

## 5. 奨励共同研究 目次詳細

(所属・学年は2020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
岡本幸平	東京大学	宇宙線研究所付属神岡宇宙素粒子研究施設	修士課程2年	太陽観測衛星を用いた太陽フレア由来のニュートリノ探索のためのTime Windowに関する研究	207
平井あすか	東北大学	大学院理学研究科	博士課程前期2年	IPDPタイプ EMIC波動による放射線帯電子降下消失現象の解明	209
吹澤瑞貴	東北大学	大学院理学研究科 地球物理学専攻 惑星プラズマ・大気研究センター	修士課程2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	211
西本将平	防衛大学校	地球海洋学科	博士課程後期1年	太陽フレア放射スペクトル予測モデルの構築	213

和文課題名 太陽観測衛星を用いた太陽フレア由来のニュートリノ探索のための  
Time Windowに関する研究

英文課題名 Study of Time Window for searching for neutrinos associated with solar flare using solar monitoring satellite

岡本 幸平、東京大学 宇宙線研究所

## 導入・研究目的

太陽フレアによって加速された荷電粒子は太陽大気中の原子核と衝突し、電子型もしくはミュー型のニュートリノを生成する[1]。太陽フレア由来のニュートリノに関する議論は1970年代から行われている[2, 3, 4]が、これまでに太陽フレア由来のニュートリノを有意に観測した事例は報告されていない。観測されれば、粒子加速機構の理解が深まる。太陽フレア由来のニュートリノは大気ニュートリノのように幅広いエネルギーを持つため、ニュートリノ検出器での観測事象に関して、バックグラウンド事象と区別することが難しい。そこで、太陽表面で陽子加速が起こっている時間帯(Time Window)を、太陽観測衛星のX線やガンマ線の情報を用いて決定する事で、ニュートリノ観測のS/N比の向上する。すなわち、ニュートリノが生成された時刻をより正確に決定する事で、太陽フレア由来のニュートリノを検出できる可能性が高まる。本研究課題では、Super-Kamiokande[5]やIceCube[6]、KamLAND[7]等のニュートリノ検出器を用いて、太陽フレア由来のニュートリノを探索するためのTime Windowを太陽観測衛星から得られた光学的情報から決定し、太陽フレアの粒子加速機構に関する研究を推進する。

## 研究方法(太陽フレアニュートリノ探索のためのTime Window設定)

太陽フレア由来のニュートリノの生成過程は大気ニュートリノの生成過程と非常に似通っており、両者のエネルギー帯は重なっている。大気ニュートリノは定常的に観測されるイベントである一方で、太陽フレア由来のニュートリノは太陽フレアにおける粒子加速のタイムスケール程度の間だけ放出されると考えられる。従って、適切なTime Windowを設定することで太陽フレア起源のニュートリノ探索のsignal/noise比を向上させることが期待される。

本研究では、ニュートリノ探索用のTime Windowを決定するために、CIDASシステム(宇宙地球環境研究所統合データサイエンスセンター)において管理されているRHESSIとGOESの観測データを解析した。以下でそれぞれTime Windowの決定方法について述べる。

### ・軟X線、軟X線ライトカーブの時間微分(GOES)

GOESで観測された軟X線1-8Åのフラックスのピーク値は太陽フレアのクラス分けの指標として広く使用されており、 $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>以上のピーク値を持つ太陽フレアは最大規模のものであると考えられている。GOES衛星で観測される典型的な軟X線のライトカーブは図1の1段目のようになっている。本研究において対象とする太陽フレアは軟X線のフラックスが $5 \times 10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>以上のピークをもつ23個の太陽フレアを選んだ。フレアの始まりの時刻として、NOAAで定められているTime windowの始まりの時刻を、フレアの終わりの時刻として、軟X線フラックスが $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>以上を下回る最初の時刻を選んだ。

