

巨大磁気嵐がもたらす宇宙空間の変動観測に成功 ～宇宙空間に電離大気の供給が抑制されていたことを発見～

【本研究のポイント】

- ・太陽フレア^{注1)}によって2024年5月10日に発生した巨大磁気嵐^{注2)}に伴う特異なプラズマ圏^{注3)}・電離圏^{注4)}電子密度の時間・空間変動の観測にジオスペース^{注5)}探査衛星「あらせ」(以下「あらせ」衛星)が成功。
- ・プラズマ圏の大きさが地球半径の1.5倍の高度域にまで急速に縮小し、元の状態に回復するまで4日以上も要していたことを発見。
- ・プラズマ圏に存在する荷電粒子の起源である電離圏の電子密度が高緯度から低緯度に至る広範な領域で静穏時と比べて最大で90%減少していたことを確認。
- ・他の磁気嵐イベントと比べて極端にプラズマ圏の回復時間が長く、それには長時間の電離圏電子密度の低下が関与していることを明示する事例。

【研究概要】

名古屋大学宇宙地球環境研究所の新堀 淳樹 特任助教らの研究グループは、全球測位衛星システム(GNSS)^{注6)}と「あらせ」衛星などの観測データを解析し、2024年5月10日に発生した巨大磁気嵐時のプラズマ圏と電離圏の電子密度の時間変化と空間構造の観測に成功しました。

観測データにおいて、通常、地球半径(6,378 km: 赤道半径)の4~6倍の高度域までの宇宙空間に広がっているプラズマ圏が地球半径の1.5倍の高度域にまで急速に縮小し、元の状態にまで回復するまでに4日以上も要していたことが分かりました。この回復時間は、通常の磁気嵐時に比べて約2倍長いことが統計解析からも明らかになりました。また、GNSSによる電離圏電子密度観測からは、高緯度から低緯度に至る広範な領域で電離圏の電子密度が静穏時と比べて最大で90%減少し、その状態が少なくとも2日以上も継続していたことが分かりました。

本研究は、このような巨大磁気嵐がもたらした異常な電離圏の希薄化がその上空の宇宙空間に広がるプラズマ圏の回復を阻害していることを初めて観測データ解析から明らかにしました。電離圏の希薄化は、電離圏での反射を利用した短波通信障害の原因となります。また、磁気嵐時のプラズマ圏の構造変化は、ジオスペースにおける高エネルギー粒子の生成に関わる電磁環境を制御します。これらは、宇宙の安全な利用に向けた宇宙天気観測の観点で予報が必要な項目です。本研究結果は、発生頻度の少ない巨大磁気嵐時の地球周辺の宇宙環境変動予測にも貢献する重要な事例です。

本研究成果は、2025年11月20日17時(日本時間)付 Springer Nature 社刊行の地球科学総合国際学術雑誌『Earth, Planets and Space』に掲載されました。

【研究背景と内容】

地球を取り巻く大気の上層(高度:60 km 以上)に存在する分子や原子の一部が、太陽からやってくる紫外線やエックス線によって電離し、電離圏が形成されています。現代の我々の生活には欠くことができない GPS に代表される全球測位衛星システム(GNSS)や衛星放送・通信で使用されている電波は、必ずこの領域を通過することになります。また、電離圏に含まれる電子やイオンといった荷電粒子が磁力線に沿って拡散していくことで地球周辺の宇宙空間にプラズマ圏と呼ばれるプラズマ密度が比較的濃い領域を形成し

ています。プラズマ圏は、ジオスペースにおける電磁波の生成や電磁波と荷電粒子との相互作用に密接にかかわるため、衛星障害の元となる高エネルギー粒子の生成過程を解明する上で、プラズマ圏の動態を把握することが近年の研究において重要視されています。太陽フレア等の太陽活動によって発生するジオスペース最大の擾乱(じょうらん)現象である磁気嵐は、電離圏・プラズマ圏を含むジオスペース全体の環境を激変させ、GPS 衛星を用いた位置情報に誤差が生じることがあります。逆に、この誤差情報に着目することで電離圏の情報が得られるため、衛星観測データと GNSS 受信機網データを活用した全球にわたるプラズマ圏・電離圏擾乱の研究が進展してきました。現在では、GNSS 受信機網データが、宇宙天気予報などの応用研究に利用されています。

