日本の未来を握る海底熱水鉱床

坂元 志歩（サイエンスライター）

林立する熱水噴出孔。

日本近海の深海底には、世界でも屈指の海底資源が知られている。地震や火山を生み出す厳しい環境が、同時に海底資源という恵みを生み続けてきたのだ。一方で、日本を支える機械産業やハイテク分野に欠かせない金属資源が世界的に高騰の兆しをみせている。海底資源開発が日本の命運を握る。

本多冬人

2005 年 8 月、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の海洋調査船「かいれい」が海上へと滑り出した。船には無人探査機「かいこう」と自律型海中ロボット r2D4 が積まれている。向かうは、東京から南へ 400 キロ、伊豆・小笠原海域の明神礁だ。研究者 31 名が殉職した大事件の起きた場所。1952 年に海底火山が爆発、調査に入っていた海上保安庁の船が巻き込まれ、研究者を含む多くの犠牲者が出た。それから 40 年近く、この海域は危険区域に指定されていた。研究者たちはなぜ、この海域を今さらめざそうというのだろう。

実は、明神礁には「海底熱水鉱床」が存在する可能性が高いと推定されていたのだ。しかも水深は 1100 メートル前後と比較的浅く、現在の技術で海底鉱床を開発しても、採算が採れる可能性のある有望な場所だと見られている [1]。

話は 1977 年にさかのぼる。世界で初めてガラパゴス沖の深海に熱水噴出孔が発見されたのだ。さらに 1989 年には日本で初めての熱水噴出孔が当時の西ドイツの海洋調査船「ゾンネ号」によって沖縄県伊是名島沖で発見され、その後熱水噴出孔から黒い煙を噴出するブラックスモーカーが JAMSTEC の有人潜水艇しんかい 2000 によって発見された。噴出する黒い煙は、重金属と硫黄が化合した硫化物。噴き出した熱水硫化物の中に貴重な金属が多量に含まれ、周囲の堆積物は金属の濃集した海底鉱床を作る。

明神礁は直径約 8 キロメートルの海底カルデラだ。このカルデラのいったいどこに鉱床があるのか。1984 年からの 5 年間に及ぶ工業技術院地質調査所（現産業技術総合研究所）の調査によって大まかな見当はすでにあった [2]。その場所へ、今度は最新機器を使った探査が開始されたのだ。波が高く、黒潮の流れがきついこの海域でやっとの思いで有索式

©2008 NPG Nature Asia-Pacific

無人探査機かいこうを送り込み、研究者たちはモニターの前に集合した。固唾をのんでモニターを見守る研究者たち。ところが、かいこうは、海底へ着く前にバシャっとブラックアウトしたまま、ついに復旧することはなかった。

ここで活躍したのが、かいれいがもっているマルチナロービームソナー、そして東京大学生産技術研究所浦環教授らがつくった「r2D4」だった。かいれいのスキャニングソナーによって、このとき初めて船から周囲の広範囲の詳細な海底地形図が作成された（図 1）。

一方、無人ロボットの r2D4 は、海底熱水鉱床の存在の証拠をつかんだ[3]。あらかじめセットしたプログラムにしたがって独立に働く自律型無人ロボットの r2D4 は計画した通りの航路（測線）をたどった。戻ってきたロボットからデータを回収し、解析。すると、急に水中のマンガン濃度が高くなり、周囲の濁りが激しくなった場所が記録されていたのだ。これこそ熱水噴出孔からマンガンを含む熱水が噴き上がっている証拠だった。

地下資源に恵まれていたかつての日本

熱心に熱水鉱床を探すには理由がある。世界的に金属の価格が急激に上昇しているのだ。中国・インド・ロシアの経済発展を背景に、金属資源の消費は世界的に拡大しつつある。特に中国は 1990 年以降、毎年 10 パーセント以上の経済成長を果たしている。経済発展に伴い、利用する鉱物資源の量も増大してきた。これまで供給側だったこうした国々の経済発展によって金属資源の供給バランスはくずれつつある。中国が世界の工場になっている側面はあるものの、日本経済にとって安定した金属資源の入手がこの先大きな問題となるのは必至だ。2007 年 11 月には甘利明経済産業相が南アフリカとボツワナを訪れ、今後世界的な枯渇が予想されるレアメタル（希少金属）の確保をめざして、いわゆるレアメタル外交を行ったことは記憶に新しい。レアメタルとは、パソコンや携帯電話、自動車などの電子部品に使用される非鉄金属を指す。

