

海と地球の情報誌

Blue Earth

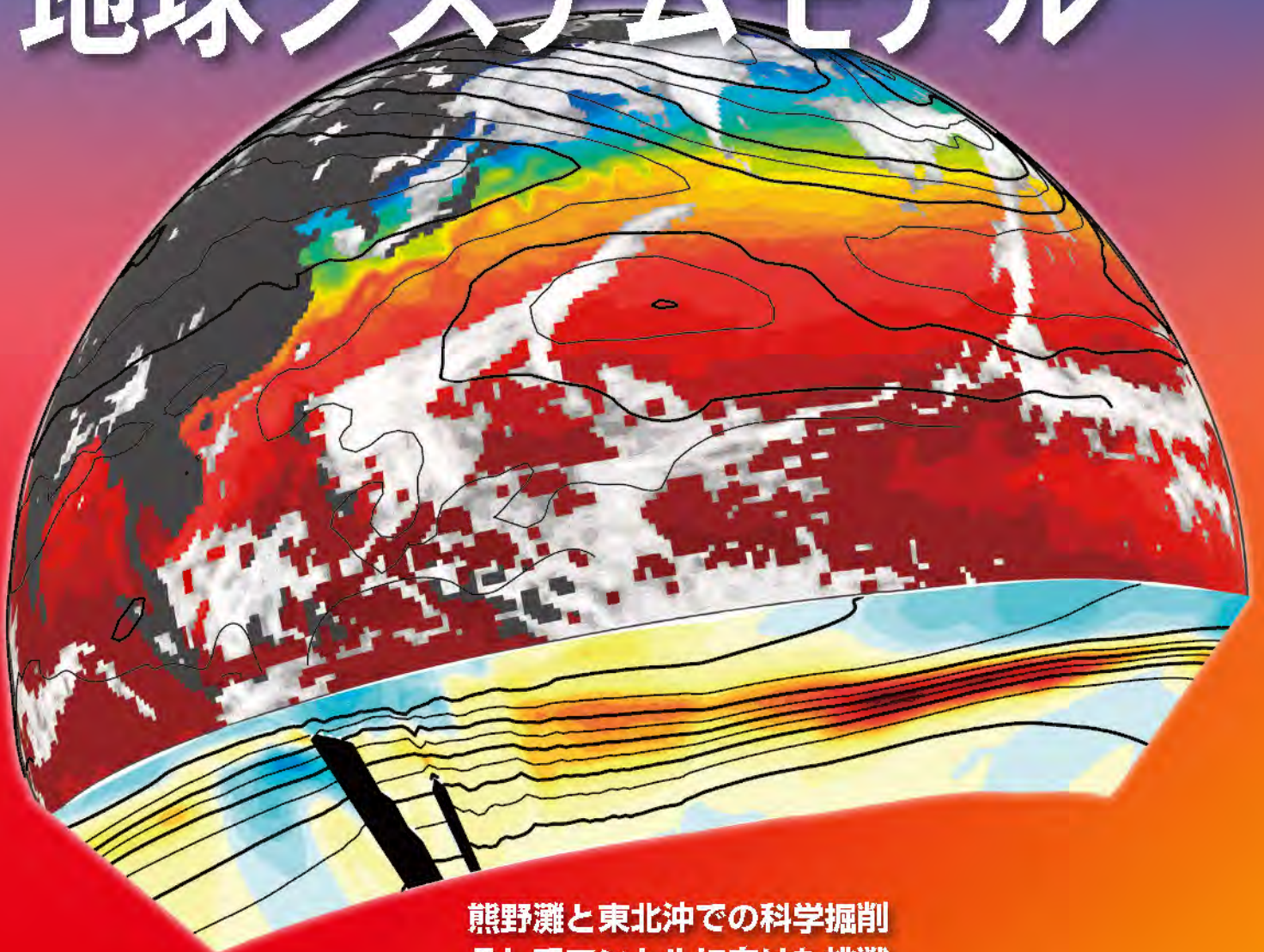
154

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2018年3月発行
隔月6回発行
第30巻 第2号
(通巻154号)



温暖化対策に貢献する 地球システムモデル



熊野灘と東北沖での科学掘削
そしてマントルに向けた挑戦

安定同位体比から食品産地や
地球の歴史を読み解く

初期生命は“混合栄養生物” として誕生した？

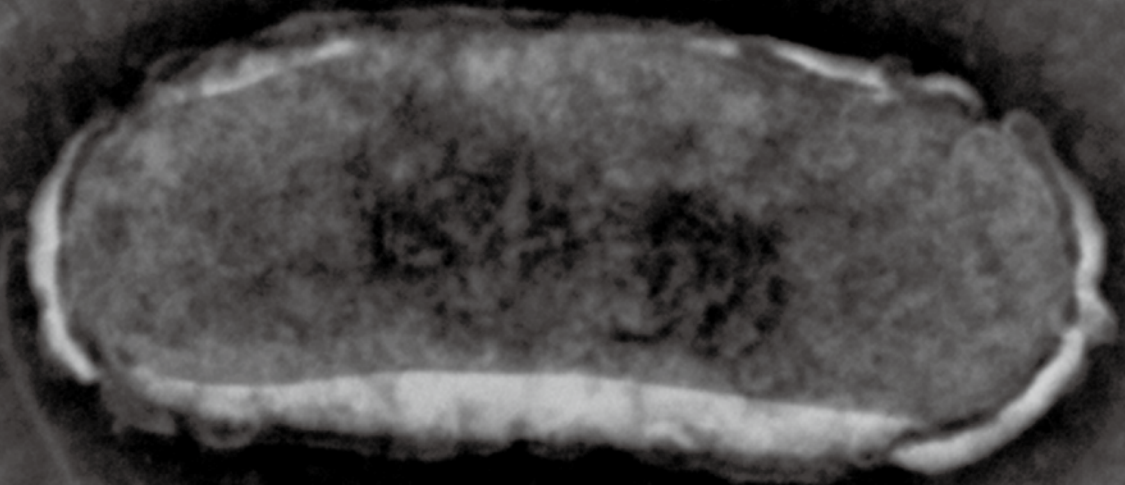
地球上に誕生した初期の生命は、自らの生命活動に不可欠な有機物を無機炭素から合成する“独立栄養生物”であったのか、あるいは非生物学的に生じた有機物を利用する“従属栄養生物”であったのか、長年にわたって議論が続いている。一方、アミノ酸などの生命の維持に不可欠な化合物を生成するTCA（クエン酸）回路という代謝機構は独立栄養と従属栄養、いずれの生命形態においても重要な仕組みであり、生命の誕生時にはすでに存在したと考えられている。

今回、海洋研究開発機構（JAMSTEC）海洋生命工学研究開発センター主任研究員の布浦拓郎さんは、北海道大学、京都大学、製品評価技術基盤機構と共同で、生命の起源に近いと考えられる系統群に属するバクテリアのTCA回路を解明することで、初期生命は“混合栄養生物”であった可能性が高いことを明らかにした。

その発見をもたらしたのが、南部沖縄トラフの熱水活動域から採取し、*Thermosulfidibacter takaii*と名付けられた好熱性水素酸化硫黄還元細菌である。従属栄養細菌は有機物を炭素源としてだけでなくエネルギー源としても利用するが、*T. takaii*は有機物のみでは増殖できない。有機物を使って増殖する際にも、水素を酸化し硫黄を還元する反応から獲得したエネルギーを必要とする混合栄養により増殖する。また、同様のエネルギーを用いて有機物を合成する独立栄養増殖も行う。この研究では、*T. takaii*のTCA回路やその反応に関わる酵素について詳しく調べた。その結果、*T. takaii*は、独立栄養条件でも混合栄養条件でもまったく同じ酵素群を用いたTCA回路で生命に必須な化合物を合成できること、そして独立栄養条件か混合栄養条件かによって、また取り込む有機物の種類によってTCA回路の反応の方向を切り替えていることが明らかになった。

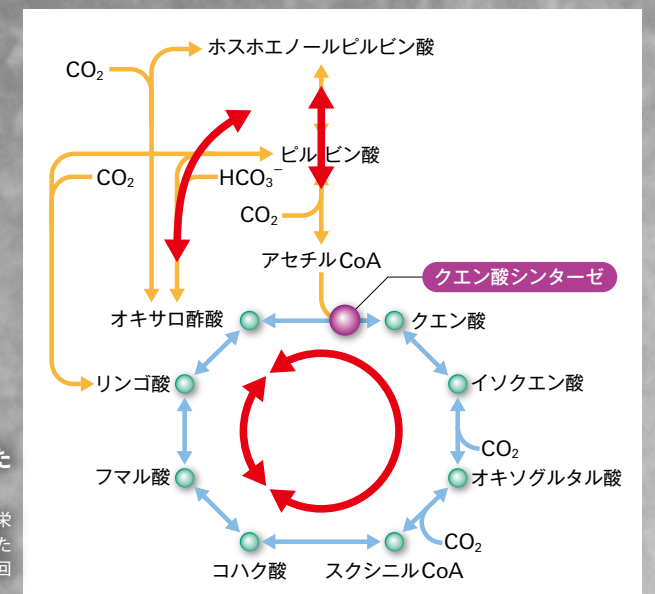
生命が誕生した原始地球において環境はダイナミックに変動していたであろう。最も祖先型のTCA回路は、*T. takaii*で観察されたように、変動する環境条件に適応して有機物の合成と取り込みを使い分けるという特性を備えていたと考えられる。このことはすなわち、初期生命は、無機物から化学エネルギーを獲得するとともに、その場に存在する無機炭素の量と有機物の種類・量に応じて代謝回路の方向を変化させる柔軟な混合栄養生物として誕生した可能性が高いと、研究グループでは考えている。

（取材協力：布浦拓郎 海洋生命工学研究開発センター 研究開発センター長代理・主任研究員）



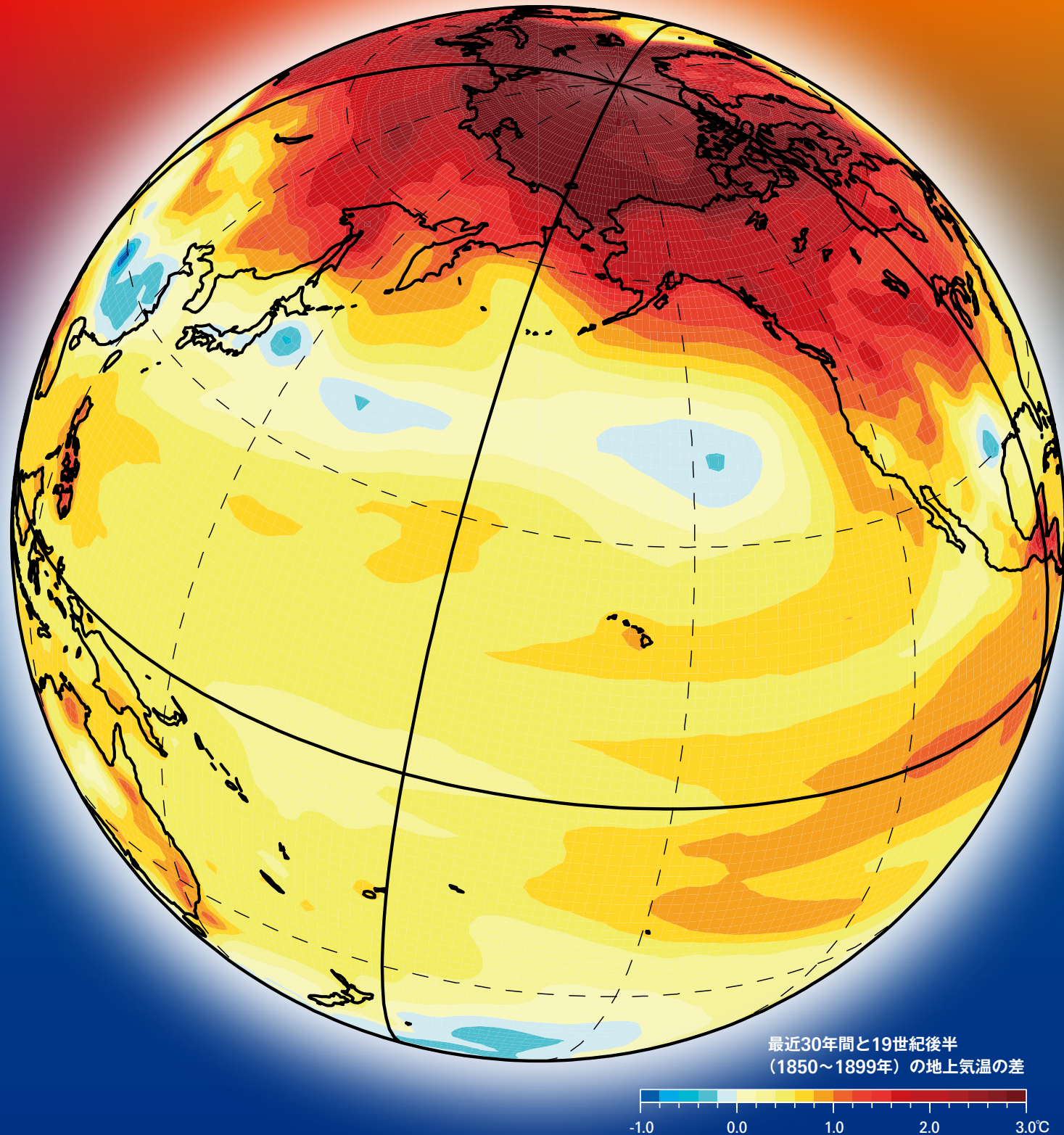
0.1μm

- 1 **Close Up**
初期生命は“混合栄養生物”
として誕生した？
- 2 **特集**
温暖化対策に貢献する
地球システムモデル
- 18 **Aquarium Gallery**
宮島水族館 みやじマリン
ウロコのない魚——タチウオ
- 20 **私がIODPで解きたい謎**
熊野灘と東北沖での科学掘削、
そしてマントルに向けた挑戦
難波康広
地球深部探査センター 技術部
技術第2グループ 主任技術研究員
- 24 **JAMSTEC生まれの種たち**
安定同位体比の精密測定を実現し
食品産地や地球の歴史を読み解く
小川奈々子
生物地球化学研究分野 主任技術研究員
- 28 **Marine Science Seminar**
海洋短波レーダーによる流況観測
津軽海峡における海洋観測の紹介
佐々木建一
むつ研究所 研究推進グループ グループリーダー代理
- 32 **BE Room**
Information
「Blue Earth」定期購読のご案内
- 裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**
南海トラフに3地点目の
長期孔内観測システムを設置

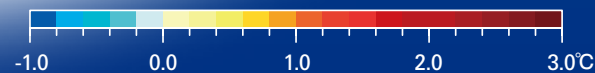


*T. takaii*から見いだされた
可逆的なクエン酸回路
 赤色の矢印は反応の方向を示す。独立栄養条件か混合栄養条件かによって、また取り込む有機物の種類によってTCA回路の反応の方向を切り替えている。

温暖化対策に貢献する 地球システムモデル



最近30年間と19世紀後半
(1850~1899年)の地上気温の差



2015年12月、国連の気候変動枠組み条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）において、パリ協定が採択された。パリ協定では、産業革命前からの気温上昇を2°Cより十分低く抑えるとともに、1.5°C上昇に抑える努力を継続する、という目標が掲げられた。これまでの観測によれば、1880~2012年の間に全球平均の地上気温は、すでに0.85°C上昇した。パリ協定の目標を実現するには、二酸化炭素（CO₂）など温室効果ガスの排出をどれくらい削減する必要があるのか。2°Cと1.5°Cの気温上昇では気候変動にどのような違いが出るのか。それらを明らかにして温暖化対策に貢献するため、海洋研究開発機構（JAMSTEC）統合的気候変動予測研究分野と気候モデル高度化研究プロジェクトチームでは、地球システムモデル「MIROC-ESM」の開発を続けている。

取材協力

統合的気候変動予測研究分野
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム

総監修 河宮未知生 分野長・プロジェクト長

羽島知洋 ユニットリーダー代理

鈴木立郎 技術研究員

齋藤冬樹 技術研究員

斉藤和之 主任研究員

野田 暁 ユニットリーダー

立入 郁 分野長代理・ユニットリーダー

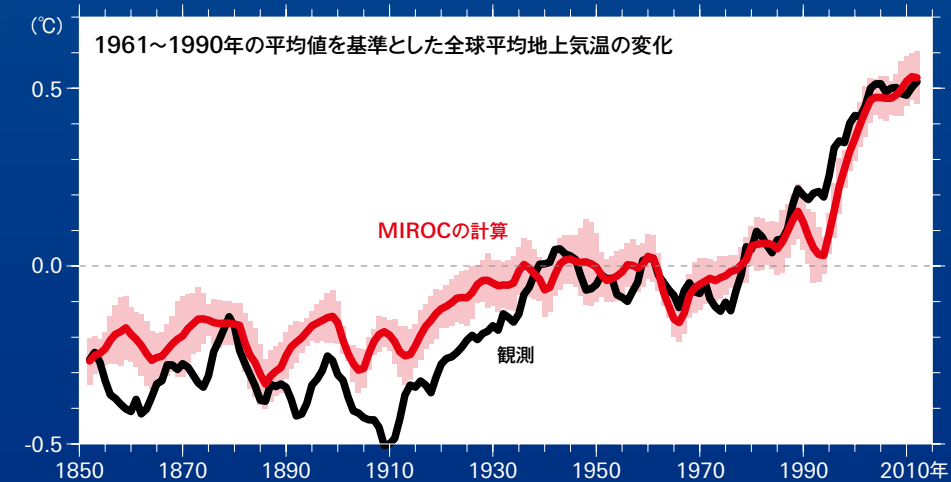
建部洋晶 ユニットリーダー

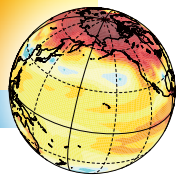
地球システムモデル「MIROC-ESM」のベースとなっている気候モデルによる19世紀半ば以降の気候シミュレーション

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）「第6次評価報告書（AR6）」に向けたMIROCの気候シミュレーション結果。

下のグラフの赤線は、MIROCで計算された全球平均地上気温変化で、観測（黒線）をよく再現している。これまでに蓄積されてきた観測データとの比較を通じて、気候モデルによる将来予測の妥当性が検討される。

左の図は最近30年間と19世紀後半（1850~1899年）の地上気温の差を示す。地球上の広い範囲で温暖化が進行している。





パリ協定後の温暖化研究

取材協力

河宮未知生

統合的気候変動予測研究分野 分野長
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
プロジェクト長

2013年、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、温暖化研究の最新成果をまとめた「第5次評価報告書（AR5）」を発表した。それを受けて2015年12月、国連の気候変動枠組み条約（UNFCCC）のCOP21において、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℃上昇を抑える努力を継続する、という目標を掲げたパリ協定が採択され、2016年11月に発効した。

