深海 ― 死と再生のハーモニー

Death and rebirth in the deep

JANE QIU 2010年5月20日号 Vol. 465 (284-286)

海底火山の噴火は、そこに暮らす生命に壊滅的なダメージを与える。

だが、時としてその「死の世界」は、新しい生命を生み出す「再生」の舞台となる。

ラトガース大学（米国ニュージャージー州ニューブランズウィック）の海洋生物学者 Richard Lutz たちが、その「ブリザード」に遭遇したのは、水深 2500 メートルの深海だった。時は 1991 年 4 月、場所はメキシコのアカブルコから 900 キロメートル沖。海底山脈がぱっくりと裂けて 1200 度の溶岩が水温 2 度の海水中へ流れ出していた。まさに黙示録の世界が、そこに広がっていた。

研究チームは、潜水艇の位置を火山活動から安全な距離に保って観察していた。すると突然、微生物の破片からなる「スノー」が吹雪のように辺りに流れてきた。噴火場所に生息していた生物群集が壊滅的な被害を受けたのだ。この区域にある熱水噴出孔の開口部付近には細菌が繁殖し、海底から吐き出される硫化水素などの化学物質からエネルギーを取り出して、イガイ類をはじめとする二枚貝やカニ類、チューブワーム（ハオリムシ）の大群といった多様な生物からなる生態系に栄養分を与えていた。これら

のほぼすべてが、噴火によって被害を受けたのである。

しかし自然は、永久に生命を消し去ったのではなかった。ただリセットボタンを押しただけだった。そして幸運にも Lutz たちは、この東太平洋海膨、北緯 9 度 50 分の地点で、生物が海底火山噴出孔へ戻ってくるようすを観察できる機会に恵まれたのだ。研究チームはモニター機器を設置し、「死から再生へのドラマ」を記録した。やがて、調査開始から 15 年が過ぎ、自然は再び「実験」を行った。2006 年、研究チームが「Nine North」とよぶこの調査場所で、また噴火が起こったのである。

「ここは、深海で 1 回の完結した噴火サイクルが観察された唯一の場所です」と、Nine North で調査研究をしているウッズホール海洋研究所（WHOI；米国マサチューセッツ州）の生態学者、Lauren Mullineaux は話す。研究者たちは、Nine North のおかげで、熱水噴出孔に最初に戻ってくる生物種がわか

り、続いてどんどん再生する生物の「帰還パレード」を見物することができた。そして、前回の噴火から 4 年経った現在、もっと難しい疑問 ― これらの生物がどこからやってくるのか、どのように旅をするのか、こうした生物の個体群は時間経過につれてどう変化していくのか ― が解明されようとしている。

いや、それ以上に大きな課題を解決できるかもしれない。モントレー湾水族館研究所（米国カリフォルニア州モスランディング）の分子生態学者、Robert Vrijenhoek はいう。「生息環境の急転を通して、種分化と遺伝的多様性の一翼を担う進化圧を知ることができるのです」。研究者たちは、世界各地の深海底にさらに多くの熱水噴出孔を見つけ出し、起伏の激しい地形によって隔てられたり、距離的に遠く離れたりして散在する「生命の小島」の複雑な相互関連性を解明しようとしている。こうした場所では、無機物を吹き出す熱水噴出孔や圧倒されるような高低差のある海底山脈や溪谷を伴うな

ど、似たような地質学的特徴がみられるが、だからといって同じ生物種を共有しているとは限らない。研究者たちは、現在、その理由の解明に取りかかっている。

急速な遷移

Nine North という実験室から得られた最初の手がかりにより、急速に再生・再構築される生物群集のようすが明らかになった、と話すのは、Lutz と共同研究をする WHOI の海洋生物学者 Timothy Shank である（20 ページ図「熱水噴出孔の生物サイクル」を参照）。1991 年の海底火山噴火の直後、周囲には微生物の「スノー」が降り積もった。最初にそこに戻ってきたのは、牧草地のような微生物のマットをむしり食べる、エビやカニ、魚類などである。それらの中には熱水噴出孔起源のものも、そうでないものもいた。そして噴火後 1 年以内に、チューブワームが戻ってきた。最初にやってきたチューブワームの一種、*Tevnia jerichonana* は、硫化物濃度の高い場所に繁茂した。さらに 1 年経ち、硫化物濃度が下がると、ジャイアントチューブワーム（*Riftia pachyptila*）が取って代わって繁茂した。

