

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400230

研究課題名(和文) 彗星・デブリ円盤ダストは変成した星間塵か？それとも原始惑星系円盤凝縮物か？

研究課題名(英文) Are dust particles in comets and debris disks altered prestellar interstellar dust or protoplanetary disk condensates?

研究代表者

木村 宏 (Kimura, Hiroshi)

神戸大学・理学研究科・理学研究科研究員

研究者番号：10400011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究によって、カッシーニ、スターダスト、ロゼッタ探査機による星間ダストと彗星ダストのデータや、ハッブル宇宙望遠鏡による星間ガスや地上近赤外線干渉計によるデブリ円盤の観測データを分析したところ、星間ダストと彗星・デブリ円盤ダストの元素組成だけでなくその粒子ごとの組成の均一・不均一性の違いが明らかになった。こうした結果から、彗星・デブリ円盤ダストは変成した星間ダストではなく、原始惑星系円盤凝縮物であるという結論に至った。

研究成果の概要(英文)：In this research, by analyzing space mission data from Cassini, Stardust, and Rosetta for interstellar dust and cometary dust as well as astronomical observation data of interstellar gas by Hubble Space Telescope and of debris disks by ground-based near-infrared interferometers, we have shown the differences in the chemical composition and its homogeneity/inhomogeneity between interstellar dust and dust in comets and debris disks. We conclude from our results that primitive dust particles in comets and debris disks do not originate from prestellar interstellar dust, but from protoplanetary disk condensates.

研究分野：天文学

キーワード：星間ダスト 局所星間雲 元素存在量 有機物 シリケイト

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内・国外の研究動向

近年の赤外線宇宙望遠鏡による高波長分解能スペクトル観測によって、主系列星周りのデブリ円盤を構成するダストに関して物質科学的アプローチによる研究が可能になった。デブリ円盤の中間赤外線スペクトルでは、マグネシウムに富む結晶シリケート(フォルステライト)特有の熱放射ピークが検出され、彗星コマの赤外線スペクトルと酷似していることが報告されている。太陽系や系外惑星系が形成された分子雲の元素組成に大きな違いがない(宇宙存在度の存在)のであれば、これはごく自然な結果であると考えられる。現在のところ、結晶シリケートの形成メカニズムについては、「星間ダストを構成する非晶質シリケートのアニーリング」と「原始惑星系円盤のガスから凝縮」という2つの説が提案されている。しかし、そのメカニズムの解明は、惑星系の始原物質が何かを明らかにする上での重要課題である。言い換えれば、結晶シリケートの形成メカニズムの解明によって、彗星・デブリ円盤ダストは熱変成した星間ダストか? それとも原始惑星系円盤凝縮物か? という問いへの解を提供する。

太陽系始原天体に関しては、1980年代に欧州やソ連のハレー彗星探査機でダストの元素組成がその場測定され、2000年代には米国のスターダスト探査機がサンプルリターンによって彗星ダスト試料の詳細な元素組成・鉱物組成分析を可能とした。また、米国では1970年代以降、成層圏における始原天体起源の惑星間塵粒子(IDPs)の採取によって、IDPsの室内分析が行なわれてきた。2014年にはチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星にランデブーする欧州ロゼッタ探査機によって、彗星ダストの詳細なその場分析がまさに行なわれようとしている状況であった。国内では、近年、はやぶさ探査機によってS型小惑星ダストがサンプルリターンされスターダストサンプル同様の分析が進み、2014年打ち上げ予定のはやぶさ2探査機によってC型小惑星ダストがサンプルリターンされる。こうして、その場測定や室内分析によって始原天体ダストの物質科学的特徴が明らかになりつつある一方、国内・国外の研究動向を見ると、その場測定や室内分析で得られた知識が天文観測にフィードバックされていないことが窺える。観測は天文学、探査・分析は惑星科学、と異なる分野で研究が行われ知識の共有が諮られていない恐れがあった。

(2) 本研究の位置付け

本研究は、その場測定や室内分析で得られた結果に基づき天文観測を理論的に考察することで、彗星やデブリ円盤に存在するダストの起源を解明しようという革新的な試みである。こうした惑星科学と天文学を有機的に結びつける学際的なアプローチは、彗星やデブリ円盤の天文観測データのみならず宇宙ダストの物質進化を正しく理解する上で重大な役割を

