

令和元年5月22日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05209

研究課題名(和文) ハワイ・ハレアカラ小中口径鏡による太陽系惑星の可視・赤外高分散分光研究

研究課題名(英文) Investigation of solar panels system planets by visible and infrared high-dispersion spectroscopy on small/medium-sized telescopes at Haleakala, Hawaii

研究代表者

笠羽 康正 (Kasaba, Yasumasa)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：10295529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハワイ大と協力しハレアカラ山頂に口径40cmシュミット(T40：可視)・60cmカセグレン(T60：可視・赤外)を整備。独自開発した赤外・可視分光器や国内外の持込機器を装着して惑星専用望遠鏡として安定稼働させた。これにより米Juno・JAXA極端紫外線望遠鏡衛星ひさき(主に木星)、欧Mars Express、米MAVEN、欧ExoMars Trace Gas Orbiter(火星)、JAXAあかつき(金星)を支える国際観測網の一翼を担い、木星(イオトラス変動と磁気圏影響、オーロラ構造と短時間脈動変動の検出)、火星(高層大気温度場・速度場導出、下層大気微量成分追跡)等を実現させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本計画で実現した「好環境下にある分光能力を持つ"惑星専用"望遠鏡」は、世界に我々の施設が唯一であり、惑星探査機群の補完やその活動期間を越えた変動追跡に必須となった。また本計画により、東北大ハレアカラ観測所は赤外線機能の増強を果たし、豊富な分子振動・回転遷移や熱輻射を含むこの波長域への拡大によって、希薄大気主体のこれまでの活動の幅を広げ、中性・電離大気の運動・加熱、微量成分の追跡、地表・エアロゾルとの相互作用の解明を可能とした。この活動は、ハワイ大他と開発途上にある1.8m新望遠鏡PLANETSにも引き継がれるものとなる。完成に向かう作業は今後より複雑化するが、一層の貢献を果たしたい。

研究成果の概要(英文)：In cooperation with Univ. Hawaii, we established the operation of 40 cm Schmidt (T40: visible) and 60 cm Cassegrain (T60: visible/infrared) at the top of Haleakala, Hawaii. We attached our infrared/visible spectrometers developed by us, and run T40 and T60 as the telescopes dedicated to solar system planets. They acted as a part of the international observation network supporting to JAXA UV/EUV space telescope 'Hisaki' and NASA Juno (Jupiter), ESA Mars Express, NASA MAVEN, ESA ExoMars Trace Gas Orbiter (Mars), JAXA Akatsuki (Venus), and (Jupiter). We utilized those unique observational tools and achieved the investigations for Jupiter (Io torus structures and links to the magnetosphere, auroral structure and short-time fluctuations), Mars (upper atmospheric temperature and velocity fields, lower atmospheric trace gases), etc.

研究分野：太陽系電波赤外線科学

キーワード：可視光観測 赤外線観測 地上望遠鏡観測 太陽系惑星 木星 火星 金星 水星

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景(2015年4月)

ハレアカラは、常設汎用の巨大望遠鏡用サイトであるハワイ島・マウナケア山頂(標高4,205m)とは違い、目的を絞った機動的観測設備を収容する性格をもつ。より高度が低いため晴天率・低水蒸気量の点ではやや劣るが、(1)日本国内より圧倒的に良い晴天率(80%以上)を活かした連続観測、(2)カフルイ市街・空港から2時間で到達可能な高アクセス性、(3)山麓のハワイ大・先端技術研究センター(ATRC)および山頂の支援施設を活用でき、ハワイ大スタッフに緊急対応を依頼することも可能な高維持・修復性から、大学規模で維持する小規模観測拠点として世界屈指である。T40望遠鏡はこれまでの努力で常時遠隔制御がほぼ可能となり、これによって1年を通じた継続運用を行ってきた。

