

TAG マウンドにおける熱水変質鉱物の 分布と化学組成

益田 晴恵*¹ 千葉 仁*² 蒲生 俊敬*³
藤岡換太郎*⁴ 中村 正和*¹

大西洋中央海嶺26°N に位置する TAG マウンドから高温の熱水とともに、多量の熱水性堆積物を採取した。熱水性堆積物中の硫化鉱物として黄鉄鉱が普遍的に多量に含まれていた。さらに、ブラックスモーカーチムニーは多量の黄銅鉱と微量の磁硫鉄鉱を含んでいた。ホワイトスモーカーからの沈殿物には閃亜鉛鉱が含まれていた。これらの硫化鉱物の違いは熱水に含まれる金属の含有量と調和的であった。熱水を湧出していた場所から得られた試料は硬石膏を含んでいた。ケイ酸塩はシリカ鉱物（石英、非晶質シリカ）と、スメクタイト、緑泥石があった。これらのケイ酸塩鉱物は、非晶質シリカを除けば、熱水から直接沈殿したのではなく、熱水性堆積物と海水の間での反応を通して、化学成分が再構成されて二次的に形成したと考えられる。

キーワード：TAG マウンド、熱水性堆積物、熱水変質鉱物、硫化鉱物、ケイ酸塩鉱物

Distribution and Chemical Characteristics of Hydrothermal Alteration Minerals Recovered from the TAG Active Mound, MAR 26°N

Harue MASUDA*⁵ Hitoshi CHIBA*⁶ Toshitaka GAMO*⁷
Kantaro FUJIOKA*⁸ Masakazu NAKAMURA*⁵

Mineralogy and chemistry of hydrothermal sediments recovered from the TAG active mound, MAR 26°N, were studied. Pyrite was commonly observed in the most of the samples. Anhydrite was found in active chimneys. Black smoker chimney contained considerable amount of chalcopyrite, while sphalerite was found in the white smoker. The occurrence of sulfide minerals is concordant with the difference of metal concentration in the hydrothermal solutions. Silica minerals (quartz and amorphous silica), smectite and chlorite were silicates detected in the hydrothermal sediments and hydrothermally altered basalts. The silicates, except amorphous silica,

* 1 大阪市立大学理学部

* 2 九州大学理学部

* 3 東京大学海洋研究所

* 4 海洋科学技術センター深海研究部

* 5 Department of Geosciences, Osaka City University

* 6 Department of Earth and Planetary Science, Kyushu University

* 7 Ocean Research Institute, University of Tokyo

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

would not be formed directly from the hydrothermal solutions, but formed secondary through the reaction between hydrothermal sediments and seawater after deposition.

Key words : TAG active mound, Hydrothermal sediments, Hydrothermal alteration minerals, Sulfides, Silicates

1. はじめに

拡大速度の遅い拡大軸として知られている大西洋中央海嶺の26°Nに位置するTAGマウンドは、1985年に発見された硫化金属鉱床を伴う活動的熱水系である(Rona, 1985)。熱水活動は現在知られている地球上の海底熱水系では最大規模のものである。海底の活動的熱水の研究は、海嶺軸からの熱と物質の供給量の見積もりを行い、海水への寄与率を検討するために重要である。また、熱水性堆積物は陸上に見られる海底で形成されたと考えられていた金属鉱床の形成機構との関連からも興味を持たれるものである。中央海嶺周辺に見られる現在形成されつつある金属鉱床は、オフィオライト中の鉱床の形成過程などとも関連づけられる興味深い対象である(たとえば、Rona, 1985)。

1994年8月に行われた「よこすか」と「しんかい6500」による調査は、Inter Ridge計画の一環として日米で共同で進められたものである。調査は引き続いて行われるODP第158次航海の掘削調査に先立ち、掘削前の熱水活動を、熱流量や熱水噴出の規則性などの物理的性質や熱水の化学的性質との両面から検討することになった。

マウンドを覆っている熱水性堆積物は熱水から直接に沈殿あるいはその後の変質を受けたものである。熱水の化学的性質を明らかにし、金属元素の供給量の見積もりを行うためには、熱水と同時に堆積物の化学的性質を検討する必要がある。本研究は、1994年に行われたTAGマウンドでの潜航調査で得られた熱水性堆積物について、鉱物化学的性質を明らかにし、熱水の性質との関連を検討することを目的に計画した。ここでは、これまでに予察的に行った熱水性堆積物の定性的分析に関する結果を述べる。

2. 試料と分析方法

本研究で用いた試料は、すべてTAGマウンドから得られた(図1)。いずれの試料も熱水活動に関係して形成されたもので、熱水を湧出していたチムニー、採水した熱水を船上に回収するまでに採水管中に沈殿した沈殿物、チムニーが崩壊した後に固結した礫状堆積物、基盤と考えられる変質した玄武岩である。

試料は、洗浄して乾燥した後、粉碎し、粉末X線回折法による鉱物同定を行った。また、代表的と考えられた試料はエポキシ樹脂で固めた後、硫化鉱物を反射光学顕微鏡で観察するとともに、走査型電子顕微鏡(JEOL JSM-5200)に付設したエネルギー分散型分析電子顕微鏡(Philips EDAX DX4 UTW/CDUシステム)で元素分布を観察した。元素の定量分析は行っていない。

変質玄武岩の変質温度を見積もるために、酸素の同位体比を分析した。試料は粉末X線解析に用いたと同じ粉末を5フッ化臭素で分解し、酸素を抽出した後、二酸化炭素とし、質量分析計で同位体比を測定した。前処理は大阪市立大学で行ったが、測定は岡山大学地球内部研究センターにおいて行った。

3. 結 果

3.1 熱水性堆積物の主要鉱物組成

表1に粉末X線回折法で同定した鉱物を試料採取地点ごとにまとめた。

すべての試料に黄鉄鉱は普遍的に大量に見られる。しかし、ブラックスモーカーチムニーには、黄銅鉱の方がより大量に含まれていることがある。さらに、ブラックスモーカーチムニーには磁硫鉄鉱も含まれている場合があった。反射光学顕微鏡によるブラックスモーカーチムニーの観察でも、黄銅鉱が圧倒的に多く、先の3種以外の硫化鉱物は見られなかった。ホワイトスモーカーチムニーには黄銅鉱はあるが、まれであった。Thompson et al. (1988)はTAGマウンドの熱水性堆積物では閃亜鉛鉱が重要な硫化鉱物の1つであると指摘しているが、今回の分析では検出できなかった。粉末X線回折法では少量しか含まれない鉱物は検知しにくいので、観察をしていない試料に含まれている可能性はある。しかし、閃亜鉛鉱を加えても、この熱水系の硫化鉱物組成は比較的単純であるといえる。

現在活動的な熱水と接する地点から採取した試料には硬石膏が含まれている。ラピュタと命名されたブラックスモーカーコンプレックスからは大部分が硬石膏からなる4.4kgの塊が得られている。これまでにTAGマウンドからは重晶石が報告されたことはないが、ブラック

