

トンガ沖海底火山噴火がもたらした電離圏の穴

～最先端の観測から見た地圏と宇宙圏のつながり～

研究のポイント

- ・ 南太平洋トンガ沖の海底火山噴火後に、同心円状の気圧波の到来に関連した電離圏^{注1)}電子密度の不規則構造の観測に成功。
- ・ 通常よりも1～2桁も電子密度が急減する多数の電離圏の穴が、日本上空で観測され、その構造が高度約2,000kmの宇宙空間まで伸びていることを確認。
- ・ 電離圏の穴の形成に関わる電離圏高度の上昇が、気圧波の到来よりも約1～2時間前に開始していることを発見。
- ・ 電波障害を起こす宇宙天気現象が、太陽フレアなどの太陽活動だけでなく、大規模噴火等の地表の現象にも起因することを明示する事例。

概要

京都大学大学院理学研究科 松岡彩子教授は、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と、全球測位衛星システム(GNSS)^{注2)}、気象衛星ひまわり、ジオスペース^{注3)}探査衛星「あらせ」、電離圏観測機器などのデータを解析し、南太平洋トンガ沖海底火山の大規模噴火に伴う同心円状の気圧波が引き起こした電離圏電子密度の不規則構造の観測に成功しました。

観測データにおいて、通常よりも1～2桁程度、電子密度が急減する多数の電離圏の穴が日本上空で観測され、探査衛星「あらせ」の観測によってこの電離圏の穴は、2,000 kmの宇宙空間まで伸びていることが分かりました。また、電離圏の穴の形成は、電離圏の高度上昇が原因であったことと、その高度上昇は火山噴火による気圧波の到来よりも約1-2時間も前に起こっていたことが分かりました。本研究は、このような火山噴火に伴って発生した大気変動による電離圏の穴の生成機構を明らかにしました。また、電離圏の穴は電波障害の原因であり、宇宙天気の観点で予報が必要な項目です。電波障害を起こす宇宙天気現象は、太陽フレアなどの太陽活動に起因することが広く知られていますが、本研究結果は、宇宙天気現象が大規模噴火等の地表の現象にも起因することを明示する重要な事例です。

本研究成果は、2023年5月22日午後6時(日本時間)付ネイチャー・リサーチ社刊行の総合国際学術雑誌「*Scientific Reports*」に掲載されました。

1. 背景と目的

地球を取り巻く大気の上部(高度：60km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。太陽フレア等の太陽活動や地震、火山噴火、台風等の気象現象による下層大気の変動によってひとたび電離圏の擾乱が発生すると、GPS衛星を用いた位置情報の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、GNSS受信機網データを用いた全球にわたる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。

赤道上空では、地球磁場^{注4)}が電離圏に対して水平となるため、いくつかの赤道電離圏特有の現象が発生します。その中でプラズマバブルと呼ばれる現象は、電子密度が周囲よりも2桁以上低い「電離圏の穴」で、その内部は、空間的に乱れた電子密度構造(電子密度の不規則構造)で満たされています。このプラズマバブルに伴う電離圏電子密度の不規則構造は、衛星測位や通信などに悪影響を及ぼします。したがって、プラズマバブル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。しかしながら、プラズマバブルがどのような条件下で発生するか、下層大気の変動がプラズマバブルの発生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。

2022年1月15日に、1,000年に一度と言われている大規模海底火山噴火が南太平洋トンガ沖で発生し、世界中に強烈な気圧波、高速の津波を引き起こすとともに、アジア域上空でプラズマバブルが発生していることが地上の電離圏観測機器によって捉えられました。そのため、現在、多くの科学者がその影響を調べていますが、このトンガ火山噴火によって生成されたプラズマバブルが、どのくらいの高さまで達しているかは分かっていませんでした。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探査衛星「あらせ」と、地上連携観測データを組み合わせた解析を行い、トンガ火山噴火後に観測されたプラズマバブルの発生メカニズムを解明することを目的として本研究が開始されました。

