開発を行っている。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、火星圏に多大な影響を及ぼす太陽風イオンと磁場を常時観測しながら、火星衛星起源イオン、火星から流出する(加速されている)大気起源イオンの観測を行う。フォボスの起源や天体表面と外環境の相互作用を調査するだけでなく、火星大気流出機構の解明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 2020 年度は予備設計期間の最終年であり、今回は試作モデルを用いた技術実証試験結果を含めてまとめ作業を行い、予備設計審査会に対応した。

#### 2. イオン質量分析器(MSA)

図 1 に MSA の構成を示す。MSA は、イオンを直接取り込んでエネルギーと質量を計測するイオン分析器(MSA-S)と、磁場 3 成分を計測する磁力計(MG-S1, S2)にて構成される。周囲の環境のその場観測であるため、2 種の観測器は探査機の外部に露出して搭載される。その他の MSA 構成要素として、観測器の制御等を行う電子機器(Electronics box)が探査機内部に搭載される。MSA イオン分析器は 10s keV/q にまで及ぶエネルギーのイオンを観測するため、高圧電源(HVPS)を含んでいる。

図 2 に MSA イオン分析器の断面図を示す。上半部に一對の球殻電極から成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。最上部に大きく開いた開口部を有し、1 対の電極に交互に電圧を掃引することで視野を選別し、その結果半球( $2\pi$  sr)以上の視野を獲得する。その下に位置する一對の球殻上電極のうち、内側の電極に負極の高電圧を掃引することで、入射してくるイオンのエネルギーを選別する。エネルギー選別を受けた入射イオンは下半部の質量分析器に到来する。始めに高電圧で入射イオンを加速して超薄膜炭素を透過させる。透過の衝撃で発生した二次電子を最下部の検出器(MCP)にてスタート信号として処理する。入射イオンのうち透過によって中性化したものはそのまま MCP

に到達してストップ信号を発生する。イオンのまま透過したものは質量分析器内にある電場によって反射し、天井部に衝突する。その結果発生した二次電子がストップ信号として MCP にて検出される。スタート信号とストップ信号の時間差から入射イオンの質量情報に変換する。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。

このようなイオン分析器はこれまでプラズマ観測衛星に数多く搭載されており、MSA イオン分析器は月探査機 KAGUYA や水星探査機 BepiClombo/MIO などに搭載された分析器に対して後継といえる。

