

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800110

研究課題名（和文）惑星系形成過程におけるジャイアント・インパクト現象への観測的アプローチ

研究課題名（英文）Observational Approaches to Giant Impact Events in Planet Formation Processes

研究代表者

藤原 英明 (Fujiwara, Hideaki)

国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員

研究者番号：70581445

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：ジャイアント・インパクトのような衝突現象は、惑星系形成過程において重要な役割を果たすと考えられる。本研究では、衝突現象やそこでのダスト生成と密接に関係があると考えられるデブリ円盤などについて多角的な観測を行い、様々な天体におけるダストの振る舞いについて調査した。その結果、新たなデブリ円盤候補天体を複数見つけ、また幾つかの天体についてはダストの物理・化学的特性を得ることができた。また、ダスト円盤系のテンプレートでもある土星リングについて中間赤外線輝度の時間変動性を見出し、その要因を探った。

研究成果の概要（英文）：Impact events such as giant impacts should play a significant role in the planet formation processes. In this study, we made various observations of debris disks and other objects that could be related to impact events and dust generation, and investigated the behavior of dust grains in multiple systems. We discovered some new candidates of warm debris disks, and succeeded to obtain the physical and chemical characteristics of debris dust around some systems. We also found the temporal variability of the mid-infrared brightness contrast in Saturn's rings, and discussed its origin.

研究分野：天文学

キーワード：惑星系形成 ダスト 赤外線観測

1. 研究開始当初の背景

現在広く受け入れられている惑星系形成のシナリオでは、若い恒星の周囲にできるガスとダスト（微粒子粒子）の円盤（原始惑星系円盤）の中で、もともと星間空間に存在していたマイクロメートルサイズの小さなダストが集まって微惑星に成長し、さらにその微惑星同士が衝突・合体することで、地球のような岩石質惑星が作られると考えられている。また、より進化した星の周囲では、微惑星同士が衝突・合体する際に生成された大量の破片によって、ダストの円盤が二次的に作られるとも考えられている。この円盤は、惑星の材料のデブリ（残骸）でできているため、デブリ円盤と呼ばれている。まさに惑星系形成の現場であると考えられ、非常に興味深い研究対象である。

2. 研究の目的

近年、このデブリ円盤の一部がジャイアント・インパクト現象と強い関係にある可能性が指摘されている。ジャイアント・インパクトは月の形成を説明する現在最も有力な説として広く知られているが、地球型惑星を作るのに必須の現象と考えることもでき、月の形成のみならず、惑星系の誕生と進化を理解する上で大変興味深い現象である。

このジャイアント・インパクト現象を直接的に観測する事は現在の観測技術では極めて難しいが、デブリ円盤やその中に存在するダスト粒子との関連から間接的に吟味できる可能性がある。そこで本研究では、デブリ円盤天体そのものや、ダストが存在するその他の天体について主に可視赤外線での観測を行うことで、多量のダスト放出源としてのジャイアント・インパクト現象とその惑星系形成過程における位置付けを検討する。

3. 研究の方法

大規模・精度な赤外線全天サーベイ観測データを用いることで高温デブリ天体の探査を行い、サンプルを増やす事を第一の軸として研究を進める。さらに既知のサンプルについては、「あかり」・WISEなどのサーベイ観測データに加え、過去に得られた、あるいは新たに得られる地上赤外線観測データを統合することで、系全体におけるダストの空間分布を明らかにし、ダストの種別・局在性・変動性などと微惑星・原始惑星の巨大衝突との関連を吟味する事を目指す。

また、太陽系外のダスト円盤系のテンプレートとなりうる太陽系内天体の観測も行う。特に、固体粒子の集合体である惑星リングや、惑星系における主要なダスト放出源として働く彗星などの時間変動を追う事で、突発的なダスト生成と惑星系形成の関係についての吟味を試みる。太陽系内・太陽系外両方の天体を観測することで、統一的な理解を狙う。

4. 研究成果

(1) デブリ円盤候補天体のサーベイ

赤外線天文衛星「あかり」の中間赤外線全天サーベイ観測に基づく点源カタログを使い、2MASSやIRSFによる近赤外線観測データとのマッチングから、ジャイアント・インパクト現象との関連が期待される高温ダストを持つデブリ円盤候補天体の探査を行った。

