

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01172

研究課題名（和文）脈石鉱物の地球化学的研究に基づく新しい熱水鉱床成因モデルの構築

研究課題名（英文）Formation mechanism of seafloor massive sulfide deposit based on geochemical studies of gangue minerals

研究代表者

石橋 純一郎 (Ishibashi, Jun-ichiro)

神戸大学・海洋底探査センター・教授

研究者番号：20212920

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円

研究成果の概要（和文）：沖縄トラフに位置する熱水活動域の海底下から掘削により得られた地質試料に含まれる脈石鉱物を対象として、流体包有物マイクロサーモメトリー、ストロンチウム・イオウの同位体比測定、放射非平衡年代測定などの地球化学的な解析を行った。解析結果に基づいて海底下の温度・化学環境を明らかにし、間隙水に満ちた堆積層に熱水由来成分が浸入し両者が混合したことで進行する化学反応により脈石鉱物の鉱化作用が進行することを示した。さらに重晶石の年代測定から、堆積環境の成立後に鉱化作用が進行したことを制約する年代を得た。これらの結果は熱水鉱床成因モデルの構築において堆積層内の化学反応を考えることが重要であることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の独創性は、現世の熱水活動域の地質試料の地球化学的解析から海底下の流体の挙動に伴う鉱化作用の進行を具体的に示した点にある。従来は地質時代に形成された熱水鉱床の地質学的な証拠によって進められてきた鉱床形成過程の議論に、新しい研究戦略を提示した点が本研究成果の学術的意義である。また本研究成果は、海底熱水鉱床を金属資源として開発する際に予想される課題に合理的な対応をするための基盤となる科学的知見の一つである点で、社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：Geochemical studies were conducted for sediment cores collected by scientific drilling into the subseafloor region of active hydrothermal fields in the Okinawa Trough. Analyses by micro-thermometry, isotope measurements of strontium and sulfur, and radio disequilibrium dating were conducted focusing on gangue minerals such as barite, in order to reveal temperature and geochemical environments beneath the seafloor. The obtained results were well explained by ongoing subseafloor mineralization by mixing of the hydrothermal fluid and pore water derived from the entrained seawater. This study successfully provided geochemical constraints to support the hydrothermal replacement model for ore genesis of seafloor sulfide ore deposits.

研究分野：地球化学

キーワード：海底熱水鉱床 脈石鉱物 マイクロサーモメトリー 同位体比測定 放射非平衡年代測定 間隙水 堆積層内交代モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海底の熱水鉱床が将来の金属資源として社会的な注目を集めている一方で、その開発に向けた課題に対して有用な情報を提供できる科学的知見が不足しているのが現状である。特に、熱水鉱床がどのような過程を経て形成されるのかという議論 (= 鉱床成因モデル) は、鉱床探査や資源量評価を合理的に進める基盤となる知見を提供できる学術的な問いであるにもかかわらず、広く合意が得られる仮説 (モデル) が確定していない。

この議論を難しくしている理由の一つとして、鉱床の形成に至るには数千年に及ぶタイムスケールでの鉱化作用の継続を考えなければいけない点がある。特に海底の熱水鉱床においては、酸素を含む海水に触れる環境で金属元素の硫化鉱物は安定して存在できないという不利な要素があることから、これを考慮に入れた地質場を設定することが要請される。本研究を開始する当初には、熱水マウンド崩壊モデル、鉱物沈殿反応モデル、鉱物沈降堆積モデル、堆積層内交代モデル、などの鉱床成因モデルが提唱されていたが、どの仮説 (モデル) にも一長一短があって、議論が収束していなかった。

2. 研究の目的

本研究は、堆積層内交代モデルに沿った「海底下堆積層内で進行する化学反応が主要な鉱化作用であり、これが継続することによって熱水鉱床の形成に至る」という作業仮説に基づいて立案された。この作業仮説を支持する地球化学的な証拠を見出すことを目的として、熱水活動域の海底下から掘削によって得られた地質試料を研究対象として選んだ。特に単純な化学形を持つ硬石膏・重晶石・石英などの脈石鉱物に着目して、これらの鉱物が熱水から沈殿生成した際の温度・化学環境を詳細に明らかにし、その温度・化学環境を作り出し得る流体の挙動を考察することを目指した。

