

沖縄トラフの現世黒鉱鉱床における変質鉱物の 組み合わせについて

丸茂克美 *1

伊是名海穴で発見された現世黒鉱鉱床に産する変質鉱物を、X線ディフракトメータおよび分析電子顕微鏡を用いて分析した。西ドイツ調査船ゾンネ号が採取した鉱石には、クリストバライト、石英、及びマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物が産する。またゾンネ号の採泥試料からは、マグネシウム質クロライト、アルミニウム質クロライト、ハロイサイト、カオリナイト等の、熱水性粘土鉱物を伴う白色粘土層が見いだされた。

「しんかい2000」の潜航調査で得られたドロマイト質チムニーには、ハロイサイト、アルミニウム質クロライト、カオリナイト等が産する。ハロイサイトやアルミニウム質クロライトのチムニー中における産出は、これらのアルミニウム質粘土鉱物の、海底熱水系における形成が可能であることを実証するものである。なお、「しんかい2000」が採取した母岩には、中新世黒鉱のそれと同様に、マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物が産する。

Alteration of Mineral Assemblages in a Modern Kuroko-Type Massive Sulfide Deposits in the Okinawa Trough

Katsumi MARUMO *2

XRD (X-ray diffraction) and ATEM (analytical transmission electron microscope) studies have been carried out on sulfide ores, unconsolidated sediments, a dolomite-bearing chimney, and an alteration rock sample from a modern Kuroko-type massive sulfide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin.

Sulfide ores collected by the German research vessel "SONNE" contain cristobalite, quartz, amorphous silica, and mica/nontmorillonite mixed layer minerals. The fine-grained whitish clay in the unconsolidated sediments is characterized by the presence of hydrothermal clay minerals (Mg-chlorite, Al-chlorite, halloysite and kaolinite).

A dolomite-bearing chimney collected by "SHINKAI 2000" contains halloysite, Al-chlorite, and kaolinite. Although the formation of these aluminum clay minerals have not been reported in modern active submarine hydrothermal systems, the mineralogical studies of the chimney strongly suggests that these aluminum clay minerals would be formed in submarine

*1 工業技術院地質調査所鉱物資源部

*2 Geological survey of Japan

hydrothermal systems.

In accordance with altered rock samples around the Miocene Kuroko deposits, the equivalent of modern analogue Kuroko-type deposits contains mica/montmorillonite mixed layer minerals as the most predominant alteration product.

1. はじめに

西北海道及び本州のグリーンタフ地域、とくに東北日本内帯の北鹿地域には、金・銀・銅・鉛・亜鉛等の金属資源の宝庫ともいえる黒鉱鉱床が多数分布する。これらの鉱床の母岩となる周囲の岩石は、海水を起源とする熱水の影響を受けて変質しており、その規模は鉱床の周囲1 km以上に及ぶことがある。新第三紀中新世の海底熱水系において、岩石-水相互作用で形成された変質帯は、潜頭鉱床を発見する際の重要なインディケータとなるばかりでなく、当時の海底熱水系の規模を把握する上で重要である。また、最近の黒鉱鉱床成因論の中には、岩石中の金属元素が熱水によって抽出・運搬され、再び一ヶ所に沈殿して鉱床を形成したとする説もある(Ohmoto, et al., 1983)。

しかし、鉱床周辺の変質帯の一部は、鉱床形成後の続成変質作用の影響を受けてしまうことが多い。また、鉱床形成後に貫入岩の活動により変形・破壊されてしまうケースもある。そのためこれらの場合には、鉱化作用に伴われた熱水活動によって形成された変質鉱物と、続成変質作用等で晶出した変質鉱物とが混在して変質帯を形成してしまうことになる。例えばVtado (1988)は黒鉱鉱床産カオリンの形成は、鉱化作用の後の熱水活動(例えば温泉作用)によるものと考えている。また石川ら(1984)は餌釣黒鉱鉱床産パイロフィライトの形成を、鉱床形成後のネバダイト貫入岩活動の産物として位置づけている。

