

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22002

研究課題名（和文）深層学習による強震動評価・即時予測の新展開

研究課題名（英文）New Development of Strong Motion Evaluation and Realtime Prediction by Deep Learning

研究代表者

大野 晋（OHNO, SUSUMU）

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：40361141

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に建物側に比べて精度が低い地震動の評価精度の向上を目指して、東北地方の超巨大地震の大振幅記録を含む多数の強震記録を用いて、深層学習を用いた強震動予測や地震動の即時評価・面的評価、さらには建物応答予測に挑戦した。深層学習は、データ数や分布に大きく依存する点に注意する必要があるが、複雑な現象をモデル化でき評価精度向上に寄与すること、学習に時間はかかるが即時に適用可能な点は早期警報や発災後対応に有効なことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層学習による物理シミュレーションの代理モデル作成は、複雑な現象をモデル化できること、学習に時間はかかるが即時に適用可能な点が大きな特徴である。本研究では、単に震度予測にとどまらず、建物では高次モードまで含めた多成分の応答波形予測が可能であること、地震動では事前予測としてスペクトルの高精度評価、早期地震警報としてスペクトルの即時予測、地震直後ではスペクトルの面的評価がそれぞれ可能であることを示した。早期地震警報や発災時対応に有効と思われる。

研究成果の概要（英文）：In order to mainly improve the evaluation accuracy of seismic motion, which is less accurate than that of the building side, this study challenged the prediction of strong ground motion, real-time and spatial evaluation of seismic motion, and building response prediction using deep learning. We used a large number of strong-motion records including large-amplitude records of the Tohoku region, Japan. Although it should be noted that deep learning is highly dependent on the number and distribution of data, we showed that deep learning can model complex phenomena and contribute to evaluation accuracy improvement. Although it takes time to learn, neural network can be applied immediately and is effective for earthquake early warning and immediate response for earthquake disasters.

研究分野：地震工学

キーワード：深層学習 強震動評価 建物応答 即時予測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築構造物の地震安全性を向上させるためには、建物側に比べて精度が低い地震動の評価精度の向上が不可欠である。兵庫県南部地震後に全国展開された強震観測網により、強震動のデータ数は飛躍的に増加しているが、経験式・数値シミュレーションどちらの方法でも評価精度の向上は限定的である。また、被害の拡大抑止・早期把握には地震動の即時情報を有効に活用する必要があるが、現時点でも周期情報のない震度ベースの運用であり、建築構造物や機器、室内空間へ適用するには不十分な（精度も上がらない）状況が続いている。

一方、現在深層学習によるニューラルネットの適用が多くの分野で進んでいる。地震工学でも被災画像解析への適用が進んでいるが、強震動予測での適用はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

深層学習によるニューラルネットは、豊富なデータがあれば非常に複雑な現象であっても精度よくモデル化できること、構築されたモデルの運用が即時かつ容易であることが特徴であり、複雑な強震動の高精度予測や地震時の即時評価が可能となれば、地震工学的意義や防災上の波及効果は大きい。本研究では、深層学習を用いた強震動予測や地震動の即時評価・面的評価に挑戦する。

3. 研究の方法

(1)強震動の加速度応答スペクトル評価

構造物への設計用入力及び地震ハザード評価に用いるために、東北地方の超巨大地震の大振幅記録を含む非常に多くの強震記録を用いて、震源・観測点情報を入力とし、応答スペクトルを出力とした深層ニューラルネットを構築する。

(2)早期地震警報と建物応答予測

地震発生後、主要動到達前の主要動予測を行うため、震源に近い前線観測点の P 波スペクトルを入力、目標地点での主要動スペクトルを出力とするニューラルネットを構築する。また、建物基礎部から上層階の応答を予測するニューラルネットを構築する。