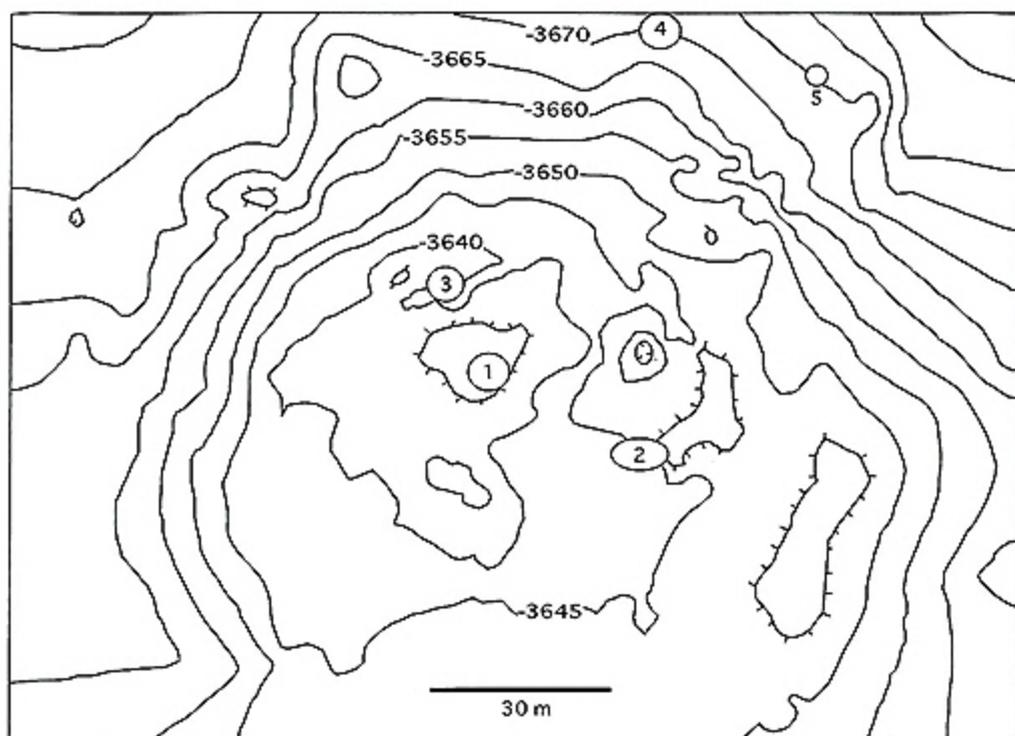


図1 本研究に用いた試料の採取地点。1：ラピュタサイト、2：マナティーサイト南、3：頂部北、4：北部斜面、5：東北部斜面

Fig. 1 Sampling localities of hydrothermal sediments of this study. 1: Laputa site, 2: South of Manatee site, 3: northern summit area, 4: northern slope, 5: northeastern slope.

スモーカーチムニー、ホワイトスモーカーチムニー、硫化物集合堆積物のいずれにもまれに含まれていることが明らかになった。

石英は活動的なチムニーにはほとんど見られなかった。ホワイトスモーカーチムニーにも、非品質シリカは大量に含まれているが、石英は含まれていない。一方で、量的にはわずかであるが、いずれの試料でもスメクタイトはしばしば観察される。スメクタイトよりは高温で形成される緑泥石の産出がまれであることとあわせると、ケイ酸は非品質シリカとして急速に沈殿し、石英を品出させるような高温で沈殿物が形成したのではないことが推察される。

一方、ブラックスモーカーチムニーが崩壊して海底面に堆積後再固結して形成されたと考えられる硫化物集合堆積物には石英がしばしば観察される。詳しくは後述するが、石英を濃集する部分は硫化物のブロックを固めるセメントのような産状を示す。これは、チムニー形成後の続成作用が石英を品出するような温度で（かつ、ゆっくりと）起こっており、再堆積後に鉱物組み合わせが変

化した結果であろう。

3. 2 熱水からの沈殿物

今回の調査で、マナティー地点南のホワイトスモーカーから採取された熱水は採取時は透明であったが、船上に回収するまでに冷却されて、微量の白色沈殿物を生じた。ブラックスモーカーからは、今回の潜航調査では端成分を代表している試料は得られず、試水採取時にすでに、熱水が海水で混合冷却されて生じた黒色沈殿物を含んでいた。沈殿物はろ過し、冷蔵庫内の低温で乾燥させた後に、実験室へ持ち帰り、粉末エックス線回折法により生成した鉱物を同定した。図2に回折スペクトルを示す。

図2に示されるように、ブラックスモーカーとホワイトスモーカーの両方の熱水からの沈殿物に、23°付近に最大値を持つ幅の広い非品質物質のピークが見られる。これは熱水噴出後、沈殿物が急冷されて生じたために結晶を形成する時間がなかったことを示している。

わずかに含まれる結晶質物質は、ブラックスモーカーからの沈殿物では黄銅鉱に富んでいる。ブラックスモ

表1 大西洋中央海嶺26°NのTAGマウンドから得られた熱水性堆積物と変質玄武岩中の粉末エックス線回折法により検出された変質鉱物

Table 1 X-ray diffraction mineralogy of selected hydrothermal sediments and altered basalts from the TAG mound, MAR 26°N.

Sample No.	Rock types	Place	Pv	CP	Pvrr	Sm	Chl	Qz	Mel	Atac	Anh	Ba	Gyp
216R-3	Anhydrite block	Laputa	x	xxxx	x						xxx		xx
219R-3-1	Black smoker	Laputa	x	xxxx		x					xx		
219R-3-2	Black smoker	Laputa	x	xxxx		x						x	
219R-8	Black smoker	Laputa	x	xxxx		x		x			x		
219R-14	Black smoker	Laputa	x	xxxx		x					xxx		x
226R-1-2	White smoker	S Manatee	xx						x			x	
230R-1-2	White smoker	S Manatee	xx	xx									
230R-1-2	White smoker	S Manatee	xxxx			x					x		
230R-1-6	White smoker	S Manatee	xx			x						x	
226R-1-1	Dead white smoker	S Manatee	xxxx								x		
227R-4	Dead white smoker	S Manatee				x							
227R-8	Sulfide aggregates	NE slope	x	x			x	xxx					
227R-9	Sulfide aggregates	NE slope		x						xxxx		x	
228R-2	Sulfide aggregates	N summit	xx	xx				x					
228R-3	Sulfide aggregates	N summit	xxxx	xxx									
228R-3-1	Sulfide aggregates	N summit		xxxx		x		x					
228R-3-2	Sulfide aggregates	N summit		xxxx				x					
228R-4	Sulfide aggregates	N summit	x	xxx						x		x	xx
230R-2-1	Sulfide aggregates	N slope	xx	xxxx				x					
230R-2-2	Sulfide aggregates	N slope	x	xx									
230R-2-3	Sulfide aggregates	N slope	x			x		x		xx			
230T-2-4	Sulfide aggregates	N slope	x			x		xxx					
226R-4	Pillow basalt			xx									
227R-7	Pillow basalt		xx	xxxx		x		x					
227R-7(rim)	Pillow basalt		x	xx			xxxx	x					

Abbreviations of minerals: Pv: pyrite; CP: chalcopyrite; Pvrr: pyrrhotite; Sm: smectite; Chl: chlorite; Qz: quartz; Mel: melendite; Atac: atacamite; Anh: anhydrite; Ba: barite.

