

海と地球の情報誌

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

BlueEarth

9・10月号
2004

特集1 地球の未来を切り拓く「地球シミュレータ」

特集2 海底下構造探査の最前線で活躍する観測技術員



特別企画：「かいこう」事故と「かいこう7000」

JAMSTEC Report 東海スロースリップの原因と推定される地下構造を発見

Blue Earth Museum 世界で初めて観察されたユノハナガニの生殖シーン

世界で最も深い海底に到達

10,000m級無人探査機「かいこう」、
水深10,911mへの挑戦

チャレンジャー海淵の海底（水深約10,911m）
に記念プレートを設置



1995年3月4日、10,000m級無人探査機「かいこう」はマリアナ海淵での最大深度潜航試験を行うため、支援母船「よこすか」とともに横須賀を出国した。

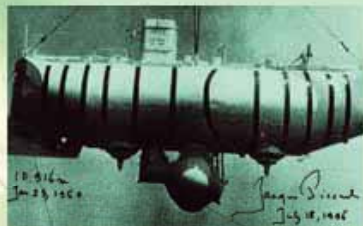
現場海域で準備作業を終え、事前調整のために潜航を試みた「かいこう」にトラブルが発生したのは3月13日のことだった。ランチャーの油圧系から油が漏れ出したのだ。トラブルはただちに修復されたが、今度は海が荒れはじめて潜航は中止となり、1週間の待機を余儀なくされた。

3月24日、「かいこう」が最大深度潜航試験に臨む日がやってきた。午前7時54分、「かいこう」着水。作動確認を行い、潜航開始。一次ケーブルが繰り出され、「かいこう」はチャレンジャー海淵の海底に向かって順調に下降していった。午前10時58分、海底まで約100mの位置（深度10,803m）で下降を停止。続いてランチャーと二次ケーブルで繋がれたピークルだけがさらに下降し、午前11時22分、世界最深の海底に着底した（着底深度記録は10,911.4m）。1960年、バチスカーフ「トリエステ」がジャック・ピカルら2人を乗せて到達して以来のできごとだった。着底後、「かいこう」ピークルはサンプルバスケットからマニピュレータで「KAKO 1995.3.24」と書かれた記念プレートを取り出し、海底に設置。さらに、周辺を航行して海底の観察・撮影を行った。「トリエステ」の潜航では、ヒラメのような魚が観察されたようだが写真は撮られていない。「かいこう」は、ビデオカメラによって、ゴカイの仲間など生物の姿を捉えることに成功している。

「トリエステ」は、世界で最も深い海底にわずか1度到達しただけだが、「かいこう」は、19回も繰り返しこの海域に潜航を行い、世界で唯一の「全海洋で最も深い場所に潜航できる探査機」として、地震発生メカニズムの解明や、有用な極限環境微生物の発見・採取など様々な学術研究に活用され、多大な成果をあげてきた。



「かいこう」は海中でランチャー（右上）からピークル（下）を分離する中継機方式の無人探査機。潜水調査船「しんかい6500」（左上）では観望できない深度6,500m以深の深海でも活動できる



バチスカーフ「トリエステ」。1960年にチャレンジャー海淵の有人潜航に成功した

Blue Earth

9・10月号／2004

Contents

2 特集1 地球の未来を切り拓く「地球シミュレータ」
人類と地球の未来を予測しシミュレーション科学の
新時代を開拓する「地球シミュレータ」

4 新しい気候シミュレーションへのチャレンジ
8 「地球シミュレータ」が果たす科学への貢献

12 特集2 海底下構造探査の最前線で活躍する観測技術員
地震発生帯の構造解析に必要な探査活動に取り組む
観測技術員とその仕事

14 【マルチチャンネル地震反射法構造探査】
航行しながらの調査は緊張の連続

16 【海底地震計を用いる地震波構造探査（屈折法）】
2ヶ月に及ぶ入念な準備が探査を支える

18 特別企画 「かいこう」事故と「かいこう7000」
10,000m級無人探査機「かいこう」ピークル亡失事故の教訓

22 事故の教訓を生かして改造された
7,000m級無人探査機「かいこう7000」

24 Blue Earth Museum
世界で初めて観察されたユノハナガニの生殖シーン

26 JAMSTEC Report

東海スロースリップの原因と推定される地下構造を発見

30 JAMSTEC Report

南極海の深層水の流れを地球シミュレータで再現に成功

34 Marine Science Seminar

～海底観測で探る地球の現在・過去・未来～
「生きている地球」

38 BE Room

海洋科学・地球科学の最先端を現場でまなぶ3日間
マリンサイエンス・スクール2004

40 Present／編集後記

41 賛助会会員名簿

表紙：深海調査研究船「かいけい」

※表紙についての詳しい説明は裏表紙をご覧ください。

“未来を語る道具”として革新的な成果を 次々に達成する 世界最高速のスーパーコンピュータ 人類と地球の未来を予測しシミュレーション科学の新時代を開拓する 「地球シミュレータ」



2002年春に誕生した「地球シミュレータ」は、当時の世界最高速のスーパーコンピュータの約5倍に及び35.86テラフロップス（1秒間に35兆8,600億回の浮動小数点計算を行う能力を示す）という驚異的な実行性能を達成し、世界に衝撃を与えた。50×65mという体育館ほどもある地球シミュレータ棟には、計算ノード320筐体、結合ネットワーク65筐体をはじめ磁気ディスク装置等が整然と並んでいる（写真）。ブルーの計算ノード1筐体につき2台の計算機が収められているが、その1台の計算機のピーク性能は64ギガフロップス、メモリは16ギガバイトで、汎用スーパーコンピュータ1台分にも匹敵する性能を持っている。「地球シミュレータ」は、640台のスーパーコンピュータを優れたネットワークで1台に統合した“超スーパーコンピュータ”なのだ。

だが、「地球シミュレータ」の価値は、単に計算性能が世界一であることだけにとどまらない。これまでのシミュレーションは、限られた計算能力のため、全体から切り離した要素ごとに行われてきた。しかし、「地球シミュレータ」の高度な計算性能は、システム全体をまるごと扱うことを可能にし、シミュレーションのリアリティを格段に向上させた。つまり、「地球シミュレータ」の登場によって、私たちは未来を科学的な根拠に基づいて“見る”ことができるようになったのだ。

運用開始から3年目を迎えた「地球シミュレータ」は、大気・海洋、固体地球等の地球環境分野をはじめ、ナノテク、バイオをはじめとする先端科学分野など、幅広い分野の研究に活用され、多くの革新的な成果を挙げている。「地球シミュレータ」は、「現在から未来を予測し、設計する」という、21世紀の新しい科学の扉を開こうとしている。



「地球シミュレータ」の高度な性能を最大限に活用し 複雑に絡み合う自然をまるごと詳細に再現する 新しい気候シミュレーションへのチャレンジ

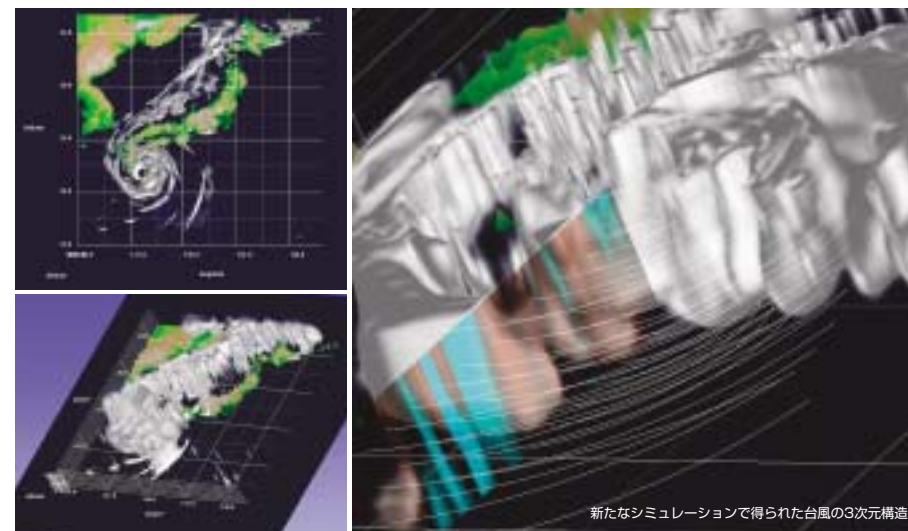
地球シミュレータセンターは、これまでのスーパーコンピュータの能力を遥かに超える「地球シミュレータ」を最大限に活かして、地球環境の変動をより高い精度で正確に予想し、地球と人類の明るい未来に貢献するとともに、高度なシミュレーション技術によって21世紀の科学の発展に寄与することをめざしている。そして、その具体的な取り組みとして、大気・海洋分野、固体地球分野をはじめとする様々な先進的シミュレーション研究プロジェクトが進められている。昨年からは始まった「複雑性シミュレーション研究」もそのひとつだ。コンピュータの限られた能力によって制限されてきたこれまでの気候シミュレーションとは全く異なる発想によって、ミクロな現象とマクロな現象が複雑に絡み合う気候変動現象を包括的にシミュレーションすることをめざしている。まさに「地球シミュレータ」なしには考えられない、全く新しい気候シミュレーション研究だ。この取り組みがどのようなものなのかを紹介しよう。



取材協力：
高橋 桂子 グループリーダー
地球シミュレータセンター
シミュレーション高度化研究開発プログラム
複雑性シミュレーション研究グループ



地球シミュレータ棟の外観



新たなシミュレーションで得られた台風の3次元構造

「地球シミュレータ」にしか できないものをゼロから構築

地球シミュレータセンターの複雑性シミュレーション研究グループは、これまでのようにコンピュータのパワーの限界をほとんど意識せず、新しい考え方によって革新的な気候モデルを開発する取り組みを進めている。その考え方とは、これまでのコンピュータの限界を取り払い、“自然をどこまで自然のまま扱えるか”を追求することだ。

従来の気候モデルでは、主にコンピュータの限られた性能が限界となっており、研究者が本当に目的とするシミュレーションが可能であったか、ということとはなはだ疑問である。実際、全球を数百kmの格子点で分割する比較的限られた分解能でしか気候のシミュレーションを行うことができなかった。そのため、直接扱うことができない分解能以下の小規模な現象がもたらす影響については、パラメタリゼーション（小さな現象の効果分を、あたかも直接扱っているように関係付けて定式化すること）という手法が導入されてきた。パラメタリ

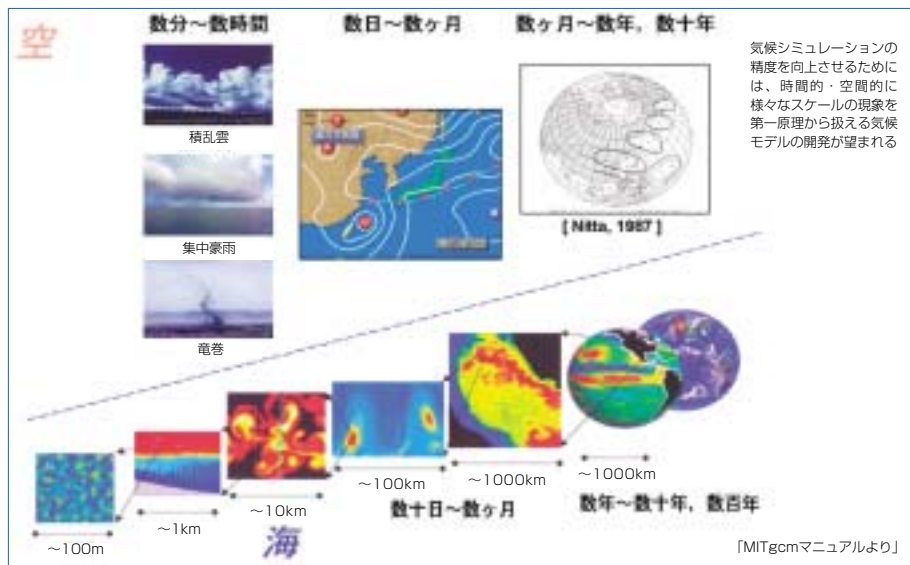
ゼーションを活用することにより、モデルの分解能が低くても、多くの要素が複雑に作用して成り立っている現象を間接的に表現することが可能になる。しかし、現象を直接的に解いているわけではないため、任意的・恣意的な影響を受けやすく、シミュレーション結果にばらつきを生む大きな原因にもな

っていた。

そうしたなか、これまでのスーパーコンピュータの能力を遥かに超える、実効性能35.86テラフロップス、主記憶容量10テラバイトという驚異的な能力を持つ「地球シミュレータ」の登場によって、気候モデルを開発するための環境は飛躍的に向上した。そして、



大気・海洋・陸面・氷氷それぞれの間には、熱交換だけでなく様々な相互作用がある。また、人間の存在も地球の気候に大きな影響を与えている



すでに全球を10kmの格子点で覆うという超高分解能でシミュレーションすることが可能になってきた。さらに、時間的・空間的なスケールに違いがありすぎて、関連性がありながらパラメタリゼーションでしか扱えなかった小規模な現象も、ひとつの系として解ける環境が整った。

複雑性シミュレーション研究グループは、これまでのコンピュータの制約のもとで構築されてきた気候モデルの考え方を一度白紙に戻し、「地球シミュレータ」の特性を最大限に活かしたとき、どこまで気候シミュレーションを自然に近づけることができるか、その可能性をゼロから考え直すことにした。そして、局所的な小さな現象からグローバルな現象のどこからどこまでを扱えるのか、また、時間的に短い現象から長い現象のどこまでを扱えるのかといった「地球シミュレータ」によるシミュレーションの可能性を見極めるとともに、「地球シミュレータ」でなければできない気候モデルとはどのような

ものなのかを掘り下げることから、この取り組みをスタートさせた。

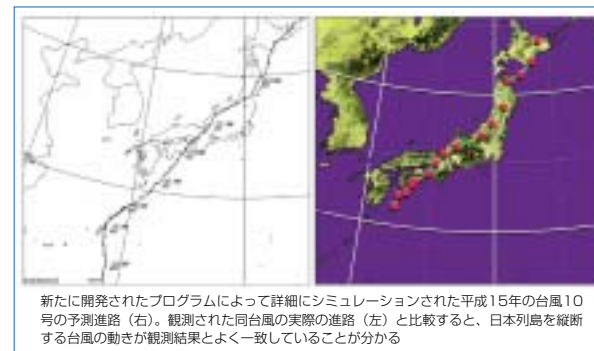
全地球スケールの現象をまるとシミュレーション

これまでのモデルの延長線上でなく、ただ分解能を高めただけでもない、「地球シミュレータ」でなければならない気候モデルを開発するという複雑性シ

ミュレーション研究グループのチャレンジは、高橋桂子グループリーダーを中心に9名で構成され、2003年の春から始動した。そして、開発すべき新たなモデルの検討を行った結果、大気・海洋・海氷・陸面を数km以下の分解能で結合させた全球のカップリングモデルであること、さらに非常に細かいスケールと大きなスケールの現象を共に扱え



新たに開発されたプログラムで、台風とそれに伴って山越える湿った空気を再現したシミュレーション画像。渦を巻く雲が台風（左）で、球（右）は空気の温度（赤いほど高く、黄色は低いことを示す）と水分（球が大きいほど水分が多い）を表している



るものが必要であることが浮かび上がってきた。全球を扱いながら、大気を数百m～数km、海洋を数km以下の分解能で結合させれば、グローバルな気候変動現象はもちろん、台風の進路や集中豪雨など、私たちの生活に密接に関連した気象現象までも、より緻密に見ていくことができる。さらに、風況予測に基づく効果的な風力発電施設の設置場所の予測や、ヒートアイランド現象に対する予測など、社会に影響の大きい環境的な事象についても正確な情報提供が可能になる。

ところが、より小さな現象を扱いながら分解能を高めていこうとしたとき、そこに大きな課題が生じた。それは鉛直方向の扱い方だ。これまでのように比較的粗い水平方向の分解能の空間スケールを対象としたときは、「鉛直方向の圧力傾度力（密度の分布）と重力が釣りあっている」という静力学平衡状態の近似を用いても問題はないことが知られている。ところが、水平方向の分解能を高めていくと、この静力学平衡の近似が成り立たず、鉛直方向も非静力学モデルとして厳密に方程式を解く必要が出てくる。粗い分解能ではパラメタリゼーションの効果として導入されている、直接扱う対象になっていなかった積雲や積乱雲などの雲、集中豪雨、ダウンバーストなどのような現

象も、より直接的に、詳しく扱わなければならないのだ。また、小さな現象を見ていこうとすると、それを取り巻く規模の大きな現象とどのように相互作用させていけばよいのか、その取り扱い自体が大きな課題となる。長い時間スケールで変動を見ていくと、小さな現象もその生成・維持・消滅・組織化を通して、やがて全球的に影響を与え、その影響が再び小さな現象にフィードバックされる。そのため、新たに開発されるモデルでは、全球的空間規模で小さなスケールの現象までも含めてとらえていくが必要になる。

