

TAG 熱水マウンドの硫化物の形態分類とその分布

加藤 和浩*1 藤岡換太郎*2

大西洋中央海嶺の中軸谷東部に存在する TAG 熱水マウンドで「しんかい6500」による潜航が15回行われた。この研究の目的は、ビデオ観察から TAG 熱水マウンドを構成している硫化物の形態分類を行うことと、TAG 熱水マウンド全体の形態を明らかにすることである。潜航ビデオの観察結果及び得られたサンプルから、硫化物の形態は初生型 (Primary type)、二次型 (Secondary type)、侵食型 (Erosional type) の3つに大きく分けることができ、さらにそれらはブロック、クラスト、サンド、アマルガメーション、レムナント、テーラス、セディメント、礫、アクティブチムニー (ブラック・ホワイトスモーカー)、インアクティブチムニーの10タイプに細分できる。

また TAG 熱水マウンド全体の地形形態は南北で非対称で、北側ではマウンド頂部から海洋底まで斜面崩壊による急斜面が存在し、南側では2つの段丘状の地形を呈していることが明らかになった。これらの硫化物の形態は、マウンドの熱水噴出域と微地形と密接な関係にあることが明らかになった。

キーワード：TAG 熱水マウンド、段丘、斜面崩壊、急斜面、硫化物の形態分類

Morphology and Distribution of Sulfide Deposits Forming TAG Hydrothermal Mound

Kazuhiro KATO*3 Kantaro FUJIOKA*4

Fifteen dives of the submersible "Shinkai 6500" were carried out in 1994 at TAG hydrothermal mound which is 2.4 km east of Mid-Atlantic Ridge (26°08'N, 44°49'W). The purpose of this study is to classify morphology of sulfide deposits and to reveal the whole TAG hydrothermal mound image by visual observation of dive videos. From the observation dive videos (#216—#230) and obtained sulfide samples, sulfide morphology can be classified roughly into 3 types; Primary type, Secondary type and Erosional type. Further these types are divided into 10 subtypes; Block, Crust, Sand, Amalgamation, Remnant, Talus, Sediment, Conglomerate, Active chimney (black and

*1 山形大学理学部

*2 海洋科学技術センター深海研究部

*3 Faculty of Science, Yamagata University

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

white smoker) and Inactive chimney.

The shape of the TAG hydrothermal mound is asymmetrical. The north area exhibits a steep slope by mass wasting from the summit of the TAG hydrothermal mound to the sea floor, while the south area consists of two notable terraces. These types of sulfide morphology which form the TAG hydrothermal mound have a close relationship to the area of active hydrothermal fluid venting and to the topography of TAG hydrothermal mound.

key words : TAG hydrothermal mound, terrace, mass wasting, steep slope, classify morphology of sulfide deposits

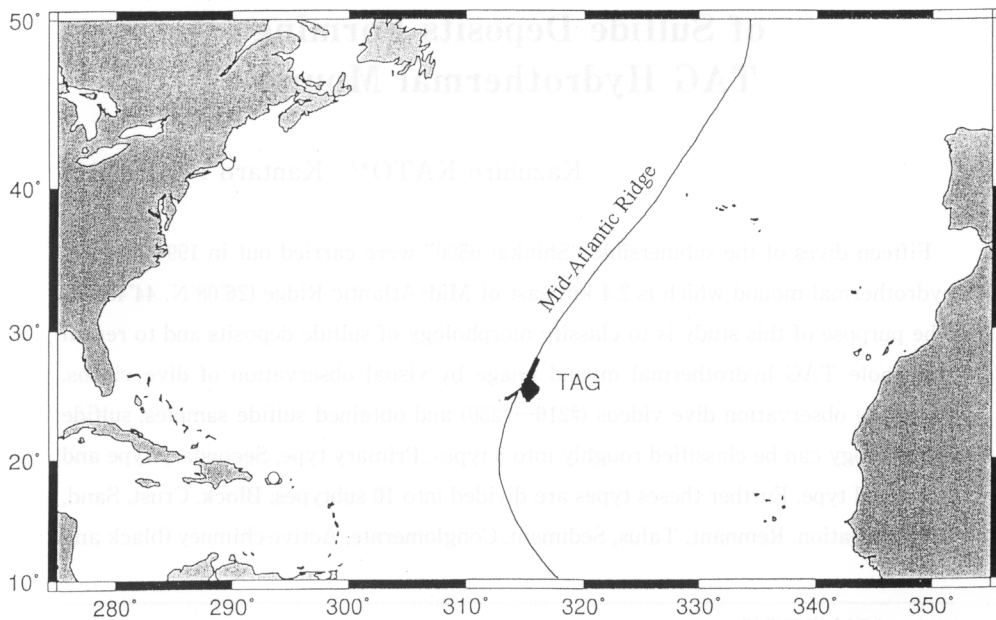
1. はじめに

海洋科学技術センターは調査船「よこすか」、潜水調査船「しんかい6500」を用いて中央海嶺の研究を行った。この研究は、MODE '94 (Mid-Ocean Ridge Diving Expedition) と名付けられた。MODE '94では4つの研究航海が行われ、この研究はLeg 2 TAG 熱水マウンド (以下 TAG マウンド) の「しんかい6500」の潜航調査の結果に基づくものであり、図1、2はその調査地域を示している。

