

## 明神海丘（北ベヨネース海底カルデラ）の 熱水活動に伴う鉱化作用

飯笹 幸吉\*<sup>1</sup> リチャード・S・フィスケ\*<sup>2</sup>  
仲 二郎\*<sup>3</sup> 角皆 潤\*<sup>4</sup>

七島・硫黄島海嶺上の明神海丘（北ベヨネース海底カルデラ）において、熱水活動に伴う変質帯及び鉱化帯の調査研究を「しんかい2000」によって実施した。熱水活動に伴う変質帯は、東部のカルデラ壁の凝灰角礫岩層に分布しており、硫化物を含む雲母・モンモリロナイト混合層鉱物及び緑泥石から構成されている。轟石の産状・分布及びメタン・ヘリウム濃度の測定などから、カルデラ床の東部及び西部において現在も低温熱水活動が続いていることが明らかになった。硫化物鉱化作用及び熱水変質作用は、カルデラ形成以前に生じたこと、また、鉱化作用の中心はカルデラの水深1,200m から1,000m の南東壁に存在している可能性が示唆される。

キーワード：明神海丘，北ベヨネース海底カルデラ，熱水変質帯，熱水活動，硫化物，鉱化作用

## Hydrothermal Mineralization of the Myojin Knoll (Kita-Bayonnaise Submarine Caldera), Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara Arc

Kokichi IIZASA\*<sup>5</sup> Richard S. FISKE\*<sup>6</sup>  
Jiro NAKA\*<sup>7</sup> Urumu TSUNOGAI\*<sup>8</sup>

Research works on the occurrence of hydrothermal alteration and mineralization were carried out using "Shinkai 2000" at Myojin knoll (Kita-Bayonnaise submarine caldera), Shichito-Iwojima ridge, Izu-Ogasawara Arc. White hydrothermally altered zones occur in the tuff breccia of the eastern caldera wall of the submarine caldera and are composed of sulfides, mica-montmorillonite mixed layer, and chlorite. Low-temperature hydrothermal activity probably still continues at the caldera floor according

\* 1 地質調査所海洋地質部

\* 2 スミソニアン博物館

\* 3 海洋科学技術センター深海研究部

\* 4 東京大学理学部

\* 5 Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

\* 6 Department of Mineral Sciences, Smithsonian Institution

\* 7 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

\* 8 Faculty of Science, University of Tokyo

to the presence of low-temperature todorokite on the floor and methane and helium anomalies in the seawater column. Hydrothermal mineralization and alteration took place in the layer of tuff breccia before the caldera formation. Mineralized zones are probably present at the southeast caldera wall of water depth between 1,200m and 1,000 m.

**Key words:** Myojin knoll, Kita-Bayonnaise submarine caldera, Hydrothermally-altered zone, Sulfides, Mineralization

### 1. はじめに

北ベヨネース海底カルデラは、七島硫黄島海嶺上の火山フロント沿いに位置する第四紀海底カルデラのひとつである(図1)。これまでに行われた調査船や「しんかい2000」による Dive624潜航調査の結果から、カルデラ床の東部には、崖錐の一部に硫化物を伴う凝灰岩やシロウリガイ、そして、カルデラ床の最深部において熱水性のマンガクラストなどが分布すること(飯笹ほか, 1993)、また、この海底カルデラはクラカトア火山の2倍の噴出

量を有する(Fiske et al., 1994)ことがわかっている。さらに、熱水活動による鉱化作用を指示するものとして、カルデラ床の東部及び西部において硫化物を主とする堆積層が確認されている(Iizasa, 1993)。中央火口丘の一部には、今回の潜航調査によって確認された東部のカルデラ壁に分布するものと同様の白色変質帯が観察されている(湯浅, 1991)。調査船航海では、カルデラ内においてマンガラン及びメタン濃度の異常が水深1,000m前後の海水中に検出されている(石橋・下島, 1992)。また、今

