

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24403009

研究課題名(和文) 太陽活動極大期、木星磁気リコネクションをハワイ高高度観測施設からとらえる

研究課題名(英文) Magnetic reconnection at Jupiter as observed from Hawaiian high-altitude facilities at solar maximum

研究代表者

佐藤 毅彦 (Sato, Takehiko)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：太陽活動の極大期に合わせ、ハワイ高高度観測施設から木星赤外オーロラの連続モニター観測を試みた。この時期は木星の自転軸が最も大きく傾くことから、黄道平面内を主成分とするIMFであっても相対的に南北成分を生じ、磁気リコネクションに寄与することが予想されたからである。前半はハワイ島マウナケア山、後半はマウイ島ハレアカラ山頂の天文台へ赤外線カメラを持ち込み、観測を試みた。望遠鏡の問題もあり、赤外線オーロラを捉えられなかったが、短波長赤外線での木星データ(衛星イオの活火山モニター)を取得、金星夜面発光の様子もとらえるなど、今後の探査機観測と相補的に活躍できる海外の拠点を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In conjunction with the solar maximum, attempts were made to monitor Jupiter's infrared auroral activities from high-altitude observing facilities in Hawaii. Jupiter's rotational axis was most tilted from the normal to ecliptic plane at this time period. In such conditions, the IMF (mostly in the ecliptic plane) can be felt by the planet as northward or southward magnetic fields, resulting in possible enhancement of magnetic reconnections. In the first half of the period, we tried to use a telescope atop Mauna Kea (Hawaii Island), and later half a telescope atop Haleakala (Maui Island). Due to troubles with the telescopes, Jupiter's aurora was not observed. Instead, we successfully obtained Jupiter and its satellite Io data (for monitoring volcanism on Io) in shorter infrared wavelengths. The emissions from Venus' nightside disk were also observed. These will reinforce future collaborations between space missions and high-altitude observing facilities.

研究分野：惑星大気科学

キーワード：磁気圏 リコネクション 太陽風 IMF 木星 赤外線 ハワイ 高高度施設

1. 研究開始当初の背景

(1) 木星磁気圏研究の重要性

惑星磁気圏という防護壁により守られている生命にとって、絶えず変動する太陽風にそれがどう呼応するかは、重大な関心事である。その理解は、宇宙天気予報と合わせ、惑星間空間へ飛び出して行く人類が将来の運命を委ねるところだ。

太陽系惑星で最大・最強の磁気圏をもつ木星へは、これまで8機の探査機が訪れている(Galileo 以外はフライバイ)。木星磁気圏は太陽側で50~100木星半径ほど、反対側では土星軌道に遠く達する巨大な空間である。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応してどのように振舞うのか、Galileo 周回後のいまもよく分かっていない。

探査機が精密なデータをもたらすとはいっても、巨大な木星磁気圏であれば、そのごく一部を垣間見るに過ぎない。搭載機器重量は言うに及ばず、強い放射線帯の存在からその近傍にいられる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。それに対し地球上からは、多様な観測装置を用いたり長い期間をかけたりし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である。

その観点では、木星磁気圏は「研究に適する」好条件をもつ。木星磁気圏からのデカメータ電波やシンクロトロン電波が地球まで届き、イオ・トラスからの可視領域発光、赤外線オーロラ(H₃⁺イオンの発光)を地上等から観測できるからである。こうして地上観測は有力な道具となり、ハッブル宇宙望遠鏡(紫外線)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。これらを背景に、木星磁気圏研究こそが惑星磁気圏一般を理解するための鍵を握る、という点で科学コミュニティの認識は一致している。木星磁気圏をマップするJuno ミッションの実現は、その証左といえるだろう。

(2) 木星オーロラと磁気リコネクション

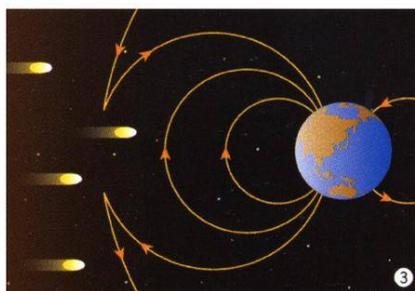
木星赤外オーロラが太陽風にどう呼応するか? その相関は、申請者らのグループにより、過去にも研究されてきた(文献①など)。赤外オーロラ輝度を太陽風動圧(Ulysses 探査機の観測)と比較し両者の間に弱い「正の相関」を見出したが、「負の相関」を予測する木星オーロラ理論モデル(文献②など)とは整合せず、木星磁気圏が一筋縄でゆかない研究対象であることを示している。