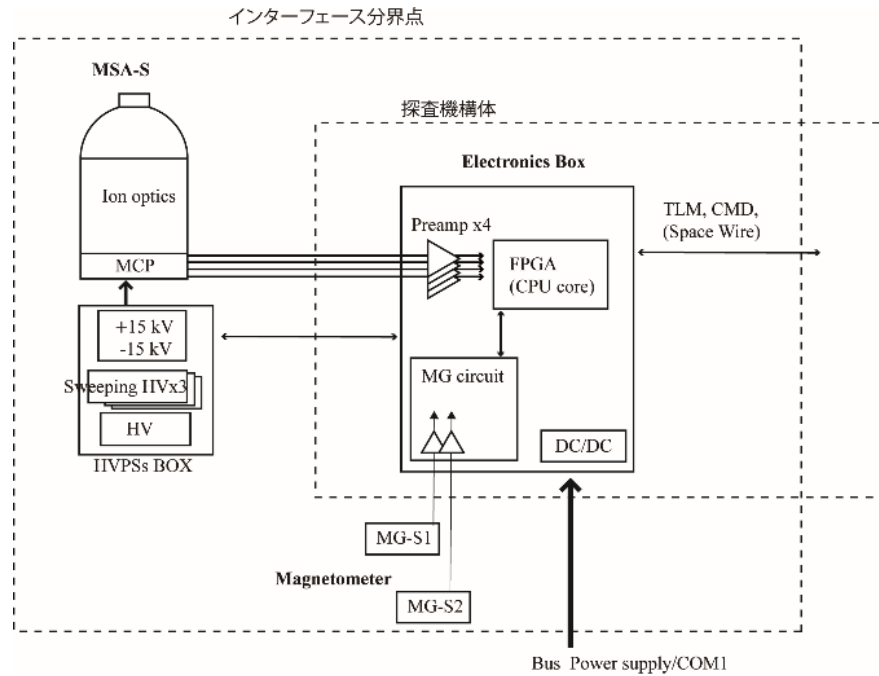


図1:MSA イオン光学系の断面図

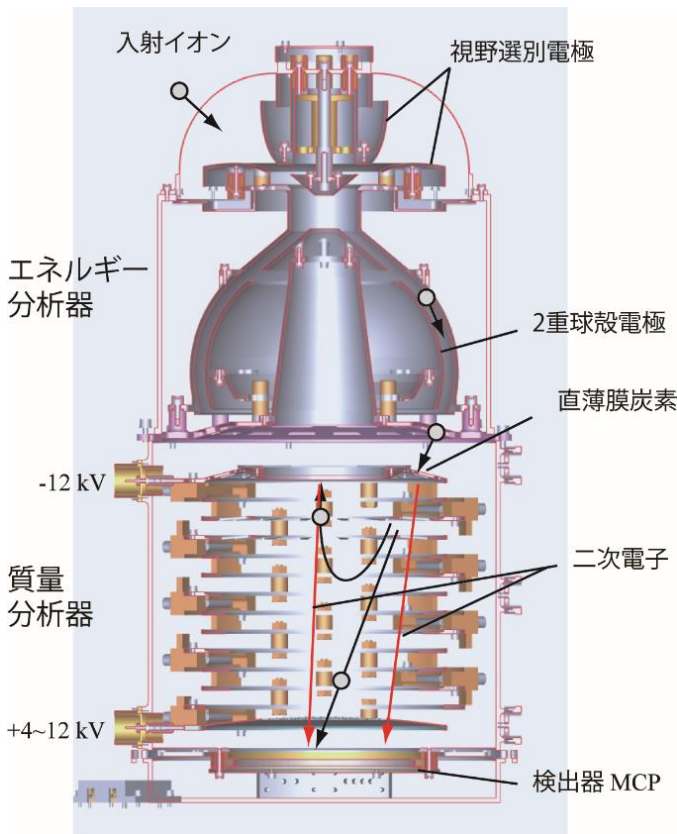


図2 MSA イオン分析器の断面

表 1 MSA イオン分析器の性能

エネルギー分析	~5 ~30k eV/q ~10% (分解能)
視野	$\geq 2\pi$ sr 22.5° × 12.25° (分解能)
質量分析	1-100 amu > 100 (分解能)
感度	$\geq 10^4$ cm <sup>2</sup> sr eV/eV

### 3. 開発状況

これまで開発担当メーカを明星電気株式会社として MSA 予備設計を実施し、開発計画の検討や各技術要素の分析などを行った。この中で、質量分析における飛行時間計測で必須となる Time-to-Digital Convertor (TDC) 機能を確立するため、RTG4(FPGA)を用いた試作モデルによる検証作業を行っており、必要とする1ナノ秒以下の分解能を確認している。イオン分析器(図2)のうち質量分析器のみの試作モデルも作成し、表1の性能を検証試験にて実証した。飛行時間計測の結果により質量分解能  $M/\Delta M > 100$  の達成を確認した。

予備設計につづいて基本設計を実施して、エンジニアリングモデル(EM)の設計を行った。数値モデル上では表1の性能を確認している。電気設計、熱解析、構造解析などに取り組んだ。探査機との I/F 調整も実施して、その中で MSA の取付形態を、当初の一体型から Electronics box のみ探査機内部に搭載する分離型(図1)へと移行することになった。主に熱解析のからの要請の結果である。

