

氏名・(本籍)	たお 埜 ち ひろ 千 尋
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2491号
学位授与年月日	平成21年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Numerical Studies of Jupiter's Magnetosphere - Ionosphere - Thermosphere Coupling Current System (木星磁気圏・電離圏・熱圏結合電流に関する数値研究)
論文審査委員	(主査) 教授 笠羽 康正 教授 岡野 章一 教授 荻野 瀧樹 (名古屋大・太陽地球環境研究所) 准教授 三澤 浩昭

## 論文目次

Acknowledgments	i
Abstract	iii
Contents	v
1 Introduction	1
1.1 Jupiter and Jovian Electromagnetic Environment	1
1.2 Coupling Processes between Magnetosphere and Ionosphere	4
1.3 Studies on Thermosphere and Ionosphere	6
1.4 Studies on Auroral Electron Precipitation	7
1.5 Emissions and Their Non-axisymmetric Characteristics	8
1.6 Purpose of This Thesis	9
2 Parameterization of Ionization Rate by Auroral Electron	11
2.1 Simulation of Electron Precipitation Process	11
2.1.1 Model Description	11
2.1.2 Results	13
2.1.3 Validation on the Model Setting	13
2.1.4 Energy Budget	15
2.2 Parameterizations	19
2.2.1 Ionization Rate	19

2.2.2	Ionization Rate for Inclined Precipitation Case	22
2.2.3	Excitation Rates	24
2.2.4	Production Rate Including Reflection Effect	25
2.3	Discussion	27
2.3.1	Comparison with Previous Studies	27
2.3.2	Ionospheric Conductance	30
2.3.3	Relaxation Time for Electron Degradation	34
2.4	Summary	36
3	Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere System	39
3.1	Model	39
3.1.1	Governing Equations for Thermosphere	40
3.1.2	Auroral Electron Precipitation	42
3.1.3	Solar EUV	43
3.1.4	Ion Chemistry and Conductivity	43
3.1.5	IR Cooling	45
3.1.6	Wave Heating	45
3.1.7	Current and Magnetospheric Plasma Convection	46
3.1.8	Magnetic Field Model and Magnetosphere-Ionosphere Mapping	47
3.1.9	Numerical Methods and Simulation Condition	48
3.2	Results	50
3.2.1	Magnetospheric Parameters and Current Distribution	50
3.2.2	Thermospheric Parameters	51
3.2.3	Ion-Neutral Coupling	55
3.3	Discussion	57
3.3.1	Validation of Thermosphere-Ionosphere Model	57
3.3.2	Energy Transfer	59
3.3.3	Effects of Neutral Dynamics on Coupling System	60
3.3.4	Radial Distribution of Radial Current	64
3.4	Summary	68
4	MI Current System (1): Characterized by Diurnal Variation	71
4.1	Model	71
4.2	Fine Structure of FAC	73
4.2.1	Results	73
4.2.2	Temporal Variation of FAC	75
4.2.3	Energy Transfer	76
4.3	Parameter Dependence of Temporal Variation of FAC	77
4.3.1	Magnetospheric Plasma Density and Mass Flux	77
4.3.2	Solar EUV	79

4.3.3 Auroral Electron Energy Spectrum .....	80
4.3.4 Planetary Rotation and Ion Chemistry .....	84
4.4 Summary .....	85
5 MI Current System (2): Characterized by Non-axisymmetric System Parameter .....	87
5.1 Model .....	87
5.1.1 Model Equations .....	87
5.1.2 Input Non-axisymmetric Parameters .....	89
5.1.3 Model Settings .....	92
5.1.4 Validation .....	93
5.2 Results .....	93
5.3 Discussion .....	96
5.3.1 Effects of Parameters on Non-axisymmetric Component of FAC .....	96
5.3.2 SSL Variation of FAC .....	99
5.3.3 Comparison with Observed Aurora .....	102
5.4 Summary .....	104
6 Summary and Conclusions .....	105
6.1 Summary and Conclusions .....	105
6.2 Suggestions for Future Works .....	108
A Emission Estimation .....	111
A.1 Emission Spectrum .....	111
A.2 Estimation of Observed Spectrum Including Absorption Effects .....	112
A.3 Color Ratio .....	114
B FAC Estimation in MI Model: Equation (5.9) .....	115
References .....	117

