

海と地球の情報誌

Blue Earth

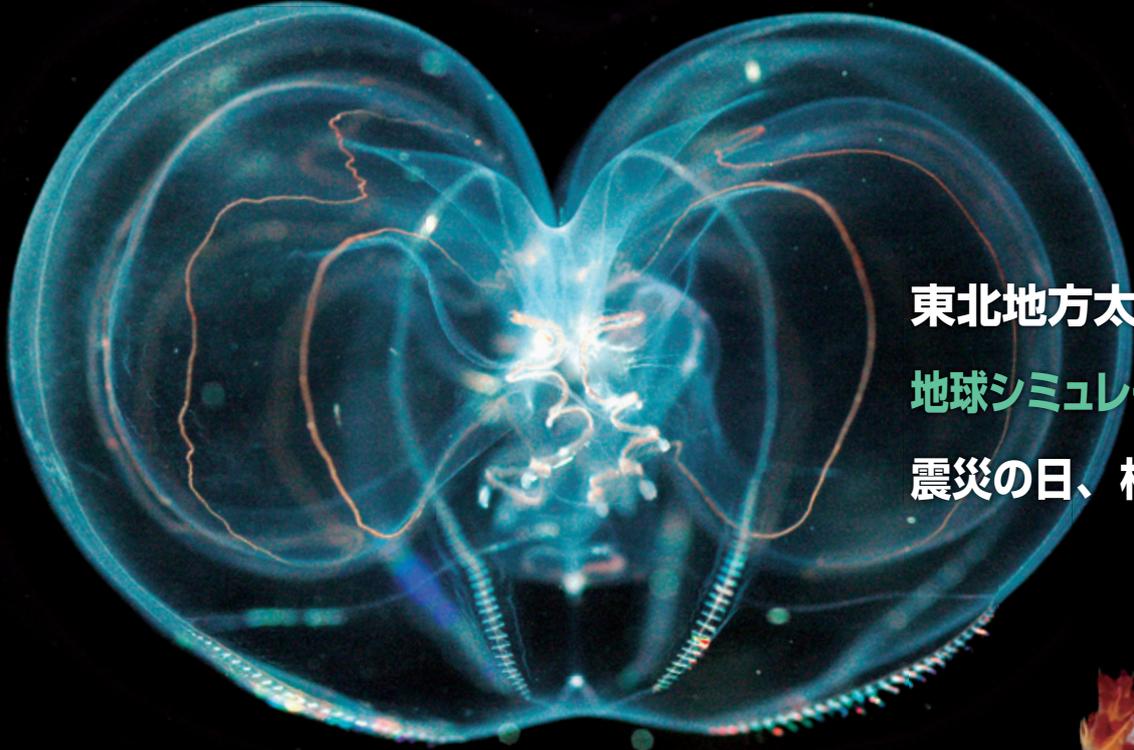
ISSN 1346-0811
2011年4月発行
隔月年6回発行
第23巻 第2号
(通巻112号)

2011 3-4 112

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

海

生物多様性のゆりかご



東北地方太平洋沖地震
地球シミュレータとスピード競走
震災の日、松島のビーバー



1 **Close Up**
東北地方太平洋沖地震、
フィリピン海プレート北東端で
破壊は止まった

2 **特集**
海——生物多様性のゆりかご

26 **Aquarium Gallery**
 マリンピア 松島水族館
震災の日、ビーバー一家のこと
 ——アメリカビーバー

28 **Marine Science Seminar**
地球シミュレータとスピード競走
 古井利幸
 地球シミュレータセンター 情報システム部長

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

表紙写真 「海洋生物のセンサス」で撮影された生物 (提供: CoML)

クダクラゲの仲間
 ©Laurence Madin,
 Woods Hole
 Oceanographic
 Institution

クダクラゲの仲間
 ©Laurence Madin,
 Woods Hole
 Oceanographic
 Institution

クダクラゲの仲間
 ©Kevin Raskoff

ヒトデの仲間
 ©Bluhm Iken

カイヤシの仲間
 ©Jan Michels

ソフトコーラルの仲間
 ©Gary Cranitch,
 Queensland Museum

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生した。地震の規模を示すマグニチュード (M) は9.0、日本周辺でこれまでに観測されたことのない史上最大級の地震だった。

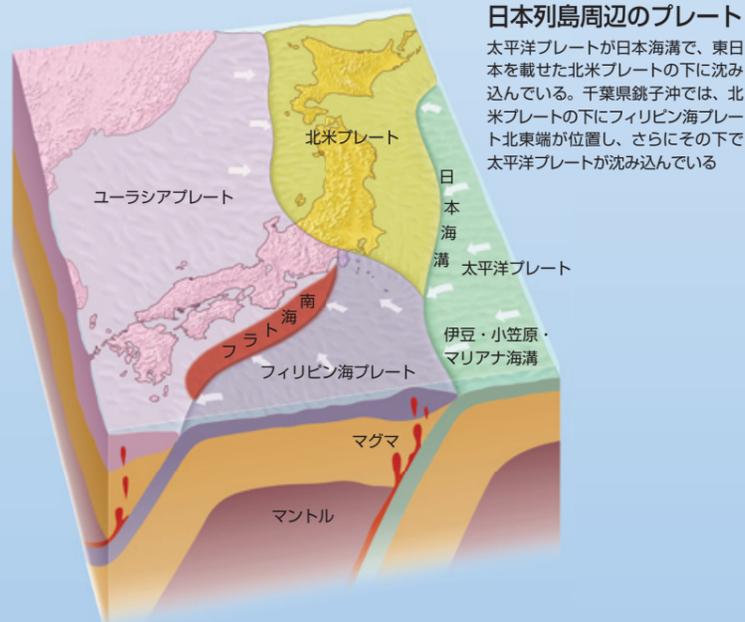
地球の表面は、十数枚のプレートと呼ばれるかたい岩板で覆われている。東北地方の太平洋側の沖合には日本海溝があり、そこで東日本を載せた北米プレートの下に太平洋プレートが沈み込んでいる。その沈み込みに伴い北米プレートが引きずられてひずみがたまる。北米プレートがひずみに耐え切れなくなり、もとへ戻るように反発することで破壊が起き、今回の超巨大地震を引き起こした。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の海底地形調査により、本震の震源付近から日本海溝へ至る領域が南東～東南東方向に約50m、上方に約7m移動した可能性があることが判明した。北米プレートが反発して南東～東南東方向へ引き伸ばされたことにより、陸に近い海底は沈降し日本海溝付近の海底は隆起した。それに伴い巨大津波が発生したのだ。

宮城県沖から始まった破壊は、南は茨城沖へ、北は岩手沖へ伝わった。破壊域は500km×200kmの範囲に及ぶと推定されている。それでは、破壊はどのようにして止まったのか。

JAMSTECでは、破壊域の南限にあたる茨城県から千葉県沖において、海底下の地下構造探査を以前に実施していた。今回そのデータを分析したところ、千葉県銚子沖の海底下にあるフィリピン海プレート北東端と破壊域の南限が一致した。この領域から南側は、北米プレートの下にフィリピン海プレートが位置し、さらにその下で太平洋プレートが沈み込んでいる。太平洋プレートのすぐ上に載るプレートが、北米プレートからフィリピン海プレートに替わる領域で、破壊が止まったと考えられる。

この領域は、余震域の南限とも一致する。ただし高橋成実グループリーダーは、「今回の超巨大地震により、プレート内の応力分布が変化し、新たな大地震を誘発する恐れがあります」と警告する。「破壊域の南側に位置する千葉県南部の房総沖では1677年にM8クラスの地震が、また北側の十勝沖では1968年にM7.9の地震が起きています。今後、これらの地域で巨大地震が誘発される可能性があ



日本列島周辺のプレート

太平洋プレートが日本海溝で、東日本を載せた北米プレートの下に沈み込んでいる。千葉県銚子沖では、北米プレートの下にフィリピン海プレート北東端が位置し、さらにその下で太平洋プレートが沈み込んでいる

東北地方太平洋沖地震、フィリピン海プレート北東端で破壊は止まった

るのかどうか、海域での観測を行い、そのデータをもとに検討する必要があります」

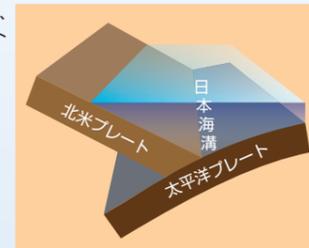
JAMSTECでは深海調査研究船「かいらい」を出航させ、3月15日より、三陸沖から銚子沖にかけて海底地震計を設置するとともに海底地形の調査を実施した。現在、その観測データの解析を進めている。さらに研究担当理事のもとに検討委員会を設置。今回の地震

と津波において海底下・海底・海中で何が起きたかを正確に把握して環境と生物への影響を調べるとともに、今後起こり得る地震について理解を深めるために有効な研究活動を検討し、実行している。本誌でもその研究について報告していく予定である。

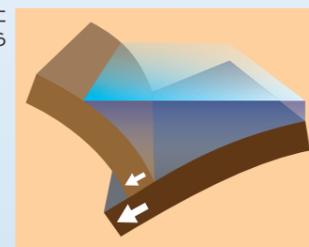
(取材協力: 高橋成実 地震津波・防災研究プロジェクト システム運用・データ管理グループ グループリーダー)

東北地方太平洋沖地震の発生メカニズム

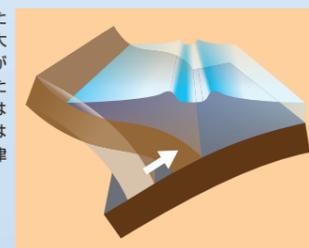
太平洋プレートが日本海溝で、東日本を載せた北米プレートの下に沈み込んでいる



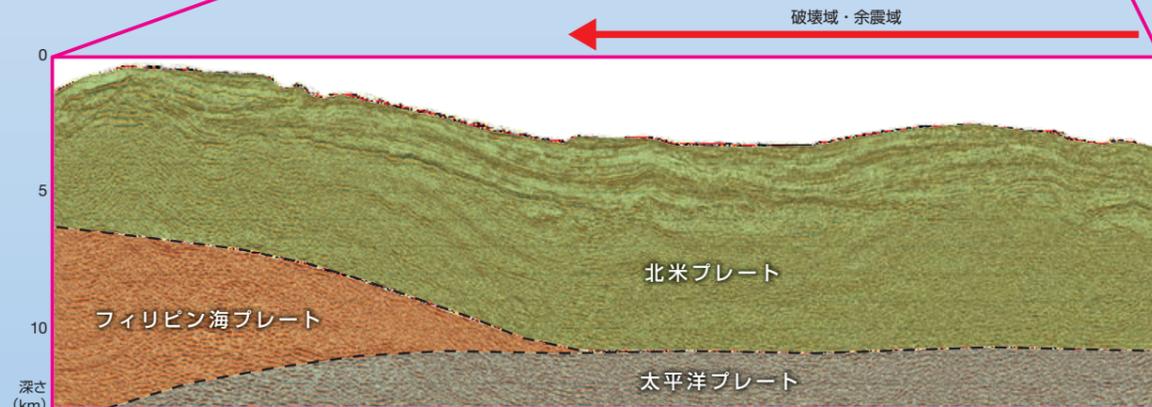
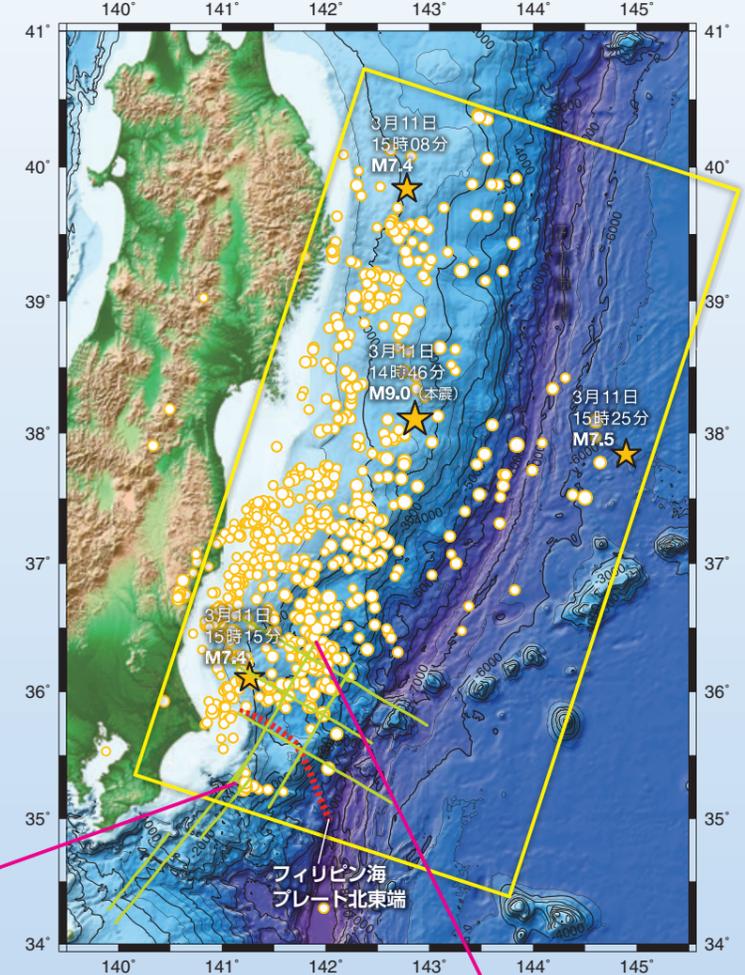
太平洋プレートの沈み込みに伴い北米プレートが引きずられてひずみがたまる



ひずみに耐え切れなくなった北米プレートが反発して巨大地震が発生。北米プレートが日本海溝側へ引き伸ばされたことにより、陸に近い海底は沈降し日本海溝付近の海底は隆起した。それに伴い巨大津波が発生した



東北地方太平洋沖地震の破壊域と余震域



地下構造

千葉県銚子沖付近の海底下にフィリピン海プレートの北東端がある。そこで破壊が止まったと考えられる

地球は、多様な生命に満ちあふれている。
なぜ地球は生命豊かな惑星になり得たのだろうか。
生命は海で誕生したと考えられている。
そして、海は地球表面の70%を占めている。
それ故、生物多様性を考えるとき、海はとても重要だ。
しかし、海はあまりにも広く、あまりにも深いために、
そこに生息している生物たちについて、
私たちはまだ十分な情報を持っていない。
どのような生物が、どこに、どれだけのいるのか。
生物たちは、どのように関わり合っているのか。
人類の活動は、どのような影響を及ぼしているのか。
——海の生物多様性をめぐる最新の研究を紹介する。

海

取材協力

JAMSTEC 海洋・極限環境生物圏領域

北里 洋／藤倉克則／山本啓之／瀧下清貴／ドゥーグル・リンズィー／土田真二／土屋正史／カ石嘉人／秦田勇二

JAMSTEC 地球環境変動領域

鈴木力英／石井励一郎

国立極地研究所

内藤靖彦

——生物多様性のゆりかご

なぜ海は多様な生物に満ちあふれているのだろうか？

取材協力
JAMSTEC 海洋・極限環境生物圏領域
北里 洋 領域長

地球は「水の惑星」とも呼ばれている。海が、地球表面の70%も占めているからだ。海には、肉眼では見えない微生物から、タコや貝などの軟体動物、エビやカニなどの甲殻類、魚類、さらにはシロナガスクジラのように体長30mを超える海生哺乳類まで、実にさまざまな生物が息している。生物は門、綱、目、科、属、種といった階級で分類される。たとえばヒトは、脊索動物門哺乳綱霊長目ヒト科ヒト属ヒト、となる。海洋生物の門の数は、陸上生物の2倍以上といわれている。このことから、海に生息する生物が多様性に富んでいることが分かるだろう。

では、なぜ海洋にはこれほど多様な生物がいるのだろうか。「地形と地質、環境、エネルギー源、相互依存、歴史——これが、海洋生物の多様性を理解するキーワードです」と北里洋領域長はいう。

陸地からなだらかに続く大陸棚、急な大陸斜面、広く平坦な深海平原、山のように隆起している海

山、山脈のように連なった海嶺、狭く深い溝になっている海溝……。海底の地形は、海の地質を反映しているために、陸上に負けないほど複雑である。また、一言に海といっても、氷に覆われた北極や南極の海、日本の周辺のような温帯の海、サンゴ礁が広がる熱帯・亜熱帯の海と、環境もさまざまだ。300℃を超える熱水が噴き出しているところ、酸素が非常に少ない場所など、極端な環境もある。こうした多様な地形や地質、そして環境が、海洋生物の多様性を支えているのだ。

陸上では、植物が太陽エネルギーを使って有機物をつくり出し、動物はそれを直接あるいは間接的に摂取している。陸上では、すべての生物が太陽エネルギーに依存しているのだ。一方、海には、太陽エネルギーに依存する光合成生態系のほかに、地球内部から出てくる硫化水素やメタンなどのエネルギーに依存する化学合成生態系がある。化学合成生態系には、細長いチューブ状のハオリムシや硫化

