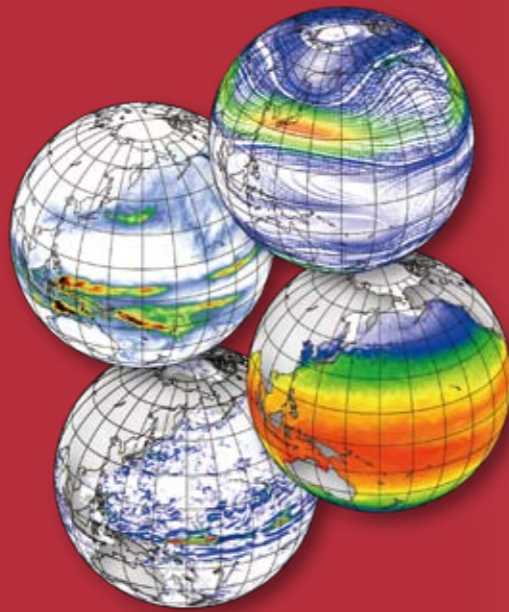


未来を設計する シミュレーション科学

地球シミュレータが拓いた新しい科学の世界



EARTH SIMULATOR



独立行政法人海洋研究開発機構
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
<http://www.jamstec.go.jp/>

地球シミュレータって、 どんなコンピュータ？



1 スパコンとは？

私たちの身近にあるパソコン（パーソナルコンピュータ）は、ゲームを楽しんだり、文書やメールを書いたり、いろいろなことができます。しかし、たとえば巨大な地球や宇宙のしくみを詳しく研究したり、明日の天気や台風の進路を速やかに予測したりするには、きわめて膨大なデータを超高速で計算できるコンピュータが必要となります。こうした目的のために開発された、その時代のトップクラスの計算性能を持つコンピュータをスパコン（スーパーコン

ピュータ）といいます。

家庭や学校にあるパソコンにくらべて、スパコンの計算速度はどれくらい速いのでしょうか。一般のパソコンは、1秒間におよそ100～200億回の計算ができます。一方、現在の「地球シミュレータ」の計算速度は、1秒間に約131兆回です。パソコンを人が歩く速さにたとえると、地球シミュレータの計算速度は、時速数万キロのスピードで宇宙へ飛び出していくロケットほどの速さになります。

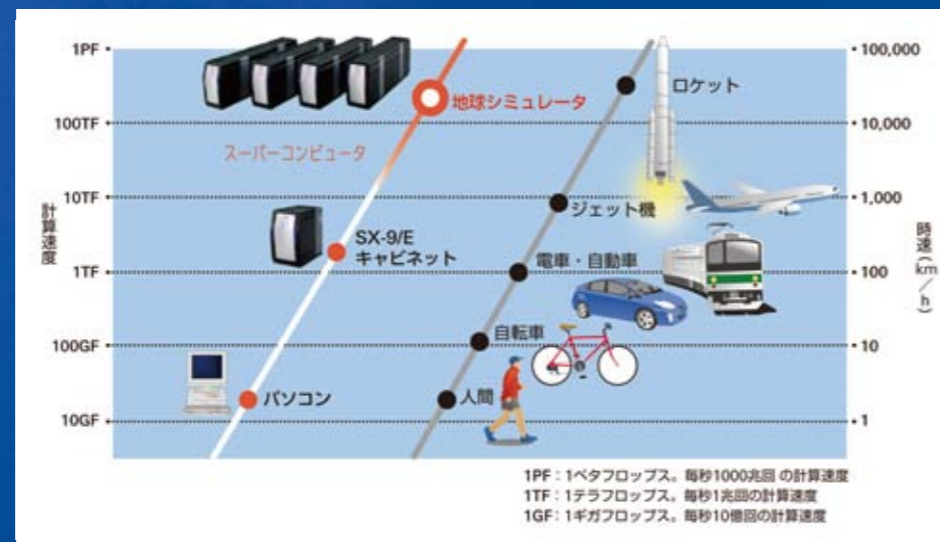


Fig.1 コンピュータの速度比較

2 地球シミュレータとは？

「地球シミュレータ」は、地球環境変動の予測など、人類的課題に挑戦できる「世界最速のスーパーコンピュータ」として、日本が開発しました。巨大なデータをまとめて計算することを得意としているベクトル並列方式を採用した「地球シミュレータ」は、2002年3月に運用をはじめ、それまで世界一だった米国のスーパーコンピュータの約5倍の計算性能（35.86テラフロップス：1秒間に約36兆回）をたたき出し、世界中を驚かせました。

