

深層学習による単独観測点からの波動伝播方向推定の試み

小寺 祐貴 (気象庁気象研究所)

1. はじめに

巨大地震や連発地震発生時においても安定して地震動即時予測を行うため、近年では震源推定をせずに揺れから揺れを直接推定する手法が提案されている (例えば, Hoshiba and Aoki, 2015; Kodera et al., 2018). これらの手法では、各観測点におけるリアルタイム震度 (功刀・他, 2013) の観測値を入力として波動伝播の計算を行っているが、波の振幅だけでなく、伝播方向などの他の物理量の観測値も合わせて用いることができれば、より予測の迅速性や精度の向上につながると期待される。本研究では、波動伝播モデルに取り込める観測情報を増やすことを目的として、観測点の地震波形から波動伝播方向を深層学習によって推定する方法を開発する。波の到来方向は P 波初動の震動軌跡を見ることでも推定することは可能ではあるが、この方法は P 波初動を正確に検出できることを前提にしており、P 波初動が不明瞭となる連発地震などではうまく推定ができない恐れがある。本研究では、初動部分だけではなく波形全体の形状から情報抽出を試みることで、よりロバストな伝播方向の推定を目指す。

2. データと手法

対象観測点を KiK-net ひたちなか (IBRH18) の地上点として手法の検証を行った (図 1)。2010 年 1 月から 2022 年 7 月までに観測された波形のうち、リアルタイム震度 0.5 以上かつ理論 P 波時刻の 2 秒前以前から収録されている波形を抽出した (約 1500 波形)。入力は 2 秒間の 3 成分加速度波形とし、理論 P 波時刻の 2 秒前から 10 秒後までを 0.2 秒ごとにスライドさせて学習用のデータセットを生成した。教師データとなる波動伝播方向は、観測点から見た震央方位に等しいとした。深層学習モデルは GRU (Gated Recurrent Unit) と全結合層からなるネットワークを採用し、データセットを train : validation : test = 6 : 2 : 2 に分けて学習と評価を行った。

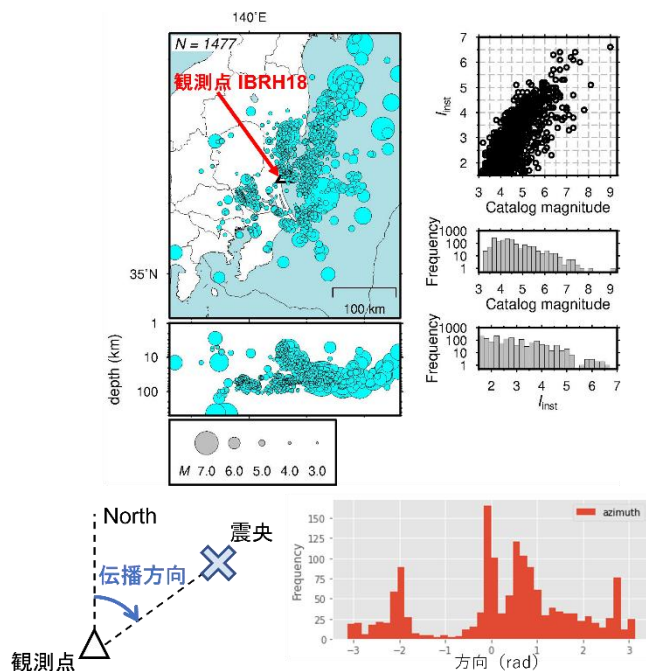


図 1 : 対象観測点 (IBRH18) と深層学習モデルの訓練・評価に使用した地震データの分布、および本研究における波動伝播方向の定義。

3. 結果

学習済みモデルをテストデータに適用したところ、以下の傾向が見られた：(1) 理論 P 波到達後 2 秒までの波形を入力した時点では、約 4 割の事例が $\pm 30^\circ$ 以内の精度で、約 6 割が $\pm 45^\circ$ の精度で伝播方向を求められた。(2) さらに後続の波を入力していくと、伝播方向の推定精度が徐々に悪化していくが、理論 P 波到達後 10 秒時点では、 $\pm 30^\circ$ 以内の精度で求まる事例が約 1 割、 $\pm 45^\circ$ の精度の事例が約 3 割あった。これらの結果は、後続波には到来方向が様々な多重反射や多重散乱の波が多く含まれているため伝播方向の推定は難しいものの、波形全体の形状を学習させることで、P 波初動を陽に検測することなく伝播方向をある程度推定することが可能であることを示している。

