

海と地球の情報誌

Blue Earth

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

106

2010 3-4

特集

深海底から探る 生命の起源と進化

有孔虫の殻形成における
石灰化メカニズムを解明

“江戸前”の自然を見つめる
——東京湾の生物たち

チェンジング・ブルー
気候変動の謎に迫る

- 1 **Close Up**
有孔虫の殻形成における石灰化メカニズムを解明
- 2 **特集**
深海底から探る生命の起源と進化
地球生命の起源と初期進化の舞台として注目される深海底熱水活動域
 - 4 環境とのつながりによって維持された生命
 - 6 「かわいいフィールド」で見つかったハイパースライムと超マフィック岩
 - 8 生命進化と熱水環境
 - 10 コマチアイトから水素が出ることを実証
 - 12 強アルカリ性原始深海底熱水仮説
- 14 **Special topic 海洋生物の多様な世界**
世界の研究者が見つけた**海の生き物たち**
 - 16 ネットワークの力で長年の夢を実現
海洋生物センサスで明らかになったこと
- 20 **Aquarium Gallery**
しながわ水族館
“江戸前”の自然を見つめる
——東京湾の生物たち
- 22 **私が海を目指す理由**
石と水の化学反応から、地球の元素循環と生命の謎を解く
中村謙太郎 システム地球ラボ
プレカンプリアンエコシステムラボユニット専任研究員
- 26 **もっと知りたい船の知識**
深海調査研究船「かわいい」
- 28 **Marine Science Seminar**
チェンジン・ブルー
気候変動の謎に迫る
大河内直彦 海洋・極限環境生物圏領域
海洋環境・生物圏変遷過程研究プログラム プログラムディレクター
- 32 **BE Room**
編集後記
「Blue Earth」定期購読のご案内
JAMSTECメールマガジンのご案内

Close Up

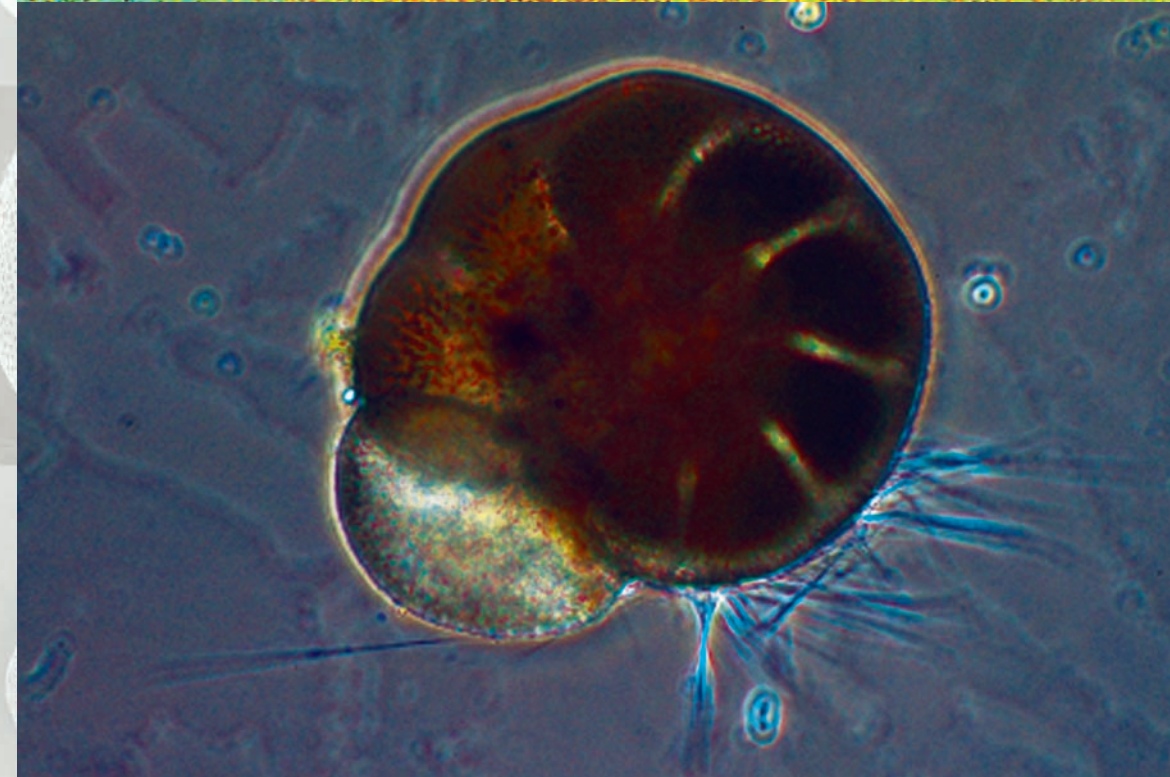
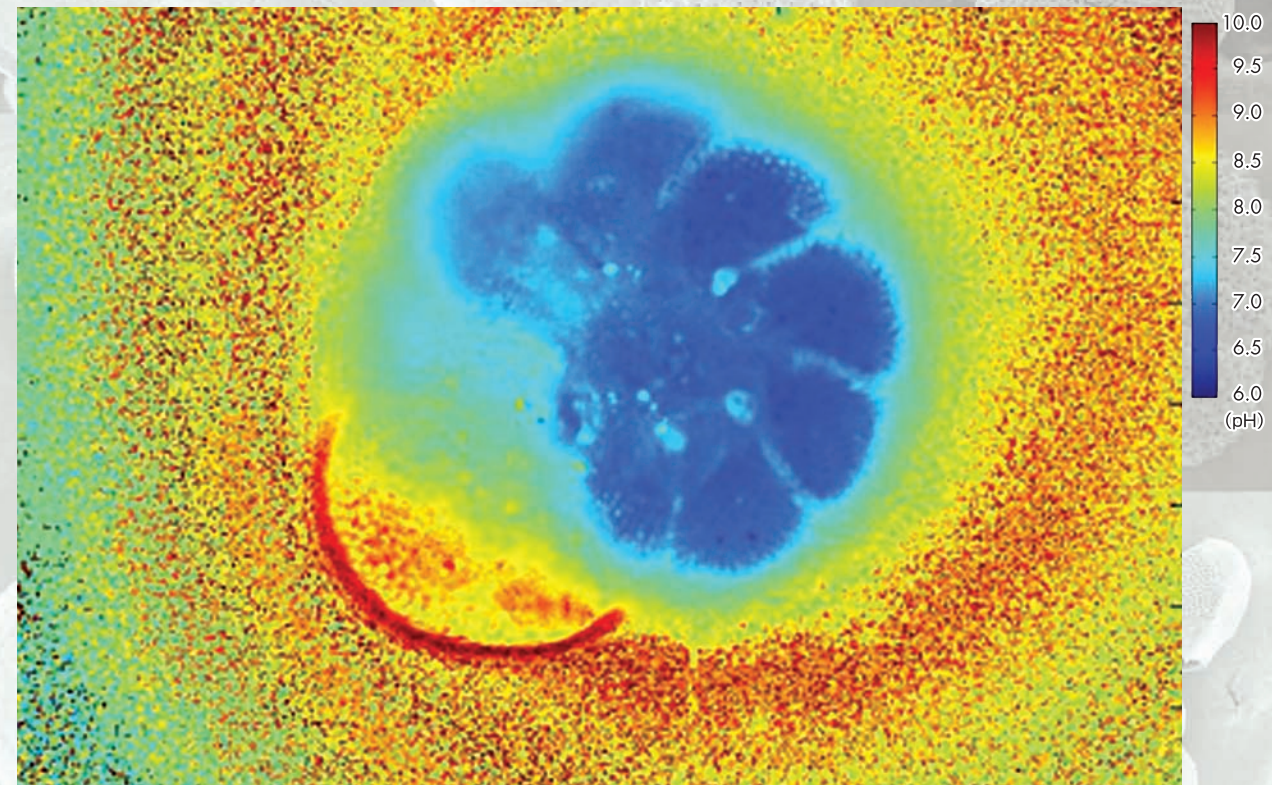
有孔虫の殻形成における石灰化メカニズムを解明

有孔虫は、世界の海に生息する原生物の一種。平均的な体長は約0.5mmと極めて小さいが、多くの種類がサンゴや貝類と同じように炭酸カルシウム (CaCO₃) の殻を形成し、海洋環境における炭酸カルシウムの主要な生産者として、物質循環に重要な役割を果たしている。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 海洋・極限環境生物圏領域の北里 洋領域長、豊福高志チームリーダーらのグループは、海洋生物の細胞内の水素イオン指数 (pH: 酸性・アルカリ性の度合いを表す数値) を可視化する新たな手法を確立し、微細な有孔虫の細胞内pHのイメージングに成功。炭酸カルシウムを沈着している有孔虫を、時系列的に観察した結果、細胞内のpH分布には空間的に大きな不均一性が見られ、殻がつくられている部位のpHが局所的に高められて石灰化を促進していることを突き止めた。これにより、有孔虫の石灰化の過程を解明する糸口をつかんだ。

従来、生物のpH分析はガラス電極を用いる方法が主流だった。そのため、測定対象のサイズが限定され、測定できる範囲も限られていた。今回、研究グループが着目したのは、HPTSというピレン系の蛍光指示薬。HPTSは、pHの変化に応じて蛍光特性 (強度) が変化するため、画像からpHを求めることができる。これを活用して、顕微鏡レベルの解像度 (1μm以下) で、pHの二次元分布を可視化する手法を確立した。これにより、有孔虫の細胞内にHPTSを取り込ませ、蛍光強度比を測定することで、石灰化部位のpHを詳細に観察することが可能になった。

有孔虫の殻 (炭酸カルシウム) のもととなる炭酸イオン (CO₃²⁻) とカルシウムイオン (Ca²⁺) のうち、炭酸イオンは海水がアルカリ性に傾くほど、その海水中の



炭酸カルシウムを沈着している底性有孔虫 *Ammonia beccarii* の蛍光強度比から得られた二次元分布像 (上) と透過光による観察像 (下)。pHによって蛍光強度が変化する指示薬 (HPTS) を使い、有孔虫が殻を形成するときに細胞内のpHが変動する様子を可視化することに成功した。左下部分で殻がつくられており、他の部分よりpHが高いことが分かる。右のスケールはpH値、暖色系はアルカリ性、寒色系は酸性を示している。

割合が増える。海水はもともとpH8.2ほどでアルカリ性 (中性はpH7) だが、有孔虫は石灰化部位で体内に取り込んだ海水のpHを9以上にし、よりアルカリ性を強め、炭酸イオンを増やして石灰化を促進させていることが、新しい手法によって明らかにされた。

近年、人為起源の二酸化炭素の影響による海洋の酸性化の進行が、大きな問題として認知されようとしている。今回の観察結果は、酸性化が海洋生物に与える影響を検討する上でも重要な知見をもたらした。海洋の酸性化が

進むと、海水中の炭酸イオンは減少 (炭酸イオンが水素イオンと結びついて重炭酸イオンになってしまう) し、有孔虫が細胞内に取り込んだ一定量の海水から得られる炭酸イオンの量も減ってしまう。さらに、有孔虫が取り込んだ海水のアルカリ性を強めることで殻を形成しているならば、殻の形成により多くのエネルギーが必要となる。いずれにしても、海洋の酸性化は、有孔虫の殻の形成を阻害する可能性が高いことを示唆している。 **BE**

深海底から探る生命の起源と進化

地球生命の起源と初期進化の舞台として注目される深海底熱水活動域

取材協力：高井 研 ユニットリーダー

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
海洋・極限環境生物圏領域 深海・地殻内生物圏研究プログラム プログラムディレクター

鈴木勝彦 兼任研究員

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
地球内部ダイナミクス領域 地球内部ダイナミクス基盤研究プログラム
地球深部と表層との共進化研究チーム チームリーダー／主任研究員

渋谷岳造 専任研究員

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

太陽光が届かない深海に、唯一エネルギーに満ちあふれた活動的な場所がある。それが深海底熱水活動域であり、地球生命誕生の舞台として注目されている。しかし、これまで具体的なストーリーは不明のままであり、地球における生命の誕生と進化は、依然、闇のなかにあった。

そんな闇のなか、新たな光が差し込もうとしている。その光とは「ウルトラエイチキューブ (Ultra H³) リンケージ」仮説だ。生命起源とそれに続く初期進化の舞台にとって重要なのは、生命を誕生させやすい場であること以上に、生命活動を持続させることができる場であり、その場を現在の深海底熱水活動域に見つけ出し、40億年にわたって続いてきた地球と生命の共進化のストーリーを解明しようとしている。どのようなメカニズムで、どのような持続可能なエコシステムがつけられてきたのか。その謎が、いま、解き明かされようとしている。

約40億年前の熱水域でも、現在と同じようにブラックスモーカーがあったと考えられてきた。しかし当時、大気中の二酸化炭素量が非常に多く、海水は酸性だったはずだ。海底の岩石と海水が反応してできる熱水も現在とは異なっていたのではないか。当時の熱水を再現した結果、熱水は強アルカリ性で大量のシリカを含んでいたことが分かった。つまりシリカでできた白いチムニーから、ホワイトスモーカーが噴き上げていたのである。

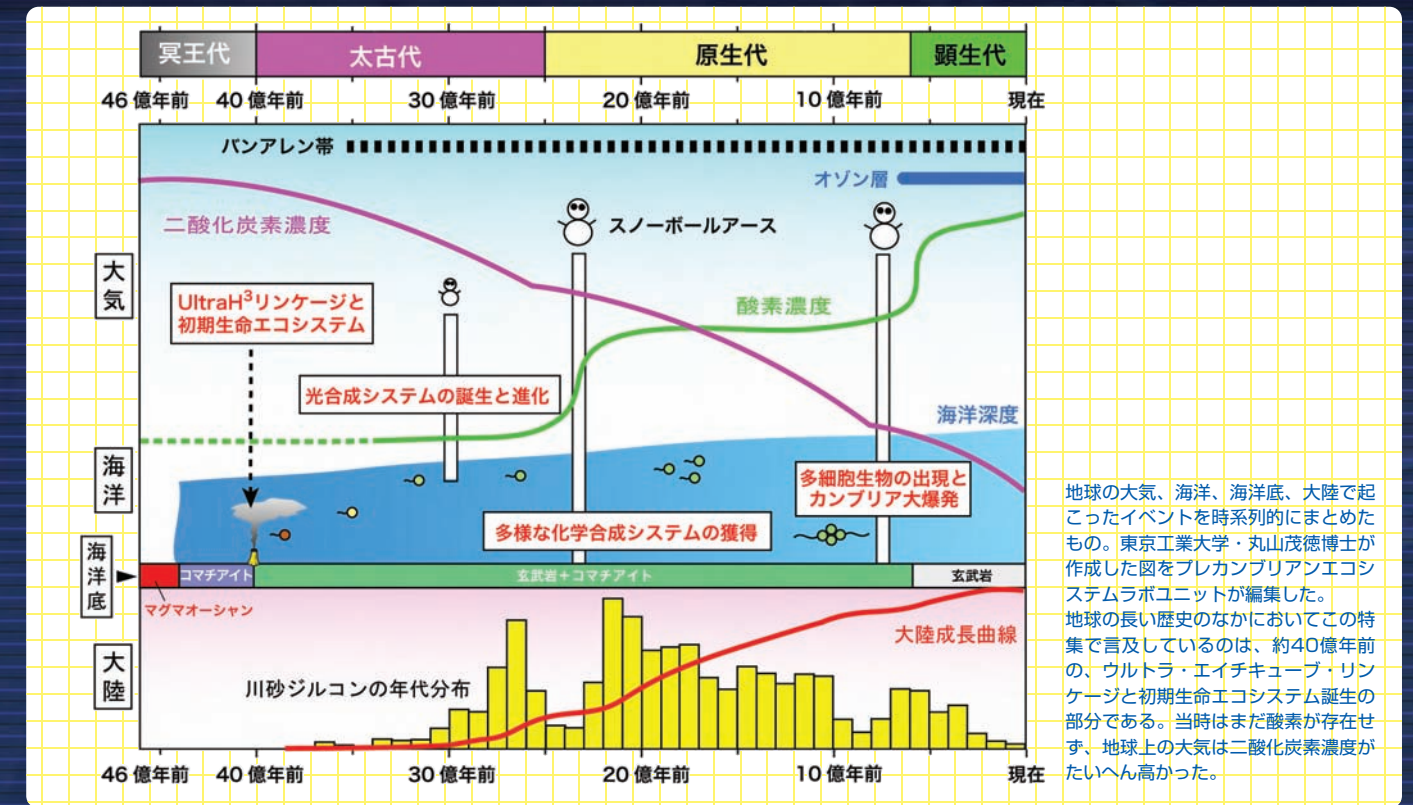
環境とのつながりによって維持された生命

生命誕生と持続の条件に迫る仮説

地球上には約43億年前には海が、そしておそらく40億年前には生命が誕生し、初期の生命エコシステム(生態系)ができたと考えられている。地球で最初の生命は、どこでどのようにして生まれ、どうやって40億年後の現在まで続く存在となり得たのだろうか。この問いに対して、生命を「本質的に外界から独立した分子機構」として捉える従来の生物学的立場から捉えた生命論だけでは、決してその謎には迫れないということが認識されるようになってきた。生命そのものとそれを内包する動的な環境のかかわりが「生命の本質的なシステム」であり、その環境の拡がり「生命圏」であるとする考え方こそが、地球における生命の誕生と存続を理解する上で重要な鍵となる。つまり、地球のどのような環境が、極めてエネルギー効率の悪い、脆弱なシステムであった原始生命を誕生させ存続させることができたのか？その生命存在条件(ハビタビリティ)を突き詰めていくと、原始

生命繁栄の場は、生命を誕生させやすい条件を備え、さらに生命活動を維持するのに十分なエネルギーが持続的に供給されるところでなければならなかったはずだ。40億年前の地球で、その両方を兼ね備えた最も有力な場が、深海底熱水である。

