

# Blue Earth はこうして生まれた

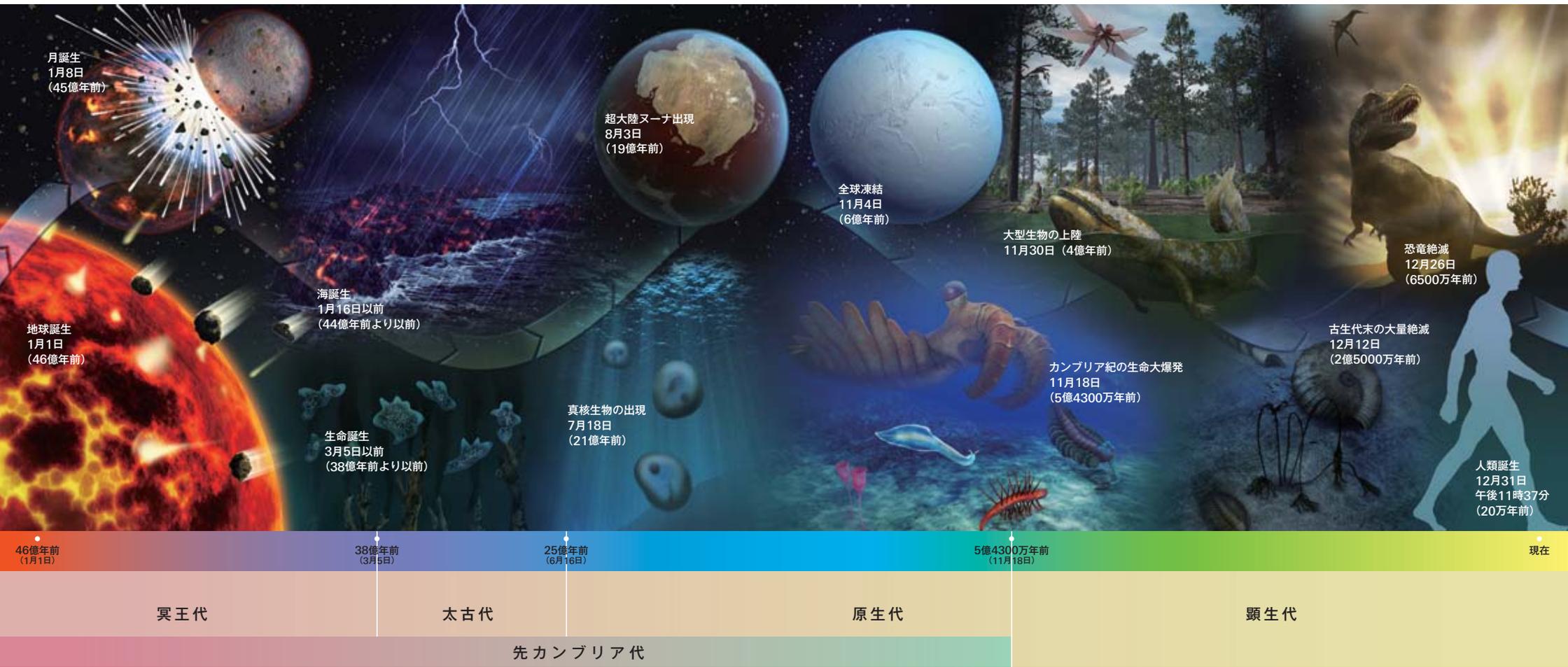
キーワードは“地球—生命相互作用 システム体”

取材協力 山口耕生  
海洋研究開発機構 システム地球ラボ  
プレカンブリアンエコシステムラボユニット  
招聘研究員  
東邦大学理学部 准教授  
NASA Astrobiology Institute

地球は約46億年前に誕生した。  
誕生したばかりの地球は、煮えたぎる赤黒いマグマに覆われていた。  
それが、どのようにしてBlue Earth、青い地球となり、豊かな生命を育んできたのだろうか。  
地球の進化と生命の進化——それは無関係に起きたのではなく、密接な相互作用の結果である。  
“地球—生命相互作用システム体”をキーワードに、46億年の地球史をひもといていこう。

宇宙から撮影した地球  
太平洋キルバート諸島周辺。高度約400km  
を周回している国際宇宙ステーションの広  
角カメラで撮影  
(写真提供：NASA)

# 地球史46億年カレンダー



(イラスト: 本多冬人)

目盛りは等間隔ではない

地球は、表面の70%を海に覆われ、宇宙から見ると青く輝いている。だが、誕生から現在までずっとそのような姿をしていたわけではない。

生まれたばかりの太陽の周りには、ガスとちりからなる円盤が回っていた。その円盤のなかで、ガスやちりが集まり、次第に大きな塊となっていく。そうしてできた微惑星が衝突・合体を繰り返し、大きな原始惑星へと成長していく。さらに幾度かの大きな衝突・合体を経て、地球が誕生した。誕生したばかりの地球は、微惑星の衝突エネルギーによって岩石がどろどろに溶け、マグマオーシャンに覆われ

ていた。

それから約46億年。月の誕生、海の誕生、生命の誕生、全海洋蒸発、地球全体が氷に覆われたという全球凍結、生物の大進化、繰り返された大量絶滅、そして人類の誕生……。地球上ではさまざまなできごとが起きてきた。しかし、46億年という歳月は、あまりにも長大過ぎて時の流れを実感するのが難しい。そこで、地球46億年の歴史を1年間に置き換えたのが、このイラストだ。たとえば、海の誕生は最近の研究成果によって44億年前より以前に起きたと考えられているので1月16日以前、20万

年前の人類(ホモ・サピエンス)誕生は12月31日午後11時37分のできごととなる。

ほんの20年ほど前まで、地球の歴史の研究といえば、化石など地質にたくさんの記録が残されている顕生代(現在~5億4300万年前、古生代・中生代・新生代)が中心だった。しかし、地球に海や大陸ができ、生命が誕生したのは、そのはるか以前のこと。地球を知るには、原生代(5億4300万~25億年前)、太古代(25億~38億年前)、さらには冥王代(38億~46億年前)までさかのぼる必要がある。しかし、何の記録も残されていないという意味

で冥王代と名付けられたことから分かるように、その時代の研究は困難を極める。

そうしたなか、冥王代、太古代、原生代をまとめた「先カンブリア代」と呼ばれる時代を相手に、地球が生命に満ちあふれる惑星となった真の原理の解明に挑んでいるのが、海洋研究開発機構(JAMSTEC)のシステム地球ラボ プレカンブリアンエコシステムラボユニットである。ラボユニットを中心とするJAMSTECの研究、海外の研究を紹介しながら、多くの謎に包まれた先カンブリア代をひもといていこう。

# 青い地球の誕生——海はプレートテクトニクスや大陸を生み出した

海はいつ誕生したのだろうか。

その答えを教えてください。オーストラリアのジャックヒルズで発見された堆積岩中の鉱物粒子が注目されている。堆積岩に含まれるジルコンという鉱物粒子を調べたところ、それが形成されたのは約44億年前という結果が出た。これまでに発見された地球最古の物質である。しかし、注目されている理由は、その古さだけではない。

