

2022年度 05) 奨励共同研究 目次詳細

3 件

*所属・学年は2023年3月現在

*Affiliation and Year of graduate school displayed are current as of March 2023.

(注1): 新型コロナウイルスの影響で中止 / Cancelled due to COVID-19

(注2): 中止 / Cancelled

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	大学院博士課程	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	194	
寺田 雄亮	東京大学	理学系研究科地球惑星科学専攻	大学院修士課程	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	196	
山川 智嗣	東京大学	理学系研究科	大学院博士課程	内部磁気圏における環電流イオンによるULF波動の励起機構の研究	198	

(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・D2

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・チャウジヤ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、内部変動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、Katoh 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、中村特任助教らと議論を進めた上で得られたものである。

【成果発表】

南條壮汰, Olivier Staiger, 門倉昭, 田中良昌, 片岡龍峰, 三好由純, 中村紗都子, 小川泰信, 笠原禎也, 松田昇也, 笠原慧, 風間洋一, 横田勝一郎, 堀智昭, 松岡彩子, 桂華邦裕, Chae-Woo Jun, 篠原育, 細川敬祐, あらせ衛星, 全天カメラ, 広角デジタルカメラで捉えたサブストームオンセット直後の脈動オーロラ, 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2022 年大会, 幕張メッセ, 2022 年 5 月 25 日

南條壮汰, Olivier Staiger, Urban Brändström, 津田卓雄, 青木猛, 細川敬祐, デジタルカメラの動画撮影機能による脈動オーロラの観測例と観測計画, 名古屋大学 ISEE 研究集会「脈動オーロラ研究集会」, 名古屋大学, 2022 年 9 月 20 日

上記の発表の他に、本研究の内容をまとめた論文の投稿を行った。現在は、査読の結果を待っている。

【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>

Katoh, 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

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1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。しかしながら海中の状況は人工衛星を用いて観測することができず、実地観測の数も現状では不十分であるため、海洋内部の海流や波動の役割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。そこで本研究では赤道太平洋に注目し、数値シミュレーションを用いて海洋波動の海洋内部における波動の振る舞いを明らかにする。

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。また、モデルの計算領域としては太平洋の東西幅のみを模した矩形の領域と、西岸境界を南北方向から東西方向へ傾けたより現実的な領域の2種類を用意した。

数値実験の第一段階として、構築したモデルの海上に理想的な東西風の変動を与え、海洋の応答を確認した。東西風により励起された波動は赤道に関して対称であり、赤道に沿って東西方向に伝搬し、西向きに伝搬したものが西岸境界に到達して反射する様子が観察された。矩形領域の場合、入射してきた波動と周期が等しく、赤道に関して対称な波動が反射波として東向きに伝搬し、赤道反対称な波動はほとんど現れなかった(図1 a)。一方西岸境界が傾いた場合、西岸境界において入射波より周期が短く、赤道反対称の波動が励起され、エネルギーを効率的に沈み込ませる結果が得られた(図1 b)。

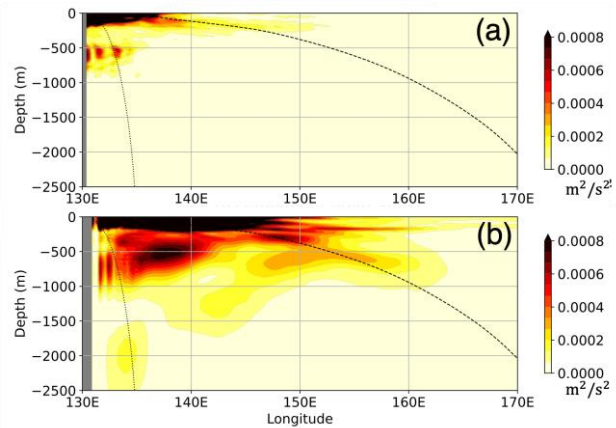


図 1 (a)矩形領域と(b)西岸境界を傾かせた場合の、赤道上の経度-深さ断面における赤道反対称波動のエネルギー分布。破線は理論に基づいた赤道反対称波動の伝播経路。130Eにモデルの西岸境界が設定されている。

このように、2種類の領域を与えた数値シミュレーションから、赤道太平洋のように西岸境界が南北方向から傾いている場合に、赤道反対称な波動が励起されやすく、エネルギーを効率的に深い場所へ伝搬させることが明らかになった。理想的な海上風の代わりに観測に基づいた現実的な風強制のもの

とで実施した数値実験でも、同様の結果が得られた。また、本研究の結果は西太平洋で実施された係留系観測[2]や深さ 1000m におけるエネルギー分布の推定[3]と矛盾しないものであった。

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 2022 年 9 月に開催された日本海洋学会秋季大会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] Zhang et al. (2020), *Journal of Physical Oceanography*, 50(4), 921-933.

[3] Delpech et al. (2020), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8), e2020JC016313.

