

海と地球の情報誌

Blue Earth

ISSN 1346-0811
2012年5月発行
隔月年6回発行
第24巻 第1号
(通巻117号)

117

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

海底下 生命圏

生命は地球内部で
どのように生きているのか？
その機能・進化・
起源に迫る

海は呼吸する

オオサンショウウオ

海洋無酸素事変は
なぜ起きたのか

海底下生命圏

生命は地球内部で どのように生きているのか？
その機能・進化・起源に迫る

1 **特集**
海底下生命圏
生命は地球内部でどのように生きているのか？
その機能・進化・起源に迫る

20 **Aquarium Gallery**
京都水族館
鴨川のヌシ——オオサンショウウオ

24 **私が海を目指す理由**
海洋無酸素事変はなぜ起きたのか
黒田潤一郎
地球内部ダイナミクス領域 地球深部活動研究プログラム
地球深部と表層との共進化研究チーム 研究員

28 **Marine Science Seminar**
海は呼吸する
海洋シミュレーションの最前線
木田新一郎
地球シミュレーションセンター
シミュレーション高度化研究開発プログラム
マルチスケールモデリング研究グループ 研究員

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

裏表紙 **JAMSTEC History 1971-2011**
2002年
「地球シミュレータ」

取材協力

高知コア研究所 地下生命圏研究グループ

(総監修) 稲垣史生 グループリーダー (GL)

諸野祐樹 主任研究員

井尻 暁 研究員

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

高井 研 プログラムディレクター (PD)

水や栄養源に乏しい暗黒の世界である海底下は、

かつて、生命の存在しない死の世界だと考えられていた。

そこに膨大な数の微生物が生息していることが明らかになったのは、
1990年代半ばのことだ。

近年、火星の地下にも生命が生息しているかもしれないと考えられ、
探査機が送り込まれている。

さらには、太陽系外でも地球に似た惑星が発見され始めている。

海底下を掘削し、過酷な環境でどのように生命が生き延びているのかを探る研究は、
宇宙における生命の生存可能な条件を知ることにもつながる。

さらに海底下深部には、海の起源、生命の起源、そして地球の成り立ちを知る
重要な証拠が秘められている可能性がある。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) では高知コア研究所を中心に、

海底下生命圏を探るための新しい研究基盤を整備してきた。

海底下を掘削し、生命の生存可能な条件や起源に迫る研究を紹介しよう。

海底下に生息する微生物

青森県下北半島八戸沖の海底下から採取した試料中の微生物の蛍光顕微鏡画像 (撮影: 諸野祐樹 主任研究員)。

高知コア研究所では、コンピュータによるイメージ分析により地質試料に含まれる微生物細胞の数をカウントする手法を開発。大陸沿岸の海底下から採取した堆積物の試料 (コア) には、平均すると1cm³あたり約1億細胞を超える微生物が生息していることが分かった。海底下の微生物細胞の総数は、地球全体の生物炭素量の約10%を占めると推計されている

50 μm

極限環境の微生物とアーキアの発見

生命とは、どのような条件で生存が可能なのか。

「1960年代ごろから、私たちのすむ世界とは懸け離れた極限環境にも、微生物が生息していることが分かり始めました」と、稲垣史生GLは微生物研究の歴史を振り返る。陸上の温泉では高温環境に好んで生育する高度好熱菌や超好熱菌、さらに飽和するほど塩分の高い湖などで生息可能な高度好塩菌の発見が相次いだ。

1977年には、東太平洋の有人潜水調査により、光が届かない深海底で、豊かな生態系がつけられている場所が発見された。そこは、海底下に染み込んだ海水がマグマの熱で温められ、熱水となって噴き出している熱水噴出孔だった。それまで知られていた生態系は、太陽光のエネルギーを利用して光合成でつくられた有機物に支えられている。光が届かない深海に、なぜたくさんの生物が生息できるのか。

地下深くに染み込んだ海水が温められて上昇する過程で、マグマに直接由来する無機化学成分や、周囲の岩石と水が反応することで生じる無機化学成分を含む熱水が海底に運ばれる。その化学成分を栄養源として、酸化還元反応で生じるエネルギーを代謝して有機物をつくる化学合成細菌が見つかった。その化学合成細菌がつくる有機物が、豊かな生態系を支えている。それはいわば、地球が供給する物質をエネルギー源とする“地球を食

べる生態系”だ。「つまり、太陽エネルギーが届かない場所でも、生命は惑星内部のエネルギーに依存して生存することが可能なのです」

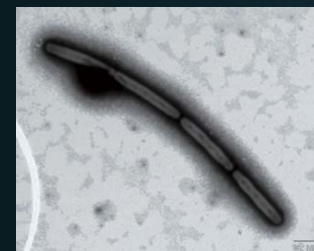
「1977年には、もう1つの大発見がありました」と稲垣GL。地球上の生命は、いくつかの例外を除き、核を持つ真核生物と、核を持たない原核生物に分けることができる。米国のカール・ワーズ博士たちは、生命に不可欠なタンパク質をつくる器官であるリボソームの遺伝情報（RNA）を解析することにより、原核生物には、従来から知られていたバクテリアとは大きく遺伝情報が異なる生物群が存在することを発見した。

「その生物群は、アーキアと呼ばれています。好熱菌や好塩菌など多くの極限環境微生物がアーキアに属しています。バクテリアにも好熱菌はいますが、90℃を超える高温で生育する超好熱菌になると、アーキアの割合が増えます。好塩菌も塩分が極端に高い環境にすむものは、ほとんどがアーキアです」

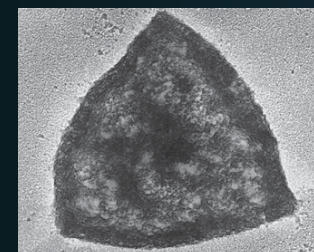
アーキアは極限環境ばかりでなく、私たちの身近にもいる。私たちが食べた有機物は胃や腸で分解され、最後に水素や酢酸が発生する。それらを使って二酸化炭素からメタンをつくるメタン生成菌が腸内にすんでいる。そのメタンが“おなら”の主成分だ。現在知られているメタン生成菌は、すべてアーキア。アーキアは私たちの腸内にもすん

でいるのだ。

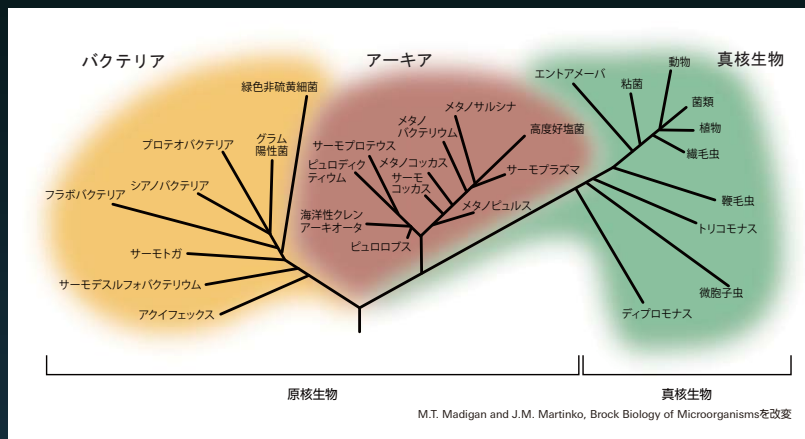
「私たちの腸内だけでなく、地球の生態系における有機物の最終分解者は一般的にメタン生成菌です。またメタン生成菌は、水素と二酸化炭素などからメタンという有機物をつくり生態系を支える一次生産者ともなります。生態系のなかで炭素は、二酸化炭素やメタン、複雑な有機物などにかたちを変えながら循環しています。有機物の最終分解者であり一次生産者でもあるメタン生成菌は、生態系における炭素循環のキープレーヤーです。特にエネルギー源の乏しい海底深部などの極限環境の生態系を考える上で、メタン生成菌がどれくらい活発に活動して有機物をつくり出しているのかが、とても重要です」



超好熱メタン生成菌
Methanopyrus kandleri 116株
(アーキア)
122℃で増殖するメタン生成菌。現在、知られている最も高温で生育できる生命体である。インド洋中央海嶺の「かわいいフィールド」で高井研PDたちが採取した

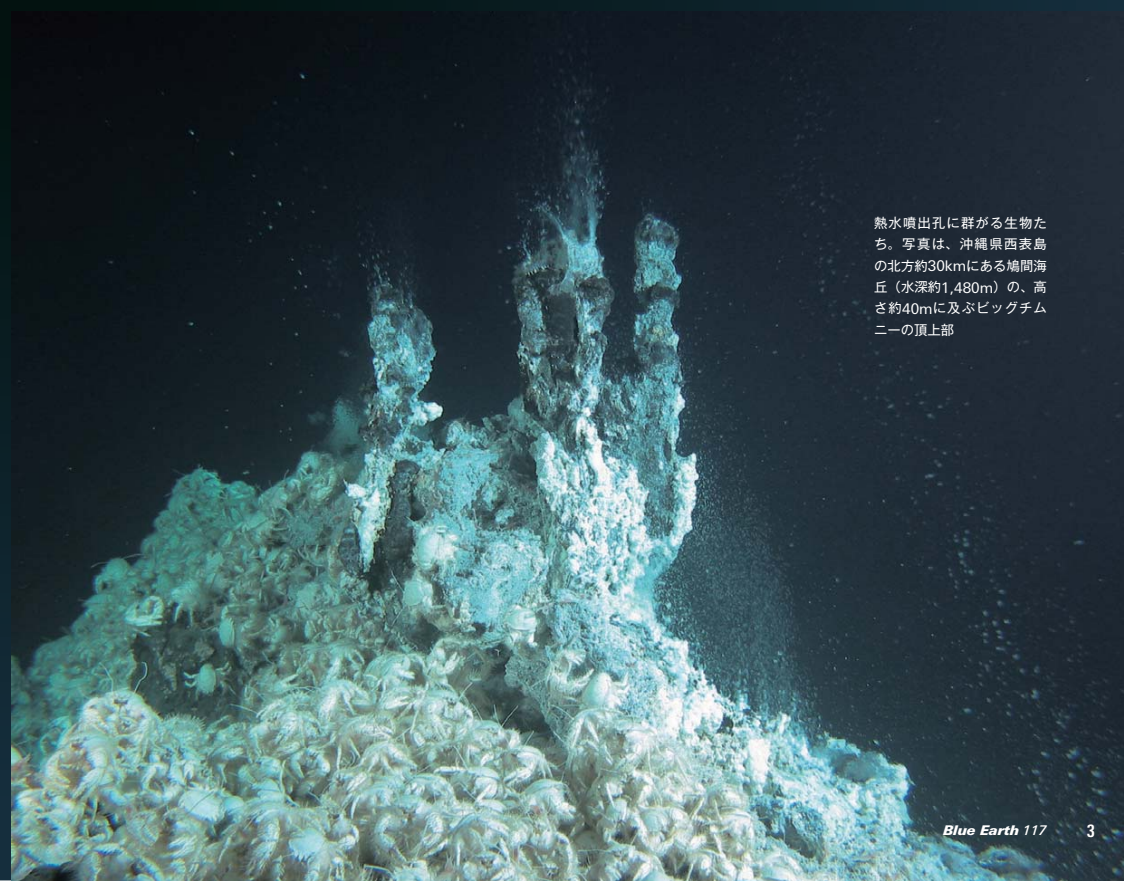


高度好塩菌
Haloarcula japonica
(アーキア)
この写真は、DEEPSTARプロジェクトの前身ともなった新技術開発事業団・掘越SuperBugsプロジェクトの成果として報告されたもの



生命進化の系統樹

アーキアで「メタノ～」と名前が付いているものは、メタン生成菌である



熱水噴出孔に群がる生物たち。写真は、沖縄県西表島の北方約30kmにある鳩間海丘（水深約1,480m）の、高さ約40mに及ぶビッグチムニーの頂上部

海底下はアーキアワールドか？

深海底で生命が生存できるならば、海底下深部にも生命圏が広がっているのだろうか？

「1980年代までは、地下に微生物が生息しているという確かな証拠を得ることができませんでした。地下の微生物を正確に検出・評価できる技術が開発されていなかったのです。また、地表には無数の微生物が生息しています。ある研究者が地下の微生物を培養したと報告しても、地表の微生物が試料に混在した「汚染」の問題が常に指摘されていました」と稲垣GL。

結局1980年代までは、地下は生命が存在できない死の世界だ、とほとんどの研究者が考えていた。「少なくとも海底下10m以深に生命圏が広がっていると主張していた研究者は1人もいなかったようです」

1994年、そのような状況を一変させる研究が報告された。イギリスのバークス博士たちが、海底下約800mまでの範囲に、細胞数にして1cm³あたり100万細胞を超える微生物が生息している、と発表したのだ。「バークス博士たちは、国際深海掘削計画（ODP）の調査船に乗り込み、世界各地の大陸沿岸の海底堆積物を掘削して得られた柱状の試料（コア）を船上で分析しました。汚染されていないコアの中心部を取り出し、細胞を染色して顕微鏡で数えたのです」

陸の地下でも微生物が発見され、地下には巨大な生命圏が広がっているらしいことが明らかになってきた。「ただし、バークス博士たちの報告は、1人の研究者が顕微鏡で細胞数を数えたデータでした。残念ながら証拠となる写真がなく、ほかの研究者が確かめることのできる試料が残されていません」

2002年、科学海洋掘削において初めての海底下生命圏の研究航海ODP第201次航海調査が、ペルー沖と東太平洋赤道域で実施された。「私はペルー沖の航海に日本からただ1人の微生物学者として乗船しました。2002年のコアはさまざまな微生物学者や地球化学者によって分析が行われ、海底下深部まで多様な種類の微生物が生息していることなど、数多くの発見をもたらしました。海底下生命圏の研究を飛躍的に発展させたのです。そのコアの分析は、現在も私たちを含め世界中で続けられています」

2003年、統合国際深海掘削計画（IODP）がスタートし、主要な研究テーマの1つに「海底下生命圏の解明」が掲げられた。そして2006年、稲垣GLたちはIODPの主力を担う地球深部探査船「ちきゅう」

