

C会場 | 特別セッション：S22. 地震学における機械学習の可能性

📅 2019年9月18日(水) 14:30 ~ 16:00 | 📍 C会場 総合研究8号館NSホール

[S22]PM-1

座長:小寺 祐貴(気象庁気象研究所)、内出 崇彦(国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門)

14:30 ~ 14:45

[S22-10] Improving the symmetry of ambient seismic field correlation functions with machine learning

*Loic Viens¹, Tomotaka Iwata¹ (1. Kyoto University, DPRI)

14:45 ~ 15:00

[S22-11] 機械学習とアンサンブルカルマンフィルタのハイブリッド手法を用いた南海トラフ巨大地震シミュレータの摩擦パラメータ推定

*山本 友¹、平原 和朗^{1,3}、八谷 大岳^{1,2}、高橋 温志¹、上田 修功¹ (1. 理化学研究所革新知能総合研究センター、2. 和歌山大学、3. 香川大学)

15:00 ~ 15:15

[S22-12] 最近傍探索を用いたマッチドフィルターと深部微動すべりインバージョンの高速化

*水野 尚人¹、井出 哲¹ (1. 東京大学大学院理学系研究科)

15:15 ~ 15:30

[S22-13] 再帰型ニューラルネットワークによる2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動の機械学習

*山佳 典史¹、三井 雄太² (1. 静岡大学大学院総合科学技術研究科、2. 静岡大学理学部地球科学科)

15:30 ~ 15:45

[S22-14] 隆起海岸段丘地形のDEMクラスタリングによる自動検出と分類

*小森 純希¹、安藤 亮輔¹、穴倉 正展² (1. 東京大学、2. 産業技術総合研究所)

15:45 ~ 16:00

[S22-15] 畳み込みニューラルネットワークを用いた地形分類予測モデルの検討

*赤木 翔¹、早川 俊彦¹ (1. 三菱スペース・ソフトウェア株式会社)

Improving the symmetry of ambient seismic field correlation functions with machine learning

*Loic Viens¹, Tomotaka Iwata¹

1. Kyoto University, DPRI

Seismic interferometry is a well-established method to retrieve the seismic wave propagation between a pair of seismic stations. Under the assumption that the ambient seismic wavefield is equipartitioned, the correlation function between the two sensors should yield the inter-station Green's function. However, such a condition is rarely fulfilled on Earth, as the ambient seismic field is generated by uneven distributions of sources, for example from ocean waves at low frequencies (<1 Hz). This uneven source distribution generally leads to non-symmetric correlation functions which can also be corrupted with non-physical wave arrivals. We focus on one year of continuous data recorded by Hi-net stations located in the Kii peninsula, Japan, and compute correlation functions between station pairs using short 15-min time-windows and stack them over 30 minutes. As the source of the ambient seismic field varies through the year, the raw stack of correlation functions over one year is strongly asymmetric for most station pairs. We propose to use machine learning techniques (e.g., Principal Component Analysis (PCA) and autoencoders) to reduce the dimensionality of the correlation function dataset for each station pair. By selecting correlation functions from the latent/low-dimension space of both methods, we show that the symmetry between the acausal and causal parts of the correlation functions can be improved. This additional processing step could help us to retrieve a better approximation of inter-station Green's functions, and therefore be useful for imaging purposes.

機械学習とアンサンブルカルマンフィルタのハイブリッド手法を用いた 南海トラフ巨大地震シミュレータの摩擦パラメータ推定

A hybrid approach of Machine learning and Ensemble Kalman Filter for estimating frictional parameters in Nankai megaquake cycle simulator

*山本 友¹、平原 和朗^{1,3}、八谷 大岳^{1,2}、高橋 温志¹、上田 修功¹

*Yu Yamamoto¹, Kazuro Hirahara^{1,3}, Hirotaka Hachiya^{1,2}, Atsushi Takahashi¹, Naonori Ueda¹

