氏　　名　浅井　歩（あさい　あゆみ）
学位(専攻分野)　博　士（理　学）
学位記番号　理　博　第 2840 号
学位授与の日付　平成 16 年 7 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　Observational Studies on Energy Release Mechanism in Solar Flares
（太陽フレアにおけるエネルギー解放機構の観測的研究）

論文調査委員　（主査）教授 黒河宏企　教授 柴田一成　教授 舞原俊憲

論文内容の要旨

太陽フレアは，磁気プラズマに蓄えられた莫大なエネルギーが短時間に解放される爆発現象であり，その際γ線から電波までの全波長領域にわたる強い電磁波と巨大なプラズマ雲やMev～Gevの超高速粒子が放出される。また宇宙では恒星フレアなど，これより更に何桁も高エネルギーの類似現象が発見されてきており，太陽フレアの研究は太陽物理学のみならず，宇宙活動現象解明の実験室として，天体物理学の重要課題の一つとなっている。フレアなどの活動現象を物理的に説明するモデルとして，磁力線のつなぎ替え（磁気リコネクション）が注目されており，最近地上観測及び人工衛星による観測からそのモデルを支持するような観測事実が得られ，リコネクションモデルによって，地球磁気圏，太陽，恒星，銀河プラズマの活動現象を統一的に理解しようとする試みも，行われるようになっている。しかし，磁気リコネクションモデルの検証に最も適した太陽フレアにおいても，現象論的，形態学的な研究が主であり，その定量的な研究は，未だ始まったばかりである。

本論文では，数多くの波長域で観測されたデータを詳細に解析し，その結果として得られるフレア領域の物理パラメータを組み合わせて，磁気リコネクションモデルを定量的に検証した。すなわち，光学観測から得られた磁場強度分布やHα線による彩層フレアの進行速度，極紫外線，軟X線コロナ磁気ループの進化，硬X線及びマイクロ波の空間・時間変化など多くのデータを組み合わせて，多面的にフレア領域の物理構造の時間変化を調べている。本論文はまず，花山天文台のザートリュース望遠鏡によって高分解能で撮影されたHαフレアのデータ解析を中心にして次の結果を得ている。

(1) Hα線で観測される多くのフレアカーネルの光度変化曲線を詳細に解析し，異なる磁場極性を持つカーネルの間で光度変化が最も良く一致する多数のペアを同定した。申請者はこれらのペアと極紫外線で観測されたフレアループとが非常に良く一致することを示し，それぞれのペアが磁気リコネクションによるエネルギー解放で加熱されたフレアループの両足下であることを明確に示すことに成功した。

(2) Hα線フレアカーネルがフレアリボンに沿って広く分布するのに対して，硬X線放射源は限られた場所にしか観測されないのはなぜか。この原因に対して諸説があったが，本論文では磁場強度の違いに着目して，磁気リコネクションモデルよりエネルギー解放率を評価して，この問題に定量的な解答を与えた。

(3) Hαリボンの移動速度と磁場の観測値を用いて，磁気リコネクションレートとそれによるエネルギー解放率の時間変化を算出した結果，これらが観測された硬X線およびマイクロ波の時間変化と非常に良く一致することを示した。

以上の結果によって本論文は，Hα線カーネルの光度変化と移動速度，光球磁場強度，硬X線及びマイクロ波放射源の時間変動と空間分布などの観測データが，磁気リコネクションモデルというエネルギー解放メカニズムによって矛盾なく説明できることを，初めて定量的に示すことに成功している。

また，本論文は別のフレアについて次のような観点からも，太陽フレアのエネルギー解放メカニズムの解析を進めており，以下のような結果を得ている。すなわちまず，(4)磁気リコネクションモデルから予想されるフレアループ上空の下降流を検

証するために，極紫外線の観測データを詳細に解析した結果，硬X線バーストの個々の鋭いピークに合わせて下降流が起こっていることを初めて見出している。

更に本論文は，(5)硬X線とマイクロ波の放射強度がほぼ同時に振動している現象を2次元画像上ではじめて同定することに成功しており，硬X線振動とマイクロ波振動のわずかな時間差が磁場構造と放射源の空間的配置の関係で説明できることを示している。

