

「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研究部門・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

宇宙天気とは、太陽—太陽風—磁気圏—電離圏系におけるプラズマ環境のことです。これらは古くから太陽物理学や磁気圏物理学として個別に研究されて来ましたが、宇宙利用の拡大と共に全体を統合して、宇宙天気と呼ばれるようになりました。本研究課題では宇宙天気を数値的に再現し、研究や予報に役立てることをめざしています。本年度は太陽から電離圏に亘る全領域での数値モデルの精度向上を進め、地球軌道での太陽風予測、磁気圏サブストーム(オーロラ嵐)の再現、電離圏赤道異常(電離圏電子密度が赤道でなく磁気緯度±15度で最大となる現象)の再現、木星磁気圏のモデル作成、などを行ったと共に、情報通信研究機構(NICT)での各種予報の公開を進めました。今後はこれまでの成果の出版を進め、公開の HP を充実させることをめざします。また宇宙研究では観測で全体が見えないという弱点を、シミュレーションで克服することに挑戦したいと思えます。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

(1)リアルタイム磁気圏シミュレーション

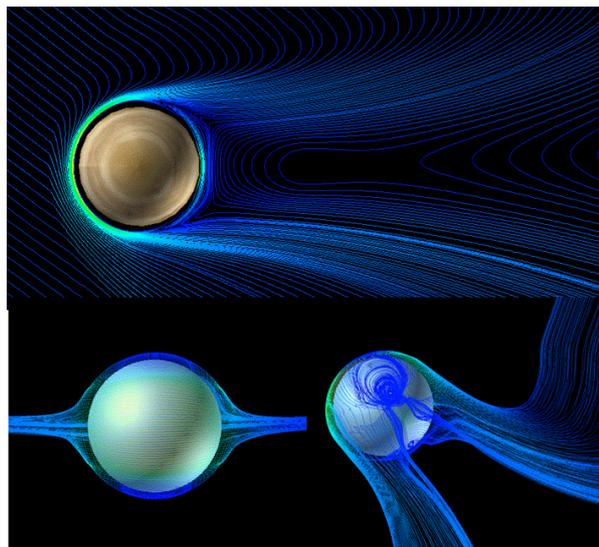
リアルタイム磁気圏シミュレーションを表示する HP の改良を進め、太陽風構造、磁気圏構造などと共に、それから派生するさまざまなパラメーターも同時に表示するシステムの開発を進めました(7)(10)(20)。現在は、地上磁場変動を表す AE インデックス、衛星運用にとって重要な放射帯粒子予測、電離圏の運動を表す電離圏ポテンシャルなどが表示されています。AE インデックスは京都大学の世界地磁気資料センターが(観測を元に)リアルタイムで算出しており、この観測による AE インデックスと計算による AE インデックスの比較は、磁気圏モデルの評価を行う上でも有用で、評価結果は論文にまとめられています(5)。また電離圏ポテンシャルは北極域に展開するレーダー網によってリアルタイム観測がなされており、これからも磁気圏モデルの評価が可能です。現在このような評価も進めています。リアルタイム磁気圏シミュレーションの結果はデータとして蓄積されており、このデータベースからモデル評価や、さまざまな現象のメカニズムの研究が進められるのではないかと考えられます。

(2) 太陽—太陽風シミュレーション

観測された太陽面磁場分布から、コロナの構造とそれに続く太陽—地球間の太陽風を再現することをめざし、太陽—太陽風シミュレーションを進めてきました。現在、正12面体分割による特異点除去格子を用いた太陽—太陽風シミュレーションは、十分な安定性を保って計算が進むようになり、熱力学過程を加えたモデルに進化しました(14)(19)。熱力学過程の要点は、磁場形状に依存したコロナ加熱と磁場に沿った熱伝導です。これにより地球軌道での太陽風の予測が出来るようになり、結果の一部は情報通信研究機構(NICT)でリアルタイム表示されるようになりました。しかしながら定常的に運用した結果では、時として予測結果が実測と合わない場合もあり、このような時は磁場のセクター構造(磁場の向きが切り替わる構造)も合わないことが分かりました。現在この点を改良中ですが、このため太陽活動周期(11年で太陽活動が活発になったり低調になったりする現象)の全てに亘って、条件が大きく異なるさまざまな場合を計算し、計算と観測が合う場合と合わない場合の違いを調べています。

