

氏 名 宮 腰 剛 広

学位（専攻分野） 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第671号

学位授与の日付 平成15年3月24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 Theoretical and Numerical Studies of an Emerging

Flux and associated Active Phenomena of the Sun

論文審査委員 主 査 教授 櫻井 隆
教授 柴崎 清登
教授 渡邊 鉄哉
助教授 梶野 敏貴
教授 柴田 一成（京都大学）

論文内容の要旨

It is well established that sunspots and active regions are formed by the emergence of magnetic fluxes from the interior of the Sun into the atmosphere. The newly emerged bipolar active regions are called emerging flux regions (EFRs). There are several observational evidences which indicate the emergence and rising motion of magnetic flux tubes in EFRs.

The emerging flux causes active phenomena and energy release in the solar corona. The Yohkoh satellite discovered many dynamic phenomena in the solar corona. One of the most interesting findings among such dynamic phenomena is solar coronal X-ray jets, which are observed as transitory X-ray enhancements with an apparent collimated motion. Based on the frequent observations of X-ray jets from emerging flux regions, Shibata et al. (1994) proposed a phenomenological model which explains the occurrence mechanism of these X-ray jets: magnetic energy of X-ray jets are released by magnetic reconnection between the emerging flux and the pre-existing coronal magnetic field.

The aim of this thesis is to understand the emerging flux and associated active phenomena of the Sun. This thesis is organized as follows:

Chapter 1. Introductory Review: In this chapter, we briefly review the observations and theories of the emerging flux and associated active phenomena in the corona.

Chapter 2. MHD Numerical Simulations of Solar Coronal Jets based on Magnetic Reconnection Model including Anisotropic Heat Conduction Effect: In this chapter, we studied about properties of solar coronal X-ray jets by MHD numerical simulations based on the magnetic reconnection model including anisotropic heat conduction effect. Yokoyama & Shibata (1995, 1996) performed a two-dimensional MHD simulation and succeeded to reproduce the plasma collimated flow along magnetic fields. We extended their works to study evaporated dense jets as X-ray brightening feature caused by magnetic reconnection between the emerging flux and pre-existing coronal fields. Key physical processes are included, such as emergence of magnetic fluxes from the convection zone, magnetic reconnection with the coronal magnetic fields, heat conduction to the chromosphere, and the chromospheric evaporation. High-density evaporation jets were successfully reproduced in the simulations. Mass of the evaporation jets M is described as $M = 6.8 \times 10^{12} \text{g} (B/10\text{G})^{15/7} (T_{\text{cor}}/10^6\text{K})^{5/14} (s_{\text{flare}}/5000\text{km}) (t/400\text{s})$, where B is the strength of magnetic fields, T_{cor} is the coronal temperature, s_{flare} is the height of the reconnection region, and t is the duration of ejection, respectively.

Chapter 3. Three-dimensional MHD Numerical Simulations of a Twisted Emerging Flux Tube from below the Photosphere: According to several studies of

the emerging flux process from convection zone to the corona, the magnetic field rising through the convection zone have the shape of an isolated tube with twisted magnetic fields. In this chapter, we performed three-dimensional MHD numerical simulations of the isolated magnetic flux tube's emergence. The purpose of this study is to investigate coronal magnetic structure formed by the emerging flux tube. We found that the strength of twists of the magnetic flux tube greatly affects the final magnetic structure in the corona. The S-shaped (like a sigmoid) structure is formed when the magnetic flux tube is strongly twisted initially, while helical magnetic structure is formed at the bottom of the tube when the tube is weakly twisted. This is because of the magnetic reconnection caused by convective plasma motion with the flux emergence.

Chapter 4. Three-dimensional MHD Numerical Simulations of Coronal Loop Oscillations Associated with Flares: Recently, coronal loop oscillations associated with flares have observed by TRACE(e.g., Nakariakov et al.1999, Aschwanden et al.1999). To investigate these oscillating loops, we performed three-dimensional numerical MHD simulations. We found that (1) loop oscillation period is determined by its Alfvén time, and (2) the amplitude of oscillation decreases exponentially in time. This is explained as energy transport by fast-mode MHD waves. The damping rate ω_{damp} is described as $\omega_{\text{damp}} \sim V_a/R$ where V_a is the Alfvén speed and R is the radius of the loop, respectively.