2. 研究内容

本研究グループは、全球の電離圏変動を高時間・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5)}に変換し、TECデータベースを作成しています。また、トンガ火山噴火によって発生した気圧波、プラズマバブル、及び電離圏の動きの情報を得るために、気象衛星ひまわり8号の赤外輝度温度、探査衛星「あらせ」の電子密度と太平洋域に設置された電離圏観測機器(イオノゾンデ^{注6)})を使用しています。探査衛星「あらせ」観測データとデータ解析ソフトは宇宙科学連携拠点として名古屋大学に設置された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7)}」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>)

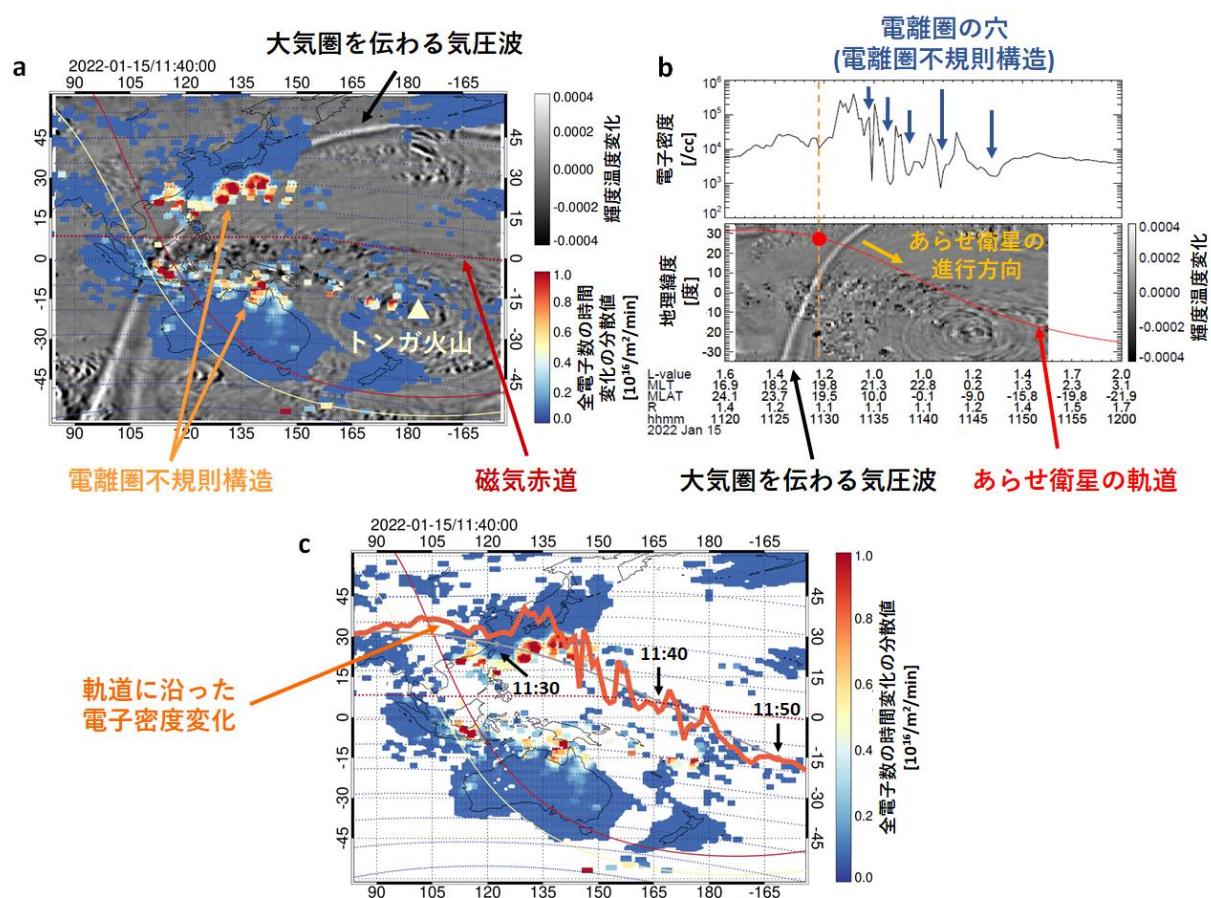


図1：トンガ火山噴火後に観測された気圧波と電離圏不規則構造。

(a)世界時^{注8)}2022 年 1 月 15 日 11:40 における赤外輝度温度と 5 分間の TEC の分散値の 2 次元マップ図。縦軸と横軸はそれぞれ、地理緯度と経度を表す。図中の横方向の赤線は磁気赤道^{注9)}を表す。(b) 探査衛星「あらせ」観測による電子密度変化の時系列プロットと赤外輝度温度の緯度－時間プロット。図下の数字は、時間と探査衛星「あらせ」の位置を示す。(c) 5 分間の TEC の分散値の 2 次元マップ図上に探査衛星「あらせ」観測による電子密度変化を重ねた図。

