

氏名	たか さき ひろ ゆき 高 崎 宏 之
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2998 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 23 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	Energetic Phenomena of the Solar Flares —— Plasmoid Ejections and Particle Transport and Acceleration —— (太陽フレアにおける高エネルギー現象——プラズモイド噴出現象、粒子輸送、加速過程——)
論文調査委員	(主査) 教授 柴田 一成 助教授 岩室 史英 教授 長田 哲也 寺澤 敏夫 (東京大学大学院理学系研究科教授)

### 論 文 内 容 の 要 旨

本博士論文は、太陽の多波長観測データの解析や数値シミュレーションから太陽フレアの磁気リコネクションの物理的特徴、加速粒子の伝播過程や加速メカニズムを明らかにしようとするものである。磁気リコネクションは、太陽フレアだけでなく、超新星爆発や降着円盤などの天体現象や地球磁気圏、実験室プラズマなどの様々な現象で重要な役割を果たしていると考えられ、重要なエネルギー解放機構である。

近年、太陽フレアのエネルギー解放機構として、磁気リコネクションモデルが確立されつつある。このモデルは向きの異なる磁力線がつながりかわる際に、膨大な磁気エネルギーが解放されるというものである。しかし、太陽フレアにおいて磁気リコネクションモデルから予測される物理量を観測的、定量的に行なった研究はそれほど多くはない。そこで本博士論文でははじめに、フレアの特徴的な物理量を見積もり、磁気リコネクションモデルから示唆される理論的な物理量と比較することを行なった。その結果、現在広く提唱されている磁気リコネクションモデルの妥当性を定量的に示すとともに、新たに、フレアリボンが広がる速度とエネルギー解放率には良い相関関係があるという、エネルギーに関する経験則を見出した。

次に、この磁気リコネクションモデルに基づき、粒子加速と密接に関係のある太陽フレアの非熱的放射と複数個のプラズモイド噴出現象に着目して研究を行った。その結果、一つの太陽フレアにおいて短い時間スケールで激しい硬 X 線バースト現象が何度も起こり、その一回一回のバーストに対応してプラズマの塊が噴出、加速されているという観測結果を世界で初めて得た。このことは、プラズモイド噴出物が太陽フレアのエネルギー解放プロセスと相補的で重要な役割を果たしており、また、太陽フレアでは磁気リコネクションが間欠的、不安定的に生じていることを示唆している。これらの結果は、従来の磁気リコネクションモデルを拡張した統一モデルの解釈とよく合うものであった。

更に、フレアで加速された非熱的な高エネルギー粒子を電磁流体的視点から粒子的な視点で捉え、磁気リコネクションによって加速された個々の粒子がフレア磁気ループ中をどのように輸送されているかを調べた。粒子のエネルギー分布を空間的に詳細に調べた結果、粒子の加速メカニズムにはエネルギー依存性があるのではないかと、という過去の多くの研究に対し、エネルギー依存性はなく共通の粒子加速メカニズムが働いている可能性がある、という粒子加速の物理学に対する大きな提案を行った。

最後に、磁気リコネクション領域がどのような状況で粒子が効率的に加速されるのか、テスト粒子シミュレーションを用いて調べた。本博士論文で示されたように、観測的には磁気リコネクションは非定常(不安定)的に生じていると考えられる。そこで本博士論文では、磁気リコネクションが定常的、非定常的に生じる MHD シミュレーション結果を用いて、直接電場加速(DC 加速)を仮定し、テスト粒子計算を行った。その結果、tearing 不安定性などによって電流シート内に磁気アイランド(プラズモイド)が生じ、磁気リコネクション領域がより乱流的(不安定)構造になった非定常の場合には、安定的構造を持つ定常の場合に比べて、粒子が効率的に加速されることを示した。

以上、本博士論文では観測的、理論的に研究を行い、太陽フレアでは磁気リコネクションは間欠的に生じ、プラズモイド噴出物や電流シート内の乱流的、不安定的なフラクタル構造が磁気リコネクションによるエネルギー解放機構や粒子加速に対して大きな鍵を握っているという結論に至った。

### 論文審査の結果の要旨

申請者の本博士論文における研究は、太陽フレアの磁気リコネクションモデルを定量的に検証し、磁気リコネクションの特徴を観測的に捉えた上で、太陽物理学の最重要課題の一つである粒子加速問題にせまるべく、観測的、数値計算的にアプローチするというものである。太陽物理学において太陽フレアにおける粒子加速の問題は、いまだ未解決の問題である。地球磁気圏などとは異なり、太陽表面では粒子加速の現場は直接観測できないため、理論的なアプローチが必須である。しかし、粒子加速現象のスケールとフレアのスケールには大きな隔たりがあり、理論的に研究することは容易ではない。本博士論文では、現在提唱されているモデルの妥当性を観測データの解析をもとに定量的に検証し、非熱的放射とプラズモイド噴出現象の関係から磁気リコネクションの特長を捉え、徐々に着眼点を電磁流体的スケールからマイクロな粒子スケールに移し、最終的に太陽物理学における粒子の伝播、加速のメカニズムに迫ろうという大変チャレンジングな研究である。

申請者は、観測的に求められた太陽フレアの特徴的な物理量と磁気リコネクションモデルから示唆される物理量を少ない仮定のもとで比較し、モデルの妥当性を観測的に示した。更に、太陽フレアのエネルギーに関する新たな関係を発見するに至った。本学位論文の特筆すべき点として、磁気リコネクションの基礎物理を探るために非熱的放射とプラズモイド噴出物の関係を詳細に解析したことが挙げられる。太陽フレアでは磁気リコネクションが間欠的、不安定的に生じ、噴出プラズモイドがエネルギー解放に対して重要な役割を果たしていることが観測的に示されたことは、大変重要な研究成果である。

申請者の独創的な研究成果の一つとして、太陽フレアにおける粒子加速の問題について重要な制限を与えたことが挙げられる。近年の進歩した観測装置の空間分解能を最大限に生かし、磁気ループ中で輸送される加速粒子のマイクロな物理的特徴に着目した結果、過去の研究とは異なり、粒子加速のメカニズムにはエネルギー依存性はなく同一の加速メカニズムが働いている、という重要な研究結果を得た。この結果は、今後の太陽フレアにおける粒子加速の理論的な研究に対して、大きな観測的制限となることは間違いない。また申請者は、観測的なアプローチだけではなく、理論シミュレーションからも粒子加速の問題に取り組み、電磁流体シミュレーションの結果を用いたテスト粒子シミュレーションを行った。その結果、tearing不安定性などによって電流シート内に磁気アイランド（プラズモイド）が生じ、磁気リコネクション領域がより乱流的（不安定）構造になった場合に粒子が効率的に加速されることを示した。

上記の多くの研究から申請者は、太陽フレアにおいて(1)磁気リコネクションは間欠的、不安定的に生じ、(2)プラズモイド噴出物がエネルギー解放プロセスに重要な役割を果たし、(3)粒子加速メカニズムにはエネルギー依存性はなく、(4)電流シート内の乱流的な構造が粒子加速に対して重要な鍵をにぎっていることを示した。これは、観測的、理論的に詳細な解析をすることによって得られた、完成度の高い研究成果であると言える。

以上のように申請者の研究は、太陽フレアにおける磁気リコネクションや加速粒子の特徴について、観測と理論シミュレーションの両面から様々な新たな知見をもたらした、独創的かつ重要な成果である。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これらに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。