

大規模数値シミュレーションによる 地震発生から地震動・地盤增幅評価までの 統合的予測システムの構築とその社会実装のための取組

プロジェクト代表 堀 高峰
国立研究開発法人海洋研究開発機構
海域地震火山部門・地震津波予測研究開発センター

海域観測データを最大活用した海溝型巨大地震・津波の発生過程の現状把握&推移予測システムの実現



先行プロジェクト：ポスト京重点検討課題（2014年度～2019年度） 地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築



地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築
東京大学地震研究所 ほか4機関

Development of Integrated Simulation Systems for Hazards and Disasters Caused by Earthquakes and Tsunamis
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo and 4 other institutions

K-computer (RIKEN)

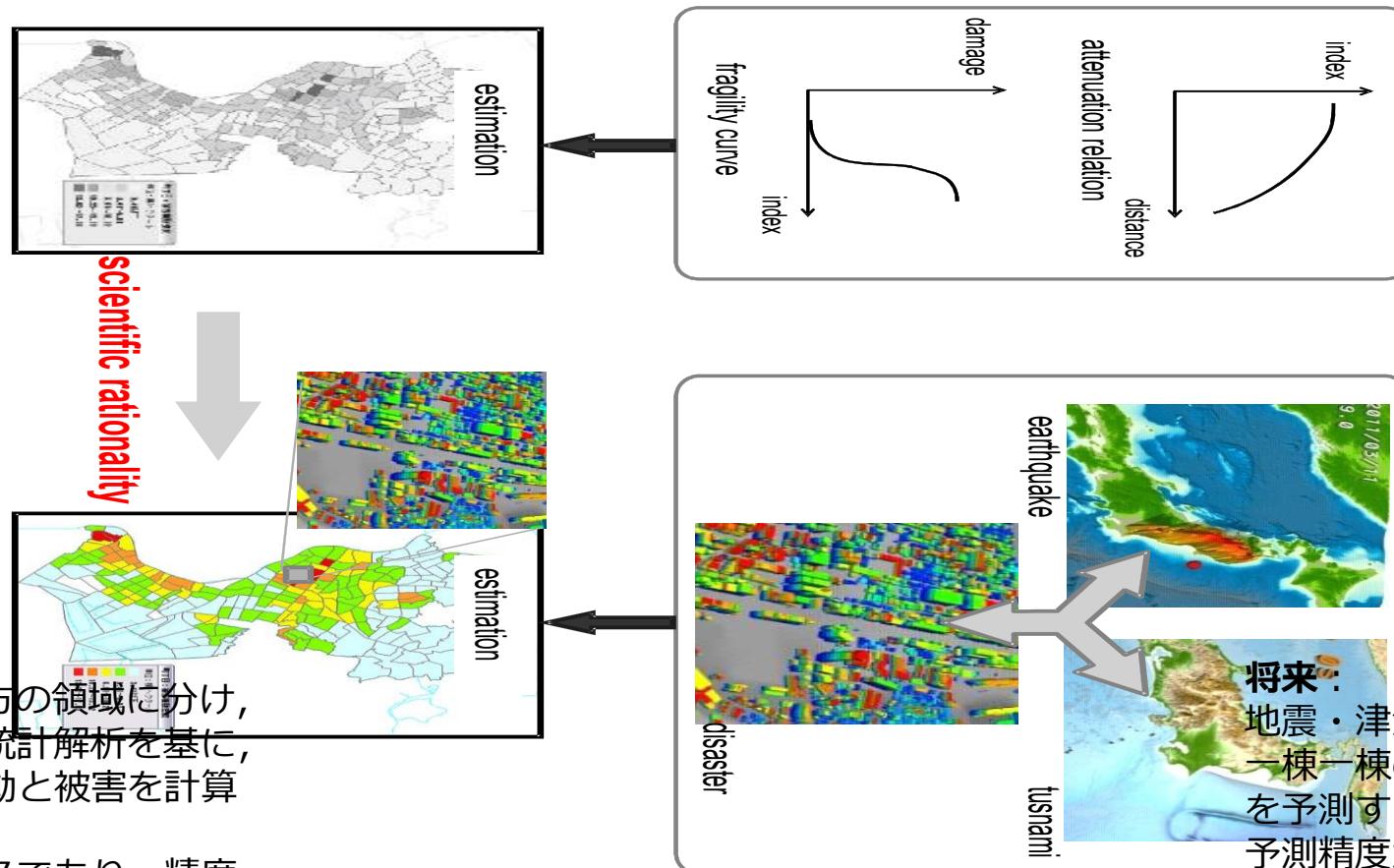


Supercomputer Fugaku (RIKEN)



先行プロジェクト：ポスト京重点検討課題（2014年度～2019年度） 地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築

地震・津波による被害の予測



現状：

都市を数百m四方の領域に分け、過去のデータの統計解析を基に、各領域での地震動と被害を計算する。
計算は経験ベースであり、精度は高くない。
他に代替がなく、経験ベースの予測に頼らざるを得なかつた。

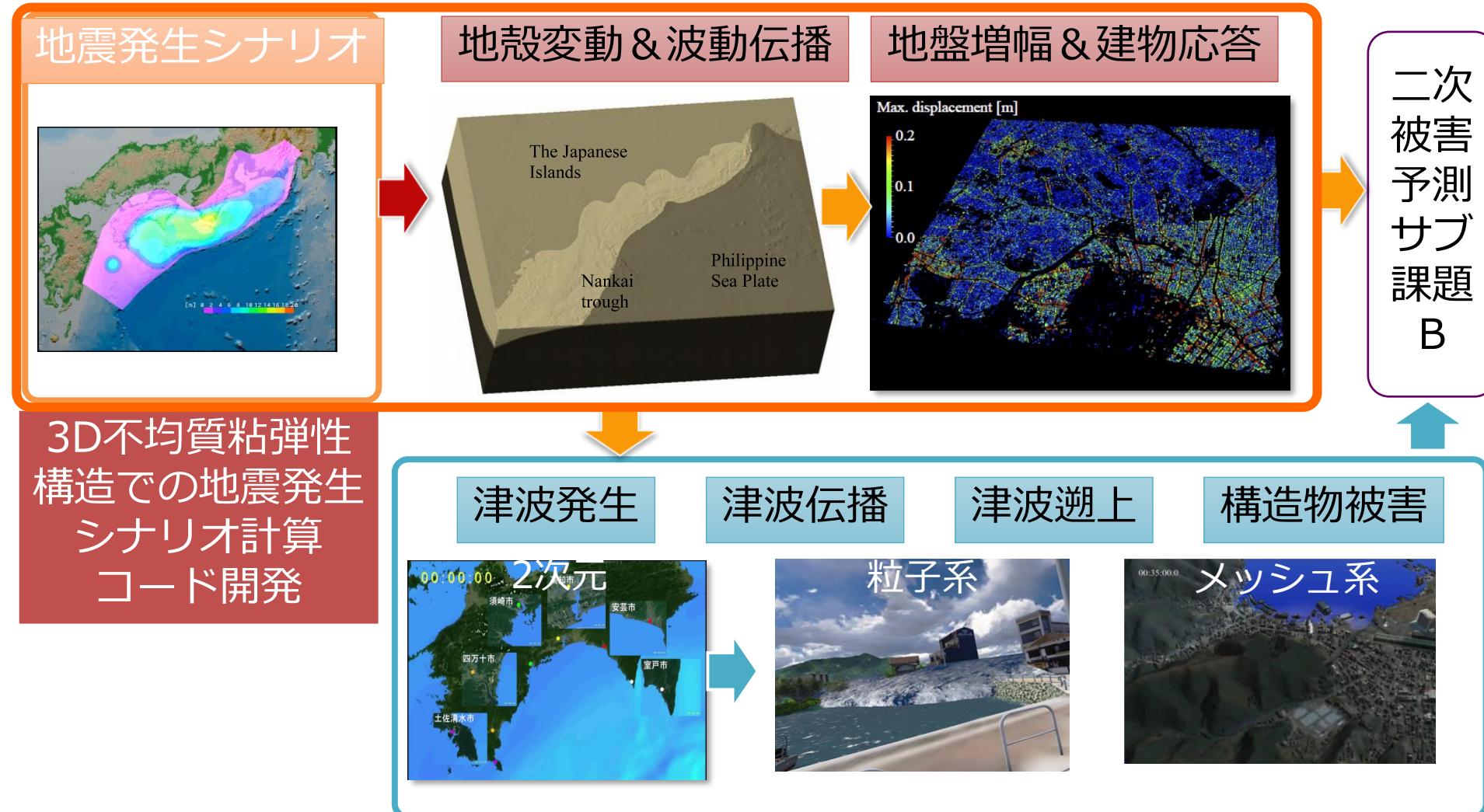
**FUTURE
simulation**

将來：
地震・津波の物理過程のシミュレーションと構造物一棟一棟の応答シミュレーションから、災害・被害を予測する。
予測精度が向上されることが期待される。
計算科学の進歩を最大限利用した計算ベースの予測
高い科学的合理性を持つ。
都市のさまざま变化に追随可能