カーの熱水はホワイトスモーカーからの熱水よりも鉄に富んでいるが、銅はホワイトスモーカーに比べてわずかに多いに過ぎない (Gamo et al., submitted)。前述したように、最も温度の高い熱水の通るブラックスモーカー中心部には、黄銅鉱が濃集していた。ブラックスモーカーの熱水は採取時にすでに大量の海水で希釈されていたために、熱水は本来は銅に富んでいるが、大部分の銅はすでに沈殿した後であったと考えられる。

ホワイトスモーカーからの沈殿物は閃亜鉛鉱に富んでいる。白い粉末には硬石膏を含むが、大部分は非晶質シリカである。沈殿物を採取した熱水の分析値は、ホワイトスモーカーの熱水が亜鉛に富んでいることを示していた (Gamo et al., submitted)。本研究では確認されなかったが、閃亜鉛鉱はこのマウンドからの重要な硫化鉱物であるという報告もあり (Thompson et al., 1988)、沈殿物中の閃亜鉛鉱の存在はこのことと矛盾しない。閃亜鉛鉱は、ブラックスモーカーより温度が低く、pHも低いホワイトスモーカーから品出するものが多いのであろう。

3.3 変質玄武岩

マウンドの北部～北東部には地滑り地形が観察される。ここから塊状玄武岩が多数採取されているが、それらはマウンドの基盤をなしていたものと想像される。これらの玄武岩は、しばしば著しい熱水変質作用を被っている。本研究では、粘土化しており鉱化作用も見られた試料 (227-R-07) について、詳しく検討した。

粘土化した部分は緑泥石かスメクタイトであった。また、硫化鉱物は粉末エックス線回折法では黄鉄鉱と黄銅鉱が検出されたが、肉眼観察では球粒状の閃亜鉛鉱が粘土上に品出していた。

3.4 熱水性堆積物の元素分布

試料採取時に熱水を噴出していたブラックスモーカーチムニー (219-R-08) の断面を写真1に示す。また、その一部について分析電子顕微鏡を用いてマッピングした元素分布を図3に示す。チムニーは硫化鉱物を主体として形成されているが、中心部の穴の周囲には黄銅鉱が集まっており、その周囲は黄鉄鉱と黄銅鉱が集まっている。硫化物を主体としているが、この部分には微量ながら

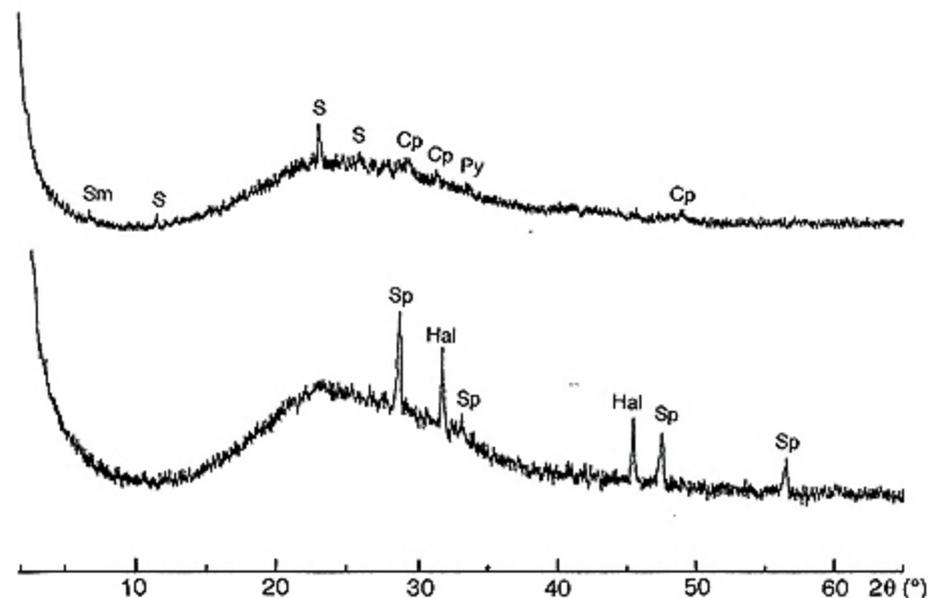


図2 熱水からの沈殿物の粉末X線回折スペクトル。上：ラピュタサイトのブラックスモーカーからの熱水中の黒色沈殿物。下：マナateeサイト南のホワイトスモーカーからの熱水中の白色沈殿物。NiをターゲットにしたCuK α 線30kV、10mAで測定。図中のアルファベットは次の鉱物を表す。Sm：スメクタイト、S：自然イオウ、Cp：黄銅鉱、Py：黄鉄鉱、Sp：閃亜鉛鉱、Hal：食塩

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of hydrothermal precipitations from hydrothermal waters of TAG mound. Above: black precipitation from the black smoker of Laputa site (sample name: 230-ORI-7). Below: white precipitation from the white smoker of the south of Manatee site (sample name: 227-ORI-3). The Ni targetted CuK α radiation of 30kV and 10mA was used for analysis. The abbreviations attached to the XRD patterns indicate the following minerals. Sm: smectite, S: native sulfur, Cp: chalcopyrite, Py: pyrite, Sp: sphalerite, Hal: halite.

石膏も含まれている。この部分には銅、鉄、イオウの濃集が認められる。硫化物の周囲には硬石膏が分布し、カルシウムとイオウの濃集が見られる。その外側には、ケイ酸塩鉱物が存在するが、これはマグネシウムと鉄に富んでいる。この部分では、アルミニウムも周辺よりは高濃度であるが、前者の2元素ほどの濃集は認められない。ケイ酸塩鉱物は粉末X線解析の結果からスメクタイトが主体であった。濃集元素はこのスメクタイトが鉄質サポナイト（マグネシウムと鉄を多く含む）であることを示唆している。マグネシウムと硫酸は高温の熱水には極めて微量しか含まれていない元素であるので、硬石膏と同様に、スメクタイトは熱水が海水と接することによって形成されたと考えられる。硬石膏とスメクタイトの分布する部分には赤い鉄の酸化鉱物が見られる。鉄酸化物は硫化物としていったん沈殿したものが海水に触れて酸化されて形成されたと考えるのが妥当であろう。もし、そうであるならば、スメクタイトも同じタイミングで形成された可能性が高い。

