

Thu. Nov 2, 2023

Room B | Regular session : S19. Seismology, general contribution

9:15 AM - 9:45 AM JST | 12:15 AM - 12:45 AM UTC | Room B F201

[S19] AM-1

chairperson:Hisahiko KUBO

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

[S19-01] Attempt to understand the use of NIED MOWLAS data (2019-2022) based on data DOI citation information*Hisahiko KUBO¹, Katsuhiko SHIOMI¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S19-02] Analysis of T-phases from the 2022 Tonga volcanic eruptions recorded by MERMAIDS*SATOSHI MURAKAMI¹, JUNKO YOSHIMITSU², Joel D SIMON³, Yong YU⁴ (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Princeton University, 4. Southern University of Science and Technology)

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

9:45 AM - 10:30 AM JST | 12:45 AM - 1:30 AM UTC | Room B F201

[S21] AM-1

chairperson:Takeo Ishibe

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

[S21-01] Machine learning-based hypocenter determination using seismic intensity data*Takeo ISHIBE^{1,2}, Yoko Ogawa³, Hiroto Tanaka³, Ryota Kiuchi³, Tsutomu Takahama³, Kazuo Sakamoto³, Yusuke Saijo³, Mitsuko Furumura¹, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP) , 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. Kozo Keikaku Engineering Inc.)

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

[S21-02] Deep Learning Estimating of Epicentral Distance for Earthquake Early Warning Systems*Shunta NODA¹ (1. Railway Technical Research Institute)

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

[S21-03] Application of Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building Using "Realistic" Synthetic Data*Fan Yu¹, Jamali Hondori Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. the University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

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

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | Room B F201

[S21] AM-2

chairperson: Keisuke Yano, Yusuke Tanaka (Tohoku University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S21-04] Application of Watanabe's Bayesian information criterion to the GNSS-A seafloor geodetic observation

*Shun-ichi WATANEBE¹, Tadashi Ishikawa¹, Yuto Nakamura¹, Koya Nagae¹, Yusuke Yokota² (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S21-05] Identifying crustal blocks using objective clustering of GNSS velocities via parallel translation and Euler vector

*Keisuke YANO¹, Atsushi Takahashi², Masayuki Kano³ (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Center for Advance Intelligence Project, RIKEN, 3. Graduate School of Science, Tohoku University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S21-06] Trial application of machine-learning-based phase detection to slow slip event signal in GNSS displacement time series

*Yusuke TANAKA¹, Masayuki Kano¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S21-07] Challenges of applying deep learning to InSAR data for the purpose of detecting small deformation around active faults and volcanoes in Japan

*Yo FUKUSHIMA¹ (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University)

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

[S21-08] Development of an Interpretable Volcanic Earthquake Classification Method Using Transformer Encoders

*Yugo Suzuki¹, Ahji Kim¹, Masami Yamasaki¹ (1. Yokohama City University)

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

1:15 PM - 2:45 PM JST | 4:15 AM - 5:45 AM UTC | Room B F201

[S21] PM-1

chairperson: Ryoichiro Agata (JAMSTEC), Shinya Katoh

1:15 PM - 1:35 PM JST | 4:15 AM - 4:35 AM UTC

[S21-09] [Invited] Theoretical challenges to understand the principles of deep learning and artificial intelligence

*Masaaki Imaizumi¹ (1. Graduate School of Arts and Science, the University of Tokyo)

1:35 PM - 1:55 PM JST | 4:35 AM - 4:55 AM UTC

[S21-10] [Invited] Potential pathway to understanding earthquakes using a data-driven approach: learning from other informatics applications

*Stephen Wu¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

1:55 PM - 2:15 PM JST | 4:55 AM - 5:15 AM UTC

[S21-11] [Invited] Deep-Learning Seismology: Current Status and Expectations for Future Developments

*Kazuro HIRAHARA^{1,2} (1. Riken Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University)

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

[S21-12] Simultaneous estimation of fault geometry and slip distribution from crustal deformation data using deep operator learning

*Tomohisa OKAZAKI¹, Kazuro Hirahara¹, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project)

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

[S21-13] Physics-Informed Neural Networks for monitoring slow slip events in a spring-slider system

*Rikuto Fukushima¹, Masayuki Kano², Kazuro Hirahara^{3,4} (1. Faculty of Science, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. RIKEN, 4. Kagawa University)

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

3:00 PM - 4:15 PM JST | 6:00 AM - 7:15 AM UTC | Room B F201

[S21] PM-2

chairperson:Kodai Sagae, Kosuke Morikawa(Osaka University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S21-14] Two-stage approach for transfer learning of seismic-phase detection model to a small sample size data via multiple clustering

*Tomoki Tokuda¹, Hiromichi Nagao^{1,2} (1. ERI, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

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

[S21-15] ETN Detector by Convolution Neural Network Using All S-net Stations

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

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

[S21-16] Development of a method for determining the hypocenter of tectonic tremors using Score-CAM

*Amane Sugii¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi² (1. Kanazawa University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S21-17] Self-Excited Detection Probability: Applications to Estimating Time-Variant b-Value Functions Immediately After Main Shocks

*Kosuke Morikawa¹, Hiromichi Nagao², Naoshi Hirata^{3,2} (1. Osaka University, 2. Univ. of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S21-18] Detection of changes in global background and clustering seismicity