最近の研究では、生命の材料となる有機物自体は宇宙空間の方が生成されやすいということが分かってきた。しかし、宇宙空間での生命の誕生と飛来(古典的パンスペルミア説)は極めて可能性は低い。その生命の材料が隕石等によって運ばれてきて、原始海洋にごく微量溶け込んでいたとしても、生命の誕生にはその濃縮が必要である。また最近、海洋地殻の高温高圧条件でアミノ酸の高分子化が促進されることも分かってきた。そのような原始海水中や原始海洋地殻内の生命の材料は、熱水循環によって海底熱水噴出環境に濃縮され得る。つまり、宇宙と原始地球で創られたさまざまな生命の材料は海底熱水環境で集積し、生命を誕生させる可能性を飛躍的に増大させるのだ。



さらに熱水は生命が続いていくための化学エネルギーを持続的に供給することができる。ただしここで重要なのは、現在の海洋底を見ても、地質学的条件によってさまざまな種類の熱水があり、当然熱水に含まれる化学エネルギーの種類や量は大きく異なり、そこに棲息する(微)生物群集の姿も全く異なるという事実だ。では、40億年前の地球で初期生命エコシステム誕生の舞台となったのは、どのような熱水環境だったのだろうか。

その答えとして、海洋研究開発機構(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、提唱したストーリーが、ウルトラ・エイチキューブ(Ultra H³)・リンケージ仮説だ。ウルトラ・エイチキューブ・リンケージとは超マフィック岩(Ultramafic rocks)のUltra(ウルトラ)と、熱水活動(Hydrothermal activity)、水素生成(Hydrogenogenesis)、ハイパースライム(HyperSLiME: Hyperthermophilic Subseafloor Lithophilic Microbial Ecosystem: 超好熱性地殻内独立栄養微生物生態系)の3つのHの相互作用のことだ。

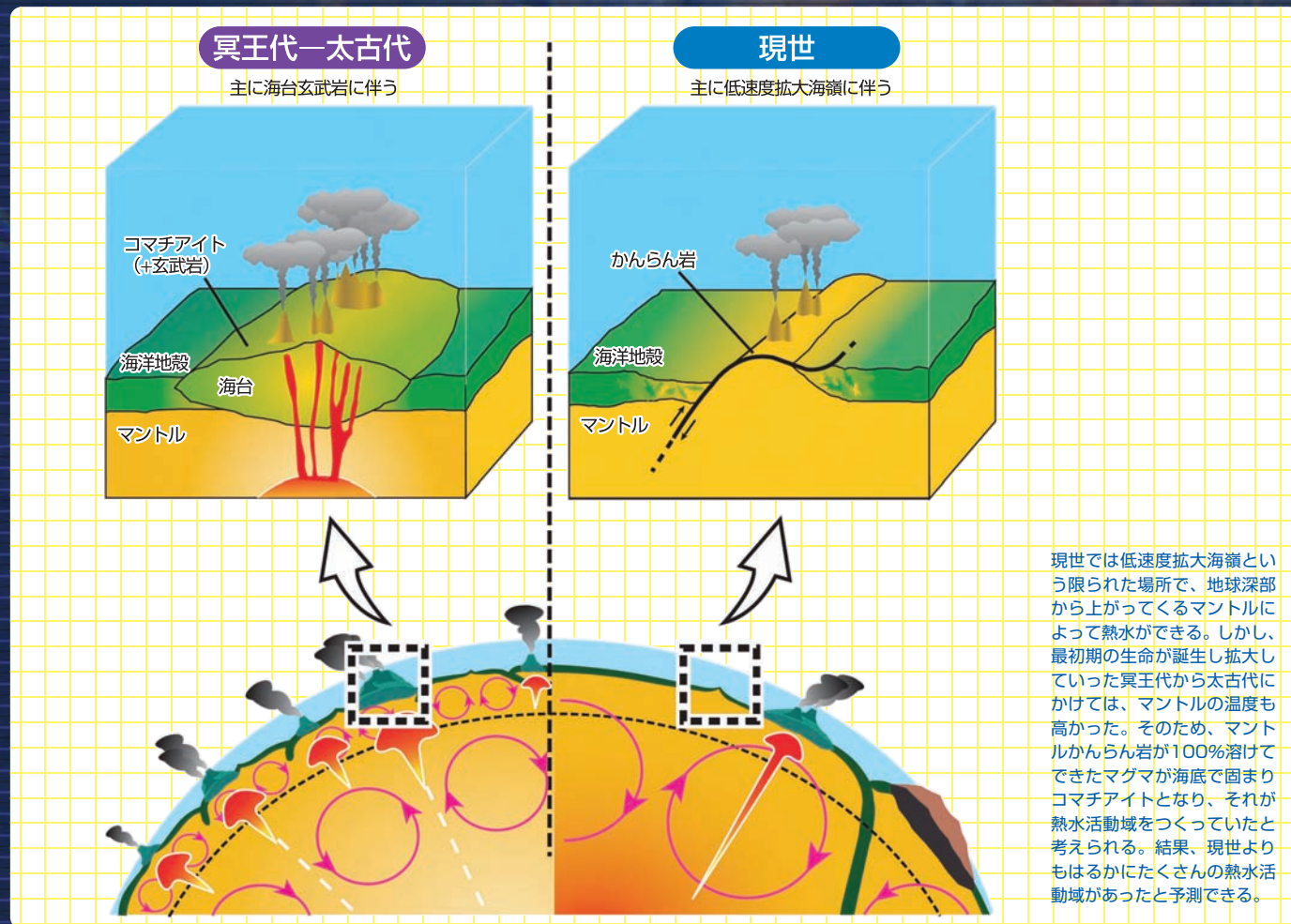
地球最古の生態系とは どのようなものだったのか

「ハイパースライム」とは、約40億年前に繁栄した最古の微生物生態系とほぼ同じようなエネルギー代謝に基づく生態系が、現在の地球にも生き残っているのではないかと示す造語である。起源の古い超好熱微生物は、光合成ではなく化学合成によってエネルギーを得ている。微生物系統学と進化生物学の視点から見ると、特に化学合成を行う微生物のなかでも、

水素と二酸化炭素を反応させてメタンと水をつくり、その化学反応のエネルギーを代謝に利用しているメタン生成菌が、最も原始的な化学合成微生物であると予想できる。これらの超好熱メタン菌は、たしかに最古の生態系の構成生命としては最も有力候補であるが、多くの海底熱水に含まれる程度の水素濃度では、生育(存続)することができないという研究成果も高井ユニットリーダーらが明らかにしていた。

一方、地球の初期では海水中の二酸化炭素はかなり高濃度だったと思われるので、残る必要条件是「高濃度水素熱水」ということになる。熱力学的に計算すると、超好熱メタン菌を支えていくエネルギー量を確保するためには、水素濃度が1ミリモラー以上必要であることも分かった。熱水にそれだけの高濃度の水素を供給する役割を果たすが、超マフィック岩だ。超マフィック岩はかんらん岩など、マントル由来の鉄やマグネシウムに富んだ岩石のことを指すが、いまよりもマントルの温度が高かった40億年前には、コマチアイトという、超マフィック噴出岩が海洋地殻の上部にたくさんあったと考えられている。そのため高濃度で水素を含む熱水活動も多数存在できたはずであり、ここでは超好熱メタン菌を一次生産者とするエコシステム、ハイパースライムが誕生し、維持された可能性が極めて高いというストーリーが導かれるのである。

このように、ウルトラ・エイチキューブ・リンケージ仮説は、われわれの祖先である初期のエコシステムが、マントルの活動や熱水循環、そこで生成された岩石といった地球とのかかわりのなかで誕生し、繁栄していったことを強く提示するものである。 BE



「きれいフィールド」で見つかった ハイパースライムと超マフィック岩

ハイパースライムの発見が示したつながり

ウルトラ・エイチキューブ・リンケージ仮説のきっかけとなったのは、2004年インド洋の水深2,450mにある「きれいフィールド」で、超好熱メタン菌（メタン生成菌）を一次生産者とするハイパースライムが見つかったことだった。さらにその熱水には、水素が高濃度で含まれていることが分かっていた。この発見をもとに、「生命が熱水で誕生し持続可能な生態系として海洋に広がるのを支えたのは、超マフィック岩-熱水活動-水素生成-ハイパースライムの4つがリンクする場である」とするウルトラ・エイチキューブ・リンケージ仮説が生まれた。さらにこのリンケージによって、現在でもマンタルかんらん岩などの超マフィック岩が関与する熱水にのみ、最古の生態系の生き残りであるハイパースライムが存在するであろうとの予想を立てることもできる。

仮説は生まれた。しかし問題は、きれいフィールド周辺は

玄武岩に覆われており、超マフィック岩が確認されていなかったことだった。また、きれいフィールドの熱水組成は、典型的なマンタルかんらん岩の熱水のものとは異なっている。そのため、アメリカの研究グループは、「きれいフィールドにはかんらん岩がなく、熱水活動は通常の玄武岩に支えられたものである」と主張。それに対して、高井ユニットリーダー率いるプレカンブリアンエコシステムラボユニットでは、「熱水に含まれる水素が、ほかの熱水と比較しても極めて高濃度なため、熱水循環のどこかに必ず水素を生成する超マフィック岩があるはずだ」と考え、論争になっていた。

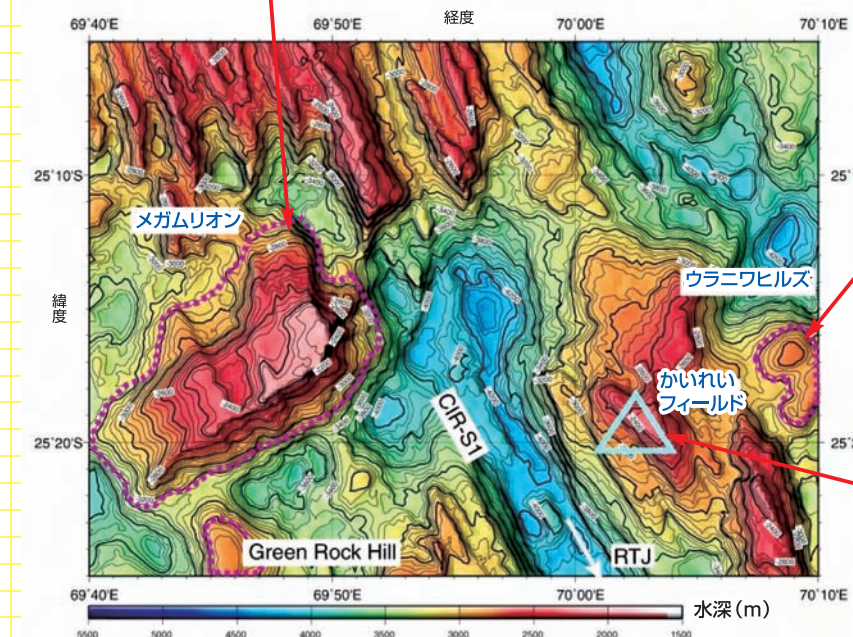
やはりあった超マフィック岩

そこで2006年、地質学研究者の協力を得て超マフィック岩の存在を証明するため、再びきれいフィールドの調査を行った。最初に潜航して岩石を採取したのは、きれいフィールド

マンタルかんらん岩がたくさんある場所



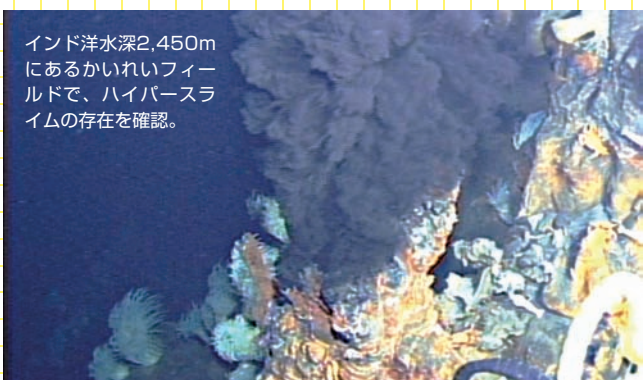
トロクトライトやダナイトを発見



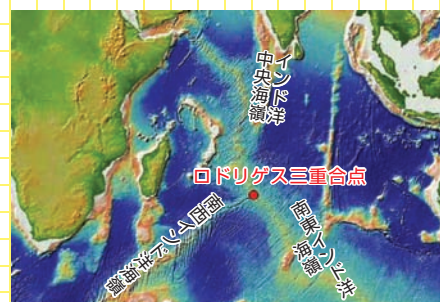
きれいフィールド周辺は玄武岩に覆われている



きれいフィールドの周辺は玄武岩に覆われているため、アメリカの研究グループはその熱水活動が通常の玄武岩によるものだと主張してきた。しかし2006年の調査で、きれいフィールドの東側でトロクトライトとダナイトという超マフィック岩が大量に発見された。これらの超マフィック岩はコマチアイトと非常に近い岩石であり、熱水の化学的組成からも、きれいフィールドの熱水はこれらに基づくことが確認された。

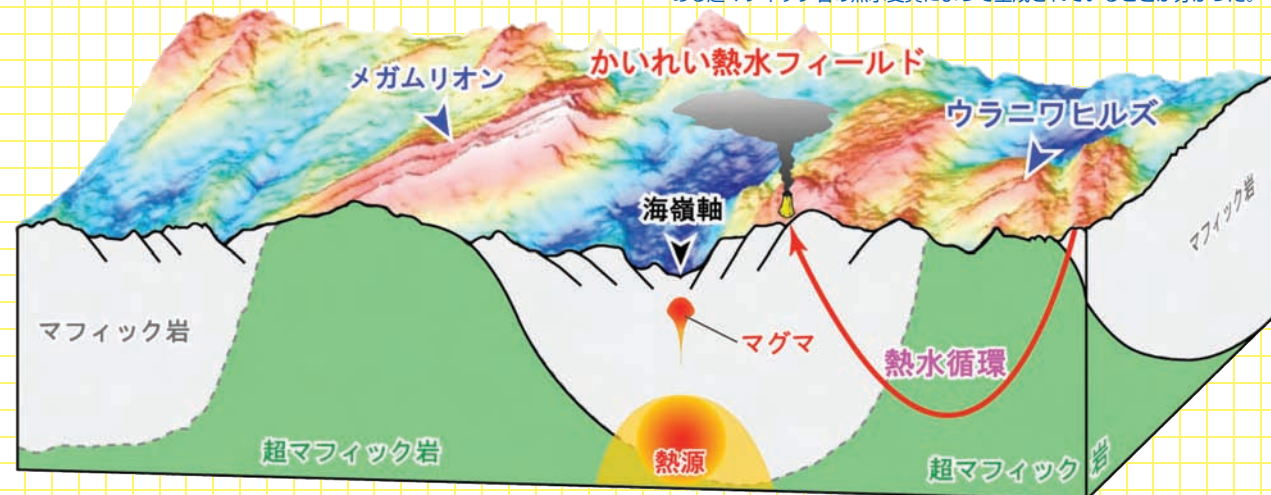


インド洋水深2,450mにあるきれいフィールドで、ハイパースライムの存在を確認。



きれいフィールドは、3つの海嶺がぶつかりあうインド洋のロドリゲス三重合点にある。

きれいフィールドの熱水は高濃度の水素を含んでいる。熱水の組成を調べた結果、きれいフィールドの熱水は、少し離れた位置にあるウラニワヒルズにある超マフィック岩の熱水変質によって生成されていることが分かった。



の真向かいの、オーシャンコア・コンプレックス（メガムリオン）といわれる、マンタルが海底に引きずり出されている典型的な構造をもつ場所である。そこでは超マフィック岩が採取され、周辺にマンタルの岩石が上がってきているのを確認することができた。しかしそこは、きれいフィールドからは海嶺軸をまたいだ反対側に当たるため、熱水がそこから回り込んでくるとは考えにくい。

次に、きれいフィールドの東側にあるウラニワヒルズ（Urania Hills）に見られた小規模のオーシャンコア・コンプレックス構造に潜航し、大量の超マフィック岩があることを発見した。これによって、熱水のもととなる海水がそこから入り、海嶺の下からきたマグマに熱せられてできた熱水と超マフィック岩が反応して、高濃度の水素が発生していると結論づけたのである。

その超マフィック岩はマンタルかんらん岩ではなく、よりマグマ由来のコマチアイトに近いトロクトライトやダナイトであった。大西洋の海嶺は非常に拡大速度が遅いため、かんらん岩が表出するか玄武岩しかないかのどちらかである。ところがイ

ンド洋は中速度拡大といって、拡大速度が速くなったり遅くなったり、あるいは場所によって速度が違うという特徴があるため、より地質が複雑になっている。

これらウラニワヒルズで発見された超マフィック岩が海水と反応するとどのような熱水がつけられるかを検証した結果、まさにトロクトライトやダナイトの熱水変質によって、きれいフィールドの熱水組成が説明できることが分かった。つまり、コマチアイトに近い超マフィック岩によるきれいフィールドの熱水こそ約40億年前に一番近いタイプの熱水であり、現世のウルトラ・エイチキューブ・リンケージであることが副次的に示されたのである。

典型的なかんらん岩の熱水である大西洋のレインボーフィールドでも、高濃度の水素が測定されている。そこで、レインボーフィールドの微生物の解析も行った結果、ハイパースライムの存在が確認された。この2つの例から、ウルトラ・エイチキューブ・リンケージが現在の熱水活動に確かに存在することが分かり、現世においてはこの仮説が裏付けられることになった。BE

生命進化と熱水環境

初期生態系には水素の存在が重要

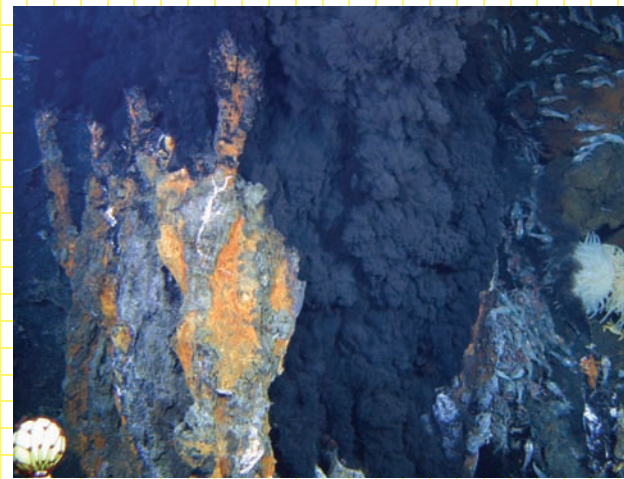
生命の起源を探るには、大きく分けて2つのやり方がある。一つは試験管のなかで無機物から生命のもととなるアミノ酸や核酸をつくり、タンパク質の合成やRNAなどの遺伝物質合成を目指すアプローチ。もう一つは、プレカンブリアンエコシステムラボユニットが行っているように、現在から過去へ、生物の共通祖先にまでさかのぼり、太古の岩石のなかから情報を取り出して当時の環境を調べ、生命の痕跡を探ることで生命の

