

令和元年6月17日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04059

研究課題名(和文) 紫外線宇宙望遠鏡による太陽系外惑星大気の研究

研究課題名(英文) Study of exoplanetary atmosphere by UV space telescope

研究代表者

亀田 真吾 (KAMEDA, shingo)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：30455464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球に類似した系外惑星の発見に向けて大型計画が複数進行しており、ハビタブルゾーンにある地球型大気の観測検討が急速に進みつつある。本研究では太陽系内地球惑星大気の観測で蓄積された技術を継承し、太陽系外の地球型惑星の観測手法の検討と技術開発を進めた。その結果、ロシアの1.7m紫外線宇宙望遠鏡WSO-UVに本研究チームが開発を担当する高感度紫外線分光器が搭載される方針が決定され、2国間の協定締結に向けて活動を継続している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

広大な宇宙において、地球そして人類は唯一の存在だろうか？地球のように表層に海洋を有し、生命を育む惑星は他に見つかっていない。太陽系外には3500個以上の惑星が見つかっており、その大きさと熱輻射量が地球と同程度の惑星も見つかっている。これらの惑星を調査し、生命保有惑星を発見することは天文・惑星科学分野の究極的な目標である。本研究は、他の計画と異なり、紫外線観測により惑星表層環境に迫るものであり、本研究により国際協力計画への参加による実現性が見えてきている。

研究成果の概要(英文)：Several large-scale projects are under study toward the discovery of an Earth-like exoplanet in the habitable zone, and observation of its atmosphere is especially intensively being studied. We proceeded to study and develop the observation method of the Earth-like planet outside the solar system by taking over those studied for planets in the solar system. As a result, high sensitivity spectrograph, this research team is in charge of developing, is planned to be onboard World Space Observatory UV (WSO-UV), the 1.7 m ultraviolet space telescope in Russia.

研究分野：惑星科学

キーワード：系外惑星 ハビタブルゾーン 地球型惑星 表層環境 高層大気

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまでに 2000 個程度の系外惑星が確認され、地球型惑星も複数検出されており、太陽系のような惑星系が普遍的ではないことも明らかとなった。今後は全天サーベイ観測が行われ、2020 年代前半までに地球型系外惑星の検出数は飛躍的に増加する見込みであり、惑星の特徴づけを目的とした計画が進められる予定となっている。太陽系周辺では、太陽より温度の低い恒星が 8 割を占めており、多くの低温度星では紫外線強度が激しく変動している。低温度星を主星とする惑星系のハビタブルゾーン(地球と総被放射量が同程度になる領域)において大気加熱源となる真空紫外線放射量は地球の数 10–数 100 倍に及ぶ。このような状況にもかかわらず、進行中の計画において真空紫外線領域は観測対象外となっており、新たな観測設備が必要な状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、太陽系内の地球惑星大気の観測によって蓄積された技術を継承し、系外惑星観測用宇宙望遠鏡装置の開発を行うことを目的として設定した。具体的には、太陽系近傍 20pc にある 2000 個程度の低温度星の真空紫外線放射量とその変動を測定できる小型紫外線望遠鏡と、地球型惑星大気の酸素原子輝線を検出可能な小型高分散分光装置の飛翔体搭載実現性を立証することを目標とした。

### 3. 研究の方法

系外惑星の大気観測には主にトランジット分光法という手法が用いられる。トランジット法では、観測者からみて惑星が恒星の前を横切る際に恒星の一部が遮蔽されるため、恒星光の時間変化を捉えることにより惑星の大きさを計測することが可能である。さらに、その際に大気原子・分子の吸収線付近の分光観測を行い、線ごとの吸収量の差から大気組成を決定するという手法はトランジット分光法と呼ばれ、系外惑星大気観測の主要な手段である。しかし、6.5m という大口径の宇宙望遠鏡 JWST を持ってしても、地球程度の小さい惑星の持つ薄い大気(約 100km)を検出することは非常に困難である。