MODE '94 Leg 2は1994年7月29日から8月27日にかけて行われ、この間#216から#230にいたる合計15回の「しんかい6500」による潜航調査が行われた。この潜航調査の主な目的は、①鉛直型長期温度測定装置 (Giant

Kelp) の設置、②長期熱流量測定装置 (Daibutu) の設置、③ブラック、ホワイトスモーカーのサンプリング、④硫化物のサンプリング、⑤ヒートフロー、重力の測定、⑥断層、割れ目の観察、⑦長期海底観察装置 (Manatee) の設置、⑧ハイドロフォン付き海底地震計 (OBSH) の設置、⑨航跡に沿った現場化学分析、である (藤岡ほか、本書)。

TAG マウンドは現在海底熱水鉱床が形成されている場であり、陸上に分布する過去の熱水活動の産物である鉱床の成因を考察するうえでも TAG マウンドの成因を考えることは非常に重要と考えられる。この研究では、TAG マウンドを構成している硫化物の形態分類が可能で、分類された硫化物は TAG マウンドの地形形態に対



Fujioka et al. (1995)

図1 TAG 熱水マウンドの位置

Fig. 1 Location of TAG hydrothermal mound.

応して分布していることから硫化物の形態変化の規則性について述べ、TAG マウンドの成因について考察する。

2. TAG マウンド周辺の地形

TAG 熱水フィールド (TAG マウンドを含む広域熱水地域) は、大西洋中央海嶺のケーンフラクチャーゾーン (北緯24度)、アトランティスフラクチャーゾーン (北緯30度) に挟まれた TAG セグメントに存在している。約 650km に及ぶ TAG セグメントは明瞭なトランスフォーム断層を伴わないオフセットによって不連続に北北東-南南西方向に延びている。TAG 熱水フィールドが存在している周辺では小規模なフラクチャーバレーが 3 本確認されている。このフラクチャーバレーは拡大軸をはさみ東西で非対称で、西側では拡大軸に斜行し、東側ではほぼそれに直行している (Rona et al., 1980)。

拡大速度も東西で非対称で西へは 1.1cm/yr, 東へは 1.3cm/yr である。この拡大速度は拡大軸をはさんで東西に存在している松山逆磁帯 (0~2.4m.y.) の幅から計算によって求められている (McGregor et al., 1977)。また TAG マウンドは中軸谷から東 2.4km の東壁に位置し

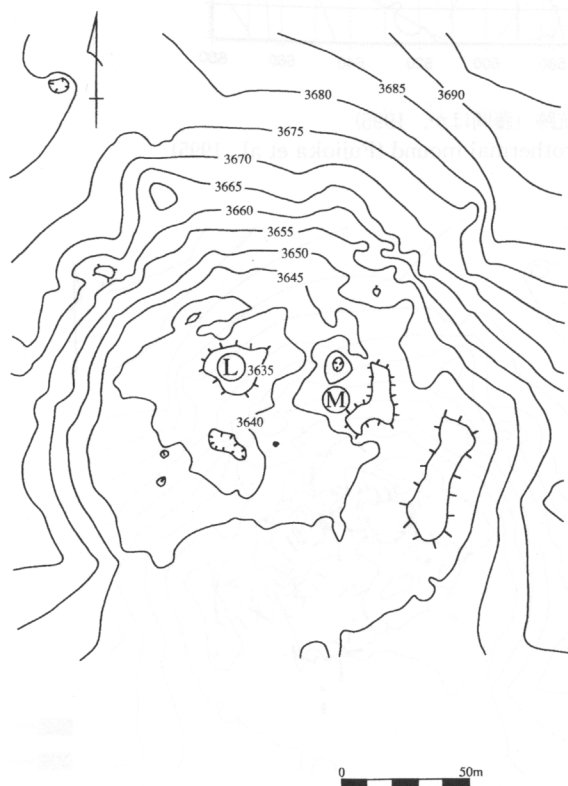


図2 TAG 熱水マウンドの地形
(L: ラピュタ, M: マナティーサイト)

Fig. 2 Detailed bathymetric map of TAG hydrothermal mound
(L: Laputa, M: Manatee Site).
Contour interval is 5m.

(Rona et al., 1986), そこはステップ状の地形を示している。このステップは正断層によって区切られており、ステップ平坦面の幅は数 km から数百 m の広がりを持っている (Rona et al., 1976; Temple et al., 1979)。

また Rona (1992) によって TAG マウンド全景の模式的鯨瞰図が示されている。それによれば TAG マウンドの中央部に巨大なブラックスモーカーがありそれを中心にしてほぼ同心円状のドーム状の地形を示している。この構造は最近 Fujioka et al. (1995) によってさらに詳細に書き換えられた。Fujioka et al. (1995) によれば TAG マウンド上で最も活動が激しいブラックスモーカーはこの航海中「ラピュタ」と呼ばれ、マナティー設置付近はマナティーサイトと呼ばれていた (図 2)。

3. 潜航概要

観測機器の設置、熱水や岩石のサンプリングのため TAG マウンドを中心に 15 回の潜航が行われた (図 3)。潜航の結果、TAG マウンドは水深約 3,680m から 3,620m に存在し、およそ 250m 四方の範囲を占めていることがわかった (藤岡ほか, 本書)。TAG マウンドから離れた地域では枕状溶岩や白い堆積物が観察され、拡大軸と平行な断層崖も観察されたが (Fujioka et al., 1995), 生物はほとんど観察されなかった。

