

3-6 シミュレーションによる宇宙天気研究

3-6 Space Weather Research with Computer Simulations

島津浩哲

SHIMAZU Hironori

要旨

宇宙天気研究における計算機シミュレーションについて概観する。特に、宇宙天気シミュレーション特有のグローバル重視(巨視的)と素過程重視(微視的)との二つの立場とそれぞれで用いられるシミュレーションの手法を紹介する。

Computer simulations in space weather researches are reviewed. We introduce two different points of view and methods of the computer simulation, which are characteristic of the space weather simulations: One is the view from global macro-structure and the other is the one from fundamental micro-structure.

[キーワード]

宇宙天気, プラズマ, 計算機シミュレーション
Space weather, Plasmas, Computer simulation

1 シミュレーションの必要性

近年、地球近傍の宇宙プラズマのふるまいを考える分野を、その人間生活に与える影響を考慮して「宇宙天気」として認識されるようになってきている。宇宙プラズマで生じる現象は一般に複雑で、非線形現象の宝庫である。例えば、磁気嵐もサブストームも、生じるプロセス、領域、特性長、特性時間が余りにも多様であり、また、その結合過程が本質であるため、各プロセスの因果関係の理解が進んでいない点が多い。特に、巨視的スケールの現象(特徴的な長さが地球半径以上)と微視的スケールの現象(特徴的な長さが数メートル程度)が相互作用しており、現象の原因と結果とを明確に分離することが難しい。このような現象の理解には計算機シミュレーションが最も有効な手段であり、国内外を問わず、実行され成果をあげてきた。巨視的現象と微視的現象との結びつきを解明できれば宇宙天気現象の定量的評価に大きく貢献し、数値予報を実現する第一歩となる。

シミュレーションという言葉は様々な意味で

使われているが、ここでは、離散化した物理現象を記述する連立偏微分方程式を、計算機を用いて数値的に解くことと定義したい。宇宙天気現象の場合、プラズマを記述する方程式系を解くことになる。多くの場合、時間発展を追跡することになる。

近年における計算機の計算速度の向上により、より大規模なシミュレーションがなされるようになってきた。宇宙天気現象の場合、観測機器を宇宙空間にくまなくばらまくことができないため、現象の理解にシミュレーションが果たしてきた役割は大きい。本稿は、宇宙天気現象を計算機シミュレーションの手法により、理解を目指す研究の概観である。特に、宇宙天気シミュレーション特有のグローバル重視(巨視的スケール)と素過程重視(微視的スケール)の二つの立場を紹介する。

2 シミュレーションの手法

解くべき方程式系の種類により、シミュレーションの方法が異なる。多くのプラズマ物理学

の入門用教科書は、荷電粒子の運動、磁気流体力学、プラズマ運動論の3部構成になっているが、プラズマのシミュレーションにおいても、大きくこの3通りの方法に分けられる。荷電粒子の運動については与えられた電磁場のもとで、荷電粒子の運動方程式を解くことによって、軌道を追跡するものである。どの断熱不変量を保存させるかや、実空間で解くか位相空間で解くか等により幾つかやり方はあるが、電磁場の時間発展があらかじめ分かっているものにしか適用できない。その点で、宇宙天気現象の研究には余り適さず、用途は限られる。

磁気流体力学シミュレーションは、磁気流体力学の基礎方程式系を解くものである。粒子シミュレーションは、プラズマ運動論の基礎方程式系に基づくものである。両者とも電磁場を記述するマクスウェル方程式とプラズマの運動を記述する運動方程式を連立させて解く点で共通である。

2.1 磁気流体力学シミュレーション

磁気流体力学では、プラズマは流体近似され、ナビエ・ストークス方程式に電磁力を加えたものが使われる。通常ゆっくりとした時間スケールの現象を考えるので、マクスウェル方程式は変位電流項を無視する近似がなされる。これらの方程式を連立させて解く。

磁気流体力学シミュレーションでは、中性流体のシミュレーションと同じ手法に、電磁場を加えて実行される。したがって、中性流体のシミュレーション法がそのまま適用されてきた。宇宙天気の研究では、有限差分と2ステップ-ラックスペンドロフ法とを組み合わせてよく用いられてきたが[1]、田中はTVD法をポテンシャル磁場のある系の磁気流体力学シミュレーションに適用し、精度の高い計算を実現した[2]。

