

氏 名 浅 村 和 史
 学位(専攻分野) 博 士 (理 学)
 学 位 記 番 号 論 理 博 第 1377 号
 学位授与の日付 平 成 12 年 3 月 23 日
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
 学位論文題目 Study of energetic neutral atoms precipitating into the low-latitude upper atmosphere
 (低緯度高高度熱圏に降り込む高速中性粒子に関する研究)

論文調査委員 (主 査)
 助教授 町 田 忍 教 授 荒 木 徹 教 授 家 森 俊 彦

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は地球の内部磁気圏から熱圏領域に降り込む高速中性粒子(ENA: Energetic Neutral Atom)を計測するための計器の開発、それによるロケット観測とデータ解析、さらに得られた結果を説明するためのモデル計算という一連の研究成果をまとめたものである。

近年、磁気圏の空間構造やその時間変化を知るために、この希薄な領域を最新先端技術を駆使して撮像観測しようという機運が高まっている。それを実現させるための一つの方法として、ENA の観測は有望視されている。地球の周辺には、かなり遠方の距離にまで、地球を取り巻く形で中性粒子が分布している。すでに広く研究対象となっているジオコローナは、その様な中性の水素ガスが太陽紫外線を共鳴散乱させるために起こる発光現象である。磁気圏中の高エネルギーイオンは磁場の影響を受けて、一般に、磁力線に巻きつく様な軌道を描いて運動しており、周辺に存在する中性粒子とある衝突確率で荷電交換反応を起こす。その結果として、高いエネルギーを持っていたイオンがエネルギーを殆ど失わず ENA に変換される。この様にして生成された ENA は磁場の構造に影響を受けることなく直線的な弾道飛行を行う。また、ENA はもとのイオンが中性化したものであるから、その質量を区別して観測すれば、イオン種別の空間構造や時間変化を推定することが可能となる。

この様な利点を備えた観測であるにもかかわらず、従来、ENA を実際に計測しようという試みは殆どなされなかった。その大きな理由は、ENA のフラックスが、およそ $10^2 \sim 10^3$ ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$) であり、対する周辺イオンのフラックスは 10^6 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$) 程度で、また、太陽紫外線のフラックスも検出器にとって、それを上回るノイズ成分を与えてしまうからである。従って、実現にあたっては、ENA に対する感度を高くすると同時に、ノイズ除去効率の良い計測器を開発する必要があった。

本研究では 10 keV 程度のエネルギーを持った ENA に対して高い感度を有し、同時に上で触れたノイズ除去に関して高い性能を備えた新しい方式の計測器を開発した。紫外線ノイズを除く機構は、上側面の電極の表面を鏡面加工し、計測器内に入射した太陽紫外線が検出部以外の場所に選択的に到達することで実現した。また、入射した ENA は超薄膜カーボンを通過する際に電離されるので、それによって生成されたイオンを静電場によって加速・偏向させ、最終的に飛行時間(TOF: Time of Flight)計測法によって、粒子速度を求めた。この加速・偏向による軌道の変位と TOF 法による速度の情報から、入射 ENA のエネルギーと質量を求める方式を採用して機器を完成させた。

新規開発した計測器は文部省宇宙科学研究所の SS-520-1 ロケットに搭載され、1998 年 2 月 5 日、日本時間 17 時 30 分に打ち上げられ、無事、観測データの取得に成功した。この実験で得られた低緯度熱圏での ENA エネルギースペクトルは、磁気圏リングカレント領域の観測データに基づいて行われた外国研究者の計算結果と良い一致を示し、観測的には世界に先駆けて低緯度熱圏に降り込む ENA の存在を確認した。

しかし、計測された ENA フラックスの高度分布は過去の計算結果とは異なっていた。申請者は、この差が ENA と大気粒

子の間の衝突効果を十分に取り入れていないからであると考え、衝突による ENA の再電離・再中性化の過程、また、電離されイオンとなっている期間の旋回運動、衝突時のエネルギー損失について実際に近いパラメータを用いてモンテカルロ法による計算機シミュレーションを実施した。その結果、観測された高度プロファイルを理論的に説明することに成功した。本研究は ENA が熱圏高度に、実際に存在していることを確認し、外圏水素原子の分布や荷電交換反応の衝突断面積など、ENA の観測から磁気圏のプラズマ分布を導出する際に必要とされる諸パラメータが妥当であることを確認し、将来の ENA 観測計画に対して大きな指針を与えた。