*Jiancang ZHUANG^{1,2}, Ziyao Xiong³ (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI, 3. Institute of Geology, China Earthquake Administration)

Room B | Regular session : S19. Seismology, general contribution

🏠 Thu. Nov 2, 2023 9:15 AM - 9:45 AM JST | Thu. Nov 2, 2023 12:15 AM - 12:45 AM UTC | 🏠 Room B F201

[S19] AM-1

chairperson:Hisahiko KUBO

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

[S19-01] Attempt to understand the use of NIED MOWLAS data (2019-2022) based on data DOI citation information

*Hisahiko KUBO¹, Katsuhiko SHIOMI¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S19-02] Analysis of T-phases from the 2022 Tonga volcanic eruptions recorded by MERMAIDS

*SATOSHI MURAKAMI¹, JUNKO YOSHIMITSU², Joel D SIMON³, Yong YU⁴ (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Princeton University, 4. Southern University of Science and Technology)

Attempt to understand the use of NIED MOWLAS data (2019-2022) based on data DOI citation information

*Hisahiko KUBO¹, Katsuhiko SHIOMI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

データDOIとは、研究データに付与される国際的なデジタルオブジェクト識別子（DOI）のことである。防災科研では、陸海統合地震津波火山観測網MOWLASを構成する様々な観測網などで得られた観測データを公開している。これらの観測データに対して、防災科研は2019年2月以降 データDOIを順次付与しており、MOWLASなどの観測データを論文や研究発表などで使用する際にはデータDOIを引用出来るようになった。本研究では、2019年から2022年までにおけるデータDOIの引用状況を調査し、どのようにMOWLAS観測データが活用されていたのかを調べた。

文献情報には2023年4月14日時点でWeb of Scienceに収録されていたものを用いた。調査対象とした文献はScience Citation Indexに収録されているジャーナルから出版されたものとした。引用間違いは目視によって省いた。

データDOIを引用した文献の数を表す出版物数は対象期間内において全体として増加している。MOWLASを構成する各観測網（Hi-net・K-NET, KiK-net・F-net・V-net・S-net・DONET）の出版物数の合計は期間全体で160を超える。観測網ごとに見ると、最も出版物数が多いのがK-NET, KiK-netで、次にHi-net、そしてF-netが続く。K-NET, KiK-netの出版物数は年々伸びているが、H-netやF-netの出版物数は2021年から頭打ちしている傾向が見られる。ただしこの頭打ちが一時的なものかどうかはより長いスパンでの調査が必要である。出版物数の伸びに合わせて、データDOIを引用した文献の引用数である被引用数も年々増えている。上記の7観測網の期間全体での被引用数の合計は700を超える。

また出版物数をジャーナル毎に比較することを行った。出版物数が多かったジャーナルのトップ5を順に並べるとEPS、JGR Solid Earth、GJI、GRL、BSSAとなる。ジャーナルごとに各観測網の出版物数の割合が異なり、EPSはバランスよく、JGR Solid EarthやGRLではHi-net・F-netが多く、GJIやBSSAではK-NET, KiK-netが多いという傾向が見られた。

今後はデータDOIの引用情報の更なる解析を進めるとともに、定点的な調査を行っていくことが重要である。将来にわたって地震津波火山観測網を維持管理し、観測データを公開し続けるためには、観測データが広く利活用され、地震学や地震工学を始めとする研究の発展に貢献していることを客観的に証明していく必要がある。引き続き研究開発におけるMOWLASデータの活用ならびにデータDOIの適切な引用をお願いする所存である。

Analysis of T-phases from the 2022 Tonga volcanic eruptions recorded by MERMAIDs

*SATOSHI MURAKAMI¹, JUNKO YOSHIMITSU², Joel D SIMON³, Yong YU⁴

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Princeton University, 4. Southern University of Science and Technology

2022年1月15日04:14:45 (UTC) にHunga Tonga-Hunga Ha'apai火山で大規模な噴火が発生した。この最大噴火の前後の04:00-04:30 (UTC) にも複数の噴火が起きており、これらの噴火に伴って発生した地震波、大気波、気象津波がグローバル規模で観測された。このなか、近傍の海中に独自に展開しているMERMAIDにおいては、この一連の噴火で発生した水中音波が観測された。MERMAIDは、ハイドロフォンを装備した自律型フロートであり、高周波 (~1 Hz) P波から海底で変換された水中音波を観測し、その波形データを衛星通信で準リアルタイムで送信することができる。現在、地球深部構造を求めることを目的として約50台のMERMAIDが南太平洋の海中を漂流している。MERMAIDは、地震P波を準リアルタイムに自動的に送信するシステムを有する一方で、自動的に送信されなかった期間でも陸上からのリクエストにより関心のある期間のデータを切り出すための連続データも保存している。大林ら (地震学会2022年度秋季大会) はHunga Tonga噴火に焦点を当てたリクエストにより得られたMERMAIDアレイのデータを紹介した。これらのデータから、まず観測されたシグナルが同じものであるかを確認するため、各波形同士で相互相関係数を計算した。次に、この噴火による水中音波は、チリに設置されたIMSハイドロフォンアレイで観測されたデータにアレイ解析手法、beamforming fk解析を適用し、到来方向と見かけ速度を決定し、ソースの位置を推定した。最後に、Tarumi et al. (2023)のback-projection法により、衛星で観測された噴火と関連づけられた遠地地震の直達P波とMERMAIDで記録された水中音波との対応づけを行い、Tarumi et al. (2023)では確認されていない噴火の可能性について議論する。

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

📅 Thu. Nov 2, 2023 9:45 AM - 10:30 AM JST | Thu. Nov 2, 2023 12:45 AM - 1:30 AM UTC | 🏢 Room B F201

[S21] AM-1

chairperson:Takeo Ishibe

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

[S21-01] Machine learning-based hypocenter determination using seismic intensity data

*Takeo ISHIBE^{1,2}, Yoko Ogawa³, Hiroto Tanaka³, Ryota Kiuchi³, Tsutomu Takahama³, Kazuo Sakamoto³, Yusuke Saijo³, Mitsuko Furumura¹, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP) , 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. Kozo Keikaku Engineering Inc.)