さらに完成から2年半の間、スーパーコンピュータの計算速度ランキング（TOP500）で世界第1位の座を守り続けるとともに、そのすぐれた計算性能を活かして、地球温暖化

をはじめ気候変動予測や地球内部変動などの地球科学分野を中心に、宇宙科学、ナノ物質科学、そしてバイオ科学からモノづくりなどの産業利用と幅広い研究に活用され、さまざまな成果をあげてきました。

そして、2009年3月には、さらなる性能の向上をめざして新システムを導入し、計算性能は3.2倍に向上、使用電力量を約3割低減させました。



Fig.2 TOP500 1位の賞状

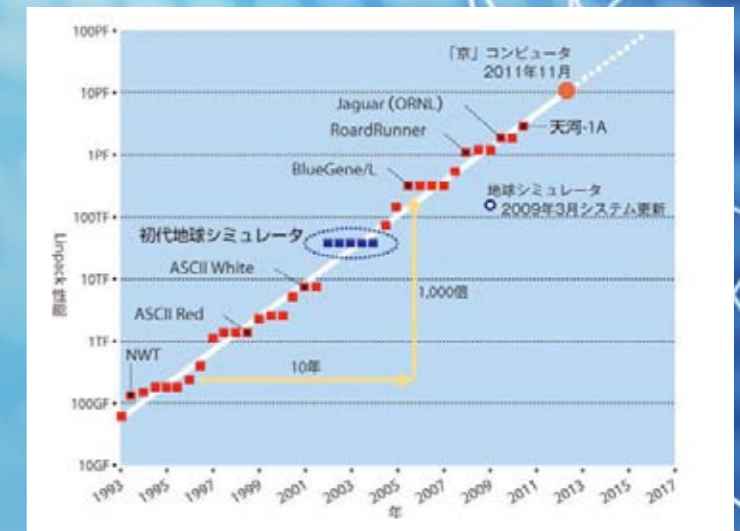


Fig.3 TOP500の歴史



Fig.4 初代地球シミュレータ (稼働期間: 2002年3月 ~ 2009年2月)

シミュレーションは “第3の科学”

3 コンピュータ・シミュレーションとは？

世界各国が、高性能なスーパーコンピュータを、先を争って次々に開発するのはなぜでしょうか。それはコンピュータ・シミュレーションが、社会や産業の発展に欠かせないものとなっているからです。

風の動きや雲の分布といった自然のふるまい、車が衝突したときの力のかかり方、さらには体のなかの血液の流れ——こうした複雑な現象は、自然の基本法則に基づいた数式の組み合わせによってコンピュータ上に表現することができます。コンピュータ・シミュレーションとは、コンピュータのなかに、さまざまな現象を再現し、仮想的に実験や予測を行なうことです。

これまでの科学は、理論の正しさを実験（観測）によって証明したり、実験から理論を導き出したりしてきました。しかし、高性能なスーパーコンピュータの開発とシミュレーション科学の進歩とともに、今日では、幅広い研究分野で理論の実証や実験の再現にシミュレーションが用いられています。そのため、シミュレーションは理論と実験に並ぶ“第3の科学”と呼ばれています。

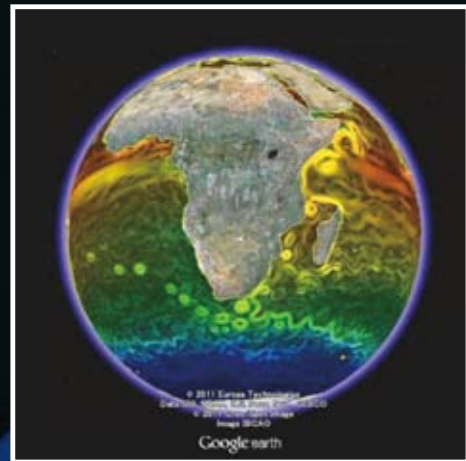


Fig.5 OFES 準全球海洋シミュレーション結果
色は海面水温を表し、色の明るさは流速を表しています。南アフリカ先端に発生する巨大な渦アガスリングや、日本近海の黒潮の速い流れなど、地球上の様々な流れ場が再現されています。
(画像：JAMSTEC)

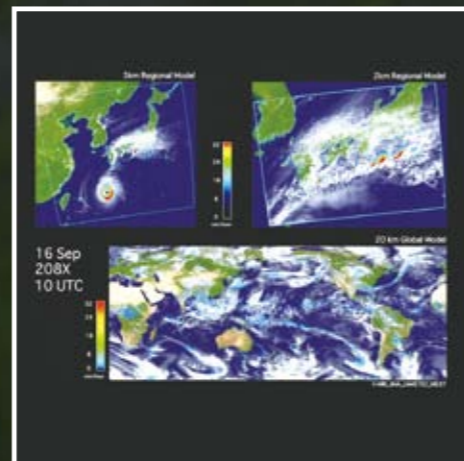


Fig.6 超高解像度全球大気モデルによるシミュレーション
(画像：MRI,JMA,JAMSTEC,MEXT)

