

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05381

研究課題名(和文)「あかり」赤外線全天画像に基づく黄道光微細構造の起源と進化の研究

研究課題名(英文) Study on small-scale structures of the zodiacal emission observed with AKARI all-sky survey

研究代表者

大坪 貴文(Ootsubo, Takafumi)

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・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50377925

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)：本研究では、日本の赤外線天文衛星「あかり」の全天観測データを基に、微細な構造まで詳細に再現した太陽系内惑星間塵雲モデル・黄道光モデルを構築する手法の確立に取り組んだ。「あかり」の遠赤外線全天画像から微細構造である小惑星ダストバンド構造の抽出をおこない、これまで確認は得られていなかった形成途中の微細な小惑星ダストバンドの存在についても、高い精度でとらえることができた。また、黄道光放射の中間赤外線分光観測スペクトル中のシリケート・フィーチャ形状に関して、黄緯(観測領域)による違いを初めてとらえ、更にオールト雲彗星と木星族彗星起源で、ダスト特性に差があることを初めて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星間塵の空間分布を理解することは、その供給源と供給メカニズムを明らかにすることであり、今回の研究で、彗星・小惑星から定常的に惑星間塵が供給されているという現在の太陽系のダイナミックな進化が明らかになってきた。また、この惑星間塵の空間分布は、今後深宇宙を探査機が航行する際にも、探査機の仕様や軌道を決定するためのひとつの条件を与えるものになると期待される。

研究成果の概要(英文)：In the interplanetary space of our Solar System, small dust grains are widely distributed. The thermal emission of interplanetary dust dominates the all-sky diffuse radiation in the mid- to far-infrared wavelength region. AKARI, the Japanese infrared astronomical satellite, detects the circumsolar ring and zodiacal dust-band structures in the far-infrared. Furthermore, in the AKARI far-infrared map, partial young dust-band candidates can be seen, which are corresponding to the possible bands suggested by the past infrared satellite observations. These small-scale structures are important to investigate the recent (< 1 Myr) evolution of the dust in the Solar System. We also analyzed mid-infrared spectroscopic data of the zodiacal emission obtained with AKARI. We detect the difference in the detailed feature shapes in the zodiacal emission spectra among various ecliptic latitudes.

研究分野：太陽系科学

キーワード：惑星間塵 黄道光 黄道光 ケイ酸塩鉱物 彗星 小惑星 「あかり」 赤外線衛星

## 1. 研究開始当初の背景

我々の太陽系の惑星間空間には、惑星・準惑星・衛星・小惑星・彗星以外にも、粒径が $\mu\text{m}\sim\text{cm}$ 程度の固体微粒子が広く分布している。この固体微粒子を惑星間塵と呼び、太陽光を散乱、あるいは吸収・熱再放射し、黄道光・黄道放射として空全体で明るく光っている。1983年打ち上げの赤外線衛星IRASや1989年のCOBE/DIRBEの観測は、赤外線で全天を観測し、それまでぼんやりとした構造しか知られていなかった黄道光・惑星間塵の分布に様々な空間微細構造があることを発見した。これらの微細構造は、小惑星・彗星などから放出された固体微粒子の軌道運動に対応していることが明らかになってきているが、IRAS、COBEの空間分解能はそれほど高くなく、微細構造を詳細に調べることはできていなかった。日本の赤外線天文衛星「あかり」は、2006年2月に打ち上げられ、約1年半をかけて中間・遠赤外線ですべての全天を観測した。「あかり」はCOBE/DIRBEよりも高い空間分解能を有し、この全天データを用いれば、より微細な構造をとらえた新しい黄道光・惑星間塵モデルを構築することができる。

## 2. 研究の目的

本研究は、赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイデータを基に、衛星観測・地上観測の赤外線分光観測を併用することで、これまで進めてきた太陽系内惑星間塵雲モデル・黄道光モデルの構築を、3年間で進展させることを目的とするものである。この研究で明らかにする空間微細構造を取り入れることで、過去のモデルでは不完全だった微細な構造まで詳細に再現することを目指す。また、黄道光の赤外線スペクトルと空間微細構造を対応づけ、スペクトル解析から導出した惑星間塵の鉱物特性と供給源である彗星・小惑星を対応づける研究に始めて取り組むものである。

