

# Boiling points

## 続々と見つかる熱水噴出孔

Nature Vol.439(905-907)/23 February 2006

著作権等の理由により画像の掲載はできません。

地球のあちこちの海底で、高温の水が噴き出す熱水噴出孔が見つかった。この特異な生態系の探索の現状を、Christina Reed が報告する。

Rachel Haymon は昨年12月、ガラパゴス諸島への航海を前に、ある種の特別な熱水噴出孔が見つかるかについて海洋学者仲間と賭けをした。ガラパゴス諸島付近では、これまでもいくつかの熱水噴出孔（過熱した水が噴き出している海底の亀裂）が見つかった。だが、最も劇的な熱水噴出孔現象の1つであるブラックスモーカーは、この海域では見つかっていなかった。ブラックスモーカーとは、黒っぽい無機物の粒子を含んだ水を噴き出しているチムニー（熱水噴出孔にできる煙突状の柱）のことである。

一部の研究者の説明によると、ガラパゴス諸島付近ではその地質的条件のためにブラックスモーカーが形成されないということだった。しかし、今にして思えばもっと賭けておくべきだったわ、とHaymonはいう。12月14日、彼女の研究チームはガラパゴス諸島付近で初となるブラックスモーカーを発見したのだ。

新発見はあちこちで続いている。ここ数年、海洋学者たちはたくさんの熱水噴出孔を発見した。かつてはわずかな数の熱水噴出孔が点在することが知られていただけだったが、今ではめまじりするほどさまざまなものが見つかった。研究者たちはまだ、こうした発見をどう理解すればよいのかわかっていないが、とりあえずは新たな発見をゆったりと楽しんでいるところだ。

最近発見されたものには、北極地域の冷たい水中で見つかった、最北の地で活発に噴き出している高温のチムニーや、南大西洋で発見されたチムニー、また、観測史上最大のブルーム（水中の火山爆発から放出された熱水の化学物質が形成する流れ）などがある。こうした新発見を通じて海洋学者たちは、今後さらに並外れたものが見つかるかもしれないことを実感しつつある。そしてそうしたすべての熱水噴出孔は、地質学的、化学的、

物理学的、生物学的な違いにより、それぞれが独特なものである。

例えば、北極海の冷たい水の中にある熱水噴出孔からは温かい水が流れ出ている。そこは水深500メートルの場所で、*Gallionella ferruginea*などの鉄酸化細菌が数キロメートルにわたって海底を覆っている。この場所は「*Gallionella*の園」とよばれ、高さ約15センチの鉱化した短いチムニーがたくさん形成されていて、その頂上の多くにはきゃしゃなウミユリ (*Heliogeton glacialis*)がある。そのようすはまるで、スース博士（米国の絵本作家）の挿絵のようだ。

2005年7月、ベルゲン大学（ノルウェー）のRolf Pedersen率いる研究チームがこの場所で調査を行った。「*Gallionella*の園」はモーンズ海嶺に沿って広がっているが、そのモーンズ海嶺では、地球を覆う構造プレートが徐々に離れていっている。いい換えるとそこは、年間約16ミリの速度で「拡大している」ところだ。速度がより速い海

嶺の場合、最大で年間 200 ミリ拡大することもある。彼らはこの場所を調べるため、「バシサウルス (Bathysaurus)」という遠隔操作の潜水機を潜らせた。そして温度センサーを使って調べた結果、ウミユリはチムニーのおかげでだいたい 0.5°C の液体の流れの中にあることがわかった。これは北極海としては温かい。この場所の周囲の水温は、マイナス 0.3°C と測定された。

研究チームはその後、地震が海底を 100 メートル押し上げてきたがけのふもとへ、バシサウルスを送り込んだ。バシサウルスががけのふもとに沿って進んだ結果、一連の熱水マウンド (小山) が見つかった。それぞれの熱水マウンドの頂上には、数個のスモーカーがみられた。そして、ここのスモーカーチムニーから流れ出る液体は、さらにはるかに高温だった。液体は沸騰しており、研究チームは少なくとも 263°C と見積もった。バシサウルスが 260°C まで測定できるセンサーを流れの中に伸ばしてみたが、案の定、センサーは壊れてしまった。

### 新たな技術で

ちょうどこの場所の上方の海面に停留していたとき、研究チームは船のすぐ下に異常を感じていた。「音響測深器が、何かが上がってくるのを記録した」と Pedersen は話す。彼は、海底の熱水噴出孔から漂い上がる栄養分の流れを追ってきた魚を検出したのだろうか、と思ったという。同様の音響信号を海嶺のさらに下方に向けて送った結果、数時間もたたないうちに、今度は「Gallionella の園」からわずか 5 キロメートル離れたところで別の熱水噴出孔フィールドが見つかった。

