

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18791

研究課題名（和文）深層学習による地震の揺れのリアルタイム予測

研究課題名（英文）Real-time prediction of earthquake ground motions using deep learning

研究代表者

後藤 浩之（Goto, Hiroyuki）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70452323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は、地震発生時に各地の揺れ（地震動）をリアルタイム予測する深層学習モデルを構成するものである。地震計位置で取得されたデータから地震動を推定することが目的である。実際のデータに基づいて様々なモデルを検討したが、実地震データに含まれる情報が十分でないため、地震動の位相特性までを再現するには至らなかった。このため、データ不足を補うため物理法則である弾性波動方程式をPINNsの枠組みで与えることで改善を図った。結果として、震源近傍においても時刻歴データを適切に再現することができた。一方、PINNsは計算コストの問題でリアルタイム性に乏しく、この解決が課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データ数の不足を物理法則である波動方程式で補うことによって、深層学習により地震動の予測が可能になる可能性を示したと言える。この結果は震源近傍の地震動を周囲の観測記録から再構成できる可能性も示しているため、例えば2024年能登半島地震のように震源断層直上の地震動の空間分布を適切に表したい場合にも活用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This research consists of a deep learning model for real-time prediction of ground motions in different regions during an earthquake. The objective is to estimate ground motions from data acquired at seismic stations. Various models were considered based on actual data, but they could not represent the phase characteristics of the ground motions due to insufficient information in the actual data. To compensate for the lack of data, the elastic wave equation was introduced in the framework of PINNs. As a result, the time history data could be reproduced adequately even in the vicinity of the source fault. On the other hand, PINNs lack real-time performance due to computational costs that must be solved.

研究分野：地震工学

キーワード：深層学習 地震動

1. 研究開始当初の背景

本研究課題は、地震発生時に各地の揺れ(地震動)をリアルタイムに予測する新しい方法論を提案するものである。現在、即時に震度を予測する緊急地震速報という技術が実用化されているが、地震動そのもの、すなわち揺れの時間経過を直接予測することを目指す。揺れが到達する前に地震動が予測できれば、地震の揺れに相対する力がかかることで構造物の揺れを積極的に抑える技術であるアクティブ制振が実現できるようになること、走行中の車両(車、鉄道)の自動制御技術にフィードバックさせることで地震時の多重衝突や脱線等の重大な事故を防ぐことができる可能性が生まれること等が期待できる。地震の揺れに静かに耐えようとするこれまでの地震防災から、地震の揺れを積極的に迎え撃つ能動的な地震防災へのパラダイムシフト、すなわち未来の地震防災のカタチを提示しようとする意欲的な萌芽研究である。

2. 研究の目的

地震の震源位置、発震時刻やマグニチュードといったパラメータ(地震の諸元)は、地震波の到達時刻や振幅のデータから即時に推定されている。また、各地の揺れやすさ(地盤増幅)や地震波が伝播する過程で受ける影響(伝播経路特性)は、過去の地震記録に基づいた分析によって明らかにすることができる。これら地震の諸元、地震波の伝播経路特性や地盤増幅は、すべて地震動を形づくる本質的なものである。従来の地震工学研究では、これまで過去や現在の地震記録に含まれる様々な情報を人為的に抽出し、これらを統合して地震動を予測する問題に活用してきた。

本研究では、地震動のリアルタイム予測を実現するため、AI技術のひとつである深層学習を利用する。深層学習は、このように複雑な因果関係を持つ問題に有効な方法であるため、人為的に情報を抽出しなくても、地震記録から地震動を直接予測することができる可能性が考えられる。

