

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01948

研究課題名(和文) 宇宙・地上望遠鏡・探査機・及びモデルを融合させた木星磁気圏の粒子加速に関する研究

研究課題名(英文) Study of particle acceleration in Jupiter's magnetosphere by space and ground-based observations, and models

研究代表者

吉岡 和夫 (Yoshioka, Kazuo)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：70637131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究を通じて惑星分光観測衛星「ひさき」が取得した木星磁気圏のスペクトルの解析手法を確立し、巨大磁気圏におけるプラズマダイナミクスを説明する新たな理論を構築した。また、ワークショップを通じて国内外の研究者との技術交流を促進し、日本の惑星磁気圏研究の存在感を示せた。また、ハッブル宇宙望遠鏡を含む他の観測衛星や複数の地上観測装置との協調観測を主導し、多くの論文を国際学術誌に発表する成果を得た。さらに、本研究の成果と知見を基に次世代の宇宙望遠鏡の検討を進め、研究期間の最終年度にはJAXAの正式な次期探査ミッション候補として選出されるに至った。この活動の呼び水として、本科研費は大いに役立ったと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本科研費研究を通して惑星磁気圏に関する理解が向上したと言える。電離圏電流の変動やオーロラ発光の変動、放射線帯からの電波放射の強度変動、モデル計算などを総合的に解析することで、木星磁気圏におけるプラズマダイナミクスを一連の流れとしてとらえるための枠組みを構築できた。この成果は、地球とは規模や強度がけた違いに大きい木星磁気圏を理解することで、対比的に我々が住む地球の磁気圏環境を理解できるという点でも極めて重要である。さらに、惑星磁気圏研究界における日本の研究者コミュニティの存在感を示すことにもつながった。また、多くの修士論文、博士論文の執筆にも寄与できたことは、研究分野の活性化に繋がる成果である。

研究成果の概要(英文)：Through this research, we established a method for the spectral analysis of Jupiter's magnetosphere obtained by Hisaki satellite and developed a new theory to explain the plasma dynamics in the magnetosphere. Furthermore, we facilitated technical exchanges with international researchers through workshops, demonstrating the significance of Japan's planetary magnetosphere research. We also took the lead in coordinated observations with other observation satellites, including the Hubble Space Telescope, and multiple ground-based facilities, resulting in the publication of numerous papers in international academic journals. Additionally, based on the achievements and knowledge gained from this research, we advanced the consideration of the next-generation space telescope and were selected as an official candidate for JAXA's upcoming mission during the final year of the research period. It can be said that this research greatly contributed as a catalyst for these activities.

研究分野：惑星科学

キーワード：木星磁気圏 粒子加速 プラズマ イオトラス 紫外線 宇宙望遠鏡

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の舞台は惑星磁気圏、特に太陽系最大の磁気圏を持つ木星に着目する。木星内部磁気圏では、衛星イオから散逸した火山ガスが、イオ軌道付近にプラズマの集合領域(**Io Plasma Torus: IPT**)を形成する。**IPT**の低温高密度プラズマは木星磁力線の回転による遠心力の影響を受けて外向きに輸送され、磁気圏内で加熱された後に、交換型不安定や磁気再結合による内向き輸送の効果を得て磁気圏内を循環する。最終的に木星近傍に運ばれてきた一部のプラズマは、さらに電磁場による加速を受けて放射線帯を形成する相対論的電子や、極域でオーロラ(数**TW**)を生起する高エネルギー電子になる。本研究はこれらの一連の物理現象を遠隔・その場観測の両面から把握し、磁気圏全体の時空間変動を捉えることで、巨大な木星放射線帯に大量に存在する相対論的電子の生成過程の解明を目指した。

これまで木星放射線帯に関しては、古くは**1950**年代の電波観測に始まり、さらに**1973**年の**Pioneer10**号探査機(**NASA**)のフライバイ観測など、様々な手法で研究されてきた。例えば地上からは大型電波望遠鏡により相対論電子が励起するシンクロトロン放射強度と空間分布が測定された[Bolton+02; Tsuchiya+11等]。また、主に長周期変動を説明する相対論電子の輸送・拡散・加速を説明する数値モデルが開発されてきた[Santos-Costa+08,09]。この数値モデルは**IPT**側(放射線帯からみて外側)の境界条件をフリーパラメータとした内向きの動径拡散過程に基づき、数週間から年単位に至る長期変動を大まかながら再現している。しかし観測的な制約から短時間(<**1day**)の相対論的電子の増減や、イオの表面に多数存在する火山活動からのプラズマ供給、磁気圏内の輸送、大気層と放射線帯の相互作用など、複数の領域間をまたぐ本質的な物理過程は模擬できていない。そのため放射線帯の時空間変動の全容を首尾一貫して説明する物理モデルは未完成であり、惑星磁気圏における粒子加速に関する最重要課題のひとつであった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、木星周辺を地球周回軌道から連続的に監視している**JAXA**の衛星「ひさき」と、初の木星極域周回軌道探査機**Juno**、さらに**GMRT**などの大型地上電波望遠鏡と数値モデルを融合させた四者の緊密連携により上述の課題に挑んだ。この連携により、今までは得られなかった短時間の放射線帯変動、**IPT**から放射線帯への粒子輸送、放射線帯電子の直接精密測定など、モデルの制約に不可欠な物理量を得る。また、詳細なハッブル宇宙望遠鏡により取得されるオーロラ画像の観測に基づき、電離圏や大気の数値モデルを用いて極域から放射線帯へ印加される電磁場擾乱を計算する。これを放射線帯モデルの動径拡散の入力パラメータとし、木星大気層と放射線帯の結合を模擬する。