(3) 電離圏シミュレーション

電離圏変動を予測するため、磁気圏、大気圏の影響を含めた全領域結合モデルの開発を進め、観測される電離圏の日々変動、磁気擾乱変動などを再現することが出来るようになりました(2)(3)。特に赤道異常と呼ばれる構造の日々変動を再現したことが大きな成果です。赤道異常とは、電離圏電子密度が赤道でなく磁気緯度±15度で最大となる現象で、大気運動に起因する電場の効果で、プラズマが輸送されることが原因とされてきました。今回の研究では、対流圏から熱圏(高度100km以上の大気領域)まで含め



第1図金星近傍の太陽風磁場

た大気モデル、大気運動を起電力として電離圏電場を計算するダイナモモデル(1)、光電離によるプラズマ生成を含む電離圏モデル、極域の電離圏にエネルギーを注入する磁気圏モデルを全て結合し、第1原理から赤道異常とその変動を再現し、また磁気圏擾乱による電離圏変動を再現しました。再現された赤道異常の振る舞いは、日々変動や地形に対する依存性を含み、観測と見まがうほどリアルなものとなりました。これは大気圏での地球規模波動の励起、上方伝搬、減衰、電離圏でのプラズマ運動、熱圏大気の運動などが複雑に統合された結果で、こうなると個々の原因について個別に追及するこれまでの研究スタイルが成り立たなくなってきました。

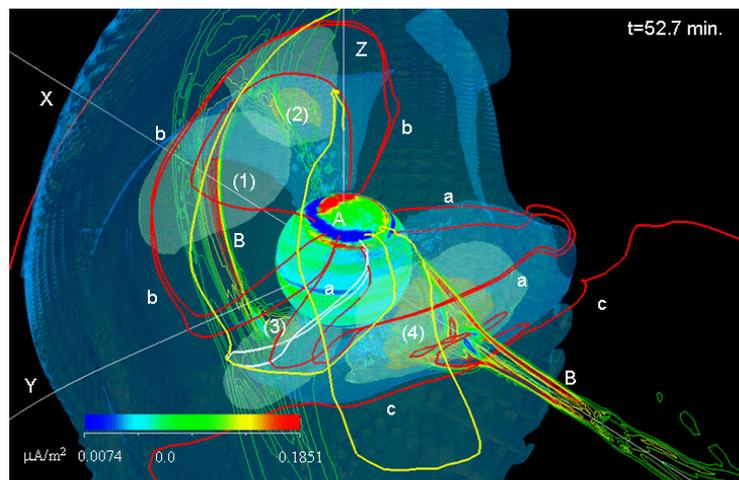
(4) 惑星シミュレーション

これまでに地球磁気圏シミュレーションと太陽シミュレーションのために開発してきたコードを応用して、太陽風と惑星相互作用の研究を進めました。これらの研究は大きく分けて磁化惑星の場

合と非磁化惑星の場合があります。まず磁化惑星の場合では木星を取り上げ、惑星の回転効果が卓越する磁気圏がどうなるかを計算しました。その結果、磁気が太陽風の動圧によって閉じ込められて磁気圏が出来るところは地球とさして変らないものの、磁気圏内のエネルギーの流れと、それを反映した電流構造は大きく異なることが分かりました(8)。電流の各要素は地球と似ているものの、相互の接続が地球の場合と異なり、木星の回転を磁気圏に伝えるような構造になっていること、その反作用として、プラズマの一部が木星回転より速く回るスーパーローテーションが発生することなどが分かりました。これらの構造は、木星オーロラの発生と関与していると思われます。非磁化惑星の場合では金星を研究し、太陽シミュレーションで用いた格子を適用して、これまでのモデルをはるかに凌ぐ高精度解を得ました(第1図)。数値解を解析し、昼側での太陽風と金星電離圏の相互作用、昼側から夜側への電離圏プラズマの輸送、夜側でのプラズマの脱出などに関し、これまでの観測結果を説明するためのメカニズムが考えることが出来ました(12)(15)(16)(21)。惑星シミュレーションの結果は、今後進められる惑星探査の計画に生かされるでしょう。

