所属・学年は2022年3月現在

2021年度 3件

研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	所属部局 Department	学年 Year	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
吹澤 瑞貴	東北大学	理学研究科	博士後期課 程3年	静電電子サイクロトロン高調波による低エネル ギー電子降下と脈動オーロラ発光	174	
平井 あすか	東北大学	理学研究科	博士後期課 程3年	あらせ衛星観測に基づくEMIC波動による放射線 帯電子散乱過程の研究	176	
西本将平	防衛大学校	理工学部地球海洋学科	博士後期課 程3年	太陽フレア放射スペクトル予測モデルの構築	180	

(別紙様式5-2)

静電電子サイクロトロン高調波による 低エネルギー電子降下と脈動オーロラ発光 Precipitation of low-energy electrons and pulsating auroral emission caused by electrostatic electron cyclotron harmonic waves

吹澤 瑞貴、東北大学大学院・理学研究科・博士課程後期3年
坂野井 健,東北大学大学院・理学研究科・准教授

【研究目的】

脈動オーロラは磁気赤道面付近で励起されたlower band chorus (LBC) 波とのサイクロ トロン共鳴によりloss coneへ散乱された数keVから数十keVの電子が電離圏に降り込み, 地球大気中粒子と衝突することで発光する. LBC 波と同様に磁気赤道面付近で励起される upper band chorus (UBC) 波と静電電子サイクロトロン高調 (ECH) 波は, LBC波より も低いエネルギーの数百eVから数keVの電子とサイクロトロン共鳴する.本研究では,オ ーロラ発光に寄与するような低エネルギー (1–10 keV) 電子のLBC, UBC, ECH波による loss coneへのピッチ角散乱が普遍的に発生しているのかをあらせ衛星によるその場観測で 得られたデータを統計的に解析することで検証することを目的とする.

【研究方法】

まず,あらせ衛星に搭載されている機上周波数分析器 (OFA) によって観測されたLBC, U BC, ECH波の振幅と,低エネルギー電子分析器 (LEPe) によって観測されたloss cone fil ling ratio (LCFR) の散布図をLEPeの観測エネルギー毎に作成した.そして,LCFR をそ れぞれの波動の振幅の関数として回帰直線を求めた.また,LCFR と波動強度のKendall の順位相関係数を求めた.そして,回帰直線の傾きが正となり,かつ相関係数が統計的に有 意な値を持つエネルギー帯をLBC, UBC, ECH波それぞれについて調べ,それぞれの波動 がピッチ角散乱に寄与するエネルギー帯を明らかにした.

また, LCFR がある閾値を超える割合をそれぞれの波動に対して求めることで,それぞれ の波動によるロスコーンへの強い拡散がどのエネルギー帯でどれくらいの頻度で発生し得 るか調査した.そして,それぞれの波動のピッチ角拡散係数を計算し,強いピッチ角散乱の 発生率が高いエネルギー帯と,ピッチ角拡散係数がstrong diffusion level を超えるエネル ギー帯を比較し,その整合性を検証した.解析期間は2017年3月24日から2020年8月31日と した.

【研究結果・考察】

LBC, UBC, ECH波の回帰直線の傾きが正であり,かつ相関係数が統計的に有意な値を持 つエネルギーは,それぞれ~2-20 keV, ~1-9 keV, ~0.1-2 keV であることが明らかとな った.この結果は,それぞれの波動がこれらのエネルギー帯で電子をロスコーンに散乱し ていることを示唆する.

また、LBC、UBC、ECH波の振幅 (B_{LBC} , B_{UBC} , E_{ECH}) がそれぞれある閾値を超えた条件下と全ての波動の振幅がある閾値を下回った条件下 (No wave) において、LCFR が0.5よりも大きくなるサンプルの割合を図1a, 1b に示す.この図から、LBC、UBC、ECH波によ



図 1 (a, b) LCFR > 0.5 となるデータ数の割合.LBC,UBC,ECH 波の振幅(*B*_{LBC},*B*_{LBC},*E*_{ECH})の条件は各パ ネルの上部に記載されている.(c, d)LBC,UBC,ECH 波のピッチ角拡散係数と strong diffusion level.

