

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：12702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05603

研究課題名(和文) 太陽系初期における含水天体の進化：始原的隕石と彗星ダストからの検証

研究課題名(英文) Mineralogy and petrology of carbonaceous chondrites and cometary particles: Insights to the evolution of water-bearing asteroids.

研究代表者

小松 睦美 (Komatsu, Mutsumi)

総合研究大学院大学・教育開発センター・助教

研究者番号：50609732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、原始太陽系でのガスから固体への凝縮過程・始原的小惑星集積および進化を理解するため、始原的隕石の水質変成・加熱履歴の詳細な条件に制約を与えることを目的とした。隕石種の中で最も始原的なCRコンドライト隕石に着目し系統的な評価を行った結果、水質変成の程度は軽度であるものの、その度合いは幅広いことを示した。また、CR天体は母天体加熱を殆ど経験しておらず、太陽系星雲での凝縮過程から集積時の情報が良く保存されていることが分かった。一つのCR隕石中には太陽近傍で凝縮過程を経て形成された酸素同位体異常を持つシリカ結晶が含まれており、原始太陽系星雲において非平衡凝縮が生じていたことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、原始太陽系での凝縮過程から始原的小惑星の進化を理解するため、始原的隕石の水質変成・加熱履歴を詳細な条件を明らかにすることを目的とした。始原的小惑星は、原始太陽系星雲内の固体物質の形成過程から、始原的小惑星の集積過程と初期の母天体活動を保存する重要な物質である。また、始原的小惑星には水や有機物が多く含まれており、その進化を明らかにすることは、原始地球の海や生命の起源を理解するという意味でも大きな社会的意義を持つ。また本研究は「はやぶさ2」探査とも連携しており、今後「はやぶさ2」探査の帰還試料分析と本研究を発展させることで、原始太陽系での物質進化の詳細が解明されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the evolution of primitive C-type asteroids, the detailed formation history of primitive meteorites was examined. We focused on the mineralogy of Renazzo-type carbonaceous (CR) chondrites. CR chondrites are understood as one of the most primitive meteorites; however, because of the rarity of CR chondrites, their parent body is not well understood. Our results show CR chondrites escaped from thermal metamorphism, but the degree of aqueous alteration is highly variable. We also found one amoeboid olivine aggregate (AOA) in one of our samples. It contains minerals with 16O-rich compositions consistent with the nebular setting. The AOA provides direct evidence that silica condensed from gas in a CAI/AOA-forming region in our solar system indicates that gas became Si-rich as Mg condensed and may explain the origin of silica detected from infrared spectroscopy of T Tauri and asymptotic giant branch stars.

研究分野：隕石学

キーワード：原始太陽系 炭素質コンドライト 水質変成 難揮発性包有物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙観測技術の精度向上により、恒星・惑星形成領域における原始円盤の観測が実現し、これまで別個に行われていた天文的観測と小惑星物質の宇宙化学的分析を総合した議論が可能となった。一方で、探査機の小型化・低コスト化により、地球以外の太陽系天体に直接探査機を送りこみ、諸天体の「その場」観測が可能となった。代表的な例としては、1970年代のアポロ計画より途絶えていた、太陽系固体物質のサンプルリターンが可能になったことが挙げられる。2006年のNASAの彗星探査機スターダストがビルト2彗星のサンプルリターンに成功し、2010年には日本の小惑星探査機はやぶさが小惑星イトカワのサンプルリターンに成功し、太陽系の物質進化に関する知見は大きく広がった。

しかしながら、小惑星の固体物質の起源、および小惑星の経験した詳細な熱史や構成物同士の関連性については、未だ不明な点が多い。このため、原始太陽系円盤での化学的性質に関するモデルに条件を与えるには至っていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

近年の研究により、初期太陽系における物質進化は、無機鉱物・有機物・水の複雑な相互作用が関連することが明らかになってきた。すなわち、固体物質の進化に“水”が介入することで、微惑星や惑星の多様性を作り出し、地球や海、生命の原材料物質へと引き継がれたと考えられるようになった。本研究では特に、小惑星内での水の挙動に着目した。

