

11 - 5 深層学習に基づく地震計古記録からの低周波微動の検出 Detection of Low-Frequency Tremors in Historical Seismograms Using Deep Learning

長尾 大道 (東京大学地震研究所)

Hiromichi NAGAO (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

スロー地震の一種である低周波微動は、プレート境界型大地震との関連が期待されており、地震波形データからの微動イベントの検出とカタログ化が精力的に進められている。しかしながら、スロー地震が稠密な地震観測網であるHi-netデータが持つ豊かな空間相関情報を利用して発見されたことから、微動カタログは直近の約20年分しか作成されていない。スロー地震・低周波微動との関連が期待されているプレート境界型大地震の発生周期が100～200年程度であることを考えると、地震観測網設置以前にまで時間軸を引き延ばし、昔の微動カタログを構築することが地震学において重要であることは明白である。

そこで本研究では、約50年前に稼働していた東京大学地震研究所 和歌山観測所熊野観測点の紙記録(以下、古記録)を画像化したもの¹⁾から微動を検出する畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を開発した(第1図)。古記録は概ね1日分の地震波形が1枚の紙にペンで直接記録されており、約150秒の波形が下から上に約500本ほど描画されている。CNNとしては残差学習モデル(ResNet)を採用し、まずは実際の紙記録を模した人工波形画像を生成し、それに基づく学習と検証によりResNetの事前学習を行なった。本研究では、画像をCNNに入力する際に縦方向(時系列を分断する方向)に5分割を行なっている。この前処理により、通常地震波形は1枚もしくは2枚の小画像に収まってしまうものの、数時間継続する微動は5枚の小画像すべてに波形が含まれることを利用して、一部の小画像に対する微動の有無判定に誤りが生じた場合でも、5枚に対する判定結果の多数決によって誤判定を防ぐことが可能となる。事前学習の結果、人工波形画像に基づく検証において正答率100%を達成すると同時に、微動波形と通常地震波形が重なった場合においても正しく微動波形を検出するという、興味深い結果が得られた²⁾。

次に、現代のHi-netデータをやはり古記録を模して大量に画像化し、それを事前学習したCNNに大量に学習(ファインチューニング)させた³⁾。画像生成にあたっては、微動カタログ⁴⁾を参照し、熊野観測点近傍のHi-net観測点データから微動を含む画像と含まない画像をそれぞれ生成した。上述の画像分割処理後の小画像は5万枚以上に及ぶため、CNNの学習にあたってはGPU計算機の利用が必須となる。Hi-netデータに基づく検証においては、ファインチューニング済みのCNNは正答率98.64%を達成した。

このようにして構築したCNNを熊野観測点の1966～1977年の古記録に適用したところ、多数の古記録からの微動検出には成功したものの(第2図)、微動検出がうまくいかなかった例も少なからず存在した。微動検出の成否を「自然知能」によって分析したところ、紙に波形を描画した際のペンの太さに依存することが判明した³⁾。今後は、強力なGPU計算機を用いて、一層大量の画像データに基づく大規模学習を実施することにより、信頼性の高い微動検出が可能な深層学習器を開発していく予定である。

(長尾 大道)