ジルコンは宝石にもなっている鉱物だ。熱や水に強いので変成を受けにくく、形成された当時の環境の情報を組成中にとどめている。ジャックヒルズで発見されたジルコンの酸素同位体比を調べたところ、海の誕生についての新事実が明らかになったのだ。同位体とは、同じ元素でも中性子の数、つまり質量数が異なるもの。自然界に安定して存在する酸素の主要な同位体には質量数16と18があり、その比率を調べることで物質が形成されたときの環境を知ることができる。ジルコンの酸素同位体比は、それが低い温度の液体の水とマグマが反応して形成されたことを物語っていた。

44億年前より以前には地球の表面に水、つまり海があった——これが、ジャックヒルズのジルコンが提示した新事実である。

地球が誕生した46億年前、地表には岩石が溶けたマグマが広がり、温度は千数百℃にも達していた。それが44億年前までに、海が存在できるほどに冷えていたことになる。これまでは、マグマオーシャンが広がる高温の状態が地球誕生以来約7億年間続いたと考えられていた。ジャックヒルズのジルコンは定説を覆し、地球は2億年かからずに急速に冷えたことになる。

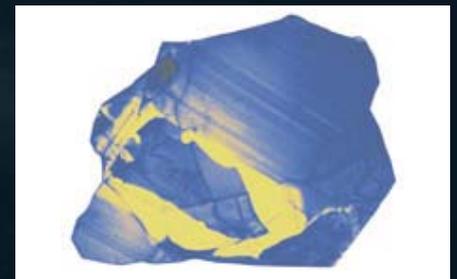
しかし、海は44億年前から現在まで、ずっと存在していたわけではない。地球誕生後も数億年間は微惑星の衝突が続いており、そのエネルギーを計算すると、海を一瞬にして蒸発させることが可能だ。おそらく海は幾度となく誕生と蒸発を繰り返してきたのだろう。

海の誕生により、地球は大きく変わり始める。まず海が形成されたことで地球の表面が冷やされ、かたいプレートと呼ばれる岩板となる。やがて、海嶺で生まれたプレートが移動し、海溝で沈み込むよう

になった。プレートテクトニクスの始まりだ。さらに、水をたくさん含んだ海洋プレートが沈み込むと、地下数十kmで溶けて花崗岩が形成され、周囲と比べて軽い花崗岩が上昇してくる。そうして大陸地殻がつくられた。

海がなかったら、プレートテクトニクスも大陸もなかったであろう。それだけではない。実は……。

**ジャックヒルズ地域の堆積岩**  
オーストラリア・ウェスタンオーストラリア州のジャックヒルズには、30億年前に形成された堆積岩が露出している。この堆積岩のなかから、海の誕生時期を物語るジルコンが発見された  
(写真提供：Simon Wilde / Curtin University of Technology)



**ジャックヒルズの堆積岩で発見されたジルコンの結晶**  
堆積岩に含まれるジルコンの結晶は、鉛の同位体比の計測から44億4000万年（誤差は800万年以内）に形成されたことが分かった。地球最古の物質である。さらに、酸素同位体比の計測から、低い温度の液体の水とマグマが反応して形成されたことが明らかになった。2001年、アメリカ・ウイスコンシン大学マディソン校のジョン・ハレー教授らによる成果  
(写真提供：John Valley / University of Wisconsin-Madison)

海の水は、地球の形成途中や初期に降り注いだ微惑星や彗星などによって運ばれてきたと考えられている

# 生命誕生——地球史上最大のイベントは38億年 前より以前に起きた

グリーンランド・イスアで発見された生命の痕跡を含む岩石

イスア地域は、地球上で最も古い岩石が露出している場所の1つ。デンマーク・コペンハーゲン大学のミック・ローゼンク教授らが、岩石中の炭素の同位体比を調べた結果、生命の痕跡であることが明らかになった。これは38億年前に海底で形成された堆積岩であり、そのうち幅30cmほどの黒い部分が最古の生命痕跡である(写真提供: 掛川武/東北大学)

生命はいつ誕生したのだろうか。

最古の生命の痕跡は、グリーンランドのイスア地域の岩石に残されている。きれいなしま模様が見える岩石の、ひとさわ黒い部分が、それだ。

しかし、生物が化石になって残っているわけではない。顕微鏡で調べても微生物らしきものもない。見えるのは、炭素の粒だけ。実は、生命の痕跡である証拠は、その炭素の同位体比にある。生物は炭素を取り込んで体をつくるのだが、質量数13の炭素 ( $^{13}\text{C}$ ) より質量数12の炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) の方を選択的に取り込むことが知られている。岩石に含まれる炭素の同位体比を調べ、 $^{13}\text{C}$ より $^{12}\text{C}$ が多く含まれていれば、それは生物の体をつくっていたものだと分かるというのだ。イスアの岩石の炭素の同位体比を調べてみると、 $^{12}\text{C}$ の方が多い。これが、イスアの岩石が生命の痕跡と考えられる根拠である。

38億年前の岩石に生命の痕跡が発見されたということは、生命は少なくともその前には誕生していたと考えるのが自然だろう。では、生命はいつ、どこで誕生したのだろうか。

イスアの岩石にあるしま模様は、それが海底で土砂が堆積して形成されたことを示している。しま模様はとても細かく、しかも乱れていないことから、波の影響を受ける浅い海ではなく、より深い海で形成されたのだろう。また、単純な物質からRNAやアミノ酸、タンパク質など、複雑な生命の材料物質をつくり、また生命が生きていくには、エネルギーが必要だ。そこで、生命誕生の場として、深海の熱水噴出孔周辺が有力視されている。

月の存在が育んだ生命もあったかもしれない。45億年前、地球の3分の1ほどの大きさの原始惑星が衝突して飛び散ったかけらが集まり、月が誕生した。このできごとは、「ジャイアントインパクト」と呼ばれる。月の誕生によって地球の海で潮汐が起こるようになり、波打ち際には泡ができる。泡の表面は非常にエネルギーが高く、分子がくっついたり離れたりして化学反応を起こすため、そこで生命の材料物質がつくられた可能性があるとする研究者もいる。

海は44億年前には存在した。生命は、海ができた直後、つまり44億年前には誕生していたのではないだろうか。



## 生物の陸上進出はいつ?

生物が陸上に進出したのは4億年前といわれている。土に根を張るような植物や昆虫、大型の動物に限れば、その年代は正しいだろう。だが、微生物のようなものはどうだろうか。

43億年前、海が誕生し、間もなく生命も誕生したと考えられている。その当時、まだ微惑星の衝突は頻繁に起きていた。微惑星が海に落ちれば巨大な津波が発生し、海水はつくられたばかりの陸にも運ばれたはずだ。できたばかりのプレートの運動による地震が引き起こす津波、悪天候による高波や竜巻もあっただろう。陸に運ばれた海水に生命が含まれていたら……。

津波や高波の引いた後には、水たまりが残される。海水とともに運ばれた生命が、その水たまりで生き延び、環境が合えばそこで繁殖した可能性も否定できない。

陸上にも火山活動に伴う熱水活動がある。温泉だ。そこで独自に生命が進化した可能性もある。また、そこに海水が運ばれてきたら、海起源の生命がそこで独自の発展を遂げたかもしれない。