鉄のうろこを持つスケリーフットなど、変わった生物も多い。2種類のエネルギー源があることで、海洋生物の多様性は大きく広がっている。

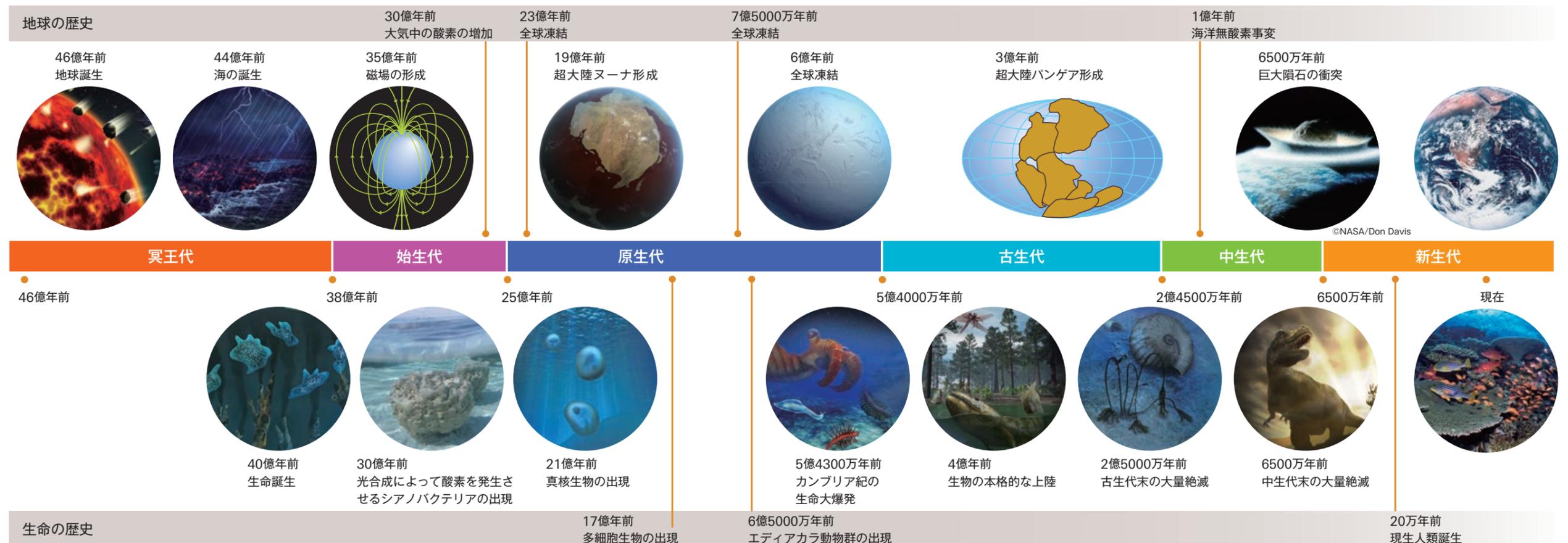
その化学合成生態系に欠かすことができないのが、4つ目のキーワード、相互依存である。硫化水素やメタンは、多くの生物にとって毒である。そのような場所で生物が生き延びるのは、硫化水素やメタンのエネルギーを使って有機物を合成する特殊な微生物を体内にすまわせているからだ。微生物にとっても、安全な住み家が手に入ることで都合である。「ほかの生物と相互依存することによって、特殊な環境にも生息できるようになり、多様性が増します」と北里領域長。「生物多様性に富んでいることで知られるサンゴ礁でも、相互依存は重要な鍵を握っています」

最後のキーワードは歴史だ。「海洋生物は地球の歴史を背負っている」と北里領域長はいう。地球が誕生した46億年前、その表面は岩石が溶けた高温

のマグマで覆われ、海は存在していなかった。海が誕生したのは、44億年前だと考えられている。そして、生命は40億年前に深海の熱水噴出孔の周辺で誕生したという説が有力だ。それから現在に至るまで、地球ではさまざまなできごとがあった。大陸の誕生、大陸の離合集散、全球凍結、激しい火山活動による二酸化炭素の大量放出、巨大隕石の衝突……。地球の変化は生物を絶滅のふちに追いやることもあるが、進化を促し多様な生物が誕生するきっかけにもなる。「光合成を行う生物の誕生によって大気中に酸素が増えたように、生物が地球を変えることもあります。地球と生物は密接に関係しながら共進化してきたのです」と北里領域長。「しかも生物が海から陸上へ本格的に進出したのは、わずか4億年前です。生物は、生命の歴史40億年のうち、90%の間、海だけで暮らしていました。その長い時間と地球との共進化が、海洋生物の多様性を育んだのです」

地球と生物の共進化

それぞれの年代は確定したのではなく、研究者によっても異なり、また研究の進展により変わる可能性がある



海洋生物のセンサス——世界の海に生息している生物のカタログをつくる。

取材協力

JAMSTEC 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

藤倉克則 チームリーダー

世界の海には、どのような生物が、どこに、どれだけいるのかを知りたい——多くの海洋生物の研究者は、そう願ってきた。しかし、海はあまりに広く深く、そこにいる生物は種類も個体数も膨大なため、それはかなわぬ夢だと思われていた。

夢を実現しようと願う研究者たちによって2000年にスタートしたのが、「海洋生物のセンサス」(The Census of Marine Life: CoML)である。センサスとは人口調査のこと。全海洋について生物の種多様性、分布、個体数を調査・解析してカタログをつくり、10年後に成果を報告しよう、という画期的なプロジェクトだ。80を超える国や地域から2,700人も研究者が参加。日本からも50人以上が参加した。

そして、約束の2010年10月、10年間の成果が報告された。最大の成果は、グローバルスケールで海洋生物の多様性や分布をカタログ化(データベース化)できたことである。また、驚くほどたくさん

の新種が発見されたことも特筆される。海洋生物の種数は、「海洋生物のセンサス」以前には約23万といわれていたが、25万まで増えた。また、「日本近海は海洋生物の“ホットスポット”であることがわかりました」と藤倉克則チームリーダー(TL)。

日本近海には、微生物から哺乳類まで合わせると3万3629種の海洋生物が出現していることが明らかになった。日本近海とは、日本の排他的経済水域(沿岸から約370kmまでの範囲)の内側をいい、その容積は全海洋のわずか0.9%だ。一方、地球全体の海洋生物は約25万種である。つまり、全海洋の0.9%にすぎない日本近海に、全海洋生物種の約13.5%が出現しているのだ。「これまでも“日本の海は豊かだ”といわれていましたが、日本近海は種多様性が世界的に見ても極めて高いことが科学的に初めて示されました」

なぜ、日本近海は種多様性が高いのだろうか。「北の海が冬には流氷に閉ざされる一方、南の海にはサ

ング礁が広がっています。潮の満ち干によって陸地になったり海になったりする干潟から水深1万mを超える超深海まで、水深もさまざまです。南からは暖流の黒潮が、北からは寒流の親潮が流れてきます。また、プレートの沈み込み帯になっているため、海底地形はとても複雑です。化学合成生態系が形成される熱水噴出孔やメタン湧出域も、あちらこちらにあります。そうした多様な生息環境が種多様性を支えているのです」と藤倉TLは解説する。

日本列島周辺の地史も生物多様性を生み出す大きな要因である。日本列島は1550万年前に大陸から分離し、日本海ができた。その後、海流に乗ってやって来た生物たちが日本近海に定着した。ところが2万6000年前、日本海が太平洋から隔離されて淡水化した結果、酸素が欠乏して日本海の深海の生物の多くが死んでしまった。現在、日本海の深海に生息している生物は、北方の浅瀬から進入してきたものといわれる。また、日本列島はプレート境界に位置

するため、数百年から1,000年ごとに巨大地震が発生している。地震やそれに伴う津波は、海底地形を変え、海洋を大きくかき乱す。それが、新たな生物の定着のきっかけにもなったのだろう。

「海洋生物のセンサス」では現在の海洋生物の調査に最も力が入られているが、現在の海について知ることだけがその目的ではない。「海洋生物のセンサス」では、釣り人が撮影した写真からレストランのメニューに至るまで過去の記録を調べ、過去の海にはどのような生物が、どこに、どれだけいたのかを調べた。その結果、この30年ほどで海洋生物の数が減り、個体サイズが小さくなっていることが分かった。大きな海洋生物では、その約90%がすでに人類の活動の影響を受けていることも明らかになった。「過去と現在を知り、未来の海にはどのような生物が生きられるのかを予測することも、『海洋生物のセンサス』の重要な目的です」

JAMSTECの調査によって撮影された日本近海の海洋生物の例

ゴエモンコシオリエビ/節足動物門
沖縄トラフ南奄西海丘、伊平屋海嶺、伊是名海穴、楢間海丘、第4与那国海丘(いずれも熱水噴出域)の水深700~1,600m



シンカイヒバリガイ/軟体動物門
根椋湾初島沖・沖ノ山堆(いずれも湧水域)、沖縄トラフ南奄西海丘・伊平屋海嶺(いずれも熱水噴出域)の水深705~1,170m



浮遊性有孔虫オーブルナ・ユニバーサ
顆粒根足虫門 世界中



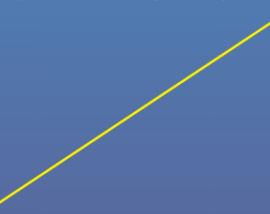
スワイガニ/節足動物門
オホーツク海、日本海、茨城県以北の太平洋沿岸などの水深20~1,250m



サツマハオリムシ/環形動物門
鹿児島湾、南海トラフ九州ノ瀬(いずれも湧水域)などの水深80~430m



ナガヅエソ/脊索動物門
南日本の太平洋岸などの水深610~1,300m



オオグチボヤ/脊索動物門
富山湾、佐渡沖の水深300~1,000m、根椋湾の水深350m、南千島沖の水深535mなど



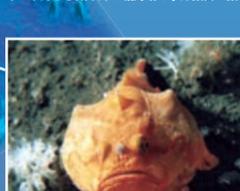
アブラガニ/節足動物門
日本海、カムチャツカ半島沿岸、ペーリング海



メダマハウスキカの近縁種/軟体動物門
三陸沖の水深622~1,118m



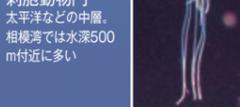
オトヒメノハナガサ/刺胞動物門
インド洋から太平洋の暖海域の水深数百~数千m



ハナグロフサアンコウ/脊索動物門
南日本太平洋岸、東シナ海の水深200~600m



ニシクラゲ
刺胞動物門 太平洋などの中層。根椋湾では水深500m付近に多い



キノガサモヅル/棘皮動物門
世界中の水深1,000~2,000m



ユビアシクラゲ/刺胞動物門
北太平洋の水深650~1,500m



アカザエビ/節足動物門
千葉県沖から沖縄本島周辺の水深200~400m



ムラサキカムリクラゲ/刺胞動物門
太平洋、大西洋、インド洋、南大洋の水深500~1,500m



センジュナマコ/棘皮動物門
世界中



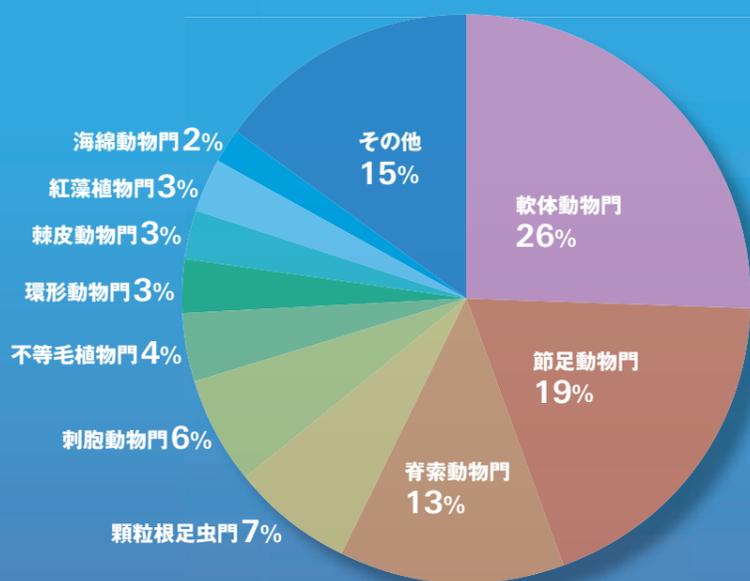
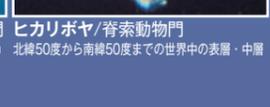
ミツマタヤリウオ/脊索動物門
北海道から南日本の太平洋の水深400~800m



センハダカ/脊索動物門
相模湾~鹿児島湾の南日本太平洋側



ヒカリボヤ/脊索動物門
北緯50度から南緯50度までの世界中の表層・中層



日本近海の生物門ごとの種数

日本近海には3万3629種の海洋生物が出現している。種の数をもとに比べると、イカやタコ、二枚貝、巻き貝などの軟体動物が8,658種と最も多く、カニやエビなどの節足動物が6,393種、魚類などの脊索動物が4,330種と続く。固有種は1,872種、外来種は39種であることも分かった

海洋微生物は無数の多様性を持っている。

取材協力
JAMSTEC 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
山本啓之 技術研究主幹

「海洋生物のセンサス」によって、既知の海洋生物の種数は23万種から25万種に増加した。特に種の数が増加したのが、微生物である。現在、既知の微生物は1万種ほどだ。では、微生物とは、どういう生物をいうのだろうか。

まず、生物の分類について見てみよう。生物は、細胞のなかに核を持つ「真核生物」と、核を持たない「原核生物」に分けられる。私たちヒトは真核生物である。原核生物はさらに、「アーキア（古細菌）」と「バクテリア（細菌）」に分けられる。どちらも単細胞生物である。アーキアはバクテリアと比べて、高温、強アルカリ性や強酸性など極限的な環境に生息しているものが多く、細胞膜・細胞壁の構造や酵素反応にも違いがある。

「微生物とは、肉眼では見ることができない小さな生物の総称です」と山本啓之技術研究主幹は解説する。

つまり、バクテリアやアーキアだけでなく、真核生物の菌類（カビ、酵母）や原生動物（有孔虫、鞭毛虫、繊毛虫など）、植物プランクトンなど、肉眼では見ることができないものであれば微生物といえる。

海洋微生物の多様性が知られるようになったのは、海洋全体の探査が進んだことはもちろんだが、生物の分類手法の変化によるところが大きい。従来、生物の分類には形態や生理機能の情報が重要だったため、似たような性質を持つ微生物の分類は非常に難しかった。その状況を大きく変えたのが、遺伝子解析である。すべての生物は細胞のなかにDNAを持っており、4種類の塩基の並び方によって形態や性質などの生体情報を記録している。塩基の並び方は種によって少しずつ異なることから、遺伝子解析によって、似たような微生物でも違いを見分けて分類することができるのだ。これまで別の種類として分類されていたものが遺伝子解析によって同じ種であると分かったケースもあるが、微生物は解析するたびに新しい種が増えていった。

ところが、その多くは遺伝子の配列しか見つから

ず、それが顕微鏡下で見えているどの微生物のものかは不明である。1つ1つの微生物を分離・培養してから遺伝子解析ができればよいのだが、現在の技術ではほとんどの微生物は分離・培養ができない。そのため、複数の微生物が混在したままの状態でも遺伝子解析を行わざるを得ないからだ。既知の微生物は1万種といったが、それは分離・培養に成功し、微生物そのものが見つけれられたものに限っている。遺伝子の配列だけが見つかるものを含めると、100万種以上と予測されている。

微生物は種の多様性が高いだけではない。海洋全体の個体数は 10^{29} （1000兆×100兆）にも上り、それらの合計重量はアフリカゾウ2400億頭分に相当するという。これは全海洋生物の重量の90%を占めると推定されている。

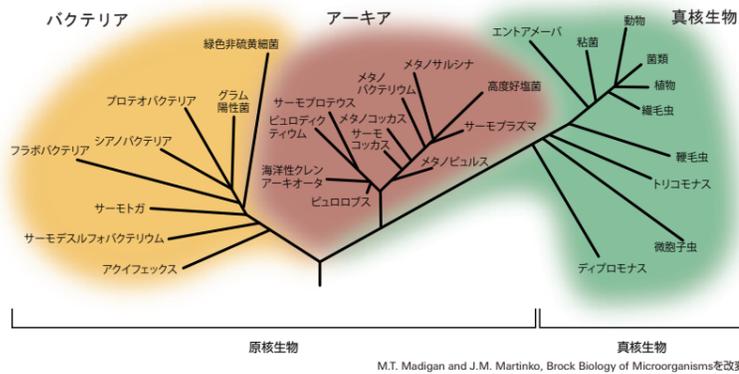
驚くほどの種の多様性と、生物量が多いにもかかわらず、私たちは普段、微生物の存在を実感することはほとんどない。しかし山本技術研究主幹は、「この地球上に、微生物と無関係に生きている生物はいません」と指摘する。たとえば、植物プランクトンは太陽エネルギーを利用し、光合成によって有機物を

を生産して酸素を放出している。私たちはその酸素を取り入れて呼吸しているし、私たちが食べている海産物は食物連鎖をさかのぼれば植物プランクトンや多様な微生物に行き着く。水深数千mという深海底で暮らす生物も、微生物と無関係ではない。生物の死骸や排せつ物には微生物がすみ着き、マリンスノーとなって深海に降り注ぐ。大きな生物の死骸は微生物によって分解され、かたちを変えて栄養となり、深海底の生物たちを育てているのだ。硫化水素やメタンを含む熱水が噴き出す海底では、アーキアやバクテリアが有機物を生産している。シロウリガイやハオリムシなどの動物は、硫化水素やメタンをエネルギー源にして有機物を生産する微生物を体内に共生させて栄養を取っている。「地球の生態系を支えているのは、微生物です」と山本技術研究主幹。

微生物の研究は遺伝子解析の導入で大きく進んだ。しかし、なお数千万から数億種以上の微生物が未発見だといわれている。生物多様性の理解に微生物研究は欠かせない。そしてそれは、地球の生命の起源の解明へもつながっていく。