4 時間・空間を超えるコンピュータ・シミュレーション

シミュレーションの優れた点は、対象の大きさや時間の延長や短縮といった実験の条件を、自由自在に変えられるところにあります。目に見えないほど小さなナノ物質や細胞のたんぱく質のように、実験が難しいもの、宇宙の銀河同士を衝突させるといった、実験そのものが不可能な壮大な現象でも、シミュレーションなら再現することが可能です。さらに、シミュレーションならではの利点は、時間を超えた過去や未来の現象までも表現できることです。

未来を予測する、つまり未来を科学の対象にすることができる点が、シミュレーションの最大の特徴なのです。

私たちの暮らしに最も身近なシミュレーションとして知られるのが天気予報です。長年にわたって日本各地で観測された気象観測データをはじめ、人工衛星や海外からの情報を含む膨大なデータをスーパーコンピュータに取り込み、シミュレーションによる予測に基づいて天気予報が行われています。また、自動車産業などの「ものづくり」分野でも、シミュレーションは大活躍しています。試作品をつくる代わりにシミュレーションで性能や強度などを調べれば、開発にかかる費用や時間・手間を大幅に減らすことができ、国際競争力のある性能と価格を持った製品の開発にもつながります。

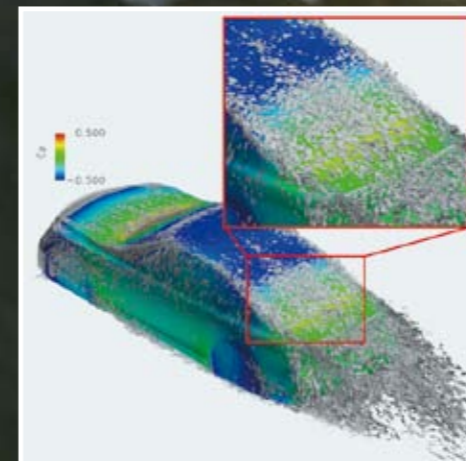


Fig.7 自動車の空シミュレーション (画像：トヨタ自動車)

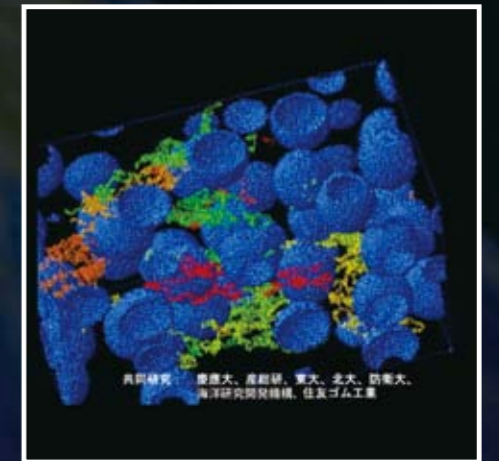


Fig.8 高性能タイヤ開発のための分子構造シミュレーション

Fig.9 (背景) 地球シミュレータで計算した オーロラのシミュレーション
(画像：JAMSTEC)

