

Tue. Oct 22, 2024

Room C | Special session : S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

9:00 AM - 10:30 AM JST | 12:00 AM - 1:30 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S21] AM-1

chairperson:Kodai Sagae, Shinya Katoh

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S21-01] Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building and Uncertainty Quantification*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S21-02] Discriminating Seismic Motion from Train Vibration Using Recurrent Neural Networks for Railway Earthquake Early Warning Systems*Shunta Noda¹, Naoyasu Iwata¹ (1. Railway Technical Research Institute)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S21-03] Enhancement of Phase Picking Models Using Deep Learning by Addressing the Label Imbalance Problem*Shinya KATOH¹, Hiromichi NAGAO¹, Masaaki IMAIZUMI², Yoshihisa IIO³ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3. ABUYAMA Seismological MUSEUM)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S21-04] Seismic detection based on unsupervised combination of station-wise phase picks by deep learning*Tomoki Tokuda^{1,2}, Hiromichi Nagao^{1,2} (1. ERI, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S21-05] Machine learning-based tectonic tremor location in the Japan Trench*Kodai SAGAE¹, Masayuki KANO², Suguru YABE¹, Takahiko UCHIDE¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S21-06] Detection of slow slip events from continuous seismic waveforms in the western Shikoku based on random forest model*Kazuki OHTAKE¹, Aitaro KATO¹, Yutaro OKADA², Takuya NISHIMURA³ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Room C | Special session : S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

10:45 AM - 12:15 PM JST | 1:45 AM - 3:15 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S21] AM-2

chairperson:Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Keisuke Yano

10:45 AM - 11:15 AM JST | 1:45 AM - 2:15 AM UTC

[S21-07] [Invited]Modeling of physical phenomena based on Bayesian statistics

*Satoru Tokuda¹ (1. Kyushu University)

11:15 AM - 11:45 AM JST | 2:15 AM - 2:45 AM UTC

[S21-08] [Invited]Machine Learning and Scientific Mathematical Models: Data-Driven Solutions of Forward and Inverse Problems

*Naoya Takeishi¹ (1. The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S21-09] Physics-Informed Deep Learning for Forward and Inverse Modeling of Inplane Crustal Deformation

*Tomohisa OKAZAKI¹, Kazuro Hirahara^{1,2}, Takeo Ito³, Masayuki Kano⁴, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S21-10] HypoNet Nankai: Rapid hypocenter determination tool for the Nankai Trough subduction zone using physics-informed neural networks

*Ryoichiro AGATA¹, Satoru Baba¹, Ayako Nakanishi¹, Yasuyuki Nakamura¹ (1. JAMSTEC)

Room C | Special session : S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S21] PM-1

chairperson:Masayuki Kano, Yusaku OHTA(RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S21-11] Bayesian non-parametric inference for the ETAS model

*Yuanyuan Niu^{1,2}, Jiancang Zhuang^{2,1} (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. The Institute of Statistical Mathematics)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S21-12] Spatio-temporal characteristics in GNSS time series based on robust spectral analysis

*Keisuke YANO¹, Masayuki Kano², Tetsuya Takatabatake³, Yusuke Tanaka², Yusaku Ohta² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University, 3. Osaka University)

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

2:00 PM - 3:00 PM JST | 5:00 AM - 6:00 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S03] PM-1

chairperson: Masayuki Kano, Yusaku OHTA (RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S03-01] Detection of a recent large Hyuga-nada long-term slow slip event and estimation of its spatiotemporal slip distributions

Hiroki Kawabata¹, Yukinari Seshimo¹, *Shoichi YOSHIOKA¹, Francisco Ortega-Culaciati² (1. Kobe University, 2. University of Chile)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S03-02] Detection of intermediate-term slow slip events and estimation of slip distribution in the shallow region of Suruga Trough

*Yuji Kikuchi¹, Yuta Mitsui², Masayuki Kano³ (1. Graduate School of Science, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S03-03] Detection of inflection points in high-rate GNSS data:
Numerical experiments and a case study of slow slip events

*Riko Arai¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S03-04] Establishment of a "Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science" and current achievements

*Yusaku OHTA¹ (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University)

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

3:15 PM - 4:45 PM JST | 6:15 AM - 7:45 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S03] PM-2

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)), Yusuke Yokota

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S03-05] The Spatiotemporal Evolution of Afterslip Following the Largest Foreshock (M 7.3) of the 2011 Tohoku Earthquake Based on OBPR Data*Kyosuke Hirata¹, Ryota Hino¹, Taisuke Yamada¹, Kosuke Minamoto¹, Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Tatsuya Kubota² (1. Tohoku University, Graduate School of Science, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S03-06] Extracting crustal uplifts during slow slip by applying MSSA to ocean bottom pressure gauge data and an oceanic model*Toshinori SATO¹, Saki SHIBATA¹, Koichi MURATA^{1,2}, Norihisa USUI³, Hajime SHIOBARA⁴, Tomoaki YAMADA⁴, Masanao SHINOHARA⁴ (1. Chiba Univ., 2. Oyo Corp., 3. MRI, 4. ERI, Univ. of Tokyo)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S03-07] Investigation of offshore SSEs detected in SGO-A*Yusuke YOKOTA¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura², Koya NAGAE² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S03-08] Utilization of Unmanned Surface Vehicles in GNSS-Acoustic Observation Using to Detect the Seafloor Crustal Deformation*Takeshi IINUMA¹, Motoyuki Kido², Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta³, Fumiaki Tomita², Ryota Hino³, Hiroaki Takahashi⁴, Takane Hori¹, Yusuke Yokota⁵ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S03-09] Estimation of Fault Interaction in Eastern Taiwan Using InSAR and GNSS: Case of the 2022 Yuli Earthquake*Yuri Ishimaru¹, Youichiro Takada², Kuo-En Ching³, Wu-Lung Chang⁴ (1. Hokkaido University, Graduate School of Science, 2. Hokkaido University, Faculty of Science, 3. National Cheng Kung University, 4. National Central University)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S03-10] 2D collision models with visco-elasto-plastic rheology applied to WNW-ESE shortening along the Niigata-Kobe Tectonic zone*Erika Moreno¹, Shoichi Yoshioka^{1,3}, Vlad Constantin Manea², Marina Manea², Nobuaki Suenaga¹ (1. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 2. Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 3. Department of Planetology, Faculty of Science, Kobe University,)

Room C | Special session : S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

📅 Tue. Oct 22, 2024 9:00 AM - 10:30 AM JST | Tue. Oct 22, 2024 12:00 AM - 1:30 AM UTC | 🏢 Room C
Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S21] AM-1

chairperson:Kodai Sagae, Shinya Katoh

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S21-01] Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building and Uncertainty Quantification

*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S21-02] Discriminating Seismic Motion from Train Vibration Using Recurrent Neural Networks for Railway Earthquake Early Warning Systems

*Shunta Noda¹, Naoyasu Iwata¹ (1. Railway Technical Research Institute)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S21-03] Enhancement of Phase Picking Models Using Deep Learning by Addressing the Label Imbalance Problem

*Shinya KATOH¹, Hiromichi NAGAO¹, Masaaki IMAIZUMI², Yoshihisa IIO³ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3. ABUYAMA Seismological MUSEUM)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S21-04] Seismic detection based on unsupervised combination of station-wise phase picks by deep learning

*Tomoki Tokuda^{1,2}, Hiromichi Nagao^{1,2} (1. ERI, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S21-05] Machine learning-based tectonic tremor location in the Japan Trench

*Kodai SAGAE¹, Masayuki KANO², Suguru YABE¹, Takahiko UCHIDE¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S21-06] Detection of slow slip events from continuous seismic waveforms in the western Shikoku based on random forest model

*Kazuki OHTAKE¹, Aitaro KATO¹, Yutaro OKADA², Takuya NISHIMURA³ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building and Uncertainty Quantification

*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.

Velocity is a fundamental parameter in seismology, essential for studying the physical properties of subsurface and converting time-recorded seismograms into representative depth sections in multi-channel seismic reflection studies. Practically, the primary output of velocity model building is a base subsurface model utilized for seismic imaging and interpretation workflows. Conventional processes to develop a seismic velocity model (e.g., traveltimes tomography or full waveform inversion) are generally operator-dependent, time-consuming, and often require a reasonably accurate initial velocity model to converge to a stable solution. To address these challenges, we propose a method to estimate the interval velocity models faster and more accurately by using Convolutional Neural Networks (CNNs). In the recently developed velocity model building tools, CNNs have proven to be effective for simple geological settings (Araya-Polo et al., 2018; Simon et al., 2023). However, in more complex geologies such as subduction systems, CNNs have a gap compared to traditional model building methods. In addition to training the CNNs model with the simple layered geological settings, we implemented a more complex synthetic geological settings into the training process to solve this issue. Our CNNs model uses the residual move-out semblance panel as input data for training and the labels for each input are from the corresponding interval velocity profile at the same location. In this study, Monte-Carlo Dropout is implemented to perform uncertainty quantification of the predicted P-wave velocity model. Our CNNs model is trained by synthetic data and then tested on real seismic data after the transfer learning.

Discriminating Seismic Motion from Train Vibration Using Recurrent Neural Networks for Railway Earthquake Early Warning Systems

*Shunta Noda¹, Naoyasu Iwata¹

1. Railway Technical Research Institute

新幹線の早期警報用地震計は、沿線の変電所内などに設置され、地震動以外にも列車通過時の振動等を観測する。当然ながら、その頻度は地震動よりも高い。現在の地震計は、P波開始から最短1秒のデータで地震諸元を推定して警報出力判定を行う（P波警報）ため、その短時間のデータから振動が列車等によるものか地震動かを正確に識別（分類）する必要がある。P波開始からの時間が短い場合、その振幅は大きくなっていない場合があり、列車振動と誤認する可能性がある。現行手法によるこの識別の再現率（Recall）は、地震動・列車振動ともに約90%である（岩田・他、2016）。地震動を正確に識別できない場合でも、しきい値超過判定に基づく警報（S波警報）を出力することができる。しかしながら、P波警報を出力することができないため、警報出力が相対的に遅くなる可能性がある。したがって、この識別精度の向上は、警報の迅速化および地震時の走行列車の安全性向上に直結する。本研究では、時間的な再帰性を考慮したニューラルネットワーク

（Recurrent Neural Network: RNN）をこの問題に適用し、その識別精度を評価した結果を報告する。RNNは、時系列データの処理に適したニューラルネットワークの一種であり、過去の入力情報を保持し、それを次の入力処理に反映させることで、時間的な連続性のパターンや相関関係を学習することができる（例えばPanakkat & Adeli, 2007）。しかし、標準的なRNNには、長いシーケンスにわたる依存関係を学習する場合、勾配消失や重み衝突などの課題が存在する。これらの問題を解決するために、LSTM（Long Short-Term Memory）やGRU（Gated Recurrent Unit）といった拡張モデルが提案されている（例えばTitos et al., 2019）。本研究では、LSTMとGRUを用いて解析を行い、その有効性を評価する。

解析に使用したデータは、列車振動に関しては、新幹線地震計で観測された10,002個の波形記録（岩田・他、2016）、および鉄道総合技術研究所の日野土木実験所（東京都日野市）内で観測された在来線列車による5,687個の波形記録である。なお、この日野土木実験所のデータには、周辺を走行する自動車による交通振動も含まれている。地震動データは、防災科学技術研究所の強震観測網K-NETで観測された10,210個の波形記録を使用した。RNNモデルには、1秒ごとの3成分加速度振幅値をシーケンスとして入力し、列車振動データはすべて非地震動（ラベル0）としてラベリングした。列車は遠方から徐々に接近し、振動開始時点を明確に決定することが容易ではないため、常時微動や強い振幅を示す列車振動も同様にラベル0とした。地震動データについては、STA/LTA法（Allen, 1978）を用いてP波開始時刻を決定した。さらに、地震動振幅レベルがP波開始前のノイズレベルの5倍以下となる状態が3秒以上継続した時点をもって地震動の終了と判定した。1秒のシーケンス内に0.3秒以上の地震動シグナル部（P波開始から地震動終了まで）が含まれるものを地震動（ラベル1）とし、それ以外は非地震動（ラベル0）とした。時間的な連続性を考慮するため、1つの波形記録内のシーケンスデータはシャッフルせず、波形記録自体を列車振動・地震動を問わずランダムにシャッフルした。データは、訓練用、検証用、テスト用にそれぞれ60%、20%、20%の割合で分割した。解析には、TensorFlowを用いてLSTMおよびGRUモデルを構築した。過学習を防ぐため、検証用データの損失が5エポック連続で改善しない時点で学習を停止させた。以下に示す結果は、学習を停止させた時点までで最良の検証損失を示したエポックのモデルを用いて、テスト用データに対して評価したものである。解析によって得られた精度（Accuracy）、適合率（Precision）および再現率（Recall）などの各指標は、LSTMとGRUを用いた場合で有意な差は認められない。ただし、GRUのほうが1シーケンスあたりの平均処理時間がわずかに短い傾向が確認された。Accuracyなどの指標にはハイパーパラメータによる影響が見られるが、例えば隠れ層の数=3、ユニット数=128等と設定したLSTMモデルの場合、Accuracyは99%、非地震動および地震動のRecallはそれぞれ99%、97%という結果が得られた。これは、現行地震計の処理手法による値（共にRecallは約90%；岩田・他、2016）と比較して有意に高い値である。この結果から、RNNを地震動と列車振動の識別に適用することで、地震警報の出力精度を向上させる可能性が示唆された。今後は、本手法を実装した早期警報用地震計の開発を目指す。

