

巨大磁気嵐が地球大気由来の酸素イオンを宇宙へ大量輸送

地球近傍で O^+ が 90%以上を占める極端状態と新たな供給メカニズムを発見

ポイント

- ① 地球超高層大気では、高度 200~300km 付近で太陽極端紫外線によって酸素原子が電離し、酸素イオン (O^+) (※1) が生成される。この O^+ は、磁気嵐(※2)に伴う超高層大気の加熱によって、一部が宇宙空間へ輸送され、宇宙空間に O^+ の増加をもたらす。
- ② 2024 年 5 月 10-11 日に発生した巨大磁気嵐 (Mother's Day Storm) 時に、地球近傍宇宙空間で O^+ が異常増加していたことを発見。
- ③ 地上磁力計ネットワークとジオスペース探査衛星「あらせ」(※3)の観測を組み合わせることで、地球近傍の宇宙空間 (内部磁気圏) における極端な O^+ 増加を世界で初めて詳細に観測した。
- ④ 観測された平均イオン質量は地球半径 2.2 倍の領域で約 15 amu(原子質量単位: atomic mass unit) に達し、プラズマの 90%以上が O^+ で構成されていた可能性を示唆。
- ⑤ 通常、 O^+ 増加は磁気嵐回復相(※4)に、より外側 (地球半径 3-4 倍程度) の領域で観測されることが多く、 O^+ の割合も 10-20%程度である。今回は、磁気嵐主相(※4)かつ地球近傍で発生しており、極めて特異な現象。
- ⑥ 宇宙の粒子観測と電離圏観測の解析から、比較的能量の高いイオンによる電子加熱を介した、新たな O^+ 供給メカニズムの存在を示唆。
- ⑦ 本成果は、巨大磁気嵐時の宇宙環境変動の理解を大きく前進させるとともに、人工衛星障害や宇宙天気予報研究への貢献が期待される。

概要

九州大学国際宇宙惑星環境研究センター (i-SPES) の尾花由紀特任准教授らの研究グループは、ニュージーランドを中心とした地上磁力計観測網と、JAXA のジオスペース探査衛星「あらせ」の観測データを組み合わせることで、2024 年 5 月 10-11 日の巨大磁気嵐時に、地球近傍宇宙空間で酸素イオン (O^+) が異常増加していたことを発見しました。

解析の結果、ニュージーランド上空の地球半径約 2.2 倍付近の宇宙空間において、プラズマ質量密度が約 35,000 amu/cm³ に達する極端な高密度状態が発生していたことが明らかになりました。さらに、「あらせ」衛星による電子密度観測と組み合わせた解析から、この領域では平均イオン質量が約 15 amu に達しており、プラズマの 90%以上が酸素イオンで占められていた可能性が示されました。

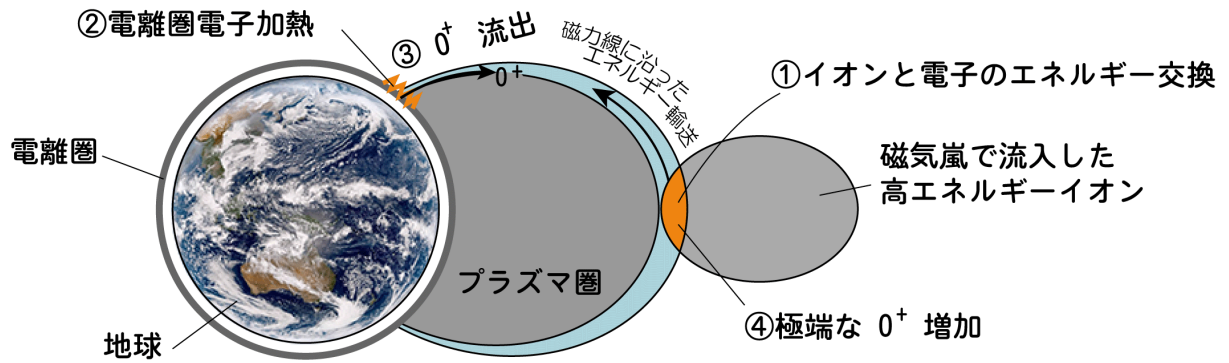
酸素イオンの増加は通常、磁気嵐回復相に地球半径 3-5 倍程度の比較的外側の領域で観測され、その割合も 10-20%程度とされています。これに対し、今回は磁気嵐主相中に、地球半径約 2.2 倍の地球近傍で O^+ が 90%以上を占める可能性が示され、従来想定されていなかった極端状態であることが分かりました。

