

平成21年 5月12日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340148  
 研究課題名（和文） 木星内部磁気圏プラズマの自動連続観測に基づく  
 磁気圏大規模ダイナミクスの研究  
 研究課題名（英文） A study of global dynamics of Jupiter's magnetosphere  
 based on continuous optical observations of the logenic plasma  
 研究代表者  
 三澤 浩昭（HIROAKI MISAWA）  
 東北大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：90219618

研究成果の概要：未解明の木星衛星イオ起源プラズマによる磁気圏現象への関与を定量的に示し、現在想定されている磁気圏・電離圏電流結合過程で木星の大規模電磁活動が説明されるかを観測に基づき査定することをテーマとし、木星プラズマ発光観測用の高信頼度の遠隔観測装置の開発・立上げを完遂し、長期連続観測による実証・検証が開始された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,400,000	0	6,400,000
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	10,100,000	1,110,000	11,210,000

研究分野：数物系科学（惑星磁気圏物理学）

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：衛星大気、イオ、プラズマ、木星、磁気圏、光学観測、遠隔観測

## 1. 研究開始当初の背景

木星には巨大な磁気圏が存在するとともに、活発で強力な電磁放射やオーロラ等の電磁現象が確認されている。この巨大で活動的な磁気圏が形成される要因は、木星の強力な磁場と高速自転、更に、衛星イオから放出される硫黄や酸素を主成分とする火山性ガスの存在が挙げられる。このガスはプラズマ化し磁気圏へ流出するが、その量は毎秒約1トンにもなり、磁気圏プラズマの卓越した成分となる。このことは木星固有の磁気圏形成や電磁現象にイオ起源重イオンプラズマが深く関わる可能性を示唆するが、定量的なプロセスの理解は進んでおらず、イオ起源プラ

ズマの変動と磁気圏活動現象の関わりは正相関か逆相関か、或いは無相関かという一見単純な問いは、久しく木星磁気圏の謎とされてきた。本件については1980年代より純理論的な考察がなされ、一つの説として磁気圏プラズマと電離圏の磁気圏活動領域をダイナミックな電流系の要素として捉え、磁気圏現象をトータルに理解しようとする“磁気圏プラズマ・オーロラ域電離圏電流結合(M-I結合)説”が提唱され、プラズマ密度の増減と磁気圏電磁活動のそれとは逆相関である可能性が示されてきた。しかし、その真偽は未だ確認すべき対象として残されており、現在、最もホットな木星磁気圏の研究対象の一つとなっている。

この研究課題に答えてゆくには、観測的にイオ起源プラズマの変動と磁気圏活動現象との関わりを明らかにしてゆくことが重要となる。実際、従来よりイオ起源プラズマの観測は実施されてはきた。米国ボストン大とドイツ・マックスプランク研究所のグループは、イオ起源プラズマが可視光域で発光することを利用し、地上からの光学観測により磁気圏プラズマの研究を精力的に行ってきた。しかし、これらのグループの観測はマシンタイムの限られる大型観測機器を用いたテンポラルな観測であり、磁気圏現象との対応を検証し M-I 結合系のダイナミクスを明らかにしようとする上で重要となる、磁気圏プラズマデータの連続性に乏しかった。また、米国のガリレオ探査機が史上初の木星磁気圏周回探査機として磁気圏プラズマを長期連続的に直接計測し貴重なデータをもたらしたが、点観測データであるが故に計測されたデータの時間・空間変動の切り分けや磁気圏広域のプラズマ状態が把握出来ないため、磁気圏ダイナミクスを論ずるには困難があった。一方、本研究グループでは、1997年から現在に至るまで、毎年約一ヶ月間、海外の光学観測適地(豪州中央砂漠地帯やハワイ高山地帯)で、イオ起源の内部磁気圏プラズマのキャンペン観測を継続して行ってきた。限られた期間の観測ではあるが、この観測からガス・プラズマの内部磁気圏での分布状態や年オーダーでの変動様相等を明らかにしてきた。また、磁気圏ダイナミクスに関連する事象として、1999年の観測から内部磁気圏プラズマが1日で約2倍に増光する特異な現象を検出し、更に、この発光変動現象と、米国の研究機関がハッブル宇宙望遠鏡の観測から検出した木星オーロラ発光域の大規模急変現象(オーロラ・フレア)が同時期に発生していたことを明らかにした。本結果は、イオ起源プラズマが磁気圏大規模現象の制御にポジティブに関与する可能性を示唆しているが、同定されたイオ起源プラズマとオーロラとの同時期変動現象は未だ一例である。両者の因果関係が普遍的かあるいは偶発的か、また、普遍的な場合、どのような状態のプラズマが、どのような電磁現象をポジティブに或いはネガティブに表出させるか、に答え磁気圏ダイナミクスを解き明かすには、観測機会と観測時間の限られる従来型のキャンペン観測では不十分であった。以上のような研究経緯に鑑み、木星磁気圏を占める重イオンプラズマの長期連続観測の実施、その観測結果に基づく議論・考察は、木星磁気圏大規模ダイナミクスを解き明かす研究推進のためには必須となってきた。

