

# 計算科学の世界



K computer

京がつくる時代

K computer Newsletter | No. 8  
March 2014

Interview

## 「京」の中で 都市を揺らす

「想定外」を極力減らすための  
地震被害シミュレーション



東京都心の地震被害シミュレーション

研究チーム紹介

利用高度化

研究チーム

複雑現象統一的解法

研究チーム



独立行政法人理化学研究所  
計算科学研究機構

Since 1917

interview



東京大学地震研究所 教授  
総合防災・減災研究ユニット  
ユニットリーダー

堀 宗朗

Muneo Hori

## 経験に基づいて 行われてきた 地震の被害予測

01

「人類は2000年以上前から建物をつくってきましたが、建物の損壊と地震の関係がはじめて研究されたのは、1923年の関東大震災のころからです」と堀さんは切り出しました。このとき、建物が受ける水平方向の加速度がはじめて設計に使われたそうです。1940年ごろにアメリカで測定された地震波が利用され、以後、耐震設計をはじめとする地震工学の研究が発展してきました。近年では、1つの建物をモデル化(「スパコンのこぼ」参照)した

うえでシミュレーションを行い、地震の際の揺れ方や大きな力を受ける箇所を明らかにして耐震設計に役立てています。

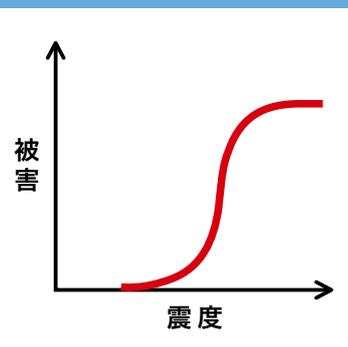
しかし、都市には非常に多くの建物があります。地震被害を予測するとき、すべての建物をモデル化し、シミュレーションすることはとてもできません。では、自治体などが行っている地震時の被害予測はどのように行われているのでしょうか? 「実は、経験に基づいているのです。過去の地震の際、どのぐらいの震度で建物がどのぐらいの被害を受けたかを示す脆弱性カーブ(図1)に基づいて計算しています。しかし、古い耐震基準に基づいた建物は壊れやすいですから、経

# 「京」の

## 「想定外」を極力減

3年前に起こった東日本大震災では、想定外の巨大地震への備えが不十分だったことが指摘されました。今後、適切な防災・減災策を講じるためには、さまざまな地震が起こったときにどのような災害が発生するかを、科学的・合理的に予測することが必要です。堀さんは「京」を使い、おもに都市を対象として、地盤・建物の揺れ方から人々の避難行動にいたるまでの統合シミュレーションに取り組んでいます。これまでの成果と今後の展望を、堀さんに聞きました。

図1 脆弱性カーブ



過去の地震の震度と被害の大きさの関係を統計的に解析して求めたカーブ。

験に基づく被害は大きく予測されがちで、信頼度が高いとは言えません。他に方法がなかったため、経験に頼ってきたというのが実情です」と堀さんは説明します。

# 中で都市を揺らす

## らすための地震被害シミュレーション

### 科学的・合理的な シミュレーションで 効果的な防災を

そこで、堀さんたちは「京」の高い計算能力を活かし、これまで不可能だった「都市をまるごと揺らす」シミュレーションに取り組みました。地震が起こると、地盤が揺れ、その上の建物が揺れます。これを「京」の中で再現したのです(図2)。

シミュレーションの対象としたのは東京都心の東西8.0km×南北7.5kmの地域で、25万棟以上の建物があります。堀さんたちは、地図製作会社がつくった平面のデータをもとに、これらの建物を立体的なモデルにしました。地盤のほうは、地盤工学会のデータをもとに、粘土、砂、岩盤の3層に分け

てモデル化しました。そして、1000ケースの地震の震動をこの地盤に与え、建物がどのように揺れるかを計算したのです。この計算から、**どういう地震のときにどういう建物が壊れやすいか**といった被害予測が可能になります。

堀さんは、「このように、科学的・合理的に被害を予測できれば、その予測をもとに防災対策の優先度を定めることができます。さらに、もっと多くのケースの震動をシミュレーションに用いることで、『想定外』のケースを少なくすることにつながります」と今回の成果の意義を語ります。

