

大規模地震動評価プログラム「E-wave FEM」を用いた長周期地震動評価の工学利用に向けた研究

課題責任者

西本 昌 大成建設株式会社 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

著者

西本 昌*¹, 山本 優*¹, 内山 泰生*¹

*¹ 大成建設株式会社 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

キーワード：長周期地震動，3次元有限要素法，E-wave FEM，震源特性の不確実性，設計用地震動

1. はじめに

固有周期が長い超高層建築物の時刻歴応答解析による構造安全性の検証では、入力となるサイト波の長周期成分を適切に評価することが重要になる。そこで筆者らは、大規模有限要素法に基づく地震動計算プログラム E-wave FEM[1][2][3]による長周期地震動の評価事例の蓄積を進めてきた[4]。

このような評価の社会実装を目指し、本課題では、以下の2テーマを実施した。

- ・テーマA：要素分割の差異による影響検証
- ・テーマB：第2階層スパコンを活用する地震動評価
次章以降に、個々のテーマの検討結果を報告する。

2. テーマA：要素分割の差異による影響検証

地震動評価を行う FEM 計算において、解析に用いるモデルの要素分割に際し、要素サイズの設定に任意性、地形の扱いに複数の手法がある。本課題では、要素サイズの設定や地形の扱いの差異が地震動評価に与える影響を検討した。

2-1. 要素サイズの違いによる影響検討

FEM 計算では一般的に、要素が細かいほど解析精度は高まるが、同時に自由度数が増えて計算負荷が増大する。実務においては、対象とする建築物の1次固有周期を含む周期(例えば超高層建築物や免震建築物を想定すると3秒以上など)を含むように要素サイズを設定することが多い。しかし計算負荷の観点から、可能な範囲で要素数を減らすことが望ましい。

以上から、本検討で用いる FEM は四面体2次要素のため、1波長5要素で表現するサイズで検討を進めているが、解析対象周期以上の精度を担保できているか確認するため、半分の大きさの要素サイズのモデルを作成して比較することで、解析の精度を確認した。

震源モデルは、1923年大正関東地震の巨視的面を用い、アスペリティ2個を配置した。地盤の層構造、物性は同一とした。要素サイズ・モデルの概要を表1に示す。

地震動評価結果(最大加速度・NS方向)を図2に示す。あわせて地震基盤深さのコンターを示す。関東平野の堆積層が厚い地域で大きな結果となっている。両者はほぼ一致し、1波長を5要素で表現する要素サイズで精度を担

保できていることを確認した。

表1 要素サイズ・モデルの概要

	最小要素 サイズ [m]	1波長 あたりの 要素数	要素数	節点数
細かいモデル	100	10	23.89億	32.26億
通常モデル	200	5	4.05億	5.47億

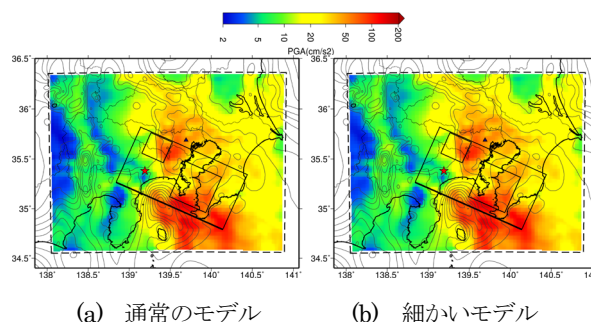


図1 要素サイズの差異による地震動評価結果の影響
(最大加速度・NS)

2-2. 地形のモデル化有無の違いによる影響検討

実地盤のモデルを作成する際、図2に示す3通りのモデル化手法がある。特に「①：地形をモデル化」と、「②：地形を押し込みフラットにモデル化」はよく用いられている。一方、これらのモデル化による地震動評価結果の差分を分析した例は少ない。

そこで本検討では、図2に示す3通りのモデル化の違いが地震動評価結果に与える影響を分析した。震源モデルは、南海トラフ沿いの巨大地震を対象とし、内閣府の基本ケース[5]を参考に設定した。震源モデルを図3に示す。