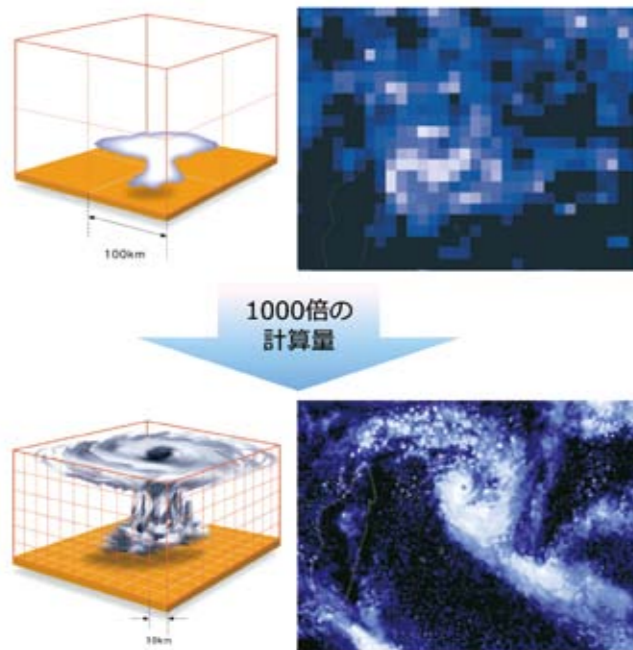
「地球シミュレータ」の なかの地球

5 「地球シミュレータ」のなかの地球

1997年から開発が始まった「地球シミュレータ」に求められた計算能力は、当時の一般的なスーパーコンピュータの約1,000倍という、とてつもなく大きなものでした。地球環境変動の予測をめざして開発された「地球シミュレータ」にとって、1,000倍という目標には確かな理由がありました。気候シミュレーションでは、地球の大気や海洋を小さな領域に区切って計算します。しかし、そのころは計算機の能力の制約から、地球全体を数百kmから50kmという粗い格子間隔で区切った計算しかできませんでした。ここでは、私たちの生活に大きな影響を及ぼす台風

の姿さえもはっきり表現することができません。そこで「地球シミュレータ」を開発して、約1,000倍の計算能力で格子間隔を緯度・経度・鉛直方向にそれぞれ数倍から10倍引き上げた10km程度とし、さらに時間の細かさも10分の1程度にして、より再現性を高めようとしたのです。当時の技術では「とても実現は難しい」といわれていましたが、開発者たちはその限界にチャレンジし、目標を大きく超える性能を持つスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が完成しました。

Fig.10
1997年当時のスーパーコンピュータの100km格子では台風が表現できなかった。



「地球シミュレータ」は10km格子で計算できるので台風を表現できる。

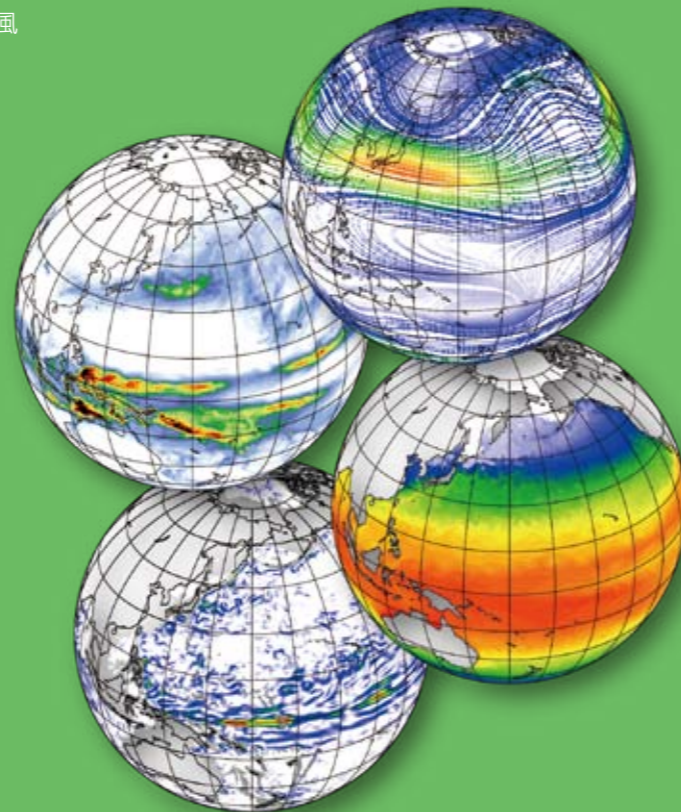


Fig.11 大気海洋結合モデルCFESによる全球シミュレーションの結果（積分19年目2月の月平均値）。上から、250 hPa面での風、降水量、海面水温、1500 m 深での流速。
(画像：JAMSTEC)

6 「地球シミュレータ」がシミュレーション科学の 新時代を開拓

「地球シミュレータ」は、これまでにない高度な計算性能と取り扱えるデータ量の大きさによって、それまでのスーパーコンピュータでは“部分的”にしか扱えなかったさまざまな現象を“丸ごと”扱うことを可能にし、シミュレーション科学の可能性は大きく広がりました。飛躍的に向上した「地球シミュレータ」の性能が、シミュレーション科学の新しい時代の扉を開いたのです。

「地球シミュレータ」の重要な課題である地球環境変動に関しても、地球全体を丸ごと細かく計算することが可能になり、地球規模で起きる気候変動現象を再現したり、未来予測に向けた気候シミュレーション

研究などが大きく進展しました。そのひとつの成果が、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）「第4次評価報告書」（2007年）への貢献です。「地球シミュレータ」を活用した気候変動予測研究は、世界の研究者から高く評価されました。そして、2007年、IPCCはノーベル平和賞を受賞しています。

一方では、気候変動予測に欠かせない観測データをより効率的に集めるために、シミュレーション技術を活用して観測システムを設計するといった、観測とシミュレーションを融合させる取り組みなども行われています。

