

海と地球の情報誌

Blue Earth 141



Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

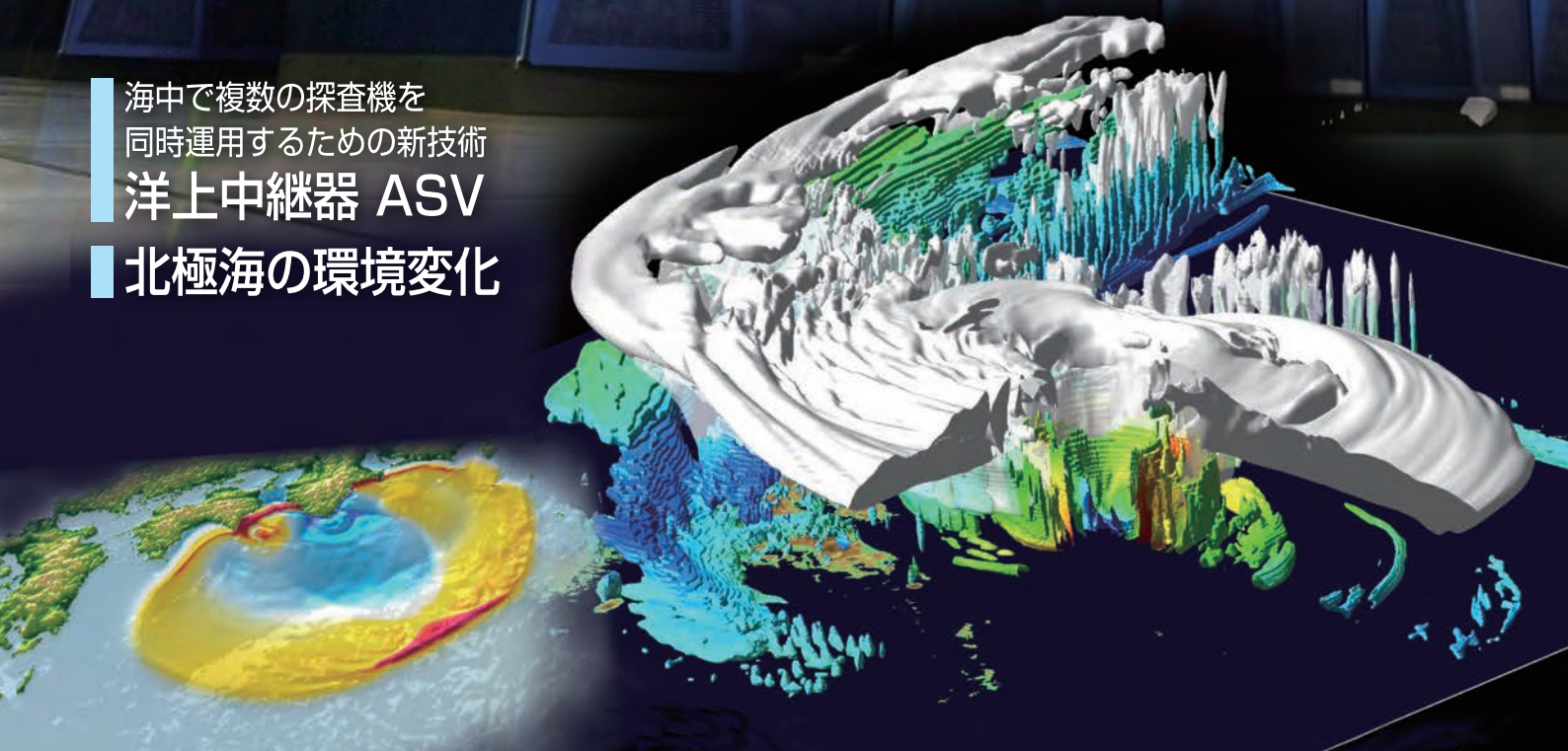
計算科学で海洋地球環境の 未来を解き明かせ！

新「地球シミュレータ」が拓く
「海洋地球インフォマティクス」の世界

海中で複数の探査機を
同時運用するための新技術

洋上中継器 ASV

北極海的环境変化



特集

1 計算科学で海洋地球環境の未来を解き明かせ！

新「地球シミュレータ」が拓く「海洋地球インフォマティクス」の世界

20 海拓者たちの肖像 Special

TEAMS ～海洋科学で東北復興を支援する研究者たち～
ウニとコンブの関係を明らかにし
津波で破壊された“海の杜”の再生に取り組む
吾妻 行雄 教授
東北大学大学院農学研究科

24 JAMSTEC Technology

海中で複数の探査機を同時運用するための新技術
洋上中継器 ASV

28 Marine Science Seminar

北極海の変化
観測研究からわかってきたこと
西野 茂人
北極環境変動総合研究センター北極環境・気候研究ユニット
主任技術研究員

32 BE Room

編集後記
『Blue Earth』定期購読のご案内
JAMSTECメールマガジンのご案内

PICK UP JAMSTEC

退役が決まった海洋調査船「なつしま」・「かいよう」
JAMSTEC横須賀本部の岸壁で最後の対面

裏表紙

表紙

新「地球シミュレータ」(中央)と、新「地球シミュレータ」で再現された、南海トラフ地震による津波シミュレーション(左:関連記事p.14-15)および伊勢湾台風(右:関連記事p.12-13)。

計算科学で海洋地球環境の未来を解き明かせ！

新「地球シミュレータ」が拓く「海洋地球インフォマティクス」の世界

JAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」は、2015年に2度目のシステム更新を行い、計算性能はこれまでの約10倍に向上。大規模なシミュレーション計算を高速で実行できる特性を生かし、海洋地球科学の研究推進に力を発揮している。

新「地球シミュレータ」と情報科学の進化が切り拓く新たな価値の創造

世の中にあふれる膨大なデジタルデータをどのように活用していくかは、近年、大きな関心事になっている。海洋地球科学分野でも同様だ。JAMSTECは海洋地球研究船「みらい」、地球深部探査船「ちきゅう」をはじめとする調査船や深海探査機器、さらには南海トラフの海底で地震・津波データの収集を行う「地震・津波観測監視システム (DONET)」などを活用し、幅広い調査・観測を実施している。加えて、高精度のシミュレーションから得られるさまざまなデータもある。

これらのデータ量は膨大であり、JAMSTECには海洋地球科学に関する“ビッグデータ”が蓄積されている。また、JAMSTECだけでなく、世界中の研究機関や地球観測衛星などで得られたさまざまなデータを含めると、海洋地球データは爆発的に積み上がっている。地球情報基盤センターの高橋桂子センター長は、「こうしたデータを有効に活用し、新たな切り口や手法で結びつけることによって、今まで見えなかった海洋・地球の姿が見えてきます。そして、新たに得られた知見が、新しいサイエンスを切り拓いていくのです」と話す。

地球情報基盤センターは、JAMSTECが保有する観測やシミュレーションのデータという「素材」と、研究開発の「道具」となる「地球シミュレータ」をはじめとする大型計算機システムを活用して、データを質の高い素材として整備し、先端的な計算手法や新しい処理・解析技術の開発研究、さら

に海洋地球科学分野に適した計算機・ネットワーク技術の開発などを担っている。こうした役割を生かして、同センターでは、膨大な観測データやシミュレーションデータの処理技術と高度な計算機システムをダイナミックに連結した新しい情報システムを活用して“実用情報”を生み出す構想「海洋地球インフォマティクス」を進めようとしている。高橋センター長は、「全ての現象が物理法則に基づいているとはいえ、自然現象は非常に複雑で、マルチスケール (多階層)・マルチフィジックス (複数の物理現象の関与) な世界です。私たちは、これまでも大気や海洋、さらには地球内部の活動の再現や予測、解析を行ってきましたが、『海洋地球インフォマティクス』は、その積み重ねをさらに一歩進め、計算能力が向上した新『地球シミュレータ』と解析処理技術を最大限に活用して、巨大な量の海洋地球科学データから情報を取り出し、そ

れらを活用してイノベーションへとつなげていく新たなチャレンジなのです」という。

「海洋地球インフォマティクス」とは何か

「海洋地球インフォマティクス」とはどのような分野なのだろうか。一般にデータ処理や情報の管理・統合といった意味合いで使われる「インフォマティクス」は、情報システム工学や計算科学などに関連する分野といわれる。高橋センター長は、「海洋地球分野に特徴的なデータを、その特徴を利用した新たな手法により新しい情報を生み出し、それらを管理・統合して知識を構築・体系化する分野」と説明する。「さまざまな観測データや精緻なシミュレーションデータから新たな情報を創り出し、さらにその情報の使い方を提示して、世の中に新しいサービスを提供していくことを目指しています。海洋地球科学情報の新しい在り方を示すアプローチ、それが『海洋地球インフォマティクス』です」

たとえば、海洋の観測データは調査船だけでなく、アルゴフロートなどのブイ観測や観測衛星などのいくつも種類のデータがあるものの、それら観測データだけでは、海洋全体の様子や変化をとらえることが難しい。これらの観測に加えて、新「地球シミュレータ」による超大規模で精緻なシミュレーションを行いこれらのデータを統合することで、観測のみあるいはシミュレーションのみでは得ることのできない海洋の全体像を再現することができ、それらの結果を利用して将来の予測ができる。つまり、これら一連の観測とシミュレーションの研究開発が連続的に統合されて初めて海洋の全体像をつかむことができるのである。観測データとシミュレ-

ーションデータからなるデータセットは、たとえば、水産源となる魚介類がどこで獲れたのか、獲れなくなったのはなぜか、という過去の事例メカニズムを説明するだけでなく、将来を予測することも可能とし、それらの情報を漁業者に情報提供することもできるようになり、どのように生物多様性を保持すればよいかについての知見が得られることにもつながる。

一方、気候変動分野においても、新「地球シミュレータ」を活用して高解像度大気モデルによる高精度なシミュレーションが行われ、世界初となる、地球温暖化が進んだ場合の日本の気候予測データベースが構築された（東京大学大気海洋研究所・木本昌秀副所長ら）。今後は、甚大な災害をもたらす極端現象の将来予測や地球温暖化への適応策の検討などに、このデータベースが役立てられるという。新「地球シミュレータ」が稼働し、非常に精緻なシミュレーションを大量に行うことが可能になったことで、希にしか起こらないような現象についてもデータが得られるようになった。これらの巨大なデータから新たな情報を生み出し、さらに情報を発信して活用するまでを“一気通貫”にできる環境が整ったのだ。

「海洋地球インフォマティクス」は 何を実現するのか

『海洋地球インフォマティクス』は、自然と科学技術の両方に向き合い、人々の暮らしや社会が、どうすれば自然を破壊することなく共存していけるのかを考えるための“科学的な根拠に基づいた知恵”を提供していくものと考えています」と高橋センター長は話す。たとえば、なぜ魚が獲れなくなったのかという疑問に、過去と現在の海洋環境を比較しながらそ

の理由を明らかにしたり、地球温暖化が進行することで雨の降り方はどう変わっていくのかという問いに、メカニズムを明らかにしながら予測を行う、——そうした「新しい情報発信のための科学」と説明する。さらに、問いに答えるだけではなく、自然災害を未然に防いだり、その被害を減らすための対策情報をはじめ、環境を考えた都市計画や土地利用などに貢献する情報、風力発電や太陽光発電の効率化といった自然エネルギーの有効活用に向けた情報など、幅広い分野において、私たちがとりうる「アクション情報」を提供していくことができるという。

これまでのシミュレーション科学と「海洋地球インフォマティクス」との違いについて、高橋センター長は次のように語る。「スーパーコンピュータの計算能力の限界とも関係していますが、今までは、海洋地球のさまざまな現象を再現することや、予測シミュレーションを実現すること自体が目標でした。そのため、シミュレーションを実行し、その結果の妥当性の検証が中心でした。このシミュレーションの成功を社会にどのように役立てるかというアクションと結びつけて研

究を進めることが不足していたように思います。今後は、人々のさまざまなアクションによって環境や未来はどう変わるのか、どのような対策を選べば最も効率良く、長く自然と共存できるか、その選択の科学的な根拠となる課題解決型のシミュレーションや予測を実現していくことが求められていると思いますし、それを実現したいと思います」

そのための取り組みが「海洋地球インフォマティクス」と語る高橋センター長は、海洋地球科学の未来を開拓する研究者や技術者に、期待を込めて次のように提案する。「私たちは、世界最先端を目指して研究や技術開発を行っています。世界に通用する成果を挙げていくことは、非常に重要なことです。ただ、それだけでなく、最先端の研究成果や技術開発をどう使い、どこに役立てるのかという視点が、さらに新しい研究開発の視点や知見を生み出すと思います」

新「地球シミュレータ」の稼働により、海洋地球分野におけるシミュレーション科学の可能性が大きく広がろうとしている。「海洋地球インフォマティクス」は、その新たな可能性のトビラを開く、重要なカギの1つであるに違いない。

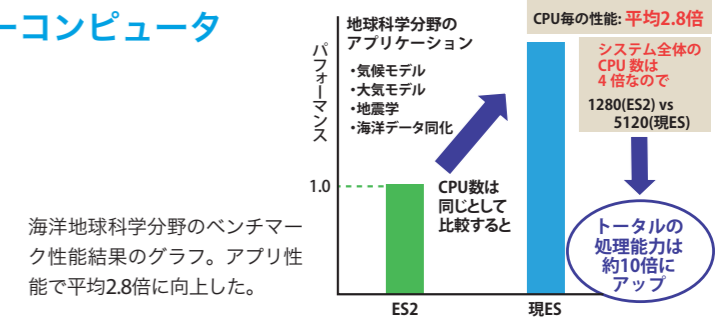
世界の海洋地球科学研究を牽引するスーパーコンピュータ 新「地球シミュレータ」

JAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が、3代目の新「地球シミュレータ」として更新され、2015年6月より本格稼働を開始した。

初代は2002年に運用を開始し、40TFLOPS（1秒間に40兆回の計算速度、理論性能）を達成して世界最速マシンとなり、2年半にわたり世界1位（TOP500）の座を守った。その後、2009年に更新を行い、計算速度は約3倍（131TFLOPS）に向上、さらに今回の更新で約10倍の1.31PFLOPS（1秒間に1310兆回）となった。更新に際しては、実際に海洋地球科学分野のプログラムを走らせて実効性能をテストし、CPUあたり平均2.8倍、トータルで約10倍の性能向上が確認された。また、消費電力も初代が1時間あたり約5MWだったのに対し、約2MW以下になっている。

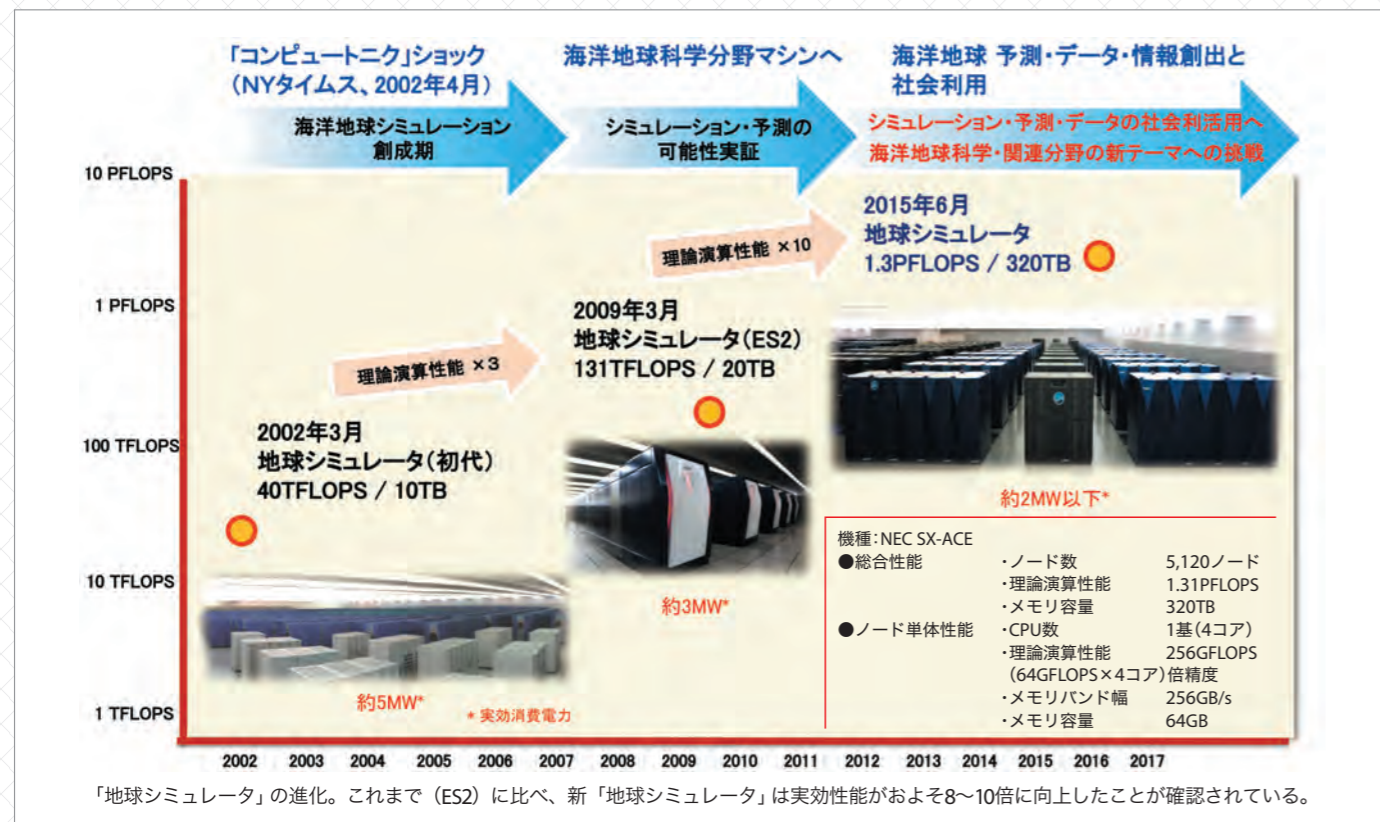
地球情報基盤センター情報システム部の塚越眞部長は、「理論性能だけで比較すると、新『地球シミュレータ』は、世界50～60位（TOP500）あたりになると思います。ただし、メモリ帯域幅が広いこのマシンは、大量のデータを効率的に扱えるため、海洋地球科学分野の計算で力を発揮する特性を持っており、この点では世界トップ10に入る実力を持っていると考えています」と話す。

現在、日本のフラッグシップマシンは神戸の「京」（理化学研究所）で、理論性能は新「地球シミュレータ」の約10倍だ。「京」は、次世代ものづくり、医療・創薬、物質・



エネルギー、宇宙など幅広い分野の研究に活用されています」と塚越部長。「新『地球シミュレータ』は計算資源量では『京』に及ばないが、そのほとんどが海洋地球科学分野に使われているため、この分野の計算資源としては大きな役割を果たしていると考えています。わかりやすくと考えると、『京』は最先端研究を切り拓く突破型の“スーパーカー”、新『地球シミュレータ』は、研究成果を社会実装するなど実用型の“大型トラック”というイメージでしょうか」と説明する。

高精度な大規模シミュレーションの実現に威力を発揮し、海洋地球科学の新たな発展に貢献する新「地球シミュレータ」の今後の活躍に、研究者からも大きな期待が寄せられている。





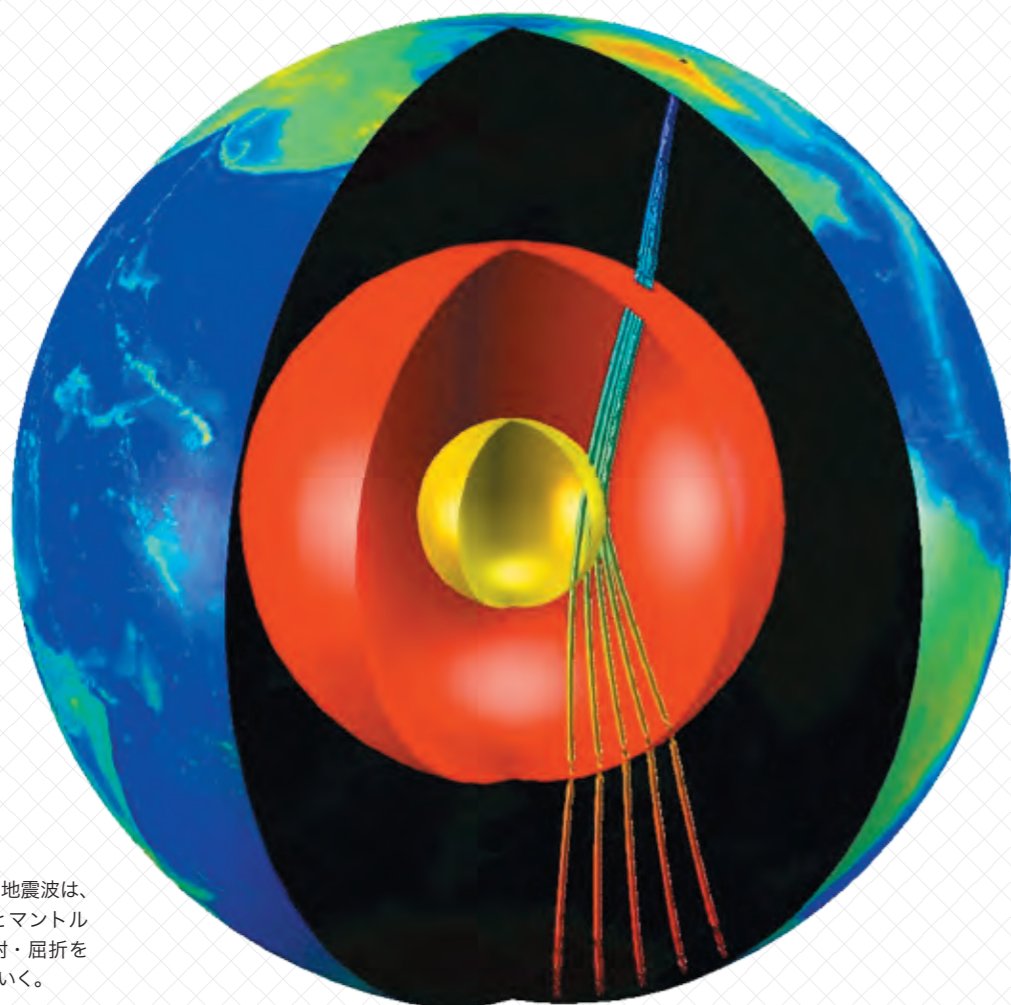
新しい「地球シミュレータ」で可能になった 全球地震波伝播シミュレーションによる 地球内部構造の解明