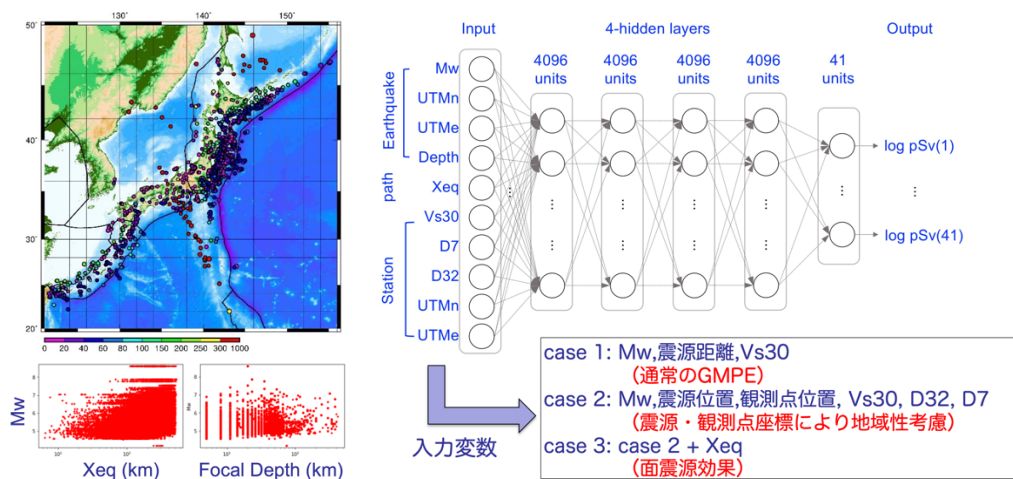
(3)地震直後の揺れの面的分布推定

地震直後の揺れの面的分布推定のために、観測点での強震記録及び地盤情報を入力に、面的な（メッシュ状の）地震動スペクトル分布を出力とするニューラルネットを構築する。

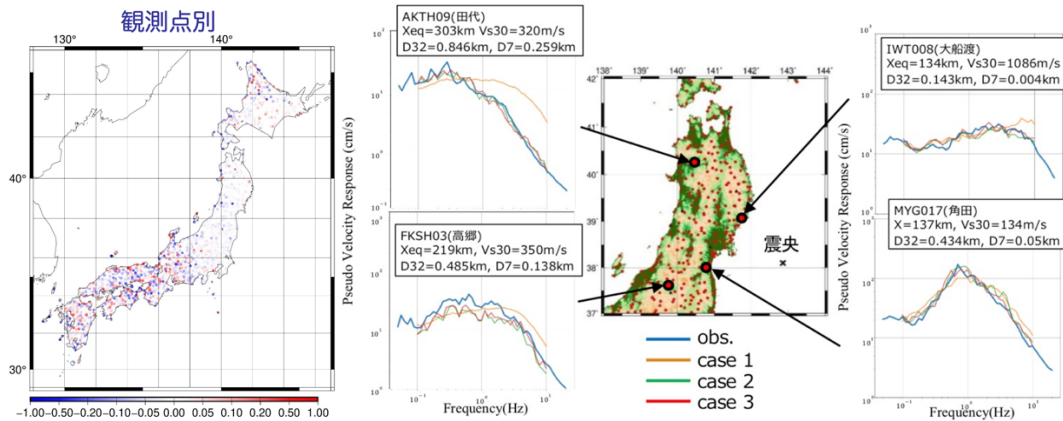
4. 研究成果

(1)強震動の加速度応答スペクトル評価

ニューラルネットワーク(DNN)による強震動スペクトルのモデル化を行った。防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net データを用いて検討した結果、入力変数として既存の地震動評価式と同じ Mw, 距離, Vs30 のみを与えた場合は精度の改善は見られなかったが、距離の代わりに震源座標と観測点座標を与えた場合は地震動評価式よりも評価精度が向上したことが、例えば前弧側と前弧側の減衰特性の違いなども学習できている結果が得られた。ただし推定精度はデータ数に大きく依存し、東北日本に比べて西日本の推定精度が悪い結果が得られた。