(5) サブストーム(オーロラ嵐)シミュレーション

一般に宇宙の研究では、観測によって見えるのは全体のほんの一部です。観測から得られた断片を繋ぎ合わせて全体像を想像するのが、伝統的な宇宙研究の手法と言えます。最も基本的な地球磁気圏の構造でも、実際に磁力線をトレースして確認されたわけではありません。ましてや電流線の構造となればもっと不確実です。これらのことに起因し、宇宙研究は常にあやふやさを含んで行われてきましたが、それが最も顕在化する例がサブストームの研究です。サブストームは太陽風磁場の(北向きから南向きになる)変化によってオーロラの活動が突然活発になる現象で、磁気圏物理学最大の未解決問題とされています。サブストームの解明をめざし打ち上げられた衛星は10以上もあるにも関わらず、いまだそのメカニズムは研究者の数だけ存在するといった状態です。このような問題こそがシミュレーションで研究されるべきで、シミュレーションによって第1原理からサブストームを再現できれば、磁場、電流の3次元構造、エネルギー流(の変動)など我々が最も知りたいことが全て分かるはずで



第2図サブストームの電流構造

このような問題こそがシミュレーションで研究されるべきで、シミュレーションによって第1原理からサブストームを再現できれば、磁場、電流の3次元構造、エネルギー流(の変動)など我々が最も知りたいことが全て分かるはずで

発想に基づき、本研究課題では粒子効果をパラメタライズした流体モデルにより、サブストームシミュレーションに挑戦してきましたが、今年度になって見かけとして観測と同じようなサブストームが再現できるようになりました(20)。観測では直接見えない部分であるサブストームメカニズムについては、計算結果から得られたものはこれまでに観測結果から推定された current wedge と呼ばれる構造が主役になるメカニズムとは大きく異なるものとなりました。我々の計算の特徴は磁気圏と電離圏の相互作用を正確に取り入れ、全ての要素を省略せず全体を複合系として扱ったことですが、結果はむしろ単純で、古くから知られている部分環電流がサブストームの主役という答えになりました(第2図)。その答えに対しては、現在のところ、サブストーム研究の権威は誰も信じないといった状態です。しかしながら我々のシミュレーションを超えるシミュレーションもなく、伝統的なモデルがシミュレーションで確認されているわけでもありません。