長年の地上・衛星観測から電離圏の電子密度が通常の状態と比べて増加と減少を示す電離圏擾乱が磁気嵐に伴って発生することが分かっています。この電離圏擾乱による電離圏電子密度の低下は、電離圏の反射を利用した通信などに悪影響を及ぼします。したがって、電離圏擾乱がどのような条件下で発生するかを予測・予報することが、宇宙天気研究の中で重要視されています。一方、電離圏の上部に存在するプラズマ圏は、磁気嵐によって縮小し、磁気嵐の回復期に1日から2日かけて元の状態に回復することが知られています。このプラズマ圏の回復には、その足元である電離圏の状態に左右されることが考えられます。しかしながら、電離圏の電子密度が減少する電離圏擾乱がプラズマ圏の回復にどのような影響を及ぼすかは十分に分かっていませんでした。

2024年5月10日に約21年ぶりとなる巨大磁気嵐の発生に伴って、日本をはじめ世界各地で低緯度オーロラが出現し、同時にプラズマ圏の急速な構造変化や全球にわたる激しい電離圏擾乱現象がGNSS 受信機網等によって数日間、捉えられました。このような背景の下、電離圏(400km)から地球近傍の宇宙空間(32,000km)までの広範な領域をくまなく観測している JAXA の「あらせ」衛星と、地上連携観測データを組み合わせた解析を行い、巨大磁気嵐後に観測された強い電離圏擾乱がプラズマ圏の回復に及ぼす影響を解明することを目的として本研究が開始されました。

【研究内容】

本研究グループは、全球の電離圏電子密度変動を高時間・高空間分解能で観測するために世界各地に設置されている9,000台を超えるGNSS 受信機データを収集し、それらのデータから全電子数(TEC)^{注7)}に変換し、TEC データベースを作成しています。また、巨大磁気嵐時におけるプラズマ圏の電子密度変化の情報を得るために、「あらせ」衛星の電子密度データを使用しています。「あらせ」衛星観測データとデータ解析ソフトは、JAXA と名古屋大学が共同で運営する名古屋大学に設置されている太陽圏サイエンスセンター^{*}から提供されています。その他のデータについては、2009年度から開始された大学間連携プロジェクト「IUGONET^{注8)}」で開発された解析ツールを活用しています。

^{*}名古屋大学太陽圏サイエンスセンター(<https://chs.isee.nagoya-u.ac.jp>)

解析の結果、地磁気指数の急激な減少を示す巨大磁気嵐の発生(図1a)に伴って、内部磁気圏における比較的電子密度の濃い(>300 個/cm⁻³)領域が地球半径の2.5倍のところ以内へ縮小していたことが分かりました(図1bと1dのカラースケール表示)。この時、「あらせ」衛星は、遠地点に向かう方向では午前側、近地点に向かう方向では午後側の

磁気圏内を飛翔していました(図 1f)。この電子密度の変化は、磁気嵐の発生に呼応したプラズマ圏の縮小を示しており、このことは、太陽方向へ向かう磁気圏内のプラズマの流れによってプラズマ圏のプラズマが太陽方向に流失したことを意味しています。また、地球半径の 2.5 から 3.0 倍の高度範囲のプラズマ圏内部の平均電子密度の時系列プロット(図 1c と 1e)を見ると、磁気嵐の開始とともに電子密度が 1 桁程度減少し、その後、数日かけて通常の状態に回復しています。結果として、プラズマ圏の電子密度の減少開始から回復するまでに 4 日以上もかかっており、プラズマ圏の元の状態に戻る過程がかなりゆっくりしていたことを、「あらせ」衛星による直接観測から世界で初めて明らかにしました。さらに、「あらせ」衛星が定常観測を開始した 2017 年 3 月下旬から 2024 年 12 月までに発生した 77 例の磁気嵐に対してプラズマ圏の回復時間の統計解析を実施した結果、明らかに 2024 年 5 月の巨大磁気嵐時のプラズマ圏の回復時間が極端に長いことも分かりました(図 2)。このようなプラズマ圏内部の電子密度が長時間低い状態に維持されることは、過去の研究を踏まえても極めて稀な現象です。