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

[S21-02] Deep Learning Estimating of Epicentral Distance for Earthquake Early Warning Systems

*Shunta NODA¹ (1. Railway Technical Research Institute)

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

[S21-03] Application of Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building Using “Realistic” Synthetic Data

*Fan Yu¹, Jamali Hondori Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. the University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

Machine learning-based hypocenter determination using seismic intensity data

*Takeo ISHIBE^{1,2}, Yoko Ogawa³, Hiroto Tanaka³, Ryota Kiuchi³, Tsutomu Takahama³, Kazuo Sakamoto³, Yusuke Saijo³, Mitsuko Furumura¹, Ritsuko S. Matsu'ura¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. Kozo Keikaku Engineering Inc.

歴史地震に対しては、主に史料に記述された被害や揺れの強さから震度分布を推定し、震源位置や規模が見積もられている。それらの震源情報は歴史地震カタログとして（例えば、宇佐美・他、2013）、地震の長期評価（例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会、2022）や防災啓発などに活用されている。歴史地震の震源・規模推定には、様々な過去地震に対する震度分布の特徴に精通した熟練した技術が必要である。一方で近年、機械学習の進歩により様々な画像認識技術が確立されており、地震学分野においても画像化したアナログ波形記録の読み取り（Furumura *et al.*, 2023）や微動検出（Kaneko *et al.*, 2021）、地震動予測の高度化（Kubo *et al.*, 2020）など広く活用されつつある。震度分布に基づく震源推定においても、画像認識技術を用いて、画像化した震度分布データ（震度分布画像）から震源情報を推定できる可能性がある。そこで本研究では、中国・四国地域を対象として、震度分布画像からの震源位置ならびに規模の推定を試みた。

実地震については、中国・四国地域で1996年4月～2021年12月に発生した最大震度4以上を記録した35地震を対象とし、うち30地震を学習に、5地震を検証に用いた。表層地盤による観測点間の震度増幅の違いが機械学習に悪影響を及ぼす恐れがあるため、 V_s30 （表層30 mの平均S波速度：地震ハザードステーションの値を使用）で決まるMatsu'ura *et al.* (2020)（M2020）による震度の距離減衰式の表層地盤の項を用いて観測震度を $V_s30=300\text{m/s}$ 相当値に変換し、Simple Kriging法による空間補間から震度分布データを作成し画像化した。なお地震間の観測点密度の偏りを低減するために、1997年当時と同程度の密度になるよう観測点をサンプリングして補間を行った。観測点数の多いものは複数回サンプリングを行い、複数の震度分布画像を作成した。また、限られた期間に発生した実地震のみを学習に用いた場合、学習データの不足が予想されるため、仮想の震源と観測点を生成し、学習データの拡張を行った。仮想震源としては、震源位置ならびに規模を乱数により発生させた400地震（モーメントマグニチュード（ M_w ）4.0～7.5）とした。また仮想観測点は、1997年当時の観測点密度と同程度（ $180(\pm 30)$ ）になるよう無作為に配置し、 $V_s30=300\text{m/s}$ 相当における予測震度をM2020のVery Shallowタイプの式を用いて算出した。そこに一定のばらつきを付与し、実地震と同様に補間することで震度分布画像を作成した。また、学習データとなる震源情報は、面震源を想定し震源位置を中心とした固定サイズの円形範囲内に M_w 値を埋め込んだ画像（震源画像）とした。非ゼロ領域が震源位置、画素値が規模となるため、震源の位置と規模を同時に推定することが可能となる。

学習モデルには、画像から画像を推定するため全層畳込み層で構成されるCNNモデルを用いた。各画素の出力値を M_w 値として、真値との平均二乗誤差関数を損失関数とした。また、強制的に震度0としている海域の影響を懸念し、位置情報を考慮した推定を可能とするため、入力画像に画像座標情報を追加する位置エンコーディング（PE）を施した。実験では、仮想震源データの有無による相違、ならびに画像のPEの有無による相違についても調査した。

学習用の実地震30件分と全仮想震源データで学習したモデルを用いて検証用の実地震5地震分を対象に震源の推定を行ったところ、 $M_w5.0$ 未満の地震に対しては震源推定が困難であったが、 $M_w5.0$ 以上の地震に対しては、概ね正しい位置に震源が推定された。また、1件の地震を除いて、比較的精度良く M_w が推定された。実地震のみで学習したモデルでは、 M_w の大きな地震に対して震源を複数箇所検出する傾向が見られ、 M_w の推定値も不安定で、極端に大きな値となる場合があり、学習データに仮想震源データを加えることで誤検出の低減効果と M_w 推定値の安定効果があることが分かった。さらに、PEを行わない場合には震源の検出自体が困難となったため、PEが必須であることが分かった。今回作成した震度分布画像は生成時点で震源情報を要しており、歴史地震の震度分布画像を生成する際にも仮の震源情報を与える必要がある。そのため、仮の震源情報が含まれる誤差を震源画像にも与えておく必要がある。

