

4. プラズマ・核融合シミュレーションの発展と将来への期待

4.3 プラズマ物理研究の観点から

堀内利得

(核融合科学研究所)

Advances in Plasma and Fusion Simulation and Prospects for the Future
From a Viewpoint of Plasma Physics Research

HORIUCHI Ritoku

National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan

(Received 2 February 2004)

Computer simulation research has greatly changed its feature due to the appearance of supercomputers and their recent revolutionary development. This paper briefly reviews how plasma simulation has developed under such a background in the information technology and what kind of problems will be attacked in the coming future, in regard to basic plasma physics research, including self-organization of an MHD plasma and collisionless reconnection. Especially, the importance of cross-hierarchy simulation is discussed.

Keywords:

plasma simulation, self-organization, collisionless reconnection, supercomputer, cross-hierarchy simulation, open system, complexity

4.3.1 はじめに

プラズマ中には、構成粒子である電子やイオンのスケールに依存したマイクロ物理過程から閉じ込めスケールのマクロ物理過程までの、異なった時間・空間スケールの物理過程が混在しており、それらが相互に影響を及ぼしあいながら系の力学構造や発生する現象を制御している。さらに、時として、今注目している系を取り囲む外部系との間でエネルギーのやり取りがあるため、そこで生起する現象は非常に複雑となっている。このようなプラズマ系で生起する複雑現象の解析には、スーパーコンピュータ(スパコン)を用いた大規模シミュレーションが強力な武器となる。

計算機が科学研究に利用できるようになった60年代の早い時期から、Dawsonとその共同研究者を中心に計算機を用いたプラズマのシミュレーション研究が始まった。プラズマの計算機シミュレーションは、注目する現象の時間・空間スケールに応じて、流体的記述に基づくものと運動論的記述に基づくものの2つに大きく分けられる。流体的記述では適当な輸送係数を仮定して磁気流体方程式を解くことにより、長時間で大きな空間スケールの現象を解析する。一方、運動論記述では、電磁場と粒子の相互作用を含む詳細なモデルに基づく運動論方程式(ブラゾフ方程式またはフォッカープランク方程式)を数値的に解く、あるいは、場や他の粒子と相互作用している粒子の集団運動を自己無撞着に計算する粒子シミュレーションを実行することにより、ミクロスケールの現象を解析する[1]。

以下では、マクロスケールの現象としてプラズマの自己組織化を、ミクロスケールの現象として無衝突磁気リコネクションを取り上げ、スパコンの登場とその後の発展によりどのようにプラズマ・シミュレーションが進展してきたかを述べ、最後に将来への期待として「階層横断シミュレーション」に言及する[2]。

4.3.2 プラズマの自己組織化

乱れた状態にあるプラズマが、自発的に整然とした空間構造を持つ状態へと緩和していく自己組織化現象がしばしば自然界や実験室プラズマで見られる[3]。地球の双極子磁場の形成過程がその典型例としてあげられる[4]。一見したところ複雑でとても起こりそうにないが、プラズマで生起する自己組織化現象は、魅力的な研究テーマであり、長い間、多くの研究者を惹きつけてきた。

もちろん、2次元系でも起き得るが、プラズマの自己組織化現象の本質的で興味深い点は、その3次元性にある。Fig.1は、円柱状導体容器に閉じ込められた磁気流体プラズマの自己組織化過程を示している。4本の直線状のプラズマ柱が磁気リコネクションを介して1本のヘリカル状のプラズマ配位(下図)へと緩和していく様子がわかる。スパコンが登場した80年代半ばより、このような3次元磁気流体モデルを用いた自己組織化のシミュレーション研究がようやく可能となった。当初は50×50×50程度の空間メッシュを用いた計算が限度であったが[5]、その後のスパコ

