

令和 6 年 5 月 4 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04108

研究課題名（和文）マルチ元素3安定同位体物質反応解読法の開発

研究課題名（英文）Development of multi-elements triple stable isotope measurements and its application

研究代表者

田中 亮史（Tanaka, Ryoji）

岡山大学・惑星物質研究所・教授

研究者番号：00379819

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：酸素、ケイ素、マグネシウム、カルシウム、ニッケル、クロムの高精度同位体分析法を開発し、原始太陽系円盤内側でのガス・メルト反応過程、海底熱水系システムの解析、小惑星リュウグウの母天体における物質進化などの研究を行った。本研究では、多元素同位体を用いて物質反応過程を解析するとともに、2つの同位体比（3安定同位体）の関係性から平衡論的および速度論的な同位体効果の判別可能性を評価した。現状では、同位体変動幅と分析精度の関係から、酸素同位体のみが応用可能であるが、他の元素を利用するために、さらなる分析精度の向上が求められる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

安定同位体は、様々な物質の反応過程を解析するための強力なツールである。本研究で開発された、微量かつ様々な化学組成を持つ試料に応用可能な多元素同位体分析法は、地球惑星科学だけでなく他の研究分野への応用も可能である。また、2つの同位体比を用いて平衡論的または速度論的反応過程を判別する方法は、現在は限られた元素にのみ有効だが、さらなる技術革新により、より広範囲の元素にこの手法を適用可能にすることが期待される。

研究成果の概要（英文）：High-precision isotopic measurements for oxygen, silicon, magnesium, calcium, nickel, and chromium were developed, and these methods were applied to the study of gas-melt reaction processes in the inner region of the protoplanetary disk, submarine hydrothermal system, the formation of the parent body of the asteroid Ryugyu, etc. In this project, multi-element isotopes were mainly used for these studies. In addition, the possibility to discriminate the equilibrium and kinetic isotope effects based on the relationship between two isotope ratios. With current analytical precision, only oxygen isotopes are applicable, and further improvement of analytical precision is required for the use of other elements.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：安定同位体 遷移金属元素

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

安定同位体は、化学・生物反応により特有の分別現象を示すため、地質試料に残された物質反応履歴や地球初期の環境や宇宙の反応過程を解明するのに有用なトレーサーである。特に、軽元素(H, C, N, O, S)はその相対質量差が大きく、反応過程を敏感に示す。安定同位体分別係数は温度の関数として地質温度計としても約70年前から利用されているが、温度推定には流体の同位体組成の不明な問題がある。この問題を解決するために、最近3酸素同位体温度計が開発された。さらに、鉱物と流体間の3酸素同位体分析を用いて地球と宇宙の間の異なる同位体分別関係を明らかにし、この技術の標準化を推進している。また、複雑な反応過程を理解するためには、酸素だけでなく複数元素の安定同位体を用いて総合的な解析を行う必要性が求められる。

2. 研究の目的

安定同位体は、様々な化学・生物反応過程において、質量依存分別を生じるため、自然界における物質反応過程を解読する為の優れたトレーサーである。一方で、安定同位体は個々の反応過程において、平衡論的同位体効果(EIE)と速度論的同位体効果(KIE)を生じるが、2つの同位体(=1つの同位体比)では、EIEとKIEを判別する術を持たない。これを解決するのが、3安定同位体法である。本研究では、申請者がこれまで開発してきた3酸素同位体解析法に加え、ケイ素と遷移元素等の高精度安定同位体解析法を開発する。さらに、開発した方法を用いて、地球や地球外環境における固相、液相、気相間反応過程を評価し、さらにこれらの元素の安定同位体を用いたEIEとKIEの判別可能性を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1)ケイ素、マグネシウム、ニッケル、クロム、カルシウムの高精度安定同位体分析を行うために、地質試料に含まれるこれらの元素の分離法の開発、および表面電離型質量分析計(TIMMS)またはマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS)を用いた同位体分析法の開発を行った。また、極微量試料中の酸素同位体を行うために、同位体比質量分析計(IRMS)を用いた酸素同位体分析法を改良した。

