西太平洋の島弧・縁海系の海底熱水活動 ——現在と過去——

浦 辺 徹 郎*

Sea-floor Hydrothermal Activities in Western Pacific and their Relation to Ancient Volcanogenic Massive Sulfide Mineralization

Tetsuro URABE*

Abstract

A compilation of 17 sulfide-bearing, sea-floor hydrothermal sites in western Pacific area was made to compare them with volcanogenic massive sulfide deposits (VMSDs) which were likely to have formed in analogous setting of ancient arc-backarc systems. Critical examination of these modes of occurrence shows that all the hydrothermal activity is limited at or above magmatic centers which occur either on backarc spreading center, in backarc rift, or on volcanic front. About half of the known localities (8 sites) are related to bimodal volcanism and are considered to be the analog of Kuroko type deposit. The other half (9 sites) are accompanied with andesitic to basaltic volcanism and are categorized into Besshi- and Cyprus-type deposits. This coincides well with the statistics that 56% of the known VMSDs belong to Kuroko type (Rona, 1988). Therefore, the present-day sea-floor mineralization well represents ancient mineralization of VMSDs now found in strata of arc-backarc affiliation.

The close spatial relationship between volcanism and hydrothermal activity suggests that both present-day and ancient deposits are of volcanogenic origin. Several lines of evidence such as isotope ratio of constituent elements (Ishibashi and Urabe, 1995) also support this conclusion. The ultimate source of these volatile elements such as oxygen, hydrogen, carbon, sulfur, nitrogen, and probably chlorine is believed to be dehydration of sediments which were subducted with oceanic plate beneath the arc-backarc systems.

I. はじめに

中生代以来、西太平洋の大陸縁辺部は海洋プレートの沈み込み帯として特異な発達をとげてきた。沈み込み帯における元素循環プロセスとして、熱水活動が火山活動と同様の重要性を占めることが分かって来つつあるが（たとえば、Hart and Gülen, 1989）、それが地質時代を通じてどのように起こってきたのかを知る手掛かりを与えてくれる

のが、日本を初めとする島弧に典型的に産する海底熱水鉱床である。その代表が、三波川帯・御荷鉾帯ほかの変成帯に産し塩基性岩に伴う別子型鉱床と、グリーンタフ帯に産し酸性岩に伴う黒鉱鉱床である。前者はその生成の場が明らかではなく、島弧でできたものとする考えと、中央海嶺ないし縁海拡大軸でできたものがプレートに乗って運ばれ、沈み込み帯で島弧に付加したとする考えが対立してきた。黒鉱型鉱床はフィリピン、インドネ

* 地質調査所鉱物資源部

* Geological Survey of Japan

シア、フィジーなどの島弧にも知られており（たとえば、Colley and Rice, 1975）、島弧を代表する鉱床の一つであるが、それが現在の島弧・縁海系の中でどこに位置するかについては必ずしも意見の一致を見ていなかった。

このような海底熱水活動により生成したと考えられる火山成塊状硫化物鉱床（Volcanogenic Massive Sulfide Deposits : VMSD）には、このほかにオフィオライトに伴うキプロス型鉱床がある。本特集の荒井論文にもあるように、現在知られているオフィオライトの多くもまた縁海で形成されたものと考えられ、しかも経済的に採掘可能な鉱床はキプロス島のそれに代表されるようにすべて縁海で生成した（Sawkins, 1972）ものである。これは大洋中央海嶺系の熱水鉱床が、海底における酸化やマントルへの沈み込みなどによって、地質体として保存されなかった可能性が高いからかもしれないし、現在まで海底掘削（DSDP および ODP）の掘削坑から鉱床が見つかっていないことから分かるように、確率が低い現象であるせいかもしれない（浦辺, 1983）。

本論では、これら3つのタイプの鉱床が西太平洋において現在生成しつつあるのかどうか、もしそうならその活動は火山活動にどう規制されているのかを考えることにする。現在と過去海底熱水活動の何が違うのかを明らかにすることは、鉱床学のみならず地球科学一般にとっても重要な課題だからである。

II. 現世の海底熱水系の種類

1979年に中央海嶺で海底熱水活動が発見されて（Francheteau *et al.*, 1979 ; Spiess *et al.*, 1980）以来、世界の海底は猛烈な勢いで探索されてきた。日本においては「しんかい2000」（1981年）および「しんかい6500」（1989年）がタイミング良く建造され、その利用により西太平洋において数多くの熱水鉱床の発見および確認が行なわれた。

これまでに世界中で発見された海底熱水活動サイトは、その兆候も含め140を数える（Rona and Scott, 1993）。西太平洋には活動を停止したものも含め27以上のサイトが知られている（Ishibashi

and Urabe, 1995）。これらは、(i) 大洋中央海嶺およびその翼部の海底火山に伴うもの、(ii) 島弧・縁海・海溝系に見られるもの、および (iii) ホットスポット火山に伴うものに大別できる。自明のことであるが、西太平洋においてはオーストラリアと南極大陸の間にある環南極海嶺を除くと (i) の大洋中央海嶺は存在しない。またハワイのロイヒ海山やタヒチのマクドナルド海山で代表される (iii) のホットスポット火山は、熱水鉱床を生成する好適な条件である高温の熱源、高い透水性など（Rona, 1988）を備えているにもかかわらず、硫酸塩ないし硫化物を主とする高温の熱水活動を伴っていない（Ishibashi and Urabe, 1995）。その理由は不明であるが、ホットスポットは現在までに分かっているところでは鉱床学的に不毛である。