起源に迫っていく方法である。

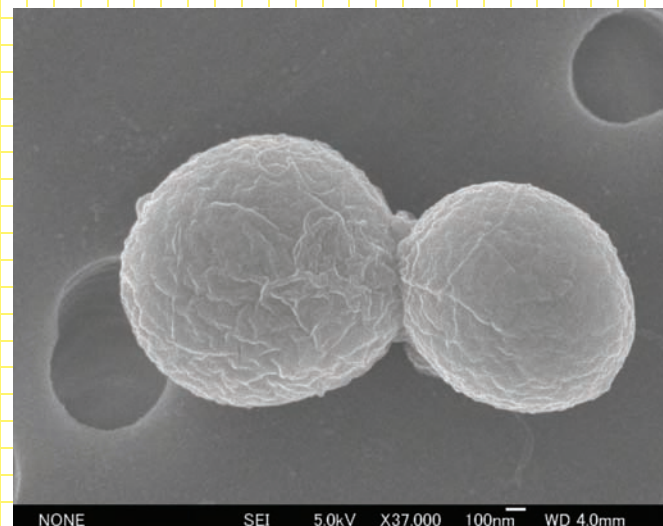
生命の材料となるアミノ酸やカルボン酸は実験室でつくることができるし、アミノ酸など低分子の有機物は宇宙から飛来する隕石にも含まれている。しかし現在のところ実験で可能なのは、アミノ酸をいくつか結びつける段階まで。タンパク質とRNAをつくり出すところまで到達するには大変な距離がある。

一方、プレカンブリアンエコシステムラボユニットは、すべての生命の共通の祖先はメタン生成菌であるとし、現存するメタン生成菌のエネルギー代謝や生息環境を調べていくことで、初期の生命体が生きながらえることができた環境を想定する手法をとってきた。メタン生成菌が生きていくために重要なポイントは、熱水中に一定以上の濃度で水素が含まれていることである。

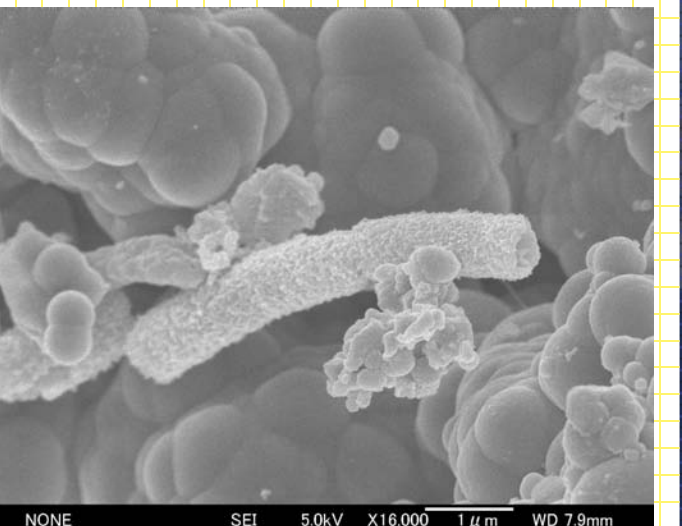
そこで水素濃度の高い熱水域をみていくと、インド洋のきれいなフィールドや大西洋のレインボーフィールド、ロガチェフフィールドといった、かんらん岩やトロクトライトがある熱水域が上位にくる。しかしその一方で、東太平洋北緯9度50分の熱水域のように、玄武岩しかないのに水素濃度が極めて高いところもある。さらに2009年の調査で、インド洋に玄武岩しかないのに水素濃度の高い熱水域、ドードーフィールドが発見された。これら玄武岩の熱水域では、水素はどうやって発生しているのだろうか。



きれいなフィールドの熱水域のチムニーから吹き上げるブラックスモーカーの様子。この熱水に含まれる高濃度の水素が、ハイパースライムを支えるエネルギー源である。



超好熱メタン菌の電子顕微鏡写真。これらの超好熱メタン菌が、冥王代の地球においてもハイパースライムの一次生産者として初期のエコシステムを支えたと考えられる。



超好熱メタン菌の電子顕微鏡写真。これらの超好熱メタン菌が、冥王代の地球においてもハイパースライムの一次生産者として初期のエコシステムを支えたと考えられる。

熱水活動域	レインボーフィールド	ロストシティフィールド	きれいなフィールド	地球初期の熱水
場所	大西洋中央海嶺	大西洋中央海嶺	インド洋中央海嶺	—
母岩	かんらん岩 はんれい岩	かんらん岩	かんらん石はんれい岩 玄武岩	コマチアイト 玄武岩
熱源	超高温の はんれい岩	蛇紋岩化	超高温の 玄武岩	コマチアイトと 玄武岩のマグマ
熱水の水素濃度	16mM以下	1~10mM	2~10mM	10mM以上
pH	3.5以下	11以下	3.5以下	4以下、または10以上
メタン濃度	1 mM	1~15mM	0.02mM	1 mM未満
鉄濃度	20mM	0.01mM	5mM	1~20mM
主なエネルギー代謝	水素—メタン発生	高分子有機 栄養型 硫黄還元	水素—メタン発生 水素—硫黄還元	水素—メタン発生 水素—鉄還元 水素—硫黄還元
ハイパースライムの有無	あり	なし	あり	あり

世界の主だった深海熱水域と冥王代の熱水域（地球初期の熱水）を比較すると表のようになる。ハイパースライムの存在は熱水の水素濃度に依存し、水素濃度が高い熱水となるためには海水が反応する母岩の種類が重要である。しかし、世界の熱水域には周辺に玄武岩しかないにもかかわらず高い水素濃度を示す例があり、これまでその理由が不明だった。しかし、実験によって、ある条件下なら、玄武岩から高濃度の水素が発生することもあり得ることが分かった。

玄武岩からも水素が発生する

岩石から水素が発生する原因の一つに、地震による断層が挙げられる。1970年代より、陸上では断層から高濃度の水素が発生することが知られていた。ただし、水素が発生するのはシリカ (SiO₂) の多い花崗岩地帯で、玄武岩やかんらん岩で発生する例はなかった。そこで高知コア研究所の廣瀬文洋研究員と協力し、石を回転させて摩擦させ断層が滑る状態を再現する装置で実験を行ったところ、玄武岩、かんらん岩でも高濃度の水素が出ることが確認された。海嶺の微小な地震程度のエネルギーでも水素は発生し、しかも水のある状態の方が水素がたくさん出た。この実験から、海嶺の小さな地震が起きている環境で水素が発生し得るとことが分かったのである。

玄武岩は大変ありふれた岩石で、約40億年前にも広く存在したと考えられている。それでは、玄武岩のつくり出す熱水が初期生命の誕生に関係していたのだろうか。

40億年前の超マフィック岩であるコマチアイトと玄武岩

の熱水を比較すると、無機物から有機物を合成する能力は、コマチアイトなどの超マフィック岩の方がはるかに高いことが分かっている。超マフィック岩は高濃度の水素を生成するだけでなく、その熱水で起きる化学反応が、生物の体内で起きている生化学反応と非常によく似ているという点で、生命の誕生に有利なのだ。生物がエネルギー代謝に利用している酵素には、鉄やモリブデン、リンなどが含まれている。おそらく熱水中のミネラルの化学反応を、生物はさらに効率的な形で利用するようになったのだろう。そのため、コマチアイトは世界中の研究者から重要視されているのだ。

約40億年前にはコマチアイトが多く存在していたはずだが、それが海洋地殻に占めていた割合については諸説ある。そこで、最初の生命が誕生し初期の生態系を確立するまではコマチアイトの熱水が、その後、生命が全地球上に広がり進化する過程では、より普遍的でありふれた玄武岩熱水から断層運動によって発生する水素が貢献したのではないかとストーリーが成り立つのである。

BE

コマチアイトから 水素が出ることを実証



35億年前に海底で噴出したコマチアイト(南アフリカ産)。表面にはコマチアイトの特徴であるスピニフェックス構造が見られる。本来はもっと鮮やかな色であるはずだが、風化が進み茶色っぽくなっている。

高温高压下実験で40億年前の熱水を再現

約40億年前の地球はマンツルの温度が高く、とけたマグマが分厚い海洋地殻を形成しており、現在のようにかんらん岩が海底に露出していたとは考えにくい。では、40億年前の地球には、海底に露出しているような超マフィック岩は存在し得なかったのか？ 実は、地球初期には、マンツル温度が1600℃以上の高温の条件で生成する、コマチアイトといわれる超マフィック岩が存在した。コマチアイトはマンツル温度が高かった25億年より古い地殻でのみ観察される岩石であり、40億年前の海底にも存在したはずである。

したがって、初期生命エコシステムが、超マフィック岩の熱水反応によって生成する水素によって支えられるとするウルトラ・エイチキューブ・リンケージによって成り立つことを証明するには、当時の海底に噴出したと考えられる、コマチアイトが熱水と反応して水素が出ることを証明する必要がある。過去の高温高压下実験でかんらん岩から水素が発生することは分かっていたが、コマチアイトから実際に水素が生

成されることは確認されていなかった。そこで地球初期の深海において海水と岩石が反応して水素に富んだ熱水が生まれる過程を高温高压下で再現する実験を行うこととなった。

実験に使用したのは南アフリカで掘り出された35億年前のコマチアイト。コマチアイトは古い時代のものほど、鉄とマグネシウムに富んでいることが知られており、冷えて固まったときにできる表面の針のような構造(スピニフェックス構造)が特徴的だ。

本来新鮮なコマチアイトに含まれる鉄は二価鉄で、そのため見た目は黒っぽい色をしているはずだが、実際手に入れたコマチアイトは風化が進んでおり、二価鉄が酸化して赤茶けていた。40億年前を再現するには、まずこれを当時の状態に戻さなければならない。そこで、コマチアイトを粉にして、コマチアイトのもととなるマグマが生成されるときと同じ酸化還元状態にした上で、温度を1600℃まで上げてと化した。温度が下がって再び固体となり、生成したコマチアイトにスピニフェックス構造が現れたことを確認した。生成物のうち、今

回はガラス状コマチアイトを粉にして、いよいよ300℃、500気圧の高温高压下で海水と一緒に「煮込む」実験に移る。実験の途中で水素濃度を測るために、なかの溶液を複数回取り出す必要がある。そこで反応容器には、柔軟性があるために内部の溶液を採取しても内部の圧力を下げずにすみ、しかもほかの物質と反応しにくい金バッグを使うことにした。

4年の苦闘の末、 高濃度の水素生成を確認

しかし、実験を始めてみると、高温高压下ゆえの問題が続出した。たとえば、装置にちょっと触れただけでも手の脂などの有機物が付着し、高温高压にすると、その微量の有機物からかなりの量の水素やメタンが発生してしまう。そこで装置は使用前に500℃で熱処理することにした。コマチアイトの粉にも処理している間に有機物が入ってしまうが、こちらは500℃で加熱すると酸化してしまうおそれがあるので、試行錯誤の結果、有機物をよくとかす上に取り除きやすいアセトンで洗うという方法にいきついた。そこでまず、アセトンでの洗浄によって水素やメタンが発生しないことを高温高压実験で確かめた後、初めて実験に入ることができたのである。ラボメンバーのあらゆる知恵を動員し、高温高压反応装置が実際に稼働するまでに約3年、これらの問題を解決するのに1年以上を要した。

実験開始後、数日たってから水素が出始めた。その後発生する水素の濃度が一気に上がり、500時間を越えたあたりで平衡に達した。水素が生成されるメカニズムは、コマチアイトに含まれる二価鉄が水と反応し三価鉄となるときに電子を放出し、その電子が水素イオンに与えられて水素となるというものだ。最初の数日間は別種の反応が起こっており、それが終了したところから二価鉄と水が反応して水素が出始めたのである。

実験によって生成された水素は、ハイパースラ임が確認されたかきれいフィールド、レインボーフィールドに匹敵する高濃度のものであった。これによって、ウルトラ・エイチキューブ・リンケージ仮説が実験によって裏付けられたことになる。 **BE**



上図は、海水と岩石を300℃以上の高温、500気圧の高压下で「煮込む」ための、バッチ式高温高压反応実験装置。容器が金でつくられているのが重要なポイントだ。下図は実際に熱水がつくられる海底下の熱水反応を再現する、フローリアクター式高温高压反応実験装置。チタンの筒のなかで岩石と熱水を反応させ、できた熱水を噴出させる仕組み。

強アルカリ性原始深海熱水仮説



イラスト：飛田敏

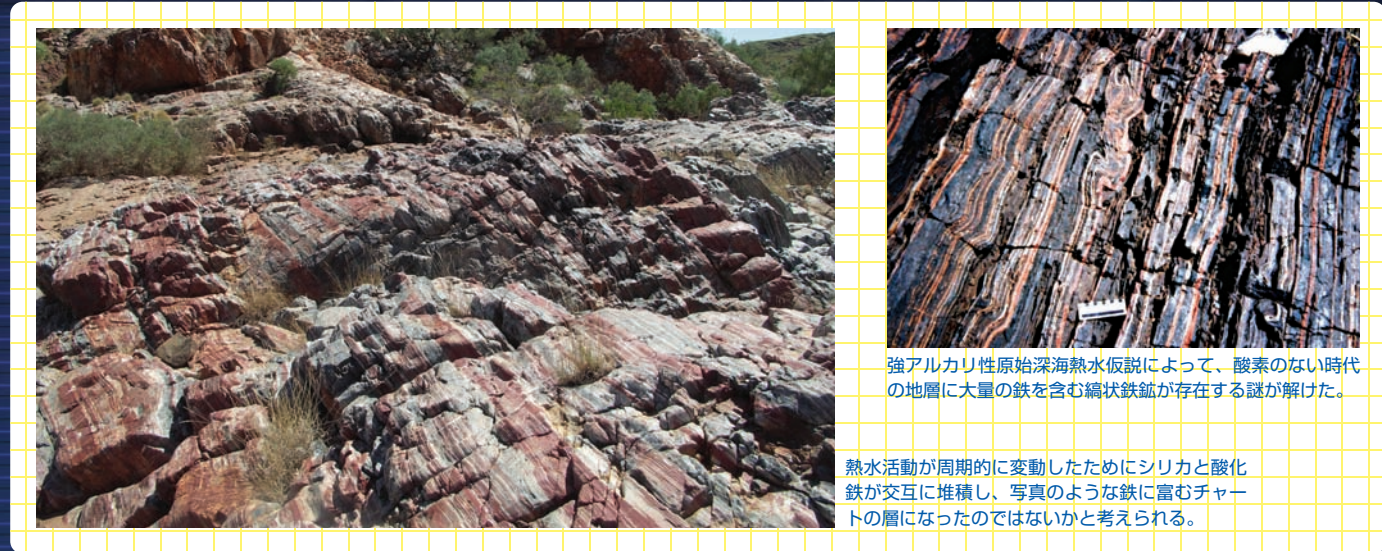
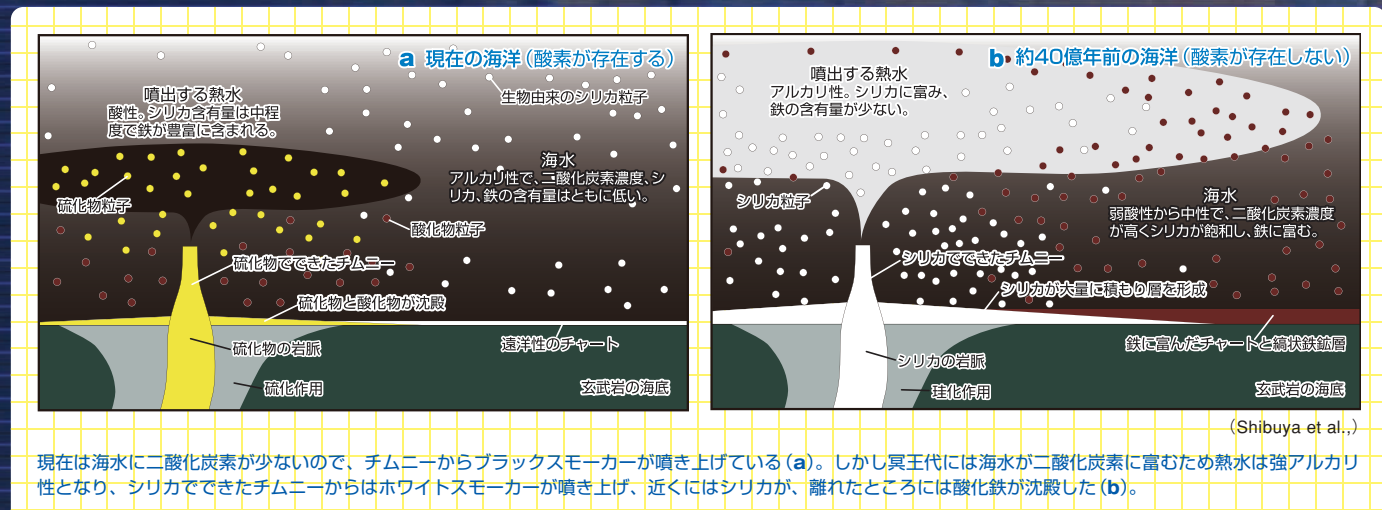
40億年前の熱水は ホワイトスマーカーだった

長らく、世界中の深海熱水研究者の間では、40億年前の熱水も現在と同じように強酸性で、硫化鉄や硫化銅を大量に含んだブラックスマーカーが噴き上げていたと考えられてきた。それを根元から覆したのが、プレカンブリアンエコシステムラボユニット・渋谷谷造専任研究員が提唱する「強アルカリ性原始深海熱水仮説」である。

太古の海底にあった溶岩（玄武岩）には、海水由来の炭酸塩鉱物が大量に含まれている。つまり岩石が海水と反応して変質したときに、大量の二酸化炭素が岩石中に入り込んだのだ。渋谷研究員はそのことから、海水中の二酸化炭素濃度は現在とは比較にならないほど高かったのではないかと考えて研究