地震波から地球内部の構造を読み解く

地球のどこかで大きな地震が起こると、地震に伴って発生した波が地球全体に広がっていく。こうした地震波を計測することにより、まるでX線で体内の状態を明らかにするレントゲン検査のように、地球の内部構造を解明する研究が進められている。だが、たとえば地球の深部を構成する内核と外核の境界については、今なお詳細にはわかっていない。その境界は地球の磁場をシミュレーションする上でも重要な情報だけに、内核・外核を通過してきた地震波（PKP波と呼ぶ）に注目した研究が行われている。

PKP波は、地球の表層で発生した後、性質が異なるマン

トル・外核・内核を通り抜けてくるために、その伝播経路は非常に複雑になる。地震波は、液体の外核より固体の内核で速く伝わることで生じる時間差だけでなく、内核と外核、外核とマントルの境界で生じる反射、屈折を経て伝わっていく地震波もあるため、地球内部で地震波が交錯してしまう。その結果、複数の地震波が混ざり合ってしまう、そのままでは地震波から地球内部の構造を読み解くことはできない。そこでコンピュータによるシミュレーション研究が重要になる。地球情報技術部の坪井誠司部長は、次のように説明する。「未だ詳細に明らかになっていない地球内部の構造を暫定的に決めて、そのモデルをつくります。このモデルで実際に起こった地震の波形（理論地震波形）をコンピュータ上で再現して、



地球内部を伝播する地震波は、内核と外核、外核とマントルの境界で生じる反射・屈折を経て複雑に伝わっていく。

図版提供：田中聡主任研究員（地球深部ダイナミクス研究分野）

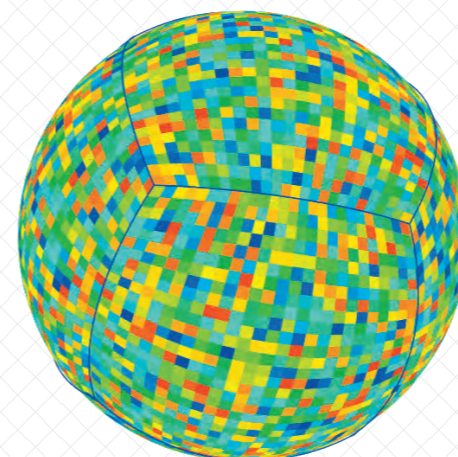
地震波がどのように伝わるかをシミュレーションします。こうして得られた理論地震波形と観測された地震波を比較することで、モデルの確かさがわかります。観測された実際の地震波形と理論地震波形の差が小さくなるようにモデルを改善し、観測された地震波と完全に一致すれば、理論上、そのモデルは地球内部の構造を正確に表現していると考えられます」

地球内部の構造が未解明であっても、シミュレーションを行う前提となるモデルを構築し、計算によって得られた理論地震波形を観測された地震波に近づけることで、正確な内部構造に迫ろうとしているのだ。

2015年5月の小笠原深発地震の謎に迫りたい

こうしたアプローチにより、複雑な伝播経路を伝わってきた地震波から地球内部の構造を明らかにするためには、地震波を再現するためのシミュレーション精度を高めなければならない。

地震が起こると、さまざまな周期を持つ揺れ（振動）が発生する。数値地震波形は、地球自由振動の重ね合わせによって解析的に計算することができるが、シミュレーション精度を高めるには、より短い周期の振動まで計算することが求められる。だが、周期が短くなるにつれて重ね合わせるモード数が増加するので、地球自由振動による理論地震波形は数秒の精度が限界だった。一方、運動方程式を数値的に解く手法では計算量は膨大になってしまうので、これまでの「地球シミュレータ」では、全球を4,056分割して計算した場合、地震波の周期はせいぜい3.5秒だったという。「周期3.5秒では地球内部の構造を明らかにするのに十分な精度とはいえません。1秒程度まで短くしたいところです。日本のスーパーコンピュータで最も計算性能に優れた『京』の全ノードの99%に

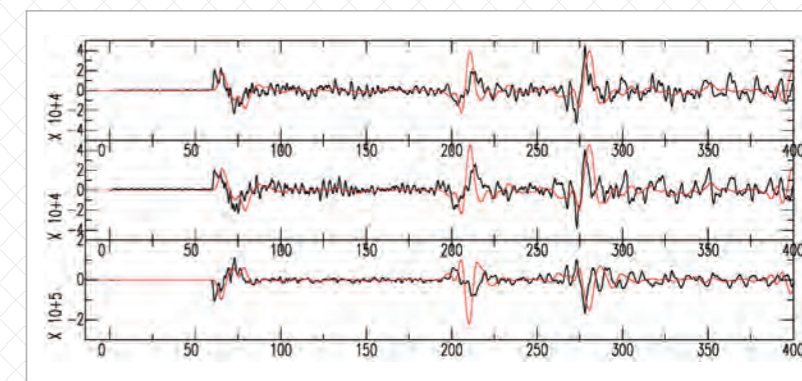


これまでの「地球シミュレータ」507ノードのシミュレーションで用いたメッシュ。全球を4,056分割し、地震波の周期3.5秒以上でしか計算できず、地球内部の構造を明らかにするのに十分な精度ではなかった。新「地球シミュレータ」では、より詳細なシミュレーションが実施される予定だ。

あたる82,134ノードを使ったと仮定して、どれくらいの計算ができるかを調べると、周期1.2秒で7分間の理論地震波の計算が約6時間で実行可能だとわかりました。それだけ精度を高めるには膨大な計算をしなければなりません。新しい『地球シミュレータ』なら全ノードの98.5%を使って、周期1.2秒の精度で7分間の計算を、1日以内で行うことが可能です」と坪井部長は話し、現在、新しい「地球シミュレータ」を活用した計算を進めている。

このように周期1.2秒の精度で地球内部の構造に迫ることができれば、2015年5月30日に起こった、小笠原深発地震の研究にも「地球シミュレータ」を活用できると期待されている。通常、プレート境界域で発生する地震は、沈み込んでいるプレート境界が滑るか、プレート内部がひび割れるようにして地震が発生すると考えられている。ところが、この小笠原深発地震は、プレートではなくマントル内部で起こった可能性が示唆されているが、断層の滑り方は謎のまま。ただ、この地震についても、遠く離れた場所で地震波が観測されており、その観測値と理論地震波を比較することで、滑り方を明らかにできるのではないかと考えられているのだ。坪井部長は、「余震が発生すれば断層のずれ方を推定できるのですが、小笠原深発地震では余震は1度だけでした。そこで、断層がプレート境界に対して水平方向に滑ったのか、直角方向に滑ったのか、2つの仮説を立て、観測値がどちらの仮説に基づく理論地震波に近似かを調べました。しかし、これまでの計算では精度が低いため、2つの仮定でほとんど差が表れず、地震の原因を明らかにできませんでした」という。

今後、新しい「地球シミュレータ」を用いて、周期1.2秒でシミュレーションを行えば、小笠原深発地震で断層がどのように滑ったかが明らかにできるかもしれない。計算性能の向上により、高精度なシミュレーションが可能になったことで、「地球シミュレータ」は地球の内部構造のみならず、原因不明の地震の謎に迫る新たな手段を私たちに与えてくれたといえるだろう。



2015年5月30日に発生した小笠原深発地震の地震波に関するノルウェーでの観測波形とシミュレーションによって得られた理論波形の比較。理論波形（赤線）と観測波形（黒線）との一致はよく、震源の深さを約678kmとすることで観測をうまく説明できていた。図は、上からEW、NS、およびZ成分の400秒間の速度記録。

気象モデルに樹木モデルを加え 都市の暑熱環境における 樹木の効果を明らかに

高層ビルに囲まれた中庭緑地と気温の関係

近年、夏季の熱中症が大きな問題になっている。熱中症による救急搬送者数は年間約5万人に及び、死亡数は年平均492人(1994年以降)に達するという。特に注目されているのが、都市部でのヒートアイランド現象の進行に伴う気温上昇だ。これにより夏季の暑熱環境は悪化し、熱中症のリスクが高まっている。現在、ヒートアイランド現象の対策の1つとして、緑地整備の取り組みが行われている。ビルの谷間に植えられた緑や屋上の緑地は、都心で働く人々や訪れる人たちに安らぎを与える“オアシス”にもなっているが、こうした小規模な緑地がどの程度、ヒートアイランド現象を抑える効果を持っているかは、これまで明らかになっていなかった。

そこで、2009年に完成した東京・丸の内パークビルを設計・施工した三菱地所設計と竹中工務店は、2012年の夏に大手町・丸の内・有楽町周辺での空間の利用状況を調べるとともに、丸の内パークビル周辺で気温の測定を行った。その結果、周辺に比べて樹木を植えた同ビルの中庭の気温が低く、

緑地がヒートアイランド現象の緩和に効果を発揮していることが示唆された。翌2013年には、より詳しい観測調査を実施し、3次元的に配置された観測点で、気温・樹冠の表面温度、風向・風速などの測定を行った。

これらの詳細な環境データを蓄積した上で、中庭緑地がどのように気温の低下に関わっているかを調べるため、「地球シミュレータ」による精緻な熱環境シミュレーション技術を持つJAMSTEC地球情報基盤センターと連携し、検証が実施された。先端情報研究開発部地球シミュレーション総合研究開発グループの大西領グループリーダー(GL)は、その内容について次のように説明する。「観測が行われた日のうち、最も中庭緑地の夜間の温度が低下した2013年8月7日～8日の夜を選び、マルチスケール大気海洋結合シミュレーションモデル(MSSG=Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment:メッセージ)によるシミュレーションを行いました」

地球規模で地球温暖化などの予測を行う場合は、全球スケールの気候モデルが利用されるが、その影響はローカルな気象現象にも及ぶ。だが、これまではローカルはローカルで、

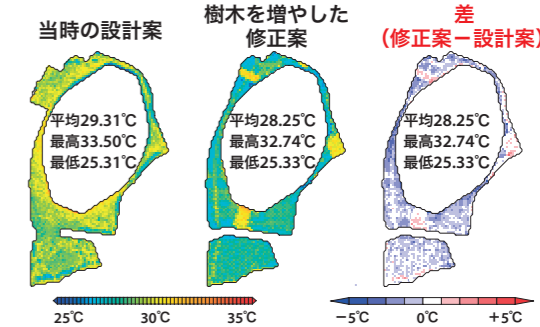
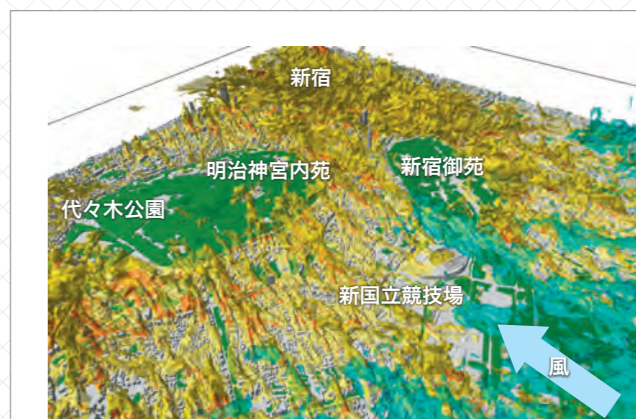
別のモデルが使われていた。こうした異なるスケール間の相互作用を接続し、全球スケール・地域スケール・都市スケールを1つの数値モデルで取り扱うマルチスケールなモデルが必要だという観点から、「地球シミュレータ」の優れた計算性能を活用して、MSSGが開発された。このモデルを用いれば、地球規模の気候変動から、丸の内周辺といった小さなエリアの環境変化までシームレスに扱うことができる。

樹木が増えれば都市の暑熱環境は改善できる

ただし、中庭緑地が持つ気温低下効果を検証するには、気象モデルに樹木による気温低下効果を加えなければならない。先端情報研究開発部地球シミュレーション総合研究開発グループの松田景吾研究員は、「緑地周辺の気温の低下には、樹木が日射の一部を遮ったり、風を弱めたりする効果、さらには樹木の蒸散も関わっているため、こうした効果を組み込んで1~5mの解像度で樹木の形状を再現する樹木モデルを加え、さらに蓄熱したビルの壁面からの加熱なども考慮した3次元放射熱輸送モデルをMSSGに取り入れました。三菱地所設計、竹中工務店から提供してもらった壁面や屋上緑化などの詳細なデータを加えてシミュレーションを行ったところ、中庭内の気温は街路に比べて低下することが確認されました」と話す。また、仮想的に樹木がない条件でのシミュレーションも実施。その結果、樹木がないケースの方が中庭内外での温度差が小さかった。さらに樹木があるケースでは、樹冠の放射冷却と蒸散による葉面温度の低下により、空気が冷やされることも確かめられた。

こうしたシミュレーションは、より広い地域でのヒートアイランド現象の検証にも利用することができる。大西GL、松田研究員らの研究グループは、明治神宮外苑周辺を対象に樹木が環境に与える効果についても調べた。「2020年の東京オリンピック開催に伴って国立競技場が建て替えられますが、2014年当初の案(いわゆるザハ案)では既存の樹木を伐採して、人工の地盤を建設する予定になっていました。人工の地盤の上では日陰が少なく、7月下旬から8月という開催時期を考慮すると、相当暑くなるはず。そこで、人工地盤をやめて樹木を増やすという、中央大学・石川幹子教授グループの案を想定して、暑さ指数がどの程度変化するかを予測しました」と大西GLは説明する。

暑さ指数は、気温・湿度・放射熱を考慮した体感温度指標

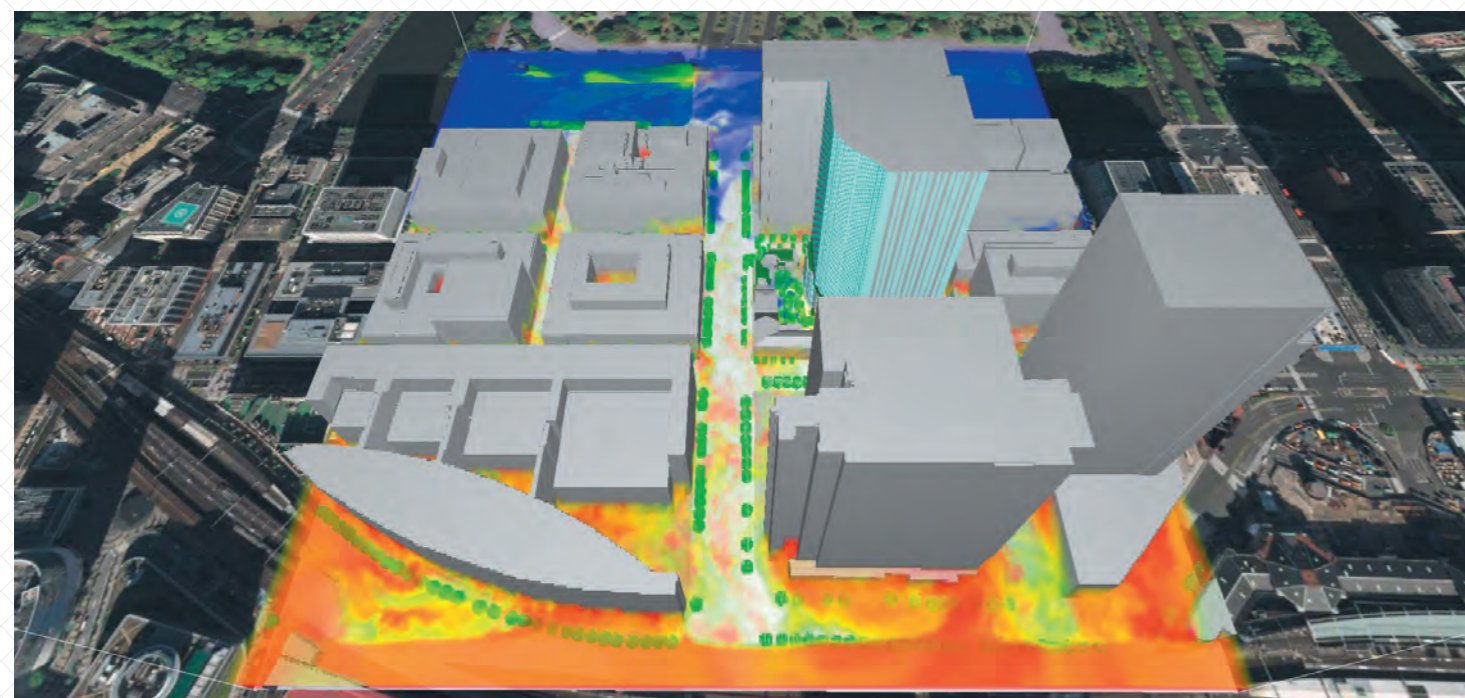


明治神宮外苑周辺域の樹冠解像熱環境シミュレーションによって試算された国立競技場(2015年夏当時)敷地内の暑さ指数分布(地上1.1m)。競技場周辺に樹木を増やすことにより、その日陰効果・蒸散効果で暑さ指数が低下し(平均で約1.0°C、局所的には最大で約4.6°C)、暑熱環境が改善できる可能性が示された。

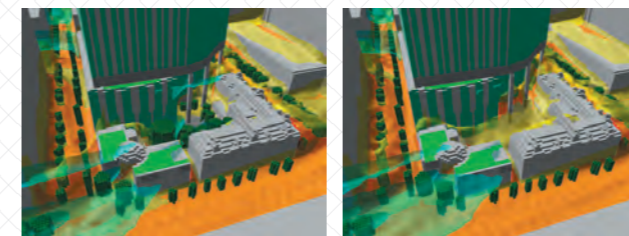
(松田景吾,大西領,山田悟史,大和広明,石川幹子,高橋桂子,「夏季晴天時における新国立競技場周辺域の樹冠解像熱環境シミュレーション」,第28回数値流体力学シンポジウム,A08-4,東京,12月,2014.より一部改変して引用)

の1つで、熱中症リスクの指標とされている。その暑さ指数が、シミュレーションの結果、平均で約1.0°C。局所的には最大で約4.6°Cも低下すると予測された。競技場の周囲に樹木を増やすことにより、今後、神宮外苑周辺の暑熱環境の大幅な改善が期待される。

樹冠の効果は考慮できているが、より樹冠モデルを精緻化することで、今後、蒸散による葉面温度の低下が、たとえば針葉樹か広葉樹かでどのように違うのかなども明らかになれば、最も気温を下げる樹種をシミュレーションによって選ぶことも可能になるだろう。樹木モデルを加えた新たなMSSGによる都市の暑熱環境のシミュレーションは、ヒートアイランド現象で悪化する都市環境を改善するための効果的な方策を私たちに提案してくれるに違いない。



丸の内パークビル(壁面が水色のビル)周辺の気温分布を再現したシミュレーション結果(2015年8月8日午前2時20分)。暖色が高温、寒色が低温であることを示す。(空中写真データ:国土地理院)



丸の内パークビル中庭周辺の樹冠分布と気温分布の数値シミュレーション結果(2013年8月8日午前2:30ころ)。左は中庭に樹木がある場合で、右は中庭に樹木がない場合。気温(10分間平均値)の等値面を半透明曲面で3次元表示している(青-黄-赤の順に気温が高くなる)。中庭に樹木がある場合、樹冠の放射と蒸散により空気が冷却され、樹木がない場合に比べて中庭内外の気温差が大きくなるのが明らかになった。建物表面の緑色は、屋上緑化と、ガラス面を表す。

観測データを統合して海洋環境を再現し 海洋データセットを構築

観測データをもとに実施した高精度な海洋再解析実験

周囲を海に囲まれる日本では、海運や水産などの産業で海を利用している。日本周辺の海洋環境に変化が生じれば、これらの産業にも影響が及ぶ。たとえば、日本の南岸を流れる黒潮の速度は時速4~5kmにもなるため、黒潮を利用して船を走らせることができれば、燃費の節約になる。また、黒潮は岸から離れて大きく蛇行することがある。カツオなど黒潮とともに回遊する魚を漁獲する漁業者にとって、流路の変動は大きな関心事だ。海流だけでなく、水温なども魚介類の好適生息域と関係がある。そのため、日本の気候予測研究はもちろんのこと、こうした産業分野においても、日本近海の海洋環境を精度よく再現・予測するシステムが求められている。

