

# 大規模三次元非線形動的有限要素解析による 東京の地盤地震動シミュレーション

藤田 航平<sup>1</sup>・市村 強<sup>2</sup>・堀 宗朗<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 理化学研究所 特別研究員 計算科学研究機構 (〒 650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)

E-mail: kohei.fujita@riken.jp

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 東京大学 准教授 地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 東京大学 教授 地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1), 理化学研究所 計算科学研究機構

E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

地震時における動的地盤歪に対する埋設パイプラインの被害を分析するため、三次元地盤地震動解析による地盤歪推定方法を開発した。ここでは、デジタルデータから作成した地盤モデルに対して高速な三次元非線形有限要素解析手法を適用することで地盤形状や地盤の非線形物性、入力地震動の時系列特性を踏まえた地盤歪を推定する。適用例として、京コンピュータの 82,944 ノードを使い、400 億自由度の大規模有限要素メッシュでモデル化した東京の 3.25 km × 3.25 km の領域の地盤歪応答を計算した。

**Key Words:** *Dynamic ground strain, ground motion simulation, high-performance computing, finite-element analysis*

## 1. はじめに

地震動による動的地盤歪は埋設管の地震被害の主な原因の一つである。対象地形における地震時の地盤歪の動的な応答分布を把握することが、地盤歪に対する耐震設計を考える上で第一であるが、時間同期したセンサネットワークが必要となるために計測が困難なのが現状である。そこで歪を計測するのに代わり、容易に計測できる PGV 等の地震動指標と地盤歪や埋設管被害を統計データから結び付ける方法が考案されてきたが、複雑地形や地震動の方向依存性など実際のサイトにおける複雑な歪場を再現するには至っておらず、未だ決定打とはなっていない。こういった地震動指標を使った推定方法とは異なるアプローチとして、近年、三次元地盤地震動解析による地盤歪の推定方法が開発されている<sup>1)</sup>。ここでは、ボーリングデータ等のデジタルデータから三次元の地盤モデルを計算機上に作成し、非線形時系列有限要素法を使うことで、表層地盤における地震波の増幅現象を数値計算する。このアプローチは従来から考えられてきたものの、歪応答の主要周波数帯の分解能で数 km × 数 km × 数百 m の領域を解析するには 100 億自由度規模の大規模解析が必要となるために実現されてこなかった。そこで我々は、従来のコンピュータに比べて何桁も高速な近年のスーパーコンピュータを高効率で使うことができる非線形有限要素法を開発することで、このような 3 次元地盤地震動解

析を実現してきた。本発表では、開発した大規模地盤振動解析手法の概要と、スーパーコンピュータ「京」を利用した 400 億自由度の大規模有限要素法による 3.25 km × 3.25 km × 150 m 領域の地盤地震動解析の解析例を紹介する。

## 2. 手法

地盤の非均質性と複雑形状の適切なモデル化のため、本研究では四面体二次要素を使った非線形動的有限要素法を用いる。この解析において計算コストのほとんどは線形連立方程式の求解問題に費やされるため、本研究ではこの求解問題に対する高速ソルバーを開発した。ここでは、計算機の性質と地盤地震動問題の性質を勘案して複数の高性能計算手法を組み合わせることで、従来手法に比べてデータ移動量・通信量・計算量を抑えた高速ソルバーを開発した<sup>2)</sup>。図-1 に、アルゴリズム開発において特に効果の高かった、非構造格子と構造格子の混合計算手法を示す。有限要素法では要素の形状を計算結果に反映するために大きな計算コストが必要となるが、ここでは、対象領域の均質部分に形状を固定した構造格子を使うことで形状に関する計算を大幅に簡略化する。構造格子を使うことができない残りの複雑形状部分には、従来通り任意形状の四面体からなる非構造格子を使う。これにより、全領域を非構造格子で計算する場合と同じ解析結果を大幅に少ない計