## 2. 研究の目的

木星では、衛星イオの火山活動を起源としてイオから木星磁気圏全域に広がる重イオンプラズマが磁気圏プラズマ全量の90%を占めるとされ

る。イオから放出されるプラズマ量は顕著な変動を示すことも知られるが、この変動が磁気圏の電磁現象にどのような影響をもたらすのか、その詳細は未解明である。

イオ起源の重イオンプラズマは可視光域で明るい発光を示す。本研究では、先ず、この発光の遠隔モニターを可能とするインテリジェントな観測装置を開発すること、また、この装置を用いた連続観測から、イオ起源プラズマの変動特性を導出することが第一の目的である。次のステップとして、本研究グループ他が行っている高感度木星オーロラ電波データや、NASA 他が実施している木星紫外・赤外オーロラのパトロール観測データ等とイオ起源プラズマ発光データとの比較に基づき、未解明のイオ起源重イオンプラズマによる磁気圏の電磁現象への関与を定量的に明らかにすることが第二の目的である。更に、現在想定されている、M-I 結合ダイナミクスのシナリオで磁気圏の大規模な電磁活動が説明しうるか否かを本研究で行う観測結果に基づき査定し、木星磁気圏大規模ダイナミクスを具体的に解き明かすことが最終目的である。

## 3. 研究の方法

本研究は概略以下の内容が予定された。

- (1) イオ起源プラズマ・プラズマ源ガス発光連続観測用インテリジェント高感度分光撮像装置の開発。
- (2) 同装置の光学観測適地への設置・立上げ。
- (3) イオ起源プラズマ・プラズマ源ガスの連続光学観測によるデータ取得。
- (4) 同データと木星オーロラ電波やオーロラ発光データとの相互比較に基づく両者間の関係の考査。
- (5) (4)迄の観測・考査と数値シミュレーションの援用による理論的考査に基づく木星磁気圏ダイナミクスの究明。

## 4. 研究成果

本研究課題の実施期間においては、3で記した研究内容の(1),(2)が完遂、(3)~(5)は現在進行中である。以下、それぞれに関しての成果を報告する。

- (1) 装置開発: 光学観測装置として、30cm口径反射望遠鏡を前光学系とし、コリメータ系+高感度低雑音CCDカメラを後光学系とする装置とした。分光装置として、コリメータ系の平行光束部にイオ起源ガス・プラズマの発光(4種)を捉える狭帯域フィルターを配し、光学観測装置との組み合わせにより、高感度分光撮像装置として開発した。フィルターは切替機構により交換式とし、フィルターの環境温度変化による中心波長のシフトを抑制するための制御機構も設けた。また、木星を追尾するために木星位置監視光学系も設け

た。これらの光学装置に加え、これらの装置の動作を遠隔視認するための機器監視装置、気象データ取得装置、全天モニター装置も設置した。光学観測装置系、機器観測装置系の全ては、開閉および視野方向の自由選択が可能な2m直径の光学ドームに収納された。以上の全装置および光学ドームは、全てパーソナルコンピュータを介した遠隔制御および木星追尾動作については自律制御が可能な、インテリジェントなシステムとして立ち上げられた。