よって西太平洋の海底熱水活動はすべて島弧・縁海・海溝系に見られるものである。西太平洋に見られるこれらの熱水活動を大まかに温度の低いものから区分すると表1のようになる。熱水の地下での沸騰や、堆積物との反応などを考慮する必要があり、熱水の化学は単純に温度だけで規定することはできないので（Ishibashi and Urabe, 1995）、これは大まかな目安である。また一つのサイトの温度はしばしば大きく変化し、それらステージの異なる生成物が重なって産している場合があるので注意が必要である。一般的に低温度から高温に向けて、沈殿する鉱物が硫化物、硫酸塩、硫化物と変化する。鉱物の溶解度の実験からも支持されるように、高温の熱水のみが重金属を溶解・沈殿しうるからである。経験的に低温度の活動は銅を伴わず、高温（350°C 以上）のものは黄銅鉱などの銅硫化物を伴う。また酸性火山に伴う熱水は鉛および重晶石を産することが多い。以下ではこれらの、一部硫化物を伴う、ないし硫化物を主とする高温の熱水活動のみに焦点を当てることとする。

III. 西太平洋における海底熱水活動

西太平洋には世界の縁海の75%が集中しており（Tamaki and Honza, 1992）、現在までに発見

表 1 熱水の温度により区分した西太平洋の海底熱水活動

Table 1 Classification of sea-floor hydrothermal activity in Western Pacific based on its estimated temperature

熱水温度	代表的自生鉱物	地質学的な「場」	代 表 例	文献
(a) <10°C	なし (cold seepage)	沈み込み帯前弧域や堆積盆地など	南海トラフ, 銭洲海嶺	1
(b) <50°C?	鉄・マンガン酸化物	火山体側斜面, 高温熱水域周辺など	小笠原海形海山KMピーク	2
(c) 50~100°C	石膏, 鉄水酸化物沈殿	火山島周辺の浅海ないし浅い海底火山	ラバウル, 薩摩硫黄島	3
(d) ≤150°C?	シリカ, 重晶石チムニー	背弧リフトの火山, 島弧の火山	小笠原スミス・リフト	4
(e) 200~300°C	硬石膏, 重晶石, 硫化物	縁海拡大軸, 背弧リフトの火山, 島弧の火山	北フィジー海盆	5
(f) 220~400°C	銅, 鉛, 亜鉛硫化物	縁海拡大軸, 背弧リフトの火山, 島弧の火山	ラウ海盆パルファー海嶺	6

主な文献: 1. Taira and Pickering (1991), 2. Usui *et al.* (1986), 3. Stuben *et al.* (1992), 4. Urabe and Kusakabe (1990), 5. 浦辺ほか (1990), 6. Fouquet *et al.* (1993).

詳しくは Ishibashi and Urabe (1995) 参照.

熱水の化学組成はさまざまな要因により左右されるし, 熱水系は短期間のうちに進化しその温度が変動することが多いので, 温度の値は単なる目安に過ぎない.

されている27カ所の島弧・縁海系の熱水活動はすべてこの地域に存在する (Ishibashi and Urabe, 1995)。そのうち硫化物を伴うことが確認されているのは17カ所である (図1, 表2)。これらのテクトニックな場所を厳密に規定するのは難しいが, 一般化すると縁海拡大軸に位置するものが9カ所, 背弧リフトが2カ所, 火山フロント上に6カ所存在する (図2)。火山岩の組成で分類すると, 8カ所はデイサイトないし流紋岩火山活動に伴われ, 9カ所は玄武岩ないし安山岩に伴われている。つまり伴われる火山活動を元にした簡略な区分でいえば, 西太平洋で発見されている現世の鉱床の約半分は黒鉱型であり, 残りの半分は別子型かキプロス型ということになる。さらに沖縄トラフのように厚い堆積物が存在する場所 (Halbach *et al.*, 1989) を含め, 硫化物を産する高温熱水活動は火山の組成によらず, すべて火山体の直上に限られている。この事実は高温熱水活動の存在にマグマ活動が不可欠であるとする考え方 (たとえば, Urabe, 1987) に強い支持を与えている。

では火山以外の所にも高温熱水鉱床が存在する可能性はあるのであろうか? つまり, 上記の熱水活動と火山活動との密接な関係は, これまでの精査地域が海底火山周辺に偏っていたためという人為的な要素によっているのであろうか? この問いに答えるのはきわめて難しいが, 幾つか手掛かり