申請者らは新たなデータを加えて両者の相関を検討し、太陽風動圧だけでなく太陽風が運ぶ惑星間空間磁場(IMF)の極性も影響しているらしいことを見出した(2003~05年度科学研究費補助金基盤研究(C) 課題番号: 15540430、木星オーロラの起源の解明~ユリシーズの木星再訪を捉える~)。本研究は、その着眼点を推し進めようと発案された。磁気リコネクションは、地球磁気圏の場合そのオーロラ活動に非常に大きな影響をもち、重要な現象であることが知られている。

一方、木星磁気圏に対しては、IMFとの磁気リコネクションがオーロラを生じていることを観測的に実証し得た研究は、世界的にもまだない(Cl Clarke et al., 2009などがHST紫外線観測の一部をリコネクション起源とする解釈を試みている)。我々は過去の研究でその片鱗を捉えたと考えており、それを確信へと変える観測的証拠をつかみたい、それが本研究の動機となった。

2. 研究の目的

本研究では、木星赤外線オーロラを地上から連続モニターし、その強度の時間変化を読み解く。観測されるオーロラの強度変化に、磁気リコネクションが起きているとすれば説明が可能であるような「証拠」を見つけ出すことを目指す。磁気リコネクションは、IMFと惑星磁場が「逆向き」で接するとき起きる現象である。つまり惑星磁軸が垂直に立っていれば、IMFの北向き・南向き成分がリコネクションに寄与する。実際の惑星間空間で



(上) IMFとの磁気リコネクションにより、太陽風粒子が惑星磁気圏へ大量に侵入する。
(右) 太陽と惑星の自転軸の相対的な傾きのために、IMFが南北成分を持たなくても、惑星磁場には「北向き」や「南向き」に感じられる。

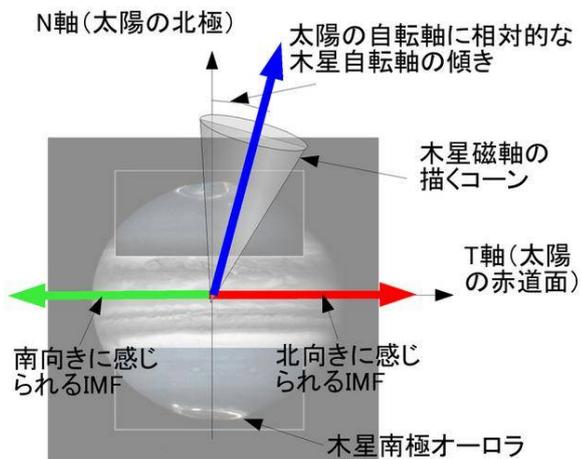


図1: IMF・惑星磁場の磁気リコネクションと、自転軸傾きの効果

はしかし、IMF は「動径成分と東西成分の和ベクトル」を主構造（セクター）とし、南北成分は大きくはない。そのような面内 IMF に対しても惑星の磁軸が大きく傾けば、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 に感じられることがある（図 1 の赤色＝鋭角側・緑色＝鈍角側の矢印）。地球においては、磁軸の傾きが大きくなる 4 月や 10 月（春分・秋分頃）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。木星においても同様に「磁軸が傾くことにより磁気リコネクション頻度が高まる」と期待して、オーロラ強度の連続モニターからそれを見つけようという計画なのである。

赤外線観測波長に十分な大気透明度をもつ最適な観測拠点マウナケア山において、2012～2014 年という最適な観測時期を選び連続モニターを行う。2013 年打ち上げ予定の SPRINT-A/EXCEED (JAXA 小型科学衛星初号機) の木星紫外線オーロラ観測とも同時観測機会をもつ。こうした工夫をもち、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ことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 「証拠」を示すための戦略