Fig.12 世界の年平均気温分布の予測シミュレーション（2000～2100年）

カラースケールは、1900年ころを0度として、そこからの年平均気温分布の変化を示しています。気温が上がれば赤い色、下がれば青い色となります。特に2050年前後から、北極域に白く明るい部分が広がります。これは10度以上の気温上昇です。北極海は現在、夏でも広い領域が氷におおわれていますが、このまま温暖化が進めば、今世紀中ごろには、夏に北極海の氷がすべてなくなってしまうという予測もあります。北極海で氷が減少することで、地球が太陽光を反射せずより多くの熱を吸収することになり、更に温暖化が進む可能性があります。

(画像：人・自然・地球共生プロジェクトK1 (AORI/NIES/JAMSTEC/MEXT))



地球とつながる都市の気象

7 階層をつなぐシミュレーション手法の開発

「地球シミュレータ」は、地球全体を丸ごとシミュレーションすることを可能にしました。しかし、それは自然のなかのひとつの階層が扱えるようになっただけで、自然を丸ごと再現できたわけではありません。空を見上げれば、月や太陽があり、その先には太陽系、銀河系といった広大な宇宙が続いています。一方、ミクロの世界を見れば、物質を構成する分子や原子があり、さらには1兆分の1mmという素粒子の世界が広がっています。私たちが暮らす世界には無数の階層が存在し、地球の環境は、壮大なマクロスケールからの影響と、微細なミクロスケールからの影響を受けながら成り立っています。

「地球シミュレータ」で見えてきた雲や降雨のメカ

ニズムも、さらに詳しく理解しようとするれば、雲を形成する水滴がどのように成長していくかといった異なる階層のシミュレーションをいっしょに扱っていくことが必要です。しかし、そのためには膨大な計算が必要で、「地球シミュレータ」がいくつあっても足りません。そこで生まれたのが、「連結階層シミュレーション」という考え方です。これは、階層ごとの現象をそれぞれの階層に適合した計算手法を用いてシミュレーションし、階層間では必要なときに必要な情報のみを交換することで階層を結び付けていくというものです。気候シミュレーション、都市のシミュレーションなど、こうした手法をさまざまな分野に利用するための研究・開発が進んでいます。



Fig.13 上陸前の大型台風(2007年台風4号)
JAMSTECにて開発されたMSSGモデルを使用して、2007年7月14日の日本近辺の雲を立体的に示したものです。日本列島に横たわる梅雨前線と九州の南西に位置する台風が確認できます。台風を取り囲むようにすじ状の雲の列(台風の腕・スパイラルバンド)も見えます。(画像: JAMSTEC)

8 時空間スケールを継ぎ目なく同時にシミュレーション

地球上の気象・気候現象は、大気・海洋・陸面・海氷・生態系といった自然環境の複雑な相互作用、さらには人間活動の影響も受けながら成り立っています。また、エルニーニョ現象などの地球規模の気候変動現象から、台風のような地域的な気象・気候現象、さらには世界各国の都市部でおきているヒートアイランド現象まで、変動現象のスケールもさまざまです。こうした複雑かつマルチスケールな気象・気候変動現象がどのようなメカニズムで発生し、日本領域や都市域がどのような影響を受けるかを明らかにするには、全地球から都市までを一度にシミュレーションすることが必要です。

これを実現するため、異なる時間・空間スケールを継ぎ目なしに同時に

見ることができる新しい気候シミュレーションモデル「MSSG(メッセージ: Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)」の開発が、「地球シミュレータ」を活用して進められています。全地球を海洋の渦や大気の流れを表現できる10kmメッシュ(解像度)で表現し、必要に応じてさらに細かいメッシュで領域の変動現象も見える状態にした上で、個別の都市で何がおきているかを同時に再現できる、まさにマルチスケールな気候シミュレーションをめざしています。これが実用化されれば、気象・気候変動の影響を受けるなかで、よりよい環境をつくりあげていくために、私たちは何をすべきかといった適応策の提示にもつながると考えられています。

Fig.15 MSSGモデルを用いた海洋上で発達する浅い積雲のシミュレーション。この雲シミュレーション法は、従来よりも物理に忠実に個々の積雲を計算することが可能であるため、気象・気候予測シミュレーションの精度向上をもたらすと期待されます。(画像: JAMSTEC)



Fig.16 真夏の東京駅付近の気温分布シミュレーション。都市部の気温は郊外に比べて高くなる傾向があり、それはヒートアイランド現象と呼ばれています。(画像: JAMSTEC)



