

令和元年5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04081

研究課題名(和文) 隕石の重元素安定同位体異常からひもとく惑星系の起源

研究課題名(英文) Decoding the origin of solar system from the isotope anomalies of heavy elements in meteorites

研究代表者

横山 哲也 (Yokoyama, Tetsuya)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：00467028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、隕石の重元素(Sr, Nd, Mo)同位体異常を測定し、惑星起源物質が被った物理履歴を制約することで、新しい惑星形成論を導くことである。Sr, Nd, Mo同位体の分析結果から、初期太陽系において小惑星帯内縁部と外縁部に同位体組成の異なるリザーバーが2種類存在することが判明した。特に外側には超新星由来の成分が多く存在することが分かった。このような同位体不均質は、初期太陽系におけるs-核種とr-核種の不均質分布によって生まれており、それは初期太陽系星雲でのダストの選択的熱破壊とCC形成領域へのケイ酸塩ダストの輸送に起因することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究最大の特色は、隕石の高精度同位体分析と理論研究を融合し、太陽系形成論のブレークスルーを目指した点である。特に隕石の重元素同位体組成に着目することにより、惑星の材料物質が被った物理化学過程を微粒子レベルで捉えた点が意義深い。本研究により、隕石の同位体異常は初期太陽系内側で生じた熱プロセスによるダスト粒子の選択的破壊と、その後再凝縮したケイ酸塩粒子の太陽系外側への運搬が原因であることが判明した。本研究の成果とはやぶさ2のような惑星探査の結果を結びつけることで、今後地球型惑星の起源物質がより高い精度で明らかになることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to derive a new planet formation theory by measuring isotope anomalies of heavy elements in meteorites and constraining the dynamic history of precursor materials of planetesimals. The isotopic compositions of Sr, Nd, and Mo in meteorites revealed the presence of two isotopically distinct reservoirs in the early solar system where parent bodies of meteorites were formed. In particular, the outer asteroid belt was found to be enriched in components derived from supernovae. Such isotopic variability is caused by the heterogeneous distribution of s- and r-process nuclides in the early solar system, which was triggered by the selective destruction of dust grains by nebular thermal processing in the inner solar system, followed by the transportation of recrystallized-silicate dusts into the outer solar system.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：隕石 同位体異常 惑星形成 小惑星帯

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽系の起源と進化の解明は宇宙地球科学分野の重要研究課題である。理論や観測から構築された太陽系形成の標準モデルは大局的には最適解だが、未解決問題も多い。その一つが初期太陽系の化学不均質と惑星化学組成の多様性である。小惑星帯には太陽からの距離に依存する大規模な化学組成変動が存在するが、近年の観測技術向上により小惑星のサイズと軌道長半径、及び化学組成にはより複雑な関係があることが分かってきた。このような組成多様性は初期太陽系における化学不均質を反映しているが、不均質の原因となる素過程には不明な点も多く、その解明は新たな惑星形成論の構築に向け必要不可欠である。

(2) 隕石はその多くが小惑星帯に由来する。隕石の種類と小惑星の化学組成には一定の関連性が報告されており、隕石の多角的分析は化学不均質の解明に極めて重要である。研究代表者は隕石の重元素同位体異常が鍵を握ると考え、隕石の高精度 Sr, Mo, Te, Nd, Os 同位体分析を精力的に行い、同位体異常と元素の揮発性に強い相関があることを発見した。これは 50%凝縮温度が 1000 K 以下のやや揮発性元素や 1650 K 以上の極難揮発性元素に同位体異常が見られず、中間的元素のみ異常があるという発見である。このことは、原始太陽系において局所的な熱プロセスが生じ、特定の粒子が選択的に破壊され、中間的元素のみに同位体異常が生じた可能性を示唆する。もう一つの重要な発見は、小惑星帯内域と外域に対応する隕石では同位体異常の程度が異なることである。これは同位体異常と化学組成変動の成立がリンクしていることを意味している。すなわち、同位体異常の発生、微惑星に至る小天体の形成とその運動、並びに小惑星の化学組成変動は互いに深く関連する事象として一体的に解明する必要がある。