申請者が企画・立案段階から主導して開発してきた極端紫外分光観測装置を搭載した「ひさき」は、特徴的なダンベル型の視野構造を始めとして木星磁気圏観測に最適化した光学設計であり、オーロラと**IPT**の高波長分解観測を実現させてきた[Yoshioka+13; Yamazaki+14等]。オーロラからは磁力線を介して中間・外部磁気圏の情報を読み解ける。また、放射線帯の外側境界である**IPT**ではプラズマが電子衝突で輝線を発している。申請者は、このスペクトルを用いたイオン組成や電子温度の導出方法を確立し、**IPT**内部でのプラズマ輸送の把握を可能にした[Yoshioka+14,18; Yoshikawa+17等]。すなわち「ひさき」は中間・外部磁気圏(オーロラ)と内部磁気圏(**IPT**)のプラズマ輸送の大局的かつ長期連続的な監視を初めて可能にしたのである。なお「ひさき」は、現在も研究分担者の山崎敦博士をプロジェクトマネージャーとして運用を継続している。

**2016**年には**Juno**が木星の超楕円極軌道に投入され定常観測を開始している。極域での**Juno**のその場観測データは、磁力線に沿って赤道面に投影されて内部・中間磁気圏の情報に読みかえられる。本研究では「ひさき」と**Juno**のデータ解析を推進させ、「ひさき」で捉えた磁気圏の大局的空間構造と**Juno**による局所詳細観測の両面から、相対論的電子の生成に至る木星磁気圏の全体構造の把握を目指す。さらに、火山活動活性化に対応して磁気圏が動的に変化する様相を詳細に解析し、巨大磁気圏ならではの粒子加速の特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

先行研究と「ひさき」のこれまでの観測成果に基づき、我々は相対論的電子を生み出す木星の粒子加速に関して、以下の1~7で表される物理仮説を提唱した。1~3は木星磁気圏を支配する準定常的な粒子加速であり、4~7のプロセスがそこに時間変動を与える。本研究では「ひさき」、**Juno**、地上電波観測、数値モデルの4者連携により各プロセスを実証する。以下では図1に基づいて、それぞれの過程を明らかにするための具体的な研究手法について説明する。

### 1. イオの火山からIPTへプラズマが供給される

木星から受ける潮汐作用をエネルギー源とする衛星イオの火山から噴出されるガス(主にSO<sub>2</sub>などの硫黄酸化物)は、周囲の電子と衝突することでSやO原子に解離し、さらに電子衝突電離を経て**IPT**を形成するプラズマとなる。これらのイオンや原子は、周囲の電子による衝突励起により極端紫外領域に複数の輝線を発している。「ひさき」の極端紫外分光観測により、中性のOと電離したS<sup>n+</sup>、O<sup>n+</sup>の時空間変動を捉え、磁気圏への質量供給を長期連続的に監視する。なお、イオからのプラズマ供給を定量するには、まず「ひさき」が測定したO原子の発光強度の分布と

ガス散逸モデルを合わせ込み、中性 O, S の空間分布を得る。さらに「ひさき」が取得した極端紫外スペクトルから導出した電子温度の情報に基づいて O, S の電離過程を再現することで、イオからのプラズマ供給率を見積もる。

2. 磁気自転の遠心力で低温 (IPT)・高温 (中間磁気圏) プラズマが交換される

木星から 30-50RJ あたりの赤道面付近に位置する中間磁気圏と、2RJ 付近に位置する放射線帯の間にある IPT において、それぞれの領域をつなぐ動径方向のプラズマ輸送は波動粒子相互作用を生起させ、相対論的な高エネルギー電子に至る粒子加速の要因と考えられている [Yoshioka+14]。「ひさき」が取得する IPT の極端紫外スペクトルから、イオン組成や電子温度の動径空間分布を読み取り、特に中間磁気圏から流れ込む高温プラズマが、さらに内側の放射線帯外縁にまで流入する様子を長期連続的に監視する。

