

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20253007

研究課題名(和文) ハワイ高高度施設から探す木星磁気圏におけるリコネクションの証拠

研究課題名(英文) Searching for an evidence of magnetic reconnection in Jupiter's Magnetosphere from the high-altitude observatory in Hawaii

研究代表者

佐藤 毅彦 (TAKEHIKO SATOH)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：10297632

研究成果の概要(和文)：木星磁気圏の太陽風との相互作用や磁気リコネクションについては未知のことが多い。本研究では磁気リコネクションの証拠を初めて見つけるべく、マウナケア山頂における連続的な赤外線モニター観測を進めた。白金シリコン検出素子を用いた赤外線カメラを開発し、ハワイ大学ヒロ校と覚書を取り交わし観測準備を進めた。現地で望遠鏡整備が遅れデータ取得に至らなかったものの、これから数年のモニター観測の準備を完了できた。

研究成果の概要(英文)：It is NOT well known how Jupiter's magnetosphere interacts with the solar wind and how magnetic reconnection works. Our plan was to carry out continuous monitoring observations in the infrared atop Mauna Kea, so that the evidence of magnetic reconnection at Jupiter is detected for the first time. We have developed an infrared camera, with a PtSi detector, and exchanged a Memorandum of Understandings with the University of Hawaii, Hilo. Although the data acquisition was delayed, due to a large delay of the telescope installation, our system development has been successfully completed so that the monitoring observations in coming years are in hand.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費        | 間接経費       | 合計          |
|--------|-------------|------------|-------------|
| 2008年度 | 11,800,000円 | 3,540,000円 | 15,340,000円 |
| 2009年度 | 2,800,000円  | 840,000円   | 3,640,000円  |
| 2010年度 | 3,400,000円  | 1,020,000円 | 4,420,000円  |
| 総計     | 18,000,000円 | 5,400,000円 | 23,400,000円 |

研究分野：惑星磁気圏物理学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：オーロラ、リコネクション、太陽風、木星磁気圏、赤外線

## 1. 研究開始当初の背景

生命の防護壁「惑星磁気圏」の理解に挑む科学コミュニティ：その鍵を握る木星磁気圏

絶えず変動する太陽風に惑星磁気圏がどう呼応するかは、磁気圏に守られている生命の重大な関心事である。木星(最大)～地球(中)～水星(小)とさまざまなスケールの磁気圏プロセスを貫く普遍的理解が重要視されている。木星へのLaplace計画、地球周

辺はCross Scale計画、水星へはBepi Colombo計画(2013年打ち上げ)と並び、惑星磁気圏の理解への挑戦が続く。木星へは過去に8機の探査機が訪れ、いまま新規計画が進められるところに、この巨大惑星の謎の深さと重要性に対する科学コミュニティの認識が示されている。木星磁気圏は、太陽側で50～100木星半径ほど、尾部は土星軌道以遠に達する。内部には、活火山を持つ衛星イオ起源のプラズマが円盤状に分布し、極域

には強いオーロラ発光が見られる。舞台が大きく複雑なこともあって、木星磁気圏が太陽風の変動に呼应してどのように振舞うのかいまだによく分かっていないが、惑星磁気圏の理解には木星磁気圏研究が鍵を握る。

#### リモートから得る木星磁気圏の「全体像」： 探査機と地上のコラボレーション

探査機データは精密だが、巨大な木星磁気圏のごく一部を垣間見るに過ぎない。搭載機器重量、観測期間や地上へ送信できるデータ量など、探査機にはさまざまな制約がある。それに対し地上からは、多様な観測装置を用いたり長い期間をかけた柔軟なモニター観測が行いやすく、これはまったく飛翔体観測と相補的なものとなるのである。

木星磁気圏に展開するさまざまな物理現象のうち、デカメータ電波やシンクロトロン電波、イオ・トラスからの可視領域発光、赤外線オーロラの観測が、これまで地上から行われてきた。ハッブル宇宙望遠鏡（赤外線）や探査機からのデータと相補的に、我々の知見を広げてきたのである。