解析の結果、トンガ火山噴火に伴って発生した気圧波(図 1a のグレースケール表示)の到来のタイミングで、磁気赤道を挟んで 5 分間の TEC の時間変化の分散値(図 1a のカラースケール表示)が増加している領域が現れていることが分かりました。その分散値の増加は、電離圏電子密度の不規則構造の形成を示しており、このことは、対流圏を伝搬する気圧波から生まれた大気変動が上方へと伝搬し、電離圏電子擾乱を引き起こしたことを意味しています。そのような中、探査衛星「あらせ」は、気圧波と正面衝突する形で夕方過ぎの近地点付近(高度 400 km)を通過し、その後、宇宙空間へと飛翔して行きました。同衛星で捉えた電子密度の時系列プロット(図 1b)を見ますと、大気圏を伝搬する気圧波の到来の数分前に電子密度の急増が起こり、その後、電子密度が周囲と比べて 1~2 桁も電子密度が急減する多数のプラズマバブルが形成されています。探査衛星「あらせ」によって捉えられた電子密度擾乱の出現領域は、5 分間の TEC の時間変化の分散値の増加領域にも対応していることが分かります(図 1c)。このプラズマバブルは、少なくとも高度 2,000 km の宇宙空間まで伸びていたことを世界で初めて探査衛星「あらせ」による直接観測から明らかにしました。高さ 2,000km まで到達するプラズマバブルは、過去の研究を踏まえても極めて稀な現象です。

