

2-3 数値宇宙天気予報に向けた統合型宇宙天気シミュレーション

2-3 *Integrated Space Weather Simulation for Future Numerical Space Weather Forecast*

2-3-1 統合型宇宙天気シミュレーションの意義と重要性

2-3-1 *Significance and Importance of the Integrated Space Weather Simulation*

品川裕之

SHINAGAWA Hiroyuki

要旨

太陽地球系は、太陽、太陽風、磁気圏、電離圏、大気圏からなるシステムであるが、これらの領域の間には相互作用過程が存在するために、領域を個別に調べる方法では、現象の本質的理解は得られない。統合型の宇宙天気シミュレーションは、宇宙天気の現況把握やじょう乱の予測を行う上で、重要なツールとなると期待されている。近年、太陽地球系の各領域のシミュレーション研究とそれらの相互作用を含むモデル結合の技術が大きく発展し、世界各国で太陽から地球までの全領域を含む現実的な宇宙天気モデルの開発が本格化している。本稿では、統合型宇宙天気シミュレーションの意義と重要性および現状と今後の展望について報告する。

The solar-terrestrial system consists of sun, solar wind, magnetosphere, ionosphere, and neutral atmosphere. Studying each region separately would not lead to an understanding of the entire system because there are strong interaction processes among these regions. It is expected that space weather simulation will become an important tool for understanding of present space weather condition as well as for predicting space weather disturbances. Recently simulation research of each region and modeling techniques to couple the regions including interactions have made a great progress, and realistic space weather models including from the sun to the earth are being developed in various countries in the world. In this paper, significance and importance of integrated space weather simulation are described, and current status and future prospect are reported.

[キーワード]

太陽地球系, 宇宙天気, シミュレーション, 相互作用, 統合モデル

Solar-terrestrial system, Space weather, Simulation, Interaction, Integrated model

1 はじめに

これまでの自然科学の研究は、実験や観測の結果を、線形化された理論と因果関係をもとに説明

することに重点が置かれてきた。しかし、実際の現象に対して線形理論で正確に記述できるのはごく一部であり、太陽地球系のような複雑性や相互作用が重要となるシステムでは必ずしも物理過程

の解明につながらないことも明らかになってきた。数値シミュレーションは、原理的にはあらゆるプロセスを含めて、実際に起こっている現象を数値的に再現することができるため、非線形なプロセスや相互作用を矛盾無く再現できる。そして、そこに作り出された物理を解析すれば、その中にある普遍的な法則を見いだすことが可能である。

数値シミュレーションは、コンピュータの性能向上とともに急速に発展し、今日、多くの研究分野において強力な解析手法として必要不可欠なものとなった。宇宙空間や地球物理の分野においても数値シミュレーション研究は飛躍的な発展を遂げ、今日ではさまざまな現象の研究や予測に用いられている。太陽地球系においては、観測データの取得が容易でないことに加え、形状の複雑さや非線形性、現象の時間・空間スケールの幅の広さなどのため、数値シミュレーション研究で本格的に取り組みが始まったのは比較的最近である。最近では衛星や地上観測の技術が向上し、観測データの増加とともに、太陽から地球までの全ての領域を含む現実的な統合型宇宙天気モデルの開発が世界各地で本格化している。

2 総観予測から数値予測へ

気象や地震、火山、津波などの自然現象における災害の現況把握や予報業務は古くから行われてきた。初期の予報では、人間が観測データを見て、知識と経験を基に現在の状況や今後の見通しを判断する「総観予測」が主な手法であった。しかし、このような方法は、予報者個人の熟練度や判断能力に大きく依存するため、客観的な予報ができないという問題があった。1950年代に入り、初期のコンピュータが普及してくると、災害の正確な把握や予測を行うため、客観的かつ定量的な手段である「数値予測」の研究が始まった。その後、数値予報研究は大きな発展を遂げるとともに、情報化社会になり、情報処理に適した数値データが一層求められるようになった。最初の数値予報から50年を経た今日では、天気予報に不可欠なツールとして確立している。さらに、地球環境変動予測の観点からも長期的将来を予測する地球環境シミュレーションは、ますますその重要性を増しつつある。