1. 理化学研究所革新知能総合研究センター、2. 和歌山大学、3. 香川大学

1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa

はじめに

南海トラフ沿いに沈み込むフィリピン海プレートは、繰り返し巨大地震を引き起こし、次の巨大地震発生が危惧されている。岩石の摩擦則に基づいて、南海トラフ巨大地震発生サイクルシミュレーション（ECS）研究が行われている。しかし、従来研究では、摩擦パラメータを手動で調整し、南海トラフ巨大地震履歴を再現しようとしているが、200年~90年と大きく変動する地震間隔をうまく再現できていない (Hyodo et al., 2006)。

そこで、複雑な地震間隔を説明する摩擦パラメータを自動的に探索するために、本研究では、機械学習のニューラルネットワーク(NN)と逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)とを組み合わせたハイブリッド手法を提案する。具体的には、シミュレーションによる断層のすべり速度履歴から摩擦パラメータを予測する逆関数を定義し、機械学習を用いて、汎化的な摩擦パラメータ分布を推定する。さらに、得られた摩擦パラメータ分布をEnKFの初期アンサンブルに用いて、真の南海トラフ巨大地震履歴から摩擦パラメータの周辺化分布を求める。

予備的な研究段階ではあるが、ECSデータと真の南海トラフ巨大地震履歴データを用いた単純な離散3セルモデル実験を通して、提案法が多様に変化する真の南海トラフ巨大地震をより正確に再現できる可能性があることを示す。

データ & 解析手法

通常のECSでは、プレート境界面を臨界サイズより細かいセルに分割するが、多大な計算コストが必要である。そこで、本研究では、南海トラフ沿いのプレート境界面の破壊断層セグメント（南海・東南海・東海）に対応する相互作用を有する離散3セルモデルを用いる。具体的には、プレートのすべり発展は速度状態依存則に、また状態変数の時間発展はスローネス則に従うとし (Dieterich, 1979; Ruina, 1983)、準動的 (Rice, 1993) に計算を行った。

各セルの摩擦パラメータに応じて、相互的に地震サイクルが変化する。また、摩擦パラメータのうち、本研究では、A, Lを固定し、Bを所定の区間で動かすことにより、B-Aを変化させている。摩擦パラメータ以外の各種パラメータは固定する。

真の南海トラフ巨大地震履歴データは、1400年に及ぶ地震発生時のみの時系列データである。時間予測

(TP) およびすべり予測 (SP) を仮定して、地震発生時のすべり量を推定し、地震発生履歴データに累積変位データを付加した真値模擬データを作成した。また、すべり継続時間は一定としてすべり速度データに変換してデータとした。南海トラフ巨大地震履歴にはその発生が不確かな地震データも含まれるため、不確かな地震データを含む/含まない場合の組み合わせを考慮した256通りの履歴を用いた。

まず、機会学習を用いた解析について述べる。単独セルにおける地震間隔と摩擦パラメータとの関係に基づき、3セルのBのサンプリング範囲はそれぞれ0.625から0.85、0.6から0.825および0.6から0.825 (MPa) とした。そして、サンプリング範囲を0.025(MPa)間隔で刻み、約80万回のシミュレーションにより、各セルにおけるすべり速度データと摩擦パラメータB-Aとの対データを作成し、すべり速度データに時系列解析の手法である高速フーリエ変換(FFT)を用いて周波数スペクトラムに変換する。そして、各ウィンドウで周波数スペクトラムの最大値を抽出し、NNの特徴量とした。これにより、摩擦パラメータB-Aの変動の影響を受ける、地震の最大間隔を抽出することができる。学習時には、地震の最大間隔の特徴量から、対となる摩擦パラメータを推定する。評価時には、学習したモデルを使用して、真の南海トラフ巨大地震履歴データから、摩擦パラメータを推定する。摩擦パラメータの微小な値を推定するために、分類で荒く摩擦パラメータの範囲を推定し、拡大された残差を回帰する2段階のNNを用いる。