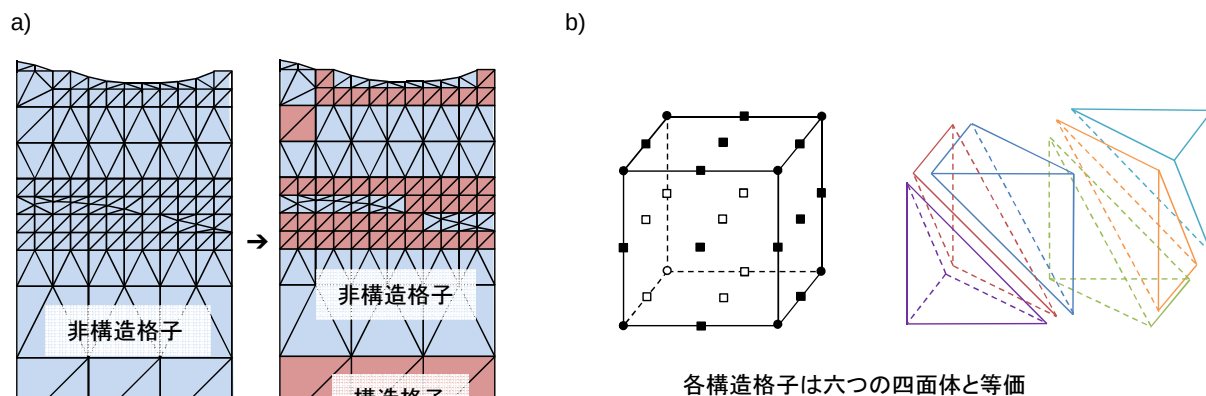


図-1 構造格子・非構造格子の混成有限要素法.

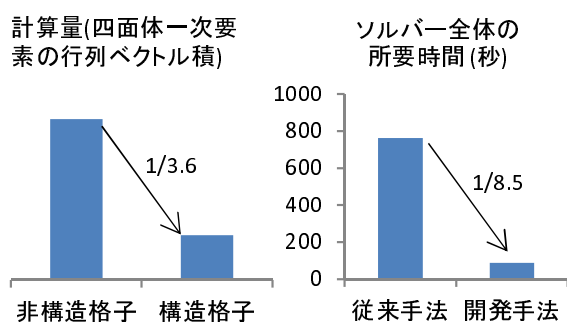


図-2 構造格子・非構造格子の混成有限要素法による計算量の削減と計算の高速化の効果.

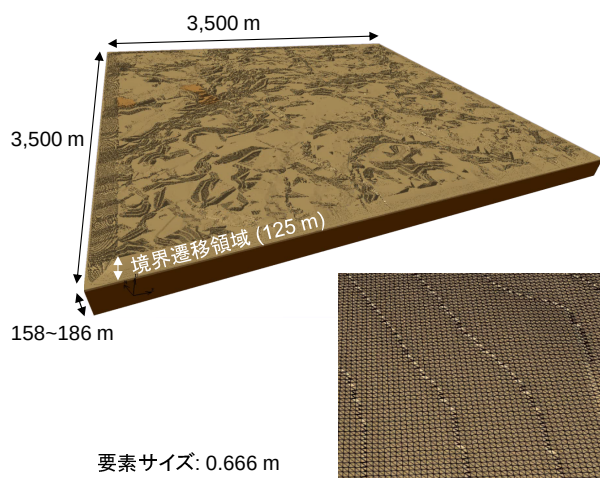


図-3 適用例における 40,152,523,902 自由度, 9,981,684,232 要素からなる有限要素モデル.