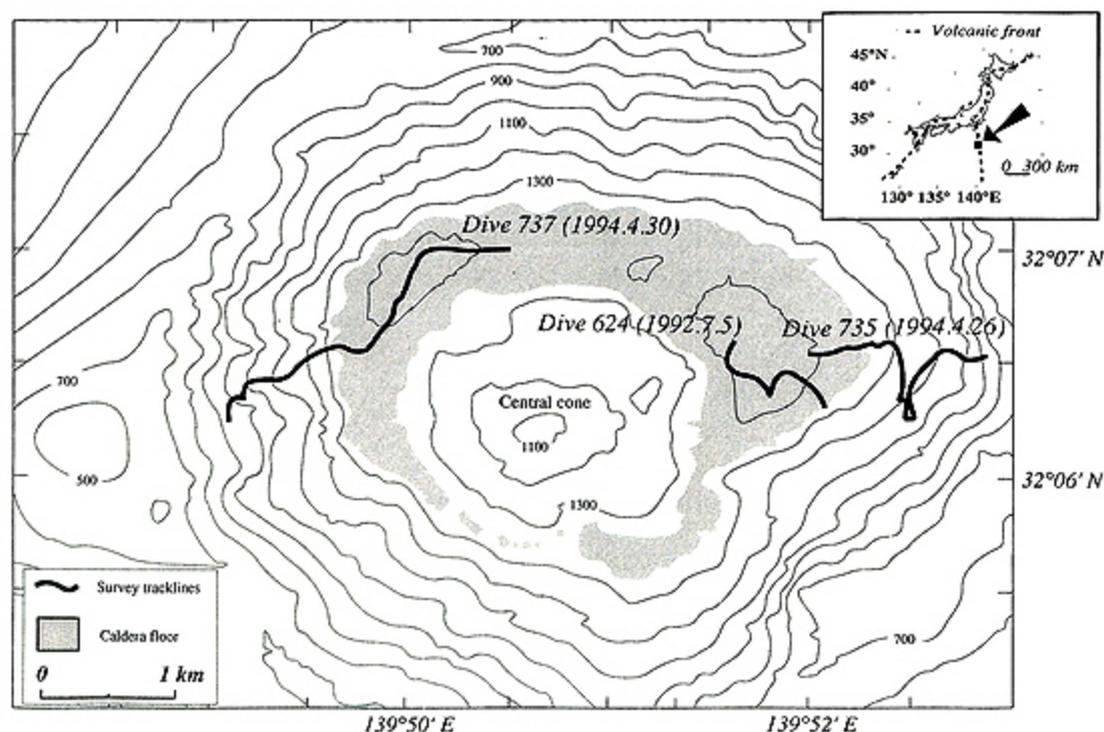


図1 明神海丘(北ベヨネース海底カルデラ)位置図及び調査船「かいよう」による海底地形図。これまでに実施された「しんかい2000」による潜航調査の中で熱水活動の調査を主体とする3潜航ルート

Fig. 1 Location map of Myojin knoll (Kita-Bayonnaise submarine caldera) and bathymetry of the Kita-Bayonnaise submarine caldera modified from the detailed map made by "Kaiyo" multi-beam echo sounder system. Three tracklines of submersible "Shinkai 2000" were carried out in terms of the study of hydrothermal activities of the caldera.

回の潜水船による海水調査においても、メタンやヘリウムの濃度異常が認められている(角谷ほか, 1995)。1994年度は、「しんかい2000」の4回の潜航調査のうち2潜航(Dive #735, #737)を熱水活動の調査にわりあて、それぞれカルデラ床の東部と西部において実施した。ここでは、潜航調査によって観察された熱水変質帯の産状・分布、採取試料の構成鉱物及び鉱化作用・変質帯の形成時期について述べる。

## 2. 地質・地形概要

北ベヨネース海底カルデラは、伊豆・小笠原弧の火山フロントに沿う七島・硫黄島海嶺上の八丈島南方100kmに位置する第四紀海底火山の1つである(図1)。このほぼ円形のカルデラの東部では、カルデラ床の崖錐分布域からおおよそ水深900mまでは凝灰岩や岩脈を挟む凝灰角礫岩の地層、900m以浅は流紋岩質軽石堆積層である。この凝灰角礫岩層には熱水変質を受けた白色粘土化帯が存在している。同様の白色粘土化帯は流紋岩質岩石を主とする中央火口丘の一部にも分布している。西部では、流紋岩質岩石の柱状節理の露頭及びその上位に軽石層が分布する。また、このカルデラの外縁は、3ないし4つの外輪山などから構成されている。カルデラ床の最深部は東部及び西北部にありその水深は約1,400m、カルデラ縁は水深800mから500m、最浅部は西部に位置するおおよそ350mの外輪山である。カルデラ床の幅は、東部ではおおよそ1.2km、北部から西部にわたる範囲が0.6kmとなっており、南部ではほとんど崖錐によって埋積されている。

## 3. 試料の分析法

採取試料の重鉱物分析は、Iizasa(1993)の方法に基づいて乾燥試料の粒度分析を行い、その後、重液テトラブロムエタンにより重鉱物を分離し、棒磁石により磁性鉱物を除去した。磁気分離を行った試料について研磨片を作成し、顕微鏡及びSEM-EDXによる観察を行った。X線粉末回折計(XRD)による粘土鉱物の同定には、水簸後、定方位及び無定方位試料を作成し、適宜エチレングリコール処理を施した。

## 4. Dive#735及びDive #737調査による表層地質

カルデラ床東部の潜航調査(Dive #735)では、カルデラ床の表層は茶褐色を呈する泥質堆積物が、その下部は軽石を主とする砂質堆積物が分布する(図2)。崖錐堆積物にいたるまでに大きさ数mの巨礫が点在したり、数条

の深さ数十cm、長さは照明の届く範囲まで確認できる窪地が、カルデラ床の最深部に北東-南西方向に存在している。崖錐はカルデラ壁の水深1,350mから1,200m付近まで分布し、それ以浅の水深1,200mから960mまでのカルデラ壁は露岩域であることが確認された。この露岩域には、数十cmの厚さを持つ2枚の凝灰岩層を挟む不規則な割れ目の発達した凝灰角礫岩層が分布している。特に、1,200mから1,000mの間の凝灰角礫岩層の一部に白色の粘土化帯が存在し、それぞれの水深での水平方向の広がり、照明の届く範囲まで確認されている(写真1)。この変質帯は凝灰角礫岩が熱水変質を受けて白色化したものであり、変質帯中には明瞭に角礫構造が保存されている。変質の強い場所の角礫岩はその内部まで変質されており、弱いところでは基質の部分に顕著な変質が見られる。変質帯下部の弱変質を受けた角礫岩中には、幅1mほどのダイクが観察された。調査した露岩域の岩石は、海水に接する面がマンガンによって一様に被覆されている。リップルマークがカルデラ床の一部に分布している。

