

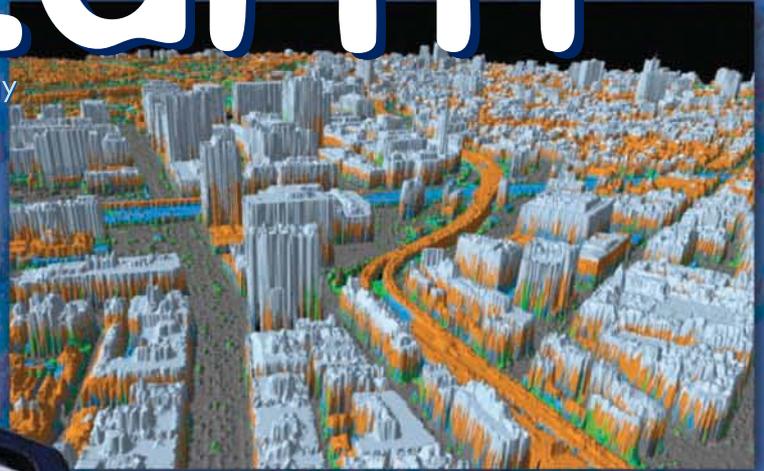
海と地球の情報誌

Blue Earth

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

104

2009 11-12



シミュレーション科学の 新たな世界へ

超高速インターネット衛星「きずな」で
「PICASSO」の海中映像を生中継

“多様な一族”へのこだわり——サメの飼育種数日本一

海に降る雪 マリンスノー
二酸化炭素の運び屋とその追跡方法

T=50.88S

1 **Close Up**
超高速インターネット衛星「きずな」で「PICASSO」の海中映像を生中継

2 **特集**
シミュレーション科学の新たな世界へ
進化した「地球シミュレータ」が
計算科学技術の明日を切り拓く

- 4 気候変動や異常気象の
予測シミュレーションに挑む
- 8 「地球シミュレータ」で予測する
南海・東南海・東海地震の強い揺れと津波
- 12 インキの流れからプレート運動まで
流体の動きを探る
- 14 新「地球シミュレータ」で
シミュレーション科学の明日を目指す
- 18 世界一のスーパーコンピュータは
どのようにして実現したか

20 **Aquarium Gallery**
アクアワールド茨城県大洗水族館
“多様な一族”へのこだわり
——サメの飼育種数日本一

22 **私が海を目指す理由**
コンパクトで安価な機器を開発
CO₂濃度観測の空白域を埋める
中野善之 海洋工学センター 先端技術研究プログラム
基礎技術研究グループ 技術研究副主任

26 **もっと知りたい船の知識**
地球深部探査船「ちきゅう」

28 **Marine Science Seminar**
海に降る雪 マリンスノー
二酸化炭素の運び屋とその追跡方法
本多牧生 海洋工学センター
先端技術研究プログラム 基礎技術研究グループ 技術研究主幹

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

超高速インターネット衛星「きずな」で「PICASSO」の海中映像を生中継



海中に投入される「PICASSO」をリアルタイムで映し出す「白鳳丸」からの映像（中央）。

2009年10月17日、海洋研究開発機構（JAMSTEC）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）による「超高速インターネット衛星「きずな」（WINDS）」を利用した深海探査機映像の伝送実験が行われた。

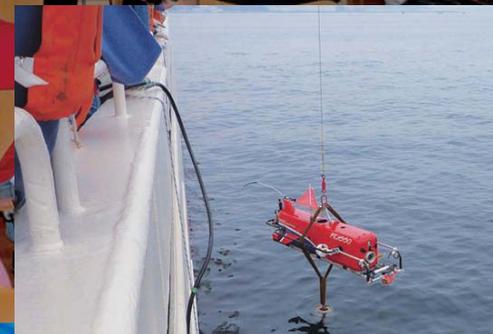
深海生物追跡調査ロボット「PICASSO」に搭載されたハイビジョンカメラが、三浦半島沖の金田湾の海中を漂うマリンスノーを映し出した。JAMSTEC横浜研究所に集まった人々は、モニターに映し出される海中の映像に見入っていた。「現在の深さはどれくらいですか」、横浜研究所からの質問に、「いま、深さ20mくらいですね。海中の映像を楽しんでいたために、ゆっくりと潜航しています」と、今回「PICASSO」の母船となった学術研究船「白鳳丸」の船上で潜航を見守る研究者から答えが返ってきた。今度は、JAXA筑波宇宙センターから質問が出た。同じ海中の映像が、この日に同センターで行われた施設一般公開の会場にも送られていたのだ。

2008年に打ち上げられた「きずな」は、宇宙と地上のネットワークをつなぎ、衛星を使った超高速・大容量の通信技術を構築するためのさまざまな通信実験を行っている。今回実施されたのは、「きずな」の可搬型地球局（小型アンテナ）を「白鳳丸」に設置し、「PICASSO」からの海中ハイビジョン映像、標準画質3チャンネル映像の合わせて4チャンネル映像を、JAXA筑波宇宙センター、

JAMSTEC横浜研究所で行われた公開実験の様子。



「白鳳丸」船上に設置された小型アンテナ。指向角度保持のため、動揺安定台の上に置かれている。



三浦半島沖の金田湾において潜航を開始するハイビジョンカメラを搭載した「PICASSO」。



「PICASSO」搭載のビデオカメラ映像を解析して計測を行う「遠隔ステレオ視計測」技術検証試験の様子。

JAMSTEC横浜研究所にリアルタイム中継するというもの。陸上の双方向テレビ会議中継を加えた6チャンネルの生中継は見事に成功し、「白鳳丸」と筑波・横浜の参加者を結ぶ遠隔海洋教室もスムーズに行われた。

さらに、JAMSTECでは、この機会を活用して、「海中探査機映像による遠隔ステレオ視計測」の技術検証試験を実施した。ステレオ視計測とは、複数のカメラの画像から三角測量の原理を応用して任意点の三次元位置情報を算出するという計測技術だ。「PICASSO」搭載のステレオ配置された2台のテレビカメラを利用して行った試験では、「きずな」を介して地上局に送信された海中映像を解析し、予め10mm間隔でマーキングしたスケールのステレオ視計測を行い、誤差1mm以下の計測に成功した。

「きずな」のような高速に大容量をやり取りできる通信衛星が実用化されれば、将来、陸上の研究室から深海調査に参加したり、洋上の観測機器を陸上から遠隔操作してデータを収集することも、決して夢ではない。



超高速インターネット衛星「きずな」を使用した行われた伝送実験の全体図

特集 シミュレーション科学の新たな世界へ

進化した「地球シミュレータ」が 計算科学技術の明日を切り拓く

世界最高速の演算性能を達成し、2002年の運用開始以来2年半にわたってスーパーコンピュータの世界ランキング「Top500」で世界1位に輝き続けた「地球シミュレータ」は、地球科学をはじめ計算科学技術の発展に大きく貢献するとともに、シミュレーション科学の新たな可能性を開拓してきた。

そして、2009年3月、「地球シミュレータ」は新たな進化を遂げた。新システムの導入により、「地球シミュレータ」のアプリケーション実行性能は、これまでのおよそ2倍に向上。地球環境変動の解明や将来予測、地殻変動や地震発生システムの解明など、先進的な研究分野の数値シミュレーションを、より高速・高精度で行うことが可能になった。さらに、地球科学分野にとどまらず、極限環境流体シミュレーション、ナノ・材料分野の物性解明・機能高度化シミュレーションなど、大規模計算を必要とする幅広い分野で活用され、高い成果を挙げている。進化した「地球シミュレータ」によるシミュレーション科学の新たなチャレンジは、まだまだ広がり続けている。



ベクトル型超並列計算機「地球シミュレータ」は、2002年に当時世界1位の演算性能（理論性能40.96テラフロップス、LINPACKベンチマーク性能35.86テラフロップス）を達成。2009年3月に新たなシステムに更新され、理論性能131.07テラフロップス（3.2倍）、LINPACKベンチマーク性能測定で122.40テラフロップスを記録した。現在（2009年11月）、世界ランキングでは31位だが、国内では1位の性能を保持している。

*「テラ（T）」は10の12乗を表す。1テラフロップス（TFLOPS）は、1秒間に1兆回の浮動小数点演算を行う能力を示す。

気候変動や異常気象の予測シミュレーションに挑む

取材協力：高橋 桂子 グループリーダー
地球シミュレーションセンター マルチスケールモデリング研究グループ

100年後の温暖化対策だけでなく 目の前の気候変動や異常気象の予測と適応策を

温暖化に代表される気候変動の進行が明らかとなり、その適応策が全世界的な課題となっている³⁾。その一方で、エルニーニョ現象やダイポールモード現象といった地球規模の気候変動による異常気象も地球環境や人間の生活に大きな影響を与えている。100年後を見据えた温暖化対策も重要だが、一方温暖化などによる気候変動と、エルニーニョ現象などの気候変動の相乗効果、加えてヒートアイランド現象などによって引き起こされる可能性のある集中豪雨などは、より身近で現実的な問題だ。そこで、予測シミュレーションの世界でも、地球規模の気候変動から世界の諸地域、さらには各国の都市部といった、より限定した範囲を扱えるようなモデルの研究開発が進められている。その研究成果を社会に直接結びつけ、いかに具体的な適応策として提示できるかが問われているのだ。

地球環境は、大気、海洋、生態系、河川や氷河、永久凍土といったさまざまな要素から成り立っている。そして、人間活動から生じる物質や現象もそこに大きな影響を与えている。世界の年平均気温はこの100年で約0.7℃も上昇し、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の報告書ではさらなる上昇が予測されている。この傾向は温室効果ガスや太陽放射の変化などの外因因子に起因する変化であるが、地球の環境は太陽放射だけではなく、大気と海洋の相互関係自体による内因因子によっても変動することを忘れてはならない。通常、季節変動として4～5℃の気温変化はそれほど珍

しいものではない。しかし、これが温暖化の気温上昇とともに起こったらどうなるであろうか。たとえば日本における熱中症患者の発生数を見ると、エルニーニョ現象やダイポールモード現象の発生した年には非常に増加していることが分かる（図1）。2006年の7月豪雨、2004年の豪雨や台風なども温暖化という地球規模の変化とともに起きた変動のなかの一つであるとする解釈もある。こうした災害を防ぐためには、まず、温暖化が進むなかで、エルニーニョ現象やダイポールモード現象のような大気と海洋の相互関係による“気候変動”がどのような影響を受けるかについて、きちんと予測する必要がある。

※気候変動枠組条約ではClimate change=（人為的な）気候変化に対して、Climate variability=非人為行為、と訳しているが、ここではIPCCの用法によりClimate change=人為・非人為両方を含む変化=気候変化、とする。

また、地球温暖化防止対策は、「省エネなどで温室効果ガスを削減し地球温暖化の根本的解決をめざす『緩和策』と、防災設備や水利用の効率化など対処療法によって温暖化による影響を軽減しようとする『適応策』」とに分類できる。

温暖化+気候変動・異常気象+都市化 大都市が抱える三重苦の適応策とは

温暖化を予測するシミュレーションモデルは、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象などの気候変動を再現するにはまだ十分な成果が得られていない。温暖化予測モデルを使用して気候変動現象をまずは再現し、温暖化とともにどのような変化があるのかについての研究成果が待たれるところである。一方、海洋開発研究機構（JAMSTEC）では、高解像度の大気海洋結合モデルSINTEX-1Fを使ってエルニーニョ現象の予測シミュレーションを行っ

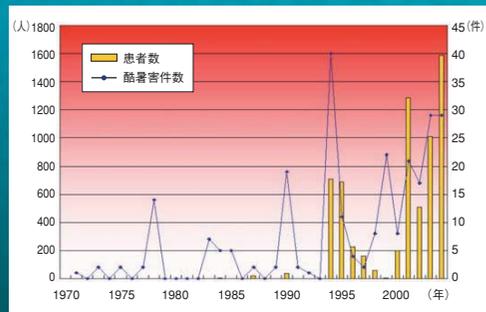


図1 日本の酷暑と気候変動との相関
日本の熱中症患者数と酷暑害の発生数（1971～2004気象庁）の統計を見ると、ダイポールモード現象のあった1994年と、エルニーニョ現象のあった2004年にピークが重なることが分かる。（図版提供：JAMSTEC山形俊男教授）

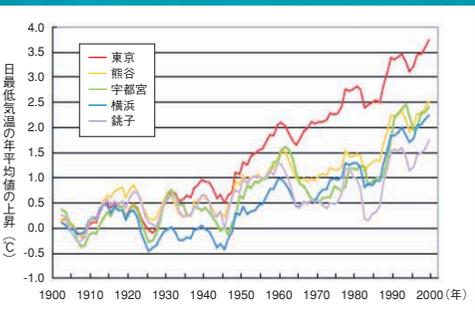


図2 東京と周辺部の日最低気温の年平均値の変化
気象庁の1900～1909年の10年間の平均値を基準として上昇分を示した。都市部ではいずれも強い上昇を示していることが分かる。（図版：環境省報告書より引用）

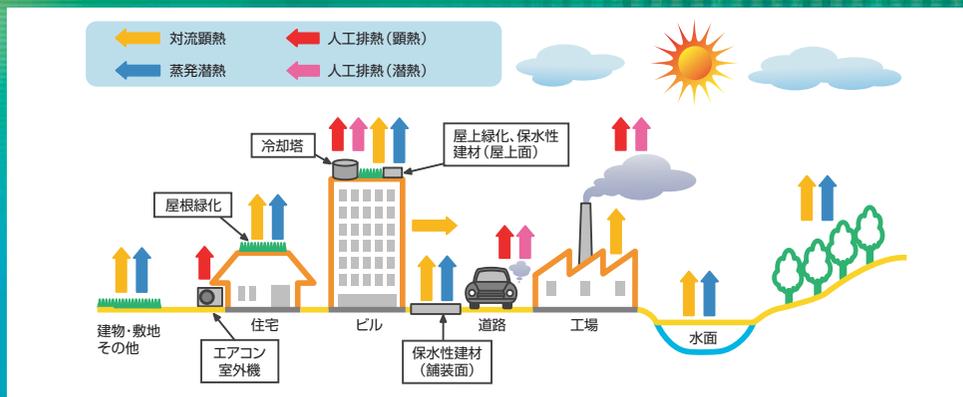


図4 ヒートアイランド現象の要因
人工的な要因と自然の対流や蒸発の現象が、複雑に絡み合っていることが分かる。
※顕熱：直接排出される熱。潜熱：蒸発のように温度を変えず物質の状態を変えた形で排出される熱。

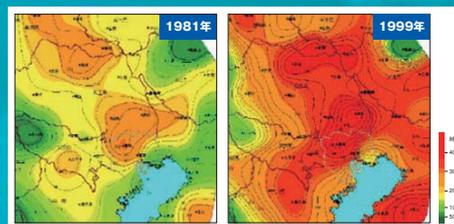


図3 首都圏の高温のべ時間の広がり
1981年と1999年の東京地域における高温のべ時間の広がり进行比较。高温に長時間さらされる人の数が著しく増えていることが分かる。

ている。その予測精度は極めて高く、世界でもトップクラスだ。短期的気候変動予測は、近い将来、実現の可能性が極めて高くなってきたといえるだろう。そうなると、次に知りたいのはいまから3カ月先の気候はどうなるのか、そしてそれによって起こる災害などを低減させるための対策はどうすればよいのかといった、私たちの環境に、より密着した現象の予測と適応策である。

たとえば、近年、話題となっている現象の一つにヒートアイランド現象がある。その原因はまだ特定されていないが、人口集中による都市化が大きな要因であることは間違いない。ヒートアイランド現象によって、ここ100年で東京は3℃も上昇したことが分かっている（図2）。世界の大都市でもこれほどの気温上昇は例がなく、東京は「地球温暖化」「気候変動」「都市化」の三重苦による影響を世界で最も早く体験する都市になるだろうといわれている。また、日本のほとんどの都市が近い将来、同じ悩みを抱えることになる。首都圏の年間気温を1981年と1999年で比較すると、東京だけではなくその周辺部も大きく温度が上昇している（図3）。30℃を超えたべ時間数の観測値では、仙台では3倍、東京や名古屋でも2倍強に増加している。また、都市部の熱帯夜も軒並み増加傾向にあるのだ。

このようなヒートアイランドや熱帯夜といった都市生活に直結した現象の原因解明はもちろん大事である。さらに、その現象をいかに予測し、具体的な、効率的な適応策を導き指針を示すための科学的根拠を示すことが、シミュレーションの次の課題だといえよう。

シミュレーション予測で 適応策に具体的な評価を与える

ヒートアイランド現象は、住宅やビル、道路、工場やグリーンベルトなどからの熱、水蒸気、さらにその相互関係によってできる熱の吹きだまりなどの要素が複雑に絡み合っている（図4）。たとえば、大きなビルからの人工排熱は60℃くらいあるといわれ、その影響は1km先にまで及ぶ。こうした要素を一つ一つモデルに組み込まなければ、ヒートアイランド現象を予測し、その適応策を考えることは難しいだろう。

