

# 計算科学 の世界

November 2019 NO. 19

月は地球のマグマオーシャンからできた  
巨大衝突説の矛盾を「京」による  
シミュレーションで解く

シミュレーション：細野七月  
可視化：中山弘敬  
国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト

## 月は地球のマグマオーシャンからできた 巨大衝突説の矛盾を「京」によるシミュレーションで解く

細野 七月 Natsuki Hosono

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター 計算科学・工学グループ  
特任技術研究員

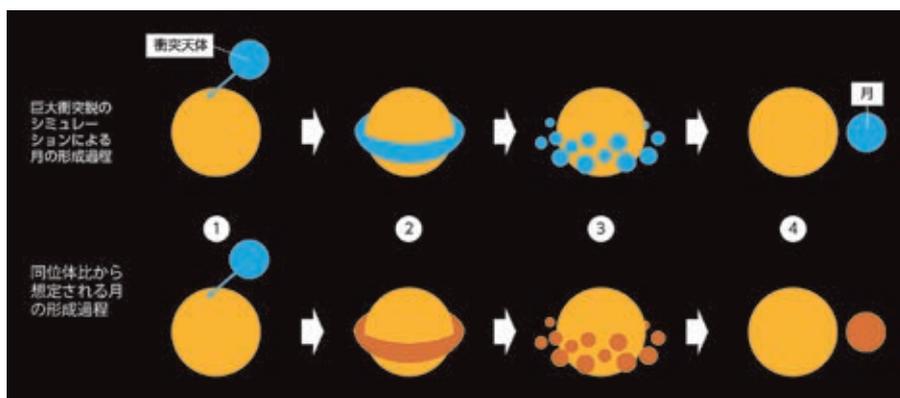


図1 巨大衝突説とその問題点

巨大衝突説では、月が次のようなプロセスでできたと考える。1) 原始地球（橙色）に、火星くらいの大きさの天体（青色）が斜めから衝突する。2) 衝突によって揮発したガスが地球を回る軌道に円盤状に散らばる。3) ガスが冷えてできた微粒子が重力によって集まり、微衛星を形成する。4) 微衛星どうしが衝突により合体し、月が形成される。

巨大衝突のシミュレーションでは、上段のように、月はおもに衝突天体から形成されるという結果が得られていた。しかし、月と地球の同位体比がよく似ているという観測結果から、下段のように、月の岩石は原始地球に由来すると考えられるようになり、巨大衝突説は矛盾を抱えることになった。

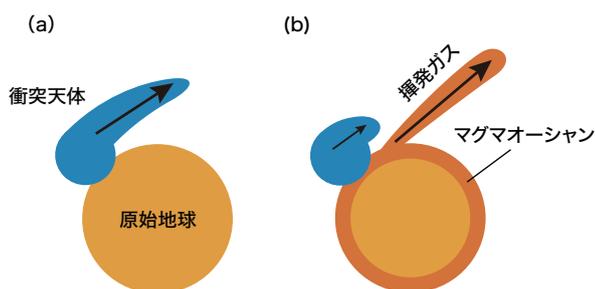


図2 マグマオーシャン説

(a) 原始地球が固体だったとすると、巨大衝突により、衝突天体由来の揮発ガスが放出されると考えられる。(b) 原始地球がマグマオーシャンをもっていたとすると、マグマ由来の揮発ガスがジェットのように飛び出す可能性がある。どちらの場合も、衝突天体にはマグマオーシャンがなかったと想定しており、それは惑星科学的に妥当である。

### 月はどのようにできたのか？

「月は私たちにとって身近な天体ですが、惑星科学の目で見ると奇妙な性質を持っています」と細野さんは言います。まず、月の直径は地球の4分の1ほどで、これは衛星としてはちょっと大きすぎるのです。太陽系には地球のほかにも3つの岩石惑星がありますが、水星と金星に衛星はなく、火星はごく小さい衛星を2つもつだけです。また、月と地球のペアは、他の岩石惑星に比べて回転（角運動量）が大きいという特徴もあります。

この「奇妙な」月がどのように形成されたのかについて、これまでいくつもの説が提唱されてきました。たとえば、遠心力により地球から分裂してできたという説、地球と同時に形成されたという説、遠くからやってきた天体が地球に捕捉されたという説などです。しかし、月の構造と運動の両方をうまく説明できるものはありませんでした。

