



2020年10月14日
国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立大学法人神戸大学
学校法人千葉工業大学
国立大学法人東北大学
国立大学法人九州大学

海底熱水鉱床の初期形成プロセスに微生物活動が寄与 —海底下鉱床形成モデルを書き換える可能性—

1. 発表のポイント

- ◆ 中部沖縄トラフ海底熱水鉱床から、極めて低い硫黄同位体比組成を示す黄鉄鉱粒子を発見した。
- ◆ 硫黄同位体比の値から、微生物活動による海水の硫酸還元プロセスにより生成された硫黄を材料としていることが明らかとなった。
- ◆ 海底熱水鉱床の初期形成プロセスの一部は、微生物活動によって誘発・促進されていることが明らかとなった。

2. 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 松永 是）海洋機能利用部門海底資源センターの野崎達生グループリーダー代理らは、国立大学法人神戸大学、学校法人千葉工業大学、国立大学法人東北大学、国立大学法人九州大学と共同で、中部沖縄トラフの海底熱水鉱床（※1）から採取された試料（図1、2）を詳細に分析した結果、極めて低い硫黄同位体比組成（ $\delta^{34}\text{S}$ ）（※2）を持つ黄鉄鉱（ FeS_2 ）粒子を発見し、微生物活動に由来するものであることを明らかにしました。

これまで、海底熱水鉱床を構成する硫化鉱物の沈殿や酸化・溶解に数多の微生物活動が関与しているであろうことは推測されていましたが、鉱床の形成プロセスと照らし合わせてその特定が試みられたことはありませんでした。そこで本研究では、地球深部探査船「ちきゅう」の航海で得られた掘削コア（※3）および熱水噴出孔のチムニー（※4）試料を対象として、詳細な顕微鏡観察や鉱物組成測定、局所硫黄同位体分析を実施しました。

掘削コア試料に含まれる黄鉄鉱粒子は、熱水活動の重複によって鉱化作用が進む（鉱床が成長する）につれて、フランボイダル（※5）、コロフォーム（※6）、自形（※7）の組織・形状を示します（図3、4）。これらの黄鉄鉱粒子について、二次イオン質量分析装置（SIMS）

を用いた局所硫黄同位体分析を行った結果、フランボイダル黄鉄鉱は最低で-38.9‰（パーミル：千分率）という極めて低い同位体比組成を有し、フランボイダル⇒コロフォーム⇒自形と組織・形状が変わるにつれて、高い硫黄同位体比組成に漸移することがわかりました（図5、6）。

このような大きな硫黄の同位体分別を起こし得るメカニズムは、硫酸還元バクテリアによる海水の硫酸還元プロセスしか知られていません。また、低い硫黄同位体比組成を持つフランボイダル黄鉄鉱は、鉱化作用が進むにつれて海底熱水鉱床を構成する黄銅鉱（CuFeS₂）、方鉛鉱（PbS）、閃亜鉛鉱（ZnS）などの他の硫化鉱物（※8）によってしばしば置換されています（図4）。したがって、フランボイダル黄鉄鉱は海底熱水鉱床を構成する硫化鉱物の出発物質・核として機能しており、鉄や硫黄などの材料を供給していると考えられます。この初期出発物質であるフランボイダル黄鉄鉱は、微生物による硫酸還元プロセスを経た硫黄を材料としていることから、海底熱水鉱床の初期形成プロセスには海底下の微生物活動が重要な役割をしており、鉱床生成を誘発・促進していると考えられます。

今後、他の海域の掘削コア試料や³³S・³⁶Sも含めたマルチ硫黄同位体分析を行い、海底熱水鉱床生成と微生物活動寄与の詳細を解明していく予定です。

本成果は、米国のThe Geological Society of America (GSA) が発行する学術雑誌「*Geology*」に10月7日付けで掲載されました。

タイトル：Microbial sulfate reduction plays an important role at the initial stage of subseafloor sulfide mineralization

著者：野崎達生^{1、2、3、4}、長瀬敏郎⁵、牛久保孝行⁶、清水健二⁶、石橋純一郎⁷、地球深部探査船「ちきゅう」第909次航海乗船研究者

1. 海洋研究開発機構 海洋機能利用部門 海底資源センター
2. 東京大学大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター
3. 神戸大学大学院理学研究科 惑星学専攻
4. 千葉工業大学 次世代海洋資源研究センター
5. 東北大学 学術資源研究公開センター 総合学術博物館
6. 海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門 高知コア研究所
7. 九州大学大学院理学院 地球惑星科学部門