一方、TAG マウンドそのものは硫化物、硫酸塩で形成されており、マウンド上ではブラックスモーカー、ホワイトスモーカー、熱水の揺らぎが存在し、生物はイソギンチャク、エビ、巻き貝、ヒトデ、カニ、魚が観察された。また拡大軸に平行な凹地や、マウンドの端では自らの重みで崩れ掛かっているために生じたと思われる割れ目が多数観察された (藤岡ほか, 本書)。

4. 硫化物の形態

4. 1 硫化物の形態分類

潜航ビデオの観察結果及び得られたサンプルから、TAG マウンドを構成している硫化物の形態の分類が行われた (加藤ほか, 1995)。そこでルートマップを作成するにあたり今回使用した主な形態分類のタイプは以下のようになり、これを使い作成したルートマップが図 4 及び 5 である。

(1) 初生型 (Primary type)

このタイプはマウンド内から噴出された熱水の冷却によって熱水中に溶けている金属が沈殿、濃集して形成されると考えられるタイプで、以下の 3 つのものがある。

① サンド (Sand type)

未固結な金属粒で光沢を持ち（写真1）、ブラックスモーカー付近でよく観察される。

② アクティブチムニー (Active chimney type)

現在活動していてブラックスモーカーあるいはホワイト

スモーカーを噴出しているチムニー（写真2）。

③ インアクティブチムニー (Inactive chimney type)

現在活動していないチムニー（写真3）。

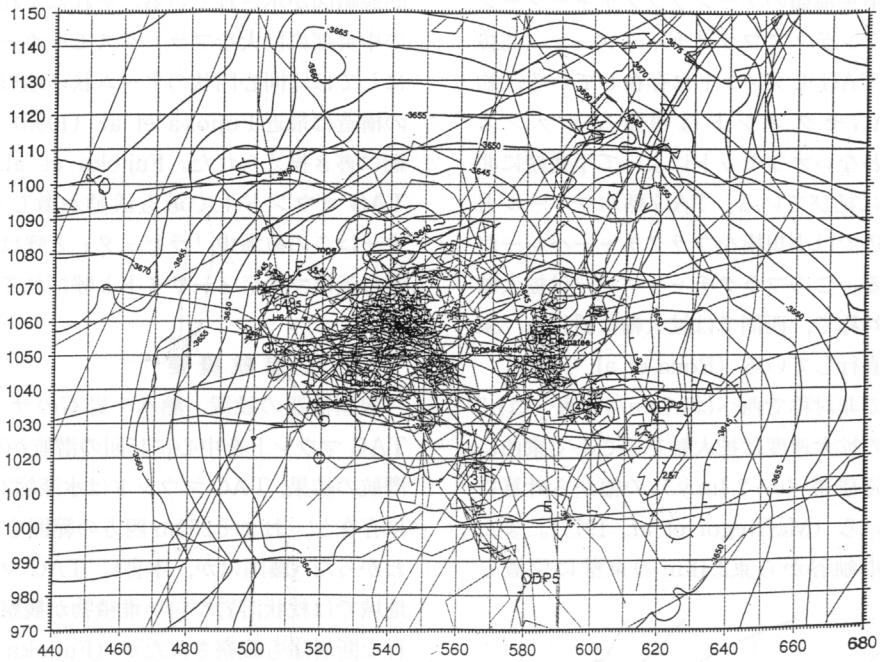


図3 TAG熱水マウンド上の「しんかい6500」の全航跡（藤岡ほか, 1995）
Fig. 3 All "Shinkai 6500" dive tracks in TAG hydrothermal mound (Fujioka et al., 1995).

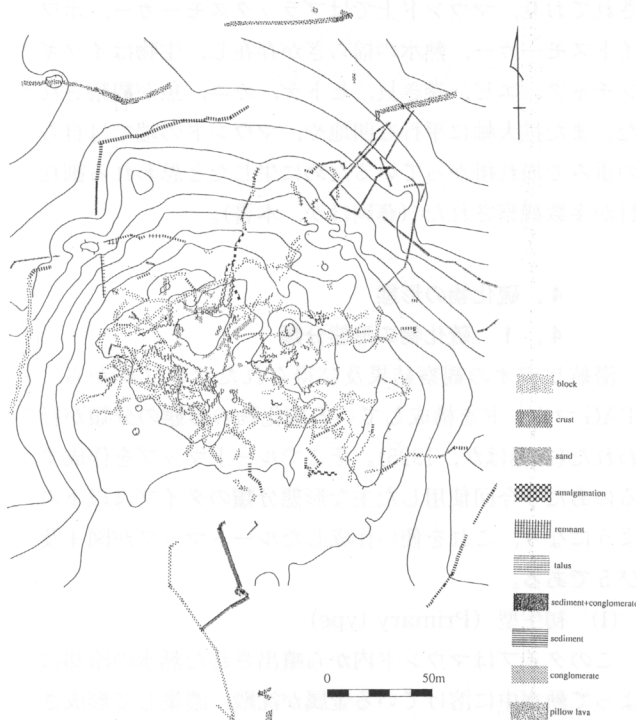


図4 全航跡のルートマップ
Fig. 4 Route map of all dives.

