

海と地球の情報誌

Blue Earth

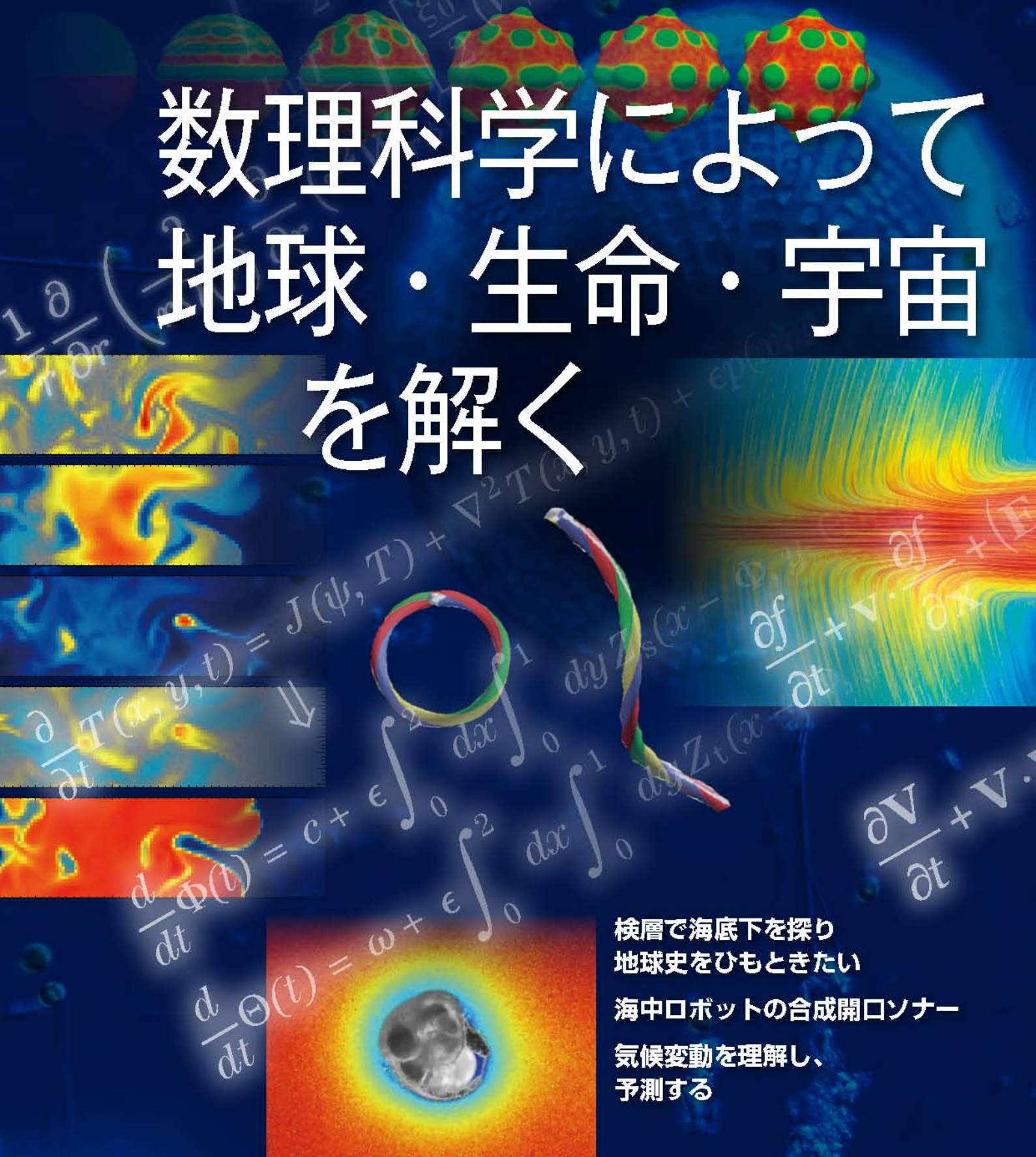
153

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2018年3月発行
隔月年6回発行
第30巻 第1号
(通巻153号)



数理科学によって 地球・生命・宇宙 を解く



検層で海底下を探り
地球史をひもときたい

海中ロボットの合成開口ソナー

気候変動を理解し、
予測する

数理科学 によって 地球・生命・宇宙 を解く

1 **特集**
数理科学によって
地球・生命・宇宙を解く

18 **Aquarium Gallery**
鳥羽水族館
アグレッシブな生きた化石
——パラオオウムガイ

20 **私がIODPで解きたい謎**
検層で海底下を探り、
地球史をひもときたい
斎藤実篤
海洋掘削科学研究開発センター
掘削情報科学研究開発グループ グループリーダー

24 **JAMSTEC生まれの種たち**
海中ロボットの合成開口ソナーで
海底の生物や断層を発見する
澤 隆雄
海洋工学センター 海洋戦略技術研究開発部
海洋観測技術研究開発グループ 主任技術研究員

28 **Marine Science Seminar**
気候変動を理解し、予測する
スーパーコンピュータが描く未来
小玉知央
ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム
極端現象全球予測研究ユニット ユニットリーダー

32 **BE Room**
Information
『Blue Earth』定期購読のご案内

裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**
「深海デブリデータベース」を公開中!

取材協力

数理科学・先端技術研究分野

阪口 秀 分野長

山本美希 研究員

河村洋史 主任研究員

下林俊典 研究員

簗島 敬 研究員

廣瀬重信 主任研究員

古市幹人 主任研究員

西浦泰介 技術研究員

海洋生物多様性研究分野

豊福高志 主任研究員

所属・役職は取材当時のものです。

数理科学・先端技術研究分野

(Mathematical science and Advanced Technology : MAT) には2つの使命がある。1つ目は、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) のほかの研究センターや研究分野と連携しながら、生物から海洋、気候、地球、そして宇宙にまで及ぶさまざまな現象の謎を数理科学によって解き明かすこと。2つ目は、数理科学に裏打ちされた先端技術を生み出すこと。そのため、所属メンバーそれぞれが取り組んでいるテーマは、実に多種多様だ。今号では、その一端を紹介しよう。



MATは、数理科学によってJAMSTEC のすべての分野に貢献する。

取材協力 阪口 秀
数理科学・先端技術研究分野 分野長

■JAMSTECには 数理科学が欠けていた

——MATは2014年4月に発足しました。発足までの経緯を教えてください。

阪口：私がJAMSTECで研究を始めたのは2004年です。着任して間もなく、ある理事から「いまのJAMSTECに欠けているものは何だと思いますか」と聞かれ、「数理科学です」と即答しました。それから10年間、数理科学に特化した組織が必要だといひ続けてきました。

——数理科学とはどういう研究分野で、なぜJAMSTECに必要なのですか。

阪口：数理科学は、現象を数式で記述し、数学的に解析することによって現象を理論的に理解し、根底にある法則を見つけ出す研究分野です。法則が分かれば、時間を進めたり戻したりするとどうなるか、数値計算によって予測も可能になります。さらには、その現象をより深く理解するためには、いつ、どこで、どのような観測や実験を行えばよいかを提示することも数理科学の大きな特徴です。

JAMSTECでは、たくさんの研究船や探査機などを使って海洋や気候、地質、生物などに関する膨大なデータを取得しています。観測は重要です。すべてのサイエンスは見ることから始まりますから。しかし当時、せっかく手に入れた観測や実験のデータを体系立てて数学的に解析し、その根底にある法則を見つけようという研究は、ほとんど行われていませんでした。観測や実験のデータをもとにスーパーコンピュータを用いた大規模な数値計算も行われていましたが、それは数理科学とは別物です。

素粒子研究や観測天文研究など膨大なデータを扱う分野には、必ず数理科学的な解析を行う研究者がいます。一方、これほど多くのデータを扱っているJAMSTECに本格的な数理科学の研究者がいないというのは、自然科学系の研究

所として不十分だと考えていました。

■ゴールまでのショートカットをつくる ——MATは、どのようなことを目指しているのでしょうか。

阪口：JAMSTECは「海洋・地球・生命の統合的理解」を掲げ、さまざまな研究・技術開発活動を行っています。たとえば、海洋観測によって気候変動を捉え、そのメカニズムを理解して予測を目指す研究、地球深部探査船「ちきゅう」によって海洋底を掘削して地質試料を採取し、地震や津波の発生メカニズムを解明して防災・減災の実現を目指す研究などがあります。そうした科学と技術によって国民のよりよい生活を築くことが、JAMSTECのゴールです。ゴールまでの道のりは、とても長い。そこで、数理科学を使った解析によって理解を促進したり、研究開発のスピードを加速させたりすることでゴールまでの距離を短くする、つまり本流の道にショートカットをつくるのが私たちMATの役割です。

■数理科学に裏打ちされた 先端技術を生み出す

——研究分野の名前には、「先端技術」という言葉も入っています。

阪口：JAMSTECには、技術開発を担うセンターが3つあります。海洋工学センター、地球情報基盤センター、地球深部探査センターです。それらは、調査船や

探査機、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」、地球深部探査船「ちきゅう」などの運用も担っているため、運用の傍らの補足的な技術開発が中心になります。しかし、それだけでは技術は先細りしてしまいます。技術は、JAMSTECの屋台骨であり体力です。どんなに賢くても、体力がなければゴールにたどり着くことができません。20年後、50年後を見据え、JAMSTECオリジナルの技術を開発し続ける必要があります。

そこで、新しい技術を考え、その実現可能性を数理科学に基づいて先取りして試すことが、MATのもう1つの役割です。20年後、50年後を見据えているので、いまは突拍子もないと思えるくらいの技術の方がいい。そうしたなかから実現できそうな技術が見つければ、室内実験で基礎データを取って検証したり数値実験を行い、さらに技術開発を担うセンターなどと連携して育てていくのです。

私は、「ショートカットの途中で迂回してもいいよ」といっています。迂回してJAMSTECが知らない技術や知識を獲得して戻ってくるのは、大歓迎です。もともとショートカットしているのでゴールまでの距離は短縮されていますから。ただし、

自己満足のための研究や開発は駄目です。本流の道を外れるという意味では、どちらも同じように見えるかもしれません。しかし、自己満足のための研究や開発の先は、行き止まりです。MATでは、迂回した場合も必ず本流の道に戻す。それを強く意識しています。

■数式を共通言語として 多種多様なテーマが進行中

——MATの発足から4年。これまでにどのような成果が出ているのでしょうか。

阪口：ゼロの状態からスタートしたので、ようやく成功事例がいくつか出てきたという状況です。その代表が、この特集でも紹介している有孔虫の殻形成に関する研究です。海洋生物多様性研究分野の豊福高志さんの実験データから出発して、MATの山本美希さんとの協働によって、有孔虫の炭酸カルシウムの殻形成は水素イオンの排出が鍵であることを突き止め、

2017年1月に発表しました。ずっと生物の研究をしてきた人がいままら数理科学を学ぶのはエネルギーと時間の無駄です。でも、MATの研究者と組めば数理科学を用いた解析が可能になり、生物の研究者だけでは解けないような問題を解くことができ、研究が発展する。それを実際に示すことができました。

ほかにも、地球内部のマントル対流、プレートの沈み込み帯における付加体の形成、気候変動のテレコネクション（遠隔相関）、カイメンのべん毛運動、細胞中の脂質ラフトや脂肪滴、宇宙プラズマの発生と地球環境への影響、原始惑星系円盤の形成、掘削用ドリルパイプの変形、多数AUV（自律型無人探査機）の同時運用法、鉄道軌道構造の設計、津波に強い堤

防の設計、海底掘削によって発生する音が魚に与える影響など、さまざまなテーマに取り組んでいます。

研究船の運航データのデータベース化も進めています。研究航海では、気象や海象が悪く予定した調査や実験を実施できないことが、実はよくあります。そこで、JAMSTECが運用している研究船の過去の運航情報をすべて、日時や航路はもちろん、気象、海象、観測・実験内容からその結果について、報告書だけでなく手書きのメモまでデジタルデータ化し、それらを数理科学的に解析することで、予定している調査や実験を達成できる確率が高い効率的な運航計画を立てることを目指しています。

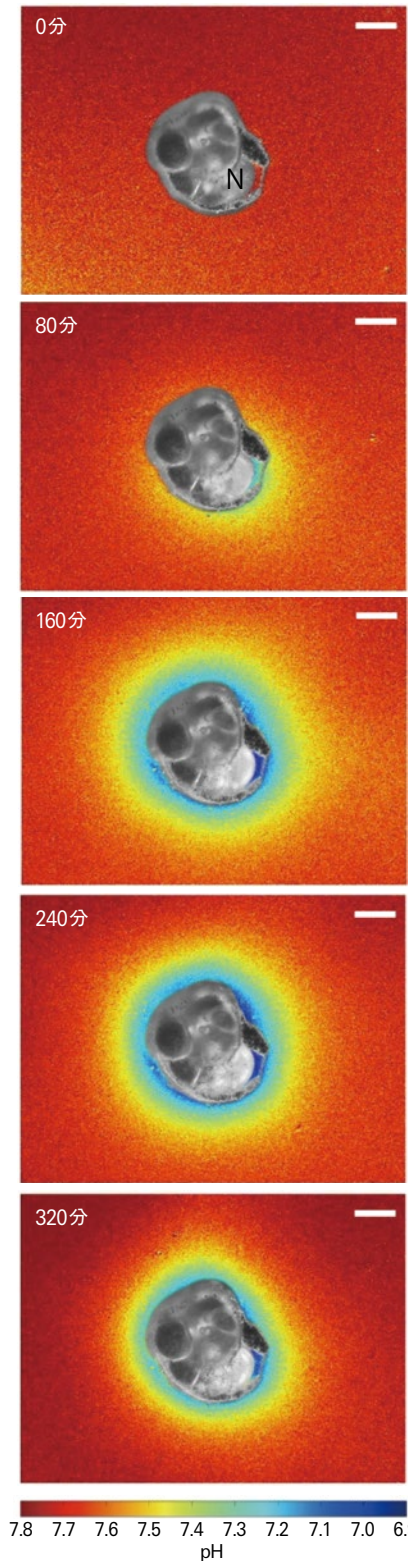
先端技術で注目しているのは、レーザーです。海底の地殻変動の検出や、シリカを主成分とする岩石やコンクリートのガラス化、また生物系の研究者と共に生物の表面に個体を識別できるバーコードなどを付けて追跡を可能にするなど、レーザーを用いたさまざまなまったく新しい技術開発に取り組んでいます。

——対象としている分野、現象が多岐にわたっていますね。

阪口：さまざまな分野、現象を扱う研究者が1つの組織に集まっていることが重要だと思っています。私たちの共通言語は数式です。どんな問題でも数式を見れば、どのような振る舞いをする現象かを理解し、議論できます。MATでは週1回セミナーを開催し、順番に自分の研究について話することになっています。まったく違う分野の研究をしている人たちのなかで話をし、また話を聞いて議論する訓練をしていると、興味の幅が広がり、考え方もやわらかくなります。そういう下地があると、異なる分野、現象についてほかの研究者から相談があったときも興味を持ち、積極的に対応できるようになります。

JAMSTECでは、さまざまな分野の研究や技術開発が行われています。そうしたすべての分野の発展に数理科学で貢献するのが、MATの最終的な目標です。





有孔虫の外側のpH分布の可視化画像。殻の形成に伴って、有孔虫周辺のpHが同心円状に低下していく。有孔虫が水素イオンを放出し、それが拡散していくことを示す。スケールバーは100μm。

海洋生物多様性研究分野の豊福高志さんには、解き明かしたい謎がある。「有孔虫は炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の殻を持っています。炭酸カルシウムの殻はカルシウムイオン（ Ca^{2+} ）と炭酸イオン（ CO_3^{2-} ）が結合してつくられますが、その詳細なメカニズムは、よく分かっていないのです」と豊福さん。

有孔虫は1mmほどの単細胞生物で、世界中の海に生息している。有孔虫の殻形成の謎を解き明かすために豊福さんは、有孔虫の細胞内のpHの分布を可視化できる手法を開発。その結果、殻を形成している部分はpHが高くなっていることが分かった。

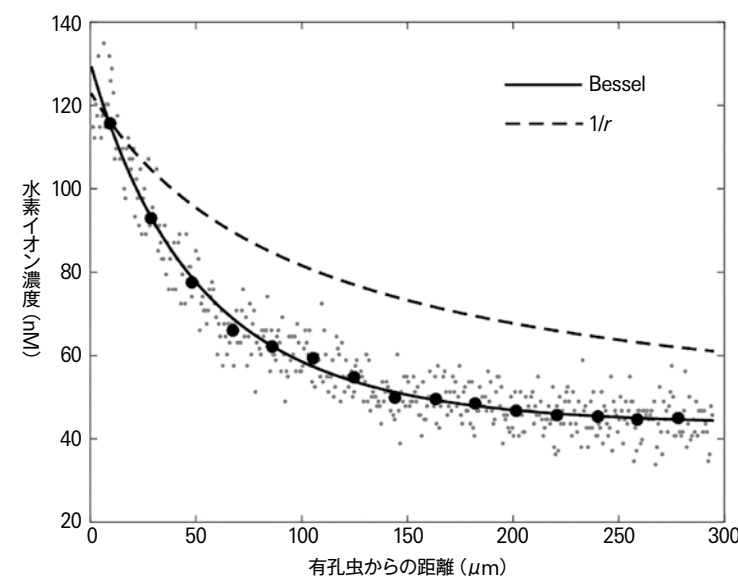
なぜpHを測るのだろうか。pHは水素イオン（ H^+ ）の濃度を表し、pHが高くなるということは水素イオン濃度が低下することを意味する。水素イオン濃度が高いと、炭酸イオンは水素イオンと結合して重炭酸イオン（ HCO_3^- ）となってしまうため、炭酸カルシウムが形成されにくくなる。殻を形成している部分はpHが高くなっていることから、炭酸カルシウムが形成されやすい環境であることが確かめられた。豊福さんはカルシウムイ

オン濃度の可視化にも成功し、pHが高い場所でカルシウムイオン濃度が高くなっていることも明らかにした。

それが2013年。有孔虫が殻をつくる時のpHとカルシウムイオン濃度を可視化した例はほとんどなく、画期的な成果である。しかし豊福さんは、「それらのデータでは、殻の材料であるカルシウムや炭素がどこから来ているかまでは分かりません」と自ら指摘する。「理解をもう一步進めるにはどうしたらいいのだろうか」と悩んでいたとき、JAMSTEC内のセミナーでMAT分野長の阪口 秀さんの話を聞いたのです。数理科学を使えば、画像を数値化し、その現象を数式で記述して法則を導くことができるという。有孔虫の殻形成のメカニズムを解き明かす突破口になるかもしれないと思い、阪口さんに相談し、山本美希さんを紹介してもらったのです。山本さんと初めて会ったのは2014年だったと思います」

初対面のとき、山本さんは？「カルシウムは外から来ているらしいのだが、それははっきり示すことができないか、と豊福さんはいうのですが、細胞内の情報だけでは無理です。有孔虫の外側のpHとカルシウムイオン濃度を測ってよ、そうすれば解ける、といいました」

豊福さんも有孔虫の外側のpHやカル



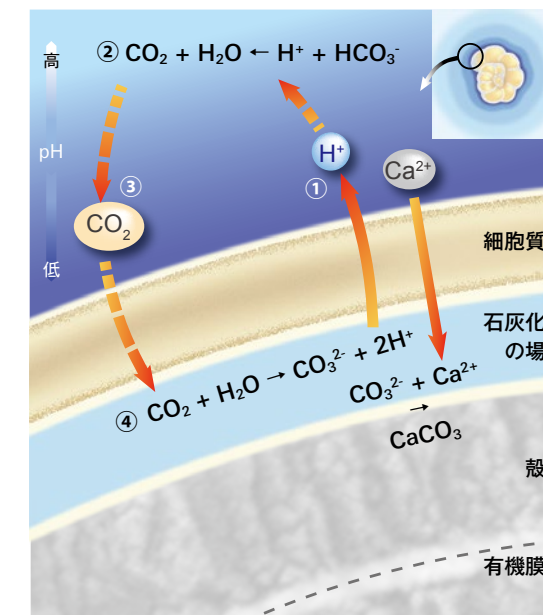
殻形成時の水素イオン濃度の分布。灰色の点は有孔虫周囲での水素イオン濃度の実測値、黒丸は平均値。実線は第2種変形球ベッセル関数で記述した数式から推定される水素イオン濃度分布、破線は距離に反比例している場合の分布。実際の分布は、ベッセルによる推定に近くなっている。有孔虫から放出された水素イオンが重炭酸イオンから二酸化炭素に変化するために消費されていることから、拡散だけでは説明できないほど減衰するためである。

