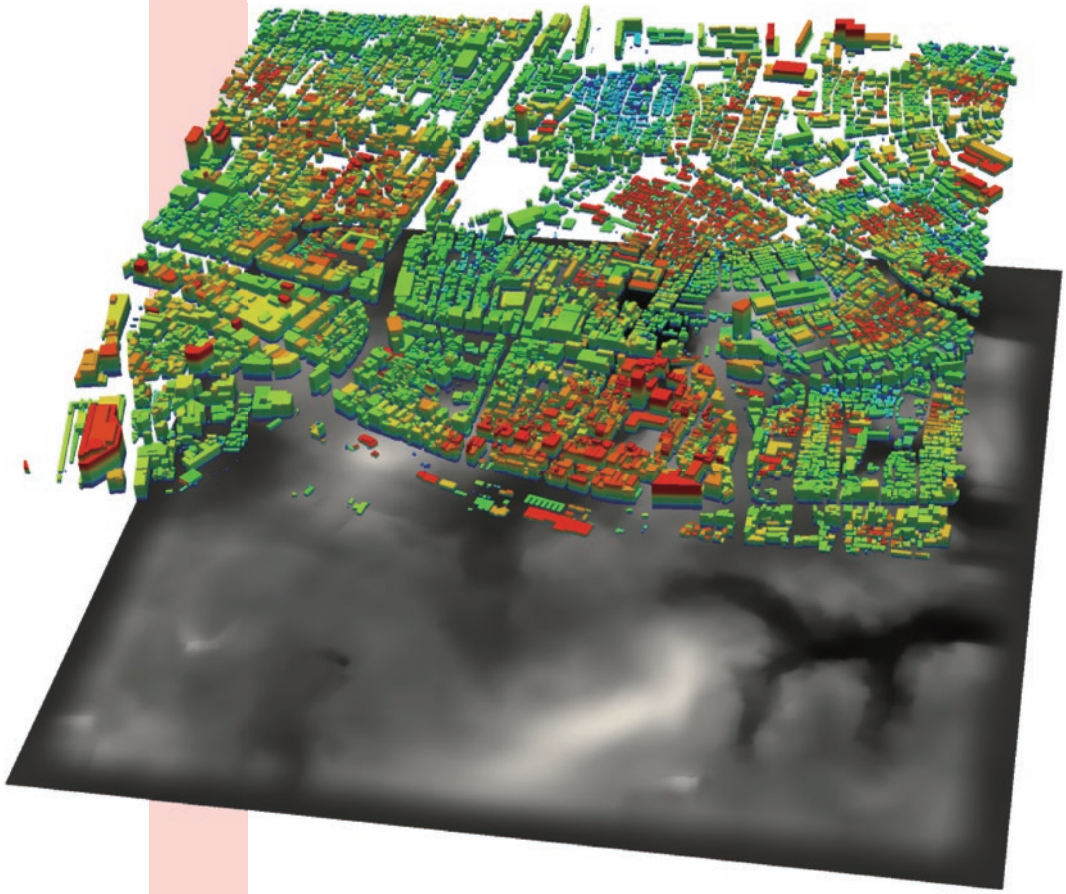
地震研究所
ニュースレター
Plus
No.21
NEWS LETTER Plus
Earthquake Research Institute,
The University of Tokyo

どこでどのような地震が発生し、地震波が地殻をどう伝わり、堆積層でどのように増幅され、その上の構造物がどのように揺れて壊れるのか。そして、人はどう避難するのか。地震研究所の巨大地震津波災害予測研究センターでは、地震に関わるすべてを包括的にシミュレーションする「統合地震シミュレータ」の開発に取り組んでいる。その実現には、これまでの限界を超え、大規模で高分解能のモデルを構築し、複雑で膨大な計算を高速で行う必要がある。市村 強 准教授らは、Computational Science（計算科学）を駆使して、それを可能にする革新的な手法の開発に挑んでいる。地震シミュレーションの最先端を紹介しよう。



