

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03944

研究課題名（和文）低散乱望遠鏡による氷衛星からの噴出活動の解明

研究課題名（英文）Study on plume activity on icy moons using low-scattered-light telescope

研究代表者

鍵谷 将人（Kagitani, Masato）

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：30436076

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ハワイ・ハレアカラに設置が予定されている1.8mの低散乱望遠鏡PLANETSを用いて太陽系の氷天体の活動現象の解明を推進することを目的に、低散乱かつ高コントラストを達成する上で要となる、補償光学を備えたコロナグラフの開発を行った。我々の開発したT60用可視AOシステムは、140素子のMEMS可変型鏡とShack-Hartmann波面センサを用いた構成をとり、最大600Hzの閉ループ制御を実現した。ハレアカラ60cm望遠鏡に取り付けて補償光学試験観測を行い、590nmにおいて半値幅0.45"となる高空間分解能を達成することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハワイ・ハレアカラに設置が予定されている1.8mの低散乱望遠鏡PLANETSを用いて太陽系の氷天体の活動現象の解明を推進することを目的に、低散乱かつ高コントラストを達成する上で要となる、補償光学を備えたコロナグラフの開発を行った。ハレアカラ60cm望遠鏡に取り付けて補償光学試験観測を行い、590nmにおいて半値幅0.45"となる高空間分解能を達成することが確認された。

研究成果の概要（英文）：It will be the key to achieving low-scattering and high-contrast for the purpose of promoting the plume activity phenomena of icy bodies in the solar system using the 1.8 m low scattering telescope PLANETS scheduled to be installed in Haleakala, Hawaii. We have developed a visible AO system for T60, which consists of a 140-element MEMS deformable mirror and a Shack-Hartmann wavefront sensor, and achieves closed-loop control up to 600Hz. Adaptive optics test observations were carried out on the Haleakala 60cm telescope, and it was confirmed that a high spatial resolution with a half-value width of 0.45" was achieved at 590nm.

研究分野：惑星分光物理学

キーワード：補償光学 低散乱

## 1. 研究開始当初の背景

エウロパやエンケラドスといった外惑星の衛星は、厚い氷に覆われた地下海の存在が強く示唆されることから、ハビタブル環境を有する最有力候補の一つである(Waite et al., 2017)。氷の厚さは数 10km 以上におよぶため地下海の直接探査は非常に困難であるが、両天体に地表氷面の裂け目からの噴出(ブリューム)活動が発見されたこと(Porco et al., 2006; Roth et al., 2014)により、噴出物のサンプルリターンや機上分析を行うことで、地下海のハビタビリティについての重要な知見が得られるとの期待が高まりつつある。エウロパ表面からの噴出活動の探査ミッション(JUICE や Europa Clipper)やサンプルリターンミッションについて、近年盛んに議論されてきている。サンプルの採取や、フライバイによる直接探査で最大の成果を得るためには、噴出活動の発生する場所と、発生するタイミングや時間変動に関する情報が決定的に不足している。本研究ではこの2つの問いに対して、地上望遠鏡を用いた数ヶ月から2年の連続観測を実施し、噴出活動の場所と変動を明らかにすることを旨とし、高コントラスト観測に必要な補償光学・高分散分光器を備えたコロナグラフを開発した。

## 2. 研究の目的

本研究では、(1)エウロパの噴出活動により突発的に放出される水分子の乖離に伴う酸素原子発光(630.0 nm)を捉え、噴出場所を特定し、噴出活動の変動の特徴(衛星の公転位相角との関係等)を明らかにすること、(2)エンケラドスでの噴出活動の結果生じる酸素原子発光(630.0 nm)を連続観測し、数ヶ月から数年スケールの変動の特徴を明らかにすることを目指し、その観測を可能とする補償光学・高分散分光器を備えたコロナグラフを開発することである。本研究では、東北大学が米ハワイ大学、独キーベンハウアー太陽研究所等と共同でハワイ・ハレアカラに設置を進めている1.8mの低散乱望遠鏡(PLANETS望遠鏡)を用いることで、数ヶ月~数年のスケールに渡る連続観測を実現させる。本研究で対象とする可視域では、惑星や衛星本体と観測対象の噴出物起源の発光は輝度差が大きく(天体の明暗境界から0.2秒角において5 pmの帯域あたり100-1000倍の輝度差)、通常の観測手段では十分な信号雑音比を得ることができない。PLANETS望遠鏡は副鏡とその支持構造による回折の影響を受けない非軸・無掩蔽光学系を特徴とし、本研究で開発する補償光学を備えたコロナグラフを既存の2次元可視高分散分光器(波長分解能80,000)と組み合わせることで、エウロパの場合、2時間の積分で従来捉えられた規模の噴出活動を捉えることが可能となる(図1)。630.0nmの発光輝線はこれまで捉えられてきた極端紫外域の発光に比べて、エウロパ固有の酸素大気による発光の寄与が小さく、噴出水分子の量を直接的にモニターする手段としてより適している。エンケラドスの噴出起源の酸素原子発光も、従来20-30日かかった観測が2時間程度に短縮され、より短時間の変化やエンケラドスの位相角の変化(公転周期4日)に伴う変動を捉える可能性が高められる。

