

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287142

研究課題名(和文) 拡散による元素移動の実験的研究:初期太陽系年代学への影響と隕石母天体の熱史の解明

研究課題名(英文) Experimental determinations of cationic diffusion coefficients in silicates for better understandings of early Solar System chronology and thermal history of meteorite parent body.

研究代表者

伊藤 元雄 (ITO, Motoo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー代理

研究者番号：40606109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：隕石の構成鉱物には太陽系の起源や現在に至るまでの進化の過程と年代についての情報が鉱物組織や割合、構成元素の同位体組成比や主要・微量元素分布の形で記録されており、当時の形成過程と時間経過を知る上で非常に重要である。その情報は生成後の熱的影響により元々の分布から変化したものであり、固体中の元素の拡散に大きく支配される。そこでケイ酸塩鉱物中の元素の拡散係数を求める実験的研究を行い、鉱物の熱史を定量的に解析し、隕石母天体における熱史を明らかにした。しかし隕石有機物も鋭敏に熱や水の影響で変成する事がわかり、本研究では有機物をトレーサーとして用いた惑星の熱史の解明への手がかりを得た。

研究成果の概要(英文)：Meteorites and its constituting minerals contain evidence of earliest physical and chemical processes that occurred in the Solar System. It is important to understand the formation process of the meteorite parent body (thermal and aqueous activities) and its temporal information that can be retrieving by observations of microstructural texture, major/minor element abundances and isotopic compositions in constituting mineral phases. In this research project, we tried to evaluate quantitative thermal histories of meteorite parent bodies and proper understanding of disturbed isochrons for early Solar System chronology based on the experimental diffusion study. We have also evaluated how the extraterrestrial organic components behave during parent body processes, i.e., thermal and aqueous activities.

研究分野：同位体宇宙化学

キーワード：拡散 惑星の熱史 二次イオン質量分析器 有機物

## 1. 研究開始当初の背景

隕石とその構成鉱物には太陽系の起源や現在に至るまでの進化の過程と年代についての情報が鉱物組織、鉱物の割合、構成元素の同位体組成比や希土類元素をはじめとする微量元素分布の形で記録されており、その当時の形成過程・時間経過を知る上で非常に重要な役目を果たす。地球上の鉱物と同様に隕石中の鉱物にもまた色々なスケールで種々の元素、あるいは同位体組成比の不均質性が観察される。これらの不均質性は、鉱物生成後の熱的影響により元々の分布から変化したものであり、固体中の元素の拡散現象に大きく支配される。従って、鉱物中での元素の拡散速度を精度良く決定する事ができれば、天然の鉱物中に見られる様々な元素、あるいは同位体組成比の不均質分布から鉱物の熱史を定量的に解析する事が可能になる。このためケイ酸塩鉱物中の元素の拡散係数を求める事は必要不可欠である。

隕石母天体での熱変成は、太陽系初期物質(例えば CAI やコンドリュール)の年代の情報に大きな影響を与える事が知られている[例えば 1]。 $^{26}\text{Al}$ (親核種)– $^{26}\text{Mg}$ (娘核種、半減期 72 万年)系を CAI に適用した年代学では、測定鉱物であるアノーサイト中の Mg の拡散係数は他の鉱物に比べると速いので、熱的影響を受けると拡散により元々の分布が攪乱される[2]。同様の事柄は他の年代決定法にも存在する。これまでに研究代表者は太陽系初期物質(CAI やコンドリュール)に $^{26}\text{Al}$ – $^{26}\text{Mg}$ 系、 $^{41}\text{Ca}$ – $^{41}\text{K}$ 系と $^{53}\text{Mn}$ – $^{53}\text{Cr}$ 系の年代測定法を適用してそれら物質の年代を決定してきた。さらに実験的にそれぞれの娘核種の拡散係数を決定し、モデル計算により母天体の熱史と得られた年代の攪乱の度合いを定量的に解明した[3–6]。

