

氏 名 裴 文 兵

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第523号

学位授与の日付 平成13年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Long Time Scale Evolution of Collisionless Driven

Reconnection in a Two-Dimensional Open System

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 岡本 正雄  
教授 小森 彰夫  
教授 佐藤 哲也  
教授 堀内 利得  
教授 吉田 善章（東京大学）  
助教授 小野 靖（東京大学）

## 論文内容の要旨

Collisionless magnetic reconnection is a fundamental process of many dynamical phenomena with a fast and impulsive energy release observed in high temperature plasmas, such as solar flares, geomagnetic substorms and tokamak disruptions. Magnetic reconnection requires some non-ideal mechanism to break down the frozen-in constraint in a weak field region, called dissipation region, and thus allows the topological change of magnetic field. This process can lead to a sudden release of stored magnetic energy into particle energy and plasma transport in a large spatial scale. The fast and impulsive reconnection in collisionless plasmas remains one of major subjects of plasma physics and at a hot issue to date. Collisionless reconnection driven by an external plasma inflow, collisionless driven reconnection, is one of the potential candidates because reconnection rate is mainly controlled by external driving conditions. Driven reconnection is a dynamical process in an open system where there exist energy inflow and outflow through its boundaries. For an open system with a constant energy supply, we would expect two ways of time evolution in collisionless driven reconnection in a long time scale, i.e., steady and intermittent ways. Only a few particle simulations have so far been carried out to investigate dynamical process of collisionless driven reconnection. However, these studies are restricted to only early growing phase because a periodic condition is used at the downstream boundaries. Thus, which way the system selects as an evolution route remains unsolved to date.

In order to explore long time scale behavior of collisionless driven reconnection, a full open boundary model is required. We develop a new two-dimensional particle simulation model for an open system with free conditions at the downstream boundaries on the basis of the previous version. In this model, a free physical condition is used at the downstream boundary, across which particles can freely go in and out. At the upstream boundary the driving condition can be uniquely determined by an external driving electric field which is described by two key parameters, i.e., the strength  $E_0$  and the early non-uniformity scale  $x_d$ . Based on the newly developed open model, long time scale evolution of collisionless driven reconnection is simulated. The simulation results reveal many new features of collisionless reconnection which help us to understand the physical processes of collisionless reconnection. In this thesis, we clarify the mechanism of collisionless driven reconnection, and the relationship between the driving conditions and the long time scale behavior of driven reconnection.

The evolution of collisionless driven reconnection depends strongly on

the external driving electric field. The strength  $E_0$  controls the reconnection rate, while the scale  $x_d$  controls the current layer shape and thus the magnetic field configuration. It is found that there are two regimes in the long time scale behavior of collisionless reconnection which is mainly controlled by the scale  $x_d$  in our simulation parameter range, i.e., steady regime and intermittent regime. In a small  $x_d$  case the system evolves toward a steady regime in which steady reconnection is realized and thus the global field topology remains unchanged. This is the first results that particle simulation discloses the existence of steady reconnection. On the other hands, in a large  $x_d$  case the system evolves into an intermittent regime in which magnetic islands are frequently excited to grow near the center of the current sheet.

The physical features of the steady reconnection is investigated. The reconnection rate in the steady regime is determined by the strength of the driving electric field  $E_0$  even if reconnection would be triggered by microscopic particle dynamics. In other words, microscopic scale dynamics in the current sheet evolves so as to accommodate macroscopic scale dynamics in the surroundings. The dissipation region has two-scales structure corresponding to both the electron dynamics and the ion dynamics. The electron dissipation region is dominated by the electron inertia effect which controls the electron flow velocity through an electrostatic field. The ion inertia effect is responsible for breaking the ion frozen-in constraint in the ion dissipation region, while the ion meandering motion plays an important role in ion dynamics which controls the spatial structures of plasma density, ion flow velocity and ion temperature. Although the current is predominantly carried by electrons, the current layer has the half-width of the ion meandering orbit scale  $l_{mi}$ . This is because the density profile is exclusively controlled by the massive ion motion. That is, the global dynamic process of steady magnetic reconnection is dominantly controlled by ion dynamics. The electrostatic field generated through a finite Larmor radius effect is a key to coordinate the motions of electrons and ions. It leads to electron acceleration in an equilibrium current direction in the ion dissipation region and ion heating by intensifying meandering motion. Our results are in good agreement with the recent experimental results in MRX in the aspects of current layer width and ion heating [Yamada *et al.*, Phys. Plasmas 7, 1781 (2000), Hus *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84, 3859 (2000)].

