

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01958

研究課題名(和文) プラズマ圏極端収縮時の放射線帯消失の撮像

研究課題名(英文) Imaging of radiation belt loss during plasmasphere extreme erosion

研究代表者

尾花 由紀 (Obana, Yuki)

九州大学・国際宇宙惑星環境研究センター・学術研究員

研究者番号：50398096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「磁気嵐の発生によりプラズマ圏が極端に収縮し、深部磁気圏でEMIC波動が励起されることで、新内部磁気圏でも波動による放射線帯電子消失が起こる」という仮説を立て、この仮説を立証するために、ニュージーランドのミドルマーチにフラックスゲート磁力計、高感度全天カメラ、誘導磁力計を設置した。これによりプラズマ圏の密度と、放射線帯粒子降下による孤立オーロラの発光と、EMIC波動を同時観測する新しい地上観測体制を確立した。また、すべての観測システムを太陽電池による電源供給で駆動し、リアルタイムデータ送信システムを導入することで、遠隔地における長期間の安定した観測を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、磁気嵐前後に大きく変動する放射線帯の変動について、特に粒子損失メカニズムを明らかにするうえで重要な研究である。これまで注目されてこなかった深内部磁気圏におけるEMIC波動による粒子拡散に着目した点が独創的であり、これを実証するために、磁気的な中低緯度にあたるニュージーランドに新しい観測体制を構築した。放射線帯は宇宙機や宇宙飛行士に被ばくという害悪を与えるものであり、本研究は宇宙の安全利用にも貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to verify that radiation belt particle losses due to EMIC waves occur even at mid- and low-latitudes, we conducted the following research.

We installed an all-sky aurora camera and a 64-Hz sampling induction magnetometer at Middlemarch, New Zealand as well as 1-Hz sampling fluxgate magnetometers. Green and red auroras respectively corresponding to the 557.7 nm and 630.0 nm emissions were observed on the night of 5 Aug 2019. Pc1 pulsations were observed in the frequency range of ~ 0.2 -1 Hz before and after a small geomagnetic storm during 4-6 October 2020. The Ionospheric Alfvén Resonator (IAR) was also identified with spectral resonance structures during this magnetic storm. Lower harmonic modes of IAR were present throughout the local nighttime, but higher harmonic modes with frequency of 5-15 Hz seemed to disappear at the onset time of substorms. This is the first report of IAR at such a high frequency range and this is the first IAR observation in the southern hemisphere.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：放射線帯 内部磁気圏 EMIC波動 孤立オーロラ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内部磁気圏には、プラズマ圏、環電流、放射線帯というエネルギー帯の異なるプラズマ群がほぼ同じ領域に存在している。これらのプラズマ粒子は直接衝突することはないが、様々な電磁波動を介してエネルギーを交換し、互いに影響を与え合っている。特に太陽風の影響を受けて磁気嵐が発生すると、地球磁気圏全体が対流によって大規模に攪拌され、内部磁気圏のプラズマ環境もダイナミックに変化することがわかっていった。特に、放射線帯の電子フラックスは数日間で数桁に及ぶ激しい増減を見せ、この変動原因の解明は磁気圏物理学の重要課題となっていた。

放射線帯電子の地球大気への降下は、電磁イオンサイクロトロン (Electromagnetic Ion Cyclotron: EMIC) 波動が共鳴条件を満たす粒子のピッチ角をロスコーンへ散乱する過程、すなわち波動粒子相互作用によって起こると考えられていた。この波動はプラズマ圏の外縁で成長率が高く、多くの場合プラズマ圏の位置が $L=4\sim 6$ であることから、これまで波動粒子相互作用はこの領域 ($L=4\sim 6$) の放射線帯電子を消失させる主要因とされていた。しかし近年の衛星観測により、深部磁気圏でも EMIC 波動が頻繁に発生していることが明らかとなり、放射線帯の内側境界付近の粒子消失やスロット領域の形成にも、この波動が関与している可能性が示唆され始めていた。

さらに、新しい研究により、磁気嵐中にプラズマ圏が大きく変動し、時には地球半径の2倍以下まで極端に収縮することが明らかになってきた。これらの状況を踏まえ、「磁気嵐の発生によりプラズマ圏が極端に収縮し、深部磁気圏で EMIC 波動が励起されることで、新内部磁気圏でも波動による放射線帯電子消失が起こる」という仮説を立て、この仮説を立証することを本研究の目的とした。

