

学位審査報告書

（ふりがな） 氏名	かわて ともこ 川手 朋子
学位（専攻分野）	博士（理学）
学位記番号	理博第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
（学位論文題目） Observational Study of Particle Acceleration in Solar Flares （太陽フレアにおける粒子加速現象の観測的研究）	
論文調査委員	（主査） 一本 潔 教授 北井礼三郎 准教授 柴田 一成 教授

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	川手 朋子
------	---------	----	-------

論文題目	Observational Study of Particle Acceleration in Solar Flares
------	--

(論文内容の要旨)

太陽フレア爆発において最も重要な問題の一つに非熱的粒子の加速現象がある。本研究の目指すところは、その解明に向けて太陽フレアにおける粒子加速メカニズムに対して観測的制約条件を与えることである。申請論文ではとくに電子のピッチ角 (磁場と加速電子の速度のなす角度) に関する研究と、電子のエネルギースペクトルのべき指数に関する研究を行った。

太陽フレアにおけるマイクロ波帯電波放射は加速された高エネルギー電子によるものである。電子は光速の数分の1の速度でコロナ中の磁場にトラップされており、相対論的效果によって電子の運動方向に放射が集中する。従って観測される電波放射は電子の運動方向と観測者の視線方向に強く依存する。その変動から電子のピッチ角分布を考察するものが本研究の目的である。ピッチ角分布は初期加速メカニズムに対して強い制限を与えることが出来る。Center-to-Limb variation とは太陽中心から太陽のふちまでフレアの発生場所によってその見え方に変動があることである。本研究では国立天文台野辺山観測所の電波ヘリオグラフによって1996年から2009年に得られた約800個のフレアデータを用いて、17GHzおよび34GHzの周波数帯でフレア放射の統計解析をおこなった。そのうち、フレアの継続時間と、電波放射後の彩層蒸発による軟X線の量、つまりどの程度熱化されたか、という尺度でフレアを分類した。その結果、全フレアの集団でCenter-to-Limb variationは確認されなかった。しかし、熱化された量が大きく、かつフレアの継続時間の短いフレアにおいては、電波強度や電波のべき指数にCenter-to-Limb variationが存在した。すなわち、そのようなフレアについてはふちに近づくほど電波強度が強くなるという有意な傾向を発見した。これは電子の初期条件を考えると、フレアループの磁場に沿った速度分布をもつ電子が集中して注入されたためであると解釈することが出来る。その場合彩層プラズマの熱化が効率よく起こり、かつフレアループ中に捕捉された電子はループの足元に集中する。その結果、太陽中心付近では強度が小さく見積られるが、太陽のふちに行くに従って強度は大きくなる。これは、どのようなフレアの形状であっても足元からの放射ではCenter-to-Limb variationの強度分布が大きくなることによる。

硬X線と電波放射が共通の加速電子によって放射されているか、或いは異なる加速プロセスを起源とする電子によって放射されているかは、フレアの粒子加速機構を考える上で重要な問題である。これまでの研究では硬X線、電波それぞれから導き出される電子のスペクトルは電波のほうが硬いという結果を示したが、これは硬X線を放射する電子のエネルギー(10-100keV)と、電波を照射する電子のエネルギー(100-1000keV)が異なるためであるとして解釈される。本研究ではとくに高いエネルギー帯(100-300keV)で強い硬X線を放射した10個のフレアを選択し、同じエネルギー帯の電子を起源とする電波と硬X線の比較をおこなった。すなわち、硬X線の放射スペクトルから加速電子のエネルギースペクトルを求め、電子の輸送・輻射モデルを用いて電波の放射スペクトルを算出し、観測された電波スペクトルとの比較を行った。その結果、硬X線の観測値から電波のスペクトルを10イベント中8イベントについてよく再現することが出来た。これは少なくとも100keV以上の高いエネルギー帯の硬X線を放射する電子と電波を放射する電子が共通の起源であることを支持するものである。

(論文審査の結果の要旨)

高エネルギー粒子の加速現象は宇宙の様々な場で発生していることが確認されているところであるが、その確固たるメカニズムはいまだ未解明であり、宇宙物理学においてきわめて重要な問題の1つである。太陽フレア爆発においても高エネルギー粒子の加速はエネルギー解放の根幹をなす要素であり、粒子加速メカニズムを理解することはフレア爆発機構の解明にとって本質的に重要である。さらにフレア粒子加速の研究は地球をとりまくスペース環境の擾乱予測につながるものであり、宇宙機器に大きく依存した現代社会においてその危機管理に資するところも大きい。また、太陽フレアは粒子加速領域のプラズマ環境を空間的に分解して観測できるため、粒子加速問題を解明する上で格好の研究対象といえることができる。

申請論文は太陽フレアで観測される非熱的放射、すなわち硬 X 線およびマイクロ波帯の電波放射の観測データを手がかりとして、粒子加速の実態を明らかにしようとするものであり、申請者が筆頭著者として科学雑誌に発表した2つの論文を柱としている。1つめは加速された電子の速度ベクトルと磁場のなす角度(=ピッチ角)に関する情報を観測的に引き出し、加速モデルに制約を与える試み、2つめは、異なる非熱的放射(硬 X 線とマイクロ波)が共通の加速プロセスを起源とする電子により放射されているかを明らかにする試みである。

第1論文では、フレアを熱的プラズマの生成効率によって分類するというこれまでにないユニークな発想で、熱的プラズマを効率よく生成するフレアについて、マイクロ波強度がフレア発生場所の太陽中心からの距離とともに系統的に変化することを発見し、これを加速された電子のピッチ角が磁場に沿った分布をしているとして説明した。ピッチ角分布は粒子加速メカニズムを制限する上できわめて重要なパラメータであり、加速された粒子のピッチ角に関する情報を初めて観測データに見いだした点で、この研究の意義は大きい。また、フレアに熱的プラズマを大量に生成するものとそうでないものがある理由として、加速された電子のピッチ角分布の違いである可能性を提案したことは、フレア研究において重要な意味を持つものである。

第2論文では、非常に高いエネルギー帯の硬 X 線スペクトルとマイクロ波スペクトルを詳細に解析し、10個のフレアのうち8個について2つの非熱的放射が共通のスペクトルを持つ電子によるものであることを証明した。全く異なる2つの非熱的放射である硬 X 線とマイクロ波が、共通の加速プロセスを起源とする高エネルギー電子によるものであるか、異なる加速プロセスを起源とするものであるかは、フレア粒子加速の実態としてきわめて重要である。これまで比較的低いエネルギー帯の硬 X 線とマイクロ波の比較から、それらの起源となる非熱的電子が異なるべき指数のエネルギースペクトルを持つことが報告されてきた。この研究は少なくとも同じエネルギー帯の電子を起源とする硬 X 線とマイクロ波は、共通の加速プロセスで説明できることを初めて示した点で、その意義は大きい。

申請論文の2つの研究は、いずれも太陽フレアの高エネルギー粒子について、これまで知られていなかった特性を初めて観測的に見いだしたものとして、太陽フレア及び高エネルギー粒子加速の研究分野に少なからぬ貢献を果たしたものであるといえる。いずれの論文も共同研究者との協力による成果であるが、研究の着想、データ解析、結果の吟味において、申請者の果たした役割は圧倒的に大きい。また、申請者は上記論文の他にも理学研究科附属天文台でフレア高速撮像装置の開発も手がけてきており(申請論文第4章)、今後の研究の進展が期待される。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月20日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。