

5. 奨励共同研究 目次詳細

(所属・職名は2021年3月現在)

| 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 |
|------------------------------------|---|--------------------|------------|--------------------------------------|-----------|
| 西本 将平 | 防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工) | 理工学部地球海洋学科 | 大学院博士課程 | 太陽フレア放射スペクトル予測モデルの構築 | 195 |
| 吹澤 瑞貴 | 東北大学 | 理学研究科 | 大学院博士課程 | 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 | 197 |
| 平井 あすか | 東北大学 | 理学研究科 | 大学院博士課程 | 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 | 200 |

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2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

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、GOES/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CHIANTI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⁾。最後に、前述の手法で再現した太陽フレア放射スペクトルと観測値との比較検証を行った⁽⁵⁾。

研究結果

観測データの統計解析から、EUVフレア放射の時間発展がラインごとに異なることを確認した。特に、Feラインはフレアループの冷却に関連しており、その持続時間はフレアループの幾何学的特徴によって決定されることが分かった。したがって、太陽フレア放射スペクトルを正確に導出するには、フレアループの幾何学的特徴に応じてフレアループ内の放射プラズマの時間発展を再現することが重要である。

1次元流体力学計算とCHIANTI原子データベースを用いて、フレアループ内の放射プラズマの空間分布を含めた時間発展を再現することによって、フレア時間積分放射強度(エネルギー)(図1)と立ち上がり時間(図2)を再現することに成功した。

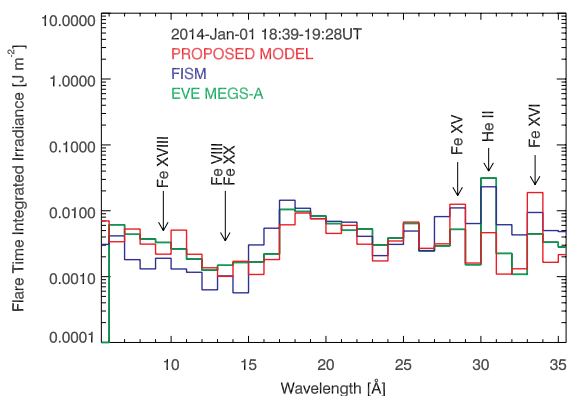


図1. 2014年1月1日に発生したM9.9クラスフレアの積算スペクトル。積算時間はフレア開始時から終了時間。

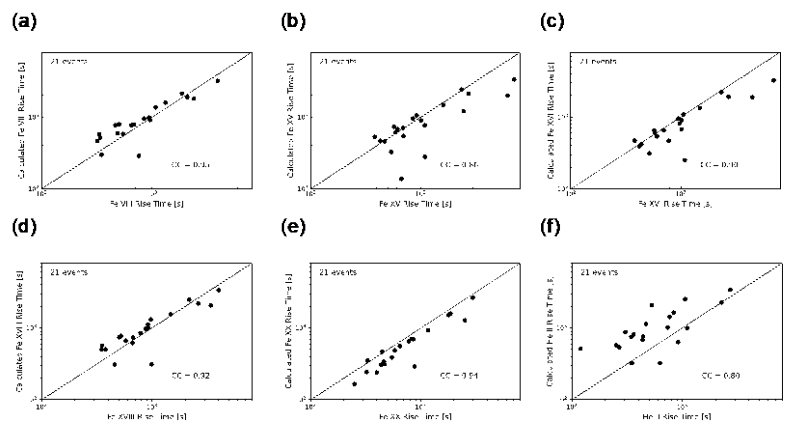


図2. 各EUVフレアライン((a) Fe VIII, (b) Fe XV, (c) Fe XVI (d) Fe XVIII, (e) Fe XX, (f) He II)の立ち上がり時間の計算値と観測値の比較。

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

成果論文

1. Kawai, T., Imada, S., Nishimoto, S., Watanabe, K., and Kawate, T. (2020) Nowcast of an EUV dynamic spectrum during solar flares. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 205:105302
2. Nishimoto, S., Watanabe, K., Imada, S., Kawate, T., and Lee, K.-S. (2020) Statistical and Observational Research on Solar Flare EUV Spectra and Geometrical Features. *Astrophysical Journal*, 904:31
3. Nishimoto, S., Watanabe, K., Imada, S., Kawate, T., and Lee, K.-S. (2021) Validation of Extreme Ultraviolet Emission Spectra During Solar Flare. *Earth, Planets and Space*, 73:79
4. Watanabe, K., Jin, H., Nishimoto, S., Imada, S., Kawai, T., Kawate, T., Otsuka, Y., Shinbori, A., Tsugawa, T., Nishioka, M. (2021) Model-based reproduction and validation of the total spectrum of solar flare and their impact on the global environment at the X9.3 event of September 6, 2017. *Earth, Planets and Space*, accepted