(3) 理論分野では近年、分担者の奥住らが超低密度ダスト凝集体の形成による微惑星の成長を提唱し、大きな反響を呼んでいる。また米仏の研究者は、木星・土星が微惑星を散乱しながら軌道方向に大移動する Grand Tack モデルを発表し、火星の形成を矛盾なく説明することに成功した。しかし、このような新しい概念に基づく太陽系形成論は物質科学的実証に乏しく、一方で隕石の同位体異常の研究を初期太陽系の物理素過程と結びつけた研究も極めて稀であり、分野を超えた融合研究による新展開が望まれている。

### 2. 研究の目的

期間内に次の 4 項目を明らかにする。初期太陽系星雲はどの程度同位体的に均質であったか。選択的破壊を起こすプレソーラー粒子の種類および熱源は何か。超新星物質流入など、熱プロセス以外に同位体異常を作る可能性はないか。同位体異常を獲得した物質からどのように微惑星が形成され、小惑星の化学組成変動が成立したか。

(1) 隕石の超高精度同位体分析(分析班) 同位体異常に関する多くの先行研究では、各々 10 個程度の代表的隕石しか測定されておらず、小惑星の多様性をカバーし切れていない。そこで、幅広い化学組成に対応する隕石を準備し、Sr, Mo, Nd 同位体を重点的に分析する。

(2) 同位体異常の起源(起源班) 隕石の同位体パターンと元素合成理論から、観測される同位体異常を支配するプレソーラー粒子の発生源と鉱物種を特定する。また、未だ元素合成の詳細が不明な r-核種の起源に関する研究を隕石学および天文学アプローチにより遂行する。

(3) 物理素過程の理論研究(物理班) 太陽系微粒子の移動と混合をモデル化し、初期条件である同位体的に均質な初期太陽系星雲の成立過程を解明する。次に同位体異常の形成過程について、熱プロセス説と超新星物質流入説の双方を理論計算から検討する。最終的に同位体異常を獲得した物質の時空間進化を、超低密度ダスト凝集体の形成や惑星移動といった新しい概念も組み込みつつ、微惑星形成と一体的に解明する。

### 3. 研究の方法

(1) 分析班は同位体異常の存在が確実な Sr, Mo に加え、Nd 同位体を重点的に分析する。これらは親石かつ親水元素 (Sr)、親石・疎水元素 (Nd) および親鉄元素 (Mo) と化学的性質が大きく異なり、母天体での水質変成など二次的現象の影響も評価できる。特に Nd は同位体異常の有無が微妙なため、高精度高確度のデータが必要である。完全分解により溶液化した隕石試料から元素分離を行い、東工大の表面電離型質量分析計 (TIMS) で同位体測定を行う。

(2) 起源班は隕石の同位体データに基づき、同位体異常を起こす粒子の鉱物種や起源を特定する。銀河の異なる星環境では異なる核反応が生じ、元素はそれぞれ異なる同位体組成を持つため、同位体異常のパターンから異常の主要原因となる粒子の起源 (AGB 星・超新星など) および鉱物種を制約できる。古典的な元素合成理論だけでなく、分担者の辻本が提唱する中性子星合体による r-核種重元素合成など、最新の天文観測から導かれる元素合成理論を積極的に取り入れる。

(3) 物理班は初期条件である同位体的に均質な初期太陽系の形成過程を、太陽系内微粒子の運動をモデル化して解明する。Os, Hf, Te などに同位体異常が見られないという事実は、同位体異

常形成前、少なくとも数 AU 以内の惑星形成領域において太陽系が同位体的に均質化したことを意味する。この初期条件がどのように形成されたのか、また太陽系のどこまで均質化されたのか調べる。同位体異常を獲得した物質の時空間進化を、超低密度ダスト凝集体の形成や惑星移動といった新しい概念も組み込みつつ、微惑星形成と一体的に解明する。