2.2 粒子シミュレーション

粒子シミュレーションでは、プラズマを構成する粒子それぞれの運動方程式を解くことになる[1]。通常、パーティクルインセルという方法が用いられ、これを用いれば、実際の粒子の数より極端に少ない数の粒子でも運動論効果を含められることが知られている[3]。これは、通常、

デバヤ長よりも長いスケールの現象を考えるので、超粒子と呼ばれる広がりをもった粒子の重心の運動の計算だけで十分なためである。それでも膨大な数の粒子の運動方程式を解く必要があり、粒子シミュレーションは磁気流体力学シミュレーションよりも計算機のメモリと計算時間を必要とする。

さらに、ハイブリッドシミュレーションと呼ばれる、流体と粒子をともに扱う、両者の中間の方法もある[4]。宇宙天気研究でハイブリッドシミュレーションと言えば、プラズマの構成要素であるイオンを粒子として扱い、電子を流体として扱うものを指す。電子とイオンの密度がどの格子でも等しいという準中性条件を課せるので、扱いやすい。さらに、電子が流体として扱われるため、電子のプラズマ振動やデバヤ長のような小さな時間スケールや空間スケールを気にしなくてもよいのが利点である。したがって、時間ステップや空間格子を粒子シミュレーションに比較すると大きくとることができる。反面、イオンのラーモア半径以下のスケールの現象である電子効果等は扱えない。

2.3 使い分け

これら各種シミュレーションの使い分けは、主に、扱うプラズマの時間スケールと空間スケールに依存する。磁気流体力学シミュレーションは、イオンのラーモア半径より大きい空間スケール、サイクロトロン周期よりも長い時間スケールの現象に用いられる。それに対して、粒子シミュレーションはどんなスケール現象にも適用できるが、膨大な計算量が必要となる。したがって、巨視的スケールの現象は磁気流体力学シミュレーションで扱い、微視的スケールの現象に粒子シミュレーションを適用することが多い。イオンラーモア半径程度のスケールの現象に重点を置く場合、ハイブリッドコードが用いられる。

最近では、粒子シミュレーションにおいても、時間積分に陰的解法を用いることにより、電子のプラズマ振動やデバヤ長のような小さな時間スケールや空間スケールを気にしなくてもよい計算法が開発されている[5]。

3 グローバルと素過程

シミュレーションでは、現実の系からその系を特徴付ける本質的なものを選び出して、その組合せを計算機上に表現することになる。選び出したものがより多く、より本質的である場合、より現実に近いと評される。つまり、選び出し方によって、様々なシミュレーションの系を設定できる。具体的には、実空間でどの大きさで考えるか、例えば、小さな領域にするか、地球をまるごと含む系にするか、また、ある種の力や化学反応を含めるかなどである。宇宙天気研究のシミュレーションでは、この選び出し方によって、大きくグローバルシミュレーションと素過程シミュレーションとに分けられる。

グローバルシミュレーションでは、地球、あるいは、太陽を含む大きな系を扱い、特徴的な時間スケールや空間スケールの違う領域(太陽風と磁気圏、電離圏)の複合系として扱うことに特徴がある。通常、大きな系を扱うので、磁気流体力学シミュレーションの手法がとられる。研究の重点は、領域間の相互作用とそれに伴う磁力線のトポロジーにある。近年のグローバルシミュレーションによって、太陽風と地球磁気圏の磁力線つなぎかえや磁気圏対流の構造、成因の理解が進んだ[6]。

素過程シミュレーションでは、小さな領域で粒子シミュレーションを行うことにより、宇宙空間で生じる素過程の物理を理解することに主目的が置かれている。具体的テーマとして、磁力線再結合や無衝突衝撃波などの研究が行われている。これまで、粒子シミュレーションは、磁力線再結合や無衝突衝撃波などの研究を通じて、宇宙プラズマの散逸過程や粒子加速現象の解明に大きく役立ってきた。人工衛星のその場観測のデータとの比較がしやすいこと、また、基礎物理への還元や天体物理への応用もあるので研究が進んでいる[5]。