の慣熟航海として、青森県下北半島八戸沖約80kmの地点で、海底下約650mまでの試験掘削を行った。

「私たちは海底堆積物に含まれる微生物について、疑問に思っていることがありました。それまでのDNA解析では、アーキアは全体の数%以下しか検出されていませんでした」

バクテリアとアーキアの大きな違いは、細胞膜の構造にある。「二重膜の構造を取るバクテリアに比べて、単一膜の構造のアーキアの細胞膜はかたく、外から物質を取り込んだり細胞内の物質を放出したりする上での流動性が低いという特徴があります。高温や高塩分などの極限環境では、かたい細胞膜で外界から身を守り、細胞内の物質が簡単に外へ出ていかないようにする必要があります。そのようなアーキアの特徴は、海底下深部の環境でも有利に働くはずですよ」

では、なぜアーキアは数%以下しか検出されないのか。「DNAを分析するには、細胞内からDNAを取り出す必要があります。しかしアーキアは細胞膜がかたくDNAを取り出しにくいので、検出されていないのかもしれないと考えました。そこで私たちはドイツのブレーメン大学と共同で、新しい手法で分析することにしました」

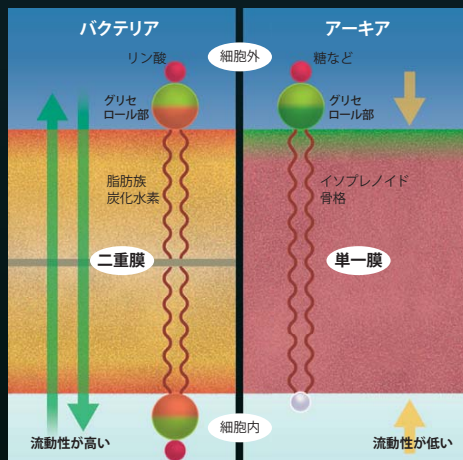
稲垣GLたちは、下北半島八戸沖の海底下約365mまでにおいて採取したコアやIODPなどによって採取された世界各地16カ所のコアを、2種類の新しい手法で分析した。「生きた微生物の細胞膜の表面には、リン酸や糖という栄養分の高い成分が付いています。細胞が死ぬと、それらの栄養分は酵素的に分解されたり、ほかの生物に食べられるなどして、すぐになくなります。私たちはそれらの栄養分の付いた、生きた微生物の完全体の細胞膜脂質を分析しました。すると、海底下1mよりも深い堆積物から抽出される細胞膜成分の87%以上がアーキア型のものでした」

さらに、細胞を凍結した後に破碎して確実にDNAを取り出し、従来とは異なる方法で増幅して解析した。すると40～60%がアーキアだった。

「海底下深部に進むほど、微生物全体の数は減っていきませんが、アーキアの比率は高くなります。私たちは2008年、これらの研究成果を英国の科学雑誌『nature』に発表、「海底下に広がるアーキアワールドを発見」とプレスリリースを行いました。ただし、海底下に本当にアーキアが多いのかどうか議論が続いており、さらに検証していく必要があります」



「ちきゅう」の船上で微生物分析用の試料を扱う稲垣GL © JAMSTEC / IODP



2006年に下北半島八戸沖の海底下約290mと約30mから採取されたコア 撮影：藤牧徹也

バクテリアとアーキアの膜構造
アーキアの細胞膜はかたい単一膜で物質の流動性が低く、バクテリアの細胞膜は二重膜で流動性が高い

海底下219m、46万年前の地層で微生物は生き延びていた

地上の生命圏と同様に、海底下生命圏でも、ある微生物のつくった物質を別の微生物が栄養分として利用する、といった物質のやりとりを行う生態系を形成することで、微生物たちは効率的に生き延びているはずだ。そのような生態系を理解するには、個々の微生物の性質を調べる必要がある。

ただし、微生物細胞の個々の性質を分析することは技術的に難しい。従来の微生物研究では、特定の微生物だけを分離・培養することで、その性質を調べる手法が用いられてきた。しかし微生物のうち、現在の技術で分離・培養できるのは、全体の1%以下だといわれている。しかもアーキアで分離・培養されているものは極めて少なく、ほとんどのアーキアの性質は未知だ。

近年、分離・培養を介さない「メタゲノム解析」という手法が微生物研究に用いられている。試料中の微生物集団からDNAを抽出し、遺伝情報を網羅的に解読して、どのような種類の遺伝子が含まれているのかを調べる手法だ。しかし、未知の遺伝子の機能は分からない。そしてメタゲノム解析だけでは、個々の微生物の性質を調べ、生態系の仕組みを解明することは難しい。

諸野祐樹 主任研究員たちは、海底下生命圏の研究に新しい技術を導入し、微生物1細胞ごとの性質を調べている。「私たちは、隕石の分析など宇宙化学に用いられてきた超高空間分解能二次イオン質量分析計（NanoSIMS）を微生物の分析に導入しました」

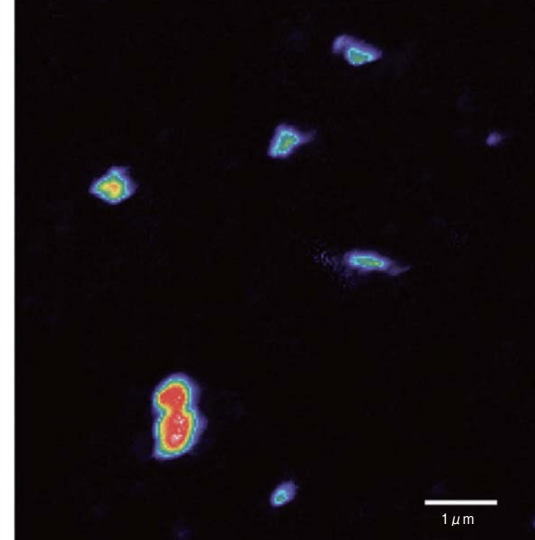
この装置は、試料を極細のビームでスキャンしながら飛び出てきた二次イオンを質量分析することで、試料中のどの場所にどのような物質があるのか、最小0.05 μm （1 μm =0.001mm）四方の分解能で調べることができる。海底下の微生物細胞のサイズは1~0.5 μm なので、微生物細胞1個ずつのスケールで調べることが可能な技術だ。

この装置を使うと、どのような測定ができるのか。諸野主任たちは、2006年に下北半島八戸沖の海底下約219mから採取した試料をNanoSIMSで分析し、そのなかの大半の微生物が「生きている」ことを確認した。

「私たちは、普通の炭素（炭素12）よりもわずかに質量の大きい炭素13で目印を付けた栄養分を微生物に与え、それを取り込むかどうか、東京大学やフランスのキュリー研究所のNanoSIMSを用いて測定しました。すると、76%の微生物が栄養分を

取り込みました。それらの微生物を採取した地層は約46万年前に堆積したもの。そこにすむ微生物の大半は生理学的に生きている状態であることを確認したのです。1細胞あたりの栄養分（基質）の取り込み速度は、炭素換算で1日あたり平均1京分の1（1兆分の1のさらに1万分の1）g、大腸菌の10万分の1以下と極めてゆっくりとしたものでした。大腸菌は、最適な環境があれば20~30分に1回分裂します。海底下の微生物は千年から1万年に1回といったペースで分裂しながら、生き延びているのでしょう」

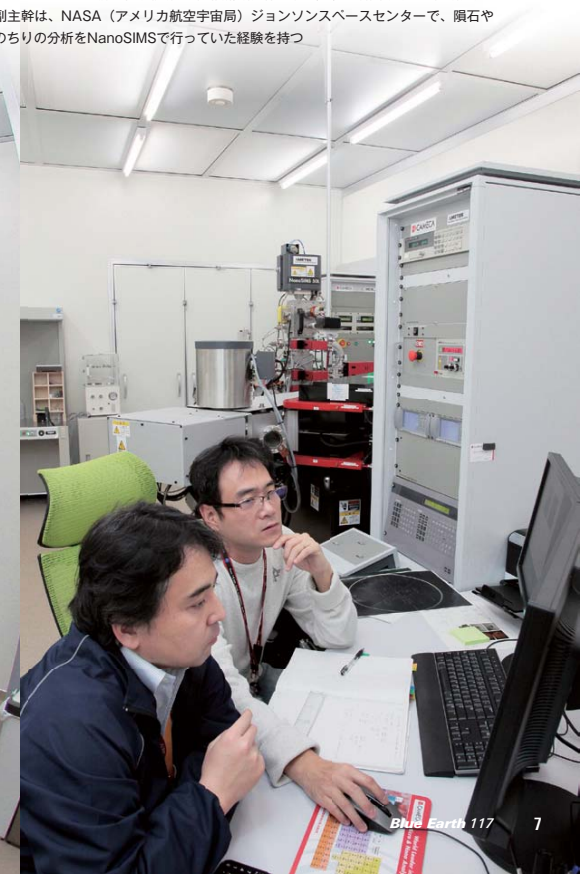
JAMSTEC高知コア研究所では2011年度、NanoSIMSイメージ分析ラボやシングルセル分析ラボなどを整備した。「シングルセル分析ラボは、文字通り、微生物を1細胞ごとに分析するための実験室です。ただし、試料のなかから1細胞だけを取り出すのが大変なんです。私は高知コア研究所に赴任して5年、その技術とノウハウの開発を積み重ねてきました。今後、NanoSIMSやシングルセル分析ラボを駆使して、海底下の微生物1細胞ごとの種類を同定したり、物質の取り込みや放出を測定したりすることで、海底下の生態系の仕組みを解明していきたいと思います」



炭素13で目印を付けた栄養分（グルコース）を取り込んだ海底下の微生物細胞のNanoSIMS画像

高知コア研究所に導入されたNanoSIMS 50L

NanoSIMS 50Lで分析を行う伊藤元雄 技術研究副主幹（奥）と諸野祐樹 主任研究員。伊藤副主幹は、NASA（アメリカ航空宇宙局）ジョンソンスペースセンターで、隕石や彗星のちりの分析をNanoSIMSで行っていた経験を持つ



海底下生命の未知なる生態と地球環境における 役割

栄養源に乏しく、無生物・化石の世界だと考えられていた海底下において、微生物はどのように生存のための代謝エネルギーを獲得して生き延びているのか。

私たち人間は酸素を呼吸して、有機物などの還元物質を“燃やす”ことで、酸化還元反応によって生じる代謝エネルギーを獲得し、生命活動を維持している。「海底下生命圏を考える上でも、堆積物に埋没した有機物のような栄養分とともに、呼吸の基質となる酸化物質がどれくらい存在しているかが重要です」と稲垣GLは指摘する。

地下に存在する酸化物質としては、硝酸や硫酸、遷移金属や二酸化炭素などが考えられる。たとえば、メタン生成菌は水素や酢酸を二酸化炭素で燃やしてメタンをつくり、エネルギーを得ている。

2002年のペルー沖の掘削により、海底下深部の生命活動に欠かせない酸化物質が、海水ばかりではなく、地球深部からも供給されていることが分かった。「海底堆積物の下には、玄武岩質の海洋地殻があります。上部玄武岩には硫酸や硝酸を含む酸化的な水の広大な帯水層があり、深部堆積層や海洋地殻に生息する微生物の呼吸代謝を支えている可能性が初めて示されたのです」

海底下にはさまざまな環境があり、生命を支えるエネルギー供給システムも多様なはずだ。ただし、従来の科学海洋掘削に用いられてきたノンライザー型の掘削船では、石炭層や天然ガス層がある場所や海底下数kmを超える大深度環境を掘削することができなかった。ライザー掘削システムを搭載した「ちきゅう」は、そのような場所の掘削が可能だ。

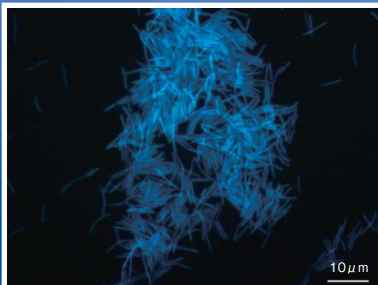
「私たちが2006年に掘削を行った下北半島八戸沖の海底下深部には、古第三紀（約5000万年前）から白亜紀（約7500万年前）にかけての石炭層があります。かつてその海域は陸でした。それが日本列島の形成に伴う地殻変動で沈降し、上に海洋堆積物が形成されていきました。もともと森や湿原だった日本沿岸の環境が、いまでは“海底下の森”として機能して石炭や天然ガスの根源となっています。そのような陸と海の層が組み合わさった石炭・天然ガス域での科学海洋掘削は初めてで、地質形成史と生命圏の進化・役割を解明する理想的な環境といえるでしょう」