3. 研究の方法

熱水域海底下堆積層内から得られた地質試料に対してまず基本的な鉱物記載を行った後に、温度環境を明らかにするため、脈石鉱物に含まれる流体包有物のマイクロサーモメトリーを行った。またこれを補うために GNS Science との国際共同研究により粘土鉱物の酸素同位体比測定を行い、熱水変質作用の温度情報を得た。次に、脈石鉱物が生成した際の化学環境に関する制約条件を得るために、脈石鉱物のストロンチウム (Sr) 同位体比およびイオウ (S) 同位体比測定を行った。さらに、鉱化作用に関する年代情報を得るために、脈石鉱物中に含まれる放射性同位体であるラジウム (Ra) とその娘核種の放射線測定を行って放射非平衡年代法を適用するとともに、表層堆積物に含まれる有孔虫の放射性炭素 (^{14}C) 年代測定との比較を行った。

4. 研究成果

(1) 熱水域海底下堆積層内の温度環境

主要な研究成果として、沖縄トラフ伊江山熱水域から得られた堆積物コアを対象試料とした解析結果を示す。まず基本的な鉱物学的解析によって、この堆積物コアの海底下深度 50-65 mbsf において鉱石鉱物や脈石鉱物を含む鉱化層が認められることを明らかにした。また、これより上盤側の堆積物は軽石状の火山性堆積物から構成されており、40 mbsf 以深で熱水変質作用による粘土鉱物の産出が認められた。下盤側の 65 mbsf 以深の堆積物は変質した火山礫から構成されていた。

重晶石のマイクロサーモメトリーによる均質化温度から鉱化作用の温度情報を得た。また粘土鉱物の酸素同位体比解析に同位体温度計を適用して熱水変質作用の温度情報を得た。これらの温度情報を堆積物の深度に対してプロットした鉛直分布 (図 1) から明らかなように、2つの異なる鉱物から得られる温度情報は良く一致していた。このことは、海底下の熱水環境は複雑な履歴を経験しておらず、単一の熱水の作用に支配されていることを示唆する。

得られた温度鉛直分布の特徴として、鉱化層の最上部である 55 mbsf を境界としてその上盤側では直線的な温度勾配が、鉱化層内ではゆるやかな温度勾配が見られた。こうした温度分布を作り出す熱水作用として、熱水に由来する流体が 55 mbsf の深度から浸入し下部に向かって拡散したという流体浸入イベントが考えられる。

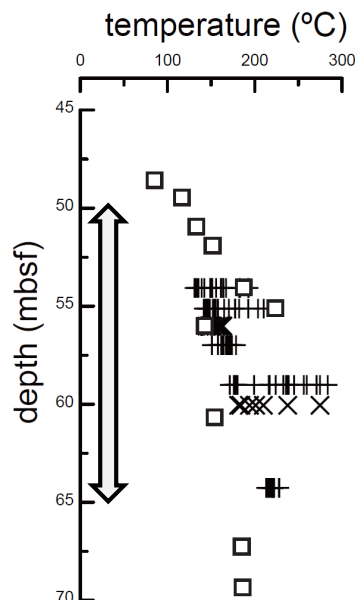


図 1 熱水活動域海底下の温度環境 (矢印は鉱化層の深度を示す)
+ : 重晶石の均質化温度
x : 硬石膏の均質化温度
● : 粘土鉱物の熱水変質温度

(2) 熱水域海底下堆積層内の化学環境

重晶石のストロンチウム(Sr)同位体比は、熱水に由来する流体が示す値から海水が示す値を範囲とする幅広い同位体比であった。この結果は、鉍化層に見られた重晶石が、熱水に由来する成分と海水に由来する成分が混合する反応によって沈殿生成したことを強く示唆する。また重晶石のイオウ(S)同位体比は、海水が示す値より有意に³⁴Sに富む値が見いだされた。これまでの熱水活動域の間隙水の研究で、こうした同位体比を示す硫酸イオンがしばしば報告されており、硫酸イオンの一部が還元反応を経験したものであると考えられている。このような還元反応は酸素を含む海水中で起こるとは考えにくく、重晶石の沈殿生成に関与する「海水に由来する成分」は海水そのものではなく堆積層内に間隙水として存在していたものであることを示唆している。