こうした様々な課題を見据えながら、新たな気候・気象のシミュレーションプログラム開発が始まった。非静力学的部分を取り込みながら、全球規模で、地域や季節限定の局所的な現象から全球的なスケールの現象までを再現する、まさに「地球まるごとシミュレーション」の試みだ。

新しい発想と計算手法で気候・気象現象を再現

複雑性シミュレーション研究グループの大きな特色のひとつは、気候や気象の専門家がほとんどいないことだ。研究グループでは、これまでの気候モデルにとらわれず、様々な研究分野で開発されている先進的な計算手法を積

極的に取り込みながら、「地球シミュレータ」の性能を活かした、全く新しい気候・気象シミュレーションプログラムを構築していくことをめざしている。気候モデルにおけるマクロな現象、あるいはミクロな現象、いずれもそれぞれ別々のスケールについては、知見が積み重ねられ、様々な手法も開発されてきた。しかし、大域的な現象と局所的な現象の相互影響を考えながらシミュレーションを行うには、さらに工夫を重ねる必要がある。たとえば、海面が波立ったときに、気体や熱はどのように取り込まれるのかといった細かいスケールの現象については、これまでにない新たな計算手法の取り込み方が重要なポイントとなる。また、計算精度や計算速度を高めるためには、これまでの研究にとらわれない新しい発想、柔軟な思考が大きな原動力になる。計算機科学の新たな次元を開拓しようとする「地球シミュレータ」を活用して、気候シミュレーションの革新的な成果を生み出すためにも、新しい分野の考え方を積極的に取り入れていくことは重要だ。

モデルの設計、プログラミングがスタートして1年半。すでに基本的なモデルはでき上がり、大気と海洋のモデルを結合してテストを行う段階に到達している。今後は、グループで開発されたオリジナルの計算手法を、これまで以上に果敢に導入する予定だ。台風などのように特に細かく見ていきたい局所的な現象に格子点間隔を集めて解像度を高めていく（動的・適応型メッシュ）といった新しい手法もそのひとつである。研究グループでは、近い将来、全球から都市部のヒートアイランド現象や都市性降雨まで、これまでには同時に扱うことのできなかった幅広い現象を、一度に再現できるシミュレーションプログラムを、地球シミュレータ上で完成予定である。



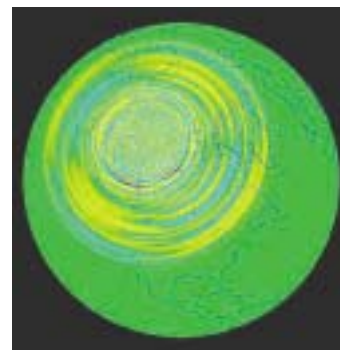
大規模シミュレーションによって 最先端科学分野の未知の領域を開拓 「地球シミュレータ」が果たす科学への貢献

世界一の計算能力を持つ「地球シミュレータ」の登場により、科学研究、技術開発をはじめ、あらゆる分野でコンピュータシミュレーションの有用性が認識され、様々な研究に利用されようとしている。なかでも、これまで実証することが難しかったグローバルのなかのローカルな現象、観察や実験が不可能だった領域などにおいて、「地球シミュレータ」は新たなフロンティアを切り拓きつつある。いまや、シミュレーションは科学・技術の未来を開拓するために欠かせない手段になったといってもよいだろう。そして、「地球シミュレータ」は、気候変動研究や固体地球研究といった地球環境分野だけでなく、ナノテクノロジーやバイオテクノロジーなどの先端科学分野をはじめ、技術・産業分野など幅広い研究プロジェクトにも門戸を開き、次々と革新的な成果を達成している。

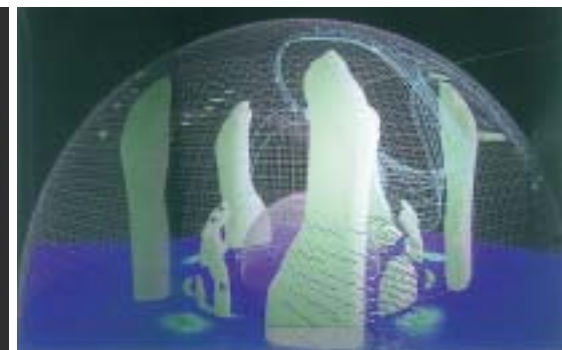
未来を予測するシミュレーション科学によって、暮らし方や社会のあり方を設計する時代の到来も、そう遠くないかもしれない。



取材協力：
渡邊 國彦 プログラムディレクター
地球シミュレータセンター
シミュレーション高度化研究開発プログラム



地球内部変動研究センター地球内部試料データ分析解析研究プログラムの坪井誠司プログラムディレクターらによって再現された、2002年のアラスカ地震で地震波が伝播する様子（2003年度ゴードン・ベル賞受賞）



地球シミュレータセンター・固体地球シミュレーション研究グループによるコア（外核）の対流運動を表したシミュレーション画像。中央の小さな球は内核、矢印は対流運動の方向を示す

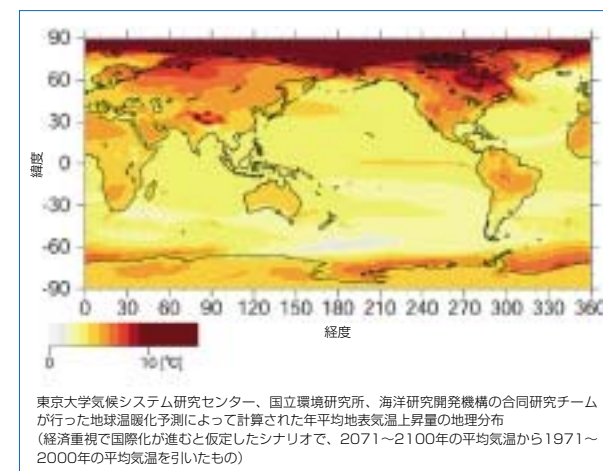
幅広い分野で活用される 「地球シミュレータ」

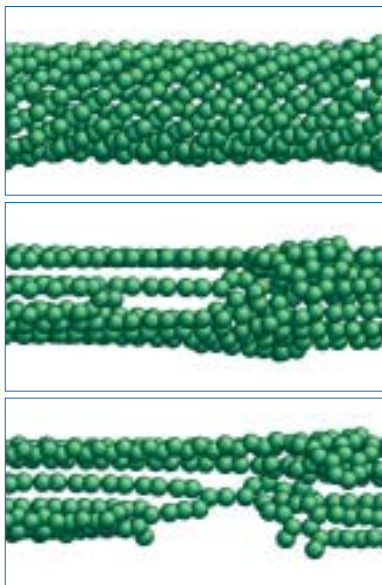
「地球シミュレータ」開発のきっかけは、地球温暖化問題だった。地球環境変動や地球温暖化が差し迫った問題となり、1997年12月、日本において地球温暖化防止京都会議（国連気候変動枠組条約第3回締約国会議、COP3）が開催された。地球シミュレータ計画が動き出したのは、まさにその1997年4月のことだった。計画は、地球規模でおきる気候変動や地球内部変動等の解明をめざし、高精度なシミュレーション研究を実施するための超高速計算機を開発するプロジェクトとしてスタートした。100年後、あるいは200年後、地球の環境はどのようにになっているのか、どうすれば温暖化を防げるのか、こうしたことを明らかにするために、シミュレーション科学によって未来を予測する道具をつくらうとしたのだ。

したがって、「地球シミュレータ」の第一義の役割は、地球温暖化をはじめとする地球規模の気候変動や地球内部変動の予測であり、それによって人と自然の共生や人類の持続的発展に貢献することだ。だが、世界に誇る日本の財産とも言えるべき「地球シミュレータ」

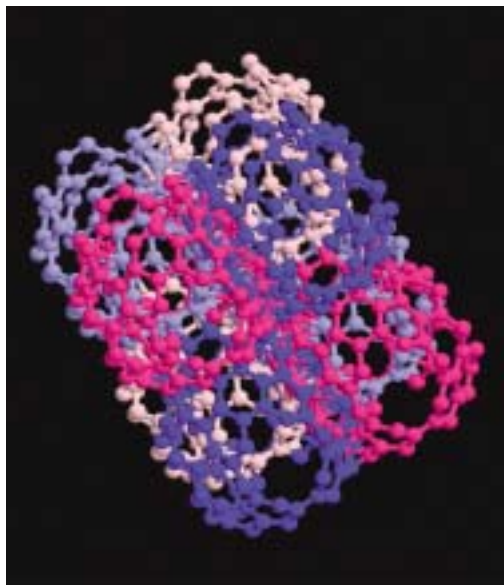
を有効に活用し、幅広い意味で社会に役立てていくため、地球シミュレータセンターでは、幅広い分野の研究者、産業界およびメディアからの委員で構成される計画推進委員会（旧・利用計画委員会）を設置し、その運用方針を策定している。同委員会が定める平成16年度の計算資源の利用配分は、大気・海洋分野が35%、固体地球分野が20%、より高効率なコンピュータの使い方や

計算手法などを開発する計算機科学分野が10%、先端科学や技術開発分野で「地球シミュレータ」を使わなければならないような研究を行う先進・創出分野が15%、次世代のコンピュータ活用や新たな可能性を見出すために柔軟な思考のもとで、国際共同研究など幅広い研究を行う戦略的研究枠が20%となっている。地球環境変動に関する研究分野は全体の半分以上を占めているが、





カーボンナノチューブの弾性シミュレーション。水平方向に力を加えたとき、徐々にチューブ構造が壊れ、切れていく様子がシミュレーションされた（高度情報科学技術研究機構）



炭素でできたサッカーボール状のフラーレンを溶接してつくるスーパージャングルス構造。硬くて軽く、半導体的性質を持つ（高度情報科学技術研究機構）

先進・創出分野では、ナノテクノロジーやバイオ関係、ロケットエンジンのシミュレーションなど、幅広い先端科学・技術の研究が行われ、また、「地球シミュレータ」の柔軟な運用を推進していくための戦略的研究枠では、産業界との連携によるシミュレーション研究や海外の研究機関との共同研究なども行われている。「地球シミュレータ」の世界に誇れる計算性能は、地球環境変動に関する研究にとどまらず、様々な分野で科学技術の未来を開拓するために活用されている。

世界最速マシンが科学の新領域を開拓

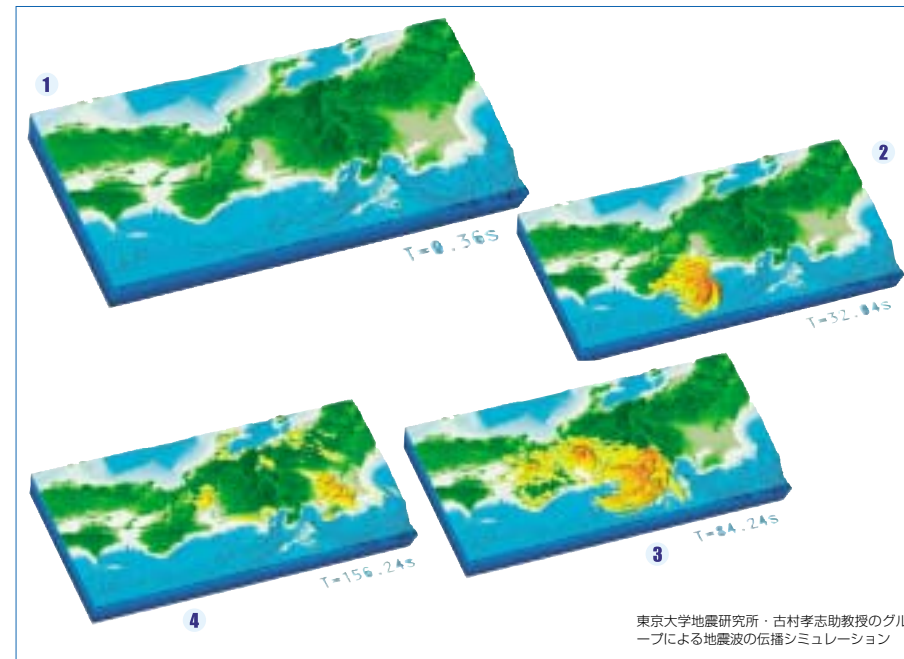
「地球シミュレータ」を利用する研究（共同プロジェクト）は、地球シミュレータセンターの課題選定委員会によって審議・選定される。昨年度は34件、今年度は37件の共同プロジェクトが選

ばれた。今年度前半は、IPCC第4次報告書のデータ締め切りに向けて、3つのプロジェクトが「地球シミュレータ」を駆使した地球温暖化予測の計算を行い、多くの計算資源がこれに割かれた。大気・海洋分野の研究のなかでは、この成果が今年度の大きなトピックスになるはずだ。

固体地球分野では地球内部の構造や変動をモデル化し、磁場の変動や内部物質の物性、地震発生過程や地震波の伝播などに関するシミュレーションが行われている。この分野で興味深い成果を挙げているのが、東京大学地震研究所・古村孝志氏が進めている地震波の伝播に関するシミュレーションだ。地震波の伝わり方に影響を及ぼす地下構造の情報を取り入れた大規模な計算により、「地球シミュレータ」を用いて過去に発生した巨大地震の地震波の伝

わる様子を再現。地下の構造によって、震源から遠くでも大きな揺れが生じる場合があることなどを明らかにした。さらに、地震波伝播のシミュレーションによって、大きな被害をもたらす強い揺れの生成メカニズムを解明しようとしている。また、今後発生する可能性が指摘されている大地震の被害地域や被害の大きさを予測するシミュレーションにより、防災に役立てたいとしている。

先進・創出分野ではナノテクノロジーやバイオシミュレーション、超伝導を活かしたテラヘルツ振振素子の開発など、先端科学分野の多彩なシミュレーション研究が行われている。ナノテクノロジー分野では、高度情報科学技術研究機構が「地球シミュレータ」を使用してカーボンナノチューブ等の特性を明らかにする研究を進めている。



東京大学地震研究所・古村孝志助教授のグループによる地震波の伝播シミュレーション

様々な優れた特性を持ち「夢の素材」といわれるカーボンナノチューブだが、直径1ナノメートル（10億分の1メートル）のチューブ構造を持つこの素材の製品レベルでの物性は、実験や従来のスーパーコンピュータでは検証することが不可能だった。「地球シミュレータ」によって、初めて長さ100ナノメートルのカーボンナノチューブのシミュレーションが可能になり、研究開発は飛躍的な進歩を遂げつつある。様々な加工されたカーボンナノチューブが、燃料電池や半導体などに実用化される日も近いといわれている。

戦略的研究枠のなかで興味深いのは、今年度から始まった「車まるごとリアルタイム高精度シミュレーションの検討」というプロジェクト。日本自動車工業会との共同研究として行われているもので、これまでの自動車開発にお

いて、計算機能力の制約により部分的または要素別に行われていたエンジン内の燃焼や車体の振動、騒音、空力特性、衝突時の安全性などのシミュレーションを、「地球シミュレータ」を用いた高精度・大規模シミュレーションによって、車をまるごとシミュレーションする方法を検討しようというものだ。この試みは、自動車開発における未来のコンピュータ利用のあり方や開発の指針になるとともに、高精度なシミュレーションが試作車を用いた実車実験に代わるものとなれば、開発期間の短縮や大幅なコスト削減に結びつくことが予想される。また、今回のプロジェクトを通して得られるシミュレーション技術開発に関する知見や経験は、「地球シミュレータ」における各種研究開発プロジェクトに対しても大きく貢献することが期待できる。さらに、シミ

ュレーションによるモノづくりなど、シミュレーション科学の産業界への普及・実用化にも貢献すると考えられている。

かつて、シミュレーションは、実験や理論を説明するために一部分だけを取り出して行われるものでしかなかった。しかし、「地球シミュレータ」の登場によって、初めてひとつの系そのものの、つまり全体を解くことが可能になった領域や複雑性領域をはじめ、これまでの科学では実証できなかった未来までも予測することが可能になった。そして、シミュレーションによる予測をもとに、これからやるべきことを具体的に設計することもできるようになっている。「地球シミュレータ」は、まさにシミュレーション科学の新たなフロンティアを開拓したといえるだろう。