を進めていた。一般に炭酸塩鉱物は温度が高いと形成されにくい、当時の海底地質をくまなく調査し炭酸塩鉱物の分布を調べると、熱水がつけられるような地殻深部の高温域まで炭酸塩鉱物が分布していることが分かった。このためには当時の海水には現在のおよそ100倍以上の二酸化炭素が含まれている必要がある。さらに、そのように二酸化炭素濃度が高い海水が岩石と反応して熱水をつくるとどうなるかを熱力学的に計算した結果、炭酸塩鉱物があることによって熱水のpHが高くなって強アルカリ性になり、岩石中から大量のシリカ(SiO₂)を溶かし出すということが分かったのだ。

現在の海水は二酸化炭素濃度が低く、熱水をつくる地殻深部の高温域に炭酸塩鉱物ができないため熱水は強酸性になる。そのため、硫化鉄でできたチムニーから鉄分を多く含む熱水が



強アルカリ性原始深海熱水仮説によって、酸素のない時代の地層に大量の鉄を含む縞状鉄鉱が存在する謎が解けた。

熱水活動が周期的に変動したためにシリカと酸化鉄が交互に堆積し、写真のような鉄に富むチャートの層になったのではないかと考えられる。

ブラックスマーカーとして噴き出し、周囲には海水中の酸素によって酸化された鉄分に富んだ黒っぽい沈殿物が堆積する。しかし、当時の熱水域の様子はこれとはまるで違ったものになる。チムニーは白っぽいシリカできており、そこからシリカを大量に含み鉄に乏しいアルカリ性の熱水が噴き出すため、ブラックスマーカーではなくホワイトスマーカーだったはずなのだ。熱水孔の近くにはシリカが沈殿し、また当時の海水には鉄が多く含まれていたため、少し離れたところでは、アルカリ性の熱水が海水中の鉄を酸化鉄に変えて沈殿させることになる。

これまで、鉄鉱石を産出する縞状鉄鉱層は、酸素がなかったはずの時代の地層から大量に発見されており、シリカからなるチャート生成の仕組みとともにその成り立ちが大きな謎とされていたが、当時の熱水が強アルカリ性であったと考えれば、その両方を説明することができる。その意味でも、強アルカリ性原始深海熱水仮説は画期的なものである。

初期生命を支える上でさらに有利に

40億年前の熱水が強アルカリ性だったとすると、生命の存在にとってはどのような意味があるのだろうか。

生物はエネルギーをつくり出すときに、プロトン(H⁺)を細胞膜の外側に出すことで細胞(あるいはミトコンドリア)膜の内外で電位差(細胞内が相対的にアルカリ性、細胞外が相対的に酸性)をつくり(これをつくり出すために一部の微生物を除いたあらゆる生物は全身全霊をかけて生きている)、その駆動力をもとにATP*生成酵素モーターを回してATPを合成している。近年、熱水によって生成されるチムニーのなかの微小な硫化物鉱物でできた孔が原始の細胞であるという仮説が提唱されているが、もしこの仮説が正しいとした場合、熱水が酸性で海水が

アルカリ性では、原始細胞(チムニーの細孔)の内側が相対的に酸性になり、ATPを生成しにくいという難点があった。しかし、この強アルカリ性原始深海熱水仮説が正しいならば、原始細胞の内側が相対的にアルカリ性になり、特に特殊な機構を用意せずともATP生成酵素モーターを回してATPをつくらせることができると考えられるのだ。つまり、原始深海熱水がアルカリ性であったとすると、それは40億年前の海底熱水環境で生命が誕生したことを示す大きな証拠となるのである。

また、ウルトラ・エイチキューブ・リンケージが成り立つには、海水中から二酸化炭素が、熱水からは一定濃度以上の水素が供給されることが必要である。現在、玄武岩由来の熱水は水素濃度が低い、約40億年前には玄武岩の熱水でも、いまよりはるかに水素が多かったと考えられている。現在の海水には酸素が多く含まれるために酸化硫黄化合物である硫酸が多く、玄武岩が海水と反応して変質するときに硬石膏(CaSO₄)という鉱物ができる。現在の玄武岩熱水は、この鉱物の影響によって水素濃度が低く保たれている。しかし、当時は酸素がないので海水中に硫酸がほとんどなく、水素濃度を低く保つ鉱物が生成されない。そのためメタン生成菌が生存できる程度の水素濃度があったかもしれないのである。コマチアイト熱水の方が初期生命活動を支えるにはより適しているが、最古の生命が伝播していくときに玄武岩熱水にも高い水素濃度があったとすれば、生物はより広がっていきやすかったのではないだろうか。このように強アルカリ性原始深海熱水仮説は、コマチアイト熱水系で誕生した最古の生態系「ハイパスライム」が地球進化と共に全地球に伝播した可能性を示すものであり、ウルトラ・エイチキューブ・リンケージ仮説をさらに強化するものである。

BE

*ATP…アデノシン三リン酸の略。アデノシン三リン酸は、アデニン(核酸を構成する塩基の一つ)と糖の一種であるリボースが結合したアデノシンに、3つのリン酸が結合した物質。生物が生命活動に使うエネルギーの基本単位で体内に蓄えることができる。エネルギーが必要になるとこのATPを分解してエネルギー供給を行う。

ウラナイカジカ属の一種



世界の研究者が見つけた 海の生き物たち

地球にはたくさんの生物がすんでいる。しかし、人間はそのすべてを知っているわけではない。特に海洋は未知の世界が多い。その海洋にどのような生物がいるのか、海洋生物の多様性、個体数などを知るため、2000年に海洋生物のセンサス（Census of Marine Life：CoML）が立ち上げられた。この活動は世界中から2000人以上の研究者が参加する巨大なプロジェクトとなり、多くの生物の存在と生態が明らかになった。この10年間でCoMLによってどのようなことが分かってきたのだろうか。

写真撮影：藤原義弘 チームリーダー
海洋・極限環境生物圏領域
海洋生物多様性研究プログラム



コシオリエビ属の一種

ミドリフサアンコウ



ベニハゼ属の一種



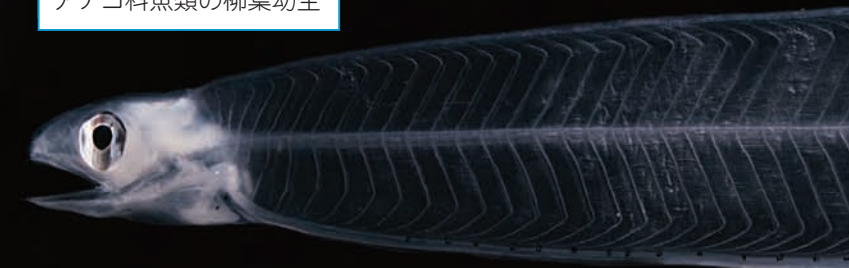
オオナミカザリダマ



ヒラノマクラ



アナゴ科魚類の柳葉幼生



ネットワークの力で 長年の夢を実現

海洋生物センサスで明らかになったこと

取材協力：藤倉克則 チームリーダー

海洋・極限環境生物圏領域 海洋生物多様性研究プログラム 深海生態系研究チーム



ウミクワガタの仲間

ネットワークで生まれる大きな力

地球には実にさまざまな生物がすんでいる。現在知られているものだけでも約175万種といわれているが、まだ知られていないものを含めると、その数は計り知れない。しかし、ここ数十年で、生物の多様性が急激に失われている。1600～1900年では1年平均で0.25種しかなかった生物の絶滅が、1975～2000年にかけては1年で4000種と桁違いのスピードで進んでいるのだ。

人間は陸上に住んでいるので陸のことはまだ見えやすい環境にあるが、海の中までは目が行き届かない。誰にも知られずに絶滅してしまった生物もいるかもしれないのだ。そこで、海洋生物について研究している世界中の研究者がネットワークを組んで、大規模な海洋生物の調査に乗り出した。それが海洋生物のセンサス（Census of Marine Life：CoML）である。

CoMLは世界80カ国から2000人以上の研究者が参加する巨大なプロジェクトだ。「海洋生物学者は、基本的に海で暮らしている生物のすべてについて知りたいと思っています。しかし、現実には一人の学者が扱えるのは、自分が専門としている領域という非常に狭い部分だけです。海の全生物を理解するなんて、あまりにも大きすぎて夢のまた夢だと思っていました」と語るのは海洋生物多様性研究プログラムの藤倉克則チームリーダー（TL）だ。

しかし、CoMLのプロジェクトが海洋学者の思いを一変させたという。CoMLの日本事務局代表を務めている藤倉TLはそのことについて「個々の力は小さくても、数千人ものネットワークを組むことですごい力が生まれます。CoMLを通して、みんなの力を集めれば、海全体の生物のことを知るのも夢ではないと分かり始めました」と話す。

誰でも使えるデータベース

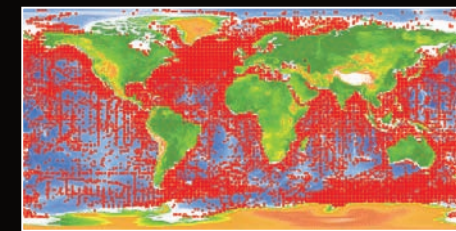
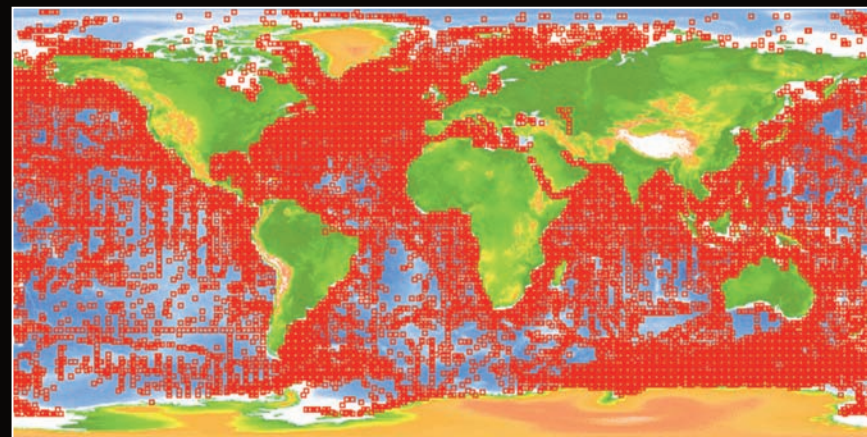
CoMLの対象は世界の全海洋と幅広い。しかも現在だけでなく、過去の歴史的な調査と未来予測も含まれている。その広い範囲をカバーするために、調査グループは16に分けられている。まず、歴史的な調査をするグループと未来予測をするグループがそれぞれ一つずつ。残りは現在の海洋について調査する14のグループだ。これらは沿岸域、珊瑚礁、大陸縁辺海、深海平原など、研究者が専門的に扱っている領域ごとに分かれている。それぞれの領域で専門的に研究して得られた成果をネットワークによって広く集めるという仕組みだ。



カイアシ類



インギンチャクの仲間



OBISにデータが登録されている場所

2005年の時点で登録された海洋生物の記録は500万件（右）だったが、現在は2220万件（左）に増えている。種別に整理すると11万2000種の生物を網羅している。（図はCoML提供）

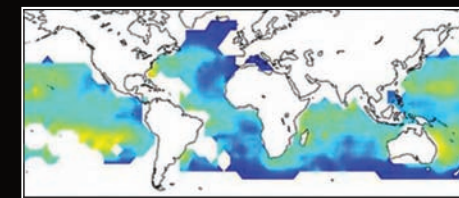
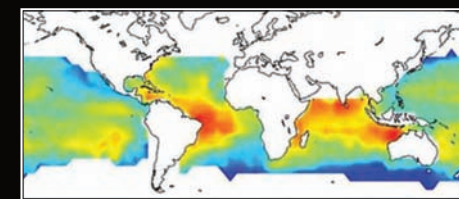
そして、その成果としてまとめられたのがOBIS（オービス：Ocean Biogeographic Information System）という検索エンジン型のデータベースで、インターネットを通じて世界中の誰もがアクセスできるようになっている（<http://www.iobis.org/>）。ここにアクセスすれば、各グループによってつくられたデータをはじめ、世界各地の研究機関などに蓄えられている海洋生物に関するデータを検索することができる。たとえば、ゾウアザラシのことが知りたければ、ゾウアザラシの学名を入力し、検索ボタンを押すだけで、その生物がいつ、どこで発見されたのかという記録が地図の上に記される。これだけでも、どの生物がどこで活動しているのかがよく分かるため、専門家でなくても楽しめる。

しかし、OBISの機能はこれだけではない。藤倉TLは「地図の機能は確かに面白いのですが、研究者は地図情報が欲しいわけではありません」という。OBISは国際的なデータベースのフォーマットに沿って、80～100項目の情報を搭載できるようになっている。世界の研究者が欲しいのはそうした詳しい情報である。詳しい情報はすべてダウンロードできるので、OBISから情報を入手して自分の研究に役立てている。ただ、全部の項目を埋めないと受付ができないのでは、登録者に大きな負担がかかってしまうので、最低限、種の名称、発見した時間と場所（緯度、経度、水深）、識別用につけた独自のIDを満たせば情報を登録できるようになっている。

研究成果をたくさんの人に届ける努力

OBISがつけられたことにより、海洋生物の研究は格段に進めやすくなった。いままでバラバラに存在していた情報が1カ所で探せるようになったので、効率よく欲しい情報に到達できるのだ。データベースは情報が多ければ多いほどより便利になる。OBISの便利さを知った研究者たちは、積極的にデータを提供するようになってきており、現在では2200万件以上の情報が登録されている。生物種数は11万種類にのぼるといふ。いま、地球上で確認されている海洋生物種は22～24万種なので、その約半数の動物がOBISに登録されたことになる。

このような膨大な情報の集積によって、従来に比べ格段にやりやすくなったものの一つが新種の決定だ。発見された生物が新種かどうか調べるためには、これまでに知られている生物種との比較が欠かせない。いままではいくつもの図書館に点在していた文献を集めて、一つ一つの写真と見比べなければ新種かどうか判定ができなかったのだが、OBISでは同じ属に入っている生物種を一



species density

生物多様性の変化

過去の記録などをもとに生物の多様性（単位面積あたりの種数）の変化を見てみると、1960年代（上）に比べて1990年代（下）の方が広い地域で生息する種の多様性が減っている。海洋生物も急速に多様性が失われていることが分かる。（図は<http://www.coml.org/media-resources/maps>より引用）

サツマハオリムシ





イトエラゴカイ属の一種

覧で表示したり、分布情報や文献情報が入手できるので、作業が一気に進む。その結果、新種と判明すれば積極的に情報発信をするようにしている。

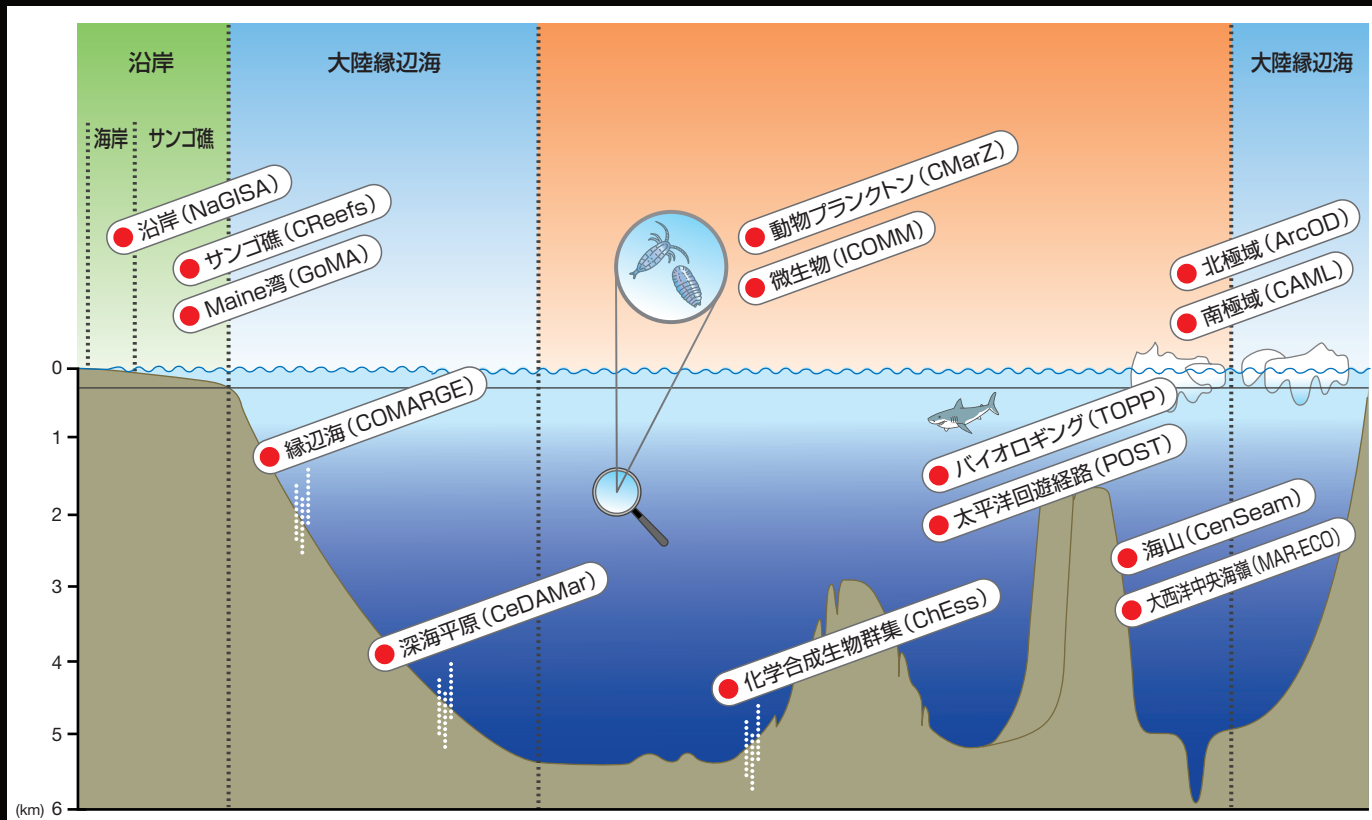
私たちは、「新種」と聞くと研究者にも意味のあることのように思ってしまうが、微生物や小型の生物が多い海のなかでは、研究者にとってあまり珍しいことではないという。CoMLが新種生物の発表を一生懸命行っている背景には、ふだん海洋生物学にはあまり縁がない一般の人たちに関心を示してもらえからだ。

