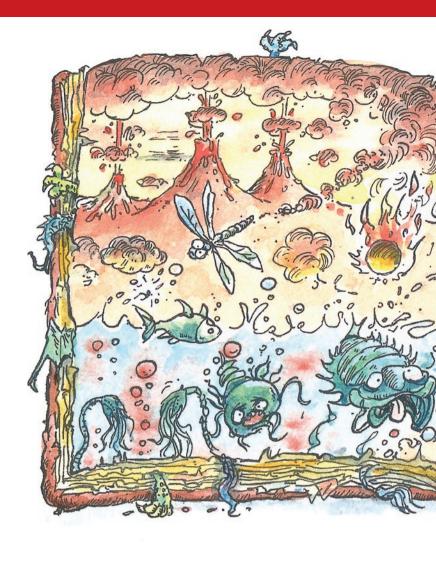
Reading the book of death

千古の「死の書」を ひも解く

Nature Vol.448 (122-125) / 12 July 2007

地球史上にかつて起こった生物大量絶滅の研究では、 大量殺りくの範囲だけに目が向けられがちである。 しかし、絶滅した種と生き延びた種の違いはわずか であり、そうした違いが運命を決めたらしいことが わかってきた。Nick Lane が報告する。



約2億5100万年前のペルム紀(二畳紀)末(P/T境界という)に起こった生物大量絶滅は、地球の歴史の中で最も興味深い大量殺りくミステリーだ。単純にいえば、未知の1人もしくは複数の犯人が、当時生きていたすべての生物種のうち最大96パーセントを絶滅に追いやったのである。古生物学者と地球システム学者は、彗星や小惑星の衝突、オゾン層の崩壊、一連の大規模な火山噴火、硫黄を含んだガスで泡立つ海水など、可能性のあるさまざまな容疑者を提案してきた。

彗星や小惑星の衝突という説を擁護する研究者もいるが、大多数の研究者はこれらの説の証拠が大雑把で決定的でないものと見なしており、そうなると、容疑者の中で最も激しく劇的なのは火山活動である。つまり、シベリアトラップ(シベリア玄武岩台地)を形成した連続的な火山噴火である。これらの噴火の規模は

桁外れに大きく、約300万立方キロメートルの玄武岩が地表に流れ出し、その主たる溶岩流は、数十万年のずれはあるかもしれないがペルム紀末の大量絶滅とほぼ同時に起こった。火山から噴出したガスと灰の巨大な雲は、まさに巨大な大砲から立ち上る煙のようだっただろう¹。

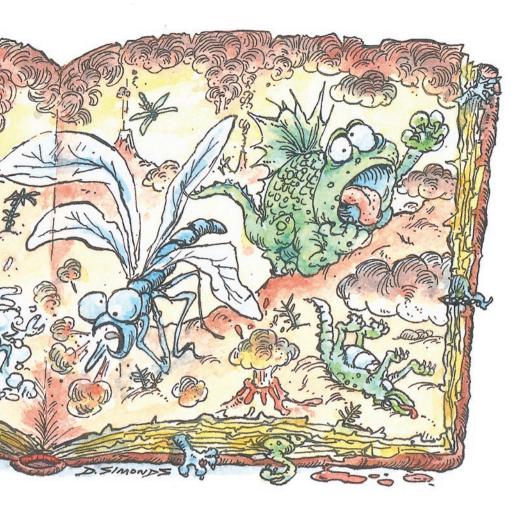
しかし、噴出した玄武岩が大規模な絶滅の原因となったことが濃厚だとしても、実際にどのようにして生物たちに被害を与えたのだろうか。小さな大陸に相当する規模の新しい地形が火に包まれて誕生した場合、空の明るさから海の化学的性質まであらゆることが変わるだろう。科学者たちは、こうした影響のどれが生物にとって不都合でどれが致死的だったかを、どうすれば解明できるだろうか。