#### 4. 研究成果

(1) 分析班は従来ほとんど分析が行われてこなかった普通コンドライト (OC)・R コンドライト・鉄隕石を対象に、TIMS による Mo 同位体測定とデータ解析を重点的に行った。その結果、これらの隕石は  $\mu^{95}\text{Mo}$ - $\mu^{94}\text{Mo}$  図上で原点を通る直線トレンドを形成し、炭素質コンドライト (CC) とは別の直線トレンドを形成することが分かった。これは初期太陽系において小惑星帯内縁部と外縁部に Mo 同位体組成の異なるリザーバーが 2 種類存在することを意味する。また、CC は  $\mu^{95}\text{Mo}$  に富むため、小惑星帯外縁部は超新星物質の影響をより強く受けていることが考えられる。

(2) 分析班は耐酸性粒子を含む CC および普通コンドライト (OC)・および CC 全岩を高温・高圧条件下で完全分解した後、TIMS を用いて高精度 Nd 同位体分析を行った。その結果、コンドライトには核合成起源の Nd 安定同位体異常が存在することが分かった (図 1) このことは、初期太陽系におけるプレソーラー粒子の不均質分布が原因である (Fukai and Yokoyama, 2017)。

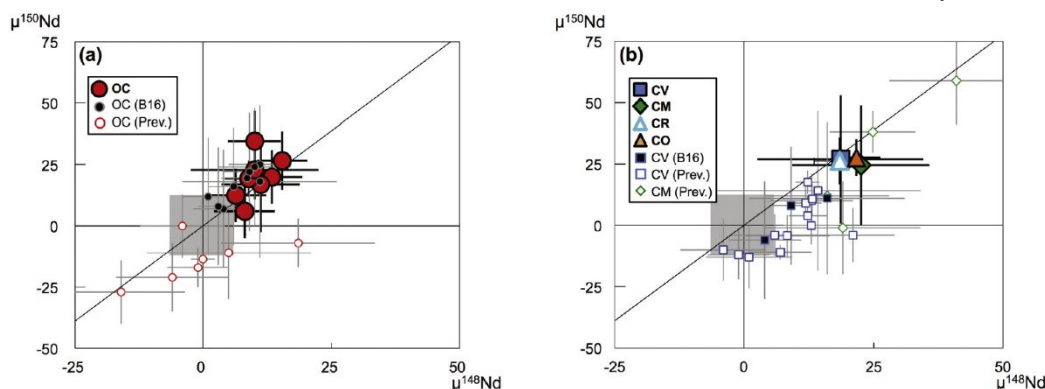


図 1 隕石の Nd 同位体異常 (Fukai and Yokoyama 2017 より)

(3) 分析班は(2)において完全分解されたコンドライト試料を用いて Sr 同位体比を測定した。また、新たにエンスタタイトコンドライト (EC) を完全分解し、Sr および Nd 同位体比を測定した。その結果、EC および OC の Sr・Nd 同位体比は均質で、地球より若干 s-核種に欠乏する異常を示した。一方、CC は Sr 同位体比にバラつきが見られ、 $\mu^{84}\text{Sr}$ - $\mu^{148,150}\text{Nd}$  図上で、s 核種端成分と地球組成との混合線から外れる結果が得られた。このずれは CC に含まれる難揮発性包有物 CAI が原因であることが分かった。地球、EC、OC、および CC から CAI を差し引いた成分に見られる Sr・Nd 同位体不均質は、初期太陽系における s-核種と r-核種の不均質分布によって生まれており、それは初期太陽系星雲でのダストの選択的熱破壊と CC 形成領域へのケイ酸塩ダストの輸送に起因することが判明した (Fukai and Yokoyama, 2019)。