謝辞：気象庁による震度データならびに防災科学技術研究所による地震ハザードステーションにおける V_s30 を使用させていただいた。ここに記して感謝申し上げます。本研究は、文部科学省による「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一環として実施された。

Deep Learning Estimating of Epicentral Distance for Earthquake Early Warning Systems

*Shunta NODA¹

1. Railway Technical Research Institute

To enhance the performance of earthquake early warning (EEW) systems that aim to issue alerts as quickly as possible, it is crucial to improve the accuracy of the epicentral distance Δ estimated via the single-station method. While the conventional method estimates Δ from the slope of the initial P-wave envelope, this study applies deep-learning techniques that can extract a variety of information from the waveform data. By analyzing approximately 20,000 records observed at Kyoshin Network (K-NET) stations in Japan, the convolutional neural network (CNN) method achieved higher accuracy than the conventional method. Increasing the data length or the number of iterations of convolution, activation and pooling layers in the typical CNN model did not significantly improve the accuracy of Δ estimation. An automatic structure search (AutoSS) technique, in which model structure and hyperparameters are randomly varied, was employed to identify models that yield higher accuracy. A typical CNN model was used as the initial structure. The models obtained through this technique showed improved accuracy with increased data length or computational cost. The models that exhibited the highest accuracy among those generated using the AutoSS technique outperformed the typical CNN model in terms of accuracy, although their computational costs were comparable. The AutoSS technique offers a significant advantage in that it allows the selection of a model that matches the computational capabilities of the hardware used for its implementation, thereby ensuring optimal computational efficiency. This demonstrates that deep-learning technologies can be used to improve the performance of EEW systems.

Application of Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building Using “Realistic” Synthetic Data

*Fan Yu¹, Jamali Hondori Ehsan², Jin-Oh Park¹

1. the University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.

Accurate interval velocity models are required for reliable depth migration of multichannel seismic reflection data. Current velocity model building methods, such as migration-based velocity analysis approaches, require a considerable amount of human interactions with several rounds of picking and model refinement which is time consuming. More advanced methods like full waveform inversion (FWI) can achieve a reasonable subsurface model in a semi-automatic manner with less user control, but their performance depends on several factors such as the accuracy of initial model, bandwidth of the seismic data, etc. We propose a method that can estimate the interval velocity models faster and more accurately by using convolutional neural networks (CNN).

The velocity model building with convolutional neural networks faces the lack of training data for various realistic problems, and one of the solutions is to use synthetic data in CNN model training. In the recently developed velocity model building tools, convolutional neural networks have proven to be effective for simple geological settings. However, in the more complex geologies such as subduction systems, CNN have a gap compared to traditional model building methods. To address this issue, we implemented a more complex synthetic model into our CNN training. The synthetic training dataset is generated by altering the “realistic” GO 3D OBS model (Górszczyk, A. and Operto, S., 2021). Our CNN model uses the residual velocity semblance panel as input data for training and the labels for each input are from the corresponding interval velocity profile at the same location. The whole dataset is split to training, validation, and test datasets.

In this study, we incorporate CNN into marine seismic data processing by using the residual velocity semblance panel and the corresponding velocity profile at each location as training data to train the CNN model. A simple pre-stack depth migration using a linear velocity helps to transform the problem to depth domain. Also, the vertical semblance profiles have a smaller data volume compared to the original shot gathers. Finally, the features of the data are easier to be learned by the CNN. Although the training requires computational resources, once the network is trained it can predict a reliable velocity model quickly.

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

🏠 Thu. Nov 2, 2023 10:45 AM - 12:00 PM JST | Thu. Nov 2, 2023 1:45 AM - 3:00 AM UTC | 🏠 Room B F201

[S21] AM-2

chairperson: Keisuke Yano, Yusuke Tanaka (Tohoku University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S21-04] Application of Watanabe's Bayesian information criterion to the GNSS-A seafloor geodetic observation

*Shun-ichi WATANEBE¹, Tadashi Ishikawa¹, Yuto Nakamura¹, Koya Nagae¹, Yusuke Yokota² (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S21-05] Identifying crustal blocks using objective clustering of GNSS velocities via parallel translation and Euler vector

*Keisuke YANO¹, Atsushi Takahashi², Masayuki Kano³ (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Center for Advance Intelligence Project, RIKEN, 3. Graduate School of Science, Tohoku University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S21-06] Trial application of machine-learning-based phase detection to slow slip event signal in GNSS displacement time series

*Yusuke TANAKA¹, Masayuki Kano¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S21-07] Challenges of applying deep learning to InSAR data for the purpose of detecting small deformation around active faults and volcanoes in Japan

*Yo FUKUSHIMA¹ (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University)

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

[S21-08] Development of an Interpretable Volcanic Earthquake Classification Method Using Transformer Encoders

*Yugo Suzuki¹, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (1. Yokohama City University)

Application of Watanabe's Bayesian information criterion to the GNSS-A seafloor geodetic observation

*Shun-ichi WATANEBE¹, Tadashi Ishikawa¹, Yuto Nakamura¹, Koya Nagae¹, Yusuke Yokota²

