

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17622

研究課題名(和文) 太陽コロナの光子計測撮像に向けた裏面照射型CMOS検出器の開発研究

研究課題名(英文) Research and Development of Backside Irradiated CMOS Detector for Photon-Counting Imaging of Solar Corona

研究代表者

渡邊 恭子 (WATANABE, Kyoko)

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・応用科学群・講師)

研究者番号：10509813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽コロナに存在すると考えられている加速域を直接観測可能な「光子計測撮像」型の太陽X線望遠鏡を構築するために必要な「裏面照射型CMOS検出器」の実現に向けて、本検出器に必要な性能をこれまでの観測から見積もる研究を行った。加速域を観測する軟X線に近い極紫外線を観測している紫外線分光装置を用いて、リムフレアを中心に解析を行ったところ、すでに他論文で報告済み(Imada et al., 2013)の1例しか加速域付近を捉えておらず、統計研究は不可能であった。そこで、他のフレア放射(白色光や硬X線、紫外線)の統計解析よりフレアで加速される粒子の流量の見積もりを行い、粒子加速発生時のフレアの特徴を得た。

研究成果の概要(英文)：Toward the realization of the "backside illuminated type CMOS detector" necessary for constructing a "photon-counting imaging type" solar X-ray telescope capable of directly observing the particle acceleration region considered to be present in the solar corona, we performed a study to estimate the performance required for this detector from previous observations. We analyzed limb flares observed by the Hinode/EIS that observes extreme ultraviolet close to soft X-rays that can be observed the acceleration region. However, there is only one flare event that observed near the acceleration region, and which was already reported in other paper (Imada et al., 2013). Therefore, we estimated the intensity of accelerated particles during solar flares statistically by using other flare radiation (white-light, hard X-ray, ultraviolet), and obtained the flare characteristics at the time of particle acceleration.

研究分野：太陽物理

キーワード：太陽フレア 粒子加速

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽フレア現象中における粒子加速機構について理解することは、天文学上で観測されている数多くの粒子加速現象のメカニズム解明に繋がるため、きわめて重要である。しかし今まで太陽では、硬 X 線や電波などの、主にフレア加速粒子が加速域から離れた密度の高い領域などで二次的に発生した放射の観測を用いて研究が行われており、いつ・どこで・どのように粒子が加速されているのか、その粒子加速現象自体の観測はなされていない。

(2) 研究代表者はこれまでに、太陽中性子や硬 X 線・核線、そして可視連続光といった加速粒子が周辺大気と相互作用することによって生成した現象を用いて粒子加速機構に迫る研究を行ってきた。しかしその過程で、いつ・どこで・どれだけ粒子がどのように加速されているのか、これらの物理量を得るためには、どうしてもモデルやシミュレーション計算を用いる必要があり、観測のみからではこれらの値が取り出せないことが分かった。

(3) もし粒子加速が発生している加速域自体を観測することができれば、モデルやシミュレーション計算における初期条件や背景パラメータを、観測から一意に決めることができると考えられる。加速域自体は太陽コロナに存在していると考えられており、その太陽コロナは軟 X 線で観測することができる。しかし、太陽コロナの活動はとても活発であるため、密度の薄い加速域を観測するためには、幅広いエネルギー感度とダイナミックレンジを持った X 線検出器が必要である。

(4) 加速域自体を観測できる能力を持つ次世代の太陽観測用 X 線望遠鏡として計画されているのは、太陽の加速域から放射される X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを測定することで、太陽コロナのプラズマの情報をそのまま取得することができる「光子計測撮像」型の太陽 X 線望遠鏡である。この望遠鏡は、時間・空間・波長とすべてに対して、太陽フレア粒子加速の物理情報を引き出すために十分な分解能を持ち、またこれらの情報を同時に取得することを目標にした、今までの太陽 X 線望遠鏡や紫外線分光装置とは異なる、まったく新しい装置である。