## 論 文 內 容 要 旨

Jupiter is a unique planet whose dominant energy source of the magnetosphere is the fast planetary rotation. The energy from the quasi-corotating neutral atmosphere is transported to the ionosphere through ion-neutral collisions, and toward the magnetosphere [e.g., Hill, 1979]. On the contrary, the dynamics in the thermosphere and the ionosphere is largely affected by the magnetosphere through a coupling process [e.g., Bougher et al., 2005; Millward et al., 2005]. However, the previous thermosphere-ionosphere models generally have assumed a static magnetospheric component of the electric field and a fixed auroral electron flux, without any feedback

effects from thermospheric dynamics. On the other hand, the magnetosphere-ionosphere coupling current models usually assumed a simplified form for the thermospheric dynamics. Therefore, the self-consistent thermospheric dynamics and current distributions affected by the magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling system have largely been unknown, despite their importance on the energy and momentum transfer processes. In addition, the theoretical and analytical approaches in previous coupling model studies have unsolved neither the effects of local time nor longitudinal variation of the system parameters.

Conquering these restrictions, we tried clarifying 1) the spatial distributions of and the relationship between the thermospheric dynamics and the coupling current, and understanding 2) the coupling current system characterized by the diurnal variation of ionospheric conductance and the non-axisymmetric variation of system parameters. This thesis engages in the following four topics.

Firstly, a new parameterization formula for ionization profile caused by auroral electron is prepared. The temporal and spatial variation of the ionospheric conductance is one of the most important key parameters for the coupling system. The main contribution on the conductance at high latitude is caused by auroral electron precipitation. Calculation of the ionization due to auroral electrons in each time step, however, requires a great deal of time to decrease computational efficiency in the thermosphere dynamic model. We calculate the penetration process of monochromatic electrons into Jupiter's  $H_2$  atmosphere using a Monte Carlo method. Based on the results, we have established a simple and useful formula for the ionization rate by auroral electrons that will be applicable to the general circulation model with  $H_2$  dominant atmosphere. The relaxation time in this electrons' degradation process,  $10^1$ - $10^3$  msec, is much smaller than the characteristic time of typical dynamical and chemical processes in the system. It assures the applicability of our parameterization method to the dynamics and chemistry in the Jovian current coupling system executed in this thesis.

Secondly, in order to investigate the spatial distributions of thermospheric dynamics and coupling current, and their relationship between them by their interactions, we have developed a new numerical model. The model calculates axisymmetric thermospheric dynamics considering main physical and chemical processes. The model simultaneously solves the torque equations of the magnetospheric plasma with radial current flowing in the magnetospheric equator. It enables us to update the electric field deposited on the ionosphere and field-aligned current (FAC) with the effects from/to the thermospheric dynamics. We have succeeded in obtaining the latitudinal distributions of the thermosphere dynamics, the ionospheric conductance, and magnetospheric plasma convection interacting each other. The energy extracted from the planetary rotation is mainly used for the magnetospheric plasma acceleration below  $74^\circ$  latitude, while it is consumed in the upper atmosphere, mainly by Joule heating, above  $74^\circ$  latitude. In the main oval region, the neutral wind dynamics contributes to the reduction of the electric field by 30% compared the rigid neutral corotation case. About 90% of this reduction is attributable to the neutral winds below 500 km altitude. The calculated radial current in the magnetospheric equator shows a steep increase in the region 15-25  $R_J$ , which is consistent with past magnetospheric observations, without excessive plasma mass flux as used in previous studies.

Thirdly, we focused on the effects of diurnal variation of the solar extreme ultraviolet (EUV) radiation on

FAC spatial and temporal distributions. Calculated FAC takes the maximum density on the dayside and the minimum just before the sunrise, due to the positive feedback of ionospheric conductance on FAC. The present simulations also show that the time variation of the maximum FAC depends on the magnetospheric plasma density and plasma mass flux. Both the theoretical analysis and numerical simulations show that FAC is proportional to the planetary angular velocity in the dayside and its square in the nightside.

Finally, we investigated variation of FAC affected by following three non-axisymmetric variations: the intrinsic magnetic field, background ionospheric conductance caused by the solar EUV ionization, and the magnetospheric magnetic field. The maximum FAC density varies by 7% during one planetary rotation period. The maximum value appears at the subsolar longitude of system III at  $210^\circ$  in the northern hemisphere and at  $0^\circ$  in the south. The high-order components of the intrinsic magnetic field expand the auroral latitude toward lower geographical latitude in the strong magnetic field regions. This geographically low-latitude region with the smaller solar zenith angle receives larger solar EUV flux to increase the ionospheric conductance and FAC, which causes the variation of the maximum FAC depending on the subsolar longitude.