たとえば、毎年、日本では夏季に冷房需要が集中して最大電力を押し上げる。環境省は、東京電力管内の1都8県の気温が1℃上昇することでピーク時の最大電力が170万kW増加するという試算をしている。そして、夏季の1日あたりの気温を1℃下げることができれば、冷房機具の使用の仕方も影響はされるが、約30万トンの二酸化炭素が削減できるという。ちなみに、鳩山首相が宣言した「二酸化炭素を1990年比25%削減」を実現するためには、約7億1700万トンの削減が必要となる（2007年度現在）。

夏季3カ月間の関東域における主に冷房機器の使用で「30万トン削減」、全国ではどれくらいになるか、さらに他の機器の電力効率を上げればどうか、などの累積効果が二酸化炭素削減につながるようになる。温暖化と都市の高温化を抑えるために、大都市では公園などのグリーンスポットの配置、水路や街路樹の設置、三角州の効果の再評価など、さまざまな対策を検討し実施しようとしている。国も過去

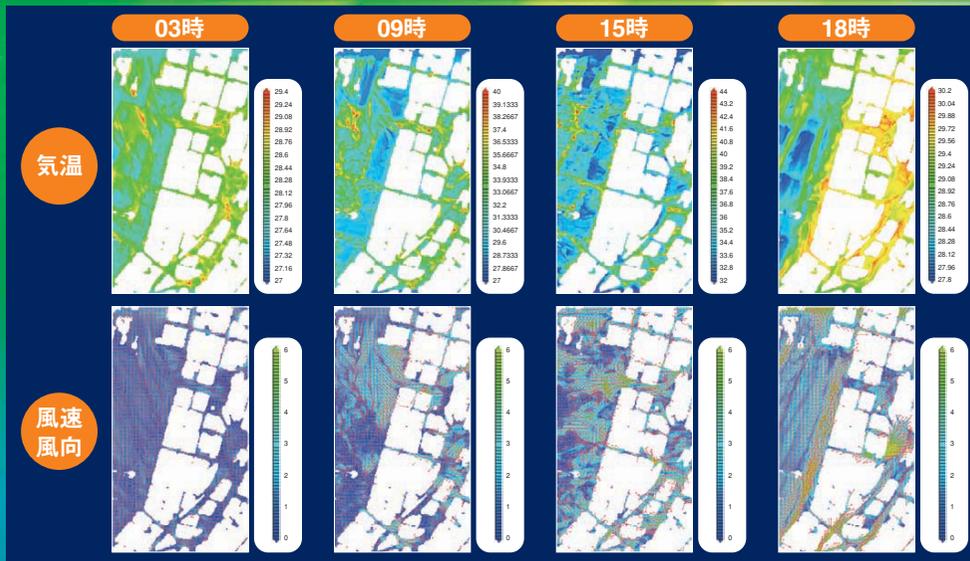


図5 MSSGモデルによる都市部の気温分布の日変化
 海拔7.5mにおける気温の動き(図上)と風速・風向の動き(図下)の変化のシミュレーション。



図6 建物の日陰の変化

の気象データに基づいたシミュレーションを行い、ヒートアイランド現象への適応策一覧を公表している。適応策のそれぞれについては、熱帯夜や昼間の高温化に対する効果の評価のランク付けもしているが、具体的にどのような優先順位や組み合わせをすれば最も効果的なのか、あるいは、どれくらいの規模の対処が最も効果的か、などの定量的評価は今後の課題である。

適応策の定量化が難しい 時々刻々と変わる都市と環境

都市の現象を考えるとときに、もう一つ忘れてはならないのは、日本はもちろん世界的にも、大都市のほとんどは海の近くにあり、海からの影響と都市化の影響の両方を受けているということだ。日中の海風や陸風の循環は非常に複雑で、昼と夜とで道筋が変わることもある。実際の観測データを見ても、都市内の温度の分布は時刻によってずいぶん違っている。そして、先に述べたような適応策は、ある年のある観測日、もしくは時刻といった限られたサンプルデータによって導かれたか、あるいは季節平均、年平均の傾向に対して考えられたものが多く、実際にその適応策が効果的かどうかについてはさらに議論と検討が必要である。適応策に定量的な評価を出すことは非常に難しいが、容易に想像できるように、その

ような定量的評価を唯一可能にするのがシミュレーションであるだろう。

JAMSTECが開発した大気海洋結合モデルMSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) では、陸と海、さらに都市までの関係も組み込んで都市の気温の分布をシミュレーションしている(図5)。都市部は約5mのメッシュで切り、建物のスケールも解像できるモデルである。それによると、やはり同じ場所でも時間帯によって風の通り方はかなり違う。時刻によって日射角度が変われば建物の日陰も変化するし、建物間の放射の影響も変わる(図6)。なおかつ、それをとりまく日中と夜の風の様子、陸と海との循環まで大きく変化する。こうした都市の特徴や都市をとりまく環境を取り入れた詳細なモデリングと観測データが、高精度の予測シミュレーションには必要なのである。

全球規模の変化から都市の現象まで 一つのモデルで同時に再現

そこで待たれているのが、全地球から都市の建物まで異なる時空スケールを継ぎ目なしで同時に見ることができ「シームレスなシミュレーションモデル」である。温暖化などの気候変化が進み、それによって気候変動が影響を受けるなか、身のまわりの環境に対する現実的な対応策を考

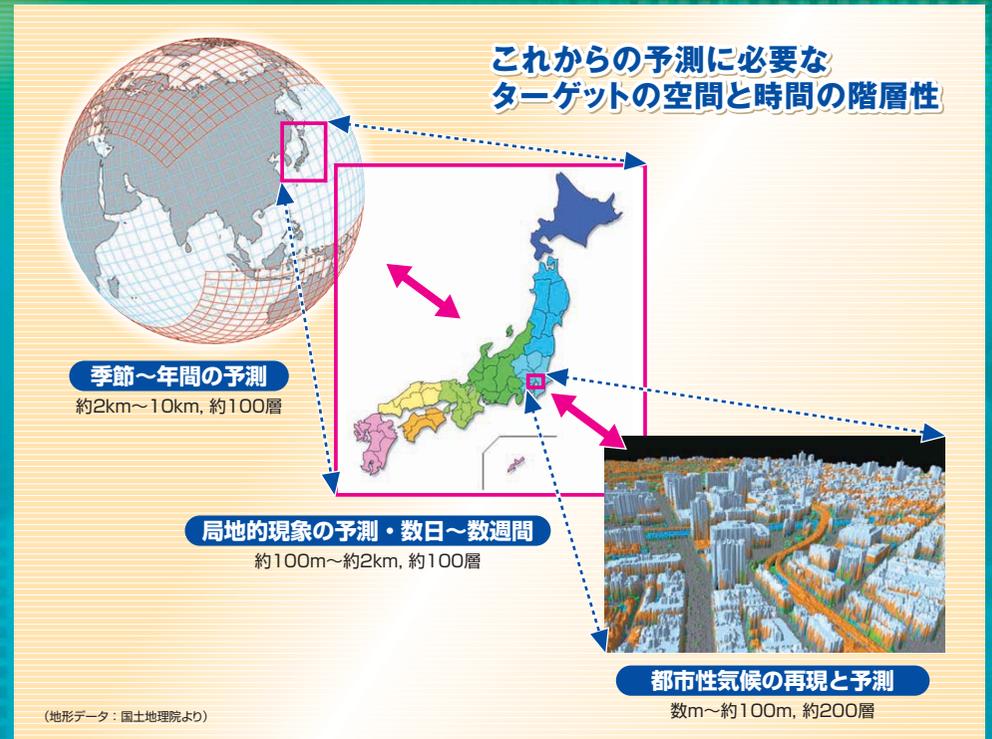


図7 シームレスシミュレーションの考え方とその再現性

える予測シミュレーションの一つのアプローチだ。それを実用化するためには、どういったスキームや計算手法が必要となるか、また時間や空間の異なる雲の生成モデルと都市のモデルを同時に、しかも高速で扱うためにはどんな技術開発をすべきか、現在研究が進められている。

まず、全球を10kmメッシュに分割し海洋の渦が再現できる解像度にしたモデルに、同様に大気の動きも10kmメッシュにして表現し、必要であればエルニーニョ現象やダイポールモード現象といった変動現象の動きも見える状態にした上で、個々の都市では何が起きているのかを同時に再現する試みだ。いまはまだ、エリアを限定した模式的な計算だが、東京・大手町を例にシミュレーションしてみると、その時点における都市のなかを熱がどのように運ばれているかについて、再現することができた(図7)。

技術開発と異分野との協働で シミュレーション予測を適応策に生かす

シミュレーション予測を適応策に生かすために不可欠なことは3つある。まず、適応策の効果を定量的に提示できること。そのためには、スケールの異なる現象を、同時かつ高速に扱える予測モデルが必要だ。すでに全球から変動レベルまでを扱うモデルは完成しているの、その先の開

発が課題となる。当然、その実現には膨大な計算能力が求められるため、相応のスーパーコンピュータと高度な計算手法の開発も欠かせない。

2つ目に、実現可能な適応策を複数提示できること。そこから、状況に即して実施可能なものを選ぶことが望ましい。そのためには社会科学分野の方々と協力し、行政に蓄積された知見をシミュレーションに生かす道筋が必要だ。そして3つ目は、斬新な適応策を提示できること。産業界や経済界なども巻き込み、地球科学分野だけでは出てこない斬新な適応策をも見いだすことが可能ではなく、たとえば制御分野の技術者と手を組めば、壁面緑化のような受け身の適応策ではなく、もっと能動的に働きかけて温度を下げる方法が出てくるかもしれない。それを効果的にするための進め方も検討している。

このような予測が実用化すれば、都市の時間の経過に伴う熱の動きまで考慮して集中的な対策を打つことができる。さらに、対策自体をシミュレーションのなかに取り入れれば、道路に施すのと緑や壁面に施すのとではどちらが効果的かといった効果測定も定量的に示すことができるはずだ。「地球シミュレータ」によって予測シミュレーションはさらに精度を上げ、より身近な施策にも生かされるべく進化を続けているのである。

BE

「地球シミュレータ」で予測する 南海・東南海・東海地震の強い揺れと津波

取材協力：古村 孝志 教授
東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター
東京大学地震研究所 地震火山災害部門

繰り返される南海トラフの巨大地震

西南日本に位置する南海トラフは、フィリピン海プレートが年間2~4cmの速いスピードで沈み込むために地殻に大きなゆがみが生じ、約100年の周期で何度も大地震を引き起こしてきた地震の巣だ（図1）。この南海トラフが、いままさに次の大地震を起こす時期を迎えている。

記録に残る南海トラフの大地震としては、まず昭和、安政、宝永の大地震が挙げられる（図2）。昭和の地震は、敗戦の1年前の1944年に起きたマグニチュード（M）7.9の東南海地震と、その2年後に起きたM8の南海地震で、当時は地震自体が軍事機密であり現存する資料は乏しい。さらに90年前の1854年の安政地震は、M8.4の東海地震と南海地震がほぼ同時に起こった。当時、日露和親条約締結のためにやってきたロシアのブチャーチン率いる軍艦も津波で大破している。さらに140年ほどさかのぼった徳川綱吉の時代、1707年の宝永地震は、東海、東南海、南海の地震が連動して一気に起きた巨大地震である。その49日後には富士山の噴火、4年前には元禄の関東地震も起きており、天災続きの時代であった。

「東海地震が起きる」といわれてからすでに30年。この

まま時間が経過すると、次の地震は安政地震のように東海、東南海、南海の3つの地震が同時に起こる可能性もあると危ぶまれている。

「震度」だけでは計れない地震災害の影響

2009年8月に起きた駿河湾の地震に、「ついに東海地震がきたか」と思った方もいるだろう。あの地震で将来の東海地震のエネルギーが開放されたと期待する声もあるかもしれないが、残念ながら駿河湾の地震は東海地震と直接関係はなく、影響を与えることもほとんどない。

駿河湾の地震で注目すべき点は、その揺れ方にある。駿河湾の地震動記録を見ると、小さな構造物に影響を与える0.2~0.5秒程度の短周期地震動が強く、駿府城の石垣や住宅の瓦屋根などに多くの被害が出た。しかし、木造家屋に影響を与える1秒程度の震動は弱く、超高層ビルを揺るがす長周期地震動はほとんど見られなかった（図3）。ちなみに、1995年の兵庫県南部地震や2007年の能登半島地震では木造家屋に影響を与える周期の揺れが強かったため住宅の倒壊が多く、2004年の新潟県中越地震では遠く離れた東京・港区の高層ビルが長周期地震動に共振してエレベ-

ーターのケーブルの一本が切れたという。

また、駿河湾の地震の直後、焼津や御前崎には約40cmの津波が発生した。通常、M6.5程度の地震で津波は起こらない。さらに不思議なのは、この津波が引き波で始まっている点だ。津波は引き波から始まることが多いが、この地震の断層運動では海底面が隆起したので、津波も押し波で始まるはずである。つまり、この津波はふつうの津波とは別の原因で起きたと考えられる。地震による海底地滑りが原因ではないかと推測できるが、真相は解明されていない。いずれにしても、「M6.5の地震なら津波は起きない」と言い切ることはできないということだ。

私たちは、地震の揺れの強さや被害を「震度」だけで考えがちだが、震度は周期0.5~2秒前後の短周期地震動の強さを表しているにすぎない。震度には現れない長周期地震動の影響は震源から何百kmも広範囲にひろがり、高層ビルや巨大タンクなどに大きな被害をもたらすおそれがある。駿河湾の地震の特徴である、周期0.5秒以下の短周期地震動の影響も深刻だ。地震災害を考える際には、その揺れの特性や予期せぬ二次災害まで考えに入れる必要がある。そのためにシミュレーションによる地震の考察は必要なのだ。

大規模数値シミュレーションが再現した地震動と津波

これから起きる地震の揺れを予測し備えるために、シミュレーションは大きな役割を果たしている。

地震動や津波のシミュレーションは、地殻モデルを格子（メッシュ）で区切り、そこに弾性定数や密度などの条件を与えて計算する。計算式はそれほど複雑なものではないが、再現したいエリアをカバーする数十億から数百億のメッシュの解を一気に解くため、かなり高い計算能力が必要となる。高精度な地下構造モデルや地震断層モデルも必要だ。兵庫県南部地震を契機に全国の平野で地下構造調査が徹底的に行われた。また、地震観測網が整備され、最近起きた地震を使ってシミュレーションの検証も繰り返し行われた。さらに、地球深部探査船「ちきゅう」で大地震の震源断層を掘削し、その構造を詳しく調べた結果がシミュレーションの高精度化に生かされている。こうして作られた高度なモデルと、「地球

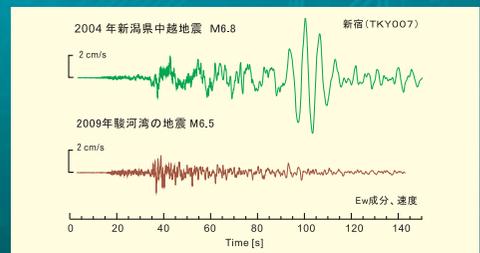
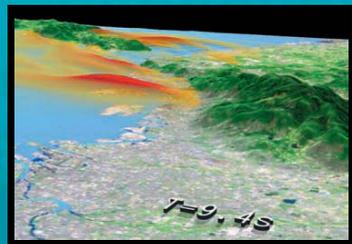


図3 駿河湾の地震の揺れ
いずれも新宿における観測記録。グラフの上は新潟県中越地震。地震発生後100秒前後の大きな揺れは、長周期地震動が減衰せずに届いたことを示す。下の駿河湾の地震では、そのような揺れは見られない。



6.6秒後



9.4秒後

図4 「地球シミュレータ」による兵庫県南部地震の再現
「地球シミュレータ」の使用可能な最高性能を使った最新のシミュレーション。神戸を大きな揺れが2度、襲っていることが分かる。

シミュレータ」のようなスーパーコンピュータの進歩によって、過去の被害地震を再現し、そして将来の大地震の被害を高精度に予測することが可能となってきたのだ。ちなみに、2009年に導入された新しい「地球シミュレータ」は、兵庫県南部地震後の1996年当時のスーパーコンピュータと比較すると10万倍近い計算速度を持っている。

この「地球シミュレータ」で使用可能な最大の128ノード、1.4テラバイトのメモリーを使い、約3.3時間かけて計算をした兵庫県南部地震の最新シミュレーションでは、明石海峡から断層破壊が進んで淡路島側、神戸側に強い揺れが伝わっていく様子が再現できたほか、神戸側は大きな揺れが相次いで2回あったために大きな災害となったことも分かった（図4）。当時は地震計も限られた場所にしか設置されていなかったが、シミュレーションを行うことでデータの無い場所の揺れも再現できたのだ。

さらに、これまで個別に行っていた地震動と津波の計算を連携させる「連成シミュレーション」の試みも始まっている。地震動シミュレーションで、地震動と海底地殻変動を計算する一方で、その変動で海面がどのように盛り上がり、津波がどう伝わるのかを津波シミュレーションで並行して計算し、地震と津波の動きを一気に再現するのだ。異なる現象を共通のモデルでシミュレーションすることで精度が上がるだけでなく、大地震に伴う一連の現象を多角的にとらえることが可能となってきた。