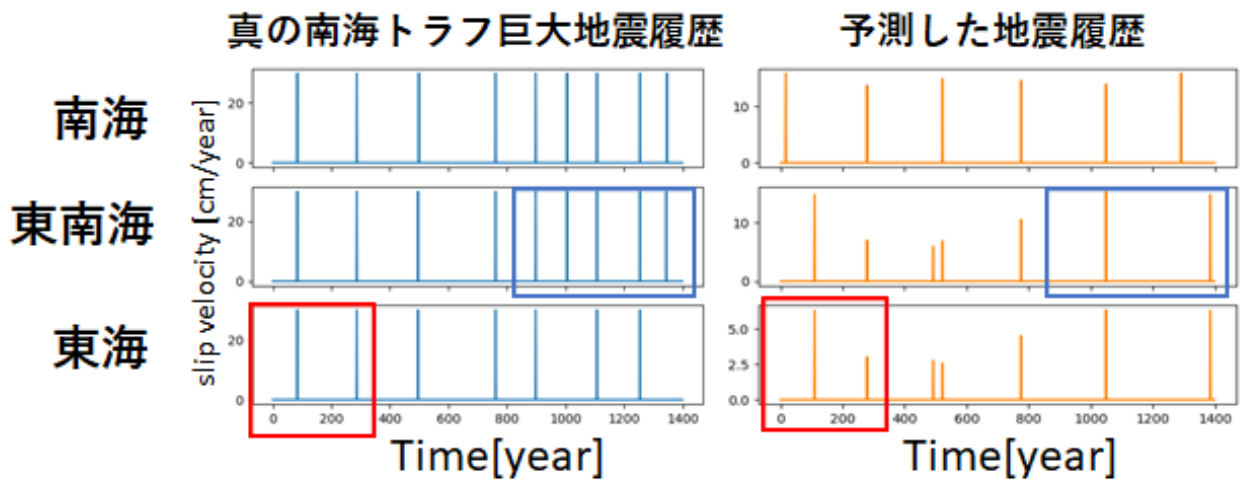
次に、EnKFを用いた解析について述べる。256通りの南海地震履歴データから機械学習により推定された値を256個の初期アンサンブル値とする。同化間隔は、2年間として南海トラフ巨大地震履歴上で地震が発生した年で更新が発生する。EnKFにおける摩擦パラメータの結果は、最後に予測した摩擦パラメータのアンサンブルの平均とする。

最終的に予測したセルそれぞれのB値を当該シミュレーションに入れ、8000年分のすべり速度を求める。そして、8000年分のすべり速度から、真の南海トラフ巨大地震履歴との地震発生時年数と予測した地震履歴の地震発生時年数の誤差の合計が最短になる1400年を取得し、真の南海トラフ巨大地震履歴の地震発生時年数との誤差を比較する。

結果 & 考察

図. 1が示すように、赤枠で囲まれた東海の比較的大きな間隔で起きる巨大地震は、平均地震年数誤差約10年以下の誤差に抑えることができているが、青枠で囲まれた比較的小さな間隔で起きる巨大地震は推定するのが難しい。

これは、NNの特徴量として、地震間隔の最大間隔を用いているため90年の比較的小さな間隔を推定するのが困難になっていることがあげられる。



最近傍探索を用いたマッチドフィルターと深部微動すべりインバージョンの高速化

Acceleration of matched-filter search and slip inversion of deep tectonic tremor using nearest neighbor search

*水野 尚人¹、井出 哲¹

*Naoto Mizuno¹, Satoshi Ide¹

1. 東京大学大学院理学系研究科

1. School of Science, The University of Tokyo

世界各地の沈み込み帯などにおいてスロー地震の一種である低周波地震やその群発的活動と考えられている深部微動が観測されている。低周波地震の検出には、典型的な低周波地震のテンプレート波形を用意し、それと相互相関の高い波形を検出するマッチドフィルターが広く用いられている。この手法ではテンプレート波形と類似性のないシグナルは検出されないため、シグナルの取り逃しを減らすためには用いるテンプレート波形の数を増やす必要がある。しかし、マッチドフィルターはテンプレート波形の数に比例した計算量がかかるため、大量のテンプレート波形を用いると必要な計算コストが非常に大きくなってしまう。また、低周波地震からグリーン関数を作成し深部微動のすべりインバージョンを行う手法 (Ohta and Ide, 2017) では、マッチドフィルターを応用し深部微動のすべり発展を捉えることが可能であるが、大量のテンプレート波形に対するマッチドフィルターを繰り返し行うことと同等の処理が必要となるため、長期間のデータを扱うことは計算コストの点で困難であった。