これらの活動と成果はハワイ大側でも高く評価され、2011年以降、(1)東北大飯館観測所60cmカセグレン望遠鏡(T60望遠鏡)のハレアカラ移設による赤外線観測能力の獲得(2014/9にファーストライト実現)、(2)ハレアカラの米空軍3.6m望遠鏡やマウナケアの巨大望遠鏡群においてハワイ大が有する「観測所時間」の援用、(3)ハワイ大ATRCとの可視・赤外分光観測装置の現地共同開発を経て、(4)惑星・系外惑星の機動的かつ継続観測を可能とする1.8m新惑星・系外惑星望遠鏡計画PLANETSの共同推進に至った。これらの推進のため、2011年4月~2012年9月には鍵谷研究員が長期滞在して可視分光器の共同開発に活躍。2012年4月からは本申請の前身である基盤研究(B・海外)によって米田研究員を長期派遣し、ハワイ大メンバーと連携した活発な運用・共同開発作業・望遠鏡移設作業を実施してきた。

2. 研究の目的(2015-8年度)

ハワイ・ハレアカラに設置した東北大40cmシュミット望遠鏡(T40:可視)に加え、2014年9月に移設された60cmカセグレン望遠鏡(T60:赤外・可視)の遠隔操作環境の整備と赤外分光観測装置の設営・調整を行い、これによって初めてカバーされる赤外域観測能力を含めた潜在能力をフルに活用可能な整備を行う。また、これを基礎として、同時・共同観測を大型赤外・サブミリ波望遠鏡等の活用とも連動させ、内外の惑星探査機群を支える以下の活動を遂行する。

(1) 木星のイオトーラス・オーロラ活動の追跡: 可視域でのナトリウムD線や硫黄発光輝線[SII]の継続観測により、イオの火山活動によって形成されたイオトーラスの大規模な密度・温度・速度場構造や、その磁気圏活動への影響を解明する。また、赤外域での南北オーロラ観測はイオ表面の火山活動状況モニターとの連動も試みる。この観測は、2013年9月に打ち上げられ稼働状態にあるJAXA極端紫外線望遠鏡衛星Hisaki/EXCEED、2016年7月に周回軌道投入された米Juno探査機による遠隔・In-situ木星磁気圏活動観測との連動を目指した。

(2) 火星大気の高層変動の追跡: 新たに設置する赤外線ヘテロダイン検出器の高分散能力をフルに生かし、大気宇宙流出にもつながりうる上層大気の下にある火星大気の高層擾乱・速度場観測、また低層のメタン・水蒸気・オゾン等の微量元素追跡を欧Mars Express探査機のCO₂氷雲・ダスト等観測と連動して行った。また、当初予定から1年以上遅延をみたものの2018年春から本格稼働した欧ExoMars/Trace Gas Orbiterとの連動も目指した。

(3) 金星大気の高層変動の追跡: 火星同様の高層大気擾乱観測、また雲頂上に位置する組成不明の「紫外線吸収物質」の波長300-400nmでの検出を試みた。本観測は、2015年末に周回軌道投入に成功したJAXA/Akatsuki探査機との連動を目指した。

(4) 水星希薄大気の組成・分布変動の追跡: 「アルカリ金属を大量に含む表層組成」から予想されるNa・K大気の組成と南北非対称性を含む分布変動の追跡を目指した。

さらに、ハレアカラを舞台にハワイ大等と共同推進する新惑星・系外惑星専用1.8m望遠鏡「PLANETS」の建設作業等を現地で遂行し、そのファーストライト実現に向け尽力する。

3. 研究の方法

(0) ハレアカラ山頂60cmカセグレン望遠鏡の実運用化 (鍵谷・中川・坂野井・笠羽、Khun・岡野[協力]) 東北大・飯館惑星圏観測施設から移設された本望遠鏡は、2014年10月に初活動である「中間赤外線ヘテロダイン検出器」(中川が2007-2014に開発)のクーデ焦点試験装着を行った。同じくクーデ焦点に「高分散可視ファイバー分光器」(鍵谷がハワイ大と2012-4に共同開発)、カセグレン焦点に可視偏光分光器DOPol-2(独・キーペンハウワー太陽研、米田が運用)の装着を行うため、前提となる(a)望遠鏡の遠隔運用化、(b)観測装置切替運用の確立を行う。