ブラックスモーカーチムニーはほぼ崩壊し、チム

ニー形成場の海底面を埋めているが、これらの崩壊したチムニーのかけらは集合して礫岩様の形態を示す（写真2）。塊状硫化物とそれらの間を充填しているセメント部分との元素分布を図4に示す。試料全体にケイ素が分布する。ケイ素の濃集する部分は酸素以外の元素を伴わないことも多く、粉末X線解析の結果とあわせると、石英として存在していることが明らかである。黄鉄鉱は鉱染状に広く分布している。黄銅鉱も粉末エックス線解析では検出されており、同様に分布する。しかし、セメント部分では、黄鉄鉱は存在するが、黄銅鉱はまれである。銅の分布は酸素の分布と一致することから、黄銅鉱の多くはセメントの部分では酸化されているのであろう。さらに、銅の分布とマグネシウム、アルミニウムの分布とも一致する。また、量的には少ないが、鉄とケイ素も同じ分布を示す。したがって、銅はケイ酸塩中に固定されているか、あるいは銅を主体とする酸化物とケイ酸塩の混合物として存在すると考えられる。ケイ酸塩は緑泥石のこともあるが、カリウムの濃集が認められることから、多くはスメクタイトであろう。

3. 5 変質玄武岩の元素再分配と酸素同位体比

写真3は核に変質の程度の低い部分を残した玄武岩である。図の青線に沿った部分を12等分して、鉱物組成と酸素同位体比を測定した。粉末X線回折スペクトルを図5に、酸素同位体比を表2に示す。

最も外側の変質の進んだ部分はスメクタイトが多いが、内側へ行くほど緑泥石が多くなる。最も内側では、灰長石が変質されずに残っている。酸素同位体比は最も外側では海水の影響を受けていると考えられ、少し重くなっているが、それより内側では内部ほど重い同位体比を濃集している。しかし、中心部でも、4%しかない。この値は一般に知られている海底玄武岩の値 (5.7 ± 0.5 ‰, たとえば, Muehlenbachs and Clayton, 1972; Pineau et al., 1976など) より軽く、変質が岩石全体に進んでい

ることをうかがわせる。分析電子顕微鏡で観察した化学成分分布は、外側がわずかにマグネシウム、アルミニウム、カリウムを濃集しているように見られたが、その差は明瞭ではなく、元素の再分配に関しては今後定量を行ったうえで議論する必要がある。

4. 考 察

TAG マウンドから湧出する熱水は、ブラックスモーカーでは銅を濃集し、ホワイトスモーカーでは亜鉛を濃集するという違いはあるが、共通して、熱水中に多量に含む重金属元素の種類は少ない (Gamo et al., submitted)。したがって、熱水性堆積物に含まれる硫化鉱物の種類にも乏しい。硫化鉱物の主要なものは黄銅鉱と黄鉄鉱であり、ブラックスモーカーでは磁硫鉄鉱が、ホワイ

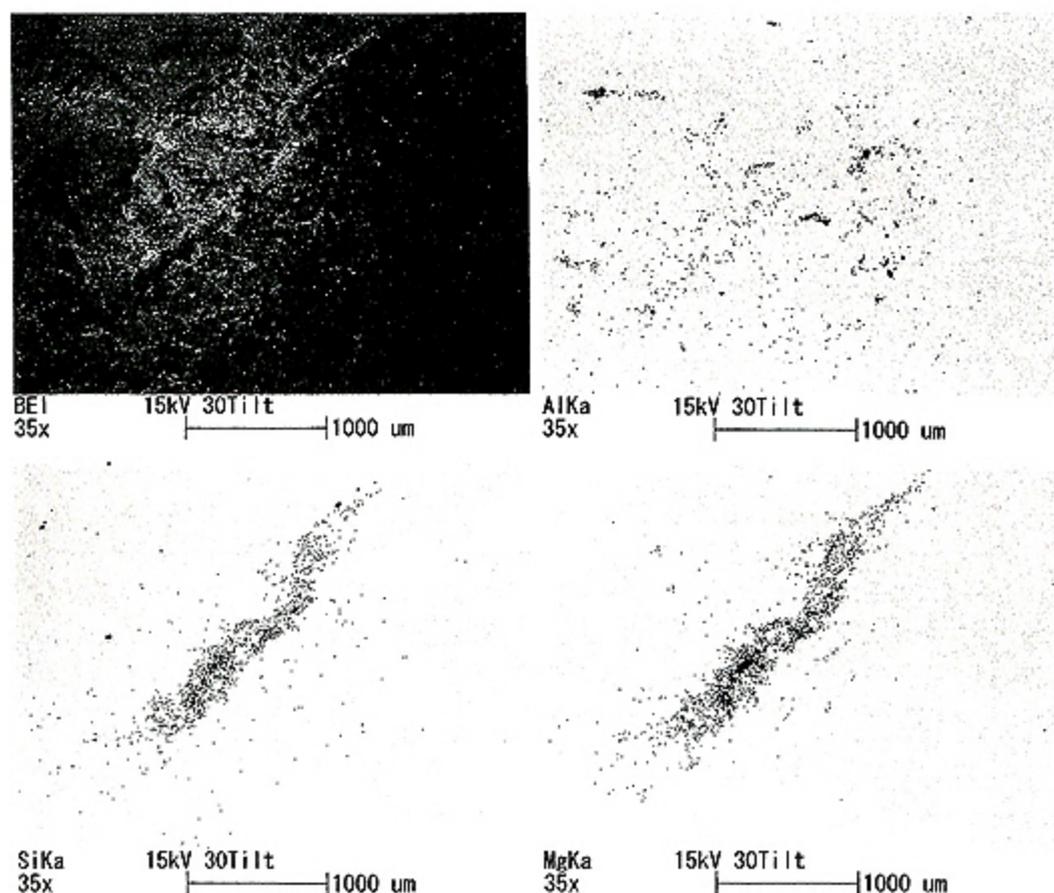


図3 ブラックスモーカーチムニー (試料名: 219-R-08) の主要元素分布。マッピング領域は写真1の青色でかこった枠内

Fig. 3 Major chemical distribution of the black smoker chimney (sample name: 219-R-08). The mapping area corresponds to blue square in Photo 1.