になる事例をあげてみよう。伊豆・小笠原弧の岩石や堆積物は, 地質調査所の特別研究「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」(1984-1989) などにより広汎な採取・分析が行なわれた (たとえば, Yuasa *et al.*, 1991; Nishimura and Murakami, 1988)。しかしマンガン酸化物を除いて表2以外の熱水堆積物は見つからなかった。日仏 KAICO-II 計画 (Le Pichon *et al.*, 1987) による Nautilé 号潜航調査や, 日米小笠原・マリアナ弧 Alvin 号潜航調査 (Taylor *et al.*, 1990) を初めとして, 西太平洋で行なわれた潜航調査は学際的なものが多く必ずしも熱水現象を目的としていなかったが, 沈み込み帯や前弧域での低温の湧水現象 (Taira and Pickering, 1991) を除くと, 火山地帯以外では熱水活動は発見されていない。熱水活動周辺は, さまざまな形で生物活動の異常によって修飾されており (太田, 1988), 他目的の潜航でも熱水活動が見過される可能性は低い。逆に熱水活動を目的とした調査でも, 熱水発見の陰に数多くの「空振り」の潜航があることが一般的で, 周辺地域の探査もなされていることが多い。つまり上記の火山中心と熱水噴出との密接な関係は, これまで西太平洋の島弧・縁海系のさまざまな場においてなされてきた調査活動を基に, 高い確度をもって得られた結論といえる。

図 1 西太平洋において確認されている硫化物を伴う海底熱水サイト
サイト番号は表 2 参照. その他の熱水サイト (小丸) は酸化物, 炭酸塩, 硫酸塩, シリカなどを伴うもの. (Ishibashi and Urabe, 1995 を簡略化)

Fig. 1 Known sulfide-bearing hydrothermal sites superimposed on simplified tectonic map of the western Pacific
Site numbers correspond to those in Table 2. "Other hydrothermal sites" may have either oxides, carbonates, sulfates, or silica, but have no sulfides. (modified after Ishibashi and Urabe, 1995)

IV. 現世の熱水に見られるマグマ起源物質

海嶺軸の玄武岩マグマ溜まりの上面の深さは、拡大速度に比例して浅くなる。拡大速度の遅い大西洋中央海嶺ではマグマ溜まりは 7 km 程度の深さにあると推定されているが、速度の速い (年間 5 cm 前後) 北部東太平洋海嶺では平均深度 1,500 m に見られる。さらに年間 15 cm の非常に速い拡大速度を持つ南部東太平洋海嶺では、海底下 900~1,200 m の深度にマグマ溜まりが存在している (Detrick *et al.*, 1992)。Kinoshita (1990) によれば、沖縄トラフの伊是名海穴 (JADE サ

イト) における熱水対流セルの大きさは、深さおよび半径約 1 km であるという。この堆積物 (軽石とシルトの互層) の厚さは不明であるが、異常に高い熱流量から計算して、海底下 1 km 程度に (岩脈状の?) 酸性マグマが存在する可能性がある。よってここでは上昇してくる熱水は、起源はともかくとして火山岩とそれを覆う堆積物の両者と反応していると考えられ、熱水の化学組成はそれらとの反応に規制されるであろう。その他の地域では対流セルの大きさが堆定されておらず詳しくは分からないが、大洋中央海嶺の類推でいえば深さ 1.5 km~6.5 km 程度であろう (Cathles,

表 2 西太平洋の島弧・縁海系に見られる硫化物を産する熱水活動 (Ishibashi and Urabe, 1995 を簡略化)
Table 2 Sulfide-bearing hydrothermal activity in arc-backarc systems in Western Pacific (Modified after Ishibashi and Urabe, 1995)

地 域 名	サ イ ト 名	水深 (m) 伴う火成岩	温度 °C	鉱 物 学 的 特 徴
〔縁海拡大軸〕				
1. 北フィジー海盆	White Lady	1,980 玄武岩	290	anhy のみ. マウンド中に py, mc, cp, sph, wurz
2. マヌス海盆中央部	Vienna Woods	2,500 玄武岩	—	sph, wurz, py, mc, cp, gn, ba, anhy
3. マヌス海盆東部	PACMANUS	1,650 デイサイト	—	anhy, cp, bo, tenn, sph
4. パルファー海嶺	Vai Lili	1,700 流紋岩～玄武岩	400	py, cp, mc, sph, ba, tenn, gn, Au
5. パルファー海嶺	Hine Hina	1,900 安山岩～ デイサイト	40	py, cp, sph, ba を Mn-oxide がコーティング
6. パルファー海嶺	White Church	1,950 玄武岩	—	ba に富む. sph, gn, tenn, cp, po, electrum
7. 北部ラウ海盆	Papatusa	2,100 玄武岩	—	wurz, py, cp, ba, silica, Mn-oxide
8. マリアナ・トラフ	Alice Spring	3,600 玄武岩～安山岩	287	ba に富む. sph, gn, cp, py
9. マリアナ・トラフ	Central Mariana	3,675 玄武岩～安山岩	?	sph, ba, silica
〔背弧リフト〕				
10. 南奄西海丘	Minami-Ensei	700 酸性岩?	278	anhy に富む. sph, wurz, tetra, cp, gn, py, bo, cov
11. 伊平屋海嶺	CLAM (Iheya)	1,400 玄武岩	220	calcite に富む. anhy, wurz, po, gn, cp, argentite
〔火山フロント〕				
12. 伊是名海穴	JADE (Izena)	1,350 デイサイト	320	sph, tetra, gn, ba, cp, py, wurz, anhy, stibnite
13. 北ベヨネーズカル デラ	Bayonnaise	1,400 デイサイト	—	ba, py, cp, sph, tetra-tenn
14. 明神礁カルデラ	Myojinsho	1,100 デイサイト	—	ba, py
15. 水曜海山	Suiyo seamount	1,370 デイサイト	311	cp, sph, anhy, ba
16. 海形カルデラ	Kaikata	930 玄武岩～安山岩	—	py, cp?, sph
17. 南部マリアナ	Snail Haven	1,470 玄武岩	202	anhy, ba, sulfides