MSA イオン分析器は周囲から飛来するイオンを取り込むため、広い視野を阻害されないことを要求している。取付形態の I/F 調整の中で視野の確保も考慮され、開口部を探査機パネルから約 20mm 突出させた比較的良好な搭載形態を確保することができた。MSA イオン分析器の視野にとって、フォボス方向が想定される着陸脚側では若干着陸脚が見え、反対側にはアンテナがある程度見える状況である。

基本設計作業から、消費電力、質量、データレートなどを見積もり、同じく I/F 調整を実施した。予備設計から基本設計に移行する際に、質量見積もりの中で新たに設定したマージンがシステム許容量を超過する問題が発生した。また、搭載形態を分析器と Electronics box との一体型から分離型(図1)へと移行したことが、質量の増加の原因の一旦にもなった。しかしながら、設計を詳細化することで各コンポーネントの軽量化してマージンを消化できたため、現在は解決している。

MSA は 2020 年 10 月に基本設計審査会を通過し、エンジニアリングモデルの開発に移行している。

### 4. まとめ

MMX 計画の大きな目的としてサンプルリターンがあり、持ち帰ったサンプル分析の一つとして質量分析がある。MSA は現場でその質量分析を行う装置であり、我々は今後も太陽系探査計画において質量分析装置を探査の現場に持ち込むことを科学観測の観点から重要と考え、提案及び機器開発を行っている。MMX 計画の MSA 観測がその契機となるよう、今後の EM 及びフライトモデル開発、観測計画の準備に努めていきたい。

MSA の開発は宇宙航空研究開発機構の開発経費にて実施している。MSA 開発全般は明星電気株式会社担当し、センサ部設計は主に大阪大学、京都大学、LPP-CNRS-Sorbonne との共同で実施している。イオン分析器は有限会社ワイエスデザインにて製造加工し、質量分析器用の高圧電源は

Southwest Research Institute 製を利用する。イオン分析器の性能試験は主に宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の粒子計測器較正試験設備（スペースチェンバー実験施設の共同利用）及び名古屋大学宇宙地球環境研究所の粒子計測器較正試験設備（国際共同利用，一般共同利用）を利用して行っている。

#### 【成果発表】

- 横田勝一郎他，Global emissions of carbon ions from the total lunar surface，日本地球惑星科学連合 2020 年大会，2020 年 7 月 13 日。
- 横田勝一郎他，火星衛星探査計画 MMX MSA 開発状況報告，第 64 回宇宙科学技術連合講演会，2020 年 10 月 29 日。
- 出口雅樹，横田勝一郎他，MMX 搭載用イオンエネルギー質量分析器の性能評価，日本惑星科学会 2020 年 秋季講演会，2020 年 11 月 12 日。
- 横田勝一郎他，In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: Mass Spectrum Analyzer (MSA) for Mars Moons eXploration (MMX)，地球電磁気・地球惑星圏学会 第 147 回総会・講演会，2020 年 11 月 2 日。
- 横田勝一郎，Lunar pickup ions, Mini-moon seminar, Taiwan Space Union, 2020 年 12 月 7 日。
- 横田勝一郎他，地球型惑星衛星に起きている物質の供給と放出，Symposium on Planetary Sciences 2021，2021 年 2 月 19 日（招待講演）
- S. Yokota et al., In situ observations of ions and magnetic field around Phobos: Mass Spectrum Analyzer (MSA) for Mars Moons eXploration (MMX), 4<sup>th</sup> MMX Science working Team Meeting, 2021年2月24日。
- 横田勝一郎他，火星衛星フォボス周辺での将来イオン磁場観測：MMX 探査機搭載 MSA の開発，ISEE 研究集会「宇宙地球結合系における物理機構・素過程に関する統合的研究形態・体系の構築・推進」，2021 年 3 月 18 日。
- S. Yokota, ..., Y. Saito, ..., K. Asamura, et al., Global emissions of indigenous carbon ions from the Moon, *Science Advances*, 6, eaba1050, 2020. doi.org/10.1126/sciadv.aba1050