小惑星内での水の挙動を議論する上で、始原隕石は最も重要な情報源の一つである。始原的な隕石の構成物質の中でも、CAI(Ca-Al-rich inclusions)やAOA(Amoeboid olivine aggregates;アメーバ状かんらん石集合体)と呼ばれるインクルージョンは、原始太陽系ガスから最初に作られる凝縮物であり、太陽系初期の物理的条件を保存していると考えられている。一方で、スターダスト探査機の持ち帰ったヴィルド2彗星塵の研究により、彗星塵には高温で形成される鉱物を多く含み、始原隕石と似た特徴を持つことが明らかになった。しかしながら、両者の関連性については不明な部分が多い。そこで本研究では、始原的な小惑星物質である始原隕石の特徴と、彗星塵の鉱物学的特徴から、始原的小惑星の進化について制約を与えることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、始原隕石を対象とし、鉱物学的手法による2次的な水質変成の評価を行った。国立極地研究所の南極隕石ラボラトリーと協力し、南極産の始原隕石であるCRコンドライト隕石の分析を中心に行った。CRコンドライトは、母天体形成後の熱変成の影響が少ない、貴重な種類の隕石である。しかしながら発見数が非常に限られていることから、これまで統計的な分析は殆ど行われていない。

本研究では、隕石の全岩的な特徴に加え、CAIとAOAに着目した分析も実施した。難揮発性包有物の一種であるAOAは、かんらん石とCaとAlに富む鉱物から成り立ち、溶融などの二次的作用の程度が低く、形成直後の状態を保存する物質として知られており、始原的小惑星の進化を議論する上で、重要な情報が得られると考えられる。また、始原隕石からみられる特徴について、はやぶさ2探査で得られるデータに応用することで、小惑星リュウグウの形成過程への理解へと繋げることも目標とした。

### 4. 研究成果

本研究において始原隕石の鉱物学的研究を行った結果は以下の通りである。

#### (1) CRコンドライト隕石の水質変成度の程度

9種のCRコンドライト隕石の水質変成の度合いについて評価を行った。一般的に、水質変成の程度は、層状珪酸塩鉱物の含有量により判断される。しかしながらCRコンドライトでは、層状珪酸塩の含有量は低く、多量の層状珪酸塩を形成するほどの大規模の水質変成は生じておらず、軽微な水質変成の程度を定量的に判断するのは難しい。本研究ではCRコンドライトに含まれるコンドリュール中に含まれるガラス、及び無水珪酸塩鉱物であるかんらん石、輝石の水質変成の程度を用いて評価を行った。

9種のコンドライトは、全て異なる水質変成の度合いを示した。本研究では、水質変成の度合いについて「Little」「Early to intermediate」「High」の3種類に分類し、それぞれのステージでの詳細な組織変化について記載を行った。

#### (2) CRコンドライトの有機物のグラフェン化

ラマン分光法を用いて、炭素質コンドライト中に含まれるグラフェンの特徴的なピークであるDバンド、Gバンドの値に着目した分析を行った。その結果、 $I_D/I_G$ の増加に伴い、Dバンドの半値幅は減少する傾向がみられた。先行研究のラマン分析では隕石を粉碎した粒子、または隕石から取り出した不溶性有機物のみを分析するケースが多いが、本研究では、薄片分析においても、熱変成温度の増加によってグラフェン化が進むことが確認された。

9種中8種のサンプルは、非常に低い熱変成度を示し、CMコンドライトと同様の値を示した。CRコンドライト隕石の多くは、母天体形成から殆ど加熱の影響を受けていないことがわかった。

水質変成とは明らかな相関は見られず、グラフェン化の度合いとの関連については不明瞭である。

### (3) 彗星粒子との比較研究

本研究では、CR コンドライト隕石中に AOA のかんらん石に着目し、彗星粒子との比較を行った。CR コンドライト隕石彗星中には、一つの薄片に 0~3 個程度含まれており、他の始原隕石である CM, CO, CV より少ない含有量である。CR コンドライトに含まれている AOA の特徴は、LIME (Fe-poor, Mn-rich) カンラン石を含むことである。本研究では、9 種の隕石の殆どに LIME かんらん石が含まれることを明らかにした。彗星塵にも LIME かんらん石が報告されており、CR コンドライト隕石と彗星塵の起源に関連があることを示した。

### (4) 加熱を経験した CR コンドライトの記載

本研究で分析した 9 種の隕石の内 9 種のラマンスペクトルは、始原的な特徴を示し、殆ど加熱を受けていない可能性が高い。しかしながら Y-982405 隕石は、他と異なり、グラフェン化の度合いが高い。他の種類の隕石との比較から、本隕石は 300-400°C 程度の加熱を受けていることが判明した。

