

海と地球の情報誌

Blue Earth

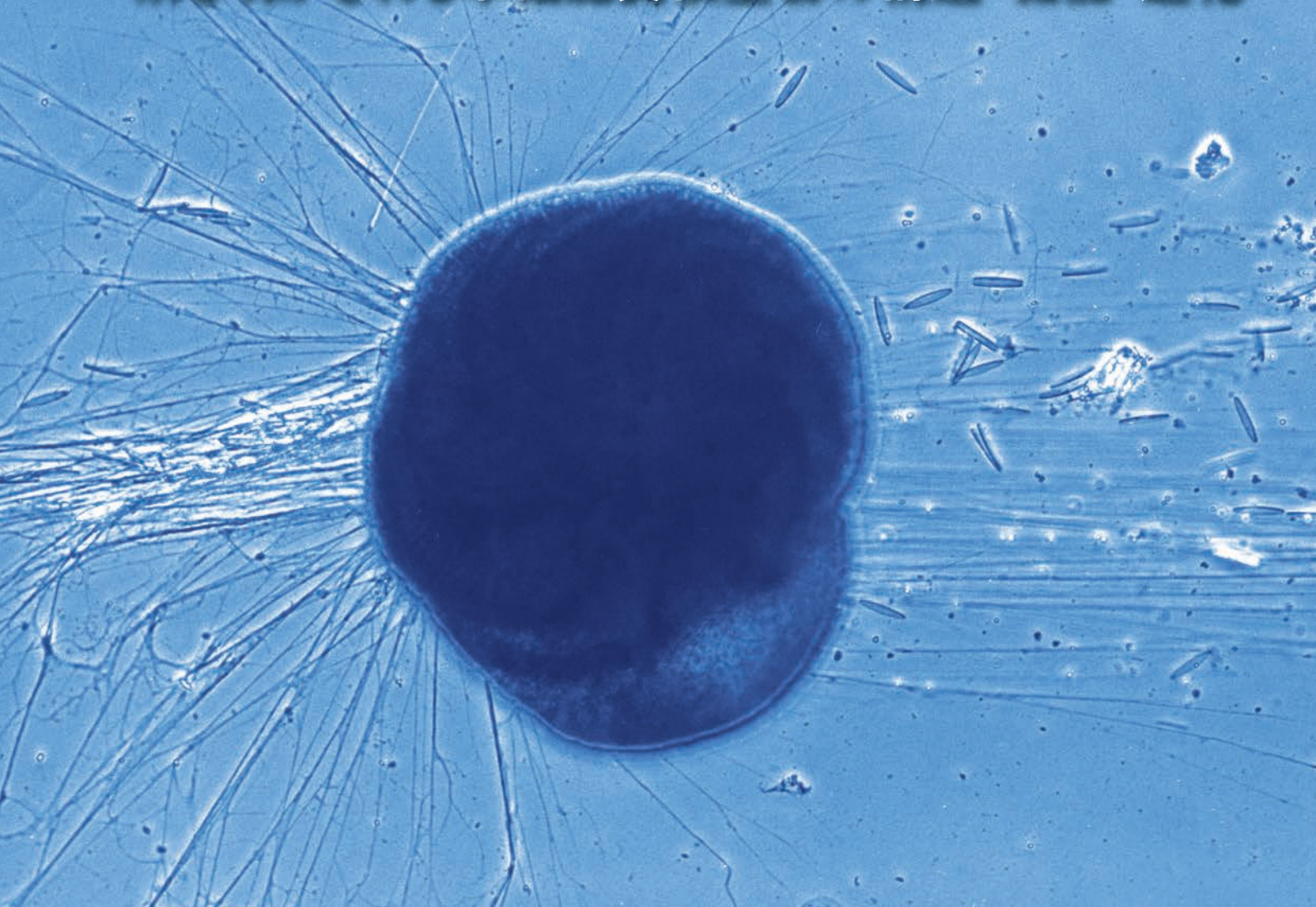
142



Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

小さな生物たちの 多様な世界を探る

解き明かされる単細胞真核生物の構造・機能・進化



- 観測データは共有財産 東北の海の「今」を「将来」のために
- 繰り返し地震活動から解き明かす 地震発生パターンの特徴

1

Close Up

西之島噴火から 大陸のでき方に迫る

特集

2

小さな生物たちの 多様な世界を探る

解き明かされる単細胞真核生物の 構造・機能・進化

20

AQUARIUM GALLERY

城崎マリンワールド 美しい海のエステティシャン

22

海拓者たちの肖像 Special

TEAMS ～海洋科学で東北復興を支援する研究者たち～

観測データは共有財産 東北の海の「今」を「将来」のために

園田 朗

東北マリンサイエンス拠点形成事業
データマネジメントユニット ユニットリーダー
地球情報基盤センター国際海洋環境情報センター
研究情報公開グループ グループリーダー代理

26

Marine Science Seminar

繰り返し地震活動から解き明かす 地震発生パターンの特徴

有吉慶介

地震津波海域観測研究開発センター
地震津波予測研究グループ 技術研究員

28

BE Room SPECIAL

海洋調査船「なつしま」「かいよう」の 輝かしい歴史を礎として 海洋科学技術のさらなる発展を目指す

30

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

PICK UP JAMSTEC

『Blue Earth』のバックナンバーなどが閲覧できる
JAMSTEC 文書カタログ

裏表紙

表紙

有孔虫が仮足を伸ばして移動・餌を採る様子。写真左側の、束にした仮足をアンカーのように強く固着して、その体を引き寄せるように移動している。写真右側に散らばっているのは主に珪藻の残骸で、この有孔虫は珪藻の殻を壊して食べている。
写真提供: 土屋正史 技術研究員 海洋生物多様性研究分野

Close Up

西之島噴火から 大陸のでき方に迫る

「たいりくプロジェクト・西之島調査報告会」より

東京の南、約1,000km離れた太平洋上で、海底火山の噴火が始まったのは2013年11月。大規模な噴火活動によって誕生した新島は、1週間あたりおよそ東京ドーム1杯分の溶岩を火口から噴出し続け、近くの旧西之島と合体してさらに拡大し、東西および南北約2km、火口付近の標高約150mにまで成長した。

激しい噴火活動が続いていた2015年6月、海洋調査船「なつしま」などによる「たいりくプロジェクト・西之島調査」が実施され、周辺の海底地形調査をはじめ、深海生物調査、深海曳航調査システム「ディープ・トウ」による海底観察・岩石採取などが約10日間にわたって行われた。海底からは、今回の噴火によるスコリア（多孔質の火山噴出物）や、西之島ができる前の古い時代に海底火山から噴出したと見られる厚いマンガン酸化物に覆われた溶岩（玄武岩）が得られた。またNHKとの共同研究により、無人ヘリコプターで火山から噴出した溶岩（安山岩）の採取にも成功した。

2015年12月11日、JAMSTEC横須賀本部で、今回の調査の報告会が開催された。調査航海で首席研究者を務めた海洋掘削科学研究開発センターの田村芳彦グループリーダー（GL）は、「今回の調査で、西之島が大陸のでき方を再現していることを、あらためて検証することができました」と話す。

139号（12～13ページ）で紹介したように、地球の表層を覆う地殻は、大陸と海洋で組成に大きな違いがある。大陸地



調査が行われた2015年6月中旬ごろの西之島の様子。(撮影:海上保安庁)

取材協力/田村芳彦 グループリーダー 海洋掘削科学研究開発センターマントル・島弧掘削研究グループ

殻の主成分が安山岩であるのに対して、海洋地殻は玄武岩だ。確かに、日本列島陸域の地殻は主に安山岩で、三宅島や八丈島など伊豆諸島の島々は、玄武岩マグマに由来することが知られている。ところが、その南に位置する小笠原諸島の西之島は、40年前の噴火後の調査で、溶岩が安山岩であることがわかった。今回の調査でも、島や海底から安山岩が採取された。なぜ太平洋上の火山から大陸地殻を構成する安山岩マグマが噴出したのか。

「謎を解くカギは地殻の厚さにあります」と田村GL。伊豆・小笠原諸島直下の地殻構造は、地震波探査によって明らかにされている。伊豆諸島では厚さが30～35kmであるのに対して、西之島を含む小笠原諸島では、地殻の厚さが15～20kmと世界でも稀な薄さだ。「厚い地殻の下でマントルがとけたマグマは玄武岩になり、小笠原のように地殻が薄く、より低圧で水が豊富な環境では安山岩マグマが生成されると私たちは考えています」と説明する。さらに、地球上に初めて陸地が生まれたころも、地殻は今ほど厚くなかったと見られており、「プレート沈み込み帯域で生成されたマグマは、現在の西之島直下のように安山岩マグマだった可能性がある」と田村GL。さらに「密度の小さい安山岩は一度生成されると沈み込むこ

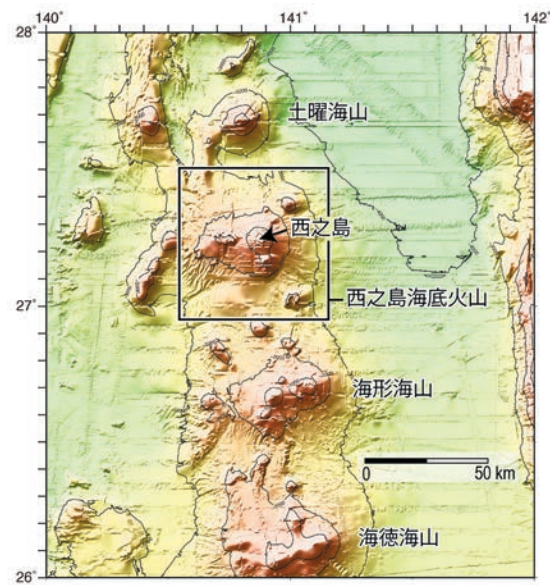


無人ヘリコプターにより、西之島の海岸から採集された溶岩(安山岩)。



伊豆・小笠原諸島の地殻構造。伊豆諸島の地殻が厚いのに対して、小笠原諸島は非常に薄いことがわかる。

「ディープ・トウ」により西之島周辺海域で採集された、今回の噴火によって噴出したと見られるスコリア(安山岩)。



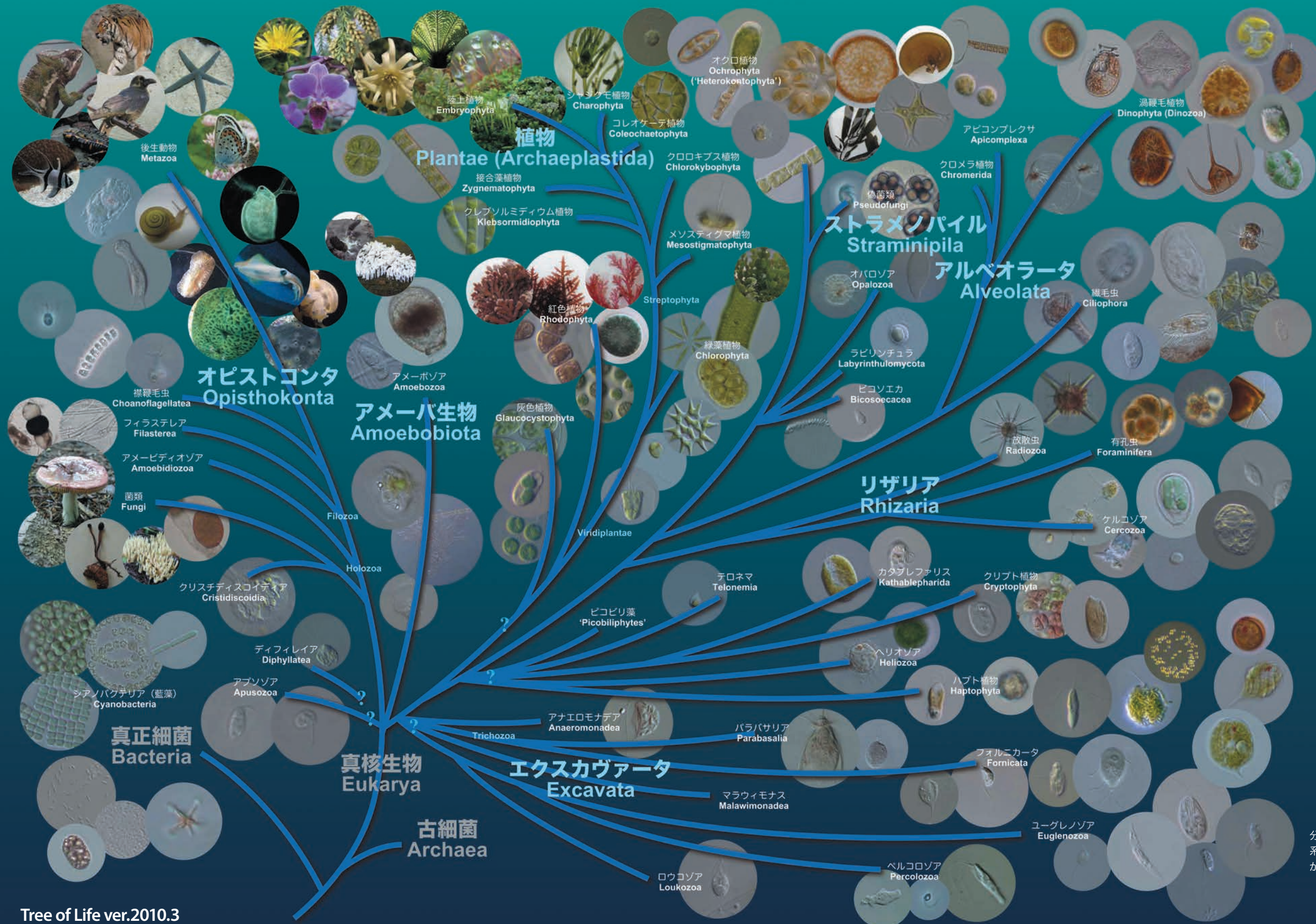
西之島周辺の海底地形。西は四国海盆、東は小笠原海盆。西之島は、水深約3,000mの海底から成長した底径約50kmの巨大な海底火山(□で囲んだ範囲)の山頂部だ。



「ディープ・トウ」により、西之島周辺海域で採集された玄武岩。まわりが厚いマンガン酸化物に覆われていることから、西之島ができる前の古い時代に海底火山から噴出したマグマと見られる。

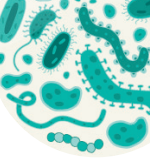
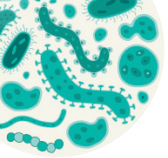
小さな生物たちの 多様な世界を探索

解き明かされる単細胞真核生物の構造・機能・進化



肉眼で見ることができない小さな生物は、すべてまとめて「微生物」と呼ばれる。大腸菌などのバクテリア(細菌)、カビなどの菌類、ミドリムシのような原生生物など、その種類は非常に多い。また、海水・土壌・淡水、さらには私たちの体内まで、微生物は地球環境のいたるところに存在し、その数も量も膨大であり、「人間はもちろん、どんな生物も微生物と無関係には生きられない」とまでいわれる。近年、顕微鏡や培養技術に加え、ゲノム解析などの分子生物学の急速な発達に伴って、謎に満ちていた微生物の世界が少しずつ明らかにされつつある。今回は、そんな微生物のなかから、ようやくその多様性が理解されはじめた原生生物(単細胞真核生物)に注目し、生態や機能・進化に関する最新の研究成果を紹介する。

分子系統学的解析に基づく、生物分類体系の一例。真核生物の世界で、原生生物がいかに多様に進化しているかがわかる。



原核生物と真核生物は どのように進化してきたか

細胞内に膜で囲まれた構造を持つ真核生物

生物は、細胞の構造から原核生物と真核生物に大別される。原核生物は、核を持たない細胞からなる生物で、自己複製のための設計図DNAがむき出しのまま細胞質基質にある。一方の真核生物は、細胞内に核をはじめ、ミトコンドリア・葉緑体など特定の機能を持つ細胞小器官（オルガネラ）と呼ばれる膜によって仕切られた構造を持つ。一般に原核細胞は直径が1〜5マイクロメートルほどで、直径数十マイクロメートルの真核細胞と比べると10分の1ほどしかない。

地球上に原始生命体が誕生したのは40〜38億年前といわれている。生物とは、膜で覆われた細胞という形を有し、エネルギー生産の仕組み（代謝系）を持ち、自己複製を行うものと定義され、初期の生物は原核生物であったと考えられている。真核生物が誕生したのは原生代（約25億年前〜約5億4200万年前）であることは確かだが、いつどのようにして生まれたのかは、まだよくわかっていない。だが、遺伝子解析技術の発達により、塩基配列の比較から、原核生物と真核生物が分岐する前に、共通祖先からバクテリア（細菌）とアー

キア（古細菌）の分岐が起きていたことが明らかにされている。さらに、真核生物が系統的にバクテリアよりアーキアと近縁であることもわかっている。アーキアは、当初、高温・高塩濃度・高圧など、極限的な環境で確認された原核生物だが、通常の高塩濃度・高圧などに生息するものも多い。ただ、同じ原核生物でも、バクテリアとはさまざまな点で違いがあることも明らかにされている。

生物にとって欠かせないのが、エネルギー生産の仕組みだ。より多くのエネルギーを効率的に生み出す仕組みを手に入れることによって、繁栄の道が開かれる。その方法を獲得したのが、酸素を活用した酸化還元反応（酸素呼吸）で飛躍的に大きなエネルギーを生み出す好気性バクテリアだ。また、シアノバクテリアは光のエネルギーを利用して有機物をつくり出す光合成という方法を生み出した。さらに、真核生物は、こうした特別な機能を持つ原核生物を自らの細胞内に取り込み、酸素呼吸をつかさどるミトコンドリアや光合成を行う葉緑体などを細胞小器官として獲得し、大きく発展したと考えられている。ミトコンドリアや葉緑体のなかにゲノム（遺伝子）が痕跡的に存在していることも、その起源がもともとは

独立した生物（つまり好気性バクテリアやシアノバクテリア）であった証拠である。

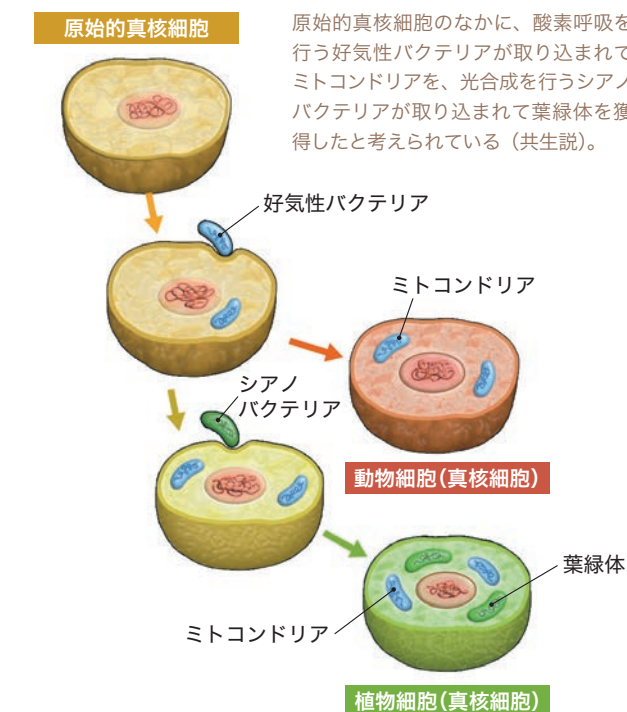
真核生物の起源を解明する糸口が見つかった!?

