平成 19 年度
実績報告

「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

太陽地球系は、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が連結されたシステムで、そこで発生する複雑な電磁（プラズマ）現象は、宇宙利用に大きな影響を与えるので、宇宙天気とも呼ばれます。本研究課題では、太陽地球系シミュレーションを研究し、その成果を宇宙天気の可視化と予報へ応用することをめざしています。またこれと表裏一体として、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。

本研究課題で開発しているシミュレーションは、流体(MHD)モデル、粒子モデルの 2 つです。このうち流体モデルは、本研究課題で最も主要なテーマとしており、太陽地球系の全体像を再現するのに適しています。これにより太陽—太陽風シミュレーション、磁気圏シミュレーション、惑星シミュレーション、電離圏シミュレーションなどが開発されています。

粒子モデルは、太陽風加速、地磁気嵐、サブストーム(オーロラ嵐)のような MHD だけでは記述できない現象を研究するときに用いられますが、その結果は MHD で太陽地球系の全体像を再現するときの散逸係数に反映されます。本研究課題では、地磁気嵐の主体である環電流(地球を取り巻くように流れる磁気圏中の電流)の再現、磁気圏への粒子侵入経路などの研究に応用しています。

太陽地球系シミュレーションを実用に応用する研究では、まず磁気圏-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。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が、本研究課題では、さらに AE インデックス(オーロラの発生に対応するインデックス)や静止軌道粒子変動なども算出し、グローバルな地上観測との比較を進めています。現在は、太陽—太陽風シミュレーションと電離圏シミュレーションの実用化を開発しています。今後はこれらについても、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。

以上の研究を通じ、太陽地球系における複合システムの科学を理解する上で重要な結果も、いくつか得ています。まず磁気圏物理学最大の未解決問題であるサブストーム(オーロラ嵐)を再現することに成功し、サブストーム開始の不連続性に対して、遅進波自己組織化モデルを提唱しています。また磁気圏—電離圏—ダイナモー大気圏結合モデルを研究し、電離圏赤道異常(赤道を挟んで、南北両半球の低緯度領域に電離圏電子密度の最大が現れる現象)の生成・変動を再現することに成功しました。これから赤道異常の複合構造を明らかにしました。

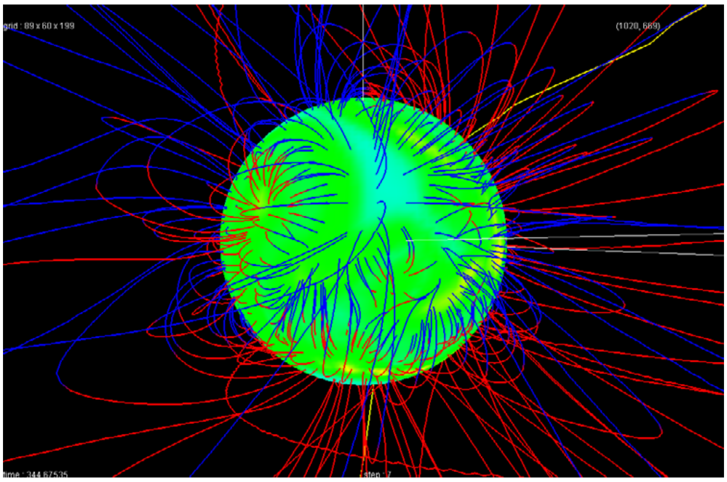
2. 研究実施内容

(1) 流体モデルとその応用

本研究課題で最も重点的に開発しているのが、流体モデルです。これはプラズマを連続体として扱う方法で、高周波の変動や、スケールが小さい現象には誤差が出ますが、ゆっくり変化する大きなスケールの構造を扱うのに適しています。したがって我々が実際に観測する宇宙天気現象の全体像を再現するのに威力を発揮します。本研究課題では、流体モデルに基づくシミュレーションとして、以下のようなものが開発されています。