### コンポーネントを 組み合わせて 多様な計算を

地震の被害は、建物の損壊だけでは

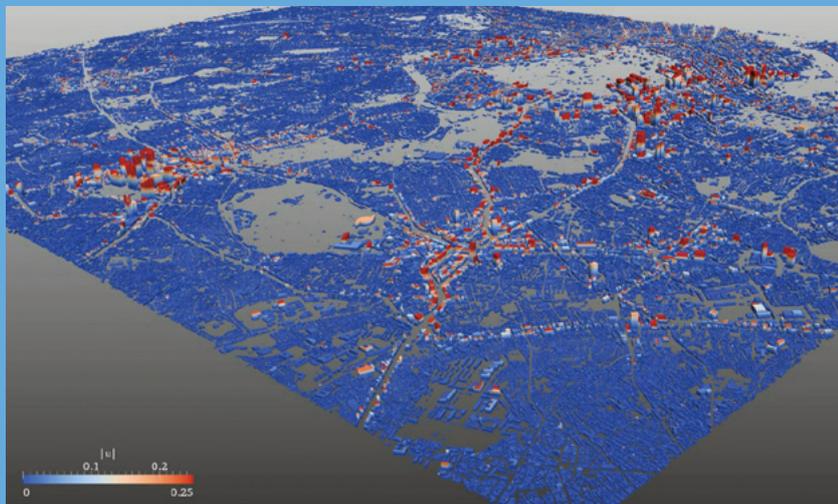
ありません。東日本大震災で多くの犠牲者を出した津波は、南海トラフの巨大地震が起こった場合にも大きな被害をもたらす可能性があります。そこで、堀さんたちは、**地震と津波の複合災害のシミュレーション**も行いました(図3)。「都市の場合と同じような地盤と建物のモデルに、津波が侵入したときの水の動きを、粒子法\*1でシミュレーションしました。その結果、地震で建物が倒壊した場合としなかった場合では、水の流れが異なることが明らかになりました」。

さらに、地震や津波の際には、人々がいかにスムーズに避難できるかも、被害の大きさを左右します。堀さんたちは、**高知市の20万人の住民が高台に避難するシミュレーション**を「京」で行いました(図4)。堀さんは、「避難行動のシミュレーションにはいろいろなやり方があるのですが、我々は、マルチエージェントモデル\*2を使いました。住民の一人ひとりが周囲の状況を見て適切な方向を考え、衝突しそうになったら速度を落とすという行動パターンをもつとして計算したのです」と、リアリティを重視したことを強調します。**このようなシミュレーションは、効果的な避難誘導の仕方や、避難標識の設置場所などを考える際の有力な情報となります。**

堀さんたちは、地盤と建物の解析、津波の解析、避難行動の解析のために、それぞれ異なるモデルをつくり、異なる計算手法を開発してきました。解析に必要な種々のデータも入手してきました。「今後は、より現実に近い

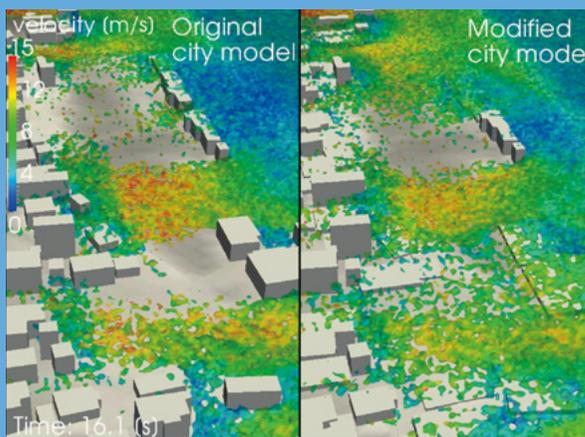
図2 東京都心の揺れのシミュレーション

※動画はweb版で見られます。



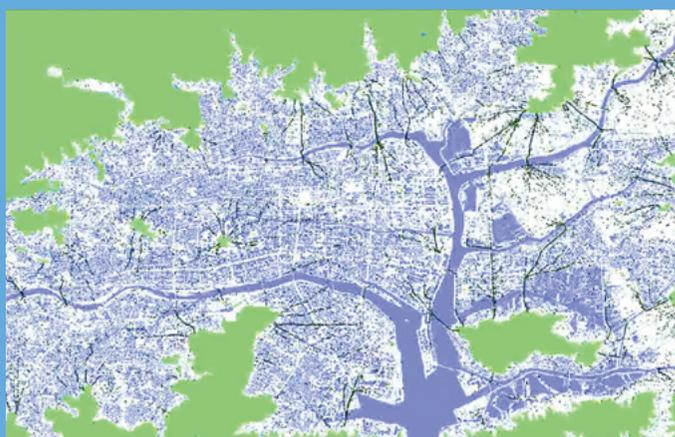
地盤と建物のモデルをつくり、地盤と建物がどのように揺れるかを「京」で計算した。この例は、1995年に阪神淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震の震動を地盤に与えたときのもの。建物の色が赤いほど、揺れによる変形が大きいことを示し、変形量がある大きさを超えたときに「壊れた」と見なす。