(4) 分析班は更に、CAI の Sr 同位体異常に関する研究を行った。Allende 隕石中の 3 種類の CAI (FTA・Type B・FS) の精密 Sr 安定同位体分析を行ったところ、FTA は Type B と比較し有意に高い  $\mu^{84}\text{Sr}$  値を持ち、FTA 内部に  $\mu^{84}\text{Sr}$  値の不均質性が存在することを発見した。これは FTA が Sr 同位体組成の異なる複数のリザーバーから凝縮したことを示している。一方、Type B は先行研究同様、一定の  $\mu^{84}\text{Sr}$  値を持ち、再溶融により  $\mu^{84}\text{Sr}$  値が均質化したことが明らかとなった。

(5) 起源班は太陽系の r-核種の起源について、考察を行った。同位体異常の程度を定量化するため r-process enrichment factor ( $\eta_r$ ) を定義し、原子番号 (Z) と 50% 凝縮温度 ( $T_{50\%}$ ) の関数として元素ごとにプロットした。その結果、 $\eta_r$  は Zr (Z=40) で最大となった後、Z の増加とともに低下し、Sm (Z=62) 以降はほぼゼロとなった。このことは、Z > 62 の同位体が太陽系内で均質に分布していること、及び、Z < 62 に見られる同位体異常の原因となる r-核種に富む超新星粒子は、Z > 62 の同位体を含んでいないことを意味する。このことから、Z = 62 より重い元素の r-核種は、超新星ではなく、より稀なイベントである中性子星合体によって作られた可能性が高い。

(6) 起源班は r 核種の合成天体を同定するため、矮小銀河 Draco の r 核種組成に関する高分散観測をすばる望遠鏡で遂行した。観測のデータ解析結果より、r 核種合成イベントが中性子星合体である可能性が高いことを明らかにした。また、r 核種と同一天体で合成されることが示唆されている Zn の銀河系における組成進化を計算し、特殊な超新星の一つである強磁場超新星起源が Zn の起源天体であることを明らかにした。これは Sr などの軽い r 核種が超新星で合成される仮説と無矛盾であり、同位体異常の原因に超新星が寄与する可能性を補強することができた。

(7) 物理班は分子雲コアの降着を考慮した円盤形成の数値シミュレーションを行い、初期太陽系が  $^{54}\text{Cr}$  に関してどの程度同位体的に均質化したかを見積もった。その結果、分子雲コアの初期角速度と原始太陽系星雲内の年生の強さがともに比較的小さい場合、同位体の均質化が生じやすいことが示された。また、原始惑星系円盤の形成と円盤内の微小ダストの移動を調べ、不均質な分子雲コアが隕石中の同位体異常の要因となる可能性について検討した。分子雲からの物質の流入があるような若い原始惑星系円盤における微粒子の成長と移動を計算し、円盤の温度が低下しさえすれば中心星から数天文単位の距離で微惑星が形成されることを明らかにした。

(8) 物理班は原始太陽系星雲の温度分布の進化を最近の抵抗性磁気流体シミュレーションによって調べたところ、星雲は従来の理論的推定よりも早い段階で低温化することが判明した。これは、原始太陽系物質の同位体的な均質化が、星雲形成直後のごく短期間にのみ起こり得たことを示唆する。また、分子雲コア内部の固体微粒子が非一様に分布していた場合、それから形成される原始惑星系円盤内の固体微粒子分布がどうなるかを理論的に調べた結果、非一様な分布になる可能性もあることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計26件) (全て査読有)