カルデラ床西部における潜航調査(Dive #737)では、表層は砂泥堆積物で、東部のそれと同様である。しかし、最深部の表層堆積物上では、数mの広がりを持ち堆積層からしみだしたような不規則な形態を示すマンガン沈殿物が分布している点が異なっている(図3)。直径数十m、深さ数mのほぼ円形の窪地では地質断面がよく観察され、中央火口丘側の表層は、数cmの厚さの軽石層を挟む厚さ5cmほどの2層の黄褐色の柔らかい粘土層から成り、その下部に軽石から構成された表面に、不規則な形態をしたマンガン酸化物の沈殿が観察された。軽石層を掘ってみるとマンガン沈殿物は存在せず、ごく表層に沈殿していることが明らかとなった。このほぼ円形の窪地は、表層の粘土層の割れた面が角張っていることから陥没によって形成されたと思われる。さらに、直径数十m、高さ3mほどのドーム状の形態をした塊状で、その表面がパン皮状の割れ目を持つ軽石質の岩石がカルデラ床の最深部において観察された。この岩石の表面の一部に金属光沢を示すクラスト状のマンガンが沈殿していた。このドーム状形態から成る岩石の下部は割れ目のない塊状岩石であり、このドームの周囲4~5mの範囲には、淘汰不良の軽石層中に大~中礫大の軽石が分布するほかに、不規則な形態をしたマンガン酸化物の沈殿が表層に存在する。ここから100mほど南西に離れた場所では、径が2~3cmほどある無数の穴の周囲にマンガン沈殿物が認められた。カルデラ床のマンガン酸化物の分

布は、ほぼ最深部に分布し、しかも、この水深に陥没地形や下部からの突き上げによって形成されたと思われるドーム状の地形などが存在する。このことから、この最深部はカルデラ床の形成後さらに陥没して形成されここを中心にマンガンを含む流体が上昇したものと推察される。西側のカルデラ壁付近では、巨大なブロックから成る崖が砂泥質堆積物を含みながら950mまで分布している。この巨大ブロックは東部カルデラ壁では全く見られない。950mから850mまでの水深では、流紋岩質岩石の見事な柱状節理の露頭が見られた。露頭の下部では柱状節理がほぼ45度の傾斜を示し、上部に行くほど急傾斜に変化していく様子が観察された。水深850mから上部では分級の良い中礫大の軽石層が分布しているが、下部の流紋岩質岩石層との境界は不明瞭である。

### 5. 熱水変質鉱物

東部のカルデラ壁に産する粘土質の脆い白色変質帯は、その上部では雲母-モンモリロナイト混合層鉱物、緑泥石及び石英から、下部では緑泥石を除く上記の鉱物から構成されている。上部の雲母-モンモリロナイト混

合層鉱物は、70wt%ほどの雲母を含み、下部のそれは60wt%ほど含んでいる。このことは、熱水変質帯における変質度が上部ほど高い傾向にあることを示唆しているのかもしれない。また、この変質帯や変質帯の源岩の一部を構成している空隙状の火山ガラス中などに鉱染状に産する熱水性鉱物として、硫化物(方鉛鉱、黄銅鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、銅藍、輝銀鉱)、白鉛鉱、重晶石、ルチル、磁鉄鉱及び燐灰石などが少量見られる。これらの結晶は、自形から半自形の大きさおよそ0.5mm以下の単結晶ないし集合体である(写真2)。黄銅鉱は閃亜鉛鉱の自形結晶の成長層のステップに沿って品出しているものも観察され、結晶の品出順序や生成機構をよく示している。方鉛鉱は、劈開がよく発達しており、その周辺に沿って多かれ少なかれ白鉛鉱に変質している(写真3)。また、方鉛鉱は、黄銅鉱に交代された組織を示していたり、黄鉄鉱-閃亜鉛鉱をその周囲にしばしば伴って硫化物の中では初期の段階に品出したことを示している。塩素を含む自形燐灰石は硫化物に伴って存在しており、熱水性であることを示している。黄銅鉱は、まれに、輝銀鉱を包有している。これまで銀を含有する黄鉄鉱は産して