(2)(1)で開発した方法により、地球および地球外物質の各種同位体分析を行い、気相-液相-固相間の物質反応過程の解読を行った。さらに、開発された分析精度を基に、EIEとKIEを判別することの可能性に関する評価を行った。

4. 研究成果

本研究課題で得られた、主要な研究成果を以下に示す。

(1)ケイ素同位体分析法開発と原始太陽系円盤内側におけるガス-メルト反応への応用

地球型惑星は、原始太陽系円盤の木星より内側で、主に非炭素質型物質から形成されたと考えられている。エンスタタイト・コンドライトと呼ばれる非炭素質型隕石は、地球や月と同位体組成が一致しており、地球の主要な形成材料とされている。一方で、非炭素質型と炭素質コンドライト型の微惑星が混合することで地球型惑星が形成されたというモデルも提案されている。しかし、地球の主要成分であるケイ素の同位体はエンスタタイトコンドライトよりも高く、これらのモデルでは説明できていない。地球型惑星や小惑星の質量の約半分は、ケイ素と酸素で構成される。したがって、隕石や地球に含まれるケイ素と酸素の物質進化過程を解明することは、地球型惑星の起源と進化を推定する上で重要な手がかりとなる。そこで、エンスタタイト・コンドライトから分離したコンドリュールと、非炭素質型惑星物質の同位体組成端成分であり、その母天体が太陽系形成後の約10万年後に形成したコレイライト隕石について、酸素($^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ & $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)およびケイ素($^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ & $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$)同位体組成を分析し、これらの関係性を評価した。

分析の結果、コレイライト隕石は幅広い酸素同位体組成を有する一方で、ケイ素同位体は $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ 、 $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ 値ともに均質であることが分かった。これは、コレイライト隕石母天体が集積した太陽系形成後の約10万年後には、原始太陽系円盤の内側には酸素同位体の不均質性が存在したものの、すでにケイ素同位体については均質化が達成されていた事を示唆する。これに対し、エンスタタイト・コンドライト中のコンドリュールは、幅広いケイ素同位体組成($^{29}\text{Si} = -0.11 \sim -0.31 \%$, $^{30}\text{Si} = -0.27 \sim -0.57 \%$, 標準試料NIST NBS28で規格化)を示し、さらに、酸素同位体の ^{17}O 値(試料中の ^{17}O 値の地球分別線からのずれ)と緩やかな負の相関性を持つことを発見した。

このケイ素と酸素同位体の関係性から以下のように結論づけた。原始太陽系円盤から早期に形成した、鉄とニッケルを主成分とする金属、およびマグネシウムとケイ素を主成分とするケイ酸塩鉱物によって構成される塵が、瞬間的な加熱によって蒸発した。この蒸発したガスと、溶融したケイ酸塩メルトとの反応によって形成された。この反応が生じた際の塵とガス全体のマグネシウム/ケイ素比と酸素・ケイ素同位体組成は、星雲内での塵/ガス比や、塵に含まれる金属/ケイ酸塩鉱物比によって決定づけられ、惑星起源物質や微惑星の化学組成は、円盤内部でこれ

らの反応が生じた場の組成を反映している。すなわち、始原的隕石の組成が必ずしも惑星の化学組成をそのまま反映しているものではないことが分かった(Tanaka et al., 2021)。一方、 $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ と $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ は相関関係を示し、ケイ素同位体が質量依存分別過程に従うことは分かったものの、得られた同位体組成範囲が分析精度に対して十分に広くないことから、EIE と KIE を判別することはできなかった。これを判別するためには、分析精度をさらに一桁以上向上させる必要があるが、本研究ではそれを達成することはできなかった。