プラズマ圏の回復時間が異常に長かった原因を突き止めるために、プラズマ圏とつながっている電離圏の電子密度変化を捉えるために全球 TEC データの解析を実施しました。その結果、TEC の空間分布は磁気嵐の発達期において非常に複雑な構造を示した後(図 3b)、ほぼ北半球全領域で TEC 値が静穏日の値と比べて約 50~90%も減少し、その状態が少なくとも 2 日間継続していたことが分かりました(図 3c~g)。この TEC 値の減少は、磁気嵐に伴ってよく見られる現象で、電離圏負相嵐と呼ばれています。この現象は磁気嵐時に極域の超高層大気が加熱されることによって電離圏高度における中性大気組成変化が起こり、その変化が電離圏電子密度を減少させると考えられています。今回の巨大磁気嵐時に発生した負相嵐の規模が非常に大きく、その継続時間も極めて長く、長時間にわたって電離圏電子密度が減少した結果、電離圏からプラズマ圏へのプラズマの供給が抑制され、プラズマ圏の回復が通常よりも長い時間を要したことが結論されます(図4)。比較的大きな磁気嵐に対する負相嵐の統計的描像や負相嵐が実際にどの程度、プラズマ圏の回復に影響するのかについては、今後の研究に託されています。

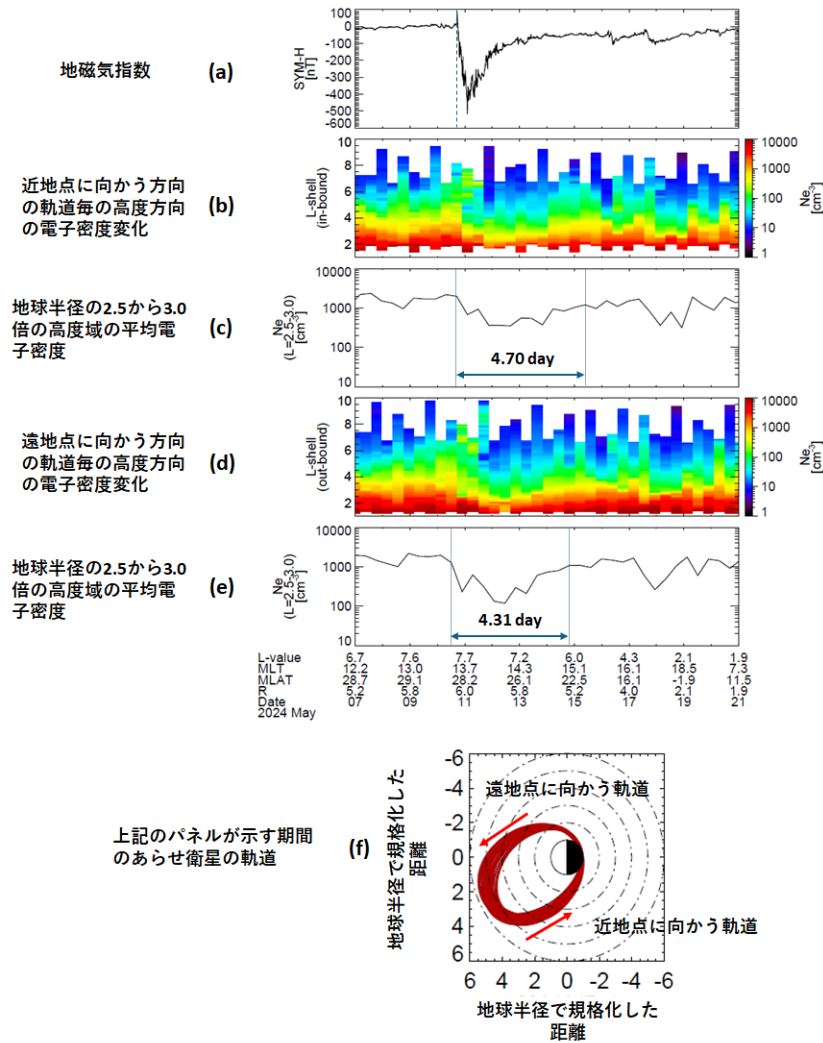


図1:2024年5月7日から21日までの期間にわたる地磁気指数の時系列プロット(a)、「あらせ」衛星で観測された近地点と遠地点に向かう軌道に沿った電子密度の高度-時間プロット((b)と(d))、地球半径の2.5から3.0倍の高度領域における平均電子密度の時系列プロット((c)と(e))、及び「あらせ」衛星の軌道図。時刻は、世界時^{注9)}である。図(a)中の青の破線は磁気嵐の開始時刻を示す。また、図(c)と(e)中の青の両矢印は、通常よりもプラズマ圏の電子密度が減少している期間を表す。