4 BuアプローチとEjアプローチ

宇宙天気現象の解釈に、BuアプローチとEjアプローチの二つの考え方があり。Buアプローチは、磁場(B)と速度(u)を基本にするが、Ejアプ

ローチでは、電場(E)と電流(j)を基本にする。一般に、グローバルシミュレーションではBuアプローチ、素過程シミュレーションではEjアプローチがとられる。

磁気流体力学では、密度と圧力を含め八つの独立変数で系を記述できる。密度と圧力以外の6変数(ベクトルで2変数)を何にとるかに応じて、上記の二つのアプローチが現れる。どちらのアプローチも等価であるが、見え方は異なる。結論から言うと、電気伝導率が無限大とみなせる理想磁気流体力学においてはBuアプローチをすべきであろう[7]。一見、Ejアプローチのほうが、電気回路との類似性から解釈がしやすいことも事実である。しかし、単純な電気回路として見る余り、流体の運動と圧力の変化が重要な役割を果たしていることを見逃していることが多い[8]。さらに、Eとjは、

$$E = -\text{ux}B$$

$$j = (1/\mu) \text{rot } B$$

のように(μ は透磁率)、Bとuからベクトル演算と微分演算で求めることができるが、逆は積分演算が必要となるため、理想磁気流体力学ではBuアプローチの方が理論的に自然な見方となる。

磁気圏電離圏結合を例にすると、Ejアプローチでは、磁気圏の対流電場が等電位の磁力線を通じて電離圏に投影されると考えるが、Buアプローチでは、対流運動に伴うマクスウェル応力が、電離圏に作用すると考える。Buアプローチの方が沿磁力線電流や圧力変化を考えやすい。

ただ、Buアプローチがうまくいくのは電気伝導率が無限大の理想磁気流体力学の場合で、「磁力線の動き」を定義できる場合に限られる[9]。運動論効果を含めた粒子シミュレーションでは、Ejアプローチを基本とする。運動論効果を含めた場合、プラズマ粒子の分布がボルツマン分布をしているとは限らず、速度uを定義するのに意味のないことが多い。さらに、あくまで磁場Bを作るのは電流jであり、仕事をするのは磁場Bではなく電場Eであるためである。

5 計算例

シミュレーションの結果については多くの文献があるので、ここでは通信総合研究所におけ

る研究の一部を紹介する。グローバルシミュレーションについては、[8]に詳しい。

粒子シミュレーションでは、無衝突衝撃波において電子のダイナミクスが調べられた[10]。図1は衝撃波面内での電子とイオンの位相空間における分布と電磁場を示している。最上部のパネルで電子の位相空間での渦が見られる。この電子の渦は、衝撃波面で反射されたイオンと入射電子との間で起きた強い2流体不安定性の非線形発展の結果であり、衝撃波散逸機構の実態の一つである。磁気流体力学では厚さがほとんど0とみなされる衝撃波面であるが、この薄い層の中に微視的構造のダイナミクスが存在していることが分かる。さらに、磁気流体力学では散逸の値を仮定せざるを得ないが、粒子シミュレーションでは、散逸をシミュレーションの結果から求めることができる。