(2) 3 酸素同位体を用いた海底熱水系システムの解析

海底熱水流体の ^{18}O 値は、海水と海洋底玄武岩間の元素分配とその反応温度、およびわずかであるが相分離によって決められ、一般的に海水および玄武岩と平衡関係にある値の範囲(約 0 ~ +4‰)を持つ。海底熱水の三酸素同位体比の研究はまだ十分に行われておらず、海水と玄武岩の反応過程で ^{17}O と ^{18}O がどのように変化するかを知ることは、i) 海洋底での反応プロセスの理解、ii) 岩石を用いた古海水の性質の推定、に寄与できる可能性がある。そこで、東太平洋海嶺域にあるいくつかの高温スモーカー型および石膏型のベントサイトから採取された流体の ^{17}O 、 ^{18}O 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値を測定した。これらの流体が、広範囲にわたって玄武岩と反応したことは、流体の主・微量元素濃度および pH から認められる。これらの流体の塩濃度は海水の 30~110% であることから、その成因には相分離が重要な役割を果たしており、これによって ^{18}O 値に影響を与えた可能性を示唆する。推定されたベント流体の ^{18}O 値および ^{17}O はそれぞれ 0.9 ~ +0.8‰、0 から -0.04‰ であった。個々のサイトでのこれらの値は異なり、focuced vent からの流体の ^{18}O 値の同位体シフトは +0.8‰ と程度であり、 ^{17}O 値のシフトは -0.01‰ 程度と小さい。拡散性硬石膏型ベントサイトでは、 ^{18}O - ^{17}O 値空間上で、著しく散乱した値を持つ流体が放出され、単純な等温海水-玄武岩反応では説明できない。観測された変動を説明し、より進化した流体に対する制約を与えるために、海洋地殻の複雑な変質を仮定する非等温反応を含む海水-玄武岩反応の平衡計算を用いて流体の 3 酸素同位体組成を計算した。Dual Porosity モデルとモンテカルロシミュレーションを用いて、玄武岩との反応によって海水が経験する可能性の 3 酸素同位体と Sr 同位体の同時シフトの範囲を示した。その結果、通常の ^{18}O 値の測定だけでは検知不可能であった、流体の酸素同位体範囲の決定が可能となった (Zakharov et al., 2021)。

(3) ニッケルおよびクロム高精度同位体分析法の開発

ニッケル同位体比は伝統的に宇宙化学の重要なトレーサーとして用いられてきたが、最近では MC-ICP-MS の開発により、地球化学、生化学、環境科学の分野で注目されている。高精度のニッケル同位体比を測定するためには、試料中に含まれるニッケルを精製することが必須であり、これまではイオン交換クロマトグラフィーで Ni を精製する際、Ni のキレート剤としてジメチルグリオキシム (DMG) を用いることが一般的であった。しかし、DMG を使用すると、Ni の回収が不十分であったり、測定中に同位体分別が生じたりするため、同位体比測定データに悪影響を及ぼす可能性があった。DMG を使用しないニッケル単離法も考案されたが、複雑な分離法が必要であること、Ni のブランクが大きいこと、Ni 回収率がマトリックスに依存することなどの欠点がある。そこで、DMG を使用せず、一般的な無機酸とともにシュウ酸を用いて、イオン交換カラムを 3 段階使用するだけで、低ブランク (<0.8 ng) でほぼ完全な Ni 回収を可能とする方法を開発した。さらに、幅広いマトリックス組成をカバーする岩石標準試料のニッケル同位体測定を行うことにより、開発した方法の汎用性を評価した。分析では、カンラン岩から流紋岩までの火成岩、堆積岩、炭酸塩岩など 20 種類の標準物質の $^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$ をダブルスパイク法を用いて MC-ICP-MS で測定した。その結果、試料マトリックス元素に依存しない Ni の高い回収率 (98 ± 3%) が達成され、100 ~ 200 ng の Ni を含む試料から $^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$ が 0.006 ~ 0.084 ‰ の 2SD で測定された (Ratnayake et al., 2021)。この方法により、様々な組成の試料から高いニッケル回収率を達成できたため、3 安定同位体分析を行うためには MC-ICP-MS での分析精度を向上させることが次に必要となった。また、3 安定同位体分析を行うためにはダブルスパイク法を用いることはできないため、試料用液に銅を混合させ、銅の同位体比を基に質量分析計内での同位体分別を補正する方法を用いた。この方法を用いることにより、ダブルスパイク法と同等の分析精度が得られた。しかしながら、実際に生物試料のニッケル同位体を測定したところ、同位体の変動幅が小さく、EIE と KIE を分別することはできなかった。従って、さらなる分析精度の向上が求められる。