伊是名海穴で発見された現世黒鉱鉱床周辺には、新第三紀中新世の黒鉱鉱床の変質帯に対比される熱水変質帯の存在を示唆する岩石(いわゆる鉱床母岩)が産する。また、現在活動中のチムニーの一部は、熱水が岩石と反応しつつある姿、鉛・亜鉛細脈を伴う鉱石は熱水と岩石との反応が中止された姿として、位置づけることができる。また海

底堆積物中に産する熱水性粘土鉱物も、海底熱水活動の産物とみなすことができる。従って、これらの岩石・鉱石・チムニー、及び海底堆積物を分析することは、黒鉱鉱化作用において熱水-岩石相互作用で初生的に形成された変質鉱物種を決定する上できわめて有益である。

2. 試料の採取地点と分析方法

伊是名海穴北東壁において、西ドイツ海洋調査船ゾネ号が採取した鉛・亜鉛細脈を伴う鉱石(Halbach et al., 1989)、海穴底の海底堆積物、及び「しんかい2000」で採取されたチムニーと母岩(加藤達弘他、本号報告参照)を試料として選び、分析の対象とした。これら試料の採取地点を図1に示す。

採取した試料を構成する各種鉱物(粘土鉱物、シリカ鉱物、硫化鉱物)をX線回折装置及び透過型分析電子顕微鏡を用いて分析した。X線回折にあたっては理学電機製RAD-r A型ディフラクトメータを用い、Cu管球で40 KV・150 mAの出力下で、スリット系 $1^\circ - 1^\circ - 0.3\text{ mm}$ 、走査速度 $2^\circ/\text{分}$ 、時定数1秒で実施した。分析電子顕微鏡による試料観察・化学分析にあたっては、フィリップス社製透過型電子顕微鏡CM/12 STEMにEDAX社製PV9900を付属させたシステムを用い、加速電圧100 KVで実施した。

3. 分析結果

3.1 鉱石に伴われる鉱物

酸性火山岩を閃亜鉛鉱・方鉛鉱の網状脈が切る鉱石や、酸性火砕岩の粒間を埋めるケイ質鉱染状鉱は著しく変質し、ケイ化ないし粘土化している。X線回折の結果、これらの変質部は非晶質シリカ(図2の160-3-5)、クリストバライト(図3の160-11)、石英(図3の160-2)、及びマ

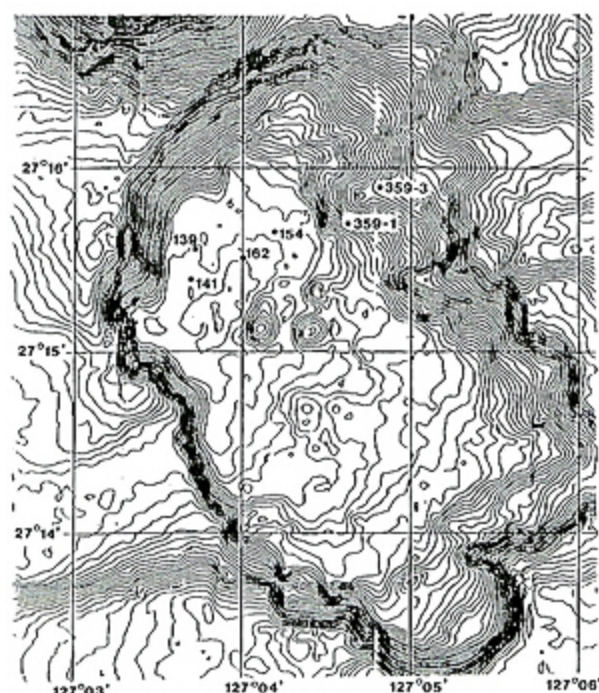


図1 試料採取位置。星印は「しんかい2000」によるチムニー採取地点。139, 141, 154, および162の各数字は西ドイツ海洋調査船ゾンネ号が実施した重力式コアラ探泥点。

Fig. 1 Sampling points shows the location of chimney collected by "SHIN-KAI 2000". Numbers 139, 141, 154, and 162 show core sampling points carried out by "SONNE".