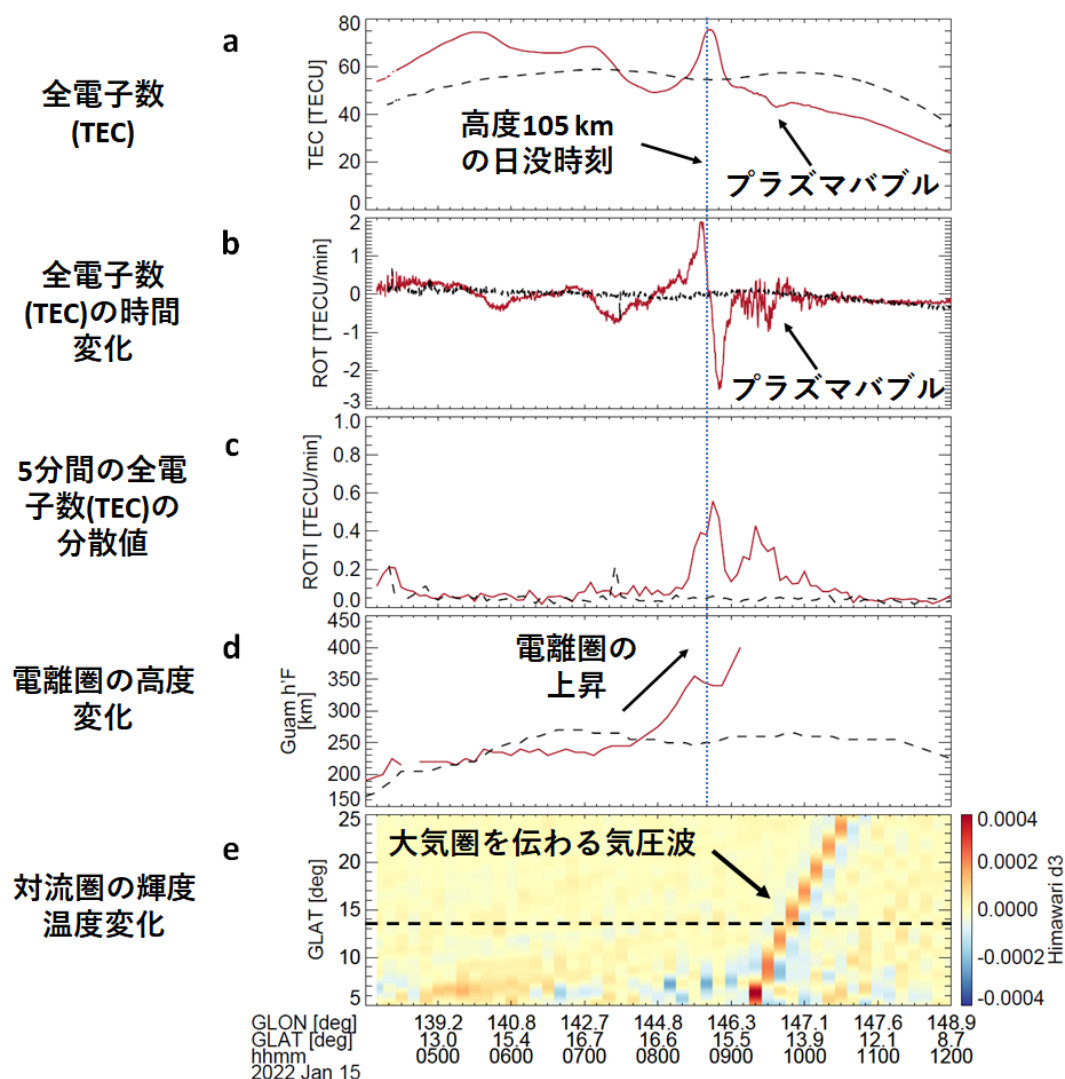


図 2：グアム島上空における TEC 変化(a-c)、電離圏高度変化(d)、及び対流圏輝度温度変化(e)の時系列プロット。図(a-d)中の黒の点線と赤の実線はそれぞれ、2022 年 1 月 13 日と 15 日のデータを示す。また、図(e)中の黒の点線は、グアム島内の観測点の地理緯度を表す。

イオノゾンデによる電離圏観測データと比較することにより、気圧波の到来に同期したプラズマバブルの発生メカニズムが明らかになってきました。図 2 はグアム島に設置されたイオノゾンデ観測によって、電離圏が 250 km から 400 km 近くまで上昇していることを示しており(図 2d)、急激な TEC 値の上昇と同期していることが分かりました。その TEC 値の上昇後に TEC 値の減少を伴うプラズマバブルが起きており、この電離圏の上昇がプラズマバブルの発生に関わっていることが推察されます。さらに、対流圏輝度温度変化との比較から、グアム島に気圧波が到来する約 2 時間前から電離圏の上昇が始まっており、対流圏を伝搬する気圧波よりも早い大気変動を考える必要が出てきました。

