

2023年度 05) 奨励共同研究 目次詳細

3 件

*所属・学年は2024年3月現在
*Affiliation and Year of graduate school displayed are current as of March 2024.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局 Department	学年* Year of graduate school	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
南條壮汰	電気通信大学	情報・ネットワーク工学専攻	博士後期課程3年	脈動オーロラの光学発光から探る磁気圏電子の空間特性	189	
北島 慎之典	防衛大学校	理工学研究科 地球海洋学科	博士後期課程1年	太陽フレア放射による地球電離圏への影響評価と地球大気電離モデルの構築	191	
寺田雄亮	東京大学	理学系研究科地球惑星科学専攻	博士後期課程2年	エネルギーフラックス解析の海洋大循環モデルへの適用	193	

(別紙様式05-2)

和文課題名

脈動オーロラの光学発光から探る磁気圏電子の空間特性

英文課題名

Spatial characteristics of magnetospheric electrons estimated by the optical emission of pulsating auroras

代表者、所属機関・部局・学年

南條壮汰、電気通信大学大学院・情報・ネットワーク工学専攻・D3

指導教員、所属機関・部局・職名

細川敬祐、電気通信大学・情報理工学部・教授

【研究目的】

輝度が周期的に変化する脈動オーロラは、真夜中から夜明けの時間帯に頻繁に観測される普遍的なオーロラである。輝度変化の周期は、数秒から数 10 秒の「主脈動」と 3 Hz 程度の「内部変調」の 2 種類が広く知られている。内部変調は、主脈動が明るいタイミング (ON phase) のみに見られ、暗いタイミング (OFF phase) には発生しない。また、全ての ON phase が内部変調を伴うわけではなく、数 Hz の輝度変調を持たない脈動オーロラも存在する。磁気圏衛星「あらせ」と地上の高速撮像カメラの共役観測によって、これらの周期構造は、磁気圏に存在するコーラス波動の周期構造と 1 対 1 対応することが明かされた (Hosokawa et al., 2020)。このことは、コーラス波動の発生分布を地上から 2 次元で導出できることを意味する。そのため、現在はコーラス波動と脈動オーロラの光学発光の関係性に関する研究が盛んである。しかしながら、コーラス波動の成長には粒子の寄与が不可欠であるため、光学観測の結果から粒子の特性が得られる可能性がある。そこで、本研究では、あらせ衛星の粒子観測と光学観測の共役観測事例を解析することで、粒子の特性 (ロスコーン内電子のフラックスや背景電子の分布など) が光学発光に及ぼす影響を調査する。

【研究方法】

2019 年 9 月 28 日 0100–0240 UT にスカンジナビア半島上空で発生した脈動オーロラを対象とした事例解析をおこなった。魚眼レンズを装着した全天カメラによる地上観測と、磁気圏衛星「あらせ」によるその場観測のデータを用いた。地上観測では、当該時刻に快晴であったスウェーデン・チャウジャスおよびフィンランド・ソダンキラに設置した EMCCD カメラのデータを用いた。「あらせ」衛星による観測では PWE による波動の電磁界強度、LEP-e/MEP-e による電子の 3D フラックスデータ、MGF による背景磁場データを用いた。EMCCD カメラは BG3 フィルタを使うことにより、オーロラの明るい禁制遷移である 557.7 nm および 630.0 nm の発光をカットしている。また、サンプリングレートが 100 Hz であるため、数 Hz で発光する内部変調を可視化できる。

【研究結果・考察】

本イベントでは、0100–0150 UT (以下、前半) に内部変調を伴わない脈動オーロラが多く見られ、0150–0240 UT (以下、後半) には内部変調を伴うオーロラが多く見られた。磁気圏衛星「あらせ」に搭載された計測器のデータから、内部変調の有無が変化した要因を調査した。Hosokawa et al. (2020) では、本研究と同様の地上・磁気圏共役観測事例を解析し、PWE/WFC による電磁界強度の計測結果を示すことで、内部変調が見られない場合、コーラス波動がはっきりとしたエレメント構造を持たない hiss-like な放射になり、内部変調が見られる場合は、数 Hz のはっきりとしたエレメント構造が見られると報告された。本研究では、前半の時間帯に 6 Hz 程度のエレメント構造が、後半の時間帯には 3 Hz 程度のエレメント構造が見られた。また、LEP-e/MEP-e による 3D フラックスデータを解析することで、前半の時間帯は、高エネルギー電子の密度と温度異方性のいずれかが大きかったのに対し、後半の時間帯ではその両方の値が小さかった。そのため、高エネルギー電子と温度異方性の両方が大き