3. 背景

日本は世界第6位の広さの排他的経済水域（EEZ）を有し、マンガン団塊、海底熱水鉱床、マンガンクラスト、レアアース泥に分類される海底鉱物資源やメタンハイドレート、海底油田などのエネルギー資源が分布しています。2010～2016年にかけて、中部沖縄トラフ伊平屋北海丘および伊是名海穴の海底熱水サイトにおいて、地球深部探査船「ちきゅう」による4度の掘削調査航海が行われました（統合国際深海掘削計画[第331次航海/2010年10月5日既報](#)、[CK14-04航海（地球深部探査船「ちきゅう」第907次航海）/2014年7月26日既報](#)、[CK](#)

[16-01 航海（地球深部探査船「ちきゅう」第 908 次航海）/2016 年 3 月 18 日既報、CK16-05 航海（地球深部探査船「ちきゅう」第 909 次航海）/2016 年 12 月 19 日既報](#)）。その後、これらの調査航海によって得られた掘削コア・チムニー試料の記載・分析が行われており（[2016 年 2 月 25 日既報](#)）、特に海底の堆積物下に埋もれた海底下鉱体の成因解明および探査手法の開発が精力的に行われています（[2018 年 8 月 24 日既報、2019 年 11 月 1 日既報](#)）。海底熱水鉱床を構成する硫化鉱物の沈殿や酸化・溶解に数多の微生物活動が関与しているであろうことは推測されていましたが、鉱石試料の詳細な顕微鏡観察に基づいて鉱化ステージごとに直接的に観察されたことはこれまでありませんでした。

そこで、海洋研究開発機構、東北大学および九州大学が中心となって、海底熱水鉱床の掘削コア試料について記載と硫黄同位体分析を進めています。その過程において、2010 年 9～10 月および 2016 年 11～12 月に地球深部探査船「ちきゅう」を用いて中部沖縄トラフ伊平屋北海丘および伊是名海穴で行われた統合国際深海掘削計画第 331 次航海・地球深部探査船「ちきゅう」第 909 次航海で採取された掘削コア試料から、極端に低い硫黄同位体比組成を示す黄鉄鉱粒子が発見されました。極端に低い硫黄同位体比組成は微生物による硫酸還元プロセスでしか説明できないことから、本研究では掘削コア・チムニー試料の研磨片について、最も普遍的な硫化鉱物である黄鉄鉱に着目して、詳細な反射顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、電子プローブマイクロアナライザーによる鉱物組成測定、二次イオン質量分析装置による局所硫黄同位体分析を行い、各鉱化ステージにおける微生物活動寄与の特定を試みました。

4. 成果

中部沖縄トラフ伊平屋北海丘および伊是名海穴で採取された掘削コア（図 2）およびチムニー試料について、詳細な記載、鉱物組成測定および局所硫黄同位体分析を行いました。その結果、掘削コア試料に含まれる黄鉄鉱粒子は鉱化作用が進むにつれて、フランボイダル⇒コロフォーム⇒自形の組織・形状を示し、フランボイダル黄鉄鉱はしばしば他の硫化鉱物に置換されていることが明らかになりました（図 3、4）。また、伊平屋北海丘の人工熱水孔（※9）上に生成したチムニー試料に含まれる黄鉄鉱は、チムニーの外側ではコロフォーム・球状組織を、チムニーの内側では自形・針状組織を示すことが明らかになりました（図 3）。伊是名海穴の硫化物マウンド鉱体（※10）、海底下鉱体および海底下鉱体上盤の軽石片・硫化物脈に含まれる黄鉄鉱粒子の硫黄同位体比組成は、フランボイダル黄鉄鉱が $-38.9 \sim -7.1\text{‰}$ ($-17.3 \pm 10.2\text{‰}$; $n = 42$) と低い値を示し、コロフォーム黄鉄鉱が $-13.6 \sim -3.0\text{‰}$ ($-7.4 \pm 2.5\text{‰}$; $n = 29$)、自形の黄鉄鉱が $-13.4 \sim -3.8\text{‰}$ ($-6.8 \pm 2.7\text{‰}$; $n = 19$) を示します（図 5、6）。伊平屋北海穴のマウンド鉱体ふもとの掘削コア試料に含まれる黄鉄鉱粒子も類似の傾向を示し、フランボイダル黄鉄鉱が $-38.0 \sim -10.4\text{‰}$ ($-28.2 \pm 9.8\text{‰}$; $n = 10$)、自形の黄鉄鉱が $+0.4 \sim +3.9\text{‰}$ ($+2.9 \pm 1.1\text{‰}$; $n = 15$) を示します（図 5、6）。一方、伊平屋北海丘の人工熱水孔上に生成したチムニー試料に含まれる黄鉄鉱粒子は狭い硫黄同位体比組成を有し、コロフォーム・球状の黄鉄鉱が $-2.3 \sim +1.9\text{‰}$ ($-0.1 \pm 0.9\text{‰}$; $n = 35$)、自形・針状の黄鉄鉱が $-0.7 \sim +2.3\text{‰}$ ($+0.6 \pm 0.9\text{‰}$; $n = 26$) を示します（図 5、6）。これらの結果から、鉱化作用の初期に形成されるフランボイダル黄鉄鉱は極めて低い硫黄同位体比組成を示し、