それを探る方法の1つは、噴火した火山やその犠牲となった生物ではなく、生き残った生物を研究することだ。死亡率

が96パーセントと聞くと、かなり無差別な大量殺りくだったように思える。しかし最近、死に絶えた生物と生き延びた生物との生理学的な比較が行われ、興味深いパターンが明らかになった²。こうしたパターンは、大量絶滅が実際にどのように起こったかについての手がかりを与えてくれるだけではない。生き残った生物が引き継いだその後の地球史を、ペルム紀末の大量絶滅がどのように形作ったのかも明らかにしてくれる。

最近まで、絶滅の原因として最も人気の高い「殺りくメカニズム」はおそらく地球温暖化だった³。そのシナリオによれば、火山から出た二酸化炭素が気温を上昇させ、それによって、海底に蓄積されていた大量のメタンハイドレート(水分子が作るかご状構造の中にメタン分子を閉じ込めた化合物)が不安定になって気化し、そのメタンがさらに気温を押し

18 | November 2007 | volume 4 NATURE DIGEST 日本語編集版 ©2007 NPG Nature Asia-Pacific



上げた。しかし、ペルム紀末に地球全体の気温が6℃も上昇したことはまず間違いないものの、このシナリオにはいくつかの問題がある。

ペルム紀末に絶滅した生物の中には植 物も多数含まれていた。気温上昇がど のようにして動物たちを死に追いやった かに関しては、もっともらしい説明がい くつかある。例えば、気温が上昇する と動物は代謝率を上げざるを得なくな り、もともと満足に得られなかったカロ リー摂取量をさらに増やす必要があった だろう。しかし、気温上昇が植物に被害 を与えるという明らかな理由は見当たら ない。そのうえ、生き残った植物の生理 機能はこのシナリオに合っていない。も ともと代謝率が高かったとみられる動物 は、代謝率の低い動物ほどの被害を受け なかった。気温が上昇した場合、ほかの 点が同じであれば、体内で発生する熱の もともと多い動物のほうが不利だと考え るのが自然だ。

可能性のあるもう1つの「殺りくメカ ニズム」は、オゾン層の減少だ。大量絶 滅のあった時期の地層には突然変異を起 こした花粉や胞子が含まれており、オゾ ンの減少によって紫外線量が増加したこ とを物語っている。英国のシェフィール ド大学の植物生理学者 David Beerling は、古気候の研究に専念している。彼 が、オゾン層減少が原因である可能性に 気づいたのは、2000年にアイスランド のヘクラ火山が爆発した際、上空に立ち のぼったプルームを通過したNASAの航 空機による観測で、かなりの量の塩酸が 成層圏に直接注入されたことがわかった ときだという。Beerling らシェフィール ド大学と英国のケンブリッジ大学の研究 者によるシミュレーションから、シベリ アトラップを形成した噴火活動は北半球 のオゾンを 70 パーセントも減らした可能性があることがわかった。これは環境変化による深刻な被害をもたらすのに十分な値である 4 。

にもかかわらず、Beerlingは、オゾン層の崩壊が大量絶滅の原因だとは考えていない。「陸上には動物たちが隠れる場所がたくさんあるし、海では最も大きな被害を受ける水深や海域から簡単に逃げられただろう」と彼は話す。さらに、地球全体の気温上昇と同じように、紫外線量の増加も生物の生き残りパターンに合っていないようにみえる。深海で暮らしていたからといって生き延びるのに有利だったわけではないらしい。

しかし、代謝率の高い生物によくみられる効率のよい呼吸方法は有利に働いたらしい。海中では、巻貝や二枚貝、カニ、魚など、えらや能動的な体内循環機構をもつ動物は、定着性のろ過摂食動物よりもうまくやっていた。陸上でも同じようなパターンがみられ、ペルム紀以前の時代の象徴的存在である巨大なトンボのように、呼吸器系に空気を送り込む仕組みがあまり発達していない動物群は、大きな被害を受けた。こうした有利・不利のパターンから、絶滅をもたらした原因をめぐっては、過酷な太陽光よりも空気の汚染に関心が集まっている。

酸素の欠乏

考えられる1つの要因は、世界的な酸素の欠乏だ。現在の大気中酸素濃度は21パーセントで、これは地質年代を通じてほぼ一定だったと考えられていた。しかし、1980年代後半にエール大学(コネチカット州ニューヘブン)のRobert Bernerが、ペルム紀の前の石炭紀にあたる3億年前には酸素濃度は30パーセントかそれ以上に達していたが、ペルム紀後期とその後の三畳紀初期にはわずか13パーセントにまで激しく落ち込んだと主張し、学界に衝撃を与えた。この時期に関するBernerのモデルは、少し改良した後に広く受け入れられた。

