

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05277

研究課題名（和文）近赤外分光観測による小惑星の水・含水鉱物の探査

研究課題名（英文）Exploration of water and hydrated minerals on asteroids using near infrared spectroscopy

研究代表者

長谷川 直（Hasegawa, Sunao）

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・主任研究開発員

研究者番号：10399553

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：東京大学天文センターはチリ共和国アタカマ砂漠のチャナントル山頂標高5640mに口径6.5m望遠鏡の地上最高地点天文台(TAO望遠鏡)の建設を進めている。この観測サイトは非常に乾燥した気候で、宇宙からの赤外線を吸収する水蒸気が大気中に少なく、天体が放つ赤外線を観測するのに適しており、太陽系内天体の含水鉱物・水氷・吸着水といった水に関連する物質の計測には、地上で最も優れた観測サイトである。そこで本研究では、太陽系内天体の含水鉱物・水氷・吸着水の実施のために、TAO望遠鏡に搭載する中間赤外分光撮像装置MIMIZUKUに近赤外分光機能を持たせるための開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本科研費の研究開発によって、宇宙望遠鏡でしか行えなかった小惑星の水・含水鉱物の探査のため高精度の観測が地上望遠鏡において実行可能になった。また期間内に行われた分光観測による小惑星研究によって、太陽系の起源や進化の理解が深まった。

研究成果の概要（英文）：The Institute of Astronomy, the University of Tokyo is proceeding with the construction of the TAO 6.5-m telescope, the highest ground-based telescope at an altitude of 5640m on the summit of Cerro Chajnantor at Atacama in northern Chile. This observation site has a very dry climate, and the amount of water vapor that absorbs infrared rays from outer space is small in the atmosphere, making it suitable for observing infrared rays emitted by celestial bodies. It is the most excellent observation site on the ground for measuring substances related to water. For the purpose of the observation of hydrated minerals and water ice on asteroids and comets, therefore, in this study, we developed near-infrared spectroscopic function on the Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe (MIMIZUKU) mounted on TAO telescope.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 含水鉱物

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。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽系の固体物質はケイ酸塩鉱物が大きな割合を占めるが、木星以遠の外惑星の衛星や彗星、太陽系外縁天体には氷として水の存在が確認されている。水が太陽系内にどのように分布しているかを調べることは、太陽系の温度環境の変遷を解き明かすために重要な情報になる。特に小惑星は、大部分がその形成以降に熱的進化をしておらず、太陽系形成時の情報を保持していると考えられている。木星軌道より内側の領域において、小惑星上の水は氷として存在するだけでなく、水とケイ酸塩鉱物の水質変成作用によって含水鉱物を生成する。含水鉱物は氷の昇華温度以上になっても安定に存在するため、生成後の温度変化にもリセットされない水の存在を示す重要なマーカーになる。このように、水の存在の探査には、水氷および含水鉱物の存在を多様な小惑星で明らかにすることが必要である。

(2) しかし、小惑星の水氷や含水鉱物の存在を調べるのは容易ではない。地上で採集される隕石は、地球の水や水蒸気で汚染されるため、水の含有量を正しく測定するのは難しい。一方、小惑星を望遠鏡で観測すれば地球の水に汚染されないサンプルを計測できるが、含水鉱物の吸収が見られる 2.55-2.85 ミクロンや水氷の吸収がある 3.1 ミクロン付近には、地球大気の水蒸気による吸収があり、地上からの観測は非常に困難である。今までの地上観測はこの大気吸収の波長帯を除いた観測が主流であった。最新の 3 ミクロン帯の観測的研究である Takir & Emery (2012) では、ハワイ・マウナケア山頂 (標高 4200m) の NASA Infrared Telescope Facility を使って 28 個の小惑星の 3 ミクロン帯の観測を行ったが、やはり 2.50-2.85 ミクロンのデータが欠けており、鉱物種の同定には至っていないのが現状である。

(3) 2006 年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」には 2.5-5 ミクロンの分光機能があり、我々はこれを用いて 70 個の小惑星を観測し、世界で初めて多くの小惑星における含水鉱物の吸収をはっきり捉えることに成功した。これらの結果から、小惑星における 3 ミクロン帯のスペクトルのパターンは、吸収がない、水質変成起源の含水鉱物に起因する 2.7 ミクロンに吸収のピークがある、太陽風の陽子によって後天的に生成された含水鉱物に起因する 2.8 ミクロンに吸収のピークがある、といった 3 種類に大別される。