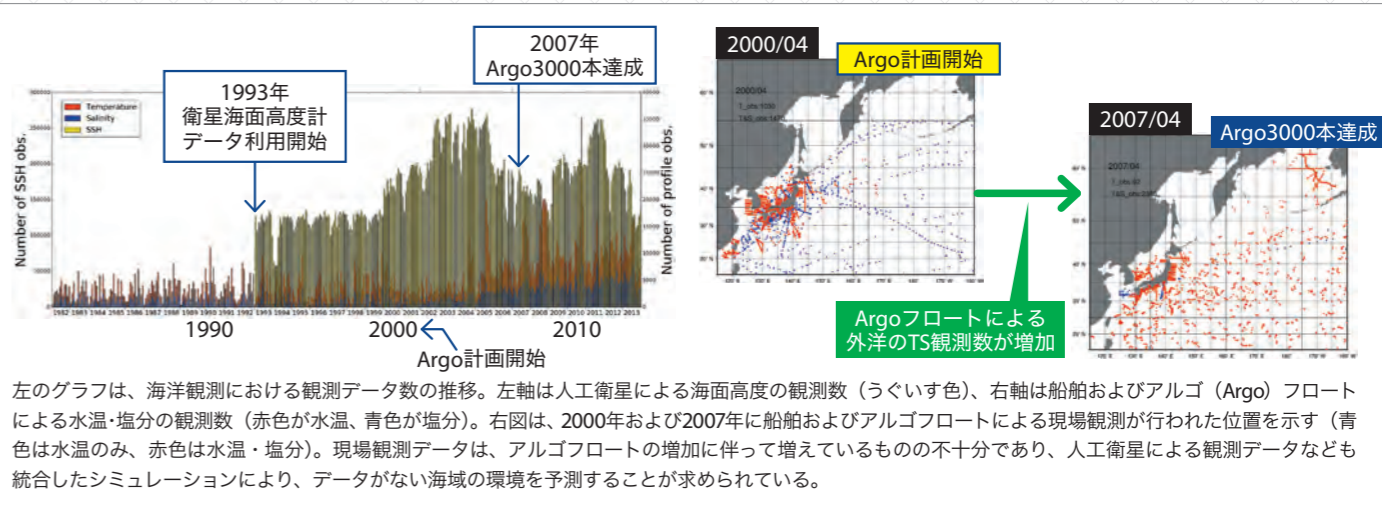
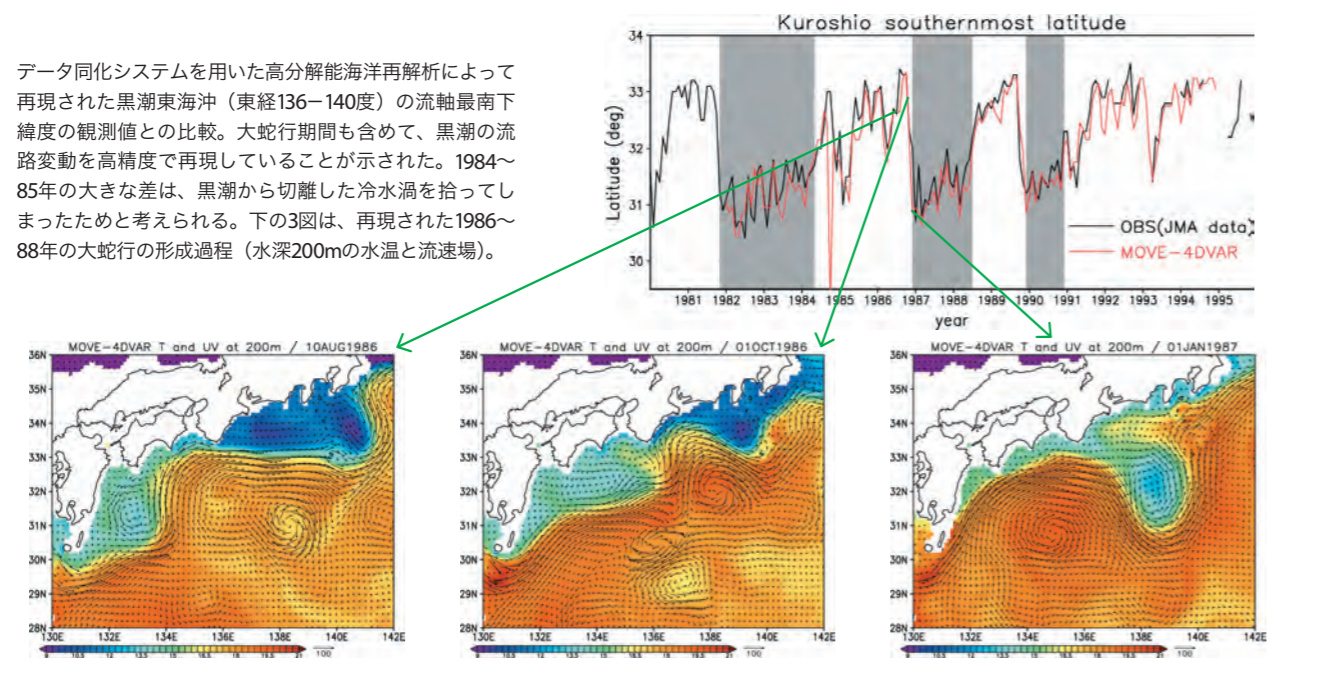
海洋環境の再現・予測の精度を高めるには、観測データが不可欠だ。しかし、海洋での現場観測はいつでもどこでも自由に行うことができるわけではなく、現場観測データで広大な海洋の環境をくまなく理解することは難しい。地球情報基盤センター統合地球情報研究開発部統融合情報研究開発グループの石川洋一グループリーダー（GL）は、「日本近海に関しては、調査船などによる多数の現場観測データが公表されていますが、網羅的な観測調査には多額の費用がかかり、現場に行っても海況が荒れて観測できないこともあります。そのため、観測データが断片的になっている海域や時期があります。今日で

は、地球観測衛星によるリモートセンシングのデータに加えて、地球全域の海洋環境の変動をリアルタイムにとらえることが可能なアルゴフロートが展開され、観測データは充実してきていますが、それでも十分に整っているとはいえません」と話す。

アルゴフロートは、自動で浮き沈みしながら深度2,000mまでの水温や塩分などを観測する円筒状の観測機器で、国際協力のもと、アルゴフロートを世界中の海に展開する「アルゴ計画」が2000年から開始され、2007年に3,000台のフロートが稼働するまでになり、現在では約4,000台から詳細な観測データが得られている。だが、それでも、観測データは不足している。特に10年前、20年前の過去の観測データ数が少ない。一般に平年値を算出するために必要な統計期間は30年であることから、海洋環境の再現や予測には、少なくとも過去30年以上の長期データセットが必要だ。そこで、石川GLらは断片的な海洋観測データを統合し、「地球シミュレータ」を活用して、信頼できる長期データセットを構築することを目指した。

たとえば天気予報では、観測データをもとに物理学の方程式に従って計算・予測する数値予報値に、最新の観測データを照らし合わせて修正する解析予報サイクルを一定間隔で繰り返している。こうすることにより、予報値のずれを補正し、予報システムの精度を高めている。石川GLらは、この解析予

データ同化システムを用いた高分解能海洋再解析によって再現された黒潮東海沖（東経136-140度）の流軸最南下緯度の観測値との比較。大蛇行期間も含めて、黒潮の流路変動を高精度で再現していることが示された。1984~85年の大きな差は、黒潮から切離した冷水渦を拾ってしまったためと考えられる。下の3図は、再現された1986~88年の大蛇行の形成過程（水深200mの水温と流速場）。



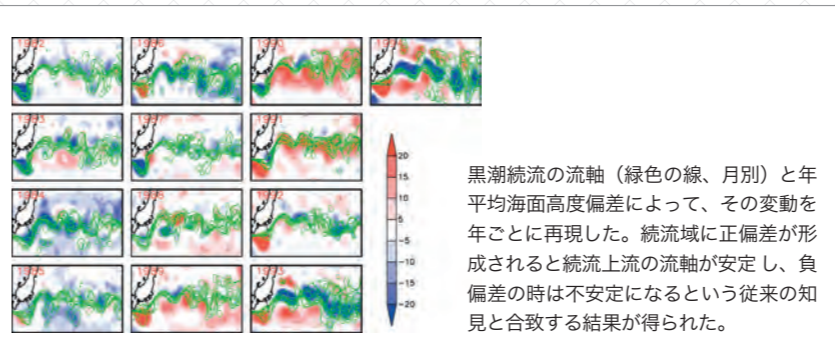
左のグラフは、海洋観測における観測データ数の推移。左軸は人工衛星による海面高度の観測数（うぐいす色）、右軸は船舶およびアルゴ（Argo）フロートによる水温・塩分の観測数（赤色が水温、青色が塩分）。右図は、2000年および2007年に船舶およびアルゴフロートによる現場観測が行われた位置を示す（青色は水温のみ、赤色は水温・塩分）。現場観測データは、アルゴフロートの増加に伴って増えているものの不十分であり、人工衛星による観測データなども統合したシミュレーションにより、データがない海域の環境を予測することが求められている。

報サイクルの手法を過去の海洋観測データに適用した海洋環境の再解析、つまり「解析」を過去にさかのぼってやり直すことで、これまでにない高い空間解像度を持ち、長期間にわたるデータセット、「海洋高分解能長期再解析データセット」の構築に取り組んできた。

旧「地球シミュレータ」で1年かかる計算を わずか3カ月間で完了

前述した通り、観測データは断片的であるため、石川GLらは「4次元変分法」と呼ばれる最先端の高度なデータ同化手法を用いることにした。この方法について、石川GLはこう説明してくれた。「船舶やアルゴフロートによる海洋物理観測データや地球観測衛星で得られた観測データなど、多種多様なデータを統合して、10日サイクルでデータ同化を行うシステムです。これにより、観測データに合うように海洋環境を再現していきました。観測データに合わせて再現することで、空間的・時間的にデータがないところを補ったデータセットをつくることのできるのです」

ただし、日本周辺の海洋環境を精度よく再現するには高い分解能が求められる。たとえば、黒潮の幅は数十kmから100kmだ。黒潮の蛇行や、渦ができる様子をコンピュータ上で再現しようとすると、少なくとも10kmという高い分解能が求められる。その分解能で、過去30年以上のデータセットをつくらうとするのだから、必要な計算量は膨大なものになってしまう。実際に、石川GLらが旧「地球シミュレータ」で計算した場合に必要な期間を調べたところ、全ての計算資源を



黒潮統流の流軸（緑色の線、月別）と年平均海面高度偏差によって、その変動を年ごとに再現した。統流域に正偏差が形成されると統流上流の流軸が安定し、負偏差の時は不安定になるという従来の知見と合致する結果が得られた。

占有しても1年間もかかることがわかった。現実的に「地球シミュレータ」を1年もの間占有することは困難であり、計算には数年はかかってしまうことになる。そのため、これまで実施できなかったが、新しい「地球シミュレータ」が整備されたことにより、状況は一変した。この研究は、新「地球シミュレータ」を活用して海洋地球科学分野で画期的な成果創出を目指す資源配分枠「特別推進課題」の1つに選ばれ、いち早く計算の実施が可能になり、30年間のデータセット作成を、わずか70日間で完了することができた。

こうして日本周辺の海洋環境を再現したデータセットができたことで、さまざまな海洋現象を調べることができるようになった。1986年から1988年にかけて起こった黒潮蛇行の再現なども行われ、精度よく再現できていることが確かめられている。

すでにデータセットは公開されており、研究目的での活用が期待される。たとえば、大量に獲れていたマイワシが急に獲れなくなる代わりに、カタクチイワシが獲れるようになる「魚種交替」という現象が確認されているが、その原因は明らかになっていない。今後、公開されたデータセットと漁獲データを詳細に照らし合わせることで、魚種交替の原因を解明できるかもしれない。さらに、データセットを利用して漁場予測を行い、漁業者に情報提供するためのシステム開発なども始まろうとしている。新しい「地球シミュレータ」によって構築された海洋環境のデータセットは、海洋そのものや水産資源について詳しく理解するための研究を、力強く後押しすることになるだろう。



研究に活用するだけでなく、得られた海洋環境データをタブレット端末などにわかりやすく可視化して、漁場予測支援システムとして活用する技術の開発も進められている。

地球温暖化に向けた適応策の設計に貢献する 気候再現・予測データベースを作成

「緩和策」だけでなく「適応策」も重要

2013年に発表されたIPCC (気候変動に関する政府間パネル)の「第5次評価報告書」は、地球温暖化は「疑う余地がない」ことを示し、21世紀末には世界平均地上気温が、最も温暖化の効果が小さいシナリオ (RCP2.6: 低位安定化シナリオ)でも、1986~2005年を基準として0.3~1.7°C上昇し、最も温暖化の効果が大きいシナリオ (RCP8.5: 高位参照シナリオ)では2.6~4.8°C上昇すると予測した。こうしたことを受けて、温暖化に対する「適応策」の重要性が、あらためて認識されている。これまで温暖化対策は、どちらかという温室効果ガスの排出を削減して進行を抑える「緩和策」に力を入れてきた。だが、温暖化の影響が避けられないことが明らかになりつつある今、自然・人間システムを調整することによって、リスクを軽減する「適応策」も欠かせないことが理解されるようになった。

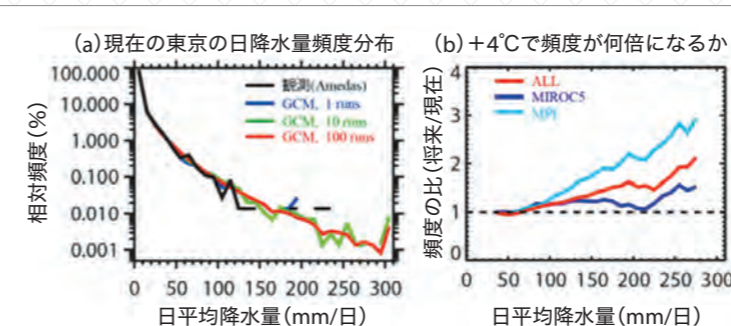
台風や豪雨に備え河川堤防を高くする、農作物をより高温に耐性のある品種に変更するなど、適応策の検討は、防災をはじめ、水資源管理・農業・保健衛生・環境保全・都市計画などさまざまな分野に及ぶ。適応策の設計に欠かせないのが、確信度の高い気候予測データだ。今後、温暖化が進んだとき何が起きるかを示す信頼性の高いシナリオを持つことで、より効果的で一貫性のある適応策を取ることが可能になる。

こうしたことから、気候変動予測の基盤技術向上を目指す

文部科学省のプロジェクト「気候変動リスク情報創生プログラム」は、新「地球シミュレータ」の稼働に伴い、その能力を最大限に生かして海洋地球科学分野で画期的な成果を創出するための「特別推進課題」という計算資源配分枠を活用し、高解像度大気モデルを用いた大規模な気候再現・予測データベースを構築した。課題の共同代表を務めた東京大学大気海洋研究所の木本昌秀教授 (副所長) は、「気候変動や異常気象の要因に迫るなどの研究以前に、まずは地球温暖化への適応策を検討するための土台となる新しい予測データセットを作成し、世の中の人々に有効に活用してもらいたいという思いで、新『地球シミュレータ』を6カ月間フルに利用してアンサンブル気候予測データベース『d4PDF(database for [4] Policy Decision making for Future climate change)』をつくりました」と話す。

極端気象についても高い確度で予測

このデータベースの最大の特長は、これまでに類のない膨大な数のアンサンブル実験を行っていることだ。アンサンブル実験は、初期値を少しずつ変えることにより、誤差の範囲内にある複数のシミュレーションを実施し、そのばらつき (不確実性) を表現する手法だ。アンサンブルの平均は、将来起こる可能性が最も高い気候・気象変化を表す。逆にアンサンブルメンバーのばらつきは、予測に伴う不確実性の幅を示し、



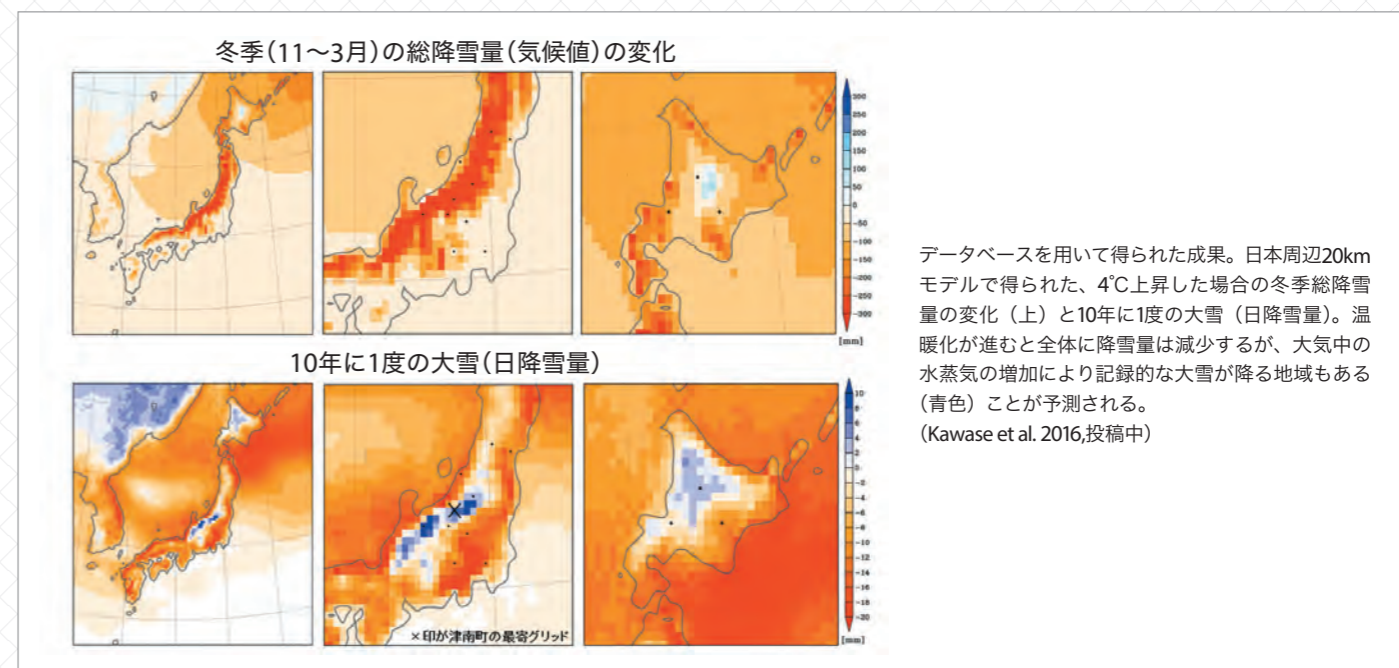
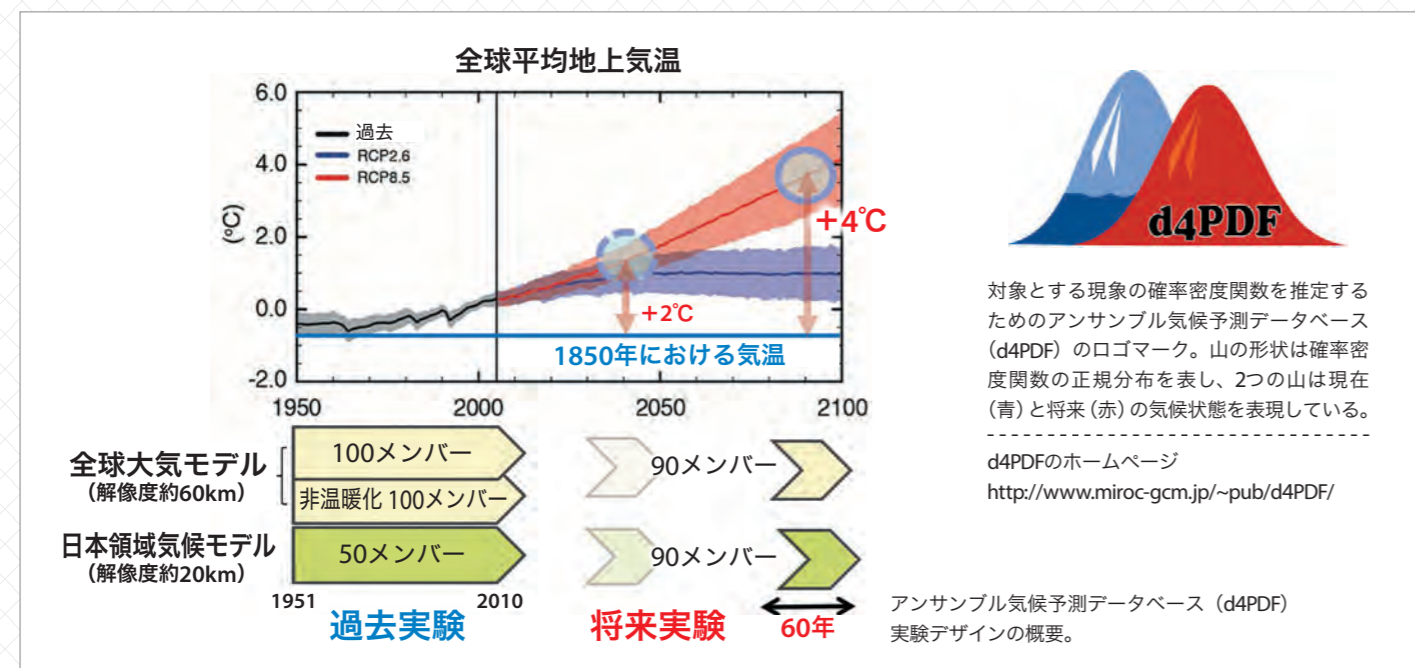
データベースを用いて得られた成果。全球モデルの東京の日降水量頻度分布。(a)は観測データ (黒) とモデル (青・緑・赤) の頻度分布。モデルは観測の頻度分布をよく再現していることがわかる。さらに、観測ではサンプル数が少なくて調べることができなかった低頻度・高強度の降雨も、アンサンブル数 (青は1回、緑は10回、赤は100回)を増やすことにより調べることが可能になる。(b)は、全球平均地上気温4°C上昇実験で、現在と比較した頻度の比。高強度の降雨ほど増加する傾向にあるが (赤)、海面水温の昇温パターン (水色・紫色) により増加割合には差が出るがわかる。

