

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	かねだ かおり 金田 香織
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 21 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科 地球惑星科学専攻
(学位論文題目)	<p>A Simulation Study of Solar Wind Control of Oxygen Escape from Mars with a Magnetosheath-Ionosphere-Exosphere Coupling Model</p> <p>(火星からの酸素流出の太陽風制御に関する 磁気圏－電離圏－外圏結合モデルによる シミュレーション研究)</p>
論文調査委員	(主査) 町田 忍 教授 家森 俊彦 教授 石川 裕彦 教授

理 学 研 究 科

(論文内容の要旨)

火星の酸素コロナに関するこれまでの研究は電離圏が定常状態であるという仮定の下で行われてきたが、実際には、強い固有磁場の存在しない火星では、太陽風と電離圏が直接相互作用を行い、太陽風の変動が電離圏の構造と力学に大きな影響を及ぼすことが予想される。そこで、本研究では、非熱的酸素フラックスに関するモデルと電離圏-マグネトシース相互作用モデルを結合し、太陽風動圧が一定の定常状態、および、それが急激に増大する非定常な場合の火星の酸素コロナの構造の変化を、数値シミュレーションによって調べた。

具体的な数値シミュレーションモデルは、(1) 電離圏における各種イオンの密度・温度・速度を計算する空間1次元および空間2次元のMHDモデル(2) 熱圏における上向き・下向きの中性酸素原子のフラックスを算出する2流体モデル(3) 外圏における衝突過程を含んだ中性酸素原子の運動を取り扱うモンテカルロ・モデルで構成される。

まず、最初に取り組んだ1次元MHDモデルによる計算は、火星大気が最も太陽に近いサブソーラー領域に適用可能であるが、定常状態のときは、太陽風動圧が低い場合の方が、高い場合に比べて、中性酸素原子の流出率が2倍近く大きくなることを見出した。これは、太陽風動圧が低い場合の方が酸素分子のイオン O_2^+ がより高い高度まで存在して、その領域で O_2^+ イオンと電子から非熱的な酸素原子 O^* が生成される解離再結合反応($O_2^+ + e \rightarrow O^* + O^*$)が効率良く進むことが原因であることを明らかにした。一方、太陽風動圧が急激に増大する非定常な場合には、太陽風動圧増大の直後に、中性酸素原子 O の流出率が定常時の約2~4倍にまで上昇する現象が見出された。この一時的な上昇は、高々度に存在していた O^+ 、 O_2^+ イオンおよび電子が、太陽風動圧の増加に伴って押し込まれるような形で下方に移動して外圏底付近に蓄積し、そこで O_2^+ の解離再結合が促進されるためであることが判明した。

続いて、1次元のMHDモデルを2次元のMHDモデルに拡張して太陽風動圧を予想される範囲内で変動させ、火星の全球的な中性酸素原子の流出率と酸素コロナの時空間変動を調べた。2次元モデルで得た中性酸素原子の流出率と太陽風動圧の関係は1次元モデルで得られた傾向と一致し、太陽風動圧が一定で電離圏が定常状態にある時は低動圧時ほど流出率が大きく、太陽風動圧が急激に増大した時は、サブソーラー領域を中心に電離圏が圧縮されて解離再結合が促進され、一時的に流出率が上昇することが確認された。

次に、この太陽風動圧による酸素コロナ密度とイオノポーズ(電離圏上側境界)高度の変化、さらに太陽風フラックスの変化を加えて、太陽風ピックアップによる O^+ イオンの流出率と太陽風動圧の関係を調べた。その結果、太陽風動圧が高い時ほど太陽風が火星大気の深部にまで侵入し、低高度に大量に存在するエネルギーの低い熱的酸素原子が太陽風にさらされるために、それが電離された後、太陽風によってピックアップされて流出する O^+ の量が増加することがわかった。通常範囲における太陽風動圧が高い時(1.43 nPa)と低い時(0.36 nPa)について計算を行い、前者は後者の場合に比べて、酸素イオン O^+ の流出率が2桁も大きくなることを見出した。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、電離圏と磁気圏（電磁圏）、熱圏、外圏を結合させた数値シミュレーションモデルを構築し、火星からの酸素流出の物理機構に太陽風が及ぼす効果を明らかにしたものである。数値シミュレーションモデルは、(1) 電離圏のダイナミクスを扱う1次元・2次元MHDモデル(2) 熱圏における中性酸素原子の輸送を記述する2流体モデル(3) 外圏での中性酸素原子の運動を取り扱うモンテカルロ・モデルで構成される。一連のコードの開発においては、多数の化学反応をその中に取り入れる必要があり、その作業は、多くの試行錯誤を含むものであったが、申請者は物理的な基礎過程や数値的な手法に関する事柄を集中的に調査・研究し、コードを組み上げた。時間変動を組み込んだ電磁圏－熱圏－外圏の結合モデルはこれまで試みられことがなく、まず、このようなコードを開発した点が評価される。

新規に開発したコードを用いて数値シミュレーションを実施した結果、通常の範囲における定常状態では、太陽風動圧の高い場合に比べて低い場合は、酸素原子の流出量が約2倍大きくなることを見出した。さらに、電離圏の時間変動が大気散逸に与える影響については、これまで調べられていなかったが、太陽風動圧が急激に増大する場合についてシミュレーションを実施したところ、時間スケールにして数百秒間の流出量の増大が過渡的に起こって、ピーク値の酸素原子流出量が定常状態のおよそ2倍から4倍にまで増加することを見出した。これは、太陽風動圧が増大することで、電離圏が圧縮され、外圏下部での O_2^+ の解離再結合反応が進むためであることをつきとめた。以上のことは、火星大気が最も太陽に近いサブソーラー領域を対象とした1次元モデル、および、より広い領域に適用できる2次元モデルで行った計算の両者において確認することができた。本研究は火星からの酸素原子流出量について定量的な変動の幅を与えただけでなく、その原因となる物理過程を明らかにした点において学術的価値が高い。

さらに、申請者は上記の過程等によって生成された火星コロナを構成する酸素原子が、太陽紫外線、太陽風電子衝突、太陽風イオンとの電荷交換などによって電離されて酸素原子イオン O^+ になり、太陽風と共に惑星間空間に持ち去られるイオンピックアップ過程について検討を進めた。そして、太陽風動圧が高くなるほど太陽風が火星大気の深部にまで侵入し、より多くの酸素原子と相互作用を行うようになるため、太陽風動圧が高い時は、低い時に比べて2桁ほど流出する O^+ のフラックスが大きくなることを見出した。物理機構について明確な説明を与えた上で、大きな変動幅を予想したこの成果は意義深く、また、学術的な価値が高いものと判断される。

近年、惑星の周りに探査機を周回させて、直接計測や間接計測によって周囲の大気や惑星表面の状態を調べる試みが盛んに行われるようになってきている。本研究で申請者が導いた結果は、今後、火星からの大気流出の謎を解き明かすための探査計画を立案する上でも重要な指針を与えるものである。

以上の観点から、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。