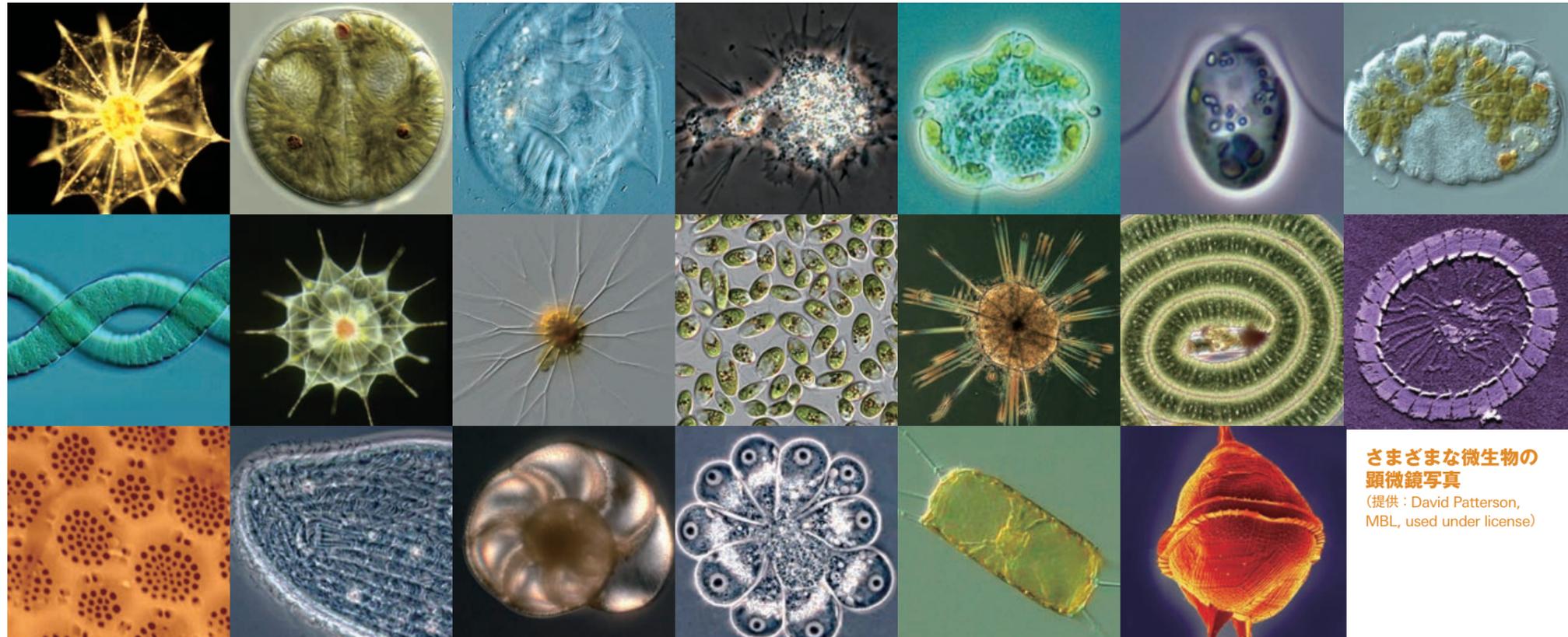
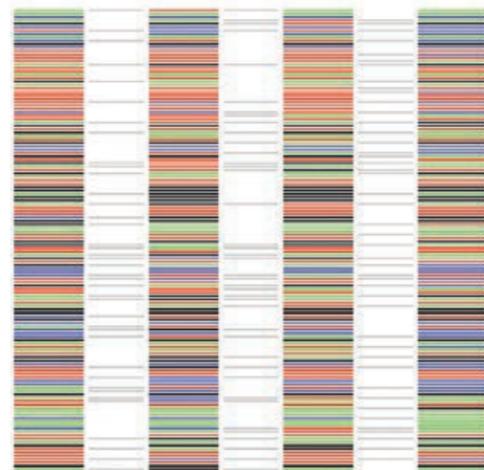
生物の分類体系

地球の生物は、大きく真核生物（ユーカリア）、バクテリア（細菌）、アーキア（古細菌）の3つに分類される。バクテリアとアーキアは、細胞に核がない原核生物で、1個の細胞だけから成る単細胞生物である。一般的には、肉眼で見ることができない生物を「微生物」と呼ぶ



遺伝子解析

微生物だけでなく、あらゆる生物で遺伝子解析による分類が行われている。色はDNAを構成する4種類の塩基配列を示している（青：シトシン、緑：アデニン、赤：チミン、黒：グアニン）。灰色の線は、配列が違っていることを示す。同じ種の塩基配列はほとんど同じで、系統が遠ければ違いが大きくなる。塩基配列から生物を分類・同定する手法を「DNAバーコーディング」と呼ぶ（提供：CoML）



さまざまな微生物の顕微鏡写真
（提供：David Patterson, MBL, used under license）

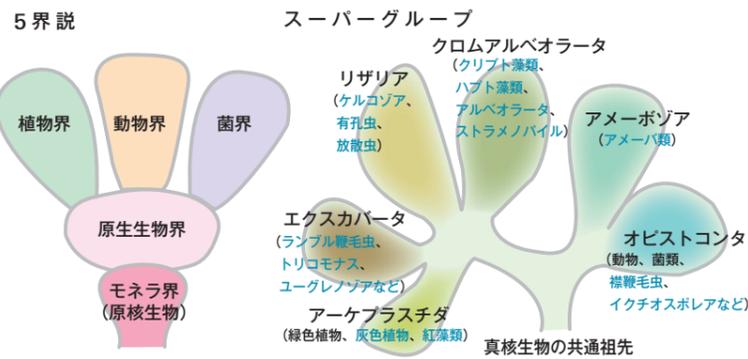
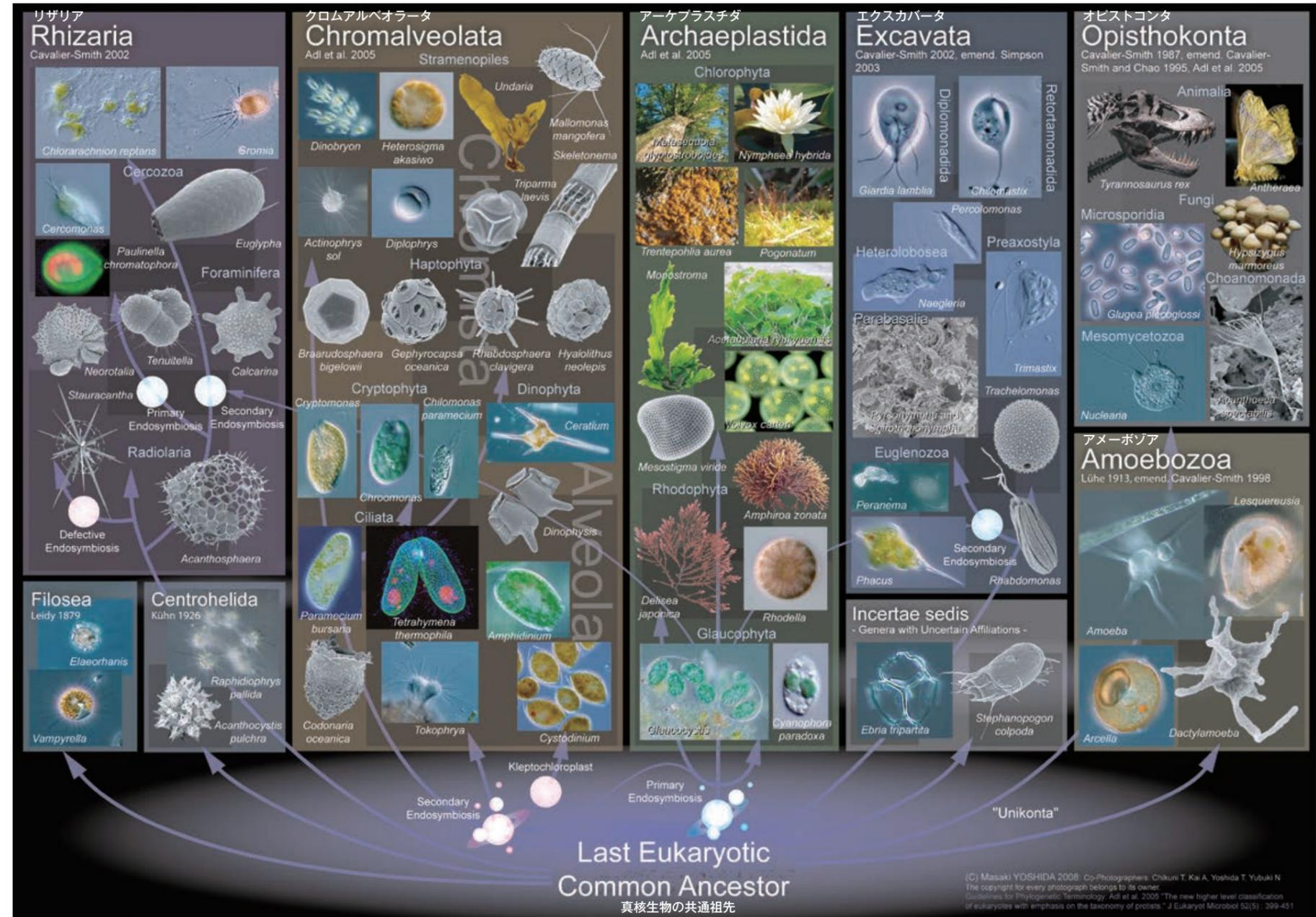
肉眼では見えない**原生生物**の世界にこそ真核生物の多様性がある。

取材協力
JAMSTEC 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
瀧下清貴 主任研究員

「海洋生物のセンサス」の10年間の調査によって、海洋生物の種類や分布、量について、たくさんの情報が得られた。しかし瀧下清貴主任研究員は、「本当の意味での生物多様性を、私たちはまだ理解できていません」という。「原生生物の情報が抜け落ちているからです」。原生生物とは、単細胞の真核生物である。ゾウリムシやアメーバも原生生物だ。

生物の分類体系の1つに「ホイタッカーの5界説」がある。原核生物はモネラ界に、真核生物は植物界、動物界、菌界、原生生物界の4つに分類される。高校の生物の教科書にも載っている有名な分類体系だが、生物研究者は最近、この分類体系を使っていないという。生物の分類において、従来はその形態が重要な情報であった。ところが、現在は遺伝子の情報に基づいた分類法も積極的に取り入れられている。進化の過程で遺伝子は少しずつ変異を起こす。遺伝子を比較することで、似ていれば近縁で、違いが大きければ系統的に遠いと分かるのだ。「遺伝子を調べると、5界説ではうまく分類できない真核生物がたくさん出てきてしまったのです。そこで2005年ころから、6つのスーパーグループが使われるようになりました」

6つのスーパーグループとは、アーケプラスチダ、エクスカバータ、リザリア、クロムアルベオラータ、アメーボゾア、オピストコンタである。「5界説で独立していた植物界はアーケプラスチダの一部、動物界と菌界はオピストコンタの一部にすぎません。一方、原生生物はスーパーグループの6つすべてに存在しています。生物多様性という、肉眼で見える



ホイタッカーの5界説と真核生物のスーパーグループ
原生生物は、5界説では原生生物界にまとめられていた。スーパーグループでは6つすべてのグループに分類され、原生生物の多様性が高いことが分かる。青字は原生生物である。一方、5界説ではそれぞれ1つの界を成していた植物、動物、菌類が、スーパーグループでは各グループの一部になる

真核生物ばかり注目されます。しかし、そのような生物はほんの一部です。真核生物の多様性は、肉眼では見ることができない原生生物の世界に広がっているのです」

瀧下主任研究員は、深海の化学合成生態系における原生生物の多様性解析を現在進めている。化学合成生態系では、バクテリアやアーキアがメタンや硫化水素をエネルギー源として有機物を合成し、その有機物をシロウリガイやハオリムシなどの真核生物が食べている。「化学合成生態系の研究でまず

注目されるのは、肉眼で見える真核生物です。そして、肉眼では見えないものの、バクテリアやアーキアの研究も進んでいます。しかし、原生生物は手付かずでした」

瀧下主任研究員は最近、バクテリアやアーキアを食べている原生生物や、多細胞の真核生物に寄生している原生生物を発見した。「原生生物が化学合成生態系においてどのような役割を果たしているのかを明らかにしたいですね。化学合成生態系に生息する原生生物のなかには、呼吸をつかさどるミト

コンドリアが退化した、進化的に面白い生物も見つかっています。真核生物の進化やその起源を知るには、原生生物の研究は不可欠です」

瀧下主任研究員は、「目に見える真核生物だけの写真を並べて「生物多様性」とうたっているのを見ると、「ちょっと待って！」といいたくなりますね」と笑う。「しかし、原生生物の研究が遅れているのも事実。原生生物の研究者は、とても少ないのです。原生生物に興味を持ち、研究を始める人が増えたらうれしいですね」

真核生物
植物、動物、菌類など肉眼で見える生物はほんの一部で、真核生物の大部分は原生生物が占めている。矢印は進化の道筋を示している
(提供：筑波大学・吉田昌樹 助教)

生物たちは関わり合って生きている。 相互依存が生物多様性を生み出す。

取材協力

JAMSTEC 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

ドゥーグル・リンズィー 技術研究副主幹
土田真二 技術研究主任

「地球には多様な生物が生息していますが、それぞれの生物種は独自に存在しているわけではありません」とドゥーグル・リンズィー技術研究副主幹はいう。「種同士が密接に関わり合って、初めて生態系が成り立っているのです」

たとえば、沖縄トラフの鳩間海丘で、生物たちの深い関わり合いを見ることができる。鳩間海丘のカルデラ内では、至るところでゴエモンコシオリエビの大群集が見つかる。水深1,500mを超える深海で、なぜそれほど多くの生物が生きていけるのだろうか。土田真二技術研究主任の研究から、その理由が明らかになった。

「ゴエモンコシオリエビは一生を海底温泉で優雅に暮らすのです」と土田技術研究主任。その秘密は体の腹側にある。腹側を観察すると、多数の剛毛で覆われていることが分かる。その剛毛を電子顕微鏡

で見ると、繊維状の微生物が無数に付着している。ゴエモンコシオリエビは、この微生物を食べているのだ。鳩間海丘では、300℃を超える熱水があちこちで噴き出している。そのすぐ横でゴエモンコシオリエビは生息している。そこは、水温が急激に下がり3~6℃となるが、硫化水素などの化学物質を大量に含んでいる。ゴエモンコシオリエビに付着している微生物は、熱水に含まれる化学物質をエネルギー源として有機物を合成しているのだ。「ゴエモンコシオリエビは微生物に住み場所を提供し、それを養殖して食べています。まさにお互いに依存し合っているのです」と土田技術研究主任はいう。

アカチウチンクラゲにも、生き物たちの関わり合いを見ることができる。アカチウチンクラゲは、日本海溝など亜寒帯海域の水深450~1,000mの深度を中心に生息している。このクラゲには、ヨコエ

ビやウミグモ、ヤドリクラゲなど、さまざまな生物が付着している。アカチウチンクラゲは、さまざまな生物に住み家を提供しているのだ。ではアカチウチンクラゲは依存されるだけの存在かということ、そうではない。そのポリプは翼足類という浮遊性の貝類の殻に付着し、そこを住み家として成長する。

相互依存——それが多様な生物を育む大きな要因である。しかし、それは危ういバランスの上に成り立っているのである。「もし翼足類がいなくなったら、アカチウチンクラゲのポリプは住み家を失い、成長できなくなります。すると、ヨコエビやウミグモ、ヤドリクラゲが住み家を失ってしまいます」とリンズィー技術研究副主幹はいう。しかも、その危険は現実になりつつある。

人類の化石燃料の消費によって大量の二酸化炭素が大気中に放出され、地球温暖化を引き起こしてい

ることは、よく知られている。実は、大気中に放出された二酸化炭素の約3分の1は海洋に吸収されている。海水に大量の二酸化炭素が溶け込むとpH（水素イオン濃度）が低下し、「海洋酸性化」が起きる。すると海水中の炭酸イオンが減り、生物が炭酸カルシウムの殻や骨格をつくりにくくなってしまふ。翼足類は炭酸カルシウムの殻をつくるため、海洋酸性化の影響を強く受けてしまうだろう。翼足類の絶滅。それは地球上から生物が1種姿を消すというだけではない。翼足類と相互依存の関係にある生物、さらにその生物と相互依存の関係にある生物……と、「絶滅の連鎖」が起きると懸念されている。アカチウチンクラゲや翼足類は一例にすぎない。「生物多様性を理解し、その未来を考えるためには、どの生物がどこにいるという情報だけでなく、生物種同士のつながりを明らかにすることがとても重要です」

アカチウチンクラゲの傘の外側には、ウミグモ（上左）やヨコエビ（上右）が付着している。下は、傘の内側に付着しているヤドリクラゲの仲間の未成熟世代。捕集ネットなどでクラゲを採集すると、付着している生物は外れてしまう。どのような生物がクラゲに住み家として利用し相互依存しているかを知るには、ハイビジョンカメラなどを搭載した有人潜水船や無人探査機によってその場で観察しなければならない

沖縄トラフ鳩間海丘の水深1,500mに生息するゴエモンコシオリエビの群集。すぐ近くで、硫化水素などの化学物質を含む300℃の熱水が噴出している。ゴエモンコシオリエビの生息域の水温は3~6℃である



ゴエモンコシオリエビ。甲らの長さは約5cmで、全身が白色。ヤドリクラゲの仲間。腹部は体の下側に折り畳まれている



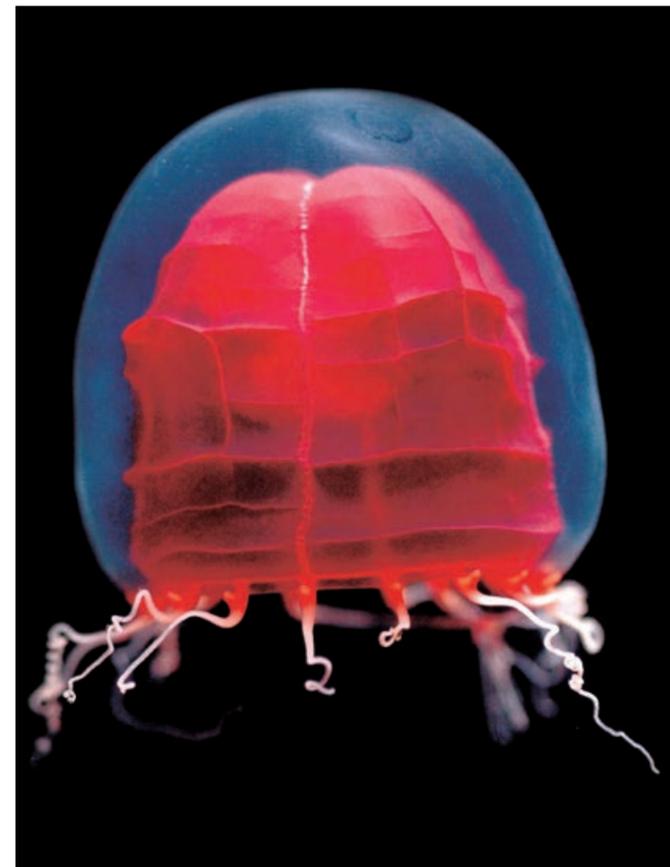
口器（餌を採取する器官）の一部には、くしの歯状にかたい剛毛が生えている。この剛毛を使って腹側の毛に付着した微生物をすき取り、口に運ぶ

腹側は多数の剛毛に覆われている

腹側の剛毛には多数の微生物が付いている

ゴエモンコシオリエビ腹側剛毛の電子顕微鏡写真。繊維状の微生物がゴエモンコシオリエビの剛毛に絡み合っている。この微生物は、熱水に含まれる硫化水素などの還元物質をエネルギー源として有機物を合成する