そんな中で、1970年代半ばに巨大衝突説が提案されました（図1）。これは、「原始地球に火星くらいの大きさの天体が斜めから衝突し、衝突の高温で岩石が揮発したガスが地球を回る軌道に円盤状に広がり、やがてガスが冷えてできた粒が重力により合体して月が形成された」というものです。「あまり起こりえないようにも思えますが、太陽系の形成過程では惑星どうしの衝突が頻繁にあったと考えられています。この説は、ほかの説と比べて月の構造や運動を無理なく説明できるうえに、2000年代には、急激な計算機の発達により複数のコンピュータ・シミュレーションが行われ、それらにより月が形成されうると検証されたため、もともと有力な仮説とみなされるようになりました」

地球を回る月はどのようにできたのでしょうか？

原始地球に別の天体が衝突して形成されたという巨大衝突説が有力ですが、月と地球の同位体比がよく似ているという観測結果とは矛盾しています。

細野さんたちは、原始地球にマグマオーシャンの存在を想定すると、この矛盾が解消されることをシミュレーションで示しました。

新たに開発されたシミュレーション法は、津波の予測にも役立ちます。



**細野 七月** 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター 計算科学・工学グループ 特任技術研究員 撮影：古末拓也

巨大衝突のシミュレーションでは、月は原始地球ではなく、おもに衝突したほうの天体から形成されるという結果が得られています。ところが、1970年代のアポロ計画で持ち帰られた月の岩石を2000年代になって分析したところ、いくつもの元素の同位体比が地球の岩石と一致することが示され、この一致は、その後の高精度分析でより確実となりました。つまり、月の岩石は原始地球に由来すると考えられるようになったのです。こうして、巨大衝突説は大きな矛盾を抱えることになりました。

### 原始地球にマグマオーシャンがあったとしたら

この矛盾を解消しようとさまざまな仮説が提案されましたが、いずれも、月ができる確率は非常に低いものでした。もっと確率の高いシナリオを求め、見逃している要素はないかと考えていた米国イェール大学の唐戸俊一郎教授は、2014年、巨大衝突時の原始地球にマグマオーシャンがあったという説を提案します。マグマオーシャンとは文字どおり岩石の溶融したマグマの海で、地球の形成初期の一定期間、表面を覆っていたと考えられています。巨大衝突を受けた際、地表が固体の岩石であるか液体のマグマオーシャンであるかによって衝突時の高温に対する挙動が大きく異なるため、ぶつかってきた天体よりもマグマオーシャンのほうが多く飛び出すと予想したのです(図2)。この成分が固まれば、地球由来成分の月ができることとなります。

ちょうどそのころ、細野さんは、理化学研究所計算科学研究機構(現 計算科学研究センター)の粒子系シミュレータ研究チーム(チームリーダー：牧野淳一郎 博士)に所属していました。「唐戸先生は地球科学の専門家ですが、シミュレーションは経験がない。一方、牧野先生は天体のシミュレーションが専門です。このお二人が高校の同窓生だった縁でたまたま会う機会があり、このシナリオの話が弾んでコラボレーションが決まり、私がシミュレーションに取り組むことになりました。巨大衝突のシミュレーションは米国が中心で、やや停滞気味の印象があったので、新しい道を切り開きたいという気持ちで研究を始めました」

マグマオーシャンをシミュレーションに採り入れるため、細野さんはまず、唐戸先生の助力を得て、液体の岩石の挙動を示す新しい状態方程式を考案しました。また、シミュレーション手法として、細野さんが開発してきたDISPH(Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics)法という新たな手法を発展させました。「従来は、天体を粒子の集まりと考えるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法が用いられていましたが、標準的なSPH法では、金属核とマンツルの境界のように密度が急激に変化する箇所をきちんと扱えません。そこで、私は学生時代から、この点を改良したいと考えてDISPH法の開発に取り組んできたのです」。しかし、DISPH法のように粒子に基づく計算は、時間と場所によって粒子の密度が大きく異なるため単純に並列化しても効

率が悪く、超並列型のスパコンである「京」の能力をうまく生かすことは困難です。そのため、細野さんら牧野チームは、計算量を自動的に平均化して並列化できる新たなソフトウェアFDPS(Framework for Developing Particle Simulator)を開発しました。