THEQUAKE DISASTER ASSESSMENT

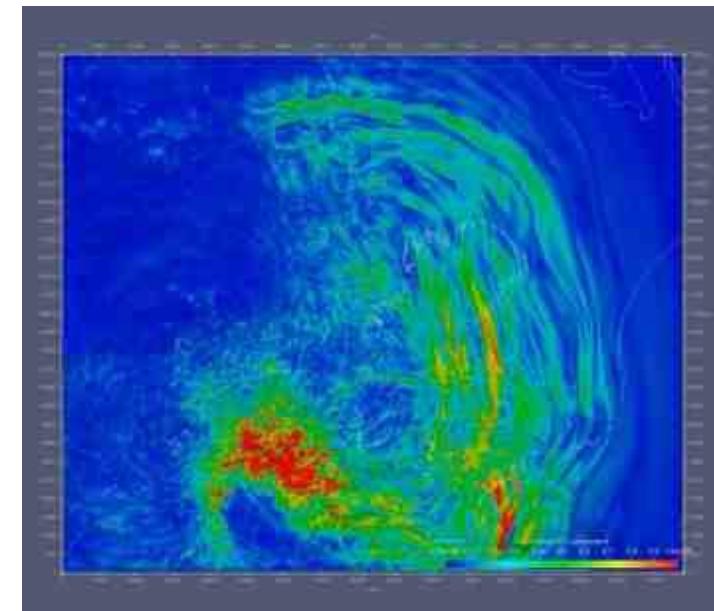
先行プロジェクト：ポスト京重点検討課題（2014年度～2019年度） 地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築

- 不確実さを考慮した多数のシナリオにもとづく強震動・津波による災害被害予測のための数値解析コンポーネントの高度化・増強

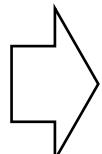


プロジェクト立ち上げの背景

- ・ポスト「京」重点課題3において、「富岳」での活用を目指した地震災害予測のためのプログラム群を開発
 - ・サイエンスと計算機・計算科学双方での実績
 - ・世界初の大規模な地震解析をいくつか実現（サイエンス）
 - ・世界最高峰の国際会議（SC）にて、5年連続で高い評価
 - ・ゴードンベル賞ファイナリスト（'14, '15, '18），ベストポスター賞（'16, '17），WACCPDベストペーパー賞（'16, '17）
 - ・「富岳」コンピュータにより、さらに信頼性が向上すると期待
 - ・国の被害想定におけるニーズとの合致
 - ・国の被害想定を担う内閣府（防災担当）では、長周期地震動評価のための推計手法の高度化を必要としていた。そのニーズに、重点課題3で開発した大規模地震解析手法が合致。



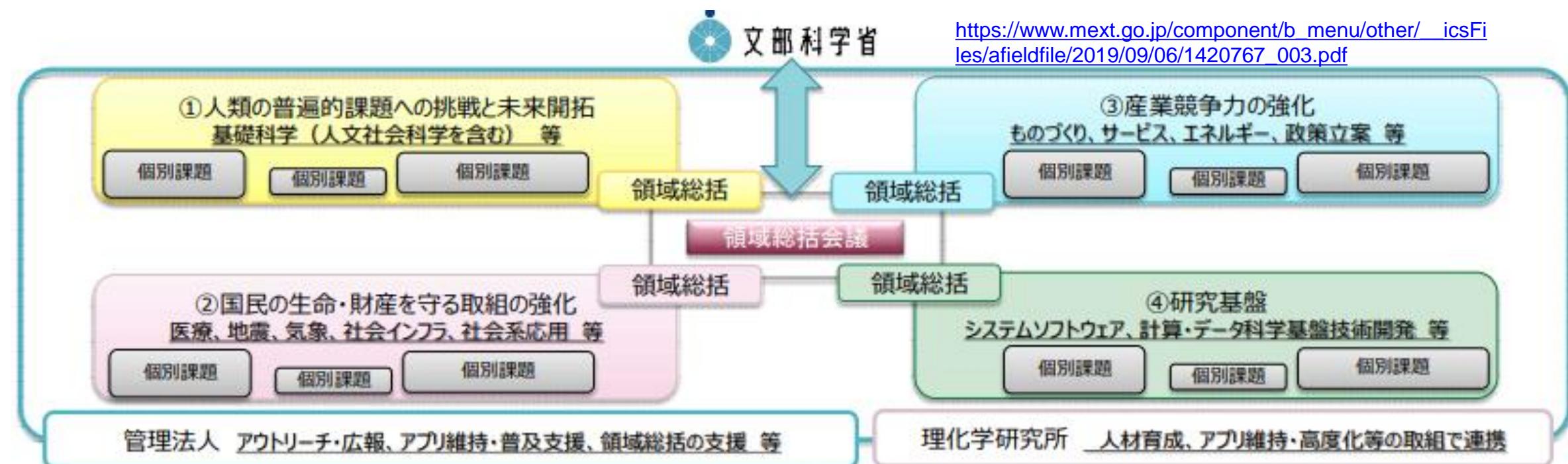
関東地域の広範囲を対象に3次元有限要素法を用いて地震動計算を実施（「相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動による被害予測の高度化」委員会資料 H30.6.12）



「富岳」でしかできない規模の地震動・地盤增幅計算開始が待たれる状況

「『富岳』成果創出加速プログラム(FY2020-2022)」の概要

- 「早ければ2021年の運用開始を目指して開発が進められている『富岳』において、京の最大100倍の実効性能を（中略）最大限活用し、2020年度から試行的利用を通して、シミュレーションを中心とする計算科学とAIやデータ科学を組み合わせた新たな科学的パラダイムを構築し、早期に成果を創出する」



「『富岳』成果創出加速プログラム(FY2020-2022)」の概要

| 領域 | 課題名 課題代表者名（所属）※所属は2020年2月28日時点 | | |
|--------------------------|---|-----------------|--|
| 領域① 人類の普遍的課題への挑戦と未来開拓 | <p>量子物質の創発と機能のための基礎科学 —「富岳」と最先端実験の密連携による革新的強相関電子科学 今田 正俊（早稲田大学理工学術院総合研究所）</p> <p>全原子・粗視化分子動力学による細胞内分子動態の解明 杉田 有治（理化学研究所生命機能科学研究センター）</p> <p><u>シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで</u> 橋本 省二（高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所）</p> <p><u>宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築</u> 牧野 淳一郎（神戸大学理学研究科）</p> <p>大規模データ解析と人工知能技術によるがんの起源と多様性の解明 宮野 悟（東京大学医科学研究所）</p> <p>脳結合データ解析と機能構造推定に基づくヒトスケール全脳シミュレーション※ 山崎 匡（電気通信大学大学院情報理工学研究科）</p> <p><u>核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓</u> 渡邊 智彦（名古屋大学大学院理学研究科）</p> | 領域③ 産業競争力の強化 | <p>省エネルギー次世代半導体デバイス開発のための量子論マルチシミュレーション 押山 淳（名古屋大学 未来材料・システム研究所）</p> <p>「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発 加藤 千幸（東京大学 生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター）</p> <p>航空機フライト試験を代替する近未来型設計技術の先導的実証研究 河合 宗司（東北大学大学院 工学研究科）</p> <p><u>次世代二次電池・燃料電池開発によるET革命に向けた計算・データ材料科学研究</u> 館山 佳尚（物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点）</p> <p><u>環境適合型機能性化学品</u> 松林 伸幸（大阪大学 大学院基礎工学研究科）</p> <p>大規模計算とデータ駆動手法による高性能永久磁石の開発 三宅 隆（産業技術総合研究所 材料・化学領域 機能材料コンピュテーション研究センター）</p> <p><u>スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用</u> 吉村 忍（東京大学大学院工学系研究科）</p> |
| 領域② 国民の生命・財産を守る取組の強化 | <p><u>プレシジョンメディシンを加速する創薬ビッグデータ統合システムの推進</u> 奥野 恒史（理化学研究所医科学イノベーションハブ推進プログラム）</p> <p><u>防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測</u> 佐藤 正樹（東京大学大気海洋研究所）</p> <p><u>マルチスケール心臓シミュレータと大規模臨床データの革新的統合による心不全パンデミックの克服</u> 久田 俊明（株式会社UT-Heart研究所）</p> <p><u>大規模数値シミュレーションによる地震発生から地震動・地盤增幅評価までの統合的予測システムの構築とその社会実装</u> 堀 高峰（海洋研究開発機構海域地震火山部門・地震津波予測研究開発センター）</p> | 領域④ 研究基盤 | <p>全脳血液循環シミュレーションデータ 科学に基づく個別化医療支援技術の開発※ 和田 成生（大阪大学院基礎工学研究科）</p> |
| ※計算資源のみ配分 | | | |
| 全19件（2件は計算資源配分のみ） | | | |

本課題の位置づけ・最終目標

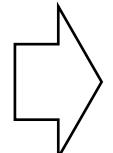
- ・「大規模数値シミュレーションによる地震発生から地震動・地盤增幅評価までの統合的予測システムの構築とその社会実装」
 - ・応募領域：②国民の生命・財産を守る取組の強化

国の被害想定のための地震・津波災害予測におけるアプリケーション活用

- ・重点課題から開発してきた大規模有限要素を用いた計算コードが、国の被害想定のもととなる長周期地震動計算や津波初期水位計算で用いられるようアプリケーションの改良を国と連携して実施する。
- ・建築・土木系企業等が、国の想定と同等の計算ができる仕組みを構築する。

地震に関する災害被害予測のための大規模アプリケーションの開発

- ・「富岳」の性能を引き出すように、計算科学・計算機科学の最先端技術を駆使して、地震に関する災害被害予測のための大規模アプリケーションを改良する。



地震災害の定量的評価を超大規模計算で実施するための統合的予測システムを構築して、**国の被害想定における地震動・地盤增幅評価の過程に実装し、政策判断や実務等に活用される基礎を築く。**

実施体制・関係機関

共通基盤：超大規模高速FEMソルバー

◆HPC・AI技術を駆使し、「富岳」の性能を引き出すFEMソルバーの開発 カーネルコード開発:東大地震研(市村・藤田)

テーマ1:長周期地震動

◆地震波伝播、長周期地震動手法の開発と適用

企業における長周期地震動計算:
大崎総研・小堀鐸二研・大成建設

国の長周期地震動計算への適用:
内閣府防災担当・東大地震研
災害科学

テーマ2:地殻変動

◆地震発生、地殻変動手法の開発と適用

テーマ3:浅層地盤增幅

◆浅層地盤における非線形地盤增幅手法の開発と適用

大規模計算

各テーマ向けコード改変

東大地震研(市村・藤田)