木星における Russel-McPherson 効果を想定し、その性質を利用することで木星磁気リコネクションの「曖昧さのない検出」を行う。その戦略は以下のとおりである。

- A) 木星自転軸の傾きが最大となる期間にそのオーロラ強度変化を記録して太陽風データと比較し、動圧と IMF 極性の各々に呼応した変動成分を抽出する。
- B) 木星オーロラ観測は、オーロラの全発光フラックスのみを求め、低い空間分解能（小口径望遠鏡＋単純な機構の赤外線カメラで可能）でよしとする。
- C) 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（文献③の手法）したものをを用いる。

上述 A) を満足するように、研究時期として 2012～2014 年度の 3 年間を選ぶ。2014 年 1 月に自転軸傾きは最大の 7.7° となる。しかも、太陽活動は 2012 年後半～2014 年前半にピークを迎えると予想されており、太陽風変化が判別しやすい刻印をオーロラに残すことが期待できる。残念ながら IPS 観測は 1～3 月には行われませんが、2014 年 1 月の衝に対して 13 年 11～12 月は時期的に十分に近く、衝よりも前に観測を行うことによる太陽風パラメータ予測精度の低下は無視し得る。

次に B) を満たすため、観測実施場所はハワイのマウナケア山とする。言うまでもなく最良の大気条件を備えた観測適地で大望遠鏡群が並ぶが、それら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、同じ山頂にあるハワイ大学ヒロ校 Hoku Kea 望遠鏡（口径 90cm）を長期借用し、本研究の観測に用いる。1 シーズンの観測期間は、セクター構造（太陽の 1 自転の間に 2 回または 4 回向きが変わる）を考慮すると 1.5 ヶ月程度を確保する。このような観測を行う前準備として、ハワイ大学ヒロ校と JAXA 宇宙科学研究所の間ですでに合意書 Letter of Agreement を取り交わしてある。

太陽風 C) は、連携研究者（徳丸）を通じてデータを得る。以上で、A)～C) の戦略にしたがい研究を遂行する。

(2) 具体的な研究手順（年次計画）

本研究の器材のうち、NIIHAMA 赤外線カメラはすでに使用可能な状態にある。UHH 望遠鏡側の調整完了予定の 2012 年夏頃に望遠鏡に装着してのテスト、撮像性能チューニングを行い 11～12 月に木星オーロラ本観測を実施する。磁気圏外縁部に起源をもつオーロラと同時に、磁気圏内奥部のイオトラスを東北大学 PPARC 望遠鏡で観測する（マウイ島ハレアカラ山頂）。

2013 年度には太陽活動の極大が予想されるとともに、紫外線で木星プラズマ圏を観測する SPRINT-A/EXCEED 衛星の打ち上げが夏頃に予定されている。木星自転軸の傾きが最大（前述）となることもあって、最も重要な観測期である。11～12 月に木星オーロラの本観測を実施する。万が一、2013 年 11～12 月に十分な木星オーロラ・データがとれない場合のバックアップウィンドーは 2014 年 4～5 月とする（木星の観測好期からは少し遅いものの、1～3 月に休止する IPS 観測が再開されるため、太陽風との比較が可能となるのはこの時期である）。

2014 年 11～12 月が、本研究計画での最後の木星観測シーズンである。木星自転軸の傾きは 6° と小さくなりはじめ、また太陽活動も下降期に入る。それらの相乗作用により、前の年と比較して有意にリコネクション機会が減ることが予想される。

2013 年度からは観測・データ解析をルーチン的に実施する。観測的に認められる太陽風動圧・IMF 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。

4. 研究成果

(1) UHH 望遠鏡との調整

本研究計画で NIIHAMA 赤外線カメラを装着して使う Hoku Kea 望遠鏡は、ハワイ大学ヒロ校 (UHH) が所有する。2012 年度は、交渉と諸調整のため、計 3 回の UHH 訪問を行った。第一回 (6 月) は、NIIHAMA 赤外線カメラで使用するための真空ポンプを現地に導入し、その性能試験を行った。山頂天文台への輸送が容易な軽量コンパクトなポンプながら、