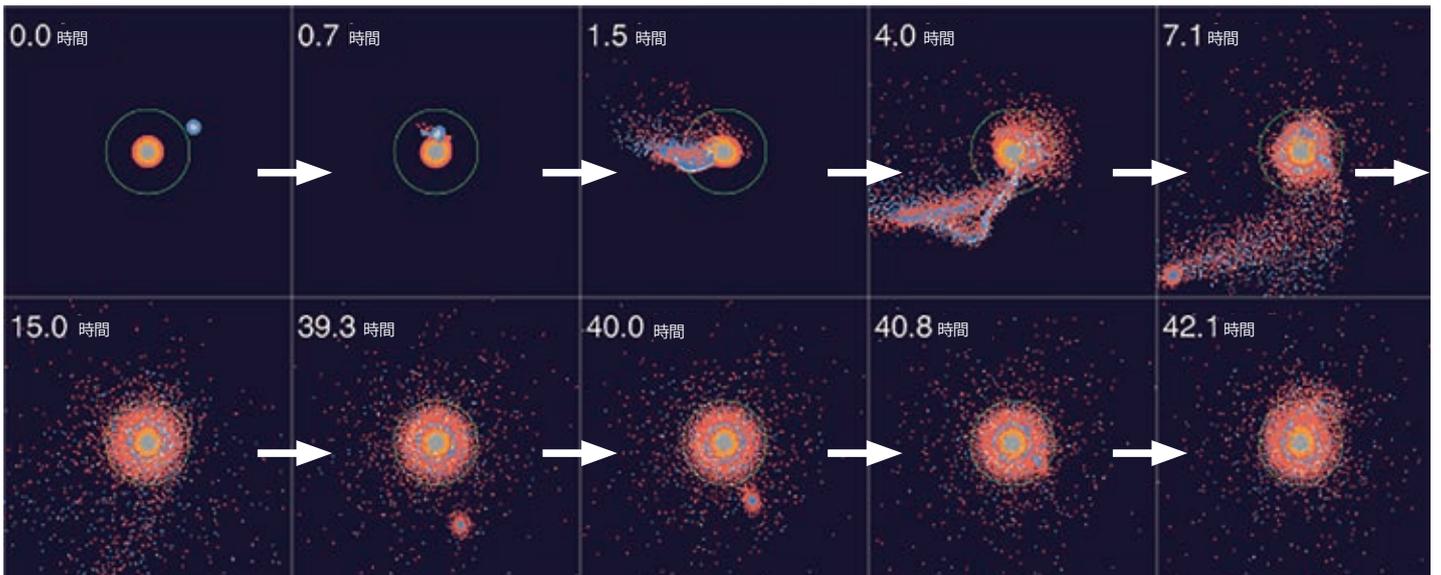
### 現在の月のもとになる円盤ができた

状態方程式、DISPH法、FDPSの3つが揃ったことにより、マグマオーシャンで覆われた原始地球への巨大衝突のシミュレーションが実現しました。「計算にあたって、原始地球は、中央に金属核、その周囲にマンツル、いちばん外側に深さ1500 kmのマグマオーシャンという3層構造をもつとしました。また、衝突した天体は、金属核とマンツルの2層構造としました。これらは、惑星科学的には十分にありうる想定です」

図3はシミュレーション結果の一例です。巨大衝突後、ジェットのように物質が吹き出し、やがて、原始地球の軌道を回る円盤が形成されました。一方、衝突後に一度離れていった衝突天体は、約40時間後にふたたび原始地球に衝突して合体しました。「ここで重要なのは、再衝突後の円盤の質量と組成です。円盤の質量は現在の月より大きく、原始地球に由来する成分が質量の70%以上を占めていました。私たちは、この条件の円盤から月ができたとする、現在の月の質量と組成を説明できると考えています」

細野さんたちは、同様のシミュレーションを、さまざまな衝突速度と衝突角度で行いました。1回の衝突をシミュレーションする

(a)



(b)

