

地震ビッグデータ解析の最前線

長尾 大道

東京大学地震研究所／東京大学大学院情報理工学系研究科

1. 序

わが国は世界でも類を見ない地震の多発帯であり、大陸プレートとその下に沈み込む海洋プレートの境界において 2011 年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）に代表されるプレート境界型大地震が周期的に発生することや、その沈み込みの「しわ寄せ」が内陸にも及び、2024 年能登半島地震のような内陸型地震が発生することは、現在では日本国民の多くが知るところである。しかしながら、その描像が分かったのは、せいぜい地震計が発明された百数十年前以降のことである。その後、長きにわたってその描像に大きな進展はなかったものの、1995 年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）を契機に日本全国に空間的に稠密な 2,000 点以上の地震計で構成される地震観測網が整備されたことにより、地震発生メカニズムの理解が格段に進んだ。その最大の成果と言えるのが、2002 年の「スロー地震」の発見である[1]。西南日本における高感度地震観測網 Hi-net の複数の観測点において、一見するとノイズのような小振幅かつ低周波の波形が同時に観測され、地球内部に起源を持つ新しい振動現象であることが判明した。現在では、スロー地震はプレート境界型地震の発生域よりもやや深部あるいはやや浅部で発生することが明らかにされているほか、継続時間等の特徴によって低周波地震や低周波微動などの 5 つのカテゴリーに分類されている。

近年は地震観測の手段が多様化しており、民間会社が所有する地震計やスマートフォンに内蔵されている振動計の利用や、特に最近では光ファイバーを利用した分散型音響センシング (DAS) システムによる極めて空間分解能が高い振動計測が注目を浴びている。このような多種多様なセンサーによる大容量の固体地球計測データが持つ豊かな情報を余すことなく活かす解析手法の創出が喫緊の課題となっている。このような地震超ビッグデータ時代の到来に先駆けて、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST 研究課題「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析」（研究期間：2017～2023 年度）や、その後継プロジェクトと言える文部科学省「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、研究期間：2021～2025 年度）などの「情報×地震」の大型プロジェクトが実施され、地震研究への人工知能をはじめとする最先端の統計学的・情報科学の積極的な導入が進められている。

2. 地震波・低周波地震検出技術の発展

地震計は設置場所における振動をベクトル量の時系列として直接計測しており、得られた地震波形データから P 波・S 波をはじめとする地震波の検出とその到来時刻を同定する「検出」と呼ばれる作業が、すべての地震研究の第一歩となる。現在、気象庁が日本周辺で発生する年間約 30 万件すべての地震の検出およびそれに基づく震源決定を業務として行っ

ており、その結果は気象庁ホームページから公開されている。従来の検出手法は、局所定常自己回帰モデル、赤池情報量基準、および粒子フィルタ法などの従来の統計学的手法を組み合わせたものとなっているが、近年の地震観測データの大容量化に伴い、解析手法の刷新や目的に合わせて用いる観測点を自動選択する技術の開発が求められている。

地震波検測は、地震研究の中でも人工知能と最も相性の良いテーマの一つであると言える。その先駆けとなったのは、カリフォルニア工科大学が2018年に発表した深層学習モデル Generalized Phase Detection (GPD)法[2]であることは、多くの地震研究者が認めるところであろう。その後、数多くの地震検測のための深層学習モデルが世界で競争的に開発されているが、筆者を研究代表者とする STAR-E プロジェクトの研究課題「人工知能と自然知能の対話・協働による地震研究の新展開」(SYNTHA-Seis)においても、GPD法を拡張することにより誤検出を減らすことに成功した地震波検測モデル(図1)などを開発している[3][4]。また、現代の地震観測網データからの低周波地震・低周波微動のカタログ化が進められているが、100~200年周期とも言われるプレート境界型大地震発生との関連性を調べるためには、過去に遡って長期間のカタログを構築することが望ましいことは明らかである。そこで我々は、50~60年前に稼働していたペン書き方式の地震計によって得られた紙記録から低周波微動を検出するための深層学習モデル(図2)の開発も行った[5][6]。

本発表においては、これらおよびマルチプル・クラスタリング法に基づく低周波地震検出のための観測点選択法[7]や4次元変分法データ同化に基づくスロー地震断層の摩擦パラメータの不確実性評価法[8][9]など、現在、SYNTHA-Seisで実施されている研究を中心に紹介する。