太陽系初期物質に対して近年確立されつつある“消滅核種を用いた初期太陽系年代の時計”は $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系(半減期 150 万年)である[例えば 7]。消滅核種 $^{60}\text{Fe}$ が重要な理由として、太陽系に普遍的に存在し、その存在度が高い事、それ故に母天体の熱源の可能性になる事、そしてこの核種は超新星爆発でなければ合成されない事があげられる。つまりこの $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系は超新星爆発をスタート時点とする時計であり、その初期太陽系物質における存在は、太陽系が超新星爆発から数百万年以内で形成を開始したことを示唆している。従って、この時計をコンドリュールと呼ばれる太陽系の初期物質の一つに適用し、かつ半減期の異なる他の時計 $^{26}\text{Al}$ – $^{26}\text{Mg}$ 系(半減期 72 万年)を同時に測定する事で、より詳細な初期太陽系の年代学を押し進める事ができると期待される。しかしながら $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系は測定の高難度のために非常に報告例が限られている[例えば 8]。Ito and Messenger [9]では変成度の低いコンドライト中に存在する鉄に富むエンスタタイトとオリビンコンドリュールの $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系を測定し、これまで

の研究結果と矛盾しないデータを得ることに成功し、かつ $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系の不均一分布はないと報告した。エンスタタイトとオリビンコンドリュール中の $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系の“均一な”分布は、このコンドライトが形成してから現在に至るまでに経験した熱変成過程を反映する。そしてその熱変成過程は母天体の大きさと形成した時期から計算可能である。

重要になるのは鉄に富むエンスタタイト輝石とオリビン中の Ni の拡散係数である。オリビン中の Ni の拡散係数は報告があるが[10]、エンスタタイト輝石中の Ni の拡散係数は報告例がない。一般的にエンスタタイトなど輝石中の陽イオンの拡散は、オリビンと比べると数桁程度遅いので拡散加熱実験に時間がかかる事、また実験に適した良い天然試料が得られない事などから拡散係数の測定は非常に困難である。それにもかかわらず、地学的には輝石中の拡散係数は非常に重要である。オリビンから得られる熱史にくらべると拡散速度が遅いため、より長時間の熱史に対する情報を得やすい特徴を持つ。そのためエンスタタイト輝石中の Ni の拡散係数を精度よく決定し、物理化学的に重要な基礎データを取得する事で、“隕石母天体内で長時間加熱された太陽系初期物質の熱史の定量的な解明”に重要な制約を与えると期待できる。

本手法で得られるコンドリュールに対する結果と難揮発性白色包有物(CAI)から計算した熱史[例えば 6]とを比較する事で、太陽系初期物質形成初期数百万年の物理化学的進化+タイムスケールの総合的な理解、そしてより普遍的な隕石母天体の熱史が明らかになれば、卓越した成果となる事が期待される。

## 2. 研究の目的

元素の拡散の研究は実験地球惑星科学の長年の課題であり、多くの実験的研究がなされている。しかしデータの蓄積は未だに十分でなく、また研究者ごとに拡散係数の値がオーダーを超えて異なる事があるなど、鉱物の熱史や放射性核種を用いた太陽系年代学の定量的議論の障害となっている。本研究は、太陽系初期凝縮物の一つであるコンドリュールに半減期の異なる $^{26}\text{Al}$ – $^{26}\text{Mg}$ 系と $^{60}\text{Fe}$ – $^{60}\text{Ni}$ 系の年代測定を適用し、初期太陽系年代学の基礎的なデータを収集すると共に、隕石を構成する主要なケイ酸塩鉱物中の元素の拡散速度を実験的に決定することで、隕石とその母天体における熱史の確立と初期太陽系年代学への影響を拡散の観点から定量的に明らかにする事を目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) IMS-6F 型 SIMS による深さ方向分析法、又は NanoSIMS によるイメージング法によりエンスタタイト中の Ni の拡散係数を実験的に決定する。

- (2) 隕石とコンドリュールの岩石鉱物学的研究をすすめるとともに、二次イオン質量分析器を用いた $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 系と $^{60}\text{Fe}$ - $^{60}\text{Ni}$ 系の同位体年代学的研究も行う。
- (3) 実験から求めた拡散係数を用いて、 $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ 系と $^{60}\text{Fe}$ - $^{60}\text{Ni}$ 系の閉鎖温度をそれぞれ考察する。その後母天体の大きさ集積時期、最高到達温度と冷却速度をパラメータとして、それぞれの系の時間変化を計算する。
- (4) 本研究の計算結果とこれまでの研究結果を比較する事で、より普遍的な初期太陽系星雲における隕石母天体の熱史の構築を目指す。