最大 2 メートルもある長く丈夫なチューブをもつジャイアントチューブワームは、数千個体にもなって、ほかの生物が生息できる豊かな環境を作り出す。やがて、そこに巻貝やさらに多くのカニ類、エビ類の大群がやってきた¹。それは、今まで語られたことのない生物の移り変わりの物語だった。しかし、この熱水噴出孔を^{りようが}凌駕する生物たちが、同じ地域内からやってきたのか、それともはるか遠くからやってきたのかは不明だった。Shank によれば、この地域の生物種構成が噴火によって変化したのかどうかはわからないのだという。なぜなら、この領域についてそれまで詳細に調べられたことがなかったからだ。

そこで、海洋動物の幼生の専門家である Mullineaux の出番となった。熱水噴出孔のさまざまな生物は、成体になると

海底やほかの生物にしっかり張り付いて生息する。しかし大半の幼生は発育初期の段階には自由に遊泳し、海流に乗って新しい別のすみかへ移動することができる。Mullineaux のチームは、1991 年の噴火以来ずっと Nine North で動物の幼生を調べており、さまざまな水深や海底で幼生を採集して、大まかな個体数や種の構成を把握してきた。

Mullineaux たちが 2010 年に発表した論文によれば²、Nine North の熱水噴出孔での幼生の種構成は、2006 年の噴火後に著しく変化した。噴火前にこの場所によく見られた種の幼生は、噴火以降まるで見当たらなくなった。再び棲み着く個体の供給源となりそうな生物群が、数キロメートル以内にあったにもかかわらずである。対照的に、それまでまれだった別の種が、噴火による壊滅的状況の後に豊富に見られるようになった。

ウッズホール研究所のチームは、Nine North で噴火以前にはまるで見られなかった、岩にしがみついた *Ctenopelta porifera* という巻貝の幼生も見つけた。この種が生息することが知られる最も近い熱水系は、ここから 300 キロメートル以上北にある。「熱水噴出孔に棲む幼生の移動距離は、我々の予想を大きく超えていました」と Mullineaux は話す。

Mullineaux のチームは 2001 年、寿命およそ 1 か月の幼生は、Nine North から最大 100 キロメートル先まで移動

できるが、大部分の幼生は 60 キロメートル以内の範囲に落ち着いただろうと予測した³。幼生はたとえそれ以上長生きしたとしても、さらに遠くまで移動することはできなかったと思われる。というのも、その地域の海流は数週間ごとに海嶺の軸方向に沿って逆転しており、幼生の移動できる距離が制限されているからである。しかし、*C. porifera* がどうやって 300 キロメートルもの旅をしたのかは依然として謎に包まれていた。

複雑な流れ

研究チームは、海嶺の頂上部にある単一箇所での海流の測定値をもとに流量を算出し、海流の方向と速度はその場所全域で同じであると推測した。コロンビア大学ラモント・ドハティ地球観測所（米国ニューヨーク州パリセーズ）の海洋物理学者 Andreas Thurnherr は、「これは、海洋の多くの部分に当てはまる妥当な予想です。しかし Nine North では、地形によって海流の流れはかなり崩れてしまうのです」と話す。

そこで Thurnherr や Mullineaux たちは、海水の流れをもっと高精度で算出しようと、海嶺の頂上部に沿った箇所と両側面に 15 個の海流測定装置を設置した。また、海底と海嶺頂上部の間を行き来して、進みながらサンプリングする可動式の海流メーターを 2 台設置した。観測の結果、海嶺頂上に近づくにつれ海流が速くなり、海嶺の東側面の海流は南方向に流れているが、西側面の海流は北方向に流れていることを見つけた。

ところが意外なことに、最も海流の流れが強かったのは、海底に近いところで、秒速約 10 センチメートルであることがわかった⁴。これには研究チームも驚いた。「深海ではたいいもつと弱くて幅広い流れがみられます。つまり、我々の観測結果は著しく異なっていたのです」と Thurnherr はいう。これによって、*C. porifera* の幼生がどうやってこんなに遠くまで移動できたかも、説明できるかもしれない。

2009 年に撮影された海底火山噴火。

さらに、当時、Mullineaux の指導を受けていた大学院生の Diane Adams は、もう 1 つ意外な発見をした。水面渦（ここでは、海水密度の差異が地球の自転と相互作用して生じる渦のこと）が上を通過したときはいつでも、Nine North の幼生の個体数が減少していたのである。

