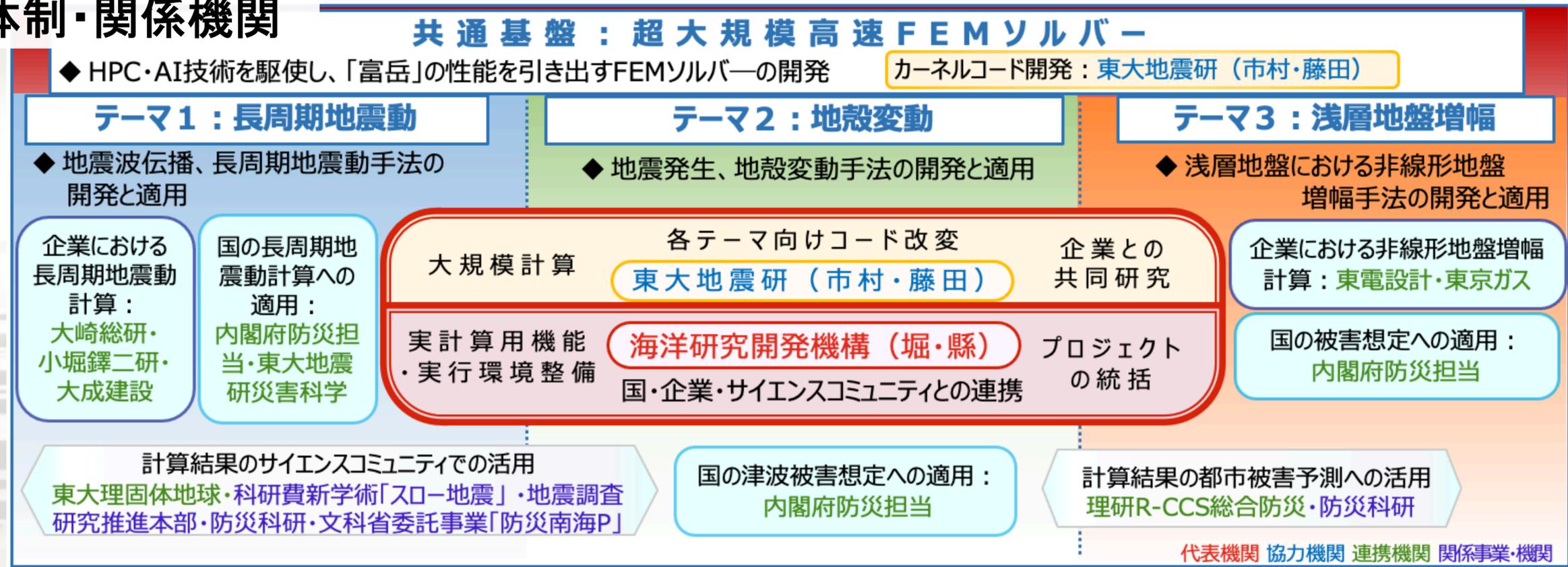


プロジェクト概要

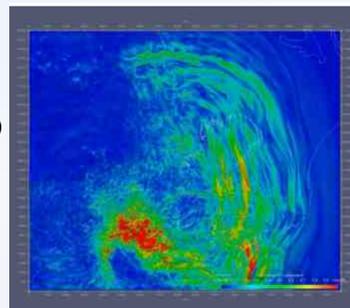
実施体制・関係機関



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SC1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)

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・地盤増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・津波災害予測でのアプリケーション活用
- 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
- 開発した計算アプリケーション群を実務で活用するための環境整備

➡ 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・地盤増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。

「富岳」加速課題: 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・地盤増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 国の被害想定のための地震・津波災害予測でのアプリケーション活用

概要

- 国による長周期地震動の被害想定では差分法計算がベースとなっている
- 複雑な三次元不均質媒質を計算モデルに反映した地震動解析は、非構造要素による任意形状の導入が可能な有限要素法計算が得意とする問題と考えられる。有限要素法の導入にかかる計算コストの問題が、計算アルゴリズムの研究とスーパーコンピュータの活用により克服されつつある。「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」参照
 - これにより、高品質を保証した計算を被害想定に導入することが視野に入ってきた。
- ➡ 複雑な三次元不均質媒質における地震動解析に有限要素法を導入するメリットを、弾性波動場を対象とした数値実験により今一度確認する
 - 重点課題から開発してきた有限要素法と国の被害想定で使われてきた差分法を比較

E-wave FEM(Ichimura+2009, Ichimura+2014など)

- 四面体二次要素
- 陰的時間積分(Newmark- β 法)
 - 高性能前処理による陰解法ソルバー
- レーリー減衰
- 粘性境界(Lysmer & Kuhlemeyer1969)
- 成層構造地盤に最適化した有限要素メッシュ生成ツール
- 今回の離散化基準: 1波長当たり5要素以上