宇宙天気予報においては、太陽地球系のスケールの大きさとシステムの多様性、複雑性のため、今日でも総観予測が主な手法である。この分野で数値モデル開発が始まったのは1980年以降であり、最近では、磁気圏、電離圏、大気圏など各領域のモデルの開発が進むとともに、それらの相互作用を含むモデル結合の技術も進み、世界各国で現実的な宇宙天気予測モデルの開発が本格化している。NICTの宇宙環境計測グループでも、実用的な宇宙天気予測のための統合型宇宙天気モデルの開発に取り組んでいる。

3 領域間相互作用のモデル化

太陽地球系をモデル化する場合、太陽表面から地球大気下端までを完全に「1つの領域」として、統一したスキームで同時にシームレスに解けば良いという考えもある。しかし、このようなシミュレーションは原理的には可能であるが、現実には各領域のスケールや物理的性質が大きく異なるために統一スキームでは計算量が膨大になり、現在の最高のコンピュータの能力を持ってしても、実用的な精度でこれを実現するのは不可能である。そのため現在の統合モデルは、別々に構築された領域モデルを、できる限り矛盾なく結合することにより、全体として一つのモデルとして機能させる手法を用いている。実際、この手法のほうが現実的であり、宇宙天気で重要となる多くの現象についてはこの方法で十分であると考えられる。以下では、この考えに基づいて領域間の相互作用過程について概略を述べる。

太陽からは、可視光、紫外線、X線、赤外線、電波などの電磁波が放射されるほか、常に太陽風が放出されている。太陽風は地球まで伝播するが、太陽風は超音速であり、地球磁気圏にぶつかるまで影響を受けない。従って、太陽風から磁気圏への影響は一方向であり、地球から太陽風上流側への影響を考える必要はない。地球近傍に来た太陽風は、地球の磁気と相互作用して磁気圏を形成し、その粒子と電場、エネルギーが磁気圏内に侵入して対流や粒子加速などを引き起こす。磁気圏から電離圏へは、電流、電場、オーロラ粒子の降り込みなどによって影響を及ぼす。これらは、電離圏の電気伝導度の変化を引き起こし、その影響は磁

気圏電流系や対流の変化をもたらすことになり、フィードバック過程が生じる。

磁気圏によって引き起こされた電離圏対流は、イオンと中性粒子との衝突を介して、熱圏大気の加速や加熱を引き起こす。一方、熱圏大気は、熱圏風がダイナモ電場を介して電離圏の対流に影響を及ぼすほか、中性組成の変化を通じて、電離圏の電子密度に影響を与える。この電離圏変動は、磁気圏へもある程度の影響を及ぼすことになる。この磁気圏-電離圏-熱圏の結合系は極めて複雑で、強い相互作用が特徴である。

また、下層大気から伝播してくる大気波動は、熱圏の運動や構造変化を通じて電離圏に影響を与えることが観測的にも知られている。電離圏、熱圏領域から中間圏以下の大気にどのような影響があるかについても多くの研究がある。オーロラなどに伴う高エネルギー粒子降下による熱圏下部、中間圏上部の電離とそれに続く化学反応過程によりNOの増加とオゾンの減少が起きる過程や、極域電離圏対流によって熱圏下部に高速の風が励起されて、その影響が中間圏にも伝わる過程、電離圏電位が地球大気圏のグローバル電流系を変化させる過程などがあるが、下層大気圏にどの程度の影響があるかどうかは依然はっきりわかっていない。