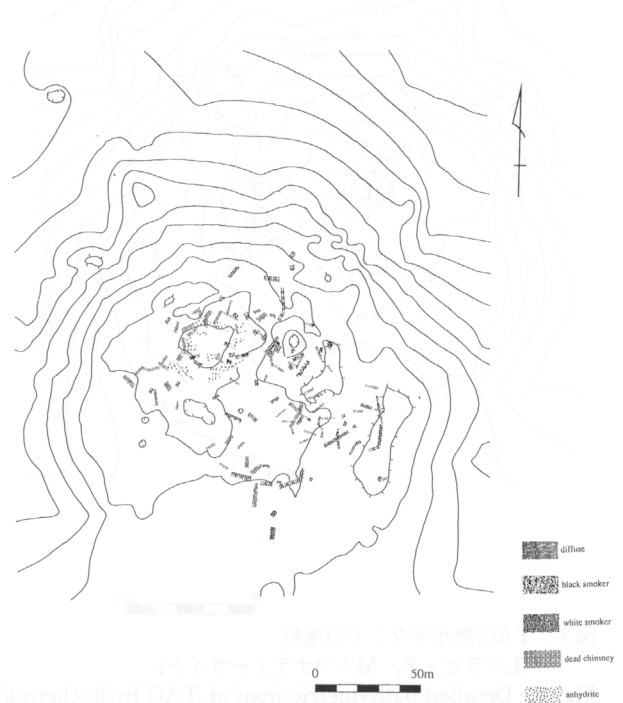


図5 全航跡のルートマップ
Fig. 5 Route map of all dives.

(2) 二次型 (Secondary type)

元々ある形態を持っていたものが熱水、温度、圧力、熱水の化学組成の影響を受け変成し異なる形態に変化したと考えられるタイプで、以下の3つのものがある。

① ブロック (Block type)

斜面地域を除いた TAG マウンド上に広域的に分布している硫化物の塊で最も一般的な形態である(写真4)。表面にはイソギンチャクやバクテリアマットを伴うことがある。

② クラスト (Crust type)

板状の形態を示す硫化物であり(写真5)、起伏と熱水噴出が少ない場所に多く分布している。

③ アマルガメーション (Amalgamation type)

もともと別々だったと思われるある硫化物の形態が何らかの影響で連結されたもの(写真6)。

(3) 侵食型 (Erosional type)

斜面崩壊により形成されたと考えられるタイプで、以下の4つのものがある。

① レムナント (Remnant type)

斜面崩壊時に削られたと思われる跡を残している硫化物(写真7)。

② テーラス (Talus type)

斜面で崩れた硫化物がたまったもの(写真8)。ほとんどの場合テーラストタイプの表面にイソギンチャクが付着することは少ない。

③ 礫 (Conglomerate type)

斜面崩壊によって上位から下位に崩れる際に壊れて礫になった硫化物(写真9)。セディメントタイプを伴い出現することが多い。

④ セディメント (Sediment type)

褐色に酸化した細粒の硫化物でマウンド斜面でよく観察される(写真10)。

4. 2 硫化物の分布

図6は潜水調査船「しんかい6500」の各々の潜航の航跡に沿って、前述の硫化物の形態に基き作成したルートマップ(図4)をまとめた図である。図7も図6と同様に「しんかい6500」の航跡に沿ったルートマップ(図5)から、熱水活動についてまとめた図である。図8は全潜航のビデオ観察と海底地形図から考えられる TAG 熱水マウンドの地形形態を示した図である。北～北西部では急斜面が発達しているが、南～南西部では2つの段丘が存在し、南北で非対称的な地形を示している。図9は北西-南西方向で作成した断面図であり断面をとった位置は図8に示してある。断面図では図8で示した地形の非

対称性がより顕著に示されている。TAG マウンドの中心を通っている②の断面図と②より南側の③の断面図では水深3,640m 付近の南西部に平坦面が存在している。これが図8でも示している2つの段丘のうちの上位段丘平坦面である。しかし、②より北側の①では上位段丘平坦面は観察できない。一方、断面図①、②、③を通じて TAG マウンドの北西部では頂部から海底面に至るまで急斜面が発達している。

第4章で分類した硫化物の形態は、前述した TAG マウンドの地形に対応して観察できたので以下にそれを示す(図6参照)。

枕状溶岩と石灰質に富む堆積物が TAG マウンドから離れた海洋底に分布している。枕状溶岩と TAG マウンドを形成している硫化物の物質境界深度が TAG マウンドの北部と東部で異なる。北部では水深約3,680m に硫化物と枕状溶岩の物質境界があるが、東部でのそれらは水深約3,640m に存在する。

ブロックタイプは TAG マウンドの斜面地域、北～北西部の急斜面地域や段丘斜面斜面地域を除いた TAG マウンド上に最も広域的に分布している。

アクティブチムニータイプは、上位段丘平坦部にあるラピュタとマナティーサイトに分布している。下位段丘平坦部でも上位段丘平坦部に比べ小規模なアクティブチムニーが分布している。

サンドタイプは上位段丘上で最も熱水活動が激しいラピュタの根本付近によく分布している。

クラストタイプとアマルガメーションタイプは上位段丘平坦部によく分布している。クラストタイプが分布している周辺ではブラックスモーカーや diffuse などの熱水活動はほとんど観察されない。一部斜面に達したクラストタイプが崩れているようなところでは、サンドタイプがクラストタイプの下に存在する場合がある。アマルガメーションタイプは diffuse を伴って観察され、下位段丘平坦部にも分布している。

インアクティブチムニーは上位、下位段丘平坦部の diffuse やブラックスモーカーが活動している地域と一致して分布している。

テーラストタイプは北～北西部の斜面崩壊地域と段丘斜面地域に分布している。

レムナントタイプは北～北西部で発達している斜面崩壊地域の上位に分布している。

礫タイプとセディメントタイプは北部の斜面崩壊地域と下位段丘斜面地域に分布している。

生物の分布は、イソギンチャクが斜面崩壊地域を除い



図6 ルートマップから分布をまとめた図。凡例は図4に同じ
 Fig. 6 Compiled map from route map.
 Legend is the same fig. 4.