過去の地震から予測する、東海・東南海・南海地震

それでは、予測される東海・東南海・南海地震は、どのようなものなのか。昔の地震の記録やシミュレーションをもとに考えてみよう。

まず、東海地震を駿河湾の地震をモデルに考える。駿河湾

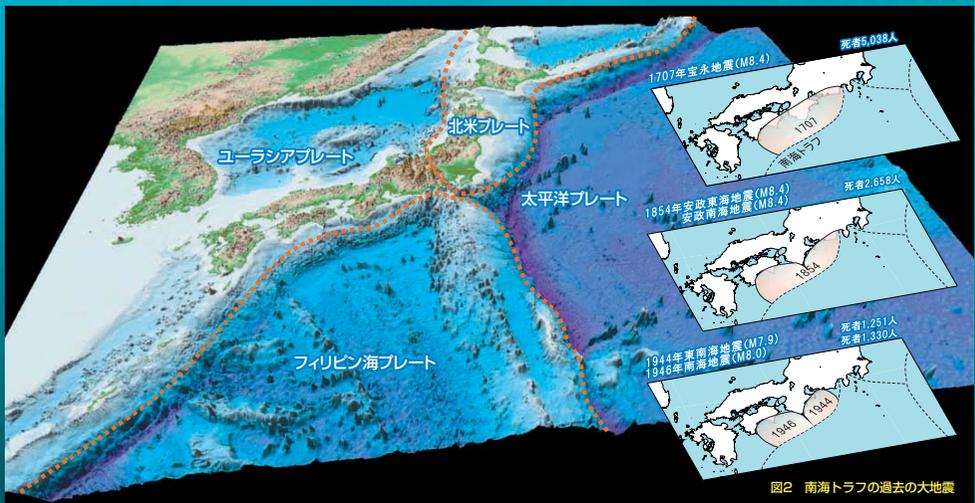


図2 南海トラフの過去の大地震

図1 南海トラフ
南海トラフはフィリピン海プレートがユーラシアプレートに潜り込む浅い海溝（トラフ）。駿河湾の富士川河口付近を起点に、御前崎から潮岬、室戸岬を通って九州沖に達する。

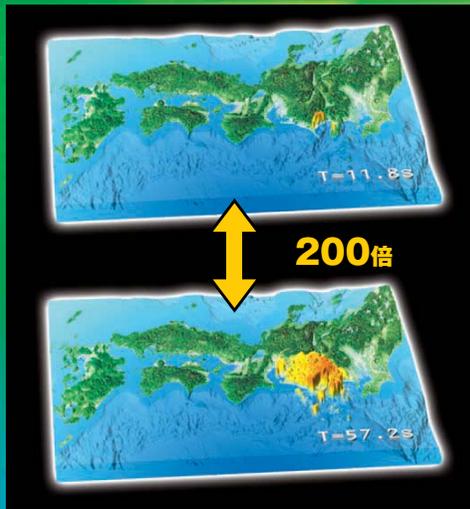


図5 駿河湾の地震と想定東海地震
駿河湾の地震はM6.5で、揺れた時間は10秒あまりでその範囲も非常に狭い(上)。一方、想定される東海地震はM8.0程度とされ、同じモデルによるシミュレーションで揺れる範囲も非常に広いことが分かる(下)。

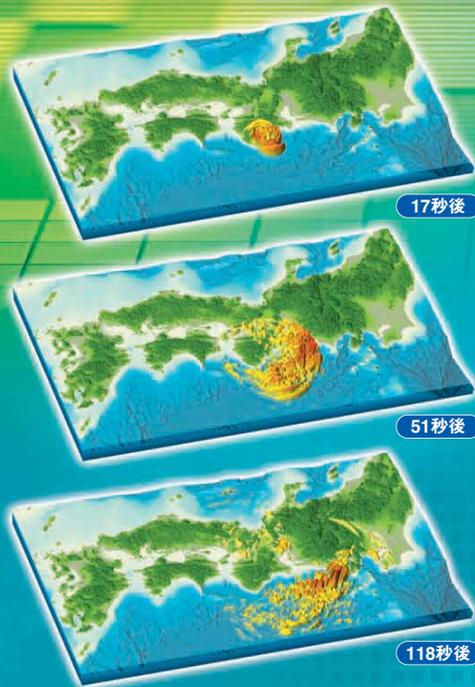
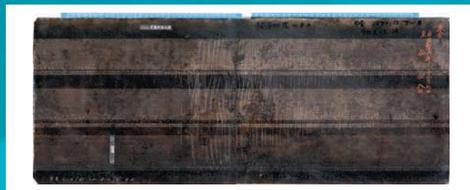


図6 昭和の東南海地震のシミュレーション
当時の記録は、古い地震計によって、すでに焼した紙に記録されていた(左)。地震波形をデジタル化し、地面の揺れを再現するとともに、この地震をシミュレーションにより再現して、当時の揺れの記録と比較した(上)。揺れは40秒で名古屋、そして90秒で関東平野に到達し、平野では大きな揺れが長く続く。

の地震はフィリピン海プレートの内部を震源とするM6.5の地震だ。これを「地球シミュレータ」で再現すると、震源に近い静岡を突き上げるような揺れが一瞬襲い、その後10秒ほどで揺れは収まった。しかし、想定される東海地震はプレートの上に震源を持つM8.2程度の地震で、駿河湾の地震の200倍ものエネルギーがある。これを同じ地下構造モデルでシミュレーションすると揺れは40秒以上続き、しかも兵庫県南部地震と同じように短周期から長周期まで幅広い周期の揺れを強く含んでいる。また、地震動や津波の広がる範囲も静岡だけではなく広範囲に及ぶことが分かった(図5)。

東南海地震は、昭和の東南海地震のデータが古い地震計によって残されている。すすを塗った紙に東西・南北・上下の揺れを針で記録した貴重なものだが、これをデジタル化して地面の揺れを再現すると、東京は長周期地震動で10分以上も揺れたということが分かった。地下構造モデルと東南海地震の震源モデルを用いた地震動シミュレーションからもこの揺れが良く再現されることを確認した(図6)。シミュレーションの結果を当時の地震計記録と比較・精査しモデルを高度化していくことで、将来の大地震の揺れの高精度予測が可能になる。

地震の強い揺れの後は地殻変動が起きる。昭和の南海地震では室戸岬は50cm隆起し、高知の市街地は60cm沈んで海水につかった。そして、そこを津波が襲った。当時の津波をシミュレーションしたところ、土佐湾では津波が何度も襲ったことが分かる。津波の集まりやすい湾では、津波が閉じ込められて反復するエッジ波が残るといわれるが、当時の験潮所の潮位記録にも土佐湾で津波が十数時間も続いたことが記されている。想定される南海地震では、このように長時間にわたる津波による被害も想定しなければならない。

シミュレーションが示唆する南海トラフ巨大地震の姿

そして、東海、東南海、南海地震が一度に起こる最悪のシナリオは、宝永地震のモデルで考えてみる。

宝永地震では紀伊半島潮岬沖あたりからプレートの破壊が始まり、断層破壊は駿河湾から足摺岬まで及んだと考えられている。そのモデルでシミュレーションを行うと、新たな疑問が浮上した。再現した宝永地震の津波は、記録に残された観測値と高さが倍近く小さいのだ(図7)。しかも、調べると大分県佐伯市の龍神池に宝永地震による津波堆積物が残されているという地質学的情報も得た。今のモ

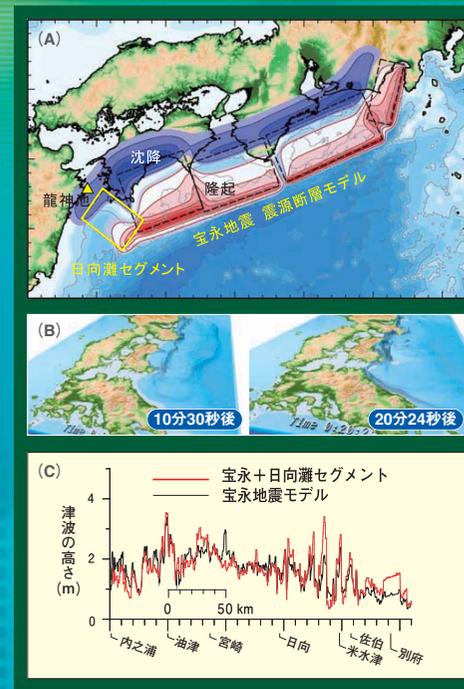


図7 宝永地震による津波の再現
最新の地質学的データやGPSの解析をもとに新しく作った宝永地震の震源モデル。断層破壊は日向灘にまで及ぶ(A)。新しい宝永地震モデルによる津波のシミュレーション(B)。これまでの宝永地震モデル(黒線)と、日向灘の断層セグメントを加えた新しいモデルによる九州の津波高の比較(赤線)(C)。

デルでは、龍神池の付近は宝永地震では沈降しなかったことになり、そこに津波池が存在することは説明できない。さらに最新の衛星利用測位システム(GPS)の解析では、龍神池は1年で2.5mm近くも隆起し続けている場所だと分かった。そこに津波の痕跡をとどめた津波池があるということは、宝永地震で数十cm沈降した可能性が非常に高い。

最新のGPS解析の数字を見ると、南海トラフでプレートが固着して地震エネルギーを蓄えている範囲が足摺岬より100km以上も西の日向灘まで伸びている可能性がわかった。それらの新しい知見を取り入れた新しい宝永地震のモデルで再度地震動と津波のシミュレーションを行うと、龍神池の付近は50cm沈降し、そして津波は観測値にかなり近い高さで再現できた。しかも、このモデルでは、足摺岬から日向灘でプレートの破壊がゆっくりと進行した場合には、津波はさらに高くなり、九州側の津波は想定より1.5倍ほど大きくなる可能性もわかった(図8)。

もし、このような3つの地震の同時発生が起きた場合には、震度5弱以上の強い揺れと数mの津波が九州～駿河湾にいたる広い範囲を一度に襲い、総人口の1/3以上が影響を受けることになる。



シミュレーションで挑む、巨大地震の災害予測・軽減

今後の地震シミュレーションは、将来の地震の揺れを予測し、被害の軽減を考えていくために非常に重要だ。これまで行っていた強震動や津波のシミュレーションだけでなく、その結果を使ってさらに被害のシミュレーションまで行い、地震に強い建物や都市計画につなげていかなければならない。シミュレーション技術の向上に伴い、地震の発生から強い揺れと津波、そして被害の発生まで、まさに「地震を丸ごと」シミュレーションする時代がすでに到来している。今後さらにコンピュータとシミュレーション技術が進めば、地震発生と同時に生の観測データを使ってシミュレーションを行い、リアルタイムで津波を予測することも可能になるだろう。現在、国土院ではGPSを全国800カ所に設置して日本列島の地殻の歪みを観測している。海洋研究開発機構では、東南海地震の震源域の紀伊半島熊野灘沖に海底ケーブル地震・津波計の設置を開始した。こうしたさまざまな観測データをリアルタイムでシミュレータに取り込み、いま地球で起きている現象を再現した“仮想地球”によって未来を予測する、これが今後のシミュレータに課せられた任務なのである。

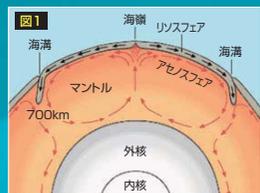
インキの流れからプレート運動まで 流体の動きを探る

取材協力：阪口 秀 チームリーダー
地球内部ダイナミクス領域
地球表面ダイナミクスの描像と予測研究チーム

地球の内部を調べるために

地球内部構造は、現代の先端技術をもってしても簡単に見ることはできない。現状では地震波などから間接的に推定するしかない。実際に地球内部を調べるために、海洋研究開発機構（JAMSTEC）では地球深部探査船「ちきゅう」を使って海底下7kmまで掘り抜く掘削計画を進めているが、地球の半径は約6,300kmもあり、表面の殻を突くようなものだ。だからこそ、観測研究を進める一方で、物理的な理論から地球の構造を考えることが非常に重要となる。

地球を構成するマントルは岩石の塊、つまり固体である。しかし一方で、プレートはマントルの対流によって動いていると考えられており、マントルはゆっくりと流れる“流体”であると考えられる（図1）。だが、沈み込み帯に見られるようにプレートが非対称に斜めに沈み込む動きなどは、流体力学では説明がつかない。



そこで、固体と流体の性質を併せ持つ地球の物性を物理的に解くことが、地球内部ダイナミクスの一つの課題となっている。

固体と流体の性質とは

固体とは、物質の分子同士ががっちり結びついた状態である（図2a）。外力がかかると原子間の距離が変化し、これに抵抗する力が発揮されるが、力を抜けば元の形に戻る。ただし、大きな力で割れたりへこんだりしたら決して

元の形には戻らない。一方、やわらかいゴムも固体だが、ひも状の長い分子で折りたたまれた構造のため、元の長さの10倍伸ばしても切れない上に、力を抜けば元の形に戻る。また、普通の固体とは逆に、温めると収縮する。この状態はひもに通した5円玉で再現できる。ひもの両端を持ち、強く5円玉を回すと、両端を持つ指はひもに引っ張られてその距離は縮む。温度を上げることは、より速く5円玉を回すことに相当し、ひもの両端はさらに縮む（図2b、c）。

一方、流体の分子はつかず離れず自由に決まった配置を持たないが、ある分子が外力で動き出すと、みなでそれを追いかけて隙間を作らない性質がある。究極の追いかけては集団回転運動で、一度始めると止まりにくい。それが対流や台風の渦のような運動を起こす仕組みである。

この固体と流体、両方の特徴をもつ物質もある。分子同士が自由な関係なのに互いに離れられない状態、すなわち流体特有の粘りと固体特有の弾力を兼ね備えた「粘弾性」物質だ。ゴムのように弾力があるが、容器に入ると形を変え、傾ければ流れ出す。ホイップクリームを冷やしてかき混ぜると角が立ったり、マヨネーズをかき混ぜるとやわらかくなる現象も、この粘弾性によって引き起こされる（図3）。

地球上の万物はみな流体？

流体の振る舞いは複雑だが、ここで、誰もが知っている砂を考えてみよう。砂は細かな固体が集まった粉体だが、条件次第で流体にも固体にもなる。つまり、流れる固体だ。これは流体の研究に欠かせない考え方で、あのマイケル・

固体

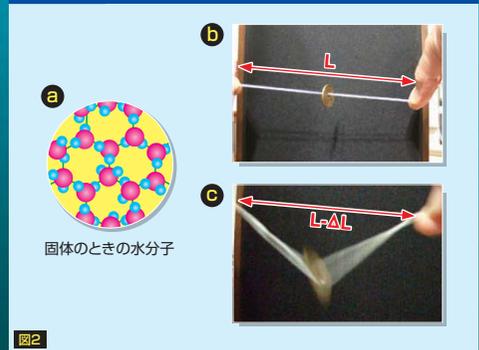


図2

流体

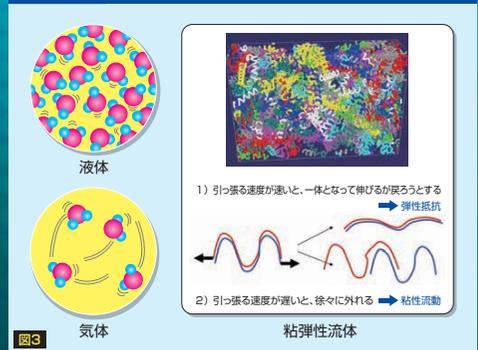


図3

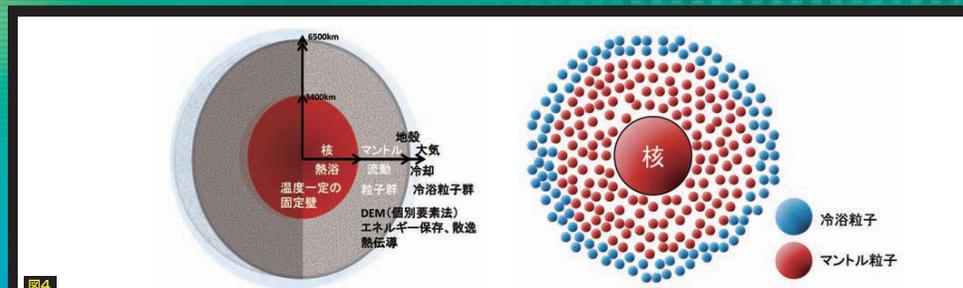


図4

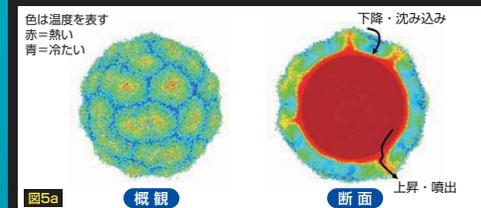


図5a

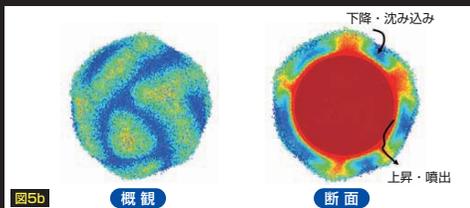


図5b

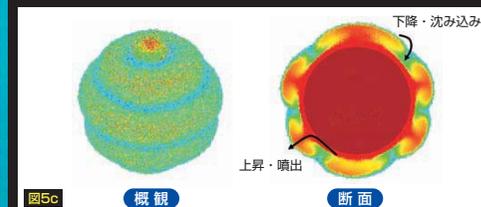


図5c

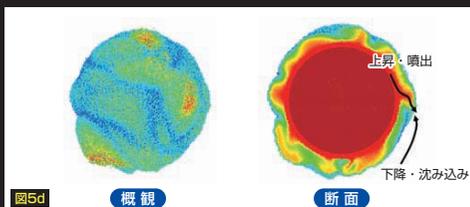


図5d

ファラデー（1791-1867 イギリスの科学者）もスピーカーの上で砂を振るわせて「粉体は振動すると対流する」ことを証明した。そして、もう一つ大切なことは、そもそも完全結晶からなる“純粋な固体”は現実には存在しないということだ。自然界では必ず不均一性が入ってくる。すなわち、地球ダイナミクス研究の対象は、万物は流体という前提で考えなくてはならないのだ。