シウムイオン濃度を測ろうとしたことはあった。しかし、細胞内と外側を同時に測るのは難しく、断念していたのだ。「外側を測る重要性をあまり感じていなかったというのもあります。でも山本さんと話して外側を測ることで一歩進むという確信を持ったことで、意気込みも変わりました」と豊福さん。そして試行錯誤の末、細胞内と同時ではないが、有孔虫の外側のpHの分布を可視化することに成功した。その結果を見て、豊福さん自身が驚いたという。「殻の形成に伴ってpHが同心円状に低下していくのです。しかも、その変化量は予想以上の大きさでした。早速、画像を山本さんに見せに行きました。これでどうだ！という感じでしたね」

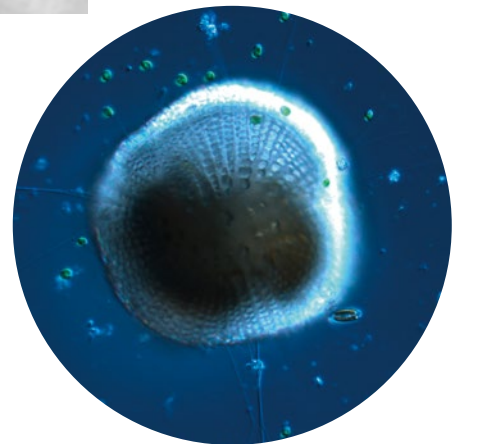
しばらくして山本さんから「水素イオン濃度の変化は第2種変形球ベッセル関数で表せるね」と連絡があった。「何をいっているのか理解できませんでした（笑）。同じ画像を見ても、数理科学の研究者には見えるものが違うんだなと思いました」と豊福さんはいう。

山本さんは、画像解析によってpHの値を定量化し、それを水素イオン濃度に変換し、有孔虫からの距離と時間による変化を数式で表した。「第2種変形球ベッセル関数」というと難しく感じるかもしれませんが、ごく簡単にいうと、有孔虫は水素イオンを能動的に排出し、それが拡散していくことが分かりました」と山本さんは解説する。水素イオンの排出は、殻が形成される場所のpHが高くなっていることと合致する。さらに山本さんは、その現象を記述した数式から成る数理モデルをつくり、pHの変化は有孔虫の近傍だけでなく離れたところまで及んでいることを予測。豊福さんが広範囲を観察できるように実験を設計して計測したところ、予測通りであることも確かめられた。

水素イオンが拡散する場合、その濃度分布は距離に反比例する。しかし実験データは、その分布から少しずれてい



有孔虫。主に海洋に生息する単細胞生物で、多くは炭酸カルシウムの殻を持つ。1mmほどの小さな生物だが、有孔虫による年間の炭酸カルシウム生産量は、海洋における全生産量の20%を占める。海洋におけるカルシウムや炭素の循環を考える上で重要な生物である。殻は化石として地層中に保存され、地層が堆積した時代や環境を知る重要な材料となっている。



明らかになった有孔虫の殻形成のプロセス

- ①有孔虫は、殻が形成される石灰化の場から酵素の働きで水素イオンを排出する。石灰化の場は水素イオン濃度が下がるため、pHが上昇する。
- ②環境の水素イオン濃度が上がるため、pHが低下する。水素イオンは海水中の重炭酸イオンと反応し、二酸化炭素を生成する。
- ③二酸化炭素は重炭酸イオンより細胞質を透過しやすいので、炭素の取り込みに有利に働く。
- ④石灰化の場ではpHが高いため、取り込まれた二酸化炭素から炭酸イオンが生成される。それが、別に取り込まれたカルシウムイオンと反応し、炭酸カルシウムが形成される。

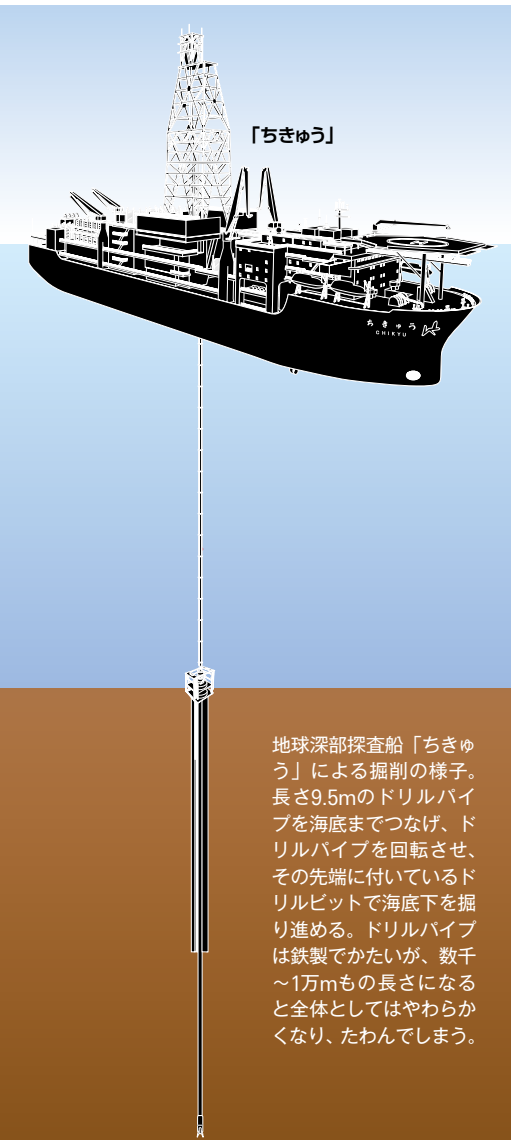
る。「拡散だけでなく、その過程で何らかの化学反応が起きていると考えないと説明が付きません」と山本さん。豊福さんが続ける。「有孔虫から放出された水素イオンが海水中の重炭酸イオンと反応すると二酸化炭素と水になります。この反応ではないかと考えています。有孔虫はその二酸化炭素を取り込んで殻の材料にしている、というのが私たちの考えです」

有孔虫が水素イオンを排出する働きを阻害すると、外側のpHの変化がなくなり、殻の形成も起きなくなった。これは、水素イオンの放出が殻形成の鍵であることを示している。「山本さんに外側を測るべきだといわれなかったら、まだやっていなかったでしょうね。測ったとしても、pHが低下しているという論文を書いて終わりだったかもしれません。有孔虫が殻の材料の炭素を二酸化炭素として取り入れていることまで分かったのは、数理科学の力です」と豊福さん。

山本さんも「生物の研究者と数理科学の研究者が対話したからこそ生まれた成果」という。

しかし、カルシウムがどこから来るのか、という謎はまだ解けていない。「有孔虫の外側のカルシウムイオン濃度を可視化するのは難しく苦戦していますが、ぜひ実現したい」と豊福さんは意気込む。一方、山本さんの興味は少し違う。「有孔虫の殻はとていろいろなかたちをしています。そのかたちを数式で記述したい。今回の殻形成より高度な数理科学が必要な難問です」という。豊福さんは、「有孔虫の殻のかたちで明らかになったことは、ほかの生物のかたちづくりの理解にも役立つ」と期待を寄せている。有孔虫の研究者と数理科学の研究者との対話は、まだ続く。

取材協力 数理科学・先端技術研究分野 山本美希 研究員



地球深部探査船「ちきゅう」による掘削の様子。長さ9.5mのドリルパイプを海底までつなげ、ドリルパイプを回転させ、その先端に付いているドリルビットで海底下を掘り進める。ドリルパイプは鉄製でかたいが、数千～1万mもの長さになると全体としてはやわらかくなり、たわんでしまう。

ある日、山本美希さんへMAT分野長の阪口 秀さんからメールが届いた。「地球深部探査センター（CDEX）が行っているドリルパイプの水槽試験で、ドリルパイプがおかしな挙動を始めた。何が起きているのか解けないかな。そんな内容でした」と山本さん。メールには、実験の動画や計測データが添付されていた。

ドリルパイプは、海底掘削に不可欠だ。JAMSTECの地球深部探査船「ちきゅう」のドリルパイプは、直径13cm、1本の長さは9.5m。それを船から海底までつなげていく。海底に到達したら、船上の巨大なモーターでドリルパイプを回転させ、先端に付けたドリルビットで掘り進む。「ドリルパイプは鉄でできていて、かたいものです。しかし1万mもの長さになると、全体としては、やわらかいもののような挙動をします。まるで長い髪の毛のようにくねくねと曲がるため、ドリルパイプを適切に回転させることはとても難しいのです」と山本さんは解説する。

冒頭の水槽実験は、そうしたドリルパイプの挙動を調べ、そのデータを安全な掘削に役立てるために行ったものだ。実験では、回転数を上げるとドリルパイプ

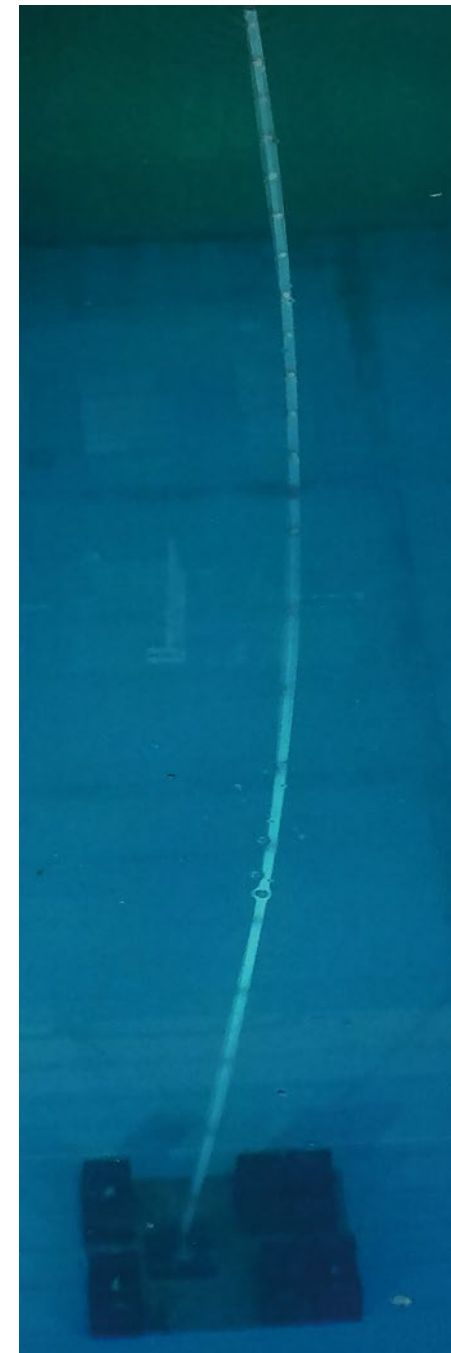
が大きいたわみ、さらに与えた回転とは異なる速さでゆっくり回り始めた。これは、振れ回りと呼ばれる現象だ。

ドリルパイプは水中で、さまざまな挙動を示す。たとえば、強い潮流があると、ドリルパイプが大きいたわみ、さらにパイプの下流側に発生する渦によってパイプが振動する現象は、よく知られている。この渦励起振動に対しては、翼のかたちをしたフェアリングと呼ばれるカバーなどの付加物を取り付けることで抑制する技術が確立されている。一方、振れ回りは強い潮流がない状況でも発生することが分かってきていた。

山本さんに声が掛かったのには、大きな理由がある。かたい物体の変形は、入力と出力の関係が一定になる。そのような関係を“線形”といい、解析は容易だ。一方、やわらかい物体の変形は、入力と出力の関係が一定にならず、突然大きく変形したりする。そのような関係を“非線形”という。長いドリルパイプはやわらかく、その変形は非線形だ。「非線形現象の解析は特殊な知識と技術が必要で、とてつもなく難しい」。そう語る山本さんの専門は、まさに非線形動力学であり、この解析ができる数少ない数理科学研究者なのだ。

山本さんは、提供された計測データをもとに、わずか1週間ほどでドリルパイプの振れ回り現象を数式で記述。さらに数理モデルを構築し、数値計算を行ってドリルパイプの振れ回り現象を再現することにも成功した。「ドリルパイプのかたさや長さ、回転数などを数式に入れることで、いつ、どのような振れ回りが起きるかを求めることができるようになります」と山本さん。回転数をいくつ以上にすると振れ回りが起きるという値を正確に予測できれば、安全な運用の1つの指標になる。

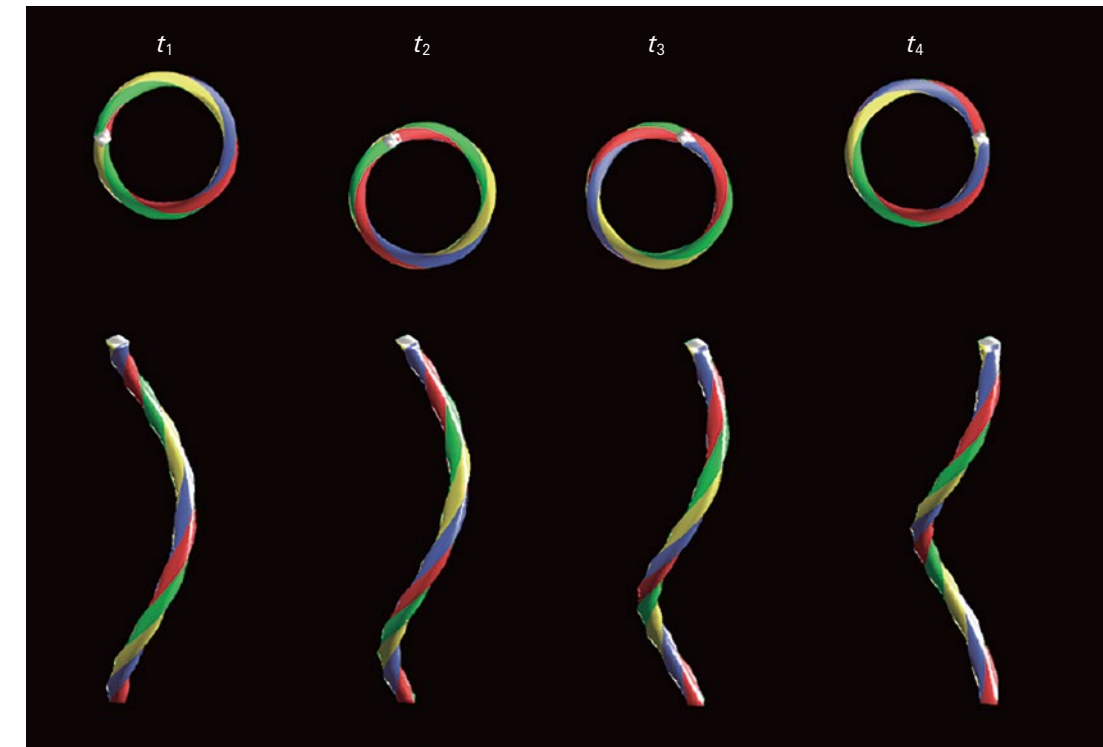
ドリルパイプだけに限っても、安全に掘削を行うために把握しなければいけない挙動は多岐にわたり、CDEXで検討されている。「振れ回りさえ解決すれば



ドリルパイプの水槽実験の様子。長さ5mのドリルパイプの模型を用いて、掘削時の挙動を調べた。東京大学とJAMSTEC地球深部探査センターの共同研究として、東京大学生産技術研究所千葉実験所海洋工学水槽にて実施。

提供：CDEX

ドリルパイプの振れ回り現象を記述した数式に基づく数値計算。数値計算の結果は、実験をよく再現している。数式にドリルパイプのかたさや長さ、回転数などを入れれば、いつ、どのような振れ回り現象が起きるかを求めることができる。



いるドリルビットが掘削面の摩擦によって付着と滑りを繰り返すStick-Slipと呼ばれる現象の解析についても、数理科学的な面で協力している。

海底に向かって伸びるドリルパイプを見ることはできない。しかし、山本さんが構築した数理モデルを用いれば、ドリルパイプの振れ回りを“見る”ことができる。さらにCDEXが進めている多岐にわたる挙動の解析ができれば、ドリルパイプ全体の挙動を“見る”ことができるようになる。「数理科学を用いると、いろいろなものを“見える化”できるのです。それは、あらゆる分野の研究に貢献できます」。そう語る山本さんは、4～5ページで紹介した有孔虫の殻形成のほか、多数AUV（自律型無人探査機）の同時運用法、日本列島の地殻下におけるマンタルの流動など、いくつもの分野横断的な研究を進めている。

ほかの分野の研究者と組んで成果を上げるために必要なこととは？「相手の分野の論文や書籍をきちんと読み、相手の分野の言葉で話すことを意識しています。そして相手の研究者に敬意を表すことが、最も大切です」と山本さん。「どの分野も数式は共通ですが、異なる分野に取り掛かるときには頭の切り替えに時間がかかります。だから、分野横断的な研究が増え過ぎると大変なことになります」と笑う。それでも分野横断研究を行う理由は？「さまざまな分野の研究者と対話するのは、面白いですよ。そして、数理科学がほかの分野の研究の進展に貢献できると、うれしい。数理科学ってすごい！ そう思ってもらえたら最高ですね」

（共同研究者：地球深部探査センター 井上朝哉 主任技術研究員）



ドリルパイプ。直径13cm、1本の長さは9.5m。

「JAMSTEC横浜研究所の一般公開では、メトロノームを使った実験をしています。皆さん、不思議そうに見ていますね」。そう語るのは、河村洋史さんだ。船の模型を水に浮かべ、複数のメトロノームを載せる。そして、メトロノームの振り子を順に揺らしていく。振り子の向きは、初めはばらばらだ。それが徐々にそろっていき、やがてすべての振り子の向きがそろふ。その瞬間、歓声が上がる。

「メトロノームの振り子の運動によって、水に浮かべた船が揺れます。その船の揺れがメトロノームの振り子の運動に影響します。そうして影響し合った結果、すべてのメトロノームの振り子の運動がそろふのです」と河村さんは解説する。「このように2つ以上の変動のリズムがそろふこと、専門的な言葉でいうと、位相差がゼロになることを“同期”といいます。

私は、この同期現象について数理科学を用いて研究しています。位相とは、周期的に変動するものが1周期のうちのどの位置にいるかを示す量である。

ホタルの発光や、心臓を構成する細胞の収縮など、自然界や生物の体には、さまざまな同期現象がある。そうしたなかで、河村さんが注目しているのが、大気の大気対流とカイメンのべん毛運動だ。しかし、2つは懸け離れた現象に思える。「空間的なスケールは大きく違いますが、同期現象で最も重要なのは位相です。位相に注目すれば、大気の大気対流とカイメンのべん毛運動は共通の数理で扱うことができます」

ヨーロッパが暖冬になると日本も暖冬になる、というように遠く離れた場所の気候変動に相関関係が見られることがある。そのような現象を“テレコネクション”と呼ぶ。「テレコネクションの原因の1つ

として、遠く離れた場所の大気の大気対流の同期が考えられています。その原理を理解することを目指しています」。河村さんがこの研究を始めるきっかけとなったのが、回転水槽の結合系実験に関する論文だ。

大気大循環の研究では、回転水槽を用いた実験が古くから行われている。三重になった円筒状の容器の外側に温水、内側に冷水、間にも水を入れる。温水を赤道の高温の大気に、冷水を極付近の低温の大気に見立てたもので、水槽を回転させることで大気大循環を再現できるのだ。「北半球と南半球に見立てた2個の回転水槽を結合すると対流が同期する、という論文が2010年に発表されました。面白いと感じ、その現象を数理的に解析してみることにしました」

しかし、その解析は非常に難しい。メトロノームの振り子の運動は振動だけなので位相は1つであり、また常微分方程式で記述できる。一方、回転水槽の大気対流は振動しながら回転している。振動（時

間）と位置（空間）という2つの位相があり、また流体方程式という偏微分方程式で記述しなければならない。「最終的に知りたいのは位相差がゼロになるかどうかです。変数が位相だけの数式に簡略化することを“位相縮約”といい、常微分方程式については位相縮約の手法が確立されています。一方、偏微分方程式では確立されていません。そのため、位相縮約の手法を偏微分方程式に拡張することから始めなければいけません」と河村さんは解説する。