これからの予測に必要なターゲットの空間と時間の階層性

(a) 季節～年間の予測
約2km～10km、
約100層



(b) 局地的現象の予測・数日～数週間
約100m～約2km、約100層



(c) 都市性気候の再現と予測
数m～約100m、約200層



Fig.14 MSSGが予測シミュレーションの対象とする全球から都市スケールまでのイメージ模式図。MSSGは、全球(a)から領域スケール(b)、更に都市スケール(c)をより詳細化し、それらを同時にシミュレーションできる。また、大気と海洋、陸面、海氷の状態も同時に予測可能なシミュレーションモデルです。その非常に詳細な予測情報は、温暖化適応策など、社会貢献へ直接結びつけることが可能です。

地球内部活動や巨大地震・津波の再現・予測に挑む

9 固体地球内部の変動現象を明らかに

「地球シミュレータ」の重要な取り組み課題である地球科学分野のなかで、気候変動予測とともに大きなテーマとなっているのが、固体地球変動の解明と予測です。地震波の解析などによって、地殻からマントル、核におよぶ固体地球内部の構造が明らかにされようとしています。地球内部で何がおきているのかはまだよく分かっていません。そこで、マントルや外核の対流による熱・物質の輸送など、地球内部のメカニズムを解明するために、「地球シミュレータ」を活用したシミュレ

ーション研究が進められています。2億年周期でおきるといわれる沈み込んだプレートとマントル対流の関係を、三次元的に再現することに成功したり、マントル対流の複雑な構造を再現するなど、着実な成果が得られています。さらにシミュレーションによって、外核の対流と地球磁場の関係や、対流に重要な影響を及ぼす外核と下部マントルの境界の構造など、地球内部の大きな謎を解き明かす研究が行われています。

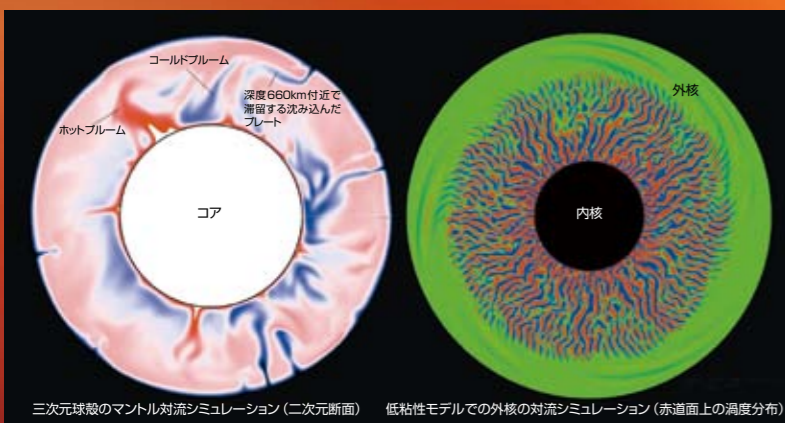


Fig.17 地球シミュレータのなかでマントルと外核の対流を再現 (画像: 大野暢亮 博士(兵庫県立大学)/宮腰剛広 研究員(JAMSTEC))



Fig.18 2011年東北地方太平洋沖地震 地震波の伝播シミュレーション (画像: JAMSTEC 坪井 誠司、古市 幹人、中村 武史)

10 シミュレーションを巨大地震の災害予測・減災に活かす

固体地球変動へのシミュレーション研究の取り組みのなかで、私たちの生活に深く関連するのが、巨大地震発生メカニズムの解明と予測技術の開発、さらに将来の地震・津波による被害を予測し、防災・減災に役立てる研究です。地球表面は十数枚のプレートと呼ばれる巨大な岩盤でおおわれており、プレートは押し合ったりずれ違ったりしながら、それぞれ異なる方向にゆっくりと移動し続けています。このプレート運動が、地震を引き起こすエネルギーの源となっています。そのエネルギーが最もたまりやすく、これまで数々の巨大地震を起こしてきた場所がプレート境界(沈み込み帯)です。ここで発生する地震は海溝型地震と呼ばれ、地震による海底の隆起によって津波がおきることも多く、沿岸



Fig.20 東海・東南海・南海地震(想定)の津波シミュレーション 海面に光を当て、また津波の高さは拡大表示しています。(画像: 東北大学大学院工学研究科 今村文彦)



Fig.19 2011年東北地方太平洋沖地震の地震動の伝播と津波のシミュレーション (画像: 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 古村孝志・前田拓人)

部に大きな被害をもたらすことが知られています。こうした海溝型地震のメカニズムを解明したり、地震による揺れや津波を予測し備えるために、シミュレーションが活用されています。