2006年の下北半島八戸沖の海底下約650mまでの掘削により、そこにはメタン生成菌が生息していることが分かった。そして砂層や火山灰層などの地

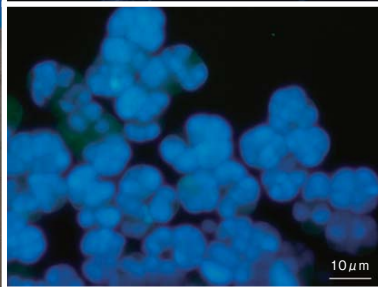
下北半島八戸沖の海底下から分離・培養されたメタン生成菌

JAMSTEC海洋・極限環境生物圏領域の井町寛之 主任研究員たちが、独自の手法で分離・培養に成功したもの

*Methanobacterium*属



*Methanosarcina*属

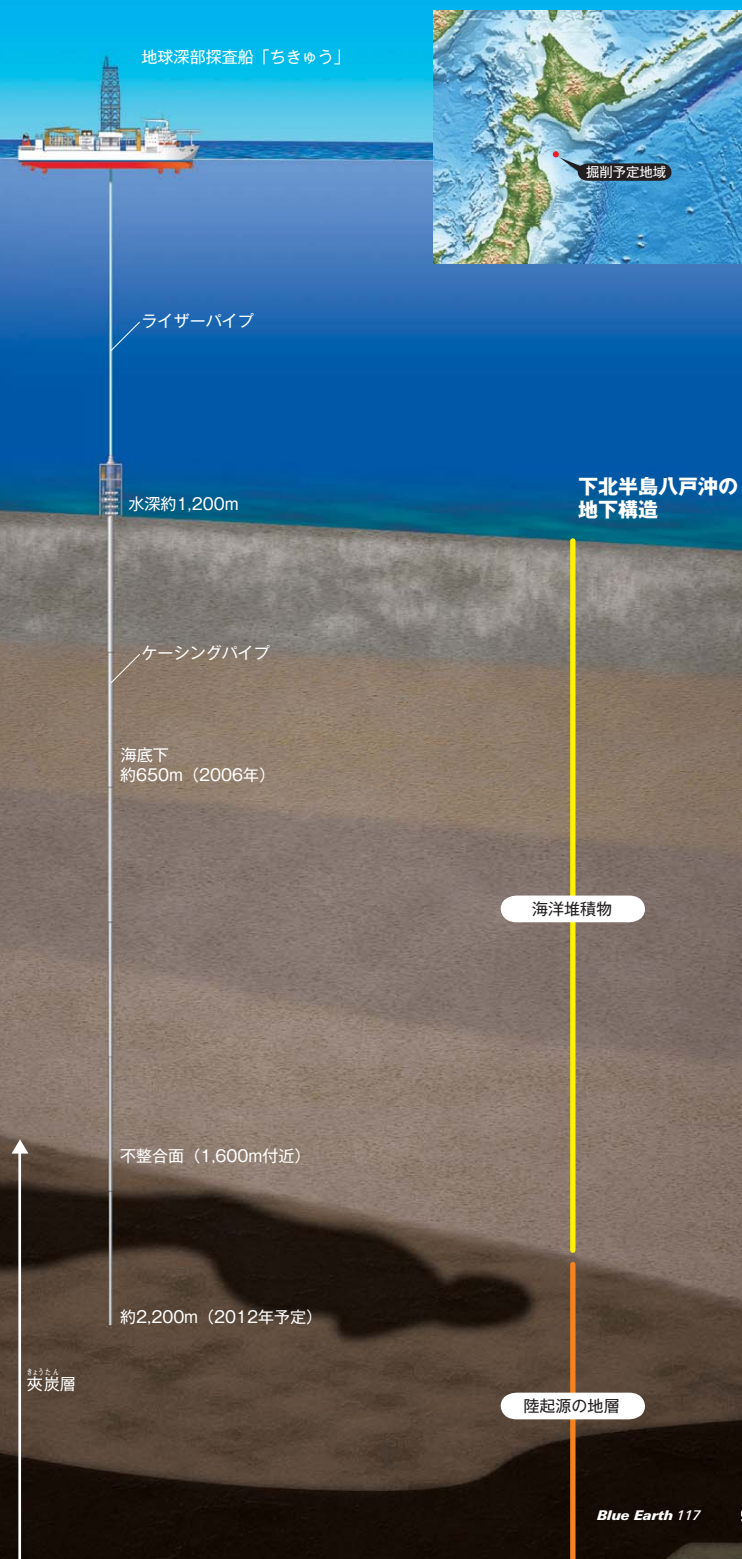


層では、メタンが氷に閉じ込められたメタンハイドレートが見つかった。

2012年の7月から9月にかけて、稲垣GLたちは「ちきゅう」のライザー掘削により、同じ場所を海底下2,200mまで掘削する計画だ。これまでの世界各地の科学海洋掘削で微生物の存在が確認されたのは、海底下1,626mまで。そして科学海洋掘削の最深到達記録は2,111mだ。それを超える人類未到底の海底下生命圏探査となる。

「石炭層では有機物が地熱で分解されて水素や有機酸、一酸化炭素や二酸化炭素、メタンなどの低分子の炭化水素が発生しているはずだ。それら微生物の栄養分となる物質が特定の場所に集まり、深部堆積物の環境にまだ発見されていない肥沃な海底下微生物生態系が形成されているかもしれません」と稲垣GL。

「さらに海底下1,600m付近の陸と海の層の境界（不整合面）を挟んで、微生物の種類や生理特性が異なっている可能性があります。そこに生息している微生物はどのような進化を遂げているのか。微生物の種類や性質をメタゲノム解析やNanoSIMS、シングルセル分析ラボなどで解析することで、地球内部の生命進化の謎に迫ることもできるでしょう。いまからとてもわくわくしています」



海底下の環境を実験室で再現

—環境・エネルギー問題の解決に貢献する—

稲垣GLたちは、海底下の石炭層の環境や微生物の活動を活用して、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を隔離し天然ガス成分であるメタンに変換して、再生可能なエネルギー源として利用する持続的な炭素循環システムを創出することに取り組んでいる。

「二酸化炭素の回収・貯留（CCS）を行う場合、日本列島の陸の地下では、地震により大気へ二酸化炭素が漏れたり森林や飲料水へ影響を及ぼしたりすることが懸念されます。海底下深部ならば、二酸化炭素を確実に隔離することができるかもしれません」

北海道南部から下北半島八戸沖にかけての海底下の石炭層は、熟成度が浅く発熱量が低い褐炭であり、微生物の栄養源となる水素やリン、窒素、有機酸などの不純物を多く含んでいる。「海底下の褐炭はそのままでは資源としての価値はありません。日本を含む西太平洋沿岸の海底下には、褐炭や二酸化炭素を通しやすい砂層が重なった夾炭層環境が広く分布しています。この夾炭層に二酸化炭素を注入すると、水素や酢酸などが発生するはず。それらは海底下深部の微生物の栄養分となり、メタン生成が活発化するはず。つまり、私たちの腸内や生態系で起きている有機物分解の最終プロセスを、海底下で人工的に引き起こすのです。それは持続的な二酸化炭素隔離・エネルギー生産システムになるはず。私たちは、それらを『バイオCCS構想』

と呼んでいます。海底下にすむメタン生成菌は、試験管を使って実験室内で培養する場合のように豊富な栄養分を与えると、メタンをつくる速度が海底下にいる場合の10億倍になるポテンシャルを持っています。容易ではありませんが、バイオCCS実現の可能性は十分にあると思います」

実際に、海底下に二酸化炭素を注入するとどのような反応が起き、メタンはどれくらいの効率で生産できるのか。それを検証するために、井尻 暁 研究員たちは、海底下の環境を再現できる「ジオバイオリアクターラボ」を高知コア研究所に構築した。

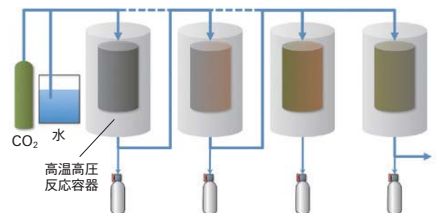
「海底下では1,000m進むごとに30～50℃温度が高くなり、圧力も高くなります。このシステムは100℃・800気圧までのさまざまな温度・圧力を再現できる4つの独立した反応容器から成ります。4つの反応容器は直列または並列に組み合わせることが可能で、海底下深部から浅部までの時空間的なプロセスを再現することができます。まずコアの試料を入れ、水に混ぜた液体や超臨界の二酸化炭素を流し込み、海底下と同様の条件で反応させます。そして、その反応過程を、各反応容器の水やガスの一部を取り出して時空間的に分析します。同時に、物性測定のスベチャリストである共同研究者たちにより、コア試料の物性変化も詳細に分析される予定です」と井尻研究員は解説する。

「注入した二酸化炭素が直接すべてメタンに変換されるわけではありません。生成するメタンやその他の有機物の濃度と、炭素13と炭素12の比を目印にして、注入した二酸化炭素のどれくらいがどのような経路を経てメタンに変換されるのか、ジオバイオリアクターで調べることができます。そして海底下のどのような場所に二酸化炭素を注入すれば最も効率よくメタンが生成されるのか探りたいと思います。また、二酸化炭素を注入するときにある工夫をすれば、メタン生成の効率がアップするかもしれません。私たちにはいくつかのアイデアがあり、それを検証していきます。そのアイデアとは？「それはまだ秘密です」と井尻研究員。

高知コア研究所には、IODPなどにより世界各地で掘削されたコア試料が保管されている。それらのコア試料をジオバイオリアクターで反応させ、世界各地の海底下の環境を再現することができる。ジオバイオリアクターはコアから情報を引き出すための新しい装置であり、それは地下生命圏の利活用法を探る有力な手段でもある。

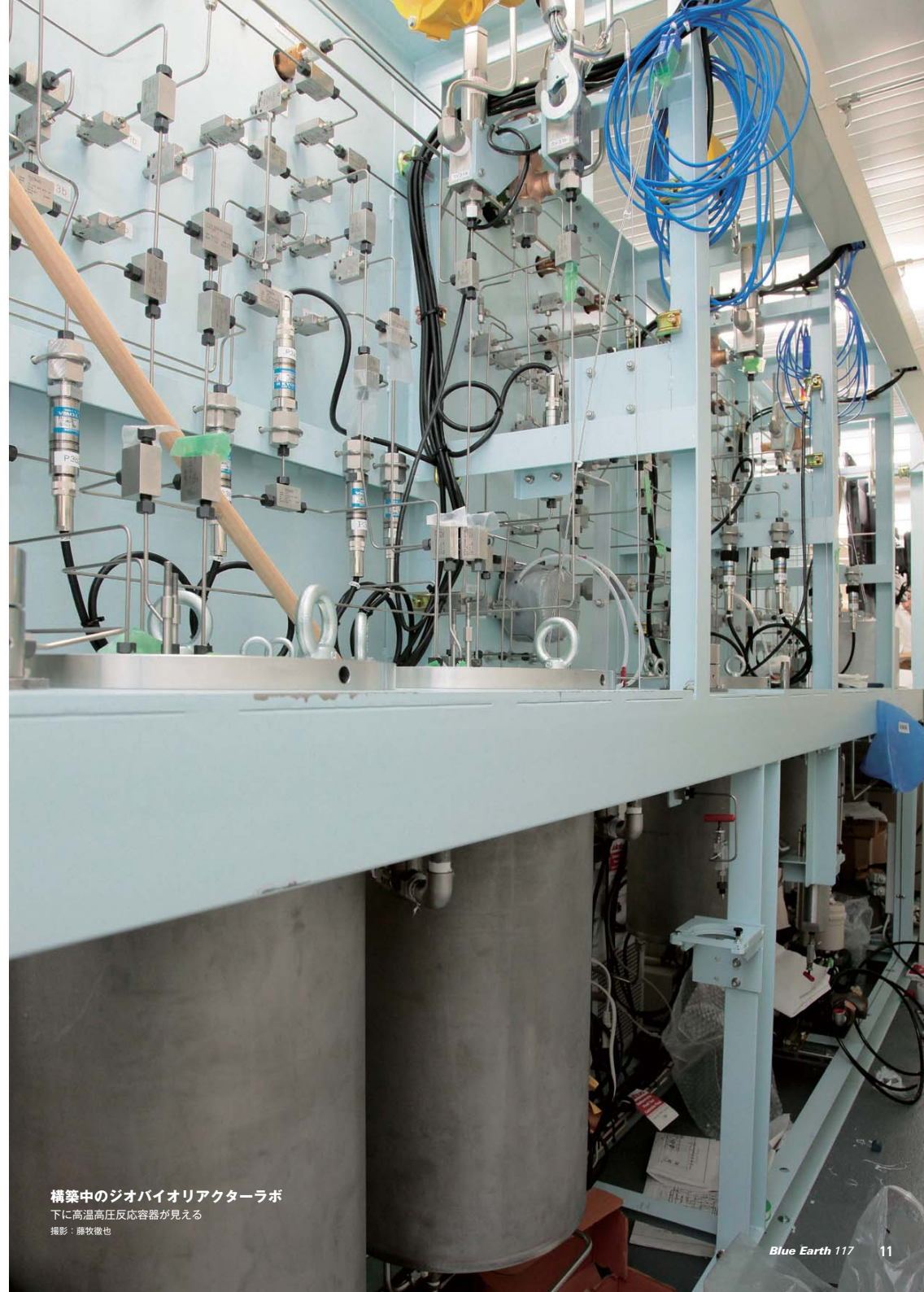


ジオバイオリアクターラボで作業する井尻 暁 研究員
撮影：藤牧徹也



ジオバイオリアクターの概略図
4つの独立した高温高圧反応容器を直列あるいは並列につなぎ、二酸化炭素（CO₂）の隔離に関連する時空間的な挙動を再現することができる

水やガスの一部を取り出して分析



構築中のジオバイオリアクターラボ

下に見える高温高圧反応容器が見える
撮影：藤牧徹也

約40億 年前に誕生した生命と存続・進化のメカニズム

生命を構成するDNAや脂質などの生体高分子は、原始地球のどのような環境で発生し、子孫を残すための存続・進化メカニズムを獲得したのだろうか？

遺伝子進化の系統樹の根元には超好熱菌が位置している。そのため、生命の祖先は深海底熱水噴出孔などの高温環境付近で誕生したと考えられている。

生命が誕生したのは、約40億年前だと考えられている。「生命は誕生しても、すぐには生き延びることはできなかったでしょう。持続的な生命活動は、異なる種類が互いに必要な物質をやりとりする生態系を形成することで初めて可能になったはずだ。その最古の生態系を支える一次生産者は、水素と二酸化炭素からメタンをつくる超好熱性メタン生成菌だった、と私は考えています」。そう語る高井 研PDは、その生態系を「ハイバースライム」と呼んでいる。

原始地球の海中には、二酸化炭素は豊富に含まれていたと考えられている。では、メタン生成菌に必要な水素はどのように供給されたのか。原始地球のマントルは現在よりも高温で、1,600℃以上の高温マグマが固まってできたコマチアイトと呼ばれる超マフィック（塩基性）岩で海底が覆われていたと考えられる。そのコマチアイトと熱水が反応すると蛇紋岩化作用という反応により水素が発生する。

このような「超マフィック岩—熱水活動—水素生成—ハイバースライム」の相互作用が、初期地球の生態系を支えたシステムだという「ウルトラH²リネージ」仮説を高井PDは提唱、プレカンブリアンエコシステムラボユニットを率いてその検証を進めている。

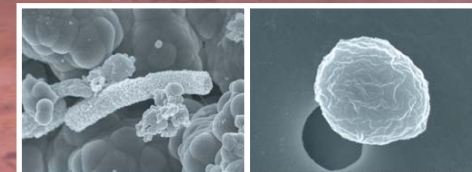
高井PDがこの説を提唱するきっかけとなったのは、2002年にインド洋の「かわいいフィールド」の深海底で、超好熱メタン生成菌と超好熱酵母菌の群集を発見したことだ。「これは現代のハイバースライムだと考えられます」。その近くには熱水噴出孔が高濃度の水素を含む熱水を噴き上げていた。2006年には、「かわいいフィールド」でコマチアイトと似た超マフィック岩を発見。さらに実験室において、高圧下でコマチアイトと熱水を反応させる実験により高濃度の水素が発生することも確かめた。