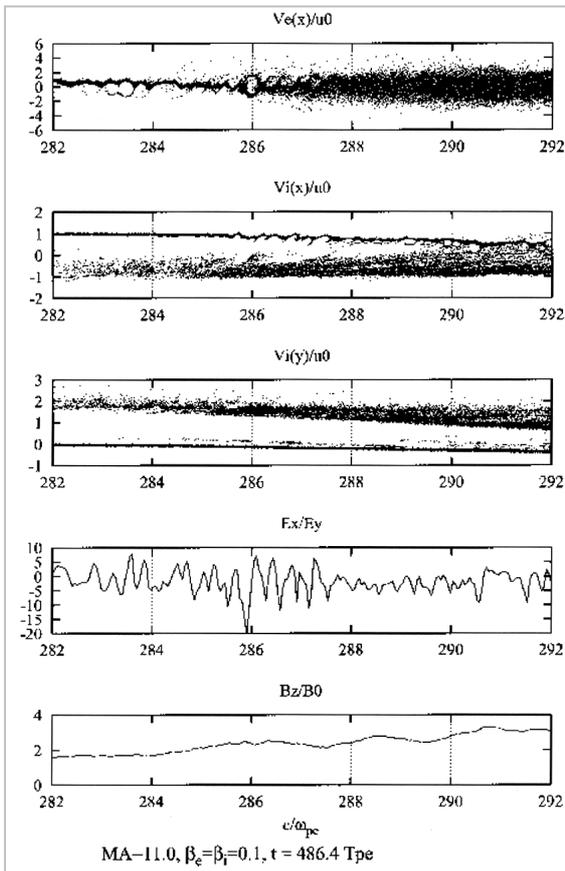


図1 無衝突衝撃波に関する粒子シミュレーションの結果。

無衝突衝撃波面の内部構造を示す。上から電子速度のx成分、イオン速度のx成分、イオン速度のy成分、電場のx成分、磁場のz成分。適当な値で規格化されている。横軸はx座標。

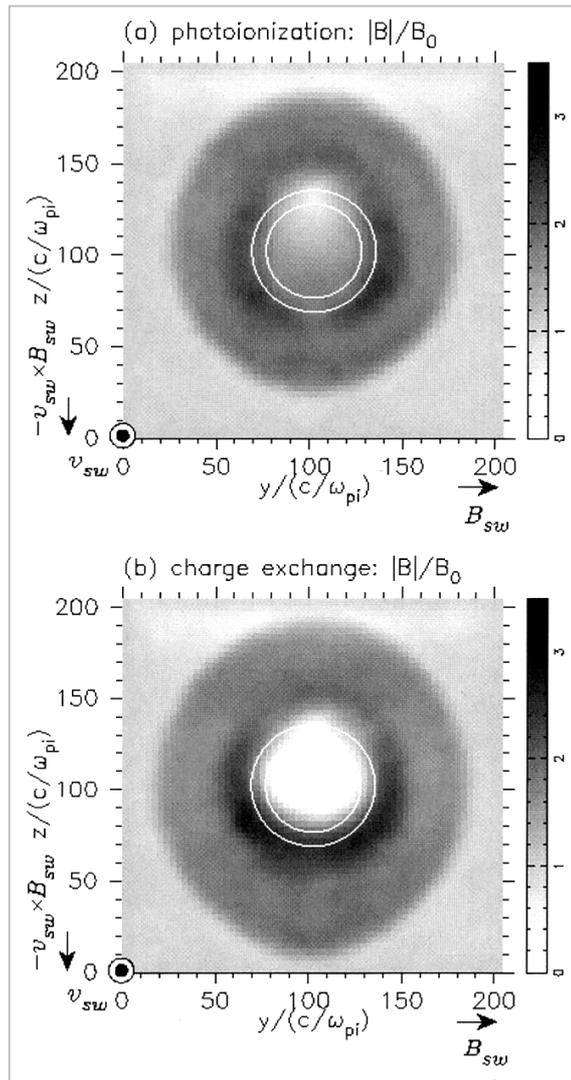


図2 太陽風惑星相互作用に関するハイブリッドシミュレーションの結果。

惑星の中心を通り、太陽を見る方向に垂直な断面での磁場の大きさを濃淡で表す。内側の円が惑星、外側の円が化学反応を含めた領域を示す。(a)光電離反応を含めると電場と逆向きの側(上側)が膨らみ、(b)荷電交換反応では電場の向きの側(下側)が膨らむことが分かった。[11]より。Copyright [2001] American Geophysical Union. Modified by permission of American Geophysical Union.