#### 4. 研究成果

本研究は、当初と異なる惑星化学の分野のうちでも地球外物質に含まれる鉱物-有機物-水間の関連性という学際領域に発展した。特に、太陽系を構成する物質のうち比較的研究の進んでいる隕石鉱物に焦点を当て、鉱物中の元素の移動を定量的に解明し母天体の熱史を推定するという目的から、実際の地球外物質の構成物質と物質化学的データを統合することで、より普遍的な母天体（つまり微惑星）の形成史（熱史や水質変成史）を解明が可能であると考え、新しい方針の研究を進めた。また同時に2020年に期間をする予定の「はやぶさ2」試料の分析を見据え、他機関とともに「有機物、水を多量に含む地球外物質」の分析プロトコルを構築する基礎的な研究へも展開した。以下に、その研究成果を記す。

(1) 始原的隕石中には有機物が数%の割合で存在するため、鉱物と並び太陽系の起源物質であり、惑星の形成に重要な役割を担った物質と考えられている[11]。そのため鉱物や有機物の系統的な分析研究が行われている。その結果、 $-260$ 度といった極低温の分子雲（有機物、鉱物、氷）、初期太陽系円盤形成期の $1,000$ 度を越す高温（無機鉱物）や小惑星内部における数 $10\sim$ 数 $100$ 度程度（無水・含水鉱物と有機物）の熱変成や水質変成それぞれの過程についての情報が保持されている事がわかってきた[12]（図1）。辿ってきたプロセスや環境により異なる同位体分別、分子の進化や官能基の変異が起こることが知られているが、有機物が持つ複雑な同位体分布や分子構造と、形成過程や形成環境との関係性については未だに解らない部分が多い。地球外物質に含まれる地球外有機物と含水鉱物がもつ「太陽系で最も始原的な情報」を得ることで、太陽系形成史において解明されていない（1）母天体形成時における鉱物・有機物の進化とその形成環境、（2）初期太陽系における有機物の起源（3）含水鉱物がもつ太陽系初期の水と母天体における水質変成、そして（4）有機物と共存する鉱物間の関連性の全体像を解明する事が今後の惑星物質化学では重要な科学目的となる。



図1：有機物が指標となる太陽系形成過程

そこで本研究では、始原隕石中の有機物に走査型透過X線顕微鏡を用いたX線吸収端近傍構造(STXM-XANES)による官能基(結合)イメージング分析、NanoSIMSによる水素、窒素と炭素同位体イメージング分析を組み合わせ、隕石内の有機物の分布、同位体と分子構造の関係、共存する鉱物との関連性とそれらの二次元分布から有機物の起源だけではなく、惑星の形成史の解明につなげる研究を展開した。

本研究では、普通コンドライトに分類されるZag隕石に着目した。この隕石は、先行研究[13]によると母天体が熱変成を経験したのちに形成したと考えられる岩塩や非常に始原的なCIクラストという部分が混在する特徴がある。そのため、太陽系初期の形成過程のうち、有機物-水-鉱物の関連性、微惑星の形成史を研究するのに最適な隕石の一つである。この隕石は、準惑星Ceresからもたらされたという報告[14]、惑星探査機DAWNの成果と合わせて、現在もっとも重要な研究の一つである。Zag隕石中に存在する $10\ \mu\text{m}$ 程度の炭素質物質それぞれについて、分子構造及び同位体の情報から有機物の起源と進化、その温度環境、および惑星の形成史を解明するために、STXM-XANES分析とNanoSIMSによる同位体イメージング分析を行った(図2)。

