

(別紙様式1)

※	受理年月日	年 月 日
※	申請番号	

平成23年度名古屋大学太陽地球環境研究所  
「地上ネットワーク観測大型共同研究(重点研究)」申請書

平成23年 2月 1日

ふりがな いちもと きよし

研究代表者 氏 名 一本 潔

所属機関・部局・職名 京都大学・理学研究科附属天文台・教授

所在地 〒506-1314 岐阜県高山市上宝町蔵柱

電話 : 0578-86-2311 FAX : 0578-86-2118

e-mail : ichimoto@kwasan.kyoto-u.ac.jp

1. 研究所担当教員	増田 智
2. 関連するプロジェクト(平成23年度は、右の2プロジェクトのみ公募)	<input type="checkbox"/> 太陽活動の地球環境への影響の研究 <input checked="" type="checkbox"/> 実証型ジオスペース環境モデリングシステム(GEMSIS) : 宇宙嵐に伴う多圏間相互作用と粒子加速の解明にむけて
3. 研究課題名	和文 可視光高速撮像観測によるフレア粒子加速の研究 英文 Study of particle acceleration in solar flares with a high speed imaging observation in visible light
4. 研究組織 (右欄に記入しきれない場合は、別紙を添付して下さい。)	氏名・所属機関・部局・職名 一本 潔・京都大学・理学研究科附属天文台・教授 永田伸一・京都大学・理学研究科附属天文台・助教 仲谷善一・京都大学・理学研究科附属天文台・技術職員 石井貴子・京都大学・理学研究科附属天文台・研究員 川手朋子・京都大学・理学研究科附属天文台・大学院生D3 浅井歩・京都大学・宇宙総合学研究ユニット・特定助教 増田智・名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授 草野完也・名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授 山本哲也・名古屋大学・太陽地球環境研究所・研究員 簗島敬・海洋開発研究機構・地球内部ダイナミクス領域・研究員 渡邊恭子・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト・研究員 横山央明・東京大学・大学院理学系研究科・准教授

(注) ※は記入しないで下さい。所属・職名の記入は略称を用いないこと。

5. 研究目的（学術的背景、目的、予想される結果と意義、関連する国際研究プログラム（CAWSES-II、ISWIなど）との関係を簡潔に記述してください）

スペース・地球環境に甚大な影響を及ぼす太陽フレアの研究において、高エネルギー粒子の加速メカニズムは最大の課題である。フレアで解放される1次エネルギーの大きな部分が高エネルギー粒子の加速に使われることから、粒子加速メカニズムの解明はフレア爆発の解明と同義であるといっても過言ではない。粒子加速は広くスペースサイエンスや天文学に於いても非常に重要な問題であるが、太陽フレアは、粒子加速が発生するグローバルな磁場配位やプラズマ環境を、3次元的な構造の時間発展として詳細に調べることができるという点で、粒子加速問題の解明にとっては格好の実験室を提供するものである。フレアに伴う硬X線や電波放射は多数の短時間バーストから構成される。このことは粒子加速が間欠的な現象であることを物語っている。一方彩層のフレアリボンは多数の特に明るい輝点（フレアカーネル）から構成され、それらが次々と光って空間的・時間的に急速に発達していく。フレアカーネルはコロナで加速されたフレアの高エネルギー粒子が太陽面に突入した場所であり、間欠的な粒子加速を起こした個々の磁力線の足元と考えられる。

今日太陽フレアに伴う高エネルギー粒子の診断には、主として高エネルギー粒子が背景プラズマと衝突して放出する硬X線での撮像分光観測と、磁場の中でのジャイロシンクロトロン放射による電波の干渉計観測がある。空間分解能を伴った観測として前者ではRHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscope Imager) 衛星、後者では国立天文台野辺山電波ヘリオグラフがある。これらの観測によりフレア高エネルギー粒子のエネルギー分布や時間的振る舞いなどの全貌が明らかになりつつあるが、共に空間分解能が十分でないためにその詳細な構造は見えておらず、またダイナミックレンジの不足から非常に明るいコア構造のみしか観測されていないのが実情である。一方、ひので衛星はX線望遠鏡、紫外線撮像分光望遠鏡および可視光望遠鏡を搭載し、高い空間分解能のフレア観測を可能としたが、データ量の制約から時間分解が悪いために(>20秒)フレアの爆発的な時間発展を捉えることができない。また視野も限られているため、いつどこで発生するか予測の難しいフレアをその中に捉えるのも簡単ではない。