また、連続して地震が発生した際の挙動を見るため、2つのイベント波形を重ね合わせて疑似的に連続地震の事例を作り出し、学習済みモデルによる伝播方向推定を試みた(図 2)。M6.3、震央距離約 185 km の波形(事例 1 と呼ぶ; 図 2 a)と M3.3、震央距離約 78 km の波形(事例 2 と呼ぶ; 図 2 b)を重ね合わせたところ、事例 1 が先行して発生するシナリオ(図 2 c, d)では事例 1 の伝播方向のみを推定することができ、事例 2 が先行するシナリオ(図 2 e, f)では事例 2 の伝播方向を推定できた後に事例 1 の伝播方向も推定することができた。事例 2 が先行するシナリオにおいては、事例 2 よりも事例 1 の方が波形の振幅が大きいため、後続のイベント波形も十分なシグナルを持つことになり、その結果両方のイベントの伝播方向推定が可能になったと考えられる。従って、本研究の手法は、後続イベントの振幅が十分大きいケースであれば、連続地震時にも適用可能であることが分かった。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所の KiK-net の観測波形記録を使用しました。本研究は JSPS 科研費 JP21K03689 の助成を受けたものです。

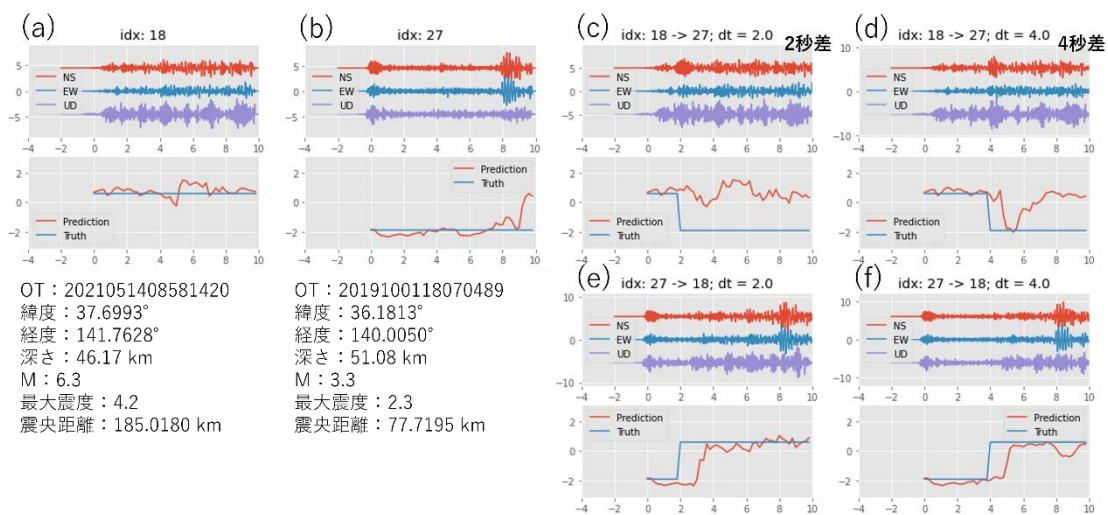


図 2 : M6.3、震央距離約 185 km の事例 1 (a)と M3.3、震央距離約 78 km の事例 2 (b)を重ね合わせた場合の伝播方向推定結果。(c)事例 1 の 2 秒後に事例 2 が発生した場合。(d)事例 1 の 4 秒後に事例 2 が発生した場合。(e)事例 2 の 2 秒後に事例 1 が発生した場合。(f)事例 2 の 4 秒後に事例 1 が発生した場合。