学会発表

1. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, Hidekatsu Jin, Kyoung-Sun Lee, “Validation of EUV dynamic spectra and their impact on the ionosphere”, JpGU Meeting 2020, Virtual, 2020 July 12 – 16
2. 西本将平, 渡邊恭子, 河合敏輝, 今田晋亮, 川手朋子, “数値モデルによる太陽フレア EUV 放射スペクトル観測の検証”, 日本天文学会 2020 年秋季年会, 弘前大学 (オンライン開催), 2020 年 9 月 8 – 10 日
3. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Toshiki Kawai, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, “Validation of Extreme ultraviolet Emission Spectra During Solar Flares”, 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, 2020 年 11 月 1 – 4 日
4. Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Shohei Nishimoto, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, “Reproduction and validation of flare spectra and their impact on the global environment at the X9.3 event of September 6, 2017”, 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, 2020 年 11 月 1 – 4 日
5. Shohei Nishimoto, Kawai Toshiki, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, “Estimation of solar flare loop length by machine learning”, 2020 AGU fall meeting, Online, 2020 December 1 – 17
6. Kyoko Watanabe, Hidekatsu Jin, Shohei Nishimoto, Shinsuke Imada, Kawai Toshiki, Tomoko Kawate, “Reproduction and validation of flare spectra and their impact on the global environment”, 2020 AGU fall meeting, Online, 2020 December 1 – 17
7. 西本将平, 河合敏輝, 渡邊恭子, 今田晋亮, “機械学習を用いたフレアループ長推定の検証”, 太陽研連シンポジウム, オンライン開催, 2020 年 12 月 21 – 22 日
8. 西本将平, 河合敏輝, 渡邊恭子, 今田晋亮, “機械学習を用いたフレアループ長の推定”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 – 19 日
9. 渡邊恭子, 荒尾宗睦, 西本将平, 峠千尋, 西岡未知, “太陽フレア放射スペクトルとデリンジャー現象の関係”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 – 19 日
10. 渡邊恭子, Louise Harra, 今田晋亮, 川手朋子, 原弘久, 清水敏文, 三好由純, 西谷望, 掘智昭, 家田章正, 河合敏輝, 陣英克, 峠千尋, 西本将平, ほか Solar-C WG, “Solar-C(EUVST)/SoSpIM の開発状況と科学課題の検討”, 日本天文学会 2021 年春季年会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 – 19 日

(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2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 (e.g., Nishimura et al., 2010)。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ことができる。Fukizawa et al. (2020)ではあらせ衛星によって観測されたLBC波とECH波がそれぞれ約9 keV以上と約5 keVの電子のloss cone外に対するloss cone内の微分フラックスの比 (loss cone filling ratio) に相関関係があるイベントが報告された。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電子の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に基づき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、UBC、ECH波の振幅と、低エネルギー電子分析器 (LEP-e) によって観測されたloss cone filling ratioの散布図をLEP-eの観測エネルギー毎に作成する。そして、loss cone filling ratioをそれぞれの波の振幅の関数とした回帰直線を求め、その傾きが正となるエネルギー帯が3つのプラズマ波で異なるか確かめることで、それぞれの波がピッチ角散乱に寄与するエネルギー帯を明らかにする。また、loss cone filling ratioがある閾値を超える割合をそれぞれの波に対して求めることで、それぞれの波によるloss coneへの強い拡散がどれくらいの頻度で発生し得るか調査する。解析期間は2017年3月24日から2020年4月18日とした。

【研究結果・考察】

磁力線平行方向と反平行方向のloss cone filling ratioをそれぞれの波の振幅の関数として求めた回帰直線の傾きのエネルギー依存性を図1に示す。この図から、それぞれの波に対する回帰直線の傾きが正となるのは、LBC波 (黒線) は数keV以上、UBC波 (青線) は数keV付近、ECH波 (赤線) は数百eVから数keVであることが分かった。この結果は、それぞれの波が一部重なりながら異なるエネルギー帯の電子をロスコーンに散乱することを示唆する。