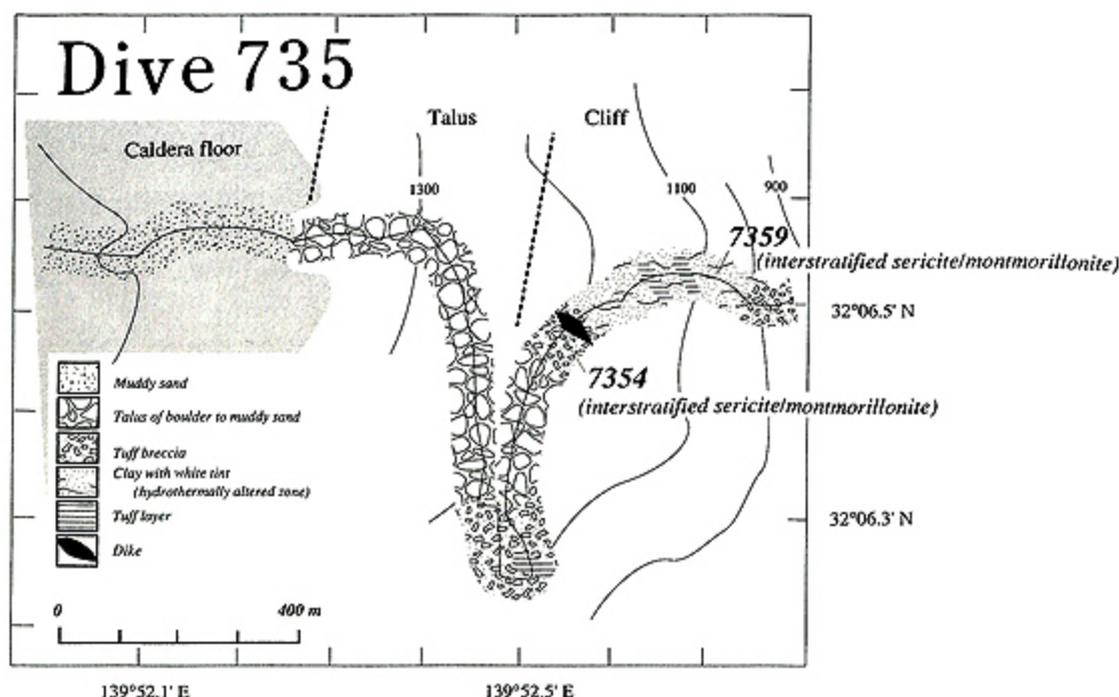


図2 東部カルデラ床付近の潜航調査による表層地質図。図中の番号は熱水変質帯における粘土試料の採取点を示している。

Fig. 2 Surface geological map around the eastern caldera floor along the track-line of dive 735. Numbers indicate samples taken from hydrothermally altered clay zone.

いたが銀鉱物が見つかったのはこのカルデラでは初めてである。黄鉄鉱結晶はしばしばその外側が鉄水酸化物に変質している。以上述べた重鉱物中には自形を示すものが多く見られることから、源岩となった凝灰角礫岩中には空隙がよく発達しており、これらの鉱石鉱物を沈殿させる環境が整っていたことを示している。重鉱物分析に用いた試料中(粒径1—0.063mmの範囲の試料で、これは全試料中のおよそ半分の量を占めている)では、およそ10wt%の硫化物が含まれているが、磁鉄鉱はごく少量である。2採取地点(7354, 7359)の試料を比較すると、変質帯の上部の試料中には硫化物が圧倒的に多いことが示されているが、その構成鉱物組織は下部のものと比較しても顕著な変化は見られない。このことは、上部ほど硫化鉱物の沈殿に適した環境であったことを示しており、混合層鉱物中の雲母の量比が変質帯の上部ほど多いことと密接に関連しているものと思われる。事前調査においてカルデラ床の軽石から構成された砂質堆積層中に発見された鉱石鉱物(Iizasa, 1993)は、今回の調査による粘土化帯に含まれたものや白色変質した凝灰岩中に存

在するもの(飯笹ほか, 1993)と同様の結晶形態、集合体、変質度を示していることから、この粘土化帯や変質岩などが源岩であると思われる。

カルデラ床の西部に見られたドーム状の地形に産するマンガン酸化物は、採取後のXRD図形では轟石あるいはBuseriteであることを示しており、しかも、長期間(およそ10か月間)室温に放置しておいてもその回折図形には変化が見られない。しかし、110度3時間の熱処理によってその最強ピークが移動する。このことから、この鉱物はBuseriteか、あるいは、結晶構造のやや不安定な轟石であることがわかる。EDX分析によると、この鉱物は海成マンガン団塊中に産するBuseriteとは、微量成分のCuやNiをふくまない点で異なっている。これまで、伊豆・小笠原海嶺の海形海山では低温熱水性の轟石から成るクラスト(Usui et al., 1986)や他海山においても同様の産状や鉱物が知られている(飯笹ほか, 1990)。海底における低温熱水性の轟石と統成のBuseriteは、結晶構造的に類似しており、1つの共通した端成分を持っている。Buseriteはその構造中に2価の遷移金属イオンを