〔略号〕 sph: sphalerite, gn: galena, py: pyrite, cp: chalcopyrite, mc: marcasite, wurz: wurtzite, tenn: tennantite, tetra: tetrahedrite, bn: bornite, cov: covellite, silica: amorphous silica, ba: barite, anhy: anhydrite, Mn: manganese

1993)。

拡大が進んだ背弧海盆の拡大軸の鉱床は、中央海嶺のそれとほとんど化学組成が類似していることが考えられる。というのも、大洋中央海嶺の鉱床でも縁海拡大軸の鉱床でも、海洋地殻を構成する岩石にほとんど差がないからである。実際、Ishibashi and Urabe (1995) は別子型、北フィジー海盆、マヌス海盆の鉱石の化学組成が大洋中央海嶺のそれと類似することを指摘した。しかし、島弧地殻の上に発達し、異なったマグマの組成を持つ鉱床では化学組成が異なることが予想される。実例を見てみると、ウラ海盆、沖繩トラフ (伊是名海穴および南奄西海丘) のそれは黒鉱の化学組

成と類似しているが、これら酸性岩マグマに伴う鉱床ばかりでなく、玄武岩に伴うマリアナ・トラフのそれも黒鉱に類似している。この玄武岩は沈み込み帯起源の元素を濃集した特異なもの (Stolper and Newman, 1992) なので、それに伴う鉱床の元素比が島弧の火山岩に伴う黒鉱と類似しているのであろう。

一方、明らかに堆積物起源と思われる成分もある。Gamo *et al.* (1991) は、沖繩トラフ伊平屋海嶺の CLAM サイトの熱水の alkalinity が高く、アンモニアに富み、硫酸塩の硫黄同位体比が ^{34}S に富むことは、すべて堆積物中の有機物との反応で説明できることを明らかにしている。また

図 2 伊豆・小笠原島弧海溝系の断面（北緯31度：Honza and Tamaki, 1985 による）に投影した各種（a～f：表1 参照）の熱水活動の産状
それらの熱水活動が必ずしもこの断面の場所に見られるわけではない。
地質断面は縦方向に拡大してある。

Fig. 2 Modes of occurrence of hydrothermal activity in relation to tectonic units in trench-arc-backarc system
Geologic cross section of Izu-Ogasawara (Bonin) arc along 31°N is used (after Honza and Tamaki, 1985) to represent typical arc system. Note vertical exaggeration. The sites of hydrothermal activity are hypothetical and are not necessarily found along this particular section. The classification of hydrothermal activity from (a) to (f) denote those given in Table 1.

伊是名海穴熱水の高い濃度のホウ素の起源は、堆積物である可能性が高い (Ishibashi and Urabe, 1995)。

反対にマグマ起源の流体が大きく寄与している成分として、硫黄、炭素およびヘリウムがある。現世の熱水鉱床の硫黄の同位体比はすべて 0-8 ‰ の範囲に入り、マグマ源硫黄に一致する (Ishibashi and Urabe, 1995)。沖縄トラフの2カ所で液体二酸化炭素の“水滴”が海底から泡状に噴出し、ガス・ハイドレートに変化する現象が発見されている (Sakai *et al.*, 1990) が、これらの二酸化炭素の炭素同位体比は高温熱水中のそれと同じで、そのいずれもがマグマ起源と考えられている (千葉ほか 1992)。液体二酸化炭素の方は、海底下のマグマ溜まりの表面から拡散した二酸化炭素ガスが、空隙率の高い堆積物中に保持されたものであるかもしれない。いずれにせよ熱水系の下に揮発性成分に富む背弧のマグマの存在を強く示唆する事実である。詳しいことは別稿 (Ishibashi and Urabe, 1995) にまとめてあるので省略するが、熱水中のヘリウム同位体比についても火山ガスに相当する値が得られている。

V. 沈み込み帯において発生する流体の寄与

沈み込み帯において沈み込んだ堆積物中の元素が、島弧マグマ、火山ガスないし低温の流体として地表に再循環してくるかどうかは地球科学上の重要な問題の一つである。Morris *et al.* (1989) は、高層大気中で宇宙線により酸素と窒素から作られる同位体である ^{10}Be を用いてその寄与の見積りを行なった。海水中に溶け込んだ ^{10}Be は海嶺玄武岩 (MORB) の 10^4 倍以上堆積物に吸着され易いため (Valette-Silver *et al.*, 1985)、島弧火山岩中の ^{10}Be 量は堆積物の寄与に対してはきわめて敏感であるのに対し、プレートを構成する火成岩の影響を受けない。さらに ^{10}Be は半減期が 1.5 百万年であるので、鮮新世以後の堆積物の影響のみを知ることができる。Morris *et al.* (1989) によると MORB 中の ^{10}Be は検出限界以下であるのに対し、島弧の火山岩は $0-24 \times 10^6 \text{ atoms/g}$ と高い値を持ち、大きな堆積物の寄与が窺える。