生命誕生や地球初期の生態系が形成された進化の場として注目される熱水噴出孔だが、海底下生命圏とはどのような関係があるのだろうか。海底下深部から地球内部エネルギー（マグマ）の影響を受けて運ばれてきた熱水が噴出する熱水噴出孔は、「地下生命圏への窓」と呼ばれてきた。しかし実際に熱水域の海底下に微生物が生息しているのかどうか、確かな証拠は得られていなかった。

2010年、高井PDたちは熱水域直下の生命圏を世界で初めて確認するため、地球深部探査船「ちきゅう」により、沖縄トラフ伊平屋北にある熱水域の海底下を掘削、巨大な海底下熱水湖が広がっていることを発見した。「その海底下熱水湖へ達するまでの領域から採取したコア試料から、アーキアのDNAを検出しました。また微生物作用を受けたメタンを含む水が大規模に循環していることが証明されつつあります。熱水域の海底下には、メタン生成菌が一次生産者として支える生態系が形成されている可能性があります」

約40億年前、生命が誕生したころの熱水噴出孔の想像図
プレカンブリアンエコシステムラボユニットの渋谷岳造 研究員は、当時の熱水は強アルカリ性だったと推定している。その説に従い、シリカを大量に含んで白く濁った熱水が描かれている。当時の熱水が強アルカリ性だったことは、生命誕生に重要な意味を持っていたかもしれない（次ページからの対談参照）

イラスト：飛田 敏



現代のハイバースライム
インド洋の「かわいいフィールド」の深海底で発見された超好熱メタン生成菌（左）と超好熱酵母菌（右）

「ちきゅう」による海底下深部掘削により、 生命の起源や進化の謎、惑星内部における 生命の生息可能条件に迫る

■多様な海底下の環境を、 どのように探査するのか

稲垣：私たち高知コア研究所では、文部科学省の最先端研究基盤事業として、ジオバイオリクターラボやクリーンルームに設置したNanoSIMSイメージ分析ラボ、シングルセル分析ラボなどの整備を行ってきました。事業名は「海底下実環境ラボの整備による地球科学-生命科学融合拠点の強化（「ちきゅう」を活用）」です。

主にプレソーラーグレイン（太陽系形成以前の微粒子）や隕石の分析など宇宙化学に使われてきたNanoSIMSの導入を進めるうちに、科学海洋掘削のようなアースセントリック（地球惑星主義的）なアプローチは、地球科学-生命科学の融合のみならず、惑星科学との融合も視野に入れるべきだと考えるようになりました。

アメリカではすでにそのような視野のシステム研究や分野融合型の分析研究が進んでいます。たとえば2012年8月に火星に到着予定のNASA（アメリカ航空宇宙局）の探査機「マーズ・サイエンス・ラボラトリー」計画に加わっている研究者が、今年の夏に行われる「ちきゅう」による下北半島八戸沖の石炭層生命圏調査にも参加する予定です。

NASAは、地球および地球外の生命の起源や進化、分布や生息可能条件、そしてその未来を研究する「アストロバイオロジー」について精力的に研究展開をしています。私たちが進める海底下生命圏の研究にも、そのような視点を積極的に取り入れていきたい。そのような考えから2012年2月、最先端基盤事業の一環として、地球科学や生命科学だけでなく、宇宙科学分野で活躍する第一線の世界的研究者を高知コア研究所に招き、「地球惑

星科学-生命科学融合研究の最前線」というワークショップを開催しました。

そこでは、現在から過去の地球生命圏における炭素や窒素の生物地球化学的な循環、地球惑星形成における水の起源、地球外物質に含まれる炭素や窒素、リンなどの化合物に関する最先端研究のほかに、地球惑星科学と生命科学に共通する科学的・技術的なテーマは何か、生命が生息可能な惑星の条件とは何か、などを議論しました。

今後の科学海洋掘削における大きな目標は、「ちきゅう」を使って人類未到達の上部マントル層まで到達することです。そこから生命や海洋、地球について何を学べるのか、というテーマでも議論しました。残念ながら高井さんは航海中でワークショップに参加できませんでした。まず、最後のテーマについてどう考えますか。

高井：いまや、マントルだけでなく地球

中心部のコアの温度・圧力を実験室で再現することで、マントルやコアがどのような物質でできているのか分かるようになりました。マントルまで掘り進めるには、数年単位の歳月と巨額なコストが必要です。個人的にはそのような巨額の投資に見合う将来のサイエンスの劇的な広がりやビジョン、感動がまったく示されていないと感じます。

稲垣：まったくですか？ 僕はまったくとまではいいませんが、生命科学などを巻き込んで、もっと厚みを増したビジョンを描くことが必要だと思います。「ちきゅう」を使う以上は、国内でもっと議論を深めるべきですね。

高井：今年、稲垣さんたちは八戸沖で海底下2,200mまで掘り進めるけれど、さらに3,000~4,000mの大深度まで掘削することは、それほど難しくないでしょう。その先のマントルや基盤岩に達しなくても、それくらいの大深度掘削をい

ろな場所で行うことで、たくさんの発見があるはずです。海洋地殻の環境はものすごく多様で、それはあたかも宇宙に存在するさまざまな環境を網羅するほどだといえる。しかし私たちは、その海洋地殻の多様性の探査が、ほとんどできていません。マントル到達だけを目標にしようとしてもナンボでもやるべきことはあるんじゃないかと。

稲垣：私は「ちきゅう」の特長を活用し切れていないことも問題だと思います。「ちきゅう」はライザー掘削システムを搭載し、従来の科学掘削船では到達できなかった、新しい環境を掘削することが可能です。しかしそのようなインフラの特徴や独自性を最大限に発揮した掘削調査が、十分に行われているとはいえません。

海洋地殻の多様な環境を探っていくには、どのように海底掘削を進めていくべきだと思いますか。

高井：海は広大で、海底下を想像するこ

高井 研 × 稲垣史生



Ken Takai

Fumio Inagaki

撮影：STUDIO CAC

マリアナ海溝チャレンジャー海淵^{かいえん}の近くで蛇紋岩化したかんらん岩から栄養を得ているシロウリガイ群集を見つけたことです（次ページ下の写真）。海溝斜面なんかにマントル物質であるかんらん岩が露出しているとは誰も思ってもいなかった。

シロウリガイは硫化水素から有機物をつくる微生物を共生させています。「シロウリガイには硫化水素が必要で、硫化水素にはメタンと海底下微生物が必要で、メタンには水素と海底下微生物が必要で、水素にはかんらん岩と水が必要」というように、シロウリガイ群集が見つかることで、その地下には想像もしなかったマントル物質が存在しており、蛇紋岩化プロセスで水素やメタンが発生し、それらをエネルギー源とする微生物の世界があるはずだ、と想像できます。

そういう新しい発見というものが、これからどんどん出てくると思います。そのようなわれわれの常識を覆すような可能性のある場所を、次々と掘削していくべきです。

僕たちが掘削した沖縄の熱水域直下や



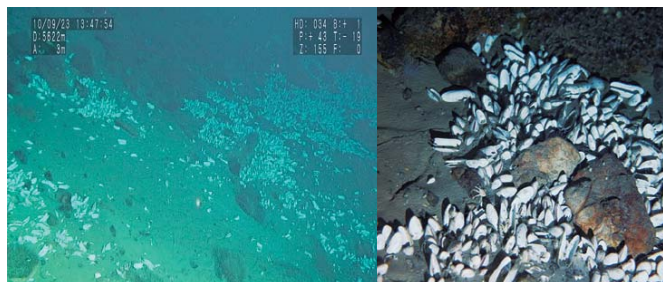
JAMSTEC高知コア研究所で2012年2月15日に開催された最先端研究拠点国際ワークショップ「地球惑星科学-生命科学融合研究の最前線」



撮影：STUDIO CAC

稲垣さんたちが進めている八戸沖は、それまで科学掘削が行われていなかった場所。そのような場所の掘削を積み重ねていくことが大事です。マントル掘削という1カ所の超大深度掘削で特大ホームランを狙うより、長打の連続が勝利につながると思う。

稲垣：同感です。私たちはIODPの一環として2010年に、南太平洋還流域のこれまでに科学海洋掘削が行われていない外洋の掘削調査を行いました。海水中の光合成基礎生産量が著しく低い、超低栄養環境の南太平洋還流域では、海水に豊富に含まれている酸素が海底下の微生物によって完全には消費されず、海洋地殻まで広範囲に達している可能性があります。還元物質に乏しく酸化物質が豊富であるという、大陸沿岸の海底下とは正反対の性質を持つ外洋の海底下に、どのような微生物生態系が存在しているのか、いま分析しているところです。



マリアナ海溝チャレンジャー海淵の近くの「しんかい湧水フィールド」で発見された、マントル物質（蛇紋岩化したかんらん岩）に集まるシロウリガイ群集（有人潜水調査船「しんかい6500」による成果）

高井 研

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

たかい けん。農学博士。1994年、米国ワシントン大学客員研究員、1997年、京都大学大学院農学研究科水産学専攻博士課程修了。日本学術振興会、科学技術振興事業団研究員などを経て、2000年、海洋科学技術センター（現、海洋研究開発機構）入所。地殻内微生物研究領域グループリーダーを経て、2009年より現職

■生命の生存を決める水の存在

稲垣：海底下生命圏の限界を考える上で、深部環境における水の存在や動態がキーポイントですね。

高井：その通り。生命が生存するには水が不可欠。生命圏の限界深度は、地殻のなかをどこまで深く水が浸入できるかで決まります。つまり地下生命圏の限界のところ、海洋地殻において水がどのような形態で存在しているのか、どの深度まで水が存在しているのか、よく分かっていません。それを理解することは、地球外の惑星で生命の存在を考える第一歩になります。

そもそも海洋地殻の構造自体がよく分かっていない。教科書には海洋地殻の構造が描かれているが、あれは想像上の動物みたいなものですね。海洋地殻の構造は主に、海洋地殻を含む海洋プレートは

中央海嶺^{かいりゅう}で生まれて移動していくというプレートテクトニクス理論と、太古の昔に形成された海洋地殻から上部マントルが陸上に露出した「オマーン・オフィオライト」というアラビア半島の地層の情報、そして地震波探査のデータをもとにして構築されたものです。

しかし、海底掘削により海洋地殻の構造が教科書通りではないことが明らかになってきた。そこからまた、地球科学の新理論や研究のアイデアが生まれてくるはずだ。

稲垣：もしかしら、私たちがまだ知らない海水の取り込みシステムが海洋地殻にはあるかもしれませんね。

高井：ある場所で取り込まれた海水が、遠く離れた場所で再び上昇するような大規模な水の循環システムがあってもおかしくない。

稲垣：そのような海洋地殻における水の動態は、オマーン・オフィオライトのような“化石”では分かりませんね。「ちきゅう」を用いた大深度の科学海洋掘削によりフレッシュな試料を手に入れる必要があります。

小惑星探査機「はやぶさ」プロジェクトが、なぜ画期的だったのか。宇宙からは小惑星のかけらが隕石として地球に降り注いでいますが、大気を通過するときには脱水したり熱で変成したりします。すると重要な情報が失われてしまいます。「はやぶさ」の科学的意義は、フレッシュな試料を小惑星から初めてカプセルに閉じ込めて持ち帰ってきたことです。大深度の科学海洋掘削の意義も、変質や汚染のないフレッシュな試料を得ること。それがないと、海底下の実態は分かりません。

高井：現在だけでなく地球史を解明するためにも、フレッシュな試料は欠かせない。オーストラリアには、約35億〜38億年前にできた海洋地殻が陸上に露出している場所があります。私たちプレカンブリアンエコシステムラボユニットの研究員、渋谷岳造さんや中村謙太郎さんたちは、そこを調査して当時の熱水や炭素循環を理解しようとしています。ただし、

多くの情報が失われているので想像で補う必要がある。そのとき重要なのが、現在の海底掘削で得られるフレッシュな試料に基づく海洋地殻の情報です。

■海底下に海と生命の起源を解く鍵がある

稲垣：私は大深度の科学海洋掘削で、海や生命の起源に迫ることができるのでは、と考え始めています。

地球はたくさんの微惑星が衝突・合体を繰り返してつくられたと考えられています。海水の起源は、その初期惑星そのものに含まれていたマグマ由来の水なのか、あるいは地球形成の過程で、彗星のような氷天体からもたらされた大量の水が寄与しているのか議論されています。さらに地球では、表層に約40億年間も液体の水が安定して存在し続けていることも、大きな謎です。

それらの謎を解く鍵が地球深部にあるのではないのでしょうか。現在の海水に汚染されていない海洋地殻深部の水を「ちきゅう」により手に入れることで、海の

稲垣 史生

高知コア研究所
地下生命圏研究グループ
グループリーダー

いなぎ ふみお。農学博士。1999年、日本学術振興会特別研究員。2000年、九州大学大学院農学研究科遺伝子資源工学専攻博士課程修了。2000年、海洋科学技術センター（現、海洋研究開発機構）入所。深海環境フロンティア研究員。2005年、ドイツ・マックスプランク海洋微生物学研究所客員研究員。2007年より現職。2010年、国際深海掘削計画における次期科学目標策定執筆委員。

起源や惑星内部の水の分布や循環システムに迫ることができるはずだ。

また水は生命にとって必須の因子ですが、大深度の海底下環境には、海水の浸透など地表境界の物質循環や生命活動とは切り離された、生命の前段階「プレバイオティック」なプロセスや領域があるのでは、と想像しています。そこに、生命の起源に迫る鍵が隠されていると思います。

高井：海底下生命圏の下に水の浸入限界があり、さらにその下にプレバイオ



撮影：STUDIO CAC

ティックな領域があるかと？

稲垣：そうです。2006年、NASAの彗星探査機「スターダスト」は、彗星のちりを地球に持ち帰ってきました。そのちりには、炭素はもちろん、窒素やリンといった生命の必須元素が含まれていました。宇宙ではタンパク質の材料であるアミノ酸もつくられていることが分かっています。原始の地球惑星そのものに含まれていたそれら単純な材料からタンパク質など生命に必要な部品が合成される「分子進化」の過程、さらに生命誕生の