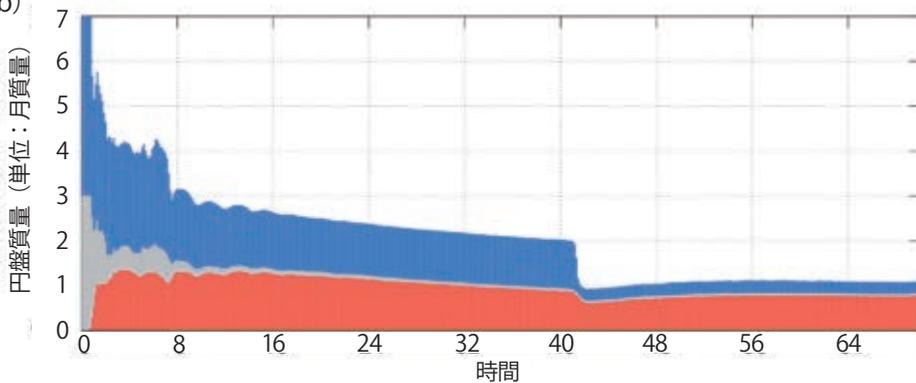


図3 マグマオーシャン説のシミュレーション結果の一例

両図とも、赤色は原始地球のマグマオーシャンに由来する成分、橙色は原始地球のマンテルに由来する成分、青色は衝突天体のマンテルに由来する成分、灰色は原始地球と衝突した天体の金属核に由来する成分を示す。

(a) 衝突後の物質粒子の運動

衝突後、原始地球の周りにはマグマオーシャンと衝突天体由来の物質がばらまかれ、衝突天体由来の物質が失われながら、円盤を形成していく。一方、7.1時間後に左下に見えていた衝突天体は、一度離れた後、40.8時間後にふたたび地球に衝突して合体する。シミュレーションは42.1時間後までだが、こうして形成された円盤から月が形成されると考えられる。

(b) 円盤の組成と質量の経時変化

衝突直後には衝突天体由来の物質の割合が大きいですが、衝突から約40時間後、衝突天体が地球と合体することにより、衝突天体由来の成分は急速に減少し、月をやや上回る質量で、その約70%がマグマオーシャン由来の円盤が生じる。

だけでも膨大な計算が必要になりますが、このように多くの場合について計算できたのは「京」の計算パワーがあつてのことで

す。計算の結果、月より大きい質量をもち、成分の70%以上が原始地球由来である円盤ができる場合が、何通りもあることがわ

かりました (図4)。

細野さんたちは、原始地球が固体だと想定したシミュレーションも同様に行いましたが、こうした条件の円盤は形成されませんでした。こうして、マグマオーシャンの存在を想定すれば、地球と似た同位体比の月がかなりの確率で形成されることがわかり、巨大衝突説の矛盾を解決できることが示唆されました。

### 新たな研究に向けて

細野さんは、この結果が得られたとき、「こんなにうまくいくわけがない」と思い、自分の直感が間違っているのか、理論が間違っているのか、計算コードが間違っているのか、ずいぶんと考えたそうです。それほど順調に得られた結果ですが、「これですべて解決したというわけではなく、今回の論文にも賛否両論が寄せられています。今後は、原始地球にはマグマオーシャンが、いつ、どのぐらいの期間、どのぐらいの規模で存在したのかを考えなければなりません

んし、現在の月の質量と組成を説明できる円盤の条件も検討する必要があります」

月の形成は重要な現象だけに研究者も多く、議論は続きそうですが、細野さんたちの結果が、今後の研究にとって大きな一歩となったことは間違いありません。さらに、「巨大衝突は太陽系のほかの惑星や、太陽系外においても起こったと考えられます。このような惑星の多様性を考える際にも、今回の結果は、重要な示唆を与えます」と

一方、細野さんが開発したDISPH法は、地震や津波、土石流のシミュレーションにも力を発揮します。これまで、「京」では、標準的なSPH法により町単位の津波遡上シミュレーションが成功していますが、後継のスーパーコンピュータ「富岳」でDISPH法による計算を行えば、「日本全体、さらには、全球のシミュレーションも可能かもしれません」と、ポスト「京」の重点課題3「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」のメンバーでもある細野さんは言います。細野さんたちの研究成果は、今後、