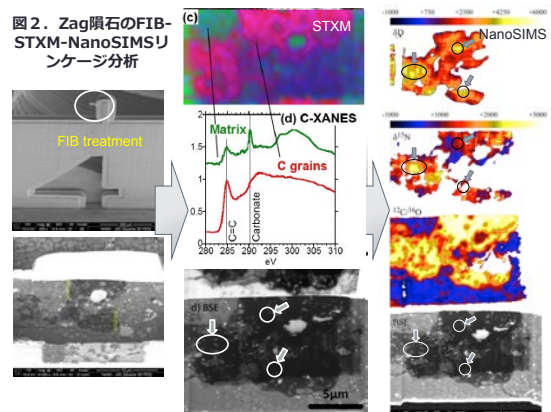


図2のSTXMの結果から、この試料に含まれる有機物は非常に均一な分子構造を持っている事がわかる。またミクロンスケールで炭酸塩と共存している事も観察できた。一方、同位体に関してはミクロンスケールで不均一分布が水素、窒素共にみとれる。さらにホットスポットと呼ばれるサブミクロンの

同位体過剰領域が多数発見された (図2)。しかし窒素と水素の同位体過剰領域は必ずしも一致していない。少なくとも、これらの有機物は、太陽系外縁部の 30-40K という非常に冷たい環境下において同位体交換反応 (化学反応) により形成したと考えられる [例えば 15]。外縁部で形成した有機物は、太陽系の内部に輸送され、隕石の母天体に取り込まれた事を示唆している。

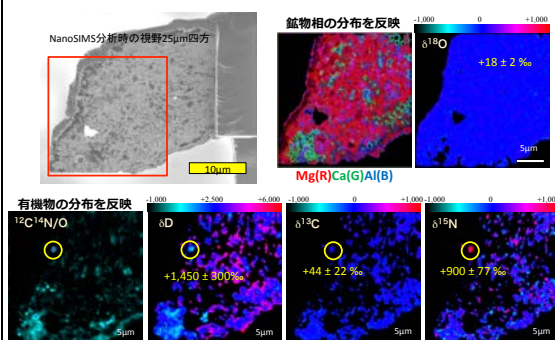
(2) 研究対象である始原的隕石には、白色包有物やコンドリュールなど太陽系初期の情報をもつ鉱物粒子群と多様な有機物が微小・微細な組織としてマトリックス中に複雑に共存するため、それぞれから同位体組成、分子式など物質科学的情報を正確に取り出すのは容易ではない。太陽系形成史を遡り、低温の分子雲であった最初期の情報、複雑な熱史を経ている小惑星上の熱変成・水質変成過程や高温期に起きたと考えられる非平衡化学反応の痕跡を微小な鉱物や有機物から読み取るためには、高空間分解能かつ高精度で物質中の化学的情報を得る必要がある。また共存する鉱物と有機物の関連性を明らかにするためには、二次元での分析法が必須となる。そのため地球惑星科学の最先端分野では、サブミクロン領域における「二次元・その場分析」を両立した新しい分析手法が強く要請されている。

これまでに月以外の惑星探査によるサンプルリターンで得られた試料は、100 ミクロン以下の粒子と非常に小さく、重量とすると 1  $\mu\text{g}$  以下である。そのため試料調製から非破壊分析、そして破壊分析に至るまでの複数の分析手法を組み合わせ、同一の微細領域から種々の情報を取得するリンケージ分析技術の開発は、サンプルリターン試料のような微量・微小なサンプルを扱う上で必要不可欠である。例えば、Uesugi et al. や Ito et al. [16, 17] では、小惑星探査機「はやぶさ」のサンプルコンテナ中に発見された炭素質物質について、micro-Raman、FT-IR、XANES、ToF-SIMS、FIB、NanoSIMS、TEM/STEM を用いたリンケージ分析により、同一のサンプルの化学結合状態、元素・同位体分布についての情報を最大限得ることに成功した。

我々は、「はやぶさ2」で持ち帰る惑星物質試料の分析を想定し、FIB-SEM、NanoSIMS、TEM/STEM を組み合わせたリンケージ分析技術の開発を行った。粒子サイズと鉱物学的観点から、南極で採集された多様な微隕石を模擬試料として用い、100 nm スケールの鉱物と有機物の同位体、化学組成と組織について詳細な研究を行った (図3)。

微細な鉱物組織観察と酸素同位体から、少なくともこの微隕石は地球に落下する際に多少の熱変成を受けている事が分かった。通常、微隕石は大気圏突入時の影響は少ないと考えられており、太陽系の始原的情報が保持されているとされてきた。本研究でも先行研究と同様にミクロスケールでは、熱変成の証

