

# 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

降着円盤における磁気乱流場を、磁気流体力学シミュレーションコードを用いて調査し、パーカー不安定性と磁気回転不安定性の競合の初期磁場配位に対する依存性を明らかにした。特に初期磁場と円盤の成す角度が約 20 度を超えると磁気回転不安定性の発達が支配的となり、円盤構造を大きく乱すことを示した。

### (b) 惑星圏長期変動シミュレーション

惑星熱圏-外気圏モンテカルロ直接シミュレーションコードにおいて、現実的な衝突モデル（前方散乱モデルなど）を組み込み、火星や金星における酸素原子の宇宙空間への流出率とエネルギー分布の定量評価を行った。

### (c) 惑星圏中期変動シミュレーション

太陽フレア発生時の火星・金星熱圏の変動を、X線や極端紫外光の時間変動の効果を組み込んだ熱圏モデルを用いて調査し、過去（約 35 億年前）の太陽フレアが外圏高度と温度変動に与えていた影響は 3 倍程度に達することを示した。

### (d) 惑星圏短期変動シミュレーション

地球磁気圏におけるホイッスラーモード波動の伝搬を高精度に解くべく、ダイポール座標系を適用した電子ハイブリッドコードの開発を進めた。

#### 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。また、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を進め、木星-イオ結合系などでの適用も行った。今後の展望は、非磁化惑星の熱圏-外気圏モンテカルロ直接シミュレーションコードと電磁圏ハイブリッドコードを結合し、太陽風起源粒子の降込みによる大気加熱・散逸を自己無撞着に解くことを目指す。

#### 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. Matsuda, K., N. Terada, Y. Katoh, and H. Misawa, The role of the electron convection term for the parallel electric field and electron acceleration in MHD simulations, *Physics of Plasmas*, 18, 082901, doi:10.1063/1.3622204, 2011.
2. Matsuda, K., N. Terada, Y. Katoh, and H. Misawa, A simulation study of the current-voltage relationship of the Io tail aurora, *Journal of Geophysical Research*, 投稿中.
3. Umeda, T., T. Kimura, K. Togano, K. Fukazawa, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, N. Terada, T. K. M. Nakamura, and T. Ogino, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body, *Physics of plasmas*, 18, 012908, 2011.
4. Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, Vertical Connection from the Tropospheric Activities to the Ionospheric Longitudinal Structure Simulated by a New Earth's Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model, *Journal of Geophysical Research*, 116, A01316, doi:10.1029/2010JA015925, 2011.
5. Ishikawa, K., Y. Ezoe, T. Ohashi, N. Terada, Y. Futaana, X-Ray Observation of Mars at Solar Minimum with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, Vol. 63, pp.S705-S712, 2011.
6. Ezoe, Y., Y. Miyoshi, H. Yoshitake, K. Mitsuda, N. Terada, S. Oishi, and T. Ohashi, Enhancement of Terrestrial Diffuse X-ray Emission Associated With Coronal Mass Ejection and Geomagnetic Storm, *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, Vol. 63, pp.S691-S704, 2011.
7. 大谷栄治, 倉本圭, 今村剛, 寺田直樹, 渡部重十, 荒川政彦, 伊藤孝士, 坂本尚義, 渡部潤一, 木村淳, 高橋幸弘, 中島健介, 中本泰史, 三好由純, 小林憲正, 山岸明彦, 並木則行, 小林直樹, 出村裕英, 大槻圭史, 「月惑星探査の来たる10年」検討・第一段階報告, *遊星人*, Vol.20, pp.350-366, 2011.
8. Masunaga, K., Y. Futaana, M. Yamauchi, S. Barabash, T. Zhang, A. Fedorov, N. Terada, and S. Okano, O<sup>+</sup> outflow channels around Venus controlled by directions of the interplanetary magnetic field: Observations of high energy O<sup>+</sup> ions around the terminator, *Journal of Geophysical Research*, 116, A09326, doi:10.1029/2011JA016705, 2011.
9. Kitamura, N., Y. Ogawa, Y. Nishimura, N. Terada, T. Ono, A. Shinbori, A. Kumamoto, V. Truhlik, and J. Smilauer, Solar zenith angle dependence of plasma density and temperature in the polar cap ionosphere and low-altitude magnetosphere during geomagnetically quiet periods at solar maximum, *Journal of Geophysical Research*, 116, A08227, doi:10.1029/2011JA016631, 2011.
10. Tsugawa, Y., N. Terada, Y. Katoh, T. Ono, H.

- Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, and M. Matsushima, Statistical analysis of monochromatic whistler waves near the Moon detected by Kaguya, *Annales Geophysicae*, 29, pp.889-893, doi:10.5194/angeo-29-889-2011, 2011.
11. Ezoe, Y., K. Ishikawa, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, and Y. Futaana, Solar system planets observed with Suzaku, *Advances in Space Research*, 47, 3, pp.411-418, 2011.
- (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, and H. Shinagawa, MHD simulations of the cold ion escape from the ionospheres of Venus and Mars, *International Union of Geodesy and Geophysics General (IUGG) 25th General Assembly, Melbourne, 28 June-7 July, 2011.*
  2. Terada, N., Modeling solar wind interaction with Venus, *ISSI International Team on Comparative Studies on Induced Magnetospheres 2nd Meeting, Bern, 7-11 November, 2011.*
- (4) 国内会議発表
1. 寺田直樹, 大気散逸と気候変動: 理論研究の現状と発展性, CPS 研究会「火星研究の現状と発展性」, 2012年2月13日.
  2. Terada, N., Evolution of the Kelvin-Helmholtz instability in an inhomogeneous plasma: Momentum density shear model, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸, 2011年11月3日-6日.
  3. 寺田直樹, 電磁ハイブリッドシミュレーション手法の現状と今後の展望, 太陽地球惑星系科学シミュレーション・モデリング技法勉強会, 2011年9月15-16日.
  4. 寺田直樹, 惑星大気および月に残された初期太陽の痕跡, 国立天文台ひのでサイエンスセ
- ンターワークショップシリーズ「Faint Young Sun Paradox 研究会」, 三鷹, 2011年9月5-6日.
5. 寺田直樹, 田中高史, 品川裕之, MHD simulations of the cold ion escape from the ionospheres of Mars and Venus, 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2011年5月22-27日.
  6. 寺田直樹, 土屋史紀, 鍵谷将人, 笠羽康正, 吉岡和夫, 吉川一朗, 村上豪, 酒井恒一, 本間達朗, 山崎敦, 木村智樹, 上野宗孝, SPRINT-A/EXCEEDによる惑星散逸大気観測計画, 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2011年5月22-27日.
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)