また、軟X線の情報から粒子加速と相関のある増光部分を取り出すため、軟X線ライトカーブの時間微分を用いた。本研究では、ライトカーブの時間微分をガウス関数でフィットをし、ピークの時間 $t_0$ からの領域をTime Windowとした。

### ・硬X線、ラインガンマ線(RHESSI)

RHESSIで観測された100-800 keVエネルギーを持つ光子のライトカーブをプロットし、増光が見られる直前をBack Groundとして定数フィット、増光部分を一次関数フィット、減光部分を指数関数でフィットした。フィットの結果からBack Groundと増光部分の交点を求め始点とし、また減光部分とBack Groundより $2\sigma$ 以上大きい点を求め終点とした。ラインガンマ線に関しては、2.218-2.228MeVのエネルギーを持つ光子のライトカーブをプロットし、硬X線と同様にして、ライトカーブをフィットした。中性子捕獲のタイムラグ[8]を考慮し、始点の100秒前から終点までの間をTime Windowとした。

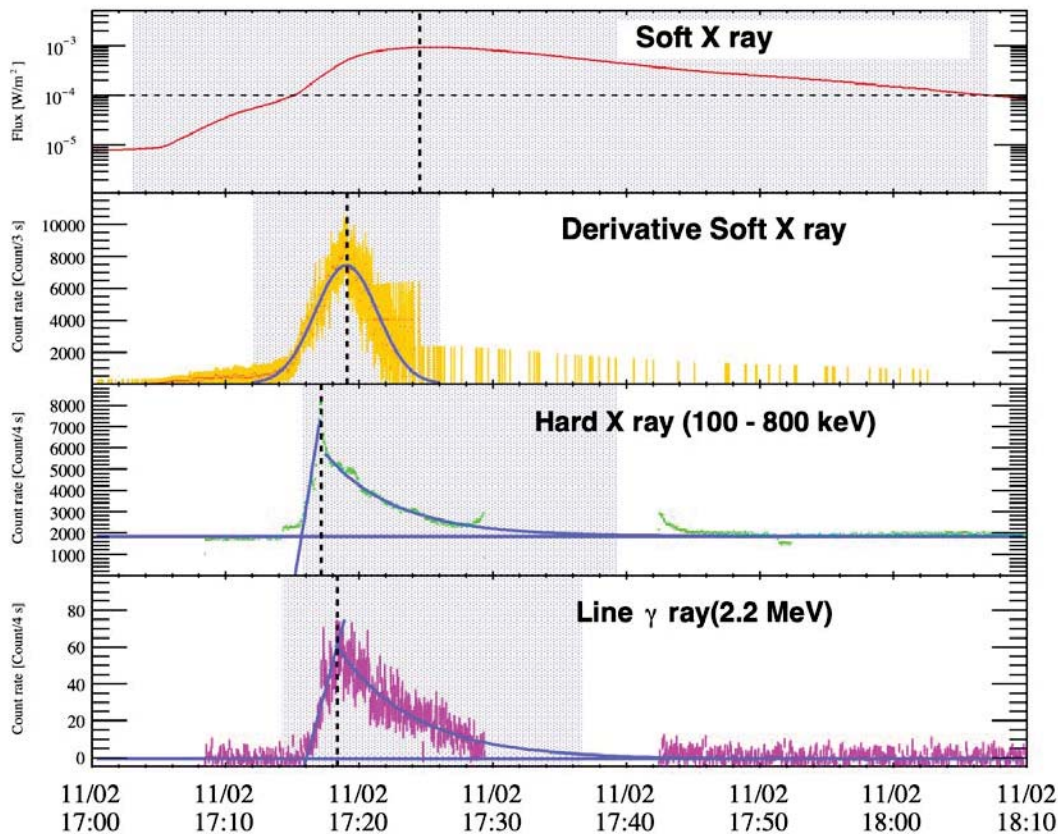


図 1:2003 年 11 月 2 日のイベントに対するライトカーブ。上から順に軟 X 線、軟 X 線の時間微分、硬 X 線、ラインガンマ線。黒の破線はピークのタイミングを表し、青線はフィットの結果を表す。灰色領域が、本研究で得られた Time Window である。