また、図2にLBC波とECH波の振幅 (B_{LBC} , E_{ECH}) が大きい時 ($B_{LBC} > 50$ pT, $E_{ECH} > 1$ mV/m) のloss cone filling ratio (LCFR) がある閾値を超える (LCFR > 0.5 または LCFR > 0.9) サンプルの割合を示す。黒線はL値が4から6の範囲、赤線はL値が6より大き

い範囲のデータを使用した。今回の解析では、あらせ衛星による高域混成共鳴波の観測から電子密度を推定し、それぞれの波動の共鳴条件を考慮するのが難しかったため、LCFRの閾値が0.9の時は強い拡散が起きる割合が低くなっている。但し、閾値を0.5に緩めると強い拡散の発生割合は高くなった。この図から、強い拡散が起きる割合は、数百eVから数keVのエネルギー帯ではLBC波よりECH波の方が大きく、数keV以上のエネルギー帯ではECH波よりLBC波の方が大きいことがわかった。この結果は図1の結果とも整合的である。また、ECH波による強い拡散はL値が大きいところで発生する割合の方が高く、図1で回帰直線の傾きが正の値を持つ数百eVのエネルギー帯での強い拡散の発生割合は約70%であることがわかった。この結果は、ECH波がL値の大きいところで数百eV帯の電子をロスコーン内に拡散し、ディフューズオーロラ発光に寄与している可能性が高いことを示唆する。

本研究成果は、昨年度の本支援を受けて実施し今年度出版されたFukizawa et al. (2020, *Geophysical Research Letters*) の結果を支持するものであり、今後投稿論文にまとめる予定である。

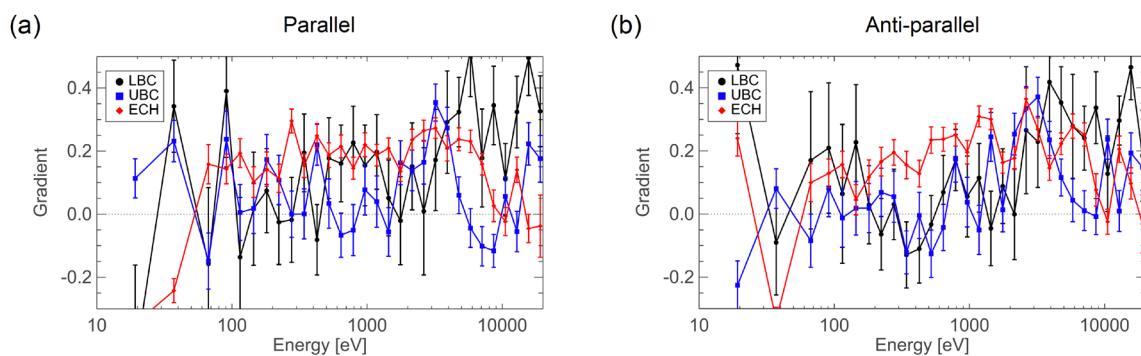


図 1 (a) 平行方向と (b) 反平行方向の loss cone filling ratio を LBC, UBC, ECH 波の振幅の関数として求めた回帰直線の傾きのエネルギー依存性。

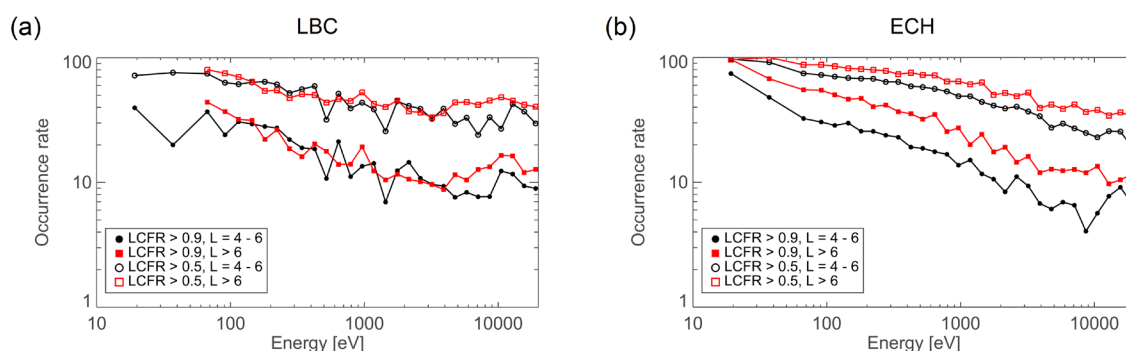


図 2 LBC 波 (左) と ECH 波 (右) の振幅が大きい時の loss cone filling ratio がある閾値 (0.5 または 0.9) を超える割合。