CoMLの運営費はアメリカの財団が中心になって拠出している。その実に4割近い金額を、研究内容や成果を一般の人に知らせたりするアウトリーチ活動に使っている。せっかく多くの知識が得られても、研究者社会のなかだけで完結してしまったのでは、世間ではあまり評価されなくなってしまう。広く社会の人たちに研究成果を伝えていくことで、CoMLの研究がいかにも有意義で、社会に役に立つものなのかを理解してもらおうというのだ。そのためには新種の発表はとても有効な道具の一つである。

そして、アウトリーチ活動としてとても大きなプロジェクトとなったのが映画「OCEANS (オーシャンズ)」だ。もともとCoMLでは、世の中にアピールしていくための手段として映画製作に注目していたが、研究者のネットワークでは映画そのものをつくるノウハウをもっていなかった。しかし、ちょうど同じ時期に映画「WATARIDORI (ワタリドリ)」を製作したジャック・ペラン監督が海洋をテーマにした映画づくりを考えているという情報が入り、製作に協力することになった。撮影のために、面白い生物が集まるスポットを紹介したり、撮影した生物の名前を決め、その生物についての説明をしたりする作業を担当した。しかし、藤倉TLはこの映画の内容については、疑問符を投げかけている。それは、「確かに面白い海洋生物の生態を映し出したシーンが多数あり、多くの人々に海の生き物の不思議さ、賢さ、したたかさ、弱さなどをうったえる映画であることは間違いありません。反面、ロボットを使ったサメ漁のシーンや、CGによる捕鯨のシーンは、生物保護を感情的に促しすぎる恐れは

現在の海洋における14の調査グループ

CoMLは、過去、現在、未来のそれぞれについて研究している。なかでも一番研究者が多いのが現在の海洋についてで、14のグループに分かれて研究を進めている。(図は<http://www.coml.org/census-framework>を改編)



イラスト：丹治美佐子

ないか。人類が海洋生物と共存し、持続的に利用することを考える上で、冷静な議論ができなくなることを恐れています」ということだそうだ。

ともあれ、そうしたCoMLの活動を通して、研究者同士にも研究のノウハウを教えあったり、調査方法を統一したりする作業が進んでいった。「国によって調査方法が違くとそれだけでデータの信頼性が落ちてしまいます。信頼性をあげるためにも、沿岸域で生物を調べるときには何cmの枠の範囲を調べましょうとか、細かいルールを決めていきました」と藤倉TL。また、先進国と発展途上国の間の研究レベルを埋めていくために、発展途上国の人に向けての教育も重要な課題だったという。藤倉TLは「生物が多様な地域は発展途上国が多い赤道沿いに集まっています。この地域の人たちが自分たちで研究を進めるようになるためにも、次世代の研究者を育てることはとても大切なことなのです」と説明する。

次の10年に向けて

このように数々の成果を挙げてきたCoMLは、2010年10月に活動を終了する。もともと10年間の時限プロジェクトだったので、10年たったところで予定通り活動終了を迎えることになるのだが、せっかくつくったネットワークを生かそうと、研究者たちは次の活動を模索している。いまのCoMLは分布や多様性データを中心に集めているが、今後は、それらに加え連鎖、物質循環、調査のための新たなテクノロジー開発といったことにも取り組むことが検討されている。現在、運営費を拠出している財団に代わる新たなスポンサーを探しているが、もし、見つからない場合は、各国で供託金を出しあう方法も視野に入れている。

2010年10月には、名古屋で生物多様性条約の第10回締約国会議 (COP10) が開催されることになっている。COP10ではこれまで海洋生物について十分な議論がされてこなかったが、CoMLにかかわる研究者を中心に、この10年の成果をもとに海洋生物についての議論もして、COP10で策定する今後の目標に海洋生物の多様性も入るように準備が進められている。CoMLの10年間の活動によって、OBISに代表される膨大な研究データがもたらされた。現在は、広い海洋に暮らす生物たちの顔がだんだんと明らかになってきたところだ。そして、それらのデータをもとに次の10年何をやっていくのか、その大きな方向性が、いま、決められようとしているのである。



調査によって見つかった新種の甲殻類。上 (Kiwa hirsute)、中 (Thaumastochelopsis sp.) の写真は、CoML提供。下の写真は、伊豆・小笠原諸島海域明神海丘水深1,200mおよび北マリアナ諸島海域水深1,600m (写真) に分布するミョウジンシンカイコシオリエビ (写真：土田真二技術研究主任海洋生物多様性研究プログラム)。

OBISの使い方



OBISの使い方はとても簡単な。まず、OBISのWebページ (<http://www.iobis.org/>) にアクセスし、検索ボックスのなかに、検索したい生物の学名か一般名を入力する。そして、[Search] ボタンを押すと、その生物が観測された地点の地図が表示されるようになっている。ただし、学名も、一般名もひらがなやカタカナでは検索できないので注意が必要。また、地図を使って、調べたい海域に生息する生物種を調べられる。

AQUARIUM GALLERY

しながわ水族館

“江戸前”の自然を見つめる —— 東京湾の生物たち

取材協力：梅原貴志・展示課係長（学芸員）

■ Information：しながわ水族館

〒140-0012 東京都品川区勝島3-2-1（しながわ区民公園内）
TEL 03-3762-3433
URL <http://www.aquarium.gr.jp/>



「品川と海」の展示水槽。ボラやカワハギ、タカノハダイ、クロダイなどが泳ぐ。



東京湾の外湾には、色鮮やかなヤギ類やウミトサカ類なども多く見られる。



カサゴ



シロギス



アナゴ



アカエイ



ボラ

しながわ水族館は、羽田空港の北に位置する埋め立て地・勝島のしながわ区民公園内にある。区民の要望で1991年に設置され、イルカやアシカのショー、ペンギンの展示をはじめ、世界の珍しい水生生物も数多く紹介する総合水族館だ。

特に目を引くのは、地元・東京の海をテーマにした水槽群。「東京湾に注ぐ川」、「東京湾の干潟と荒磯」、「品川と海」、「東京湾に棲む生物たち」といった展示水槽が並び、シロギス、カサゴ、メバル、クロダイ、カワハギ、マイワシ、マダコ、ボラ、ウミタナゴなど、いわゆる“江戸前”の魚たちが泳ぐ。一方で、これらの展示水槽は、かつての豊穡の海から大きく姿を変えた、大都市・東京の海の現実をしっかりと表現している。「品川と海」の水槽は、海岸に迫る工場や倉庫が背景に描かれ、護岸やブロックなどの人工物に囲まれた海を再現する。「東京湾の干潟と荒磯」では、「急速な埋め立てによりその90%が失われた東京湾の干潟は、現在では、三番瀬、羽田州、谷津干潟、盤洲干潟などがわずかに残っているだけです」と展示解説に記し、豊かな自然が失われていくことの重大さを私たちに問いかける。だが、これらの展示水槽は、「それでも東京湾にはちゃんと魚たちが生きている」というメッセージでもあり、私たちに元気づけてくれる。

「東京湾と聞くと、汚染された海を想像し、生き物もいないと思っている人がいます。でも、実際に調べてみると、東京湾にもた

くさんの生き物がいることが分かります。特に湾口に近い外湾には、比較的水質がよいところに棲む魚やヤギ類、ウミトサカ類、サンゴ類も見られます。また内湾や湾奥にも、適応力のある比較的強い魚たちが棲息しています。そのことを水族館に来た人たちに感じていただき、東京湾をもっと豊かな海にするにはどうしたらよいかを考えるきっかけになれば嬉しいですね」と展示課係長の梅原貴志さんは話す。

1960年代から70年代半ばころまで、急速な工業化と都市化に伴い、東京湾は“死の海”といわれるほどに汚染が進んだ。だが、その後の環境意識の高まりや工業用排水・生活排水の浄化対策により、少しずつ東京湾の水質はよくなり、豊かさを取り戻しつつあるといわれる。しながわ水族館では、千葉県・金谷沖（外湾）での潜水調査や定置網調査をはじめ、東京都大田区・京浜島（湾奥）の運河に面した干潟での生物調査を15年以上にわたって続けている。さらに、これらの調査に併せて水質調査も実施し、東京湾の環境を見守っている。「季節変動や年ごとの変化も大きいのですが、生物は比較的安定し、少しずつよい方向に向かっていっていると思います。もちろん、水質は決してよいとはいえませんが、もっと長期間継続していくと、いろいろなことが見えてくるかもしれません。地道な調査ですが、ずっと続けていくことが大事なのだと思っています」と梅原さんはいふ。



埋め立て地に並ぶ工場や人工護岸、これも東京湾の姿であり、そんな海にもしっかりと魚たちは生きている。手前はタカノハダイ。

石と水の化学反応から、地球の元素循環と生命の謎を解く

中村 謙太郎 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専任研究員



海底下で熱せられた水が300℃以上もの熱水となつて地殻内の元素を溶かし込み、真っ黒なブラックスモーカーとして噴き上げている海底熱水系。そこでは地球表層の海水と地殻の岩石との間で化学反応による元素のやりとりが大規模に行われている。海底熱水系における岩石と水との化学反応を研究する中村謙太郎研究員は、熱水が石とどんな反応をしているかが分かれば、地球で生命が生まれた謎を解く鍵にもなるという。生命の存在に、岩石と水はどうかかわっているのだろうか。

「しんかい6500」潜航前
(2009年中央インド洋海嶺の調査)

Profile

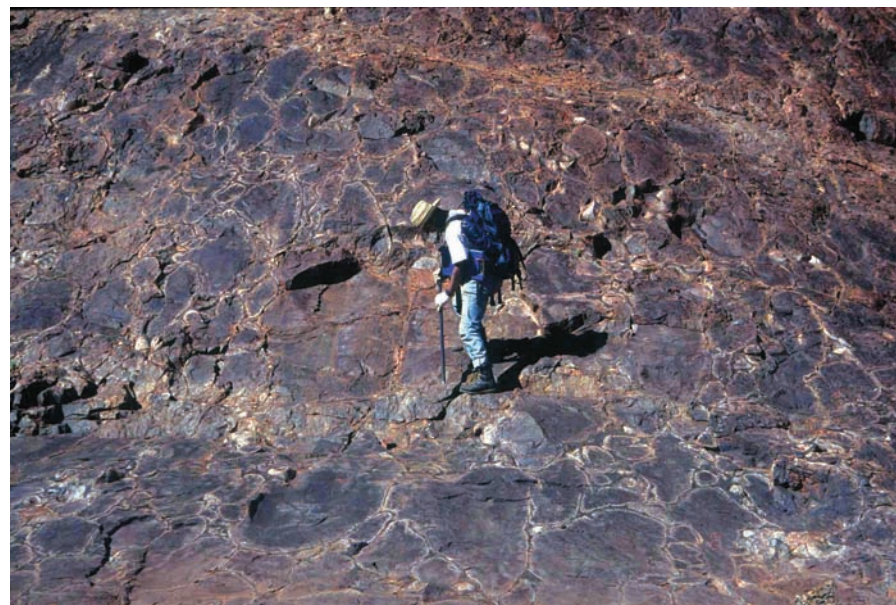
なかむら・けんたろう
1974年東京生まれ。博士(工学)。
山口大学理学部地質学鉱物科学科卒業。
東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻修了。日本学術振興会特別研究員(海洋研究開発機構地球内部変動研究センター)、東京大学大学院工学系研究科附属エネルギー・資源フロンティアセンター助教を経て、2009年より現職。専門は変質岩石学。

太古の地球への興味から地学を学ぶ

——地学的なものには昔から興味があったのですか。

中村：地学的なもので最初に興味を持ったのは、小さいころ読んだ本に載っていた恐竜と、アトランティスやムーといった消えた大陸の話です。小学生のころには、遠足でリュックサックいっぱい石を拾って帰ってきたことも何度かあったそうです。なぜそんなことをしたのか全然覚えていませんが、無意識のうちに地球への興味が芽生えていたのかもしれない。フィールドで大量の岩石サンプルをリュックサックに詰め込んでいる現在の自分の姿と重ねると、なんだかおかしいですね(笑)。ただ、その

後は自分で本を読むくらいで、高校でも地学の授業はありませんでした。そこで、大学では地学を基礎から学ばなくてはと考えて、大学の学科紹介に「基礎から学べる」という一文があった山口大学に入学を決めました。そこで私の師匠となる加藤泰浩先生(現 東京大学大学院准教授)に出会ったのです。——大学では鉱床学を学ばれたわけですが、具体的にはどんな学問なのですか。中村：地質学は地球に関係する幅広い対象を扱う学問ですが、鉱床学はそのなかで文字通り、鉱床を扱う分野です。鉱床とは人間にとって有用な物質が濃集した場所のことで、鉄やマンガンの採れる金属鉱床、リンや硫黄などの非



大学4年生のときのオーストラリアでの調査。足元には35億年前の海底の岩石が広がる。

金属鉱床、石油や天然ガスが採れる油田なども広い意味では鉱床に含まれます。このように特定の物質が特定の場所に濃集するプロセスにはマグマを介して元素が移動・沈殿するものや、水がかかわるものがあります。私の専門は、このうち水と石とのかかわりでできる熱水性鉱床で、マグマのなかや周りにおける水分がさまざまな元素を溶かし込んで運び出し濃集して鉱床をつくるプロセスを研究します。つまり、水と岩石との間の反応を扱うのです。熱水によってつくられる鉱床には、現在の海底熱水噴出孔でつくられている海底熱水鉱床のほか、別子型鉱床や黒鉄鉱床、鉄脈型鉱床、スカルン鉱床など多くの種類があります。

熱水は地球を溶かし込んだスーパ

——熱水鉱床はどのようにして、できるのですか。

中村：熱水とは、地下でマグマに熱せ

られた水が岩石に含まれるミネラルや金属をたっぷり溶かし込んだいわば“だし”のようなものです。それが海底から噴き出して冷たい海水と混ざると、溶けたままではいられなくなって海底に降り積もり熱水鉱床ができあがります。私は海底で採れる“だしがら”である変質岩を手がかりに、鉱床のできあがったプロセス、その材料や成立条件を追いかけているのです。本来、熱水の味を知るためには“だし”を直接味見するのが最も手取り早いのですが、過去の地球の熱水活動を知らうとすると、残念ながら熱水そのものは手に入りません。そこで“だしがら”から過去の熱水の味を推測するのです。もとの石と、水と反応した後の石とで鉱物や元素がどう変化したのかを調べていくことで、現存しない太古の熱水を味わうことができるというわけです。——海洋研究開発機構(JAMSTEC)に来る前から、石と水の関係を研究して

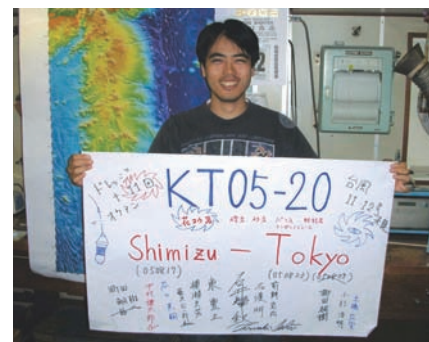
いたのですね。

中村：大学では、オーストラリアのマーブルバーという場所にある35億年前に海底で熱水と反応したと考えられる石を調べていました。その結果、変質岩のなかには炭酸塩鉱物が大量に含まれていることがわかりました。これは水から石へ二酸化炭素(CO₂)が取り込まれていたことを意味します。現在の海底では、水と石との間でCO₂の出入りはほとんどありません。また、現在の熱水系では、水と石の反応によって石から水へ金属などの“だし”が出る現象が卓越しているので、熱水活動によって逆に水から岩石にCO₂が入るといのは想定外の発見でした。太古の地球大気には大量のCO₂が存在していたために、海水にも多くのCO₂が溶け込み、それが熱水となって石と反応し固定化されたと考えられるのです。調べていくとその固定量は非常に大きく、太古の地球では熱水活動が地球表層のCO₂循環に大きな影響を与えていたことがわかりました。

石と水の研究で生命の謎が解ける?