生物は、大きくバクテリア（細菌）・アーキア（古細菌）・真核生物の3つのドメイン（生物分類学の最も上位の階層。以下、界・門・綱・目などに分かれる）に分類される。先に紹介したように、共通祖先から原核生物がバクテリアとアーキアという2つの系統に分かれ、後にアーキアと真核生物に分岐したとされる。だが、真核生物がいつどのようにして誕生

したのか、その起源は不明のままだ。そうしたなか、2015年に発表された最新の研究で、アーキアのある系統から真核生物が生まれたのではないかとする説が唱えられている。

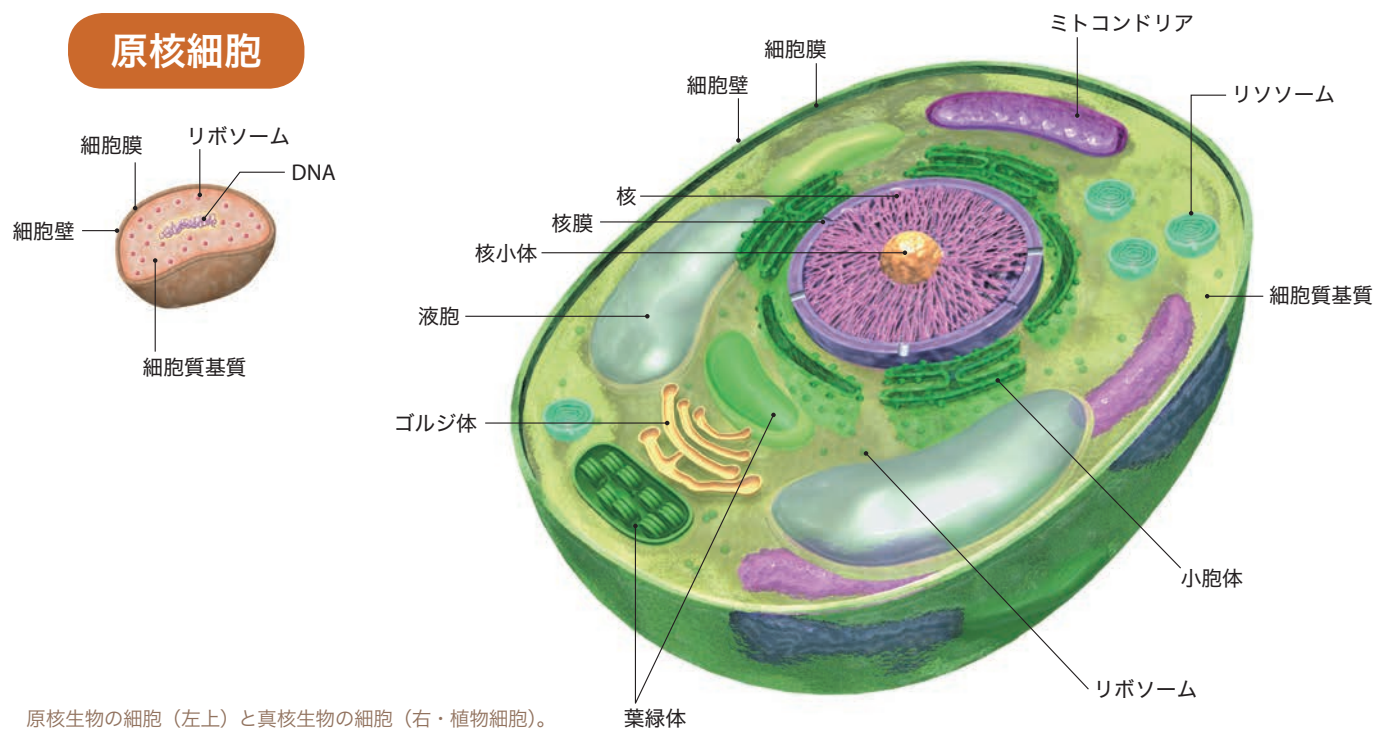
その根拠となる発見は、2010年に採取された北極海（北極中央海嶺）の海底熱水域周辺のコア試料からもたらされた。堆積泥のなかから、メタゲノム解析と呼ばれる手法でロキアーキオータと名付けられたアーキアの存在が示唆された。メタゲノム解析は、さまざまな微生物が含まれる環境試料を丸ごと遺伝子解析し、得られた遺伝子情報をもとに微生物集団を明らかにする解析手法で、分離・培養が困難な新たな生物が見つかる可能性がある。ロキアーキオータも細胞そのものは培養されていないが、メタゲノム解析により5,000を超える遺伝子を含むゲノムが確認され、そのなかに真核生物特有の構造や機能を生み出すために必要な遺伝子が数多く含まれていることがわかった。今後、さらにロキアーキオータの研究が進めば、真核生物の起源をたどる新たな発見が得られるのではないかと注目されている。

酸素呼吸と光合成という代謝系を獲得した真核生物は、やがて多くのグループに進化し、そのなかから多細胞生物も現れた。これらの真核生物のうち、動物・植物・菌類のいずれにも属さない単細胞真核生物は「原生生物」と呼ばれている。海洋生物多様性研究分野の瀧下清貴主任研究員は「原生生物の世界は多様性に満ちた、非常に興味深い世界です。しかし、バクテリアなどの原核生物や真核生物の動・植物に比べると、研究者の数が少ないこともあり、まだまだわからないことばかり。そこが原生生物を研究する面白さでもあります。また、真核生物がどのように誕生したのか、どうやってその多様性を獲得してきたのか、こうした謎を明らかにしていく上でも原生生物は重要な研究対象です」と話す。

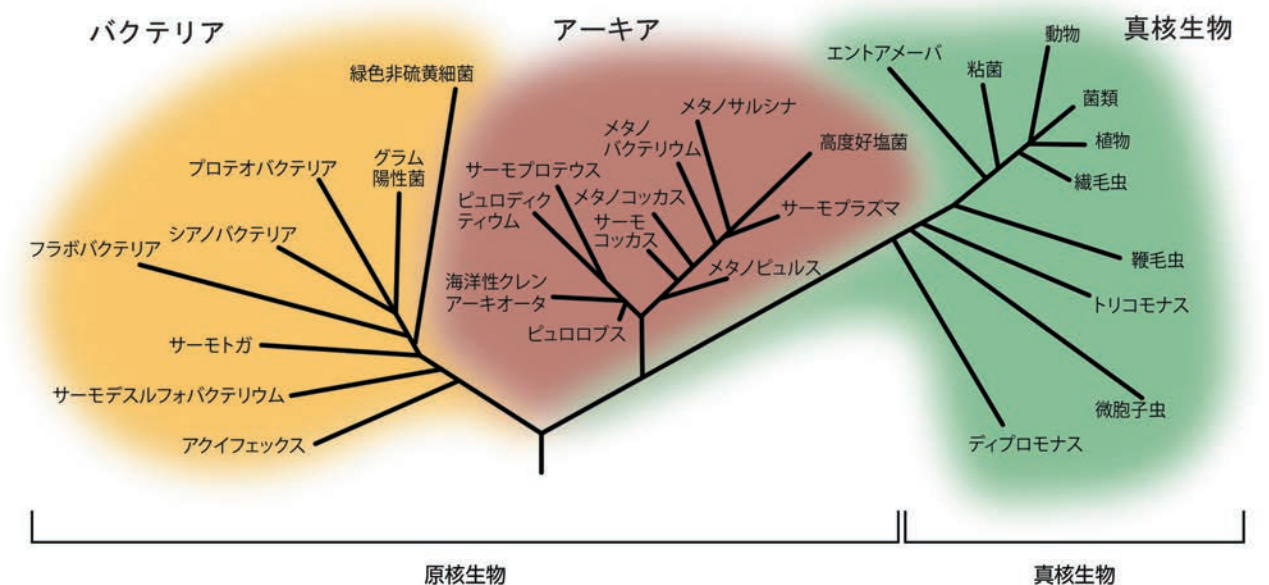


真核細胞

原核細胞

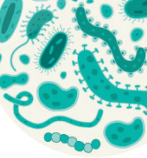
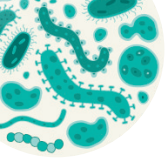


原核生物の細胞（左上）と真核生物の細胞（右・植物細胞）。



生物の世界の3つのドメイン。

M.T. Madigan and J.M. Martinko, Brock Biology of Microorganismsを改変



多様なグループを形成する原生生物 その生き方もバラエティ豊か

生物の分類は5界説からスーパーグループへ

20世紀の半ばまで、生物を動物と植物に二分する分類が一般的だった。そんななか、1969年に米国のロバート・ホイタッカーが「5界説」を発表。生物の世界を原核生物・原生生物・植物・菌・動物の5つに分けた。この分類はわかりやすく、多くの支持を得た。しかし、DNAの塩基配列による系統解析が行われるようになると、生物の世界はもっと多様かつ複雑であることが明らかになり、主に生物の形態や生態で分類された5界説は適切でないと考えられるようになった。

5界説では原核生物を除く真核生物は原生生物・植物・菌・動物に分類されたが、2012年に発表された国際原生生物学会（ISOP）の分類体系によると、真核生物は図で色分けしたように、アーケプラスチダ・エクスカヴァータ・アメーボゾア・オピストコンタ・SAR（ストラメノパイル・アルベオラータ・リザリアという3グループの頭文字）の5つの「スーパーグループ（高次分類群）」群に分けられ、それ以外に高次レベルでの系統的位置が未確定のもの（灰色部分）が少なからず存在する。ただし、異なる考え方も多く存在し、この分類が確定したわけではない。スーパーグループでは、植物はアーケプラスチダの一部であり、私たちヒトを含む動物はオピストコンタと呼ばれる系統に含まれる。図を見てわかるように、どちらかというと私たち動物はキノコ・カビなどの菌類に近い生物ということになる。

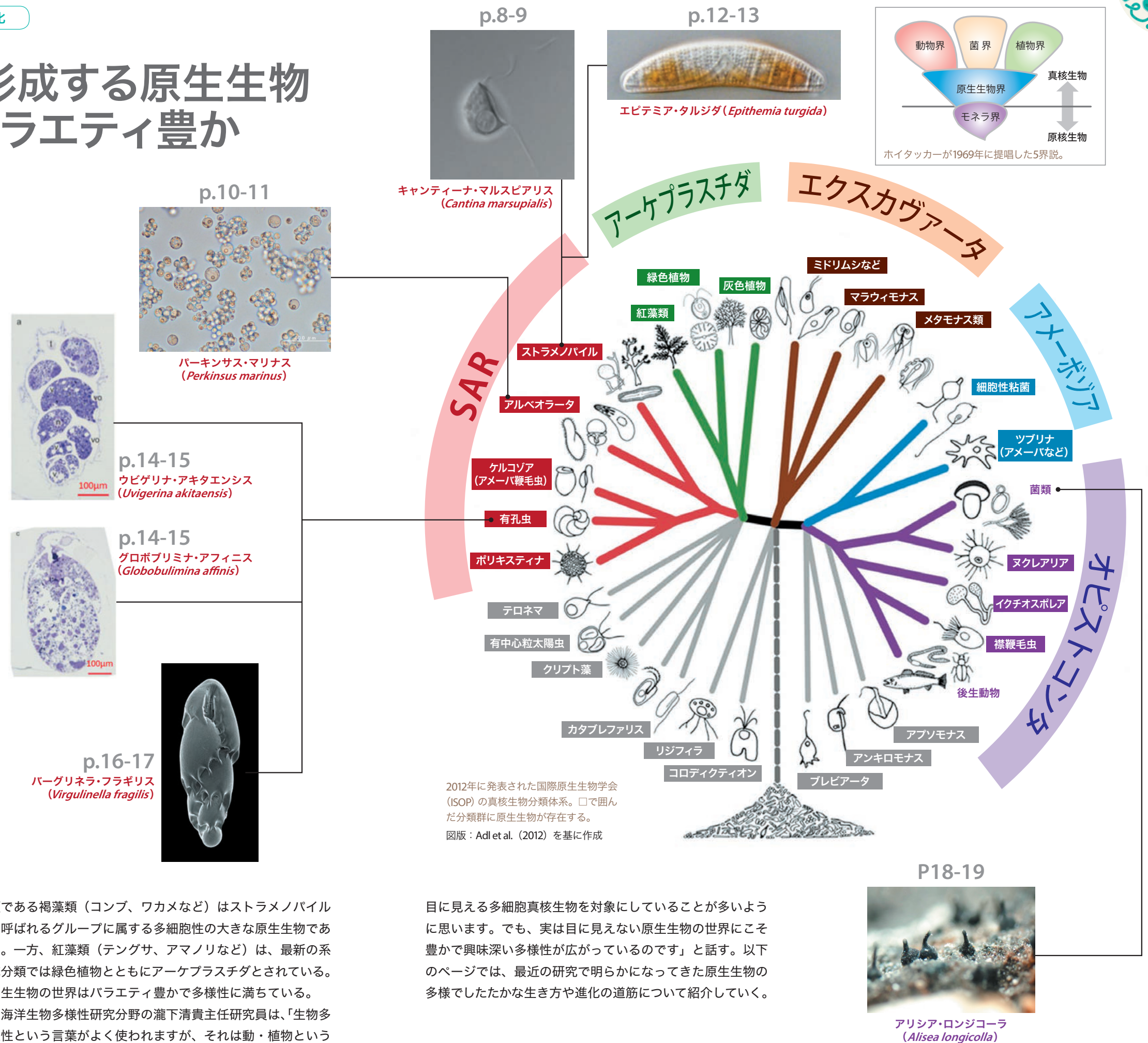
多様で進化的にも興味深い原生生物の世界

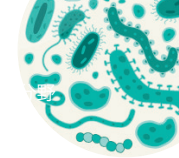
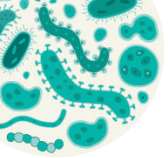
スーパーグループではっきりと示されているのが、原生生物の多様性だ。5界説では原生生物は1つの界として分類されていたが、原生生物を1つのグループとしてまとめることはできない。4～5ページで原生生物は真核生物のうち、植物・菌・動物のいずれにも属さない生物と述べたが、図に示される通り、原生生物は多様な真核生物のすべてのスーパーグループにまたがって存在している。

多くの原生生物は、1つの細胞からできた単細胞生物であり、ほとんどは顕微鏡を使わないと見ることができない。私たちの身近では、水中で見られるアメーバ・ミドリムシ・ゾウリムシ・タイヨウチュウなどが原生生物だ。また、石灰質などの殻を持つ有孔虫も原生生物だ。ちなみに、藻類は5界説では基本的に植物界に分類されていたが、現在その一部のものは原生生物として分類されている。たとえば、身近な藻

類である褐藻類（コンブ、ワカメなど）はストラメノパイルと呼ばれるグループに属する多細胞性の大きな原生生物である。一方、紅藻類（テングサ、アマノリなど）は、最新の系統分類では緑色植物とともにアーケプラスチダとされている。原生生物の世界はバラエティ豊かで多様性に満ちている。

海洋生物多様性研究分野の瀧下清貴主任研究員は、「生物多様性という言葉がよく使われますが、それは動・植物という





ミトコンドリアを退化させる 嫌気環境の原生生物

酸素の少ない環境で生きる原生生物のミトコンドリア

キャンティナー・マルスピアリス (*Cantina marsupialis*) は、全長約10マイクロメートル (100分の1mm) の単細胞真核生物 (原生生物)。分類群 (6〜7ページ参照) としてはストラメノパイル (不等毛類: 体の鞭毛に中空の小毛を持つ真核生物) に分類される。

海洋生物多様性研究分野の瀧下清貴主任研究員らは、酸素の極めて少ない環境 (嫌気環境) に適応しているキャンティナー・マルスピアリスを鹿児島県 ^{こしきしま}・甕島 ^{かいいげ}にある貝池の水深10mほどの底泥から採取し、顕微鏡で詳しい観察を行い、細胞内のミトコンドリアに通常の真核生物細胞には見られない

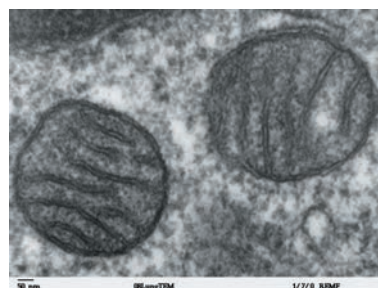
特徴を見つけ出した。

真核生物は、一般に酸素呼吸を行うことで大きなエネルギーを獲得している。細胞内でその大切な役割を担っているのがミトコンドリアだ。ミトコンドリアは、酸素を利用して効率的にATP (アデノシン三リン酸: エネルギーを蓄える化合物、分解されるときにエネルギーを放出する) を生成している。生物の体内では、代謝 (物質の合成や分解) に伴うエネルギーのやり取りは、すべてこのATPにより行われることから、真核生物にとって、ミトコンドリアはなくてはならない器官といえる。細胞内には、酸素を使わないATP生成の仕組みも備わっている。細胞質基質で行われる解糖系と呼ばれる過程で、嫌気環境に生きる微生物でこれに頼っているものも多い。一方のミトコンドリアでは、この解糖系でできた物質を取り込み、TCA回路 (クエン酸回路) や電子伝達系と呼ばれる複雑な化学反応を行うことにより、さらに多くのATPを効率的に生成している。長さ1〜2マイクロメートルほどのミトコンドリアの内部には、内膜がひだ状に折れ曲がった構造 (クリステ構造) があり、内膜の表面積を大きくすることによって、化学反応が効率的に行われている。

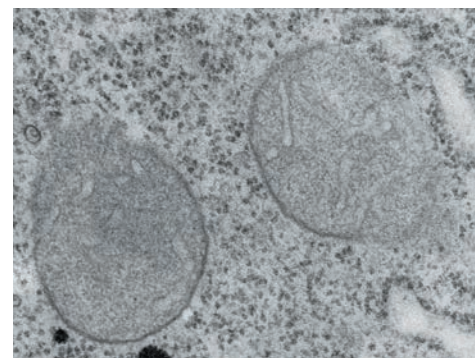
キャンティナー・マルスピアリスのミトコンドリアを電子顕微鏡で観察した瀧下主任研究員らは、通常のミトコンド



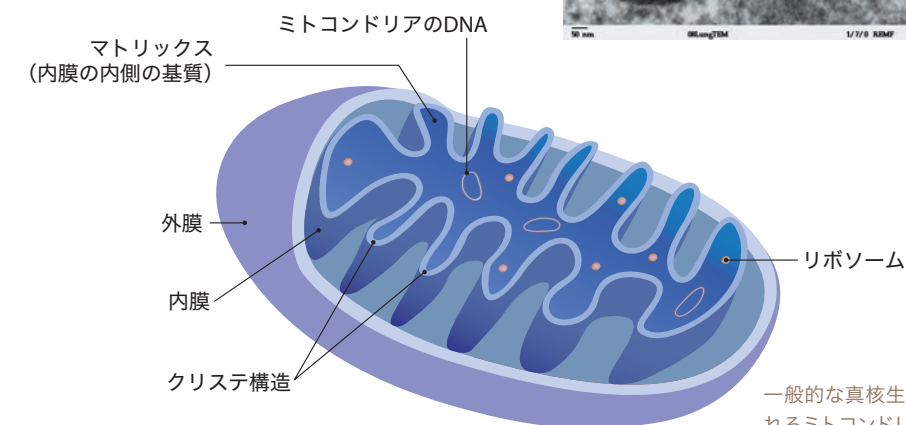
キャンティナー・マルスピアリスの光学顕微鏡画像。



電子顕微鏡で見た一般的な真核生物細胞のミトコンドリア。内膜のクリステ構造が見える。



キャンティナー・マルスピアリスの退化的ミトコンドリアの電子顕微鏡画像。一般的なひだ状構造が見られない。
写真提供: 雪吹直史博士 (Charles University in Prague)