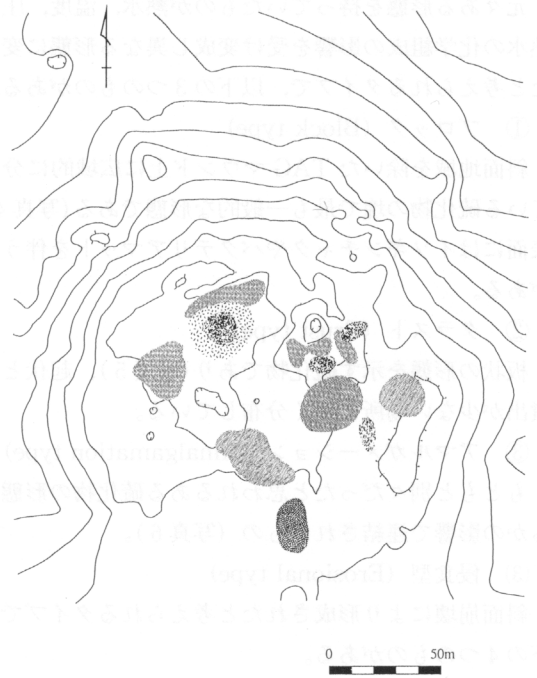


図7 ルートマップから分布をまとめた図。凡例は図5に同じ
 Fig. 7 Compiled map from route map.
 Legend is the same fig. 5.

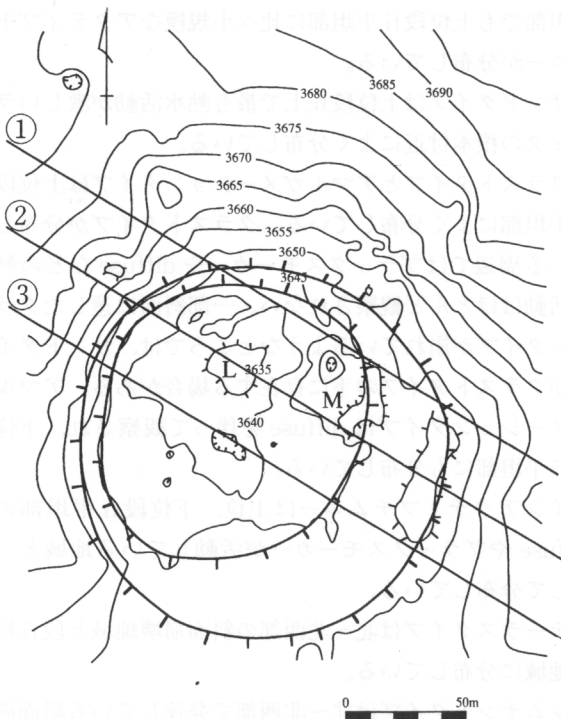


図8 TAG 熱水マウンドの地形解釈と断面図の位置
 (L: ラピュタ, M: マナティーサイト)
 Fig. 8 Topographical interpretation of TAG hydrothermal mound, and 1, 2 and 3 is cross section line
 (L: Laputa, M: Manatee Site).

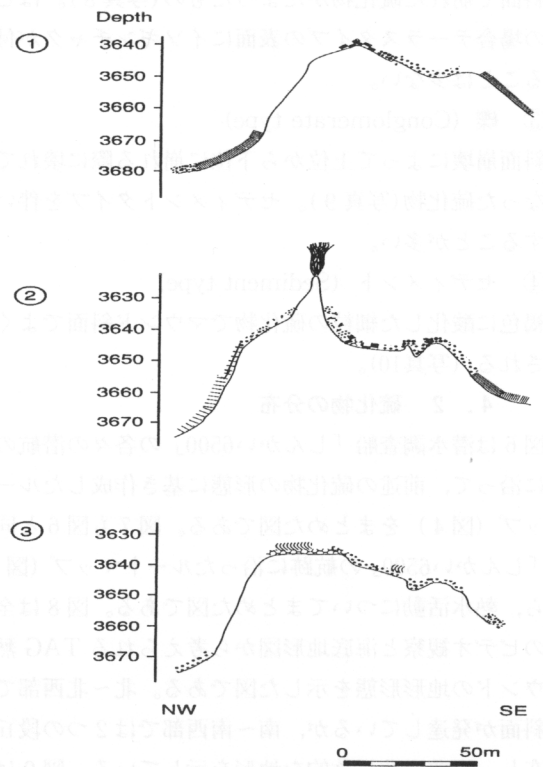


図9 断面図
 Fig. 9 Cross section of each line.

