

海と地球の情報誌

Blue Earth

159

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2019年3月発行
隔月6回発行
第31巻 第1号
(通巻159号)



海洋・地球・生命の 統合的理解への挑戦

Part 1

地球温暖化によって
台風のサイズは変わるのか？
「しんかい6500」
音響画像伝送が高速に
微小領域の地球科学へ



海洋・地球・生命の 統合的理解への挑戦

Part 1

- 1 **特集**
**海洋・地球・生命の
統合的理解への挑戦
Part 1**
- 18 **Aquarium Gallery**
島根県立宍道湖自然館ゴビウス
驚きやすく傷付きやすい——シラウオ
- 20 **JAMSTEC生まれの種たち**
微小領域の地球科学へ
坂井三郎
生物地球化学研究分野 技術研究員
- 24 **「しんかい6500」**
音響画像伝送が高速に
志村拓也
海洋工学センター 海洋基幹技術研究部 先端技術研究グループ
グループリーダー
- 28 **Marine Science Seminar**
地球温暖化によって
台風のサイズは変わるのか？
高解像度モデルが示す台風の将来予測
山田洋平
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 ポストドクトラル研究員
- 32 **BE Room**
Information
JAMSTEC×SDGsの取り組みウェブサイト公開
- 裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**
「Team KUROSHIO」、
Shell Ocean Discovery XPRIZE
決勝ラウンド終了

2014年度に開始した第3期中期計画が、2019年3月で終了する。
JAMSTECではこの5年間、「海底資源」「海洋・地球環境変動」「海域地震発生帯」
「海洋生命理工学」「先端的掘削技術を活用した総合海洋掘削科学」
「先端的融合情報科学」「海洋フロンティアを切り拓く研究基盤」という
7つの課題を掲げ、研究開発を進めてきた。
それぞれの課題における取り組みと成果を
2号連続で特集する。

所属・役職は取材当時のものです。

朝日を浴びる深海調査研究船「かいわれい」
写真提供：東京海洋大学 後藤慎平 助教

海洋・地球・生命の統合的理解への挑戦

取材協力

平 朝彦

JAMSTEC 理事長

科学技術に基礎を置いた海洋立国を目指す

——2014年度に開始した第3期中期計画の期間が、2019年3月で終了します。まず、中期計画について教えていただけますか。

平：JAMSTECの使命は、海洋に関する基盤的研究開発や学術研究を総合的に行うことにより、海洋科学技術の水準の向上を図るとともに学術研究の発展に資することである、と独立行政法人通則法で定められています。また、文部科学大臣が、3~7年の期間において達成すべき中期目標を設定することが決められています。その目標達成のためにJAMSTECで作成するのが、中期計画です。

JAMSTECでは、第3期中期計画が始まる1年半ほど前、2012年10月に「長期ビジョン~海洋・地球・生命の統合的理解への挑戦」を策定しています。それは、およそ15年先を見据え、私たちは何をすべきなのかを考え、その目標に到達する

ためのアプローチをまとめたものです。——長期ビジョンには、どのような内容が示されているのでしょうか。

平：「科学技術に基礎を置いた海洋立国を目指す」と冒頭でうたっています。海洋生物特有の機能を利用した産業が興り、海底に大規模な鉱床が発見されて実用開発が始まり、気候変動や地震・津波による自然災害に強く、海洋に対する理解が深まり環境の保全活動が展開されている……。それが目指す海洋立国の姿です。さらに、日本がリーダーとなり世界に規範を示すことを目指す、としています。

実は、2008年にも長期ビジョンが策定されています。しかし、それは内部資料の扱いでした。JAMSTECは国民の負託を受けて活動しているのですから、何を目指し、どのような研究開発をし、社会にどう貢献できるのかを皆さんに伝える必要があると考え、現在の長期ビジョンはJAMSTECのホームページで公開しています。第3期中期計画は、この長期ビジョンを踏まえたものになっています。

7つの研究開発課題を基礎研究と戦略研究の連携で解く

——第3期中期目標では、JAMSTECは海洋科学技術の中核機関として、わが国が海洋立国として発展するために必要な取り組みに邁進することが求められ、特に研究開発は国家的・社会的要請を踏まえ戦略的・重点的に推進すること、とされています。それに対する中期計画は？

平：第2期（2009~13年度）は、地球環境、地球内部ダイナミクス、極限環境生物という3本の柱を立てていました。2011年3月11日に東日本大震災が起きたことで、国の在り方が大きく変わりました。社会に密接したテーマに対する要請が高まり、私たちもその必要性を強く感じたことから、第3期では7つの研究開発課題を設定しました。

日本周辺の海底に豊富に存在することが分かってきた「海底資源」、人類にとって喫緊の課題である地球温暖化などの「海洋・地球環境変動」、巨大地震が発生する場所にフォーカスした「海域地震発生帯」、生命起源の解明などの理学に加えて海洋生物特有の機能を活かす工学も

展開する「海洋生命理工学」、地球深部探査船「ちきゅう」によって先端的掘削技術を開発し活用する「総合海洋掘削科学」、スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を活用し付加価値情報を創出する「先端的融合情報科学」、海洋の総合的な理解に必要な技術開発を行う「研究基盤の構築」です。

——組織も変更していますね。

平：私たちが対象としている海洋・地球システムは広く複雑で、生命活動も含まれ、すべての学問分野を包含しています。カオス状態であることがその面白さでもあるのですが、学際的な基礎研究にじっくり取り組まなければ理解は不可能です。一方で、社会貢献も求められます。そこで研究部門を、課題解決型の「戦略研究開発領域」と先進的な基礎研究を行う「基幹研究領域」に再編しました。7つの研究課題は、両方の領域の複数の部署が連携して取り組んできました。

ユニークで世界的な成果の数々非常に高い評価

——第3期の成果は？

平：2018年3月に第2回JAMSTECアドバイザー・ボード（JAB）を開催し、世界各国の海洋研究機関のトップリーダーや専門家から、第3期中期計画の進行状況について評価を受けました。JAMSTECの研究開発はユニークで、かつ世界的な成果が出ていると、非常に高い評価を得ています。

たとえば「海底資源」では、海底熱水鉱床の成因の科学的研究に基づいた効率的な探査方法を世界で初めて確立しました。これは、内閣府が推進している「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の課題の1つである「次世代海洋資源調査技術（海のジバング計画）」で得られた成果です。この課題には複数の省庁の研究機関や民間企業が参加し、JAMSTECが管理法人を務めました。とてもよい経験をし、研究機関として足腰が強くなったと感じています。

私たちの活動範囲は5年前とは比べものにならないほど広がり、外部との関わりが多くなりました。日本そして世界の産業界や研究機関から求められて協働し、サクセスストーリーをたくさんつく

る。そして、JAMSTECがなくなったら日本も世界も困る、といわれる存在にならなければいけないと考えています。

——2019年4月に第4期中期計画が始まります。

平：第4期の期間は7年になり、2026年3月までです。長期ビジョンは2013年からおよそ15年先、つまり2028年ごろを見据えたものですから、その実現にとって非常に重要な期間になります。学際的な基礎研究に取り組み、かつ社会貢献を見据える、というマインドはJAMSTECのなかでしっかり育っています。一方、JABでも指摘された組織の国際化への取り組みが急務です。

日本は、海に囲まれ、しかも地球上で非常にユニークな場所にあります。そして私たちは、船舶や探査機、スーパーコンピュータなど、研究開発のための設備を持っています。そうした特性を活かし、海洋・地球・生命を統合的に理解し、それを支える体系としてJAMSTECから発信し、そして科学技術に基礎を置いた海洋立国を実現すること。それは、私たちの責務です。



平 朝彦 海洋研究開発機構 理事長



「JAMSTEC長期ビジョン 海洋・地球・生命の統合的理解への挑戦」
2012年10月策定。JAMSTECのホームページでPDFを公開している。
<https://www.jamstec.go.jp/j/about/vision/>

第3期中期計画における7つの研究開発課題

- 海底資源研究開発
- 海洋・地球環境変動研究開発
- 海域地震発生帯研究開発
- 海洋生命理工学研究開発
- 先端的掘削技術を活用した総合海洋掘削科学の推進
- 先端的融合情報科学の研究開発
- 海洋フロンティアを切り拓く研究基盤の構築

日本周辺の海底に存在する豊富な資源の調査・研究を進めてきた

取材協力

木川栄一

海底資源研究開発センター 研究開発センター長

表層型（塊状）



メタンハイドレートは、海底に露出して塊状になっているもの、海底下の泥や砂のなかで塊状になっているもの、海底下で塊にならずに泥や砂と混ざっているものという3種類の状態で存在している。表層型（塊状）の写真は、新潟県上越市北方沖にある上越海盆で撮影されたものである。写真提供（砂層型、塊状型）：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム



砂層型

塊状型



2013年3月にJOGMECが行ったメタンハイドレート海洋産出試験の様子。写真提供：メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム

日本にはかつて、石見銀山や佐渡金山、別子銅山などのほか、秋田に黒鉱鉱床もあった。「黒鉱とは深海底にある熱水鉱床が地殻変動で陸に上がってきたもので、銅や鉛、亜鉛のほか、金や銀、レアメタルなどが含まれている鉱物です。日本は、さまざまな金属資源を産出する資源大国だったのです」と木川栄一さんは語る。現在の日本では、資源をほぼ輸入に頼っている。そのような状況のなかで、「海に目をやると、豊富な資源があることが分かってきました。私たちJAMSTECが海底資源の研究に取り組んできた最大の理由はそこにあります」と木川さん。

日本の国土面積は世界で61位である。しかし周囲を海に囲まれた日本では、排他的経済水域と領海を合わせた面積を見ると世界で6位となる。それらの海域の面積は、国土の12倍にも及ぶ。広大な日本近海の海底には、熱水鉱床やコバルトリッチクラスト、レアアース泥、マンガンジュールといった金属資源のほか、メタンハイドレートも豊富に存在していることが分かっている。

天然ガスの保管庫 メタンハイドレート

メタンハイドレートは、天然ガスの主成分であるメタンが水と反応してできる物質だ。石油や石炭に比べ、天然ガスは二酸化炭素や窒素酸化物、硫酸化物などの排出量が少なく、非常にクリーンなエネルギー源として期待されている。メタンハイドレート1m³にはメタンガスが170m³も含まれている。「メタンハイドレートは天然ガスの保管庫のようなものです。それが近年、海底下で大量に発見されています」と木川さん。

メタンハイドレートは、海底下のメタンガスと、海水の水が反応して形成される。地上のような1気圧の条件下でメタンハイドレートができるには、気温がマイナス80℃であることが必要だ。気圧によって温度の条件は変わり、40気圧では5℃で形成されるようになる。「水深400mまで潜ると、40気圧、5℃ほどになります。水深400mの海底下にメタンガスがあれば、水は海水中に豊富にありますからメタンハイドレートが形成されます」

メタンハイドレートのもとになるメタンは、ほとんどが微生物起源である。海底下に、二酸化炭素(CO₂)を食べてメタンガスをつくる微生物が存在しているのだ。「JAMSTECでは、微生物がメタン



沖縄トラフの伊平屋北フィールドで撮影された熱水噴出孔。噴出した熱水が海水で冷やされ、熱水中に溶けていた成分が析出して煙のように見えている。

ガスを生成するプロセスの研究や、海底下における微生物活動の解明や応用に向けた研究を行ってきました。「メチル補酵素M」という、反応を進めるための触媒のような物質を自然界で初めて発見したのは、JAMSTECの研究者です。また、微生物にCO₂を餌として与えてメタンガスをつくる実験にも成功しています」と木川さんという。

2013年と17年の2度、地球深部探査船「ちきゅう」を使って知多半島沖でメタンハイドレートを採掘する試験が行われた。これは石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が実施主体となって進められたものだ。

メタンハイドレートは、低温高圧下でメタンガスと水が混ざることできる。逆にメタンハイドレートを高温あるいは低圧にすれば、メタンガスと水に分解できる。メタンハイドレートからメタンガスを回収するには、主に圧力を下げる「減圧法」が用いられる。

「原理はとても単純」と木川さん。海底下のメタンハイドレートの層まで掘削する。掘削した穴の海水をくみ上げることで、メタンハイドレート層にかかる圧力が下がって、メタンハイドレートがメタンガスと水に分解する。掘削した穴のなかの海水に出てきたメタンガスを回収するのだ。

2013年と17年に行われた試験も減圧法で行われ、メタンハイドレートからメタンガスを回収することに成功した。



2010年に行われた「ちきゅう」による熱水鉱床の掘削で得られたコア（上）とコアの一部（左）。

沖縄トラフで進められてきた 熱水鉱床の探索

熱水鉱床は、深海底で海底下から熱水が噴き出す熱水噴出孔の周りがある。海底に染み込んだ海水は、海底近くまで上がってきたマグマに接して熱せられる。そのとき、マグマ中の金属成分が海水中に溶け出す。1気圧では水は100℃以上になると蒸発してしまいが、深海底のような高圧下では400℃以上になることがあり、高温になるほどマグマの金属成分は海水中に多く溶け出すことになる。金属成分を含んだ高温の水が海底から噴き出すと、すぐに周囲の冷たい海水に冷やされて、金属成分が沈殿する。そのようにしてできるのが熱水鉱床だ。

沖縄トラフにある伊平屋北フィールドではこれまで、「ちきゅう」による熱水鉱床掘削が4回行われてきた。最初の掘削は2010年のことだった。「この掘削で黒鉱とほぼ同じ成分のものが発見されました」と木川さん。「実は熱水鉱床が黒鉱のもとだということは、2010年の掘削まではっきりしていませんでした。『ちきゅう』での掘削によって初めて、海底下で現在生成されている黒鉱の採取に成功したのです」

その後も2014年に1回、2016年に2回、「ちきゅう」

水深1,400~1,700m付近

水深2,500~2,700m付近

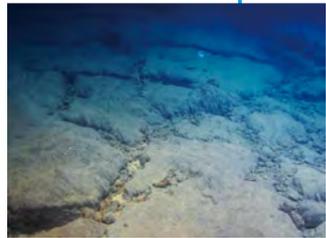
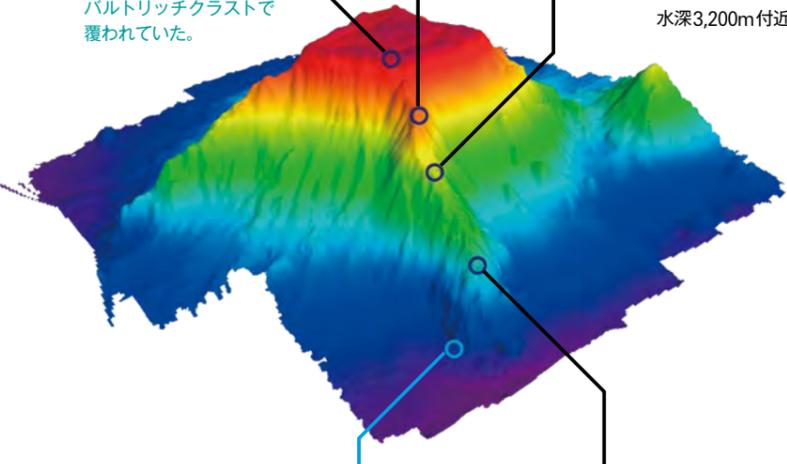


拓洋第3海山

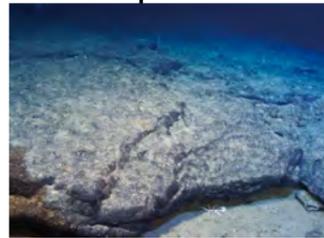
2017年、無人探査機「かいこうMk-IV」を用いて拓洋第3海山で調査を行ったところ、調査した斜面一帯がすべて厚いコバルトリッチクラストで覆われていた。



水深3,200m付近



水深5,500m付近



水深4,300m付近



拓洋第3海山の水深3,200m付近で採取された、厚さ約13cmのコバルトリッチクラスト。

による掘削が行われてきた。その結果、伊平屋北フィールドでは熱水鉱床が非常に大きな規模で形成されつつあることが示唆された。掘削前は海底下の熱水の通り道である数十mの範囲で熱水鉱床が生成されると考えられていたが、掘削後は、熱水が数kmにわたりくまなく循環し、広い範囲で鉱床を生成していると考えられるようになったのだ。

「沖縄トラフはマグマが上がってきやすい場所です。そのため大規模な熱水鉱床ができやすい。しかも陸に近いので水深が浅い。このような恵まれた海底熱水鉱床を持っているのは先進国では日本だけです」と木川さん。

なお、2014~16年の3回の掘削は「海のジバング計画」のもとで行われたものだ。海のジバング計画は、内閣府のもとで進められてきた「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」のうちの1課題「次世代海洋資源調査技術」のことである。複数の省庁の研究機関や民間企業が連携し、2014~18年度にわたり研究・開発が進められてきた。JAMSTECは、予算や課題の管理などを行う管理法人を担ってきたほか、さまざまな研究開発にも関わってきた。