一般的な真核生物細胞に見られるミトコンドリアの構造。

アのクリステ構造に比べて、ひだがほとんどなくのっぺりに見えることに注目した。さらに、ミトコンドリアの分子 (遺伝子) レベルの解析も行った。その結果、ミトコンドリア内膜から酸素呼吸に必要なタンパク質複合体がいくつも失われていることが明らかになった。「電子顕微鏡写真からクリステ構造が退化していることが見えましたが、機能的にもミトコンドリアが退化し、酸素呼吸を行っていないと推察されます。キャンティナー・マルスピアリスの祖先は普通のミトコンドリアを持っていて酸素呼吸を行っていたと思われますが、嫌気環境に適応したことによって、多くの酸素呼吸に必要なタンパク質複合体が失われ、ほんの一部だけが残っているのだと考えられます」と瀧下主任研究員は話す。

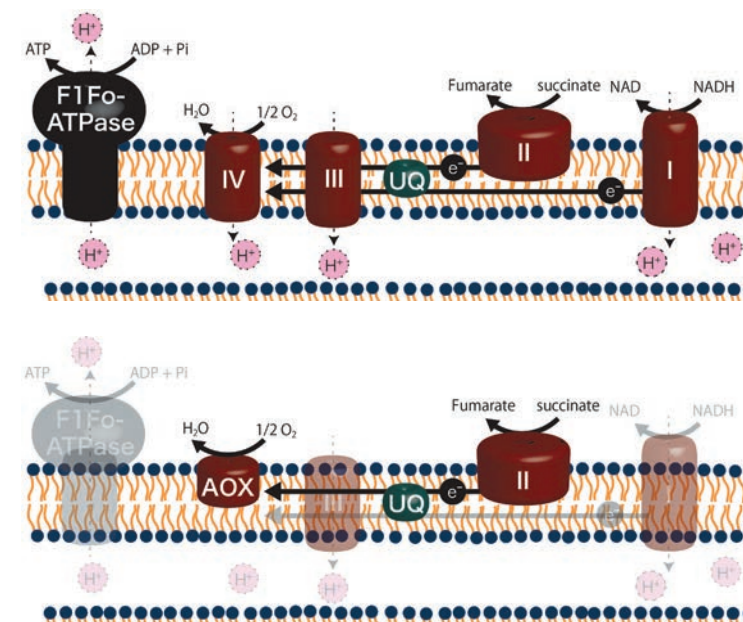
嫌気環境への適応で失った機能、獲得した機能

嫌気的な環境は、土壌内部、汚泥、海底下、動物の体内など、さまざまな場所に存在している。嫌気性の真核生物は寄生虫などとして私たちの体内にも存在し、医学的な必要性からよく研究されてきた。そのなかで退化したミトコンドリアも観察されている。「ミトコンドリアが退化した生物は、細胞質基質の解糖系等によってエネルギーをつくり出すことができます。しかし、それだけではなく、嫌気環境への適応の過程でミトコンドリアの代謝系を改造して、酸素呼吸ほどの効率は得られませんが、新たなエネルギー獲得システムがつけられることもあります。トリコモナス (性感染症を引き起こす病原性の原生生物) のような嫌気性生物が持つハイドロ

ジェノソーム (退化したミトコンドリアの一種) は、その代表的なものです。これと同じようなことが、キャンティナー・マルスピアリスでも起きているようです。今回得られた知見は、ミトコンドリアが細胞内で果たす役割は何かについてあらためて考える材料にもなると思います」と瀧下主任研究員。

かつて地球上には遊離酸素がほとんどなく、生物は嫌気的な環境のもとで誕生したとされる。そんな生物たちにとって酸素 (活性酸素) はまさに毒ガスにも等しい。シアノバクテリアが作り出した好気的な環境では、その酸素から自らの体を守る防衛システムを獲得するか、もしくは嫌気的な環境に逃げ込むしか、生きのびる道はなかったはずだ。いずれにしても、真核生物は、ミトコンドリアの獲得によって、毒ガスであった酸素を活用することが可能となり、勢力を拡大し、発展を遂げた。だが、そんな真核生物の一部が、キャンティナー・マルスピアリスのように、ミトコンドリアの主要な機能を失ってまで再び嫌気的な環境に適応したのはなぜだろうか。

「それは謎ですが、もしかしたら、競争相手が少ないところへ進出しようとした結果なのかもしれません。優れた器官を退化させてでも、新しいニッチに入り込み、そこで多様化するということも、真核生物の進化の道の一つだったのではないかと思います。そのためには自らの構造や機能さえもフレキシブルに変えてしまう。それこそが、今日の真核生物の多様性を生み出した原動力ではないでしょうか」と瀧下主任研究員はいう。

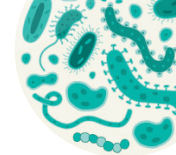
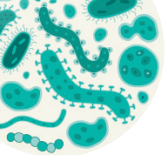


キャンティナー・マルスピアリスの退化的ミトコンドリアの分子レベルの解析結果 (下)。上は好気的な環境で生きる生物の普通のミトコンドリア。リン脂質の二重層から成るミトコンドリア内膜 (クリステ構造の膜) に酸素呼吸に必要な電子伝達に関わるタンパク質複合体がどのように存在しているかを示している。キャンティナー・マルスピアリス (下) では酸素呼吸に必要なタンパク質複合体がいくつも欠落している。



地中海の海底堆積物から発見された嫌気的な環境に生きる多細胞生物 (*Spinoloricus cinzia* 胴甲動物門)。

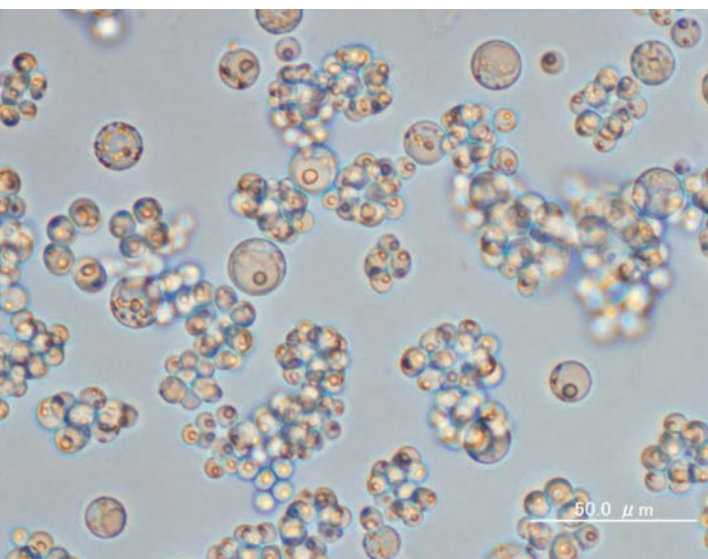
写真: Roberto Danovaro, Antonio Dell'Anno, Antonio Pusceddu, Cristina Gambi, Iben Heiner & Reinhardt Mobjerg Kristensen (Wikimedia Commons)



寄生性原生生物が持つ光合成機能を失った葉緑体の役割を探る

光合成をやめて寄生虫になった原生生物

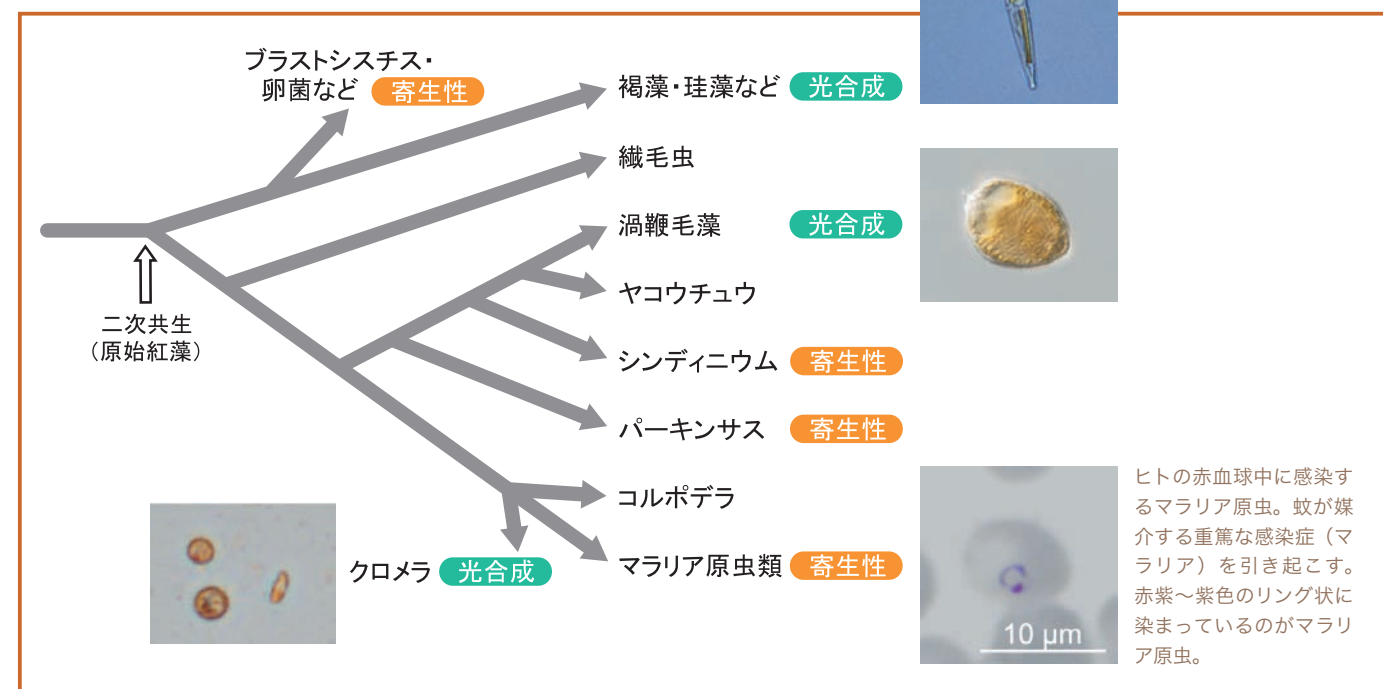
パーキンサス・マリナス (*Perkinsus marinus* 以下「パーキンサス」と表記) という貝の寄生虫がいる。直径約10マイクロメートルほどの球形の単細胞真核生物 (原生生物) で、カキがこの寄生虫に感染すると身がやせ細り、やがて死んでしまう。米国の東海岸ではこの100年間でカキの漁獲高が激



顕微鏡で見たパーキンサス・マリナス。

減しており、パーキンサスがその原因の1つであることがわかってきた。幸い日本のマガキには感染しても影響が出ないことが明らかになり、米国東海岸でも、日本のマガキが養殖されるようになったという。近縁種のパーキンサス・オルセニ (*Perkinsus olseni*) は、アサリに感染して被害をもたらす。日本近海でのアサリの漁獲高減少の原因の1つとして、この寄生虫が疑われている。ただし、感染したアサリを生で食べても、ヒトには感染しないので、健康上の心配は無用だ。

パーキンサスは、6〜7ページの分類群ではSARスーパーグループのアルベオラータに属する。近縁の生物には、ヤコウチュウ・マラリア原虫などがある。光合成をするものが多いが、寄生虫となっているものも少なくない。このグループの生物の祖先は、シアノバクテリアを取り込んで光合成するようになった原始紅藻を細胞内に取り込み、いわゆる二次共生によって光合成をする能力を獲得したと考えられている。その後も光合成する能力を維持して自ら有機物をつくり続けている生物がいる一方で、シンディニウム、パーキンサス、マラリア原虫などは、光合成機能を失って寄生虫として生きる



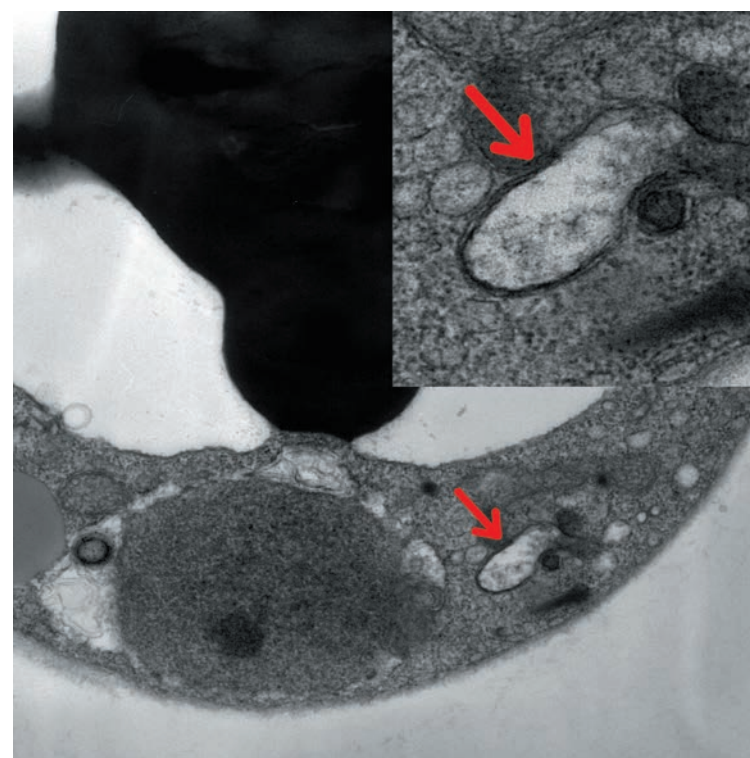
パーキンサスと近縁な生物。寄生性のものだけでなく、光合成を行う種も多い。

道を選んだ。

光合成を行わない葉緑体が果たす役割

光合成が、真核細胞内の葉緑体で行われることは広く知られている。では、光合成をやめて寄生虫になったパーキンサスやマラリア原虫は、葉緑体そのものも失ってしまったのだろうか。東京大学大学院医学系研究科の松崎素道助教は、「葉緑体は残っていますが、中身はスカスカで、“葉緑体のなれの果て”のような姿です。一般に葉緑体はDNAを持っていますが、パーキンサスの葉緑体にはDNAありません」と話す。「パーキンサスの葉緑体が何をしているのかはよくわかりませんが、同様に光合成をやめた近縁のマラリア原虫では、退化した葉緑体の役割が明らかになっています」と松崎助教。それは次の3つだ。

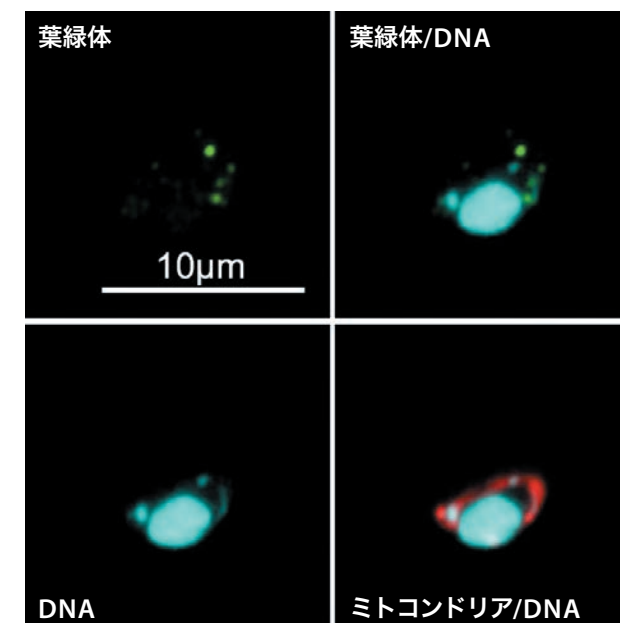
- (1) 脂肪酸をつくる。この機能を失うと、マラリア原虫はヒトの血液中では生存できても、蚊の体内で生存できない。
- (2) ヘムをつくる。細胞が呼吸するのに必要なシトクロムの部品として重要。この機能を失うと、マラリア原虫は血液中のヘモグロビンからヘムを得ることはできるものの、蚊の体内ではやはり生存できなくなる。
- (3) イソプレノイドをつくる。ユビキノン (呼吸するときにミトコンドリアで使われる化合物)、ビタミンK、カロテノイド、植物ホルモンの材料として不可欠。この機能を失うとマラリア原虫は生存できない。



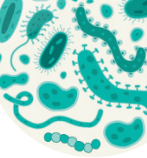
パーキンサスに見られる衰退した葉緑体。右上は部分的に拡大したもの。

細胞内で必要なこれらの物質をつくるために、葉緑体働いていると考えられている。「なかでも非常に重要なのが、イソプレノイドの合成です。植物細胞の葉緑体は『非メバロン酸経路』という仕組みでイソプレノイドを合成していますが、マラリア原虫の衰退した葉緑体でも、非メバロン酸経路がイソプレノイドをつくっていることが明らかになっています。パーキンサスの場合も、ゲノム解析からイソプレノイドの合成をしていると推測されています」と松崎助教はいう。

葉緑体には光合成以外にも重要な働きがあり、光合成を行わなくなったパーキンサスが未だに葉緑体を保持している理由もそこにある。ところで、マラリア原虫やパーキンサスは、なぜせっかく獲得した光合成という素晴らしい能力を捨ててまで、寄生虫になることを選択したのだろうか。「確かなことはわかりませんが、好気環境で光合成を行うということは、危険な酸素 (活性酸素) に身をさらすということで、生物は細胞に傷を負わないように、防御策を講じなければなりません。光合成は、エネルギーがたくさん得られるので生存に有利ですが、リスクな行為でもあるのです。もし周囲に十分な有機物があるなら、光合成をやめて、寄生虫として直接有機物を取り込んだほうが有利ということなのかもしれません」と松崎助教は話す。



パーキンサスを蛍光染色した画像。左上の緑色が衰退した葉緑体。左下の青色はDNA (大きな丸い水色部分は核)。右上は葉緑体とDNAを一緒に表した画像。右下は赤色のミトコンドリアとDNAを一緒に表した画像。この4枚から、核以外に観察されるDNAはすべてミトコンドリアDNAで、葉緑体にはDNAがないことがわかる。



共生バクテリアがオルガネラ化する 進化の過程に迫る

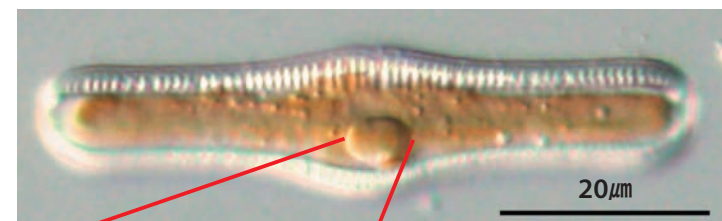
光合成の機能を失ったシアノバクテリア

淡水中にも海水中にも広く見られる珪藻（ケイソウ）は、細胞内に葉緑体を持ち、光合成を行うことで知られる単細胞真核生物だ。そのなかのロパロディア科珪藻は、空気中の窒素ガスを利用して窒素化合物をつくる窒素固定を行う細胞内共生体を持っている。

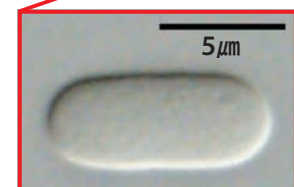
生物が無機窒素化合物からアミノ酸をつくり、タンパク質などを合成する働きは窒素同化と呼ばれる。窒素固定は、その窒素同化に必要なアンモニアなどの窒素化合物を、空気中の窒素ガスを利用して効率よく生み出す機能のことだ。窒素固定ができる生物は、非常に限られている。我々ヒトや動物・植物を含む真核生物自体は一般に窒素固定能力を持たないが、ダイズやエンドウなどのマメ科の植物は根に根粒というコブ状の組織をつくり、そこに入り込んだ窒素固定能力を持つ根粒菌（バクテリア）が合成した窒素化合物を受け取ることで、窒素分の少ない土壌でも成長することができる。