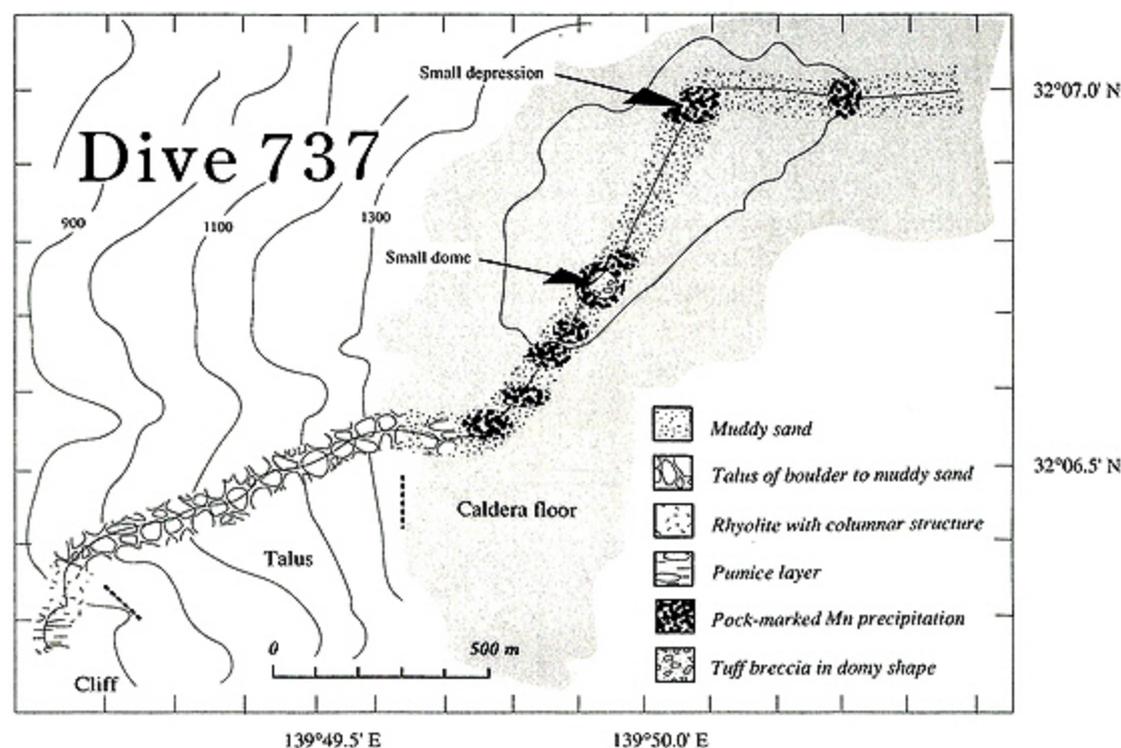


図3 西部カルデラ床付近における潜航調査による表層地質図。マンガン酸化物は、ほぼ最深部に分布している  
Fig. 3 Surface geological map around the western caldera floor along the track-line of dive 737. Mn precipitation occurs mainly in the deepest part of the caldera floor.

選択的に取り込み比較的稳定なものに連続的に変化するが、低温熱水性の礫石の結晶の安定性はどうか形成時の温度に関係している可能性がある (Usui et al., 1989)。本研究のマンガン酸化物は、化学組成、結晶の安定性、及びパン皮状の表面を持つ緻密な軽石の割れ目に灰色の金属光沢を示すクラストとして産することから、熱水性でもやや不安定な結晶構造を持ち、より低温で生成した礫石である可能性を示している。

## 6. カルデラの形成と鉱化作用

東部カルデラ壁における火砕岩や白色粘土変質帯の産状・鉱物組成や西部カルデラ床における熱水性マンガンの産状・分布や柱状節理の発達した流紋岩の分布、さらにこれまでの調査によるカルデラ床堆積物中の硫化物の分布 (Iizasa, 1993) から、本カルデラの硫化物を伴う鉱化作用とカルデラの形成に関して以下のようなシナリオが考えられる。

海底噴火による凝灰岩や凝灰角礫岩層の堆積後、軽石層が堆積する (図4)。カルデラ形成に先立って山体の中心部に割れ目が形成され、そこを通路として熱水溶液が主に山体の東側や西側に上昇し、硫化物やその周囲に混合層鉱物から成る熱水変質帯を形成した。また、これと前後して山体の西側を中心に流紋岩質マグマが上昇し、現在見られる見事な柱状節理の岩体を形成した。その後、山体の中心部において陥没が始まり、それ以後、カルデラ床に流紋岩を主とする中央火口丘ができた。カルデラ形成後、割れ目を通路としてカルデラ床にマンガンを沈殿させる低温熱水溶液の上昇が見られた。この熱水溶液は、現在も陥没が続いているカルデラ床の最深部において、供給されている。

## 7. 結 び

カルデラ床東壁の熱水変質帯の雲母-モンモリロナイト混合層鉱物を主成分とする白色粘土は、この採取点のおよそ1 km 南西に位置する前回の潜航調査 (Dive # 624) 地域において、巨礫大の崖錐の一部から得られた硫化物の鉱染する凝灰岩中に産する白色粘土に対比される。

白色粘土帯には、これまで確認されていなかった輝銀鉱が存在し、方鉛鉱・閃亜鉛鉱・黄銅鉱・黄鉄鉱・銅藍などの硫化物が10wt%ほど含まれている。

熱水変質を受けた凝灰角礫岩層の分布やこれまで得られた結果は、硫化物を伴う鉱化帯が、今回の潜航地点より南のカルデラ壁の水深1,200m から1,000m の間に分布