こうした危機を自国で救う可能性をもつのが海底熱水鉱床だ。実はこの海底熱水鉱床と同じメカニズムでできた鉱床が、すでに日本の陸上の地層中に数多く知られており、重要な金属資源として利用されてきたのだ。海底熱水鉱床のいわば「化石」は 2 種類あり、黒鉱および別子型鉱床とよばれている。明治維新を支えた別子鉱床（愛媛県）や、1960 年代からの高度経済成長を下支えしたのが北鹿盆地（秋田県北部）に広がるこの黒鉱だった。とくに黒鉱は日本で開発が始まったため、世界でも「kuroko」という単語が広く使われている。黒鉱とは黒い鉱石を意味しており、その鉱石には金、銀をはじめ、銅、鉛、亜鉛、ガリウム、ゲルマニウム、インジウムなど、他のタイプの鉱床に比べ、非常に多様な金属を含むのが特徴だ（図 2）。

今でこそ、資源の乏しい国といわれているが、その昔、日本は鉱物資源の豊かな国だったと東京大学理学部の浦辺徹郎教授はいう。7～8 世紀の仏教伝来の折には、日本は世界最大の産金国だった[4]。この金が仏教文化の導入に使われた。また 16 世紀の鉄砲や西洋文化の伝来といった戦国時代を支えていたのも金だった。江戸時代には日本は、石見銀山といった鉱山によって世界最大の産銀国だった。江戸幕府の屋台骨は、伊豆、山梨、佐渡の金山が支えていた。そして明治維新のころには日本は幸いに

