

# 研究課題名：変動惑星圏シミュレーション

研究課題責任者：寺田直樹（東北大学大学院理学研究科）

## 概要

惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒～数十億年スケールの時間変動、及びその蓄積によって生じる惑星圏システムの多様性を明らかにすべく、惑星圏変動の各々の時間スケールにおける特徴的な課題を遂行する。

## 1. 研究の目的と意義

惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒～数十億年スケールの時間変動、及びその蓄積によって生じる惑星圏システムの多様性を明らかにすべく、本研究グループが現有する(a)星・惑星形成、(b)惑星圏長期変動（数千万年～数十億年）、(c)惑星圏中期変動（数分～数十年）、(d)惑星圏短期変動（マイクロ秒～秒）の数値シミュレーションコードを適用・拡充発展させ、惑星大気・プラズマの変動と進化に係る統合的知見を得ることを目的とする。星・惑星形成過程や、惑星圏環境の時間変動、及びその蓄積によって生じる多様性を理解することは、我々がどこから来てどこに向かうのかという根源的な問題を知る上で重要である。近年のコンピュータの計算能力の発達に伴って、多圏間結合過程やマルチ物理現象、多様な時間スケールの現象を統合的に理解することが可能となりつつあるが、本研究では、まずは(a)(b)(c)(d)の各課題を遂行し、それぞれの時間スケールにおける特徴的な惑星圏変動現象の理解を深める。そして将来的にそれらを統合的な視点で繋ぎ合わせ、惑星圏環境の変動現象とその蓄積によって生じる多様性をモデルとして統合するための足がかりを創ることを目標とする。

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

- (1) 共同研究を実施した大学名  
東北大学
- (2) 共同研究分野  
プラズマ、流体、環境

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など  
名古屋大学太陽地球環境研究所及び情報基盤センターの共同研究者と、主に数値補間スキームの改良において連携を行った。

## 3. 研究成果の詳細

### (a) 星・惑星形成シミュレーション

磁気流体-流体結合シミュレーションコードを用いて、分子雲形成過程及び降着円盤における磁気乱流場を定量的に解析し、星・惑星形成環境において磁場が果たす役割を明らかにした。特に、初期重力収縮時における熱的不安定と両極性拡散の競合のパラメータ依存性を明らかにした。

### (b) 惑星圏長期変動シミュレーション

惑星電磁圏磁気流体力学コードと外気圏モンテカルロコードを結合させて、非磁化惑星における大気・プラズマの宇宙空間への流出率の太陽風動圧変動に対する応答を定量的に解析し、特に解離再結合過程の寄与を明らかにした。

### (c) 惑星圏中期変動シミュレーション

電離圏-熱圏-拡張大気圏シミュレーションコードを用いて、上下間結合過程によって地球型惑星電離圏の経度構造が生じる機構を明らかにした。また、フレア発生時の電離圏-熱圏構造の変動を調査すべく、X線や極端紫外光の時間変動の効果を組み込んだコードの開発を進めた。

### (d) 惑星圏短期変動シミュレーション

惑星電磁圏プラズマ波動-粒子相互作用に関する電子ハイブリッドコードを用いて、木星相対論的電子の生成過程を調べた。ガリレオ探査機の粒子・波動観測と比較考察を行い、ホイッスラーモードコーラスと高エネルギー電子の非等方性の発達に良い相関があることを示した。

#### 4. これまでの進捗状況と今後の展望

本研究で実施した(a)星・惑星形成シミュレーション、(b)長期変動シミュレーション、(c)中期変動シミュレーション、(d)短期変動シミュレーションは、そのほぼ全てが初期的な成果をJGR誌などの学術誌に掲載済みである。外気圏-熱圏の中性大気 DSMC シミュレーションは学術誌に未掲載であるが、その初期的な成果は地球電磁気・地球惑星圏学会講演会にて公表済みであり、且つコードの基盤となる外気圏粒子追跡計算の結果はJGR誌及びGRL誌に既に掲載済みである。また、本研究の鍵となる惑星大気の宇宙散逸、相対論的電子加速、惑星超高層大気の循環・運動では数々の先駆的な研究を行っており、多様な時間スケールに跨がる惑星圏変動の研究で国内随一の研究成果を挙げている。今後の展望は、上記の幅広いコードに適用可能なユニバーサルスキームの開発・実装を目指す。また、特にフレアやCME等の変動現象が、惑星大気・プラズマの宇宙空間への流出に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目指す。

#### 5. 研究成果リスト

(1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

1. Miyoshi, T., N. Terada, Y. Matsumoto, K. Fukazawa, T. Umeda, and K. Kusano, The HLLD approximate Riemannsolver for magnetospheric simulation, IEEE Transactions on Plasma Science, 38, 9, 2236-2242, doi:10.1109/TPS.2010.2057451, 2010.
2. Matsumoto, Y., N. Terada, T. Miyoshi, K.