イカ/モンモリロナイト混合層鉱物(図3の160-11及び160-2)からなることが明らかにされた。

とくに、酸性火砕岩の粒間を埋めるケイ質鉱物中では、マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物とクリストバライトとが共存するが(図3の160-11), こうした鉱物組み合わせは中新世の黒鉄鉱床の変質帯にはほとんど見られない。

3.2 海穴底平坦面の海底堆積物の構成鉱物

1988年6月に西ドイツ海洋調査船ゾンネ号が実施した重力式コアラによる採泥により、海穴底平坦面の海底堆積物中に、厚さ数10cmの白色粘土

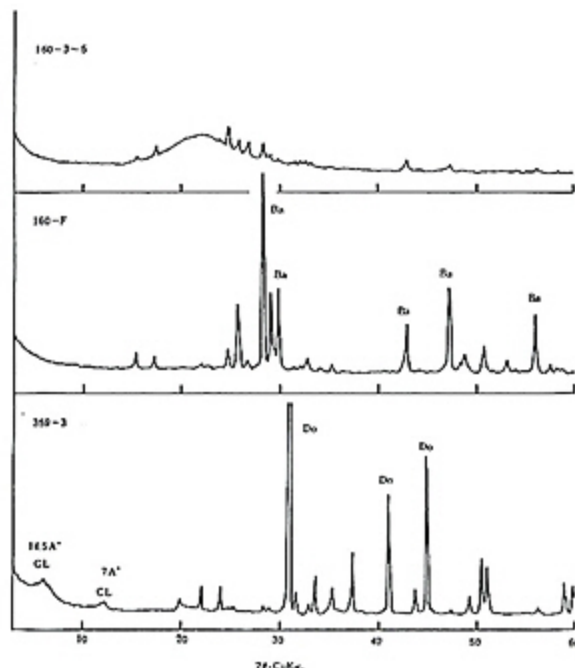


図2 鉱石およびドロマイト質チムニーのX線回折結果。上より鉱石中の非晶質シリカ(160-3-5), 重晶石鉱石(160-F), およびドロマイト質チムニー(359-3)のX線回折結果。Q: 石英(Quartz), Ba: 重晶石(Barite), Do: ドロマイト(Dolomite), Cl: 粘土鉱物(Clay minerals)。

Fig. 2 XRD patterns of ores and dolomite-bearing chimney. From top to bottom as follows: amorphous silica in the siliceous ore (160-3-5), the barite ore (160-F), and the dolomite-bearing chimney (359-3).

層が伴われることが判明した。この白色粘土層は2本のコアで確認され、かつそれらは随伴する凝灰質層との関係から、ほぼ同一層準に位置するものと考えられる(中村, 私信)。

これらの粘土層は亜鉛の濃度異常を示し(Halbach et al 1989), かつマグネシウム質クロライト・アルミニウム質クロライト・ハロサイト・カオリナイト等の熱水性粘土鉱物を伴っている。これらの粘土鉱物のうち、154コアの深度131~135cmの試料の、分析電子顕微鏡によるX線化学