全島弧の火山岩の生産レートは $1.1 \text{ km}^3/\text{年}$ と試算されるので、2-8 % の堆積物が島弧マグマに混入しているのなら、堆積物の 11-44 % は地表に還流することになる (Morris *et al.*, 1989)。

さらに Kita *et al.* (1993) は、空気からの混入による影響を除外した東北日本の火山ガス端成分が、九州地区のそれに比べて約 10 倍高い N_2/Ar 比を持つことから、沈み込み帯の上に存在する東北日本の島弧マグマに大きな堆積物由来の窒素の寄与があり、沈み込み帯が到達していない西南日本の島弧マグマにそれがないことを明らかにした。また Giggensbach (1992) によると、太平洋周辺域の沈み込み帯の火山に伴う火山ガスや地熱水の酸素・水素同位体組成は、堆積物中に取り込まれた海水を起源としている。彼によれば 98 % 以上の “andesite water” は二酸化炭素、窒素、および塩素と同様、このようにしてもたらされた “devolved seawater” と考えられる。しかし島弧マグマ自体の組成に堆積物の寄与があるかどうかは論争のあるところで、非常に少ないとする説 (たとえば, Saunders *et al.*, 1991) と大きいとする説 (たとえば, Stolper and Newman, 1992) が対立している。

現在地球上には海嶺の総延長の約半分に相当する $37,000 \text{ km}$ の沈み込み帯があり、沈み込みの平均速度は 80 km/Ma とされている (Reymer and Schubert, 1984)。そこでプレート上に幅 1 km 、深さ 0.3 km のベーズンが 20 % の割合で覆っていたとすると、百万年当たり沈み込む堆積物量は約 $2 \times 10^5 \text{ km}^3$ と計算できる。その中の有機炭素含有量を控えめに平均 0.5 % と見積ると、沈み込む有機炭素の総量は $5 \times 10^8 \text{ ton/yr}$ と計算される。これはメタンとして中央海嶺の熱水系から放出されている炭素量 $6.6 \times 10^6 \text{ ton/yr}$ の 75 倍に相当する (浦辺, 1993)。陸上の火山から放出される「マグマ源」メタンの量は全く分かっていないが、固体地球からの二酸化炭素の放出量 (全地球で $1.3-1.8 \times 10^8 \text{ ton/yr}$) は陸上の火山ガスの方が海底熱水系に比して約 3 倍程度多いので、もし陸上でも海底と同じ二酸化炭素/メタン比 (約 100) が変わらなと仮定するなら、陸上メタンの放出フラッ

クスは約 2×10^7 ton/yr となる。これらの数字は今後検討の余地があるが、いずれにせよ沈み込み帯において炭素は非常に“入超”で、火山ガスないし島弧の海底熱水系などで放出されている量は、沈み込み量に比べてごくわずかである。西太平洋の海底熱水系が大洋中央海嶺のそれに比して、非常にガス成分に富む (Ishibashi and Urabe, 1995) ことは、この計算からも十分うなずける。

また黒鉱でも現世の鉱床でも、火山中心と鉱化中心が一致しており、酸性マグマの上昇口を利用して熱水が上昇している。陸上の島弧活火山では火山ガス中や地熱水の H_2O に大きなマグマ水の寄与が知られているので (Giggenbach, 1992)、海底においても同様のことが起こっていることが強く示唆される。西太平洋の海底熱水系は、中央海嶺のそれに比べマグマの寄与がより明解に見られ、結果として生成した鉱床中にもその影響があると考えられるのである。

VI. 火山活動と鉱化作用

黒鉱鉱床はこれまで述べてきたように酸性火山活動に伴うが、マグマ発達史的な視点を加えるとリフティングに関連したパイモダル火山活動に伴うといったほうが正確な表現となる (Urabe, 1987)。秋田県北鹿地方の黒鉱鉱床をもたらした酸性火山活動は、例外なく溶岩円頂丘の生成か、発泡度のごく低い角礫よりなる火山角礫岩の堆積で始まっている。その上に、碎屑岩の挟みを持つことなく黒鉱鉱体に乗っており、噴火活動と鉱化作用との間に時間間隙がなかったことを示している。鉱化活動が終了した後に海底を覆った堆積物、つまり上盤側の岩石には、厚い軽石流が見られる場合、玄武岩の活動がある場合、および厚い泥岩の堆積がある場合の3通りがある。Urabe (1987) はイエローストーン・カルデラにおけるパイモダル火山活動からの類推により、島弧地殻のリフティング、マントル内での玄武岩マグマの発生と上昇、玄武岩の熱によるリフト帯の下部地殻の溶融と酸性プルトンの発生、酸性マグマキューポラの上昇と溶岩円頂丘の生成、マグマ源鉱液の分離と黒鉱の生成、リフティングの終了に伴う海底の浅化、プル

