

「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」

平成 16 年度採択研究代表者

田中 高史

(九州大学大学院理学研究院 教授)

「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究」

1. 研究実施の概要

地球環境の最上部に位置するジオスペースは、磁場とプラズマから構成される領域で、そこでは太陽風―磁気圏―電離圏という、全く異なる性質と大きさを持つ系同士の相互作用によって、複雑な自然現象が発生する。人工衛星が飛び交い、宇宙飛行士が活躍し、また将来は宇宙発電も行われるジオスペースは、もはや人類の活動圏に含まれており、これらの自然現象は人類の生活に影響を与えるので、宇宙天気とも呼ばれる。

本研究計画では、このような宇宙天気現象を再現するシミュレーションモデルを開発し、人類の宇宙活動のための予報に役立つようなレベルにまで発展させることを目指すと共に、形を持った自然の複雑性をシミュレーションによって研究する方法を確立し、複合系の科学を開拓する。

これまでに本研究チームでは、ジオスペースシミュレーションに最適な計算方法である、有限体積TVDスキームを開発して来たが、さらにこのスキームの高速化・並列化とリアルタイムグラフィックスを開発し、平成 17 年度には、インターネットでリアルタイム宇宙天気予報シミュレーションの公開を開始した。今後の計画としては、太陽―太陽風結合系のグローバルシミュレーションをめざした、完全非構造格子を用いたシミュレーションモデルの開発と、地磁気嵐の再現をめざした、MHD―粒子連成スキームの開発を行う。

2. 研究実施内容

(1) 磁気圏―電離圏リアルタイムシミュレーションとモデルの検証

グローバルMHDシミュレーションコードとして、非構造格子と有限体積TVDスキームを用いた太陽風―磁気圏―電離圏結合のシミュレーションコードを開発し、またこのコードの高度なベクトル化・並列化の達成によって高速化を図り、ACE 衛星の太陽風観測データを入力とするリアルタイム処理を実現した。NICTではスーパーコンピュータの1ノード(8CPU)をこの計算専用に割り当て、計算の結果から磁気圏構造と電離圏対流をリアルタイムで表示し、世界初のリアルタイム宇宙天気シミュレーションのオンライン公開を開始した。

観測点の多い電離圏上で、モデル―観測の比較を行うため、電離圏モデルを改良して、多種のパラメーターが算出できるようにし、これを観測と比較してモデルの検証を行った。また太陽風の変

動に対し、磁気圏—電離圏が正しく応答するようなモデルへの改良点を探索し、AE インデックス（地上磁場変動の指標）の再現を試みた。この点をさらに研究し、来年度には AE インデックス予報の公開を行いたい。

（2）検証システムの構築

グローバルな観測データを収集するシステムを開発し、九大が保有する既存の観測システムと合わせて、モデル—観測の比較をより正確にすることを行った。今後は、磁場観測の結果を MHD で求めた電離圏電流と実際に比較し、より正確な AE インデックスを予測するために役立てると共に、これらのシステムを応用し、データ同化の研究を発展させたい。

（3）完全非構造格子による太陽モデルの開発

太陽の全球シミュレーションを行い、観測される太陽風の再現を行うため、球面を三角で覆って六角柱を要素にする有限体積法を開発し、見かけの特異点を持たない完全非構造格子 MHD コードの研究を進めた。その結果、特異点周りで計算が破綻しやすいというこれまでのモデルの欠点を解消し、安定に太陽—太陽風のグローバル構造を計算することに成功した。来年度はこれを更に進め、観測された太陽表面の状態から惑星間空間を予測する方法を開発し、太陽風加熱の熱力学過程も組み込んで、CIR（共回転相互作用領域）や地球軌道での太陽風観測を予測するモデルを研究する。

（4）粒子追跡コードの開発

磁気嵐、環電流生成など非 MHD 効果を含んだ現象を予測するため、粒子シミュレーションを開発した。粒子シミュレーションの研究としては、まず非磁化惑星をモデルとして、グローバル粒子シミュレーションを開発し、惑星電磁圏モデルに適用した。同時に、MHD で求めた非構造格子上の場の中での粒子追跡を行う MHD—粒子連成モデルを開発した。ここでは、追跡の高速化を計るため、MHD コードでは領域分割による並列化、テスト粒子追跡ではグループ化による並列化を行い、両者を共存させるコードを設計した。また粒子追跡においては、グループごとに時刻同期を行い、内部磁気圏での粒子追跡を可能にする方法を開発した。来年度は、実際に磁気圏中での粒子追跡を行うと共に、グローバル磁気圏粒子シミュレーションへの発展を検討する。

