

氏 名 新 田 伸 也

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第668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 Self-similar evolution of fast magnetic reconnection
in free space :a new model for astrophysical
reconnection

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 渡邊 鉄哉
教授 櫻井 隆
教授 堀内 利得
教授 観山 正見
教授 柴田 一成 (京都大学)

論文内容の要旨

We present a new model for time evolution of the fast magnetic reconnection in free space, which is characterized by self-similarity. The possibility of this type of evolution is verified by numerical simulations. We also find an analytical solution which is consistent with the numerical result.

In many cases of astrophysical problems, e.g., solar flares or geomagnetospheric substorms, the spatial scale of the reconnection system significantly expands as time proceeds. The focus of this work is on this expanding phase. The resultant spatial scale of the reconnection system is much larger than the initial scale (its dynamic range is 10^5 - 10^7 in order of magnitude). Thus, actual astrophysical reconnection must be treated as an evolutionary process in a free space which is free from any influence of external circumstances, at least in its expanding phase just after the onset. Eventually, the evolution will be strongly influenced by these external circumstances, and will settle into a final state. Even in this final state, we can expect the influence of the expanding phase will continue to affect the later evolution of the system.

In spite of this, most previous numerical works focused on the character of evolution strongly affected by artificial boundary conditions on the simulation boundary. On the other hand, most analytical works focused on a stationary state of the reconnection as a boundary problem. However, we do not know how we should impose a well-described boundary condition for these cases, because it is actually determined as a result of the evolutionary process of this expanding phase. Hence, the freely expanding phase is essential to our understanding of the properties of astrophysical magnetic reconnections.

Our new model for magnetic reconnection aims to clarify a realistic evolution and spontaneous structure formation in free space. We assume the reconnection arising in an asymptotically uniform current sheet system (the Harris current sheet). The only fixed spatial scale in this system is the initial current sheet thickness, which is finite. Such a system probably has a self-similar solution, because when the system sufficiently matures, there is no fixed proper spatial scale in the system other than the size of the expanding system itself. Thus, it is worthwhile to study the possibility of self-similar evolution of magnetic reconnection. We do this both numerically and analytically as outlined below.

First we study it numerically, wishing to obtain evidence of self-similar evolution of the system. The reconnection is supposed to be triggered by artificially enhanced resistivity in the middle of the current sheet, which is held as a constant, independent of the time. This is a simplified model for anomalous resistivity. We were able to carry the computer simulation for the

period while the system expanded by almost three orders of magnitude in the spatial scale and we succeeded in finding the expected self-similar expansion of the system. The characteristic structure around the diffusion region is quite similar to the Petschek model which is characterized by a pair of slow-mode shocks and the fast-mode rarefaction-dominated inflow. In the outer region, a vortex-like return flow takes place driven by fast-mode compression caused by the piston effect of the reconnection jet takes place. The entire reconnection system expands self-similarly.

However, owing to technical reasons in computer simulation, the dynamic range of the expansion in the spatial scale studied by our numerical simulation is not sufficient to constitute evidence that the obtained evolution is truly a self-similar one. In order to check this, we sought a self-similar solution of the inflow region by an analytical study and compared the solution with our numerical result. By assuming that deviation owing to the reconnection from the initial equilibrium state is very small, we can analyse it with a perturbative method. This approximation is relevant for the inflow region to the original current sheet. We adopt a traditional mathematical method called the Grad-Shafranov approach. After a long derivation, we obtain several equations for the inflow region. One of them is a second order partial differential equation of the elliptical type for the magnetic flux function. We call it the Grad-Shafranov [G-S] equation. Each of the other equations shows an algebraic relation between a physical quantity and the magnetic flux function. Thus, by solving the G-S equation under a relevant boundary condition, we can obtain the distribution of magnetic flux function which shows the magnetic structure of the system. Once we obtain the magnetic flux function, we can easily derive the distributions of other quantities from other equations. The obtained solution for the inflow region is fairly consistent with our numerical solution.

This analytical study confirms the existence of self-similar growth. On the other hand, numerical study by time-dependent computer simulation verifies the stability of the self-similar growth with respect to any MHD mode. Hence, these two approaches are complementary, and their results confirm the stable self-similar evolution of the fast magnetic reconnection system.

近年、天体における磁気リコネクション現象が注目を集めるようになってきている。太陽においては「ようこう」を中心とするX線観測により、フレアはもとより、CME、X線ジェットや磁場浮上領域の様々な活動現象が磁気リコネクションを原因とするのではないかと考えられ、その仮説と多くの観測事実との整合性が指摘されている。恒星の活動性や銀河・銀河団における高温プラズマの振る舞いも、その原因を磁気リコネクションに求める説は有力となっているし、地球磁気圏においても、オーロラなどを多彩な現象を伴う磁気圏のサブストームが磁気リコネクションによって引き起こされることが明らかになってきている。申請者の論文は、この磁気リコネクション現象をより物理的に理解するために、数値シミュレーションを行うと共に、その準解析解を導出し、その両結果を総合して、新しい知見、即ち自己相似的な解の存在を示し、この解の物理的な解釈を行い、既存の定常解や数値解との関連や観測的検証の可能性などを議論したものである。

申請者は、境界を持たない自由空間において、磁気リコネクションによって自ずと形成される構造の時間変化を調べることとした。2次元空間 (x,y) において、平面上 $(y=0)$ 一様に広がる電流面を設定し、その限られた領域に異常抵抗(空間・時間的に固定された有限の抵抗)を導入し、磁気リコネクションを発生させる。この際、唯一の空間的な尺度となり得るものは、有限な電流面の厚さだけである。このような系においては、系の大きさが電流面の厚さに比して充分大きく発展した際には、系の大きさ自身以外には適当な長さの尺度がなくなり、解は自己相似的な発展を遂げると考えられる。

まず数値的なシミュレーションを行った結果、Petschekモデルと呼ばれる定常解に似た構造をもち、自己相似的に増長する解を得ることができた。すなわち、2方向のスローモード衝撃波面とファーストモード膨張波に特徴づけられる形状は、計算可能な空間スケールが3桁程度増長する間について、リコネクションジェットの前面で圧縮されて生じた渦が、電流面に流入する流れを形成しながら相似的に維持されていくことが分かった。

次に、数値シミュレーションで得た自己相似的な解の振る舞いを検証するため、解析的な取り扱いを行った。ファーストモード膨張波と共に拡大する座標系を導入し、流入流の存在する領域を初期状態からの摂動問題として捕らえ、その座標系で磁気ポテンシャルの楕円型偏微分(Grad-Shafranov)方程式の境界値問題として求めた。得られた流入流領域の構造は、数値シミュレーションの結果と類似していることが検証された。

ファーストモード膨張波に伴って発生する低密度(dimming)領域の成長の様子は、太陽フレアにおいて、その時間発展を観測できる可能性があり、このモデルの観測的検証の可能性を示唆するものである。

以上、申請者によって得られた結果は、従来の磁気リコネクションモデルの理解に新しい知見を与えるものであり、高く評価できる。