

日本近海の海底熱水鉱床の中で  
なぜ伊是名海穴は規模が大きいのか；  
海底下軽石置換鉱化作用の重要性

野崎 達生・石橋純一郎・熊谷 英憲

# 日本近海の海底熱水鉱床の中で なぜ伊是名海穴は規模が大きいのか； 海底下軽石置換鉱化作用の重要性

野崎 達生<sup>1,2,3\*</sup>・石橋純一郎<sup>4,5</sup>・熊谷 英憲<sup>6,1</sup>

## The Reason Why Izena Hole Hosts the Large-scale Seafloor Hydrothermal Deposit Around Japanese Coastal Waters; Importance of Subseafloor Pumice Replacement Mineralization

Tatsuo NOZAKI<sup>1,2,3\*</sup>, Jun-ichiro ISHIBASHI<sup>4,5</sup> and Hidenori KUMAGAI<sup>6,1</sup>

<sup>1</sup>Submarine Resources Research Center, Research Institute for Marine Resources Utilization, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

<sup>2</sup>Frontier Research Center for Energy and Resources (FCER), Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>3</sup>Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

<sup>4</sup>Kobe-Ocean Bottom Exploration Center (KOBEC), Kobe University

<sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

<sup>6</sup>Department of Intercultural Communication, Gakushuin Women's College

### Abstract

From November to December 2016, a scientific drilling cruise CK16-05 by using *D/V Chikyu* was performed at Hakurei Site, Izena Hole, middle Okinawa Trough to understand mainly the metallogensis and physical property of the subseafloor sulfide body. At Hole 9026A of the deepest hole down to 180.0 mbsf, lithologies of drilling cores, in descending order, are (1) underwater debris flow deposit (pumiceous sediment), (2) hemipelagic sediment, (3) subseafloor sulfide body with two intercalated layers of hemipelagic sediment, (4) greenish hydrothermally altered clay with pyrrhotite-cubanite veins and (5) pervasive altered hydrothermally altered clay. Based on the all results of petrographic observations, chemical analyses and geophysical logging of boreholes, genesis of Northern Mound can be explained well by a classical syngenic model, however, the subseafloor sulfide body was the most plausibly formed by “subseafloor pumice replacement mineralization”. Thus, the subseafloor replacement process (subseafloor pumice replacement mineralization) would be one of the important factors to form the large-scale seafloor hydrothermal deposit.

**Key words:** Seafloor hydrothermal deposit, Pumice replacement mineralization, Izena Hole, Okinawa Trough, Syngenic, Epigenetic

### 1. はじめに

我々の暮らしている日本の国土面積は約 37.8 万 km<sup>2</sup>、世界の総陸地に占める割合は 0.25% と世界第 61 位であ

**キーワード:** 海底熱水鉱床, 軽石置換鉱化作用, 伊是名海穴, 沖縄トラフ, 同生説, 後生説

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構海洋機能利用部門海底資源センター

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

<sup>4</sup> 神戸大学海洋底探査センター

<sup>5</sup> 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

<sup>6</sup> 学習院女子大学国際文化交流学部国際コミュニケーション学科

2024 年 2 月 13 日受理

\*e-mail: nozaki@jamstec.go.jp

り決して大きくはないが、日本の領海と排他的経済水域 (EEZ) を合わせた面積は約 447 万 km<sup>2</sup> と世界第 6 位の広さを有している。EEZ の中には、油田、ガス田、メタンハイドレートのエネルギー資源だけでなく、膨大な量の海底鉱物資源が胚胎している。この海底鉱物資源は、(1) マンガン団塊 (マンガンジュール)<sup>1</sup>、(2) マンガンクラスト (コバルトリッチクラスト)<sup>1</sup>、(3) 海底熱水鉱床<sup>2</sup>、(4) レアアース泥<sup>3</sup> の 4 つに大別され、将来の新たな非鉄金属の供給源として期待されている (※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』を指すため、商業開発に至っていない海底熱水鉱床については、鉱床という言葉を使うべきではない。しかし、英語の seafloor hydrothermal deposit に相当する他の適切

日本近海の海底熱水鉱床の中でなぜ伊是名海穴は規模が大きいのか

な訳語が存在しないことから、本文では海底熱水鉱床という言葉を用いる)。4種類の海底熱水資源のうち、海底熱水鉱床は主に銅・鉛・亜鉛に富み、副産物として金・銀などを含む。過去の海底で生成した海底熱水鉱床が陸上の地質帯に取り込まれ、現在陸上で観察されるものを火山性塊状硫化物 (VMS: volcanogenic massive sulfide) 鉱床<sup>4</sup>と呼ぶが、VMS 鉱床のうち中央海嶺に起源を有して銅・亜鉛に富むものは別子型鉱床<sup>5</sup> (例えば、別子、佐々連、下川、楨峰など)、島弧・背弧の海底熱水鉱床に起源を有して銅・鉛・亜鉛に富むものは黒鉱鉱床<sup>6</sup> (例えば、小坂、松峰、深沢、餌釣など) と呼ばれ、日本の高度経済成長期の金属需要を支えた。

海底熱水鉱床は、1977年にガラバゴス海嶺ではじめて発見されたのを皮切りに、これまでに全世界から700を超える海底熱水鉱床が発見されている<sup>7</sup>。日本近海では、1986年7月、中部沖縄トラフ伊平屋小海嶺東方の「なつしま海丘」における低温熱水湧水域の発見を契機として、これまでに数十の海底熱水鉱床が報告されている。経済産業省は平成30年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクトの開始を見据えて、海

底熱水鉱床の探査、選鉱・製錬方法の検討、環境影響評価、経済性評価などを行っている。独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (現: 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構) は、2013年に中部沖縄トラフ伊是名海穴 Hakurei サイト (Fig. 1a, b) におけるボーリング調査によって、堆積物下に胚胎する海底下鉱体 (潜頭性鉱体) を発見した<sup>8-10</sup>。また、2017年には世界で初めて海底熱水鉱床の連続揚鉱試験に成功し<sup>11</sup>、2018年には海底熱水鉱床の鉱石から亜鉛地金の製造にも成功している<sup>12</sup>。2023年11月に報告された海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書においては、沖縄海域および伊豆・小笠原海域を合わせた概略資源量として合計5,180.5万トン把握し、生産システムの改良や操業の効率化による生産コストの削減、さらなる新鉱床の発見、金属価格の上昇により収入が増加すれば、経済性を見出し得ると評価されている<sup>13</sup>。