内部磁気圏における環電流イオンによるULF波動の励起機構の研究

Study of the excitation mechanism of ULF waves by ring current ions in the inner magnetosphere

(1行スペース)

山川智嗣、東京大学・理学系研究科・博士課程3年

関華奈子、東京大学・理学系研究科・教授

研究目的

地球を取り巻く宇宙空間(内部磁気圏)における最大の変動現象である磁気嵐時には、夜側に粒子が注入され、西向き(西向き)の環電流(\sim keV)が発達する。環電流は地球の固有磁場を変化させるだけでなく、ULF波動と呼ばれるmHz帯の周波数を持つ電磁波動を励起させることがある。ULF波動は内部磁気圏最大のエネルギーを持つ放射線帯電子(\sim MeV)の加速機構にも影響を与える重要な波動だが、環電流によってどこでどのようにULF波動が励起されるのかはよく理解されていない。本研究では、数値シミュレーションを用いて、環電流起源のULF波動の励起機構・空間分布を明らかにすることを目指す。

研究手法・内容

本研究では磁気圏電離圏結合されたモデル(GEMSIS-RC + GEMSIS-POT)による数値シミュレーションを行った。GEMSIS-RCモデル(Amano et al., 2011, JGR)は、環電流イオンの旋回中心の運動と電磁場を自己無撞着に解くことのできるドリフト運動モデルである。GEMSIS-POTモデルは(Nakamizo et al., 2012, JGR)は電離圏全球を解く2次元のポテンシャルソルバーである。これらのモデルを結合させることで、夜側の粒子注入・注入された粒子の輸送・環電流の形成・環電流によるULF波動の励起という一連のプロセスをモデルで再現することができる。本研究ではこの結合モデルを用いて、夜側に粒子が注入された状態(密度2 /cc、温度10 keVのKappa分布を仮定)を初期条件として仮定し、数値計算を行い、環電流イオンによるULF波動の解析を行った。

本研究では、背景密度を与える低温粒子の運動を解くモジュールを新たに開発し、結合されたモデルに組み込んだ。低温粒子を動かさない場合(Case a)と動かす場合(Case b)、2種類のケースで数値計算を行い、シミュレーション結果の比較を行った。

研究成果

Case a(低温粒子を動かさない場合)では、メカニズムの異なる2種類のULF波動が励起されることが明らかになった。

1. 昼側で励起されたドリフト共鳴によるULF波動(2-4 mHz)
2. 夕方側で励起されたドリフトバウンス 共鳴によるULF波動(2 mHz)

先行研究(Yamakawa et al., 2020, JGR)では、電離圏と結合せずにGEMSIS-RCモデルのみ用いて、環電流によるULF波動の励起を調べたが、このときも昼側と夕方側でULF波動が励起された。ただ磁気圏電離圏結合させると、ULF波動の振幅が上昇し、モデルにおけるULF波動の記述性能が高まった。また、ULF波動の成長率に関する解析を行った結果、昼側のULF波動はイオンの位相空間密

度のエネルギー勾配が波を成長させているのに対し、夕方側のULF波動はイオンの位相空間密度の空間勾配が波を成長させていることが明らかになった。これらの研究成果をまとめた学術論文は国際誌(JGR)に採択された。

Case b(低温粒子を動かす場合)では、背景密度が時間と共に変化し、夜側でのプラズマ圏の収縮・プラズマポーズの形成がモデルで再現された。Case bでは、上記の2種類のULF波動に加えて、夜側のプラズマポーズ付近と明け方側の密度勾配が急峻な領域にULF波動が見られ、合計4カ所でULF波動が励起されることが明らかになった。これらの研究成果をまとめた学術論文は現在投稿準備中である。

成果発表 [投稿論文]

1. Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Nakamizo, A., Takahashi, N., & Yamamoto, K., Excitation of two types of storm-time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030486.

[受賞]

2. 2022年度地球惑星科学連合(JpGU)大会にて学生発表賞, 2022.05

[学会発表]

3. Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Nakamizo, A., Takahashi, N., & Yamamoto, K., Excitation of two types of storm-time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, *JpGU Meeting*, 幕張, 2022.05, 口頭
4. Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Nakamizo, A., Takahashi, N., & Yamamoto, K., Excitation of two types of storm-time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, *GEM (Geospace Environment Modeling) Meeting*, Honolulu, 2022.06, ポスター
5. Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Nakamizo, A., Takahashi, N., & Yamamoto, K., Control of the dynamics of cold particles on the excitation of ULF waves based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, *SGEPSS Fall Meeting*, 相模原, 2022.11, 口頭
6. Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Nakamizo, A., Takahashi, N., & Yamamoto, K., Effects of the dynamics of cold plasma on the excitation of internally driven ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, *ERG Science Meeting*, 金沢, 2023.03, 口頭
7. Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Nakamizo, A., Takahashi, N., & Yamamoto, K., Excitation of internally driven ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, 2022年度ISEE研究集会, オンライン, 2023.03, 口頭(招待講演)