

多階層シミュレーションモデルによる磁気リコネクション研究

宇佐見 俊 介

自然界には、様々なスケールの過程が複雑に絡み合っている多階層現象が多く見られます。例えば、人の体は何十兆もの細胞からできていますが、細胞が集まって肺などの器官や組織を構成して人体を作っています。さらに、多数の人間によって複雑な「社会」が運営されています。このように、細胞・器官・個体・社会といった、それらを特徴づける大きさや活動する時間など(スケール)がそれぞれで異なっている場合、それらを「階層」といいます。

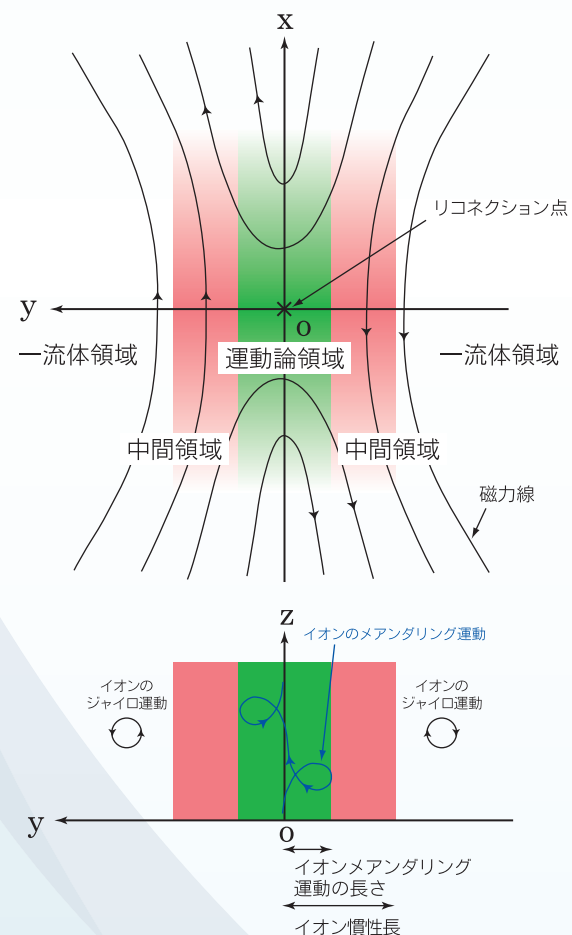


図1 磁気リコネクションの階層構造(上図)と粒子の軌道(下図)。上流方向(y軸方向)については、リコネクション点からの距離によって、運動論領域(緑)、中間領域(赤)、一流体領域(白)に分けられることが分かっています。運動論領域では、粒子の速度によって様々な形状のメアンダリング運動が発生します。下図中の軌道はその一例です。

宇宙に目を向ければ、私たちの地球は太陽系に属していますが、そのような恒星系が多数集まって銀河という階層が構成されています。そして、銀河が数千集まって銀河団を作り、宇宙論スケールで大規模構造を形成しているといわれています。

それでは、核融合科学研究所が研究対象としているプラズマはどうでしょうか。プラズマは、まさに多階層現象の宝庫と言えます。プラズマ中には、プラズマを構成するイオンや電子の運動スケールに依存したマイクロな過程から、領域全体にまたがるマクロスケールな過程まで、様々な時間・空間スケールの物理が混在しています。プラズマ実験装置を例にとりますと、粒子の振る舞いは10マイクロメートル(マイクロは100万分の1)という非常に小さいスケールですが、プラズマを閉じ込めている装置は1メートルサイズです。

我々のグループは、プラズマの基礎的な過程の1つ、磁気リコネクションをターゲットとして、その多階層現象を調べています。磁気リコネクションとは、互いに向きの異なる2本の磁力線が繋ぎ変わる現象で、磁場に蓄えられたエネルギーがプラズマの運動や熱のエネルギーに変換されます。この現象は、核融合プラズマをはじめとした高温プラズマで普遍的に見られる過程です。磁気リコネクションが起きると、磁場の形状が大きなスケール(実験装置ならば装置全体に及ぶスケール)で変化し、大規模なプラズマ輸送が発生します。その一方、この現象の引き金となる物理過程は、非常に小さな領域における、プラズマ粒子1つ1つのマイクロな動きが基になっています。そして、磁気リコネクションはこれらマクロ・マイクロの現象が絡み合って発展していくと考えられています。

磁気リコネクション研究は世界中で精力的に行われており、その階層構造の特色がわかってきました。特に、我々のグループによってプラズマが流入してくる上流方向については定量的な知見が得られています。図1に磁気リコネクションの階層構造について模式的に示しました。磁力線が繋ぎかわる点(リコネクション点)付近では、粒子が単純なジャイロ運動ではなく、まがりくねった、メアンダリング運動と呼ばれる複雑な動きをしています。リコネクション点からイオンのメアンダリング運動の振幅程度までの領域(運動論領域)は、