(4) しかし、このような含水鉱物の特徴を統計的に議論するには、吸収のパターンのサンプル数が数十個では不十分であり、その 10 倍以上の観測データが必要である。ここで、地上観測による安定的な観測体制が確立できれば、宇宙望遠鏡のような厳しい観測制約によらない幅広い種類の小惑星のデータ取得が可能になる。

### 2. 研究の目的

東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センターはチリ共和国アタカマ砂漠のチャナンツール山頂標高 5640m に地上最高地点の天文台の建設を進めている。この観測サイトは非常に乾燥した気候で、宇宙からの赤外線を吸収する水蒸気が大気中に少なく、天体が放つ赤外線を観測するのに適しており、太陽系内天体の含水鉱物・水氷・吸着水といった水に関連する物質の計測には、地上で最も優れた観測サイトである。本天文台内に設置される口径 6.5m 望遠鏡 (TAO 望遠鏡) に搭載する中間赤外分光撮像装置 MIMIZUKU に、近赤外分光チャンネルを設置することで、地上から最も精度の高い小惑星の 3 ミクロン帯の含水鉱物・水氷・吸着水の分光観測を実現することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究は以下の 3 段階で実施する。この 3 段階を通じて、MIMIZUKU に近赤外線分光機能を搭載し、小惑星の水・含水鉱物の探査ができる機能を実現する。

(1) 第 1 段階は近赤外線分光機能を MIMIZUKU に追加するために必要なグリズム等の光学要素を開発し、それを MIMIZUKU に実装することである。

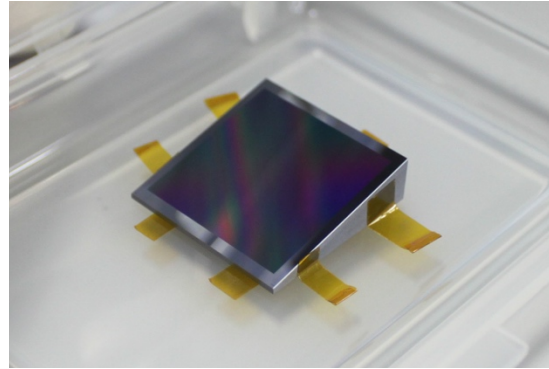
(2) 第 2 段階は MIMIZUKU をハワイ・マウナケア山頂のすばる望遠鏡に搭載し、本研究において重要な高精度の大気透過率校正を実現するフィールドスタッカーの機能実証を行い、その機能実証を行うことである。

(3) 科研費実行途中で発生した近赤外線検出器の動作不安定が確認された。検出器の正常動作は本科研費の前提であったので、本科研費範囲外であるが、検出器が動作しないと観測が実行できない為に、本科研費研究で対応することとした。これが第 3 段階である。

また、並行して近赤外分光手法を用いた小惑星観測的研究を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 近赤外線分光機能を MIMIZUKU に追加するために、平成 27-29 年度にかけて、分光光学系の製作、その成功確認が行われ、性能に問題がないことを確認した（右上図は製作された分散素子であるグリズム）。



(2) 平成 30 年度に MIMIZUKU は国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡において試験観測を行うこととなり（右下図はすばる望遠鏡のカセグレン焦点面に装着された MIMIZUKU）、本研究において重要な高精度の大気透過率較正を実現するフィールドスタッカーの機能実証を行い、その機能実証に成功した。具体的には、本研究で観測する 3 ミクロン帯と同等に大気透過率の悪い 20 ミクロン帯において、過去の観測装置では大気透過率較正がうまくいかず良い分光データが得られなかったものが、フィールドスタッカーを利用することでその取得が可能となることを実証した。これにより、3 ミクロン帯の分光観測も可能になるものと考えられる。



(3) 平成 31・令和元年度は、懸案であった近赤外線検出器の改修作業を行った。具体的には検出器を制御するための電子回路設計の改良を進め、これを用いた検出器の冷却駆動試験を実施した。この駆動試験の中で検出器制御のためのクロックの最適化も実施した。これらの改修作業の結果、検出器が入射光に対し正常に反応するようになり、駆動試験を行い、正常な読み出し呼び出しの実現を行うことに成功した。