「産業革命前からの気温上昇を1.5℃上昇を抑える努力を継続する、という目標はUNFCCCにおいて、温暖化による海面上昇で国土全体が水没する恐れのある南太平洋などの島しょ国の強い要望でパリ協定に盛り込まれました。温暖化研究ではこれまで、1.5℃を対象にした研究はほとんど行ってきませんでした。UNFCCCからの依頼を受けて、IPCCでは1.5℃に関する特別報告書を2018年に発表します。それに向けて、私たちを含め世界各国の研究グループが2℃と1.5℃に着目した研究を急いで進めているところです」。河宮未知生さんは、パリ協定後の温暖化研究の動向をそのように紹介する。

1.5℃に関する特別報告書には、①気温上昇を2℃と1.5℃に抑えるには人類のCO₂排出量をどれくらい削減する必要があるのか、②気温上昇2℃と1.5℃でどれくらい負の影響に差が出るのか、③気温上昇2℃と1.5℃でCO₂削減コストはどれくらい違うのか、という主に3つのテーマが盛り込まれる見込みだ。

2020年以降に発表される予定のIPCC「第6次評価報告書（AR6）」の前には、さらに、陸域の土地利用や生態系と、海洋と雪氷圏に関する2種類の特別報告書がIPCCから発表される予定だ。

現在、AR6に向けて世界各国の研究グループが独自の地球システムモデルや気候モデルによる計算を進めるとともに、それぞれのモデルの計算結果の比較検討を行い、より高い精度の予測ができるようにする取り組みが組織的に行われている。

「前回のAR5で発表された重要な知見は、複数の地球システムモデルのシミュレーション結果をまとめることで、人類が排出したCO₂積算量にほぼ比例して、地球の平均気温が上昇することを明らかにしたことです。私たちは、地球システムモデル

『MIROC-ESM』でAR5に貢献しました」

パリ協定では、それぞれの参加国が、できるだけ高いCO₂排出削減目標を立てて実行することになっている。日本は、2013年に比べて2030年に26%、2050年に80%という目標を掲げた。しかし、各国の削減目標を合計しても、気温上昇を2℃以下に抑えることは難しいという予測が出されている。

「ただし、気温上昇を2℃や1.5℃に抑えるのに、人類はあとどれくらいのCO₂排出を許されるのか、肝心なその予測値がモデルによってかなり幅があります。その幅を縮めるには、地球上のどこを観測して、モデルのどこを改善すべきか。MIROC-ESMの予測精度を向上させる研究を羽島知洋さんたちが進めています」

温暖化によって海面はどれくらい上昇するのか。AR5では、気温上昇2℃以下を念頭に人類が温室効果ガスの削減に取り組むシナリオRCP2.6の場合、2081～2100年の世界平均海面水位が1986～2005年を基準にして26～55cm上昇すると予測している。鈴木立郎さんたちは、大気の大気熱を海が吸収するモデルの改良を進めて海面水位の予測幅を縮めるとともに、2℃と1.5℃でどのように海面水位の上昇が異なるのかを予測する研究を進めている。

AR5の海面水位の予測では、想定されていない事態も懸念されている。グリーンランドや西南極の氷床の大規模な崩壊による海面上昇だ。「それらの氷床の崩壊が起きる閾値が、2℃と1.5℃の間にあるかもしれないと指摘されています。齋藤冬樹さんが氷床を予測するモデルの開発を続けています」と河宮さん。

そのような後戻りできない大規模な変化が起きる閾値を、「ティッピングポイント」と呼ぶ。夏季に北極海の海水が完全になくなる現象や、サンゴの絶滅も、気温上昇2℃と1.5℃の間にティッピングポイントがあるかもしれないと指摘されている。

気温上昇によりシベリアやアラスカの永久凍土が融けて大量のメタンが放出され、温暖化を加速させる事態も懸念されている。斎藤和之さんたちは、シベリアやアラスカの永久凍土で現地調査を進めている。

温暖化した地球ではどのような気象現象が起きるのか、それを予測することも温暖化対策には重要だ。野田 暁さんたちは、全球雲解像モデル「NICAM」により温暖化した地球における台風について詳しく調べている。

パリ協定では、2023年から参加各国の長期目標の達成状況を5年ごとにチェックする会合を開く計

画だ。「その会合に合わせて、過去5年間の気温上昇のうち自然要因と人為要因の割合はどれくらいか、今後の大気中のCO₂濃度の予測などをMIROC-ESMで導き出すことを目指しています。現在、各地の気温や降水量の3か月予報が出されていますが、MIROC-ESMによって10年規模の長期予測ができるようにして、猛暑や干ばつなどの対策に貢献することも私たちの大きな目標です。それらを実現するためのMIROC-ESMの改良を、建部洋晶さんが中心になって進めています」

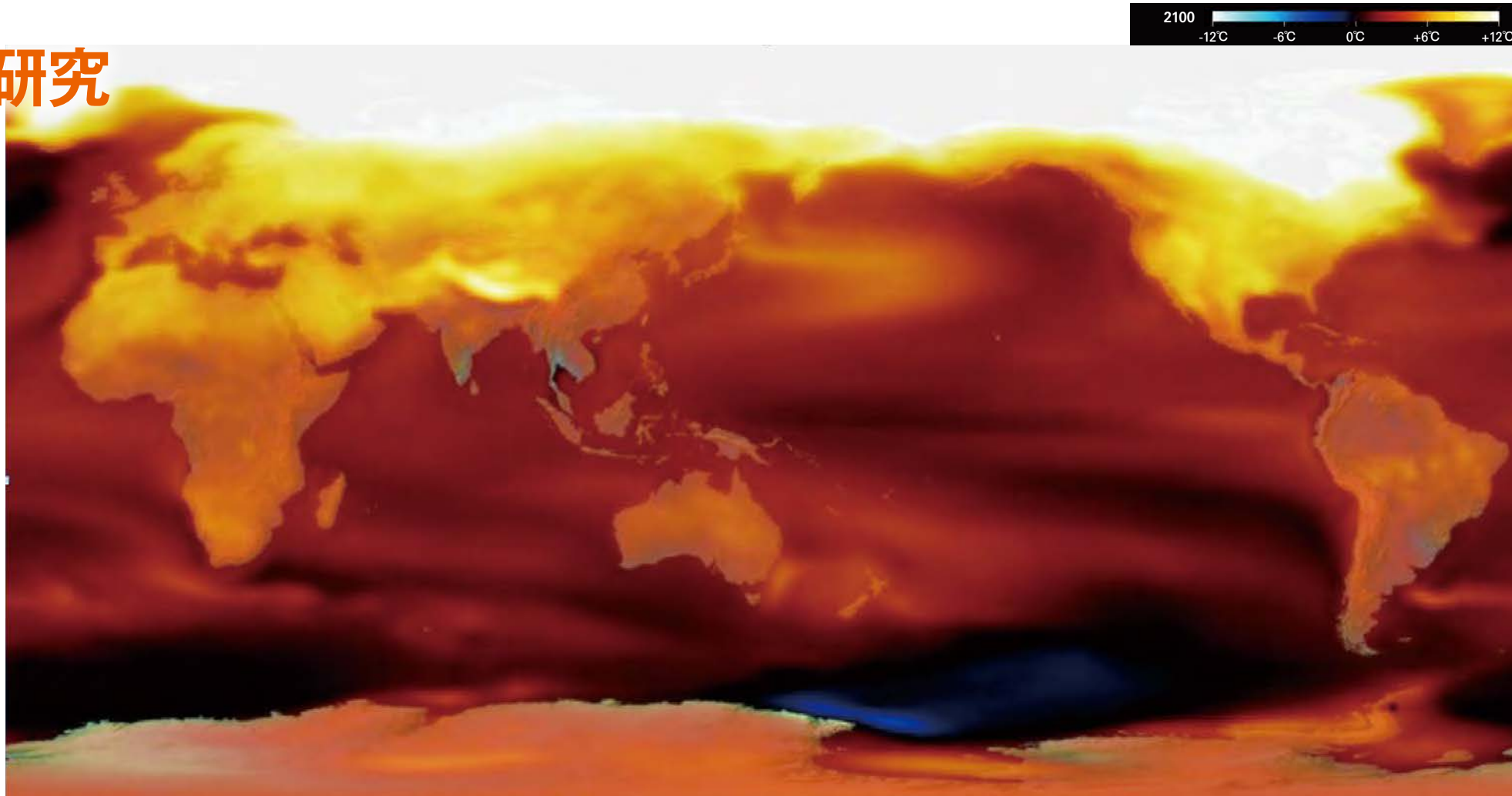
近年、何十年に1度の猛暑や豪雨といった異常気象の報道をよく耳にする。温暖化によって、そのような異常気象がどの地域でどれくらい増加するのかわ、MIROC-ESMなどを使って予測する研究も始まっている。

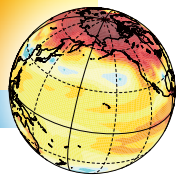
気温上昇を2℃や1.5℃に抑えるために、人類はCO₂排出をどのように削減していくべきか。そのような社会経済シナリオを描く研究も進められている。その社会経済シナリオと地球システムモデルを連携させて温暖化対策に必要な情報を生み出し、発信する取り組みを、立入 郁さんたちは進めている。

次から、JAMSTECのそれぞれの取り組みを具体的に紹介していこう。

MIROC-ESMのベースとなっている気候モデルによる2100年の地上気温変化の予測

1961～1990年の平均地上気温に比べて、何℃上昇するかを示している。RCP8.5（次ページ参照）に基づくシミュレーション。





人類のCO₂排出と温暖化の関係を つなぐ地球システムモデル

取材協力 羽島知洋

気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
地球システムモデル開発応用ユニット
ユニットリーダー代理

「現在、人類の活動により毎年、約10PgC (1PgCは炭素換算で1000兆グラム=10億トン) という量のCO₂が排出されています。そのうち化石燃料の使用によるものが約9PgC、森林伐採後の木材の燃焼や腐敗など土地利用変化によるものが約1PgCと推定されています」と羽島知洋さんは紹介する。

大気・海洋・陸域では、CO₂やメタンなどのかたちで炭素をやりとりする炭素循環が起きている。人類の活動により毎年排出される10PgCの炭素のうち、約3PgCが陸域に、約2.4PgCが海洋に吸収され、残りの4.7PgCが毎年、大気に蓄積されていく。こうして大気中のCO₂濃度が増加することが主因となり、地球温暖化が進行している。

気温上昇1.5ないし2℃以内を実現するには、人類のCO₂排出をどこまで抑える必要があるのか。それ

を知るには、温暖化が進んだ地球において、人類が排出したCO₂を陸や海がどれだけ吸収するかを予測する必要があります。

気候モデルでは、大気中のCO₂濃度をシナリオとして与えて、気温や海水温の変化などを予測する。海水も大気も流体なので、気候モデルは流体力学の方程式を基軸とする物理モデルのコンピュータ・プログラムだ。JAMSTECではほかの研究機関と協力して気候モデル「MIROC」の開発を続けてきた。

「ただし、気候モデルだけでは気候-炭素循環の全容を再現できません。特に炭素循環は、大気中のCO₂が海へ溶け込む化学的な過程や、光合成によるCO₂吸収といった生物活動が絡むからです」

物理モデルである気候モデルに、生物モデルや化学モデルを加えて炭素循環の全容を再現し、大気中のCO₂濃度も予測できるようにしたものが、地球システムモデルだ。「地球システムモデルは、人類のCO₂排出と温暖化の関係を つなぐことができるのです」と羽島さんは説明する。

現在、気候モデルは世界で30~40種類が開発されている。一方、21世紀に入って各国で開発が進められた地球システムモデルは現在、十数種類ある。JAMSTECは気候モデル「MIROC」に生物モデルと化学モデルを加えた地球システムモデル「MIROC-ESM」の開発を進めてきた。

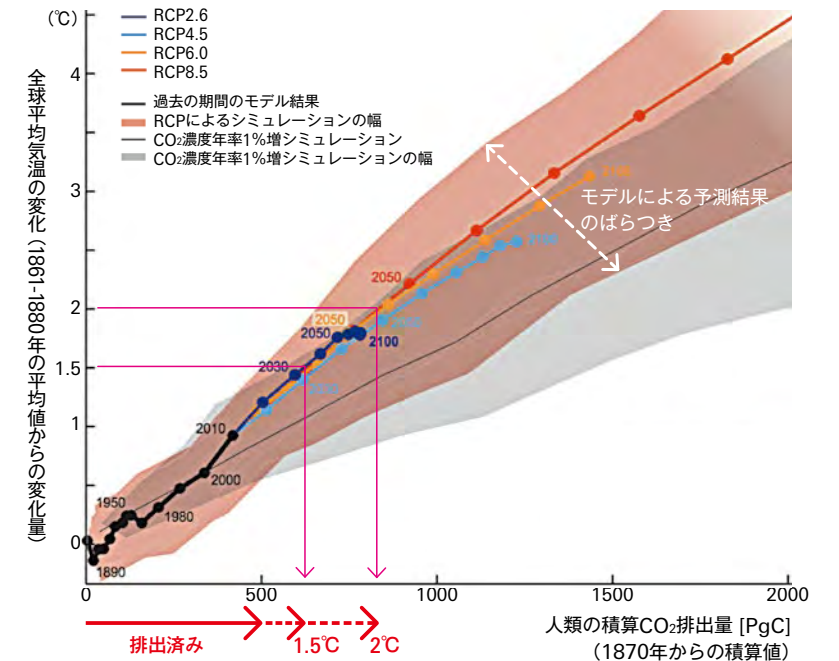
AR5には、各国の地球システムモデルの計算結果を、人類の積算CO₂排出量と気温上昇の関係で示し

た図が掲載されている。先に河宮さんが紹介したように、その図は、人類が排出したCO₂の積算量にほぼ比例して地球の平均気温が上昇することを示している。

「その図では、気温上昇を2℃以下にするには、人類の積算CO₂排出量を800PgCほどに抑える必要があります。すでに約500PgCを排出済みであることが示されています。つまり、人類が今後排出できるCO₂は残りの約300PgCという予測です」

ただし、使用する地球システムモデルによってその予測値にばらつきが生じる。温暖化対策を進める上で、そのばらつきの幅を縮めることが不可欠だ。「何が原因でこのようなばらつきが生じているのか、そしてモデルをどう改善したらよいかについてさまざまな研究が世界で行われ、私たちも取り組んできました。その結果、大気中のCO₂濃度が増えたとき植物の光合成がどれくらい増大するのかという『CO₂の施肥効果』が、モデルごとに大きく違っていました。最近、大気中のCO₂濃度の観測データとの比較から、このCO₂の施肥効果の度合いについて急速に理解が進みました。次のAR6では、人類の積算CO₂排出量と気温上昇の関係におけるばらつき幅が、半分程度にまで減ることを期待しています」と羽島さんはいふ。

大気中のCO₂が増えても、栄養分である窒素が不足していれば植物の光合成とそのCO₂吸収は抑えら



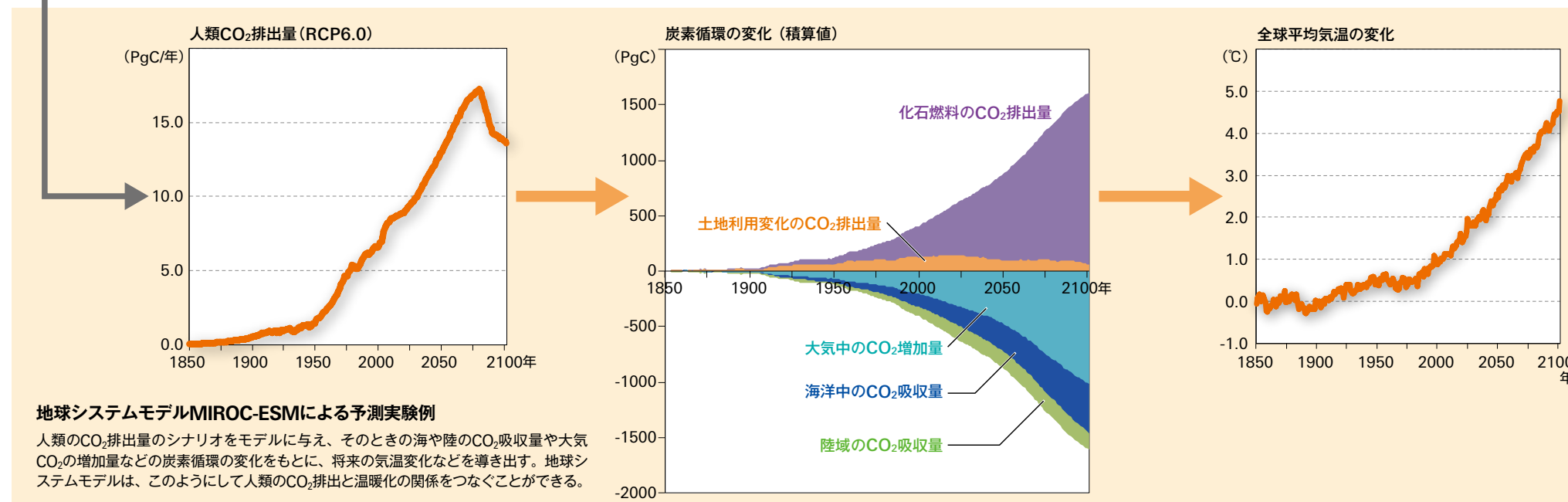
人類の積算CO₂排出量と全球平均気温との関係 (AR5)

4種類のRCPシナリオについて複数の地球システムモデルが予測実験を行った結果を、人為CO₂排出量(積算値)と全球平均気温の観点でまとめたもの。色線は、CO₂に加えさまざまな温室効果ガスなども考慮に入れたRCPシナリオ実験。細黒線は大気CO₂の増加だけを考慮した実験。

RCP (代表的濃度経路) シナリオごとの 全球平均気温の予測 (AR5)

基準年は1986~2005年の全球平均気温。これまでの観測によれば、1880~2012年の間に全球平均気温はすでに0.85℃上昇した。その分を考慮して数値を読み取る必要がある。

シナリオ	2081~2100年	
	平均	可能性の高い範囲
RCP8.5	3.7℃	2.6~4.8℃
RCP6.0	2.2℃	1.4~3.1℃
RCP4.5	1.8℃	1.1~2.6℃
RCP2.6	1.0℃	0.3~1.7℃



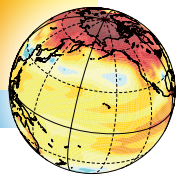
地球システムモデルMIROC-ESMによる予測実験例

人類のCO₂排出量のシナリオをモデルに与え、そのときの海や陸のCO₂吸収量や大気CO₂の増加量などの炭素循環の変化をもとに、将来の気温変化などを導き出す。地球システムモデルは、このようにして人類のCO₂排出と温暖化の関係を つなぐことができる。