つまり、微生物のようなものだったら、生命が誕生した直後から陸上にもいたのではないだろうか。

# 生命誕生の場の再現に挑む——キーワードは「ウルトラH<sup>3</sup>リンケージ」

最初の生命は、どのような場所で誕生し、どのようなものだったのだろうか。

生命誕生の場として最も有力なのが、深海の熱水噴出孔の周辺である。海底に浸み込み、地球内部のエネルギーによって熱せられた海水が、噴き出している。最近では、有人潜水調査船や無人探査機による調査によって、熱水噴出孔の周辺の様子が詳しく分かるようになってきた。そこには、熱水に含まれる硫化水素やメタンをエネルギー源にして有機物をつくり出す化学合成生物をはじめ、それらを餌とするものなど、多種多様な生物たちがたくさん暮らしている。生命誕生の場と考えるにふさわしい光景だ。

しかし、生命が誕生したのは38億年前より以前である。当時の熱水噴出孔周辺の様子、そしてそこで何が起きたかは、まだ謎に包まれている。そうしたなか、生命誕生の場、そして初期生命がどのようにエネルギーを得ていたかを説明する仮説として注目されているのが、JAMSTECプレカンブリアンエコシステムラボユニットの高井研ユニットリーダーらが提唱する「ウルトラH<sup>3</sup>（エイチキューブ）リンケージ」である。ウルトラH<sup>3</sup>リンケージとは、超塩基性岩（Ultramafic rocks）、そして3つのH、つまり熱水活動（Hydrothermal activity）、水素発生（Hydrogenesis）、ハイパースライム（HyperSLiME: Hyperthermophilic Subseafloor Lithotrophic Microbial Ecosystem；超好熱性地殻内独立栄養微生物生態系）の相互作用のことだ。

超塩基性岩とは、マントルを構成している岩石である。生命が誕生したころ、地球はまだ熱く、マントルも地下の浅いところまで来ていた。現在の海洋地殻の上部は主に玄武岩で、玄武岩と海水が熱水反応すると、蛇紋岩化作用という反応によって水素が発生する。熱いマントルの初期地球においては、

海洋地殻上部はコマチアイトという岩石だった可能性がある。コマチアイトでも、浸み込んだ海水と熱水反応すると蛇紋岩化作用が進み、水素を出す。当時の海底では、あちこちの割れ目から、水素をたくさん含んだ熱水が噴出していたことだろう。そこには水素をエネルギー源にする生命が誕生した可能性がある。それらは単独では生きられず、いくつかの種類が集まり、互いが生産する物質を循環させて生態系をつくっていたと考えられている。その群集が、ハイパースライムである。

ウルトラH<sup>3</sup>リンケージはまだ仮説だが、有力な証拠が得られている。インド洋の「かわいいフィールド」と呼ばれる海底では、マントルが海底付近まで上昇してきており、岩石と海水が熱水反応して発生した水素が、海底のあちこちから熱水とともに噴出している。そこで超好熱メタン菌と超好熱発酵菌の群集が発見されたのだ。

ウルトラH<sup>3</sup>リンケージ仮説を証明するためには、確かめなければいけないことが山ほどある。当時の海水の成分、熱水の成分は？ 岩石と熱水の反応は、どのくらいの圧力、どのくらいの時間で起こり、どれだけの水素を出すか？ その水素は、どれだけの微生物の生命活動を支えることができたのか？ それらを明らかにするために、ユニットでは、人工的に水と岩石を高温高压で反応させる実験を行っている。しかし、コマチアイトの入手は難しい。そこで、コマチアイトを人工合成する技術も開発した。生命誕生の場を再現するという壮大な実験は、試行錯誤しながら進められている。

生命は、マントル物質や熱水、プレート運動といった地球との相互作用によって誕生し、育まれた。「地球—生命相互作用」はすでに始まっている。そして、次は生命が地球を変えていく番だ。

約40億年前の深海底の様子

浅いところまでマントルが来ていたため、深海底のあちこちにマグマがわき上がっていた。コマチアイトと海水が熱水反応すると水素が発生する。その水素が熱水とともに噴き出している。その周りで水素のエネルギーを使って有機物をつくり出す生命が誕生し、ハイパースライムと呼ばれる群集を形成していたのだろう。現在の熱水噴出孔は酸性で鉄に富んだブラックスモーカーが多いが、生命が誕生した初期地球では、ケイ酸に富み金属に乏しいアルカリ性のクリアスモーカーだったのではないかと考えられている（イラスト：本多冬人）

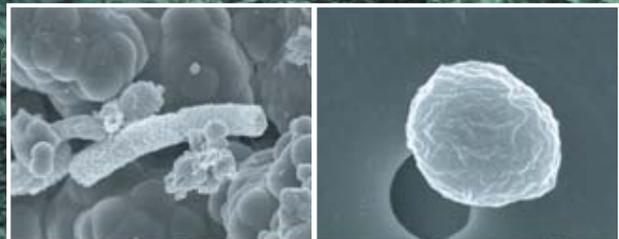


深海底の高温高压の熱水環境を再現する装置

上は装置の全体図。ヒーターでなかに入れた高压容器の温度を上げる。反応した溶液はチューブを通して、バルブから採取する。左下は高压容器。高压容器に水と金製の反応容器（右下）を入れる。反応容器には、岩石と反応水を入れる。この装置では、600℃、600気圧の圧力までの実験が可能（写真提供：鈴木勝彦 / プレカンブリアンエコシステムラボユニット）

## 現代のハイパースライム

左は超好熱メタン菌、右は超好熱発酵菌。その2種類の微生物の群集が、インド洋の「かわいいフィールド」の海底下で発見された。近くには熱水噴出孔があり、その熱水にはたくさんの水素が含まれている



# 地球は生命の星へ——そして大気が変わった

現在の大気の成分は、窒素80%、酸素20%、二酸化炭素0.04%。しかし、大気の成分は、46億年の歴史のなかで大きく変動してきた。

微惑星が地球に衝突すると、微惑星そのものや衝突地点の岩石が溶け、水素やヘリウム、窒素、二酸化炭素などの揮発成分が蒸発する。それが地球の大気の始まりだ。地球誕生直後の大気は二酸化炭素の濃度が高く、現在の数百倍～数万倍にも達していたといわれている。一方、酸素はほとんど存在していなかった。地球の大気は、いつから酸素に富むようになったのだろうか。

酸素の起源としては、2つのシナリオが考えられる。大気中の水蒸気が太陽から降り注ぐ紫外線で分解され、水素と酸素になる。水素は軽いので宇宙空間へ出ていき、酸素だけが残された。これが第1のシナリオだが、このプロセスだけでは現在の酸素量を説明できない。光合成によって酸素をつくり出すシアノバクテリアの出現、という第2のシナリオが有力だ。

大気中に酸素が増えたことを「大気の酸化」という。15年ほど前まで、大気の酸化時期は約22億年前というのが定説だった。研究の積み重ねによって、約23億2000万～24億4000万年前までさかの