- (2) 光学観測装置の観測適地への設置:(1)で完成させた装置一式を、世界的な光学観測適地の一つである豪州中央砂漠地帯のアリス・スプリングス郊外に移設した。現地には、ニュー・サウス・ウェールズ大学の施設があり、この施設内の一角に光学ドームを据え置いた(図1)。同地に高速インターネット回線を設け、日本との常時接続を可能とし、日本からの遠隔操作+自律制御により木星イオ衛星起源プラズマ・ガスの観測が可能なシステムを2008年8月に完成させた。



図1. 豪州中央砂漠地帯アリス・スプリングス郊外に設置されたイオ衛星起源プラズマ・ガス遠隔観測装置の全景。2m直径の光学ドームの中に30cm口径反射望遠鏡を前光学系とした高感度分光撮像装置が見えている。光学ドームの傍らに制御棟があり、棟内のコンピュータを介した高速インターネット通信により日本と結ばれている。

- (3) 連続光学観測によるデータ取得:(2)で記した光学観測装置による木星イオ起源プラズマ・プラズマ源ガス観測は、2008年の木星観測好機最終時期の8月に一時的に実施されたが、本格的な観測は2009年の木星観測好機である今後に予定されている。観測装置の信頼性を高めることに時間を要したために、このような事態となった次第である。しかし、本研究課題では、研究目的を達成するため、豪州中央砂漠帯同様の世界的な光学観測適地の一つであるハワイの高山地帯に本研究グループが保有する光学

観測サイトにおいても、本研究課題で開発した装置を一部用いて、木星イオ起源プラズマ・プラズマ源ガス観測を各年約1~2ヶ月有人で実施した。この結果、2007年5~6月の連続観測から、プラズマ源ガスが数日間ファクターで2程度変化する短期変動が検出された。また、2007年と2008年5~6月の観測結果と、それ以前の数年の結果とを比較し、プラズマ・プラズマ源ガスの密度が増加傾向にある可能性を見出した。

- (4) (3)で得られた観測結果と、人工衛星 WIND で取得された木星オーロラ電波、および、ハッブル宇宙望遠鏡で得られた木星紫外線オーロラのデータの比較を行った。オーロラ電波強度およびオーロラ強度と、プラズマ源ガス発光量の比較では、同時期に両者に系統的な時間変化は認められなかった。イオ起源プラズマのオーロラ域に相当する磁気圏へ拡散する時間スケールは数ヶ月と予想されている。イオ起源プラズマ・ガスの観測が1~2ヶ月であったことを考慮すると、この相互比較の結果は上記予想を否定しないことが分かった。また、年オーダーの長期のプラズマ・プラズマ源ガス発光強度とオーロラ電波強度の比較の結果、両者には正相関関係があることが示された。但し、この結果には2008年の光学観測結果は含まれていない。プラズマ・プラズマ源ガス発光強度とオーロラ、オーロラ電波強度の変動の間には数ヶ月の差異も予想されるが、(3)で今後取得される観測結果も含めた比較研究により、両者間の時間差も含めた、より詳細な検討が今後成されると期待される。
- (5) 東北大学の大学院学生の協力を得た木星電離圏-磁気圏結合過程の数値シミュレーション解析により、イオ起源プラズマが磁気圏の電磁現象に及ぼす影響が定量的に調べられた。この結果、定常状態では、特に木星中心から30惑星半径程度までの領域を通る磁力線上に発生するオーロラやオーロラ電波については、その強度とプラズマ量の間には顕著な正の相関があること、また、プラズマ量によりオーロラや電波の顕著な出現域は異なる可能性が示唆された。プラズマ量に時間変動がある場合についても検討が進められつつあり、より実態に即した条件の下で、プラズマ変動による磁気圏応答プロセスの詳細が定量的に明らかにされることが期待される。

以上、本研究グループは、イオ起源プラズマ・プラズマ源ガスの観測装置の開発と観測、数値解析に基づく定量的な木星電離圏-磁気圏結合過程の考察を実を伴う形で進めてきた。長期観測の実施と、よりリアリスティックな数値解析を