さらに、「あらせ」衛星および DMSP 衛星(※5)の観測から、数 keV 程度の比較的能量の高いイオンと冷たい高密度プラズマが共存していたことや、電離圏全電子数 (TEC) の減少・電離圏電子温度の上昇も確認されました。これらの結果は、比較的能量の高いイオンによる電子加熱を介して、電離圏から酸素イオンが効率的に供給されていた可能性を示しており、新たな O^+ 供給メカニズムの存在を示唆しています。

今回の発見は、巨大磁気嵐時における地球周辺宇宙環境の理解を大きく前進させるとともに、人工衛星障害や高エネルギー粒子環境変動に関わる宇宙天気研究への貢献が期待されます。

本研究結果は、Springer Nature 社刊行の国際学術誌『Earth, Planets and Space』に 2026 年 5 月 23 日 (土) (現地時間) に掲載されました。

2024年5月の巨大磁気嵐（主相）



【研究背景と目的】

地球周辺の宇宙空間には、地球大気起源の低エネルギープラズマが存在しており、地球磁場に捕捉されることで「プラズマ圏(※6)」と呼ばれる高密度プラズマ領域を形成しています。このプラズマは主に水素イオン (H^+) から構成されていますが、磁気嵐時には特定の領域で酸素イオン (O^+) が増加することが知られています。 O^+ は、高度 200~300km 付近で太陽極端紫外線によって酸素原子が電離することで生成されます。 H^+ の 16 倍重い O^+ は、通常的环境では重力を振り切って宇宙空間へ飛び出すことは困難で、効率的な宇宙空間への輸送を起こすには、電離圏の強い加熱が必要です。

これまでの観測研究から、 O^+ は磁気嵐回復相に、地球半径 3-5 倍程度の比較的外側の領域で増加すると言われてきました。この領域は「酸素トラス (oxygen torus) (※7)」と呼ばれており、 O^+ の割合は通常 10-20%程度まで増加します。従来の酸素トラス形成は、磁気嵐回復相に電離圏から宇宙空間へ再供給された低エネルギープラズマが、比較的高エネルギーの高いプラズマと共存することで、エネルギー交換が進み、電離圏の加熱と O^+ 供給が進むという枠組みで説明されてきました。そのため、磁気嵐主相中に、より地球に近い領域で O^+ が 90%以上を占めるような極端状態が生じることは、従来の理解では想定されていませんでした。

O^+ は、質量が大きいため、少しの増加で磁気圏内における電磁波動の伝搬や、高エネルギー粒子の生成・輸送過程に大きな影響を与えます。そのため、宇宙空間で O^+ がいつ、どこで、どのように増加するか理解することは、宇宙の安全利用を目指す宇宙天気研究において重要な課題です。

2024年5月10日に発生した巨大磁気嵐 (Mother's Day Storm) は、約 20年ぶりの極めて大規模な宇宙擾乱現象であり、日本を含む世界各地で低緯度オーロラが観測されました。この磁気嵐では、地球周辺宇宙環境にも極端な変動が発生していたことが報告されています。

こうした背景のもと、本研究では、ニュージーランドを中心とした地上磁力計ネットワークと、「あらせ」衛星の観測データを組み合わせることで、巨大磁気嵐時の内部磁気圏プラズマ環境を詳細に調査し、極端な O^+ 増加の発生メカニズムを解明することを目的として研究を行いました。

【研究内容】

研究グループは、ニュージーランド、ヨーロッパ、北米などに設置された地上磁力計ネットワークの観測データを解析し、ULF 波動(※8) (超低周波波動)の固有振動周波数から内部磁気圏のプラズマ質量密度を推定しました。

その結果、2024年5月10日 20-24時 (世界時) 頃に、ニュージーランド上空の地球半径約 2.2 倍付近において、極端なプラズマ質量密度増加が発生していたことが明らかになりました。推定された質量密度は約 $35,000 \text{ amu/cm}^3$ に達し、通常時を大きく上回る極端な高密度状態となっていました(図 1)。

さらに、「あらせ」衛星が同時期に近い領域を飛行しており、電子密度観測データとの組み合わせ解析から、この領域では平均イオン質量が約 15 amu に達していたことが分かりました(図 2)。これは、プ

ラズマの 90%以上が O^+ で構成されていた可能性を示しています。

また、この極端な O^+ 増加はニュージーランド付近で特に顕著であり、巨大磁気嵐時のプラズマ輸送や加熱過程に経度差があったことも示唆されました。

さらに、「あらせ」衛星の観測から、磁気嵐の主相中にもかかわらず、プラズマ圏の外側境界付近のごく限られた領域で、冷たいプラズマと比較的高エネルギーなプラズマが共存していたことが確認されました。また、米国 DMSP 衛星の観測から、電離圏の電子温度が上昇していたことも確認されました。これらの結果は、磁気嵐主相中にも、局所的なエネルギー交換と O^+ 供給が起こり得ることを示唆しています。