「海のジバング計画では、主に海底熱水鉱床に焦点を当て、それをいかに効率よく見つけるか。その手法の確立に焦点を絞って進めてきました」と木川さんという。陸上での金属資源探査ではまず、人工衛星からのリモートセンシングにより調査地域を絞り込んでいく。しかし海の資源探査ではリモートセンシングによる調査は行えない。電磁波は液体中を伝播しないからだ。「だから海の資源探査は難しい」と木川さん。そんな海の資源探査において、リモートセンシングに代わるのが資源の成因研究である。資源ができる過程や濃集のメカニズムを明らかにすることで、資源が存在していそうな海域を絞り込んでいくのだ。

熱水鉱床が存在し得るのは、海底下からマグマが上がってくる場所に限られる。世界中の海のなかで、そのような場所は、中央海嶺、伊豆・小笠原のような火山性島弧、沖縄トラフのような背弧海盆、ハワイ諸島のようなホットスポットという4種類の場所しかない。「ちきゅう」による掘削が行われた沖縄トラフは、まさに熱水鉱床が存在し得る海域なのである。

2017年9月にはJOGMECが、沖縄県近海の水深1,600mの海底から鉱石を吸い上げることに成功した。その後、その鉱石から精錬した亜鉛地金が製造された。「採算を取るためには技術的にまだ課題はありますが、採掘から精錬まで一気通貫で行ったのは世界で初めてのことで」と木川さん。

海山斜面に広く分布するコバルトリッチクラスト

古い海山の斜面には「コバルトリッチクラスト」と呼ばれる岩石が分布している。コバルトリッチクラストは、マンガン、銅、ニッケル、コバルト、白金などが含まれている海底の岩石で、レアメタルやレアアースの資源として期待されている。

南鳥島の近く、東京の南東約1,800km沖に「拓洋第5海山」と呼ばれる巨大な海山がある。拓洋第5海山付近では、水深3,000mまでの海底にコバルトリッチクラストがあることが以前から知られていた。2016年に海のジバング計画の一環として、無人探査機「かいこうMk-IV」で行われた調査によって、水深5,500mまでコバルトリッチクラストが存在していることが明らかになった。

コバルトリッチクラストは海底で時間の経過とともに厚みを増して成長していく。ただし成長の速度は一定ではない。詳しく調べてみると、現在から1500万年前ほどまでは100万年で3mm、1500万年前~3000万年前の間はほぼ成長せず、3000万年前~6500万年前の成長速度は一定していなかったことが判明した。コバルトリッチクラストは鉄・マンガン酸化物が主体の岩石だ。酸化物なので、成長するには海水中に十分な酸素が必要になる。気温が低いと海水中の酸素量が多くなり、逆に気温が高いと海水中の酸素量が少なくなるという相関がある。コバルトリッチクラストの成長は、海域規模の環境変動とも関係しているのだ。

2017年には、房総沖350kmにある拓洋第3海山の北斜面で調査が行われ、水深1,500mから5,500mの斜面一帯にコバルトリッチクラストが存在していることが分かった。「拓洋第3海山は陸に近いので海底には泥砂が多く、コバルトリッチクラストのような微量元素は濃集しないだろうと言われていました」と木川さん。ただ、拓洋第5海山での調査などから、北太平洋の海山斜面にはコバルトリッチクラストが普遍的に存在するのではないかと考えられるようになった。また拓洋第3海山は、拓洋第5海山と同様に古いプレート上にあるため、より長期間にわたって成長して厚くなっているだろうとも考えられ、調査が行われたのだ。

2018年には常磐沖の磐城海山で調査が行われ、同じようにコバルトリッチクラストが発見されている。

3種の海底鉱物資源の成因は関連している？

岩石の破片や魚の歯などを核として、鉄・マンガン酸化物が同心円状に沈着したものを「マンガ



マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、レアアース泥はいずれも酸化物を主体とする鉱物資源である。南鳥島沖のマンガンノジュールは、拓洋第5海山のコバルトリッチクラストと組成が似ていた。また南鳥島沖のマンガンノジュールとレアアース泥は分布域が似ている。これら3種の鉱物資源の成因が、マンガンノジュールを手掛かりとして包括的に理解できる可能性があると考えられている。

ンノジュール」という（「マンガン団塊」とも呼ばれる）。鉄やマンガンのほか、コバルトなども含まれる鉱物資源だ。マンガンノジュールは従来、日本から遠く離れたところにしか存在しないといわれていた。しかし2016年に行われた有人潜水調査船「しんかい6500」の潜航調査などにより、南鳥島沖の排他的経済水域内の深海底（水深5,500~5,800m）で、マンガンノジュールが密集している広大な領域が発見された。マンガンノジュールが深海底に広く分布しているのが見つかったのは初めてのことで。

一方、海底にある高濃度のレアアースを含む堆積物を「レアアース泥」という。レアアースとは希土類元素のことで、ジスプロシウムやイッテルビウムなど計17元素の総称だ。JAMSTECと東京大学は2013年、深海調査研究船「かいらい」による研究航海において、南鳥島沖の水深5,700mの深海底で、レアアースが超高濃度で含まれるレアアース泥を発見した。

南鳥島周辺のマンガンノジュールは、コバルトリッチクラストと成分が非常によく似ている。また南鳥島周辺のマンガンノジュールの分布域は、レアアース泥の分布とよく一致している。それらのことから、マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、レアアース泥という3つの海底鉱物資源の成因が関連しているのではないかと考えられている。マンガンノジュールを手掛かりとして、3種の鉱物の成因を包括的に解明できる可能性があり、研究が進められている。

日本海溝で起きる巨大地震・津波の実態解明と予測に向けた研究開発を実施

取材協力

小平 秀一

本部 研究担当理事補佐
地震津波海域観測研究開発センター 研究開発センター長

巨大地震は海底下で起きる。JAMSTECが研究を進める海域地震発生帯の主な現場は、日本海溝と南海トラフだ。まず日本海溝の研究から紹介しよう。

陸側プレートの下に太平洋プレートが沈み込む日本海溝では、2011年3月11日にM（マグニチュード）9.0の東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）が発生。JAMSTECではその3日後に深海調査研究船「かいれい」を宮城県沖の日本海溝に緊急派遣し、海底地形や地下構造の探査を実施した。JAMSTECでは1999年と2004年にも、この海域の海底地形の調査を行っていた。「過去のデータと比較することで、宮城県沖の北緯38度付近の海溝軸周辺では、陸側プレートが水平方向に約50mすべり、断層が海底を突き抜けたことが分かりました。その大規模な海底変動により海水が持ち上げられて巨大津波が発

生したのです」と小平秀一さんは説明する。

その後、日本海溝のほかの海域の探査も進めた。「50kmほど北側の北緯38度40分付近でも断層が約70mすべっていました。ただし100数十km北側の北緯39度30分付近の岩手県三陸沖や、南側の北緯37度20分付近の福島県沖では大規模な海底変動が見られませんでした」

2004年に巨大津波を引き起こしたM9.1のスマトラ島沖地震では、約400kmにわたり10数mの断層すべりが起きた。「一方、東北沖地震はM9クラスの地震としては約200kmと比較的狭い領域で、50～70mという大きなすべりが起きたという特徴が見えてきました」

新たな謎も浮かび上がってきた。大規模な海底変動が見られなかった三陸沖でも、巨大津波が発生したことだ。「その原因は分かっていません。北緯39度30分付近の海溝軸付近で、小規模な崖崩れの跡と思われる地形が南北40kmにわたり点在していることが分かりました。その崖崩れが巨大津波を引き起こした原因の一部かもしれません。しかし、東北沖地震以前の地形データがそろっていないので、東北沖地震による崖崩れかどうかは不明です。また、調査した海底地形図の精度（水平方向20m、垂直

方向数m）では、崖崩れの跡がはっきりとは見えません」

東北沖地震のような巨大地震・巨大津波がどれくらいの発生間隔で起きてきたのか。それを探るために、JAMSTECでは日本海溝の海溝軸に沿ってピストンコアラーという装置で海底堆積物を採取して分析した。「巨大津波を引き起こす海底変動により泥が巻き上げられて堆積します。宮城県沖の海溝軸での試料から、1454（享徳3）年と869（貞観11）年に海底変動の痕跡が見られました。ただし、地震の規模は不明です。また、その2回とも三陸沖や福島県沖の海溝軸では痕跡が確認できませんでした。やはり東北沖地震と同様に宮城県沖の海溝軸近傍の比較的狭い領域で断層が大きくすべったと考えられます」

今後、この海域ではどのような地震が起きる可能性があるのか。「東北大学が海域のGPSで2011年4～12月に観測したデータを解析すると、東北沖地震で大きくすべった宮城県沖の陸側プレートは、固着を回復して太平洋プレートの沈み込みとともに陸側へ移動しています。一方、三陸沖などは東北沖地震でのすべりが小さかった分を埋め合わせるように、海側へゆっくりと移動していることが分かりました。このような地震後の変動を余効すべりと呼びます」

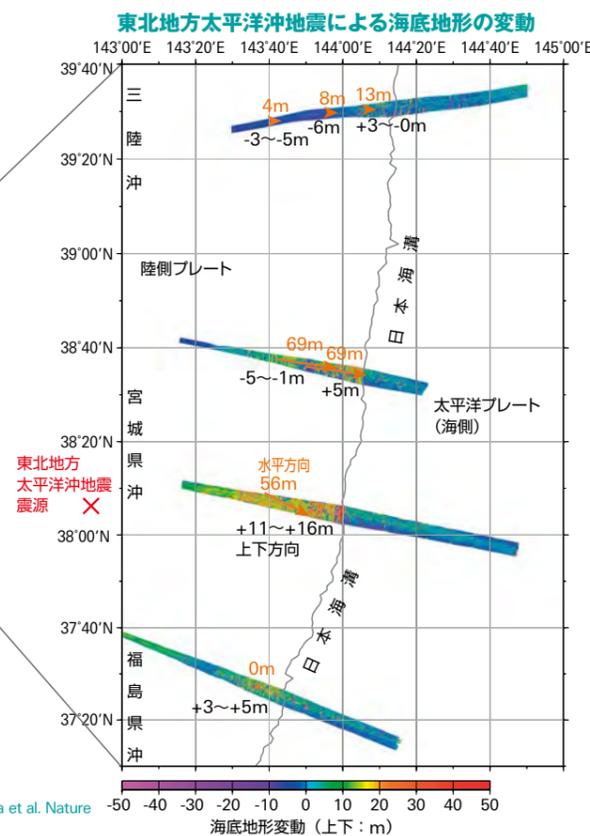
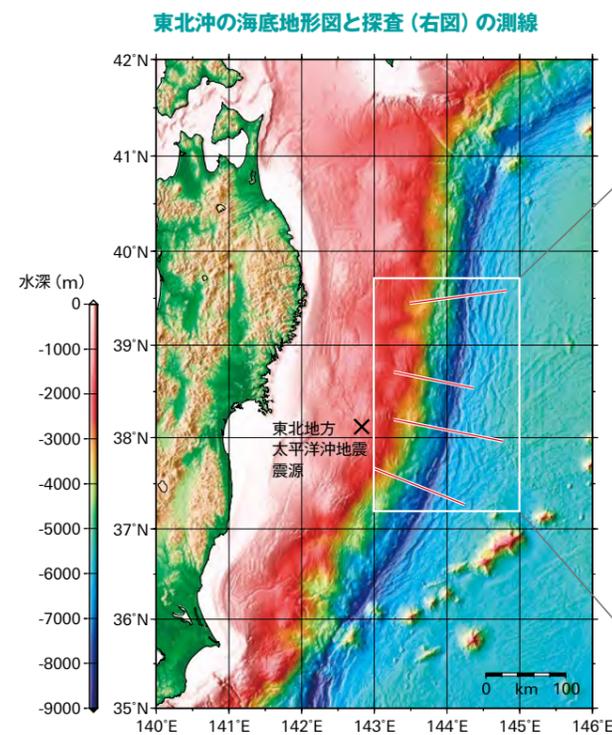
JAMSTECでは、東北沖地震や余効すべり、東北沖地震前の宮城県沖地震の発生間隔を再現する、少しずつ条件が異なる121種類の数値モデルをつくり、未来予測のシミュレーションを行った。すると121種類のうちの86%のモデルが、宮城県沖地震の発生間隔が短くなるという結果になった。しかも多くのモデルは、従来の半分以下の発生間隔になるという計算結果だった。「周辺領域の海側へ移動する余効すべりにより宮城県沖地震の震源にひずみが蓄積して、発生間隔が短くなると考えられます」

東北沖地震の前、M7クラスの宮城県沖地震が平均37年ほどの間隔で起きてきた。それが半分の20年ほどの間隔となり、2011年から20年後の2030年ごろまでにM7クラスの宮城県沖地震が起きることを想定して備える必要がある。

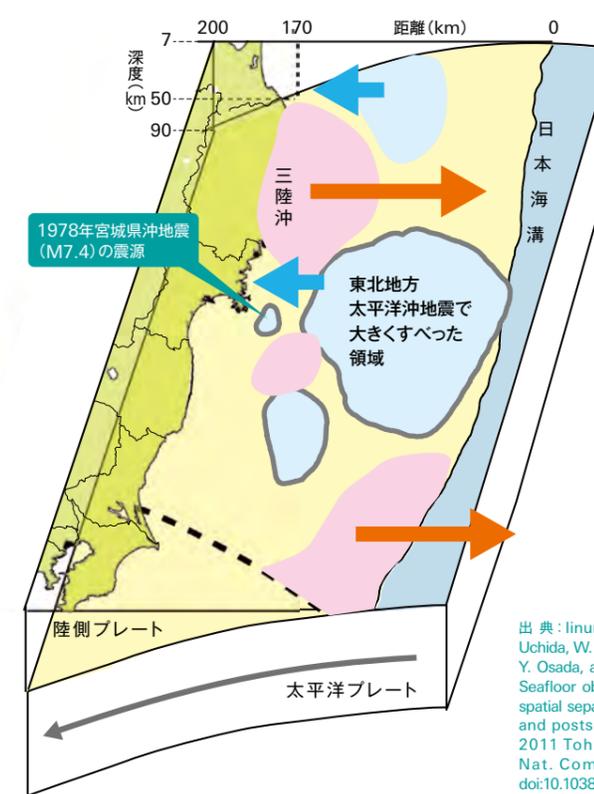
次の地震に向けたプレート固着状態の変化を捉えることは可能なのか。沈み込む太平洋プレートと固着が強いと陸側プレートは引きずられ変動が大きく、固着が弱いと変動が小さくなる。「その陸側プレートの変動を捉えた陸上GPSのデータを分析すると、東北沖地震の前に、固着が弱くなった領域の北限が東北沖地震の震源へ近づき、それに伴うゆっくりすべりが起きていました。次の宮城県沖地震が起きる前にも、そのような変動が起きる可能性があります。海溝軸に近い海域の陸側プレートほど変動の変化は大きく表れます。海域のGPS観測網の整備が必要です」

この海域では、海溝軸から海側のアウターライズ断層が引き起こす地震の発生も危惧されている。約2万2000人の死者・行方不明者を出した1896年の明治三陸地震（M8.5）の37年後、1933年に昭和三陸地震（M8.1）が起き3,000人以上が犠牲となった。この2つの地震は揺れよりも津波の被害が大きい津波地震だった。そして昭和三陸地震はアウターライズ地震だったと考えられている。「JAMSTECでは東北沖地震の後、地下構造探査により、潜在しているアウターライズ断層を突き止める調査を進めてきました」

アウターライズ断層の探査データは防災科学技術研究所（NIED）に提供され、津波浸水シミュレーションの開発が進められている。NIEDでは、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）を整備し、運用を始めている。そのS-netを活用した津波浸水即時予測を構築して、アウターライズ地震などに備える取り組みが進められている。



2011年4月23日～12月10日の余効すべりの模式図



出典：Iinuma, T., R. Hino, N. Uchida, W. Nakamura, M. Kido, Y. Osada, and S. Miura (2016). Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku Earthquake. Nat. Commun., 7, 13506. doi:10.1038/NCOMMS13506.