ロパロディア科珪藻の細胞内に見られる特殊な共生体は、「スフェロイドボディ」と呼ばれる。このスフェロイドボディは、光合成を行うシアノバクテリアを起源とするが、現在の主な役割は細胞内で窒素固定を行い、宿主である珪藻へ窒素化合物を供給することであると考えられている。しかし、その共生関係について詳しいことはわかっていなかった。

筑波大学の稲垣祐司准教授と中山卓郎研究員らの研究グループは、ロパロディア科珪藻の一種エピテミア・タルジダ（*Epithemia turgida*）のスフェロイドボディから取り出したDNAを解析し、その全ゲノム配列を決定することに成功した。



ロパロディア科の珪藻。



珪藻に共生しているスフェロイドボディを取り出したもの。

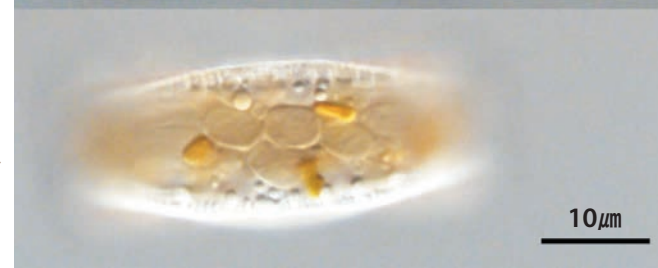
ロパロディア科のエピテミア・タルジダに近縁な種エピテミア・アドナータ（*Epithemia adnata*）。下は俵型のスフェロイドボディに焦点を合わせた画像。

そして、ゲノム上に存在する遺伝子を調べた結果、スフェロイドボディが独立して生育するために必要な遺伝子の多くが失われていることが明らかとなった。全ゲノム配列の長さも、通常のシアノバクテリアに比べ短かった。これらのことは、スフェロイドボディが、宿主の珪藻に強く依存していることを示している。しかも、失われた遺伝子のなかには、光合成に関連する遺伝子も含まれていた。つまり、スフェロイドボディはシアノバクテリアを起源とするにもかかわらず、光合成の能力を失っていることが明らかになったのだ。

真核生物の細胞内共生を解明する手がかり

稲垣准教授は、「シアノバクテリアに窒素固定をするものがあることはわかっていましたが、光合成ができないものは知られていませんでした。スフェロイドボディと葉緑体の起源はともにシアノバクテリアですが、細胞内で果たす機能が違っているのです。葉緑体を持ち光合成を行っている珪藻は、スフェロイドボディの祖先が持っていた光合成能力と窒素固定能力のうち後者の機能だけを残そうとしているのではないかと考えられます。スフェロイドボディは珪藻の細胞の一部として統合されつつあるのかもしれません」という。

近隣の湖や筑波大学構内の池などからロパロディア科の珪藻を繰り返し採集して培養し、共生体を観察し続けてきた中山研究員は、「私たちが見ているのは、この珪藻の共生体が、バクテリアからオルガネラ（細胞小器官）化される初期の段階ではないかと考えています。ミトコンドリアと葉緑体は、すでに細胞内で退化してオルガネラになっていますが、この共生体はその道をたどる過程にあるのではないのでしょうか。



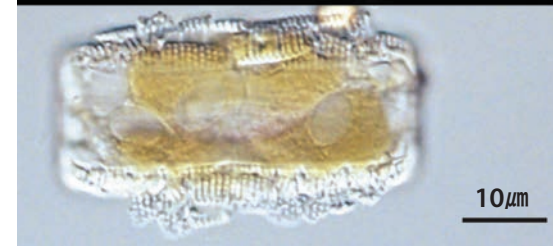
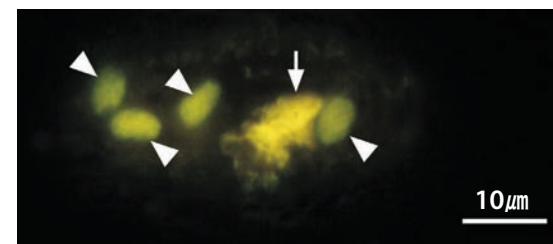
その進化の過程を明らかにすることによって、ミトコンドリアや葉緑体がたどってきた進化の道を類推することもできるのではないかと思います」と話す。

共生体とオルガネラの境界線

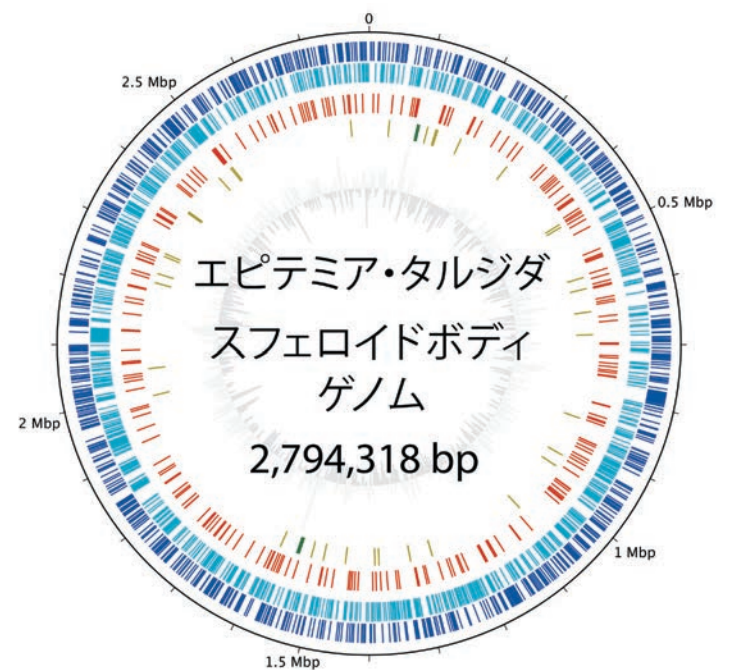
スフェロイドボディが、共生体からオルガネラへと向かう途上にあるとするなら、その境界線はどこに引かれるのだろうか。稲垣准教授は、「遺伝子が共生体ゲノムから宿主ゲノムに水平移動して、宿主がつくったタンパク質を共生体が利用していることが明らかになれば、オルガネラと呼んでもいいのではないかと考えています。ロパロディア科の珪藻では、物質のやり取りをしていることは明らかですが、スフェロイドボディ内の代謝反応に必要なタンパク質を、宿主に合成してもらっているという明確な証拠は得られていません。また、生物としての独立性があるかどうか、視点として重要です。ゲノムデータに基づくと、スフェロイドボディは今のところ単細胞生物としてある程度の独立性を保っているとも考えられ、まだオルガネラとは呼べないと思います」と説明する。

スフェロイドボディとの共生は、いつごろから始まったのだろうか。その年代について、中山研究員は、「珪藻は殻を持っているので、化石として残るため、検証しやすい生物です。ロパロディア科の珪藻が他の近縁の珪藻と分岐した年代は、だいたい1200万年前と考えられています。この科の珪藻の祖先が窒素固定シアノバクテリアを共生体として取り込んだかどうかははっきりしないので、共生が始まったのは1200万年前以降であると推測できますが、それ以上はわかりません」という。

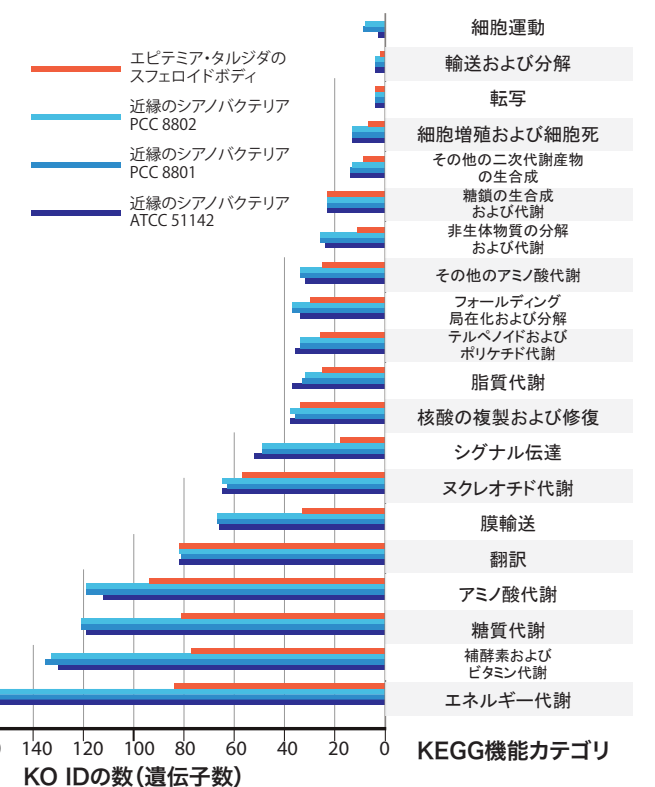
真核生物が原核生物を取り込んで高度な依存関係を築いている例は極めて稀であるといわれる。そうしたなか、「スフェロイドボディはミトコンドリアや葉緑体に次ぐ“第三の共生オルガネラ”となる可能性がある」と稲垣准教授・中山研究員らは考えている。



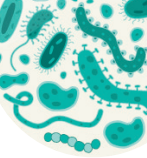
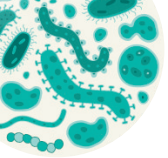
珪藻（下）の細胞内DNAを蛍光色素で染色した画像（上）。矢印が示すのは珪藻の核のDNA、矢頭（▲）は共生体のDNAを示す。



ロパロディア科の珪藻の1種、エピテミア・タルジダにおけるスフェロイドボディのゲノムマップ。総塩基数は約279万塩基対。共生生活をしていないシアノバクテリアに比べて、ゲノムが縮小していることが明らかになった。Nakayama et al. (2014) PNASを基に作図。



スフェロイドボディと近縁のシアノバクテリアの機能別の遺伝子数の比較。残されている遺伝子と失われた遺伝子の割合が遺伝子の機能別に異なっており、必要のない遺伝子は失われやすいことが示されている。Nakayama et al. (2014) PNASを基に作図。



有孔虫の 多様な細胞構造と機能

殻を持つ真核微生物、有孔虫

有孔虫は海に生活する単細胞の真核生物で、熱帯から極域まで、海洋表層から水深10,000mを超えるマリアナ海溝まで、広範囲に分布している。海底や堆積物のなかにすむ底生有孔虫が現在生息しているだけでも数千種、海中を漂う浮遊性有孔虫も数十種が知られている。その大きさは、目で見てようやく粒のように見える程度、長さ0.5mmくらいものが多い。

有孔虫の大きな特徴は、殻をつくることだ（有機膜に覆われただけのものもある）。殻にはいくつかのタイプがあり、最もよく知られるのは石灰質の殻。周囲にある砂などで殻をつくるものもある。石灰質の殻を持つ有孔虫は最大で1cmくらいだが、砂などの粒子で殻をつくる種の中には直径が10cmに達するものもある。有孔虫の巨大化には、殻の形成が重要な役割を果たしていると考えられており、細胞の形態を維持するだけでなく、外敵から身を守ることに役立っている。殻の表面には壁孔と呼ばれる無数の孔があいている。口孔から仮足と呼ばれる網状の細胞質を伸ばし、移動や餌の捕食などに利用している。

底生有孔虫は、深海底にも数多く生息し、植物プランクトンの死骸などの有機物の分解に大きな役割を果たしている。海底の泥のなかのように酸素の少ないところで生きる種も多く、貧酸素環境の生態系で重要な役割を担っていると考えられている。貧酸素環境にすむ有孔虫の一部は、酸素呼吸に代

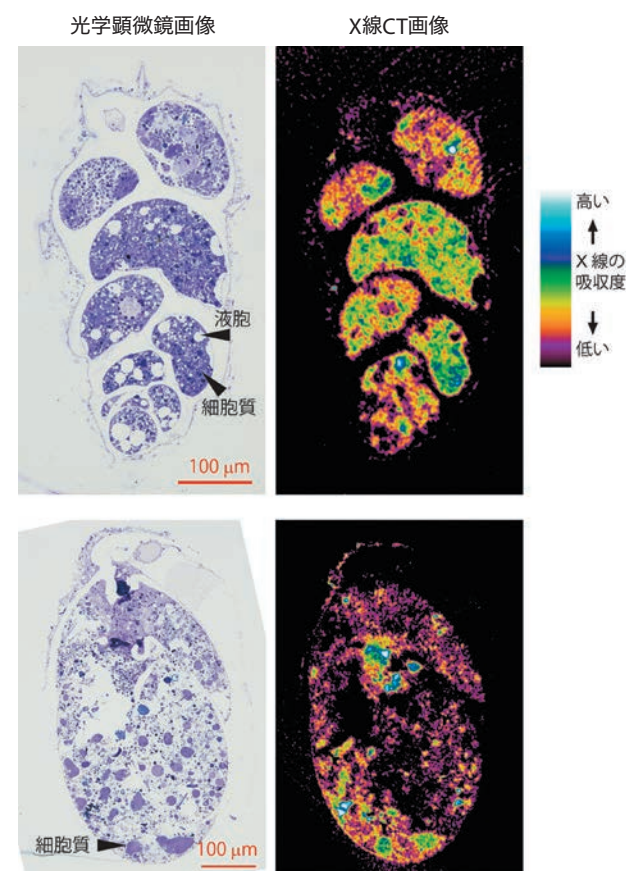


有孔虫の1種アンモニア（*Ammonia* sp.）。殻の直径は0.3mm程度。右側の口孔から仮足を出しているのがわかる。

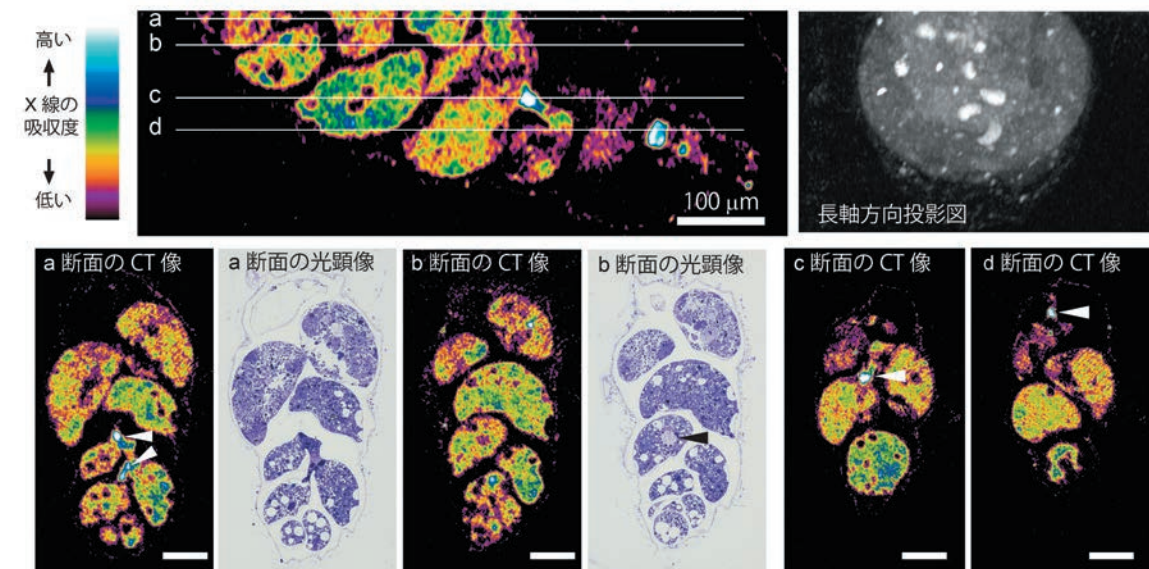
わる仕組みを持っている。硝酸塩呼吸がその1つで、酸素の代わりに硝酸塩を利用して呼吸をし、エネルギーをつくり出す。堆積物中の硝酸塩を細胞内の液胞にためて呼吸に使っていると考えられているが、その詳細はまだ謎が多い。細胞内に共生細菌を取り込み、酸素のない環境でも微生物からエネルギーや栄養を得るものもある。

X線CTで有孔虫の細胞内を立体的に見る

生物地球化学研究分野の野牧秀隆主任研究員らは、マイクロX線CT（コンピュータ断層撮影）装置を使って、有孔虫の細胞の構造を立体的に明らかにする手法を世界で初めて開発した。これまでは、立体的な構造をとらえるためには、数十から数百枚の連続的な切片をつくり、それを1枚1枚電子顕微鏡で撮影して、立体構造を再構成しなければならなかった。



左は光学顕微鏡で見た切片の画像。右はマイクロX線CTによるスライス画像。有孔虫をウランやオスミウムなどの金属で染めることで、X線の吸収度の違いが色により画像に表されている。上のウビゲリナ・アキタエンシスでは、緑色の部分（細胞質）が多く、下のグロブプリミナ・アフィニスでは少なくまばらに分布していることがわかる。



ウビゲリナ・アキタエンシスをさまざまな面（上の画像のa～d）でスライスして得られたX線CT画像と光学顕微鏡画像の比較。「△」で示されたところはプラグ、「▲」は核。スケールバーは100マイクロメートル（0.1mm）。

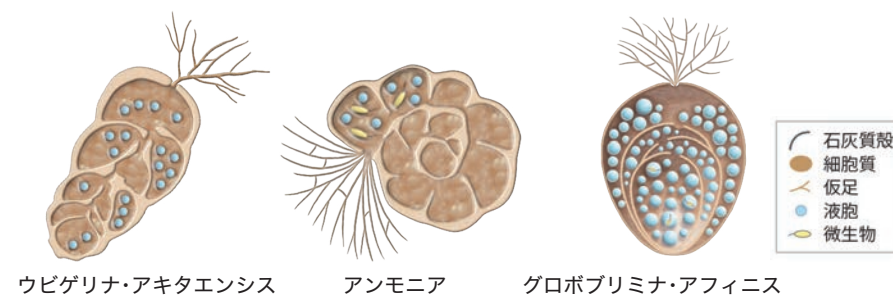
だが、細胞膜やタンパク質などにウランやオスミウムのような金属を化学結合させたのちに、高性能のマイクロX線CT装置で撮影すると、短時間の撮影で細胞の構造を立体的に見ることができ、細胞全体の体積や液胞の体積、表面積などを計算することが可能になった。「ウビゲリナ・アキタエンシス（*Uvigerina akitaensis*）」という有孔虫では、液胞が細胞全体の体積に占める割合は5～10%ですが、グロブプリミナ・アフィニス（*Globobulimina affinis*）では30～50%に達する、というようなことを、定量的に示せるようになりました。前者は堆積物のうち比較的酸素のある環境に生息しているのに対し、後者は、堆積物の深いところ、つまり酸素の少ない環境で細胞内に高濃度の硝酸塩を蓄えていることが知られています。大きな体積を占める液胞に硝酸塩をたくさんためて、硝酸塩呼吸に用いていると考えています。さらに細胞内の観察を透過型電子顕微鏡観察などの手法で進めた結果、正体のわからないオルガネラも見いだされるなど、新たな成果も得られつつあります」と野牧主任研究員は話す。

多様な環境に多様に、柔軟に適応

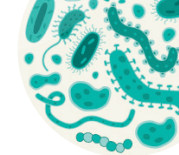
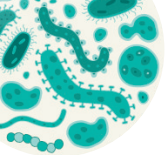
有孔虫は単細胞生物だが、一部の有孔虫を除き、細胞はいくつもの小部屋（チェンバー）に分かれており、チェンバー間が「プラグ」という“栓”のようなもので仕切られていることがある。つまり、単細胞生物であるにも関わらず、必要に

