

# もう一つの月世界へ：火星衛星探査計画MMX その4 ～イオン質量分析による火星大気流出 観測の意義～

益永 圭<sup>1</sup>，黒川 宏之<sup>2</sup>，小池 みずほ<sup>3</sup>，中川 広務<sup>4</sup>，寺田 直樹<sup>4</sup>，横田 勝一郎<sup>5</sup>，  
MSAチーム，MSSSTチーム

(要旨) 2023年末に火星衛星探査機MMXの打ち上げが2年延期された。現在は2026年打ち上げに向けて計画が粛々と進められている。本稿では、これまでにイオン質量分析器MSA(Mass Spectrum Analyzer)チームおよび火星サイエンスチームMSSST(Mars System Science Strategy Team)で検討されてきた火星大気流出の観測に関する内容の一部について紹介する。

## 1. はじめに

現在の火星は寒冷かつ乾燥した気候で、表面に液体の水は存在していない。しかし、観測により得られた地形的特徴などから、過去の火星は温暖で、表面に海が存在したと考えられている。かつて存在した海はどのようにして失われたのか？有力視されている1つの説は、大気流出を通じた宇宙空間への水の喪失である。

これまで欧米を中心とする探査機により、火星から流出する大気(主に水素原子や酸素原子及びそれらのイオン)の観測がなされてきた。観測に基づく現在の水素や酸素の流出率をH<sub>2</sub>O由来と仮定して過去まで遡ると、過去の火星には少なくとも全球数メートルから数十メートルの海に相当する水が存在したと見積もられる[1]。このような液体の水が存在するためには、温室効果をもつ厚いCO<sub>2</sub>大気も存在していたと考えられているが、過去に火星が保有していたCO<sub>2</sub>大気量の見積もりについては不確実性

が大きいのが現状である。その理由として、炭素の流出に関する観測が不足していることが挙げられる。これまでに観測が行われてきた水素は主にH<sub>2</sub>O由来と考えられるものの、酸素はH<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>の両方に由来する。そのため、過去のCO<sub>2</sub>大気量の不確実性に制約を与えるためには、今後は水素、酸素の観測だけでなく、炭素の観測も同時に行う必要がある。また、火星の生命環境を議論する上で重要な大気成分の1つとして窒素があげられる。窒素は火星大気中でCO<sub>2</sub>に次いで豊富なガスであるが、火星上層大気からの窒素の流出の直接観測の例はこれまでになく、その実態はよくわかっていない。

MMXに搭載されるMSA観測器は、高い質量分解能を持ち、これまでに観測されてきた水素イオンや酸素イオンに加え、炭素イオンや窒素イオンを含む様々な粒子種のイオンを観測することができる。本稿では、MSAによる火星圏の質量分析観測の意義について説明する。

## 2. MSA観測器

MSAはイオンのエネルギーを分析するトップハット型静電分析部と質量を分析するTOF(Time Of Flight)質量分析部から成り、イオンのエネルギー(正確にはE/Q (eV/q))と質量(正確にはM/

1.JAXA宇宙科学研究所

2.東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

3.広島大学大学院先進理工系科学研究科

4.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

5.大阪大学大学院理学研究科

masunaga.kei@jaxa.jp

表1: MEX, MAVEN, およびMMX搭載のイオンエネルギー・質量分析器の装置特性. [2-4]より作成. なお, MSAとMAVEN/STATICの質量分析部はTOF型であるがMEX/IMAの質量分析部は磁場でイオンを曲げることで質量分析している.

Parameters	MEX/IMA	MAVEN/STATIC	MMX/MSA
Energy range	10 eV–30 keV	0.1 eV–30 keV	~5 eV–30 keV
Energy resolution ( $\Delta E/E$ )	7%	16%	10%
Mass range (amu)	1-80	1-70	1-100
Mass resolution	1, 2, 4, 16 ( $H^+$ , $He^{2+}$ , $He^+$ , $O^+$ )	1, 2, 4, 16, 32, 44 ( $H^+$ , $He^{2+}$ , $He^+$ , $O^+$ , $O_2^+$ , $CO_2^+$ )	$M/\Delta M > 100$ ( $^{18}O^+$ , $^{13}C^+$ などの同位体分析も可能)
FOV	$360^\circ \times 90^\circ$	$360^\circ \times 90^\circ$	$\geq 2\pi$ sr
Angular resolution	$22.5^\circ \times 4.5^\circ$	$22.5^\circ \times 6^\circ$	$22.5^\circ \times 12.25^\circ$
Time resolution (3次元速度分布関数)	3 min	16 sec	10 min