——そしてJAMSTECに来てからは、先カンブリア代の生物と石の関係を調べていると聞きました。

中村：はい。私がJAMSTECに来たきっかけは二つあります。一つは日本学術振興会の特別研究員の申請をJAMSTECの鈴木勝彦主任研究員の研究室でお願いしていたこと。そして、もう一つが「プレカンブリアンエコシステムラボユニット※」のもととなったプロジェクトに誘っていただいたことです。ここではすでに高井研プログラムディレクターと熊谷英憲技術研究主任がインド



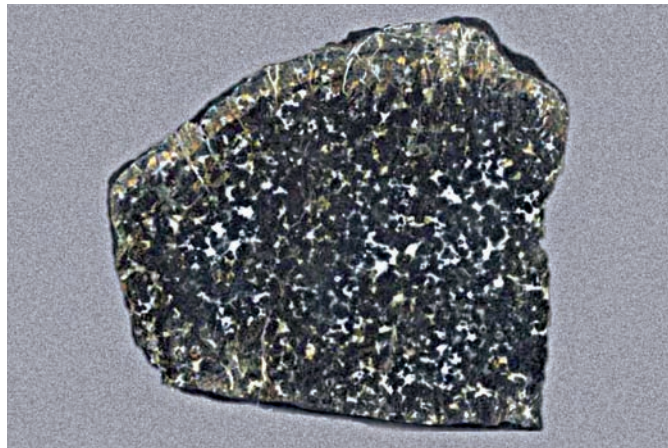
2005年、東京大学海洋研究所と共同で行われた小笠原海域での火山岩調査航海にて。



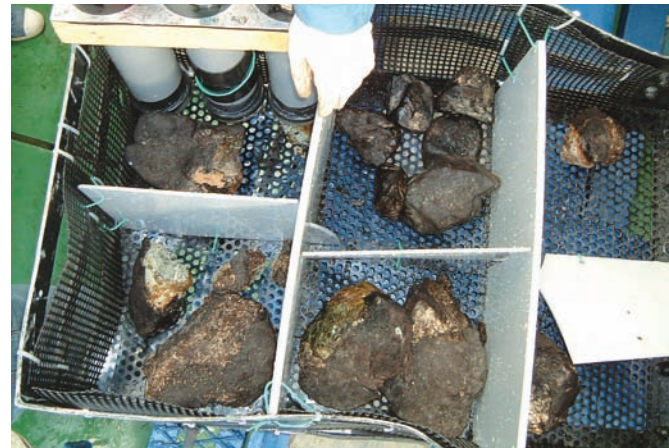
船上にて、鉄のバケツを海底で引きずり岩石を採取するドレッジ調査の作業をする様子。



調査中、台風に追われて大変な目にあつた。つかの間の晴れ間の船上スナップ。



インド洋かいいいフィールド、水深3,000mで採取した超マフィック岩（蛇紋石化したトロクトライト）。



「しんかい6500」で深海底から引き揚げられたばかりのサンプル。仕切られたバスケットにマニピュレータで上手に入れている。



「しんかい6500」による深海底の調査より無事、帰還。



採取した石の外見は変色や汚損があるため、ダイヤモンドカッターで切断して内部を観察する。その後、研究室でプレバートなどに加工し分析を進める。

洋のかいいいフィールドで生物と熱水の研究を進めていて、それを地質と結びつけて解明するため、私にも「インド洋の調査に行きませんか」と声をかけてくださったのです。最終的には鈴木さんもこのプロジェクトに加わり、結局二つのきっかけは一つにつながりました。

JAMSTECに来る以前の私の研究は完全に無機のプロセスだけを研究対象としていたのですが、高井さんと出会って実はそれが生命とも密接にリンクしたテーマだったと気づかされたのです。太古の地球を知ろうと思ったときに、生き物や水はほとんど残っていませんが、私が対象としている岩石なら残っています。岩石から生命の誕生や進化をたどれるのは非常に面白いと思いました。小さいころから漠然と持ち続けていた、地球と生命の歴史に対する興味が、水-岩石反応という自分の研究テーマとして突如具現化したことにとっても興奮しました。

——中村さんは、その研究のどの部分を担っているのでしょうか。



2006年「よこすか」によるインド洋かいいいフィールド調査。「しんかい6500」の格納庫で中間の研究者と。

中村：この研究を3階建ての建物にたとえると、1階が岩石、2階が熱水、3階が生物という構成になっていて、各階をつなぐ化学的なリンクをたどると生命の進化と地球の結びつきが解明できるという構造になっています。私の研究対象は、この各階をつなぐ階段です。それが分かると、どんな岩石からどんな熱水ができて、さらにその熱水から生物がどんな手段でどのくらいエネルギーを得ているかという道筋が分かってくるのです。現在の地球の多くの生き物は太陽光をエネルギー源として植物が光合成でつくった有機物に依存していますが、植物も酸素もない太古の地球では、熱水に含まれる化学物質をエネルギー源とする生き物が一次生産を担っていたはずで、そして、化学反応で得られるエネルギー量は熱水に含まれる元素、つまり岩石と水がどういった化学反応をしたかによって決まります。生き物、水、岩石の3つがすべて実際に見られる現在の海底熱水系を調べることで、この3つのつながりを支配する方程式を見つけられれば、今度は古い時代の変質岩を使ってその方程式を解くことで、過去の熱水や生き物のことを明らかにできるのです。

微生物を支える熱水と石の反応

——太古の地球では、どんな石がどんな化学反応を起こしていたのですか。

中村：光合成生物がない太古の地球には当然、酸素もありません。しかし、生きるためのエネルギーは酸化還元反応で得ていたはずで、一番強力な酸

化剤である酸素のない世界で酸化還元反応を支配する元素は何か。まず考えられるのは水素です。実は、かいいいフィールドの熱水は非常に水素濃度が高いのです。調査の結果、熱水噴出孔から非常に古い系統の遺伝子を持つメタン菌が分離され、水素とCO₂でメタンをつくるという酸化還元反応のエネルギーによって生態系が支えられていることが明らかとなりました。そこで、私たちは太古の地球で最初の生命が誕生したのも、このように水素に富んだ熱水が噴出する場所だったのだろうと考えているのです。

私が調べたのはその太古の生態系を支える水素の発生源です。海底で最も普遍的に見られるのは玄武岩ですが、これが熱水と反応しても水素はできません。そこでかいいいフィールドの周辺の岩石を詳しく調べてみると、その付近の海底には超マフィック岩というマンツルの組成に近い岩石が露出していることが分かりました。この岩石は熱水と反応して水素をたくさん出すことが知られていて、かいいいフィールドの岩石にも水素を発生した痕跡こんせきがしっかりと刻み込まれていました。水素の発生源についてはアメリカの科学者が異なる説を説いていたため、この事実はそれを覆す大発見でした。

——どのように深海での調査を行っているのですか。

中村：調査は主に有人潜水調査船「しんかい6500」を使います。私もインド洋で3回潜航しています。ただし、熱水をもうもうと噴き上げるチムニーから

水や生物を採る熱水化学や生物の研究とは違い、岩石の研究者はその周辺の何の変哲もない海底を黙々と調べます(笑)。1潜航で2~3kmしか進めませんから、海底下の構造や水脈の見当をつけるためには熱水噴出孔の周囲数十km四方を何度も調べる必要があります。ちなみに、個人的には岩石への情熱とは別に「熱水噴出孔も一生に一度は見てみたい」と思っていたのですが、今年の調査でついに願いがかないました。まだ、チムニーが形成されて間もない非常に新しい熱水噴出孔でしたが、海底から噴き上げる真っ黒な熱水と、そこに群がるたくさんの生物に感動しました。

潜航ポイントは事前に地形図やデータで予測をつけて絞り込みますが、潜ってみると堆積物が多くて肝心の岩が見えないこともあります。そこで、ソーナーで岩のありそうな場所を探したりもします。本来は障害物を避けるためのソーナーを逆利用するわけです。また、「しんかい6500」の窓は小さいので2人同時にはのぞき込めません。しかも、3つの窓から見える方向はそれぞれ違うため、パイロットに採りたい石を伝えるのも苦労します。さらに、海底の岩石は表面の風化や付着物によって本来の色であることは稀です。陸上ならその場で割ってサンプルの選別もできますが深海ではそうもいかず、最終的によいサンプルが採れるかどうかは運もあります。

——現在、取り組んでいる一番新しい課題は何ですか。

中村：熱水で水素が出る要因は、本当に超マフィック岩だけなのかというのが現在の課題です。なぜなら、東太平洋海膨かいほうで玄武岩しかないのに水素の濃度が高い場所が見つかるからです。ここでは、また違ったプロセスで水素が濃集されているのではないかと考えています。今年のインド洋調査で私たちも似たような熱水を見つけたので、今後も調査を続け、玄武岩で水素を供給するプロセスがあるのかどうかを見極めたいと思います。超マフィック岩はコマチアイトという初期地球の地殻を構成していた岩石に非常に近いので、初期の生命を支えた水素の供給源としては最有力候補です。しかし、玄武岩もその時代から普遍的にある岩石ですから、2つの岩石の役割をきちんと理解することが初期生命の生息環境を説明する上で重要な鍵になると考えています。

水を媒体に元素は地球を巡っている
——昨年は日本地球化学会奨励賞を受賞されたそうですね。

中村：これまで行ってきた水-岩石反応研究の応用範囲の広さと、成果の重要性を評価していただきました。実は、岩石の研究者のなかでも、水との関係を扱う人は多くありません。やはりメジャーなのはマグマやマンツルを扱う岩石学で、そうした研究には水は邪魔者なんです(笑)。水によって変質すると大事なオリジナルデータを逸してしまうからです。しかし、水というのは非常に興味深い媒体で、いろいろな

元素を溶かし込んで移動させる力があります。水の惑星である地球では水を媒体にあらゆる元素が動いています。そのため、水-岩石反応研究は、何の元素に注目するかで多様なテーマに応用が利きます。金属に注目すれば資源開発に、CO₂に注目すれば温暖化など地球の表層環境に、そして水素に注目すれば生命の誕生と進化の謎に、といった具合です。これは変質岩研究の大きな魅力だと思います。

——これから研究者を目指そうという人に向けて一言お願いします。

中村：生命は海で生まれたということは誰でも知っていますが、そこに自分が専門とする石がかかっていると思うとワクワクします。生命にも興味があるし、地球のことも知りたい。その両方がやれるのですから、水-岩石反応の研究はまさに私にとっては「おいしいところ取り」です。また、石と水との間の化学的なつながりが理解できれば、太古の地球はもちろん地球外生命の存在にまで応用することができます。その星の岩石が地球と異なる組成だとしても、基本となる原理さえ分かれば予測は可能なのです。こうした無限の広がりを持つテーマに出会い、夢中で謎解きに挑めるというのが研究の醍醐味の一つです。そして、どんなに小さなことでも「謎が解けた瞬間」のいいようなない高揚感と達成感、病みつきになりますよ。



2010年、学術研究船「白鳳丸」による南西インド洋の調査。船内で「岩石」のようにかたいアイスクリームを掘削中！

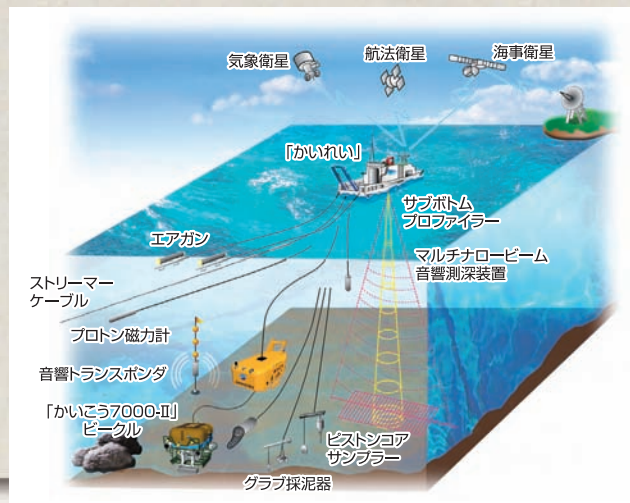
※プレカンプリアンエコシステムラボユニット…p2~13参照。

「かいこう7000-II」などの探査機器を駆使して
世界の大深度海域の調査に活躍する

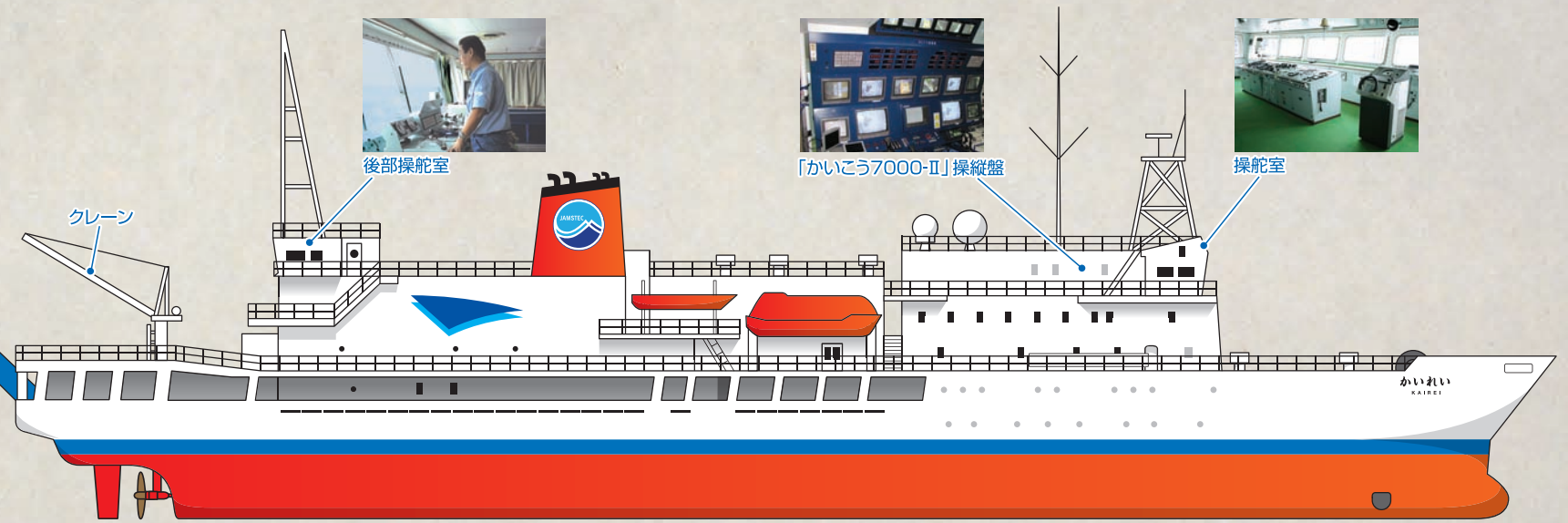
深海調査研究船

「かいらい」

Deep Sea Research Vessel KAIREI



「かいこう7000-II」の潜航支援はじめ、海底下深部構造の探査などでも活躍。



「かいらい」が搭載する7,000m級無人探査機「かいこう7000-II」。

■ 船体データ	
全長	106.0m
幅	16.0m
深さ	7.3m
喫水	4.7m
国際総トン数	4,517トン
航海速度	約16ノット
航続距離	約9,600マイル
定員	60名 (乗組員29名、潜水船運航要員9名、研究者等22名)
主推進機関	ディーゼル機関 (2,206kW×2基)
主推進方式	可変ピッチプロペラ×2軸
■ 主な研究設備	
無人探査機「かいこう7000-II」潜航支援システム、曳航式深海底調査システム「ディープ・トウ」潜航支援システム、マルチチャンネル反射法探査システム、マルチナロービーム音響測深装置、サブボトムプロファイラー、船上重力計、船上3成分磁力計、フロトン磁力計、ヒストンコアサンブラーなど。	

「かいこう」の支援母船として誕生

1997年に完成した「かいらい」は、1994年にマリアナ海溝チャレンジャー海淵(水深10,911m)最深部に到達した無人探査機「かいこう」(「かいこう7000-II」の初代機)の支援母船として運用することを主目的に建造された。それまでは、有人潜水調査船「しんかい6500」の支援



初代機「かいこう」は、1万mを超える潜航能力を活かし、深海探査で数々の優れた成果を挙げた。

母船「よこすか」に搭載されていたが、「かいこう」をより有効に活用するため、新たな支援母船が望まれていた。

1995年度に建造が決まった「かいらい」は、建造期間を短縮するため「よこすか」と同じ船形を採用することになった。しかし、「かいこう」の運航をよりスムーズに行うために、12,000mのケーブルを巻き取るケーブルストアウインチを設置したり、やや荒れた海でも安全に着水・揚収が行えるよう「かいこう」に適した新たなAフレームクレーンを装備したり、ウインチ操作や作業の指示などを行う後部操舵



ピークル亡失事故の直後は、無人探査機「UROV7K」を改造してピークルとした(「かいこう7000」)。

室を改良するなど、さまざまな工夫が凝らされている。また、操船機能の向上、研究設備の充実、甲板作業環境や居住環境の改善など、「よこすか」の使用実績や乗組員・研究者からの意見を積極的に取り入れて徹底的な見直しが行われ、より完成度の高い研究船に仕上がった。ちなみに「かいらい」は、その年に建造された多くの船舶のなかで優れたものに与えられる「シップ・オブ・ザ・イヤー準賞」(日本造船学会)を受賞している。

2003年に「かいこう」ピークルを亡失するという事故が発生したが、現在は2006年に運用が開始された「かいこう7000-II」の支援母船としての役割を果たしている。

総合的な深海調査を実施

「かいらい」に求められたもう一つの役割は、深海域海底および海底下の総合的な調査研究だ。そのため、水深11,000mまでの測深が可能なマルチナロービーム音響測深装置、深海底表層の地層や断層の探

査を行うサブボトムプロファイラーといった音響探査機器をはじめ、ピストンコアサンブラーやドレッジなど、多くの調査機器を搭載している。さらに、海洋・地球科学の研究に大きく貢献しているのが、「かいらい」に搭載されているマルチチャンネル反射法探査システムだ。圧縮空気を一気に放出することによって人工的に地震波(音波)を発振するエアガンを用いて音波を海中に送り、海底やその下にある地層境界で反射して海面に戻ってきた反射波を、多数の受振器(ハイドロフォン)を備えたストリーマーカーケーブルで検出、そのデータ



2008年、さまざまな波長の音波を発振できる最新のエアガンシステムが「かいらい」に搭載された。

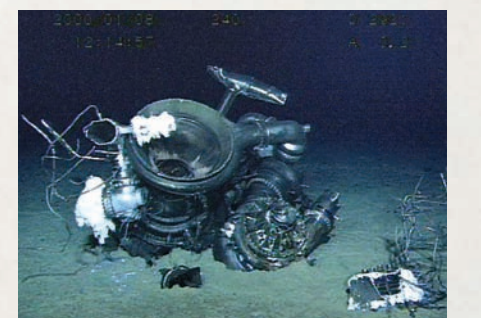
を解析することによって海底下の構造を調べることができる。「かいらい」には、船尾から海中に展開される8基のエアガンやエアガンに高圧空気を送るためのコンプレッサ、また海面に繰り出される総延長約5,000mのストリーマーカーケーブルなどが装備されており、調査を効率よく実施できるようにウインチなどの配置も工夫されている。

「かいらい」は、1998年にマリアナ海溝チャレンジャー海淵で底生生物の採取に成功したことをはじめ、パプアニューギニアでの巨大地震・津波発生場所の調査



海底や海底下の地層で反射して海面に戻った音波をとらえる、長さ約5,000mのストリーマーカーケーブル。

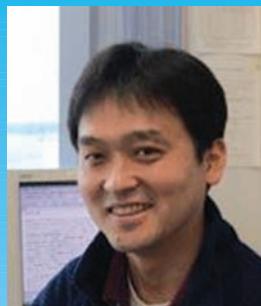
(1999年)、インド洋中央海嶺で初めての熱水活動と熱水噴出孔生物群集の発見(2000年)、さらには太平洋プレート上で新しい火山活動ブチスポットの発見に貢献するなど、数々の研究成果を挙げてきた。また、南西諸島海域での学童疎開船「対馬丸」の確認(1997年)、小笠原海域での「H-IIロケット8号機」のロケットエンジン部品発見(1999年)、ハワイ・ホノルル沖で沈没した「えひめ丸」の遺留品回収(2001年)など、優れた深海探査能力を活かして社会貢献活動においてもその力を発揮している。