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

GNSS-Aによる海底地殻変動観測は、日本海溝や南海トラフ等の沈み込み帯で発生するプレート間地震のサイクルによって生じる地殻変動をモニターすることに貢献している（例えば、Spiess 1998; 渡邊 2022）。GNSS-Aにおいて海底基準点の3次元位置を精密に決定する際には、海洋擾乱による音響走時への影響を適切に推定・除去する必要がある。そこで、Watanabe et al. (2020) は観測方程式において音速擾乱に相当する項 γ を導入し、それを擾乱場と呼ばれるスカラー場から抽出されるものとして定式化した。それを実装したソフトウェアはGARPOSとして公開されている。

測定の原理上、擾乱場 Γ は一般に時刻 t 、海上局位置 P 及び海底局位置 X の関数として表現される。この定式化（GARPOSモデル）では、 $\Gamma(t, P, X)$ を何らかの関数でパラメタライズしてモデルパラメータを推定することを問題としている。既往のGARPOSでは、単純な形として Γ を P 及び X の一次関数とし、その各係数を時間方向にBスプライン関数展開することでパラメタライズしている。その上で、時間方向のラフネスを抑制する先験条件をベイズの事前分布として導入した。加えて、音響経路の似ているデータは共通の誤差項を持つという想定から、Fukahata and Wright (2008) がInSARの高分解能地殻変動データに対して適用したように、データの非ゼロ共分散項を考慮した。筆者らは、これらの統計モデルを構成するパラメータについて、周辺尤度を最大化するように選択する経験ベイズアプローチ（GARPOS、以下明示的にGARPOS-EBと言う；Watanabe et al., 2020）及びモデルパラメータとの同時事後分布を直接求めるフルベイズアプローチ（GARPOS-MCMC; Watanabe et al., in press）に基づく求解手法を提案・実装してきた。

半解析的に解が求まるGARPOS-EBは、探索範囲次第ではあるが、迅速な解析が可能かつ決定論的に解が確定するため、オペレーションフェイズで有用である。この利点は、モデルパラメータの周辺尤度がラプラス近似で求められることによって生ずる。一方、フルベイズのGARPOS-MCMCは、計算コストが比較的高くなるが、モデルの正則性や線形性を考慮する必要がないため、非線形 Γ モデルの導入による柔軟なモデルの構築や、事後分布の形状等、解の性質を精査する際に特に力を発揮する。Watanabe et al. (in press) では、GARPOS-MCMCの特徴を活かし、海洋学的により現実的と思われる音速場モデルを2つ導入した。これらの新たな Γ モデルでは、音速傾斜場についての空間分布の情報を分割しそれぞれ海面と海底に投影したものと解釈できる P の係数と X の係数を関連付けており、モデルの自由度が小さくなっている。これらのモデルによって海底局位置の解が時系列に安定し、精度が向上することが確認された。

しかしながら、それぞれのGNSS-Aデータセットに対し、与えたモデルの妥当性を定量的に検討することはできていない。実際、適切と思われるモデルはいくらでも考えられるため、どのモデルを選択すべきかについての基準がなければ、恣意的なモデル選択が行われてしまう恐れがある。そこで、本研究では事後分布が正規分布で近似できない場合にも適用可能なモデル選択基準を導入し、それぞれのデータセットに対して統計的に適切なモデルを決定する手法を開発した。具体的には、確率モデルと事前分布の適切さを与えるベイズ自由エネルギー（Good, 1965）を指標にする。このベイズ自由エネルギーの近似値を一回のMCMCサンプル列から求めることができる「広く使えるベイズ情報量規準（WBIC）」がWatanabe (2013)によって得られており、今回は、Watanabe et al. (in press) で導入した3つのモデルに対しWBIC値を求め、データセットごとに適切なモデルを選択した。その結果、東北沖の複雑な海洋場が想定されるようなケースも含め、ほとんどのデータセットでは、GARPOS-EBで用いた線形 Γ モデルよりも、自由度の低い他の2つのモデルが選ばれた。これは、今の側線配置等の観測構成では海洋場を大まかにしか解像できないことを、改めて明確に示したものとも言える。このように、モデルの適切性を定量的に評価できるようになったことは、新たなモデルの開発だけでなく観測配置の効率化においても有用である。また、各データセットについて、選ばれたモデルと、その時の海洋同化モデルやデータ品質等を比較することで、データ自体の信頼性を評価するといったことにも応用できると期待される。

Identifying crustal blocks using objective clustering of GNSS velocities via parallel translation and Euler vector

*Keisuke YANO¹, Atsushi Takahashi², Masayuki Kano³

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Center for Advance Intelligence Project, RIKEN, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