これらの日本近海に分布する海底熱水鉱床のうち、詳細なボーリング調査と資源量の把握まで至っている例は多くはないが、中部沖縄トラフ伊是名海穴 Hakurei サイトでは、海底面上のマウンドおよび潜頭性の海底下鉱体

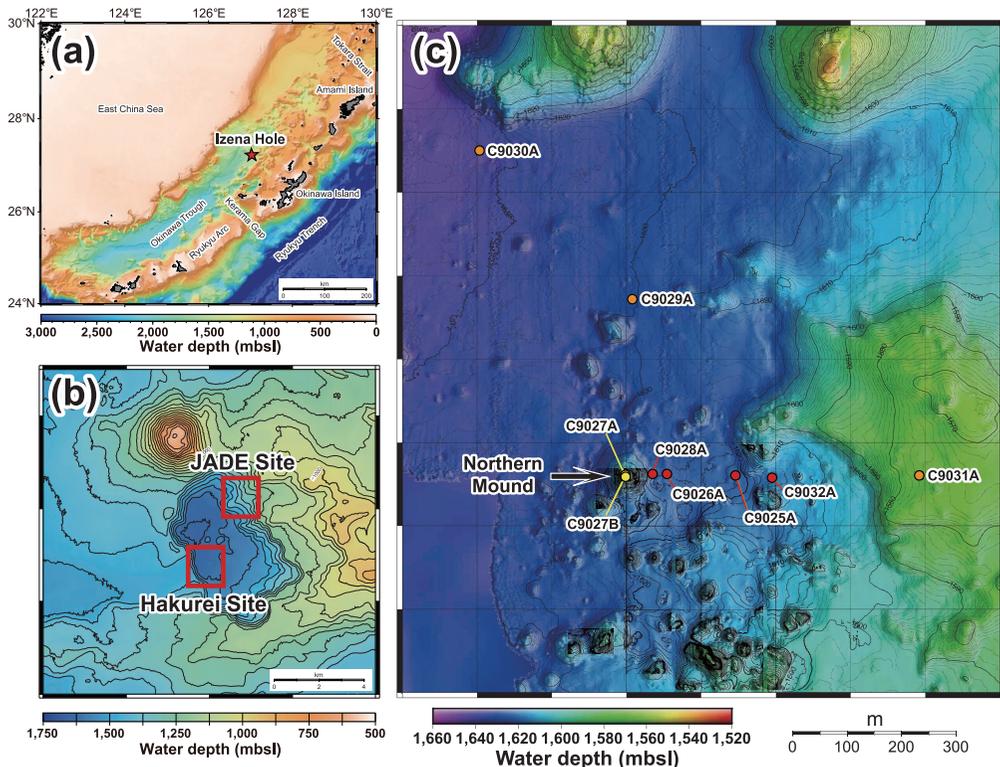


Fig. 1 Location and bathymetric maps of Hakurei Site, Izena Hole, middle Okinawa Trough (modified from Nozaki et al., 2021<sup>11</sup>). (a) Location of Izena Hole, (b) bathymetric map of Hakurei and JADE Sites in Izena Hole and (c) detailed bathymetric map of Hakurei Site and drill hole locations. Red circles; Holes encountering the seafloor sulfide body. Yellow circles; Northern Mound. Orange circles; Reference sites without any sulfide mineralisation.

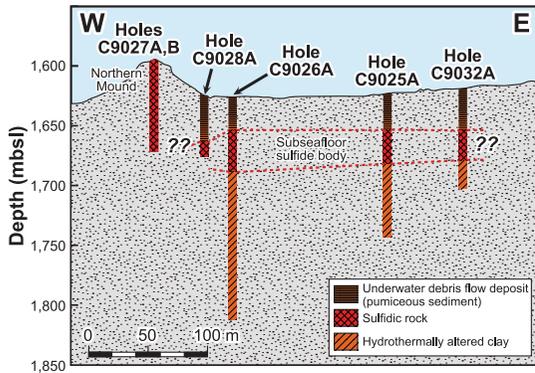


Fig. 2 Simplified lithology of six drill holes along an E-W transect including Northern Mound (modified from Nozaki et al., 2021<sup>17</sup>).

を含めると 2016 年時点で約 740 万トンの鉱石が胚胎していると見積もられている<sup>9,10</sup>。現世の海底熱水鉱床は小規模なものが多く、せいぜい数万トン程度の鉱石しか賦存していないのが一般的であるのに対し<sup>14</sup>、伊是名海穴の約 740 万トンという鉱量は、過去に開発されたキプロス型 VMS 鉱床の典型的な鉱石量に匹敵する値である<sup>14</sup>（この他に規模の大きな現世の海底熱水鉱床として、海底熱水活動が約 5 万年続いていると考えられている大西洋の TAG マウンド<sup>15</sup>（鉱量 390 万トン）およびアメリカ西海岸に位置する堆積物を被覆した中央海嶺である Middle Valley<sup>16</sup>（鉱量 880 万トン）が挙げられる）。このような中、2016 年 11～12 月にかけて、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の課題「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」における「海洋資源の成因に関する科学研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」の一環として、伊是名海穴 Hakurei サイトにおける科学掘削調査航海（CK16-05 航海）が地球深部探査船「ちきゅう」によって実施された<sup>17</sup>（Figs. 1 and 2）。本論では、この科学掘削調査によって描像される伊是名海穴 Hakurei サイトの成因モデル、特に海底下における軽石置換鉱化作用の重要性について解説し、なぜ日本近海に分布する海底熱水鉱床の中で、伊是名海穴 Hakurei サイトの規模が大きいかを考えていきたい。