本研究は、この仮説を検証するために、ニュージーランドのミドルマーチに高感度全天カメラと誘導磁力計を設置し、元から稼働していたフラックスゲート磁力計と合わせて、プラズマ圏の密度と、放射線帯粒子降下による孤立オーロラの発光と、EMIC 波動を同時観測するという新しい地上観測体制を確立した。また、すべての観測システムを太陽電池による電源供給で駆動し、リアルタイムデータ送信システムを導入することで、遠隔地における長期間の安定した観測を可能にした。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、地球にごく近い深部磁気圏における放射線帯消失現象のメカニズムを解明することである。この目的を達成するために、以下の具体的な目標を設定した。

EMIC 波動による放射線帯消失の立証:

深部磁気圏での EMIC 波動の発生と、それによる放射線帯粒子の降下・消失プロセスを実証することを目指した。これまでの研究では、EMIC 波動が主にプラズマポーズ付近 ($L=4\sim 6$) で発生し、放射線帯粒子の消失に寄与していることが示されてきた。しかし、近年の衛星観測により、 $L<3$ の深部磁気圏でも EMIC 波動が発生していることが確認された。このため、本研究では $L<3$ の領域での EMIC 波動と放射線帯消失の関連性を立証することを重要な目標とした。

地磁気嵐によるプラズマ圏収縮と放射線帯消失の因果関係の解明:

地磁気嵐の発生により、プラズマ圏が極端に収縮する現象が観測されている。このプラズマ圏収縮が放射線帯粒子の降下・消失にどのように影響を与えるかを明らかにすることが本研究の重要な課題である。特に、地磁気嵐中のプラズマポーズの位置変動と、それに伴う EMIC 波動の発生条件を詳細に解析することで、放射線帯粒子の消失メカニズムを解明することを目指した。

中緯度超高層大気への影響評価:

放射線帯粒子が大気に降下することで、超高層大気の組成や電離層にどのような影響が生じるかを評価する。具体的には、放射線帯粒子降下による孤立オーロラの発光を観測し、そのスペクトル解析を行うことで、降下粒子のエネルギーや降下領域の空間構造を明らかにすることを目指した。これにより、放射線帯粒子が大気に与える影響を定量的に評価し、地球環境へのインパクトを理解することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ニュージーランドのミドルマーチ観測点において、新しい地上観測システムを開発・導入し、深部磁気圏における放射線帯消失現象のメカニズムを明らかにすることを旨とした。具体的な研究方法は以下の通りである。

まず、観測システムの設置と運用について述べる。ミドルマーチ観測点には、2011年から研究代表者によってフラックスゲート磁力計が設置され、地磁気3成分の1秒値観測が行われている。本研究では新たに高感度全天カメラと誘導磁力計を設置した。これらの機器は、太陽電池による電源供給で運用され、長期間の安定した観測を可能にするために設計された。オーロラ全天カメラは、孤立オーロラの発光を捉えるために高感度のCCDセンサーを搭載しており、1分ごとに撮影された画像データをリアルタイムで保存する。また、誘導磁力計は、地磁気脈動(Pc1波動)の観測を行うために広帯域の感度を持ち、64Hzの高頻度サンプリングでデータを収集する。

ミドルマーチ観測点は、周囲に電磁波ノイズ源や人工光の発生源がなく、晴天率も高いため、地磁気観測や光学観測に適している。しかしながら、商用電源は届いていないため、機器の運用は、太陽電池に頼らざるを得ない。また市街地から離れているため、現地協力者の訪問は月に1度しか望めない。そのため、消費電力を最小限に抑え、かつ太陽光発電システムでも安定して動作する観測システムを新たに構築した。

しかし、コロナ禍の影響で、観測機器の設置や現地での作業が大幅に遅れることとなった。当初予定していたスケジュールは大幅に変更され、観測開始が遅延した。この遅延は、国際的な移動制限や現地での感染防止対策のために生じたものであり、プロジェクトの進行に大きな影響を及ぼした。それにもかかわらず、最終的には観測機器の設置を完了し、安定した運用を開始することができた。