1999年12月、小笠原海域水深2,900mの海底で発見された「H-IIロケット8号機」のエンジン部品。

チェンジング・ブルー 気候変動の謎に迫る

(2009年12月19日 第106回地球情報館公開セミナーより)



海洋・極限環境生物圏領域
海洋環境・生物圏変遷過程研究
プログラム プログラムディレクター

大河内 直彦

おおこうち・なほひこ。1966年、京都市生まれ。東京大学大学院博士課程を修了後、京都大学生態学センター博士研究員、北海道大学低温科学研究所助手、米ウッズホール海洋研究所博士研究員などを経て現職。現在、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻および東京工業大学大学院総合理工学研究科化学環境学専攻の准教授も兼任。専門は生物地球化学。各種有機物を用いた地球環境の解明法の開発と応用。

私の専門は、生物プロセスの視点から地球環境を解明することですが、今回は10年以上かけて集めた資料をまとめた著書『チェンジング・ブルー—気候変動の謎に迫る—』(岩波書店)をもとに、堆積物や氷床に残された気候の歴史を読み解き、そこから明らかになる気候変動の仕組みについてお話しします。過去数万年間に起きた大規模な気候変動は、現在の気候を考える上で多くの示唆を与えてくれます。そして、温暖化問題が顕在化する何十年も前から、気候の解明にさまざまな手法を使って挑んできた多くの研究者たちのことも知っていただければと思います。

地球は本当に温暖化しているのか？

気象庁によると、東京の平均気温はここ130年間で約3.5℃上昇しています。「昔はもっと寒かった」と思う方も多いと思いますが、一方で都市化の影響という側面があるのも事実です。しかし、都市化していないハワイのカウアイ島で1900年頃から観測されているデータでも気温は1℃以上上昇しています。北半球の平均気温をとると、やはり温暖化傾向は見えます。1900年から第二次世界大戦終戦あたりまでは徐々に温暖化し、途中若干の寒冷化を経て、1970年代半ば以降現在に至るまで再び上昇しています。

では、さらに昔はどうかでしょうか。測器の記録、古文書や年輪、珊瑚の年輪などを使って過去1300年間の気温の変動を調

べたグラフを見ると、20世紀に入ると過去にはない急激な上昇があります(図1)。日本の歴史に照らしてみれば、弘法大師がいたころは現在よりも寒く、紫式部の時代は現在と比較的近い気温です。鎌倉・室町時代は現在よりも寒く、江戸時代になるとさらに寒くなり、福沢諭吉が登場する明治時代には再び暖かくなり始めます。

海底の泥に隠された太古の気候

昔の気候を知る手段の一つに、海底に積もった堆積物を調べる方法があります。私の研究は主にこうした泥の分析で、大きな掘削船を使えば何kmもの堆積物を掘り出すことができます(図2)。そして、堆積物を調べると過去に起きた気候変動

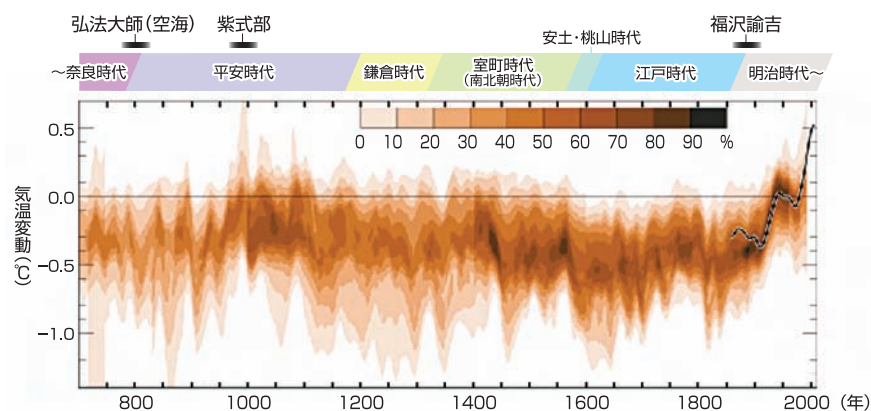


図1 過去1300年間にわたる北半球の平均気温変動

過去約1300年間にわたる北半球の平均気温の変化。1961~1990年の平均気温を基準に、多くの地質学的記録や古文書記録をもとに復元されたものを重ね合わせ、重なり具合(%)を示している。IPCC(2007)を改訂

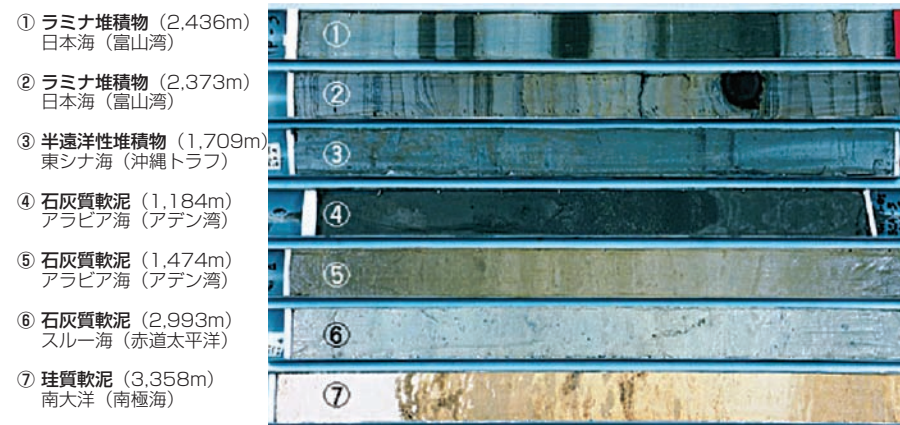


図2 さまざまな海底堆積物

世界各地でピストンコアによって採取された海底堆積物。地球上で形成されるさまざまな物質が混じり合っているため、多様な色をもっている。高知大学海洋コア総合研究センターの池原実准教授による。

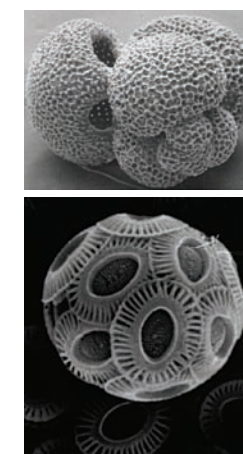


図3 有孔虫の化石
有孔虫(上)は鉱物質の殻を持つ原生生物。円石藻(下)は炭酸カルシウムの殻を持つ植物性プランクトンの一種。いずれも1mm以下の小さなものだが、海洋の生態系や炭素循環を支える役割も果たしている。

図3上 <http://oceanworld.tamu.edu/> より
図3下 <http://www.mbari.org/> より

の記録を読み解くことができるのです。堆積物には有孔虫というプランクトンの化石が入っています(図3)。これは炭酸カルシウムできていて、このなかの酸素の安定同位体比を測定するとそれがつくられた時代の水温や氷床量を推定することができます。海水中にある酸素原子のほとんどは質量数16ですが、0.2%だけ質量18のものが混じっています。そして、質量18の酸素原子が炭酸カルシウムに含まれる割合は、それができたときの水の同位体比と水温によって微妙に変わるため、そこから過去の氷床量や水温を求めることができます。その結果、過去100万年の間、地球の気候は氷期と間氷期の間を行ったり来たりしてきたことがわかります。その変動の幅は平均気温で7℃くらいだということも分かってきました。

変動する海面

地質学者は陸上の記録も調べてきました。たとえば、平原に転がる「迷子石」と

呼ばれる巨石。これは、氷河が削り取って運んできた岩が、氷河が融けた際に置き去りにされたものです。U字型をした谷も氷河が谷底を削ってできた地形です(図4)。氷河が削り取ったがれきなどが堆積してできるモレーンと呼ばれる地形もあります。こうした証拠をまとめた結果、現在グリーンランドと南極にある氷床以外にも、カナダ一帯やイギリスからシベリアの北にかけて大きな氷床があったことがわかりました(図5)。

巨大な氷床は、もともと海水が蒸発して雨や雪として降ったものでできています。つまり、氷期にはその分だけ海水量が減ります。そして海水が減れば海面も下がります。珊瑚やマングローブのような浅瀬に生息する生物の化石を調べれば、こうした海面の変化を復元することができます。それによると、いまから約2万年前の氷期には140mぐらい海面が低かったのですが、その後氷床が融けて1万9000年前、1万4000年前、1万年前には急激に海面が上

昇しました。最も速いときは、おそらく1年間に10cmぐらい海面が上がったでしょう。当時の人々は大変な迷惑を被ったと思いますが、この問題は現在の私たちも直面しつつある問題です。海面は、20世紀には年平均2mm、ここ10年では年平均3mmのスピードで上昇しています。このままいくと100年後には30cmも海面が上昇する計算で、ツバルのような海拔の低い国だけでなく、世界中の低地に住む人々にとって大きな問題になってくるでしょう。

地球の軌道要素が気候を変動させた

科学史をさかのぼると、17世紀のドイツの天文学者ヨハネス・ケプラーは、地球の公転軌道が楕円形であることを発見しました。日々太陽と地球の距離は変わっているのです。さらに、公転軌道の楕円の度合いも地球の外側を回る木星の重力の影響で年々少しずつですが変わります。このように、太陽と地球の距離が変われば、地球に与える太陽のエネルギー量も

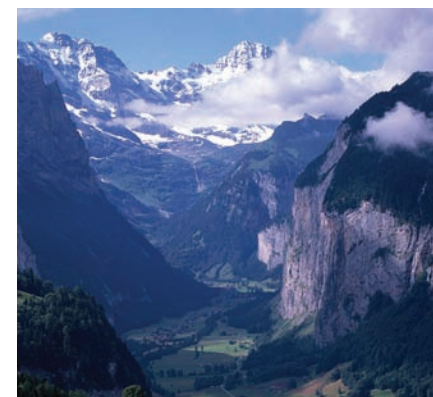


図4 スイスのU字谷



氷期モード



間氷期モード
(現在)

図5 氷期と間氷期の地球

現在、主な氷床はグリーンランド氷床だが、氷期にはヨーロッパ北部の北ヨーロッパ氷床、北米大陸北部にはローレンタイド氷床という巨大氷床もあった。

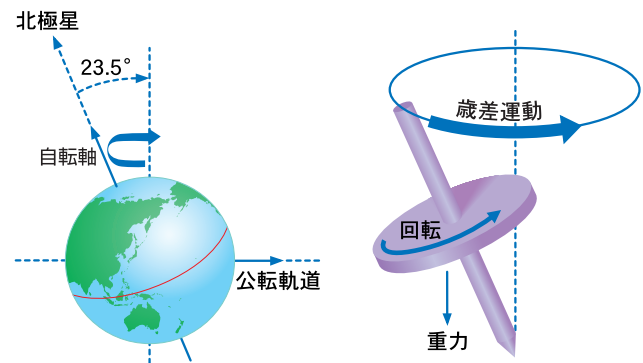


図6 自転軸の首振り運動

地球の自転軸の首振り運動のことを歳差と呼ぶ。このような動きがあるため、現在の「北極星」はこぐま座のポラリスだが、占星術が成立した紀元前3000年ごろはりゅう座のトッパンが「北極星」だった。

こぐま座ですが変化します。

地球の自転軸の傾きも現在は公転軌道面に対して23.5度ですが、約4万年周期で22.1度から24.5度の間で変化します。さらに、自転軸がコマのように首振り運動をしているために生じる歳差(図6)などの結果、太陽からの入射エネルギーのバランスに変化が生じ、気候を変化させる要因になってきました。こういった地球の軌道要素の変化は、長期的な気候変動の重要なメカニズムなのです。地球の軌道要素の変動と氷期・間氷期とを初めて関連づけたのが、20世紀初頭のセルビアの研究者ミランコビッチです。彼はこれを手計算で一生涯をかけてやり遂げました。

ここで重要なことは、軌道の変化によって太陽からの入射エネルギーの地理的分布や季節的分布が変わっても、地球全体で受ける総量は氷期でも間氷期でもほとんど変わらないということです。つまり、入射エネルギー量にかかわらず地球の気候には氷期と間氷期という2つの安定状態があるのです。

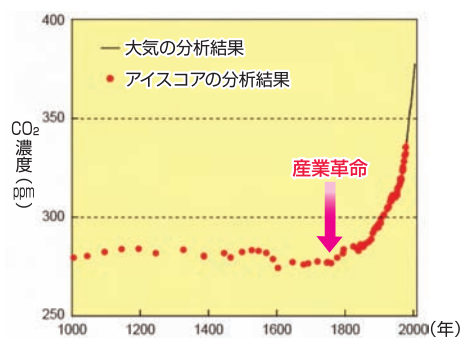


図8 過去1000年の大気中の二酸化炭素濃度

ハワイのマウナロア火山における観測結果に、アイスコア中の気泡の分析結果を重ね合わせたもの。人為起源の二酸化炭素が大気中に顕著に蓄積され始めたのが19世紀半ばであったことが分かる。それ以前の大气中の二酸化炭素濃度はおよそ280ppmである。

Etheridges et al. (1996) を改変

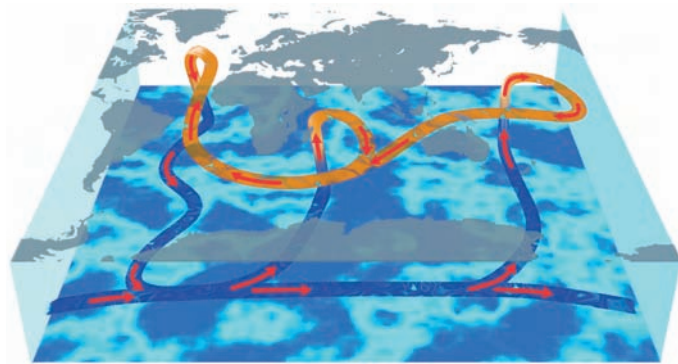


図7 深層水循環のコンベヤー・ベルト

プロッカーの「コンベヤー・ベルト」と呼ばれる海洋の大循環を示した図。青色で示した深層水の流れに、オレンジ色で示した海洋表層の流れをつなぎ、海洋全体を一本の流れとして表している。

太陽からの入射エネルギーは低緯度域に多く、極域では少ないのですが、その一方で、地球の放射エネルギーは赤道域と極域で、それほど大きな差はありません。このままいけば、赤道はどんどん暑く、極域はどんどん寒くなるはずですが、実際にそんなことは起きません。これは、低緯度域から極域へ大気や海洋によって熱が輸送されているからです。海洋は熱輸送の約3割を担っており、その約半分は海底の深層水循環の働きによるものです。低緯度域で温められた暖流は極域で冷やされ塩分が大きくなって沈み込み、コンベヤー・ベルトのようにエネルギーの再分配を担っているのです(図7)。

「温室効果」がカギ

もし太陽がなければ、地球は宇宙空間と同じ-270℃に冷えてしまいます。太陽がどれだけ地球を温めるかは、地球の反射率によって決まります。夏に白い服を着ると反射して涼しいのと同様に、地球に白い水が増えれば冷えます。反対に

森林が広がると黒っぽくなり地球は温まります。実際の入射エネルギーと放射エネルギーのバランスだけで計算すると、地球の表面温度は-18℃になります。これは現実とかなりかけ離れた数字です。実は地球の平均気温が-18℃ではなく15℃という温度に保たれているのは、地球大気に「温室効果」があるからです。

大気中に含まれるガスのなかで最も大きな温室効果をもっているのは水蒸気です。次いで二酸化炭素、メタンなどが挙げられます。「温室効果」を最初に指摘したのはフランスの数学者フーリエです。電解質溶液の研究でノーベル賞をとったアレニウスは、1896年に発表した論文で、大気中の二酸化炭素濃度がいまの3倍になったら地球の温度は9℃上がると推定しました。当時は誰にも相手にされませんでした。非常に先駆的な仕事です。

1950年代後半から、アメリカのスクリプス海洋研究所のキーリングはハワイや南極点で大気中の二酸化炭素濃度の測定を始め、現在まで続けられています。これ

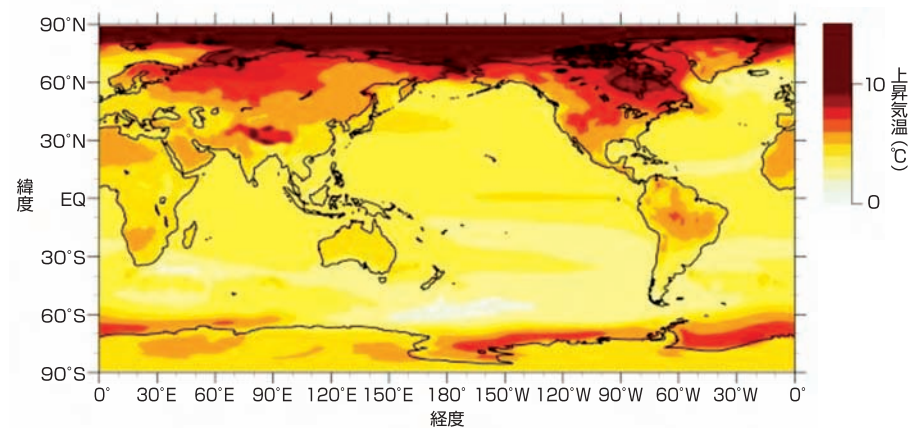


図9 21世紀末期における気温上昇

JAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」によって計算された、21世紀末期にどのくらい気温が上昇するかを示した図。西暦2071~2100年の平均気温から、1971~2000年の平均気温を差し引いたところ、平均4.2℃上昇するという結果になった。(http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/)

