

Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning

*Takashi FURUMURA¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

深層学習に基づき、大地震の震源域近傍での強震観測波形データに基づき、遠地の離平野で生成する長周期地震動（周期2～20秒程度）の即時予測モデルを開発した。深層学習を強震動予測に適用した既往研究には、震源要素とサイト特性を入力とする最大加速度分布の予測（例えば、Kubo et al. 2020）や、震源近傍での地震波形データから遠地の地震動レベル（例えば、Jozinovic et al. 2020）及び応答スペクトルの予測（田屋・古村、2022-本大会）がある。本研究では、震源近傍での観測波形から、遠地の長周期地震動を予測する、“波形から波形の予測”を行った。これは、長周期地震動による構造物の影響評価において、速度応答スペクトル値に加え、揺れの包絡線形状や継続時間など、揺れ波形の特徴も重要な指標になると考えられるためである。

2. データ・手法

日本海溝沿いの大地震による長周期地震動予測をターゲットとし、F-net八溝観測点（YMZF；栃木県大田原市）の速度型強震計記録を入力データとして、南南西方向に141 km離れたHi-net 富岡観測点（YFTH；横浜市金沢区）の長周期地震動の予測を行った。この距離では、表面波の到着まで約50秒の猶予時間がある。予測モデルには、時系列データ処理に用いられるTemporal Convolutional Network (TCN)を採用し、Keras-TCNライブラリ(Remy 2020)を用いてpythonコードを作成した。TCNは、他の時系列処理モデル（RNNやLSTMなど）に比べて、長い入力データを少メモリ・計算量で処理可能である。ここでは、長時間の波形データを扱うために、畳み込み層のフィルタ項数を256、カーネルサイズを3, dilationsを2,4,...,128と大きく設定した。また、過学習を防ぐためにドロップアウト率を0.01に設定した。学習データには、東北地方太平洋沖地震の前（2004/4/1～2011/3/10）に発生した、Mw6.0以上の33個の地震のF-net, Hi-net波形データを使用した（図1）。Hi-netデータは振り切れがないことを確認し、地震計特性補正フィルタ（Maeda et al. 2017）により広帯域化した。波形データには周期1～40 sのバンドパスフィルタをかけた後に4 Hzにリサンプリングし、長さ600秒の学習データセットを用意した。学習は、東大情報基盤センターのWisteriaを用いて実行し、バッチサイズを10とする1000エポック数の繰り返し学習にはGPU計算で2分を要した。

3. 結果

学習済みTCNモデルを用いて、東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）と以後（2011/3/11～2018/1/24）に東北沖で発生した25個の地震（ $\geq$ Mw6.3）を対象に長周期地震動の予測テストを行った。予測は、WisteriaのCPU計算により1地震あたり0.06秒で完了した。図2に、(a)東北地方太平洋沖地震、(b)2005/12/12岩手県沖の地震（Mw6.9）、(c)2008年12月14日の福島県沖の地震（Mw6.1）の長周期地震動の予測波形と実際の観測波形の比較、及び入力波形を示す。全ての地震の予測テスト結果と観測波形との一致度は、1）速度応答スペクトルの強度比、2）弾性震動エネルギーの総和比、3）波形エンベロープの相関係数、の3つの指標で定量化し、その分布の四分位数を箱ひげ図を用いて示す（図2d）。指標1)～3)の平均値は、それぞれ0.7、0.52、0.5となり、全体的に過小評価気味ではあるが、速度応答スペクトルと経時特性の形状が良く再現された。一方、予測の外れ値（過大評価）は、YMZF観測点に近い福島県浜通りの地震に対する予測結果である。この地域では、東北地方太平洋沖地震後に活動が活発化しており、予測モデルの汎用化に向けて新たな観測データを追加した学習の更新が必要である。

4. 今後の課題

今回の予測実験では、関東平野での予測の入力地点として茨城県のYMZF観測点を使用した。予測の猶予時間を確保するためには、より遠地の入力に基づく予測が望ましい。一方、猶予時間と予測精度にはトレードオ