何年もの間、研究者たちは熱水噴出孔の場所を探し出すために化学物質のブルームを追跡するという、かなり骨の折れる作業をしてきた。だが、その状況は今、音響測深器の登場で一変した。音響測深器は熱水噴出孔の場所を探し出すのに役立つだけでなく、ブルームや、それに伴う魚の群れと思われるものの画像を得るのにも役立つ。「以前にはまったくなかった方法だ」と Pedersen はいう。彼の研究チームは次の夏、魚などの動物や微生物、流体のサンプルを得るためにモンス海嶺にある熱水噴

出孔を再訪する予定だ。そして新しい技術を使って、さらに北のもっと水深の深い場所で熱水噴出孔を探すことにしている。

研究の前線を北方へと押し広げる研究者がいる一方で、南へ向かい、大西洋中央海嶺の南部で熱水噴出孔を見つけ出すという研究者もいる。大西洋中央海嶺は、大西洋の中央部を背骨のように走る水面下の山脈だ。この山脈の北部では、熱水噴出孔フィールドが 20 以上も見ついている。しかし、この海嶺の南部では熱水噴出孔の探索はほとんど行われていない。そこで 2005 年 2 月、英国自然環境研究会議 (NERC) 所属の研究船「チャールズダーウィン号」が、海嶺沿いに 250 キロメートルにわたる海底を調査する 1 か月の調査航海に出た。研究者たちは意気込んで船に乗り込んだ。

この研究チームは南緯 5 度付近で、熱水噴出孔がある可能性のある場所を 2 か所見つけた。2 か所は互いに 1 キロメートル離れた場所にあった。そして、両方の場所で自律的の海底調査船 (ABE) と名づけた水中ロボットを使い、高解像度のソナーで地図を作成した<sup>1</sup>。ある時の ABE の潜行では、ブラックスモーカーのフィールドである可能性のある場所をデジタルカメラで撮影しようと試みた。「ABE を甲板に戻してみると、全体が黒く焼け焦げていた」と、調査航海のリーダーで英国サウサンプトン国立海洋学センターの Chris German は話す。ABE が撮影した映像から、German が「調理場」とよんでいる場所には、新鮮な玄武岩の溶岩流や、小エビやイガイ、カニのようなものが見られることがわかった。

4 月には、ドイツの海洋観測船「メテオール」が同海域の 3 か所を調査した。タートルピットとよばれる場所では、キール大学 (ドイツ) の Karsten Haase 率いるチームが 400°C 近い温度で沸騰する液体を採取した。

このチームの一員でプレーメン国際大学 (ドイツ) に所属する地球化学者 Andrea Koschinsky は、「この温度は大西洋中央海嶺沿いで測定された中で最も高い」という。高温であることは液体がマグマの源の近くで熱せられていることを示し、おそらく最近の上昇流か、火山の爆発由来である可能性が最も高い。「最近の火山活動が

かわったとみられる海底の熱水系への作用は、東太平洋海膨などの高速拡大中心か、中速の拡大中心だけでしか記録されていない。火山活動がまれな低速拡大海嶺では記録がない」と Koschinsky は話す。

このドイツの研究チームは、南緯 9 度 33 分の場所でも別の熱水噴出孔フィールドを見つけた。これは、大西洋中央海嶺でこれまでに見つかったものの中で最南端にある熱水噴出孔フィールドとなる。とても若い、小さなイガイが生態系を支配していることから、研究グループはこのフィールドを「リリパット」(ガリヴァー旅行記に登場する小人国) と名づけた。Koschinsky はこの 4 月に予定している次回のメテオールの調査航海に、さらに高温の熱水噴出孔を探知できるよう改造された ABE を搭載することになっている。