本研究は地上望遠鏡の利点を生かし、可視光においてフレアカーネルの時間発展を高速かつ高空間分解能で撮像することで、フレア加速粒子の空間的・時間的発展を詳細に捉えようとするものである。光の波長はフレアカーネルの見やすい水素のH $\alpha$ 輝線と647nmの連続光、時間分解能30ミリ秒、視野350秒角 x 260秒角、空間分解能0.6秒角であり、上記の高エネルギー粒子観測の短所を十分に補うものとなっている。N極とS極に対応するフレアカーネルの発光の同時性から、高エネルギー粒子が注入された磁気ループの繋がりを同定し、そのわずかな時間差から加速粒子が注入されるループ内での位置に関する情報を得る。そして、次々と異なる場所で発光するフレアカーネルの時間的な発展から、コロナにおける高エネルギー粒子の注入領域の時間的推移を捉える。また連続光でも同時に撮像することにより白色光フレアの検出も行う。白色光フレアはエネルギーのとくに高い粒子に起因していると考えられるため、その診断に有用であるが、一方で連続光の発光メカニズムがまだ解明されておらず、本研究では高い空間分解能と時間分解能を生かしてこの長年の謎にも挑戦する。さらにフレアを発生する活動領域のベクトル磁場を、広い視野(45° x 340°)、高い感度、高い時間分解能(~30秒)で同時に取得し、それを境界条件としたコロナの3次元磁場のモデリングをおこなって、フレアカーネルの観測から推定された磁力線の接続情報との比較研究を行う。

以上の解析から得られる知見、すなわち加速粒子の注入位置の情報は、コロナにおける高エネルギー粒子の輸送モデルを介して、粒子の加速領域の特定につながる。これにより、これまで提案されてきた様々な加速機構(電流シート加速や、リコネクションに伴う乱流・衝撃波加速など)を観測的に検証することが可能になるため、その意義は極めて大きい。また、コロナの3次元磁場構造の中における粒子加速領域の時間的推移の情報は、磁気リコネクション領域の空間的伝搬、さらにはフレアのエネルギー解放機構の解明に繋がるものである。フレアに先行するわずかな増光現象をこれまでにない空間+時間分解能で捉えることにより、フレアのトリガメカニズムに対する新たな手がかりを得ることができる。

本研究の撮像観測で得られるデータは、サーバーを介して研究の構成員および外部研究者が共有し、ひので、野辺山電波ヘリオグラフ、RHESSI、SDO (Solar Dynamic Observatory) 等のデータとの比較による、より総合的なフレア粒子加速の探求を推進する。本研究は日本の高エネルギーフレア粒子の問題に取り組む主要なメンバーが揃い、異なるアプローチを結集するもので、太陽フレアのエネルギー蓄積過程、トリガ機構、エネルギー解放過程、粒子加速過程を統一的に理解することを目標に掲げるGEMSIS-太陽プロジェクトの重要な一翼を担うものと期待できる。また、フレアで発生した高エネルギー粒子が飛来すると、宇宙飛行士の被曝や人工衛星障害といった甚大な被害をもたらすことから、フレアの粒子加速研究は宇宙天気研究にとってきわめて重要かつ緊急の課題である。この意味で本研究は、CAWSES-II、なかでも、「太陽の短期変化がジオスペース環境に与える影響(タスクグループ3)」に関する国際共同研究プログラムを強く推進するものである。

6. 研究計画（研究目的を達成するための研究計画・方法、本研究所の教員も含めた参加者の役割分担、他の経費との関連について簡潔に記述してください）

本研究で実施するH $\alpha$ /連続光高速撮像観測と高精度ベクトル磁場観測は、京都大学理学研究科附属飛騨天文台の太陽磁気活動望遠鏡（SMART、下図）を用いて行う。SMARTは4連の屈折望遠鏡（口径20cm x2, 口径25cm x2）で、そのうちの1つは現在H $\alpha$ 線で太陽全面の速度場観測を定常的に行っている。本研究の高速撮像観測は口径25cm望遠鏡の光学ベンチに新たに撮像光学系を設置することにより実現する。一方高精度ベクトル磁場の観測はもう一つの25cm望遠鏡で行うが、これは科研費（基盤B、H20-H22、代表：永田）によってすでに開発を進めてきたものである。