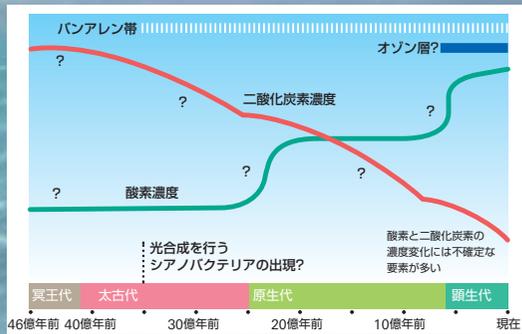
ぼる可能性があるというのが、最近の有力な説になっている。しかし、大気の酸化時期についてはさまざまな説があり、活発な議論が続いている。

そこで、地球史における大気の酸化時期を明らかにするために風化の影響が極力少ない地質試料を採取しようと、日本・アメリカ・オーストラリアによる太古代生命圏掘削プロジェクト（Archean Biosphere Drilling Project）が立ち上げられ、2003年にオーストラリア西部ビルバラのマーブルバー地域で陸上掘削が行われた。地下200mから得られた高品質の試料を用いた研究により、2008年、JAMSTECプレカンブリアンエコシステムラボユニットの鈴木勝彦主任研究員（地球内部ダイナミクス領域研究代表者）は、少なくとも27億年前には大気中の酸素が増え始めていたと発表した（『Blue Earth』本号24～27ページ、2009年1-2月号1ページ参照）。

また、太古代生命圏掘削プロジェクトに企画段階から参画しているラボユニットの山口耕生招聘研究員は、マーブルバーの地下から採取した34億6000万年前の赤色チャートの研究を進めている。そして、赤鉄鉱が多く含まれる層について微量元素の量を分析し、この赤色チャートが堆積した当時の海

水は酸素に富んでいたことを示唆する証拠を発見した。山口招聘研究員は、大気の酸素の増加は27億年前どころかもっと早く、少なくとも35億年前ではないかと考えている。そのころまでには光合成によって酸素を出すシアノバクテリアが出現し、大気中の酸素が急増した可能性があるというのだ。アメリカ・イェール大学のトニー・ラサガ元教授とペンシルベニア州立大学の大本洋教授らの動的地球化学モデルによって、シアノバクテリアの出現からわずか100万年ほどで大気は急速に酸化されることが分かっている。シアノバクテリアの出現と大気の酸化は、億年の単位の地質学的時間スケールで見れば、ほぼ同時期であったのかもしれない。

大気に酸素が増えた時期や濃度の決定にはさらなる研究が必要だが、生物が地球の大気を変えたのは間違いない。では、シアノバクテリアが大量出現したのはなぜか。その謎を解く鍵は、地球の内部にあった。



**大気中の酸素・二酸化炭素の濃度変化**  
地球史初期の大気には、酸素はほとんど含まれていなかった。大気中に酸素が増えたのは、光合成によって酸素をつくり出すシアノバクテリアの働きによる。現在の酸素濃度は20%である。一方、地球史初期の二酸化炭素濃度は現在の数百倍～数万倍程度もあった。海と陸が誕生すると、岩石風化の際に吸収されたり炭酸塩鉱物として沈殿することによって徐々に減少していった。現在の二酸化炭素濃度は0.04%である



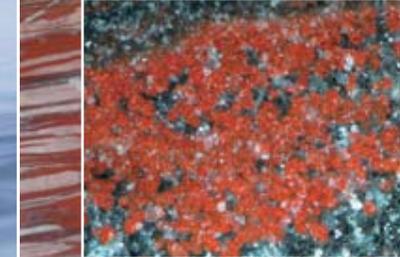
最古の生命痕跡を発見したミニック・ローズ教授（左、9ページ参照）と全球凍結を提唱したジョセフ・カーシュビック教授（右、17ページ参照）。ローズ教授は大気中に酸素が増加したのは早かったと考え、カーシュビック教授は遅かったと考えている。大気の酸化時期については、紙が2人を隔てているように、学界を二分しての熱い議論が現在も続いている  
(写真提供：山口耕生)



**マーブルバー地域の露頭**  
ウェスタンオーストラリア州マーブルバー地域には、約34億6000万年前に堆積したしま状の赤色チャートが露出ししている。赤い部分には赤鉄鉱が含まれる  
(写真提供：山口耕生)



**太古代生命圏掘削プロジェクトの陸上掘削の様子**  
2003年夏、マーブルバー地域で行われた。風化の影響を受けていない地質試料を採取するため、深さ260mの掘削を行った  
(写真提供：山口耕生)



**掘削試料**  
左は試料の表面で幅約3cm。右は薄片の顕微鏡写真。赤い粒子は、鉄が酸化された赤鉄鉱。赤鉄鉱が多く含まれる層について微量元素の量を詳しく調べた結果、この赤色チャートが堆積した約34億6000万年前当時の海水は酸素に富んでいたことが明らかになった  
(写真提供：山口耕生)



**ストロマトライト**  
35億年前、光合成によって酸素をつくり出すシアノバクテリアが出現し、大気中に酸素が増加したと考えられている。ストロマトライトは、シアノバクテリアが層状に堆積しながら成長していく。現在は、ウェスタンオーストラリア州のシャーク湾など限られた地域にのみ生息している。シャーク湾は世界遺産に登録されている

# 冷えていく地球がつくり出したシールド——磁場が生命を守り、地球を変えた

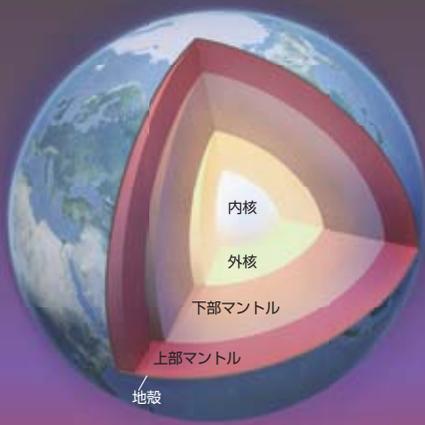
46億年前はすべてのものがどろどろに溶けた状態だった地球も、時がたつにつれ、少しずつ冷えていく。その過程で海が生まれ、プレートテクトニクスが始まり、大陸がつくられたことは、すでに紹介した。冷えていく地球の内部では、岩石からなるマントルと、鉄からなる核が分離する。核は、さらに内核と外核に分かれる。内核は高い圧力のために固体となり、その外側を液体の外核が取り巻くという構造ができた。地球の中心までは地表から6,400km、外核までは2,900km。これほど地下深くで起きている地球内部の進化は一見、生物の進化など地表でのできごととは無関係のようだが……。

外核では、液体の鉄が熱をマントルに渡しながら対流運動をしている。液体の鉄のように電気を通す物質が磁場のなかで動くと、電流が発生する。電流が流れると、周りに磁場がつくられ、最初にあった磁場を強める。すると、電流が強くなり、さらに磁場を生む……。その繰り返しによって、外核には10億アンペアもの強い電流が流れ、強い磁場がつくられる。このプロセスを「地球ダイナモ」と呼ぶ。ダ