そして河村さんは、その難題をクリア。しかし、いきなり回転水槽の大気対流を解析するのはハードルが高いため、隙間が狭く二次元空間として扱うことができるシリンダー状のHele-Shawセルという容器で考えることにした。「Hele-Shawセル結合系の大気対流を記述する偏微分方程式を、位相縮約によって、空間の位相差と時間の位相差を求める数式に簡略化し、それを解きました。すると、2つの大気対流が空間的にも時間的にも同期している状

態が唯一安定であり、どのような状態から出発しても同期状態になることが分かりました」と河村さん。「この解析によって、大気の大気対流をより深く理解できるようになりました」

次は、回転水槽の大気対流の解析に挑む。「それができれば、気候変動の研究者と議論できるようになるでしょう。将来的には、気候変動予測の高精度化に貢献できればうれしいですね」

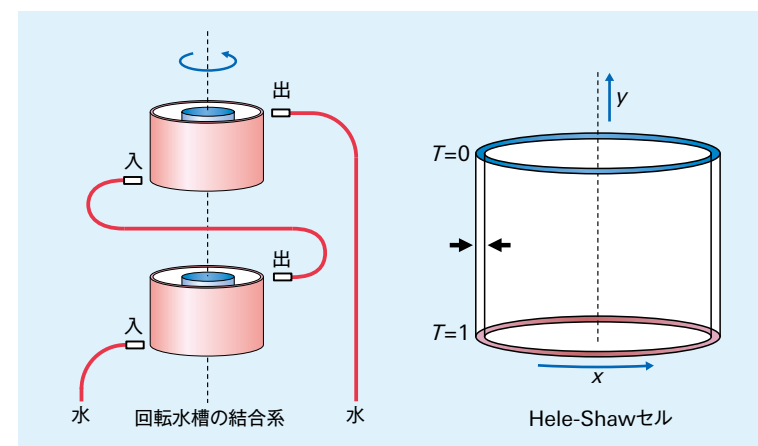
もう1つのテーマであるカイメンは、原始的な多細胞生物で、世界のあらゆる海に生息している。「私が兼務している海洋生命工学研究開発センター新機能開拓研究グループの椿 玲未さんから相談されたのが、この研究を始めたきっかけです」と河村さん。カイメンの表面には大きな孔が複数開いていて、そこから水を吐き出している。その水は、表面の無数の小さな孔から吸い込まれ、体内の水路を通ってきたものだ。水路のあちこちには、襟細胞という細胞が密集した襟細胞室がある。襟細胞のべん毛の動きに

よって水流が生み出されていることが知られている。

「襟細胞室のべん毛は流体を介した相互作用により同期しているのか。同期しているのなら、それが水の輸送効率と関係しているのか。それが椿さんの疑問でした」と河村さん。

べん毛運動は偏微分方程式で記述されるが、河村さんが構築した手法を使えば、位相縮約が可能だ。「まずは2本のべん毛の運動について解析し、初期状態によらず同期することが分かりました。襟細胞室にはたくさんのべん毛があります。今後は、べん毛の集団について解析し、さらに輸送効率との関係も明らかにしていく計画です」

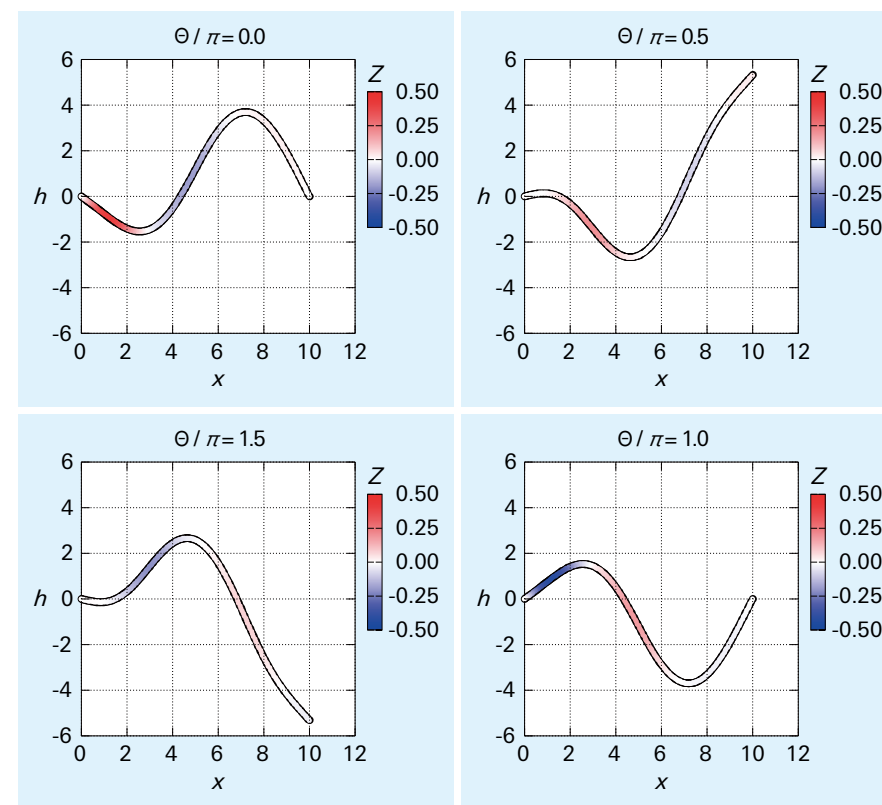
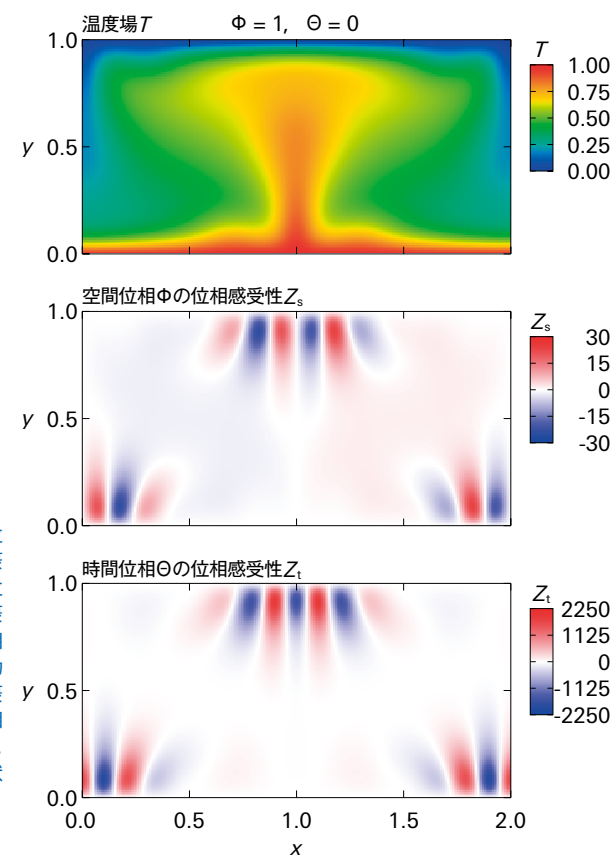
大気の大気対流とカイメンのべん毛運動の例でも分かるように、位相縮約法を用いると、さまざまな対象の同期現象を解析できる。河村さんは、「自然界で観察されているさまざまな同期現象の統一的、普適的な理解につなげていきたい」と意気込む。



回転水槽は、内側に冷水、外側に温水、間にも水を入れて回転させる。これは地球の極・赤道間の温度差と自転の効果を考慮したもので、回転水槽の結合系は北半球と南半球が結合した地球を模倣している。シリンダー状のHele-Shawセルは、隙間が狭いため二次元空間と見なすことができる。回転水槽の結合系の模式図はRead and Castrejón-Pita, 2010を改変。

Hele-Shawセルにおける対流の温度場 T と2つの位相感受性のスナップショット。位相感受性とは、振動に対して位相がどのように応答するかを示す。位相感受性 Z が赤い（青い）領域の温度場 T に正の振動が加わると対流の振動の位相が進む（遅れる）。振動の影響を受けやすい領域と受けにくい領域（位相感受性の絶対値が大きい領域と小さい領域）がある。Hele-Shawセルの結合系における対流は、初期状態によらず同期状態になる。

Kawamura and Nakao, 2015より



カイメンのべん毛の振動運動と位相感受性（時間位相 θ の位相感受性 Z ）のスナップショット（順番は時計回り）。位相感受性 Z が赤い（青い）領域に上向きの振動が加わるとべん毛の振動の位相が進む（遅れる）。べん毛の位相感受性の絶対値はべん毛の根元付近（左半分）の方が先端付近（右半分）よりも大きい。2本のべん毛の運動は、初期状態によらず同期状態になる。

Kawamura and Tsubaki, 2018より



カイメン。表面に無数にある小さな孔から水を吸い込み、内部の水路を通して大きな孔から水を吐き出す。右はカイメン内部の水路の模式図。水路の途中に襟細胞室があり、襟細胞のべん毛の運動で水流を起こしている。襟細胞のべん毛の長さは20 μ mほど。

提供：海洋生命工学研究開発センター新機能開拓研究グループ 椿 玲未 ポストドクトラル研究員

脂質ラフトは、いかにつくられるのか。鍵となる相転移現象を実験と数理で見る。

取材協力 数理科学・先端技術研究分野 下林俊典 研究員

水は、温度を下げていくと0℃付近で氷になり、温度を上げていくと100℃で水蒸気になる。ミクロに見れば水分子という同じ物質だが、マクロに見ると異なる物質のように見える。そのようなマクロな状態が変化する現象を「相転移」という。「生物の細胞内でも相転移現象が起きていて、生物はそれをうまく利用していることが、近年の観察・計測技術や遺伝子工学の進展により分かってきました。私は、生物が利用している物理現象を解明していくことで、最終的には生命を物理的観点から理解したいと思っています」と下林俊典さんは語る。

相転移が起きている場所として下林さんが注目しているのが、細胞膜にある脂質ラフトだ。細胞膜は、リン脂質が疎水性部分を内側に、親水性部分を外側に向けて並び、二重膜となっている。細胞膜にはさまざまなタンパク質や脂質が埋め込まれているが、スフィンゴ脂質とコレステロールなどに富む領域が脂質ラフトである。ラフトとは、いかだという意味だ。細胞膜に浮かんでいると考えられることから名付けられた。脂質ラフトは、細胞膜の内と外の物質や情報のやりとり重要な働きをしている。「相転移の種類の1つに相分離があり

ます。混ざって一様になっていた相が水と油のように複数の相に分離する現象です。脂質ラフトは相分離現象によって形成されると考えられていますが、未解決な問題も多いです。そこで、脂質ラフトの形成メカニズムを実験と数理科学の両方から明らかにすることを目指して研究してきました」。下林さんは、生物実験と数理解析の両方を自分で行うという、MATのなかでは少ない研究スタイルを取っている。

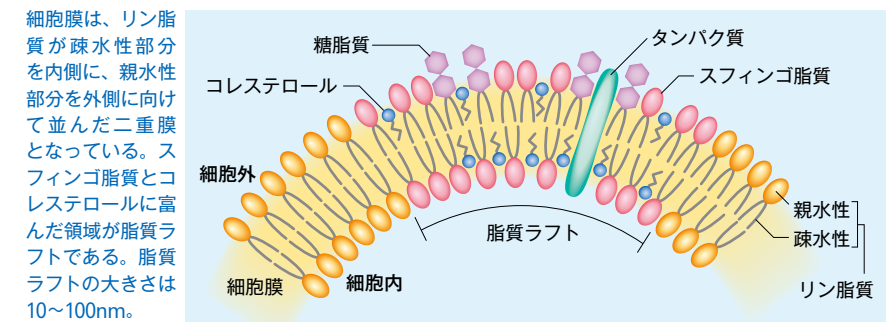
脂質ラフトを人工的につくる研究は20年近く前から行われている。「生き物の素材から人工的に脂質ラフトをつくれることは知られていましたが、そのサイズが問題になっていました」と下林さんは指摘する。「生体内の脂質ラフトは10～

100nmですが、人工的につくった脂質ラフトは100～1,000倍も大きくなります。そこで、どうしてこのような差が生まれるのかに興味を持ち、その原因を追究しました。私が着目したのは、細胞膜の非対称性です」

人工的につくった細胞膜は内側と外側の組成が対称になっている。一方、生体内の細胞膜では、内側と外側の組成が非対称になっているのだ。下林さんは、細胞膜の非対称性が脂質ラフトのサイズの決定に重要な役割を担っていると考え、その仮説を実験で検証した。

まず、DOPC、DPPC、コレステロールという3種類の脂質を用いて人工的に脂質ラフトを作製した。DOPCは細胞膜の主成分であるリン脂質で、DPPCは脂質ラフトを構成するスフィンゴ脂質と同じ働きをするものだ。すると、DPPCとコレステロールに富む大きな脂質ラフトが形成された（左の画像の緑）。脂質ラフトと、DOPCに富む細胞膜（左の画像の赤）は、相分離している。そこに糖脂質を加える。糖脂質は脂質二重膜の外側にだけ入る。すると、相分離の状態が変化し、脂質ラフトの大きさが変わり始めた。

「1つの大きい脂質ラフトはストライプ状になり、やがてストライプがくびれてちぎれ、多数の小さな脂質ラフトへと変化しました。細胞膜の非対称性が脂質ラフトのサイズ制御に関与していることが確かめられました」と下林さん。それぞれの相分離の状態を、マクロ相、ストライプ相、ミクロ相と呼んでいる。



下林さんの研究は、ここで終わりではない。「細胞膜が非対称になると、なぜ脂質ラフトのサイズが小さくなるのか。そのメカニズムを数理で理解する必要があります」

細胞膜は弾性膜である。細胞膜が本来あるべき曲がり具合（曲率）と異なる状態になっていると、戻ろうとする力、すなわち弾性力が働く。細胞膜の内側と外側の組成が対称である場合と非対称である場合とでは、膜に働く弾性力は異なる。下林さんは、そうした細胞膜の振る舞いを表す数式を考え、数値計算を行った。細胞膜の組成を非対称にすると、マクロ相からストライプ相、そしてミクロ相へと相分離状態が転移していった。それは、実験とよく一致している。

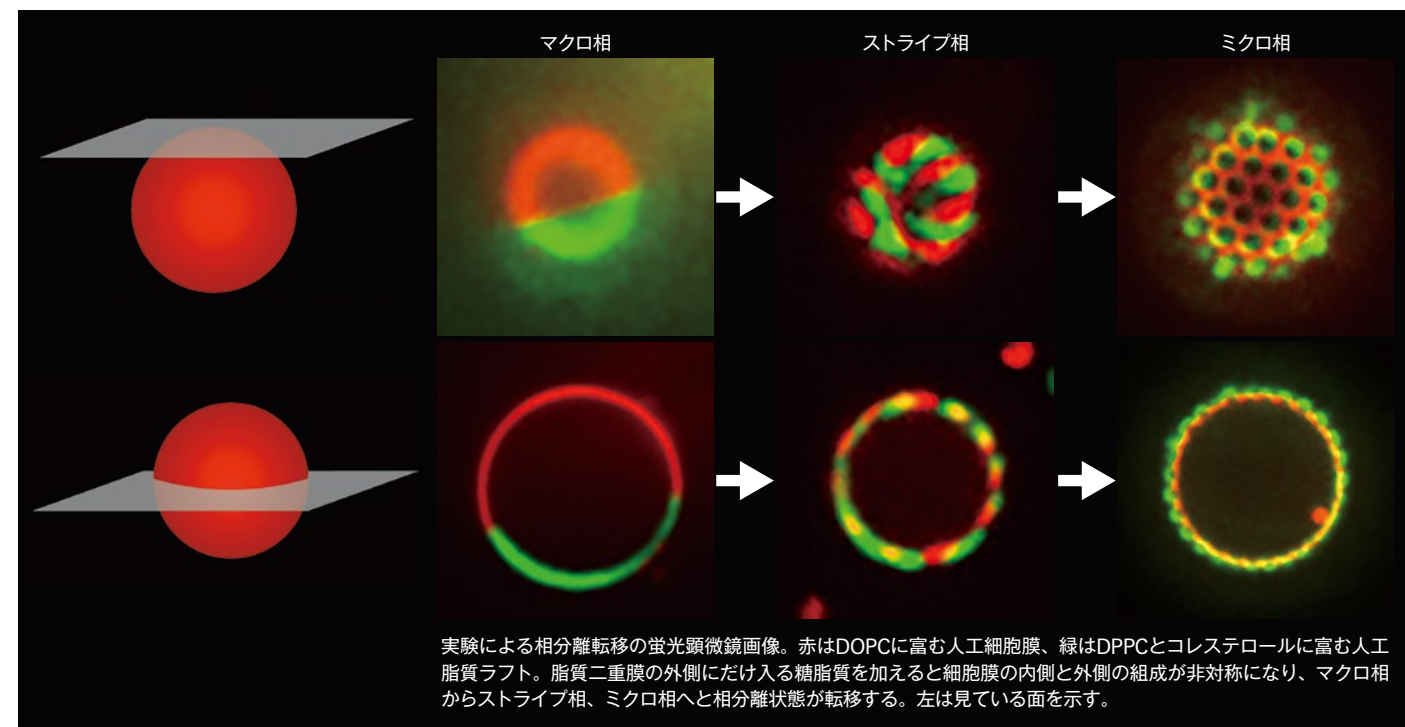
さらに、数式からは、細胞膜の非対称性が大きくなるほど弾性力が増加し、脂質ラフトのサイズが小さくなることが予想された。そこで糖脂質の量を増やして実験を行ってみた。すると、脂質ラフトのサイズがどんどん小さくなり、生体内の脂質ラフトのサイズに近づくことが確かめられた。「細胞膜の内側と外側の組

成が非対称になることによって、膜に曲がるとうする力が働き、その結果、相分離構造の転移が起きて脂質ラフトのサイズが小さくなります。脂質ラフトのサイズが決まるメカニズムを明らかにすることができました」

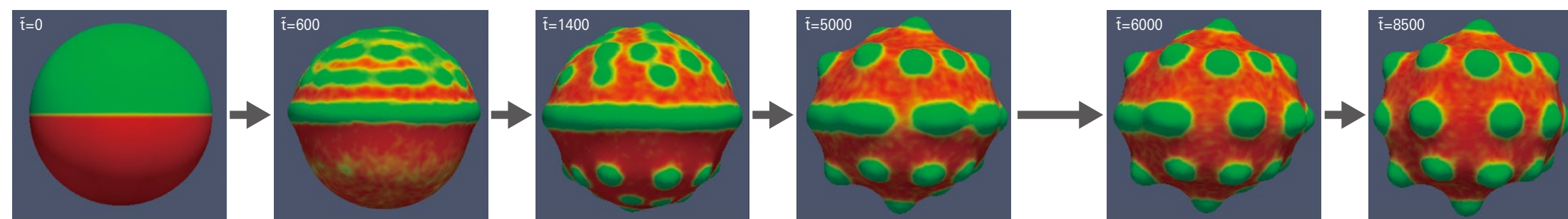
下林さんがJAMSTECで研究を始めたのは、2016年10月だ。ここで紹介した脂質ラフトの研究の多くは、JAMSTECに来る前に行われたものである。JAMSTECでは、どのような研究を進めているのだろうか。「相転移に注目して生命現象を理解する、という方向性は変わりません。脂質ラフトの研究を続けるとともに、新しく脂肪滴の研究を始めています」

脂肪滴とは、細胞のなかにある脂質の塊で、生物のエネルギーの貯蔵庫となっている。「脂肪滴でもある条件では相転移が起きますが、現象そのものや生物にとっての意味はほとんど何も分かっていません。脂肪滴は疾患とも関わっているもので、それらを明らかにすることで医療に貢献できる可能性もあると考えています」