## 2. 研究の目的

### 新たな着眼点：磁気リコネクションとオーロラ

本研究で目指すのは、ハワイを拠点とした赤外線オーロラの地上観測と、それによる木星磁気圏と太陽風相互作用の理解の深化である。木星赤外線オーロラと太陽風の相関は、本研究代表者らにより、過去にも研究されてきた (Baron et al., 1996 など)。赤外線オーロラ輝度と太陽風動圧 (Ulysses 探査機の観測) の間に弱い「正の相関」を見出したが、「負の相関」を予測する木星オーロラ理論モデル (Bunce and Cowley, 2001 など) とは整合せず、木星磁気圏が一筋縄でゆかない研究対象であることを示している。

本研究の準備として、新たなデータを加え両者の相関を検討し、太陽風動圧だけでなく惑星間空間磁場 (IMF) の極性も影響しているらしいことを見出した (平成 15~17 年度基盤研究 C)。本研究で、その新たな着眼点を推し進める。磁気リコネクションは、地球磁気圏ではそのオーロラ活動に非常に大きな影響をもつことが知られている。一方、木星の磁気リコネクションに着目し、それがオーロラに現れるものと考え観測的に実証しようとした研究は、世界的にもまだない。

### 期待される成果：将来ミッションへの貴重なフィードバック

本研究は、マウナケア山という最適な観測拠点、2008~2010 年という最適な観測時期

を選びかつ、装置の機能はとことん厳選する。こうした工夫をもって、太陽系最大の磁気圏をもつ木星磁場が IMF とどのようにリコネクションするのか、という課題に観測的回答を与える。木星における磁気リコネクションの様相が (オーロラを介して間接的にはあっても) 初めて捉えられることで、惑星宇宙望遠鏡 SPRINT-A/EXCEED (2013 年実施の JAXA 小型科学衛星初号機で、木星の紫外オーロラも観測する) や、国内・国外で推進されつつある木星ミッション (NASA の Juno、ESA の Laplace) へも貴重な指針を与えることを目指す。

## 3. 研究の方法

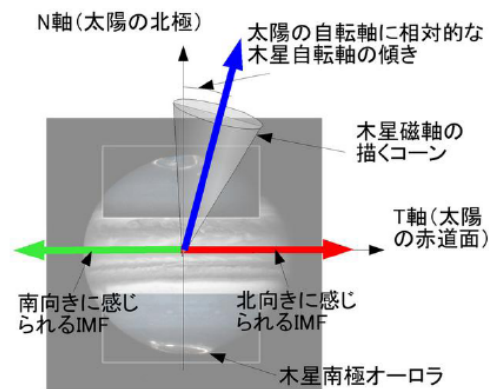


図 1：IMF と惑星自転軸傾きの効果

磁気リコネクションは、IMF と惑星磁場が南北「逆向き」で接するとき起きる。実際には IMF は「動径成分と東西成分の和ベクトル」を主構造とし、南北成分は大きくはない。そのような IMF に対して惑星の磁軸が傾けば、東西成分だけであっても北向きや南向き成分をもった IMF に感じられる (図 1)。地球においては、磁軸の傾きの大きな 4 月や 10 月にリコネクション頻度が増す観測事実があり、Russel-McPherson 効果と呼ばれる。本研究では、木星においても同様な「磁軸が傾くことにより磁気リコネクションが多く起きる」現象が存在するかを以下の戦略で観測的に検証する。

1. 木星磁軸の傾きが異なる複数期間にそのオーロラ活動を観測して太陽風データと比較し、動圧と IMF 極性の各々に呼应した変動成分を抽出する。
2. 観測は、専用の装置を安価・短期間に準備し行う。木星オーロラの全発光フラックスのみを低い空間分解能 (小口径望遠鏡で可能) で観測対象とする。
3. 太陽風データは飛翔体観測ではなく、惑星間空間での電波シンチレーション (IPS) の地上観測にもとづき推定 (Hayashi et al., 2003 の手法) した