3. IPT の高温プラズマが動径拡散や波動粒子相互作用を経て放射線帯を形成する

Juno は木星極域上空を高緯度から低緯度 (またはその逆) に移動しながらプラズマをその場観測している。これは、磁気圏の各領域から磁力線に沿って極域に降り込むプラズマの動径方向スキャンに相当する (極域に集中する磁力線が赤道面近傍の磁気圏の様子をトレースしている)。この特徴的な観測条件を利用して、相対論的電子が降り込む様子の緯度分布を測定し、放射線帯から外部磁気圏に至る広い領域での粒子加速の空間分布を取得する。高エネルギー粒子の変動の把握には Juno の JEDI (高エネルギー粒子検出器) を用いる。同機器の開発から観測を一貫して担っている G. Clark 博士 (APL) らと共同研究を進め、観測量、物理量を正確に把握する手法を確立する。また、相対論的電子降下による大気加熱に関連するプラズマ変動を定量化する上で必須な極域上空のプラズマ密度等の物理量は、Juno の JADE (低エネルギープラズマ観測器) を用いて推定する。同観測器の開発を主導した R. Ebert 博士 (SwRI) と共同研究をすすめ、物理量導出の精度を高める手法を確立する。

放射線帯からのシンクロトロン放射の周波数は、粒子のエネルギー分布と磁場強度に対応しており、高周波ほど高エネルギーかつ磁場が強い木星近くの情報を反映している。これまでは、主に数 GHz 帯の電波干渉計 VLA (米国) で観測されてきたが、本研究では木星から比較的離れた IPT 近傍領域の加速も調べるために、約 1MeV の電子に対応する数百 MHz 帯の電波に特化した電波干渉計 GMRT (インド) を用いる。イオ軌道近傍に注入された放射線帯の“種”となる粒子が、更に準定常的に放射線帯外縁から内部へと動径拡散輸送されてく様子を明らかにする。

4. 磁気圏の短・長期変動

地上観測による研究から、木星周辺の相対論的電子加速で放射されるシンクロトロン放射が短時間スケール (時定数 1 日以下) で突発増光する事象が報告されている [Nomura+07]。また、1995 年に木星周回軌道 (赤道面軌道) に投入された NASA のガリレオ探査機は、同時刻に磁場やオーロラ電波の変動を検出した。近年では、Juno が極域通過中にマイクロ波観測装置も突発増光を複数回検出した。これらの突発変動は、「ひさき」で観測された磁気再結合に伴うオーロラ増光 [Kimura+15] と同様のもので、イオの火山噴火によるプラズマ輸送の活性化で頻発すると考えられる [Tsuchiya+18; Yoshioka+18]。本研究では「ひさき」のオーロラ監視により突発的磁気圏変動に伴う相対論電子加速の発生時刻を検出する。また、火山は“プロセス 3”の動径拡散を数 100 日単位で長期変動させることもわかっている。

5. オーロラ変動に伴う大気加熱が電離圏の電場擾乱をもたらし高緯度から低緯度へ伝搬

オーロラの時空間変動は、中間磁気圏からの粒子の降り込みと、それに伴う極域大気加熱、電離圏擾乱を可視化している。ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) で取得するオーロラ画像を介して磁気圏-大気-電離圏全体のダイナミクスを捉え突発的オーロラ増光の時空間発展を追う。Juno はこのダイナミクスの理解の鍵となるオーロラを発光させる粒子の直接的な観測情報を初めてもたらし、また「ひさき」からも 1 分の時間分解能で連続的な時間変動を捉える。それらの情報を電離圏-磁気圏結合モデルに組み込み、観測されるオーロラ発光変動がもたらす極域の大気加熱および電離圏電場擾乱の低緯度への時空間発展を評価する。なお、磁気圏を極域に投影するオーロラを高空間分解能で観測し、磁気圏変動の時空間発展を詳細に把握できるのは HST のみである。申請者らは既に Liege 大学 (ベルギー) の

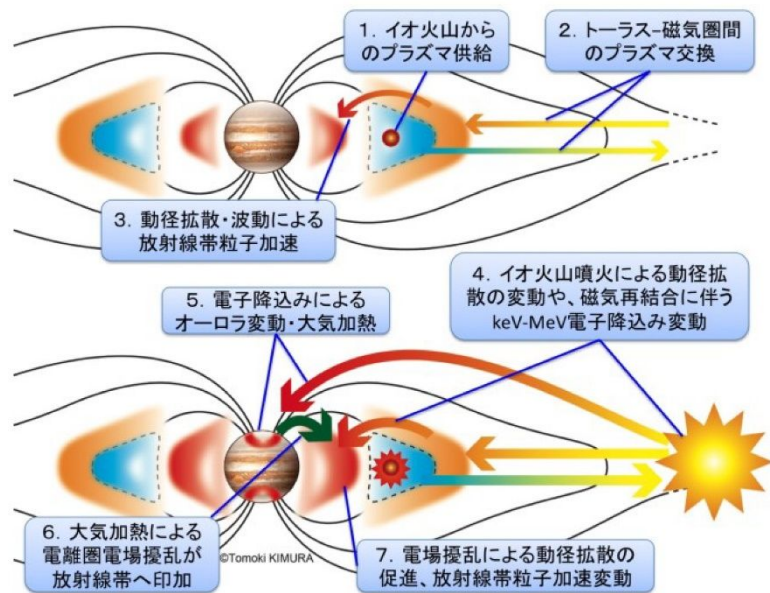


図 1. 磁気圏粒子加速の物理仮説

時空間発展を詳細に把握できるのは HST のみである。申請者らは既に Liege 大学 (ベルギー) の



研究グループと協力して Juno とタイミングを合わせた HST の観測を行っており、本研究においてさらにデータ解析と、今後の観測立案に関する議論を活発化させる。

