

深層学習モデルによる震源直上に観測網がない場合の震源深さ推定

気象研究所 中村雅基

Donet、S-net、N-net など海底地震観測網が構築され、海域で発生した地震の震源決定精度向上に寄与している。一方、このような海域は限られており、震源直上に観測網がない場合、特に震源深さの推定精度が良くない。これまで、sP depth phase を仮定した震源深さの推定が多く行われてきたところであるが、その仮定の妥当性は必ずしも明らかではない。また、複数の depth phase を合理的に説明できる震源の深さを探索する Depth Scanning Algorithm が Yuan et al. (2020, JGR) で提案されているが、全国の海域で発生する地震に適用するにはチューニングが困難であり、必ずしも実用的ではない。

本研究では、震源直上に観測網がない場合の震源深さ推定の試みとして、Ristea and Radoi (2021, GRSS) に準拠し、Naoi et al. (2024, EPS) で整理されたもののうち、2013 年から 2022 年 9 月までの全国の海域で発生した震央距離 500km 以内の地震の高感度波形データ（標準化済＝振幅情報なし：DONE T、S-net、N-net の波形は含まない）を用いて、観測点毎に 3 成分の 1 分間 100Hz サンプリングの地震波形を与えて震源の深さ・震央距離・マグニチュードを推定する深層学習モデルの構築を行った。モデルは、短時間フーリエ変換後 10 層の複素畳み込みニューラルネットワークで構成されている。震央距離、マグニチュードの教師データは気象庁カタログ値を用い、震源の深さの教師データは、S-net 観測網直下で発生した 2020 年 9 月以降の地震は気象庁カタログ値、それ以外は F-net、JMACMT、AQUA で推定された MT 解の複数の深さが 8km 以内の場合のみを用いた。なお、それぞれの MT 解カタログを用いる際、これらを本震として近傍で 1 日以内に発生した地震を余震とし、同じ深さで発生したと仮定して利用している（本震余震とも断層長を考慮し $3.0 < M < 5.5$ を対象）。これらの条件から、全国 4586 地震 1042 観測点の約 13 万 3ch 観測波形を抽出し、気象庁カタログの P 波読取前 8 秒から 1 分間、読取値がない場合は IASPEI91 理論 P 波到達時 8 秒前から 1 分間を利用した。訓練データは、これらのうち train と validation は 5 がつかない日で割合は 0.8 と 0.2、test は 5 のつく日とした。併せて、期間外について、ペタバイトサーバ（中川・他、2016, 震研彙報）を利用して test データを構築して検証に利用した。

観測点毎の震源の深さ推定（図 1：実用上 S-net 観測網直下で発生する地震を予測対象とすることはないので、そのような地震は対象外）においては、予測値とラベル値との差が 20km 以上となるものが少なくはないものの、地震毎の深さ推定（図 2：S-net 観測網直下で発生した地震は対象外）は観測点毎の深さ推定値を統計処理することとなるが、その標準偏差が 10km 以下となる全体の 8 割超の地震において、予測値とラベル値との差は概ね 10km 以下となった。

また、標準化済＝振幅情報なしの地震波形データを用いて学習を行ったにもかかわらず、地震毎のマグニチュードの予測値とラベル値との差は概ね 0.5 以下となった（図 2）。一般にマグニチュードの推定には、地震波形の最大振幅を用いることが多いが、構築したモデルでは継続時間やコーナー周波数などの情報をもとに推定を行っているものと考えられる。