果たす。

(3) 着想に至った経緯

彗星やデブリ円盤で観測された中間赤外線スペクトルを解釈する際、常套手段として、サブミクロンサイズのフォルステライト粒子から期待される熱放射スペクトルで観測データをフィッティングすることに力を注ぐ研究者が多い。しかし、フォルステライト粒子は単体で彗星に存在しないことがその場測定や室内分析により示されている。結晶・非晶質にかかわらずサブミクロンサイズのシリケートは有機物で被われ、有機物が接着剤の働きをしてサブミクロン粒子が付着成長した数十~数百ミクロンにもなる凝集体を形成している。したがって、存在しないフォルステライト粒子単体で観測データをフィッティングしても正しい理解が得られないのは自明である。研究代表者のこれまでの研究成果から、赤外線スペクトルに現れるフォルステライトに起因する熱放射ピークの波長は、有機物含有量に大きく依存することが明らかになった。さらに、彗星やデブリ円盤で観測された中間赤外線スペクトルから有機物の物理特性、特に誘電率が決定できると示唆された。有機物は紫外線照射や熱変成によって物理特性が変化し、カーボン化やグラファイト化などそれぞれのプロセスで異なった光学特性を生むため、有機物の誘電率を決定することで、有機物がどのようなプロセスを経てきたかが明らかになる。さらに、有機物の経たプロセスと結晶シリケートの形成メカニズムは無関係ではないということに着目して、有機物の誘電率が結晶シリケート形成メカニズムを解明する上でロゼッタストーンの役割を果たすのではないかとこの着想に至った。本研究で有機物の誘電率を決定することによって、彗星・デブリ円盤ダストは星間起源か原始惑星系円盤起源かに対する解を見いだせるに違いない。

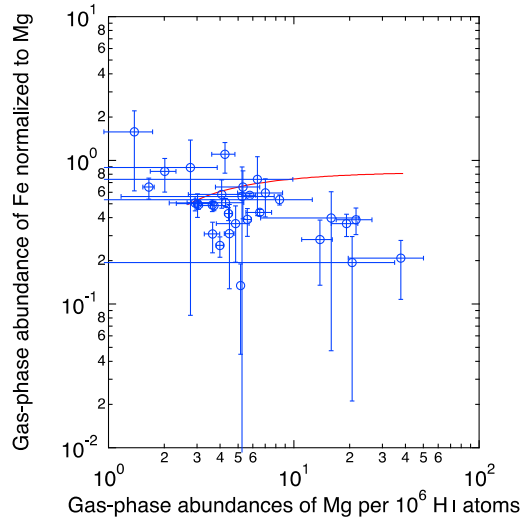
2. 研究の目的

原始惑星系円盤でダストの集積により形成された始原天体(彗星や小惑星)は、デブリ円盤ではダストの供給源である。彗星やデブリ円盤の観測データに正しい解釈を与えることは、惑星系形成初期の環境を理解する上で重要な役割を果たす。研究の全体構想では、原始惑星系円盤からデブリ円盤と遷移する環境の中で、ダストの物質進化に関する一貫した描像を確立することを目指す。その中で、本研究の具体的な目的は、近年の赤外線宇宙望遠鏡で得られた観測データから彗星・デブリ円盤ダストは変成した星間ダストか? それとも原始惑星系円盤凝縮物か? という問いに答えを出すことである。

3. 研究の方法

本研究では、『有機物の変成度』というものをしを用いて、彗星・デブリ円盤において観測された中間赤外線スペクトルに現れる熱放射ピークの波長を計ることで、彗星・デブリ円

鉄とマグネシウムの無相関（雑誌論文8より）

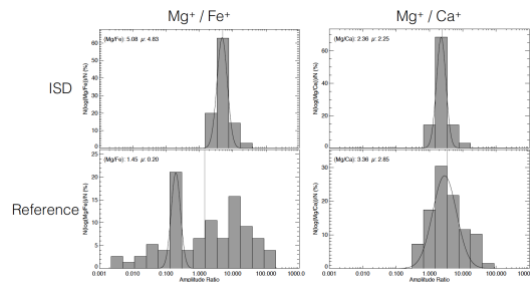


盤ダストは変成した星間ダストか原始惑星系円盤凝縮物を明らかにする予定であった。そのために、海外共同研究者や関連する研究者らの協力を得て、(1)『有機物の変成度』のものさしが使用可能なスペクトル波長の確定、(2)その場測定・室内分析に基づいたダスト熱輻射理論の検証、(3)数値計算による赤外線スペクトルモデルの構築、(4)中間赤外線スペクトルの観測データとモデルの比較、(5)スペクトル波長から有機物の誘電率の決定、(6)導出した誘電率から結晶シリケート形成メカニズムの特定、を行なう予定であった。