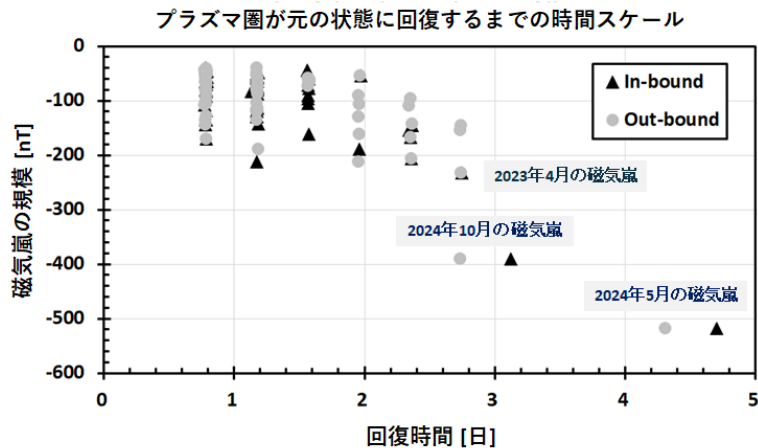
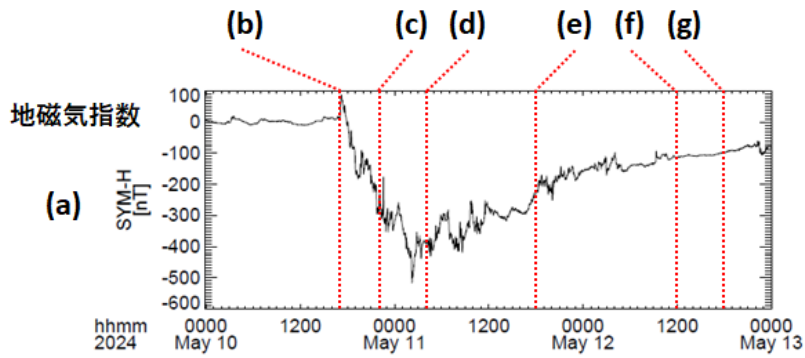


図2:2017年3月から2024年12月までに発生した77例の磁気嵐に対するプラズマ圏の回復時間の統計解析結果。横軸はプラズマ圏の回復時間[日]、縦軸は磁気嵐の規模[nT]で表す。



北半球における静穏10日平均TEC値からの規格化差分TECの極域マップ

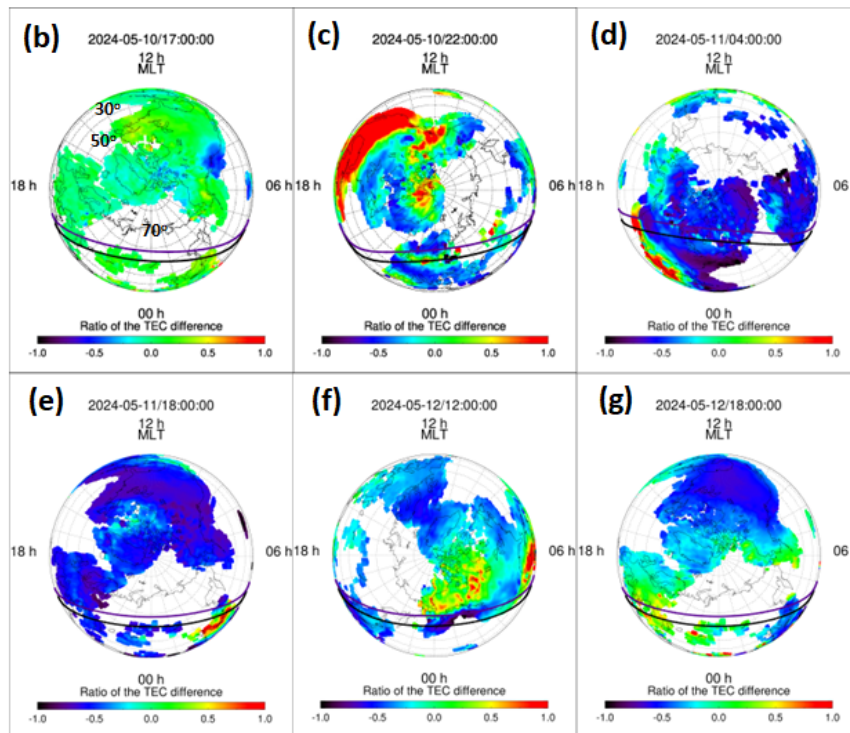


図 3:2024 年 5 月 10 日から 13 日までの期間にわたる地磁気指数の時系列プロット(a)、北半球における静穏 10 日平均 TEC 値からの差分 TEC の極域マップ((b)~(g))。図(a)中の赤の破線とアルファベットは、6 つの差分 TEC マップの時刻に対応する。また、図(b)~(g)のカラーバーは、静穏 10 日平均 TEC 値で規格化した差分 TEC 値を-1.0 から 1.0 までの範囲で表す。

