

MHD 乱流シミュレーションコードの開発: 磁気リコネクションでの乱流効果

東森 一晃 [1]; 星野 真弘 [1]; 横井 喜充 [2]
[1] 東大・理; [2] 東大・生産研

Development of MHD turbulence simulation code: Effects of turbulence in magnetic reconnection

Katsuaki Higashimori[1]; Masahiro Hoshino[1]; Nobumitsu Yokoi[2]
[1] University of Tokyo; [2] University of Tokyo

In general, since the magnetic Reynolds number in space, e.g., the Earth's magnetosphere and the solar corona, is much greater than unity, turbulence can be observed in many situations. Turbulence plays a key role in various phenomena like solar wind, magnetic reconnection, the diffusive acceleration in shocks, and so on. For example in magnetic reconnection, one of the main interests is in the point that how turbulence affects the nature of the release of the magnetic field energy.

The relationship between turbulence and magnetic reconnection has been studied from 1980s by both theoretical and numerical procedures [e.g., Matthaeus & Lamkin, 1986]. In many cases, ad-hoc turbulence is assumed. For example, it is theoretically suggested that the rate of reconnection is independent of the electric resistivity by assuming the strong Alfvénic turbulence around the current sheet [Lazarian and Vishniac, 1999]. On the other hand recently, the importance of self-generation of turbulence in magnetic reconnection has been addressed from the viewpoint of the theory of turbulence [Yokoi and Hoshino, 2011]. This theory predicts that the cross helicity (which is defined as a macroscopic value for turbulence) generated by the breaking of symmetry in magnetic reconnection would enhance the rate of reconnection dramatically.

We invent a new simulation code, where the effects of self-generated turbulence are included, in order to clarify how turbulence affects the macroscopic physics in the self-consistently developing system. Here, we present the MHD turbulence simulation code and discuss the early simulation results for magnetic reconnection. In our simulation code, equations of time evolution for the cross helicity and turbulent kinetic energy (which can be derived strictly) are solved in addition to the ordinal MHD equations. Then, these quantities for turbulence interact with mean quantities, like the magnetic field and the velocity, through the turbulence electromotive term in the Ohm's law. Simulation results show the generation of the cross helicity along the reconnection exhaust as is predicted by the theory of turbulence. It also turned out that the spatial inhomogeneity of the cross helicity determines the spatial distribution of the effective turbulent diffusion in the current sheet. In this presentation, based on these simulation results and the theoretical forecast, we discuss how the self-generated turbulence affects the macroscopic physics in magnetic reconnection.

一般に地球磁気圏や太陽コロナをはじめ、宇宙空間での磁気レイノルズ数は非常に大きく、乱流状態となっていることが多い。そして乱流は太陽風や磁気リコネクション、衝撃波での統計加速など、様々な現象で鍵となっている。例えば我々が現在対象としている磁気リコネクションでは、磁気エネルギーの解放過程が乱流の存在によりどう変わるか、ということに興味がある。

磁気リコネクションと乱流の関係は 1980 年頃から理論・数値シミュレーションによって調べられてきた [e.g., Matthaeus and Lamkin, 1986]。多くの場合、乱流はアドホックなものとして与えられる。例えば電流層付近での強い Alfvén 乱流を仮定し、リコネクション効率が電気抵抗に依存しないという理論が提唱されている [Lazarian and Vishniac, 1999]。一方で近年、乱流理論の観点から磁気リコネクションで自発的に発達する乱流の重要性が指摘されている [Yokoi and Hoshino, 2011]。そこでは、対称性の破れによって生じるクロスヘリシティ（マクロに定義された乱流の物理量）の効果によって、リコネクション効率が劇的に変化するという理論的予測がある。

我々は、自発的に発達する乱流効果を取り入れた新たな数値シミュレーションコードを開発し、セルフコンシステントな系で乱流がマクロに及ぼす影響を明らかにしたい。今回は開発した MHD 乱流シミュレーションコードと、これを磁気リコネクション問題に適用した初期結果について議論する。我々の開発したシミュレーションコードでは、通常の MHD 方程式系に加え、厳密に導かれるクロスヘリシティと乱流エネルギーの時間発展方程式を解く。そしてこれらマクロに定義された乱流の物理量が Ohm の法則中に現れる乱流起電力を介して、磁場や速度場などの平均場と相互に影響しあうシステムとなっている。これまでの結果によると、理論的予測と同様に、リコネクションアウトフローに沿ったクロスヘリシティの生成が見られ、このクロスヘリシティの空間非一様性によって、電流シート内での実効的乱流拡散の空間構造が決まることがわかった。本発表では、シミュレーションにより得られた知見と理論的予測を基に、リコネクションで自発的に生成される乱流が、マクロな物理に与える影響について議論する。