ものを用いる。

時期として、急激に磁軸傾きが減少する  
2008～2010

年の3年間を  
選んだ。観測  
好期の夏は  
IPS 観測に向  
いていること

| 木星の暦    |       |
|---------|-------|
| 木星の衝    | 磁軸の傾き |
| 2008年7月 | 7.5°  |
| 2009年8月 | 5.0°  |
| 2010年9月 | 0.7°  |

(IPS 観測は  
1～3 月には行われない)、太陽活動が極大に向  
かい活発な太陽風変化が判別しやすい刻印  
をオーロラに残すと思われることより、この  
期間が最適と考えた。

観測実施場所はハワイのマウナケア山(最  
良の大気条件を備えた観測適地で大望遠鏡  
群が並ぶ)である。一般に共同利用望遠鏡で  
はマシンタイムが著しく限られる。そこで、  
同じ山頂にある小口径(口径 60cm)望遠鏡を  
ハワイ大学ヒロ校から長期借用し、本研究の  
ための観測に用いる。具体的な年次計画は以  
下のとおり。

## 2008年度の計画

- ◆ 本研究で用いる赤外線カメラ(InSb 検  
出素子、320×240 画素)の整備をメイ  
ンに行う。本研究では、撮像対象を木星  
オーロラだけに絞り込み、市販の赤外線  
カメラを利用することで、安価・短期間  
に実際の観測にこぎつける即決型のア  
プローチをとる。  
ベースとするのはアイ・アール・システ  
ム(株)が取り扱うカメラで、InSb 素  
子・読み出し回路・冷却システム・結像  
光学系が一体となったハンディなもの  
である(直方体3 辺の和が70cm にも満  
たない)。赤外オーロラ波長( $H_3^+$ イオン  
の輝線で、 $3.4\mu m$ )に透過中心を合わせ  
たフィルター(手持ち)をこれに内蔵し、  
望遠鏡と接続し結像する補助部品を製  
作する。
- ◆ マウナケア山頂の60cm 望遠鏡を長期借  
用するための交渉・打ち合わせを、ハ  
ワイ大学と行う。研究代表者はかつてハ  
ワイ大学天文学研究所に客員として滞  
在経験があり、研究所の知人を通じて交  
渉を進める。
- ◆ 初年度はInSb カメラ調達に時間を要す  
るため、これを用いての木星オーロラ  
観測は無理と思われる。東北大学グル  
ープのマウイ島ハレアカラ望遠鏡を用  
いるか、マウナケア山頂のすばる望  
遠鏡やIRTF 望遠鏡を用い、7.5° とい  
う大きな木星の磁軸傾き(太陽に相  
対的)をもつ時期の観測を実施する。  
木星オーロラ観測と比較するためのIPS  
観測は名古屋大学STE 研の定常観測  
として実施される。

## 2009年度以降の計画

続く2 年間は、観測・データ解析をルーチ  
ン的に実施し、各年度の終わりには「ま  
とめ」を行う。観測的に認められる太  
陽風動圧・IMP との磁気リコネクショ  
ンと整合するような木星磁気圏MHD  
モデルシミュレーションの境界条件を  
求め、本研究はその所期の目標を達  
成する。

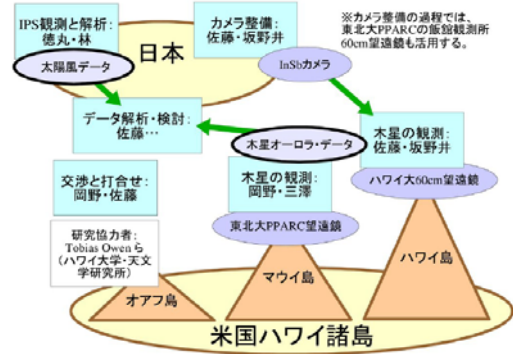


図2：参加研究者の役割分担と活動場所

## 4. 研究成果

### 【木星オーロラ観測システムの開発】

当初計画で使用を予定していたInSb 検  
出素子赤外線カメラのスペックを詳細に調  
べた結果、照度の低い天体観測では雑音  
の増大が問題となりそうなことが判明し  
、別の赤外線カメラを選択する必要が  
発生した。