(1) 木星のイオトーラス・オーロラ変動の追跡 (鍵谷・坂野井・笠羽、山崎・吉川[連携]、米田[協力]) 極端紫外線観測衛星Hisaki/EXCEEDによる2013/12~2014/4の木星キャンペーン観測は、初の「木星紫外線水素オーロラ」と「イオトーラスの密度・温度・イオン種(O⁺, S⁺, S⁺⁺, S⁺⁺⁺)の大規模分布情報」の初長期連続観測を実現させ、ハレアカラ40cm望遠鏡(T40)を初めとするサポート観測(ハッブル宇宙望遠鏡(2014/1)、Chandra/Newton/SuzakuのX線宇宙望遠鏡群(2014/4)、マウナケアIRTF-3m・SUBARU-8m(2014/1, 2, 4))の充実もあって、「イオトーラスの磁気圏起源の高温電子の輸送」「イオトーラスにかかる太陽風駆動電場」「木星磁気圏尾部からイオトーラスに至るエネルギー流入の時間スケール」等がみえてきた。これらをさらに推し進め、ハレアカラ40cm・60cmの活用と共に他の大口径望遠鏡の協力も得て、2016年に周回軌道に入った米・Juno探査機を支える長期継続観測をHisaki/EXCEEDと連動して実施する。

(2) 火星大気の高層変動 (中川・笠羽、寺田[連携]、青木・Sornig・Schneider[協力])

(3) 金星大気の高層変動 (中川・笠羽・坂野井、山崎[連携]、青木・Sornig[協力])

東北大 60cm 望遠鏡のクーデ焦点に独自開発の中間赤外ヘテロダイナミクス観測装置を設置し、その高波長分解能 ($\sim 10^{-7}$) を活用して、地球型惑星の大気観測を実施する。火星では、「中間圏の速度場・温度場」と「対流圏の微量成分」の継続観測に挑戦する。前者は 2014 年 9 月に周回観測を開始した米・MAVEN、後者は 2018 年春から本格観測開始した欧火星探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) との連携を目指す。また金星では、JAXA 金星探査機 Akatsuki の周回観測と連動しうる、高高度速度場・温度場観測および 300-400nm での雲上吸収物質 (組成が未だ不明) の検出試行を行った。

(4) 水星希薄大気の組成・分布変動の追跡 (亀田・鍵谷、吉川[連携]) 2014 年まで行われた米・MESSENGER 探査機 (磁気圏高エネルギー粒子観測) と本学ハレアカラ 40cm 望遠鏡 (ナトリウム希薄大気) の連動観測により、磁気圏活動と大気変動に明瞭な相関がない、という予想外の事実が判明した。一方、米 MESSENGER 探査機では「アルカリ金属を大量に含む南北非対称の表層組成」が示された。40cm 望遠鏡を活かしてこの表層分布と大気との関係を明らかにすべく、「アルカリ金属希薄大気」の追跡に挑戦する。本観測は、2025 年末の軌道投入を目指し飛翔中の日欧共同水星探査計画 BepiColombo に接続する準備研究となる。

(5) ハレアカラ 1.8m 望遠鏡 PLANETS の開発試験 (坂野井・鍵谷・笠羽・中川、J. Kuhn・岡野・Berdyugina・米田[協力]) T40・T60 望遠鏡の整備・観測装置設営と観測運用に伴い、メンバーは相当期間ハワイ大に滞在する。これに伴い、PLANETS 望遠鏡の本体設備とドーム建屋の設計検討および製造、初期装着観測装置開発に対し直接的マンパワーとして貢献する。特にその遠隔操作機能等の実装には、T60cm 望遠鏡の経験を最大限に活かす。また、観測装置のひとつである系外惑星散乱大気の偏光検出を目指す「可視偏光分光器 DIPo1-2」を T60 望遠鏡に装着して試験を行う。赤道儀駆動である T60 は、追尾に伴う視野回転がないため高精度偏光観測に最適であり、その特性を生かすものである。

