

氏 名 高橋 邦生

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1224 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Numerical Studies of Emerging Magnetic Flux in
the Stratified Atmosphere

論文審査委員 主 査 教授 富阪 幸治
准教授 末松 芳法
准教授 関井 隆
教授 堀内 利得
准教授 横山 央明（東京大学）

The emergence of magnetic flux from the interior of the Sun into the solar atmosphere is one of the most important subjects in solar physics because it plays an essential role in various active phenomena, such as flares, surges, X-ray jets, and coronal mass ejections. In order to understand the mechanism of solar activity, we need to investigate how the magnetic fields appear and then evolve in the solar atmosphere. The emergence of a magnetic field into the atmosphere is a highly nonlinear process, and numerical simulations are the most powerful means to investigate the dynamics of emerging flux. In the present thesis, we will perform two and three dimensional magnetohydrodynamic (MHD) simulations of the emerging magnetic flux in order to investigate the relation between the observed dynamics and the underlying physical mechanisms.

At first, we investigate the nonlinear dynamics of solar emerging flux and the formation of intense flux tubes by two-dimensional MHD simulations. An isolated horizontal magnetic flux sheet that is placed below the solar photosphere is unstable to both convective instability and the Parker instability. We performed two cases in the simulations: with and without radiative cooling in the photosphere. Our main results show the following: (1) An initially weak convection zone magnetic flux ($B \sim 600$ G) is amplified up to $\sim 1000 - 1500$ G by the mechanism known as the convective collapse of the flux tube triggered by downflow along the tube in a very short time (~ 10 min) after the emergence of the tube into the photosphere. (2) The maximum speed of the downflow inside the intense flux tube (with a size of $200 - 400$ km) just after the convective collapse is nearly half the sound speed (~ 5 km/s) at the photosphere, and subsequent bounced upward flows exceed the sound speed in the low chromosphere ($\sim 10 - 15$ km/s). Thus shock waves are generated and significantly heat the plasma in the flux tube in the low chromosphere. (3) Strong downdrafts inside the vertical flux tube resulting from the convective collapse produce a line-tying effect near the photosphere, which decelerates the rise motion of the magnetic loop. We found that the numerical results reproduce basic observational features. In the photosphere, the emerging magnetic field is observed as a pair of opposite polarity magnetic elements corresponding to the loop footpoints which move away from each other at around 4 km/s in the initial phase, and they slow down to 1 km/s or less in the later phase of flux emergence. These observed results are consistent with our simulations. Some observational studies have already indicated the evidence of convective collapse in the quiet regions. The observed evolution of field strength (~ 1500 G), velocity fields (~ 5 km/s downflow), and time scale (~ 10 min) of the convective collapse is quantitatively consistent with our simulation results. Bright points are frequently observed in the emerging flux regions. On the basis of these results, we suggest that the emission in

the bright points might be due to the downflow and subsequent shock waves after the convective collapse.

Next, we extend the two dimensional simulations by performing three-dimensional simulations of an emerging magnetic flux tube coupled with surface cooling. We study the effect of the initial twist parameter in an isolated flux tube by taking into account the effect of convective instability due to the surface cooling. The convective collapse is driven by the displacement of matter along the tube by convective instability. Thus the pressure scale height inside the tube decreases, and the pressure equilibrium with the surroundings is only maintained by a contraction of the tube, which increases the field strength. In the case of twisted flux tubes, it is expected that the collapse of the tube may be altered by the azimuthal field component inside the tube. In the simulations we found the following results. (1) In the non-twisted cases, the magnetic field is amplified up to $B > 1500$ G by the convective collapse of the flux tube triggered by downflows after the emergence of the tube into the photosphere. This result is similar to 2D simulations. However, the process is different from 2D simulations in that the tube expands horizontally in the photosphere, and the emerging motion is suppressed temporarily. However, as time goes on, the emergence starts again at the vicinity of the footpoints of the tube. (2) In the twisted cases, the emerging magnetic fields at the photosphere are stronger ($B > 1500$ G) than the non-twisted cases. Therefore, the convective collapse does not occur easily at the footpoints of the tube. The azimuthal field component of the tube also forms a loop structure and the convective collapse is generated partially at the footpoints. This result indicates that the convective collapse will occur easily in regions of weak and vertical magnetic fields.