## 研究結果・今後の展望

表 1 に本研究で決定した Time Window の情報をまとめた。本研究で決定した Time Window のうち、最も短い軟 X 線の微分を用いれば、例えば SK での太陽フレアニュートリノ探索のバックグラウンド事象を 0.067 events/flare 程度にすることができる。また、Time Window の結果と決定法を合わせて論文として発表予定 (Solar Physic) である。

## 成果発表

Development of a method for determining the search window for solar flare neutrinos  
K. Okamoto et al., (Solar physics に提出中 arXiv:1909.10715)

## 参考文献

- [1] D. Fargion et al., *Astrophys. J.* 3(2003) 75-86.
- [2] R. Davis, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 32 (199) 13-32.
- [3] B. Aharmim et al., *Astropart. Phys.* 55 (2014) 1-7.
- [4] K. S. Hirata et al., *Phys. Rev. Lett.* 61 (1988) 2653-2656.
- [5] Y. Fukuda et al., *Nucl. Instrum. Meth. A*501 (2003) 418-462.
- [6] A. Achterberg et al., *Astropart. Phys.* 26, 155 (2006).
- [7] A. Gando Phys. et al., *Rev. Lett.* 117, 109903 (2016)
- [8] W. Q. Gan, *The Astrophysical Journal* 496 (2) (1998) 992.

IPDPタイプEMIC波動による放射線帯電子降下消失現象の解明  
Radiation belt electron precipitation  
caused by IPDP-type EMIC waves

平井あすか、東北大学・大学院理学研究科・博士課程1年  
小原隆博、東北大学・大学院理学研究科・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にあり、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。電磁イオンサイクロトロン波動 (Electromagnetic ion cyclotron: EMIC) 波動は、磁気圏で発生するプラズマ波動であり、放射線帯電子を効果的に散乱し、大気に降下消失させることが、衛星や地上観測で明らかにされている (Miyoshi et al. 2008他)。EMIC波動は磁力線に沿って磁気圏まで伝搬することができ、地上でPc1地磁気脈動として観測される。近年の観測から、1時間で0.1から1.2Hz程度周波数が上昇する、Intervals of pulsations of diminishing periods (IPDP) タイプのEMIC波動が効果的に電子を降下させることが示唆されている (Hendry et al. 2016他)。しかしIPDPと電子降下との因果関係およびそのメカニズムは明らかにされておらず、これらを解明することによって、放射線帯消失現象に対するEMIC波動の寄与について、理解が進むことが期待される。本研究では、電子を効果的に散乱させ得るEMIC波動が、どのような状況で発生するかを明らかにすることを目的にし、EMIC波動とそれに伴う電子降下現象の統計解析を行った。

【研究方法】

本研究では、2016年11月から2018年12月の期間の地上観測データを用い、電子降下に関連するEMIC波動の統計解析を行った。EMIC波動はアサバスカ (カナダ) に設置されている誘導磁力計 (PWING) により観測された。EMIC波動イベントの同定を客観的に実施するために、Bortnik et al. (2007)による波動自動検出アルゴリズムを用いた。当初は、解析対象とするEMICイベントをIPDPタイプに制限する計画であったが、IPDPタイプのEMIC波動が特に強い電子散乱を引き起こすことを予言する理論研究は今日まで知られていない。このため、本研究ではまずすべてのEMIC波動イベントを解析対象とすることにした。

電子降下イベントは、VLF/LF帯標準電波観測から検出を行った。米国のNDKから25.2k Hz、NLKから24.8kHzの電波が送信されており、アサバスカに設置されている電波受信機でそれらの信号が受信される。電波の伝搬経路上の電離圏下部で発生した電離現象を捉えることができ、100keV以上の電子降下を検出可能である。EMIC波動により散乱された電子の降下のみを検出するために、EMIC波動の出現と時間的対応のある受信信号の変化のみを、イベントとして検出した。

