

学 位 論 文 題 名

極域電離圏イオンの加熱と散逸

学位論文内容の要旨

磁気圏プラズマは、太陽から流れ出る高速のプラズマ流、“太陽風”起源の成分と、地球大気起源の成分からなる。磁気圏プラズマ中の水素イオン、ヘリウムイオンは、太陽風と地球大気を起源としているが、衛星観測で見つかる酸素イオンをはじめとする重イオンは、明らかに地球大気起源である。酸素イオンや重イオンは磁気圏では微量成分であり、磁気圏の構造や力学には影響を与えないとして、磁気圏研究では無視されてきた。しかし、地球起源の重イオンが、予想以上に磁気圏内に多く存在し、場合によっては磁気圏の構造や力学に大きな変化をもたらすことが示唆されている。

一方、磁気圏プラズマの供給源として、磁力線が開いた領域となる極域上空の電離圏プラズマがその担い手として考えられている。極域電離圏からイオンが散逸するという現象は、太陽風とのアナロジーから“ポーラーウィンド”(極風)と呼ばれ、古くから研究されてきた。“ポーラーウィンド”は、水素イオンやヘリウムイオンの流れであり、酸素イオンは質量が大きすぎるため、その散逸量は無視できるほど小さい。しかし、最近の衛星観測は多くの酸素イオンが散逸していることを示しており、極域電離圏において酸素イオンの加熱と加速が起きていることが示されている。

また、過去の衛星による粒子観測では、さらに重い分子イオンを高度数 R_L もの高高度で発見している。高高度に分子イオンが存在する為には酸素イオン同様に特殊な加熱・加速を受けていなければならないと考えられるが、詳細な研究がまだ行われていない。

本研究では、電離圏や磁気圏イオンの加熱と加速、散逸の物理・光化学過程を解明するために、長期の衛星データを用いて地球電離圏から原子イオンが散逸する現象を調べ、その特徴を取り入れた経験モデルを構築した。また分子イオンを電離圏起源イオンのトレーサーとして注目し、光学観測手法を開発し、観測を実施した。

■原子イオン散逸の衛星観測 あけぼの衛星に搭載されたイオン質量分析器 (SMS) の観測データから、原子イオン (水素、ヘリウム、酸素イオン) のプラズマ物理量 (速度、温度、密度)、と宇宙環境データをデータベース化した。その解析から、磁気活動度が活発であるほどイオン流発生分布が低緯度側に移動する様子や太陽活動周期と呼応してイオン質量フラックスが 1 桁程度変化することを明らかにした。

■原子イオン散逸経験モデルの構築 原子イオンのプラズマ物理量を空間、時間、磁気活動、太陽活動に関する関数として表現し、10 年間の観測データを使用した正規方程式を解くことで関数内の係数を求めた。作成したモデルは極域電離圏高度 1000 km - 10,000 km 間の任意の場所のイオン流を表現できる。このモデルから、イオン散逸の空間分布、時間変化、季節変化、磁気活動依存性、太陽活動依存性を明瞭に示し、イオン加熱、加速、散逸の物理・光化学過程を明らかにした。

■分子イオン流衛星観測 あけぼの衛星/SMS のデータを詳細に調べ、窒素分子イオンが極域上空の高度 4000km 以上で観測される事例を抽出し、統計的な振る舞いを明らかにした。また、窒素分子イオンが磁力線垂直方向の加熱を受けている事例を初めて発見した。

■窒素分子イオン地上観測・数値モデル 窒素分子イオンは太陽光を共鳴散乱をすることが知られている。これを利用し、窒素分子イオンを地球電離圏から散逸していくイオンのトレーサーとして活用できる可能性がある。基礎研究として、地上からの光学観測を実施し、窒素イオン分子が高度数千 km まで存在しうることを、またそれを地上から観測し得ることを確かめた。

高高度に窒素イオン分子が存在する理由を考察するために、1次元の電離圏モデル計算を行った。その結果、ヘリウムイオンと窒素分子の電荷交換反応を考慮することにより、窒素イオンがこれまで考えられていたより数百 km 上空の高度まで存在しうることを明らかにした。また、異なるイオンの成分比から衛星で観測された窒素イオンはもともと高度 300 – 800 km 程度に存在していたものであると推定される。

地上観測・数値モデルの両者とも、窒素分子イオンが高度千 km 程度まで普通に存在することを支持する。また、高度数千 km の衛星観測で見つかる分子イオンを説明するには、この高度間で何らかのイオン加熱・加速機構が働いていると考えなくてはならない。

本研究を通し、地球の極域電離圏からどのようにイオンが散逸し、運ばれていくのかが明らかとなった。また、磁力線垂直方向へのイオン加熱・加速が、酸素イオンに限らず、地球大気主成分である窒素分子のイオンにも起きていることがわかった。磁場とプラズマが存在する空間において、磁力線垂直加熱・加速現象は、基本的な物理過程であると考えべきである。本研究の結果からは、現在の地球大気進化において電離圏イオン散逸現象は大きな役割を果たしていないと結論づけられる。しかし、この磁力線垂直加熱・加速という物理過程は、磁場を持つ惑星や恒星の進化、あるいは惑星大気進化を考える際、今まで全く考慮されてこなかったものであり、これら進化のある段階において、その寄与を考える必要があるだろう。

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	教 授	小 笹 隆 司
副 査	助教授	倉 本 圭

学 位 論 文 題 名

極域電離圏イオンの加熱と散逸

太陽からの極紫外線やオーロラ粒子の降りこみによって生成された極域電離圏プラズマが地球磁気圏や惑星間空間に散逸していることを、衛星観測は明らかにした。著者は、1989年に打ち上げられ、現在も観測を実施している「あけぼの衛星」を用いて、散逸しているイオンの観測・研究を行った。10年以上の観測データから、イオンの速度、温度、密度を求めるアルゴリズムを世界に先駆けて開発し、40万点以上からなる膨大なデータベースを作成した。そのデータベースを用いて、独自のモデルを作成した。これらの一連の研究から、極域電離圏の水素イオン、ヘリウムイオンが地球から散逸していること、さらに、酸素イオンや窒素分子イオンが極域電離圏上部に存在するプラズマ波動によって加熱され、コニクスを形成しつつ地球磁気圏や惑星間空間に散逸していることを発見した。その散逸量は、季節、太陽活動、磁気活動等に依存し、1日に数トンから数10トンのイオンが散逸していることを発見した。散逸したイオンの50%ほどがリングカレントに入り込み、その一部は再び地球大気圏内に進入するという、電離圏・磁気圏プラズマ大循環過程をコンピュータシミュレーションによって明らかにした。さらに、極域電離圏からのイオン散逸を地上からモニターするために、窒素分子イオンによる太陽光の共鳴散乱光をトレーサとする手法を開発し、オーロラ帯で観測を実施した。その結果は、極域電離圏上部から1000km高度付近まで、窒素分子イオンが分布することを発見した。その生成機構として、極域電離圏から散逸するヘリウムイオンと大気中の窒素分子との電荷交換反応が重要であることを、コンピュータシミュレーションを用いて明らかにした。観測、データ解析、モデリングを駆使した研究は、多くの発見をもたらし、世界的に高く評価されている。

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。