

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「計測技術と高度情報処理の融合による  
インテリジェント計測・解析手法の開発と応用」  
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」

## 研究終了報告書

研究期間 2017年10月～2023年3月

研究代表者：平田 直  
(東京大学地震研究所 特任研究員／  
東京大学 名誉教授)

## §1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

地震学は、観測点で得られた地面の振動ベクトル(地震計測データ)を解析することにより、地下で起きている地震活動、地震の断層運動、地震波が伝播する媒質の情報を得る科学である。わが国では、1995年兵庫県南部地震を契機に二千点以上の高精度地震計からなる地震観測網が整備され、それによって得られた高品質な地震計測データが利用されてきた。しかし、近年では、ライフラインや建物に設置された振動計で得られた中品質データや、スマートフォンに内蔵された加速度計で得られた低品質データなど、多種多様な地震計測データの利活用が検討されてきており、近い将来、数千万点ないし数億点の地震観測点からなる「地震超ビッグデータ」時代が到来することが予想されている。しかし、そのようなヘテロな地震超ビッグデータから情報を抽出するためには、従来の手動によるデータ処理では限界があることは明白であり、最新の情報学・統計学に基づいた革新的な地震計測データ解析手法の開発が必要不可欠である。これは、地震学と情報学・統計学の専門家の強力な協働によって初めて実現可能である。そこで本研究課題では、東大地震研グループ、東大情報理工グループ、および3年目から加わった東北大グループの連携により、(A) 次世代地震計測ビッグデータ利活用、(B) 最先端ベイズ統計学に基づく地震波動解析アルゴリズムの構築を実施した後、これらの成果を融合した (C) インテリジェント地震波動解析システムの構築に取り組んだ。

(A) においては、東大地震研グループが中心となり、首都圏地震観測網(MeSO-net)で得られた計測データを基に、地震計測データ解析手法の検証のための「首都圏観測地震波形データセット」の構築、ならびに公開を実現した。また、東北大グループが中心となり、実験流体力学分野で開発されたスパースセンシング技術を基に、対象に合わせて解析する地震観測点を自動選択するアルゴリズムを創出し、東大地震研グループとの協働により、地震波動場再構成を例にその有効性を示した。(B) においては、東大情報理工グループと東大地震研グループの協働により、地震計測データから地球内部起源の振動現象である地震や深部低周波微動を検出するための基盤解析技術の開発、ならびにそれにより得られた情報を用いて地震・微動の発生メカニズムや固体地球内部の総合的理解を深めるための応用解析技術を開発した。基盤解析技術としては、複数観測点の空間配置を反映するグラフ構造を導入することにより、地震観測点間の空間相関情報を最大限に活かした高次元地震計測データからの地震波自動検出(検測)のためのニューラルネットワーク、新規統計量に基づく微動検出手法、スパース正則化に基づくスロースリップイベント検出手法を開発した。また、主な応用解析技術として、ベイズ逆解析に基づく震源と速度構造の同時決定手法、スパースモデリングに基づく地震波速度トモグラフィ手法、応力降下量推定のための統計分布の提案、4次元変分法データ同化に基づく断層摩擦特性の不確実性評価手法、地震計古記録からの微動検出手法、ガウス過程回帰に基づく余震活動時間推移の予測手法など、地震・微動発生メカニズムや地球内部構造の解明に繋がる技術を開発した。(C) においては、現在、「インテリジェント地震波動解析システム」の実現に向けて、(B) で開発した技術要素の既存の地震データ処理システムへの実装を進めており、その第一歩として、本研究課題の主要技術である地震・微動自動検出手法の実装を完了した。これにより、これまでよりも地震イベントが精度良く検出されること、およびこれまでと比較にならない数の微動イベントが検出されることが見込まれ、本成果はスロー地震活動や火山活動についての理解の深化に資することが期待される。

本研究課題は、近年、世界的に急進展している地震学と情報科学の融合研究のパイオニア的存在であったと言え、本研究課題が始動した2017年以降、深層学習に基づく地震学の研究に関する論文数が急増している(2016年:約5本、2017年:約20本、2018年:約50本、2019年:約250本 (Mousavi and Beroza, 2022))。また、本研究課題の最大の成果の一つとして、若手研究者の発掘と育成が挙げられる。地震学と情報学・統計学の両分野から多数の優秀な若手研究者を発掘し、将来の「情報×地震」分野を担う研究者として育成し、本研究課題に参画した若手研究者のほとんどが、大学や国研のテニユアの研究職に栄転した。加えて、本研究課題は、統計関連学会連合大会、日本地震学会、日本地球惑星科学連合大会において関連セッションを継続して企画・実施したほか、一般公開等のアウトリーチ活動も積極的に行い、研究成果を幅広く周知するとともに、他分野の研究者と交流機会を持つことにも努めた。その結果、本研究課題の活動が注目されたことにより、2021年度より文部科学省「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)がスタートし、本研究課題に参画した研究者に加え、さらに多くの研究者が STAR-E プロジェクトに参画している。本研究課題によって種が蒔かれた「情報×地震」分野は、今、大きな花を開こうとしており、今後益々の発展が期待される。