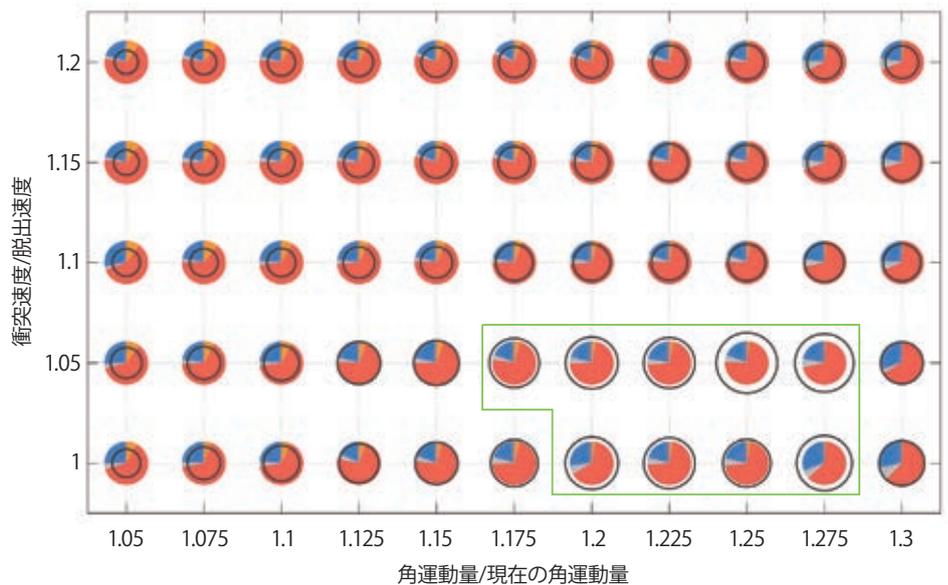


図4 さまざまな衝突速度と衝突角度で行ったシミュレーションの結果

縦軸は衝突速度の指標、横軸は衝突角度の指標。円グラフは円盤の成分組成（成分の色は図3と同じ）を表し、黒い円は円盤の質量を表す。円グラフの円の大きさは、現在の月の質量に揃えてあり、黒い円が外側にある場合は、現在の月よりも質量の大きい円盤が形成されたことを示す。緑の線で囲んだ範囲では、成分の70%以上が原始地球に由来し、月の質量を上回る円盤が形成された。

天文学や惑星科学に限らず、防災・減災への応用も期待されているのです。

(取材・執筆：サイテック・コミュニケーションズ  
飯田啓介/青山聖子)

## まだまだ気になるQ&A 教えて細野さん!



**Q** 新しいことに挑戦するためのモチベーションはなんですか？

**A** 大学院生のときから、手堅くて結果の出やすい研究テーマよりも、新規性が高く先の見えないような研究テーマに惹かれ、そのぶん、たくさん苦労もしてきました。大学院時代の恩師にいただいた「残念ながら、君には論文をたくさん書ける、経済的にも安定した人生は望めないよ。その代わりに、成功したときにはすごくいいことがある」という言葉が支えになっています。今の研究者は論文の数で評価されることが多いのですが、自分は1本の論文で勝負していきたいと思っています。

**Q** 英語はどうやって勉強しましたか？

**A** 海外への留学経験はなく、日本にいながら英語を学びました。じつは、オンラインゲームが好きで、ゲームで海外の人とチームを組み、コミュニケーションしながら戦うことによって英語が使えるようになったのかもしれない。趣味を通じて英語を勉強するのは有効かもしれませんね。

**Q** 今後はこういった研究をしたいですか？

**A** 今回の研究は一段落したので、あとはほかの方にお任せして、新しい研究テーマを探しているところです。このところ、シミュレーションに集中し、シミュレーション手法や計算方法の開発からはやや離れていたのですが、大規模計算の効率化に取り組みたいと思っています。個人的には、「富岳」が完成したとき、最初に全ノードを使って計算した人になりたいですね。最初はうまくいかないでしょうが、だからこそおもしろいので。

# スーパーコンピュータ「富岳」の開発

## ◆「富岳」の目的

「富岳」は、社会や科学分野のさまざまな課題を解決すること、Society 5.0(仮想空間と現実空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会)の実現に貢献することを大きな目的としています。

## ◆「富岳」の特徴

- 幅広い用途に使える、世界最高レベルの計算機システムを実現します。
- 国際協力により、世界最先端で、かつ、国際標準となるような技術を開発します。
- 「京」で達成されたシミュレーション能力を受け継ぐとともに、ビッグデータやAI(人工知能)への展開を目指します。

## ◆「富岳」の開発の進め方

左の目的を達成するため、幅広い分野に応用できるように、計算機システムとアプリケーションの協調的な設計(Co-design)によって開発を進めています。多くのアプリケーションの中から選ばれた9つの「ターゲットアプリケーション」の特性に合わせてシステムを設計し、さらに、そのシステムに合わせてアプリケーションを最適化することで、アプリケーションの実効性能を最大で「京」の100倍にすることを目指しています。