次の南海トラフ巨大地震に、観測に基づく数値モデル予測で立ち向かう

取材協力

小平秀一

本部 研究担当理事補佐
地震津波海域観測研究開発センター 研究開発センター長

フィリピン海プレートが陸側プレートの下に沈み込む南海トラフでは、100~150年ほどの間隔でM8クラスの巨大地震が繰り返し起きてきた。最近では、1944年に昭和東南海地震（M7.9）、1946年に昭和南海地震（M8.0）が発生。それから70年以上が経過し、次の南海トラフ地震の発生が危惧されている。

JAMSTECでは、次の南海トラフ地震に備えるため、地震・津波観測監視システム（DONET）の整備を進め、東南海地震の震源域に設置したDONET 1

は2011年、南海地震の震源域のDONET 2は2016年に防災科学技術研究所（NIED）に移管し、運用されている。

「2016年4月1日、DONET 1直下でM6.5の地震が発生しました。その地震による海底変動をDONETの水圧計（海底津波計）が捉えました。海底が沈降すると水圧が高くなり、逆に隆起すると水圧が低くなります。M6.5の地震により、震源付近では17mm沈降、海溝軸に近い海側では隆起したことが分かりました。この海底変動は、プレート境界がずべたと考えると説明が付きまします。2016年の地震はこの海域のプレート境界で約70年ぶりに起きたM6以上の地震だったのです。DONETの水圧計は、その海底変動を数mmの精度で観測することに成功しました」と小平秀一さんは説明する。

JAMSTECでは2007年から、地球深部探査船「ちきゅう」により南海トラフの掘削調査を進めてきた。そのうちの3カ所の掘削孔には長期孔内観測システムが設置されている（本誌12~13ページ参照）。「そこには、掘削孔にかかる水圧を測る間隙水圧計があります。先行して設置された2カ所の間隙水圧計のデータから、2011年末~16年夏の6年間に、地震発生帯より浅い領域の断層でゆっくりすべりが8回起きていたことが分かりました」

南海トラフでは、フィリピン海プレートが年間4cmほど沈み込んでいる。それに伴い陸側プレートが引きずられてひずみがたまり、やがて一気に

反発して巨大地震が起きる。「観測されたゆっくりすべりは、数日から数週間にわたり陸側プレートが1~4cm、海側へ反発する動きでした。それによりひずみの30~50%解消されると推定されます。東北地方太平洋沖地震の前にも、ゆっくりすべりが起きたことを紹介しましたが、巨大地震とゆっくりすべりの関係はまだよく分かっていません。ただし多くの研究者は、ゆっくりすべりの領域が固着の強い領域に浸食していき、固着を引き剥がすことで巨大地震が起きると予想しています。長期孔内観測システムで観測したゆっくりすべりなどに関するデータは、国の地震調査研究推進本部に報告することになりました」

南海トラフでは、今後30年以内にM8~9クラスの地震が70~80%の確率で起きると予測されている。「その確率は過去の発生間隔を統計的に分析した値です。実際の発生間隔は90年~250年以上とばらつきがあります。現在の予測を単純化して言えば、過去100年間、3月1日に30回雨が降ったので、今年の3月1日の降水確率は30%という考え方です。大局的には間違っていないが、現在の天気予報は観測に基づく数値予測モデルにより、高い精度の予報を実現しています。私たちは地震の発生も、観測に基づくモデル予測を行うことを目指しています」

JAMSTECでは南海トラフの地下構造探査を進めてきた。その探査データに基づきフィリピン海プ

レートが陸側プレートの下にどのような形状で沈み込んでいるのか、三次元のプレートモデルを構築し、公開している。

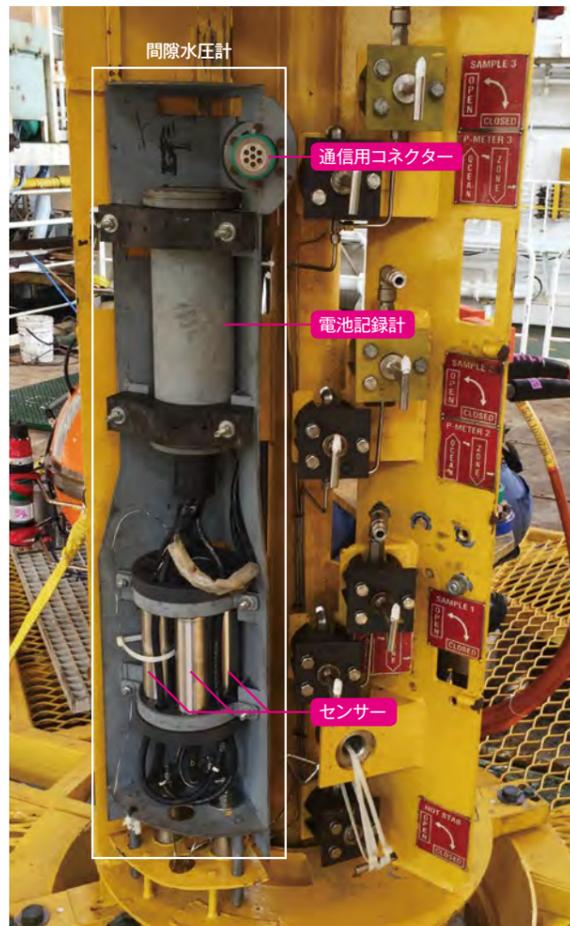
「地震発生のシミュレーションもJAMSTECでは進めています。それにより、南側の日向灘でM7クラスの地震が起きると、M8クラスの南海トラフ地震を数年以内に誘発するというシナリオを示しました」

巨大地震が起きたときに、防災に役立つ情報を即時に発信することも重要だ。「JAMSTECではNIEDと共同で、DONETを活用した即時津波予測システムを構築し、すでに和歌山県や三重県、香川県、静岡県御前崎市にある浜岡原子力発電所を持つ中部電力が導入しています」

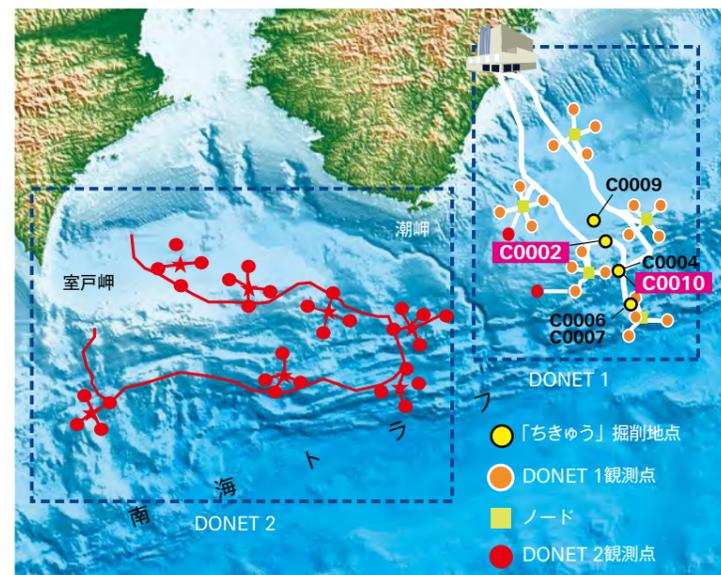
即時津波予測システムは、さまざまな規模や震源の地震が起きたときに発生する津波と各地の浸水パターンを何種類も計算しておき、地震が起きたときにDONETで観測したデータと最も一致するパターンを選び出し、ある地域が何分後にどれだけ浸水するのか、防災に役立つ情報を即時に発信するものだ。

JAMSTECでは今後、海底火山の調査も進めていく計画だ。鹿児島南部海域の鬼界カルデラでは、7,300年前に巨大噴火が起き、南九州の縄文人が絶滅したといわれている。「現在、鬼界カルデラの海底下のマグマだまりはどうなっているのかなど、今後の活動予測に必要な観測に貢献していきます」

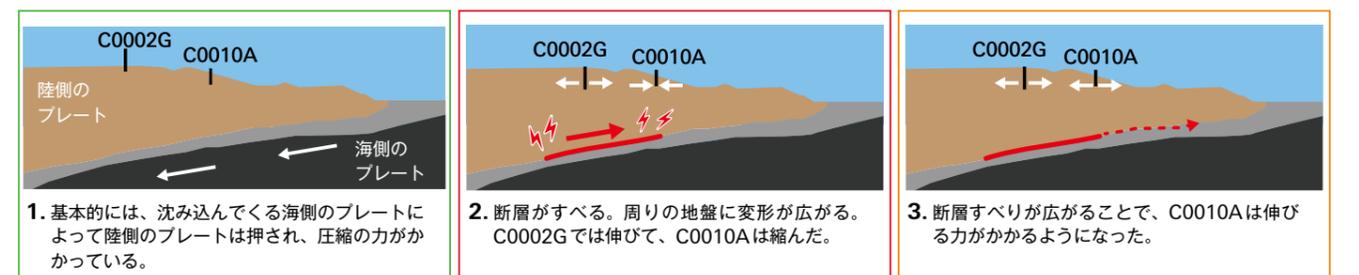
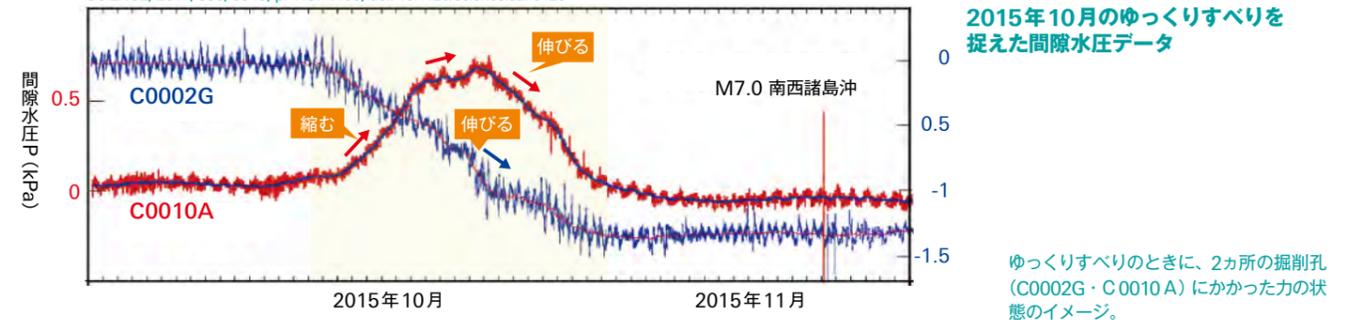
南海トラフの長期孔内観測システムに導入された間隙水圧計



DONETの観測点と「ちきゅう」による掘削地点



出典: Araki et al., Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust. SCIENCE, 2017, 356, 6343, p. 1157-1160, doi: 10.1126/science.aan3120



海底下を掘削して巨大地震の現場を直接観測

取材協力

山田泰広

海洋掘削科学研究開発センター 研究開発センター長

日本は、世界最高の掘削能力を持つ地球深部探査船「ちきゅう」により、世界23カ国が参加するIODP（国際深海科学掘削計画）に貢献してきた。そのなかでJAMSTECは「ちきゅう」を管理・運営するとともに、IODPが定めた「気候・海洋変動」「生命圏フロンティア」「地球活動の関連性」「変動する地球」という4つのテーマの研究を進めてきた。

「私たちは研究だけではなく、先端的な技術開発にも力を入れてきました。新しい技術でいままで見えなかったものが見えるようになりますと、その現象を理論化して、応用したり予測したりすることができるようになります」と山田泰広さんは語る。

「ちきゅう」が特に力を注いだのが、南海トラフや日本海溝などで起きる巨大地震の解明だ。これまでの地震科学では、地震波の伝わり方などで海底下の地震発生帯の様子を間接的に調べてきた。「ちきゅう」は海底下を掘り進めることで、いままで見えなかった巨大地震の現場を直接観測し、地震科学にブレークスルーをもたらそうとしている。

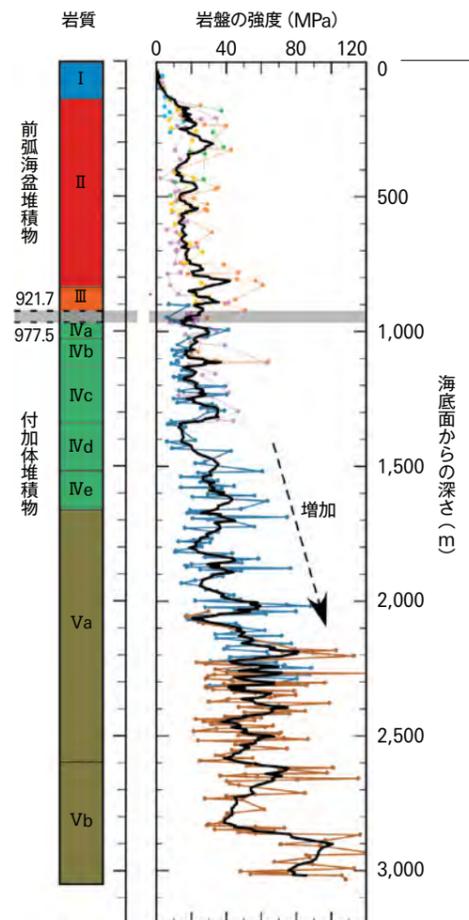
日本海溝では、IODPの一環として、東北地方太平洋沖地震で陸側プレートが約50mすべて巨大地震を引き起こした

宮城県沖の海溝軸付近を「ちきゅう」で掘削し、海底下820m付近の断層の岩石試料（コア）を採取することに成功した。

コアを分析した結果、そこにはスメクタイトと呼ばれる粘土鉱物が78%も含まれていることが分かった。そのコアを用いて地震を再現する実験を行うと、断層のすべりで生じる摩擦熱によって膨張した水をスメクタイトが閉じ込めることで水圧が高くなる現象が起きた。地下深いところにある断層はその上についている地層や海水の重さで押し付けられ、すべりにくくなっている。しかし地震が起きることで、スメクタイトを多く含む断層内部の水圧が高くなり、上からの力を押し返して、断層が大きくなることでできたと考えられる。

東北地方太平洋沖地震の前には、ゆっくりすべりも観測された。「この海域では、陸側プレートの下に年間8.5cmの速度で太平洋プレートが沈み込んでいます。そのような条件でゆっくりすべりが起きる

掘削データから解析された南海トラフの岩盤強度



出典：Hamada et al. Scientific Reports 2018, 8, doi:10.1038/s41598-018-20870-8

かどうか、コアを使った長時間の再現実験を行いました。すると確かにゆっくりすべりが起きることが分かりました。一方、スメクタイトとは別の粘土鉱物を粉末状にして再現実験を行うと、ゆっくりすべりは起きません。この断層は、地震時に大きくすべるとともに、普段はゆっくりすべりも起こすことが実験で確かめられました。ただし、これらのすべりがいつどのように起きるのかなど、まだ分かっていないことは多いのです」

南海トラフでは、JAMSTECが中心となり2007年からIODPの一環として地震発生帯の掘削調査が続けられてきた。

「掘削すること自体が実験を行っているようなものです。「ちきゅう」は1秒間に1,000種類もの掘削・運航データを取得し、そのすべてを記録しています。それらのビッグデータを解析するデータサイエンス、『掘削情報科学』を私たちは提唱してきました。その手法により花開いた成果を、2018年に発表しました」

それは、掘削データから南海トラフの地震発生帯の上部にある岩盤強度を明らかにしたものだ。「ちきゅう」は、ドリルビットと呼ばれる刃を回転させて岩盤を掘り進んでいく。そのドリルビットにかかる力（トルク）の値を、ビットが1回転する間に掘り進んだ距離で割り算することで、岩盤強度を導き出す計算式を開発した。

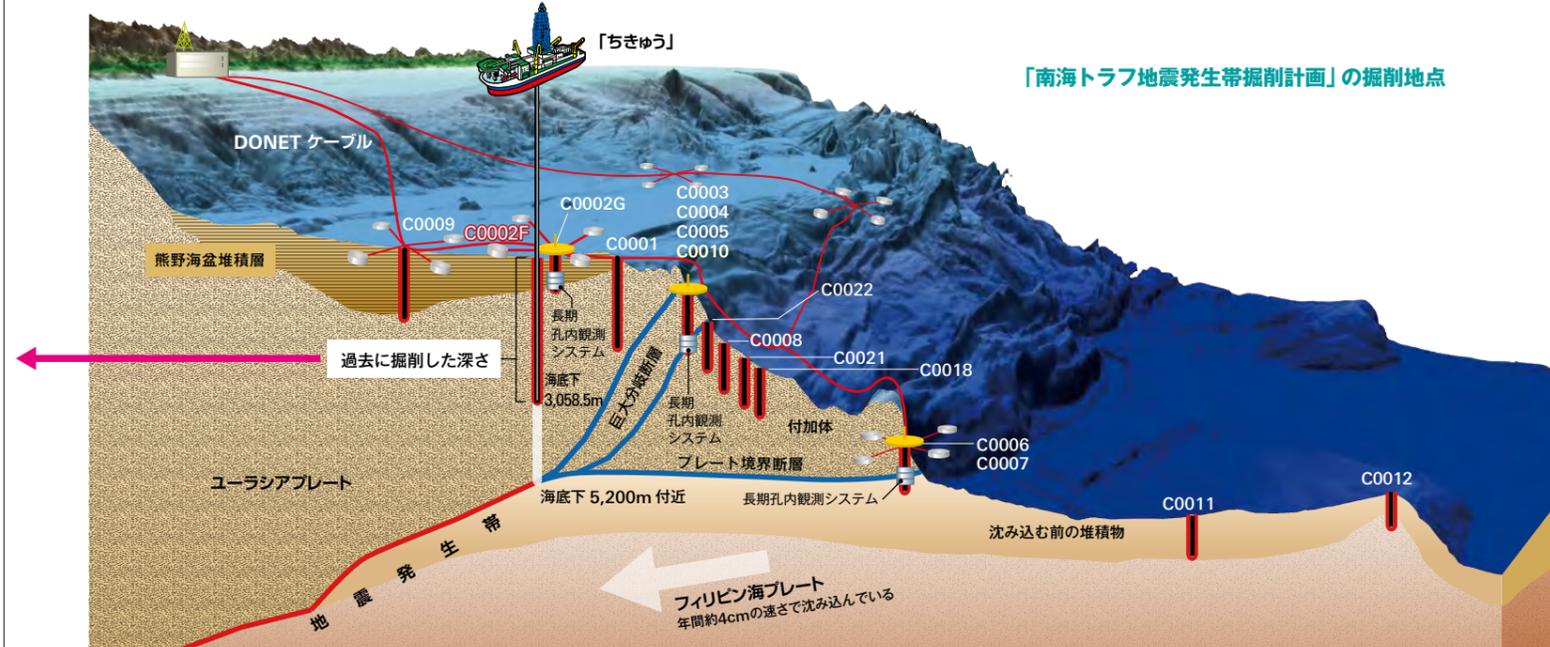
掘削地点C0002では、水深約1,900mの海底下約3,000mまで掘り進められていた。その掘削データを、開発した計算式で分析することで、岩盤強度を連続的に明らかにすることに成功したのだ。