鉍化作用が進むにつれて形成されるコロフォームおよび自形の黄鉄鉍はより高い硫黄同位体比組成を示すことが明らかになりました。また、噴出孔付近では 300℃を超える熱水と 4℃の海水が混ざり合う環境で生成される人工熱水孔上のチムニーは、黄鉄鉍の組織や晶出順序に関わらず、ほぼ一定の硫黄同位体比組成を示すことが明らかになりました。

伊平屋北海丘の底層海水の硫黄同位体比組成は、+21.2‰であることが報告されています。したがって、フランボイダル黄鉄鉍との間には、最大で約 60‰に達する硫黄の同位体分別が起こっています。黄鉄鉍に含まれる硫黄の起源として、主に (1) マグマに由来する硫黄 (2) カルシウム硫酸塩鉍物 (硬石膏; CaSO_4 、石膏; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) や海水が熱化学的 (非生物的) に還元された硫黄、(3) 海水が硫酸還元細菌によって還元された硫黄、の 3 つが考えられます。(1) の硫黄は、同位体比組成が約 0‰であることが知られているので、本研究で見られたような極めて低い同位体比組成を説明することができません。また、カルシウム硫酸塩鉍物や海水硫酸の熱化学的還元作用では、200℃で約 30‰、250℃で約 25‰、300℃で約 20‰の同位体分別を起こすことができますが (200 度以下ではこのような反応は進行しません)、伊平屋北海丘や伊是名海穴のカルシウム硫酸塩鉍物および海水硫酸の硫黄同位体比組成は、+16.3~+25.5‰および+21.2‰であることが知られているので、フランボイダル黄鉄鉍に見られる-38.9‰のような低い同位体比組成を作ることはできません。したがって、フランボイダル黄鉄鉍を構成する硫黄は、海水の微生物硫酸還元プロセスによって形成され、その後鉍化作用が進むにつれて、微生物によって還元された硫黄の割合が低下していることが分かります。すなわち、熱水活動の重複によってマグマの硫黄あるいは熱化学的硫酸還元プロセスを経た硫黄の寄与が増加し、鉍床生成初期にのみ見られる微生物活動の証拠が上書きされて消えていく、という現象を考えれば一連の硫黄同位体比組成の変化が説明できます。一方、チムニーの硫黄同位体比組成は、マグマの硫黄か熱化学的硫酸還元プロセスを経た硫黄のみで説明することができます。

以上から、海底熱水鉍床の初期出発物質であるフランボイダル黄鉄鉍の生成には、微生物による海水硫酸の還元プロセスが欠かせないことが分かります。また、このようなフランボイダル黄鉄鉍は、引き続き硫化鉍物沈殿における鉄や硫黄の材料を供給していることから、微生物活動が鉍床形成の核として機能し、海底下における鉍床生成を誘発・促進していることが明らかになりました。一方、海底面上の熱水・海水の混合により形成されるチムニーの成長には、硫黄同位体比組成の観点からは微生物活動の寄与がなくても無機化学的プロセスで説明できることが明らかになりました。