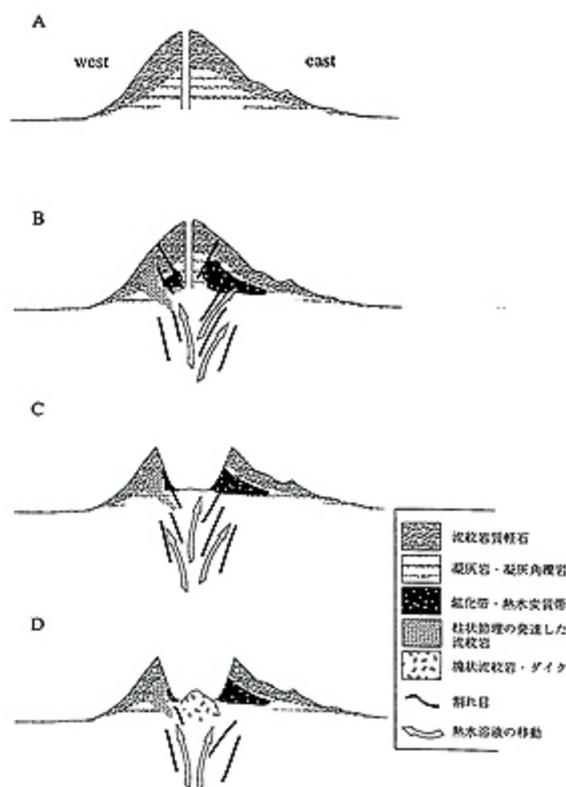


図4 海底カルデラの形成と硫化物を伴う鉱化作用に関する東西断面の概略図。A:凝灰岩・凝灰角礫岩層及び軽石層から構成される海底火山、B:火山体内部に発生した割れ目、流紋岩の貫入及び鉱化帯・熱水変質帯の形成、C:山体中央部の陥没及び割れ目を上昇する低温熱水溶液、D:陥没後、カルデラ床の中央付近に生じた流紋岩の貫入、低温熱水溶液の上昇及び新たな小陥没の発生

Fig. 4 East-west cross sectional illustration of mechanism of ore mineralization and caldera formation of the Kita-Bayonnaise submarine caldera. A: submarine volcano composed of tuff and tuff breccia layers in the lower formation and pumice layer in the upper formation; B: fissure development, rhyolite intrusion, and mineralized and hydrothermally altered zones in the volcano; C: collapse and subsidence in the central part of the volcano and ascent of low-temperature hydrothermal fluid; D: After the caldera formation rhyolite intrusion around the center of the caldera floor, supply of low-temperature hydrothermal fluid and continuity of small-scale subsidence.

している可能性が高いことを示唆している。

熱水性のマンガン酸化物は、現在も沈降していると思われるカルデラ床の最深部に分布している。

## 謝 辞

今回の潜航調査では、「しんかい2000」の運航チームの方々、「なつしま」の乗組員の方々に大変お世話になり、深く感謝いたします。

## 引用文献

- Fiske, R. S., J. Naka, K. Iizasa and M. Yuasa (1994): Caldera-forming submarine pyroclastic eruption at Myojin knoll, Izu-Ogasawara arc, Japan. Preprints of JAMSTEC Symp. on Deep Sea Res., 11, p.99.
- Iizasa, K. (1993): Petrographic investigations of sea-floor sediments from the Kita-Bayonnaise submarine caldera, Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara Arc, northwestern Pacific. Mar. Geol., 112, 271-290.
- 飯笹幸吉・寺島 滋・佐々木宗建・丸茂克美 (1993): 伊豆・小笠原弧-明神海丘 (北ベヨネース海底カルデラ) の熱水活動. しんかいシンポジウム報告書, 9, 105-115.
- 飯笹幸吉・白井 朗・錠 京子 (1990): 天保海山のマンガン酸化物, 海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する研究 (平成元年度研究概要報告書), 47-53.
- 石橋純一郎・下島公紀 (1992): 伊豆・小笠原弧における地球化学的手法による熱水活動探査. 月刊地球, 14 (8), 489-492.
- 角皆 潤・石橋純一郎・脇田 宏・蒲生俊敬・飯笹幸吉・R. S. Fiske・仲 二郎 (1995): 伊豆・小笠原弧北ベヨネース海底カルデラの熱水活動. 地球惑星科学関連学会1995合同大会予稿集, p.92.
- Usui, A., T. A. Mellin, M. Nohara and M. Yuasa (1989): Structural stability of marine 10 Å manganates from the Ogasawara (Bonin) arc: implication for low-temperature hydrothermal activity. Mar. Geol., 86, 41-56.
- Usui, A., M. Yuasa, S. Yokota, M. Nohara, A. Nishimura and F. Murakami (1986): Submarine hydrothermal manganese deposits from the Ogasawara (Bonin) arc, off the Japan islands. Mar. Geol., 73, 311-322.
- 湯浅真人 (1991): 七島・硫黄島海嶺北部の海底カルデラ: 明神海丘潜航調査. 第8回しんかいシンポジウム予稿集, 69-71.