図1. SMART望遠鏡

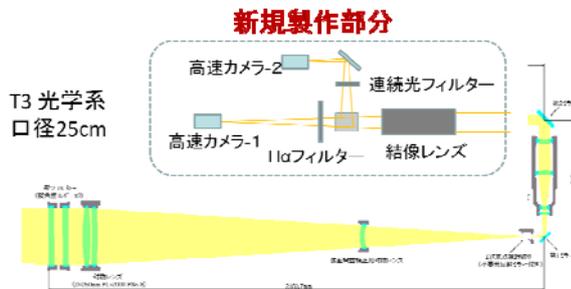


図2. 高速撮像システム

H $\alpha$ /連続光高速撮像システムは、光を2つの撮像系に分けるビームスプリッター、H $\alpha$ と連続光（647nm）の多層膜バンドパスフィルター、および2台の高速CCDカメラ（1600x1200画素）から構成され、これを25cm望遠鏡（T3）の光学ベンチに搭載する。視野は350" x260" をカバーし、30フレーム/秒で2つの波長の画像を同時に取得する。H $\alpha$ のフィルターは透過幅5Åのものを採用するため、純粋な彩層画像は得られないが、同時に取得した連続光画像を差引くことによりH $\alpha$ 線の積分強度に対応する画像を得ることになる。露出時間は1msec程度が見込まれる。これは大気の揺らぎ（シーイング）の時定数よりも十分に短いため、スペックル像再生処理を施すことにより、回折限界の解像度（ $\sim 0.6$ 秒角）を達成する。画像データは望遠鏡タワー下の観測室に設置する観測制御計算機にて連続的に保存する。このとき発生するデータ量は1時間当たり1TB、一日に7 $\sim$ 8TBと膨大なものとなるが、フレアが発生している時間帯以外のデータを棄却することにより、現実的なデータ量に抑える計画である。フレアを常に待ちかまえて高速に高分解画像のデータを取得するという試みは世界にも例がなく、ユニークなデータを提供するものである。

一方高精度ベクトルマグネトグラフは、現在調整の最終段階にあり、今年の春から定常運用を開始する予定である。この装置はひのでの可視光望遠鏡やSDO/HMI に対して、高い検出限界（測光精度 $3 \times 10^{-4}$ ）と時間分解能（ $\sim 30$ sec）を有することを特徴としており、これによって活動領域の磁場構造の発達過程をより詳細に捉えることができる。

SMART望遠鏡は晴天時には定常的に観測を行う。飛騨天文台における昼間の晴天率は年平均するとおよそ30%であるが、過去の太陽活動期におけるフレアの統計と望遠鏡稼働率を考慮すると、C5クラス以上のフレアが年間80イベントほど観測されることが期待できる。これから高速撮像観測によって取得されるデータ量は圧縮後に年間およそ7TB、またベクトル磁場データも数TBが見込まれる。京都大学附属天文台ではこれまで花山天文台に設置したデータサーバーにSMARTのH $\alpha$ 全面画像を蓄積し、公開しているが、今後のデータ発生量に対応するために本計画ではデータ蓄積装置の増強（16TB）をおこなう。取得されたデータはほぼ1日の遅れでネットワークを介して本研究の参加者が共有できるようにする。

得られた大量の画像データは、まずフレアイベントの抽出を行い、フレアをカバーする時間帯のデータについて、連続光画像を用いてシーイングの補正処理等をおこなった後、連続光画像を差し引くことによってH $\alpha$ 画像の時系列を生成する。この自動イベント抽出とデータの1次処理システムの整備は、本計画の正否を握る重要な部分である。詳細なデータ解析はこうして得られた良質なフレアのデータセットについて集中的に行うことになる。