クロム同位体は、酸化還元状態により、複数の価数を持つことから、生物、非生物の酸化還元反応による質量依存安定同位体分別が生じることが知られている。そのため、本研究課題の目的として用いる際の有効なトレーサーとなることが期待された。しかし、多価のクロム種が存在することは、地質試料からクロムを分離する際、特にクロム濃度が低い試料を取り扱う際、十分な回収率が得られないという問題があった。ここでは、超苦鉄質岩から珪長質岩までの様々な試料マトリックスからクロムを分離するための、簡単な 3 ステップのイオン交換クロマトグラフィーの手順を開発した。各カラムクロマトグラフィーのステップを通して、1 mL の陽イオン交換樹脂 AG50W-X8 (200-400 メッシュ) を固定相として使用し、無機酸に加えてキレート剤としてシュウ酸を使用した。この方法では、岩相に関係なく Cr の高い回収率 [93 ± 8% (2SD, N = 7)] が得られた。また、ダブルスパイク (DS) 法、トータルエバポレーション (TE) 法を組み合わせ、TIMS を用いた分析法 (DS-TE-TIMS) を開発し、極微量 (約 20 ng) のクロムを用いて、 $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$

の高精度分析を達成した。この方法を標準試料に用いて分析した結果、NIST NBS3112a (ニッケル溶液) で 0.02%、岩石試料では 0.01-0.07 %の 2SD 外部精度を達成した。この結果は、比較的微量試料で、様々なマトリックスとクロム濃度を持つ地質試料の高精度 $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 分析を可能とした (Ratnayake et al., 2023)。

(4) 微量試料を用いた水素、炭素、窒素、酸素、クロム、カルシウム同位体分析法の開発と小惑星リュウグウ試料分析への応用

(2)(3) で開発した酸素、クロム同位体分析法を小惑星リュウグウ試料の分析に応用するための分析法の改良を行った。さらに水素、酸素、炭素 (全炭素および全有機炭素)、窒素同位体分析法の改良とカルシウム同位体分析法の開発も行った。この分析を行った 16 試料のリュウグウ試料はそれぞれ 0.8~10mg と限られており、それぞれの同位体分析に用いることが可能であった試料量は <0.6mg 程度であったため、極微量元素量を用いた高精度同位体分析が求められた。分析の結果、リュウグウ試料中の水素、全炭素 (TC)、全有機炭素 (TOC)、窒素濃度はそれぞれ 0.69~1.30、2.79~5.39、1.77~4.00、および 0.10~0.22 wt.%、 δD 、 $^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 、 $^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 、 ^{15}N 値はそれぞれ、+100~+345、-15.3~+14.7、-23.1~-15.4、および +0.4~+53.0 ‰であった。これらの値を CI コンドライト隕石と比較すると、リュウグウ試料の全炭素の濃度と同位体比はほぼ同様の値を示し、窒素の濃度と同位体比はより分散する値を示す一方、リュウグウ試料は有意に低い水素濃度と高い δD 値を持つことが分かった。これは、隕石試料が地球環境下で二次的に変質することにより、その影響が特に水素の濃度と同位体比に著しく影響を与えたことを示唆する。

リュウグウ試料の ^{18}O 、 ^{17}O 、 ^{17}O 値はそれぞれ 17.72~20.08、9.84~11.03、0.503~0.615 ‰ (N = 5) となり、これらの値は CI コンドライトに近いものの、いずれの値も CI コンドライトよりも有意に高い値であった。リュウグウ試料 2 試料から測定された ^{48}Ca 値と ^{54}Cr 値はそれぞれ 1.97、2.21 および 1.49、1.77 であった。これらの結果から、リュウグウ母天体がこれまでに測定されたいずれの炭素質コンドライト隕石母天体よりもより熱処理の影響が小さく、さらに太陽からより遠方で形成されたことが示唆された (Nakamura et al., 2022)。