れてしまう。陸域の炭素循環をより適切に再現するには、陸域生態系や農地での窒素循環、そして窒素肥料などの影響も予測で考慮する必要がある。「AR5では、1~2種類の地球システムモデルにしか窒素循環が入っていませんでした。私たちの地球システムモデルにも、AR5後に窒素循環を組み込みました。予測結果のばらつきに深く関わっているからです」

人類が排出している温室効果ガスの総量を二酸化炭素換算量で比較すると、二酸化炭素は7割以上と大部分を占めるが、ほかにも家畜や水田から出るメタンが約16%、化石燃料の使用などで排出される一酸化二窒素が6%ほどある。単位質量あたりで見ると、メタンは二酸化炭素の約30倍、一酸化二窒素は約300倍の温室効果がある(100年換算)。

「CO₂は大気中で極めて安定な物質ですが、メタンは約12年、一酸化二窒素は約120年の寿命を持ちます。メタンは比較的寿命が短いので、家畜や水田、汚泥などから出るメタンの排出削減は効果が出やすく、今後の温暖化対策のポイントの1つになるでしょう。私たちは、メタンや一酸化二窒素の循環も地球システムモデルに組み込む取り組みを開始し、より包括的な温暖化予測を行い、幅広く温暖化対策に貢献することを目指しています」



温暖化は止まっても海面水位は上昇し続ける

取材協力 鈴木立郎

統合的気候変動予測研究分野
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
基盤的気候モデル開発応用ユニット
技術研究員

温暖化に伴う海面上昇の被害を受けるのは、海抜の低い島しょ国だけではない。世界の大都市の多くが沿岸地域にある。それらの大都市において、海面上昇により洪水や高潮による被害が拡大する恐れがある。

「地球平均の海面上昇は20世紀末から、加速しているようです。ただし、その上昇幅の確度は高くありません。人工衛星により地球全体の海面上昇が観測できるようになったのは、1993年以降です。それ以前は、世界各地の潮位計の観測から推計した値しかないので」と鈴木立郎さんは説明する。

温暖化に伴う地球平均の海面上昇の要因には、大気の大気熱が海に吸収することによる熱膨張、山地の氷河や、グリーンランドや南極の氷床が融けて海に流れ込むこと、さらに、陸の湖や河川からの流入量の増加などがある。「つまり海水の量の増加と熱膨張によって海面は上昇するのです」

海面水位や海水の量は人工衛星により、海水温は国際的な協力の枠組みのもとJAMSTECも展開している自動観測ロボット「アルゴフロート」や海洋調査船などにより、観測されている。「近年は、地球平均で年3.2mmのペースで海面上昇が続き、その要因を見ると、熱膨張は4割、氷河・氷床の融解は5割と推計されています。熱膨張に比べて

氷河・氷床の融解が進んでいるようです」

ただし、世界各地における海面水位の変化は一律ではない。地殻変動による海底面の隆起や沈降、風や海流の力学的応答によっても海面水位は変わる。「地球全体で見る温暖化に伴う海面水位変化の地域差は、大気からの熱吸収の違いによるものが大きく、太平洋よりも北大西洋、特に北米東部沿岸で海面水位が大きく上昇すると予測されています」。温暖化による海面上昇は、南太平洋などの



ニューヨークのマンハッタン島
©iStock.com/FilippoBacci

島々よりもニューヨークなどの方が大きいと予測されるのだ。

現在の気候モデルで評価できる世界各地の海面上昇は熱膨張と海洋の力学応答によるもので、そこには氷床モデルは組み込まれていない。鈴木さんたちは最新のMIROCにより、シナリオRCP2.6とRCP4.5における日本周辺の海面上昇を予測した。「差が明確に表れるのは2100年以降です。2100年までに大気温暖化を止めたとしても、それ以降も海面上昇は続くのです。それは大気に比べて海は暖まるのに時間がかかるからです。もう一つのポイントは、RCP4.5に比べて人類がCO₂排出を低く抑えるRCP2.6の方が、海面水位上昇の絶対値はもちろん、上昇のペースが遅いため、洪水や高潮などの対策を講じる時間的な余裕があることです。気温上昇を1.5℃と2℃に抑えた場合の違いも、同様の傾向になるはず」

AR5では、1986～2005年を基準にした2081～2100年の世界平均の海面水位は、同じRCP2.6でも気候モデルによって26～55cmと大きな差が出た。「なぜ、その差が生じるのか。AR6へ向けて気候モデル間の違いを比較する研究を進めています」

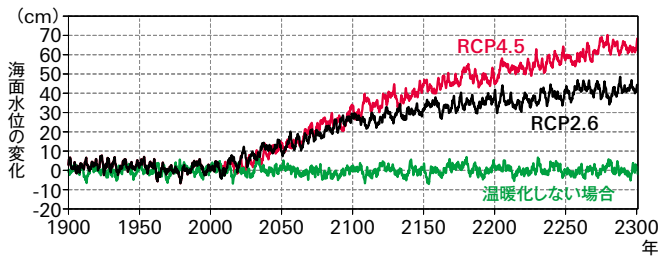
海が熱を蓄える容量は大気の1,000倍ほど大きい。温暖化に伴って地球に蓄えられた熱のうち、9

割以上は海に吸収されたと推計されている。「私は、海による大気熱の吸収に注目して、MIROCを用いた研究を進めてきました。MIROCで大気中のCO₂濃度を倍増させる温暖化実験を行うと、その熱の多くがグリーンランド沖の北大西洋や南極海で吸収され、海洋全体に広がっていきます。ほかの気候モデルでも同様な結果になることが報告されていますが、北大西洋や南極海における熱の吸収のされ方が気候モデルごとに異なることが、気温上昇や海面水位の予測にばらつきが出る大きな原因の一つである可能性があります。その差を縮めるために、どのような観測データが必要か、モデルのどこを改良すべきかを探っているところです」

温暖化により海が熱を吸収して熱膨張する速度よりも、氷河や氷床が融ける速度は遅く、海面水位の上昇は数千年後まで続く。「気温上昇1℃につき、数千年後までに2.3mの海面上昇が起きるといふ古気候の研究があります」と鈴木さんは紹介する。

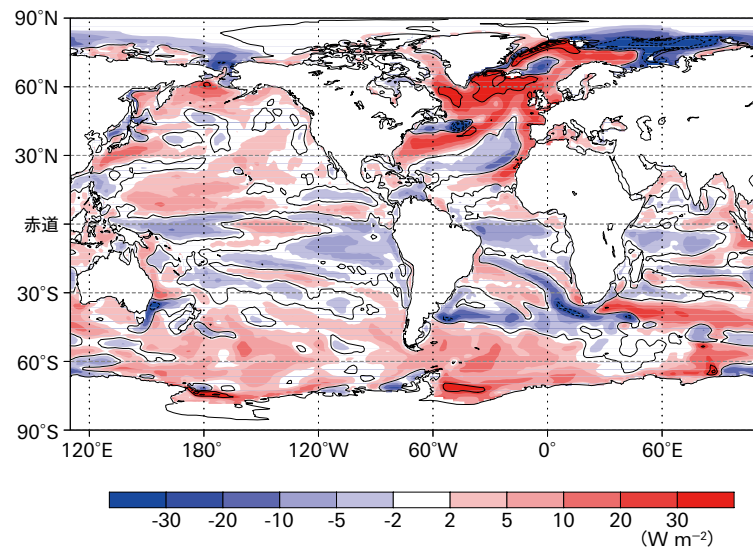
気温上昇1.5℃と2℃の差は、数千年後までに世界平均の海面水位に1m程度の違いを生み出すと予測される。ただしその予測には、グリーンランドや西南極の氷床が大規模に崩壊することは想定されていない。1.5℃から2℃の間に氷床の大崩壊が起きるティッピングポイントはあるのだろうか――

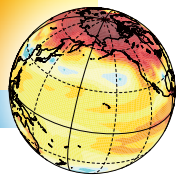
MIROCによる日本周辺の海面水位の変化の予測
(力学的応答と熱膨張分)



MIROCで計算した温暖化した地球における海の熱吸収分布

大気中のCO₂濃度を1年につき1%の割合で増加させる温暖化実験を行った。CO₂濃度がおよそ2倍になったとき(61年目から80年目の時間平均値)の海洋の熱吸収分布によると、温暖化による大気熱の多くがグリーンランド沖の北大西洋や南極海で吸収される。





グリーンランドや西南極の氷床崩壊が始まっている？

取材協力 齋藤冬樹

統合的気候変動予測研究分野
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
地球システムモデル開発応用ユニット
北極環境変動総合研究センター
北極域気候変動予測研究ユニット
技術研究員

「グリーンランドや西南極の氷床がすべて融ければ、地球平均の海面水位をそれぞれ6~7mおよび5mほど上昇させます」と齋藤冬樹さんはいう。

地球温暖化による気温上昇がある閾値を超えると、グリーンランドや西南極の氷床の大崩壊が進み、後戻りできないと考えられている。「その閾値(ティッピングポイント)は、現地の気温でいえば、グリーンランドでは、産業革命前に比べて約0~3℃の気温上昇、西南極では約0~6℃の間にあると、多くの研究者が予測しています。約0℃からというのは、すでにティッピングポイントを超えた、と考えている研究者もいるからです」

なぜティッピングポイントが想定されているのか。「その仕組みは、グリーンランドと西南極で異なります」と齋藤さんは解説する。

グリーンランドでは大気熱で氷床が融けていく効果が大きい。グリーンランドの氷床は、おわんを逆さまにしたようなドーム形で、標高が3,000mほどだ。氷は0℃付近で融け始め、気温上昇に比例し

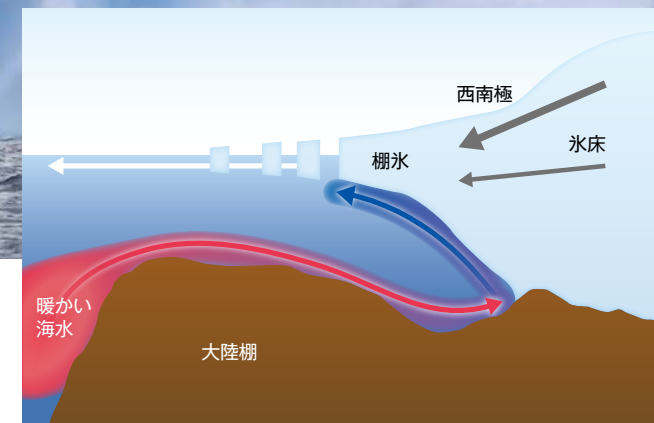
て融ける量は増えていく。標高の高い地点では気温が低く氷は融けない。氷床が融けるのはドーム縁辺部の標高が低く気温が高い場所だ。下部が融けて標高が低くなるほど、氷が融ける標高に位置する氷床の面積が増える、という正のフィードバックが働く。その正のフィードバックで、氷床の崩壊が後戻りできなくなる閾値が、0~3℃の気温上昇だと考えられているのだ。温暖化は高緯度地域で強く現れる。グリーンランドで0~3℃は、地球平均では0~2℃の気温上昇に相当する。

「一方、西南極は気温がとても低いので、数℃の上昇でも氷の融解はそれほど増えません。西南極の氷床の崩壊は、海に張り出した棚氷の下へ暖かい海水が流れ込むことで起きる可能性があります。沿岸の棚氷がなくなると、それにせき止められていた陸側の氷床も海へ流れ込み、崩壊が起きると考えられるのです。そのティッピングポイントは、南極付近の気温でいえば0~6℃の間にあると多くの研究者が予測しています。それは地球平均でいえば、0~4.5℃の気温上昇に相当するだろう。

ティッピングポイントを超えても、グリーンランドや西南極の氷床がすべて融けるには、1,000年あるいはそれ以上の時間がかかると予測されている。「現在では、世界で30種類ほどグリーンランドの氷

壊が始まっている？

南極海の海水
2012~13年、「みらい」による西部太平洋・南大洋の観測航海より。
撮影：土居知将/JAMSTEC地球環境観測研究開発センター



床モデルが開発されていますが、ティッピングポイントや融解の進行速度の予測には、大きなばらつきがあります」

地球平均の気温上昇についてある数値を与えたとしても、グリーンランドの気温が何℃上昇するかは気候モデルによってばらつきがある。「グリーンランドにおける気温の数値を与えたとしても、どれだけ氷床が融けるかは、日射量や氷による光の反射率、風速、湿度など複数の条件があり、氷床モデルによって差があります。また、氷が融ける量を与えたとしても、氷床がどのように動いて海へ流れ込むかの予測もモデルによって異なります。私は氷床の動きを予測するモデルの開発を進めてきました」

西南極の氷床では、温暖化によって棚氷の下へどれだけ暖かい海水が流れ込むかを予測する必要がある。しかし、それは広大な西南極沿岸域の海底地形によっても異なる。

JAMSTECでは、海洋地球研究船「みらい」による南太平洋や南極海の観測を定期的に続けてきた。「私たちモデル研究の側では現在、AR6に向けて氷床モデル間の比較を行い、ばらつきの原因を探る研究を進めています。それにより、ばらつきの幅を縮めるには、どのような観測データが必要かを明らかにしたいと思います」

ただし、現在の観測データだけでは温暖化したときの氷床の融解を予測することは難しい。「そこで、

現在と同じくらい温暖だった約12万年前に、グリーンランドや西南極の氷床がどれくらい融けたのかという古気候のデータと照合する必要があります」

グリーンランドや西南極の氷床の崩壊は、海面水位だけでなく、地球全体の海流や気候に大変動をもたらす可能性がある。グリーンランド沖や南極海では、大気に冷やされて低温で塩分が高い重い海水が深層まで沈み、深海を1,000年以上かけて巡る深層循環が起きている。ところが、氷床が融けた淡水が大量に海に流れ込むと、塩分が下がり表層の海水が軽くなって沈み込みが弱まり深層循環が停滞する。すると暖流が弱くなり、暖流の影響で比較的温暖な気候だった北米や欧州で急激な寒冷化が起きたことが古気候の研究から分かってきた。

沈み込みとともに、大気から海表層に吸収されたCO₂も深海へ運ばれる。人類が排出したCO₂の海の吸収分のうち、4割を南太平洋が吸収している。南極海での沈み込みが弱まると、その海域でのCO₂吸収力も弱まる可能性がある。

「氷床が融けて海へ淡水が流れ込んだ後、沈み込みがどう変動するかを再現できるモデルの開発も、今後進めたいと思います」と齋藤さんは展望を語る。

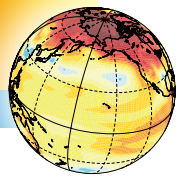
西南極の氷床崩壊の仕組み

棚氷によって陸側の氷床はせき止められている。棚氷の下に暖かい海水が流れ込み、棚氷が薄くなって海へ流れ出すと、せき止められていた氷床も海へ流れ出して融ける可能性がある。



グリーンランドのイリサット氷河の河口付近

撮影：齋藤冬樹



永久凍土からのメタン放出の“想定外”を探る

シベリアのレナ川のそばでエドマ層が陥没して池ができている。
撮影：斉藤和之

取材協力 斉藤和之

統合的気候変動予測研究分野
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
地球システムモデル開発応用ユニット
主任研究員

北半球の高緯度地域にあるシベリアやアラスカ、カナダには、永久凍土が広く分布している。地球温暖化の影響は高緯度地域で強く表れる。そのため永久凍土が融けて、大量のメタンやCO₂が大気中に放出される可能性がある。

夏に気温が高くなると、永久凍土の表層が融ける。その層を「活動層」と呼ぶ。活動層では微生物などが土壌中の有機物を分解してメタンやCO₂を生成し、それが大気中に放出される。それらの温室効果ガスが温暖化を促進して、夏に融ける活動層が深くなり、さらに大量の温室効果ガスが放出されるようになる。そのような正のフィードバックにより、大量のメタンやCO₂が永久凍土から放出されると考えられている。

このような永久凍土からのメタンやCO₂の大気への放出過程を地球システムモデルに組み込む研究が、10年ほど前から進められてきた。2013年に発表されたAR5では、産業革命後から2100年までの積算で、50~500PgCの炭素がメタンやCO₂として大気中に放出されると予測されている。これは、地球の平均気温を0.1~1°C上昇させる量に相当する。

大気の熱が地中へ伝わり、凍土が融けて微生物が有機物を分解したメタンやCO₂が大気中へ放出される経路は、比較的ゆっくりと永久凍土の全域で進行する。一方、限られた地域ではあるが凍土中に氷の塊をたくさん含んだ層があり、その氷が融けて、氷に閉じ込められていたメタンやCO₂が大気中へ一気に

に放出される経路があることが分かってきた。それは「エドマ層」と呼ばれている。

「エドマ層が大気の熱、海の波や河川による浸食、火災などによって崩壊して氷塊が融けるのです。それにより放出されるメタンやCO₂は、現在の温暖化予測では想定に入っていません」。そう語る斉藤和之さんは、国立環境研究所や北見工業大学、アラスカ大学と共に、その想定外の現象の調査を2016年から続けている。エドマ層全体からどれくらいのメタンやCO₂が放出され、地球温暖化にどれくらい影響を与えるのかを調べるのが目的だ。

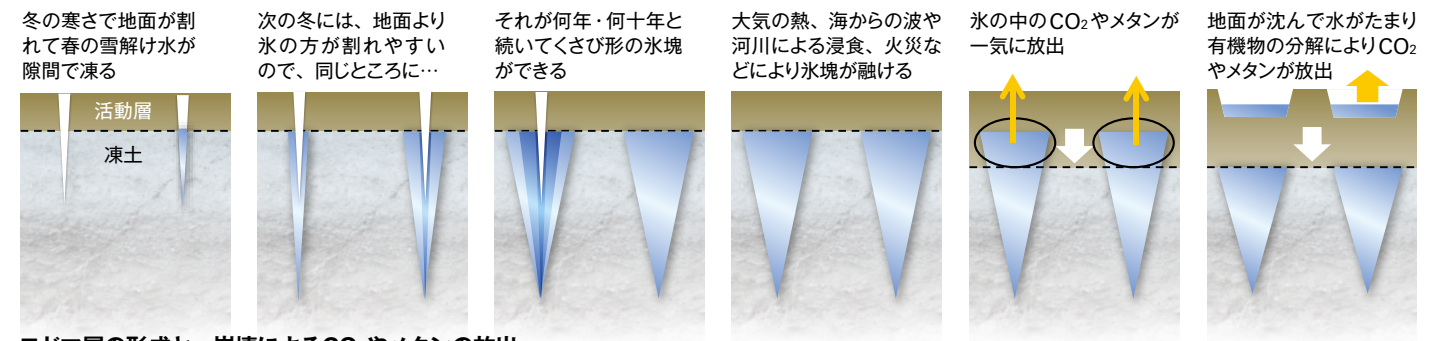
「それを知るには、1カ所のエドマ層からどれくらいメタンやCO₂が放出されるのか、そしてそのようなエドマ層がどれくらい存在しているのかを知る必要があります」