高知コア研究所のシングルセル分析ラボ。地表の微生物に試料が汚染されないようにクリーンルームになっている

撮影：藤牧徹也

過程が、現在でもそのプレバイオティクス領域で進行しているのではないかと考えています。

高井：僕も、アストロバイオロジーの研究では「生命の材料は宇宙から来たのか、地球でつくられたのか」が重要なテーマの1つであると考えています。生命をつくるには、タンパク質と核酸（DNAやRNA）が必要。宇宙でアミノ酸がつくられることは知られています。難しいのが、核酸の材料となるリボースをつくること。リボースがどこで、どのようにつくられたのが長年の謎です。実は、リボースはホウ素を含む鉱物があると比較的容易につくることができるんです。

稲垣：それは面白い！

高井：地球内部に由来する鉱物や元素が触媒となり、分子進化を促進した可能性があるわけです。そのような分子進化における地球内部の役割はまだまったく分かっていない。

稲垣：最近、渋谷さんは原始地球の海底熱水は強アルカリ性だったという説を発表していますね。熱水域で強アルカリ性から中性に移り変わる場所は、分子進化にとって重要だったと思います。

高井：確かに。分子進化におけるアルカリ性の重要性は、ほとんど指摘されてこなかったかもしれない。アミノ酸はアルカリ性の水溶液中では、次々とつながっていく。そのようにしてタンパク質がつくられた可能性があります。ただし、アルカリ性の場で核酸がつくられやすいのかどうかは、まだ誰も実験していないかもしれません。

稲垣：アルカリ性では分子が変性しやすい一方で重合も起きやすいので、タンパク質も核酸もつくられやすいはず。生命誕生の研究では、タンパク質がつくられたのが先か核酸が先か、DNAが先かRNAが先かという、いわゆる「セントラルドグマ」に関する議論が続いてきまし

た。しかし、タンパク質もDNAもRNAも、分子が重合しやすいアルカリ性から中性に移り変わる場で、同時多発的にできていたのかもしれない。

高井：そう、熱水域ですべて同時発生的に完成したのだと思う。

稲垣：そして熱水域でタンパク質や核酸から生命の共通祖先が誕生して、やがてアーキアとバクテリアに分化し、高井さんのいう「ハイバースライム」のような最古の生態系が形成されていった……。

高井：僕は1つの共通祖先からアーキアとバクテリアが分化したのではなく、生命誕生の最初の段階から、アーキアの祖先とバクテリアの祖先に分かれていたのではないと思う。つまり生命の起源は1つではない、「オリジン」ではなく「オリジンズ」。なぜなら、アーキアとバクテリアの性質はあまりに違い過ぎます。そして生命が誕生した熱水域の環境も一様ではない。温度だけを考えても高温か

ら低温までさまざまな環境があります。熱水域の異なる環境でアーキアの祖先とバクテリアの祖先が生まれたのかも知れない。

稲垣：それなら、2つのタイプだけでなく、もっとたくさんのタイプが誕生していたのかもしれない。アーキアとバクテリアでは、細胞膜を構成する部品が違います。それ以外のタイプが生まれたかどうかは、分子進化の過程でどれだけ多様な生命の部品が用意されたかによると思います。

高井：たくさんタイプが生まれて、アーキアとバクテリアだけが生き延びたのかもしれない。ただ、別のタイプの子孫が海底下で生き延びている、あるいは現在も誕生しているかということ、それは難しいでしょう。

稲垣：否定はできないでしょうが、難しいかもしれませんね。自己増殖はできないけれど、核酸がタンパク質の殻に覆われた単純な構造のウイルスならば、いままで知られていないタイプが海底下にいてもおかしくない。

高井：そう、ウイルスなら、われわれの常識を覆すようなものが海底下で発生していてもおかしくないね。

■海底下で異なるシステムの生命をつくる

稲垣：ここまで議論してきたような視点で海底下の大深度環境を掘削する場合、われわれは技術的な準備ができているといえるでしょうか。

高井：それは、稲垣さんたちが高知コア研究所で整備してきた研究基盤のようなものが重要だと思う。特に、諸野祐樹さんがやっているような、微生物を1細胞ごとに調べるシングルセル分析ラボやNanoSIMSのような超高感度の質量分析の技術がとても重要。地表はあまりに生命に満ちあふれているので、生命活動の微弱なシグナルを消去してしまう。いかに掘削試料を地表の生命に汚染されないクリーンな状態で扱い、微生物細胞1個を検出し分析するのか、そこがポイントです。

次に、生死を見分ける必要がある。こ

れはとても難しい問題。完全に死んでいるもの、明らかに生きているものは識別できるが、その境界の微妙なものの生死を区別することは、現在の科学も解決できていない課題です。

近年、分子1個の挙動まで測定できるようになってきましたが、分子1個は生死とは無関係に挙動している。生死を物理法則として区別するのが難しいことは、分子生物学の祖の祖である理論物理学者シュレーディンガーが1940年代にすでに指摘している通りですね。

稲垣：科学海洋掘削に関わる技術でいえば、掘削した孔井を使って、どのような観測や実験をすべきか、もっと真剣に検討すべきですね。

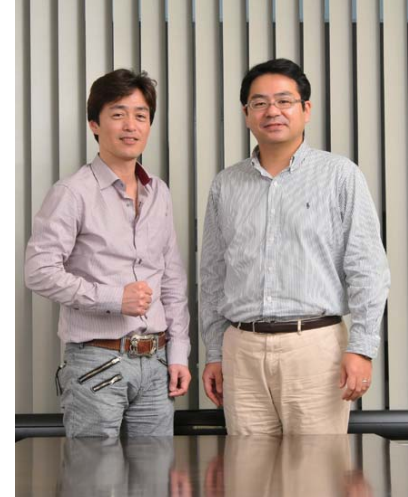
高井：それは本当に重要。いま、地下生命圏研究の最先端にいる人たちは、コアよりも掘削孔を使って成果を出そうとしている。

稲垣：高知コア研究所を代表して反論しますが、コア試料も大事。コアの重要性を説明すると……。

高井：いや、分かっております（笑）。コア試料と掘削孔の両方が大事。コアの分析で分かったことを掘削孔の観測で検証するという意味でも両方重要です。そして掘削孔は天然の実験室としても使える。たとえば、上部マントルと水や二酸化炭素が反応したら何が起きるのか、誰にも分からない。IODPで掘削した孔井は、すべて観測や実験に使えるようにしてほしいね。

稲垣：先ほど、アルカリ性から中性に移り変わる場で分子進化、さらに生命誕生が進んだかもしれない、という話題が出ました。海底下で強アルカリ性から中性に移り変わるような場所を掘削して、その掘削孔に生命の材料となる分子を入れて何が合成されるのか実験してみたいですね。それは地上の実験室でも可能かもしれないけれど……。

高井：いや、やはり実験室では自然環境のすべてを再現することはできない。たとえば、現場の鉱物が合成に重要だったりすることが、実験室の実験では分からない。やはり自然環境を利用して実験する意義は大きいと思う。



撮影：STUDIO CAC

稲垣：そのような海底下ラボトリーを使った実験で、地球内部で分子進化、さらには生命誕生が進行している証拠をつかめるかもしれません。

高井：実際に生命を誕生させるのは難しいと思うが……。

稲垣：現在、知られている地球上の生命はすべて、DNAに書かれた遺伝情報をRNAが転写して、タンパク質がつくられるというシステムです。そうではない異なる自己複製システムの生命がいてもいいはず。

高井：それは、海底下でわれわれとは違う生命をつくらう、という意味だね。

稲垣：海底下生命圏の研究を、われわれとは異なる、もしくはまったく知らない生命システムがあってもおかしくない、という視点で進めていくことが大事だと思います。

高井：おっしゃる通り。

稲垣：高井さんとは5年ほど前までJAMSTECの同じ部署で研究を行い、そのころは每晚、朝方まで実験をしながら今日のような議論をしていましたよね。その後、部署は分かれたましたが、同じ時期に同じようなことを考えながら、それぞれの研究を進めてきた気がします。このようなかたちで高井さんとお話するのは久しぶりでしたが、とても有意義でした。ありがとうございました。

BE



高知コア研究所のコア保管庫。世界各地の海洋環境から採取した全長93km、16万5000本以上のコア試料を保管している

撮影：藤牧徹也

穴の入り口に踏ん張る交雑種のオオサンショウウオ。前あしに4本の指を持ち、後ろあしに5本の指を持つ。ときどき呼吸のために水面から顔を出す

2012年3月14日にオープンしたばかりの京都水族館の顔、それはオオサンショウウオだ。身体に対してアンバランスな大きな頭に小さな眼、赤ちゃんのような指。見た目はお世辞にも美しいとはいえず、動きもあまりない。ただ、えもいわれぬ愛嬌で周囲にほんわかとした雰囲気をつくる。そのせいなのか、特に女の子たちに人気だ。

日本固有のオオサンショウウオは最大で150cmにもなる。重さは30kgを超え、世界でも最大級の両生類だ。外国人の来館も多いが、彼らもその姿に驚喜する。古都として名高い京都は、実はこうした淡水の生きものたちの宝庫でもある。手付かずの豊かな原生林が源流に広がり、日本海へと流れ込む由良川水系、誕生から約400万年の歴史をもつといわれる古代湖の琵琶湖から大阪湾へと続く淀川水系、また古くから整備された市内の水路も、固有種の大切な生息場になっている。オオサンショウウオは京都府下の北部～南部地域、驚くことに鴨川の四条大橋付近まで生息が確認されている。人々が楽しむ夏の風物詩・川床の下で、オオサンショウウオはひっそりとその様子をうかがっているというわけだ。

人気者のオオサンショウウオは国の特別天然記念物ゆえ、水族館に迎えるまでにはいくつもの乗り越えなければならないハードルがあった。捕獲は国の特別な許可を受けなければ実現しない。オオサンショウウオは夜行性であるため、調査と捕獲のための時間は深夜になる。4～5人で18時に集まり、20時くらいから本格的に調査開始だ。暗い水面を懐中電灯で照らし、それぞれの調査員が経験に基づいて川のさまざまな場所のなかでも、独自の狙い場所や捕獲方法を定めて攻めていく。京都水族館に展示されている日本固有の在来種を捕獲したのは、賀茂川の源流に近い場所だった。

オオサンショウウオはたいてい穴に潜んでいる。在来種もそのようにして見つけた横穴にいた。まずは餌になる魚を捕まえ、その魚に針と糸を付けて見つけた個体の巣穴に入れた。オオサンショウウオは顎の下あたりに敏感な部分があり、周りの水流の変化を感じると周囲の水ごと一気に勢よく獲物を吸い込む。餌にかぶりついてきたところを少しずつ引っ張り出し、ある程度身体が穴から出てきたところを網で捕獲する。このような捕獲法を“釣り出し”と呼ぶ。ここまででも十分大変だが、苦労は続く。重さ10kgを超える個体を網に入れ、さらに専用の容器に移し、傷付けないように車まで運ばなければならない。相当な重労働。こうして何とか捕獲したオオサンショウウオが初めて水族館に来たのは、2011年11月16日の深夜2時。しかも、この時期施設はまだ完成していなかった。辛うじて用意されていた仮設の事務所に大切にそっと運び込んだ。

チュウゴクオオサンショウウオ。大きさは50～150cmくらい。長江、黄河、珠江流域の広範囲に生息していたが、今はほぼ絶滅している。模様が大きいのが特徴



オオサンショウウオ（在来種）。大きさは50～150cm。愛知県・岐阜県以西の本州と四国、九州に分布している。中国産に比べ模様が小さいなどの特徴がある



こんもりした茂みの下に繁殖用の巣穴が用意してある。水がよどまないように巣穴のなかには湧き水を模して水が染み出る。現在は交雑種の展示を行っているため、奥まで入れないようになっている

オオサンショウウオ（交雑種）。日本固有の在来種と中国産のチュウゴクオオサンショウウオが交配して雑種化したもの。大きさは50～135cm。鴨川水系で見つかっている



京都市内を流れる鴨川の上流を模したオオサンショウウオのいる水槽。実際の風景を参考に、植生や岩などの表現を行っている。全長12m、10トン水槽で、オオサンショウウオをはじめ5種類、700匹の生きものが展示されている



3年目の幼生。京都水族館ではオオサンショウウオの種の保全のための研究を進めている

鴨川を日本の固有種の川に戻したい

京都のオオサンショウウオは大きな危機にひんしている。中国産のオオサンショウウオである「チュウゴクオオサンショウウオ」との雑種化が進んでいるためだ。40年前に食用として中国から輸入されたものが、どういった経緯で鴨川へと逃げ込み、日本固有の在来種と交配して「雑種」になったと考えられている。

これまでの生態調査では247匹のうち、雑種が223匹、外来種が20匹。在来種はたった4匹のみだった。それぞれを隔離しようにも、雑種と在来種を外見で区別するのはかなり難しく、判定までに数日かかるDNA検査を行うしか現状では方法がない。雑種は在来種に比べ、食欲旺盛で繁殖力が強く活動性も高いため、在来種の生息環境は脅かされている。

雑種よりは比較的外見で判別しやすいチュウゴクオオサンショウウオを駆除しようにも、この種自体が国際的な保護動物に指定されている。中国産だけを集めて中国へ帰そうと思っても、日本で長く過ごした種を再び戻すためには、中国のどこの出身かを注意深く見極める必要がある。安易に戻せば、今度はその場所の在来種との雑種化が新たな問題となるからだ。

在来種と雑種は性格にも違いがある。在来種は引っ込み思案なのか、岩陰に隠れていて昼間はほとんど顔を出さない。活動性も低い。ところが雑種は昼間でも明るいところに来て、好奇心旺盛なのか人懐っこく寄ってくる。在来種を脅かす存在とはいえ、一匹一匹はとても憎めないやつなのだ。