Berner は、酸素減少の原因は、シベリアトラップを形成した火山活動の800

万年ほど前にあった別の大規模な火山活 動だとしている。この火山活動が地球温 暖化を引き起こし、気候を乾燥させ、当 時の石炭湿地の一部を干上がらせたはず だと彼は主張する。こうした湿地は有機 炭素を地中に埋める働きをし、埋設され た炭素は呼吸作用によって再び二酸化炭 素として大気中に放出されることはな く、そのせいで酸素濃度は高くなった。 湿地が干上がると、このように地中に埋 められる有機炭素は少なくなり、呼吸に よって二酸化炭素となって大気中に戻る 炭素が増え、この過程で酸素が消費され た。数百万年にわたって炭素埋設のペー スが落ちたために、酸素濃度は先例のな いほど低くなった⁵。

Bernerのいう酸素濃度の減少によって、多くの陸上動物は活動できる地理的範囲が制限されただろう⁶。ほとんどの動物には生息地の高度限界があり、それより高い高度では支障なく暮らすことができない(ヒトの場合は高度5100メートル)。ペルム紀後半に酸素濃度が下がったとき、生物の高度限界も下がり、生息域は低い高度に限定された。ワシントン大学(同州シアトル)の古生物学者Peter Wardによると、酸素濃度が高い環境で進化した生物にとっては、高さわずか数百メートルの小さな丘でも、酸素濃度の低下した環境では乗り越えることができない障壁になったかもしれないという。

海の中でも、生物が生息できる領域は酸素濃度が下がると小さくなっただろう。酸素が水に溶ける量は、冷たい水よりも温かい水のほうが少ないので、地球温暖化は事態を悪化させたはずだ。同じような影響は現在の地球でもみられる。今年1月、北海の魚の数の調査から、気温上昇で酸素の供給量が少なくなると、ゲンゲ科魚類の一種の数が減り、個体のサイズも小さくなることが明らかになった7。

英国のプリマス大学の古生物学者 Richard Twitchettは、似たようなことがペルム紀にも起こったと考えている。彼の説の根拠は、ペルム紀末に消えたが数百万年の空白を経て再び現れたようにみえる、「ラザロ分類群」(ラザロはキリ

ストによって生き返った男)とよばれる生物種だ。三畳紀中期に見つかる腹足類 (巻貝など) のうち、なんと70パーセントもの種がこのようにしてよみがえったものらしい。Twitchettは、個体数があまりに少なくなったので、たまたま化石記録が見つからず、空白期間になって酸素度が回復し始めるまで、状況は腹足類にとって好転しなかったのである®。そして、こうした腹足類が再び出現したとき、体は以前よりも小さくなっていた。彼らはラザロであるだけでなく、リリパット (小人国) の住人にもなっていたのだ。

しかし、これらすべてをもってして も、大量絶滅を完全に酸素欠乏のせいに することはむずかしい。生理学的な視点 からみれば、低酸素状況を生き延びる可 能性の最も高い種は代謝率が低い種と考 えられる。定着性のろ過摂食動物はその 条件を満たすが、彼らのたどった運命は 悲惨なものだった。そしてタイミングの 問題もある。有機物が地中に埋められる 速度は数百万年かけて変化し、それを反 映して大気中の酸素濃度の変化はゆっく り進んだ。対照的に、化石が保存された 地層を詳細に分析すると、絶滅は急激で ほとんどの種は数万年で消えたことがわ かる⁹。ハーバード大学(マサチューセッ ツ州ボストン)の古生物学者Andrew Knollは、「変化が数百万年かかって起 こるゆっくりしたものなら、生物はそれ に適応するだろうと私は思う。しかし、 もしも変化が1万年で起こったら、環境 が生物を打ちのめしたことは間違いな い」と話す。