「地球シミュレータ」を活用した地震シミュレーション研究のなかで高い成果を上げているのが、「地震波伝搬・強震動シミュレーション」です。高精度な地下構造モデルに基づいて、地震波がどのように伝わり、地表にどれだけの揺れをもたらすのかをシミュレーションするもので、地震の被害を高精度に再現・予測するとともに、地震防災にも役立てられようとしています。地震動だけでなく津波も同時にシミュレーションできるため、海溝型地震にとまなう一連の現象を多角的にとらえることが可能です。

さまざまな分野の**先進的研究**に利用される「地球シミュレータ」

多彩な研究で成果をあげる「地球シミュレータ」

気候変動や固体地球内部変動に関するシミュレーション研究で、数多くの成果をあげてきた「地球シミュレータ」ですが、その用途は地球科学分野だけに限りません。運用を開始した当初から「先進創出分野」として、ナノテクノロジー・材料分野、医療・ライフサイエンス分野、機械・電気・電子分野、建築・

土木分野など、幅広い分野の先進的・独創的な研究に門戸を開くとともに、航空機や自動車産業との共同研究なども進めてきました。

現在も、カーボン・ナノチューブなどのナノテクノロジー素材の特性を明らかにするための研究、テラヘルツ波と呼ばれる電波と光の間の未利用電磁波を活

用するための素子やシステム開発の研究、鉄筋コンクリート建物の地震による振動や損傷を再現する研究、有用なゲノム資源を見つけ出すための大規模ゲノム解析の研究など、さまざまな先進的な研究が「地球シミュレータ」を活用して行われています。

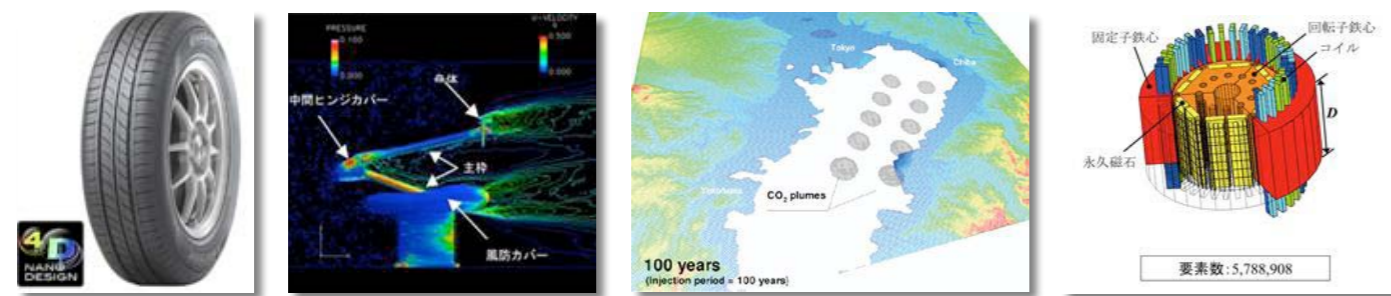


Fig.21 画像：左より
 ■ 住友ゴム工業株式会社
 ■ JR東日本
 ■ 大成建設株式会社 技術センター
 ■ 東洋電機製造株式会社

「地球シミュレータ」の産業利用

産業界でも、「地球シミュレータ」を新製品の開発に役立てたり、将来的な技術開発に結び付けるための基礎研究に活用するなどの動きが広がっています。たとえば、鉄道車両の高速化によって大きな課題となる空力騒音を大規模なシミュレーションによって明らかにし、騒音を低減するための研究、自動車の空気抵抗を減らすための技術開発研究、

高性能なタイヤを開発するためにゴムやカーボンなどのタイヤ素材を分子レベルで解析する研究、新しい薬の候補化合物を分子レベルのシミュレーションによって見つけ出すための基礎的な技術研究など、多くの企業が「地球シミュレータ」を事業に役立てるための研究・開発に利用しています。

また、地球シミュレータの利用では原

則として利用者情報や研究内容が公表されますが、それらが公表されない非公開型の「成果専有型有償利用」制度も実施しています。この制度では、ユーザーからの相談に応じて専門スタッフがプログラム開発やチューニング等の技術支援を行っています。はじめての利用で不安があるユーザーには、無償での試用（事前評価）にも応じています。