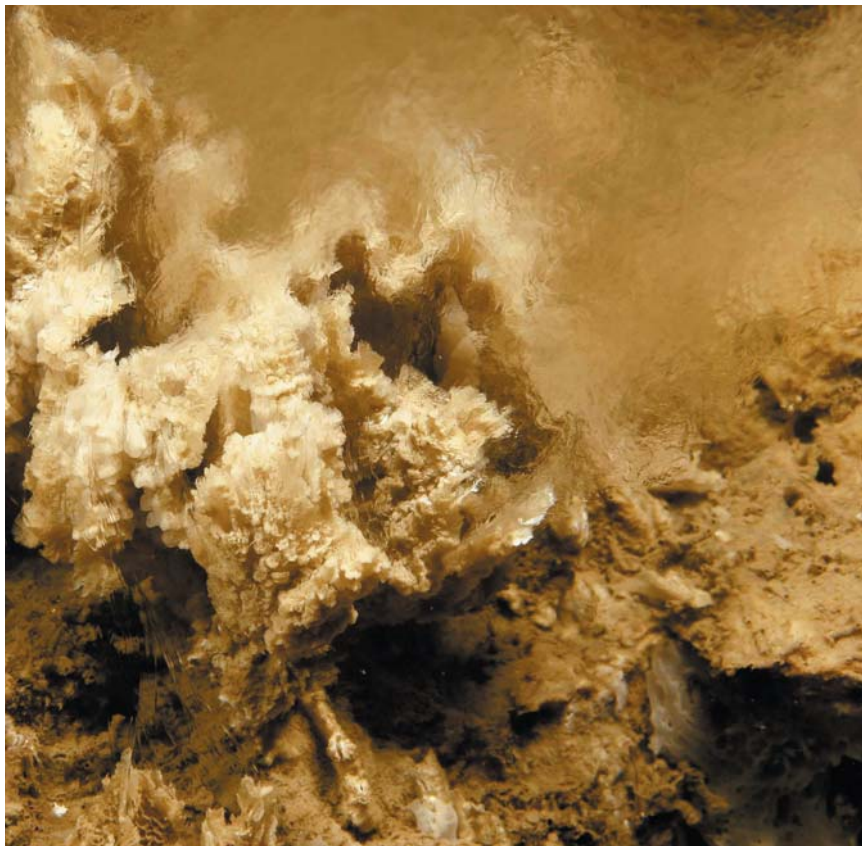
海洋学者たちは、熱水噴出孔の場合はどういうものがありうるのか予測しきれないことを悟りつつある。だから可能なときはいつでも、プレート境界とみられる場所の地図を作るときでさえ、ブルームセンサーを使うのが習慣になった。これには、海洋地質学者の Bramley Murton が 2003 年にインド洋でチャールズダーウィン号に乗船したときの経験が生きている。

### 70 キロメートルに広がる巨大ブルーム

少し楽観的すぎるようにも思えるが、Murton は小型自律性ブルーム記録装置 (MAPR) とよばれる 1 組のセンサーを、低速で拡大しているカールスバーク海嶺の地球化学的調査を行う目的で潜水させた、海底を調べるための装置の引き綱に取り付けた。地質学者たちは、実際に誰



深海の熱水噴出孔の内部や周辺にいる鉄酸化細菌がウミユリにとって絶好の環境を作っている。



ホットスポット:熱水噴出孔から噴き出す無機物と高温の水が海洋生物の命を支えているのかもしれない。

かが見たからというわけではなく、ロシアが1970年に行った海底の地磁気調査でそこに存在するはずだと予測されたからという理由だけで、そこに海嶺が存在するものと考えていた。Murtonの調査では、海底地形の高解像度の美しい映像が得られるソナーの一種「マルチビーム・スワス・バシメトリー」を使い、カールスバーク海嶺の初めての地図作りをもくろんだ。MAPRは、海底の火山爆発からのブルームの手がかりを見つけるため、念のために取り付けられたのだった。

Murtonのチームは何とか海嶺の地図を作り上げた。また研究者たちは、海嶺から引き上げられたガラス質の玄武岩にも興奮したが、いちばん驚かされたのはMAPRの測定結果だった。MAPRのセンサーは、海水に含まれる化学物質から、水中で最近爆発が起きたらしい証拠を検出していた。研究室に戻ってさらに分析した結果、彼らが出くわしたのは熱水ブルームではないことがわかり、その結果は昨年12月にサンフランシスコで開かれた米国地球物理学連

合の学会で発表された。それは「イベントブルーム」で、水中で起きた1回の火山爆発に由来していることを意味していた。

海洋学者たちが熱水噴出孔を見つけ出すのに使っていたほとんどのブルームは、単一のチムニーか熱水噴出孔フィールドに由来している。熱水噴出孔フィールドからの化学シグナルをろうそくの煙に例えるなら、イベントブルームからの化学シグナルは野火から上がる煙だ。さらに驚くべきことに、今回見つかったイベントブルームはこれまでに見つかった中で最も強く大きく、以前に観測されたものの7~20倍も大きいことが判明した。ブルームは海底から1400メートルの高さまで立ちのぼり、幅は1キロメートル、海嶺沿いの70キロメートルにわたって漂っていた。「このようなブルームを形成する熱を作るためには、2000万立方メートルの溶岩が必要だと思われる」とMurtonは話す。それは明らかに、大きな火山爆発によるものだった。