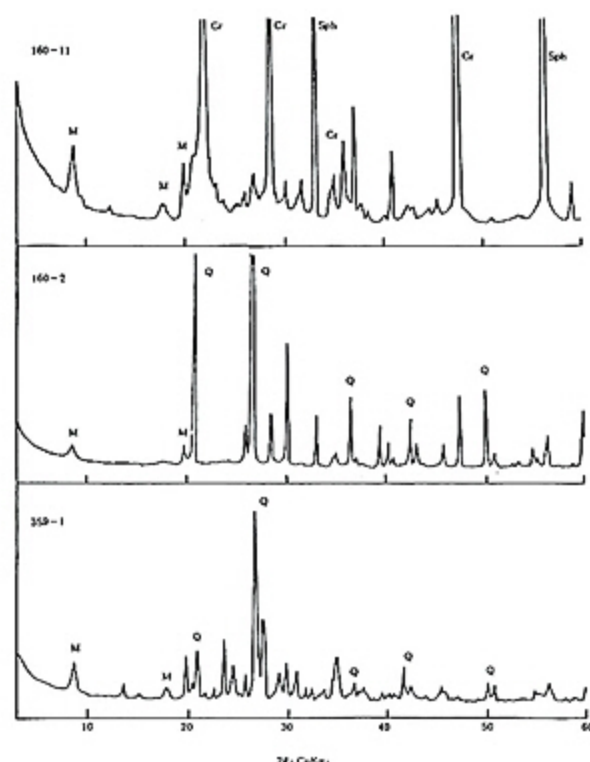
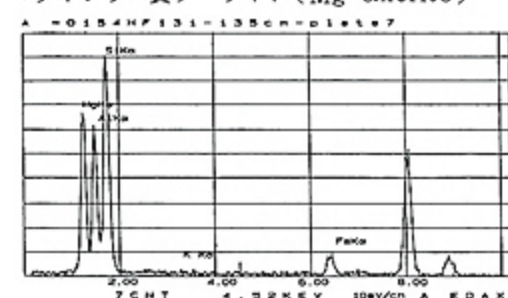


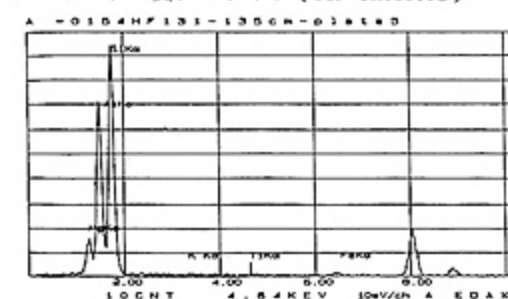
図3 鉱石および母岩のX線回折結果。上より鉱石中のクリストバライトとマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物(160-11)、鉱石中の石英とマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物(160-2)、母岩中の石英とマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物(359-1)。Cr:クリストバライト(Cristobalite), Q:石英(Quartz), M:マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物(mica/montmorillonite mixed layer minerals), Sph:閃亜鉛鉱(Sphalerite)

Fig. 3 XRD patterns of ores and a wall-rock. From top to bottom as follows; cristobalite and mica/montmorillonite mixed layer minerals in the sulfide ore (160-11), quartz and mica/montmorillonite mixed layer minerals in the sulfide ore (160-2), quartz and mica/montmorillonite mixed layer minerals in the wall-rock (359-1).

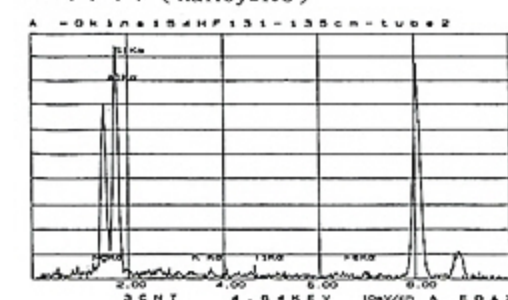
マグネシウム質クロライト (Mg-chlorite)



アルミニウム質クロライト (Al-chlorite)



ハロイサイト (halloysite)



カオリナイト (Kaolinite)

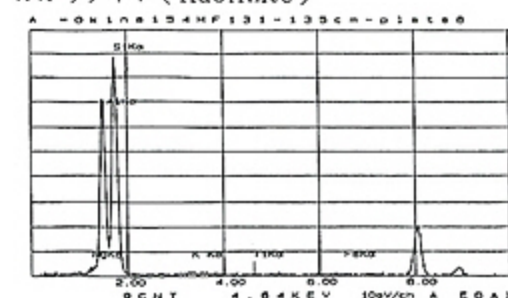
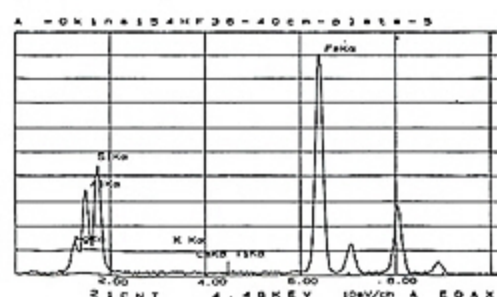