調査船による探査実施に欠かせない現場のスペシャリスト 地震発生帯の構造解析に必要な探査活動に取り組む 観測技術員とその仕事 【海底下構造探査編】

取材協力：
日本海洋事業株式会社



前号では、高精度CTD採水観測などの海洋観測に従事する観測技術員の仕事について紹介した。しかし、独立行政法人海洋研究開発機構では、海洋観測研究のほかにも海洋・地球科学に関する幅広い調査・研究を行っており、観測技術員が担当する業務も多岐に渡っている。たとえば、潜水調査船や無人探査機等による調査の研究活動のサポートや、様々な調査によって得られた膨大なデータ管理など、研究活動を支える重要な仕事を担当している。こうしたなかから、今回は海底下構造探査で活躍する観測技術員の仕事にスポットを当ててみたい。海溝型巨大地震や火山活動など、私たちの生活に大きな影響を与える海洋底ダイナミクスを探り、プレートの挙動や地震発生のプロセスを解明するために行われる海底下深部の構造解析やモデル研究は、海洋研究開発機構が取り組む重要な研究分野だ。そして、研究を推進するための調査船による構造探査の果たす役割は大きい。こうした探査において、観測技術員は機器の運用をはじめデータの解析など、調査を成功に導くための重要な役割を担っている。

海溝域地震発生帯を理解するためには、地質学や地球物理学など幅広い分野の研究を複合的に行うことが必要とされているが、何よりも基礎的かつ重要な情報を提供するものとして重視されているもののひとつが地下構造研究だ。海溝域で海洋プレートがどのように沈み込んでいるのかといった沈み込み帯の地殻構造を解明することが、沈み込み帯の内部で発生する地震のメカニズムを知るための大きな手がかりとなる。

海洋研究開発機構では、海底下深部の詳細で広域に渡る構造を明らかにするため、深海調査研究船「かいれい」、海洋調査船「かいよう」等の船舶を活用し、海底下深部の構造探査を行っている。「かいれい」では、主に「マルチチャンネル地震反射法探査」が行われる。これは、人工的に音波（地震波）を発生するエアガンを用いて、地震波を海中に送り、海底やその下の地層境界で反射し、海面に戻ってきた波を、多数の受振器（ハイドロフォン。振動を受波する機器）を備えたストリーマケーブルで検出し、解析することによって海底下の構造を調査する方法だ。一方、「かいよう」では、海底地震計を用いた「屈折法探査」が行われる。同じよ

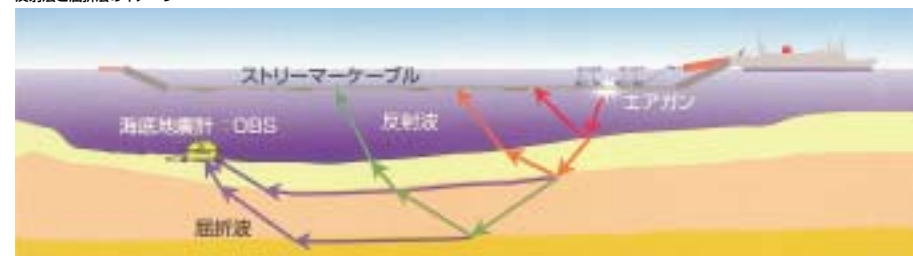
うにエアガンによって地震波を発生し、海底下の地層境界面で反射・屈折して海底に戻ってきた波を海底地震計で受振・記録する方法だ。反射法は、比較的浅い海底下の構造を詳しく理解するために効果的で、屈折法は、より深いところまでの大きな構造を探りたい場合に用いられる。

こうした調査は、大型機器のエアガンをはじめ、大量の海底地震計や、長さ約5,000mに及ぶストリーマケーブル等が使用される大規模なものだ。これらの機器のオペレーションやデータ収集には、調査内容や機器についての高度な知識と技術を持った観測技術員というスペシャリストの存在が欠かせない。

どちらの方法も、探査が開始されると、船舶は数百kmに及ぶ測線上を、数日間、休みなく定期的にエアガンを発振させながら航走していく。その間、観測技術員は、交代しながら24時間体制で探査を監視しつつ取得データの解析を進める。地道な作業だが、調査を支障なくスムーズに進行させ、正確なデータを取得するという観測技術員の仕事が、海洋底ダイナミクスを明らかにするための重要な研究を支えている。



反射法と屈折法のイメージ



*本誌28～29ページに、海底下深部構造探査に基づく研究成果が掲載されています。あわせてご覧ください。



ストリーマーケーブルをチェックしながら海に投入する観測技術員

【マルチチャンネル地震反射法構造探査】 航走しながらの調査は緊張の連続

海面に繰り出されたストリーマーケーブルの長さは約5,000m。この長いケーブルを曳航しながら、深海調査研究船「かいれい」は500kmに及ぶ測線をゆっくりと航走していく。ストリーマーケーブルには約300m間隔で深度調整器（バード）がセットされており、ケーブルの深度を一定に保たせることができる。さらに船尾からは、左右に4本

ずつ、計8本のエアガンも曳航される。これは、総量約150リットルの容量を持つ世界最大級のシステムだ。エアガンは圧縮空気を一気に放出することにより人工的に地震波を発振する。そして、所定の距離間隔（およそ50m、約20秒毎）で発振され、海底から反射して戻ってきた波を、ストリーマーケーブル内の受振器（ハイドロフォン）でと

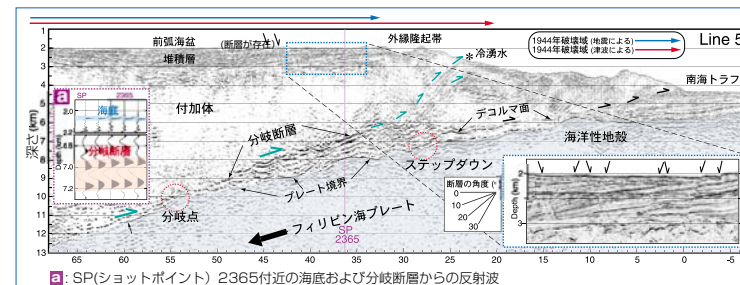
らえて記録していく、これがマルチチャンネル地震反射法構造探査だ。観測技術員が探査前に行わなければならない最初の重要な仕事は、巨大なリールに巻き取られたストリーマーケーブルの投入だ。ケーブルの1本の長さは75m。そのなかに25m間隔でチャンネルを構成する受振器（内蔵されているハイドロフォンの総数は96個）が装



取材協力：
樋泉 昌之 主任
日本海洋事業
海洋科学部



巨大なウィンチのリールに巻き取られたストリーマーケーブル。長さは約5,000m。ケーブル内にハイドロフォンが組み込まれている



熊野灘南海トラフ周辺において行われたマルチチャンネル地震反射法探査で得られたデータをもとに、研究者が地殻構造の垂直断面をイメージした結果、分岐断層の存在が浮かび上がった
(Park et al. 2002)

備されている。これらが次々に連結されたものが全長約5,000mのストリーマーケーブルだ。何もトラブルがなく、途中でケーブルを海中に繰り出すだけでも約3時間かかる。だが、各ケーブルのコネクター部分には、受振したアナログデータをデジタルに変換するモジュールや増幅器などが組み込まれており、通電したときに受振器やこれらの機器にトラブルが見つかった場合によっては、観測技術員ら総出で75mのケーブルをそっくり交換しなければならない。こうしたトラブルや不具合がいくつも重なると、早朝5時から始める投入作業が、夕方になってもまだ終わらないということもある。

続いてエアガンが投入される。エアガンは出航前にしっかりとメンテナンスが行われているが、エア漏れなど、思わぬトラブルが発生することもある。機器を投入し、探査の準備が完了する

まで、観測技術員たちは気が抜けない。もちろん、構造探査が始まってからも、さらに緊張の時間が続く。もし探査の途中でストリーマーケーブルやエアガンなどにトラブルが発生し、データが取得できなくなった場合、船は再観測すべき場所まで戻り、再び測線上を航走して観測をし直さなければならない。もちろん、その間に観測技術員は換取された探査機器を急いで整備し、再度投入の準備を行う。限られた航海期間内に探査を完了しなければならないため、時間は少しも無駄にできない。

航走中、観測技術員は交代で24時間、船内のラボに常駐する。そして、中央制御・記録装置、エアガン制御装置、ケーブル深度制御装置、測定制御装置などの状況を確認しながら、構造探査が順調に進み、データが異常なく確実に取れているかどうかを監視する。さらにもうひとつ、探査中に行わなければ

ならない大切な仕事がある。それは、受振データに入り込むノイズ情報を記録しておくことだ。たとえば、近くを他の船舶が航行するとその推進器の音がデータに影響する。また、海が荒れていると波浪のノイズを拾ってしまう。さらに、探査中に自然地震が発生した場合も、データに大きな影響を与える。こうしたノイズを排除するための情報を探査中にしっかりと押さえておくことが、取得したデータを処理する段階で重要になる。いかにして研究の基礎となる安定したデータを取得し、ノイズ排除などの処理を行ってクオリティの高いデータを提供するか、それが、構造探査を行う観測技術員に課せられた大きな使命なのだ。

観測が終了すると、ただちにデータの解析作業が始まる。研究者に渡すためのデータがまとまるまで、彼らの仕事は終わらない。



ストリーマーケーブルのコネクター部を接続する作業



人工的に地震波を発振するエアガンを海中に展開するための調整作業



バードと呼ばれるストリーマーケーブルの深度調整器を約300mおきに装着



「かいよう」の甲板上に並べられた100台にも及ぶ海底地震計

【海底地震計を用いる地震波構造探査(屈折法)】 2ヶ月に及ぶ入念な準備が探査を支える

海洋調査船「かいよう」は、海面下の1対の没水船体と海上の船体からなる独特の構造を持つ双胴船だ。一般の単胴船に比べて波浪による揺れが格段に小さく、作業を効率よく安全に行える。また、甲板面積が非常に広く、大量の実験機器を搭載できるというメリットがある。こうした「かいよう」の特徴が遺憾なく発揮される調査が、海底地震計を用

いて海底下深部の構造を調べる屈折法探査だ。屈折法探査では、大量の海底地震計を、あらかじめ探査を行う測線に沿って、数kmから数十km間隔で海底に設置して行われる。「かいよう」なら、船上に100台もの海底地震計を搭載することができる。さらに、「かいいい」と同容量の世界最大級のアガガが、「かいいい」にも搭載されている。

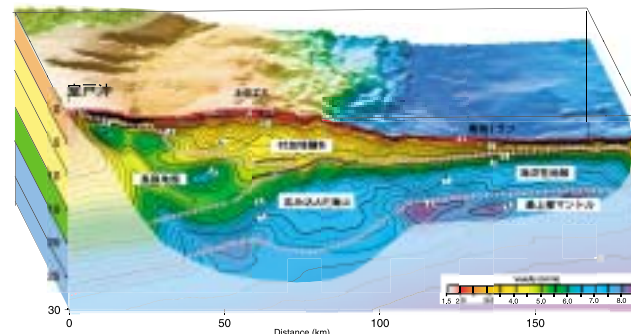
屈折法の構造探査では、海底地震計を設置した後に、測線上を200m(およそ90秒)隔でアガガによる地震波を発振させながら「かいよう」が航走。そして、終了後に再び海底地震計を回収し、その内部に記録されたデータを解析する。海底地震計は、海底下の地層境界面で反射・屈折した地震波を記録し、その記録を解析することによって、海底下深



取材協力：
伊藤 誠 主任
日本海洋事業
海洋科学部



地震計センサ、レコーダー、電源がセットされたガラス球(写真)を開けてデータを取り出す



1999年、「かいよう」および「かいいい」を投入し、海底地震計100台を使用した屈折法探査と2船式探査で反射法探査を行うという大規模かつ高密度な深部構造探査によって、四国沖南海トラフに巨大な海山の沈み込み構造が存在することが確認された(Kodaira et al., 1999)



航海前に海底地震計の準備作業を行う観測技術員

部構造を地震波の伝わる速度の違いとしてとらえることができる(一般に速度が速いものは硬く、遅いものは柔らかい)。そして、探査で得られた成果を、研究者が他の構造探査やモデルと比較・検討し、海底下深部の構造を探っていくのだ。

反射法探査と同様に、屈折法探査でも観測技術員の最大の業務は、探査を適切かつスムーズに実施し、確実に安定したデータを取得するためのオペレーションだ。そして、彼らの仕事は、乗船前からすでに始まっている。それは、海底地震計の準備だ。海底地震計は、黄色いハードハットと呼ばれるカバー、そのなかの17インチ耐圧ガラス球、さらにガラス球に収められた3成分速度型地震計センサ、データ記録部(レコーダー)、電源などから構成されている。さらに、海底地

震計は、海面から投入して自由落下で海底に設置し、回収時は、海上から音響信号によって地震計とアンカーを繋ぐステンレス板を強制的に電蝕させて切り離し、浮上させる。そのための切り離し装置付きアンカーや、切り離しの音響信号を受信したり、浮上中の位置を追尾するために使われるトランスポンダ、さらには浮上確認用のフラッシャー、ラジオビーコンなども搭載されている。これらの機器の点検や組み立て作業は、すべて乗船前に行っておかなければならない。100台の海底地震計を使用する大規模な探査では、その準備に約2ヶ月かかるという。ガラス球に収められたセンサやレコーダーは、ガラス球内に封入されてしまえば、その後は調整することができない。また、耐圧深度6,000mのガラス球も、半球同士の接合と密封にミスがあ

ると、浸水してデータが取れなくなってしまう。それだけに、作業は慎重の上にも慎重を心掛けて行われる。

逆に、探査中は、エアガンにトラブルがなければ、あとは海底に設置した地震計が正常に機能してくれることを祈るしかない。そして、乗船中の観測技術員が最も緊張する作業が、探査後に待ち受けている。海底地震計の回収だ。切り離し装置が正常に作動し、浮上した海底地震計をすべて回収するまで、張り詰めた緊張感が観測技術員たちを包む。だが、仕事はそれだけでは終わらない。レコーダーに記録されたデータを取り出し、それらを整理してまとめ、研究者に提出するという重要な仕事がある。その後には、次の探査に備えて再び海底地震計をメンテナンスする作業が、彼らを待っている。