次に、データ収集と解析の手法について説明する。フラックスゲート磁力計による観測データは、リアルタイムでクラウドストレージにアップロードされ、遠隔地からアクセス可能な形で管理された。これにより、現地でのデータ管理の負担を軽減し、迅速なデータ解析を可能にした。収集されたデータは、磁気嵐に伴う汎世界的な地磁気変動の解析や、地磁気脈動の解析に用いられ、プラズマ圏密度の推定も行われた。また、オーロラ全天カメラの画像データからオーロラ発光を解析し、誘導磁力計のデータを用いて、電離圏アルヴェン共鳴器 (Ionospheric Alfvén Resonator: IAR) や、磁気圏におけるEMIC波動励起の結果生じるPc1型地磁気脈動等の解析が行われた。

4. 研究成果

本研究では、ニュージーランドのミドルマーチ観測点に設置した高感度オーロラ全天カメラとフラックスゲート磁力計、誘導磁力計を用いて、オーロラと地磁気脈動の観測を行った。その結果、以下の重要な成果を得ることができた。

まず、観測システムの安定運用に成功した。太陽電池による電源供給とリアルタイムデータ送信システムを導入したことで、長期間にわたる連続観測が可能となり、これまで困難であった中緯度帯での高精度な地上観測を実現した。特に、コロナ禍の影響で観測開始が遅れたにもかかわらず、最終年度までに安定した観測体制を整えることができたことは、本研究の大きな成果である。観測の開始が遅れたために、2023年度内には予定したデータの収集が完了しなかった。しかし、現在も継続してデータ収集を行っている。特に、2024年5月10日に発生した20年ぶりの大磁気嵐により、有望なデータを取得できたため、今後このデータの詳細な解析を進める予定である。

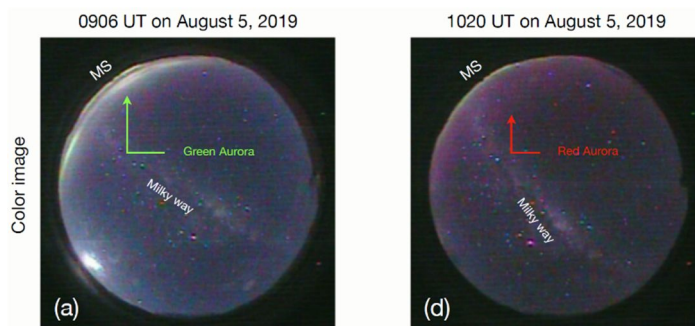


図1: 2019年8月5日の夜に得られたオーロラ画像の例。557.7 nmの緑のオーロラと630.0 nmの赤いオーロラがとらえられている。

次に、観測データから得られた具体的な成果として、複数の小規模な磁気嵐の際に緑色（557.7 nm）および赤色（630.0 nm）のオーロラ発光を観測したことが挙げられる（図1）。また、磁気嵐の前後において0.2-1 Hzの周波数帯域でPc1型地磁気脈動を観測し（図2）、EMIC波動が磁気圏内の特定の領域で発生していることを確認した。