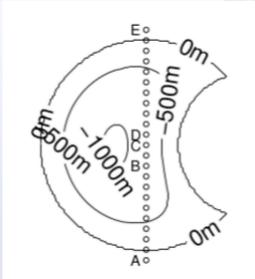
FDM(林・引間2001など)

- 空間四次近似
- 陽的時間積分(二次)
- メモリバリアブル法による減衰導入
- 吸収境界(Higdon1991)
- 今回の離散化基準: 1波長当たり10グリッド以上

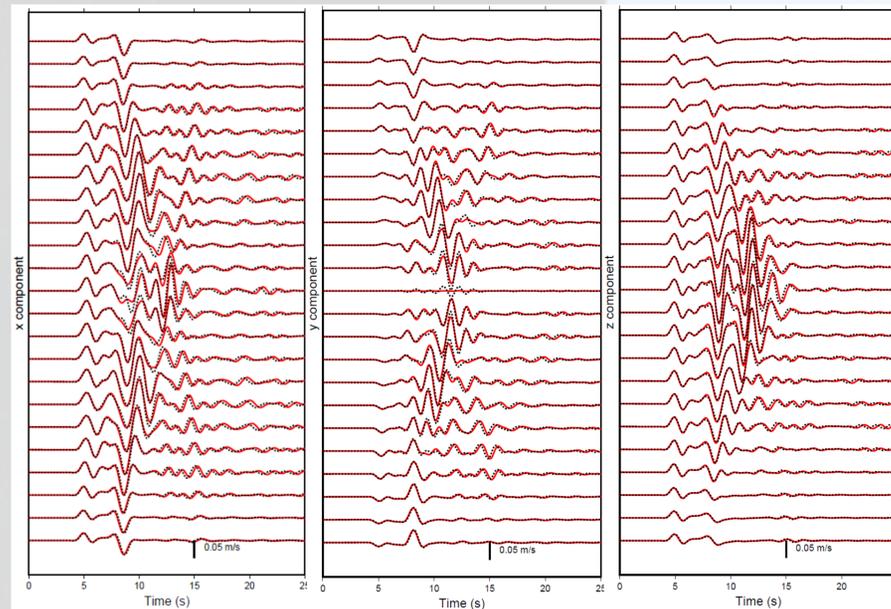
結果

測線上での速度波形の比較

- ほとんどの場所でよく一致している。中央部に近くなるにつれ、ややずれが大きくなる傾向



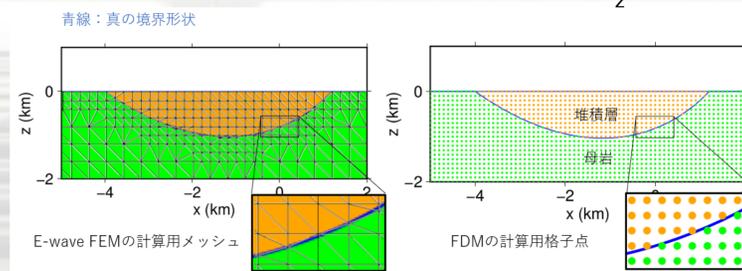
黒点線: FDM
赤線: E-wave FEM



比較のための問題設定

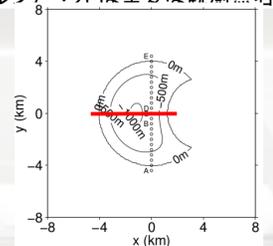
- MoonBasin問題: 基本的には Sánchez-Sesma and Luzón (1995)に従う

- 半径aの円の内部で半径bの円の外側に堆積盆地あり ($a=4000\text{m}$, $b=0.7a$)



有限要素法と有限差分法での計算モデルの比較 (赤線上断面図)

堆積層と母岩の層境界形状
○は観測点位置
アルファベットは重要な観測点名



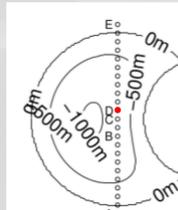
物性値

| | Vp(m/s) | Vs(m/s) | ρ (kg/m ³) | Qp | Qs |
|-------------------|---------|---------|-----------------------------|-----|-----|
| Sedimentary layer | 2082 | 1000 | 1600 | 250 | 250 |
| Bed rock | 3464 | 2000 | 2000 | 800 | 800 |