その結果、調査した678の恒星のうち、53天体が波長18マイクロメートルで顕著な赤外線超過を示す事を見出した。このうち9天体は新たに発見されたデブリ円盤候補天体である。

さらに見つかったデブリ円盤候補天体について、円盤進化モデルとの比較を行った。その結果、少なくとも9天体については中心性の年齢に対して大きな赤外線超過があり、定常的なデブリ円盤生成・進化のモデルでは説明できず、ジャイアント・インパクト現象のような突発的なダスト生成イベントとの関連が示唆される事が分かった。

(2) 高温デブリ円盤ダストの分光観測

赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ点源カタログで同定されたデブリ円盤のうち、南天に分布している天体についてはヨーロッパ南天天文台VLTに搭載された中間赤外線観測装置VISIRを用いて、北天に分布している天体についてはすばる望遠鏡搭載の中間赤外線観測装置COMICSを用いて、10マイクロメートル帯の分光観測を行った。想定していたデータは概ね取得でき、過去に取得されたデータも含めて、制約が概ね完了した。

さらに、観測した天体の中で顕著なダストフィーチャーが検出された一つの太陽型星のデブリ円盤(図1)について、フィーチャーの形状に基づく組成分析を行った。その結果、このデブリ円盤ではサイズの小さな(サブマイクロメートル程度)の非晶質シリケートダストが支配的であり、比較的大きな(マイクロメートル程度)の非晶質シリケートや結晶質シリケートの存在比が大変少ないことがわかった。既知のデブリ円盤の中では稀な組成を持つデブリ円盤であると考えられ、ジャイアント・インパクト現象との関連についてさらなる議論を進めている。

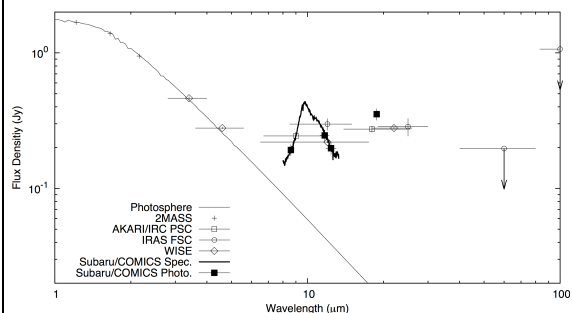


図1: 「あかり」で見つかった高温デブリ円盤天体の、すばる望遠鏡COMICSによる中間赤外線スペクトルエネルギー分布。波長10

マイクロメートル付近に、小さな非晶質シリケートに起因する顕著なダストフィーチャーが見られる。

(3) 土星リングの中間赤外線観測

すばる望遠鏡 COMICS で取得された土星リング粒子の中間赤外線観測データの解析を行った。ジャイアント・インパクトによって生成された可能性も指摘されている土星のリングはデブリ円盤のテンプレートとして捉えられ得ることを踏まえ、中間赤外線放射の時間変動について解析を行った。特に今年度は探査機「カッシーニ」で得られた遠赤外線データや光学的厚み情報を付加することで、粒子の温度やその変動について詳細な情報を得ることができた。

さらに 2005 年～2008 年の間に生じたリングの中間赤外線輝度コントラストの「反転」に着目し、その要因を調べた (図 2)。その結果、この「反転」は、リング粒子間衝突の突発的な変動でなく、むしろ太陽や地球に対するリングの開き角の変化によって引き起こされる可能性が高いと結論付けられた。土星の自転軸は公転面に対して大きく傾いており、太陽に対するリングの開き角は約 15 年周期で大きく変化する。その際、リング粒子の温度や地球から見たときの充填率がリングの開き具合に応じて変わること、中間赤外線でのリング輝度が変化し、結果としてコントラストが逆転すると考えられる。