計算機システム

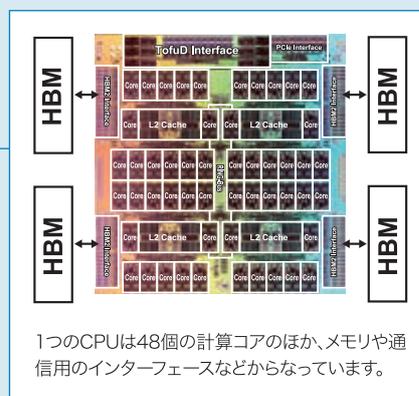
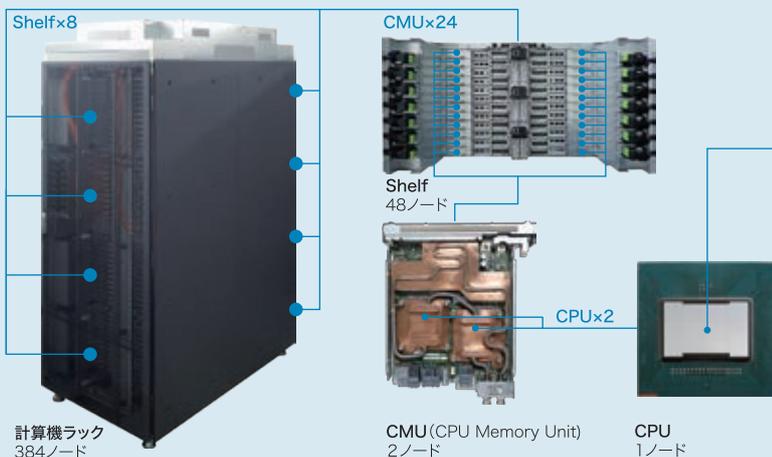
## 計算機システムの特徴

「富岳」は、「京」と同じように、多数のCPUに計算を分担させるしくみの計算機です。CPUは、広く使われている既存のCPUを「富岳」のために大幅に改良して、高い演算性能と高い省電力性能をもたせたもので、ビッグデータやAIなどSociety 5.0に必要とされるアプリケーションで高い能力を発揮します。さらに、このCPU自体が世界標準として、クラウドやIoTにも使われる可能性を秘めています。

このCPU2個からなる単位をCMU、CMUを24個積み重ねたものをShelfと呼んでいます。Shelfを8個組み合わせて1個のラックが構成されます。

### CPUと計算機ラックの構造

写真は試作機。提供：富士通株式会社

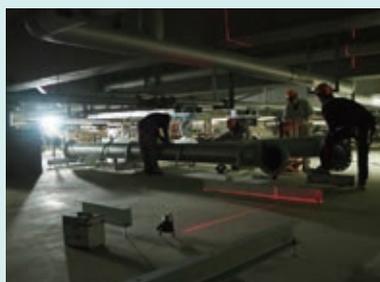


## 進む設備工事

「富岳」は「京」の施設や設備の一部を再利用して設置されますが、「京」に比べて消費電力が増加し、それに伴う排熱も増大する見込みのため、電気設備や冷却設備などを増強します。すでに、2019年5月から工事は始まっています。