Enhancement of Phase Picking Models Using Deep Learning by Addressing the Label Imbalance Problem

*Shinya KATOH¹, Hiromichi NAGAO¹, Masaaki IMAIZUMI², Yoshihisa IIO³

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3. ABUYAMA Seismological MUSEUM

近年、様々な深層学習を用いた地震波の走時読み取りモデルが開発されている。深層学習を用いた走時読み取りモデルでは、人が読み取ったP波とS波の走時位置を学習させる。現在、よく使用されているモデル(PhaseNet; Zhu and Beroza, 2019)は走時読み取りタスクをSemantic Segmentationタスクとみなし、入力地震波を含む3成分波形データであり、正解ラベルはP, S波の走時時刻を頂点かつ高さ1とし、標準偏差0.1 sとしたガウス分布の形状をしたP, Sラベルとそれら以外を1としたノイズ(N)ラベルである。そして、モデルが推論する走時は出力確率分布が最大となる点である。

深層学習を用いた地震波走時読み取りモデルが高精度とされる一方で、トレース内に複数の地震波が存在する場合、全ての地震波の走時検出が困難という問題がある(Park et al., 2023)。この問題は定常的な地震活動のモニタリングなどでは大きな問題にならないが、大地震後の余震活動や注水実験による活発な誘発地震活動などでは大きな問題となる。余震活動や誘発地震活動は時間あたりの地震数が増えるため深層学習による自動化が求められる状況である。そのため一つのトレースに複数の地震波が含まれている場合でも読み取りができるようにする必要がある。

本研究では、この問題をラベル不均衡(Saini and Susan, 2023)によって生じている可能性があると考えた。PhaseNetの学習時に与えるラベルの面積比はPラベルとSラベルがそれぞれ1 %でNラベルが98 %である。そのため、大部分がNラベルであり、走時読み取りに重要なP波やS波を示すラベルはごくわずかである。これにより、モデルの学習時の損失値に影響を与えるのは主にNラベルであり、P波やS波ラベルの影響は限定的となる。そのため、Nラベルが多い状況は、モデルがP波やS波の信号を見逃しやすくなり、地震波の走時時刻を検出する際の感度が低下する可能性がある。このため、モデルのP波やS波への感度を向上させるために、ラベル不均衡に対処する必要がある。

そこで、本研究ではラベル不均衡を解消するために、損失関数に対する重み付けを行った。損失関数にはクロスエントロピー誤差を使用した。走時読み取りを行うモデルには、Vision Transformerを階層的に使用したSegPhase (Katoh et al., 2024)を用いた。PhaseNetと同様に走時読み取りタスクをSemantic Segmentationタスクとしており、正解ラベルはP, S, Nラベルとなっている。その結果が図である。図(d)が重み付けしたクロスエントロピー誤差を用いて学習したモデルの結果で、図(e)が通常のクロスエントロピー誤差を用いたモデルである。重み付けを行ったことで検出能力が大幅に向上していることがわかる。通常のクロスエントロピー誤差を用いたモデルではほとんどの波形が検出できていない。これは、学習データに日本の通常地震のものを使用しており、推論した地震波形はOklahomaの注水実験によって生じた地震のもので、学習と推論におけるデータの特徴が異なるためだと考えられる。しかし、それでも重み付けをすることで検出ができるようになっている。これは、重み付けによって地震波の本質的な特徴を効率よく学習できているからかもしれない。

本発表では、この手法の詳細と連続波形に適応した結果を紹介する

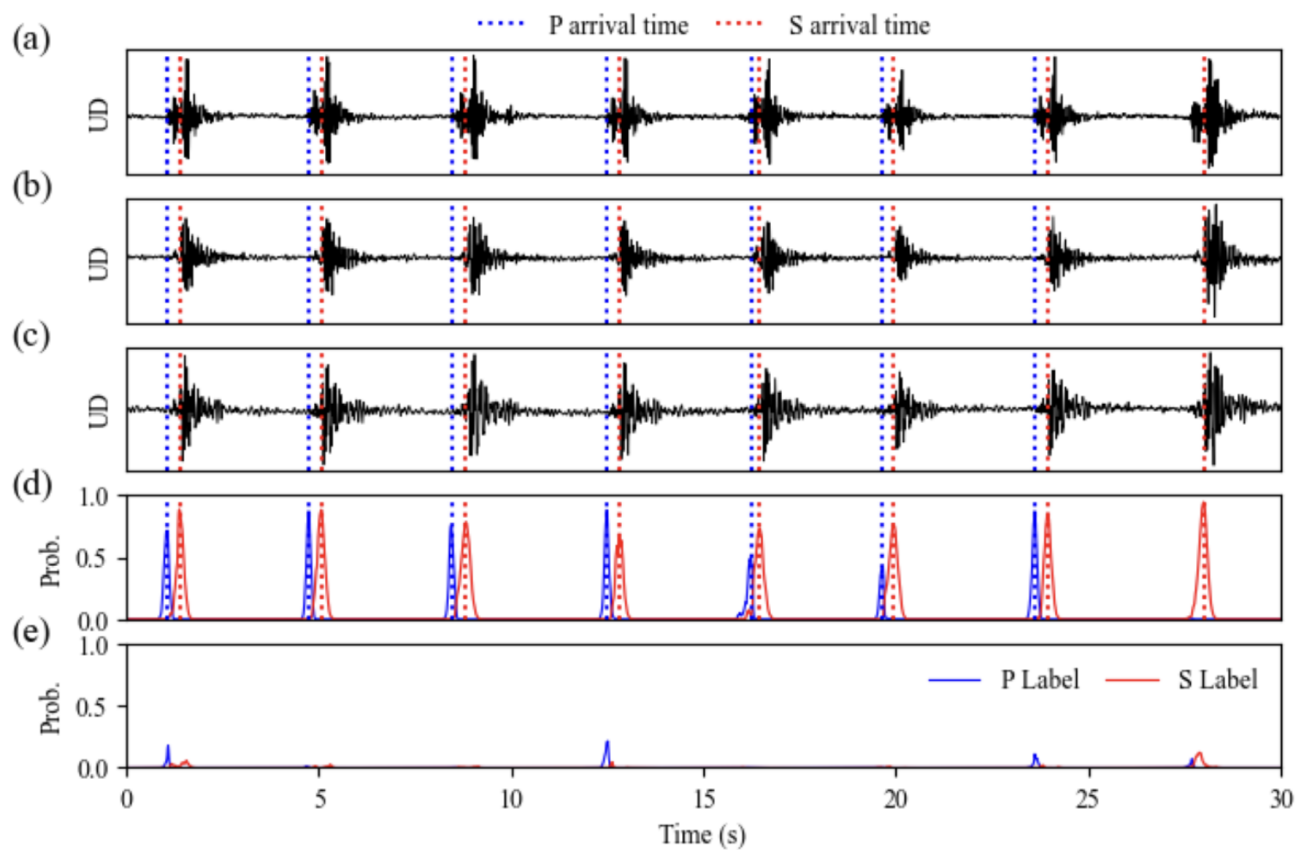


図 走時読み取り結果

2019年7月25日16時21分40秒(UTC)、オクラホマ州にあるネットワークO2のステーションFW01で記録された地震波形の走時読み取り結果である。(a)はUD成分の波形、(b)はNS成分の波形、(c)はEW成分の波形、(d)は重み付けしたクロスエントロピー誤差を用いて学習したモデルの結果、(e)は通常のクロスエントロピー誤差を用いたモデルである。

Seismic detection based on unsupervised combination of station-wise phase picks by deep learning

*Tomoki Tokuda^{1,2}, Hiromichi Nagao^{1,2}

1. ERI, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

近年、従来のSTA/LTA法に代わる地震検出法として深層学習に基づく検出手法が注目されている。ニューラルネットワークのもつ優れた表現能力によって、深層学習モデルは的確に波形データの特徴を捉え、精度よく地震を検出することができる。深層学習モデルを用いた地震検出のさらなる拡張として、複数観測点で得られた波形データに対する適用が考えられる。複数観測点で得られた波形データを相補的に活用することにより、地震検出能力がさらに向上するものと期待される。複数観測点の波形データから地震を検出する一般的な方法は、観測点ごとにP波、S波到達時間を評価し、検出結果を矛盾なく説明する震源をグリッドサーチによって精査する手法である。こうした手法は深層学習モデルによる地震検出結果に対しても適用することが可能であり、様々な調査・研究で用いられている。しかし、このようなグリッドサーチによる相組み合わせ探索を効果的に行うには、時間窓内のP波、S波検出数の閾値、グリッドサイズ等を適切に設定する必要があり、その設定は必ずしも容易ではない。本研究では、グリッドサーチを用いることなく、複数の観測点から得られる地震検出結果を簡素でかつ効果的に組み合わせて、地震検出を行う新しい手法を提案する。具体的には、時間窓に対して、観測点ごとのP波、及びS波検出確率の最大値に基づいて地震検出傾向を示す「スコア」を定義し、地震検出を行う。地震、及びノイズを含む連続波形に適用した際にスコアの分布が地震・ノイズに二極化するという仮定を用いて、スコア算出に最適な観測点数、及び閾値を教師なし学習法（ラベル付データを必要としない）の枠組みで自動的に決定する。尚、P波、及びS波検出確率の評価には学習済み深層学習モデルを用いる。実データへの応用として、首都圏地震観測網（MeSO-net）から得られた1週間分の波形データに提案手法を適用した。その結果、提案手法は都市生活に起因するノイズの影響を受けず、効果的に地震を検出できることがわかった。

Machine learning-based tectonic tremor location in the Japan Trench

*Kodai SAGAE¹, Masayuki KANO², Suguru YABE¹, Takahiko UCHIDE¹

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

スロー地震の一種であるテクトニック微動(以降、微動)は、世界中のプレート沈み込み帯における巨大地震発生域の深部延長または浅部延長で発生している (Obara & Kato, 2016). 微動はプレート境界面上の断層すべり現象に伴い発生すると考えられるため、微動活動を網羅的に把握することは巨大地震発生域周辺の断層すべり現象をモニタリングするうえで重要である。

微動の検出・震源決定には、観測点間のエンベロープ波形の相互相関に着目したエンベロープ相関法 (ECM; Obara, 2002) が広く使われている。しかし、この手法では地震と微動の信号を区別するのが困難であり、日本海溝のように地震活動が活発な地域では多くの誤判別をしてしまう可能性がある。また海域では、堆積層に地震波がトラップされることによる地震波形の複雑化 (e.g., Takemura et al., 2020; 2024) などの影響でエンベロープ波形の類似性が低下し、微動の検出漏れが起こる可能性がある。このような誤検出や検出漏れを解決する策として、機械学習に基づく信号分類はイベント波形の継続時間や周波数特性を学習するため有力である (e.g., Nakano et al., 2019; Takahashi et al., 2021). そこで本研究では、防災科研のS-net を用いて機械学習に基づく日本海溝の微動モニタリングシステムを開発したので報告する。

本モニタリングシステムは以下の3ステップからなる。まず、1分間の時間窓で計算された3成分スペクトログラムを入力とする CNN モデル (Sagae et al., in prep) を用いて、S-net 全観測点で地震・微動・ノイズへの信号分類を行った。次に、グラフ理論に基づくクラスタリング手法であるスペクトルクラスタリング (von Luxburg, 2007) を用いて、微動を検出した観測点群の取りまとめを行った (Sagae et al., 2024, JpGU). 最後に、取りまとめた観測点群の全観測点ペアで、エンベロープ波形の相互相関とエネルギー比を同時に最適化するような3次元グリッドサーチを行うことで、1分ごとに微動の震源決定を行った。エネルギーの計算には、Yabe et al. (2021) で推定された震源距離に依存する地震波減衰パラメータと水平サイト増幅特性を用いた。

2016年8月から2024年6月までの期間で微動カタログの作成を行った。2016年8月から2021年12月までは ECM を用いて震源決定された従来の微動カタログ (Nishikawa et al., 2023) と期間が一致している。水平方向の不確かさが10 km 以内の微動について、1年あたりの検出数は従来のカタログと比べて約 5 倍となった。従来の微動カタログの震源分布で空間的に不連続となっていた場所にも微動が検出・震源決定されていることと、時間分解能が2.5分から1分に向上していることから、本研究では時空間分解能が向上した微動カタログの作成に成功したと考えられる。また微動のエネルギー分布に着目すると、先行研究で報告されている strike 方向の空間変化 (Yabe et al., 2021) だけでなく、dip方向への変化も確認できており、プレート間カップリングとの関係を議論できる可能性がある。

謝辞：本研究では防災科研のS-net波形データを使用しました。本研究はJSPS科研費 JP21H05205 の助成を受けたものです。記して感謝申し上げます。

Detection of slow slip events from continuous seismic waveforms in the western Shikoku based on random forest model