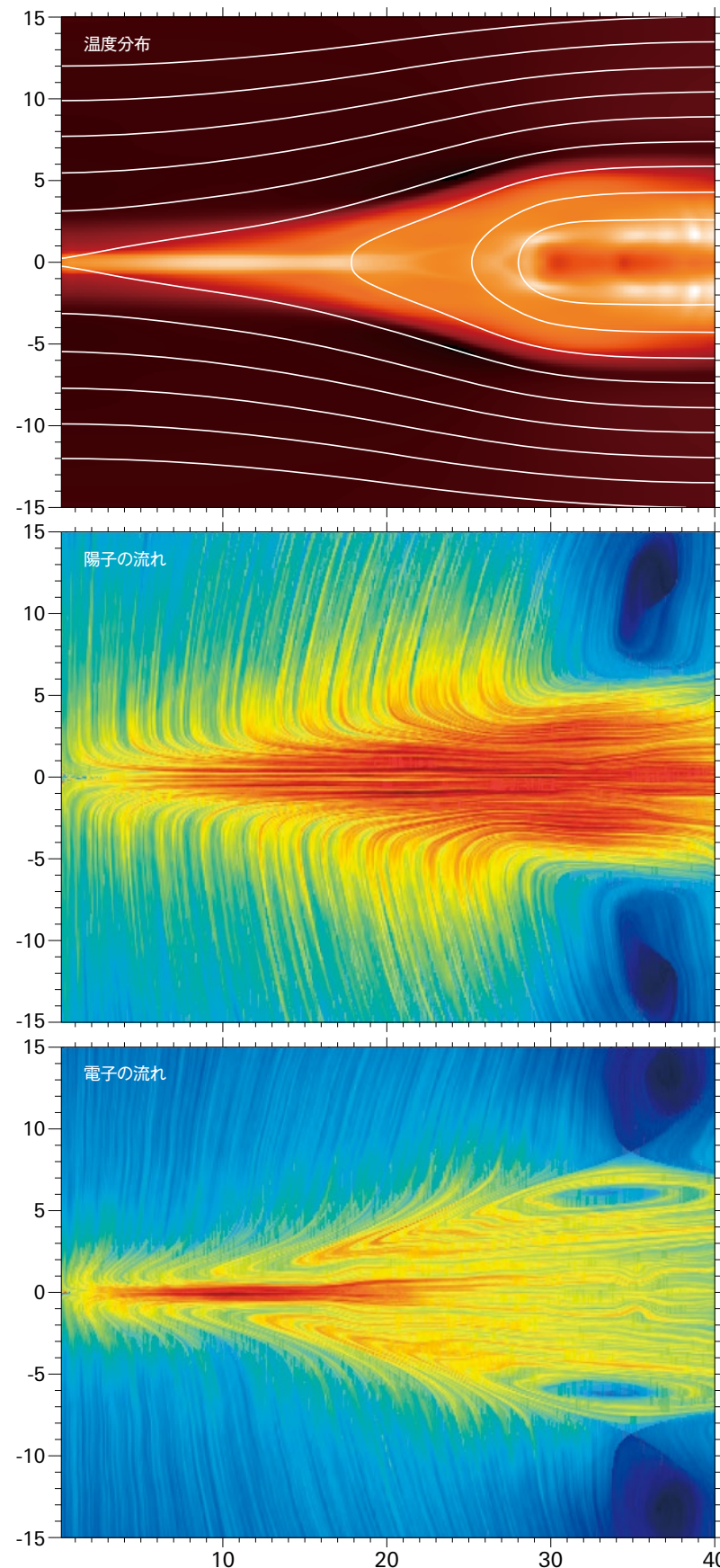
下林さんは、「脂質ラフトや脂肪滴をはじめ細胞内小器官の形成メカニズムや構造、物性を理解する上で、相転移という概念は有効」と強調する。「水が氷や水蒸気に変化するように、生き物を構成する要素も多数集まると、その集団としての振る舞いは多彩になります。このような生き物に内在する物理を解き明かすことで、新しい生命の姿が見えてくると期待しています」



実験による相分離転移の蛍光顕微鏡画像。赤はDOPCに富む人工細胞膜、緑はDPPCとコレステロールに富む人工脂質ラフト。脂質二重膜の外側にだけ入る糖脂質を加えると細胞膜の内側と外側の組成が非対称になり、マクロ相からストライプ相、ミクロ相へと相分離状態が転移する。左は左側面を示す。



相分離転移を記述する式に基づいた数値計算の結果。細胞膜の内側と外側の組成を非対称にすることで、マクロ相からストライプ相、ミクロ相へと相分離状態が転移する。数値計算の結果は実験とよく一致している。

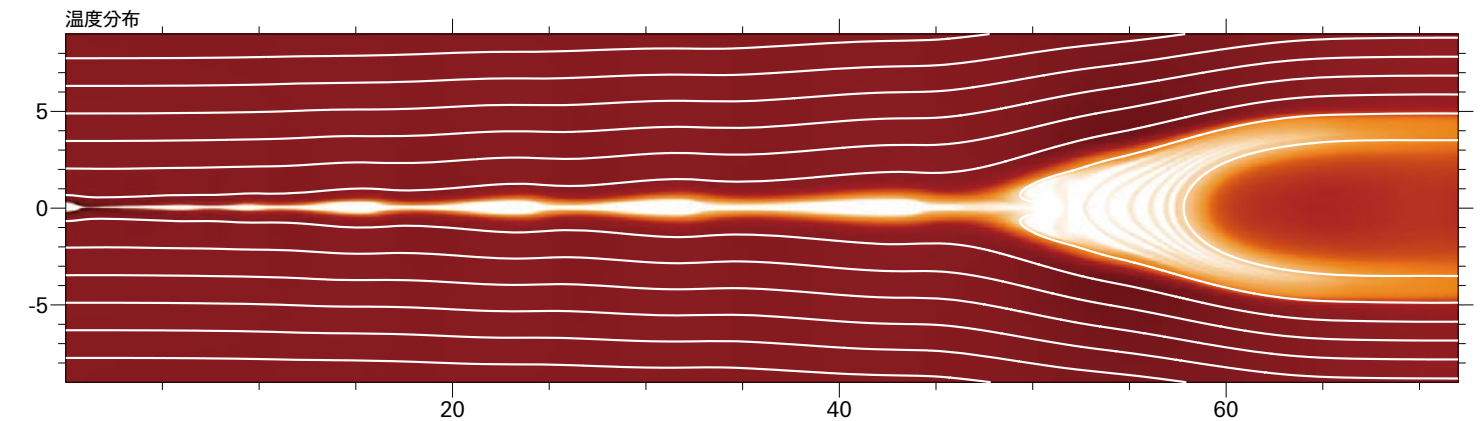


磁気リコネクションの第一原理シミュレーション。上から、温度分布、陽子の流れ、電子の流れ。第一原理シミュレーションでは、プラズマを構成する粒子である陽子と電子それぞれの物理量を得ることができる。

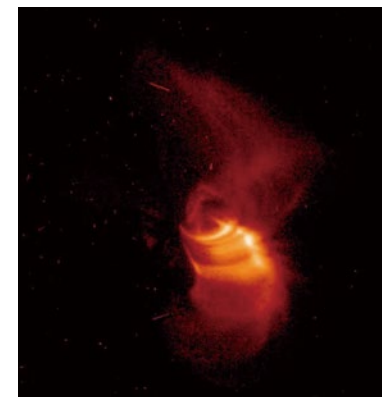
2017年9月、「大規模な太陽フレアが発生。通信障害の可能性も」といった報道があったことを覚えている人もいるだろう。簗島 敬さんは、「フレアは太陽のくしゃみのようなもの」と例える。「フレアが発生すると、太陽からプラズマの塊が噴き出します。それは数日かけて地球まで到達し、人工衛星の故障や通信障害、送電線の損傷など地球環境にさまざまな影響を及ぼします。そのため、太陽フレアの発生とその影響の予測の実現が待たれています。そこで私はまず、太陽フレアを駆動していると考えられている磁気リコネクションの仕組みの解明を目指しています」

プラズマは、固体、液体、気体続く物質の第4の状態ともいわれる。物質は1万度くらいになると、原子を構成しているプラスの電荷を帯びた原子核とマイナスの電荷を帯びた電子がばらばらに動き回るようになる。その状態がプラズマだ。太陽は1万度を超える高温のため、太陽全体がプラズマ状態になっている。電荷を帯びた粒子が運動すると、電場と磁場が発生する。磁場の向きをつないでできた線が、磁力線だ。棒磁石の周りに砂鉄をまいたときにできる線、といえば分かりやすいかもしれない。その磁力線がつなぎ換わることを“磁気リコネクション”という。

磁気リコネクションの仕組みを、どのように解明していくのだろうか。「太陽は高温希薄な特殊環境のため、地上実験で同様の環境を再現することは極めて困難です。そこで、数値シミュレーションというアプローチを取っています。磁気リコネクションの過程を数式で記述して数理モデルをつくり、スーパーコンピュータで大規模な数値計算を行って解析します」



磁気リコネクションの磁気流体シミュレーション。磁気流体シミュレーションでは粒子性を無視する代わりに、大きなスケールを解くことができる（軸のスケールは第一原理シミュレーションと異なる）。ただし、速い磁気リコネクションを引き起こすには、粒子性に起因する追加の物理現象が必要である。



磁気リコネクションが引き起こす太陽フレアのX線観測画像。2006年12月、日本の太陽観測衛星「ひのけ」による。

しかし簗島さんは、「プラズマのシミュレーションは非常に難しい」という。その理由に、「プラズマが粒子と流体という2つの性質を持つこと」を挙げる。プラズマは多数の電子と陽子から成り、小さなスケールで見ると、それぞれの粒子は個性を持って運動している。一方、大きなスケールで見ると、粒子は集団的に運動し流体として振る舞うのだ。「粒子の振る舞いは第一原理、流体としての振る舞いは磁気流体力学と、記述する方程式が異なります。そのため、2つのシミュレーションが必要になるのです」

簗島さんは、2つのシミュレーションを駆使して磁気リコネクションの理解を進めてきたが、磁気リコネクションには大きな未解決問題が残されている。「小さなスケールの第一原理シミュレーションでは、磁気リコネクションはとても短い時間で起きます。しかし、大きなスケールの磁気流体力学シミュレーションで

は、磁気リコネクションが起こるのに時間がかかるのです。第一原理シミュレーションはボルツマン方程式とマクスウェル方程式に基づいて非常に厳密に計算しています。ということは、重要な現象を記述する数式が磁気流体力学シミュレーションで抜けていると考えられます」

第一原理シミュレーションに入っていない現象を探索。そして、プラズマ同士の摩擦と熱の輸送を磁気流体力学シミュレーションに取り入れると、プラズマの振る舞いが変わり、磁気リコネクションが短い時間で起きようになった。「第一原理が磁気流体力学のどちらか一方のシミュレーションだけに注力するのではなく、異なるスケールを同時に検討することで、この問題に気が付くことができたのだと思います」と簗島さん。

「究極の目標は、第一原理シミュレーションで流体としての振る舞いまで一気に解くことです。計算量が膨大になるので、本質は何かを見極めて数理モデルを簡略化していく必要があります。それが腕の見せどころ。ぜひ実現したいですね」と意気込む。一方で「シミュレーションは事実とは限りません。必ず観測と比較する必要があります。観測は真実ですから」と指摘。現在では人工衛星の活躍によって、大きなスケールの現象は太陽から、小さなスケールの現象は地球磁気圏

のその場観測から、それぞれ豊富な観測データが得られている。そうした観測研究との連携が重要である。

簗島さんは、太陽フレアの地球環境への影響の予測、いわゆる宇宙天気予報実現のための研究も行っている。「太陽フレアが発生したら、どのくらいの量・エネルギーのプラズマが、いつ地球に届き、どのような影響が出るのかを予測することが求められています。そのために粒子の加速メカニズムの解明に取り組んでいます」

プラズマは太陽を出たときは100万度くらいだが、そのうちのごく一部は地球に到達するところには1兆度くらいに達する。これは粒子が加速されたことによるもので、非常に高いエネルギーを持つため、人工衛星を故障させ、宇宙飛行士を被ばくさせる。「プラズマの塊が超音速で移動すると、その前面に衝撃波ができます。そこで粒子が加速されていると考え、シミュレーション研究を進めているところです」

宇宙空間は真空といわれる。しかし実際は、ごく薄いプラズマで満ちている。「プラズマ現象は、宇宙ではありふれた現象です。太陽フレアや磁気リコネクションの研究で明らかになったことは、木星など磁場を持つ太陽系の惑星はもちろん、ほかの恒星やブラックホール、超新星爆発などの理解にもつながります」

「海洋や生命を含む地球の材料はすべて、原始惑星系円盤から来ています」と廣瀬重信さんはいう。生まれたばかりの太陽の周りには、回転するガス円盤がある。それが、原始惑星系円盤だ。宇宙空間を漂う星間ガスが集まり、自らの重力で収縮し、密度が高くなった中心部分に星の赤ちゃんである原始星が誕生する。周りのガスは、回転しながら原始星に落下していく。このとき、円盤をつくるのだ。ガスはさらに中心に向かって落下し、原始星は一人前の星へと成長して輝き出す。そして、円盤のなかでは惑星系が形成される。

「私は、原始惑星系円盤がどのように進化するかを物理学の基本法則に基づいた数値計算をもとに解析し、太陽系や地球の形成過程を明らかにすることを目指しています」と廣瀬さん。天体に落ち込むガスが形成する円盤を降着円盤といい、それは多くの天体の周りで見られる。原始星の周りに形成されるものを、特に原始惑星系円盤と呼んでいる。

原始惑星系円盤は、主に水素ガスから成り、重量にして1%ほどのダスト（ちり）が含まれている。ダストは、氷や有機物、地球の岩石の主成分でもあるシリカ（二酸化ケイ素）などで、その存在は

観測によって確認されている。「地球は、原始惑星系円盤のダストが衝突・合体を繰り返して成長してつくられました。しかし、ダストの大きさは0.1 μ mほどであるのに対して、地球の直径は1万kmを超えます。ダストと地球の大きさには14桁もの開きがあり、その成長過程はよく分かっていません」

太陽系の形成過程に関する研究はこれまで、現在の太陽系の姿や物質質量をもとに、出発点である原始惑星系円盤を推定するというアプローチが主流だった。そうした時間をさかのぼっていくバックワードアプローチについて廣瀬さんは、「太陽系の形成過程は説明できるかもしれませんが、しかし近年、太陽系以外の惑星系が次々と見つかり、それらは太陽系とはまったく違う姿をしています。そうした多様な惑星系の形成過程を説明できません」と指摘する。「私は、近年の星形成研究から分かってきた原始惑星系円盤の初期状態を出発点として、それが時間経過とともにどのように進化していくかに着目しています。このフォワードアプローチならば、太陽系に限らず、さまざまな惑星系の形成過程を理解できるはずです」

原始惑星系円盤の進化は、原始惑星

系円盤のガスとダストの運動によって決まるので、それらの運動をスーパーコンピュータを用いて計算していく。「ガスとダストの運動は、スムーズに回転しているだけならば、それほど難しい計算ではありません。しかし、原始惑星系円盤では乱流が発生します。この乱流が、計算を難しくするのです」と廣瀬さん。

ダストが小さいうちはガスに釣られて動くため、まず理解すべきはガスの振る舞いだ。落下していくガスは中心に近いくほど回転速度が速くなるため、内側のガスと外側のガスの間で摩擦が生じ、その境界が不安定になり乱流が発生する。特に中心近くでは、摩擦熱の影響が強くて高温になるためにガスが電離し、磁場との相互作用によって磁気乱流が起きる。一方で、ガスは放射によって冷えていくため、その放射冷却の影響の方が大きければ電離が起きるほど温度が上がらず、磁気乱流が発生しない。

「原始惑星系円盤の乱流を理解するには、回転と磁場と放射が複雑に絡み合った物理過程を解く必要があるのです。そこで、それを可能とする三次元輻射磁気流体力学計算を行うための計算プログラムを独自に開発しました」。廣瀬さんが行っている、回転と磁場と放射を入れた原始惑星系円盤の数値計算は、世界的に見ても最先端のものだ。計算量が膨大になるため、円盤全体を対象とするのは難しい。そこで現在は、中心からいろいろな距離にある円盤の一部を切り出して計算し、その結果を組み合わせることで円盤全体の理解を進めようとしている。

「初期条件としてのガスとダストの量や分布、ガスを非熱的に電離させる原始星のX線強度などの外的要因が違えば、乱流の起き方が変わり、原始惑星系円盤は異なる進化の道をたどると考えています。それによって、太陽系の形成過程だけでなく、惑星系の多様性を説明できると期待しています」

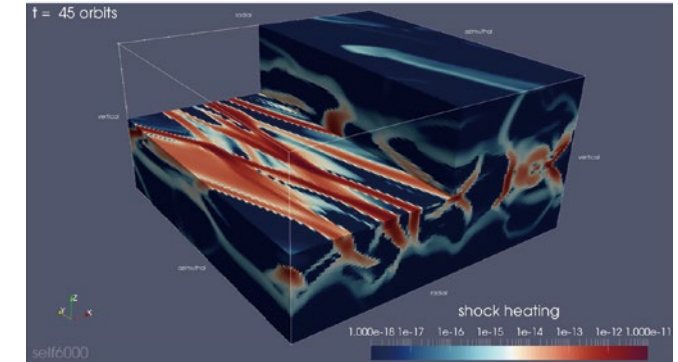
この三次元輻射磁気流体力学計算では、温度も導き出せる。「地球が誕生し

たとき、その軌道付近の温度は水の昇華温度（およそマイナス120℃）以下と算出されました。だとすると、水は氷として存在していたことになります。従来は、水は気体として存在していて地球内部に取り込まれなかったと考えられていましたが、氷ならば取り込まれます。地球内部に、これまで試算されていたより多くの水がある可能性が出てきたのです。そうでないとすれば、地球は、水が気体で存在するもっと内側で誕生し、後に現在の位置に移動してきたのかもしれない。三次元輻射磁気流体力学計算の結果から、そういったことまで議論することができるのです」

地球外生命の存在についても、重要な示唆を与えることができるかもしれない。土星の衛星エンケラドスは、表面を覆う氷の下に液体の海があり、海底では熱水活動が起きていることが分かっている。地球の生命は深海の熱水活動域で誕生した可能性が高いことから、エンケラドスに生命が存在しているかもしれないと注目されているのだ。しかし、その熱水活動が生命を育むのに十分な期間活動しているのかが分かっていない。「エンケラドスは、土星の周りにできた降着円盤のなかで誕生しました。そこに現在行っている研究を応用すれば、衛星が形成される過程でその内部にどれだけの熱エネルギーがため込まれたかを求めることが可能です。そこから、熱水活動の継続時間を試算することができるでしょう」。JAMSTEC深海・地殻内生物圏研究分野には、エンケラドスの研究を行っている研究者もいる。今後、連携を深めていくことを計画している。

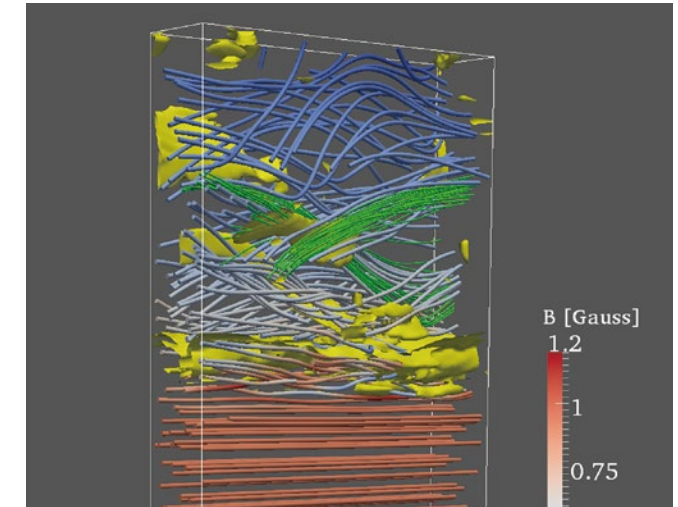
「系外惑星についてこういう観測を行えば、生命が存在する可能性や熱水活動がある可能性を確かめられる。そういう提案もできるようにしたい」と廣瀬さん。そして、「JAMSTECが目指す海洋・地球・生命の統合的理解につなげることが、この研究のゴールです。ただし、現在行っている研究とのギャップはまだと

