

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03985

研究課題名(和文) 銅同位体を用いた海底熱水鉱床の形成機構に関する研究

研究課題名(英文) Study on formation mechanism of seafloor hydrothermal deposits based on Cu isotope measurement

研究代表者

池端 慶 (IKEHATA, KEI)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：70622017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：日本周辺の海域から採取された海底熱水鉱床試料中の含銅鉱物の銅同位体組成は、先行研究で報告されている現世の海底熱水鉱床において高い頻度で産出する各種含銅鉱物の同位体組成の範囲に含まれた。これらの試料は、続成作用や広域変成作用の影響を強く受けていないことから、その同位体組成は初生的な情報を保持していると考えられる。含銅鉱物の鉱物組織・産状と銅同位体組成との比較から、これらの鉱物の晶出に関与した母岩起源の銅を含む熱水の流路の推定を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果から、海底熱水鉱床試料に含まれる様々な大きさの各種含銅鉱物の銅同位体組成は、鉱物組織(産状)と詳細に比較することで、銅の起源のみならず、これらの鉱物の晶出に関与した熱水の流路を評価・推定する指標になり得ると考えられる。これらの基礎的な情報は、ある海底熱水変質域中の鉱化流体の広がり(鉱量)や鉱床の品位の評価につながる可能性が高いことから、海底熱水鉱床の探査や開発に役に立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Copper isotope compositions of copper-bearing minerals in seafloor hydrothermal deposits around Japan are within the range of those for reported main various copper-bearing minerals in modern seafloor hydrothermal deposits worldwide. Compared with ancient seafloor hydrothermal deposits which may have experienced more significant isotopic homogenization processes, initial (e.g., pre-metamorphic) copper isotopic characteristics of modern seafloor hydrothermal deposits are probably preserved. The spatial distribution of copper isotopic compositions in this study may reflect fluid pathways during hydrothermal activity.

研究分野：鉱床学・地球化学・火山学

キーワード：海底熱水鉱床 銅同位体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱水溶液から有用元素が沈殿、濃集して形成したと考えられている熱水鉱床は、火山性塊状硫化物鉱床（黒鉱型鉱床、別子型鉱床など）、斑岩銅鉱床、スカルン型鉱床を代表とし、地球表層において銅、亜鉛、鉛の大部分はこのタイプの鉱床を形成している。日本の周辺海域の海底には、現世の火山性塊状硫化物鉱床とよべる海底熱水鉱床が多数形成されているが、これらの形成機構や、有用元素の濃集機構、起源に関しては、未だ良く分かっていない。金属資源の安定確保のためには、これらの海底熱水鉱床の探査など、新たな鉱床の開発やそのための基礎的な鉱床形成機構の解明に関する研究は重要である。

試料中の元素の安定同位体比は、その元素の起源や輸送過程、さらに試料が形成された時の物理化学的状態など、元素の濃度分析からは得ることのできない様々な有益な情報を提供する。有用元素の一つである銅の同位体比は、岩石の熱水変質の程度や銅含有鉱物形成時の熱水の温度、pH、酸化還元状態等、銅の起源や濃集機構の解明に大変有効な指標となることが明らかになってきた（例：Moynier et al., 2017）。したがって、海底熱水鉱床に関連する様々な試料に含まれる銅の同位体比を高精度・高確度分析することにより、未知の部分の多い海底熱水鉱床の形成機構に関して有益な知見が得られることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、日本周辺の海域（沖縄トラフや伊豆・小笠原・マリアナ弧など）の海底から系統的に採取された岩石・熱水変質鉱物・鉱床鉱物試料の構成物の種類や組織を詳細に把握した後、主に銅含有鉱物に含まれる銅の同位体比を高精度・高確度分析することにより、銅の起源や濃集機構を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 日本周辺の海域（沖縄トラフや伊豆・小笠原・マリアナ弧など）の海底から系統的に採取された岩石・熱水変質鉱物・鉱床鉱物試料の構成物を実体顕微鏡などで観察する。その後、試料の表面は、各種岩石切断機や研磨材を用いて整形・研磨して、薄片（片面、両面）や厚片（エポキシ系樹脂などでマウントしたもの）を作成する。研磨試料を偏光顕微鏡、金属反射顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)、顕微ラマン分光装置などを使用して詳細に観察・鉱物同定を行う。一部の試料は、粉砕機を使用して密閉容器内で粉末化する。粉末試料は粉末 X 線回折装置(XRD)により、構成鉱物の同定を行う。これらの作業により、試料の形態学的特徴、変質程度、構成鉱物の種類・産状などを把握する。