るstrong diffusion の発生割合が高いエネルギー帯は、回帰直線の傾きと相関係数の解析 からそれぞれの波動がピッチ角散乱に寄与すると示唆されたエネルギー帯とおよそ一致し ていた. さらに、先行研究でピッチ角散乱への寄与が小さいと報告されていたECH波につ いても、図2bの振幅が強い場合は 0.1 keV 付近で最もstrong diffusion の発生率が高く なっていることが明らかとなった. そして、それぞれの波動によるstrong diffusion の発 生割合が高いエネルギー帯と、ピッチ角拡散係数がstrong diffusion level を超えるエネル ギー帯がよく一致していることが確かめられた(図2c, 2d).

これらの結果を, Journal of Geophysical Research: Space Physics に投稿し,2022年3 月11日に出版された.

【研究成果】

- Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Kazama, Y., Katoh, Y., Kasahara, Y., et al. Statistical Study of Approaching Strong Diffusion of Low-Energy Electrons by Chorus and ECH Waves Based on In Situ Observations. Journal of Geop hysical Research: Space Physics, 127, e2022JA030269. https://doi.org/10.1029/2 022JA030269, 2022
- Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Kazama, Y., Kasahara, Y., Matsuda, S. et al., Pitch Angle Scattering by Electrostatic Electron Cyclotron Harmonic Wave s Based on Arase Observations. URSI GASS 2020, Online, 2021/8/31 (口頭発 表)
- Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Kazama, Y., Katoh, Y., Kasahara, Y., et a l., Statistical Study of Approaching Strong Diffusion of Low-Energy Electrons by Chorus and ECH Waves Based on In Situ Observations. *ERGサイエンス会 議*, Online, 2022/3/15 (口頭発表)

あらせ衛星観測に基づくEMIC波動による放射線帯電子散乱過程の研究 Study of radiation belt electron scattering by EMIC waves based on Arase observation

> 平井あすか・東北大学大学院理学研究科・D3 土屋史紀・東北大学大学院理学研究科・准教授

[背景]

電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動は、0.1-5Hzの周波数で左回り偏波特性を持つ電 磁波である。温度異方性を持つリングカレントイオンによって磁気赤道付近で励起され、リ ングカレントのプロトンと相対論的電子のどちらとも相互作用しうる興味深い波動の一つ である。EMIC 波動のふるまいを理解することは、内部磁気圏、特にリングカレントと放射 線帯外帯の変動の包括的な理解に寄与する。EMIC 波動による電子の散乱は、放射線帯外帯 を消失させるメカニズムの一つと考えられてきた。EMIC 波動の励起と電子の散乱に関し て二つの未解決問題がある。一つは、intervals of pulsations of diminishing periods (IPDP) の周波数上昇のメカニズムである。IPDP は磁気圏の夕方側で発生し、数 10 分から数時間 かけて周波数が上昇するという特徴を持つ EMIC 波動の一種である。先行研究では、IPDP タイプ EMIC 波動は、他の EMIC 波動より相対論的電子降下を引き起こしやすいと示唆さ れている。しかし、周波数が上昇するメカニズムと、相対論的電子降下との関係を繋ぐ答え はまだない。もう一つの問題は、EMIC 波動が相対論的電子を散乱しやすい状況についてで ある。多くの先行研究で、EMIC 波動は磁気圏の幅広いL 値、MLT 範囲で発生することが 示されている。しかし、相対論的電子降下を引き起こす EMIC 波動の特徴を統計的に調べ た研究は少ない。

[目的]

次の2つの未解決課題に取り組む。(1)IPDP タイプ EMIC 波動の発生領域の時空間変化を 解析することで、周波数上昇のメカニズムを明らかにし、相対論的電子降下と IPDP の関係 を理解する手がかりをつかむ。(2)EMIC 波動が相対論的電子のピッチ角散乱を生き起こし やすい条件を観測的に明らかにする。

[研究結果:課題(1)]