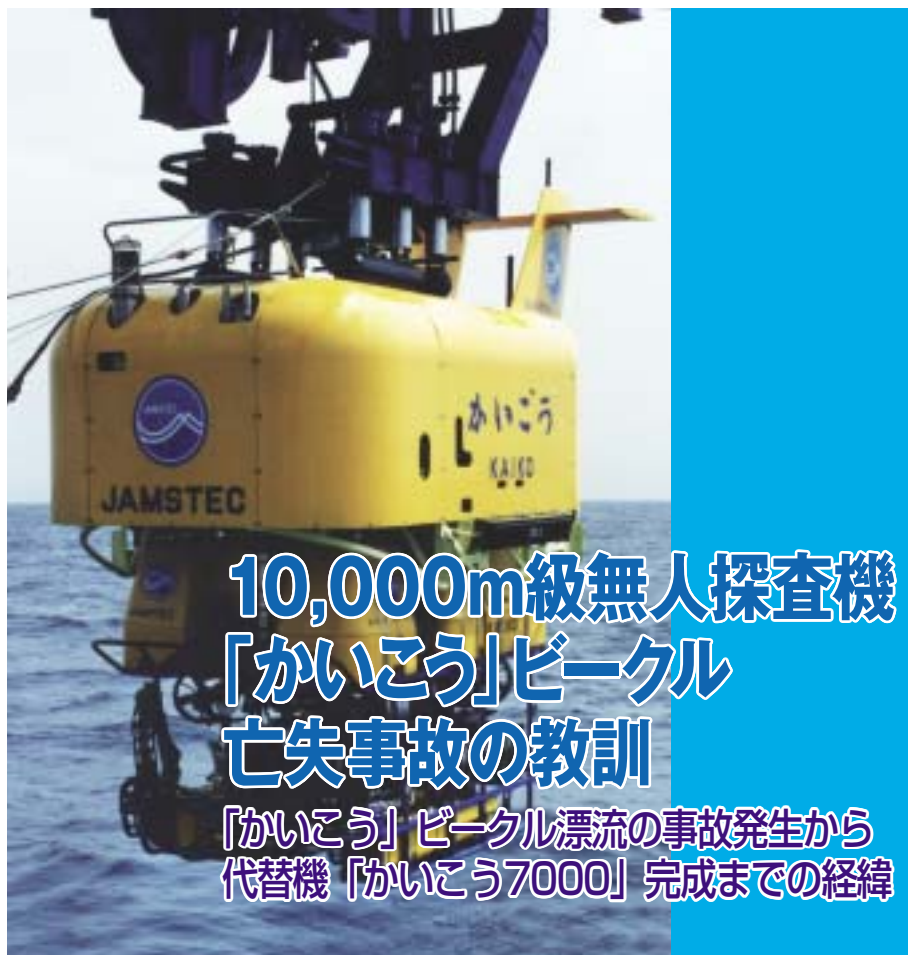
探査海域に投入される海底地震計。海面から自由落下させて海底に設置する



海底に沈んだ海底地震計。斜めに着地しても内部の地震計センサは水平を保つ



浮上した地震計を回収。ラジオビーコンとフラッシャーが浮上を知らせる

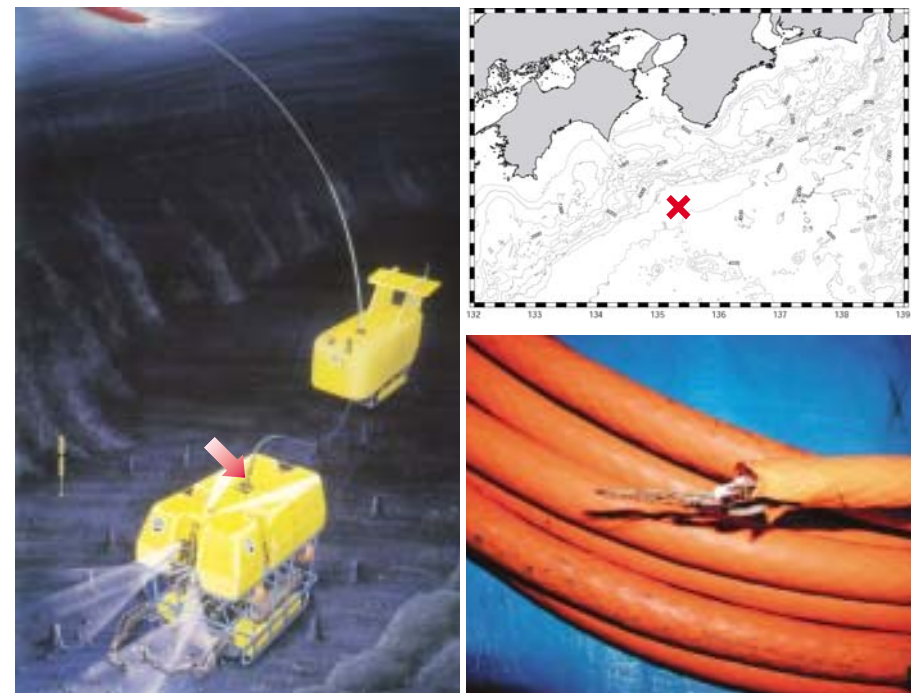


取材協力：
海洋工学センター 研究支援部

参考資料：
「「かいこう」ビークル漂流事故調査 最終報告書」
（「かいこう」ビークル漂流事故調査委員会 編）

10,000m級無人探査機「かいこう」は、全海洋最深の海底に到達できる世界で唯一の深海探査システムだ。建造以来296回の潜航が行われ、それまでほとんど知られていなかった世界最深の海底に科学の光を当て、様々な分野で新発見をもたらすなどの科学的成果を挙げるとともに、地震発生に関する調査等では社会的にも多大な貢献を果たしてきた。2003年5月29日、その「かいこう」で事故が発生した。ランチャーとビークルを繋ぐ二次ケーブルが破断し、浮上・漂流したビークルが行方不明となったのだ。

事故はなぜおきてしまったのか。事故原因究明のために組織された「かいこう」ビークル漂流事故調査委員会（委員長は東京大学生産技術研究所・浦環教授）がまとめた最終報告書をもとに、今回の事故を振り返ってみたい。また、「かいこう」の運用が停止する状態が続けば、これまで行われてきた研究に支障をきたすなど大きな影響が出るため、独立行政法人海洋研究開発機構では、ビークル建造までの暫定的な措置として、7,000m級無人探査機「UROV7K」をビークルとして改造し、代替機「かいこう7000」を完成させた。「かいこう7000」には、今回の事故から学んだ様々な教訓が生かされており、早期の建造が熱望されるビークル後継機の開発にも大いに役立つものとなるはずだ。



左：二次ケーブルとビークルの結合部（ケーブル引留部）で破断がおきた 右上：事故が発生した海域 右下：破断した二次ケーブル先端部

「かいこう」ビークル漂流事故

2003年5月29日、「かいこう」は、高知県室戸岬沖の南東約130kmの南海トラフにおいて、掘削孔に設置された掘削孔内モニタリング装置に記録されているデータを回収する目的で、潜航を行っていた。

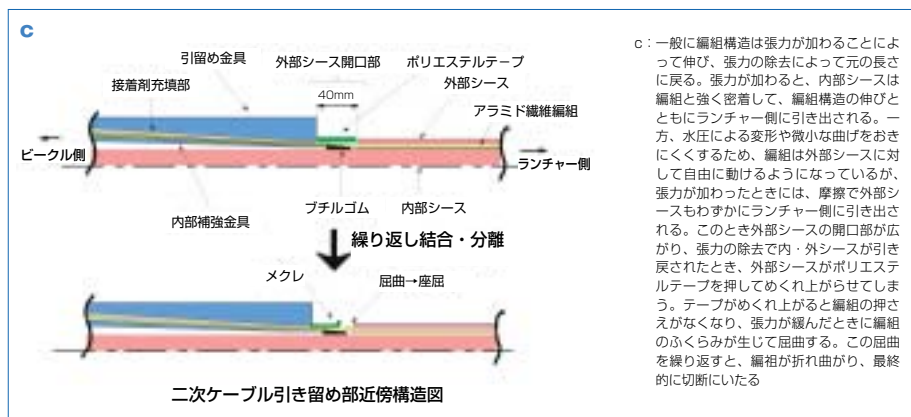
10,000m級無人探査機「かいこう」は、中継機方式の有索無人探査機だ。中継機であるランチャーは、ビークルと結合したまま、一次ケーブル（長さ約12,000m）により海上の母船である深海調査研究船「かいれい」から吊り下げられる。そして、海底からの高度約100mの位置で、ランチャーから二次ケーブル（長さ約250m）で結ばれたビークルが分離される。ビークルは、母船からの操作により二次ケーブルの長さの範囲内で自由に航走し、TVカメ

ラで海底の様子を観察したり、目的に応じて試料の採取や計測機器の設置などの作業を行うことができる。調査や作業を終えたビークルは、再びランチャーに結合し、そのまま一次ケーブルを巻き上げて母船に揚収される。

掘削孔内モニタリング装置が設置されていた海底は水深4,675m、ランチャーから離脱した「かいこう」ビークルは、予定されていた海底での作業を問題なく完了させた。そして、午後1時12分、ランチャーと結合するため、二次ケーブルの巻き取りが開始された。ところが、巻き取り終了の直前、二次ケーブルに異変がおきていることが、ランチャーのTVカメラで確認された。二次ケーブルとビークルの結合部（ケーブル引留部）で、ケーブルの引っ張り強度を保持するための抗張力体・ア

ラミド繊維編組（網目状にケーブルの外周を覆っている）が切断していたのだ。そして、ケーブル内部の光ファイバユニット、動力線、アース線などを覆っている内部シースがむき出しのまま、その余長分が伸び切った状態（P20写真b-2）でビークルを支えていた。そのため、本来ならケーブルを巻き取った状態でランチャーと結合できるはずのビークルは、吊り下げられたままの状態だった。さらに、その後にビークルの光通信および高圧給電が「断」となり、ランチャーとビークルの制御・給電は不可能となった。母船の「かいれい」は、午後1時29分、一次ケーブルの巻き取りを開始、ランチャーとビークルが結合できない状態のまま揚収を行うことにした。

午後4時47分、ランチャーの「かい



れい」への揚収が完了した。だが、すでに二次ケーブルは破断しており、ビークルを揚収することはできなかった。その1分後、「かいれい」はビークルから浮上を知らせるラジオビーコン信号を3回受信した。「かいこう」ビークルは、電源が切れた場合、タイマーによって1時間後に自動的にパラスト（鍾）、サンブルバスケットを切り離して浮上し、海面浮上後にラジオビーコン信号を発信して、位置を知らせる仕組みになっているのだ。だが、その後ビーコン信号は途絶え、漂流するビークルを発見することはできなかった。

海洋科学技術センター（現・独立行政法人海洋研究開発機構）は、ただち

に平野理事長を本部長として「「かいこう」ビークル漂流緊急対策本部」を設置し、事態への対応にあたった。そして、「かいこう」ビークル漂流事故の発生から3週間以上にわたって、室戸岬南東沖から千葉県・犬吠崎東方沖にいたる海域で、「かいれい」をはじめ、支援母船「よこすか」、支援母船（現：海洋調査船）「なつしま」、海洋調査船「かいよう」の船舶、さらにはチャーター航空機、海上保安庁や航空宇宙技術研究所（現・独立行政法人宇宙航空研究開発機構）の協力を得ながら、ビークルの捜索が続けられた。だが、ビークル発見の手がかりは全く得られなかった。ビークルの捜索については、「「かいこう」

ビークル漂流緊急対策本部」の要請によって、独立行政法人水産総合研究センター遠洋水産研究所・水野恵介南海・南大洋部長（当時）をグループ長とする「「かいこう」ビークル漂流捜索アドバイザーグループ」が設置され、捜索の妥当性の検討とともに、今後の捜索活動について提言を受けてきた。大規模な捜索にも関わらずビークルが発見できなかった理由については、いったん浮上したものの、ペイロードラックが落下していなかったこと、黒潮流域の温水により海水密度が低下したことでビークルの浮力が想定より小さくなり、海面下で漂流している可能性が高いことが指摘されている。

事故はなぜおきたのか

ビークル捜索が続けられるなか、海洋科学技術センター（現・独立行政法人海洋研究開発機構）は、事故原因を調査究明するとともに、その後の対応策を検討することを目的に、東京大学生産技術研究所・浦環教授を委員長として、他14名で構成される「「かいこう」ビークル漂流事故調査委員会」を設置した。

委員会は、二次ケーブル破断に到った原因の解明を進めるとともに、一旦浮上したビークルを回収できなかった原因などについても検討を行った。

二次ケーブルは、3トン以上の引っ張り強度を持つケーブルとして設計・開発されている。実際の運用で二次ケーブルに加わる張力（水中）が、最大でも450kgであることを考えれば、十分な強度を持っていることが分かる。事故後の調査で、今回の破断が、設計上の引っ張り強度を上回るような張力によっておきたものではないことが分かった。では、なぜケーブルは破断したのか。その原因は、二次ケーブルとビークルの結合部（ケーブル引留部）において、ケーブルの張りや緩みの繰返しにより、ケーブルの強度を支える抗張力体・アラミド繊維編組が屈曲し、やがてそれが編組の乱れを生むのではないかと推察された。編組に乱れがでると、それぞれのアラミド繊維にかかる荷重は不均一となり、さらなる屈曲や損傷が発生し、これによって切断へのプロセスが加速される。実際に、他の二次ケーブルを使用して行われた引留部引っ張り試験でも、通常運用レベルの張力を繰返し加えることで引留部の編組に屈曲や劣化を生じ、やがて破断することが確認された（p20図c参照）。

「かいこう」が開発された当時、抗張力体であるアラミド繊維編組の均圧については十分な対策がなされていた。だが、結合・分離の繰返しで加えら



れた通常レベルの張力でも、引留部の外部シース開口部（ケーブルの外側の覆いが途切れる部分）の編組に折れ曲がりが生じ、アラミド繊維に損傷を与え、やがて切断にいたることまでは、残念ながら想定されていなかった。今回の事故で、開発終了後も最新技術を継続的に導入することの必要性等があらためて認識されたことは、貴重な教訓だった。

一方、浮上後のビークルを発見できなかった原因についても、「「かいこう」ビークル漂流事故調査委員会」で様々な検討がなされた。そして、二次ケーブル破断時の安全システムの不備が指摘された。破断後にビークルの水中測位を行うシステムが搭載されていなかったこと、また、浮上後の位置確認手段としてラジオビーコンしか搭載していなかったことが、ビークル亡失の大きな原因となってしまったのだ。こうした点についても、今後の大きな課題として示された。

新「かいこう」建造の必要性

「かいこう」は、深度11,000mまで潜航できる世界で唯一の深海調査システムとして、これまで多大な成果を挙げてきた。1995年のマリアナ海溝チャレンジャー海淵への潜航を含めて同海域へ19回潜航を行い、極限環境に生息する未知の深海生物や有用細菌を発見・採取したことをはじめ、2000年に

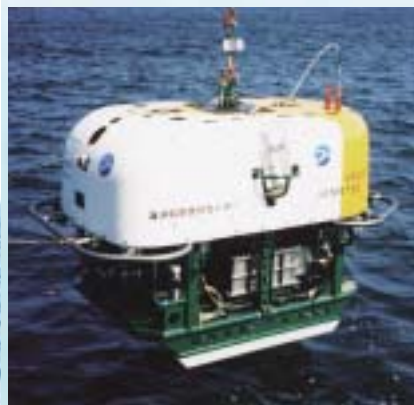
はインド洋で世界初の熱水噴出孔を発見するなど、深海研究への貢献は数多い。また、地震発生メカニズムの解明やその予測研究にも大きな貢献を果たしてきた。さらには、学童疎開船「對馬丸」の船体発見（1997年）、H-IIロケットのエンジン部品の発見（1999年）、「えひめ丸」の遺留品回収（2001年）、など、様々な社会的活動も行っている。

今回の「かいこう」ビークル漂流事故から1年半が経過しようとしている。委員会は、その最終報告書において、次のように言及している。「「かいこう」を失うことにより、今後の深海研究のみならず、防災に関わる社会的に重要な研究活動にも大きな支障が発生すると考えられる」。さらに、「本委員会は、「かいこう」ビークル後継機の日も早い建造と新しい「かいこう」による深海調査の再開を希望する」としている。海洋研究開発機構では、早急に深度10,000mの調査能力を取り戻すため、新「かいこう」の建造に取り組む方針だ。

また、研究者らの強い要望に応え、差し迫った深海調査等を継続するために、7,000m級無人探査機「URUV7K」を代替ビークルとした「かいこう7000」システムを完成させた。来年度から、しばらくはこの代替機によって深海調査を実施する計画だ。しかしながら、深度7,000mを超える海域についての調査研究は困難な状況が続くことになる。



「かいこう7000」の海域試験



改造される前の「UROV7K」



7,000mの海底写真

事故の教訓を生かして改造された 7,000m級無人探査機「かいこう7000」 「かいこう」代替機として海溝域の調査に活用

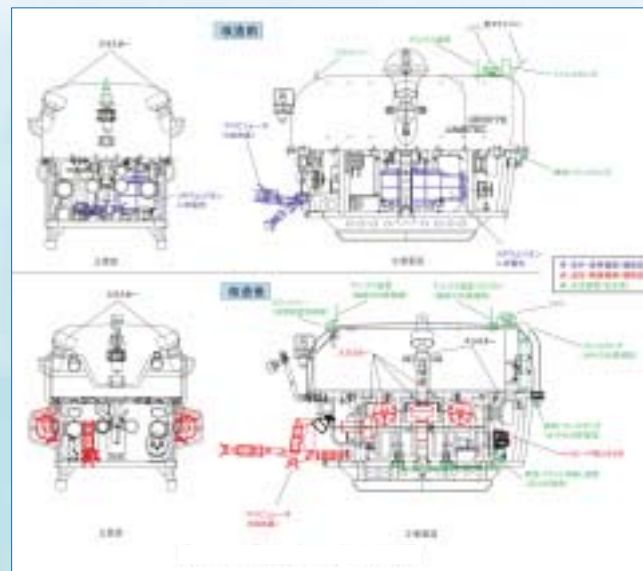


二次ケーブル引留部のカバー（ベルマウス）は内部が目視できるように改良された

「かいこう7000」は、「かいこう」ピークル漂流事故に伴って停止している深海調査を継続するための暫定的な措置として、7,000m級無人探査機「UROV7K」を改造してピークルに使用した深海探査システムだ。

「UROV7K」は、深海に設置した係留システムの監視や深海底の調査などを目的として開発された無人探査機。機体に高

性能バッテリーを内蔵し、TVカメラの画像信号やデータ通信のみを細径光ファイバで送るため、母船上に大型装置（ケーブルストアウインチなど）を必要としないなどの特徴を持っている。この「UROV7K」へ大幅に手を加えて、これまでの「かいこう」ランチャーと結合させ、「かいこう7000」がつくられた。改造にあたっては、ただ単にピークル代替



「UROV7K」と改造後の「かいこう7000」ピークルとの比較図

機としての機能を持たせるだけでなく、より高度な機能性を追加するとともに、「『かいこう』ピークル漂流事故調査委員会」から指摘された安全対策についても最高度の対策が施されている。たとえば、「かいこう」事故で破断した引留部（外部シーす開口部）については、目視点検できる構造が採用され、1潜航ごとに点検が行われる。さらに、原則1航海ごとに引留部の強度試験と再加工も実施される。また、二次ケーブルにかかる張力を詳細に把握するため、張力計測がこれまでの20倍（0.1秒周期）の頻度で計測されることになっている。ピークルには、海面における十分な浮力を確保するための緊急バラスト切離装置、水中の位置確認を行うための水中測位トランスポンダ（2基）、海面での位置確認のためのアルゴス装置（2基、うち1基はGPS付き）、夜間の視認性を確保するためのフラッシャー（点滅灯）が追加装備された。一方で、これまで搭載されていたバッテリーは取