Q (amu/q))を分析する観測装置である[2]. これに加え, イオン入射部は, 機器座標系における方位角方向に $360^\circ$  ( $22.5^\circ \times 16$ チャンネル), 仰角方向には静電スキャンにより約 $90^\circ$  ( $\sim 12.25^\circ \times 8$ 方向)のほぼ半球の視野を持つため, 入射するイオンの速度方向も分解できる. TOF質量分析器は, 線形電場型(Linear Electric Field)を採用しており, これまでの火星探査機に搭載されたイオンエネルギー・質量分析器と比べ, 格段に質量分解能が向上している( $M/\Delta M > 100$ ). 参考のため, MSA, 欧州のMEX(Mars Express)搭載のIMA(Ion Mass Analyzer)及び米国のMAVEN(Mars Atmosphere and Volatile Evolution)搭載のSTATIC(SupraThermal And Thermal Ion Composition)の装置特性を表1に示す.

MSA(及びIMA, STATIC)によって観測されるデータは速度分布関数と呼ばれるが, これはいわば3次元速度空間のヒストグラムのことである. すなわち, ある速度(速さと方向)をもって装置に入射したイオンが探査機の周りに何個いるのかを記録したデータである. このデータを統計的に解析することにより, 様々な質量のイオンの密度, 速度, 温度, 圧力といった基本的な物理量を導出することができる. なお, イオンの速度分布関数を解析する際には, 磁場

の情報が有用であるため, MSAには磁力計も組み込まれている. 速度分布関数と磁場データを合わせて解析することにより, 様々なイオンの物理量に加え, イオンの運動, 加速機構, イオンの起源(どこからやって来たのか)などを詳細に調べることができる.

### 3. 火星圏におけるMSAの観測

現在の火星からの大気流出の主要メカニズムは, ジーンズエスケープ(Jeans Escape)と呼ばれる熱的散逸と光化学反応による非熱的散逸の2つに分けられる. ジーンズエスケープは熱圏上部において分子が太陽紫外線やX線を吸収して得た熱エネルギーが脱出エネルギーを超えると起こる現象で, 主に水素原子のような軽い粒子の主要流出メカニズムとなっている. その結果として火星の周辺にはHの希薄大気(外気圏)が広がっていることが知られている[5]. 光化学反応に関しては, 電離圏におけるイオンの解離再結合(例えば,  $O_2^+ + e^- \rightarrow O + O$ )等による流出があり, O, C, Nなど重い粒子の主要流出メカニズムの1つとなっている. 解離再結合で生まれた原子の一部は脱出エネルギーを超えるため, 火星の周りにはHだけでなく, Oの外気圏が広がっていることも観測的に分かっている[6](C, Nの外気圏の存在も

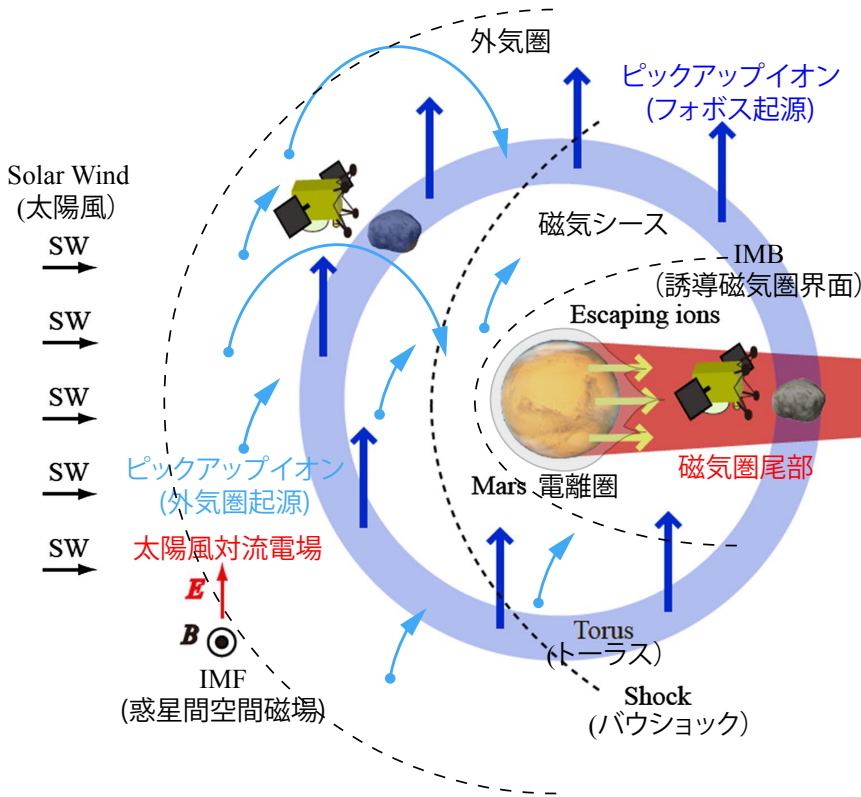


図1: 火星圏プラズマ環境の概略図. Yokota et al. (2021)を改変.