「これまで予測していたよりも岩盤がかたいことが分かりました。陸側プレートの岩盤がかたいほど、海洋プレートの沈み込みによって引きずられたひずみを蓄積して、大きな地震を起こす可能性があります」

「掘削深度が深くなるとコアの採取が難しくなりますが、掘り進めることさえできれば、掘った区間の岩盤の強度を掘削データから導き出せます。これによって、断層などの弱い部分を見つけることができます。深いところにある岩盤の強度がどれくらいなのか、弱い地層があるのか、もしあればその厚さはどれくらいか、それを知りたいですね」

ドリルビットの上部に付けたセンサーにより掘削孔の壊れ具合も観測できる。「それと岩盤強度から、断層にかかる力（応力）を正確に導き出すことができます。断層にかかる応力に断層の強度が耐え切れなくなったときに地震が起きます。ですので、地下の岩盤強度を正確に計測する必要があります」

地震の発生現場を直接観測したデータにより、地震発生を予測する数値モデルの精度を向上させることができる。



「南海トラフ地震発生帯掘削計画」の掘削地点

宮城県沖の日本海溝の海溝軸付近、海底下約820mで採取されたコア（長さ97cm）

©JAMSTEC/IODP

海洋プレートの“化石”の陸上掘削データをもとに国際協力でマントル層を目指す

取材協力

山田泰広

海洋掘削科学研究開発センター 研究開発センター長

露出したオマーン・オフィオライト 撮影：高澤栄一／新潟大学



地球は、海洋地殻や大陸地殻の下にマントル層という岩石層が深さ2,900kmまで続き、その下に液体金属から成る外核、中心部に固体金属から成る内核がある。マントル層は地球の質量の約60%、体積の80%を占める。人類は1960～70年代のアポロ計画により月の石を手に入れた。しかしマントル層の岩石にはいまだに手が届いていない。

「地球深部探査船『ちきゅう』はマントル層への到達を最終目標に定めて建造されました。しかしマントル掘削は簡単には実現できません」と山田泰広さんはいう。

海洋地殻を6kmほど掘り進めれば、マントル層に到達する。「ちきゅう」は、南海トラフにおいて海底下3,000m以深を掘り進めたが、そこは比較的や

オマーン・オフィオライトの陸上掘削で得られたかつての海洋地殻・マントル境界付近のコア

海底下6km付近では、地震波の伝わる速度が速くなることが知られ、モホロビッチ不連続面（モホ面）と呼ばれる。モホ面は海洋地殻・マントル境界だと考えられている。オマーン・オフィオライトの陸上掘削により、かつての地殻・マントル境界付近には、海洋地殻由来の岩石（白）と、マントル層由来の岩石（黒）が混じった遷移層があることが分かった。

「実際のマントル掘削でも海洋地殻・マントル境界が大きな注目点です。地球内部にはマントル・外核などいくつかの境界がありますが、海洋地殻・マントルは人類が唯一、手の届く境界です。そこを掘削して調べることで、より深部の境界についての理解も深まるはず」と山田さんは解説する。



出典：Tamura et al. (2018). JpGU meeting 2018 abstract SCG54-P08.

0 10 20 30cm

わらかい付加体と呼ばれる堆積層だ。一方、マントル層に到達するには、堆積層に比べて格段にかたい海洋地殻の岩盤を掘削する必要がある。

「海洋地殻とマントル境界の温度は300℃以上と推定されていますので、熱に弱いドリルビットを冷やしながら掘り進める必要があります。しかし、水などを循環させてドリルビットを冷やすと、周囲の岩石も冷やされて収縮し、ひびが入り、水と反応して岩石の状態が変わってしまうでしょう。私たちは、掘削によって乱される前の状態の岩石を知りたいのです。掘削で得られるデータから、掘削前の岩石の状態を推定する手法を開発する必要があります」

海洋地殻とマントル最上部を含む厚さ約100kmの層は海洋プレートと呼ばれる。海洋プレートは中央海嶺で生まれ、移動し、海溝で沈み込む。そのようなプレート運動により、地震や火山活動、造山活動などさまざまな地殻変動が起き、地上と地球内部で水や炭素、熱などがやりとりされている。このようなプレートテクトニクスが確認されている惑星は地球だけだ。

「プレートはかたい板という意味です。どれくらい海洋プレートはかたいのか。マントル層まで掘削できれば、掘削データから岩盤強度を連続的に導き出すことができます。それは地球という惑星を理解する、大変貴重なデータとなります」

「掘削により岩石の状態は変わってしまいますが、見方を変えると、それは海洋プレートを冷やす実験だといえます」と山田さんは続ける。「約46億年前に誕生した地球は高温で、それが冷えることで現在の姿になりました。今後も地球は冷え続けていきます。冷えていく海洋プレートが今後どうなるのか、マントル掘削は地球の未来を、時間を短縮して観察する実験になるのです」

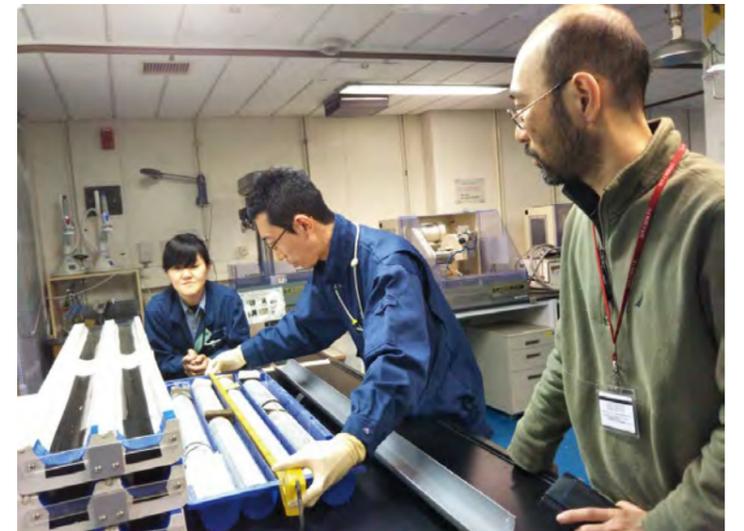
これまで、海洋プレートを知るための貴重な場となってきたのが、アラビア半島に分布するオマーン・オフィオライトだ。そこは海洋地殻からマントル最上部までが約8000万年前に陸上に丸ごと乗上げて露出した地層だ。

2016～18年、国際陸上科学掘削計画（ICDP）の一環として、オマーン・オフィオライトを史上初めて陸上掘削するプロジェクトが行われ、JAMSTECも参加した。掘削された岩石試料（コア）は、「ちきゅう」に運ばれ、船上ラボ設備で解析が行われた。

「オマーン・オフィオライトのかつてマントル層にあった岩石は、意外にも、やわらかくて軽い蛇紋



地球深部探査船「ちきゅう」



©Oman Drilling Project and JAMSTEC

静岡県清水港に停泊中の「ちきゅう」の船上ラボ設備において、オマーン・オフィオライト陸上掘削によるコアの解析が行われた。

岩に変質していました。蛇紋岩はマントルの岩石と水が反応してできます。かたく重いマントルの岩石が水と反応してやわらかく軽くなることで、オマーン・オフィオライトは陸上に乗り上げることができたのでしょう」

海洋プレートやマントル層にある岩石の性質を知るには、やはりマントル掘削が必要だ。「オマーン・オフィオライトの陸上掘削により、かつての海洋地殻からマントル層に至るまでの連続的なデータが得られました。それを参照しながらマントル掘削を進めることができます。マントル層に到達するために最も重要なことは、全世界が協力して人類の英知と技術、人材、資金を結集することです」

海底下生命圏やマントルを探查し、地球システムの理解と生命存続のイノベーションにつなげる

取材協力

稲垣史生

海洋掘削科学研究開発センター 研究開発センター長代理
高知コア研究所 研究所長代理

海洋掘削科学の進展により、かつて死の世界だと思われていた海底下深部にも生命圏が広がっていることが分かり始めたのは1990年代半ばだ。JAMSTECではIODPの一環として地球深部探査船「ちきゅう」による「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」を2012年に実施、海底下2,466mまでの堆積物にも微生物がいることを確かめた。また、2016年には「室戸沖限界生命圏掘削調査 (T-Limit)」を行い、栄養源や水分がある海底下でどれくらいの高温まで生命圏が存続し得るのかを探った。

「21世紀に入ってから海洋掘削科学により、全球規模の海底下生命圏の実態が見えてきました。地球全体の海底下には約 2.9×10^{29} 細胞という膨大な数の微生物がいることが分かりました」と稲垣史生さんは紹介する。それを炭素に換算すると約40億トン、地球の全生命体の炭素の約1%を占めると試算されている。

「大陸沿岸の堆積層には、私たちが想像していた以上の大深度にまで生命圏が広がっていました。そこは有機物などの栄養源があっても生物にとっては分解しにくく、呼吸に使われる酸素などは海底表層の生物が使い果たしてしまうので、生命を維持するためのエネルギーを非常に獲得しにくい環境です」

大陸沿岸の海底下には、メタンが水分子に囲まれたメタンハイドレートが分布している海域がある。そのメタンのほとんどは海底下のメタン生成菌などが、主に二酸化炭素 (CO₂) と水素 (あるいは酢酸)

から生成したものだ (本誌4~5ページ参照)。「さらに、天然ガスや石炭、石油の生成過程にも海底下の微生物が重要な役割を果たしていることが分かってきました」

JAMSTECでは、IODPの一環として沿岸域だけでなく南太平洋環流の調査航海にも参加した。「陸から離れた外洋の堆積層中に栄養源となる有機物はほとんど存在しません。しかしそこでも海底面から基盤岩 (海洋地殻) 直上のすべての堆積層に微生物が生息していました。そこにすむ微生物はわずかな有機物と酸素を極めてゆっくり消費しています。そのため、海水から堆積層へ染み込んだ酸素は完全には消費し尽くされず、堆積層の下の基盤岩へ達していました。そのような超低栄養の好気的生命圏が地球全体で最大37%の海域に広がっています。海洋地殻に到達した酸素は、岩石内の微生物によって消費されない限り、やがてプレートの沈み込みとともに地球内部へ供給されるでしょう」

海底下生命圏は、エネルギー資源の生成や、炭素や酸素などの元素循環に重要な役割を担っていることが分かってきたのだ。「原始地球の大気には酸素はほとんど含まれていませんでした。それが20億年以上前に、シアノバクテリアなどの光合成微生物が大量に繁茂し、大気へ膨大な量の酸素が供給されました。微生物が地球環境を大きく変えてきたのです。海底下生命圏が、海洋環境や気候などの地球システムとどのように関わっているのかについてさらに探っていく必要があります」

稲垣さんは、今後3つの取り組みが重要だと考えている。「1つは、これまでの知見を統合して、海水から海底下までの生命圏を組み込んだかたちで海洋・地球・生命の統合的理解を深めていくことです。CO₂排出など、人類の活動が地球環境に大きな影響を与えています。地球の歴史には、大気中のCO₂濃度が現在よりも高く、温暖化していた時期もあります。しかし現在のCO₂濃度の上昇速度は、かつて例のない急激さです。これまでの海洋掘削科学は、海底堆積物に刻まれた地球の歴史をひもといてきました。これからの海洋掘削科学では、現在進行形の地球システムとその未来を理解することがメインテーマとなります。それにより、人類活動の影響で海洋や地球環境がどのように変動するのかを予測し、それに対応するための具体的な選択肢を示すこ

とに貢献するべきです。そのためには、急激な環境変動がどのように起こり、そして生命圏がどのように応答し、生命活動がどのように全球的な地球システムへ影響を与えるのか、その潜在的なパワーやレジリエンス (復元力) とは何か、といった視点の研究を進めていく必要があります」

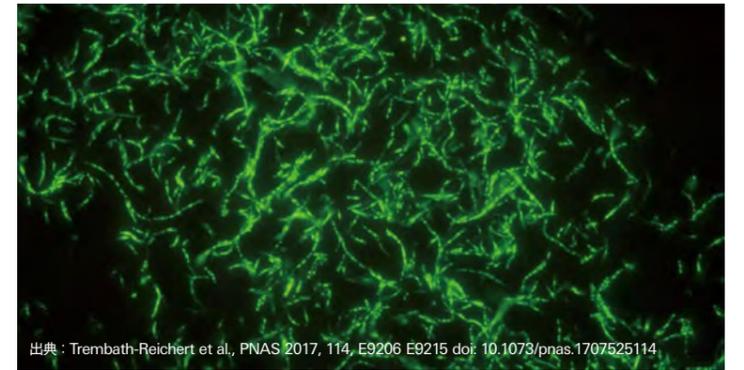
2つ目は、未踏領域の探索だ。「これまでのIODPの研究により、堆積物の下の海洋地殻の岩石の隙間にも微生物が生息していることが分かってきました。また、私たちはマントルそのものの物性や変質がどのようなもので、マントルの不均一性や進化のプロセスが生命の誕生や進化とどのように関わってきたのかを知らなければなりません。日本には『ちきゅう』という世界オンリーワンの研究基盤があります。『ちきゅう』により海洋地殻を貫通して上部マントル層まで掘削し、その掘削コアやデータを分析するとともに掘削孔で観測や実験を行い、生命や地球システムの理解につなげていく、そのようなプロジェクトを国際的に主導していくことはJAMSTECにしかできないのではないかと思います」

3つ目は、「海底下の環境を理解し、それを人類と地球環境の持続性のために活用する地球システムイノベーションを起こすことです」と稲垣さんはいう。

気候変動問題に対する国際的な枠組みである「パリ協定」では、産業革命前からの気温上昇を2℃より十分に抑えるとともに、1.5℃上昇に抑える努力を継続する、という目標を掲げている。その実現には、人類のCO₂排出量の大幅削減だけでは足りず、CO₂の回収・貯留が必要になると予測されている。

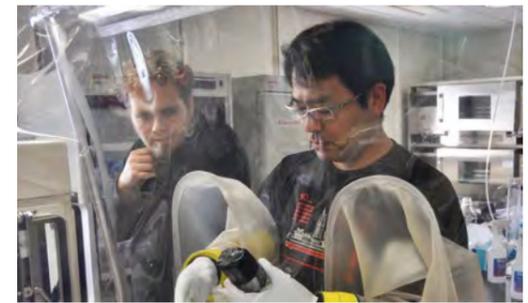
外洋の大水深の海底下に広がる海洋地殻は、CO₂の貯留庫として有望だと稲垣さんは指摘する。「外洋における日本の排他的経済水域内には、地震や海底地すべりが起きない安定した海域が広がっています。その海域の水深は深く、亀裂の多い表層の海洋地殻環境に、CO₂を注入できるかもしれません。その上には水を通さない粘土質の堆積層があり、水圧も高いので安定的にCO₂を隔離して貯留できる可能性があります。もちろん、CO₂を岩石に注入することでどんな反応が起きるのか事前に調べる必要があります。深海の海洋地殻を掘削して岩石サンプルを採取し、現場の温度や圧力条件下での岩石とCO₂との反応を調べるなど、JAMSTECの研究開発は大きな可能性を秘めていると思います」