## 3 研究の方法

本研究では、3年間をかけて「あかり」黄道光分布中の微細構造について詳細な検証をおこない、太陽系内の惑星間塵空間分布について明らかにする。特に以下の2点に注力をおいて研究を進める。

- (1) 観測データから、まず黄道光の大局構造を差し引き、全天観測画像に画像補正処理を施し、様々な空間微細構造を抽出する。他の赤外線衛星や地上観測と比較しながら、ダストの供給源である彗星・小惑星との照合を進め特定する。
- (2) 微細構造に関して、「あかり」の中間赤外分光観測や他の観測と比較しながら、ダストの鉱物特性をしらべる。ダストの供給源である彗星・小惑星そのもののダスト特性と比較しながら、放出後の力学的軌道進化メカニズムについて探っていく。

## 4. 研究成果

- (1) 赤外線天文衛星「あかり」の遠赤外線全天画像データ(65, 90, 140, 160  $\mu\text{m}$ )は、現在広く一般に対し公開されているが、これは黄道光・黄道放射研究にとっても重要なデータである。IRASやCOBE/DIRBEなど過去の赤外線衛星の観測により、黄道放射の空間微細構造として黄経方向に広がった小惑星ダストバンドが検出されていたが、「あかり」の遠赤外線画像でも短波長側(65, 90  $\mu\text{m}$ )で黄道面付近と黄緯 $\pm 10^\circ$ の数MJy/srレベルのダストバンドが明確に検出できていることを確認した(Ootsubo et al., 2016)。

そこで、まずこの構造の黄緯、幅、強度をガウシアン・フィッティングを基にモデル化し、小惑星ダストバンドの表面輝度全天分布のテンプレート作成を完了した。過去のIRAS衛星で確認されたダストバンドのうち、 $\sim 1\text{--}2$  MJy/srの黄緯 $\pm 1.4^\circ$ 、 $\pm 2.1^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ の主要な3つを明確に検出した。長波長側の140, 160  $\mu\text{m}$ の2つの波長帯では明確なダストバンドは検出されなかった。この3つの小惑星ダストバンドが、ほぼ全黄経に渡って広がっている比較的古い時代に多量のダストが放出された主要なダストバンドであると考えられる。

さらに高空間分解・高精細な構造をとらえるために、ハイパスフィルタなどの画像処理を施すことで、黄緯 $\pm 1.4^\circ$ 、 $\pm 2.1^\circ$ と $\pm 10^\circ$ の主要3バンドに加え、過去の中間赤外線観測で存在を示唆されていた黄緯 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 13^\circ$ 、 $\pm 17^\circ$ 付近の、より淡いバンド構造を抽出することができた。遠赤外線波長域でも $3\sigma$ レベルで検出できている可能性が高い。この微細なバンド構造の中でも

特に±17° バンドは主要 3 バンドに次いで明るく、DIRBE のデータを基にした黄道光モデルにも組み込まれているが、観測はこれまで中間赤外線のみで、遠赤外線での明確な検出は「あかり」が初めてである。

特定の黄経の領域にだけ断続的に広がっているダストバンド構造は、現在から ~1 Myr 以内の衝突で形成された形成途中の比較的若いダストバンドだと考えられ、「あかり」全天画像により複数の形成途中のバンド構造を遠赤外線ですべて検出することに成功した(図1)。±17° バンドは ~2.2 × 10<sup>5</sup> 年前の衝突で形成された小惑星族である Emilkowalski cluster 起源であると考えられており、また全黄経の一部にしか広がっておらず、ダストバンド形成途中の状態を見ていると考えられる。「あかり」遠赤外線画像中でも、この ±17° バンドは一部の黄経でのみ検出されている。さらに ±6° バンドも検出し、これは Datura cluster 起源と推定されている。