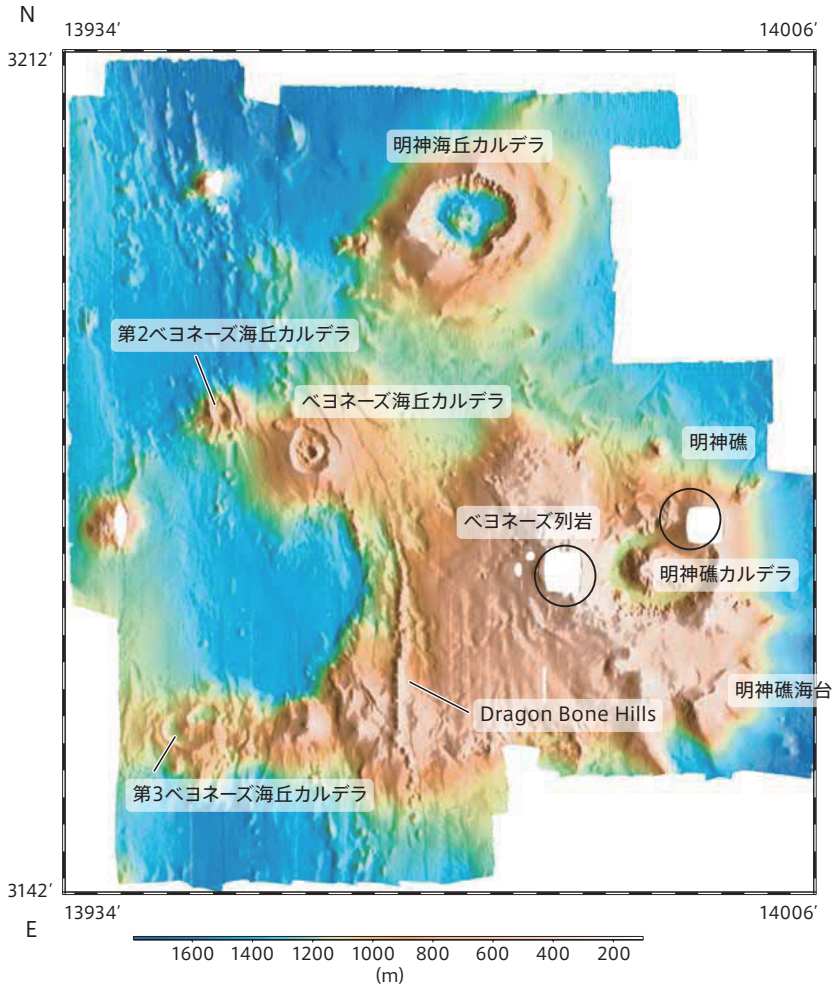


図 1　伊豆・小笠原海域には多くの海底カルデラが広がっている。これまでにベヨネーズ海丘の白嶺鉱床、明神海丘のサンライズ鉱床、水曜海山（上記地図より南側）3 つの海底熱水鉱床が発見された。複数のカルデラが集中して存在するため、今後もこの海域で新たな鉱床が見つかると期待されている。

東京大学大学院工学系研究科 玉木賢策教授

©2008 NPG Nature Asia-Pacific

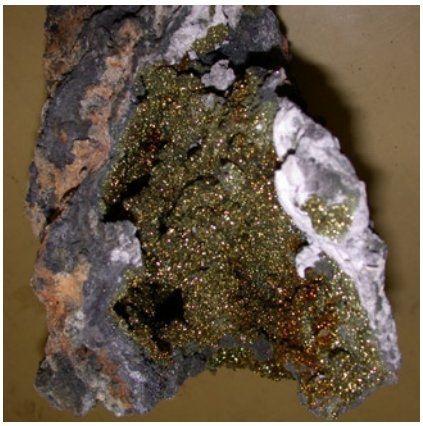
も世界最大の産銅国であり、この時の銅の対価で文明開化を推し進めたという。これほど多くの地下資源見つかってきた理由、それは日本の成り立ちと深い関係がある。

陸上の鉱床と日本列島の成り立ち

陸で見つかる黒鉱や別子型鉱床は、かつて海底にあった「熱水鉱床」だった。熱水鉱床には大きく2種類の出来方がある。（図3）海底でできるものと、陸でできるものだ。どちらも地球内部の熱源（マグマだまり）によって暖められた熱水が岩石にできた割れ目の間を通ることで始まる。

数百度の熱水は、周囲の岩石に含まれる水に溶けやすい金属を溶かし込んでその割れ目の間を走っていく。もし、割れ目の間を走っている間に、熱水の温度が冷やされれば熱水の通り道沿いに溶け込んだ金属などの物質が析出していくことになる。これが鉱脈型とよばれる鉱床のでき方だ。このタイプは陸でも海底下でも見ることができる。

一方で海底下に熱源のマグマがあり、熱水ができる場合、金属を溶かし込んだ熱水が海底から噴き出す場合もある。これが熱水噴出孔であり、ブラックスモーカーやグレースモーカー、ホワイトスモーカーなどとなって周囲に鉱床ができる。これが黒鉱や別子型鉱床だ。海底の場合には、さらに海底下の地殻部分に鉱脈型の鉱床が発達する場合もある。こうしてできる海底熱水鉱床の中で、島弧にできたのが黒鉱である。



産業技術総合研究所 飯笹幸吉グループ長
産業技術総合研究所標本館 青木正博館長

図2　左の写真の黒灰色部は熱水噴出孔（チムニー）の外側で閃亜鉛鉱から、白色部は硬石膏から成る。黄金色の部分はチムニーの内側で熱水の通路部に沈殿した黄銅鉱が光を反射して輝いている。右は黒鉱の写真で、最上部の赤色は赤鉄鉱（バンド主成分は重晶石）による着色。黒色部の主成分は閃亜鉛鉱と方鉛鉱、黄色部は黄銅鉱を主とし、白色部は重晶石。

東北地方の北鹿盆地は黒鉱が密集した地域で、小坂や花岡の地名で知られている。この北鹿盆地は金・銀・銅・鉛がとても狭い範囲に集中して産出する場所として世界的に有名だった。

なぜこれほど多くの黒鉱がこの場所に集まっているのか。広範囲な鉱床探査が1960年代に行われた。この調査により、すべての黒鉱は約1500万年前にできたものだった。いったい1500万年前に何があったのか、この年代はマジックナンバーとして長い間研究者たちを悩ませていた。