4. 研究成果

2014年度、スターダスト探査機でサンプルリターンされた星間ダストの分析結果が発表された (Westphal et al. 2014, Science 345, 786)。さらに、研究代表者がカッシーニ探査機における星間ダストその場分析チームに加わり、星間ダストの物質同定を行うこととなった。また、局所星間雲に関する新たな描像が提案された (Gry & Jenkins 2014, A&A 567, A58)。これらの研究で得られた知見から、星間ダストはどのような物質からなっているのかを知る有力な手がかりを得られることから、急遽、予定を変更して星間ダストの物質についての考察を行った。この変更は、当該研究の目的である「彗星・デブリ円盤ダストは変成した星間ダストか、それとも原始惑星系円盤凝縮物か、という問いに答えを見出す」上で、星間ダストの物質という基盤となる知識を得るために必要不可欠であった。局所星間雲に関する新たな描像に基づいて、星間ガスの紫外線吸収スペクトルからの元素存在量データを分析することで、星間ダストの元素組成や弱いショックによるダスト破壊の様子を洞察することができた。マグネシウム、ケイ素、及び鉄の元素存在度の相関から、シリケートに鉄を含まないことや、鉄は主に金属の形で星間ダストに存在することが分かった。

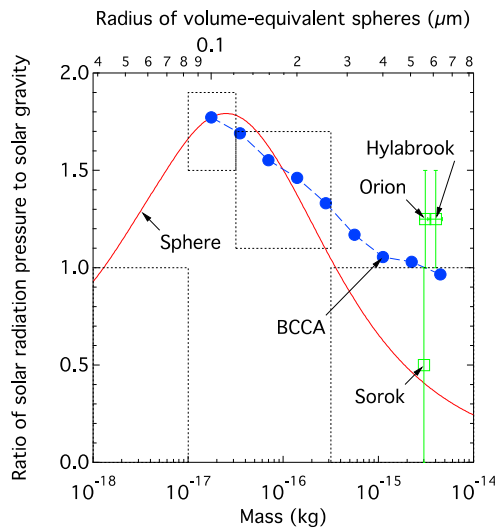
カッシーニ星間塵組成の均一性（雑誌論文4より）



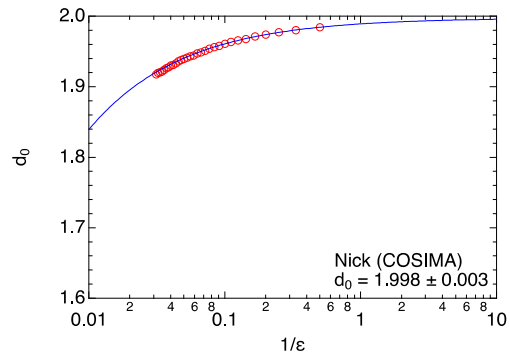
また、ガス/ダスト質量比は約120であり、有機物がダスト質量の40%を占めることが分かった。

2015年度では、(1)スターダスト探査機でサンプルリターンされた星間ダストの鉱物組成・化学組成分析結果、(2)カッシーニ探査機における星間ダストその場質量スペクトル分析結果、(3)星間空間起源ピックアップイオン(H, N, O)の空間密度その場測定から推定される星間ダストの元素組成それぞれが矛盾なく説明出来る星間ダストの物質・空隙率・サイズ分布を同定する試みを行った。その結果、星間ダストの有機物成分が、太陽から数百天文単位まで近づいた時点で昇華したと仮定すると、上記(1)~(3)が矛盾なく説明できることがわかった。これは、おそらく、太陽光で温められた有機物中のラジカルが発熱反応を起こし、爆発的なエネルギーにより急激な温度上昇の結果、有機物成分が昇華したためであろうと考えられる。さらに、カッシーニ探査機によるデータを詳細に解析したところ、サブミクロンサイズの星間ダストは空隙率が低く、シリケートはマグネシウムに富み、鉄は金属として存在していると結論付けることができた。また、星間ダストの粒子ごとの組成のばらつきは非常に小さく、彗星ダストの組成のばらつきが星間起源であるというこれまで考えられてきた論拠は薄弱であることがわかった。この結果は、ダストが星周で形成された後、星間で昇華・凝縮が繰り返していることを示唆している。同様の昇華・凝縮は星・惑星形成時のほうが起こりやすく、彗星・デブリ円盤ダストは変成した星間ダストではなく原始惑星系円盤凝縮物である可能性が高くなった。