論文審査の結果の要旨

宇宙では，恒星フレアなど，太陽フレアと類似の高エネルギー現象が多く発見されており，太陽は宇宙活動現象の実験室となっている。また強い太陽フレアは電気・通信・情報設備を乱し，宇宙飛行士にとって大きな脅威となるので，発生を予知する必要があり，そのエネルギ解放機構の解明が，宇宙天気予報研究にとっても最重要課題の一つとなっている。

フレアメカニズムの最も難しい課題の一つは，X線・γ線放射や高速粒子・プラズマ雲放出などに見られるような莫大なエネルギーの解放を数秒から数十分という短い時間内に解放することである。この物理メカニズムを説明するモデルとして，磁力線のつなぎ替え（磁気リコネクション）モデルが注目されている。しかし，これまでは現象論的，形態学的な研究が主であり，それを定量的に検証する研究は未だ始まったばかりである。

このような中で，本論文は光学観測から得られた磁場強度分布，Hα線による彩層フレアの進行速度，極紫外線・軟X線コロナ磁気ループの進化，硬X線およびマイクロ波の空間・時間変化など多くの観測データを組み合わせて，多面的且つ総合的に磁気リコネネクションモデルを検証することに成功した初めての論文であると言うことが出来る。これによって，太陽フレア研究のみならず関連分野の研究に多くの影響を与える優秀な研究であると言える。

具体的には，本論文は次の5つの新しい研究成果から構成されている。

(1) Hα線で観測された多くのフレアカーネルの光度変化曲線について，異なる磁場極性を持つカーネルの間で，光度変化の相関係数が最も大きいペアを決定し，これらのペアが極紫外線で観測されたフレアループと非常に良く一致することを示した。このように，同期して変動するHαフレアカーネルが高温フレアループで連結されていることを明確に示したのはこの研究が最初である。

(2) 広いフレア領域の中で，硬X線源が限られた場所にしか観測されない理由について解析し，磁場強度と磁気リコネクションモデルより評価したエネルギー解放率が，硬X線放射源では他のフレアカーネルに比べて圧倒的に強いことを初めて定量的に示した。

(3) Hαリボンの移動速度と磁場の観測値を用いて，磁気リコネクションレートとそれによるエネルギー解放率の時間変化を算出した結果，これらが観測された硬X線およびマイクロ波の時間変化と非常に良く一致することを初めて示した。この結果はフレアのエネルギ解放機構を特定する上で重要な研究成果といえる。

以上のように本論文は，典型的な一つの強い大きな太陽フレアについて，Hα線カーネルの光度変化と移動速度，光球磁場強度，硬X線・マイクロ波放射源の時間変動と空間分布の観測データを詳細に解析して，これらがすべて磁気リコネクションモデルによって矛盾なく説明できることを，初めて定量的に示したものということができる。

また，本論文は磁気リコネクションモデルを更に別の側面から検証するために，(4)極紫外線の観測データを詳細に解析して，硬X線バーストの個々の鋭いピークに合わせて下降流が起こっていることを見出している。フレアの爆発的エネルギ解放に一致して下降流が発生していることを示したものとしては最初の例であり，今後更に多くの例が見つかる可能性のある重要な結果である。更に本論文は別のフレアについて，(5)硬X線とマイクロ波の放射強度がほぼ同時に振動している現象を初めて2次元像上で同定することに成功して，これら振動間のわずかな時間差を説明する放射源についての三次元磁場構造のモデルを示すことに成功している。この研究手法もフレアにおける粒子加速メカニズムの解明に，今後つながるものと期待される重要なものである。

以上のように本申請論文は，太陽フレアについての多波長同時観測データを詳細に解析することによって，磁気リコネクッションモデルを定量的に且つ多面的に検証したものであって，上記5つの問題について太陽フレアのエネルギー解放機構の研究を進展させる重要な新しい知見を与えている。また，この論文で用いている多波長同時観測解析による，フレア領域

の定量解析手法の成功は，観測精度を今後更に向上させることによって，フレア現象及び磁気リコネクションメカニズムによって生じる多くの活動現象について，更に詳細な解明が可能であることを示唆しており，この分野の観測・シミュレーション比較研究の活性化に拍車をかけるもので，この点からも特に優れた研究である。

本論文審査は5年未満の特例に基づいて行われたものであるが，以上の理由により，この特例に基づく博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。

なお，主論文に報告されている研究業績を中心として，これに関連した研究分野について，試問を行った結果，合格と認めた。