The dynamical process of collisionless reconnection in the intermittent regime is studied. The intermittent behavior is found to appear due to the frequent formation of magnetic islands as a result of the excitation of an electron microscopic instability. The detailed analysis of simulation

results reveals that the island growth is caused by the current increase through the electron trapping in it, and thus the instability is triggered by electron dynamics. To shed light on the island excitation mechanism in the intermittent regime, the effect of the driving parameters  $E_0$  and  $x_d$  on the current layer structure and the magnetic field configuration has been explored in the regime of steady reconnection. As  $E_0$  increases, the current layer is similarly compressed, and thus the corresponding magnetic field configuration is almost unchanged. On the contrary, as  $x_d$  increases, the current layer becomes narrow and flat in shape so that the angle between the separatrices decreases. The change of the current layer structure leads to generation of a seed island with spatial size longer than the electron meandering size in the outflow direction, which is equal to the spatial size of unmagnetized electron thermal motion. This island grows up by increasing the electric current through the electron trapping in it. Thus, in a large  $x_d$  case the system evolves into the intermittent regime in which magnetic islands is frequently formed near the original X point.

本学位論文は、太陽コロナや地球磁気圏を始めとする様々な天体プラズマ、地上実験プラズマ、及び核融合プラズマで観測される、ダイナミカルで高速エネルギー解放を伴った磁気リコネクション現象の全体像解明を目的とした研究を行っている。そのためには、従来の定常モデルや閉鎖系モデルに立脚した解析では不十分で、ミクロな粒子運動論過程と長時間にわたるマクロなダイナミカル構造変化を同時に自己無撞着に記述し得る開放系の運動論的モデルに基づくシミュレーションモデルが必要であるという考察の下に、開放系での電磁粒子シミュレーションモデルを開発し、外部駆動源が存在する系での駆動型無衝突磁気リコネクションの解析を行っている。

論文では、まず、この研究のために開発した開放系での電磁粒子シミュレーションモデル、即ち、数値手法、初期条件、境界条件、及び、シミュレーションパラメータについて解説している。特に、境界条件は上流境界条件および下流境界条件から成り、この研究のために独自のアイデアに基づき開発したものをを用いている。上流境界では、流入速度をコントロールする電場強度  $E_0$  と流入するプラズマの流速パターンをコントロールする空間スケール  $x_d$  の2つのパラメータによって制御された、外部駆動電場を平衡電流方向に加え、系内へのプラズマ流入を可能にしている。一方、下流境界では、系内部のダイナミカルな時間発展に応じて、荷電中性条件を満たしながら、プラズマが自由に境界を流出入できる自由境界条件を課している。この2つの境界条件の開発により、従来のモデルでは不可能であった、開放系での無衝突磁気リコネクションの長時間にわたる時間発展の解析が可能となっている。

次に、開発した開放系モデルを用いて得られたシミュレーション結果の分析と考察を行い、外部駆動電場と長時間にわたる系の力学構造変化の関係、イオンダイナミクスや電子ダイナミクス等のミクロな運動論効果と無衝突駆動リコネクションの関係を明らかにしている。特に、上流境界でのプラズマ流速パターン（空間スケール  $x_d$ ）を変化させることにより、定常的な磁気リコネクションが現れる領域から間欠的振る舞いを示す領域へと解が遷移することを明らかにしたことは特筆されるべき成果であろう。本論文では、4章で定常リコネクションを、5章で間欠的振る舞いに関する詳細な解析を行っている。

主な結果として、定常リコネクションは空間スケール  $x_d$  が小さい場合に実現し、

- 1) 定常状態でのリコネクション率は、外部駆動電場の強度  $E_0$  によって制御されており、リコネクション電場は駆動電場  $E_0$  に等しくなる。
- 2) 系の力学構造は、主としてイオン熱運動（蛇行軌道）によって支配されており、電流層の厚さはイオン蛇行軌道の振幅に等しくなる。
- 3) 電流層で有限ラーモア効果により静電場が発生し、イオン蛇行軌道との相乗効果によりイオンが加熱される。
- 4) これらの結果はプリンストン大学で行われた MRX 実験と良く整合している。

一方、駆動電場の空間スケール  $x_d$  が増大すると、

- 1) 電流層の構造変化に伴い、イオンの運動に支配された駆動リコネクションに重畳して、局所的にテアリング不安定性が誘発され、磁気島の間欠的生成と下流への輸送が発生する。

- 2) そのため、リコネクション電場や電流層の力学構造が間欠的に時間変化する。
- 3) これらの振る舞いは、電流層が圧縮され、その幅が電子の蛇行軌道振幅に近づいた時現れることから、電子ダイナミクスが重要な働きをしているものと結論している。

以上の研究成果は、開放系での自己無撞着な電磁粒子シミュレーションモデルというこれまでにない独自の着想に基づく数値モデルの開発とそれを用いた詳細な物理過程の解析によって始めて得られたものであり、開放系における無衝突駆動リコネクションの研究に大きな前進をもたらすものであると評価できる。従って、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容を持つものであると結論した。