この課題を解決するために、研究代表者は地球型惑星の高層大気の広がりに着目し、観測実現性の検討を進めた。低温度星系における強深紫外線環境では高層大気が加熱を受け、水素原子だけでなく酸素原子の高層大気が遠方まで広がる。低温度星にある地球型惑星の酸素原子大気は遠方まで高い密度を保ち、中心星光を遮蔽するという見込みのもと、大気モデルの構築、観測実現性の検討、観測装置開発を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 地球水素コロナの観測 (5 雑誌論文 )

PI として開発を担当した超小型深宇宙探査機 PROCYON 搭載用水素ライマン  $\alpha$  線カメラ LAICA のデータ解析を進め、地球の高層水素原子大気が 20 万 km 以上遠方まで広がっている様子を世界で初めて捉えることに成功した(図 1)。TWINS 衛星による観測データは地球高層大気の南北非対称性を示していたが、LAICA の観測結果は、太陽放射圧によって僅かに反太陽側に流されているものの、球対称に近い形状を示していた。本研究では、球対称な超高層大気の密度分布に用いられるチェンバレンモデルに太陽放射圧の効果を入れた大気モデルを構築し、そのモデルが本観測結果を説明できることを示した。この結果は新聞主要 4 誌他多数地方紙に掲載され、発表論文は GRL Journal Highlight に選出された。

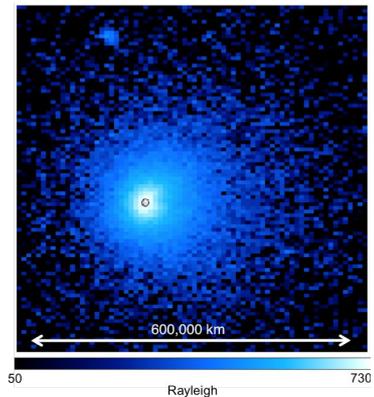


図 1 地球高層大気の広域撮像結果

#### (2) 太陽系外惑星地球型惑星の高層水素大気シミュレーション研究(5 雑誌論文 )

地球水素コロナの観測結果が、太陽系外惑星科学の研究者にも注目されるようになり、スイス・ジュネーブ観測所の研究者チームと共同研究を進め、(1)の研究で構築した大気モデルを用い、系外の地球型惑星の高層水素大気のシミュレーションを行い、ハッブル宇宙望遠鏡や次世代の大型計画 LUVOIR での観測実現性を示した。

#### (3) ロシア 1.7m 宇宙望遠鏡計画 WSO-UV への参加・装置提供(5 雑誌論文 )

本計画の開始当初は、数 10cm–1m 級の宇宙望遠鏡によって系外惑星の紫外線観測を実現することを検討していたが、地球水素コロナの観測結果や系外惑星を紫外線で観測するアイデアが評価され、ロシアが 2020 年中頃の打ち上げを目指して計画中の 1.7m 紫外線宇宙望遠鏡である World Space Observatory-UV(WSO-UV)の開発チームから、装置提供について検討するように依頼を受けた。WSO-UV は日本単独では実現が困難な規模の計画であり、本計画の目的を達成するために、当初は想定もしていなかった絶好の機会である。そこで、30cm 級の望遠鏡の開発に注力するよりも、WSO-UV に搭載する観測装置の開発に注力し、ロシア側と協議を進めながら開発を進めた。WSO-UV への参加には、計画を推進するロシア側の宇宙機関

ROSCOSMOS と日本側の宇宙機関である JAXA 間の協定締結が必要となる。本研究で得られた成果を基にし本研究代表者を主査として、JAXA 宇宙理学委員会に「系外惑星紫外分光 WG」の設立を申請した結果、設立が承認された。また、計画を主導するロシア天文研究所(INASAN)、ロシア宇宙科学研究所(IKI)と、日本の宇宙科学研究所の 3 機関における協定(Letter of Intent)が各所長によって署名されており、ROSCOSMOS-JAXA 間の協定締結に向けた準備が整いつつある。