重力不安定が原因となる乱流



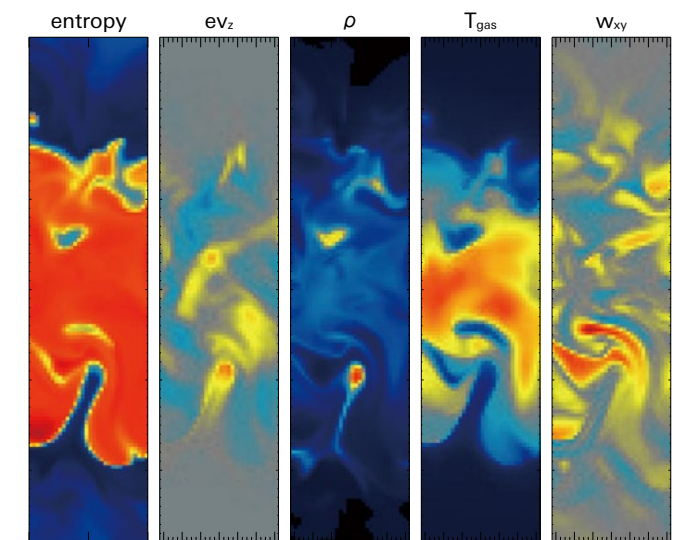
原始星から遠い場所では、ガスの温度が低く、かつ回転速度が小さいために重力不安定が起こり、それによって乱流が駆動される。

原始星からのX線による電離が原因となる乱流



地球軌道近傍では、原始星からのX線によって電離が起きる円盤表面層のガスだけが、磁場との相互作用を通じて乱流状態になる。

熱対流との相互作用を起こす磁気乱流

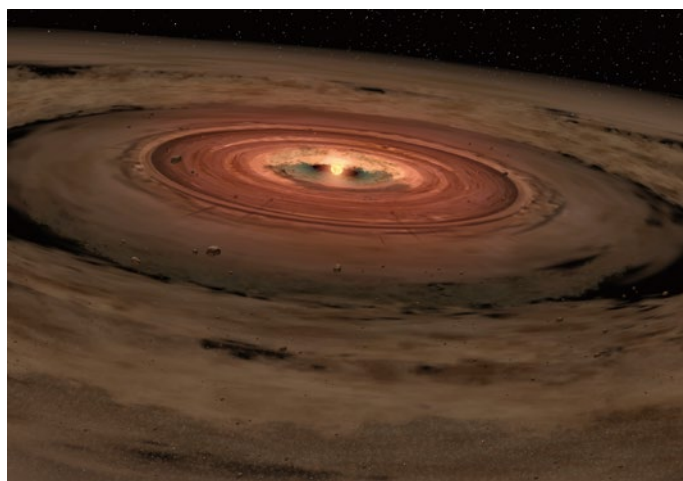


原始星近傍では、電離したガスと磁場が生み出す磁気乱流が、円盤内部で発生する熱対流運動によって、特徴的に強められる。

原始惑星系円盤における乱流。三次元輻射磁気流体力学計算によって、原始星からの距離によって性質が異なる乱流が起きることが分かった。

ても大きい。私の所属分野のテーマである数理科学の手法は、この大きなギャップを乗り越えるための鍵となるはずで」と結んだ。

原始惑星系円盤の想像イラスト。原始星の周りに回転する円盤が形成される。円盤はガスと少量のダストから成り、回転しながら中心に落ち込んでいく。この円盤のなかで惑星系がえられる。
©NASA/JPL-Caltech



「私たちは、その時代の最先端のコンピュータの能力を十分に引き出せる計算手法を開発してきました」と古市幹人さん。その取り組みは、MATが発足する以前から続いている。

たとえば西浦泰介さんは、画像処理を行うためのGPU（グラフィックス演算処理装置）を使って数値計算を行うためのアルゴリズムを2010年に開発。「当時GPUはまだ世のなかに広まっていませんでしたが、従来から使われているCPU（中央演算処理装置）より処理速度が速く、安いというのが魅力です。今後注目されるようになるだろうと思い、いち早く着手しました」。そう語る西浦さんは、粒が集まった粉体の数値計算を得意とする。粉体を扱う代表的な計算手法であるDEM（Discrete Element Method）をGPU上で計算できるアルゴリズムを開発したところ、CPUでは数日かかっていた計算が1日に短縮する大幅な高速化に成功した。いまでは演算装置としてGPUを科学計算に使うための研究はあらゆる分野で行われているが、西浦さんはその先駆者といえる。その後、西浦さんは複数のGPUを使って並列計算できるアルゴリズム開発にも挑戦し、さらなる成功を収めている。

「GPUを用いたDEMのアルゴリズムは、土木をはじめさまざまな分野で使

われています。粉や砂など身の回りのあらゆるところに粒子は存在していますから、応用範囲が広いのです」と西浦さん。「一方で、液状化や豪雨による土砂崩れなどは水も関係しているため、固体の粒子だけを扱うDEMでは計算できません。そこで、固体の粒子と液体を一緒に計算できるアルゴリズムの開発に取り組みました」

流体は格子で区切って計算する手法が古くからある。しかし、一方が粒子、一方が格子で計算したのではアルゴリズムが異なり、計算の高速化は望めない。そこで、流体を粒子として扱うSPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）という手法に注目。DEMとSPHを連結し、固体も流体も粒子として扱い、GPUを用いて高速計算を実現する手法を開発した。「津波による堤防の倒壊メカニズムを調べ、津波に強い防潮堤の設計などに活かす研究を進めています」と西浦さんは語る。

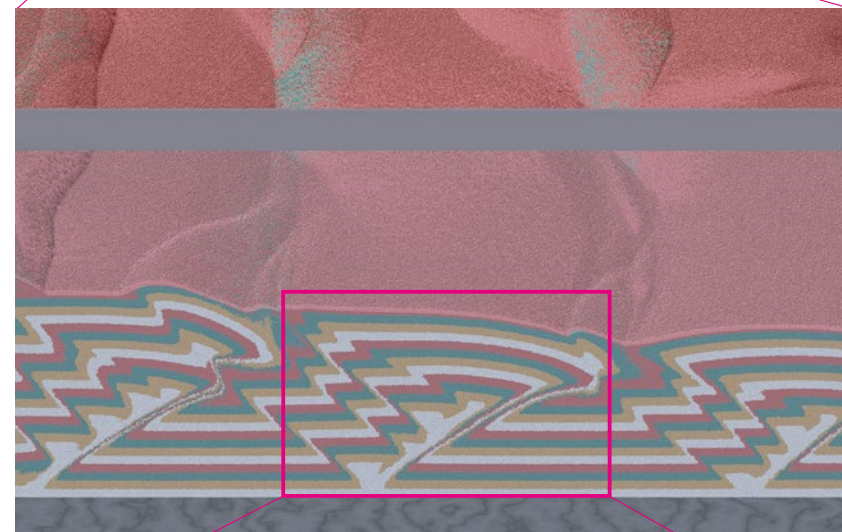
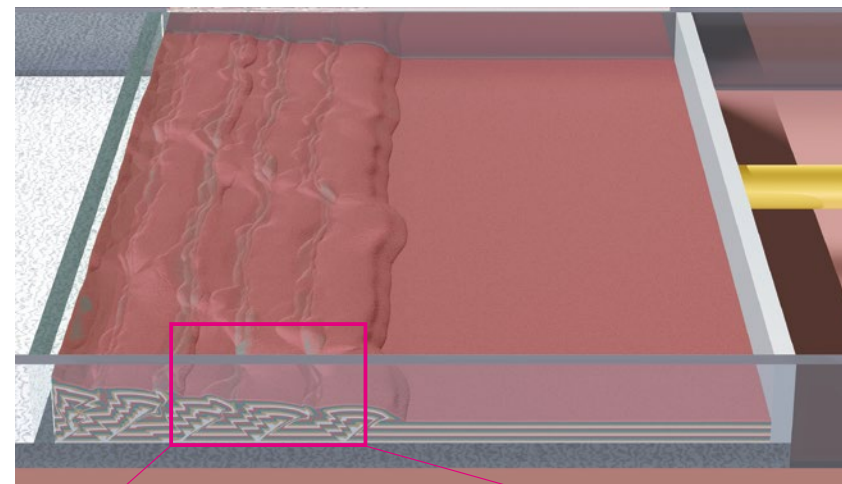
日本における最先端のコンピュータ・プラットフォームの1つが、「京」だ。「京」は巨大な並列コンピュータである。1台の独立したコンピュータとして機能する単位をノードと呼び、「京」は8万2944個のノードで構成されている。「『京』を用いて効率的に計算を行うには、多数のノードをつないでも性能が出る計算ア

ルゴリズムをつくる必要があります。しかし、これまではあまり効率的ではない方法が使われていました」と古市さん。「そこで私は、『京』で高速な計算が可能なDEMのアルゴリズムを開発しました。ポイントは、“動的負荷分散”という技術です」

粒子の運動を並列計算する場合、空間をあらかじめ区切っておき、各領域にノードを1個ずつ割り当てて計算する。しかし粒子は動き回るため、ある領域には粒子がなく、別の領域に粒子が集まってしまうこともある。すると、ノードによって計算量が偏ってしまい、高速化が望めない。「開発した動的負荷分散では、計算の途中で粒子数によって変わる計算量の空間分布に応じて領域のサイズを変えます。あなたは仕事が少ないのもっと広い領域を担当しなさい、あなたは仕事が多過ぎるので担当する領域を小さくしましょう、という感じです。どのノードも同じ計算量になり、効率的で高速な計算が可能になります」と古市さん。

計算を高速化すれば、大規模な計算も可能になる。古市さんは、25億個の粒子を用いた大規模な科学計算を実現。これは世界最大規模である。「これまで大規模な物理実験を再現するには、粒子のサイズを大きくしたりして計算量を減らしていました。科学計算と実験を併用することが多いのですが、計算量を減らした科学計算の結果は、現象をありのままに再現しているとは必ずしもいえません」と古市さんは指摘する。「25億個もの粒子を使った大規模科学計算が可能になると、計算量を減らさずにそのまま実際の条件を扱うことができるので、物理実験を忠実に再現できます。科学計算は、新しいステージに入ったといえるでしょう」

一方で、大規模計算が可能になったからこその問題もある。「電気代です。物理実験と科学計算で同じ現象を捉えることができるならば、どちらの方法を使



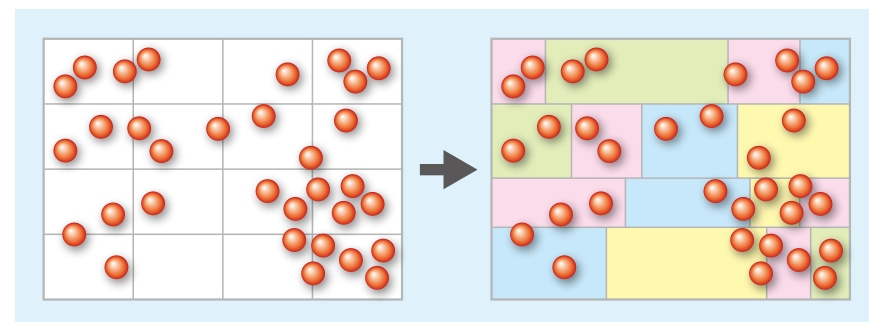
砂箱における断層形成の大規模計算。25億個の粒子を使用し「京」で計算を行った。拡大していくと、たくさんの粒子で構成されていることが分かる。粒子の直径は約100μm。実験室で行われた実際の砂箱実験の結果と比較すると、それらに特徴的な粒子の局所運動や断層境界、湾曲した地層構造などが再現されている。

うのか選ぶ際の基準は費用になるでしょう」と古市さん。スーパーコンピュータを動かすには大きな電力が必要で、大規模計算になるほど電気代はかさむ。いかに消費電力を抑えた大規模計算を実現するのに注目が集まっている。そこで、古市さんは、多数の演算器を持つメニーコアプロセッサとそれを搭載する電子回路基板を冷媒液のなかに浸ける液浸型のコンピュータの活用が鍵となると考えている。「日々進化するメニーコアプロセッサに応じて、DEMのアルゴリズムを最適なかたちへと発展させることも、最先端技術の開発を託されている私たちにとって重要な目標の1つです」と古市さん。

古市さんは「いまは付加体に興味があります。25億個の粒子の大規模計算も付加体の形成過程を理解するために行いました。大規模粒子計算の技術は、地球科学以外の研究分野、さらにはさまざまな産業分野でも現在役立っています。こんな用途で使いたいという要望があれば喜んで協力します」と語る。

西浦さんも続ける。「世のなかには、必要とされていても一般的に出回っている計算手法では解けない物理現象や扱うことが難しい産業プロセスがまだまだたくさんあります。でも、そのような問題を解決できる唯一無二の計算技術がJAMSTECにあるなら使いたいという人たちが多く現れるはず。そのためには、不可能を可能にする最先端な計算技術を世界に先駆けて開発し、JAMSTECの研究開発や世のなかの役に立てていきたいと思っています」

BE



動的負荷分散による並列計算の効率化。並列計算では、空間を区切って領域ごとにノードを割り当てて計算する（左）。粒子が移動すると各領域にある粒子の数は変化し、計算負荷が各領域で不均一になる。動的負荷分散では、各領域の計算負荷が均一になるように領域の区切りを変える（右）。

2017年9月25日、最初のトラップを仕掛けた。狙うはパラオオウムガイ。世界に5種類ほどいると考えられているオウムガイの仲間のなかでは最大級で、殻径は20cmほどになる。2億数千万年前からほとんど姿を変えずに地球上に存在し、生きた化石ともいわれる。このパラオオウムガイを捕獲し、日本で育て共同研究を進めようというのだ。鳥羽水族館とパラオ共和国にあるパラオ国際サンゴ礁センター（PICRC）が特別に友好協力協定を結んだことで、実現に至った。

パラオ共和国は、太平洋ミクロネシア地域の400以上の島々から成る。その島の1つ、コロール島から30分ほど沖に出たところに、急激に水深が深くなるショートドロップオフがある。最も深いところは水深600mにもなるこのドロップオフの水深200mほどのところに、PICRCの職員が自作したトラップを仕掛けた。トラップはカニ籠のなかにオウムガイを寄せるための鶏肉を入れて落とす。1日置いて翌朝引き上げる。

1日目、パラオオウムガイは2個体入っていた。2日目、2個体。3日目は0個体だった。4日目には8個体ものパラオオウムガイが入っていた。

採集したパラオオウムガイは畜養という段階に入る。輸送時に食べたものを吐き出さないように、食べ物を与えず、消化に徹してもらう。同時に、安静に保ち、体力を温存させる。

鳥羽水族館では、1979年から1991年にかけて、パラオオウムガイを飼育した経験がある。それ以後、パラオオウムガイは飼っていなかったものの、オオベソオウムガイやオウムガイを飼育し、繁殖にも成功した。どのような生きものにもいえることだが、状態よく輸送することが、水槽に収容した際の生死を分けることが多い。輸送時間を短くし、パラオオウムガイが生息する深い海のように低温に保つこと。この2つを実現し、無事に日本へ輸送するためにパラオ共和国はじめ、航空会社などと、捕獲前の5月からいくつもの書類を取り交わした。しかし、1月のワシントン条約改定により、オウムガイは付属書Ⅱに記載され、輸出入はいつそう厳しくなった。輸出に必要な書類をそろえているにもかかわらず、航空会社から生きた野生生物は載せられないという理由で積み込み許可が下りず、パラオからの直行便は諦めざるを得なかった。

ところが、それが幸いしたのだ。急きょ探し出した航空会社はクーリングルームを装備していた。直行便ではなかったため輸送時間はかかってしまったが、航空会社に預けた時点で18℃だった水温は、日本での受け取り時には16℃ととてもよいコンディションで移動を切り抜けた。畜養もうまくいったのだろう、吐き出しも少なく済んだ。ほかのオウムガイの仲間よりアグレッシブだといわれるパラオオウムガイも暴れ



今回捕獲したパラオオウムガイ。鳥羽水族館では1979年にパラオ共和国から12個体のパラオオウムガイを譲り受けている。このころは情報も少なく、長生きさせることが難しかった。いまでは高性能の海水ろ過装置を設置し、水温を低く保つこと、また餌などを工夫することで、他種のオウムガイたちの飼育期間も確実に延びてきている。

ることなく、日本まで来たようだ。パラオから輸送した10個体は、いまま元気に鳥羽水族館で飼育されている。

今後の目標はやはり繁殖だ。すでに繁殖を成功させているほかのオウムガイのように、パラオオウムガイを飼育し、その子どもたち、さらには孫たちを育てていく。PICRCの方々と情報共有し、ゆくゆくはパラオオウムガイの種の保存へとつなげていきたい。そんな夢を追い掛けている。 **BE**

取材協力：三谷伸也／鳥羽水族館 飼育研究部長
写真提供：鳥羽水族館



パラオオウムガイの捕獲の様子。トラップの入り口の大きさから、入ってくるのはパラオオウムガイやヤドカリの仲間など限られている。



鳥羽水族館で繁殖し、ふ化したオウムガイ。オウムガイやオオベソオウムガイの繁殖例から、水温の変化が産卵に重要であることが分かってきた。パラオオウムガイも水温を調整し、繁殖を目指している。

Information: 鳥羽水族館
〒517-8517 三重県鳥羽市鳥羽3-3-6
TEL 0599-25-2555 URL <http://www.aquarium.co.jp/>



齋藤実篤

海洋掘削科学研究開発センター
掘削情報科学研究開発グループ
グループリーダー

さいとう・さねあつ。1965年、秋田県生まれ、博士（理学）。東北大学大学院理学研究科地学専攻博士課程修了。東京大学海洋研究所助手などを経て、2001年、JAMSTEC（海洋科学技術センター）深海研究部副主幹。2004～06年、IODP（統合国際深海掘削計画）国際計画管理法人 札幌オフィス所長補佐、2010～12年、IODP科学技術パネル議長などを歴任し、2014年より現職。

2012年、「ちきゅう」によるIODP第343次研究航海「東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST）」において、検層データを解析して断層のシグナルを見つけ出した。

海を知らずして 陸は理解できない

——なぜ地質学を専門に選んだのですか。

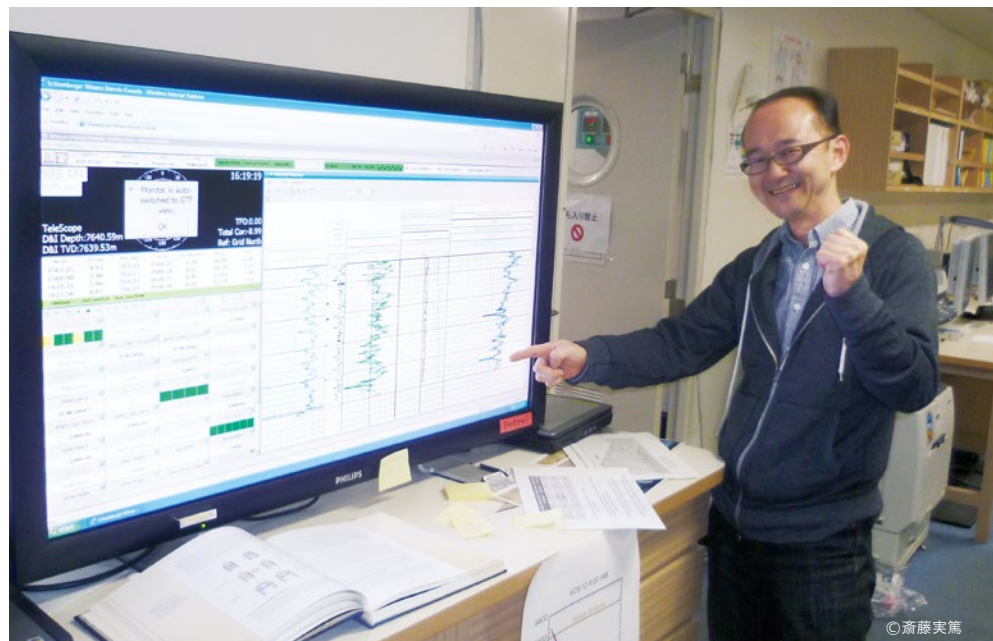
齋藤：いまから思えば、祖父や父の影響かもしれません。父方の家系図を見ると、代々、名前に実（さね）の字が付きます。私はその11代目です。

秋田県の秋田市内で育ちましたが、夏休みになると、両親の出身地である、自然豊かな湯沢市で過ごしました。父方の祖父は、小・中学校の先生で地学が好きでした。家には岩石標本があり、近くの山や川で地層や岩石を観察するフィー

検層で海底下を探り、 地球史をひもときたい

掘削孔に計測機器を下ろして地層の特性を深度方向に連続計測する手法を「検層」という。齋藤実篤さんは、検層データを解析するスペシャリストだ。検層により世界各地のプレート沈み込み帯の断層を見つけてきた齋藤さんは、「断層ハンター」の異名を持つ。