トンの封圧の減少による揮発性成分の発泡と爆発的噴火、それによる厚い軽石流の発生、プルトンの固化とそれを貫く玄武岩マグマの噴出、というマグマ・熱水系進化過程を提案した。

このモデルは現世の海底熱水鉱化作用にも適用できるものと思われる。パイモダル火山活動が知られている例として、表2の沖繩トラフ伊是名海穴の他に、硫化物は見られないが黒鉱の鉄石英に類似した化学組成を持つシリカ・チムニーと重晶石を産する小笠原スミス背弧リフトの例がある (Urabe and Kusakabe, 1990)。後者では気泡に富む枕状玄武岩溶岩を突き破って直径500 m 程度の流紋岩の溶岩円頂丘が噴出しており、その頂上近くに重晶石・シリカチムニーが林立している。ラウ海盆のバルファー海嶺でも、パイモダル火山活動に鉱床が密接に伴っている (Fouquet *et al.*, 1993)。伊是名海穴では2個の流紋岩質の溶岩円頂丘が鉱床近傍に見られているが (中村光一、私信)、玄武岩溶岩は見つかっていない。小笠原の水曜海山、バルファー海嶺の一部も酸性火山岩のみが知られている。

注目に値するのは、これら酸性岩に伴う海底熱水鉱床が他のものに比べて鉱量が多いということである。いずれの鉱床においても具体的な推定をするだけのデータは揃っていないが、伊是名海穴、水曜海山、バルファー海嶺のものは比較的大規模であり、玄武岩に伴うものは小規模である傾向がある。先に述べたように、西太平洋で発見されている現世の海底熱水鉱床の約半分は黒鉱型であり、残りの半分は別子型かキプロス型であるが、この比率は陸上のVMSDのうち、黒鉱型のものが約56%を占めるという統計結果 (Rona, 1988) とよく符合する。さらにVMSDのうち玄武岩に伴うものが17%で、鉱量も3,000万トンどまりであるのに対し、黒鉱型のものは鉱量も最高2億3,000万トンに達するという事実も上記の観察と整合的である。やはり現世の海底熱水鉱床は、ほぼ地球史を通じて生成されてきたVMSDの現代版といってよく、その頻度や産状も地質時代を通じて齊一的に解釈できそうである。

VII. 鉱床の保存

黒鉱型 VMSS は別名を層準規制型塊状硫化物鉱床 (starata-bound massive sulfide deposits) と呼ばれる。これはこの種の鉱床がある特定の層準に偏って見られ、他の層準に見られない例が多いからである。たとえば北鹿地域の黒鉱鉱床は 15 Ma に限られ、その上位の酸性火山岩には伴わない。この原因については、その時代が酸性火山活動のピークに相当し、さらに細かくいえば同地域の黒鉱が火山砕屑岩などの特有な噴火様式のみ伴われる (Urabe, 1987) ことなどが、説明としてあげられている。

しかし、熱水性硫化物は生成後地質体として保存されなければ鉱床にならないという要素も忘れてはならない。Mitchell and Garson (1981) は現世の縁海において鉱化作用が発見されない (注：これは明らかに誤りであるが) のは、現在火山弧と大陸の間にできた縁海がないため、火山灰と砕屑物により金属鉱床が覆われ、保存される可能性がないためと考えたほどである。梶原 (1983) は、嫌気的な水塊に覆われたバズンにおいて硫化物が保存される可能性を指摘しているが、現世の鉱床が火山中心に伴われることと、これらのことは矛盾する。というのも、火山中心は温度が高く、マグマの噴出が起こるので、周囲の海底に比べて水深が浅いことが一般的だからである。このような地形的な高まりに嫌気的な環境を作ったり、堆積物のカバーを乗せることは難しい。実際、堆積物に覆われない大洋中央海嶺の場合、死んだチムニーが酸化されて赤褐色の酸化鉄塊になっていることがしばしば観察される。

そこで考えられるのが火山カルデラないし山頂火口である。これらは極地的に凹地を作っているため、保存のための条件を満たしやすい。カルデラ底に熱水の余波があるだけでも、極地的な還元状態が作りだせるし、カルデラ壁からの崖錐堆積物の供給により鉱床が速やかにカバーされることが期待できるからである。実際このような条件は海形カルデラ、明神礁カルデラなどで実現されている可能性がある。黒鉱がカルデラに伴うという

古くて新しい説の正当性は、そこが生成の場としてのみでなく、保存の場としても好適であることによっているものと考えられる。

VIII. 結 論

西太平洋海域には 17 の硫化物を伴う海底熱水活動サイトが知られている。そのうち、縁海拡大軸に位置するものが 9 カ所、背弧リフトが 2 カ所、火山フロント上に 6 カ所存在する。熱水活動の約半数は酸性火山活動に伴うもので、残りは塩基性火山活動に伴われている。前者は生成中の黒鉱鉱床といえるもので、後者はキプロス型ないし別子型鉱床に分類される。これら陸上の VMSS のうち各タイプの鉱床が占める割合は現世の海底熱水活動の分類とほぼ同じで、VMSS が現在の海底熱水活動と同様の生成プロセスで、地質時代の島弧・縁海系で形成されるものとする考えが支持される。