(原稿受理: 1995年6月28日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

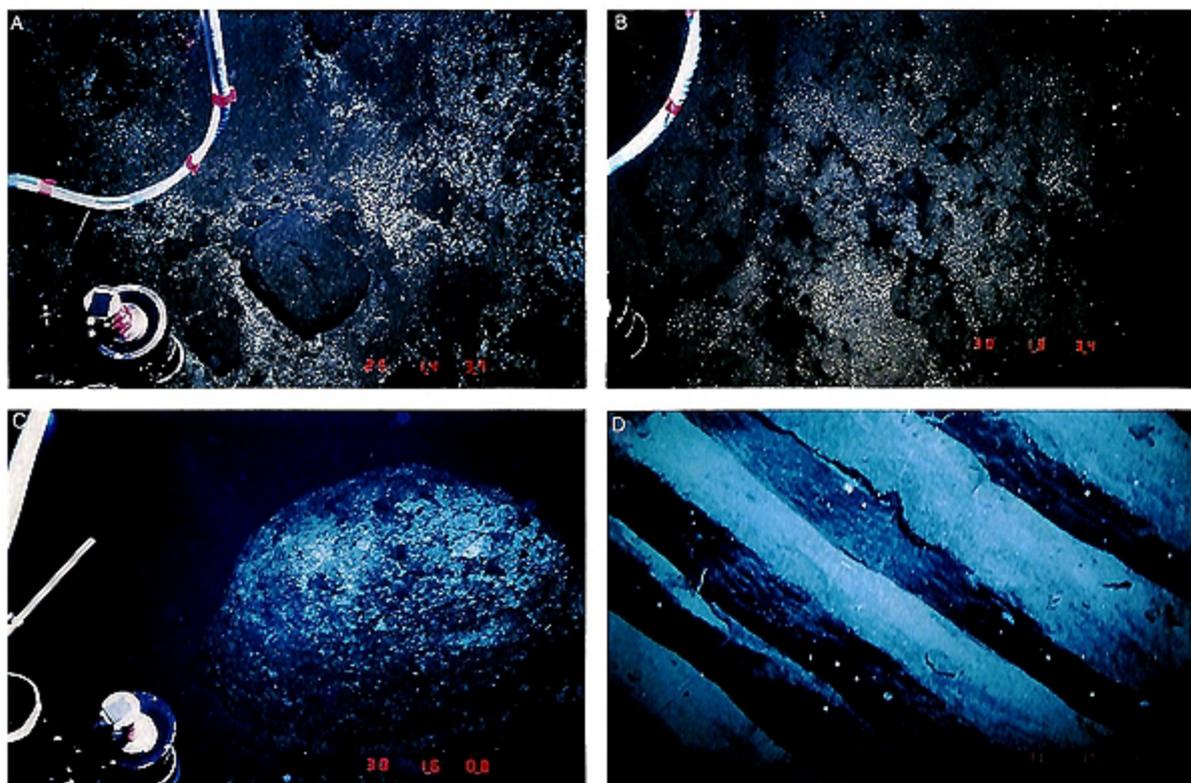


写真1 「しんかい2000」による海底写真。A：東部カルデラ壁における凝灰角礫岩層に見られる白色熱水変質帯，B：西部カルデラ床の最深部に不規則な形態で分布するマンガン酸化物，C：西部カルデラ床の最深部に存在するドーム状の地形を示す塊状軽石，D：西部カルデラ壁に分布する柱状節理の発達した流紋岩

Photo 1 Sea-bottom photographs taken by "Shinkai 2000" in the Kita-Bayonnaise submarine caldera. A: white hydrothermally-altered zone present in tuff breccia layer in the eastern caldera wall; B: Mn precipitation in irregular shapes on the deepest part of western caldera floor; C: massive pumice in domy shape on the western caldera floor; D: rhyolite with perfect columnar joint at the western caldera wall.