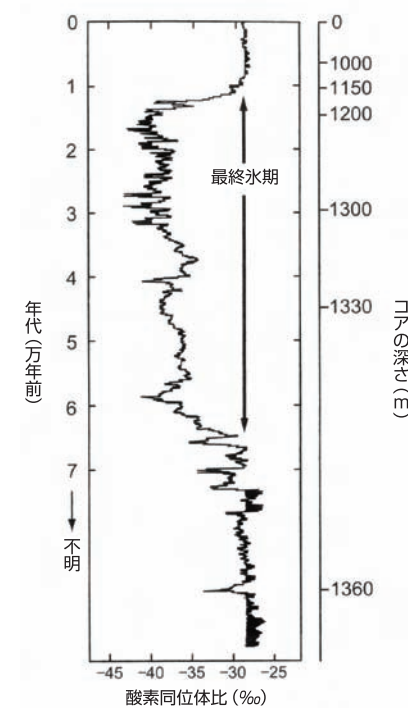


図10 グリーンランド氷柱の酸素同位体記録

ダンスガードが測定した、グリーンランドのアイスコアの酸素同位体比の記録。この分析結果から、アイスコアが最終氷期だけでなく、その前の間氷期の気候も記録していることが示唆された。

Dansgaard et al. (1969), Dansgaard (2004) を改変

を、過去の記録と合わせてみると、18世紀末の産業革命以降、大きく上昇してきたことが分かります(図8)。大気中の二酸化炭素濃度上昇の重要な原因が、化石燃料の燃焼にあることは間違いありません。では、大気中の二酸化炭素がどの程度気温を上昇させるのか。それをコンピュータを用いて研究したのが、かつて海洋研究開発機構(JAMSTEC)にも在籍されていたプリンストン大学の真鍋淑郎教授です。地球をグリッドに切って流体力学と熱力学の法則を当てはめて計算するシミュレーション手法を開発しました。現在「地球シミュレータ」で行われている気候シミュレーション法の原点です(図9)。

氷で読み解く太古の気候

さて、先ほど海底の泥から気候を調べる話をしましたが、グリーンランドや南極の氷床には太古の氷が堆積しています。この氷に含まれる酸素の同位体比を使った気候変動の研究も1960年代から行われています。デンマークのダンスガードは、グリーンランド氷床に建設されたアメリカ軍の基地で採取された1km以上の長さをもつアイスコアの酸素の同位体比を測定し、そこに過去の気温の情報が記録されていることを明らかにしました(図10)。

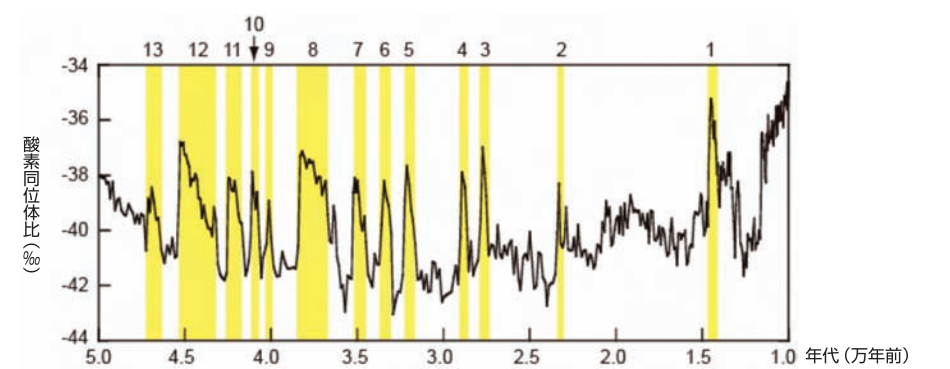


図11 ダンスガード-オシュガー・イベント

グリーンランドのアイスコアのなかに見られる、5万年前~1万年前にかけての急激な気温の変化(黄色い部分)。研究者の名前をとって「ダンスガード-オシュガー・イベント」と呼ばれる。オシュガーは1950年代、雪のなから初めてトリチウムという化学物質を見いだした地球化学者で、ダンスガードの共同研究者。

Grootes and Stuiver (1997) を改変

その後、南極のソ連のポストーク基地などでもアイスコア掘削が行われていました。南極はグリーンランドに比べて積雪量が少ないため、同じ長さのコアで数倍の年代をさかのぼることができます。この研究が画期的だったのは氷に含まれる大気中の化石、つまり閉じこめられた気泡から過去数十万年にも及ぶ大気中の二酸化炭素濃度を復元したことです。その結果、二酸化炭素濃度は気候変動と平行に変化していることが分かりました。詳しく調べると、気候が変動して炭素サイクルが変化し、それが大気中の二酸化炭素濃度の変動につながったことも分かりました。

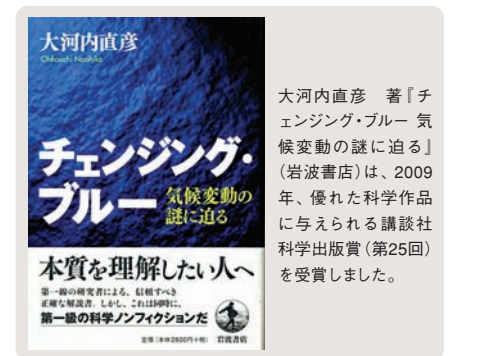
短い周期で繰り返す気候変動

グリーンランドのアイスコアの分析では、「ダンスガード-オシュガー・イベント」という現象も発見されました。これは、氷期の中に、気温の急激な上昇下降が繰り返される現象です(図11)。この現象は、気候が急激に変動する性質をもつものであることを教えてください。その最たるものが1万2000年ほど前のヤンガー・ドリアス時代で、わずか50年で気温が5℃以上も上昇しました。これは、当時カナダ北部にあった氷床の融け水が一気に海洋に流れ込んで深層流を止め、熱分配ができなくなったことが原因ではないかと考えられています。氷床はある大きさになると底面に地熱がこもり、氷が融けて滑り出します。その融け水が深層流を止めて気候を寒冷化し、氷がある程度のサイズまで戻ると再び深層流が動き出すというのです。微妙なバランスで成り立っている深層流が、気候システムにとって重要な働きをもっていることが分かります。

日本の江戸時代から明治の初期ぐらいまでは、世界的に気温の低い小氷期がありました。しかし、この小氷期の原因はよく分かっていません。そして、その後、1900年頃から世界中の水河が急速に後退していることも調査で明らかになっています。これは気温が100年で0.8℃上昇したことを反映しています。

温室効果ガスのロシアンルーレット

過去の気候変動を調べることにより、気候が非線形性をもつシステム、つまり急激に上昇したりする可能性を秘めたものであることを知ることができました。その一方で、細かく見ればそれはきわめて複雑なシステムで、完璧な予測は非常に難しいものです。アメリカの地球化学者プロッカーはかつて、「温室効果ガスが地球温暖化の原因であると100%証明できないという事実は、さして重要なことではない。むしろ、人類の生活基盤である『気候』に対して温室効果ガスを加えるロシアンルーレットを行っていることが問題だ」と言いました。私たちは長い間「安定した気候」の恩恵を受けてきましたが、現在起きつつある地球温暖化の倫理的な側面も忘れずにおきたいものです。 [E]



編集後記

特集「深海底から探る生命の起源と進化」は、いかがだったでしょうか。よく地球誕生から現在までの46億年の歴史は1年365日のカレンダーに例えられます。それによると、現在地球上で繁栄している人類の直接のご先祖（新人＝ホモ・サピエンス）が生まれたのは、大晦日も終わりに近い12月31日の午後11時37分頃です。産業革命が起こったのは、新年の僅か2秒前の11時59分58秒だそうです。しかし、最初の原始生命が生まれたのは、地球誕生からそれほど時間が経過していない2月17日頃（40億年前）の、はるか昔の話なのです。今回の特集は、この最初の生命がどこでどのようにして生まれ、どうやって40億年後の現在まで続く存在となり得たのか、という誕生の謎に迫る最新の研究結果を取り上げました。他の参考書では、キチンと解説されていなかった内容ですので、ぜひ熟読いただき、遙かなる地球と生命の進化に想いを馳せていただきたいと思います。

さて、今回の編集後記は、出張先で執筆するために、BE誌のグラブリ原稿を電子ファイルで送ってもらいました。そして、新しく入手した、アップル社のインターネット端末のiPadで、電子書籍(?)のように読んでいます。画面がきれいで、しかも文字の大きさも自由に変わることができるため、私のような老眼(!)でもとても快適なので、別に印刷物ではなくてもいいかという気になってしまいました。読者のみなさまのなかには、書籍を購入するのに、インターネットからAmazonなどに注文する方も多いと思います。米国では、更に進んで、AmazonやApple Storeなどからダウンロードして、KindleやiPadなどの端末で読むことのできる電子書籍の発刊が爆発的に増加しているということです。わが国でも、若者の雑誌を含めた書籍離れが問題となっています。しかし、パソコンや携帯メールなどの利用を考えれば、「活字離れ」はあっても「文字離れ」というわけではなく、新しい読者を対象とした電子書籍が伸びる余地は、十分にありそうです。BE誌の編集委員会としても「Blue Earth BOOK」などの地球科学の素晴らしい書を解説した書籍を、より多くの人達に読んでもらうために、今後、それらの電子書籍化の可能性についても検討を進めていきたいと考えています。(T.T)

海と地球の情報誌 『Blue Earth』 第22巻 第2号 (通巻106号) 2010年3月発行

発行人 他谷康 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部
 編集人 他谷康 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部 広報課
 Blue Earth 編集委員会
 制作・編集協力 株式会社ミュール
 ディレクション 前田和則
 取材・執筆・編集 滝田よしひろ／萩谷美也子／荒松良孝／山崎玲子／柏原羽美
 デザイン 山田浩之／木元優介

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/> Eメールアドレス info@jamstec.go.jp

* 本誌掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます

『Blue Earth』定期購読のご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>

1年度あたり6号発行の『Blue Earth』を定期的にお届けします。

■申し込み方法
 EメールかFAX、はがきに①～⑤を明記の上、下記までお申し込みください。
 ①郵便番号・住所 ②氏名 ③所属機関名(学生の方は学年)
 ④TEL・FAX・Eメールアドレス ⑤Blue Earthの定期購読申し込み
 *購読には、1冊300円+送料が必要となります。

■支払い方法
 お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構指定の銀行口座に振り込みをお願いします(振込手数料をご負担いただきます)。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。
 平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

■お問い合わせ・申込先
 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
 海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部 広報課
 TEL.045-778-5406 FAX.045-778-5498
 Eメール info@jamstec.go.jp
 ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧ください。



*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号(3-4月号)までとさせていただきます。
 バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。
バックナンバーのご紹介
 URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>

*お預かりした個人情報は、「Blue Earth」の発送や確認のご連絡などに利用し、独立行政法人海洋研究開発機構個人情報保護管理規程に基づき安全かつ適正に取り扱います。

JAMSTECメールマガジンのご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/mailmagazine/>

JAMSTECでは、ご登録いただいた方を対象に「JAMSTECメールマガジン」を配信しております。イベント情報や最新情報などを毎月10日と25日(休日の場合はその次の平日)にお届けします。登録は無料です。登録方法など詳細については上記URLをご覧ください。

お詫びと訂正

『Blue Earth 105』に誤りがありました。お詫びして訂正いたします。
 p.4 本文左段下から3行目 誤) 15℃ 正) 4℃
 p.5 水温断面図 誤) 30°E 10°E 正) 30°N 10°N
 年平均全球表層塩分偏差 誤) 60E 40E 20E 正) 60N 40N 20N
 p.9 右中図 誤) Bottm 正) Bottom
 誤) 100°N 120°N 140°N 160°N
 正) 100°E 120°E 140°E 160°E
 p.11 上図 引用アドレス 誤) print-page.pl 正) printpage.pl
 下図 クレジット 誤) S.A.thrope 正) S.A.thorpe
 p.13 図2 上から2つ目の表層 誤) 表層 正) 中層
 p.15 南緯17度の図 誤) (STATION NO.) 1000 正) 100
 誤) 20°W 正) 120°W
 p.30 図4 誤) 76°E 正) 76°W

賛助会(寄付)会員名簿 平成22年4月30日現在

独立行政法人海洋研究開発機構の研究機関につきましては、次の賛助会員の皆さまから会費、寄付を頂き、支援していただいております。(アイウエオ順)

株式会社IHI	広和株式会社	株式会社鶴見精機	株式会社日立プラントテクノロジー
株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド	国際気象海洋株式会社	株式会社テザック	深田サルベージ建設株式会社
株式会社アイケイエス	国際警備株式会社	寺崎電気産業株式会社	株式会社フジクラ
アイワ印刷株式会社	国際石油開発帝石株式会社	電気事業連合会	富士ゼロックス株式会社
株式会社アクト	国際ビルサービス株式会社	東亜建設工業株式会社	株式会社フジタ
株式会社アサツー ディ・ケイ	五洋建設株式会社	東海交通株式会社	富士通株式会社
朝日航洋株式会社	相模運輸倉庫株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社	富士電機システムズ株式会社
アジア海洋株式会社	佐世保重工業株式会社	東京海上日動火災保険株式会社	物産不動産株式会社
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	株式会社サノヤス・ヒシノ明昌	東京製網繊維ロープ株式会社	古河電気工業株式会社
泉産業株式会社	三建設備工業株式会社	東北環境科学サービス株式会社	古野電気株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	株式会社ジーエス・ユアサ テクノロジー	東洋建設株式会社	松本徽章株式会社
株式会社エス・イー・エイ	JFEアドバンテック株式会社	株式会社東陽テクニカ	マリメックス・ジャパン株式会社
株式会社NTTデータ	財団法人塩事業センター	東洋熱工業株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
株式会社NTTデータCCS	有限会社システム技研	有限会社長澤工務店	株式会社丸川建築設計事務所
株式会社NTTファシリティーズ	シナネン株式会社	株式会社中村鉄工所	株式会社マルトー
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	清水建設株式会社	西芝電機株式会社	三鈴マシナリー株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	シュルンベルジェ株式会社	西松建設株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
有限会社エルシャンテ追浜	株式会社商船三井	日油技研工業株式会社	三井石油開発株式会社
株式会社OCC	社団法人信託協会	株式会社日産クリエイティブサービス	三井造船株式会社
沖電気工業株式会社	新日鉄エンジニアリング株式会社	ニッスイマリン工業株式会社	三菱重工株式会社
株式会社海洋総合研究所	新日本海事株式会社	ニッセイ同和損害保険株式会社	株式会社三菱総合研究所
海洋電子株式会社	須賀工業株式会社	日本SGI株式会社	株式会社森京介建築事務所
株式会社化学分析コンサルタント	鈴鹿建設株式会社	日本海洋株式会社	八洲電機株式会社
鹿島建設株式会社	スプリングエイトサービス株式会社	日本海洋掘削株式会社	郵船商事株式会社
株式会社川崎造船	住友電気工業株式会社	日本海洋計画株式会社	郵船ナブテック株式会社
株式会社環境総合テクノス	清進電設株式会社	日本海洋事業株式会社	ユニバーサル造船株式会社
株式会社関電工	石油資源開発株式会社	社団法人日本ガス協会	
株式会社キュービック・アイ	セナーアンドバーンス株式会社	日本興亜損害保険株式会社	
共立インシュアランス・ブローカーズ株式会社	株式会社損害保険ジャパン	日本サルヴェージ株式会社	
共立管財株式会社	第一設備工業株式会社	社団法人日本産業機械工業会	
極東貿易株式会社	大成建設株式会社	日本水産株式会社	
株式会社きんでん	大日本土木株式会社	日本電気株式会社	
株式会社熊谷組	ダイハツディーゼル株式会社	日本ヒューレット・パカード株式会社	
クローバテック株式会社	太陽日酸株式会社	日本マントル・クエスト株式会社	
株式会社グローバルオーシャンディベロップメント	有限会社田浦中央食品	日本無線株式会社	
京浜急行電鉄株式会社	高砂熱学工業株式会社	日本郵船株式会社	
KDDI株式会社	株式会社竹中工務店	株式会社間組	
株式会社ケンウッド	株式会社竹中土木	濱中製鎖工業株式会社	
株式会社構造計画研究所	株式会社地球科学総合研究所	東日本タグボート株式会社	
神戸ペイント株式会社	中国塗料株式会社	株式会社日立製作所	

独立行政法人 海洋研究開発機構の研究機関

横須賀本部 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15 TEL.046-866-3811(代表)	東京事務所 〒105-0003 東京都港区西新橋1丁目2番9号 日比谷セントラルビル6階 TEL.03-5157-3900(代表)
横浜研究所 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 TEL.045-778-3811(代表)	国際海洋環境情報センター 〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3 TEL.0980-50-0111(代表)
むつ研究所 〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地 TEL.0175-25-3811(代表)	Washington D.C. Office 1120 20th street, NW, Suite 700, Washington, D.C. 20036, USA TEL.+1-202-872-0000 FAX.+1-202-872-8300
高知コア研究所 〒783-8502 高知県南国市物部乙200 TEL.088-864-6705(代表)	

第11回全国児童

「ハガキにかこう
海洋の夢コンテスト」

海洋への関心が高まる今日、未来を担う子どもたちの海洋への夢や憧れ、興味をさらに高めるため、海洋研究開発機構(JAMSTEC)では毎年、全国の児童を対象にした絵画コンテストを、文部科学省などの後援により開催しています(作品募集は、毎年11月下旬~1月末ころ)。第11回コンテストには、全国から2万4280点の応募があり、70点が入賞作品に選ばれました。前号に続き、その入賞作品のなかから、子どもたちの夢あふれる優れた作品を紹介します。



● 絵画部門 ●

海洋研究開発機構 **金賞**シーラカンスと
進化の勉強

静岡大学教育学部附属浜松小学校3年 榎日奈子

海洋研究開発機構 **銀賞**世界がつながる
海の遊園地

仙台市立南材木町小学校5年 降矢愛里

海洋研究開発機構 **金賞**タコとぼくの
すもうたいけつ

茨城町立大戸小学校1年 郡司 嵐至

海洋研究開発機構 **銀賞**ミツクリザメと
チョウチンアンコウのにらめっこ

横浜市立金沢小学校2年 永橋 凱

第12回全国児童

「ハガキにかこう
海洋の夢コンテスト」

たくさんのご応募、ありがとうございました。

第12回「ハガキにかこう海洋の夢コンテスト」は、2010年1月31日をもって募集を締め切り、全国の小学生から2万6000点をこえるご応募をいただきました。入賞作品は当機構ホームページで見ることができます。

くわしくはホームページで

<http://www.jamstec.go.jp/kids/hagaki/>