応じて細胞をいくつかの「区画」に分けているのである。野牧主任研究員らが開発した撮影法では、このプラグがウランとよく結合し、マイクロX線CTでははっきりと視覚化できるようになった。プラグの役割は明確にはわかっていないが、細胞全体で化学反応を起こすと効率が悪い場合に、一部分をプラグで閉じ、そのなかだけで代謝を行うことで効率を高めているのではないかとわれている。「プラグがどのようなタイミング、たとえば新たな殻の付加、好ましくない環境に運ばれたとき、無性生殖前、でつくられ、いつ消えているのかがわかれば、プラグが代謝に果たす役割を解明する重要な手がかりになります」と野牧主任研究員は考えている。

有孔虫の構造を調べ、それをさまざまな種で比較することによって、細胞構造だけでなくバクテリアなどの微生物との共生が多様であることも、これまでより詳しくわかってきた。「液胞のなかに微生物を持つもの、細胞の外側に外部共生させるもの、パーグリネラ・フラギリス（16～17ページ参照）のように細胞質の内部でも縁の部分に集中して共生させているものなどがあることが明らかになっています。貧酸素環境にいる有孔虫が微生物を共生させる方法にも、かなりバリエーションがあるようです。共生するバクテリアが異なれば、バクテリアと有孔虫との関係も異なります」と野牧主任研究員。単細胞生物でありながら、環境に応じて構造や機能を変えて、柔軟に対応しながら生きる有孔虫への興味は尽きない。



有孔虫の多様な細胞構造の模式図。ウビゲリナ・アキタエンシスは、好気的な環境にすむ。酸素のない環境でアンモニアを培養すると、最終チェンバー付近に硝酸塩などを濃集させ、細胞内に共生微生物を取り込む。グロブプリミナ・アフィニスは、酸素がほとんどない環境にすみ、殻のなかに大きな液胞と細胞質を展開し、微生物を共生させると考えられる。

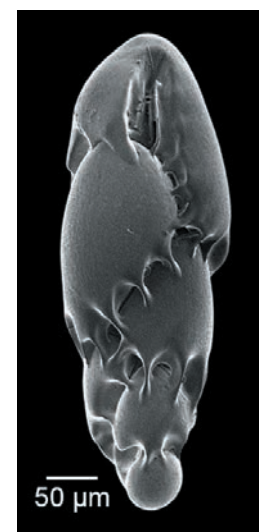


珪藻から 葉緑体を盗み取る有孔虫

酸素が少ないと殻の壁孔が大きくなる

前ページに続いて、有孔虫の興味深い生き方を紹介しよう。バークリネラ・フラギリス (*Virgulina fragilis*) は、海底の堆積物中の酸素が少ない環境に生息する有孔虫で、世界各地に飛び石的に分布している。海洋生物多様性研究分野の土屋正史技術研究員は、ニュージーランドのウェリントン湾、アフリカのナミビア沖、そして鹿児島県・甑島^{こしきじま}の海鼠池^{なまこいけ}という地理的に遠く離れた3カ所でこれを採取して調べたところ、どれもほぼ同じ遺伝子配列を持ち、1つの遺伝的集団とみられることがわかった。遠く隔たった環境で遺伝子配列に違いがないのは、この種が無性生殖を続けているからと考えられている。

さらに土屋技術研究員は、3つの海域で採取したバークリネラ・フラギリスの外部形態や殻の壁孔の違いと、生息環境の溶存酸素濃度・硫化水素濃度を対比してみた。その結果、壁孔は周囲の環境条件を反映して、大きさや密度が変化していると考えられる。たとえば、溶存酸素濃度が低い海鼠池やナミビア沖のものは、壁孔が大きく細長くなるのに対して、酸素濃度が高いウェリントン湾のものは壁孔の1つひとつが小さくて丸くなることが示された。実際に、別の底生有孔虫を用いて酸素濃度を変えて飼育実験を行った研究で、孔の大きさに同様の変化が現れた例もあるという。土屋技術研究員は、「壁孔はガス交換に利用されるので、貧酸素環境で成長すると、酸素を取り込みやすくするために壁孔が大きくなるの



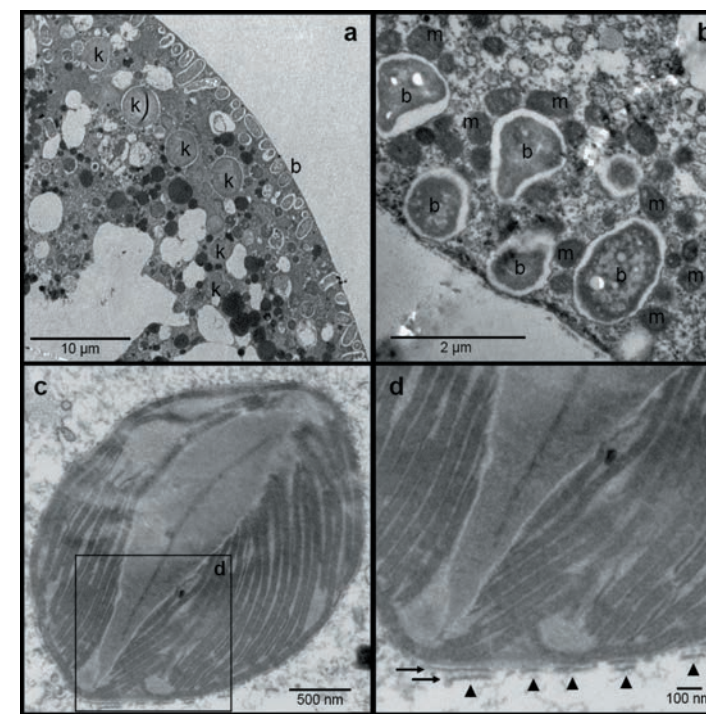
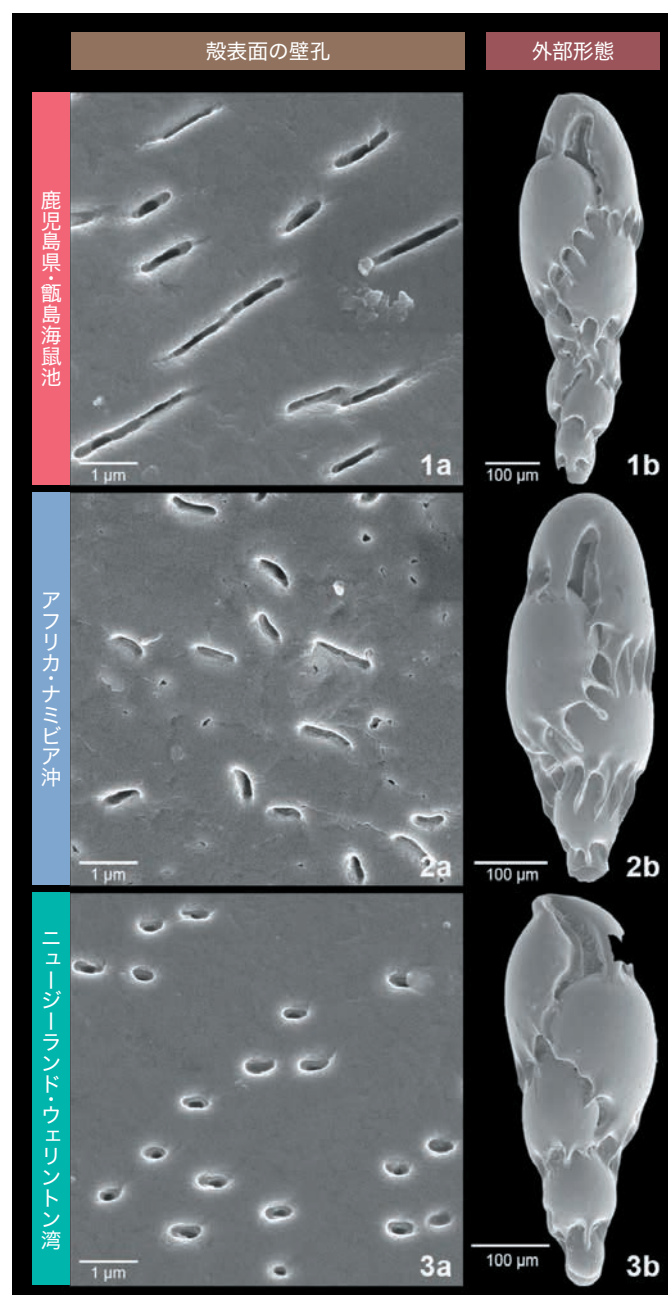
バークリネラ・フラギリス
全長約470μm。

3つの海域から採集したバークリネラ・フラギリスの殻表面の壁孔の違い (a) とその外部形態 (b)。スケールバーは、aが1μm、bが100μm。

ではないかと考えています。また、ナミビア沖と海鼠池のものは殻の表面がガサガサしており、特にナミビア沖の個体で顕著です。殻を形成するときに硫化水素があると、石灰化が阻害される可能性も考えられます」という。

珪藻の細胞から葉緑体だけを盗んで使う

底生有孔虫バークリネラ・フラギリスには、貧酸素環境への適応戦略に関する興味深い謎がある。2003年、米国の生物



バークリネラ・フラギリスの細胞内の構造。
a: 細胞の表面近くにバクテリア (b) が分布し、細胞の内側に盗葉緑体 (k) が見られる。
b: 細胞内に見られるバクテリア (b) とそれを取り囲むミトコンドリア (m)。
c: 盗葉緑体の構造。
d: 葉緑体の膜 (矢印) が断片化 (▲) している。

学者が、ベネズエラ沖のカリアコ海盆で採取したバークリネラ・フラギリスを電子顕微鏡で観察し、細胞の表面近くにバクテリアが共生し、細胞のより内側には「盗葉緑体」が存在することを明らかにした。盗葉緑体現象とは、従属栄養生物が他の藻類の葉緑体だけを細胞内に盗み取り、一時的に維持する現象のこと。取り込まれた葉緑体は光合成することができる。獲得した葉緑体はグルコースなどの光合成産物を宿主に供給するが、分裂できないので10日から長くても1年ほどで消化されてしまう。したがって、宿主は常に新しい葉緑体を獲得し続ける必要がある。

盗葉緑体はウミウシ・渦鞭毛藻などでも見られるが、有孔虫で特徴的なのは、光が届かない深海底の有孔虫が盗葉緑体を持つことだ。普通に考えれば、海底堆積物のように光が届かないところでは、盗葉緑体は光合成ができず、宿主に栄養物を供給することもできない。つまり、何の役にも立たないことになる。にもかかわらず、バークリネラ・フラギリスが盗葉緑体を持っているのは、なぜだろうか。

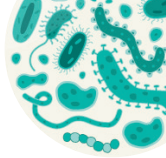
米国・カリフォルニア沖のサンタバーバラ海盆の海底に生息する底生有孔虫ノニオネラ・ステラ (*Nonionella stella*) からも、珪藻由来の盗葉緑体が見つかっており、獲得した葉緑体は光がほとんど届かない環境でも活動していることがわかっていて。葉緑体は、環境適応のために何らかの役割を果たしていると考えられているが、それが何かはまだ明らかになっていない。

共生バクテリアと盗葉緑体は何をしているのか

土屋技術研究員は、バークリネラ・フラギリスの共生バクテリアと葉緑体をもともと持っていた珪藻の種類を特定して、

細胞内の配置も確かめている。どの個体でも、細胞の表面近くには従属栄養性のバクテリアがいて、その周囲をミトコンドリアが取り囲んでいた。これが何を意味するのか。土屋技術研究員は、「バークリネラ・フラギリスが生息するのは周辺に硫化物が多い環境で、毒になる硫化物は細胞内に入れたくありません。一方、ミトコンドリアは酸素を使ってATPをつくるだけではなく、硫化物の酸化も行う場合もあるといわれています。バークリネラ・フラギリスは、ミトコンドリアを細胞の表面に集めて硫化物を酸化し、硫化物を遮断できればいいのですが、自力で行うことができません。そこで、バクテリアを維持することで細胞の表面近くにミトコンドリアを集めているのかもしれない」と説明する。ただし、「実際にこのバクテリアが何をしているのはまだ謎で、今後の研究課題です」と土屋技術研究員。

それでは、盗葉緑体は有孔虫の細胞内で何をしているのだろう。バークリネラ・フラギリスが保持している盗葉緑体には特徴的な構造が見られ、本来4重膜構造を持つ珪藻葉緑体のうち、少なくとも2枚が断片化し、有孔虫の細胞に直に接していた。内側2枚の膜は一次植物由来の膜で、代謝産物は自由に透過できる（通常、物質が膜を通過するにはチャネルが必要）。膜があると物質の輸送に邪魔になる可能性があるが、バークリネラは、あえてこの状態にすることで、物資の輸送に関わる何らかの仕組みを担わせている可能性がある。「盗葉緑体、ミトコンドリア、バクテリア、宿主の間の物質輸送に関与し、バークリネラ・フラギリスは何らかの利益を得ているのかもしれない。未解明ですが、暗環境でも盗葉緑体に何らかの利用価値があることは間違いなく考えています」と話す。今後の研究による謎の解明に期待したい。



深海からも発見される 真菌

植物とともに陸に進出した真菌が海にもいる

「真菌」は、真核生物のなかで、単細胞・糸状・キノコ状とさまざまな形態を持つ従属栄養生活を営む生物群。キノコ・カビ・酵母などが含まれる。「菌類」とも呼ばれるが、細菌（バクテリア）と紛らわしいため「真菌」が使われることが多く、ここでもそれに倣う。分類上は原生生物から外れる（6～7ページ参照）が、最近、深海から非常に興味深い真菌が見つかっており、併せて紹介したい。

かつて真菌は植物に近いといわれていたが、現在は、オピストコンタと呼ばれるスーパーグループに分類され、私たち動物に近縁の生物であることがわかっている。1本の後方鞭毛を持つのがオピストコンタの特徴であり、真菌と動物の共通の祖先は、海洋で生活する鞭毛を持った単細胞生物だったといわれている。その後、海洋中で動物と真菌に分かれ、最終的には陸上に進出して、現在見られる形に広がった。植物が海から陸上に進出するときに真菌も陸へ進出し、植物との共進化によって現在の多様性が生まれたと考えられている。

ノリなどの紅藻や緑藻を除く植物は陸上だけに見られ、真菌も主として陸上に生息すると思われてきたが、研究が進む

につれ、海にもさまざまな真菌が存在することがわかってきた。

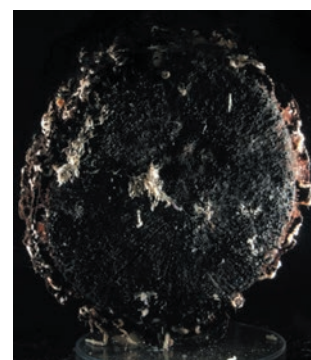
水深500mの深海から キノコのような真菌が見つかった

2012年、南西諸島沖の水深500m地点に沈めたウバメガシの丸太に、びっしり生える黒い真菌が発見された。大きさは1mmに満たないが、「深海中でキノコのような形をつくる真菌の発見は極めて珍しい」と海洋生物多様性研究分野の長野由梨子研究員はいう。「丸太は、2008年に同じ海域の水深100m・200m・500m・1,000m・2,000m・3,000mの6カ所に沈め、4年後に確認したところ、水深500mの地点にだけ生えていました。新種かと思ったのですが、過去にバヌアツ共和国沖の水深630～791m地点で見つかっており、世界2例目でした。学名はアリシア・ロンジコーラ (*Alisea longicolla*) で、他のグループから系統的に離れており、もしかしたら深海に適応した真菌かもしれません。深海のどこかで生育していたものから放出された孢子が、沈めた木について増殖したのではないかと思います」

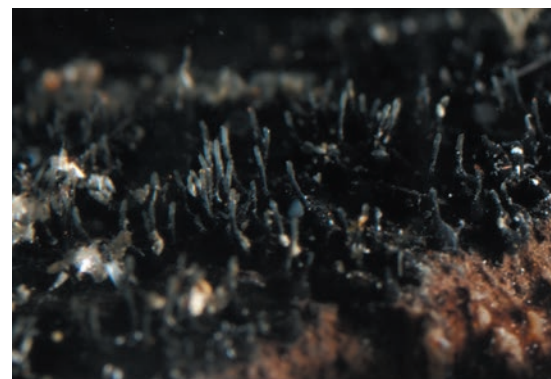
長野研究員は、海水や深海堆積物を採取してそのなかから



丸太に生えた真菌アリシア・ロンジコーラの姿。



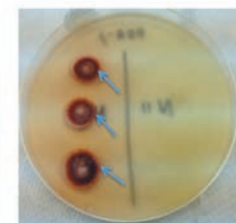
沈めた丸太にびっしりと生えていた真菌アリシア・ロンジコーラ。右下はその拡大画像。



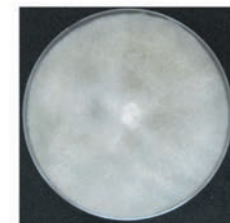
相模湾初島沖の深海底にある冷湧水域。堆積物サンプルから地上に広く分布する糸状菌がいくつも分離されている。



NT13-07-RBAN9



共培養



NT13-07-RBAN11

2種の真菌を共培養すると、単独では出さない化合物が産生されることがある。この写真では真ん中の色素が共培養によって出現したことが示されている（青い矢印部分）。



相模湾初島沖水深800～1,200mの冷湧水域サンプルから分離・培養されたカビ。

真菌を探す研究も行っており、孢子がしばしば見つかるという。2012年の発見までは、陸上から運ばれた孢子がたまたま深海で見つかったのではないかといわれることが多かったが、この発見により考えが変わった。「実際に、深海中で木材をすみに生活サイクルが営まれていることが明らかになったわけです。とはいえ深海に生育する真菌が、陸から流れてくる木質だけに頼るとは考えにくい。いろいろな基質を分解する能力があるのではないかと思います。また、今回見つかったものは、一度陸上に進出したものが、海に戻る形で再適応したものだろうと考えています」と話す。

深海に真菌が生息する証拠は、相模湾初島沖水深800～1,200mの深海底堆積物からも見つかった。海底からメタンや硫化水素を豊富に含んだ冷水が噴き出している海域で、シロウリガイのコロニーなどの冷湧水化学合成生態系が見られる。そこで堆積物をサンプリングし、分離培養を行ったところ、ミカンに生えるカビなど地上に広く分布する糸状菌（真菌のうち、菌糸と呼ばれる管状の細胞から構成されるもの）がいくつも分離された。一方で、堆積物中から直接DNAを抽出し、どのような真菌が存在しているのかを解析したところ、9割近くが未知の遺伝子配列で、新種の真菌が数多くいる可能性が示された。「真菌では原始的といわれるツボカビのグループのDNAも、たくさん出てきました。海にいる真菌は、海にいるときにある程度の多様性を獲得したものと、一度陸上に進出して再び海に戻ったものの2つのタイプに分かれるのではないかと思います」と長野研究員はいう。

深海由来の真菌から新しい抗生物質を探す

真菌からは、ペニシリンをはじめとする抗生物質が数多く発見されている。微生物がつくり出す薬になる化合物は生理活性物質と呼ばれるが、これまでの研究開発は陸上の真菌が主なターゲットだった。ほとんど採取されていなかったこともあり、深海由来の真菌がつくる生理活性物質研究は、まだ手付かずの状態だ。長野研究員は、こうした応用分野の研究にも守備範囲を広げ、深海の糸状菌を用いた生理活性物質の探索（スクリーニング）を北里大学生命科学研究所と共同で進めている。