図3 地震・津波複合災害シミュレーション



ある海岸の町に津波が侵入するようすのシミュレーション。左は地震被害がない場合の地盤と建物のモデル、右は地震で倒壊した建物がある場合のモデル。左右で津波の侵入の仕方が異なることがわかる。

図4 マルチエージェントモデルによる避難行動のシミュレーション



高知市を舞台とし、20万のエージェントが一定の行動パターンで避難するようすを「京」で計算した。

※ 動画はweb版で見られます。

シミュレーションを行うため、これらの要素(コンポーネント)を組み合わせ、多様な計算をすることをめざしています」と、堀さんはさらに先をみています。

## 科学的な被害予測を 全国に広げたい

# 04

ここまでの話は、堀さんがHPCI戦略プログラム「分野3 防災・減災に資する地球変動予測」\*3のメンバーとして行っている研究です。計算科学研究機構総合防災・減災研究ユニットのリーダーとしての堀さんは、分野3で開発したモデルづくりと計算のためのプログラムを、神戸市や兵庫県内の都市に適用する研究を進めています。「神戸市からは、建物の構造に関する詳しいデータを提供していただいたので、東京都心よりも精密なモデルをつくってシミュレーションを行うことができます。他の地域でも、科学的・合理的な予測手法があるとなれば、詳しいデータを提供していただきやすくなりますから、より精度の高いシミュレーションができるようになりますと期待しています」と、堀さんは今後の展望を語

ります。

堀さんはさらに、「京」のために開発したプログラムを全国の大学のスパコンで利用してもらおうという計画も進めています。「地震被害の予測は、地域ごとに行わなければなりません。大学のスパコンで『京』と同じ規模の計算はできませんが、対象とする面積を10分の1にすれば、同じ精度の計算はできる。そうなれば、多くの地域について科学的・合理的な被害予測ができることでしょう」。

地震の防災・減災のための本格的なシミュレーションはまだ始まったばかりです。

シミュレーションに必要なさまざまなコンポーネントをパワフルに生み出し続ける堀さんは、これからもこの分野の研究を牽引し続けるに違いありません。

- \*1: 天体、水滴、分子などの粒子に数値を置き、粒子の運動を支配する方程式に従って計算する方法。ここでは、粒子法のうちでも恒星の運動を計算するために使われる方法を応用した。
- \*2: 複数の人が同時に活動し、相互作用する状況をシミュレートするためのモデル。人を、一定のルールに従って行動する「エージェント」と見なす。
- \*3: 「京」をはじめとする日本のスパコンを最大限に活用して世界最高水準の研究成果の創出をめざす5分野のうちの1つ。

## 堀さんはこんな人



「私の専門は土木で、大学を出たらゼネコンに入り、アフリカに行って橋をつくりたいと思っていました」という堀さん。なぜ、研究者になったのでしょうか？

堀さんは、大学卒業後、指導教官に勧められてアメリカのノースウエスタン大学に留学したものの、すぐに帰りたくなってしまったそうです。しかし、留学先で堀井秀之さん(現東京大学教授)に出会ったことが転機となりました。4歳年上の堀井さんに、勉強で徹底的にしごかれている

うちに、研究が好きになっていったのです。その後、留学先で博士号をとり、帰国して大学の研究者となりました。

「先生ではなく先輩に教えてもらおうと、教え方はうまくないかもしれませんが、熱く教えてくれる。堀井さんが教えてくれた連続体力学はしっかり身につく、今の研究を進める上で大きな強みになっています」と語る堀さん。今の若い人たちにも、いい先輩との出会いがあることを願っているそうです。

## 利用高度化研究チーム

### HPC Usability Research Team

今日の超高性能スーパーコンピュータは、大量の小さなコンピュータを高速なネットワークでつなぐことで構成されています。このため、スーパーコンピュータを効果的に利用するには、大量のコンピュータをどのように使いこなすかが重要となります。例えば、「京」は60万以上のコンピュータ（プロセッサ）をつな