フがあるため、複数観測点を用いた予測や、観測データの取得状況に合わせた予測の随時更新など、予測システムの拡張が必要である。

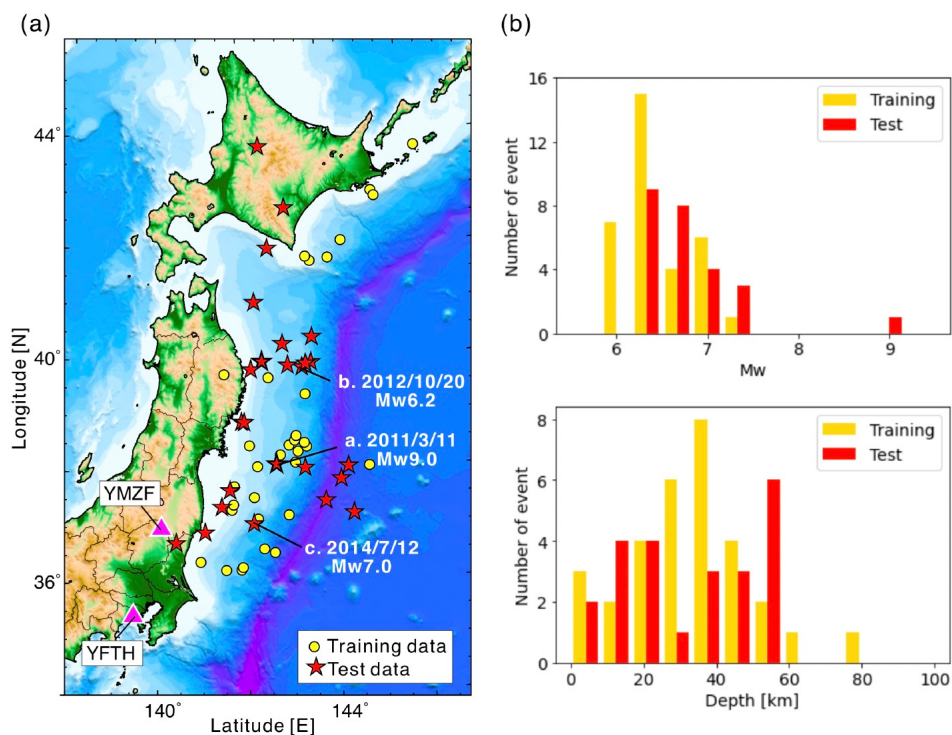


図1. (a)長周期地震動予測に用いる入力観測点 (YMFZ) と予測地点 (YFTH)。地図中の黄色○印は学習データ、赤色★印はテストデータに用いた地震を表す。(b) 学習データとテストデータの Mw と深さ分布。

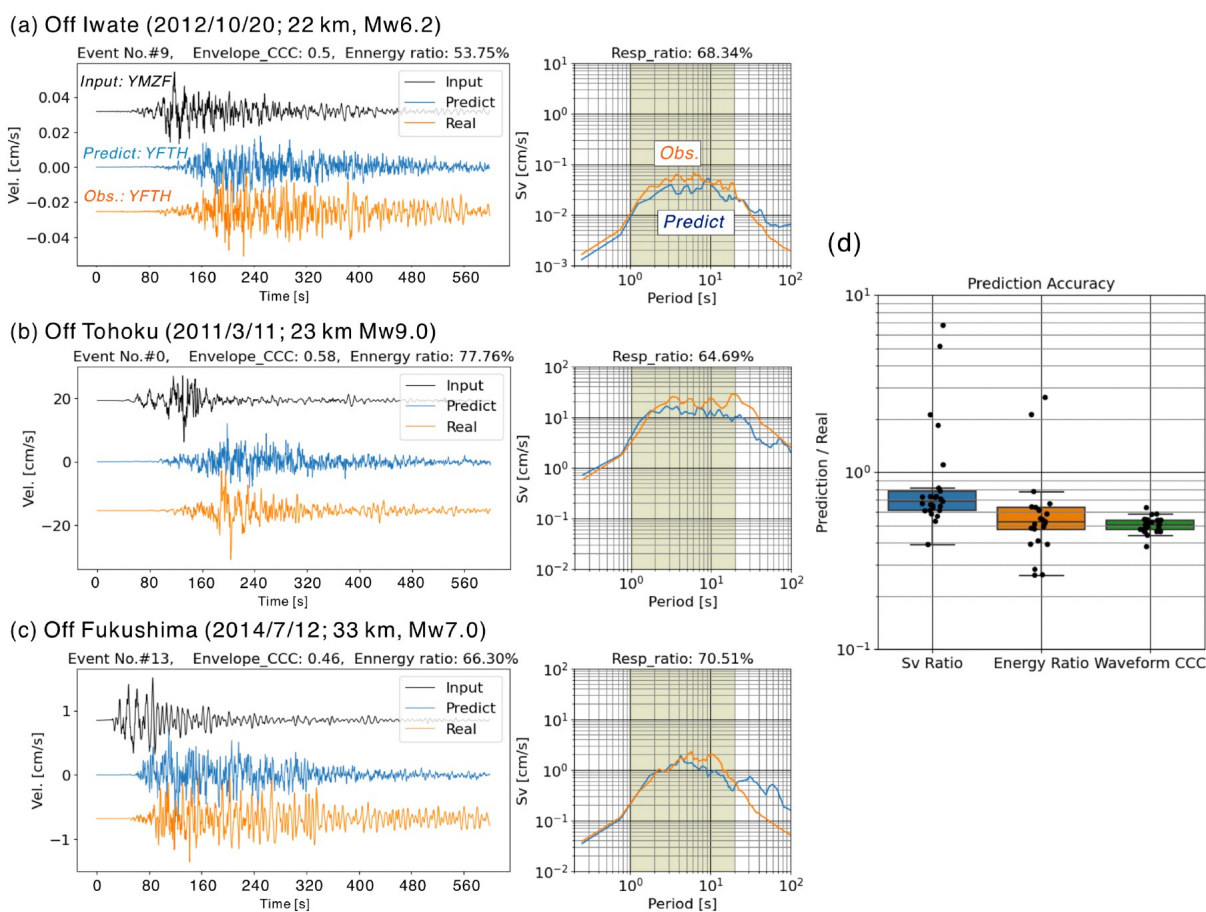


図2. 入力波形 (YMFZ 観測点; 黒)、予測波形 (YFTH 観測点; 青)、および観測波形 (オレンジ) の比較・右図は予測・観測波形の速度応答スペクトル (ハッチは予測対象周期範囲: 1~20 秒)。(a) 岩手県沖の地震 (Mw6.2)、(b) 東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) (c) 福島県沖の地震 (Mw7.0)。右図は予測・観測波形の速度応答スペクトル ($h=5\%$)。 (d) 25 個の地震の予測/観測比と相関係数の分布を四分位数にて表示 (左から、1. 速度応答スペクトル比、2. 弾性エネルギー総和比、3. 波形の相互相関係数の分布)。