1－1. 太陽—太陽風

太陽の全球シミュレーションのため、球面を三角で覆い六角柱を要素にした有限体積法を完成させ、見かけの特異点を持たない完全非構造格子によるMHDシミュレーションを開発しました。この応用で、太陽面から地球軌道にいたる広域のシミュレーションを可能にし、太陽のコロナ構造、コロナ磁場、セクター構造(惑星間空間の磁場構造)、地球軌道での太陽風などを再現するモデルを実現しました。



太陽シミュレーション。カラー分布は温度分布を示す。温度分布に、コロナホールが見られる。コロナホールから、開いた磁力線が延びている。

太陽風加速に関わる熱力学過程を考慮するため、太陽風中の非線形プラズマ波動のダイナミクスを、コロナ磁場構造と結びつけるようなパラメタリゼーションを試みました。これはコロナ磁場の拡大率と加熱を対応付けることによって行いました。これから、コロナホール、CIR(共回転相互作用領域)、太陽風速度、密度などが再現でき、地球軌道での観測をある程度予測できるモデルが得られました。しかしながら、太陽活

動極大で合わせたパラメタリゼーションは、極小では良好に地球軌道の太陽風を再現性せず、パラメタリゼーションの一般性に問題が残っています。

さらに先の問題は、このモデルを背景場として、太陽面の突発的な擾乱（コロナ質量放出など）が惑星間空間を伝搬する様子を再現することですが、これはかなり困難な問題と思われます。

１－２．地球磁気圏

これまでに、グローバルMHD（電磁流体）シミュレーションコードとして、非構造格子とTVD（全変動量逓減）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 MHD 計算高速化を図り、リアルタイム磁気圏シミュレーションとして実用化しました。磁気圏シミュレーションでチューニングされたスキームは、太陽シミュレーション、惑星シミュレーション、太陽圏（太陽風―銀河プラズマ相互作用）シミュレーションなどの応用のベースになっています。現在の問題点は、散逸の構造を如何にパラメタライズするかです。この散逸構造は MHD 理論からは得ることができず、粒子モデルが必要ですが、粒子モデルは計算量が多く、全体構造を計算することが出来ません。そこで太陽風加速の場合のようにパラメタライズが必要になります。磁気圏シミュレーションでは、サブストーム（オーロラ嵐）や磁気嵐のモデル化に際し、この点が大きな問題となります。このためサブストームが再現できるような散逸モデルを開発しています。

１－３．惑星磁気圏

磁気圏シミュレーションを一般化し、惑星磁気圏への応用も行えるように組み立てることを行っています。惑星シミュレーションは大きく分けて、固有磁場が在りかつ惑星の回転効果が顕著である木星・土星型と、太陽風と電離圏が直接相互作用を起こす火星・金星型に分かれます。

近年ハッブル宇宙望遠鏡によって木星オーロラの形態が詳細に観測されるようになってきています。シミュレーションにより、木星の太陽風―磁気圏―電離圏結合を再現し、これから木星での磁気圏―電離圏結合の現れである沿磁力線電流系の構造、それと木星オーロラとの関係、さらに木星オーロラから予測される磁気圏構造などを解明する目的で、MHD シミュレーションを開発しました。その結果、木星磁気圏構造や電離圏上のオーロラ分布などが再現されています。また地球磁気圏で求められたプラズマ対流の理論を木星に応用し、木星磁気圏中で、プラズマが木星の回転速度より速く回ること（スーパーローテーション）が可能であることを示しました。