京都水族館では在来種の繁殖を目指している。全長12mの水槽には繁殖用の巣穴も用意した。オオサンショウウオは普段見た目には雄、雌を区別できないが、繁殖期になると違いが現れる。雌はおなかが大きくなり、雄は総排せつ孔の周りが膨らんでくる。この時期に自然界なら「ヌシ」と呼ばれる大型の雄が巣穴に居座り、ほかの雄を寄せ付けない。この巣穴に雌が入ってくると、ヌシも一緒になかへと進む。このとき、ヌシはもう自分のことで精いっぱいであり、普段のようにほかの雄を追い払うことができない。この機会を狙ってまんまと忍び込む不屈な雄もいる。産卵を終えた雌と、忍び込んで精子をかけた雄は、すぐに巣穴を出ていってしまう。残ったヌシは子どもたちが誰の子であろうとも、ふ化するまで卵を守る。餌を取ることもなく、巣穴の中で卵に

新鮮な水を送ったりしながら、入り口を大きな身体で守り続けるのだ。

水槽での繁殖に成功すれば、世界初となる。バックヤードでは捕獲してきた幼生のオオサンショウウオを育てている。ヌシがふ化させた子どもたちを、ここで大きく育てるための研究だ。用意した巣穴で在来種を繁殖させ、増やし、鴨川へ戻す。鴨川を在来種の川に戻す。これが目下の夢だ。

取材協力：関 慎太郎／京都水族館・展示飼育部係長
撮影：フォトスタジオSCENE 奥野竹男

■ Information: 京都水族館
〒600-8835 京都市下京区観音寺町35-1 (梅小路公園内)
TEL: 075-354-3130
URL: <http://www.kyoto-aquarium.com>



背景は黒色頁岩を含むイタリア・グッピオ近くにある露頭。左は野外調査の様子。上2点はスペイン、左下はスコットランド、右下はイタリア

海洋無酸素事変はなぜ起きたのか

「イタリアのグッピオ近くにある露頭が好きですね」と黒田潤一郎研究員。その露頭は、真っ白な地層の間に、黒い地層が挟まっている。黒い地層は約1億年前のもので、有機物が分解されずに堆積してできた黒色頁岩である。黒色頁岩の存在は、約1億年前、海底が無酸素状態になる「海洋無酸素事変」が起きたことを示している。なぜ海洋無酸素事変が起きたのか。黒田研究員は、その原因の解明を目指してきた。そして、ついに、海洋無酸素事変と大規模な火山活動が関連している証拠を発見。「大きな進歩ですが、研究はまだ進行中です。地球内部の変動と地球表層の環境変動のつながりを明らかにしたい」と語る。

地球内部ダイナミクス領域 地球深部活動研究プログラム
地球深部と表層との共進化研究チーム
研究員

黒田潤一郎

黒田潤一郎（くろだ・じゅんいちろう）。1977年、大阪府生まれ。博士（理学）。2000年、筑波大学第一学群自然科学類卒業。2005年、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。2006年、海洋研究開発機構（JAMSTEC）固体地球統合フロンティア研究システム研究員。2006年より現職。専門は地質学、古海洋学、同位体地球化学

始まりは高校3年の偶然

——専門は堆積学とのことですが、その分野に興味を持ったのはいつからですか。

黒田：高校3年生のときです。1995年、兵庫県南部地震が起きた年です。

私は当時、大阪の茨木市に住んでいました。地震からしばらくたったある日、家の近くを自転車で走っていると、地面を掘って何やらやっている人たちがいました。トレンチ調査といって、活断層を調べていたのです。家の近くに有馬—高槻構造線という活断層があることなど、それまで知りませんでした。

調査している方が見学者に説明をしていたので、私も加えてもらいました。一番下が縄文時代、その上が弥生時代、一番上は最近の地層であること、縄文と弥生の地層が左右でずれているのは地震によって動いたからであること、最近の地層はずれていないので、この断層が最後に動いたのは弥生時代であること……。1つ1つの説明に、地層からそんなことまで分かるのかと驚き、地層って面白いな、

と思いました。

——偶然から始まったのですね。

黒田：高校は理数科コースだったので大学は理系に進むつもりではいましたが、地学という選択肢を考え始めたのは、あの日からでした。私の高校では、進路の参考にするため、卒業生が大学で学んでいることなどを話しに来てくれます。そのなかで外に出て研究をする分野の人の話が圧倒的に面白かった。化学や理論研究など屋内が中心の分野より、外に出る分野がいいな、と漠然と思っていました。

山を歩き、地層を調べる

——進学先に筑波大学を選んだ理由は？

黒田：地学について学べる大学をいろいろ調べました。筑波大学は、地層学だけでなく、地形学や岩石学、古生物学、さらには気象学など、さまざまな分野が集まって1つの学類（学科にあたる）を構成しています。いろいろな可能性があった面白そうだったのです。

その選択は大正解でした。ほかの学群

（学部）の授業を受けることもできたので、芸術専門学群の油絵や、社会・国際学群の日本史の授業も受けていました。

——野外に出ることもできましたか。

黒田：期待通り、たくさんの野外調査や実習があり、とても面白かったですね。卒業論文では野外調査に明け暮れましたが、1日中歩いても調べることができるのは、せいぜい沢1本分くらいです。それを10日、20日と続けると、一帯の地質図がだんだんでき上がってきます。まず、その過程が楽しいのです。

日本の地層は変動を受けていないものはまれで、多くの場合、断層によってずれたり浸食されたりしています。地層が受けた変動を取り除くように平たく伸ばしていくと、その地層が堆積したときの姿が見えてきます。その姿を描き出す過程もとても面白く、わくわくしてきます。

——大学院は東京大学海洋研究所（現・大気海洋研究所）ですね。

黒田：山を歩いて地質図を描いているだけでは駄目だと、次第に思い始めたので

す。その地層ができた背景を知りたい。そう思っていたところ、当時の指導教官から、東京大学の海洋研究所（大学院理学系研究科地球惑星科学専攻）に進学してはどうかと声を掛けていただきました。そこで、私が現在所属している地球内部ダイナミクス領域（IFREE）地球深部と表層との共進化研究チームのチームリーダーである鈴木勝彦さんや、上級研究員の大河内直彦さん、高知コア研究所の谷水雅治さんと出会い、いまの研究につながっています。

海洋無酸素事変は、なぜ起きた？

——現在はどのような研究を？

黒田：世界各地には、中生代白亜紀（1億4550万～6550万年前）に堆積した真っ白い地層が見られます。石灰質の殻をつくるプランクトンの化石が積み重なってできた地層です。その白い地層の間に真っ黒い地層が挟まっていることがあります。黒い地層は約1億年前に堆積した黒色頁岩です。白い地層が突然黒い地層に

なるのですから、その間に大きな環境変動があったに違いありません。何があったのか、その理由を知ろうとしています。

——黒い地層の正体は？

黒田：プランクトンの死骸など有機物が分解されずに残ったものです。

現在の海では、グリーンランド沖や南極の周辺で冷たく塩分の高い海水が表層から海底に沈み込み、世界の海を巡って再び湧き上がる、深層循環が起きています。深層循環によって海底まで酸素が行き届くため、有機物はすぐに分解されます。ところが、1億年前の地球では、何らかの理由で海底に酸素が行き届かない状態だったと考えられています。その結果、有機物が分解されずに積み重なり、真っ黒な地層ができたのです。

そこまではすでに明らかになっており、このできごとは「海洋無酸素事変」と呼ばれています。では、なぜ海底に酸素がなくなったのか。私たちは、その原因を知りたいのです。

——海洋無酸素事変の原因として、どの

ようなことが考えられているのですか。

黒田：1億年前の地球では、火山活動がとても活発だったことが知られています。地球内部のマントルの対流が活発化してマグマとなって噴出し、オントンジャワ海台やマニヒキ海台、カリブ海台など、海底に巨大な火山が次々と形成されました。放出された膨大な量のマグマが地球環境に何らかの影響を与えたに違いない、と以前からいわれていました。海洋無酸素事変も大規模な火山噴火が原因ではないかと考えられていましたが、2つを結び付ける証拠がなかったのです。

私たちはこれまでに、海洋無酸素事変と火山噴火を結び付ける証拠を見つけることに成功しました。

同位体比から過去の地球環境を知る——海洋無酸素事変と火山噴火を結び付ける証拠とは？

黒田：堆積物に含まれるある元素の同位体比を調べることで、当時の環境が分かれます。私たちは、堆積物に微量に含



イタリア・グッピオ近くのコンテッサ採石場。石灰岩から成る真っ白な地層の間に、黒い地層が挟まっている。黒い地層は、海底に酸素が不足したために有機物が分解されずに堆積してきた黒色頁岩である。海洋無酸素素事変は、何度も起きたことが分かる

まれている鉛 (Pb) やオスミウム (Os) の同位体比を調べています。同位体とは同じ元素でも質量数が異なるもので、鉛やオスミウムにはいくつかの同位体があります。その比は、大陸地殻に対して、マントルや地球外物質では低いという特徴があります。

黒色頁岩中の鉛やオスミウムの同位体比を測定した結果は、大量のマグマが放出されたと考えれば説明がつかないものでした。鉛の同位体比の測定からは、太平洋での火山噴火の影響がヨーロッパまで及んでいたことも分かりました。

——2011年には日本地球化学会奨励賞と地質学会小澤儀明賞を受賞されています。

黒田：オスミウムや鉛の同位体比の解析から、地球内部の変動と地球表層の環境変動とのつながりを明らかにしたことを評価していただきました。こうした賞を頂けたことは、とてもうれしいです。

しかし、この研究はまだ完成していません。いまできているのは、活発な火山活動と海洋無酸素素事変の時期が一致していることを示したところまでです。火山が噴火したら、なぜ海底の酸素がなくなるのか。そこをつなげなければ。

火山噴火によって大気中に大量の二酸化炭素が放出されると、地球温暖化が進みます。表面の海水が温められて軽くなった結果、海水の循環が弱くなって海底に酸素が供給されにくくなった、という説があります。あるいは、火山噴火が起きると、大量の鉄が放出されます。海水に鉄が増えるとプランクトンが大繁殖する、といわれています。プランクトンの死骸が増え、その大量の有機物を分解するために酸素が使い尽くされてしまった、という説もあります。そのほか諸説ありますが、確定したものはありません。——今後やらなければならないことは？

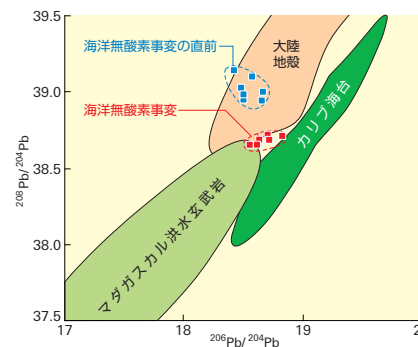
黒田：1つは、堆積速度がとても速い場所の地層を調べる。鉛やオスミウムの同位体比を測定した地層は堆積速度が遅いので、年代を細かく解析することができず、火山活動と海洋無酸素素事変が起きた時期が一致しているとはいえません。堆積速度が速い地層であれば、火山活動が起きた後に海洋無酸素素事変が起きたというように、前後関係がより明確になり、因果関係を明らかにできるでしょう。

もう1つは、鉄や二酸化炭素が大量に放出されたら本当に海底が酸欠状態になるのか、1億年前の地球環境を復元して検証することです。そのためには、シミュレーションの研究者と力を合わせる必要がありま

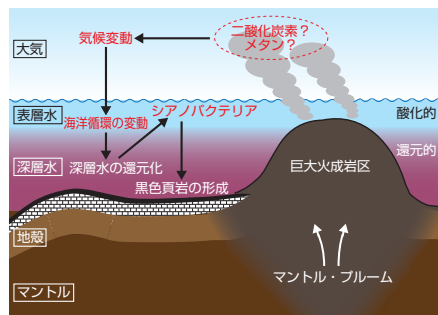
す。

海底掘削のコアを開く瞬間が好き
——2009年と2011年には、統合国際深海掘削計画 (IODP) の研究航海に参加しています。陸上の地層調査と海底掘削、どちらが好きですか。

黒田：同じように好きだし、どちらも必要なことなので、答えるのは難しいなあ。海底掘削は、船に乗れば掘削地点まで連れていってくれるし、食事や寝る場所も用意されているので楽ですね。大学時代の調査フィールドは、クマヤイノシシも



鉛の同位体比組成。赤四角はイタリア中部で採取された9400万年前の海洋無酸素素事変のときに堆積した黒色頁岩 (ボナレリ層)、青四角はその直前に堆積した石灰岩の値である (いずれも年代補正済み)。青四角は、平均的な大陸地殻とほぼ同じ値である。一方、赤四角は、同時代に噴出したマグマによってできたカリブ海台やマダガスカル洪水玄武岩に近い値になっている (黒田ほか、2010年「地学雑誌」に加筆)



黒田研究員らが提唱している黒色頁岩形成の原因。活発なマントル活動によって大量のマグマが噴出したことが原因となり、海底が無酸素状態となり、黒色頁岩が形成されたと考えている。その過程は諸説あり、まだ確定したものは無い (大河内・黒田、「科学」に加筆)

いるような、山梨県の山奥でした。安全な場所を自分で見つけてテントを張り、食事もちろん自炊しなければなりません。大変ですが、それも楽しいものです。

科学的な面からいえば、海底掘削で採取する円柱状の試料 (コア) の方が、過去の地球環境を知るためのきれいなデータを得ることができます。陸上の地層は、もとは海底で堆積したものです。それが隆起して、風化などを受けて現在の姿になりました。一方コアは、変動を受けずに堆積したときの情報が比較的良好に保存されています。コアを半分は割って開く瞬間が好き。何が出てくるのだろう、とワクワクします。

地球内部の変動と表層の環境をつなぐ
——この研究の魅力は？

黒田：地層にわずかに含まれる元素から、数千万年、数十億年も前の地球環境を読み解くことができる。そのスケールのギャップも、魅力の1つです。

——日本地質学会のホームページの「地質マンガ」というコーナーに、黒田研究員作の「タイムスケール」が掲載されています。デットに1時間遅れ、怒っている彼女に「1時間なんて地質学的スケールでいったら無視できる誤差の範囲だ」と。彼女は、あきれて帰ってしまう……。あれは、実体験ですか。

黒田：ほぼ実体験ですね。研究では、100万年、1000万年単位で考えていますから、ついつい、そんなこともありますね。——マンガは、よく描いているのですか。

黒田：絵を描くことは、昔から好きでした。「地質マンガ」も、いくつか構想中のネタがあるのですが、描く時間がなくて。——休日はどのように過ごしていますか。

黒田：月に2〜3回は野球をしています。高校から軟式野球を始め、いまはJAMSTECの職員のチームに所属しています。明後日、大会なんです。マンガを描いたり、体を動かしたりすると、よい気分転換になります。