3. 研究実施体制

「MHD・太陽・観測」グループ

①研究分担グループ長：田中 高史（九州大学、教授）

②研究項目：完全非構造格子による MHD シミュレーション、太陽—太陽風結合系のグローバルシミュレーション、モデル—観測比較システム

「粒子・実装」グループ

①研究分担グループ長：小原 隆博（NICT、グループリーダー）

②研究項目：リアルタイムシミュレーションの運用、リアルタイムグラフィックスの開発、粒子追跡・MHD-粒子連成スキームの研究

「電離圏・データ同化」グループ

①研究分担グループ長：藤田 茂（気象大学校、助教授）

②研究項目：電離圏モデルの改良とAE インデックスの予測、データ同化

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

(九州大学)

- Kitamura, K., H. Kawano, S.-I. Ohtani, A. Yoshikawa and K. Yumoto, Local-time distribution of low and middle latitude ground magnetic disturbances at sawtooth injections of April 18-19, 2002, *J. Geophys. Res.*, *110*, A07208, doi:10.1029/2004JA011179, 2005.
- Nakamizo, A., The wavelength of slow MHD waves observed in the night-side plasma sheet, in *Multiscale coupling of Sun-Earth processes*, edited by A. T. Y. Lui, Y. Kamide and G. Consolini, p421, Elsevier, 2005.
- Obana, Y., A. Yoshikawa, J. V. Olson, R. J. Morris, B. J. Fraser, and K. Yumoto, North-South asymmetry of the amplitudes of high-latitude Pc 3-5 pulsations: Observations at conjugate stations, *J. Geophys. Res.*, *110*, A10214, doi:10.1029/2003JA010242, 2005.
- Tanaka, T., Two state transition model of the magnetosphere, in *Non equilibrium Transitions in Plasmas, Astrophysics and space science library*, edited by A. S. Sharma and P. K. Kaw, p. 91, Springer, 2005.
- Tanaka, T., Substorm onset caused by the two state transition of the magnetosphere, in *Multiscale coupling of Sun-Earth processes*, edited by A. T. Y. Lui, Y. Kamide and G. Consolini, p217, Elsevier, 2005.
- Yumoto, K., Monitoring of geophysical electromagnetic environment for space weather study—a review, *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci.*, XXXI, 81, 2005.
- Yumoto, K., Magnetic environment in geospace, *IEEJ Trans. FM*, *125*, 77, 2005.
- 湯元清文, 宇宙天気における宙空ダイナミクス, *学術月報*, *58*, 210, 2005.

(NICT)

- Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, and Y. Hayashi, Real time

- earth magnetosphere simulation with 3-dimensional MHD code, *Space Weather*, 4, doi: 10.1029/2004SW000100, 2006.
- Den, M., T. Kuwabara, T. Ogawa, T. Tanaka, I. Goncharenko, and H. Amo, A Glassless Stereo-type Visualization System for 3D MHD Real-time Earth's Magnetosphere Simulator, *J. Plasma Phys.*, in press, 2006
 - Kataoka, R., S. Watari, N. Shimada, H. Shimazu, and K. Marubashi, Downstream structures of interplanetary fast shocks associated with coronal mass ejections, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12103, doi:10.1029/2005GL022777, 2005.
 - Obara, T., Y. Miyoshi, and T. G. Onsager, Generation and loss of new electron radiation belt in the slot region, *Space Radiation*, 4, 145-152, 2005.
 - Obara, T., T. Goka, and H. Matsumoto, Coupling of relativistic electrons in the inner magnetosphere to space weather phenomena, in *Multiscale coupling of Sun-Earth processes*, edited by A. T. Y. Lui, Y. Kamide and G. Consolini, p135, Elsevier, 2005.
 - Ogawa, T., and M. Den, High-resolution simulation of propagating of interplanetary shock wave caused by a coronal mass ejection observed on November 13, 2003, *Adv. Polar Upp. Atmos. Res.*, 19, 71, 2005.
 - Ogawa, T., M. Den, T. Tanaka, K. Yamashita, H. Amo, and T. Takei, Three-dimensional adaptive mesh refinement simulation of propagation of coronal mass ejection on October 28, 2003 connected with Earth's global magnetosphere simulation, *Adv. Space Res.*, in press, 2006.
 - Shimazu, H., and T. Tanaka, Simulation of entry of shock-drift-accelerated solar energetic protons into the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 110, A10105, doi:10.1029/2004JA010997, 2005.
 - Shimazu, H., T. Tanaka, M. Den, and T. Obara, Simulation of the entry of solar energetic particles into the magnetosphere, *Adv. Space Res.*, in press, 2006.
 - 小原隆博、宇宙に延びる地球磁場、*日本応用磁気学会誌*, 29, 906, 2005.
 - 武井 利文、田 光江、田中 高史、天羽 宏嘉、小原 隆博、島津 浩哲、SX を活用したリアルタイム数値宇宙天気予報システムの開発、*NEC 技報*, 58, 53, 2005.

(気象大学校)

- Fujita, S., T. Tanaka, and T. Motoba, A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 3. A SC in the magnetosphere-ionosphere compound system, *J. Geophys. Res.*, 110, A11203, doi: 10.1029/2005JA011055, 2005.