1. Nakanishi, N., Yokoyama, T., Ishikawa, A. Refinement of the micro-distillation technique for isotopic analysis with pg-level Os in geologic samples. *Geostandard. Geoanal. Res.* in press, 2019. DOI:10.1111/ggr.12262
2. Fukai, R., Yokoyama, T. Nucleosynthetic Sr–Nd isotope correlation in chondrites: Evidence for nebular thermal processing and dust transportation in the early Solar System. *Astrophys. J.* in press, 2019.
3. Okabayashi, S., Yokoyama, T., Nakanishi, N., Iwamori, H. Fractionation of highly siderophile elements in metal grains from unequilibrated ordinary chondrites: Implication for the origin of chondritic metals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 244, 197-215, 2019. DOI : 10.1016/j.gca.2018.10.003
4. Mori, S., Bai, X-N., Okuzumi, S. Temperature Structure in the Inner Regions of Protoplanetary Disks: Inefficient Accretion Heating Controlled by Nonideal Magnetohydrodynamics. *The Astrophysical Journal*, 872, 98, 2019 DOI: 10.3847/1538-4357/ab0022
5. Ueda, T., Flock, M., Okuzumi, S. Dust Pileup at the Dead-zone Inner Edge and Implications for the Disk Shadow. *The Astrophysical Journal*, 871, 10, 2019 DOI: 10.3847/1538-4357/aaf3a1
6. Myojo, K., Yokoyama, T., Okabayashi, S., Wakaki, S., Sugiura, N., Iwamori, H. The origin and evolution of nucleosynthetic Sr isotope variability in calcium and aluminum-rich refractory inclusions. *The Astrophysical Journal* 853, 48 (9pp), 2018. DOI : 10.3847/1538-4357/aa9f2e
7. Tsujimoto, T., Nishimura, N. Early Chemical Evolution of Zn Driven by Magnetorotational Supernovae and the Pathway to the Solar Zn Composition. *Astrophys. J.* 863, L27, 2018. DOI: 10.3847/2041-8213/aad86b
8. Homma, K., Nakamoto, T. Collisional Growth of Icy Dust Aggregates in the Disk Formation Stage: Difficulties for Planetesimal Formation via Direct Collisional Growth outside the Snowline. *Astrophys. J.* 868, 118, 2018 DOI: 10.3847/1538-4357/aae0fb
9. Kanagawa, K. D., Muto, T., Okuzumi, S., Tanigawa, T., Taki, T., Shibaike, Y. Impacts of Dust Feedback on a Dust Ring Induced by a Planet in a Protoplanetary Disk. *The Astrophysical Journal*, 868, 48, 2018 DOI: 10.3847/1538-4357/aae837
10. Tsukamoto, Y., Okuzumi, S., Iwasaki, K., Machida, M. N., Inutsuka, S. Does Misalignment between Magnetic Field and Angular Momentum Enhance or Suppress Circumstellar Disk Formation?, *The Astrophysical Journal*, 868, 22, 2018 DOI: 10.3847/1538-4357/aae4dc
11. Suzuki, T., Sakata, S., Makino, Y., Obayashi, H., Ohara, S., Hattori, K., Hirata, T. iQuant2 : software for rapid and quantitative imaging using laser ablation-ICP mass spectrometry” to “Mass Spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry Society of Japan*, 7, A0065, 2018.
12. Tsujimoto Takuji, Matsuno Tadafumi, Aoki Wako, Ishigaki Miho N., Shigeyama Toshikazu Enrichment in r-process Elements from Multiple Distinct Events in the Early Draco Dwarf Spheroidal Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 850, L12, 2017. DOI: 10.3847/2041-8213/aa9886
13. Arakawa Sota, Tanaka Hidekazu, Kataoka Akimasa, Nakamoto Taishi Thermal conductivity of porous aggregates. *Astronomy & Astrophysics*, 608, L7, 2017. DOI: 10.1051/0004-6361/201732182
14. Miura, H., Yamamoto, T., Nomura, H., Nakamoto, T., Tanaka, K., Tanaka, H., Nagasawa, M. Comprehensive Study of Thermal Desorption of Grain-surface Species by Accretion Shocks around Protostars . *The Astrophysical Journal*, 839, 47, 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa67df
15. Tsukamoto Y., Okuzumi S., Kataoka A. Apparent Disk-mass Reduction and Planetesimal Formation in Gravitationally Unstable Disks in Class 0/I Young Stellar Objects. *The Astrophysical Journal*, 838, 151, 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa6081
16. Kanagawa, K., Ueda, T., Muto, T., Okuzumi, S. Effect of Dust Radial Drift on Viscous Evolution of Gaseous Disk. *The Astrophysical Journal*, 844, 142, 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa7ca1

