

(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7年度の成果の概要:

・今年度の成果の概要

1. 津波シミュレーションの代理モデルを用いた津波予測と震源インバージョン

津波の即時予測に向けて、Neural Operator (NO)に基づく高効率な震源インバージョンおよび津波予測フレームワークを開発した。従来の津波予測では、津波伝播計算に多大な計算コストを要し、また観測波形から断層パラメータを推定するインバージョン解析においても、多数の津波シミュレーションが必要となることが課題であった。

本研究では、NOを津波シミュレーションの代理モデルとして活用し、任意の津波波源から津波の時空間分布を瞬時に予測することを目指した。そのため、U-Net型エンコーダ・デコーダ構造とフーリエ空間での畳み込みを組み合わせたU-shaped Neural Operator (U-NO)をPyTorch上に実装した。学習には、東北沖日本海溝沿いに設定した2,000通りの断層モデルに対するJAGURS津波シミュレーション結果を用いた。

未学習データによる検証の結果、津波の伝播パターンを概ね良好に再現できることを確認したが、短波長成分がやや過小評価される傾向が認められ、今後の改善課題として残された。

さらに、U-NOモデルの自動微分機能を活用し、観測波形とのミスフィットを最小化する勾配法に基づく震源インバージョンへと手法を拡張した。推定の安定化のため、ラプラシアン正則化による空間平滑化を導入した。さらに、Okada (1985)の地殻変動計算をPyTorch上に実装し、U-NOと結合することで、断層パラメータから海底地殻変動、津波波動場までを一貫して予測可能な統合モデルを構築した。本手法は、従来のグリッドサーチ法と比べ、非線形なパラメータ空間を効率的に探索できる点に利点がある。

今後は、分散性を含む高計算コストな津波モデルへのU-NOの適用を進め、代理モデルの高速性を活かした即時予測手法の高度化を図る予定である。

2. 地震動シミュレーションの代理モデルを用いた長周期地震動の即時予測

長周期地震動の即時予測に向けて、計算時間を要する地震動シミュレーションに代わり、U-shaped Neural Operator (U-NO)を用いた地震動計算の代理モデルによる高速予測の実現可能性を検討した。

まず、U-NOに対して、1997年から2024年にかけて中部日本で発生したMj6以上の地震79事例を用いて、多様な震源パラメータに対するJ-SHIS地下構造モデルおよびF-net震源解を用いてOpenSWPCにより計算した三成分速度場(時間刻み0.1秒、2400ステップ)の時空間変化を学習させた。そして、地震発生直後の2つの時刻(t_{\square} , t_{\square})の波動場を入力として、一定の時間刻みで予測を繰り返し、未来の波動場を推定する。

学習済みのU-NOを用い、2007年新潟県中越地震をテストケースとして、地震発生後の2つの時刻(10s, 10.5s)の波動場を入力として、未来の波動場を予測した。結果、約30秒先までの波動場を良好に再現できることが確認され、それ以降は時間経過とともに波面振幅が徐々に減衰する傾向が見ら

れた（図2）。

今後は、U-NOモデルによる予測結果と地震観測データを同化しながら予測を逐次修正し、同化が進んだ一定時間経過後は、最新の予測結果を初期条件として数十秒先の波動場の予測を行う、逐次同化・予測フレームワークへと拡張する予定である。

3. 機械学習による長周期地震動と建物の揺れの即時予測

長周期地震動による高層建物の揺れの即時予測を目的として、前年度に引き続き、深層学習に基づく予測フレームワークの開発を進めた。

昨年度までに開発したTemporal Convolutional Network (TCN) モデルによる予測

(Furumura and Oishi, 2023) では、東北沖地震を対象に、入力点と予測点の距離から S 波到達時間差を事前に与えていた。本研究では、震源深さが多様な南海トラフ地震にも対応するため、到達時間差を含めて予測可能なモデルへの高度化を図った。到達時間差の推定に Transformer を、波形予測に TCN を用いた TCN-Transformer 結合モデルを新たに構築し、見かけ速度の異なる地震に対する予測性能の向上を実現した。

さらに、都心における予測地震動から、周辺の高層建物各階の揺れを推定するための建物応答予測の TCN モデルを整備し、地震動予測モデルと直列に接続する二段階予測手法を構築した。建物応答の予測には、建物振動の運動方程式に基づく物理拘束を損失関数に組み込んだ TCN-PINN (Physics-Informed Neural Network) モデルを採用した。これにより、建物強震観測データ数が少なくても、物理的に妥当な建物応答の推定が期待できる。