## 3. 研究の方法

研究開始当初の予定ではR2年度にPLANETS望遠鏡の開発が完了する予定であったが、コロナ禍の影響もあり予定より遅れることとなった。そこで当初から研究のバックアップ

手段として想定していたとおり、ハレアカラ観測所の東北大学 60cm 望遠鏡を用いて補償光学を備えたコロナグラフの開発に注力した。また東北大学の既存の可視分光器(波長分解能 70,000)をアップグレードしたファイバ視野集積器を備えた高分散分光器を開発した。

#### 4 . 研究成果

開発したハレアカラ 60cm 望遠鏡(T60)用の可視補償光学は、我々の開発した T60 用可視 A0 システム(図 2)は、140 素子の MEMS 可変型鏡(Boston Micromachin 社)と Shack-Hartmann 波面センサ(TIS 社 DMK33UX287 と Thorlabs 社 MLA150-7AR)を用いた構成をとり、Windows PC(HP 社 AMD Ryzen 5PRO 4650G)を用いて最大 600Hz の閉ループ制御を実現した。1 素子当たりの大きさは、望遠鏡の主鏡上で 6cm となり、ハレアカラ山頂における大気揺らぎの大きさ(  $\lambda=500\text{nm}$  で夜間典型値 15 cm、昼間典型値 8 cm)より十分小さい。このシステムをハワイ現地の T60 のカセグレン焦点に設置し、遠隔制御により A0 制御ソフトの開発と評価を行った。波面補償計算には、(1)適切な打ち切り精度を設定した校正行列の特異値分解法、(2)波面を Zernike モードに展開しモード別に制御する方法の 2 種類を検討・適用した。(1)では、3.5 等級までの自然星を対象とした観測で 300Hz の安定した閉ループ制御を実現した。夜間に 2.5 等級の恒星を対象に行った試験観測(  $\lambda=590\text{nm}$ )では、シーイング半値全幅(FWHM)3.2" の条件下で A0 動作時に FWHM 0.69" を達成した(図 3)。今後これらの観測装置を用いて氷衛生噴出物のモニタ観測を実施することで、噴出活動の変動の特徴(衛星公転位相角との関係など)を明らかにすることが期待できる。

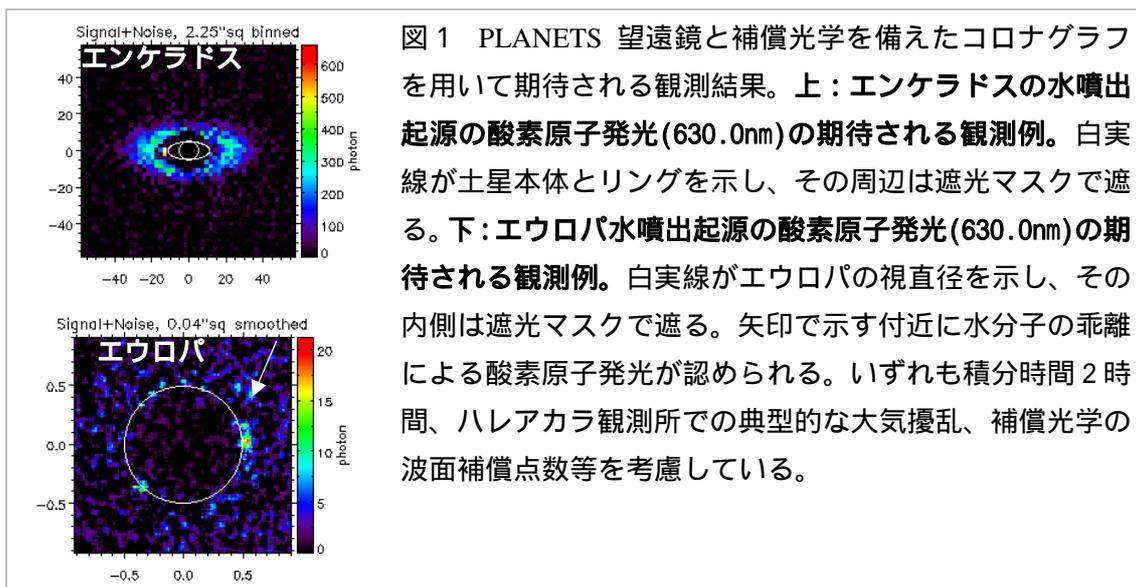


図 1 PLANETS 望遠鏡と補償光学を備えたコロナグラフを用いて期待される観測結果。上：エンケラドスの水噴出起源の酸素原子発光(630.0nm)の期待される観測例。白実線が土星本体とリングを示し、その周辺は遮光マスクで遮る。下：エウロパ水噴出起源の酸素原子発光(630.0nm)の期待される観測例。白実線がエウロパの視直径を示し、その内側は遮光マスクで遮る。矢印で示す付近に水分子の乖離による酸素原子発光が認められる。いずれも積分時間 2 時間、ハレアカラ観測所での典型的な大気擾乱、補償光学の波面補償点数等を考慮している。