簡単なファラデーの実験の再現でさえ、数値計算では砂粒の動き一つ一つを計算するために膨大な時間がかかる。しかし、西浦泰介ポスドク研究員（地球内部ダイナミクス領域）が開発したGPU（Graphics Processing Unit）を使えば、パソコンで粉体対流実験のシミュレーションができる。そこで、地球上では不可能な粉体振動対流を三次元の球殻上で行う実験をシミュレーションしてみた（図4）。最初は粉体の設定値を極めて流体に近くした。すると、球殻上にサッカーボール状のベナール対流のような模様が現れた（図5a）。粉体の設定値を固体に近づけていくと帯状の対流が見られる（図5b、c）。またその遷移過程では、日本海溝に見られるような斜めの沈み込みも再現された（図5d）。この結果から、地球の沈み込み活動はまだ過渡期で最終的には帯状対流で安定するという予測も立てられる。このGPUコードを「地球シミュレータ」に搭載すれば、粒子を

数十億個使って地球の対流シミュレーションも可能である。

インキの研究で地球が分かる？

さらに現在、印刷用インキの製造会社と、数値シミュレーションによってインキ中の顔料の均質な動きのための条件やレオロジー（流動学）に関する共同研究も行われている。実は溶岩とインキは、粘性は大幅に異なるものの、その振る舞いはよく似ている。どちらも粘性のある液体のなかに顔料や岩石といった小さな粒子を含む物質で、圧力を加えると流れ出し、その力が一定以下になると固まる性質をもつ。こうした振る舞いは従来の流体力学だけで考えることは難しかったが、シミュレーションの手法を使うことでより高度な解析が可能になった。インキの研究のためのシミュレーションの精度をさらに高めれば、地球内部の研究に应用することができるのだ。

力学はすべての物質に普遍的であるべきだが、残念ながら既存の材料力学などを流用しただけでは地球を理解することはできない。地球科学専用の新しい力学的手法の研究・開発をさらに進め、それを社会にも還元していくことが求められている。

※ベナール対流…下部の方が温度が高い水平な二平面の間起こる対流。温度差や平面の間隔によって独特の規則的なパターンを示す。

新「地球シミュレータ」で シミュレーション科学の 明日を目指す



渡邊 國彦 センター長
地球シミュレータセンター

地球シミュレータセンター 渡邊 國彦 センター長に聞く

「地球シミュレータ」が新システムに更新され、新たな運用を開始して1年が経過した。これまでの利用者には新システムへの対応が必要となるなど戸惑いもあったが、基本性能の向上に伴う優れた研究成果が次々と生まれるなど、「地球シミュレータ」は新たなステージへ向けて着実な一歩を踏み出した。この1年間、新「地球シミュレータ」を見守ってきた渡邊國彦センター長に、今後「地球シミュレータ」が果たすシミュレーション科学への貢献について話を聞いた。

「地球シミュレータ」の性能は いまま世界トップクラス

—— 運用開始から7年が経過した2009年春に、「地球シミュレータ」が更新された理由についてお聞かせください。

渡邊 これまでの「地球シミュレータ」のCPUやメモリに使われていたチップは、すでに3世代前の古いものになっていました。どうしても部品は壊れますから、交換などのメンテナンスが必要です。しかし、わざわざ3世代前の部品をつくるというのは逆に至難の業で、非常にコストがかかってしまいます。また、データなどを保存するテープライブラリが、昨年6月で保守の対象から外れるという事情もありました。いろいろなものが、もはや限界に近づいていたということです。「地球シミュレータ」は、非常に優秀なマシンでしたから、できることならもう少し運用を続けたかったのですが、決断の時が来たという判断を下し、更新を決めました。

—— 最近、スーパーコンピュータの世界ではベクトル型よりもスカラ型が主流になりつつあると聞きますが、新しい「地球シミュレータ」は、以前と同様にベクトル型ですね。

渡邊 特にベクトル型にこだわったわけではありません。入札の仕様書でも、前の「地球シミュレータ」より2倍以上速いという条件さえ満たせば、どちらでも構わないということにしています。ただ、結果的にはベクトル機に決ま

りました。やはり、ここにはベクトル機用に開発されたプログラムが多いですし、気象・気候現象などのシミュレーションに用いられる流体計算や地震波の伝搬計算などでは、ベクトル機の方が圧倒的に優れているからだと思います。

—— 更新によって、システムはどのように改善されましたか。

渡邊 前の「地球シミュレータ」の計算ノードの数は640台。1つのCPUのピーク性能は8ギガフロップスで、1つの計算ノードに8個のCPUを搭載し、合計5,120個のCPUでピーク性能が40テラフロップスという仕様でした。これに対して新しい「地球シミュレータ」は、計算ノードの数が160台、1つのCPUのピーク性能は102.4ギガフロップス、各計算ノードのCPU数は同じく8個ですが、全体の1,280個のCPUによるピーク性能は131テラフロップスと、約3.2倍向上しています。メモリアクセス速度の関係で、実効性能では、大体2倍強というところですが、シミュレーションコードによっては、ほぼ理論性能比通りの速さが出ているものもあります。性能の向上の一方で、スペースはいまままでの半分弱、電気代もいまままでのおよそ60～70%です。

—— 2009年11月に発表された「Top500」のランキングでは、新「地球シミュレータ」は国内1位ですが、世界では31位でしたね。

渡邊 ええ。しかし、速さだけでなく計算システムの性能を総合的に評価する「HPCチャレンジアワード」では、4



東京大学・古村孝志教授の地震波伝播シミュレーション
新「地球シミュレータ」へ向けたチューニングによって、
これまでの約3倍という優れた計算性能を達成した。

指標のうちの2指標（「多重負荷時のメモリアクセス速度」と「高速フーリエ変換の総合性能」の2指標）で、それぞれ第3位を受賞しました。Top500は、単純な行列計算によるランク付けで、第1位であるオークリッジのコンピュータは、「地球シミュレータ」の14倍以上速いことになっています。しかしながら、フーリエ変換のような、実際の計算にも用いられるプログラムを動かしたら、その性能の差は1.6倍もないことが実証されたわけです。「地球シミュレータ」は、実際のシミュレーションプログラムの実効性能で比較すれば、いまでも世界でトップクラスのスーパーコンピュータであると、私は考えています。

—— システムを入れ替えたことで、これまで走らせてきたプログラムの手直しなども必要だったではありませんか。

渡邊 もちろん、手直しが必要です。基本的には同じようなアーキテクチャ（設計仕様）にしたのですが、ADB（Assignable Data Buffer）と呼ばれるメモリアクセスを向上させるベクトルデータ・バッファリング機能が新たに追加されるなど、いろいろと以前と違う部分がありますからね。そのため、ユーザーの皆さんには、テストをしながら3か月から半年くらいかけてプログラムを直すといったチューニングをしていただきました。

人間の頭脳がシミュレーション科学の 「質」を変える

—— 2002年に「地球シミュレータ」が誕生したときには、その性能に世界中が驚き、「地球シミュレータ」は日本の計算科学の進展に大きく貢献してきましたが、今回の更新によって、シミュレーション科学の新しい進展はあるのでしょうか。

渡邊 初代の「地球シミュレータ」は、当時のスーパーコンピュータの数百倍から1,000倍の計算性能を実現させました。それによって、それまでできなかったシミュレーションが可能になりました。つまり、「量」が「質」を変えたわけです。しかし今回の更新では、量的には2倍から3倍のレベルです。処理能力はもちろん向上していますが、シミュレーション科学の「質」が変わるかといえば、それは無理な話です。シミュレーション科学の世界で新しいものを見たかと思ったら、1次元方向に10倍くらい必要です。3次元で1,000倍、さらに時間方向を加えると1万倍。これくらい進化しなければ



新「地球シミュレータ」は、「HPCチャレンジアワード」クラス1性能測定において2指標で第3位を受賞。2009年11月18日、SC09（高性能計算機・ネットワーク等の国際会議）で授賞式が行われた。

新しいものは見えてこない、それがシミュレーションの世界です。では、今回の更新は意味がないのかというと、それは違います。私は、この「地球シミュレータ」によって、新しいシミュレーションの世界を切り拓いていきたいと考えています。今度は「量」ではなく、人間の頭脳によって「質」を変えていくのです。つまり、シミュレーションのやり方を工夫していくことで、新しい世界を見つけ出していく。そうした新しいシミュレーションの手法を開発していただきたいと思います。「量」はそれほど変わらないわけですから、いまままでと同じ手法でやっていたのでは何も変わりません。そこで、知恵を働かせるわけです。今回、規模が大きくなることによって、いろいろと工夫する余地が出てきます。そういう部分が必要出てくるのです。そこからいまままでと違うやり方、新しい手法を、知恵を働かせて生み出してほしいと思います。その工夫を積み重ねていくことによって、やがて「次世代スーパーコンピュータ」のように「量」的な進歩が実現したときに、その工夫が実を結んで、大きく飛躍した新しい世界が見えてくるはずですね。この新しい「地球シミュレータ」は、ある意味では、次の新しいシミュレーションの世界への“準備のためのマシン”といってもよいかもしれません。

—— これまでも、そうした工夫の積み重ねによって、シミュレーション科学は進歩してきたわけですね。

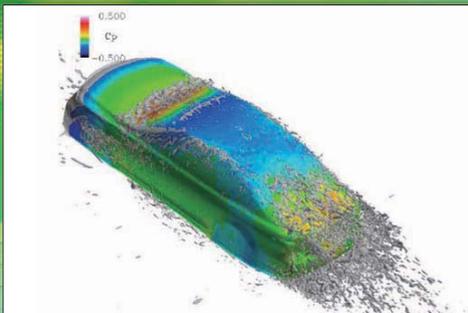
渡邊 そうですね。皆さんはあまりご存じないかもしれませんが、シミュレーション科学というのは、実は日本の“お家芸”でもあるのです。戦後の日本は、ロケットは打ち上げら

■ハードウェア仕様

		地球シミュレータ	新・地球シミュレータ	性能比
CPU	クロック	1GHz	3.2GHz	3.2x
	ベクトル性能	8GF	102.4GF	12.8x
	メモリ転送性能	32GB/s	256GB/s	8x
ノード	CPU数	8	8	1x
	ベクトル性能	64GF	819.2GF	12.8x
	メモリ容量	16GB	128GB	8x
	ノード間転送性能	12.3GB/s x 2	8GB/s x 8 x 2	5.2x
システム全体	ノード数	640	160	1/4x
	演算性能	40TF	131TF	3.2x
	メモリ容量	10TB	20TB	2x
	NWトポロジー	Single-Stage Crossbar Network	Fat-tree Network	—



都市の風況分布(地上7.5m)のシミュレーション例
 全球から都市域まで、目的に合った時空間スケールのシミュレーションが可能で、コードの高精度化や工夫で、環境デザインなど新しい分野への応用も期待される。



車周りの縦渦構造
 「地球シミュレータ産業利用シンポジウム2009」発表資料集「非定常渦構造の特性解明およびそれに基づく抜本的空気抵抗低減技術開発」(トヨタ自動車株式会社)より引用

れないし、大型の望遠鏡や加速器などの観測装置や実験装置もつくれません。そんなときに、実際につくれないならシミュレーションでやってみよう、コンピュータを使って計算でやれるんじゃないか、そんなことから始まっています。いまから見れば、ものすごく小さなマシンでしたが、それでもできることは何かを一生懸命工夫してシミュレーションをやってきたのです。核融合とか宇宙プラズマといった世界、それから流体の世界などでは、かなり早い段階から研究者がシミュレーションに取り組んでいました。それが今日の「地球シミュレータ」につながっているわけです。

—— 私たちにとっては、「地球シミュレータ」の登場によって、シミュレーション科学というものの存在が広く知られるようになった印象があります。

渡邊 そうですね。特に一般の方々に知られるようになったのは、「地球シミュレータ」による地球温暖化のシミュレーションなどが話題になってからかもしれませんね。

無限に広がる「地球シミュレータ」の可能性

—— 新しい「地球シミュレータ」にどのような成果を期待しておられますか。

渡邊 これまでお話しした通り、スーパーコンピュータといえども限界はありますし、そのなかでできる工夫も、それまでの延長線上にあるようなものであれば、数年で終わりが見えてしまいます。しかし、最近のシミュレーション研究のなかに、これまでまったく考えていなかった新しいシミュレーション技術を生み出そうとする動きも、いくつか始まっています。たとえば、これまで単純な物理モデルでパラメタリゼーションとして処理していたものを、もっと正確な第一原理に近づいたものを新しい発想で工夫して、より正確なものを求めていこうとする取り組みなどが、いろいろな分野の研究で進められています。こうした研究の成果には、大いに期待しています。

産業利用についても、最近、その応用範囲が広がり、材料関係、輸送機器や産業機器などのものづくり関係だけでなく、医薬品関係などで、さまざまな成果が出始めています。実は、こうした産業利用を積極的に進めていくなかで、私たちも一

緒に経験を積みながら、いずれは海洋研究開発機構内部での経験が生かせるのではないかと考えています。たとえば、海洋工学センターと連携して、次世代の潜水調査船の製作にシミュレーションを活用するというようなことも可能です。もちろん、ものづくりは最後は実機でやるわけですが、そこに至るまでのさまざまな過程にシミュレーションを取り入れるのは、非常に有効ではないかと思えます。また、情報科学とあまり縁がなかった他の領域の研究者たちからも、「地球シミュレータ」を使ってこんな研究ができなだろうか、そのためにはどんな手法でやったらいいだろうかといった相談もいくつか受けています。これまでシミュレーションなんて考えてもみなかった分野で、そうした動きが出始めているのは、とても楽しみです。

—— これまでのシミュレーション科学の枠にとらわれない、まったく新しい動きが出始めているのですね。

渡邊 実は、私にはこれからぜひとも取り組んでみたい夢があります。それは“あいまいなシミュレーション”です。経済とか、ゲノムなどもそうですが、データはたくさんあるけれど、規則・法則が分からない、こういったもののシミュレーションをやりたいのです。普通はシミュレーションといったら、法則が分かっているわけです。その方程式を計算機を使って解いていく、それがシミュレーションです。でも、そうではなくて、データはたくさんあって、大体こんな傾向にあることは分かっているけれど、そうでない場合もある。そんなあいまいなシミュレーションに取り組んで、完成させたいと思っているんです(笑)。

—— シミュレーションの可能性は、まだまだ広がっていくのですね。

渡邊 はい。まだまだこれから広がっていくでしょう。そして、そのために「地球シミュレータ」にできることは、本当にたくさんあると思います。 BE

※ベクトル型とスカラ型…専用に開発されたCPU(中央演算処理装置)を搭載するベクトル機は、一つの命令で連続的に複数の処理を行うことが可能で、膨大な量のデータを扱うシミュレーションに有利とされる。スカラ機はパソコンなどの汎用コンピュータに使われているCPUで構成され、データを順次処理していくため、ランダムなデータアクセスを求められる計算に適しているといわれる。こうした仕組みから、ベクトル型は多くの人を途切れなく通ぶエスカレーターに、スカラ型は一人乗りエレベーターに例えられる。