海底下は、循環型エネルギーシステムを構築する場としても有望だと稲垣さんは続ける。「大陸沿岸



出典: Trembath-Reichert et al., PNAS 2017, 114, E9206 E9215 doi: 10.1073/pnas.1707525114

「ちきゅう」により下北八戸沖の海底下約2,000mの石炭層から採取されたサンプルから培養された微生物の蛍光顕微鏡写真 (DNAを蛍光色素で染色したもの)。石炭層に含まれるメチル化合物などの有機物を代謝する微生物の存在が明らかとなった。



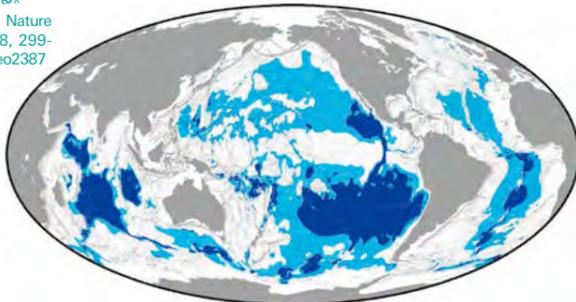
「ちきゅう」によるIODP第337次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」で採取された海底下約2,500mの石炭層のコアを嫌気グローブボックス内で処理する共同首席研究者の稲垣さんと乗船研究者のグロムピッツァさん (当時: ドイツ・ポツダム大学)。これらの国際的な海洋掘削科学プロジェクトにより、海底下生命圏の限界に迫る数々の成果が生まれた。

の海底下には、CO₂を水素などで還元して、メタンなど炭化水素のエネルギー資源を生産するのに適した環境があります。その海底下の還元力を利用する技術が必要です。私たちは海底下の微生物を地上で培養すると1億倍以上に代謝が活性化することを確かめました。地球内部の還元力を利用するとともに、その場にいるメタン生成菌などを活性化することができれば、CO₂とエネルギー問題に同時に対応できる可能性があります」

海底下生命圏の研究は私たちの生命観にも大きな影響を与える。「海底下深部の極限的な環境にも生命はいました。その知見は火星における生命探査や、ほかの天体で生命が存続できる条件 (ハビタビリティ) を理解する上で重要な示唆を与えています。また、海底下生命圏の限界を探る研究は、宇宙における生命とは何か、非生命物質と生命とは何が違うのかという根源的な問題に直面します。量子生物学の分野では、原子を構成する量子レベルの秩序状態 (コヒーレンス) が保たれているかどうか为非生命物質と生命の違いだ、という説が提唱されています。そのような新しい学問分野とも交流しながら、海洋・地球・生命システムの理解を深めていく必要があります」

BE

海底表層から海洋地殻まで酸素が到達している海域を示す地図。青や水色の海域の海底堆積物環境に超低栄養の好気的な生命圏が広がっている。
出典: D'Hondt et al., Nature Geoscience 2015, 8, 299-304 doi: 10.1038/ngeo2387



シラウオは生まれてから成魚になるまで、ずっと透き通った体をしている。成魚は10cmほどになる。寿命はおよそ1年。現在、ゴビウス生まれの3世代目のシラウオが展示されている。

餌を食べると、半透明な体を餌が通過していくのが見える。繁殖期の雌は、おなかにたくさんのお卵を観察することができる。写真は雄。



2019年1月に完成、公開を開始した「シラウオ水槽」。年間を通してシラウオを展示しているのは、日本ではここだけだ。



シラウオを手に入れるため、なじみの漁師さんのもとを訪れた。漁師さんに促され、シラウオを見ようと定置網をのぞき込む。ところがさっぱり見つけられないのだ。漁師さんは「ほら、あそこに！」と指さすけれど、分からない。慣れないと分からないほどに、シラウオは透明だ。

ゴビウスは、日本有数の汽水湖である宍道湖西岸に位置する。シラウオを展示することは早くから決まっていた。シジミやウナギなどと並び「宍道湖七珍」として地元で親しまれ、宍道湖を象徴する魚の1つでもあるからだ。

2001年の開館当時、展示するシラウオは漁師さんから分けてもらうことに頼っていた。ウロコは雄にわずかにあるだけで、傷付きやすいシラウオを捕まえるときには、そっと水ご

と容器ですくい上げる。それでも弱りやすく、漁のシーズンには何度も漁師さんのもとを訪ねる必要があった。

水族館で人工繁殖による育成ができるようになったのは2006年から2007年にかけてのこと。当時担当していた先輩の話では、餌として与えるプランクトンも生き延びるような水槽の環境にしたところ、卵からかえったシラウオの仔魚も順調に成育するようになったということだった。おそらくこれが初めてのシラウオ人工繁殖による、約1年の飼育の成功だったと聞いている。しかし、繁殖には成功したもの、春に生まれた個体のうち次の繁殖期まで1年間に生き残るのは、依然としてごくわずか。年間を通しての安定した展示にはこぎ着けなかった。

転機が訪れたのは2016年、飼育用の水槽を大きくしてからのことだ。シラウオは敏感な魚で驚きやすい。びっくりすると水槽に衝突し、体を傷付けてしまうことがしばしばあった。口から突進して、口を傷付けてしまい餌を食べられなくなる個体や、水槽のガラスに張り付いてしまう個体がこれまでよく見られていた。水槽を大きくすると、衝突は格段に減った。餌や飼育水の検討も功を奏して、多くの個体が1年間生き残るようになった。

2019年1月には、常設展示用に水槽を新設した。透き通ったシラウオを間近でじっくり観察できる水槽だ。背骨はもちろん、おなかのなかの餌も見える。照明や映像を使った展示演出も施され、人工繁殖の取り組みで得た貴重な資料をもと

に、シラウオの餌や、成長過程についても紹介している。驚きやすいシラウオだが、いまは大きな水槽のなかでゆったりと群れている。その姿を見たお客さんたちからも「ガラス細工のように美しい」と、評判は上々だ。シラウオの体にキラキラと光が反射している。 **BE**

取材協力：田久和剛史／公益財団法人ホシザキグリーン財団
環境修復事業プロジェクト 係長
写真提供：島根県立宍道湖自然館ゴビウス

Information: 島根県立宍道湖自然館ゴビウス
〒691-0076 島根県出雲市園町1659-5
TEL 0853-63-7100
URL <http://www.gobius.jp/>



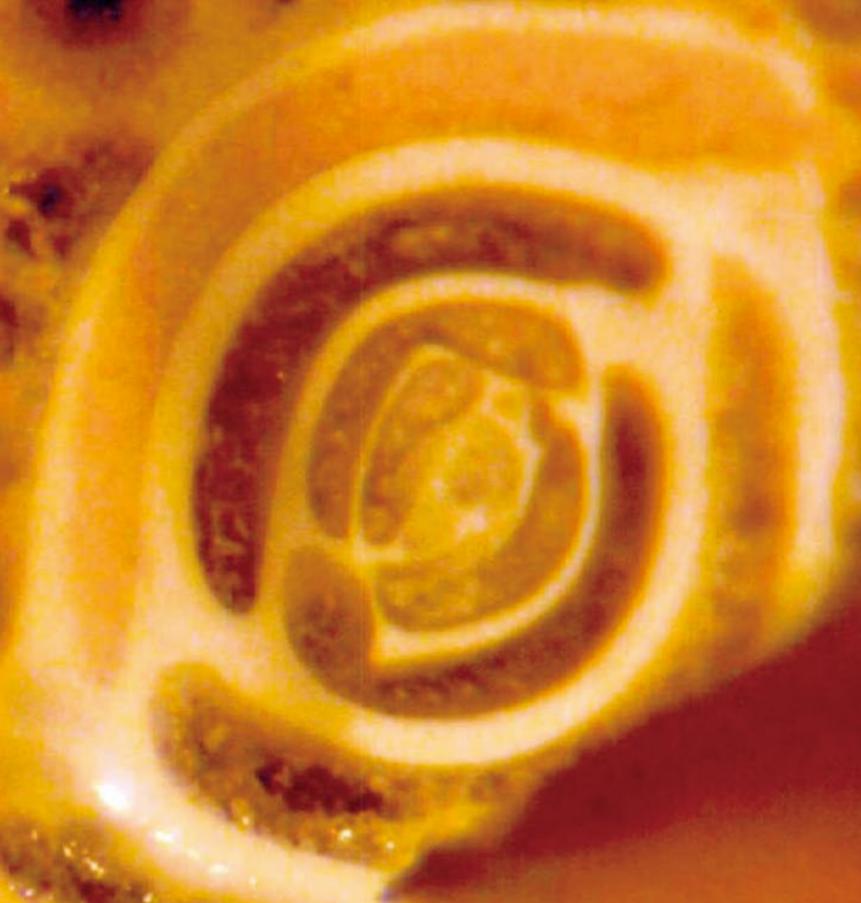
微小領域の地球科学へ

かたい石灰岩に埋まっている微化石を取り出し、サンゴ礁が発達したときの環境を知りたい——それを実現するために坂井三郎さんは、1 μ m単位で試料を削ることができるマイクロミル「GEOMILL326」、粉末試料を効率よく回収できる「吸収男児」、微量の試料で同位体分析が可能な赤外レーザー吸収分光法、炭酸塩鉱物の結晶構造を識別できるテラヘルツ波分光法などを開発してきた。そして、それらの利用は地球科学を超え、医療分野にも広がろうとしている。

取材協力

坂井三郎

生物地球化学研究分野 技術研究員



高精度マイクロミル「GEOMILL326」化石や岩石試料から分析したい箇所を1 μ m(1,000分の1mm)単位で精度よく削り出すことができる。

GEOMILL326による石灰岩からの微化石の切削。約60万年前のサンゴ礁性堆積物に含まれる底生有孔虫の殻の構造に沿って、切削している様子。微化石に接しているのはドリルビット。

かたい石灰岩から微化石を取り出したい

「このなかに入っている微化石を分析したい。そう思ったのが、すべての始まりです」。そうやって坂井さんは、白い塊を手取る。「サンゴ礁が化石になった石灰岩です。このなかには有孔虫などの1mmにも満たない小さな化石がたくさん入っています。微化石に含まれる微量元素や同位体を質量分析計などで分析することで、それらが生きていたときの環境を知ることができるのです」

同位体とは、同じ元素でも中性子の数が違うために質量数が異なる原子をいう。有孔虫は、海水温が低いときに質量数18の重い酸素(¹⁸O)を多く取り込み、海水温が高いときに質量数16の軽い酸素(¹⁶O)を多く取り込む性質がある。この性質を使うと、微化石となった有孔虫の殻に含まれる酸素同位体の比率から過去の海水温が分かるのだ。

これまでは、顕微鏡で位置を確認しながら手作業で石灰岩を削って微化石を取り出していた。しかし、石灰岩はかたく、複雑なかたちをしている微化石を取り出すのは非常に難しかった。「微化石をきれいに取り出せたら、精度のよい化学分析ができて新しいことが分かるはず。既存のよい方法がないのなら、微小領域を削ることができるマイクロミルを自分でつくってしまおう。そう決めました」と坂井さん。「いったんアイデアが浮かぶと、それを実現しようと突き進むタイプなんです」と笑う。それが、2001年ごろのことだ。

島根での出会い

坂井さんは2001年当時、JAMSTECに籍を置いて島根大学汽水域研究センターで研究を行っていた。「島根での2つの出会いがなかったら、マイクロミルは実現せず、その後のさまざまな技術開発もなかったでしょう」と坂井さんは振り返る。

1つ目は、アメリカのアリゾナ大学から客員教授として島根大学に来ていたデビッド・デッドマンさんとの出会いだ。坂井さんと同じ地球化学が専門で、マイクロミルを自作した経験があった。

デッドマンさんのアドバイスを受けながらカメラやドリルなどを組み合わせで装置を試作した。

次に、それらを制御するためのソフトウェアをつくらうと、専門書を読み始めた。しかし自分でやるのは無理だと悟り、ソフトウェア開発を依頼できる会社を探すことに。次々と断られる



なか初めて話を聞いてくれたのが、合資会社いずもWebというホームページ制作会社だった。「代表の松田新一さんは『面白いね。やってみましょう』と、すぐに試作品を持ってきてくれました。島根県の出雲は縁結びの地といわれています。その通り、とてもよい縁がありました」

研究以外でも出会いがあった。松江藩に伝わる茶道の一派・不昧流を習う機会に恵まれ、いまでも続けている。2018年に松江市で開催された、不昧流の流祖・松平不昧公の没後200年祭でお点前を披露。アリゾナ大学で研究をしていたときには、日本庭園のオープン記念イベントでお茶をたて、地元の新聞でも紹介された。「砂漠とサボテンの街ツーソンの青く澄んだ空の下でのお点前は気持ちよかったですよ」

1 μ mの単位で試料の切削が可能「GEOMILL326」

ハードウェア、ソフトウェアそれぞれについて調整を重ね、念願のマイクロミルシステムができ上がった。それを生かした研究成果を学会などで発表すると、使ってみようという問い合わせが相次ぎ、共同研究がいくつも始まった。「『製品化しないの?』といわれ、驚きました。自分の研究用につくただけで、特許も取っていませんでした」

「試料採取用マイクロミル」と「マイクロミリングシステムおよびその制御方法」の特許を2005年にJAMSTECと島根大学が共同出願。そして、いずもWebを加えた産官学が連携して、製品化に向けて動きだした。「部品や配線をすべて見直し、装置の大きさを半分にしました。私はシンプルでコンパクトなものが好きなんです」と坂井さん。そして2008年、高精度マイクロミル「GEOMILL326」の販売が開始された。「326」は、坂井さんの名前の語呂合わせだ。

GEOMILL326の操作は簡単だ。試料を台座に置くと、CMOSカメラで撮影されパソコンのモニターに映し出される。モニター上で削る位置を指定すると、自動で座標に変換され、後はスタートボタンを押すだけ。指定された座標に従って台座が動き、固定されているドリルで試料を削っていく。

粉末試料を効率よく回収する「吸収男児」

GEOMILL326の登場によって新たな問題が出てきた。試料を削ると粉末になる。しかも削るのは微小な領域なので、粉末試料はごく微量だ。それを針の先端やへらですくい取るのだが、時間がかかる上に回収率が低い。それを1個の試料で何十回も繰り返さなければならない。「苦痛でした」

と坂井さん。「だから、微量の粉末試料を効率よく回収できる装置をつくることにしました」。そして、「粉粒体回収装置」の特許を2007年に出願して製品化、2010年に販売を開始した。製品名は「吸収男児」。坂井さんは熊本出身だ。

坂井さんいわく、「吸収男児は掃除機を小さくしたようなもの」。ポンプを起動して吸入管の先端から粉末試料を吸い込み、バイアル瓶と呼ばれるガラス容器に回収する。「シンプルな構造ですが、さまざまな技術が詰め込んであります」。吸収男児は、公益社団法人発明協会の2018年度関東地方発明奨励賞を受賞した。

ライフサイエンスへも展開

GEOMILL326は2008年の発売以来20台、吸収男児は2010年の発売以来29台販売されている(2018年末現在)。販売先には海外も含まれている。

どのような研究に使用されているのだろうか。「最近の共同研究では、津波堆積物に埋没した二枚貝の解析から、津波が発生した季節の推定に貢献できました」と坂井さん。津波堆積物とは、津波

によって海底の砂泥などが別の場所に運ばれて堆積したものである。坂井さんらは、沖縄県石垣島の津波堆積物に埋没していた二枚貝に注目。それは殻を閉じていたことから、津波によって生きたまま運ばれて埋もれたと考えられる。二枚貝の成長線に沿って削り、酸素同位体を分析して水温変化を推定した。すると水温が上昇していく時期に成長が止まっていたことから、その二枚貝は春に死んだ、つまり津波は春に発生したと考えられる。それは古文書の記録にある1771年の明和の大津波の発生時期とも一致した。津波の発生時期を詳細に推定できる新しい手法として注目されている。

地球科学以外では魚の耳石の解析が多いという。耳石とは、脊椎動物の内耳にある炭酸カルシウムから成る組織である。耳石の断面には、1日1本ずつ年輪のような輪が形成されている。これまでは季節単位でしか解析できなかったが、GEOMILL326によって高精度な切削が可能になり、数日～数十日単位での酸素同位体の解析が実現した。海水温の変化から魚の回遊履歴を解明して、水産資源の維持などに役立つと期待されている。

「最近、医薬などライフサイエンスの研究にも使われています。自分の発明が想定していなかった分野へ広がっていくのは、うれしいですね」

赤外線の吸収で同位体を分析

一方で坂井さんは、「GEOMILL326は本来の力を発揮できていない」ともいう。「1μmの単位で試料を切削可能ですが、その粉末試料はわずか0.001mgほど。微量過ぎて質量分析計では分析ができないため、10μmくらいの単位で削っています。微量の試料も分析できるように質量分析計の改良も行われていますが、私は新しい方法を開拓することにしました。それが、赤外レーザー吸収分光法です」