特 集

Computational Science for Earthquake

複雑なものを複雑なままシミュレーションする

東京大学地震研究所

Computational Scie

複雑なものを複雑なままシミュレー

巨大地震津波災害予測研究センター 准教授　市村 強

都市スケールの地震シミュレーションを可能に

地震によって都市がどのような被害を受けるかを高い信頼性をもって想定することは、防災対策を考える上で非常に重要である。しかし、これまでは過去の被害データの統計解析に基づいて被害を想定し、対策を立てていた。経験ベースの被害想定の信頼性は、必ずしも高くない。そこで市村准教授らは、信頼性の高い被害想定を可能にする新しいシミュレーション手法の開発に取り組んでいる。

シミュレーションとは、物理現象を数式で表したモデルをつくり、その数式を計算機で解いて現象を再現・予測するものである。「都市の被害を想定するには、地盤と構造物のモデルを構築し、地盤がどのように揺れ、その揺れに構造物がどのように応答するかを計算する必要があります。しかし、地盤震動のシミュレーションは非常に難しい」と市村准教授。地震波は、地盤の上の軟らかい堆積層で非線形に増幅される。しかも、地盤の形状や物性の分布は、浸食や堆積によってとても複雑になっている。そのため、計算が膨大になってしまうのだ。そこで、計算量を実現可能な範囲で抑えながらも本質を抽出できそうなモデル、例えば地盤は水平成層であるとしてシミュレーションしていた。しかし市村准教授は、「簡単化したモデルは有用ではありますが、限界もあります。複雑なものは複雑なまま解析した方がいい」と指摘する。

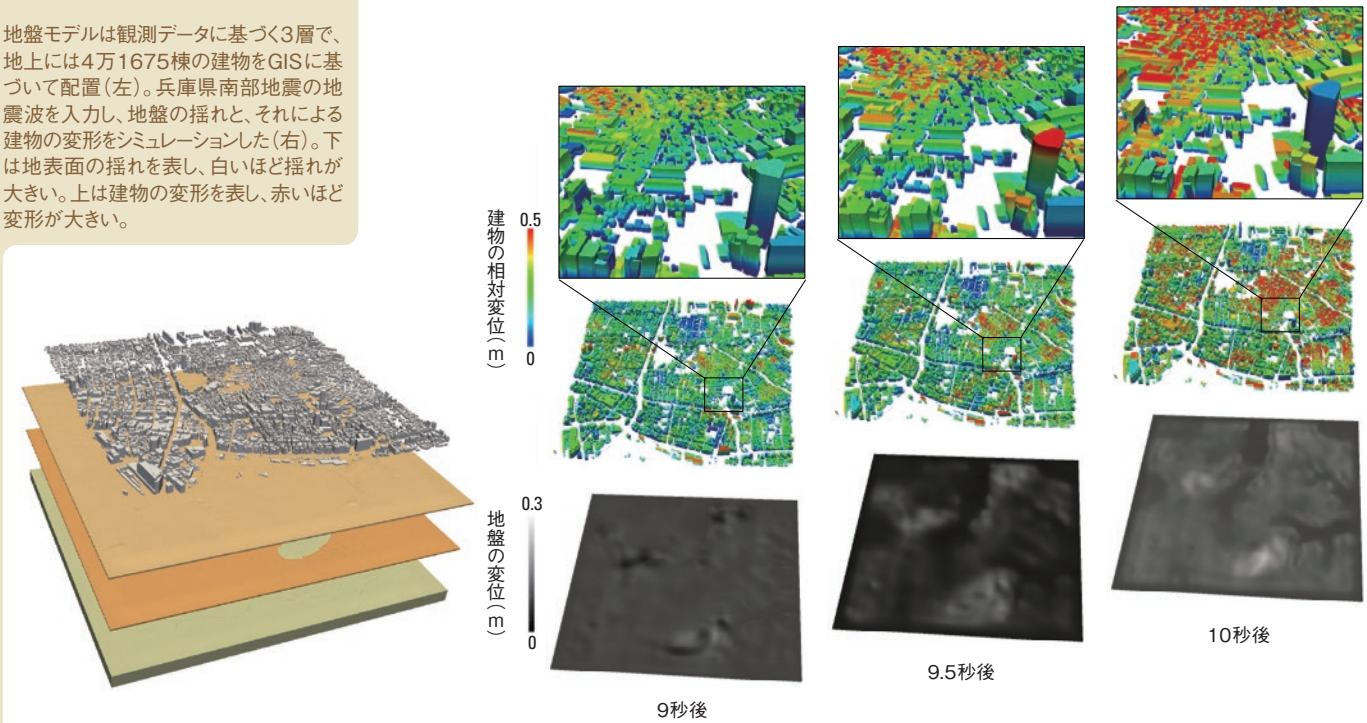
そこで市村准教授らは、計算量を減らすため、マルチグリッド法や精度混合演算などComputational Science（計算科学）的な手法を駆使した新しいシミュレーション手法を開発。「GAMERA」と名付けたこの手法を使うことで、観測データに基づいて複雑な地盤の形状を正確にモデル化し、大規模な非線形計算を高速で行い、地盤震動をシミュレーションすることが可能になった。