## 2. 中部沖繩トラフ伊是名海穴の地質概説

沖繩トラフは、琉球列島の北西に位置する東シナ海に広がる背弧海盆（沈み込み帯の上に位置する島弧において、火山フロントより後ろに位置する背弧側の海底の大規模な凹所）である（Fig. 1a）。沖繩トラフには、南奄西海丘、伊平屋北海丘、伊是名海穴、与論海穴、伊良部海丘、多良間海丘、鳩間海丘、第四与那国海丘などの

10 を超える熱水サイトが報告されている<sup>18</sup>。沖繩トラフの伸張速度は比較的遅い  $3.7 \pm 0.06$  cm/年と見積もられており<sup>19</sup>、地震波探査による地下構造解析から沖繩トラフは背弧海盆形成の初期過程カリフティングから背弧拡大への遷移期に相当すると考えられている<sup>20</sup>。伊是名海穴は  $6 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  の長方形の凹地であり（Fig. 1b）、中部沖繩トラフの第四紀琉球火山列の南西延長に位置する<sup>21</sup>。伊是名海穴には、北東のカルデラ斜面部に位置する「JADE サイト」とカルデラ底南部に位置する「Hakurei サイト」の少なくとも 2 つの活動的の海底熱水サイトが確認されている<sup>10,18,22</sup>（Fig. 1b）。

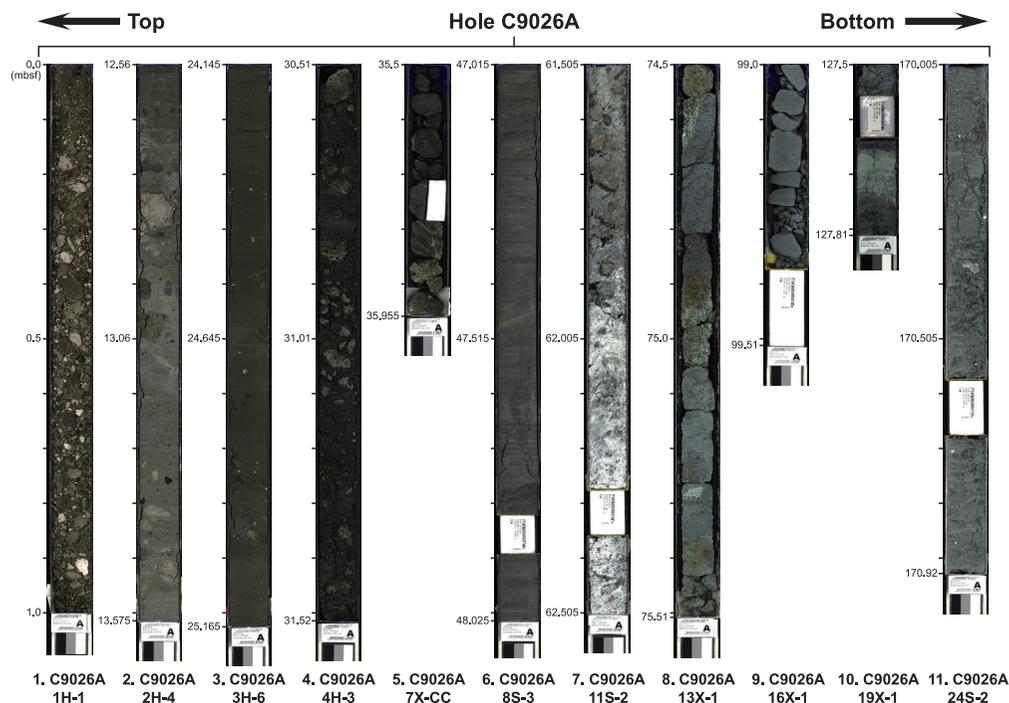
CK16-05 航海では、Hakurei サイトを対象に 8 つの Site, 9 つの Hole において、総掘削長 1034.5 m の科学掘削が行われた（Figs. 1c and 2）。Hole C9027A および C9027B は、海底面上の硫化物マウンド（北部マウンド）を対象に掘削された。また、北部マウンドから東方にかけて 5 つの Hole で掘削が行われ、そのうち 4 つの Hole（西から東にかけて Hole C9028A, C9026A, C9025A, C9032A）において、海底下鉱体が捕捉されている（Fig. 2）。他の 3 つの Hole（C9029A, C9030A, C9031A）において硫化物鉱体は捕捉されていないが、海底下構造を把握するためのリファレンスサイトとして掘削が行われた。カルデラ底に位置する Hole C9029A と C9030A は軽石層が卓越する一方、カルデラ底東端よりも東方に位置する Hole C9031 A は水中乱泥流堆積物が卓越していた。各 Hole の構成鉱物、変質・鉱化作用、コア試料の化学組成、検層結果については、北田ほか（2020）<sup>23</sup>、Nozaki et al.（2021）<sup>17</sup> に詳述されているので、そちらも参照されたい。

## 3. 掘削コアの記載学的特徴

### 3.1 典型的な岩相ユニット

CK16-05 航海において掘削された 8 Site, 9 Hole のうち、掘削長が 180.0 mbsf (meters below seafloor) と最長で、海底下鉱体を含めて典型的な岩相が一通り揃っており、なおかつ海底下鉱体とその直上の堆積物が連続的に採取された Hole C9026A に着目して岩相を見ていく。

Hole C9026A の掘削コア試料は、上位から下位にかけて (1) 水中乱泥流堆積物（軽石質堆積物：層厚約 30 m）、(2) 硫化物（海底下鉱体：層厚約 35 m）、(3) 熱水変質粘土（層厚約 115 m）の 3 つのユニットに大別される（Fig. 2）。水中乱泥流堆積物ユニットのうち、浅い部分（約 0～12 mbsf）は記載学的に pumiceous gravel / mud に対応する堆積物であり、mm～cm サイズの軽石片（白色を呈する未変質のものから緑色を呈する変質したものまで様々な軽石片を含む）、暗灰色の半遠洋性堆積物、明灰色の有孔虫に富む堆積物など様々な構成物が不



**Fig. 3** Representative scanned drill core images of typical lithologies at Hole C9026A (modified from Nozaki et al., 2021<sup>17</sup>). (1, 2) underwater debris flow deposit (pumiceous sediment), (3) hanging wall hemipelagic sediment, (4, 5, 7) subseafloor sulfide body with (6) intercalated hemipelagic sediment, (8) hydrothermally altered clay with pyrrhotite-cubanite veins and (9–11) hydrothermally altered clay containing muscovite (illite) + chlorite ± K-feldspar.