以上を持って MIMIZUKU に近赤外線分光機能を搭載させ、小惑星の水・含水鉱物の探査ができる機能の開発に成功した。

また、関連の近赤外分光手法的アプローチによる小惑星観測的研究を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hasegawa Sunao, Hiroi Takahiro, Ohtsuka Katsuhito, Ishiguro Masateru, Kuroda Daisuke, Ito Takashi, Sasaki Sho	4. 巻 71
2. 論文標題 Q-type asteroids: Possibility of non-fresh weathered surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103_1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz088	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する
1. 著者名 Hasegawa Sunao, 他 4 2 名	4. 巻 70
2. 論文標題 Physical properties of near-Earth asteroids with a low delta-v: Survey of target candidates for the Hayabusa2 mission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114-1~29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy119	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する
1. 著者名 Usui Fumihiko, Hasegawa Sunao, Ootsubo Takafumi, Onaka Takashi	4. 巻 71
2. 論文標題 AKARI/IRC near-infrared asteroid spectroscopic survey: AcuA-spec	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-1~41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy125	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Matsumoto Toru, Hasegawa S., Nakao S., Sakai M., Yurimoto H.	4. 巻 303
2. 論文標題 Population characteristics of submicrometer-sized craters on regolith particles from asteroid Itokawa	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 22~33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.12.017	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Kuroda Daisuke, Ishiguro Masateru, Watanabe Makoto, Hasegawa Sunao, Sekiguchi Tomohiko, Naito Hiroyuki, Usui Fumihiko, Imai Masataka, Sato Mitsuteru, Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 611
2. 論文標題 Significantly high polarization degree of the very low-albedo asteroid (152679) 1998 KU2	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A31-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201732086	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Hasegawa Sunao, Kuroda Daisuke, Yanagisawa Kenshi, Usui Fumihiko	4. 巻 69
2. 論文標題 Follow-up observations for the Asteroid Catalog using AKARI Spectroscopic Observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 99(1~17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx117	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 T. Kamizuka et al.	4. 巻 9908
2. 論文標題 Development status of the mid-infrared two-field camera and spectrograph MIMIZUKU for the TAO 6.5-m Telescope	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 99083W, 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2231565	査読の有無 無
オープンアクセス 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 該当する