## 6. 研究計画 (続き)

2 リボンフレアの画像データからは、次々と増光するフレアカーネルの時間的・空間的發展を詳細に追跡し、N極とS極のフレアカーネルの同時性から、高エネルギー粒子が注入された磁気ループの同定を行い、また増光のわずかな時間差から加速粒子が注入されたループ内の位置を推定する。このとき高エネルギー粒子の速度が光速の1/3とすると、30ミリ秒の時間分解能から約3000kmの精度で位置を決めることが可能である。また、各カーネルのペアに対するフレアループがフレアの進展に伴ってどのように順次励起されていくのか、コロナにおける高エネルギー粒子の注入領域の時間的推移とともに、連鎖的な磁気リコネクションの発達過程を捉える。

ひのでやSAMRTで同時に取得された光球のベクトル磁場を境界条件として、コロナ磁場の3次元モデル(フォースフリー磁場)を構築し、カーネルから推定される磁場の接続状態との比較を行う。ここで、フレアカーネルのペアとフォースフリー磁場のループの両足元が一致していれば、さらに磁場の3次元モデルを使って高エネルギー粒子の輸送問題を解くことにより、粒子の注入位置から加速領域の特定に迫る。このときSDO/AIAの紫外線高解像撮像データによるコロナ形態の時間的發展を、コロナの3次元磁場モデルと比較し、さらにひので/EISのコロナの分光データを使って粒子加速領域におけるプラズマの運動を調べることにより、磁気リコネクションの裏付けをおこなう。一方、もしフレアカーネルのペアとフォースフリー磁場のループの足元が系統的に異なることが発見されれば、これは高エネルギー粒子の輸送過程に関して新たな問題を提起するものであり、さらにその探求を進めることになる。

リムに近いところで発生したフレアについて連続光の増光が認められた場合、H $\alpha$ カーネルと位置の詳細比較をおこない、白色光フレアの高さの同定を行う。カーネルの重心位置は空間分解能0.6秒=430kmの数分の1の精度で求めることが可能である。これによって白色光がフレアによる彩層の圧縮領域(H $\alpha$ 放出領域)から出るのか、もっと下の光球から出るのか、という長年の論争に決着を付け、その結果に基づき高エネルギー粒子との関係を吟味する。それには多数のフレアについてRHESSIの像合成をエネルギー帯で分割して行い、最も時間と位置が連続光カーネルと合うエネルギー帯を調べることにより、白色光フレアが高エネルギー電子起源だとしたときの白色光フレアを起こす電子のエネルギー帯を特定し、白色光フレアの発生メカニズムを探る。さらにひのでによるGバンドフレアと連続光画像を比較することにより、これまでGバンドのデータで議論されてきた「白色光」フレアに関する研究結果の妥当性を検証する。

野辺山電波ヘリオグラフで観測している電波は、磁場に捕捉された電子による放射である。H $\alpha$ の高時間・高空間分解能のデータにおいてフレアの足元で彩層に衝突する変動と電波観測を比較することで、磁場に捕捉された電子と磁場に捕捉されなかった電子、一旦捕捉された後フレアの足元へ落下した電子のそれぞれの数を時間毎に見積もることが出来る。それによりフレアループのロスコーン、電子のピッチ角分布の初期状態とその変動を理解することが出来る。電子のピッチ角分布は太陽フレアの粒子加速メカニズムに大きく関係し、粒子加速問題を解く鍵となり得る。

SMARTによる初期撮像データが蓄積された頃、S T E 研にて本研究の参加者によるデータ解析ワークショップをおこない、初期成果及び今後の研究の進め方について討議する。

以下本計画の役割分担である。

- |                               |          |
|-------------------------------|----------|
| ・高速撮像装置の製作                    | 一本、仲谷    |
| ・高速撮像観測制御システムの構築              | 川手、石井    |
| ・ベクトルマグネトグラフの運用、磁場データの取得      | 永田、一本    |
| ・データ蓄積装置の設置とデータベースの整備         | 石井、永田    |
| ・H $\alpha$ 、連続光画像データの解析ソフト整備 | 川手、石井    |
| ・コロナ磁場のモデリング                  | 草野、山本    |
| ・高エネルギー粒子の輸送モデリングによるデータ解釈     | 簗島、横山、川手 |
| ・野辺山電波ヘリオグラフ、RHESSIとの比較研究     | 増田、川手    |
| ・SDO/AIA、ひのでEIS/XRT データとの比較研究 | 浅井       |
| ・ひのでSOT-Gバンド画像との比較研究          | 渡邊       |