（資料提供：土田真二技術研究主任）



アカチウチンクラゲ。傘の直径は約10cm、高さは約17cm。伸ばすと1mにもなる触手が14~30本ある。亜寒帯海域の水深450~1,000mの深度を中心に分布していると思われる



翼足類の表面に付着したアカチウチンクラゲのポリプ。翼足類は貝の仲間、翼足と呼ばれる羽のような器官を用いて海中を浮遊している

（資料提供：ドゥーグル・リンズィー 技術研究副主幹）

バイオリギング——海のなかのことはそこで暮らす生物たちに聞こう。

あのアザラシたちは、いつ、どこで、何を食べているのだろう——40年ほど前、オホーツク海に面した北海道の能取岬でアザラシを観察しながら、大学院生だった内藤靖彦名誉教授が抱いた疑問が、すべての出発点だった。「流水の上に現れたアザラシを観察するのですが、アザラシは寝ているだけ。それをいくら観察しても、アザラシの生態を理解できるはずがありません。やはり、海中での行動を知る必要があります」。しかし、当時、それができる方法はなかった。「なければ、つくればいいんです」と内藤名誉教授。

内藤名誉教授は1970年代から、水圧を計測して深度を記録する装置の開発に着手。試作や実験を繰り返し、1987年にはキタゾウアザラシに深度記録計を取り付け、その潜水行動の記録に挑んだ。「すでに同様の研究はありましたが、最長記録は2週間でした。キタゾウアザラシは繁殖期を終えると2ヵ月ほど餌を求めて回遊します。私たちは、1回の回遊期間にあたる73日間の全潜水行動を記録することに成功しました。それは、誰も見たことがない、でもキタゾウアザラシの生態を理解するためには絶対知りたいデータでした」。潜水回数は約6,000回で、平均的な潜水時間は約20分、水深は400~800mだった。最大深度は1,250m、最長潜水時間は約50分と、考えられていたより深く、長く、休まず潜水していることが分かった。

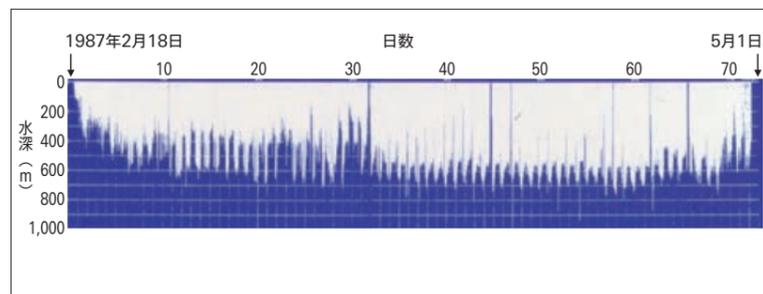
このように生物に小型の装置を付け、海中や空など人が行って観察できない場所での生物の行動を記録することを、「バイオリギング (Bio-logging)」という。生物を意味するバイオ (bio) と、

記録するという意味のログ (log) を組み合わせた造語で、内藤名誉教授たちが名付けた。バイオリギングは現在、クジラなどの海生哺乳類、ペンギンなどの海鳥、ウミガメ、魚など、さまざまな生物の行動を探ることができる画期的な方法として世界中で使われている。

初期の深度記録計は、表面にアルミを蒸着させた特殊な紙に、半導体の微細加工で使うダイヤモンドの針で細い線を書いていくアナログ式だった。1990年代になると、デジタル化によって装置は小型化し、記録できる項目も増えた。現在では水深のほかに、遊泳速度、3軸方向の加速度、心拍数、心電図、体温、周囲の温度や塩分、地磁気、照度などが記録できるようになり、生物の行動や生理状態だけでなく、生物がいる環境についても分かるようになった。さらには小型カメラを取り付け、生物たちが海中で見ている風景を知ることできる。

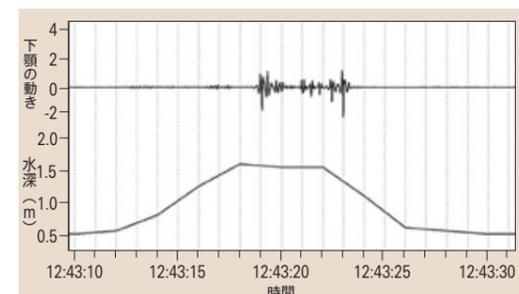
「一番知りたいのは、生物たちがいつ、どのように餌を採っているかです」と内藤名誉教授はいう。最近、マッコウクジラなどのハクジラ類やゾウアザラシ類など大型の海生哺乳類は、水深1,000mを超える中深層の深くまで潜水することが分かってきた。しかし、彼らは肺呼吸をする必要がある。深く潜れば潜るほど、餌採りに使える時間は制約される。「よほど上手に、効率的に餌を採っているのか。あるいは、深い海にはたくさん餌があるのか。中深層の生態系はいかなるものか……。多くの疑問が湧いてきます。彼らの採餌の現場を見るための新たな観測手法を開発中です」

餌を食べるときは、顎を動かす。そこで、下顎



世界で初めて記録されたキタゾウアザラシの回遊中の全潜水記録

このキタゾウアザラシは、1987年2月18日にアメリカ・カリフォルニアの集団繁殖地を出発し、餌を求めて回遊した後、5月1日に戻ってきた。73日間のキタゾウアザラシの潜水深度の変化が、長さ20cmの紙に細い線で記録されている。幅1mmに約100本の線があり、潜水回数は約6,000回にも上る



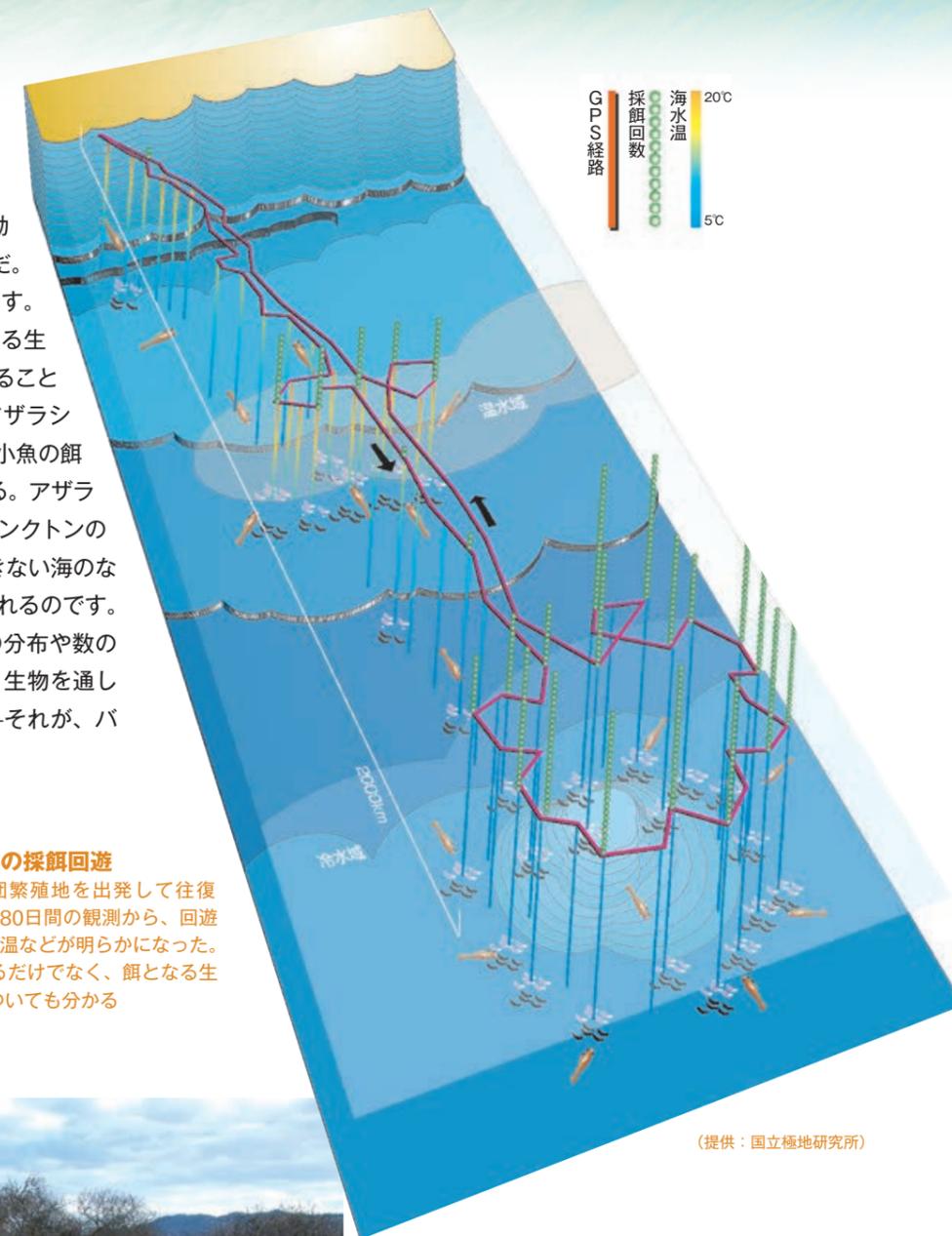
採餌シグナル ゴマフアザラシの下顎に加速度センサーを装着して下顎の動きを記録する。下顎の動きと潜水深度やカメラの画像、GPSデータなどから、いつ、どこで、何回、どのような餌を食べているかを知ることができる (協力: 伊豆三津浜シーパラダイス)

取材協力
国立極地研究所
内藤靖彦 名誉教授

に小型の加速度計を取り付け、その動きから採餌行動を知ろうという戦略だ。「40年前の夢がようやくかかないそうです。実は、採餌行動を調べると、周辺にいる生物や環境、そして生態系についても知ることができるのです」と内藤名誉教授。アザラシが餌を食べた場所には小魚が、そして小魚の餌となるプランクトンがいることが分かる。アザラシが食べた小魚の量が分かれば、プランクトンの量も推定できる。「人が見ることができない海のなかの情報を、生物たちが運んでくれるのです。長期間にわたって観測すれば、生物の分布や数の変化、環境の変化も分かるでしょう。生物を通して、海を環境をモニタリングする——それが、バイオリギングのゴールの1つです」

キタゾウアザラシの80日間の採餌回遊

キタゾウアザラシは、春に集団繁殖地を出発して往復4,000kmもの採餌回遊を行う。80日間の観測から、回遊経路、採餌する場所や回数、海水温などが明らかになった。キタゾウアザラシの行動が分かるだけでなく、餌となる生物の分布や量など、生息環境についても分かる



(提供: 国立極地研究所)



ロガー (記録装置) を装着したキタゾウアザラシ 頭部に画像を記録するカメラと海面に出たときに位置を記録するGPS-アルゴス発信機、背中には潜水深度やストローク、体軸角度、遊泳速度、水温などを記録するセンサー、下顎には餌を食べた回数を記録する加速度センサーが取り付けられている。ロガーは、生物の皮膚を傷付けないように、体毛にエポキシ樹脂で装着する (毛が生え替わるため装着跡は残らない)。左は内藤名誉教授 (提供: 国立極地研究所)



オキアミの群れを襲うペンギン ペンギンに装着したカメラロガーによって撮影された (提供: 国立極地研究所)

“食べる—食べられる”の複雑な関係を アミノ酸の窒素同位体から読み解く。

海に生息している生物はすべて、“食べる—食べられる”という関係にある。食物連鎖の始まりは、太陽エネルギーを使って無機物から有機物をつくり出す植物プランクトンなどの1次生産者である。植物プランクトンを動物プランクトンが食べ、それを小型の生物が食べ、さらに中型の生物、大型の生物へと食物連鎖の栄養段階は進んでいく。「食物連鎖

は網の目のように複雑に絡み合っています。生態系全体を理解するには、生物と生物の関係を詳細に知ることが不可欠です」と土屋正史TLはいう。海洋生物を捕まえて胃のなかを調べるのも1つの方法だが、小さなプランクトンの胃のなかを調べるのは困難だ。では、どのようにすれば生物の捕食関係が分かるのだろうか？

「アミノ酸に含まれる窒素同位体比を分析することで、その生物が食物連鎖のなかでどの栄養段階にいるのかを知る新しい方法を開発しました」とカ石嘉人主任研究員。同位体とは、同じ元素でも重さ（質量数）が異なる元素のことである。自然界に安定して存在する窒素（N）の同位体には、質量数が14の¹⁴Nと、質量数が15の¹⁵Nがある。生物の体にはさまざまなアミノ酸があるが、この分析で使うのは、グルタミン酸とフェニルアラニンである。グルタミン酸の場合、生産者では¹⁵Nの割合が大きく、栄養段階が高くなるほど¹⁵Nの割合が大きくなる。一方、フェニルアラニンの場合、栄養段階が高くなっても¹⁵Nの割合は変わらない。つまり、生物に含まれるグルタミン酸とフェニルアラニンにおける¹⁵Nの割合を比較すれば、その差が大きいほど栄養段階が高いことが分かる。たとえば、植物プランクトンや海藻の栄養段階は1、動物プランクトンや貝は2、カニは2.5、魚は3.5、サメは5という具合だ。

アミノ酸の窒素同位体比分析に必要な試料はナノグラム（1ナノグラムは10億分の1グラム）オーダーでよい。小さな魚でもうろこ1枚あれば十分で、さらに微生物も分析できる。また、アミノ酸が変質していなければ化石やホルマリン漬の標本でも分析可能だ。同じ種について過去と現在で栄養段階が変わっていないかを調べたり、絶滅した生物の栄養段階を知ることもできる。「アミノ酸の窒素同位体比分析の原理はシンプルですが、高精度な機器と熟

海洋の生態系 海洋の生態系には、太陽エネルギーに基づく光合成生態系と、地球内部から湧き出る硫化水素やメタンをエネルギー源にする化学合成生態系がある。化学合成生態系では、化学合成微生物が1次生産者、シロウリガイやハオリムシなどが1次消費者、ユノハナガニやオハラエビなどが2次消費者である。光合成生態系と化学合成生態系は、関わりを持っている

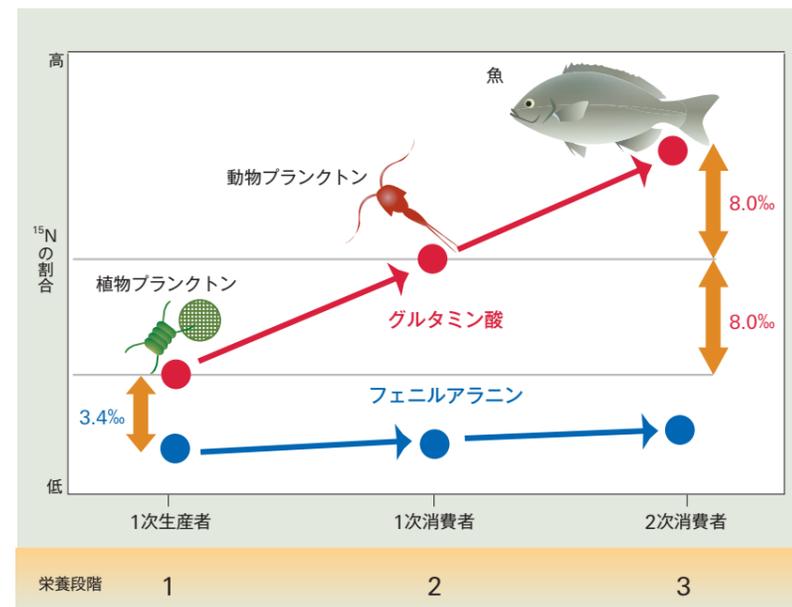
取材協力
JAMSTEC 海洋・極限環境生物圏領域 海洋環境・生物圏変遷過程研究プログラム 同位体生態学研究チーム
土屋正史 チームリーダー
カ石嘉人 主任研究員

練した技が必要です。現在この分析ができるのは、私たちJAMSTEC同位体生態学研究チームとハワイ大学のチームだけです」と土屋TLは胸を張る。

同位体生態学研究チームでは、化学合成生態系にも注目している。太陽エネルギーに基づく生態系を光合成生態系という。一方、化学合成生態系では、地球内部から出てくる熱水や湧水に含まれるメタンや硫化水素をエネルギー源としている。たとえば、シロウリガイは微生物をえらに共生させ、微生物が硫化水素をエネルギー源として合成した有機物をもたらしていると考えられている。研究チームによるアミノ酸の窒素同位体比分析の結果、シロウリガイの筋肉の栄養段階は微生物より1つ高く、実際に食べるわけではないが、広い意味での“食べる—食べられる”の関係にあることが分かった。また、シロウリガイの貝のなかから見つかったゴカイを調べると、シロウリガイのえらより栄養段階が1つ上がっていた。ゴカイはシロウリガイのえらを選んで食べているのだ。化学合成生態系における食物連鎖の研究は、光合成生態系と比べて遅れているため、アミノ酸の窒素同位体比分析による進展が期待されている。

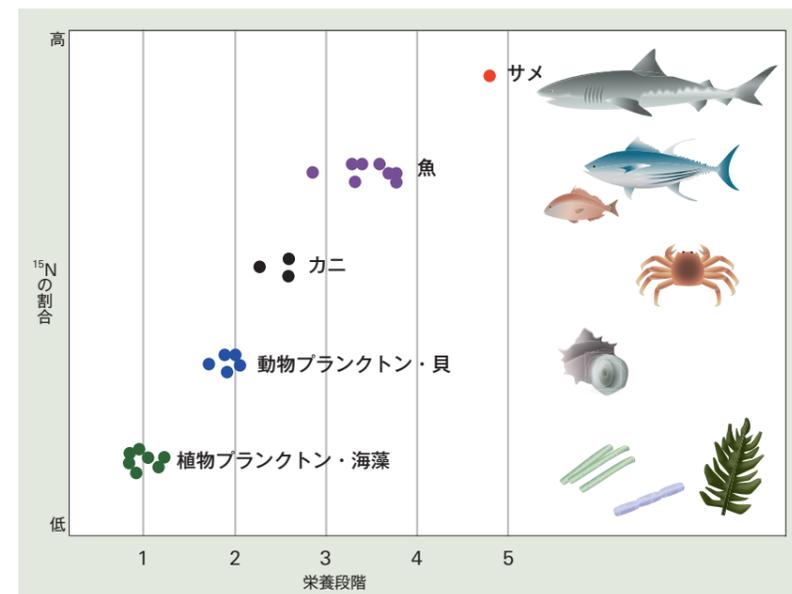
カ石主任研究員は、「まずは、海のなかのエネルギーと物質の流れを明らかにしたい」という。「太陽エネルギーが有機物に変換されて海面から深海底へと降り注ぎます。深海底では化学合成のエネルギーが有機物に変換されています。2つの生態系は隔離されたものではなく、相互に依存しているはずです。その依存度を理解したいのです。アミノ酸の窒素同位体比分析は、もちろん陸上の生物にも使えます。地球上のすべての生物の関わりを明らかにし、地球の全生物圏における物質やエネルギーの流れを描き出す。それが最終目標です」