図4 154 コアの深度 131 - 135 cm に含まれるマグネシウム質クロライト, アルミニウム質クロライト, ハロイサイト, およびカオリナイトのX線化学分析結果。

Fig. 4 EDX patterns of clay minerals in the 154 core (131-135 cm depth), From top to bottom as follows; Mg-chlorite, Al-chlorite, halloysite, and Kaolinite.

鉄質クロライト
(Fe-chlorite)



モンモリロナイト
(montmorillonite)

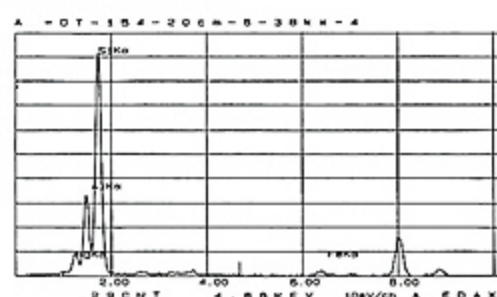


図5 154 コアの深度20-40cm中に含まれる鉄質クロライトとモンモリロナイトのX線化学分析結果
Fig.5 EDX patterns of clay minerals in the 154 core (20-40cm depths). Fe-chlorite (top) and montmorillonite (bottom).

分析結果を図4に、マグネシウム質クロライトとハロイサイトの電子顕微鏡写真を写真1に示す。また一方、白色粘土層以外の海底堆積物には、これらの粘土鉱物の代わりに鉄クロライトやモンモリロナイトが含まれる。154 コアの深度20cm~40cmの試料のX線化学分析結果を図5に示す。

3.3 ドロマイト質チムニー中の粘土鉱物

「しんかい2000」の潜航調査ではいくつかのチムニー試料が採取されたが、そのうちの1つ(359-3)は、径5mm大のドロマイト球粒状結晶を伴うことで特徴づけられる(青木、丸茂、加藤、本号報告、写真1)。このチムニーは全体に変質し、粘土化している。この粘土質部分のX線回折結果



写真1 154 コアの深度131-135cm中に含まれるマグネシウム質クロライトとチューブ状ハロイサイト。

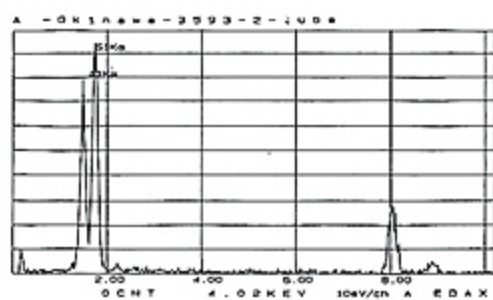
Photo.1 Mg-chlorite and halloysite in the 154 core (131-135 cm depth).

を図2に示す。14.5 Å および 7 Å に粘土鉱物に特徴的な底面反射が認められるが、これらのデータのみからは、粘土鉱物種の決定は困難である。一方、分析電子顕微鏡による粘土鉱物の形態観察の結果、チューブ状のハロイサイトと考えられる結晶が見いだされた(写真2)。この結晶のX線化学分析の結果を図6(最上)に示す。アルミニウムとシリカのピークのみが見いだされ、かつそれらのピーク強度比がほぼ1:1に近いことから、この結晶はハロイサイトと断定できる。なお、ハロイサイトのほかにも、アルミニウム質クロライト、及び六角板状のカオリナイトの存在も分析電子顕微鏡観察の結果明らかになった(図6)。