表-1 適用例における地盤物性. Layer 1 は修正 Ramberg-Osgood モデルと Masing 則でモデル化される非線形層, Layer 2, 3 は線形物性層とする.  $V_p$  と  $V_s$  は縦波・横波速度,  $\rho$  は密度,  $h_{\max}$  は最大減衰率 (線形時は減衰率),  $\gamma_r$  は基準歪を示す.

|         | $V_p$ m/sec | $V_s$ m/sec | $\rho$ kg/m <sup>3</sup> | $h_{\max}$ | $\gamma_r$ |
|---------|-------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
| Layer 1 | 1,210       | 150         | 1,500                    | 0.25       | 0.005      |
| Layer 2 | 1,380       | 255         | 1,800                    | 0.05       | —          |
| Layer 3 | 1,770       | 490         | 1,900                    | 0.005      | —          |

算量で求めることができるようになる. 図-2 に従来手法に対する計算量の削減量と高速化率を示す. 図から, 構造格子部分では, 非構造格子に比べて計算量が 1/3.6 に減っていることがわかる. また, その他の高性能計算手法との組み合わせにより, 大規模計算で標準的に使われる  $3 \times 3$  ブロックヤコビ前処理付き共役勾配法 (従来手法) に比べて 8.5 倍の高速化が実現できていることがわかる.

### 3. 適用例

パイプラインネットワークの地震被害分析に使うことを念頭に, 東京の  $3.25 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$  の領域を要素サイズ  $0.66 \text{ m}$  でモデル化し, 1995 年の兵庫県南部地震において神戸気象台で観測された波形に対する応答を計算した. ここでは, 国土地理院の  $5 \text{ m}$  数値標高地図と地盤工学会の電子地盤図を基に有限要素モデルを作成した (図-3 参照). 地盤物性は, K-NET TKY007 (新宿) でのボーリングデータ情報を基に表-1 のように設定している. 領域外周に  $125 \text{ m}$  の境界遷移領域を設け, 半無限吸収境界と併せることで外周からの波の入反射を防ぐ. 基盤面まで引き戻した神戸波をモデル底面から一様に入力し, 82,944 台の計算ノードからなる京コンピュータ全部を  $6.4$  時間使って応答計算をした. 図-4 に地表面における最大主歪の時系列最大値を示す. 図から, 歪分布は概ね地表面標高や Layer 1 (表層) の厚さと