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、太陽系惑星で最大の磁気圏を持つ木星の電離圏・熱圏・磁気圏相互作用下における、1) 熱圏大気運動と結合電流の空間分布とその関係、および、2) 電離圏電気伝導度日変化や系の自転軸非対称成分が特徴付ける結合電流系、を明らかにすることを目的としたものである。具体的には、以下の成果を挙げた。

### 1. オーロラ電子降り込みによる水素大気イオン化率高度分布のパラメータ式開発：

H<sub>2</sub> 大気への電子降り込み素過程をモンテカルロ計算し、得られたイオン化率高度分布を用いて大気およびオーロラ電子の物理量を変数とするパラメータ式を初めて確立した。任意の中性水素大気および降下電子に対して適応可能なものである。

本モデルにおける緩和時間（10–1000 ミリ秒）は、大気の力学・化学特性時間より十分短い。本パラメータ式は、局所平衡仮定を前提とした力学・化学モデルへ適用可能である。

### 2. 熱圏・電離圏運動および結合電流分布を同時に解くモデルの開発と解析：

熱圏・電離圏運動と電離圏・磁気圏電流系を結合した、初めての木星熱圏・電離圏・磁気圏結合モデルを開発した。本モデルは自転軸対称を仮定し、緯度高度 2 次元面で大気運動 / 温度分布を得るもので、領域間相互作用に基づく熱圏中性大気運動・電離圏電気伝導度・磁気圏プラズマ対流の分布を初めて定量的に導出した。メインオーロラオーバル領域において、中性大気運動による電場の減少率は 30% で、その 90% は高度 500 km 以下の大気運動が寄与することを示した。また本モデルは、木星近傍で急峻増大する赤道動径電流分布を、自然な仮定のもとで初めて再現した。従来モデルでは、この再現には、過大なイオ起源プラズマフラックスを仮定したが、本モデルは中性大気運動によってこれを無理なく説明した。

### 3. 太陽紫外線変動による結合電流系の時間変化と系変動特性の抽出：

オーロラ電子と同様に電離圏電気伝導度に寄与する「太陽紫外線による電離効果」の評価、すなわち太陽紫外線の日変化が領域間結合系に及ぼす影響を初めて調べた。電離圏電気伝導度の沿磁力線電流 (FAC) に対する正フィードバックの性質を通し、FAC の絶対値およびピーク緯度の日変化を見いだした。また、FAC 時間変化に対し、磁気赤道プラズマ密度は系の慣性を担い、プラズマ質量フラックスは磁気赤道プラズマ加速領域および昼側 FAC の最大値を制限することを示した。さらに、これらの数値計算および理論式から、FAC 絶対値の惑星自転角速度依存性を初めて示した。

### 4. 自転軸非対称な磁気圏・電離圏・惑星固有パラメータによる結合系変動：

自転軸に対し非対称な磁気圏・電離圏・惑星固有パラメータがもたらす結合系の変動の特徴を調べた。これらの作用の総和として、沿磁力線電流最大値が 7% の自転周期変動を示す結果を得た。この変化は、北・南半球それぞれで、太陽直下点経度 210 度および 0 度において最大となる。これは、磁軸が自転軸に対し傾きを持つため磁場の強い領域でオーロラ領域が低緯度に広がり、この領域の太陽紫外線による電離圏電気伝導度の増大が FAC 増大をもたらすためである。

本論文は、自転によって駆動される「木星型磁気圏」の首尾一貫した数値モデルを世界で初めて提示し、それにより従来説明できていなかった木星磁気圏の諸現象に新たな解釈をもたらしたものである。著者は、

これに必要な数値シミュレーションモデルを独力で開発し、それによって世界に先駆け関係研究者から評価される優れた研究成果を挙げた。

論文・プレゼンテーションの内容は、背景となる物理の理解、結論および将来展開への提案等、水準に達するもので、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

以上の理由により、埜 千尋<sup>たお ちひろ</sup>提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格であると認める。  
なお、本論文の主要部はすでに出版ないし投稿済である。