イナモとは発電機という意味だ。

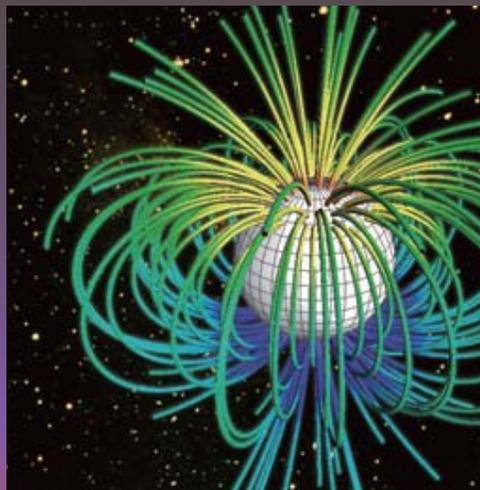
そうしてつくられた磁場は、地球を取り巻くように分布している。磁場ができたのは、最新の研究成果によると、少なくとも35億年前。これは、シアノバクテリアによる光合成が盛んになったと考えられる時期と一致している。宇宙には高いエネルギーを持った宇宙線や太陽風などが飛び交い、地球にも降り注いでいた。それら高エネルギー粒子は、生物にとって有害だ。磁場ができると、それがシールドとなり、生物に有害な高エネルギー粒子が地球に入ってこなくなった。その結果、生物が浅瀬でも暮らせるようになり、強い太陽の光を浴びて活発に光合成を行い、たくさんの酸素が大気中に放出されるようになったと考えられている。

もし磁場がなかったら……。宇宙線や太陽風が降り注ぐ地表や浅瀬では、生命は存在できなかっただろう。地球内部の進化の結果できた磁場が、地表で進化した生命を守る。一見、無関係と思える地球と生命の進化。実は、相互にかかわり合いながら、共進化しているのだ。



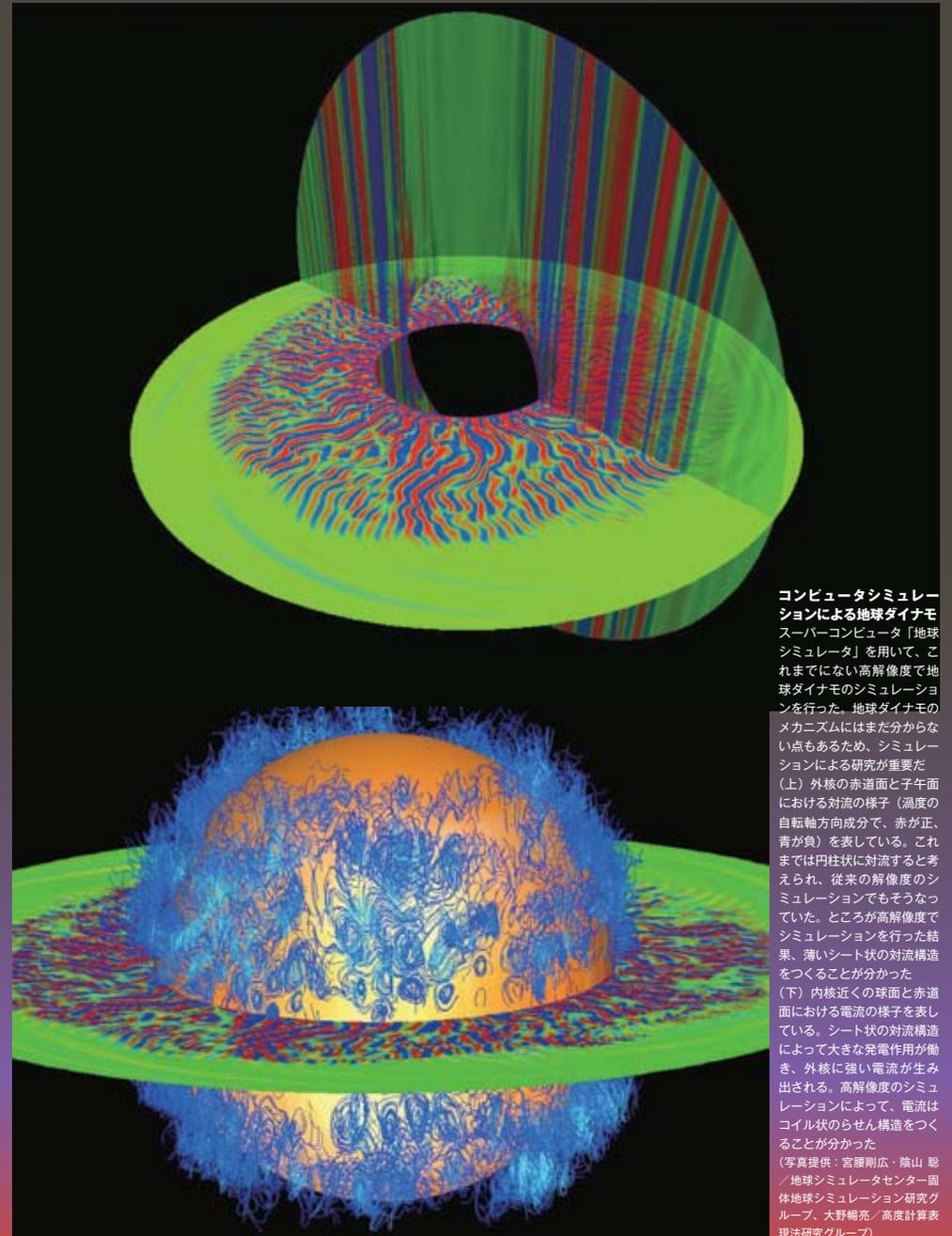
地球の内部構造

地球は、地殻、マントル、核からなり、マントルは上部と下部、核は内核と外核に分けられる。核は鉄からなり、内核は固体、外核は液体になっている。外核が対流運動をすることで磁場がつくられる。



コンピュータシミュレーションによる地球磁場

地球磁場は地球を取り巻くように分布している。その形状は双極子磁場と呼ばれ、棒磁石の周りに鉄粉をまいたときに見えることができる磁場のかたちと似ている。この磁場が、有害な宇宙線や太陽風から生命を守るシールドの役割をしている。大気が宇宙空間に逃げていかないのも磁場のおかげである。



コンピュータシミュレーションによる地球ダイナモ  
スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を用いて、これまでにない高解像度で地球ダイナモのシミュレーションを行った。地球ダイナモのメカニズムにはまだ分からない点もあるため、シミュレーションによる研究が重要だ。  
(上) 外核の赤道面と子午面における対流の様子（温度の自転軸方向成分で、赤が正、青が負）を表している。これまでは円柱状に対流すると考えられ、従来の解像度のシミュレーションでもそうになっていた。ところが高解像度でシミュレーションを行った結果、薄いシート状の対流構造をつくること分かった。  
(下) 内核近くの球面と赤道面における電流の様子を表している。シート状の対流構造によって大きな発電作用が働き、外核に強い電流が生まれ出される。高解像度のシミュレーションによって、電流はコイル状のらせん構造をつくること分かった  
(写真提供：宮腰剛広・陰山 聡 / 地球シミュレータセンター・固体地球シミュレーション研究グループ、大野福亮 / 高度計算表現法研究グループ)

