

別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

主 論 文 の 要 旨

論文題目

**Study on the roles of solar wind variations and crustal magnetic fields
in atmospheric escape from Mars based on in-situ spacecraft observations**

(探査機による直接観測に基づく太陽風変動と残留磁化が
火星大気流出に果たす役割の研究)

氏 名 原 拓也

論 文 内 容 の 要 旨

現在の火星は、地球と比較して寒冷乾燥した気候を持ち、地球の 1%未満という希薄な大気を保有していない。しかし火星の表層には、過去に大量の液体の水が存在し、地球のような温暖湿潤な気候の時代があったことを示す地質学的痕跡が多数発見されている。温暖湿潤な気候を実現するためには、少なくとも 1 気圧以上の二酸化炭素大気が必要であり、こうした劇的な気候変動に伴う火星大気進化の過程を理解するためには、過去に大量に存在した二酸化炭素と水の行方を明らかにする必要がある。

太陽風と惑星の相互作用の形態は、惑星が固有磁場を保有するかによって大きく異なる。現在の火星には、地球のような全球的な固有磁場を保有していない。故に太陽風が惑星の超高層大気と直接相互作用するような系が実現し、太陽風の運動量・エネルギーが惑星の超高層大気にまで輸送される。その結果、火星大気が宇宙空間に流出している。従って、こうした大気流出現象が火星の大気進化の過程で主要な役割を果たした可能性がある。先行研究では、太陽風条件に応じて大気流出の総量が少なくとも 1 桁以上変動することが報告されている。一方で火星には残留磁化が局所的に点在し、太陽風磁場と相互作用することで、火星周辺の電磁場環境は時空間的に変動に富む複雑な構造が形成される。これまでに多様な大気流出機構が提唱されてきたが、従来の周回衛星による限られた観測データからは、流出機構ごとの太陽風応答特性と残留磁化の影響は詳細に理解されていない。そこで本研究では、Mars Express (MEX) と Mars Global Surveyor (MGS) の 2 機の火星探査機の観測データを用いて、スパッタリングと磁気フラックスロープと

いう2つの大気流出機構に着目して、その太陽風変動と残留磁化への依存性を調べた。

スパッタリングとは、惑星周辺に高高度まで広がる酸素コロナが電離され、太陽風電場で加速(ピックアップ)された後に大気に再入射することで、大気を構成する中性粒子に脱出エネルギーを超えるエネルギーを与え、主に中性大気の流出を引き起こす大気流出機構である。流出する中性粒子自身は従来の衛星観測では計測できないが、スパッタリングを駆動する惑星起源イオンの降り込みは直接観測が可能である。そこで本研究では、惑星起源イオンの降り込み現象に着目し、太陽風データとの比較から、従来の数値実験では常に存在すると結論付けられていた惑星起源イオンの降り込みが、太陽風の擾乱構造の一種である CIR (Corotating Interaction Region)、特にその中でも磁場が圧縮された構造が通過したときに限って観測されることを示した。この結果は、従来考えられていたよりもスパッタリングの発動状況が太陽風条件に大きく依存することを示唆している。また太陽風にピックアップされた水素イオンの速度分布関数の特徴から太陽風磁場の向きを推定する工夫を行ったことで、磁力計を搭載しない MEX 衛星データから、惑星起源イオンの太陽風電場依存性を調べることが可能となった。その結果、過去の数値実験結果から予想された、降下イオンの空間分布が太陽風電場に対して非対称になるという傾向が MEX 衛星観測からも確認された。更に、惑星起源イオンの降り込みが残留磁化の弱い領域で観測されやすいことを明らかにし、残留磁化がスパッタリングによる大気流出を抑制している可能性を示した。

次に本研究では、近年発見された残留磁化の下流で見られる特徴的なフラックスロープ(螺旋状の磁場構造)に着目し、その特性と大気流出に果たす役割について、MGS 衛星の観測データを用いて調べた。Grad-Shafranov (GS)再現法という、衛星の1点観測の時系列データからフラックスロープの2次元構造を再現することが可能な手法を、磁場データのみを観測している MGS 衛星の観測例に適用する手法を考案することで、従来よりも詳細に空間構造の特徴を推定し、不確定性の大きかった磁気フラックスロープの大気流出への寄与を、より定量的に評価することが可能となった。GS 再現法に基づく統計解析結果から、残留磁化の下流で見られる特徴的なフラックスロープは、他と比べて大規模な構造を持ち、推定される磁気フラックスロープの軸が近傍の残留磁化の向きに対して、明瞭な依存性を示さないことが明らかとなった。また、こうした残留磁化下流のフラックスロープは、太陽風動圧が高いほど、より頻繁に観測されることが示された。その形成メカニズムに惑星空間磁場が寄与しない場合とする場合とを判別する手法を提案し、両者の比が約 2:1 であることを明らかにした。すなわち、観測されたフラックスロープのうち、約 2/3 ではフラックスロープの磁力線の足元は惑星に接続したままである可能性が高く、そのままでは流出しにくいのに対し、残りの約 1/3 については惑星から流出することが容易で、1つの磁気フラックスロープが占める大気流出量は、太陽活動極小期の大気流出量に比べて、約 1~10%にとどまることを明らかにした。