マジックナンバーの謎が急展開を見せたのは1992年、東京大学大学院工学研究科の玉木賢策教授らによる研究だった[5]。1500万年前、今の東日本の陸地は、ほとんどが海の底にあった（図4）。その1500万年前からおよそ100万年間、日本海周辺では活発な火山活動が起きていたというのだ。海底に地溝帯が形成され、日本海が開き始めた。玉木教授によれば、このときの火山活動の規模は、ちょうど現在の伊豆・小笠原海域の活動に匹敵するという。この活動に伴って活発な火山活動が起こり、その熱源によって東北地方に広がる黒鉱が形成されていった。

今の日本列島の形ができるのはそれから1000万年以上も後の180万年前のことだ。このとき、日本海東縁に北米・ユーラシアプレート境界が日本海の中に新たに形成され、2つのプレートの衝突によって日本列島が上昇を始めたのだ。この上昇によって、海底熱水鉱床は陸に上がり、黒鉱とよばれる鉱床となった。

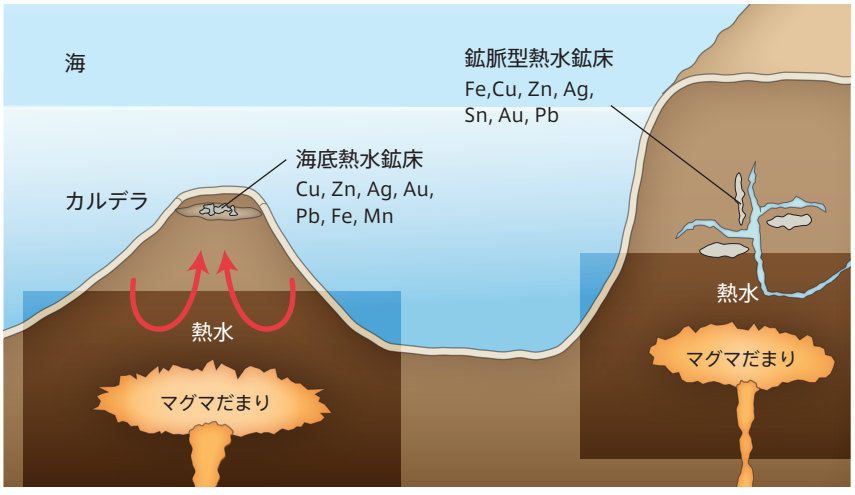


図3　海底熱水鉱床と鉱脈型熱水鉱床。マグマだまりで暖められた熱水は、周囲の岩石から金属物質を取り込む。熱水の通り道で冷えて、溶けていた金属物質が析出すれば鉱脈型とよばれる鉱床を作る。これは通常陸地や海底下でできる熱水鉱床だ。熱水が海底で噴き出し、その場で冷えて金属が降り積もれば、海底熱水鉱床となる。

島弧が生み出す豊かな環境

日本列島周辺の海域に広がる活発な火

©2008 NPG Nature Asia-Pacific

山活動が、日本に金属資源を導いた。火山活動は熱源を意味し、熱源によって熱水が生まれるからだ。海底熱水鉱床はプレート発散域である中央海嶺や、日本の伊豆・小笠原弧のようにプレートが収束する火山活動の盛んな海洋性島弧で作られる。1980 年代後半より発見が相次いだ島弧の熱水鉱床の分析により、島弧周辺の方が発散型の中央海嶺よりも、金属が多様で複雑であり、経済的に有用な金属元素が多く含まれることがわかってきた。このような特徴は島弧でできた黒鉱鉱床についてもいえる。「中央海嶺の鉱床は銅と亜鉛しか含まれません。しかし、島弧の熱水鉱床や黒鉱は中にレアメタルも含まれている。何度もおいしい鉱山なんです」と浦辺徹郎教授はいう（表 1）。

島弧型の海底熱水鉱床の特徴は、この複雑な金属構成にあるのだ。実は、黒鉱の存在は江戸時代から知られていた。しかし、あまりに鉱石の構成が複雑なため、金や銀といった特定の貴金属を選別する技術がなく、そのまま放置されていたという。江戸時代に盛んに開発された佐渡や伊豆、山梨から産出する金銀鉱石は、陸の熱水鉱床と考えられ、金や銀が主成分。ほかの金属はほとんど混じっていなかった。