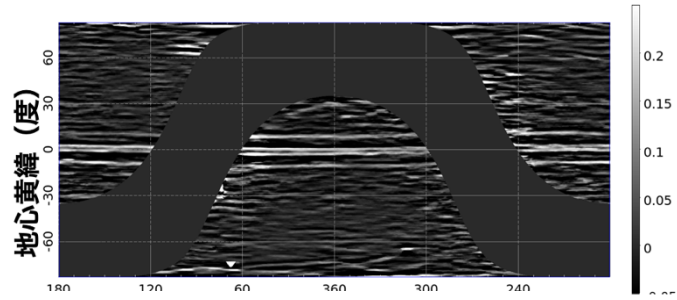


図1: ハイパス・フィルタを施した後の、「あかり」の遠赤外線全天画像。黄道面付近に主要なダストバンドが見られる。±6° , ±13° , ±17° 付近には、形成途中と思われるダストバンド構造が見られる。

- (2) 惑星間塵の性質を知る手がかりとして、黄道放射スペクトルに見られる波長 10 μm 周辺のシリケートフィーチャーにも着目し、その形状を様々な天域で比較した。「あかり」で取得した 74 視線方向の黄道放射のスリット分光スペクトル(波長 5.4-12.3 μm) の全てにおいて、波長 9-12 μm で連続光に対する超過成分を検出し、その形状から各視線方向に含まれる惑星間塵の性質を特定した。全天域における典型的な惑星間塵の性質として、1 μm 以下のサイズの結晶質シリケートを含み、特に特異な結晶形状を持つ Enstatite 粒子もそこに含まれることがわかった。また、高黄緯の惑星間塵、つまり彗星起源と想定される塵ほど、低い Forsterite/(Enstatite+Forsterite) 比、Olivine/(Pyroxene+Olivine) 比を示すことがわかった(Takahashi et al., 2019)。

一方で、惑星間塵の供給源である彗星ダストについて、中間赤外線の地上分光観測をおこなった。公転周期 6.6 年の短周期彗星であるジャコビニ・ツィナー 彗星(21P/Giacobini-Zinner) は、10 月りゅう座流星群(旧称ジャコビニ流星群)の母天体と考えられている。この彗星は、過去の観測から揮発性の高い分子が枯渇していることが分かっており、一方で、より複雑な有機分子が存在する可能性が指摘されていた。われわれは、すばる望遠鏡搭載の冷却中間赤外線分光撮像装置 (COMICS) を用いて 2005 年 7 月 5 日 (UT) に観測されたジャコビニ・ツィナー 彗星の中間赤外線分光観測データを詳細に解析した。その結果、ケイ酸塩鉱物起源の放射フィーチャに加えて、彗星ではこれまで明確に検出されたことのない 8.2, 8.5, 9.2 μm のフィーチャを、初めてそのスペクトル中に検出した(図2)。これらはケイ酸塩鉱物では説明できない未同定赤外バンドであり、起源は多環芳香族および脂肪族炭化水素などの複雑な有機分子である可能性が高い(Ootsubo et al., 2019)。

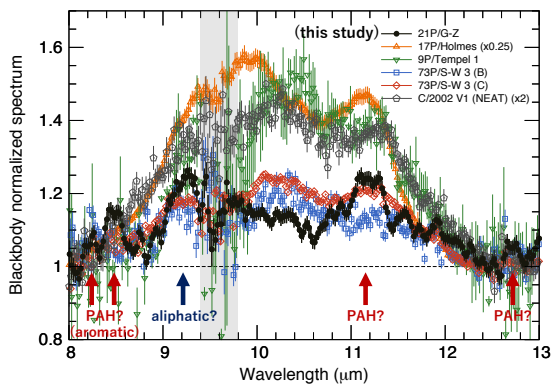


図2: ジャコビニ・ツィナー 彗星の中間赤外線相対放射強度スペクトル(観測スペクトルを黒体放射で割ったもの)。比較のために、他の様々な彗星のスペクトルもプロットしている([1] の図を改変したもの)。ジャコビニ・ツィナー 彗星では、他の彗星では見られない特徴的な輝線バンドがみられ、複雑な有機分子由来だと考えられる。