本研究では近似最近傍探索を用いたマッチドフィルターの高速化を行い、これを応用することですべりインバージョンを高速化した。通常のマッチドフィルターではS波やP波の到達時刻の前後数秒を用いるが、本研究では発生時刻からの数十秒の時間窓を用いた。これによりテンプレート波形と観測波形が最近傍探索におけるデータ点とクエリ点にそれぞれ対応し、マッチドフィルターを最近傍探索として定式化できる。この定式化ではデータの次元が時間窓の長さとお観測成分数の積であるので、1万次元程度の高次元データを扱うこととなる。このようなデータの次元が大きい場合における最近傍探索は古典的には愚直な探索より高速化することが困難であったが、近年の研究によって近似解においては大幅な改善が行われている (e.g. Johnson et al., 2017)。本研究では特異値分解を用いた次元削減・近似最近傍探索による枝刈り・GPUを用いた高速化等の工夫を行い大幅な高速化を達成した。Ohta and Ide (2017) のインバージョン手法はマッチドフィルターの拡張として捉えることができるので、マッチドフィルターと同様の方法で近似最近傍探索に帰着し高速化することが可能である。本研究の手法によって先行研究と比較して1000倍以上の高速化が達成され、長期間のデータに対する解析が可能となった。

再帰型ニューラルネットワークによる2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動の機械学習

Machine learning of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on recurrent neural network

*山佳 典史¹、三井 雄太²

*Norifumi Yamaga¹, Yuta Mitsui²

1. 静岡大学大学院総合科学技術研究科、2. 静岡大学理学部地球科学科

1. Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University

2011年東北地方太平洋沖地震以来、余効変動が続いている。この余効変動の影響により、各種スローイベントの小さなシグナルが隠れている可能性がある。余効変動は、一般に、対数関数や指数関数、またその組み合わせによってフィッティングされている。この余効変動をより正確に表現するために、機械学習手法の1つであるニューラルネットワークを導入し、既存のデータから特徴を学習する。余効変動の時系列データとして、国土地理院のGNSS(Global Navigation Satellite System)観測網に基づく東西成分、南北成分の変位を用いる。観測点数は191点である。191の観測点のうち、153点を学習用の観測点とし、残りの38点をテスト用の観測点とした。テスト用の観測点は、空間的な偏りが生じないように、緯度・経度それぞれを0.5度ずつ区切ったグリッドごとに、1点ずつ選択した。学習時には、観測点ごとに、時系列の前半90%を使用する。学習で用いるデータを用いて、観測点ごとに変位量を0.1~0.9に値を正規化した。時系列データを365日ごとに区切り、連続した365日を入力データとし、その次の日の値を出力データとした。ニューラルネットワークの層は、単純化のために1層に固定し、LSTMを32個設定した。ここでLSTMは、複数のニューロンから構成されるユニットであり、長期時間依存性を学習できる。損失関数には平均絶対誤差を、最適化アルゴリズムにはAdamを用いた。学習したモデルを用いて、2種類の予測実験を行う。実験1では、38点のテスト点で、東北沖地震後365日経過した時点からの余効変動を期間の最後まで予測して、実データと比較する。実験2では、191の全観測点に対し、学習へ使用していない時系列の後半10%について、余効変動の予測および実データとの比較を行う。2種類の実験の両方で、従来の回帰分析を上回る結果を得られた。特に、実験1の結果の時空間分布からは、太平洋側の、特に岩手県沖・福島県沖の領域で、2013年中頃から、予測よりも実データが西向きにずれていくことがわかる。これは、東北沖地震後の余効変動の減衰と、プレート境界の固着状態変化の和を表すと考えられる。