(5) 本研究では、太陽コロナ観測用の「光子計測型 X 線望遠鏡」に向けた「裏面照射型 CMOS 検出器」の開発のために、検出器の X 線への応答を正確に把握するとともに、「光子計測型 X 線望遠鏡」実現に向けた技術課題を洗い出す。特に放射の弱い加速域における X 線放射量の見積もりと、フレアループからの強い放射による検出器のダメージについての見積もりを行う。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、太陽コロナ観測用の「光子計測型 X 線望遠鏡」に向けた「裏面照射型 CMOS 検出器」の開発のために、検出器の X 線への応答を正確に把握するとともに、「光子計測型 X 線望遠鏡」実現に向けた技術課題を洗い出すことが目的である。

(2) まず、本研究で用いる検出器に必要な性能は次の通りである。

- A. 0.5-10keV の X 線に感度を持つ
- B. ピクセルサイズは 10 ミクロン程度
- C. 512×512 ピクセル程度の領域をデッドタイムなしで 1 秒間に 1000 回露出

まず観測エネルギー範囲は 0.5-10keV であるが、これらのエネルギーを X 線光子 1 つ 1 つについて記録するため、常に広範囲のエネルギー感度を有する観測装置となる。0.5keV は活動領域の観測、また 10keV はフレアの観測をターゲットとしている。この装置は 10keV まで観測できることから、10keV 以下に存在すると言われている (Tanaka, 1987; Hannah et al., 2008; Imada et al., 2011 など) フレアにおける熱的・非熱的プラズマの境界を観測できる初めての観測装置となる。次に空間分解能は光学系とマッチさせ、角度分解能として 0.5 秒角程度になるように、ピクセルサイズを 10 ミクロン程度以下とする。また、焦点面検出器のピクセル数を 512×512 程度とすることにより、太陽活動領域の大きさに匹敵する広い範囲の太陽面像の撮像を可能にする。最後に、1 秒間に 1000 回という高速読み出しを行うことにより、観測対象からの放射によるパイルアップを防ぎ、時間スケールの短い現象を詳細にとらえることができる。以上により、太陽コロナで発生している現象を「広視野」で「長時間・空間分解能」を持って観測でき、かつ「エネルギースペクトル」を「一度に」得られるという、他に例のない新しい装置となる。

(3) 加速域の加速粒子を観測するためには、その放射を観測するために必要なデータを取得するための所要時間などをあらかじめ見積もっておく必要がある。また、加速域はフレア上空のコロナのリコネクション点から主ループまでのどこかに存在していると考えられるが、この領域からの放射はかなり弱いため、加速域観測時における放射の強い主ループからの検出器への影響も見積もっておかなければならない。これらの情報を見積もるために、既存のひので衛星や SDO 衛星搭載の紫外線撮像装置を用いて観測された太陽フレアデータを統計的に解析する。フレア時において、加速域とフレア主ループの極紫外線強度比の平均とばらつきを押さえ、これを軟 X 線域で予想される強度比に焼き直すことにより、CMOS 検出器に必要な感度と与えるダメージが評価できる。

3. 研究の方法

(1) 「光子計測撮像」型の太陽 X 線望遠鏡を開発するために必要な高速・低ノイズ・X 線分光性能を有する「裏面照射型 CMOS 検出器」の実現に向けた開発研究を行う予定であった。そのためにまずは、CMOS 検出器の駆動評価、読み出しノイズ・ダーク等の特性を把握する実験を行い、また X 線ビームラインも用いて CMOS 検出器の X 線感度ならびに X 線耐性について評価を行う予定であった。

(2) しかし、上記の開発実験については、「裏面照射型 CMOS 検出器」が当初購入予定であった e2v 社から販売されなかったため、購入できなかった。また、同等の性能を持った他社製品が平成 28 年度に発売されたが、本研究費では購入不可能な額であった。そのため、他社同等製品は他資金で購入することとし、本研究費では検出器の性能評価のために必要な関連する実験機器の購入を行った。他社製品の納入が平成 29 年度末となったため、機器の性能実験を平成 29 年度中に始めることができなかった。そのため性能評価実験は平成 30 年度以降に引き続き行わせていただく。