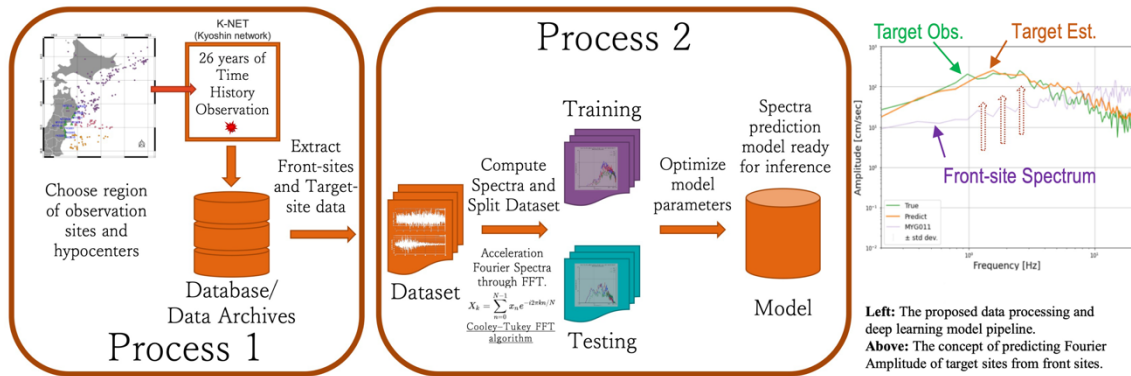
強震記録のデータベース(左)と加速度応答スペクトル評価ニューラルネット構成(右)



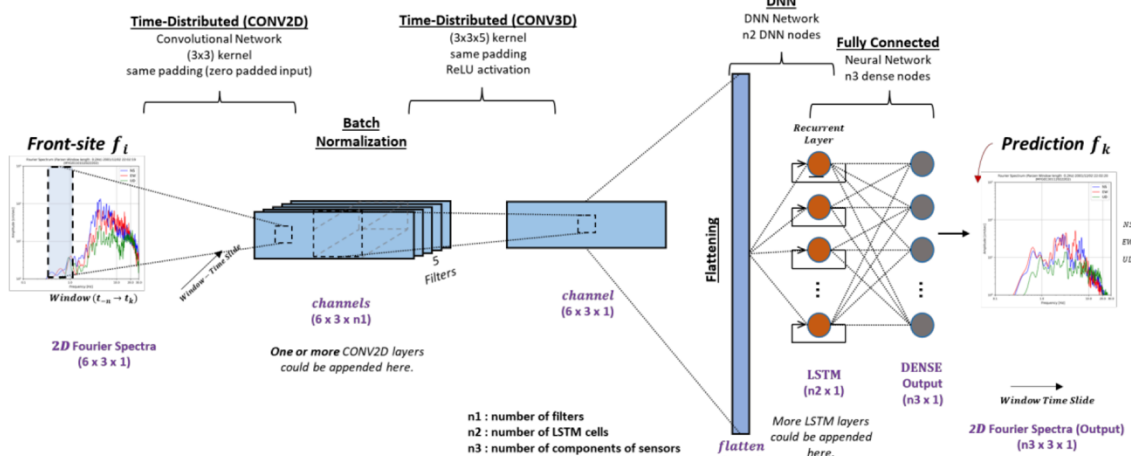
周期 1 秒の残差分布(左)と東北地方太平洋沖地震への適用例 (右)

(2)早期地震警報と即時建物応答予測

早期地震警報において、建物応答や床応答を予測するためには震度だけでなくスペクトル情報が必要である。震源に近い前線観測点の P 波もしくは S 波を含む区間から、遠方の目標観測点の主要動部分のスペクトルを逐次推定するニューラルネットを CNN, LSTM, DNN を組み合わせて構築し、防災科学技術研究所の K-NET データを用いて学習した。震源、前線観測点、目標観測点の位置関係に依存して余裕時間に違いはあるが、目標地点の主要動到達前に精度良く応答スペクトルを推定することが可能であることを示した。