り外され、電池の代わりに二次ケーブルによるランチャーからの給電に切り替えられた。加えて、ランチャーには新たにピークル用電源スイッチが設置され、二次ケーブルが破断しても、ランチャー単独で給電できるシステムとなった。

さらに、推進力と操縦性能を向上させるため、ピークルに新たに6機のスラスター（推進器）を増設して、合計10基とした。また、マニピュレータの高性能化や、ペイロード機器（研究者持込みの計測機器）の搭載を可能とし、調査性能も向上した。

こうした改造はすでに本年3月末に完了し、これまでに7,000mの最大深度に到達した。来年度には調査・研究のための潜航が再開される計画だ。

「かいこう7000」の運用は、あくまでも暫定的な措置でしかない。1日も早く「かいこう」ピークル後継機が建造されることが望まれる。



増設されたスラスター



フラッシャーとアルゴス装置（上部奥）



アルゴス用GPS装置



より自由度の高いマニピュレータやサンプルバスケットも増設



「かいいい」船上の「かいこう」操作席には、暫定ピークルの光通信・制御装置（左の白い装置）と操作パネル（中央右手）が追加された

研究用水槽の仲間たち

世界で初めて観察された
ユノハナガニの生殖シーン

取材協力:

土田 真二 研究員

極限環境生物圏研究センター 海洋生態・環境研究プログラム



2000年11月3日 海形海山 水深450m付近で採集されたユノハナガニ (学名 *Austinograea yunohana*)。水槽の水温は常時12℃に管理されている。

右の○内は「しんかい2000」から見た海形海山の海底の様子。白く見えるのがユノハナガニの群生 (1992/7/23、水深488m)。

世界で初めて観察された
ユノハナガニの交尾

- 1 オスは脱皮しそうなメスを見つけると、その上に覆いかぶさる。
- 2 脱皮をするメスから片時も離れないオス。脱皮直後は体が柔らかく外敵に狙われやすい。そのため、メスにとっては自分を守ってくれるオスは頼もしいパートナーだ。
- 3 赤く透き通った体が脱皮したてのメス。脱皮後の体は柔らかくオスの交接器を挿入しやすい。
- 4 オスは交接器をメスの体に挿入し精子の入った精包を渡す。メスは脱皮後1週間くらいの間に何度か交尾をするが、最後に交尾をしたオスの精子が有効だと考えられている。オスは自分の子孫を残そうと交尾後もほかのオスが来ないようにメスを守り続ける。



2000年11月、小笠原諸島近海に潜航した「しんかい2000」は、海形海山の中央火口丘付近の熱水噴出域で、まるで白い絨毯を敷きつめたように群生する生き物に出会った。ユノハナガニである。体は白く、目は退化している。海洋研究開発機構では、この深海性のカニの飼育に成功し、長期的な研究を行っている。

脱皮を繰り返しながら成長するカニの年齢を外観から判断するのは難しいが、ズワイガニなどは20年近く生きると言われている。ユノハナガニの場合

も脱皮の頻度やその後の成長率などからおよそその年齢を推測する。研究室での生存記録は最長で約10年。その間に3〜4回の脱皮が確認された。これまでフィールドで発見された最大の個体は甲羅の幅が約6cmほどであり、前述の脱皮のペースでは寿命は80年近くになってしまう。しかし、近年の調査で若いカニの個体も採集・飼育されるようになり、それらはもっと頻繁に脱皮をすることが分かった。そのため現在では、ユノハナガニの寿命は40〜50年くらいではないかと推測されている。

また、長期飼育の結果、世界で初めてユノハナガニの交尾も観察することができた(写真上)。交尾を終えたメスは、数カ月から数年の間、体内に精子を貯蔵して産卵するが、研究室では胚の発生がうまくいかず孵化するまでには至っていない。これは現在の飼育環境(水圧や化学成分など)が本来の生育環境と異なることに起因しているのかもしれない。いずれにしても、こうした長期飼育研究を通して深海のカニの生活史も少しずつ明らかになり始めている。



東海スロースリップの原因と推定される地下構造を発見

その発生メカニズムと東海地震発生との関連を探る

南海トラフ周辺域（駿河湾から西に延びる水深3,000m～4,000mの海底のくぼ地）では巨大地震が繰り返し発生してきた。特に東海沖では1854年の安政東海地震以降巨大地震の発生がなく、次の地震発生が警戒されている。また国土地理院のGPS観測によれば、東海地方では通常のプレート運動以外に2000年後半から年間約1 cm程度の局所的なスロースリップ（プレート境界間でのゆっくりとした滑り）が生じている。南海トラフを中心に構造研究を進めてきた地球内部変動研究センターは、国立大学法人東京大学地震研究所と共同で実施した中部日本横断海陸統合地殻構造探査の結果から、東海スロースリップの発生メカニズムの構造要因を明らかにした。



取材協力：
金田 義行 プログラムディレクター
地球内部変動研究センター
プレート挙動解析研究プログラム

地殻構造探査でわかった海嶺の沈み込み

フィリピン海プレートが沈み込んでいる南海トラフ周辺では100～150年間隔でマグニチュード8クラスの大規模な海溝型巨大地震が繰り返されており、1854年の地震ではわずか30時間程度の時間差で、1944年東南海地震の破壊域と1946年南海地震破壊域に当たるエリアが続いて破壊されている。南海トラフ

では近い将来に東海地震の発生が警戒されることがや南海・東南海地震との連動も議論されていることもあって、2003年には南海・東南海特別立法*も施行され、この地域に対する調査研究が強化されている。

次の東海地震震源域になるのではないかと想定される地域はちょうど陸と海の境界域にあり、最も調査のしにくいところである。そこで2001年7～8

月に実施された東海中部日本海陸統合地殻構造探査では、東海沖から中部日本を通過して日本海に達する探査測線を取り、海域を海洋研究開発機構（当時：海洋科学技術センター）が、陸域を東京大学地震研究所が中心となって観測を担当することになった。海域では海底地震計70台、陸域にも328台の陸上地震計を設置し、地上では海洋研究開発機構によるTNT火薬500kgを用い

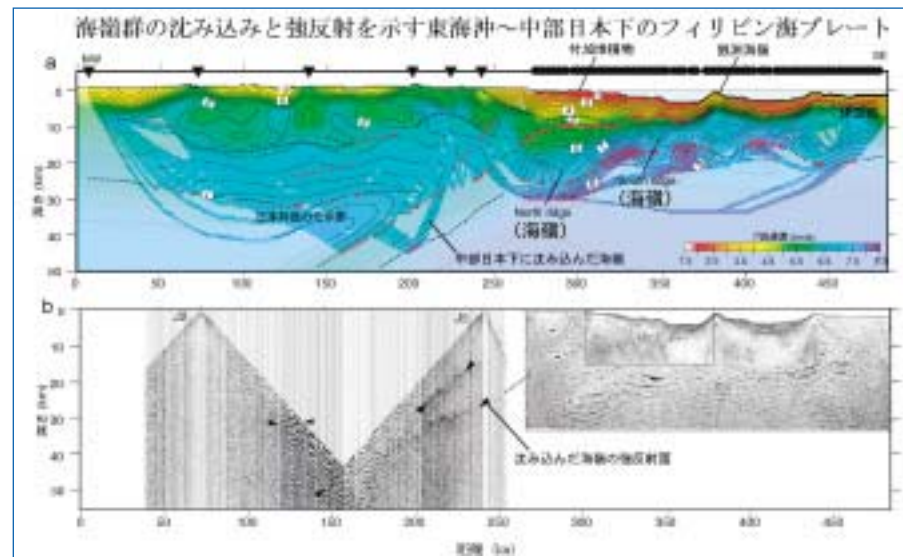


図1 地殻構造イメージングの結果

探査測線下の断面図。上図は地震波（P波）速度によって地殻構造を表したもので、South ridgeは現在の銭洲海嶺の一つ前の古・銭洲海嶺、North ridgeは二つ前の古・銭洲海嶺であり、中部日本下にはさらにそれ以前に沈み込んだ海嶺がある。下図で黒い線のように見えるのが強い反射面。（kodaira et al.,2004）

た発破を5地点（加えて東京大学地震研究所による小発破1地点）、海域では船からの大容量エアガン発振を実施した。その際に地中を伝播する屈折波および反射波の記録を海陸両側から観測し解析することで、海陸境界域の地殻構造の解明を行ったのである。

探査結果を元に、地殻構造のイメージングを行うと図1のようになる。図1上は屈折法探査（地震波速度の違いを利用したもので、深部の探査に向いている）によって得られた地下断面図だ。東海沖の伊豆半島南の海域には、銭洲海嶺と呼ばれる海嶺があるが、フィリピン海プレートが沈み込むことで銭洲海嶺以前に海底にあった古い海嶺が、東海沖から中部日本の下に繰り返し沈み込んでいることが、今回のイメージングから明らかになった。

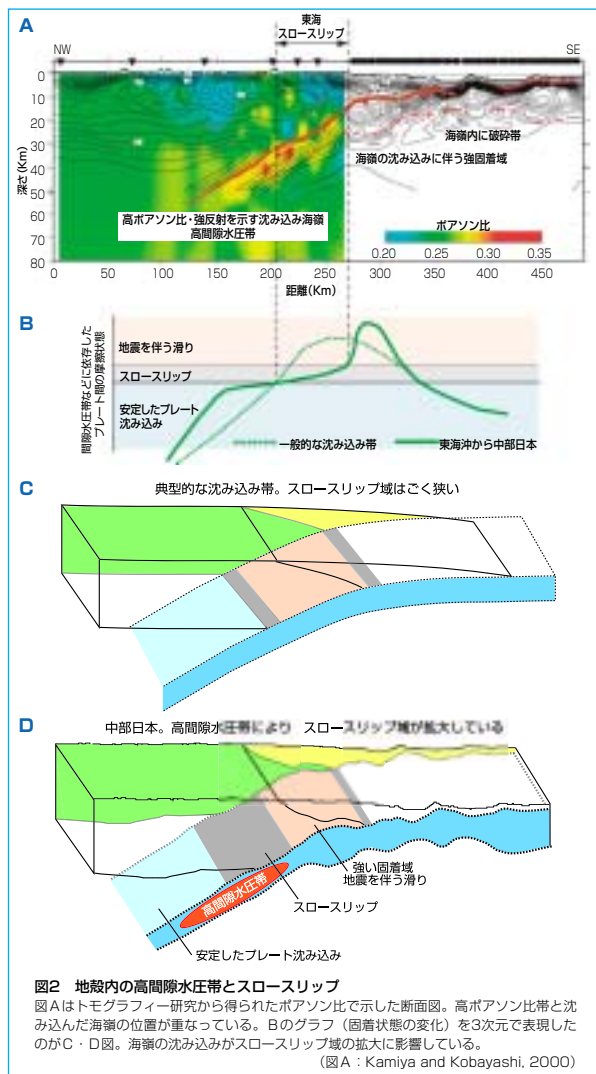
沈み込んだ海嶺とスロースリップの関係

さらに、今回の探査に基づいたイメージングからは、東海スロースリップに関して新たな事実が判明した。図1下（東京大学地震研究所の解析）は屈折法のデータを反射法（地震波の反射を利用し比較的浅いところを詳細に探査するのに向いている）的処理で陸域から見た断面図である。古い海嶺が沈み込んでいる部分に強い反射面（黒い縞状の部分）が見られる。

一方で地球内部変動研究センターには、陸上の地震観測ネットワークが捉えた自然地震の波形データを用いたトモグラフィ研究（医療で用いられるCTスキャンと同じ原理で、伝わる地震波の到達時間や波形を用いて地下の速度構造を探索する）を行っている研究グループがある。地震波のP波（縦波）、S波（横波）の速度が得られると、それを

使って「ポアソン比」という、物質のやわらかさの指標を表す情報が得られる。ポアソン比はP波速度とS波速度に依存する数式で求められ、やわらかい物質あるいは流体が存在する構造では値が高くなる（高ポアソン比となる）ため、地殻構造の物性がどのような状態なのかを知ることができる。

図2Aはポアソン比を示す断面図である。この赤色の高ポアソン比を示す部分は図1の左下図の強反射面や東海スロースリップの位置と良く対応している。強い反射面は地下に地震波速度や密度に大きな違いがあると発生すること、ならびに高ポアソン比帯と対応していることから、この反射波境界域には流体が存在する可能性を示唆している。周囲の岩石に比べて地震波速度や密度が小さい流体が存在することで周囲とのコントラストが大きくなり、その結果、強反射波や高ポアソン比（流



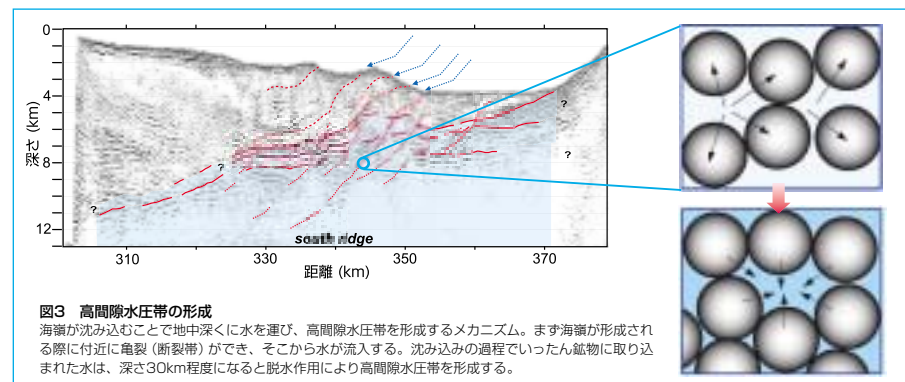
体の存在によって強度が下がるため）帯を形成する。現在の銭洲海嶺も沈み込んでいる古い海嶺も、もとは地殻が押されて盛り上がりできたもので、その過程で海嶺の「山すそ」に当たる部分に多くの亀裂（断層帯）が入っていることが反射法探査で明らかになってお

り、この亀裂に海水が取り込まれると考えられる。深さ10kmに沈み込んだ海嶺部分の反射面を示したのが図3である。赤い部分は地殻内の亀裂で、この亀裂から海水が岩石の中に入りこみ、沈み込んでいく過程で温度と圧力で水は岩石の中に

結晶として取り込まれる。ところがより深く沈み込んで深さ30km程度まで達すると、さらに高温高压環境に置かれるため水は鉱物の中にとどまることができずに押し出され、脱水する。脱水した水は逃げ場を失ってどんどん岩石の隙間に溜まって周囲を押し、いわゆる「高間隙水圧帯」を形成する。間隙水圧とは、地下の微細な間隙（すきま）に存在する水に起因する水圧のことで、高間隙水圧帯とは、間隙内の水の体積が増えるなどして間隙水圧が高くなったゾーンを指す。陸のプレートと海のプレートの境界近傍に高間隙水圧帯があると、このゾーンは潤滑油のような作用をし、プレート境界域はすべりやすくなる。この高間隙水圧帯をポアソン比で見ると、見かけ上「やわらかい物質」と捉えられるわけだ。

プレート境界の摩擦の状態を見ると、典型的なプレートの場合（図2C）、深さ10～30kmに沈み込んだあたりが固着（摩擦）が強く、地殻のひずみによるエネルギーをため込んで地震の発生域となる部分である。その前後にスロースリップ域に相当する部分はあるものの、ごく狭いもので、それより深くなるとプレートは安定して滑りながら沈み込んでいる。しかし海嶺のような不整形な構造が繰り返し沈み込んでいる場合（図2D）、沈み込む過程で水を取り込み、深さ30km以深で脱水作用により高間隙水圧帯を形成するためスロースリップ帯はるかに広くなると考えるモデルが提案された。観測結果からも、国土地理院のGPS解析によるスロースリップ帯と中部日本下の高ポアソン比、強反射域はよく合致していることがわかる。

今回の調査では銭洲海嶺の前の古い海嶺の沈み込みの様子がわかったのが第1の成果で、第2の成果として東海スロースリップや東海地震の発生メカニズムが、海嶺の沈み込みと深く関連しているであろうことがわかった。想定