(3) 一方、本検出器で加速域近傍を観測するために必要な感度と、観測時におけるフレア主ループからの明るい X 線が CMOS 検出器に与えるダメージの程度を評価するために、既存の観測データを用いて統計研究を行う。今までにひので衛星搭載の各機器や SDO 衛星により、非常にたくさんの太陽フレア現象が観測されている。これらの大量の観測データから効率よくフレア上空のコロナが観測されているデータを得るために「ひのでフレアカタログ(Watanabe et al., 2012)」を用いて、ひので衛星搭載の極紫外線撮像分光装置(EIS)で観測されたデータの抽出を行う。EIS のデータは 1 枚のイメージを取得するために数分にわたるスキャンを行っているため、フレア現象中に EIS のデータが存在していても、そのデータの中にリコネクション点や加速域を含む領域が含まれているかどうかは目で見てすぐに判断はできない。そこで、時間分解能が良いフィルターデータ(「ひので」/XRT や SDO/AIA の X 線・紫外線データ)とも比較を行い、EIS データに加速域を含むフレア上空のコロナが含まれているか否かの判定を行う。

(4) 前述の判定を行った結果、フレア上空のコロナが、どのデータにも明確には含まれていない、またはかなりイベントが少数である可能性がある。イベントが少数であった場合は、今後発生する太陽フレアイベントにおいて、EIS で加速域を観測できる観測プランを立案し、その観測を行うことで観測イベント数を増やす。

(5) フレア上空のコロナを観測できている個々イベントについては、その観測データを詳細に解析してゆく。各観測ラインにおけるスペクトル変化を用いて、リコネクション点から主ループまでの領域において周囲と異なる物理量の挙動を示す場所を探索し、そこが加速域である可能性を検討する。加速域が特定された領域においては、その電子密度変化を得ることによって加速粒子量も見積もる。

4. 研究成果

(1) 太陽フレア現象中で発生している粒子加速機構を明らかにするため、太陽コロナに存在していると考えられている加速域を直接観測することができる「光子計測撮像」型の太陽 X 線望遠鏡を開発することを最終目標として、本望遠鏡を構築するために必要な高速・低ノイズ・X 線分光性能を有する「裏面照射型 CMOS 検出器」の実現に向けた機器の開発実験と、加速域を観測するために検出器に必要な性能をこれまでの観測から見積もる研究を行った。

(2) 軟 X 線に近い極紫外線を観測している紫外線分光装置(「ひので」/EIS)を用いて、主ループからの影響が少ないリムフレアを中心に解析を行った。「ひので」/EIS が観測した M クラス以上のリムフレアは、2010 年 2 月から 2016 年 3 月の間に 28 例あった。SDO/AIA の高速撮像動画より、加速域付近と考えられる領域を EIS が実際に観測していたのは (Imada et al., 2013, ApJL, 776, L11 にて報告済みの) 1 例だけであった。このため、加速域の放射量を統計的に見積もることは、今回の研究では残念ながらできなかった。今後は、C クラスフレアなどの規模の小さなフレアについても調べ、また 2016 年 3 月以降に発生したフレアイベントについても調べることにより、EIS で加速域付近が観測されているイベントを見つけたい。

(3) 上記のように、紫外線分光装置による加速域付近の観測が得られなかったため、従来同様の、加速粒子が周辺大気と相互作用することによって生成した現象を用いて、フレアで発生している加速粒子の量を見積もる研究についても行った。また、各フレア(主ループ)からの紫外線放射強度について見積もる研究も行った。この紫外線放射強度と太陽フレアの規模や構造との関係性を調べることによって、検出器にダメージを与える放射量をフレアごとに見積もることができる。