地上・衛星観測から2017年4月19日に発生したIPDPタイプEMIC波動の解析を行った。 極軌道衛星POESと地上誘導磁力計による観測は、IPDPの周波数上昇の原因は、EMIC波動の発生領域が地球向きのシフトであると示した。EMIC波動の発生領域は、プラズマポーズの位置の指標として用いられた中緯度トラフにそって内側に移動していた。これは、対流 電場の増大による発生領域の内側へのシフトを示唆している。統計解析から、IPDPの周波 数上昇は極冠電位の増大と正の相関を示した。この結果は、夕方側で発生する IPDP の周波 数上昇は EMIC 波動が発生しやすい領域であるコールドプラズマとリングカレントの重複 領域の内向きへのシフトで説明できることを表している。また、プラズマの蓄積によるプラ ズマ圏の拡大と対流電場もしくはサブストームによる誘導電場の増大は IPDP の発生に重 要なことが明らかになった。

[研究結果:課題(2)]

2016年11月1日から2018年10月31日の2年間、EMIC 波動とそれによる相対論的電 子降下の統計解析を行った。EMIC 波動は、カナダのアサバスカに設置されている誘導磁力 計で観測された。相対論的電子降下イベントは、NDK と NLK から送信され、アサバスカ で受信される VLF 帯電波により検出された。EMIC 波動の MLT 依存性は、朝側で発生頻 度が高いことを示した。一方、電子降下を伴う EMIC 波動は夕方側に局在化し、サブスト ーム中に発生することを示した。電子降下を伴う EMIC 波動は磁気嵐主相時に発生しやす く、半数以上がプラズマ圏内で発生している可能性があることが明らかになった。これらの 結果は、磁気嵐主相時かサブストーム時にリングカレントと高密度コールドプラズマの重 複領域で発生する EMIC 波動は、電子降下を引き起こしやすいことを示している。これは、 高密度プラズマ領域では EMIC 波動による電子の共鳴エネルギーが減少するという先行研 究と矛盾しない。

[考察・まとめ]

IPDP タイプ EMIC 波動の周波数上昇は、サブストームに伴う誘導電場か対流電場の増大 とそれに続くリングカレント領域の地球向きへのシフトによって引き起こされることが示 唆される。部分リングカレントの発達は、IPDP の発生に必要な前提条件である。このよう な状況は、主に磁気嵐の主相で発生する。主相では、リングカレントとプラズマ圏もしくは プラズマ圏プリュームの重複領域が形成され、それは EMIC 波動の励起と夕方側の EMIC 波動による相対論的電子のピッチ角散乱のどちらにも好都合な領域である。これが IPDP と EMIC による相対論的電子降下が磁気嵐の主相時に発生しやすい理由である。放射線帯外 帯の相対論的電子の位相空間密度の減少は、EMIC 波動の発生源領域の広がりと共鳴エネ ルギーと矛盾しないことが示された。これは、EMIC 波動が磁気嵐主相中の放射線帯外帯の 消失に寄与する可能性があることを示している。

以上の結果は、研究代表者の博士学位論文としてまとめられるとともに、下記のような学 会、論文発表として報告された。また、一連の研究に対して、日本地球惑星科学連合の学生 優秀発表賞を受賞した。

[学位論文]

Asuka Hirai, Characteristics of IPDP-type EMIC waves and their relation to relativistic electron precipitation based on ground-based and satellite observations, Doctoral Thesis, Tohoku University, 2021 [受賞]

日本地球惑星科学連合 2021 年学生優秀発表賞、2021 年 6 月 7 日

[論文]

野本博樹, 芳原容英, 土屋史紀, 平井あすか, VLF 帯送信電波伝搬の数値計算を用いた プロトンオーロラに伴う下部電離層擾乱のモデリング, 信学技報, vol. 121, no. 288, EMCJ2021-56, pp. 11-15, 2021 年 12 月

[学会発表]