理論的には予測されている [7, 8]).

また、別の非熱的散逸としてイオン流出がある。地球のような固有の双極子磁場を持たない火星では、太陽風が固有磁場に遮られることなく惑星近傍まで流入し、プラズマ化した超高層大気と直接相互作用する。その結果、太陽風中の電磁場によって大気起源のイオンが加速され、宇宙空間に流出する。イオン流出は、太陽風や太陽放射といった宇宙天気にも強く影響を受けることが知られている。これは、太陽の進化とともに変化する太陽風や太陽放射の状態が、火星の大気進化や気候変動に長期的な影響を与えた可能性があることを示唆している。したがって、イオン流出メカニズムや流出率の理解は、過去の大気量の推定において重要となる。

これまで多くの探査機が火星から流出するイオンを直接観測してきた。特に、2000年代からのMEXや

MAVENの観測によって太陽風状態に対するイオン流出の研究は多く行われ、その物理的機構は明らかになってきている。図1に火星圏のプラズマ環境の様相を示す。太陽風、磁気シース(太陽風が亜音速まで減速され、プラズマが圧縮・加熱されている領域)、誘導磁気圏(惑星間空間磁場が電離圏に巻き付いて形成されるミニ磁気圏)、電離圏(惑星大気の一部が電離している高度約100-500 km程度までの層)など異なるプラズマ領域が存在する。本稿ではまず、フォボス軌道を周回するMMX軌道にある磁気圏尾部及び太陽風・磁気シースにおける観測の2つについて考えていく。また、流出イオンの同位体分析の狙い、複数衛星による火星大気流出の協調観測の可能性についても述べ、気象観測やサンプル分析へのシナジー効果についても説明する。