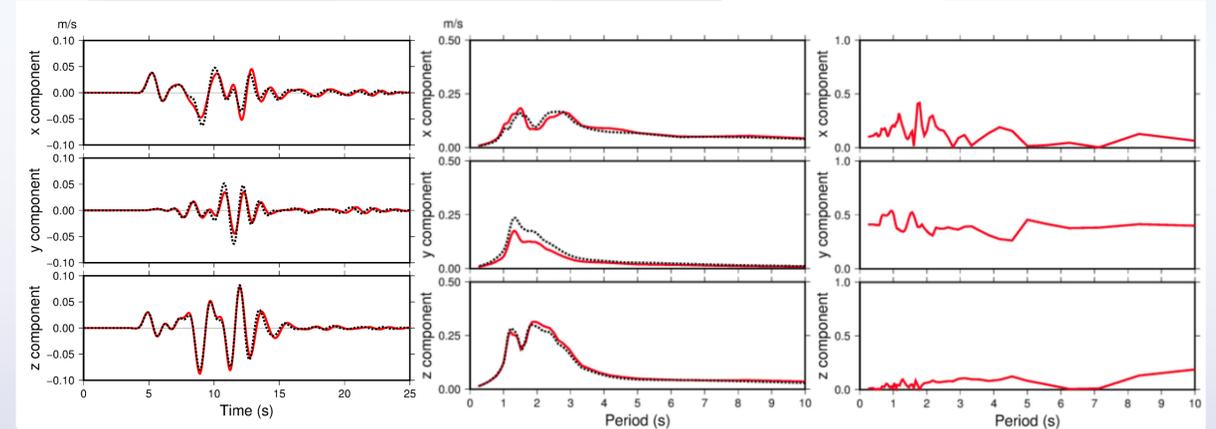
震源パラメータ

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Hypocenter (x, y, z) | (-10 km, 0km, -10 km) |
| Source time function: | Bell shape |
| Rise time | 2s |
| M_0 | 1.0×10^{17} N m |
| Strike, Dip, Rake | 90°, 0°, 0° |

Moon-basin問題: Dでの結果比較



黒点線: FDM
赤線: E-wave FEM
(右図のみ相対差)



時刻歴速度波形

疑似速度応答スペクトル

➡ 今後、FEMが得意とする計算へと展開

- 地形を含んだ計算、薄く低速な浅層を含む計算、など

「富岳」加速課題: 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・地盤増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

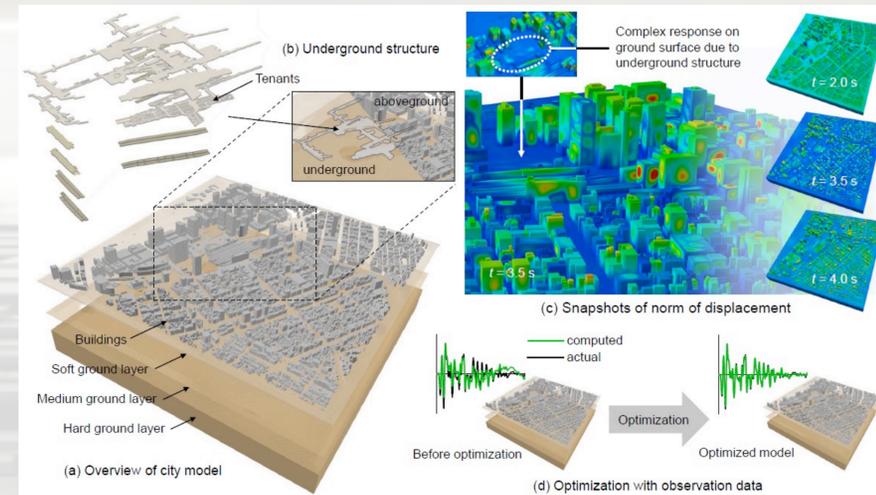
地震に関する災害被害予測のための大規模アプリケーションの開発

「富岳」に適した大規模解析手法の構築

「富岳」を用いた地盤・構造物の地震応答解析のためのアルゴリズム開発

- 構造モデルの詳細度にあわせて超大規模モデルのデータ構造を変更した手法(解析結果をlearningする構造の導入, 連続メモリアクセス化)
- 「富岳」で採用されているアーキテクチャ(ARM)に合わせたチューニング
- SC20(高性能計算分野における世界最高峰の学会)においてresearch poster & ワークショップ ScalA20での発表
 - Ichimura, Fujita et al. : Fast scalable implicit solver with convergence of physics-based simulation & data-driven learning: toward high-fidelity simulation with digital twin city (Ichimura et al. 2020a)
 - Ichimura, Fujita et al. : A Fast Scalable Iterative Implicit Solver with Green's function-based Neural Networks (Ichimura et al. 2020b)