図3. 非溶融微隕石FIB切片のNanoSIMSイメージング分析



拠が発見された事になる [18]。同時に炭素質物質の微隕石内での二次元分布と同位体分布を可視化する事にも成功した (図3)。この中から、ナノグロビュールと呼ばれる、太陽系の外縁部で形成された直径 200-300 nm の球状有機物を発見し、その炭素、窒素と水素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C} = 44 \pm 22$  パーミル,  $\delta^{15}\text{N} = 900 \pm 77$  パーミル,  $\delta\text{D} = 1,450 \pm 300$  パーミル) は先行研究 [19] とほぼ同じ程度である事も分かった。その結果、この微隕石はもともと CM や CI に分類されるような母天体を起源とすることが示唆される。

本研究で構築したシステムは、2020 年後半に控える「はやぶさ2」などによる地球外有機物と含水鉱物の分析体制・技術を整える事につながる事が期待される。

#### 引用文献

1. MacPherson et al. (1995) The distribution of aluminum-26 in the early solar system—A reappraisal. *Meteoritics* 30:365-377.
2. LaTourrette and Wasserburg. (1998) Mg diffusion in anorthite: Implications for the formation of early solar system planetesimals. *Earth and Planetary Science Letters* 158:91-108.
3. Ito and Ganguly. (2004) Potassium diffusion in melilite: Experimental studies and constraints on the thermal history and size of planetesimals hosting CAIs. *Meteoritics & Planetary Science* 39:1911-1919.
4. Ito and Ganguly. (2006) Diffusion Kinetics of Cr in olivine and  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  thermo-chronology of early solar system objects. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 799-809.
5. Ganguly, Ito and Zhang. (2007) Cr Diffusion in Orthopyroxene: Experimental Determination,  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  Thermochronology, and Planetary Applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 3915-3925.
6. Ito and Messenger (2010) Thermal metamorphic history of a Ca, Al-rich inclusion constrained by high spatial resolution Mg isotopic measurements