エドマ層の崩壊が始まらない限り、人工衛星や空からは、どこにエドマ層が存在しているのかは分からない。斉藤さんたちはシベリアやアラスカで現地調査を行い、地中の氷塊のサンプルを採取している。「そのサンプルの分析から推定すると、エドマ層の氷に含まれているメタンやCO₂の放出量は、これまで研究が進められてきた活動層からの放出量の1%ほどと推定されます」

ただし、エドマ層からのメタンやCO₂の放出には、もっとゆっくり進む経路もある。地中の氷塊が融けると、地面が大きく陥没して、そこに水がたまり池や湖ができる。その池や湖で微生物による有機物の分解が進みメタンやCO₂が放出されるのだ。「その量の推計も進めているところですが、氷から一気に放出される量よりも1桁多そうです」

永久凍土には、想定外のメタンの放出経路がさらに2種類ある、と斉藤さんは指摘する。「1つは永久凍土の地下にあるメタンハイドレートの崩壊です。シベリアの北極海に面したヤマル半島で2014年、直径20~30mほどの穴が見つかり、日本でも報道されました。この穴は、地下のメタンハイドレートが崩壊してできたという説があります」

メタンハイドレートは、低温・高圧の環境でメタンが氷の分子に閉じ込められてできる。「温暖化によって大気の熱がより多く地中へ伝わったり水が染み込んだりして温度や圧力が変化すると、メタンハイドレートが融けてメタンが放出されます。ただし、資源であるメタンハイドレートがシベリアにどれだけ分布しているのかを、ロシア国外の研究者が調べるのは難しい状況です」

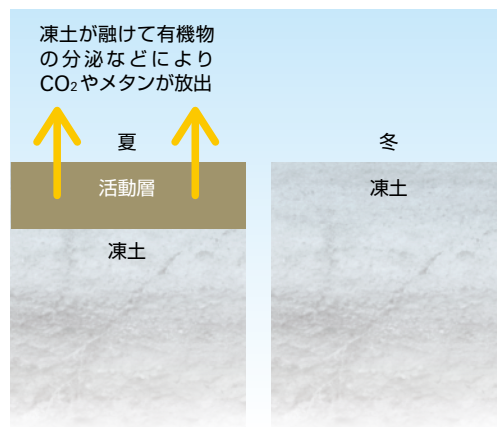


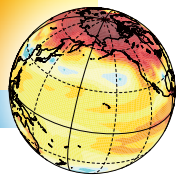
エドマ層の形成と、崩壊によるCO₂やメタンの放出
永久凍土の限られた地域にあるエドマ層でCO₂やメタンの放出が起きている。

もう1つの経路は、海底の永久凍土からのメタンやCO₂の放出だ。2万年前ごろの氷期には、海面水位が現在よりも低かった。当時の永久凍土の一部は現在、北極海などの海底となっている。それが海底永久凍土だ。「近年、北極海の海氷が少なくなること、海が太陽光を吸収しやすくなり海水温が上昇する傾向にあります。それにより海底永久凍土が融けて、そこからメタンやCO₂が放出されています。しかしその実態の解明も国外からはなかなか手が出せない状態です」

大気中にはCO₂などとして830PgCの炭素がある。その倍に相当する1,500PgCの炭素が有機物として永久凍土に含まれていると推計されている。地中の有機物は湿地ではメタンに、乾燥地ではCO₂に分解されやすい傾向がある。メタンはCO₂の約30倍の温室効果を持つので、どちらのかたちで放出される量が多くなるかは、温暖化予測にとって重要だ。「どちらが多いかは専門家の間でも議論が分かれています」
温暖化の行方にとって、永久凍土の動向が大きな鍵となる。

永久凍土の活動層からのCO₂やメタンの放出
温暖化により永久凍土の全域でCO₂やメタンの放出が進行している。





全球雲解像モデルNICAMで温暖化した地球の台風の構造を分析する

取材協力 野田 暁

気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
全球雲解像モデル開発応用ユニット
ユニットリーダー

温暖化した地球では、最大風速が秒速70mを超えるスーパー台風などの強い台風が増えると予測されている。そのような予測は防災にとって重要だ。しかし、MIROCなどの気候モデルでは、地球大気を水平方向に約100km四方の粗い解像度に区切って計算しているため、台風の発生過程や構造を詳しく再現することはできない。「MIROCなどでは、ある気温や水蒸気、風などの条件では、こういう雲が発達するだろうという経験則に基づく方法（パラメタリゼーション）で雲を計算しています」と野田 暁さんは説明する。

野田さんたちは、全球雲解像モデル「NICAM」の開発を進めてきた。NICAMは大気を水平方向に1辺が14km～800mの三角形の格子に区切って計算する。「NICAMでは高い解像度で、大気の運動や雲の成長、雲種同士の相互作用などを物理法則に基づいて計算することが、従来の気候モデルとの大きな違いです」

NICAMは、現在の地球で発生している台風の、発生から消滅までを高い精度で予測・再現することができる。「NICAMでは、詳細な雲の分布などについて人工衛星のデータと直接比較して雲の物理モデルを改良していくことができます」

従来の気候モデルによって計算された、温暖化した地球の海面水温の分布などをNICAMに与えることで、温暖化によりどのような台風が増えるのかを予測することができる。「現在の地球大気のデータと温暖化した気候の海面水温の推定値を与えることで、温暖化した地球の大気状態を計算しています」

NICAMの計算によると、温暖化した地球では台風の発生数は22.4%減少するが、強い台風の数も6.6%増加し、台風に伴う降水量も11.8%増加した。これは、従来の気候モデルを用いた先行研究が示す結果と、変化の傾向は同じだ。さらにNICAMは、台風の構造がどのように変化するかを明らかにした。「同じ中心気圧の台風でも、強風域（ここでは風速が秒速12m以上）が10.9%拡大することが分かったのです。それは、温暖化による海面水温の上昇に伴い水蒸気が増えて、台風の中心の外周部にできる壁雲の高さが高くなることによります」

温暖化した地球における雲のつき方は、温暖化

の行方を左右する。雲は太陽光を遮り温暖化を抑える「日傘効果」と、地表の熱を閉じ込めて温暖化を促進する「温室効果」の両方を併せ持つ。雲の高度や厚さによって日傘効果と温室効果の大きさは異なる。気候モデルによって気温上昇の予測に幅がある最大の要因は、温暖化した地球での雲のつき方にばらつきがあるためだ。

「従来の気候モデルの多くが、温暖化によって低層の雲の面積が減ることで日傘効果が小さくなり温暖化が促進されると予測しています。それはNICAMでも同じです。ただし、上層の雲には違いが見られます。従来の気候モデルでは上層の雲の面積は狭まりながら厚くなると予測しています。一方、NICAMでは雲の面積が広がって薄くなるという計算結果になりました」

高い解像度のNICAMは計算量が膨大なため、数十年分といった長い時間の計算が難しかった。「そのためAR5まで、NICAMの研究成果は盛り込まれていません。近年、コンピュータの性能が向上し、NICAMでも数十年スケールの計算ができるようになってきました。AR6にはNICAMの研究結果を提供する予定です」

全球雲解像モデルの開発は、アメリカやイギリス、

ドイツでも進められているが、さまざまな計算結果が論文発表されているのはNICAMによる研究だけだ。今後、各国の全球雲解像モデルの開発が進めば、それぞれの違いを比較して、雲の物理モデルをさらに改良していくことができる。

日本と欧州は共同で、雲やエアロゾルの量や分布を観測する人工衛星「EarthCARE」を打ち上げる予定だ。「EarthCAREでは、雲粒が落下する速度などの観測を行います。そのような新しい観測データでNICAMの雲の物理モデルを検証して、さらに改良していく計画です」

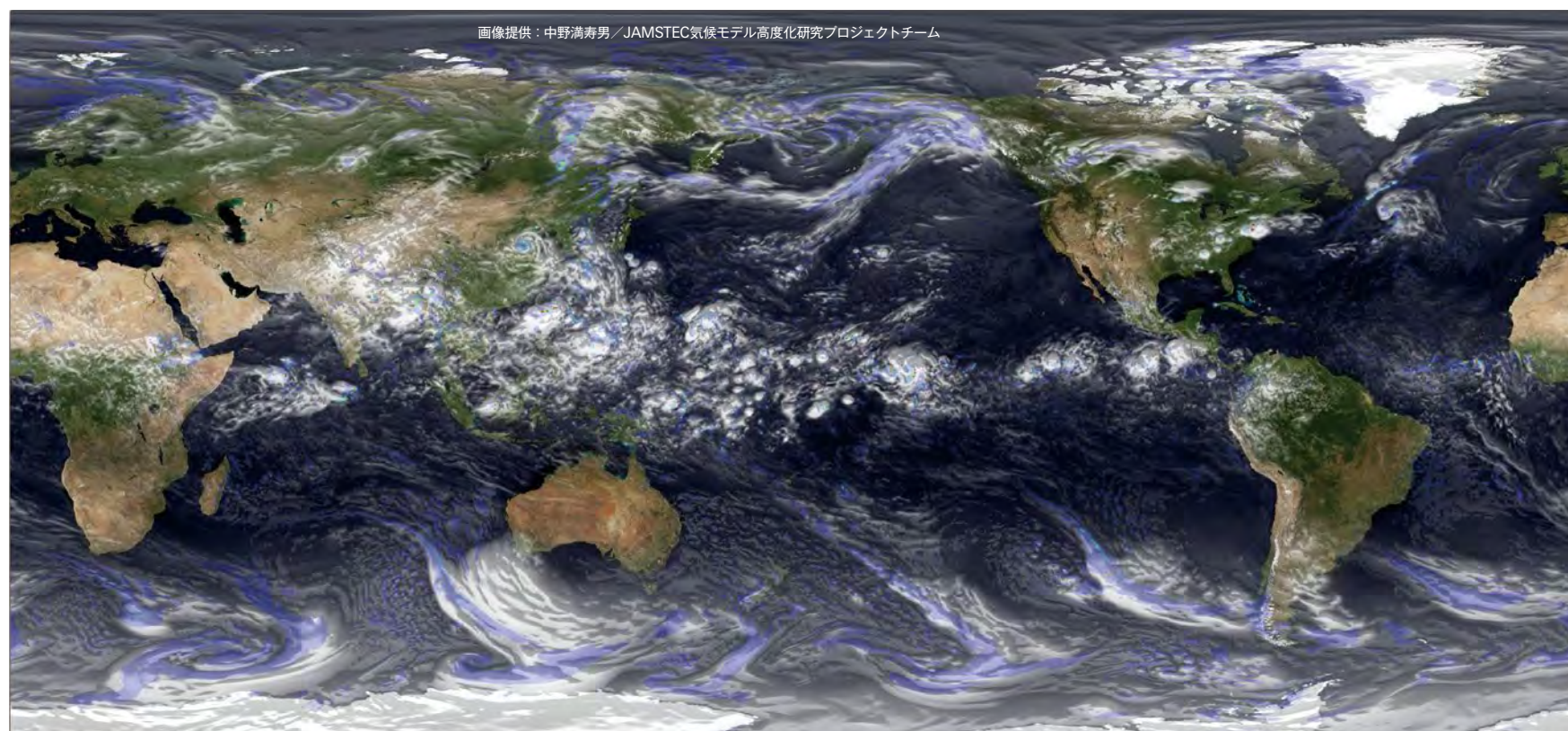
MIROCなどの気候モデルは、産業革命前から21世紀末までといった数百年の気候変動のシミュレーションを行う。一方、全球雲解像モデルは、それらの気候モデルで計算した海面水温などを与えることにより、雲を詳細に再現して、温暖化した地球で何が起きるのかをより細かな空間スケールで予測することができる。その雲のデータで得た知見により、気候モデルで雲を計算するパラメタリゼーションを改良することで、気温上昇などの予測精度を向上させることができる。そのためにJAMSTECでは、NICAMとMIROCの開発チームが共同研究を始めている。

温暖化した地球で台風の強風域が拡大する仕組み

温暖化によって高くなった壁雲周辺と外部との気圧差が大きくなり、強風域が拡大することが、NICAMの計算結果から分かった。

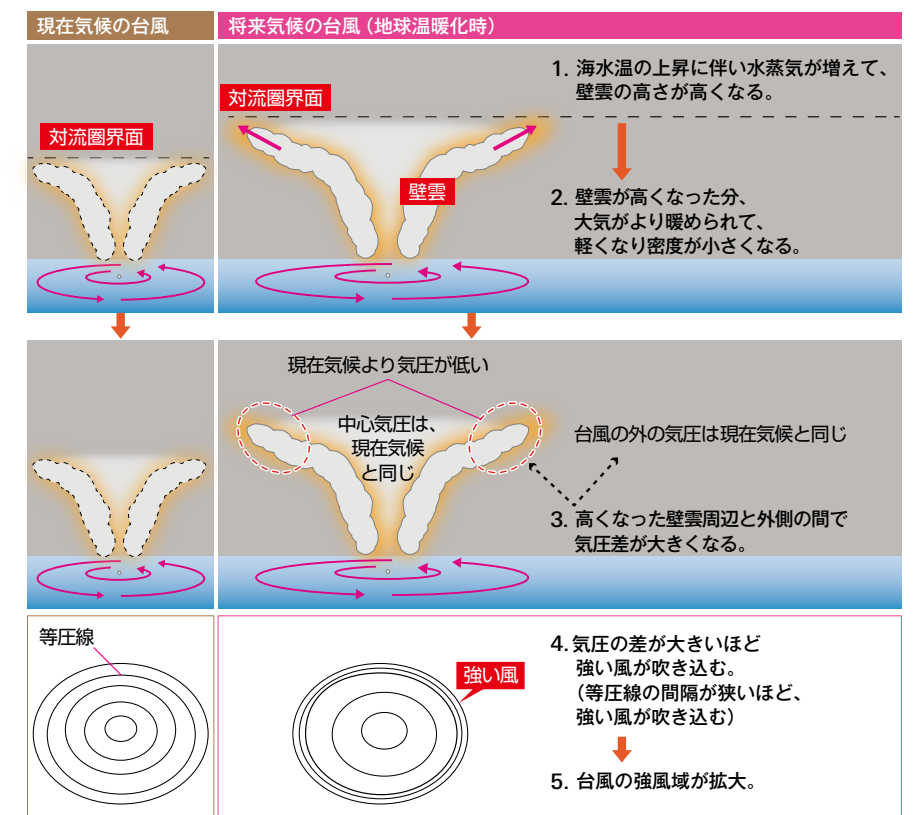
NICAMによる地球全体の雲の再現

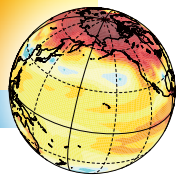
格子14kmの解像度のNICAMにより、現在気候（1979～2008年の30年分）、IPCCにおける将来変化シナリオ（A1Bシナリオ）とそのシナリオに基づく海面水温の将来予測をもとにした将来気候（2075～2104年の30年分）の延べ60年分をスーパーコンピュータ「京」を用いて計算して、現在気候と将来気候で発生する台風を比較した。



Simulated by NICAM Team (JAMSTEC/AORI U. Tokyo/RIKEN AICS) on the K computer
Supported by HPCI SPIRE3 of MEXT

20900816 23:00 UTC
Visualized by Drs. M. Nakano and D. Matsuoka (JAMSTEC)





地球システムモデルは温暖化対策にどのように貢献できるのか

取材協力

立入 郁

統合的気候変動予測研究分野 分野長代理
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
地球システムモデル開発応用ユニット
ユニットリーダー

建部洋晶

気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
基盤的気候モデル開発応用ユニット
ユニットリーダー

パリ協定では、1.5℃や2℃といった目標値だけでなく、その実現に向け、温室効果ガスを削減して気候変動を小さくする緩和策や、気候変動が起きたときの被害を小さくする適応策について、その実施手段および支援に関する進捗を評価する仕組み（グローバル・ストックテイク）が決められている。そこで地球システムモデルが担うべき大きな役割は、人為起源の温室効果ガスが、大気、陸域、海洋の間でどのようにやりとりされ、気候および生態系へどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることにある。また、産業革命以前から今世紀末にかけての気温上昇を1.5℃ないし2℃に収めるため、今後人類が排出を許される温室効果ガスはどの程度なのかという社会・経済的に重要な問いにも、地球システムモデルは答えることができる。

JAMSTECの統合的気候変動予測研究分野と気候モデル高度化研究プロジェクトチームでは、立入 郁さんが中心となり、1.5℃上昇と2℃上昇の影響の違いについての研究を行っている。MIROC-ESMによる計算の結果、気温上昇が2℃の場合と1.5℃の場合で、サンゴの白化につながるような高水温の頻度が大きく異なることが示された。これは、温度上昇への適応を考えない場合、気温上昇2℃ではサンゴは絶滅するが、1.5℃では10~20%は生き残るといった既存研究の結果とも整合する。サンゴ礁は「海の熱帯雨林」とも呼ばれ、海にすむ生物の4分

の1がサンゴ礁に関わって生息するともいわれており、サンゴの絶滅は海の生物多様性に大きな影響を与える。サンゴの白化は、サンゴと共生する藻類が失われることを意味し、それによりサンゴは光合成によってつくられる酸素や栄養分を受け取れなくなって死んでしまう。「海の生物多様性を支えるサンゴが絶滅するかどうかのティッピングポイントが1.5℃と2℃の間にある可能性があるのです」と立入さんは指摘する。

MIROC-ESMによる計算の結果では、1.5℃と2℃で、陸域の植物などが光合成によって生産する有機物量に地域によって有意な差が見られたほか、北極海の海水量にも明確な違いが見られた。

また、JAMSTECと共同研究を続けている国立環境研究所の塩竈秀夫 主任研究員らは、「100年に1度の暑い昼」という異常気象の発生頻度が、気温が2℃上昇した世界では顕著に増加する可能性があるとして指摘している。これは特に開発途上国の集中する低緯度で顕著な傾向であり、気候変動による経済的ダメージと政情の不安定化、先進国との経済格差の拡大を招く恐れがある。

気温上昇を1.5℃に抑えるためには、温室効果ガスの削減をどのようなペースで進める必要があるのか。地球環境産業技術研究機構（RITE）の計算（気温のオーバーシュートを想定せず、50%の達成確率を採用した場合）では、2030年において2℃では現在よりも10%、1.5℃では52%の削減が必要とされている。「ただし、大気中の温室効果ガスの増加に対して気候が強く影響を受けて気温が上昇する場合には、温室効果ガスの排出削減がさらに前倒しされなければなりません。MIROC-ESMの計算はそのような想定に対応していて、その場合、2030年までに70%以上の削減が必要になります」と立入さんは紹介する。