*Kazuki OHTAKE¹, Aitaro KATO¹, Yutaro OKADA², Takuya NISHIMURA³

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

南海トラフのプレート境界では、固着域と深部安定すべり域の遷移領域においてスロー地震が起きている。スロー地震には、測地学的帯域で観測されるスロースリップイベント（SSE）と、地震学的帯域で観測される低周波地震（LFE）や微動（tremor）等が知られており、巨大地震との関連が指摘されている(Obara and Kato, 2016)。近年、継続時間が数日程度の短期的SSE（S-SSE）が、GNSSデータを用いて検出されるようになったものの(Nishimura et al., 2013, Okada et al., 2022)、傾斜計やひずみ計に比べてGNSSデータは感度が低いいためS-SSEの検出が難しく、特に小さな規模のSSEは見逃している可能性がある。一方で、SSEと微動の同期現象は、カスカディア沈み込み帯で発見され(Rogers and Dragert, 2003)、その後西南日本でも見つかった(Obara et al., 2004)。Rouet-Leduc et al. (2019)は、カスカディア沈み込み帯の連続地震波形記録に機械学習を適用することで、SSEの発生に関連するGNSS観測点の変位速度の時間変化を予測できることを示した。他の地域の異なるテクトニクス環境でも機械学習により連続地震波形記録を用いてGNSS変位速度の時間変化を予測できるか検証することが重要である。本研究では、四国西部の連続地震波形記録を用いて、機械学習によりGNSS観測点の変位速度の時間変化を予測し、S-SSEを検出することを目的とする。

2004年4月から2020年3月までの四国西部の複数のHi-net観測点で取得された地震波形記録を用いて、1日ごとに統計的特徴量を計算した。測地データとしては、四国西部周辺の複数のGEONET観測点について、Okada et al. (2022)の方法でGNSS変位速度を計算した。GNSSシグナルを強調するために、Bletery and Nocquet (2023)に従って、観測変位速度とスタックされたSSE期間の理論変位(Kano et al., 2019)との内積和を計算した。決定木のアンサンブルであるランダムフォレストによりモデルを構築し、連続地震波形記録の統計的特徴量からGNSS変位速度の時間変化を予測した。予測されたGNSS変位速度が1mm/yearより大きいタイミングを、S-SSEとして検出した。検出された各S-SSEについて変位速度を時間積分して変位分布を求め、すべりインバージョンにより断層モデルを推定した。その結果、モデルのGNSS変位速度の推定値は実際のGNSS変位速度と高い相関を示した。このモデルは地震波形記録の変化からS-SSEと考えられる変位速度の応答を検出し、そのほとんどはOkada et al. (2022)のS-SSEカタログのイベントに対応し、さらにカタログにないイベントも新たに検出された。本研究は、連続地震波形記録を用いて、機械学習により南海トラフ沿いで発生するSSEをより高精度に検出できる可能性を示す。

Room C | Special session : S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

📅 Tue. Oct 22, 2024 10:45 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 1:45 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 Room C
Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S21] AM-2

chairperson: Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Keisuke Yano

10:45 AM - 11:15 AM JST | 1:45 AM - 2:15 AM UTC

[S21-07] [Invited] Modeling of physical phenomena based on Bayesian statistics

*Satoru Tokuda¹ (1. Kyushu University)

11:15 AM - 11:45 AM JST | 2:15 AM - 2:45 AM UTC

[S21-08] [Invited] Machine Learning and Scientific Mathematical Models: Data-Driven Solutions of Forward and Inverse Problems

*Naoya Takeishi¹ (1. The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S21-09] Physics-Informed Deep Learning for Forward and Inverse Modeling of Inplane Crustal Deformation

*Tomohisa OKAZAKI¹, Kazuro Hirahara^{1,2}, Takeo Ito³, Masayuki Kano⁴, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S21-10] HypoNet Nankai: Rapid hypocenter determination tool for the Nankai Trough subduction zone using physics-informed neural networks

*Ryoichiro AGATA¹, Satoru Baba¹, Ayako Nakanishi¹, Yasuyuki Nakamura¹ (1. JAMSTEC)

[Invited] Modeling of physical phenomena based on Bayesian statistics

*Satoru Tokuda¹

1. Kyushu University

古くは17世紀に発見されたケプラーの法則が象徴するように、単純な数式を用いて計測データを表す数理モデリングは様々な物理現象に対する理解を深めてきた。しかし、扱う現象が複雑になり、高度な計測技術を駆使する現代科学では理解が困難な計測データが顕在化している。本講演では統計科学の視点から、モデルの不定性・観測ノイズ・モデル不一致の三課題に着目する。凝縮系物理学の研究者との異分野協働で得た実証例を交えつつ、三課題への対処法やその基礎となるベイズ統計に関する我々の研究を紹介する。

[Invited]Machine Learning and Scientific Mathematical Models: Data-Driven Solutions of Forward and Inverse Problems

*Naoya Takeishi¹

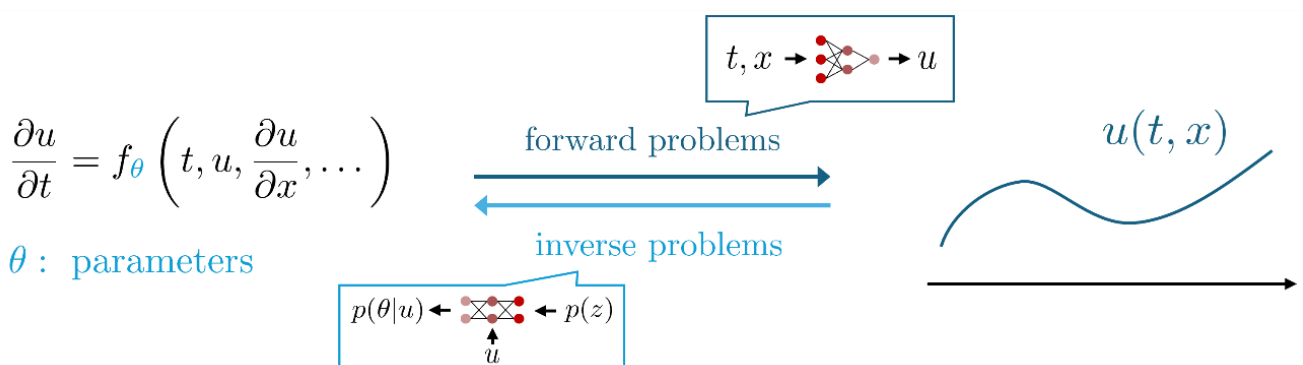
1. The University of Tokyo

科学研究の様々な分野で登場する微分方程式などの数理モデルに関連する諸問題に機械学習を応用することで、計算の効率化や、より複雑な設定への対応ができると期待されている。本講演では、そのような機械学習手法の基本的概念と最新の進展を紹介する。

まず、数理モデルの解を求める問題（いわゆる順問題）に対する機械学習の手法を取り上げる。physics-informed neural networksやdeep Galerkin methodといった、数理モデルによって損失関数を定義する手法の基本的な考え方を説明する。また、PDEなどの解をデータとして学習するneural operatorsと呼ばれるモデルについて論じる。これらの方法は、深層ニューラルネットワークの表現力を活用し、高次元の微分方程式の解を効率的に表現できると期待されている。

次に、観測データから数理モデルのパラメタを推論する問題（いわゆる逆問題）に対する機械学習の手法を扱う。特に、数理モデルの尤度関数を計算できない場合にパラメタの確率推論を行うという問題設定を扱う。これはlikelihood-free inferenceやsimulation-based inferenceとして知られる問題設定であり、近年特に深層学習による解法が注目を集めている。本講演ではその主要な方法を紹介し、推論の信頼性の問題など実践上の課題を議論する。このようなデータ駆動型の逆問題解法により、複雑な事後分布を表現したり、推論時に最適化やモンテカルロ法を実行せずに高速に計算したりできると期待されている。

最後に、科学的な数理モデルと機械学習のモデルを直接組み合わせるハイブリッドモデリングの研究動向を紹介する。ハイブリッドモデリングは、数理モデルと現実との乖離を機械学習によってうめて、より精緻な予測やシミュレーションを実現し得る方法である。



Physics-Informed Deep Learning for Forward and Inverse Modeling of Inplane Crustal Deformation

*Tomohisa OKAZAKI¹, Kazuro Hirahara^{1,2}, Takeo Ito³, Masayuki Kano⁴, Naonori Ueda¹

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University

プレート運動や地震に起因する地殻変動は、断層の変位食い違いモデル(dislocation model)により記述され、解析解や差分法・有限要素法などの数値解法によるモデリング手法が発展してきた。一方で、機械学習分野においてneural network (NN)により偏微分方程式系を順・逆解法するphysics-informed neural network (PINN)が提案され(Raissi et al., 2019)、自然科学・工学の各分野に応用されている。Okazaki et al. (2022)はPINNを横ずれ断層のモデルである「反平面(antiplane)歪み」における地震時地殻変動の「順解析」に適用し、同手法による3次元構造や様々なレオロジーにおける時間発展モデリング、逆解析やデータ同化への発展可能性を示した。

本研究では、PINNによる地殻変動の解析対象を以下の2点において拡張する：

- ・平面(inplane)歪み
- ・逆解析

正・逆断層のモデルである平面歪み問題は沈み込み帯のモデリング研究等で用いられており、これらの拡張はPINNの実用化に向けて重要なステップと考えられる。

Okazaki et al. (2022)は極座標を用いることで断層端部(dislocation line)における特異性を解消し、断層近傍を含め正確な解を得た。この方法は平面歪み問題にも適用できるが、一般の3次元構造には直接応用できない。そこで本研究では直交座標による解法も実施する。断層両側で変位不連続が生じるため、直交座標では単一のNNで解を近似することができない。そこで断層面に沿って領域を二分割し、各領域の変位場を異なるNNにより近似し、二領域の(断層面以外の)接触面において変位とその微分が連続である条件を課す。この方法では、断層端部で応力発散する一様すべりの変位場は解けないが、物理的に妥当な有限応力を生じるすべり分布の変位場を解くことができる。以下では順・逆解析それぞれについて直交・極座標による解析結果を比較する。

順解析においては、直交・極座標ともにほぼ正確な変位場が得られたが、変位場に定数シフト(剛体運動)の差異が見られた。定数シフトは断層が傾斜しているほど、また直交座標のほうが一貫して大きく、順解析においては極座標のほうが優れている結果となった。また、PINNは幾何形状・係数変化のモデリングに長けており、平面歪み問題においても地形・不均質・断層形状のある地下構造を容易に解析できた。

逆解析では、断層形状を含む地下構造を既知とし、すべり分布を推定する線形インバージョンのsynthetic testを実施した。PINNによる逆解析では、観測量(例：走時)と推定量(例：地震波速度)を近似する複数のNNを同時に最適化するのが一般的であるが、すべり逆解析においては観測量(地表変位)と推定量(断層すべり量)がともに変位のため、単一のNNで実施できる点が特徴である。数値実験の結果、直交座標のほうが良い推定値が得られた。

PINNによる逆解析では、微分方程式と観測データからの残差を損失関数とし、推定を安定させる正則化項を陽に課していないにもかかわらず、平滑なすべり分布が推定された。この理由をグリーン関数に基づく以下の2つの運動学的逆解法と比較することで検討した：

- ・ABIC: すべり量を基底関数展開する。平滑化の先験情報を与えABICにより最適化。
- ・NN: すべり量をNNで表現する。平滑化条件を課さない。

NNでは極めて不安定なすべり分布が推定された。NNは連続関数であるが自由度が高いため、観測データに過適合することを示している。ABICでは観測データの量・質に応じた平滑な解が得られたが、PINN直交座標の解はそれと同程度の滑らかさであった。これはPINNにおいて暗黙的に正則化がかかることを示唆している。手法の特性として、グリーン関数を用いる場合は断層すべりと地表変位の関係のみを扱い、地下の変形は考慮されない。一方PINNでは地下を含む変位場を解くため、断層近傍に応力が極度に集中する不安定な解が回避され

やすいと考えられる。このようにPINNでは微分方程式を直接解くことで、物理的な要請に基づき暗黙的な正則化がかかっている可能性が考えられる。一般の劣決定問題におけるPINN解の正則性について、本大会の佐藤・岡崎（2024, 地震学会）で議論される。

HypoNet Nankai: Rapid hypocenter determination tool for the Nankai Trough subduction zone using physics-informed neural networks