「地層の連続的なデータを取得できる検層は、地震に関する断層の検出だけでなく、地球の成り立ちと進化をひもとく重要な手法です」そう語る齋藤さんは、IODP（国際深海科学掘削計画）による、南海トラフの地震発生帯や、水没した第7大陸「ジューランドピア」の掘削に挑もうとしている。



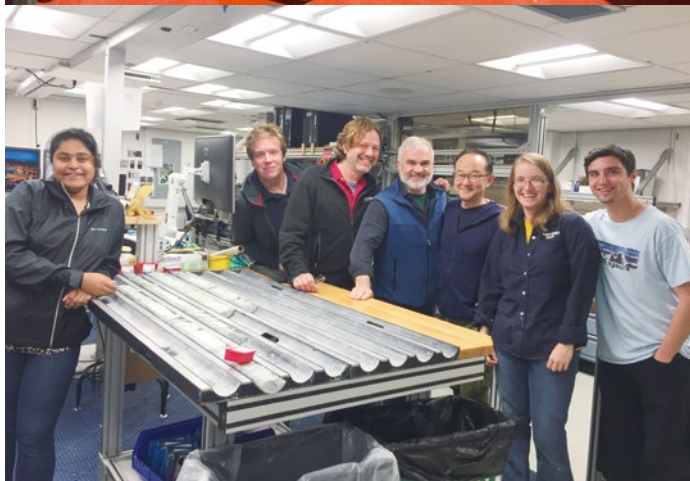
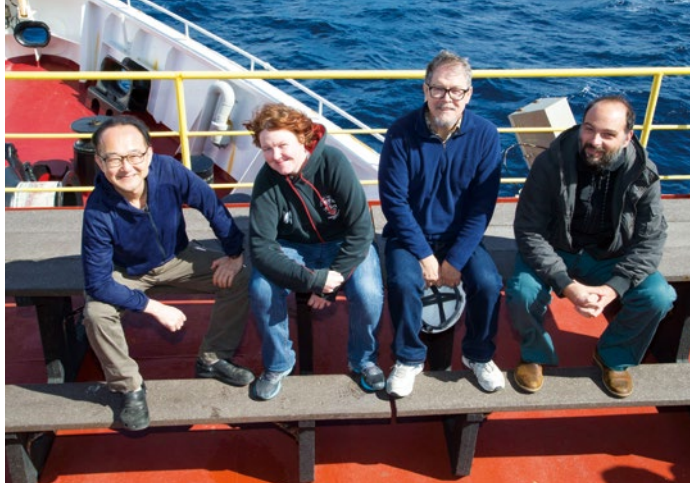
ルドワークに私を連れていってくれました。父は高校の地理の先生をする傍ら、人文地理学の立場から秋田県にある鉾山の歴史を研究して、40代のとき、東北大学で学位を取りました。

小学生のころの私は、子ども向けの科学雑誌や図鑑、科学マンガをむさぼるように読み、特に天体や宇宙が好きでした。惑星としての地球の成り立ちや歴史に興味を持ち始めたのもそのころです。——東北大学理学部に進まれました。

齋藤：天文学や理論物理にも興味がありましたが、地質学科へ進みました。そして、三浦半島や房総半島をハンマー

を持って歩き回り地層を調べました。海洋プレートの上に堆積物が降り積もり地層ができます。やがて海洋プレートが陸のプレートの下に沈み込むとき、堆積物が剥ぎ取られて陸側にくっつきます。それを「付加体」と呼びます。三浦半島や房総半島は、年代がとても新しい付加体が陸上で観察できる、世界でも珍しい場所です。——陸から海へフィールドを移した理由は？

齋藤：私が陸上で調べた付加体がどのようにできたのかを知るには、海を調べる必要があるからです。大学院に進んだ



©IODP/JR50

私は、東北大学に籍を置いたまま、東京大学海洋研究所（現 大気海洋研究所）の平 朝彦 教授（現 海洋研究開発機構 [JAMSTEC] 理事長）の研究室に自主的に出入りするようになりました。——初めて研究航海に出たのはいつですか。

齋藤：1989年、修士課程2年生のときに乗船した学術研究船「淡青丸」による伊豆・小笠原海域の航海が、私の海洋地質学の原点です。その海域の海底には、三浦半島や房総半島の地層で見た砂や泥が堆積していました。

1993年に東北大学で学位を取った後、ポストがなく、授業料を払って海洋研究所の研究生になりました。そして、平先生にお願いして、IODPの前身である国際深海掘削計画（ODP）の航海に参加させてもらいました。米国の深海掘削船「ジョイデス・レゾリューション」（JR）によるグリーンランド沖の調査で、それが私の初めての海洋掘削航海です。——なぜ、海洋掘削に参加したのですか。

齋藤：海底表層の調査だけでは、地層がどのようにできたのか分かりません。

海底下を掘削することで、地層形成の歴史が刻まれた連続的な試料やデータが得られます。それが海洋掘削の魅力です。また、陸上で地層が露出した露頭は、風化が進んでいたり連続的な試料が得られなかったりする場合があります。風化していないフレッシュで連続的な試料が得られる海洋掘削に、どうしても参加したかったのです。掘削試料（コア）の直径は8cmほどですが、「このコアは、あ のとき房総半島で見た崖の露頭にそっくりだ」などとイメージが膨らみ、感動します。

検層との出会い

——初めてのJRによる掘削航海の印象は？

齋藤：大変でした。まず、英語が聞き取れない、伝わらない。2ヵ月の航海で何とか海外の研究者と科学的な議論ができるようになりました。1年間留学するよりも上達したかもしれません。

貴重なコアはみんなが欲しがります。コアを持ち帰るには、自分が進めようとする研究の意義を訴えて、ほかの研究者



2017年、「ジョイデス・レゾリューション」によるIODP第371次研究航海「タスマン海域における沈み込みの開始と古第三紀の古気候変動」において、ジューランドピアの海域で掘削調査を行った。国際的には「Sanny Saito」が齋藤さんの通称。

たちに納得してもらう必要があります。ODPのような大きな国際プロジェクトに参加するには、周到に研究戦略を立て、ほかの人と競合しない独自の視点が求められることを痛感しました。

そして私は、最初のJRの掘削航海で「検層」を初めて知りました。——検層とは何ですか？

齋藤：掘削孔にセンサーを下ろし、電気伝導度や自然ガンマ線、音波速度など、掘削孔の地層の特性を測定する手法です。地層が柔らかいと、ある区間のコアがまったく採れないケースもありますが、検層ならば連続的なデータが得られます。

当時、日本でも科学掘削船をつくる計画が検討され、それが地球深部探査船「ちきゅう」の建造につながりました。私は将来、その日本の科学掘削船で活躍したいと思い、そこでは連続的なデータが得られる検層が重要になると確信しました。ただし日本ではまだ、科学掘削における検層の重要性はあまり認識されていなかったと思います。

私は、1995～96年の2年間、海洋研究



1993年ごろ、房総半島の地層調査にて。

所でポスドク研究員（日本学術振興会特別研究員）に採用されました。検層の勉強がしたいと平先生に相談して、ODPの検層データの取得や解析を担っていた米国コロンビア大学に1年間、留学しました。こうして私は、当時の日本にはほとんどいなかった、検層のスペシャリストになることができました。そして1997年に海洋研究所の助手に採用され、2001年にJAMSTECに移りました。

「断層ハンター」の集大成

——検層を使ってどのような研究を進めたのですか。

斎藤：主に、地震に関する研究を続けてきました。海洋プレートが陸側のプレートの下に沈み込む場所で巨大地震が起きます。深度10～20km付近にプレート同士がしっかりとくっついた固着域があり、海洋プレートの沈み込みに伴い、固着域にひずみがたまっていきます。そしてあるとき、一気に断層がすべて巨大地震が起きます。ただし、同じ沈み込み帯でも、地震の規模や発生周期は異なります。沈み込む速度や角度など、どのような条件が地震の規模や周期を決めているのかが大きな謎です。それを解るために、私は世界中のさまざまなタイプの沈み込み帯の掘削航海に10回ほど、参加してきました。——最も印象深い掘削航海は？



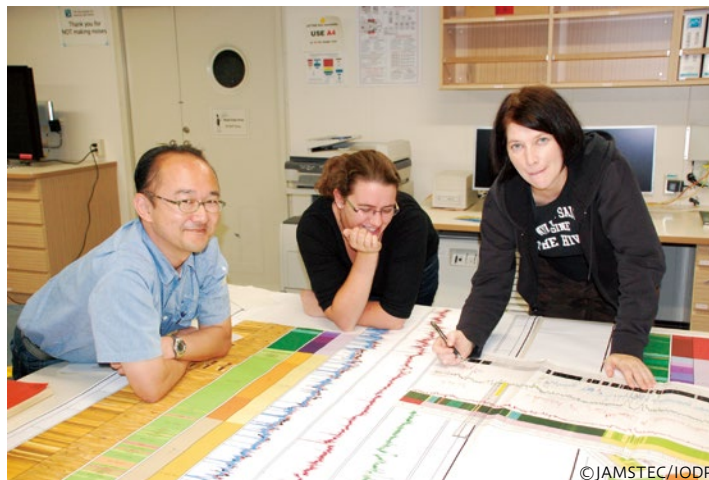
東京大学海洋研究所時代。上の写真(1998年)の後列左から3人目が斎藤さん、前列左から3人目が平朝彦教授(現JAMSTEC理事長)。海洋研究所所有のサイドスキャンソナー「イザナギ」をバックに撮影。下の写真(1999年)は、「淡青丸」の船内研究室での作業(右端が斎藤さん)。

斎藤：やはり、2012年に「ちきゅう」を使って行われた「東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)」ですね(ODP第343次研究航海)。この地震では、地震発生帯で起きた断層のすべりが浅い領域まで伝わり、海溝軸付近の陸側のプレートが50mもすべり巨大津波が発生しました。その発生メカニズムを探るために、大きくすべった海溝軸付近の断層まで掘り進めて、コアを採取することが最大の目的でした。

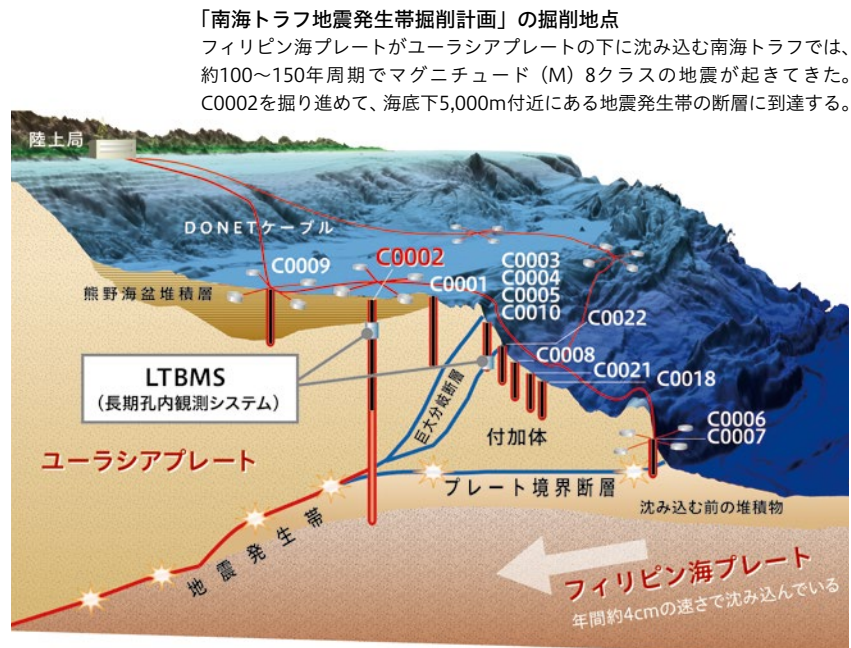
そのために、まず検層を行うための孔を掘りました。検層データを解析してこの深度にこれくらいの厚さの断層があると予測することが、「断層ハンター」で

ある私の仕事です。海底下820m付近に断層のシグナルを見つけました。検層用の孔のすぐ近くにコア採取用の孔を掘り、820m付近は取りこぼしがないように小刻みに掘り進めることで、断層のコアを採取することに成功しました。——2018年度には、「ちきゅう」により南海トラフの地震発生帯まで掘り進める計画ですね(ODP第358次研究航海)。

斎藤：海溝型巨大地震の固着域を貫通する掘削プロジェクトは世界初です。2007年から続く南海トラフ掘削調査、そして私の「断層ハンター」としての集大成になります。



2009年、「ちきゅう」によるODP第322次研究航海「南海トラフ地震発生帯掘削計画」において首席研究員として乗船。掘削同時検層(logging-while-drilling:LWD)で得たデータを解析する斎藤さん(左)。



現在、海底下3,058mまで掘削されています。さらに2,000mほど掘り進めて、地震発生帯の断層に到達します。しかしその掘削には時間とコストがかかるため、今回、掘ることができる孔は1本だけです。ほとんどの区間は検層だけで掘り進め、あらかじめ決められたいくつかの区間のみでコアの採取を行います。従って、断層そのもののコアを採取できるとは限りません。それだけに、検層がいっそう重要になります。また、ドリルビットで掘り進めることは、地層の強度試験を行っているようなものです。ドリルビットに加わる荷重やトルクなどの掘削データも、検層データとともに、地震発生帯の断層の特性を知るための重要な情報となります。——地震発生帯の断層を掘削することで、

どのようなことが分かるのでしょうか。

斎藤：断層をすべらせようとする力が、断層の強度を上回ると地震が起きます。それらを検層データや掘削データから推定できれば、次の巨大地震がどれくらい差し迫っているのか、切迫度を知るための重要な情報となります。

私たちは、地震発生帯の断層で、検層や掘削のデータにどのようなシグナルが表れるか予測していますが、実際に掘ってみなければ分かりません。断層のシグナルを捉えることができるか、いまから大きなプレッシャーを感じています。

水没した第7大陸、マントル掘削……

——南海トラフ掘削の次に目指すターゲットは？



ジューランドと「ちきゅう」による掘削候補地点

斎藤：最近、私が最も興味があるのが、オーストラリア東方沖に水没した第7大陸「ジューランド」です(『Blue Earth』145号「特集」)。ジューランドは、超大陸 Gondwana の端から分裂した細長い断片「コンチネンタル・リボン」が集まってできていることが分かってきました。2017年3月、「ちきゅう」によるジューランドの掘削がODPのプロジェクトとして正式に認められました。掘削により、ジューランドが超大陸から分裂して水没し、現在に至るまでの過程が詳しく分かるはずです。実は、日本列島もユーラシア大陸から分裂したコンチネンタル・リボンが集まってできたと考えられています。ジューランドを知ることは、日本列島の成り立ちの理解にも役立ちます。

2020年代には、「ちきゅう」によるマントル層の掘削も計画され、その掘削地点の候補としてハワイ沖の調査が進められています。ハワイ沖の次は、ぜひ日本海をマントル層まで掘ってみたいですね。それにより日本列島の形成に関する重要な情報が得られるはずです。

私は、地球に関するさまざまなテーマに関心があり、面白そうな掘削航海にはできるだけ乗船したいのです。いずれのテーマでも検層が役立ちます。これからも検層データの解析で、地球のさまざまな謎に挑んでいきたいと思っています。



海中ロボットの合成開口ソナーで海底の生物や断層を発見する

地球の海底の様子は、月や火星の地表よりも分かっていないといわれる。月や火星の地表は人工衛星の電磁波を使った観測により広範囲を詳細に調べることができる。一方、海中では電磁波はすぐに減衰してしまう。音波を使って海底地形を調べる通常型ソナーの解像度にも限界があった。海中ロボットに搭載した合成開口ソナーが、そのような状況にブレークスルーをもたらす重要技術の1つになると期待されている。海洋研究開発機構（JAMSTEC）の澤 隆雄さんたちは2009年、合成開口ソナーの実用化試験に成功。さらに解像度を理論値近くまで向上させて、海底の小さな生物や断層を発見できるように改良を進めている(図1)。

取材協力
澤 隆雄
海洋工学センター
海洋戦略技術研究開発部
海洋観測技術研究開発グループ
主任技術研究員

図1 合成開口ソナーで捉えた沈没漁船（2011年）
岩手県大槌町沖で沈没した漁船（全長約70m）を70～80m離れた上方から合成開口ソナーで捉えた画像。解像度は50cm程度だと推定される。右下の白いもやは魚網、そのなかの白い点は浮きだ。中性浮力曳航体に合成開口ソナーを搭載した観測システム「響電」による。

大きなソナーを仮想的に合成する 合成開口ソナー

1912年、英国の豪華客船「タイタニック」が冰山に衝突して沈没し、1,000人を超える犠牲者が出た。「この事件をきっかけに、視界が悪い状況で冰山を発見するために、ソナーの開発が進みました。現在では主に、海底地形などを調べるために使われています」と澤 隆雄さんは紹介する。

ソナーは、海底の目標に向けて音波のビーム（音響ビーム）を出し、戻ってくる音を受信する装置だ。海底に突起があれば音はすぐに戻ってくるし、溝があれば戻ってくるのに時間がかかる。音が戻ってくる時間を測ることで海底の凹凸を描くことができる。また、海底のかたい場所に当たると戻っ

てくる音は大きく、やわらかい場所では小さくなるので、海底の地質の情報を得ることもできる。

ただし、最新のソナーを使って船上から3,000m下の海底を調べても、せいぜい30～40mの物しか識別できない。「細かく見る精度、解像度があまり高くないのです。それは、海中で音響ビームが広がったり、海水の温度差によって進行方向が曲げられたりすることが原因です」

大きなレンズを使えば高い解像度で細かい物を見ることができるように、ソナーも大きいほど解像度は高くなる。「大きなソナーは、広がらず絞り込んだ鋭い音響ビームを出すことができます。また、戻ってきた音がどちらの方向から来たのかを正確に識別できるので、解像度が高くなるのです。小さな音も受信できるので、感度もよくなります」

ただし、搭載できるソナーの大きさには限度がある。「実際に大きなソナーを搭載しなくても、コンピュータのなかで大きなソナーを仮想的に合成する手法が合成開口ソナーです。ソナーを直線的に移動させながら、目標に向かって異なる角度から何度も音響ビームを出し、戻ってきた音进行处理します」と澤さんは説明する(図2)。

大きなソナーを合成するには、コンピュータのなかでソナーを真っすぐに並べなければならない。「海上の船は波によって大きく揺れます。揺れも計算に入れて補正しようとしても、メートル単位で船は揺れるので、真っすぐに並べることができません。解像度をほとんど向上できないため、海上の船のソナーでは合成開口ソナーの実現は難しいと現在でもいわれています」

合成開口の技術は、電波を使ってソナーと同様な原理で地形の凹凸などを観測するレーダーの分野で実用化が先行し、1960年代のアポロ計画による月探査でも使われた。「宇宙空間を飛行する人工衛星は計算通りに飛行して揺れません。補正しなくても、真っすぐに並べて仮想的に大きなレーダーを合成できるのです」

合成開口レーダーなど、人工衛星の電磁波を使ったさまざまな手法での観測により、月や火星の地表は詳細な地形図がつくられている。一方、地球のほとんどの海域の海底は、現在でも500m～1km四方につき1点しか高低が分からないという状況だ。海底には未解明のフロンティアが広がっているのだ。

「うらしま」で合成開口ソナーの実用化試験に成功！

澤さんがJAMSTECに入った1998年、深海巡航探査機「うらしま」の開発が始まった。「うらしま」は、海中を自律的に航行する海中ロボット（AUV：自律型無人探査機）だ。「AUVの揺れはセンチメートル単位です。AUVの登場により、それくらい小さな揺れならば補正して合成開口ソナーが実現できるかもしれない、と考えられるようになりました。私もそう思い、開発を始めました」

澤さんたちは2009年、「うらしま」を使った合成開口ソナーの実用化試験で、合成処理を行わない通常型ソナーよりも解像度の高い画像が得られることを確かめた。「通常型ソナーに比べて解像度は約3倍、ノイズは約1/8に低減した画像を得ることができました」（図3）

