

「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・地球惑星科学部門 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、そこでの複雑な自然現象は、太陽―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領域同士の、エネルギー交換を伴う相互作用の結果です。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ます。本研究チームは、ジオスペースシミュレーションに最適な電磁流体 (MHD) 計算方法として、有限体積 TVD (total variation diminishing) スキームを開発してきましたが、これをさらに太陽―太陽風―磁気圏―電離圏―大気圏結合系全体にわたるグローバルシミュレーションに発展させ、宇宙天気全体の可視化と予報への応用をめざしています。また本研究チームは、これらの実用的目標に加え、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、複合系の科学開拓をめざしています。

本課題では、太陽風観測データ (ACE 衛星) を入力に用いて、磁気圏-電離圏シミュレーションをリアルタイム化し、インターネットで公開するシステムを開発しましたが、最近 NASA でも同様のシステムが開発され、はからずも本研究課題の成果は、世界に先駆ける結果となっています。今年度は本研究課題では、シミュレーションの結果からさらに AE インデックス (オーロラの発生に対応する) や静止軌道粒子分布なども算出し、グローバルな地上観測との比較を進め、これによってシステムの検証を行ってきました。またこのモデルは大気圏との結合をめざし拡張中で、これにより中低緯度領域での宇宙天気擾乱の予報が可能となります。

観測される太陽風を予測するため、本課題では、太陽―太陽風結合系のシミュレーションも開発してきましたが、今年度は太陽面から地球軌道にいたる領域の 3 次元構造を再現できたので、今後はこれを基に、太陽圏構造の可視化画像をインターネットで公開するシステムを開発する予定です。

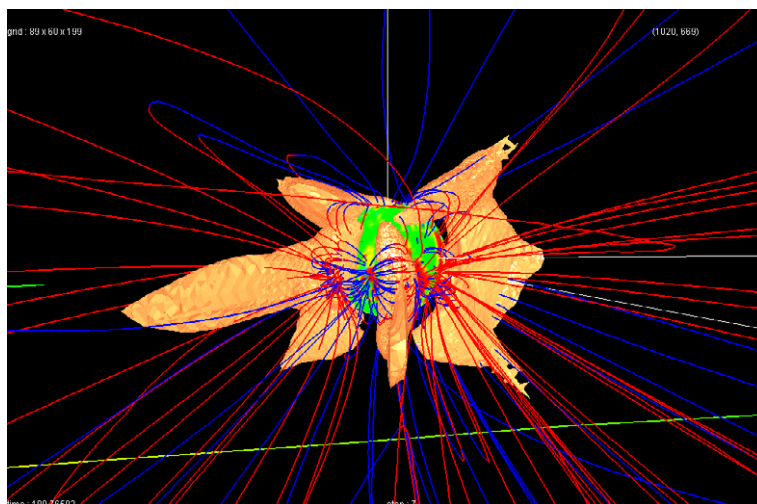
本課題では、宇宙天気における最重要問題である地磁気嵐の再現をめざし、MHD 粒子連成シミュレーションを開発してきましたが、本年度は磁気圏全体にわたる粒子追跡を行い、地磁気嵐の主体である環電流の再現に成功しました。今後は衛星観測データを入力とする磁気圏―電離

圏シミュレーションとの統合を進める予定です。

2. 研究実施内容

1. 特異点除去コードによる太陽—太陽風シミュレーション

従来の MHD コードを改良し、見かけの特異点を持たない、完全非構造格子を用いた MHD コードを開発した。これを応用して太陽圏の 3 次元 MHD モデルを開発



した。計算は太陽と共に回転する系で行い、内部境界条件として観測された太陽面磁場を与え、太陽圏全体を再現することができた。この開発における主な工夫は、(1) 太陽面付近の詳細構造と、太陽から地球に至る広域