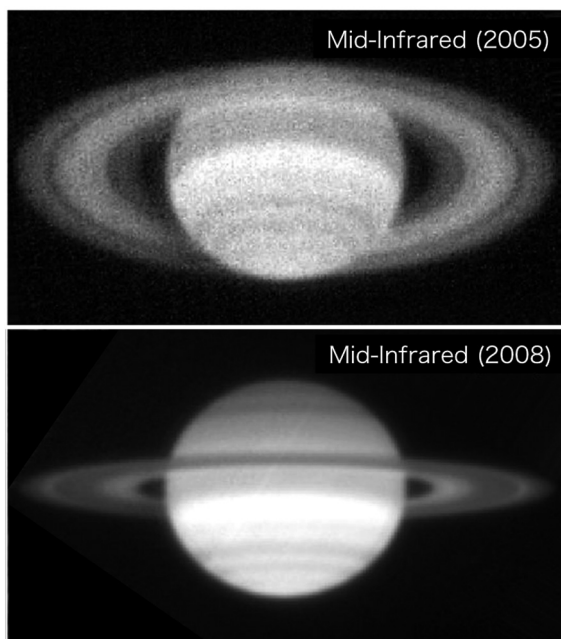


図 2 : すばる望遠鏡 COMICS の観測データにより発見された、2005 年～2008 年における中間赤外線輝度コントラストの「反転」現象。2005 年には暗かった C リングとカッシーニのすき間が、2008 年には明るくなっている。これは、太陽・地球に対するリングの開き角の変化に応じ、粒子の温度や見かけの充填率が大きく変化したことによる「季節変動」であると考えられる。

(4) その他の関連天体の観測

デブリ円盤の前駆天体であると考えられる原始惑星系円盤について、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡による観測で得られた高空間分解能画像に基づき、円盤内のダストの分布やその非対称性、惑星形成との関連について議論した。

また、太陽系内において主要なダスト放出源である彗星について、すばる望遠鏡を用いて可視光線で観測を行い、形態学的特性やその時間変動について探った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

(1) Fujiwara, Hideaki; Morishima, Ryuji; Fujiyoshi, Takuya; Yamashita, Takuya, Seasonal variation of the radial brightness contrast of Saturn's rings viewed in mid-infrared by Subaru/COMICS, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Volume 599, A29 (2017)
<https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201527529>

(2) Ishihara, Daisuke; Takeuchi, Nami; Kobayashi, Hiroshi; Nagayama, Takahiro; Kaneda, Hidehiro; Inutsuka, Shu-ichiro; Fujiwara, Hideaki; Onaka, Takashi, Faint warm debris disks around nearby bright stars explored by AKARI and IRSF, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Volume 601, A72 (2017)
<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2017/05/aa26215-15/aa26215-15.html>

(3) Ishihara, Daisuke; Takeuchi, Nami; Kondo, Toru; Kobayashi, Hiroshi; Kaneda, Hidehiro; Inutsuka, Shu-ichiro; Oyabu, Shinki; Nagayama, Takahiro; Fujiwara, Hideaki; Onaka, Takashi, Debris Disks and the Zodiacal Light Explored by the Akari Mid-Infrared All-Sky Survey, *Publications of The Korean Astronomical Society*, 査読有, vol. 32, issue 1, pp. 67-71 (2017)
http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=CMHHCI_2017_v32n1_67

(4) C. Snodgrass; et al. (incl. H. Fujiwara), The 67P/Churyumov - Gerasimenko observation campaign in support of the Rosetta mission, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 査読有, Vol. 375, No. 2097, 20160249 (2017)
<http://rsta.royalsocietypublishing.org>

(5) Yoshiko Kataza Okamoto; Hirokazu Kataza; M. Honda; T. Yamashita; T. Fujiyoshi; T. Miyata; S. Sako; H. Fujiwara; I. Sakon; M. Fukagawa; M. Momose; T. Onaka, A Circumstellar Disk around HD 169142 in the Mid-Infrared (N-Band), The Astronomical Journal, 査読有, in press (2017)

(6) Muto, Takayuki; Tsukagoshi, Takashi; Momose, Munetake; Hanawa, Tomoyuki; Nomura, Hideko; Fukagawa, Misato; Saigo, Kazuya; Kataoka, Akimasa; Kitamura, Yoshimi; Takahashi, Sanemichi Z.; Inutsuka, Shu-ichiro; Takeuchi, Taku; Kobayashi, Hiroshi; Akiyama, Eiji; Honda, Mitsuhiko; Fujiwara, Hideaki; Shibai, Hiroshi, Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Volume 67, Issue 6, 122 (2015)
<https://academic.oup.com/pasj/article-lookup/doi/10.1093/pasj/psv098>