*Ryoichiro AGATA¹, Satoru Baba¹, Ayako Nakanishi¹, Yasuyuki Nakamura¹

1. JAMSTEC

巨大地震の発生が予測されている南海トラフ域において正確な震源決定解析を行うことは、ハザード予測と地震現象の科学的理解向上の双方の観点において重要である。震源決定の精度向上において重要となるのは、震源から地表の観測点までの走時を正確に計算することである。震源決定のための走時計算には1次元構造などの単純な速度構造モデルを用いた手法が広く用いられてきた。しかし、沈み込み帯のように地下構造が複雑な空間変化を持つと考えられる領域では、より現実的な3次元速度構造を組み込むことは、震源決定精度に大きな影響を与えると考えられる。南海トラフ地域では、3次元速度構造モデルの確立に向けた研究が進展している（例えばNakanishi+2018）。多数公開されているグリッドベースの有限差分的数値計算のプログラムを用いることで、そのようなモデルをベースとした走時の3次元計算も可能である。しかしそのような状況でも多くの研究で単純な構造に基づく震源決定が行われていることは、走時の3次元計算に必要な実用上の計算コストと労力は依然として大きいということを示唆する。3次元速度構造モデルの震源決定への適用を進めるには、このような計算コスト・労力を伴わない、使いやすい震源決定ツールの公開が効果的であると考えられる。従来から知られている手法の中では、事前に計算して保存した走時表を使うというアプローチが候補となる。しかし、この方法には、精度を確保するために仮想的震源を高密度の格子上に用意する必要がありデータ量が大きくなりがちであることや、観測点が追加されると追加の計算による走時表の更新が必要になるという欠点がある。一方、深層学習などの機械学習モデルは、入力と出力の間の非線形関係を代理する軽量なモデルを生成する、より現代的なアプローチを提供する。物理情報ニューラルネットワーク（physics-informed neural networks、PINN、Raissi+2019）は、偏微分方程式で記述された物理法則を学習に組み込むことができ、ラベル付きの学習用データがなくても、走時を高速に計算（推論）する深層学習モデルの構築を可能にする。そこで本研究では、南海トラフ域の3次元速度構造モデルに対して学習させたPINNに基づく、3次元速度構造ベースの高速震源決定ツール「HypoNet Nankai」を開発した。HypoNet Nankaiで用いられるPINNは、速度構造モデルの解析対象領域内の任意の震源と受振点の組み合わせの多数のサンプルに対し、走時を決める偏微分方程式であるアイコンナル方程式の残差が小さくなるように学習されている（Smith+2021、Waheed+2021）。アイコンナル方程式における伝播速度は、海域地震探査データに重きを置いて構築された3次元P波速度構造モデル（Nakanishi+2018）から与えられる。学習済みPINNは、震源決定に必要な任意の震源と地表の観測点間の走時を高速に計算（推論）することが可能となる。震源決定のアルゴリズムには、最大事後確率推定とラプラス（ガウス）近似による不確定定量化に基づく手法（Hirata+1987）を用いた。学習済みPINNとそれを搭載したHypoNet Nankaiの精度を検証するために、グリッドベースの数値計算手法との比較による2つの検証テストを実施した。その結果、ランダムに設定した震源に対する地球表面の走時関数において良好な一致が見られ、震源決定においては推定誤差の範囲内で整合的な推定位置が得られた。100以上の観測点における初動走時データを用いた一つの震源決定において、HypoNet Nankaiが要した時間は平均5秒未満であった。HypoNet Nankaiが、南海トラフ域の主に海域における震源決定を行うための、グリッドベースの3次元走時計算や1次元速度構造に基づく従来法に対する有望な代替ツールとなることを確認した。現在、HypoNet Nankaiの一般公開サーバーへのアップロードの準備を進めている。さらに、室戸沖での自動地震検知・震源決定システム（馬場ら、本大会）への組み込みを目標に、S波速度構造も対象とした震源決定ツールの拡張を進めている。発表当日はこれらの最新の結果についても紹介する予定である。

Room C | Special session : S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

📅 Tue. Oct 22, 2024 1:30 PM - 2:00 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 4:30 AM - 5:00 AM UTC | 🏢 Room C
Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S21] PM-1

chairperson: Masayuki Kano, Yusaku OHTA (RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S21-11] Bayesian non-parametric inference for the ETAS model

*Yuanyuan Niu^{1,2}, Jiancang Zhuang^{2,1} (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. The Institute of Statistical Mathematics)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S21-12] Spatio-temporal characteristics in GNSS time series based on robust spectral analysis

*Keisuke YANO¹, Masayuki Kano², Tetsuya Takatabatake³, Yusuke Tanaka², Yusaku Ohta² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University, 3. Osaka University)

Bayesian non-parametric inference for the ETAS model

*Yuanyuan Niu^{1,2}, Jiancang Zhuang^{2,1}

1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. The Institute of Statistical Mathematics

The epidemic type aftershock sequence (ETAS) model, an example of a self-exciting, spatiotemporal, marked Hawkes process, is widely used in statistical seismology to describe the self-exciting mechanism of earthquake occurrences. The ETAS model is characterized by the rate of arriving earthquake events conditioned on the history of previous events, which is also called the conditional intensity function. Fitting an ETAS model to data requires us to estimate the conditional intensity function. Many previous methods, including parametric and non-parametric, have certain limitations in quantifying uncertainty since most estimation techniques deliver a point estimate for the conditional intensity function. The GP-ETAS model defines the background intensity in a Bayesian non-parametric way through the Gaussian Process prior, allowing us to incorporate prior knowledge and effectively encode the uncertainty of the quantities arising from data and prior information. Based on the GP-ETAS model, we have carried out some new research topics, and some work is still ongoing. This presentation introduces the GP-ETAS model and some developments we have made.

Spatio-temporal characteristics in GNSS time series based on robust spectral analysis

*Keisuke YANO¹, Masayuki Kano², Tetsuya Takatabatake³, Yusuke Tanaka², Yusaku Ohta²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University, 3. Osaka University

The Global Navigation Satellite System (GNSS) is an observation system to measure the locations of observation stations by receiving radio waves transmitted from the satellites. Due to this observation principle, raw GNSS data contain various information from satellites to receivers such as the ionosphere, atmosphere, surrounding environment close to the antennas, as well as the motion of the Earth. Thus, pre-processing of raw GNSS data is required to estimate the target products by modeling the other factors using analysis software. The Geospatial Information Authority of Japan provides the daily coordinates at the GEONET stations as the F5 solution (Takamatsu et al. 2023). Because of its convenient use, the F5 solution is frequently used for a variety of geodetic, seismic, and volcanic analyses related to crustal deformation. To precisely extract the transient deformation due to tectonic or volcanic processes, it is important to understand the spatio-temporal characteristics and to accurately model them. Nonetheless, the comprehensive analysis of spatio-temporal characteristics in the F5 solution has been rarely published. Takabatake and Yano (2023) recently proposed a method to robustly estimate the frequency-domain characteristics of observed time series. In this presentation, we introduce this robust spectral estimation and its application to the GEONET F5 solution. The method utilizes the spectral Renyi divergences, which includes the Itakura-Saito divergence as a limit. The Itakura-Saito divergence (Itakura and Saito, 1968; Whittle, 1953) is widely used in the spectral analysis and provides the foundations of the maximum likelihood method or Burg's maximum entropy method. However, the method based on the Itakura-Saito divergence is unstable in the presence of outliers in the frequency domain such as annual or semi-annual components. The spectral estimation using the spectral Renyi divergence is shown to become more stable against the presence of outliers in the frequency domain than that using the Itakura-Saito divergence, which reduces the effect due to pre-processing of observations. We then applied the method to the F5 solution from 1996 to 2023, which was then divided into four years overlapping 0.5 years to calculate power spectral densities (PSD). We modeled each PSD as the sum of the two Brune's spectral models (Brune, 1970) representing both high-frequency and low-frequency components. In this model, the amplitudes, cut-off frequencies, and slopes of the spectra for both frequencies are estimated by the proposed method. Our preliminary result indicates that, for low-frequency bands, the modeled spectral shows the colored noise with the slopes of ~ -4.0 to -1.5 , while those for high-frequency bands are close to the pink to white noise with slopes of ~ -1.5 to 0.0 . In addition, the amplitudes of high-frequency component showed a temporally gradual reduction until ~ 2003 . This may correspond to the reduction of GNSS orbits provided by International GNSS service.

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

📅 Tue. Oct 22, 2024 2:00 PM - 3:00 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 5:00 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 Room C
Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S03] PM-1

chairperson: Masayuki Kano, Yusaku OHTA (RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S03-01] Detection of a recent large Hyuga-nada long-term slow slip event and estimation of its spatiotemporal slip distributions

Hiroki Kawabata¹, Yukinari Seshimo¹, *Shoichi YOSHIOKA¹, Francisco Ortega-Culaciati² (1. Kobe University, 2. University of Chile)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S03-02] Detection of intermediate-term slow slip events and estimation of slip distribution in the shallow region of Suruga Trough

*Yuji Kikuchi¹, Yuta Mitsui², Masayuki Kano³ (1. Graduate School of Science, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S03-03] Detection of inflection points in high-rate GNSS data:
Numerical experiments and a case study of slow slip events

*Riko Arai¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S03-04] Establishment of a "Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science" and current achievements

*Yusaku OHTA¹ (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University)

Detection of a recent large Hyuga-nada long-term slow slip event and estimation of its spatiotemporal slip distributions

Hiroki Kawabata¹, Yukinari Seshimo¹, *Shoichi YOSHIOKA¹, Francisco Ortega-Culaciati²

1. Kobe University, 2. University of Chile

九州南東部における国土地理院のGNSS時系列データの水平および垂直変位を用いて、日向灘地域で最近発生した長期的スロースリップイベント（SSE）を検出し、その時空間滑り分布を推定した。水平変位のS/N比が1.0以上となるように0.8年の最短の時間窓を設定し、滑りの時間変化を求めた。その結果、2018.5年～2019.3年の期間、宮崎県中部下のプレート境界で2 cm以上の滑りが発生したことが分かった（単位は0.1年＝36.5日）。その後、2019.3年～2020.1年には、宮崎県南部下のプレート境界で滑り量が若干増加・拡大し、その後の期間（2020.1年～2020.9年）には滑り量が最大3.9 cmに達した。さらにその後の0.8年の間（2020.9年～2021.7年）には、ほぼ同じ場所でより小さな滑りが発生し、2021.7年以降は、滑りは検出されなかった。したがって、長期的SSEの発生期間は2018.5年～2021.7年の約3.2年間と推定された。年平均最大滑り速度は2020.1年～2020.9年の期間にみられ、約4.9 cm/年 (3.9 cm/0.8年) と求めた。最大総滑り量は約12.9 cm、解放されたモーメントは 4.9×10^{19} Nm、Mwは7.1 と推定された。今回の長期的SSEを日向灘地域で発生したこれまでの長期的SSEと比較すると、年平均最大滑り速度は比較的小さく、主な滑りはプレート境界のほぼ同じ位置で検出された。一方、今回の長期的SSEの滑りの継続時間は最も長く、解放されたモーメントとMwは最大となった。本研究で推定された日向灘長期的SSEの約10 cm以上の総すべり域は、深さ約30～40 kmの範囲で、1996年12月3日の日向灘地震の余効滑り域とほぼ重なっていた。短期的SSEも同じ深さ範囲で発生している。これら3者のプレート間地震イベントが同じ深さ範囲で発生している原因として、そのプレート境界面上での沈み込み方向の大きな温度勾配が考えられる。大きな温度勾配は、プレート境界での摩擦パラメータ(a-b)の深さ範囲を狭めるという重要な役割を果たす。マントルウェッジコーナー(MWC)部と沈み込んだ九州一パラオ海嶺の外縁部の両方がプレート境界の深さ約30 kmに位置していることともあいまって、間隙水圧と法線応力も滑りをコントロールする臨界スティッフネスと密接に関係している。MWCのプレート境界の浅部側と深部側の間隙水圧と法線応力の対照的な値も、3種類の非地震性滑りが同じ深さ範囲で発生することに寄与している可能性がある。

Detection of intermediate-term slow slip events and estimation of slip distribution in the shallow region of Suruga Trough

*Yuji Kikuchi¹, Yuta Mitsui², Masayuki Kano³

1. Graduate School of Science, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

西南日本の南海トラフ沈み込み帯では、GNSSやひずみ計・傾斜計に基づく深部スロースリップイベント（SSE）の検出が行われてきた（例えばNishimura et al., 2013; Kano & Kato, 2020; Okada et al., 2022; Yabe et al., 2023）。いくつかの先行研究（Kano & Kato, 2020; Okada et al., 2022）は、南海トラフ沈み込み帯広域のデータを用いた網羅的な検出手法により、帯状に分布する深部SSEとは別に、駿河トラフなどのより浅部で多少の断層すべりを推定した。また、海溝に近い紀伊半島沖・室戸岬沖の浅部領域において、短期的SSEの典型的な継続時間よりもはるかに長い、数十日以上継続する、やや長期的なSSEの検出が報告されている（例えばYokota et al., 2020; Takemura et al., 2022）。

本研究では、2016～2022年の駿河トラフ上盤/下盤間のGNSS基線長変化に注目し、複数基線間の一時的短縮を検出することにより、駿河トラフ浅部領域でやや長期的なSSEが単独発生した可能性のある期間を推定した。その後、SSE候補期間における水平変位ベクトルを用いて、ベイジアンインバージョン解析に基づき断層すべり分布を推定した。