トスモーカーでは閃亜鉛鉱が微量に含まれるに過ぎない。拡大速度の違い東太平洋海膨や陸域に近い背弧海盆などとは異なり、大西洋中央海嶺の熱水と反応している岩石の組成が一定であることの反映であるのかもしれない。

TAG マウンドの熱水性堆積物にはケイ酸塩も少ないことが報告されている (Thompson et al., 1988)。ブラックスモーカーチムニーはほとんどが硫化物で構成されている。ホワイトスモーカーチムニーも活動的なものは非晶質シリカを多く含むが、ケイ酸塩鉱物としてはスメクタイトを微量に含むだけである。スメクタイトは、ブラックスモーカーでは硬石膏や酸化鉄と近接して産出する。あるいは硫化物の礫状堆積物では塊状の硫化物間を充填するセメントの一部として石英とともに産出する。このように、スメクタイトは海水と反応をしたことが明らか

な場所に分布している傾向が見られることから、熱水からだけでなく、海水に由来する成分であるマグネシウムやカリウムをもとり込んで形成したものであろう。礫状堆積物の場合には、セメントが石英であることから、ケイ酸に富む熱水が二次的に隙間を充填したものであり、スメクタイトも二次的に形成されたものであろう。

変質玄武岩は崩落崖ではあるが、比較的マウンド頂部に近いところから得られている。したがって、マウンドを覆う硫化物を中心とした熱水性堆積物は厚いものではなく、直下に玄武岩が存在していると考えられる。酸素同位体比を測定した変質玄武岩について、熱水の酸素同位体比が海水のそれとほぼ等しいと仮定して、緑泥石を多く含む試料の値 (1.1~1.9‰から緑泥石の平衡温度 (Wenner and Taylor, 1971) を計算すると190~230°Cであった。実際の熱水の酸素同位体比は海水よりもわず

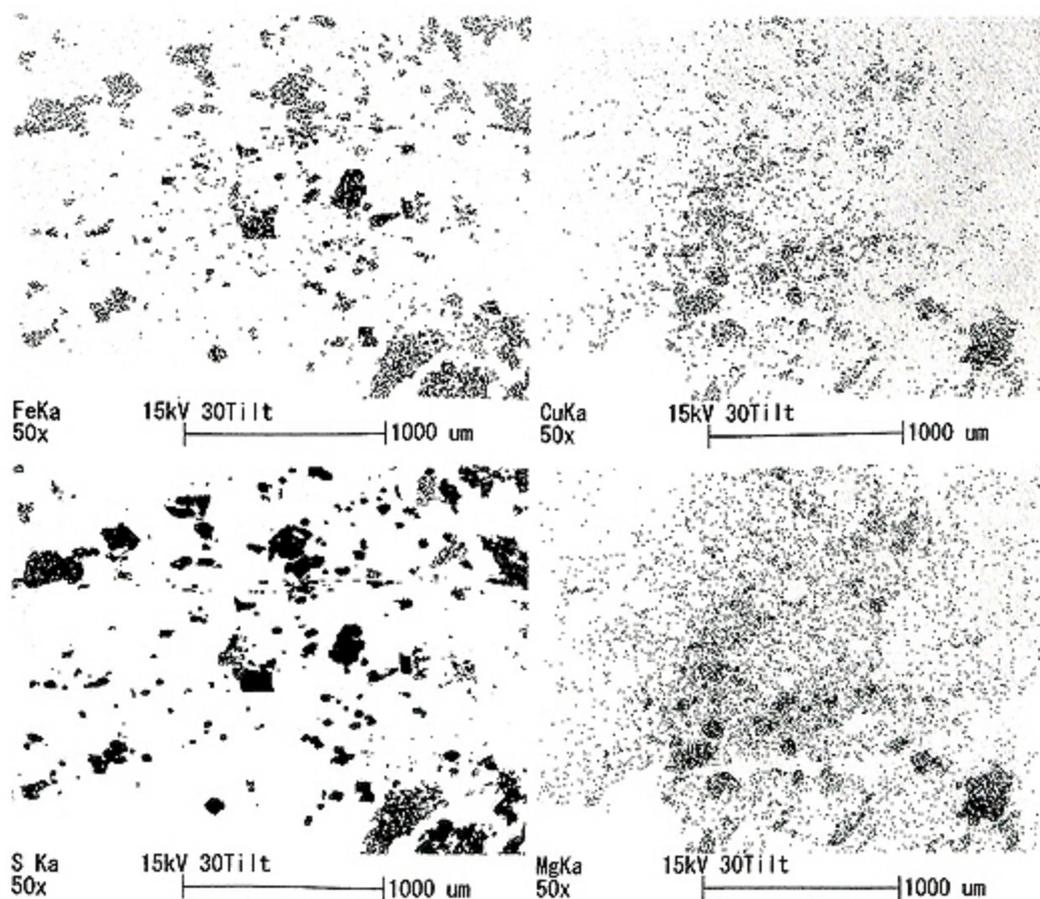


図3 (続き)
Fig. 3 (Continued)

かに高い(〜2%)と推定されるので、(Bowers, 1989)、熱水の寄与があれば、反応温度は150°C程度であった可能性もある。マウンドを形成する基盤の玄武岩は深部から湧出する熱水か、あるいはマウンド内に侵入していった海水と、低くても、150°C程度の温度で反応していることは明らかである。灰長石からスメクタイトや緑泥石が形成されるときには、シリカが余剰成分となるはずであるが、試料には石英はなく、非晶質シリカも存在しないように見える。大部分が溶存ケイ酸として移動したものと考えられる。このような溶存ケイ酸はマウンド上で、前述した環状硫化物のセメント物質を形成しているのかもしれない。

5. ま と め

TAG マウンドから得られた熱水性堆積物を熱水活動、特に熱水の溶存化学組成との関連から検討するための予察的研究として、熱水活動にともなって形成された堆積物と変質玄武岩の鉱物学的検討と元素分布の観察を行った。得られた結果は次のとおりである。

① ブラックスモーカーに由来する堆積物は黄銅鉱と黄鉄鉱を大量に含み、まれに磁硫鉄鉱を含む。ホワイトスモーカーに由来する堆積物は黄鉄鉱と閃亜鉛鉱を含む。このマウンドの熱水活動にともなって沈殿した硫化鉱物の種類は他の海底拡大軸と比較して少ない。