# 白い地球の出現——大陸移動と生物が地球を凍らせた

青い地球が白い地球へと姿を変えた時期があった。大陸は赤道付近まで氷に覆われ、海も水深2,000mまで凍り付いた。このできごとは「全球凍結」と呼ばれている。しかも、それは一度ではない。6億年前と7億5000万年前、そして約23億年前にも全球凍結が起きたと考えられている。

全球凍結の有力な証拠は、ナミビアで見つかった。地層がむき出しになった茶色っぽい断崖に埋まっている白い石がそれだ。直径1mほどで、その存在は明らかに周りから浮いている。この白い石は、なぜここにあるのだろうか。

犯人は氷河だ。氷河は、周りの岩石を削りながらゆっくりと動いていく。削られた岩石は10mに達するものから1cmに満たないものまでさまざま。それらが氷河とともに運ばれていく。氷河は海に到達し、はるか沖合まで運ばれるものもある。沖合の海底では、沿岸域の海底に比べ、とても細かい粒子が堆積する。氷河が融解することによって解放された巨石がそのような海底に沈んでいった。そうして、場違いな白い巨石は細かい粒子からなる地層に埋め込まれた。このようなものを「氷河性堆積物」と呼び、世界各地に見られる。氷河性堆積物は、かつてそこに氷河があったことを意味する。

アフリカのナミビアに氷河!?!と驚くかもしれないが、プレートテクトニクスによって大陸は移動し、現在のアフリカ大陸が高緯度にあったこともあるので、それだけでは驚くに値しない。しかし、岩石に記録された地磁気の解析から、それは6億年前に赤道付近でできたことが分かった。最も暖かいはずの赤道付近に氷河があった——この事実は、地球全体が氷に覆われていたことを意味する。

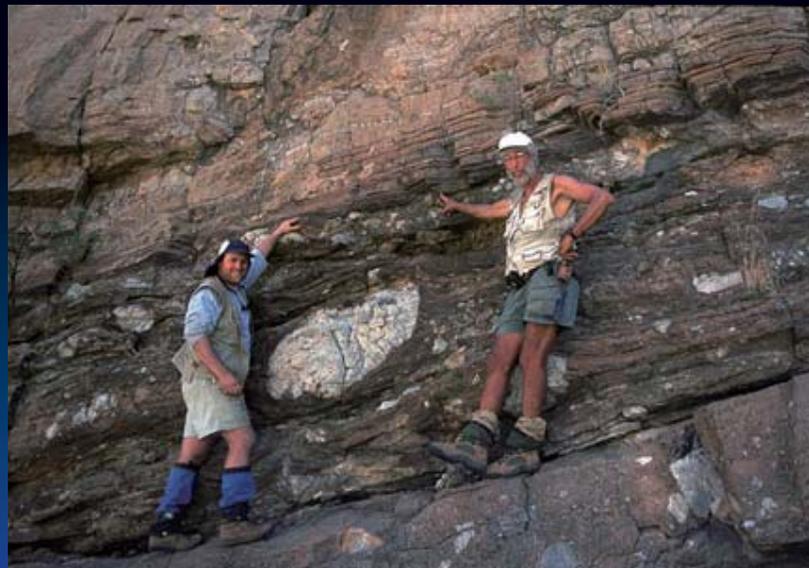
全球凍結のきっかけは、大陸の配置の変化だと考えられている。全球凍結が起きる前、大陸は1つにまとまって超大陸をつくっていた。それが、プレートテクトニクスによって大陸がばらばらになった。大陸の周りには浅瀬ができるので、大陸分裂によって光合成を行う生物たちの生息場所が増え、数が急増した。その結果、大気中の二酸化炭素が光合成に使われて減少し、温室効果が弱まり、気温が低下したのだろう。雪や氷が増えると太陽エネルギーを反射しやすくなり、地球は一気に凍り付いた。これが、全球凍結に至るシナリオだ。

全球凍結は数千万年も続いた。その間も火山活動は続いていたため、大気中に二酸化炭素が少しずつたまっていき、その温室効果によって気温が再び上昇し、地球は青い姿を取り戻したと考えられている。

## 全球凍結

地球全体が氷に覆われスノーボール（雪玉）のようになっていたという説は、1992年、アメリカ・カリフォルニア工科大学のジョセフ・カーシュビング教授によって提唱された。カーシュビング教授は、世界各地で見つかる氷河性堆積物や、その地層のすぐ上にある炭酸塩岩やしま状鉄鉱層など、いくつかの謎は全球凍結で説明できると考えた

(イラスト:本冬冬人)



ナミビアで見つかった氷河性堆積物

中央に見える白い岩は、氷河によって削り出されて運ばれ、土砂に埋もれたもの。氷河性堆積物と呼ばれる。この岩石に含まれる磁気を帯びた鉱物を調べた結果、赤道近くでできたことが分かった。地層の年代から、6億年前、赤道付近には氷河が存在していたことになる。これは全球凍結の証拠である。アメリカ・ハーバード大学のポール・ホフマン教授(右)の成果

(写真提供: Gabrielle Walker)

# 多様性——地球内部の暴走から生命を守ったもの

全球凍結によって、生命はすべて死に絶えてしまったのだろうか。

全球凍結といっても、高山や火山、温泉地帯には厚い氷はなかったと考えられている。全球凍結のときの地球は「スノーボール」に例えられるが、むしろ「スラッシュボール」といった方がいいかもしれない。スラッシュとは、融けかけた雪のことだ。生物は、厚い氷に覆われていない場所や深海で生き延びた可能性がある。また、生物には、環境が悪くなると生命活動を停止し、環境が改善されると活動を再開するものがある。全球凍結によって多くの生物は死に絶えたことだろう。しかし、氷に閉ざされたまま静かに青い地球に戻るのを待っていた生物がいたはずだ。

ここで、生命の進化を簡単に振り返ってみよう。生命は38億年前より以前に誕生した。生命が生きていくためにはエネルギーが必要だ。初期の生命は、周りにふんだんにある水素やメタンをエネ