研究チームは、水面渦が海洋底にまで達するとは思っていなかったが、水面渦の通過後まもなく、回転水流の痕跡を拾い上げることができた。「実際のところ、水面渦は幼生を海嶺から押し流して、幼生の分散に重要な役割を果たしている可能性があります」と Mullineaux は話す。

このような地質学上の特性と海流との相互作用には、化学合成生物の研究者たちも数十年前から関心をもってきた。「これは、自然災害後の生物再定着だけでなく、進化の過程での海洋生物どうしの結びつきにとっても重要です」と、マイアミ大学（米国フロリダ州）の海洋生物学者 Robert Cowen は話す。

研究者たちが知っていたがっていることはいろいろある。海底では生物の生存が可

能な化学物質が供給される場所は距離を置いて点在しているのに、なぜ、棲み着いている生物種は独特だが重複しているのだろうか。これらの生物種はどこからやってきたのだろうか。これらが最初に現れるのは熱水噴出孔なのか、それともひょっとして、硫化水素やメタンなどの炭化水素が地球内部から漏れ出す浅海冷水湧出域なのだろうか。また、クジラ死骸から出る硫化物含有^{しんしゅつ}滲出物に頼って生活しているような生物群（鯨骨生物群集）は、化学合成生物群集^{けいごうせいぶつぐんしゅう}どうしの結びつきにどういった関与をしているのだろうか。

こうした海洋生物種の進化上の分岐や^{しゅうれん}収斂を考えるうえでカギとなるのは、海流や地質学的制約、そして数百万年にわたる海洋底の地形変化をうまく切り抜ける幼生の能力である。これだけの時間があれば、少数の幼生が移動するだけで、地理的に隔たった個体群の間で遺伝子交換は十分に可能である。「こうした結びつきの規模は驚くほど大きくなりうるのです」と、ペンシルベニア州立大学（米国ユニバーシティーパーク）の海洋生物学者 Charles Fisher は話す。

深海の長距離タクシー

例えば Fisher の研究チームは、メキシコ湾の冷水湧出域に生息する一部のチューブワーム種やイガイ種が、ナイジェリアの西岸沖に生息する同類種と遺伝的類縁関係があることを見つけている。これは、1 万キロメートル以上も離れた 2 つの地域の間で遺伝子交換があったことを意味する⁵。こうした結びつきは、未知のいくつかの段階を経て、何世代もかけて生じる。しかし研究者たちは、大西洋では赤道域深海のジェットとよばれる海流が生物群集間の結びつきに寄与しているのではないかと考えている。ジェットは、水深によって東へ流れたり西に流れたりしているため、幼生を東西両方向へ輸送できると考えられるからだ。

一方、かなり短い距離でも幼生の分散が遮断されている場合もあり、それが種分化につながっている。太平洋北東域では、長さ 450 キロメートルにわたるブランコ・トランスフォーム断層が、米国ワシントン州沖のファンデフカ海嶺系とオレゴン州沖のゴルダ海嶺系を切り離している（次ページ図「不思議な深海域」

を参照)。Vrijenhoek の研究チームは、ファンデフカ海嶺とゴルダ海嶺に生息する同じ外見の巻貝が、類縁関係はあるが、およそ 1100 万年前に分岐した全く別の種であり、この分岐年代が断層形成の時期と一致することを見いだした⁶。

しかし Vrijenhoek によれば、「こうした地理的制約がすべての動物に全く同じように作用したわけではない」のだという。例えば、断層の両端に棲むチューブワームは、遺伝学的にみて多少の違いはあるものの同一種である⁷。遺伝子の伝播は、この地域の海流と同じ方向である、北側から南側の個体群へと起こっている。「おそらくチューブワームの幼生は、十分長い寿命をもっているか、もしくは吹き出す海水柱の適切な箇所にとどまっているために長距離ジャンプができるのでしょう」と彼はいう。

そのほかの場所でも、地質学的変化が同様に種の分離を生じた可能性がある。例えば、カリブ海の真東に位置するロガチェフ熱水噴出孔は、太平洋でよく見られるオトヒメハマグリ科の貝が、大西洋中央海嶺の中で唯一生息することが知られる場所である。これらの貝は太平洋起源であり、500 万年前にパナマ地峡が隆起する前に、南北アメリカ間にあった「海の通路」を通り抜けて到来したのではないかと、一部の研究者はみている。