規則に混在している (Fig. 3)。XRD (X線粉末回折)の結果からは、主な構成鉱物は石英、イライト、曹長石/灰長石が卓越し、方解石、緑泥石、黄鉄鉱を含む。これらの起源が異なる様々な構成物が混在していることから、水中乱泥流によって生成されたいわば水中土流堆積物に相当すると考えられる。Hole C9026AおよびC9032Aよりもさらに東方の崖を超えた高まりに位置するHole C9031Aの掘削コア試料は、そのほとんどが水中乱泥流堆積物から構成されており、しばしば上方細粒化組織が認められる。したがって、Hakureiサイトには東方崖上の高まりから、しばしば水中乱泥流堆積物が供給されていると考えられる。水中乱泥流堆積物ユニットのうち、深い部分(約12~30 mbsf)は浅部に比べて含まれる軽石片のサイズが小さく、さらに海底下鉱体直上の堆積物は黒色を呈し、幅数mmの葉理(ラミナ;地層に見られる縞模様、成層構造)を示す(Figs. 3 and 4)。したがって、水中乱泥流による擾乱が浅部よりも少なく、比較的穏やかで安定した環境下で堆積したことを示している。XRDの結果からは、石英、イライト、曹長石が卓越し、緑泥石、モンモリロナイト、黄鉄鉱、ドロマイトを含み、カオリナイト、硬石膏をわずかに伴う。炭酸塩鉱物は方解石が消失し、ドロマイトが主体に置き換

わっている。

海底下鉱体(約30~65 mbsf)は、黄鉄鉱、白鉄鉱、閃亜鉛鉱/ウルツ鉱、方鉛鉱、重晶石が卓越し、黄銅鉱、硬石膏、磁硫鉄鉱を伴う硫化物鉱体である(Fig. 3)。しばしば数cmサイズのチムニー片あるいは軽石が鉱化作用を受けたと思しき空隙を多く含む鉱石が観察される。海底下鉱体は単純一様な一枚の鉱体ではなく、コアリングと掘削孔のロギング(ガンマ線、温度、圧力)の結果から少なくとも2枚の堆積物層を挟むことが確認されている<sup>17,23</sup>。これらの堆積物は、海底下鉱体直上の堆積物と類似し、黒色、葉理を有しており、しばしば硫化物鉱物の細脈を含んでいる。

海底下鉱体よりも下位(約65~180 mbsf)は、源岩がまったく判別できないほど変質作用を受けた熱水変質粘土層である。海底下鉱体の直下(~75 mbsf)においては、緑色の変質粘土層中に、磁硫鉄鉱が卓越し、少量のキューバ鉱および中間固溶体(ISS)を含む硫化物脈が観察される。この層は海底下鉱体の少なくとも東西方向に延長しており、鍵層として追跡できる。磁硫鉄鉱が卓越し硫酸塩鉱物を伴わないことから、海底下鉱体の主要部とは異なり、海水との物理的混合があまりなく $f_{S_2}$ (硫黄フガシティー)の低いより還元のかつ初生的

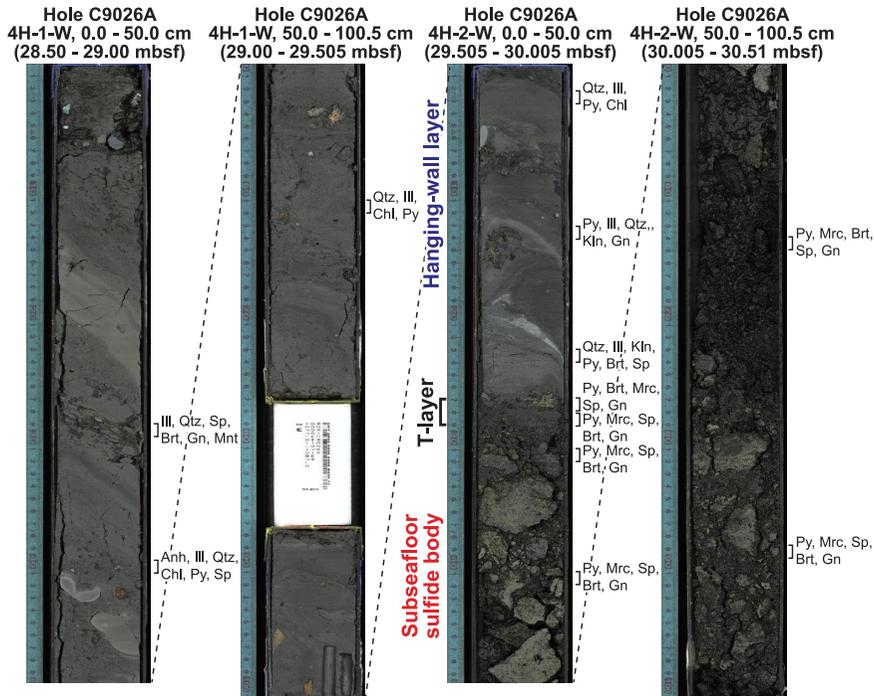


Fig. 4 Scanned drill core images showing the contact between hemipelagic sediment and the subseafloor sulfide body at Hole C9026A (modified from Nozaki et al., 2021<sup>17)</sup>). Abbreviations; Anh = anhydrite, Brt = barite, Chl = chlorite, Gn = galena, Ill = illite, Kln = kaolinite, Mnt = montmorillonite, Mrc = marcasite, Py = pyrite, Qtz = quartz; Sp = sphalerite.