炭素という殺し屋

酸素濃度の低下が生物を危険な状況に追いやったことは間違いないが、限界を超えさせたものは何か別のものだった。容疑者の有力な手がかりの1つは、世界中の地層で見つかる炭素同位体比の一連の異常な変化で、大量絶滅の時期とほぼぴったりと一致する。

炭素同位体比の一連のスパイク(一時 的な急上昇)は、この当時の炭素循環に

奇妙なことが起こっていたことを物語っ ている。この異常(重い炭素13に対する 軽い炭素12の比率の突然の急上昇)は あまりに大きく、バイオマス(生物体量 ともいい、炭素12に富む傾向がある)の 総量の変化では説明できない。最も妥当 な説明は、メタンの噴出だろう。しかし、 海底に蓄積されたメタンハイドレートで は、この現象を説明できないだろう。ペ ルム紀後期から三畳紀初期にかけての記 録には5つのスパイクが見つかる。ハー バード大学のJonathan Payneらによる と、こうしたスパイクのうち1つは、海底 に蓄積されたメタンハイドレートの噴出で 説明できるかもしれないが、メタンハイ ドレートの補充は一連のスパイクを説明で きるほど速くは行われなかっただろう¹⁰。

オレゴン大学(同州ユージーン)の Greg Retallackは、異なる炭素12供給源を指摘している。シベリアトラップ形成時でも、それより前の火山活動でも、溶岩が炭酸塩岩と炭田を通過して地表に達した。きょう炭層(石炭を含む地層)を通過する熱い溶岩は重質炭化水素の一部をメタンに分解し、この熱生成メタンは同位体的には海底のメタンほど軽くないが、同位体比のスパイクを説明するには十分なほど軽い¹¹。

酸素濃度の低下がすでに動物たちの生命を脅かしていたとき、大量のメタンが大気に注入され酸化して一酸化炭素や二酸化炭素が生成し、そのため酸素が欠乏して動物たちの命が奪われたのかもしれない。植物についていえば、条件が最も悪かったのは湿地の植物だったと

著作権等の理由により画像を 掲載することができません。

絶滅の犠牲者:ほ乳類に似た爬虫類、Dinogorgon rubidgei。

20 November 2007 volume 4 NATURE DIGEST 日本語編集版 ©2007 NPG Nature Asia-Pacific

Retallackは指摘する。湿地は酸素濃度がもともと低いため、湿地の植物の根が窒息したのだという。

高濃度の二酸化炭素に対処する必要性 は、生き残った生物の分子レベルの微細 な機構も含めた生理機能のさまざまな側 面の説明となるかもしれない。Knollは、 イカに似たアンモナイト類(絶滅した種 類)と、らせん状の貝殻をもつ現在のオ ウムガイの祖先にあたる動物との、色素 の使用における微妙な違いに興味をもっ ている。動物は、肺やえらから酸素を得 て必要とする組織へ送り、そこで生じた 二酸化炭素を取り除くのに、ヘモグロビ ンなどの呼吸色素を使っている。二酸化 炭素濃度があまりに高くなると、こうし た色素の一部はきちんと働かなくなり、 体内のじゃまな二酸化炭素を取り除くこ とができなくなったり、より多くの酸素 を得ることができなくなったりする。オ ウムガイは高濃度の二酸化炭素をうまく 処理する色素をもっている、とKnollは 指摘する。一方、現存する中でアンモナ イト類に最も近いイカ亜綱(イカやタコ などの柔らかい体をもつ頭足類)の動物 は、こうした色素をもっていない。

アンモナイト類は、うまく働かない色素をもっていたとしても絶滅には至らなかったかもしれない。しかし、貝殻を作る動物であるアンモナイト類には別の問題もあった。二酸化炭素増加がもたらす影響の1つは、土壌と同様、海水も酸性になることだ。二酸化炭素濃度が上がり、生物が自らの生体機構で酸性の海水に十分対処することができなくなれば、貝殻もうまく作れなくなる、とKnollは主張する。酸性の海水に対処することが非常に苦手な生物群は、ペルム紀末に特にひどい打撃を受けたようだ。えらに水を供給するために貝殻を必要とした動物も同じだった。

