

宇宙プラズマにおける PIC-MHD 連結階層シミュレーションモデル

杉山 徹 [1]; 草野 完也 [1]
[1] 地球シミュレータセンター

PIC - MHD Interlocked Simulation in Space Plasma

Tooru Sugiyama[1]; Kanya Kusano[1]
[1] ESC/JAMSTEC

A fluid description of plasmas is useful to investigate the global structure in space plasma, such as the magnetosphere and heliosphere. It can reproduce the time evolution of macroscopic variations of density, bulk velocity and pressure. On the other hand, the microscopic dynamics of plasmas should be described by spatial and velocity distribution in the phase space. Wave-particle interaction process is the typical example for the application of the microscopic description. For these micro- and macroscopic description, different kinds of numerical approach may work well, respectively, e.g. MHD simulation for the macroscopic phenomena and PIC simulation for microscopic process. However, it is widely accepted that the cross-scale interaction between micro and macro processes plays a crucial role, for instance, in the diffusion region in the magnetic reconnection process. Therefore, a new model which can treat MHD-scale dynamics including particle kinetic effects is necessary. We have developed the new simulation method called "Interlocked simulation", in which MHD and PIC simulations are simultaneously performed. Here, we show its algorithm and some examples.

宇宙プラズマにおいては、人口衛星で観測されているような短い時間スケールで発展する「速い磁気リコネクション」を説明しようという試みが、現在、盛んになされている。特に数値シミュレーション手法を用いた説明では、磁気流体力学 (Magnetohydro Dynamics、以下 MHD) 的なアプローチのみならず、粒子シミュレーション (プラズマを構成する粒子 (電子やイオン) の個々の運動と、その粒子の運動によって生じる電流や電磁場の変化を矛盾なく解き進める手法、以下 PIC) によるアプローチも積極的に行われている。昨今の計算機能力の発展により、粒子シミュレーションでも 3次元空間で行うことが可能となったが、「速い磁気リコネクション」を説明するモデルの構築がいまだ発展途上である理由は、以下のような課題が残されているためである。

(1) MHD シミュレーションにおいて、磁場拡散領域に生じる異常電気抵抗を、self-consistent に決めることができない。

(2) PIC シミュレーションは、システムの一部を切り出した計算のため、人為的な境界条件を必要とする。

これらの課題に取り組むため、我々は連結階層シミュレーション手法を用いた新しい計算モデルを開発した。そこでは、MHD シミュレーション内の磁場拡散領域に、PIC シミュレーションをはめ込むことにより、運動論効果を取り入れたグローバル MHD シミュレーションが実行される。これにより、上記 2つの課題の克服が可能となる。本講演では、その接続方法を紹介する。

MHD と PIC シミュレーションを同時に実行し、MHD の時間ステップ毎に、お互いの情報を交換する。その際、MHD スケールは PIC スケールに比べ長く大きいため、PIC の計算結果を時間と空間方向に平均化した値に対して連結を行う。また、PIC シミュレーションでは、MHD シミュレーションでは再現されない高周波かつ短波長の波動が存在する。これらの波動は、MHD シミュレーションにとっては雑音であるため、PIC から MHD へ情報を渡す際には、この雑音を取り除いたものでなければならない。この操作のため、MHD と PIC シミュレーションの間に緩衝領域を設けたモデルを用いる。シミュレーションプログラムは、MPI を基本に構成される。MHD と PIC コードは、情報交換のタイミングのみ考慮された独自開発のコードを用いている。すなわち、各コードを統合するメインルーチンをかぶせるだけで連結を実現させるアルゴリズムを用いている。太陽コロナや磁気圏など、システム全体を PIC シミュレーションで計算することは不可能であることから、連結階層シミュレーション (Interlocked Simulation) 手法はスケール間結合を取り扱う強力なツールとなり得る。