図 4　およそ 1500 万年前の日本地図。東日本のほとんどの陸地は、当時は浅海だった。プレートの衝突によって、日本付近では活発な火山活動が起きていた。

大量の生命が群がる活動熱水域

1977 年、世界で初めて発見されたガラパゴス沖の熱水噴出孔に群がる奇妙な、なおかつ大量の生きものの姿は、それまで荒涼としていると考えられていた深海のイメージを一新した[9]。以来、世界中の海で三百数十か所の熱水活動域が見つけられてきた。食糧が少ないと考えられている深海で、微生物は熱水中の酸化物質と、地球内部から噴き上がってくる還元的なガスや金属などを利用し、酸化還元反応によってエネルギーを手に入れることができる。そのため、熱水活動域には多くの微生物が繁栄し、また微生物を体内に共生させた多くの生きものが群がるのだ。

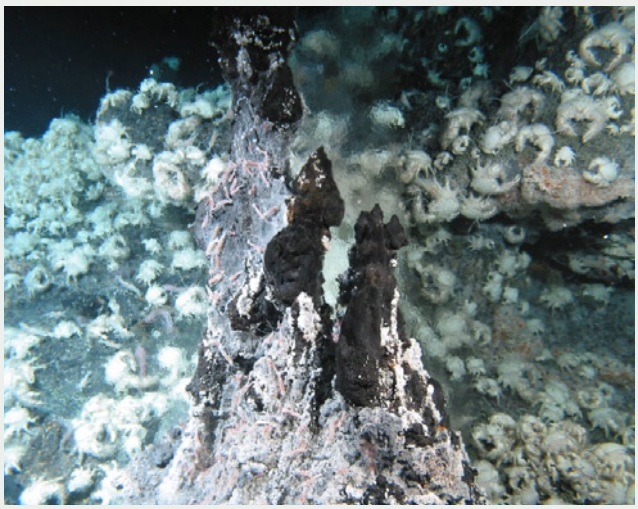
浦辺徹郎教授は、熱水活動域が微生物の宝庫だと語っている。陸上ではまったく見ることができない新種の微生物が見つかるというのだ。微生物ハンターとしても活躍する、JAMSTEC 極限環境生物圏研究センター地殻内微生物研究グループの高井研プログラムディレクター（PD）は、熱水活動域の表層や熱水噴出孔下の微生物群集は、活動域ごとに大きく異なること[10]、またマントルの特性やマグマ活動といった地質学的な条件と、そうした群集は密接なかかわりがあることを報告している[11]。中央海嶺型、島弧型、また同じ島弧型であっても、どのような堆積物が沈み込むか、その場所の特性によって、そこに暮らす微生物は遺伝子レベル及び表現型レベルで群集構造が異なるという。

生きものがエネルギーを得やすい熱水活動域は、初期生命活動の場だったと予測されている。初期の地球大気は、酸素がないか、今よりずっと少なかったと考えられている。2004 年には高井 PD らによって、インド洋カイレイフィールドで酸素から完全に独立した生態系が発見された。超好熱メタン菌と超好熱発酵菌が一塊の群集をなし、互いに物質を循環させる生態系を構成していたという。高井 PD はこれと同じようなエネルギー代謝を有した生態系が初期生命を持続可能にした場に存在したと考えている。

また 2007 年には JAMSTEC 極限環境生物圏研究センター有用微生物探索グループの中川聡研究員らよって、熱水活動域の優占微生物（イプシロンプロテオバクテリア）が他の生物と共生するための仕組みが、胃がんの原因となるヘリコバクター・ピロリや、腸炎やギランバレー症候群を引き起こすキャンピロバクターといった病原菌がもつ病原機構のルーツであることが発見された[12]。中川研究員は、深海の熱水活動域という変化しやすい過酷な環境が、これらのバクテリアが他の生物と共生もしくは感染して生き抜くメカニズムを生み出す原動力となったではないかと考えている。

熱水活動域には非常に貴重な、珍しい生きものが大量に発見されつつある。熱水活動域の海底下にも巨大な生命圏が広がっていると予測されている。

S.S.