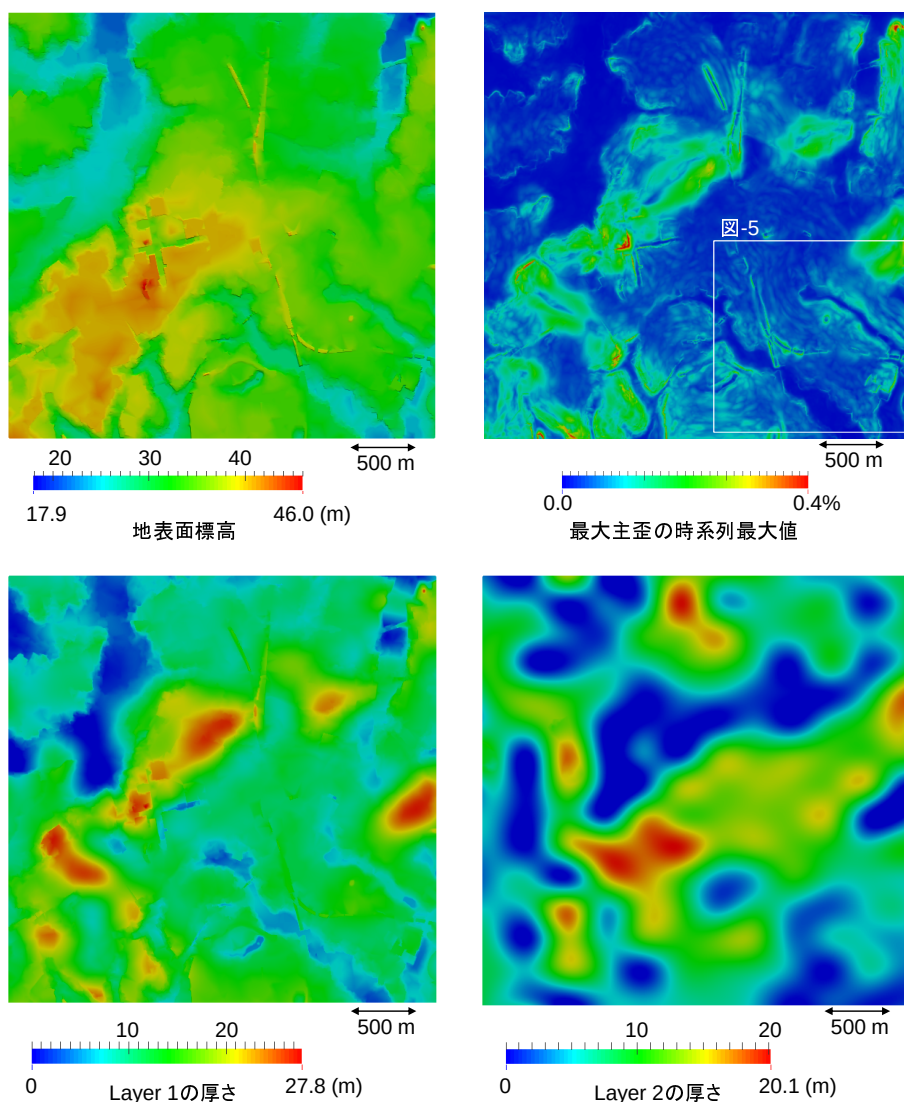


図-4 地盤形状と地表面における最大主歪分布．ここでは，地表面標高・Layer 1 (表層) の厚さ・Layer 2 (中間層) の厚さと，地表面における最大主歪の時系列最大値を比較している．また，図-5 における可視化領域を白線で示している．

相関があるように見えるが，一部領域では縞模様といった複雑な分布となっていることがわかる．この縞模様ができる要因について，図-5 に示す地表面歪応答の時系列スナップショットを通して分析する．図から歪は地表面の凹凸箇所でも生じ，減衰しながら周囲に伝播していることがわかる．また，ある地点で発生した歪波形が伝播するうちに，他の点で発生した歪波形と干渉している様子が確認され，これが縞模様など，複雑な最大歪分布の要因の一つになっていると考えられる．このように，時系列最大主歪分布は歪波形の伝播・減衰・干渉の結果として得られるものであり，一次元や二次元で簡略化したモデルで正確に歪分布を計算するのは難しいと考えられる．本研究のような詳細計算によるアプローチを使うことで，地盤の三次元形状と非線形物性・入力波の周波数分布を反映した，合理性の高い地震時の動的歪推定が可能になると考えられる．

#### 4. おわりに

スーパーコンピュータ上で高速計算できる非線形動的有限要素法を開発することで，東京の  $3.25 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$  領域の詳細三次元地盤地震動解析を実施した．計算された地盤歪分布は三次元地形や地盤物性，入力波の特性を反映した複雑な分布となった．このような合理性の高い手順で得られた歪分布の信頼性は高いと期待され，パイプラインの耐震補修優先度の選定など，埋設パイプラインネットワークの耐震対策への利用が期待される．今回利用した地盤データの水平分解能は  $250 \text{ m}$  であるため，現状では地盤データの分解能が歪推定精度の制約になっていると考えられる．そこで今後は，多数の地上地震動観測点で得られる微振動データと多数回的高速地盤地震動解析を使うことで地盤モデルを同化・改善する方法を開発する計画である．

