

氏名	横山 央 明
学位（専攻分野）	博士（理学）
学位記番号	総研大甲第130号
学位授与の日付	平成7年3月23日
学位授与の要件	数物科学研究科 天文科学専攻 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Magnetohydrodynamic Simulation of Solar Coronal X-ray Jets Based on Magnetic Reconnection Model
論文審査委員	主査 教授 櫻井 隆 教授 平山 淳 教授 岡本 功 助教授 柴田 一成（国立天文台） 教授 寺沢 敏夫（東京大学）

論文内容の要旨

1991年8月に打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」は、X線観測により太陽コロナのダイナミックな振る舞いを次々と明らかにした。その発見の一つがX線ジェット現象である。ジェットは、コリメートされたプラズマが毎秒数十～数百キロの速度で放出される現象である。長さは数万キロから数十万キロあり、 10^{26} から 10^{28} エルグの運動エネルギーを持っている。類似の現象としては、可視光や紫外線によって見いだされているジェット現象（スピキュール、サージ、紫外線ジェットなど）があるが、X線ジェットは、温度が数百万度に達してX線を放射するので、これらのなかで最も高温の現象である。

他の活動現象と同様、X線ジェットにおいても磁場が重要な役割を果たしている。コリメートされた形状は磁場による成形と解釈でき、エネルギー源としても磁気エネルギーが最も有力である。実際にどのような磁気のプロセスでジェットが形成されるかについては、太陽内部から磁気浮力のために上昇してくる新しい磁場領域と、すでにコロナの中に存在する古い磁場との間で、いわゆる磁気リコネクション過程により、プラズマの加熱と放出が起こっているとするモデルが提案されていた。このモデルは定性的にはジェット現象の特徴をよく説明する。本論文は、X線ジェットが磁気リコネクションにより形成されることを、数値シミュレーションによって示すことを目的とした。

第2節では、基礎となる電磁流体力学の方程式系を無次元化して数値シミュレーションのための方程式を導き、次に数値計算の実際について、用いる差分法、境界条件、初期条件の設定について検討した。シミュレーションの結果、以下のような結論が得られた。太陽表面下の対流層に置いた磁場の管に初期擾乱を与えると、磁気浮力不安定により上昇して太陽表面に顔を出し、コロナへと上昇して行く。この過程でコロナに元々からある磁場との間で磁気リコネクションを起こし、速いプラズマの流れ（ジェット）を生成する。特に、新たな磁場が浮いてくる場所が、元々ほぼ水平な磁場を持っている場合には、横向きに2つのジェットが生じるが、元々の磁場が垂直に近い場合には、上向きの噴水状のジェットが生成される。前者は平均的なコロナの環境、後者はコロナホールに対応する。X線観測でも実際2通りのタイプのジェットが観測されており、このことからモデルの正当性が裏付けられる。

第3節では、「ようこう」衛星によるコロナのX線観測と、コロナより下層の低温の大気（彩層）の観測を比較し、磁気リコネクションの兆候がX線ジェットに付随して彩層においてもサージ現象として必ず見られることを確認した。サージの中には回転運動に対応するドップラー変移を示すものもあり、よじられた磁場が関与したりコネクションを示唆している。この結果は、「ようこう」衛星のX線データの解析を通じて共同研究を行ってきたハワイ大学の研究者の協力を得て、ハワイ大学ミース太陽天文台のデータを解析して得たものである。

第4節では、数値シミュレーションを更に一歩進め、磁気リコネクションという基本過程そのものについても研究した。磁気リコネクション過程は、ジェット現象のみならず、太陽フレアなど天体にみられる磁気エネルギーの爆発的解放の基本メカニズムであると考えられているが、天体プラズマでは一般に磁気拡散の時間が非常に長く、いかにして速い磁気リコネクションが可能になるのかが大きな研究課題となっている。本論文で考える、