一方、パリ協定の各国の削減目標を足し合わせると、2030年には逆に10%以上増加してしまう。2030年時点での削減目

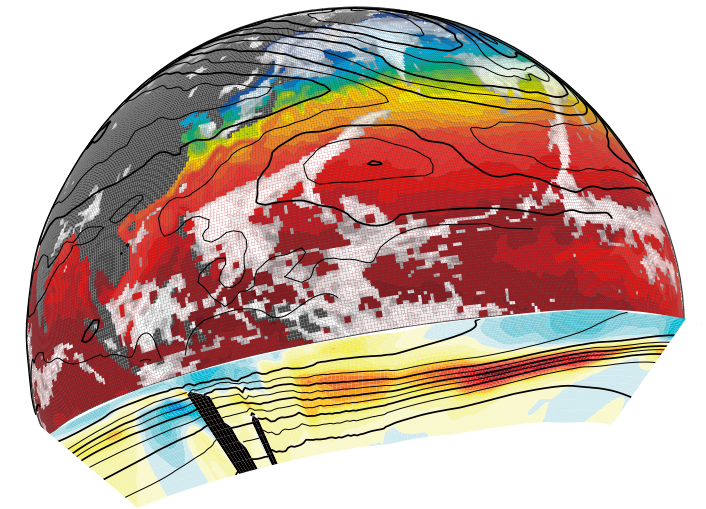
標を達成できない場合、2030年以降の排出量をさらに下げ、今世紀後半には大きな負の排出量、つまりCO₂などの回収・貯留が必要となる。「エネルギー源を化石燃料から太陽光や風力などの自然エネルギーに切り替えるとともに、光合成由来のバイオマス燃料の利用を拡大し、さらにバイオマス燃料から出るものも含め、大量のCO₂を回収・貯留することが、1.5℃や2℃などの厳しい目標を達成するための社会経済シナリオの前提になっています」と立入さん。

パリ協定の実現に向けた具体的議論が進むことにより、気温上昇を1.5℃ないし2℃に抑えるために必要な技術やコストに関する研究もさらに進むはずだ。1.5℃を達成するには2℃に比べて温室効果ガスの削減コストが3~5倍増加するという研究例もあるが、そのコストの増加分よりも2℃の気温上昇により生じる政治・社会・経済的な損失が1.5℃に比べて大きいのであれば、1.5℃目標の達成が経済的に妥当ということになる。

「気候変動と一口にいても、数年規模の変動とパリ協定でターゲットにされているさらに長期の温暖化とは、支配するメカニズムが大きく異なります」と建部洋晶さんは指摘する。「地球の気候システムには、さまざまな時間規模で変動する自然起源の内部変動が存在します。特に数年から十年程度の比較的近い将来を予測するためには、人為起源の温暖化に加えて、この内部変動も予測する必要があります」

21世紀の最初の十数年間、気温上昇は停滞したと報告されている。「その主な原因は、太平洋数十年規模振動（IPO）という自然起源の内部変動だと考えられています」。IPOとは、平年値からのずれで見たとときの熱帯太平洋および北米大陸沿岸の海面水温と日本東方海域の海面水温のうち、一方が高いとき他方が低くなる気候変動パターンであり、10~30年程度の周期で水温の高低は入れ替わる。21世紀の最初の十数年間は、熱帯太平洋および北米大陸沿岸の海面水温が平年よりも低くなっていた。温暖化傾向がIPOに伴う気温の低下傾向により相殺された結果、気温上昇が一時的に抑えられていたわけである。

「IPOのような数十年規模の内部変動は、大西洋でも確認されています。しかしながら、これら内部変動の数年先までの予測はまだ定量的には難しいのが現状です」と建部さん。パリ協定で定められたグローバル・ストックテイクでは、5年ごとの温室効果ガス排出量変化とその気候への影響なども議論されることが想定される。その際、気候変動のうちどの程度が人為起源であり、どの程度が自然起源、すなわち内部変動によるのかを切り分ける必要がある。「内部変動に伴う海水温のパターンによって、海洋や陸域が大気から吸収する二酸化炭素量は大きく変わります。わが国のみならず世界各国の温暖化対策がどの程度進んでいるのか、また、その対策は、パリ協定に記述された『先進国と途上国とで共通であるが差異ある責任』とい



地球システムモデル「MIROC-ESM」のベースとなっている気候モデルで再現したある時刻の大気や海洋の状況

球面上の色は海面水温、灰色は雲、実線は10hPa気圧高度等温線を示す。赤道断面での実線は水温分布、色は水温の平年値からのずれ（偏差）を示す。日本近海における海流や熱帯における対流活動、エルニーニョの引き金となる中層（亜表層）の暖水の偏差などが再現されている。

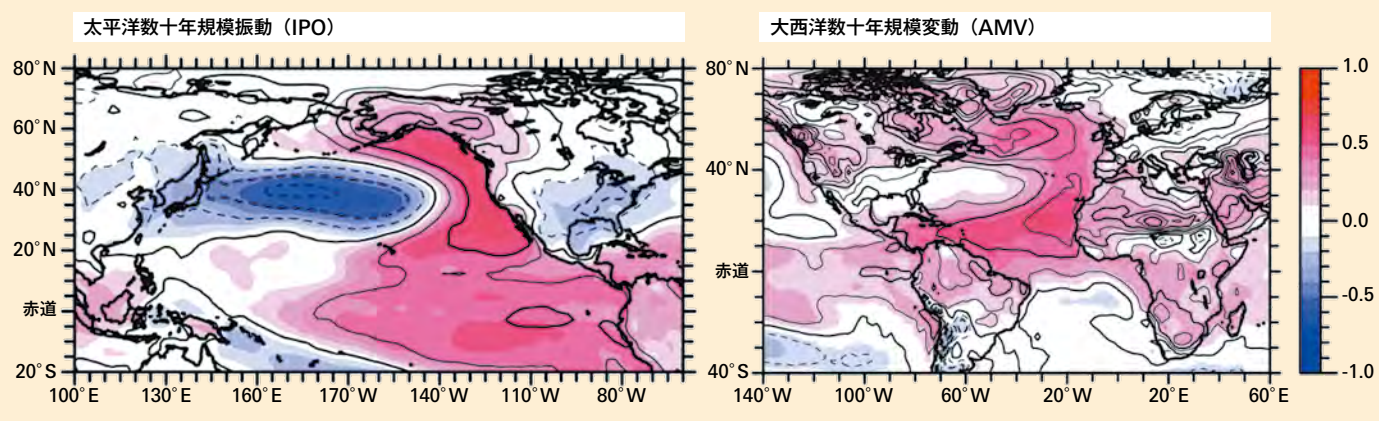
う文言に沿っているのか。これらを公正に評価するには、数年先までの気候変動だけでなく、大気・海洋・陸域における炭素循環を正確に理解し、また、予測していくことが求められるでしょう。そのためには地球システムモデルを最大限に活用し、また今後も、より精緻かつ高度なモデルへ発展させる必要があります」と建部さんは指摘する。

「地球規模の気候は、個々にひもといていくと実は空間的に非常に小さな現象の積み重ねで成り立っています」と建部さんは続ける。たとえば、100m規模の雲に伴う対流、月の潮汐力に起因する数cm規模の海洋の乱流、木々の一枚一枚の葉の成長などだ。「これらが相互に作用しながら、地球の気候は成り立っているのです。地球システムモデルにはさまざまな物理および生物・化学的な仮定が置かれています。近年では人工衛星や海洋観測フロート、また、雲解像モデルと呼ばれる大気シミュレーションモデルから、詳細なプロセスに関する情報が出てきています」

前述の全球雲解像モデル「NICAM」で再現された微細な雲過程に関する知見を取り入れることで、地球システムモデルの雲過程における仮定を徐々に少なくし、不確実な部分をなくするような取り組みを、建部さんは野田 暁さんたちと始めている。「地球システムモデルには、具体的な議論や対策のベースとなる、信頼性の高い気候変動予測情報を社会に発信することが求められています。このような社会的ニーズに応えると同時に、地球気候の成り立ちを解明していくというサイエンスにも取り組むこともできる、それが地球システムモデルのよいところです」と建部さんは締めくくった。

BE

観測データに基づく、自然起源の数十年規模の内部変動に伴う海面水温の変化パターン



夜9時、水族館を出発する。水族館から広島県呉市の港まで車で約2時間。翌朝4時に瀬戸内海の豊島沖を目指して船を出す。

ここ宮島水族館では、全国で唯一タチウオの通年展示を実現している。それは豊島で代々行われてきたタチウオの曳縄漁の貢献が大きい。

成長すれば1.5mにもなるタチウオは、とてもデリケートな魚だ。うろこがないため、すこぶる傷付きやすい。素手で触れば、たちまち表面に手痕が付き、そこから炎症が始まる。まるでやけどした痕のように皮膚がグズグズになってしまう。網での確保などもってのほかなのだ。とにかくよい状態でタチウオを捕獲すること、それが長期飼育の鍵となる。

宮島水族館では7年ほど前よりタチウオの展示を始め、工夫を重ねてきた。豊島で行われてきた曳縄の漁をもとに方法を模索した。

漁師さんと協力し、まず傷付きやすいタチウオのために、釣り針のかえしをなくした。胴の部分ではなく、口先や顎先に釣り針がかかった状態のタチウオだけを飼育用に確保する。手には手術用の手袋をし、かかったタチウオを素早く30リットルのバケツに移す。もし深いところから上がってきたものならば、浮き袋が膨らんでいることがある。そんなときには、側線上部に素早く注射針を刺し、浮き袋の空気が自然に抜けるのを待つ。ここはタイミングが勝負だ。注射針を抜くタイミングが遅いと空気が抜け過ぎてタチウオは浮き上がることができなくなり、死んでしまう。逆に早過ぎると、おなかを上に乗らなれず、やはり生き残るのは難しい。こうした調整をした後に、タチウオを前方の大きな移動用のタンクに移していく。船上で手分けをし、こうした作業をできる限りテンポよく進める。とにかくチームワークが勝負だ。

最近では数ヶ月はタチウオを飼育できるようになってきた。ただし、長期飼育していると口元が丸くなってきたり、尾の部分が切れて展示に向かなくなることがある。担当が変わるだけで、飼育期間が短くなってしまいうこともある。飼育に携わる一人一人と向き合って、どう猛でありながらも臆病で神経質なタチウオとの付き合い方を確認していくこと。長期飼育の一番の近道、それは人と人とのつながりなのだ。 **BE**

取材協力：三浦和伸／宮島水族館 みやじマリン 飼育員
写真提供：宮島水族館 みやじマリン

宮島水族館では、採集してきたタチウオをすぐに展示するようにしている。採集したばかりのときは30匹くらいのタチウオが泳ぐことになる。互いに隣同士を気にし、距離を保って泳いでいる。



銀色はグアニンという成分でできた膜で、その下はすぐに筋肉質の身体となるため、外傷にとっても弱い。タチウオを解剖してみると、見た目の雌雄差はないことが分かった。タチウオは大きなもので1.5mほどになる。



とても鋭い歯を持っている。どう猛な性格で、神経質なことから、近づくと仲間を鋭い歯で攻撃することもある。採集する途中でタチウオにかみ付かれたこともある。

◆ **Information:** 宮島水族館 みやじマリン
〒739-0534 広島県廿日市市宮島町10-3
TEL 0829-44-2010
URL <http://www.miyajima-aqua.jp/index.html>

私が
IODPで
解きたい謎

難波康広

地球深部探査センター
技術部 技術第2グループ
主任技術研究員

なんば・やすひろ。1971年、大阪府生まれ。
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環
境システム学専攻博士課程修了。博士（工学）。
2010年より現職。専門は船舶海洋工学。

熊野灘と東北沖での 科学掘削、そして マンタルに向けた挑戦

地球深部探査船「ちきゅう」による掘削では、岩石試料（コア）を採取するだけでなく、掘削孔に観測装置を設置して、現場観測を行うことも重要である。掘削孔に観測装置を安全・確実に設置・回収するため、さまざまな技術開発が行われている。その一端を、地球深部探査センター（CDEX）技術部の難波康広さんに聞いた。難波さんが所属する技術第2グループでは、現在、マンタル掘削に向け、鋼鉄製に代わるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）ライザーパイプの開発も進めている。人類未踏の世界、マンタルに挑む取り組みも紹介しよう。

「ちきゅう」の前で

黒潮の速い流れに打ち勝つ

——「ちきゅう」の運用を担うCDEXの技術部に所属されています。どのようなことに取り組んできたのでしょうか。

難波：CDEXで初めて担当したのは、孔内観測装置の設置技術の開発です。「ちきゅう」はIODP（2003年10月～統合国際深海掘削計画、2013年10月～国際深海科学掘削計画）のもと、2007年から紀伊半島沖熊野灘において「南海トラフ地震発生帯掘削計画」（以下、南海掘削）を行っています。南海トラフでは、100～150年の間隔でマグニチュード8クラスの地震が繰り返し発生しています。そ

の海域において複数の地点で掘削を行い、巨大地震の発生メカニズムを解明することが、南海掘削の目的です。そのために、岩石試料の採取と並んで重要なのが、掘削孔に観測装置を設置して行う現場観測です。掘削孔に観測装置を安全に、確実に設置するためには、さまざまな工夫が必要です。

——どのような難しさがあるのですか。
難波：孔内観測装置は、「ちきゅう」から伸びるドリルパイプの先端に取り付け、掘削孔のなかに下ろしていきます。掘削孔は水深およそ2,000～4,000mの海底にあり、孔の内径は220mmほど。そ

のなかに観測装置を設置しなければいけないのです。しかも南海掘削を行っている紀伊半島沖熊野灘は、流れがとても速い黒潮が流れています。

ある速さの流れのなかにドリルパイプを入れると、パイプの下流側に渦が2つ左右対称にできます。さらに流れが速くなると、渦が左右非対称になります。熊野灘の黒潮のなかにドリルパイプを入れると、流速によってはその状態になります。渦の非対称性はパイプ表面上での流速の非対称性を生じます。それはパイプに作用する流体力の左右非対称性となり、流れに直角な方向にパイプが動き



左上：JFASTにて孔内温度計の設置準備。2012年7月14日。下：設置から9ヵ月後、「かいこう7000 II」によって回収された孔内温度計。回収翌日の2013年4月27日に撮影。難波さんは奥から2人目。右上：静岡県の清水港で行われた「ちきゅう」一般公開で案内をする難波さん。2017年12月25日、サンタ帽子をかぶって。

ます。渦の生成・剥離に伴って、左、右、左とパイプが振動を始めてしまうのです。これを渦励振といいます。パイプは鋼鉄製でかたいのですが、つなげて数千mもの長さになると、くねくねと曲がります。渦の発生周期とパイプの固有周期が一致すると、共振現象によってパイプが激しく振動します。その振動によって、パイプの先端に付けた観測装置が揺さぶられ、壊れてしまう危険があります。——振動の問題を、どのように解決したのでしょうか。

難波：海洋研究開発機構（JAMSTEC）で採用した方式は、ドリルパイプに沿って長さ数百mほどのロープを4本、90度間隔で取り付けるというものでした。——それだけですか？

難波：はい、それだけで振動が止まりました。流れがロープに当たって渦が崩れ、渦励振が発生しなくなるのです。数百mというのは、流れが速いのは水深数百mくらいまでだから。簡単にできて、経済

的で、効果抜群です。

この技術を使って2010年12月、南海トラフのC0002地点の海底下約1kmに達する掘削孔に、長期孔内観測装置を設置することに成功しました（IODP第332次研究航海）。長期孔内観測装置には、ひずみ計、傾斜計、温度計、間隙水圧計、広帯域地震計、短周期地震計、強震計といった各種センサーが含まれています。これらを掘削孔のなかにセメントで固定して設置することで、海底面上に設置するより地震断層やその周辺の地殻の微小な変動を高感度・高精度に観測できるようになりました。

全長820m、55個の温度計が 連なった装置を引き上げる

——2012年に行われたIODP第343次研究航海「東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST）」でも孔内に観測装置を設置していますね。

難波：JFASTの目的は、2011年3月11日

に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う巨大津波を引き起こしたプレート境界断層を調べるために、断層の岩石を採取し、掘削孔内に高精度の温度計を設置することでした。掘削地点が水深6,900mと深く、南海掘削とは違う難しさがありました。

——孔内温度計とは？

難波：55個の温度計が数珠つなぎになっていて、全長はおよそ820mです。断層がすべると摩擦熱が発生します。プレート境界断層とその付近の温度変化を直接観測できれば、巨大地震・津波が発生したときに生じた摩擦熱を逆算して推定し、さらに掘削で得られた地層の物理データや岩石試料と併せて分析することで、プレート境界断層がどのようにすべったのかが分かります。水深6,900mの掘削孔に全長約820mの孔内温度計を設置するのはもちろん大変でしたが、回収でも大変苦労しました。

——孔内温度計は2012年7月16日に設置され、9ヵ月後の2013年4月26日に回収されました。

難波：孔内温度計の回収は、無人探査機「かいこう7000 II」によって行われました。「かいこう7000 II」は、支援母船の深海調査研究船「かきれい」とケーブルでつながったランチャーと、ランチャーとケーブルでつながったビークルから成り、「かきれい」船上からの遠隔操作で作業を行います。

孔内温度計の上端には回収用の取手が付いています。「かいこう7000 II」ビークルのマニピュレーターを使って取手にフックを引っ掛け、真上に上昇しながら引き抜きます。しかし孔内温度計は820mもあります。掘削孔から抜く途中で斜めになって引っ掛かってしまったら、引き上げができなくなる危険があります。しかもビークルの水中テレビカメラは真下を向けられないため、様子を見ながら引き上げることができないのです。

そこで、フックにつながったロープの端に荷重計を付け、かかっている力をモニターしながら引き上げることができるようにしました。掘削孔を模擬したパイプと孔内温度計の模型を使い、いろいろな角度で引き上げる実験を何度も行い、荷重がいくつ以上になったら引っ掛かっている可能性があり作業を止めなければ



ドリルパイプに振動防止のためのロープを取り付けている様子

いけないかを調べました。その情報を「かいこう」チームに伝え、孔内温度計を引き上げてもらったのです。

——孔内温度計の設置は、地震発生からわずか1年4ヵ月後でした。これほど早い時期に摩擦熱を計測したのは、世界初だそうですね。

難波：断層で発生した摩擦熱は、時間の経過とともに周囲に拡散してしまいます。計測開始は、早ければ早いほどいいのです。しかし、地震発生から1年ほどしかたっていないと、まだ断層が動いている可能性があります。断層が動く、孔内温度計のロープがずれてしまい、途中で引っ掛かって安全に引き上げられなくなります。そこで、一定以上の荷重が

かかると切れるウィークリンクを3ヵ所に入れました。上のウィークリンクは切れにくく、下のウィークリンクは切れやすくすることで、できるだけ多くの温度計を回収できるようにしています。