4 米国における統合型モデル開発

太陽地球系の統合モデルは、現在、主に米国の2つのグループにおいて開発が進められている。一つは、Center for Integrated Space Weather Modeling (CISM) プロジェクトで、ボストン大学を中心に、米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research)、コロラド大学など多数の研究機関が共同で、太陽から地球超高層大気までのモデルを開発するものである [1][2]。モデルの基本部分は、太陽コロナモデル、太陽風モデル、磁気圏モデル、電離圏・熱圏モデルを結合した統合型モデルであり、さらに内部磁気圏モデルなどの充実を進めている。このモデルでは、定常太陽風に、太陽面で人工的なコロナ質量放出 (CME) を入れて、その影響が地球の電離圏・熱圏に到達するまでの状態を計算できるまでになっている。

もう一つは、米国ミシガン大学で進められている Space Weather Modeling Framework (SWMF) というプロジェクトで、CISM と同様、太陽コロナモデル、太陽風モデル、磁気圏モデル、電離圏・熱圏モデルの結合モデルであるが、そのほか、CME モデル、太陽高エネルギー粒子モデル、放射線帯モデル、内部磁気圏モデルを別途加えて、さまざまな物理過程を再現できる機能を備えている [3][4]。これらのモデルは、一部はすでに一般研究者に公開されており、研究用に用いられている。

5 NICT における統合モデルの開発と将来展望

世界的に見て、宇宙天気分野で現実的なシミュレーションが可能になったのは、コンピュータの能力が大きく向上した 1980 年頃からである。我が国でも、NICT の前身である郵政省通信総合研究所が 1990 年代からスーパーコンピュータを導入し、太陽風を入力として、3次元の電磁流体力学方程式を解いて、磁気圏の構造と磁気圏風の再現をする磁気圏シミュレーションモデルの開発に着手した。1990 年代終わり頃には、高精度の磁気圏モデルが完成し、現実的な磁気圏が再現できるようになった [5][6]。

宇宙天気予報においてはリアルタイムのデータが重要であるため、シミュレーションでもリアルタイムのデータを提供することに重点を置いてきた。NICT では、太陽風観測衛星 ACE で得られるリアルタイム太陽風データを入力として、磁気圏モデルをリアルタイムで実行するシステムの構築が始められ、2003 年に「リアルタイム磁気圏シミュレータ」の開発に成功し [7][8]、その後運用を継続している。2008 年には、このリアルタイム磁気圏シミュレータに加えて、新たに太陽・太陽風と電離圏・熱圏の2つのリアルタイムシミュレータを開発し、太陽面から地球周辺の高度 100 km 位までの状態を再現する「リアルタイム宇宙天気統合シミュレータ」を構築した。これは太陽面から地球周辺までの空間をリアルタイムで統合的に計算できる世界で初めてのシステムである。

太陽・太陽風シミュレータでは、太陽観測衛星で取得された太陽面の磁場観測データを入力として、3次元電磁流体力学方程式を解くことにより、

太陽面から地球軌道までの太陽風の状態を求めて表示することができる。現状はまだ太陽風の変動を正確に再現できていないが、今後改良を行い、地磁気嵐の原因となる高速太陽風がいつ地球に到達するかを予測できるようにする予定である。

電離圏・熱圏シミュレータでは、磁気圏シミュレータで得られる電離圏の電位や電気伝導度などのデータをモデルの入力として、電離気体と中性大気の流体方程式を解いている。これにより、現在の電離圏、熱圏の状態や、極域電離圏におけるオーロラの発生のおよびなどを求めて、その結果を画像に表示することが可能となった。この計算では、太陽風観測衛星 ACE の太陽風データを磁気圏モデルの入力として磁気圏の計算を行い、その結果を直ちに電離圏モデルに送って電離圏の計算を行っている。

これらのリアルタイムシミュレーションは、2007年に導入されたスーパーコンピュータ NEC SX-8R を用いて行われており、その結果は、2008年8月から NICT の Web サイトの「宇宙天気予報」の中で一般に公開されている。

今回開発したリアルタイム宇宙天気統合シミュレータによって、太陽から地球周辺までの宇宙環境の現況を再現することが可能となったが、観測された変動やじょう乱を再現できない場合があることも分かってきた。現在、このシミュレータで得られた結果と衛星や地上観測のデータとの比較・検証を行ってモデルの改良を進め、じょう乱現象の定量的な再現性を高める作業を行っている。