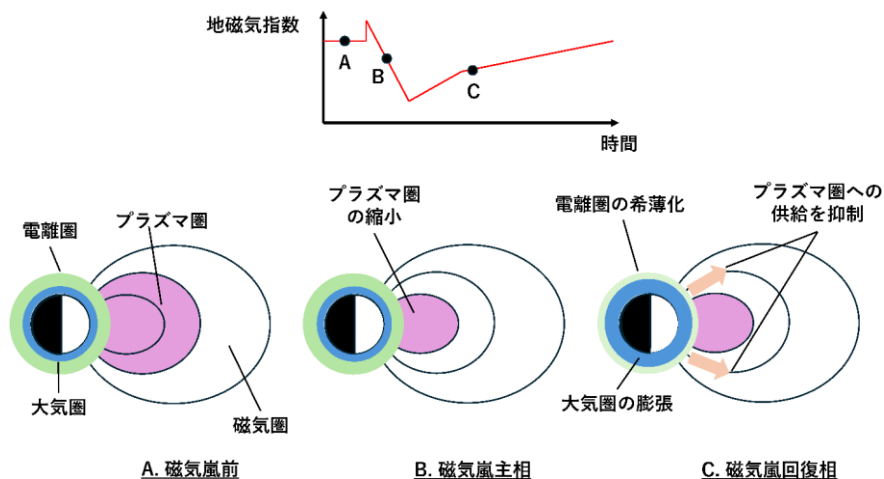


図 4:巨大磁気嵐時に観測されたプラズマ圏と電離圏変動のプロセスの特徴。

【成果の意義】

電離圏起源の低エネルギーのプラズマから構成され、比較的高密度のプラズマで満たされているプラズマ圏は、これまでの研究結果から磁気圏内で発生する電磁波動の生成、伝搬、電磁波動と荷電粒子との相互作用の効率に重要な役割を持っていることが知られています。特に、地球周辺の宇宙空間を飛翔する人工衛星に深刻なダメージを与えるとされる高エネルギー粒子の生成過程を理解するために、磁気嵐時におけるプラズマ圏の電子密度の空間分布とその時間変化を解明することは、宇宙天気研究の中で重要視されています。ただし、巨大磁気嵐の発生頻度は通常の磁気嵐に比べて低く、巨大磁気嵐に対するプラズマ圏の応答と電離圏擾乱(負相嵐)がプラズマ圏の回復にどのように関わっているかは十分に分かっていませんでした。

今回の研究結果は、2024年5月10日に発生した巨大磁気嵐に伴ってプラズマ圏が急速に地球に近い領域まで縮小したこと、プラズマ圏の回復時間が他の磁気嵐と比べて極端に長かったこと、極域から低緯度に至る広範な領域で電離圏の電子密度低下が起こり、長い時間継続していたことを世界で初めて示しました(図4)。この結果は、磁気嵐時に発生した極域の熱圏^{注10)}大気の膨張と組成変化が電離圏の電子密度を低下させた結果、プラズマ圏へのプラズマの供給が抑制され、プラズマ圏が元の状態になかなか回復しなかったという、従来のプラズマ圏の回復過程に電離圏擾乱(負相嵐)の効果を加味すべきであることを示唆しています。

本研究結果は、こうした科学面だけでなく、宇宙環境変動予測といった宇宙天気においても意義があります。今回のような大規模イベントの場合、極端な電離圏の電子密度の低下が全球にわたって長時間、継続するという非常に大きな電離圏擾乱が発生していたことを観測から示しました。このような事例は、宇宙天気予報モデルでは十分に予測することができておらず、今後、似たような事例を解析し、そこで得られた知見を取り入れていくことが期待されています。これにより、今後、巨大磁気嵐の発生に起因した電離圏擾乱が起こった場合に、衛星放送や通信の障害の軽減に貢献できると考えられます。