併用した考察は課題となったが、最終目的であるイオ起源プラズマの影響下での磁気圏大規模ダイナミクスの更なる究明に向け、研究を継続し完遂を目指す。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① 三澤浩昭、土屋史紀、森岡昭、野澤宏大、木星電波の発生域の考察、惑星圏研究会集録集、10、印刷中、2009、査読無
- ② 米田瑞生、鍵谷将人、三澤浩昭、岡野章一、過去10年間に見られた木星ナトリウム雲の変動、惑星圏研究会集録集、10、印刷中、2009、査読無
- ③ 三澤浩昭、土屋史紀、森岡昭、伊藤智美、野澤宏大、木星電波の情報とは？、惑星圏研究会集録集、9、109-112、2008、査読無
- ④ 米田瑞生、鍵谷将人、岡野章一、木星ナトリウム雲の短期変動、惑星圏研究会集録集、9、91-94、2008、査読無
- ⑤ 三澤浩昭、森岡昭、土屋史紀、木星電波の長期変動特性、惑星圏研究会集録集、141-144、8、2007、査読無
- ⑥ 野澤宏大、三澤浩昭、鍵谷将人、土屋史紀、森岡昭、岡野章一、イオプラズマトールにおける太陽風の効果、惑星圏研究会集録集、8、125-128、2007、査読無
- ⑦ 米田瑞生、岡野章一、鍵谷将人、三澤浩昭、木星周辺に観測されるイオ起源ナトリウム雲の東西非対称性、惑星圏研究会集録集、8、67-70、2007、査読無
- ⑧ Misawa, H., A. Morioka, H. Nozawa, and F. Tsuchiya, Investigations of plasma environment of Jupiter's polar upper ionosphere by spectrum analysis of auroral radio emissions, Proc. ISAS Lunar Planet. Symp., 39, 7.1-4, 2007. 査読無
- ⑨ Nozawa, H., H. Misawa, F. Tsuchiya, S. Okano (他6名, 1,2,4,8番目), Implication for the solar wind effect on the Io plasma torus, Geophys. Res. Lett., 33, doi:10.1029/2005GL025623, 2006. 査読有

[学会発表] (計8件)

- ① Yoneda, M., M. Kagitani, and S. Okano, Ground-based observation of logenic plasma and neutral clouds at Haleakala observatory, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会、仙台、2008年10月11日
- ② 米田瑞生、鍵谷将人、岡野章一、木星ナトリウム雲の短期変動、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉、2008年5月28日

- ③ 鍵谷将人、埜千尋、米田瑞生、岡野章一、イオプラズマトールにおける共回転遅延の朝夕非対称、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉、2008年5月28日

- ④ Yoneda, M., M. Kagitani, and S. Okano, Short-term variability of Jupiter's extended sodium nebula, 第122回地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2007年9月30日

- ⑤ Okano, S., H. Misawa, A. Morioka, F. Tsuchiya, Y. Kasaba, and T. Ono, Cooperative Optical and Radio Observations of Planets from the Ground, 4th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, バンコック, タイ, 2007年8月2日

- ⑥ Misawa, H., A. Morioka, and F. Tsuchiya, Long Term Variation of Jupiter's Decametric Radio Emission, Magnetspheres of the Outer Planets 2007 Symp., サン・アントニオ, 米国, 2007年6月25日

- ⑦ Yoneda, M., S. Okano, M. Kagitani and H. Misawa, Short-term variability of Jupiter's extended sodium nebula, 日本地球惑星科学連合2007年大会、千葉、2007年5月20日

- ⑧ 三澤浩昭、森岡昭、土屋史紀、木星電波の長期変動特性、第8回惑星圏研究会、仙台、2007年3月21日

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等(本研究グループ総合サイト)  
<http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

三澤 浩昭(MISAWA HIROAKI)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号:90219618

##### (2)研究分担者

岡野 章一(OKANO SHOICHI)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号:10004483  
土屋 史紀(TSUCHIYA FUMINORI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号:10302077

##### (3)連携研究者

野澤 宏大(NOZAWA HIROMASA)  
鹿児島工業高等専門学校・一般教育科理系・准教授  
研究者番号:60398914