いでつくられています。これは（数だけ見れば）鳥取県や兵庫県姫路市の人口を超える数です。

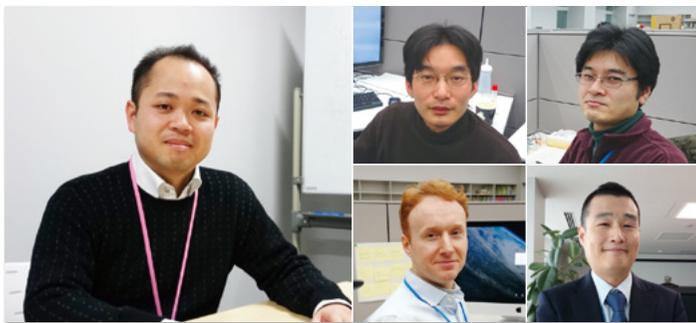
私たち利用高度化研究チームは、このような大量のコンピュータを効率的かつ便利に使いこなす方法について研究・開発を行い、「京」に代表されるような超高性能スーパーコンピュータを、一部の技術者にとどまらず、より多くの人が手軽に利用できる

ようにすることをめざしています。

とをめざしています。

例えば、超高性能スーパーコンピュータ上にさまざまな種類の計算を用意し、利用者がその中から必要なものを簡単に選択し実行できるような計算ポータル構築方法の研究や、コンピュータ上にプログラムによってソフトウェア的に仮想のコンピュータを再現し、超高性能コンピュータを使うことなく超高性能スーパーコンピュータ向けのプログラムを開発・試験できるようにする仮想化技術の研究、プログラムを解析することにより、プログラムを実行する前にそのプログラムの問題やバグを検出することをめざすプログラム解析・検証技術の研究など、さまざまな研究を行っています。

(前田 俊行)



前田俊行チームリーダーとチームのメンバー

## 複雑現象統一的解法研究チーム

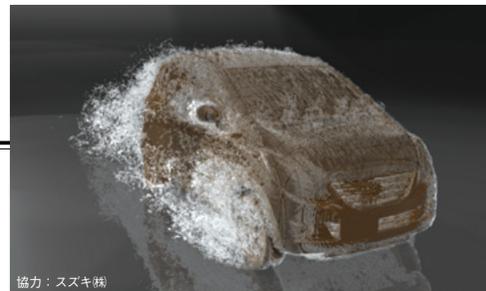
### Complex Phenomena Unified Simulation Research Team

私たちのチームでは、スーパーコンピュータの能力を使って、複雑現象をシミュレーションする方法を考えています。

さて、複雑現象という言葉を知って、皆さんは何を思い浮かべるのでしょうか？あまりに漠然とした言葉なのでとらえどころがないですが、少なくともシミュレーションで扱う「現象」は、科学の法則を「より所」として、その現象のしくみを数式で表せなければなりません。つま

り、より所となる科学的法則さえもわからない「超常現象」は相手にできません。

では、「複雑」はどうでしょう。ここでいう「複雑」とは、いくつかの「現象」が絡み合った状態のことをいいます。例えば、風が吹いて吊り橋が揺れるような一見単純そうな現象は、実は橋の周りの流れ現象と、橋自体の振動現象が合わさった複雑現象ということになります。こうなると格段に難しくなると、70年前にアメリカでこの現象により大きな吊り橋が崩落したことさえあります。今までのシミュレーション



協力：スズキ様

### 自動車の空力シミュレーション

車体の運動と気流の複雑な関係を明らかにすることで、燃費や走行安定性を向上できる。

というのは、ある特定の現象に対して、その現象を表す数式をコンピュータで解く方法（アルゴリズム）を考えてきました。ところが我々の身の回り、特に「ものづくり」の世界では、いくつかの現象が絡み合った結果起こる複雑現象であふれていて、現象を理解して設計に役立てるための新しいシミュレーションが待ち望まれています。

チームのメンバーは日本人2人の他、台湾、スウェーデン、インドから参加しています。この国際色豊かな顔ぶれで、日本のみならず世界のものづくりに貢献できるシミュレーションをめざして、日夜努力しています。

(坪倉 誠)