また、ENA が大気粒子と衝突を繰り返すために、再び地球に戻って行く ENA が磁気圏から降り込んでくる総量の数十パーセントに及ぶことをシミュレーションによって見いだした。このことは、熱圏で ENA を観測する時に、地球に向かう余分な ENA の生成源があると誤って観測されてしまう点に注意が必要であることを示唆している。

以上の様に、本研究では ENA 計測器を設計・製作し、それをロケットに搭載して取得されたデータを解析した。求まった ENA フラックスの高度分布を計算機シミュレーションの結果と比較し、磁気圏のリングカレント領域から熱圏に降り込む ENA に大気粒子が与える衝突効果を明らかにした。

論文審査の結果の要旨

地球の磁気圏の物質・エネルギーの輸送に対して主要な役割を担っているのはプラズマ粒子である。そのために、従来から、人工飛行体を用いた磁気圏プラズマの直接観測が精力的に行われてきた。異なった場所・時刻で得られたデータを数多く組み合わせることで、平均的な描像が形作られてきた。しかしながら、磁気圏は活動的であって、常にその様な平均的な描像があてはまる平衡状態にはない。それゆえ、磁気圏が瞬時にいかなる構造をもち、時間的に変化するのかという側面の解明が重大な課題として残されてきた。

プラズマ計測をはじめとする従来の直接観測の手法においては、得られる情報が衛星周辺のものに限られるため、大局的な構造を瞬間ごとにとらえるのは極めて困難である。そのため、磁気圏の情報を含みつつ遠方まで到達することのできる、電磁場変動などの観測対象を用いてリモートセンシングを実施し、磁気圏の構造を知ろうという研究が進められている。高速中性粒子 (ENA: Energetic Neutral Atom) の観測は、その様な観点から着目され、現在、活発な研究開発が進められている。磁気圏では、高エネルギーイオンが、ジオコローナを発光させている周囲の低エネルギー中性水素と荷電交換反応を行うことで ENA が生成される。ENA は電磁場の影響を受けずに弾道飛行を行い、また、荷電交換反応に伴うエネルギーの損失が僅かなために、ENA の粒子種およびエネルギーが、ほぼそのまま、磁気圏におけるイオンの粒子種・エネルギーに対応することになる。従って、磁気圏の適切な場所で ENA を観測すれば、磁気圏のイオンに関する有益な情報が引き出せることになる。特に、ENA 観測は、決して他のリモートセンシング法では得られないプロトンに関する情報をひきだせる点で優れている。

ENA の観測は、上記の様な利点をもっているにもかかわらず、技術的な困難さのために、これまで殆ど観測が行われなかった。その最大の理由は、磁気圏において ENA のフラックスが、 $10^2 \sim 10^3 \text{ (cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}\text{)}$ であるのに対し、イオンや太陽紫外線が、それよりも 10^4 程度も高いフラックスを持つことである。従って、イオンや太陽紫外線を効率良く除去し、ENA に関して高い感度をもった計測器の開発が必要であった。

申請者は、紫外線除去という観点から、これまで非常に困難とされていた数十 keV のエネルギー範囲の ENA 計測器開発に取り組んだ。その様な選択を行なったのは、このエネルギー範囲が磁気圏粒子の典型的なエネルギー領域だからである。独創的な着想に基づく紫外線除去の効率化と Time of Flight (TOF) 法を用いたエネルギー・質量分析機構の開発、また、実験室における動作試験と校正試験を遂行して高い性能の搭載機器を完成させた。1998 年 2 月 5 日、日本時間 17 時 30 分に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた SS-520-1 号ロケットに計測器を搭載し、熱圏での ENA 観測に、世界で初めて成功し、当該分野の中で大きな貢献をなした。

得られた観測データを解析し、ENA の高度分布は、過去に海外の研究者が理論的に予想していたものとかかなり良く一致しているという結果を導いた。しかし、高度の低い領域では、両者が大変異なることを見出した。申請者は、ENA と熱圏大気中の中性粒子との衝突が重要であり、この過程をより正確に計算の中で扱う必要があると考えて、衝突による ENA の再電離・再中性化、エネルギー損失およびイオンに転換された際の磁場による旋回運動を取り入れたモンテカルロ・シミュ

レーションを実行した。これにより、熱圏低高度の ENA フラックス減少に、熱圏大気の衝突過程が重要な役割を果たしていることを明らかにした。また、観測結果とモデル計算の整合性は、外圏中性水素の高度分布や、荷電交換反応などの衝突断面積といった、ENA から磁気圏のプラズマ分布を求める際に必要な諸パラメーターの値が信頼できるものであることを示し、将来の ENA 観測計画を検討する上でも大きな手がかりを与えたものとして高く評価される。

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。なお、平成 12 年 2 月 2 日、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。