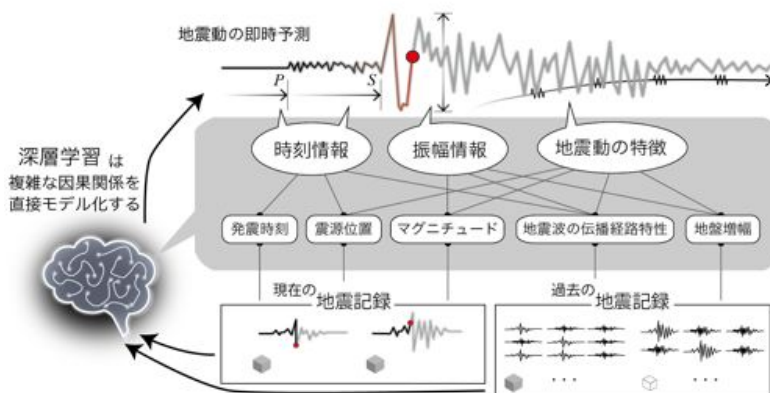


図1 深層学習がモデル化する複雑な因果関係

3. 研究の方法

本課題では、深層学習を利用した地震動のリアルタイム予測を研究する。当初の研究計画は以下のものであった。対象とする地点に多数の地震計を展開して十分な数の地震記録を収集し、収集した大量の地震記録に基づいて深層学習モデルを学習させる。深層学習モデルは、常設の地震観測所で得られた地震記録を入力とし、臨時で設置した地震計の記録を出力とするものである。十分に学習の進んだ深層学習モデルを用いれば、各地の地震動を予測することができるようになると考えた。

しかし、コロナ禍の影響が想定より長引き、地域住民の理解を得て地震計を実際に展開し、地震記録を収集することは困難となったため、これまでの研究で収集した地震記録、入手可能なデータ、あるいは仮想的に生成した地震波動場を用いて、地震動予測の実現可能性について検討を

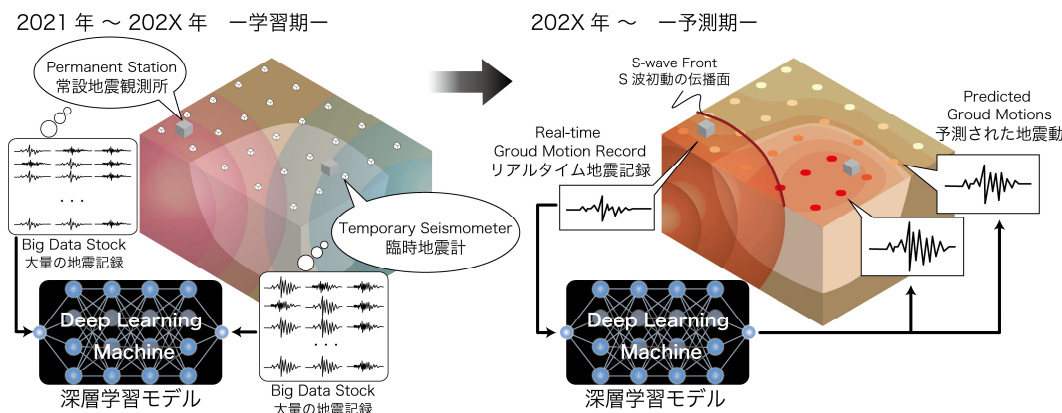


図2 地震動のリアルタイム予測する深層学習モデルの当初概念図

進めた。

4. 研究成果

(1) 地震記録を用いた深層学習モデルの検討

本課題は周囲の地震記録から地震動を推定する深層学習モデルを構築することが目的であるが、地震動は水平上下3成分の時刻歴データであり難易度が高い。そこで、既往研究である Otake et al.(2020)では、変動の比較的少ないスカラー値の時系列データであるリアルタイム震度をターゲットにモデル構築を試みた。これは、周辺観測点のリアルタイム震度を入力とし、対象地点のリアルタイム震度を出力するものであった。そこで本検討では、他の入出力に対しどの程度の性能を示すのか検討を進めた。

大崎市古川地区で実施してきた高密度地震観測網のデータ (Goto et al., 2012) を用いて検討する。入出力に3成分の加速度波形、速度波形を用いた場合、同様のアルゴリズムで深層学習モデルを構成し、結果を比較した。加速度波形は短周期成分を多く含むため、位相情報を含めて合わせることは容易でないが、出力波形の最大値(最大加速度)を予測すること比較的精度が良い。速度波形においても位相情報をあわせることは困難であるが、比較的広い周波数帯域を合わせることができているため、周波数特性は比較的精度が良いことがわかった。これを踏まえ、ウェーブレット変換によるスカログラムであれば改善する可能性を考えたが、結果として精度の向上は見込めなかった。

以上の検討は Long short-term memory (LSTM)を用いた深層学習モデルによる結果である。この他、Furumura and Oishi (2023)によって、TCNを用いた深層学習モデルによって長周期地震動の予測問題が検討されている。LSTMに比べて振幅特性やエンベロープ形状(過渡的特徴)をよく説明できていることから、TCNは有効なツールと考えられる。実際、派生研究として研究代表者らが実施した研究(ショーバック他, 2022)においても、TCNによる時刻歴データの学習が一定の成果をあげている。しかし、TCNを用いたとしても位相特性を含めて波形の時刻歴全体を構成するには至っていないのが現状である。この理由は、深層学習モデルそのものの問題である可能性もあるが、波形を再現できるほど実データが充実していない可能性も考えられるため、現状としてデータのみから地震動を予測する方法には限界があると考えた。