## 【研究結果】

約2年の統計解析期間で、999例のEMIC波動イベントを検出した。そのうち23例で、電子降下イベントが発生していた。EMIC波動の発生頻度のローカルタイム分布では、朝側で発生頻度が高くなる結果が得られた。一方、電子降下を伴う23例では、全て夕方側から真夜中のローカルタイムで発生していた。地磁気活動度とEMIC波動発生頻度のローカルタイム分布を比較すると、AL指数やSYM-H指数が低いほど、夕方側で発生頻度が高くなった。また、解析期間を磁気嵐の各相に分類しEMIC波動の発生頻度を調べたところ、電子降下を伴う23例のEMIC波動イベントは、それ以外のイベントに比べて、磁気嵐の主相中に発生しやすいことが示された。これらの結果から、夕方側で発生するEMIC波動は、磁気嵐やサブストームの地磁気擾乱時に発生しており、電子降下を引き起こすEMIC波動も同様に夕方側で、特に磁気嵐の主相時に発生しやすいことがわかった。

理論研究から、プラズマ密度の高い領域では、EMIC波動と相互作用する電子の共鳴エネルギーが減少することが示されている (Summers and Thorne, 2003他)。本研究の結果と理論研究から、EMIC波動が電子を効果的に散乱し、大気に降下させるためには、磁気嵐やサブストーム時に、プロトンがプラズマポーズの内側まで注入され、発達したリングカレントとホットなプロトンが同じ領域に存在することであると予想される。この予想が確かかどうかを調べるために、衛星データを用い、プラズマポーズの位置を確かめてイベントを分類するとともに、リングカレントプロトンのピッチ角分布を調べる予定である。

## 【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、Martin, Connors, Statistical study of IPDP type EMIC wave-related electron precipitation at subauroral latitude、日本地球惑星科学連合 2019 年大会、幕張、千葉、2019 年 5 月 29 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、Martin Connors、Statistical study of EMIC wave-related electron precipitation at subauroral latitude、第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、熊本市国際交流会館、熊本、2019 年 10 月 23 日 (ポスター)

[3] A. Hirai, F. Tsuchiya, T. Obara, Y. Kasaba, Y. Katoh, H. Misawa, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, S. Kurita, M. Connors, Statistical study of EMIC wave-related electron precipitation at subauroral latitude, AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, U.S., 10 December 2019 (ポスター)

[4] 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、Martin, Connors, Spatial and temporal characteristics of EMIC wave-driven energetic electron precipitation from ground-based observations, PSTEP-4 & ISEE-2、名古屋大学坂田・平田ホール、名古屋、2020 年 1 月 28-30 日 (ポスター)

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1年  
坂野井 健、東北大学大学院・理学研究科・准教授

### 【研究目的】

脈動オーロラとは数秒から数十秒の周期をもって明滅を繰り返すオーロラであり、数keVから数十keVの高エネルギー電子が磁気赤道面で励起されたコーラス波と呼ばれるプラズマ波動と相互作用することによって電離圏に降り込み、オーロラを発光させていることが先行研究により示されている (Miyoshi et al., 2015; Nishimura et al., 2010)。一方、コーラス波以外のプラズマ波動としては、静電電子サイクロトロン高調 (ECH) 波という静電波が数百eVから数keVの低エネルギー電子を電離圏に降り込ませることができる。Fukizawa et al. (2018)では衛星によって観測されたECH波と地上全天カメラによって観測された脈動オーロラ発光の強度の時間変化に相関があるイベントが報告された。本研究では、ECH波によりオーロラ発光に寄与するような低エネルギー電子が電離圏に降り込んでいるかを人工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】

ECH波によって低エネルギー電子が磁気赤道面付近から電離圏に降下しているかを確認するため、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ECH波と、低エネルギー電子分析器 (LEP-e) によって観測された電離圏に降下するロスコーン内の電子フラックスの間で相互相関係数を計算し両者の関係を調べた。