2016年度では、中間赤外線スペクトルの計算結果と観測データとの比較を行う予定であったが、(a)スターダスト探査機でサンプルリターンされた星間ダストの星間起源に疑問が呈され (Silsbee & Draine 2016, ApJ, 818, 133; 以後 SD16)、(b)デブリ円盤の中心星近傍での近赤外線超過として発見された灼熱ダスト集積の謎が深まり (Rieke et al. 2016, ApJ, 816, 50; 以後 R16)、これら(a)及び(b)を喫緊の課題として検討する必要に迫られた。(a) SD16は、天文分野では一番良く用いられる古典的な星間ダストモデルに基づいて星間



ダストに働く太陽輻射圧を計算した結果、スターダスト探査機によってサンプルリターンされたダストと矛盾することを示した。しかし、カッシーニ探査機搭載の質量分析計による星間ダストのその場測定データに基づいて星間ダストに働く太陽輻射圧を計算した結果、SD16が呈した疑問は解決された。(b) R16は、灼熱ダスト集積問題はダストの昇華領域で恒星磁場に捕らえられたダストであり、自転周期の早い恒星ほど灼熱ダストの集積率が高いという仮説を提唱したが、近赤外線超過の観測データと恒星の自転や磁場の強さの関連を調べた結果、灼熱ダスト集積と恒星の自転や磁場の強さとは関係しないことが分かった。また、恒星磁場に捕らえられる前に昇華によってダストは消失するために、R16の提唱した仮説を却下することができた。2017年度では、(1)ロゼッタ探査機搭載の二次イオン質量分析計 COSIMA で得られた彗星ダストのデータ分析、(2)カッシーニ探査機搭載の宇宙塵アナライザ CDA で得られた星間ダストの組成分析、(3) 苦土かんらん石の異なる形状による中間赤外線スペクトルの数値計算、を行なった。(1)COSIMA や原子間力顕微鏡 MIDAS によって撮像された彗星ダストの形状は、2次元ユークリッド空間でのフラクタル次元が2であることが分かった。これは、3次元ユークリッド空間におけるフラクタル次元が2~3の間にあることを意味するが、ダスト検出器 GIADA で測定された質量と幾何断面積の関係を分析した結果、フラクタル次元が3で空隙率が0.5及び原始太陽系星雲における rainout と呼ばれるダスト成長過程と調和的であった。又、COSIMA ターゲットへの衝突および外部電場への反応を分析すると、ダスト表面は炭化が進んだ有機物と調和的であることも判明した。(2)カッシーニ探査機搭載の宇宙塵アナライザ CDA で得られた星間ダストの組成は、地球外起源ダストの GEMS (glass embedded with metal and sulfides) とは



Fe/Mg 比、Si/Mg 比が異なり、GEMS の組成が結晶の組成と太陽組成のガスに対して相補的であり GEMS が太陽系起源であることも調和的であることが分かった。(3) 苦土かんらん石の複素屈折率が有機物を含む炭素質物質の影響によって、中間赤外線スペクトルは苦土かんらん石の形状にあまり依存しないことが分かった。しかし、炭化の度合いによって赤外線スペクトルが異なる事から、さらなる精査が必要である。本研究結果を総括すると、彗星・デブリ円盤ダストは変成した星間ダストではなく原始惑星系円盤凝縮物であると結論づけられる。

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9件)