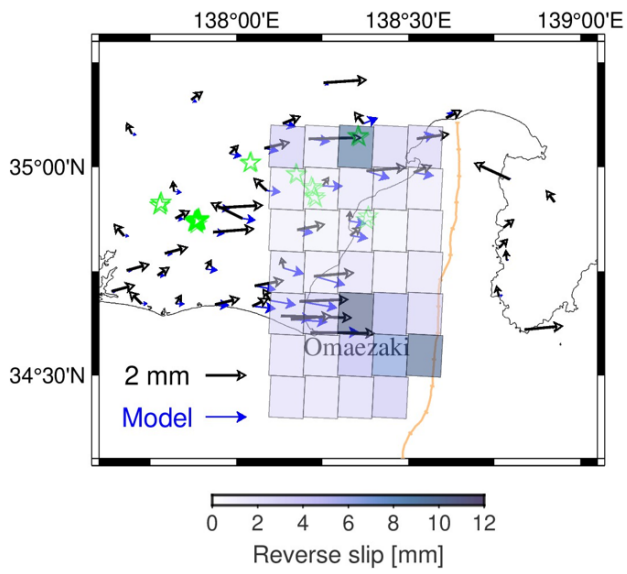
観測データは、国土地理院GEONET・F5解の水平成分について、2016年～2022年の時系列データを使用した。駿河トラフ浅部南側で上盤/下盤間の4つの基線を取り、基線長データに変換した。GNSS基線長データからはオフセットや季節変動、線形トレンドを予め除去した。

駿河トラフ浅部で100日程度継続するやや長期的なSSEが単独発生した可能性のある時期を探るため、複数の方法でSSE候補期間を絞り込んだ。まず、SSEによる基線短縮をランブ関数で模擬したテンプレートとGNSS基線長移動平均データとをテンプレートマッチングにより相関分析した。また、GNSS基線長移動平均データをトレンド除去したものに100日間のタイムウィンドウを設定し、基線短縮速度の増減を調べた。具体的には、タイムウィンドウに含まれるデータに直線をフィッティングし、回帰直線の右端と左端の差を求めることで基線長の速度変換（m/100day）を行った。複数基線においてテンプレートマッチングと基線長速度変換の両結果が調和的であった期間をSSE候補期間とし、当該期間内におけるテンプレートマッチングの相関係数のピークを抽出した。その後、相関係数の最大ピークの日付を中心にテンプレートの時間窓を50日～400日の間で変化させ、改めてテンプレートとGNSS基線長移動平均データとを相関分析することにより、継続時間を決定した。

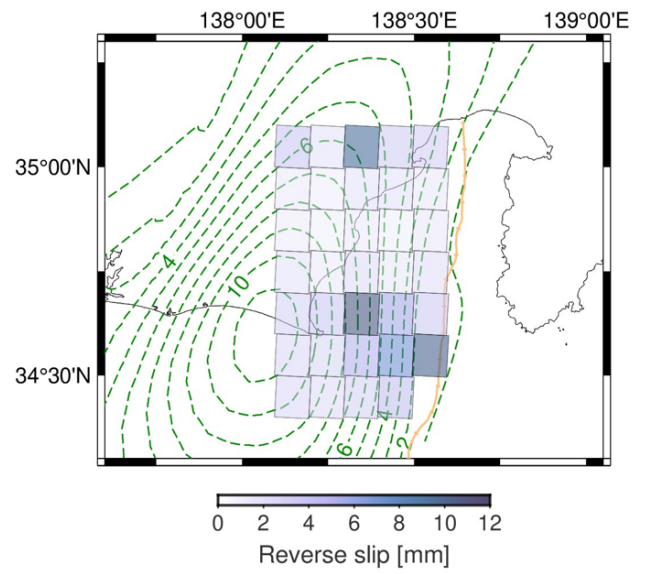
解析の結果、2019年9月6日～2020年1月1日にかけて、継続時間118日程度のSSE候補を推定した。SSE候補期間においては、駿河トラフ付近で小繰り返し地震（Igarashi, 2020）が活発化しており、SSEと繰り返し地震活動に何らかの関連性が示唆された。

変位ベクトルを用いて、馬蹄型事前分布（Carvalho et al., 2009）を仮定したハミルトニアンモンテカルロ法に基づく断層すべり分布推定を行った。その結果、御前崎沖のプレート境界浅部（深さ～7 km）において最大10 mm程度の断層すべりを推定した（左図）。このすべり領域の一部は、Ochi & Kato（2013）が報告した東海地方の固着域近傍に位置していた（右図）。当該領域におけるすべり欠損速度は、南海トラフ沈み込み帯全体の中で比較的小さいと報告されている（Nishimura et al., 2018）。本研究で推定したSSEが繰り返し発生していることを仮定すれば、小さなすべり欠損速度の原因を一部説明できる可能性がある。

断層すべり分布の推定結果
(緑色の星は小繰り返し地震; Igarashi, 2020)



2000～2005年におけるすべり欠損
(1cmコンター; Ochi & Kato, 2013)



Detection of inflection points in high-rate GNSS data: Numerical experiments and a case study of slow slip events

*Riko Arai¹, Yuta Mitsui²

1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University

スロー地震の多様な時間スケールにおける研究が進められている中、100秒～1日程度の継続時間を持つイベントの検出は難しい(e.g., Ide and Beroza, 2023)。さらに、長い継続時間を持つイベントが、より短いイベントの集合体である可能性についての議論も活発に行われている(e.g., Frank and Brodsky, 2019)。このため、スロー地震の理解を深める上で、短いサンプリング間隔での測地学的観測データを用いたスロースリップイベント(SSE)の検出が重要である。

本研究では、1日より短いサンプリング間隔を持つハイレートGNSSデータを用いて、網羅的なイベント検出方法について検討する。このために、Nevada Geodetic Laboratoryが提供する5分間隔の精密単独測位解データセット(e.g., 三井・新井, 2023)を使用した。我々が以前に行った予備研究では、ハイレートGNSSデータのノイズが大きいため、1日サンプリングデータで行われているテンプレートマッチングによるシグナル検出(e.g., Rousset *et al.*, 2017)が困難であることがわかった。そこで、イベントの開始時刻と終了時刻に生じる時系列データの変曲点を自動で検出する手法(Taylor and Letham, 2017)を採用した。具体的には、変曲点の候補を多数設定し、事前分布としてラプラス分布を仮定した最大事後確率推定に基づく折れ線回帰を用いて、有意な変曲点を抽出する。

まず、実際のハイレートGNSSデータのノイズ特性解析に基づいて作成した人工時系列データで、変曲点解析の設定の検討(数値実験)を行った。GNSSデータのノイズスペクトルは一般にホワイトノイズ的ではなく、周波数に依存した成分を持つことが知られている(e.g., Genrich and Bock, 2006; Geng *et al.*, 2018)。このことがシグナル検出に影響を与えていると考え、観測データに含まれるノイズのパワースペクトル密度の形状を調べた。次に、観測データのパワースペクトル密度の形状を単純化したパワースペクトル密度を持つノイズにClipped ReLU関数のシグナルを足して、人工データを作成した。この人工データを用いて、変曲点検知によるシグナル検出数値実験を行った。シグナルの変位量および変位期間を変えたとき、正解の位置に変曲点を検知できるか否かで、シグナル検出の結果を評価した。解析のための設定として、ラプラス分布のパラメータ τ および変曲点の候補点数に注目した。これらを変えたとき、シグナル検出の精度の変動の様子から、継続時間ごとに最適なパラメータを決定した。

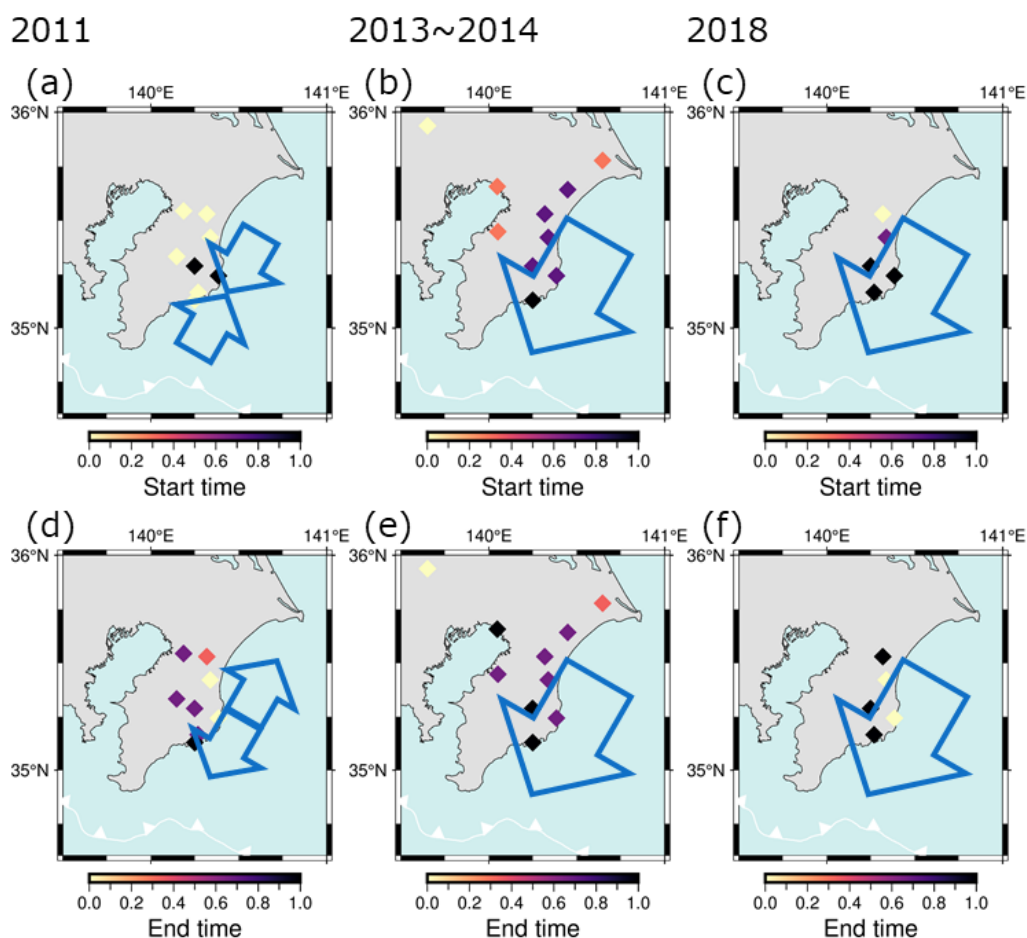
次に、数値実験の結果を踏まえて、1日サンプリングGNSSデータに基づく先行研究のSSEシグナルを、ハイレートGNSSデータを用いて再検出した事例を紹介する。具体的には、東日本の相模トラフに沿った房総半島沖のフィリピン海プレート沈み込み境界で発生した、2011年、2013年～2014年、2018年のSSE(e.g., Fukuda, 2018)、さらに日本海溝に沿った茨城県南部付近の太平洋プレート沈み込み境界で発生した2016年のSSE(Nishimura, 2021)を対象とした。検出テストの結果、2011年、2013年～2014年、2018年のイベントでは、変位の方向、開始時刻、および終了時刻が先行研究とほぼ一致し、シグナルの自動検出に成功した。しかし、2016年のイベントでは、明確なシグナルを検出できなかった。これは、2011年、2013年～2014年、2018年のイベントでは最大で1 cm以上の観測点変位があったのに対し、2016年のイベントでは変位が最大でも3 mmに満たず、シグナルがノイズに対して不十分であったためと考えられる。

ハイレートGNSSデータは短いサンプリング間隔を持つため、イベントの時間発展を1日サンプリングデータより詳細にとらえることが期待される。例として、シグナルを検出できた3つのイベントについて、観測点ごと

の変曲点(開始・終了時刻)を空間的に比較し、伝播の様子を調べた。2011年のイベントでは、開始時刻の伝播と終了時刻の伝播が逆方向となる傾向があった(図a, d)一方、2013~2014年および2018年のイベントでは、開始・終了時刻ともに、おおむね同方向に伝播した(図b, e; c, f)。また、変曲点における傾きの変化率を示すデルタ値を用いて、SSEの開始時刻と終了時刻のどちらがより明瞭であったかを評価した。結果として、2011年のイベントでは開始時刻が、2018年のイベントでは終了時刻が全体としてより高いデルタ値を示した。これは、開始・終了のどちらがより急激な現象となるか、イベントによって異なる可能性を示唆する。

本研究で導入した手法は、煩雑な前処理を必要としない自動検出であるため、世界中のSSEの多様性および普遍性を比較検討するのに役立つことが期待できる。

図. 変位量が最大値の50%以上の観測点を使用。



Establishment of a “Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science” and current achievements