い時に、内部変調が可視化されやすい可能性があるのではないかと考察した。本研究で得られた値とパラメータレンジは大きく異なるが、Kato et al. (2018) によるコンピュータシミュレーションでは、これらのパラメータが大きいほどコーラス放射が発生しやすいことが示唆されており、本研究の結果と定性的に一致する。これらの結果・考察は本共同利用による経費支援を受けて、名古屋大学宇宙環境研究所を訪問し、三好教授、中村特任准教授らと議論を進めた上で得られたものである。本年度は、昨年度に得られた研究成果を学術論文として公表し、国内外で成果がどのように応用されるかの展望について発表を行った。

【成果発表】

Nanjo, S., Ebukuro, S., Nakamura, S., Miyoshi, Y., Kurita, S., Oyama, S.-I., et al. (2023). An implication of detecting the internal modulation in a pulsating aurora: A conjugate observation by the Arase satellite and all-sky imagers. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2023JA031499. <https://doi.org/10.1029/2023JA031499>

Nanjo, S., U. Brändström, T. T. Tsuda, T. Aoki, and K. Hosokawa, An AI-based auroral observation using a wide angle digital camera mounted on a gimbal, 47th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Optical Meeting), Stockholm University, 2023 年 8 月 21 日 (招待講演)

南條壮汰, U. Brändström, T. Sergienko, 津田卓雄, 青木猛, 細川敬祐, 広角レンズを装着したデジタルカメラとジンバルを用いたオーロラの観測: BROR ロケット実験との同時観測を含めた観測例の紹介, 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2023 年大会, 幕張, 2023 年 5 月 23 日 (学生発表賞受賞)

【参考文献】

Hosokawa, K., Miyoshi, Y., Ozaki, M. et al. Multiple time-scale beats in aurora: precise orchestration via magnetospheric chorus waves. *Sci Rep* 10, 3380 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59642-8>

Kato, Y., Omura, Y., Miyake, Y., et al. Dependence of generation of whistler mode chorus emissions on the temperature anisotropy and density of energetic electrons in the Earth's inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 1165–1177 (2018). <https://doi.org/10.1002/2017JA024801>

【省略した単語】

EMCCD: Electron multiplying charge-coupled device

PWE: Plasma Wave Experiment

WFC: Waveform capture

LEP-e: Low-Energy Particle Experiments – Electron Analyzer

MEP-e: Medium-Energy Particle Experiments – Electron Analyzer

MGF: Magnetic Field Experiment (MGF)

UT: Universal time

太陽フレア放射による地球電離圏への影響評価と地球大気電離モデルの構築
The evaluation of the response in the Earth's ionosphere during the solar flares
and development of a model of Earth's atmospheric ionization

北島慎之典、防衛大学校・理工学研究科・後期課程1年
指導教員：渡邊恭子、防衛大学校・理工学研究科・准教授

研究目的

宇宙領域を利用した現在のインフラシステム社会において、安全かつ安定した通信環境を構築するためには、宇宙天気状況の予報精度向上は必須である。宇宙天気現象を起因とした通信障害の中でも、航空機無線や船舶無線に影響するのは、短波の通信障害であるデリンジャー現象である。デリンジャー現象の原因は太陽フレア放射であり、その中でも電離圏 D 領域の電離に大きく影響している X 線放射が電波吸収の主要因あると考えられている。しかし、X 線の最大放射フラックス（フレア規模）とデリンジャー現象の規模が比例しない観測例が多数あり、電離圏 D 領域以外の E, F 領域に影響する太陽フレア放射も考慮する必要があることがこれまでの研究などから示唆されている。現在の問題点として、世界各国で開発された全地球大気のシミュレーションモデル（e.g. WAM-IPA, WACCM, IRI）には、特に通信障害に寄与する電波吸収が最も大きい太陽フレア中の電離圏 D 領域の電離について計算するモデルが入っていない。この問題は、本研究で用いる大気圏・電離圏結合モデル GAIA⁽¹⁾も同様である。そこで、高エネルギーの放射や粒子の地球大気内の伝播を計算することができる PHITS モデル⁽²⁾を導入することにより、太陽フレア放射による電離圏 D 領域の電離についても計算可能なモデルの構築を行う。