「地球シミュレータ」の産業利用ページのURL
<http://www.jamstec.go.jp/es/jp/sangyou/>



数値データを読み解く 可視化技術

13 「地球シミュレータ」の成果をわかりやすく表現

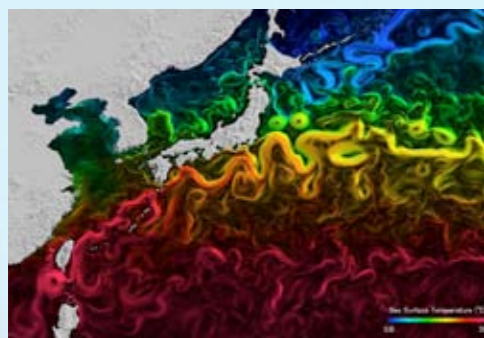


Fig.22 日本周辺の海の流れ
(画像: JAMSTEC 松岡 大祐, 荒木 文明, 木田 新一郎, 佐々木 英治, 田口 文明)



Fig.23 バーチャルリアリティシステム「BRAVE」

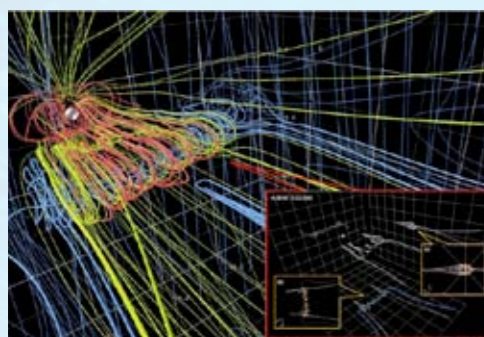


Fig.24 地球磁気圏における磁力線の
ビジュアルデータマイニング
(画像: JAMSTEC)

コンピュータシミュレーションと、私たちはコンピュータグラフィックスで描かれた美しい画像を思い浮かべます。しかし、実際に「地球シミュレータ」のシミュレーションから得られるのは、大規模な計算による大量の数値データです。数値データはそのまま使えるわけではありません。大切なのは、データからどのような現象が起きているのかを理解することです。そのためには、膨大なデータのなかから意味のある情報を取り出して、わかりやすく表現する技術が必要です。その手法のひとつが、画像や動画として表現する可視化技術です。たとえばいうなら、「地球シミュレータ」は素材の製造装

置で、素材を信頼できる価値のある製品（研究成果）に加工するのが可視化技術なのです。

海洋研究開発機構（JAMSTEC）では、3次元画像で可視化し、その画像のなかに入り込んで、見たい部分を自由自在に動かせるバーチャルリアリティシステム「BRAVE」をはじめ、より効率的に意味のある情報を引き出すための新しい手法であるビジュアルデータマイニングの研究などを推進し、「地球シミュレータ」の大規模シミュレーションを研究者さらには社会と結びつけるための架け橋となる、より効果的・効率的な可視化技術の研究・開発に取り組んでいます。

Fig.25 「EXTRAWING」
<http://www.jamstec.go.jp/esc/extrawing/>
地球科学シミュレーションデータの効果的でアピーリングな可視化表現と社会へ向けた情報発信

* EXTRAWINGは、Google社が提供する Google Earth™ の機能を利用しています。



「地球シミュレータ」の効率的な運用を推進



Fig.26 地球シミュレータ棟
(横浜市金沢区 JAMSTEC 横浜研究所)

「地球シミュレータ」の1年間の利用機関数は、多い年で約200機関におよび、現在も大学、公的機関から民間、海外まで、100を超える機関が利用しています。こうした「地球シミュレータ」の運用を担っているのが、海洋研究開発機構（JAMSTEC）です。「地球シミュレータ」の効率的・効果的な運用を推進するための技術開発・環境改善をはじめ、利用者への技術支援・技術研究といった利用推進のための取り組みにも力を注いでいます。

さらに、「地球シミュレータ」の性能を最大限に活かしたシミュレーションの開発をめざして、独自に研究開発プログラムも設置し、シミュレーション研究の成果をより効果的で分かりやすく表現するための可視化技術などの研究開発や、シミュレーション技術を産業分野に応用していくための技術開発なども行っています。

社会に役立つ計算科学技術の発展をめざして



Fig.27 理化学研究所「京」コンピュータ

日本は毎年のように、台風、集中豪雨、地震、津波などに見舞われ大きな被害を被っています。特に、2011年3月11日の東北地方太平洋沖を震源とする超巨大地震とそれに伴う巨大津波は、東北地方を中心に多くの犠牲者と壊滅的な被害をもたらしました。このような大規模な自然災害は社会や経済活動などに深刻な打撃を与えることから、防災・減災に向けた対策が喫緊に求められています。大規模な自然災害に関しては、野外実験が不可能であり、大規模シミュレーションによる研究が不可欠です。

JAMSTECは「JAMSTEC 神戸サテライト」とを開所し、日本が世界に誇るスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」と「京」コンピュータを連携した、防災・減災に役立つ研究を推進するとともに、次の時代を担う研究者の育成にも努めています。