

金星大気と太陽風の相互作用

学位論文内容の要旨

金星は固有磁場を持っていない。そのため地球のように磁場で守られることなく、太陽風と金星大気が直接相互作用を行い、運動量・エネルギーを交換する。金星には、地球で見られない様々な特有の現象が見つかり、この多くは太陽風との相互作用によって生じると考えられている。

高度 100 km を越えると金星大気は太陽紫外線によって電離し、電離圏を形成する。電離圏のプラズマは、太陽風および太陽風とともに流れてくる惑星間空間磁場 (IMF) の影響を非常に強く受ける。太陽風動圧や太陽風の向き、IMF の方向により刻一刻と電離圏は様子を変えていく。太陽風の変動に対応した電離圏プラズマ分布を調べることは太陽風と金星大気の相互作用を調べる上で不可欠である。電離圏に入り込んだ磁力線は太陽風の変動に応じて、その強さや形状を変化させ、電離圏プラズマの運動、熱収支に影響を与える。そこで、本研究では太陽風の向きと IMF の向きを基準とした太陽風座標系を定義し、その座標系において Pioneer Venus Orbiter (PVO) によって得られたデータを基にプラズマ分布、磁場形状を調べた。また、これらの解析から得られた結果を基に数値実験を行った。更に、太陽風との相互作用により形成され则认为られている電離圏プラズマホール形成についても考察した。

ドレイブ磁場と磁気リコネクション

太陽風動圧が低い場合、昼側で磁力線は地面に対して水平を向き、磁気経度 160 度付近で向きを変え、高度 300 km 以上で垂直を向く形状をしていることが分かった。この磁力線は電離圏の外側につながっている。磁気赤道域、磁気中緯度域ともに同じ傾向にある。磁気経度 200 度以上の場所でも地面に対し水平な磁力線が観測されたが、磁気経度 200 度の場所にははっきりとした垂直の磁力線は観測されなかった。磁気経度 180 度、高度 500 km 以上では昼側からドレイブしてきた磁力線の向きと逆向きの磁力線が観測された。この磁力線は昼側の磁力線が両極を回りこみ、夜側で電離圏の外の抜け出したものである。

太陽風動圧が高い場合、磁気赤道における昼側電離圏での磁場の方向は地面と水平向きであった。水平な磁場は磁気経度 160 度付近で垂直に向きを変え、磁気経度 180 度付近で山のような形状をした夜側電離圏全体を覆うようなループ状の磁力線が観測された。このループ状磁力線は太陽風動圧が高い磁気赤道域にのみ観測された。ループ状磁力線は磁気リコネクションの結果であると考えられる。

夜側電離圏の構造と熱・力学

太陽風動圧が高い場合、磁気赤道ではループ状磁力線が見られた磁気経度 150 度およ

び 200~230 度付近において、周囲よりも電子数密度が低くなっている構造が見つかった。ループ状磁力線の中心部分ではやや密度が高くなっている。磁気経度 80 度、260 度付近の電離圏は高度 800 km と太陽風動圧が低い場合に比べ低くなった。

太陽風動圧が高い場合、低い場合に比べて電離圏全体の電子温度が高くなった。電子数密度が低くなる磁気経度 120 度および 230 度付近で電子温度が高くなっている場所が見つかった。ループ状磁力線の周辺では太陽風からの熱フラックスが流入しやすくなっていると考えられる。ループ磁力線の内側では、太陽風動圧が低い場合に比べてやや電子温度が高くなっているものの、ループ状磁力線の外側の電子温度と比べて低いため、熱フラックスは妨げられていると考えられる。磁気中緯度ではループ状の磁力線は見られなかったが、ループ状の磁力線が見られた磁気赤道と同じような場所、磁気経度 210 度付近に局所的な密度減少が見られ、電子温度は周囲よりも高かった。

