

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	にしづか なおと 西塚 直人
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) Ubiquitous and Fractal Reconnection in the Solar Atmosphere (太陽大気における磁気リコネクションのユビキタス性と フラクタル性の理論的・観測的研究)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 柴田 一成 教授 一本 潔 教授 北井礼三郎 准教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京 都 大 学	博 士 (理 学)	氏 名	西 塚 直 人
論 文 題 目	Ubiquitous and Fractal Reconnection in the Solar Atmosphere		

(論文内容の要旨)

本博士論文は、磁気リコネクションの物理過程を、数値シミュレーションと多波長観測データの解析から明らかにしようとするものである。太陽コロナはフレアやジェットなどの爆発現象に満ちている。これらの爆発現象の起源は、プラズマ中の磁気エネルギーがプラズマの熱・運動エネルギーに突発的に変換されることによる。磁気リコネクションとは、磁力線のつながり変わりによる磁気エネルギーを高速に解放するメカニズムであり、太陽フレアだけでなく、恒星、降着円盤などの天体や地球・惑星磁気圏、実験室プラズマなど様々な現象で重要な役割を果たしていると考えられている。その基礎物理過程の理解は、太陽物理だけでなく広くプラズマ物理学一般の重要課題である。

太陽コロナは磁気リコネクションに満ちているが、磁気流体プラズマは自己相似的であり、太陽大気中ではより小規模な磁気リコネクションも起きていると予想される。近年のひので衛星観測は、太陽彩層もまた微小なジェット現象に満ちたダイナミックな描像を明らかにした。申請者は浮上磁場とコロナ磁場とのリコネクションの2次元磁気流体シミュレーションを行い、ひので衛星観測による彩層ジェットとの比較を行った。太陽大気は光球からコロナにかけて密度が8桁も変化するため現実的なシミュレーションは困難であったが、申請者らは計算技法の改善により観測結果との定量的な比較を初めて可能にした。その結果シミュレーションは観測をよく再現し、彩層中(弱電離衝突プラズマ)で「速い」磁気リコネクションが起きていることを示した。さらに、ジェットに伴いアルフベン波が発生し伝播していることを観測的に初めて発見し、シミュレーションによって定量的に再現することにも成功した。彩層ジェットの統計解析からはジェット自身が衝撃波によって加速されている可能性を示し、これらの波はコロナ加熱を説明するメカニズムとしても重要である可能性がある。

一方で電流シートや粒子加速領域は微小なため、地球から直接観測することは不可能である。本博士論文では、多波長の観測データを用いてフレア輝点を詳細に解析することで、間接的に電流シートの情報を得る手法を確立し、統計解析によりフレア輝点の強度分布や発生頻度分布が冪分布であることを示した。フレア輝点の振る舞いはエネルギー解放メカニズムを反映しており、ミクロとマクロをつなぐ物理として、近年提唱されている電流シート中の乱流を考慮するモデルを観測的によく説明している。

また申請者らは、フレア中に複数のプラズモイド噴出を発見した。各噴出プラズモイドと硬X線強度には時間的・エネルギー的によい相関があり、この結果は磁気リコネクションの非定常性、プラズモイドと粒子加速との関連性を示唆するものである。申請者は、これらの観測事実に基づきファーストショックにおけるプラズモイド噴出に伴う粒子加速モデルを提唱した。プラズモイド噴出の2次元磁気流体シミュレーションとテスト粒子計算を行い、プラズモイド噴出のダイナミクスに伴って粒子は効率的に加速され、プラズモイドのフラクタル性から観測されるX線の冪分布が自然と説明できることを示した。

(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、天体プラズマ物理学の最重要課題の一つである磁気リコネクションの物理の解明に、太陽観測データの解析と数値シミュレーションの両面からせまるものである。磁場構造のグローバルな変化を可視化して見ることのできる太陽大気は、プラズマ物理学の格好の実験場であるという認識は、近年徐々に広まりつつあるが、リコネクションの基礎物理を探るといふ観点から太陽観測データを詳細に解析した研究は、その重要性にも関わらずいまだ多くはなされていない。

観測データと数値シミュレーションとの比較により物理過程を解明しようとする申請者の手法は、ひので衛星の高分解能多波長観測データと現実的な初期パラメータによるシミュレーションによって初めて可能になったものであり、磁気リコネクションモデルの検証と磁場やプラズマの運動の可視化に大変有用である。これにより、申請者は彩層中でも「速い」リコネクションが起きている可能性を示した。それに加えて、リコネクションに伴ってアルフベン波が発生し伝播している証拠や、統計解析によってジェット自身に彩層中でスローショック等の加速機構が関与している可能性を指摘し、プラズマ物理や太陽コロナ加熱問題に新しい知見を与えるリコネクションの基礎物理的な素過程を明らかにした。

申請者の研究は、磁気リコネクションの理論モデルに基づきつつ多波長データ解析によって物理素過程の解明を行うものである。複数のプラズモイド噴出に加えてそれらの硬X線バーストとの相関の発見は、リコネクションの非定常性に加え、プラズモイド噴出と粒子加速との関連性を強く示唆する初めての発見である。さらに、これまで着目されてこなかった紫外線フレア輝点の解析によって間接的に粒子加速領域の背景場について知ろうとする発想は非常に柔軟で斬新であり、太陽フレアのエネルギー解放のミクロな物理機構解明に貢献するだけでなく、3次元的な描像の解明にも有効な手法である。

計算機による数値シミュレーションは、磁気リコネクションのような非定常、非線形性が本質的である現象を理解する上で強力な武器となっている。さらに磁気流体シミュレーションとテスト粒子との組み合わせにより、太陽フレアのマクロな場の変動とミクロな粒子の運動とを同時に扱うことを初めて可能にした。申請者の提唱する磁気リコネクションのフラクタル性とそれに伴う粒子加速は宇宙プラズマの基本的な物理過程であり、太陽のみならず磁気圏サブストームや天体高エネルギー現象の解明にも応用可能な普遍性を有していると期待される。

以上のように申請者の研究は、磁気プラズマ活動現象理解の鍵となる磁気リコネクションについて、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。また、平成22年1月15日に、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。