東京駅周辺の地上・地下構造物を対象とした地震応答解析

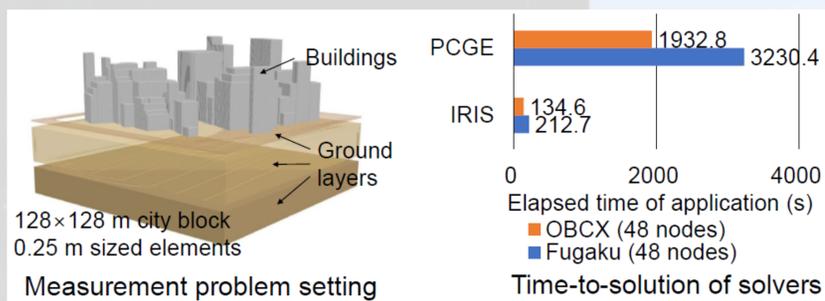


11,002,859,706自由度、2,593,545,132要素の計算モデルと「富岳」の98,304 CPUコア(2,048ノード)を用いて実施。(Ichimura et al. 2020a)

従来法との「富岳」における比較

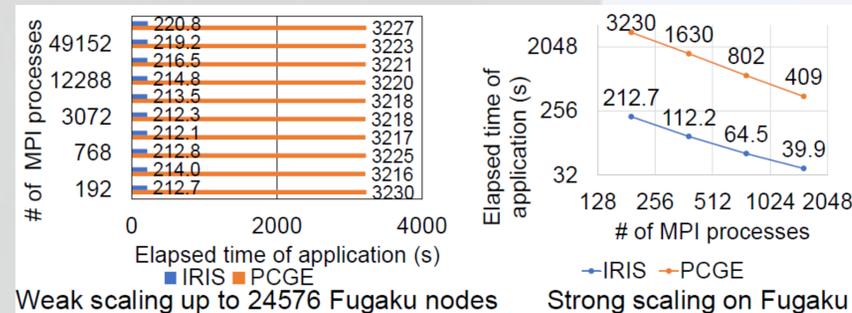
良く使われる手法との比較:

- PCGE: conjugate gradient (CG) solver with block Jacobi preconditioning & matrix-free matrix-vector multiplication
- 提案手法により15.2倍高速化



「京」向け高速計算手法との比較:

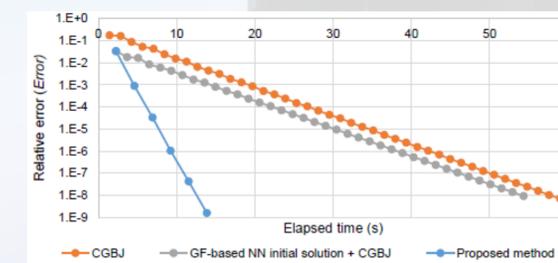
- SC14で発表済みのソルバー
- 提案手法により10.3倍高速化



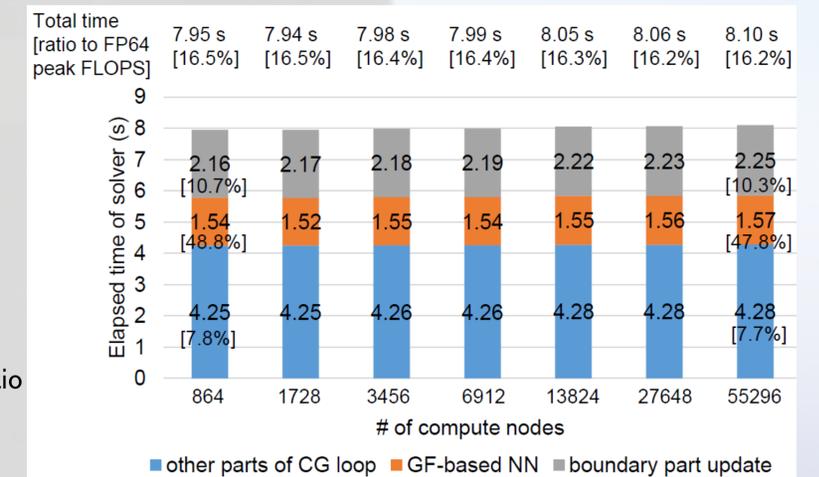
Ichimura et al. (2020a)

高性能計算と人工知能の融合

Green's function-based Neural Networksにより収束性能を改善したimplicit matrix solverを開発 (Ichimura et al. 2020b)



Convergence speeds of solvers measured on one Oakbridge-CX node. The convergence ratio (ratio of change in relative error per iteration) was greatly improved by the use of the GF-based NNs in each refinement iteration in the proposed method. The simple CG scheme using GF-based NNs for initial solution of PDE solver scheme (CGBJ) could not utilize this improvement in the convergence ratio.



Weak scaling results of proposed solver on Fugaku: a 5.57 trillion degrees-of-freedom problem was solved with 98.1% weak scalability from 864 up to 55,296 Fugaku nodes with 30.3 PFLOPS (16.2% of FP64 peak performance).