企業との共同研究

実計算用機能
・実行環境整備

海洋研究開発機構(堀・縣)
国・企業・サイエンスコミュニティとの連携

プロジェクトの統括

企業における非線形地盤增幅計算:東電設計・東京ガス

国の被害想定への適用:
内閣府防災担当

計算結果のサイエンスコミュニティでの活用

東大理固体地球・科研費新学術「スロー地震」・地震調査研究推進本部・防災科研・文科省委託事業「防災南海P」

国の津波被害想定への適用:
内閣府防災担当

計算結果の都市被害予測への活用
理研R-CCS総合防災・防災科研

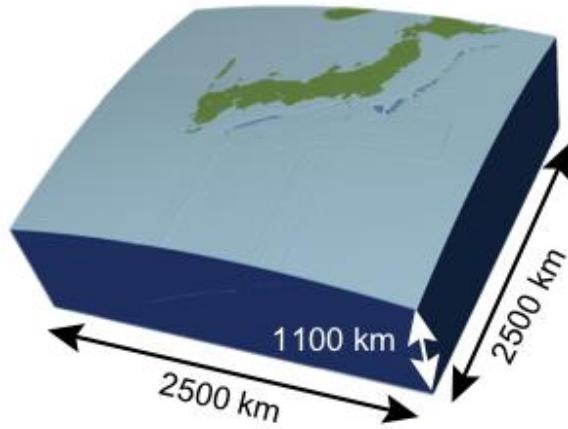
代表機関 協力機関 連携機関 関係事業・機関

- 代表機関： 海洋研究開発機構（プロジェクト代表：堀高峰）
- 協力機関： 東京大学地震研究所（プロジェクト副代表：市村強）
- 連携機関： 内閣府（防災担当）、東京大学大学院理学系研究科、理研R-CCS
株式会社 大崎総合研究所、株式会社小堀鐸二研究所、大成建設株式会社、東京ガス株式会社、東電設計株式会社

開発するコード群

E-Cycle FEM

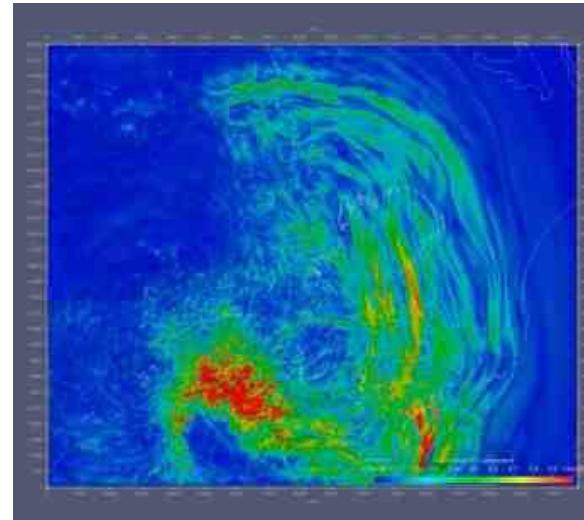
粘弾性変形計算のための
大規模有限要素法



地震学&測地学への貢献

E-Wave FEM

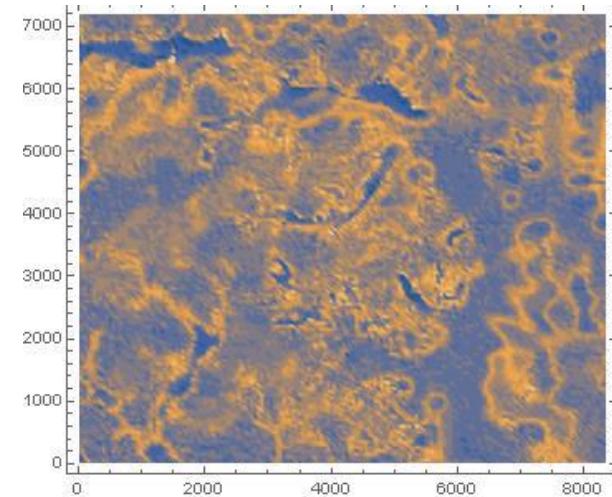
断層運動による地震波動場
を高分解能で計算するため
の大規模有限要素法



国々の被害想定への貢献

STRIKE

非線形地盤増幅計算用の
大規模非線形有限要素法



地盤応答評価への貢献

(1) 国の被害想定のための地震災害予測での活用

- 国の被害想定を行う内閣府（防災担当）から、相模トラフの巨大地震による長周期地震動を、重点課題から協力して開発してきた大規模有限要素コードを用いて計算した結果が、初めて公表される予定
 - 先行プロジェクトで開発してきた統合的予測システムの数値解析コンポーネントが、国の被害想定のための基盤技術として、社会実装されることになる
 - これは、地形や地下構造の影響をより正確に取り込むためなど、内閣府（防災担当）が進める「長周期地震動評価のための推計手法の高度化」の第一歩であり、非線形地盤增幅評価における新たな方向性が示されることになる

これと並行して海洋研究開発機構で進めるサイト地震動評価の仕組みを用いて、本申請課題終了後に、国の被害想定で活用された計算コードと共に地下構造モデル、さらには機構の地球シミュレータ（ES4）を、企業が実務や基盤研究で使用できるようにする。

被害想定に必要な精度検証・機能追加：

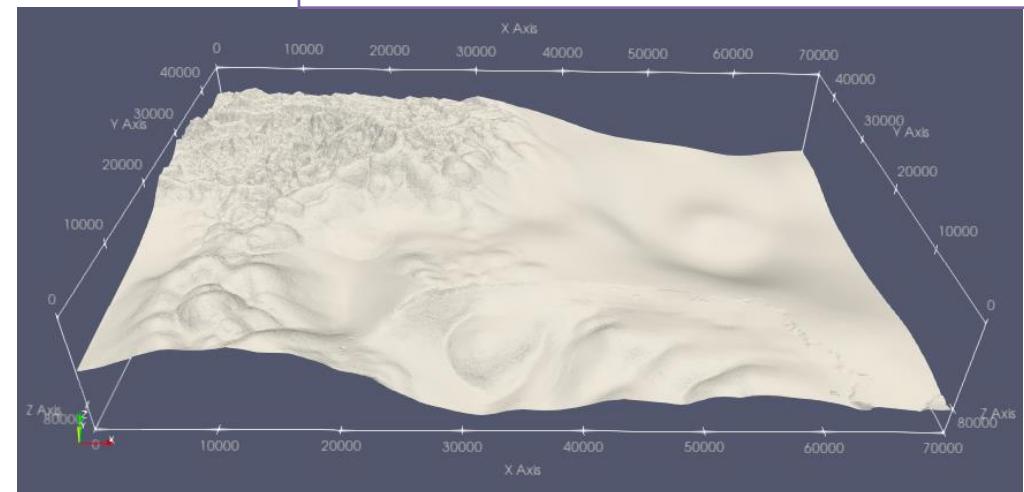
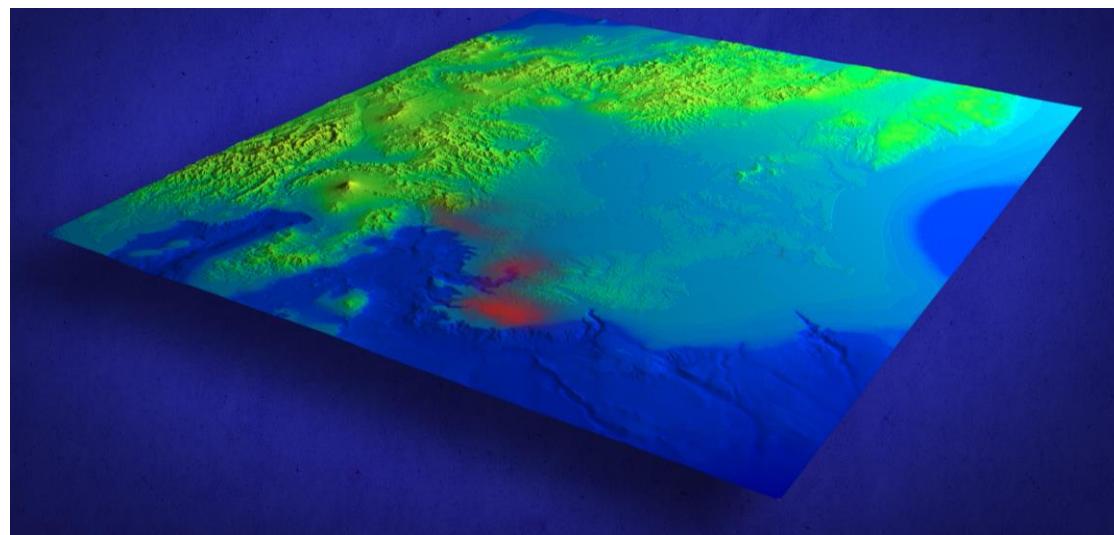
「富岳」を用いた国の被害想定に必要な規模の地震動計算

- ・関東地方における長周期地震動のシミュレーション

- ・詳細な地形を反映させた計算モデルの構築
 - ・588億自由度、147億個の四面体要素からなる
- ・「富岳」の4096計算ノードを5時間使用
- ・計算結果の可視化