熱水に群がるオハラエビやゴエモンコシオリエビとイプシロンプロテオバクテリアは、共生している。沖縄本島から北北西へ 200km ほどの伊平屋北熱水活動域（水深は約 1000m）。

海洋研究開発機構 中川聡研究員

©2008 NPG Nature Asia-Pacific

このような差ができる原因は２つある。１つは水だ。陸でできる熱水鉱床の熱水は、多くは雨水が地下深く染みこんだ地下水から作られる。一方で海底熱水の場合は、熱水に塩分が含まれることになる。この塩化物が熱水中に混じっていると、金、銀以外のさまざまな重金属を溶かし出す能力が高くなる。そのために海底熱水鉱床の黒鉱は、複雑に金属を含んだ鉱石なっている。

原因のもう１つは地殻の構造で、島弧という環境にある。プレートが沈み込む海溝部ではプレートが堆積物もろとも島弧の地下に沈み込み、やがてマグマを発生させる。このような島弧マグマは堆積岩の複雑な成分を受け継いで多くの微量元素を含むことになる。一方の発散型の中央海嶺では、プレートどうしが発散することで圧力が下がるため、地球内部からマントルが部分的に溶けて上昇してくる。そのため、堆積岩のような複雑な構成の岩石が混じることもなく、単純な組成になることが多い。中央海嶺でできる海底熱水鉱床は銅、亜鉛、鉄などが主成分となり、それ以外の金属元素はとても少ないのだ。

すでに陸上にある鉱床は、資源探査目的の人工衛星によって探査し尽くされている。地下に埋もれていて見えない鉱床の見つかる可能性に賭けるしかないが、発見率は年々低下している。しかも、陸上は掘れてもせいぜい深さ３キロまでだ。それ以上になると「山はね」という、岩圧によって何トンという岩が坑道の壁からはじけ飛ぶという現象が生じるからだ。新たに見つかる陸上の鉱床の多くは、どんどん深い位置になってきている。「将来的には、陸上での金属資源は今までのようなペースでは見つからなくなるでしょう」そう浦辺教授は語った。

採算性の高い日本の海底資源

海こそ、残されたフロンティアなのだ（図５）。「海底熱水鉱床の発見とさらなる調査によりその特徴がつかめれば、埋もれている陸上鉱床発見の新たな突破口になる可能性もあります」と玉木教授は話す。

「海底熱水鉱床を発見する手段も確立されつつあります」と産業技術研究所の飯笹幸吉グループ長は語った。現在、熱水鉱床を見つけるには海底カルデラや背弧海盆（沈み込み帯の背弧地域に生じる海洋底拡大によって生じる縁海・海底）をターゲットに調査が進められているという。海底熱水鉱床が日本で初めて見つかった伊是名島沖のものも、また明神海丘にあるサンライズ鉱床もどちらもカルデラ内のものだ。

詳細につくられた海底地形図を頼りに、構造の交差部、例えばカルデラと断層が交差しているような場所を探していく。地形的に有望な場所が見つかったら、次に２～３キロメートルほどのグリッドを切り、そのグリッド内から地質試料を採る。その方法は通常、船上から筒のようなものを自由落下させ、その重みで筒内に海底からの土の塊（柱状コア）を得る。こうして得たサンプルを解析して組成を調べると、グリッドごとの熱水活動に伴って生成された鉱物の変化を知ることができる。例えば、硫化物の量の分布を調べ、しだいに増えていく方向を見定めることで噴出している地点の当たりを付けていく。

できあがった硫化物分布マップをもとに、さらに小さな区画でグリッドを切り、今度は r2D4 のような自律型海中ロボットを使ってマンガン濃度や地形などの詳細な調査を行う。ここでさらにねらいを定める。そして最後に有人潜水艇などを使って、目視で場所を確認する。こうした調査方法ですでにいくつかの海底熱水鉱床が発見されている。

これまでに伊豆・小笠原近海で３つの海底熱水鉱床が見つかっているものの、現在海底から資源として採掘された金属資源はほぼないといっていい。それは海底から採掘する技術が確立されてお