### 【研究結果・考察】

図1(a) 内の赤線はECH波強度を、図1(b) 内の赤線はコーラス波強度の時間変化を示す。図1(a)、1(b) 内の青線はどちらも4.8 keVのロスコーン内の電子フラックスを示す。この期間のECH波との相互相関係数は0.42であるのに対して、コーラス波は-0.053であり、ECH波の方が相対的に大きく統計的にも有意であった。他のエネルギーに対しても相互相関係数を計算した (図1(c))。その結果、ECH波は約5 keVの電子を、コーラス波は約9 keVの電子をロスコーン内に散乱し電離圏に降下させていることが示唆された。

OFAによって観測されたECH波が5 keVの電子をロスコーン内に拡散することができるかを調べるために、ピッチ角拡散係数を計算した。その結果、電子温度を1 eV、ECH波の伝搬角を $87.5^\circ$  という条件下において、5 keVの電子に対するピッチ角拡散係数が他のエネルギーのピッチ角拡散係数よりも大きくなり、今回の解析結果を説明することができることが分かった。また、LEP-eによって観測された5 keVの電子フラックスは明るさ約4 kRのオーロラ発光に寄与することがモデル計算により確かめられた。

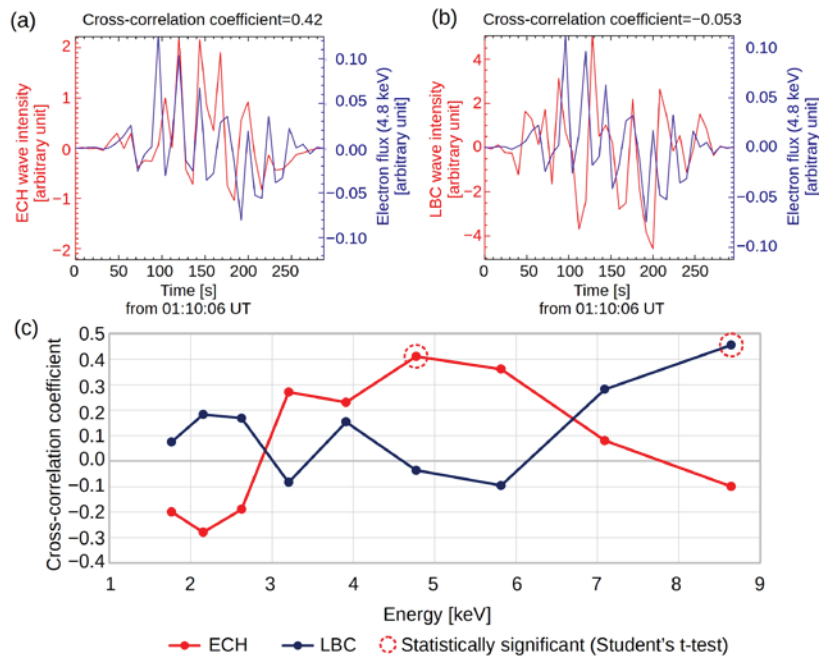


図 1 (a) ECH 波強度 (赤線) と 4.8 keV のロスコーン内の電子フラックス (青線)。 (b) コーラス波強度 (赤線) と 4.8 keV のロスコーン内の電子フラックス (青線)。 (c) ロスコーン内の電子フラックスと ECH 波との相互相関係数 (赤線) およびロスコーン内の電子フラックスとコーラス波との相互相関係数 (青線)。

#### 【引用文献】

- Fukizawa, M., Sakanoi, T., Miyoshi, Y., Hosokawa, K., Shiokawa, K., & Katoh, Y. (2018). Electrostatic Electron Cyclotron Harmonic Waves as a Candidate to Cause Pulsating Auroras. *Geophysical Research Letters*, 45(12), 661–668. <https://doi.org/10.1029/2018GL080145>
- Miyoshi, Y., Saito, S., Seki, K., Nishiyama, T., Kataoka, R., Asamura, K., et al. (2015). Relation between energy spectra of pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler-mode chorus waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1–9. <https://doi.org/10.1002/2015JA021562>.
- 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】