——「かいこう7000Ⅱ」が孔内温度計を引き上げているときの気持ちは？

難波：無事に上がってきてほしい。それだけです。荷重計のほかにアナログのばねばかりも用意し、ピークルの水中テレビカメラでモニターするようにもしました。ほかにも、ランチャーとピークルの位置関係をモニターしたり、ソナーで掘削孔の位置を捉えて真っすぐ上がっているかを確かめたり、念には念を入れています。それでも、上がってこなかったら

どうしようと考えてしまう。心臓が悪いですね。とはいえ、回収作業が始まったら、「かいこう」チームの皆さんを信じて任せるしかありません。

——回収の結果は？

難波：途中で切れることなく、すべての温度計を回収できました。実はCDEX技術部部長の許正憲さんが、温度計の1つに「回収ありがとう」と書いておいたのです。孔内温度計が甲板に引き上げられたときに見てもらおうという、「かいこう」チームへの感謝のメッセージです。皆さん、喜んでくれていましたね。

孔内温度計には9ヵ月間の温度変化が記録されていて、その解析結果は論文にまとめられアメリカの科学雑誌『Science』に掲載されました。私も協力者に入ってもらっています。JFASTは、未曾有の大震災を目の当たりにし、JAMSTECとして、科学者・技術者として何ができるのかを考え、計画されました。一定の成果が出たことは、とてもうれしいです。

理論物理、浮体式構造物を経て

——どのような経緯で、CDEXで技術開発に携わるようになったのですか。

難波：大学は理学部で、理論物理を学びました。大学院の進学先を探していたとき、九州大学大学院で浮体式の海上空港について研究していることを知り、思い切って分野を変え、総合理工学研究科へ進みました。理論物理も面白かったのですが、浮体式の海上空港は実際に物をつくることのできる、という点が魅力でした。

波と浮体式構造物の相互作用について

の博士論文で学位を取得し、海上技術安全研究所に就職しました。浮体式構造物の研究を続けていましたが、JAMSTECに転向することに。そして、南海掘削の孔内観測装置の設置技術の開発に携わるようになったのです。

——戸惑いはありませんでしたか。

難波：JAMSTEC横須賀本部の沖に、海上空港のプロトタイプが設置されていたことがあります。大学院生のときに何度か近くに来ていたので、懐かしい感じがしましたね。もちろん、浮体式構造物と孔内観測装置は、まったく違います。しかし、孔内観測装置は地震研究に使われるものです。それに関する技術開発に携われるというのは、地震の多い日本においては特に意義のあることだと思いました。その後、JAMSTECで仕事をしたいと思い、転職しました。

高強度で軽く、かたいライザーパイプの開発が必須

——現在は、どのような技術開発を行っているのですか。

難波：いくつかありますが、中心はマンテル掘削に向けたライザーパイプの開発です。「ちきゅう」はライザー掘削システムを搭載した世界初の科学掘削船で、水深2,500m、海底下7,000mまで掘削可能です。しかし、マンテル掘削を実現するには、まだ能力向上が必要です。

——マンテル到達に必要な掘削能力は？

難波：マンテル掘削の候補地として、コスタリカ沖、アメリカ・カリフォルニア沖、ハワイ沖が挙げられています。3候補のどれに決まっても対応できるように、一番厳しい条件を想定した開発を行っています。水深に関してはハワイ沖が最も厳しく水深4,050~4,500mで、ここでは海底下5,500~6,000mまで掘削しなくてはなりません。これに対応した大水深掘削技術の開発が必要です。

現在のライザーパイプは、鋼鉄製です。それを海底まで4,500mも伸ばすと、重過ぎて自分の重さを支えられなくなってしまいます。強度を上げるために断面積を増やすと、さらに重くなるため、鋼鉄製のライザーパイプは使えません。マンテル掘削を実現するには、高強度で、軽いライザーパイプが不可欠なのです。船体の上下動と共振しないように、かたさも



CFRPライザー模型の引張試験の様子

必要です。それらの条件を満たす材料として有力視されているのが、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）です。

ただし、CFRPには耐熱性の問題があります。コスタリカ沖では地殻とマンテルの境界とされるモホロビッチ不連続面（モホ面）の温度は250℃以上と推定されています。ライザー掘削では泥水と呼ばれる特殊な流体をドリルパイプから送り込み、ライザーパイプとの間を通して船に戻すので、高温の泥水が上がってきます。CFRPの耐熱性はそれほど高くないため、鋼鉄製のライザーパイプとの併用も検討しています。

——マンテル掘削に向けた技術開発の難しさは？

難波：相手の正体が分かっていないことですね。まだ誰もマンテルまで到達したことがないわけですから。中東のオマーンにかつての海洋地殻とマンテルが陸に乗り上げている場所があり、掘削調査が進められています。それらから重要な情報は得られます。しかし、それはマンテルの化石です。生のマンテルがどのようなものは、実際に手にしてみるまで分かりません。

マンテルを目指す理由

——なぜマンテルを目指すのですか。

難波：マンテル掘削は、人類初の月面着陸を成し遂げたアポロ計画に例えられる

ことがあります。確かに、人類がまだ到達していないマンテルにまで到達して、その岩石を手にするには大きな意味があります。しかし、マンテル掘削の意義はそれだけではありません。東北地方太平洋沖地震は、プレートの沈み込みに伴って発生しました。プレート移動の原動力はマンテルです。しかも、マンテルは地球の体積の80%以上を占めています。にもかかわらず、私たちはまだマンテルを知らないのです。地震の発生メカニズムの理解のためにも、マンテル掘削は大いに意味があるでしょう。

地震波の速度が急激に変化するモホ面は、地殻とマンテルとの境界だと考えられています。しかし、モホ面は本当に地殻とマンテルの境界なのか、という疑問が以前からありました。モホ面を掘り抜くことで、答えが出るでしょう。地下生命圏の限界も、分かるかもしれません。ぜひマンテルまで掘って調べてください。私は考えます。

——マンテル掘削に向けた今後の予定はどのようなになっていますか。

難波：マンテルに到達するには、大水深掘削技術の開発のほかに考慮しなければいけない技術がたくさんあります。まだスケジュールははっきり決まっていますが、まず浅い深度での掘削を行い、その後マンテルへ挑戦することになるでしょう。楽しみにしててください。 **BE**

「かいこう7000Ⅱ」による孔内温度計回収作業の様子。2013年4月26日。掘削孔の入り口（ウェルヘッド）から伸びる棒が孔内温度計の上端。上端にある取手に「かいこう7000Ⅱ」のマニピュレーターでフックを引っ掛け、引き上げた。



©JAMSTEC/IODP

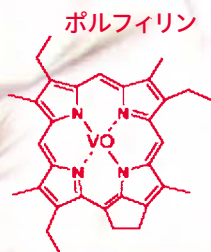
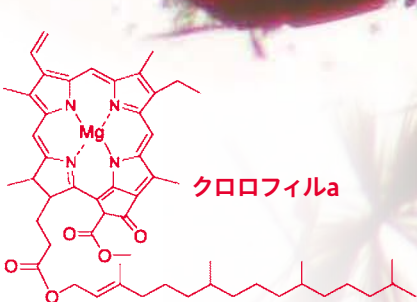


©JAMSTEC/IODP

JFASTにおいて掘削孔に設置され、9ヵ月後の2013年4月26日、「かいこう7000Ⅱ」によって回収された孔内温度計。一番下に設置されていた温度計のカバーには、「よくガンパッタ!! かいこうチーム回収ありがとう!!」と書かれていた。

安定同位体比の精密測定を実現し 食品産地や地球の歴史を読み解く

自然界には同じ元素でも、わずかに質量が異なるものがある。それを同位体という。同位体のうち放射性壊変しないものを、安定同位体という。安定同位体比はこれまで、生物地球化学の分野で物質の起源や挙動などを読み解く道具として使われてきた。最近では、食品の原料や産地の特定にも利用されている。海洋研究開発機構（JAMSTEC）生物地球化学研究分野の小川奈々子さんは、微量な試料でも安定同位体比を正確に測定できるようにするため、さまざまな技術開発を行ってきた。JAMSTECでは現在、世界で最も微量の試料で有機物中の炭素や窒素の安定同位体比を測定することができる。いかにして世界トップの微量化を実現したのだろうか。



取材協力
小川奈々子
生物地球化学研究分野 主任技術研究員

およそ1億年前に堆積した黒色頁岩から抽出したポルフィリンの結晶の顕微鏡写真。植物が作り出したクロロフィルaが分解してきたもの。炭素と窒素の安定同位体比を測定することで、どのような光合成をする植物が作り出したかが分かる。

安定同位体とは

安定同位体とは？と尋ねると、小川奈々子さんは1つのイラストを示した（下の図）。「生元素という生物を構成する主要な元素のうち炭素、窒素、酸素、水素の安定同位体比を模式的に描いたものでIsotope personと呼ばれています。オリジナルは、私の大学院での指導教官であり、現在はJAMSTECフェローでもある和田英太郎先生の手によります。和田先生は天然に存在する生元素の安定同位体を用いた生物地球化学研究の基礎を築いた研究者で、一見難解に感じる安定同位体を身近なイメージで表す方法として、このイラストを考案されました」

Isotope personの顔のCは炭素、胴体と腕のOは酸素、足のHとNは水素と窒素の元素記号である。元素は、同じ原子番号を持つ原子の名称で、原子番号は原子核を構成する陽子の数だ。6個の陽子を持つ原子は炭素、8個の陽子を持つ原子は酸素である。ところが、同じ原子番号なのに原子核を構成する中性子の数が異なっているものがあり、そのような原子同士を同位体、英語ではIsotopeと呼ぶ。

同位体には2種類ある。時間が経過すると放射線を出してほかの原子に壊変していく放射性同位体と、壊変を起こさない安定同位体だ。小川さんが注目しているのは、安定同位体である。炭素には、中性子が6個と7個の安定同位体がある。陽子の数と中性子の数の合計を質量数といい、元素記号の左肩に書く。 ^{12}C 、 ^{13}C といった具合だ。自然界に存在する炭素のほとんどが ^{12}C だが、少し重い ^{13}C が1.11%含まれている。酸素には ^{16}O と ^{17}O 、 ^{18}O 、窒素には ^{14}N と ^{15}N 、水素には ^1H と ^2H （Dと表記）という安定同位体があり、それぞれ重い方の安定同位体がわずかに存在している。

Isotope personは、体重50kgの人では炭素・酸素・窒素・水素の各安定同位体がどのくらい含まれているかを模式的に示している。炭素は、 ^{12}C が11.4kg、 ^{13}C が137g含まれている。「地球上のあらゆる物には、さまざまな安定同位体が含まれています」と小川さん。「原子の化学的な性質は電子の数で決まり、電荷を帯びていなければ電子数と陽子数は同じです。つまり、同位体の化学的な



Isotope person
体重50kgの人の体に、炭素・酸素・窒素・水素の各安定同位体がどのくらい含まれているかを示している。オリジナルは和田英太郎博士の考案。

性質は等しい。しかし質量が異なるため、化学的・物理的な反応では、軽い同位体はさっと動き、重い同位体は動きが遅い、といった違いが出てきます。その差を利用すると、物質の動き方や生物同士のつながりなどが見えてくるのです」

物の起源を識別

「安定同位体比は、物の起源の識別にも利用されています。安定同位体比の違いから農作物の産地も分かるんですよ」と小川さんはいう。安定同位体比とは、最も存在量の多い同位体に対してほかの同位体が存在する比率で、炭素でいえば $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ である。ただし、安定同位体比の変化は非常にわずかなため、標準物質に対する千分偏差（‰、パーミル）で表した δ （デルタ）値で表される。 δ 値が大きいほど重い同位体が多いことを意味する。

小川さんたちは、12の産地が異なるコシヒカリについて、コメに含まれる炭素と窒素の総量、炭素と窒素と酸素の安定同位体比を計測した。すると、産地によってそれらのバランスが異なることが分かった。「同じ品種でも、産地による生育条件の違いが安定同位体比に反映されるのです。違いは、予想していたより大きく出ました」と小川さん。

酸素の安定同位体比は、水の起源の指標になる。海から蒸発した水が雲をつくり、雨となって陸に落下する。このとき、重い ^{18}O を含む水から先に落ちていく。地球上では赤道域の海洋から蒸発した水が高緯度へと運ばれていくため、雨水の酸素同位体比の分布を見ると、低緯度ほど重い ^{18}O が多く、高緯度ほど軽い ^{16}O が多くなっている。変化は小さいが同じ理由から、沿岸部の雨水には ^{18}O が多く、内陸ほど ^{18}O が少なくなる。「コシヒカリが育つとき、雨水を吸収します。その結果、沿岸部で栽培されたコシヒカリは ^{18}O が多く、内陸部で栽培されたコシヒカリは ^{18}O が少なくなるのです」と小川さんは解説する。窒素同位体比は、主に肥料の違いが反映される。「近年、食の安全・安心が注目されています。安定同位体比を指紋のように使い、食品の産地偽装を見破ることができるのではないかと考えています」

食物連鎖や個体の生活史を見る

安定同位体比からは、生態系における食う・食われるの関係も分かる。生産者を1、一次消費者を2、高次消費者を3、4……とした栄養段階と、生物の体に含まれる炭素・窒素の安定同位体比の関係を調べると、 ^{13}C の割合は食べた生物と食べられた生物でほとんど変化しない。一方、 ^{15}N の割合は栄養段階が1段階上がるごとに3%ずつ高くなるのだ。

「栄養段階と窒素同位体比の関係を利用すると、生物の生活史も見えます」と小川さん。オウムガイの殻を調べると、ふ化前に形成された部分は¹⁵Nの割合が高い。ところが、ふ化後に形成された部分は¹⁵Nの割合が低くなる。そして、成長期に形成された部分は¹⁵Nの割合が高くなる。

¹⁵Nの割合が変化する理由を、小川さんはこう考えている。ふ化前のオウムガイは卵囊の栄養分を食べて成長する。卵囊は母親がつくったものなので母親の栄養段階を反映した¹⁵Nの割合となり、それを食べた子がつくった殻も同じ割合になる。ふ化すると、子は自分で餌を捕らなければならない。小さいオウムガイが食べることができるのは小さい生物で、それらの栄養段階は低いので、¹⁵Nの割合が低くなる。その後は成長とともに栄養段階が上がり、¹⁵Nの割合が高くなっていく。「オウムガイが小さいときは小さい生物を食べていただろうと予測はできます。安定同位体比を用いると、予測ではなく証拠を示すことができるのです」

石英管を細くすることで微量化を実現

安定同位体比からさまざまなことが分かることを紹介してきたが、小川さんは「安定同位体比の精密な測定はとても難しい」という。そもそも自然界に存在する炭素のうち98.89%は¹²Cで、¹³Cは1.11%しかない。窒素の場合、¹⁴Nは99.64%で、¹⁵Nは0.36%だ。しかも、それぞれの質量差は中性子1個分と非常にわずかである。「コメのように測定に使える試料がたくさんある

場合はよいのですが、私たちは古い時代の岩石や、海底の堆積物など、貴重で量が限られている試料を分析しなければいけません。そのため、微量の試料でも精度よく測定できる装置の開発に取り組んでいます」

安定同位体比の計測方法はいくつかあるが、オウムガイの殻の解析に使った方法をごく簡単に紹介しよう。まず、元素分析計の燃焼炉で試料を高温で燃焼（酸化）させてガスにした後、還元し、水などの余分なガスを除去する。それをガスクロマトグラフィーで成分ごとに分離し、同位体質量分析計に導入してイオン化する。窒素ガスの場合は¹⁴N¹⁴N⁺、¹⁴N¹⁵N⁺、¹⁵N¹⁵N⁺という3種類のイオンが生じる。イオン化された試料は加速され、磁石によって生み出された磁界のなかを通過するとき、イオンの進路が曲げられる。曲げられる角度はイオンの質量数によって異なるため、イオンが質量数ごとに分離され、それぞれ検出器でカウントされる。そのデータから安定同位体比を求めるのだ。

小川さんが微量化を実現するために最初に注目したのが、元素分析計の燃焼炉の管のサイズである。「もともと大容量試料用につくられた装置なので、微量な試料では燃焼させて発生したガスが経路のなかで希釈されてしまうという問題がありました。そこで、微量な試料でも最適な状態になるように、ガスクロマトグラフィーの基本理論にのっとって管の径を下半分だけ細くしました。こうすることで、同じ量の試料がより大きなピークとして検出されるようになり、微量な試料でも精度のよい安定同位体測定を実現しました」

元素分析装置の燃焼炉は、なかで試料を燃焼させるため1,000°Cを超える耐熱性が要求され、石英の管でできている。石英の管を下半分だけ細くするという加工は非常に難しい。石英管の加工

技術に秀でている光信理化学製作所の協力によって実現したものだ。小川さんたちは2006年、その手法を特許として京都大学と共同出願。石英管とそれを使用するための周辺機器は、光信理化学製作所から販売されている。

小川さんは、微量な試料で精度のよい安定同位体比測定を実現するため、ほかにもさまざまな改良を行っている。「従来の装置は試料を燃焼炉に投入するときに大気中の窒素がわずかに混入していました。大容量試料の測定では問題にならない量ですが、微量分析ではわずかな窒素でも邪魔になります」と小川さん。そこで、大気中の窒素の混入を防ぐ装置を開発。また、元素分析計のガスクロマトグラフィーで分離したガスを損失なく同位体質量分析計に導入できるように改良を加えた。

従来の100分の1の量で測定可能に

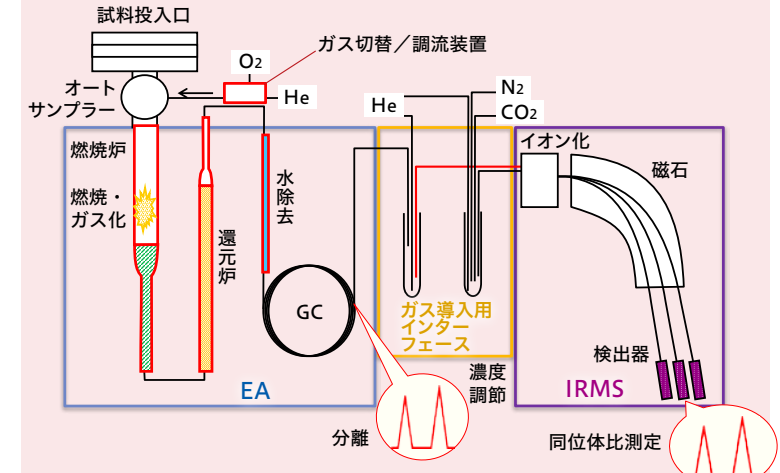
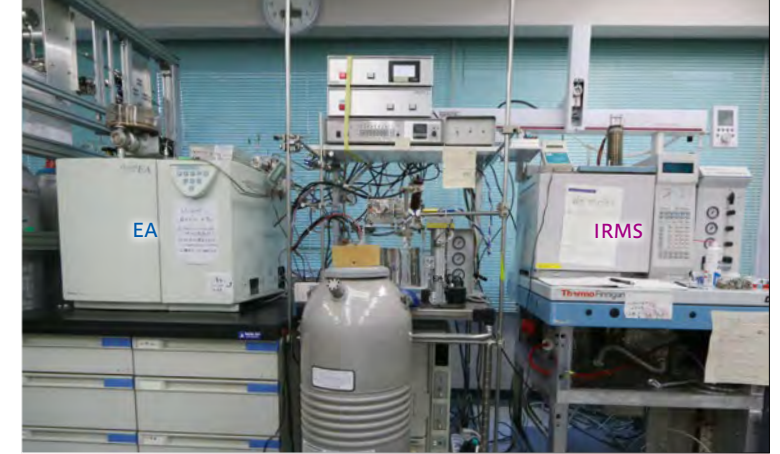
「私たちはいま、世界で一番少ない量の試料で、生物などに含まれる炭素と窒素の安定同位体比を同時に測定することができます」と小川さん。市販の装置と比べると、100分の1の量で安定同位体比の正確な測定が可能だ。