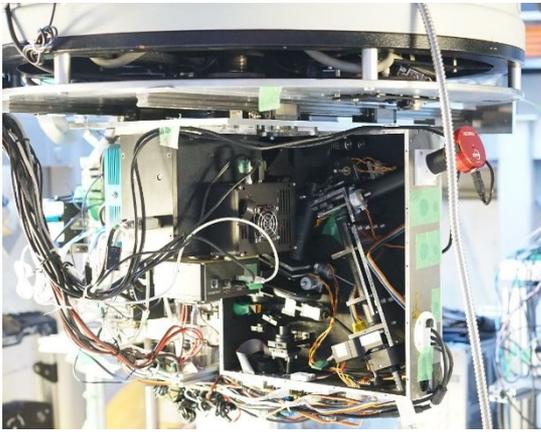
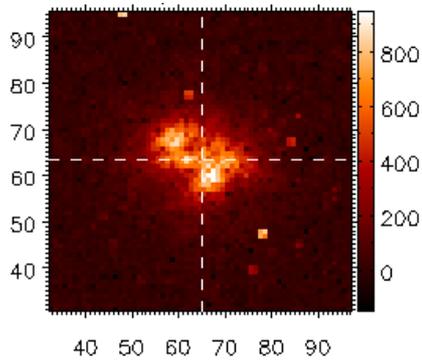


図 2 ハレアカラ 60cm 望遠鏡のカセグレン焦点に搭載した可視補償光学コロナグラフ（撮影のため蓋を外した状態）

AO なし、FWHM  $\sim 1.6''$  @ 590nm



AO あり、FWHM  $\sim 0.5''$  @ 590nm  
補償ループ 600Hz,  $v_m=2.5$

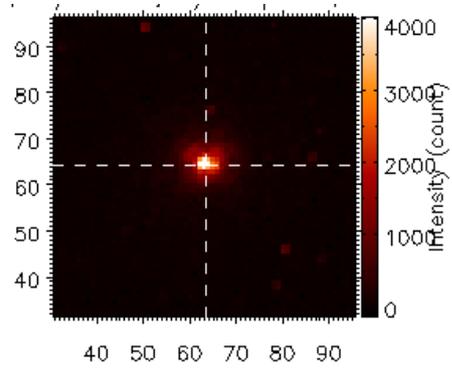


図 3 補償光学による試験観測結果。左が補償光学を作動させない場合、右が補償光学を作動させた場合の恒星像(590nm, 10nm 帯域)の比較。それぞれ積分時間  $t=0.5\text{ms}$  で撮像された 256 枚を平均した画像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Kasaba Yasumasa, Hirahara Yasuhiro, Kurita Mikio, Kuhn Jeffrey R., Berdyugina Svetlana V., Emilio Marcelo	4. 巻 11445
2. 論文標題 High dynamic-range observation using a 1.8-m off-axis telescope PLANETS: feasibility study and telescope design	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1144543
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2556458	査読の有無 無
オープンアクセス 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 該当する

1. 著者名 Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Kasaba Yasumasa, Okano Shoichi	4. 巻 11447
2. 論文標題 A coronagraph using a digital micromirror device as an adaptive occultation mask: design and observational result	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 114479
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2561906	査読の有無 無
オープンアクセス 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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masato Kagitani
2. 発表標題 1.8m軸外し望遠鏡PLANETSの開発状況
3. 学会等名 日本天文学会2021春期年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Kagitani
2. 発表標題 High dynamic range observation using a 1.8 m off axis telescope PLANETS: feasibility study and telescope assembly
3. 学会等名 JpGU 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Kasaba Yasumasa, Hirahara Yasuhiro, Kurita Mikio, Kuhn Jeffrey R., Berdyugina Svetlana V., Emilio Marcelo
2. 発表標題 High dynamic-range observation using a 1.8-m off-axis telescope PLANETS: feasibility study and telescope design
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Kasaba Yasumasa, Okano Shoichi
2. 発表標題 A coronagraph using a digital micromirror device as an adaptive occultation mask: design and observational result
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍵谷将人, 坂野井健, 笠羽康正, 平原靖大, 栗田光樹夫
2. 発表標題 1.8m 軸外し望遠鏡PLANETS の開発状況
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍵谷将人, 鈴木駿久, 坂野井健, 笠羽康正, 平原靖大, 栗田光樹夫
2. 発表標題 1.8m軸外し望遠鏡PLANETS による高ダイナミックレンジ観測
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Kagitani, Fuminori Tsuchiya, Kazuo Yoshioka, Go Murakami, Tomoki Kimura, Ryoichi Koga, Reina Hikida, Takeshi Sakanoi
2. 発表標題 Structure of Io plasma torus observed with the Tohoku 60-cm telescope
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

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0件

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