尚、本研究課題の一部(高速撮像装置の製作)に係る費用については科研費若手研究(B)にも申請中である(代表:石井貴子、総額3,000千円)。

7. 準備状況

SMART望遠鏡は2005年より定常運用を行っており、本計画の要である高速撮像観測を実施するための設備は整っている。また、H $\alpha$ と647nm連続光の撮像を行うための光学系の設計および結像性能の評価はすでに完了しており、H22年度には連続光のフィルターを使って試験的な撮像を行い、良質な画像の撮れることを確認した。またベクトルマグネトグラフもSMART望遠鏡に搭載され、最後の調整を進めているところである。

光球磁場データからコロナ磁場を導出するモデリングは、草野がすでに多くの実績を上げており、また山本はGEMESISプロジェクトの一環として、ひのでのベクトルマグネトグラフを用いて3次元コロナ磁場モデルのデータベース構築を進めているところである。高エネルギー粒子の輸送モデリングについては、簗島がブラソフ方程式に基づいたシミュレーションコードを開発し、フレアにおける高エネルギー粒子の時間発展を議論している<sup>1)</sup>。このように、得られた観測データからフレア磁場及び高エネルギー粒子の振る舞いをモデリングし、その物理的な解釈を通じて加速メカニズムを探求する準備は整っている。

本研究で野辺山電波ヘリオグラフ、ひのでの、SDO、RHESSI等のデータ解析を担当する参加者は、それぞれ各データ解析に精通しており、本研究を進める上で支障はない。中でも浅井ら(2003)はXクラスフレアのH $\alpha$ 画像を用いてカーネルのペアを抽出する手法を確立し、紫外線画像によるコロナループとの比較研究を行っている。また渡邊ら(2010)<sup>3)</sup>はひのでの可視光望遠鏡のGバンド画像を用いて「白色光」フレアとRHESSIデータの比較を行い、「白色光」が40keV以上の高エネルギー電子とよく相関していることを見いだした。本研究は純粋な連続光でフレアを捉えてこれを検証するもので、解析の準備はすでに整っている。

研究代表者である京都大学の一本と名古屋大学の増田、草野は本計画についてすでに綿密な打ち合わせを行っており、また共同研究者も全員本研究に参加する強い意欲があり、これを遂行する準備は整っている。

<sup>1)</sup> Minoshima, T., Masuda, S., Miyoshi, Y., 2010, "Drift-kinetic Modeling of Particle Acceleration and Transport in Solar Flares", ApJ, 714, 332

<sup>2)</sup> Asai, A., Ishii, T.T., Kurokawa, H., Yokoyama, T., Shimojo, M., 2003, "Evolution of Conjugate Footpoints inside Flare Ribbons during a Great Two-Ribbon Flare on 2001 April 10", ApJ, 586, 624

<sup>3)</sup> Watanabe, K., Krucker, S., Hudson, H., Shimizu, T., Masuda, S. and Ichimoto, K., 2010, "G-band and Hard X-ray Emissions of the 2006 December 14 Flare Observed by Hinode/SOT and RHESSI", ApJ, 715, 651

8. 必要経費	金額(千円)
旅費(行先、おおよその日程、人数など)	
飛騨天文台一名古屋、2011年度前期2泊3日、3名	120
2011年度後期5泊6日、3名	246
京都一名古屋、2011年度前期2泊3日、3名、	114
2011年度後期5泊6日、3名	240
東京一名古屋、2011年度前期2泊3日、3名、	147
2011年度後期5泊6日、3名	273
設備備品費(品名(型番)、数量など)	
高速カメラ(Prosilica GE1660)、2台	1,400
観測用制御計算機(カスタムPC)、一台	400
データ蓄積装置(ニューテック NUP1T16SA3U/LU16T)、1台	1,230
消耗品費(品名、数量など)	
光学部品(ビームスプリッター、フィルター)、各1個	300
機構部品(光学レール、ホルダー等)、一式	500
合計	4,970