※設備工事・設置レポートは、R-CCSのホームページやTwitterでご覧いただけます。

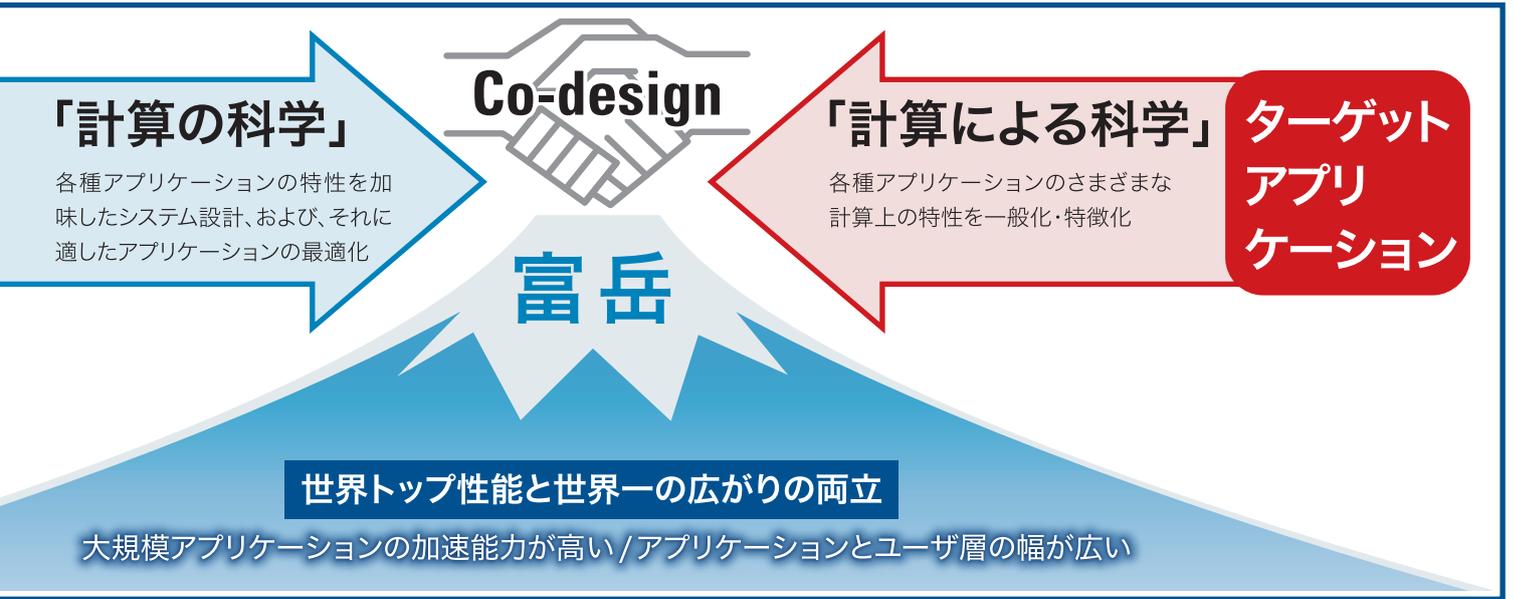


2019年6月、地下の免震ピットに運び込んだ冷却管をつなぎ合わせた。正確な位置決めのため、レーザーを使用。



2019年8月、計算機棟2階の高圧電圧室に「富岳」用の変圧器を設置。

R-CCSは、スーパーコンピュータ「京」の後継機である「富岳」(2019年5月に名称決定)の開発・整備を、主体となって進めています。ここでは、富岳の開発の概要をご紹介します。



## ターゲットアプリケーション

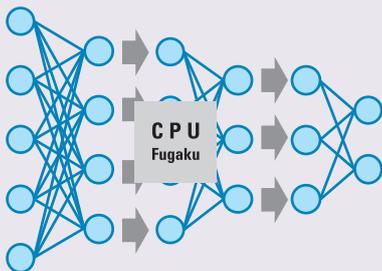
さまざまな計算を「富岳」で効率よく行えるようにするために、計算の目的や実行のしかたが異なる9つのアプリケーションが「ターゲットアプリケーション」に選ばれました。これらが「富岳」で最大限働くようにするために、新しいアルゴリズムや実装方法の研究開発が進められています。

GENESIS	タンパク質の動きを計算
Genomon	ゲノム解析
GAMERA	地殻・都市の地震を計算
NICAM+LETKF	観測データを融合した地球大気のシミュレーション
NTChem	分子の構造を解明
ADVENTURE	大規模システムのシミュレーション
RSDFT	物質の特性を解明
FrontFlow/blue	乱れのある流れや音響を計算
LQCD	素粒子の振る舞いを計算

## 「富岳」での取り組み

### AI、データサイエンス研究

「富岳」のCPUと通信ネットワークは、AIの基本をなす深層学習のための計算に適しているため、「富岳」は世界でもトップクラスのAIマシンとなる見込みで、AIやデータサイエンスの研究に活躍すると期待されています。



#### AI研究の未来

AIは、自動運転、自動翻訳、病気の診断など、ビッグデータと結びついて社会に広まると予想されるため、より高度な研究が求められる。

### シミュレーションとAIの融合

AIを利用して実験や観測の結果とシミュレーション結果を融合させることで、より精度の高い予測を行うことができます。また、シミュレーション結果をデータとしてAIに「正解」を探してもらうこともできます。