この確率密度分布の裾野には、「30年に1度」、「50年に1度」などといわれる極端な気象現象が表される。木本教授は、「平均気温は何度上昇するのか、平均雨量はどれくらいになるのかだけでなく、夏の最も暑い日は何度になるのか、一番激しい雨はいったいどれくらい降るのかなど、極端気象がどれくらいの規模と頻度で起こるのかという情報が得られなければ、本当に役に立つ適応策が取れません」と説明する。今回のプロジェクトで作成したデータベース『d4PDF』は、たとえば“数十年に1度”といわれるような観測データだけではサンプル数が少な過ぎて評価できなかった、非常に頻度が低い極端気象の情報も、アンサンブル数を増やすことにより、今までよりはるかに統計的に信頼性の高い予測を出すことが可能になった。

「d4PDF」の作成にあたって、いったいどれくらいの数のアンサンブル実験が行われたのだろうか。今回の実験では、気象研究所で開発された全球大気モデル (水平解像度約60km) と、同じく気象研究所の日本周辺域をカバーする領域気候モデル (水平解像度約20km) が用いられた。全球実験では、過去60年分の歴史気候再現実験 (1951~2011年)、および同期間の非温暖化歴史実験で、それぞれ100メンバー、世界平均地上気温が4°C上昇時の将来気候予測実験 (RCP8.5シナリオ

の21世紀末に相当する2051年~2111年) で90メンバーのアンサンブル実験が行われ、さらにこの実験結果を用いて、過去実験50メンバー、4°C上昇実験90メンバーの日本周辺域ダウンスケール実験が行われた。日本周辺域だけでも、積分年数にして過去3000年分、将来5400年分の高精度モデル実験が行われたことになる。「全球も合わせると、総積分年数2万年を超える大規模なシミュレーション計算です。これを旧『地球シミュレータ (ES2)』でやった場合、全ノードを使っても1年半かかります。しかし今回、計算性能が向上した新『地球シミュレータ』を活用することにより、6カ月間で完了することができました」と木本教授はいう。

2014年に環境省でも同様の予測データベースが作成されているが、気候変動シナリオ等に焦点を絞ったアンサンブル実験であるため、予測計算のメンバー数は20に満たない。このため、発生頻度の少ない異常気象や高強度の極端気象については十分に評価することが難しい。今回、「d4PDF」が公開されたことにより、統計的に信頼性の高い解析が可能になった。木本教授は、「このデータベースを研究者はもちろん、各省庁・自治体、産業界など、多くの人たちに活用していただき、地球温暖化へ向けた適応策の推進に役立ててもらいたい」と話す。





過去のスーパー台風を再現し 強度予測の精度向上を目指す

進路の予測に比べて台風の強度予測は難しい

南の海で発生し、日本にもたびたび襲来する台風。その進路は地球の自転や貿易風・偏西風と呼ばれる上空の風などの影響を受けて決まり、現在ではかなり予測精度が改善されてきている。しかし、台風の強度が発生からどのように変化していくかは、未だ精度よく予測することは難しいという。台風の強度は、台風そのものの構造に加えて、海洋上部の貯熱量（海面水温）をはじめとする海洋構造、大気の大気熱力学的な構造など、さまざまな環境要因も影響するため、台風の強度予測には、広い領域を高解像度で詳しくシミュレーションする必要があるのだ。とはいえ、台風は非常に激しい気象現象の1つであり、強風や大雨が大きな被害をもたらすことも多いため、防災の観点からも、その強度を予測する技術の確立が望まれている。

名古屋大学宇宙地球環境研究所の坪木和久教授の研究グループは、JAMSTECの「地球シミュレータ」をはじめとするスーパーコンピュータを用いて、コンピュータ上に台風を再現し、その強度を予測する技術の研究を進めている。

「これまでは台風の再現に、雲を解像する大気モデルを使っていました。しかし、台風は海から供給される熱エネルギー

によって発達し、その規模や強度も決まるので、海洋モデルを接続する必要がありました。そこで、名古屋大学の大気モデル『CReSS』とJAMSTECが開発した非静力学海洋モデル『NHOES』を結合し、さらに波浪モデル・海洋混合層モデル・放射モデルを導入した非静力学大気波海洋結合モデル『CReSS-NHOES』を開発しました。このモデルを新しい『地球シミュレータ』で実行して、伊勢湾台風をはじめ、過去のスーパー台風の再現に取り組みました」と坪木教授は話す。

台風は海から供給される熱エネルギーで発生・発達するが、その成長には台風の中心にある眼の周りに積乱雲が集まってつくられる壁雲が関わっている。わかりやすく喩えるなら、海からの熱エネルギーが“ガソリン”で、壁雲が“エンジン”となって、台風を大きくするとともに、その強度を決定づけている。そのため台風は熱エネルギーを供給する海は大きな影響を持つはずだが、従来の台風モデルでは海がしっかり計算されていなかった。坪木教授の研究グループは、海面下の熱や海洋構造も再現するため、海洋モデルや波浪モデルを組み込み、新たな数値モデルを構築したのだ。

規模の大きな台風になれば、数千kmの範囲でシミュレーションを行う必要がある。その一方で、壁雲の積乱雲の水とエネルギー循環を規定する雲・降水過程もしっかり計算しな

ければ台風の強度を正しく予測できないため、解像度を低くするわけにはいかない。当然、モデルは複雑になり、計算負荷は大きなものになる。坪木教授は、「解像度を下げることなく、広い範囲のシミュレーションが可能になったのは、新しい『地球シミュレータ』の高い計算性能のおかげですが、加えてJAMSTECの『NHOES』の計算性能が高いということも関わっています。そのため新たに開発した『CReSS-NHOES』を用いて、新『地球シミュレータ』でスーパー台風を、海洋を含む広域で計算し、高精度で再現できるようになりました」と語る。

過去のスーパー台風を「地球シミュレータ」で精度よく再現

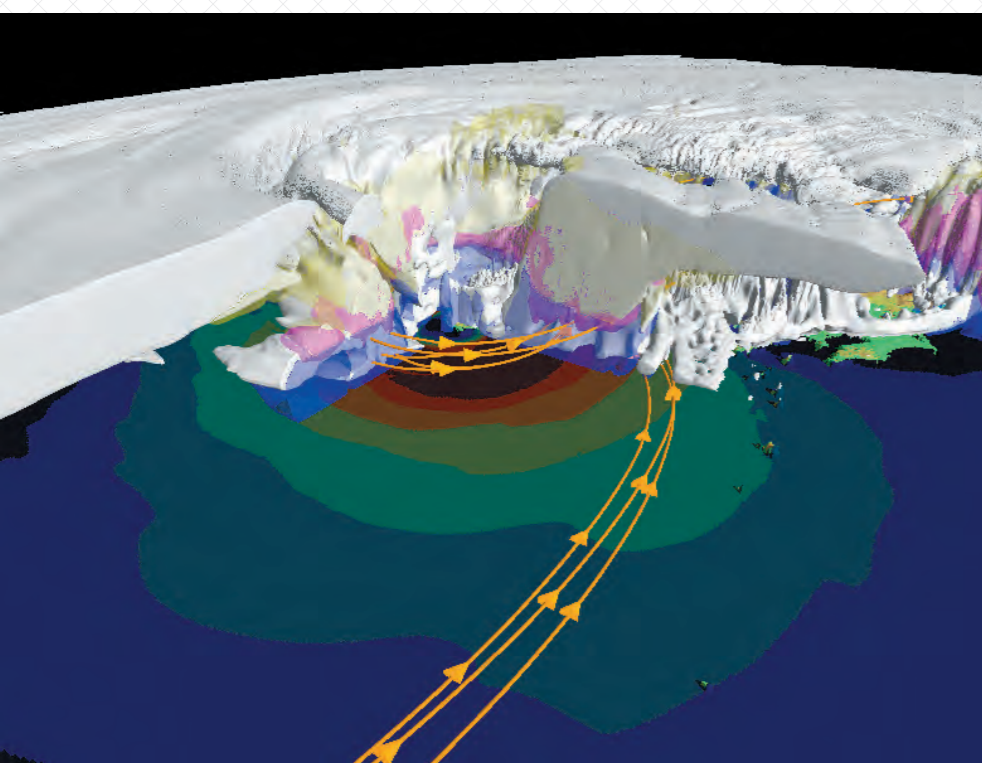
いくら「地球シミュレータ」上に台風を再現できても、その確かさが確認できなければ、数値モデルの正しい評価や改良につながらない。坪木教授は、いち早く新「地球シミュレータ」を活用（特別推進課題）し、過去の台風を再現して中心気圧や風速といった観測データと照らし合わせることで数値モデルの精度を確かめた。1959年に上陸して東海地方に甚大な被害をもたらした伊勢湾台風をはじめ、2013年11月にフィリピンに上陸したスーパー台風HAIYAN（台風30号）、2015年3月に南太平洋で発生したサイクロンPAMなどの再現を行ったところ、中心気圧に多少のずれはあったものの、これまで行ってきた大気モデルによるシミュレーションに比べて、より精度よく再現できることが示された。「台風は熱を供給すると海面水温は低くなりますが、大気モデルだけではそれを精度よく再現できませんでした。しかし、『CReSS-NHOES』で

は台風が通った後の海面水温の低下をはじめ、大気と海洋の複雑な相互作用が確認されました。ただし、まだ残された課題があります。それは、上空の巻雲をいかに精度よく再現するかです」と坪木教授。

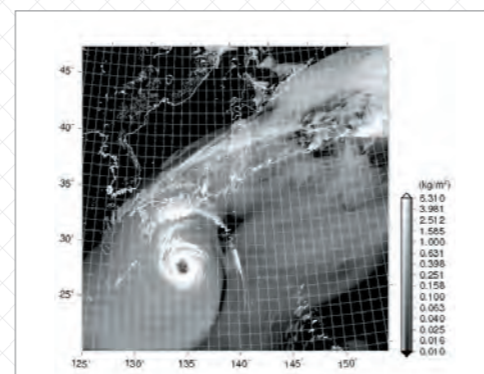
巻雲は高層に生じる層状の雲で、台風の上空を覆っていることが知られているが、これまでの台風シミュレーションで注目されることはなかった。しかし、この巻雲は熱放射を通して台風に影響を与えるため、間接的に台風の強度に関わっていることが明らかになってきた。実際に、坪木教授が新「地球シミュレータ」を用いて実施した過去の台風の再現実験でも、熱放射を考慮した場合と考慮しなかった場合を比較すると、考慮した場合の方が再現の精度は高まったという。そのため、今後は巻雲も精度よく再現していかなければならないが、巻雲に関しては、まだ内部の粒子の特性（形や大きさおよび数濃度など）が十分に明らかになっていないという。

巻雲に関する新たな知見を数値モデルに反映できるようになれば、台風の強度をさらに正確に予測できるようになる。また、こうしたシミュレーション研究を積み重ねていくことにより、今後、地球温暖化が進んだときに、「どれほどの強度を持つ台風が発生するかもより精度よく予測できるようになる」と坪木教授はいう。

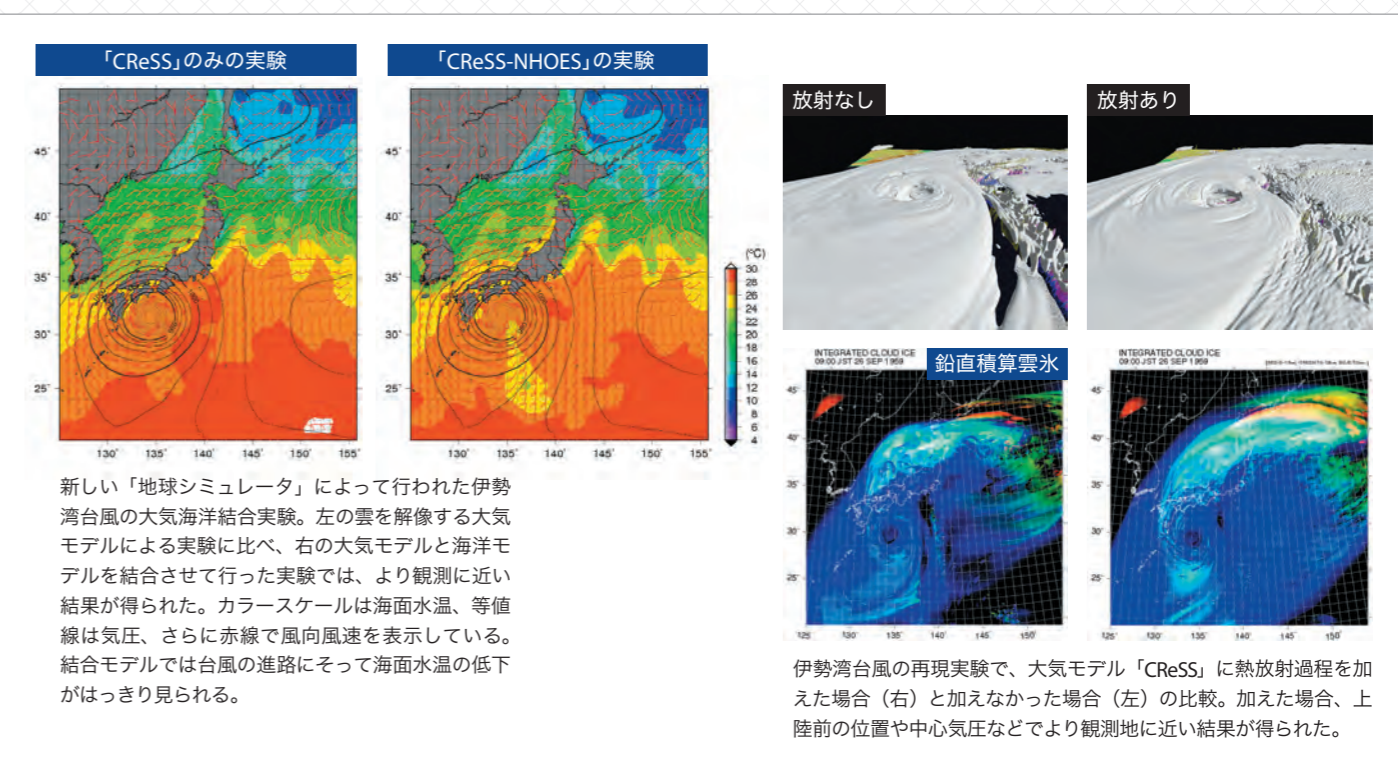
地球温暖化の進行によって将来何が起きるのか、台風災害に備えるためにどのような対策を進めればよいのか、こうしたことを考える上でも、坪木教授らの研究は重要な知見を私たちに提供してくれるはずだ。



雲解像モデル「CReSS」を用いた伊勢湾台風の本州上陸時のシミュレーション結果を立体的に可視化した図（格子間隔2km）。雲（白）内部のあらをピンク色、雪を黄色、雨を青色で表示している。さらに、カラーレベルで地表の気圧（暖色になるほど気圧が低い）、矢印で代表的な流れ線を重ねている。



雲解像モデル「CReSS」を用いて再現された伊勢湾台風を上空から見た姿。伊勢湾台風は1959年9月26日午後6時ごろに和歌山県潮岬の西に上陸したが、この図は上陸前の同日午前1時30分の様子。



「CReSS」のみの実験

「CReSS-NHOES」の実験

放射なし

放射あり

鉛直積算雲氷

新しい「地球シミュレータ」によって行われた伊勢湾台風の大気海洋結合実験。左の雲を解像する大気モデルによる実験に比べ、右の大気モデルと海洋モデルを結合させて行った実験では、より観測に近い結果が得られた。カラースケールは海面水温、等値線は気圧、さらに赤線で風向風速を表示している。結合モデルでは台風の進路にそって海面水温の低下がはっきり見られる。

伊勢湾台風の再現実験で、大気モデル「CReSS」に熱放射過程を加えた場合（右）と加えなかった場合（左）の比較。加えた場合、上陸前の位置や中心気圧などでより観測に近い結果が得られた。



津波データベースを構築し 地震直後に津波浸水予測の 発信を目指す

津波の高さを知らせる警報だけでは不十分

駿河湾から紀伊半島沖・四国沖・日向灘にまで連なる南海トラフは、およそ100年から200年の間隔で巨大地震を繰り返してきたが、1944年、1946年に起こった昭和地震から約70年が経過しており、近い将来、大規模な地震が発生すると考えられている。さらに過去の地震研究から、地震の揺れによる被害に加えて、プレート境界で発生する南海トラフ地震では、大きな津波が発生し、西日本の広い範囲に押し寄せることが心配されている。気象庁による津波警報システムが整備され、地震発生の数分後には津波の高さを示す警報が発令されるようになっているが、津波の高さ情報だけでは、「自分は大丈夫」と思い込む正常性バイアスが働き、必ずしも避難行動に結びつかないとされる。実際、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震発生3分後に津波警報が発令されていたにもかかわらず、逃げ遅れによって多くの犠牲者

が出た。こうした津波被害をなくすためには、津波の高さ情報だけでなく、より詳細な浸水予測情報を提供し、人々の避難行動を促すことが必要といわれている。

こうしたことから、JAMSTECは和歌山県などとともに的確な避難行動に役立つ津波即時予測システムの開発に取り組んでいる。さらに、このシステムとの連携を視野に入れて、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部の馬場俊孝教授らは、津波浸水予測データベース構築のための高分解能・量的津波シミュレーションを、新しい「地球シミュレータ」を活用して実施した(特別推進課題)。この研究プロジェクトに参加する和歌山県の職員で、現在、地震津波海域観測研究開発センターに向向している石橋正信事務主任は、「JAMSTECでは、地震や津波の発生を早期に検知する『地震・津波観測監視システム(DONET)』の整備を進めています。紀伊半島沖熊野灘に敷設されたDONET1はすでに稼働しており、紀伊水道沖にはDONET2の敷設が進められ、2015年度末に完成予

定です。私たちは、DONETで得られた観測データをより効果的に防災・減災に生かすために、和歌山県では津波予測システムの開発を進めており、今回は多数のシナリオに基づく津波の浸水予測のデータベース化に取り組みました。事前にシミュレーションしておき、地震が発生したら、観測データに近い結果をすぐを選び出して、自治体に津波予報を出そうとしているのです」と説明する。そのため、南海トラフ地震で想定される発生地点・震源の深さ・地震の規模(マグニチュード)・断層の滑り量と滑り角度などから1,506の地震のパターン(断層シナリオ)を設定し、それぞれのシナリオで地震が発生した場合に、どのような津波が押し寄せるかをシミュレーションするための、和歌山県を対象としたデータベースを構築したのだ。

驚異的な速さで津波シミュレーションを実施

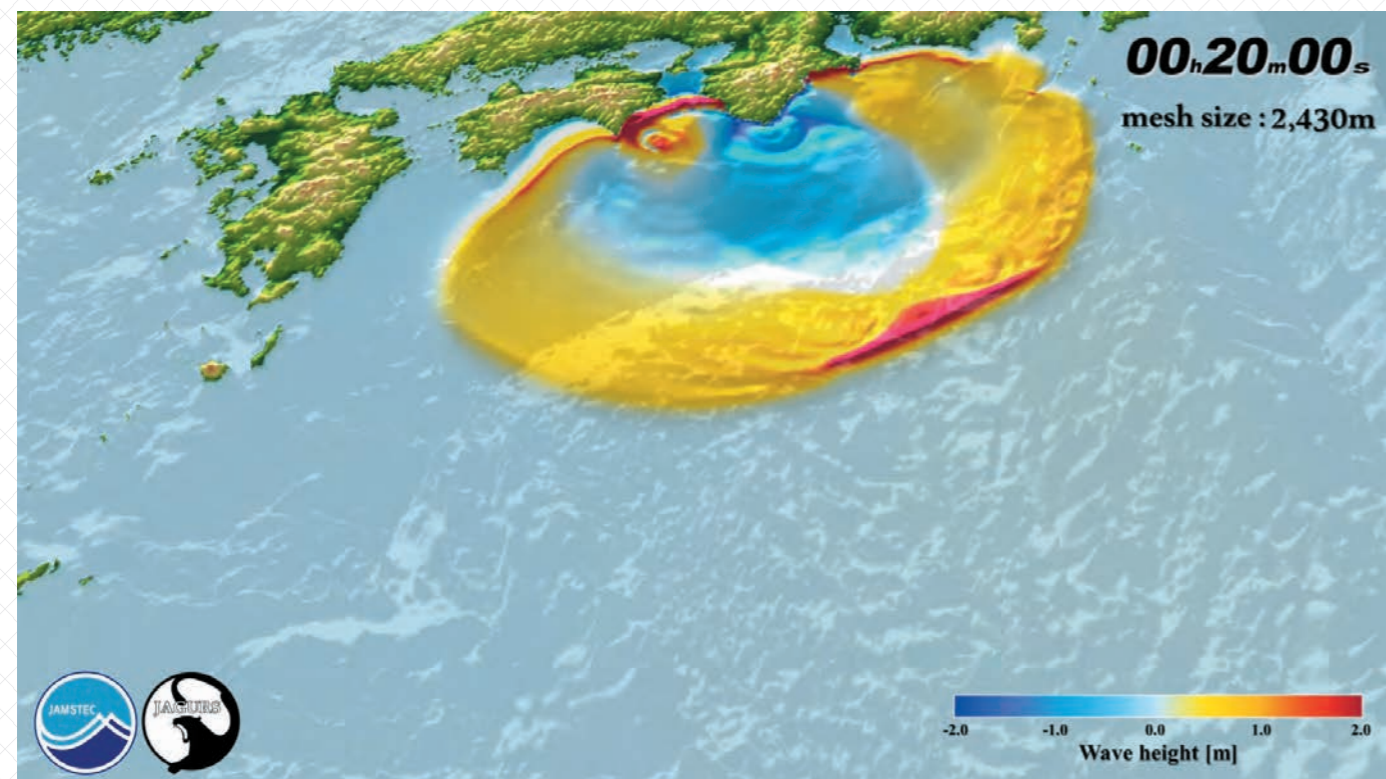
石橋事務主任らは、津波が襲来する危険性のある和歌山県沿岸部全域の約10m分解能の地形データを作成。これをもとに、津波がどこまで浸水するかを予測するシミュレーションを行った。「和歌山県の沿岸全域を1度に計算しようとすると膨大な計算量になってしまうので、21地域に分割してシミュレーションを行いました。当初、JAMSTECの別のスーパーコンピュータで行ったところ、1地域のシミュレーションに約3カ月間の時間を要したのですが、特別推進課題に採択されたからは、新しい「地球シミュレータ」で残り20地域のシミュレーションを約2カ月半で終わらせることができました」と