研究方法

まず、太陽フレア放射スペクトルと電離圏電子密度分布の変動との関係性を M3 クラス以上の太陽フレア 38 イベントについて GOES/XRS, SDO/EVE とイオノゾンドの観測値を用いて統計解析した。次に、同じイベントに対して太陽放射スペクトルの経験モデルで広く使われている FISM2⁽³⁾を GAIA に入力し、太陽フレア放射に対する電離圏応答を推定した。アップルトン・ハートレーの式と組み合わせ、イオノゾンドのパラメータを再現し、観測値と比較した。最後に、GOES/XRS から得られる X 線のエネルギースペクトルを PHITS に入力し、Gledhill (1986) ⁽⁴⁾による再結合係数を用いて電離圏 D 領域の電子密度を再現した。本研究では、PHITS による電子密度と GAIA によるシミュレーション結果を組み合わせ再現したイオノゾンドの f_{min} の再現値と観測値との比較及び EISCAT で観測した電子密度値との比較を行い、PHITS が電離圏 D 領域の電子密度を再現できるかを検証した。

研究結果

PHITS と GAIA の電子密度を用いてイオノゾンドの f_{min} 値を再現し、比較検証した（図 1）。ブラックアウトの捕捉率は PHITS : 58 %、GAIA : 35 %であり、PHITS を用いた方がイオノゾンドの f_{min} 値をより再現できた。次に、PHITS による電子密度と EISCAT の電子密度の観測値を比較した。一例として 2017 年 9 月 6 日の X9.3 クラスフレアを図 2 に示す。PHITS によるフレアピーク時の電子密度は観測値にほぼ一致した。一方、フレア発生前の電子密度は観測値に対してばらつきが大きかった。PHITS はフレア発生時の電離圏 D 領域の電子密度の再現に適応可能であることがわかった。

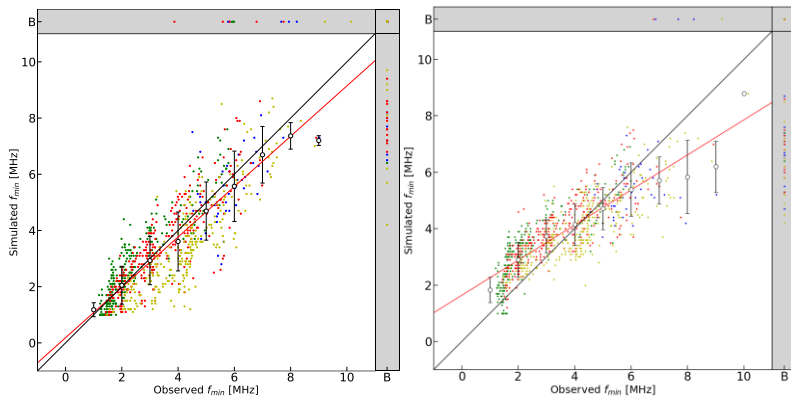


図1 $f_{\min}$ 値の予測値と実測値の比較。左図:PHITS、右図:GAIAの結果。赤実線は最小二乗法による近似直線。図中の“B”はブラックアウトを示す。

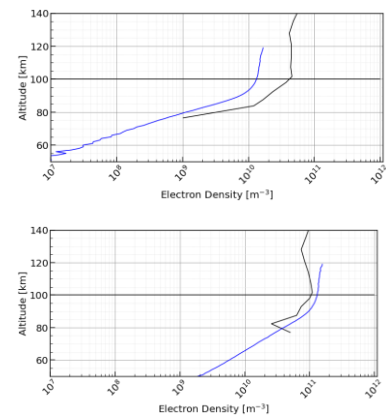


図2 フレア発生前(上図)とピーク時間(下図)における電子密度の比較。青実線:PHITS、黒実線:EISCAT。

引用文献

- (1) Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., et al., 2011, JGR, 116, A01316
- (2) Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., et al., 2024, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135
- (3) Chamberlin, P. C., Eparvier, F. G., Knoer, V., et al., 2020, Space Weather, 18, 12, SW002588
- (4) Gledhill, J. A., 1986, Radio Science, 21, 3, 399-408