17. Ueda, T., Okuzumi, S. Flock Mario Analytic Expressions for the Inner-rim Structure of Passively Heated Protoplanetary Disks. *Astrophys. J.*, 843, 49, 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa74b5
18. Mori, S., Muranushi, T., Okuzumi, S., Inutsuka, S. Electron heating and saturation of self-regulating magnetorotational instability in protoplanetary disks. *Astrophys. J.*, 849, 86, 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa8e42
19. Shibaike, Y., Okuzumi, S., Sasaki, T., Ida, S. Satellitesimal Formation via Collisional Dust Growth in Steady Circumplanetary Disks. *Astrophys. J.*, 846, 81, 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa8454
20. Johansen Anders, Okuzumi Satoshi Harvesting the decay energy of  $^{26}\text{Al}$  to drive lightning discharge in protoplanetary discs. *Astronomy & Astrophysics*, 609, A31, 2017. DOI: 10.1051/0004-6361/201630047
21. Fukai, R., Yokoyama, T. Neodymium isotope heterogeneity for ordinary and carbonaceous chondrites and the origin of non-chondritic  $^{142}\text{Nd}$  composition of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters* 474, 206-214, 2017. DOI : 10.1016/j.epsl.2017.06.036
22. Tsujimoto, T., Yokoyama, T., Bekki, K. Chemical evolution of  $^{244}\text{Pu}$  in the solar vicinity and its implication for the properties of r-process production. *Astrophys. J. Lett.*, 835, L3 (5pp), 2017. DOI : 10.3847/2041-8213/835/1/L3
23. Fukai, R., Yokoyama, T., Kagami, S. Evaluation of the long-term fluctuation in isotope ratios measured by TIMS with static, dynamic, and multistatic methods: A case study for Nd isotope measurements. *Inter. J. Mass Spectrom.*, 414, 1-7, 2017. DOI : 10.1016/j.ijms.2016.12.016
24. Yokoyama, T., Nagai, Y., Hinohara, Y., Mori, T. Investigating the influence of nonspectral matrix effects for determination of 22 trace elements in rock samples by ICP-QMS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 41, 221-242, 2017. DOI : 10.1111/ggr.12147
25. Fukami, Y., Yokoyama, T. Tellurium isotope compositions in acid leach fractions of carbonaceous chondrites. *Geochemical Journal*, 51, 17-29, 2017. DOI : 10.2343/geochemj.2.0443
26. Kagami, S., Yokoyama, T. Chemical separation of Nd from geological samples for chronological studies using  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  and  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  systematics. *Anal. Chim. Acta*, 937, 151-159, 2016. DOI : 10.1016/j.aca.2016.07.004

[学会発表](計 24 件)