#### 6. 磁力線を介して電場擾乱が放射線帯へ伝搬し動径拡散を促進する

大気加熱による電離圏電場擾乱の低緯度への時間・空間発展を、磁力線を介して放射線帯に伝搬させ、動径拡散にフィードバックをかける。すなわち“プロセス5”で求めた電場擾乱を動径拡散モデルに入力し、放射線帯の時空間変動を予測する。地上電波望遠鏡 (GMRT) によるシンクロトロン放射の観測と、Juno による粒子観測の結果を用いてモデルの精度を向上させ、極域擾乱が放射線帯に生起する短時間スケールの動径拡散過程を明らかにする。また、“プロセス4”で説明した火山噴火に関連する動径拡散の長期変動は、モデル中の IPT の境界条件を変動させることで反映させる。Juno が観測した放射線帯への MeV 電子降り込みによるシンクロトロン放射を発見した D. Santos-Costa 博士 (SwRI) と協力して、突発増大現象、放射線帯、IPT との物理的関連を理解するための数値モデルを確立する。

#### 7. 放射線帯の MeV 粒子 (相対論的電子) が増加する

Juno のその場観測と大型地上電波望遠鏡 (GMRT) による観測で、局所的・大局的に放射線帯を監視し、オーロラ発光強度の変動と関連した放射線帯粒子の突発的変動 (時定数 1 日以下) と、火山噴火に起因する数か月オーダーの長期変動を検出する。

## 4. 研究成果

### 【成果の概要】

本研究を通じて惑星分光観測衛星「ひさき」が取得した木星磁気圏のスペクトルの解析手法を確立し、巨大磁気圏におけるプラズマダイナミクスを説明する新たな理論を構築した。また、ワークショップを通じて国内外の研究者との技術交流を促進し、日本の惑星磁気圏研究の存在感を示せた。また、ハッブル宇宙望遠鏡を含む他の観測衛星や複数の地上観測装置との協調観測を主導し、多くの論文を国際学術誌に発表する成果を得た。さらに、本研究の成果と知見を基に次世代の宇宙望遠鏡の検討を進め、研究期間の最終年度には JAXA の正式な次期探査ミッション候補として選出されるに至った。この活動の呼び水として、本科研費は大いに役立ったと言える。個別の成果について以下に説明する。

高温電子密度の突発的な増大により生じる IPT の極端紫外線の増大を「ひさき」により観測するとともに、米国の Juno 探査機により得られた電磁波観測データと比較することにより、磁気圏内で解放されたエネルギーが内部磁気圏に再配分される過程を調べた。極端紫外線の増大位置を統計的に調べた結果、増大の開始が木星の夕方側に局在化すること、Juno 探査機が観測した狭帯域キロメートル放射 (nKOM) と発生タイミングに対応があることが明らかとなった。これらの結果は、磁気圏の夜側でリコネクションなどの過程で解放されたエネルギーは 10 時間程度の時定数で IPT にまで輸送される経路があることを示唆する。

流星による金属イオンを考慮した木星電離圏の化学モデルを構築し [Nakamura et al., 2022]、磁気圏-電離圏結合モデルから見積もられる衛星イオ軌道における朝夕電場は金属イオンの考慮によってひさきによる観測に近い値が導出されることが示された [Nakamura et al., under review]。Juno 探査機による観測パラメータを入力した数値モデル計算を行い、磁気圏-電離圏結合において鍵となる物理量の導出およびエネルギー収支の評価を評価した [Wang et al., 2021]。木星磁気圏ではさまざまな観測で準数日周期変動がみられる。ひさき宇宙望遠鏡により 2014-2016 年に観測された北半球オーロラの解析から類似の周期変動を抽出した [Tao et al., 2021]。2015 年のイオ火山活動による変動周期の有意な変化は検出されなかったが、この火山時のプラズマ変化を考慮した理論モデル評価と consistent であることが示された。周期変化に関するさまざまな観測を包括する木星磁気圏ダイナミクスの概観を提示した。

さらに、本研究の副産物として、ひさき衛星データに含まれるノイズを統計処理した結果、ひさき衛星の軌道に沿った地球の放射線粒子の年変動を議論することができた。これは、ひさき江衛星の検出器が光だけでなく放射線粒子にも感度をもつことを利用した研究であり、本科研費研究による解析手法の高度化に伴う副産物であると言える [Yoshioka et al. 2021]