NIIHAMA 真空容器の容積に対し十分な排気性能をもち、検出素子の性能を発揮させ得ることを確認できた。

第二回（11月）は、UHH/Hoku Kea 望遠鏡の新ディレクターPierre Martin 博士と会い、望遠鏡の現状について詳細な説明を受けるとともに、今後に向けたディスカッションを行った。UHH 望遠鏡の光学系は修正研磨をぶじ完了したものの、望遠鏡架台部分やドームにも少なからぬ問題があり、その解決に長い時間と多大な費用を要しそうだという内容であった。UHH 訪問のあとマウイ島に移動し、天文学研究所 (IfA) の Jeff Kuhn 博士と会いディスカッションを行った。その成果として、UHH 望遠鏡が本格稼働を開始するまでの間、IfA がハレアカラ山頂に設置している SOLAR-C 望遠鏡に NIIHAMA カメラを装着し木星オーロラ観測を実施させてもらえることとなった。SOLAR-Cは口径は50cmと小さいが、軸外シグレゴリオ式の反射望遠鏡であり、光路中に障害物をもたない。そのため、高いコントラストをねらったり熱雑音が気になる赤外線観測に有利な構造と期待される。

この合意を受け、NIIHAMA カメラに若干の改造が必要となったため、第三回（2013年2月）のUHH 訪問を行いカメラ一式を日本へ輸送する作業を行った（もともと、本観測終了後に一時カメラを日本に戻し、細部の改修を行う、という計画であった）。

オーロラと密接な関連があると思われる木星極域ヘイズの偏光モニターを行うため、飛騨天文台を訪れデータを取得した（5月、8月、10月）。

(2) SOLAR-C 望遠鏡での研究実施

IfA の好意により、ハレアカラ山頂の口径50cm SOLAR-C 望遠鏡に赤外線カメラ NIIHAMA を持ち込み、装着した。そのため 2013 年度前半に日本で行った作業は、次のとおり。

- フィルターの追加：NIIHAMA のフィルターホイールは 6 ポジションあり、DARK, H₂⁺, J, H, K, OPEN であった。この OPEN ポジションに金星観測用の波長 2.26 μm

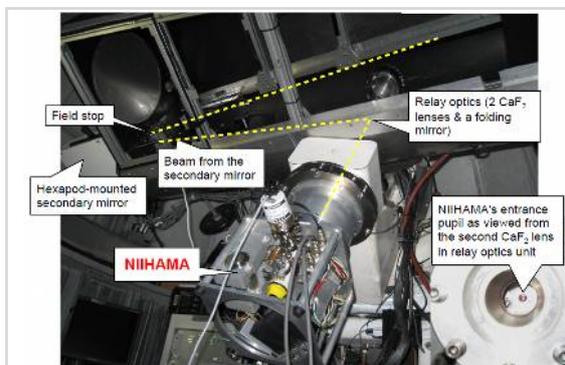


図2: SOLAR-C 望遠鏡と NIIHAMA 赤外線カメラ(2013年11月)。左上方にある太陽熱処理・冷却用のフィールドストップが、長波長の赤外線観測に対しては性能阻害要因となり得ることが判明。

フィルターを装着した。

- 検出素子の問題の解決：四つある象限のうち二つが読み出し不安定となった。予備の検出器基板を装着する際に固定ネジの数を減らし、冷却時の収縮で発生するストレスを緩和した（あかつき IR2 で施したのと同じ対策）。
- SOLAR-C 望遠鏡へ取り付けるためのアタッチメントの製作：望遠鏡のサイズやマウント形式が異なるため、アタッチメントを新規作成した。部品の再製作が最小で済むよう配慮した。
- リレー光学系の設計・製作：望遠鏡の主焦点からカメラまで光を導くためのリレー光学系を、CaF₂の平凸レンズを2枚使用し中間に折り曲げミラーを入れる形で設計した。
- すべての部材が揃ったところで、再びハワイへ装置一式を輸送した(11月下旬)。カメラの望遠鏡への装着(機械的マッチング=図2)、リレー光学系による結像は想定どおりの良好な結果となった。