5. 今後の展望

本研究では、掘削コア・チムニー試料の詳細な記載と二次イオン質量分析装置による局所硫黄同位体分析を合わせて各鉍化ステージにおける微生物活動の寄与を解明しましたが、現世の海底熱水鉍床からこのような報告がされたのは本研究が初めてです。今後は同様の研究手法を他の海域の海底熱水鉍床にも適用し、鉍床初期形成プロセスにおける微生物活動寄与の普遍性を検証していく必要があります。また、本研究では ^{32}S と ^{34}S の 2 種類の硫黄同位体を用いましたが、さらに ^{33}S や ^{36}S を合わせたマルチ硫黄同位体測定を行うことで、熱化学的

硫酸還元や微生物硫酸還元などの各プロセスの寄与を可視化する研究へと発展させる予定です。

鉱床初期形成プロセスにおける微生物活動寄与の普遍性およびその海底下の層準（位置）が明らかになれば、堆積物に埋没した海底下鉱体の新たな探査指針になる可能性も秘めています。また、海底下における鉱床形成プロセスや硫黄の物質循環モデルを大きく書き換える可能性を秘めています。今後、このような鉱床学と微生物学を融合させた『生物鉱学』の研究に着手していく予定です。

【補足説明】

※1 海底熱水鉱床：海底火山活動に伴って湧出する熱水から沈殿した鉱床。鉱床とは、資源として利用できる元素や石油・天然ガスなどが濃縮している場所で、採掘して採算が取れるものを指す。したがって、商業開発に至っていない海底熱水鉱床を『鉱床』と記すのは語弊があるが、Seafloor hydrothermal deposit に相当する他の適当な訳語が存在しないため、海底熱水鉱床という用語を使用した。

※2 硫黄同位体比組成 ($\delta^{34}\text{S}$)：試料の $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ から標準物質の $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ の差分を取り、それを標準物質の $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ で割り算して、1000 を掛けたもの（＝千分率を取ったもの）。式で表すと $\delta^{34}\text{S} = ((^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}} - (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{standard}}) / ((^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{standard}}) \times 1000$
標準物質として、本研究では Vienna-Canyon Diablo Troilite (VCDT) を使用している。 $\delta^{34}\text{S}$ の単位はパーミル (‰：千分率) (参考；パーセント、%：百分率)。

※3 掘削コア：掘削作業により得られた柱状地質試料のこと。通常の掘削作業で使用するドリルビットとは形状が異なり、真ん中に穴が開いているコアビットを用いて掘削することで、穴の開いた部分に円柱状の岩石が入り込んでいき、それが掘削コア試料として回収される。

※4 チムニー：海底の熱水活動によって供給された金属元素が、海底面上で硫化鉱物、酸化鉱物、珪酸塩鉱物、硫酸塩鉱物などとして沈殿し、熱水噴出孔の周囲に形成される煙突状の鉱体。チムニー (chimney) とは英語で煙突を意味する。

※5 フランボイダル組織：顕微鏡的な球状鉱物の集合 (framboid) した組織。

※6 コロフォーム組織：微粒子が同心円縞状に沈積した鉱物組織。Colloidal 組織ともいわれ、コロイドからの沈殿組織であるが、溶液から直接結晶化が進んでこの組織ができる場合もある。集合形態により、ぶどう状・腎臓状・乳房状などとなり、低温生成の鉱物に多い。

※7 自形：鉱物固有の結晶面がよく発達している形を形容する語。対義語は他形。

※8 硫化鉱物：鉱物の分類上で、硫黄と結合している鉱物群。本研究に用いた掘削コアおよびチムニー試料は、主に黄銅鉱（ CuFeS_2 ）、閃亜鉛鉱（ ZnS ）、方鉛鉱（ PbS ）、黄鉄鉱（ FeS_2 ）などから構成される。

※9 人工熱水孔：統合国際深海掘削計画第 331 次研究航海における掘削調査によって、沖縄トラフ伊平屋北海丘に生成された熱水孔。傾斜地での掘削を可能にするガイドベース、コロージョンキャップ（掘削孔の腐食を防ぐためにガイドベースにかぶせる蓋）が設置され、掘削調査後も熱水が噴出し続けている。

※10 マウンド：海底の熱水活動によって供給された金属元素が、海底面上で硫化鉱物、酸化鉱物、珪酸塩鉱物、硫酸塩鉱物などとして沈殿し、熱水噴出孔の周囲に形成される小丘状の鉱体。マウンド（mound）とは英語で丘、小山を意味する。