分子はそれぞれ固有の波長の赤外線を吸収するため、赤外線を照射し透過してきた光のスペクトル(波長ごとの強度)を測定することで分子を特定できる。赤外レーザー吸収分光法では、強力で安定な径の細い赤外線を発生できる量子カスケードレーザーと、両端のミラー間で赤外線を往復させることで吸収が何重にも起きる多重反射セルを使い、高い分解能と超高感度を実現する。

微化石の同位体分析を行う場合、炭酸カルシウムとリン酸を反応させ、発生した二酸化炭素と水のうち二酸化炭素を取り出して分析する。「二酸化炭素には同位体の組み合わせによって $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ や $^{16}\text{O}^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ などがあります。それぞれ吸

収する波長が異なるため、吸収スペクトルからの同位体がどれだけあるかを定量できるのです」と坂井さんは解説する。「質量分析計のようにイオン化する必要がない、分析に必要な試料の量は質量分析計の10分の1、質量分析計では分離できない同じ質量の異なる分子の識別が可能など、赤外レーザー吸収分光法による同位体分析にはいいところがたくさんあります」

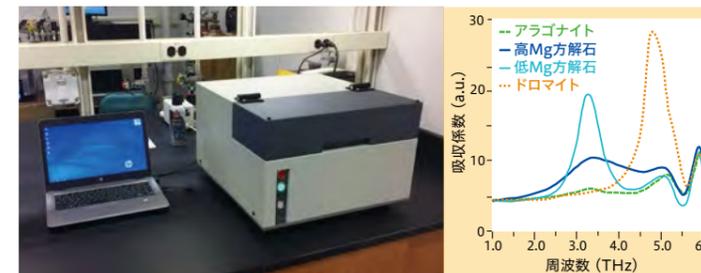
坂井さんは2015年、「ガス分析用前処理装置」という特許を出願している。「水を分離して二酸化炭素だけを取り出す際に温度を下げるのですが、冷却に液体窒素やエタノールを使っていたため、配管が複雑、温度制御が不安定などの問題がありました。シンプルでコンパクトを好む私としては、どうにかしたかったのです」。そこで、電気駆動し、-200から100℃まで0.1℃単位で制御可能で、数時間以上安定した冷却ができるスターリングクーラーを用いた前処理装置を開発。赤外レーザー吸収分光装置だけでなく、質量分析計などさまざまなガス分析装置に使えるのも特長だ。

赤外レーザー吸収分光装置についても、国産レーザーの採用、高感度化、小型化を進めている。2020年に小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰る小惑星リュウグウの試料の解析に、その装置を使うことが検討されている。さらに坂井さんは「医療への展開も意識している」という。最近、呼吸に含まれるガスを測定することで消化器や腸内細菌叢などの状態を知る呼吸診断が注目されている。いまは限られた同位体だけを測定しているが、赤外レーザー吸収分光法を使うことで、さまざまな同位体を指標とした詳細な呼吸診断が簡便にできるようになると考えているのだ。

テラヘルツ波分光の大きな可能性

坂井さんは、光と電波の中間の波長の電磁波であるテラヘルツ波にも注目し、新たな分析法を開拓している。それが、2017年に浜松ホトニクス株式会社と特許を共同出願した「炭酸塩鉱物の分析方法」だ。

炭酸塩鉱物とは、炭酸イオン(CO_3^{2-})と陽イオンとの結合によってできている鉱物で、炭酸カルシウムも含まれる。炭酸塩鉱物は、サンゴや有孔虫といった生物の骨格や、石灰岩や大理石の主要鉱物で、過去の環境の解明には欠かせない。炭酸カルシウムには結晶構造の違いからアラゴナイトと方解石があるように、炭酸塩鉱物の結晶構造には多形が存在する。そのため、炭酸塩鉱物の分析では、化学組成だけでなく結晶構造の識別・定量が重要になる。「テラヘルツ波は、その特徴から結



テラヘルツ波分光装置と炭酸塩鉱物の結晶構造解析

正確にはテラヘルツ波時間領域分光といい、テラヘルツ波の波形を直接測定することによって得られる電磁波の電場の時間波形をフーリエ変換し、電磁波のスペクトルを得る分光法。広帯域(0.5～7THz)で計測が可能。右は、炭酸塩鉱物にテラヘルツ波(1～6THz)を照射したときの吸収スペクトル。結晶構造ごとに特徴的な吸収スペクトルが得られた。

晶構造の解析に向いていることは知られていましたが、未踏領域とも呼ばれ発生や検出の技術開発が遅れていました。今回、浜松ホトニクスとの共同研究によって高感度のテラヘルツ時間領域分光装置が実現し、炭酸塩鉱物の分析が可能になったのです」

天然に存在する主な炭酸塩鉱物である、高マグネシウム方解石、低マグネシウム方解石、アラゴナイト、ドロマイトにテラヘルツ波を照射すると、それぞれに特徴的な吸収スペクトルが得られた。そして、その吸収スペクトルを用いて、試料におけるそれぞれの含有量を高感度で求めることに成功した。

「テラヘルツ波分光法が役立つのは地球科学だけではなくありません。生体分子の識別・定量を目指した研究開発をアメリカのパデュー大学と共同で進めています」。坂井さんは現在、パデュー大学の兼任教授も務める。「薬学部に籍を置いています。DNAを合成したり、すべてが新鮮です。ここで育てた技術を地球科学で役立てる。そんな循環をつくりたいと思っています」

かたい石灰岩に埋まっている微化石を取り出し、サンゴ礁が発達したときの環境を知りたい——さまざまな技術開発は、ここから始まり、すべてつながっている。「しばらく技術開発に没頭してきました。まさにいまから、それらの技術を駆使したエキサイティングな研究を始めようとしています。とても楽しみです」

【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。

特許情報

- 試料採取用マイクロミル(特許第4608370号)
- マイクロミリングシステムおよびその制御方法(特許第4203860号)
- 粉粒体回収装置(特許第5009688号)
- ガス分析用前処理装置(特願2015-176635)



「しんかい6500」音響画像伝送が高速に

取材協力 **志村拓也**

海洋工学センター 海洋基幹技術研究部
先端技術研究グループ グループリーダー

有人潜水調査船「しんかい6500」には、音響画像伝送装置が搭載されている。深海で撮影したカラー画像を海上の母船に音波を使って送信する装置で、世界に先駆けて開発されていたものだ。船上の研究者と運航要員も深海の画像を確認できるようになり、潜航調査の効率が飛躍的に向上した。しかし、運用開始からすでに25年以上がたち、新型機への更新が望まれていた。そして海洋工学センター海洋基幹技術研究部の志村拓也さんたちにより、通信速度が大幅に向上した高性能の新型機が実現。2018年度から実運用を開始した。

2017年3月、駿河湾や小笠原諸島海域で「しんかい6500」の試験潜航が行われていた。5年ごとに行われる大掛かりな定期検査工事の後ということもあり、支援母船「よこすか」には緊張感が漂っていた。さまざまな試験が進んでいくなか、みんなの視線が総合司令室などに設置されたモニターに集まる。音響画像伝送装置の新型機の試験が始まるからだ。水深3,600mを潜航中の「しんかい6500」から画像を送信。そのおよそ2秒後、「よこすか」のモニターに画像が映し出さ

れた。そして2秒ごとに画像が更新されると、「おおっ！」という歓声が上がった。新型機の開発を担当した志村さんも「ほっとしました」と、そのときを振り返る。「画像の転送速度は、それまで搭載されていた初号機の4倍を超え、期待以上の結果でした」

音響画像伝送装置は「しんかい6500」が世界初

「しんかい6500」は、水深6,500mまで潜航可能な世界有数の有人潜水調査船である。定員は3人。1989年に完成したとき、音響画像伝送装置は搭載されておらず、「しんかい6500」と「よこすか」とのやりとりは水中通話機を介した音声だけで行われていた。

しかし、有人潜水調査船を運用していくなかで、音声通信だけで深海で行われている調査の状況を伝えるのは難しく時間がかかるため、潜水調査船から母船に画像を伝送できるようにしたいという声が上がっていた。そうした背景から音響画像伝送装置の開発が進められ、1991年、音響画像伝送装置が「しんかい6500」に搭載されたのだ。音響画像伝送装置を常設した潜水調査船は世界初だ。「しんかい6500」に搭載している研究者とパイロットだけでなく、船上の研究者と運航要員も深海の画像を確認できるようになり、潜航調査の効率が飛躍的に向上した。

だが、運用開始から25年以上たち、最近では装置の老朽化

が問題になっていた。そうした理由から、新型機の開発が始まったのだ。中心になったのは、先端技術研究グループの志村さんと出口充康さん、樹田行弘さんである。

音響通信が難しい理由

音響画像伝送という名前の通り、海中では音波を使って画像を送る。「陸上では通信に電波を使いますが、電波は海中ですぐに弱くなってしまい遠くまで届きません。そのため海中での通信には音波を使います。ところが、電波と音波では性質が大きく違うために、音響通信で高速通信を実現するのは非常に難しいのです」と志村さん。

1つ目の違いは、伝搬速度である。電波は空気中を1秒間に30万km伝わる。音波が海中を伝わる速度は1秒間に1.5kmであり、空気中を伝わる電波の20万分の1と非常に遅い。

2つ目の違いは、通信に使える周波数の帯域幅である。周波数とは1秒間に繰り返す波の数のことで、通信に使う周波数の範囲を周波数帯域幅という。「周波数帯域幅は道路の幅だと思ってください。周波数が高いほど帯域幅を広く取れるので道路の幅が広くなり、一度にたくさんの情報を送ることがで

きます」と志村さんは説明する。携帯電話などの電波通信にはMHz（メガヘルツ）やGHz（ギガヘルツ）の高い周波数が使えるので、帯域幅が広く、一度にたくさんの情報を送ることができる。一方、音波は周波数が高くなると急激に海中で減衰しやすくなるので、数kmの音響通信のために利用できるのは十数～20kHz（キロヘルツ）くらいの低い周波数に限られてしまう。そのため帯域幅が狭く、一度にたくさんの情報を送ることができない。

ほかに、ドップラー効果の影響が大きいなど、音響通信には電波通信とは異なる特有の問題がある。音響通信装置の開発では、そうしたさまざまな難題を克服しなければいけないのである。ところが、今回の新型機の開発で大変だったことを志村さんに尋ねると、「苦労したことは特にありませんでした。実は、今回の新型機の開発には1ヵ月もかかっていないんです」と意外な答えが返ってきた。

音響通信に関する基礎研究からのスピノフ

では、どのようにして通信速度の高速化を実現したのか。志村さんは、「性能を上げるには、画期的な新しい技術を取り入れる方法と、技術は既存のものだが1個1個の要素をきちんと見直して最適化していく方法があります。今回の音響画像伝送装置の新型機開発は、後者です」という。「海中の調査観測に音響通信は欠かせないため、私たちは音響通信に関するさまざまな基礎研究を行ってきました。そのなかで培ってきた技術と知識を使ったスピノフなのです」

志村さんが装置を開発する際に重視しているのは、「基礎研究で得た知識や技術のなかから、条件、環境、目的に適合したものを選んで使うこと」だという。「今回の音響画像伝送装置であれば、条件は音波を使うこと、環境は最大水深6,500mの海中、目的は通信速度の高速化です。専門的になるので詳



音響画像伝送装置新型機の試験の様子
「よこすか」船上のモニターに「しんかい6500」から送信された画像が映し出されている。

「しんかい6500」音響画像伝送装置初号機と新型機の比較

	0秒	2秒	4秒	6秒	8秒	10秒	12秒	14秒
初号機 240×256ピクセル 10秒に1枚 10秒ごとに1枚の画像が送信され、モニター上では左上からブロックごとに表示されていく。復調に失敗して画像が欠けてしまうビットエラーが起きているところもある。	12:59 073 0936 0005 1枚目受信開始	12:59 073 0936 0005	12:59 073 0936 0005	12:59 073 0936 0005	12:59 073 0936 0005	12:59 074 0936 0005 1枚目受信完了	12:59 074 0936 0005 2枚目受信開始	12:59 074 0936 0005
新型機 240×320ピクセル 2秒に1枚 2秒ごとに1枚の画像が送信され、モニター上ではスライドが切り替わるように次々と表示されていく。ビットエラーはほとんど起きない。	16:02 338 1154 2 1枚目受信開始	16:02 338 1154 2 1枚目受信完了	16:02 338 1154 2 2枚目受信完了	16:02 338 1154 2 3枚目受信完了	16:02 337 1154 2 4枚目受信完了	16:02 337 1154 2 5枚目受信完了	16:02 337 1154 2 6枚目受信完了	16:02 337 1154 2 7枚目受信完了

【しんかい6500】音響画像伝送装置の構成



研究者と
運航チーム
からの
声

音響画像伝送装置が新型になり「よこすか」船上で受信した画像は、深海から音波で送られてきているとは思えないほどきれいでした。近い将来、ドレッジや海底地震計、ピストンコア、採水器、係留装置、漁網などに深海用ビデオカメラを取り付け、撮影した画像を船で受信することも可能になるでしょう。音響画像伝送の応用範囲は、限りがないように思います。

石井輝秋 静岡大学 防災総合センター 客員教授

初号機では、画像の送信間隔が10秒と長く、また低画質だったことから、状況の共有は水中通話機によるコミュニケーションが主で、貴重な潜航時間を取られることもあり。新型機では、送信間隔が2秒になり画質も上がったため、画像によるコミュニケーションが可能となり、潜航時間をより有効に使えるようになりました。

画像の送信間隔が短いので、「しんかい6500」の運用画像としても活用できるようになりました。そのため「よこすか」の総司令室にあったTVカメラ用の小型モニター1台を取り外すことができ、船内環境の改善につながっています。

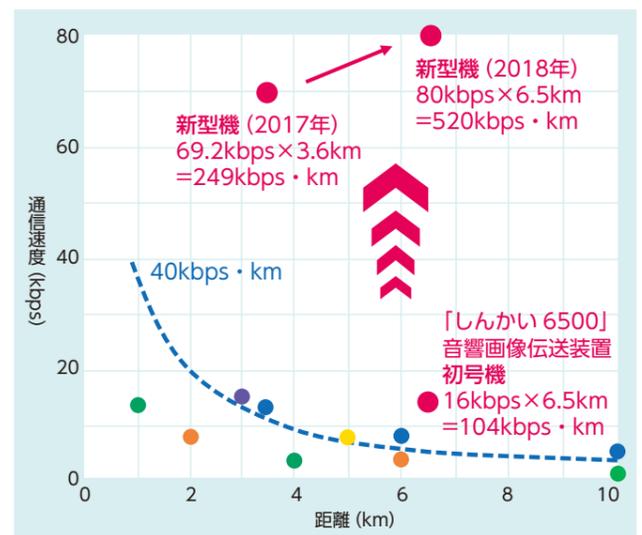
初号機では、音響ノイズの影響などで頻繁に画像が途切れ、ときには1分以上映像が確認できないこともあり。新型機では安定した画像が送られてくるので、オペレーションを指揮するための情報としての信頼度が格段に向上しました。

画像の送信間隔が2秒になったことで、これまでより母船からの小まめな誘導指示が可能になりました。また、指示通りにオペレーションされているかどうか、画像で早期に確認できるようになりました。

初号機は、潜水調査船の内部、上部ともに予備品がなく、メンテナンスも基板清掃程度のことしかできませんでした。新型機ができたことで、老朽化の懸念もなく安定した運用が期待できます。

開発初期段階から、開発チームと運航チームとの検討の場を何度も設けていただきました。新型機には現場の意見が多く取り入れられているため、とても使い勝手のよい装置になっています。このような開発の進め方が今後にもつながれば、現場としてもうれしいです。

次のステップとして、潜航者が監視している船内機器データを画像と一緒に船上へ送信することを検討していただきたいです。潜水調査船内の状況の把握が母船上で可能となり、2018年10月から開始したパイロット1人と観察者2人が乗船する「ワンマンパイロット」の安全運用へつなげると期待します。



音響画像伝送装置の性能比較
水中音響通信装置の性能評価の指標には「通信速度 (kbps) × 距離 (km)」が使われ、市販品は40くらいである (点線)。「しんかい6500」の新型機は、2017年の試験で、距離3.6km、通信速度69.2kbpsを達成した。2018年に行われた試験では、距離6.5km、通信速度80kbpsの高速通信を達成している。

細な説明はしませんが、それらに適合した技術や知識を選び、最適化していきました」

画像伝送が10秒ごとから2秒ごとに

音響画像伝送装置は、「しんかい6500」に搭載されている送信機、電力増幅器、送波器と、「よこすか」に搭載されている受波器、受信機で構成されている。まず、「しんかい6500」のTVカメラで撮影された映像を送信機に取り込み、1コマを静止画として圧縮、デジタルデータに変換する。さらに、デジタルデータを音波の振幅や位相に割り当てる変調を行い、電力増幅器を経由して送波器から海中に音波を送信する。音波は海中を伝搬し、「よこすか」の受波器に到達する。受信機で変調信号をもとのデジタルデータに戻す復調を行うと、静止画がモニターに映し出される。