代案として、白金シリコン(PtSi) 検  
出素子を用いるカメラを製作する案を検  
討した。PtSi 検出素子(1024×1024 画  
素)は金星探査機「あかつき」IR2 カ  
メラ実装のものと同等級品であり、三  
菱電機(株)が製作した。メリットは、  
国産品であり既に手元にあることから  
「時間の読みにくいExport License 手  
続きを要しない」ことがある。研究代  
表者の佐藤はIR2 主任研究員であり「  
素子の特性を熟知している」し、「素子  
を取り扱った実績のあるメーカー(住  
友重機械工業)にカメラ製作を安心し  
て任せられる」ことも挙げられる。当  
初計画とは異なるものの、基本コン  
セプト「安価・短期間に実際の観測に  
こぎつける即決型のアプローチ」は維  
持できるものとして計画を修正、木  
星オーロラ用カメラの製作を次の手  
順で開始した。

- 望遠鏡のスペック(焦点距離、F 値)を  
入手し、それを受けて適切な拡大(縮  
小)倍率でPtSi 検出素子に結像する  
光学系を設計する。
- 光学系の設計ができると、望遠鏡  
焦点位置から検出素子までの距離が  
決まる。それをできるだけコンパクト  
に収められるように冷却用真空容器  
を設計する。
- 真空容器のサイズが決まると各部  
の熱容

量が計算できる。それを必要温度まで冷却するための熱設計を行う。

- 光学系・真空容器・冷却系のすべてを組み合わせたカメラとして全体設計を行う。

### 光学系の設計

ハワイ大学から望遠鏡スペックを入手した段階で、当初計画で予定していた口径 60cm 望遠鏡の「更新」が進められていたことを知らされた。新望遠鏡は下記の仕様で、まだ Equinox Interspace 社（米国コロラド州）にて製作中とのことであった。

|          |          |
|----------|----------|
| 口径       | 900mm    |
| 焦点距離     | 9000mm   |
| F 値      | 10       |
| 形式       | カセグレン式反射 |
| バックフォーカス |          |

この望遠鏡に装着して木星オーロラを撮像する最適な光学系を設計する。

基本的な考え方は、次のとおり。

- この望遠鏡+カメラによる観測では、高い空間解像度は求めない。木星の南北両極に光る赤外線オーロラ、その明るさを別々に測定できればよい。
- 木星の明るい四つの衛星（ガリレオ衛星）のいくつかを同時に視野中にとらえたい。測光の基準星を確保できるため、安定した測光精度を保証できる。

以上の考え方にもとづいて、次のような光学系を設計することとした。

|          |                      |
|----------|----------------------|
| 画素ピッチ    | 17 $\mu\text{m}$     |
| 画素スケール   | 0.56 arcsec / pix    |
| 有効視野     | 6 arcmin (650 pix)   |
| 入射瞳      | $\phi 16 \text{ mm}$ |
| 倍率       | $\times 0.7$ 縮小      |
| イメージサークル | $\phi 11 \text{ mm}$ |

という設計目標値を設定した。

木星オーロラ観測は  $\text{H}_3^+$  発光輝線に合わせた波長 3.42  $\mu\text{m}$  の狭帯域フィルターを通して行われる。レンズの色収差は問題とならず、それ以外の球面収差等が許容範囲に収まるような光学系設計を行うこととなる。レンズは2枚必要である。