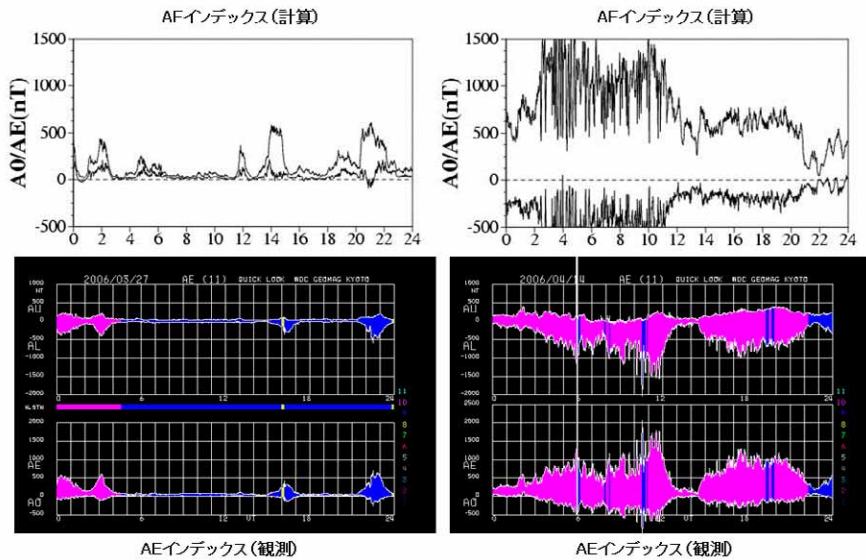
構造を同時に計算できるような格子構造を作成した、(2) 強い太陽重力によって大気成層が急峻となるので、それによって計算不安定が発生しないようなスキームを考えた、(3) 非構造格子で divergence cleaning (磁場発散の消去) を行う際に、計算コストが大きくなり、かつ even odd 分離 (一種の計算不安定) を起こさないような計算法を考えた、(4) 太陽大気加熱を、太陽磁場構造に依存した形で与え、熱力学的にも自己無撞着な構造を実現した、などである。図に示す計算例は 2006 年 12 月の太陽で、高温コロナ領域 (等値面で示す)、コロナホール (シェーディングで示す)、磁場構造 (赤青ラインで示す) などが見られる。

2. 磁気圏—電離圏シミュレーション検証データの取得

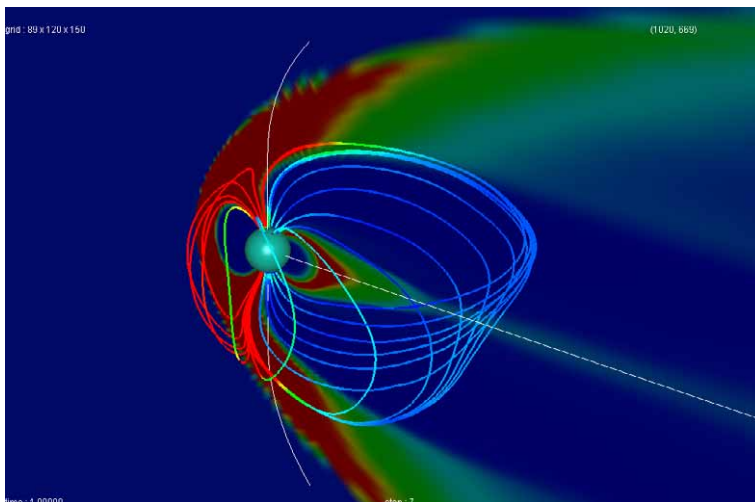
九大が保有するグローバルな観測データを収集するシステムを改良し、リアルタイム磁気圏シミュレーションの検証を行えるようにした。太陽風—磁気圏—電離圏結合システムの 3 次元構造を直接観測することは不可能であるが、領域間相互作用の最終結果である電離圏電流系を比較することは、3 次元構造全体を検証することと同等になると考えられる。

3. 磁気圏—電離圏シミュレーションのリアルタイム公開

予測AEインデックスと観測AEインデックスの比較



オーロラ発生に対応するインデックス) と静止軌道粒子に関する予報も公開を開始した。図に計算された AE インデックスと観測された AE インデックスを比較した例を2つ示す。第1の例は、孤立した擾乱が1日に数回発生している場合であり、第2の例は激しい擾乱が終日続く、磁気嵐の場合である。どちらの場合も細部にわた