→国の長周期地震動高度化計算に本計算プログラムが使用される準備ができている

「政策対応枠」で計算が実施されている



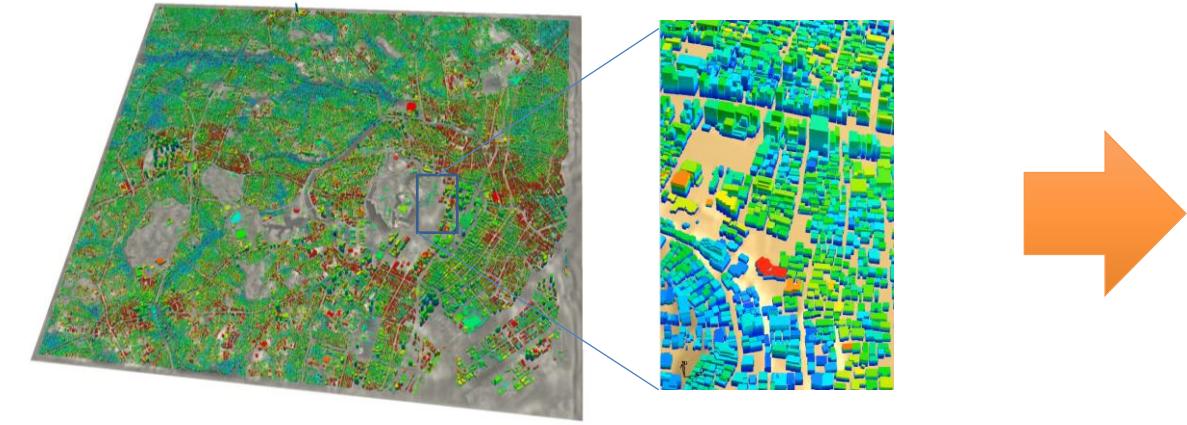
Vs1500m/s層の下端(縦5倍)

(2) 富岳での大規模高速化の取り組み（地震研）

地震に関する災害被害予測のための大規模アプリケーションの開発

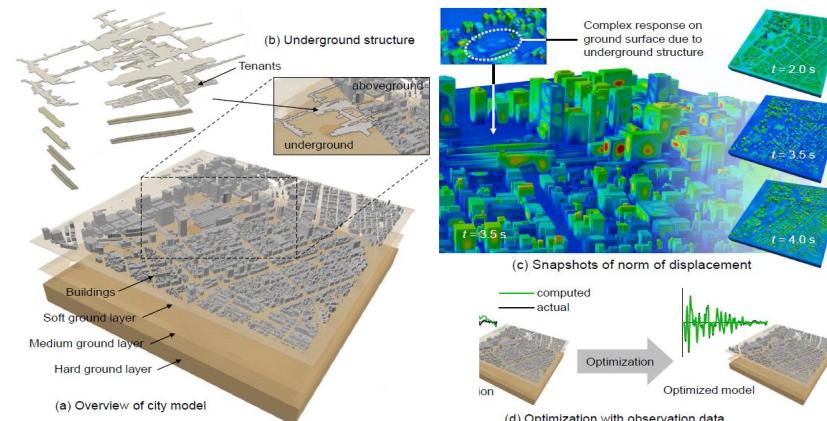
- ・「富岳」の性能を引き出すように、計算科学・計算機科学の最先端技術を駆使して、地震に関する災害被害予測のための大規模アプリケーションを改良する。
- 152K-computer-node parallel scalable implicit solver for dynamic nonlinear earthquake simulation digital twin city (Ichimura et al., 2021)
 - 地下深部での地震発生から地下＆地上構造物の揺れまでのシームレスな超大規模計算を「富岳」で実施
 - アーキテクチャ依存が低く、他の問題にも適用可能性の高いソルバーの提案
 - 「富岳」全系での超大規模並列有限要素計算で高い並列性能を実現
- Fast scalable implicit solver with convergence of physics-based simulation & data-driven learning: toward high-fidelity simulation with digital twin city
 - SC20 research posterにaccept (Ichimura, Fujita et al.)
- A Fast Scalable Iterative Implicit Solver with Green's function-based Neural Networks
 - SC20 the 11th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systemsにaccept (Ichimura, Fujita et al.)

(2) 富岳での大規模高速化の取り組み 京から富岳で何が変わったのか？



(Ichimura, et al., SC15 Gordon Bell Finalist)

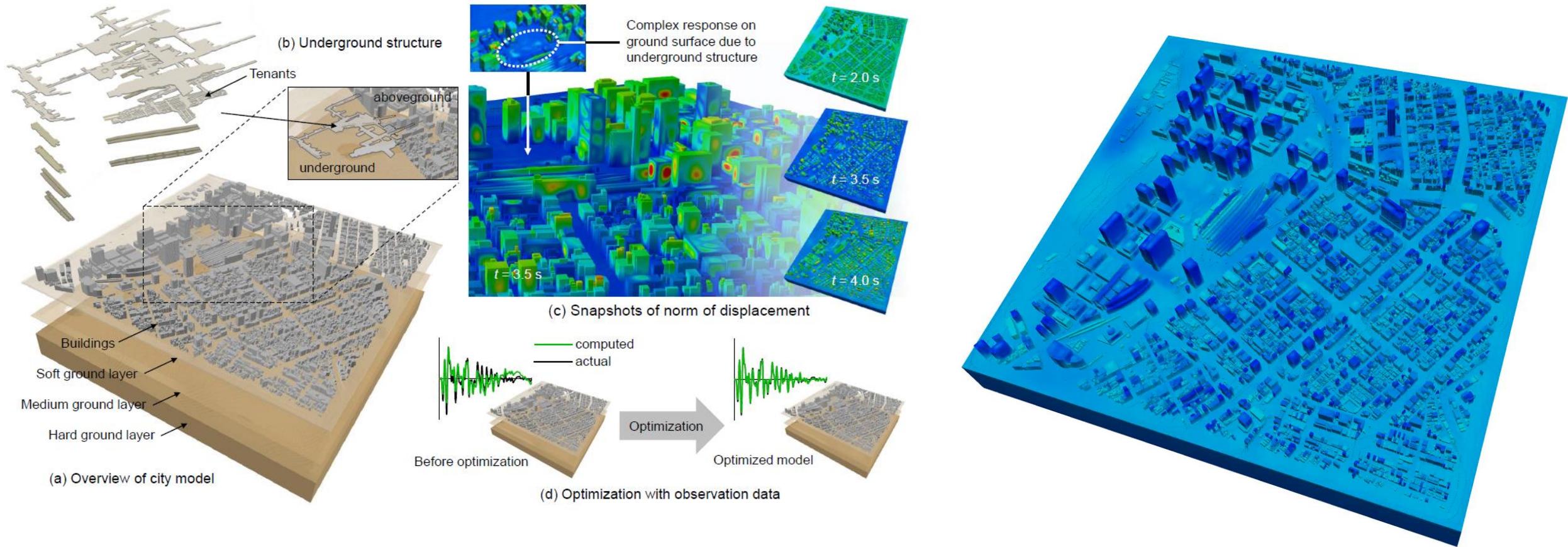
地盤増幅計算→地表の建物の揺れ
両者を**独立**に計算
「京」全系を用いた計算



(Ichimura, et al., SC20 Technical Poster)

地表構造物 + 地下構造物 + 地盤の**統合**解析
変形特性の大きく異なるものを同時計算
収束しにくい高負荷大規模計算
「富岳」2,048ノードでの実施

大規模ターミナル駅の地上・地下構造物を模擬した地震応答解析 (「富岳」成果創出加速プログラム)

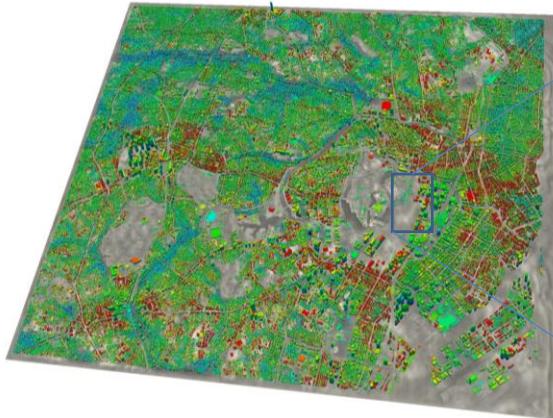


110億自由度、26億要素の計算モデルと「富岳」の98,304 CPU コア(2,048ノード)を用いて実施。

(Ichimura, Fujita, et al., SC20 Technical Poster)

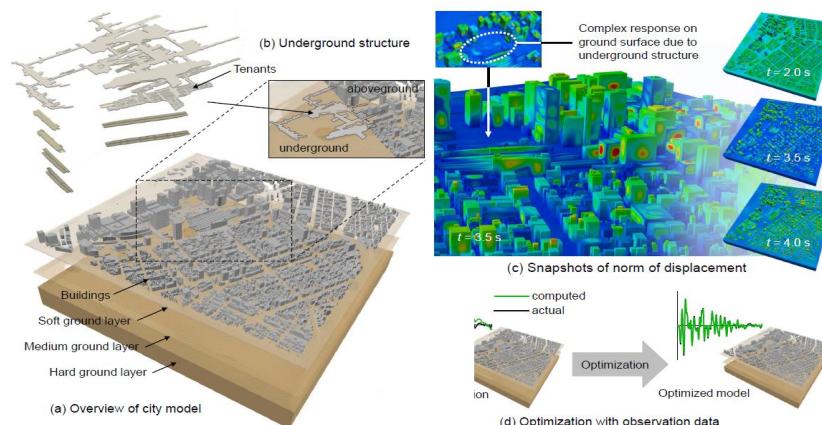
(2) 富岳での大規模高速化の取り組み

京から富岳で何が変わったのか？



(Ichimura, et al., SC15 Gordon Bell Finalist)

地盤増幅計算→地表の建物の揺れ
両者を**独立**に計算
「京」全系を用いた計算



(Ichimura, et al., SC20 Technical Poster)