電流層の幅や磁場の勾配などで代表される現象の時間・空間スケールが粒子のマイクロな運動のサイズと同程度となるミクロの階層です。一方、リコネクション点から離れるにしたがって、現象は空間スケールの大きいゆっくりとした振る舞いへ移行していきます。運動論領域の外側に出ますと、イオンと電子が別々ではありますが流体として扱えるようになります(中間領域)。さらに、リコネクション点からイオン慣性長と呼ばれる長さより離れた場所(一流体領域)は、プラズマの振る舞いは一流体的な描像で記述できるマクロの階層となります。

磁気リコネクションのこの特色を利用して、我々は異なる階層の現象を同時に扱うことができる多階層シミュレーションモデルを考案しました。このモデルでは、領域によって計算手法を変える領域分割法(境界連結法とも呼ばれます)を採用しています。まずは、図2のように上流方向について領域を分割した多階層シミュレーションモデルを作りました。一流体で近似できる領域をマクロ領域とし、この部分は磁気流体法によって計算されます。一方、マクロ領域の内側はミクロ領域とし、粒子法で計算します。ミクロ領域は図1で示された運動論領域と中間領域に対応します。インターフェイス領域とは、粒子・磁気流体法のデータをやりとりして、ミクロ・マクロの階層をスムーズに連結するための技術的な領域です。

粒子法は、多数の場合によっては何十億個ものプラズマ粒子1つ1つの軌道を求めて第一原理的に計算する手法です。磁気流体法は、プラズマを1つの流体と近似して解く手法です。磁気リコネクションを発生させる電気抵抗は、運動論領域におけるプラズマ粒子の運動から自己無撞着に生み出されると仮定していますので、マクロ領域の磁気流体法では、電気抵抗なしの理想磁気流体方程式を用います。

この多階層モデルを用いて行った磁気リコネクションのシミュレーション結果を紹介しましょう。図3は、磁力線および磁場の鳥瞰図です。マクロ領域からプラズマを流入させることにより、ミクロ領域の中心で磁気リコネクションが駆動されています。マクロ領域とミクロ領域の間で、磁力線(磁場)がスムーズにつながっており、階層間が正しく連結されていることが分かります。また、過去に行われた粒子シミュレーション結果と比較して、磁気リコネクションが正しい物理過程の下で駆動されていることも確かめられました。

テストとして行われた今回の多階層シミュレーションでは、計算領域が小さいですが、今後は、モデルをさらに改良して、大規模かつ長時間の多階層シミュレーションを行っていきたくと考えてい

ます。磁気流体法は粒子法に比べて計算負荷が極めて小さいことから、今回の多階層シミュレーションの必要な計算時間・メモリは、全領域を粒子法で解くシミュレーションの40%程度に節約することができました。将来、マクロ領域を広くとることができれば、これまでできなかった核融合実験装置あるいは地球磁気圏などの天体現象全体の多階層シミュレーションを行うことも可能となるでしょう。

(基礎物理シミュレーション研究系 助教)

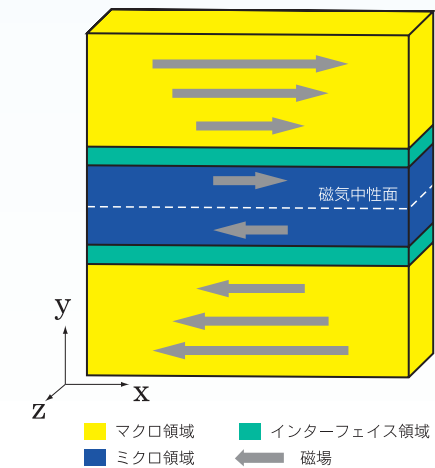


図2 多階層シミュレーションボックスの模式図。上流方向(y軸方向)について領域が分割され、それぞれ異なる手法で計算されます。

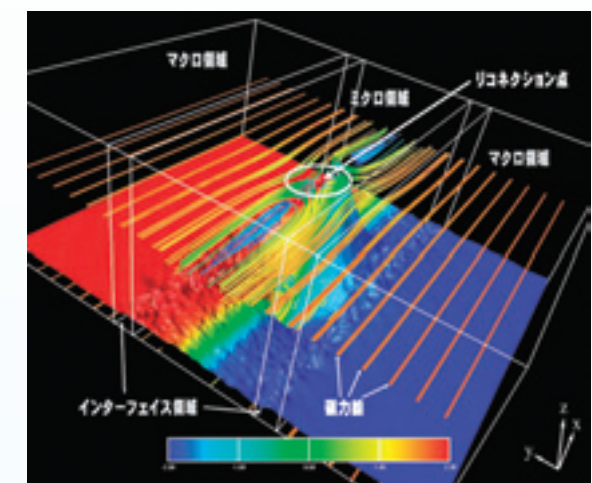


図3 多階層シミュレーションによる磁気リコネクションの例。線は磁力線を表し、カラーマップの色と高さは、それぞれ磁場のリコネクションする成分(x方向)とその結果生まれた成分(y方向)を示します。はじめ、カラーマップの赤色の部分では磁力線が+x方向、青色の領域では-x方向を向いており、y成分は全くない状態でしたが、リコネクション点で磁場のつながりかわりが起こったため、磁力線はU字型になりました。このとき、磁力線にはy成分が生まれるので、カラーマップには高い山と深い谷ができています。