坪倉誠チームリーダー(後列右)とチームのメンバー

# 構造物のモデル化

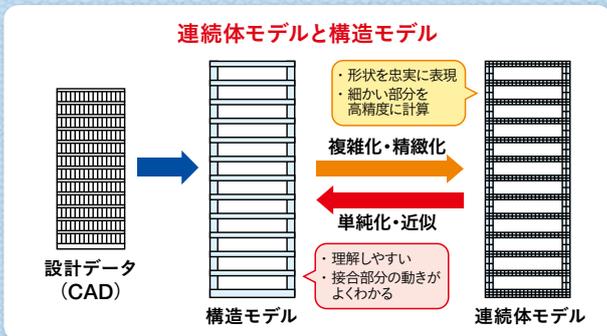
**ビ**ルや橋などの鉄筋コンクリート構造物は、地震の揺れで力を受けると、亀裂が入ったり、その亀裂が大きくなって壊れたりすることがあります。橋の橋脚では、鉄筋が曲がったり、ふくらんだりすることもあります。これを防ぐには、地震の揺れで構造物のどこにどんな力がかかるかを事前に予測しておく必要があります。この予測は、構造物が物理の法則に従って運動するようすを計算することで行います。計算のために、構造物の形状や材質などの情報を、計算機で処理できるような形にすることがモデル化です。

モデル化には、構造物を連続体と見なして細かいブロックに分ける方法(連続体モデル)や、多数の部材がバネでつながっていると見なす方法(構造モデル)などがあり、目的に応じて使い分けられています。

例えば、ビル設計では、設計データをもとに連続体モデルをつくります。通常設計ではビル全体を10万個程度に

分けていますが、ブロックを細かくすればするほど精密に計算できます。そこで、HPCI戦略プログラム分野3では「京」の計算能力を活かし、高層ビルを数cm刻みで分け、10億個程度のブロックをつくって揺れを計算しています。このような研究は、構造物の耐震性をよりよくするのに役立ちます。

一方、構造物の特徴を大きくつかむには、構造モデルが向いています。構造モデルでは、ビルを床、壁などの部材に分け、部材間の結合をバネで表します。分野3の都市全体を揺らすシミュレーションでも、ビルをこのような構造モデルで表して計算しています。ビルの形状、部材の重さや部材間をつなぐバネの強さが正確であるほど、より信頼性の高いシミュレーションを行うことができます。そこで、分野3の研究では、平面地図や高さの情報からビルの正確な形状をつくり出す手法を開発するとともに、関係機関からビルの構造や材質に関するデータを得る努力をしています。



## 「CPUを水で冷やす」

**?** CPUは、温度が上がると故障しやすくなります。「京」では、どうやって冷やしているのでしょうか？

「京」を安定して運用するためには、CPU温度を30℃以下に保つことが必要です。そのため、CPUを確実に冷やせる「水冷方式」を採用し、CPU温度をいつもモニターしています。これにより、CPUはふだん20℃以下に保たれ、ちょっとしたいへんな計算をしても30℃

には届きません。システムボードのCPUの上には、銅製の水冷モジュール(中空になった板状の部品を細い銅管でつないだもの)がぴったりくっついており、その中を流れる水がCPUを冷やします。水は計算機棟2階の空調機械室からポンプで

送り出され、配管を通してCPUが収められているラックに供給されます。配管に「出口」はなく、水は空調機械室と水冷モジュールの間をぐるぐる循環しています。

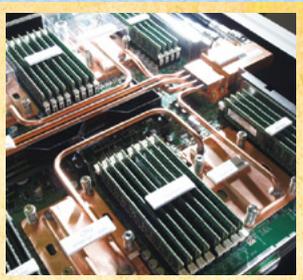
1枚のシステムボードの上を流れている水は約110mLで、1分間で約20回、入れ替わります。水冷モジュールに入る水は15℃で、出ていくときは17~18℃になります。

水は、水道水から鉄分を除き、イオン交換樹脂で処理した純水を使います。また、循環している水の一部をいつも取りだして、浄化処理をしています。水の腐敗の原因となる微生物やゴミを取り除くためにフィルターでろ過したり、水中に溶けた酸素で銅が腐食するのを防ぐために脱気膜を通したりします。紫外線による殺菌や微量



脱気膜

の腐食防止剤の投入も行われます。「京」のCPUの性能は、冷たくてきれいな水に守られているんですね。



システムボード上の水冷モジュール



空調機械室の配管とポンプ