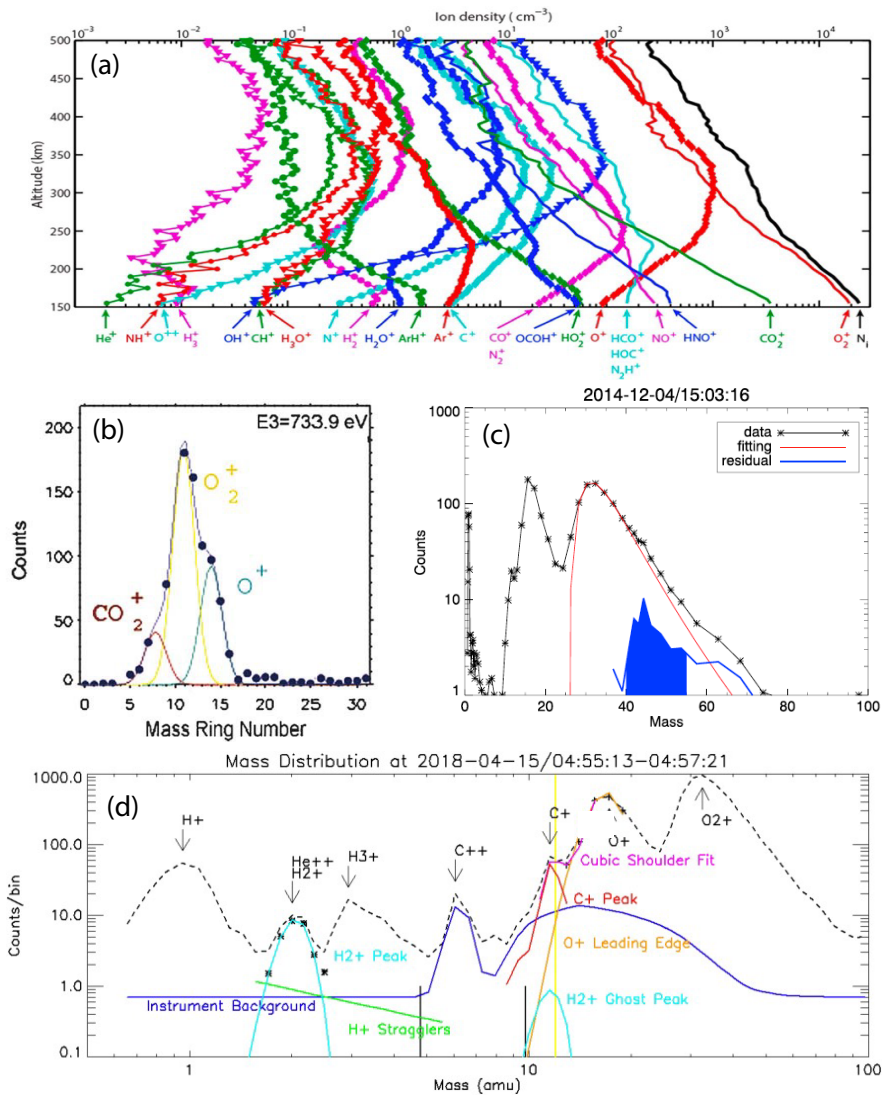


図2: (a) MAVEN/NGIMSによって観測された電離圏イオンの数密度高度分布 [12]. (b) MEX/IMAによって観測された磁気圏尾部(高度約1,000 km)のイオンの質量分析結果 [13]. (c) MAVEN/STATICによって観測された磁気圏尾部(高度約2,000 km)のイオンの質量分析結果 [9]. (d) MAVEN/STATICによる磁気圏尾部のC<sup>+</sup>イオン検出イベント [14].

### 3.1 磁気圏尾部

磁気圏尾部は火星から流出するイオンの主要流出経路であり、この領域における流出機構を理解することは大気流出量の定量化のために重要である。これまでのMAVEN等の観測により、磁気圏尾部からは主に電離圏起源のイオンが流出していると考えられている [9, 10]。図2にMEX及びMAVENの磁気圏尾部におけるイオン質量分析結果の例とMAVEN搭載の質量分析器NGIMS(Neutral Gas

and Ion Mass Spectrometer) [11, 12]<sup>1</sup>によって観

<sup>1</sup>ここで、STATICとNGIMSの違いについて簡単に説明しておく。STATICはトップハット型のエネルギー分析部とTOF型の質量分析部から成る装置で、観測値は質量方向だけでなく、エネルギー方向の情報を持っている。脱出エネルギーを超えるエネルギー帯に感度を持つため、主に高高度(磁気圏や太陽風領域など)の惑星圏を流出していくイオンの速度分布を計測する。一方で、NGIMSは主に四重極質量分析部のみからなり、低高度(電離圏・熱圏)における高密度の熱的イオン(及び原子・分子)の密度を計測している。

測された火星電離圏イオン数密度の高度分布を示す。図2aより電離圏は $O^+$ 、 $O_2^+$ 、 $CO_2^+$ を主成分としているが、それ以外にも様々な副成分が含まれていることが分かる。一方で磁気圏尾部の観測(図2b,c)では、装置の質量分解能の制約によりイオンの質量は完全には分離できていない。電離圏の主成分でフィッティングすることにより $O^+$ 、 $O_2^+$ 、 $CO_2^+$ の流出フラックスを求めることに成功している[9, 10, 13]が、この中にどれほどの割合で副成分が含まれているのかについては理解が進んでこなかった。

ところが、近年のSTATICを用いた解析により、磁気圏尾部の $C^+$ が初検出された(図2d) [14]。しかし、STATICの質量分解能では、様々な仮定のもとでフィッティング・ノイズ除去等の複雑な処理を行った上で $C^+$ を同定する必要がある。そのため、 $C^+$ の流出イベントは数十例に留まっており、統計解析に基づいた流出率の導出という定量的な議論は行えていない。我々はMSAの高い質量分解能を活かし、磁気圏尾部から流出していく $C^+$ の流出率の定量化を目指す。

また、再度図2dに着目すると、電離圏高高度(500 km)には $C^+$ と同程度の密度(数個 $cm^{-3}$ オーダー)を持った様々なイオンが電離圏高度に存在していることがわかる。MEX/IMAやMAVEN/STATICの観測では質量分解できていないが、おそらく現実ではこのような副成分イオンも磁気圏尾部から流出していると予想される。その中には、 $N^+$ 、 $OH^+$ 、 $H_2O^+$ 、 $CO^+$ 、 $N_2^+$ など水、温室効果ガス、生命構成要素に関わるイオンが含まれる。我々はMSAによってこれらの流出イオンを初検出することにより、イオン流出成分や流出率の実態を詳細に把握できることが期待される。