地表構造物 + 地下構造物 + 地盤の**統合**解析
変形特性の大きく異なるものを同時計算
収束しにくい高負荷大規模計算
「富岳」2,048ノードでの実施

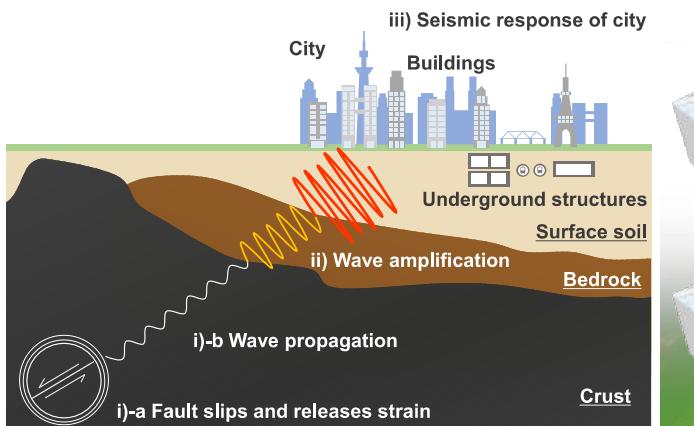


関東平野を含む**広域**モデルで、地下深部
の地震発生から**構造物**の揺れまでの
シームレスな計算を**「富岳」**で実施

(Ichimura, Fujita, et al., HPCAsia 2021, Best Paper Award)

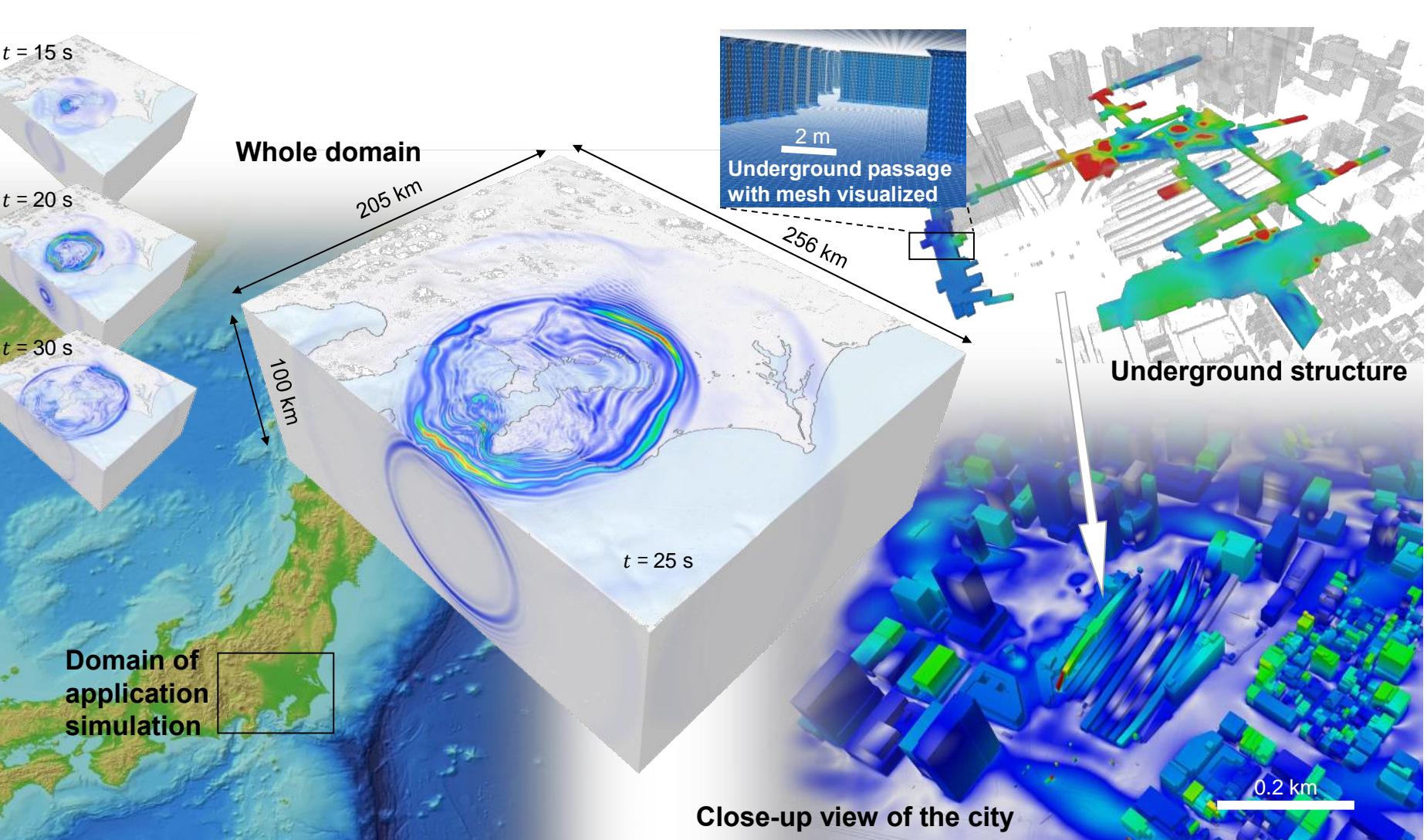
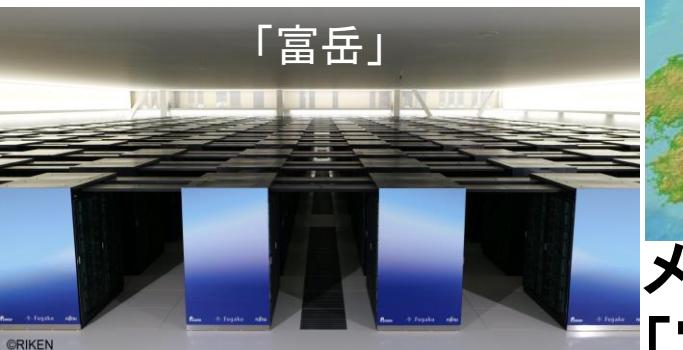


関東平野を含む広域モデルで、地下深部の地震発生から構造物の揺れまでのシームレスな計算を「富岳」で実施



- 震源断層
- 地震波伝播
- 地盤増幅
- 地下構造物を含む都市の揺れ

すべてを統合した計算を実現



メッシュ: 0.125m to 64m 3,240億自由度

「富岳」全系（京コンピュータの約1,000倍の解析能力を実現）

Ichimura et al. (2021)

(3) 企業が国の想定と同じ計算ができる仕組み作り (開発したアプリケーションの維持・普及に関する取組)

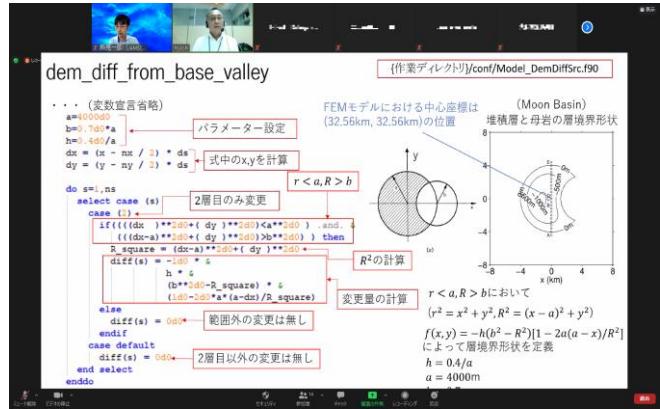
- 重要構造物（超高層ビルやライフライン）に関わる建築・土木の主要企業が、国の想定と同じ大規模有限要素コードや地下構造モデルを用いて富岳で大規模計算ができる仕組みを構築し、実務で有用となる問題設定を検討した上で、富岳上の計算を最終年度に実施。
 - これと並行して海洋研究開発機構で進めるサイト地震動評価の仕組みを用いて、本申請課題終了後に、国の被害想定で活用された計算コードと共に地下構造モデル、さらには機構の地球シミュレータ（ES4）を、企業が実務や基盤研究で使用できるようにする。
 - これにより、超高層ビルを対象にした長周期地震動など、実務に必要な検討に、本申請課題で開発したアプリケーションが継続的に活用されるような仕組みを構築する。



地球シミュレータ（ES4）

企業との連携：E-wave FEMのユーザインタフェース整備・チュートリアル実施

- Linux環境上でE-wave FEMを比較的容易に取り扱えるような計算環境を構築
 - 海洋研究開発機構所有の計算サーバ（プリプロセス用）と東京大学Oakforest-PACS上にまず構築し、現在では「富岳」・ES4へも展開済み。
 - ユーザ用マニュアルの整備
- 本課題連携企業を対象に、昨年10－12月にチュートリアルを計5回、今年10月に1回実施済み
 - 構築済みの計算環境を使用して複数の例題解くためのハンズオントレーニング
 - 企業からのフィードバックを計算環境に反映中
 - 現実的な不均質構造でのモデル化まで
- 非線形地盤応答は地震研との共同研究を発展（東京ガス・東電設計）



WEB会議システムによるチュートリアルの模様

This screenshot shows a configuration file editor with several tabs open, each containing parameter definitions and notes. The tabs include:

- 1. conf/Model/Parameters.h90: Notes on basic parameter definitions.
- 2. conf/Model/Geometries.h90: Notes on defining subdomains (e.g., 'NX 12, NY 12' for a 12x12 grid).
- 3. conf/Model/Elements.h90: Notes on element types and sizes.
- 4. conf/Model/Boundary.h90: Notes on boundary conditions.
- 5. conf/Model/Load.h90: Notes on load application.
- 6. conf/Model/Output.h90: Notes on output options.
- 7. conf/Model/DemDiffSrc.f90: Notes on defining source terms.

Each tab contains detailed explanations and examples related to the specific parameters defined in the code.