「大学院時代に、真菌が原因で起こるヒトの病気の研究をしていました。真菌は動物に近縁なので、真菌に与える毒性が身体にも影響しやすく、新しい抗生物質が待たれています」と長野研究員。深海由来の糸状菌が抗菌作用を持つ化合物を産生する割合は、陸上のものよりも多いことがわかっている。また、共培養といって、2つの株を互いに争わせるように培養することで、単独では出さない化合物の取得にも成功している。「抗生物質は、他の生物との競争に勝つために出しているとも考えられます。その意味で、単独でいるときにはつくり出さないけれど、競争相手がいるときに、相手にダメージを与える化合物を出すとしたら、共培養は理にかなっているといえます」と話す。未知の深海由来真菌から、医療に貢献する新規化合物が見つかる日が来ることを期待したい。

BE



飼育員が掃除する手を止めると、手のクリーニングをしようと近寄ってくる

クリアクリーナーシュリンプ (ウロカリデラ・アントンブルニー)
Urocaridella antonbruunii

テナガエビ科ソリハシコモンエビ属。熱帯から亜熱帯の暖かい海域に生息する。日本でも伊豆半島以南の太平洋側で普通に見られる。水深5〜30mあたりの岩穴に潜み、魚たちがやってくると体に取りついて、口の中やエラなどにいる寄生虫を食べる“クリアクリーナーシュリンプ”の1つ。彼らが、ほかのエビと異なり肉食性の魚たちに食べられない理由はまだ明らかではない。透き通った美しい姿からクリアクリーナーシュリンプと呼ばれている。

近年、人間の世界では部屋の掃除をしてくれるロボットが人気だが、海の世界でも掃除屋は頑張っている。特にエビやカニといった甲殻類は腐食性の仲間が多く、海底の死がいや餌の食べ残しをきれいに食べ尽くすスカベンジャーとして有名だ。今回紹介するクリアクリーナーシュリンプは、同じ掃除でも魚たちの体をきれいにするエステティシアンだ。約4cmという小さな体で、ウツボやハタといった肉食性の魚たちにも果敢に取りつき、口の中からエラの内側まで、細いはさみできれいに掃

除する。

「魚の体に着く寄生虫が好物なんです。ときおり体の前で腕を組むようにはさみを合わせ、左右にゆらゆら揺れて魚たちにアピールするような仕草もするんですよ」と話すのは、城崎マリンワールドでクリアクリーナーシュリンプの飼育を担当している松山祐介さん。城崎マリンワールドはエビの繁殖にも力を入れ、2008年にアカシマモエビ、そして2015年にはクリアクリーナーシュリンプの繁殖賞を日本で初めて受賞している。



抱卵1日目の雌。
産卵直後の卵は
緑色をしている。



産卵間近の雌。
卵巣が白く透けて見える。



ふ化後6日目のゾエア幼生。
体は白っぽい。



ふ化後22日目のゾエア幼生。
体が赤くなる。



ふ化後70日目の稚エビ。



ふ化後35日目の稚エビ。
ようやく親と同じような姿に。



ふ化後26日目のメガロバ幼生。
少しエビらしくなった？

初めて抱卵が確認できたのは2013年の1月ごろ。エビは卵からかえると、ゾエアとメガロバという2段階の幼生期を過ごし、さらに稚エビの時代を経て約10カ月で成体となる。「ところが、最初は何回やってもメガロバになる前に死んでしまう。水槽の水換えの方法や水温を変えても、うまくいきませんでした」。試行錯誤の末、栄養不足ではないかと思いつき、生き餌として与えていたアルテミアというプランクトンに餌を豊富に与え、それをゾエアに与えたところ、見事、メガロバに成長した。しかし、その餌やりにもひと苦労させられた。餌となるアルテミアは時間が経てば栄養価が下がってしまう。毎日、栄養価の高い餌を与えるためには食べ残したアルテミアを取り除かなければならず、その作業がひと仕事なのだ。「体長3mmにも満たないゾエアをピペットで1匹ずつ吸って別の水槽に移し、それから水槽の水ごとアルテミアを取り除くわけです。ゾエアは多いときには100匹以上いましたから、それを毎日行うのは大変でした」と松山さん。現在も卵がかえるたび、メガロバに育つまではこの作業を繰り返しているそうだ。

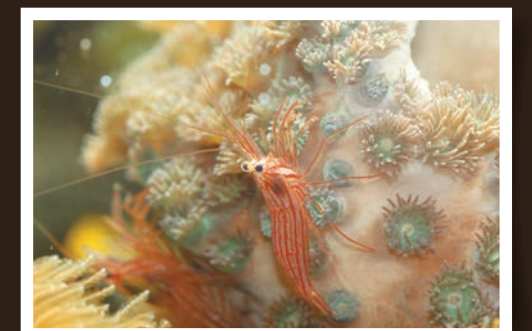
メガロバになれば、餌も手間がかからなくなる。個体数が多いと脱皮をしたばかりの柔らかな個体を狙った共食い起きるが、岩やサンゴで隠れ家を作ってやる注意さえ怠らな

ければ、無事成体に育つそうだ。

成体となったクリアクリーナーシュリンプは飼育下では3〜4年ほど生きるといふ。成体になってしばらくの間は雄と雌の大きさも姿形もほぼ同じで、その見分けは難しい。しかし、成熟すると雌の体内には卵巣が透けて見えるようになる。そして、ふ化が近くなると、抱卵直後は緑色だった卵が灰色に変化する。その兆しが認められた母エビはバックヤードに移され、別の水槽で再び新たな命を産み落とす。「このエビもそうですが、魚介類は卵のなかの様子が見えるものが多いんです。心臓ができて、やがて目や体の形もわかるようになっていくさまは感動的です。いつ出てくるのかとドキドキしながら生命の誕生に立ち会う体験を、ぜひ子どもたちにも味わってほしいですね」と松山さん。まずは、子どもたちがクリアクリーナーシュリンプと触れあうことのできる展示を実現させたいと力強く話してくれた。

BE

2008年に繁殖賞を受賞したアカシマモエビ。同じくクリアクリーナーシュリンプの仲間、魚やサンゴに害を与えるイソギンチャクなども食べてくれる。



TEAMS ～海洋科学で東北復興を支援する研究者たち～

観測データは共有財産 東北の海の「今」を「将来」のために

東北マリンサイエンス拠点形成事業（TEAMS）では、研究活動で得られた観測データは広く一般に公開され利用されることを目指している。そのためTEAMSでは、3つの調査研究課題に加え、「東北マリンサイエンス拠点データ共有・公開機能の整備・運用」が4つ目の課題にあげられている。TEAMSの研究活動で得られた観測データを収集し、データベース化して、研究者間で共有するだけでなく情報を広く公開するのがその役割だ。これを推進するデータマネジメントユニットでリーダーを務めているのが、長年JAMSTECでデータの管理・公開業務に携わってきた園田朗ユニットリーダー（UL）。「海拓者の肖像Special」最終回は、観測や調査から得られた情報をどのように公開しようとしているのか、園田ULに聞いた。

園田 朗

東北マリンサイエンス拠点形成事業
データマネジメントユニット ユニットリーダー
地球情報基盤センター国際海洋環境情報センター
研究情報公開グループ グループリーダー代理

園田 朗（そのだ・あきら）

1964年東京都生まれ。1989年東海大学大学院 海洋学研究科 海洋科学専攻を修了。修士（理学）。海洋開発研究機構 地球情報基盤センター 企画調整室長。東日本海洋生態系変動解析プロジェクトチーム データマネジメントユニット ユニットリーダー（兼務）。「データから情報へ 科学情報を社会へ」をモットーに活動。これまで、深海映像・画像アーカイブス（J-EDI）や、海洋生物の多様性と分布情報のデータベース「BISMaL」の構築に携わってきた。またユネスコ政府間海洋学委員会の政府間海洋情報交換システム（IODE）の一部であるOBIS連携データユニットを担う日本ノード（J-OBIS）の構築・運用にも携わる。

国際的な観測プロジェクトで 精度管理の必要性を痛感

——以前は、どのような研究に携わられていたのですか。

園田：学生時代は熱水噴出域周辺の化学物質の挙動についての調査・分析に取り組み、その後も船舶での観測に携わっていましたが、海洋地球研究船「みらい」の共同利用の開始を契機として調査観測で得たデータの管理・公開業務が本格的に動き出したとき、その立ち上げから関わり、それ以来ずっとJAMSTECのデータの管理・公開を担当してきました。

——データの管理・公開とは、どのような業務ですか。

園田：観測データの精度には、どうしてもわずかなバラつきがあります。観測者や観測機器の違いによって、同じ海域、同じ時間の観測でも数値に差が出ることがあるのです。国際プロジェクト等で多くの機関や研究者が関わる場合、それを一緒に扱うような解析を行うと結果に影響が出てしまう可能性もあるため、観測データの精度管理が必要になります。また、せっかく苦勞して研究者が取ったデータも、「いつ』『どこで』『どのように』得たデータなのかといった周辺情報が一緒に保管されていないと、第三者がデータを活用することはできません。ですから、データの精度管理情報をはじめ、どのような条件で観測されたかという情報を一緒にした体系的なデータセットとして整理しておく必要があります。こうした地道な作業を経て初めて、第三者にも利用可能なデータが公開できます。

私自身がこうしたデータ管理や精度管理の重要性を意識するようになったのは、今年退役した海洋調査船「かいよう」でかつて実施された、北西太平洋でのWOCE各層観測プログラム（WHP）*に参加したことがきっかけでした。

——観測データの管理・公開は、研究機関が果たすべき重要な役割ですね。

園田：海洋科学の分野で全球規模の研究が盛んに行われるようになると、当然、研究者個人のデータだけでは研究できず、他国のデータを利用して研究することになります。そうすると、自然にデータを集めて公



TEAMS公式サイトのトップページ（中央）。研究の中心となる東北大学・東京大学大気海洋研究所・JAMSTECのそれぞれのTEAMSサイト（左）とも連携し、各サイトからの情報を自動収集して、公式サイトで新着情報を掲載している（右）。

開することで誰でもデータをシェアする動きが出てきますが、体系的に整理されていないと「保存」されていても誰も利用できない、ゴミの山にしかありません。データを取得した機関や研究者がその周辺情報と併せて体系的に整理したデータセットとして「保管」することで初めて意味のある「公開」になります。また、最近では世界的に、気候変動への適応策検討など、社会経済的な分野での必要性が高まってきており、国際的に連携したデータベースシステム間でのシェアも大事になってきています。

データ公開は当然との認識が 広まるのに10年を要した

——日本の研究機関のデータ公開は欧米に比べて遅れていたのですか。

園田：日本では海上保安庁が窓口となり、国連の教育科学文化機関（ユネスコ）のIOC（政府間海洋学委員会）を通じて、海洋観測データを国内外に公開する取り組みを進めていましたが、かつては欧米に比べると公開データが圧倒的に少なかったのは否めぬ事実です。大規模な国際共同研究を進める上での発言力を維持するためにも、日本からもデータを公開していかなければなりません。そこで、JAMSTECでも1997年の海洋地球研究船「みらい」就航を契機に、データを管理・公開する部門が設立され、観測データを研究者から提出してもらい、データ公開システムを整備して国内外に公開することを原則としました。

——研究者にとって観測データは研究を行う上で最重要な情報です。公開は、すぐに受け入れられましたか。

園田：もちろんそう簡単にはいきませんでした。これまでのように研究者が個人的にデータ交換しているだけでは全球規模の研究などではデータが足りない。さらに他国のデータセットを利用するなら、自分たちも公開しなければなりません。このことを理解してもらいながら進めてきましたが、公開が当然という意識が定着するのに、10年くらいかかりました。とはいえ、観測してすぐに公開してしまえば、観測者の研究論文がまとまらないうちに、他の研究者によって論文が書かれてしまうかもしれません。そのため、データは一定の猶予期間後に公開するというルールをつくりました。

——国際海洋環境情報センター（GODAC）の設立にも関わっていますね。

園田：JAMSTECには海洋環境の数値データだけでなく、有人潜水調査船「しんかい6500」や無人探査機などが撮影した映像・画像資料がたくさん保存されていますが、かつては整理が行き届かず、十分に活用できていませんでした。たとえば1時間もののテレビ番組で映像を使いたいといわれても、放送局のディレクターが1ヵ月近くビデオテープが納められた倉庫にこもって、必要な映像を選び出し、やっと番組ができるという状況でした。GODACの設立によって、映像や画像を整理する機会を得たので、それらをデジタル化し、撮影情報とともに公開したのが「深海映像・画像アーカイブス（J-EDI）」です。たとえば深海生物の貴重な生態を記録した映像には、何分何秒のところかを示すタイムコードと一緒に生物名などを記載する「インデキシング」作業を行い、データベース化したことで、

*WOCE (World Ocean Circulation Experiment=世界海洋循環実験) は、気候変動に大きな影響を与えるとされる海洋循環に注目して、世界30カ国以上の研究機関が参加して実施された大規模な国際観測プロジェクト。1990年から2002年まで世界中の海で観測が行われた。各層観測プログラム（WHP）は、大洋の岸から岸までの測線を海面から海底まで、海水の水温・塩分をはじめ、溶存酸素・二酸化炭素・栄養塩類などを高精度で観測するプログラム。

生物の名前などから映像を簡単に探し出せるようになりました。

GODACは、沖縄県名護市が推進する県北部地域での情報通信関連企業の誘致・雇用創出・人材育成促進を目的として整備され、2001年11月よりJAMSTECが運用する施設。潜水調査船・無人探査機で得られた貴重な深海映像・画像や海洋調査船などが取得した研究データのデジタル化および整理保存（デジタルアーカイブ）、さらに海洋・地球環境情報を、WEBサイトなどで発信する拠点となっている。また、海洋科学技術の理解増進のためのさまざまな取り組みも行っている。（<http://www.godac.jp/>）。

沿岸の栄養塩のデータが
カキやアワビの浜値に影響

——どのような経緯で、TEAMSに参加
されることになったのですか。

園田：TEAMSは、震災後の東北がどうなっているのかは国際的にも非常に関心が高く、海外の研究者からも情報提供が

求められていることと、何よりも被災した東北地方の水産業の復興を科学の力で後押しするという役目を担っているため、研究者が研究して終わりではなく、水産業に貢献できるように研究成果情報やデータを積極的に公開する必要があると。そこで、これまでJAMSTEC内でデータの管理・公開に携わってきた経験が役に立つということで、声が掛かったのかもしれませんね。TEAMSで得られたデータの共有と公開を進める課題4の課題代表者を任されることになりました。——水産関係者への積極的な情報提供も求められているのですね。

園田：地元の水産行政の担当者や漁協の方々などの要望を聞く機会をつくるようにしていますが、さまざまな希望がありますね。そのため、まずはTEAMSの研究活動情報や、そこから得られたデータを公開する「i-TEAMSサイト」と、「TEAM Sデータ案内所 リアス」を開設して、誰でもアクセスできるようにしました。以前、サイトの利用者について調べたところ、被災した地方自治体や環境アセスメントの会社の方々などがよくアクセスし

ていることがわかりました。——漁業関係者の利用は少ないのですか。園田：漁業者の皆さんは、長年の経験や知識で漁を営んでいる方が多いようで、研究用の観測データそのままではあまり利用されないのかもしれませんが、東京大学や東北大学が提供しているリアルタイムの沿岸海域の水温データを見ている方は多いと聞いています。今後、課題1～3の研究成果が多く出て閲覧できるデータが充実してくれば、漁業者の利用もさらに進むと期待しています。——そのためにも、可能な限り速やかに公開していかなければなりませんね。

園田：ただ、私たちのユニットメンバーが水産関係者に聞き取り調査をしたところ、公開に慎重にならなければならないデータがあることも明らかになってきました。たとえば、沿岸域にはウニやアワビといった水産業にとって重要な魚種がいますが、津波の影響で大きく攪乱（かくらん）を受けてしまいました。そのため、どこにどんな生物がどの程度いるかは、漁業関係者にとって重要な情報になりますが、安易に公開してしまうと、密漁者による乱獲を招きかねません。重要水産魚種でなくとも、絶滅危惧種の捕獲を誘発することにもなりかねず、その公開は慎重に行わなければなりません。

——生き物のデータは公開されないのですか。

園田：いいえ、一切公開しないとすると、



データマネジメントユニットのメンバーは、調査現場に足を運んだり、解析に立ち会うことも積極的に行っている。

必要な研究や水産業の復興を後押しすることもできなくなりますから、一部の支障のない情報を公開し、それ以外については情報の存在と問い合わせ先を提供することで必要に応じて利用してもらうかたちや、提供先の範囲を考慮するなどの方法を考えています。

——物理・化学的なデータの公開に関しても、留意すべきことがありますか。

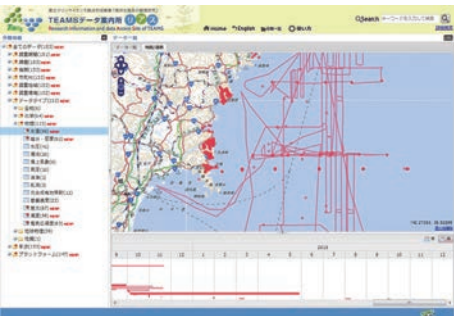
園田：聞き取り調査から、沿岸の栄養塩類などのデータの扱いも、慎重にすべきだということが明らかになりました。通常、外洋域では、栄養塩のデータは比較的早く公開される基礎データなのですが、沿岸域ではそれがプランクトンやそれを餌とする養殖カキ、アワビの成長に影響するというので、データが独り歩きしてしまい、カキやアワビの浜値に影響を与えてしまう可能性があります。それだけに、漁業者にとって重要な情報なのですが、誰でも閲覧できる状態で公開してしまうと、流通業者がアワビやウニを買い付ける際の、身入りを予測する材料にもなることがあるため、漁業者の不利益にならないように注意しなければなりません。——データ公開の仕方で、思いがけない影響があるのですね。

園田：従来、JAMSTECの船舶観測で得られた栄養塩類のデータなら、規定に則って公開することに何ら問題ありませんでしたから、沿岸海域のデータの扱いの難しさを実感しました。同様に、汚染物質のデータの扱いも注意しなければなりません。なかでも、特に慎重を要するものの一つがPCBですね。

ITシステムの開発で
生物情報の収集を支援

——データマネジメントユニットでは、データ収集のための支援システムの開発も進めていますね。

園田：はい、現在、「生物観察記録アーカイブシステム（BORAS）」の開発を進めています。津波によって大きく攪乱された東北の海の生物情報は、1人の研究者が自分の研究に役立てるだけでなく、後世に残していかなければなりません。そこでTEAMSに参加している研究者に「BORAS」を野外調査の野帳作成支援ツールとして広く利用してもらおうと考えています。具体的には、フィールドワークで何か生物を観察したら、まず撮影して記録を保存します。その写真には、観察した日時や場所などの付帯情報を記入しておき、このシステム内で公開・共有して、別の詳しい研究者が種名を記載す



TEAMSの研究活動で得られたデータを公開するウェブサイト「TEAMSデータ案内所 リアス」(<http://www.i-teams.jp/catalog/rias/>)。

く、東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波により相当数が流れ、海底でのPCBの漏出が心配されている。

——もしPCBの漏出が検出されたら、そのデータは公開されるのですか。

園田：もちろん、隠蔽（いんぺい）することはありません。幸い、今のところ検出されていませんが、もし環境に影響するような値が検出された場合には、周辺の自治体や環境省をはじめ関係省庁に知らせることになっています。ただ、不用意に公開してしまうと、思いがけない風評被害を招きかねません。情報を正確に伝えるという点でも、専門家の解説情報と一緒に提供するなど、慎重にデータを扱わなければならないと考えています。