磁気浮力による磁場の浮上が駆動するリコネクションの場合には、電気抵抗が一定では速いリコネクションは起こらず、電気抵抗が電流密度と共に増加するような異常抵抗モデルでは速いリコネクションが起こることがわかった。また、異常抵抗を起こすしきい値が大きいほどリコネクションが激しく起こることもわかった。即ち、速いリコネクションには、リコネクションが開始する前に磁場に十分な歪みがたまっていることが必要である。

太陽コロナのような高温のプラズマでは、熱伝導が主たる熱輸送の機構である。第5章では、前節までの研究では考慮していなかった、熱伝導の効果も取り入れてシミュレーションを精密化した。磁場のために熱伝導度は異方性を示し、熱はほぼ磁力線に沿ってのみ伝わるので、この点も取り入れたシミュレーションを行った。その結果、熱伝導によるリコネクション点からの熱の除去のため、磁気リコネクションはより高速に進むことを見いだした。

以上のように、X線ジェット現象は磁気リコネクションによってよく説明できる。数値シミュレーションは太陽コロナの実際の高い電気伝導度をそのまま取り入れることはできないが、本研究で得られた電気伝導度とリコネクションの速さの関係から、実際のリコネクションのエネルギー解放量も矛盾なく説明することができる。

論文の審査結果の要旨

本論文は、太陽観測衛星「ようこう」が発見したX線ジェット現象が、磁気リコネクション過程によってよく説明できることを、電磁流体数値シミュレーションにより示したものである。太陽表面下の対流層に置いた磁場の管が磁気浮力不安定により上昇して太陽表面に顔を出し、コロナへ上昇して行く過程で、コロナに元々からある磁場との間で磁気リコネクションを起こし、速いプラズマの流れ（ジェット）を生成する。特に、新たな磁場が浮いてくる場所が、元々ほぼ水平な磁場を持っている場合には、横向きに2つのジェットが生じるが、元々の磁場が垂直に近い場合には、上向きの噴水状のジェットが生成されることを示した。前者は平均的なコロナの環境、後者はコロナホールの環境に対応し、観測結果を見事に再現するものとなっている。

次に、磁気リコネクションという基本過程そのものに注目して、電磁流体シミュレーションによる研究を進展させている。いかにして速い磁気リコネクションが可能になるのか、という基本的問題に対しこれまでに、外部からの流れの駆動が重要であるという説、リコネクション点での電気抵抗を増加させる過程が重要であるという説などが提案されていた。前者の立場では、流れの駆動は境界条件を通して随意に与えられるという仮定がされることもあったが、本論文では、磁気浮力による磁場の浮上という問題設定の中で、流れの駆動機構までを含んだ解析となっている点が特長である。そして数値シミュレーションの結果、電気抵抗が一定では速いリコネクションは起こらず、電気抵抗が電流密度と共に増加するようなモデルでは速いリコネクションが起こるといふ、重要な結論に到達した。

これらの結果は太陽物理学に新たな展開をもたらすものである。シミュレーションの結果予測される、ジェット現象のエネルギーや時間スケール、冷たいプラズマと熱いプラズマのジェットの位置的關係など、観測と対比できるものについては定量的な比較も行い、理論的研究のみならず観測データの処理の力量も見せていることも見逃せない。なお、この研究の一部は既に、*Astrophysical Journal*誌、及び3編の国際シンポジウム集録に発表されている。

論文の審査は、平成7年1月24日に審査委員全員の出席のもとに行った。公開発表会の形で論文内容を1時間かけて話させ、その後質疑応答を約1時間行った。発表はよく要点が整理されており、シミュレーションで得られた解の時間発展はビデオ化して示すなど、工夫されていた。この研究テーマの背景、問題の設定、シミュレーション技法、結果の物理的解釈のいずれもよく理解して発表し、質疑に対して的確な回答を与えた。提出論文はしっかりした英語でよく練られた構成の上で書かれており、語学力も十分であると判断できた。

以上の結果を総合して、学位論文として十分の内容を備えたものと判断した。