TCN-Transformer モデルは、1997~2011 年に東北沖で発生した M6.0 以上の 90 地震を用いて、震源近傍の F-net 広尾観測点 (HROF) の波形を入力とし、130 km 離れた関東平野の MeSO-net 銀座観測点 (GNZM) における長周期地震動を予測する。また、TCN-PINN モデルでは、GNZM から約 1.6 km に位置する中央合同庁舎第 2 号館 (CG2) の地下 4 階、13 階、21 階の応答を予測するために、2010~2014 年に発生した M6 以上の 25 地震を用いて学習・検証を行った。

2021 年 5 月 1 日の宮城県沖 M6.8 地震を対象とした二段階予測では、地震発生後約 40 秒間の観測波形を入力とし、GNZM における予測結果を経由して CG2 の 16 階および 32 階の揺れを推定した。その結果、建物に揺れが発生する数十秒前に、P/S 到達時刻、継続時間、波形包絡などの特性について良好な予測結果が確認された（図 3）。一方で、累積弾性エネルギーは過小評価となる傾向があり、被害評価への応用に向けた精度向上が今後の課題である。

4. 機械学習による震度予測モデルの開発

機械学習に基づき、震源パラメータ（緯度、経度、深さ、 M_j ）を入力として、日本各地の計測震度を即時に推定するモデルを開発した。本研究では、従来の震度予測式 (GMPE) が有する物理的妥当性を活かしつつ、GMPE では表現しきれない要素を機械学習により補完することで、高精度な震度予測を目指した。

具体的には、GMPE により算出した基準震度に対する残差を LightGBM で学習する「残差学習」手法を採用した。あわせて、マグニチュードの増大に伴い震度が大きくなる、震源距離の増加とともに震度が減衰するなどの物理的に妥当な関係を反映するため、単調制約をモデルに付与した。また、各観測点における表層地盤の平均 S 波速度 (AVS30) や基盤深度 (D1400) を先見情報として入力し、サイト特性の影響を考慮した。

学習データには、防災科学技術研究所 J-SHIS の「強震動データ・フラットファイル (2024)」を用い、震源情報、観測点位置および地盤情報、観測震度に基づいて学習および検証を行った。その結果、交差検証により残差の RMSE を約 0.41 まで低減できることを確認した。

学習済みモデルを用いた検証では、内陸地震、プレート境界地震、スラブ内地震、さらには深発地震を含む多様な地震タイプに対して、震度分布を概ね良好に再現できることが確認された（図 4）。GMPE により波動伝播の基本的な物理特性が担保されているため、学習データの範囲外においても極端な過大・過小評価は生じにくいと期待される。一方で、観測例のない未知の地震に対する予測精度の検証および妥当性評価は、今後の課題として残される。

・「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)-アに対して、以下の研究成果を得た。

- ・深層学習に基づき、長周期地震動および高層建物の揺れを対象とした即時予測手法を開発した。
- ・機械学習に基づく代理モデルを用いて、初期波源（震源モデル）を迅速に推定する手法を開発した。

- ・機械学習に基づく代理モデルにより、地震波伝播を高速に予測する手法を開発した。
- ・機械学習を用いて、震源情報から震度分布を即時に推定する震度予測モデルを開発した。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7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. & Furumura, T. Physics-Informed Neural Networks for Offshore Tsunami Data Assimilation. *Geophysical Journal International*, 242(3), ggaf243 (2025).
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaf243>, 査読有, 謝辞無

Someya, M., Yamada, T. & Okazaki, T. OkadaTorch: A Differentiable Programming of Okada Model to Calculate Displacements and Strains from Fault Parameters. *arXiv preprint* (2025).
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.17126>, 査読無, 謝辞無

- ・学会・シンポジウム等での発表

染矢真好、古村孝志「Neural Operator による津波シミュレーションの代理モデル」（日本地震学会2025年度秋季大会、2025/10/20、福岡国際会議場）

(9) 令和7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8年度実施計画の概要：

津波および長周期地震動の即時予測を目的として、U-NOモデルを用いた観測データ同化・予測フレームワークを構築し、実観測データによる検証を行う。関東平野周辺の複数観測点のデータを入力とし、都心域の揺れを予測する多チャンネル入力モデルへと拡張する。さらに、多質点系の運動方程式を物理拘束として組み込んだ PINNモデルを導入し、高層建物の揺れ予測の高度化をはかる。