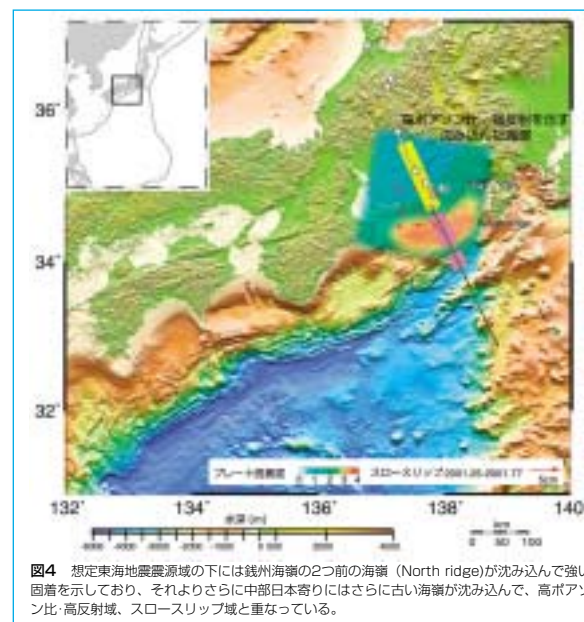


されている東海地震震源域には現在の銭洲海嶺の2つ前の古い海嶺が沈み込んでおり、それが今度の東海地震のアスぺリティ（普段は固着していて地震のエネルギーを溜め、地震の時に大きく滑るところ）となる可能性がある。そのさらに先の中部日本下には、高ポアソン比・強反射を示す高間隙水圧帯が

あり、東海スロースリップを起こしている場所と重なる。これも海嶺が連続して沈み込むことで、岩石内に水を取り込んで深部に運び込み、高温・高压状態で脱水した水が高間隙水圧帯を作り出し、プレートが滑りやすくなっているためと仮定できる。それが非常に広いゾーンにわたるため、国土地理院の

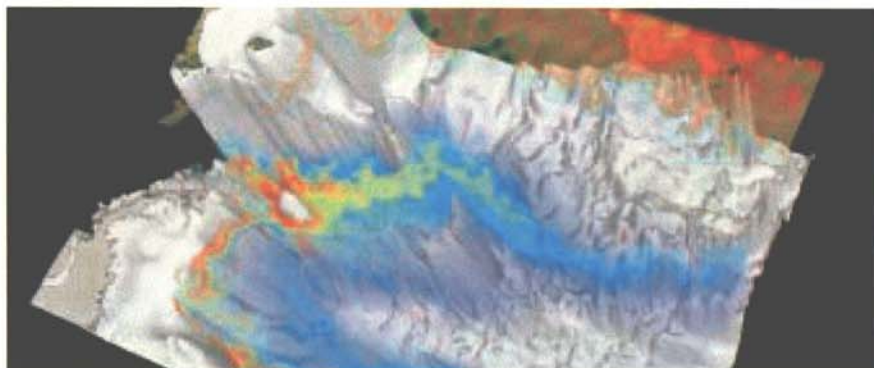
GPS観測に捉えられたと考えられる。

地球内部変動研究センター・プレート挙動解析研究プログラムの研究グループは、現在起っている現象を理解するには、海嶺の沈み込みに起因する今まで述べたプロセスで東海スロースリップが発生しているという仮説がもっとも適切だと考えている。地殻構造研究で得られたモデルを用いた地球シミュレータ等の大規模シミュレーションによる長い時間間隔での地震発生サイクルに関する研究も進んできた。したがって、今後は東海だけでなくとどまらず、南海・東南海・東海にわたる南海トラフを一つのシステムとして捉えていくことが重要であり、さまざまな地殻変動・地震のデータ等、さらには断層岩による分析・物理実験やシミュレーション研究を統合化した研究を推進していくという考えだ。



●参考
 High Pore Fluid Pressure May Cause Silent Slip in the Nankai Trough
 Shuichi Kodaira, Takashi Iidaka, Aitaro Kato, Jin-Oh Park, Takaya Iwazaki, Yoshiyuki Kaneda
 28 May 2004, Science Volume 304, pp. 1295-1298

●引用
 S. Kamiya, Y. Kobayashi, Geophys. Res. Lett. 27, 819 (2000).



モデルで再現されたウェッデル海のフロンド分布(1990)
(地球シミュレータセンター
高度計算表現法研究グループ作成)

南極海の深層水の流れを 地球シミュレータで再現に成功

フロンド輸送を手がかりに 超高解像度海洋大循環モデル「OFES」で詳細に解析

人間の活動により大気中に放出された二酸化炭素(CO₂)の一部は海洋に吸収されるため、海洋にどれだけ吸収能力があるかは地球温暖化の研究に重要な課題となっている。そのためには、CO₂を吸収して運搬する海洋の循環(海水の大きな流れ)を正確に再現する必要がある。海洋循環には風の力によって起こる表層の循環(風成循環)と温度差や塩分濃度差によって沈みこんだ深層の循環(熱塩循環)があり、両者を合わせて「海洋大循環」とよぶ。海洋大循環は巨大なベルトコンベアにたとえられ、一巡するにはおよそ2000年かかるとされている。今回の研究ではCO₂の大きな吸収源のひとつ、南極のウェッデル海に焦点を当て、シミュレーションによって海水の循環を細部にわたって再現することに成功。これまでの観測結果と一致する結果を得た。



笹井 義一 研究員
地球環境フロンティア研究センター
生態系変動予測研究プログラム
海洋生態系モデル研究グループ



石田 明生 研究員
地球環境フロンティア研究センター
生態系変動予測研究プログラム
海洋生態系モデル研究グループ



佐々木 英治 研究員
地球シミュレータセンター
計算地球科学研究開発プログラム
大気・海洋シミュレーション研究グループ

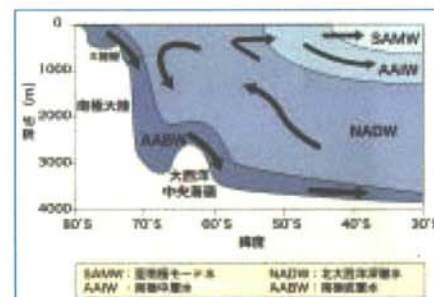


図1 南極海におけるオーバーターニングの様式図
南極から赤道にかけての海面から海底までの海水の流れを模式的に描いた図。南極で形成される深層水(南極深層水)が最も深く、大陸棚に沿って深海へと落ち込んでいき、海のもっとも深いところを北上する。グリーンランド沖で形成される北大西洋深層水は、南極深層水よりもやや軽い形成される量が多く、南極深層水の上を南下している。

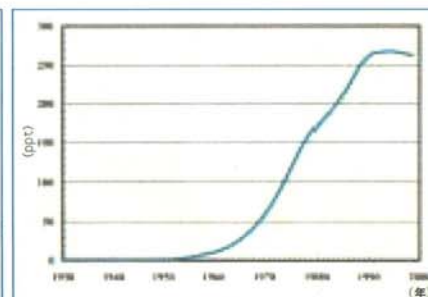


図2 大気中のフロンド濃度 (Walker et al., 2000)
1950年から大気中のフロンドは急増し、大気中濃度に比べるとわずかな量ではあるが海面から海水に溶ける。大気中フロンドはフロンド排出規制の効果で1990年代に入って減少傾向にある。

深層水の2大形成域のひとつ・ 南極のウェッデル海に着目

海洋は、海面表層部で大気と接触し、短い時間スケールでCO₂やその他の成分のやり取りをしている表層水と、特定の海域で冷やされた冷たくて重い水が深海に沈み込み、海洋内部を循環する深層水に大別される。表層水は容量が小さく比較的早く平衡に達してしまうが、深層水は吸収したCO₂を深海へと運び、再び表層に現れるには長い時間がかかる。海洋がどれだけCO₂を吸収するかを見積もるには、深層水の循環を知ることが非常に大切なのである。

海面で冷やされて深層に沈み込む深層水の形成海域のひとつが南極海周辺である(図1)。南極海で形成される深層水は、北大西洋北部(グリーンランド沖)で形成される北大西洋深層水と並ぶCO₂吸収源である。さらに南極海周辺域でもっとも大きな深層水形成域として知られているのは、南アメリカ大陸の南端のさらに南側、南極半島のそばにあるウェッデル海だ。そこで、海洋大循環モデルOFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator)を使って地球シミュレータで海洋に吸収されたフロンド濃度分布のシミュレーションを行い、そ

のフロンドを追跡することにより、ウェッデル海で形成される深層水が深層に沈み込んだ後どのような経路で流れて広がっていくのか注目した。

海洋循環を調べるために 有効な化学物質・フロンド

今回、深層水の流れを調べるためにトレーサー(追跡のための指標)として用いたのはフロンドである。大気中のフロンドはオゾンホールの原因となるが、海洋循環の調査には非常に重要である。地球温暖化研究のためには人間が排出したCO₂がどの程度海洋に吸収されるかを知りたいのだが、CO₂はもともと海水中にたくさん含まれており、人間が排出したCO₂だけを区別することは難しい。一方フロンドは1930年ごろ人為的に合成、工業化されるまでは大気中にも海水中にも存在しなかった化合物である。

大気中のフロンドはわずかに海水にも溶ける。1930年から1950年までは大気中のフロンド濃度も低かったが、1950年以降急激に増加し(図2)、海面から深層水に溶け込んでいった。フロンドは化学的に変質することも生物に取り込まれることもなく非常に安定しており、海面から濃度分布のシミュレーションを行い、そ

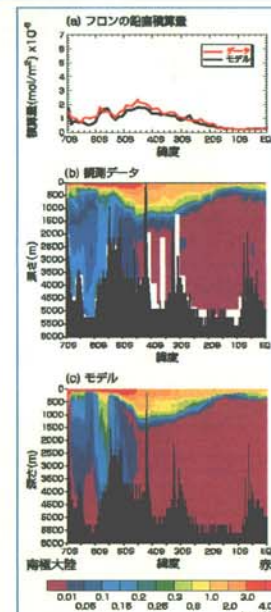


図3 グリーンランド沖に沿ったフロンド濃度の観測データとモデルの比較(1983年)
観測データとモデルの濃い部分は海底地形。フロンド濃度の単位はpmol/L(ピコモル/リットル)。p(ピコ)は10の-12乗である。地球シミュレータを利用できるようになる以前の代表的なモデルは水平解像度400km×400kmスケールで、フロンド濃度の再現性も低かった。今回地球シミュレータを用いたモデルは10km×10kmスケールで、観測による濃度分布をほぼ忠実に再現している。

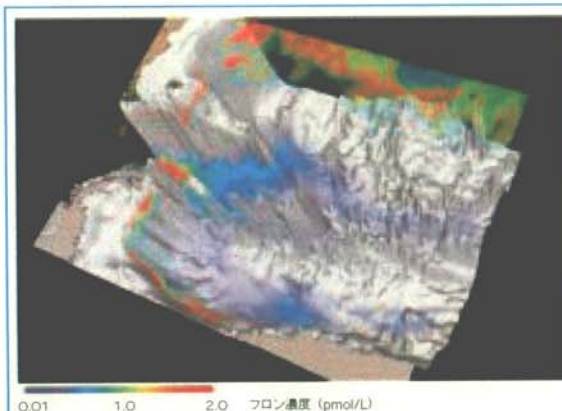
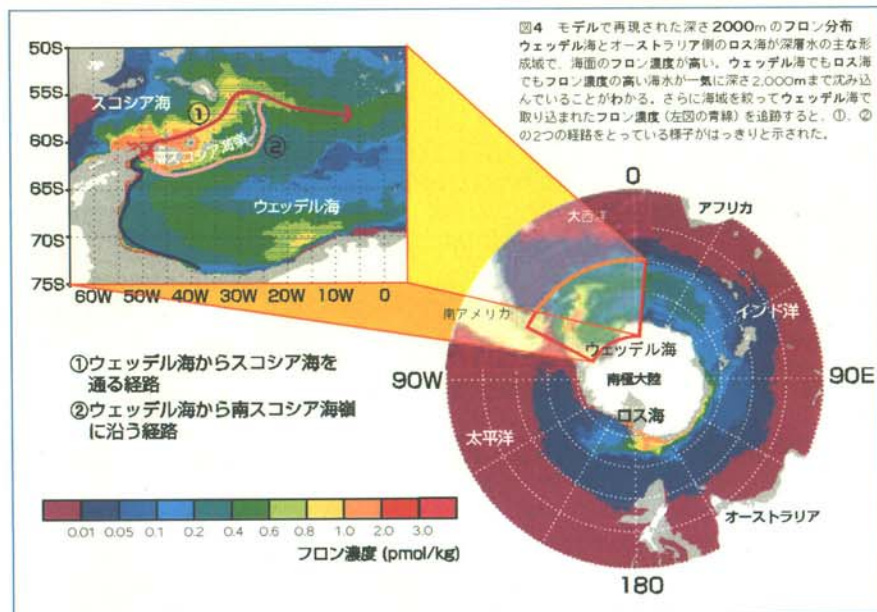


図5 ウェッデル海のフロン分布(アニメーションのスナップショット: 1980年)
深さ500m以下のフロン濃度をボリュームレンダリング(3次元可視化の手法)で示したものの、アニメーションでは海面から取り込まれたフロンがどの程度の深さまで沈み込み、どのような経路で流れ広がっているかが示されている。(地球シミュレータセンター 高度計算表現法研究グループ作成)

る。よってフロンは1950年以降の海洋循環の変動を数ヶ月から数十年単位で追跡するのにたいへん適しているのだ。海洋におけるフロン観測は1980年代から始まり、1990年代の世界海洋循環実験(World Ocean Circulation Experiment)を経て観測データが豊富に蓄積されている。フロンの運動を現実に近い形でシミュレーションできれば、CO₂の運搬経路に置き換えることも可能であるため、フロン観測データを数値モデルでシミュレーションし検証することは重要な意味を持つ。

地球シミュレータで初めて可能になった 超高解像度シミュレーション

従来のシミュレーションは解像度が粗く、モデル計算では観測結果を十分に再現することはできなかったが、今回は地球シミュレータを用い、海洋モデルOFESを超高解像度で実行することがで

きた。OFESは米国のGFDL(地球流体力学研究所)が開発したMOM3 (Modular Ocean Model Ver.3)を地球シミュレータ用に最適化し高速化したモデルである。解析領域は極域を除くほぼ全球の75°S-75°N、水平解像度は約10kmの格子間隔とした。深さ方向は6,500mまでを54層としたが、変動の激しい垂表層をより細かく再現するために層厚は表層を5m、最深層を330mに設定した。また、海底地形をより現実的に表現するために海底地形は層の区切りではなく、任意に設定できるようになっている。

フロンの運動をシミュレーションする準備段階として、モデルが平均的な海洋循環を再現できることを確認する必要があった。そこでまず季節的な大気の変動を海面に与えて50年間分の計算を行い平均的な季節の変動を再現。その後1950年以降の大気中のフロン濃度を与えてシミュレーションを行なった。海洋循環のモデルには温度、塩分、3次元方向の流速等の変数があり、それにフロンが加わる。一つの変数をデータとして出力するのに1.2ギガバイトを使用するため、それに変数の数とサンプリングの時間をかけるとあっという間にデータ量がテラバイト単位の膨大なものとなり、その扱いには苦労が多かった。

最も有名なフロン濃度観測のひとつに、南大西洋のグリニッジ子午線に沿った海域で1983年に行われたものがある。その観測結果とOFESを用いたシミュレーション結果を比較してみると、非常によく一致した。海面からのフロン濃度を積算したグラフでも観測値と地球シミュレータでのモデル結果はほぼ一致する(図3)。

さらに南極周辺海域を詳細に調べると(図4)、南極大陸沿岸で吸収されたフロンが、南スコシア海嶺の複雑な地形に沿いながら、一部が海嶺の狭い隙間を越え、残りは南スコシア海嶺の南側を回り込んで流れていくことが分かった。こうした詳細な構造をシミュレーションで再現したのは今回が初めてである。

フロン濃度を追跡すると、ウェッデル海から沈み込んでいる深層水(南極底層水)やグリーンランド沖から沈み込んだ北大西洋深層水の流れを3次元的に把握でき、深層水の流れによって輸送されるフロンの時間的な経過も推定することが可能だ。地球シミュレータセンター・高度計算表現法研究グループの協力で、最近数十年間に沈み込んだフロンが今どこまで到達しているのかをアニメーションでビジュアルに再現することもできた(図5、図6)。

今回の成果のまとめと 今後の取り組み

以上のように、地球シミュレータを用いた超高解像度海洋大循環モデル実験は、ここ数十年蓄積されてきたフロン観測データのマッピングとも非常に整合性があり、南極海におけるフロン分布を再現し、またウェッデル海で形成されスコシア海に抜けていく南極底層水の経路をシミュレーションで解明することができた。最終的には炭素循環における海洋の役割を研究することにつなげていきたいと考えている。

今回シミュレーションを行ったのは、海洋大循環における深層循環の入口部分に過ぎない。さらにシミュレーションを続けていけば、深層水の循環とともにフロンが到達する場所や時期を予測することも可能だろう。これまではシミュレーション側が観測データを用いてモデル精度の検証を行ってきたが、シミュレーション結果から観測を行う側に情報提供や提案を行い、海洋大循環の研究さらには海洋大循環が影響する気候変動の研究がいつそう進展することが期待できる。そのためにさらにモデルの精度を上げていきたい。