隆起海岸段丘地形のDEMクラスタリングによる自動検出と分類 Automatic detection and classification of the uplifted marine terrace by clustering DEM dataset

*小森 純希¹、安藤 亮輔¹、宍倉 正展²

*Junki Komori¹, Ryosuke Ando¹, Masanobu Shishikura²

1. 東京大学、2. 産業技術総合研究所

1. The University of Tokyo, 2. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

標高数値モデル（DEM）を使用した新たな海岸段丘の解析手法を開発し、房総半島に分布する完新世海岸段丘である沼段丘に適用した。沼段丘は過去7000年間に相模トラフ沿いで発生したプレート間地震（関東地震）による隆起で形成されたと考えられており、災害発生予測の観点からも調査が重要視されている地形である。しかし近年実施された年代測定調査などから、関東地震について従来の固有地震的な解釈に疑問が呈されてきたため、その形成履歴に関して再評価が求められていた。本研究では、従来の測量や航空写真判読に代わり、より定量的な手法としてDEMを用いた段丘区分を提案した。この手法では、旧汀線アングルを指示する崖基部の地形を抽出した点群データに対し、クラスタリングを使用して年代ごとの標高分布を取得する。解析の結果、房総半島南端部の海岸線沿い約30kmの長さにわたり、連続的に4段の旧汀線アングルの標高分布を得ることができた。今回得られた沼段丘のそれぞれの比高は互いによく一致した分布を示しており、同様な地殻変動を経験したことが示唆される。しかし年代測定から推定された発生間隔が互いに大きく異なっていることを考慮すると、プレート間のすべりの繰返しモデルでは段丘形成の説明が困難である。これらの地質データを総合して、プレート内断層の寄与も含めた地殻変動履歴モデルを構築することが今後求められる。

畳み込みニューラルネットワークを用いた地形分類予測モデルの検討

Investigation of Prediction Model for Engineering Geomorphologic Classification using Convolutional Neural Network

*赤木 翔¹、早川 俊彦¹

*Sho Akagi¹, Toshihiko Hayakawa¹

1. 三菱スペース・ソフトウェア株式会社

1. Mitsubishi Space Software Co., Ltd.

地形・地盤分類メッシュマップ（若松・松岡 2013）は、工学的な分類基準に基づく地形・地盤分類（微地形区分）のデータベースであり、地震動の増幅、液状化、土砂災害などのハザード評価において微地形を参照することを想定して定義されており、各種自然災害に対する防災上の重要な基盤情報となっている。地形・地盤分類メッシュマップは、日本全国を覆う約250m単位のメッシュに対して、標準化された地形分類基準に従う人の判読によって地形の区分（24種類）を決定している。地形分類基準における地形等の情報は分布データ確認による人の判定に基づいている。

本研究では、標高データが持つ地形に関する情報を抽出して微地形区分を予測することを目的として、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network）を用いた微地形区分の予測モデルの開発を試みた。人の判読によって構築された微地形区分を機械学習に基づく手法で予測できるようになることで、個人差や時間経過により生じる地形分類の判定のゆらぎの検知と是正、既存の微地形区分の更新や微地形区分が作成されていない地域での新たな地形分類、メッシュスケールの異なる地形分類の構築に役立つと考えられる。また、数値標高データの分布を入力とした予測モデルから得られる特徴量の特性を理解することで、地形にまつわる様々な問題に対して数値標高データを有効に活用するための知見を得ることができると期待される。

畳み込みニューラルネットワークは、入力サンプルである画像データの中で特徴的な形状を抽出し、画像中において特定の形状を持つ文字や物体の識別に効果的な特徴空間に射影する畳み込み層を含むニューラルネットワークの一種である。近年の深層学習の高度化に伴って急速に発展し、画像認識を代表とする多くの分野で応用手法が提案されている。