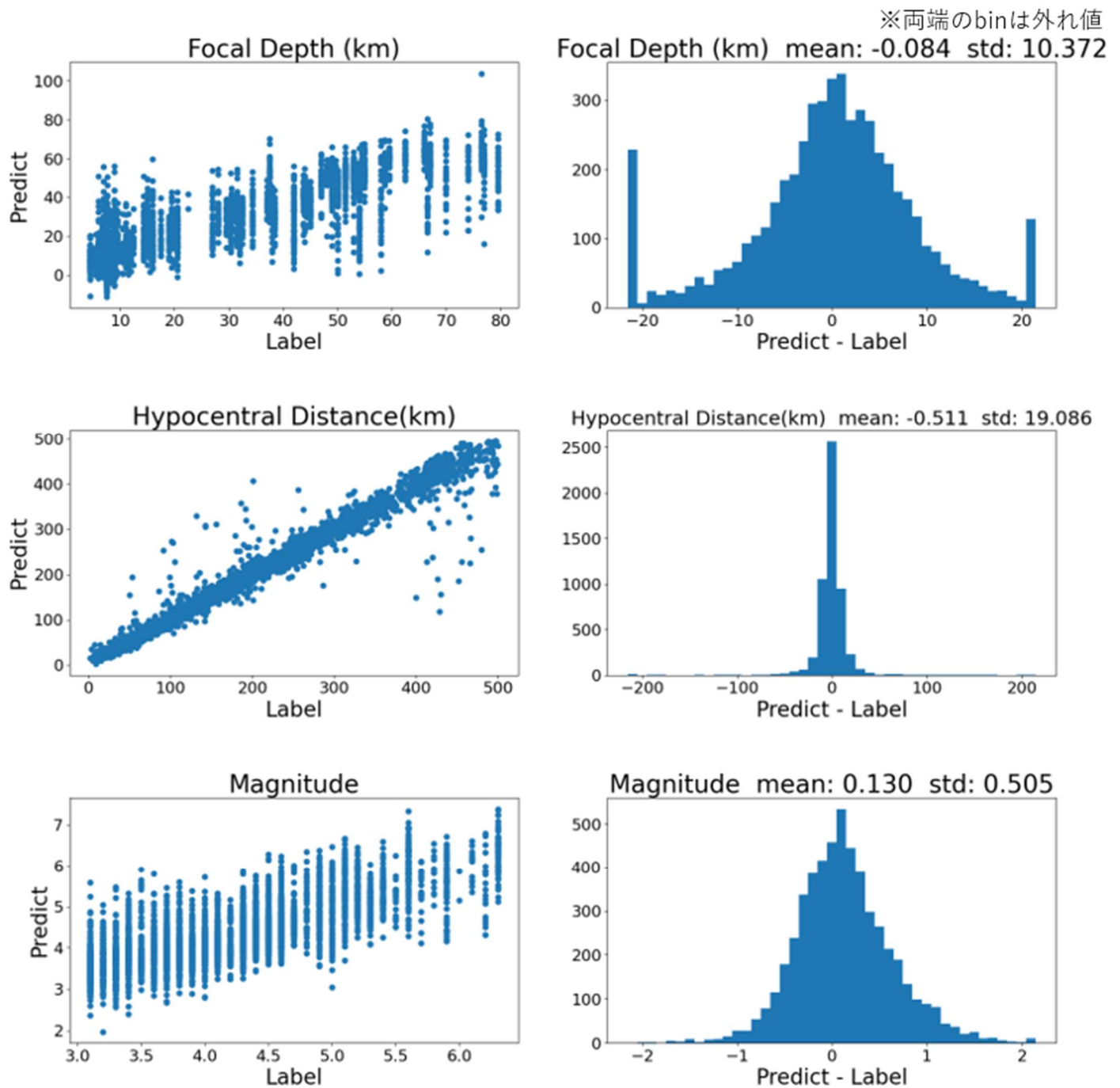


図1 Naoi et al. (2024)で整理されたデータで構築したテストデータの観測点毎の予測値。左はラベル値と予測値の散布図。右は予測値ーラベル値の頻度分布。

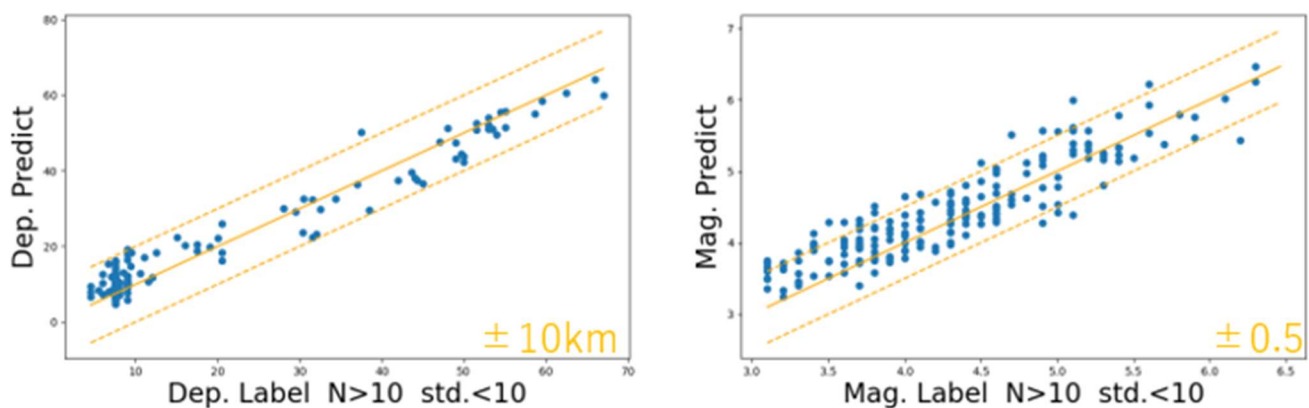


図2 Naoi et al. (2024)で整理されたデータで構築したテストデータによる地震毎の予測値。ラベル値と予測値の散布図。地震毎の予測値は観測点毎の予測値の平均値。