図1と表紙は、GAMERAを用いた都市部の地震シミュレーションの例だ。3.5km四方で、地盤モデルは観測データに基づいた3層になっている。地上には、地理情報システム（GIS）に基づいて4万1675棟の建物を配置。建物はGISのデータなどからモデル化している。そして、1995年の兵庫県南部地震の地震波を入力し、堆積層による地震波の増幅を計算。次に、建物1棟ずつについて地盤震動に対する15秒間の応答を計算し、変形の大きさを推定した。この解析には、スーパーコンピュータ「京」の全ノードを使い、7時間44分かかった。自由度は400億だ。計算式に含まれる変数の数を自由度といい、自由度が増えるほど計算は複雑になる。この計算は、400億元の方程式を数万回解くことに相当する。これまでは100万程度が限界だった。

「これほど大規模な都市の地震シミュレーションは世界初です。複雑な地盤構造に建物1棟1棟の特性が加わって、全体として非常に複雑な被害分布になることが示されています。これは、新しい手法の開発などComputational Scienceの進展、『京』の

図1　都市部の地震シミュレーション

地盤モデルは観測データに基づく3層で、地上には4万1675棟の建物をGISに基づいて配置（左）。兵庫県南部地震の地震波を入力し、地盤の揺れと、それによる建物の変形をシミュレーションした（右）。下は地表面の揺れを表し、白いほど揺れが大きい。上は建物の変形を表し、赤いほど変形が大きい。



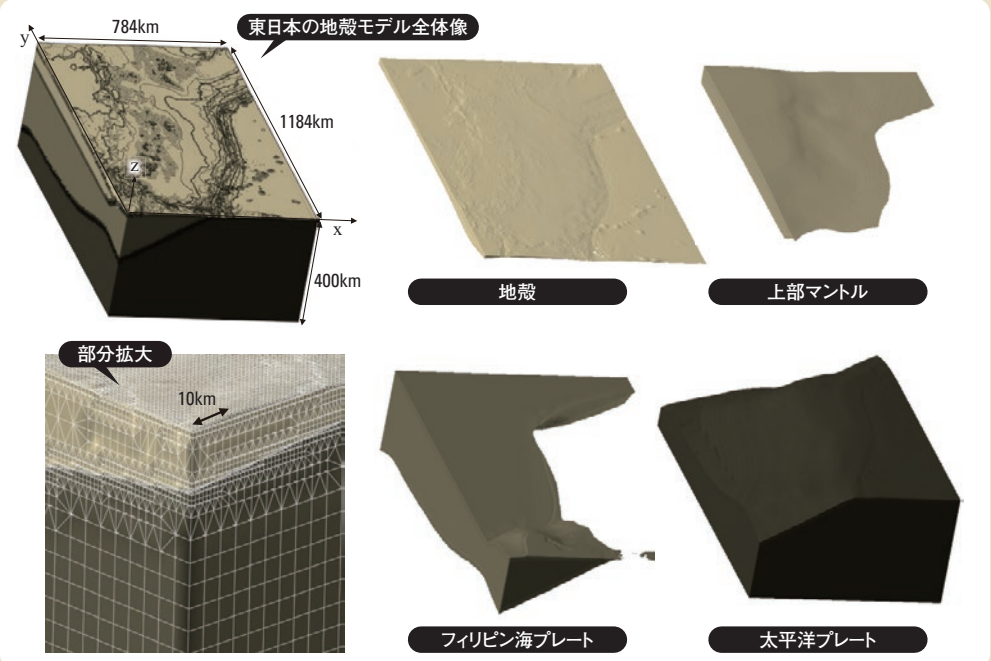
nce for Earthquake

ションする

ような超高速計算が可能な計算機の出現、そして地盤の構造など観測データの蓄積によって、初めて可能になったものです」

この都市部の地震シミュレーションは、2014年の「ゴードン・ベル賞」にノミネートされ、大きな注目を集めた。ゴードン・ベル賞は、科学技術分野で高性能な並列計算を実現した論文に与えられるアメリカ計算機学会の賞だ。