た TAG マウンド上に最も広域的に分布している。また熱水活動が激しいラピュタやアクティブチムニー、diffuse 周辺ではイソギンチャクよりもエビの出現の方が卓越している。エビ、イソギンチャクのほかにカニ、巻き貝、ヒトデも観察された。

4.3 分布のまとめ

表1は第4章で示した硫化物の各々の形態が、TAG マウンドの地形形態に対応して分布していることを示している。表1によれば、北部の斜面崩壊地域と南部の段丘斜面ではセディメントタイプと礫タイプの分布が発達している。また、上位、下位段丘平坦部や上位段丘斜面ではブロックタイプ、クラストタイプ、アクティブチムニー、インアクティブチムニーの分布が発達していることがわかる。

図8、9からTAGマウンドの地形はドーム状の地形(Rona, 1992)ではなく、Fujioka et al. (1995)で示されているTAGマウンドの形態、つまり南北方向で顕著に地形形態が異なることが確認できた。

TAGマウンドを形成している硫化物と枕状溶岩の物質境界深度が、TAGマウンドの北部と東部で異なっている。これは拡大軸付近で発達している正断層の影響を受けているものと考えられる。

生物の分布に関しては、熱水が噴出している地域ではエビの分布が卓越しており、それから外れるとイソギンチャクの分布の方が卓越している。また、テラスタイプにはほとんどイソギンチャクが分布していないので、頻繁に斜面崩壊が発生していると推測される。

5. 考 察

TAGマウンドの形成過程は、TAGマウンドを構成している硫化物の形態変化の規則性から以下のように推測できる。熱水噴出活動が活発な場所、例えば「ラピュタ」の根本付近ではサンドタイプが非常に卓越し、マナーサイトではアクティブチムニーが存在している。サンドタイプが卓越している場所から少し離れるとクラストタイプやブロックタイプが卓越するようになる。つまり、TAGマウンドを形成している硫化物の初生的な形態はサンドやチムニーであると考えられる。サンドタイプが水圧の影響を受け粒子間が密になりクラストタイプを形成していく。さらに活動が続くクラストタイプの上にも新たにサンドタイプや崩れたチムニーが覆いかぶさるようになり、その結果、埋められた初生的な硫化物は温度や熱水の影響を受け変質しさらに大きな塊、ブロックタイプへと変化していくのではないかと考えられる。この過程の繰り返しによってTAGマウンドは成長してきたと考えられる。

TAGマウンドの成因を考えるうえで外すことができない問題としてTAGマウンドの地形形態の非対称性がある。これについての現在の考えは、熱水活動が南～南東から北～北西方向に移動した結果を示しているのかもしれないということである。これは上位段丘ほどではないが下位段丘でも弱いながら熱水噴出活動（ブラック、ホワイトスモーカー）が確認された事実とインアクティブチムニーの存在に基づいて考えている。つまり、下位段丘で観察された弱い熱水活動もおそらく過去には活発

表1 TAGマウンドの地形形態と硫化物の形態の関係

Table 1 Relationship between morphotectonic element of TAG hydrothermal mound and morphology of sulfide deposit forming TAG hydrothermal mound.

The morphotectonic element of TAG mound	Sulfide morphology (north area)	Sulfide morphology (south area)
Lower steep slope	Sediment type, Conglomerate type Talus type	-
Upper steep slope	Remnant type	-
Lower terrace slope	-	Sediment type, Conglomerate type Talus type
Lower terrace plane	-	Dead chimney type, Block type Amalgamation type
Upper terrace slope	-	Talus type
Upper terrace plane	-	Block type, Crust type, Sand type Amalgamation type

だった時期があったが、現在ではマウンド内部での熱水循環の変化で活動が鈍くなり、その結果2つの段丘を形成したのかもしれない。また2つの段丘があるということから過去に2回熱水活動が停止、あるいは非常に弱くなった時期があって現在3回目の熱水活動が活動中とも考えられ、その結果2つの段丘が形成されたとも考えられる。

6. まとめと今後の課題

大西洋中央海嶺の東部に存在する TAG マウンドで行われた「しんかい6500」の15回の潜航ビデオの観察から、TAG マウンドを形成している硫化物の形態は、初生型 (Primary type)、二次型 (Secondary type)、侵食型 (Erosional type) の3つに大きく分けることができ、それらはさらに10のタイプに細分された。また地形解釈、断面図、「しんかい6500」の潜航ビデオの観察から、TAG マウンドの地形形態は斜面崩壊が発達する北部と2つの段丘が発達する南部とで非対称的であった。分類した硫化物の形態に基づいて作成したルートマップをまとめた結果、各々の形態の硫化物は、TAG マウンドの地形形態と熱水噴出域と密接に関係して分布していた。TAG マウンドの地形形態に対応して、ある特定の硫化物の形態が分布していることから、硫化物の形態変化にある規則性の可能性を示し、これが TAG マウンドの形成史を解明するうえで非常に重要であると考えた。また2つの段丘の存在から熱水活動域の移動、あるいは熱水活動の断続を指摘した。

硫化物の形態変化の規則性の可能性と熱水活動の移動あるいは断続性の解明は TAG マウンドの成因を考えるうえで非常に重要であると考えられる。硫化物の形態変化に規則性がありその繰り返して TAG マウンドが成長してきたのであれば、硫化物の形態変化の規則性を明らかにすることが TAG マウンドの形成過程を復元することになる。また現在の TAG マウンドの地形形態を考慮して考察することによってさらに詳細な形成過程が復元できると考えられる。現在の研究段階ではビデオ観察だけに終わっているため、今後はサンプルの化学分析を併用して以上の問題を解決していきたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり以下の方々に感謝します。MODE '94 Leg2 乗船研究者の方々は潜航ビデオを快く使用させてくださった。また海洋科学技術センター深海