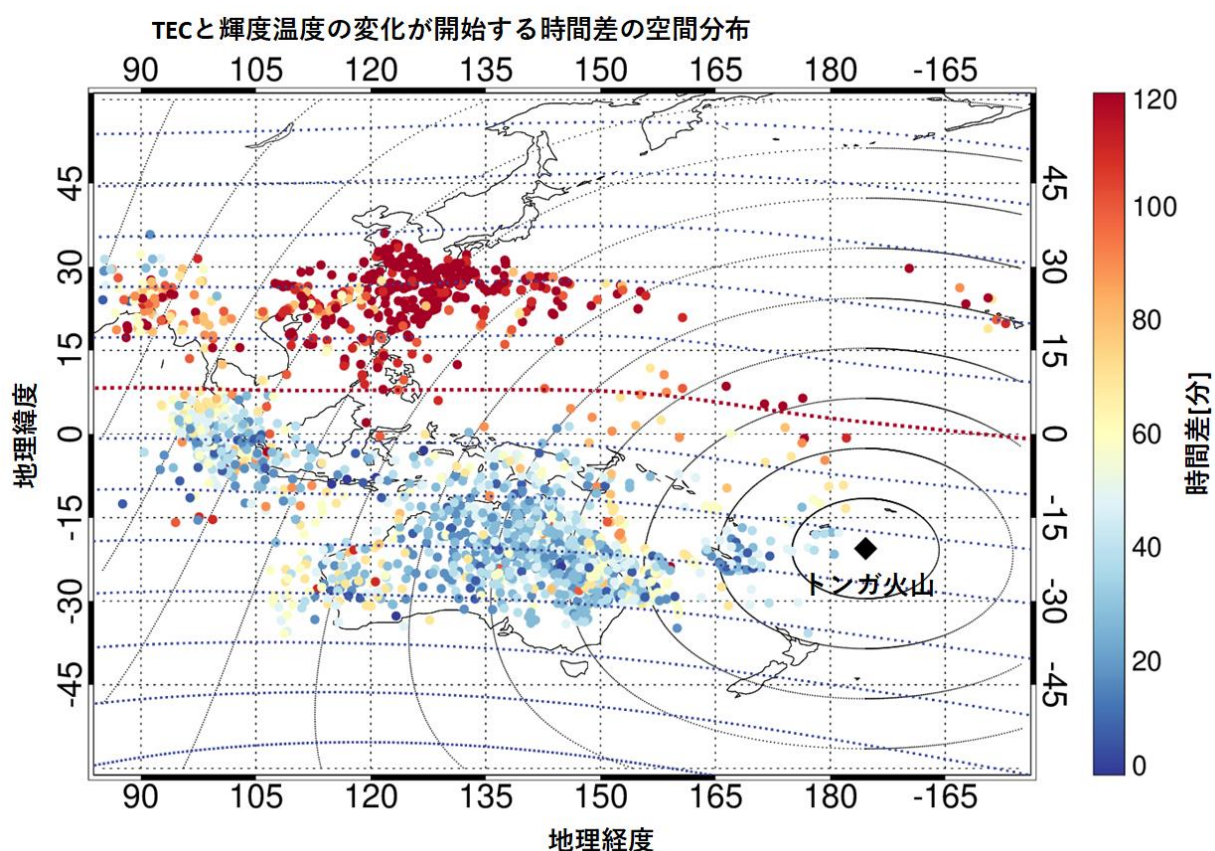


図 3：電離圏 TEC 変動と対流圏輝度温度変化の開始時間差の空間分布。この時間差は、0～120 分間のカラースケールで示す。図中の同心円は、1,000 km 毎のトンガ火山からの距離を表す。