夜側電離圏では密度が 10^4cm^{-3} 程度と低いため、電子温度は電離圏界面からの熱フラックスの量で決まる。一方、イオン温度は電子に与えた熱フラックスの量に変化してもほとんど変化せず、電子数密度で決まることが数値実験により明らかになった。電子を効率的に冷却するためには 10^5cm^{-3} 程度の密度が必要である。このことから夜側電離圏の電子温度は電離圏界面からの熱フラックスの量により決まると推測される。

夜側電離圏の電子温度を保つためには電離圏界面からの熱フラックスが必要である。磁力線を地面に対し垂直と仮定し、電離圏下部でプラズマを供給した場合、電離圏界面からの熱フラックスが存在すると、常にプラズマが流出することが明らかとなった。この状態からプラズマ供給をやめ、熱フラックスを増加させると 1000 秒間程度プラズマ流出量が増加し、上下に運動しながらプラズマは消滅した。逆に熱フラックスを減少させるとプラズマほとんど宇宙空間へ流出することなく落下し、化学反応により失われる。熱フラックス増加直後のプラズマ流出量は観測から見積もられた量に匹敵することが分かった。しかし、その量は大気進化に与える影響ほど大きなものではない。

ホール形成過程

プラズマホールが見つかる場所はループ磁力線が見つかる場所と一致していることから、見つかった密度減少はホールである可能性が高い。太陽風動圧が強くなると太陽風によって作られる太陽風電場 $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ が強くなる。ここで $\mathbf{v}$ は太陽風の速度、 $\mathbf{B}$ は惑星間磁場である。そのため夜側電離圏では $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが強くなり、電離圏プラズマは真夜中へと輸送する方向に力が働き、磁場は真夜中へと集中するようになる。夜側に集められた磁力線は太陽風に直接つながっており、そこから熱フラックスが入ることにより、プラズマは加熱され、電離圏外へ流出する。磁場の拡散が強くなると磁気リコネクションが起こり、金星側にループ磁場を形成する。ループ状磁力線は太陽風に直接つながっていないため、熱フラックスが減少し、そこでの電子温度は低くなる。そのためプラズマは熱圏下部に落下し、化学反応により失われる。ループ状磁力線の周囲では太陽風につながった磁力線が存在するので、そこでは電子温度は高いまま保たれる。太陽風動圧が高い場合はこれらが繰り返される。太陽風動圧が低くなると磁気リコネクションは起こらなくなるが、磁場構造は数日間維持される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 渡 部 重 十

副 査 教 授 林 祥 介

副 査 助 教 授 倉 本 圭

学 位 論 文 題 名

金星大気と太陽風の相互作用

固有磁場を持たない金星では、太陽風は金星大気に進入し、大気と直接に相互作用する。その結果、金星大気と金星電離圏プラズマの加熱・運動・散逸を引き起こす。パイオニアビーナス探査機は、その姿を見事に捉えることに成功している。著者は、パイオニアビーナス探査機によって測定した磁場と太陽風・電離圏プラズマ密度・温度・速度に着目し、金星大気・プラズマがどのような機構で太陽風の影響を受けているか詳細に研究した。金星電離圏内の磁場、プラズマ密度・温度を、太陽風座標系に変換して解析するという新しい手法を用いることによって、金星尾部の赤道域に、太陽風動圧が高い時に磁気リコネクションが発生することを発見した。これは、無磁場惑星に存在する磁気リコネクションを疑いの余地無く初めて示したものである。さらに、磁気リコネクションと夜側電離圏に現れるプラズマホール（局所的なプラズマ密度減少領域）の関係についてもパイオニアビーナスのデータから明らかにすると共に、電磁流体力学方程式を用いた金星大気・プラズマのモデリングから金星大気・プラズマとプラズマホール内のプラズマ運動と熱力学過程について明らかにした。この時点で、今まで金星探査機によって観測された様々な現象が統一的に理解できるようになった。これらの一連の研究から、金星大気の進化過程について、プラズマ散逸の重要性を明らかにしている。

問題の設定から、調査、解析、モデリングに至る、研究手法を用いた研究成果は、金星大気・プラズマと太陽風の相互作用過程を定量的に初めて示したものであり、地球惑星科学分野に大きな貢献をしたものと高く評価できる。

よって、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。