また、本研究の成果を基に、次世代電波望遠鏡 SKA による木星オーロラ・放射線帯の観測検討や、木星磁気圏で得られた知見や物理モデルを系外惑星の磁気圏へ拡張する検討を行い、次世代宇宙望遠鏡の観測提案にまでつなげることができた。

本科研費研究を通して惑星磁気圏に関する理解が向上したと言える。電離圏電流の変動やオーロラ発光の変動、放射線帯からの電波放射の強度変動、モデル計算などを総合的に解析することで、木星磁気圏におけるプラズマダイナミクスを一連の流れとしてとらえるための枠組みを構築できた。この成果は、地球とは規模や強度がけた違いに大きい木星磁気圏を理解することで、対比的に我々が住む地球の磁気圏環境を理解できるという点でも極めて重要である。さらに、惑星磁気圏研究界における日本の研究者コミュニティの存在感を示すことにもつながった。また、多くの修士論文、博士論文の執筆にも寄与できたことは、研究分野の活性化に繋がる成果である。

本科研費研究に関連する 10 本以上の論文が国際学術誌に発表（アクセプト）された。また，国内学会，国際学会で 2 件/年以上の招待講演および計 20 件以上の一般講演を行った。さらに，東京大学，東北大学において 3 名の博士論文に寄与し，7 名の修士論文の執筆に寄与した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 3件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Roth Lorenz, Boissier Jeremie, Moullet Arielle, et al.   | 4. 巻<br>350                   |
| 2. 論文標題<br>An attempt to detect transient changes in Io's SO <sub>2</sub> and NaCl atmosphere  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Icarus   | 6. 最初と最後の頁<br>113925 ~ 113925 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.icarus.2020.113925   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Wibisono A D, Branduardi-Raymont G, Dunn W R, Kimura T, Coates A J, Grodent D, Yao Z H, Kita H, Rodriguez P, Gladstone G R, Bonfond B, Haythornthwaite R P | 4. 巻<br>507                   |
| 2. 論文標題<br>Jupiter's X-ray aurora during UV dawn storms and injections as observed by XMM-Newton, Hubble, and Hisaki   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society  | 6. 最初と最後の頁<br>1216 ~ 1228     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/stab2218   | 査読の有無<br>無                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>O'Donoghue J., Moore L., Bhakypaibul T., Melin H., Stallard T., Connerney J. E. P., Tao C.   | 4. 巻<br>596                   |
| 2. 論文標題<br>Global upper-atmospheric heating on Jupiter by the polar aurorae  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Nature   | 6. 最初と最後の頁<br>54 ~ 57         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41586-021-03706-w   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Wang Yuxian, Blanc Michel, Louis Coarentin, et al.   | 4. 巻<br>126                   |
| 2. 論文標題<br>A Preliminary Study of Magnetosphere Ionosphere Thermosphere Coupling at Jupiter: Juno Multi Instrument Measurements and Modeling Tools                   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Space Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>-               |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2021JA029469   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                  |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Bonfond B., Yao Z. H., Gladstone G. R., Grodent D., G?rard J. C., Matar J., Palmaerts B., Greathouse T. K., Hue V., Versteeg M. H., Kammer J. A., Giles R. S., Tao C., Vogt M. F., Mura A., Adriani A., Mauk B. H., Kurth W. S., Bolton S. J. | 4. 巻<br>2       |
| 2. 論文標題<br>Are Dawn Storms Jupiter's Auroral Substorms?   | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>AGU Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2020AV000275  | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する    |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kimura Tomoki, Fujii Yuka, Kita Hajime, Tsuchiya Fuminori, Sagawa Hideo, SKA-Japan Planetary Science Team                  | 4. 巻<br>75                |
| 2. 論文標題<br>Revealing the dynamics of magnetosphere, atmosphere, and interior of solar system objects with the Square Kilometre Array | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Publications of the Astronomical Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>S196 ~ S216 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/pasj/psac079   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Smith H. T., Koga R., Tsuchiya F., Dols V. J.                            | 4. 巻<br>127     |
| 2. 論文標題<br>Insight Into Io Enabled by Characterization of Its Neutral Oxygen Torus | 5. 発行年<br>2022年 |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Space Physics                           | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2022JA030581                                   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する    |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Koga Ryoichi, Suzuki Tatsuya, Tsuchiya Fuminori, Sakanoi Takeshi, Hirahara Yasuhiro | 4. 巻<br>907           |
| 2. 論文標題<br>ALMA Observation of SO2 Gas Originating from Io's Volcanic Plume and Lava Areas    | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>L6 ~ L6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/2041-8213/abd39f  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Hikida R., Yoshioka K., Tsuchiya F., Kagitani M., Kimura T., Bagenal F., Schneider N., Murakami G., Yamazaki A., Kita H., Nerney E., Yoshikawa I.  | 4. 巻<br>125                 |
| 2. 論文標題<br>Spatially Asymmetric Increase in Hot Electron Fraction in the Io Plasma Torus During Volcanically Active Period Revealed by Observations by Hisaki/EXCEED From November 2014 to May 2015                | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Space Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>-             |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2019JA027100   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                |
| 1. 著者名<br>Koga Ryoichi, Tsuchiya Fuminori, Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Yoshioka Kazuo, Yoshikawa Ichiro, Kimura Tomoki, Murakami Go, Yamazaki Atsushi, Smith H. Todd, Bagenal Fran                           | 4. 巻<br>124                 |
| 2. 論文標題<br>Transient Change of Io's Neutral Oxygen Cloud and Plasma Torus Observed by Hisaki   | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Space Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>10318 ~ 10331 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2019JA026877   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                |
| 1. 著者名<br>Tsuchiya F., Arakawa R., Misawa H., Kagitani M., Koga R., Suzuki F., Hikida R., Yoshioka K., Steffl A., Bagenal F., Delamere P., Kimura T., Kasaba Y., Murakami G., Yoshikawa I., Yamazaki A., Yoneda M. | 4. 巻<br>124                 |
| 2. 論文標題<br>Azimuthal Variation in the Io Plasma Torus Observed by the Hisaki Satellite From 2013 to 2016   | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Space Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>3236 ~ 3254   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2018JA026038   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                |
| 1. 著者名<br>Lorenz Roth, H. Todd Smith, Kazuo Yoshioka, Tracy M. Becker, Aljona Blocker, Nathaniel J. Cunningham, Nickolay Ivchenko, Kurt D. Retherford, Joachim Saur, Michael Velez, Fuminori Tsuchiya              | 4. 巻<br>in press            |
| 2. 論文標題<br>Constraints on Europa's water group torus from HST/COS observations   | 5. 発行年<br>2023年             |
| 3. 雑誌名<br>Earth and Planetary Astrophysics,  | 6. 最初と最後の頁<br>in press      |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                |