休みの日に、何もしずに、ぼーっとしていることも大切です。最近、日々の忙しさに追われて目先の問題をこなすだけの研究スタイルに陥りつつあります。これから何をすべきか、自分の研究についてゆっくり考える時間も必要です。——今後、研究をどのように進めてい

黒田研究員が参加した統合国際深海掘削計画 (IODP) の第339次研究航海の様子「地中海流出水と地球環境変動の関連性の解明」を目指したもので、2011年11月17日から2ヵ月間、地中海の出口で海底掘削を行った



コアから顕微鏡観察用の試料を採取する黒田研究員



「ジョイデス・レゾリューション号」の甲板にて



床に資料を広げて議論



航海中、地中海深海掘削計画について発表

たいとお考えですか。

黒田：地球内部の変動と地球表層の環境のリンクを明らかにする。それが私の大きなテーマです。そのために、堆積速度の速い地層を調べることに、シミュレーション研究との連携を進めていきます。そしてもう1つ、クロム (Cr) の同位体比の測定を取り入れたい。クロムの同位体比は、過去の地球環境を知るための指標としては、まだほとんど使われていません。しかし、海の酸素濃度の変化を知ることができる可能性があります。

オスミウムに目を付け、過去の地球環境を知る指標として使えるようにした人は、素晴らしい。チームリーダーの鈴木さんもその1人です。私も、そういうブレークスルーをもたらす仕事をしたいですね。

白い地中海へ

——研究提案書を書き上げたところどうですか。どのような研究ですか。

黒田：地球深部探査船「ちきゅう」による地中海の掘削です。地中海は600万年前に干上がったと考えられていますが、本当のところは分かりません。海底を掘削して、深海まで干上がったのか、生命への影響がどうだったのかを、明らかに

したいのです。地中海の海底数kmに眠る蒸発岩 (海水が蒸発することで形成される岩石) は、「ちきゅう」でなければ掘削できません。

——地中海がすべて干上がった、どのような影響があったのでしょうか。

黒田：地中海の海水は、蒸発が盛んなため、塩分が高くなっています。その塩分の高い海水が大西洋に流れ込み、深層循環の駆動力の1つとなっています。もし地中海がすべて干上がった、塩分の濃い海水が大西洋に流れ込まなくなるため、深層循環が弱まるかもしれません。それは、大規模な気候変動を引き起こします。

また、青かった地中海が一転、岩塩が露出して白くなります。白い表面は太陽光を反射します。地球の熱収支が変化し、気候に影響を与えた可能性があります。

地中海の掘削は、生物学の研究者からも注目されています。地下の塩の層に特殊な微生物がいる可能性があるのです。——地中海の掘削は、いつごろ実現できそうですか。

黒田：「ちきゅう」を使った掘削提案は競争率がとても高いです。数年、もしかしたら10年先かもしれませんが、ぜひ実現したいと思っています。 **BE**

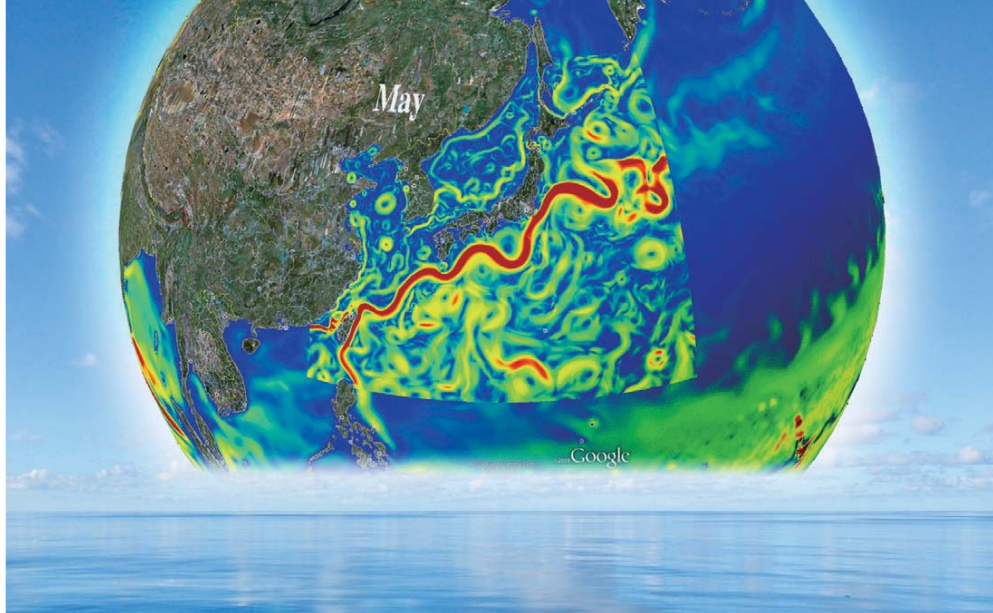
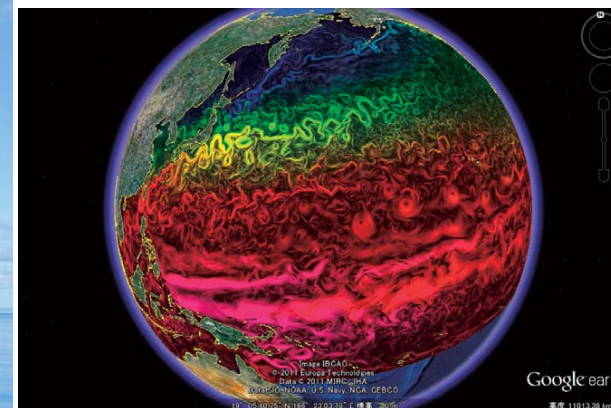


図1 海流の速さ・海水温のシミュレーション結果

海流や海水温の分布を、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」で計算した結果。左は、日本周辺の海流を大気海洋結合モデルMSSGでシミュレーションした画像と海のイメージを合成したもの。赤いところほど流れが速く、青いところほど遅いことを示している。下は、地球全体の海流を海洋大循環モデルOFESでシミュレーションしたもの。色は海水の温度（赤は暖かく、青は冷たい）を表し、色の明るさは流れの速さ（明るいところは速く、暗いところは遅い）を表している



海は呼吸する 海洋シミュレーションの最前線

2011年10月15日 第134回地球情報館公開セミナーより



地球シミュレータセンター
シミュレーション高度化
研究開発プログラム
マルチスケールモデリング
研究グループ 研究員

木田新一郎

きだ・しんいちろう。1977年生まれ。Ph.D. 2000年、東京大学理学部地球惑星物理学科卒業。2006年、マサチューセッツ工科大学・ウッズホール海洋研究所ジョイントプログラム修了。ハワイ大学国際太平洋研究センターを経て、2008年、海洋研究開発機構地球シミュレータセンターに入所。専門は地中海、インドネシア多島海、日本海などの縁辺海と外洋との関係

ある日突然、広い海の上に1人残されてしまったとしましょう。何とか自力で一番近くにある港まで船でたどり着き、ものの、見渡す限りの大海原で、自分がいったどこにいるのか見当もつきません。居場所を教えてくれるGPSのような機器はなく、あるのは、海水の温度と塩分を測ることのできる観測機器のみです。

さて、このような状況に追い込まれたとき、あなたは自分がいる場所を突き止めることはできるのでしょうか？

答えは、YESです。

なぜかという、海水がそれを教えてくれるからです。世界中同じように見える海水も、実は場所によって水質が違います。では実際にどうやって海水から自分の位置を突き止めていけばいいのか、手順を追いつながり話を進めていきましょう。

海水の水温を測る

船から観測機器を下ろし、海面から深さ2,000mまで水温を測ると、図2左のようにになったとします。この図から、まず自分がいる場所が中緯度だと分かります。

海水温は、海面近くは一定で、深くなるほど徐々に冷たくなり、深さ2,000mぐらいで約4℃になります。これは世界中の海ではほぼ同じですが、温度の下がり方が緯度によって違います。低緯度では、海面は30℃近くで、少し深くなると急激に水温が下がります。高緯度も、海面は10℃以下とそもそも冷たいのですが、少し深くなると急激に水温が下がります。

それに比べ中緯度では、海面は20℃ぐらいで、深く冷たくなる途中で、ゆっくりと下がっていく段階を踏みます。自分が観測して得られた図2のグラフには、この水温がゆっくり下がる段階があることから、自分がいる場所は中緯度だと分かるのです。

海は「呼吸」をしながら日々変わっていく気象の情報を海のなかへ伝えていきます。海面近くにとどまる浅い呼吸や、深層大循環を起こす深い呼吸など、呼吸の種類とその強弱は海域によってさまざまです。そのため世界各地にある海では、それぞれの海特有の海水がつくられます。海洋シミュレーションでも重要な鍵となる海の呼吸の仕組みと、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を用いた海洋シミュレーションの挑戦について紹介します。

海水の塩分を測る

次に海水の塩分も測ってみましょう。さまざまな深さで測定した海水の塩分と水温の組み合わせをグラフにすると、図3左のようにになったとします。この図から、自分のいる場所が北大西洋の東側だろうということまで分かります。

図3のグラフにははっきりとした凸部分が中央にあります。これは水温が低いところ（つまり深いところ）に塩分が高い海水があることを意味しており、北大西洋の海水の特徴なのです。北大西洋の深層には、塩分の高い海水が地中海から流れ込んでおり、東側ほどそのシグナルが強いので、図3から自分のいる場所が北大西洋の中緯度、そしてその東側だと分かるのです。

以上の手順を踏めば、自分のいる場所をおおまかに突き止めることができます。ここでは、水温と塩分から見つけ出す手順を紹介しましたが、海水に含まれる酸

素や栄養分なども調べることができれば、自分の居場所をさらに細かく特定できます。海水は、世界各地でそれほど違う水質を持っているのです。

海は毎日呼吸している

海水が世界各地で異なる水質を持つのは、海が呼吸しているからです。そして、世界各地の天気は異なるように、海の呼吸も海域によって種類と強弱が異なるからです。では「海の呼吸」とは、いったいどのような現象なのでしょう？

太陽が昇る前、海面近くの海水は深さによってあまり温度が変わりません。太陽が昇ると、海水は太陽によって暖められ、海面近くほど温度が上がっていきます。しかし日が暮れると、今度は海面から熱が奪われ始め、冷たくなっていきます。冷たくなった海水は重いため、海中へと沈み込んでいきます。日没から時間がたつほど表面の海水は冷やされ、沈み

込んでいきます。そして日の出前には、海の温度は再び一様な状態に戻ります。このように、海面近くの海水は太陽の昇沈とともに暖められ、冷やされることによって海中へと運ばれるのです。この一連の循環のことを「海の呼吸」と私は呼んでいます。人間が呼吸を通じて体内に酸素を取り込むように、海も呼吸を通じて、空気に触れていた海面の水を海のなかへと取り込んでいくのです。

季節の変化に伴って、海が呼吸によって取り込む海水の水質も少しずつ変わっていきます。春には日が長くなるにつれ海水温は少しずつ暖かくなり、秋には夜が長くなるにつれ少しずつ冷たくなります。こうして海は、日々変わっていく気象の変化に関する情報を毎日少しずつ取り込むのです。海の呼吸によって、表面の海水とその下の海水は常に入れ替わっており、その呼吸が届く深さはだいたい数十～数百mです。

世界各地で水塊が生まれる

海が呼吸するには、海水が海面で「冷やされる」ことが重要です。寒気が来たり強風が吹いたりしても海水は冷やされ、呼吸を引き起こします。海水が蒸発したり氷ができたときも、海水の塩分が高くなるため、冷やされた場合と同様に海水が重くなって呼吸が起きま

図2 緯度による海水温度変化の違い

左は、とある場所で、海水温を深さ2,000mまで測定した結果。急激に水温が下がる前に、ゆっくり水温が下がる段階がある。北太平洋の低緯度、中緯度、高緯度の典型的な例と比較すると、測定結果は中緯度の特徴を示していることが分かる

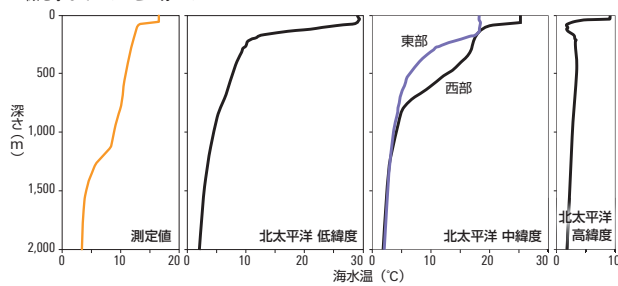


図3 海水温と塩分の組み合わせから見てくる海水の特徴

左は、図2と同じ場所で測定した水温と塩分の関係を示す。赤い点線で囲んだ部分から、北大西洋中緯度(北緯20°-50度、右図の黄)の特徴を持っていることが分かる。これは、地中海から塩分の高い海水が流れ込んでいることによる

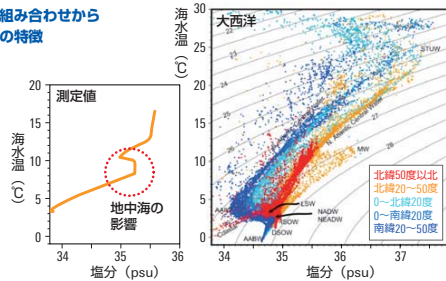
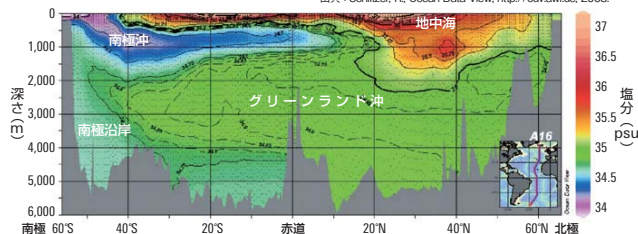


図2右3点・図3右図出典：Talley L.D., Pickard G.L., Emery W.J., Swift J.H., 2011. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (Sixth Edition), Elsevier, Boston, 560 pp.