【引用文献】

Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Kazama, Y., Katoh, Y., Kasahara, Y., et al. (2020). Pitch-Angle Scattering of Inner Magnetospheric Electrons Caused by ECH Waves Obtained With the Arase Satellite. *Geophysical Research Letters*, 47(23), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL089926>

Nishimura, Y., Bortnik, J., Li, W., Thorne, R. M., Lyons, L. R., Angelopoulos, V., et al. (2010). Identifying the driver of pulsating aurora. *Science*, *330*(6000), 81–84. <https://doi.org/10.1126/science.1193186>

【研究成果】

Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Kazama, Y., Katoh, Y., Kasahara, Y., et al. (2020). Pitch-Angle Scattering of Inner Magnetospheric Electrons Caused by ECH Waves Obtained With the Arase Satellite. *Geophysical Research Letters*, *47*(23), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL089926>

Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Kazama, Y., Katoh, Y., Kasahara, Y., et al., Pitch-angle scattering of inner magnetospheric electrons caused by ECH waves obtained with the Arase satellite. *ERGサイエンス会議*, Online, 2021/2/10 (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・博士課程2年
土屋史紀、東北大学・大学院理学研究科・准教授

【研究目的】

地球双極子磁場に相対論的エネルギーを持つ電子が捕捉されている領域である放射線帯は、太陽風から磁気圏へのエネルギー流入により発生する磁気嵐時に劇的なフラックス変動が起こる。放射線帯電子の加速・消失過程の双方とも、メカニズムは解明途上であり、原因となる物理過程の解明に向けた国際的な研究が進行中である。この中で、磁気圏で発生するプラズマ波動である電磁イオンサイクロトロン (Electromagnetic ion cyclotron: EMIC) 波動は、相対論的電子を効果的に散乱し、大気に降下消失させるため、放射線帯外帯を消失させる要因の一つと考えられている。

申請者は、地上観測に基づき EMIC 波動と電子降下の統計解析を行ってきた。解析結果から、発達したリングカレントとプラズマ圏の重なる磁気圏夕方側の領域で EMIC 波動が励起されるとともに、電子が効率よく散乱されていることが予想される。本研究では、統計解析から予測される状況とグローバルな磁気圏の状況に矛盾がないか検証するために、統計解析で得られた EMIC 波動による電子降下イベントの中の、地上-衛星同時観測イベントの詳細解析を行った。

【研究結果】

2017年4月19日03:30UTから06:00UTにVan Allen Probe AでEMIC波動が観測された。この時間帯は小規模の磁気嵐の主相から回復相初期 (SYM- $H_{min}=-34nT$)、サブストーム中 (AE=828nT) であった。Van Allen Probe Aは19-22MLT、L=3-6に位置し、EMIC波動が観測されている間、約1-60keVのプロトンのフラックスが増大していた。UHR周波数の観測から、この時間帯Van Allen Probe Aはプラズマ圏を通過していた。これは、プラズマ圏とリングカレントが重なる領域でEMIC波動が発生していたことを示している。このとき、Van Allen Probe Aのfootprintは北米に位置し、PWINGやCARISMAの誘導磁力計でIPDPタイプのEMIC波動が観測されていた。また、標準電波観測とPOESでは高エネルギー電子降下が観測されていた。Van Allen Probe Aで観測されたEMIC波動と共鳴するプロトンのエネルギーを計算したところ、フラックスが増大していたプロトンのエネルギーと矛盾のない結果が得られた。このことから、磁気嵐中のサブストームに、プラズマ圏内に注入されたリングカレントがIPDPタイプのEMIC波動を励起し、このEMIC波動が電子降下を引き起こしたと考えられる。

今後は、プロトンのピッチ角分布について、EMIC 波動が発生している時間帯としていない時間帯で違いはあるかどうかについて、詳細解析を行う予定である。

【成果発表】

[1] 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、栗田伶、Jun Chae-Woo、Martin, Connors、Statistical study of EMIC waves and energetic electron precipitation: ground-based magnetometer and subionospheric VLF/LF radio measurements at subauroral latitude、JpGU-AGU Joint Meeting 2020, オンライン、2020年7月12-15日(ポスター)

[2] 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、栗田伶、Jun Chae-Woo、Martin, Connors、Statistical Study of EMIC Wave-Related Electron Precipitation: Ground-Based Magnetometer and Subionospheric VLF/LF Radio Measurements、VERSIM 2020 Virtual Meeting、オンライン、2020年11月17日(ポスター)