1. コリメータレンズ：望遠鏡焦点から広がる光を平行光線とする（このあとに、狭帯域フィルターを通過する）。
2. 結像レンズ：上記平行光線を PtSi 検出素子上に焦点を結ばせるレンズである。まず最初に、結像性能の優秀さに期待して非球面レンズを組み合わせる案を検討した。

|       |  |
|-------|--|
| コリメータ | 合成石英非球面平凸<br>エドモンド 48537-J<br>D = 25 mm, f = 30 mm |
| 結像    | 合成石英非球面平凸<br>エドモンド 48536-J<br>D = 25 mm, f = 25 mm |

許諾条件にしたがいメーカーから開示され

た非球面係数を用い、光学設計ソフト ZEMAX により光線追跡計算を行った。結果として、光軸上では非常にシャープな像を結ぶもののそこから離れるにつれて急速にスポット径が大きくなることを確認した。視野を十分にやりたい本カメラの光学系としては好ましくないと判断し、より単純な球面レンズを組み合わせる案を検討した。

|       |   |
|-------|---|
| コリメータ | 合成石英球面両凸<br>エドモンド 48294-J<br>D = 25 mm, f = 50 mm |
| 結像    | 合成石英球面両凸<br>エドモンド 48037-J<br>D = 12 mm, f = 35 mm |

この組合せで設計した光学系の光路図を図3に、スポットダイアグラムを図4に示す。光軸上でのシャープさには少し劣るもののより広い視野をとることが可能である。中心から半径 4mm 以内ではスポット直径 (RMS) が1画素以内を達成できる。画像高 6mm ではスポット直径が3画素近くまで広がるものの、そのような周辺領域は測光基準である衛星の明るさ測定にしか使わない。光量の減衰がない限り、測光目的には問題ない。単純でありながら本計画の当初目的を十分に満足する光学系の設計ができた。

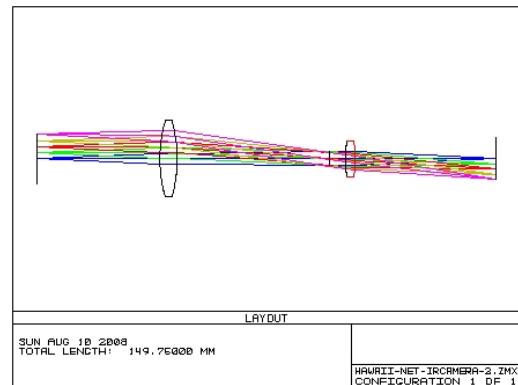


図3：木星カメラ光学系光路図

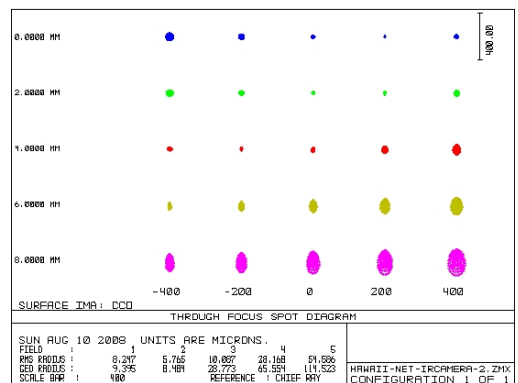


図4：スポットダイアグラム

### 冷却用真空容器の設計

次に、上で設計した光学系と検出素子ができるだけコンパクトに収納する冷却用真空容器を設計する。望遠鏡焦点から検出素子まで（設計値 155 mm）を直線状に配置すると全長が大きくなり、それだけ大きな真空容器を必要とする。冷却能力の高い冷凍機を必要とし、また望遠鏡の架台とのクリアランスという点でも好ましくない。そのため、光学系の途中にダイアゴナルミラーを配置することで 90° 折り曲げる構造とした（図 5）。

この構造を採用したおかげで、最も低温環境を必要とする内部シールド部分の容積を  $\phi$  146mm × 121mm 高というコンパクトなサイズに抑えることができた。真空容器の外形は  $\phi$  250mm × 200mm 高である。