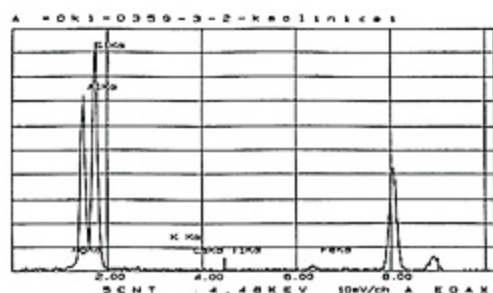
3.4 母岩に産する変質鉱物

「しんかい2000」の潜航調査で採取された母岩タフ(359-1、加藤幸弘ほか、本号報告、写真5)は全体に弱変質しており、北鹿地域の新第三紀中新世の黒鉄鉱床周囲の、下盤タフでしばしば見られるように淡緑色を呈する。この母岩のタフのX線回折結果を図3(359-1)に示す。石英及びマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物の回折ピークのみが顕著で、長石や炭酸塩鉱物を特徴づけるピークはほとんど見られない。マイカ/モンモリロナ

ハロイサイト
(halloysite)



カオリナイト
(Kaolinite)



アルミニウム質クロライト
(Al-chlorite)

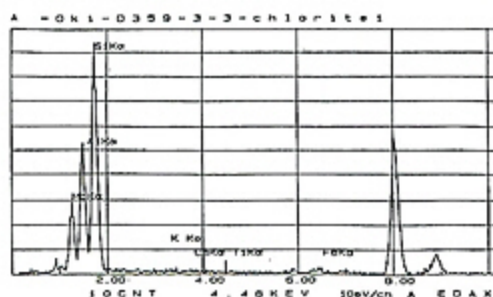


図6 ドロマイト質チムニーに含まれるハロイサイト、カオリナイト、およびアルミニウム質クロライトのX線化学分析結果

Fig. 6 EDX patterns of clay minerals in the dolomite-bearing chimney. From top to bottom as follows; halloysite, Kaolinite, and Al-chlorite.

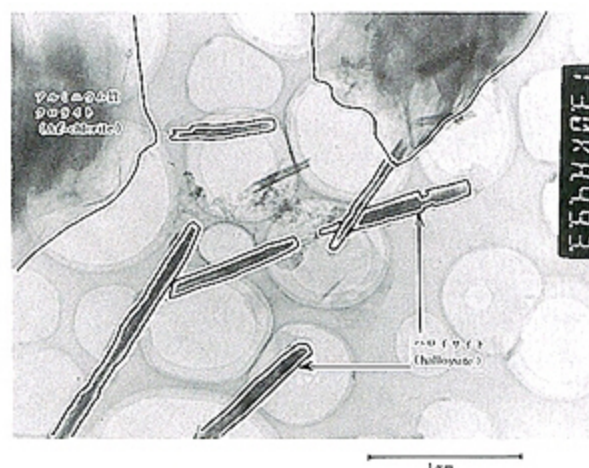


写真2 ドロマイト質チムニーに含まれるチューブ状ハロイサイト

Photo. 2 Halloysite in the dolomite-bearing chimney.

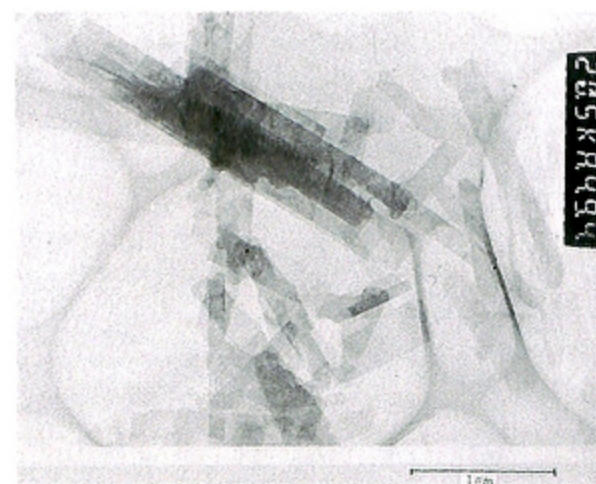


写真3 母岩中に含まれるマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物

Photo. 3 Mica/montmorillonite mixed layer minerals in the wall-rock.