はじめに

高密度のGlobal Navigation Satellite System (GNSS)観測データの拡充により、プレート運動の様子がより明らかになってきた。例えば、Thatcher (2007, 2009)では、GNSS観測データを用いて、それまで知られていたものより多くの地殻ブロックを同定した。これらの地殻ブロックを同定することは、地震防災の評価（例えば、Syu et al., 2016）にも用いられており重要である。広く知られているように、ブロック断層モデルの結果は、地殻ブロックの選択に強く影響される（例えば、McCaffrey, 2007; Wallace et al., 2007; Floyd et al., 2010）。近年、適切な地殻ブロック構造を仮定するための客観的な同定方法が提案されている。Simpson et al. (2012), Savage and Simpson (2013a, 2013b), Takahashi et al. (2018)では、GNSS速度データの速度ベクトル空間での階層的クラスタリングを用いて、それぞれサンフランシスコ湾・モハベ砂漠・台湾における地殻ブロックの同定が行われた。また、Savage and Wells (2015), Savage (2018), Takahashi and Hashimoto (2022)では、オイラーベクトルを用いた非階層的クラスタリングを用いて、それぞれ太平洋岸北西部・西南日本・ニュージーランドにおける地殻ブロックの同定が行われた。しかしながら、速度ベクトル空間でのクラスタリングは必ずしもオイラーベクトルによる回転運動を考慮できず、一方でオイラーベクトルによるクラスタリングは階層型にする事が難しく、さらに必ずしも観測点の隣接性が考慮できない。本講演では、これらの問題点を解決すべく、地殻ブロックの新たな同定法を提案する。

データと方法

提案手法では、オイラーベクトルによる回転運動と接ベクトルの平行移動を利用する。まず、二点 P, Q のGNSSの位置座標と速度ベクトルを用いてオイラーベクトルを推定する。その推定値の当てはまりによって二点 P, Q の速度ベクトルの非類似度を定める。一方で、GNSS速度ベクトルを球面上の相異なる二点に分布する接面に平行なベクトル（接ベクトル）と見なし、この接ベクトルを移動させる「平行移動を導入し、地理的に離れた二点の速度ベクトルの非類似度を定める。ここで、この「平行移動」を用いて先行研究で提案された速度ベクトル空間でのクラスタリングを説明する事ができる。二つの非類似度の和を用いた階層クラスタリングを行うことで、平行移動と回転運動のいずれも考慮したGNSS速度ベクトルの階層クラスタリングが可能となる。本講演では、Altamimi et al. (2012)が構築したITRF2008プレートモデルおよび公開データを用いて、観測点の位置座標と速度ベクトルのみから客観的にプレートの復元を試みた。

結果と考察

提案手法による階層クラスタリングによって、既知のプレートを速度ベクトルと位置情報のみから復元できていることが確認できた。復元したプレートは、巨視的に北アメリカとユーラシア・オーストラリアグループに分かれた。また、特に後者の中にいくつかのサブブロック（ユーラシア・インド・オーストラリア）が見受けられ、プレート運動の類似度を直感的に表現することができた。

Trial application of machine-learning-based phase detection to slow slip event signal in GNSS displacement time series

*Yusuke TANAKA¹, Masayuki Kano¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University

地震学と情報科学の融合による重要な成果の一つが、地震動の高精度かつ自動化された検出である。機械学習を用いて地震波形データから地震動のシグナルを自動検出する手法はこれまでに多数考案され、日々蓄積される膨大な波形データの解析の著しい効率化に貢献している (e.g., Münchmeyer et al., 2022)。一方でGNSS時系列等の測地データも近年その量が急速に増加しており、スロースリップイベント (SSE) 等の非定常なシグナルの検出手法の開発が重ねられている (e.g., Okada et al., 2022)。しかしながら機械学習を活用した解析は途上であり、多くの手法は多数の処理手順と試行錯誤的な最適化に依存している状況である。また機械学習の活用を試みた一部の研究事例 (e.g., Xue and Freymueller, 2023) も多くは模擬データに依存しており、実データによる学習を介した手法開発はほとんど行われていない。こうした背景に基づき、本研究では西南日本の短期SSEを対象として、地震動検出の一手法であるGPD (Generalized Phase Detection, Ross et al., 2018) をGNSS時系列に応用することを試みた。西南日本はOkada et al. (2022) 等の先行研究でおよそ300近い短期SSEの検出がなされており、最も豊富な検出カタログが確立している地域である。そこで同研究の検出カタログに基づき、短期SSEのシグナルを含むGNSS日座標時系列を抽出して実データによる学習データを作成した。時系列の長さは120エポックで東西・南北成分の2チャンネル、また時間窓の中でのシグナルの位置を変化させることで見かけ上のデータ数を増加させ、約6000個のシグナルありのデータを確保した。同様にイベントを含まない場所・時期の座標時系列を抽出し、ノイズのみのデータを約22000個生成した。季節変動やトレンドの除去といった前処理は一切行わず、シグナルと様々な周期のノイズが混在した状態で、目視では判別が困難なデータとした。これらの単点の座標時系列を入力とし、時系列にSSEのシグナルを含む確率、全てノイズである確率の2個のラベルを出力とした学習を試みた。学習時の正解値は、Okada et al. (2022) でイベントの可能性が高いクラス1と判定されたものについては両者をそれぞれ1.0と0.0、可能性に劣るクラス2については0.5と0.5、ノイズのデータは0.0と1.0とした。元のGPDでは400エポックの波形時系列を入力とし、4層の畳み込みと2層の全結合層で特徴抽出と判定を行う。これに対して本研究での入力120エポックと短いため、GPDの構造に準拠しつつ2層の畳み込みと2層の全結合層によるモデル構造を採用した。上記の設定で実際に数十エポック程度の学習を試みた。損失関数として交差エントロピーを用い、最適化アルゴリズムにはAdamを使用した。その結果、シグナルとノイズの判定精度は学習用データ・検証用データいずれでも7~8割程度にとどまった。また学習用データと検証用データの分割の仕方によらず判定精度はほぼ一定であるものの、損失関数の値は顕著な低下が見られず、現時点では有効な学習が行えていないと考えられる。本研究で扱うGNSS時系列は傾きを有し、また地震動の立ち上がりのような急な振幅の変化ではなく緩やかなステップ変動を捉えなければならない点など、地震波形と異なる困難性がいくつか考えられる。発表ではデータ量の増加やモデル構造の最適化といったさらなる改良を踏まえ、時系列の特徴抽出の状況やシグナルの判定基準の可視化について詳細を紹介する。その上で、GNSS時系列への機械学習の適用における困難性と課題を議論する。