初号機の通信速度は、6,500mの距離で16kbpsだった。bpsは通信速度の単位で、1秒間に何ビットのデータを送信できるかを表す。では、新型機の通信速度は？ 2017年3月の試験では、3,600mの距離で最高速で69.2kbpsを達成した。通信速度を単純に比べると、16kbpsから69.2kbpsへ約4倍も向上している。

水中音響通信では通信速度は距離に反比例するため、装置の性能を比較するには、「通信速度 (kbps) × 距離 (km)」という指標で比較すればよい。初号機は16kbps×6.5kmで104である。市販されている標準的な水中音響通信装置の値は40くらいだから、初号機も十分高性能であるといえる。そして新型機は、69.2kbps×3.6kmで249。性能評価の指標でも、初号機から大幅に向上し、かつ市販の水中音響通信装置の性能を大きく上回っていることが分かる。

初号機は、画素数が256×240の画像を約10秒に1枚送ることができた。新型機では、画素数が320×240の画像を約2秒に1枚送信できるようになった。「10秒に1枚と2秒に1枚。その違いは大きい」と志村さん。10秒ごとでは、1枚目に写っていた魚が2枚目ではフレームから外れて見失ったり、珍しい生物が横切っても1枚目と2枚目の間だったために気付かなかったり、ということが起こり得る。2秒ごとに間隔が短くなると、そうした懸念は減る。また、画素数が上がったことで画像が鮮明になった。さらに、初号機では復調に失敗して画像が欠けてしまうビットエラーがしばしば起きていたが、新型機ではほとんど発生しない。

これほどの高性能を実現できたのは、プロトタイプ製作をインハウス、つまり海洋基幹技術研究部内部で行ったことも大きく効いている、と志村さんは指摘する。「インハウスにすることで、細部まで設計や性能にこだわりながらも、速く、そして低コストで製作することができました」

2018年度から実運用を開始

2017年3月の試験後、実装機を製作。2018年度から「しんかい6500」に搭載して、実運用を開始している。そして、「研究者と運航チームからの声」で紹介しているように、新型機は現場から高く評価されている。志村さんは、「今回、基礎研究の成果を具現化し、しかも深海調査研究に役立つ実用機になりました。工学研究者としては、とてもうれしい」と語る。

2018年に行われた試験では、6,500mの距離で80kbpsの通信速度を達成。性能評価の指標は520となり、まさに飛び抜けている。志村さんは、「今回新しくしたのは、音響画像伝送装置のうち送信機と受信機だけです。送波器や受波器も新しくしたりすることで、さらなる性能向上を図っていく計画です」と意気込む。

地球温暖化によって 台風のサイズは変わるのか？

— 高解像度モデルが示す台風の将来予測 —

地球情報館公開セミナー 第222回 (2018年8月18日開催)

山田洋平 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
ポストドクトラル研究員



やまだ・ようへい。1980年、神奈川県生まれ。東京工業大学大学院総理工学研究所修士(理学)。民間企業を経て、2008年よりJAMSTEC地球環境フロンティア研究センター研究技術専任スタッフ。在職中に社会人博士課程に進学、東京大学大学院理学系研究科修士(理学)。2016年より現職。専門は気候学・気象学。高解像度モデルNICAMのシミュレーションによる地球温暖化の台風への影響の研究に携わる。

台風とは

熱帯の海上で発生する低気圧を「熱帯低気圧」といいます。北西太平洋で発生した熱帯低気圧で、最大風速が秒速約17m以上になったものが「台風」です(図1)。熱帯低気圧は世界中の熱帯域で発生します。発生する海域などによって「ハリケーン」や「サイクロン」と呼ばれます。ただし今日の話で「台風」というときは、ハリケーンやサイクロンも含んでいると思ってください。

水が水に、水が水蒸気に変化するとき、逆に水蒸気が水に、水が氷に変化するときなど、物質の状態が変わるときには、熱が吸収されたり放出されたりします。その熱のことを「潜熱」といいます。

熱帯の海では、暖かい海面から海水が蒸発し、大気中に水蒸気が供給されます。水蒸気が上昇して雲粒になるときに潜熱を放出します。その潜熱をエネルギー

源として台風は発達します。

ここ40年間で見ると、平均して年に80個ほど台風が発生してきました。ただし台風の発生数は毎年異なります。台風より大きな時空間スケールを持った現象の影響を受けて、年々変動が起きるのです。

エルニーニョ現象と台風

台風より時空間スケールの大きな現象としては、ブロッキング高気圧やエルニーニョ現象などがあります。地球温暖化の話とも関係しますので、ここでは台風とエルニーニョ現象の関係についてお話しします。

熱帯太平洋のペルー沖の海面水温が、普段より暖かくなる状態をエルニーニョ現象と呼びます。エルニーニョ現象が発生した場合、北大西洋では台風の活動度合いが減少するといわれています。大気の流れ(循環)が変わり、台風

の活動や発生を抑制する効果があるからです。

では太平洋ではどうなるでしょう。

熱帯域(北緯12.5度)の大気の断面図を見ると、エルニーニョ現象発生時とラニーニャ現象発生時とで、東西方向の大気の循環が逆回りになります(図2)。エルニーニョ現象のときには、経度180度付近で対流が活発になる一方、東経140度付近で対流が活発でなくなります。ラニーニャ現象のときには逆に、東経140度付近で対流が活発になり、経度180度付近で対流が活発でなくなります。このような変化が、台風の発生に影響すると考えられます。

エルニーニョ現象発生時と、ラニーニャ現象発生時とで台風の発生する位置を比べてみると、エルニーニョ現象のときには、ほかの時期に比べて南東側で台風が発生しやすくなることが知られています。また、エルニーニョ現象の発生時には、北西太平洋の台風は寿命が長くなったり、台風の活動度合いが活発になったりすることが知られています。

地球が温暖化すると台風はどうか

では、地球温暖化のように気候が変化する場合、台風の発生数や強度は変化するのでしょうか。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書では、正味2ページほどで台風の将来変化に関してまとめられています。

図3は、海域ごとの台風の変化を示しています。複数の数値モデルの結果をまとめて作成されたものです。なお、数値モデルについては後で説明します。

台風の年間発生数は、全球では減少

毎年、夏から秋にかけて台風が日本付近にやって来ます。

台風は、ときに大きな被害をもたらすこともあります。

地球温暖化が進んだときに、台風がどのように変化するかについては、科学的のみならず社会的にも関心の高いテーマです。

これまでも研究は進められてきましたが、未解明のこともたくさん残されています。

私たちは数値モデルを使った研究で、台風の強風域が広がる可能性を示しました。

地球温暖化による台風の変化を紹介しながら、

将来的に台風の強風域が拡大する理由についても紹介します。

あるいは本質的には変化しないとみられています(I)。海域ごとの結果は数値モデルごとにばらつきが大きく、信頼性はあまり高くありません。

強い台風の年間発生数は、全球で増加するといわれています(II)。ただし、こういった強い台風を表現するには高解像度モデルを使う必要があります。IPCC第5次評価報告書の段階ではまだ高解像度モデルは少なく、北西太平洋や北大西洋以外では研究が進んでいませんでした。最近では高解像度モデルを使った研究事例も増えているので、今後、より信頼できる結果が出てくるので

はないかと考えられます。

台風の平均的な強度は大きくなると考えられます(III)。温暖化によって海面水温が上昇し、海から供給されるエネルギーが増えるからです。

台風の周囲での降水は、モデルによってばらつきはあるものの、すべての海域で増えるといわれています(IV)。全体としては最大20%程度増加するだろうと予測されています。これも、温暖化によって海面水温が高くなり水蒸気が増えるからだと考えられます。

海面水温の変化や、それに伴う大気循環の変化の影響を受けて、台風の発生

する場所が北西太平洋では現在より南東にずれるといわれています。これまでの研究では、地球温暖化によって海面水温はエルニーニョ現象に似た分布をもって増加すると考えられています。そのため、信頼できる海面水温の予測が必須であると考えられています。

台風の強度や数は、台風による災害の被害規模などに影響します。強風や高潮、高波などの被害を決める要素としては、台風の大きさも重要です。気象庁の定義では、10分間平均風速が秒速15m以上の風が吹く範囲を強風域といいますが、この強風域の大きさは、たとえば高波の被害を受ける範囲に直接的に影響します。ただ台風の大きさについては、これまであまり議論されてきませんでした。それは台風の構造、数値モデルの解像度に関係しています。

台風の構造

台風の中心には雲のない眼があり、その周囲を積乱雲が壁のように取り巻いています(「壁雲」と呼ばれます)。さらにその外側は、雲が渦を巻いた構造をしています。台風は中心で気圧が低く、外に行くほど気圧が高くなります。

台風のなかで吹く風を「接線風」や「動径風」、「上昇流」の3つの成分に分解して考えます。

接線風は台風の中心に対して回転するように吹く風です。大気下層の、台風の中心より少し外側で風速が最大になります。この半径を最大風速半径と呼びます。動径風は、大気下層では台風の外側から中心に向かって吹き、大気上層では逆に中心から外側に向かって吹く風です。上昇流は、台風の中心付近で上に向



図1: 台風の衛星画像 2018年8月21日、奄美地方に接近中の台風19号ソーリック。台風の眼がはっきりと見えている。画像はNASA Worldview (https://worldview.earthdata.nasa.gov/) より。

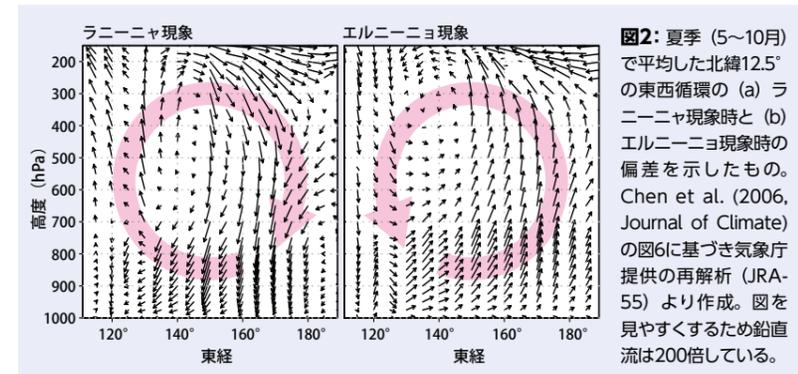


図2: 夏季(5~10月)で平均した北緯12.5°の東西循環の(a)ラニーニャ現象時と(b)エルニーニョ現象時の偏差を示したものの。Chen et al. (2006, Journal of Climate)の図6に基づき気象庁提供の再解析(JRA-55)より作成。図を見やすくするため鉛直流は200倍している。

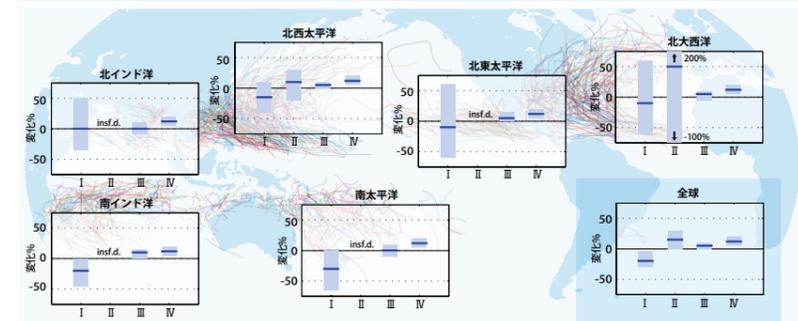
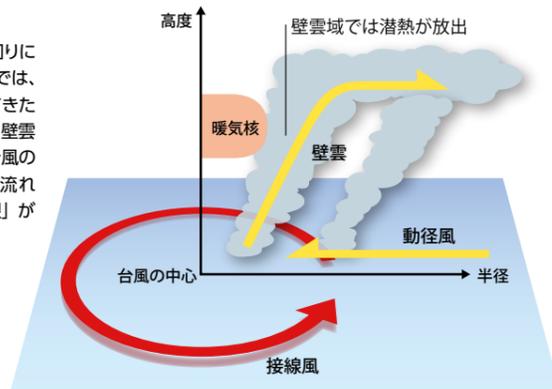


図3: 台風の将来変化 各グラフはそれぞれの地域における (I) 台風の年間発生数、(II) 強い台風の年間発生数、(III) 台風の平均強度、(IV) 台風の周りの雨、を示している。青の太線は複数のモデルの平均値で、棒グラフが長いほど数値モデルごとの差が大きいことを示している。出典: IPCC第5次評価報告書より(一部改変)

図4：台風の構造の模式図

台風の中心の周りには反時計回りに風が吹く。一方、大気の下層では、外側から中心に向かって流れてきた風が、中心付近で上昇流となり壁雲ができる。壁雲の上の方では台風の中心から外側に向かって風が流れる。中心付近には雲のない「眼」があり、暖気核が存在する。



かう風です。台風の中心近く壁雲のあたりで、渦を巻きながら上昇しています。

また、台風内部では、中心付近の上空に「暖気核」と呼ばれる暖かい空気の塊があります。暖かい空気は密度が低く、周囲よりも気圧が低くなります。そのため台風の中心気圧が低くなります(図4)。

接線風は、等圧線に沿って北半球では反時計回りに流れています。等圧線の間隔が狭くなると接線風が強くなり、等圧線の間隔が広がると接線風が弱くなるという関係になっています。また、最大風速半径の外側では、中心からの距離が離れるにつれて、接線風は弱くなっていきます。

台風の大きさ(水平スケール)は台風によって異なります。ただ数値モデルが200kmほどの水平スケールを解像できないと、台風の構造を表現できません。IPCC第5次評価報告書で使われた数値モデルの多くは、台風の水平スケールを十分に解像できませんでした。そのため、台風の水平スケールに関する議論はできませんでした。そのような議論を行うには、高解像度のモデルが必要になります。

数値モデルと解像度

台風の構造を調べるには、地上観測や人工衛星による観測のほか、航空機で直接台風のなかに入っていき方法などさまざまな手法があります。私たちは数値モデルを使ったシミュレーションという手法で台風の構造を研究しています。

大気中では、放射や雲・降水過程などさまざまなプロセスが存在します。そういったプロセスについて、流体力学の基礎方程式や熱力学の式に基づいて、風、気温、気圧、水蒸気、雲の量などの物理

量の平均的な振る舞いを求めるのが数値モデルです。まだきちんと理解されていないことも含まれていて不完全な点はあるものの、台風の構造や現象を理解するための強力なツールとなっています。

現実世界は連続的ですが、シミュレーションを行うには大気を三次元的な格子に区切る必要があります。三次元に区切った格子ごとに、平均的な風や気温、気圧、水蒸気、雲の量などを計算していきます。この格子の数が解像度です。格子の数を増やすと現実に近づきます。逆に格子の数を減らしていくと、現実から離れていきます。数値シミュレーションをする上では、限りなく現実に近い方がよいのですが、現実に近づけるために格子の数を増やすほど計算量が増えていきます。

膨大な計算を処理するには、「地球シミュレータ」のようなスーパーコンピュータが必要になります。それだけでなく、高解像度の計算を行うことができる数値モ

デルも必要です。私たちのグループでは「NICAM(非静力学正20面体格子大気モデル)」という数値モデルを使って研究をしています。NICAMはJAMSTECと東京大学、理化学研究所が共同で開発している数値モデルです。数km以下の格子サイズでの実験を実施したこともあり、「地球シミュレータ」では3.5kmの格子まで計算が可能になっています。

地球温暖化で台風は大きくなる

台風の大きさは時間とともに変動します。地球温暖化が進んだときに台風の大きさがどうなるのか、変動するもの同士の大きさを比べるには基準が必要です。そこで、台風の気圧が最も低くなる時点を基準にして、その時点での水平スケールを比較します。