計算結果の減衰5%の擬似速度応答スペクトル(pSv)の分布を図4に示す。また、pSvの比率を図5に示す。地形をモデル化したモデルでは、振幅が小さい地域で比率が大きくなっている。②と③はよく対応しており、陸域の地形の影響より、海域の地形の影響の方が大きい。

また、新宿付近と敦賀付近の波形を図6に示す。直達波と考えられる部分の差は小さく、後続の表面波で差がある。振幅が大きく建築物に対して影響が大きい地域では差が小さく、地形のモデル化の違いによる影響は小さいものと考えられる。

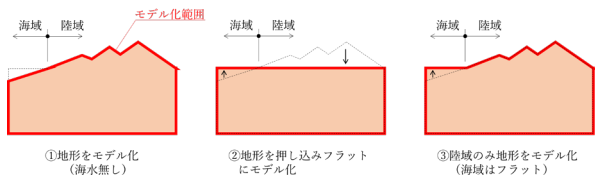


図 2 地形モデル化手法

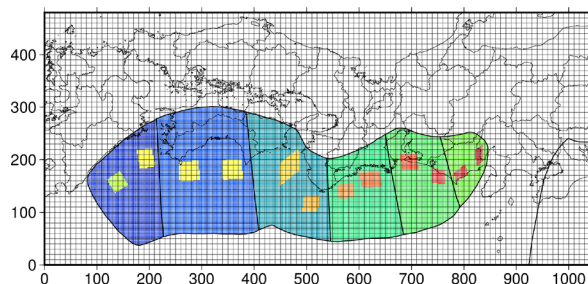


図 3 震源モデル (内閣府・基本ケース)