M. Fukizawa, T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Kazama, Y. Kasahara, S. Matsuda, S-Y. Wang, and S.W.Y. Tam, Low Energy Electron Precipitation Caused by Electrostatic Electron Cyclotron Harmonic Waves Based on Arase Observations, AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2019/12/13 (poster)

(他、口頭発表1件、ポスター発表2件)

# 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1年  
指導教員：渡邊恭子、防衛大学校・理工学研究科・准教授

太陽フレアにおいては、マイクロ波からガンマ線まで、様々な電磁波の増光が観測される。これらの放射のうち特にEUVやX線は、地球電離圏の電子密度を急激に変化させ、通信障害現象であるデリンジャー現象を引き起こすことが知られている。このためデリンジャー現象の予測にはこれらの電磁波の観測が必要であるが、EUV領域のスペクトル観測は観測機器が運用されていた期間に限られている。最近では、SDO/EVE MEGS-Aが2010年4月から観測を始めたが、CCDの電源の故障により2014年5月に観測を終了している。このように太陽フレアのEUV放射スペクトルデータは限られており、デリンジャー現象の予測には用いることができないため、常に観測されているX線の観測データなどから太陽フレア放射スペクトルを再現する予測モデルが構築されている。現在、最も広く使用されているモデルはFlare Irradiance Spectral Model (FISM)<sup>(1,2)</sup>であるが、FISMは経験則に基づいたモデルであるため、フレア放射の物理過程を理解することはできない。そこで本研究では、太陽フレア放射の物理過程が明確な数値計算モデルを用いて太陽フレアスペクトルの予測モデルの構築を目指している。

我々のモデルでは、CANS1Dパッケージ<sup>(3)</sup>を用いた1次元流体力学計算とCHIANTI原子データベース<sup>(4)</sup>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て太陽フレアEUV・X線放射を求めている(以下、CANS+CHIANTI)<sup>(5,6)</sup>。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33イベントについて、このCANS+CHIANTIを用いて太陽フレア放射スペクトルを求め、観測値との比較を行った。まずスペクトルの比較を行ったところ、CANS+CHIANTIの計算結果は太陽フレア発生時のEUV放射の時間積算スペクトルをよく再現していた(図1)。また、いくつかのEUVラインの立ち上がり時間についても調べたところ、良い相関が得られていた。FISMで予測精度が低い140Å以下の波長のEUV放射エネルギーを観測値と比較した結果、FISMは観測値の半分以下のエネルギー量であったが、CANS+CHIANTIは観測値をよく再現していることが分かった(図2)。以上の結果より、我々のCANS+CHIANTIのモデルは、観測されたEUV放射スペクトルを良く再現していることが分かった。