4. 研究成果

本基盤 B による支援により、ハワイ大・天文学研究所と協力するハワイ・ハレアカラ山頂口径 40cm シュミット (T40: 可視) ・60cm カセグレン (T60: 可視・赤外) を整備し、我々が独自開発した赤外・可視分光器や国内外の持込機器を装着し、「惑星専用望遠鏡」として安定稼働させることができた。これによって、我々も参加して運用する JAXA 極端紫外線望遠鏡衛星ひさき (主に木星)、我々が観測・解析に参加する欧 Mars Express・米 MAVEN・欧 ExoMars Trace Gas Orbiter (火星)、JAXA あかつき (金星)、米 Juno (木星) を支える「国際観測網」の一翼を担った [論文 6, 16, 他講演 7 編]。5. 発表論文 (学会発表は紙幅の制約で略) を軸に研究成果を総括する。

(0) ハレアカラ山頂 60cm カセグレン望遠鏡の実運用化

[望遠鏡の遠隔運用化] 2015-2018 年度にかけ、ドーム開閉、望遠鏡指向制御 (副鏡 Tip Tilt 制御等を含)、天候モニター (特に雨・結露の検出) 等をネットワーク経由で可能とし、緊急時対応 (天候・故障対策、バックアップ・現地メンバー連絡手段確保等) を確立した。これにより、東北大・立教大・ドイツ等からの安定した遠隔運用およびハワイ大スタッフからの緊急時支援が可能なスキームを構築した。この作業には、T40 望遠鏡の遠隔制御化経験が大きく寄与した。

[観測装置切替運用の確立] クーデ焦点に置く 2 機器の切替に要する中間光学系の整備、およびクーデ/カセグレン焦点切替に必要な副鏡交換・第 3 鏡着脱作業の確立を行った。T60 はこの規模の望遠鏡としては珍しいクーデ焦点を有し、比較的大型となる高分散分光器の装着を可能としており、この柔軟な切り替えは本望遠鏡の特徴を活かすに欠かせないものとなった。また後者は、重量物の交換作業を伴うため高度 3000m の高所作業として本来危険を伴うもので、確実かつ容易な手順の確立を実現した。これらにより、複数の観測装置の柔軟に切替運用を可能とした。

(1) 木星

[イオトラス変動と木星磁気圏への影響 (可視撮像)] ハレアカラ 40cm シュミット望遠鏡の広視野を活かしたナトリウム D 線 (589nm) による中性トラスの密度分布、硫黄 [SII] 発光 (673nm) によるプラズマトラス密度を継続的に取得し [講演 1 編]。本観測は国際観測網の重要な一翼として貢献したもので、2016 年 7 月に開始された米・Juno 探査機による木星内部磁気圏全域のサーベイ観測 (極軌道からの極域オーロラ上空通過を含む) を支え、また JAXA Hisaki 紫外線望遠鏡衛星と連動して「イオトラス・火山活動」に伴うイオ近傍ガスの長期変動情報を提供した。

特に、火山活動に伴うイオからのガス供給過程とそれに対するイオ表層溶岩温度からの影響示唆を行うとともに [論文 10, 11, 講演 7 編]、2014 年 12 月から 2015 年 6 月にかけて起きたイオの火山活動増大を捉え [論文 20, 講演 4 編]、これによる木星磁気圏プラズマ密度の増大や、電子・イオンの加熱を引き起こし、さらには紫外線オーロラの変動 [論文 3] に至る一連の連携観測のトリガーを引き、木星磁気圏の自律的な内部変動を連続的に捉えることに世界で初めて成功した。これらによるイオプラズマトラス近傍の木星磁気圏電子温度、プラズマ密度、中性ガスの供給量の時間変遷追跡を初めて可能とし、磁気圏ダイナミクスの解明に寄与した [講演 2 編]。

これらの研究はまた、太陽風推定および電離圏-磁気圏結合モデルによる木星-イオトラス-磁気圏結合系の活動度推定を絡めた研究へと発展した。こちらは太陽風からの影響による木星磁気圏の他律的活動で、地上電波観測による放射線帯強度と地上近赤外観測による熱圏大気温度との結合による熱圏-電離圏-磁気圏結合のモデル検証 [論文 8]、aurora 発光変動に対するイ

オトラス活動影響と太陽風影響の時間的遅延と積分の効果[論文 9, 21、講演 3 編]、Hisaki EUV Io torus 空間分布変動への太陽風変動の影響から推定される木星磁気圏-電離圏間の電流・電場結合[論文 13、講演 1 編]、Io torus 空間分布変動から推定される磁気圏電子加熱[論文 19、講演 4 編]といった成果を挙げた。