な熱水から晶出したと考えられる。磁硫鉄鉱脈を含む層準よりも下位においては、XRDの結果からは緑泥石、イライト、カリ長石、石英が卓越する。深度によって緑泥石、イライト、カリ長石の量比が異なり、それらの量比（モード組成）がロギングで得られたガンマ線強度を支配する要因であると考えられている<sup>17,23</sup>。なお、165 mbsf付近においてガンマ線強度が急低下するスパイクが検出されたが、掘削コアのインナーチューブが高熱により一部溶解していたことから、海底下の活動的な熱水流路を貫いたと考えられる。

### 3.2 海底下鉱体と堆積物の遷移層

CK16-05 航海においては、硬軟入り混じった岩相から少しでもコア試料の回収率を向上させるために、浅部の軟らかい地層においてはHPCS (Hydraulic Piston Coring System)あるいはSHPCS (Short Hydraulic Piston Coring System)を用い、ピストンコアリングでは掘削できない硬い地層に達した後はESCS (Extended Shoe Coring System)を用いてコアリングを行った。その結果、Hole C9026Aにおいては、海底下鉱体とその直上の堆積物層を連続的に採取することに成功した (Fig. 4)。

Figure 4は、Hole C9026Aの掘削コア試料の28.5～30.5 mbsfのみを拡大したスキャン画像である。

29.79 mbsf以深は、黄鉄鉱、白鉄鉱、閃亜鉛鉱/ウルツ鉱、方鉛鉱、重晶石によって構成される海底下鉱体である。海底下鉱体の最上部 (29.77～29.79 mbsf)は、粒径に基づく記載学的には粗粒の砂質な硫化物層 (sulfidic sand)であり、構成鉱物は下位の海底下鉱体と変わらないものの、重晶石のモード組成が多くなっているのが特徴である。この厚さわずか2 cmの硫化物層 (遷移層: T-Layerと命名)より上位は岩相が急激に変化し、黒色を呈し、葉理を有する半遠洋性堆積物から構成されており、主要な構成鉱物は石英、緑泥石、イライト、黄鉄鉱である。T-Layerの約5 cmおよび約15 cm上位に白色の薄層が観察されるが、これらの白色薄層からは酸性変質で生成するカオリナイトが多量に含まれている (XRDのピーク強度から類推されるカオリナイトのモード組成は、それぞれ約11%および約21%)。また、T-Layerから約80 cm上位に位置する層準では硬石膏が検出され、XRDのピーク強度から類推したモード組成では、硬石膏が約31%と最も卓越している。

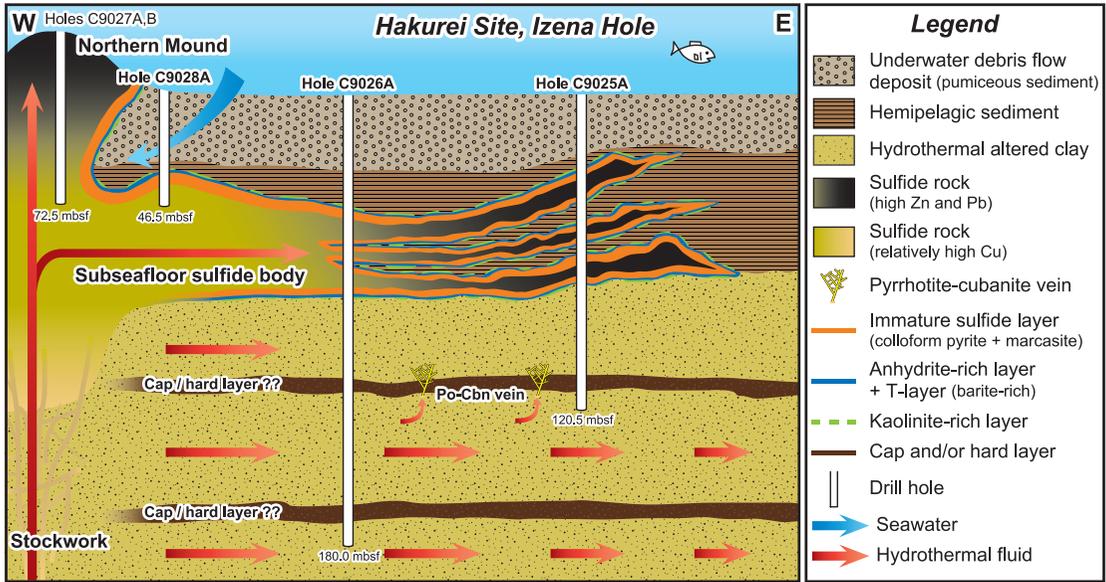


Fig. 5 Simplified subseafloor structure of Hakurei Site, Izena Hole (not to scale) (modified from Nozaki et al., 2021<sup>17</sup>). Abbreviations; Cbn = cubanite, Po = pyrrhotite.

#### 4. 海底下軽石置換鉱化作用と成因モデル

##### 4.1 Hakurei サイトの成因モデル

紙面の都合上、Hole C9026A におけるコア試料の岩相記載に焦点を当てて解説したが、他のコア試料もすべて含めた記載、XRD 分析、船上での議論、その後の化学分析結果を統合すると、北部マウンドおよび海底下鉱体を含む伊是名 Hakurei サイトの鉱体について、我々は Figure 5 に示すようなイメージを抱いている<sup>17</sup>。