隕石中に含まれる鉱物は、天体上での加熱により、化学組成に変化が生じることが知られている。Y-982405 隕石に含まれているコンドリュール、CAI、AOA に含まれる鉱物は、加熱による化学変化は見られないことが確認された。このことは、本隕石が母天体加熱ではなく、短時間の加熱を受けている可能性を示唆している。また、本隕石には、コンドリュールが決まった方向に並ぶ foliation という組織が見られ、ある時期に天体上で一方向の圧力が加わったことを示している。

以上の結果より、本隕石は、他天体による衝突加熱を受けた可能性が高い。他の隕石にはこのような特徴がみられないことから、CR 隕石母天体では、表面では局地的に衝突加熱が生じていたことが分かる。

またこれらの加熱を経験した物質が、分光的にどのような特徴を持つかについても検討した。加熱を経験した隕石は、脱水が生じ NIR の領域の吸収が大きく減少することがわかった。はやぶさ 2 探査でも、表面に加熱された物質が存在していれば、NIR 分光計で検出できる可能性があることを示した。

### (5) 太陽近くで形成された超難揮発性鉱物およびシリカの記載

本研究で分析を行った Yamato-793261 中の AOA (AOA# 4) には、AOA を構成する通常の鉱物である Mg かんらん石、Ca 輝石、Mg 輝石に加えて、超難揮発性鉱物 (Zr-Sc 酸化物、Sc-Ca 輝石) シリカが含まれることがわかった (図 1)。結晶構造を調べたところ、このシリカは、シリカの中でもより低温で結晶化する「石英」であることを同定した。この集合体に含まれる鉱物が星雲ガスから凝縮する温度は、約 1500 から 900 であったと考えられる。このように、非常に広い温度領域で鉱物が凝縮された形跡を示す集合体は、太陽系物質で初めての発見である。しかも、これらの鉱物の酸素同位体組成は、太陽組成に近い値を持つことが明らかになり、集合体の鉱物の全てが、太陽に近い場所で形成されたことが示された。しかしながらシリカは、太陽系星雲ガス組成の平衡凝縮計算では理論的には形成されない。従ってこの発見は、太陽系円盤の中心部太陽の近くに、他の鉱物が凝縮することによって化学組成が分別したガスが存在し、そこでシリカが形成された証拠であると考えられる (図 2)。

本研究成果を、米国電子ジャーナル Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) に発表した。

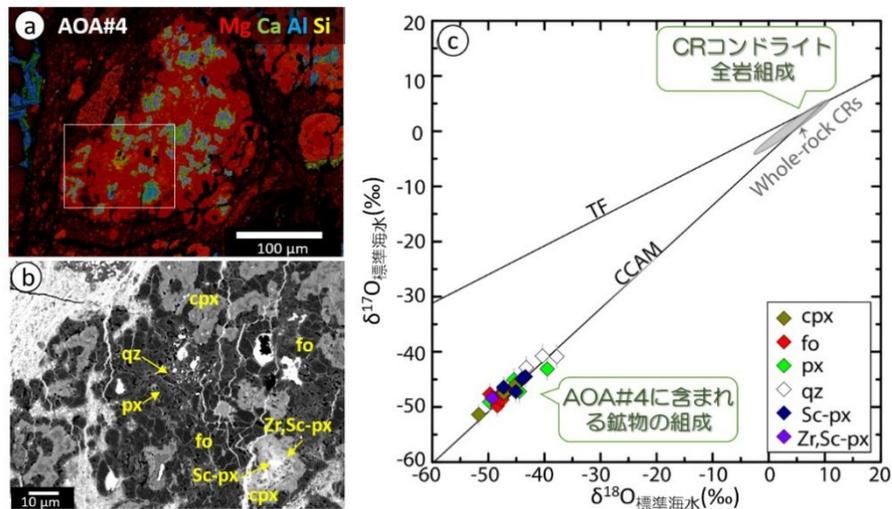


図1. AOA#4の(a)元素マップ、(b)反射電子顕微鏡像と(c)酸素同位体組成。(a) AOA#4は、マグネシウム(Mg)に富む鉱物(赤色の鉱物)と、カルシウム(Ca)とアルミニウム(Al)に富む鉱物(緑色と青色の鉱物)から成り立っている。黄色い鉱物がシリコン(Si)に富むシリカである。(b)四角で囲った部分を拡大した反射電子顕微鏡写真では、明るい色の難揮発性鉱物であるZr-Sc輝石(ZrSc-px)、Sc-Ca輝石(Sc-px)、Ca輝石(cpx)と暗い色の鉱物であるMgかんらん石(fo)、Mg輝石(px)、シリカ(qz)が共存している。(c)地球外物質の酸素同位体組成は、CCAM(炭素質コンドライト無水鉱物)線上にプロットされることが知られている。AOA#4に含まれる酸化物は、CCAM線上でも特に、太陽に近い酸素同位体組成を持つことが明らかになった。