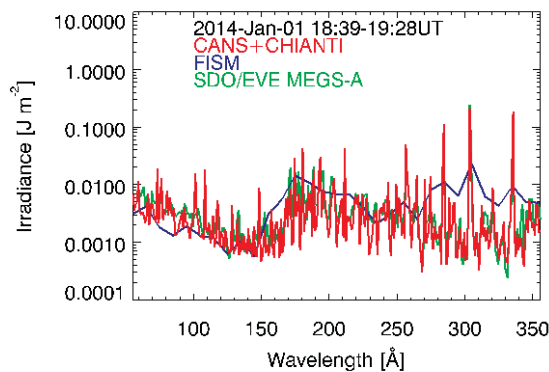


図1 2014年1月1日に発生したM9.9クラスフレアの積算スペクトル。  
積算時間はフレア開始時から終了時間。

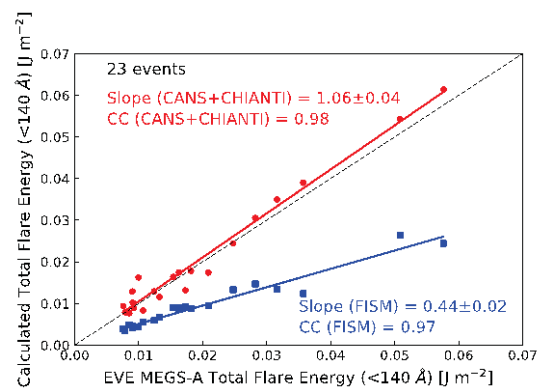


図2 フレアにおけるEUV放射エネルギー(<140Å)の数値計算モデル(CANS+CHIANTI, FISM)の値と観測値(SDO/EVE)との比較。



## 参考文献

- (1) Chamberlin, P. C., Woods, T. N. & Eparvier, F. G., 2007, *Space Weather*, 5, 7, S07005
- (2) Chamberlin, P. C., Woods, T. N. & Eparvier, F. G., 2008, *Space Weather*, 6, 5, S05001
- (3) Coordinated Astronomical Numerical Software; <http://www-space.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/etc/cans/>
- (4) Dere, K. P., Del Zanna, G., Young, P. R., et al., 2019, *ApJS*, 241, 22
- (5) Imada, S., Murakami, I., & Watanabe, T., et al., 2015, *Physics of Plasma*, 22, 101206
- (6) Kawai, T., Imada, S., Nishimoto, S., et al., 2020, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, under review

## 成果発表

1. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Statistical and observational research of solar flare for constructing total emission spectra prediction model", JpGU Meeting 2019, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2019 May 26 – 30
2. Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Shinsuke Imada, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Statistical and Observational Research of Solar Flare Spectra for Total Emission Spectra Prediction Model", AOGS 16th Annual Meeting, Singapore, 2019 June 28 – August 2
3. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Construction of Solar Flare EUV Emission Spectral Prediction Model", East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas, Nagoya University, 2019 July 29 – August 2
4. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Construction of Solar Flare EUV Emission Spectral Prediction Model", Hinode-13, The University of Tokyo, Japan, 2019 September 2 – 6
5. 西本将平, 渡邊恭子, 今田晋亮, 河合敏輝, 川手朋子, Kyoung-Sun Lee, "太陽フレア EUV 放射スペクトル予測モデルの構築", 日本天文学会 2019 年秋季年会, 熊本大学黒髪キャンパス, 2019 年 9 月 11 – 13 日
6. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Statistical and Observational Research of Solar Flare EUV Spectra and Geometrical Features for Predicting Total Flare Emission Spectra" 2019 AGU fall meeting, San Francisco, USA, 2019 December 9 – 13
7. Shohei Nishimoto, Kyoko Watanabe, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, "Validation of EUV dynamic spectra during solar flare", PSTEP-4, Nagoya University, Japan, 2020 January 28 – 30
8. Kyoko Watanabe, Shohei Nishimoto, Shinsuke Imada, Toshiki Kawai, Mitsuru Matsumura, Tomoko Kawate, Kyoung-Sun Lee, Hidekatsu Jin, "Solar flare EUV spectra and effect to the Earth's atmosphere", PSTEP-4, Nagoya University, Japan, 2020 January 28 – 30
9. 西本将平, 渡邊恭子, 今田晋亮, 河合敏輝, 川手朋子, Kyoung-Sun Lee, "観測データを用いた太陽フレア多波長スペクトルモデルの検証", 太陽研連シンポジウム, 国立天文台, 2020 年 2 月 17 - 18 日
10. 西本将平, 渡邊恭子, 今田晋亮, 河合敏輝, 川手朋子, Kyoung-Sun Lee, "観測データによる太陽フレア EUV 放射スペクトルモデルの検証", 日本天文学会 2020 年春季年会, 筑波大学筑波キャンパス, 2020 年 3 月 16 - 19 日