author's e-mail: horiuchi.ritoku@nifs.ac.jp

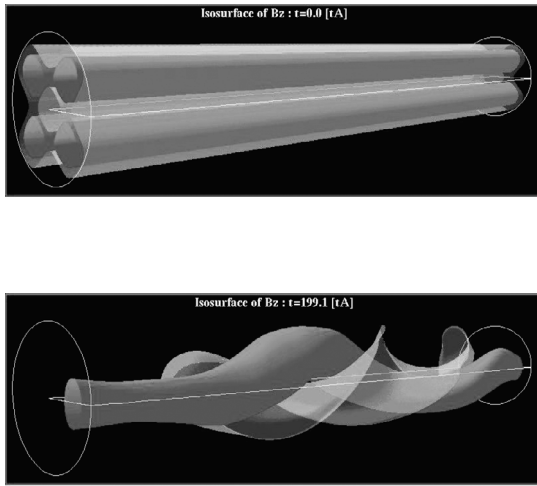


Fig. 1 Self organization of a magnetohydrodynamic plasma in a cylindrical conducting vessel where isosurfaces of toroidal magnetic field at the initial and final stages are respectively plotted in the top and bottom panels, respectively.

ンの能力の飛躍的増大により、現在では、1次元方向に1,000メッシュ以上をもつ3次元計算が可能となっている。Fig. 1は、 $300 \times 128 \times 256$ の空間メッシュを用いた結果である。自己組織化現象では、非線形過程と散逸過程の競合過程により、磁気エネルギースペクトルのカスケード現象と磁気ヘリシティスペクトルの逆カスケード現象が同時に起こることが知られている[5]。別の言い方をすると、このスペクトル遷移現象に伴い、プラズマ中にコヒーレントな磁場の空間構造が形成され、磁気リコネクションにより、磁場トポロジーの変化と余分な磁気エネルギーの効率的散逸が発生し、安定で秩序構造を持った自己組織化状態へプラズマが自発的に緩和する。これは、空間スケールの大きなモードと小さなモードとの間でエネルギーや情報のやり取りが行われていることを示しており、そのため、広い範囲の空間スケールの現象を同時に記述できる精度の良いシミュレーション手法が必要となる。このようにシミュレーションによる自己組織化のダイナミカルな非線形過程の解明には、計算機能力の向上が不可欠である。これまでに、様々な系で発生するプラズマの自己組織化現象が計算機シミュレーションにより、解明されている。

4.3.3 無衝突磁気リコネクション

ここでは、高温プラズマ中の重要な基礎過程の1つである無衝突磁気リコネクションに関する粒子シミュレーション研究を議論する。理想磁気流体(MHD)近似が成り立つプラズマ中では、磁場がプラズマに凍結しているため、磁気リコネクションは起こりえない。高温・希薄で2体粒子間衝突効果が無視できる無衝突プラズマ中で磁気リコネクションが発生するためには、ミクロスケールの物理に依存した電気抵抗を生み出す「非理想MHD」過程が必要となる。磁気リコネクションの研究で長い間議論されてきて、いまだに決着のついていない問題の1つがこの無衝突プラズマ中での電気抵抗発生機構である[6]。この研究は古く、1960年代にはすでに理論解析を用いた研究として始

まっており、1980年代に入ると粒子シミュレーションを用いた研究へと発展してきた。これまでの研究で提案されてきた機構としては、大きく、プラズマ中で励起された不安定性による波と平衡電流を担う粒子との相互作用に起因する「異常抵抗モデル」と、有限慣性を持った荷電粒子のリコネクション点近傍での運動に起因する「粒子運動論効果」の2つに分けることができる。粒子シミュレーションを実行する場合、プラズマ中には電子とイオンという質量の異なる2種類の荷電粒子に起因するミクロスケールの物理が存在し、それらが相互に複雑に影響を及ぼしながら現象を構成しているため、両者に特徴的な時間・空間スケールを同時に分解できる精度が必要となる。また、数値的に安定で数値ノイズの少ない計算を行うには1空間メッシュあたりの粒子数を多く取る必要があること、等の計算精度に関する要請がある。計算機性能が今に比べかなり劣っていた粒子シミュレーションが始まった当初は、2次元モデルで、かつイオンと電子の質量比を現実の値に比べかなり小さなものを使うなどの工夫をしながら物理的に信頼できる結果を得る努力を行っていた。しかしながら、2次元シミュレーションであるため、異常抵抗の効果と粒子運動論効果の両者が競合する現実的な系においてどちらが無衝突リコネクションの誘発機構として重要であるかという問題に対する解答をこれらのシミュレーションから得ることはできない。それは、「異常抵抗モデル」の解析[7]では平衡電流方向と平衡配位の空間依存性のある方向の2次元平面(Fig.2の(y,z)平面)の物理を解いているのに対し、「粒子運動論効果」の解析[8]では、平衡磁場方向と空間依存性のある方向の2次元平面(Fig.2の(x,y)平面)の物理を解いているためである。両効果の競合現象の解明には、実際の質量比の粒子と十分な時間・空間分解能を持った3次元粒子シミュレーションを長時間行う必要がある。