- (1) Kobayashi, M., Krüger, H., Senshu, H., Wada, K., Okudaira, O., Sasaki, S., Kimura, H., In situ observations of dust particles in Martian dust belts using a large-sensitive-area dust sensor, *Planet. Space. Sci.*, 156, 41-46, 2017. doi:10.1016/j.pss.2017.12.011.
- (2) Kimura, H., High radiation pressure on interstellar dust computed by light-scattering simulation on fluffy agglomerates of magnesium-silicate grains with metallic-iron inclusions, *Astrophys. J. Lett.*, 839, L23 (4pp), 2017. doi:10.3847/2041-8213/aa6c2d.
- (3) Kimura, H., On the photoelectric quantum yield of small dust particles, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 459, 2751-2761, 2016. doi:10.1093/mnras/stw820.
- (4) Altobelli, N., Postberg, F., Fiege, K., Trieloff, M., Kimura, H., Sterken, V.J., Hsu, H.-W., Hillier, J., Khawaja, N., Moragas-Klostermeyer, G., Blum, J., Burton, M., Srama, R.,

- Kempf, S., and Gruen, E., Flux and composition of interstellar dust at Saturn from Cassini's Cosmic Dust Analyzer. *Science*, 352, 312-318, 2016. doi:10.1126/science.aac6397.
- (5) Kimura, H., Wada, K., Senshu, H., and Kobayashi, H., Cohesion of amorphous silica spheres: Toward a better understanding of the coagulation growth of silicate dust aggregates, *Astrophys. J.*, 812, 67(12pp), 2015. doi:10.1088/0004-637X/812/1/67.
 - (6) Shalima, P., Wada, K., and Kimura, H., Ejecta curtain radiative transfer modeling for probing its geometry and dust optical properties, *Planet. Space Sci.*, 116, 39-47, 2015. doi:10.1016/j.pss.2015.03.017.
 - (7) Senshu, H., Kimura, H., Yamamoto, T., Wada, K., Kobayashi, M., Namiki, N., and Matsui, T., Photoelectric dust levitation around airless bodies revised using realistic photoelectron velocity distributions, *Planet. Space Sci.*, 116, 18-29, 2015. doi:10.1016/j.pss.2015.03.009.
 - (8) Kimura, H., Interstellar dust in the Local Cloud surrounding the Sun, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 449, 2250-2258, 2015. doi:10.1093/mnras/stv427.
 - (9) Kimura, H., Senshu, H., and Wada, K., Electrostatic lofting of dust aggregates near the terminator of airless bodies and its implication for the formation of exozodiacal disks, *Planet. Space Sci.*, 100, 64-72, 2014. doi:10.1016/j.pss.2014.03.017.

[学会発表] (計 17 件)

- (1) Arai, T., Kobayashi, M., Ishibashi, K., Yoshida, F., Kimura, H., Wada, K., Senshu, H., Yamada, M., Okudaira, O., Okamoto, T., Kameda, S., Srama, R., Krüger, H., Ishiguro, M., Yabuta, H., Nakamura, T., Watanabe, J., Ito, T., Ohtsuka, K., Tachibana, S., Mikouchi, T., Komatsu, M., Nakamura-Messenger, K., Sasaki, S., Hiroi, T., Abe, S., Urakawa, S., Hirata, N., Demura, H., Komatsu, G., Noguchi, T., Sekiguchi, T., Inamori, T., Yano, H., Yoshikawa, M., Ohtsubo, T., Okada, T., Iwata, T., Nishiyama, K., Toyota, H., Kawakatsu, Y., and Takashima, T., DESTINY+ Mission: Flyby of Geminids Parent Asteroid (3200) Phaethon and In-situ

Analyses of Dust Accreting on the Earth. 49th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA, March 19-23, 2018.