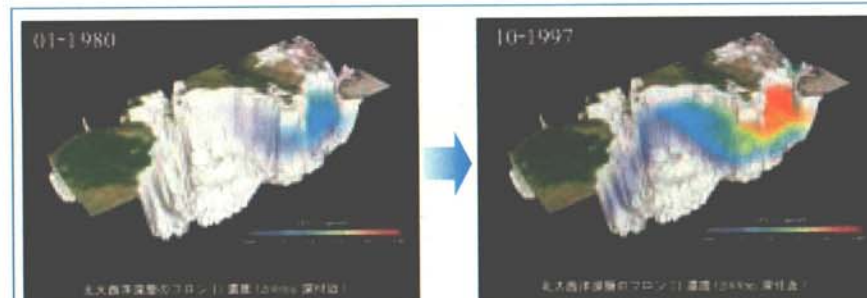


図6 グリーンランド沖から南下するフロン(アニメーションのスナップショット: 左: 1980年、右: 1997年)
南極底層水と同じ手法で、深さ1500m前後の北大西洋深層水の広がりも可視化することができた。フロンを吸収して沈み込んだ深層水の一部、深層西岸境界流が、約20年の時間スケールで北アメリカ大陸沿岸に沿って南下し、南アメリカ大陸のアマゾン川の河口付近まで到達している状態がわかる。(地球シミュレータセンター 高度計算表現法研究グループ作成)

～海底観測で探る地球の現在・過去・未来～ 「生きている地球」

(2004年1月17日 海洋研究開発機構横浜研究所[当時:海洋科学技術センター] 第15回地球情報館公開セミナーより)

地球が生きている証を観測できる場所のひとつが中央海嶺です。地球内部からマグマが上昇する、地球内部のエネルギー放出の最大の場所です。一方冷えたプレートが沈み込む場所では、日本のように巨大地震や津波など、地球の脅威をまざまざと感じることができます。私たちは海底の観測を通して「生きている地球」の姿を見ると同時に、過去を調べ未来を推定する研究をしています。



木下 正高 グループリーダー

地球内部変動研究センター
海洋底ダイナミクス研究プログラム
(当時:深海研究部第3グループ副主幹)

1961年長野県生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。2001年、海洋科学技術センター(当時)へ入所。海底での熱流量を高密度で測定し、地下の間隙水の存在・移動などを解明したり、沈み込み帯での巨大地震発生に關する断層活動と間隙水の関連を研究。最近では、IODP南海地震発生帯掘削提案の主提案者の一人として、特に孔内長期モニタリングを推進している。

地球内部のエネルギーが地震を起こす

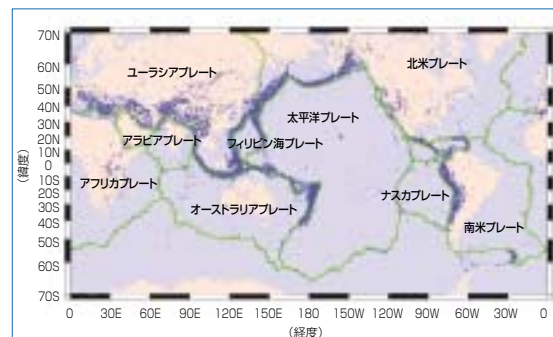
地球内部にあるエネルギーが解放される過程で、様々な地学現象が起こります。そのひとつが地震です。地球表面を覆う十数枚のプレートが運動して生じるひずみのエネルギー解放によって地震が起きます。

地震は世界中どこでも均等に起きているわけではありません。地球上の地震発生分布を表した地図を見ると、いかに日本に地震が多いかが分かります(図1・2)。日本では太平洋プレートやフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む際、プレートが反発すること

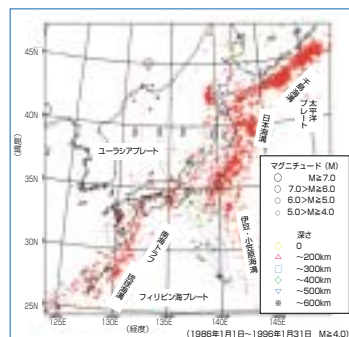
によって地震が起きます。特に、東海地震、東南海地震、南海地震という一連の巨大地震が起きる典型的な地域を総称して南海トラフと呼びます。南海トラフは、M(マグニチュード)8を超える巨大地震が100～200年に1回という頻度で発生する世界最大級の危険な海溝です。東南海地震の今後30年以内の発生確率は50%と言われ、地震が起きそうな地域も規模も分かっていますが、それ以上に詳細な予測は現状では困難です。東南海地震の想定震源域では、最近全く地震が起きていません。M7クラスの地震が1～5年という周期的な間隔で起こって

る三陸沖などに比べ状況も分かりにくく、かえって不気味です。一方で、こうした海溝にもメリットはあります。プレートが沈み込む部分では、海側プレートの一部が陸側に付加体を形成し、そのような場所にはメタンハイドレートが豊富に蓄積されていますので、これが採取できれば有効な資源となります。石油よりはるかに採取は大変ですが、可能性は秘めています。

海洋プレートが生まれる中央海嶺は、主に東太平洋からインド洋まで、そして大西洋の真ん中を縫うように走っています。これらは世界最大の海底火山です。



(図1) 世界の地震発生分布図



(図2) 日本で発生したM4.0以上の地震分布図

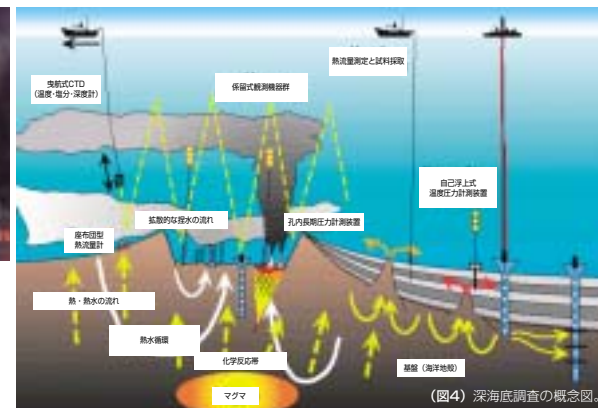


(図3) 太平洋中央海嶺TAG熱水マウンドで発見されたブラックスモーカー。白く見えるのはエビの群。

海嶺では、地殻内に含まれる金属などが300℃を超えるような熱水中に溶け、これが海底から黒煙を吹き上げるがごとく噴出するブラックスモーカーも見られます(図3)。このような熱水活動域では、鉱物資源の形成や、メタンや硫化水素を栄養源とする微生物、大型の魚やチューブワームなどが繁殖しており、まさに海底のオアシスです。生命の誕生はまさにこういう場所ではないかと言われています。

地球内部変動研究センター 海洋底ダイナミクス 研究プログラムの研究

海洋底ダイナミクス研究プログラムでは、最先端の機器や大型の機器を用いて、組織的・系統的な、長期戦略に基づく観測をしています。また、新たな科学的進歩をもたらすための新しい観測機器の開発も目指しています。機器の開発はお金もかかり成果も出しにくいので、それを負担できる余裕がないと取り組みません。しかしそのような努力を続けて初めて、生きている地球の真の姿を観測することができるのです。私たちは、掘削や深海曳航調査により、海底断層の活動度を調査して地球の中の様子を探っています。また、熱水活動や火山噴火のメカニズムや岩石学的な研究も含めた物質・熱輸送のダイナミクスの研究、沈み込み帯やホットスポットの集中的な観測を行い、さらに海底ケーブルを使用したネッ



(図4) 深海調査の概念図。

トワーク総合観測システムも展開しています(図4)。

深海底の調査と観測機器

深海底を調べるには、たとえば地震波や電磁波・重力異常などを使います。硬い地層があれば強い反射、軟らかい地層なら弱い反射が返ってきますから、これを連続的に行えば地下の構造が分かります。また、調査船から測定機器を降ろし海底観測を行います。海底の堆積物や海底火山の石などを採取したり、地下深部からの熱流量も調べます。こうした基本的な調査を実施したのち、必要に応じて潜水船で深海に降り、活断層や熱水活動・海底火山などを直接観察したり、長期観測機器を設置します。このほか、海

底ケーブルによるリアルタイム観測や掘削船による調査も行っています。以下、生きている地球の姿を浮かび上がらせるための、海底での観測手法を簡単に紹介しましょう。

【地形調査】

海底地形は、地球の活動を知る最も基本的な指標です。海底には電波が届かないため、音波を使って探査しますが、陸上に比べてその精度には限界があります。しかし最近では、コンピュータを駆使して非常に細かい分解能で地形調査を行うことが可能になり、またその結果を3次元画像で表示することも容易になりました(図5)。

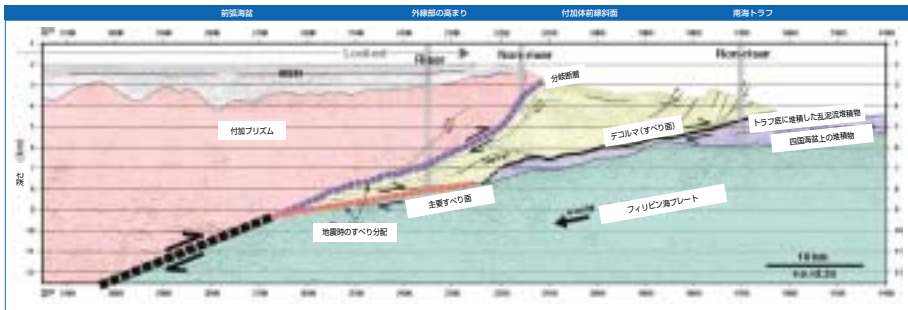
【地震探査・地球物理的探査】

調査船から巨大なエアガンで音を出



(図5)

コンピュータによる東南海震源域海底の3D動画からの画像。図は潮岬沖から静岡県遠州灘沖の天竜海底谷付近を望んだもの。



(図6) 東南海地震震源域の断面図。青い線が分岐断層の反射面、赤い線がプレート境界断層の反射面。このあたりで大地震が起きると考えられている。Riser、Non-riserと書かれているのがODPIによる掘削計画地点。薄い緑の部分は海洋地殻 (Park et al., 2002を改変)。

し、海底下の堆積層からの反射波や屈折波を水中マイクロフォンで拾うことにより、堆積層と地殻内の断面構造を調べます。地形調査と並んで、もっとも基本的な調査です。一例として、東南海地震の震源域の断面を紹介します(図6)。沈み込むプレートとその上側のプレートの境界を見て取ることができ、この面に沿って巨大地震が発生すると考えられます。この面は長さ100km程度、地震時にはこの範囲が最大4m程度ずれると考えられます。

地震探査や地形探査と同時に、磁場・重力場探査も実施されます。これにより、地下のマグマや断層などの構造が明らかになります。

【試料の採取】

海底の調査には、上記のようなリモートセンシングによるものだけでなく、実際に試料を採取してその層序（地層の重なる順序）や組成・特性を調べることも重要です。表層の泥は、四角い箱のような採取器を海底に突き刺して30cm四方の固まりで採ります。一方、より深部までの連続的な試料を採取するには、ピストンコアラーを使います。長さ4〜8mの中空パイプを自由落下させ柱状試料を採取します。泥が流れて逃がして石を採るバケツのような機器（ドレッジ）もあります。得られた試料は、海洋研究開発機構や、当機構と協力関係にある高知

大学海洋コア総合研究センターなどで、
物性（密度・音波速度・帯磁率・電気伝導
度など）や写真撮影、CTスキャンなどを
実施し、冷蔵庫などで保管されます。な
お、最近東京大学海洋研究所と共同で、
海底をカメラで観察しながら狙った場所
にピストンコアローを落下させる装置に
よる試料採取も試みています。

【熱流量測定】

地下の状態を知る尺度のひとつとして、熱流量があります。温度計が6~8m といった檣を海底につきさして、地中の温度勾配を調べます。なお海底での機器の位置を正確に知ることは、たとえば活断層との位置関係を把握するためにも必要で、機器にはトランスポンダと呼ばれる音響装置が装備され、船上で位置を確認することができます。

【地震観測】

海底下で起こっている微小地震を観測するために、おもり付きの地震計を海に投下し、海底に設置して数週間から1カ月、地震を観測し続けます。設置は船から投げ込みますが、回収は船上から音響による切り離し指令を送り、これによりおもりを切り離して計測機器部分が浮上します。当機構ではこうした地震計を100台ほど展開して自然地震の観測や地下構造の調査に利用しています。

【探査機・潜水調査船による調査】

遠隔操作無人探査機 (ROV) は、支援

母船とケーブルでつながった動力を持つ潜水船です。当機構では3,000m級無入探査機「ハイパードルフィン」などを所有しています。小さくて着水揚収作業も短時間で済み、カメラやソナーを備え、コンピュータで海底の機器の設置・回収・保守なども行えます。一方、動力は持たず船に引っ張ってもらう曳船式深海底調査システム「ディープ・トウ」もあります。

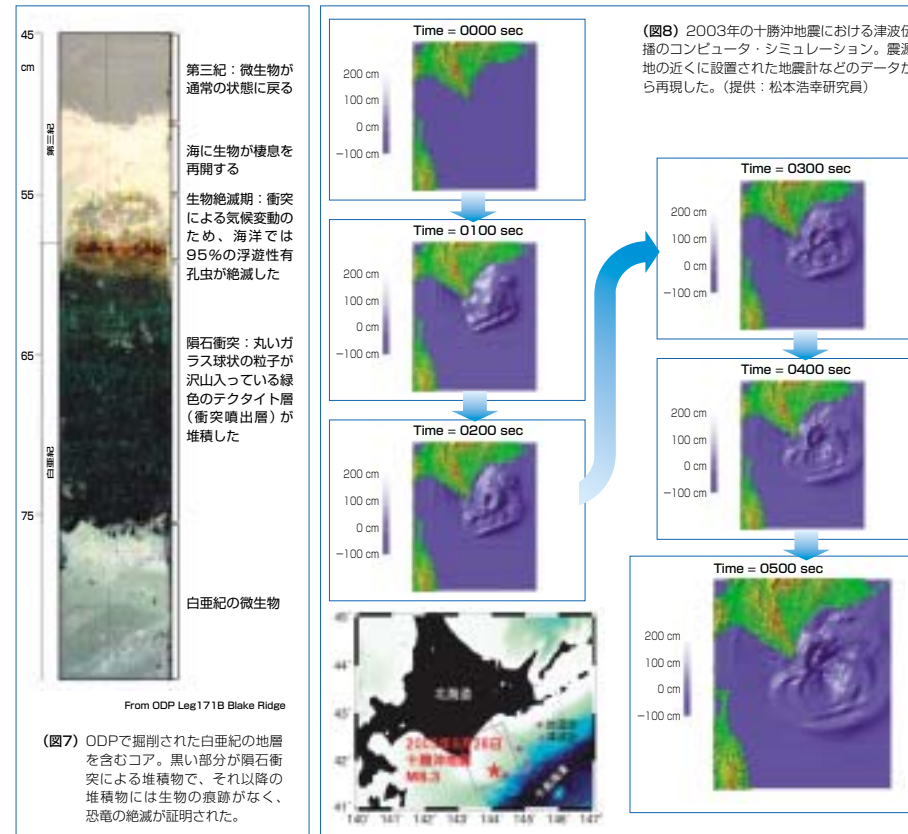
当機構の有人潜水調査船「しんかい6500」は現在、世界で最も深く潜れる有人潜水調査船です。定員は3名で通常パイロット2人に研究者が1人乗船します。潜水調査船から見る深海はROVのカメラに比べ視界も広く、人間の目の感覚がいかに素晴らしいかを実感します。マニピュレータで熱水域に計測機器を設置したり、試料を採取することもできます。

そして、究極の観測手段は、ケーブルを持たずコンピュータプログラムで自ら調査するロボット、自律型無人探査機（AUV）です。海洋研究開発機構では深海巡航探査機「うらしま」を開発中で、現在、動力を燃料電池に積み替え海域試験を重ねています。

近い将来、探査はAUVに任せ、データはブイからリアルタイム転送し、自宅のインターネット経由で様々な情報が得られるようになるかもしれません。

【掘削船による調査】

地下の構造や状態を知るには、構造探



(図7) ODPで掘削された白亜紀の地層を含むコア。黒い部分が隕石衝突による堆積物で、それ以降の堆積物には生物の痕跡がなく、恐竜の絶滅が証明された。

査を行った上で、代表的な場所に掘削して試料を得たり、温度や圧力、地震、歪、傾斜などの観測するのが最適です。例えば孔内地震計では、海底に設置した地震計よりもはるかに微少な揺れまで計測できます。科学目的の掘削船調査計画としては、1985年より始まったODP（国際深海掘削計画）が、2003年よりIODP（統合国際深海掘削計画）として新しいフェーズに入っています。ODPでは、例えば採取したコアサンプルから隕石の衝突の痕跡が発見され、恐竜絶滅イベントを証拠づける大きな成果となりました（図7）。IODPでは地球深部探査船「ちきゅう」によって2,500mの海底からさらに