地球シミュレータの産業利用

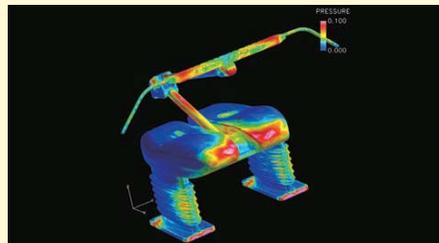
大規模なデータ処理で企業の研究開発にも威力を発揮

取材協力: 新宮 哲 グループリダー
 地球シミュレータセンター シミュレーション応用研究開発プログラム
 シミュレーション応用研究グループ

「地球シミュレータ」はもともと地球の気候変動や内部変動など地球科学分野におけるシミュレーション研究用に開発されたスーパーコンピュータであるため、専用計算機であると思われることがある。しかし、「地球シミュレータ」は汎用的なベクトル処理型のスーパーコンピュータをベースに開発されたもので、さまざまな用途に利用することが可能である。運用を開始した当初から、先進創出分野として、材料系、バイオ系のシミュレーションにも門戸を開き、航空機や自動車産業との共同研究も進めてきた。一言で産業利用といっても、扱う内容は企業によって異なる。新製品の開発に直結するようなものもあれば、すぐに製品には結びつかないが新しいものづくりのヒントが得られるような基礎研究に近いものまでさまざまな取り組みがなされている。

たとえばJR東日本は、大規模乱流数値シミュレーションを用いて、新幹線の高速化に重要な空力騒音(風切り音)の解析に取り組んでいる。車間部の解析では、「地球シミュレータ」を使うことで、1億5000万点の格子点の計算が可能となり、従来の計算機よりも、微細な乱流の渦まで解像できるようにした。その結果、2500万点の計算では解析できなかった高周波の音まで予測が可能になった。また、より複雑な形状を有するパンタグラフを対象とした解析も行っている(下図)。乱流の数値シミュレーションにより、従来の実験計測では測定が困難であった詳細な音源位置を把握することが可能となった。このように、乱流のシミュレーションは、基礎研究のみならず複雑な製品形状を対象にした産業利用も可能な状況となっており、得られた知見は今後の低騒音化技術の開発に生かされていくものと期待している。

また、新日本製鐵は鉄鉱石から銑鉄をつくる際に高炉

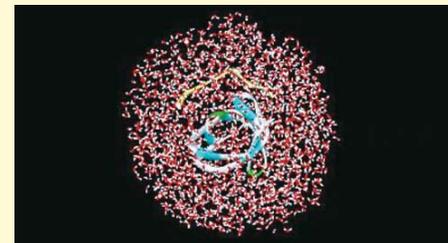


パンタグラフ形状の表面圧力変動分布
 平成20年度「地球シミュレータ産業戦略利用プログラム」利用成果報告書
 「数値シミュレーションによる次世代高速新幹線騒音(パンタグラフ)の開発」
 (東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター)より引用

のなかで何が起きているのかを探るために「地球シミュレータ」を利用した。銑鉄をつくる時、高炉のなかにコークスと鉄鉱石を交互に入れていく。高炉に熱風をかけてこの両者を溶かしていく過程で何が起きているのか1,000℃を超える高温のため測定が困難であったが、シミュレーションで内部の様子が分かるようになってきた。高炉に入れるコークスの量を減らすことができれば発生する二酸化炭素の量を減らすことができるが、減らしすぎると温度が下がって反応が止まってしまう。効率を落とさずにギリギリのところを探るには、数値シミュレーションによる手法に期待がかけられている。

その他にも、自動車の抜本的な空気抵抗低減技術を開発しているトヨタ自動車、新しい薬の候補化合物をシミュレーションで見つけるための基盤技術を開発しているキッセイ薬品工業、高性能なエコタイヤの開発を目指して、高分子のゴムとフィラー(カーボンなど)の「補強効果」を分子レベルで解明しようとしている住友ゴムなどさまざまな取り組みがある。「地球シミュレータ」産業戦略利用プログラムは成果公開が原則となっているが、先端的な技術開発を行う場合には成果を非公開にしたい場合もある。そのような要望に応じて、2007年から企業が利用量に応じて運用経費を全額負担する代わりに成果を専有できる制度も実施している。また、2009年度からは成果公開であっても3年以上の利用については運用経費の一部負担が必要となっている。

産業界の製品開発において数値シミュレーションは、欠かせないものとなっており、直接的な製品開発への貢献だけでなく、設計への重要な指針を与えたり、試作品を減らすといった点でも重要性が増している。先進的な製品開発に向けて、できるだけ多くの企業に「地球シミュレータ」を活用して成果を挙げてもらいたい。



SH3タンパクとリガンドペプチド複合体の周囲10Åに水分子1532個を配置させてFMO計算を行った時の例
 「地球シミュレータ産業利用シンポジウム2009」発表資料集
 「フラグメント分子軌道(FMO)法の創案における分子シミュレーションの応用」
 (キッセイ薬品工業株式会社)より引用

世界一のスーパーコンピュータは どのようにして実現したか

取材協力：平野 哲
海洋研究開発機構 情報技術審議役

2002年2月末、世界最高速の演算性能を持つスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が完成した。性能番付に用いられる指標「Linpackベンチマークテスト」で、それまで最高速を誇っていた米国「ASCI Whiteシステム」の約5倍という驚異的な性能を發揮した「地球シミュレータ」は、一躍世界から注目された。世界中を驚かせ、その後も2年半にわたって世界一の座を守った「地球シミュレータ」は、どのようにして誕生したのか。

超高速スーパーコンピュータ実現への道のり

日本でスーパーコンピュータが開発されるようになったのは、1980年代以降といわれる。その先駆けとなったのは、1977年に航空宇宙技術研究所（2003年に現在の宇宙航空研究開発機構JAXAに統合）に設置された「FACOM230-75APU」（計算性能は最大22メガフロップス）だった。航空宇宙技術研究所では、航空機開発に欠かせない流体力学解析に利用するため、早くからスーパーコンピュータの導入に力を入れ、数値シミュレーションの開発を進めていた。80年代に入るとNEC、富士通、日立といった企業が次々に優れたスーパーコンピュータを開発するようになり、日本の技術は米国と肩を並べるまでに成長した。そして、1993年に航空宇宙技術研究所の「数値風洞（Numerical Wind Tunnel）」が完成。世界最高性能（124ギガフロップス）を記録して、「Top500」で1位に輝いた。

「FACOM230-75APU」の時代から「数値風洞」に到るまで、航空宇宙技術研究所でスーパーコンピュータ開発に尽力してきたのが三好甫氏だった。スーパーコンピュータを活用した科学研究の重要性にいち早く着目した三好氏は、利用する立場からだけでなく、ハードウェアについても熱

心に学び、アーキテクチャから半導体そのものについてまで、技術者と対等に話ができるほどに熟知していた。「数値風洞」完成の年に同研究所を退職した三好氏だったが、胸中には、すでに「数値風洞」を超えるスーパーコンピュータ開発への強い思いがあった。それが、後の「地球シミュレータ」だった。

現状の1,000倍の性能をめざして

国家プロジェクトとして「地球シミュレータ計画」が動き出したのは、1997年4月のことだ。その2年前、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が第二次評価報告書において地球温暖化を確認したことを発表するなど、当時、環境変動が人類にとって重大な問題であることが広く認識され始めていた。多様なプロセスが複雑に絡み合って地球規模でおきる気候変動や地殻変動などの現象を解明し、将来を予測するためには高精度な計算シミュレーションという研究手法を確立することが求められていた。そのためのインフラ整備として「地球シミュレータ」の開発プロジェクトがスタートした。計画推進のため、宇宙開発事業団（現在のJAXA）と、動力炉・核燃料開発事業団（現在の日本原



「地球シミュレータ」施設
海洋科学技術センター（現・海洋研究開発機構）横浜研究所に設置された「地球シミュレータ」施設の全景。機器が設置されている地球シミュレータ棟（右）は約50m×65m。左の建物は研究棟。



地球シミュレータ研究開発センター長を務めた故・三好甫氏。「地球シミュレータ」誕生に心血を注いだ。



計算機フロアの床下スペースに敷設された各ノード間を接続する大量のネットワークケーブル。総本数8万3,200本、総延長約2,400kmに及ぶ。



プロセッサボード（冷却器を取り外している）。中心の黒い部分が2cm×2cmに収められたベクトルプロセッサ。1チップで8ギガバイトの演算処理性能を持つ。

子力研究開発機構）の2法人によって、地球シミュレータ研究開発センターが設立され、センター長には三好氏が着任した。1999年からは、海洋科学技術センター（現在の海洋研究開発機構）が計画に参画し、宇宙開発事業団、日本原子力研究所（現在の日本原子力研究開発機構）の3法人により「地球シミュレータ」の製作が進められた。そして、完成後の運用は海洋科学技術センターが一元的に行うことに決まった。

より高精度な気候シミュレーションを実現するためには、現状のスーパーコンピュータの約1,000倍の性能が必要——「地球シミュレータ」に要求された開発目標は、途方もなく高いものだった。そのころ使用されていたスーパーコンピュータの実効性能は、4~6ギガフロップス。研究者のニーズに応えるためには、実効性能5テラフロップスを実現することが要求された。

これを達成するため、「地球シミュレータ」には、ベクトルプロセッサを要素計算機として、これを高速のネットワークでつなぎ、ひとつの巨大な計算システムとして機能する並列計算機が採用されることになった。計算機（ノード）の数は640台、各ノードは、ピーク性能8ギガフロップスのベクトルプロセッサ8個が16ギガバイトの主記憶装置を共有する、共有メモリ型計算機となっている。合計5,120個のプロセッサでピーク性能40テラフロップスを実現させて、実効性能5テラフロップスを達成しようという計画だ。

難関を乗り越えて「地球シミュレータ」完成

計画を実現させるには、数多くの技術的な課題をクリアしなければならなかった。技術開発の大きな課題のひとつは、プロセッサの1チップ化だった。受注メーカーが当時開発していた8ギガフロップスのベクトルプロセッサは、約25cm角のボードにLSIが32チップ載ったものだった。これを約2cm角の1チップ（約5000万トランジスタ）に収め、そこに約5,000ピンを実装しようというのだ。そのためには、配線も0.15ミクロンという細さが必要だった。これは東京

ドームのグラウンドに幅1mmの配線を行うに匹敵する。プロセッサ構成の徹底的な見直しによってスリム化を図り、最後の数カ月は技術者らが24時間体制で開発に取り組み、ようやく1チップ化に成功した。これにより、設置面積は約50分の1、消費電力も約20分の1という飛躍的な進捗がなげられた。このほかにも基板の多層化による配線収容性の改善、プロセッサの高発熱に対応するための高性能な冷却技術の開発、ノード内でプロセッサとメモリーをつなぐ約2万本のケーブルによる高速信号接続など、さまざまな課題を乗り越え、「地球シミュレータ」は完成した。

ハードウェアの技術開発とともに、ソフトウェアの開発にも力が入れられた。どれほど高性能なスーパーコンピュータがつくられても、その性能を十分に發揮させるための優れたソフトウェア開発が伴わなければ成果は生まれない。「地球シミュレータ」が運用開始から優れた性能を發揮できたのは、最適化された優秀なソフトウェア開発が実を結んだ結果といえる。

「地球シミュレータ」が世界最高速を記録したことを1面で報じた米国・ニューヨークタイムズ紙は、その驚きを「コンピュータニク・ショック」という言葉で表した。1957年に、ソ連が人類初の人工衛星「スプートニク1号」打ち上げに成功したときに米国が受けたショックと危機感（スプートニク・ショック）に、勝るとも劣らない大きな出来事であったことを表現したのだった。その後、米国エネルギー省長官は、巨費を投じた国家プロジェクトによってスーパーコンピュータ技術開発に力を入れ、世界一の座を取り戻すことを明らかにした。

世界最速のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」は、この計画推進に全力を注いだ三好氏の情熱、その情熱に応えた多くの関係者の創意工夫と努力のたまものといえるだろう。だが、「地球シミュレータ」の開発計画が動き出すころには、すでにそれを超える次のスーパーコンピュータの構想を練っていたといわれる三好氏は、「地球シミュレータ」の完成を目前にした2001年11月に他界された。

AQUARIUM GALLERY

アクアワールド茨城県大洗水族館

“多様な一族”へのこだわり ——サメの飼育種数日本——

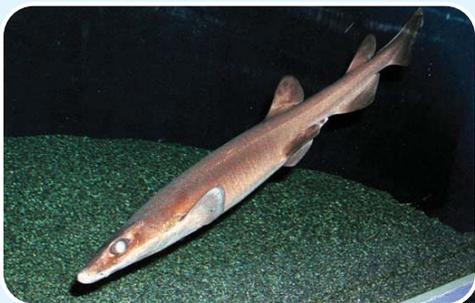
取材協力：望月利彦・副参事 齋藤伸輔・魚類展示課主任



大洗の海の生物を紹介する大水槽にも、サメやエイの仲間が数多く展示されている。



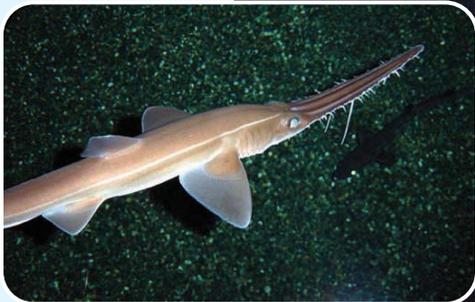
アカシュモクザメ。英名「ハンマーヘッド」の名の通り、頭部が金づち状で左右の端に目がある。



イモリザメ。飼育がとても難しいことで知られる。日本における飼育日数記録を更新中。



シノノメサカタザメ。実はサメではなくエイの仲間。強いあごで貝やカニを殺すことがみられる。



ノコギリザメ。長く伸びた吻の上あごにトゲのような歯が並ぶ様子はまさにノコギリ。



自然体験塾「サメのからだの秘密」では、実際にクロヘリメジロやトラザメの解剖を参加者とともに行った。

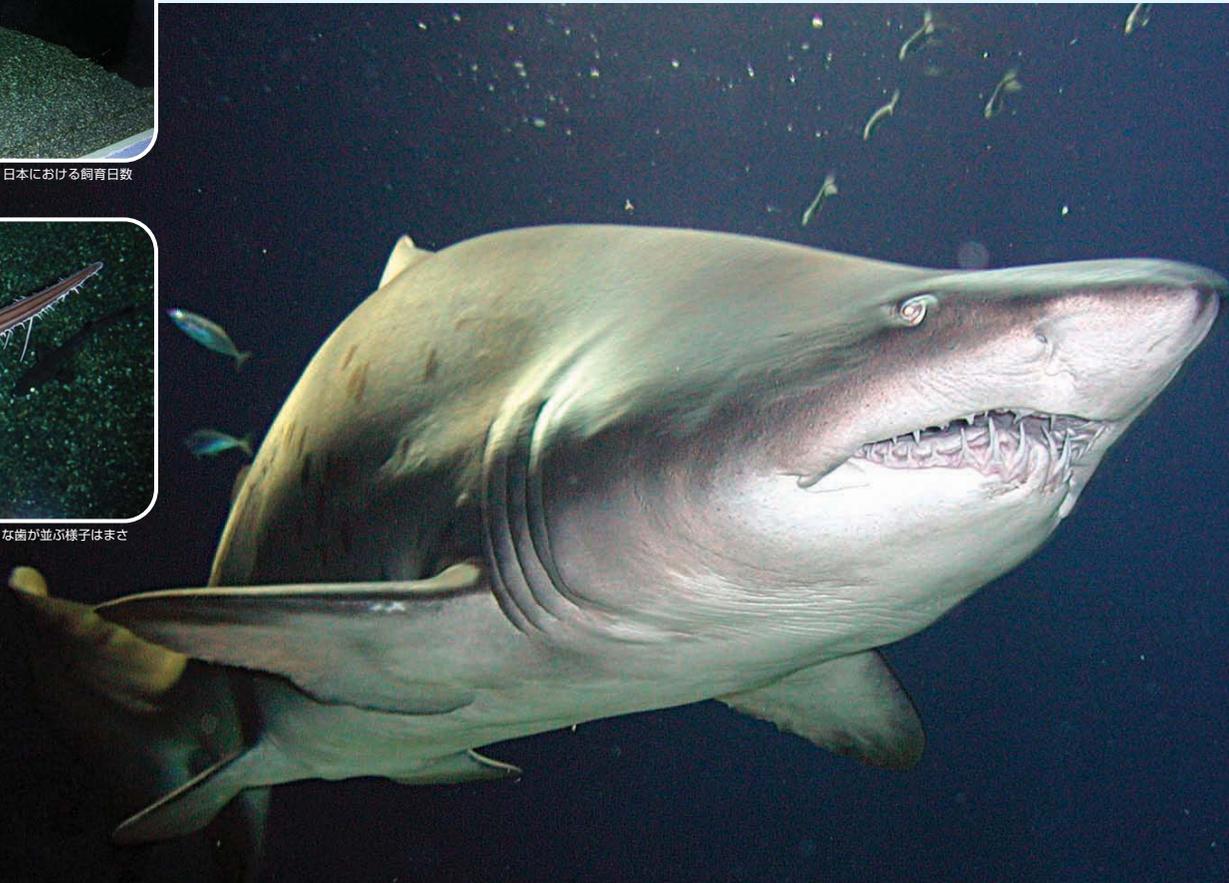
サメと聞くと、多くの人が「人さえも襲う凶暴で恐ろしい生き物」を思い浮かべる。確かに、ホホジロザメなど人に危害を加える危険なサメもいるが、多くは魚やイカ、オキアミのようなプランクトンを餌としている。危険でないものの方が圧倒的に多い。

