

氏 名	寺 田 直 樹
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2456 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 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	Theoretical Study of the Solar Wind-Venus Ionosphere Interaction with Boundary-Fitted Global Hybrid Simulation Code (境界適合格子を用いたグローバルハイブリッドコードによる太陽風と金星 電離圏との相互作用の理論的研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 町 田 忍 教 授 荒 木 徹 教 授 家 森 俊 彦

論 文 内 容 の 要 旨

金星などの固有磁場を持たない惑星では、太陽風が惑星の電離大気に直接衝突して相互作用を行う。その際に惑星を起源とする酸素原子イオンなどは惑星の半径と同程度のジャイロ半径を持つために、粒子の有限旋回半径効果が重要になってくる。特に、太陽風と電離圏プラズマの境界であるイオノポーズには、大きな速度シアアが形成され、それに起因するケルビン-ヘルムホルツ不安定性が励起されることが指摘されている。この不安定性は惑星から粒子が持ち出される過程に本質的な役割を果たしている可能性があるが、イオンの有限旋回半径効果は、その発展の仕方に大きな影響を及ぼすことが考えられる。本研究はその様な点を解明し、粒子の散逸過程をより深く理解することを目的として行われた。

研究を進めるにあたっては、空間グリッドを境界適合格子によって構成し、さらに、イオンを粒子、電子を流体として取り扱うことによって、電磁流体的な低周波現象を扱うことのできる2次元ハイブリッドコードを開発した。境界適合格子の間隔は、電離圏の部分で10km、また、太陽風の領域で約100kmに設定して、従来のコードでは実現できなかった化学反応を含む電離圏現象と電磁的な要素が支配的である太陽風側の現象を結び合わせて統一的にモデル化することを可能とした。

計算を実行し、金星イオノポーズにおけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性が、従来安定であると考えられていた太陽直下領域から発達するという事実を見出した。それは有限の幅をもつイオノポーズ遷移層での運動量交換過程で電離圏上端領域に速度シアアが生じ、その高密度電離圏プラズマ内での速度シアアがケルビン-ヘルムホルツ不安定性を励起することに原因のあることを明らかにした。また、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の発達領域の分布が、太陽風電場方向に対して明瞭な非対称を示すという結果を得た。特にイオノテイル表面では太陽風電場が惑星表面から離れる方向を向く半球では惑星半径スケールの表面波構造が見られるのに対し、太陽風電場が逆向きの半球では擾乱がほとんど見られないことがわかった。このケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非対称的な発達は、イオンの有限旋回半径効果に起因する非対称な安定化/不安定化効果によって説明できることを線形理論を用いて示した。イオノポーズにおける物理過程は、太陽風プラズマ流から電離圏プラズマへの運動量輸送を担っており、従来の流体モデルでは見られなかった非対称な電離圏プラズマ対流を生じさせている。また惑星イオンの損失過程においても、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性を介した拡散的および粘性的な電離圏イオン流出過程が重要であることを指摘した。

さらに、金星イオノポーズで周辺で多量の非熱的惑星イオンが生成されることを見出したが、この非熱的イオンは、ケルビン-ヘルムホルツ渦のよどみ点で起こる2領域のイオンの混合過程によって、低エネルギー惑星イオンが高速の磁気シース流に巻き込まれ、加速されることが主な成因であることを明らかにした。また、昼側磁気シース領域の圧力の時間変化や、惑星周りのプラズマの流れに伴う磁場強度減少構造も非熱的イオンの生成に寄与していることを示した。加えて、この非熱的イオンがイオノポーズ高度の非対称性を引き起こすことも明らかにした。

論文審査の結果の要旨

本研究を遂行するにあたっては、太陽風と金星電離圏との相互作用におけるイオンの粒子性に起因した物理過程を取り扱うことのできる、境界適合格子を用いた2次元グローバルハイブリッド（粒子／流体）シミュレーションを新規に開発することから始まった。このコードは金星の電離圏高度では10km、太陽風領域ではおよそ100kmの格子間隔を実現することができ、従来のハイブリッドコードと比した際、電離圏近傍の化学反応を組み入れた詳細な現象を計算し、同時に電磁的な過程が支配的な太陽風側の領域を取り扱うことを可能とした点で、独創的で先進的なものである。それを独自に開発し、実用化した申請者の能力は大変高く評価される。本コードにより、従来取り扱いが極めて困難であった太陽風プラズマと金星電離圏プラズマとの境界領域であるイオノポーズでの物理過程、その中でも特にケルビン-ヘルムホルツ不安定性に関連する様々な運動論的過程の研究を行うことに成功した。

従来、太陽に最も近い真昼の赤道域付近の電離圏では、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性は励起されないと考えられていたが、申請者はイオノポーズ付近で電離生成され、さらに太陽風電場によって加速される酸素イオンの作る流れが、この不安定を成長させるのに必要な速度シェアーを与えて、その結果、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性が励起されることを見出した。この過程は、米国の金星探査機パイオニア・ビーナス・オービターによって観測されていたが、成因が不明であった磁場・プラズマ構造を合理的に説明することができ、新しい解釈を与えた点で評価できる。また、イオノポーズ付近でケルビン-ヘルムホルツ不安定性によって発達する渦構造は、太陽風電場が惑星電離圏に向かう方向の半球で発達し、反対半球においては、非常に長波長の成分が発達するために、必ずしも、渦列として認識されない構造を生成させることを見出した。この特性は、さらに、下流側のイオノテイルと呼ばれる領域に受け継がれ、前者では惑星半径スケールの発達した表面波構造が見られるのに対し、後者では擾乱がほとんど発達しないという性質を示した。申請者は、この様な異差をイオンの有限旋回半径効果に起因する非対称な安定化／不安定化効果によって説明できることを線形理論を用いて示し、さらに、惑星イオンの損失過程においてケルビン-ヘルムホルツ不安定性を介した拡散的および粘性的な電離圏イオン流出過程が大きな寄与を与えうることを指摘した。ケルビン-ヘルムホルツ渦のよどみ点で起こる2領域のイオンの混合過程によって、低エネルギー惑星イオンが高速の磁気シース流に巻き込まれ、加速されることが原因となり、非熱的イオンの生成される過程も見出した。これらの一連の現象にケルビン-ヘルムホルツ不安定性を軸とした統一的な解釈を与えたことは、当該分野において、今後の理論的・観測的研究に重要な指針を与えたものとして、大変高く評価される。

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た。主論文に報告されている研究内容と、それに関連する分野について口頭試問ならびに学識確認を行った結果、合格と認めた