海底面上でマウンド構造として観察される北部マウンドは、掘削コアの最上位から最下位にかけて、すべて黄鉄鉱、閃亜鉛鉱/ウルツ鉱、方鉛鉱、黄銅鉱、重晶石から構成される硫化物層であり、深くなるほど黄鉄鉱および黄銅鉱のモード組成（≒ Fe および Cu 濃度）が高くなる傾向が認められた。これは、一定期間継続する熱水活動とそれに伴う鉱化作用および Zone Refining（閃亜鉛鉱・方鉛鉱の溶解・移動・再沈殿）により、浅部ほど黒鉱質であり、深部ほど黄鉱質であることを示している<sup>17</sup>。一方、海底下鉱体は、約 30 m の厚さを持つ水中乱泥流堆積物（軽石質堆積物）の下位に胚胎しており、単純一様・一枚の塊状鉱体ではなく、2 層の堆積物層を挟む 3 層構造になっていることがコアリングおよびロギングから確認されている。Hole C9028A における掘削が、孔内状況の悪化によって 46.5 mbsf で終了せざるを得なかったために、北部マウンドと海底下鉱体が海底下でどの程度まで繋がっているのが正確には分からないが、

Hole C9028A における海底下鉱体の上位には硬石膏・緑泥石・イライトが卓越する層準が約 2 m にわたって観察されることから、小規模な断層と海水流入（km スケールではなく、より小規模なスケール（数十 m<sup>2</sup>）での海水のリチャージ）が存在すると考えられる（Figure 5 において、概念的に青矢印で示した）。また、海底下鉱床の下位には磁硫鉄鉱が卓越し、少量のキューバ鉱および中間固溶体（ISS）によって構成される硫化物脈を含む緑色粘土層が観察されるが、海底下鉱体と構成鉱物が明瞭に異なることから、両者を生成した熱水の起源が同一であったとしても、その出口側（硫化物鉱物が沈殿する場）では繋がっていないと考えられる。

次に、どのような鉱化作用を想定すれば、Figure 5 に示したような海底下鉱体を地質学的に形成できるか、コア試料の構成鉱物や組織を整合的に説明できるかを考えてみたい（Fig. 6）。海底下鉱体の捕捉を目的としていない 3 つのリファレンスサイト（Hole C9029A, C9030A, C9031A）から得られたコア試料は、カルデラ底に位置する Hole C9029A および C9030A においては極めて軽石が卓越し、しばしば半遠洋性堆積物が挟在される。サイズの大きい軽石ほど浮力が大きくなるので、軽石が卓越するユニットでは上方粗粒化組織が観察される。また、既に述べたように、Hole C9026A および C9032A よりもさらに東方の崖を超えた高まりに位置する Hole C9031A は水中乱泥流堆積物が卓越していた。したがって、伊是名海穴のカルデラ底の地層は、間欠的な噴出に伴う軽石

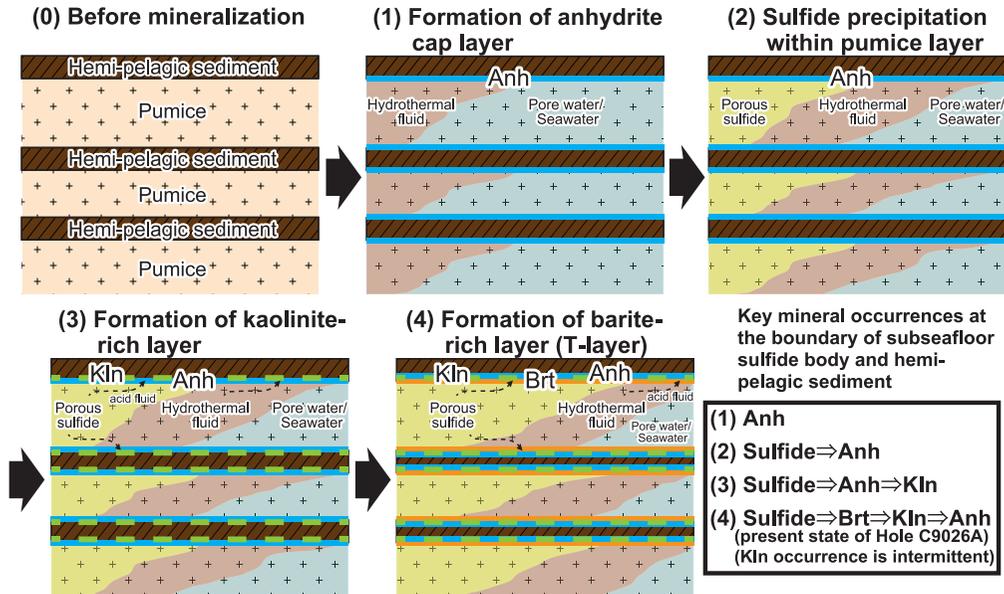


Fig. 6 Conceptual diagram of seafloor sulfide mineralisation with pumice replacement (modified from Nozaki et al., 2021<sup>17</sup>). Abbreviations; Anh = anhydrite; Brt = barite; Kln = kaolinite.

層が卓越し、半遠洋性堆積物あるいはしばしば水中乱流によって供給された堆積物が挟在される互層構造になっていると考えられる (Fig. 6)。このような地質構造を持つ海底下で熱水の流入が起こると、透水性の低い堆積物層よりも透水性の高い軽石層に優先的に熱水が流入していくと考えられる。熱水が流入した軽石層と堆積物層の境界には、熱水中に含まれる Ca と間隙水 (海水) 中に含まれる硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) が反応して、まずは硬石膏が沈殿すると考えられる。軽石層と堆積物層の境界に硬石膏が沈殿すると、硬石膏は熱水の側方流れを制御するキャップ層として機能し、冷たい間隙水との混合が減少するために軽石層内の温度が上昇して、硫化鉱物の沈殿が始まると考えられる。海底下鉱体においては、軽石中のガラスや長石は熱水変質によって溶解しやすいだけでなく、軽石に由来すると思しき変質ガラスを伴うフランボイダル黄鉄鉱などの組織が観察されることから、既存の軽石層を置換 (交代) しながら硫化鉱物の沈殿が進んでいく (軽石置換鉱化作用<sup>17,24</sup>)。硬石膏によるキャップ層、熱水の側方流れおよび軽石層内の温度上昇によって軽石層を置換しながら硫化鉱物の沈殿がさらに進んでいくと考えられるが、硬石膏によるキャップは完全ではなく、しばしば熱水 (あるいはそのガス成分) が漏れ出る場所があると考えられる。伊是名海穴 Hakurei サイトの熱水端成分の pH は 4.7 と見積られており<sup>25</sup>、このような pH では酸性変質作用によって沈殿するカオリナイトを生成することができない。しかし、伊是名海