### 3.2 太陽風・磁気シース

ジーンズエスケープや光化学反応により流出した大気の一部は火星の重力圏から逃げきれずに周辺にとどまり、外気圏を形成する。火星のような太陽風誘導型の磁気圏のサイズは小さいため、外気圏大気は磁気シースや太陽風領域にまで広がる。これが太陽紫外線による光電離や太陽風粒子との電荷交換、電子衝突によって電離されると、太陽風中の対流電場によって加速され、ピックアップイオンとして火星

圏から流出していく(図1)。ピックアップイオンは実空間では電場と磁場方向に対して垂直にドリフト運動を行う(図3a)が、この運動は速度空間で見るとリング分布と呼ばれる特徴的な速度分布を示す(図3b)。MSAはイオンの速度分布関数を観測する装置であるため、太陽風領域や磁気シース領域においてピックアップイオンのリング分布を観測できる。これまではMEX/IMAやMAVEN/STATICによって $H^+$ と $O^+$ のリング分布が同定されている(図3c, d) [15-17]。MMXミッションではMSAの高い質量分解能を活かし、 $C^+$ やこれまでに検出されなかった $N^+$ など、様々な粒子種のピックアップイオン(リング分布)が観測されることが期待される。

また、速度分布関数と磁場のデータを解析することにより観測されたイオンの軌道を解析的に計算することができる。これにより、各々のイオンの起源(どこからやって来たのか)を調べることができる。現在、我々はピックアップイオンのリング分布を詳細に解析することにより、ピックアップイオンの源である外気圏の原子の数密度分布を導出する外気圏リトリバル手法を構築中である。MSAの観測データにこの手法を適用することで、O、C、Nなどのさまざまな粒子種の外気圏における3次元分布とその時間変化を調べることが可能になる。このアプローチにより、イオン流出の分析に留まらず、解離再結合のような光化学反応を通じた大気流出機構に関する理解にも貢献することを目指す。

### 3.3 同位体分析

大気散逸によって火星から失われた大気量・水量の推定には、大気・水を構成する揮発性元素の同位体組成が有用である。大気散逸では軽い同位体が選択的に失われるため、多くの原子が失われるほど火星表層は重い同位体に濃集するためである。MSAの高い質量分解能は同位体分析も可能としている( $^{13}C^+$ 、 $^{18}O^+$ など)ため、MSA観測から大気散逸の同位体分別係数(軽い同位体が選択的に失われる度合いを示す指標)を求めることにより、火星の大気量が時間とともにどのように変化したかを明らかにできる。我々はMSAを使って外気圏起源のピックアップイオンや磁気圏尾部のイオン流出フラックスの同位体比( $\phi_{13C}/\phi_{12C}$ 、 $\phi_{18O}/\phi_{16O}$ など)を観測することにより、実効的な同位体分