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 S. Hasegawa, D. Kuroda, K. Yanagisawa, and F. Usui
2. 発表標題 Follow-up observations for AKARI/IRC near-infrared asteroid spectroscopic survey (AcuA-spec)
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, T. Ootsubo, and T. Onaka
2 . 発表標題 AKARI/IRC near-infrared asteroid spectroscopic survey: AcuA-spec
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, and T. Ootsubo
2 . 発表標題 Near-infrared asteroid spectroscopic survey with AKARI: Dehydration process of C-complex asteroids revealed by spectral features in 2.7 $\mu\text{m}$ band
3 . 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, T. Ootsubo, K. Amano, and T. Nakamura
2 . 発表標題 ehydration Process of C-Complex Asteroids Revealed Through Near-Infrared Spectroscopy
3 . 学会等名 Asteroid Science in the Age of Hayabusa2 and OSIRIS-REx ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Usui
2 . 発表標題 Search for Water on Asteroids with TAO/MIMIZUKU
3 . 学会等名 Mid-infrared Astronomy --- Past 20 years & Future 20 years
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hasegawa, T. Hiroi, K. Ohtsuka, M. Ishiguro, D. Kuroda, T. Ito, and S. Sasaki
2. 発表標題 Q-type asteroids: Possibility of having non-fresh weathered surfaces
3. 学会等名 51st Lunar and Planetary Science Conference
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井文彦、長谷川直、大坪貴文
2. 発表標題 近赤外線分光観測による小惑星族母天体の内部構造探査計画
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川直、廣井孝弘、大塚勝仁、石黒正晃、黒田大介、伊藤孝士、佐々木晶
2. 発表標題 Q型小惑星：風化した表層である可能性
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井文彦、長谷川直、大坪貴文、塩谷圭吾、宮田隆志、上塚貴史、高遠徳尚、北里宏平
2. 発表標題 近赤外線分光観測による小惑星母天体の内部構造探査
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Ootsubo, F. Usui, S. Hasegawa, T. G. Mueller, V. Ali-Lagoa, J. Pyo, A. Takahashi, D. Ishihara, S. Takaba, and H. Kawakita
2. 発表標題 Comets, asteroids and interplanetary dust as seen in near- to far-infrared with AKARI
3. 学会等名 42hd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hasegawa 他 4 2 名
2. 発表標題 Spectroscopic, spectrophotometric, and periodic observations for low delta-v near-Earth asteroids
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, T. Ootsubo, and T. Nakamura
2. 発表標題 Toward an innovative asteroid mineralogy: comparative study of asteroid and meteorite spectra in the 3-micron band
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川直 他 4 2 名
2. 発表標題 はやぶさ2のバックアップ天体搜索の為の観測：近地球小惑星の物理特性
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 臼井文彦、長谷川直、大坪貴文
2. 発表標題 赤外線天文衛星「あかり」近赤外線分光観測による小惑星の含水鉱物探査
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 臼井文彦
2. 発表標題 天文観測による小惑星の水関連物質探査
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Usui
2. 発表標題 AKARI Near-Infrared Asteroid Spectroscopic Survey
3. 学会等名 Thermal Models for Planetary Science III (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, T. Ootsubo, T. Onaka
2. 発表標題 Exploring Hydrated Minerals on Asteroids with AKARI
3. 学会等名 50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, and T. Ootsubo.
2. 発表標題 Near-infrared asteroid spectroscopic survey with AKARI
3. 学会等名 Asteroids, Comets, Meteors 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川直、黒田大介、柳澤顕史、白井文彦
2. 発表標題 Bus-DeMeo分類と物理観測から推定される小惑星表層組成: C,Cb,B型小惑星表層における水氷の存在の可能性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, and T. Ootsubo
2. 発表標題 Investigation of hydrated minerals on the main belt asteroids from the AKARI near-infrared spectroscopy
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 F. Usui, S. Hasegawa, T. Ootsubo, and T. Onaka
2. 発表標題 Search for Water on Asteroids with the AKARI Near-infrared Spectroscopy
3. 学会等名 The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI archive: from galaxies and stars to planets and life (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上塚貴史、宮田隆志 他
2. 発表標題 中間赤外線観測装置 MIMIZUKU の開発・性能評価試験
3. 学会等名 日本天文学会 2017 年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上塚貴史、宮田隆志 他
2. 発表標題 TAO 6.5 m 望遠鏡用中間赤外線装置 MIMIZUKU の輸送後性能評価試験
3. 学会等名 日本天文学会 2018 年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kamizuka et al.
2. 発表標題 Development status of the mid-infrared two-field camera and spectrograph MIMIZUKU for the TAO 6.5-m Telescope
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Kamizuka
2. 発表標題 Exploring hydrous materials on asteroids with TAO/MIMIZUKU
3. 学会等名 International Workshop:Planetary Science and Space Exploration (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 F. Usui
2. 発表標題 Infrared Asteroid Survey with AKARI
3. 学会等名 International Workshop: Planetary Science and Space Exploration (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川直 他
2. 発表標題 あかり3 $\mu$ m分光観測小惑星のYJHK分光観測
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川直 他
2. 発表標題 あかり3ミクロン分光観測小惑星の近赤外YJHK分光観測
3. 学会等名 天体の衝突物理の解明 (XII)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Kamizuka
2. 発表標題 Hydrous silicate survey program with TAO/MIMIZUKU
3. 学会等名 33rd Grain Formation Workshop
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 上塚貴史 他
2. 発表標題 小天体の含水鉱物探査にむけた MIMIZUKU 近赤外線分光機能の検討
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 臼井文彦 他
2. 発表標題 天文衛星および地上望遠鏡による小惑星の含水鉱物探査
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2015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
研究分担者	上塚 貴史  (KAMIZUKA TAKAFUMI)  (30613509)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任助教   (12601)	
研究分担者	臼井 文彦  (USUI FUMIHIKO)  (30720669)	神戸大学・理学研究科・特命助教   (14501)	
研究分担者	高遠 徳尚  (TAKATO NARUHISA)  (50261152)	国立天文台・ハワイ観測所・教授   (62616)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	宮田 隆志  (MIYATA TAKASHI)  (90323500)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授       (12601)	