

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）データ同化・深層学習に基づく長周期地震動の即時予測

（英文）Early forecast of long-period ground motions based on data assimilation and deep learning

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震の災害誘因の即時予測手法の高度化（重点研究）

ア. 地震動の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(1) 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 大規模火山噴火

(5) 本課題の5か年の到達目標：

大地震による強い揺れの事前予測と災害軽減に向け、海・陸リアルタイム強震観測データと地震波伝播シミュレーションとのデータ同化、及び観測・計算結果の深層学習に基づいて、震源域近傍での強震観測データから遠地の平野での長周期地震動を即時に予測する手法を開発する。現行の緊急地震速報が対象とする震度の予測に対し、本研究では地面の揺れ（地震波形）と個々の建物の揺れの時刻歴を予測することで、建物や地盤被害そして避難等の対応に必要なきめ細やかな防災情報の提供が可能になる。5年間の計画では、陸域（K-NET, KiK-net, F-net, MeSO-net）及び海域（S-net, DONET）の地震観測データセットを活用した即時手法開発を進めるとともに、テストサイトにおける建物強震観測を実施して、手法の有効性を検証し、防災現業機関や行政、関連企業等との連携により社会展開を図る。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

1. データ同化に基づく長周期地震動の即時予測

(1)最適内挿法に基づく長周期地震動のデータ同化・即時予測手法（Furumura et al. 2019）を改良し、アンサンブルカルマンフィルタに基づくデータ同化により、予測の幅を定量化した実用的な即時予測モデルを構築する(R6~8年度)。(2)震源近傍の強震観測点から予測地点の地震波伝播の伝達関数（グリーン関数）を利用した瞬時の予測手法（Oba et al. 2021）を発展させ、自然地震や常時微動から求めたグリーン関数を用いて大地震の長周期地震動を瞬時予測するシステムを開発する(R6~8年度)。(3)全国地震観測データ流通ネットワーク（JDXnet）により配信される連続観測データを東大情報基盤センターのWisteria/BDEC01スパコンでリアルタイム処理し長周期地震動を即時予測するシステム開発（中島, 2021）を継続し、防災現業機関と企業との協働により実用化に繋げる(R6~10年度)。

2. 深層学習に基づく地面と建物の長周期地震動の即時予測

(1)震源近傍での強震観測データから遠地の平野の長周期地震動を予測する深層学習(TCN)モデル(Furumura & Oishi, 2023; 1地点入力-1地点波形予測)を拡張(多地点入力-1地点波形予測)し、南海トラフ・日本海溝沿いの海溝型地震及び内陸地震を対象とする関東平野、濃尾平野、大阪平野の即時予測システムを開発する(R6~7年度)。(2)波動方程式などの物理法則を拘束条件とする物理情報深層学習(PINN)モデルを開発し、多様な地震の予測に対応できる、汎化性能の高い即時予測モデルを開発する(R6~9年度)。(3)地面の揺れの予測結果から、個々の建物(階層)毎の揺れを予測する、2段階TCNモデルを開発し、地震工学・建築学の研究者と協働により実用的な建物の即時被害予測を進める(R6~10年度)。

3. 深発地震による長周期地震動の予測

(1) 2008年オホーツク海深発地震(Mw7.7, 680 km)や2015年小笠原諸島西方沖地震(Mw7.9, 680 km)で観測されたように、sP変換波(地表へのS波臨界角入射による大振幅のP変換波)とs-PL波(地殻を広角多重反射により伝播する周期5~30秒の地震動)を含めた多様な長周期地震動の予測の実現に向けて、上記1, 2を拡張した深発地震の長周期地震動即時予測モデルを整備する(R6~8年度)。加えて、(2)千島海溝~日本海溝~伊豆小笠原海溝の深発地震の観測データを用いて、長周期地震動及の距離減衰式を作成する(R8~10年度)。なお、本距離減衰式は、最大速度値の予測に加え、速度応答スペクトルの強度と揺れの継続時間の予測を対象とする。

(7) 令和6年度の成果の概要:

・今年度の成果の概要

1. データ同化に基づく震源の即時推定

日本列島の陸海を覆う稠密地震観測網の整備と、リアルタイムデータ取得が実現したことで、観測波形からP・S波を読み取ることなく、地震波形をそのまま用いた新たな震源推定が可能である。そこで、運動方程式の時間・空間対称性に基づいて、観測波形を震源に向けて時間を遡って逆伝播させることで震源の位置と発震時刻を推定するTime Reversal source Imaging (TRI)を用いた高精度な震源推定に挑戦した。本研究では、従来の最適内挿法によるデータ同化を導入したTRI手法