3. 研究実施体制

(1)「太陽シミュレーション・惑星」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

太陽全球シミュレーションの改良

惑星磁気圏への応用

サブストームシミュレーション

(2)「粒子・リアルタイム公開」グループ

①研究分担グループ長： 品川 裕之（(独)情報通信研究機構 主任研究員）

②研究項目

HP の改良

太陽シミュレーションの実装

MHD-粒子連成コードと地磁気嵐シミュレータ開発

磁気圏-電離圏-熱圏-大気圏結合モデルの開発

(3)「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 准教授）

②研究項目

磁気圏-電離圏-熱圏-大気圏結合モデルの開発

データ同化

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

1. Amm, O., A. Aruliah, S.C. Buchert, R. Fujii, J.M. Gjerloev, A. Ieda, T. Matsuo,

- C. Stolle, H. Vanhamaki, and A. Yoshikawa, Understanding the electrodynamics of the 3-dimensional high-latitude ionosphere: present and future, *Annales Geophysicae*, AG/2008057, 26, 3912–3913, 2008.
2. Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure, *J. Geophys. Res.*, 113, A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008.
 3. Jin, H., and T. Maruyama, Temporary decrease in daytime F-region peak electron density due to eastward electric field penetration during magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, 113, A05305, doi:10.1029/2006JA011928, 2008.
 4. Jin, H., K. Maezawa, and T. Mukai, The critical solar wind pressure for IMF penetration into the Venus ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 113, A02309, doi:10.1029/2007JA012725, 2008.
 5. 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.*, 113, A03S10, doi:10.1029/2007JA012514, 2008.
 6. Lammer, H., Terada, N., Y. N. Kulikov, H. I. M. Lichtenegger, M. L. Khodachenko, and T. Penz, Atmospheric Erosion Caused by Stellar Coronal Plasma Flows on Terrestrial Exoplanets within Close-In Habitable Zones of Low Mass Stars, *Proceedings of 14th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun ASP Conference Series*, Vol. 384, p.303, 2008.
 7. Matsuoka, D., K. T. Murata, S. Fujita, T. Tanaka, K. Yamamoto, E. Kimura, Analyses of 3D Structure of Magnetic Flux Ropes via Global MHD Simulations, *Transactions of Visualization Society of Japan*, 28, No. 6, pp.38–46, 2008.
 8. Moriguti, T., A. Nakamizo, T. Tanaka, T. Obara, and H. Shimazu, Current systems in the Jovian magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 113, A05204, doi:10.1029/2007JA012751, 2008.
 9. Oyama, S., B. J. Watkins, S. Maeda, H. Shinagawa, S. Nozawa, Y. Ogawa, A. Brekke, C. Lathuillere, and W. Kofman, Generation of the lower-thermospheric vertical wind estimated with the EISCAT KST radar at high latitudes during periods of moderate geomagnetic disturbance, *Ann. Geophys.*, 26, 1491–1505, 2008.
 10. Shimazu, H., K. Kitamura, T. Tanaka, S. Fujita, M. S. Nakamura, and T. Obara, Real-time global MHD simulation of the solar wind interaction with the earth's magnetosphere, *Adv. Space Res.*, 41, doi:10.1016/j.asr.2007.07.014, 2008.
 11. Uozumi, T., K. Yumoto, K. Kitamura, S. Abe, Y. Kakinami, M. Shinohara, A. Yoshikawa, H. Kawano, et al., New index to monitor temporal and long-term variations of the Equatorial Electrojet by MAGDAS/CPMN real-time data: EE-Index, *EPS-letter, Earth Planets Space*, 60, 785–790, 2008.
 12. Terada, N., Y. N. Kulikov, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, T. Tanaka, H.

Shinagawa, and T. Zhang, Atmosphere and water loss from early Mars under extreme solar wind and EUV conditions, *Astrobiology*, 9, doi:10.1089/ast.2008.0250, 2009.

13. Tsubouchi, K., Alfvén wave evolution within corotating interaction regions associated with the formation of magnetic holes/decreases, *Journal of Geophysical Research*, A02101, doi:10.1029/2008JA013568, 2009.

(印刷中)

14. Kamei, S., A. Nakamizo, T. Tanaka, T. Obara, and H. Shimazu, Development of the global simulation model of the Heliosphere, *Earth, Planets Space*, in press, 2009.
15. Kaneda, K., N. Terada, and S. Machida, Solar-wind control of the hot-oxygen corona around Mars, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2008JE003234, in press, 2009.
16. Shinagawa, H. and N. Terada, MHD and kinetic modeling of the ionospheres of Venus and Mars, *Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations*, in press, 2009.
17. Tsuda, T., S. Nozawa, S. Oyama, T. Motoba, Y. Ogawa, Y. Ogawa, H. Shinagawa, N. Nishitani, K. Hosokawa, M. Lester, and R. Fujii, Acceleration mechanism of high-speed neutral wind observed in the polar lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, in press, 2009.
18. Fukazawa, K., Global Simulation of the Magnetosphere Using Nested Grids Model with Inner Boundary of 1Re, *AdGeo*, in press, 2009.

(査読中)

19. Nakamizo, A., T. Tanaka, H. Shinagawa, and H. Shimazu, Development of the 3-D MHD simulation model of the Sun-solar wind combining system, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2009.
20. Tanaka, T., A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S. Fujita, H. Shinagawa, H. Shimazu, T. Kikuchi, and K. K. Hashimoto, Substorm convection and current system deduced from the global simulation, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2009.
21. Terada, N., H. Shinagawa, T. Tanaka, K. Murawski, and K. Kaneda, A three-dimensional, multi-species, comprehensive MHD model of the solar wind interaction with the planet Venus, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2009.

国内

(印刷中)

22. 久保勇樹、品川裕之、島津浩哲、田中高史 N I C Tリアルタイム宇宙天気統合シ

ミュレータ：現状と展望、「第5回宇宙環境シンポジウム」講演論文集、in press, 2009.

(2) 特許出願

平成20年度 国内特許出願件数：0件（CREST 研究期間累積件数：0件）