ITシステムの開発で
生物情報の収集を支援

——データマネジメントユニットでは、データ収集のための支援システムの開発も進めていますね。

園田：はい、現在、「生物観察記録アーカイブシステム（BORAS）」の開発を進めています。津波によって大きく攪乱された東北の海の生物情報は、1人の研究者が自分の研究に役立てるだけでなく、後世に残していかなければなりません。そこでTEAMSに参加している研究者に「BORAS」を野外調査の野帳作成支援ツールとして広く利用してもらおうと考えています。具体的には、フィールドワークで何か生物を観察したら、まず撮影して記録を保存します。その写真には、観察した日時や場所などの付帯情報を記入しておき、このシステム内で公開・共有して、別の詳しい研究者が種名を記載す



「生物観察記録アーカイブシステム（BORAS）」の概要。

るという仕組みです。ITを活用した生物観察支援システムで、東北の海の生物情報が数多く集まれば、研究者が面倒なフォーマット変換作業を意識せずに自動的に国際標準のフォーマットにして、一般公開型のデータベース「海洋生物の多様性と分布情報のデータベース（BISMAL）」さらには「海洋生物地理情報システム（OBIS）」に登録していくことも考えています。「BORAS」は、後世に残すべき財産になると期待しています。将来的には、日本全国の野外調査の現場や、個人の趣味の釣果データ記録のために使われるなど普及すればいいと思っています。

——観測データの管理・公開の業務に携わる立場から、どのようにTEAMSの研究を後押ししていこうと考えていますか。

園田：たとえば、TEAMSではハビタットマッピングユニットの研究グループが、東北沖合で生物群集がどこにいるのかを解析して推定する研究を進めています。海洋環境の変化に応じて生物分布がどう変化するかを予測するため、より多様な海洋データの統合とともに、数値シミュレーション研究との融合の試みも始まっています。こうした研究が進めば、やがては海況に応じた生物の分布変化も予測できるようになるでしょう。そして、こうした研究成果が目に見える「ノウハウ」として水産業に生かされるような形にして公開することを考えています。このように現在TEAMSで得られた観測データは、今後さまざまな研究に活用され、漁業のIT化の推進などを通して、東北の海で漁業を営む方々のお役に立てる情報を提供できると期待しています。そして、そのために私たちデータマネジメントユニットがやらなければいけない仕事はたくさんあると思っています。 **BE**

データマネジメントユニットが行う観測データの収集からデータ管理・データベース構築、さらに公開までの流れ

繰り返し地震活動から解き明かす 地震発生パターンの特徴

● 地球情報館公開セミナー第188回 2015年3月21日開催

釜石沖での地震予測と相似地震

地震の予測というと、多くの人は難しいと考えているのではないのでしょうか。今日は私の研究を含めながら、地震予測の研究の歩みについてお話ししたいと思います。

まず、日本で初めて発生場所、規模、時間について予測が成功した釜石沖の例を見てみましょう（図1）。1957年9月の記録以降、マグニチュード（M）5前後の地震が同じような間隔で起きています。この現象は、1999年頃、当時は東北大学の大学院生だった五十嵐俊博さん（現 東京大学地震研究所）によって発見されました。1999年の直近の同様の地震は1995年3月に発生しています。そこで次の地震は2001年11月までに99%の確率で発生し、その次は2007年5月±1.75年で起こると予測され、実際に2001年11月、2008年1月に発生しました。これらの地震は波形もとてもよく似ています。このように、規模は多少異なっても、同じ場所で、非常に似た波形の地震が繰り返し起きる現象を「相似地震」といいます。釜石沖は相似地震が日本で最初に発見された例であり、最も有名な例でもあります。

相似地震の起きる場所

相似地震はどのような場所で起きるのでしょうか。

プレート境界型地震の場合、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込み、ひずみがたまって耐えきれなくなると岩盤がずれ、大きな地震を起こすと考えられています。ただこれは、プレート全体がくっついていての場合の説明です（図2左）。実際の釜石沖周辺では、部分的に引っかかってくっつき、その周囲の岩盤は地震を起こさず、ズルズルとすべっていると考えられています。この引っかかっている部分を「アスぺリティ」といいます。アスぺリティが小さく、孤立した場所にあると、そこだけ地震が規則的に繰り返し発生すると考えられています。これが、相似地震のメカニズムです（図2右）。

では、相似地震がわかれば地震予測も簡単にできるかという、そうではありません。相似地震と判断するための相互相関係数は95%という高い基準であり、そのような基準で判断するためには、ノイズの入っていない高品質なデータが必要になります。

巨大地震での発見は困難

東北大学では、1975年からデジタル記録を開始しました。そのため、1975年以降は、小規模な地震の記録もたくさんあります。釜石沖では、デジタル記録のある1979年から4回、相似地震が起きています。これをもとに次の地震を予測し、的中したわけです。相似地震だと証明し、さらに次の地震発生を予測するためには、少なくとも4回程度の地震を確認する必要があります。

現在は、ごく簡単に説明すると、ある地震に対して、どれだけ近い波形をもつ地震が起きたかをコンピュータでひたすら探す、という方法で相似地震を発見しています。ただし、デジタル化以前の地震については、各研究機関のマイクロフィルムなどのアナログ記録をたどり、波形を目で見て判断しなければなりません。相似地震の発生間隔は厳密には一定ではないので、何年分もたどるには膨大な作業が必要となり、小さな地震の検証には限界があります。

一方、地震の規模が大きくなると、相似地震の発生間隔が長くなります。たと

えばM5クラスの発生間隔は約5年ですが、M7クラスだと30年になります。M8クラスの巨大地震では、たとえば十勝沖の場合、1843年にM8.2、1952年にM8.2、2003年にM8.0と繰り返し発生しました。

十勝沖も釜石沖も、地震の規模はマグニチュードで0.2程度のばらつきがあります。もっと小規模な地震、たとえば、M4.9と5.1の違いなら、断層の大きさの差は1～3km程度で、遠い観測点からだとその違いは点と見なすことができ、似たような地震波形になります。ところがM8程度となると、8.0と8.2では断層の大きさも大幅に違い、点とは見なせなくなります。すると断層が同じような壊れ方をしたようには見えず、地震波形が相似しくくなります。また、十勝沖ほどの発生間隔になると、アナログ記録さえ存在しない過去にまでさかのぼっての検証が必要になります。こうしたことから、巨大地震について相似地震なのかどうかを判別するのは今のところ困難なのです。

相似地震から何がわかる？

では相似地震の発見にはどのような意味があるのでしょうか。

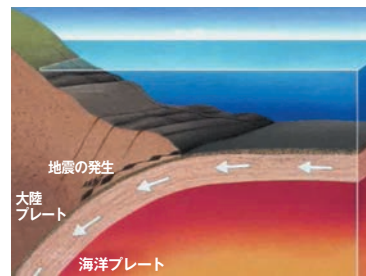


図2 相似地震のメカニズム

左はプレート境界型地震のメカニズム。大陸プレートの下に沈み込む海洋プレートにより大陸プレートにひずみが生じ、限界に達したところで岩盤が破壊されて地震が発生する。右は釜石沖で相似地震が発生するエリアを模式化したもの。アスぺリティがプレート境界面上にあり、周囲から孤立している場所で起きる。

有吉慶介

地震津波海域観測研究開発センター
地震津波予測研究グループ
技術研究員



●ありよし けいすけ。1974年千葉県生まれ。2006年東北大学で理学博士号を取得後、宮城県沖重点観測の産学官連携研究員を経て2007年より現職。専門は海溝型巨大地震サイクルの数値シミュレーション。平成20年全国共同利用情報基盤センター顕彰 功績賞受賞。平成26年度日本地震学会論文賞を受賞。

これを使うと、小さな地震も含めてプレート境界面のすべりの速度が推定でき、陸上のGPS観測では追えない場所で沈み込むプレートの動きも推定できるのです。

地震が発生すると「余効すべり」という現象も起きます。たとえば東北地方太平洋沖地震では、日本海溝に近い場所のすべりが50mくらいだったといわれています（図4）。地震時のすべりの影響は周辺にゆっくり拡散するので地震計ではとらえられません。このようなすべりを余効すべりといいます。

たとえば、スマトラ島沖地震では、2004年にM9、その後はM8の地震が複数回にわたって起きています。同じように、東北地方太平洋沖地震も何年か後に、茨城沖や十勝沖でM8クラスの地震が起きるかもしれません。事前にこれを把握するためには、余効すべりがどのように広がったかをとらえておく必要がありますが、すべりは海底での動きなので、正確

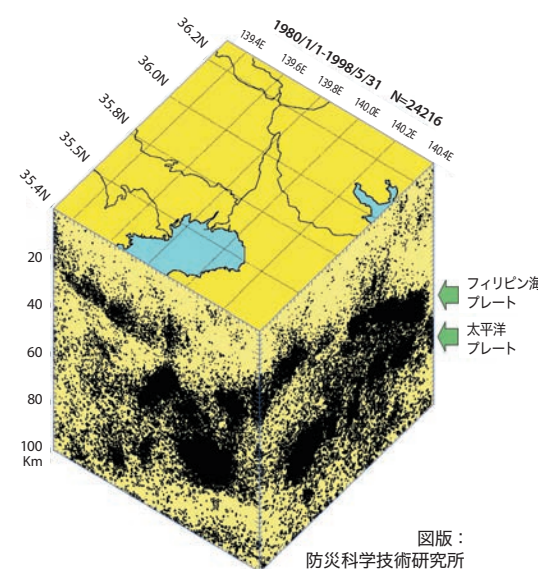


図3 震源分布の例

北米プレートの下にフィリピン海プレートが沈み込み、さらにその下に太平洋プレートが沈み込むという複雑な構造をした場所での震源分布。この結果だけでも、プレートの境界面はある程度の幅をもって特定することはできているが、相似地震を使えばさらに明瞭に決まることが期待される。

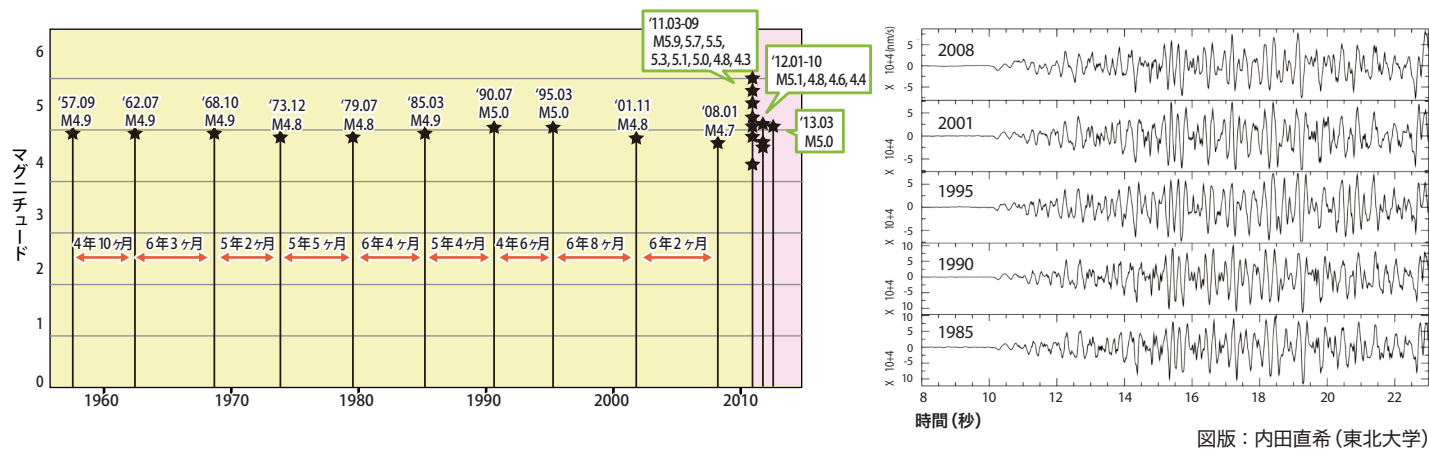


図1 釜石沖での地震活動と波形

左は1956年から2013年3月までの釜石沖での地震記録。M5クラスの地震が約5年ごとに繰り返し発生していることがわかる。右は、そのうち1985年から2008年に起きたM5クラスの地震の地震波形。互いによく似ていることがわかる。

にとらえることが難しいのです。相似地震はこの動きをとらえるための、非常に大事なツールになるのです。

浮かび上がってきた謎

相似地震を研究するなか、新たな謎や課題も浮かび上がってきました。2003年に起きた十勝沖地震（M8.0）の、余効すべりの推定すべり量を検証すると、陸上のGPSによる推定量と相似地震による推定量がかなり一致する観測点がある一方で、M7.1のアスペリティの近くでは、相似地震による推定量の方が明らかに小さかったのです。この点は解明できておらず、大きな課題になっています。さらに、余効すべりは、地震で起きたすべりの勢いが周辺に広がるため、その勢いで相似地震が活発化すると考えられますが、実際にはむしろ不活発になっていました。これも謎の一つです。

東北地方太平洋沖には、相似地震の空白域があります（図5）。東北地方太平洋沖地震後にあらためて相似地震の分布を見ると、その空白域と地震で大きなすべ

りが起きた場所はおおよそ一致することがわかりました。そこで相似地震の空白域は超巨大地震の震源域なのではないかという考えを、東北大学の内田さん・松澤さんたちが論文で発表しました。しかし、なぜ東北地方太平洋沖地震前にこの固着域で相似地震が起こっていないのかは、未解明です。

また、釜石沖では5年くらいの間隔でM5程度の相似地震が発生していたという話をしましたが、東北地方太平洋沖地震が起きた直後には、図6に示したように多くの地震が起きました。規模はM6クラスもあればM4クラスもあり、発生間隔は短いものでは数日、相似性が低く似ていない地震も多く、震源は東北地方太平洋沖地震前と比べて東南東から西北西の方向にずれていました。

なぜこのような地震活動が起こったのか、多くの研究者が頭を悩ませました。未発見のアスペリティがすべったと考える人たちもいました。しかしその論文を読んだとき私は、「本当かな」と疑問に思いました。もし活発化した地震を起こ

した場所が未発見のアスペリティだったなら、他の震源とは孤立しているので以前にも相似地震を起こしていたはずで、この考えでは2011年の東北地方太平洋沖地震のときにだけ発生したことが説明できないと考えたのです。私は地震の活発化には東北地方太平洋沖地震の余効すべりが影響しており、1つのアスペリティだけで説明できるのではないかと考え、JAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を使ったシミュレーションで検証してみました（図7）。

シミュレーションから見たこと

検証目的は、巨大地震を引き起こすアスペリティと相似地震を起こすアスペリティとの距離によって巨大地震後の地震の特徴が変わるかどうか、地震の活発化を孤立した1つだけのアスペリティだけで説明できるかどうかを探ることです。

その結果、3つの小さなアスペリティのうち、巨大地震を引き起こすアスペリティからの距離が中間のもので、かなり釜石沖に近い地震活動の活発化が再現されました。近いものでは似ていない地震しか起きず、遠いものでは発生間隔が長すぎました。東北地方太平洋沖地震の震源域と釜石沖との位置関係が地震活動活発化の背景にあったのです。

また、通常の相似地震が発生しているときには、小さなアスペリティの中心だけが壊れていると考えられますが、シミュレーションでは余効すべりが小さなアスペリティを通過した瞬間に、アスペリティ領域全体が破壊されました。その後、アスペリティ内部の中心からずれたところで小さな地震が複数発生しましたが、この震源がゆらいでいて、その方向は、余効すべりが広がる方向と一致していました。さらに時間が経過すると、通常の相似地震と同じような形にだんだんと落ち着いていきました。余効すべりの影響により、1つのアスペリティの全体が破壊されたり、内部で小さな破壊が起こったりした結果、規模も震源もばらばらの複数の地震が発生した様子が再現できたのです。

このシミュレーション結果から、釜石沖での現象は余効すべりが東南東から西北西の方向に伝播してきた影響によるもので、1つのアスペリティの破壊で説明がつくことを示しているのではないかと私は考えました。

これらを踏まえ、今日の話に出てきた課題について、私なりの考えを簡単に説明しましょう。まず、相似地震で推定したすべり量がGPSよりも小さいのはなぜか、余効すべりが相似地震を活発化させないのはなぜかということについては、巨大地震の規模が大きかったり、巨大地震と相似地震の距離が近かったりすると、余効すべりの影響が強すぎて相似性の低い地震が起きるため、相似地震のすべり量としてカウントされず、小さい量しか推定されないのではないかと考えました。

さらに、東北地方太平洋沖地震の震源域がなぜ相似地震の空白域になっていたかについては、震源域にとっても近く、徐々に固着域がはがれるという影響を受けたため、相似性の低い地震しか起きないのではないかと考えています。また、東北地方太平洋沖地震後に活発化した地震については、震源域のずれはありますが同じアスペリティが壊れているので、相似地震のすべり量にカウントする必要があると考えています。

今後の地震予測に向けて

今回のシミュレーション結果から、釜石沖のような巨大地震後の相似地震の震源域のゆらぎを検証していけば、それぞれの相似地震の震源域で、余効すべりがどの方向に進んでいるかを解明することができ、地震活動の推定に役立つのではないかと考えています。南海トラフで起きると考えられている巨大地震にも適応が可能です。

南海トラフでは相似地震が確認されていないエリアがあります。ものすごく強く固着しているからかもしれないし、見逃しているのかもしれませんが。さらなる検証には海底観測が必要であり、JAMSTECでは「地震・津波観測監視システム（DONET）」を構築し、海底地震計を設置してリアル

タイム観測をしています。

地震予測は確かに難しいことですが、複雑に見える現象の背景に、単純な物理法則も見え隠れしています。相似地震や「ゆっくりすべり」といった現象が発見され、スーパーコンピュータ等を使って現象を再現できるようになったことで、多くの知見が蓄積されるようになりました。

私の所属する部署はDONETの観測データを解析していますが、海底に観測網ができることにより、より精度の高いデータが得られるようになりました。今後は世界を視野に入れながら経験を積むことで、予測は“単に難しい”という段階から、“できなくはない”と考える段階に進んでいくと感じています。BE

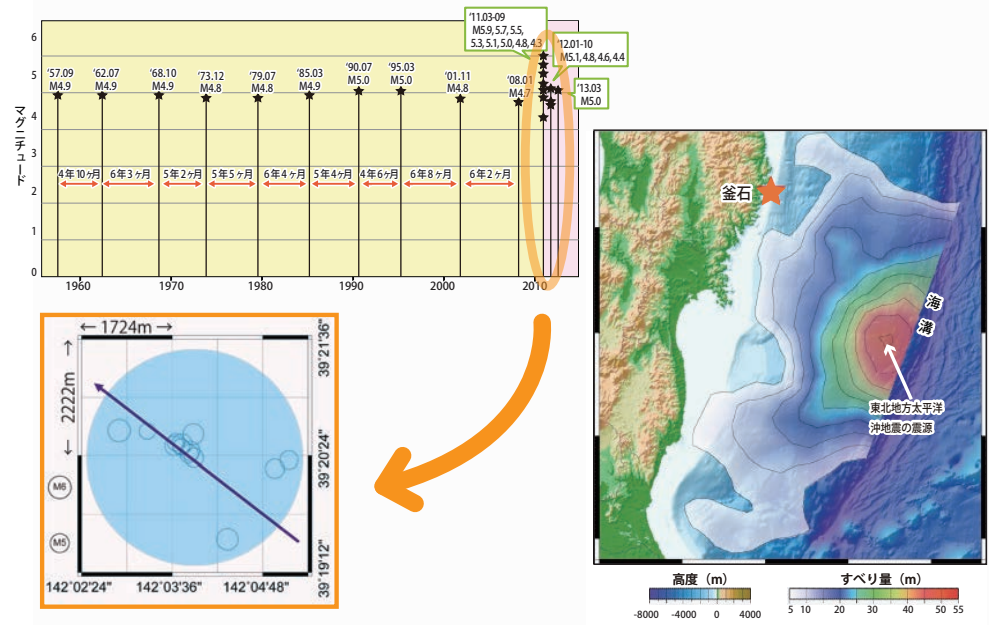


図6 東北地方太平洋沖地震後の釜石沖の地震活動

左上図はM5前後の地震の発生状況。東北地方太平洋沖地震後、地震活動が急速に活発化していることがわかる。左下図は東北地方太平洋沖地震後に起きた地震の震源を示す。本震前は中央部に震源が集中していたが、本震後は東南東から西北西にゆらいでおり、余効すべりの伝播の方向と考えられる。右は本震によるすべり量。星印が釜石沖。