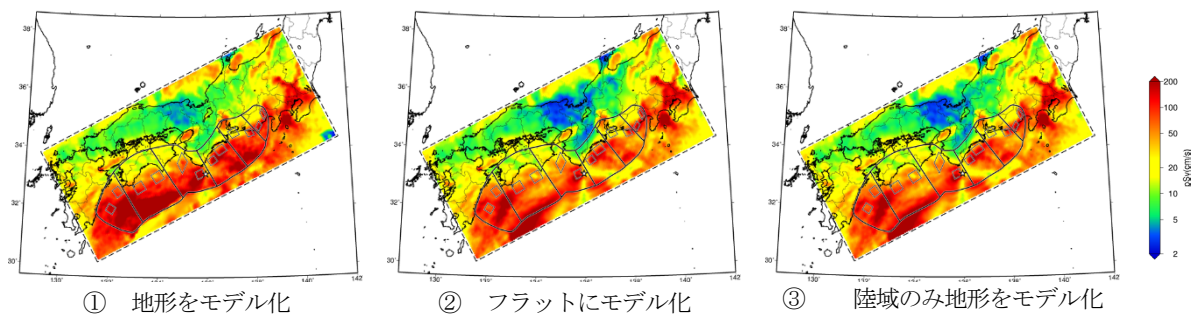


図 4 擬似速度応答スペクトルの空間分布

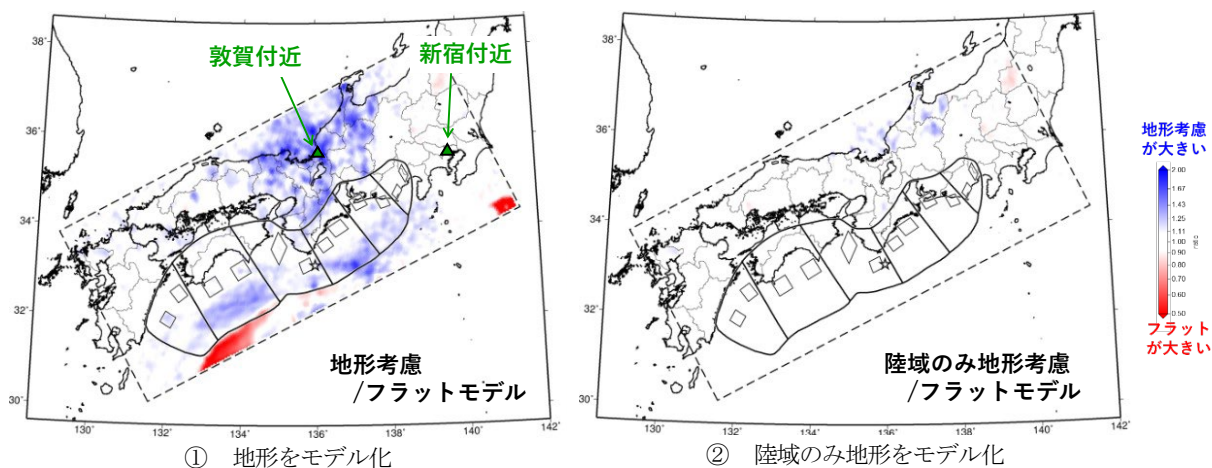


図 5 擬似速度応答スペクトルの比率の空間分布

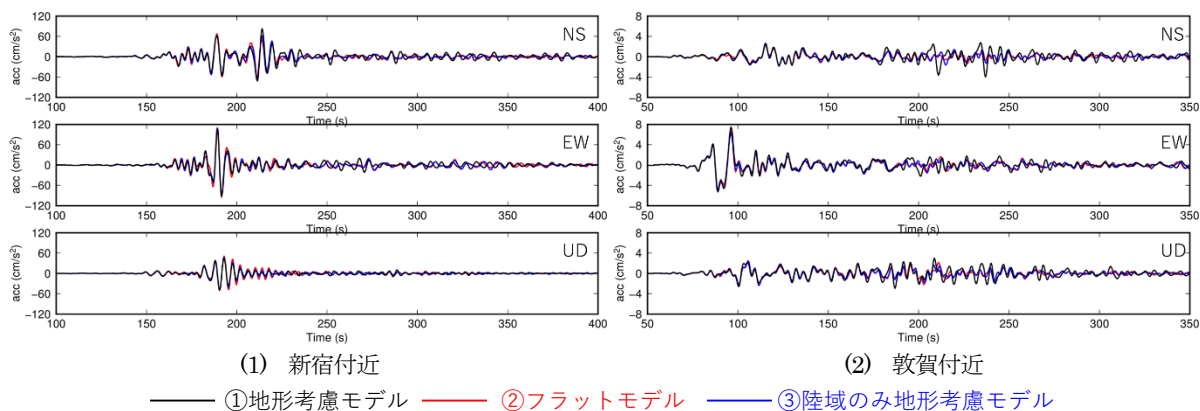


図 6 加速度波形

3. テーマ B：第2階層スパコンを活用する地震動評価

東北地方太平洋沖地震以降、地震動予測において、最大クラスを含む地震シナリオの多様性や震源の不確実性を取り入れた評価の重要性が認識されるようになった。地震動予測の平均やばらつきの範囲を適切に考慮した設計用地震動を作成する場合、モンテカルロ法により震源特性をサンプリングした数百～数千回の多数回計算を行い、計算波から選択することが一般的であるが、大規模なモデルでは計算負荷が膨大になる。そのため富岳等のフラグシップシステムを用いる必要があるが、実務に利用するハードルは依然高い。

そこで、研究機関や大学等で稼働中の機種が多く、実務利用が進んでいる第2階層スパコン（地球シミュレータ等）の活用を想定し、モンテカルロ法より少ない計算回数で地震動予測の平均やばらつきの範囲を適切に評価し、設計用地震動を作成する方法を検討した。

3-1. 提案手法の概要

提案手法は、特定の震源断層を対象に、震源特性のばらつきに起因する地震動のばらつきを、ラテン超方格法を用いることでモンテカルロ法と比較して少ない計算回数で算出する。さらに、計算結果から構築した応答曲面を用いて、建築物の目標性能に応じて任意に設定する地震動ばらつきの包絡割合に対応した震源特性を抽出し、断層モデルを作成する。この断層モデルを用いて設計用地震動を計算する。提案手法の手順および概要図を図7に示す。なお、提案手法の詳細は文献[6]に記載している。