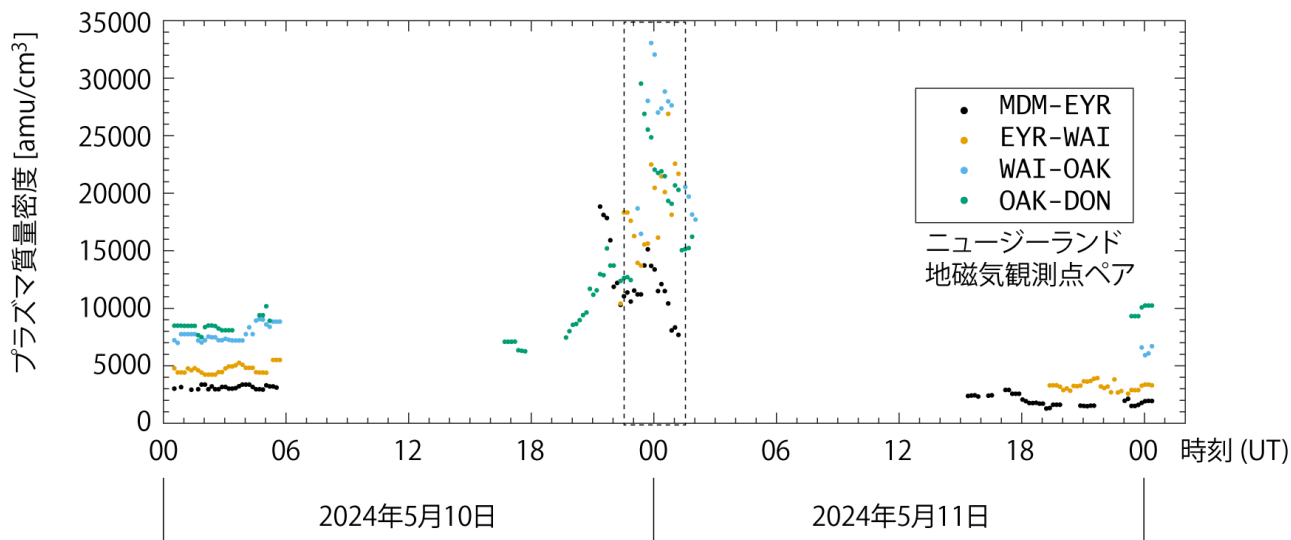


図 1 2024 年 5 月巨大磁気嵐時に観測された内部磁気圏プラズマ質量密度の増加。ニュージーランド地上磁力計ネットワークの複数観測点ペア (MDM-EYR、EYR-WAI、WAI-OAK、OAK-DON) の解析結果を示す。2024 年 5 月 10 日夜 (世界時) に、地球近傍宇宙空間においてプラズマ質量密度が急増し、特に WAI-OAK 観測点ペアでは約 35,000 amu/cm³ に達する極端な高密度状態が観測された。破線で囲った時間帯は、「あらせ」衛星による電子密度観測と組み合わせることで平均イオン質量を推定した時間帯を示す。

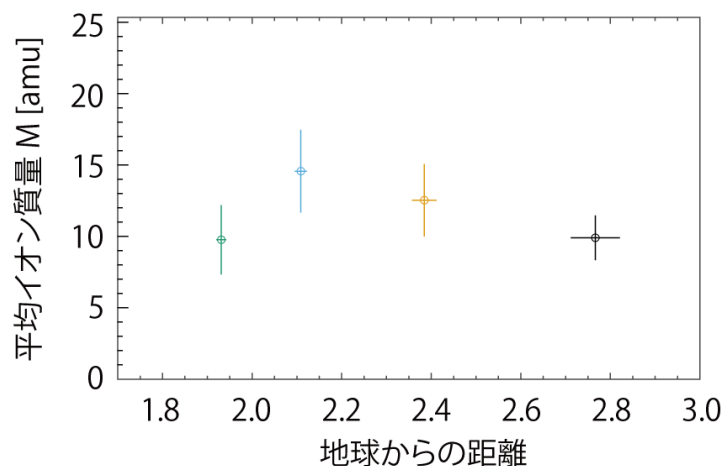


図 2 巨大磁気嵐時に推定された内部磁気圏プラズマの平均イオン質量。地上磁力計観測から推定したプラズマ質量密度と、「あらせ」衛星による電子密度観測を組み合わせることで、内部磁気圏プラズマの平均イオン質量を推定した。地球半径約 2.1-2.4 倍付近では平均イオン質量が約 15 amu に達しており、プラズマの 90%以上が酸素イオン (O^+) で構成されていた可能性を示している。これは、通常の磁気嵐