(2) 試料の全岩化学組成（主要・微量元素）の定量分析は、四重極型誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)などを使用して行う。また、ミクロンレベルの鉱床鉱物、関連する変質鉱物の主要・微量元素定量局所分析は、X 線マイクロアナライザー (EPMA)、レーザー掘削装置付き四重極型誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)などを使用して行う。含銅硫化物などの鉱床鉱物の形成温度を把握するため、これらの鉱物と同時に形成されたと考えられる熱水変質鉱物中に含まれる流体包有物の均質化温度の測定に関しては、顕微鏡用冷却加熱ステージを使用して実施する。

(3) 粉末試料の酸分解と標準試料の調合などは、主にメタルフリークラス 1000 クリーンルーム中のクリーンブース(クラス 100)内で行う。各種試料の銅の同位体比の高精度・高確度測定は、多重検出器型質量分析装置(MC-ICP-MS)を使用して実施する。

4. 研究成果

(1) 本研究で扱った海底熱水鉱床試料には、いわゆる鉱床に相当する塊状硫化物のみならず、粘土鉱物などの様々な熱水変質鉱物中に脈状に産出する硫化物もみられた。これらの試料中に含まれる主な含銅鉱物は、黄銅鉱であり、その他に微量であるが砒四面銅鉱などを含むことが分かった。黄銅鉱は、単独で産することは少なく、多くは黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱などの他の硫化物と密雑している。一部の黄鉄鉱粒子の中には、長径数ミクロン程度の微細な黄銅鉱がインクルージョンとして存在していることも確認した。熱水変質鉱物の組み合わせは、熱水の温度や組成などを反映するが、ミクロンレベルの領域において含銅鉱物がどのような種類の粘土鉱物中に産しているかを判断することは、一般的な粉末 X 線回折装置を使用した分析方法では困難である。そこで、顕微ラマン分光装置を使用して、ミクロンレベルで熱水変質鉱物の同定を試みた。しかし、一部の粘土鉱物に関しては、ラマンスペクトルや分析条件の情報が著しく不足していることが判明したため、主要粘土鉱物(モンモリロナイト、パイロフィライト、ディッカイト、カオリナイト、サボナイト)の分析条件の設定やリファレンススペクトルの取得は、日本粘土学会参考粘土試料を使用して実施し(Ikehata et al., 2021)、実試料に適用することができた。

(2) 本研究で扱った海底熱水鉱床試料に含まれる各種含銅鉱物（黄銅鉱など）の銅同位体組成 {ある試料の銅同位体比は、米国国立標準技術研究所の銅板標準試料（NIST976）の同位体比と比較して千分率（‰）で示す} を多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析計（MC-ICP-MS）により測定した。その結果、各種含銅鉱物の銅同位体組成は、先行研究で報告されている現世の海底熱水鉱床において高い頻度で産出する各種含銅鉱物の銅同位体組成（-1~+3‰: Zhu et al., 2000; Rouxel et al., 2004）の範囲に含まれ、特異な値は示さなかった。本研究対象試料は、過去の海底熱水鉱床（例えば別子型鉱床）試料の銅同位体比の分析結果から指摘されている（Ikehata et al., 2011）、鉱床形成後の続成作用や広域変成作用の影響を強く受けていないことから、その同位体組成は初生的な情報を保持していると考えられる。黄銅鉱や銅を含む黄鉄鉱、閃亜鉛鉱の鉱物組織・産状と銅同位体組成との比較から、これらの鉱物の晶出に関与した熱水の流路の推定を行うことができた。銅の起源は、母岩であると考えられるが、各サイト内の銅同位体比の変動幅は、主に母岩からの銅溶脱時、銅を含む熱水の上昇時、銅鉱物の晶出時の同位体分別に起因することが示唆された。

<引用文献>

Hedenquist, J.W., Izawa, E., Arribas, A., and White, N.C., Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration, Resource Geology Special Publication, No.1, 1996, 17

Ikehata, K., Notsu, K., and Hirata, T., Copper isotope characteristics of copper-rich minerals from Besshi-type volcanogenic massive sulfide deposits, Japan, determined using a femtosecond LA-MC-ICP-MS, Economic Geology, v.106, 2011, 307-316