② 崩壊したブラックスモーカーチムニーはマウンド頂部を広く覆っているが、これらは再堆積後にセメントされている。もとのチムニーの破片からは黄銅鉱が黄鉄

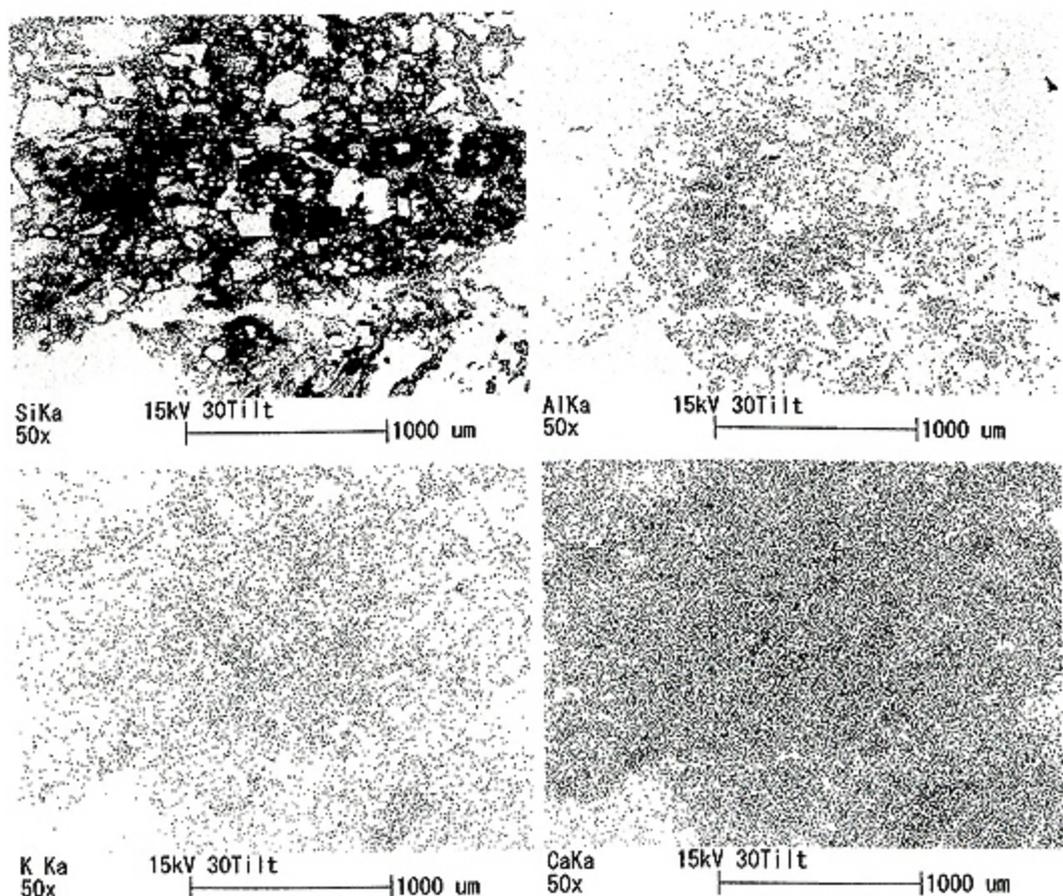


図4 環状硫化物(試料名:227-R-07)の主要元素分布。マッピング領域は写真2の青色でかこった枠内
 Fig. 4 Major chemical distribution of a sulfide block (sample name: 227-R-07). The mapping area corresponds to a blue square in Photo 2.

鉱よりも早く分解して銅や鉄の酸化物となっている。セメント部分はシリカを主体としており、石英やスメクク

イトが主要構成鉱物である。

③ マウンドは比較的浅いところに基盤の玄武岩があ

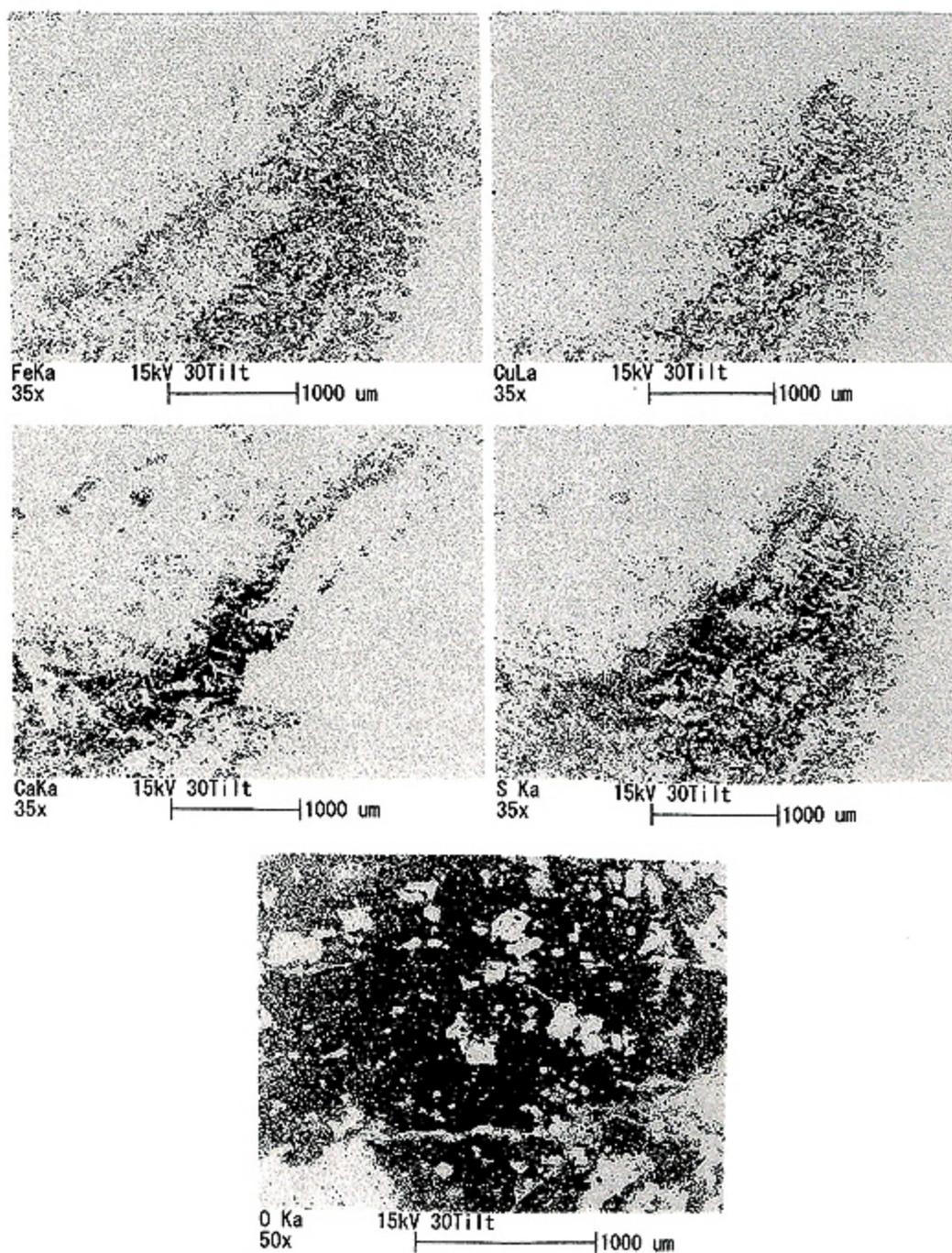


図4 (続き)
Fig. 4 (Continued)