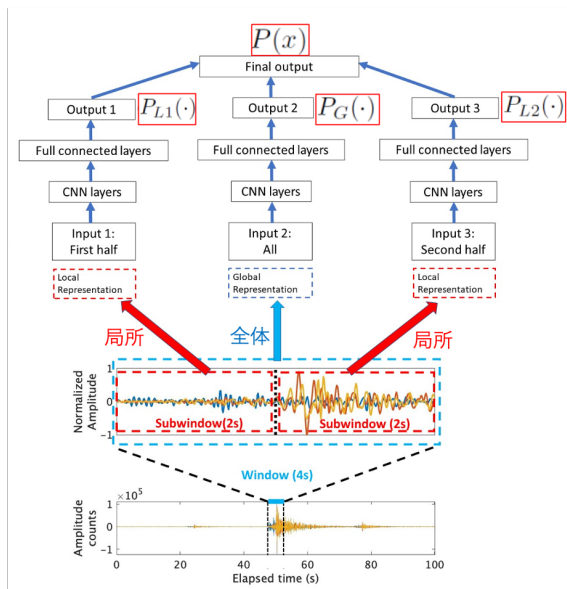


図1: GPD法を拡張した地震波検測のための深層学習モデル[3]

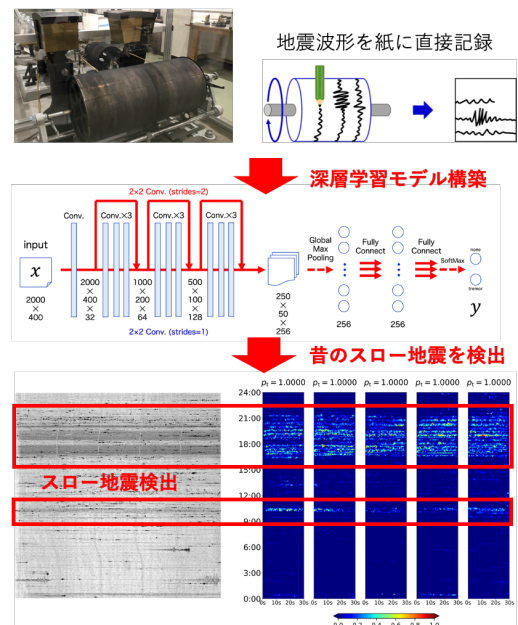


図2: 深層学習を用いた約50年前の地震計紙記録からの低周波微動検出[5][6]

謝辞

本発表内容は、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) No. JPJ010217、科研費基盤研究(A) No. 23H00466、国際共同研究加速基金(海外連携研究) No. 23KK018、挑戦的研究(萌芽) No. 20K21785、東大地震研特定共同研究(A) ERI JURP 2024-A-04、特定共同研究(B) 2022-B-06、2024-B-01 の支援を受けております。ご支援に対し、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, Vol. 296, Issue 5573, pp. 1679–1681, doi:10.1126/science.1070378, 2002.
- [2] Ross, Z. E., M.-A. Meier, E. Hauksson, and T. H. Heaton, Generalized seismic phase detection with deep learning, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 108(5A), pp. 2894–2901, 2018.
- [3] Tokuda, T. and H. Nagao, Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms, *Geophys. J. Int.*, Vol. 235, Issue 2, pp. 1163–1182, doi:10.1093/gji/ggad270, 2023.
- [4] Katoh, S., Y. Iio, H. Nagao, H. Katao, M. Sawada, and K. Tomosaka, SegPhase: Development of Arrival Time Picking Models for Japan’s Seismic Network Using the Hierarchical Vision Transformer, *Earth Planets Space (in revision)*, doi:10.21203/rs.3.rs-4291782/v1.
- [5] Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara, 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, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 128, Issue 2, doi:10.1029/2022JB024842, 2023.
- [6] Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, K. Obara, and H. Tsuruoka, Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 12705, pp. 31–43, doi:10.1007/978-3-030-75015-2_4, 2021.
- [7] 徳田智磯, 長尾大道, 混合ウィシャートモデルに基づくマルチプル・クラスタリングによる低周波地震検出のための観測点選択, *応用統計学*, 52 巻, 2 号, pp. 99–112, doi:10.5023/jappstat.52.99, 2023.
- [8] Ito, S., M. Kano, and H. Nagao, Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault, *Geophys. J. Int.*, Vol. 232, Issue 1, pp. 671–683, doi:10.1093/gji/ggac354, 2023.
- [9] Ito, S., H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano, and J. Inoue, Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, *Phys. Rev. E*, 94, 043307, doi:10.1103/PhysRevE.94.043307, 2016.