(4) まずは、フレアで加速された粒子の量を見積もるために、白色光フレアという可視連続光の増光が観測される太陽フレアを用いて、フレアの軟 X 線や硬 X 線放射、そして紫外線放射との比較を行った。

(5) 「ひのでフレアカタログ」より、Mクラス以上の規模の大きなフレアについて、「ひので」/可視光望遠鏡(SOT)の可視連続光バンドで観測されていたイベントを調べたところ、「ひので」の観測開始から2016年2月までの間に101例あった。そのうち白色光の増光が確認された白色光フレアイベント(WLF)は49例、「ひので」/SOT・SDO/HMIどちらでも白色光の増光が見られなかった非白色光フレアイベント(NWL)は52例であった。まず、これらのWLFとNWLFのフレア継続時間を調べたところ、WLFの継続時間がNWLFと比べて明らかに短いことが分かった。次にWLFとNWLFの温度とエミッションメジャーの関係を調べたところ、WLFはNWLFより温度が高く、エミッションメジャーが小さい傾向があった。この関係より、WLFの加速域の磁場はNWLFより強いことが示唆された。次に、これらのイベントにおけるフレアリボン(SDO/AIA 1600)のサイズとリボン間距離、フレアリボン下の光球磁場強度について調べたところ、フレアリボンサイズは太陽フレアの規模とほぼ一致しており、リボン間距離はWLFの方が短い傾向が見られた。また、光球磁場強度はWLFとNWLFで特に違いはなく、光球磁場強度はあまり白色光の発光に影響していないことが分かった。

(6) 先行研究より、白色光フレアは硬X線と良く相関していることが知られているため、RHESSI衛星の硬X線データとの関連性も調べた。上記の101例の観測イベントのうち、27例のイベントがRHESSIでも50keV以上の硬X線を伴って観測されていた。このうちWLFは17例、NWLFは10例であった。各フレアにおける硬X線の全エネルギーを調べたところ、平均でNWLFよりもWLFの方が大きいことが分かった。また、観測された硬X線の全エネルギーと太陽フレアの継続時間を比較したところ、WLFとNWLFの間に境界線があることが確認された。この結果は、単位時間当たりの加速電子の注入率(impulsivity)が白色光増光を発生する条件のひとつになっていることを示している。

(7) 白色光だけでなく、太陽フレアの激しさの指標(impulsivity)とCME発生率との関係性についても検証を行った。長寿命フレアと関連性を指摘されているCMEの発生は、impulsivityとの関係は見られなかったが、太陽フレアの規模と継続時間との関係性が見られた。これより、CMEの発生率はGOESの光度曲線の情報からほぼ見積もれることになる。

(5) また、どのような特徴を持つ太陽フレアが、どのようなX線や紫外線を発生するのか、その特徴を見積もる研究も行った。まず、太陽フレアの多波長スペクトルを観測データから統計的に見積もった。その結果、多くの

紫外線放射は線放射強度変化とほぼ同様の変動を見せたが、その紫外線放射を生成しているプラズマの温度によって変動に時間差が見られた。また、軟X線放射とは全く異なる硬X線放射と似た時間変動をする紫外線放射も多くあることが分かった。太陽フレアやそれを発生した黒点の幾何学的な様相が太陽フレアスペクトル変動に与える影響についても統計的に解析した。まず、フレア発生時の黒点の面積とその種類、そして太陽フレアの規模や発生率との関係を調べたが、これらの間に明確な関係性は見られなかった。次に、フレアリボンの長さとりボン間距離について調べたところ、どちらも太陽フレア放射の継続時間に影響していることが分かった。以上の観測結果をもとに、太陽フレア放射を再現する数値計算モデルを構築した。フレアループが長い場合(ループ半長:52,000km)、短い場合(ループ半長:5,200km)、一般的な長さの場合(ループ半長:26,000km)について計算したところ、フレアループが長いフレアについてのみ、観測された紫外線放射の強度と時間発展をおおむね再現することに成功した。今後は、この数値計算モデルより、個々のフレアの放射スペクトルを再現可能なパラメータを導出し、得られた放射の検出器への影響を検証していく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Watanabe Kyoko, Kitagawa Jun, Masuda Satoshi, Characteristics that Produce White-light Enhancements in Solar Flares Observed by Hinode/SOT, The Astrophysical Journal, 850, 204, 2017 DOI: 10.3847/1538-4357/aa9659(査読有)