研究部研究員の皆様からは有益な助言をいただいた。日本海洋事業の青木美澄氏、高知大学の岡野肇氏には終始議論していただいた。

引用文献

- Fujioka, K., T.Gamo and M.Kinoshita (1995): MODE '94 Shinkai 6500 Dives in the TAG Hydrothermal Mound on the Mid-Atlantic Ridge. Cruise Report of the Fleet of JAMSTEC for Deep Sea Research No.1, 226pp.
- 加藤和浩・藤岡換太郎・MODE '94 Leg2 乗船研究者一同 (1995): 大西洋中央海嶺 TAG 熱水フィールドの地形—MODE '94航海の結果—。日本地質学会第102年学術大会講演要旨, P.207.
- McGregor, B.A., C.G.A.Harrison, W.Lavell and P.A. Rona (1977): Magnetic anomaly patterns on Mid-Atlantic Ridge crest at 26°N. *Journal of Geophysical Research*, **82** (2), 231-238.
- Rona, P.A., R.N.Harblison, B.G.Bassinger, R.B.Scott and A.J.Nalwalk (1976): Tectonic fabric and hydrothermal activity of Mid-Atlantic Ridge-crest (lat 26°N). *Geological Society of America Bulletin*, **87**, 661-674.
- Rona, P.A., D.F.Gray (1980): Structural behavior of fracture zones symmetric and asymmetric about a spreading axis: Mid-Atlantic Ridge (latitude 23°N to 27°N). *Geological Society of America Bulletin*, **91**, 485-494.
- Rona, P.A., G.Klinkhammer, T.A.Nelsen, J.H.Trefry and H.Elderfield (1986): Black smokers, massive sulfide, and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, **321**, 33-37.
- Rona, P.A. (1992): DEEP-SEA GEYSERS OF THE ATLANTIC. *NATIONAL GEOGRAPHIC.*, **182** (4), 104-109.
- Temple, D.G., R.B.Scott and P.A.Rona (1979): Geology of a submarine hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge, 26°N Latitude. *Journal of Geophysical Research*, **84** (B13), 7453-7466.

(原稿受理: 1995年7月3日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

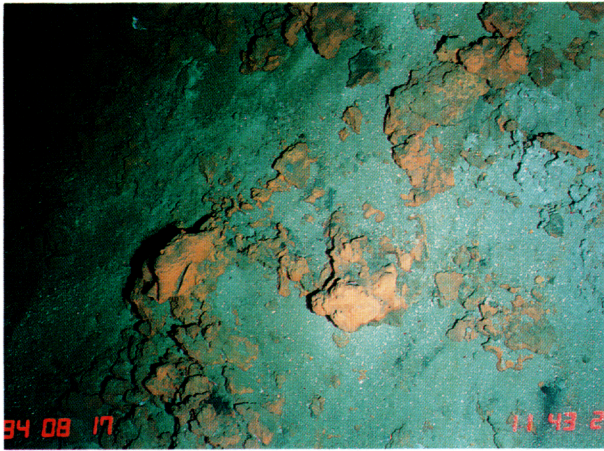


写真1 サンドタイプの硫化物
Photo 1 Sand type of sulfide deposit.



写真2 アクティブチムニータイプ
Photo 2 Active chimney type.

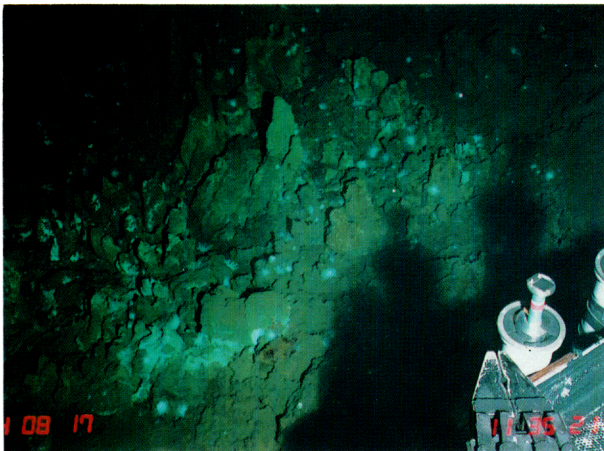


写真3 インアクティブチムニータイプ
Photo 3 Inactive chimney type.

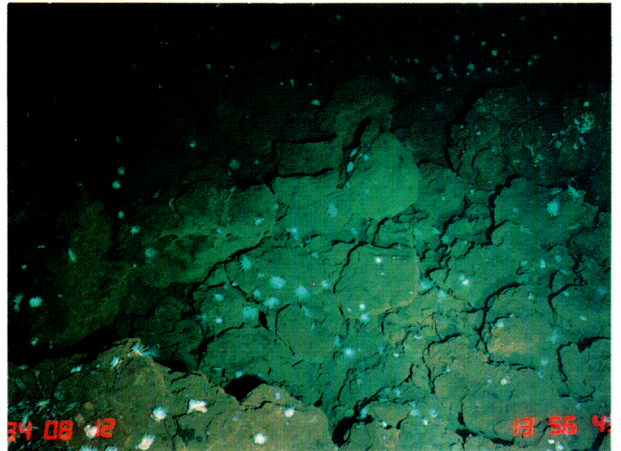


写真4 ブロックタイプの硫化物
Photo 4 Block type of sulfide deposit.