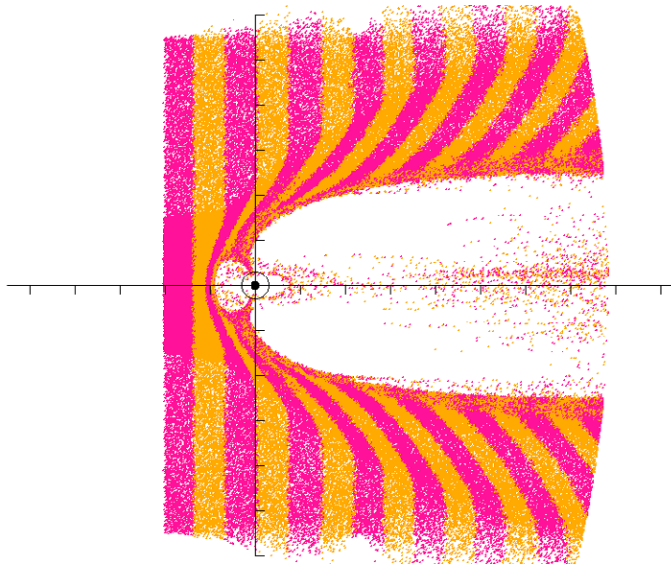
る不一致はあるが、全体の傾向は一致している。この結果は、磁気圏—電離圏シミュレーションの研究方向は間違っていないものの、まだまだ改良の必要はあることを示している。次に磁気圏—電離圏シミュレーションの結果をさらに深く解析する方法として、磁場精密描画プログラムの開発を行った。磁気圏磁場は複雑な構造を示すが、それは cusp-null や X-null と呼ばれる特異点 (異なるトポロジーの磁場が集まる点) の発生、これらの特異点を結ぶ separator line などの構造に起因する。この複雑構造を理解するためには、特異点近傍の磁場を精密に描かなくてはならない。このため磁場描画の際の始点を精密にコ

オンライン可視化を開発し、ACE の太陽風観測を入力とする磁気圏リアルタイム計算の結果を、インターネットで公開した。本年度からは磁気圏プラズマ、磁気圏磁場、電離圏対流に加え、AE インデックス (オ

ントロールできるプログラムを開発した。図に結果の一例を示すが、これは太陽風磁場が北向きの場合の、最も外側の閉磁場を描いたものである。

4. 粒子追跡コードによる磁気嵐の再現

将来の粒子グローバルシミュレーションに発展させることをめざし、非構造格子上の MHD 場の中で粒子追跡を実現する方法を開発した。粒子追跡の高速化を図るため、MHD コードでは領域分割による並列化、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開発し、太陽風—磁気圏結合系全体での粒



子追跡を実現した。このモデルでの問題点は、地球近傍の強磁場領域では高速に粒子が回転し、計算の時間ステップが極めて短くなることであるが、この点を克服するため、Buneman-Boris 法（粒子軌道の数値積分法）と Gyrokinetic 法（同上）を併用する粒子追跡を開発した。図（目盛は 10 倍の地球半径で黒丸は地球）に計算結果の一例を示すが、太陽風中に蒔いた粒子を追跡し、それらの粒子のうち子午面近くに到達したものを描いている。ここで、色は粒子を投入した時間の違いを表す。粒子の一部が磁気圏内に侵入し、プラズマシート（x 軸上）や環電流（地球近傍）を形成しているのが見られる。今後は電離圏粒子の追跡も併せて行うモデルを開発する。

5. 電離圏—大気圏モデルと太陽風応答特性の改良

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、特に AE インデックス（オーロラ発生に対応する）が算出できるようにすることを進めた。結果はリアルタイム磁気圏シミュレーションシステムに組み込み、モデルの検証に応用した。磁気圏の 3 次元構造を観測することは不可能であるが、磁気圏—電離圏結合系の終端にある電離圏電流系は、磁気圏—電離圏結合系の 3 次元構造の反映であり、この比較により実質的モデル全体が検証されると考えられる。今後も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の改良点を探す。電離圏は大気圏とも結合しており、AE インデックスで表現される擾乱は、大気圏や中低緯度電離圏にも影響する。これらの予報を

めざし、現在電離圏—大気圏結合モデルを開発中である。中低緯度の電離圏擾乱は、測位誤差、電波伝搬などに影響を与える。

6. データ同化

AE インデックスの予測と観測の差から、モデルの改良を行うシステムの開発が望まれるので、その方法を調査した。このようなシステムは多大の計算パワーを必要とし、その実現は困難と予想されるが、CREST 研究課題・樋口チームの結果を参考にし、可能性を探った。具体的な開発は今後の課題である。

3. 研究実施体制

(1)「太陽シミュレーション・観測」グループ

①グループリーダー

田中 高史(九州大学 教授)

②研究項目

- ・ 特異点除去コードによる太陽—太陽風シミュレーション
- ・ 磁気圏—電離圏シミュレーション検証データの取得

(2)「粒子・リアルタイム公開」グループ

①グループリーダー

島津 浩哲((独)情報通信研究機構 主任研究員)

②研究項目

- ・ 磁気圏—電離圏シミュレーションのリアルタイム公開
- ・ 粒子追跡コードによる磁気嵐の再現

(3)「電離圏・データ同化」グループ

①グループリーダー

藤田 茂(気象大学校 助教授)

②研究項目

- ・ 電離圏—大気圏モデルと太陽風応答特性の改良
- ・ データ同化

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- Den, M., T. Kuwabara, T. Ogawa, T. Tanaka, I. Goncharenko, and H. Amo, A glassless stereoscopic visualization system for a 3D MHD real-time Earth's magnetosphere simulator, J. Plasma Phys., 72, 837, 2006.

- Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hyashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, and Takei, and Y. Miyoshi, Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code, *Space Weather*, Vol. 4, S06004, 105–114doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- Fujita, S. and T. Tanaka, Magnetospheric plasma processes during a sudden commencement revealed from a global MHD simulation, in *Magnetospheric ULF waves: Synthesis and New Directions*, Geophysical Monograph Series, Volume 169, pp. 31–50, ed. by K. Takahashi, P. Chi, R. Denton, and R. Lysak, American Geophysical Union, Washington, D. C., 2006
- Kanao, M., N. Terada, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, T. Abe, and M. Nakamura, The effect of the motional electric field on the Venus nightside ionopause, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, A03306, doi:10.1029/2005JA011293, 2006.
- Kulikov, Y. N., H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, N. Terada, I. Ribas, H. K. Biernat, C. Kolb, E. F. Guinan, S. Barabash, and R. Lundin, Atmospheric and water loss from early Venus, *Planet. Space Sci.*, Vol. 54, 1425–1444, 2006.
- Nishino, M., K. Makita, K. Yumoto, Y. Miyoshi, N. J. Schuch, M. A. Abdu, Energetic particle precipitation in the Brazilian geomagnetic anomaly during the “Bastille Day Storm” of July 2000, *Earth, Planets Space*, 58, 607–616, 2006.
- Obara, T., Toward the radiation belt forecast in Japan, *Selected papers in ISTS 2006*, 1351–1355, 2006.
- Obara, T., Magnetospheric plasma: Special issue on space weather, *J. Plasma Fusion*, Vol. 82, 756–761, 2006.
- Shimazu, H., T. Tanaka, M. Den, and T. Obara, A. Geraniotis, E. Antonia, Dependence of the cutoff latitude of solar energetic protons on the southward component of the IMF, *Adv. Space Res.*, Vol. 38, 503–506, 2006.
- Shinagawa, H., and S. Oyama, A two-dimensional simulation of thermospheric vertical winds in the vicinity of an auroral arc, *Earth, Planets Space*, Vol. 58, 1173–1181, 2006.
- Shiokawa, K., K. Seki, Y. Miyoshi, A. Ieda, T. Ono, M. Iijima, T. Nagatsuma, T. Obara, K. Takashima, K. Asamura, Y. Kasaba, A. Matsuoka, Y. Saito, H. Saito, M. Hirahara, Y. Tonegawa, F. Tohyama, M. Tanaka, M. Nose, Y. Kasahara, K. Yumoto, H. Kawano, A. Yoshikawa, Y. Ebihara, A. Yukimatsu, N. Sato, and S. Watanabe, ERG-A small-satellite mission to investigate the dynamics of the inner magnetosphere, *Adv. Space Res.*, Vol. 38, 1861–1869, 2006.
- Takasaki, S., H. Kawano, Y. Tanaka, A. Yoshikawa, M. Seto, M. Iijima, Y. Obana, N. Sato and K. Yumoto, A significant mass density increase during a large magnetic storm in October 2003 obtained by ground-based ULF observations at $L \sim 1.4$, *Earth*

Planets Space, Vol.58, 617-622, 2006.

- Lammer, H., H. I. M. Lichtenegger, Y. Kulikov, J. M. Griessmeier, N. Terada, N. V. Erkaev, H. K. Biernat, M. L. Khodachenko, I. Ribas, T. Penz, F. Selsis, CME activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets, Part II: CME induced ion pick up of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones, *Astrobiology*, in press, 2007.
- Shimoda, T., S. Machida, and N. Terada, Numerical Calculation on a Top-Hat Plasma Particle Analyzer Using a Boundary-Fitted Coordinate System, *IEEE Transactions on Plasma Science*, in press 2007.
- Delcourt, D. C., F. Leblanc, K. Seki, N. Terada, T. E. Moore, and M.-C. Fok, Ion Energization During Substorms at Mercury, *Planetary Space Science*, in press 2007.
- Tanaka, T., Magnetosphere-ionosphere convection as the compound system, *Space Sci. Rev.*, in press, 2007.