これらの脈石鉍物の同位体比測定から推定される堆積層内の化学環境は(1)で示唆された熱水由来流体の浸入イベントで説明できる。すなわち、流体浸入イベントに引き続いて起こる熱水と海水が混合する化学反応が、脈石鉍物を沈殿生成する鉍化作用であると考えられる。

研究対象とした堆積物が掘削された地点の地質学的特徴も(1)で示唆された浸入イベントと調和的である。掘削地点はその地形的特徴から直径 100 - 200 m の火口の内側に位置していると考えられる。火口を埋める軽石状の火山性堆積物は空隙率が高いことから、大量の間隙水によって満たされていると推定できる。また火口の周囲には熱水噴出孔が多数存在している。深部のマグマ近傍から海底に向かって上昇する熱水の通路として、火口壁が利用されている可能性が高い。このように地質学的考察によっても、熱水由来流体の浸入イベントを合理的に説明できる。

(3) 熱水域海底下堆積層内の鉍化作用の年代情報

鉍化層から抽出された重晶石の年代測定から放射非平衡年代測定法により 30 年程度の年代が得られた。同じ重晶石を対象とした電子スピン共鳴法により得られた年代は数 100 年であり、一致が必ずしも良くないものの両者ともかなり若い鉍化年代であった。一方で、掘削地点の周囲の海底表層堆積物から浮遊性有孔虫を抽出して放射性炭素年代測定を行った結果から、少なくとも 1000 年前後は静的な堆積作用が継続していることが明らかになった。堆積層が形成された後に堆積層内で鉍化作用が進行したと考えないと、これらの年代情報を統合的に説明することができない。

また年代測定法を重晶石に適用して年代情報を得る研究を進める際の問題点を解決するために以下の副次的な研究を合わせて進めた。沖縄トラフの熱水活動域は大陸地殻のリフティングというテクトニックセッティングに胚胎することから、ウランやトリウムといった放射性核種が熱水活動域周囲の海底に豊富に存在する。海底下堆積層内の化学反応で生成した重晶石に年代測定法を適用する際に、こうした放射性核種の存在が妨害因子となる可能性が考えられる。そこでこの効果を検討するために、放射性核種の存在量が少ない海洋地殻の島弧火山のテクトニックセッティングに胚胎される熱水域である東青ヶ島熱水活動域からの試料採取と解析を行った。これらの比較検討を行った結果、沖縄トラフ熱水活動域では重晶石中に含まれる Ra 量が十分に大きいので放射非平衡年代測定法へ与える影響は無視できることが確認された。一方、平行して実施した電子スピン共鳴法による年代測定においては堆積物中の放射性核種からのガンマ線による被曝などの要因が無視できない場合があり、これが 2 つの年代測定法により得られる年代の相違が沖縄トラフの熱水活動域で大きいことに影響している可能性が示唆された。

(4) 本研究の位置づけとインパクト、今後の展望

以上(1)-(3)に述べたように、「海底下堆積層内で進行する化学反応が鉍化作用である」という作業仮説の前半部分については、脈石鉍物の鉍化作用が熱水由来成分と海水由来成分の間隙水の混合によって進んだことを複数の地球化学的証拠をもとに解明することができた。この点で本研究の目的の大部分は達成されたということが出来る。

一方、作業仮説の後半部分である「鉍化作用が継続することによって熱水鉍床の形成に至る」については、必ずしも十分な解明に至らなかった。その要因の一つとして、本研究の対象とした堆積物コアに記録されている情報が鉍床形成のごく初期段階のものに限定されていたことが考えられる。このことは、鉍化層における硫化鉍物の蓄積量がかなり少ないこと、得られた年代情報に幅があまりなかったこと、などの解析結果から推定される。先述したように海底下の熱水環境が長期にわたる複雑な履歴を経験していないことが温度鉛直分布の解析結果を直観的に解釈することを可能にした面があることから、必ずしも研究試料の選択を誤ったということではない。この意味で、当初に考えていた沖縄トラフの複数の熱水域から得られた堆積物コアを用いた比較検討を行うという戦略が、他の熱水域の試料で脈石鉍物の産出が限定されていたために展開しきれなかったことは、反省すべき点と言えるかもしれない。