[オーロラの垂直構造導出・短時間脈動変動(近赤外分光・撮像)] T60 望遠鏡に装着を想定し開発中の近赤外観測装置による成果を先取りすべく、マウナケア大口径望遠鏡(Subaru-8m・IRTF-3m)の協力を得て、熱圏の化学事象との連結の大きな赤外線オーロラの時空間分布とその変動を捉えた[講演 1 編]。赤外オーロラは、「熱圏(H_2 輝線: $2\mu m$ 帯)-電離圏(H_3^+ 輝線: $2\mu m/3\mu m$ 帯)」の結合観測という側面を有する。これにより、両者の高度分布に大きな相違ないにも関わらず後者がオーロラオーバルに集中すること[論文 7、講演 3 編]、また赤外線オーロラに地球でも見られる脈動的変動[論文 22、講演 1 編]といった発見を提示した。

[対流圏・成層圏活動およびその日周変動(中間赤外撮像)] 同じく T60 望遠鏡に装着を想定し名大で開発中の中間赤外観測装置による成果を先取りすべく、マウナケア大口径望遠鏡(Subaru-8m)の協力を得て、より低高度に位置する対流圏・成層圏活動の観測にも着手することができた。Juno 探査機の来着に先駆けた北半球赤道帯の擾乱観測[論文 4]、また近赤外~中間赤外全域の熱発光日周変動からの系外惑星熱発光の日周変動への示唆[論文 5]といった、国際協調の地上マルチ波長木星観測の一翼を支えた。引き続き Juno 探査機近木点通過時のサポート観測を継続実施した[講演 2 編] (一部は 2019 年 4 月に論文出版)。

(2) 火星・金星

[火星: 高層大気温度場・速度場検出、下層大気微量成分追跡] T60 クーデ焦点に装着した独自開発の中間赤外ヘテロダイン観測装置[講演 1 編]によって、火星中間圏の速度場・温度場を取得した[論文 14, 17, 22, 26]。火星は、2014 年 9 月に周回観測を開始した米・MAVEN と連携したものである。MAVEN 紫外線観測は、より高高度の $O\cdot CO$ 等の紫外輝線をモニターし、高度~150km 以上の希薄な上層大気の挙動を把握する。我々の観測はその下を捉え、世界で唯一、ダストストーム時での中間圏大気の加熱を捉えた[講演 2 編]。より下層の大擾乱が生んだ大気重力波による加熱とみられ、通常状態のモデル研究[論文 12]との差分の検証を実施中である。

また、高分散分光観測は、火星および地球大気中の CO_2 等の深い吸収を迂回し「火星対流圏の微量成分観測」を可能とする。例えば大気酸化物質の存在指標となる H_2O_2 があるが、欧 Mars Express 観測では波長分解能が~1,000 と小さく、精度のよい導出が困難であった[論文 1]。マウナケア大口径望遠鏡(Subaru-8m)の協力を得た観測を進め、特に水循環の指標となる H_2O/HDO 比(H/D比)の季節変動導出に成功した[論文 2]。欧火星探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter(TG00)の 2018 年春からの本格観測開始とともに、成層圏を飛行する航空機望遠鏡 SOFIA やサブミリ波電波干渉計 ALMA の活用も含む国際地上サポート観測網に参画している[講演 7 編]。

[金星大気低層~高層変動] 同じく T60 クーデ焦点に装着した中間赤外ヘテロダイン観測装置 MILAHI によって、金星中間圏の速度場・温度場を取得した。金星は、JAXA 金星探査機 Akatsuki のサポート観測であり、紫外・近赤外・中間赤外および電波科学で観測される雲層近傍[論文 17, 18]と MILAHI 観測による中間圏の速度場・温度場からその上下結合を解明しようとするものである[講演 9 編]。また、300-400nm で観測可能な雲上吸収物質(組成が未だ不明)の検出試行も T60 に装着したファイバ面分光観測装置によって行った[講演 1 編]。マウナケア大口径望遠鏡(Subaru-8m)の協力も得て、中間赤外域での対流圏活動観測にも着手している[講演 1 編]。