(Furumura and Maeda, 2021)を改良し、シミュレーション波形と観測波形をアジョイント法に基づき繰り返し同化を進めることで、従来法よりも格段に解像度の高い震源推定を実現した(森田・古村・前田, 2023)。アジョイント法計算では、観測波形と推定震源に対応する計算波形との残差を目的関数として、逆伝播計算により目的関数の勾配を求め初期波動場の修正を繰り返し行う。そして、弾性エネルギーが最大となる位置と時間を震源と推定する(震源イメージング)。震源における応力値(stress glut)を用いて、震源メカニズム(CMT)も得ることができる。

本研究では、MeSO-netの観測波形を用いて関東平野直下のM4~5規模の地震の震源推定を行った。手法の有効性を確認するために、まずOpenSWPC(Maeda et al. 2017)によるシミュレーション波形を用いた数値実験を行い、観測点間隔やノイズ(S/N比)が震源推定に与える影響を調査し、観測条件が悪い場合においても従来法より高精度での震源イメージングが可能であることを確認した。また、複数個の地震の同時発生やテクトニック微動のように連続する地震では、P波とS波エネルギーの相関を用いた別のイメージング手法が有効であることを確認した。これらの結果を踏まえ、東京23区直下の地震(Mw4.1, 23 km)と神奈川県下の地震(Mw5.2, 42 km)のMeSO-net実観測データを用いた震源イメージングを行なった。結果、東京23区の地震では、気象庁震源の位置と時刻にシャープな震源イメージング像が得られ、CMTもF-net解と一致した。神奈川県下の太平洋プレート内部の地震については、神奈川~茨城のMeSO-net側線の距離が短く深い震源からの十分な見込み角度が確保できないため、震源イメージング像がプレート上面に沿ってやや広がる結果となった。

本研究では、地震観測データと波動伝播シミュレーションの同化波動場を用いて、時間を遡った過去の波動場(震源)の推定を行ったが、逆に、同化波動場を初期値に時間を進めた未来の波動場の即時推定への適用が次の目標である。

2. 物理情報ニューラルネットワーク(PINN)による津波波動場の同化

沖合に設置された海底ケーブル津波計(S-net, DONET, N-net)データを同化し、津波発生時から現在までの津波の時空間分布を即座に推定するニューラルネットワーク(NN)モデルを開発した。NNの学習過程では、観測データに加えて、津波伝播の物理方程式(本研究では線形長波方程式を使用)を拘束条件とする物理情報NN(PINN)により行うことで、観測点間隔が数十キロの離散的な津波計データ

から時・空間的にスムーズな津波波動場を効率良く学習すると期待される。学習を終えたPINNモデルを用いて、任意の地点と時刻の津波波動場を推定することができる。これにより得られた、地震発生直後の初期波動場あるいは任意の時刻の波動場を推定し、これを津波シミュレーションの初期条件に用いて津波の伝播や沿岸の津波予測を行った。

まず、2011年東北地方太平洋沖地震を対象として、津波シミュレーションから得られたS-net地点での津波合成波形を用いた数値実験を行ない、物理拘束のない従来のNNに比べて、海底津波計の無い地点においても同化が適切に進むことを確認した。また、PINNでは津波観測データに含まれるノイズを過学習することなく、物理的に適切な解が得られることも確認した。

次に、2016年福島沖地震のS-net観測波形と2024年日向灘地震のN-net観測波形を用いた津波同化と予測の数値実験を行った。同化により得られた初期津波場を初期条件とする津波シミュレーションにより沿岸の観測所での津波波形を推定し、観測された波形データとの良い一致を確認した。今後の課題として、海岸線の境界条件をPINN学習の拘束条件に導入して、海岸での津波反射波を含む沿岸の津波予測への拡張が必要である。