- 平井 あすか, 土屋 史紀, 小原 隆博, 笠羽 康正, 加藤 雄人, 三澤 浩昭, 塩川 和夫, 三好 由純, 田 采祐, 栗田 怜, Connors Martin, Hendry Aaron, 新堀淳樹, 大塚雄一, 津川卓也, 西岡未知, 地上-衛星観測による IPDP タイプ EMIC 波動の周波数上昇に関 するイベント解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回総会・講演会, オンライン, 2021年11月1日-4日
- 2. 野本 博樹, 芳原 容英, 土屋 史紀, 平井 あすか, VLF 帯送信電波伝搬の数値計算を用いた電磁イオンサイクトロン (EMIC) 波動に伴う下部電離層擾乱のモデリング, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回総会・講演会, 2021 年11月1日-4日
- 3. 野本博樹, 芳原容英, 土屋史紀, 平井あすか, VLF 帯送信電波伝搬の数値計算を用いた プロトンオーロラに伴う下部電離層擾乱のモデリング, 電子情報通信学会, 環境電磁 工学研究会, 名古屋, 2021 年 12 月 08 日
- 4. Asuka Hirai, Fuminori Tsuchiya, Takahiro Obara, Yasumasa Kasaba, Yuto Katoh, Hiroaki Misawa, Kazuo Shiokawa, Yoshizumi Miyoshi, Chae-Woo Jun, Satoshi Kurita, Martin G Connors, Aaron Hendry, Properties of EMIC waves observed by Van Allen Probes and ground-based magnetometers during relativistic electron precipitation, JpGU Meeting 2021, オンライン, 2021年5月30日-6月6日
- 5. Asuka Hirai, Fuminori Tsuchiya, Takahiro Obara, Yasumasa Kasaba, Yuto Katoh, Hiroaki Misawa, Kazuo Shiokawa, Yoshizumi Miyoshi, Chae Woo Jun, Satoshi Kurita, Martin G Connors, Aaron Hendry, Atsuki Shinbori, Yuichi Otsuka, Takuya Tsugawa, Michi Nishioka, and Jerry W. Manweiler, The mechanism of frequency increase of IPDP type EMIC waves: event analysis of ground and satellite observations on 19 April 2017, AGU fall meeting, 13-17, Dec., 2021, New Orleans/Online
- 6. Fuminori Tsuchiya, Asuka Hirai, Yoshizumi Miyoshi, Shiokawa Kazuo, Hiroyo Ohya, Yoshiya Kasahara, Atsushi Kumamoto, Martin G Connors, Takahiro Obara, Hiroaki Misawa and Iku Shinohara, Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: Statistical analysis of sub-ionospheric VLF radio propagation and

low altitude satellite, AGU fall meeting, 13-17, Dec., 2021, New Orleans/Online

7. 平井あすか, 土屋史紀, 小原隆博, 笠羽康正, 加藤雄人, 三澤浩昭, 塩川和夫, 三好由純, Chae-Woo Jun, 栗田怜, Martin Connors, Aaron Hendry, 新堀淳樹, 大塚雄一, 津川 卓也, 西岡未知, 地上-衛星複合観測に基づく IPDP タイプ EMIC 波動の発生領域と周 波数上昇に関する解析, 太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用, オンライン, 2021 年 09 月 30 日, 招待講演

太陽フレア放射スペクトル予測モデルの構築 Construction of solar flare spectra prediction model

西本将平、防衛大学校·理工学研究科·後期課程3年 指導教員:渡邉恭子、防衛大学校·理工学研究科·准教授

研究目的

太陽フレアに伴うX線・極端紫外線(EUV)放射は、地球熱圏および電離圏の大気 を急激に電離することによって、通信障害などの宇宙天気現象を引き起こすこ とが知られている。フレア放射による地球高層大気の応答を正確に見積もるた めには、フレア放射の強度、継続時間、スペクトルを正確に把握することが重 要である。正確な太陽フレア放射スペクトルを得ることは、太陽フレア放射が 太陽地球圏環境にどのような影響を与えるのかを考える上で必要不可欠である。 そこで本研究では、太陽地球圏環境に影響を与える太陽フレア放射を決定して いるパラメータを同定するため、フレアの物理過程に基づいた太陽フレア予測 モデルの構築を目指している。本予測モデルを構築することで、定常的に得ら れている観測値を入力値として、実際は観測されていない太陽フレア放射スペ クトルを推定することができる。