|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Nakamura Y., Terada, K., Tao, C., Terada, N., Kasaba, Y., Leblanc, F., Kita, H., Nakamizo, A., Yoshikawa, A., Ohtani, S., Tsuchiya, F., Kagitani, M., Sakanoi, T., Murakami, G., Yoshioka, K., Kimura, T., Yamazaki, A., Yoshikawa, I., | 4. 巻<br>127(3)              |
| 2. 論文標題<br>Effect of Meteoric Ions on Ionospheric Conductance at Jupiter  | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Review space physics   | 6. 最初と最後の頁<br>e2022JA030312 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2022JA030312  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Yoshioka, K., Miyoshi, Y., Kurita, S., Teramoto, M., Tsuchiya, F., Yamazaki, A., Murakami, G., Kimura, T., Kita, H., Yoshikawa, I., and Kasaba, Y. | 4. 巻<br>19                  |
| 2. 論文標題<br>. Long-term monitoring of energetic protons at the bottom of Earth 's radiation belt  | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Space Weather  | 6. 最初と最後の頁<br>e2020SW002611 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2020SW002611   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                   |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Chihiro Tao , Tomoki Kimura , Elena A. Kronberg , Fuminori Tsuchiya , Go Murakami , Atsushi Yamazaki , Marissa F. Vogt , Bertrand Bonfond , Kazuo Yoshiohoka , Ichiro Yoshikawa , Yasumasa Kasaba , Hajime Kita , Shogo Okamoto | 4. 巻<br>126            |
| 2. 論文標題<br>Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 4. Quasi Periodic Variation   | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research, Space Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>in press |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2020ja028575  | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する           |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kita, H , T. Kimura , C. Tao , F. Tsuchiya , G. Murakami , A. Yamazaki, K , Yoshioka , R. W. Ebert , R. J. Wilson , F. Allegrini , G. Clark , J.E.P. Connerney , R. Gladstone , I. Yoshikawa , M. Fujimoto | 4. 巻<br>124               |
| 2. 論文標題<br>Jovian UV aurora's response to the solar wind: Hisaki EXCEED and Juno observations  | 5. 発行年<br>2019年           |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research, Space Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>10209,10218 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2019JA026997   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>該当する              |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Ryoichi Koga , Fuminori Tsuchiya , Masato Kagitani , Takeshi Sakanoi , Kazuo Yoshioka , Ichiro Yoshikawa , Tomoki Kimura , Go Murakami , Atsushi Yamazaki , H. Todd Smith , Fran Bagenal | 4. 巻<br>124                |
| 2. 論文標題<br>Transient Change of Io's Neutral Oxygen Cloud and Plasma Torus Observed by Hisaki   | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research, Space Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>10318, 10331 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2019JA026877   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>該当する               |

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 14件)