最後に本研究で得られた成果の学術的インパクトとして、同位体比に代表される地球化学的証拠を利用することで海底下の流体の挙動による鉍化作用の進行を具体的に示すことができ、説得力がある鉍床成因モデルの構築につながるという研究戦略を示せたことがあげられる。同位体比という指標を共通の物差しとして、現世の海底熱水鉍床を対象とした化学反応の解析結果を、地質時代に熱水活動で形成された黒鉍型熱水鉍床の鉍石に残された地質学的な記録と比較検討することで、長いタイムスケールの中で熱水鉍床がどのような過程を経て形成されるのかという議論により説得力ある証拠を提供していくことが今後の課題となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 J. Ishibashi, S. Totsuka, T. Miyamoto, Y. Itatani, K. Shimada, Y. Okazaki, T. Yamasaki, K. Ikehara, T. Nagase, Y. Takaya, R. Shinjo, T. Yamanaka, K. Arai, M. Tomita, S. Toyoda, H. Machiyama, K. Iijima, H. Yamamoto, H. Kumagai	4. 巻 1
2. 論文標題 Sulfide and sulfate mineralization within a volcanic conduit located in an active hydrothermal field in the Okinawa Trough	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th SGA Biennial Meeting, 28-31 March 2022	6. 最初と最後の頁 153-155
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 無
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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 板谷優志、石橋純一郎、新城竜一、山中寿朗、岡崎裕典、尾上哲治
2. 発表標題 中部沖縄トラフ伊江山熱水域で産する粘土鉱物・硫酸塩鉱物の解析に基づく海底下堆積物中における熱水・海水混合の考察
3. 学会等名 地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石橋純一郎、板谷優志、尾上哲治、岡崎裕典、富田麻紀子、豊田新、新井和乃
2. 発表標題 沖縄トラフ熱水域の掘削コア試料を用いた年代学研究
3. 学会等名 日本地球化学会第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石橋純一郎、宮本堯、戸塚修平、島田和彦、山崎徹、池原研、長瀬敏郎、高谷雄太郎、町山栄章、飯島耕一、山本浩文、熊谷英恵
2. 発表標題 沖縄トラフ伊江山熱水域から得られた堆積物コアの鉱物学的・地球化学的研究
3. 学会等名 地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 板谷優志、石橋純一郎、富田由紀子、豊田新、新城竜一、新井和乃、藤原泰誠
2. 発表標題 沖縄トラフ伊江山サイト熱水域に産する重晶石の地球化学的・年代学的研究
3. 学会等名 地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Ishibashi, S. Totsuka, T. Miyamoto, Y. Itatani, K. Shimada, Y. Okazaki, T. Yamasaki, K. Ikehara, T. Nagase, Y. Takaya, R. Shinjo, T. Yamanaka, K. Arai, M. Tomita, S. Toyoda, H. Machiyama, K. Iijima, H. Yamamoto, H. Kumagai
2. 発表標題 Sulfide and sulfate mineralization within a volcanic conduit located in an active hydrothermal field in the Okinawa Trough
3. 学会等名 Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 16th Biennial Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022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
研究分担者	新城 竜一 (Shinjo Ryuichi) (30244289)	総合地球環境学研究所・プログラム研究部・教授 (64303)	
研究分担者	山中 寿朗 (Yamanaka Toshiro) (60343331)	東京海洋大学・学術研究院・教授 (12614)	
研究分担者	岡崎 裕典 (Okazaki Yusuke) (80426288)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	豊田 新 (Toyoda Shin) (40207650)	岡山理科大学・古生物学・年代学研究センター・教授 (35302)	

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			
ニュージーランド	GNS Science			