そこで、図 2 に見られた急激な電離圏 TEC の上昇と対流圏輝度温度変化の開始時間の差の空間分布について調べてみることにしました。その結果、全体的に電離圏 TEC の上昇が開始する時間の方が対流圏輝度温度変化よりも約 20 分から約 2 時間、早く始まることと、その開始時間の差は、南半球よりも北半球側で大きいことが分かりました(図 3)。この原因として以下の 2 つが考えられます。一つは、トンガ火山噴火によって発生した気圧波が高温の熱圏^{注 10)}に到達し、そこで加速された気圧波が、対流圏を伝わる気圧波を追い越す形で伝わり、電離圏の上下運動をもたらしたことです(図 4)。もう一つは、南半球で発生した電離圏変動が高速で磁力線に沿って北半球に伝わったことです。詳細なメカニズムについては、今後の研究に託されています。

こうしたトンガ火山噴火によって発生した一連の大気変動が、赤道電離圏におけるプラズマバブルの生成を促すとともにそれが高高度へと発達したと考えられます(図4)。

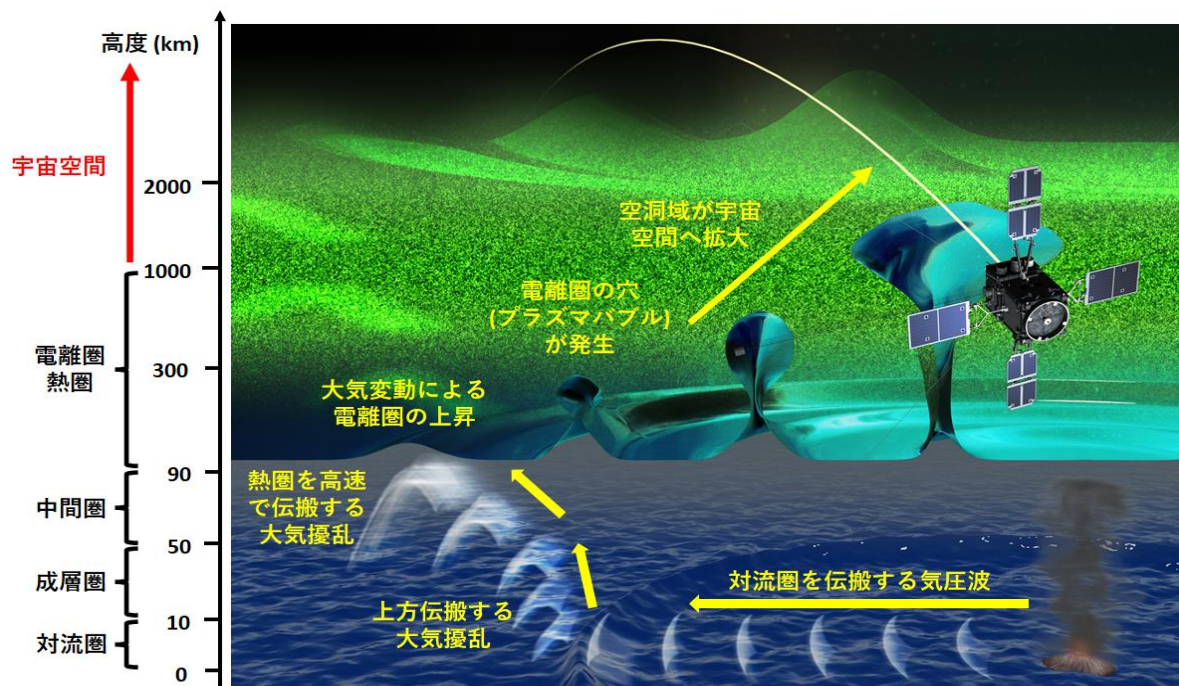


図4：トンガ火山噴火後に観測されたプラズマバブルの発生メカニズム。左の縦軸は高度を表し、値と目盛は各領域の境界の大まかな高度を示す。

3. 成果の意義

プラズマバブルの内部では、周囲と比べて1～2桁ほど局所的に電子密度が減少し、その内部は電子密度不規則構造で満たされているため、そこを通過する電波の散乱、屈折、透過を引き起こし、衛星測位や通信などに悪影響を及ぼします。そのため、プラズマバブルの発生を予測・予報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、地震、火山噴火、台風などの下層大気の変動がプラズマバブルの発生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、トンガ沖海底火山噴火に伴う気圧波に伴ってプラズマバブルがアジア域の低緯度電離圏に発生したこと、そのプラズマバブルは通常では考えられないほどの高高度まで達していたこと、プラズマバブルの発生要因となる電離圏の高度上昇は気圧波の到来よりも早く開始していたことを世界で初めて示しました。この結果は、火山噴火等を通じて対流圏で生じた大気変動が、数分から数十分かけて電離圏へ伝搬し、電離圏電子密度変動を引き起こすという、従来の地圏—大気圏—電離圏結合の考え方を見直す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、宇宙天気・防災面においても意義があります。トンガ火山噴火のような大規模イベントの場合、通常では起こりにくいと考えられている条件下(季節、場所)でも、プラズマバブルが形成されうることが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には取り入れられておらず、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、地震や火山噴火等の自然災害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、2016年度から始まった日本学術振興会科学研究費補助金（特別推進研究）「地上多点ネットワーク観測による内部磁気圏の粒子・波動の変動メカニズムの研究」の支援のもとで行われたものです。

<用語説明>

注 1) 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 60～1,000 km 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 2) 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 3) 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 4) 地球磁場：

地球が持つ磁性及び、地球により生じる磁場。磁場は、空間の各点で向きと大きさを持つ物理量であり、赤道域で水平になる。地球磁場の大きさの単位は、国際単位系の磁束密度の単位であるテスラである。通常、地球磁場はとても弱いので、「nT」が単位として用いられる。

注 5) 全電子数(TEC)：

1 平方メートルの断面積を持つ円柱にそって、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 6) イオノゾンデ：

電離圏に電波を垂直にうち当てて反射して来た信号を調べる一種のレーダー。短波帯の電波を掃引することで、電離圏の性質(電子密度の高度分布)を調べることができる。