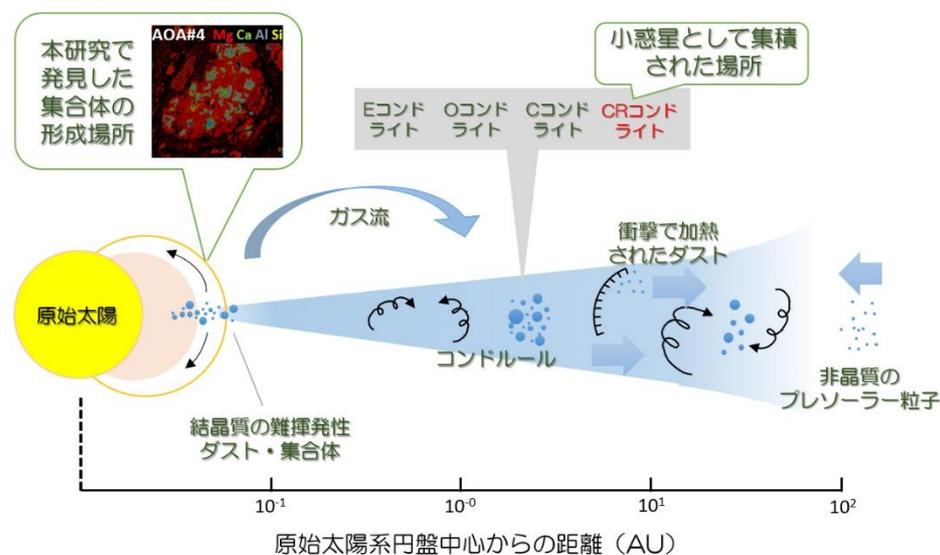


図2. 原始太陽系円盤系星雲の模式図。今回発見した集合体(AOA#4)は、原始太陽近くで形成された後、小惑星帯付近まで飛ばされ、コンドリュールや低温のダストと共に小惑星として集積したと考えられる。(Scott and Krot, 2005; Nakashima et al., 2012を改訂)

#### <引用文献>

- Scott E.R.D. and Krot A.N. (2005) Chondritic meteorites and the high-temperature nebular origins of their components. In Chondrites and the Protoplanetary Disk, A. N. Krot, E. R. D. Scott, and B. Reipurth editors, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser. 341, 15-53.
- Nakashima, D., Ushikubo, T., Joswiak, D. J., Brownlee, D. E., Matrajt, G., Weisberg, M. K., and Kita, N. T. (2012). Oxygen isotopes in crystalline silicates of comet Wild 2: A comparison of oxygen isotope systematics between wild 2 particles and chondritic materials. Earth and Planetary Science Letters, 357-358, 355-365.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Komatsu Mutsumi, Fagan Timothy J., Krot Alexander N., Nagashima Kazuhide, Petaev Michail I., Kimura Makoto, Yamaguchi Akira	4. 巻 115
2. 論文標題 First evidence for silica condensation within the solar protoplanetary disk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 7497 ~ 7502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1722265115	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 該当する
1. 著者名 Iwata Takahiro, Kitazato K., Abe M., Ohtake M., Arai T., Arai T., Hirata N., Hiroi T., Honda C., Imae N., Komatsu M., Matsunaga T., Matsuoka M., Matsuura S., Nakamura T., Nakato A., Nakauchi Y., Osawa T., Senshu H., Takagi Y., Tsumura K., Takato N., Watanabe S., Barucci M. A., Palomba E., Ozaki M.	4. 巻 208
2. 論文標題 NIRS3: The Near Infrared Spectrometer on Hayabusa2	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 317 ~ 337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-017-0341-0	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 該当する
1. 著者名 Matsuoka Moe, Nakamura Tomoki, Osawa Takahito, Iwata Takahiro, Kitazato Kohei, Abe Masanao, Nakauchi Yusuke, Arai Takehiko, Komatsu Mutsumi, Hiroi Takahiro, Imae Naoya, Yamaguchi Akira, Kojima Hideyasu	4. 巻 69
2. 論文標題 An evaluation method of reflectance spectra to be obtained by Hayabusa2 Near-Infrared Spectrometer (NIRS3) based on laboratory measurements of carbonaceous chondrites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 120 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0705-4	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 該当する
1. 著者名 小松睦美	4. 巻 25
2. 論文標題 エポックメイキングな隕石たち その10 Y-81020 ~ 極めて始原的な日本の南極産隕石 ~	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌	6. 最初と最後の頁 8-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kitazato K. et al.	4. 巻 364
2. 論文標題 The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 272-275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aav7432	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 該当する