3. 深層学習に基づく地面と建物の長周期地震動の即時予測

前課題で開発したTemporal Convolutional Network (TCN) による長周期地震動波形の予測モデル (Furumura & Oishi, 2023) を用いて、1) 震源域から関東平野への揺れの予測、2) 平野の観測点から建物への揺れの予測、の2段階予測に基づいて、都心の超高層ビルの揺れの即時予測実験を行った。東北沖の大地震における都心の超高層ビルの揺れ予測を目的として、まず1段階目のTCNモデルに対して、福島F-net (HROF) 強震計2成分を入力として、200キロ離れたMeSO-net銀座観測点 (GNZM) の水平動2成分の揺れを予測する学習を行った。次に、2段階目のTCNモデルでは、GNZMの揺れを入力として、5キロ離れた合同庁舎7号館 (CG7) の最上階 (37階) の水平2方向の揺れを予測する学習を、建築研究所強震観測データベースを用いて行った。そして、学習済みの2つのTCNモデルを用いて、東北沖のM6級の地震における超高層ビルの揺れを予測し、建物の揺れの時系列、応答スペクトル、揺れの継続時間などの特徴が適切に予測できることを確認した。今後、入力観測点を多点化して、内陸地震や南海トラフ沿いの地震などの大地震の長周期地震動予測へと適用範囲を拡大する予定である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

目標3-(2)-アに対し、本研究成果は深層学習に基づく長周期地震動及び建物の揺れの即時予測手法を開発した。また、地震動の即時予測に必要な震源パラメータの推定法と長周期地震動による建物の揺れの予測手法、及び津波の即時予測のための初期波源の推定手法を開発した。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Someya, M., Watada, S. and Furumura, T., 2024, 2D FDM Simulation of Seismic Waves and Tsunamis Based on Improved Coupling Equations Under Gravity, Pure Appl. Geophys., 181, 1053-1073, <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03468-2>,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

染矢真好・古村孝志, 2024, Physics-Informed Neural Network (PINN) による津波のデータ同化, 日本地球惑星科学連合2024年大会, 幕張, HDS11-P08

染矢真好・古村孝志, 2024, Physics-Informed Neural Network (PINN) による津波のデータ同化, 日本地震学会2024年度秋季大会, 新潟, S17-10

森田寅靖・古村孝志・前田拓人, 2024, アジョイント方程式に基づく地震波動場のデータ同化と震源メカニズム推定, 日本地球惑星科学連合2024年大会, 幕張, SSS07-03

森田寅靖・古村孝志・前田拓人, 2024, アジョイント方程式に基づく地震波動場のデータ同化と震源メ

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和7年度実施計画の概要：

PINNモデルに基づく津波即時予測の実現に向け、海岸線の境界条件をPINN学習の拘束条件に導入して、反射波を含む沿岸の津波予測に挑戦する。S-net直上でのリアルタイム観測データ同化のために、海底地殻変動の同化を行うためのモデルの拡張を行う。TCNモデルに基づく建物の揺れの即時予測の高度化に向けて、新たな建物強震観測データを追加した強化学習を行い、また多様な場所で発生する地震に対処するために、多点入力モデルへと拡張する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

古村孝志（災害科学系研究部門）, 武村俊介（日本列島モニタリング研究センター）

他機関との共同研究の有無：有

前田拓人（弘前大学大学院理工学研究科）, 大石裕介（九州大学データ駆動イノベーション推進本部）, 中島研吾（東京大学情報基盤センタースーパーコンピューティング研究部門）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所