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>木村智樹、ひさきサイエンスチーム       |
| 2. 発表標題<br>木星磁気圏におけるプラズマの加速、加熱、輸送 |
| 3. 学会等名<br>プラズマ・核融合学会 (招待講演)      |
| 4. 発表年<br>2021年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tomoki Kimura  |
| 2. 発表標題<br>Opening remarks of WG5 Pre-workshop “ Jupiter-Moon-magnetosphere electrodynamic interactions |
| 3. 学会等名<br>ISSI-Beijing “ Exploring the Jovian satellite system: from formation to habitability (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tomoki Kimura  |
| 2. 発表標題<br>Physics of reconnection-related auroral emission of giant planets and its application to exoplanet |
| 3. 学会等名<br>NAOJ IRCC-AFP meeting (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>北 元, 木村 智樹, 土屋 史紀, 村上 豪, 山崎敦, 埜千尋, 古賀亮一, 疋田伶奈, 吉岡 和夫, 吉川一朗             |
| 2. 発表標題<br>Long-term monitoring of Jupiter's aurora and Io torus by Hisaki EXCEED |
| 3. 学会等名<br>地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回 総会・講演会   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>北 元, 木村 智樹, 土屋 史紀, 村上 豪, 山崎敦, 埜千尋, 古賀亮一, 疋田伶奈, 吉岡 和夫, 吉川一朗 |
| 2. 発表標題<br>ひさき衛星による木星オーロラ及びイオトラスの長期観測結果                               |
| 3. 学会等名<br>宇宙科学シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Go Murakami et al.  |
| 2. 発表標題<br>Future ultraviolet observation for monitoring outer planetary systems |
| 3. 学会等名<br>Magnetospheres of Outer Planets (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>村上豪 他                    |
| 2. 発表標題<br>天文学および惑星科学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画 |
| 3. 学会等名<br>光赤天連シンポジウム               |
| 4. 発表年<br>2019年                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Koga, R., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, M. Yoneda, K. Yoshioka, I. Yoshikawa, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, H. T. Smith, F. Bagenal |
| 2. 発表標題<br>Hisaki observation of the oxygen neutral cloud around Io's orbit before and during the enhancement event of Io plasma torus                        |
| 3. 学会等名<br>Magnetospheres of Outer Planets 2022 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Fuminori Tsuchiya                                   |
| 2. 発表標題<br>Moon-plasma interaction in the Jovian magnetosphere |
| 3. 学会等名<br>ISAS Planetary Exploration Workshop (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>古賀亮一, 土屋史紀, 鈴木達也, 平原靖大, 坂野井 健, 北 元, 鍵谷将人, 木村智樹, 吉岡和夫, 吉川一朗, 村上 豪, 山崎 敦 |
| 2. 発表標題<br>ひさき及びALMAの観測で明らかになった、木星衛星イオの火山活動が大気及びイオトラスに与える影響                       |
| 3. 学会等名<br>惑星圏研究会2020 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Chihiro Tao, Tomoki Kimura, Fuminori Tsuchiya, Hajime Kita, Sarah Victoria Badman, George B Clark, Robert W Ebert, Nicolas Andre, Go Murakami, Kazuo Yoshioka, Atsushi Yamazaki, Ichiro Yoshikawa, Yasumasa Kasaba, Masaki Fujimoto |
| 2. 発表標題<br>Jupiter's Auroral Variations as Revealed by Hisaki: Internal and External Drivers   |
| 3. 学会等名<br>AGU fall meeting 2019 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|          |   |
|----------|---|
| 1 . 発表者名 | Tomoki Kimura,Fuminori Tsuchiya,Chihiro Tao,Kazuo Yoshioka,Hajime Kita,Go Murakami,Atsushi Yamazaki,Ryoichi Koga,Reina Hikida,Fumiharu Suzuki,George B Clark,Zhonghua Yao,Fran Bagenal,Peter A DeLamere,Howard Todd Smith,Keiichiro Fukazawa,Ichiro Yoshikawa,Masaki Fujimoto,the Hisaki science team |
| 2 . 発表標題 | Recent updates on the Hisaki observations for Jupiter's magnetosphere and Io's atmosphere   |
| 3 . 学会等名 | AGU fall meeting 2019 (招待講演) (国際学会)   |
| 4 . 発表年  | 2019年   |

|          |   |
|----------|---|
| 1 . 発表者名 | Fuminori Tsuchiya,Arakawa Ryo,Hiroaki Misawa,Masato Kagitani,Ryoichi Koga,Fumiharu Suzuki,Reina Hikida,Kazuo Yoshioka,Andrew Steffl,Fran Bagenal,Peter A DeLamere,Nicholas McCord Schneider,Tomoki Kimura,Yasumasa Kasaba,Go Murakami,Ichiro Yoshikawa,Atsushi Yamazaki,Mizuki Yoneda |
| 2 . 発表標題 | Azimuthal variation in the Io plasma torus: New insights from the Hisaki satellite  |
| 3 . 学会等名 | AGU fall meeting 2019 (国際学会)  |
| 4 . 発表年  | 2019年   |

