

# 論文審査の結果の要旨

氏名 久保田 康文

本論文は、火星電離層と太陽風との相互作用による電離層イオンの流出過程とその結果生じる火星の尾部構造について論じている。火星電離層は、火星の固有磁場が弱いので、固有磁場をもつ地球電離層とは異なり、太陽風が直接火星の電離層大気と相互作用をすることが予想されていた。実際 Phobos-2 および Mars Express 探査機により、火星の電離層イオンの流出とそのプラズマで満たされた尾部構造が観測されており、 $O^+$ 、 $O_2^+$ 、 $CO_2^+$  の重イオンが、空間的に局在化した Ray 構造を形成していることなどが分かってきた。しかし、このような電離層イオンは、火星表面から重力に打ち勝って流出することが必要であるが、どのような流出機構が働いているのか理解されていなかった。本論文では、これまで未解決であった火星電離層イオンの流出機構について、3次元電磁流体の数値シミュレーションを用いてイオン種ごとの流出機構を考察し、流出には太陽風磁場の磁気張力効果が重要であることを見出した。また、火星表面から流出するイオンのフラックスを太陽風のガス圧や磁気圧の関数として評価することで、火星電離層と太陽風との相互作用を統一的に理解した。

本論文は全部で七つの章の構成である。第1章は序論であり火星のプラズマ観測や先行理論研究について記述されている。2章から6章までが理論シミュレーション研究の主要部分であり、第7章は全体のまとめになっている。

まず第2章は、本研究で用いる3次元電磁流体モデルについて述べられており、火星大気モデリングに必要な大気化学反応過程や高精度3次元電磁流体計算の手法について議論されている。第3章は、光化学反応および鉛直方向の対流運動による火星電離層の化学平衡状態について考察している。先行研究との比較を行いながら、通常太陽風の状況下では  $CO_2^+$  および  $O_2^+$  は230km以下の低高度で生成され、 $O^+$  および  $H^+$  は高高度まで達することが述べられている。しかし太陽風の圧力が低い場合は、 $CO_2^+$  および  $O_2^+$  でも高高度に輸送されることを議論している。第4章では、第3章で議論した電離層構造に対して、そのイオン種が非磁化の太陽風との相互作用でどのように宇宙空間へと流出するかについて考察している。電離層の  $O^+$  高度の領域からは、電離層プラズマの流れ場の流線が宇宙空間へと開いているが、電離層  $CO_2^+$  および  $O_2^+$  の領域からの流線は閉じているため、両者の間で流出フラックスが大きく異

なることが述べられている。このため単なる太陽風との相互作用だけでは、 $\text{CO}_2^+$  および  $\text{O}_2^+$  の観測と矛盾することが指摘されている。この問題点を解決するために第5章では、磁化した太陽風との相互作用について研究を発展させている。太陽風磁場は  $\text{CO}_2^+$  および  $\text{O}_2^+$  高度まで侵入することができるので、その磁力管に沿って磁気張力を受けて大気流出が増大することが議論されている。そしてその結果  $\text{CO}_2^+$  および  $\text{O}_2^+$  の流出フラックスは観測を説明できることが述べられている。また磁場によるプラズマ運動の束縛から、空間的に局在化した流出イオンの尾部構造が現れることも議論している。第6章は、5章までに得られた基本メカニズムをもとに、太陽風の動圧の関数として大気流出フラックスがどのように変化するかを定量的に調べた。イオン種ごとの流出フラックスを流線に沿った積分法で評価した結果、 $\text{O}^+$  は太陽風の全動圧変化と比例して増大すること、一方  $\text{O}_2^+$  および  $\text{CO}_2^+$  については弱い依存性があることが見出された。最終章の7章では、本論文全体のまとめが書かれており、特に今回のシミュレーションによるモデリングが観測を統一的に説明できることや、火星大気進化の観点からも本研究で考察された電磁氣的相互作用が重要であることが述べられている。

以上のように、本論文では高精度の大規模3次元電磁流体シミュレーションを用いることで、これまでよくわかっていなかった太陽風の磁場を介した電離層イオンの流出過程について考察し、その流出物理的メカニズムと流出イオンの尾部構造を解明した。本論文の惑星大気科学における学術的価値は高い。

なお、本論文の一部は、前澤洸、陣英克との共同研究であるが、論文提出者が主体となつて行った理論シミュレーション研究であり、論文提出者の寄与が十分大きいと判断できる。

従って、審査委員全員一致で博士（理学）の学位を授与できると認める。