1. 著者名 Krot A.N., Ma C., Nagashima K., Davis A.M., Beckett J.R., Simon S.B., Komatsu M., Fagan T.J., Brenker F., Ivanova M.A., Bischoff A.	4. 巻 79
2. 論文標題 Mineralogy, petrography, and oxygen isotopic compositions of ultrarefractory inclusions from carbonaceous chondrites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochemistry	6. 最初と最後の頁 125519 ~ 125519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.07.001">https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.07.001</a>	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 Keith T Smith, et al.	4. 巻 364
2. 論文標題 Hayabusa2 at the asteroid Ryugu	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 249-250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1126/science.364.6437.249-g	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

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 M Komatsu, TJ Fagan, A Yamaguchi, M Kimura, M Yasutake, T Mikouchi, ME Zolensky
2. 発表標題 Primary mineralogy and secondary alteration characteristics observed in Antarctic CR chondrites
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 M Komatsu, TJ Fagan, A Yamaguchi, M Kimura, M Yasutake, T Mikouchi, ME Zolensky
2 . 発表標題 Examination of Silica Polymorphs in the CR Chondrites
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 M Komatsu, TJ Fagan, A Yamaguchi, M Kimura, M Yasutake, T Mikouchi, ME Zolensky
2 . 発表標題 Petrology of amoeboid olivine aggregates in Antarctic CR chondrites: Evidence for aqueous alteration and shock metamorphism.
3 . 学会等名 The Eighth Symposium on Polar Science ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M Komatsu, TJ Fagan, A Yamaguchi, M Kimura, M Yasutake, T Mikouchi, ME Zolensky
2 . 発表標題 Amoeboid Olivine Aggregates in Antarctic CR Chondrites: Petrologic Variations Among CR Chondrites
3 . 学会等名 80th Annual Meeting of the Meteoritical Society ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M Komatsu, TJ Fagan, A Yamaguchi, M Kimura, M Yasutake, T Mikouchi, ME Zolensky
2 . 発表標題 A Unique Ultra-refractory Inclusion-bearing AOA from Y-793261
3 . 学会等名 The Seventh Symposium for Polar Science ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 Komatsu M.
2. 発表標題 Ultra-Refractory Ca-Al-rich Inclusion in an AOA in CR Chondrite Y793261.
3. 学会等名 The 48th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M Komatsu, TJ Fagan, A Yamaguchi, M Kimura, M Yasutake, T Mikouchi, ME Zolensky
2. 発表標題 Petrology of Chondrule Rims in Yamato-791498 and Asuka-881828, the Least-Altered CR Chondrites in the Japanese NIPR Collection
3. 学会等名 50th Lunar and Planetary Science Conference, (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M Komatsu, A Yamaguchi, M Ito, S Yoneda, T Saito, T Ohgane, T Hayashi, M Sakamoto, T Mikouchi, M Kimura
2. 発表標題 Ryuseito: The Japanese Swords made from Shirahagi Iron Meteorite.
3. 学会等名 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M Komatsu, A Yamaguchi, TJ Fagan, ME Zolensky, N Shiran, T Mikouchi
2. 発表標題 An Amoeboid Olivine Aggregate in LEW 85300
3. 学会等名 The 26th Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M Komatsu, TJ Fagan, AN Krot, K Nagashima, MI Petaev, M Kimura, A Yamaguchi
2. 発表標題 Ultra-Refractory CAI in a Low-Ca Pyroxene-and Silica-Bearing Amoeboid Olivine Aggregate in a CR Chondrite: Formation by Gas-Solid Condensation over a Wide Temperature Range
3. 学会等名 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----