たとえば、電子とイオンの質量比を200にとった場合、電流シートでのイオンスケールの物理と電子スケールの物理を同時に解析するには、1次元方向に256程度の空間メッシュが、3次元空間では $256 \times 256 \times 256$ 程度の空間メッ

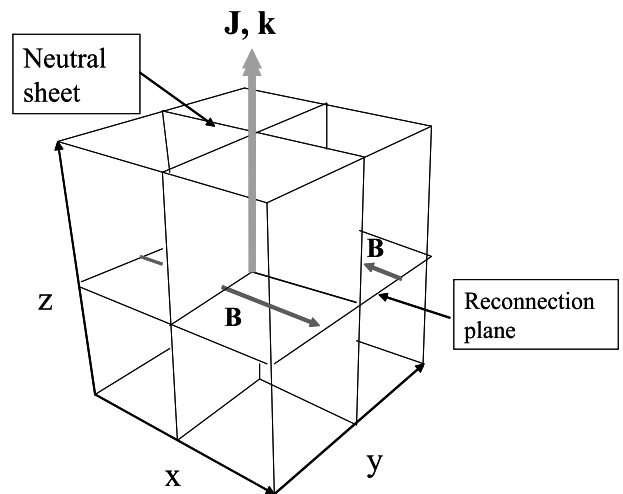


Fig. 2 Simulation domain for analyses of the anomalous resistivity and particle kinetic effects.

シユが必要となる。1空間メッシュあたりの粒子数を100にとると、計算領域としては1~2テラバイトとなり、この計算を10イオン回転時間だけ行くと10万~20万程度の時間ステップ数の計算が必要となる。そのため、この計算を終えるには、世界トップクラスのスパコンでも1~2ヶ月はかかることになる。このように、コンピュータ性能の飛躍的な向上により、かなり目標に近い計算が可能となりつつあるが、まだ全貌の解明には至っていない。近い将来、この目標のシミュレーションが実現するものと期待される。

4.3.4 階層横断シミュレーション

次に、もう1つの重要な磁気リコネクションの側面に議論を移そう。上記の自己組織化の例で見たように、リコネクションの結果、グローバルスケールでの磁場閉じ込め配位の変化やプラズマ輸送が発生する。即ち、磁気リコネクションを通じてミクロスケールの物理とマクロスケールの物理が直接結びついており、磁気リコネクション過程の全貌の解明には、単にミクロスケールとして側面だけでなく、マクロスケールとしての側面も同時に考慮した計算機シミュレーションが必要となる。たとえば、上記の自己組織化の場合、初期配位に摂動を加えると不安定性が発生し、磁束管同士が近づく運動が生まれる。この運動は周辺の磁気フラックスを接点近傍に集積させ、大きなリコネクション電流を形成する働きをする。実験室プラズマに限らず、磁気圏プラズマや太陽コロナプラズマなどの様々な系のプラズマで見られる磁気リコネクション現象には、このようなリコネクションを駆動するエネルギー源が、リコネクションが発生している領域（リコネクション領域）の外側に存在し、かつマクロスケールの物理に支配されている場合が多くあり、現象を複雑にしている。このような外部駆動源が存在すると、無衝突磁気リコネクションの誘発機構も影響を受けるであろうし、また、リコネクションのダイナミクスが全体として大きく変わる可能性がある。そのため、ミクロスケールの物理が重要な無衝突磁気リコネクションを考える場合でも、リコネクション領域を取り囲むマクロな外部系とエネルギーや情報の交換が可能なミクロ開放系モデルに基づく粒子シミュレーションを実行する必要がある。Fig. 3は、外部駆動源であるプラズマ流入の可能な上流境界とリコネクションで生まれた高速のプラズマ流が自由に出入りできる下流境界の2つの開放系境界をもった3次元粒子シミュレーションの例で、質量比として100という値を使用した場合の結果を示している[9]。駆動プラズマ流の影響を受けた電流シートで生起するミクロスケールの物理により、磁気リコネクションが発生し、電流シートがダイナミカルに分裂・変形していく様子がわかる。