石橋事務主任はいう。

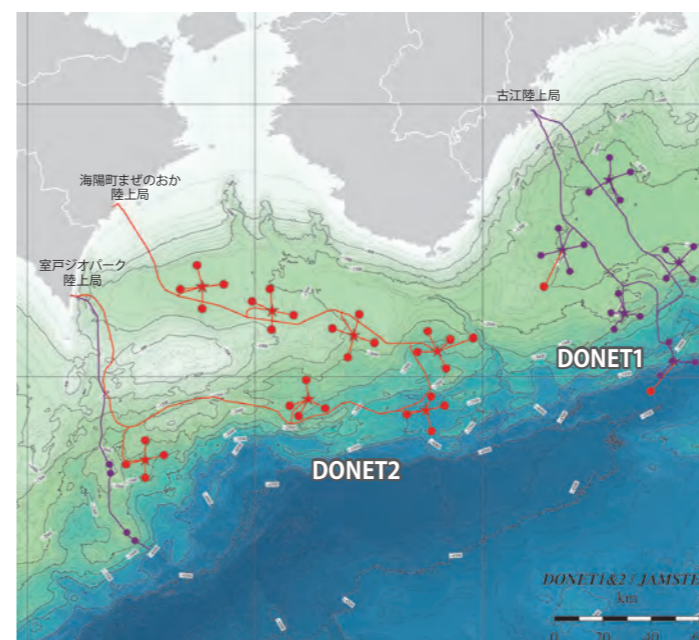
こうして得られたシミュレーション結果をもとに、津波が襲来した際に大きな被害が想定される98地点の最大津波波高、津波到達時間および21地域の浸水マップを作成し、津波データベースとして和歌山県が運用する津波予測システムに組み込まれた。ひとたび地震が発生すれば、DONETの観測情報をもとにデータベースから最大津波波高が最も高くなる断層シナリオを抽出。それに基づく浸水予測が各自治体に伝えられるシステムになっている。

気象業務法の定めにより、気象庁の許可なく津波予報を発することはできない。そのため和歌山県は2015年3月に、まず紀伊半島の南端の串本地域に対する津波予報業務の許可を取得。さらに2015年12月には気象庁の施設がある田辺市、紀伊半島の東に位置する那智勝浦や太地などの5地域の業務許可を取得し、合計6地域の津波予報を出せるようになった。これにより、津波予報を受けた自治体は浸水予測をもとに適切な災害対策を進めることができるわけだ。

紀伊半島の南東地域が選ばれたのは、すでに稼働中のDONET1がカバーしている地域であるためだ。今後、DONET2の観測データが津波予測システムに組み込まれるようになれば、紀伊半島の西側沿岸部に位置する市町村でも、津波予報を出すための業務許可を順次取得することになるだろう。新しい「地球シミュレータ」の優れた計算性能によって実現したデータベースを活用した津波の浸水予測は、南海トラフ地震において被害を最小限に食い止める大きな力になるに違いない。



南海トラフ地震による津波シミュレーションの一例。



南海トラフ地震の震源域に構築されている「地震・津波観測監視システム(DONET)」。



串本地域の浸水予測の図。

北極域の気候・生態系・物質循環を 精緻に数値モデル化し 数十年先の北極環境の変化を予測する

北極域の変化と日本などの遠隔地への影響を 予測するためのモデル開発

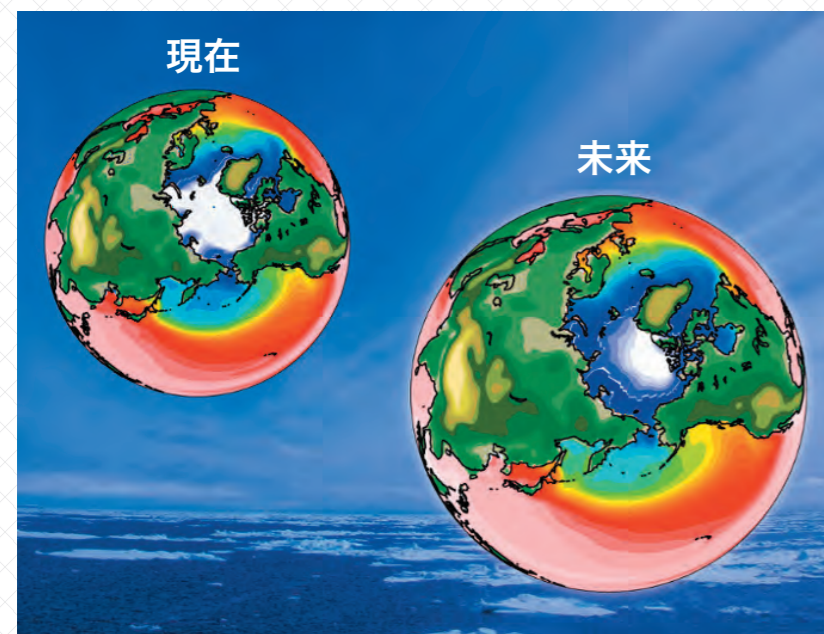
地球温暖化の影響により、北極域の環境は急激に変化しているといわれている。特に北極の海を覆う海氷の減少は顕著で、近い将来、気温が上昇する夏には海氷が全て消えてしまうのではないかと考えられている。

1990年代から北極研究を積極的に推進してきたJAMSTECでは、2015年に北極環境変動総合研究センター（IACE: アイエース）を立ち上げ、北極域での観測および研究体制のさらなる充実を図ることになった。近年では、北極域の環境変化が、中緯度地域にもさまざまな影響を及ぼすことが盛んに指摘されている。そうした変化に適応する効果的な対策を講じるには、数十年先に北極域の環境がどのように変化するのかを、できる限り正確に予測しておかなければならない。そこでIACEでは、観測研究とともに「地球シミュレータ」を活用したシミュレーション研究に力を注いでいる。

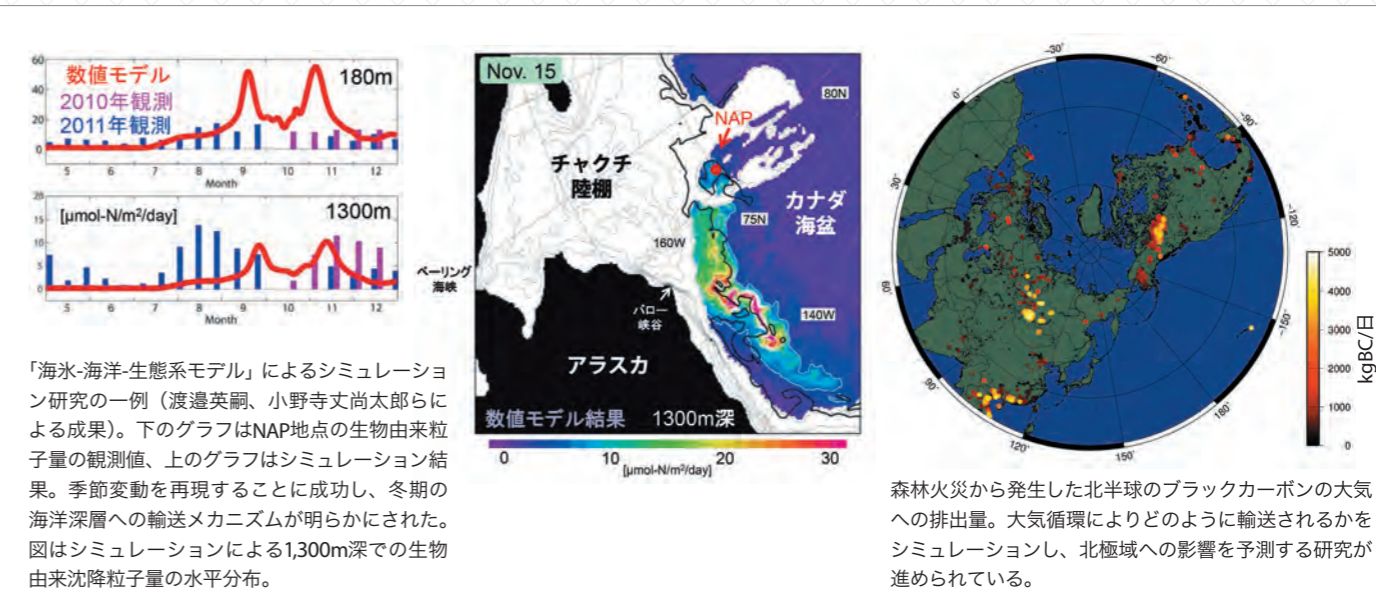
北極域において、北極海の海水やグリーンランドなどの陸域の氷床は今後どのように変化していくのか、IACEは国内の研究機関とともに開発を進めてきた高解像度大気海洋結合モデル「MIROC:ミロク」（気候モデル）に北極域特有の海水や

氷床をより高精度で予測する数値モデルを結合させてシミュレーションを進めていこうとしている。ただし、全球の気候のなかで北極という限定的な海域に起こる現象を詳細に予測するには、北極域を高解像度化させながら全球モデルとして計算可能な規模のモデルを構築することが求められる。IACE北極域気候変動予測研究ユニットの小室芳樹ユニットリーダー（UL）は、「将来発表されるであろうIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の『第6次評価報告書』に採用される最新の気候変動予測でも、計算のための全球の分割は、おそらく1/4度格子が精一杯。1/2度や1度格子に分割した予測もまだ多いはず。これでは、北極域の環境変動を予測するには粗過ぎます。より細かい格子で予測したいところですが、全球で格子を細かくすると、新しい『地球シミュレータ』のような優れた性能を持つスーパーコンピュータをもってしても計算負荷が大き過ぎます。そのため私たちは、全球を比較的粗い格子で計算しつつ、北極域については、より細かい格子で計算するという手法でこの問題に取り組もうとしています」と話す。

全球を粗い格子で解析しつつ、必要な領域を細かい格子で解析する手法は「ネスティング」と呼ばれている。この手法でシミュレーションすることにより、北極域の環境変動の影



「MIROC」で再現・予測された海水温と海氷の変化。海水の色は、暖色ほど海水温が高いことを示す。地球温暖化が進行した将来（右）では、海氷の減少とともに中緯度域での海水温上昇も顕著である。



「海水-海洋-生態系モデル」によるシミュレーション研究の一例（渡邊英嗣、小野寺丈尚太郎らによる成果）。下のグラフはNAP地点の生物由来粒子量の観測値、上のグラフはシミュレーション結果。季節変動を再現することに成功し、冬期の海洋深層への輸送メカニズムが明らかにされた。図はシミュレーションによる1,300m深での生物由来沈降粒子量の水平分布。

森林火災から発生した北半球のブラックカーボンの大気への排出量。大気循環によりどのように輸送されるかをシミュレーションし、北極域への影響を予測する研究が進められている。

響も全球に反映させられる。

全球を緯度経度格子で分割しようとすると、どうしても両極に格子線が収束してしまう。これにより計算は難しくなるが、小室ULらは北極域にだけ緯度経度とは別の格子をはめ込むことで、この問題を回避している。3つの「極」を持つことから「三極格子構造（tripolar grid）」と呼ばれるこの格子のうち、北極域以外は25~30kmの格子で計算しつつ、北極の海洋については5km、できれば3kmの格子で計算することが当面の目標である。とはいえ、この北極域に特化した格子ですら100年先を予測するモデルとしてはあまりに計算負荷が大き過ぎる。そのため、別に計算が進んでいる、より粗い格子による100年先までの全球予測をもとに、いくつかの期間でこのモデルを使って10年間程度の予測実験を行うことで、より精緻な将来像を描き出そうとしている。

北極域の環境に影響を及ぼす化学物質はどこからやってくる？

より正確に北極域の環境変化を予測するには、気候モデルの高度化に加えて、地球規模での化学物質の循環や北極域の

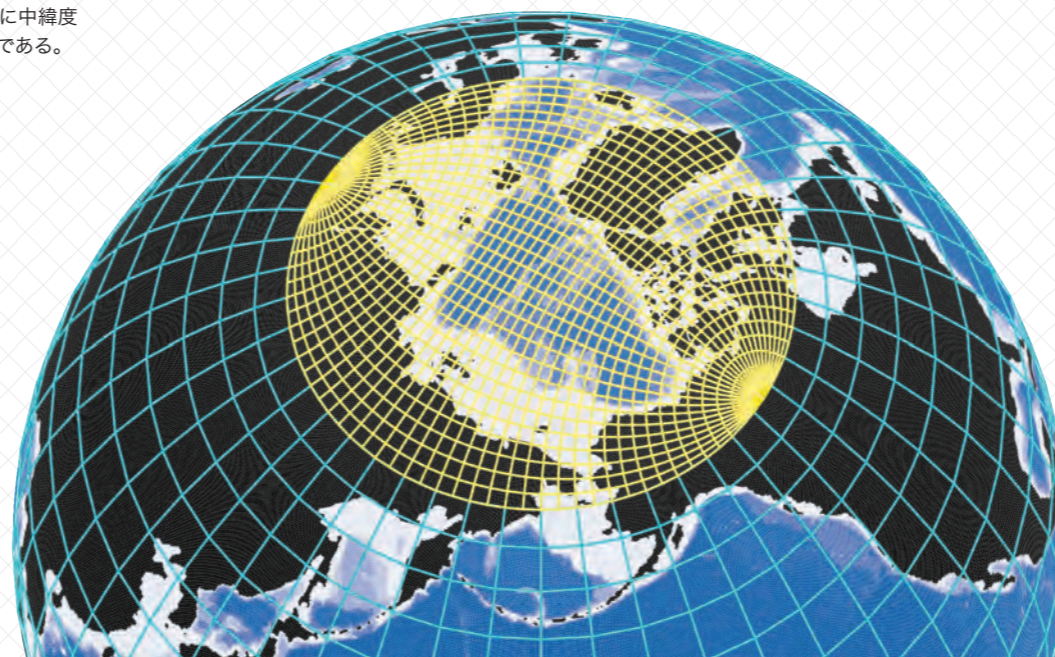
生態系の変化についてもシミュレーションすることが必要だ。「人間活動が盛んな中緯度地域で排出される煤（ブラックカーボン）の存在も気かけなければなりません。白色に比べて、黒色の方が太陽光の熱を吸収しやすいですよ。ブラックカーボンが北極域に運ばれて雪や氷の上に付着すると、太陽熱の影響を受けやすくなり、温暖化や海氷の融解が進むことも考えられます」と小室ULはいう。

ブラックカーボンや温室効果ガスの1つであるメタンなど、北極域に影響を与える可能性が高い化学物質の大規模循環を解明するため、IACEでは北極化学物質循環研究ユニットを組織し、JAMSTECの海洋地球研究船「みらい」などによる観測研究に加えて、化学物質の循環を予測する輸送モデルの開発が進められている。こうした化学物質と大気・海洋・雪氷とのやり取りは、現在の気候モデルにほとんど反映されていない。化学物質のモデルを精緻化させていくことで、地球温暖化や北極海の海水の予測をより高度化させていくことが期待される。

一方、北極域で温暖化が進行した場合、そこに暮らす生物への影響も見逃すことはできない。IACE北極海洋生態系研究ユニットでは、北太平洋海域を対象として開発された海洋生態系モデル「NEMURO」を北極海向けに改良し、海水海洋物理モデルと結合させた「北極海の海水-海洋-生態系モデル」の構築を進めている。

IACEでは、小室ULらが中心となって進める北極域の気候変動予測に加えて、化学物質の循環や生態系の変動まで含めた数値シミュレーション研究を進めていくことで、北極がどのように変わっていくかを、より多面的・総合的に把握しようとしている。そして新「地球シミュレータ」は、研究推進に欠かせない「道具」として重要な役割を果たすはずだ。

北極域を高解像度でシミュレーションするために用いられている計算格子のイメージ図。北極点で1点に計算格子が収束しないように、北極域に緯度経度格子（水色）とは異なる格子（黄色）を当てはめ、さらにその部分を高解像度化している。





手厚いサポート体制で「地球シミュレータ」の利用促進に取り組む

産業分野にも計算資源を分配

計算科学の進歩とともに、幅広い分野でスーパーコンピュータを活用したシミュレーション研究が進められている。シミュレーションで模擬的な実験を実施して仮説の確かさを検証するといった従来の手法にとどまらず、新たな「発見の道具」としてシミュレーション科学を積極的に活用する動きも出ている。

研究機関や企業のなかには、自前の計算設備を用意するところもあるが、大規模な計算を可能にするスーパーコンピュータは、コスト的にも簡単に用意できるものではない。そのため、自分たちの研究や技術開発にシミュレーションを取り入れてみたいと考えても、設備の問題から断念している研究者や技術者もいる。JAMSTECは、自ら運用する「地球シミュレータ」の計算資源の一部を外部の研究者向けにも分配して外部からの利用の門戸を開いている。地球情報基盤センター情報システム部HPC応用グループの浅野俊幸グループリーダー（GL）は、「年度によって配分は変わりますが、2015年度の場合、『地球シミュレータ』の計算資源の20%は日本の海洋地球科学と関連分野の研究を推進するための『公募課題』に割り当てられており、採択されると無償で利用できます。また、国からの委託・補助を受けてJAMSTECが実施している『地球シミュレータ産業戦略利用プログラム』などの事

業でも利用が可能で、『指定課題』という枠組みのなかで、産学官研究者らの共用を促進するための支援も行っています」と説明する。

「地球シミュレータ」が利用できることは、計算科学の先端的な課題に取り組もうとする研究者にとって魅力的だ。しかし、公的な支援のもとで利用するため、公募課題や指定課題で「地球シミュレータ」を利用した場合、その成果は公開されることになっている。一方、民間企業のなかには「地球シミュレータ」は使ってみたく、将来のビジネスシーズになる可能性を考慮して、公開を前提とした利用は避けたいと考えるケースもある。こうした利用に対しては、成果の公開を前提としない「成果専有型有償利用課題」が設けられている。有償ではあるが、研究分野も地球科学に限定されず、さまざまな分野の研究に利用することが可能だ。

数値モデルの開発段階からサポートすることも

計算科学の知識があっても、「地球シミュレータ」のような大規模システムは、誰でも手軽に扱えるというわけにはいかない。まずはシステムの構成や性能を理解してもらい、効率的に利用するためにはプログラムの見直しも必要になる。「地球シミュレータ」を運用管理する地球情報基盤センターでは、こうした利用者に向けた手厚い技術支援を用意し、利用の促進に取り組んでいる。地球情報基盤センター情報システム部

計算技術グループの上原均GLは、「大学などの研究者であれば、すでに数値モデルをつくったり、研究室でシミュレーションを進めている方が多いのですが、民間企業の場合は、漠然と『こんなシミュレーションをやりたい』というイメージだけで相談に来られる方もおられます。こうした方々にはイチから説明し、プログラムの作成にも協力するなど、できる限りのサポートを行っています。場合によっては、研究の内容をうかがい、関連する研究をされている大学の先生を紹介して共同研究をお勧めするといった、コンサルティングのような仕事をすることもあります」と話す。なかには、実際に「地球シミュレータ」を使うまでに2年間かけてサポートした例もあったそうだ。「地球シミュレータ」の利用が始まってからも、プログラムの最適化など、効率よくシミュレーションを行ってもらえるよう、技術支援担当を配置して、成果が出るまでしっかりと技術支援を続けるという。2015年3月にシステムの更新を行った「地球シミュレータ」の計算能力を最大限に生かし、画期的な成果創出の加速を目的とした「特

別推進課題」がスタートした。情報システム部では、運用面での制限緩和処置をはじめ、プログラムの移植や最適化を含めたさまざまな技術的サポートや連携を行い、各課題で確実に成果が達成できるよう全面的に協力した。課題責任者からは、「サポートスタッフによる最適化や、ジョブの管理のフレキシブルな対応など、これらのサポートがなければ短期間での計算はできなかった」（徳島大学・馬場俊孝教授）、「今回の成果は、運用面とサポート体制でJAMSTECの強力なバックアップがあったからこそ得られた」（名古屋大学・坪木和久教授）、「チューニングと運用の総合的なサポートのおかげで、旧システムでは数年かかる計算が2カ月程度で結果が得られた」（地球情報基盤センター・石川洋一GL）など、情報システム部の支援を高く評価するコメントが寄せられた。