本研究では、面的な数値標高データを画像データと見做して畳み込みニューラルネットワークに入力し、標高の分布が有する特徴的な形状を学習させて微地形区分の予測に反映することを試みた。微地形区分の識別に有効な形状を学習するため、250mメッシュに割り当てられた微地形区分を教師データとし、予測対象メッシュを含む周辺地域の数値標高データを説明変数に含めた教師あり学習による予測モデルを構築した。

予測モデルは、数値標高データが持つ形状の情報と周辺メッシュの微地形区分の情報をともに取り入れるため、まず数値標高データに対して畳み込み層を適用し、畳み込み層の出力と微地形区分の入力層をマージして予測ラベルを決める出力層に接続する構成とした。予測の汎化性能を考慮し、説明変数とする数値標高データは予測対象メッシュの標高との差分値とした。説明変数とする微地形区分は標高が高い山側のメッシュとし、山側から標高の低い平野のメッシュに向かって逐次的に微地形区分を予測していく手法を採用した。標高が高い地域は地形分類の区分数が少なく比較的容易に地形分類を決定できるため、本手法は地形分類の構築に有効である。

本研究で構築した予測モデルを、北海道十勝平野を覆う約8万の250mメッシュのデータを用いて学習・予測し、本手法の有効性を検証した。予測対象メッシュを中心とした250mメッシュ数値標高データ（9×9メッシュ）と予測対象メッシュより北側にある微地形区分データ（9×4メッシュ）を説明変数とし、予測対象

領域の北端から逐次予測した結果を示す。予測結果が南方向に大きく影響している箇所があるものの、入力した微地形区分が逐次予測により概ね再現されており、対象とした範囲の数値標高と微地形区分の関係が学習されていることが確認できた。

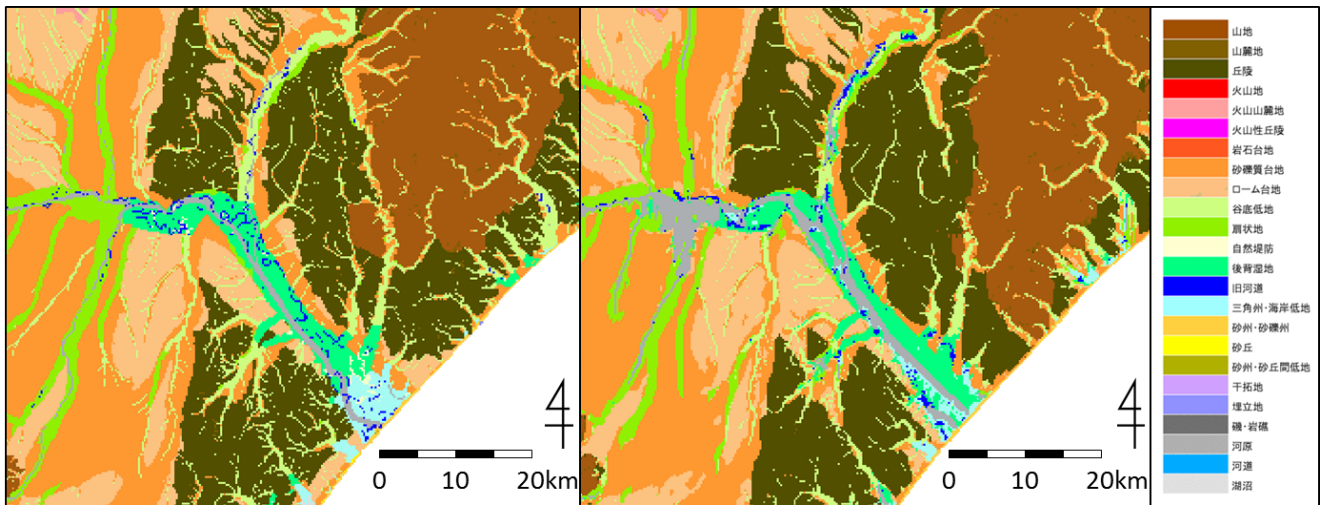


図 検証に使用した十勝平野の微地形区分(左)と北端から逐次予測された微地形区分(右)。