(2) 物理法則を導入した深層学習モデルの検討

データが不足している状況下での学習は難しい問題であるが、地震動は地球内部を伝播する弾性波として理解できるため、弾性波動方程式という条件を課すことによってデータ不足を補うことができる可能性がある。このような物理的制約を偏微分方程式の形で記述できる場合、PINNs(Physics informed neural networks, Raissi et al., 2019)を利用できる。このため、PINNsによって地震動予測が実現できる可能性が考えられた。

ここでは検討のため2次元SH波動場を対象とする。正解とする地震動をFEMにより作成し、地表の数点に地震計が設置されている

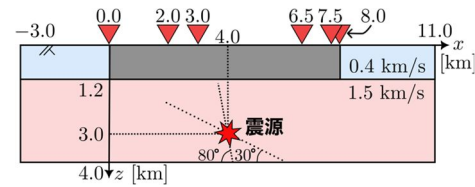


図3 PINNsで地震波動場の再現を行うモデル図

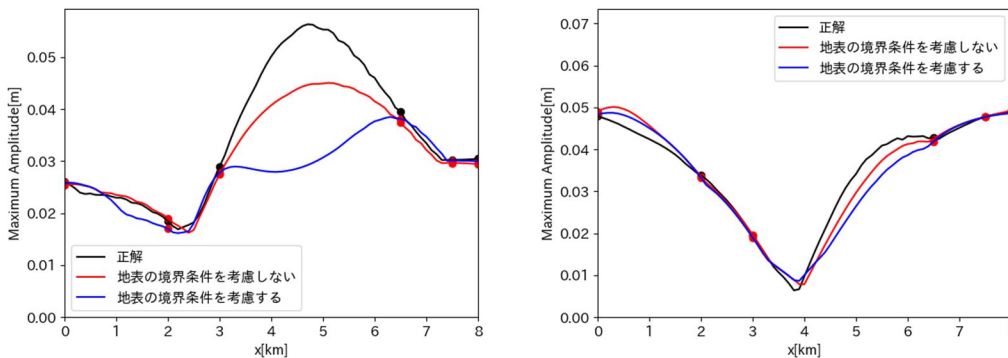


図4 PINNsによる地表変位の最大値分布(左:傾斜角30度,右:傾斜角80度)。

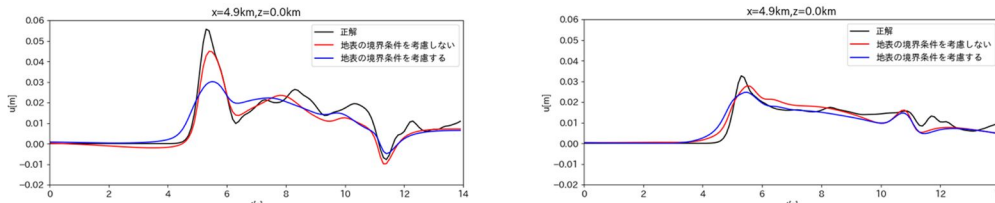


図5 PINNsによる地表変位の時刻歴(左:傾斜角30度,右:傾斜角80度)。

状況を模擬して、正解の地震動を入力データとして与える。地震計位置での地震動の予測誤差に加え、2次元波動方程式から得られる誤差を用いて損失関数を作成する。この損失関数を最小にするようモデルを学習させることで、波動場を再構成することを行う。従来、PINNsを用いて波動方程式を解いた事例はあったが、本研究では、地震計位置で取得された地震記録から、地震波動場を構成することが目的であるため、初期条件は不明であり、かつ地震動データは地表の限られた地点のみで利用できる、という厳しい条件設定とした。

横ずれ断層型のメカニズムを持つ点震源によって生成される地震動を再現する。図中に示すように地表に地震計を模した地震動データが与えられている地点を用意し、その他は波動方程式および境界条件以外を与えない。断層傾斜角は30度と80度の2ケースを行った。30度の場合には地表に設けた地震計はいずれも同じ極性となるが、80度の場合には極性が反転する。地表における最大値分布を正解データと比較すると、傾斜角30度の場合には震源直上で地震計位置より大きな値となる必要があるが、PINNsの結果はそれを再現していることがわかる。また、80度の場合には震源直上で小さな値となる必要があるが、これも再現されている。このような分布は地震計位置でのデータの空間補間では表現できないため、非常に重要な成果であると言える。また、ここで重要である時刻歴の再現性であるが、正解データと似た経時変化を示しており、位相特性も良好に再現されていることがわかる。