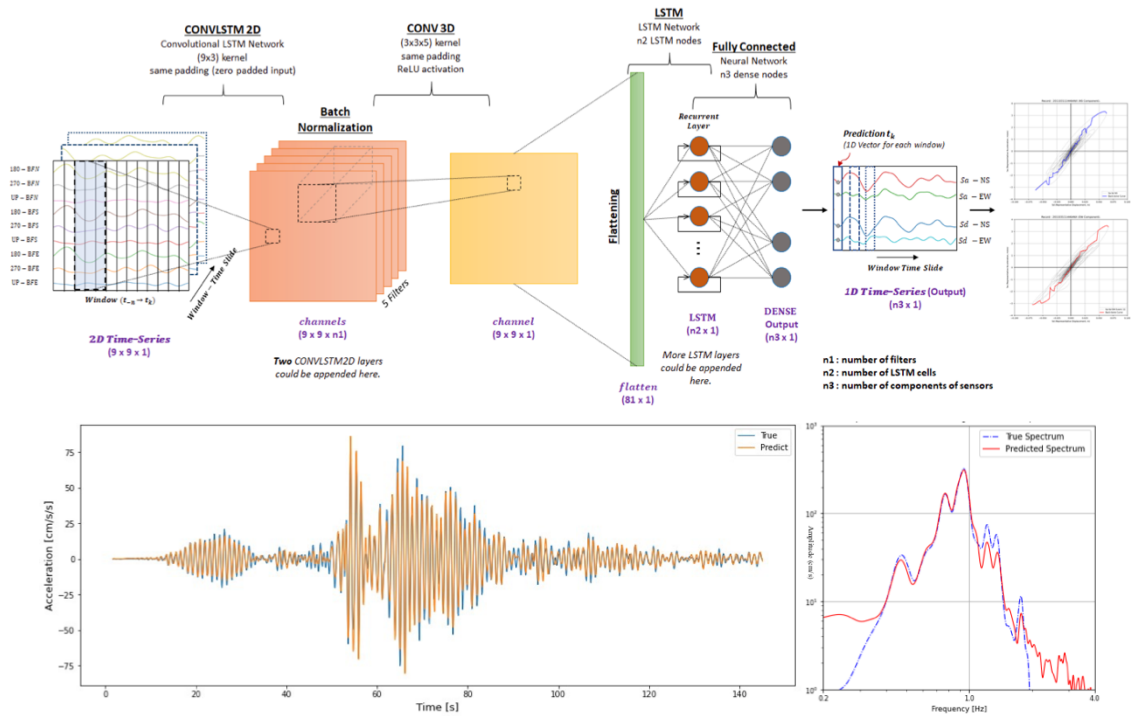


早期警報検討用のデータベース(左)と検討の枠組(中央), 適用例(右)



前線観測点から目標観測点主要動区間のスペクトル推定のニューラルネット構成

建物の基礎階の入力地震波が得られた時に建物上層階の応答波形を予測するニューラルネットを CNN, LSTM, DNN を組み合わせて構築し、建築研究所建物の高密度観測データを用いて学習した。ウェーブレット変換と組み合わせることで高次モードまで精度良く推定可能なこと、応答波形のみならず、スペクトルや SA-SD 曲線も予測可能であることを示した。