カールスバーク海嶺は、最もゆっくりと拡大する海嶺の1つであることから、お

そらくはあまり活発でない海嶺であり、多くの研究者はここは大きな火山爆発が起こる場所ではなさそうだと考えていた。こうした海嶺では、熱は地下にあるマグマからゆっくりと放出されると考えられている。

こうした海洋科学の新発見は、新しい領域を調査することの重要性を示している。しかもそうした調査には、常に数百万ドルの費用と1か月の深海探検期間が必要なわけではない。科学者たちにとっては、潜水艇のカメラ映像を通してよりも、自身の水中メガネを通して熱水噴出孔を見る機会が増えてきているのだ。

海洋の深さは平均すると約4キロメートルなので、熱水噴出孔の深さが1キロメートル未満であれば「浅い」といわれることが多い。しかし最近の研究でわかってきたように、研究者がスキューバダイビングで目視できるほどの本当に浅い熱水噴出孔は、深海の熱水噴出孔とは極めて異なっている。

### ヒ素汚染をもたらすものも

2004年、研究者たちは、エイヤフィヨルズルというアイスランド北部のフィヨルドで、浅いところにある豊かな熱水噴出孔生態系を発見した。アイスランドジオサーベイ社の地質学者Bjarni Gautasonは「この海域には熱水噴出孔が1つあるだけではなく、一連のチムニーと亀裂が約500メートルにわたって続いている」と説明する。いくつかのチムニーの頂上は、海面からたった14メートルの深さのところにある。すべてのチムニーは真水を噴き出して海水は1%未満しか混じっておらず、水温は77℃に達する。このチムニーは「ここにしかない地形を作り出し、この海域の動物と植物に独特の生息地を提供している」とGautasonは話す。

アイスランドのアクイレイリ大学の生物学者で、Gautasonのチームの一員であるHreiðar Valtýssonは「世界のあちこちにある浅い熱水噴出孔フィールドを知っているが、こんなふうにチムニーを形成しているところはほかには知らない。だから、この場所は極めて特殊な場所なのだと考えている」と話す。

しかし、浅いところにある熱水噴出孔のすべてが訪れたくなるようなものであ

るとは限らない。パプアニューギニアのアンビトル島近くにある熱水噴出孔には、有毒なヒ素が混じった海水を噴出しているものがある。周囲のサンゴ礁には、これらの熱水噴出孔から毎日 1.5 キログラムものヒ素が流れ出ている<sup>2</sup>。

熱水噴出孔の周囲の最大 200 メートルの範囲では、微生物が沈殿物とサンゴを赤と緑のバイオフィームで包んでいる。こうした微生物はヒ素に汚染された環境でも生き延びることができるらしく、海的环境下におけるヒ素の研究や、微生物がどのように生態系内でヒ素を循環させているのかを調べるきっかけになるかもしれない。バングラデシュでは、シルト（砂より小さく、粘土より粗い堆積物）から出たヒ素が水源に入り込み、数百万人がこれを摂取しているかもしれないことが、ここ数年のいくつかの研究で示されている。アンビトル島近くの熱水噴出孔は、このような問題にどう取り組めばいいのか、その手がかりを与えてくれる可能性もある。

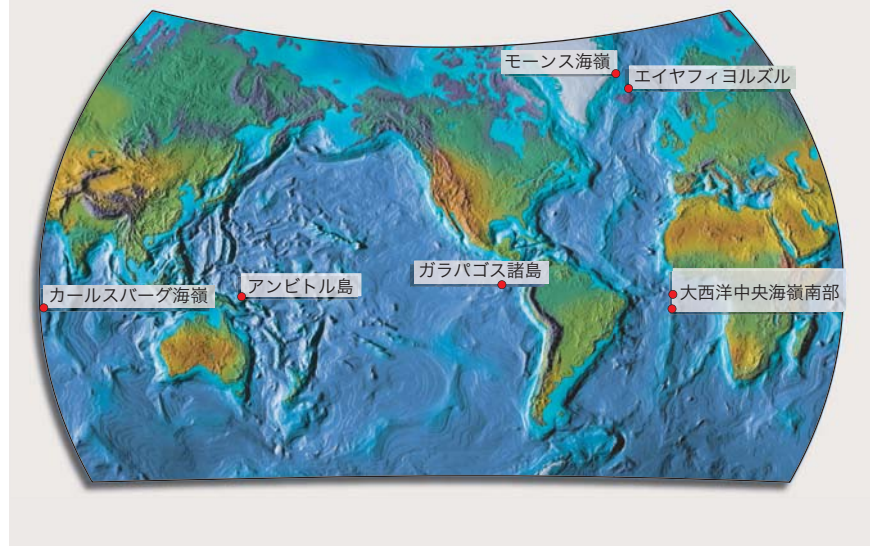
バングラデシュでは微生物の活動により、沈殿物中のヒ素 (V) 化合物が水に溶けやすいヒ素 (III) 化合物に変化している。ヒ素 (III) 化合物は、地下水に染み込んで飲料水を汚染する。ワシントン大学（ミズーリ州セントルイス）の微生物地球化学者 Jan Amend は、その逆の化学反応、すなわち、ヒ素 (III) 化合物を酸化して溶けにくいヒ素 (V) 化合物に戻す反応を微生物がどうやって触媒するのかを解明するのに、彼の研究チームが行ったアンビトル島近くの熱水噴出孔での研究が役立つはずだと考えている。「ヒ素循環のこの部分は、十分に注目されてきたとはいえない」と Amend は話す。