## (2) 顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

1. Yano, K., T. Shiina, S. Kurata, A. Kato, F. Komaki, S. Sakai, and N. Hirata, Graph-Partitioning Based Convolutional Neural Network for Earthquake Detection Using a Seismic Array, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, Vol. 126, Issue. 5, 2021, doi:10.1029/2020JB020269

#### 概要:

多数の地震観測点で構成される地震計アレイでの地震検知のための畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を開発した。本手法は以下の特徴をもつ:(a)アレイを利用することで単観測点に対するCNNと比較し誤検知を抑えることができ、(b)観測点配置をCNN内に取り入れることでアレイに対する単純なCNNの適用と比較し地震見逃しが削減できる。時空間の発展をもつ現象に対する深層学習は現在様々な角度から国内外で検討されており、本研究はその先駆けとなっている。

2. Morikawa, K., H. Nagao, S. Ito, Y. Terada, S. Sakai, and N. Hirata, Forecasting Temporal Variation of Aftershocks Immediately After a Main Shock Using Gaussian Process Regression, *Geophysical Journal International*, Vol. 226, Issue 2, pp. 1018-1035, 2021, doi:10.1093/gji/ggab124

#### 概要:

本震直後は余震が頻発し、先に起こった地震の波形に後続の地震の波形が埋もれ、地震波形データのSN比が著しく悪化するため、余震の検出が極めて困難となる。検出された余震データのみを用いた余震時系列分布の推定は、データの欠測の影響により大きな推定バイアスを生じる。本研究ではガウス過程回帰という機械学習の手法を用いて、余震の検出確率を明示的にモデリングすることなく解析に組み込み、柔軟かつ頑健な余震時系列分布推定のバイアス補正法を提案した。

3. 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, 2023, doi:10.1029/2022JB024842

#### 概要:

約20年前に整備された地震観測網により、深部低周波微動が発見された。微動は巨大地震との関連が強く推認されており、昔の微動を調べることは地震学において重要な課題である。本研究では、50年以上前の地震計による大量の紙記録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。人工画像および現代の地震観測網データの画像をCNNに学習させ、地震計古記録に適用したところ、これまで未知であった数多くの昔の微動を検出することに成功した。

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. Shiina, T., T. Maeda, M. Kano, A. Kato, and N. Hirata, An Optimum 2D Seismic-Wavefield Reconstruction in Densely and Nonuniformly Distributed Stations: The Metropolitan Seismic Observation Network in Japan, *Seismological Research Letters*, Vol. 92, No. 3, 2021, doi:10.1785/0220200196

#### 概要:

地震災害への建造物のレジリエンスを高める耐震建物評価のためには、個々の建造物への入力地震動をピンポイントで予測することが重要となる。そこで本論文では、空間的には離散的な情報として得られる地震動の計測記録から、連続場として地震動の空間分布を再構成する手法を提案した。特に、不均質な観測点配置へ最適化することで高精度な地震波動場再構成を実現した。提案手法により、首都圏周辺では、長周期地震動の大きさや揺れの特徴の即時把握が可能となる。

2. 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, 2023, doi:10.1093/gji/ggac354

#### 概要:

断層面上の摩擦特性空間不均一性の高速・高解像評価を目的として、近年提案された symplectic second-order adjoint 法に基づく不確実性評価法を、豊後水道スロースリップ発生域を模擬した断層運動モデルへ適用した。本研究より、得られる摩擦特性不確実性の空間分解能を既存研究と比べて飛躍的に向上することで、スロースリップの動力学と摩擦特性空間分布の構造との関係をより詳細に定量化した。

3. Nagata, T., Nakai, K., Yamada, K., Saito, Y., Nonomura, T., Kano, M., Ito, S., Nagao, H., "Seismic wavefield reconstruction based on compressed sensing using data-driven reduced-order model," *Geophysical Journal International*, Vol. 322, No. 1, pp. 33-50, 2023, doi:10.1093/gji/ggac443

概要:

高精度なリアルタイム地震波動場推定には、地震観測網から適切に選び出した少数の観測点の情報および事前情報を最大限に活かす必要がある。本研究では、データ駆動型低次元モデルを用いた地震波動場のスパース再構成手法を提案した。また、線形逆問題のためのセンサー最適化アルゴリズムを応用して提案手法での再構成に適した観測点を選択した。観測点が疎な条件でも一定の精度で地震波動場の再構成が可能である。

<代表的な論文>

1. Kurihara, R., A. Kato, S. Kurata, and H. Nagao, Detection of Low-frequency Earthquakes by the Matched Filter Technique using the Product of Mutual Information and Correlation Coefficient, *Earth Planets Space*, Vol. 73, No. 225, 2021, doi:10.1186/s40623-021-01534-w

概要:

火山性地震の正確な検出は噴火の予測に直結する防災的に重要であるが、研究者・技術者が目視によって規模の小さい火山性地震を高い精度で検出することには限界がある。これまで、代表的な波形(テンプレート波形)との相関に基づく手法(マッチドフィルタ法)で微小地震の機械的な検出が試みられてきたが、この手法での高精度な検出には通常多くの観測点を必要とするため、適用可能性に限界がある。そこで、本研究では通常使用する単独の相関係数ではなく、相関係数と相互情報量の積を指標とする1観測点のみを使った新たなマッチドフィルタ法を提案し、1観測点のみでも霧島山で発生する深部低周波地震の検出において高精度な結果が得られることを示した。

2. Yamanaka, Y., S. Kurata, K. Yano, F. Komaki, T. Shiina, and A. Kato, Structured Regularization based Velocity Structure Estimation in Local Earthquake Tomography for the Adaptation to Velocity Discontinuities, *Earth, Planets and Space*, Vol. 74, No.43, 2022, doi.org/10.1186/s40623-022-01600-x

概要:

地震波の到着時刻を入力として地震波速度構造を出力する地震波速度トモグラフィ法へスパース正則化を導入し、地震波速度不連続面などに起因する構造変化を検出する手法を開発した。提案手法は滑らかな速度変化への対応力を有しつつ、急峻な構造変化領域のイメージングを限られた観測から高い精度で実現する。これらの速度変化は現実の地球内部において観測される代表的な構造的特徴であり、そのイメージングの両立は、より精緻な地球内部構造モデルの構築に繋がると期待される。

3. Yoshimitsu, N., T. Maeda, and T. Sei, Estimation of Source Parameters Using a Non-Gaussian Probability Density Function in a Bayesian Framework, *Earth, Planets and Space*, Vol.75, No.33, 2023, doi:10.1186/s40623-023-01770-2

概要:

地震の震源特性を表現する震源パラメータの推定法として、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた推定を改良した。比形式のデータへの適性を考慮して尤度推定のための確率密度関数にF分布を提案し、正規分布を用いた解析と比較したところ、F分布がスペクトル比解析に適している結果を得た。サンプリング分布からはパラメータ間のトレードオフや不確実性に加え、結果を洗練させるために使用できるデータの品質基準も明らかになった。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「東大地震研」グループ

研究代表者: 平田 直 (東京大学地震研究所 特任研究員 / 東京大学 名誉教授)

研究項目

- ・「インテリジェント地震波動解析システム」の構築
- ・「首都圏観測地震波形データセット」の構築
- ・観測点自動選択アルゴリズムの開発 (実観測データへの適用実験)
- ・地震波動場再構成手法の高度化
- ・東北大工学研究科グループと協働し、地震波動場推定の高速化を検討
- ・東大情報理工グループと協力し、通常の地震とは異なる周波数特性を持つ地震の自動検出手法の検討
- ・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

#### ② 「東大情報理工」グループ

主たる共同研究者: 駒木 文保 (東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

研究項目

- ・既存の地震波動解析手法の統計学的妥当性の検証
- ・観測点の空間相関情報を考慮した高次元状態空間モデルの構築
- ・観測点自動選択アルゴリズムの開発
- ・深層学習に基づく地震波自動検出法を開発・改良・拡張
- ・スパースセンサー位置最適化技術にベイズ統計学の手法を加えた高度化
- ・スパースモデリングを駆使した高精度な地震波速度トモグラフィにより、複雑な地下速度構造を推定
- ・ベイズ的時空間点過程モデルを用いた、地震データ分類手法を開発
- ・地震データの従属関係を高精度に分析する、方向統計学を応用した手法を開発

#### ③ 「東北大工学研究科」グループ

主たる共同研究者: 野々村 拓 (東北大学大学院工学研究科 准教授)

研究項目

- ・スパースセンサー位置最適化技術によるリアルタイム地震波動場推定のための複数観測点自動選択アルゴリズムの開発
- ・スパースセンサー位置最適化技術にベイズ統計学の手法を加えたセンサー位置最適化手法の高度化
- ・低次元モデル構築による地震波動場再構成と地震波速度トモグラフィ技術への応用展開

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

2019 年度に、深層学習による地震計測データ解析研究の世界的な第一人者であるアメリカ・カリフォルニア工科大学の Zachary E. Ross 博士を本研究課題によって短期招聘した。滞在中は、本チームメンバーの研究に関する議論はもちろん、国際会議ならびに東大地震研での招待講演や気象庁への訪問などとともに、今後の日米間連携の構築に向けた議論を行った。2022 年度の 12 月に再び東京大学地震研究所の短期招聘研究者制度によって来日し、さらに深い議論や新しい情報交換などを行い、チームの活性化・国際化に積極的に関わっていただいた。

また、スマートフォンを模した小型地震計を製作し、首都圏において連続観測を実施しているドイツ・GFZ Potsdam 研究所の Danijel Schorlemmer 博士を、本研究課題によって 2022 年 12 月～2023 年 3 月の期間、招聘した。小型地震計によって得られた地震計測データは順調に蓄積されており、本研究課題で開発した地震波自動検出手法の適用に向けた議論を行った。また、実際に稼働している国内の小型地震計のファームウェアのバージョンアップを行い、今後の実験・調査のあり方を検討した。