Fukazawa, T. Umeda, T. Ogino, and K. Seki, Comparative study of global MHD simulations of the terrestrial magnetosphere with different numerical schemes, IEEE Transactions on Plasma Science, 38, 9, 2229-2235, doi:10.1109/TPS.2010.2056704, 2010.

3. Fukazawa, K., T. Umeda, T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, and T. Ogino, Performance measurement of magnetohydrodynamic code for space plasma on the various scalar-type supercomputer systems, IEEE Transactions on Plasma Science, 38, 9, 2254-2259, doi:10.1109/TPS.2010.2055162, 2010.
4. Matsuda, K., H. Misawa, N. Terada, and Y. Katoh, Asymmetrical features of frequency and intensity in the Io-related Jovian decametric radio sources: Modeling of the Io-Jupiter system, Journal of Geophysical Research, 115, A12222, doi:10.1029/2010JA015844, 2010.
5. Kitamura, N., Y. Nishimura, T. Ono, Y. Ebihara, N. Terada, A. Shinbori, A. Kumamoto, T. Abe, M. Yamada, S. Watanabe, A. Matsuoka, and A. W. Yau, Observations of very-low-energy (<10 eV) ion outflows dominated by O<sup>+</sup> ions in the region of enhanced electron density in the polar cap magnetosphere during geomagnetic storms, Journal of Geophysical Research, 115, A00J06, doi:10.1029/2010JA015601, 2010.
6. Yoshikawa, I, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, S. Kameda, M Ueno, N. Terada, F. Tsuchiya, M. Kagitani, Y. Kasaba, Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics Explore (EXCEED), Adv. in Geosci, 19, 579, 2010.
7. Ezoe Y., K. Ishikawa, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, and H. Negoro, Discovery of Diffuse Hard X-Ray Emission Around Jupiter with Suzaku, Astrophysical Journal, 709, L178-L182, doi:10.1088/2041-8205/709/2/L178, 2010.

8. Ezoe, Y., K. Ebisawa, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, H. Yoshitake, N. Terada, Y. Miyoshi, and R. Fujimoto, Time Variability of the Geocoronal Solar Wind Charge Exchange in the Direction of the Celestial Equator, Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ), 62, 981-986, 2010.
  9. 齋和人, 寺田直樹, 加藤雄人, 小野高幸, 降着円盤における磁気回転不安定性の数値実験, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 2, pp.45-52, 2010.
  10. 寺田香織, 寺田直樹, 藤原均, 加藤雄人, 笠羽康正, 火星におけるピックアップ O<sup>+</sup>イオンの生成率の太陽風動圧依存性, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 2, pp.61-66, 2010.
  11. 松田和也, 三澤浩昭, 寺田直樹, 加藤雄人, イオ関連デカメートル電波発生源の準定常構造に関する計算機実験, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 2, pp.67-73, 2010.
  12. 松本緑, 寺田直樹, 小野高幸, 星間雲形成における部分電離の効果, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 1, pp.5-10, 2010.
- (2) 国際会議プロシーディングス
  - (3) 国際会議発表
    1. Terada, N., T. Tanaka, H. Shinagawa, K. Murawski, and K. Masunaga, Modeling Solar Wind Interaction with the Ionosphere of Venus, ISSI International Team on Comparative Studies on Induced Magnetospheres, 1st Meeting 29 March-1 April, 2010.
    2. Terada, N., T. Tanaka, and H. Shinagawa, MHD and hybrid simulations of the cold ion escape from the ionosphere of Venus, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010, Hyderabad, India, 5-9 July 2010. (Invited)
  3. Terada, N., D. C. Delcourt, K. Seki, M. Fujimoto, T. Ogino, and Y. Matsumoto, The Role of the Kelvin-Helmholtz Instability for Mass Exchange at the Magnetopause: Mercury versus Earth, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010, Hyderabad, India, 5-9 July 2010. (Invited)
  4. Terada, N., H. Lammer, Yu. N. Kulikov, T. Tanaka, H. Shinagawa, Space weathering of planetary atmospheres by the solar wind - the Sun in time, 5th Alfvén Conference on Plasma Interaction with Non-magnetized Planets/Moons and its Influence on Planetary Evolution, Hokkaido, 4-8 October, 2010. (Invited)
- (4) 国内会議発表
    1. 寺田直樹, H. Lammer, Y. N. Kulikov, M. L. Khodachenko, 田中高史, 品川裕之, Simulation study of atmospheric escape from Mars and its application to extrasolar planets, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2010 年 5 月 23-28 日
    2. 寺田直樹, H. Lammer, Y. N. Kulikov, 田中高史, 品川裕之, 太陽系初期および系外における太陽風-惑星相互作用, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2010 年 5 月 23-28 日
    3. 寺田直樹, 渡辺重十, はしもとじょーじ, 惑星磁気圏の科学探査, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2010 年 5 月 23-28 日
  - (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)