産業技術総合研究所 飯笹幸吉グループ長

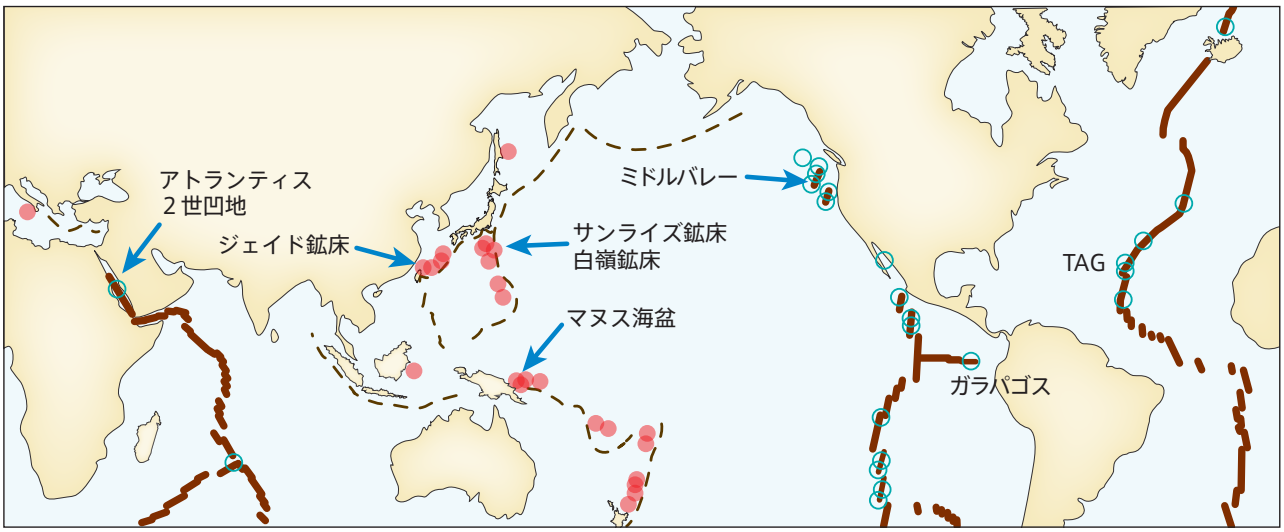


図５　島弧と中央海嶺に伴う海底熱水鉱床の位置。

©2008 NPG Nature Asia-Pacific

産業技術総合研究所地質情報部門

	海域		銀	金	鉛	銅	亜鉛	鉄	Co	Ni
		n *	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	ppm
中央海嶺系	エクスプローラー海嶺	46	124	0.80	0.11	3.4	5.0	26.8	-	-
	ガラパゴス海嶺	17	46	0.34	0.04	4.5	4.0	32.6	86	270
	東太平洋海膨 (21°N)	-	159	0.08	0.32	0.8	32.3	19.2	100	3
	東太平洋海膨 (13°N)	6	62	0.31	0.07	7.9	10.8	23.9	1100	70
	ファンデフカ海嶺 (中軸部)	-	436	0.30	0.75	0.2	11.3	19.6	20	20
	ファンデフカ海嶺 (南部)	-	207	2.50	0.18	0.9	24.3	9.9	20	90
島弧系 / 背弧	ラウ海盆，トンガ	46	178	3.80	0.38	5.2	21.6	10.6	-	-
	沖縄トラフ伊是名海穴	14	2806	4.70	11.49	2.0	20.9	10.3	4	50
島弧系 / 火山	明神海丘 (Sunrise)	37	1213	20.00	2.27	5.5	21.9	10.5	22	26
	水曜海山	11	203	28.90	0.84	12.6	20.8	15.7	50	10

＊ n はサンプル数

表 1　世界の海底熱水鉱床との組成比較。塊状硫化物の海域別金属含有量の平均値。中央海嶺系よりも島弧系の方がレアメタルの濃度が高い。

らず、金属の価格をみても輸入した方が、採算に見合うからだ。しかし、金属の相場は上昇傾向にある。最近では資源ナショナリズムも高まりつつある。

採掘方法を開発すれば、海底資源において日本は最も採算の採れる可能性が高い場所にあるといえるだろう。鉱山開発は、鉱床を探すのに 5～7 年、その開発に 2～4 年、投資した資金を回収するまでに 10～15 年かかるといわれる。合計おおむね 20 年の期間を必要とするのだ。海の場合はおそらく 10 年以上かかるだろうと試算されている。今日始めて、明日採れ始めるものではないのだ。