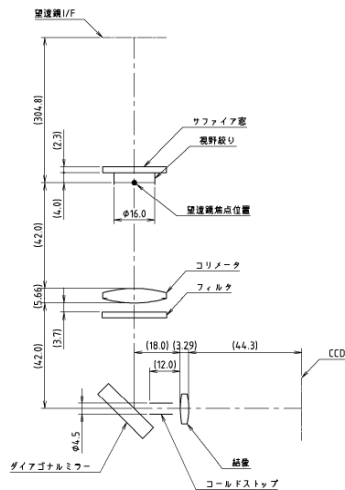


図 5：光学系～検出器部

### 熱設計

良好な赤外線撮像性能をもたせるため、要求温度は次の通りである。

- 検出器：70 K 以下
- 光学系、フィルタ：170 K 以下

これを達成するために 2 台のスターリング冷凍機（住友重機械 SRS2110 型）を使用し、1 台は検出器を直接冷却、もう 1 台は図 5 の光学系を搭載したステージを冷却させた。温度モニターには、白金抵抗（5ヶ所）およびアルミ抵抗（1ヶ所）を設置した。



図 6：ハワイ大学望遠鏡に取り付けた赤外線カメラ

### カメラ全体設計

真空容器を「望遠鏡とのインターフェイス部」と「冷凍機保持および放熱部」で挟み込む形で全体を構成した。このとき最大外径は  $\phi$  490mm、全体の高さは 753mm となった。図 6 にハワイ大学 90cm 望遠鏡に装着した際の画像を示す。黄色い部分が主鏡を支える望遠鏡底部である。その内側に、中央穴のある円形プレートをインターフェイスとしてカメラ全体が 6 本のロッドで支えられる構造となっている。画面中央の円筒が真空容器部、その下の四角い領域が冷凍機保持および放熱部である（冷凍機の発熱を逃がすためのファンが写っている）。

### 【マウナケア山頂望遠鏡の整備（ハワイ大学側）】

今回の研究計画では、メーカー Equinox Iterspace 社から望遠鏡が出荷されたのが 2010 年春にまで遅延したことが律速段階となった。そして、山頂に到着した望遠鏡とその制御システムに複数の不具合が発見され、実際の観測運用には 2012 年 2 月現在でも至っていないのが現状である。

この望遠鏡の責任者であるハワイ大学の Josh Walawender 博士とは連絡をとり続けている。博士からの状況報告には三つの大きな問題と、解決見通しが述べられている。

- We have tested the optics and found that they were rather poor. We are currently having them refigured by an optician on the mainland. 光学系の精度が悪く、米本土の光学技術者により修正研磨中である。5 月頃に完了の予定と追記されている。
- The telescope control system as delivered by Equinox is terribly buggy and is missing key features. We need to replace this. 納品された望遠鏡制御系はバグが多く機能も足りず、これを交換する必要がある。
- The dome control system was inadequate and buggy. A local engineer is working to modify an off-the-shelf control system to fit our needs. ドーム制御系も不適切でバグを含む。地元エンジニアが既製の制御システムのカスタマイズに取り組んでおり、6 月頃に完了の予定と追記されている。

博士は、これら全部の解決には 2012 年夏頃までかかるという見通しを述べている。このため本研究期間内での木星データ取得はできなかったが、望遠鏡とのフィットチェックおよび山頂環境でのカメラ冷却試験はぶじに完了した（2010 年 11 月）。したがって望遠鏡の整備が完了し次第、当初目的であった木星赤外線オーロラの連続モニター観測を

実施可能な状況までは到達している。

#### 【ハワイ大学との覚書】

山頂天文台を長期にわたり使用するために、宇宙科学研究所(研究代表者の所属機関)とハワイ大学ヒロ校との間で正式な覚書(Memorandum of Understandings)を取り交わす必要があった。2009年末から研究者レベル、2010年春からdepartmentレベルの話し合いを進め条文の作成を行った(当時の望遠鏡責任者David James博士が、2010年3月に話し合いのために来日)。MOUは、宇宙科学研究所側は対外協力室の高橋忠幸教授、ハワイ大学ヒロ校側は学長のDonald Straney博士により正式に署名され有効となった。