(7) Honda, M.; Maaskant, K.; Okamoto, Y. K.; Kataza, H.; Yamashita, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Fujiyoshi, T.; Sakon, I.; Fujiwara, H.; Kamizuka, T.; Mulders, G. D.; Lopez-Rodriguez, E.; Packham, C.; Onaka, T., High-resolution 25 μ m Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 804, Issue 2, 143 (2015)
<http://iopscience.iop.org/0004-637X/804/2/143/>

(8) Yagi, Masafumi; Koda, Jin; Furusho, Reiko; Terai, Tsuyoshi; Fujiwara, Hideaki; Watanabe, Jun-Ichi, Initial Speed of Knots in the Plasma Tail of C/2013 R1(Lovejoy), The Astronomical Journal, 査読有, Volume 149, Issue 3, 97 (2015)
<http://iopscience.iop.org/1538-3881/149/3/97/>

[学会発表] (計 11 件)

(1) Hideaki Fujiwara, Dust in Warm Debris Disks, NARIT Friday Seminars, February 17, 2017, Chiang Mai Thailand.

(2) Hideaki Fujiwara; Ryuji Morishima; Takuya, Fujiyoshi; Takuya, Yamashita, Seasonal variation of the radial brightness contrast of Saturn's rings viewed in mid-infrared by Subaru/COMICS,

Ices in the Solar System, January 23-26, 2017, Madrid, Spain.

(3) Hideaki Fujiwara, Introduction to Research with Subaru Telescope, Tropical school in undergraduate astronomy: astronomical observations, December 7-11, 2016, Quy Nhon, Vietnam.

(4) Hideaki Fujiwara, Dust in Warm Debris Disks, SEARCH FOR LIFE: FROM EARLY EARTH TO EXOPLANETS, December 11-16, 2016, Quy Nhon, Vietnam.

(5) 藤原英明, デブリ円盤ダストの観測, サイズ分布ビッグピクチャー研究会, 2016年2月11-12日, 千葉工業大学スカイツリータウン(R)キャンパス, 墨田区, 東京都, 日本.

(6) Hideaki Fujiwara, Observational Research with Subaru Telescope, SEAYAC 2015, December 4-5, 2015, Krabi, Thailand.

(7) Hideaki Fujiwara, Infrared Observations of Warm Debris Disks, Exoplanet in Lund 2015, May 6-8, 2015, Lund, Sweden.

(8) Hideaki Fujiwara; Takuya, Yamashita; Takuya, Fujiyoshi, Multi-Band Mid-Infrared Observations of Saturn's Rings, Ground and space observatories: a joint venture to planetary science, March 2-5, 2015, Santiago, Chile.

(9) Hideaki Fujiwara, Warm Debris Disks Proved by AKARI Observations, East Asian Young Astronomers Meeting 2015, February 9-12, 2015, Taipei, Taiwan.

(10) Hideaki Fujiwara, Warm Debris Disks, JCMT Science Workshop 2014, September 1-2, 2014, National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo, Japan.

(11) Hideaki Fujiwara, Warm Debris Disks Proved by AKARI Observations, THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, July 9-11, 2014, Oxford, UK.

[図書] (計 1 件)

(1) 井田茂; 田村元秀; 生駒大洋; 関根康人 編 (執筆者として藤原英明を含む), 系外惑星の事典, 朝倉書店, 2016.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

国立天文台ハワイ観測所（すばる望遠鏡）
2017年2月23日プレスリリース
中間赤外線で見えた土星リングの姿 ～明るく輝く「カッシーニのすき間」～

Press Release from Subaru Telescope,
February 23, 2017
Saturn's Rings Viewed in the Mid-infrared
Show Bright Cassini Division
<https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2017/02/23/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 英明 (FUJIWARA, Hideaki)
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員
研究者番号：70581445

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

MARSHALL, Jonathan (MARSHALL, Jonathan)
ニューサウスウェルズ大学・理学部・研究員

EIORA, Carlos (EIORA, Carlos)
マドリッド自治大学・理学部・教授

王 挺貴 (WANG, Tinggui)
中国科学技術大学・天文系・教授

石原 大助 (ISHIHARA, Daisuke)
名古屋大学・理学研究科・特任講師
研究者番号：30507835

山下 卓也 (YAMASHITA, Takuya)
国立天文台・TMT推進室・教授
研究者番号：00211631

藤吉 拓哉 (FUJIYOSHI, Takuya)
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員