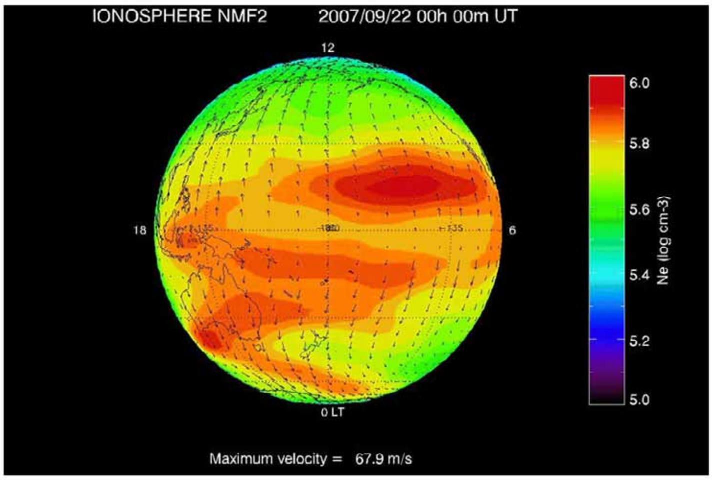
火星シミュレーションでは、太陽シミュレーションで開発した見かけの特異点を持たない完全非構造格子による MHD シミュレーションが、非常に効果を発揮しています。この格子を用いたシミュレーションは安定性に優れ、極端に高速な太陽風や、極端に密度の高い太陽風が惑星に当たっても計算が破綻しないことが分かりました。これにより惑星大気進化の問題を研究する方法に、新たな道が開けています。

1－4. 地球電離圏

地球電離圏は太陽の紫外線によって電離された大気層で、高度100kmより上空に存在します。それは電波の伝搬に重要な影響を与える領域で、上層の磁気圏、下層の大気圏の双方の影響を受け、変動します。本課題では流体モデルを用いて、磁気圏―電離圏―大気圏結合モデルを開発し、電離圏の予報をめざしています。

このモデルでは、磁気圏シミュレーションの結果得られる極域電離圏擾乱を元に、極域大気中に注入されるエネルギーを見積もります。これを基に電離圏大気の運動を計算し、太陽擾乱が電離圏に達する様子を再現しています。また下層の大気中の擾乱が上空に伝搬し、電離圏変動を引き起こすので、電離圏の下端境界で、伝搬してきた大気運動を取り込みます。この大気運動には、気象モデルを用いています。これらの複合されたモデルによって、電離圏赤道異常の再現に成功したのが大きな成果といえます。

このように電離圏シミュレーションでは、多くの領域を結合することが中心的課題となってきます。このことはソフトウェアの設計法としても洗練されたモデル開発の必要性に繋がり、モデル結合の方法まで考慮して、各モデル開発する方法を検討しました。



磁気圏ー電離圏ーダイナモー大気圏結合シミュレーション。電離圏電子密度の分布を示す。電子密度分布に赤道異常が見られる。

(2) 粒子モデルとその応用

流体モデルは、宇宙天気の全体構造を再現するには適していますが、そこでの散逸(電気伝導度、拡散係数など)は自己無撞着的に求めることが出来ません。宇宙天気現象では、サブストームなど、この散逸構造が重要となってくるものもあります。この散逸構造を研究することは非常に難しい問題で、本課題ではこれを本格的に取り上げているわけではありませんが、流体計算の結果を応用する粒子計算をいくつか試みています。

2－1. 粒子追跡

MHD モデルから磁場、電場の分布が求められるので、その中で乱数モデルで作ったプラズマ粒子を追跡し、粒子効果の一部を再現することを試みました。場を与えているので、粒子追跡からは元の MHD で計算したプラズマ分布が再現されるだけと予想されますが、実際には領域が不連続面を含んでいるので、ここで粒子の回転効果がきいて、一部 MHD と異なった粒子の振る舞いが現れます。

本研究課題では、太陽風粒子がどのように磁気圏中に侵入するか、電離圏から放出された粒子が、磁気圏の中でどのように振舞うか、などの計算を行っています。太陽風粒子が磁気圏に侵入する問題では、その経路が惑星間空間磁場の向きに大きく依存することが分かりました。惑星間空間磁場が北向きのときは、粒子は磁力線に平行運動をしつつ磁気圏の脇から侵入し、数は惑星間空間磁場が南向きのときよりも多量になります。

電離圏から磁気圏に放出された粒子は、プラズマシート(磁気圏尾の赤道面にプラズマが溜まっている領域)に達するまでは冷たいままで、プラズマシートに達すると高温になり、地球に向け逆流してくることが再現されています。