「生物同士の関わりが分かると、生物多様性が維持される仕組み、そして未来の生態系が見えてくる」と土屋TLはいう。生態系は微妙なバランスの上に成り立っている。温暖化や海洋酸性化などによって生息環境が変化すると、特定の種の個体数が増えたり減ったりして生態系のバランスが崩れてしまおうと危惧されている。生物同士の関わりを理解できていれば、環境変化によって生態系にどのような影響が現れるかを予測できる。未来が見えれば、いまなすべきことが見えてくる。



アミノ酸の窒素同位体比分析による栄養段階の推定

生物の体を構成するアミノ酸には、2種類の窒素同位体¹⁴Nと¹⁵Nが含まれている。グルタミン酸の場合、栄養段階が高くなるほど¹⁵Nの割合が一定の率で大きくなっていく。フェニルアラニンの場合、栄養段階が高くなっても¹⁵Nの割合はほとんど変わらない。グルタミン酸における¹⁵Nの割合とフェニルアラニンにおける¹⁵Nの割合を比較することで、差が小さければ栄養段階が低く、大きければ栄養段階が高いと推定できる



アミノ酸の窒素同位体比分析によって求めた生物の栄養段階

太陽エネルギーから有機物をつくり出す植物プランクトンや海藻の栄養段階は1である。それらを食べている動物プランクトンや貝の栄養段階は2と、食物連鎖が進むと栄養段階は上がっていく。食物連鎖の頂点に立つ生物の栄養段階は5くらいである

極限環境に暮らす多様な 深海微生物たちは**有用物質**の宝庫

深海は、太陽の光が届かず、水温は2℃ほどしかない、暗く冷たい世界だ。そして、高い圧力がかかっている。水深6,500mでは680気圧に相当し、指先に軽自動車が1台載っているようなものだ。ところどころで300℃を超える熱水が噴出し、酸素がほとんどないところ、アルカリ性や酸性の非常に強いところもある。深海には、私たちが生活している地上とはまったく異なる環境が広がっているのだ。深海探査が進み、そうした極限環境にも多様な微生物が生息していることが分かってきた。最近、その極限環境の微生物たちが注目されている。

「極限環境に生息する微生物は、一般的な環境に生息する生物にはない物質をつくり出していることがあります。そのなかから、私たちの生活や健康増進に役立つものを見つけ、産業利用へ展開するための研究を行っています」と秦田勇二TLはいう。秦田TLが率いる海洋有用物質の探索と生産システムの開発研究チームが、深海微生物から発見した有用物

質をいくつか紹介しよう。

1つ目は、アガロースを分解するアガラーゼという酵素である。アガロースはテングサなどの紅藻類の海藻に含まれる多糖類で、寒天の主成分である。アガロースがアガラーゼによって分解されると、アガロオリゴ糖になる。アガロオリゴ糖には、抗がん作用や免疫機能の活性化、肌の美白作用、保湿効果などの優れた機能があることが知られている。「私たちは深海微生物にアガラーゼをつくるものがないか、探すことにしました。すると10種類以上も見つかり、そのなかには60℃という高温でも働くものがありました。深海の微生物の多様さには驚かされます」と秦田TL。そして、この耐熱性アガラーゼの大量生産に成功し、2009年に製品化された。「遺伝子解析用の試薬として使われています。自分たちが深海微生物から発見した物質が生物学や医学に貢献している。とてもうれしいことです」

2つ目は、地球上で最も深いマリアナ海溝で採取

取材協力

JAMSTEC 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 海洋有用物質の探索と生産システムの開発研究チーム

秦田勇二 チームリーダー

された微生物から発見されたもので、さまざまな化合物に糖を結合する糖転移酵素だ。「高い機能を持つが水に溶けにくいために利用されていない物質が、たくさんあります。糖は、水にととても溶けやすい性質を持っています。水に溶けにくい物質に糖を結合させることで、その溶解性を飛躍的に向上させ、利用を拡大することができます」と秦田TLは解説する。たとえば、クロラムフェニコールという抗生物質は水に溶けにくいエタノールに溶かして使っているが、この糖転移酵素を使って糖を結合することで水への溶解性が20倍も向上して、利用しやすくなった。

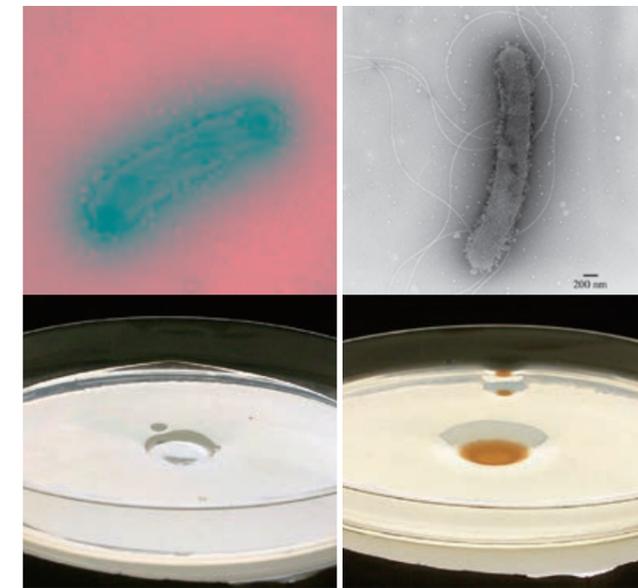
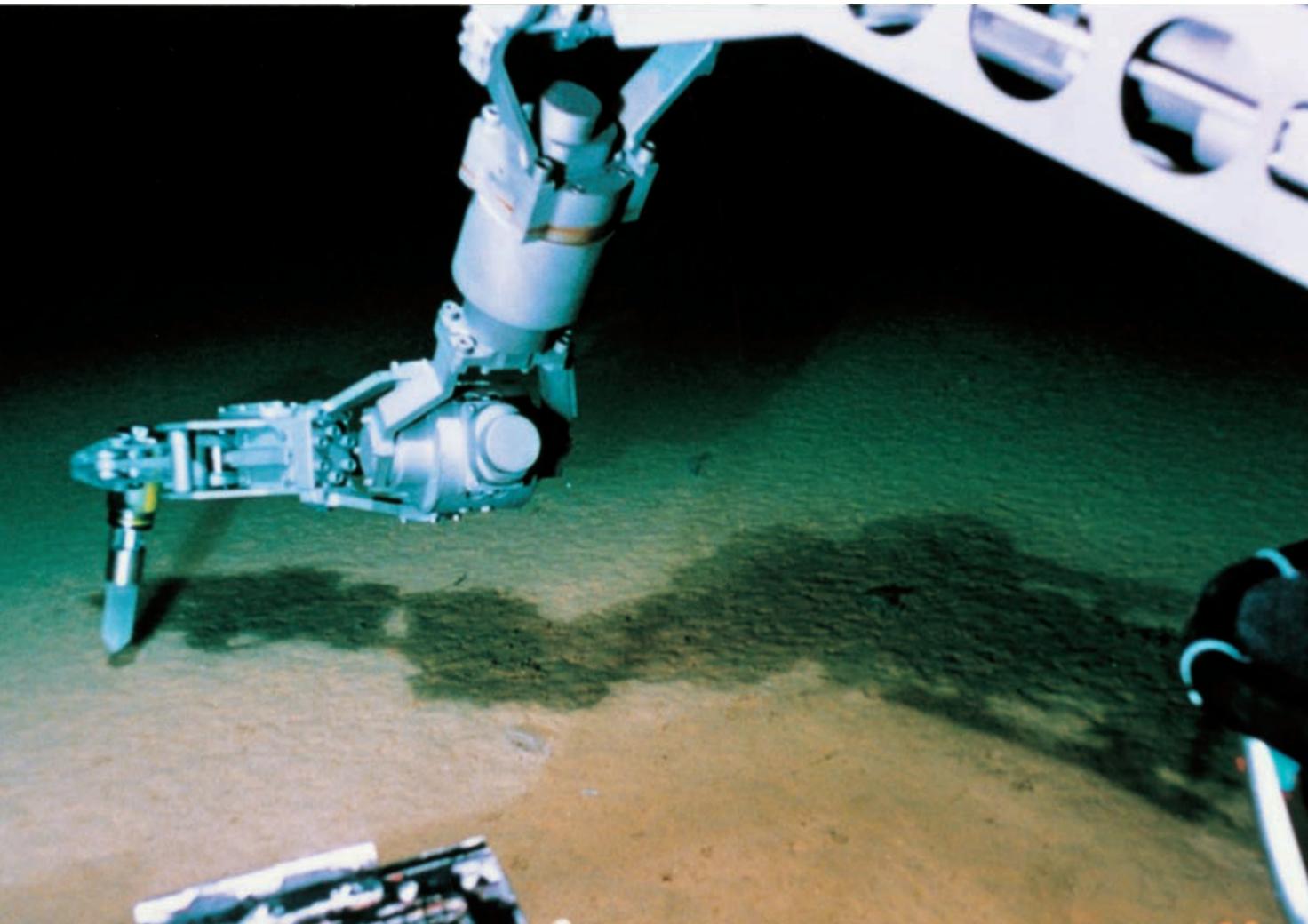
3つ目は、トレハロースをつくり出す2種類の酵素、マルトースホスホリラーゼとトレハロースホスホリラーゼである。秦田TLらは、相模湾の深度1,174mで採取された微生物が、マルトースをトレハロースに効率よく変換する機能を持っていることを発見。トレハロースは高い保水性、冷凍耐性、デンプン老

化抑制など多様な作用を持つことから、さまざまな加工食品に添加されている。「私たちは、反応に関わっている2種類の酵素の遺伝子を微生物から取り出し、酵素を大量につくり出しました。その酵素を使い、マルトースからトレハロースを効率よくつくり出すことに成功しました。近い将来、より安価なトレハロースの生産が可能になるでしょう」

ほかにも、高濃度の過酸化水素で処理してもその活性がまったく低下しないデンプン質分解酵素や、植物油脂や糖からバイオサーファクタントを大量につくり出す酵母などを発見している。秦田TLは、「バイオサーファクタントは生分解性の高い界面活性剤です。新しい洗浄剤や、液晶を形成するためのナノテクノロジーの材料にも利用できるでしょう」と期待している。研究チームでは、探索のターゲットを深海に生息している多細胞生物にも広げ始めた。これからも深海の生物たちから有用な物質が次々と見つかり、産業利用へと広がっていくに違いない。

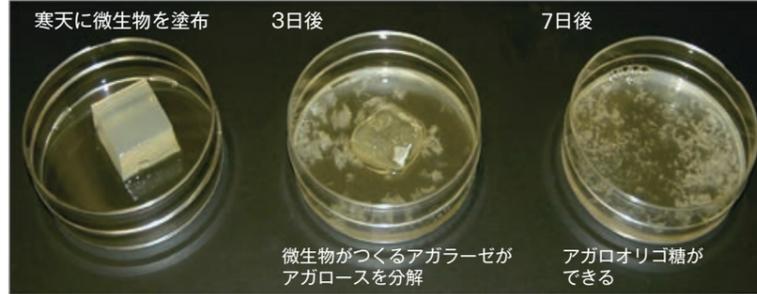
マリアナ海溝における海底堆積物の採取

7,000m級無人探査機「かいこう」は1996年、世界最深部であるマリアナ海溝チャレンジャー海淵の水深1万898mの海底で、堆積物を採取した。そのなかからは、約180種類の微生物が見つかった



アガラーゼをつくる微生物の探索
寒天の上に、深海から採取してきた微生物を塗る。寒天が分解されてくぼみがあれば、その微生物はアガロースを分解する酵素、アガラーゼをつくるということが分かる

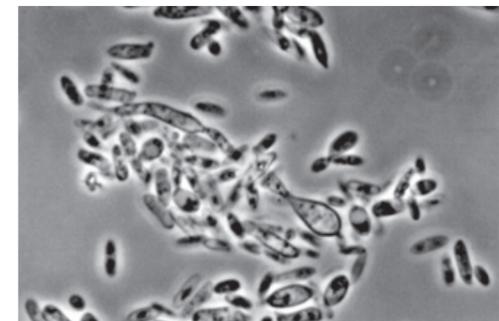
アガロース分解酵素「アガラーゼ」
アガラーゼは、寒天の主成分であるアガロースを分解してアガロオリゴ糖をつくる。アガロオリゴ糖は、アポトーシス（細胞死）誘発、活性酸素産生抑制作用、抗炎症作用、免疫機能活性化、メラニン産生抑制、保湿、血管新生抑制などの機能を持つ



寒天に微生物を塗布 3日後 7日後
微生物がつくるアガラーゼがアガロースを分解 アガロオリゴ糖ができる



製品化されたアガラーゼ
遺伝子の解析をする際の重要な試薬として使われている



バイオサーファクタントをつくり出す酵母
バイオサーファクタントとは生分解性の高い界面活性剤である。深海から採取されたこの酵母 (Pseudozyma) は、植物油脂や糖からバイオサーファクタントをつくり出す

宇宙から植物の分布を調べ 生物多様性の変化を読む。

多様な海洋生物が暮らす海は、閉じた世界ではない。たとえば、海洋の生態系を支えている植物プランクトンは、窒素やリンなどの無機物から、太陽エネルギーを利用して有機物をつくり出す。それらの無機物は陸から大量に供給されているのだ。「海洋生物の多様性を理解するには、陸域の生態系も知る必要があります」と鈴木力英TLはいう。「JAMSTECは海のイメージが強いかもしれませんが、地球環境システムを総合的に捉えようと、陸域の生態系を対象とした研究も行っています」

陸域生態系の研究で活躍するのが、人工衛星によるリモートセンシングである。植物の葉は、目で見える光、すなわち可視光の大部分を吸収するが、近赤外の光を強く反射している。その特性を利用すると、地球のどこに、どのくらいの植物が分布しているのかを、宇宙から知ることができる。1年を通じた観測データからは、日本の大部分が属する温帯のほか、亜寒帯やツンドラ地帯では、夏に植物が増え冬に減るといった季節変化も見えてくる。

「しかし、衛星リモートセンシングだけでは、植物の種類など詳しい情報までは分かりません。そこで、私たちは現地観測を行っています」と石井励一郎研究員。現地を歩き、植物の種類を調べ、木の太さや高さ、密度などを測定する。その地域の植物が光合成によって、どのくらいの二酸化炭素を吸収し酸素を放出しているのかも重要だ。それには葉の量やその季節変化を知る必要があるが、数cmから数十cmほどの葉を衛星から観測することは不可能である。そこで、実際に葉を採取して調べたり、定点カメラを設置して定期的に森林の景観を撮影したりする。「広い範囲を粗く見る衛星リモートセンシングと、狭い範囲を詳しく見る現地観測を組み合わせることで、地球全体の植物分布を詳細に知ることができます。実は、それによって分かるのは、植物についてだけではありません。植生が豊かで広いほど、そこをすみかとする動物などほかの生物の種類や数も増えると考えられています。植物の分布が分かると、その場所の生物多様性を

取材協力
JAMSTEC 地球環境変動領域 物質循環研究プログラム 陸域生態系研究チーム
鈴木力英 チームリーダー
石井励一郎 研究員

より詳しく推定することができるのです」

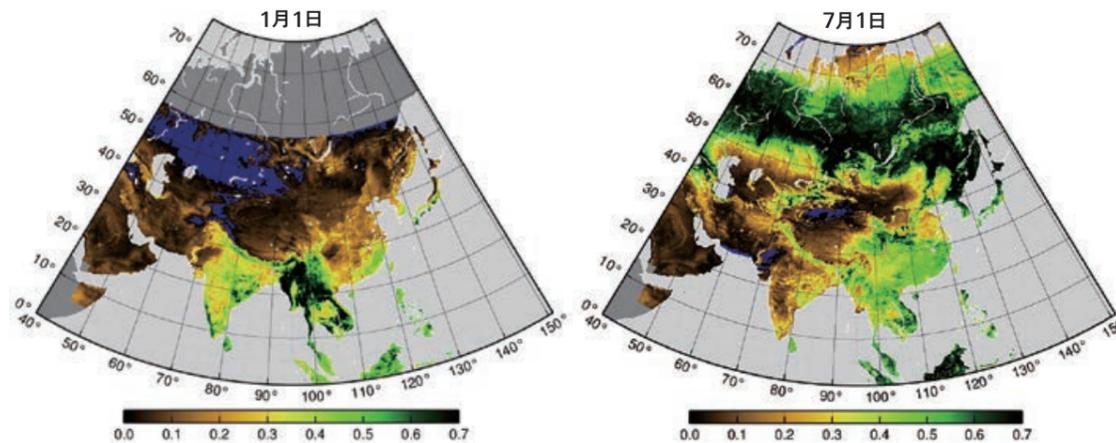
一方、衛星リモートセンシングでは、海のなかを見ることができない。しかし、鈴木TLは、「衛星リモートセンシングから海洋生態系についての重要な情報を引き出すこともできます」という。海の表面の色を観測することで、表層のクロロフィルの濃度とその変化を知ることができる。クロロフィルは、植物の葉緑体に多く含まれる色素だ。その濃度は植物プランクトンの量と密接に関係していることから、海洋生態系の1次生産者である植物プランクトンの分布や季節変化が分かる。北太平洋におけるクロロフィル濃度の分布を見ると、緯度にかかわらず沿岸に多い。このことから、海と陸域の生態系のつながりを読み取ることができる。

「私たちの最大の関心事は、生物多様性が将来どうなるのか、ということです。しかし、生物同士の関わり合いはとても複雑で、分かっていないことが多いため、生物多様性の将来予測は非常に難しく、まだまだこれからの分野です」と石井研究員。生