穴 Hakurei サイトの熱水端成分の Cl 濃度は 608 mM と見積られており<sup>25</sup>、海水の Cl 濃度 (=540 mM) よりも高い。したがって、伊是名海穴における海底熱水は沸騰現象 (二相分離; 熱水が  $\text{H}_2\text{S}$  や  $\text{CO}_2$  などのガス成分に富む気相と Cl に富むブライン (液相) の二相に気液分離すること) を経ており、Hakurei サイトからは気相に乏しいブラインが、JADE サイトの Biwako Vent からは気相に富む熱水 ([Cl] = 167 mM) が噴出していることが知られている<sup>25</sup>。したがって、軽石層内に流入した熱水も沸騰している (あるいは沸騰を経験している) と考えられ、液相よりも移動しやすい  $\text{H}_2\text{S}$  や  $\text{CO}_2$  などの気相が硬石膏のキャップ層の隙間から漏れ出ることが想定される。このような気相成分の局所的な漏洩と pH 低下を考えれば、海底下鉱体の直上あるいは直下においてのみ XRD で検出されるカオリナイトの産出を整合的に説明することができる (なお、カオリナイトの産出は海底下鉱体に必ず伴う必要はなく、硬石膏のキャップ層がいかに機能しているかに依存していると考えられる。実際、Hole C9026A に比べて、Hole C9025A および C9032A ではカオリナイトの産出層準が極めて限られている<sup>17</sup>)。なお、キャップ層として機能していた硬石膏は、海底下鉱体の上下方向および側方方向への成長に伴って常に移動していると考えられる。また、硬石膏の溶解度は温度と逆の関係にあるため<sup>26</sup>、熱水活動 (鉱化作用) の終息とともに溶解・消失する運命にあり、最終的に安定な硫酸塩鉱物である重晶石が遷移層 (T-Layer) に多く含ま

れていると考えると、掘削コア試料の岩相・記載学的特徴をすべて整合的に説明することができる。なお、このような硬石膏によるキャップ層の形成⇒キャップ層内部の温度上昇と硫化鉱物の沈殿というメカニズムは、海底面上のチムニーの古典的な生成メカニズム<sup>27</sup>に類似している。

したがって、伊是名海穴 Hakurei サイトの規模が、日本近海の他の海底熱水鉱床に比べて比較的大きい理由として、(1) カルデラ底の海底下構造が間欠的な軽石の噴出と水中乱泥流堆積物（堆積物の主要な起源は中国本土からの風成塵）の供給によって、軽石層と半遠洋性堆積物の互層構造となっていること、(2) このような軽石層と堆積物の互層構造と軽石置換鉱化作用によって、海底面上で観察される北部マウンドだけでなく、海底下の広範囲にわたって複数層の海底下鉱体が生成されていること、(3) 伊是名海穴 Hakurei サイトの熱水活動は、重晶石の電子スピン共鳴 (ESR) 年代から少なくとも約 16,000 年以上前から始まっていると考えられ<sup>28</sup>、沖繩トラフに分布している他の海底熱水鉱床よりも古くから熱水活動が始まっていることが複合的に絡みあった結果であると考えられる。

#### 4.2 同生説 vs. 後生説論争における位置づけ

これまで伊是名海穴 Hakurei サイトから採取された掘削コア試料の岩相および記載学的特徴の紹介し、それらを整合的に説明可能な鉱床の成因モデルについて述べてきた。最後に、本研究が VMS 鉱床の研究史において、どのような位置づけになるかを紹介して本論を締めくくりたい。

過去の海底で生成した海底熱水鉱床である陸上の VMS 鉱床については、その成因について長らく議論が行われてきた。日本においても VMS 鉱床の生成について、同生説 vs. 後生説論争が活発に行われてきた<sup>29,30</sup>。鉱床の存在位置が特定の地層に規制されている場合、その鉱床が堆積岩の堆積過程と同時に生成した場合が同生説 (syngenetic)、あるいは堆積岩の形成後特定の地層が交代された場合を後生説 (epigenetic、あるいは交代説、鉱染説とも呼ぶ) という。紙面の都合上研究史の詳しい紹介は省略するが<sup>29,30</sup>、黒鉱鉱石中にしばしば観察される級化層理、葉理、微化石の産出、チムニー類似構造の発見などから次第に同生説が優勢となり、1977 年のガラゴス海嶺における世界初の海底熱水鉱床の発見により、多くの研究者が同生説を支持する結果となり、このような論争は下火になった。このような鉱床成因の論争に対して、伊是名海穴における掘削航海によって組み立てられた成因モデルは何を語ってくれるのだろうか？

伊是名海穴 Hakurei サイトの海底面上で観察される北部マウンドを含むマウンド群は、海底における熱水噴出

と同時に海底面上で硫化鉱物や硫酸塩鉱物が沈殿して生成しているため、同生説に基づいた考え方で矛盾なく説明できる。それでは、海底下の既存軽石層を置換しながら生成した海底下鉱体についてはどうだろうか。北部マウンドと海底下鉱体を形成する熱水の起源は、地理的な空間分布・サイズから大きく異なるとは考えにくいので、同一起源の熱水からほぼ同じタイミングで北部マウンドおよび海底下鉱体が生成していると考えられる。しかし、海底下鉱体においては既存の軽石層を置換しているために、後生説 (交代説) に基づいた考えの方が良く合致してしまう。これは、交代作用の時間軸をどの程度として考えるかに大きく依存すると考えられる。例えば、一般的に同生説で説明可能とされるマウンド構造についても、引き続き熱水活動と鉱化作用によって、一部の鉱物は溶解・移動・再沈殿し、Zone Refining が行われる。これは、マウンド頂上では同生的に鉱石鉱物が沈殿すると同時に、マウンド内部では交代作用が起こっていることを意味している。したがって、厳密な意味での同生説 vs. 後生説の議論はその時間軸を決めないと難しく、伊是名海穴 Hakurei サイトの掘削コア試料を用いた研究からは、同生説・後生説のどちらも正しいように考えられる。実際、海外の研究者らによる VMS 鉱床の生成メカニズムのレビュー論文においては、しばしば『subseafloor replacement』という概念が紹介されており<sup>4,31,32</sup>、単一マウンドによる海底面上での鉱化作用のみに比べて、海底下で広範囲に変質・鉱化作用を引き起こすことができることから、大規模な鉱床の生成に有利であると考えられている。