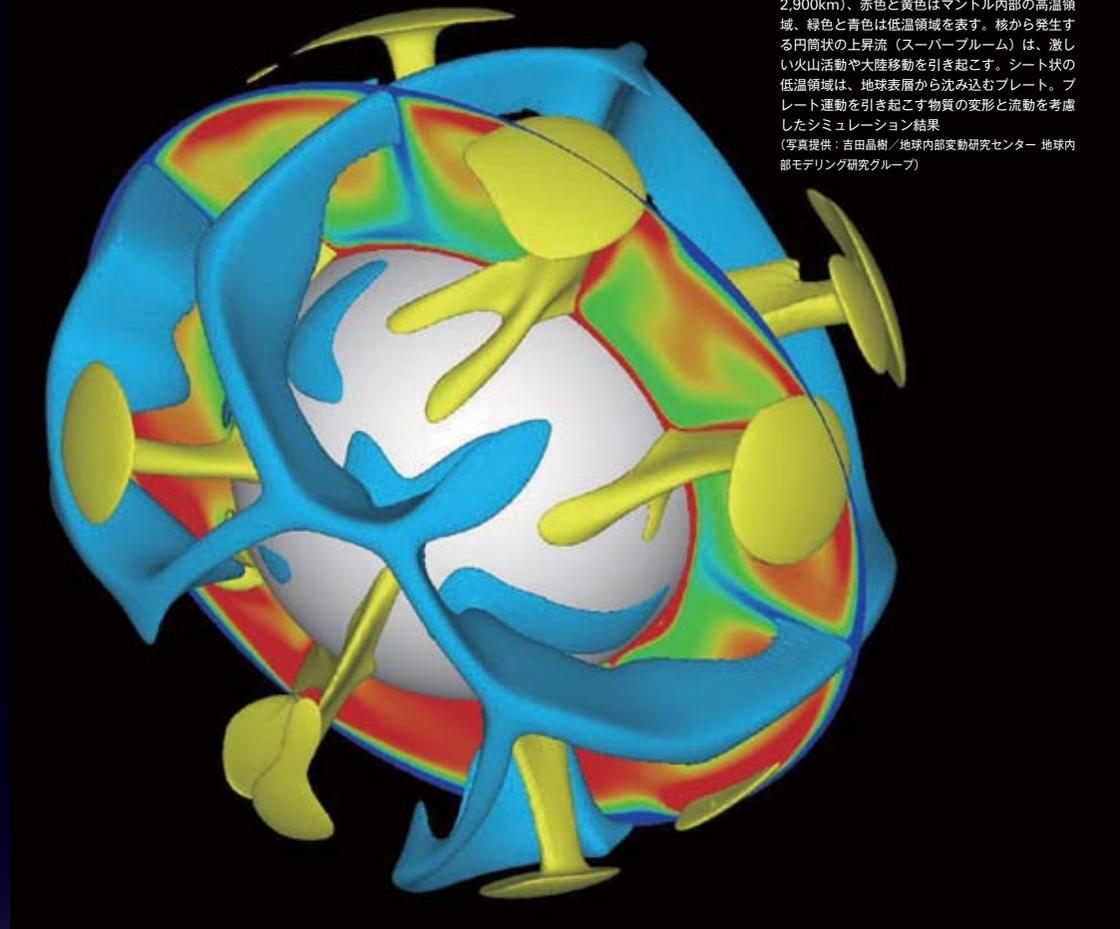
ギー源にしていたかもしれない。やがて微生物は、水素酸化・メタン生成・メタン酸化・硫酸酸化・鉄酸化・硫酸還元・鉄還元・窒素固定・脱窒・マンガン酸化・光合成など、さまざまな代謝機能を獲得し、進化を遂げた。真核生物の登場という大きな進化は、約21億年前に起きた（約27億年前とする説もある）。それまでの原核生物は核を持たないが、真核生物は核を持ち、遺伝情報をつかさどるDNAをそのなかに入れていた。さらに約17億年前に多細胞生物が登場した後、大きな進化のない時代が長く続く。そして約6億年前、大型の生物が登場。エディアカラ生物群と呼ばれるもので、骨格や殻を持たず、多くは平たいかたちをしている。なかには数mの大きさのものもいた。

大型生物の出現——それは、約6億年前の全球凍結を経て、白い地球が青い地球に戻った時期と一致する。真核生物が登場したとされる少し前、約23億年前にも全球凍結があった可能性がある。全球凍結という過酷な時代を生き延びた生物たちは、大きく進化し、多様化することで生命をつないでいこうとしたのではないだろうか。

エディアカラ生物群は、先カンブリア代の終わり（約5億4500万年前）に姿を消す。顕生代に入ると、骨格や殻を持ち、奇妙な姿をしたバージェス頁岩動物群などが登場する。いわゆる「カンブリア紀の生命大爆発」だ。それを境に、生物の種類、数が急速に増えた。しかし、その後も大量絶滅は繰り返されている。最大のものは古生代末（2億5000万年前）に起きた。古生代末の大量絶滅の原因は、マンツルの巨大な上昇流「スーパーブルーム」だと考えられている。スーパーブルームが超大陸パンゲアを分裂させ、また激しい火山活動によって太陽の光が遮られ、植物の光合成ができなくなってしまったのだ。生態系は崩れ、酸素が不足し、海洋では数千万年にわたって無酸素状態が続いた。それは「海洋無酸素事変」と呼ばれる。その結果、地球上の約68%、海に限ると約96%の種が絶滅した。

暴走ともいえるほどの地球内部の活動によって、生物は何度も絶滅のふちに追いやられてきた。しかし、それを乗り越えたとき、生物は進化し多様化する。古生代末の大量絶滅の後も例外ではなかった。地球—生命相互作用システムは、未来も働くだろう。しかし、現在の地球では生物の多様性が失われつつある。いま地球内部の暴走が起きたら、私たちはそれを乗り越えることができるのだろうか。

**マンツル対流のシミュレーション**  
中心の白い球面は核とマンツルの境界面（深さ2,900km）、赤色と黄色はマンツル内部の高温領域、緑色と青色は低温領域を表す。核から発生する円筒状の上昇流（スーパーブルーム）は、激しい火山活動や大陸移動を引き起こす。シート状の低温領域は、地球表面から沈み込むプレート、プレート運動を引き起こす物質の変形と流動を考慮したシミュレーション結果  
（写真提供：吉田晶樹／地球内部変動研究センター 地球内部モデリング研究グループ）



**白亜紀の「海洋無酸素事変」を示す黒い地層（イタリア北部）**  
海洋無酸素事変は、古生代末、中生代白亜紀などに起き、生物の大量絶滅の原因になったと考えられている。酸素がないため、大量の有機物が分解されないまま海底に堆積し、黒色頁岩という黒い地層をつくる。JAMSTECでは、白亜紀の黒色頁岩の解析研究を進めている。シアノバクテリアが光合成によって酸素をつくり出す前、初期地球の海洋は無酸素状態であった。白亜紀の黒い地層を調べることは、初期地球の環境を知ることもつながる（写真提供：大河内直彦／地球内部変動研究センター 地球化学研究グループ）

カンブリア紀の生命大爆発と古生代末の大量絶滅（イラスト：本多冬人）



# 地球の存在——偶然か？ 奇跡か？

太陽系には8つの惑星がある。そのうち地球と金星は、大きさも密度もほぼ同じで、誕生直後の姿はまるで双子だった。しかし、現在の地球と金星の環境は大きく異なっている。金星の地表面の温度は460℃、気圧は90気圧、大気の96.5%を二酸化炭素が占める。金星と地球の運命を分けたもの——それは、海の有無だと考えられている。地球では海が二酸化炭素を吸収し、炭酸塩という鉱物として海底に固定した。金星にも初期には海があったと考えられているが、太陽からの距離が近いために長く存在し続けることはできなかった。そのため、大量の二酸化炭素が大気中に残されてしまい、温暖化が進んだのだろう。もちろん地球では、二酸化炭素を使って酸素をつくり出した生物たちの貢献も欠かされなかった。

では、生命が存在するのは、地球だけなのだろうか。太陽系内で生命が存在する可能性がある惑星・衛星として、いくつか候補が挙がっている。まずは、木星の衛星エウロパ。厚い氷の下では、土星や木星の重力による潮汐で発生するエネルギーによって氷が融かされ、液体の水が存在している可能性がある。そこでは生命が誕生しているかもしれない。火星も有力な候補だ。火星にはかつて海があり、現在も地下に液体の水があると考えられ、NASA（アメリカ航空宇宙局）などが精力的に探査を行っている。太陽系以外で地球のような惑星を探そうという