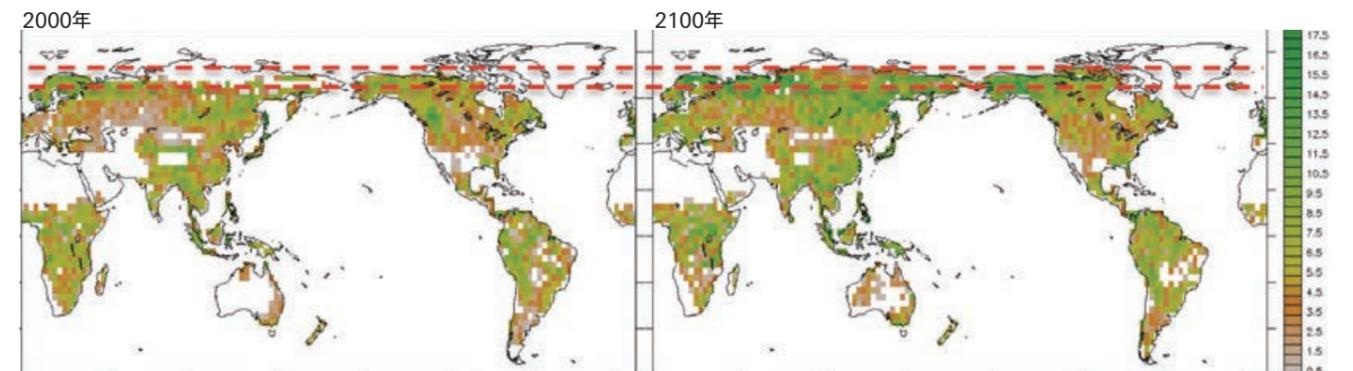
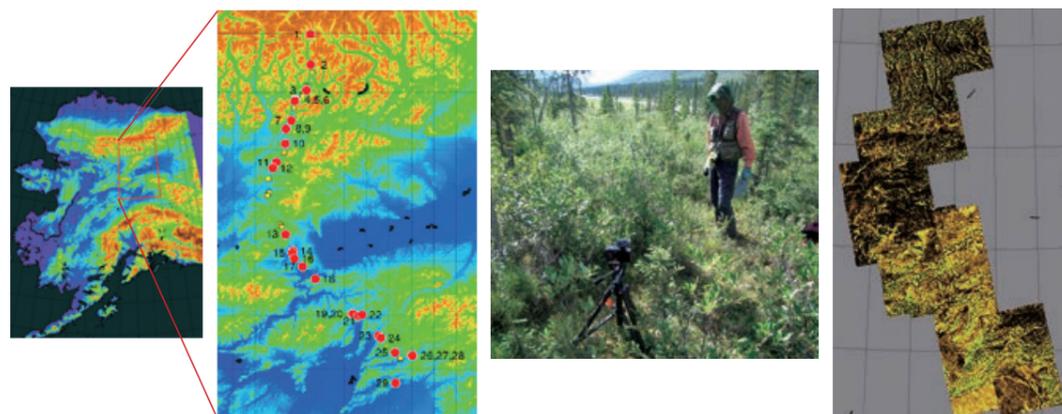
物多様性の未来を知る方策はあるのだろうか。長期間にわたって観測データを蓄積することで、植生がどう変化したかを知ることができる。たとえば、1982~2000年の観測データからは、6月のシベリアで植物の増加傾向が見られる。アラスカの北部では、ほとんど木が生えていなかった場所に低い木が生えてきたことが現地の写真から確認されている。変化の傾向が分かれば、将来を予測することができる可能性がある。今後の二酸化炭素の増加や温暖化を考慮すると、2100年ころには、現在のツンドラ地帯に亜寒帯林が北上してくるという予測もある。「植生が変わり、そこにすむ生物種が変われば、生態系の物質循環において果たす役割も変わるでしょう。私たちは、植生の変化から生物多様性とその機能の未来を読み取ろうとしています」

陸域の生態系の変化は、海洋生物の未来と無関係ではない。

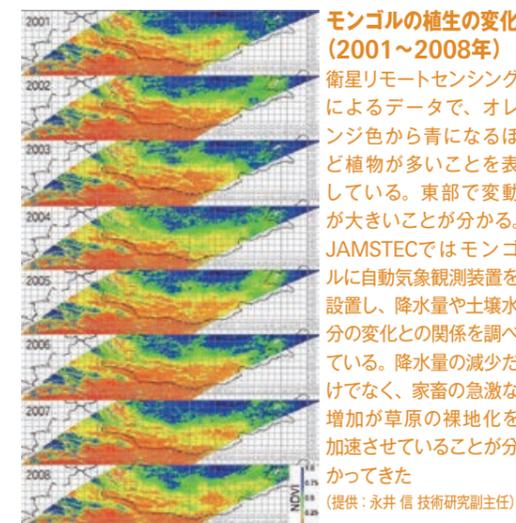
植生の季節変化
(1982~2000年の平均)
衛星リモートセンシングによって得られた1月1日と7月1日のデータで、緑色は植物が多いこと、茶色は植物が少ないことを表している。砂漠を除くと、夏に植物が多くなるのが分かる。特に、シベリアでの季節変化が顕著である
(提供: 鈴木力英TL)



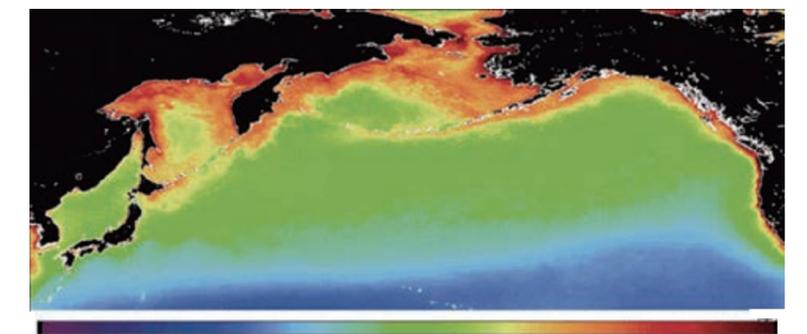
アラスカ中部から北部の植生分布
左は、陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されたマイクロ波レーダーセンサーを用いた観測によって推定された、2007年夏季におけるアラスカの植生分布。真ん中は、現地観測の様子。29地点で、木の太さや高さ、密度、種類などを測定した。右は、衛星リモートセンシングと現地観測の結果をもとに作成した植生分布
(提供: 鈴木力英TL)



2100年における植生分布の予測 左は2000年における植生分布。右は、二酸化炭素増加や温暖化による気温上昇などを考慮して予測した2100年における植生分布。赤の点線で示したように、現在のツンドラ地帯に亜寒帯林が北上してくると予測されている (提供: 羽島知洋 ポストドク研究員)



モンゴルの植生の変化
(2001~2008年)
衛星リモートセンシングによるデータで、オレンジ色から青になるほど植物が多いことを表している。東部で変動が大きいことが分かる。JAMSTECではモンゴルに自動気象観測装置を設置し、降水量や土壌水分の変化との関係調べている。降水量の減少だけでなく、家畜の急激な増加が草原の裸地化を加速させていることが分かってきた
(提供: 永井 信 技術研究副主任)



北太平洋におけるクロロフィルの濃度の分布
(1997~2007年の平均)
SeaWiFS衛星は海の色を観測し、そのデータからクロロフィルの濃度を求めることができる。クロロフィルの濃度から植物プランクトンの分布を知ることができる
(提供: 笹岡晃征 研究員)

BISMaL と OBIS

——海洋生物のデータベースを使ってみよう。

JAMSTECでは、海洋調査船や無人探査機、有人潜水船、高解像度カメラシステム、係留系の観測装置、衛星リモートセンシングなど、さまざまな手段で海洋観測を行っている。調査は、日本列島周辺の海域だけでなく、北極海、インド洋、西部太平洋にも展開している。「調査で得られた海洋生物やその生息域についての情報は膨大です。それらの情報をデータベースに蓄積し、誰でもアクセスして利用できるようにしていくことが重要です」と山本啓之技術研究主幹はいう。「そのために、JAMSTECではBISMaL (ビスマル) というデータベースを構築しました」

BISMaLはBiological Information System for Marine Life (海洋生物情報システム) の略で、JAMSTECの調査・研究活動によって採取・観察された日本周辺の海洋生物4,000種以上の情報が蓄積されている。2009年5月から一般にも公開され、研究者に限らず誰でも自由に使うことができる。「BISMaLは写真や動画が豊富です。ぜひ皆さ

んにも使っていただきたい」と山本技術研究主幹。

BISMaLの使い方は、実に簡単だ。BISMaLのホームページ (<http://www.godac.jp/bismal/j/>) にアクセスし、検索ボックスに調べたい生物の学名や英名、和名を入力して、検索ボタンを押すだけ。すると、採取や観察した位置、分類や生態などについての解説、分布、画像や動画を閲覧することができる。調べたい海域を地図から選んでそこに生息している生物を調べたり、階層的に整理された分類ツリーから検索することも可能だ。

「日本周辺だけでなく、世界の海洋生物について知りたいと思うこともあるでしょう。それに答えてくれるデータベースがOBIS (オービス) です」。OBIS (Ocean Biogeographic Information System) は「海洋生物のセンサス」によって構築されたデータベースで、世界の海洋生物12万種の情報が蓄積されている。OBISには日本語ページがあり、BISMaL同様、使い方も簡単だ。OBISのホームページ (<http://www.iobis.org/ja>) にアクセス

取材協力

JAMSTEC 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

山本啓之 技術研究主幹

し、検索ボックスに生物の学名か英名、和名を入れる。すると、その生物が観測された地点や解説が表示される。調べたい海域に生息している生物種を検索したり、海水温や塩分、深度と生物の分布を1枚の地図で見られることもできる。過去の情報がある生物については、分布や個体数の変化も分かる。

「データベースに重要なのは、情報量を増やし維持すること」と山本技術研究主幹は指摘する。「海洋生物のセンサス」は2010年に終了したが、OBISはユネスコ (国際連合教育科学文化機関) によって引き続き運用されている。BISMaLの充実も必要だ。「JAMSTECの調査で得られた情報に限らず、多くの研究者から日本周辺の海洋生物についての情報をBISMaLに登録する仕組みをつくっていると

ころです。さらにBISMaLとOBISは連携しており、日本周辺だけでなく世界の情報を共有し、身近な海岸から遠くの深海底まで、広く海洋生物を知るためのデータベースを目指しています」

本技術研究主幹は、「人類がいま考えなければいけないのは、海を持続的に利用していくにはどうすべきか、ということです。現在の海の状況を知り、過去の記録と比較し、これからの変動を考える。そのなかから、何をすべきかという知恵を探し出す。その情報源になるのがデータベースです」と答える。BISMaLとOBISには、どの種類の生物が、いつ、どこに、どれだけいて、ほかの生物とどのような関係にあるのかといった、生物多様性とその分布についての情報が蓄積されている。研究者はそれらの情報を解析して、環境変動や人間活動など外的な要因によって種の多様性や生態系がどのように変化するかを知ろうとしている。「そうした科学的裏付けのある評価や予測をもとに、生態系に影響を与えない海洋資源の利用方法や、海洋保護区の選定への助言、さらには傷付いてしまった生態系の再生方法の提案などができます。生態系研究の成果を社会へつなげ、海を持続的な利用を実現させる。それが私たちの目指すところです」

BISMaLの使い方

1 <http://www.godac.jp/bismal/j/> にアクセス



目的やBISMaLを構築した背景などを紹介

BISMaLに収録されているデータの種類の利用、著作権、引用について紹介

検索方法を紹介します

3 検索方法 1 生物の名前やキーワードから検索

生物の名前 (学名や和名、英名) やキーワードを入力。語句の一部でも検索できる。

3 検索方法 2 採集・観察場所から検索

地図上の任意の地点をクリックするとバーンが表示される。バーンをドラッグすると、四角い緑の枠が表示される。枠で示された部分が検索範囲になる。地図下のボックスに緯度 (Latitude)・経度 (Longitude) を直接入力して検索範囲を指定することもできる。



3 検索方法 3 水深から検索

「Depth」のボックスに水深を入力する。左側に小さい値、右側に大きい値を入れる。

生物の名前やキーワード、採集・観察場所、水深を組み合わせると検索することもできる。

4 検索開始 Searchボタンを押す



名前から検索するときは、ここに入力することもできる。

2 検索ページへ

検索方法を日本語で説明

5 検索結果 「ゴエモンコシオリエビ」を検索した例

画像 複数の画像が登録されている場合は、「NEXT」をクリックすると次の画像を見ることができる。「PREV」をクリックすると前の画像に戻ることができる。

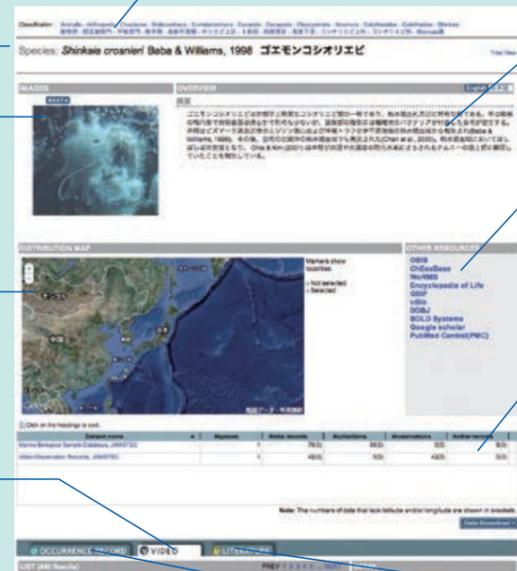
分布図 生物が出現した位置が地図上にプロットされる。「+」「-」をクリックすると地図を拡大縮小できる。地図上でクリックしたまま動かすと、地図を移動できる。

映像 国際海洋環境情報センター (GODAC) が公開している深海映像データベースの映像を閲覧できる。撮影された年月日や場所など、映像の基本情報も掲載されている。



分類 それぞれの分類群の名前をクリックすると、該当するページにジャンプできる。

学名や和名



解説 「日本語」をクリックすると、日本語で表示される。

外部リンク 検索中の生物について、それぞれのデータベースの検索結果にジャンプすることができる。

データセットリスト 検索中の生物についての情報を含むデータセットの名称、各データセットに含まれている生物出現記録の総数などを確認できる。

参考文献

生物出現記録 各記録のID、生物の学名、記録の種類、位置情報、地名、水深、採集・観察日、同定者名が表示される。左端の「+」をクリックすると、記録の原典や引用表記が表示される。

こちらも、おすすめ!

国際海洋環境情報センター「海を知る、地球を知る」
http://www.godac.jp/top/education_index.html
「海を知る、地球を知る」は、海や地球についての入門サイトだ。海洋調査の記録ビデオから選り出されたさまざまな生物が紹介されている。ここで見つけた生物の詳しい情報はBISMaLやOBISで探ることができる。



なぜ生物の多様性が大切なのだろうか？

「海洋生物のセンサス」10年の成果

国際連合が定める「国際生物多様性年」でもあった2010年は、海洋生物の研究にとって大きな節目の年になった。全世界の海洋生物のカタログづくりを目指した10年間の国際プロジェクト、「海洋生物のセンサス」が終了を迎えたのだ。

「世界の海のどこに、どのような生物が、どれだけいるのかを知りたいと、ずっと思っていました。でも、それは夢だと諦めていました。それが、80を超える国から2,700人の研究者が集まることで可能になったのです。『海洋生物のセンサス』は、『ドラゴンボール』の元気玉のようなものですね」と、「海洋生物のセンサス」の日本代表を務めた藤倉克則TLは笑う。「1人1人のエネルギーは小さいけれども、みんなのエネルギーが集まると巨大なパワーを持つ。ヒューマンネットワークの重要性を再認識しました」

藤倉TLは、「海洋生物のセンサス」10年間の特筆すべき成果として、次の3つを挙げる。既知の海洋生物の種数が約23万種から25万種に増加したこと。新種の可能性が高い約6,000種を発見し、そのうち1,200種について新種として論文に記載されたこと。そして、3万5000種の遺伝子解析を行い、生物の分類の手助けをしたこと。

一方で、藤倉TLは「海洋生物のすべてが分かったわけではありません」と指摘する。日本

近海だけでも10万種を超える未知の種がいる。全海洋では途方もない数の未知種がいることは容易に想像できるが、「海洋生物のセンサス」でも未知種の数の評価はできないほどであった。「海の面積のうち20%以上は、いまだに生物のデータがまったくありません。特に、東太平洋、南極海、大西洋には、データがない広大な海域が残されています。深さで見ると、中深層のデータがとてつもない。海の生物を丸ごと知るには、この空白域を埋めていく必要があります。2011年は新しい『海洋生物のセンサス』の始まりの年でもあるのです」

私たちは、ほかの生物に頼って生きている

なぜ生物の多様性が大切なのですか——北里洋領域長は、この質問をよく受けるという。「私たちヒトは、さまざまな生物に頼って生きています。食糧や水、木材、繊維、燃料、そして酸素も、生物たちによってもたらされたものです。私たちが地球上で生きていくためには、生物の多様性を維持していくことが不可欠なのです」

生態系によってもたらされる、ヒトが生きていくために必要で役立つものを、「生態系サービス」と呼ぶ。藤倉TLは、「私たちは、深く考えることなく生態系サービスを利用してきました。そして気が付いたときには、生物多様性は大きく損なわれていたのです。生態系サービスを受け続けるためにはどうしたらよいか。それ

を考えると、私たちが『海洋生物のセンサス』の次にやるべきことが見えてきます」

機能を理解し、キーストーン種を探す

どの種類が、いつ、どこに、どれだけいるのかについては、「海洋生物のセンサス」で情報が集まってきた。「次にやるべきことは、機能の理解です」と、北里領域長と藤倉TLは口をそろえる。生物たちは、「食べる—食べられる」という食物連鎖だけでなく、住み家を提供したりされたり、複雑な相互依存の関係を築いている。相互依存の関係を明らかにし、ある生物が生態系のなかのどの位置にあり、どのような役割を担っているかを理解することが求められているのだ。

「生物たちの相互依存の関係を図で書くと、線が複雑に絡み合い真っ黒になってしまいます。そのなかの生物が1種くらい絶滅しても生態系には影響がないのではないか、と思われるかもしれませんが、それは間違いです」と北里領域長はいう。「生態系には、鍵を握っている“キーストーン種”があります。その種がいなくなると、生態系が大きく変わってしまう。しかし私たちは、どの種がキーストーン種なのか、まだ知りません。1種1種の機能を明らかにしていくことで、キーストーン種を見つけ出すことが必要です」。生物種数は膨大で、その関係は複雑だ。気が遠くなるような作業だが、バイオロギングや、栄養段階を決めることができるアミノ酸の窒素