(3) ファーストライト成功と問題点

2013年12月から2014年2月にかけて、ファーストライト観測を実施し、金星、木星の赤外線画像の取得に成功している。取得データを検討したところ、波長 2 μm 程度までは問題なかったが、波長 3.4 μm については改善を必要とすることも判明した。「カメラ周辺の常温物体からの熱赤外線放射の入力が大きく」3.4 μm 観測の性能が低下していたのである。

それを軽減させるためのコールドバップルを2014年度に製作した。NIIHAMA カメラの入射窓を二重構造の金属筒で延長し、その内筒をペルチェ素子により-20℃以下まで冷却する仕組みである。日本で製作したコールドバップルを現地へ持ち込み、山頂天文台にて装着(図3)・テスト観測を実施した。

装着されたコールドバップルは想定どおりに機能し、熱赤外線波長域では画面外周囲での雑音成分軽減が見られた。しかし画面中央付近の雑音はあまり減らなかった。これはカメラ周囲からではなく直視する方向、すな



図3: NIIHAMA カメラの入射窓部分に装着されたコールドバップル

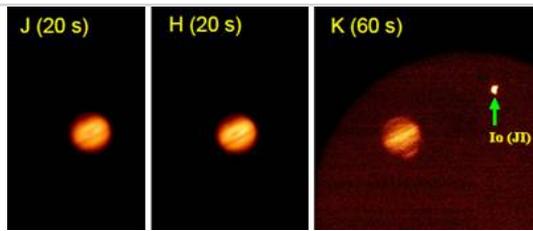


図 4: 2014 年 2 月に撮影した赤外線 3 波長における木星。K バンドの画像(右端)では木星本体がメタン吸収で暗く写り、相対的に衛星イオが明るく見え、活火山モニターに適している。

わち望遠鏡の副鏡を覆うように存在するフィールドストップが発するものと考えられる。SOLAR-C は軸外シグレゴリオ式であり、本来ならば副鏡の支持構造が視野内に見えないから、熱赤外線の混入は極小とできる望遠鏡である。しかし SOLAR-C は、太陽からの強烈な熱を焦点付近で処理するフィールドストップ(絞りと冷却水循環系)を設けており、その構造物が視野の真正面に存在している(図 2)。したがって、それに起因する熱放射を避けることは難しいと判断される。

(4) バックアップ・プランの実施

機械的にも光学的にも SOLAR-C 望遠鏡に適合し撮像観測をできるようになったが、「太陽望遠鏡」の構造上、熱赤外線波長では期待された性能を達成できないことが分かった。そのため、波長 $3.4 \mu\text{m}$ の木星オーロラについては観測を断念し、それより短い波長での木星観測および金星観測のバックアップ・プランに移行した(図 4, 5: $2.26 \mu\text{m}$ フィルターの装着は、この万が一の事態に備えたもの)。リレー光学系のアライメントを最適化し、前年よりも良好なフォーカスを得ることに成功し、衛星イオが木星の影に入っている間の熱放射(火山活動を示唆する現象)モニター、金星の赤外偏光撮像を実施した。前者のデータは「ひさき」衛星観測と、後者のデータは飛騨天文台で行っている可視偏光撮像観測と比較を進めている。また、マウナケア山頂すばる望遠鏡を用いての木星オーロ

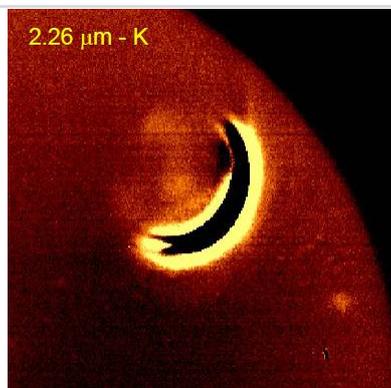


図 5: 金星夜面の発光(下層大気からの漏れ光)を波長 $2.26 \mu\text{m}$ で捉えた。太陽光の当たる昼面は明る過ぎて、検出器が飽和している(黒い三日月状の部分)。