これら硫化物を産する高温熱水活動はすべて火山体の直上に限られており、高温熱水活動の存在にはマグマ活動が不可欠であるといえる。また熱水の起源としてマグマ水が有力である。水、硫黄、炭素、塩素、ヘリウム、および窒素などの成分では、沈み込み帯の堆積物起源の成分の寄与が見られ、それら堆積物起源元素がいったん島弧・縁海のマグマに取り込まれ、さらにマグマから分離放出されたマグマ性熱水に溶存して上昇し、鉱床を形成したものであることが分かる。できた鉱床が保存される場としては火山カルデラが最も好適であり、これらが黒鉱鉱床がカルデラに伴う一つの理由であろう。

謝 辞

西太平洋において、日本人の手により数多くの熱水活動が発見された背景には、2 つの「しんかい」のオペレーション技術が、短期間で世界最高水準に達したことの寄与が大きい。海洋科学技術センターの関係者の不断の努力を称えと同時に、これまでの航海でお世話になった司令以下オペレーション・チームの方々、船長以下乗組員の方々に深く感謝したい。この小論は石橋純一郎、川幡穂高、篠原宏志、中村光一の各博士との議論から多くを得て書かれた。これらの人に感謝する。

文 献

- Cathles, L. M. (1993): A capless 350°C flow zone model to explain megaplumes, salinity variations, and high-temperature veins in ridge axis hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, **88**, 1977-1988.
- 千葉 仁・酒井 均・蒲生俊敬・石橋純一郎・中島和夫・南 秀樹・土橋 史 (1992): 南奄西海丘で湧出している気泡の化学・同位体組成. 第8回しんかいシンポジウム報告書, 海洋科学技術センター, 81-89.
- Colley, H. and Rice, C. M. (1975): A kuroko-type ore deposit in Fiji. *Econ. Geol.*, **70**, 1375-1386.
- Detrick, R. S., Harding, A. J., Kent, G. M., Orcutt, J. A., Mutter, J. C. and Buhl, P. (1992): Seismic structure of the southern East Pacific Rise. *Science*, **259**, 499-503.
- Fouquet, Y., von Stackelberg, U., Charlou, J. -L., Erzinger, J., Herzig, P. M., Muhe, R. and Wiedicke, M. (1993): Metallogenesis in back-arc environments: The Lau Basin example. *Econ. Geol.*, **88**, 2154-2181.
- Francheteau, J., Needham, H. D., Choukroune, P., Juteau, T., Ségrét, H., Ballard, R. D., Fox, P. J., Normark, W., Carranza, A., Cordova, D., Guerrero, J., Ranjin, C., Bougault, H., Gambon, P. and Hekinian, R. (1979): Massive deep-sea sulfide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, **277**, 523-528.
- Gamo, T., Sakai, H., Kim, E. S., Shitashima, K. and Ishibashi, J. (1991): High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 328-338.
- Giggenbach, W. F. (1992): Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 495-510.
- Halbach, P., Nakamura, K. I., Wahsner, M., Lange, J., Sakai, H., Kaeseltz, L., Hansen, R. D., Yamano, M., Post, J., Prause, B., Seifert, R., Michaelis, W., Teichmann, F., Kinoshita, M., Maerten, A., Ishibashi, J., Czervinski, S. and Bulm, N. (1989): Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, **338**, 496-499.
- Hart, S. R. and Gülen, L. eds. (1989): *Crust/mantle recycling at convergence zones*. NATO ASI Series C-258, Kluwer Academic Publ., Bonn, 279 p.
- Honza, E. and Tamaki, K. (1985): Bonin Arc. In Nairn, A. E. M., Stehli, F. G. and Uyeda, S. eds.: *The ocean basins and margins*. The Pacific Ocean Series, Plenum Co., New York, 459-502.
- Ishibashi, J. and Urabe, T. (1995): Hydrothermal activity related to arc-backarc magmatism in western Pacific. In Taylor, B. ed.: *Backarc basins*. Plenum Press, New York (in press).
- 梶原良道 (1983): 黒鉱鉱床生成の地史学的意義——黒鉱・石油同源説. 鉱山地質 (特別号), **11**, 289-304.
- Kinoshita, M. (1990): *Heat flow anomaly in some Western Pacific trench-arc-backarc systems associated with interstitial water circulation*. Ph. D. Thesis, Univ. Tokyo, 74 p.
- Kita, I., Nitta, K., Nagao, K., Taguchi, S. and Koga, A. (1993): Difference in N₂/Ar ratio of magmatic gases from northeast and southwest Japan: New evidence for different states of plate subduction. *Geology*, **21**, 391-394.
- Le Pichon, X., Kobayashi, K., Cadet, J. P., Iiyama, T., Nakamura, K., Pautot, G. and Renard, V. (1987): Project Kaiko. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **83**, 181-375.
- Mitchell, A. H. G. and Garson, M. S. (1981): *Mineral deposits and global tectonic settings*. Academic Press, London, 405 p.
- Morris, J., Tera, F., Sacks, I. S., Brown, L., Klein, J. and Middleton, R. (1989): Sediment recycling at convergent margins: Constraints from the cosmogenic isotope ¹⁰Be. In Hart, S. R. and Gülen, L. eds.: *Crust/mantle recycling at convergence zones*. Kluwer Academic Publ., 81-88.
- Nishimura, A. and Murakami, F. (1988): Sedimentation of the Sumisu Rift, Izu-Ogasawara Arc. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **39**, 39-61.
- 太田 秀 (1988): 海底熱水系と生物過程. 地球化学, **22**, 87-95.
- Reymer, A. and Schubert, G. (1984): Phanerozoic addition rates to the continental crust and crustal growth. *Tectonics*, **3**, 63-77.
- Rona, P. A. (1988): Hydrothermal mineralization at oceanic ridges. *Canad. Mineral.*, **26**, 431-465.
- Rona, P. A. and Scott, S. D. (1993): Preface for a special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: New perspectives. *Econ. Geol.*, **88**, 1935-1976.
- Sakai, H., Gamo, T., Kim, E. -S., Tsutsumi, M., Tanaka, T., Ishibashi, J., Wakita, H., Yamano, M. and Oomori, T. (1990): Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in Mid-Okinawa Trough backarc basin. *Science*, **248**, 1093-1096.
- Saunders, A. D., Norry, M. J. and Tarney, J. (1991): Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, **A. 335**, 377-392.
- Sawkins, F. J. (1972): Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *J. Geol.*, **80**, 377-397.
- Spieß, F. N. and RISE Group (1980): East Paci-