硫黄の脅威をくぐり抜ける

かなりの生物が窒息に追い込まれたという主張には説得力がある。しかし、地球温暖化と酸素濃度の低下により、もう1つの致命的なガスが放出されたとみられ



生物大量絶滅のビッグファイブ

これまでに生物は、数回の大量絶滅にさらされたと考えられている。その中でも上記の5つが代表的なもので、「ビッグファイブ」とよばれている。今回、この記事では3番目のペルム期末 (P/T境界) に起きた史上最大の大量絶滅の謎について考察している。このとき、古生代に繁栄した三葉虫も絶滅した。

る。硫酸塩からエネルギーを得る細菌は、ばく大な量の硫化水素を作る。このような細菌は酸素濃度が極めて低い条件でのみよく繁殖する。現在、こうした条件は閉鎖された内海でのみみられ、最も顕著な例が黒海である。しかし、ペルム紀末には、そうした条件の場所が現在よりずっと広範囲にあったことを示す証拠がたくさんある。

ペンシルベニア州立大学(同州ユニバーシティーパーク)の地球化学者Lee Kumpは、硫化物を多く含んだ深海の水は徐々に上昇して、遭遇したあらゆる生き物を殺し、「ストレンジラブ博士の海(死の海)」*1を作り出したのかもしれないと主張する。この水が海面に達すると、有毒なガスを直接空気中に放出しただろう12。昨年、ペルム紀末の一部の地層で、硫化物を利用して光合成を行う嫌気性の「緑色硫黄細菌」に特有のバイオマーカーが見つかり、酸素を含まない水が光合成を行えるほど海面に近づいていたことが示唆された13。

海から放出される硫化水素の影響は おそらく局所的で、地球全体には及ばな かっただろう。そして Beerling のモデ ルは、これまでもいわれてきたように、 妥当な量の硫化水素ガスではオゾン層が 損なわれなかった可能性があることを示 している。しかし、すでにストレスにさ らされていた生態系にとっては、硫化水 素ガスは新たな脅威となっただろう。

大気の酸素濃度は危険なほど低くなって生態系は圧縮され、ばらばらになった。深海も大部分は居住に適さなかった。陸上植物は乾燥した温室効果気候の中で根を残して枯れ、動物たちが食物を得ることはむずかしくなった。そして、そこに運命の一撃が来た。地球の歴史上最大の火山噴火によってばく大な量のメタンと二酸化炭素が放出され、地球の気温が6℃上がり、海の「ストレンジラブ博士」状態はほとんど海面まで達した。

丘陵に向かえば酸素はなく、海岸にとどまれば硫化水素を吸い込む危険を冒すことになる。高い二酸化炭素濃度が呼吸色素を妨害し、窒息させる。たとえすぐに死ぬことはなくても、繁殖のための余分なエネルギーは残っていそうにない。個体数は減り、体のサイズも小さくなる。たとえ当面の有毒な環境を生き延びたものでも、数世代をかけてゆっくりと絶

滅の道をたどることになりそうだった。 ゆっくりといっても、地質学的時間の中 では、まばたきする程度の時間でしかな いのだが。

そして起こった悲劇的結末が、その後 の地球史を形作った。イリノイ州のシカ ゴ自然史博物館の Peter Wagner らの研 究によると、大量絶滅前の海中には、現 在のウミユリなどの固着性のろ過摂食動 物が大部分を占める単純な生態系と、多 数の種が動き回って互いに影響し合う複 雑な生態系とがあり、ほぼ半々に分かれ ていた。絶滅とその後の回復の後、複雑 な生態系が単純な生態系に数で勝るよう になり、3対1の比になった¹⁴。絶滅の ボトルネック(びんの首)をくぐり抜け たのは、必死でえらをバタバタさせたわ ずかな動物だった。生物多様性のパター ンはこのできごとを反映し、それ以来 ずっとほぼそのままである。

状況は大陸でも同様だった。爬虫類で

最も頑健な分類群は、哺乳類の祖先にあ たるとされる犬歯類(キノドン類)だっ た。犬歯類に近く、ずんぐりして顔の平 たいリストロサウルス(カバに似た哺乳 類型爬虫類) は、鼻と口を分離する骨で できた口蓋と、深呼吸に役立つ筋肉でで きた隔膜のあるがっしりした胸のおかげ で、楽に呼吸することができ、三畳紀に 入っても繁栄した。犬歯類は鼻甲介(鼻 腔の内側にひだ状に突き出した部分)に も助けられた。