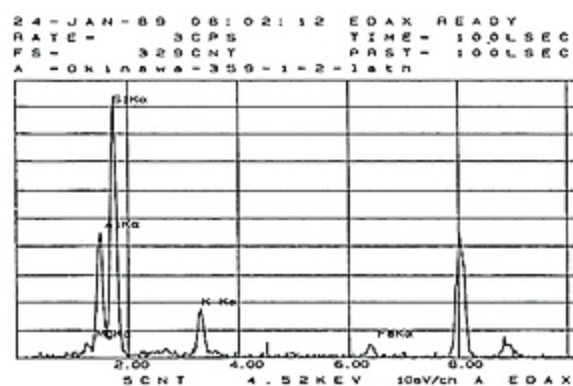


図7 母岩に含まれるマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物のX線化学分析結果

Fig. 7 An EDX pattern of mica/montmorillonite mixed layer minerals.

イト混合層鉱物は短冊状結晶で、かつそのカリウム含有量はおおむねマイカの半分ほどである（写真3および図7）。

4. 考察と結論

伊是名海穴の現世黒鉱鉱床産の鉱石の変質は、マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物と、クリストバライトといった鉱物組み合わせによって特徴づけられている。この2つの鉱物の組み合わせは新第三紀中新世の黒鉱鉱床ではほとんどみられず、クリストバライトに代って石英が産している。堆積岩中の非晶質シリカは続成作用の過程でクリストバライトを経て石英に変化し、かつこの変化は温度と時間の関数であることが知られている（Mizutani 1974, Kano 1978）。現世黒鉱鉱床で見いだされた非晶質シリカを伴う鉱石、クリストバライトを伴う鉱石は、いずれも地質学的時間スケールで続成作用を受けた場合、新第三紀中新世の黒鉱鉱床産鉱石のように、非晶質シリカやクリストバライトに代って石英を伴うことになると考えられる。

ドロマイトを伴うチムニーにはチューブ状ハロイサイトが産しているが、海底熱水系における自生ハロイサイトの記載はこの報告が初めてである。海底熱水系では鉄・マグネシウム質粘土鉱物（例えばスメクタイトやクロライト）の産出は多数報

告されているが（例えばCole, 1983）、ハロイサイトのようなアルミニウムとシリカを主とするカオリン鉱物の生成は、ほとんど知られていない。しかし Riverin and Hodgson (1980) は熱力学的データに基づき、海水起源の熱水が温度低下(200℃以下)に伴ってカオリン鉱物を晶出しうることを予測した。また Haymon and Kastner (1986) や Howard and Fisk (1988) は、現在の海底熱水系でアルミニウム質粘土鉱物（バイデライトやクロライト/モンモリロナイト混合層鉱物）やペーマイトの産出を報告している。いずれにせよ、ハロイサイトの産出が報告されたことにより、海底熱水系でカオリン鉱物の形成が可能であることが実証されたことになる。なお、ドロマイトを伴うチムニーでは、ハロイサイトに伴ってアルミニウム質クロライトが産しているが、この鉱物の海底熱水系における記載も今回が最初である。

海穴底平坦面で確認された白色粘土層は、2ヶ所の地点において同一層準に位置している。また、白色粘土層に含まれる粘土鉱物はドロマイトを伴うチムニーに含まれるもの（アルミニウム質クロライト、ハロイサイト、カオリナイト）や、新第三紀中新世の黒鉱鉱床に多産するマグネシウム質クロライトである。一方、白色粘土層以外の堆積物中には、鉄質クロライトやスメクタイト等の海底堆積物にしばしば見られる粘土鉱物が産している。また白色粘土層とその上下の堆積物との間には、熱水が岩石や堆積物を交代した際にしばしば見られる変質鉱物組み合わせの、漸移的な変化を示す累帯配列は見られない。これらのことから、白色粘土層は周囲の熱水系から粘土鉱物が吹き飛ばされ、海穴底に運ばれて堆積したものと考えられる。