- (2) Kobayashi, M., Srama, R., Krüger, H., Arai, T., Kimura, H., DESTINY+ Dust Analyzer. 49th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA, March 19-23, 2018.
- (3) Kimura, H., Postberg, F., Altobelli, N., and Trieloff, M., Three Mysteries of Interstellar Dust Revealed by Space Missions. PERC Int'l Symposium on Dust & Parent Bodies (IDP2018), Chiba, Japan, February 26-28, 2018.
- (4) Kimura, H., The Organic-rich Carbonaceous Component of Dust Aggregates in Circumstellar Disks: Effects of its Carbonization on Infrared Spectral Features of its Magnesium-rich Olivine Counterpart. Workshop on Gaseous Debris Disks, Wako, Japan, October 10-11, 2017.
- (5) Shalima, P., Wada, K., and Kimura, H., A Radiative Transfer Model of an Impact-induced Ejecta Curtain Consisting of Dust Aggregates. Cosmic Dust, Mitaka, Japan, August 14-18, 2017.
- (6) Kimura, H., Kunitomo, M., Thebault, P., Suzuki, T. K., and Mitsuishi, I., Enormous Accumulation of Hot Dust Grains in the Immediate Vicinity of Main-sequence Stars. Cosmic Dust, Mitaka, Japan, August 14-18, 2017.
- (7) Kobayashi, M., Okudaira, O., Kurosawa, K., Okamoto, T., Senshu, H., Wada, K., Sasaki, S., Kimura, H., and Nakamura, M., Dust Sensor with a Large Detection Area Using Polyimide Film for Martian Moons Exploration. 48th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA, March 20-24, 2017.
- (8) Kimura, H., On the Photoelectric Quantum Yield of Small Dust Particles. Cosmic Dust, Sendai, Japan, August 15-19, 2016.
- (9) Senshu, H., Kimura, H., and Wada, K., The Effect of High Energy Photoelectrons on the Structure of Photoelectric Sheath and Dynamics of Dust Grains in the Sheath. Cosmic Dust, Sendai, Japan, August 15-19, 2016.

- (10) Kimura, H., Senshu, H., Wada, K., and Kobayashi, H., Cohesion of Amorphous Silica Spheres: Toward a Better Understanding of the Coagulation Growth of Silicate Dust Aggregate. International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III", Ishigaki, Japan, February 21-24, 2016.
- (11) Kimura, H. and Senshu, H., Electrostatic Lofting of Dust Particles Near the Terminator of Airless Bodies and Recent Advances in Modeling a Photoelectric Sheath. Workshop on Lunar and Interplanetary Dust Study, Macau, China, November 17, 2015.
- (12) Senshu, H., Kimura, H., and Wada, K., The Influence of High Energy Photoelectrons on the Structure of Photoelectric Sheath and Dynamics of Dust Grains. Cosmic Dust, Tokyo, Japan, August 17-21, 2015.
- (13) Kimura, H., Postberg, F., Altobelli, N., and Trieloff, M., Missing Organic Materials From Interstellar Dust Inside the Solar System. Cosmic Dust, Tokyo, Japan, August 17-21, 2015.
- (14) Wada, K. and Kimura, H., Ejecta Mass Produced at Collisions of Monomers Against Large Dust Aggregates, Cosmic Dust, Tokyo, Japan, August 17-21, 2015.
- (15) Senshu, H., Kimura, H., Wada, K., Kobayashi, M., Namiki, N., Yamamoto, T., and Matsui, T., Photoelectron Emission From an Airless Body and Dust Motion Above the Surface of the Body. Cosmic Dust, Osaka, Japan, August 4-8, 2014.
- (16) Kimura, H., Senshu, H., Wada, K., and Kobayashi, H., Cohesion of Amorphous Silica Spheres: Toward a Better Understanding of Growth of Silicate Dust Aggregates via Coagulation in Protoplanetary Disks and Molecular Clouds. Cosmic Dust, Osaka, Japan, August 4-8, 2014.
- (17) Kobayashi, M., Shibata, H., Nogami, K., Fujii, M., Miyachi, T., Ohashi, H., Sasaki, S., Iwai, T., Hattori, M., Kimura, H., Hirai, T., Takechi, S., Yano, H., Hasegawa, S., Srama, R., and Grün, E., Mercury Dust Monitor for the BepiColombo MMO. Asia Oceania Geosciences Society

11th Annual Meeting, Sapporo, Japan, July 28-August 1, 2014.

〔図書〕 (計1件)

- (1) Kimura, H., Kolokolova, L., Li, A., and Lebreton, J., Light scattering and thermal emission by primitive dust particles in planetary systems. In Light Scattering Reviews, Vol. 11, ed. A. Kokhanovsky (Berlin: Springer), Chap. 8, 363-418, 2016. doi:10.1007/978-3-662-49538-4_8.

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 宏 (KIMURA HIROSHI)
神戸大学・大学院理学研究科・理学研究科
研究員
研究者番号：10400011

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()