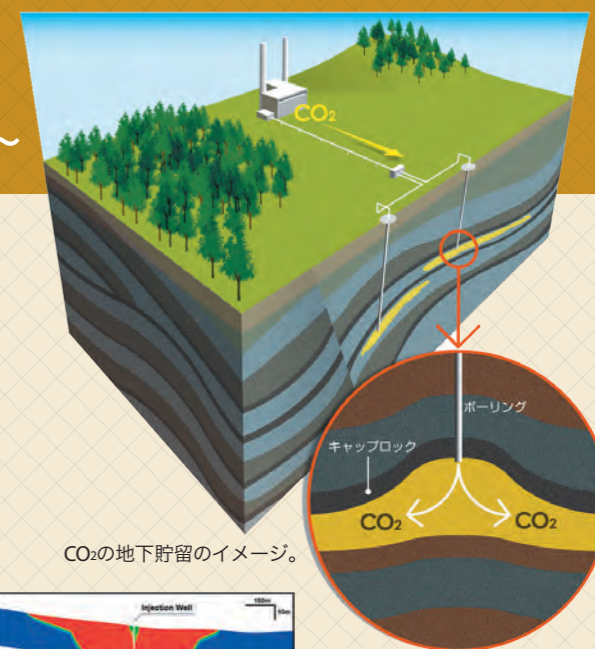
浅野GL、上原GLらの地道な活動が、「地球シミュレータ」の利用促進のみならず、日本の計算科学の裾野を広げることにも大きな貢献を果たしている。

BE

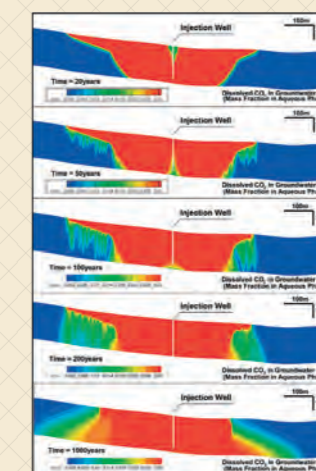
地層中に圧入したCO₂の動きを予測 ～「地球シミュレータ」の産業界での利用事例～

地球温暖化対策の1つとして、近年、発電所や製鉄プラントなどから排出される二酸化炭素（CO₂）ガスを地中深部の地層中に貯留するための技術開発研究が進められている。回収したCO₂を、「キャップロック」と呼ばれる浸透性の低い地層の下に圧入する技術だが、地中に長期にわたって確実に貯留できることを確認しながら慎重に進めることが重要であり、予測シミュレーションはそのための有力な方法である。大成建設は、2007年度から2013年度まで、「地球シミュレータ」を利用して、圧入後の地中のCO₂の動きをシミュレーションする研究を行ってきた。

当時の地球シミュレータセンター（現・地球情報基盤センター）は、海外の研究機関により作成されたプログラムの改良など、初期段階から支援を行い、「地球シミュレータ」による高速大規模並列計算技術を用いた最適化が進められ、計算効率は当初の130倍にまで高められた。その結果、地下のCO₂の動きや分布を高精度かつ実用的な時間でシミュレーションでき、産業上有用であることが示された。その後、この技術は国内外の地中貯留プロジェクトで数多く活用されている。



CO₂の地下貯留のイメージ。



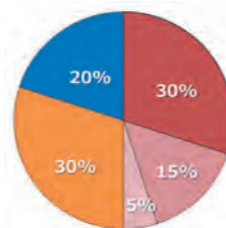
CO₂の地下貯留に関する数値シミュレーション結果。圧入から1000年間で地下水中の溶存CO₂が拡散する様子（質量分率の変化）。

2015年度の「地球シミュレータ」計算資源配分

● **機構課題**：機構の中期目標及び中期計画の達成のために必要な研究開発を行う課題、並びに成果専有型有償利用課題。

- **所内課題**：機構の役職員らを代表者として、機構内の研究者を対象に募集する課題。
- **特別推進課題**：「地球シミュレータ」の能力を最大限に活用し、画期的な成果創出の加速を目的として、機構の内外を問わず募集する課題。集中的な資源利用や、専任スタッフが技術的側面から強力に支援するなど、成果創出に向けた突破口が提供される。
- **指定課題**：国などからの委託、補助金等を受け、機構が実施、または第三者に実施させる課題や受託研究。
- **成果専有型有償利用課題**：産業界などを対象にした有償課題で、利用者は成果を専有することができる。

● **公募課題**：日本の海洋地球科学と関連分野の研究を推進するため、および機構の中期目標・中期計画の達成のために、広く「地球シミュレータ」利用の機会を開き、機構外から募集する課題。



● 特別推進課題
● 所内課題
● 成果専有型有償利用課題
● 指定課題
● 公募課題

<76課題、807名>
(2015.12現在)

「地球シミュレータ成果専有型有償利用」の詳細については、JAMSTECホームページをご参照ください。
<http://www.jamstec.go.jp/es/jp/senyu/>



産業利用促進のために毎年開催されている「地球シミュレータ産業利用シンポジウム2014」会場の様子。

ウニとコンブの関係を明らかにし 津波で破壊された“海の杜”の再生に取り組む



東北地方太平洋沖地震・津波で大きな打撃を受けた東北地方の水産業復興を後押しするために発足した「東北マリンサイエンス拠点形成事業（TEAMS）」のプロジェクトに参加する研究者へのインタビュー連載、今回は長年コンブとウニの関係を調査し、“磯焼け”の原因解明などに取り組んできた、東北大学の吾妻行雄教授の研究を紹介する。津波の影響で破壊された三陸のコンブの森は再生できるのか。そのカギを握るコンブとウニの関係について話を聞いた。

吾妻 行雄

東北大学大学院農学研究科教授

吾妻 行雄（あがつま・ゆきお）
1954年、福岡県生まれ。1978年に東北大学農学部水産学科卒業。北海道立水産試験場、北海道原子力環境センターを経て、1997年より東北大学大学院農学研究科へ。助教授、准教授を経て、2010年より現職。博士（農学）。平成22年日本水産学会水産学進歩賞受賞。専門分野：水圏植物生態学、ウニ類の生物学、生態学、水産科学。

海中林が崩壊する 磯焼けはなぜ起こるのか

——震災以前はどのような研究をされていたのですか。

吾妻：1997年に東北大学に着任するまでは、北海道の水産試験場で、主にウニ類の生態と磯焼けの原因解明に取り組んでいました。本来、温帯から亜寒帯の沿岸の岩礁域、つまり磯には、コンブやホンダワラといった大型海藻の森が広がっています。この森は「海中林」とも呼ばれており、その生産力は非常に高いことが知られています。

——生産力はどのくらい高いのですか。

吾妻：陸上で最も生産力が高い場所は熱帯雨林です。コンブなどの褐藻類が光合成で生産するのはマンニトール、ラミナランといった多糖類なので、CO₂と水からデンプンをつくり出す植物の生産力と単純に比較することはできませんが、生産される有機物の炭素量を比較すると、海中林の生産力は熱帯雨林の1～5倍と報告されています。

——海中林は、沿岸岩礁域の生態系の基盤になっているのですか。

吾妻：はい。海中林のコンブ葉が脱落すると、ウニやアワビなどに食べられ、植食連鎖（生食連鎖）の出発点となります。ウニやアワビの成長あるいは身入りは食物となるコンブに支えられて漁獲量が左右されます。食べ残されたコンブはバクテリアによって分解され、腐食連鎖に取り込まれていきます。もちろんメバル・カサゴ・ソイ・アイナメといった岩礁域に生息する魚にとっても、海中林はとても重要な存在です。ところが、海中林が失われてしまうことがあります。それが磯焼けです。海中林が失われた岩礁域は、無節サンゴモという石灰質の



コンブの仲間、アラメの海中林。

津波によって葉の部分がちぎれ破損したアラメ。

紅藻に覆われてしまいます。無節サンゴモが優占した場所の生産力は、コンブ類の海中林に比べて100分の1ほどに低下してしまうのです。したがって、磯焼けが発生すると周辺海域の漁業に大きな損失をもたらされるのです。ですから、北海道の水産試験場の研究職員として磯焼けが起きる原因に迫ろうと研究を続けてきました。

——そのころは、どのような調査を行っていたのですか。

吾妻：磯焼けは環境中で起きる現象ですから、さまざまな原因が考えられます。人間活動の影響も指摘されています。私は、北海道日本海沿岸で広く磯焼けが起こっている原因として、自然の変化に的を絞って研究を行ってきました。海の変化と、ウニが増えることがコンブの生育に大きな影響を与え、磯焼けにかかわっていると考えたからです。

——ウニの摂食が磯焼けの原因ということですか。

吾妻：確かにウニが増加するとコンブの海中林に対する摂食圧が高まるのは間違いありません。しかし、それだけでは磯焼けを説明できません。そこで、実際に海に潜って、コンブの消長、親ウニの増減、稚ウニの生まれた量と水温や栄養塩類の濃度など、

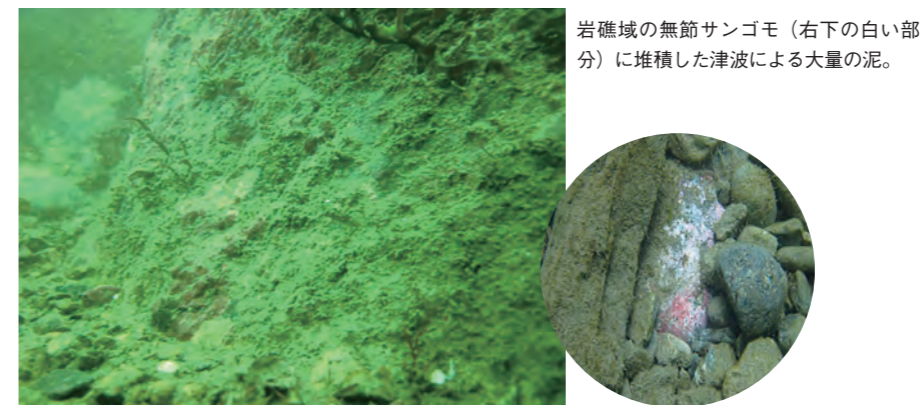
環境の変化との対応関係を丹念に調べていきました。その結果、北海道南西部沿岸の磯焼けの発生とその持続には対馬暖流の流れの変化と高密度化したウニの摂食圧が大きくかかわっていることが明らかになりました。

日本海を北上する対馬暖流は、水温が高く、貧栄養という特徴を持つ。通常、対馬暖流の一部は津軽海峡を抜けて太平洋へ流れていくが、太平洋と日本海の潮位差により津軽海峡を抜けられず、北海道西岸沖を北に流れることがある。そうすると、磯焼けが起きやすくなるとされる。冬から春にかけてコンブが芽生えるときに、高水温・貧栄養の海流にさらされると生育が抑えられる。そして、無節サンゴモ群落で増えたウニの摂食圧によって磯焼けが持続することが指摘されている。一方、東北地方太平洋岸では、親潮が弱まることで高水温・貧栄養の海水がもたらされ、磯焼けが発生しやすくなるといわれている。

アラメの70%以上が 傷つけられた津波の破壊力

——東北地方太平洋沖地震に伴う津波は、沿岸域の海中林にも大きな影響をもたらしたわけではありませんか。

吾妻：おっしゃる通り、津波は海中林とウニ・アワビにとって大きな攪乱要因の1つです。私にとって津波の影響調査は、TEAMSが初めてではありません。水産試験場に勤めていたときに、1993年の北海道南西沖地震を経験しました。地震が発生して1週間もたたないうちに、津波の被害が大きかった奥尻島の対岸、北海道



岩礁域の無節サンゴモ（右下の白い部分）に堆積した津波による大量の泥。



本土側のやや北に位置する鳥牧村の海岸で調査を始めました。後背が断崖絶壁となっている海岸には大量のウニやアワビが山となって打ち上げられていて、潜ってみると津波によって多くのコンブがなぎ倒されていました。ところが、海中林は翌年には回復し、ウニ・アワビ資源も2年後にはずいぶん回復しました。このときの経験から、東北沿岸でも早く回復するのではないかと期待していました。しかし、地震・津波から4年以上がたった今も回復したとはいえない地区があります。

——東北の海中林の調査も、津波の直後から実施されたのですか。

吾妻：地震後、すぐにでも調査をしたかったのですが、余震による津波や海底に沈んだ瓦礫が危険ということで、潜水調査は宮城県によって禁じられていました。それでも北海道南西沖地震のときに大量のウニ・アワビが打ち上げられていたことを思い出し、4月上旬には宮城県気仙沼市の大谷海岸で調査を始めました。

——気仙沼沿岸でもウニ、アワビは打ち上げられていたのですか。

吾妻：鳥牧村とはずいぶん状況が違っていました。打ち上げられたウニやアワビを確認できましたが、広域に拡散しており、定量的に調べられませんでした。実態は

潜って把握しなければなりません。6月初めにやっと宮城県の禁止が解除され、潜水調査を開始することになりました。

——沿岸部はまだ混乱していたと思いますが、潜水調査の機材などはそろっていたのですか。

吾妻：私たちの研究室では潜水機材はポンベを除いてすべて整備されています。調査はラインを海底に敷設し目視による定量的な観察によって行います。水中カメラ、水中ノート、採集袋、コドラートという海底に置く枠があれば調査は可能です。

——具体的にどのような調査が行われたのでしょうか。

吾妻：志津川湾で震災以前にアラムの海中林が形成され、ウニ・アワビの漁場であった12地区を選んで、津波の影響を調べました。陸上の植物と異なり、海藻は仮根と呼ばれる部位で岩に張り付いて体を支えます。アラムの仮根による固着力はとても頑強です。潜水調査中に波が荒くて流されそうときはアラムの根元をよくつかみませんが、びくともしません。津波で根こそぎ流された個体もなかにはあったかもしれませんが、海中林に及ぼす津波の影響を調べるにはアラムが最適であったといえます。調査の結果、湾奥ほど被害が深刻であることがわかりました。地形によって異なるものの、一般的に津波は湾口よりも海が狭まる湾奥でよりエネルギーが増幅されて被害が大きいのといわれています。実際、湾奥では全体の70%以上のアラムの枝が折れたり、茎が切断されて破損しており、津波の被害が大きくなることを如実に物語る調査

結果が得られました。TEAMS発足以前から、こうした調査を進めていたもので、TEAMSにはごく自然に参加することになりました。

回復しつつあった海中林がウニの大発生で崩壊

——TEAMSではどのような研究に取り組んでいるのですか。

吾妻：すでにお話した通り、海中林は沿岸岩礁域の生態系の基盤です。東北地方の水産業を復興させていく上で、コンブやアラムの海中林はなくてはならない存在です。津波によって深刻な打撃を受けてしまった海中林が、どのように回復するかを調べてきました。当初は女川や牡鹿半島でも調べていましたが、現在は志津川湾のアラム海中林に絞って調査を継続しています。

——北海道と比べて、東北の海中林がなかなか回復しないのはなぜですか。

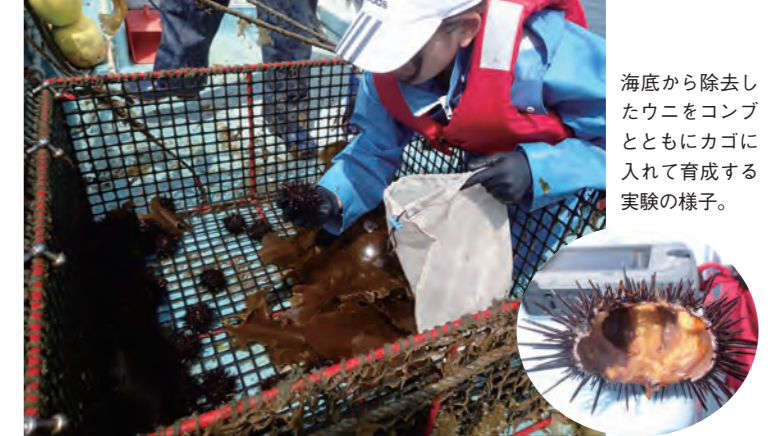
吾妻：私たちは、アラムの被害が最も大きかった志津川湾の湾奥部の岸から水深7mにいたる1,600m²を永久実験区と設定して調査を継続しています。津波から2年がたった2013年には、震災後に生まれた小さなアラムが多数観察され、回復が顕著に見られ始めました。このまま順調に生育してくれば、今ごろ海中林は完全に回復していたでしょう。しかし、予期せぬことに2011年の秋に生まれたウニが大発生して回復を阻害してしまったのです。

——ウニが大発生した原因は明らかになっているのですか。

吾妻：当初、水温がかかわっているのではないかと考えていました。というのも、孵化して1カ月程度の間、ウニは浮遊幼生となって海中を漂って暮らします。そのときに水温が高いと浮遊期間が短くなって、生き残る確率が高まって稚ウニの発生に結びつくといわれています。ところが、浮遊期に相当する2011年秋の水温を調べてみると、例年に比べて高く推移した事実はありませんでした。ならば、幼生がウニの形となって着底した後の生残率が高かったのかもしれませんが。その原因として、たとえば、稚ウニを捕食す



津波の後に海底で大発生したウニ。



海底から除去したウニをコンブとともにカゴに入れて育成する実験の様子。

るカニやヒトデが津波で流されてしまったとか、津波で新たに運ばれた岩石の表面などに、微小藻類など稚ウニが食べる食物が十分保障されて成長が速まったなどの要因が働いたのかもしれませんが。しかし、これらは確証のない推論です。2011年の秋に生まれた大量の稚ウニは成長して満2歳となった2013年の秋以降、アラムの海中林を直接食い荒らし始めたのです。

本来、アラムにはフロロタンニンというポリフェノールが含まれており、ウニの摂食を阻害する化学防御の働きを持っている。このフロロタンニンは水溶性であるため、脱落した葉から溶け出すことで、ウニはアラムを食べられるようになる。しかし、志津川湾で大発生したウニはフロロタンニンをものともせず、生きたアラムを直接食べ尽くしている。その結果、回復しつつあったアラムの海中林は崩壊して縮小し、磯焼けが拡大していると考えられている。

——ウニが大発生したままでは、海中林の回復は望めないのでしょうか。

吾妻：磯焼けの拡大を防ぎ、海中林を回復させるためには、大発生したウニを除去することが必要であると考えています。それを検証するために、現在、徹底的にウニを駆除した実験区を設定しました。しかし、ウニは周辺海域から侵入してきますので、除去は継続しなければなりません。ウニの寿命は15年ほどですので、自然死を待つて放置すれば、10年以上もウニによる高い摂食圧が海中林にかけ続けられることを意味します。大発生したウニを放置したままでは、海中林の回復は望めないと思われます。

海中林を回復させるにはウニの利用を推進するしかない

——ウニを減らすために、利用を押し進めればいいのではないのでしょうか。漁業者がウニを獲れば減るように思いますが。

吾妻：磯焼けの海で育ったウニは身（生殖巣）が痩せていて、色も悪く、商品価値はありません。売れないウニでは、誰も獲ろうとしないでしょう。地元では堆肥化するためにウニを除去することも計画されましたが、順調には進んでいないようです。一方、これまで漁業者や我々研究者の間でウニにコンブを食べさせると身の品質と味がよくなることが経験的に知られていました。そこで、宮城県漁業協同組合志津川支所に協力を仰ぎ、青年部の漁業者とともに磯焼けの場所で採集したウニにコンブを与える実験を行いました。科学的な検証によって、本当にコンブを与えておいしくなることを示せば、ウニの利用を推進できると考えたのです。

——ウニにコンブを与えるとおいしくなるというのは、科学的に調べられていなかったのですか。

吾妻：これまで、ウニにコンブを与えるとウニの身はコンブの旨味成分のグルタミン酸でおいしくなる、といわれること

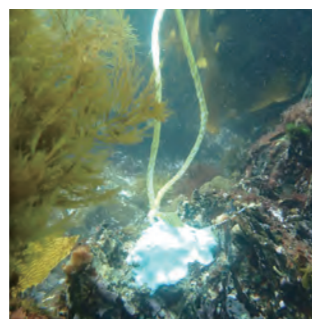
もありましたが、味をもたらす成分の変化は調べられていませんでした。志津川湾の波が穏やかな場所で、ウニをカゴに入れてコンブを与えました。そして、収穫後に漁業関係者の方々による食味試験を行ったら、目論見通りおいしくなっていることが確認されました。また、コンブを与えることによってグルタミン酸ではなく、アラニンやセリンなどの甘みの遊離アミノ酸が増加しておいしくなったことがわかりました。

——おいしくなれば、高値で売れそうですね。

吾妻：実際にそうなれば、漁業者はこぞってウニを獲り、育てるようになるでしょうから、海域のウニは減少し海中林の回復にもよい効果をもたらされるはずです。しかし、本当に高値で売れるためには、高品質化を目指した養殖方法や養殖時期についてさらなる研究が必要であると考えています。いずれにしても、沿岸岩礁域の水産業を復興させるためには、海中林の回復は不可欠です。海中林とバランスのとれたウニ・アワビ漁業の復興を目指すとともに、今後も起こりうる磯焼けをうまく活用したウニのカゴによる短期育成技術を確立させることが復興への一助になれば幸いです。 **BE**