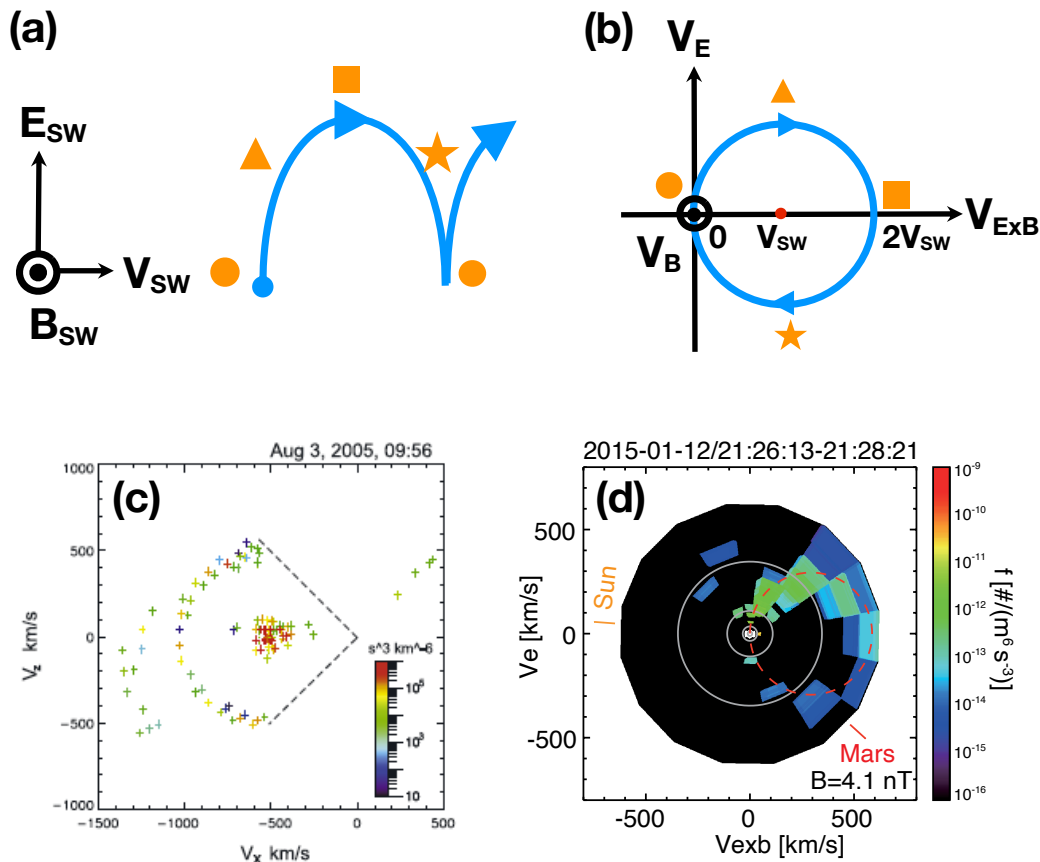


図3:(a)実空間におけるピックアップイオンの軌道(ExBドリフト)。(b)速度空間におけるピックアップイオンの軌道(リング分布)。パネルaにおける各記号(丸, 三角, 四角, 星)の場所では, パネルbの同記号に対応する速度ベクトルを持っている。(c)MEX/IMAによって観測されたH<sup>+</sup>リング分布[15]。(d) MAVEN/STATICによって観測されたO<sup>+</sup>リング分布 [17]。

別係数を導出する[2]。これにより, 過去から現在にかけて失われた水とCO<sub>2</sub>の量に制約を与えることを目指している。

### 3.4 複数の火星探査機との協調観測

磁気圏尾部は火星イオン流出の主要経路であり, 1980年代から現在にかけて複数の探査機によって直接観測がなされてきた。にもかかわらず, 磁気圏尾部におけるイオン流出メカニズムはまだ分かっていない点が多い。その理由の1つとして挙げられるのが, 磁気圏尾部の磁場の形状が複雑な上に時間スケールの短い変動(<<イオンのジャイロ周期)があり, 結果としてイオンの運動や流出経路も時間的・

空間的にダイナミックに変動していることである。実際, 数時間で火星を周回するMAVEN等のプラズマ・磁場データを見ていると, 毎周回磁気圏尾部のデータの見え方は大きく異なっている。このような観測事実から, 火星磁気圏のシステム全体が上流の太陽風状態の変化に応じて直ちに応答すると考えられている。そのため, 磁気圏尾部におけるイオン流出メカニズムを理解するためには, 秒スケールという短い時間で太陽風状態や電離圏イオン, 流出イオンを同時に観測することが必要である。しかし, 探査機一機による観測ではこれを実現することは難しい。幸いにも2024年1月現在, プラズマ観測が可能な複数の探査機(MEX, MAVEN, Tianwen-1)

が火星を周回しており、今年には米国の2機構成火星探査計画ESCAPADE(Escape and Plasma Acceleration and Dynamics Explores)も打ち上げられる予定である。残念ながらMMXの打ち上げは2年延期され、火星圏への軌道投入が2027年となってしまったが、もしこれらの探査機が観測を続けていれば、MMXによる磁気圏尾部の詳細なイオン質量分析と残り5機の探査機(MEX, MAVEN, Tianwen-1, ESCAPADE×2)による太陽風や電離圏の同時観測が実現する可能性が高い。我々MSAチームは、MAVENやESCAPADEチームのコアメンバーと協調観測についてすでに議論を始めており、MMXミッションの成果の最大化を目指している。

### 3.5 気象観測とのシナジー

火星からの大気流出機構を理解するためには、太陽放射や太陽風の影響だけでなく、下層大気からの影響を調べることも重要である。火星下層大気中にはダストが常に浮遊しており、太陽放射を吸収・散乱して大気を加熱している。これにより火星の大気温度分布や大気中の水蒸気量が支配されている。近年の観測により、火星表層でダストストームが発生すると大気が急速に加熱され、下層大気中に存在した水蒸気が高度100 km近くまで輸送されることが明らかになった[18]。ダストストームによって輸送された高高度の水蒸気を起源とする水素原子が外気圏まで広がり、結果、水素の流出を増大させることも明らかになった[19]。一方でダストストーム時に酸素原子の流出は抑制される可能性も指摘されており[20]、下層大気からの水の輸送に伴い上層大気において複雑な変動が起こっていることが予想される。このような上層大気の複雑な変動は電離圏イオンの分布にも影響を及ぼし、イオンの流出にも影響を与えることが予想される[21]。