日本のような加工貿易国では、その原料となる金属資源を安定的に手に入れる手段を確保しておかなければならない。備蓄はあるものの、今後同じような方法で資源を確保できる保証はない。資源エネルギー庁や金属鉱業事業団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構）、地質調査所（現産業技術総合研究所）などによって長年地道な調査が続けられ、それに伴って日本の排他的経済水域内（EEZ：経済的な主権が及ぶ水域のこと）には飛び抜けて多くの資源があることが判明している[6,7]。2007 年 11 月には JAMSTEC によって、伊豆・小笠原海域の地殻が海洋地殻ではなく、大陸地殻の特徴をもつと発表された。この研究から大陸棚の延長であることが認められれば、国連海洋法条約によって EEZ が最大で 57 パーセント増加する可能性がある。

貴重な生物と熱水鉱床

「海底資源でいえば、我が国は世界一の資源国なんです」と浦辺教授と玉木教授は同じように語っていた。北鹿盆地で掘り尽くされた黒鉱の鉱石量は約 5000 万トン、現在発見されている日本の海底熱水鉱床では少なくとも数百万トンの鉱石量が推察されている[8]。

実際に、これらの海域に具体的にどれほどの鉱量があるのか。実はこの調査はまだきちんと行われていない。ある程度正確な鉱量を知るためには、さらなる調査を行う必要がある。こうした背景を受けて、2007 年 12 月に内示された来年度予算で、本格的な海底熱水鉱床開発費がついに計上された。

金・銀の含有率が高いとされる伊豆・小笠原海域に広がる海底熱水鉱床に興味を示し、採掘に挑もうとする海外資本の会社もすでに現れている。

2007年10月15日～17日にかけて、東京大学で学会 Underwater Mining Institute（UMI）が開かれた。ここではカナダに拠点を置くノーチラス・ミネラルズ社が同じ島弧型のパプアニューギニアの海底熱水鉱床で鉱量の調査を行った結果が報告された。報告によれば海底下 11 メートルに渡って鉱床が広がっているという。これくらいの厚みが全体に渡ってあれば、十分採掘に値する量だと浦辺教授はいう。また、今回の UMI には内外を含め 15 を超える鉱山開発関連会社の人々が参加していた。海底資源は無視できない状況になりつつある。

一方で活動性の海底熱水鉱床には、貴重な生物が多数発見されている。また日本の EEZ は、大切な漁場が広がる海でもある。日本の海を守り、その生態系を絶やすことなく選鉱、採掘する技術を開発する必要がある。自国の海に責任をもって次の世代へと引き渡していくのは、その国で暮らすものの義務だろう。

2007 年夏、飯笹グループ長らは再び明神礁で調査を行った。2008 年 3 月には同じチームである浦教授らが r2D4 を連れて再びここを訪れる。海は世界とつながり、未来を照らすものであってほしいという願いを胸に。 ■

1. 玉木賢策、浦辺徹郎ら、人と海洋の共生をめざして -150 人のオピニオン III、海洋政策研究財団 (2007)
2. Iizasa, K. *et al. Marine Geology*, v.108, p.39-58 (1992)
3. I. kitahara, *Nature digest*, **2**,22-23(2005)
4. 浦辺徹郎, *Ship & Ocean Newsletter*, **146**, 2-3(2006)
5. 玉木賢策、日本海の形成機構ー新しい背弧海盆拡大モデル、*科学*、11 月号（1992）
6. Usui, A. and Glasby,G.P. *The Island Arc*, **7**, 422-431（1998）
7. Ishibashi, J. and Urabe, T. *Plenum Press, N.Y.* 451-495（1995）
8. K. Iizasa, *et.al. Science*, **283** 975 – 977(1999)
9. Corliss, J. B. *et. a.l. Science* **203**, 1073-1083.(1979)
10. Takai, K. *et. a.l. Geological, Biological, Chemical and Physical Interactions*, 185-213 (2006)
11. Takai, K.*et.al, Paleontological Res.* **10**, 269-282. (2006)
12. Nakagawa S *et.al, Proc Natl Acad Sci U S A.* **104**, 12146-12150 (2007).

©2008 NPG Nature Asia-Pacific