ミクロスケールの物理は電流シートの中央に局在した電気抵抗を生み出すことにより、磁気リコネクションを誘発する。その結果、リコネクション点での磁力線のつなぎ変えやリコネクション点近傍に存在する荷電粒子の加熱や加速を通じて急激なエネルギー変換が行われる。リコネクションによって生まれた高速のプラズマ流は、やがて、リコネクション領域を抜け出て、マクロな系でのプラズマ輸

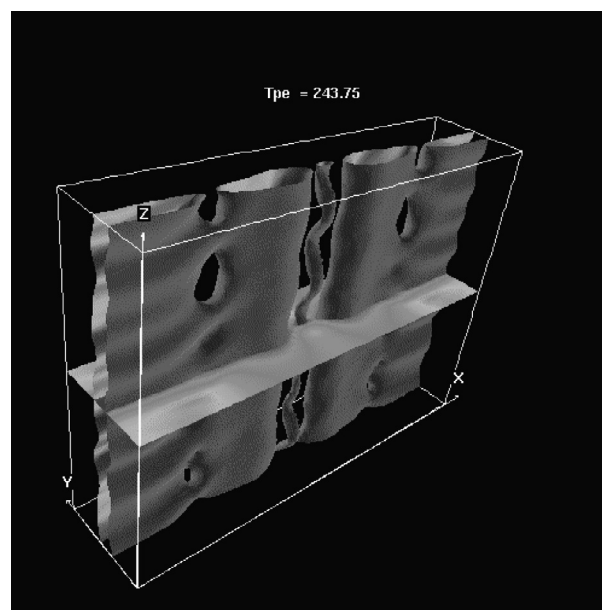


Fig. 3 Perspective view of magnetic field strength ($B_x^2 + B_y^2$) in three dimensions at $\omega_{ce}t = 244$, where weak field regions are plotted by an isosurface.

送や拡散を通じてグローバルな配位や構造の変化を生み出す。このようにリコネクションを伴ったプラズマの複雑現象では、ミクロスケールの物理とマクロスケールの物理が互いに複雑に絡み合っており、その全貌の解明には、異なるスケールの階層が繋がった世界を、同時にかつ矛盾なく解くシミュレーション、“階層横断シミュレーション”，が必要不可欠となっている。このシミュレーションの実行には、現在より数桁大きな計算機性能を持つスーパーコンピュータの登場が待望されている。このように、プラズマの研究は、現在、スーパーコンピュータの飛躍的発展を背景に、ミクロとマクロの階層にまたがった複雑現象の解明を目指した研究へと踏み出したところである。

参考文献

- [1] C.K. Birdsall and A.B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation* (McGraw-Hill, New York, 1985).
- [2] 岸本泰明編：小特集「異なった時空間スケールが関与する多階層プラズマシミュレーション研究」プラズマ・核融合学会誌 **79**, 460 (2003).
- [3] A. Hasegawa, *Adv. Phys.* **34**, 1 (1985).
- [4] J. Li, T. Sato and A. Kageyama, *Science* **295**, 1887 (2002), and references therein.
- [5] R. Horiuchi and T. Sato, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 211 (1985).
- [6] 星野真弘, 柴田一成：プラズマ・核融合学会誌 **77**, 981 (2001).
- [7] 例えば, D. Winske, *Phys. Fluids* **24**, 1069 (1981); M. Tanaka and T. Sato, *J. Geophys. Res.* **86**, 5541 (1981); M. Ozaki, T. Sato, R. Horiuchi and the Complex Simulation Group, *Phys. Plasmas* **3**, 2265 (1996).
- [8] R. Horiuchi and T. Sato, *Phys. Plasmas* **1**, 3587 (1994).
- [9] R. Horiuchi, H. Ohtani and A. Ishizawa, *Comp. Phys. Comm.* (2004) [in press].