Chapter 5. Summary and Future Directions: Finally summary of the thesis and the future directions are shown in this chapter. We also discuss application of the magnetic flux emergence and magnetic reconnection model to other astronomical objects such as accretion disks, galaxies, and so on.

宮腰剛広氏の学位論文は、太陽の内部から浮き上がってくる磁束管が引き起こすいくつかの興味深い現象をMHD数値シミュレーションにより研究したものである。1991年に打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」のX線画像、1998年に打ち上げられたアメリカの人工衛星TRACEの紫外線画像など、時間・空間とも分解能の高いデータが得られるようになり、太陽表層からコロナにかけての磁気プラズマの振る舞いについて、観測データと数値シミュレーションが詳細に比較できるようになって初めて可能となった研究テーマである。

論文第1章では、研究開始の動機となった、浮上磁場領域、ようこう衛星によるX線ジェット、TRACE衛星によるコロナループの振動現象の観測について紹介し、これらの現象の背景にある基礎過程として、磁気浮力とパーカー不安定、磁気リコネクション、彩層蒸発などについてまとめている。

第2章では、X線ジェット現象のMHDシミュレーションを行っている。X線ジェットは、浮上してきた磁束管がコロナに元々からある磁場と磁気リコネクションを起こす結果発生すると考えられている。下条（1999年総研大学位論文）により、X線ジェットはリコネクション領域で発生した熱が太陽表面に向かって流れ、密度の高い彩層を熱した結果、圧力の上昇した彩層プラズマが上昇してくるもの（彩層蒸発過程）である、というモデルが提出され広く受け入れられている。しかし下条の研究では磁気リコネクションを直接扱ってはならず、リコネクションの結果発生する熱入力を仮定して、それに応じて発生するプラズマの流れを求めたものであった。今回の研究は、磁気浮力による磁束の浮上、コロナ中に浮上した磁気ループとコロナ磁場との相互作用による磁気リコネクションからジェットの生成までの一連のプロセスを2次元のMHDシミュレーションで説明したものである。熱の輸送については、磁気プラズマでは熱はほぼ磁力線に沿って伝わるので、そのような非等方熱伝導を取り入れるなど、この種のものとして世界で最も進んだモデルとなっている。その結果、彩層蒸発によるジェットが形成されることが確認され、また放出されるプラズマ質量の物理パラメータ依存性が、数値シミュレーションに基づく物理的考察から評価できることもわかった。こうして導かれたスケール則は、ようこう衛星で観測されたX線ジェットの特徴を定量的にもよく説明する。また、リコネクション領域から直接放出される高温・低密度のジェットもシミュレーション結果には存在しており、今後のSolar-B衛星などでの観測的検証の可能性も議論している。

第3章では、光球下からコロナへ浮上する磁束管の3次元シミュレーションを行った。よじれの弱い磁束管の浮上では、 Ω 字型になった磁束管の足元部分が磁気リコネクションを起こし、局所的に強くよじれた磁場構造を形成した。もともとよじれの大きい磁束管の浮上では、 Ω 字型の足が斜めに離れているため、足元部分でのリコネクションは少なく、大規模なよじれ構造を作った。今後のより詳細な数値シミュレーションによって得られた解の一般性を確立・確認する必要があるが、観測されるコロナループのS字型構造の成因などにヒントを与える結果である。

第4章では、コロナループが近傍で発生したフレア爆発によって強制的に揺すられ、その振動が減衰していくという観測結果を説明するため、3次元MHDシミュレーションを行った。振動の減衰は運動エネルギーの散逸すなわち熱への転換を意味するという解釈が提案され注目を集めているが、本研究では振動の減衰は波動がエネルギーを持って逃げ去るために起こるといふ、これとは真向から対立する結果を得た。今後さらに解析を進める必要があるものの、波動エネルギーによるコロナ加熱説に一石を投じる結果である。

本研究はMHDシミュレーションにより、太陽の対流層からコロナにかけての磁気プラズマの振る舞いを調べたものである。3次元の配置、あるいは2次元でも非等方熱伝導を取り入れるなど数値計算としては大規模なものであるが、得られた結果から基礎となる物理過程を抽出し理解することにも成功している。対象とした現象も太陽物理学上重要かつ興味深いもので、全世界で多くの研究者が競って研究を進めているテーマである。本研究はその中でもトップクラスのもので、得られた知見は太陽物理学に大きな進歩をもたらすものであり、博士学位論文として十分の内容を備えたものと判断した。