本研究は、2024年度から始まった日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究C)「地上一衛星観測と物理モデルを組み合わせた磁気嵐時の電離圏-熱圏結合過程の解明」の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注1)太陽フレア:

太陽表面付近に存在する磁場によって引き起こされる数分から数時間のタイムスケールで起こる多波長の増光現象。

注2)磁気嵐:

地磁気が通常の状態から数時間から1日程度の時間をかけて減少し、その後数日かけて徐々にもとの強さまで回復していくという過程をとる地磁気擾乱現象。この過程の中で地磁気が減少して磁気嵐が発達する過程を主相、回復する過程を回復相と呼ぶ。磁気嵐時に変化する地上磁場は通常時の地上磁場の1000分の1程度であるが、巨大磁気嵐の場合は通常時の地上磁場の100分の1程度にも達する変化が観測される。

注 3) プラズマ圏:

電離圏起源の低エネルギー(低温)の荷電粒子群(プラズマ)から構成され、比較的高密度のプラズマが存在する領域。この領域は、電離圏の外側から地球磁気圏の内側に存在し、その外側境界でプラズマ密度が 1 桁程度、急激に減少する。その境界はプラズマ圏界面と呼ばれている。

注 4) 電離圏:

地球を取り巻く超高層大気中の分子や原子が、紫外線やエックス線などにより電離した、高度約 60~1,000kmの領域。この領域は電波を吸収、屈折、反射する性質を持ち、これによって短波帯などの電波伝搬に影響を及ぼす。

注 5) ジオスペース:

人類の活動域となりつつある、地球周辺の宇宙空間。

注 6) 全球測位衛星システム(GNSS):

アメリカの GPS、日本の準天頂衛星(QZSS)、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo 等の衛星から発せられる信号を用いた位置測定・航法・時刻配信を行う衛星測位システムの総称。その中で、よく認知されている全地球測位衛星システム(GPS)は、上空約 2 万 km を周回する GPS 衛星(6 軌道面に30個配置)、GPS 衛星の追跡と管制を行う管制局、測位を行うための利用者の受信機で構成される。

注 7) 全電子数(TEC):

1 平方メートルの断面積を持つ円柱に沿って、2点間で積分された電子の柱状数密度。単位には、TECU= 10^{16} 個/m² が用いられる。

注 8) IUGONET(Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork):

太陽地球大気関連の地上観測を長年推進してきた実績を持つ国立極地研究所、東北大学、名古屋大学、京都大学、九州大学の5機関が連携し、2009 年に6年計画でスタートした大学間連携プロジェクト。本プロジェクトでは、各観測データを一元的に取り扱うデータ解析システムの開発を行っており、分野横断型研究を促進している。

注 9) 世界時:

グリニッジ子午線を基準とし、夜中の 0 時を 1 日の始めとする平均太陽時。いわゆるグリニッジ時間である。

注 10) 熱圏:

大気圏を温度の高度分布にしたがって区分した場合の領域の一つで、高度約 90~600 km 程度の高度領域を指す。温度は 90 km 付近で約-80℃から高さとともに上昇し、600 km 付近での温度は 1,000~2,000℃に達する。

【論文情報】

雑誌名: Earth, Planets and Space

論文タイトル: Characteristics of temporal and spatial variation of the electron density in the plasmasphere and ionosphere during the May 2024 super geomagnetic storm

著者:

新堀 淳樹	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教
北村 成寿	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教
山本 和弘	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教
熊本 篤志	東北大学大学院 理学研究科	准教授
土屋 史紀	東北大学大学院 理学研究科	教授
笠原 禎也	金沢大学学術メディア創成センター 先端宇宙理工学研究センター	教授
松田 昇也	金沢大学理工研究域 電子情報通信学系 先端宇宙理工学研究センター	准教授
寺本 万里子	九州工業大学 大学院工学研究院 宇宙システム工学研究系	准教授
松岡 彩子	京都大学 大学院理学研究科	教授
惣宇利 卓弥	京都大学 生存圏研究所	特定研究員
大塚 雄一	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	准教授
西岡 未知	情報通信研究機構 電磁波研究所	主任研究員
ペルウィタサリ セプティ	情報通信研究機構 電磁波研究所	研究員
三好 由純	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	教授
篠原 育	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所	教授

DOI: 10.1186/s40623-025-02317-3