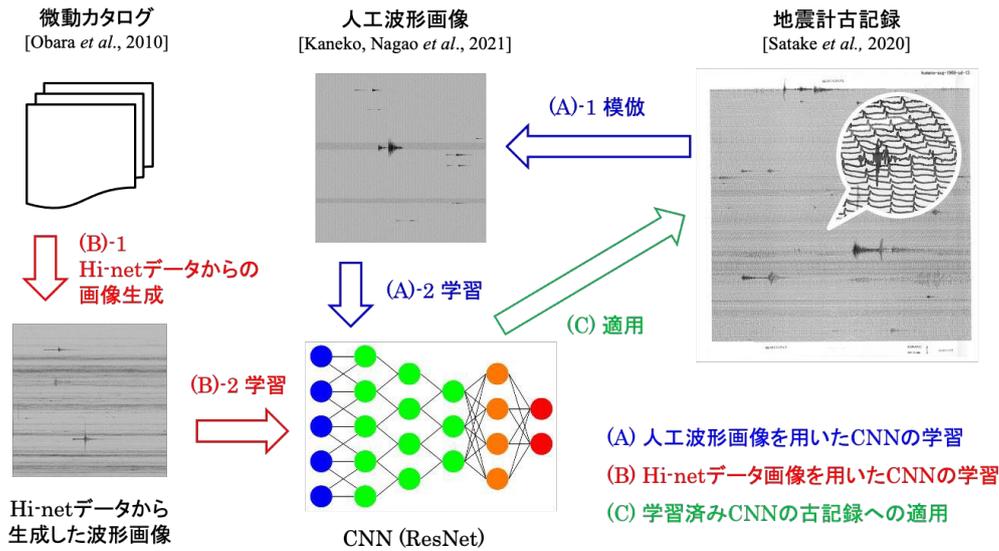
NAGAO Hiromichi

謝辞

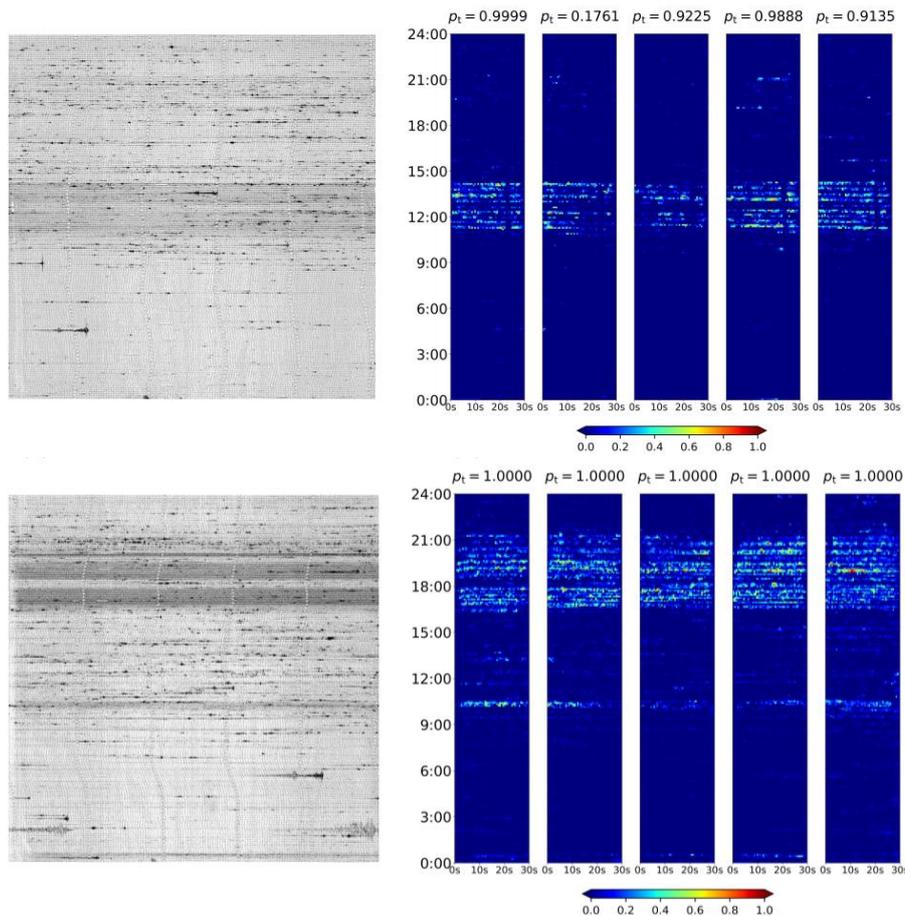
本研究は、文部科学省「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト」(STAR-E プロジェクト) (課題番号 JPJ010217) のご支援を受けて実施したものです。また、一部については科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST (課題番号 JPMJCR1761, JPMJCR1763), 科研費挑戦的研究(萌芽) (課題番号 20K21785), 東大地震研共同利用 (課題番号 2022-A-03, 2021-B-01, 2022-B-06) のご支援を受けております。この場を借りて、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Satake, K., H. Tsuruoka, S. Murotani, and K. Tsumura (2020), *Seismol. Res. Lett.*, **91**(3), 1384-1393. Analog seismogram archives at the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo
- 2) Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, K. Obara, and H. Tsuruoka (2021), *Lecture Notes in Computer Science*, **12705**, 31-43. Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images
- 3) Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, K. Obara, and H. Tsuruoka (2023), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **128**(2), e2022JB024842. Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network
- 4) Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, and T. Matsuzawa (2010), *Geophys. Res. Lett.*, **37**(13), L13306. Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan



第 1 図 地震計古記録から低周波微動を検出するための残差学習に基づく畳み込みニューラルネットワークの構築
 Fig. 1 Development of a convolutional neural network based on residual learning to detect low-frequency tremors in historical seismograms.



第 2 図 開発した畳み込みニューラルネットワークによって古記録から検出された低周波微動の例
 Fig. 2 Examples of low-frequency tremor detections in historical seismograms using the developed convolutional neural network.