さらに、リュウグウ 9 試料のクロム同位体分析の結果、Mn-Cr 年代法を用いたリュウグウ母天体の水質変質温度が太陽系形成後 (CAI 形成後) 4.13 (+0.62/-0.55) Myr であったことが分かった。このことから、水に富んだ小惑星母天体 (リュウグウ、CI、CM、CR、ungrouped C2) の水質変質が、太陽系外側領域でほぼ同時期 (3.8 ± 1.8 Myr after CAI) に生じたことが分かった (Tanaka et al., 2024)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Zhang Wei, Tanaka Ryoji, Kitagawa Hiroshi, Bohlin Madeleine, Nakamura Eizo	4. 巻 480
2. 論文標題 A rapid method of simultaneous chromatographic purification of Li and Mg for isotopic analyses using MC-ICP-MS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 116893
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijms.2022.116893	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 Saavedra Marcela E., Roszjar Julia, Riebe My E. I., Varela Maria E., Yang Shuying, Humayun Munir, Tanaka Ryoji, Busemann H.	4. 巻 57
2. 論文標題 Malotas (b), a new eucrite from an old fall	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 2081 ~ 2101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/maps.13913	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 Potiszil Christian, Ota Tsutomu, Yamanaka Masahiro, Sakaguchi Chie, Kobayashi Katsura, Tanaka Ryoji, Kunihiro Tak, Kitagawa et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Insights into the formation and evolution of extraterrestrial amino acids from the asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1482
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-37107-6	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 Ratnayake, D. M., Tanaka, R., Nakamura, E.	4. 巻 1181
2. 論文標題 Novel nickel isolation procedure for a wide range of sample matrices without using dimethylglyoxime for isotope measurements using MC-ICP-MS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Analytica Chimica Acta	6. 最初と最後の頁 338934
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aca.2021.338934	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 Zakharov D. O., Tanaka R., Butterfield D. A., Nakamura E.	4. 巻 9
2. 論文標題 A New Insight Into Seawater-Basalt Exchange Reactions Based on Combined ^{180}Pb and ^{170}Tm Values of Hydrothermal Fluids From the Axial Seamount Volcano, Pacific Ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 691699
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2021.691699	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 Karin, C., Andy, B., Tanaka, R., Tingwen, Z., Zhen, S., Ruoff, R. S., Chuan, Z., Xianjue, C.	4. 巻 186
2. 論文標題 Liquid-phase water isotope separation using graphene-oxide membranes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 344-354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.10.009	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 Nikitczuk, M. P., Bebout G. E., Ota T., Kunihiro T., Mustard J. F., Flemming R. L., Tanaka R., Halldorsson, S. A., Nakamura, E..	4. 巻 127
2. 論文標題 Nitrogenous Altered Volcanic Glasses as Targets for Mars Sample Return: Examples From Antarctica and Iceland	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2021JE007052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE007052	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 Nakao, A., Uno, S., Tanaka, R., Yanai, J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Mineralogical Factors Controlling the Ability to Retain ^{137}Cs in Andosols in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Behavior of Radionuclides in the Environment III	6. 最初と最後の頁 365-375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-6799-2_16	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 Tripathi, H., Potiszil, C., Tanaka, R., Nakamura, E.	4. 巻 513
2. 論文標題 The ice-organic-silicate contents of small solar system bodies: indicators for a comet to asteroid evolutionary pathway	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3734-3741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1068	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 Nakamura, E., Kobayashi, K., Tanaka, R., et al.	4. 巻 98
2. 論文標題 On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: A comprehensive geochemical perspective	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the Japan Academy, Series B	6. 最初と最後の頁 227-282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2183/pjab.98.015	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 Tanaka, R., Potiszil, C., Nakamura, E.	4. 巻 2