注 7) 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 8) 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 9) 磁気赤道：

地磁気(地球磁場)の伏角、すなわち磁針の方向と水平面の作る角がゼロである点を結んだ曲線。磁気赤道で地球一周をするが地理経度によって磁気赤道の緯度は異なる。

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 90～600km 程度の高度領域を指す。温度は 90km 付近で約 -80℃から高さとともに上昇し、600km 付近での温度は 1,000～2,000℃に達する。

<論文情報>

雑誌名: *Scientific Reports*

論文タイトル: Generation of equatorial plasma bubble after the 2022 Tonga volcanic eruption

著者名: *Atsuki Shinbori¹, Takuya Sori¹, Yuichi Otsuka¹, Michi Nishioka², Septi. Perwitasari², Takuo Tsuda³, Atsushi Kumamoto⁴, Fuminori Tsuchiya⁵, Shoya Matsuda⁶, Yoshiya Kasahara⁶, Ayako Matsuoka⁷, Satoko Nakamura¹, Yoshizumi Miyoshi¹, Iku Shinohara⁸

¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University; Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan.

²National Institute of Information and Communications Technology; Koganei, Tokyo, 184-8795, Japan.

³The University of Electro-Communications; Chofu, Tokyo, 182-8585, Japan.

⁴Department of Geophysics, Tohoku University; Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan.

⁵Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University; Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan.

⁶Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University; Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192, Japan.

⁷World Data Center for Geomagnetism, Graduate School of Science, Kyoto University; Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan.

⁸Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Chuo-ku, Sagami-hara, 252-5210, Japan.

著者:

新堀 淳樹	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教
惣宇利 卓弥	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教
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
セプティ ペルウィタサリ	情報通信研究機構 電磁波研究所	研究員
津田 卓雄	電気通信大学大学院 情報理工学研究科	准教授
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
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
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
松岡 彩子	京都大学大学院 理学研究科	教授
中村 紗都子	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任准教授
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: 10.1038/s41598-023-33603-3