取材協力
JAMSTEC 海洋・極限環境生物圏領域
北里 洋 領域長
藤倉 克則 チームリーダー

同位体比の解析、たとえば深海に生きるクラゲに付着する生物をその場で観察できる観測機器などが、その解明に大きく貢献すると期待されている。

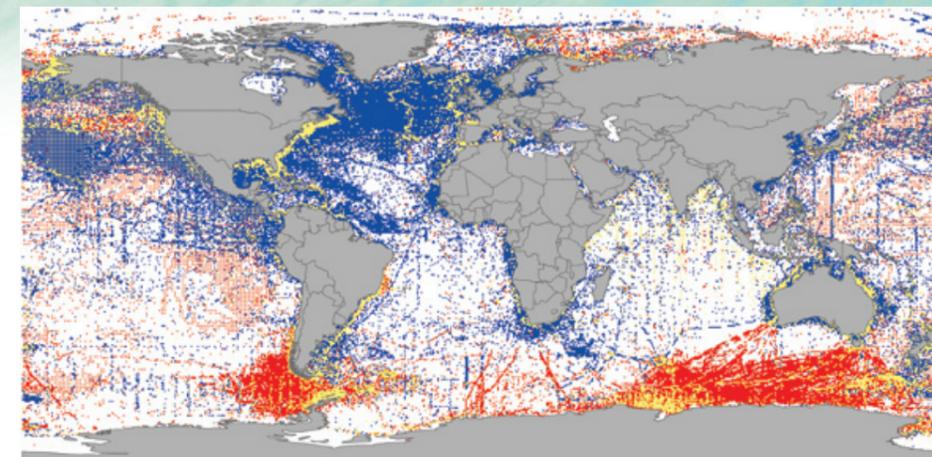
未来の生態系を予測する

「将来、海にはどのような生物が生きられるのかを予測すること。それが、『海洋生物のセンサス』でも掲げていた、私たちの最終目標です」と藤倉TLはいう。「そのために必要なのが、データベースの統合です」

現在、日本周辺の海洋生物の情報は、JAMSTECのBISMaLや『海洋生物のセンサス』で構築したOBISに集められている。現在は出現記録が中心だが、遺伝子や栄養段階、移動、個体数、機能、相互依存の関係にある生物など、あらゆる情報を1つのデータベースに統合する必要があると、藤倉TLは考えている。「それによって、地球環境の変化や人類活動によって生態系がどのように変化するかを予測することが可能になります。未来を予測できれば、何をどのくらい利用してもよいか、保護すべきものはどのくらいかが見えてきます」

生物多様性をいかに守るか

2010年10月には、名古屋で生物多様性条約第10回締約国会議が開催され、JAMSTECの研究者・職員も多数参加した。今回の会議では、遺



「海洋生物のセンサス」によって得られた観測データ

12万種、3000万の分布情報を表している。青は以前からあったデータを集約したもの。赤と黄色は「海洋生物のセンサス」によって新たに加わったデータ。情報は大幅に増加したが、東太平洋、南極海、大西洋にデータがない広大な海域がある (提供: CoML)

伝資源へのアクセスと利益分配に関する「名古屋議定書」と、「新戦略計画(愛知目標)」が採択された。「愛知目標」には、「2020年までに生態系が強靱で基礎的なサービスを提供できるよう、生物多様性の損失を止めるために、実効的かつ緊急の行動を起こす」として、海域の10%を海洋保護区にすることが盛り込まれている。

海洋保護区の選定基準は7つ。①ユニークさ・珍しさ、②生物の成育に重要、③危機にひんしている生物種や生息地、④損傷を受けやすい・壊れやすい・回復に時間がかかる、⑤生産性が高い、⑥多様性が高い、⑦自然性である。藤倉TLは、「日本近海では、あらゆる海域が、いずれかに当てはまっています」という。「どの海域を海洋保護区とするべきか、その選定には『海洋生物のセンサス』で得られた情報も役に立つでしょう。海洋保護区は、一切手を

触れてはいけないとするのか、調査は行ってよいとするのかも、議論が必要です。私は、海洋保護区の生物を集散的に調査して情報を集め、ほかの地域の理解に役立てていくべきだと考えています」

なぜ生物多様性の研究をするのですか——北里領域長の答えはこうだ。「なぜ地球は多様な生物に満ちあふれた惑星になったのか、それを知りたいのです。そのためには、生命の起源を明らかにすることも必要です。JAMSTEC海洋・極限環境生物圏領域では、世界中の海に点在する極限環境の生物群集を調査する世界一周航海を計画中です。新しい生物多様性の世界が見えてくると期待しています」

海洋生物の多様性研究の新たな10年が始まっている。 **BE**

「海洋生物のセンサス」で発見された生物たち (提供: CoML)



ヨスジフエダイの仲間 (太平洋クリスマス島周辺)
©Philip A. Sacks, Sea Education Association



さまざまな多毛類
©Tetsuya Kato/NaGISA



ニチリンヒトデの仲間
©NaGISA-Casey Debenham, University of Alaska Fairbanks



イカの仲間 (リザード島周辺)
©John Huisman, Murdoch University



エビの仲間
©Tin-Yam Chan, National Taiwan Ocean University, Keelung



ソコダラの仲間
©MAR-ECO/Oystein Paulsen



アイスフィッシュの仲間
©J. Gutt, AWI/Marum, University of Bremen Germany



イバラカンザシの仲間 (リザード島周辺)
©John Huisman, Murdoch University



イシガニの仲間
©Hans Hillerwaert



等脚類エビメラ (南極半島周辺)
©Cédric d'Udekem d'Acoz, RBINS



ヒドロクラゲ (北極海)
©Kevin Raskoff, Monterey Peninsula College



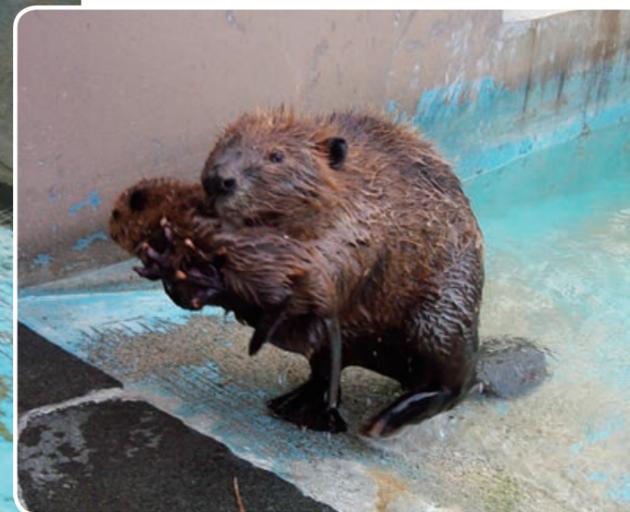
スキッドワーム
© Laurence Madin, Woods Hole Oceanographic Institution

震災の日、ビーバー一家のこと —— アメリカビーバー

赤ちゃんを両方の前足でお姫様抱っこして歩くお父さん。お父さんの体長は、およそ100cm。ビーバーの尻尾は平たく、その長さは20～30cmにもなる。お父さんは面倒見がよく、赤ちゃんをいつも小屋へ運んだ



食事のビーバー一家。左から2歳の末っ子、8歳のお母さん、4歳の双子のお兄さんたち、5歳のお姉さん。草食で、餌を両方の前足で持って食べる。水族館では、家族一緒に仲よく食事する



小屋のなかで授乳するお母さん。ビーバーたちは、餌にもなるヤナギの枝を歯で裂いて細かくし、小屋の床に敷き詰める

お母さんと5歳のお姉さん、4歳の双子のお兄さん、2歳の双子の6人家族。これが水族館にいた震災前のビーバー一家だった。お父さんは去年、亡くなってしまった。

マリニア松島水族館は、31年前からアメリカビーバーを飼育している。現在の一家は3家族目だ。ビーバーは、大きくて丈夫な門歯（前歯）を持ち、かじり付いて木を倒す。自然で暮らすビーバーは切り倒した木などを使ってダムをつくり、川の流れをせき止めて水辺を広げる。そこに巣をつくって家族で暮らしている。また、哺乳類では珍しい一夫一妻制だ。泳ぐのに適した水かきのある後ろ足、平たい尻尾。水族館には、ビーバーが泳ぐプールと、寝たり休んだりする小屋がある。

まだお父さんがいたころ、生まれて数日しかたっていない赤ちゃんが、プールに浮いていたことがある。大きさはわず

か20cm程度。溺れると思い、すくい上げようと慌てて網を取ってくると、赤ちゃんはお父さんに“お姫様抱っこ”されて小屋に戻る途中だった。お父さんは抱っこが上手だった。家族はとても仲がよく、いつも全員で幼い子どもたちに注意を払っていた。

震災の日、3月11日。松島も甚大な被害を受けた。津波は容赦なく一帯を襲った。水が引いた後、薄暗いなか戻ってくると、水族館も泥とがれきに覆われていた。言葉に言い表せない、ひどい状況だ。しかし、この時点でビーバー一家の何頭かは、泥水で満杯になったプールで、元気そうに泳いでいた。

食が細くなり始めたのは、お母さんが最初だった。その後、4歳のお兄さんのうちの1頭と2歳の双子の様子もおかしくなった。プールに入らないように、小屋に隔離。小屋にストーブを入れ、暖かくする。注射や点滴などの処置。必死の

介護もむなしく、まずお母さんが、続いてお兄さんが亡くなった。それから1週間くらいがたち、点滴では取り切れない栄養分を流動食にして口からチューブで流し込んだが、間もなく2歳の双子のうちの1頭が息を引き取った。低体温症と脱水症状。この2つが主な死因だ。ビーバーは泳ぐ前、また泳いだ後に毛づくろいをし、皮膚はぬらさないようにしている。いろいろなものが入り交じった泥水のなかにいたことで、毛の保温作用がうまく保てなかったようだ。また、淡水で暮らしているビーバーが塩分を含んだ海水を飲んだことが、おそらく脱水症状につながった。

お母さんが亡くなり、年長者になったお姉さんは、心なしか気が強くなった。残った家族を守ろうとしているのだろうか、威嚇行動が目立つ。動物の気持ちは分からないけれど、それぞれが何かを感じているのだろう。

水族館では、ほかにも多くの動物たちが震災の犠牲になった。それでも、他県の水族館の支援もあり、すべての水槽に生きものが戻り、4月23日再開にこぎ着けた。3月11日、ついでた生命。このときに起きたことを決して忘れず、前へ進む。そんな人間の決意をよそに、たった3頭になってしまっても、ビーバー一家はほほんとしていて、一見いつもと変わらない。いつもと変わらない日々のいとおしさを体現しているみたいだ。

取材協力：佐藤由美子 飼育員・田中悠介 獣医師／マリニア松島水族館

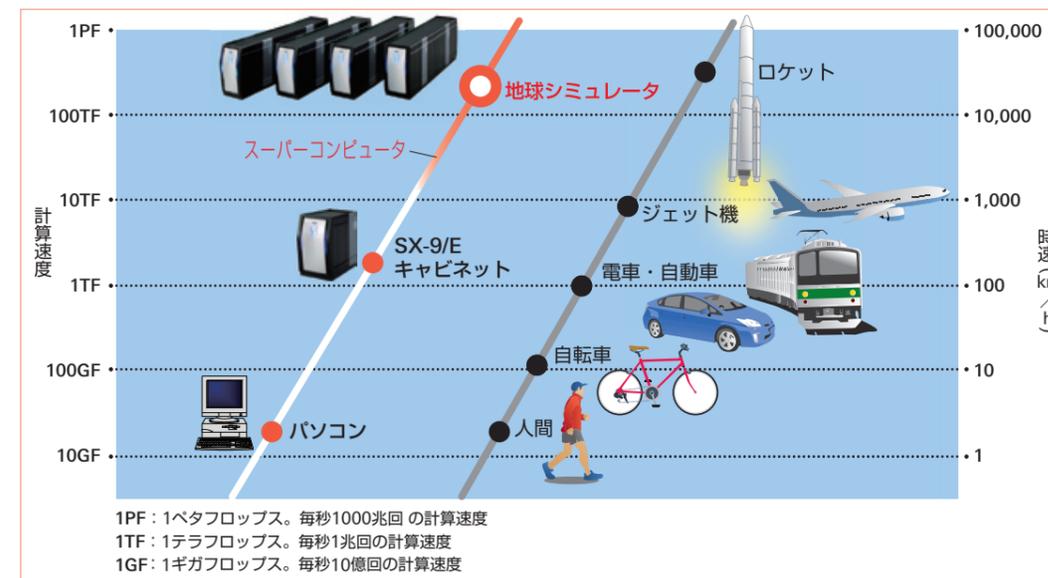
■ Information: マリニア松島水族館
〒981-0213 宮城県宮城郡松島町松島字浪打浜16
TEL 022-354-2020 FAX 022-354-5304
URL <http://www.marinepia.co.jp/index.html>



図1 地球シミュレータ
2010年、HPCチャレンジアワードの高速フーリエ変換の総合性能 (Global FFT) で世界1位を獲得した。SX-9/Eというコンピュータ160台が超高速ネットワークで接続されている

図2 コンピュータの計算速度の比較

普通のパソコン (10~20ギガフロップス) の計算速度を人間が歩く速度にたとえると、地球シミュレータを構成するSX-9/Eは、キャビネット (筐体) 1個あたり1.6テラフロップスなので、車や電車ぐらいの速さになる。地球シミュレータ全体は131テラフロップスなので、ロケットほどの超高速である



地球シミュレータとスピード競走

2010年12月18日 第122回地球情報館公開セミナーより

2010年11月、スーパーコンピュータの性能を評価する

「HPCチャレンジアワード」の一部門で、「地球シミュレータ」が世界第1位を獲得しました。

地球シミュレータが世界各国の巨大なコンピュータをものぐ実力を持っていることが、あらためて認められた瞬間でした。

スーパーコンピュータの特色やスピード競走の歴史、そして地球シミュレータの実力の秘密をご紹介します。

で大量の荷物を一度に運ぶように、膨大なデータをまとめて計算することができます。天気予報や航空機開発など、大規模な計算を必要とする分野に適しています。地球シミュレータは、このベクトル型です。

一方、小さいCPUを数多く使って同時に計算するスカラ型というものもあります。スカラ型は、乗用車で小さな荷物をあちこちに配るように、データを細かく分けて順番に計算する分野に向いています。アメリカ・オークリッジ国立研究所のJaguarなどが、スカラ型です。

スカラ型に演算に特化した部品を加えたものが、アクセラレータというタイプです。特定の現象を速く処理するためのもので、応用範囲は限られますが、驚異的な性能を出します。

こうしたそれぞれの特徴に応じて、スパコンは適材適所に使い分けられています。

地球を丸ごと計算するために

日本では、1993年に航空宇宙技術研究所 (現・宇宙航空研究開発機構) の数値風洞 (NWT) が誕生しました。航空機の機体周りで起こる空気の流れなど、従来は巨大な風洞で模型を使って調べていたことが、このNWTによってシミュレーションで解析できるようになりました。こ



地球シミュレータセンター
情報システム部長
古井利幸

ふるい・としゆき。1949年、静岡県生まれ。1971年、信州大学工学部卒業。スーパーコンピュータの開発・販売などを経て2009年、海洋研究開発機構に入所。現在、地球シミュレータセンターで運用統括と海洋研究開発機構のITのインフラ整備を担当。専門は計算機工学

「地球シミュレータ」は、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の横浜研究所にあります (図1)。研究所の一般公開日には、地球シミュレータが設置してある計算機室に入って見学する探検ツアーが行われます。この探検ツアーは非常に人気が高く、毎年定員の10倍もの申し込みがあります。今回はこの探検ツアーのように、外から見ただけではなかなか分からない、地球シミュレータの内側までご紹介します。

スーパーコンピュータとは

スーパーコンピュータ (以下、スパコン) とは、その時代でトップクラスの性能を持つコンピュータです。スパコンの計算速度がどれほど速いか、普通のパソコンと比較してみましょう (図2)。普通の人を使うパソコンの計算速度は10~20ギガフロップスです。フロップスとはコンピュータの計算速度を表す単位で、10ギガフロップスのコンピュータは1秒間に100億回の計

算ができます。地球シミュレータの性能は131テラフロップスで、1秒間に131兆回もの計算ができる性能を持っています。普通のパソコンを人間の歩く速さにたとえると、地球シミュレータはロケットぐらいの速さになります。

シミュレーションは時空を超える

スパコンは、高速な科学技術計算を必要とするシミュレーションに使われます。シミュレーションとは、大気や水の流れなどの現象を数式で表し、コンピュータで計算して、仮想的に実験を行うことです。従来は、理論の正しさを実験で検証し、実験から理論を導き出していました。しかし最近では、シミュレーションを使って理論を実証したり、実験で明らかになったことをシミュレーションで再現したりしています。シミュレーションはあらゆる分野の研究開発の基盤となるもので、理論と実験に並

ぶ第3の科学、計算科学と呼ばれています。

シミュレーションの利点は、実験条件を数値で入力するので、対象物の大きさや時間などの条件を自由に変えられることです。そのため、目に見えないものや実験が不可能なものでも扱うことができます。たとえば大きいものでは銀河の衝突、小さいものでは細胞のなかのタンパク質の動きなどもシミュレーションが可能です。時間も思いのままに延長・短縮できるので、1兆分の1秒といった瞬時の現象も検証できます。

現在の現象は実際に実験で検証することもできますが、未来を予測することはシミュレーションでなければできません。時空を超えて未来や過去の現象を仮想的に実験できることが、シミュレーションの大きな特徴です。

こうしたシミュレーションは、社会のあらゆる場面で活用されています。最も身近な例が天気予報です。100年先の気候予測や、地球内部のマントル対流の研究に

もシミュレーションが使われています。最近増えてきたのが、薬の設計です。タンパク質とぴったり結合してその機能を変えることができる構造の化合物を設計し、特効薬をつくらうとしています。車など「ものづくり」の分野でも、試作品をつくらずにシミュレーションで性能評価を行うのが最近の傾向です。開発にかかる費用と時間を大幅に削減できます。

スーパーコンピュータの進化

半導体技術の進歩によってCPU (中央演算処理装置) の性能が向上しただけでなく、多くのCPUで同時に計算する並列処理の手法などが開発され、スパコンは飛躍的に進化しました。10年前のスパコンは、現在ではポケットに入るほどです。さらに利用分野の拡大に応じて、計算処理方法や特色が異なる多様なスパコンが生まれました。

ベクトル型のスパコンは、大型トラック



の革新的なスパコンを開発した三好甫氏が、1997年当時のスパコンの1,000倍の性能を持つスパコンをつくらうと計画したのが地球シミュレータです。

シミュレーションでは、対象を小さな領域に区切って計算します。小さく区切るほど精度のよいシミュレーションができますが、計算量が増えてしまいます。当時のスパコンの性能では、地球の大気の流れを計算するには、縦、横、高さを100km単位で区切るのが限界でした。天気予報の場合、東京の100km隣というと山梨あたりなので、「東京都は全部晴れ」という予報になってしまいます。10km単位で計算できれば、「新宿は晴れ、三鷹は雨」といえるようになります(図3)。100km単位を10km単位にするには、10倍の性能が必要です。縦、横、高さすべ

てを10倍にするためには10の3乗、つまり1,000倍の性能が必要になるわけです。

また日本の天気をシミュレーションする場合、当時は日本周辺だけ詳細なデータを使っていました。しかし三好氏は、本当の意味でシミュレーションをするには地球全体の詳細なデータが必要だと考えました。それだけの性能と主記憶装置(メモリ)を持ち、地球全体を丸ごと計算できるスパコンを目指して、1997年から地球シミュレータの設計が始まりました。

地球シミュレータ、誕生!