MMXには赤外分光器MIRS(MMX Infrared Spectrometer[22])、OROCHI(Optical Chromatic Imager)及びTENGOO(Telescopic Nadiar Imager for Geomorphology)[23]が搭載されており、火星昼側の水蒸気・ダストを観測可能である。特に、MMXはフォボスに並走する赤道軌道のおかげで、火星近傍から広範囲な水平分布の数時間スケールの変

化を追うことができる。また、現在火星を周回中のMEX、MRO(Mars Reconnaissance Orbiter)、TGO(Trace Gas Orbiter)の赤外分光器は水蒸気やダストの高度分布も観測できる[19, 24, 25]。もしこれらの探査機が観測を続けていれば、MIRS、TENGOO、OROCHIの観測と組み合わせることにより水蒸気やダストの3次元的分布の時間変動が明らかになる。このような気象データとMSAによって観測される流出イオンの時空間変動を照らし合わせることで、火星の下層大気と上層大気の結合関係を明らかにしたいと考えている。

### 3.6 サンプル分析とのシナジー

火星の衛星であるフォボスは、太陽風および火星超高層大気から流出するイオンに晒されている。火星から流出するイオンはフォボス表面に打ち込まれると予想されている[26]。具体的には、太陽風・磁気シース領域においては主に太陽風起源のプロトンや外気圏起源のピックアップイオンが打ち込まれ、磁気圏尾部では電離圏起源のイオンが打ち込まれる。フォボスは潮汐ロックされているため、これらのイオンの打ち込み分布は火星面と反火星面で異なっている。以上から、フォボスのレゴリス試料には火星大気流出と太陽風の情報がほぼリアルタイムで記録されていると期待できる。

MMXではフォボスの複数の地点から $\geq 10$  gのレゴリス試料の回収を計画している。回収された試料は(1) quick analysis, (2) pre-basic characterization, (3) basic characterization という3段階のキュレーションを経て初期分析が行われる[27]。試料回収コンテナ内にはフォボスのレゴリス(固体試料)に加えて揮発性成分(ガス)が捕獲されるため、(1) quick analysisではこのガス成分を抽出し密封容器に保存する。その後の初期分析フェーズにてガス成分を調べることで、MSAの観測データを補完する地上検証データが得られると期待できる。

さらに、フォボスには、火星に隕石が衝突した際に巻き上がった地表粒子(表土、岩石、有機物など)が蓄積されている[28]。こうした火星粒子はフォボス表面の数100 ppmを占めると予想されている[29]。隕石衝突は火星上のあらゆる場所で生じるので、フォボス試料を回収することは火星粒子のランダム

なサンプリングにも相当する。火星の地質年代を考慮すれば、火星粒子の多くは40–30億年前の堆積岩であり、太古の火星大気を捕獲している可能性が高い。フォボス回収試料のキュレーションおよび初期分析の段階で、このような火星粒子の選別と分析が行われる[27]。火星粒子から得られる太古の大気組成情報と、MSA観測等で得られる現在の流出大気情報を組み合わせることで、火星大気の長期的な進化史を制約できると期待する。

## 4. 火星大気進化の解明へ

MSAによる高精度な質量分析を通じて、火星磁気圏尾部や外気圏から流出する主要なイオン( $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $CO_2^+$ ,  $H^+$ )のみならず、 $C^+$ ,  $N^+$ といった副成分イオンの流出率も定量的に測定される。また、ピックアップイオンの観測を通じた外気圏リトリーバル手法を用いることで、光化学反応によって生まれた原子の流出率も定量化できる。これらの観測により、現在の火星がどのようなプロセスを通じてどのような大気成分を失っているのかの平均的な傾向が明らかになる。

太陽フレアやコロナ質量放出(CME)といった宇宙天気イベントに対するイオン流出率の応答を調べるためには、複数の火星探査機との共同観測が有用である。太陽風、外気圏、磁気圏尾部、電離圏の多点観測により、宇宙天気イベント発生時のイオンや原子の流出率の瞬時応答が明らかになる。これにより、過去の活発な太陽活動時における火星の大気流出率を推定できる。