2－2. 粒子モデル

乱数で作ったプラズマ粒子を追跡し、刻々の粒子の位置と速度から電荷と電流を計算し、これを基に再び電場と磁場を求めると、粒子モデルとなります。本研究課題ではこのようなモデルまではめざしていませんが、磁気圏のサブストーム現象を研究するときには、粒子効果は無視できなくなると考えられています。そのため来年度から核融合科学研究所で開発された粒子モデルと連携し、サブストームモデル化の研究を計画しています。

(3) 実用化

情報通信研究機構(NICT)は日本における宇宙環境情報の発令機関であり、実際の予報の現場に宇宙天気の可視化情報や予測情報を表示し、実運用に貢献することをめざしています。

3－1. 磁気圏予報

太陽地球系シミュレーションを実用に応用する研究では、ACE 衛星の太陽風観測データを入力とし、磁気圏-電離圏シミュレーションをリアルタイム化した。このシステムは NICT(情報通信研究機構)で実運用されており、インターネットで公開されている。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が、本研究課題では、さらに AE インデックス(オーロラの発生に対応するインデックス)や静止軌道粒子変動なども算出し、グローバルな地上観測との比較を進めています。これらの比較からは、モデルの信頼性に関してのデータも得られています。

3－2. 太陽—太陽風予報

太陽—太陽風シミュレーションの実用化を開発しています。この計画では観測された太陽面磁場のデータを入力とし、3 日後の太陽風速度、セクター、密度などの予測を行います。このようなモデルでは、太陽活動極大期の擾乱効果はまだ予測できませんが、太陽活動極小期の回帰性磁気嵐などは予測可能です。今後はこれらについても、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。

3－3. 電離圏予報

本研究課題で開発された電離圏モデルを実用化し、磁気圏擾乱の効果や下層大気の効果まで含めた電離圏予報を行うことをめざしています。完全な日々変動を予測するには、気象庁の実観測による天気予報モデルを結合する必要がありますが、そこまで進めなくても、季節変動の効果や磁気嵐の効果はモデル化可能です。電離圏ではこれらの効果が大きいので、このようなモデルでも十分有効です。

(4) 複合システムの科学

本研究課題では、太陽地球系という複合された自然を仮定を置かずに再現することをめざしています。 これまでの基本原理に分解して自然を理解するという考え方に対し、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開拓しています。

4－1. サブストーム

サブストーム(オーロラ嵐)はオーロラが突然光り出し、それと共に磁気圏と電離圏の磁場やプラズマ分布が激しく変動する現象で、不連続性を含む変動のメカニズムは磁気圏物理学最大の未解決問題であります。急始をオンセット、その前の前兆期間を成長相、オンセット後の激しい変動期間を拡大層と呼び、多くの観測研究が行われています。しかしながら刻々と変動する、太陽風―磁気圏―電離圏の3次元構造を観測から描くことは困難であり、その説明は磁気リコネクションと関連付けられた現象論に留まっているのが現状です。本研究課題ではサブストームとシミュレーションで再現することに成功し、得られた数値解から磁気圏―電離圏の 3 次元構造を解明しました。その結果から、開始の不連続性に対して、遅進波自己組織化モデルを提唱しています。

4－2. 赤道異常の研究

電離圏赤道異常は、赤道を挟んで、南北両半球の低緯度領域に電離圏電子密度の最大が現れる現象で、日本で発見されたものです。赤道異常は大きな日々変動を示し、その変動は必ずしも地磁気活動と対応しません。本課題では、一切の仮定を置かずに赤道異常を再現することをめざし、磁気圏―電離圏―ダイナモー大気圏結合モデルを構築し、これから電離圏赤道異常の生成・変動を再現することに成功しました。赤道異常は全ての領域の相互作用を含めることによって、始めて再現できるものであることを示し、その複合構造を明らかにしました。

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研究者名：田中　高史（九州大学）

②研究項目

・太陽全体のシミュレーションの構築、磁気圏モデルの惑星磁気圏への応用

(2)「粒子・リアルタイム公開」グループ
①研究者名:品川　裕之((独)情報通信研究機構)
②研究項目
・HPの改良、MHD－粒子連成コードと地磁気嵐シミュレータ開発、熱圏予報モデルの開発

(3)「電離圏・データ同化」グループ
①研究者名:藤田　茂(気象大学校)
②研究項目
・電離圏予報モデルの開発、データー同化

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

Asai. K, T. Nagatsuma, H. Shimazu, T. Hori, K. Kitamura, and Y. Miyoshi, Cutoff L-values of solar protons 、Cutoff L-values of solar protons in comparison with ring current protons during a storm: NOAA/POSES observations, Advances in Geosciences, Vol. 8 Solar Terrestrial, 2007.