※11 仮像：温度・圧力・化学的状态の変化によって、その外形を保ったまま、成分の一部あるいは全部が置換してまったく新しい鉱物になったもの。仮晶とも。

お問い合わせ先：

（本研究について）

国立研究開発法人海洋研究開発機構

海洋機能利用部門海底資源センター グループリーダー代理 野崎達生

電話：046-867-9630 E-mail：nozaki@jamstec.go.jp

国立大学法人東北大学総合学術博物館

学術資源研究公開センター 准教授 長瀬敏郎

電話：022-795-6652 E-mail：nagase@tohoku.ac.jp

国立大学法人九州大学大学院理学研究院

地球惑星科学部門 准教授 石橋純一郎

電話：092-802-4215 E-mail：ishibashi.junichiro.779@m.kyushu-u.ac.jp

（報道担当）

国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 広報課

電話：045-778-5690 E-mail：press@jamstec.go.jp

国立大学法人神戸大学 総務部 広報課

電話：078-803-6678 E-mail：ppr-kouhoushitsu@office.kobe-u.ac.jp

学校法人千葉工業大学 入試広報課

電話：047-478-0222 E-mail：cit@it-chiba.ac.jp

国立大学法人東北大学大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

電話：022-795-6708 E-mail：sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

国立大学法人九州大学 広報室

電話：092-802-2130 E-mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

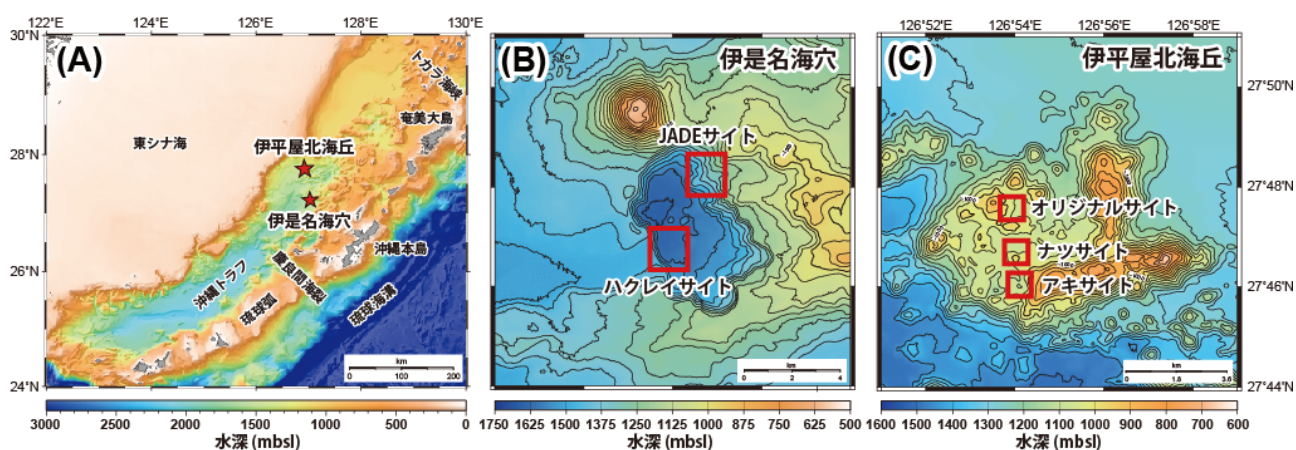


図1 本研究に用いた試料の採取位置図。伊是名海穴の掘削コア試料はハクレイサイトから、伊平屋北海丘の掘削コア・チムニー試料はオリジナルサイトから採取された。

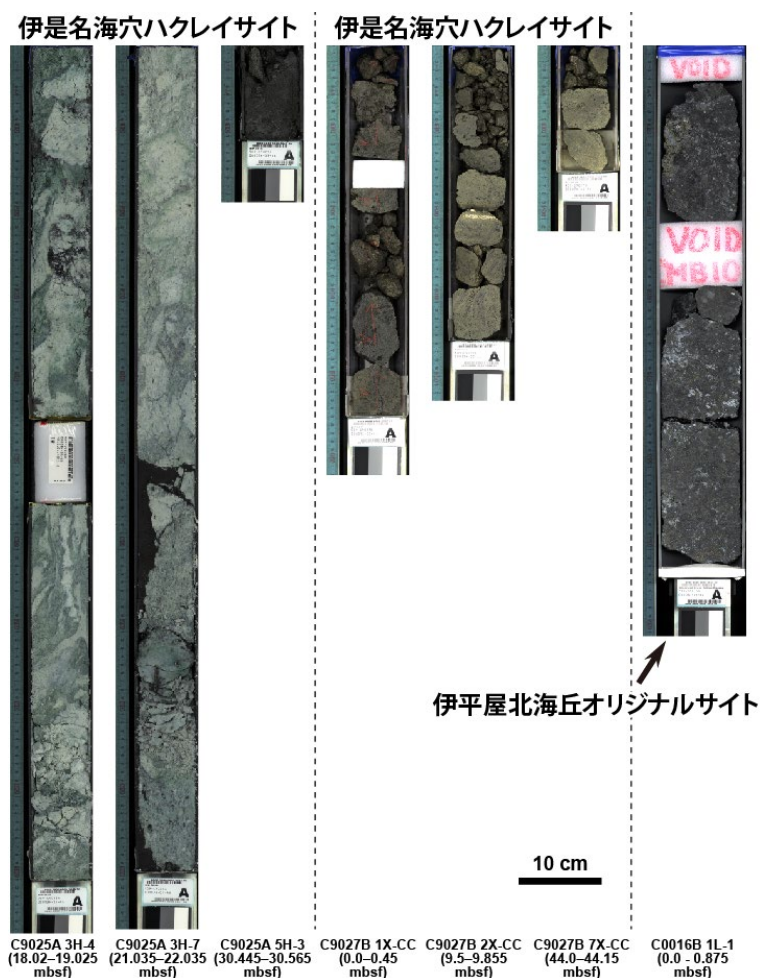


図2 本研究に用いた伊是名海穴ハクレイサイトおよび伊平屋北海丘オリジナルサイトの掘削コア試料断面写真。

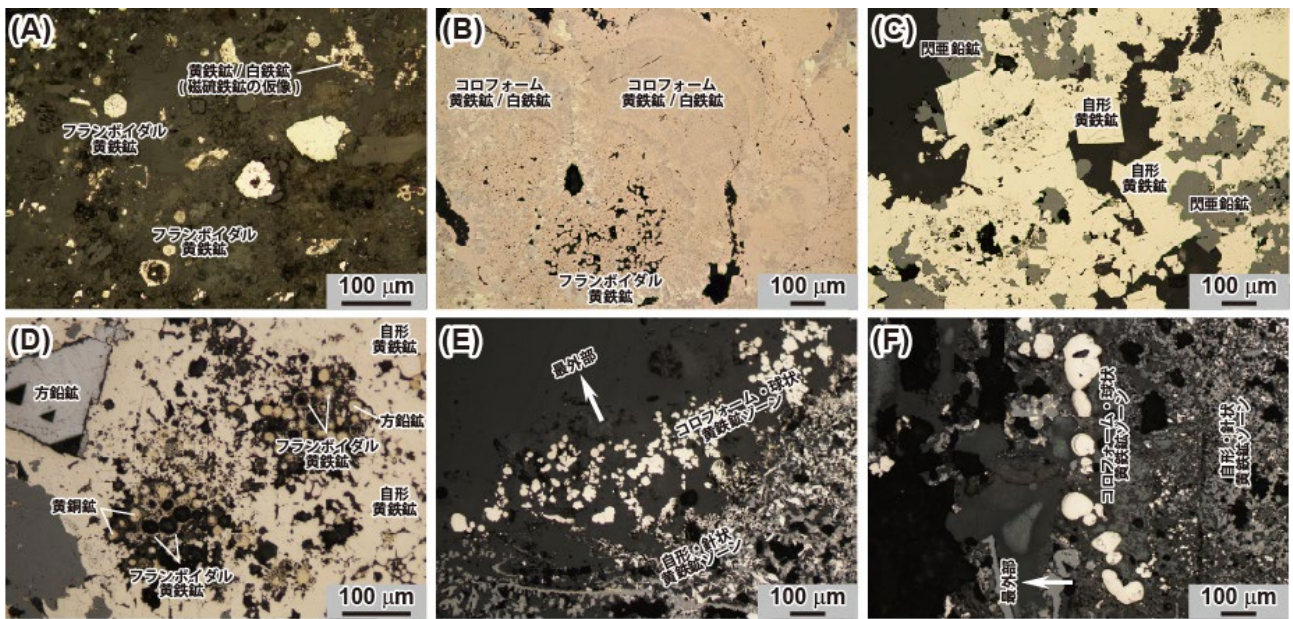


図3 成熟度・鉱化ステージに応じて様々な組織・形状を示す黄鉄鉱粒子。A～Cは伊是名海穴の掘削コア試料、Dは伊平屋北海丘の掘削コア試料、E・Fは伊平屋北海丘のチムニー試料。
仮像（※11）については用語解説を参照。