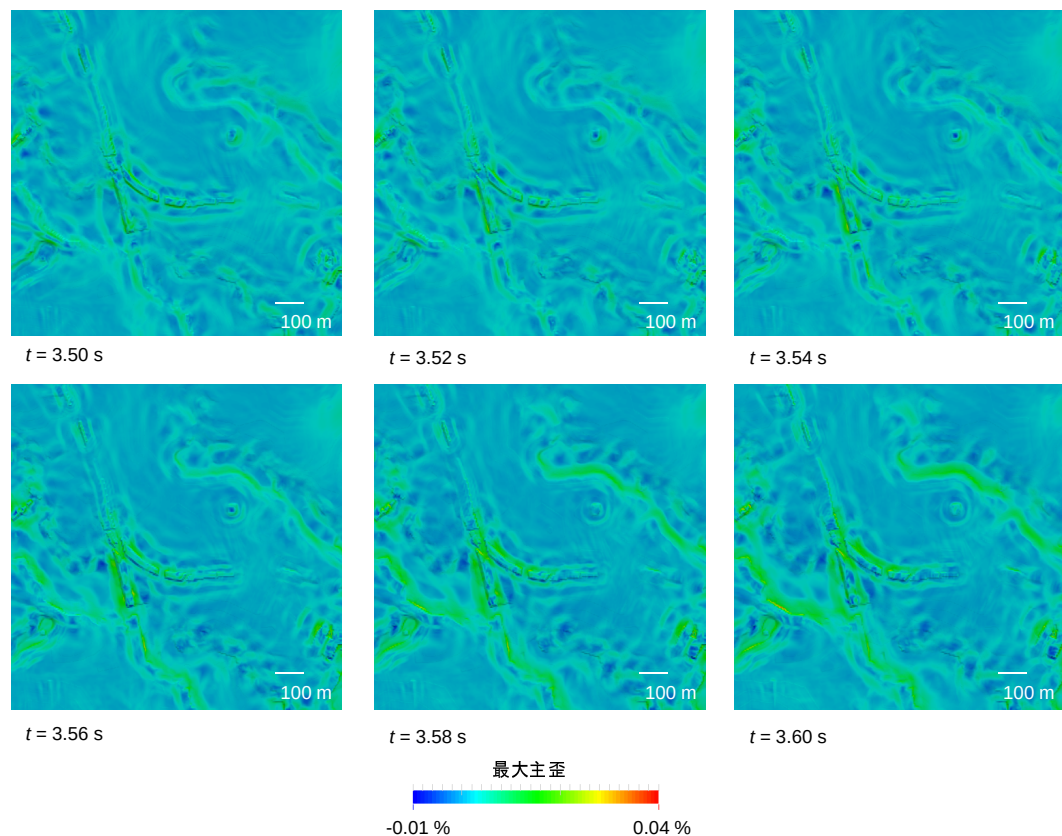


図-5 地表面における最大主歪の時系列スナップショット.

**謝辞:** 本研究は理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです(課題番号: hp160221, hp160160, 160157). また, 本研究はJSPS 科研費 15K18110, 26249066, 25220908 の助成を受けたものです. また, 本研究はポスト「京」重点課題(3)の一部として行われたものです.

#### 参考文献

- 1) T. Ichimura, K. Fujita, P.E.B. Quinay, M. Hori, T. Sakanoue, R. Hamanaka, F. Ito, and I. Suetomi, Comprehensive Seismic Response Analysis for Estimating the Seismic Behavior of Buried Pipelines Enhanced by Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Ground Motion and Soil Amplification. ASME. J. Pressure Vessel Technol. 2016;138(5).
- 2) T. Ichimura, K. Fujita, P.E.B. Quinay, L. Maddeggedara, M. Hori, S. Tanaka, Y. Shizawa, H. Kobayashi, and K. Minami, Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, pp 4:1–4:12, 2015

(2016. 9. 2 受付)

## EARTHQUAKE GROUND AMPLIFICATION SIMULATION OF TOKYO USING LARGE-SCALE DYNAMIC NONLINEAR THREE-DIMENSIONAL FINITE-ELEMENT METHOD

Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, and Muneo HORI

We developed a dynamic seismic ground strain estimation method based on three-dimensional ground motion analysis for accessing damage of buried pipelines. By applying a fast three-dimensional nonlinear finite element analysis method to a ground model based on digital ground data, we can obtain ground strain estimates reflecting shape and material properties of the ground and time-history characteristics of the input ground motion. As an application example, we conducted a ground strain simulation of a 3.25 km × 3.25 km area of Tokyo using 82,944 nodes of the K computer.