したがって、筆者らは同生説・後生説はどちらも正しく、海底下の岩相・構造次第でどちらも起こり得ると考えている。そうすると、長年にわたって繰り返された同生説・後生説論争は一見不毛に思えるかもしれないが、2つの明瞭な科学的対立軸が存在する場合、両説の科学者が新しい観察事実・知見を蓄積しながら議論を展開していくので、当該分野における科学レベルを大きく向上させることが多い。このような論争の開始から既に百数十年が経過しているが、先人が蓄積してきた多くの知見を元に、現在我々が得た研究結果を解釈できることに、大いに感謝していることを述べて本文を終わりたい。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の山本秀雄氏、大槻由香里氏、熊谷清美氏には、粉末試料の調製や化学分析をサポートして頂いた。CK16-05 航海に際しては、船長、OSI、OIM、乗組員、ROV チームおよびマリンワークジャパンの技術スタッ

フにお世話になった。Figure 5の作成に当たっては、千葉工業大学の藤永公一郎上席研究員とJAMSTECの宇野澤暢子氏にご協力頂いた。粗稿の改訂に際して、匿名査読者から有益なコメントを頂いた。本研究は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の課題「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)」における「海洋資源の成因に関する科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」の一環として行われた。

### References

- J. Hein, K. Mizell, A. Koschinsky, T.A. Conrad: *Ore Geol. Rev.*, **51**, pp. 1–14 (2013)
- M. Hannington, J. Jamieson, T. Monecke, S. Petersen, S. Beaulieu: *Geology*, **39**, 12, pp. 1155–1158 (2011)
- Y. Kato, K. Fujinaga, K. Nakamura, Y. Takaya, K. Kitamura, et al.: *Nat. Geosci.*, **4**, pp. 535–539 (2011)
- F. Tornos, J.M. Peter, R. Allen, C. Conde: *Ore Geol. Rev.*, **68**, pp. 142–163 (2015)
- K. Sato and K. Kase: *Island Arc*, **5**, 3, pp. 216–228 (1996)
- R. Yamada and T. Yoshida: *Mineral. Deposita*, **46**, 431–448 (2011)
- S.E. Beaulieu and K.M. Szafranski: *Pangaea*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.917894> (2020)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構：平成25年3月27日ニュースリリース (2013)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構：平成28年5月26日ニュースリリース (2016)
- 両角春寿・渡部一雄・櫻井宏信・日野ひかり・門泰之ほか：資源地質，**70**, 2, pp. 113–119 (2020)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構：平成29年9月26日ニュースリリース (2017)
- 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構：平成30年10月10日ニュースリリース (2018)
- 経済産業省資源エネルギー庁・独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構：海底熱水鉱床開発計画総合評価報告書，pp. 234 (2023)
- M.D. Hannington, I.R. Jonasson, P.M. Herzig, S. Petersen: *AGU Geophys. Monogr.*, **91**, pp. 115–157 (1995)
- S.E. Humphris, P.M. Herzig, D.J. Miller, J.C. Alt, K. Becker, et al.: *Nature*, **377**, pp. 713–716 (1995)
- R.A. Zierenberg, Y. Fouquet, D.J. Miller, J.M. Bahr, P.A. Baker, et al.: *Nature*, **392**, pp. 485–488 (1998)
- T. Nozaki, T. Nagase, Y. Takaya, T. Yamasaki, T. Otake, et al.: *Sci. Rep.*, **11**, 8809 (2021)
- J.-i. Ishibashi, F. Ikegami, T. Tsuji, T. Urabe: *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, Springer (New York), pp. 337–359 (2015)
- Y. Kotake: *Bull. ERI Univ. Tokyo*, **75**, pp. 229–334 (2000)
- R. Arai, S. Kodaira, Y. Kaiho, T. Takahashi, S. Miura, et al.: *J. Geophys. Res.*, **122**, 1, pp. 622–641 (2017)
- R. Shinjo, S.-L. Chung, Y. Kato, M. Kimura: *J. Geophys. Res.*, **104**, B5, pp. 10591–10608 (1999)
- P. Halbach, K.-i. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, H. Sakai, et al.: *Nature*, **338**, pp. 496–499 (1989)
- 北田数也・真田佳典・山田泰広・野崎達生・熊谷英憲ほか：物理探査，**73**, pp. 33–41 (2020)
- 石橋純一郎：海洋化学研究，**36**, 1, pp. 27–33 (2023)
- J.-i. Ishibashi, T. Noguchi, T. Toki, S. Miyabe, S. Yamagami, et al.: *Geochem. J.*, **48**, 4, pp. 357–369 (2014)
- C.W. Blount and F.W. Dickson: *Geochim. Cosmochim. Acta*, **33**, 2, pp. 227–245 (1969)
- R.M. Haymon: *Nature*, **301**, pp. 695–698 (1983)
- T. Fujiwara, S. Toyoda, A. Uchida, J.-i. Ishibashi, S. Nakai, et al.: *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems*, Springer (New York), pp. 369–386 (2015)
- 杉本功・五十嵐善之丞：日本鉱業会誌，**80**, 907, pp. 47–54 (1964)
- 渡辺武男：地球化学，**7**, 8, 1, pp. 17–22 (1974)
- M.G. Doyle and R.L. Allen: *Ore Geol. Rev.*, **23**, 183–222 (2003)
- S.J. Piercey: *Econ. Geol.*, **110**, pp. 1655–1660 (2015)