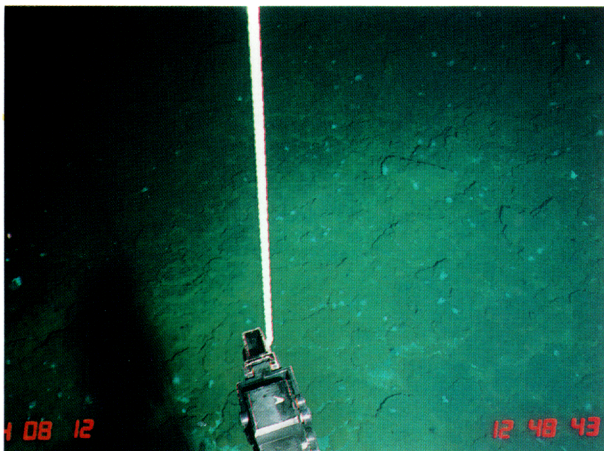


写真5 クラストタイプの硫化物
Photo 5 Crust type of sulfide deposit.

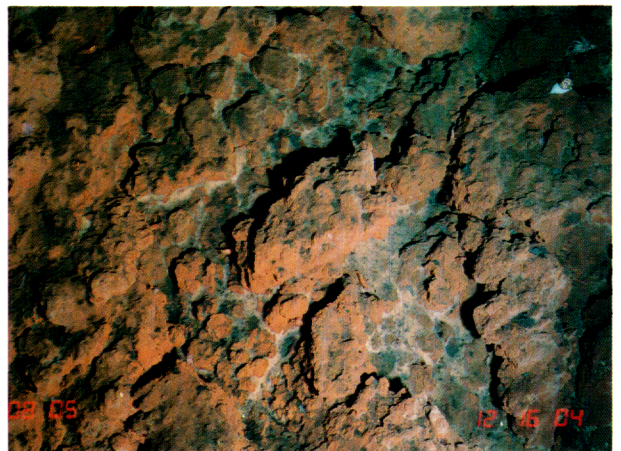


写真6 アマルガメーションタイプの硫化物
Photo 6 Amalgamation type of sulfide deposit.

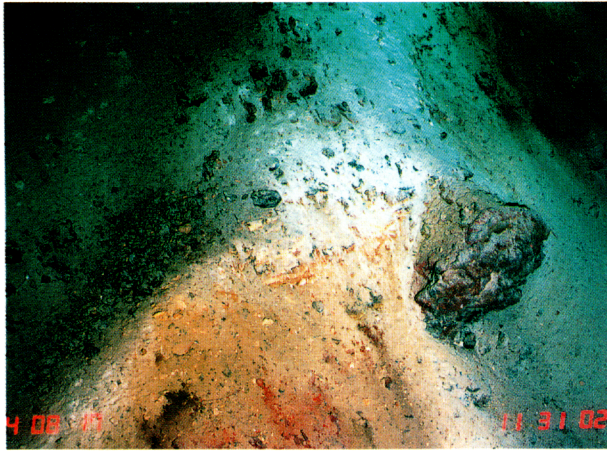


写真7 レムナントタイプの硫化物
Photo 7 Remnant type of sulfide deposit.

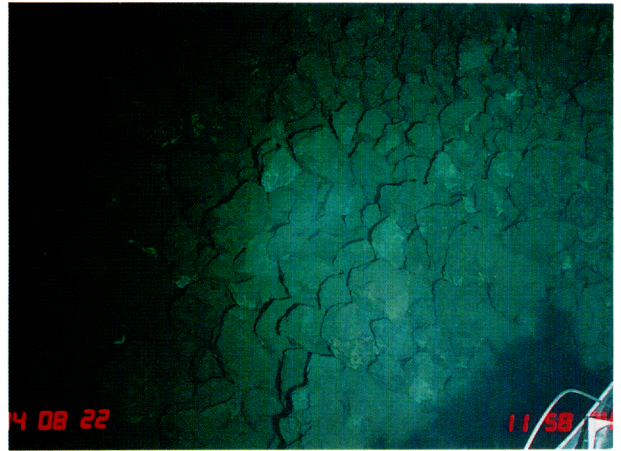


写真8 テーラスタイプの硫化物
Photo 8 Talus type of sulfide deposit.

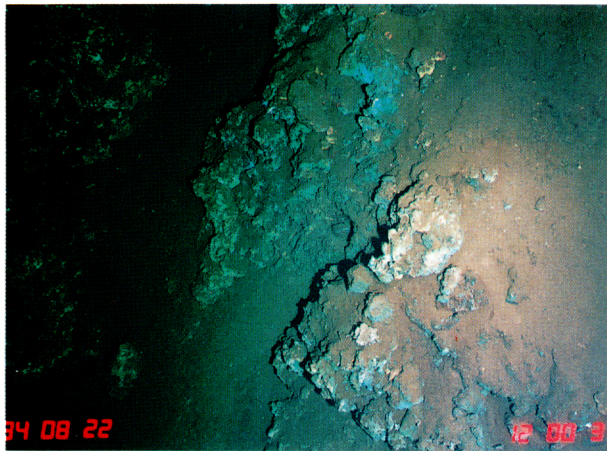


写真9 礫タイプの硫化物
Photo 9 Conglomerate type of sulfide deposit.



写真10 セディメントタイプの硫化物
Photo 10 Sediment type of sulfide deposit.