2. 論文標題 Silicon and oxygen isotope evolution of the inner solar system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Planetary Science Journal	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/PSJ/abf490	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 Nakao, A., Uno, S., Yanai, J., Kubotera, H., Tanaka, R., Robert A. Root, R. A., Kosaki, T.	4. 巻 385
2. 論文標題 Distance-dependence from volcano for Asian dust inclusions in Andosols: A key to control soil ability to retain radiocesium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 114889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geoderma.2020.114889	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 Miller, M. F., Tanaka, R., Greenwood, R. C.	4. 巻 34
2. 論文標題 Comment on: 'A simple cryogenic method for efficient measurement of triple oxygen isotopes in silicates' by Ghoshmaulik et al. (Rapid Commun Mass Spectrom. 2020;34(18):e8833)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Rapid Communications in Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 e8913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rcm.8913	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 Ratnayake, D. M., Tanaka, R., Nakamura, E.	4. 巻 1278
2. 論文標題 Determination of mass-dependent chromium isotopic compositions in geological samples by double spike-total evaporation-thermal ionization mass spectrometry (DS-TE-TIMS)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Analytica Chimica Acta	6. 最初と最後の頁 341723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aca.2023.341723	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 Tanaka, R. Ratnayake, D. M. et al.	4. 巻 965
2. 論文標題 Unraveling the Cr Isotopes of Ryugu: An Accurate Aqueous Alteration Age and the Least Thermally Processed Solar System Material	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad276a	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 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Ryoji Tanaka, Christian Potiszil, Tsutomu Ota, Tak Kunihiro, Chie Sakaguchi, Katsura Kobayashi, Hiroshi Kitagawa, Masahiro Yamanaka, Eizo Nakamura
2. 発表標題 Aqueous alteration on the progenitor body of the asteroid Ryugu revealed through H-C-N-O isotope systematics
3. 学会等名 Goldshmidt 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Christian Potiszil, Katsura Kobayashi, Ryoji Tanaka, Tak Kunihiro, Hiroshi Kitagawa, Tsutomu Ota, Masahiro Yamanaka, Chie Sakaguchi, Eizo Nakamura
2. 発表標題 Constraining the processes responsible for the origin and evolution of extraterrestrial organic matter: evidence from the asteroid Ryugu
3. 学会等名 Goldshmidt 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ratnayake Mudiyanseelage Dilan Madusanka Ratnayake, Ryoji Tanaka, Eizo Nakamura
2. 発表標題 Development of a sequential ion exchange chromatography method to separate geochemically important tracers for isotope measurements
3. 学会等名 Goldshmidt 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Madeleine S. Bohlin, Christoffer Hemmingsson, Dilan Ratnayake, Ryoji Tanaka, Eizo Nakamura, Anna Neubeck
2. 発表標題 Nickel isotope fractionation during iron oxide formation
3. 学会等名 Geologiska Foreningen Specialpublikation (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>小惑星リュウグウの起源と進化 -- 地球化学総合解析による太陽系物質進化の描像 https://pml.misasa.okayama-u.ac.jp/pages/projects/Ryugu2022/ 小惑星リュウグウに記録されたアミノ酸生成の痕跡 https://pml.misasa.okayama-u.ac.jp/pages/projects/Ryugu2023/index-ja.php 初期太陽系における地球型惑星の材料物質の進化を解明 https://pml.misasa.okayama-u.ac.jp/pages/projects/tanakaetal2021siois.php 大量の有機物からなる小惑星「リュウグウ」 https://pml.misasa.okayama-u.ac.jp/pages/projects/ryugu-albedo-2020.php Discussing Science https://pml.misasa.okayama-u.ac.jp/pages/news/ryocomm2020rpcms.php</p>

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
研究協力者	ラトナヤケ ディラン (Ratnayake Dilan)	岡山大学・惑星物質研究所・大学院生 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スウェーデン	Uppsala University	Stockholm University		
オーストリア	Natural History Museum Vienna			
米国	University of Arkansas			
インド	Physical Research Laboratory			
スイス	University of Lausanne	ETH		
オーストラリア	The University of New South Wales	The University of Newcastle		
米国	Lehigh University	Brown University	Florida State University	
英国	The Open University			