

博士論文の要約

論文題目 Study of High-Energy Oxygen Increase in the Ring Current During Geomagnetic Storms
(磁気嵐中リングカレント における高エネルギー酸素イオンの増加現象に関する研究)

氏 名 三谷 憲司

地球固有の双極子磁場が支配的に効いている領域は、地球磁気圏と呼ばれ、太陽風と呼ばれる高速プラズマ流が絶えず太陽から吹き付けることで太陽と反対方向（夜側）へ尾を引くような形をしている。地球磁気圏内でも特に固有磁場が強い静止軌道よりも内側の磁気圏（内部磁気圏）に補足されているプラズマは、磁力線周りを旋回運動、磁場に沿ってバウンス運動、磁場勾配に垂直にドリフト運動している。地球磁気圏では太陽風の変化の影響を受けて様々な擾乱現象が起こっており、磁気嵐は其中最も大規模な擾乱現象である。磁気嵐は、内部磁気圏に発達する西向き環電流（リングカレント）によって規模が決定するため、リングカレントの発達過程を知ることは、地球を取りまく宇宙環境の最も大きな変動現象を理解するために不可欠である。リングカレントは主に水素イオンと酸素イオンによって担われており、それらのイオンは太陽風や地球電離圏から磁気圏尾部（磁気圏の夜側に尾を引いたような領域）を介して供給される。リングカレントへのイオンの磁気圏尾部からの供給過程は、イオン種やエネルギーによって異なり、これまでに、リングカレントの主要な成分である 150 keV 以下の低エネルギーイオンを中心に多く研究されてきた。しかし、近年 150keV 以上の水素イオンは、より低エネルギーの水素イオンとは全く異なる振る舞いと供給過程を持つことが指摘された。一方で、150 keV 以上の高エネルギー酸素イオンについては、これまでその供給過程や挙動が殆ど理解されていなかった。本研究では、高エネルギー酸素イオンに着目し、そのリングカレントへの供給過程を調べるために、内部磁気圏での位相空間密度の空間分布を衛星観測に基づいて導出し、水素イオンと酸素イオンの時間発展を比較することで、高エネルギー酸素イオンのみが増加する SOI という新たな現象を発見した。また、この SOI とグローバルな磁場脈動の変化との関連を調べるために、多点地上磁場観測データを解析し、リングカレントへの酸素イオンの新たな供給過程を提唱した。

第一章の序論、2章の観測手段およびデータセットの説明に続き、第3章では2013年4月23日から25日に起こった磁気嵐中のSOIの事例研究を報告している。この期間に

は、二つの Van Allen Probes 衛星の遠地点が真夜中付近にあり、軌道周期が約半周期ずれていたため、磁気圏尾部から内部磁気圏へのイオン供給を時間分解能よく捉えるのに適していた。解析結果から、磁気嵐の2回目の発達時に水素イオンが供給された領域よりもより地球近くで高エネルギー酸素イオンの位相空間密度が増加していることを見いだした。この時、Van Allen Probes 衛星は数 mHz から数十 mHz の低周波 (ULF) 波動を観測していて、Van Allen Probes 衛星のいる地表での磁力線の足元に位置する IMAGE 地上磁場観測網の同時観測データから、これらの ULF 波動の経度方向の波数 (m) は 10 以下であることが示された。高エネルギー酸素イオンのドリフト運動とバウンス運動の周期を計算すると、比較的地球に近い内部磁気圏内側ではドリフト運動と ULF 波動との共鳴 (ドリフト共鳴) 条件を、より外側ではドリフト、バウンス運動と ULF 波動との共鳴 (ドリフト・バウンス共鳴) 条件を満たしていることが明らかとなった。これらの二つの共鳴の組み合わせによって高エネルギー酸素イオンが経度方向に加速されると、磁気モーメントの保存により、磁場の強い地球方向へ輸送される。ドリフト・バウンス共鳴の条件は質量依存するため酸素イオンだけが共鳴条件を満たすことができるので、輸送の始まり付近の外側で酸素だけが加速を受けることになる。これが、観測された酸素イオンの選択的な増加 (SOI) イベントの発生機構であるとの仮説を提案した。

次に第4章では、SOI イベントの統計解析研究を行った。その結果、2013 年から 2017 年に Van Allen Probes が観測した 90 の磁気嵐のうち 30 の磁気嵐中で 43 の SOI イベントを同定した。SOI はほぼグローバルに広い経度範囲で観測され、大きな磁気嵐ほど頻繁に発生すること、および、大きな磁気嵐では小さな磁気嵐に比べて地球に近い領域で SOI イベントが起こることが明らかになった。また、多点地上磁場観測網で観測された ULF 波動は、SOI イベントを観測した時間に 1.7-6.7 mHz (Pc 5 帯) で地球から 4 R_E (R_E : 地球半径) 以下の領域で、6.7-22 mHz (Pc 4 帯) で地球から 4 R_E 以上の領域で強度の増加が広い経度帯に見られた。高エネルギーイオンのドリフト共鳴とドリフト・バウンス共鳴の共鳴条件を SOI イベント観測時の条件下で計算した結果、水素イオンの観測から想定される対流輸送の内側限界とイオンが Pc 5 波動とドリフト共鳴できる領域との間にはギャップがあり、そのギャップを埋める形で、酸素イオンだけが Pc 4 波動とドリフト・バウンス共鳴可能な領域があることがわかった。これらのドリフト・バウンス共鳴とドリフト共鳴が可能な領域は、Pc 4 帯と Pc 5 帯の ULF 波動が SOI イベント時に強まっていた領域とそれぞれ一致していた。なお定量的には、SOI イベントは磁気嵐中の地球磁場の弱まりに対して、平均的に 9%ほどの寄与をすることが概算された。

本論文では、これまで理解されていなかった高エネルギー酸素イオンのリングカレントへの供給過程に着目し、高エネルギー酸素イオンの選択的な増加 (SOI) 現象を発見し、SOI が酸素イオンと ULF 波動とのドリフト・バウンス共鳴とドリフト共鳴の組み合わせによる輸送で説明できるという仮説を提唱した。さらに、長期間の科学衛星と多点地上磁場観測網による同時観測データの解析に基づき、この仮説を統計的に実証することに成功した。