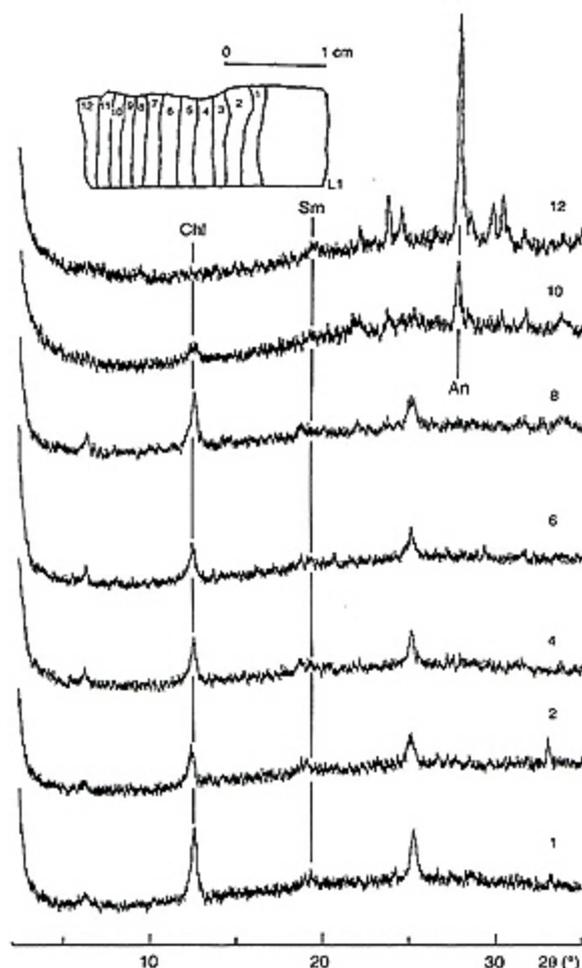


図5 熱水変質作用を被った基盤玄武岩の粉末X線回折スペクトル。試料断面に示された下端(L1)が写真3の青線に対応する。スペクトルに示したアルファベットは次の鉱物を表す。Chl: 緑泥石, Sm: スメクタイト, An: 灰長石

Fig. 5 Powder X-ray diffraction patterns of a hydrothermally altered basalt. L1, indicated in the cutting profile, corresponds to a blue line in Photo 3. Abbreviations attached to the spectrum indicate the following minerals. chl: chlorite, Sm: smectite, An: anorthite.

る。この玄武岩は150°C程度では熱水変質を受けている。再堆積した礫状酸化鉱物のセメント部分のシリカは、玄武岩の熱水変質作用によりもたらされたものであるかもしれない。

謝 辞

「よこすか」乗組員と「しんかい6500」潜航チームの方々には、試料採取にあたり、大変お世話になった。また、岡山大学地球内部研究センターのH下部実教授には質量

表2 TAGマウンドの北西斜面の崩落堆積物中の変質玄武岩の酸素同位体比

Table 2 The oxygen isotope ratios of hydrothermally altered basalts in the debris from the north eastern foot of the TAG mound.

No.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, SMOW)
1	2.3
2	1.3
3	1.1
4	1.7
5	1.7
6	1.9
7	1.9
8	2.8
9	3.2
10	4.1
11	4.1
12	4.1

Sample Nos correspond to those in Fig. 5.

分析でお世話になった。電子顕微鏡の使用にあたっては大阪市立大学の八尾昭教授と古山勝彦博士にさまざまな助言をいただいた。ここにお礼を申し上げます。

引用文献

- Bowers, T.S. (1989): Stable isotope signatures of water-rock interaction in mid-ocean ridge hydrothermal systems: sulfur, oxygen, and hydrogen. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 5775-5786.
- Gamo, T., H.Chiba, H.Masuda, H.N.Edmonds and K Fujioka: Chemical characteristics of hydrothermal fluids from the TAG mound in 1994: Implications for spatial and temporal variability of hydrothermal activity. Submitted to *Journal of Geophysical Research*.
- Muehlenbachs, K. and R.N.Clayton (1972): Oxygen isotope studies of fresh and weathered submarine basalts. *Canadian Journal of Earth Science*, **8**, 1591-1594.
- Pineau, F., M.Javoy, J.W.Hawkins and H.Craig (1976): Oxygen isotope variations in marginal basins and ocean-ridge basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, **28**, 299-307.

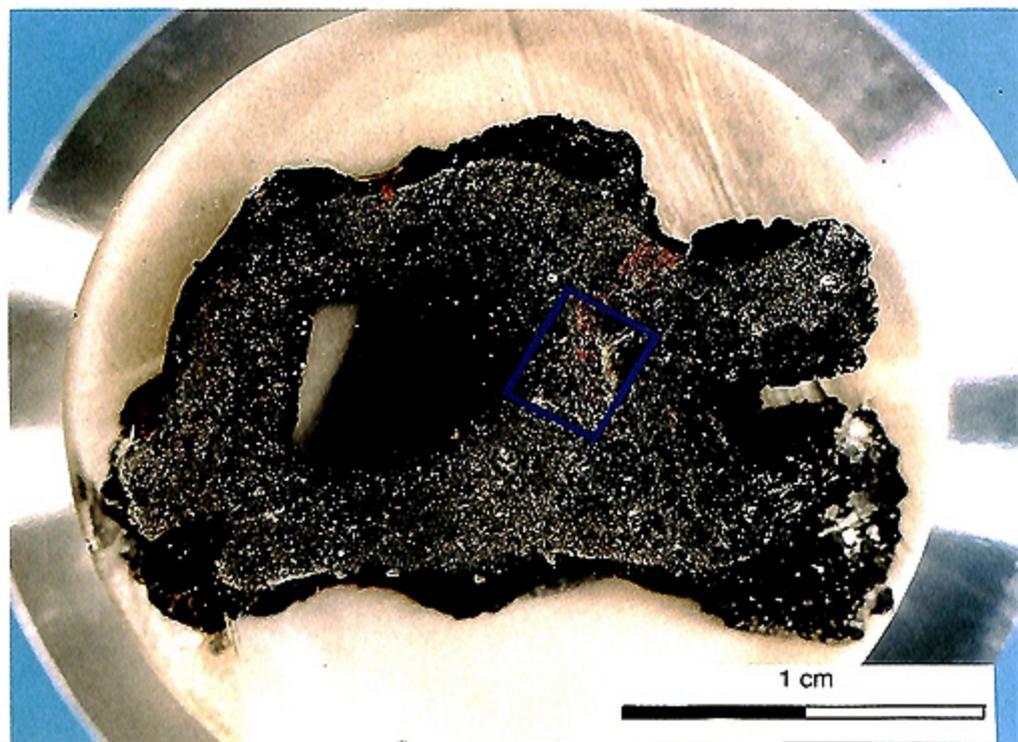
- Rona, P. A. (1985): Black smokers and massive sulfides at the TAG Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge 26°N. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 26, 431-465.
- Rona, P.A. (1988): Hydrothermal mineralization at oceanic ridges. Canadian Journal of Mineralogy, 26, 431-465.
- Thompson, G., S.E.Humphris, B.Schroeder, M.Sulanowska and P.A.Rona (1988): Active vents and massive sulfides at 26°N (TAG) and 23°N (SNAKEPIT) on the Mid-Atlantic Ridge. Canadian

Journal of Mineralogy, 26, 697-711.