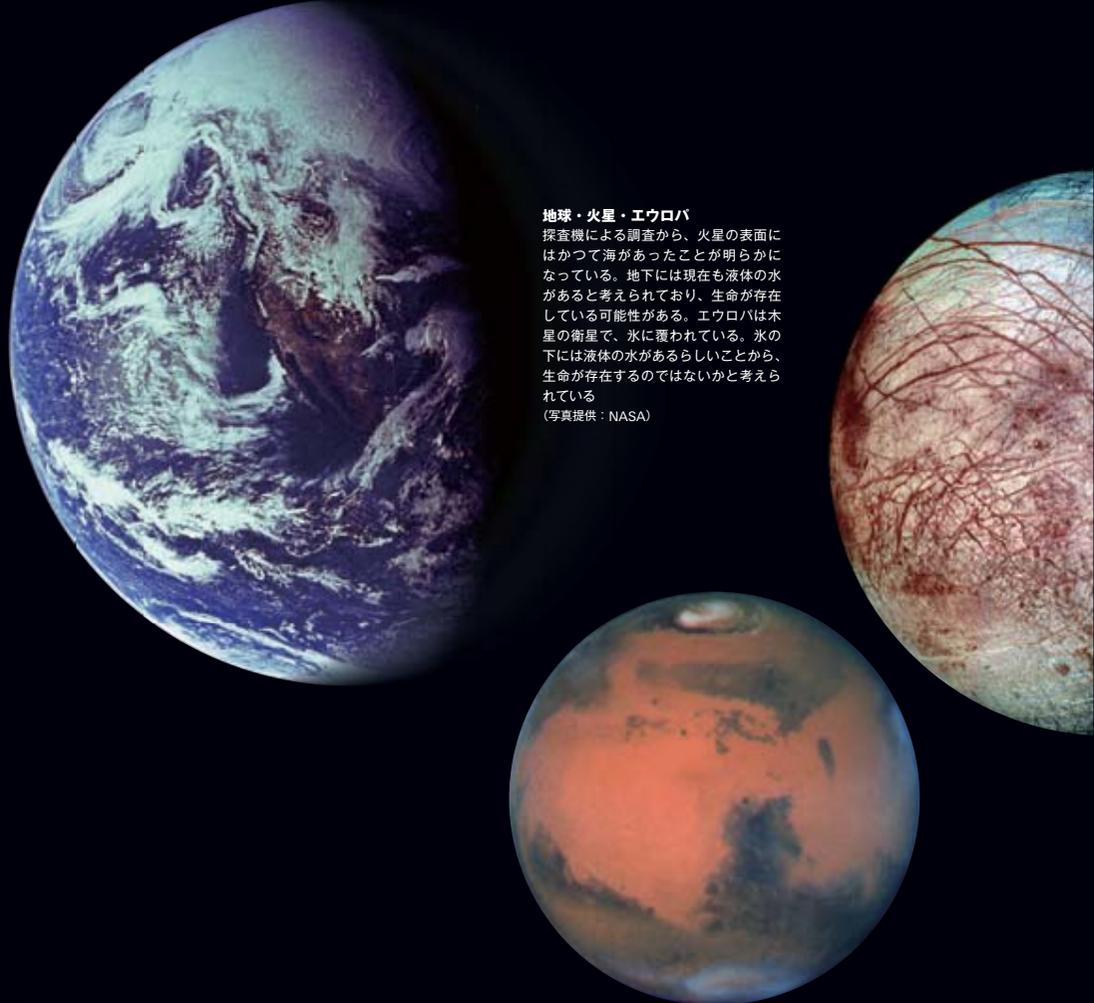
試みもある。

生命が生き可能な惑星（ハビタブル・プラネット）になるためには、その惑星が程よい大きさを持つこと、太陽から程よい距離にあること、そして液体の水が存在すること、などの条件を満たすことが必要だと考えられている。しかし、私たちは地球の生命しか知らない。いや、地球の生命についても、実はほとんど分かっていないのかもしれない。

たとえば、十数年前まで、地下深くに生物は存在しないと考えられていた。ところが、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削調査などから、海底下にもたくさんの生物、特にアーキア（古細菌）が大量に生息し、陸、海と並んで「第3の生命圏」となっていることが分かってきた。また、インド洋の深海の熱水噴出孔で採集された超好熱メタン菌は、122℃の高温下でも増殖可能なことが分かった。微生物の追試可能な生育温度はこれまで最高113℃だったことから、大幅な更新だ。宇宙には、地球とはまったく違う、想像を超えた環境で生存している生命がたくさんいるかもしれない。

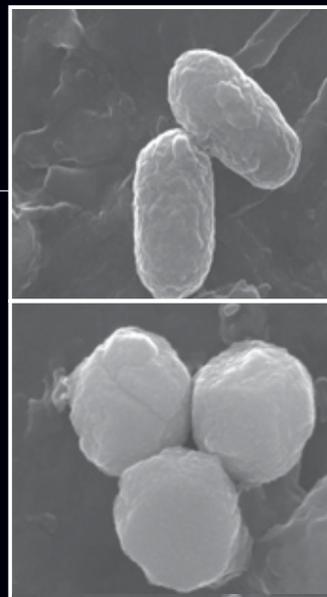
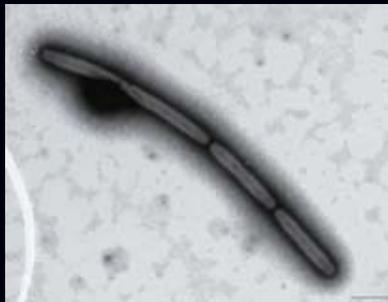
地球が生命に満ちあふれた稀有な惑星になり得た真の原理——その探求は、まだまだ始まったばかりだ。JAMSTECでは、さまざまな分野の研究者が多様なアプローチで、その原理を明らかにしようという研究を進めている。

BE



**地球・火星・エウロパ**  
探査機による調査から、火星の表面にはかつて海があったことが明らかになっている。地下には現在も液体の水があると考えられており、生命が存在している可能性がある。エウロパは木星の衛星で、氷に覆われている。氷の下には液体の水があるらしいことから、生命が存在するのではないかと考えられている  
(写真提供：NASA)

**超好熱メタン菌 *Methanopyrus kandleri* 116株の電子顕微鏡写真**  
インド洋中央海嶺「かいらいフィールド」から採集。これまでの微生物の最高生育温度を更新し、122℃の高温下でも増殖可能であることが分かった。プレカンブリアンエコシステムラボユニット 高井研ユニットリーダーらの成果



**海底下から採集されたアーキア（古細菌）**  
「ちきゅう」により青森県八戸沖約80km、水深1,180mの海底下から掘削された堆積物から検出された。これまで海底堆積物に生息している微生物のほとんどはバクテリア（真性細菌）で、アーキア（古細菌）はわずかだと考えられていた。ところが、高知コア研究所地下生命圏研究グループの稲垣史生グループリーダーらの解析から、アーキアが大量に生息していることが明らかになった