Challenges of applying deep learning to InSAR data for the purpose of detecting small deformation around active faults and volcanoes in Japan

*Yo FUKUSHIMA¹

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

Sentinel-1衛星などの高頻度SAR観測データを用いたInSAR時系列解析の隆盛を背景とし、世界では、InSARへの深層学習の適用研究が活発に行われている。適用事例としては、火山変動検出、地すべり・地盤沈下検出、断層すべり検出、大気ノイズ補正などがある。しかし、深層学習の有効性は、データの質や量、および、対象とする現象のシグナルの特性等に依存する。今回、主に活断層や火山周辺における微小な変形を捉えることを想定し、日本においてInSAR解析に深層学習を活用することの困難な条件について整理した。

まず、植生の深い日本では、現在高頻度観測が行われているCバンドやXバンド衛星のデータは都市部でしか使えないという制約がある。このため、現状、1) 観測頻度が少ないALOS-2衛星(Lバンド)のみに依存せざるを得ない場合が多い。2) Lバンドデータの利用については、電離圏ノイズが大きいという不利な点もある。3) 日本の国土は気候の季節変化や複雑な地形により対流圏ノイズの補正が難しいことが多く、また、4) 積雪地域では冬季のデータが使えないのでその分利用可能データが減る。5) 活断層周辺の変動を検出しようとする場合、サンアンドレアス断層や北アナトリア断層などに比べて一桁小さい年間数mmの変動速度を目標にしなければならず、しかも、地下深部の動きに対しては地表面上で空間的に滑らかな変形パターンが出現するので、対流圏ノイズと分離がしにくい。最後に、6) 主要な変動域が海域にあったり海で挟まれていたりすると(瀬戸内海等)、変動検出が阻害される。

今後、ALOS-4衛星やNISAR衛星の打ち上げにより、不利な条件はある程度緩和されることが期待されるが、条件的に劇的な改善が望めるかは不透明である。深層学習には、従来の手法に比べてInSAR解析結果から地下の変動プロセスをより詳細に抽出できるポテンシャルはあるが、不利な条件のなかでも、いかに解析方法を工夫してそれを実現するかを検討することが必要である。

Development of an Interpretable Volcanic Earthquake Classification Method Using Transformer Encoders

*Yugo Suzuki¹, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹

1. Yokohama City University

火山地帯では火山活動に関連して度々活発な群発地震が発生する。また、噴火が近くなるとその数は増大し、中でも低周波地震の発生数が増加する傾向にある事例が報告されている。それらの地震のタイプ分類は火山防災において非常に重要であるが、現在、これらのプロセスは最終的には人間の判断に委ねられ、膨大な時間とコストを要し、リアルタイムでの詳細な検証は不可能である。そこで本研究では機械学習を用いて、上記のプロセスをリアルタイムに行うためのシステムを開発する。また、分析結果を避難指示等に用いるため、結果には解釈性が必要となる。そこで本研究では機械学習（Transformer）を用いて様々な地震のタイプ別にパターンや特徴を分析し、それらを解釈性のある形で出力することを目的とする。本研究で構築するモデルは自然言語処理のモデルとして知られるBERTのアーキテクチャをベースとしている。入力データを時間0.5ごとの特徴量として埋め込み、データ先頭にclsトークンを付与し、位置エンコーディングを行った後に3層のTransformerエンコーダーレイヤーでエンコーディングを行う。エンコーディングされた時系列からclsトークンを取得し、全結合層を通し最終的にラベルの確率として出力する。上記のモデルを検証するために、様々なタイプの低周波地震が多く観測されている浅間山で発生する地震を解析対象として選んだ。モデルの構築には東京大学地震研究所、気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院などによって設置した約20箇所の観測点で記録した過去約20年間（2000年代前半から現在まで）の観測波形データを使用する。浅間山のカタログでは地震のタイプは12種類あるが、今回はそのうちA型、B型の分類を目的とし、その2種類の地震とノイズデータを使用する。データ数はA型地震が1001個（6634波形）、B型地震が4204個（31415波形）、ノイズが11205波形となっている。各データのチャンネル数は3（水平2成分及び上下動）、サンプリングレートは100Hzである。9001ポイントのデータのうち、A型地震、B型地震はP波到達時間からランダムに選んだ150~1000ポイントの間を開始地点とし、そこから3000ポイントを切り取って使用する。ノイズは上記9001ポイントデータのイベント波形以外の6000ポイント以降を使用する。これらのデータの80%を訓練データ、残りを検証データとして性能を評価した結果、A型地震、B型地震、ノイズのPrecisionはそれぞれ0.77、0.95、0.99、Recallは0.84、0.95、0.93となった。また、アテンションの重みを可視化することによりA型地震は主にS波に、B型地震はP波からイベント波形の中盤にかけて注目して分類を行っていることがわかった。今後は畳み込み層の出力やカーネルサイズ、Transformerのマルチヘッド数やレイヤー数などのハイパーパラメータのチューニングを行いさらなる精度の向上が見込めるかを検証する。また、解釈性の向上のために、アテンションの重みが集中している周波数帯についても検証する予定である。