一方、デューク大学海洋研究所（米国ノースカロライナ州ビューフォート）の深海生物学者 Cindy Van Dover をはじめとするほかの海洋生物学者たちは、これらの貝はおそらく、現在考えられているよりも大西洋中央海嶺に広く生息しており、太平洋からきたものとは限らないと主張している。「我々はまだ、はっきりわかるほど十分な試料を入手していないだけなのです」。この言葉は、比較的歴史の浅いこの研究分野の限界をよく表現している。今のところ化学合成生物の分布に関しては、基礎的知識しか得られておらず、ましてや、群集の結びつきと種分化の基盤となる機構の解明など、ほど遠い話である⁸。

これまでのところ、世界中で見つかった熱水噴出孔はわずか 200 か所ほど、冷水湧出域は 20 ～ 30 か所しかない。「海洋の大部分は未調査なのです」と、英国立海洋学センター（サウサンプトン）の海洋生物学者 Paul Tyler。彼は、海洋の生物多様性を記録する世界的取り組みである海洋生物調査（Census of Marine Life; CoML）の「Biogeography of Deep-Water Chemosynthetic Ecosystems (ChEss; 深海化学合成生物生態系の生物地理学)」プログラムのリーダーを務めており、「プロジェクトの調査地点の中には、進化がどのように起こったかを解くための失われたパズルピースになるものがあります」と語る。しかし、そうした場所には北極海や南極海も含まれ、厚い氷や荒れ狂う海のために探索が非常に困難になっている。

そのほか、チリのトリプルジャンクションも調査地点となっている。ここでは、南米プレート、ナスカプレート、南極プレートの 3 つのテクトニック・プレートが 1 点で接しており、中央海嶺の 1 つであるチリ海嶺が南米プレート下へ沈み込んでいる。「この場所では、熱水噴出孔と冷水湧出域が非常に接近する可能性があります。そのおかげで、地理的な変数を導入しなくても、熱水噴出孔の動物と冷水湧出域の動物の進化上の類縁関係の解明に取り組むことができます」と Tyler は話す。

未知の大物

カリブ海、なかでもグランドケイマン島近くの探査の進んでいない中央ケイマン海膨は、深海生物学で最もやっかいな疑問のいくつかを解くうえでカギとなるかもしれない。この領域の水深ほぼ 5000 メートルにある熱水噴出孔は、未踏の極限環境にあるはずであり、新種の生物が見つかる可能性がある。またここは、熱水噴出孔の生物種の分岐や結びつきへのパナマ地峡の関与を調べることにうってつけの場所である。

中央ケイマン海膨の動物相は、パナマ

地峡を挟んで反対側にある東太平洋海膨の動物相により近いのだろうか、それとも大西洋中央海嶺の動物群に近いのだろうか。WHOI の海洋地球科学者で ChEss プログラムの副リーダーである Chris German が率いた、2009 年 10 月の調査では、中央ケイマン海膨近くの熱水ブリュームのシグナルが検出された。続いて英国立海洋学センターが行った追跡調査では、それまでの記録で最深の水深 5000 メートルにある複数の熱水噴出孔が見つかった。そこでの発見に関して、調査チームはほとんど何も公表していないようだが、それにもかかわらず German は驚くような結果を期待している。「2、3 年前には、地理的な制約や海流に関してはすべてわかっており、これから何が見つかるかも予測できると考えていました。しかし、我々はそれ以降今までずっと勘違いしていたのです」。

(翻訳：船田晶子)

Jane Qiu は、北京在住の Nature のライター。

- Shank, T. M. et al. *Deep Sea Res.* **45**, 465–515 (1998).
- Mullineaux, L. S., Adams, D. K., Mills, S. W. & Beaulieu, S. E. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **107**, 7829–7834 (2010).
- Marsh, A. G., Mullineaux, L. S., Young, C. M. & Manahan, D. T. *Nature* **411**, 77–80 (2001).
- McGillicuddy, D. J., Lavelle, J. W., Thurnherr, A. M., Kosnyrev, V. K. & Mullineaux, L. S. *Deep-Sea Res.* **1** (in the press).
- Cordes, E. E. et al. *Deep Sea Res.* **54**, 637–653 (2007).
- Johnson, S. B., Young, C. R., Jones, W. J., Warren, A. & Vrijenhoek, R. C. *Biol. Bull.* **210**, 140–157 (2006).
- Young, C. R., Fujio, S. & Vrijenhoek, R. C. *Mol. Ecol.* **17**, 1718–1731 (2008).
- Van Dover, C., German, C. R., Speer, K. G., Parson, L. P. & Vrijenhoek, R. C. *Science* **295**, 1253–1257 (2002).