一部の鼻甲介は速い呼吸に伴う水分の 損失を抑えるので、温血動物の高い代謝 率と関係している。三畳紀初期では、窒 息しそうになった動物が激しく呼吸する 際の水分損失を鼻甲介が抑えてくれたの かもしれない 15。生き延びたほかの動物 には主竜類もいる。主竜類は気嚢(呼吸 器官の1つ)のおかげで楽に呼吸するこ とができた。主竜類の子孫は、恐竜、鳥 類、ワニ類になった 16。

こうした呼吸機能の適応が、ペルム紀 末の動物たちを窒息させた状況に対応し て進化したという可能性は低い。大惨事 を生き延びる可能性が最も高かった動物 は、むしろ、日々の生活で窒息する状況 に対応できるようにすでに適応したもの たちだった。すなわち、陸上で地中に穴 を掘ったり、海の大陸棚のよどんだ泥の 中をあさったりする習性の動物たちであ る。あるいは、たまたま特にすぐれた気 嚢系をもつという幸運に恵まれた動物た ちも生き残った。

深呼吸をしても肺は有毒なガスで満た され、薄い酸素を求めてあえぐ。ほとん どの生物が死んだのは不思議ではなかっ た。しかし、私たちの遠い祖先は生き延 び、現在も見られるような新たなやり方 でふたたび地球上に生息地を広げた。大 量絶滅の時代の遺伝的記憶は、私たちの 生理機能に、そして現在の生物界の構造 に刻みつけられている。

Nick Lane は 『Power, sex, suicide: Mitochondria and the meaning of life (力、 性、自殺:ミトコンドリアと生命の意味)』の

*1 ストレンジラブ博士の海 映画『博士の異常な愛情』の主人公の名にちなん だ「死の海」のこと。皆殺し状態という意味で、 Kenneth J. Hsu et al. 'Strangelove ocean' before the Cambrian explosion Nature 316, 809-811 (1985) のタイトルが使い始めである。

- 1. Kamo, S. L. et al. Earth Planet. Sci. Lett. 214, 75-91
- 2. Knoll, A. H., Bambach, R. K., Payne, J. L., Pruss, S. & Fischer, W. W. Earth. Planet. Sci. Lett. 256, 295-313 (2007).
- 3. Benton, M. J. & Twitchett, R. Trends Ecol. Evol. 18. 358-365 (2003).
- 4. Beerling, D. J., Harfoot, M., Lomax, B. & Pyle, J. A. Phil. Trans. R. Soc. B 365, 1843-1866 (2007).
- 5. Berner, R. A. Geochim. Cosmochim. Acta 69, 3211-3217 (2005).
- 6. Huey, R. B. & Ward, P. D. Science 308, 398-401 (2005).
- 7. PöNrtner, H. O. & Knust, R. Science 305, 95-97 (2007).
- Twitchett, R. J., Krystyn, L., Baud, A., Wheeley, J. R. & Richoz, S. Geology 32, 805-808 (2004).
- Jin, Y. G. et al. Science 289, 432-436 (2000)
- 10. Payne, J. L. et al. Science 305, 506-509 (2004).
- 11. Retallack, G. J. & Krull, E. S. in Wetlands Through Time (edsGreb, S.&DiMichele, W.A.) 249-268 (Geological Society of America, Boulder, Colorado, 2006).
- 12. Kump, L. R., Pavlov, A. & Arthur, M. A. Geology 33, 397-400 (2005).
- 13. Grice, K. et al. Science **307**, 706-709 (2006).
- 14. Wagner, P. J., Kosnik, M. A. & Lidgard, S. Science 314, 1289-1292 (2006).
- 15. Berner, R. A., VandenBrooks, J. M. & Ward, P. D. Science 316, 557-558 (2007).
- 16. O'Connor, P. M. & Claessens, L. P. A. M. Nature 436, 253 (2005).