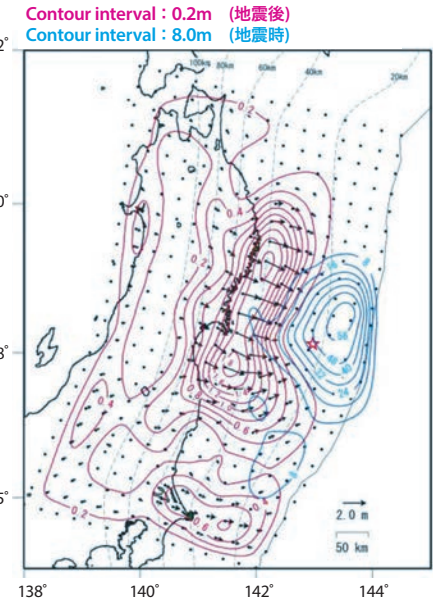


図4 東北地方太平洋沖地震時のすべり量と余効すべりのすべり量の分布

青線は地震時のすべりの、8m間隔の等値線。赤線は余効すべりの0.2m間隔の等値線。余効すべりは本震の影響がゆっくりと拡散したすべりであるため、地震計でとらえることは難しい。

図版：国土地理院

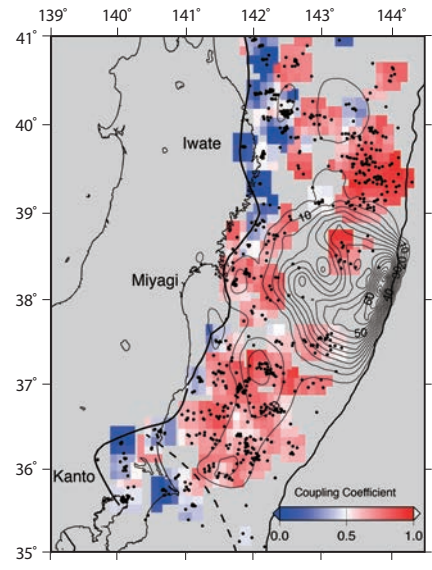


図5 相似地震活動の分布

赤色は、プレートの沈み込み速度に比べ相似地震があまり起きていない、大陸プレートと海洋プレートが強く固着していると考えられる場所。青色は、プレートの沈み込み速度と同じくらいの割合で相似地震が起きているので、ズルズルとすべっていると考える場所。灰色は相似地震が見つからず、解析していない場所で、東北地方太平洋沖地震の震源域が含まれていた。

図版：東北大学(第190回地震予知連絡会資料より)

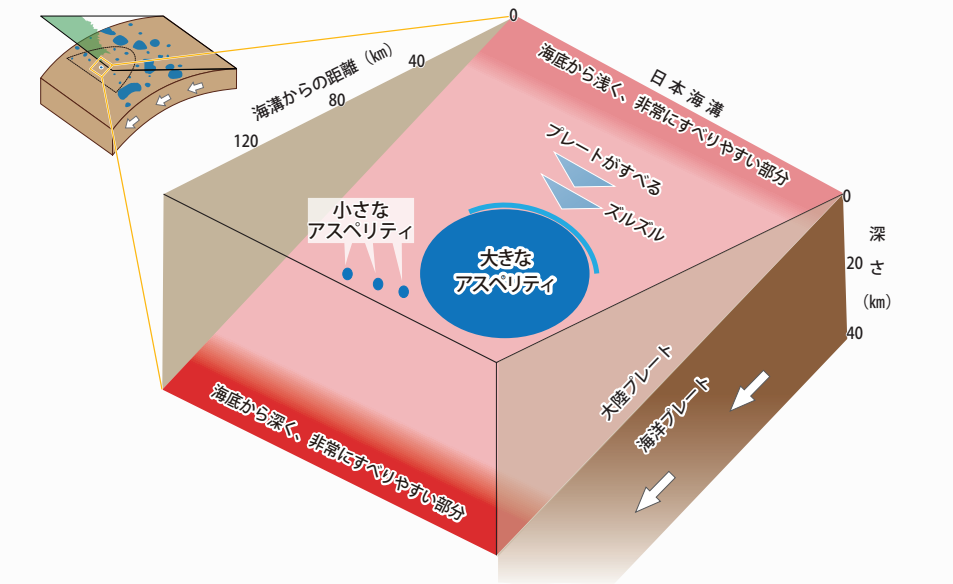


図7 「地球シミュレータ」を使った数値実験

釜石沖での東北地方太平洋沖地震後の地震活動を検証するために行った数値実験の模式図。巨大地震を引き起こすアスペリティは、M7クラスの地震を繰り返し起こす、アスペリティはM4クラスの地震を引き起こすものと想定した。繰り返し地震のアスペリティは、巨大地震のものから距離を変えて3カ所設定した。

海洋調査船「なつしま」「かいよう」の輝かしい歴史を礎として 海洋科学技術のさらなる発展を目指す

『「なつしま」「かいよう」合同退役セミナー・退役式典』を実施

海洋調査船「なつしま」「かいよう」の2船が2015年度で運航を終了することとなり、2016年1月29日にJAMSTEC横須賀本部で、「2船合同退役セミナー」および「退役式典」が行われた。

セミナー・式典の前には、本部前の岸壁に停泊した「なつしま」で、最後の船内見学会も実施され、集まったJAMSTEC職員・研究者らは、深海調査のパイオニアとして活躍し、JAMSTECの活動を支えてきた「なつしま」との別れを惜しんだ。

「2船合同退役セミナー」では、挨拶に立った海洋工学センター・磯崎芳男センター長が、「なつしま」の35年間の総航海距離が約152万kmにおよび、「これは地球の赤道を38周する

距離、地球と月を2往復する距離に相当する」こと、また「かいよう」は30年間でこれを上回る「約173万kmの航海を行ってきた」ことを紹介した。続いて同センター・田代省三センター長代理が、「なつしま」「かいよう」の懐かしい映像とともに、2船の輝かしい軌跡を紹介。「『なつしま』は、有人潜水調査船『しんかい2000』とともに、日本で初めて研究者を深海へお連れし、試行錯誤を繰り返しながら深海調査の礎を築いてきた船です」、また「『かいよう』は、完成直後はさまざまなトラブルに悩まされましたが、深度300mの飽和潜水技術確立を目指した『ニューシートピア計画』を成功に導き、後には大陸棚画定調査をはじめ、広い甲板を有効に活用して『DONET（地震・津波観測監視

システム）』構築に力を発揮するなど、『かいよう』ならではの数々の偉業を成し遂げてきました」と話した。

さらに地震津波海域観測研究開発センター・川口勝義研究開発センター長代理が、「DONET」構築計画に活躍した2船の思い出を紹介。海洋工学センター運航管理部・内田徹夫次長は、1995年の「なつしま」および無人探査機「ドルフィン-3K」による海上自衛隊遭難ヘリコプター捜索協力、1997年の「なつしま」および「ドルフィン-3K」、深海曳航調査システム「ディープ・トウ」によるロシアタンカー「ナホトカ号」の事故調査、「なつしま」および「ドルフィン-3K」による学童疎開船「対馬丸」調査など、「なつしま」が果たしてきた社会貢献活動について語った。

セミナーの後に「2船合同退役式典」が行われた。平朝彦理事長は、JAMSTECが最初に運用した「なつしま」、2番目の「かいよう」は、「人が船をつくり、船が人をつくる、まさに“人船一体”となって、JAMSTECの基盤、日本の海洋科学技術の基盤を築いてきた」と話し、「これまで30年、35年の長きにわたって、大きな事故もなく、安全に運航されたことが2船の偉大な

業績であり、2船とその運航を支えてきた皆さんに感謝の言葉を送りたい」と挨拶した。引き続き、「なつしま」「かいよう」の運航を担ってきた日本海洋事業株式会社への感謝状贈呈。さらに同社の石原泰隆代表取締役社長、「なつしま」漁野伸哉船長、「かいよう」井上孝道船長が挨拶し、2船の思い出などを語った。そして、機構旗の返還、両船長への花束贈呈が行われ、式典の最後に挨拶した堀田平理事は、「2船が遺してくれた大きな財産」として、長きにわたって研究者の活動を支え、多大な成果を達成したこと、人と技術をつなぎ、世界トップレベルのオペレーション技術と安全管理を成し遂げたこと、そして人と人のつながりを築いてきたことの3つを挙げた。

JAMSTECの活動を30年以上支えてきた「なつしま」「かいよう」の退役は惜しまれるが、「2船が築き上げた伝統を受け継ぎ、海洋科学技術の次の時代を創っていくことこそが、私たちの使命」と平理事長は話す。まさにその使命を果たすべく、最先端の調査機器を搭載した最新鋭の研究船、海底広域研究船「かいめい」が2016年春に完成し、試験航海が開始される予定だ。

海洋調査船「なつしま」



退役式典で挨拶する
平朝彦理事長。



退役を惜しみ、職員・研究者らが書いた寄せ書き。



「なつしま」進水式（1980年8月 川崎重工業神戸工場）



「なつしま」および「ドルフィン-3K」が行った学童疎開船「対馬丸」調査。



2船合同退役式典の記念撮影。

海洋調査船「かいよう」



多くの関係者・職員が参列して行われたセミナーおよび式典の会場の様子。



会場に展示された「なつしま」「かいよう」の号鐘。



「かいよう」命名式（1984年5月 三井造船千葉事業所）



「かいよう」で行われた「ニューシートピア計画」深海飽和潜水実験の様子。

特集「小さな生物たちの多様な世界を探る」はいかがだったでしょうか？ 最近マスコミに「腸内細菌フローラ」とか「菌活」などという話題がさかんに取り上げられています。これらを非科学的だというのは簡単ですが、実は私も原核生物と真核生物の違いや原生生物の多様性などあまり気にしたことがありませんでした。さすがに最先端の研究者の話題は、実に興味深く「珪藻から葉緑体を盗み取る有孔虫」とか「深海の真菌」などは、まさに“目からうろこが落ちる”話で、ほかの科学雑誌の解説にもひけを取らない内容だったと思います。BE編集部としては、地球物理や大型生物などだけではなくこのような基礎的な研究分野についてもできるだけ最新の話題をわかりやすく読者の皆さまにお送りしたいと考えています。

さて、ついに、いままで我々のさまざまな海洋調査や技術開発を支えてくれた船舶「なつしま」と「かいよう」が退役し、先般JAMSTEC本部の岸壁から最後の見送りをしました。「なつしま」は「しんかい2000」の母船として建造された、JAMSTEC最初の観測船でした。我々はその当時、備船ではなく自前の船に乗って、やっと本物の「海洋研究所」になったとしみじみ思ったものでした。建造時、私は、多くの仲間と共に「なつしま」と「かいよう」の音響機器や電波航法装置（GPSのない時代）の開発やテストを、メーカーや造船所と一緒に寝食を忘れて繰り返しました。これらの経験が、その後のJAMSTECの船舶建造の技術的な基礎となっているといっても過言ではありません。

2016年4月には、退役した2隻にかわって新しい海底広域研究船「かいめい」が就航します。BE編集部は今後も「かいめい」の活躍を注視していきたいと思います。（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メールまたは電話でお申し込みください。
Eメールの場合は、①～⑤を明記の上、下記までお申し込みください。
① 郵便番号・住所 ② 氏名(フリガナ) ③ 所属機関名(学生の方は学年)
④ TEL・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冊本体286円＋税＋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 広報部 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（142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、国立研究開発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28年3月10日現在

国立研究開発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	オフショアエンジニアリング株式会社
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋エンジニアリング株式会社
株式会社アイケイエス	海洋電子株式会社
株式会社アイワエンタープライズ	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アクト	鹿島建設株式会社
朝日航洋株式会社	川崎汽船株式会社
アジア海洋株式会社	川崎重工業株式会社
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	川崎地質株式会社
株式会社安藤・間	株式会社環境総合テクノス
泉産業株式会社	株式会社キュービック・アイ
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	共立インシュアランス・ブローカーズ株式会社
株式会社エス・イー・エイ	共立管財株式会社
株式会社エスイーシー	極東貿易株式会社
株式会社SGKシステム技研	株式会社きんでん
株式会社エヌエルシー	株式会社熊谷組
株式会社NTTデータ	クローバテック株式会社
株式会社NTTデータCCS	株式会社グローバルオーシャンティベロップメント
株式会社NTTファシリティーズ	株式会社KSP
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	京浜急行電鉄株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	KDDI株式会社
株式会社OCC	鉱研工業株式会社
株式会社オキシーテック	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

広和株式会社	セナーアンドバーンズ株式会社
国際石油開発帝石株式会社	株式会社ソリッド・ソリューションズ・インク
国際ビルサービス株式会社	損害保険ジャパン日本興亜株式会社
コスモス商事株式会社	第一設備工業株式会社
株式会社コベルコ科研	大成建設株式会社
五洋建設株式会社	大日本土木株式会社
株式会社コンボン研究所	ダイハツディーゼル株式会社
相模運輸倉庫株式会社	太陽日酸株式会社
佐世保重工業株式会社	有限会社田浦中央食品
三建設備工業株式会社	高砂熱学工業株式会社
三洋テクノマリン株式会社	株式会社竹中工務店
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー	株式会社地球科学総合研究所
JFEアドバンテック株式会社	中国塗料株式会社
株式会社JVCケンウッド	中部電力株式会社
シチズン時計株式会社	株式会社鶴見精機
シナネン株式会社	株式会社テザック
株式会社シーフロアーコントロール	寺崎電気産業株式会社
シモダフランチ株式会社	電気事業連合会
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	東亜建設工業株式会社
シュルンベルジェ株式会社	東海交通株式会社
株式会社昌新	洞海マリンシステムズ株式会社
株式会社商船三井	東京海上日動火災保険株式会社
新日鉄住金エンジニアリング株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社
須賀工業株式会社	株式会社東京チタニウム
鈴鹿建設株式会社	東北環境科学サービス株式会社
セイコーウオッチ株式会社	東洋建設株式会社
石油資源開発株式会社	株式会社東陽テクニカ
セコム株式会社	トピー工業株式会社

新潟原動機株式会社	富士ソフト株式会社
西芝電機株式会社	株式会社フジタ
株式会社ニシヤマ	富士通株式会社
日油技研工業株式会社	富士電機株式会社
株式会社日産電機製作所	古河機械金属株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	古河電気工業株式会社
日本SGI株式会社	古野電気株式会社
日本エヌ・ユー・エス株式会社	株式会社ベッツ
日本海工株式会社	株式会社マックススラジアン
日本海洋株式会社	松本徽章株式会社
日本海洋掘削株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海洋計画株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海洋事業株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
一般社団法人日本ガス協会	株式会社マルトー
日本サルヴェージ株式会社	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
株式会社日本製鋼所	三井造船株式会社
日本電気株式会社	三菱重工業株式会社
日本マントル・クレスト株式会社	三菱スペース・ソフトウェア株式会社
日本無線株式会社	三菱電機特機システム株式会社
日本郵船株式会社	株式会社森京介建築事務所
濱中製鋼工業株式会社	八洲電機株式会社
東日本タグボート株式会社	株式会社ユー・エス・イー
株式会社日立製作所	郵船商事株式会社
日立造船株式会社	郵船ナブテック株式会社
深田サルベージ建設株式会社	ヨコハマゴム・マリン&エアロスペース株式会社
株式会社フグロジャパン	株式会社落雷抑制システムズ
株式会社フジクラ	

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28巻 第2号（通巻142号）2016年3月発行

発行人 鷲尾幸久 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部
編集人 廣瀬重之 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部 広報課
Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 株式会社ミュール
アートディレクション 前田和則
取材・執筆 滝田よしひろ (p.1-3、p.30-31)、上浪春海 (p.2-19)、
山崎玲子 (p.20-21)、斉藤勝司 (p.22-25)、寺田千恵 (p.26-29)
編集・制作 滝田よしひろ、柏原羽美
デザイン 三橋理恵子、木元優介、山田浩之、高塩由香
イラスト 加藤愛一 (p.4、p.5右上、p.15)
撮影 藤牧徹也 (p.22)、滝田よしひろ (p.1、p.30右3点、p.31左2点)

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。

国立研究開発法人海洋研究開発機構の事業所

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)

PICK UP JAMSTEC

Blue Earth

142号

2016年3月発行 隔月6回発行 第28巻 第2号 (通巻142号)

編集・発行 国立研究開発法人海洋研究開発機構 横浜研究所 広報部 広報課
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3-173-25

『Blue Earth』のバックナンバーなどが閲覧できる JAMSTEC 文書カタログ

JAMSTEC では、「JAMSTEC 文書カタログ」サイトで、2000 年以降の『Blue Earth』バックナンバーを公開しています。閲覧したい冊子を PDF でダウンロードできるほか、知りたいことや読みたい記事をキーワードで検索することもできます。

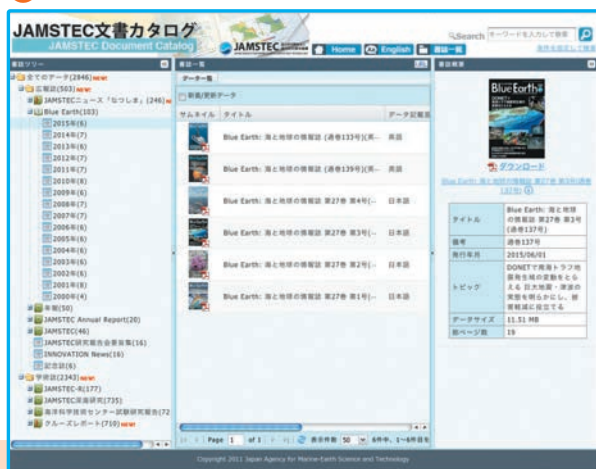
さらにこのサイトでは、JAMSTEC の最新情報がわかる「JAMSTEC ニュース なつしま」や調査観測の様子などがまとめられた「クルーズレポート」など、さまざまな JAMSTEC の広報誌、学術誌が公開されています。ぜひ活用ください。

かんたん 使い方ガイド



http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/doc_catalog/metadataList?lang=ja&tab=category&value=%E5%BA%83%E5%A0%B1%E8%AA%8C,Blue%20Earth

① 2015 年の表紙をクリックすると…



その年の一覧が表示されます。読みたい冊子の欄をクリックすると、右側に簡単な内容が表示されます。

② ゆめいるか と入力すると…



JAMSTEC 文書カタログで公開されている全冊子（2846 点：2016 年 3 月 10 日時点）から、関連の記事や内容が掲載されている文書が一覧で表示されます。

※ PDF のコンテンツが含まれています。ご覧になるには Adobe Reader が必要です。
※ 閲覧できるのはバックナンバーのみです。最新号は含まれません。

刊行物 のご案内

『Blue Earth』の最新号やバックナンバーのご購入については、JAMSTEC ホームページにて手続き等をご案内しています。お気軽にお問い合わせください。
<http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/>