コンピュータのなかでソナーを真っすぐに並べる補正法には、戻ってきた音波の情報を使うなど、

いくつかの手法がある。澤さんはソナーを搭載した海中ロボットの揺れの情報を使った。「最初は、揺れの情報を全部使って補正を行いましたが、うまくいきませんでした。揺れには補正に不要なデータも含まれており、それがノイズとなってしまったのです。私たちは、揺れのデータのなかで補正に必要な情報だけを抽出する手法と、それを使ってソナーを真っすぐに並べる手法を開発しました」。澤さんたちはそれらの独自手法の特許として出願した。

開発には場数が必要

澤さんたちはその後も改良を進めた。「通常型ソナーより5〜6倍高い解像度を、現在では実現しています。それは100mほど離れた上方から、海底にある50cm程度の物体を識別できる解像度です。海底に沈んだ漁船を観測したところ、船体の近くに白いもやと点が見えました。その後、近づいて海中カメラで確認すると、もやは船体に絡まった魚網、白い点は網に付いた浮きでした」（図1）

理論的には、合成開口ソナーの解像度は、通常型ソナーに比べて30倍ほどの解像度を達成できる。「それは100m上方から9cmの物体を識別できる解像度です。ノルウェー系の多国籍企業は、独自手法で理論値に近い解像度を達成しており、そのシステムを市販しています。解像度を向上させるには、実際に海中ロボットに合成開口ソナーを搭載して海域試験を重ね、装置を微調整したり情報処理のノウハウを習得したりする必要があります。そのような“場数”に私たちとその企業では圧倒的な差があるのでしょう」

ただし、その市販の合成開口ソナーシステムはとても高価だ。「私たちのシステムは、それより1桁以上、低コスト化を実現できます」

「ゆめいるか」でシロウリガイを発見する

澤さんたちは、JAMSTECのAUVである深海探査機「ゆめいるか」に合成開口ソナーを搭載できるようにした（図4）。「AUVの揺れが小さいほど、合成開口ソナーの解像度は高くなります。『ゆめいるか』は安定性に優れ揺れが小さいので、場数さえ踏めば、私たちの合成開口ソナーも近い将来、理論値に近い解像度を達成できると思います」

ある海域を調査する場合、まず船のソナーで海底地形を調べ、重要な領域を絞り込む。その領域を、有人潜水調査船「しんかい6500」や、船とケーブルでつながれた無人探査機で探査して、熱水噴出孔や生物群、断層などを見つけ出し、カメラで撮影したり、岩石や泥、生物のサンプルを採取し

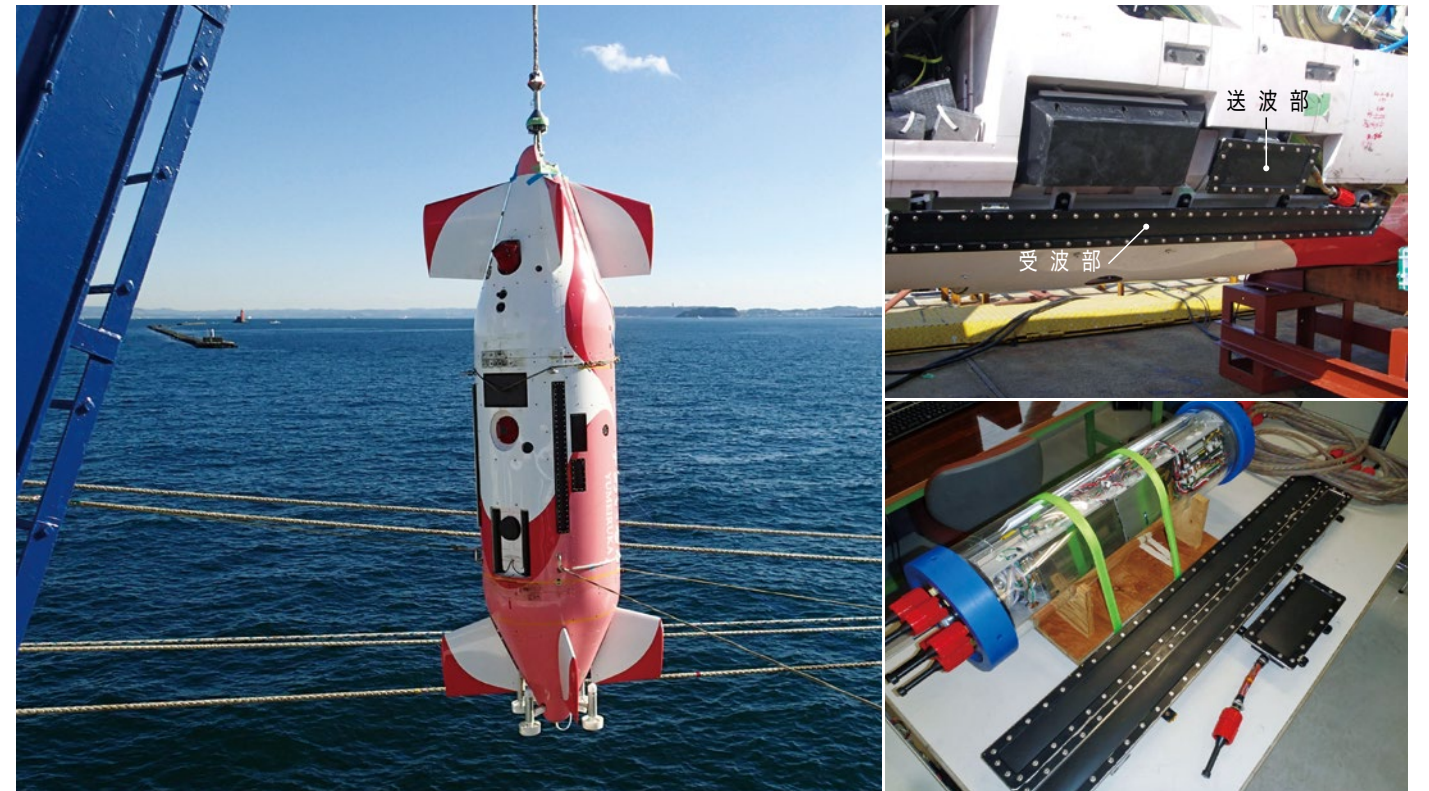


図4 「ゆめいるか」に搭載した合成開口ソナー

たりする。

「船のソナーで絞り込んだ領域を、AUVに搭載した合成開口ソナーで探査して、シロウリガイを発見できるようにしたいですね」と澤さんは目標を語る。海底下からメタンや硫化水素を含む海水が湧き出る断層や熱水噴出孔などにシロウリガイは生息している。シロウリガイは断層や熱水噴出孔の目印になるのだ。その場所をAUVで発見できれば、有人潜水調査船や無人探査機による調査効率は格段に向上するだろう。

「通常型ソナーでも熱水噴出孔を発見できる場合があります。しかし、直径10cm前後のシロウリガイを見つけることはできません。シロウリガイを発見できるようになれば、多くの研究者たちが合成開口ソナーを使いたがるでしょう。それで場数が増えれば、合成開口ソナーの解像度をどんどん向上させていくことができます」

21世紀の海底探査の主役 AUVの可能性を広げる

現在、石油業界大手のRoyal Dutch Shellがメインスポンサーの国際海洋ロボットコンペ「Shell Ocean Discovery XPRIZE」が進められており、日本からはJAMSTECを含めた8機関で結成した「Team KUROSHIO」が挑んでいる。

このコンペの主な課題は、限られた時間に無人

で広大な海域の海底地形図を作製することだ。求められる解像度は水平方向で5mとそれほど高くないが、海底地形図作製の高速化・低コスト化が求められている。それには、カメラのレンズに例えれば視野の広い広角レンズの役割をするソナー技術を搭載したAUVが必要だろう。一方、合成開口ソナーは解像度の高い望遠レンズだといえる。

「21世紀の海底探査の主役はAUVになると思います。ドローンが一気に普及したように、AUVもさまざまな場面で使われるようになるでしょう。ただし現在はまだAUVの黎明期です。AUVにどのような観測技術を搭載して、どのような用途で使うのか、みんなが模索している段階です。カメラにも用途に応じてさまざまなレンズが必要のように、AUVのソナーにも目的に応じてさまざまな手法が必要になります」

澤さんたちの合成開口ソナーの技術が、AUVによる海底探査の可能性を大きく広げるキーテクノロジーの1つとなるだろう。

BE

特許情報

- 特許第4062311号
合成開口処理システムにおけるプラットフォーム動揺補正方法
- 特許第5182676号
合成開口処理システム及び合成開口処理方法

図2 合成開口ソナーの原理
揺れを補正してコンピュータのなかでソナーを真っすぐに並べることで、大きなソナーを仮想的に合成する。それにより解像度や感度が向上する。

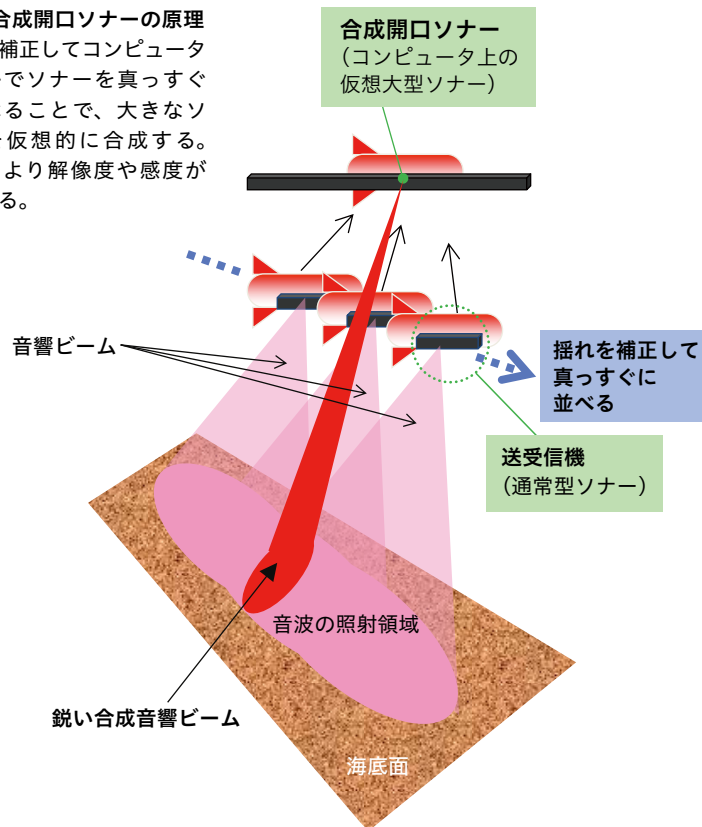
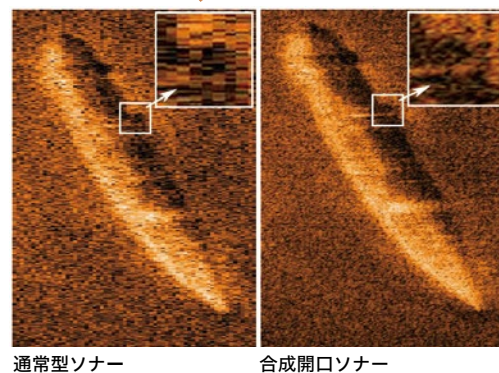


図3 合成開口ソナーの実用化試験（2009年）
「うらしま」に搭載した合成開口ソナーで、通常型ソナーより解像度を3倍に高めることに成功した。



【問い合わせ先】
JAMSTEC イノベーション推進課
chizai@jamstec.go.jp

【JAMSTECシーズ集】
JAMSTECの最先端の研究や技術開発から生まれた、さまざまな分野に及ぶ特許を下記のWEBサイトで紹介しています。



気候変動を理解し、予測する —— スーパーコンピュータが描く未来 ——

地球情報館公開セミナー 第206回（2017年1月21日開催）

小玉知央 ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム 極端現象全球予測研究ユニット ユニットリーダー

未来の気象・気候を知るために

シミュレーションは未来の気象・気候を知るためのほとんど唯一の方法です。たとえば今日・明日の天気や週間予報といった天気予報では、シミュレーションの結果が使われています。また季節予測では、たとえば1月から3月の3ヵ月間について、平年に比べて暖くなるのか寒くなるのかといったことを数ヵ月前に予測します。さらに、数十年後や100年後の将来的な気候予測でも、シミュレーションが活躍します。

では、シミュレーションはどのようにして行われているのでしょうか。未来の気象や気候を知るためには、まず現在の気象の状態を知る必要があります。日本各地に設置されているアメダス（地域気象観測システム）や人工衛星などを使って、気温や雲の様子など、さまざまな観測データが得られています。ただし、現在の状態を知るだけでは未来のことは分かりません。

そこで「数値モデル」が必要になりま

す。物理法則をもとに気温や風などの時間変化を計算するための方程式の集まりを数値モデル、または単にモデルと呼びます。計算量が膨大で人間が手作業で計算することはできないので、大きなコンピュータも必要です。観測データと数値モデル、そしてコンピュータの3つがそろって初めて、未来の気象・気候が予測できるようになります。

数値モデルには多くの方程式が含まれる

図1の大王転がしを例に、数値モデルを簡単に説明しましょう。

力を加えて大王を転がし続けると、大王の速度は速くなります。どれくらいの力を加えるとどれくらいの速度になるのかは「運動方程式」を使えば計算できます。大きな力をかけるほど、また力をかける時間が長いほど大王は速くなります。同じ力でも大王が重ければ速度はなかなか速くなりません。

大気に関する話ですので、温度のことも考えましょう。大王に日光が当たって

熱が与えられると温度が上昇します。大王の材質（たとえばプラスチックか鉄か）によっては暖まりやすさが違ってくるでしょう。時間がたつと温度がどれくらい上がるのかは、熱力学の方程式で表すことができます。運動方程式と熱力学の式では、速度が温度に変わり、力が熱に変わっていますが、全体のかたちはよく似ています（図1）。

ここまではある2つの時刻の間の変化だけを考えました。この後、大王には別の力や熱が加わるかもしれませんが、同じ計算を行うことで、さらに次の時刻の速度と温度が計算できます。これを繰り返すことで、任意の時刻における速度と温度が求まります。これが数値モデルの原理です。

実際のモデルでは、大王ではなく空気が相手です。空気はたくさんの粒子（分子）の集まりです。しかし1個1個の粒子について計算しようとすると、数が多過ぎて計算し切れません。そこでモデルでは、流体力学という学問に基づき、粒子全体の平均的な振る舞いを計算します。その際、空気は突然消えたり現れたりしないという式（連続の式）と、高校化学ではおなじみの気体の状態方程式が加わります。また、地球の自転や重力の効果などを運動方程式に加える必要もあります。さらに、太陽光や水の凝結などによって空気が加熱・冷却される効果を熱力学の式に含める必要もあります。運動方程式、熱力学の式、連続の式、気体の状態方程式のセットを大気モデルの基礎方程式と呼びます。

このような基礎方程式が分かっているからといって、気象・気候予測が簡単にできるわけではありません。後述するよ

未来の気象・気候を知るためには、気象を支配する方程式の集まりである「数値モデル」をつくり、コンピュータを使って未来の大気の状態を計算する必要があります。高速なコンピュータを使って地球を細かい格子で区切ることで、複雑な大気の流れや雲についてより高い信頼性を持った予測情報が出せるようになると考えています。今回のセミナーでは、予測においてどのような計算を行うかという基本的なことや、スーパーコンピュータを用いた気候予測研究の最先端などについて紹介します。

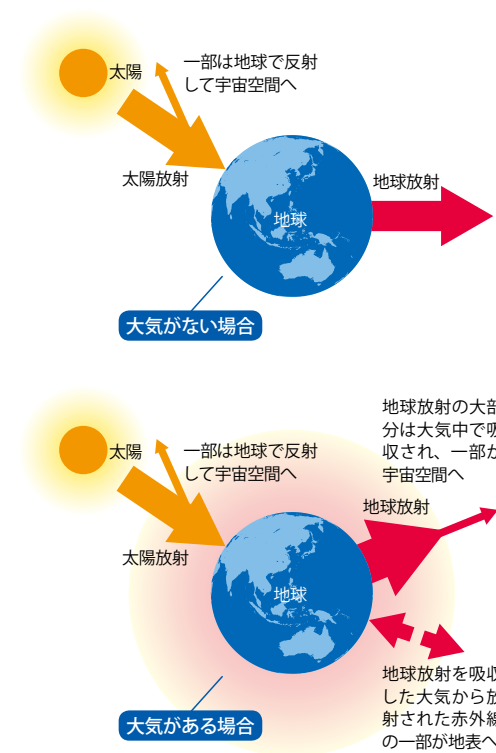


図2：温室効果

太陽放射の一部は、地球に当たって反射する。一方、地球の表面からは温度の4乗に比例して赤外線が放射されている。大気があると、地球の表面から放射された赤外線の一部が吸収され、上下へ再放射することで地球を暖める働きをする。いずれも、地球に入ってくる熱と地球から出ていく熱とが釣り合うように気温が決まる。

うに、雲は大気や地表面の加熱・冷却にとって重要な役割を果たしています。雲のモデル化には蒸発、凝結、雲粒同士の併合、落下といった複雑な過程を考慮する必要があります。また大気中には、砂漠や火山、工場などから放出されるエアロゾルという微粒子が漂っており、それが太陽光を反射したり吸収したりする効果も考慮しなければなりません。また、大気と接する海洋や河川が大気にどのように影響するか、オゾンなどの化学物

質の影響、さらには植生の振る舞いについても、場合によっては考慮する必要があります。このように、気象・気候予測を行うためのモデルにはさまざまな過程が含まれるので、非常に複雑なのです。

温室効果と地球温暖化

気象庁によると、地球全体の平均気温は統計を開始した1891年以降で2016年が最も高くなりました。2000年代に入ってから地球温暖化が停滞したかのように見える時期もありましたが、全体の傾向として上昇を続けています。地域的に見てもほとんどの場所で温暖化しています。北極域の海水面積が縮小していることも観測で確かめられています。また温暖化によって、この100年間でじわじわと海面の高さも上昇しています。

そもそも地球の気温はどのように決まっているのでしょうか。

地球を暖めるエネルギー源は太陽放射です。太陽放射を地球が受けて、それを反射したり吸収したりします。同時にすべての物体は温度に応じた電磁波を出しており、地球表面からも赤外線が出ています。これらの地球に入ってくるエネルギーと出ていくエネルギーとがバランスすることで地球の気温は決まります。

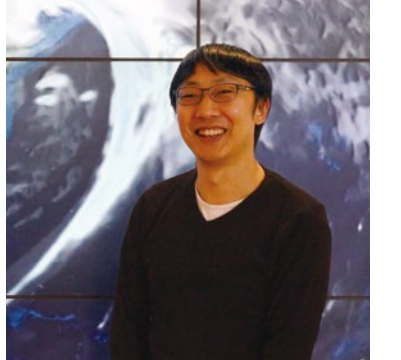
地球に大気がない状態でエネルギーのバランスを計算すると、地表付近の気温は-19℃になります。これは現在の気候と比べるととても寒いものです。しかし地球には大気があり、赤外線をよく吸収します。大気中で赤外線を吸収するのは水蒸気や二酸化炭素、また雲粒などさまざまです。赤外線を吸収したそれらからも、四方八方に赤外線が出てい

き、その一部が地表の方に戻っていきます。その結果、大気がない状態と比べて地表付近の気温は上がります。そのおかげで、私たちは-19℃ではなく、15℃程度の暖かい環境で生きていけるのです。このように大気によって暖められる効果は「温室効果」と呼ばれます（図2）。

地球温暖化を止めるために二酸化炭素の排出量を減らそうとしています。大気中の二酸化炭素は、地球からの赤外線放射を効率よく吸収します。そのため、二酸化炭素が増えると温室効果が強まるのです。二酸化炭素のほか、メタンなども温暖化を促進する効果が高い物質です。ほかにもエアロゾルなど、定量的な効果が十分に理解されていない物質もあります。温暖化を考える上では、二酸化炭素だけではなく、いろいろな物質を考慮する必要があります。