地球シミュレータは2002年に完成し、TOP500というスパコンの性能比較ランキングでその年の第1位に輝きました(図4)。TOP500はLinpackというプログラムを計算して性能を競います。地球シミュレータは、前年度1位だったアメリカのASCII Whiteを5倍も引き離しました。

しかしアメリカがもっと驚いたのは、地球シミュレータがAFESという気象予測のプログラムで非常に高い実効性能を出したという点でした。コンピュータには理論上のピーク性能があります。計算性能を評価するために作られたLinpackでは、理論上のピーク性能に近い性能が出ます。しかし、一般的なプログラムを使ったときの性能、実効性能は、データ通信時間のロスなどのために理論上のピーク性能よりも低くなります。

当時、AFESの実効性能はピーク性能の20~30%だったのに対し、地球シミュレータは65%を達成したのです。この衝撃的なニュースは、アメリカに先んじて人類初の人工衛星となった旧ソ連のスポーツ用品になぞらえ、「コンピュートニク」と報道されました。

生まれ変わった地球シミュレータ

2009年に、地球シミュレータの左側半分を新しい機械に入れ替え、システムを更新しました。新しい地球シミュレータは、SX-9/Eというコンピュータ(ノード)160台を超高速ネットワークでつないだもので、ノードは2台ずつキャビネット(筐体)に収められています。ピーク性能は131テラフロップスと、以前の3倍以上になりました。これは普通のパソコン約6,000台分に相当します。

特にCPUが進化し、1個のCPUの性能が8ギガフロップスから102.4ギガフロップスと13倍近くも上がりました。地球シミュレータのCPUは、数は少ないですが、最新のスカラ型コンピュータと比較しても、はるかに高い性能を誇っています。

さらに、この高精度なCPUに見合った強力なデータ転送性能も備えています。あるスカラ型コンピュータと比較すると、CPU性能は地球シミュレータの方が1.4倍も高く、しかもメモリからCPUへのデータ転送性能は8倍もありました(図5)。

またCPUの性能が高くても、ノード間のデータ通信に時間がかかると、高い実効性能は出ません。地球シミュレータは、ノード間の通信性能が高く、あるスカラ型コンピュータの100倍以上の速さを持っています。ノード間をつなぐケーブルも光ファイバーにし、従来の約10分の1の長さに短縮しました。

このようなCPUの計算処理能力、CPUへのデータ転送性能、そしてノード間の通信性能などによって、地球シミュレータは小規模でも実効性能が高いスパコンになりました。

スーパーコンピュータ性能競走

TOP500はスパコンの性能を競うものですが、私は「勝ち負け」ではなく「スピードレース」だと考えたいので、「競争」ではなく「競走」という言葉を使っています。2010年のTOP500は、中国の天河-1Aが1位になり、4位に東京工業大学のTSUBAME2が入りました(図4)。地球シミュレータは更新時の2009年には22位に回復しましたが、残念ながら2010年は54位まで落ちてしまいました。

TOP500では、10年間に約1,000倍の比率でコンピュータの性能が進化しています。このまま行けば、2012年には10ペタフロップス(毎秒1京回計算する速度)を達成するコンピュータが現れるでしょう。日本の次世代スパコン「京」は、まさにこの10ペタフロップスを目標とし、2012年の完成を目指して開発が進められています。

スパコンの電力効率を競うGREEN500というコンテストもあります。TOP500の基準となるLinpackの値をシステムの消費電力で割り、1ワットあたりどれだけ計算できるかを競っています。1位はアメリカの実験機でしたが、実用機としては

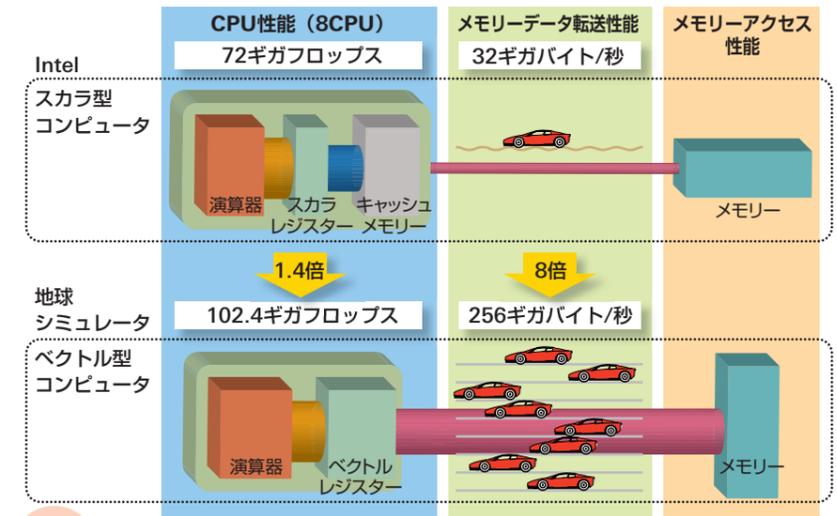


図5 CPU性能とデータ転送性能の比較
スカラ型コンピュータ(Intel)と地球シミュレータを比較すると、メモリーとCPU間のデータ転送性能は地球シミュレータの方が圧倒的に速い。この強力なメモリーデータ転送性能が、実効性能を引き上げるポイントとなる

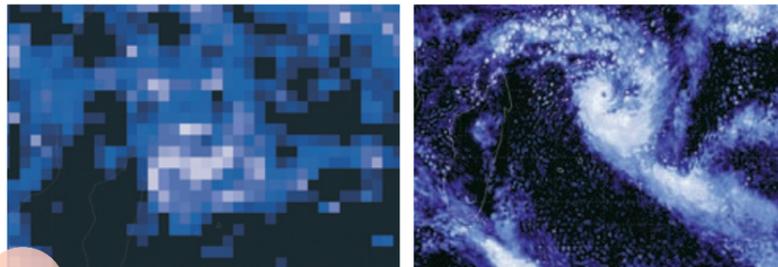


図3 地球シミュレータによるシミュレーションの例
地球の表面にある水蒸気の動きをシミュレーションした画像。100km単位の計算では、台風のかたちは確認できない(左)。地球シミュレータによって10km単位での計算が可能となり、台風の目の構造などが詳細に再現できるようになった(右)

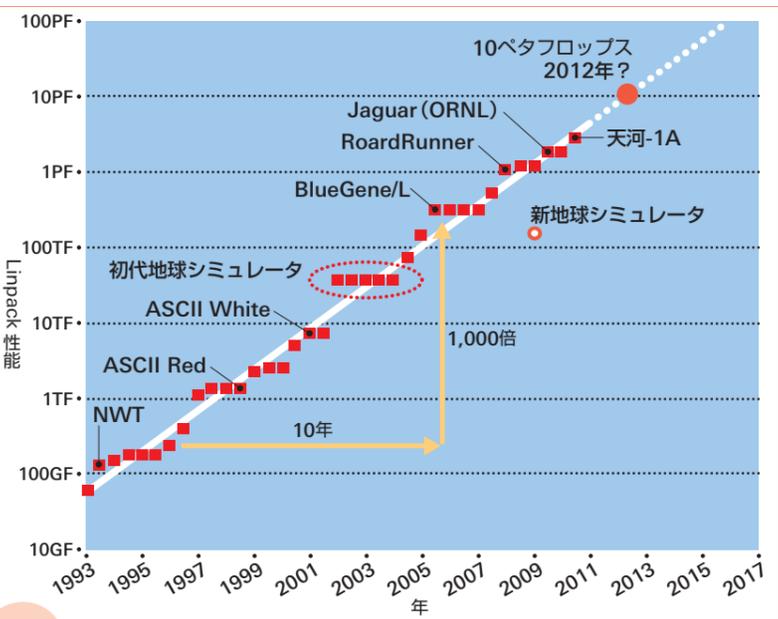


図4 TOP500の歴史
TOP500で1位を獲得したコンピュータの推移。1993年には航空宇宙技術研究所の数値風洞(NWT)が登場した。初代地球シミュレータは2002年に1位になり、2年半の間、その座を守り続けた。その後順位は下がったが、2009年に機能を更新して22位に回復した

TSUBAME2が1位でした。

高い実効性能で世界1位を獲得

Linpackはピーク性能に近い性能が出るプログラムなので、この値がそのスパコンの本当の実力といえるかという問題が以前から指摘されていました。この点を補うため、コンピュータのさまざまな性能を評価するHPCチャレンジが始まりました。これは演算やメモリーの性能、システムの通信性能など28項目で性能を競うものです。地球シミュレータを構成するSX-9/Eは、28項目中19項目で世界最高性能を達成しました。このように地球シミュレータはノード単体では強いのですが、システム全体の規模が必要な計算ではなかなか勝つことができませんでした。

HPCチャレンジの28項目のうち4項目が、「HPCチャレンジアワード」として表彰されます。このなかで、ノード間通信性能を含めた高い計算性能が必要とされる項目があります。それが、2010年に地球シミュレータが世界1位となった高速フーリエ変換です。高速フーリエ変換は、主に気象予測や気候変動予測など、地球の大気や海の流れを解析するのに使われる科学技術の重要な計算手法です。

この高速フーリエ変換で、地球シミュレータは世界最高速の11.88テラフロップス、実効性能比率で9.1%を記録しました。2位のアメリカのJaguarは10.7テラフロップスでしたが、実効性能比率では0.52%

です。つまり実効性能比率で比べると、地球シミュレータはJaguarの17.5倍も効率のよい性能を持っているのです。

Jaguarはピーク性能では2,045テラフロップスもある巨人で、地球シミュレータは131テラフロップスしかない小人のような装置です。しかし高速フーリエ変換の計算性能では、地球シミュレータの方が逆に10%も上回っています。このことから、地球シミュレータがいかに効率のよい装置であるかが分かります。

世界に並んで活躍できる実力

スパコンは日本の技術開発力を支える屋台骨であり、研究に不可欠なインフラです。事業仕分けで議論されたのは、TOP500が1位か2位かということでした。しかしTOP500の順位だけでは、スパコンの性能は測れません。議論しなければならなかったのは、実効性能の高さです。地球シミュレータは小粒ですが、HPCチャレンジアワードでは、日本で唯一、世界1位を取りました。地球シミュレータは高性能で使いやすく、世界に並んで活躍できる実力を持っています。

現在、地球シミュレータは、主に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次報告書作成に向けて、地球温暖化のシミュレーションを行っています。さらに地震や津波の高精度シミュレーションによって防災や減災にも貢献するなど、皆さんの日々の暮らしに役立っています。 BE

編集後記

今回の特集「海——生物多様性のゆりかご」は、いかがだったでしょうか？ 昨年後半は、10月に名古屋市で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）の主要会合関連のニュースが多く報じられました。本特集では、海洋生物の多様性に関して詳しく解説しています。

『Blue Earth』の読者の皆さまのなかには、新聞各紙で報じられたニュース「日本近海、生物の宝庫——生物多様性調査・海洋機構など」を目にされた方もいると思います。この発表を行った研究チームは、国際的な取り組みの一環として、海洋研究開発機構（JAMSTEC）や大学の研究者ら約50人体制で、日本の排他的経済水域（EEZ）の内側の生物について1953年以降の膨大な文献を調べ、データベース化しました。全世界の海洋生物種は約25万種が知られていますが、日本近海の海洋生物は計3万3629種に上り、全体の約13.5%を占めるとのこと。調査された26海域中、日本近海が1位だそうです。地球の全海洋容積でたった0.9%しかない日本のEEZ内に多様な種が存在することになり、まさに日本近海は生物多様性のゆりかごといえます。

環境省は、EEZ内の深海や干潟の生物の生息状況を明らかにすべく、海洋版「絶滅危惧種リスト（レッドリスト）」を作成して4～5年後に公表し、それにより海洋保護区の指定などにもつなげたいとしています。このような取り組みに対しても、本誌22～23ページで紹介したBISMAL（海洋生物情報システム）が活用されており、今後さらなる拡充が期待されています。読者の皆さまもこの機会にぜひ<http://www.godac.jp/bismal/j/> にアクセスして、世界一豊かな海の珍しい海洋生物たちをじっくりとご覧になってみてはいかがでしょうか？（T. T.）

『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.045-778-5406 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。

賛助会（寄付）会員名簿 平成23年5月15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	川崎重工業株式会社
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
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	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	株式会社ケンウッド
沖電気工業株式会社	株式会社構造計画研究所

神戸ペイント株式会社	株式会社損害保険ジャパン
広和株式会社	第一設備工業株式会社
国際気象海洋株式会社	大成建設株式会社
国際警備株式会社	大日本土木株式会社
国際石油開発帝石株式会社	ダイハツディーゼル株式会社
国際ビルサービス株式会社	太陽日酸株式会社
五洋建設株式会社	有限会社田浦中央食品
相模運輸倉庫株式会社	高砂熱学工業株式会社
佐世保重工業株式会社	株式会社竹中工務店
株式会社サノヤス・ヒシノ明昌	株式会社竹中土木
三建設備工業株式会社	株式会社地球科学総合研究所
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	中国塗料株式会社
JFEアドバンテック株式会社	株式会社鶴見精機
財団法人塩事業センター	株式会社テザック
シナネン株式会社	寺崎電気産業株式会社
清水建設株式会社	電気事業連合会
シュルンベルジェ株式会社	東亜建設工業株式会社
株式会社商船三井	東海交通株式会社
社団法人信託協会	洞海マリンシステムズ株式会社
新日鉄エンジニアリング株式会社	東京海上日動火災保険株式会社
新日本海事株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社
須賀工業株式会社	東北環境科学サービス株式会社
鈴鹿建設株式会社	東洋建設株式会社
スプリングエイトサービス株式会社	株式会社東陽テクノカ
住友電気工業株式会社	東洋熱工業株式会社
清進電設株式会社	株式会社中村鉄工所
石油資源開発株式会社	西芝電機株式会社
セナーアンドバーンズ株式会社	西松建設株式会社

日油技研工業株式会社	富士通株式会社
株式会社日産クリエイティブサービス	富士電機システムズ株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	物産不動産株式会社
日本SGI株式会社	古河電気工業株式会社
日本海洋株式会社	古野電気株式会社
日本海洋掘削株式会社	松本徽章株式会社
日本海洋計画株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海洋事業株式会社	マリンサポート株式会社
社団法人日本ガス協会	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本興亜損害保険株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
日本サルヴェージ株式会社	株式会社マルトー
社団法人日本産業機械工業会	三鈴マシナリー株式会社
日本水産株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本電気株式会社	三井造船株式会社
日本ヒューレット・パカード株式会社	三菱重工業株式会社
日本マントル・クレスト株式会社	株式会社三菱総合研究所
日本無線株式会社	株式会社森京介建築事務所
日本郵船株式会社	八洲電機株式会社
株式会社間組	郵船商事株式会社
濱中製鋼工業株式会社	郵船ナブテック株式会社
東日本タグボート株式会社	ユニバーサル造船株式会社
株式会社日立製作所	
日立造船株式会社	
株式会社日立プラントテクノロジー	
深田サルベージ建設株式会社	
株式会社フジクラ	
富士ゼロックス株式会社	
株式会社フジタ	

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23巻 第2号（通巻112号）2011年4月発行

発行人 山西恒義 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 満澤巨彦 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 有限会社フォトンクリエイト
 取材・執筆・編集 立山 晃 (p1) / 鈴木志乃 (p2-25) / 坂元志歩 (p26-27) / 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 沖縄県名護市宇豊原224番地3 TEL. 0980-50-0111 (代表)

『ハガキにかこう 海洋の夢コンテスト』

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

海洋への関心が高まっている今日、未来を担う子どもたちが持つ海洋への夢やあこがれ、興味をさらに高めるために、海洋研究開発機構（JAMSTEC）では全国の児童を対象と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月下旬から1月末ごろです。第12回コンテストには、全国から2万6709点の応募がありました。そのなかから入賞作品を紹介します。コンテストに関する詳しい情報は、JAMSTECのホームページをご覧ください。これまでの受賞作品もご覧いただけます。



特別賞



アイデア部門

名護市教育委員会教育長賞

海のクーラー

沖縄県名護市立安和小学校6年
樺澤汐音



特別賞

絵画部門

南国市教育委員会教育長賞

深海火山のてっぺんで ぼくもポップコーンパーティー がしたい

愛知県大府市立大府小学校3年
鈴木俊哉



第13回
全国児童

『ハガキにかこう 海洋の夢コンテスト』

入賞作品決定！

第13回コンテストでは、2万9319作品の応募がありました。

たくさんのご応募、ありがとうございました。

審査の結果、入賞15作品・入選105作品が選ばれました。

入賞・入選全120作品は、JAMSTECのホームページでご覧いただけます。

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



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）