図4 大西洋の塩分分布

大西洋を南北に切った鉛直断面図で、色は塩分を表している。灰色部分は海底地形。緯度や深さによって、塩分が大きく異なっている。地中海やグリーンランド沖、南極周辺などから、それぞれ特徴を持った海水がいろいろな深さに流れ込んでいる

出典：Schlitzer, R., Ocean Data View, <http://odv.awi.de>, 2008.



す。太陽の昇沈以外にも、さまざまな形で海は呼吸するのです。

世界中の海では、多様な原因が重なり合って海の呼吸が起きています。たとえば夏の太平洋の中央部では、海流が弱く、広く浅い呼吸が起きています。それに対して日本南岸では、南から流れてくる暖かい黒潮が、低気圧によって冷やされ、沈み込むという呼吸が起きています。この沈み込んだ海水は、再び海面に湧き上がるまで数十年と長い年月がかかるため、この呼吸は深い呼吸でもあるといえます。

さらにずっと深い呼吸が、グリーンラ

ンド南西沖で起きています。この海ではとても冷たい風が吹くことで海水が冷やされる上に、海水もできて塩分が高くなります。その結果、海底や深さ1,000mぐらいまで届くような「深呼吸」が起きます(図5)。この深呼吸によっていったん海底近くまで潜り込んだ海水は、世界中を巡りながら数百年以上かけて再び海面に湧き上がります。これがいわゆる海の「深層大循環」です。

このように世界中の海では、呼吸の強弱と種類に応じて、水温や塩分の特徴がある海水「水塊」がつけられるのです。

海水分布がで上がる

太平洋や大西洋のような外洋には、さまざまな海域の呼吸でできた水塊が流れ込みます。そして水質に応じて流れ込む深さが異なるため、その結果、緯度や深さによって異なる特徴を持った海水分布がで上がります。たとえば大西洋は、緯度や深さによって塩分が大きく異なる特徴を持っています(図4)。海底には、海水ができる南極沿岸から塩分の高い海水が沈み込んでいます。その上の深層にはグリーンランド沖から沈み込んだ海水があり、中層には海水が融ける南極沖から塩分の低い海水が沈み込んでいます。北半球の中緯度には、地中海から塩分の高い海水が流れ込んでいます。

海水は呼吸したときの状況を記憶し、その記憶を運びながら世界中を巡っています。そして世界各地の海で、独特の海水分布をつくり出すのです。最初にお話ししたように「自分の居場所」を言い当てられるのは、この水塊がつくり上げる海水分布のおかげなのです。

海洋シミュレーションとは

海洋シミュレーションとは、世界のあらゆる場所の水温と塩分、そして流れをコンピュータ上で再現することです。海岸から見ているだけでは気付くことのないスケールで、立体的でダイナミックな流れを再現しています。海洋シミュレーションの特徴は、地球の自転や潮の満ち干、海面の高さ、そして塩分を考えなくてはならない点です。たとえば海面の高さはどこも同じだと思うかもしれませんが、日本周辺の海面は南極周辺より数mも高いのです。特に黒潮の流域では急激

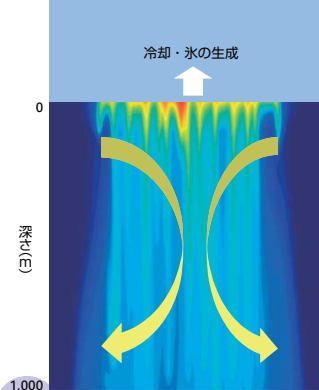


図5 「海の深呼吸」のシミュレーション

グリーンランド南西沖の「深呼吸」をシミュレーションした画像。色の違いは海水の塩分濃度分布を表している。海面近くで塩分が高く重い海水がつけられ、深さ1,000mまで沈み込んでいる

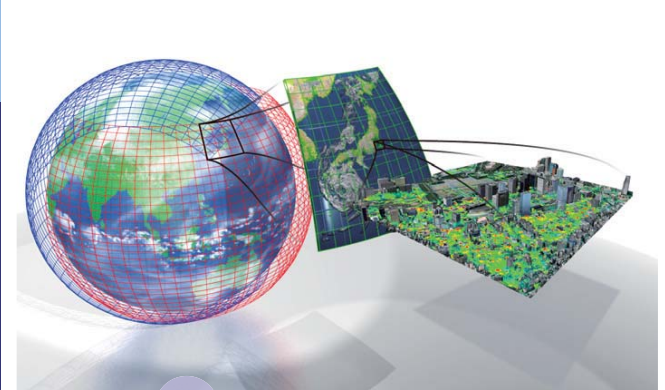


図6 大気海洋結合モデルMSSGのイメージ

MSSGは、大気と海洋の多様な現象をシミュレーションできるモデルである。地球全体という大きな規模から都市などの小さな規模まで、さまざまな時空間スケールに用いることができる

に海面の高さが変化しています。海面の高さは海流の速さと密接な関係があるため、それを再現することは大変重要です。

地球全体で行う海洋シミュレーションには、もう1つ考えなければいけないことがあります。それは小さな平面を組み合わせて丸い地球をどう表現すればいいのか、ということです。これまでいくつかの方法が提案されてきましたが、代表的なのは緯度経度の格子を用いる方法です。海洋研究開発機構(JAMSTEC)地球シミュレータセンターの地球流体シミュレーション研究グループが開発している海洋大循環モデルOFES (Ocean general circulation model For the Earth Simulator) は、この緯度経度格子を採用しています。私の所属するマルチスケールモデリング研究グループで開発している大気海洋結合モデルMSSG (Multi-Scale Simulator for the Geo-environment) は、野球のボールのような陰陽格子を採用しています(図6)。

図1は、日本周辺や世界中の海流を再現したシミュレーション画像です。日本の南西から、暖かい黒潮が流れてくるのが見えます。海流は、地図では1本の矢印などで示されることが多いのですが、実際は流れの速さや方向が常に変化しており、渦もたくさんできています。海流の細かい構造は、黒潮の強さや位置、そして周辺の生物活動にも重要な役割を果たしていると考えられています。地球シミュレータのように高速で計算するスーパーコンピュータでなければ、これほど

詳細なシミュレーションをこのスケールで行うことはできません。

海洋シミュレーションを用いることで、研究者は複雑な海流の流れの仕組みを理解したり、予測したりすることができ、地球規模の現象から局所的に起きている現象まで、多様な時空間スケールの現象を再現できるモデルを開発しています。MSSGは海だけではなく、雨や、ビルの谷間を吹き抜ける風などもシミュレーションし、ヒートアイランド現象の研究などにも活用されています。

海の呼吸をシミュレーション

海の呼吸は、日々の気象にも重要な影響をもたらしています。それは呼吸の強弱によって海面の水温が決まるからです。海面水温は気象現象を左右するエンジンの1つで、海面水温を介して海と大気が連動し、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象など地球規模の気候変動も起きます。つまり、日々そして年々変化する海と大気をシミュレーションで再現するには、海の呼吸をいかに再現するかが重要な鍵を握ることになります。

実は、図1ほどの高解像度のシミュレーションでも、海が呼吸する現象を1つ1つシミュレーションすることはできません。それは、海の呼吸が数m程度のとても小さい対流を通して起きるためです。このことから、海がさまざまなスケールの現象の重なり合いであることが分かるかと思います。一辺数mの解像度で、

地球全体をシミュレーションできるほど計算性能が高いスーパーコンピュータは、まだ実現できていません。

しかし、ただ手をこまねているわけにはいきません。パラメタリゼーションという方法を使って、海の呼吸を近似的に再現しています。パラメタリゼーションとは、1つ1つの現象をすべて再現することなく、経験に基づいた知識を利用して現象がもたらす結果を予測する方法です。このぐらいの強い風が吹けば、このぐらいの深さまで海の水がかき混ぜられるというような情報を、あらかじめモデルに組み込んでいくのです。

海は「呼吸」しています。呼吸は世界中の海をそれぞれの海域独自なものにしてくれ、海を变化の豊かな環境にしてくれています。地球シミュレータセンターでは、海が呼吸を通して大気と会話したり、呼吸によってできた水塊が世界中に流れていったりする様子を、より正確に再現できるよう日々研究しています。

私たちが海岸で手に取る海水は、いったいどこから来たのか、そしてどこへ行くのか。

ただ見たたりなめたりしただけでは分からない、そんな海への好奇心に、シミュレーションは答えてくれます。そして予測という力を私たちに与えてくれます。日々、そして年々変化する海を再現・予測しながら、海と地球の気候の仕組みを明らかにする道具として、海洋シミュレーションは活躍しているのです。 **BE**

特集「海底下生命圏」はいかがだったでしょうか？ 最新の海底下生命圏についてご理解いただけたのではないかと思います。昔の生物の教科書には、生命圏は光合成を行う植物をもとにしたものであると記載されていました。しかし、1977年にガラパゴス諸島沖でアメリカの有人潜水調査船「アルビン」が熱水噴出孔に新しい生命圏を発見し、その後の研究によって生物の生息できるとされる限界がどんどん拡大しています。特に海底下の生命圏に関する新しい知見には目を見張るものがあります。これらは、もはや海洋だけではなく、太陽系全体の生命圏の問題に発展しています。NASAの火星探査計画の研究者が、2012年の夏に行われる地球深部探査船「ちきゅう」による「下北八戸沖石炭層生命圏掘削」にも参加する予定だということです。これらの研究によって、今後、火星をはじめとして木星や土星の衛星などにおける地球外生命体の存在が解明されることを期待したいものです。

ここで、とてもエキサイティングな最新の話題を1つ。有名な映画監督で探検家のジェームズ・キャメロン氏（かなりの深海オタクです……）が2012年3月26日、海洋の最深部であるマリアナ海溝チャレンジャー海淵の着底に成功し無事帰還しました。彼は、新しい1人乗りの潜水船「ディープシー・チャレンジャー」を8年かけて秘密裏に開発し、有人としては1960年の「トリエステ」以来50年ぶりとなる快挙を成し遂げました。深海探査に携わる者として、このようなチャレンジングな試みができるのは、とてもうらやましい限りです。素直にキャメロン氏の成功を祝福したいと思います。（T. T.）

賛助会（寄付）会員名簿 平成24年4月30日現在

独立行政法人海洋研究開発機構の研究開発につきましては、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	株式会社カイショー
株式会社アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド	株式会社海洋総合研究所
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋電子株式会社
株式会社アイケイエス	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アイワエンタープライズ	鹿島建設株式会社
株式会社アクト	川崎汽船株式会社
株式会社アサツディ・ケイ	川崎重工株式会社
朝日航洋株式会社	株式会社環境総合テクノス
アジア海洋株式会社	株式会社関電工
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	株式会社キュービック・アイ
泉産業株式会社	共立インシュアランス・ブローカーズ株式会社
株式会社伊藤高压瓦斯容器製造所	共立管財株式会社
株式会社エス・イー・エイ	極東製薬工業株式会社
株式会社SGKシステム技研	極東貿易株式会社
株式会社NTTデータ	株式会社きんでん
株式会社NTTデータCCS	株式会社熊谷組
株式会社NTTファシリティーズ	クローバテック株式会社
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	株式会社グローバルオーシャンディベロップメント
株式会社MTS雪氷研究所	KDDI株式会社
有限会社エルシャンテ追浜	京浜急行電鉄株式会社
株式会社OCC	株式会社構造計画研究所
沖電気工業株式会社	神戸ペイント株式会社

『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①～⑥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）
④ TEL・FAX・Eメールアドレス ⑤ Blue 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けます）。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.045-778-5378 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（118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。

海と地球の情報誌 Blue Earth

第24巻 第1号（通巻117号）2012年5月発行

発行人 鷲尾幸久 独立行政法人海洋研究開発機構 事業推進部

編集人 満澤巨彦 独立行政法人海洋研究開発機構 事業推進部 広報課

Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト

取材・執筆・編集 立山 晃（p1-19）／鈴木志乃（p24-27、裏表紙）／坂元志歩（p20-23）
佐藤ひとみ（p28-31）

デザイン 株式会社デザインコンビビア
（AD 堀木一男／岡野祐三／飛鳥井羊右ほか）

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。

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）

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）

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）

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）

東京事務所

〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号
富国生命ビル23階
TEL. 03-5157-3900（代表）

国際海洋環境情報センター

〒905-2172 沖縄県名護市字豊原224番地3
TEL. 0980-50-0111（代表）



創立40周年
記念企画

JAMSTEC History 1971-2011



2002年に運用を開始した「地球シミュレータ」

2002年「地球シミュレータ」

コンピュータのなかに“仮想地球”をつくり出した——1997年、世界最速のスーパーコンピュータの開発を目指す国家プロジェクト「地球シミュレータ計画」がスタートしました。異常気象をもたらすエルニーニョ現象など気候変動のメカニズムの解明や、地球温暖化の予測には、シミュレーションが不可欠です。シミュレーションでは、地球を格子に区切り、格子ごとに計算します。格子が細かいほど精度が高くなりますが、計算量が増えます。地球を丸ごと高精度でシミュレーションするには、既存のコンピュータでは性能が不足していたのです。

開発に5年をかけ2002年、「地球シミュレータ」が海洋科学技術センター（現・海洋研究開発機構）の横浜研究所に誕生しました。ピーク性能は40テラフロップス。1秒間に40兆回の計算ができます。スーパーコンピュータの性能比較ランキング「TOP500」で、2002年から2年半もの間、世界第1位の座にありました。

「地球シミュレータ」が登場し、将来の気温上昇や、温暖化によって各地の気候がどのように変化するのかなど、詳細な予測が可能になりました。それらの成果は、2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）「第4次評価報告書」に大きく貢献しました。

2009年にはシステムを更新し、ピーク性能は131テ



2009年にシステムを更新した「地球シミュレータ」

ラフロップスに向上。2010年には、コンピュータのさまざまな性能を評価する「HPCチャレンジアワード」において、高速フーリエ変換の計算能力を競う部門で第1位を獲得。高速フーリエ変換は、大気や海の流れの解析に使われる計算手法です。その性能は、IPCC「第5次評価報告書」（2013～14年発表予定）に向けた地球温暖化のシミュレーションでも発揮されています。

「地球シミュレータ」は、大気や海だけでなく地球のあらゆる現象のシミュレーションに利用され、成果を挙げています。地震や津波の高精度なシミュレーションを行い、防災や減災に貢献することも、重要な使命です。



R270
石油ハルバ配合率70%再生紙を使用



独立行政法人
海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

定価300円（税込）