宇宙天気予報では、数時間から数日程度の予報が求められているが、それには太陽風の数値予測

が不可欠となる。通常の太陽風は速度が 300 km 程度であるので、太陽面から地球軌道まで到達するのに数日かかる。したがって、太陽・太陽風シミュレータの精度を高めることにより、数日先までの宇宙天気のある程度の精度で予測することは可能と思われる。しかし、大きな磁気嵐の原因となる CME やフレアなどのような突発性の太陽面現象に関しては、世界のどのモデルもまだ定量的な再現や予測はできておらず、現在の最も大きな課題である。

さらに、GPS (Global Positioning System) の測位精度に直接影響を与えるプラズマバブルなどの電離圏じょう乱は、下層大気から伝播してくる大気波動が重要な役割を担っている。その予測のためには、高精度の大気圏-電離圏結合モデルが必要であり、現在、宇宙環境計測グループで開発を進めている。

6 むすび

太陽地球系の統合シミュレーションモデルは、世界各地で本格的な開発が始まっている。しかし、モデルに含まれているのは代表的な物理過程のみであり、今後、宇宙地球環境をさらに包括的かつ定量的に調べ、実用的な予測モデルとしていくには、可能な限り多くのプロセスと領域を矛盾なく含むグローバル宇宙地球モデルの構築が必要であると同時に、予測技術そのものの研究も必要となってくると思われる。太陽活動は依然低いレベルであるが、数年後頃に予想される太陽活動極大期に向けて数値予報技術の研究開発を進め、「宇宙天気数値予報システム」の構築を進めている。

参考文献

- 1 Baker, D. N., R. S. Weigel, E. J. Rigler, R. L. McPherron, D. Vassiliadis, C. N. Arge, G. L. Siscoe, and H. E. Spence, "Sun-to-magnetosphere modeling: CISM forecast model development using linked empirical models", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.66, No.15-16, pp.1491-1497, 2004.
- 2 Luhmann, J. G., S. C. Solomon, J. A. Linker, J. G. Lyon, Z. Mikic, D. Odstrcil, W. Wang, M. Wiltberger, "Coupled model simulation of a Sun-to-Earth space weather event", *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, Vol.66, pp.1243-1256, 2004.

- 3 Tóth, G., et al., Sokolov, I. V., Gombosi, T. I., Chesney, D. R., Clauer, C., Zeeuw, D. L. D., Hansen, K. C., Kane, K. J., Manchester, W. B., Powell, K. G., Ridley, A. J., Roussev, I. I., Stout, Q. F., Volberg, O., Wolf, R. A., Sazykin, S., Chan, A., Yu, B., and Kóta, J., "Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community", J. Geophys. Res., Vol.110, A12226, doi:10.1029/2005JA011126, 2005.
- 4 Tóth, G., D. L. De Zeeuw, T. I. Gombosi, W. B. Manchester, A. J. Ridley, Igor. V. Sokolov, and I. I. Roussev, "Sun-to-thermosphere simulation of the 28-30 Oct.2003 storm with the Space Weather Modeling Framework", Space Weather, Vol.5, S06003, doi:10.1029/2006SW000272, 2007.
- 5 Tanaka, T., "Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential fields", J. Comput. Phys., Vol.111, pp.381-389, 1994.
- 6 Tanaka, T., "Generation mechanisms for magnetosphere-ionosphere current systems deduced from a three-dimensional MHD simulation of the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling process", J. Geophys. Res., Vol.100, pp.12,057-12,074, 1995.
- 7 Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, and T. Take, "Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code", Space Weather, Vol.4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- 8 Kitamura, K., H. Shimazu, S. Fujita, S. Watari, M. Kunitake, H. Shinagawa and T. Tanaka, "Properties of AE indices derived from real-time global simulation and their implications for solar wind-magnetosphere coupling", J. Geophys. Res., Vol.113, A03S10, doi:10.1029/2007JA012514, 2008.



品川裕之

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ主任研究員 Ph. D.
電離圏物理学