Ikehata, K., Arakawa, Y., and Ishibashi, J., Raman microspectroscopic study of reference clay minerals and alteration minerals in volcanic ejecta from the 7 March 2012 phreatic eruption on Ioto Island (Iwo-jima), Izu-Bonin arc, Japan, Vibrational Spectroscopy, v.114, 2021, 103247, doi., <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2021.103247>

Moynier, F., Vance, D., Fujii, T., and Savage, P., The Isotope Geochemistry of Zinc and Copper, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v.82, 2017, 543-600

Rouxel, O., Fouquet, Y., and Ludden, J.N., Copper isotope systematics of the Lucky Strike, Rainbow, and Logatchev sea-floor hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge, Economic Geology, v.99, 2004, 585-600

Zhu, X.K., O'Nions, R.K., Guo, Y., Belshaw, N.S., and Rickard, D., Determination of natural Cu-isotope variation by plasma source mass spectrometry: implications for use as geochemical tracers, Chemical Geology, v.163, 2000, 139-149

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ikehata Kei, Arakawa Yoji, Ishibashi Jun-ichiro	4. 巻 114
2. 論文標題 Raman microspectroscopic study of reference clay minerals and alteration minerals in volcanic ejecta from the 7 March 2012 phreatic eruption on Ioto Island (Iwo-jima), Izu-Bonin arc, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vibrational Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vibspec.2021.103247	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 Nozaki Tatsuo, Nagase Toshiro, Takaya Yutaro, Yamasaki Toru, Otake Tsubasa, Yonezu Kotaro, Ikehata Kei, Totsuka Shuhei, Kitada Kazuya, Sanada Yoshinori, Yamada Yasuhiro, Ishibashi Jun-ichiro, Kumagai Hidenori, Maeda Lena, D/V Chikyu Expedition 909 Scientists	4. 巻 11
2. 論文標題 Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-87050-z	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 Eslami Alireza, Malvoisin Benjamin, Grieco Giovanni, Aradi Laszlo Elod, Marchesi Claudio, Cavallo Alessandro, Montanini Alessandra, Borghini Giulio, Mathur Ryan, Ikehata Kei, Davis Donald W., Li Chun-Hui, Szabo Csaba	4. 巻 382-383
2. 論文標題 Native copper formation associated with serpentinization in the Cheshmeh-Bid ophiolite massif (Southern Iran)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2020.105953	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11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 石橋純一郎、戸塚修平、堤 映日、塚本 成、吉良優佑、島田和彦、山崎 徹、池原 研、長瀬敏郎、高谷雄太郎、池端 慶、後藤隆嗣、郷津知太郎、新城竜一、町山栄章、飯島耕一、山本浩文、熊谷英恵
2. 発表標題 沖縄トラフごんどうサイトの海底下の熱水変質鉱物の鉱物学的・地球化学的特徴
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸塚修平、石橋純一郎、島田和彦、池端 慶、町山栄章、飯島耕一、山本浩文、熊谷英恵、池原 研、山崎 徹、高谷雄太郎、長瀬敏郎、ティンデル トーマス、米津幸太郎、多田祐輝
2. 発表標題 沖縄トラフごんどうサイトの海底下から得られた熱水性堆積物の鉱物学的・地球化学的特徴
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池端 慶、伊達みのり、石橋純一郎、菊川城司、萬年一剛
2. 発表標題 箱根山大涌谷の球状硫黄
3. 学会等名 資源地質学会第69回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸塚修平、石橋純一郎、野崎達生、木村純一、常青、池端 慶、島田和彦、宮本 堯
2. 発表標題 中部沖縄トラフごんどうサイトにおける掘削コア試料中の方鉛鉱のPb同位体組成
3. 学会等名 資源地質学会第69回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長瀬敏郎、野崎達生、高谷雄太郎、石橋純一郎、山崎 徹、鳥本淳司、戸塚修平、池端 慶、米津幸太郎、ティンデル トーマス、熊谷英 憲、前田怜奈
2. 発表標題 伊是名海穴掘削コア鉱石試料の鉱物学的解析
3. 学会等名 資源地質学会第69回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸塚修平、石橋純一郎、島田和彦、宮本 堯、池端 慶
2. 発表標題 沖縄トラフごんどうサイトの海底下における塊状硫化物の鉱物学的特徴
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年年会
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

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