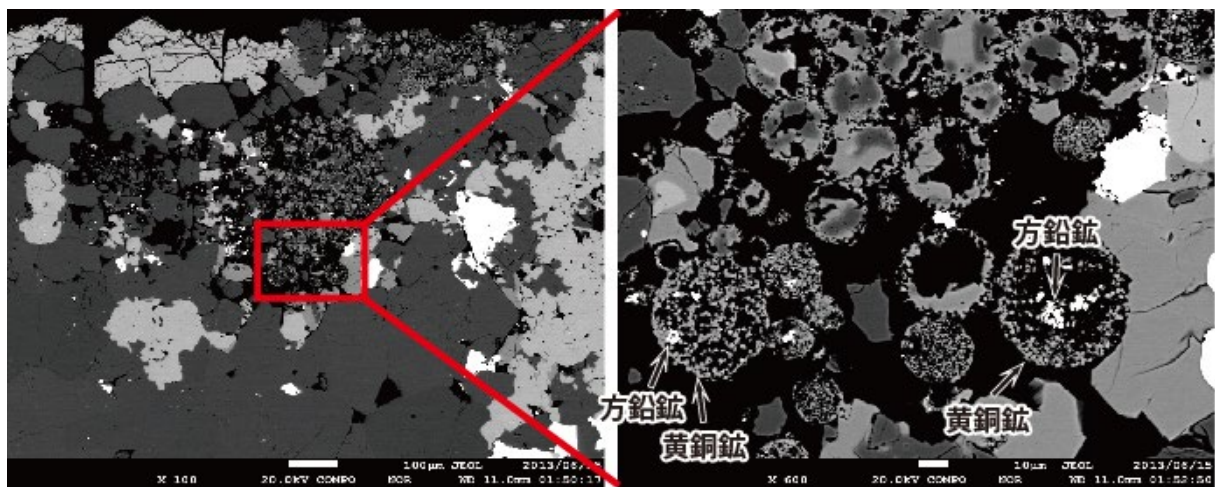


図4 フランボイダル黄鉄鉱が、黄銅鉱や方鉛鉱に置換されている様子を示す後方電子散乱画像。試料は伊平屋北海丘の掘削コア試料。

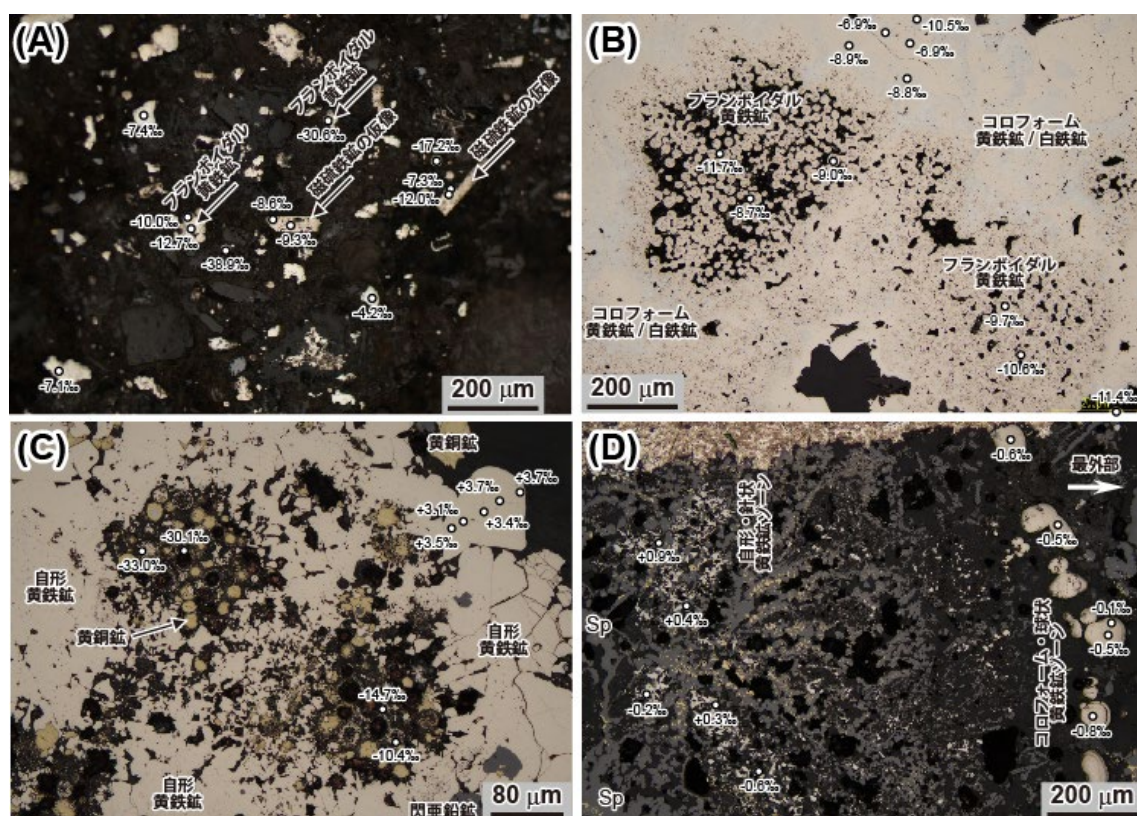