ラ観測もプロポーザルが採択され 2014 年 2 月に実施した(データ解析が進行中)。

NIIHAMA 赤外線カメラによる連続モニターは、UHH 望遠鏡の遅延、SOLAR-C 望遠鏡の構造上の問題が重なり、できなかった。しかし短波長赤外線での木星データの蓄積、金星観測データの蓄積、すばる望遠鏡への観測プロポーザル採択とデータ取得を成し遂げることができた。今後も、木星に関しては「ひさき」衛星との連携、金星に関しては「あかつき」との連携が期待され、海外に恒常的な観測拠点を獲得するという意味の成果も大きかったといえる。

<引用文献>

- ① Baron, R., et al., Solar wind control of Jupiter's H_3^+ aurorae, *Icarus* **120**, 437-442, 1996.
- ② Bunce, E. J., and S. W. H. Cowley, Local time asymmetry of the equatorial current sheet in Jupiter's magnetosphere. *Planet. Space Sci.* **49**, 261-274, 2001.
- ③ Clarke, J. T., et al., Response of Jupiter's and Saturn's auroral activity to the solar wind. *J. Geophys. Res.* **114**, A05210, doi:10.1029/2008JA013694, 2009.
- ④ Hayashi, K., et al., MHD tomography using interplanetary scintillation measurement. *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2002JA009567, 2003.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Satoh, T., and 14 co-authors: Venus' clouds as inferred from the phase curves acquired by IR1 and IR2 on board Akatsuki. *Icarus* **248**, 213-220 (2015). doi:10.1016/j.icarus.2014.10.030
2. Sato, T.M., and 9 co-authors with T. Satoh in 5th: Cloud top structure of Venus revealed by Subaru/COMICS mid-infrared images. *Icarus* **243**, 386-399 (2014). doi:10.1016/j.icarus.2014.09.004
3. Yoneda, M., et al. with Kagitani, M. in 12th: Mid-infrared observations of Io's volcanism from the ground in 2011 and 2012. *Icarus* **236**, 153-156 (2014). doi:10.1016/j.icarus.2014.01.019
4. Yoshikawa, I., and 12 co-authors with Kagitani, M. in 6th: Extreme ultraviolet radiation measurement for planetary atmospheres/magnetospheres from the earth-orbiting spacecraft (EXCEED). *Space Science Reviews*

184, 237-258 (2014).

doi:10.1007/s11214-014-0077-z

5. Sato, T.M., Satoh, T., and Kasaba, Y.: Retrieval of jovian cloud structure from the Cassini ISS limb-darkening data: I. Continuum scattering phase functions for cloud and haze in the South Tropical Zone. *Icarus* 222, 100-121 (2013).
doi:10.1016/j.icarus.2012.09.035
6. Tao, C., Badman, S. V., Uno, T., and Fujimoto, M.: On the feasibility of characterizing jovian auroral electrons via H₃⁺ infrared line-emission analysis. *Icarus* 221, 236-247 (2012).
doi:10.1016/j.icarus.2012.07.015

[学会発表] (計5件)

1. 佐藤 毅彦・米田 瑞生・鍵谷 将人・Jeff Kuhn: NIIHAMA 赤外線カメラによる木星観測. 日本地球惑星科学連合, 2014年04月28日~2014年05月02日, パシフィコ横浜 (横浜市)
2. Takehiko Satoh: NIIHAMA: A Program for Continuous Monitoring of Jupiter's Auroras. 10th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, 2013年06月24日~06月28日, Brisbane, Australia.
3. 佐藤毅彦: NIIHAMA プロジェクト: 木星赤外オーロラの連続モニター. 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年05月19日~05月24日, 千葉県幕張市.
4. 榎本孝之, 佐藤毅彦, 仲谷善一, 中串孝志, 佐藤隆雄, 大月祥子, 細内麻悠: HOPS 装置による金星上層ヘイズの観測. 大気圏シンポジウム, 2013年2月28日, 宇宙科学研究所 (神奈川県相模原市).
5. 佐藤毅彦・中串孝志・仲谷善一・木村かおる・榎本孝之: HOPS による偏光度分布観測から探る金星上層エアロゾルの性質. 月惑星シンポジウム, 2012年8月2日, 宇宙科学研究所 (神奈川県相模原市).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

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

鍵谷 将人 (Masato Kagitani)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号: 30436076

(3) 連携研究者

三澤 浩昭 (Hiroaki Misawa)

東北大学・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