成果発表

1. Shinnosuke Kitajima, Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao and Michi Nishioka, Impact evaluation of Dellinger phenomena during solar flares using GAIA model, JpGU Meeting 2023, 幕張メッセ, 2023 年 5 月 26 日
2. Shinnosuke Kitajima, Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao and Michi Nishioka, Verification of the Response of the Earth's Ionosphere by Solar Flare Spectra Using GAIA, AOGS 2023, Singapore, 2023 年 8 月 1 日
3. Shinnosuke Kitajima, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, and Kiyoka Murase, Reproduction of electron density variation in the ionospheric D region during solar flares by the PHITS and GAIA models, 第 154 回 SGEPSS 総会および講演会, 東北大学青葉山北キャンパス, 2023 年 9 月 24 日
4. Shinnosuke Kitajima, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Chihiro Tao, Michi Nishioka, and Kiyoka Murase, Validation of electron density variation in the ionospheric D region due to solar flares using the PHITS and GAIA models, AGU Fall Meeting 2023, San Francisco, USA, 2023 年 12 月 12 日
5. 北島慎之典, 渡邊恭子, 陣英克, 埜千尋, 増田智, 西岡未知, 村瀬清香, PHITS と GAIA を用いた太陽フレア時の電離圏 D 領域の電子密度の再現, 2023 年度太陽研連シンポジウム, 国立天文台三鷹キャンパス, 2024 年 2 月 20 日-22 日

エネルギーフラックス解析の海洋大循環モデルへの適用
Application of Seamless Energy Flux Analysis to Ocean General Circulation Model

寺田雄亮、東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、博士課程2年
升本順夫、東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、教授

研究目的

海洋の波動は海水の移動を伴わずにエネルギーのみが移動することで離れた場所に水温や圧力の変化を効率的にもたらすもので、熱帯域では赤道に沿って東西に伝搬するとともに深さ方向にも伝搬し、海面付近で励起された海洋波動が沈み込みながら伝搬する現象も知られている。このように海洋表層からより深い場所へ沈み込んでエネルギーを伝搬させる波動は、赤道海洋の表層より深い場所に存在する海流の駆動源であることが示唆されている。近年深さ約 1000m を漂流する Argo フロートの位置情報データにより海中の波動の存在が明らかになり始めた。しかしながら依然として深さ 1000m 以外の流速データは非常に限られているため、波動の起源を明らかにするためには海洋モデルを用いた数値シミュレーションによる研究が不可欠である。そこで本研究では Argo フロートがとらえた東赤道太平洋深さ 1000m における季節内波動に注目し、数値シミュレーションを用いて波動の詳細な振る舞いやそのエネルギー源を明らかにする。

実施内容

海洋波動によるエネルギー伝搬を扱う数値実験の準備として、名古屋大学宇宙地球環境研究所の相木秀則准教授が提案したエネルギーフラックスの定式化[1]を適用可能な海洋モデルの構築を実施した。Argo フロート観測に基づいた研究により、今回注目する東赤道太平洋深さ 1000m の南北流速変動は 30 日周期振動が支配的であることが報告されている[2]。ただ深さ 1000m 付近にそのような波動の励起源が存在しないことから、波動は海洋のより浅い場所からもたらされた可能性がある[3]。この仮説を検証するため、構築したモデルの赤道上の海面で 30 日周期の南北風強制を与える数値実験を実施した。与えた強制により赤道反対称な 30 日周期の波動が海面付近で励起され、波動がエネルギーを東向き、下向きに輸送する結果が得られた(図 1)。したがって深さ 1000m で観測された 30 日周期変動はより浅い場所で励起された波動により説明できる可能性がある。