図5 二次イオン質量分析装置により測定した各黄鉄鉱粒子の硫黄同位体比組成の例。A・Bは伊是名海穴の掘削コア試料、Cは伊平屋北海丘の掘削コア試料、Dは伊平屋北海丘のチムニー試料。

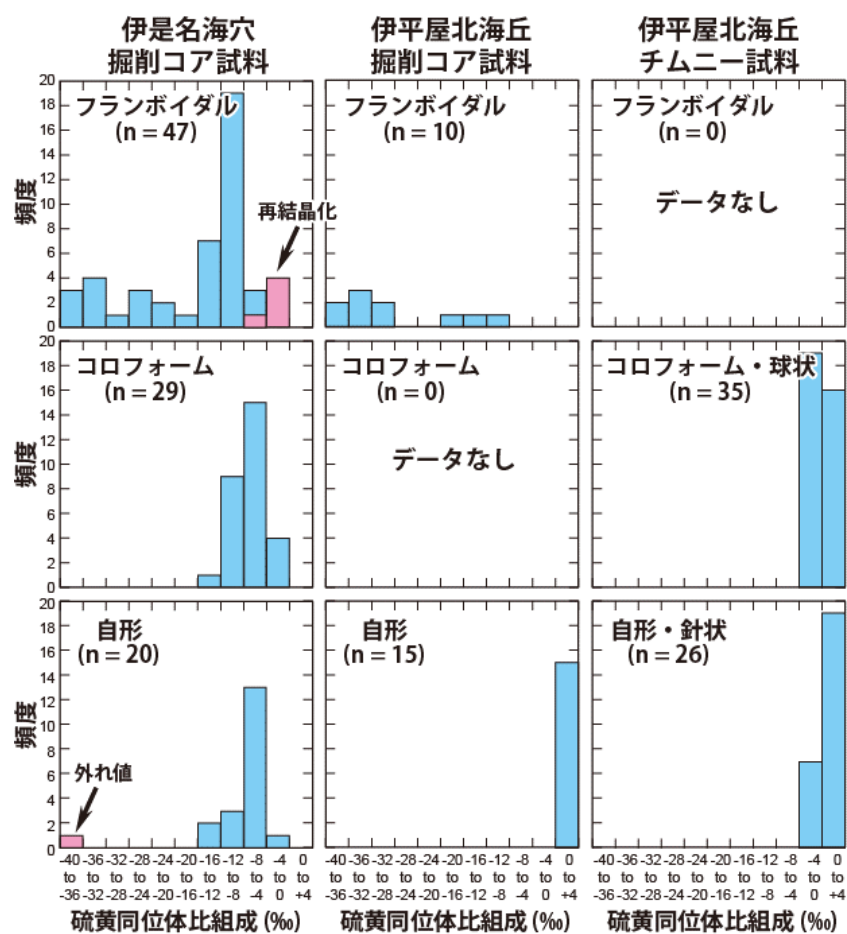


図6 黄鉄鉱粒子の硫黄同位体比組成 ($\delta^{34}\text{S}$) のヒストグラム。n は分析した黄鉄鉱粒子の数。