1. Yokoyama, T., Fukai, R., Tsujimoto, T. Molybdenum isotopic evidence for nebular thermal processing and material transportation in the inner solar system. Lunar and Planetary Science Conference 2019 年
2. Yokoyama, T., Fukai, R., Tsujimoto, T. Meteoritical perspective on the origin of r-process nuclides in the Solar System. 3rd Korea-Japan joint workshop on isotope-ratio mass spectrometry (招待講演) 2018 年
3. 辻本拓司 希土類元素創生：2018 年宇宙の旅. 日本希土類学会 (招待講演) 2018 年
4. Tsujimoto, T. r-process study based on stellar abundances and meteorites. Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Area Workshop (国際学会) 2018 年
5. 辻本拓司 星と隕石の化学組成に刻まれた r 過程元素の起源と進化. 重力波観測時代の r プロセスと不安定核 (招待講演) 2018 年
6. Takuji Tsujimoto r-process nucleosynthesis and enrichment. Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Second Annual Symposium 2018 年
7. Taishi Nakamoto and Akira Takeishi A Model for Generation of Isotope Anomalies in the Inner Solar System by Inhomogeneous Molecular Cloud Core. in workshop "Meteorites - Understanding the origin of planetodiversity" 2018 年
8. Yokoyama, T., Fukai, R., Tsujimoto, T. Meteoritical Perspective on the Origin of r-Process Nuclides in the Solar System. Lunar and Planetary Science Conference 2018 年
9. Fukai, R., Yokoyama, T., Sugimoto, K. Isotopic dichotomy in the early Solar System inferred from nucleosynthetic Sr isotope anomalies in bulk chondrites. The Seventh Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research 2017 年
10. Yokoyama, T., Fukai, R., Tsujimoto, T. Origin of R-Process Nuclides in the Solar System: Astronomical and Meteoritical Perspectives. Goldschmidt Conference (招待講演) 2017 年
11. Fukai, R., Yokoyama, T., Okui, W., Hasegawa, S. High Precision Sr Isotope Measurements for Bulk Chondrites with Complete Sample Digestion. Goldschmidt Conference 2017 年
12. Tsujimoto, T. r-process enrichment traced by Pu and Ba near the sun and in the Draco. Observational Signatures of r-process nucleosynthesis in neutron star mergers 2017 年
13. Nakamoto, T., Takeishi, A. Distribution of  $^{54}\text{Cr}$  Isotope Anomalies in Asteroid Belt. JpGU-AGU Joint Meeting 2017 2017 年
14. 中本泰史 惑星系形成. 天体形成論 :過去・現在・未来 (招待講演) 2017 年
15. Okuzumi, S. Dust growth and planetesimal formation near the snow line in protoplanetary disks. JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演) 2017 年
16. Okuzumi, S. Dust growth inside and outside the snow line. Disk Formation Workshop 2017 (招待講演) 2017 年
17. Fukai R, Yokoyama T., Okui W. Nucleosynthetic neodymium isotope anomalies of bulk chondrites. The

Seventh Symposium on Polar Science 2016 年

18. Fukai R, Yokoyama T. Nucleosynthetic neodymium isotope anomalies in bulk chondrites. Goldschmidt Conference 2016 年
19. Nagai Y, Yokoyama T. Mo isotope evidence for distinct isotope reservoirs in the early Solar System. Goldschmidt Conference 2016 年
20. Yokoyama T, Nakahara M, Fukai R. Nucleosynthetic Yb isotope anomalies in meteorites. Goldschmidt Conference 2016 年
21. Tsujimoto T, Yokoyama T. Origin and evolution of r-process nuclides in Local Universe.. Goldschmidt Conference 2016 年
22. Nakamoto, T., Takeishi, A. Inhomogeneous Molecular Cloud Core and Isotope Anomalies in Meteorites. Goldschmidt Conference 2016 年
23. Tsujimoto T. Observational constraints on r-process site & nucleosynthesis from dwarf galaxies, the Milky Way, and the solar system. The r-process nucleosynthesis: connecting FRIB with the cosmos (招待講演) 2016 年
24. Okuzumi S. Dust growth in the early stage of planet formation. New Directions in Planet Formation (招待講演) 2016 年

〔図書〕(計0件)

〔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

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/yokoyama/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：平田 岳史

ローマ字氏名：HIRATA, TAKAFUMI

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：教授

研究者番号(8桁): 10251612

研究分担者氏名：辻本 拓司

ローマ字氏名：TSUJIMOTO, TAKUJI

所属研究機関名：国立天文台

部局名：光赤外研究部

職名：助教

研究者番号(8桁): 10270456

研究分担者氏名：中本 泰史

ローマ字氏名：NAKAMOTO, TAISHI

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：理学院

職名：教授

研究者番号(8桁): 60261757

研究分担者氏名：奥住 聡

ローマ字氏名：OKUZUMI, SATOSHI

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：理学院

職名：准教授

研究者番号(8桁): 60704533

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。