天気予報と気候予測の違い

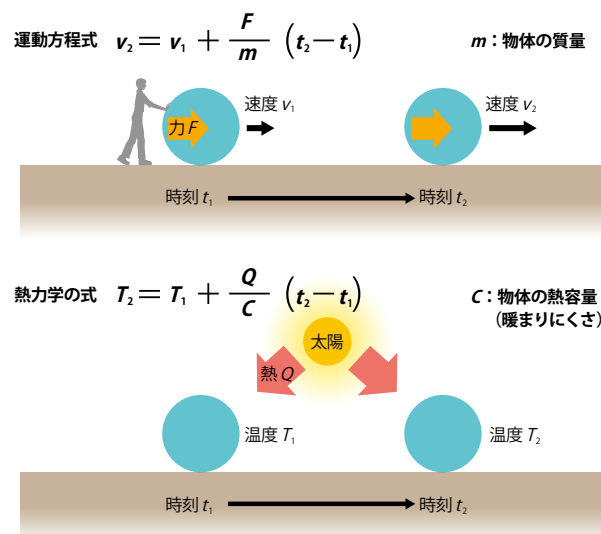
1週間先の天気予報でも外れるのに、どうして100年後の未来が予測できるのか、疑問に思ったことはないでしょうか。天気予報では、ある特定のタイミングで、晴れるのか雨が降るのか、あるいは暖かいのか寒いのかなどを予報します。特定のタイミングとは、普通は1週間程度先までです。余談ですが、この予報期間を延ばすための研究も私たちのチームで進めています。気象現象が発生するタイミングを当てるには、モデルに与える初期条件（現在の状態）が決定的に重要です。たとえばいまの天気が晴れているか雨なのか、低気圧がどのくらいの勢力でいまどこにあるのか、などが大事なのです。一方で、二酸化炭素の量の増減などといった外部条件は、天気予



こだま・ちひろ。1981年、秋田県生まれ。東北大学大学院理学研究科博士課程修了。博士（理学）。2009年よりJAMSTEC。IPCC貢献地球環境予測プロジェクト、シームレス環境予測研究分野（現在も兼務）などを経て、2016年より現職。専門は気象学、気候学、情報科学。高解像度モデルを用いた気象・気候予測に携わる。

図1：運動方程式と熱力学の式

大王に力を加えたとき、ある時間経過後の大王の速度は運動方程式で求められる。さらに大王に熱を加えたときの、ある時間経過後の大王の温度は熱力学の式で求められる。これを繰り返すことで、任意の時間の速度と温度を求めることができる。



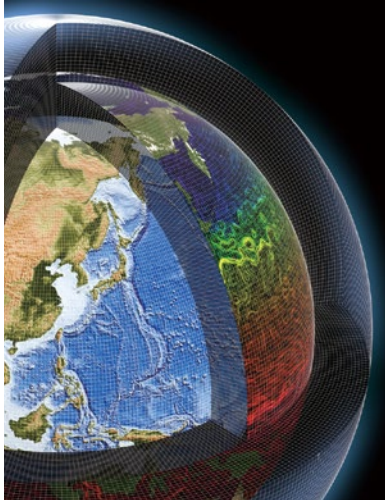


図3：大気を格子で区切る

数値モデルでは、大気を三次元的に格子で区切って計算を行う。

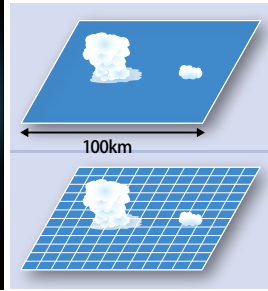


図4：格子サイズが大きいと雲を計算できない

通常の数値モデルでは、雲の集団を100km程度の領域の平均値で表すため、雲を直接計算することができず、経験的な方程式に依存していた。格子サイズが数kmのNICAMでは、雲集団内部の1つ1つの雲を直接計算できる。



図7：3世代目の地球シミュレータ

報にとってあまり重要ではありません。

一方、気候予測は、幅を持った期間の平均的・統計的な気象状態を知るためのものです。たとえば100年後には台風の数が増えるか減るか、豪雨の頻度はどうなるか、といったようなことです。気候予測では気象現象が発生するタイミングを当てる必要はありません（原理的に不可能）。従って、天気予報とは異なり、初期条件はあまり重要ではありません。

実は、気候予測と気象予報の方程式は原理的には一緒です。ただ気候予測では、外部条件によって結果が大きく変わってきます。たとえばモデルに与える二酸化炭素の量を変えると地球の気候は変化します。つまり、将来における二酸化炭素量を見積もる必要があります。これは人間が今後どのくらい排出するか、という経済活動に依存します。二酸化炭素の排出量を、今後抑える方向になるのかどうか、気象や気候の研究者には分かりません。経済的なシナリオによって、将来の気温の見積もりは変わってきます。このような外部条件がたくさんあり、それらを仮定して予測する必要があります。そこが天気予報と大きく違う点です。

では、正しい外部条件さえ与えれば、モデルは正しい気候予測を行ってくれるのでしょうか？ 残念ながら現在のモデルの性能はまだ不十分であることが分かっています。日本をはじめとする世界各国の気候研究機関では、それぞれが開発したモデルを用いて同じ経済シナリオに基づいて予測を行っています。たとえば、二酸化炭素が増加したときの気温上昇量の予測には2倍程度のばらつきがあ

ります。このばらつきの主な理由は、温暖化が進む際に雲がどのように振る舞うかがモデルによって異なるためであると分かっています。次に述べるように、私たちはこの雲の振る舞いを高解像度のモデルを用いて解明しようとしています。

格子サイズを小さくしたい

モデルでは、地球の大気を格子で区切って、それぞれの格子で風や気温、気圧などがどうなるかを計算します（図3）。その場合、格子のサイズ（解像度）より

小さい現象をモデルで表すことはできません。

ただ、格子を細かくすると、計算量がとても多くなります。気候予測で使われているモデルの大半は、100kmもしくはそれ以上の粗さの解像度で計算をしています。気候予測は長い年月を計算します。そのような計算をする場合、粗い格子でないと計算量が多過ぎて計算し切れないのです。

100kmの格子のなかには、雲がある場所やない場所など、さまざまな情報が

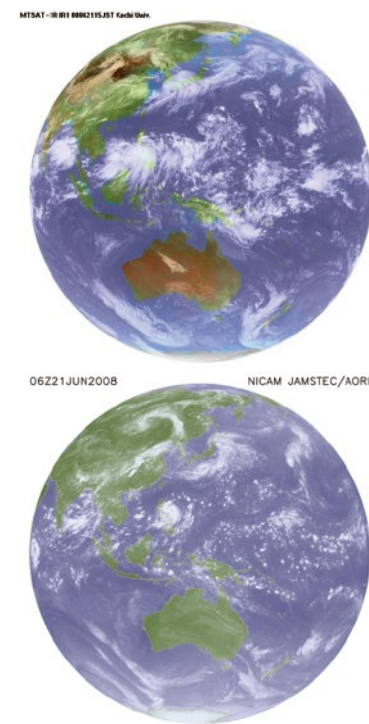


図5：衛星画像(上)とNICAMで計算したシミュレーション画像

2008年の台風6号（フェンシェン）がフィリピン付近で最盛期を迎えたところの様子を示したものである。雲の様子などが非常に細かくシミュレートされている。

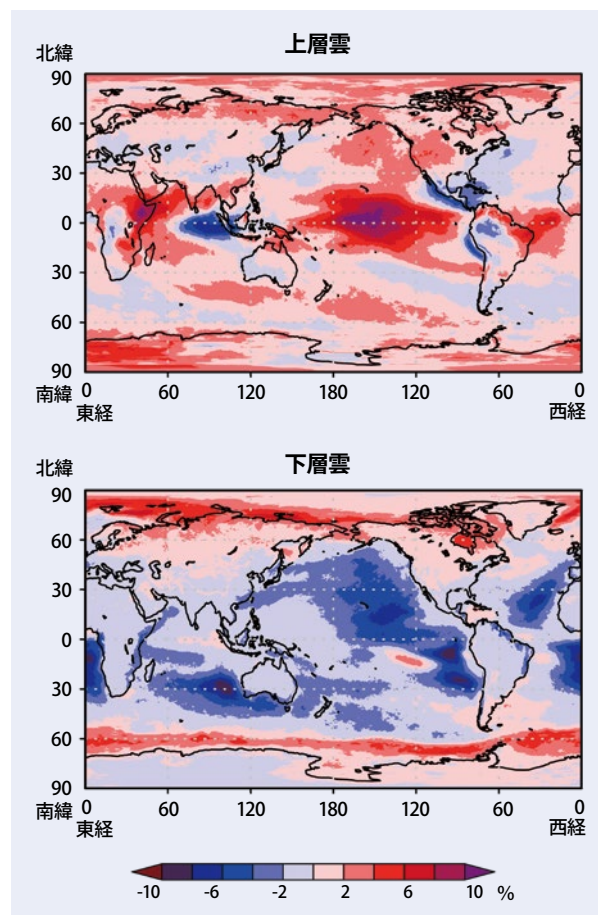


図6：NICAMシミュレーションによる雲量の将来変化予測

あるはずです。それを1個の格子で表すことには無理があります（図4）。

そこで海洋研究開発機構（JAMSTEC）と東京大学、理化学研究所が共同で、「NICAM（全球非静力学モデル）」というモデルを開発しています。地球全体を対象とするモデルとしては非常に細かく計算できるように設計しており、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」で計算する場合には格子サイズを3.5kmまで小さくできます。これにより、雲や対流をより直接的に計算することが可能になりました（図5）。

図6は格子サイズ14kmのNICAMを使った、地球温暖化に関する計算の一例です。雲の将来的な増減を計算したものです。

雲があると、太陽放射は雲で反射されて一部しか地表に届きません。これは「日傘効果」と呼ばれます。雲には地表を冷やす効果があるのです。この効果は厚い雲（主に下層の雲）ほど大きいことが分かっています。一方で、雲は地球の表面から出た赤外線を吸収して再放射することで、地表付近を暖かくする効果もあります。この効果は雲頂が高い雲（主に上層の雲）ほど大きいことが知られています。どのタイプの雲が増えるか減るかによって、温暖化を促進するか抑制するかが変わってきます。

図6の結果から、全体として、上層の雲は増えて下層の雲は減ると予測されていることが分かります。下層の雲が減ると日傘効果が減少するので、温暖化を加速する方向になります。一方で上層の雲が増えると、温室効果と日傘効果の両方が増すのですが、両者が打ち消し合った結果、温室効果の方が少し効いてきま

す。つまり雲は温暖化をより促進するというのを、NICAMは予測しています。

数値モデルは完全ではない

シミュレーション研究には課題がいくつもあります。

まず、モデルは観測されたものを完璧に再現することはできません。さまざまな要因によって観測とシミュレーションは合致しないのですが、その合致しない度合いのようなものをバイアスといいます。温暖化予測では、バイアスは将来的に変化しないと仮定して解析を行います。

ちなみに観測も完璧ではありません。たとえば「ひまわり」のような静止気象衛星で上層の雲と下層の雲を観測した場合、上下の雲が重なっていると下に雲があっても観測データには現れません。観測データを見るときにも、注意が必要になります。

数値モデルそのものの課題として、雲が形成される細かい過程はモデル化が難しかったり、海洋やエアロゾル、河川や植生などモデル化するべき対象が多くて複雑であったりといったことがあります。モデルは現象に対する理解の度合いを反映していますが、これが不十分であるということです。私たちの理解が進むほど、モデルもよくなっていくはずだという希望を持って研究を進めています。

また、どんなに素晴らしいモデルがあっても、よいコンピュータがなくては計算できません。複雑な雲の様子などを計算するには、3.5kmであってもまだ格子サイズが大き過ぎます。スーパーコンピュータの性能を最大限に引き出すことも

大事で、そのためには計算科学との連携が鍵になってきます。

コンピュータも非常に重要

2002年に稼働し始めた初代「地球シミュレータ」は、演算性能が40テラフロップスでした。1テラフロップスとは、1秒間に1,000,000,000,000回計算できるという意味の単位です。1の後に0が12個並んでいます。ちなみに私が2012年に購入した職場のパソコンは0.1テラフロップス程度ですから、地球シミュレータがとんでもなく速いことが分かります。

地球シミュレータは2015年には3世代目が稼働し始めました（図7）。これは1.3ペタフロップス=1,300テラフロップスで、初代の30倍以上のスピードです。理化学研究所で2012年に運用を開始したスーパーコンピュータ「京」は10ペタ（1京）フロップスです。そして現在開発中で2021～22年ごろに運用開始予定のポスト「京」は、数百ペタフロップスになるといわれています。

計算速度は大事です。たとえばNICAMを用いて格子サイズ14kmで週間予測をする場合、「京」では16分ほどで計算できます。私のパソコンで計算すると、なんと3ヵ月もかかります。ポスト「京」では、20秒程度で計算できると予想されています。計算速度が速くなれば、格子を細かくしたり、あるいはさまざまな仮定を精緻化したりすることで、よりよい予測につながります。

気候変動を予測するためには、数値モデルの改善とともに、コンピュータの計算速度を速くしていくことも非常に重要なのです。

BE

JAMSTECの情報を
発信中！

JAMSTECでは多くの方に海洋
科学技術への理解と親しみを持
っていただくためにFacebook
やTwitter、YouTubeなどを利用
して、コラムや広報イベント、
プレスリリースなどの情報をお
届けしています。外部サー
ビスのJAMSTEC公式アカウ
ントの一覧は、[http://www.
jamstec.go.jp/j/sns/](http://www.jamstec.go.jp/j/sns/)でご覧い
ただけます。



Facebook
JAMSTEC公式

Twitter

JAMSTEC広報
@JAMSTEC_PR



地球深部探査船
「ちきゅう」
@Chikyu_JAMSTEC



有人潜水調査船
「しんかい6500」
@6K_JAMSTEC



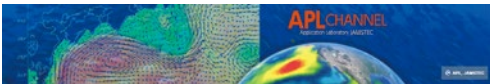
アプリケーション
ラボ
@APL_JAMSTEC



YouTube

JAMSTECチャンネル

APL_JAMSTEC
チャンネル



賛助会（寄付）会員名簿

2018年2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
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社
株式会社アイケイエス
株式会社アイワエンタープライズ
株式会社アクト
朝日航洋株式会社
アジア海洋株式会社
株式会社天野回漕店
株式会社アルファ水工コンサルタンツ
株式会社安藤・間
泉産業株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
潮冷熱株式会社
株式会社エス・イー・エイ
株式会社エスイーシー
株式会社SGKシステム技研
株式会社エヌエルシー
株式会社NTTデータ
株式会社NTTデータCCS
株式会社NTTファシリティーズ
株式会社江ノ島マリンコーポレーション
株式会社MTS雪氷研究所
株式会社OCC
株式会社オキシーテック
沖電気工業株式会社
海洋エンジニアリング株式会社

海洋電子株式会社
株式会社化学分析コンサルタント
鹿島建設株式会社
株式会社カネカ
川崎汽船株式会社
川崎近海汽船株式会社
川崎重工業株式会社
川崎地質株式会社
株式会社環境総合テクノス
株式会社キュービック・アイ
共立インシュアランス・ブローカーズ
株式会社
共立管財株式会社
極東貿易株式会社
株式会社きんでん
株式会社熊谷組
クローバテック株式会社
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KSP
KDDI株式会社
京浜急行電鉄株式会社
鈦研工業株式会社
株式会社構造計画研究所
神戸ペイント株式会社
広和株式会社
国際石油開発帝石株式会社

『Blue Earth』定期購読のご案内

<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
だきます）。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。
平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払
いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付け
ておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

■ お問い合わせ・申込先

〒237-0061 神奈川県横浜須賀市夏島町2番地15
海洋研究開発機構 横須賀本部 広報部 広報課
TEL.046-867-9052

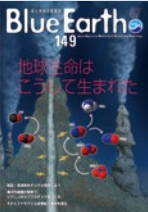
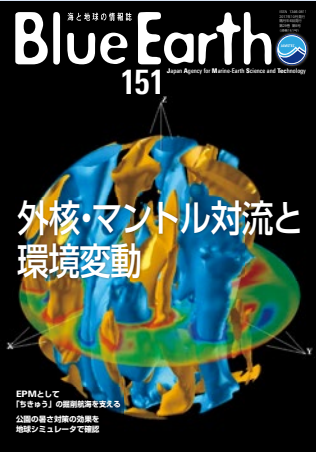
Ｅメール info@jamstec.go.jp

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（154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

<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。

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 神奈川県横浜須賀市夏島町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）

海と地球の情報誌 Blue Earth

第30巻 第1号（通巻153号）2018年3月発行

発行人 田代省三 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部

編集人 田村貴正 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 有限会社フォトンクリエイト
取材・執筆・編集 立山 晃（p20-27）、鈴木志乃（p1-17、裏表紙）
岡本典明／ブックブライト（p28-31）、坂元志歩（p18-19）
デザイン 株式会社デザインコンビビア
（飛鳥井羊右、山田純一、岡野祐三）

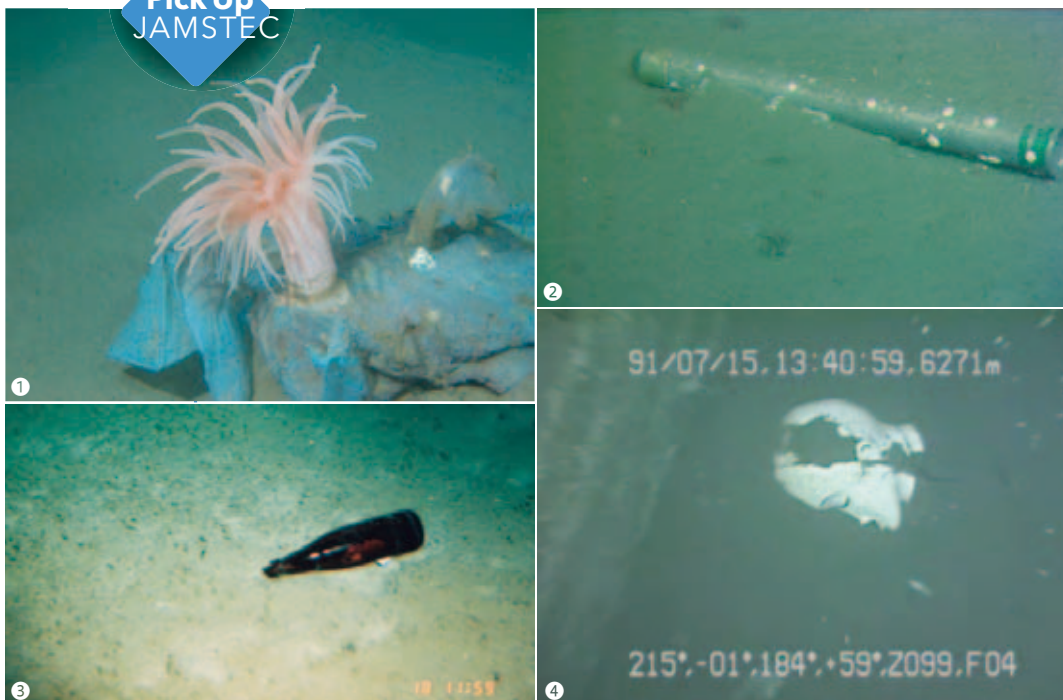
ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

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。

①オオグチバヤとイソギンチャクが付着したポリ袋／日本海 隠岐堆 ②パイプ状のごみ／紀伊水道 紀伊海底谷西側斜面 ③ガラス瓶／南海トラフ 遠州灘沖御前崎南方 ④マネキン頭部／日本海溝 宮古東方東部

Pick Up
JAMSTEC



「深海デブリデータベース」を公開中！

ポリ袋、ペットボトル、ガラス瓶、タイヤ、ズボン、帽子、靴、さらにはマネキンの頭部……。これらはどれも、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の潜水調査船や無人探査機による潜航調査の際に海底で撮影されたものだ。JAMSTECの国際海洋環境情報センター（GODAC）では、そうした海底ごみ（デブリ）の映像や画像を集めた「深海デブリデータベース」を公開している。

映像や画像は、ごみの種類で細かく分類され、潜航調査場所や潜航日、撮影水深、ごみの状況や底質、生物の有無などの情報が登録されている。データー一覧の「リスト」や「マップ」で閲覧したい項目や潜航調査地点を選べると、深海に沈んだごみの映像や画像と情報を見ることができる。

日常生活では、深海に沈んだごみを目にする機会はない。潜航調査で撮影された映像や画像は、海底におけるごみの様子を知ることができる貴重なデータである。ごみの分布と地質・地形との関係や、ごみが生物に及ぼす影響の把握、また海洋ごみに対する理解増進にも役立つと期待されている。2018年1月時点での登録数は2,314件。今後も海底ごみの情報を継続的に追加していく予定だ。

深海デブリデータベース

<http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/dsdebris/j/>