粘土鉱物が海底熱水系から放出され、一定の広がりをもって堆積するような証拠は、北鹿地域の第三紀中新世の黒鉱鉱床では見いだされていない。これは北鹿地域の黒鉱鉱床が鉱床形成後に続成作用を受けており、海底熱水系で放出されて再堆積した薄い粘土層の識別が困難になってしまったためであると考えられる。しかし、北海道の南白老黒鉱型鉱床のように、続成作用の影響の少ない鉱床では、そうした粘土鉱物（主にカオリン）の噴出・堆積の証拠が見つかった（丸茂、

1989)。

いずれにせよ、海底熱水系から放出され、一定の広がりをもって堆積する粘土層の広がり、海底熱水系の探査をする上で重要なインディケーターになりうる。分析電子顕微鏡のような分析手段が実用化されている現在では、海底堆積物中の熱水系粘土鉱物の検出はきわめて容易になりつつあるので、今後の海底熱水系の探査には海底堆積物のチェックが重要になるであろう。

謝 辞

この研究で活用した試料は西ドイツ海洋調査船ゾンネ号及び「しんかい2000」によって採取されたものである。これらの試料を提供して下さった地質調査所海洋地質部の中村光一氏、および海上保安庁水路部の加藤幸弘氏には深く感謝の意を表したい。また、作業を進めるにあたっては地質調査所鉱物資源部の浦辺徹郎氏及び青木正博氏には多くの助言をいただいた。

参考文献

- Cole T. G., 1983, Oxygen isotope geothermometry and origin of smectites in the Atlantic II Deep, Red Sea, Earth planet. Sci. letters 66, 166-176.
- Halbach P., Nakamura K., Wahsner M., Lange J., Sakai H., Käselitz L., Hansen R.-D., Yamano M., Post J., Prause B., Seifert R., Michaelis W., Teichmann F., Kinoshita M., Märten A., Ishibashi J., Czerwinski S. and Blum N., 1989, Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin, Nature, 338, No. 6215, 496-499.
- Haymon R. M. and Kastner M., 1986, The formation of high temperature clay minerals from basalt alteration during hydrothermal discharge on the East Pacific Rise axis at 21°N, Geochim. Cosmochim. Acta 50, 1933-1939.
- Howard K. J. and Fisk M. R., 1988, Hydrothermal alumina-rich clays and boehmite on the Gorda Ridge, Geochim. Cosmochim. Acta 52, 2269-2279.
- 石川洋平・本多朔郎・松枝大治, 1980, 北鹿地域 餌釣黒鉱床地区のパイロフィライト形成の場について, 秋田大学鉱山学部研究報告, 1, 36-47.
- Kano K., 1979, Deposition and diagenesis of siliceous sediments of the Onnaga-formation, The science reports of the Tohoku University, series III, vol XIV, No. 2.
- 丸茂克美, 1989, 黒鉱床に産する粘土鉱物の形成時期と形成環境について, 日本鉱山地質学会第39回年会学術講演要旨, 鉱山地質, v, 39, p. 51.
- Mizutani, S., 1967, Kinetic aspects of diagenesis of silica in sediments, The Journal of Earth Sciences, Nagoya University, vol. 15, No. 2.
- Ohmoto H., Mizukami M., Drummond S. E., Eldridge C. S., Pisutha-Arnond V. and Lenagh T. C., 1983, Chemical processes of Kuroko Formation, Econ. Geol. Monograph 5, 570-604.
- Riverin G., and Hodgson C. J., 1980, Wallrock alteration at the Millenbach Cu-Zn mine, Noranda, Quebec, Econ. Geol. 75, 424-444.
- Utada M., 1988, Hydrothermal alteration envelope relating to Kuroko type mineralization: A review. In wall rock alteration and ore genesis (ed., Bamba T. and Togari K.) Soc. Mining Geologists Japan, Spec. Issue 12, 79-92.

(原稿受理 1989年6月12日)