#### (4)真空紫外線用高感度検出器の開発(5 学会発表 )

MCP の表面形状の変更(図 2)により実効開口率を向上させる可能性があることに着目し基礎開発を進めた。従来品は、表面が平面であるため開口率が 60%程度以下であったが、新しく試作したファネル型は表面処理によって開口率を 90%以上まで向上させた。これにより深紫外線領域における検出効率が 1.7 倍程度まで向上することを試作品によって実験的に確認した。深紫外線領域での量子効率は 10 年以上向上しておらず、特に開発費用が高額となる大口径の宇宙望遠鏡に搭載する場合は、1.7 倍の効率向上は非常に価値が高い。

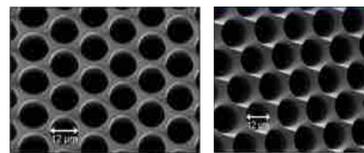


図 2 従来型 MCP(左)とファネル型(右)形状加工により実効開口率を向上

#### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 16 件)

Watanabe S., Hirabayashi M., Hirata N., Hirata N., Noguchi R., Shimaki Y., Ikeda H., Tatsumi E., Yoshikawa M., Kikuchi S., Yabuta H., Nakamura T., Tachibana S., Ishihara Y., Morota T., Kitazato K., Sakatani N., Matsumoto K., Wada K., Senshu H., Honda C., Michikami T., Takeuchi H., Kouyama T., Honda R., Kameda S. et al., Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu-A spinning top-shaped rubble pile, *Science* 364, 2019, 268-272, 査読有

10.1126/science.aav8032

Kitazato K., Milliken R. E., (略), Kameda S. et al., The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy, *Science* 364, 2019, 272-275 10.1126/science.aav7432, 査読有

Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S. et al., The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy, *Science* 364, 2019, 252, 査読有

10.1126/science.aaw0422

dos Santos Leonardo A., Bourrier Vincent, Ehrenreich David, Kameda Shingo, Observability of hydrogen-rich exospheres in Earth-like exoplanets, *Astronomy & Astrophysics* 622, 2019, A46, 査読有

10.1051/0004-6361/201833392

Hirabayashi Masatoshi, Tatsumi Eri, Miyamoto Hideaki, Kameda Shingo, et al., The Western Bulge of 162173 Ryugu Formed as a Result of a Rotationally Driven Deformation Process, *The Astrophysical Journal* 874, 2019, L1, 査読有

10.3847/2041-8213/ab0e8b

Tinetti Giovanna, Drossart Pierre, Eccleston Paul, (略), Shingo Kameda, et al., A chemical survey of exoplanets with ARIEL, *Experimental Astronomy* 46, 2018, 135-209, 査読有

10.1007/s10686-018-9598-x

Tavrov Alexander, Kameda Shingo, Yudaev Andrey, Dzyuban Ilia, Kiselev Alexander, Shashkova Inna, Korablev Oleg, Sachkov Mikhail, Nishikawa Jun, Tamura Motohide, Murakami Go, Enya Keigo, Ikoma Masahiro, Narita Norio, Stellar imaging coronagraph and exoplanet coronal spectrometer: two additional instruments for exoplanet exploration onboard the WSO-UV 1.7-m orbital telescope, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 4, 2018, 1, 査読有

10.1117/1.JATIS.4.4.044001

Iwagami N., Sakanoi T., Hashimoto G., Sawai K., Ohtsuki S., Takagi S., Uemizu K., Ueno M., Kameda S., Murakami S., Nakamura M., Ishii N., Abe T., Satoh T., Imamura T., Hirose C., Suzuki M., Hirata N., Yamazaki A., Sato T., Yamada M., Yamamoto Y., Fukuhara T., Ogohara K., Ando H., Sugiyama K., Kashimura H., Kouyama, T., Initial products of Akatsuki 1- $\mu\text{m}$  camera, *Earth, Planets and Space* 70, 2018, 70-75, 査読有

