

## 論文内容の要旨

### IMF penetration into the ionospheres of Venus and Mars (太陽風磁場の金星と火星の電離層への侵入)

陣 英克

本論文は、金星や火星といったグローバルな固有磁場を持たない惑星における電離層、または電離層と太陽風の境界で起こる物理過程を扱っている。これらの惑星では、太陽風が直接電離層に吹き付けており、太陽風と電離層の圧力関係は、電離層内構造や太陽風-電離層境界付近の構造にとって非常に重要である。両領域間に圧力バランスが成立すれば明確な境界が出来、成立しない場合は太陽風が電離層構造にもたらす影響が大きいはずである。これまでの衛星観測では、太陽風動圧が比較的小さい時に金星電離層と太陽風との間に明確な境界 (ionopause) が存在するのが確認され、太陽風動圧が大きい時には ionopause の幅が厚くなり境界が不明瞭になるのが観測されている。後者のケースでは、太陽風起源と思われる磁場が電離層内で観測される。この金星電離層における太陽風磁場の侵入については、これまで磁場の対流拡散モデルを用いた理論的研究が多くなされているが、メカニズムについての理解は十分とは言えない。特に、太陽風と電離層の圧力関係と鉛直対流を結び付けるような研究はなされていない。一方火星の観測では、明確な境界はほとんど見られず、多くの場合電子密度のスケールハイトが高高度領域まで一定に保たれている。火星電離層内への太陽風磁場の侵入についての研究はこれまであまり無く、ionopause 構造に関しては、既存の数値モデルで再現されず、さらなる理論的研究が必要であった。本論文では、グローバルで高空間分解能をもった MHD シミュレーションモデルを開発し、そのモデルを用いて、(1) 太陽風動圧の変化が電離層内対流に与える影響に注目し、太陽風磁場の電離層内への侵入過程を明らかにする。さらに、(2) 太陽風と電離層で圧力バランスが成立する場合と、成立しない場合の電離層内部、境界付近の構造の違い、(3) 金星と火星における磁場の侵入の様子の違い、電離層構造に与える影響の違いを議論する。本

論文は6章と3つの appendix から成る。第1章では、研究背景や研究動機を詳しく述べる。第2章は、本研究のために開発したグローバル MHD シミュレーションの詳細を述べる。第3章は、MHD シミュレーションで得られた太陽風—金星電離層相互作用の全体的な構造を概観し、他のモデルや観測との比較を行う。第4章は、上記項目の(1)と(2)について議論する。第5章は、火星電離層への磁場の侵入を扱い、上記項目(3)を議論する。第6章はまとめである。以下に、3から5章の内容について概要を述べる。

### (第3章)

本研究では昼側電離層と境界付近の構造が主な対象だが、この章では、その領域を含め MHD モデルで得られた太陽風—電離層相互作用の全体的な構造を概観し、観測や他のモデルとの比較を行う。我々のモデルは、高精度の空間分解能を採用にしたことにより、bow shock、magnetic barrier、magnetosheath、ionotail といった比較的スケールの大きい構造だけでなく、電離層内のプラズマの分布や細かい擾乱構造もよく再現している。過去の研究で議論されてきた電離層内プラズマの加速や夜側電離層のソースの問題、テイル領域の複雑なプラズマの流れについても議論している。また、3章後半では、本研究の基礎として重要な昼側電離層内の鉛直対流の形成についても議論している。

### (第4章)

4章前半では、太陽風動圧の変化が電離層鉛直対流に与える影響を調べることにより、金星電離層への太陽風磁場侵入のメカニズムを議論する。その結果、電離層すぐ上の太陽風圧力 ( $P_{sw}$ ) がある臨界圧力 ( $P_{crtc}$ ) を越えた時に太陽風プラズマが磁場とともに電離層内に侵入することが解った。臨界圧力の大きさは電離層内の対流の様子によって決まり、臨界状態では、電離層上層で生成したプラズマの大部分が下向き対流で輸送され、下層で化学反応によって消滅していることが解った。幾つかの parameter 依存性を調べたところ、臨界圧力の大きさが通常電離層ピーク圧力よりも小さいことが解った。4章後半は、電離層と太陽風の圧力バランスが成立する場合 ( $P_{sw} < P_{crtc}$ ) と成立しない場合 ( $P_{sw} > P_{crtc}$ ) における電離層構造、境界構造の違いについて議論している。特に、 $P_{sw} < P_{crtc}$  では、プラズマの生成・消滅にともなう鉛直対流が重要であるのに対し、 $P_{sw} > P_{crtc}$  では、磁場の対流拡散過程が電離層構造を左右していることが parameter survey などを通して明らかになった。ionopause の形成過程の違いも明らかにした。 $P_{sw} < P_{crtc}$  では、ionopause は2領域間の圧力がバランスする tangential discontinuity であるのに対し、 $P_{sw} > P_{crtc}$  では、ionopause を通過するプラズマ流が存在し、その境界構造を定常的に維持するためには ionopause における電離層プラズマの生成が重要な役割を果たすことが解った。さらには、太陽風動圧が大きくなるほど ionopause 高度が下がるが、ある程度下がると太陽風動圧が大きくなってもそれ以上は下がらなくなるというような観測事実を、シミュレーションによって再現した。すなわち、 $P_{sw} < P_{crtc}$  では、太陽風動圧変化が電離層内の鉛直対流に与える影響を通して ionopause 高度が変化するが、一方  $P_{sw} > P_{crtc}$  では、電離層内に溜まる磁場の圧力の影響で ionopause 高度がほとんど変化しないことが明らかになった。

### (第5章)

この章では、4章で行ったシミュレーションによる解析を火星においても行い、まず前半は、磁場の電離層への侵入過程、電離層構造にもたらす影響、ionopause 構造について、金星と火星の比較をした。その結果、火星では、金星のように顕著なプラズマの生成・消滅領域、そして鉛直対流構造が存在しないことが解り、この違いが電離層内の磁場や鉛直速度の高度分布、ionopause 構造の違いにつながっていることが明らかになった。プラズ

マの生成・消滅領域の有無の違いは、両惑星の中性大気分布の違いから生ずるものである。後半は、我々のシミュレーションモデルの結果を、火星におけるこれまでの観測や他のモデルの結果と比較している。火星では、金星で見られない MPB (Magnetic Pileup Boundary) と呼ばれる構造や、金星に比べてより不明瞭な ionopause が観測されているが、両構造とも既存の理論モデルでは再現出来ず、未解決問題である。本研究では、MPB 形成過程について提案 (太陽風が冷却される影響) をし、不明瞭な ionopause 構造については、これまで可能性が示唆されてきた地殻起源磁場の影響なしに、再現できることを明らかにした。