ここで、今回の数値実験では 30 日周期の風強制を与えたが、現実で

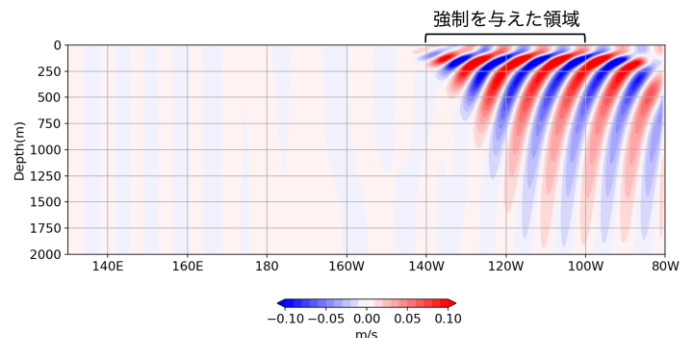


図 1 海面で 30 日周期の強制を与えた実験における積分開始後 183 日目の赤道上の南北流速

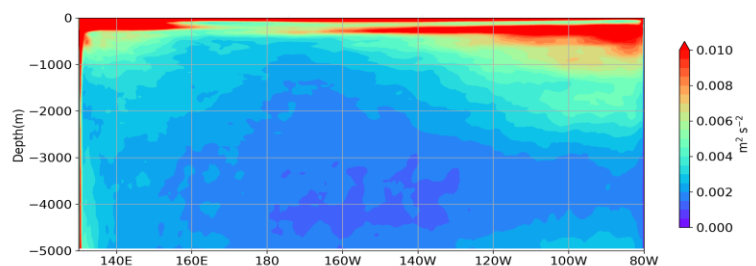


図 2 貿易風を与える追加実験で得られた積分開始後 50~100 年目の赤道、深さ-経度断面における赤道反対称波動のエネルギー分布。

はそのような顕著な海上風変動は観測されていない。代わりに 30 日周期波動を励起する可能性があるものとして表層海流の不安定が挙げられる[4]。そこで同じモデル上で海洋表層の海流系を再現する追加実験を実施した。波動を直接励起せず、かつ表層海流を駆動するために時間・東西に平均された一定の貿易風を海上に与え続け、海洋の応答を確認した。海面から深さ 200m にかけては、赤道に沿って西向きに流れる南赤道海流、東向きに流れる赤道潜流・北赤道反流が再現された。さらに表層海流系の不安定により 30 日周期の波動の励起が確認された。このような不安定現象は中央・東太平洋で発生し、そこで生じた 30 日周期の波動がエネルギーを東向き・下向きに輸送するため(図 2)、深さ 1000m では西経 140 度から東の赤道上にエネルギーが集中する分布となった(図 3a)。このような東太平洋における波動エネルギーの空間分布は Argo フロート

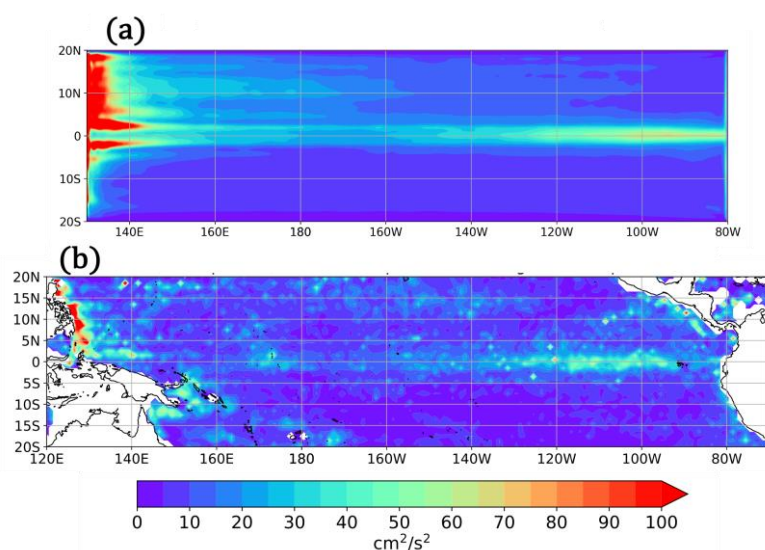


図 3 (a)追加実験における深さ 1000m での南北流速変動のエネルギー分布。(b)Argo フロートで観測された深さ 1000m における南北流速変動のエネルギー分布。

により観測された分布(図 3b)とよく一致し、その大きさも同程度であった。以上の結果は、東赤道太平洋深さ 1000m で観測された南北流速変動が、海洋表層海流の不安定により励起された 30 日周期の波動の東向き・下向きエネルギー輸送から生じることを示唆している。

各実験結果の解釈については相木准教授と議論を行い、得られた成果について 2023 年 12 月に開催された 6th ISEE symposium で口頭発表を実施した。

引用文献

- [1] Aiki et al. (2017), *Progress in Earth and Planetary Science*, 4(1), 1-18.
- [2] Delpech et al. (2020), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8), e2020JC016313.
- [3] Ascani et al. (2010), *Journal of Physical Oceanography*, 40(5), 1118-1142.
- [4] Ménesguen et al. (2019), *Earth and Space Science*, 6(3), 370-386.