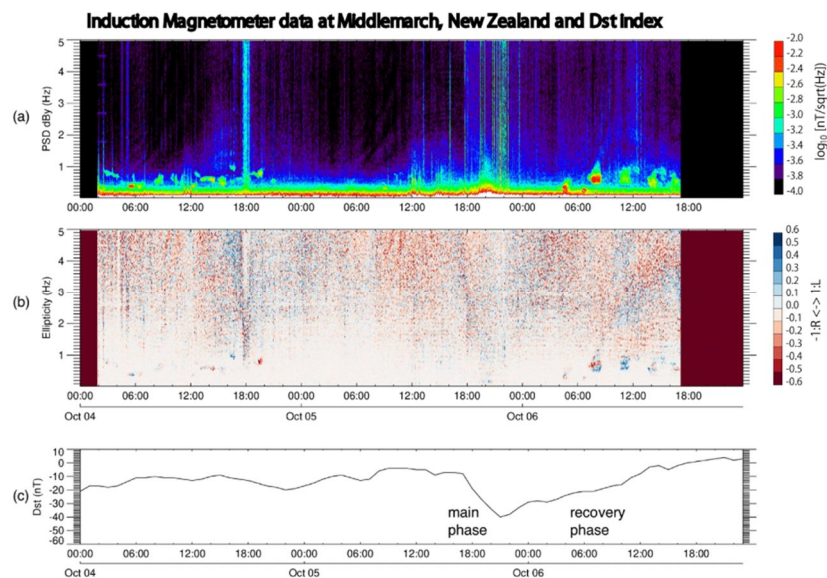


図2：2020年10月4～6日における（a）ミドルマーチ観測点で観察された地磁場変動のパワースペクトル密度（b）ミドルマーチ観測点で観察された地磁場変動の楕円率（c）磁気嵐の発生を示すDst インデックス。

さらに、我々の観測データからは、電離層アルヴェン共鳴器の存在を確認することができた（図3）。特に、IARの低調波モードが夜間にわたって観測され、高調波モードはオーロラサブストームの開始時に消失することが分かった。これは、高周波数帯域におけるIARの観測としては世界初の成果であり、南半球における初めてのIAR観測でもある。この発見は、磁気圏物理学に新たな知見をもたらすものであり、今後の研究において重要な基礎資料となる。

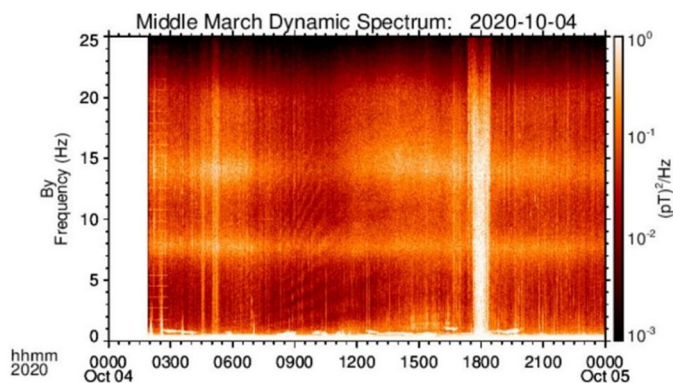


図3：2020年10月4日にミドルマーチ観測点で観測された地磁気のダイナミックパワースペクトル。電離層アルヴェン共鳴器（IAR）に特有の共鳴構造が1-20Hzの幅広い周波数帯に見られる。

本研究の成果は、学术论文や学会発表として発表され、国際的な評価を受けた。特に、観測データに基づく初期分析結果をもとに、国際共著論文として出版されたことは、本研究の学術的意義を示すものである。また、本研究の成果をもとに、今後さらなる詳細な解析や新しい観測プロジェクトの展開が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Obana Yuki, Sakaguchi Kaori, Nose Masahito, Hosokawa Keisuke, Jaquiere Peter, Saita Satoko, Shiokawa Kazuo, Connors Martin, Kadokura Akira, Nagatsuma Tsutomu, Petersen Tanja	4. 巻 76
2. 論文標題 New observational projects in New Zealand for studying radiation belt loss processes in the deep inner magnetosphere: instrumentation, operation by solar power and initial results	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-024-01990-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 尾花由紀, 坂口歌織, 能勢正仁, 細川敬祐, 塩川和夫, Martin Connors, 門倉昭, 長妻努
2. 発表標題 ニュージーランドに設置された誘導磁力計によるPc1, IARの観測：初期結果報告
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾花由紀, 坂口歌織, 能勢正仁, 細川敬祐, 塩川和夫, Martin Connors, 門倉昭, 長妻努
2. 発表標題 ニュージーランドに設置された誘導磁力計によるPc1, IARの観測：初期結果報告
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akiko Fujimoto, Yuki Obana, Satoko Saita
2. 発表標題 Seasonal Variation in Plasmaspheric Mass Density in the New Zealand Meridia
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂口 歌織 (Sakaguchi Kaori) (60598994)	国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波伝搬研究センター・主任研究員 (82636)	
研究分担者	細川 敬祐 (Hosokawa Keisuke) (80361830)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	
研究分担者	能勢 正仁 (Nose Masahito) (90333559)	名古屋市立大学・データサイエンス学部・教授 (23903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ニュージーランド	University of Otago	GNS Science	
米国	University of Colorado		