ハイブリッドシミュレーションでは、太陽風と惑星との相互作用が調べられた[11]。微視的過程が巨視的過程にどのように影響を及ぼしているか調べることを目標としている。微視的過程として荷電交換と呼ばれる反応、巨視的過程として、衝撃波の電場方向での非対称性を考えた。磁気流体力学では、このような電場方向の非対称性は表れない。しかし、金星での観測からこ

のような非対称性が数パーセント程度あることは知られていた[12]。シミュレーションの結果、荷電交換反応によって、このような非対称性が作り出され得ることが示された(図2)。

6 将来課題

宇宙天気という観点でシミュレーションを見た場合、地上の天気予報のように数値予報の実現を考えなければならない。このためには、グローバルも素過程も一つのモデルに含めなければならない。なぜなら、グローバルシミュレーションで研究されている磁力線のトポロジーや領域間結合と、素過程シミュレーションで研究されている散逸過程や粒子加速のうち一方を仮定してパラメータとして取り込めば、宇宙天気現象を矛盾なくシミュレーションで再現できないためである。このことは、巨視的現象と微視的現象との結合が本質的であることを示している。

しかし、グローバルも素過程も一つのモデルに含めることは、モデルの複雑さと計算量の膨大さから今のところ現実的でない。現実的なやり方として、太陽、太陽風、磁気圏、プラズマ圏、放射線帯等の領域ごとに別々のモデルを計算して、何らかの方法で結合するという試みもなされている。ただ現状ではうまくいっていないように思える。どのように、領域間を結合するか、また、スケールの異なる現象をどのように結合し、グローバルと素過程とを統合していくかは今後の非常に大きな課題である。

シミュレーションの結果を観測と対応させることも重要である。観測データと比較することによって、シミュレーションの結果を検証することができる。また、自由に条件を設定できるシミュレーションの結果は、観測結果のうち何が本質的かを知るのに不可欠な手段である。さらに、まだ観測されていない現象を予言することも可能であり、今後の観測のテーマを提供できる。精度のよいシミュレーションが可能になれば、観測を埋めることが可能となり、場合によっては観測に置き換わるものになる可能性を秘めている。

これまでに述べなかったが、数値計算法の技術的側面も重要である。例えば、空間格子をどのような形状で、どの程度の細かさで生成させるかによって、シミュレーションの精度や計算時間に影響するため、慎重な検討が必要である。格子の形状や大きさは、物理現象を適切に表現するようにとらなければならない。

近年の計算速度の向上は、計算機のプロセッサを多数同時に用いる並列化によるところが大きい。大型汎用機はもとより、パーソナルコンピュータの並列化技術も進み、グリッドコンピューティングと呼ばれる形態にも注目が集まっている。シミュレーション研究においては計算機の技術の発展形態に応じたプログラムを開発していく必要がある。

本稿の作成に当たり、田中高史九州大学教授、小原隆博グループ長、島田延枝研究員から貴重な助言を頂き、感謝いたします。

参考文献

- 1 Matsumoto, H., and T. Sato (Eds.), "Computer Simulation of Space Plasmas", Terra Scientific Publishing Company, 1984.
- 2 Tanaka, T., J. Comput. Phys., Vol. 111, p. 381, 1994.
- 3 Morso, R. L., Methods Comput. Phys. Vol. 9, p. 213, 1970.
- 4 Byers, J. A., B. I. Cohen, W. C. Condit, and J. D. Hanson, J. Comput. Phys., Vol. 27, p. 363, 1978.
- 5 田中基彦, 西川恭治共著, "高温プラズマの物理学", 丸善, 1991.
- 6 丸橋克英, 恩藤忠典編集, "ウェーブサミット講座 宇宙環境科学", オーム社, 2000.
- 7 Parker, E. N., J. Geophys. Res., Vol. 101, p. 10587, 1996.
- 8 田中高史, "太陽風-磁気圏-電離圏相互作用と磁気圏対流の発生", 本特集.
- 9 Lui, A. T. Y., Rev. Geophys., Vol. 39, p. 535, 2001.

- 10 Shimada, N., and M. Hoshino, *Astrophys. J.*, Vol. 543, p. L67, 2000; Hoshino, M., and N. Shimada, *Astrophys. J.*, Vol. 572, p. 880, 2002.
- 11 Shimazu, H., *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, p. 18751, 2001.
- 12 Alexander, C. J., J. G. Luhmann, and C. T. Russell, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 13, p. 917, 1986.
-



しま ひろし のり
島津浩哲

電磁波計測部門シミュレータグループ
主任研究員 博士（理学）
宇宙プラズマ物理学