すなわち、データ数の不足を物理法則である波動方程式で補うことによって、地震動の予測が可能になる可能性を示したと言える。この結果は震源近傍の地震動を周囲の観測記録から再構成できる可能性も示しているため、例えば2024年能登半島地震のように震源断層直上の地震動の空間分布を適切に表したい場合にも活用できる可能性がある。一方、本検討は2次元波動場のみであるため、現実の3次元波動場での検討をより進める必要がある。また、PINNsを現実時間で計算するにはまだ計算リソースが十分でなく、リアルタイム性は乏しい。このフレームワークで地震動分布をリアルタイムに予測するためには更なるブレイクスルーが必要であることも明らかとなった。

<引用文献>

- Otake et al.(2020). Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity, *Seismological Research Letters*, 91(6), 3433-3443.
- Goto et al.(2012). Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seismological Research Letters*, 83(5), 765-774.
- Furumura and Oishi (2023). An early forecast of long-period ground motions of large earthquakes based on deep learning, *Geophysical Research Letter*, 50(6), e2022GL101774.
- ショーバック他(2022). 深層学習と数理モデルの組み合わせによる土の繰返しせん断特性の表現法, *AI・データサイエンス論文集*, 3(J2), 201-208.
- Raissi et al.(2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 ショーバック ジェイコブ英輔、栗間 淳、後藤 浩之、三上 武子、吉田 望、澤田 純男	4. 巻 3
2. 論文標題 深層学習と数理モデルの組み合わせによる土の繰返しせん断特性の表現法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 201 ~ 208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/jsceiii.3.J2_201	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 Kaneko Yoshihiro, Goto Hiroyuki	4. 巻 49
2. 論文標題 The Origin of Large, Long Period Near Fault Ground Velocities During Surface Breaking Strike Slip Earthquakes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GL098029	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 GOTO Hiroyuki, CHAKRABORTY Anirban	4. 巻 78
2. 論文標題 VISUALIZING SPATIAL PROBABILITY FIELDS REFLECTING SIGNIFICANT DIFFERENCES IN NEIGHBORING VALUES	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 I_79 ~ I_86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejsee.78.4_I_79	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 Goto Hiroyuki, Kaneko Yoshihiro, Naguit Muriel, Young John	4. 巻 111
2. 論文標題 Records of Extreme Ground Accelerations during the 2011 Christchurch Earthquake Sequence Contaminated by a Nonlinear, Soil-Structure Interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 704 ~ 722
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0120200337	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 該当する

1. 著者名 ASANO Kota、GOTO Hiroyuki、OKUMURA Yoshihiro、SAWADA Sumio	4. 巻 77
2. 論文標題 A STUDY ON THE BUILDING DAMAGE DISTRIBUTION IN TAKATSUKI AND IBARAKI CITY DURING THE 2018 NORTHERN OSAKA EARTHQUAKE CONSIDERING GEOGRAPHIC FACTORS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 I_638 ~ I_648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.77.4_I_638	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7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 ショーバックジェイコブ英輔, 栗間淳, 後藤浩之, 三上武子, 吉田望, 澤田純男
2. 発表標題 深層学習と数理モデルの組み合わせによる土の繰返しせん断特性の表現法
3. 学会等名 第3回AI・データサイエンスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奈良樹, 後藤浩之
2. 発表標題 ワッサースタイン計量を用いた地震波センブランス解析の試み
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江口拓生, 後藤浩之, 栗間淳, Anirban Chakraborty
2. 発表標題 2022年3月16日福島県沖の地震の余震観測に基づく福島県相馬市付近の地盤震動特性の評価
3. 学会等名 第42回地震工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奈良樹, 後藤浩之
2. 発表標題 地震波形の類似度評価におけるワッサースタイン計量の特性とセンブランス解析への適用
3. 学会等名 第42回地震工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奈良樹, 後藤浩之
2. 発表標題 ワッサースタイン計量を用いた類似度評価による地震波センブランス解析の試み
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Otake, Jun Kurima, Hiroyuki Goto, Sumio Sawada
2. 発表標題 Deep learning model to predict real-time seismic intensity,
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Goto, Yoshi Kaneko, John Young, Muriel Naguit
2. 発表標題 Extremely large asymmetric vertical accelerations (AsVA) during recent earthquakes
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------