*Yusaku OHTA¹

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University

全地球測位システム (GNSS) は、地震や火山現象にともなう地殻変動の把握だけでなく、対流圏における水蒸気量の動態そして太陽活動やその他の地球表層現象によって生じる電離圏の時空間変動等を高い時間分解能で把握できる観測センサーである。日本では国土地理院によって観測点間隔20-30kmで1,300点を超えるGNSS観測網から構成されるGEONETが1996年以降25年を超えて運用され、地殻変動を初めとするさまざまな地球科学現象の理解に大きく貢献してきた。近年、自動運転やドローンなどの技術発展が著しい。これら技術の根幹となるナビゲーション技術はGNSSがその基盤であり、従来のメートル精度の測位に加え、搬送波位相を用いたセンチメートル精度のリアルタイムでの位置情報取得が普遍的に利用できる状況が整いつつある。これらの基準点として特に携帯電話事業者が中心となり、独自のGNSS観測網を日本全国に展開を開始している。例えばソフトバンク株式会社 (以下、ソフトバンク) では、3,300点を超える独自のGNSS観測網をすでに設置、稼働させている。Ohta and Ohzono (2022) は、これらソフトバンク独自基準点の地殻変動監視への応用可能性について検討を行い、日座標値の推定値からおおむねGEONETと同等の性能で地殻変動を捉えられる可能性があることを指摘した。これらの成果を受けて、東北大学大学院理学研究科では、より幅広い地球科学分野へのソフトバンク独自基準点の利活用を目的としたコンソーシアム (Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science, 略称: CSESS) を2022年8月にソフトバンク株式会社およびALES株式会社の協力を得て設立した。参画機関は2024年8月現在、東北大学大学院理学研究科を代表機関として、国内の大学・国立研究開発法人など23機関28部局およびソフトバンク株式会社、ALES株式会社等民間企業3社である。現在、CSESSの枠組みを通じ、ソフトバンク独自基準点の全観測点の観測データが専用線経由で東北大学大学院理学研究科に送信・蓄積され、コンソーシアム加盟機関が各研究テーマに沿ってデータを活用できる状況となっている。さらに、それら観測データのルーチン的な日座標値推定が行われ、GNSSデータ解析を行わずとも超稠密GNSS観測網の成果を活用できる。発表では、これら日々の座標値推定結果にもとづくソフトバンク独自基準点の精度評価結果を示すとともに、これまでにCSESSの枠組みで得られた成果についてレビューを行う。

謝辞: 本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社およびALES株式会社より提供を受けたものを使用しました。

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

📅 Tue. Oct 22, 2024 3:15 PM - 4:45 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 6:15 AM - 7:45 AM UTC | 🏢 Room C
Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S03] PM-2

chairperson: Takeshi Iinuma (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)),
Yusuke Yokota

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S03-05] The Spatiotemporal Evolution of Afterslip Following the Largest Foreshock (M 7.3) of the 2011 Tohoku Earthquake Based on OBPR Data

*Kyosuke Hirata¹, Ryota Hino¹, Taisuke Yamada¹, Kosuke Minamoto¹, Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Tatsuya Kubota² (1. Tohoku University, Graduate School of Science, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S03-06] Extracting crustal uplifts during slow slip by applying MSSA to ocean bottom pressure gauge data and an oceanic model

*Toshinori SATO¹, Saki SHIBATA¹, Koichi MURATA^{1,2}, Norihisa USUI³, Hajime SHIOBARA⁴, Tomoaki YAMADA⁴, Masanao SHINOHARA⁴ (1. Chiba Univ., 2. Oyo Corp., 3. MRI, 4. ERI, Univ. of Tokyo)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S03-07] Investigation of offshore SSEs detected in SGO-A

*Yusuke YOKOTA¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura², Koya NAGAE² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S03-08] Utilization of Unmanned Surface Vehicles in GNSS-Acoustic Observation Using to Detect the Seafloor Crustal Deformation

*Takeshi IINUMA¹, Motoyuki Kido², Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta³, Fumiaki Tomita², Ryota Hino³, Hiroaki Takahashi⁴, Takane Hori¹, Yusuke Yokota⁵ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S03-09] Estimation of Fault Interaction in Eastern Taiwan Using InSAR and GNSS: Case of the 2022 Yuli Earthquake

*Yuri Ishimaru¹, Youichiro Takada², Kuo-En Ching³, Wu-Lung Chang⁴ (1. Hokkaido University, Graduate School of Science, 2. Hokkaido University, Faculty of Science, 3. National Cheng Kung University, 4. National Central University)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S03-10] 2D collision models with visco-elasto-plastic rheology applied to WNW-ESE shortening along the Niigata-Kobe Tectonic zone

*Erika Moreno¹, Shoichi Yoshioka^{1,3}, Vlad Constantin Manea², Marina Manea², Nobuaki Suenaga¹ (1. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 2. Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 3. Department of Planetology, Faculty of Science, Kobe University,)

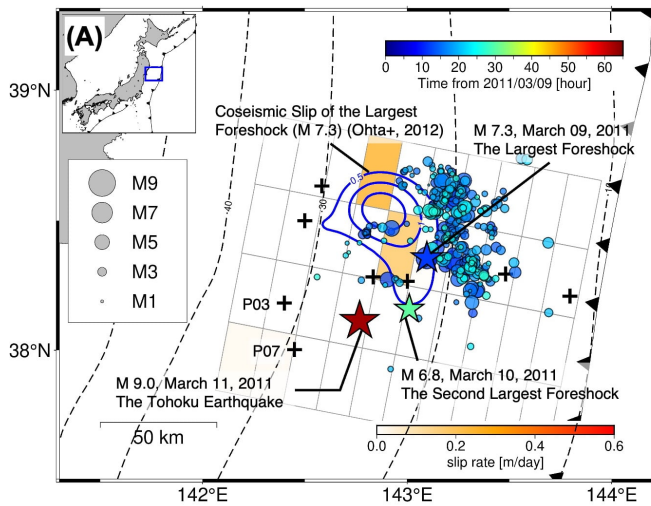
The Spatiotemporal Evolution of Afterslip Following the Largest Foreshock (M 7.3) of the 2011 Tohoku Earthquake Based on OBPR Data

*Kyosuke Hirata¹, Ryota Hino¹, Taisuke Yamada¹, Kosuke Minamoto¹, Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Tatsuya Kubota²

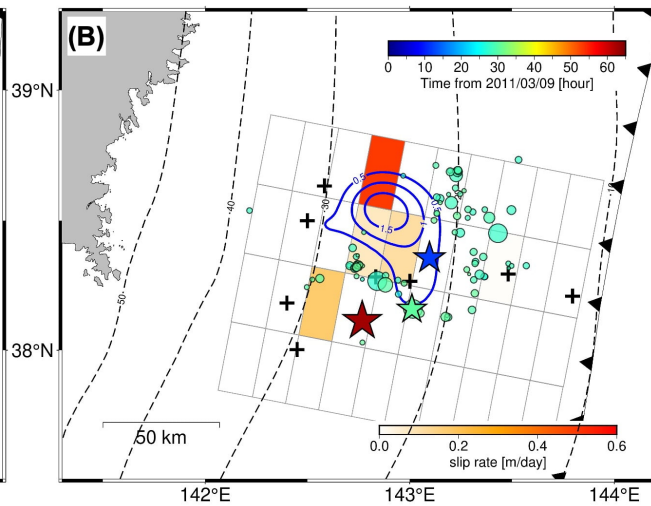
1. Tohoku University, Graduate School of Science, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本研究では、2011年3月11日14:46 (JST) 頃に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の最大前震 (Mw 7.3; M9本震より51時間前に発生) (前震#1) の発生から本震に至る非地震性すべりの時空間発展について、海底水圧計 (OBPR) データの再解析を通して、より詳細に明らかにする。Ohta+ (2012)は、陸上GNSS及びOBPRのデータを使用し、すべりの空間分布が時間的に変化しないことを仮定し、前震#1からM9本震までの地表面変位からすべり分布を推定した。しかし、前震#1からM9本震に至るまでに、本震の約32時間前にMw 6.5の2番目に大きな前震 (前震#2) が発生しており、この地震が本震に至る非地震性すべりの時空間発展に影響を及ぼしている可能性がある。OBPRデータには、時定数及び振幅が地殻変動成分とよく似た非潮汐海洋変動成分 (海洋ノイズ) が含まれており、地殻変動検出を行うにあたっては海洋ノイズとの分離が重要となる。本研究では、日本近海で高空間解像度を有する海洋モデルであるMRI.COM (Hirose+, 2020) の出力と主成分分析を使用して非潮汐海洋変動起源のノイズ除去を試みた。その結果、使用した8観測点においてノイズレベル (1σ) は1 cm (水圧変動に換算して ~ 1 hPa) 未満となり、OBPRデータ上での地殻変動成分のS/N比が向上した。処理後のOBPRの記録を詳しくみると、前震#1の震央に近い観測点 (P09) では、前震#1直後からその余効すべりによると考えられる変動が見られているのに対して、震央から離れた他の観測点での顕著な変動は9-13時間程度遅れて始まっており、前震#1後の余効すべりの範囲が時空間的に変化していることが示唆される。こうした特徴を示すOBPRデータからすべりの時空間分布の推定を試みた。観測データが8観測点での上下変動成分のみと少ないことから、非負拘束付きスパースモデリング (LASSO) を使用してインバージョン解析を行った。前震#1発生後、地震時すべりを起こした領域 (M9本震震源北側) 付近で非地震性すべりが発生し、遅れてM9本震震源のダウンディップ側で非地震性すべりが加速し、その後M9本震に至るまで本震震源付近ですべりが継続するというように、すべりの範囲が経過時間とともに遷移していることを明らかにすることができた。M9震源ダウンディップ側の非地震性すべり域では、すべりの加速に同期するような群発地震活動も見られた。

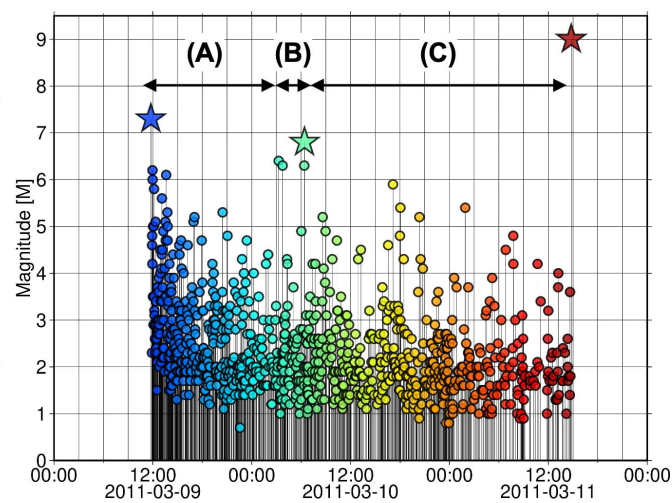
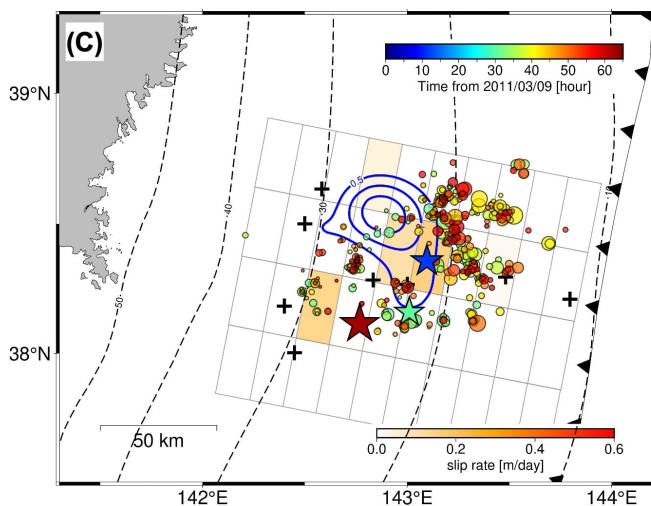
2011-03-09 11:00:00 -> 2011-03-10 03:00:00



2011-03-10 03:00:00 -> 2011-03-10 07:00:00



2011-03-10 07:00:00 -> 2011-03-11 14:00:00



Extracting crustal uplifts during slow slip by applying MSSA to ocean bottom pressure gauge data and an oceanic model

*Toshinori SATO¹, Saki SHIBATA¹, Koichi MURATA^{1,2}, Norihisa USUI³, Hajime SHIOBARA⁴, Tomoaki YAMADA⁴, Masanao SHINOHARA⁴

1. Chiba Univ., 2. Oyo Corp., 3. MRI, 4. ERI, Univ. of Tokyo

1. はじめに

海底圧力計（OBP）は、海底の上下変動を連続的に観測でき、スロースリップ（SSE）などのゆっくりした変動を捉えることに有効である。しかし、OBPの観測データには、地殻変動以外に、海洋潮汐、海洋変動、季節変動、機器の永年変化（ドリフト）などが記録されていて、これらを適切に取り除く必要がある。海洋変動を取り除くため、これまでは、複数の観測点の平均を差し引く方法（e.g. Ito, et al, Tectonophysics, 2013）、深さが同様の観測点のデータの差を取る方法（e.g. Fredrickson, et al, JGR, 2019）などが行われてきた。我々は、観測データと海洋モデルをマルチチャンネル特異スペクトル解析（MSSA）を用いて成分に分解し、相関のよい成分のみを用いて観測データから海洋変動を取り除くという方法を開発した（清水、他、JpGU, 2021）。これは、海洋モデルの不完全さを取り除き、より観測データから地殻変動を取り出しやすくする方法である。本研究では、2018年の房総SSEにこの方法を適用し、従来の方法との比較等を行った。

2. 方法

解析に使用した海洋モデルは、気象庁気象研究所が開発した日本沿岸海洋再解析データセット

「MOVE/MRI.COM-JPN Dataset」（広瀬、他、2020）である。OBPデータは房総沖SSE領域で観測した4地点のデータ（2016~2018）を使用した。このデータには、2018年のSSEが含まれている。