志津川湾の海底に永久実験区を設定して継続的な調査を行っている。



海底に固定して実験区の位置を示す目印。



カゴで育成したウニの食味試験の様子。おいしくなっていることが確認された。

海中で複数の探査機を 同時運用するための新技術

洋上中継器 ASV

海上から自律型無人探査機を監視・制御する自律航行型の洋上中継器 Autonomous Surface Vehicle

深海で資源探査などに活躍する自律型無人探査機 (AUV) を監視する自律航行型の洋上中継器 (ASV) の開発が進んでいる。ASV が実用化されれば、1機の探査機を1隻の母船で監視するこれまでのシステムに代わり、複数のAUVを同時に運用し、深海調査を効率的に行うことが可能になると期待されている。



【取材協力】
百留忠洋 グループリーダー代理
海洋工学センター海洋技術開発部 探査機技術グループ

ASVのイメージ図。上部には、衛星通信装置や、母船と通信するための無線LAN装置、映像を送るためのVHF装置、GPS受信装置、360°カメラなどが搭載されている。

● 複数のAUVを同時運用するための新技術

海底下に眠るメタンハイドレートや、レアメタルなどの鉱物資源を効率よく探るために、JAMSTECはAUV (自律型無人探査機 autonomous underwater vehicle) の開発を進め、すでに運用も始まっている。AUVは、その頭脳ともいえるコンピュータの設定に従って自律的に航走し、カメラやソナー、各種センサーを用いて深海底やその下の地層の様子を詳しく調べるロボットだ。しかし、深海では何が起るかわからない。そのため、実際には海上の母船からAUVの動きを音響通

信で確認しながら運用されている。トラブルが発生したり、予定外のコースを航走するなど、何か異常があったときには、直ちにAUVに修正の指示を出したり、探査の中止や浮上を命じたりしなければならない。現時点では、1機のAUVを1隻の母船がつきっきりで監視している。

AUVの航走速度は時速2~3ノット (時速3.7~5.6km) ほどで、

◀キール (ここにAUVと通信するための音響機器が入っている)

朝から夕方まで稼働させても、1機のAUVによる探査の範囲は限られる。

母船の航海日数は決まっているので、限られた時間をできるだけ有効に使わなければならない。そこで、深海探査の効率を高めるために、複数のAUVの同時運用が求められるようになってきた。

自律航走が可能なAUVなら、1隻の母船から複数のAUVを展開することも可能ではないかと思うかもしれないが、AUVの

安全かつ確実な運用を行っていくためには、海上からAUVを追尾し、監視・制御できる体制は欠かせない。また、1隻の母船で複数のAUVを同時に運用するためには、高度な通信技術なども必要となる。こうしたなか開発が進められているのが、「洋上中継器 (ASV: Autonomous Surface Vehicle)」だ。自律航行しながら海上からAUVを監視・制御する「船型のロボット」というイメージだ。このASVで、AUV1機を監視できれば、母船でもう1機を追尾し、同時に2機のAUVの運用が可能になる。複数のASVを展開できれば、調査効率はさらに向上する。

2015年2月に相模湾で行われたASV試作器の洋上試験の様子。



●母船とAUV間の通信の中継役

JAMSTEC海洋工学センターにおける本格的なASV開発は、内閣府「総合科学技術・イノベーション会議」が創設した「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」における「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」の一環として2014年にスタートした。

この計画のなかで、JAMSTECは海洋資源に関する効率的な調査を推進するための「AUVの複数運用手法等の技術開発」や、サンプリング調査などの海中作業を効率的に実施するための「ROVによる高効率海中システムの開発」を担当している。AUVの複数運用については、27ページ下図に示すように、小型で機能を限定したAUVを用いる広域調査と、多機能型のAUVを用いて絞り込んだ領域を詳しく調査する特異点重点調査という2つのアプローチを組み合わせることで調査効率を高めることが計画されており、JAMSTECはASVを活用して、高精度・多項目の調査・観測が可能な高機能中型AUVの複数機同時運用システムという後者のアプローチに関する技術開発を担っている。当面は、2機のAUVの同時運用が目標だが、その先には3機以上の調査網を構築することが想定されている。

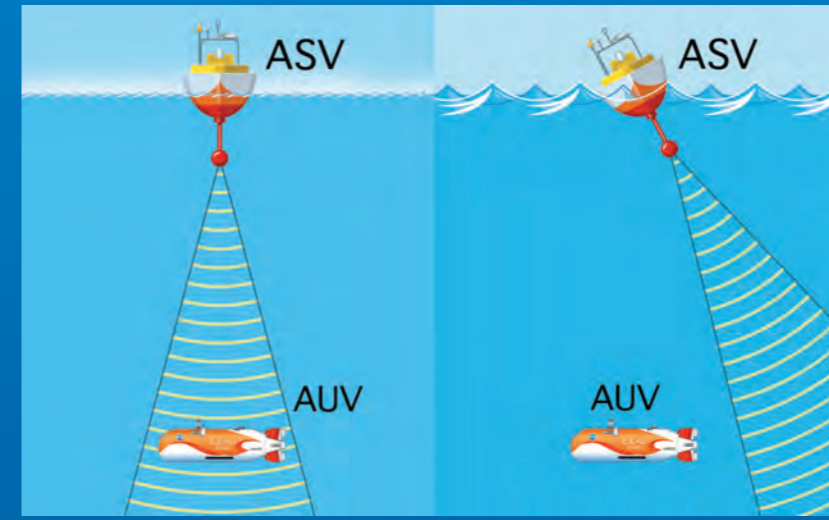
ASVは、AUVを監視しながら、AUVと母船あるいは陸上の管制センターとの通信の中継点としての役割を果たす。空中を進む電波や光は水中に入ると減衰してしまうため、水中では通信に使用できない。そのため、母船やASVと海中のAUVとの通信は、音波で行われる。陸上の管制センターとAUVとの通信では、水中の音波による通信と空中の電波による通信（衛星通信）の仲介役が必要になる。こうしたことから、ASVを用いたAUVの複数運用を実現するためには、高度な音響通信システムの構築およびそのための技術開発が求められている。

●揺れるASVの音響装置を常にAUVの方に向ける技術

現在、海洋工学センターが開発を進めているASV試作器の全長は6m、幅は2.4mほど。プレジャーボートくらいのサイズだ。発電用のディーゼルエンジンを搭載し、生み出された電気は器体（ASVの場合、船体と呼ばずに器体と呼んでいる）を前に進めるスラスタに用いられるほか、通信装置などの電源としても使われる。海面上に出ている部分には、通信衛星や母船とやり取りをする電波通信装置、位置を把握するためのGPSなどが載っている。海面下の船底には音響通信機器を取付けたキール（船舶の下に配置された水中構造体）が取り付けられている。これはAUVとやり取りをする音響通信機器をなるべく器体から離して、エンジンなどの雑音から遠ざけるための工夫だ。

こうした工夫を施しても、ASVは全長6mと小型のため、荒れた海況では波浪に揉まれて器体の姿勢が安定せず、通信が途切れる場合がある。搭載されている音響通信システムは、器体の直下を中心に約30度の円錐形の範囲しかカバーできない。そのため、AUVが深いところを走行しているときは影響が小さいものの、深度1,000m程度までだと、ASVが傾いたときに音波が届かなくなる恐れがある。そこで、波で器体が傾いてもASVの送・受信装置が常にAUVの方を向くようにする技術が必要になる。開発チームは、キール内に納めた送・受信装置が器体の動揺とは独立した動きをしながら、直下に向けた姿勢を保つ仕組みの開発を進めている。そのメカニズムについて、開発チームの百留忠洋グループリーダー（GL）代理は次のように説明する。

「私たちは『音響装置用スタビライザー』と呼んでいます。特許出願を考えているので詳しいことはお話しできませんが、その仕組みは動画を撮影するときにカメラを安定させるカメラスタビライザーに似ています。手持ちのカメラでは姿勢や向きが動いてしまい、どうしても映像がブレてしまいます。それを抑えるために使われるのがこの装置です。ASVの場合は、海上部分が揺れてもキール内の送・受信装置が常に安定した姿勢をとる仕組みになっていますので、いってみれば



▲カメラスタビライザー。カメラを持つ人の手が動いても、カメラはいつも一定の姿勢を保ってぶれない。
◀ASVが揺れて大きく傾くと、海中のAUVとの通信ができなくなる。

カメラスタビライザーを逆にしたものと考えてもらえばいいでしょう」

開発が進んでいるスタビライザーには、横揺れ（傾き）の安定化だけでなく、上下動を抑える仕組みも備わっていると百留GL代理はいう。「小さな器体は、海面のうねりによって大きく上下に動きます。そのときに、ドップラー効果により送・受信する音波の波長が長くなったり、逆に短くなったりします。この変化が大きすぎると補正が難しいので、上下動を緩やかなものにするのも欠かせません。その開発も同時に進めています」

●AUVを賢く追尾し、状況に応じて母船の指示を仰ぐ

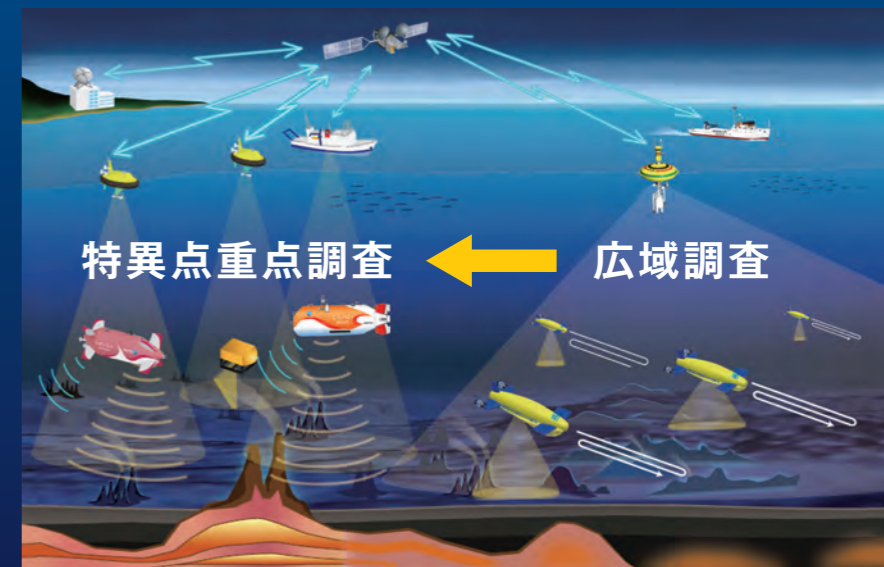
母船のオペレーターに代わってAUVを監視するASVには、AUVを追いながら自律航行する機能だけでなく、状況を判断してAUVを制御する機能が求められる。開発チームは、ASVにどのような自律機能をもたせるか検討を重ねているが、百留GL代理の頭のなかではそのイメージが具体的な像を結び始めている。

「AUVの動きに完全に同調して一緒に航行するのではなく、より効率的に航行しながら、AUVにつかず離れず追尾するのが目標ですが、それを実現するには時間がかかりそうです。現在は、音響により海面下のAUVの位置を確かめながら追う機能の確立を目指しています。AUVは定められたチェックポイントの通過を確認しながら進んでいきますが、海面では波や風の影響を受けるので、海中のAUVと同じように航行するのはなかなか難しい。そこで、ASVはAUVのチェックポイント通過を確かめたら、自分はその先を飛ばしてAUVを追っていきけるような、できるだけ賢い自律機能を構築しているところです」

自ら状況を判断してAUVを制御する機能については、「今は初期段階なので、AUVの動きを監視して、異常があったときは母船に連絡し、母船からの指示をAUVに送って動きを停止させる機能をもたせています」と話す。

現在のところ、AUVの観測データをリアルタイムで受けて、それを母船に送ることは考えられていない。観測データは、音響通信で送るにはデータ量が大きすぎるからだ。観測データは、AUVを母船上に回収した後に取り出される。したがって、ASVから母船に送信される主なものは、AUVが正常に航行しているかどうかの情報と、ASVに搭載されたテレビカメラの映像ということになる。ASVの周囲の海上の危険を知らせるため、カメラ映像を母船に送り続けるのだ。ASVから母船への送・受信は、母船との距離が1km程度の場合は無線LANで、もっと離れた場合は、VHF（超短波）あるいは衛星通信を使って行われる。

ASV試作器の初めての洋上試験が、2015年2月に相模湾で行われた。このときは、船上のクレーンで吊り上げて海面に着水させる際の動作確認や海上での旋回性能のテストのほか、無線LAN・VHFによる通信の確認などが実施された。2016年2月には2回目の洋上試験が予定されており、AUVを想定した海中の送・受信装置とASVとの間で音響通信テストを行う計画だ。



▲ASV運用のイメージ図。1機のASVが複数のAUVを監視する広域の探査（右：広域調査）と、1対1ないしは1対2で狭い範囲を詳細に探査する（左：特異点重点調査）、2つのアプローチで調査効率を大幅に向上させることが可能となる。

北極海の環境変化

観測研究からわかってきたこと

● 地球情報館公開セミナー第187回 2015年2月21日開催

増幅される極域の温暖化

近年の地球温暖化に伴い、北極海では特に太平洋側で海水の著しい減少が観測されています(図1)。私たちはJAMSTECの海洋地球研究船「みらい」やカナダの砕氷船で北極海の観測を実施し、海水減少に伴う北極海の物理・化学環境の変化や生態系の応答についての研究に取り組んでいます。

図2は21世紀後半の気温変化をシミュレーションしたものです。この図から、特に北極域での気温の上昇が著しいことがわかります。北極海の海水は白く、海は黒っぽい色をしているため、雪や氷は太陽光を反射しますが、海は吸収し暖まります。光の反射率をアルベドといい、雪や氷では85~90%にもなりますが、海では10%程度、地面では20%程度です。その結果、海や地面が暖まり、雪や氷が融けて海や地面の面積が増えるためにさらに暖まっていく、という現象が繰り返されます。この一連の過程を「アイス・アルベド・フィードバック」といい、これにより極域の温暖化が増幅されているのです。

海水融解と海水温の変化

では氷がなくなったとき、北極海はど

のように変化するのでしょうか。図3右上は2008年に「みらい」やカナダ・ドイツの砕氷船で観測した海面水温の分布です。この図の西経150度の赤のラインに沿った海水温を過去の平均データと比較した結果、北緯72~74度付近の海面水温は、5℃以上も上昇したことがわかりました。この海域では、海水がまったくありませんでしたが、水温上昇の低いより北の海域には氷がありました。南の海域では、アイス・アルベド・フィードバックにより海水融解と海の温暖化が進んでいると考えられます。

ただ、あらゆる場所で温暖化しているわけではないことも、観測からわかってきました。図3下は、上図の青いラインに沿った水温断面です。2002年と2008年を比べると、2008年の方が亜表層の水温が低下しているのがわかります。なぜこのようなことが起きたのでしょうか。

その場所は、2000年代前半には海面を海水が覆っていました。その下の海水は、海水があるため大気との間の熱のやり取りが妨げられます。2000年代後半になると、沿岸付近で氷が融けてなくなります。アラスカ側では夏の7月終わりごろまでには海水が融けているので太陽の熱を吸収して海水が暖まりますが、シベリア側



で氷がなくなるのは9月中旬です。そのころには大気が冷たくなっているため逆に海水が冷やされ、密度が増して重くなって対流が起こり、分厚い冷たい水の層が形成されて広がったのです。

海洋循環と淡水化

一方、淡水化について考える際には北極海の海洋循環(図4)が重要です。北極海には太平洋から入ってくる水と大西洋から入ってくる水があります。両者を比べると、大西洋は蒸発が活発で、太平洋は降水が多いことなどから、大西洋の方が塩分が高く、太平洋は塩分が低いので、後者は淡水の1つの供給源になります。また北極海には、ユーラシア大陸のレナ川やエニセイ川、北米大陸のマッケンジー川などから大量の淡水が流れ込んでいます。もちろん氷が融けることでも淡水が付加されます。

近年、図のポーフォート循環内で淡水化が著しいということが、アメリカの研究者によって明らかにされました。2000年代前半には夏でも海水が北極海(アラスカ沖)を覆っていたので、上空のポー

地球温暖化は、北極域にも海水の減少をはじめ、さまざまな影響を与えています。海水が少なくなることで海中の環境や生態系はどのように変化してきたのでしょうか。

フォート高気圧によって動かされる時計回りの海の流れは、非常に弱かったのです。ところが海水が融けて隙間が多くなると、海水自体が風で動くようになり、その下の海水もその力によって動かされ、非常に強い時計回りの循環が生じます。すると、地球の回転の効果で表層の水がどんどん循環の中央に集められる。つまり、淡水が時計回りの循環のなかにたまっていくという現象が起きます。それでアラスカ沖では淡水化が起きているわけです。

通常、暖かくて塩分の高いメキシコ湾流は、ヨーロッパ辺りまで北上してグリーンランド沖で冷やされ、重くなって急激に沈み込みます。そして深層流として逆に大西洋を南下し、大洋間を千年単位の非常に長い時間スケールで循環して表層に戻ります。しかし北極の海水やグリーンランドの氷床が融けて淡水が大西洋に流れ出ると、淡水は海水に比べ軽いので、冷やされても沈み込みにくくなります。このため、海洋の大循環や気候に何らかの影響を与える可能性も考えられます。

海洋のCO₂吸収と生物ポンプ

ここまでは海洋物理的な話でしたが、海洋化学、生物学的な話題にも触れたい

西野 茂人
北極環境変動総合研究センター北極環境・気候研究ユニット
主任技術研究員

●にし の ・しげと。1967年大阪府生まれ。1990年北海道大学水産学部水産化学科卒業、1997年同大学院理学研究科修了。1998年海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)入所、2015年より現職。主な研究分野は海洋物理・化学。海水減少に伴う北極海の物理・化学環境の変化に関する観測研究に従事。



と思います。ここでは、CO₂(二酸化炭素)をはじめとした炭素循環がキーワードになります。大気中のCO₂濃度は、植物の光合成が低下する冬に上昇し、植物が活発にCO₂を取り込む春から夏にかけて低下するという季節変動を繰り返しながらも、全体としてはどんどん高くなっています。なぜなら、われわれが化石燃料を使用したり森林を破壊したりすることでCO₂を排出しているため、年間の排出量(炭素換算)は8.9ペタグラム(ペタ=10の15乗)という莫大な量です。このうちの海洋が吸収する量は2.3ペタグラムと見積もられています。その際、生物が重要な働きをしています。

海中にいる植物プランクトンは、海水に溶けているCO₂を光合成で体に取り込み、有機炭素をつくり出します。有機炭素は植物プランクトンが集まったり死んだりすると沈降して深いところに運び去られていきます。あるいは動物プランクトンによって食べられ、糞粒として沈むこともあります。また動物プランクトン自身も死んだり移動したりすることによって深層へと沈みます。このように海洋の表層でCO₂を取り込んだ生物が沈降することで、炭素は深層へと運ばれ貯蔵されるのです。すると海洋表層のCO₂濃度が下

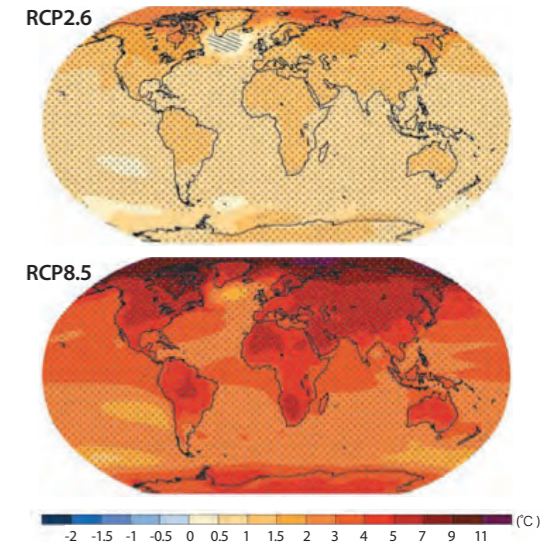
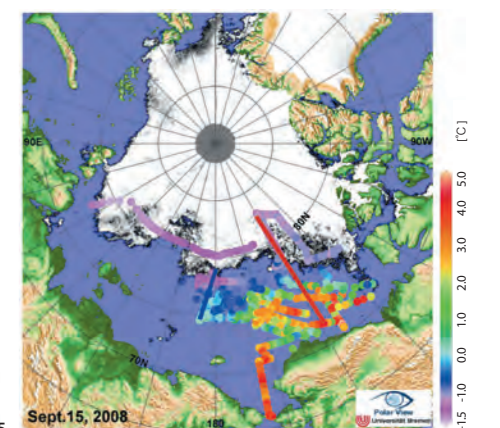


図2 地上気温変化のシミュレーション
年平均気温変化(1986~2005年平均と2081~2100年平均の差)を2通りのシミュレーションで示した図。「RCP2.6」は、温室効果ガスの排出量が少なく、最も温暖化が抑えられた場合、「RCP8.5」は2100年における排出量が最大に相当する、最も温暖化が進んだ場合。いずれにせよ北極域で温暖化が著しいことがわかる。(IPCC AR5 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約より引用)



2008年8~10月の北極海の表面水温と9月15日の海水分布
(Nishino et al. (2013), Journal of Geophysical Research - Oceansの図を改変)