Finally, we carried out two-dimensional magnetohydrodynamic simulations of the Galactic center gas disk to show that the dense loop-like structures discovered by the Galactic molecular cloud survey by NANTEN 4m telescope can be formed by the buoyant rise of magnetic loops due to the Parker instability. At the initial state, we assumed a gravitationally stratified disk consisting of the cool layer ($T \sim 10^3$ K), warm layer ($T \sim 10^4$ K), and hot layer ($T \sim 10^5$ K). The simulation box is a local part of the disk containing the equatorial plane. The gravitational field is approximated by that of a point mass at the Galactic center. The self-gravity, and the effects of the galactic rotation are ignored. Numerical results indicate that the length of the magnetic loops emerged from the disk is determined by the scale height of the hot layer (~ 100 pc at 1kpc from the Galactic center). The loop length, width, velocity gradient along the loops and large velocity dispersions at their foot points are consistent with the NANTEN observations. We also show that the loops become top-heavy when the curvature of the loop is sufficiently small. so that the rising loop accumulates the overlying gas faster than allowing it to slide down along the loop. This mechanism is

similar to that of the formation of solar chromospheric arch filaments. The molecular loops emerge from the low temperature layer just like the dark filaments observed in the $H\alpha$ image of the emerging flux region of the sun.

論文の審査結果の要旨

本論文は、太陽活動領域等の天体に見られる磁束管（磁気チューブ）浮上現象を2次元および3次元の非定常磁気流体力学シミュレーションによって系統的に研究したものである。申請者は、太陽表面の輻射冷却現象をニュートン近似により取り扱った上で、理想磁気流体力学方程式を、良くテストされたCIP法（2次元）およびラックス・ヴェンドロフ法（3次元）の数値計算法により解いた。また銀河中心領域の分子線電波ループを磁束管浮上現象の立場から調べた。

第2章では2次元平板シミュレーションが取り扱われ、対流層に埋められた磁束管（実際は磁束板）の磁気浮力不安定性によって、光球、彩層、コロナへ上昇する過程が、磁場強度、磁束管の厚み、輻射冷却時間などを広い範囲で変えながら調べられた。その結果、浮き上がった磁力線の両方のつけ根（足元）はしだいに太陽表面に垂直な形状をとる。この磁束管の足元で輻射冷却により冷却したガスは、下降流を形成し、磁束管内部で熱圧力が減少することにより、磁束管の半径を縮めること、また、この対流崩壊（convective collapse）現象が、活動領域に見られる強い磁場の生成に重要であることが明瞭に示された。さらに申請者は、断熱変化を仮定した計算とこれを比較対照し、ひので衛星などによる観測と比較した。その結果、磁束管の足元の間隔の変化が、ひので衛星で観測された時間変化と一致するなど、対流崩壊現象に特有と考えられる現象が観測されていることが明らかとなった。

第3章では、より現実的と考えられる3次元シミュレーションが取り扱われ、特に磁束管のひねりに着目して、軸方向の磁場強度とひねりの2つのパラメータを広い範囲で変えながら解析が行われた。無力（force-free）配位のひねりを持つ磁束管を対流層に埋め、その上昇過程と対流崩壊現象が計算された。

(1) その結果、ひねりのない磁束管の場合、光球より上部で半径方向に大きくふくらんでしまうことが分かった。(a) 軸方向の磁場強度が弱い場合は浮上に失敗すること、(b) 磁場強度を上げて磁束管の足元は垂直方向までは立ち上がらず、2次元で見たような強い磁場は形成されず、(c) さらに磁場強度の強い場合のみ、ふくらんだ磁力線の足元で対流崩壊現象を生じ、1500G以上の垂直磁場ができることが分かった。

(2) それに対して、ひねりをもつ磁束管の場合は、円周方向の磁場成分が磁束管を圧縮する方向に働くため、半径方向のふくらみが小さくなる。しかし、この円周方向の磁場成分は磁束管の足元では、下降流を起こさない方向の磁気圧勾配を生じることが明らかとなった。その結果、(a) この場合は、対流崩壊現象は磁束管の足元では生じず、(b) 円周方向の磁場が光球と連結された付近で生じる、という全く別の活動領域磁場の形態が見いだされた。

第4章では、銀河中心領域の電波観測で明らかになった、分子雲のループ状構造の成因を、2次元シミュレーションにより研究した。重力場が銀河円盤の上下で逆向きであることが太陽大気の場合とは異なるが、本質的には類似のメカニズムにより磁場のループ構造が形成され、その大きさも観測と良く一致することがわかった。

このように申請者は、磁束管浮上現象と、そこで磁場を強める効果である対流崩壊現象を広いパラメータ領域について系統的に研究し、その物理過程と観測的妥当性を明らかに

した。これは太陽物理学において基本的問題の一つである、太陽の磁気活動の基礎過程について新たな知見を与えるもので、十分意義のある成果と判定された。また同じ物理過程は、銀河中心領域の分子線電波ループ構造の成因となっていることも示された。これらの結果から、審査委員会は本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。