Delcourt. D. C, F. Leblanc, K. Seki, N. Terada, T. E. Moore, and M.-C. Fok, Ion Energization During Substorms at Mercury, Planet. Space Sci., 55, 1502-1508, 2007.

Fujimoto. M, W. Baumjohann, K. Kabin, R. Nakamura, J. A. Slavin, N. Terada, and L. Zelenyi, Hermean Magnetosphere-Solar Wind Interaction, Space Sci. Rev., 132, 529-550, 2007.

Fukazawa. K, T. Ogino, and R. J. Walker, Vortex-ssociated reconnection for northward IMF in the Kronian magnetosphere, Geophys. Res. Lett., 34, L23201, doi:10.1029/2007GL031784, 2007.

Kaneda. K, N. Terada, and S. Machida, Time variation of nonthermal escape of oxygen from Mars after solar wind dynamic pressure enhancement, Geophys. Res. Lett., 34, L20201, doi:10.1029/2007GL030576, 2007.

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.

Kubo. Y, Statistical Models for the Solar Flare Interval Distribution in Individual Active Regions, Solar Physics, Vol. 248, pp. 85-98, 2008.

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, and 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, Vol. 7, pp. 167-184, 2007.

Motoba. T, S. Fujita, T. Kikuchi, and T. Tanaka, Solar wind dynamic pressure forced oscillation of the magnetosphere-ionosphere coupling system: A numerical simulation of directly-pressure-forced geomagnetic pulsations, J. Geophys. Res., 112, A11204, doi:10.1029/2006JA012193, 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, Vol. 35, pp. 1178-1183, 2007.

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., Adv. Space Res., 41, doi:10.1016/j.asr.2007.07.014, 2008.

Shinagawa. H, T. Iyemori, S. Saito, and T. Maruyama, A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra Earthquake on December 26, 2004, Earth Planets Space, Vol. 59, pp. 1015-1026, 2007.

Tanaka. T, Magnetosphere-ionosphere convection as the compound system, Space Sci. Rev., Doi 10.1007/s11214-007-9168-4, 2007.

Tsubouchi. K, and Y. Omura, Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events, Space Weather, Vol. 5, doi:10.1029/2007SW000329, 2007.

Washimi. H, G. P. Zank, Q. Hu, T. Tanaka, and K. Munakata, A Forecast of the Heliospheric Termination-Shock Position by Three-Dimensional MHD Simulations, Ap. J., 670, 2007.

今村剛、佐藤毅彦、上野宗孝、寺田直樹、高橋幸弘、わが国の惑星大気探査の展望、日本惑星科学会誌, 17, 54-57, 2008.

小原隆博、宇宙天気予報、渋沢栄一記念財団雑誌「青淵」第720号, 21-23, 2007.

松岡大祐、村田健史、藤田茂、田中高史、山本和憲、木村映善、Global MHDシミュレーションによる磁気フラックスロープの3次元構造解析, 可視化情報学会論文集, 2008.

（印刷中）

Delcourt. D. C, Y. Saito, K. Seki, N. Terada, Dynamics of magnetospheric ions at Mercury: Some open questions awaiting BepiColombo measurements, Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, in press, 2008.

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, 2008.

Moriguchi. T, A. Nakamizo, T. Tanaka, T. Obara, and H. Shimazu, Current systems in the Jovian magnetosphere, J. Geophys. Res., in press, 2008.

Obara. T, H. Matsumoto, and T. Goka, Recent Topics of Radiation Belt Science, Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, in press, 2008.

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, 2008.

小原隆博、宇宙天気予報－宇宙の安全な利用のために－、「情報通信 BULLETIN」、KDDI、印刷中, 2008.