[火星高層希薄大気発光] 火星の超高層電離大気に対する太陽風の影響を理解するため、将来火星探査でその相互作用領域を二次元光学観測し境界域に迫ることが検討されている。超高層電離大気の主成分である O_2^+ はそのトレーサの有力候補だが、未だ観測がない。2018 年 9 月にこの検出を目指して T60 クーデ焦点の可視高分散分光器による観測を実施した[講演 1 編]。

(3)水星: 希薄流出大気の変動追跡(可視) T40 望遠鏡により、アルカリ金属希薄大気総量変動を追跡した。4年間に得られたのべ160日を超える観測結果を水星明け方側・夕方側で分類した。真近点離角 250 度付近の密度上昇を説明するため、水星クレータ密度分布との関係を調べ地形との相関を確認した。クレータ数が多い領域と少ない領域ではナトリウムの量が異なる可能性がある。しかし相関は見られず、経度 250 度付近の上昇の原因は分かっていない。[講演 1 編]

(4)系外惑星: 偏光検出観測 T60 望遠鏡に装着した可視偏光分光器 DIPol-2 (独・キーペンハウアー太陽研と共同)は系外惑星散乱大気偏光検出を目指す。この試験設営と運用に協力し、既知の系外惑星で比較的大きな偏光がありえる $\nu And\cdot\tau Boo$ を観測。この高精度偏光測定に必要な観測システム固有の偏光特性の確認を行った[講演 3 編]。

(5) 1.8m 惑星・系外惑星専用望遠鏡「PLANETS」の開発 観測に伴うマウイ島長期滞在機会を活かし、ハワイ大・ドイツ・ブラジルグループらと共同建設中の PLANETS 望遠鏡について、ハレアカラ現地における検討・作業に参加した。これにより、主鏡ラフ研磨作業(東北大学の別途資金による)、望遠鏡構造の設計・開発、および観測所予定敷地の環境アセスメント作業に直接的な貢献を行った。また、望遠鏡本体設備とドーム建屋の設計検討および製造、初期装着観測装置開発に対し直接的マンパワーとして貢献した。この望遠鏡の「オフセットグレゴリアンシステム」低散乱性による新研究に踏み出す準備を整えつつある。[論文 15、講演 9 編]

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 22 件) (うち 査読付:20、国際共著:11)