整備中のユーザー用マニュアル

企業による地震動計算の活用に向けて

- ・昨年度は、企業のユーザに使いやすい計算環境の構築を構築した。ただし、シンプルな速度構造を扱うことを想定した設計にとどまっていた。
- ・今年度は、J-SHISデータベースや全国一次地下構造モデルなどの現実的なデータを取り込みやすいように、計算環境をアップデートした
- ・10/5はアップデートした環境に関するチュートリアルを実施
- ・今年度～来年度にかけて具体的な問題設定を行い、連携企業の方々が「富岳」での大規模計算を実施予定



チュートリアルでの例題で計算対象とした3次元不均質地下構造の有限要素モデル。東西180km、南北150km、鉛直50kmの領域に33の層（層内で地震波速度一様）からなる現実的な3次元不均質地形・地盤・地下構造モデルを構築。震源ならびに地下構造情報は防災科研からの提供

成果の利活用を含む他のプロジェクトとの連携

基盤S「震災軽減のためのヘテロ解析による地殻イメージング手法の開発とその適用」
(H30-R4)
地殻構造推定・推移予測の新たな手法開発

開発された手法を現実的な問題に適用できるよう大規模化

JAMSTEC サイト地震動評価プロジェクト
第2階層スパコン（ES4）を活用し、国の想定と同等の計算ができるプラットフォームを企業に提供



サイエンスでの活用
科研費学術変革
Slow to Fast 地震学
に参画
ゆっくり地震から通常地震までの統一的なシミュレーション・
解析の実現

国難である南海地震への適用
防災対策に資する南海
トラフ地震調査研究
プロジェクト (R2-R6)
現実的な地下構造モデルで
の地殻活動解析の実現

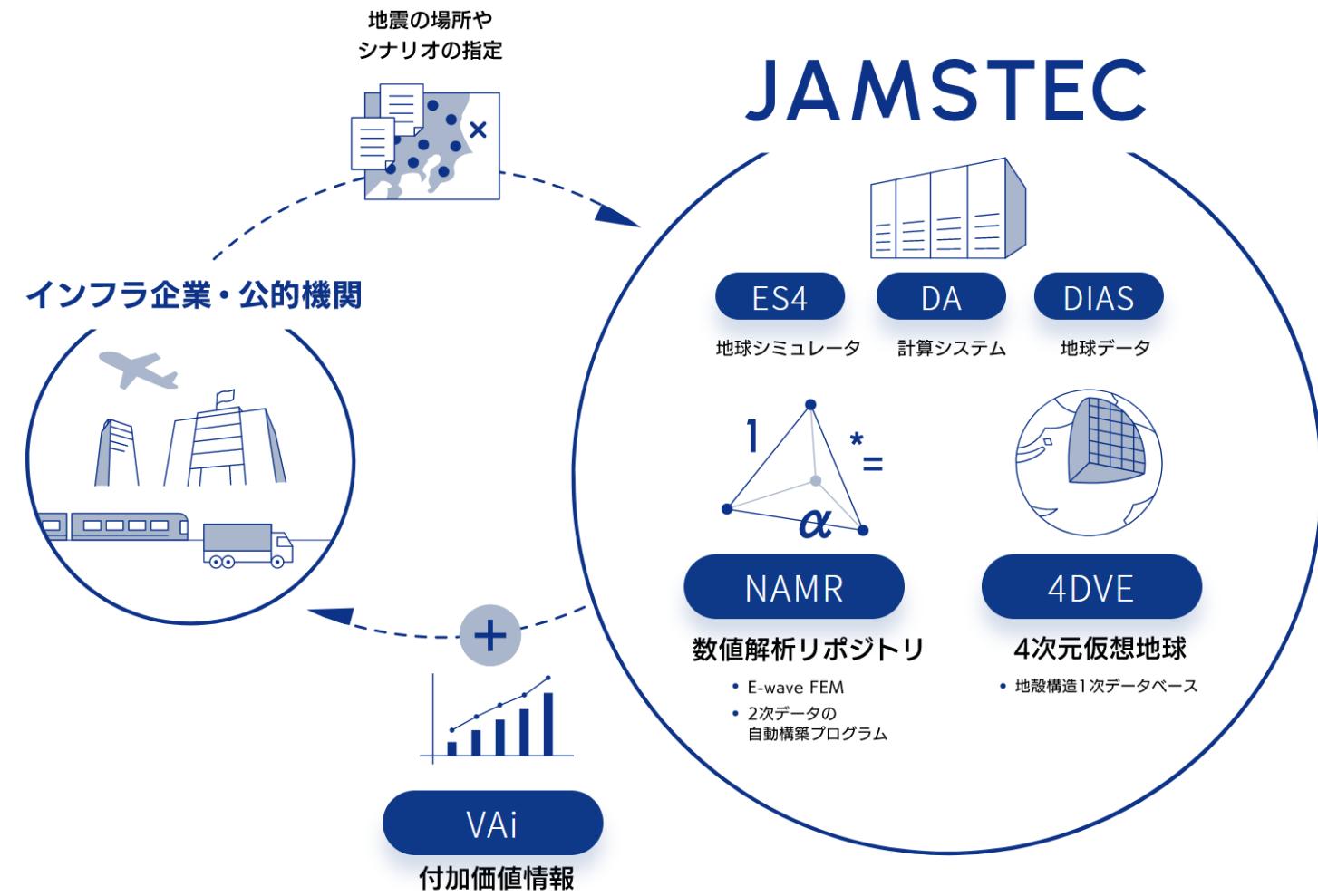
第2階層上の社会実装
産業利用へ

社会科学系との連携
都市丸ごとシミュレーション

R-CCS総合防災・減災
研究チームとの連携
「富岳」での避難・交通・
経済等の大規模社会科学系
シミュレーション

JAMSTEC サイト地震動評価PJ

- ・第2階層スパコン（ES4）を活用し、国の想定と同等の計算ができるプラットフォームを企業等に提供
 - ・富岳加速プログラム終了後も継続した取組として進める
 - ・国の被害想定で活用される長周期地震動計算コードとプリ・ポスト環境の整備（数値解析リポジトリ）
 - ・国にオーソライズされた地下構造モデルを活用できる環境整備（四次元仮想地球）



その他のプロジェクトとの連携

防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト (R2-R6)

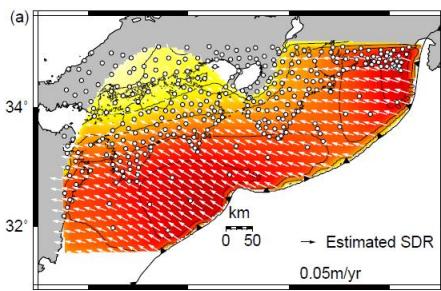
現実的な地下構造モデルを用いた巨大地震震源域での固着・すべりの現状把握と推移予測のための手法開発

固着・すべり状態の時空間変化の推定

現状: 地下構造の曖昧さやプレート境界以外、分岐断層等の海域断層および粘弾性の効果が考慮されていない

粘弾性構造モデルでの固着・すべりの推定とその推定誤差を定量的に評価する手法を開発

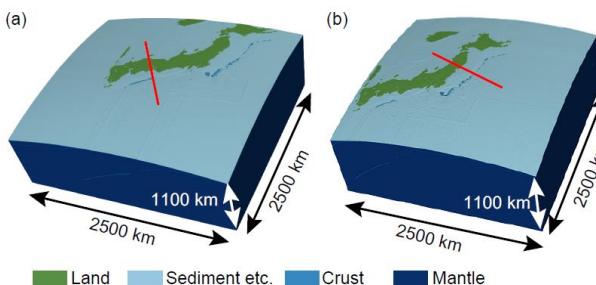
国土地理院と
密接に連携

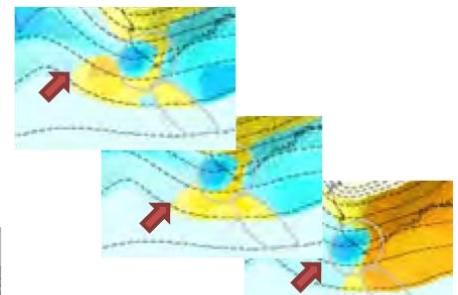
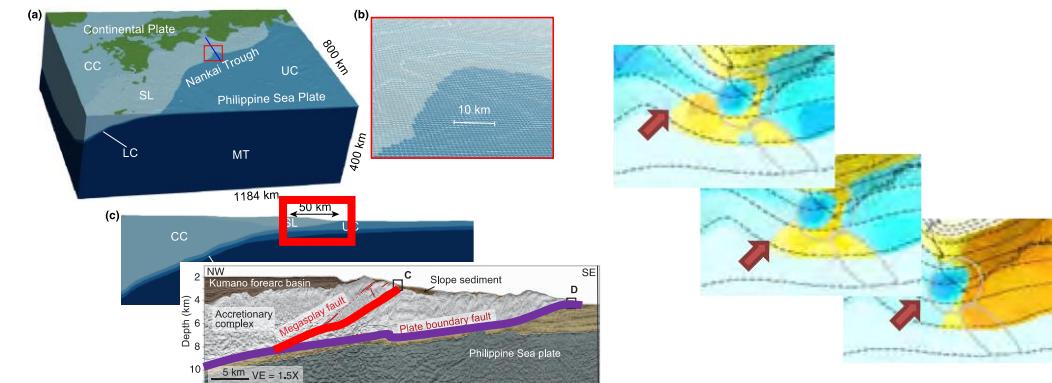
地震時すべり分布の即時決定

現状: 地下構造のモデルが単純(実際は三次元的に不均質)