それには熱も重要なかわりがあるかもしれない。イタリア沖合にある火山島の熱水系を研究している地球化学者たちは、水温が高い場合に、そうした熱水系から供給される地下水のヒ素濃度が高くなる可能性があることを示している<sup>3</sup>。

### ブルームを住みかに

熱水噴出孔の温度とそこに沈殿する鉱物に、付近の地質学的条件がどう影響するかについてはまだはっきりしていない点が多い。

## 最近の熱水噴出孔探査地



Haymon が最近調査した、拡大しているガラパゴス海嶺はそうした例の 1 つだ。地球の奥深くから上昇してくるマグマのホットスポットがガラパゴス諸島を形成し、そしてそれは今も形成され続けている。このホットスポットから放出されるマグマの量と熱の量が、この地域の厚く、また、もしかすると柔らかいかもかもしれない地殻を形成していて、だから低温の熱水噴出孔しか存在しないのかもしれない。そして、これまでの調査でわかったことはこれがすべてだ。

しかし、ガラパゴス諸島の北に広がる海嶺では熱いマグマが海底近くに横たわり、ブラックスモーカーを形成するのに必要な高温の水の流れが集中しているはずだと Haymon は考えている。熱水噴出孔を探してこの領域を調査した者はまだいない。

Haymon らのチームは、ガラパゴス諸島で初めて見つかったスモーカーチムニーに、熱帯の花の名をとってプルメリアと名づけた<sup>4</sup>。そして、その発見の数時間後には、12 ~ 14 メートルの高さのブラックスモーカーが 6 つ集まっているのを発見した。これらは、ガラパゴス諸島で最も有名な海の爬虫類の名前からイグアナと名づけられた。2 週間後には、さらに多くのブラックスモーカーがたまっている別の 2 か所も見つかった。

こうした発見により、ガラパゴス諸島周辺のチムニー群は、諸島のものがそうであるように、独特の動物種の住みかである

可能性が出てきた。チムニー群は、熱水噴出孔が作る特別の環境を利用する動物にとっては「道路」のようなものなのかもしれない。チムニーからチムニーへ、中央海嶺を上へ下へとブルームの中を幼生たちが漂っているからだ。「動物を見ました。でもそれが新種だったかどうかは外見からはわからなかった」と Haymon は話す。これは、さらなる調査、生物の採集、遺伝子の分析を経て初めてわかることだろう。

ガラパゴス諸島は、チャールズ・ダーウィンの進化に関する仮説にヒントを与えた場所だ。そして今ここが最新の水中ミステリーの焦点になっているとは、いかにもこの場所にふさわしいことにも思える。だが、Haymon は特に驚いてはいない。「海の大きさ、それにあらゆるものが海に隠れていることを考えれば、海に存在するものについて私たちはまだ本当に知り始めたばかりなのです。海にはまだまだ多くの驚きが残っていると確信しています」と彼女は話した。

Christina Reed は、ワシントン州シアトルを拠点とするフリーランスのサイエンライター。

1. Clarke, T. *Nature* **421**, 468-470 (2003).
2. Price, R. E. & Pliker, T. *Chem. Geol.* **224**, 122-135 (2005).
3. Aiuppa, A. et al. *Chem. Geol.* doi:10.1016/j.chemgeo.2005.11.004 (2006).
4. Haymon, R. M. <http://www.oceanexplorer.noaa.gov/explorations/05galapagos/logs/dec14/dec14.html> (2005).