(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：

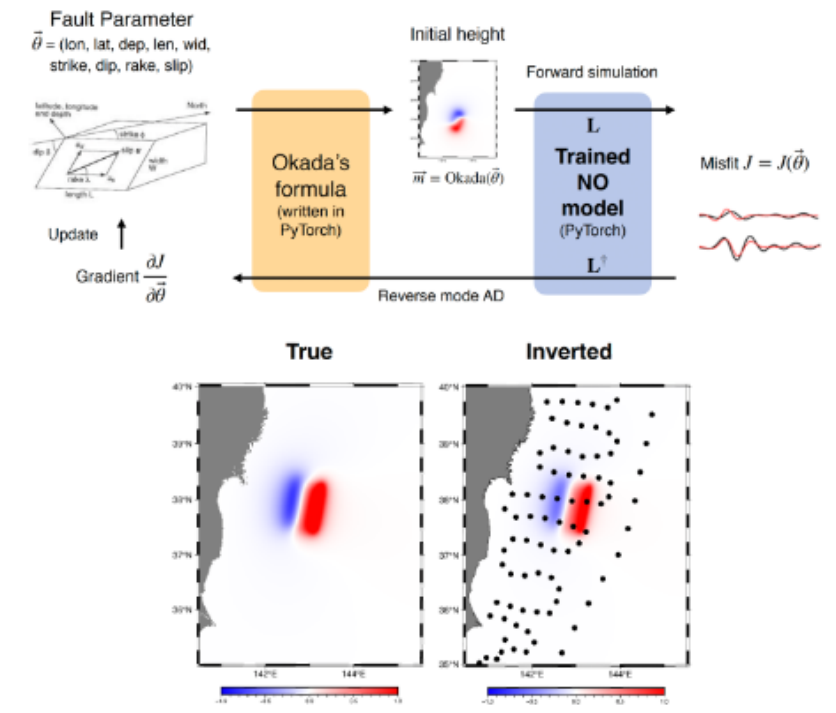
e-mail：

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

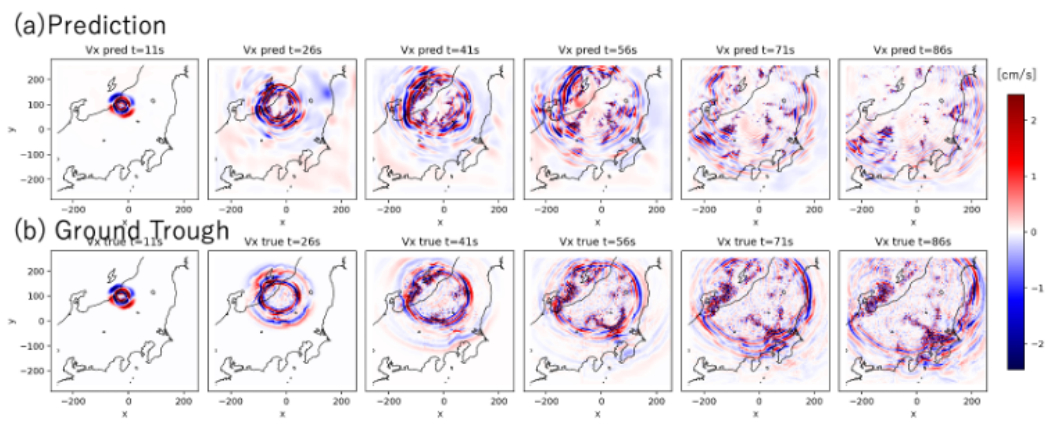
氏名：古村孝志

所属：東京大学地震研究所



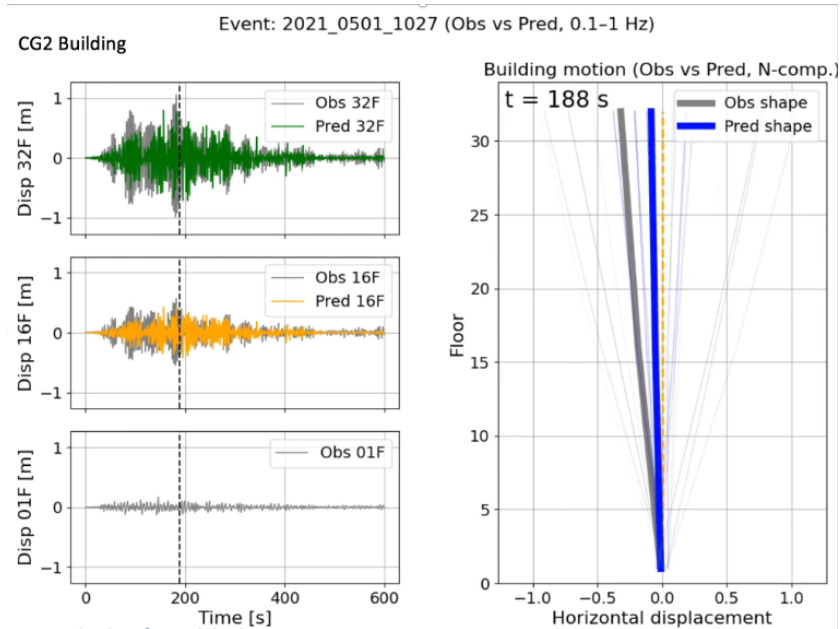
U-NOモデルによる津波波源予測

津波の順解析による予測と逆解析による震源インバージョンのフレームワーク。S-net観測データを想定した津波インバージョン結果と正解との比較。