|          |  |
|----------|--|
| 1 . 発表者名 | Seiya Nishimura,Fumiharu Suzuki,Kazuo Yoshioka,Reina Hikida,Go Murakami,Fuminori Tsuchiya,Tomoki Kimura,Ichiro Yoshikawa |
| 2 . 発表標題 | Revealing the energy source for the IPT by measuring the duration of the sudden IPT brightenings                         |
| 3 . 学会等名 | AGU fall meeting 2019 (国際学会)   |
| 4 . 発表年  | 2019年  |

|          |  |
|----------|--|
| 1 . 発表者名 | Ryoichi Koga,Fuminori Tsuchiya,Masato Kagitani,Takeshi Sakanoi,Tomoki Kimura,Kazuo Yoshioka,Ichiro Yoshikawa,Go Murakami,Atsushi Yamazaki,H. Todd Smith,Fran Bagenal |
| 2 . 発表標題 | Enhancement of the oxygen atoms escape from Io's atmosphere and relation to the volcanism and Io plasma torus  |
| 3 . 学会等名 | AGU fall meeting 2019 (国際学会)   |
| 4 . 発表年  | 2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>F. Tsuchiya, K. Yoshioka, T. Kimura, I. Yoshikawa, G. Murakami, H. Kita, C. Tao, R. Koga, F. Suzuki, R. Hikida, S. Han, M. Kagitani, Y. Kasaba, H. Misawa, T. Sakanoi, M. Kuwabara, A. Yamazaki |
| 2. 発表標題<br>Variations in Jupiter's Inner Magnetosphere Seen by Hisaki: Effects of Io and the solar wind  |
| 3. 学会等名<br>Magnetospheres of Outer Planets 2019 (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Fuminori Tsuchiya, Kazuo Yoshioka, Tomoki Kimura, Chihiro Tao, Ichiro Yoshikawa, Go Murakami, Hajime Kita, Ryoichi Koga, Hikida Reina, Fumiharuru Suzuki, Sooman Han, Masato Kagitani, Takeshi Sakanoi, Hiroaki Misawa, Yasumasa Kasaba, Atsushi Yamazaki |
| 2. 発表標題<br>New pictures of Jovian magnetosphere obtained from the Hisaki satellite observation   |
| 3. 学会等名<br>JPGU 2019 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yoshioka, K., F. Tsuchiya, M. Kagitani, F. Bagenal, N. Schneider, G. Murakami, T. Kimura, A. Yamazaki, H. Kita, E. Nerney, I. Yoshikawa, and R. Hikida |
| 2. 発表標題<br>Temporal variation of the Io plasma torus seen from Hisaki satellite   |
| 3. 学会等名<br>Magnetosphere of Outer planets 2021 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉岡和夫、吉川一朗、山崎敦、村上豪、木村智樹、北元、土屋史紀、三好由純、栗田怜、寺本万里子、吉川一朗                         |
| 2. 発表標題<br>The observational study for high energy particles below L=2.1 using Hisaki |
| 3. 学会等名<br>日本地球惑星科学連合   |
| 4. 発表年<br>2020年   |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshioka, K., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Kimura, G. Murakami, D. Fukuyama, R. Hikida, F. Suzuki, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto |
| 2. 発表標題<br>The radial transport of plasmas around Jupiter's inner magnetosphere with response to Io's volcanic activity                                  |
| 3. 学会等名<br>AGU Fall meeting 2019 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshioka, K., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Kimura, G. Murakami, D. Fukuyama, R. Hikida, F. Suzuki, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto |
| 2. 発表標題<br>The influence of Io's volcanic activity in 2015 on Jupiter's magnetospheric dynamics  |
| 3. 学会等名<br>MOP meeting 2019 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                         | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 山崎 敦<br>(Yamazaki Atsushi)<br><br>(00374893)   | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授<br><br>(82645) |    |
| 研究分担者 | 土屋 史紀<br>(Tsuchiya Fuminori)<br><br>(10302077) | 東北大学・理学研究科・教授<br><br>(11301)                  |    |
| 研究分担者 | 木村 智樹<br>(Kimura Tomoki)<br><br>(50578804)     | 東京理科大学・理学部第一部物理学科・准教授<br><br>(32660)          |    |

## 6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                   | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)   | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 北 元<br><br>(Kita Hajime)<br><br>(60756493)  | 東北工業大学・工学部・講師<br><br><br><br>(31303)                          |    |
| 研究分担者 | 埜 千尋<br><br>(Tao Chihiro)<br><br>(80552562) | 国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波伝搬研究センター・研究員<br><br><br><br>(82636) |    |

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

| 国際研究集会   | 開催年         |
|--|-------------|
| 国際研究集会<br>Io plasma torus workshop 2021 (online) | 2021年～2021年 |

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関              |      |     |      |
|---------|----------------------|------|-----|------|
|         | LASP                 | SwRI | PSI | 他3機関 |
| 米国      |                      |      |     |      |
| ベルギー    | University de Liege  |      |     |      |
| 英国      | Lancaster University |      |     |      |