OBPデータからは、潮汐モデル「Baytap08」（Tamura et al. 1991）を用いて潮汐成分を取り除き、直線フィットでトレンドを取り除いた。潮汐とトレンドを除いたデータと海洋モデルを用いてMSSAを行い、成分ごとにデータとモデルの相関を出した。その結果、負の相関が高い成分とほぼ同じ周期を持つ正の相関が高い成分が対で存在することがわかった。これは、海洋モデルがその周期を再現しているが、振幅までは正確に再現できていないと考えられる。そこで、海洋モデルの再合成では、正の相関が高い成分を足し、負の相関が高い成分を引くことを行った。これは、観測データによって海洋モデルを補正したことになる。この再合成モデルを潮汐とトレンドを除いた観測データから差し引いた。その後、SSEによる変動や季節変動等を見積もるため、パラメトリックモデル（Sato et al, GRL 2017）を当てはめ、SSEによる変動の抽出を試みた。

3. 結果

再合成した海洋モデルは、元の海洋モデルと比べると、一見大きな違いはないように見られたが（図1(c)、(d)）、潮汐とトレンドを除いた観測データから再合成した海洋モデルを差し引いたデータ（図1(f)）は、単純に海洋モデルをそのまま差し引いた場合（図1(e)）より、変動がよりなめらかになった。パラメトリックモデルを当てはめて推定した2018年の房総SSEの変動は、3点で隆起、1点で沈降という結果となり、SSEのすべり領域を考えると妥当な結果である。従来の深さが同様の観測点のデータの差を取る方法と比較すると、変動の傾向（隆起か沈降か）はほぼ同様だが、変動の誤差は、今回の方法では5 mm程度、従来の方法では14 mm程度と、今回の方法のほうがよりよく変動を求められることがわかった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、海洋エンジニアリング（株）「第三開洋丸」、「第五開洋丸」を使用させて頂きました。各船長以下、乗組員の方々に感謝します。本研究は文部科学省の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援および科研費(25287109, 23K03541)の補助を受けました。

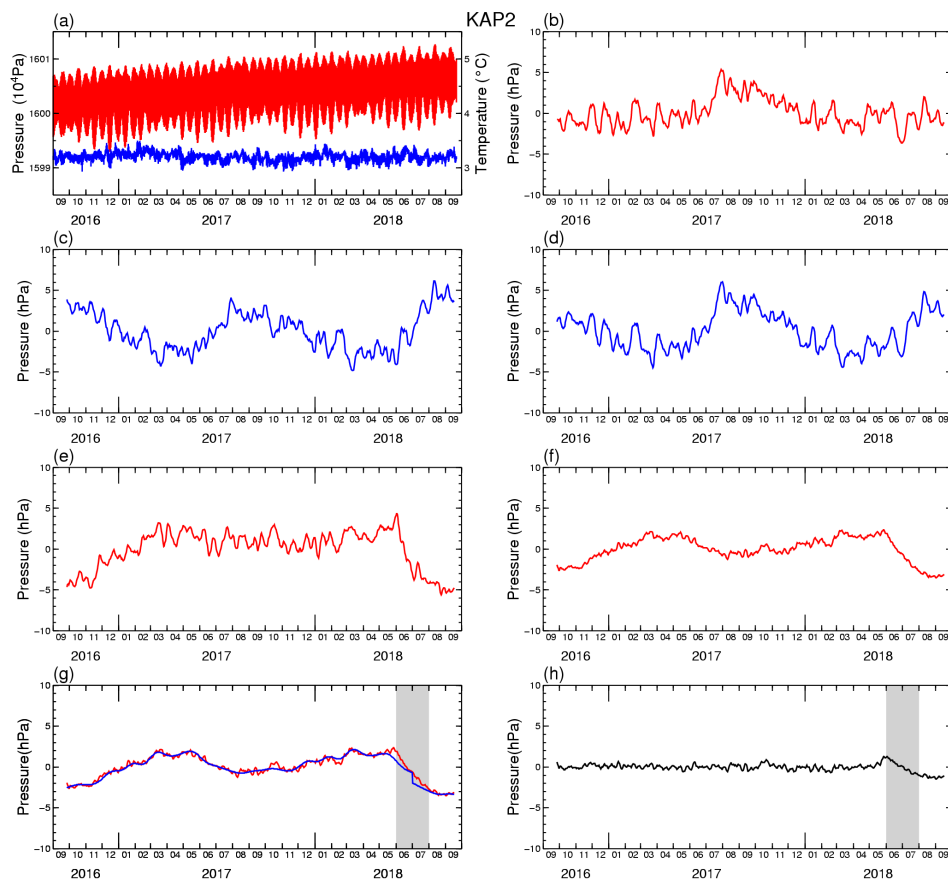


図1 (a)OBP観測点(KAP2)の圧力(赤)と温度(青)。(b)潮汐成分を除いた圧力の7日移動平均。(c)海洋モデルの7日移動平均。(d)再合成した海洋モデル。(e)潮汐成分を除いた圧力から海洋モデルそのものを差し引いたもの。(f)潮汐成分を除いた圧力から再合成した海洋モデルを差し引いたもの。(g)パラメトリックモデルの当てはめ。赤線は(f)の結果、青線は当てはめたパラメトリックモデル。グレーはSSE発生期間。(h)SSEによる変動。(g)の赤線から青線のSSEによるジャンプを除いたものを差し引いた結果。

Investigation of offshore SSEs detected in SGO-A

*Yusuke YOKOTA¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura², Koya NAGAE²

1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

これまで、海上保安庁のGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測網SGO-Aのデータは、海底局、海上局の機器バイアスによる影響を受けていた。この機器バイアスを評価し、補正するために、東京大学、JAMSTECにおいて水槽実験が実施された（中村ほか, 2023, 海洋情報部研究報告; Yoshizumi et al., 2024, JASA; 永江ほか, 2024, 超音波研究会）。これらの結果に基づくバイアス補正法, Acoustic Ambiguity Reduction (AAR) 法（Yokota et al., 2024, EPS）が開発され、すべての観測点での上下の位置決定精度、異なる種類の海底局が混じって設置されている観測点・観測時期の水平・上下の位置決定精度が改善された。

SGO-A観測網では南海トラフ浅部においてスロースリップイベント（SSE）が検知されている（Yokota & Ishikawa, 2020, Sci Adv）。本発表では、最新のデータのGARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）による解析結果から浅部SSEの活動について調査し報告する。

ここでは、Yokota & Ishikawa (2020, Sci Adv)（以下、YI）のSSE検知と同様の手法を南海トラフに設置された15観測点と房総沖に設置された観測点を合わせた16観測点の2013年から2023年までのデータの水平動の時系列に対して適用する。最小二乗法で時系列に対する折れ線関数と直線をそれぞれ推定し、c-AICが最小となるケースを解とする。イベントの向きはすべり欠損の方向にならないものとした。YIではSSEの信号の長さを1年と仮定して推定していたが、この推定では、信号の長さは可変とした。

結果として、YIにおいて強い信号として検知された4地点の信号が今回も検出された。一方で、当時のデータ・期間では検知されなかった信号がいくつか検出された。たとえば、房総沖に設置された観測点ではOzawa et al. (2019, EPS)で推定された房総沖のSSEと同時期に信号が検出されている。

上下の位置決定精度が向上したことで上下動の時系列に対しても同様にイベントの探索を行うことができるようになった。この手法とデータ、期間（2013-2023年）においては5 cm程度の上下動を伴うイベントは検出されなかった。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所の公募研究ERI JURP 2024-Y-KOBO12，セコム科学技術財団，JSPS科研費 学術変革A” Slow to Fast地震学” のJP21H05200により実施されています。

Utilization of Unmanned Surface Vehicles in GNSS-Acoustic Observation Using to Detect the Seafloor Crustal Deformation

*Takeshi IINUMA¹, Motoyuki Kido², Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta³, Fumiaki Tomita², Ryota Hino³, Hiroaki Takahashi⁴, Takane Hori¹, Yusuke Yokota⁵

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

2018年に開発に着手して以来、海洋研究開発機構と東北大学は無人観測機ウェーブグライダーを用いてGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（以下、GNSS-A観測）を行うシステムを運用してきた。2019年7月に実海域での試験観測を実施したのち、2020年度以降は年二回、各運航で多数の観測点（7～18点）を巡回してGNSS-A観測を行っており、本予稿執筆時点までに計11回の長期（20～80日程度）運航を終えている。これらの運航において収録されたデータを解析して得られた地殻変動場については、富田・他（本大会）により報告される。本講演ではウェーブグライダーを用いてGNSS-A観測を実施してきたことによって得られた、海上無人機の活用及び運航に関する知見を報告するとともに、今後計画されている取り組みについて紹介する。ウェーブグライダーはLiquid Robotics社（米）が開発した、自動自律航行する海上無人機であり、波浪による海水の上下運動の大きさが海面と海中とで違うことを利用して推進力を得る。海面に位置するフロート部の太陽光パネルと二次電池からの電力供給により、航行制御や陸上との衛星通信、観測機器の作動及びデータ収録などが行われる。燃料の消費を要しないため、太陽光パネルによる発電量が十分な時期であれば、長期間の航行及びGNSS-A観測の実施が可能である。また、ラダーの角度を海流の向きや機体の進行方向を踏まえて調節して、設定した航路をたどれるようにしたり、船舶自動識別装置を搭載した船舶と接近した場合には、その針路に応じて衝突を回避したりといった自律制御がなされる。これまで、根室半島沖～茨城県沖の観測点を網羅する1～2か月程度の観測を春～夏に、青森県沖～宮城県沖の観測点を重点的に巡回する1か月弱の観測を夏～秋にそれぞれ実施してきた。他船との接触や内部機器の深刻な不具合のような、機体の亡失や大破につながる大きな事故やGNSS-A観測が実施不能となるトラブル等を起こすことなく航行及び観測を実施できている。とはいえ、海流の影響で設定した通りの航路をたどれないことがあったり、太陽光パネルによる発電量が十分ではないために観測時間を短縮せざるを得ないことがあったりと、機体の性能による運用の限界も明らかとなってきた。海流についていえば、ウェーブグライダーの航行速度（対水速度）は補助スラスタを最大出力で稼働させたとしても2ノット程度であり、黒潮続流や津軽暖流の中心域においては、設定どおりの航路を期待した速度で航行するのが難しい。特に、GNSS-A観測点における移動観測（観測点の水深を直径とする円を航路として設定）は、高精度の測位に不可欠であるものの、その実施の可否は流速による制限を大きく受けてしまうことになる。また、移動観測の実施可否は、補助スラスタ使用時には消費電力が非使用時の2～4倍にもなるため、電力残量及び発電量にも依存する。これまでの経験からすると10月下旬以降の日射量は不十分であることが多く、運用可能時期は限定的である。一方、無人機によるGNSS-A観測の実施には、費用対効果の面や荒天耐性の面で、船舶に比して優れたところは数多く存在する。現在、ウェーブグライダーの他にも、セイルドローンやブルーボトルといった風力によって航行する無人機が存在し様々な海域観測に用いられている。大型の機体を用いるならば、発電量を増やしたり航行速度をあげたりすることが可能となるが、日本国内においては、無人船舶と位置づけられるか漂流物とみなされるかが、機体の大きさに依存する。無人船舶扱いとなると運用面でのコストが増大し、費用対効果の面での利点を損ないかねない。本講演では、それらのうちどのような機体がGNSS-A観測にとって望ましいのかについて、ウェーブグライダーを用いて重ねてきた実績をもとに考察するとともに、開発途上にある新たな機体についても紹介する。謝辞：本研究の一部はJSPS科研費JP19H05596, JP20KK0097, JP23H01262及びJP24H00258の助成を受けて行われた。また、ウェーブグライダーの投入及び回収の一部は、海洋研究開発機構所内利用航海（MR20-E02, 「みらい」）及び東京大学大気海洋研究所の共同利用研究航海

（KS-19-12, KS-20-16, KS-21-5, KS-21-25, KS-23-4, KS-23-14, KS-24-7及びKS-24-20, すべて「新青丸」）にて行われた（KS-24-20については、行われる見込み）。記して感謝を表す。

Estimation of Fault Interaction in Eastern Taiwan Using InSAR and GNSS: Case of the 2022 Yuli Earthquake

*Yuri Ishimaru¹, Youichiro Takada², Kuo-En Ching³, Wu-Lung Chang⁴

1. Hokkaido University, Graduate School of Science, 2. Hokkaido University, Faculty of Science, 3. National Cheng Kung University, 4. National Central University

台湾東部はフィリピン海プレートとユーラシアプレートの衝突境界に位置し、世界で最も急速な造山運動が進行する地域の一つである (Chai, 1972; Takada et al., 2007). 衝突の境界には、台東縦谷断層 (Longitudinal Valley Fault, LVF) と中央山脈断層 (Central Range Fault, CRF) の2つの活断層が並行して存在するが (Shyu et al., 2006; Lee et al., 2023), これらの断層の力学的相互作用はほとんど解明されていない. 本研究では、まず2022年3月22日にLVFで発生したYuli地震 (Mw 6.7) による地殻変動をInSARとGNSSを用いて面的かつ高精度に検出し、断層面上のすべり分布を求めた. さらに、Yuli地震の断層すべりに伴うCRF上での応力変化量を計算することで、2022年9月18日にCRFで発生したChihshang地震 (Mw 7.0) への影響を調べた.