三次元不均質地下構造モデルを用いつつ、推定不確実性の定量評価も含めた地震時すべりの即時推定手法を開発



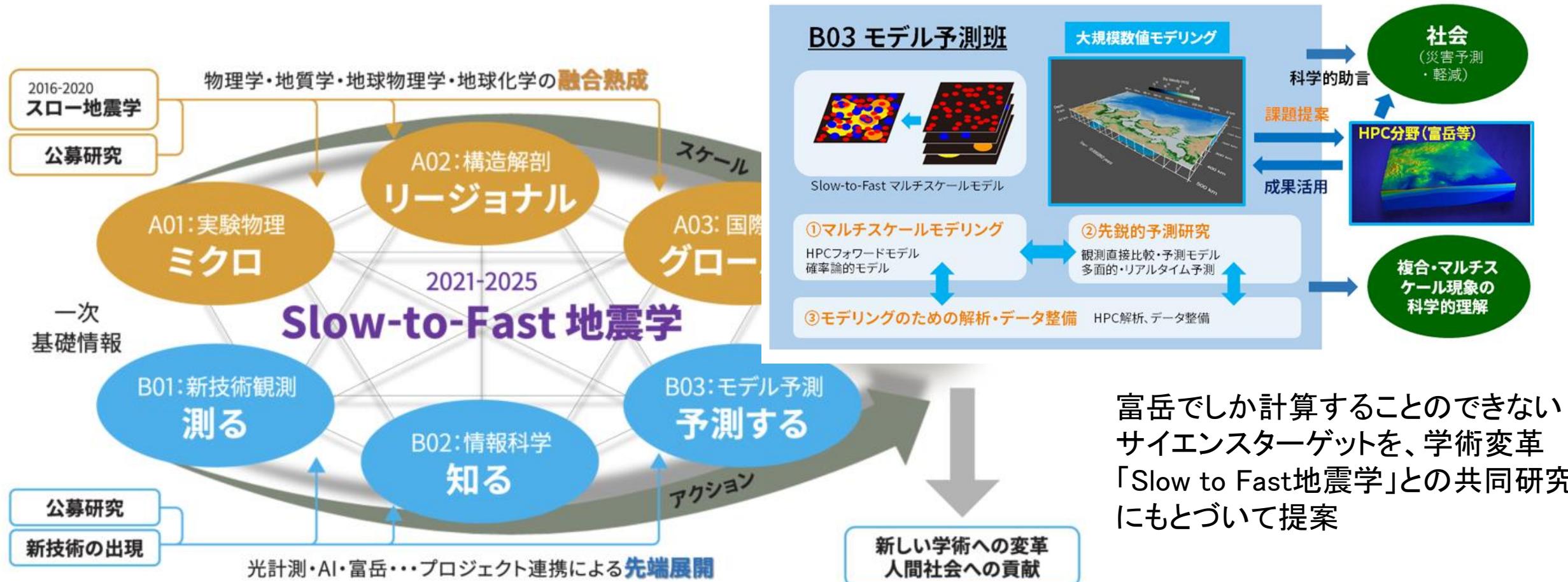
地下構造モデル・現状把握結果と過去の履歴を踏まえた推移予測



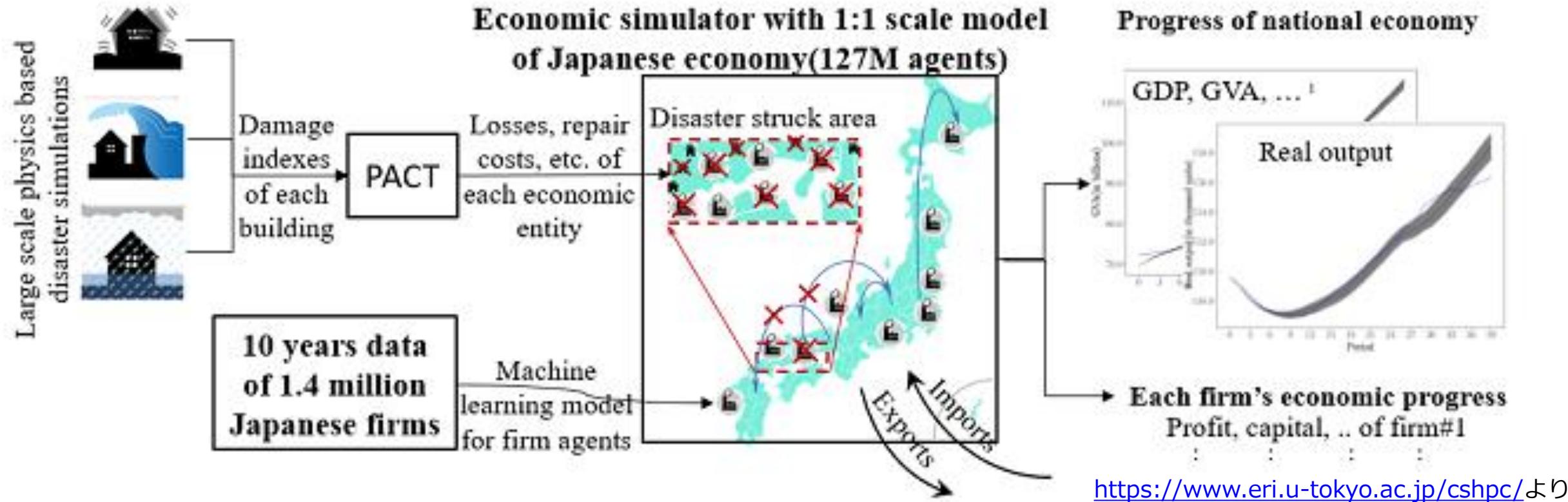
その他のプロジェクトとの連携

科研費学術変革 (A)Slow to Fast 地震学 (R2-R6)

スロー地震から普通の地震まで、地震という現象を幅広くとらえ、深く理解し予測するための研究計画



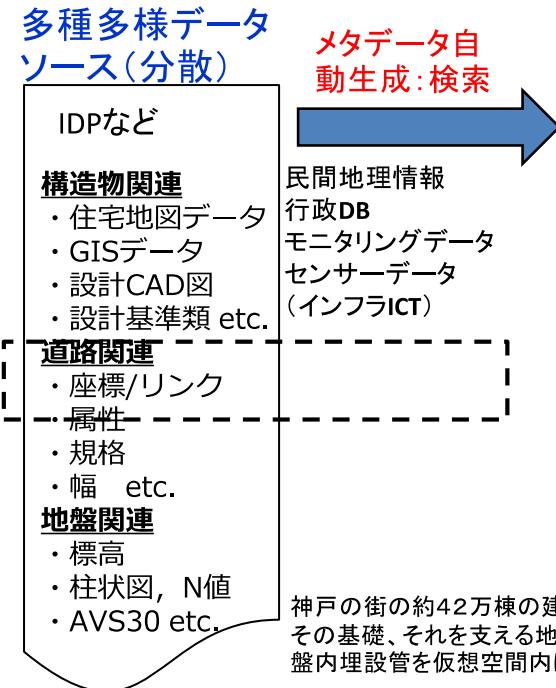
富岳を用いた大規模ミクロ経済シミュレーションの検討



「マルチエージェントモデルに基づく、災害時の全国規模の大規模ミクロ経済シミュレーション」の基礎検討をすすめており、次期PJで提案したいと考えている

都市丸ごとシミュレーション

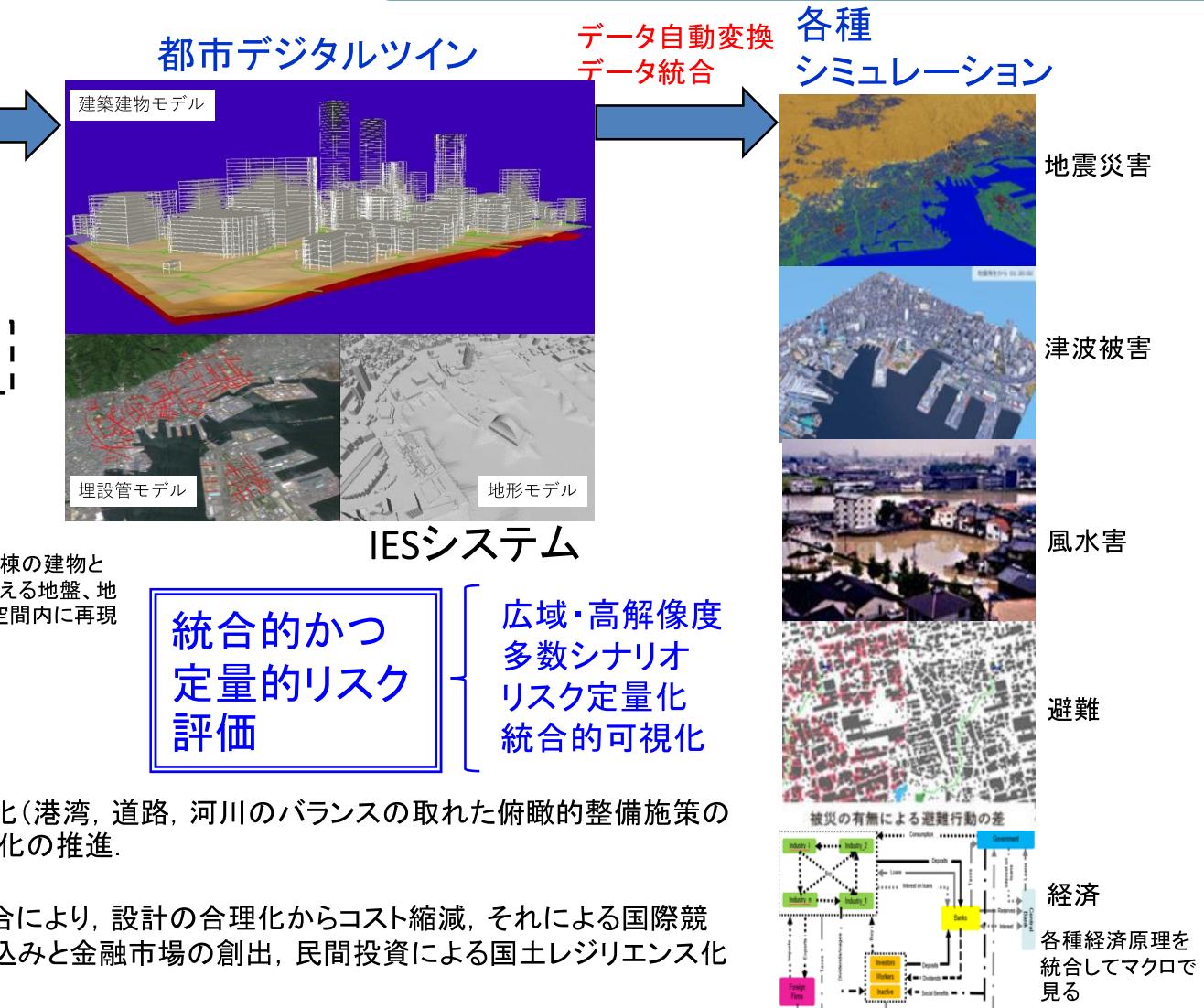
「都市丸ごとシミュレーション技術」とは
都市のデジタルツイン
解析モデルが集合した実物と「瓜二つ」の都市モデル
都市の丸ごとシミュレーション
都市のデジタルツインを使う、広域・高解像度シミュレーション



国土交通データPF

「公が使える」: 行政における効率化(港湾, 道路, 河川のバランスの取れた俯瞰的整備施策の立案), 効率的な国土レジリエンス化の推進.