台風の強度と水平スケールとの間の関係は、台風ごとに違っていただつきが大きいですが、ある程度の強度までは、水平スケールは強度とともに大きく

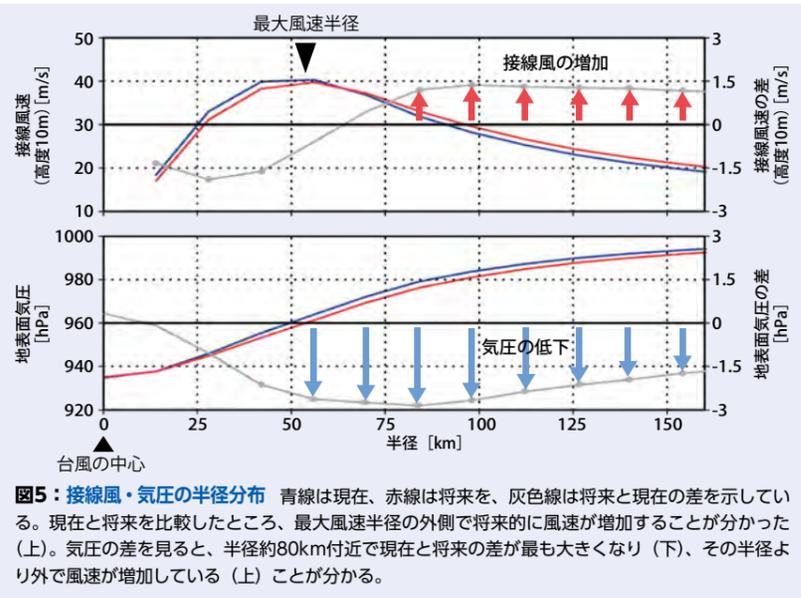


図5：接線風・気圧の半径分布 青線は現在、赤線は将来を、灰色線は将来と現在の差を示している。現在と将来を比較したところ、最大風速半径の外側で将来的に風速が増加することが分かった(上)。気圧の差を見ると、半径約80km付近で現在と将来の差が最も大きくなり(下)、その半径より外で風速が増加している(上)ことが分かる。

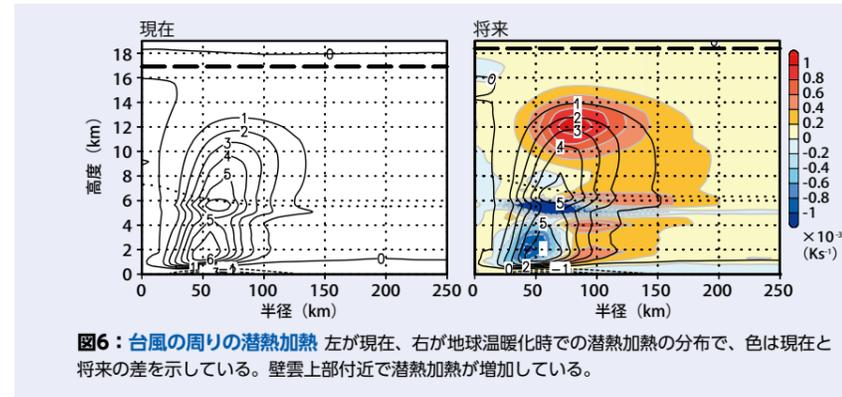


図6：台風の周りの潜熱加熱 左が現在、右が地球温暖化時での潜熱加熱の分布で、色は現在と将来の差を示している。壁雲上部付近で潜熱加熱が増加している。

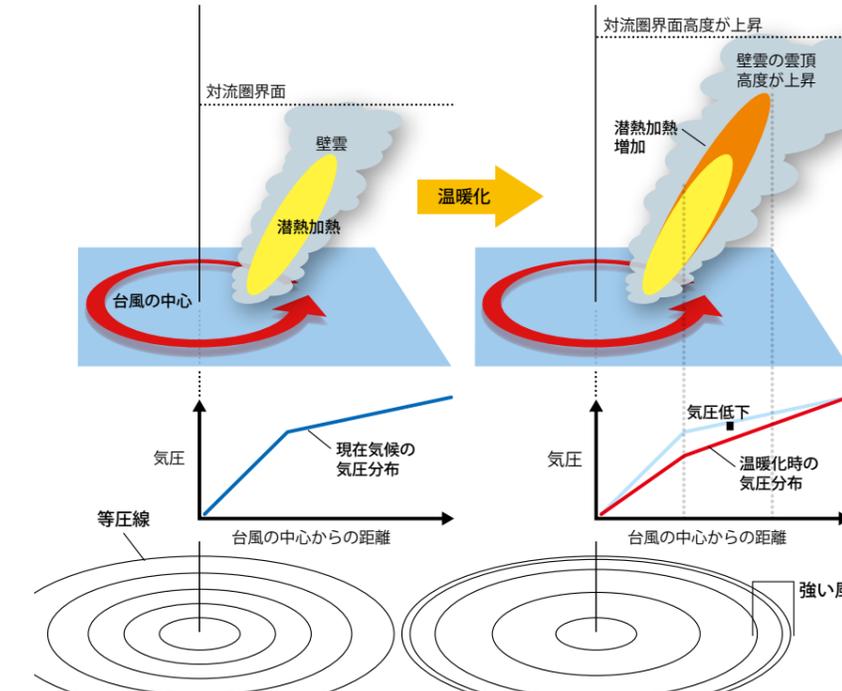


図7：壁雲の雲頂高度上昇と強風域の拡大 壁雲が高くなり、潜熱の放出が増える。現在よりも大気が加熱されるため、壁雲の下では気圧が低下する。台風の外側との気圧差が大きくなり、強い風が吹き込むようになる。下は、地表付近の気圧を等圧線で示したもの。中心から離れたところで等圧線の間隔が狭くなり強い風が吹くようになる。

なり、それ以上では強度とともに小さくなるという傾向もあります。そういったことを考慮に入れる必要もあります。

私たちは、格子の大きさが14kmのNICAMで、現在と将来、それぞれ30年ずつの高解像度シミュレーションを行い、台風の水平スケールを調べました。その結果、強度が強くなると平均的な台風の水平スケールが大きくなること分かりました。

なぜ台風は大きくなるのか

その結果を受けて、台風のサイズがどうして大きくなったのか、そのメカニズムを考えました。メカニズムを考えるにあたり、差がはっきりと見えている強い

台風注目してサンプルを採りました。サンプルとして抽出した台風は、最低中心気圧が920~945hPaのもので、現在までの結果のなかでは267個、将来の結果のなかでは271個のサンプル数になりました。それくらいの数があれば、統計的に有意な差が見えてきます。それらの平均的な描像を得て、その差からどのようなバランスのもとで大きくなったのかを比較しました。

台風の周りの風の分布を見ると、台風の中心から50kmほどのところで風速が最大になり、そこから外に行くにつれて風速が小さくなります(図5上)。現在と将来の差を見てみると、温暖化した場合には、最大風速半径の少し外側で風速

が増加することが分かりました。

台風の中心からの距離に応じて、気圧がどのように分布しているのかを見たところ、温暖化したときの台風は、最大風速半径より外側で、いまよりも気圧が下がることが分かりました(図5下)。気圧が下がるということは、上の空気が軽い、つまり密度が低い状態であるということです。

最大風速半径のところには壁雲があります。図6は、台風の周りの潜熱加熱の量を示しています。壁雲があるあたりで加熱が大きくなり、将来的に特に大気の上層が現在よりも暖まることが分かります。温暖化すると、対流圏界面(対流圏と成層圏の境界面)が上昇するといわれています。対流圏界面が上昇すると同時に、壁雲の雲頂高度も高くなります。そのため、もともと雲がなかったところにも対流性の雲ができて、潜熱の放出により大気が暖められるようになります。すると大気の密度が小さくなるため、壁雲の下の地表面気圧が下がると考えられます。

壁雲域で気圧の低下が顕著になる一方で、台風の外の気圧は現在とほとんど変わりません。台風の中心気圧と、台風外の気圧が変わらないなかで壁雲域の気圧が下がるので、中心から離れたところで等圧線の間隔が狭くなります。等圧線の間隔が狭いほど強い風が吹き込むこととなります。このように台風の中心から離れたところで風が強くなるので、強風域が拡大するのです(図7)。

地球温暖化と台風の関係について、今後もシミュレーションの精度をさらに向上させて、研究を進めていきたいと考えています。

BE

Information

JAMSTEC×SDGsの取り組みウェブサイト公開

持続可能な開発目標（SDGs）とは、2001年に策定されたミレニアム開発目標（MDGs）の後継として、2015年9月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」に記載された2016年から2030年までの国際目標です。JAMSTECが、わが国を代表する総合的な海洋研究開発機関として国際社会が共有する課題の解決に積極的に貢献していくことを皆さんにお伝えするために、SDGsへの取り組みを紹介しています。



<http://www.jamstec.go.jp/sdgs/j/>

『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、①～⑥を明記の上、下記までお申し込みください。
① 郵便番号・住所 ② 氏名(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

〒237-0061 神奈川県横浜須賀野市夏島町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(160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案内

<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 神奈川県横浜須賀野市夏島町2番地15
TEL. 046-866-3811 (代表)
- 横浜研究所**
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25
TEL. 045-778-3811 (代表)
- むつ研究所**
〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地
TEL. 0175-25-3811 (代表)
- 高知コア研究所**
〒783-8502 高知県南国市物部乙200
TEL. 088-864-6705 (代表)
- 東京事務所**
〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号
富国生命ビル23階
TEL. 03-5157-3900 (代表)
- 国際海洋環境情報センター**
〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3
TEL. 0980-50-0111 (代表)

賛助会 (寄付) 会員名簿 2019年2月28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は、次の賛助会員の皆さまから会費、寄付を頂き、支援していただいております。(アイウエオ順)

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 株式会社IHI | 株式会社カネカ |
| 株式会社アイケイエス | 川崎汽船株式会社 |
| 株式会社アイワエンタープライズ | 川崎近海汽船株式会社 |
| 株式会社アクト | 川崎重工業株式会社 |
| 朝日航洋株式会社 | 川崎地質株式会社 |
| アジア海洋株式会社 | 株式会社環境総合テクノス |
| 株式会社天野回漕店 | 株式会社キュービック・アイ |
| 株式会社アルファ水工コンサルタンツ | 共立インシュアランス・ブローカーズ |
| 株式会社安藤・間 | 株式会社 |
| 株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所 | 共立管財株式会社 |
| 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 | 極東貿易株式会社 |
| 潮冷熱株式会社 | 株式会社きんでん |
| 株式会社エス・イー・エイ | 株式会社熊谷組 |
| 株式会社エスイーシー | クローバテック株式会社 |
| 株式会社SGKシステム技研 | 株式会社グローバルオーシャン |
| 株式会社エヌエルシー | ディベロップメント |
| 株式会社NTTデータCCS | 株式会社KSP |
| 株式会社NTTファシリティーズ | KDDI株式会社 |
| 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 | 鋳研工業株式会社 |
| 株式会社OCC | 株式会社構造計画研究所 |
| 株式会社オキシテック | 神戸ベイント株式会社 |
| 沖電気工業株式会社 | 広和株式会社 |
| 海洋エンジニアリング株式会社 | 国際石油開発帝石株式会社 |
| 海洋電子株式会社 | 国際ビルサービス株式会社 |
| 株式会社化学分析コンサルタント | 株式会社COAST |
| 鹿島建設株式会社 | コスモス商事株式会社 |

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 株式会社コノエ | 株式会社ソリッド・ソリューションズ |
| 株式会社コベルコ科研 | 株式会社ソルトン |
| 五洋建設株式会社 | 損害保険ジャパン日本興亜株式会社 |
| 株式会社コンボン研究所 | 大成建設株式会社 |
| 相模運輸倉庫株式会社 | ダイハツディーゼル株式会社 |
| 佐世保重工業株式会社 | 太陽日酸株式会社 |
| 三洋テクノマリン株式会社 | 有限会社田浦中央食品 |
| 三和化成工業株式会社 | 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JSP | 中部電力株式会社 |
| 株式会社JVCケンウッド | 株式会社鶴見精機 |
| シチズン時計株式会社 | 株式会社社帝国機械製作所 |
| 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 |
| 清水建設株式会社 | 株式会社寺本鉄工所 |
| 清水港振興株式会社 | 東亜建設工業株式会社 |
| シモダフランチ株式会社 | 東海交通株式会社 |
| ジャパンマリンユナイテッド株式会社 | 洞海マリンシステムズ株式会社 |
| シュルンベルジェ株式会社 | 東京海上日動火災保険株式会社 |
| 株式会社昌新 | 東京製綱繊維ロープ株式会社 |
| 株式会社商船三井 | 株式会社東京チタニウム |
| 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 | 東北環境科学サービス株式会社 |
| 須賀工業株式会社 | 東洋建設株式会社 |
| 鈴与株式会社 | 株式会社東陽テクノカ |
| セイコーウオッチ株式会社 | 株式会社東和製作所 |
| 株式会社清友農材センター | トビー工業株式会社 |
| 株式会社関ヶ原製作所 | トーホーテック株式会社 |
| 石油開発サービス株式会社 | 新潟原動機株式会社 |
| 石油資源開発株式会社 | 西芝電機株式会社 |
| セコム株式会社 | 株式会社ニシヤマ |
| セナーアンドバーンズ株式会社 | 日油技研工業株式会社 |

- | | |
|-----------------|-------------------|
| 株式会社日産電機製作所 | 古河電気工業株式会社 |
| ニッスイマリン工業株式会社 | 古野電気株式会社 |
| 日東電工株式会社 | 株式会社ベッツ |
| 株式会社日放電子 | 松本徽章株式会社 |
| 日本アキュムレータ株式会社 | マリメックス・ジャパン株式会社 |
| 日本エヌ・ユー・エス株式会社 | 株式会社マリン・ワーク・ジャパン |
| 日本海工株式会社 | 株式会社マルトー |
| 日本海洋株式会社 | 三鈴マシナリー株式会社 |
| 日本海洋掘削株式会社 | 三井E&S造船株式会社 |
| 日本海洋計画株式会社 | 株式会社三井E&Sマシナリー |
| 日本海洋事業株式会社 | 三井住友海上火災保険株式会社 |
| 一般社団法人日本ガス協会 | 三菱重工業株式会社 |
| 日本軽金属株式会社 | 三菱スペース・ソフトウェア株式会社 |
| 日本サルヴェージ株式会社 | 三菱造船株式会社 |
| 日本水産株式会社 | 三菱電機株式会社 |
| 日本電気株式会社 | 三菱電機特機システム株式会社 |
| 日本ベイントマリン株式会社 | 株式会社森京介建築事務所 |
| 日本マントル・クエスト株式会社 | 八洲電機株式会社 |
| 日本無線株式会社 | ヤンマー株式会社 |
| 日本郵船株式会社 | 郵船商事株式会社 |
| 株式会社ハイドロシステム開発 | 郵船ナブテック株式会社 |
| 濱中製鎖工業株式会社 | 株式会社ユー・エス・イー |
| ハリマ化成株式会社 | 株式会社落雷抑制システムズ |
| 東日本タグボート株式会社 | 株式会社ラジアン |
| 日立造船株式会社 | 株式会社ロボット |
| 深田サルベージ建設株式会社 | |
| 株式会社フクロジャパン | |
| 株式会社フジクラ | |
| 富士ソフト株式会社 | |
| 富士通株式会社 | |
| 富士電機株式会社 | |
| 古河機械金属株式会社 | |

海と地球の情報誌 Blue Earth

第31巻 第1号 (通巻159号) 2019年3月発行

発行人 村田範之 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部
編集人 田村真正 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 (p8-17)、鈴木志乃 (p1-3, p20-27、裏表紙)
岡本典明/フックブライト (p4-7, p28-31)、坂元志歩 (p18-19)
デザイン 株式会社デザインコンピビア
(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。

マッピングデータ提出およびサインセレモニーの様子

Pick Up
JAMSTEC

「Team KUROSHIO」、 Shell Ocean Discovery XPRIZE決勝ラウンド終了

「Team KUROSHIO」は、海中ロボットなどを用いた超広域高速海底マッピングの実現を目標とする海底探査技術の国際コンペティション「Shell Ocean Discovery XPRIZE」に挑戦するために結成された。JAMSTEC、東京大学生産技術研究所、九州工業大学、海上・港湾・航空技術研究所、三井E&S造船、日本海洋事業、KDDI総合研究所、ヤマハ発動機の若手メンバーで構成されている。

このXPRIZEは2015年12月に開催が公表され、2016年6月に32チームが参加登録。2017年2月の技術提案書審査を通過した21チームのうち19チームが、2017年11月～2018年2月に行われた「Round 1 技術評価試験」に挑んだ。高速かつ広域での海底探査に必要な技術を有するかが審査され、「Team KUROSHIO」を含む9チームが通過。そして「Team KUROSHIO」は2018年12月9～19日に、決勝に当たる「Round 2 実海域競技」をギリシャのカラマタ沖で実施した。

決勝の課題は、水深4,000mの海域で24時間以内に最低250km²以上の海底地形を調査し、海底ターゲットの写真を10枚撮影、そして調査後48時間以内にマッピングデータを作成し提出すること。「Team KUROSHIO」は、12月19日22時50分（日本時間）にマッピングデータを提出し、競技の全日程を終了した。

共同代表・チームリーダーを務めるJAMSTECの中谷武志さんは、「難しい海況のなかではありましたが、現在でき得る最大限のパフォーマンスを発揮できたことを素直にうれしく思っています。これまで支えてくださった方々への感謝の気持ちでいっぱいです」というコメントを発表。結果は、2019年6月ごろに発表される予定だ。