- [1] Aoki, S., M. Giuranna, Y. Kasaba, H. Nakagawa, G. Sindoni, A. Geminale, and V. Formisano (2015), Search for hydrogen peroxide in the Martian atmosphere by the Planetary Fourier Spectrometer onboard Mars Express, *Icarus* 245, 177-183, doi:10.1016/j.icarus.2014.09.034
- [2] Aoki, S., H. Nakagawa, H. Sagawa, M. Giuranna, G. Sindoni, A. Aronica, Y. Kasaba (2015), Seasonal variation of the HDO/H₂O ratio in the atmosphere of Mars at the middle of northern spring and beginning of northern summer, *Icarus* 260, 7-22, doi:10.1016/j.icarus.2015.06.021
- [3] Badman, S.V.; Bonfond, B.; Fujimoto, M.; Gray, R.L.; Kasaba, Y.; Kasahara, S.; Kimura, T.; Melin, H.; Nichols, J. D.; Steffl, A. J.; Tao, C.; Tsuchiya, F.; Yamazaki, A.; Yoneda, M.; Yoshikawa, I.; Yoshioka, K. (2016), Weakening of Jupiter's main auroral emission during January 2014, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3, 988-997, doi:10.1002/2015GL067366.
- [4] Fletcher, L.N.; Orton, G.S.; Sinclair, J.A.; Donnelly, P.; Melin, H.; Rogers, J.H.; Greathouse, T.K.; Kasaba, Y.; Fujiyoshi, T.; Sato, T.M.; Fernandes, J.; Irwin, P.G.J.; Giles, R.S.; Simon, A.A.; Wong, M.H.; Vedovato, M. (2017), Jupiter's North Equatorial Belt expansion and thermal wave activity ahead of Juno's arrival, *Geophys. Res. Lett.* 44, 14, 7140-7148, doi:10.1002/2017GL073383
- [5] Ge, H., X. Zhang, L.N. Fletcher, G.S. Orton, J. Sinclair, J. Fernandes, T. Momary, Y. Kasaba, T.M. Sato, T. Fujiyoshi (2019) Rotational light curves of Jupiter from UV to mid-infrared and implications for brown dwarfs and exoplanets, *Astron. J.* 157:89, doi:10.3847/1538-3881/aafba7.
- [6] Kasaba, Y. (2017), 特集:物理科学、この1年:外惑星系の科学と探査, *Parity* 32(1), 69-71, 丸善出版 (non-referee, in Japanese)
- [7] Kita, H., S. Fujisawa, C. Tao, M. Kagitani, T. Sakanoi, Y. Kasaba (2018), Horizontal and vertical structures of Jovian infrared aurora: Observation using Subaru IRCS with adaptive optics, *Icarus* 313, 93-106, doi:10.1016/j.icarus.2018.05.002.
- [8] Kita, H., H. Misawa, A. Bhardwaj, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, Y. Kasaba, C. Tao, Y. Miyoshi, A. Morioka (2015), Relation between the short-term variation of the Jovian radiation belt and thermosphere derived from radio and infrared observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, doi:10.1002/2015JA021374.
- [9] Kita, H.; Kimura, T.; Tao, C.; Tsuchiya, F.; Misawa, H.; Sakanoi, T.; Kasaba, Y.; Murakami, G.; Yoshioka, K.; Yamazaki, A.; Yoshikawa, I.; Fujimoto, M. (2016), Characteristics of solar wind control on Jovian UV auroral activity deciphered by long-term Hisaki EXCEED observations: Evidence of preconditioning of the magnetosphere?, *Geophys. Res. Lett.* 43, 6790-6798, doi:10.1002/2016GL069481.
- [10] 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 (2018), Spatial distribution of Io's neutral oxygen cloud observed by Hisaki, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 123, 3764-3776, doi:10.1029/2018JA025328.
- [11] Koga, R., F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, M. Yoneda, K. Yoshikawa, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, I. Yoshikawa (2018), The time variation of atomic oxygen emission around Io during a volcanic event observed with Hisaki/EXCEED, *Icarus*, 200, 300-307, DOI:10.1016/j.icarus.2017.07.024.
- [12] Medvedev, A.S., H. Nakagawa, C. Mockel, E. Yigit, T. Kuroda, P. Hartogh, K. Terada, N. Terada, K. Seki, N.M. Schneider, S.K. Jain, J.S. Evans, J.I. Deighan, W.E. McClintock, D. Lo (2016) Comparison of density and temperature in the Martian thermosphere from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling. *Geophys. Res. Lett.* 43, 7, 3095-3104, doi:10.1002/2016GL068388.
- [13] Murakami, G.; Yoshioka, K.; Yamazaki, A.; Tsuchiya, F.; Kimura, T.; Tao, C.; Kita, H.; Kagitani, M.; Sakanoi, T.; Uemizu, K.; Kasaba, Y.; Yoshikawa, I.; Fujimoto, M. (2016), Response of Jupiter's inner magnetosphere to the solar wind derived from extreme ultraviolet monitoring of the Io plasma torus, *Geophys. Res. Lett.* 43, 12308-12316, doi:10.1002/2016GL071675.
- [14] Nakagawa, H.; Aoki, S.; Sagawa, H.; Kasaba, Y.; Murata, I.; Sonnabend, G.; Sornig, M.; Okano, S.; Kuhn, J.R.; Ritter, J.M.; Kagitani, M.; Sakanoi, T.; Taguchi, M.; Takami, K. (2016), IR heterodyne spectrometer MILAHI for continuous monitoring observatory of Martian and Venusian atmospheres at Mt. Haleakala, Hawaii, *Planet. Space Sci.* 126, 34-48, doi:10.1016/j.pss.2016.04.002.
- [15] Sakanoi, T., J. Kuhn, S. Berdyugina, M. Emilio, M. Kagitani, Y. Hirahara, H. Nakagawa, Y. Kasaba, T. Obara, S. Okano, I. Scholl, A. Berdyugin, and V. Piirola (2018) Development of PLANETS telescope and visible-infrared spectrometer for monitoring of planetary and exoplanetary atmospheres, *Proc. SPIE* 10700, *Ground-based and Airborne Telescopes VII*, 107004J, doi:10.1117/12.2312363.

