

## [Invited]Deep-Learning Seismology: Current Status and Expectations for Future Developments

\*Kazuro HIRAHARA<sup>1,2</sup>

1. Riken Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University

ビッグデータの蓄積と驚異的發展を遂げているAI等の情報科学の活用により、ChatGPTに象徴されるように多くの分野で新たな展開が生み出されている。「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）」（文科省）に見られるように、日本の地震学においても、情報科学が活用されている。本講演では、AI等の情報科学のうち機械学習(ML)、特に深層学習(DL)の地震学における活用に焦点をあて、私の関わる研究も含めて現状の紹介と今後の展開への期待を述べる。なお、タイトルのDeep-Learning Seismologyは Mousavi & Beroza (2022 : MB2022と略)から借用したものである。

Bergen+(2019)は、固体地球科学におけるデータ駆動型ML活用を3モード（自動化・モデリング・発見）に分類している。現状最大の成果は自動化にあり、MB2022では、データ処理自動化として、地震イベント検出・P波S波検測・位相関連付け・震源決定・極性決定・発震機構決定等において多くのDLモデルが提出され、また地震動予測や緊急地震速報でも大きな成果を上げていると報告している。STAR-Eプロジェクトでも、同様なMLモデルが試みられ、反射波の検出や地震計古記録からの低周波微動検出 (Kaneko+, 2022) 等、特色ある成果が出ている。

一方、モデリングでは、地震学における順・逆問題の解法にDLが用いられ始めており、私に関わる課題として以下のものがある。

- 1) GNSSデータへの深層学習の適用による 短期的SSEの断層すべり直接推定 (中川他, 2023, JpGU) : プレート境界上に断層すべりを想定し、Okada(1992)による地表変位データを合成し（データ拡張）、短期的SSE断層すべりの時空間分布を推定する深層学習手法を開発している（逆解析DL）。これに対し、解をニューラルネットワーク(NN)で表し、偏微分方程式等の物理方程式および初期・境界条件を損失関数に組み込み、最適化により解を求める物理深層学習PINNs (Physics-Informed Neural Networks) が、Raissi+ (2019) により提唱され、多くの研究が行われている。なお、これは順問題であるが、逆問題として、観測データを損失関数に加えることにより、比較的容易に物理方程式に含まれるパラメータ推定に拡張できるのがPINNsの利点と言える。これに関連して以下の2つの研究を行っている。
- 2) PINNsによるバネブロックモデルにおけるSSEすべりモニタリング (Fukushima+, 2023, JGR査読中 <https://doi.org/10.22541/essoar.168988460.01601423/v1>) : SSEすべりのモデリングとして1自由度バネブロックモデルを用いて、速度状態依存摩擦則に従うSSEすべりのシミュレーションに加えて、摩擦パラメータ推定・すべり発展予測を行うPINNsモデルを構築している(順・逆問題DL)。
- 3) PINNsによる地殻変動モデリング (Okazaki+, 2022, Nat. Commun.) : 2次元反平面問題において、非平面自由境界を有する不均質弾性媒質中における曲面断層すべりに対するPINNs地殻変動モデリングを行っている。この問題は有限要素法等の数値解法でないと解けない問題であるが、それに代わるメッシュフリーの新解法となる可能性を示している（順問題DL）。なお、2) では逆問題を扱っているが、より一般的にはB-PINNs (Bayesian PINNs) (Yang+, 2019) を考える必要があり、事後確率の計算が議論となっている。これに対し、Agata+(2023)は、走時トモグラフィー問題において、関数空間における粒子ベース変分推論に基づくPINNsを用い、P波到達時刻を用いた速度構造とその不確かさを推定する手法を提案している。

(B-)PINNsの今後の展開への期待として、例えば、不均質非線形粘弾性媒質中での速度状態依存摩擦則に従う地震発生サイクル計算・データ同化が挙げられる。通常、地震サイクル計算における媒質応答はすべり応答関数を用いて行うが、（準）解析解は半無限均質弾性体や成層線形粘弾性媒質のものに限られる。

Barbot (2020) は、積分法により非線形粘弾性媒質中での地震サイクル計算を行っているが、弾性定数は均質に限られている。従って有限要素法等の数値解法に頼らざるを得ないが、計算負荷等の問題であまり行われていない。(B-) PINNsによる解法は、原理的には課題(2)と(3)を組み合わせれば良いと考えられるが、現状では計算負荷等解決すべき技術的問題があり、今後多くの研究が必要とされる。