現在から過去に遡って様々なイオン・原子の流出率を時間積分することにより、火星がこれまでに失った大気の総量を求められる。この分析により、過去の火星が持っていた $CO_2$ 量の不確定性を制約するとともに、生命維持に重要な物質である窒素量の理解にも貢献できる可能性がある。なお、ダストストームなどにより火星の下層大気の状態が長期にわたってどのように変化してきたかについては、現在まで十分に理解されていない。そのため、下層大気の状態がイオン・原子の流出率にどのように影響しているかを過去に遡って解析することは今後の研究の重要課題の1つである。

さらに、MMXミッションでは、MSAによる同位体分析や地球に持ち帰られたサンプルの詳細な分析を行うことにより、火星の大気の歴史を理解することができる。太陽風や下層大気の状態に対する実効的な同位体分別係数の導出や地球に持ち帰ったフォボスのサンプルに含まれる火星大気成分の実態を明らかにすることで、火星大気進化の歴史の制約が可能となる。

以上のように、MMXは火星の大気進化の理解に向けて多角的な解析を行うことができる国際的にもユニークなミッションである。我々は、このミッションが提供する貴重なデータを活用して、火星の大気がどのようにして現在の状態に至ったのか、そのプロセスをより深く理解することを目指す。さらに、MMXの成果は、火星だけでなく他の惑星や衛星の大気進化に関する知見の拡大にも寄与することが期待される。これらの研究は、太陽系の成り立ちと進化の謎を解き明かす鍵となる可能性があり、将来の宇宙探査計画の設計にも大きな影響を与えることが期待される。

## 5. おわりに

本稿では、MSAによる火星から流出するイオンの質量分析観測の意義を中心に説明してきた。一方で我々MSA及びMSSSTチームは、フォボス表層と太陽風の相互作用やフォボス表層から流出するイオンの観測についても計画を進めている。これらのサイエンスの詳細に関しては、火星衛星の表層科学と地質学に関わるサイエンスチームであるSurface Science and Geology Science Strategy Team (SSGSST)と火星衛星の起源に関わるサイエンスチームであるOrigin of Phobos and Deimos Science Strategy Team (OPDSST)の今後の別稿に譲りたいと思う。



## 参考文献

- [1] Jakosky, B. et al., 2018, *Icarus* 315, 146.
- [2] Yokota, S. et al., 2021, *EPS* 73, 216.
- [3] Barabash, S. et al., 2006, *SSR* 126, 113.
- [4] McFadden, J. et al., 2015, *SSR* 195, 199.
- [5] Chaffin, M. et al., 2015, *GRL* 42, 9001.
- [6] Deighan, J. et al., 2015, *GRL* 42, 9009.
- [7] Lee, Y. et al., 2013, *JGR Planets* 119, 2014.
- [8] Fox, J., 1993, *JGR Planets* 98, 3297.
- [9] Inui, S. et al., 2018, *GRL* 45, 5283.
- [10] Inui, S. et al., 2019, *JGR Space Physics* 124, 5482.
- [11] Mahaffy, P. et al., 2015, *SSR* 195, 49.
- [12] Benna, M. et al., 2015, *GRL* 42, 8958.
- [13] Carlsson, E. et al., 2006, *Icarus* 182, 320.
- [14] Pickett, N. et al., 2021, *JGR Space Physics* 127, e2021JA029635.
- [15] Dubinin, E. et al., 2006, *GRL* 33, L22103.
- [16] Masunaga, K. et al., 2016, *JGR Space Physics* 121, 3093.
- [17] Masunaga, K. et al., 2017, *JGR Space Physics* 122, 4089.
- [18] Aoki, S. et al., 2019, *JGR Planets* 124, 3482.
- [19] Chaffin, M. et al., 2021, *Nature Astronomy* 5, 1036.
- [20] Masunaga, K. et al., 2022, *Nature Communications* 13, 6609.
- [21] Stone, S. et al., 2020, *Science* 370, 824.
- [22] Barucci, M. et al., 2021, *EPS* 73, 221.
- [23] Kameda, S. et al., 2021, *EPS* 73, 218.
- [24] Fedorova, A. et al., 2020, *JGR Planets* 126, e2020JE006616.
- [25] Kleinböhl, A. et al., 2009, *JGR Planets* 114, E10006.
- [26] Nenon, Q. et al., 2021, *Nature Geoscience* 14, 61.
- [27] Fukai, R. et al., 2024, *MaPS*, doi: 10.1111/maps.14121.
- [28] Ramsley, K. and Head, J., 2013, *PSS* 87, 115.
- [29] Hyodo, R. et al., 2019, *Scientific Reports* 9, 19833.