サメの仲間は、熱帯から寒帯まで世界中に400～500種類いるといわれる。ジンベエザメのように十数mにまで成長するものから、成長しても十数cmという小さなものまでさまざま。生息海域も、種類によって沿岸から外洋まで、浅海域から深海まで幅広く分布している。こうした姿かたちも生き方も多様なサメにこだわっているのが、アクアワールド茨城県大洗水族館だ。現在、57種・約400匹のサメを飼育し、そのうちの48種・約250匹を展示している(2009年12月現在)。日本の水族館では最多の飼育種数を誇る。体長約3m、迫力ある姿が人気のシロワニをはじめ、飼育が難しいイモリザメやノコギリザメなど、珍しいサメも数多い。「サメについては、まだ分からないことがたくさんあります。遊泳性のサメは泳ぎ続けていないと呼吸ができず、水族館に運ぶことも難しい。また、与える餌を食べないなど、飼育が困難なサメはまだ数多くいます。こうしたサメの飼育や繁殖にチャレンジし、サメ

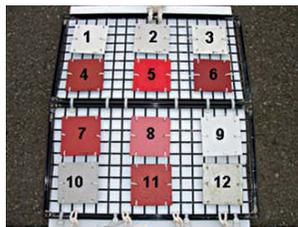
の生態について理解を深めていきたい」と同水族館の望月利彦さんはいう。

サメの生態で、非常に興味深いのが繁殖について。「サメは雄と雌の見分けが簡単にできます。サメは体内受精のために交尾をする珍しい魚です。そのため、雄には交接器があるんです」とサメの飼育を担当する齋藤伸輔さん。そして、受精した後の出産方法も、かたい卵殻に包まれて母体から産み出されるもの(卵生)もあれば、母体内で孵化し、ある程度成長してから産み出されるもの(胎生)もいるという。アクアワールドでは、繁殖に成功しているサンゴトラザメの卵なども展示している。「恐いモノ見たさでサメの展示に興味を持つ来館者も多いと思いますが、実はサメにはもっと面白い点がたくさんあることに気づいてもらい、サメに関心を持ってもらえたらうれしいですね」と齋藤さんは話す。

■ Information：アクアワールド茨城県大洗水族館
〒311-1301 茨城県東茨城郡大洗町磯浜町8252-3
TEL 029-267-5151
URL <http://www.aquaworld-orai.com/>

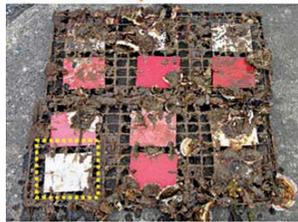


シロワニ。見るからに凶暴な顔つきだが、比較のおとなしい性格で、人を襲うことはないといわれる。



ブイに光合成する藻がついても、呼吸する生物が付着しても、周囲の海水のCO₂濃度が変わってしまうため、生物付着防止塗料を塗る必要がある。むつ研究所の岸壁で実験した結果、10番目の塗料を採用した。

500日後



(むつ研究所の敷地内岸壁にて)



リチウム電池を使用したタイプ(右)、トライトンブイ用に太陽電池を用いたもの(左)



むつ研究所の屋上でリチウムイオン・キャパシタの性能実験中。

続けてはいたのです。

——その後、むつ研究所に入られたのですね。

中野：そうです。「海洋二酸化炭素センサー開発と観測基盤構築」というプロジェクトの公募があったのがきっかけでした。

小型化と省電力への格闘

——一番苦労されたのはどの部分ですか。

中野：いかに小さく安く作るかです。高い機械なら精度よく測れますが、安い機械で精度を保つ必要があります。安く小さい部品の選定に時間がかかりました。さらに、観測は自動ですから一つの制御基板がすべてのデータを取って、まとめて衛星にデータを送ります。その通信系をイーサネットやUSBといったいろいろなものを使わずに一つのシリアル形式にそろえたりして制御システムを簡素化し、製作費を安くする工夫をしました。

初めのころは失敗もありました。最初に実海域試験をした、トライトンブイにつけた試作機は、一年動く予定が一月で止まってしまいました。電力消費を抑えるように省電力の部品をそろえたのですが、制御基板自体が電気を食ってしまったのです。

——省電力がポイントなのですね。

中野：ええ、制御基板もそうですが、

光源も新規開発です。光源はpH指示薬の色の吸収を見るために不可欠なので、消費電力の少ないLEDを使うことにしました。最初はLEDを買ってきて、とりあえずつなげてみましたが、コンパクトでかつ均一な光が出るようにするには、自分の力だけでは限界がありました。そこで、ある機器展に行き業者さんを探しました。大口の仕事でもないし、当面はこの機械以外に使えませんが、何社かに断られました。一社だけ滋賀県の会社が「うちは何でもやりますよ」といってくれて、そこで作ってもらうことができました。

次に苦労したのが、pH指示薬の液が流れる部分です。CO₂濃度の測定原理は、先ほど簡単に述べましたが色のついたpH指示薬をガス交換膜という細かいチューブのなかに流します。チューブの外側は海水で圧倒的に量が多いですから、流れていく間に平衡、つまり外側の海水のCO₂濃度と同じになります。そこでpH指示薬の色を見るとまわりの海水のCO₂濃度を計算できる仕組みです。その液が流れる機構、つまりポンプと液を切り替えるバルブ、光の吸収を見るところ(セル)をどういう形にするかが問題でした。

また、ブイの外側(海水側)にあるポンプやバルブの電線類は電源供給や制御のためブイのなかに入れなければい

けないのですが、ブイに電線を通す穴が多くなると浸水の危険性が高くなります。そこで全部一つにまとめようと考え、アクリルの樹脂にドリルで溝を掘ってそれを流路にし、アクリルのなかにポンプとバルブも組み込んでしまいました。するとジョイントするためのコネクターが要りませんから、流路全体の体積が減り試薬の搭載量が減るので小型化にもつながります。見た目もすっきりして電線の穴も減り、コネクターが外れて測定できなくなる危険もありません。作ってくれそうな会社はWebで探し、名古屋の会社に受けてもらいました。

——いろいろなものづくりの会社に支えられていますね。

中野：こういう装置を一人で作るのは無理な時代になってきています。ただ、日本には必ず技術を持っている会社があるだろうから、あとは自分で探すだけだという考えはありました。制御基板を作った会社はJAMSTECの海洋工学センターの方に紹介してもらいました。そういう人のつながりはとても大事です。

この装置には十数社にかかわって作ってもらっています。こちらの誠意が伝わったから作ってくれたということもあります。当初は、パソコンとつないでバルブやポンプを動かすのも一苦労



ラブラドル海へ向かう船、ハドソン号(ベッドフォード海洋研究所、カナダ)の前で小型漂流ブイを手に。このように一人でも十分扱える。

で、「あれ? 動かない」となる基板屋さんに電話して、連日午前2時過ぎまで付き合ってもらったり。それをやってくれる人がいるから何とか完成することができました。

——電源は電池ですか。

中野：海洋測器で使用実績があるリチウム電池です。日照が期待できないような世界のいろいろな場所で使えるように、充電しない一次電池を考えて採用しましたが、トライトンブイは赤道域にあるので太陽電池を使うタイプも作ってみました。2009年11月には、リチウムイオン・キャパシタという新しい充電電池でも実海域試験を開始しました。2008年に設置したものは鉛蓄電池を使っていたのですが、それよりもずっと性能がよさそうです。新しい技術を取り入れていくのは楽しいことです。

——実際のデビューはどこでしたか。

中野：最初の実海域試験はトライトンブイとの係留ですが、漂流させたのは大西洋の北、グリーンランドとカナダの間のラブラドル海が最初で、その次が南極海です。

ラブラドル海も1年の予定が半年で観測が終わってしまいました。寒い場所では電池容量はおよそ3分の2に減るのですが、その見積もりが甘かったのです。そこで南極海に流したときは、さらに制御基板を省エネタイプにし、電池性能の見積もりを直して、安全策をとって観測は週1日と減らしました。し

かし、結局2009年1月に2台流して、5月末と8月中旬でそれぞれ終わってしまいました。観測終了海域が海水域と重なるので、おそらく海水にぶつかって漂流ブイ自体が壊れてしまったのだと思います。やはり南極は難しいですね。一方、2009年3月に太平洋で流した2個は、12月の時点でまだ機能しています。

必要に迫られれば道は拓ける

——今後の展開は。

中野：残念ながらプロジェクトは2009年度で終わりになりますが、何とか資金を得て続けたいと思います。医療分野などで使われるマイクロマシン技術を使えば、さらに小さく省電力化できるはず。一年前にトライトンブイにつけた装置が2009年11月に回収され、そこからも改良点が見えてきました。今後はさらに改良し、現場実験ももっとやっていきたいです。



いよいよラブラドル海に漂流ブイを降ろす。

この装置が1,000機くらいあれば、観測の空白域をカバーできるのではないかとわれています。いま一番やりたいと思っているのは、アルゴフロートにセンサーを取り付けてCO₂濃度を測ることです。センサーだけになるのでブイ本体は必要なく、当然もっと安くできます。アルゴフロートはいま全世界で3,000本流されています。その3分の1につけるといのはなかなか大変だと思いますが、このあたりがきちんとできないと物質循環や気候変動予測のモデルの精度が上がっていきません。いま生きている人間の仕事として、いまの地球の状態をきちんと記録して後世に残すのは非常に大切だと思います。

——観測や観測装置に興味がある人たちにアドバイスをお願いします。

中野：最初、私には海洋や分析などについての化学の知識しかありませんでしたが、いろいろな技術分野に関する知識は、やっているうちに付きます。一つ得意なものを持ちながら続けていけば、そのうちにそこに「すそ野」が広がってくる。そうしてだんだん太い山になっていくのではないのでしょうか。だからあせることはないと思います。

私は英語がものすごく苦手でした。英語が嫌いだから理系に進んだのに、こんなに英語を使うことになるなんて予想外でした。実際には英語でメールや論文を書いたり話したりしなければいけません。それも何とかすそ野の一部としてできるようになってきた部分です。何か好きで得意なものがあれば、あとは必要に迫られて何とかできます。ですから、好きなことを追い求める姿勢が大事だと思います。



ハドソン号の船内で、船員さんたちと。

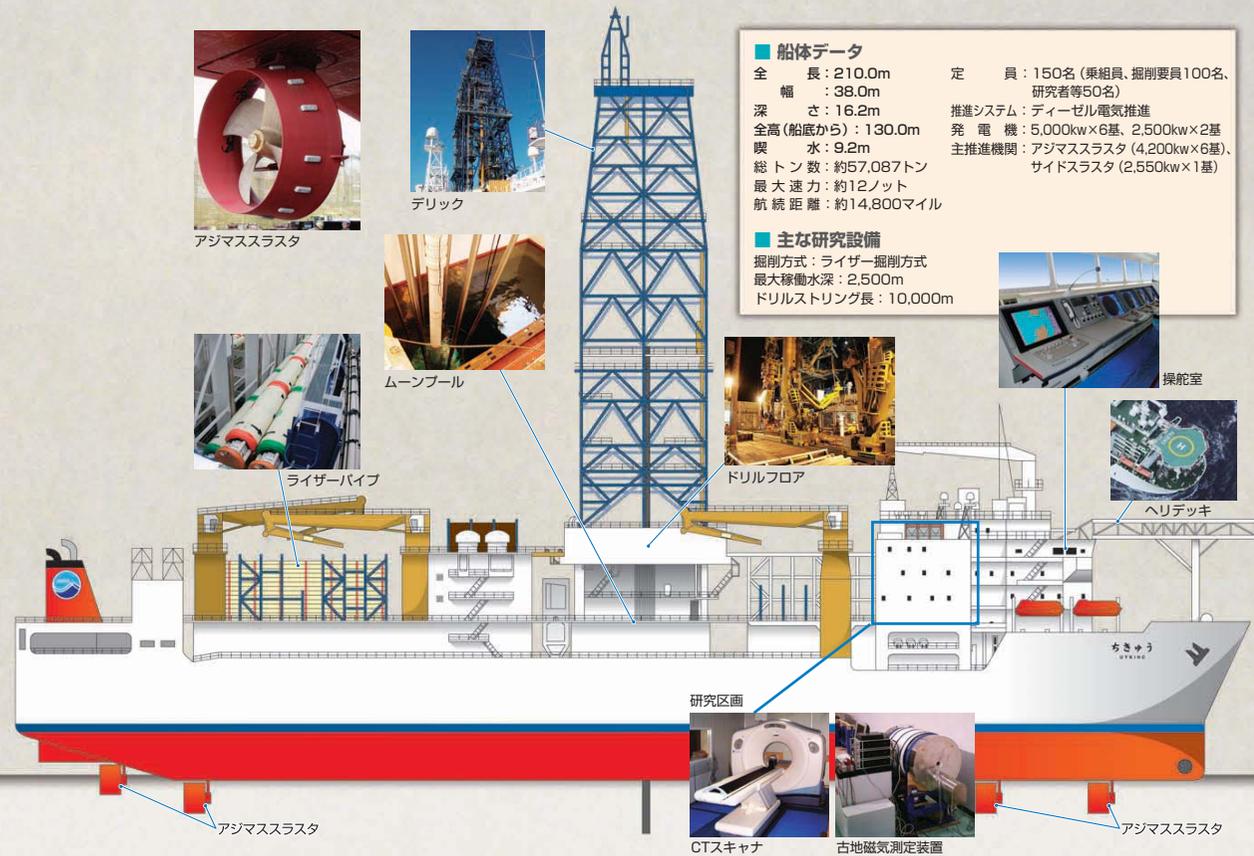
ライザー掘削で海底下7,000mに挑戦
21世紀の科学掘削を牽引する

地球深部探査船 「ちきゅう」

Deep Sea Drilling Vessel CHIKYU



船上の作業の様子。写真左の円筒がライザーパイプ。



■ 船体データ	
全長	210.0m
幅	38.0m
深さ	16.2m
全高(船底から)	130.0m
喫水	9.2m
総トン数	約57,087トン
最大速度	約12ノット
航続距離	約14,800マイル

■ 主な研究設備	
掘削方式	ライザー掘削方式
最大稼働水深	2,500m
ドリルストリング長	10,000m

定員	
乗組員	150名
掘削要員	100名
研究者等	50名

推進システム	
推進システム	ディーゼル電気推進
発電機	5,000kw×6基、2,500kw×2基
主推進機関	アジマススラスト(4,200kw×6基)、サイドスラスト(2,550kw×1基)

新しい地球・生命科学の創成をめざして

「大陸地殻よりも薄い海洋地殻を掘り進めばマントルまで到達できるのではないか」、そんな途方もない科学者たちの夢から始まった科学掘削は、海洋底拡大説の立証、地下生物圏の発見、小惑星衝突が恐竜絶滅に結びつく環境変動を引き起こしたことの証拠となる地層の発見など、これまで数多くの成果を挙げてきた。私たちが暮らす地球表面の現象と地球内部

が非常に密接な関係にあることを、科学掘削は明らかにしてきた。

日本で地球深部探査船(科学掘削船)の建造に向けた取り組みが開始されたのは、1990年代に入ってからだった。海溝型巨大地震のメカニズムを解明し防災に役立てる、深海底に残された古い地層から地球環境変動の歴史を明らかにして将来予測の手がかりにする、生命起源の謎に迫る、新しい有用資源を探索するといった目的を掲げ、技術開発が進められ

た。そして2001年、いよいよ地球深部探査船「ちきゅう」の建造が始まり、2005年に完成。その後は下北半島沖でのシステム統合試験をはじめ、アフリカ・ケニア沖、オーストラリア沖での海外試験運用が行われた。

2年間の入念な準備を経て、いよいよ世界への入念な準備を経て、いよいよ世界の国々が参画するIODP(統合国際深海掘削計画)の主力船として科学掘削を開始したのは、2007年9月だった。「ちきゅう」が最初に挑んだのは、紀伊半島沖

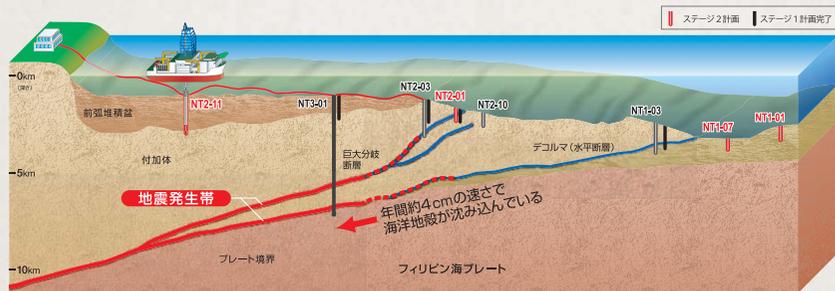
の南海トラフ。ここで長期間にわたって実施される「南海トラフ地震発生帯掘削計画(南海掘削)」は、巨大地震を何度も引き起こしているプレート沈み込み帯で地震断層を掘り抜き、地震発生のメカニズムを明らかにするとともに、長期モニタリングのための地震観測機器を設置するというものだ。