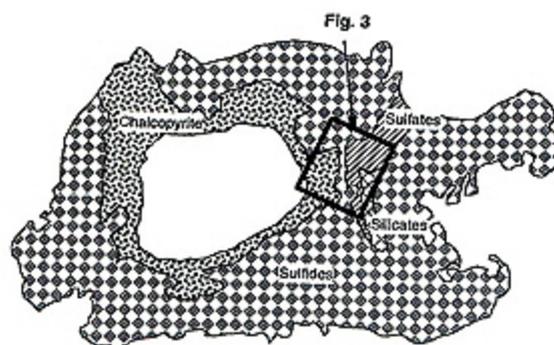
- Wenner, D.B. and H.P.Taylor, Jr. (1971): Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on O^{18}/O^{16} fractionation between coexisting serpentine and magnetite. Contribution to Mineralogy and petrology, 32, 165-185.

(原稿受理：1995年6月26日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

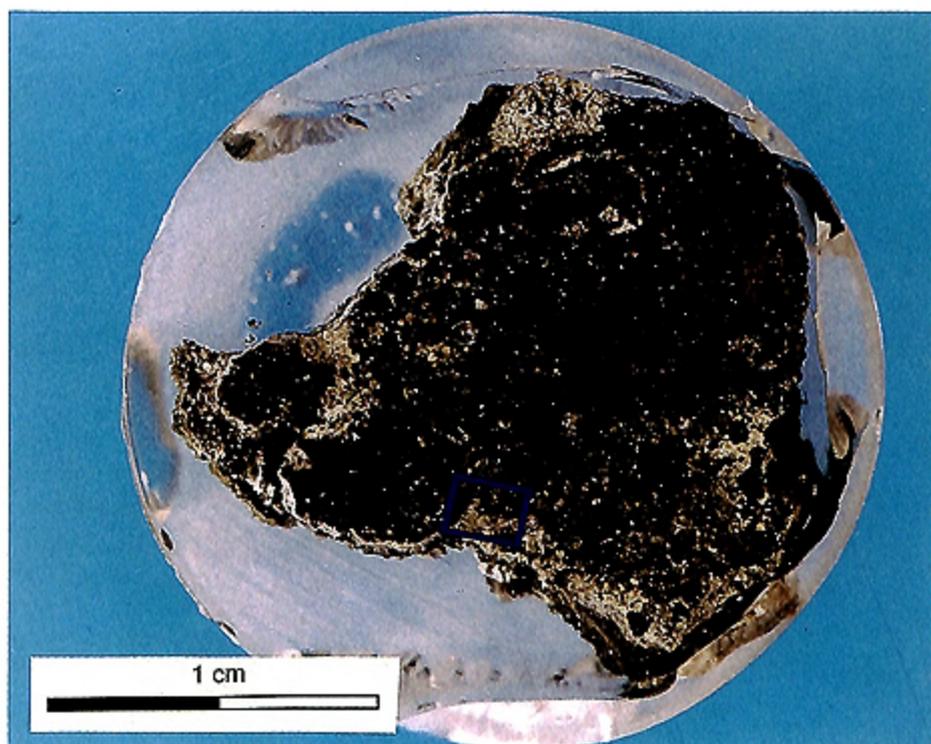


a

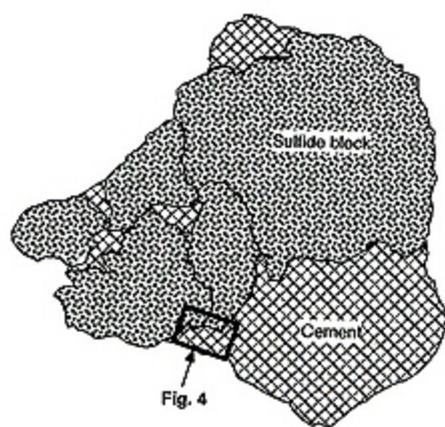


b

写真1 ブラックスモーカーチムニーの横断面 (試料名: 219-R-08)。a: 研磨断面, b: 主要構成鉱物による分帯
 Photo 1 Cutting profile of a black smoker chimney. a: Photo of polished cutting profile, b: zone of the most major alteration minerals.



b



c



a

写真2 硫状硫化物の断面 (試料名: 227-R-07)。a: 全岩の形状, b: 研磨断面, c: 主要構成鉱物による分帯
 Photo 2 Cutting profile of a sulfide aggregate (sample name: 227-R-07). a: Photo of the whole sample, b: profile of the polished cutting sample, c: Zone of most major alteration minerals.

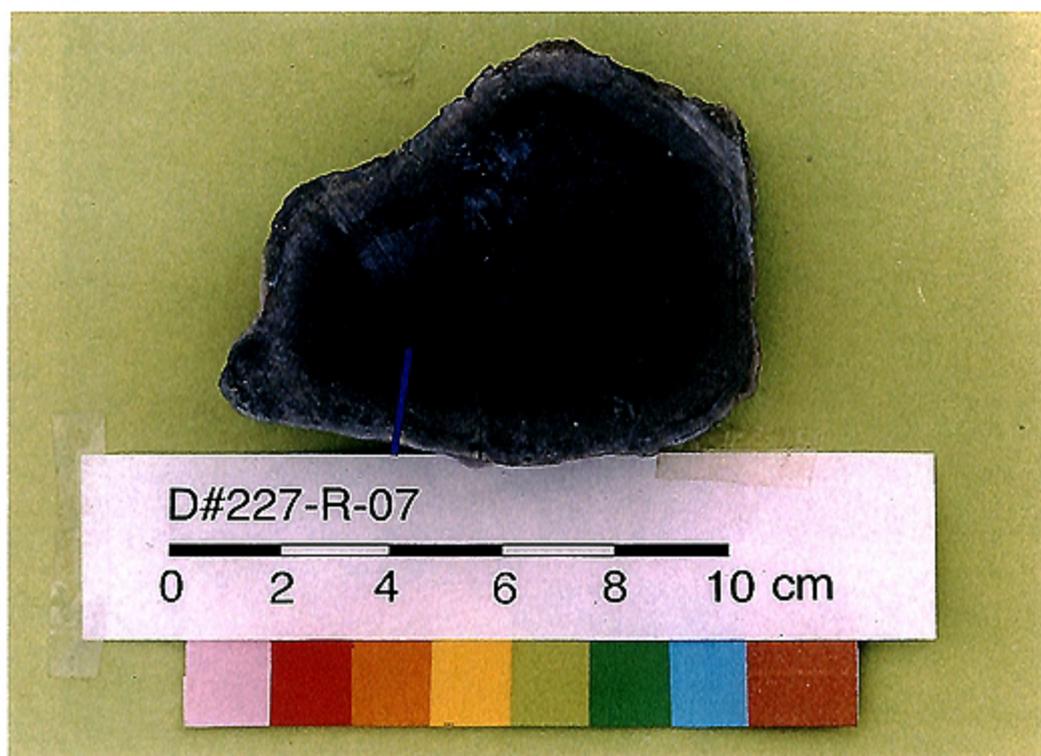


写真3 熱水変質作用を被った基盤の玄武岩（崩落堆積物中の礫、試料名：227-R-07）

Photo 3 Cutting profile of a hydrothermally altered basalt from debris flow on the northeastern slope (sample name: 227-R-07).