図2　東日本の地殻モデル　複雑な地殻の形状を観測データに基づいて4層でモデル化している。分解能は1km。



断層から都市まで一気にシミュレーションする

建物を揺らす地震波は、断層の破壊によって発生する。プレート運動によるひずみの蓄積から断層の破壊、地震波の伝播も、統合地震シミュレータに必須の要素である。「断層破壊など地殻変動のシミュレーションに使うモデルをつくるために必要な地殻の形状や変動に関する観測データは、蓄積されてきています。しかし、これまでは観測データを間引いてモデルをつくっていました。地殻変動のように巨大で高分解能のシミュレーションには複雑で膨大な計算が必要で、モデルを簡単化しなければ手に負えなかったのです」と市村准教授は言う。「観測データが多いほど分解能や精度の高いシミュレーションができます。何とかして蓄積されているすべての観測データを使って地殻モデルをつくり、シミュレーションをしたい。そこで私たちは、大規模で高分解能の地殻モデルを構築し、高速な数値解析を可能にする新しい手法を開発しました」

図2は、新しい手法で構築した東日本の地殻モデルである。地殻、上部マントル、フィリピン海プレート、太平洋プレートの4層になっている。水平方向1184km×784km、深さ400kmで、分解能は1kmだ。自由度は1億5700万である。この東日本の地殻モデルを用いて、2011年の東北地方太平洋沖地震の断層すべりを入力して地殻変動を解析した。その結果を、従来用いられている地殻モデルと比較したところ、大きく違っていた。「複雑なものは複雑なまま解析することで、観測データからより信頼性の高い結果を引き出すことができるのです」

さらに、プレートの沈み込みからシミュレーションしようとすると、3000km四方、深さ1000kmの高分解能なモデルが必要になる。今までは手が出せなかった規模だ。自由度は100億である。市村准教授らは、その超大規模な地殻モデルの構築にも成功。東北地方太平洋沖地震の発生後3年間、余効変動によって日本列島がどのように変形したかを解析した。この計算には、「京」の10分の1のノードを使い、約50分かかった。実際に観測されている地震発生後3年間の地殻変動と比較したところ、モデルのチューニングはまだしていないにもかかわらず、変動の方向など定性的な特徴は再現されていることが分かった。

「こうしたさまざまな階層のシミュレーション手法を開発し、さらにそれらを統合することで、プレートの沈み込みという地球科学のスケールから都市という工学的なスケールまで地震の一連の現象をつなげて解析するためのシステムの確立を目指しています」

信頼性の高いシミュレーションは社会の対応力を向上させる

「私たちの役割は、Computational Scienceを駆使して、これまでは諦めていたシミュレーションを可能にする革新的な手法を開発すること」と市村准教授は言う。

新しい手法によって大量で複雑なデータを処理できるようになれば、さまざまな地震のシナリオを入力したり、構造物の経年変化や地下に埋設されたライフラインなどより多くの要素を含むシミュレーションも可能になる。「信頼性の高いシミュレーションを考え得るシナリオに対してすべて行えば、想定外をなくし、地震に対する社会の対応力を増すことにつながる」と市村准教授。

今後の鍵を聞くと、「人」という答えが返ってきた。「信頼性の高い地震シミュレーションの実現には、都市や構造物などに関する工学、地震や津波などの地球科学、そして計算科学の知識を備えた人が連携して、難しい問題を解決しなければなりません。特に、学生の皆さんの新しい発想ができる若い知性に期待しています」