電話：

e-mail：

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：古村孝志

所属：東京大学地震研究所

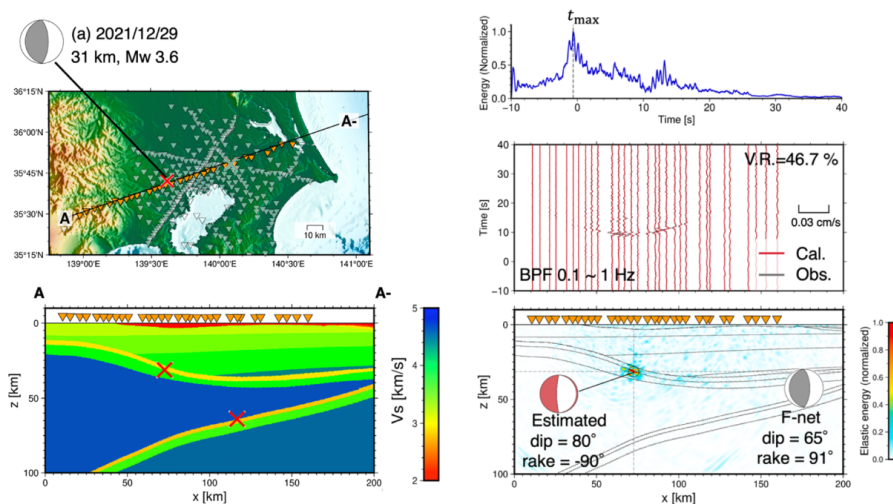


図 1

MeSo-net観測波形データのアジョイント計算による震源とメカニズムの推定。

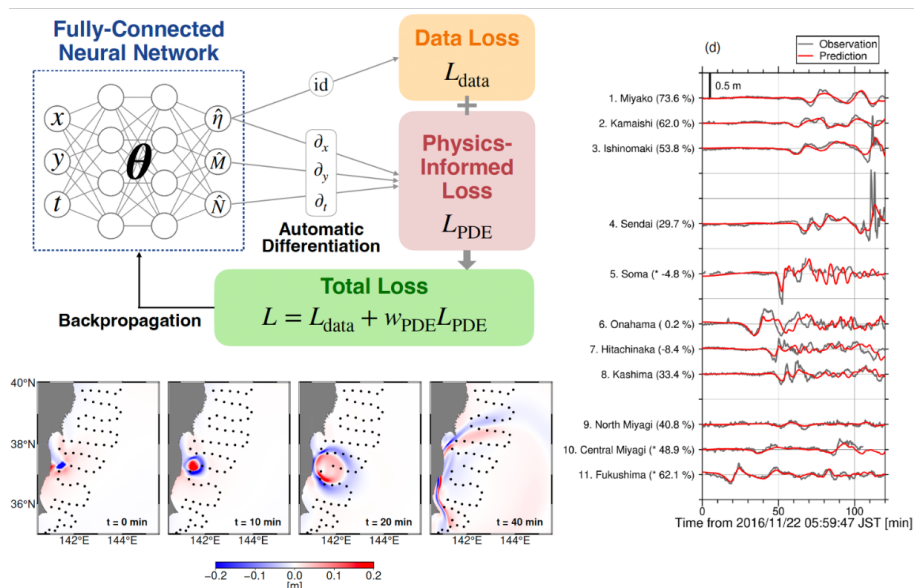


図 2

物理情報ニューラルネットワーク（PINN）に基づく津波波動場の同化と沿岸津波予測。

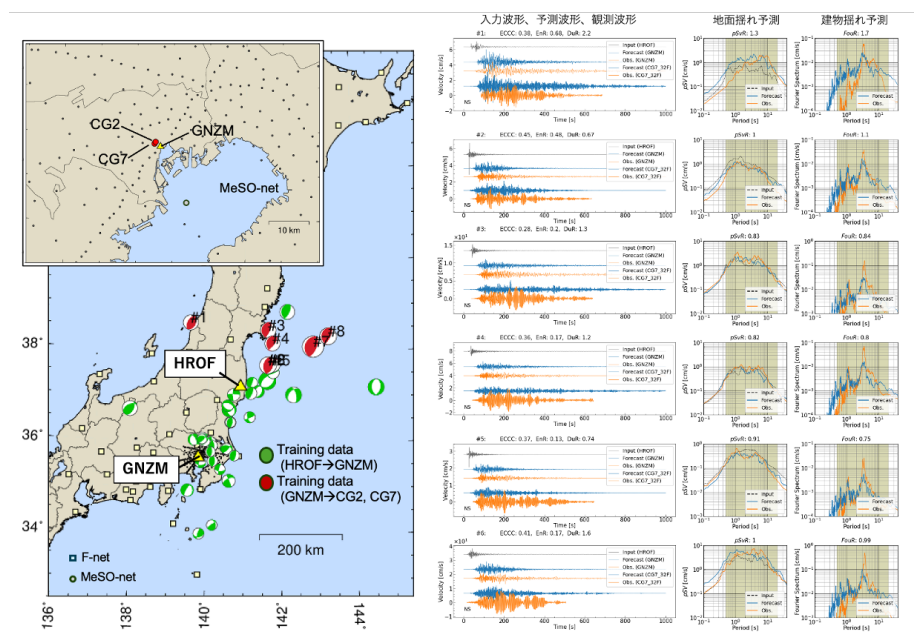


図 3

TCNモデルに基づく長周期地震動による建物の揺れの即時予測。