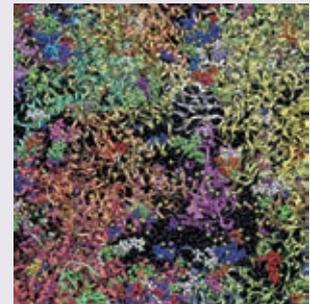


#### 社会シミュレーションとAI

個々人の行動や特性に基づいてシミュレーションを行い、避難時間や効率との関係性をAIで学習することにより適切な避難計画を提案。

### シミュレーション

アプリケーションの実効性能が上がることから、より「高解像度」「長時間」「大規模」「多数のケース」のシミュレーションが可能となり、身近な社会的課題の解決から、基礎科学の理解まで、さまざまなインパクトが期待されます。



#### 基礎科学の理解

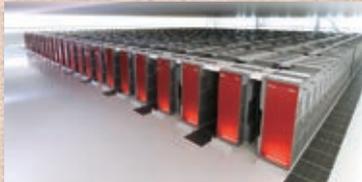
1個の細胞中の全分子の動きを再現し、細胞のメカニズムの解明に貢献。

# ありがとう、京

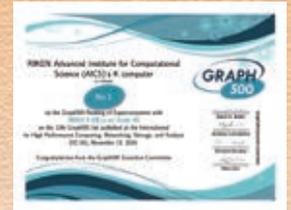
2019年8月30日、「京」がついにシャットダウンされました。ここでは、システムの一部稼働開始からシャットダウンまでの日々を振り返ります。

## 2011年3月31日 システムの一部稼働開始

- 2011年6月20日 TOP500で世界一を達成
- 2011年11月14日 TOP500で2期連続世界一を達成
- 2012年6月29日 システム完成
- 2012年9月28日 システム共用開始



計算速度世界一認定証



Graph500で9期連続世界一



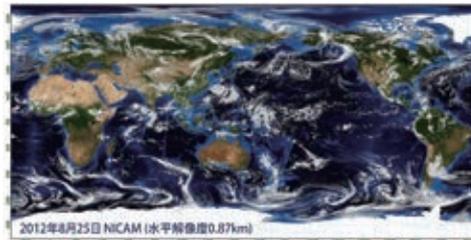
HPCGで3期連続世界一

「京」は、計算速度世界一のほかにも、有名な賞をとっているぞ。

## 「京」で生まれた成果の数々

国が定めたHPCI戦略プログラムの5分野を中心に、「京」を用いることで高精度のシミュレーションが達成され、社会問題の解決や自然現象の理解につながる数々の成果が生まれました。

※クレジットの組織名、所属は成果発表当時のものです。



### 超高解像度全球大気シミュレーション

台風や集中豪雨などの発生メカニズム解明に寄与

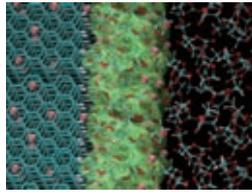
海洋研究開発機構、  
東京大学大気海洋研究所、  
理化学研究所 計算科学研究機構の  
共同研究/可視化 吉田龍二



### UT-Heart

本物と同じ動きをするヒトの心臓を「京」の上に再現

株式会社UT-Heart研究所/  
協力 富士通株式会社



### 化学反応シミュレーション

リチウムイオン電池内の膜形成反応を解明

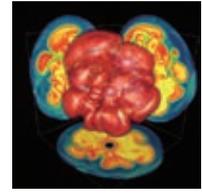
物質・材料研究機構 館山佳尚、  
袖山慶太郎/富士フイルム株式会社  
奥野幸洋、後瀧敬介



### 自動車空力シミュレーション

実走行時の自動車周りの空気の流れを再現

神戸大学、広島大学、  
理化学研究所 計算科学研究機構、  
マツダ株式会社



### 超新星爆発シミュレーション

超新星爆発を再現し、メカニズム解明に貢献

国立天文台 滝脇知也、  
固武慶、諏訪雄大

2019年8月16日 システム共用終了  
(すべての計算終了)

## 2019年8月30日 シャットダウン



シャットダウンのボタンを押す  
松本紘 理化学研究所理事長ら



メッセージを寄せてくれた兵庫県立  
北摂三田高等学校の生徒たち  
(同校は2011年に「京」を最初に見学)

## 「京」の運用実績 (共用期間中)

稼働率: 97.3%

(予定された保守の時間を除く)

処理したジョブ数: 4,178,481件

提供したノード時間積: 3,629,271,144ノード時  
(使用されたCPUの数×時間)

エッペン。よくがんばったでしょう?



## 撤去作業

別れを惜しむ間もなく、9月から「京」の撤去作業が始まりました。作業は急ピッチで進み、12月初めからは「富岳」の筐体の搬入が始まる予定です。