「民が使える」: シミュレーション統合により, 設計の合理化からコスト縮減, それによる国際競争力の向上, インフラ投資の呼び込みと金融市場の創出, 民間投資による国土レジリエンス化の推進.



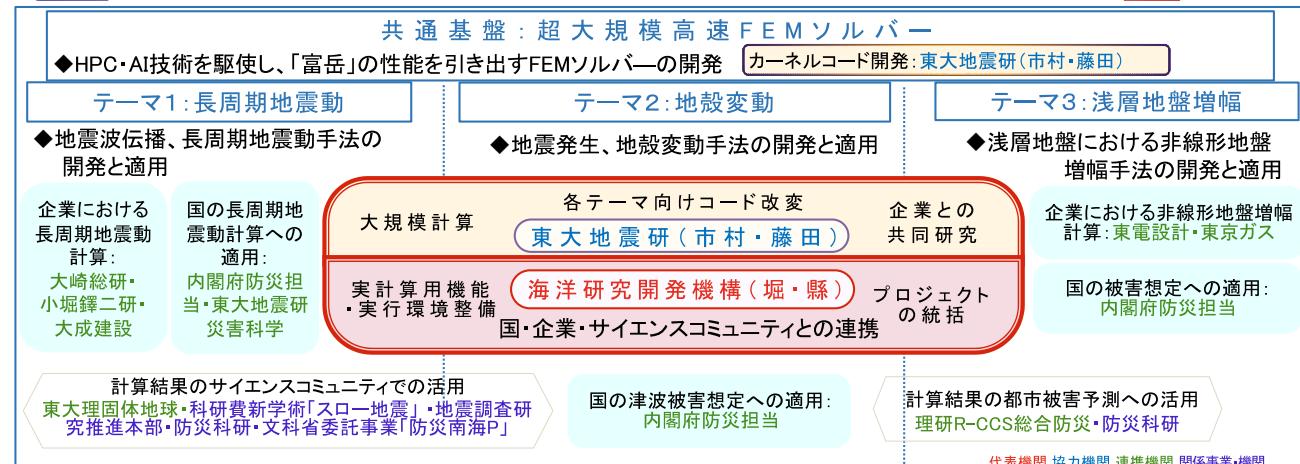
- ・ 従来の経験則にもとづいて行われている被害予測を、シミュレーションにもとづく科学的に合理的な予測に置き換えるための都市丸ごとシミュレーション技術の開発が進んでいる
- ・ 物理的な被害だけでなく、マルチエージェントでの避難や経済の「富岳」での大規模シミュレーションも開発が進められている

成果の利活用を含む他のプロジェクトとの連携

基盤S「震災軽減のためのヘテロ解析による地殻イメージング手法の開発とその適用」
(H30-R4)
地殻構造推定・推移予測の新たな手法開発

開発された手法を現実的な問題に適用できるよう大規模化

JAMSTEC サイト地震動評価プロジェクト
第2階層スパコン（ES4）を活用し、国の想定と同等の計算ができるプラットフォームを企業に提供



サイエンスでの活用
科研費学術変革
Slow to Fast 地震学
に参画
ゆっくり地震から通常地震までの統一的なシミュレーション・
解析の実現

国難である南海地震への適用
防災対策に資する南海
トラフ地震調査研究
プロジェクト (R2-R6)
現実的な地下構造モデルで
の地殻活動解析の実現

第2階層上の社会実装
産業利用へ

社会科学系との連携
都市丸ごとシミュレーション

R-CCS総合防災・減災
研究チームとの連携
「富岳」での避難・交通・
経済等の大規模社会科学系
シミュレーション

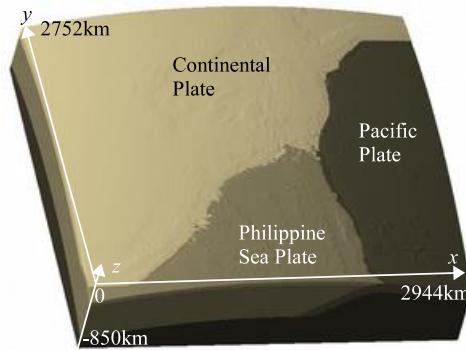
マルチスケール・デジタルツイン日本列島

数百億自由度以上（最大2兆自由度）の超大規模高速有限要素法解析の実現

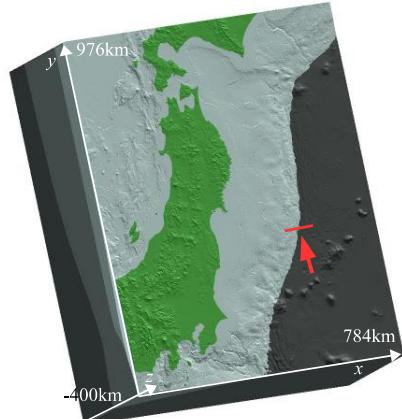
(SC14・15・18GordonBell Finalist: 市村教授@東大地震研)

→列島スケールの応力蓄積過程からM9クラスの震源過程、都市の揺れから地盤・構造物の連成までをシームレスに扱う技術的基盤。さらに、ソルバーの高速化へのAIの活用などHPC+AIの技術開発。

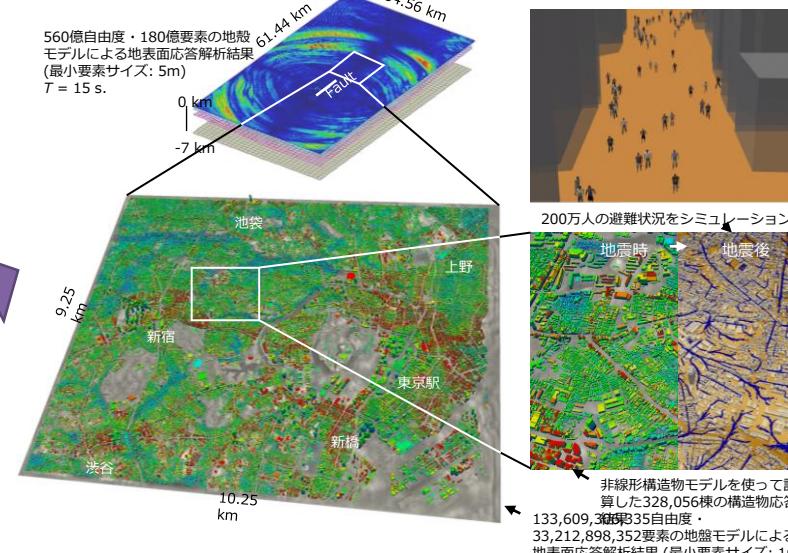
列島スケール (数1,000km)



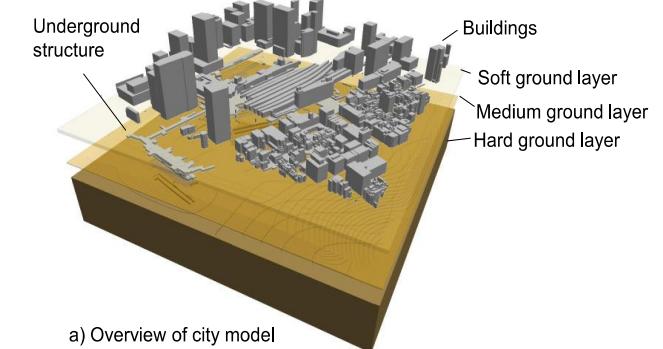
M9震源域スケール (数100 km)



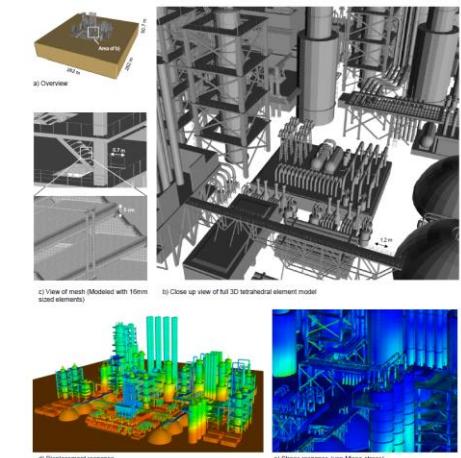
都市まるごとスケール (~10km)



都市スケール (~1km)



構造物スケール (~100m)



次のステップ

- ・フォワードシミュレーションからデータ同化へ
- ・モデルや計算の定量的な品質保証・曖昧さの定量化