

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	高 棹 真 介
論文題目	Fundamental Magnetohydrodynamic Processes of Solar Flares: Formation of Flare-productive Regions and Evolution of Flare Loops		
(論文内容の要旨)			
本論文の研究は、大規模な太陽フレアの発生に至るまでの過程、さらにはフレアの際のエネルギー解放過程を、磁気流体シミュレーションを駆使して明らかにしようとしたものである。 太陽フレアは、太陽内部から浮上してきた磁場が黒点を形成し、その上空コロナに蓄えられた磁気エネルギーを磁気リコネクションによって急速に解放する爆発現象である。したがって太陽フレアの理解には物理状態が大きく変化する大気における磁場と流体の振る舞いを明らかにする必要がある。しかし、黒点を生じる磁束管の内部での構造やエネルギー解放の際に重要になるコロナでの衝撃波は、直接観測が困難であることなどが障害となり未だ理解されていない。そこで申請者は、磁気流体シミュレーションにより以下の3つの未解決重要問題の解決を目指した。 第1の問題は、逆極性の黒点暗部が共通の半暗部に含まれる「デルタ型黒点」の起源についてである。デルタ型黒点はフレア活動性が高いことで長年注目されており、特に活動性の高いものは強いねじれと四重極構造を示す傾向が観測からみえてきた。しかし、形成過程とフレア発生に至るまでの過程に関するこれまでの知見は極めて乏しいものであった。そこで申請者は、デルタ型黒点は強くねじれた磁束管の浮上によって形成されるという観測に基づく仮説を立て、3次元磁気流体シミュレーションを行った。その結果、磁束管が太陽内部から表面上に浮上する際に磁束管のねじれを解放するキンク不安定性が生じれば、自発的にデルタ型黒点に類似した四重極の光球磁場が出現することが初めて示された。四重極構造はコロナへ浮上した磁場の一部が光球に再び沈み込むことによって生じており、その沈み込みにともなってフレア発生に重要な電流シートも形成されることが明らかになった。 第2の問題は、衝撃波に関するものである。フレアの際に生じる非熱的な高エネルギー粒子の生成や高温フレアループ内の熱構造の決定には衝撃波が重要な役割を果たすと考えられているが、未だ衝撃波の構造は十分理解されていない。そこで申請者は、高解像度2次元磁気流体シミュレーションを駆使して太陽フレアループ内部および上空で生じる衝撃波の詳細な解析を行った。その結果、フレアループ内部および上空は多くの衝撃波で満ちていることが初めて明らかとなった。特にリコネクションアウトフローが減速する時に形成される終端衝撃波 (termination shock) はこれまで1枚の水平、準定常な衝撃波だと思われていたが、複数の斜め衝撃波が形成されることが示された。このことは衝撃波での粒子加速の機会が想定していたより多い可能性を示す重要な結果である。さらに、ループ内に形成される衝撃波の多くを再現できる1次元簡易フレアループモデルを構築し、フレアの時間発展を追うために必要な計算量を大幅に減らすことに成功した。 太陽フレアは様々な波動や振動を励起することがフレアから放射される電磁波強度の時間変動やコロナに伝播する波動として観測されていたが、これまでの標準的フレアモデルはその振動的性質を説明できていなかった。しかし申請者は、フレアのシ			

シミュレーション内で観測と類似するコロナ波動が自然に再現されることを発見した。シミュレーション結果を解析した末、コロナ波動はアウトフローが減速する領域の振動によって発生していることが判明した。さらにその振動はアウトフローの跳ね返りによって駆動されており、振動する磁場構造の振る舞いが「音叉」と極めて似ていることも明らかとなった。この音叉的振動は周期的なコロナ波動の発生と同時に終端衝撃波の強さを周期変動させることで非熱的粒子起源の放射を変動させうる。したがって、この発見は未だ起源が謎であるフレア放射強度の周期変動とコロナ波動の両方を同時に説明できる可能性を持つ重要なものである。

(論文審査の結果の要旨)

本論文の研究は、磁気流体シミュレーションを駆使して、太陽フレアの発生に至るまでの過程、さらには磁気リコネクションによるエネルギー解放過程の解明を目指したものである。

大規模な太陽フレアは地球大気や人工衛星に多大な影響を与えることが知られている。さらに、太陽型星で超巨大フレア（スーパーフレア）が発生していることも明らかになってきた。このため、フレア活動性の高い「デルタ型黒点」の起源は大フレアとの関連性の観点から大きな注目を集めている。しかしデルタ型黒点を生じる太陽内部の磁場構造や、フレア発生に至るまでの過程はこれまで全くと言っていいほど理解されていなかった。観測から強くねじれた磁束管がキンク不安定性によって軸を変形させて浮上しているのではないかと言われていたが、よく見られるフレアを起こしやすい四重極構造の起源やフレア領域のコロナ磁場構造は謎であった。

申請者は強くねじれた磁束管の浮上によってデルタ型黒点が形成されるのではないかという観測に基づく仮説を立て、太陽内部からコロナまでを含めた大規模3次元磁気流体シミュレーションを行った。その結果、キンク不安定性によって軸が変形した磁束管が浮上すれば特に活動性の高いデルタ型黒点の特徴が再現されることを示すことに成功した。この成果は、太陽における大フレア発生の起源の理解を進めるとともに、他の太陽型星におけるスーパーフレアの起源にもつながる点で重要である。

太陽フレアの際に非熱的な高エネルギー粒子が生成されていることが知られている。粒子加速には衝撃波が重要な役割を担っているのではと考えられているが、その構造の複雑さゆえ、フレアにおける衝撃波構造の理解は2000年代初めから進んでいなかった。申請者は太陽フレアの高解像度2次元磁気流体シミュレーションを行うことで、フレアループ内部および上部は無数の衝撃波で満ちていることを明らかにし、過去のフレアモデルを大きく進展させた。さらに衝撃波における粒子加速の機会がこれまでの予想よりも多い可能性をも示した。この成果は、太陽フレアにおける粒子加速の理解を進めるのみならず、宇宙で普遍的に見られる高エネルギー粒子の起源の理解にもつながる可能性がある。

幅広い電磁波波長帯において太陽フレアの放射強度はしばしば周期的に変動することが知られており、特に非熱的粒子起源の放射でその変動は顕著である。さらに近年の高感度撮像観測によってフレア領域から周期的なコロナ波動が生じていることも見つかри、フレアの振動的性質が徐々に明らかになってきた。他の恒星フレアも同様の変動を示しており、振動的性質が普遍的であることを示している。しかし、これまで磁気リコネクションの物理を考慮した上で放射強度の変動とコロナ波動の発生を同時に説明するモデルは存在しなかった。申請者の研究は、これを世界で初めて達成したものである。さらに申請者は振動周期の磁場強度依存性を明らかにした。この成果は直接観測が不可能な恒星コロナの磁場強度と振動周期を結びつけ、フレア振動の観測から恒星の磁気活動の理解を進める重要なものである。

このように申請者の研究は太陽フレアを多角的に考察するのみならず、宇宙物理学的に重要な問題と深く結びついたものである。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、これらに関連した研究分野について平成28年1月15日に口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降