微量測定ができると、どのような利点があるのだろうか。小川さんはまず、「微量しかないで測れないと諦めていた試料も測定できること」を挙げる。オウムガイの殻は、そのほとんどが無機物で、有機物はほんのわずかしかない。微量化が実現されていなければ測定は不可能だった。海洋堆積物や太古の岩石に含まれるわずかな有機物の安定同位体比の測定も可能になったことで、地球の歴史の空白を埋めることができるかもしれない。

次に挙げたのが、「特定の化合物の安定同位体比を測定できること」だ。有機物にはいろいろな化合物が混ざっている。そのなかから特定の化合物を抽出し、それに含まれる安定同位体比を測定することで、本当に知りたい情報が得られるのだ。

小川さんたちは、1億年前の中生代白亜紀に堆積した黒色頁岩からポルフィリンという化合物を抽出し、そこに含まれる炭素と窒素の安定同位体比を測定した。黒色頁岩は生物の死骸が分解されないまま海底に堆積してできたもので、石油の起源といわれている。ポルフィリンとは、植物がつくったクロロフィルaが分解してできたものである。

黒色頁岩から抽出したポルフィリンの炭素と窒素の安定同位体比を分析することで、もとのクロロフィルaをつくったのはどのような光合成をする植物か、つまり黒色頁岩を構成する死骸の正体を明らかにできるのだ。そして、それは植物プランクトンの一種、シアノバクテリアであることを突き



nano EA/IRMS
元素分析計 (EA) と同位体質量分析計 (IRMS) で構成されている。オートサンプラーや燃焼炉の石英管、ガス導入用インターフェースなどいくつかの改良を加えることで、世界で最も微量の試料で炭素・窒素の安定同位体比の測定を可能にした。必要な試料は従来の100分の1である。

止めた。石油の起源は生物だと考えられていたが、どの生物かははっきりしていなかった。安定同位体比の測定が動かぬ証拠となったのだ。安定同位体比の測定を微量化できたからこそその成果である。小川さんは「大切なものは目に見えない」と『星の王子さま』の一節を挙げて、こう続ける。「でも、最先端の分析技術でならば見えてくるものもあるのです」

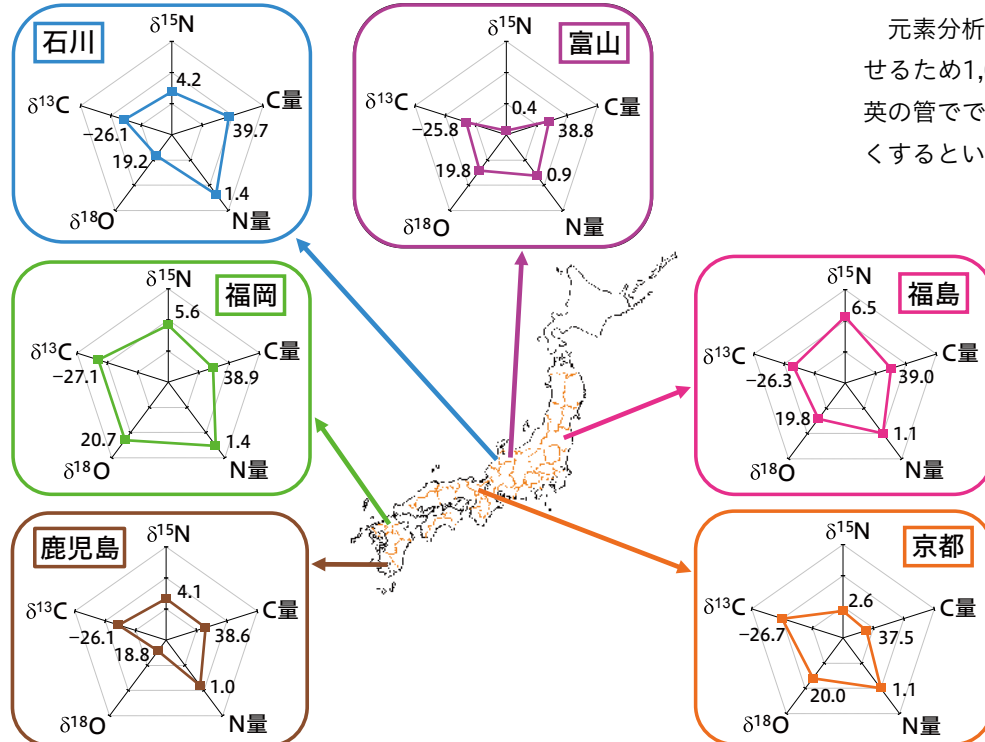
「さらに10分の1、つまり従来の1,000分の1の量で測定できる微量化を目指した研究開発も進めています。難しく苦戦していますが……」と小川さん。「微量で安定同位体比を測定できることが社会に広く知られるようになれば、さまざまなニーズが増えてくるに違いありません。ぜひ、安定同位体比をいろいろな用途で使ってほしいですね」

BE (記事中の元素の同位体の組成は『安定同位体地球化学』酒井 均・松久幸敬、東京大学出版会、1996年による)

特許情報
● 元素分析用前処理装置 (特許第4967141号)
● 元素分析用前処理装置及び元素分析装置 (特許第5396245号)

【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。



コシヒカリの産地による安定同位体比の違い
産地によって、炭素と窒素の量、炭素・酸素・窒素の安定同位体比のバランスが異なっていることが分かった。このように産地間で特徴がある場合は、安定同位体比を指紋のように用いて食品の産地特定に利用することができる。
Suzuki, Y., Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., and Korenaga, T. (2008) Food Chemistry, 109(2), 470-475. doi:10.1016/j.foodchem.2007.12.063.

海洋短波レーダーによる 流況観測

——津軽海峡における海洋観測の紹介——

地球情報館公開セミナー 第209回 (2017年4月15日開催)

佐々木建一 むつ研究所 研究推進グループ グループリーダー代理

電波のドップラー効果を利用して海の 状況を知る

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) で行われている研究は、外洋域に関するものが多いのですが、私が所属するむつ研究所ではここ数年、日本近海の海洋環境変動を捉えるため、津軽海峡を試験海域とした観測を行っています。そのためのツールとして導入されたのが、海洋短波レーダーです。

日本海には、日本列島に沿って北上する対馬海流が流れています。対馬海流は、津軽海峡の西側で二手に分かれ、一方はさらに北上していき、もう一方は津軽海峡に入っていきます。後者を津軽暖流と呼びます。また津軽海峡には東側から、オホーツク海を起源とし、北海道南岸に沿ってやって来る沿岸親潮という寒流も入ってきます。津軽海峡は暖流と寒流の両方の影響を受ける場所になっているのです。そのため、よい漁場としても知られています。

図1は、海洋短波レーダーで得られた津軽海峡の海表面の流れの状況の例です。海洋短波レーダーは、装置を海に入れて流れを直接計測するわけではありません。電波を使ったりリモートセンシング、つまり遠隔で計測するシステムです。むつ研究所では北海道に1ヵ所、下北半島に2ヵ所、全部で3局のレーダー局を置いて、2014年4月から海表面の流れを計測しています。各局で観測したデータを、むつ研究所内の中央局に集めて解析を行います。えさん局と岩屋局では、地元の漁業協同組合に協力していただき、漁協の建屋に器械を入れて屋上にアンテナを立てています (図1)。

海洋短波レーダーは、ドップラー効果を利用して海の流れなどを計測します。動く物体に電波が当たって反射すると、物体の速度に応じて波長が変化します。物体が近づいている場合はもとの電波より短い波長に、遠ざかっているときは

もとの電波より長い波長になります。

レーダー局のアンテナから海に向けて電波を放射します。電波長の半分の波長を持つ海波にブラッグ共鳴散乱され、電波が基地局の方へ強く返ってきます。その電波を受信すると、波の動き (位相速度) の分だけドップラーシフトした波長をピークとする連続スペクトルが得られます。水深が十分に深い場合の海洋波 (深海波) の位相速度は海波長の関数となるので、位相速度に相当するドップラーシフトの度合いはレーダーに用いる電波長によって決まりますが、海表面に流れがあると、ピーク波長はその分だけさらに少しドップラーシフトします。その少しの波長のシフトから、海の流れを計算しています。

1つのレーダー局のみでは、視線方向 (レーダー局と観測点を結ぶ直線上) 成分の流速しか分かりません。2ヵ所以上のレーダー局で観測したデータをベクトル合成することで、計測したい地点の

海洋短波レーダーは、基地局から電波を放射し、海面に反射して返ってきた電波の波長から海の流れなどを調べるシステムです。海流の研究のほか、漁場予測や海上交通安全などのためにも利用されています。海洋短波レーダーのような遠隔で計測する手法では、計測値を実際に現場で観測機器を使って計測したデータと照合することが重要です。私たちは、そのようなデータ品質管理に向けた努力をしつつ、津軽海峡周辺の海洋環境に関する研究を進めています。

海の流れの方向と速度を求めることができます。

海洋短波レーダーの利点と欠点

JAMSTECが津軽海峡で使用している海洋短波レーダーの周波数は13.9MHz (メガヘルツ) です。日本国内で海洋短波レーダーとして使っている電波は、5MHz帯と13MHz帯、24MHz帯の3種類があります (ほかにVHF帯を用いた海洋レーダーなどもあります)。周波数が低いほど遠くまで電波が届きますが、得られるデータの空間分解能は粗くなります。津軽海峡の地理的な規模から、私たちは13MHz帯のレーダーを使っています。なお、私たちが用いているレーダーの装置はJAMSTECが開発したのではなく、アメリカのCODAR社で製造・販売しているものです。

海洋短波レーダーには利点と欠点それぞれいくつかあります。

利点としてはまず、流況などの海洋情報を、空間的な広がりを持ってほぼ瞬時に把握できることが挙げられます。さらに、計測を続けることで時間変化を詳細に捉えることができます。同じような情報を直接観測で得るためには、海域に膨大な数の観測機器を設置するか、あるいは船舶での移動観測を延々と続けなければなりません。膨大な費用と労力が必要になり、非現実的です。

また、レーダー局は陸上にありますから、海中に設置する観測機器と比べて維持管理が非常に簡単です。荒天だと船を出せませんが、海洋短波レーダーは陸上にあるので荒天時でも運用が可能なおも利点の1つです。



ささき・けんいち。1971年、北海道生まれ。北海道大学大学院地球環境科学研究科修士。博士 (地球環境科学)。名古屋大学大気水圏科学研究科COE研究員、東京農工大学農学部COE研究員を経て、2002年よりJAMSTEC海洋観測研究部特別研究員。2014年より現職。専門は化学海洋学。化学トレーサを用いた海盆規模の海洋循環研究のほか、現在は海洋短波レーダー観測などによる沿岸環境研究にも携わる。

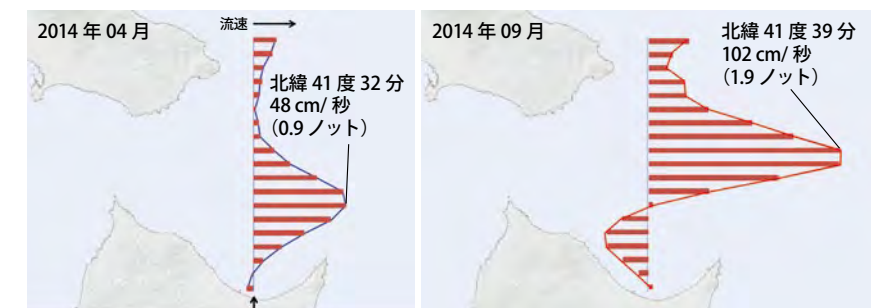


図2: 東経141.25度線を通過する月平均東西成分流速の季節変化。全体的に東向きに流れている。2014年4月に比べて、9月は流軸が北に移動し、流速がより速いことが分かる。

一方で、海洋短波レーダーには欠点もあります。まず1つ目は、海の流れしか計測できないことです。海の内側の流れを知ることはできません。2つ目は、たとえば流速計で行うような直接観測に比べると、どうしても精度・確度が劣ります。3つ目は、流れではないほかの現象を、流れとして誤認識する場合があります。たとえば、強風による波しぶきを流れとして捉えてしまうことがあります。

津軽海峡での東西方向の 流れの季節変動

図2は、東経141度15分の線を横切る流れについて、2014年4月と9月それぞれの月平均を調べたものです。流れをベクトル分解して東西方向だけを見ています。短い時間スケールで見ると、潮汐の影響などによる複雑な変動をしています。1ヵ月間の平均の流れを見ると、おおむね東向きに流れています。

1年間分のデータを同様に解析することで、津軽暖流が最も速く流れる場所「流軸」が、季節によって南北に変動し、さらにその流速も季節変動していること

が分かりました。4月から7月にかけて流軸が少しずつ北上しつつ流速が上がり、12月から2月にかけて流軸が南下しつつ流速が低下するように季節変動していたのです。

津軽海峡を抜けた後の津軽暖流は、北海道側にぐるりと渦を巻くように広がる「渦モード」と、本州の三陸沿岸に沿って南下していく「沿岸モード」という2つのモードを取ることが知られています。海上保安庁の海洋速報によると、2014年は6月下旬から7月にかけて渦モードに移行し、11月下旬に沿岸モードに移行しています。このようなモードの切り替わりは漁場形成などにも影響するので、漁業者にとっても重要な情報です。流軸の変動とモードの切り替わりがほぼ同時に起きていることから、津軽暖流の流軸の季節変化は、このモードの切り替えと関連しているのではないかと考えています。

流れの情報はさまざまな場面で利用

海の流れの情報を利用したいのは、私たち研究者ばかりではありません。津軽海峡に関していえば、たとえば漁師さ

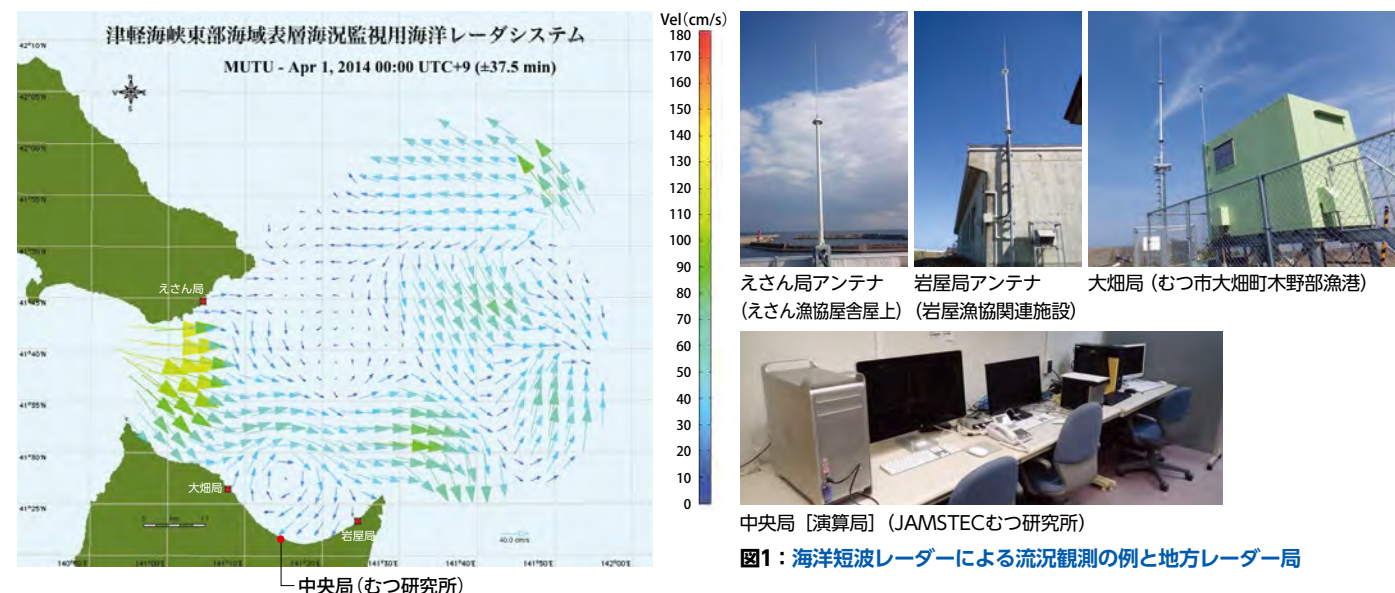


図1: 海洋短波レーダーによる流況観測の例と地方レーダー局



図3：北海道大学水産学部附属練習船「うしお丸」船上での係留系の投入風景

図4：海洋短波レーダーと現場のデータの比較

左が南北成分、右が東西成分を比較したものである。横軸が現場海域で電磁流速計によって計測した値で、縦軸が海洋短波レーダーによって計測した値である。

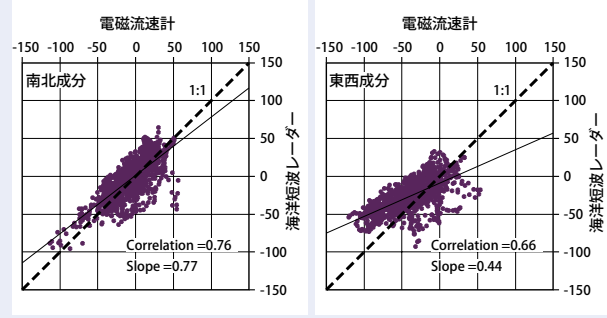
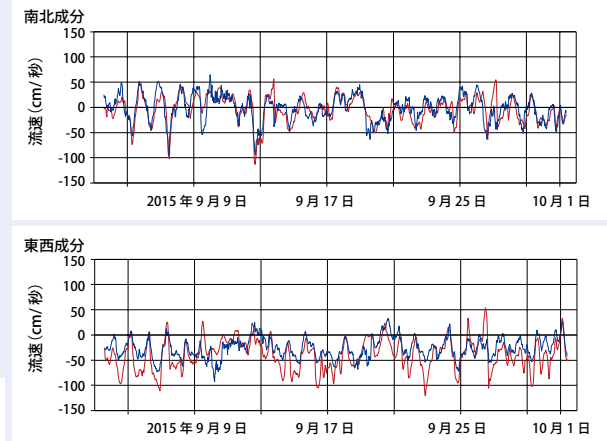