はじめに、ALOS-2のInSAR画像とGNSSデータを用いて、半無限弾性体のグリーン関数 (Okada, 1985) によるジョイントインバージョン解析を行い、Yuli地震に伴うLVF上でのすべり分布を推定した. InSAR画像の誤差は空間的に相関を持つため、共分散成分を指数関数でモデル化した (Lohman & Simons, 2005; Fukushima et al., 2005). 推定されたすべりベクトルは逆断層成分を示し、断層すべりは深さ約10 kmから30 kmの範囲に集中した. 最大すべり量は約60 cm、モーメントマグニチュードは6.8であった.

次に、Coulomb 3.3 (Toda et al., 2011) を用いて、LVFで発生したYuli地震の断層すべりに伴うCRF上のクーロン破壊関数の変化 (ΔCFF) を計算した. その結果、Chihshang地震の震源北部の主破壊域においてCFFが約0.3 MPa増加したことが明らかになった (図1). これは、Yuli地震がChihshang地震の破壊域を北側に広げる役割を担ったと解釈できる. また、この ΔCFF をCRFの長期的な応力蓄積速度で割ることで、Yuli地震がChihshang地震の発生を約50年早めた可能性を示した.

一方で、1951年にLVFで発生した台東縦谷地震や、2022年にCRFで発生したChihshang地震では、向かい合う断層面上に負の ΔCFF を引き起こす (Tang et al., 2023). このような ΔCFF の正負の違いをもたらす原因を解明するために、震源断層面でのすべり角を 90° から 0° まで系統的に変化させて ΔCFF を計算した. その結果、震源断層面でのすべり角が 90° の場合にはレシーバー断層面上の ΔCFF は正の値となるが、 0° に近づくにつれて負の ΔCFF が現れることが明らかになった. LVFとCRFの位置関係はハの字型に向かい合っているため、LVFで発生した地震がCRF上にもたらす応力変化だけでなく、逆の場合についても同様の結果が得られる.

さらに、この地域の過去の地震記録を調べた結果、上記で明らかにしたように、震源断層のすべり角の違いによって、他方の断層面上において地震活動が活発化・静穏化する事例を見出した. 以上より、台湾東部の2つの断層での地震発生間隔は、他方の断層で発生する地震によって大きく変化し、その影響の大きさは断層のすべり角に強く依存すると結論付けた.

謝辞：本研究は東京大学地震研究所共同利用 (2024-B-02) の援助をうけた. 本研究で用いた PALSAR-2データはPIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) とPIXELとの共同研究契約に基づきJAXAから提供された. PALSAR-2データの所有権はJAXAにある.

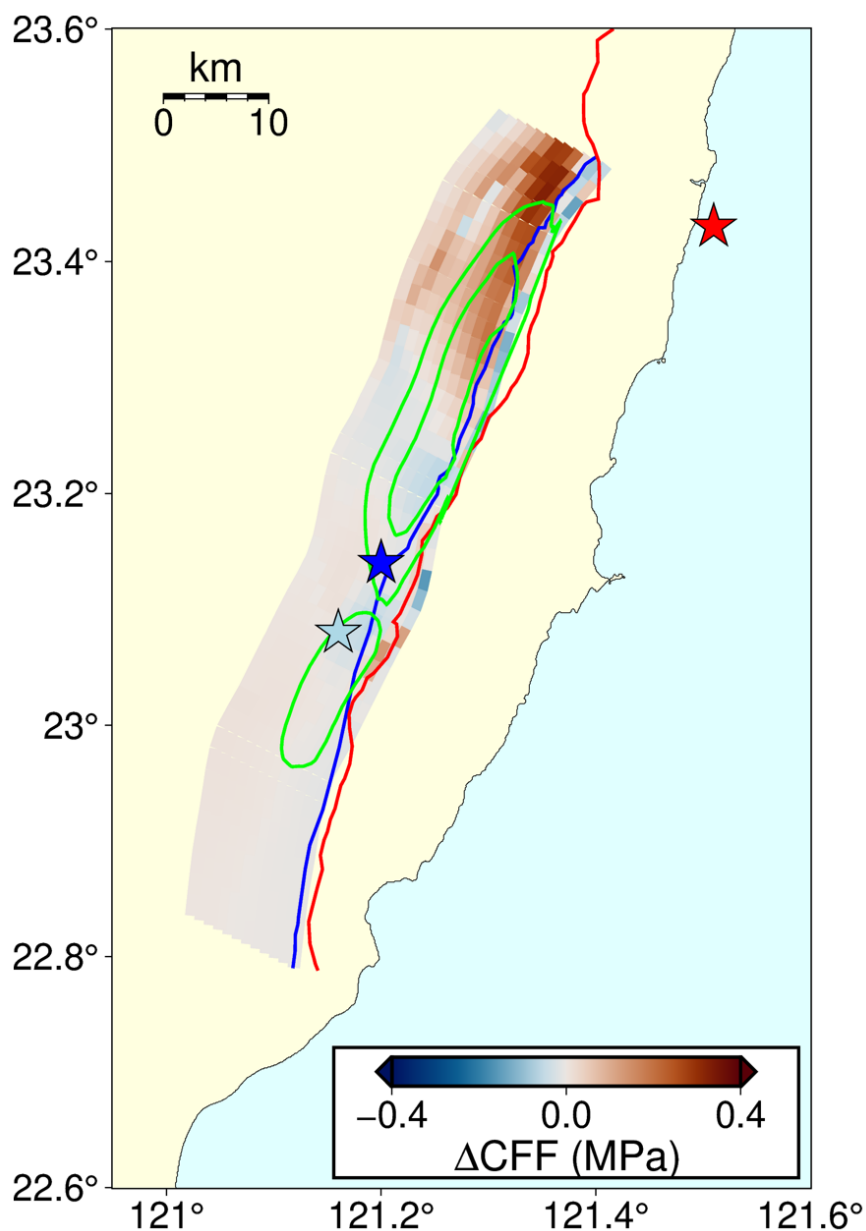


図1. 2022年Yuli地震に伴うCRF上の ΔCFF . CRFの各パッチのすべり角は, Tang et al. (2023) によって推定されたChihshang地震時のすべり角を用いた. 見かけの摩擦係数 μ' は0.4とした (Hsu et al., 2010; Tang et al., 2023). 赤, 水色, 青の星はそれぞれYuli地震, Guanshan地震, Chihshang地震の震源を示す. 赤線と青線はそれぞれLVFとCRFの地表トレースを示す (Styron et al., 2010). 緑色の等値線は, Tang et al. (2023) によって推定されたGuanshan地震 (南側, 50 cm間隔) とChihshang地震 (北側, 100 cm間隔) の地震時すべり分布を示す. ΔCFF はChihshang地震の主破壊域北部で0.3 MPaに達する.

2D collision models with visco-elasto-plastic rheology applied to WNW-ESE shortening along the Niigata-Kobe Tectonic zone

*Erika Moreno¹, Shoichi Yoshioka^{1,3}, Vlad Constantin Manea², Marina Manea², Nobuaki Suenaga¹

1. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 2. Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 3. Department of Planetology, Faculty of Science, Kobe University,

Niigata-Kobe Tectonic Zone (NKTZ) is experiencing an unusual spatially non-uniform strain rate concentration and a continuous shortening in the WNW-ESE direction whose amount is decreasing from NE toward SW direction. The NE part of the NKTZ is characterized by the presence of a 6-km thick sedimentary layer. The central and SW parts of the NKTZ are strongly influenced by volcanism and the interaction between the Philippine Sea (PHS) slab and the Pacific (PAC) slab. In order to explain the observed strain concentration, previous studies used numerical simulations with a viscoelastic rheology and suggested the existence of a weak, low-viscosity layer between the upper and lower crust in the central and SW regions of the NKTZ, possible related to the presence of magmatism and fluids. However, it remains unclear how this hypothesis elucidates the highest surface concentration observed in the NE part of the NKTZ. In this study, we employ two-dimensional high-resolution thermomechanical numerical models with visco-elasto-plastic rheology under a horizontal compressive regime. Our objective is to analyze whether surface high-strain rate along the NKTZ could be explained by the combination of a thick sedimentary layer with a low-viscosity layer located below the upper continental crust and presence of hydrated crust and, magmatic intrusions. We attempt to predict temperature, viscosity, surface strain rate and surface deformation, and three numerical setups were constructed across NE, central and SW parts of the NKTZ, aligned with the maximum compressive direction of principal strain to analyze the pattern of WNW-ESE shortening along the NKTZ: Model 1 incorporates a hydrated layer with low-viscosity between the upper and lower crust (Profile 1, SW part of the NKTZ). Model 2 incorporates a hot hydrated mantle plume intrusion below the lower crust (Profile 2, Central part of the NKTZ). We prescribed initial thermal anomaly ($\Delta T=150^\circ\text{C}$) with a spherical shape (radius of 15 km). Finally, Model 3 (Profile 3, NE part of the NKTZ) incorporates a 6-km low density mechanically weak sedimentary layer (density= 2200 kg/m^3 , Cohesion: 1×10^4 , viscosity = 10^{17} Pa s). Lateral boundary conditions are used from plate motion velocities that represent the average from 1997-2022 (Kawabata, 2024), and increase from SW to NE across the NKTZ, and the total duration of the time evolution considered is 3 Myr. The numerical results for Model 1 with a hydrated crust between the upper and lower crust with a viscosity $< 10^{18}\text{ Pa s}$, show strain concentration at the model surface with values ranging from $0-2 \times 10^{-7}\text{ /yr}$. Model 2 in the presence of magmatic intrusion with a viscosity of 10^{16} Pa s shows an increased strain concentration at the model surface with values ranging from $2-5 \times 10^{-7}\text{ /yr}$. Finally, Model 3 in the presence of a sedimentary layer shows the highest strain concentration at the model surface with values of $7-9 \times 10^{-7}\text{ /yr}$. The predicted principal horizontal strain directions coincide well with the observed directions of maximum principal strain direction in WNW-ESE. Our study shows that the high-strain concentration at the Earth's surface in the NE part of the NKTZ is strongly related to the presence of low-viscosity layers ($< 1 \times 10^{19}\text{ Pa s}$) due to the presence of fluids, magmatism intrusion released from the subducting slabs, and mechanically weak sediments.

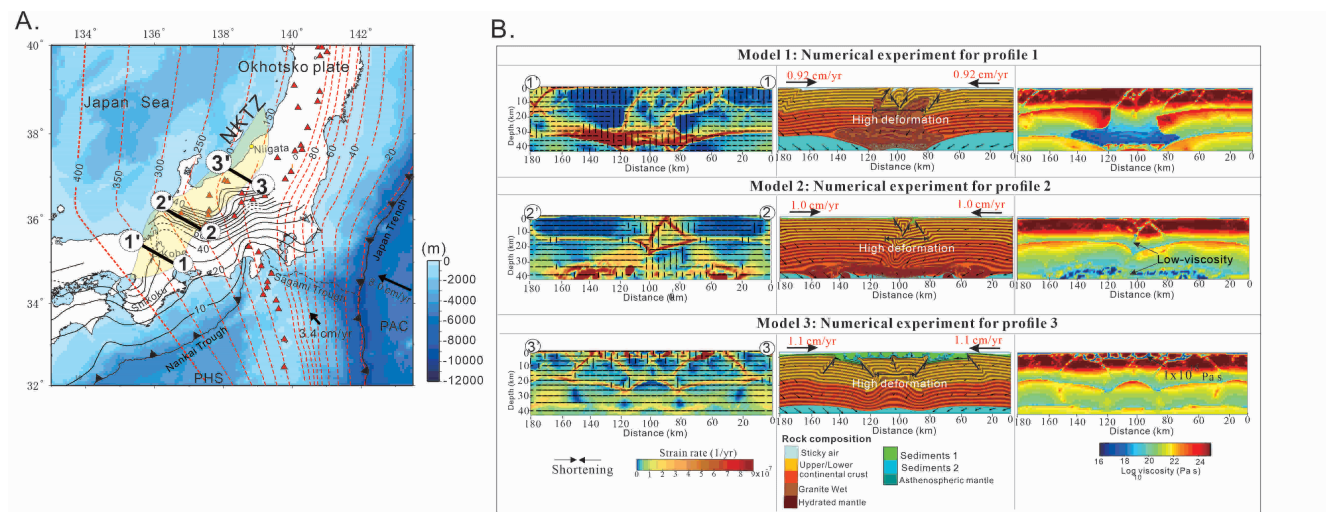


Figure 1. **A.** Map with the region and study profiles (Hirose et al., 2008). **B.** Results of 2D visco-elasto-plastic models in terms of strain rate, rock composition and viscosity for profiles 1, 2 and 3 with respective plate motion velocities taken from Kawabata (2024). The result shows strain concentration at the model surface and the horizontal directions of the strain rate on the surface of the numerical model. Note the strain and fault concentration where the low-viscosity layer is located. In the lower crust, the vertically located bars indicate extension.