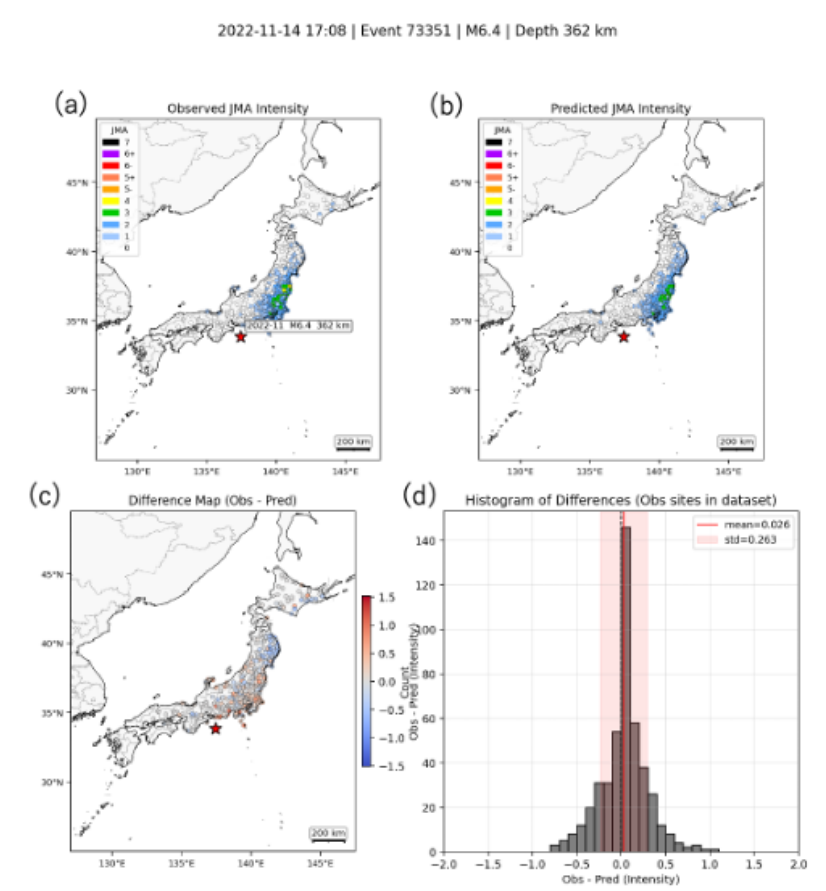
U-NOモデルによる地震波の伝播予測

(a) 予測結果（地震発生から10, 10.5秒を入力とする、11s, 26s, ..., 86s後）と、(b) 正解との比較。



TCNモデルによる建物の揺れ予測結果

32階（緑色）、16階（オレンジ色）の揺れの予測結果と実際の揺れ（グレー）。右は地震発生から188秒後の建物の揺れ（青）と実際の揺れ（グレー）の比較。



機械学習による震度予測

(a) 2022年1月1日の遠州灘の深発地震（M6.4, 362 km）の震度分布、(b) 震度予測結果、(c) 予測の残差（観測－予測）、(d) 残差の頻度分布。

