

高密度強震観測データ同化に基づく 長周期地震動の即時予測実験

#古村孝志（東大地震研）・前田拓人（弘前大理工）・大峽充己（東大地震研）

Test for forecasting of long-period ground motions
based on data assimilation using dense strong motion network

#T. Furumura (ERI), T. Maeda (Hiroasaki Univ.), A. Oba (ERI)

1. はじめに

大地震の際に大規模平野で強く増幅される周期3～10秒程度の長周期地震動は、超高層ビルや大型石油タンク等と共振して大きく長く揺することで被害を起こす恐れがある。2003年十勝沖地震（M8.0）では、震源から230 km離れた苫小牧の石油タンクが長周期地震動に共振して破損、出火した。2011年東北地方太平洋沖地震では、震源から750 km離れた大阪（咲洲）の55階建て超高層ビルが長周期地震動により最大で1.7 m揺れ、施設に被害が発生した。

本研究では、長周期地震動への早期対応と災害軽減に向け、2007年新潟県中越沖地震（Mw6.6）と2011年東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）の強震観測記録を用いて、全国の強震観測網（K-NET, KiK-net）のリアルタイムデータ同化と、高速計算機による地震波伝播シミュレーションに基づいて、関東平野における長周期地震動の即時予測の数値実験を行った。

2. 長周期地震動の観測波形データ同化

長周期地震動を形成する、周期3～10秒程度の表面波の伝播・増幅は、3次元的に不均質な地下構造、特に表面波の波長に相当する地下数km程度の堆積層の影響を強く受ける。例えば、関東平野においては、新潟、長野、伊豆などの地震では表面波が都心にマルチパスにより集まる結果、大振幅かつ長い波群を持つ長周期地震動が強く生成するのに対し、宮城方向の地震では長周期地震動が弱いことが確認されている（例えば、Furumura, 2014; 向井・他、2018）。また、南海トラフの地震では、伝播経路に沿って厚く堆積する付加体に沿って表面波が誘導される結果、大振幅かつ長い波群が生成される特徴がある（Hayakawa and Furumura, 2007）。長周期地震動のこうした特徴は、地震の規模とサイト増幅に基づく一般的な地震動予測式（GMPE）から評価することは難しい。

本研究では、K-NET, KiK-netの強震観測データを入力として、3次元差分法により長周期地震動の波動場データ同化と、波動場の予測に向けた数値実験を行った。データ同化手法としては、最適内挿法を採用した。本手法は、震度分布の即時予測（Hoshiya and Aoki, 2015）や津波の即時予測（例えば、Maeda et al., 2015）などで広く活用されている。最適内挿法は、粗い観測点で記録された地震波形を空間補完して数値計算結果を補正し、各タイムステップ毎に観測と計算を同化させる技法である。

観測記録は地表に限られるが、表面波（基本モード）のエネルギーは地表付近に集中するため地表観測点を用いた同化が十分可能である。地表の波動場振幅を修正することで、表面波の伝播とともに、すぐに表面波の3次元波動場が再構築される。

3. 長周期地震動の即時予測実験（2007年新潟県中越沖地震）

2007年新潟県中越沖地震（Mw6.6）の強震観測データ同化と予測の結果を図に示す。評価領域は480 km x 480 km x 55 kmとし、防災科学技術研究所のJ-SHISモデルに基づき0.24 kmの格子間隔で長周期（> 2.7秒）地震動を3次元差分法計算により評価した。領域内の482点の

強震観測記録を計算格子に与え、地震発生から30、50、70、及び90秒間のデータ同化（図a）結果を用いて、高速計算により未来（地震発生から160秒後）の長周期地震動を予測した（図b）。予測波形と観測波形、速度応答スペクトルを図c、dに比較する。予測精度と猶予時間にはトレードオフがあるが、データ同化が進むにつれ、長周期地震動の波形が振幅と継続時間を含めておおよそ良く予測できることがわかる。

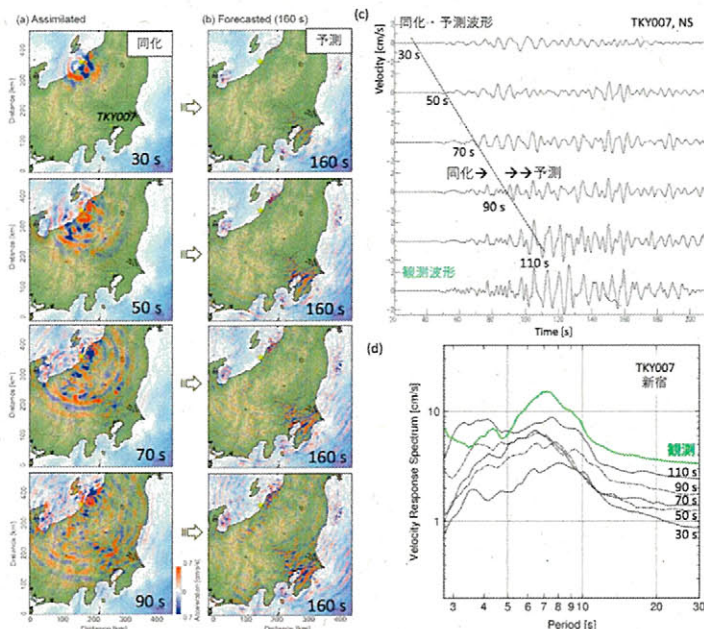
評価領域外で発生した、2011年東北地方太平洋沖地震のデータ同化・予測においても本即時予測手法が適用できることを確認した。

同化により求められた波動場は、津波データ同化（Maeda et al., 2015; Gusman et al., 2016）と比べてバタついたものになっている。観測点近傍での表面波のサイト増幅の影響が大きいことや、3次元地下構造モデルの不確定性の影響が考えられ、今後の改善に向けた課題である。

データ同化完了後に100秒後の波動場の予測に要する時間は、東大と筑波大が共同運用するOakforest-PACS計算機（Intel Xeon Phi 7250）の並列計算（2048 CPU）で12.4秒であった。これは、長周期地震動の伝播にかかる実時間よりずっと短く、観測データの取得に合わせて即時予測を繰り返し進め、予測の精度を高めることが可能である。差分法計算の解像度（格子サイズ）を2倍に広げ、長周期地震動の評価対象を5.4秒以上に限定すれば、より小規模の計算機システム（128 CPU程度）でも同程度の時間で実施可能である。

4. 即時予測の実現に向けた今後の課題

南海トラフ巨大地震等の長周期地震動即時予測では、たとえばDONET等の震源域近傍の評価地点で早い時刻にデータ同化を終え、それ以降の波動伝播を、予め計算しておいた評価地点～予測地点のグリーン関数を用いて超高速に評価する工夫が予測のより高速化に向け有効である（大峯・古村・前田、2019；本研究集会）。この手法はWang et al. (2017)により津波データ同化・予測の目的に開発（GFTDA; Green's Function-based Tsunami Data Assimilation）



され、本研究で進めるデータ同化・予測の手順と数学的に等価であることが示されている。Figure. (a) Snapshots of the assimilated wavefield of NS component ground accelerations for the 2007 Off Niigata earthquake at 30, 50, 70, and 90 s from the earthquake origin time. (b) Forecasted wavefield at 160 s based on the FDM simulation using each assimilated wavefield. (c) Comparison of the forecasted waveforms at TKY007 obtained by the assimilated wavefield at 30, 50, 70, 90, and 110 s, and observed waveform. (d) Comparison of the velocity response spectrum of horizontal motions.

5. Reference

T. Furumura, Maeda, T., and Oba, A. (2019), Early forecast of long-period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.