10.1186/s40623-017-0773-5

Suzuki H., Yamada M., Kouyama T., Tatsumi E., Kameda S., Honda R., Sawada H., Ogawa N., Morota T., Honda C., Sakatani N., Hayakawa M., Yokota Y., Yamamoto Y., Sugita S., Initial inflight calibration for Hayabusa2 optical navigation camera (ONC)

for science observations of asteroid Ryugu, Icarus 300, 2018, 341-359, 査読有

10.1016/j.icarus.2017.09.011

Shinnaka, Y., N. Fougere, H. Kawakita, S. Kameda, M. R. Combi, S. Ikezawa, A. Seki, M. Kuwabara, M. Sato, M. Taguchi, I. Yoshikawa, Imaging observations of the hydrogen coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in September 2015 by the PROCYON/LAICA, Astronomical Journal 153, 2017, 76-81, 査読有

10.3847/1538-3881/153/2/76

Kameda S., Ikezawa S., Sato M., Kuwabara M., Osada N., Murakami G., Yoshioka K., Yoshikawa I., Taguchi M., Funase R., Sugita S., Miyoshi Y., Fujimoto M., Ecliptic North-South Symmetry of Hydrogen Geocorona, Geophysical Research Letters 44, 2017, 11,706-11,712, 査読有

10.1002/2017GL075915

Ogohara K., Takagi M., Murakami S., Horinouchi T., Yamada M., Kouyama T., Hashimoto G., Imamura T., Yamamoto Y., Kashimura H., Hirata N., Sato N., Yamazaki A., Satoh T., Iwagami N., Taguchi M., Watanabe S., Sato T., Ohtsuki S., Fukuhara T., Futaguchi M., Sakanoi T., Kameda S. 他, Overview of Akatsuki data products: definition of data levels, method and accuracy of geometric correction, Earth, Planets and Space 69, 2017, 167, 査読有

10.1186/s40623-017-0749-5

Cho Yuichiro, Kameda Shingo, Okuno Mamoru, Horiuchi Misa, Shibasaki Kazuo, Wagatsuma Ryo, Aida Yusuke, Miura Yayoi N., Yoshioka Kazuo, Okazaki Ryuji, Sugita Seiji, Experimental characterization of elastomeric O-rings as reusable seals for mass spectrometric measurements: Application to in situ K<sup>2</sup>Ar dating on Mars, Advances in Space Research 60, 2017, 1453-1462, 査読有

10.1016/j.asr.2017.07.002

Kameda S., Suzuki H., Takamatsu T., Cho Y., Yasuda T., Yamada M., Sawada H., Honda R., Morota T., Honda C., Sato M., Okumura Y., Shibasaki K., Ikezawa S., Sugita S., Preflight Calibration Test Results for Optical Navigation Camera Telescope (ONC-T) Onboard the Hayabusa2 Spacecraft, Space Science Reviews 208, 2017, 17-31, 査読有

10.1007/s11214-015-0227-y

〔学会発表〕(計13件)

村上豪, 亀田真吾, 生駒大洋, 成田憲保, 塩谷圭吾, 寺田直樹, 小玉貴則, 紫外線による系外惑星大気のトランジット観測計画, 第19回惑星圏研究会(招待講演), 2018

S. Kameda et al., Hydrogen Geocorona Observed by PROCYON/LAICA, AOGS2018(招待講演)(国際学会), 2018

S. Kameda et al., FAR-EXTENDED HYDROGEN EXOSPHERE OBSERVED BY PROCYON/LAICA, COSPAR2018(国際学会), 2018

S. Kameda, G. Murakami, et al., VUV Spectroscopy for terrestrial exoplanetary exosphere, EPSC2018(国際学会), 2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 村上 豪

ローマ字氏名: MURAKAMI, go

所属研究機関名: 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名: 宇宙科学研究所

職名: 助教

研究者番号(8桁): 50734026

(2)研究協力者

研究協力者氏名：長田 直也  
ローマ字氏名：OSADA, naoya

研究協力者氏名：堀越 寛己  
ローマ字氏名：HORIKOSHI, hiroki

研究協力者氏名：生駒 大洋  
ローマ字氏名：IKOMA, masahiro

研究協力者氏名：成田 憲保  
ローマ字氏名：NARITA, norio

研究協力者氏名：塩谷 圭吾  
ローマ字氏名：ENYA, keigo

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。