- with NanoSIMS 50L. *Meteoritics & Planetary Science* **45**, 583–595.
7. Tachibana and Huss (2003) The Initial Abundance of  $^{60}\text{Fe}$  in the Solar System. *The Astrophysical Journal* **588**, L41–L44.
  8. Huss et al. (2010) Development of Multi-collection Ni isotopic analysis of Ferromagnesian silicates in the ion microprobe. *41st Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract#1567.
  9. Ito and Messenger (2010) Fe–Ni systematics in Fe-rich olivine and enstatite chondrules in Semarkona chondrite utilizing a NanoSIMS 50L ion microprobe. *41st Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract#1724.
  10. Petry et al. (2004) Experimental determination of Ni diffusion coefficients in olivine and their dependence on temperature, composition, oxygen fugacity, and crystallographic orientation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **68**, 4179–4188
  11. Sephton (2002) Organic compounds in carbonaceous meteorites. *Nat. Prod. Rep.* **19**, 292–311.
  12. Alexander et al. (2007) The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromolecular organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **71**, 4380–4403
  13. Zolensky et al. (1999) Asteroidal Water Within Fluid Inclusion-Bearing Halite in an H5 Chondrite, Monahans. *Science*, **285**, 1377–1379.
  14. Fries et al. (2013) Do we already have samples of Ceres? H chondrite halites and the Ceres-Hebe link. *76th Annual Meteoritical Society Meeting*, Abstract#5266.
  15. Remusat et al. (2010) Accretion and preservation of d-rich organic particles in carbonaceous chondrites: Evidence for important transport in the early solar system nebula. *The Astrophysical Journal* **713**:1048–1058.
  16. Uesugi et al. (2014) Sequential analysis of carbonaceous materials in Hayabusa-returned samples for the determination of their origin. *Earth, Planets and Space* **66**: 102.
  17. Ito et al. (2014) H, C, and N isotopic compositions of Hayabusa category 3 organic samples. *Earth, Planets and Space* **66**: 91.
  18. Engrand and Dobrica (2012) Bulk Oxygen Isotopic Composition Of Antarctic Micrometeorites : Effect Of Atmospheric Entry. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract#2636.
  19. Nakamura-Messenger et al. (2006) Organic globules in the Tagish Lake meteorite: remnants of the Protosolar disk. *Science* **314**:1439–1442.
5. 主な発表論文等  
〔雑誌論文〕(計 11 件 全て査読有)
- (1) Zolensky M. E., Bodnar R. J., Yurimoto H., Itoh S., Fries M., Steele A., Chan Q. H. -S., Tsuchiyama A., Kebukawa Y., and Ito M. (2017) The search for and analysis of direct samples of early Solar System aqueous fluids. *Phil. Trans. R. Soc. A* **2017** 375 20150386; DOI: 10.1098/rsta.2015.0386.
  - (2) Jogo K., Nakamura T., Ito M., et al. (2017) Mn–Cr ages and formation conditions of fayalite in CV3 carbonaceous chondrites: Constraints on the accretion ages of chondritic asteroids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **199**: 58–74.
  - (3) Ito M. and Messenger S. (2016) Rare earth element measurements and mapping of minerals in the Allende CAI, 7R19–1, by NanoSIMS ion microprobe. *Meteoritics & Planetary Science* **51**: 818–832.
  - (4) Tomioka N., Miyahara M., and Ito M. (2016) Discovery of natural MgSiO<sub>3</sub> tetragonal garnet in a shocked chondritic meteorite. *Science Advances* Vol. 2, no. 3, e1501725.
- 〔学会発表〕(計 20 件)
- (1) Ito M., Tomioka N., Kodama Y., and Imae N. (2017) A FIB–NanoSIMS–TEM Study of Unmelted Antarctic Micrometeorite TT006D107. *48th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract#1776. The Woodlands, TX (USA) 2017年3月23日
  - (2) Kebukawa Y., Ito M., et al. (2017) Highly Pristine Organic Matter in a Xenolith Clast in the Zag H Chondrite. *48th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract#1381. The Woodlands, TX (USA) 2017年3月24日
  - (3) Kebukawa Y., Ito M., et al. (2017) In-Situ Analysis of Surface and Subsurface Samples from a Jupiter Trojan Asteroid Using a High Resolution Mass Spectrometer in the Solar Power Sail Mission. *48th Lunar*

and Planetary Science Conference,  
Abstract#2221. The Woodlands, TX (USA)  
2017年3月23日

- (4) Ito M., Tomioka M., Kodama Y., and Imae N. (2016) A FIB-NanoSIMS-TEM study of unmelted Antarctic micrometeorite TT006D107. The Seventh Symposium on Polar Science, NIPR. 国立極地研究所 (東京都・立川市) 2016年12月1日

[図書] (計3件)

- (1) Kubota, K., Morono, Y. and Ito, M. (2017) Nanoscale Secondary-Ion Mass Spectrometry Imaging of Biological Structures. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. 1-17, DOI: 10.1002/9780470027318.a9418.
- (2) 伊藤元雄 (2015) 酸素同位体からみる太陽系の進化の歴史. “地球のしくみを理解する” 広島大学地球惑星システム学科, 広島大学出版会 330 (53-56)
- (3) 伊藤元雄・坂本尚義 (2014) 先端科学への応用 (宇宙・惑星科学等) -質量分析法. “マイクロビームアナリシスハンドブック” 日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会編、オーム社. 708 (595-603)

[その他]

ホームページ等

- (1) 国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・同位体地球化学研究グループ

<http://www.jamstec.go.jp/kochi/j/groups/isotope-geochemistry.html>

- (2) 研究代表者ホームページ

<https://sites.google.com/site/motooito3/home/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 元雄 (ITO, Motoo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー代理

研究者番号：40606109

### (2) 研究分担者

山口 亮 (YAMAGUCHI, Akira)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：70321560

牛久保 考行 (USHIKUBO, Takayuki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・技術研究員

研究者番号：10722837

### (3) 連携研究者

富岡 尚敬 (TOMIOKA, Naotaka)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・主任技術研究員  
研究者番号：30335418

癸生川 陽子 (KEBUKAWA, Yoko)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70725374

### (4) 研究協力者

兒玉 優 (KODAMA, Yu)

株式会社マリン・ワーク・ジャパン