研究方法

まず、太陽フレア放射スペクトルを決定するパラメータを特定するために、G OES/XRS、SDO/AIA、SDO/EVE MEGS-Aによって観測されたM3クラス以上の太 陽フレア50イベントについて、観測データの統計解析を行った⁽¹⁾。次に、統計 解析結果に基づいて、CANS1Dパッケージ⁽²⁾を用いた1次元流体力学計算とCHIA NTI原子データベース⁽³⁾を組み合わせることで、フレアループ内のプラズマの物 理過程を再現し、太陽フレア放射スペクトルを導出した^(4,5)。最後に、太陽地 球圈環境変動に影響を与える太陽フレア放射スペクトルを特定するために、上 記手法によって再現したフレア放射スペクトルを大気圏-電離圏結合モデルGAI A⁽⁶⁾に入力し、9例の大規模フレアイベントを再現した。本研究では、電離圏の 全電子数 (TEC) 変動の計算値と観測値を統計的に比較した。

研究結果

本研究の手法を用いて、太陽フレアによるTEC変動 (SITEC) を相関係数0.9以上の精度で再現することに成功した (図1)。太陽フレア放射によるTEC増大は、 波長35 nm以下の軟X線とEUV放射によって決定されることがわかった。また、 TEC増大の原因となる太陽放射は、波長1-2 nmの軟X線放射とFe XVII 10.08 n m, Fe XIX 10.85 nm, He II 30.38 nmのEUVライン放射であることがわかっ た (図2)。



引用文献

- (1) Nishimoto, S., Watanabe, K., Imada, S., et al., 2020, ApJ, 904:31
- (2) Coordinated Astronomical Numerical Software; http://www-space.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/etc/cans/
- (3) Dere, K. P., Del Zanna, G., Young, P. R., et al., 2019, ApJS, 241, 22
- (4) Kawai, T., Imada, S., Nishimoto, S., et al., 2020, JASTP, 205: 105302
- (5) Nishimoto, S., Watanabe, K., Kawai, T., et al., 2021, EPS, 73:79
- (6) Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., et al., 2011, JGR, 116:A01316

成果発表

- <u>Shohei Nishimoto</u>, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, "Validation of solar flare emission spectra and their impact on the ionosphere", JpGU Meeting 2021, Virtual, 2021 May 30 – June 6
- <u>Shohei Nishimoto</u>, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Toshiki Kawai, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, "Statistical analysis for EUV dynamic spectra and their impact on the ionosphere during solar flares", AOGS2021, Virtual, 2021 August 1 – 6
- 3. <u>西本将平</u>,渡邉恭子,陣英克,河合敏輝,今田晋亮,川手朋子,"数値モデルを用いた太陽フレア放 射による電離圏変動の検証",日本天文学会 2021 年秋季年会,京都産業大学および京都大学(オン ライン開催),2021 年 9 月 13 – 15 日
- 4. <u>Shohei Nishimoto</u>, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Toshiki Kawai, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, "Statistical study on the effect of solar flare emission spectra on the Earth's ionosphere using numerical simulations",地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, オンライン開催, 2021 年 10 月 31 11 月 4 日
- <u>Shohei Nishimoto</u>, Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Toshiki Kawai, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, "Reproducing the response of the Earth's ionosphere to solar flare emission spectra using a physical-based model", AGU fall meeting 2021, Virtual, 2021 December 13 – 17
- 6. <u>西本将平</u>,河合敏輝,渡邉恭子,今田晋亮,"数値モデルを用いた太陽フレア放射による電離圏変動 の検証",太陽研究者連絡会シンポジウム,オンライン開催,2022年2月14-17日
- 7. <u>西本将平</u>,渡邉恭子,陣英克,河合敏輝,今田晋亮,川手朋子,大塚雄一,新堀淳樹,津川卓也,西岡未知,"数値モデルを用いた太陽フレア放射スペクトルによる電離圏変動の統計解析",日本天文学会 2022 年春季年会,オンライン開催,2022 年 3 月 16 19 日