図5：海洋短波レーダーと現場のデータの時系列での比較

南北成分はよく合っている。東西成分は変動パターンは合っているが、流れの強度に不一致が見られる



んたちにとっては重要な情報になるでしょう。レーダーアンテナの設置などで漁業協同組合が協力してくれるのもそのためだと思います。

そこで、私たちが海洋短波レーダーで観測した海の流れの図をいつでも誰でも見ることができるようウェブサイトを構築しました。それが津軽海峡東部海洋レーダーデータサイト、MORSETS 海洋短波 (URL: <http://www.godac.jamstec.go.jp/morsets/j/top/>) です。2015年秋から、JAMSTEC地球情報基盤センターとむつ研究所が共同で運用しています。海洋短波レーダーのデータは30分置きに解析して流況図を作成しており、ウェブサイトのデータもそのたびに更新しています。潮流にはある程度の周期性があるため、それを確認できるように2日前にさかのぼって連続再生する機能もあります。また教育研究などの非営利目的であれば、ユーザー登録することによって図のもとになった数値データをダウンロードすることもできます。

海洋短波レーダーによる観測は、日本各地で行われています。私たちは海洋短波レーダーのデータを、海環境を研究するための基礎データとして利用していますが、ほかにもさまざまな目的で利用されています。たとえば北海道大学では、流水観測のためにも海洋短波レーダーを利用しています。

海洋短波レーダーのデータは、漁場予測や漁業管理、海上交通安全などにも利用できます。内湾ではごみや有害物がどのように流れるかといった調査や、赤潮や青潮のモニタリングにも利用されています。解析方法を変えることで、海上の風向や波浪の推定にも利用

できます。理論上は、津波の検出にも利用できるようです。

対馬海峡では九州大学応用力学研究所が、宗谷海峡では北海道大学低温科学研究所が、海洋短波レーダーによる観測を行っています。私たちJAMSTECの観測と合わせると、対馬海流の入り口1ヵ所と出口2ヵ所を海洋短波レーダーで観測していることになります。対馬海流系の理解を目指して、九州大学、北海道大学、JAMSTECの3者で連携して研究を進めているところです。

現場観測のデータとの比較が重要

海洋短波レーダーによる観測のようなりモートセンシングでは、実際に現場で観測したデータと比較して、どれだけ合っているかを確認することは非常に重要です。

私たちは、北海道大学との連携協定のもと、同大学水産学部附属練習船「うしお丸」に年4回程度乗せてもらって津軽海峡の観測を行っています。その観測の一環で、海洋短波レーダーの計測範囲内に観測点を設け、電磁流流速計を搭載した係留系を設置しました (図3)。約1ヵ月後に青森県大畑町漁業協同組合の協力でそれを回収し、海面下2m

に設置した流向流速計の観測結果とレーダーのデータを比較しました。

それぞれのデータを、東西方向と南北方向の成分に分けた上でプロットしたのが図4です。縦軸がレーダーのデータ、横軸が現場観測のデータで、両方が一致すれば、1:1を示す黒い点線の上にプロットした点が乗ることになります。図4左は南北成分についてのグラフで、ややばらつきはありますが、おおむね黒い点線の周囲にプロットされています。一方で東西成分についてのグラフでは、プロットの分布が黒点線よりも少し傾きが小さいように見えます (図4右)。

図5は、同じデータを時系列に並べて、1ヵ月間の変動を比較した図です。レーダーのデータ (青) と現場観測のデータ (赤) とを比較すると、南北成分についてはよく合っています (図5上)。一方で東西方向の成分について見ると、変動パターンは合っているものの強度に不一致が見られ、現場観測データと比べてレーダーデータは低めの流速となっています (図5下)。レーダーデータを処理する際のパラメータチューニング不足や、空間平均の方法が本海域の事情に合っていないなど、不一致の原因はいくつか

考えられますが、まだ解決には至っていません。現状では、海洋短波レーダーは流速を小さめに見積もっている可能性があります。

このような不一致があっても、“流軸が南北に移動する” というようなパターン解析の場合はあまり問題になりません。一方で定量的な議論をする場合には注意が必要です。私は、津軽海峡を抜けていく水が周囲の海洋環境にどのように影響するのかを調べたいと思っています。そのとき、流速が実際より低く観測されるということになると、たとえば津軽海峡を通過する栄養塩量の見積もりなどに大きく影響してしまいます。それでは困るので、海洋短波レーダーと現場観測の不一致の原因を探るための試みをいろいろ行っているところです。

水温の継続的な計測も行う

むつ研究所では、海洋短波レーダー以外にもさまざまな観測を行っています。その1つが、関根浜での海水温の計測です。

図6は、2002年から2017年までの海水温の季節変化を重ねた図です。2月終わりから3月初旬あたりで水温が最も低くなり、8月から9月にかけて水温が最も高くなるという季節変動が見られます。詳しく見ると、平年値から大きく外れる観測値も見られます。たとえば2010年の夏季には、25℃以上の水温が続きました。陸奥湾はホタテ養殖が盛んですが、その当時は養殖ホタテの大量へい死が起き、大打撃を受けました。

2014年の冬季には異常冷水となりました。この海域は暖流系の水塊が支配的なので、平年は冷たくても7~8℃程

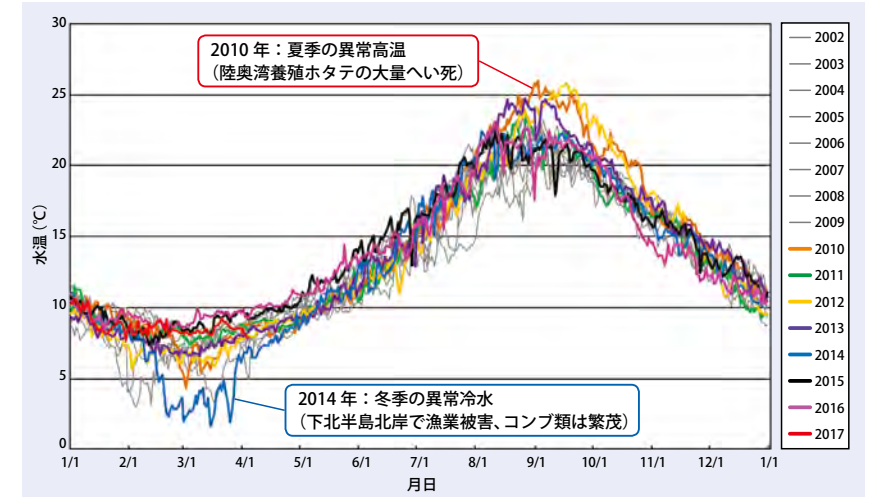


図6：関根浜で連続計測した水温の季節変化 年間の水温の変動を2002年から2017年まで重ねたグラフである。計測した水温のデータは、地方独立行政法人 青森県産業技術センター水産総合研究所の「海ナビ@あomorい」 (URL: <http://www.aomori-itc.or.jp/uminavi/>) で公開されている。

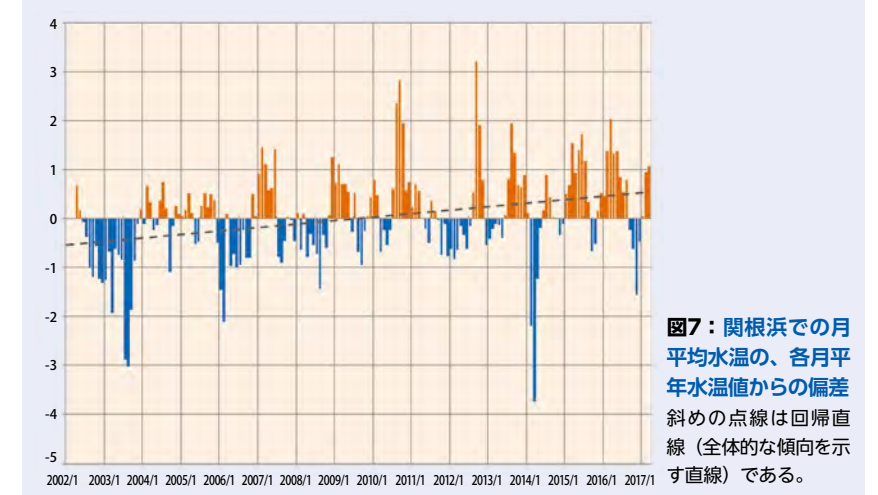


図7：関根浜での月平均水温の、各月平年水温値からの偏差 斜めの点線は回帰直線 (全体的な傾向を示す直線) である。

度ですが、このときは2℃ほどにまで下がってしまいました。下北半島の風間浦村ではアンコウが有名で地域ブランド化もされていますが、そのアンコウが取れなくなりました。一方で、コンブ類は冷たい水を好むので、翌年にはコンブが豊作になりました。

同じデータを使って水温の長期的な傾向を見てみます。図7は、各月の月平均水温から、平年の各月水温を差し引いた偏差を15年分並べたものです。水温が上昇傾向にあり、回帰直線を引くとその傾きは10年間で0.72℃の温度上昇に相当します。

この海域は、日本海からやって来る水塊が支配的です。解析期間がかなり違いますが、日本海中部の温度上昇については気象庁が発表しており、10年あたりになると0.17℃程度です。津軽海峡での温度上昇が直接地球温暖化に起

因すると考えるには、温度上昇があまりにも急過ぎます。

冒頭でお話したように、津軽海峡は、津軽暖流系の水塊が支配的ですが、寒流系 (沿岸親潮) の影響も受けています。このような海域の場合、それぞれの水塊自体の水温変化は小さくても、暖流系と寒流系の水塊の支配率が変われば、結果的に大きな水温変化として捉えられることになります。海洋短波レーダーで海流のデータを蓄積していくことで、それを解析できるようになるのではないかと考えています。

すでに触れたように、私たちの海洋短波レーダーのデータにはまだまだ改善の余地があります。現状のデータ品質に満足しているわけではなく、定量的な研究目的のために、データの品質管理をさらに進めていこうと考えているところです。

『生命の起源はどこまでわかったか』 ——深海と宇宙から迫る』発売中！

地球生命は、どこで、どのように生まれたのか。それはいまだに最大級の謎であり、諸説入り乱れています。そうした生命の起源をめぐる混沌を読み解く決定版が、岩波書店から刊行されました。『Blue Earth』148～150号の特集と特別座談会を



再編集し、最終章にはJAMSTEC深海・地殻内生命圏研究分野分野長の高井研さんによる書き下ろし「生命の起源研究 7つの論点」を収録しています。

高井 研 編
定価 本体1,700円+税
A5・並製・208ページ
岩波書店

『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。

賛助会 (寄付) 会員名簿 2018年3月15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	海洋電子株式会社
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アイケイエス	鹿島建設株式会社
株式会社アイワエンタープライズ	株式会社カネカ
株式会社アクト	川崎汽船株式会社
朝日航洋株式会社	川崎近海汽船株式会社
アジア海洋株式会社	川崎重工業株式会社
株式会社天野回漕店	川崎地質株式会社
株式会社アルファ水工コンサルタント	株式会社環境総合テクノス
株式会社安藤・間	株式会社キュービック・アイ
泉産業株式会社	共立インシュアランス・ブローカーズ
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	株式会社
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	共立管財株式会社
潮冷熱株式会社	極東貿易株式会社
株式会社エス・イー・エイ	株式会社きんでん
株式会社エスイーシー	株式会社熊谷組
株式会社SGKシステム技研	クローパテック株式会社
株式会社エヌエルシー	株式会社グローバルオーシャン
株式会社NTTデータ	ティベロップメント
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	鉦研工業株式会社
株式会社OCC	株式会社構造計画研究所
株式会社オキシーテック	神戸ペイント株式会社
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

国際ビルサービス株式会社	セコム株式会社
株式会社COAST	セナーアンドバーンス株式会社
コスモス商事株式会社	株式会社ソリッド・ソリューションズ
株式会社コノエ	損害保険ジャパン日本興亜株式会社
株式会社コベルコ科研	第一設備工業株式会社
五洋建設株式会社	大成建設株式会社
株式会社コンボン研究所	ダイハツディーゼル株式会社
相模運輸倉庫株式会社	太陽日酸株式会社
佐世保重工業株式会社	有限会社田浦中央食品
三建設備工業株式会社	高砂熱学工業株式会社
三洋テクノマリン株式会社	株式会社竹中工務店
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	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	千代田化工建設株式会社
シチズン時計株式会社	株式会社鶴見精機
シナノン株式会社	株式会社帝國機械製作所
株式会社シーフロアーコントロール	株式会社テザック
清水建設株式会社	寺崎電気産業株式会社
シモダフランチ株式会社	電気事業連合会
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	東亜建設工業株式会社
シュルンベルジェ株式会社	東海交通株式会社
株式会社昌新	洞海マリンシステムズ株式会社
株式会社商船三井	東京海上日動火災保険株式会社
新日鉄住金エンジニアリング株式会社	東京製綱織維ロープ株式会社
須賀工業株式会社	株式会社東京チタニウム
鈴与株式会社	東北環境科学サービス株式会社
セイコーウオッチ株式会社	東洋建設株式会社
株式会社清友農材センター	株式会社東陽テクニカ
株式会社関ヶ原製作所	株式会社東和製作所
石油開発サービス株式会社	トビー工業株式会社
石油資源開発株式会社	新潟原動機株式会社

西芝電機株式会社	富士ソフト株式会社
株式会社ニシヤマ	富士通株式会社
日油技研工業株式会社	富士電機株式会社
株式会社日産電機製作所	古河機械金属株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	古河電気工業株式会社
日東電工株式会社	古野電気株式会社
株式会社日放電子	株式会社ベッツ
日本アキュムレータ株式会社	松本徽章株式会社
日本エヌ・ユー・エス株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海工株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海洋株式会社	株式会社マルトー
日本海洋掘削株式会社	三鈴マシナリー株式会社
日本海洋計画株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本海洋事業株式会社	三井造船株式会社
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	三菱電機株式会社
日本水産株式会社	三菱電機特機システム株式会社
日本電気株式会社	株式会社森京介建築事務所
日本ヒューレット・パカード株式会社	八洲電機株式会社
日本ペイントマリン株式会社	ヤンマー株式会社
日本マンホール・クエスト株式会社	郵船商事株式会社
日本無線株式会社	郵船ナブテック株式会社
日本郵船株式会社	株式会社ユー・エス・イー
株式会社ハイドロシステム開発	ヨコハマゴム・マリン &
濱中製鎖工業株式会社	エアロスペース株式会社
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	
株式会社フグロジャパン	
株式会社フジクラ	

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)

海と地球の情報誌 Blue Earth

第30巻 第2号 (通巻154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 (p2-17)、鈴木志乃 (p1、p20-27、裏表紙)
岡本典明/ブックプライト (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。

おわびと訂正

『Blue Earth』153号 表紙の左下、および特集の1ページ目の左下に掲載している数式に誤りがありました。正しい数式は以下の通りです。おわびして訂正いたします。

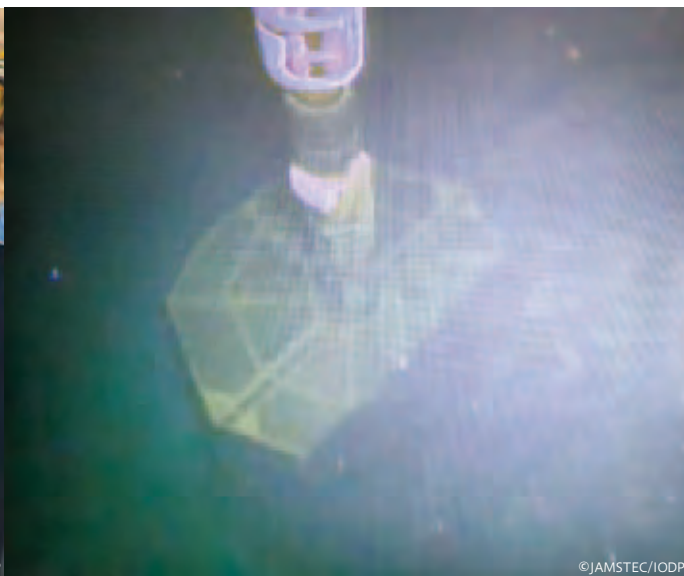
$$\frac{\partial}{\partial t} T(x, y, t) = J(\psi, T) + \nabla^2 T(x, y, t) + cp(x, y, t).$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{d}{dt} \Phi(t) = c + \epsilon \int_0^2 dx \int_0^1 dy Z_s(x - \Phi, y, \Theta) p(x, y, t),$$

$$\frac{d}{dt} \Theta(t) = \omega + \epsilon \int_0^2 dx \int_0^1 dy Z_t(x - \Phi, y, \Theta) p(x, y, t).$$

左は、「ちぎゅう」船上で長期孔内観測システムの設置準備をしている様子。右は、長期孔内観測システムの設置を終え、掘削孔の最上部に孔口装置を取り付けている様子。



南海トラフに3地点目の 長期孔内観測システムを設置

地球深部探査船「ちぎゅう」による国際深海科学掘削計画（IODP）第380次研究航海（2018年1月18日～2月7日）において、南海トラフのC0006地点（水深3,871.5m）で海底下495mまで掘削し、長期孔内観測システムが設置された。長期孔内観測システムは、温度センサー、ひずみ計、広帯域地震計、傾斜計、高感度地震計、強震計、圧力ポートで構成されている。孔内にセメントで固定され、海底下で起きている微小な変動を長期にわたって高感度かつ高精度に観測できる。

南海トラフでは、すでにC0002地点とC0010地点に長期孔内観測システムが設置されている。C0002地点は、巨大地震発生帯の海溝側の端の真上に位置する。C0010地点は、C0002地点の海側に位置し、地震発生帯から海底面へ延びる巨大分岐断層の浅部にあたる。フィリピン海プレートが陸側のプレートの下に沈み込むプレート境界断層の前縁に位置するC0006地点が加わることで、地震発生帯の海溝側の端から海溝軸まで、海底下の変動を観測できるようになった。ひずみの蓄積がどの程度進んでいるのかなど、巨大地震発生の手掛かりが初めて得られると期待される。3月には、C0006地点の長期孔内観測システムを、すでに海底に敷設されている地震・津波観測監視システム「DONET」に接続し、ほかの長期孔内観測システムと同様にリアルタイムで観測データを取得できるようになる。

2018年10月～2019年3月に予定されているIODP第358次研究航海では、C0002地点において地震発生帯の断層まで掘り進み、地質試料の採取を目指す。2007年から行われてきた「南海トラフ地震発生帯掘削計画」の集大成だ。