- [16] Sakanoi, T., M. Kagitani, H. Nakagawa, T. Obara, Y. Kasaba, S. Okano, J.R. Kuhn, S.V. Berdyugina, I.F. Scholl, and M. Yoneda (2017), Optical and IR observations of planetary and exoplanetary atmospheres, *SPIE news room*, doi:10.1117/2.1201612.006817. (non-referee)
- [17] Satoh, T.; Nakamura, M.; Ueno, M.; Uemizu, K.; Suzuki, M.; Imamura, T.; Kasaba, Y.; Yoshida, S.; Kimata, M. (2016), Development and in-flight calibration of IR2: 2-um camera onboard Japan's Venus orbiter, Akatsuki, *Earth Planet. Space*, 68, 1, doi:10.1186/s40623-016-0451-z.
- [18] Satoh, T., S. Ohtsuki, N. Iwagami, M. Ueno, K. Uemizu, M. Suzuki, G.L. Hashimoto, T. Sakanoi, Y. Kasaba, R. Nakamura, T. Imamura, M. Nakamura, T. Fukuhara, A. Yamazaki, M. Yamada (2015), Venus' clouds as inferred from the phase curves acquired by IR1 and IR2 on board Akatsuki, *Icarus*, 248, 213-220, doi:10.1016/j.icarus.2014.10.030
- [19] Tsuchiya, F.; Kagitani, M.; Yoshioka, K.; Kimura, T.; Murakami, G.; Yamazaki, A.; Nozawa, H.; Kasaba, Y.; Sakanoi, T.; Uemizu, K.; Yoshikawa, I. (2015), Local electron heating in the Io plasma torus associated with Io from HISAKI satellite observation, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 120, 12, 10, 317-10, 333, doi:10.1002/2015JA021420.
- [20] Yoneda, M, M. Kagitani, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, S. Okano (2015), Brightening event seen in observations of Jupiter's extended sodium nebula, *Icarus* 261, 31-33, doi:10.1016/j.icarus.2015.07.037.
- [21] Yoshikawa, I.; Yoshioka, K.; Murakami, G.; Suzuki, F.; Hikida, R.; Yamazaki, A.; Kimura, T.; Tsuchiya, F.; Kagitani, M.; Sakanoi, T.; Uemizu, K.; Tao, C.; Nozawa, H.; Kasaba, Y.; Fujimoto, M. (2016), Properties of hot electrons in the Jovian inner magnetosphere deduced from extended observations of the Io plasma torus, *Geophys. Res. Lett.* 43, 11552-11557, doi:10.1002/2016GL070706.
- [22] Watanabe, H.; Kita, H.; Tao, C.; Kagitani, M.; Sakanoi, T.; Kasaba, Y. (2018). Pulsation characteristics of Jovian infrared northern aurora observed by the Subaru IRCS with adaptive optics, *Geophys. Res. Lett.* 45, 21, 11, 547-11, 554, doi:10.1029/2018GL079411.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 : 坂野井 健
 ローマ字氏名 : SAKANOI, Takeshi
 所属研究機関名 : 東北大学
 部局名 : 理学研究科
 職名 : 准教授
 研究者番号 (8桁) : 80271857

研究分担者氏名 : 鍵谷 将人
 ローマ字氏名 : KAGITANI, Masato
 所属研究機関名 : 東北大学
 部局名 : 理学研究科
 職名 : 助教
 研究者番号 (8桁) : 30436076

研究分担者氏名 : 中川 広務
 ローマ字氏名 : NAKAGAWA, Hiromu
 所属研究機関名 : 東北大学
 部局名 : 理学研究科
 職名 : 助教
 研究者番号 (8桁) : 30463772

研究分担者氏名 : 亀田 真吾
 ローマ字氏名 : KAMEDA, Shingo
 所属研究機関名 : 立教大学
 部局名 : 理学部
 職名 : 教授
 研究者番号 (8桁) : 30455464

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。