2009年には、この南海掘削で海洋科学掘削史上初となるライザー掘削が実施され、水深約2,000mの海底から深度1,603.7mの掘削に成功している。

問題があった。「ちきゅう」と海底をライザーパイプで結び、そのなかにドリルパイプを通して掘り進み、掘削孔内もケーシングパイプで固定していくライザー掘削システムを採用することによって、「ちきゅう」は、そうした問題を克服し、より安全に深くまで掘削を行うことを可能にした(右下図)。

このほか「ちきゅう」には、風・波に影響されず船を海上の一点に保つための

優れた船位保持システム(DPS)が搭載されるなど、掘削を安全かつ効率的に行うための最新の技術が備わっている。さらに、船上には掘削によって採取されたコア試料などを直ちに分析・研究するための地質学・生物学・化学・物理学など多分野の最先端研究機器が揃う4階建ての研究区画も用意されている。その充実した設備とスケールは、まさに海上の研究所だ。



南海トラフ地震発生帯掘削計画の概念図。今後行われる「ステージ3」では、地震発生帯を掘り抜く掘削が計画されている。

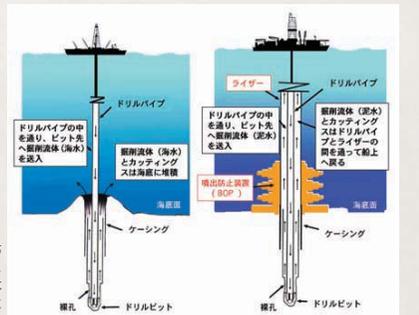
海に浮かぶ研究所

「ちきゅう」は、水面からの高さが121mという巨大なやぐら(デリック)を持つ世界最大の科学掘削船だ。その最も大きな特徴は、科学研究用では初めてのライザー掘削システムを搭載している点だ。これまでのドリルパイプだけで海底を掘り進むライザーレス掘削では掘削孔が崩れやすく、地中に存在する石油やガスによって掘削が制限されるという



採取されたコア試料は、直ちに船内の研究区画に運ばれ、分析が行われる。

従来のライザーレス掘削(左)と「ちきゅう」によるライザー掘削の仕組み。掘削孔をケーシングパイプで固定しながら掘り進むライザー掘削は、安全により深くまで掘削することができる。



海に降る雪 マリンスノー 二酸化炭素の運び屋とその追跡方法

(2009年10月17日 第102回地球情報館公開セミナーより)



海洋工学センター
先端技術研究プログラム 基盤技術研究グループ 技術研究主幹
本多 牧生

ほんだ まさお。1961年、大阪府生まれ。北海道大学水産学部卒業後、同大学院水産化学研究科修士課程を修了し、1986年、海洋研究開発機構に入所。1992年より1994年まで米ウッズホール海洋研究所の駐在員兼在外研究員。2009年より現職。専門は化学海洋学。自動試料採集装置やセンサーを海中に設置し北西部北太平洋の生物活動による二酸化炭素吸収能力の観測研究に従事。博士（地球環境科学）。

私は海中を浮遊する粒子状物質の研究をしています。海の粒子には数十メートルのクジラから魚やプランクトンまで、さまざまなものが含まれますが、私の研究対象は直径1cmにも満たない海中の浮遊物「マリンスノー」とよばれるものです。近年、この小さな粒子が地球温暖化、とりわけ二酸化炭素の吸収に関して非常に大きな役割を果たしていることが分かってきました。世界中の海洋学者が、この小さな「二酸化炭素の運び屋」の役割に注目しています。今日はその研究について、お話したいと思います。

海に降る雪、マリンスノーの正体

潜水船やスキューバダイビングで海に潜ると、地上に降る雪のように上から降ってくる白いものに気づくはず。これはマリンスノーとよばれるもので、命名したのは日本の科学者です。1951年、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の有人潜水調査船「しんかい6500」ができる前、北海道大学が中心となって開発した「くろしお号」という潜水艇に乗船した研究者が名付けたのです。同大学の雪氷学者、中谷宇吉郎教授の研究にあやかっただけともいわれます。以来、マリンスノーという言葉は世界中で用いられるようになりました。

マリンスノーは、植物プランクトンや動物プランクトンなどの生物の死骸や排泄物、陸上からの土砂などが集まった、ちょうど目玉ご飯でつくったおにぎりのような固まりです（図1）。

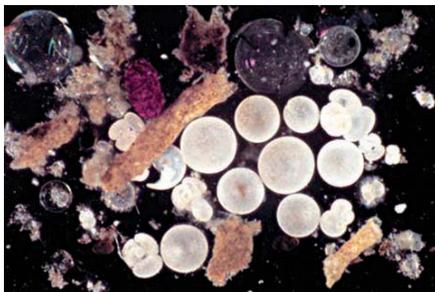


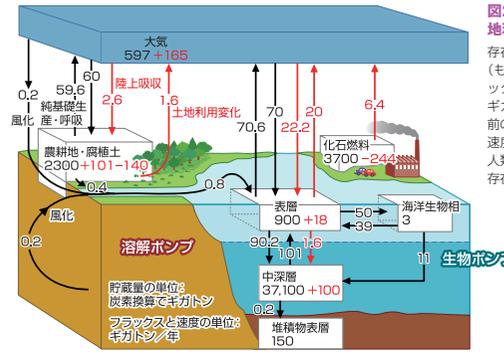
図1 マリンスノー
マリンスノーの顕微鏡写真

(Honjo, 1997. ウッズホール海洋研究所発行「OCEANUS」フォトギャラリーより引用)

その構成成分は海域によっても異なりますが、主成分は大きく4つからなります。生物起源である有機物、炭酸カルシウム、生物起源のケイ酸塩（オパール）、そして陸上由来の粘土鉱物です。主成分である生物の死骸や排泄物は、いずれも植物プランクトンが二酸化炭素（CO₂）を使って生産した有機物（炭素化合物）や、それを食べた動物プランクトンの残骸です。そして、このマリンスノーは海洋生物の貴重なエサとなる一方で、地球温暖化の原因といわれる大気中のCO₂の制御に大いにかかわっているのです。

地球温暖化で海洋の果たす役割

マリンスノーのお話をする前に、地球温暖化問題について整理しておきます。地球の気温は、18世紀に起きた産業革命以降、急激に上昇しています。IPCC



(IPCC AR4, 2007. Sarmiento and Gruber, 2006の図をもとに作成)

(気候変動に関する政府間パネル)は、地球の気温は20世紀の100年間で平均0.7℃上昇し、2100年までに1.5～4℃上昇するかもしれないと発表しています。

気温が上がれば海水温も上昇します。これまでの研究によると、過去50年で表層から水深3,000mまでの海水温度は平均で約0.037℃上昇したと報告されています。数字としてはわずかですが、それだけの量の海水を0.037℃温めるのに必要な熱量は、気温をなんと35℃(!)も上げる熱量に相当します。つまり、海のおかげで気温の上昇は抑えられているのです。一方、水温の上昇は海水を膨張させ、海面上昇を引き起こしています。このように、地球温暖化に伴う極地の氷の減少、サンゴの白化、海面の上昇、異常気象の増加などさまざまな地球環境の変化と人類への影響が心配されているのです。

CO₂急増の解明が温暖化を解く鍵

地球温暖化の主な原因は大気中のCO₂の増加だといわれています。大気中CO₂濃度の、精度の高い観測がハワイ島で始まった1958年から現在までの変化を見ると、1年間に平均約1.5ppmという急激な速さで増加し、産業革命前に約280ppmだった大気中のCO₂濃度は現在では380ppmを超えています。これを地球の気温上昇のグラフと重ねてみると非常によく一致します。

では、CO₂が増えるとなぜ気温が上昇するのでしょうか。地球には常に太陽放射が降り注いでいます。これは大気を通してまず地表を温め、次に赤外線となって宇宙に戻ります。赤外線は、酸素や窒

図2 1990年代における地球上のCO₂循環過程
存在量は炭素換算でギガトン(もしくは10億トン)。フラックスや速度は年間あたりのギガトン。黒字は産業革命以前の自然のCO₂存在量と循環速度で赤字は産業革命以降の人類活動の影響を受けたCO₂存在量の増減と循環速度。

変化速度は、水期における変化速度の約500倍に相当します。さらに、人類が今後どの程度CO₂を放出していくのかも不明であり、大気CO₂濃度と地球気温変化の正確な予想は困難なものとなっています。海洋の深層水大循環を「ベルトコンベア」にたとえたことで知られる、アメリカの地球科学者ブロッカー博士は「人類は地球規模の実験をしている」と現状を皮肉っています。

海が吸収するCO₂量は人間が排出する量の約10倍

人間活動によるCO₂の排出量は、1990年代の平均値で64億トン(炭素換算)。うち32億トンは大気に残存し、残りの22億トンは海洋、10億トンは森林が吸収しているとまとめられました(図2)。ただし海洋と森林の吸収量の見積もりには50%近い誤差が含まれているため、その数値をより正確にするために私たちは炭素循環の仕組みを研究しているのです。

CO₂が海洋に吸収される仕組みは大きく2つあります。ひとつは「溶解ポンプ」。これは、大気中のCO₂が海面から海水に溶けて、海水の循環によって深海まで運ばれる仕組みです。そして、もうひとつが「生物ポンプ」です。

「生物ポンプ」は、海洋表層で植物プランクトンの光合成によって吸収されたCO₂が、海洋の食物連鎖を経てマリンスノーとなって輸送される仕組みです。植物プランクトンが光合成によって1年間に吸収するCO₂量は約500億トンと見積もられ、人間が出すCO₂量のほぼ10倍になります。そ

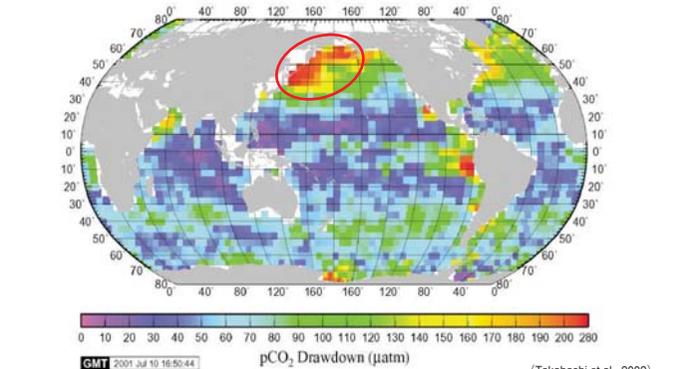


図3 「生物ポンプ」による海中CO₂濃度の低下量
北西部北太平洋(赤丸)では、「生物ポンプ」の活動が活発な海域であることが分かる。

のうち390億トンは分解されて大気に戻るため、残りの110億トンがマリンスノーとして表層(約100m)から海洋内部に運ばれている計算です(図2)。しかし、海底に落ちる途中で食べられたり分解されたりして、水深1,000mまで到達できるマリンスノーは全海洋平均でわずか1%、海底に堆積するのはたった0.1%にすぎません。ただし、マリンスノーの分解速度は、その成分や季節、海域などに左右されます。分解されたマリンスノーは海水に溶け、再び表層へ浮上して植物プランクトンの栄養分となります。

海域や季節によっても異なる海のCO₂輸送システム

ここで気をつけなければいけないのは、大気と海洋のCO₂交換量には海域差や季節変動、年変動があるということです。海域で見ると、北大西洋や南極はCO₂を吸収する海域です。これらの高緯度海域は水温が低いのでCO₂が溶けやすく、さらに冷たく重くなった海水が深海に沈み込んで深層水を形成するため「溶解ポンプ」が活発に働きます。一方、赤道付近はCO₂の放出海域です。赤道域ではCO₂をたっぷり含んだ冷たい中層(亜表層)の海水が湧昇し、表層で温められてCO₂を放出します。しかし、この海域を年変動で見ると、エルニーニョの発生年には海水の湧昇が抑えられるため、CO₂の放出量が低下します。

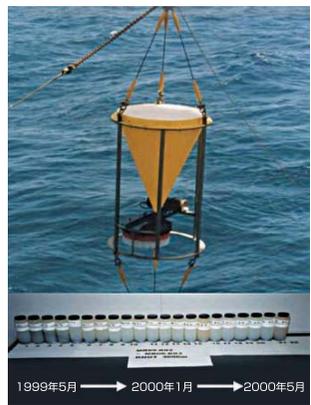


図4 セジメントトラップとマリンスノー
セジメントトラップ(上)。電源、コンピュータ内蔵のケースは耐圧6,000m。下の写真は1999年5月~2000年5月まで時系列的に捕集されたマリンスノー。

季節変動で見ると、たとえば北西部北太平洋では、冬はたくさんのCO₂をもつ亜表層から海水が湧昇するため、CO₂の放出域になります。春になると植物プランクトンが増殖して「生物ポンプ」が活発に働くため、晩春から初秋にかけて今度はCO₂の吸収域になります。そして秋になると表層の海水温が低下し亜表層の海水の湧昇が始まるため、再び翌春までCO₂の放出域になるのです。この海域はCO₂濃度の季節変動の解析から「生物ポンプ」が世界で最も活動している海域であることが分かっています(図3)。

このように、地域や季節による変動の詳細を解明するためには、地球規模で季節を通した海洋調査が必要となります。調査で取得したデータは、スーパーコンピュータのシミュレーションなどにも反映され、地球環境変動の再現や将来予測の研究に役立てられるのです。

マリンスノーを計測する

「生物ポンプ」の季節変動データを得るために、私は北西部北太平洋でマリンスノーを自動的に集めるセジメントトラップ

という装置を使って観測研究を行っています(図4)。セジメントトラップは海洋のCO₂研究の代表的な観測機器です。横から見ると円錐状の大きな漏斗のような形で、この上部からマリンスノーが入り、下の防腐剤入りの捕集カップに溜まります。カップは回転板に21本装着され、あらかじめセットされた時間に自動的に回転・交換して、各季節のマリンスノーを時系列で捕集することができます。これを深さごとに海底から立ち上げたワイヤーロープに取り付けて、ほぼ1年間設置して回収・分析するのです。この装置で調査したマリンスノー中の有機炭素と、水中光測定システムで推定した植物プランクトンの光合成の量(基礎生産力)の季節変動を見ると、6月末から急増しています(図5)。また、各水深で計測した有機炭素量が時間差をもって増加していること、マリンスノーが水深約5,000mに到達するのに、約1カ月半かかることなどが分かり、「生物ポンプ」の働きを、まるごと同時に観測できたことは世界でも希有な観測結果となりました。

一方、海洋の表層付近に自動採水装置

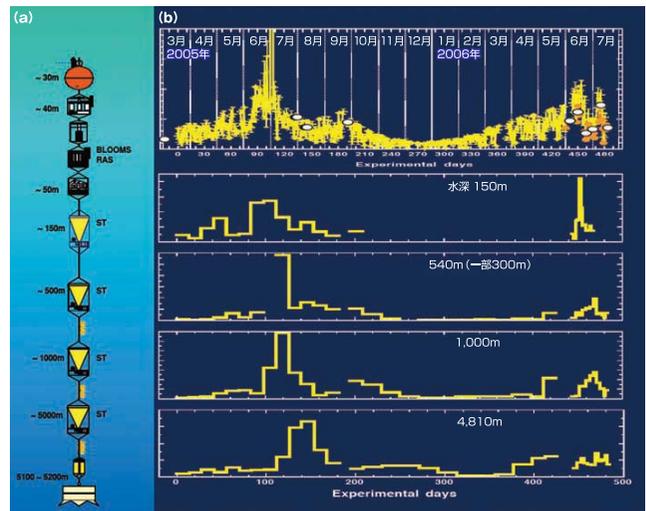


図5 植物プランクトンの基礎生産力の季節変動の観測結果
(a) セジメントトラップ(ST)、水中光測定システム(BLOOMS)、自動採水装置(RAS)を搭載した係留系
(b) 2005年3月~2006年7月における基礎生産力と、水深150m、540m(一部300m)、1,000m、4,810mにおけるマリンスノー(有機炭素)の季節変動。(Honda et al., 2009をもとに作成)
2005年3月に観測を開始。最初は低かった基礎生産力が6月下旬~7月上旬にかけて急増し、10月頃に若干増加し冬に再度低下。翌年より徐々に増加し6月、7月に再び増加している。また、基礎生産力の増加に呼応して、水深150m、540m、1,000m、4,810mの各地点で有機炭素量が時間差で増加する様子が観測された。このことから、海洋表層で固定されたCO₂は、海流に左右されることなく海洋深層へ鉛直的に輸送されていることが明らかになった。

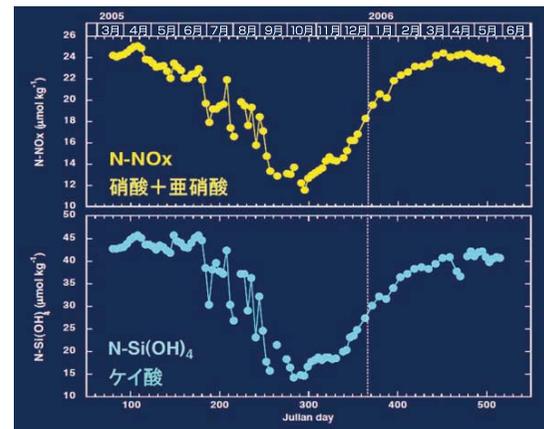


図6 栄養塩の季節変動
2005年3月~2006年6月に自動採水装置で観測された海水中栄養塩(硝酸+亜硝酸、ケイ酸濃度)の季節変動を示す。この自動採水が成功するまで数年を要したが、外洋域における1年半の定期的な海水採集の世界初の観測となった。