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda and Masanori Ohno, Capability of the accelerated protons as the origin of white-light emission of solar flare, Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), 2017, (査読無), <https://pos.sissa.it/301/,id.150>

[学会発表](計20件)

渡邊恭子、山寄一弘、有馬伸、堀巖允、増田智、太陽フレアのimpulsivityと白色光・CMEとの関係II、日本天文学会2018年春季年会、2018年

渡邊恭子、山寄一弘、有馬伸、堀巖允、増田智、白色光フレア・CMEの発生条件と太陽フレア放射の関係、太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」、2018年

渡邊恭子、フレア：粒子加速研究からの観点、太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」、2018年

Kyoko Watanabe, Kazuhiro Yamazaki, Shin Arima, Yoshimasa Hori, Satoshi Masuda, Solar flare impulsivity and its relationship with white-light flares and with CMEs, 2017 AGU Fall Meeting, 2017

渡邊恭子、沼田広葵、Kyoung-Sun Lee、太陽フレアにおける彩層応答と白色光放射との関係、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Masanori Ohno, Capability of the accelerated protons as the origin of white-light emission of solar flare, AOGS 14th Annual Meeting, 2017

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Masanori Ohno, Capability of the accelerated protons as the origin of white-light emission of solar flare, 35th International Cosmic Ray Conference, 2017

Kyoko Watanabe, Shin Arima, Yoshimasa Hori, Satoshi Masuda, Solar flare impulsivity and its relationship with white-light flares and with CMEs, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017

渡邊恭子、増田智、大野雅功、白色光フレアにおける白色光発光の起源についての検証、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Masanori Ohno, Statistical approach for the origin of white-light emission of white-light flares, Hinode-10, 2016
Kyoko Watanabe, Hinode Flare Catalogue and Solar Flare Activities in Solar Cycle 24, AOGS 13th Annual Meeting, 2016

Kyoko Watanabe, Characteristics that Produce White-Light Enhancements in Solar Flares Observed by Hinode/SOT, AOGS 13th Annual Meeting, 2016

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Masanori Ohno, Statistical approach for the origin of white-light emission of white-light flares, 15th RHESSI Workshop, 2016

Kyoko Watanabe, Solar white-light flares, Superflares on Solar-type Stars and Solar Flares, and Their Impacts on Exoplanets and the Earth, 2016

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, A Statistical Approach to a Better Understanding of the Conditions that Produce White-Light Enhancements in Solar Flares Observed by Hinode/SOT, 2015 AGU Fall Meeting, 2015

渡邊恭子、原弘久、坂東貴政、勝川行雄、清水敏文、浦山文隆、木本雄吾、宮崎英

治、美浦由佳、太陽観測衛星「ひので」搭載装置の飛翔中における感度変化と次期太陽観測衛星 Solar-C のアウトガス対策、2015 年

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, A Statistical Approach to a Better Understanding of the Conditions that Produce White-Light Enhancements in Solar Flares Observed by Hinode/SOT, Hinode-9, 2015

渡邊恭子、増田智、白色光増光現象を引き起こす太陽フレアの特徴、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年

Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Jun Kitagawa, Characteristics that enhance white-light emission in solar flares, AOGS 12th Annual Meeting, 2015
Kyoko Watanabe, Satoshi Masuda, Jun Kitagawa, Characteristics that enhance white-light emission in solar flares, Japan Geoscience Union Meeting 2015, 2015

〔その他〕

ひのでフレアカタログ

https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/flare_catalogue/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 恭子 (WATANABE, Kyoko)

防衛大学校・応用科学群・講師

研究者番号：10509813