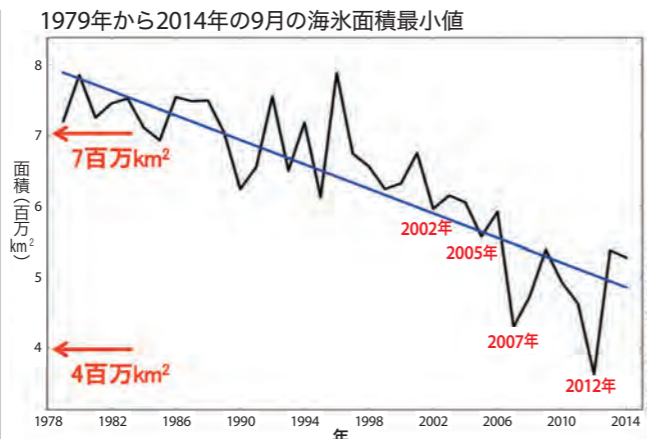


図1 北極海の海水減少の様子
左は、海水面積が衛星観測史上最小を記録した2012年9月16日の海水分布。2000年代の平均的な氷縁位置(オレンジのライン)と比べると、特に太平洋側で大幅に後退しているのがわかる。グラフは1年のうち海水が最も少なくなる9月の海水面積の推移。観測が始まった1979年には700万km²あったが、2012年には約半分まで減少している。
(左図: 国立極地研究所北極観測センター北極域データアーカイブVISHOPより作成)

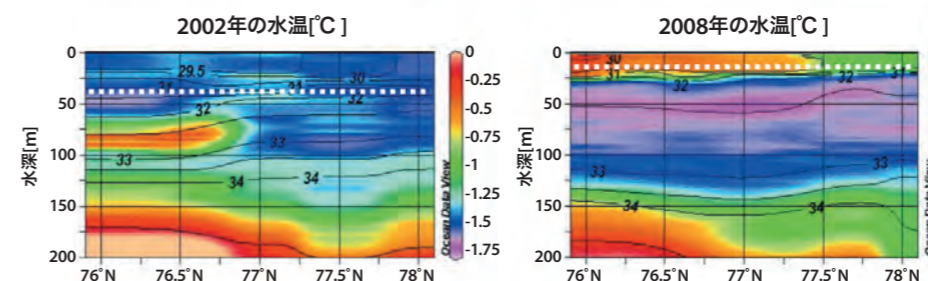
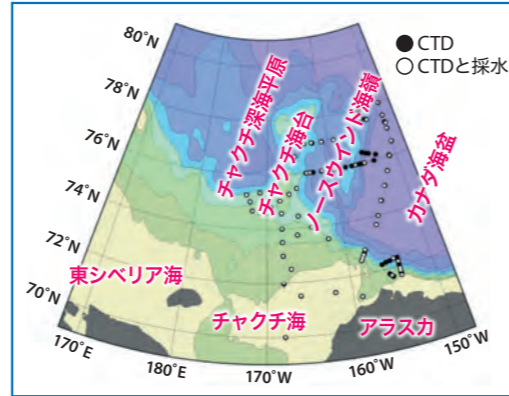


図3 海水融解と海水温の変化
右上図は2008年8~10月の海面水温の分布。赤のライン(北緯72~83度、西経150度)に沿った観測では、南の海域で5℃以上も海面水温が上昇していた。下の2図は青のラインに沿って観測した2002年と2008年の水温分布。暖色系は水温が高く、寒色系は低いことを示す。亜表層は2008年の方が寒冷化していた。白の点線は、深さとともに栄養塩濃度が急激に高くなる栄養塩躍層、等値線は塩分。

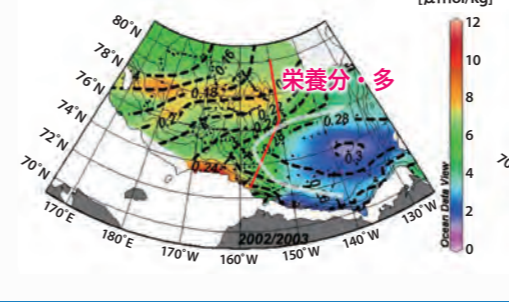


図4 北極海の海洋循環

太平洋水はベーリング海峡を通じて北極海に入り、時計回りのボフォート循環によって広がっていく。ボフォート循環は上空のボフォート高気圧という時計回りの風の場によって駆動される。大西洋水は北極の縁を通ってシベリア・アラスカ沖まで達する。図3のグラフで水深200m付近に見られた暖かい水は大西洋からやってきた水で、それより上の水は塩分が低くて軽い太平洋水。(Woods Hole Oceanographic Institutionのweb siteの図を改変)



2002年/2003年における水深50mの栄養分(硝酸)の分布



2008年/2009年における水深50mの栄養分(硝酸)の分布

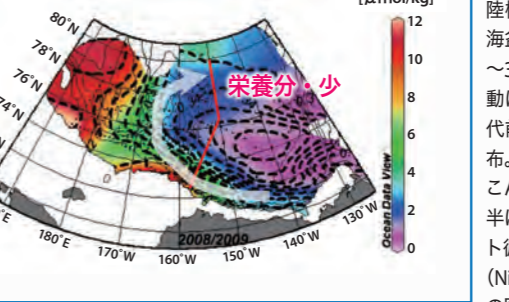


図5 「みらい」北極航海での観測結果

アラスカ沖やシベリア沖には、水深が50mより浅い陸棚域が、それより北には急激に深くなる陸棚斜面が広がって、さらに北にはカナダ海盆やチャクチ深海平原といった、水深が2,000~3,000mの深い海が広がっている(左)。生物活動は陸棚域で非常に活発。中・右図は、2000年代前半と後半の水深50mでの栄養分(硝酸)の分布。図中の破線は海の流れのパターンで、線がこんでいるところほど流れが強い。2000年代後半には流れが強くなり、非常に大きいボフォート循環が見られたことがわかる。(Nishino et al. [2011a], Journal of Oceanographyの図を改変)

がり、それを補うように大気中からCO₂が吸収される。この仕組みを「生物ポンプ」といい、生物ポンプが働かなければ大気中のCO₂は現在の3倍程度にまでなるといわれています。

酸性化に伴う海的环境変化

近年、大気中のCO₂の増加に伴い海に溶け込むCO₂も増えていきます。そこで今、非常に大きな問題となっているのが「海洋の酸性化」です。酸性化といっても海が酸性になるわけではありません。海は弱アルカリの性質を持っていますが、CO₂を吸収することでそのアルカリの度合いが小さくなる、これが酸性化です。

海洋が酸性化すると、炭酸カルシウムを殻を持つ生き物にとっては、殻が溶けたり、殻の形成が阻害されたりする、すみにくい環境になります。こうした環境変化は食物連鎖網を通じてより高次の生態系に影響を及ぼすのではないかと非常に問題視されています。

観測や数値シミュレーションの結果、北極海が最も炭酸カルシウムが溶けやすい環境になっていることがわかりました。先にお話した通り、北極海では海水が融けたりすることで淡水の量が増加しています。淡水が増えると、炭酸カルシウ

ムがより溶けやすくなります。さらに、海水の蓋がなくなることで大気からのCO₂を吸収しやすくなり、より酸性化が進行します。淡水化と酸性化のダブルパンチで、北極海は最も炭酸カルシウムが溶けやすい環境になっているのです。

海水融解と光合成

2004年の「みらい」による観測では、海水融解に伴い生物ポンプが強化されている様子を観測しました。植物プランクトンである珪藻が殻をつくる時に必要な栄養分に、ケイ酸塩があります。ケイ酸塩の分布は、1994年には表層で比較的高い濃度が高く、水深100m程で最大濃度となり、深いところ(底層)では低濃度になっていました。一方2004年の観測では1994年に比べて、表層でケイ酸塩の濃度は減少し、底層で増加しているという結果になりました。この変化は恐らく、海水がなくなって海中の光の環境が良くなり、光合成が活発化することで、表層の栄養分が多く使われたことが要因だと考えられます。そのため表層のケイ酸塩濃度は下がり、表層で増えた珪藻が沈降して底層で殻が溶解することで、ここではケイ酸塩の濃度が上がったと考えられます。つまり、海水が融けることにより生物ポンプが強化したと考えられるわけです。また、その地点での植物プランクトン量の指標であるクロロフィルaの濃度は、2004年の方が高く、生物ポンプの強化と整合的でした。

ただ、海水が減少した至る所で植物プランクトンが多いわけではありませんでした。クロロフィルaの濃度はシベリア側で非常に高く、アラスカ側では低かった

のです。この分布はケイ酸塩の分布とよく一致しました。つまり、海水が消失し、海中の光環境が良くなっても、光合成に必要な栄養分がなければ植物プランクトンは増えることができないわけです。当たり前のような話ですが、北極海の東西でこうした差があることが、「みらい」の観測で初めて明らかになりました。

海洋循環の変化と生物活動

一方、2009年の観測(図5)では、海水融解に伴いアラスカ沖で生物ポンプが弱体化していることを観測しました。水深50m付近の硝酸塩という栄養分の分布と、大型植物プランクトンのクロロフィルaの分布について、この2009年と2008年のデータを合わせたものと、2000年代前半(2002、2003年)のデータを比較しました。すると、アラスカ沖では2000年代前半は表層でも比較的高い濃度が高く、大型の植物プランクトンが観測されましたが、2000年代後半になると栄養分が少なくなり、大型の植物プランクトンは観測されませんでした。つまり生物ポンプが小さくなっていることがうかがえたのです。

2000年代前半は氷が張りつめていたために、アラスカ沖のボフォート循環が弱く、淡水層は非常に薄く、その下には栄養分がたっぷりの海水がありました。しかし2000年代後半になると、海水が融けて海洋循環が強くなり、その時計回りの循環のなかに淡水が蓄積されることで栄養分の高い海水が下の方に押し下げられてしまうのです。そのため下層からの栄養分の供給が抑えられ、栄養濃度が低下して植物プランクトンが育たない環境

になってしまったのです。

2010年の観測では、アラスカ沖で巨大な暖水の渦を発見しました(図6)。渦の内部では栄養分であるアンモニアの濃度が非常に高く、小型の植物プランクトンが非常によく繁殖していました。前述の通り、2000年代後半には栄養分の高い水はどんどん深い方向に追いやられ、下層からの栄養分の供給が抑えられて、大型の植物プランクトンが増殖しない状況になっていました。そこへこの渦が栄養分を運んできたので、別の種類の植物プランクトンが増殖するという結果になったのです。

また、近年は北極海で秋に嵐が増加する傾向にあるようですが、これにより海がかき混ぜられ、深いところから栄養分がもたらされて生物活動が活発になると考えています。2013、2014年の観測ではこれを示唆する結果も得ています。

海岸浸食と永久凍土の融解

最後に、アラスカにある国際北極圏研究センター(IARC)が中心となって取り組んでいる、海岸浸食、海底永久凍土の融解の話をしてと思います。

北極海沿岸に接岸した海水は、波による海岸浸食を防ぐ役割を果たしています。IARCのラリー・ヒンズマン元所長によると、近年、北極海沿岸では海水が接岸している期間が短くなり、波が直接、海岸に当たって永久凍土を融かし、海岸を浸食するという現象が起きています。家屋が崩壊するなど社会的なインパクトも大きいのですが、生態系にとっても非常に大きなインパクトがあるといわれています。

まず、海岸浸食の結果、土砂が海に流れ込むことで海が濁り、光環境が悪くなって植物プランクトンの光合成が抑えられると考えられます。一方で、土砂とともに有機物も運ばれてきてプランクトンの栄養分になるというプラスの面も考えられ、どちらの効果が高いのかはよくわかっていません。また、土砂が海底にたまと、そのなかの有機物が分解されるときにCO₂が発生するため、海底で酸性化が起きているともいわれています。

一方、永久凍土が融けると、そのなかの有機物が分解されてメタンが生成されます。またメタンハイドレートも分解してメタンが生成されます。生成されたメタンは、海を通じて大気に放出されます。メタンは温室効果ガスですから、放出されると地球温暖化を加速し、さらに永久凍土を融かしてメタン放出を加速することも考えられます。

シベリア沖には、海底の永久凍土の80%が集中し、この海域から放出されるメタンの排出量は、全海洋から放出されるメタンの半分にもなるという見積もりがあります。IARCが中心となって行ったシベリア沖観測では、海底からメタンがぶくぶくと泡状に噴き出している様子

が見られました。このようなメタンも含めると、シベリア沖から放出されるメタンの量は、従来の見積もりの倍以上あるのではないかと報告が、最近なされました。

もっともメタンは、海だけでなく地上からも放出されています。シベリア沖から放出されるメタンの量は地球全体の放出量の5%程度ですから、急激に温暖化に影響を与えるわけではないと考えられます。しかし、北極海の海底には大気中のメタンの10倍に相当するメタンハイドレートが眠っているのです、これが分解してメタンが生じると長期的には温暖化を助長するともいわれています。

今回は紹介できなかった話も含め、北極海的环境変化についてはさまざまなプロセスがあり、それらが複雑に絡み合った将来予測は不確定性が非常に大きいのが現状です。今後も「みらい」等による船舶観測を続けるとともに、通年データを取得できる係留系観測や広範囲をカバーする衛星観測なども連携して、激変する北極海の海洋環境を把握し、地球温暖化に伴う環境変動の将来予測とその精度向上に貢献していきたいと考えています。BE



北極海にてCTD採水器を投入する様子。

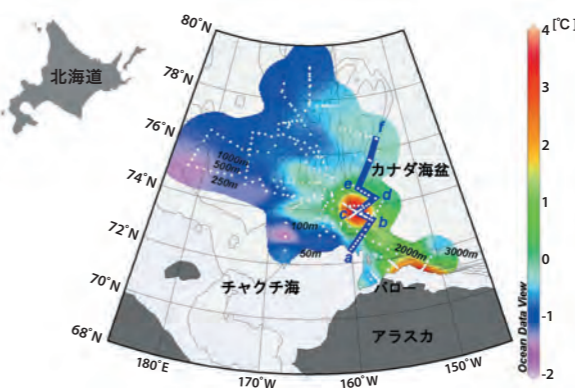


図6 2010年「みらい」の観測で見られた暖水渦

2010年の「みらい」の北極航海で観測された、水深50mでの水温分布。暖かい水が渦の中心に取り込まれている様子がうかがえる。通常、北極海で見られる渦は直径20~30km程度だが、この時観測された渦は時計回りの直径100km程度の巨大なものだった。左上は同縮尺の北海道。(Nishino et al. [2011b], Geophysical Research Letterの図を改変)

編集後記

特集「計算科学で海洋地球環境の未来を解き明かせ！」はいかがでしたか?「地球シミュレータ」は1998年頃からJAMSTECが中心となって開発を開始し、2002年3月15日に運用を開始しました。計算科学の有効性を世界に示すとともに、地球温暖化や地殻変動など、文字通り地球規模でのシミュレーションに利用され、「気候変動に関する政府間パネル」の2007年ノーベル平和賞受賞にも大きく貢献しました。

私は「地球シミュレータ」の建造をJAMSTECが引き受けることになった当時、発案者の三好 甫先生(故人)とお話をさせていただく機会がありました。大規模計算機による次世代のシミュレーション科学の未来にかける彼の熱い思いに大きな感銘を受けたものです。「地球シミュレータ」の当初の目的は、世界に負けない超高速の計算機をつくり、さまざまなシミュレーション手法を確立することでした。しかしこれからは、高橋センター長が述べているように「自然と科学技術の両方に向き合い、人々の暮らしや社会が、どうすれば自然を破壊することなく共存していけるのかを考えるための“科学的な根拠に基づいた知恵”を提供していく」ことが重要になります。人間活動で未来がどう変わるか、それに対してどのような対策をすれば良いか、いわゆる問題解決型のシミュレーションを行う必要があるということです。また、日本の計算科学の裾野を広げることにも大きな貢献を果たしています。今後の更なる展開にBE編集部も注目していきます。

さて、今年2月1日付の英科学誌『Nature Communications』電子版に面白い記事が掲載されていました。それは、JAXA等の共同チームが「金星の北極域、南極域が高温になる仕組みを明らかにするため、『地球シミュレータ』を利用して金星上空の大気の気温分布を再現し、高温領域の生成や維持の仕組みを解明した」というものです。「シミュレーションの結果、地球とは違って赤道から南北に向かう大きな大気の流れが影響している」とのこと。我々の生活とは関係なさそうな話ですが、今後、地球上でCO₂や硫酸塩を含むエアロゾルが増加した場合の気象変化予測に役立つ可能性があるといわれています。速い宇宙の話ですが、「地球シミュレータ」の利用に関して大きな期待を抱かせる話題でした。(T.T)

『Blue Earth』定期購読のご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>

1年度あたり6号発行の『Blue Earth』を定期的にお届けします。

■ 申し込み方法

Eメールまたは電話でお申し込みください。
Eメールの場合は、①～⑥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

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
海洋研究開発機構 横浜研究所 広報部 広報課
TEL.045-778-5378 FAX.045-778-5498
Eメール info@jamstec.go.jp
ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧ください。
*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号(142号)までとさせていただきます。
バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。

■ バックナンバーのご紹介

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>



*お預かりした個人情報、「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。

JAMSTEC メールマガジンのご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/mailmagazine/>

JAMSTECでは、ご登録いただいた方を対象に「JAMSTECメールマガジン」を配信しております。イベント情報や最新情報などを毎月10日と25日(休日の場合はその次の平日)にお届けします。登録は無料です。登録方法など詳細については上記URLをご覧ください。

海と地球の情報誌 Blue Earth

第28巻 第1号(通巻141号) 2016年2月発行

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

制作・編集協力 株式会社ミュール
アートディレクション 前田和則
取材・執筆 滝田よしひろ (p.1-3, p.10-11, 裏表紙)、斉藤勝司 (p.4-9, p.12-23)、上浪春海 (p.24-27)、寺田千恵 (p.28-31)
編集・制作 滝田よしひろ、柏原羽美
デザイン 三橋理恵子、山田浩之、高塩由香、木元優介
イラスト カサネ・治 (p.24-25, p.27)
撮影 藤牧徹也 (p.20, p.22上, 裏表紙)

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。

賛助会(寄付)会員名簿 平成28年2月5日現在

国立研究開発法人海洋研究開発機構の研究開発につきましては、次の賛助会員の皆さまから会費、寄付を頂き、支援していただいております。(アイウエオ順)

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

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

新潟原動機株式会社	富士ソフト株式会社
西芝電機株式会社	株式会社フジタ
株式会社ニシヤマ	富士通株式会社
日油技研工業株式会社	富士電機株式会社
株式会社日産電機製作所	古河機械金属株式会社
ニッサイマリン工業株式会社	古河電気工業株式会社
日本SGI株式会社	古野電気株式会社
日本エヌ・ユー・エス株式会社	株式会社ベッツ
日本海工株式会社	株式会社マックスラジアン
日本海洋株式会社	松本徽章株式会社
日本海洋掘削株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海洋計画株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海洋事業株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
一般社団法人日本ガス協会	株式会社マルトー
日本サルヴェージ株式会社	三鈴マシナリー株式会社
日本水産株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
株式会社日本製鋼所	三井造船株式会社
日本電気株式会社	三菱重工業株式会社
日本マントル・クレスト株式会社	三菱スペース・ソフトウェア株式会社
日本無線株式会社	三菱電機特機システム株式会社
日本郵船株式会社	株式会社森介建築事務所
濱中製鎖工業株式会社	八洲電機株式会社
東日本タグボート株式会社	株式会社ユー・エス・イー
株式会社日立製作所	郵船商事株式会社
日立造船株式会社	郵船ナブテック株式会社
深田サルベージ建設株式会社	ヨコハマコム・マリン&エアロスペース株式会社
株式会社フグロジャパン	株式会社落雷抑制システムズ
株式会社フジクラ	

退役が決まった海洋調査船「なつしま」・「かいよう」 JAMSTEC 横須賀本部の岸壁で最後の対面

2015年12月初旬、横須賀本部の岸壁に海洋調査船「なつしま」、海洋調査船「かいよう」の2船が並んで停泊した。両船は、ともに2015年度で運航を終了することが決まっており、こうして並んで次の出航を待つ姿も、これが最後となった。

有人潜水調査船「しんかい2000」の支援母船として建造された「なつしま」は、1981年に就航し、日本の深海調査・研究のパイオニアとして、未知のフロンティアを切り拓いた。「しんかい2000」の退役後も、無人探査機の潜航支援をはじめ、さまざまな調査に活躍。2005年には、その機動力を生かしてインドネシア・スマトラ島沖地震の直後に、科学調査船として世界で初めて震源海域の調査を行っている。

一方の「かいよう」は、海中作業実験船として1985年に就航し、当時JAMSTECが取り組んでいた海洋開発のための深海飽和潜水技術（深度300m）の確立に貢献した。その後は、広い甲板を持つ半没水型双胴船の特徴を生かし、多目的海洋調査船として、多数の海底地震計を展開する地震波構造探査や、地震・津波観測監視システム（DONET）の構築作業などで活躍した。

30年以上にわたって海洋科学調査・研究、技術開発の最前線で運用され、日本の海洋科学技術の発展に力を尽くしてきた両船の退役は惜まれるが、海洋調査船「なつしま」、「かいよう」が築き上げた伝統はこの先も受け継がれ、JAMSTECのさらなる発展の礎となるに違いない。



▲▶本部前の岸壁に並んで停泊する海洋調査船「かいよう」(左)と海洋調査船「なつしま」(右)。



▲「かいよう」の操舵室。



▶「なつしま」の操舵室。

▼かつては潜水調査船「しんかい2000」の支援母船として、その後は無人探査機「ハイパードルフィン」などの母船として活躍した「なつしま」。



▲「かいよう」の広い甲板スペースは、地震波構造探査をはじめ、さまざまな海洋実験や調査に役立った。



▲「かいよう」の厨房。



▲「なつしま」の居室。