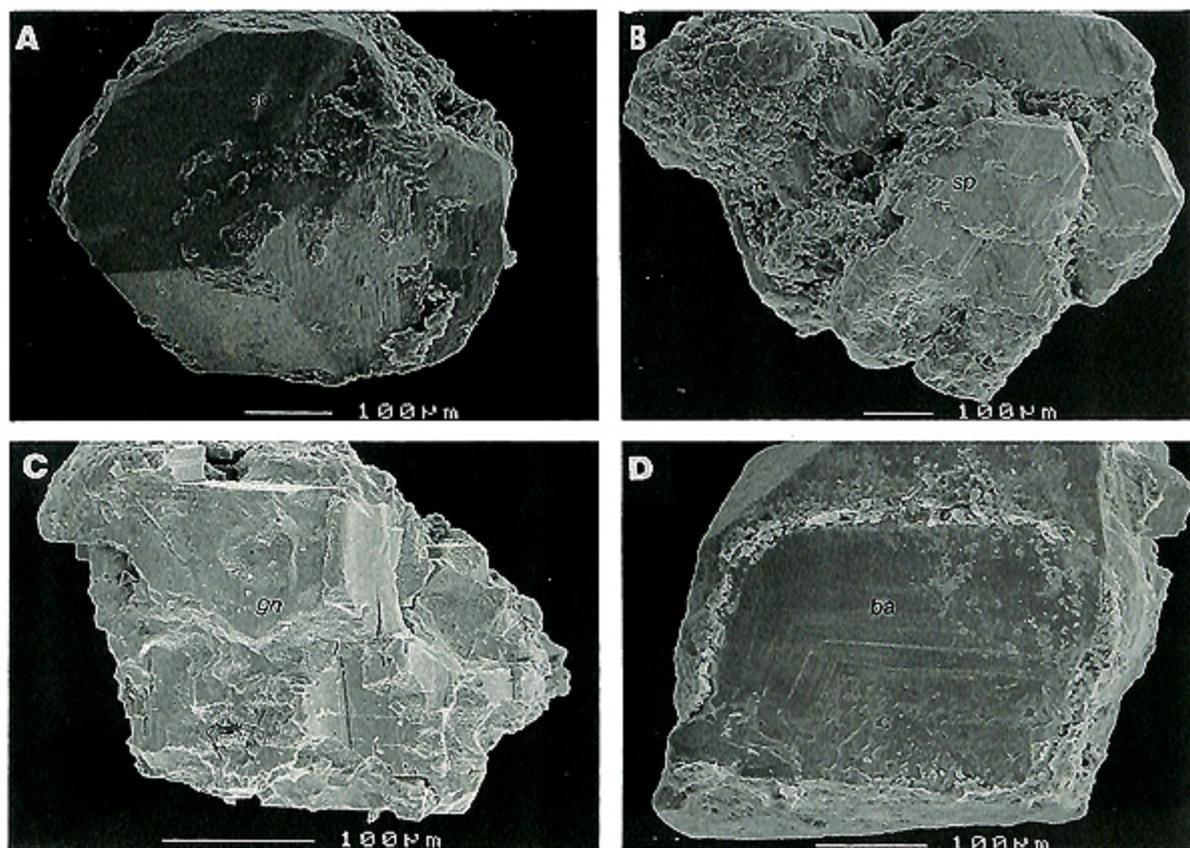


写真2 東部カルテラ壁の白色熱水変質帯に産する鉱石鉱物のSEM像。A：自形閃亜鉛鉱(sp)単結晶の成長層のステップ上に沈殿している黄銅鉱(cp)結晶，B：自形閃亜鉛鉱結晶集合体，C：自形・半自形を示す方鉛鉱(gn)結晶集合体，D：成長層の見られる重晶石結晶

Photo 2 SEM images of ore minerals present in hydrothermally-altered white clay zone of the eastern caldera wall. A: chalcopyrite (cp) crystals precipitation on the steps of growth layers of a sphalerite (sp) single crystal; B: aggregate of euhedral sphalerites; C: aggregate of euhedral to subhedral galena; D: barite crystal associated with growth layers.

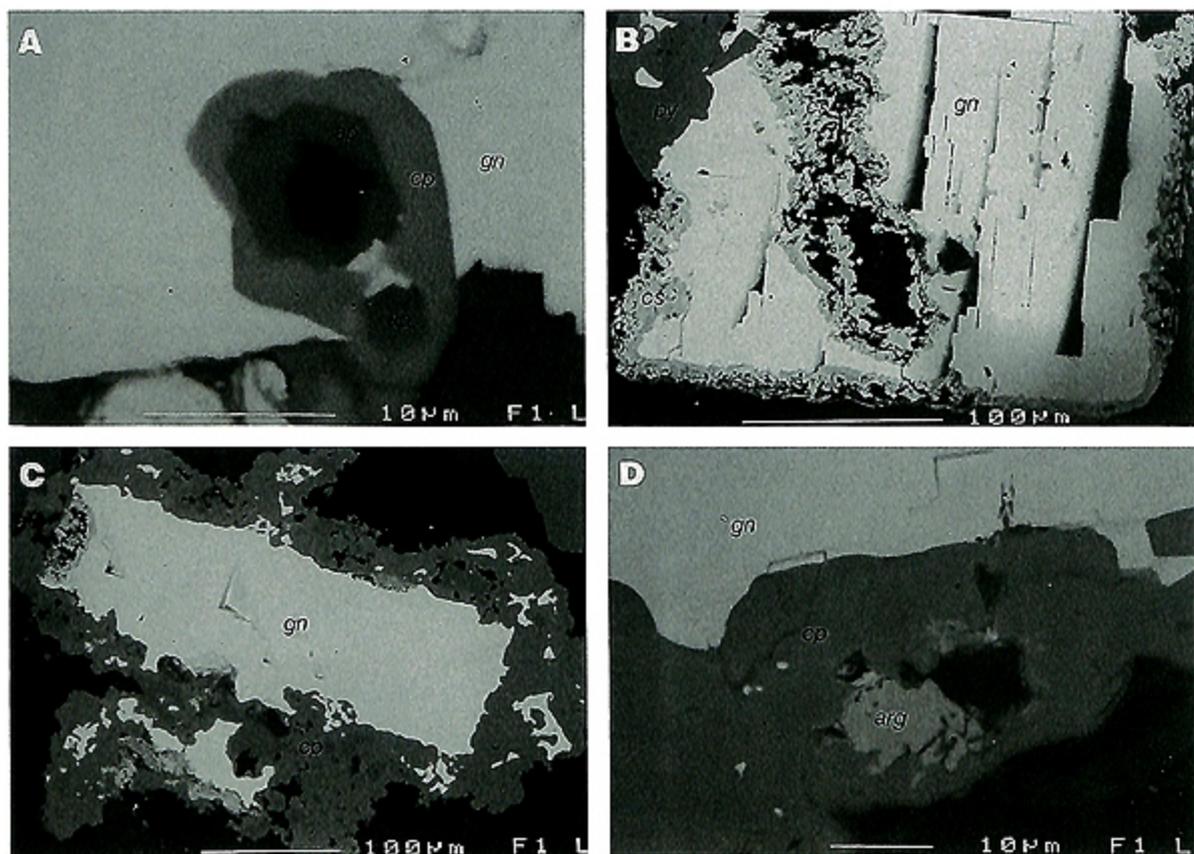


写真3 東部カルデラ壁の白色熱水変質帯に産する硫化鉱物の反射電子像。A：方鉛鉱中の黄銅鉱に包有されている塩素を含む磷灰石(ap)，B：劈開の顕著な方鉛鉱を交代する黄鉄鉱(py)及び方鉛鉱が酸化変質して生じた白鉛鉱(cs)，C：方鉛鉱を交代する黄銅鉱，D：方鉛鉱を交代した黄銅鉱中の輝銀鉱(arg)

Photo 3 Back-scattered electron images of sulfides and barite disseminated in hydrothermally-altered white clay zone. A: chlorine-bearing apatite (ap) included in cp in gn; B: gn associated with prominent cleavages replaced by pyrite (py) and weathered to cerussite (cs); C: gn replaced by cp; D: argentite (arg) in cp which replaces in part gn.