6,000m掘り進み、断層に直に計測機器を入れて観測を行う計画があります。

【海底ケーブル調査】

当機構では、相模湾初島沖、四国室戸沖、釧路沖の3カ所に海底ケーブルに接続された観測点を所有しています。2003年9月の十勝沖地震の際には、震源地のごく近くに設置された地震計と水圧計の記録がリアルタイムで得られました。水圧計の記録により、地震に伴って海底が隆起し津波が誕生する瞬間を捉え、世界的にも貴重なデータとなりました。その時のデータをもとに、津波伝播の様子をコンピュータ・シミュレーションによって再現もしています(図8)。

また、現在アメリカで展開されている海底ケーブル・ネットワークを、将来的に日本のケーブル・ネットワークとつなぐ構想もあります。それが実現すれば、いながらにして地震をリアルタイムで観測できるようになります。しかし、海底ケーブルの設置には莫大な資金が必要で簡単には実現できません。

私たちは、これらの観測を通じて「地球科学は人類を救えるか」を考えています。特に新たなライザー掘削ができる「ちきゅう」をフルに活用して巨大地震発生の仕組みが解明されれば、これに勝る幸せはありません。



海洋科学・地球科学の 最先端を現場で まなぶ3日間 マリンサイエンス・スクール2004

夏の恒例となった「マリンサイエンス・スクール」。今年も7月28日～30日、全国の高校、高等専門学校から23名の生徒たちが集まった。参加者は学年も違えば、参加動機も「海に興味があった」「進路を考えるために」などさまざまだが、いずれも海洋研究開発機構横須賀本部での2泊3日を有意義に過ごしたようだ。

初日は開校式を終えるとさっそく講義。



開発中の「うらしま」を見学

海洋研究の概要を学んだ後、最新の自律型無人探査機「うらしま」の開発担当者からの講義を聞き、施設を見学。先端の調査機器やその開発現場などを見て回った。実物の「うらしま」には「思ったよりでかい!」と驚きの声も。横須賀本部前の岸壁では小型ROVを実際に操作して、ナマコやイソギンチャクの姿を捉えた。その日の夜は親睦会としてバーベキューパーティーも開か



潜水シミュレーターで高圧の世界へGO!

れた。

2日目は「しんかい6500」のパイロットによる深海探査の講義、国際的な科学掘削計画「深海地球ドリリング計画」や地球深部探査船「ちきゅう」に関する講義などが行われ、午後には実際に圧力体験実験や海洋観測実習も体験した。圧力体験実験では、深度500mまでの高圧環境を再現できる潜水シミュレーター装置で深度25m、約3.5気圧の世界に挑戦。乗り込んだ耐圧チェンバー内は圧力が上がるにつれて温度も上昇し、深度25m相当で約40℃に。配られたウチワを振る手も重くなる。あらかじめ硬式テニスボールとその直径よりやや口の狭いガラスビンも配られ、高圧下でボール内部の空気が圧縮されるとビンにスッポリ納まる実験も行った。その後、北極海域の観測研究や地球規模の気候変動などの講義を受け、この日最後の実習。まずは岸壁前で行う海洋観測。アクリルパイプやゴムボールなどを使った手づくりの採水器を使って目的の深さの海水を採取。さらに、プランクトンネットでプランクトンを採取して顕微鏡で観察した。そして、潜



「しんかい2000」の前で記念撮影。

水調査船整備場に保管される「しんかい2000」に乗船し、小さな窓をのぞき込んでパイロットたちの気持ちに思いをめぐらせた。

最終日は深海生物に関する講義の後、低温に管理された飼育室でシロウリガイやチューブワームなどを見学。初めて見る姿に寒さまで忘れて見入っていた。そして、午後には最後の講義、体験潜水。構内の潜水訓練

プールでスノーケリングやスクーバ潜水を体験した。

参加者たちは、普段なかなか体験できない講義や実習を満喫しながら同世代同士の交友も深めたようだ。

マリンサイエンス・スクール HP

<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/EVENT/mss2004/>



手作り観測機器で採水のしくみを理解



体験潜水では水とたっぴり親しんだ



バーベキューで雰囲気ながむ



『氷に刻まれた地球11万年の記憶』 温暖化は氷河期を招く

リチャード・B・アレイ／著 山崎 淳／訳

ソニー・マガジンス／刊

1,890円 (税込み)

東京に巨大な雪が降り、ヨーロッパが凍りつく天候の激変を描いたハリウッド映画『ディ・アフター・トゥモロー』。あれは映画の中のお話だが、ストーリーには科学的な根拠がある。そのひとつが本書だ。著者はグリーンランドの氷床から氷の柱を掘削し、過去の気候変化を調べている研究者。本書ではグリーンランドの氷からどうやって過去の気候を知るのか、という古気候学の基本の知識もユニークなたとえ話を交えながら説明している。

そして、その氷柱から彼が導き出したひ

とつとつ事実、それは「過去11万年間、地球の気候は絶えず急激な変化を繰り返してきた。つまり『激変する』のが気候の『正常』な姿だ」ということ。そして、地球温暖化により大量の氷床が融けて北大西洋に流れ込めば、地球のサーモスタット「海流のベルトコンベア」が止まり、地球は急激に冷え込むという。人類も温暖化を阻止するために知恵を絞っているが、果たして未来はどちらに進むのか。科学進歩に期待をしつつ、結局は地道にできることを日々行いうのが私たちに唯一できることなのだ。



定期購読のご案内 URL:
<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/regular/index.html>

『Blue Earth』定期購読のご案内

定期的にお手元に届く便利な定期購読をご利用ください。定期購読を申し込まれる方は、以下の内容を明記のうえEメールかFAX、もしくはハガキにてお申し込みください。
購読するためには、
定価(1冊300円) + 送料
+ 振込手数料
が必要となります。

郵便番号・住所・氏名・所属機関名(学生の方は学年)
・TEL・FAX・E-mailアドレス・定期購読を希望する刊行物名(海と地球の情報誌『Blue Earth』)・希望支払方法

支払方法

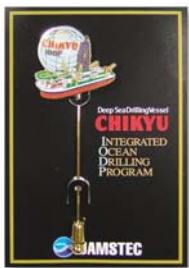
・年度一括: 申込日以降に発行される号から年度最終号の3・4月号までを一括でお振り込みいただけます。
・一誌毎: 毎号送付する際に請求書を同封いたします。その都度振込手数料がかかります。

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 情報業務課
横須賀研究所 情報業務課
「Blue Earth」編集室
TEL: 045-778-5350
FAX: 045-778-5424
E-mail: info@jamstec.go.jp

※定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号の3・4月号までとさせていただきます。申込日以前に発行されたバックナンバーの購読をご希望の方はあらためてお問い合わせ下さい。バックナンバー参照URL:
<http://www.jamstec.go.jp/pdf/index.html>
※1年度あたり6回発行

Present プレゼント



地球深部探査船「ちきゅう」ハットピン

現在、海洋研究開発機構で建造が進められている地球深部探査船「ちきゅう」（2005年5月完成予定）が描かれたオリジナル・ハットピン。帽子やジャケットの衿などに刺してとめるピン部分は、海底下を掘削するためのライザーパイプと噴出防止装置をイメージしています。バッジに船体とともに描かれた地球には、「ちきゅう」が参加するIODP（統合国際深海掘削計画）の文字も記されています。

今回は、この限定製作の「ちきゅう」ハットピンを、抽選で3名様にプレゼントいたします。

応募方法

官製ハガキに、1.プレゼントの品名、2.氏名、3.住所（郵便番号も含む）、4.年齢、5.職業（学生の方は学年）、6.電話番号、7.いちばん興味を持った記事、8.「Blue Earth」へのご意見・ご希望を明記の上、下記までご応募ください。応募締め切りは、11月30日（火）当日消印有効です。なお、当選者発表は発送をもってかえさせていただきます。

応募先

〒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
情報業務課 情報業務課
「Blue Earth」編集室プレゼント係

賛助会（寄付）会員名簿

独立行政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賛助、寄付をいただき、支援をいただいております。（アイウエオ順）

平成16年10月現在

株式会社 アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド	昭和ベトロリウム株式会社	ニッセイ同和損害保険株式会社
アイワ印刷株式会社	株式会社白石	日本SGI株式会社
株式会社アクト	社団法人信託協会	株式会社日本海洋科学
株式会社アサツディ・ケイ	新日本海事株式会社	日本海洋掘削株式会社
株式会社浅沼組	新日本製鐵株式会社	日本海洋計画株式会社
アジア海洋株式会社	新菱冷熱工業株式会社	日本海洋事業株式会社
石川島播磨重工業株式会社	須賀工業株式会社	社団法人日本ガス協会
泉産業株式会社	鈴鹿建設株式会社	日本興亜損害保険株式会社
株式会社伊藤高屋瓦斯容器製造所	スプリングエイトサービス株式会社	日本サルヴェージ株式会社
栄光電設株式会社	住友電気工業株式会社	社団法人日本産業機械工業会
株式会社エス・イー・エイ	清進電設株式会社	日本水産株式会社
株式会社NTTデータ	西武造園株式会社	日本電気株式会社
株式会社エヌ・ディ・ティファシリティーズ	セナー株式会社	日本電池株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	セントラル・コンピュータ・サービス株式会社	日本飛行機株式会社
株式会社OCC	株式会社総合企画アンド建築設計	日本ビュレット・バックカード株式会社
オートマックス株式会社	株式会社損害保険ジャパン	日本無線株式会社
沖電気工業株式会社	第一設備工業株式会社	日本郵船株式会社
株式会社オーケーピーリアルティシステム	株式会社大気社	株式会社間組
海洋電子株式会社	大成建設株式会社	株式会社ハナサン
株式会社化学分析コンサルタント	大日本土木株式会社	瀬中製鋼工業株式会社
鹿島建設株式会社	ダイハツディーゼル株式会社	東日本タグポート株式会社
カナダ株式会社	大陽日酸株式会社	株式会社日立製作所
カバシステム マシナリー株式会社	有限会社田浦中央食品	日立ブランド建設株式会社
川崎設備工業株式会社	高砂興学工業株式会社	深田サルベージ建設株式会社
株式会社川崎造船	株式会社竹中工務店	株式会社フジクラ
株式会社環境総合テクノス	株式会社竹中土木	藤沢薬品工業株式会社
株式会社開電工	株式会社地球科学総合研究所	富士ゼロックス株式会社
株式会社キュービック・アイ	中国塗料株式会社	株式会社フジタ
共立管財株式会社	株式会社鶴見精機	富士通株式会社
極東貿易株式会社	株式会社デジック	富士電機システムズ株式会社
株式会社きんてん	寺崎電気産業株式会社	物産不動産株式会社
株式会社熊谷組	電気事業連合会	古河総合設備株式会社
株式会社クロスワークス	東亜建設工業株式会社	古河電気工業株式会社
株式会社グローバルオーシャンディベロップメント	東海交通株式会社	古野電気株式会社
ケイジーケー株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社	松本微蔵株式会社
京浜急行電鉄株式会社	東京海上火災保険株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
ケー・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	株式会社丸川建築設計事務所
KDDI株式会社	東北環境科学サービス株式会社	株式会社マルタン
神戸ベイント株式会社	東北ニュークリア株式会社	株式会社マルトロー
国際気象海洋株式会社	東洋建設株式会社	三鈴マシナリー株式会社
国際警備株式会社	東洋通信機株式会社	株式会社みずほ銀行
国際石油開発株式会社	株式会社東陽テクニカ	三井住友海上火災保険株式会社
国際ビルサービス株式会社	東洋熱工業株式会社	株式会社三井住友銀行
小倉興産株式会社	戸田建設株式会社	三井造船株式会社
五洋建設株式会社	飛島建設株式会社	三菱重工業株式会社
相模運輸倉庫株式会社	有限会社長澤工務店	株式会社三菱総合研究所
三建設工業株式会社	株式会社中村鉄工所	株式会社明電舎
株式会社三晃空調	奈良建設株式会社	株式会社森京建築事務所
三洋テクノマリン株式会社	西芝電機株式会社	有限会社やすだ
財団法人塩事業センター	西松建設株式会社	株式会社コアサコーポレーション
ジオテクノス株式会社	日動火災海上保険株式会社	株式会社コアテック
有限会社システム技研	日南石油株式会社	郵船商事株式会社
シナネン株式会社	日油技研工業株式会社	郵船ナブテック株式会社
清水建設株式会社	株式会社日産セキュリティ・サービス	ユニバーサル造船株式会社
株式会社商船三井	日新火災海上保険株式会社	株式会社緑星社
株式会社湘南	ニッスイ・エンジニアリング株式会社	若葉建設株式会社

編集 後記

今回は、特集として「地球シミュレータ」を取り上げました。ご存じのように「地球シミュレータ」は、完成してから既に2年以上計算速度世界一の座を守り続けています。ことコンピュータの開発競争のような環境において、2年という歳月は、いわゆる、Dog Year であり、10年や20年にも相当するといわれています。聞くところによれば、米国では、新しいスーパーコンピュータの開発目標として「地球シミュレータ」がターゲットにされているということです。近年、我が国の技術力の低下が危惧されていますが、このような世界から目標にされるものがJAMSTECにあるということは、我々の大きな誇りでもあります。

「地球シミュレータ」が計算した地球全体の海流のシミュレーション結果を

3D画像で見せていただいたことがあります。このときは、黒潮や湾流はもちろん、南アフリカ沖のアルガスリングなどの現象がはっきりと現れているのを見ることができ、まるで衛星からの画像を見ているような錯覚にとらわれました。もしかすると、将来、さらに優れたアーキテクチャーを持つコンピュータや優秀なモデルが作られるようになれば、SF作家が想像したように本当にコンピュータプログラムによって宇宙や地球に人間が暮らすような世界が創れるのではないかなどと勝手なことを夢想してしまいました。今後は、地球科学以外の様々な分野のシミュレーション研究にも利用されるとのことです。我々の想像もつかないような結果が出ることを期待しています。

(T.T)

海と地球の情報誌「Blue Earth」第16巻第5号（通巻第73号）2004年10月 発行
編集人 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 情報業務課 情報業務課 小柳洋昌久
発行人 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 情報業務課 土屋利雄

本部〒237-0061 神奈川県横浜須賀町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3173-25 TEL.045-778-3811（代表）
むつ研究所〒035-0022 東京都目黒区大田町1-11 TEL.03-378-2511（代表）
国際海洋環境情報センター〒905-2172 沖縄県名護市豊原224番地3 TEL.0980-50-0111（代表）
Washington Office1133 21st Street, NW, Suite 400 Washington, D.C. 20036, USA TEL.+1-202-872-0000（代表） FAX.+1-202-872-8300
Seattle Office810 Third Avenue Suite 632 Seattle, WA 98104, USA TEL.+1-206-957-0543（代表） FAX.+1-206-957-0546
東京事務所〒105-0003 東京都港区西新橋1-2-9 日比谷セントラルビル10階 TEL.03-5157-3900（代表）

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/> Eメールアドレス info@jamstec.go.jp
制作 株式会社 ミュール

※本書掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます



表紙：深海調査研究船「かいいい」
Deep Sea Research Vessel **KAIREI**

裏表紙：7,000m級無人探査機「かいこう7000」
7,000m class Deep Sea Remotely Operated Vehicle **KAIKO 7000**

表紙の写真は、これまでの10,000m級無人探査機「かいこう」に代わって7,000m級無人探査機「かいこう7000」を搭載した深海調査研究船「かいいい」。裏表紙の上の写真は、今年7月に相模湾で行われた「かいこう7000」の海域試験の様子。

10,000m級無人探査機「かいこう」は、2003年5月、四国沖での調査直後に二次ケーブルが破断。ビークルは浮上・漂流したのちに行方不明となった。深海調査を行う研究者らの強い要望に応えるため、海洋研究開発機構では、「かいこう」ビークルの代わりに、細径光ファイバー式無人探査機「UROV7K」を改造して「かいこう」ランチャーと繋ぎ、代替機として7,000m級無人探査機「かいこう7000」を完成させた。現在、来年度からの使用に向けて、性能試験や実海域での訓練が行われている。しかしながら、「かいこう」はこれまで19回に渡って深度10,000mを超える大深度の潜航を行うなど、深海研究に大きく貢献してきた。今後も深度7,000mを超える海域での調査を継続する必要性は高く、「かいこう」ビークル後継機の早期の建造が望まれる。

独立行政法人

海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>