を設置してマリンスノーのもととなる栄養塩濃度の季節変動も観測しました。自動採水が成功するまで数年かかりましたが、努力の甲斐あって、外洋域で1年半、4~8日ごとの海水採集に世界で初めて成功しました。観測の結果、栄養塩濃度は春から秋に減少し、秋から翌春に増加すると分かりました(図6)。春から秋は植物プランクトンが非常に増えて栄養塩が消費され、秋から翌春は海洋表層が冷やされて海が攪乱され、亜表層から表層に栄養塩が供給されたためと推定できます。この栄養塩濃度の変化は同時期(6月下旬から7月上旬)のマリンスノーの増加とほぼ同調しています。

同じ植物でも役割が異なる珪藻と円石藻

海洋のCO₂循環を考える上で重要な植物プランクトンは珪藻と円石藻です(図7)。どちらも光合成でCO₂を吸収します。また、珪藻はガラス質のケイ酸塩の殻(オパール)をつくります。珪藻は円石藻より大きく、分泌する粘液でプランクトンの死骸などを絡め取って大粒のマリンスノーとなり、比較的速い速度で沈んでいきます。一方、円石藻は炭酸カルシウムの殻をつくりますが、そのときにCO₂もつって海水中のCO₂濃度を高めます。その結果、せっかく光合成をしてもCO₂吸収効率を下げてしまいます。セジメントトラップによる北西部太平洋域での観測結

果を見る限り、CO₂の吸収においては円石藻より珪藻の方が効率的だと考えられます。しかし、多くの欧米の研究者は、オパールより高密度な炭酸カルシウムの殻をもつ円石藻の方が、深海へ有機炭素を運び(オパール)としての働きが大きいと考えており、議論となっています。いずれにしても、現在、海洋の温暖化、成層化、酸性化が進行中で、それが栄養塩の供給や円石藻の繁殖に大きな変化をもたらす可能性も指摘されています。ですから、海洋の変化が植物プランクトンの種組成をどのように変化させ、海の「生物ポンプ」がどのように変わるのかを観測研究することが今後の課題といえるでしょう。

マリンスノーを“探る”から“撮る”へ

今後の課題として、マリンスノーをセジメントトラップで捕集することなく、現場でその量や質、分布状況を観測する手法の導入も検討しています。たとえば、数年間、定期的かつ自動的に海中を上下して水温、塩分、酸素などを測定するアルゴフロート*に、プランクトンやマリンスノーの量を推定できる濁度計を搭載して季節変動を観測します。北大西洋ではすでに同様の試みが行われていますので、これをぜひ北太平洋でも試してみたいのです。

さらに、マリンスノーを写真撮影して画像を解析し、その鉛直分布や季節変動などを明らかにしようという新たな試みもあります。JAMSTECが開発した深海生



図7 海洋の炭素循環に大きくかかわる珪藻と円石藻
写真提供: ウッスホール海洋研究所 本庄正名 菅教授

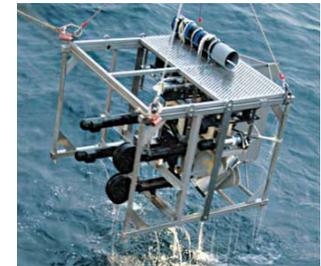


図8 ビジュアルプランクトンレコーダー
写真提供: JAMSTEC Lindsay博士

物追跡調査ロボットシステム「PICASSO(ピカソ)」やビジュアルプランクトンレコーダー「VPR」はクラゲなど中深層に生息する深海生物の観測機器ですが、使ってみたらマリンスノーの映像が圧倒的に多く撮れました(図8)。そこで、その映像データの解析を始めたのです。現在は粒子の数、形状、大きさが解析されていますが、改良を重ねてマリンスノーの微妙な色も解析できるようになれば、マリンスノーの種類まで判別できると考えています。1回の潜航で何十万枚もの画像データが撮れるので、新しい発見が得られるのではないかと期待しています。このように、地球の気候システムには海洋が大きな働きをしており、そこにはほんの数ミリの小さなプランクトンたちの営みも反映されています。地球温暖化という壮大なスケールの難問も、極小の世界の研究を積み重ねることで明らかになっていくのです。

*アルゴフロート…世界中の海の水温・塩分・酸素・栄養塩などの計測を自動的に行う国際科学プロジェクト「ARGO(アルゴ)計画」で使用されている観測フイ。計画にはわが国も参加し、JAMSTECが観測を実施している。現在、世界中の海洋に3,000個のフイが投入されている。

編集後記

新しい「地球シミュレータ」の特集はいかがだったでしょうか？ JAMSTECがなぜ高性能なスーパーコンピュータが必要なのかご理解いただけたと思います。

先日、愛車（話題のT社の！）の車検がありました。昔のイメージで、多分、数日間車を預けて、代車かな？ などと勝手に想像していたのですが、1時間半ほどお茶を飲んでいる間に終了してしまいました。なんでも、専用のコンピュータを車につなぐと自動的に必要な項目を点検してくれるのです。以前なら、熟練技術者が目視や分解点検する必要があったため、時間がかかり、技術者の確保も大変だったというところでした。この話を聞いて、合点したのは、日本の製造業の競争力低下の原因です。コンピュータチップを内蔵するデジタル家電の分野では、日本のトップの家電メーカーさえも韓国家電メーカーに負け続けています。実は、この分野では後発メーカーも熟練技術者を養成しなくても十分な品質が保証できます。したがって、ICなどの部品さえ入手できれば、完成後の難しい調整などが不要で大量生産が簡単です。ですから、以前は日本の強みとされていた熟練技術者の差が性能の差にならず、どこで作っても同じものが作れるため、人件費の安いところが勝つことになるのです。

JAMSTECの得意とする海洋観測機器の分野でも、機器の中身はデジタル家電に使われているものと同じものになっています。しかし、それらの周辺をかためる耐圧容器や水圧コネクタ、さまざまなセンサ類は、簡単には生産ができず、作られた後の運用にも多くの工夫と熟練技が要求されるのです。海洋分野の技術者の不足が叫ばれていただいたちますが、今のところ関連会社の優秀な技術者の方々の頑張りによって大きな事故もなく円滑に運用されています。しかし、JAMSTECの誇る「しんかい6500」も建造されてからすでに20年以上たっており、船舶などの機器も徐々に老朽化が目立ってきています。できるなら、熟練技術者がまだ存在するうちに是非新しい機材の建造を望みたいものです。(T.T)

海と地球の情報誌「Blue Earth」 第21巻 第6号 (通巻104号) 2010年1月発行

発行人 他谷康 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部
 編集人 田代省三 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部 広報課
 Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 株式会社ミュージル
 デイレクション 前田和則
 取材・執筆・編集 滝田よしひろ／山崎玲子／荒船良孝／秋谷美也子／柏原羽美
 デザイン 山田浩之／加地寛正

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

「Blue Earth」定期購読のご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/jr/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メールかFAX、はがきに①～⑤を明記の上、下記まで申し込みください。

- ①郵便番号・住所 ②氏名 ③所属機関名(学生の方は学年)
 - ④TEL・FAX・Eメールアドレス ⑤Blue Earthの定期購読申し込み
- *購読には、1冊300円+送料が必要となります。

■支払い方法

お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構指定の銀行口座に振り込みをお願いします(振込手数料をご負担いただきます)。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

■お問い合わせ・申込先

〒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 事業推進部 広報課
 TEL.045-778-5406 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(3-4月号)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/jr/publication/index.html>

*お預かりした個人情報は、「Blue Earth」の発送や確認のご連絡などに利用し、独立行政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/jr/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。

賛助会(寄付)会員名簿 平成22年2月1日現在

独立行政法人海洋研究開発機構の研究機関につきましては、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HII	神戸ペイント株式会社	中国塗料株式会社	株式会社日立製作所
株式会社アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド	広和株式会社	株式会社鶴見精機	株式会社日立プラントテクノロジー
株式会社アイケイエス	国際気象海洋株式会社	株式会社テザック	深田サルベージ建設株式会社
アイウ印刷株式会社	国際警備株式会社	寺崎電気産業株式会社	株式会社フジクラ
株式会社アクト	国際石油開発帝石株式会社	電気事業連合会	富士ゼロックス株式会社
株式会社アサツー ディ・ケイ	国際ビルサービス株式会社	東亜建設工業株式会社	株式会社フジタ
朝日航洋株式会社	五洋建設株式会社	東海交通株式会社	富士通株式会社
アジア海洋株式会社	相模運輸倉庫株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社	富士電機システムズ株式会社
株式会社アルファワークコンサルタンツ	佐世保重工業株式会社	東京海上自動火災保険株式会社	物産不動産株式会社
泉産業株式会社	株式会社サノナス・ヒシノ明昌	東京製綱繊維ロープ株式会社	古河総合設備株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	三建設工業株式会社	東北環境科学サービス株式会社	古河電気工業株式会社
株式会社エス・イー・エイ	株式会社ジーエス・ユアサ テクノロジー	東洋建設株式会社	古野電気株式会社
株式会社NTTデータ	JFEアレック株式会社	株式会社東陽テクニカ	松本徽章株式会社
株式会社NTTデータCCS	財団法人塩業センター	東洋熱工業株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
株式会社NTTファシリティーズ	有限会社システム技研	有限会社長澤工務店	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	シナネ株式会社	株式会社中村鉄工所	株式会社丸川建築設計事務所
株式会社MTS雪氷研究所	清水建設株式会社	西芝電機株式会社	株式会社マルタン
有限会社エルシャンテ追浜	シュルンベルジェ株式会社	西松建設株式会社	株式会社マルトー
株式会社OCC	株式会社商船三井	日油技研工業株式会社	三鈴マシナリー株式会社
沖電気工業株式会社	社団法人信託協会	株式会社日産クリエイティブサービス	三井住友海上火災保険株式会社
株式会社海洋総合研究所	新日鉄エンジニアリング株式会社	ニッスイマリン工業株式会社	三井石油開発株式会社
海洋電子株式会社	新日本海事株式会社	ニッセイ同和損害保険株式会社	三井造船株式会社
株式会社化学分析コンサルタント	須賀工業株式会社	日本SGI株式会社	三菱重工株式会社
鹿島建設株式会社	鈴鹿建設株式会社	日本海洋株式会社	株式会社三菱総合研究所
株式会社川崎造船	スプリングイトサービス株式会社	日本海洋掘削株式会社	株式会社森京井建築事務所
株式会社環境総合テクノス	住友電気工業株式会社	日本海洋計画株式会社	八洲電機株式会社
株式会社関電工	清進電設株式会社	日本海洋事業株式会社	郵船商事株式会社
株式会社キュービック・アイ	石油資源開発株式会社	社団法人日本ガス協会	郵船ナブテック株式会社
キウウェアソリューションズ株式会社	セオリアンドバーンス株式会社	日本興亜損害保険株式会社	ユニバーサル造船株式会社
共立インシュランス・ブローカーズ株式会社	株式会社損害保険ジャパン	日本サルヴェージ株式会社	レコードマネジメントテクノロジー株式会社
共立管財株式会社	第一設備工業株式会社	社団法人日本産業機械工業会	
極東貿易株式会社	大成建設株式会社	日本水産株式会社	
株式会社きんでん	大日本土木株式会社	日本電気株式会社	
株式会社熊谷組	ダイハツディーゼル株式会社	日本ビュレット・バックカード株式会社	
クローバテック株式会社	大陽日酸株式会社	日本マンホール・クレスト株式会社	
株式会社グローバルオーシャンディベロップメント	有限会社田浦中央食品	日本無線株式会社	
京浜急行電鉄株式会社	高砂熱学工業株式会社	日本郵船株式会社	
KDD株式会社	株式会社竹中工務店	株式会社間組	
株式会社ケンウッド	株式会社竹中土木	濱中製鋼工業株式会社	
株式会社構造計画研究所	株式会社地球科学総合研究所	東日本タグボート株式会社	

独立行政法人 海洋研究開発機構の研究機関

横須賀本部 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15
 TEL.046-866-3811(代表)
 横浜研究所 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25
 TEL.045-778-3811(代表)
 むつ研究所 〒035-0022 青森県むつ市大字開根字北開根690番地
 TEL.0175-25-3811(代表)
 高知コア研究所 〒783-8502 高知県南国市物部乙200
 TEL.088-864-6705(代表)

東京事務所 〒105-0003 東京都港区西新橋1丁目2番9号 日比谷セントラルビル6階
 TEL.03-5157-3900(代表)
 国際海洋環境情報センター 〒905-2172 沖縄県名護市豊原224番地3
 TEL.0980-50-0111(代表)
 Washington D.C. Office 1120 20th street, NW, Suite 700,
 Washington, D.C. 20036, USA
 TEL.+1-202-872-0000 FAX.+1-202-872-8300

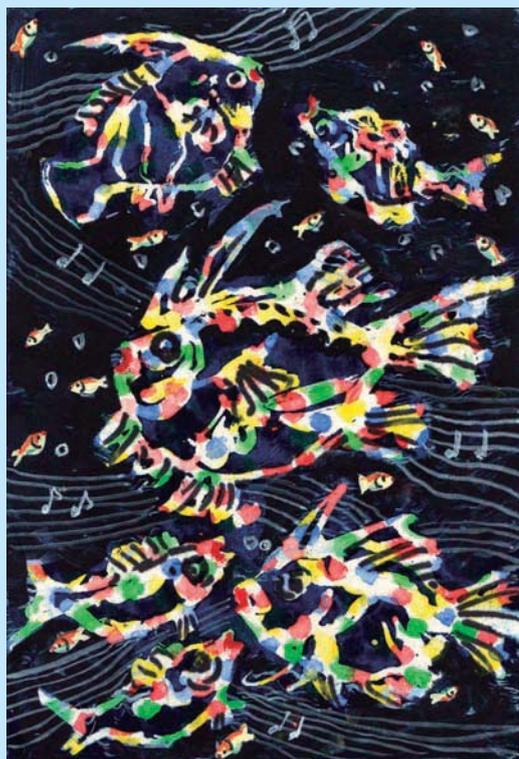
第11回全国児童

「ハガキにかこう
海洋の夢コンテスト」

海洋への関心が高まる今日、未来を担う子どもたちの海洋への夢や憧れ、興味をさらに高めるため、海洋研究開発機構(JAMSTEC)では毎年、全国の児童を対象にした絵画コンテストを、文部科学省などの後援により開催しています(作品募集は、毎年11月下旬~1月末ころ)。第11回コンテストには、全国から2万4280点の応募があり、70点が入賞作品に選ばれました。前号に続き、その入賞作品のなかから、子どもたちの夢あふれる優れた作品を紹介します。



● 絵画部門 ●



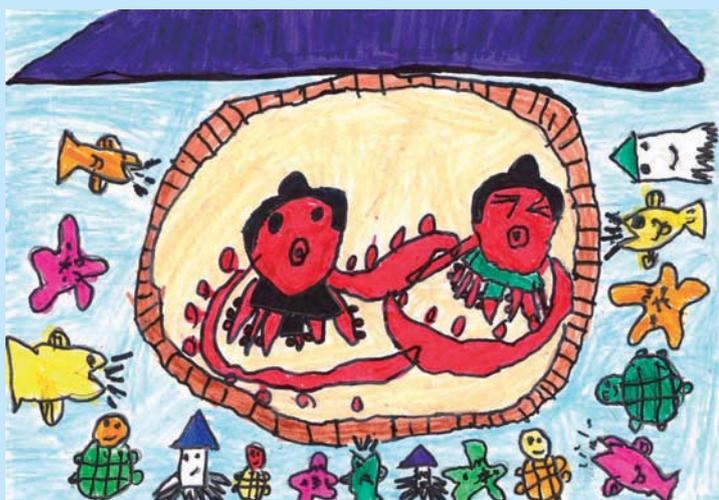
南国市長賞
おしゃれな
魚の女王様登場

稲沢市立大里東小学校6年
井上由美子



CHESS賞
海底探検へ出発!!

旭川市立西御料地小学校5年
阿部舞子



横浜市教育委員会教育長賞

たこのおすもう

むつ市立若生小学校1年
山本 遼太郎

第12回全国児童
「ハガキにかこう
海洋の夢コンテスト」

たくさんのご応募、
ありがとうございました。

第12回「ハガキにかこう海洋の夢コンテスト」は、2010年1月31日をもって募集を締め切り、全国の小学生から2万6000点をこえるご応募をいただきました。心よりお礼申し上げます。選考結果については入賞・入選者の方に直接ご連絡します。また、3月上旬に当機構ホームページ等で発表します。

くわしくはホームページで

<http://www.jamstec.go.jp/j/kids/hagaki/>