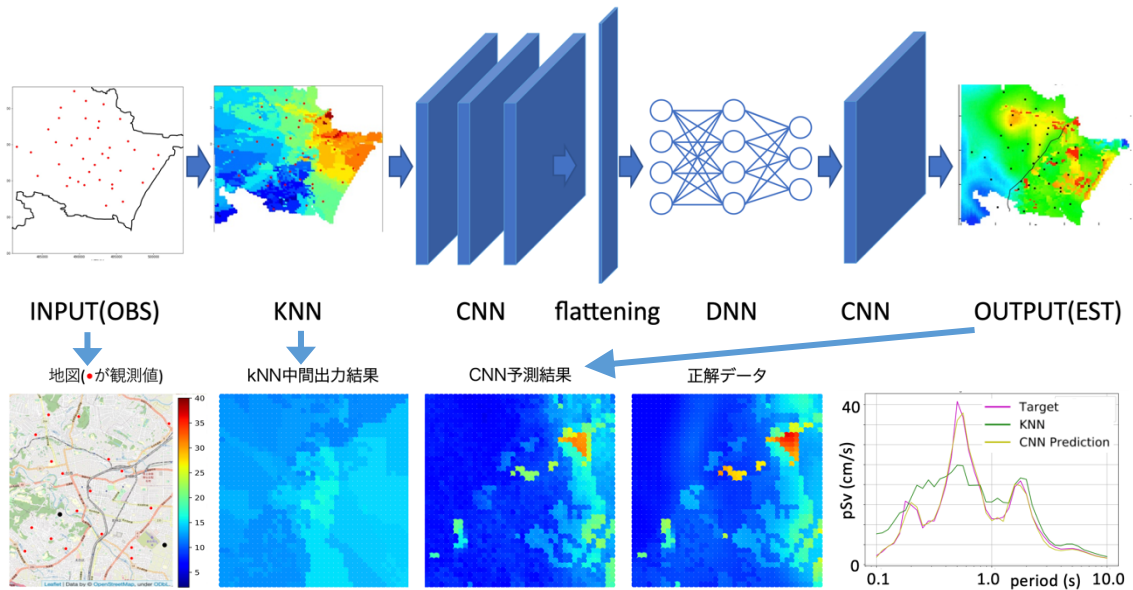


基礎入力建物上部出力のニューラルネットワーク構成(上)と適用例(下)

(3)地震直後の揺れの面的分布推定

メッシュ地盤構造の等価線形解析(スペクトルモーダル解析)と空間補間を組み合わせた面的出力結果(仙台の250mメッシュの応答スペクトル分布)を教師データとしてニューラルネットワークを学習させた。観測点の空間密度が粗いため、教師データに近い値をCNNの入力値として用いる必要があった。そのため空間データの分類に優れているとされるKNNを中間分布推定に用い、CNNとDNNの組み合わせでネットワークを構築した。

KNNのみによる簡易評価に比べて、KNN+CNN+DNN出力結果の空間分布の方が正解データに近く、スペクトル推定も可能であったことから、提案手法により有効な代理モデルが推定可能と思われる。本手法は学習に時間がかかるものの、できたモデルの適用には時間がかからず、地震時の被害推定に有効と思われる。



面的スペクトル推定の深層学習の枠組(上)と適用例(下)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 A. A. Torky, S. Ohno, T. Kashima	4. 巻 9c
2. 論文標題 DEEP LEARNING TECHNIQUES FOR STRUCTURAL RESPONSE PREDICTION DURING STRONG GROUND MOTIONS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 17WCEE	6. 最初と最後の頁 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Torky Ahmed A., Ohno Susumu	4. 巻 252
2. 論文標題 Deep learning techniques for predicting nonlinear multi-component seismic responses of structural buildings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers & Structures	6. 最初と最後の頁 106570 - 106570
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruc.2021.106570	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松岡恭平・大野晋
2. 発表標題 深層学習を用いた地震動スペクトル評価の検討
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. A. Torky, S. Ohno, T. Kashima
2. 発表標題 A Deep Learning Approach to Dynamic Response Predictions for Structures
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松岡恭平・大野晋
2. 発表標題 深層学習を用いた地震動スペクトル評価の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野晋, 松岡恭平
2. 発表標題 深層学習による強震動スペクトル評価
3. 学会等名 第48回地盤震動シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松岡恭平・大野晋
2. 発表標題 機械学習を用いた地震動スペクトル評価に関する検討
3. 学会等名 日本地震工学会第15回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. A. Torky, S. Ohno
2. 発表標題 Deep Learning Predictions of Seismic Capacity Curves of Buildings
3. 学会等名 日本地震工学会第15回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森川拓海・Torky Ahmed・大野晋
2. 発表標題 深層学習を用いた地震動応答スペクトルの準即時的予測
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ahmed Alaaeldean Torky, Susumu Ohno
2. 発表標題 Deep Learning Technique for Temporal Site-to-Site Seismic Predictions using short-interval Fourier Amplitude Spectra
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関