Both parties hereby agree to all the terms and conditions described above and execute this Agreement by the affixing of their signature on the dates below:

|   |  |
|---|--|
| University of Hawaii at Hilo  | Institute of Space and Astronautical Science,<br>Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) |
|  |           |
| By Its Chancellor   | By Its Director for International Strategy and<br>Coordination                             |
| DEC 13 2010   | 2010/Dec/02  |
| Date  | Date   |

図7：双方の署名がされた覚書

MOUは(第16条により)ハワイ大学側署名日付(2010年12月13日)から5年間有効となっている。2015年末までであるから、宇宙科学研究所の小型科学衛星SPRINT-A/EXCEEDが地球軌道上から木星プラズマ圏の極端紫外線観測を行う期間を含んでいる。マウナケア山頂からの赤外線による連続モニター観測との同時研究に期待がかかる。

#### 【IPS観測による太陽風パラメータ】

惑星間空間シンチレーション(IPS)観測～MHDトモグラフィ解析～太陽風パラメータの決定はルーチン的に実施され、2009年までのデータがすべて揃えられた。2010年夏にIPS観測システムの更新・調整が入り2010年は欠測となった。ハワイ大の望遠鏡整備完了までに、新システムによる太陽風データが恒常的に取得できるようになる予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① Oka, M., Fujimoto, M., Shinohara, I., Phan, T.D.: "Island surfing mechanism of electron acceleration during magnetic reconnection" J. Geophys. Res. 115, A8, doi:10.1029/2010JA015392, 2010. (査読有り)
- ② Chaston, C. C., K. Seki, T. Sakanoi, K.

Asamura, M. Hirahara (2010), Motion of aurorae, Geophys. Res. Lett., 37, L08104, doi:10.1029/2009GL042117. (査読有り)

〔学会発表〕(計5件)

- ① Satoh, T., et al., "NIIHAMA project: Monitoring Jupiter's H<sub>3</sub><sup>+</sup> auroras", Asia Oceania Geosciences Society. (2011年8月10日), Taipei.
- ② Lysrup, M. B., Guio, P., Satoh, T., Achilleos, N. A., Connerney, J. E. P.: "Imaging studies of Jupiter's H<sub>3</sub><sup>+</sup> infrared aurora" American Geophysical Union. (2009年12月17日). 米カリフォルニア州サンフランシスコ
- ③ 佐藤隆雄, 佐藤毅彦, 笠羽康正: "IRTF/SpeXを用いた木星5-micron帯の分光観測" 地球電磁気・地球惑星圏学会. (2009年9月28日). 石川県金沢市
- ④ 坂野井健, 小鮎格久, 岡野章一, 笠羽康正, 佐藤毅彦: "木星赤外オーロラ高分散分光観測による木星電離圏プラズマ運動" 第23回大気圏シンポジウム(2009年2月27日). 神奈川県相模原市
- ⑤ 佐藤毅彦, Connerney, J., 徳丸宗利, 林啓二: "木星H<sub>3</sub><sup>+</sup>オーロラ観測と太陽風シミュレーションの比較" 第9回惑星圏研究会. (2008年3月17日). 宮城県仙台市

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

佐藤 毅彦 (TAKEHIKO SATOH)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  
研究者番号: 10297632

##### (2) 研究分担者

藤本 正樹 (MASAKI FUJIMOTO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  
研究者番号: 30242811  
坂野井 健 (TAKESHI SAKANOI)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 80271857

##### (3) 連携研究者

岡野章一 (SHOICHI OKANO)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 10004483  
三澤浩昭 (HIROAKI MISAWA)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 90219618  
徳丸宗利 (MUNETOSHI TOKUMARU)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授  
研究者番号: 60273207