

# 博士学位論文の要約

論文題目 The Study of Martian Plasma Boundaries Based on Spacecraft Observations

(探査機による観測に基づく火星プラズマ境界層の研究)

氏名 松永 和成

太陽系に存在する惑星は、惑星間空間磁場(Interplanetary Magnetic Field, IMF)を伴った太陽風と呼ばれる高速プラズマ流に曝されている。現在の火星は地球に比べて薄い大気を保持しているが、地球のような全球的な固有磁場を保有していない。従って地球のような磁気圏は存在していないが、太陽風と火星大気由来の電離圏との相互作用の結果、誘導磁気圏と呼ばれる惑星の勢力圏が形成されている。火星誘導磁気圏は地球の磁気圏と比べて太陽風を防ぐ効果がとても弱いため、太陽風と火星上層大気が直接的に相互作用している。その結果、太陽風と火星上層大気との境界層では様々なエネルギー・運動量・物質交換の過程が起きていることが、近年の火星探査機によるプラズマ観測によって明らかになりつつある。しかしながら、Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN)衛星の科学観測が2014年に始まるまでは、単一の探査機による長期的な火星周辺でのイオン・電子・磁場同時観測が行われてこなかった。そのため、火星周辺のプラズマ構造、特に太陽風起源プラズマと火星電離圏プラズマの間に位置するプラズマ境界層については様々な呼称や議論がなされているが、未だに決着がついていない。そこで本研究では、Mars Global Surveyor (MGS)衛星と MAVEN 衛星の2機の火星探査機のプラズマ観測データを用いて、磁場と電場から判別される誘導磁気圏界面(Induced Magnetosphere Boundary, IMB)と、イオンの主成分が太陽風由来の水素イオンから火星由来の重イオンへと変化するイオン成分境界面(Ion Composition Boundary, ICB)、太陽風のガス圧と動圧に対して火星誘導磁気圏の磁気圧が釣り合う境界( $\beta^*$ 境界と呼称)という3つのプラズマ境界層に着目して、その存在位置と特徴、太陽風変動と火星地殻起源の残留磁場への依存性を調べた。

火星における IMB は MGS 衛星に搭載された磁場・電子観測器によって初めて観測された。そこで本研究では、まず MGS 衛星の7.5年に及ぶ観測データから MGS 衛星が IMB を通過したイベントを選定し、その通過頻度に対する太陽風動圧と IMF の向きの依存性を調べた。探査機が IMB を通過すると、高エネルギー電子と磁場強度の変動が観測されることが先行研究からわかっている。この特徴を基に MGS 衛星の磁場と電子観測データより IMB を通過した時間帯を同定した。MGS 衛星は太陽風領域を直接的には観測していなかったが、先行研究で用いられた手法を改良することで、太陽風動圧と IMF の向きを推定し、その依存性を調べることが可能となった。統計解析の結果、判別した IMB 通過イベントの3分の2程度が、相対的に低い太陽風動圧のときに起こっていることを発見した。さらに、太陽風動圧が低い条件下では、IMF が太陽から遠ざかる向きになるときに、IMB が北半球でより低高度に存在していることを発見した。このときの IMF の条件は、北半球でプラズマ不安定性

の一つであるケルビンヘルムホルツ不安定性(KHI)が起きやすい条件を満たしていた。そのため、IMB 内で KHI が引き起こされ、KHI による渦構造の向きとイオンの運動の向きが一致することで、太陽風領域をより低高度まで侵入させ、IMB を低高度に存在させているという仮説を提唱した。

次に、初めて火星周辺で行われた MAVEN 衛星によるイオン、電子、磁場の同時観測データを用いて、IMB、ICB、 $\beta^*$  境界を比較するための統計解析を行った。MAVEN 衛星が太陽風領域を観測した期間(合計約 8 か月)のみを使用し、太陽風変動への依存性も調べている。IMB の同定は MGS 衛星の解析時に使った手法を基に行い、ICB の同定は水素イオン密度と重イオン( $O^+$ 、 $O_2^+$ )密度の比率を調べることで行った。また、IMB と ICB の二つの境界層と比較する指標として、太陽風のガス圧と動圧に対して火星誘導磁気圏の磁気圧が釣り合う位置 ( $\beta^*$  境界) についても太陽風依存性などを統計的に調べた。MAVEN 衛星がこれら 3 つのプラズマ境界層を通過した時間を自動的に調べるアルゴリズムを開発することで、長期間のデータを統計的に処理することを可能とした。統計解析の結果、まず、太陽風動圧が強いときには通常より低い高度に位置するという先行研究と同じ傾向を確認するとともに、3 つのプラズマ境界層の形成位置は地理的な南北半球で非対称性を持ち、三者とも南半球で北半球よりも高い高度に形成されることを発見した。この傾向は、残留磁場の強い地表面の位置する地方時に関係なくみられるが、特に残留磁場が昼側にあるとき、南半球での境界層の位置は通常より高い高度に位置することも明らかになった。また、IMB と ICB の比較から、両者は昼側ではほぼ同位置に存在するが、夜側では平均的には IMB の方が ICB より高い位置に存在することがわかった。一方で、太陽風電場が下向き(IMF が夕方向き成分を持つ)、かつ、残留磁場が昼側にあるという条件が満たされた場合、夜側の境界層の位置が最も高くなるとともに、ICB が IMB よりも高い高度に形成され、両者の上下関係が反転することを発見した。

これらの観測結果は、火星周辺のプラズマ境界層について、昼側では主に mass loading process により IMB と ICB が形成されていること、また夜側境界層の位置が残留磁場の影響により常に南北非対称をもつことを世界で初めて示したものである。また、南半球で太陽風電場の向きが下向きとなる場合には、火星大気起源の重イオンが低エネルギーのまま広い範囲に流出し、ICB を通常より高い高度に押し上げていることを示唆している。流出メカニズムの候補としては、残留磁場が形成するミニ磁気圏からのイオン流出が考えられ、IMF との磁気再結合によるフラックスロープの形成やカスプ領域からの流出などが挙げられる。低エネルギーイオンの流出は、火星気候変動を引き起こした大気流出過程の候補として注目されており、その発生条件を観測的に明らかにした点でも重要な研究成果である。