時に報告されている酸素イオン割合（10–20%程度）を大きく上回る極端な状態である。

【成果の意義】

本研究は、巨大磁気嵐主相中に、地球近傍宇宙空間で極端な O^+ 増加が発生し得ることを示した初めての観測事例です。

従来、 O^+ 増加は磁気嵐回復相に、より外側の内部磁気圏で発生すると考えられていました。しかし今回の研究では、磁気嵐主相中に、地球半径約 2.2 倍という地球近傍領域で、 O^+ が 90% 以上を占める極端状態が発生していたことが明らかになりました。また、本研究では、「あらせ」衛星の高精度観測により、磁気嵐主相中にもかかわらず、プラズマ圏の外側境界付近のごく限られた領域で、冷たい高密度プラズマと比較的エネルギーの高いイオンが共存していたことを明らかにしました。この二種類のプラズマは起源が異なり、磁気嵐の主相中には共存することは一般には考えられていませんでした。回復相であれば、電離圏から新しく低エネルギープラズマが再供給されることで共存が可能のため、従来の酸素トラスの形成過程も、その文脈で説明されてきました。今回の観測は、主相中にも局所的にエネルギー交換が生じ得ることを示す重要な発見です。さらに、DMSP 衛星観測と組み合わせることで、実際に電離圏電子温度の上昇、すなわち電離圏の加熱が生じていたことも観測データから確認されました。これらは、巨大磁気嵐時における電離圏–磁気圏結合過程と内部磁気圏ダイナミクスに新たな視点を与える重要な成果です。

O^+ は質量が大きいため、少しの増加でも磁気圏内における ULF 波動や電磁波動の伝搬特性を大きく変化させ、放射線帯などの磁気圏で最も高エネルギーの粒子の生成・輸送にも強い影響を与えます。そのため本研究成果は、極端宇宙天気イベントに対する地球周辺宇宙環境の応答理解を深めるとともに、人工衛星障害、放射線帯変動、宇宙天気予報モデル高度化などへの応用も期待されます。

【用語説明】

(※1) 酸素イオン (O^+)

地球超高層大気では、太陽紫外線などによって酸素原子が電離し、 O^+ （酸素イオン）が生成される。水素イオンの 16 倍の質量を持つ重いイオンであり、磁気圏内の波動や高エネルギー粒子環境に大きな影響を与える。

(※2) 磁気嵐

太陽面での爆発現象などによって太陽風が強まり、地球周辺の宇宙環境が大きく乱される現象。強い磁気嵐では低緯度オーロラが出現し、人工衛星障害や通信障害などを引き起こす場合がある。

(※3) ジオスペース探査衛星「あらせ」

JAXA が 2016 年に打ち上げた科学衛星。地球近傍宇宙空間におけるプラズマ、波動、高エネルギー粒子などを観測している。

(※4) 主相・回復相

磁気嵐が急激に発達する期間を「主相」、その後ゆっくり元の状態へ戻る期間を「回復相」と呼ぶ。

(※5) DMSP 衛星

米国が運用する極軌道衛星群。電離圏プラズマや電子温度、オーロラ粒子などを観測している。

(※6) プラズマ圏

地球磁場に捕捉された低温・高密度のプラズマ領域。主に電離圏起源の水素イオンや電子から構成され

る。

(※7)酸素トーラス (oxygen torus)

磁気嵐後に内部磁気圏の比較的外側で形成される、酸素イオンが増加したドーナツ状構造。古くから知られていた比較的外側での酸素トーラスも、今回発見された地球近傍の O^+ 異常増加と同様に地球大気由来と考えられているが、大気から重い O^+ を宇宙空間まで引き上げるために必要な加熱が、いつ、どこで、どのように生じるかが大きく異なる。

(※8)ULF 波動

数十秒～数十分周期で振動する超低周波電磁波。地球磁場に沿った固有振動 (FLR) を形成する。

【論文情報】

掲載誌：Earth, Planets and Space (Springer Nature)

論文タイトル：Extreme O^+ Enrichment in the Deep Inner Magnetosphere: The May 2024 Geomagnetic Storm

著者：尾花由紀 (九州大学国際宇宙惑星環境研究センター) ほか

DOI：10.1186/s40623-026-02452-5