#### <引用文献>

Ootsubo et al., 2016, PASJ, 68, id.35

Takahashi et al., 2019, PASJ, 71, id.110

Ootsubo et al., 2020, Icarus, 338, A113450

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 1件）

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 ~ 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 Yamagishi Mitsuyoshi, Yamamura Issei, Mizuki Toshiyuki, Ootsubo Takafumi, Baba Shunsuke, Usui Fumihiko, Onaka Takashi	4. 巻 71
2. 論文標題 AKARI mid-infrared slit-less spectroscopic catalogue	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 3-1 ~ 3-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy132	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 Ohsawa Ryou, Sako Shigeyuki, Sarugaku Yuki, Usui Fumihiko, Ootsubo Takafumi 他	4. 巻 165
2. 論文標題 Luminosity function of faint sporadic meteors measured with a wide-field CMOS mosaic camera Tomo-e PM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 281 ~ 292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2018.09.006	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 Arimatsu K., Tsumura K., Usui F., Shinnaka Y., Ichikawa K., Ootsubo T., Kotani T., Wada T., Nagase K., Watanabe J.	4. 巻 3
2. 論文標題 A kilometre-sized Kuiper belt object discovered by stellar occultation using amateur telescopes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 301 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0685-8	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 Shinnaka Yoshiharu, Ootsubo Takafumi, Kawakita Hideyo, Yamaguchi Mitsuru, Honda Mitsuhiko, Watanabe Jun-ichi	4. 巻 156
2. 論文標題 Mid-infrared Spectroscopic Observations of Comet 17P/Holmes Immediately After Its Great Outburst in 2007 October	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 242-1 ~ 242-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aadfea	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 Ishihara D., Kondo T., Kaneda H., Suzuki T., Nakamichi K., Takaba S., Kobayashi H., Masuda S., Ootsubo T., Pyo J., Onaka T.	4. 巻 603
2. 論文標題 A likely detection of a local interplanetary dust cloud passing near the Earth in the AKARI mid-infrared all-sky map	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A82-1 ~ A82-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201628954	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 Ishihara Daisuke, Takeuchi Nami, Kobayashi Hiroshi, Nagayama Takahiro, Kaneda Hidehiro, Inutsuka Shu-ichiro, Fujiwara Hideaki, Onaka Takashi	4. 巻 601
2. 論文標題 Faint warm debris disks around nearby bright stars explored by AKARI and IRSF	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A72-1 ~ A72-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201526215	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 Ueda Takahiro, Kobayashi Hiroshi, Takeuchi Taku, Ishihara Daisuke, Kondo Toru, Kaneda Hidehiro	4. 巻 153
2. 論文標題 Size Dependence of Dust Distribution around the Earth Orbit	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 232-1 ~ 232-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa5ff3	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 Ootsubo Takafumi, Doi Yasuo, Takita Satoshi, Matsuura Shuji, Kawada Mitsunobu, Nakagawa Takao, Arimatsu Ko, Tanaka Masahiro, Kondo Toru, Ishihara Daisuke, Usui Fumihiko, Hattori Makoto	4. 巻 32
2. 論文標題 SMALL-SCALE STRUCTURE OF THE ZODIACAL DUST CLOUD OBSERVED IN FAR-INFRARED WITH AKARI	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of The Korean Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 63 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5303/PKAS.2017.32.1.063	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 Takahashi Aoi, Ootsubo Takafumi, Matsuhara Hideo, Sakon Itsuki, Usui Fumihiko, Chihara Hiroki	4. 巻 71