- fic Rise; Hot springs and geophysical experiments. *Science*, **297**, 1421-1433.
- Stolper, E. M. and Newman, S. (1992): Fluids in the source regions of subduction zone magmas: Clue from the study of volatiles in Mariana Trough magmas. *Geological Survey of Japan, Report*, **279** (Hedenquist, J. W. ed.: Magmatic contributions to hydrothermal systems), 161-169.
- Stuben, D., Stoffers, P., Cheminee, J. L., Hartman, M., McMurtry, G. M., Richnow, H. H., Jenish, A. and Michaels, W. (1992): Manganese, methane, iron, zinc, and nickel anomalies in hydrothermal plumes from Teahitia and Macdonald volcanoes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 3693-3704.
- Taira, A. and Pickering, K. T. (1991): Sediment deformation and fluid activity in the Nankai, Izu-Bonin and Japan forearc slopes and trenches. In Tarney, J., Pickering, K. T., Knipe, R. J. and Grew, J. F. eds.: *The behaviour and influence of fluids in subduction zones*. The Royal Society, London, 63-88.
- Tamaki, K. and Honza, E. (1992): Global tectonics and formation of marginal basins: Role of the western Pacific. *Episode*, **14**, 224-230.
- Taylor, B., Brown, G., Fryer, P., Gill, J., Hochstaedter, A., Hotta, H., Langmuir, C., Leinen, M., Nishimura, A. and Urabe, T. (1990): ALVIN-Sea Beam studies of the Sumisu Rift, Izu-Bonin arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **100**, 127-147.
- 浦辺徹郎 (1983): 海底の熱水鉱床とユニフォームタリ
アニズム. 海洋科学, **15**, 548-553.
- Urabe, T. (1987): Kuroko deposit modeling based on magmatic hydrothermal theory. *Mining Geol.*, **37**, 159-176.
- 浦辺徹郎 (1993): 深層天然ガスとは・季報エネルギー総合工学, **15**, 36-43.
- Urabe, T. and Kusakabe, M. (1990): Barite silica chimneys from the Sumisu Rift, Izu-Bonin Arc: Possible analog to hematitic chert associated with Kuroko deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **100**, 283-290.
- 浦辺徹郎・Auzende, J. M.・Deplus, C.・Eissen, J. P.・Grimaud, D.・Huchon, P.・石橋純一郎・上嶋正人・Lagabriele, Y.・Mevel, C.・仲二郎・Ruellan, E.・田中武男・棚橋・学 (1990): 北フィジー海盆中央拡大軸における熱水鉱床——ノーチル号による潜水調査予報. 鉱山地質, **40**, 117-124.
- Usui, A., Yuasa, M., Yokota, S., Nohara, M., Nishimura, A. and Murakami, F. (1986): Submarine hydrothermal manganese deposits from the Ogasawara (Bonin) Arc, off the Japan islands. *Mar. Geol.*, **73**, 311-322.
- Valette-Silver, J. N., Tera, F., Pavich, M. J., Brown, L., Klein, J. and Middleton, R. (1985): ¹⁰Be contents of natural waters. *EOS*, **66**, p. 423.
- Yuasa, M., Murakami, F., Saito, E. and Watanabe, K. (1991): Submarine topography of seamounts on the volcanic front of the Izu-Ogasawara, Bonin, Arc. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 703-743.
- (1995年1月23日受付, 1995年3月20日受理)