3-2. 検討概要

本検討では、大正型関東地震の巨視的面を用いて、アスペリティと破壊開始点に不確実性を考慮した検討に適用した。ラテン超方格法のサンプリング数は92個とし、提案手法を用いて、モンテカルロ法でサンプリングした1000個の計算結果の平均、 $+1\sigma$ に対応する地震動を設定することを試みた。

3-3. 検討結果

本検討で作成した地震動を図8に青線で示す。モンテカルロ法による平均、および $+1\sigma$ のレベルを黒線で示す。モンテカルロ法による結果（赤線）と比較すると、黒線との差が生じる周期もあるが、 $1/10$ 以下の計算負荷で、モ

ンテカルロ法による結果を概ねとらえるレベルの地震動を設定できた。

謝辞

本課題の一部（FEMによる地震動計算）は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム『「富岳」による地震の大規模シミュレーションの基礎拡充と社会実装へ向けた展開』（JPMXP1020230213）の一環として実施されたものです。東京大学地震研究所が開発中のコードを当該プロジェクトで提供頂き、海洋研究開発機構が独自に改変・運用し得られたものです。また本課題の地震動計算にはES4に加えて、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源を使用しました。

文献

- [1] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., “A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography”, Geophysical Journal International, Volume 177, Issue 3, 1221-1232, (2009).
- [2] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., & Kobayashi, H., “Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF $\times$ 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation”, SC'14, (2014).
- [3] Ichimura, T., Fujita, K., Quinay, P. E. B., Maddegadara, L., Hori, M., Tanaka, S. et al., “Implicit nonlinear wave simulation with 1.08 T DOF and 0.270 T unstructured finite elements to enhance comprehensive earthquake simulation”, SC'15, (2015).
- [4] 西本昌, 谷翼, 山本優, 縣亮一郎, 堀高峰, “多様なシナリオを考慮した地震動評価と建物応答解析 千島海溝沿いの巨大地震を対象とした検討”, 大成建設技術センター報第55号, (2022).
- [5] 内閣府, “南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編”, (2012).
- [6] 西本昌, 山本優, 五十嵐さやか, 内山泰生, 糸井達哉, “震源特性のばらつきを考慮した長周期地震動の効率的な計算方法”, 第16回地震工学シンポジウム, Day1-G417-28, (2023)

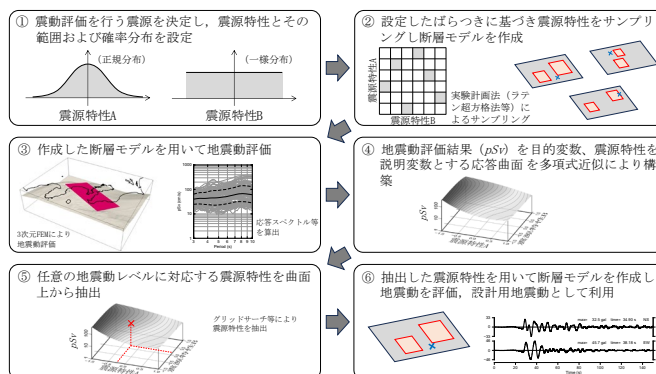


図7 提案手法の手順・概要

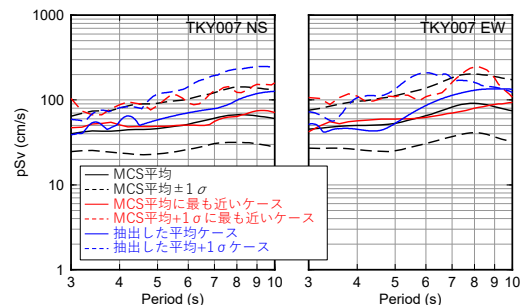


図8 地震動作成結果