2. 論文標題 Mid-infrared spectroscopy of zodiacal emission with AKARI/IRC	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 110-1 ~ 110-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz095	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 Ootsubo Takafumi, Kawakita Hideyo, Shinnaka Yoshiharu, Watanabe Jun-ichi, Honda Mitsuhiko	4. 巻 338
2. 論文標題 Unidentified infrared emission features in mid-infrared spectrum of comet 21P/Giacobini-Zinner	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113450	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Takafumi Ootsubo
2. 発表標題 Mid-infrared observations of cometary silicate dust
3. 学会等名 DUSTY VISIONS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ootsubo, Takafumi; Ishihara, Daisuke; Hasegawa, Sunao; Pyo, Jeonghyun; Usui, Fumihiko; Kawakita, Hideyo; Mueller, Thomas; Ali-Lagoa, Victor; Takahashi, Aoi; Takaba, Sachi
2. 発表標題 Comets, asteroids and interplanetary dust as seen in near- to far-infrared with AKARI
3. 学会等名 42nd COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takafumi Ootsubo, Yoshiharu Shinnaka, Hideyo Kawakita, Mitsuhiko Honda, and Jun-ichi Watanabe
2. 発表標題 Estimating the formation region of the cometary nuclei based on the infrared observations of cometary dust
3. 学会等名 The 11th meeting on Cosmic Dust (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白井 文彦, 長谷川 直, 大坪 貴文, 中村 智樹
2. 発表標題 天文観測と隕石分析で探る C 型小惑星の熱的進化過程
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大坪 貴文, 白井 文彦, 土井 靖生, 他「あかり」チーム
2. 発表標題 「あかり」遠赤外線全天画像がとらえた小惑星ダストバンドの形成過程
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会
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2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋葵, 松原英雄, 大坪貴文, 左近樹, 臼井文彦
2. 発表標題 「あかり」中間赤外線分光観測による異なる母天体起源の惑星間塵の性質比較
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大坪貴文, 瀧田怜, 川田光伸, 北村良実, 中川貴雄, 土井靖生, 松浦周二, 臼井文彦, 有松亘, 石原大助
2. 発表標題 「あかり」遠赤外線全天画像に見られる形成途中の小惑星ダストバンド
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 Takafumi Ootsubo
2. 発表標題 Faint young asteroidal dust bands observed with AKARI
3. 学会等名 The 10th meeting on Cosmic Dust (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Takafumi Ootsubo
2. 発表標題 Global and small-scale structure of the zodiacal dust cloud observed with AKARI
3. 学会等名 The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI archive (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takafumi Ootsubo
2. 発表標題 Infrared Observations of Zodiacal Dust: Cometary or Asteroidal Origin?
3. 学会等名 PERC International Symposium on Dust & Parent Bodies (IDP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高羽幸, 金田英宏, 石原大助, 深川美里, 安田晃子, 小林浩, 大坪貴文
2. 発表標題 「あかり」中間赤外線全天サーベイデータを用いた黄道光ダストバンドの形成プロセスの研究
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 新中善晴, 大坪貴文, 河北秀世, 山口充, 本田充彦, 渡部潤一
2. 発表標題 Birth-place of comet 17P/Holmes from its mass fractions of minerals
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takafumi Ootsubo
2. 発表標題 Cometary dust: A perspective from mid-infrared spectroscopy
3. 学会等名 The 12th meeting on Cosmic Dust (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大坪貴文, 河北秀世, 新中善晴, 本田充彦, 渡部潤一
2. 発表標題 ジャコビニ・ツィナー彗星(21P/Giacobini-Zinner)の中間赤外線スペクトルに見られる未同定赤外バンド
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takafumi Ootsubo
2. 発表標題 Mid-infrared observations and mineralogy of comet dust grains with Subaru/COMICS
3. 学会等名 Subaru Telescope 20th Anniversary (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大坪貴文, 河北秀世, 新中善晴, 本田充彦, 渡部潤一
2. 発表標題 未同定赤外バンド放射から推定するジャコビニ・ツィナー彗星 (21P/Giacobini-Zinner) の原始太陽系円盤中での形成領域と温度環境
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020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	石原 大助  (Ishihara Daisuke)  (30507835)	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・ 研究開発員   (82645)	
連携 研究者	臼井 文彦  (Usui Fumihiko)  (30720669)	神戸大学・理学研究科・特命助教   (14501)	
連携 研究者	土井 靖生  (Doi Yasuo)  (70292844)	東京大学・総合文化研究科・助教   (12601)	