シミュレーションの魅力は？「急速に発展してきたシミュレーションは、地震に限らず、すべての分野に共通のアプローチです。汎学問で新しい手法を創造し、誰も解いていないような問題を解くことができるというのが、シミュレーションの面白さ、魅力です」と市村准教授。「解かなければならない難しい問題は、まだたくさんあります。そして難しい問題を解けば解くほど、さらに難しい問題が出てくる。だからこそ面白いのです」

（取材・執筆:鈴木志乃）

本所永遠の使命とする所は
地震に関する諸現象の科学的研究と
直接又は間接に地震に起因する災害の予防並に
軽減方策の探究とである（寺田寅彦）

TOPICS

イベント報告

●2014年度技術研修会

毎年恒例の技術研修会が今年も1月28日から30日まで開催され、全国の大学・研究機関から技術職員の方々が集い、技術発表や所外研修（今年は海洋研究開発機構［JAMSTEC］）に参加しました。

所外研修で訪れたJAMSTECでは講義のほか、施設や海洋調査船「かいよう」を見学。

●UTokyo Research, on site

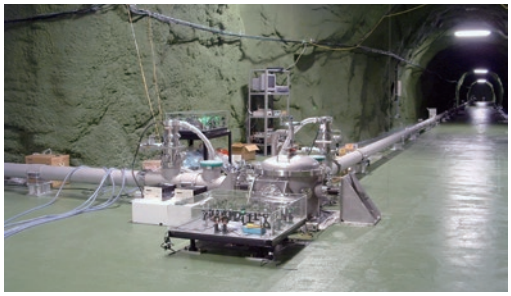
東京大学本部広報室が、駐日の海外メディアや大使館の科学技術アタッシェ（専門職員）などを対象に、本学の研究を紹介するため、シリーズで企画する英語のイベント「UTokyo Research, on site」。5回目となる今回は、2月27日に地震研究所で開催されました。「Flying into the frying pan : Volcano research at the University of Tokyo」というテーマで、火山に関連する最新の研究を3つ、海外メディアに向けて紹介しました。

無人ヘリコプターによる火山観測についての紹介

最近の研究から

最近の研究を紹介するコンテンツ「最近の研究から」に、新たな論文が追加されています。ぜひご覧ください。
http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/category/thesis/

● 自動アラインメント制御を用いた100m絶対長レーザー干渉計によるひずみ観測



神岡鉱山内に設置されているレーザーひずみ計

地震・火山情報

●西之島の噴火活動

2013年11月21日に始まった西之島の噴火活動が今も続いており、ホームページで随時情報を更新しています。
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/?page_id=183&id=4805

ストロンボリ式噴火で飛び散る噴石。2015年3月4日撮影。

●2015年2月17日三陸沖の地震

2015年2月17日08時06分ごろ三陸沖でM6.9の地震が発生し、気象庁より津波注意報が発表されました。
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/?page_id=183&id=6799

INFORMATION

人事異動

●4月1日

採用	竹尾明子	観測開発基盤センター 助教
	原田智也	災害科学系研究部門 特任助教
	等々力 賢	災害科学系研究部門 特任助教
	池澤賢志	技術部総合観測室 技術職員
	諏訪祥士	技術部総合観測室 技術職員
昇任	辻 浩	技術部総合観測室 技術専門員
転入	古村孝志	災害科学系研究部門 教授
	見供 隆	事務長
	佐藤美智代	庶務チーム・庶務 係長
転出	三宅弘恵	災害科学系研究部門 准教授
	戸張勝之	事務長
	権藤智香子	庶務チーム・チームリーダー 専門職員

●3月31日

定年退職	瀬野徹三	数理系研究部門 教授
任期満了	田中聖三	巨大地震津波災害予測研究センター 特任助教

●2月16日

昇任	塩原 肇	海半球観測研究センター 教授
	三宅弘恵	災害科学系研究部門 准教授

東京大学地震研究所 ニュースレターPlus 第21号

発行日　2015年3月31日

発行者
東京大学 地震研究所

編集者
地震研究所 広報アウトリーチ室

制作協力
フォトンクリエイト
（デザイン：酒井デザイン室）

問い合わせ先
〒113-0032
東京都文京区弥生1-1-1
東京大学 地震研究所
広報アウトリーチ室

Eメール
orhp@eri.u-tokyo.ac.jp

ホームページ
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/