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

📅 Thu. Nov 2, 2023 1:15 PM - 2:45 PM JST | Thu. Nov 2, 2023 4:15 AM - 5:45 AM UTC | 🏠 Room B F201

[S21] PM-1

chairperson: Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Shinya Katoh

1:15 PM - 1:35 PM JST | 4:15 AM - 4:35 AM UTC

[S21-09] [Invited] Theoretical challenges to understand the principles of deep learning and artificial intelligence

*Masaaki Imaizumi¹ (1. Graduate School of Arts and Science, the University of Tokyo)

1:35 PM - 1:55 PM JST | 4:35 AM - 4:55 AM UTC

[S21-10] [Invited] Potential pathway to understanding earthquakes using a data-driven approach: learning from other informatics applications

*Stephen Wu¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

1:55 PM - 2:15 PM JST | 4:55 AM - 5:15 AM UTC

[S21-11] [Invited] Deep-Learning Seismology: Current Status and Expectations for Future Developments

*Kazuro HIRAHARA^{1,2} (1. Riken Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University)

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

[S21-12] Simultaneous estimation of fault geometry and slip distribution from crustal deformation data using deep operator learning

*Tomohisa OKAZAKI¹, Kazuro Hirahara¹, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project)

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

[S21-13] Physics-Informed Neural Networks for monitoring slow slip events in a spring-slider system

*Rikuto Fukushima¹, Masayuki Kano², Kazuro Hirahara^{3,4} (1. Faculty of Science, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. RIKEN, 4. Kagawa University)

[Invited]Theoretical challenges to understand the principles of deep learning and artificial intelligence

*Masaaki Imaizumi¹

1. Graduate School of Arts and Science, the University of Tokyo

深層学習を用いたデータ解析の発展により、人工知能技術が発展し社会に変革をもたらしている。ただし、これらの技術には多くの課題も残されており、膨大化する計算コストや悪意ある攻撃に対する頑健性など、社会により浸透する中で改善すべき点も多い。

これらの課題を解決するための障害のひとつとして、深層学習・人工知能の原理の不理解がある。深層学習や人工知能は素晴らしい性能を発揮する技術だが、これらがなぜこのような性能を発揮できるかといった原理には未だ不明な点が多い。これらの不理解が、低コストな計算アルゴリズムや効率的な制御技術の開発を阻む一員となっている。よって、深層学習・人工知能を理解し効率的に改善するために、それらの仕組みを理解し記述するための理論基盤が必要とされている。

本講演では、(I)なぜ深層学習は高い精度を発揮できるのか、(II)人工知能をどのように数理的に表現・解析すれば良いか、という問いに関する理論的な研究を紹介する。

(I)の深層学習に関する研究では、特に (i)深層構造を持つモデルの優位性および劣位性とそれを改善する学習手法、(ii)深層モデルの不確実性を損失曲面の形状を用いて評価する理論、および(iii)大自由度モデルの漸近的な解析（過剰パラメータの理論）を深層構造に拡張する試みを紹介する。(II)の人工知能に関する研究では、特にChatGPTなどに代表される基盤モデル・大規模言語モデルに注目し、文脈内学習という汎用的な学習フレームワークの誤差解析を通じてその仕組みを理解するところを紹介する。

[Invited]Potential pathway to understanding earthquakes using a data-driven approach: learning from other informatics applications

*Stephen Wu¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

The quest to comprehend the complex and intricate mechanisms underlying large magnitude earthquakes has been a central pursuit in the field of seismology. In recent years, the advent of data science, coupled with the emergence of the fourth paradigm of science, has provided a novel avenue to revolutionize our understanding of seismic events. This talk explores the potential of harnessing data-driven methodologies, inspired by informatics applications from diverse scientific domains, to unravel the enigmatic nature of earthquakes.

The fourth paradigm of science emphasizes the significance of data-intensive research in shaping the trajectory of scientific discovery. Historically, seismology has been constrained by the limitations of traditional observational techniques, which often fail to capture the multifaceted dynamics of earthquake generation. However, the integration of modern data science techniques offers an unprecedented opportunity to gather, process, and analyze vast datasets to extract meaningful insights. This paradigm shift enables researchers to move beyond empirical observations and delve into the realm of data-driven hypothesis generation, refining our comprehension of the underlying processes that lead to seismic activity.

The potential of the modern data-driven approach is apparent, as the first two paragraphs of this abstract were actually written by ChatGPT, the famous chatbot service based on a large language model trained by deep learning technology. Recent research has demonstrated that deep learning can significantly improve the efficiency and accuracy of processing seismic data into information useful for further analyses, or can assist different tasks in seismic monitoring. However, cautions shall be made when using such convenient tools as the “no free lunch theorem” holds here as well. Users are required to correctly interpret the prediction results from a machine learning model under the well-known limitation of such data-driven models being effective only within the domain of their training data.

The inherent complexities of earthquake systems demand careful consideration of data quality, feature selection, and model interpretability. In this talk, I will draw inspirations from informatics applications in other scientific disciplines, such as materials science, and discuss potential strategies that seismologists can further capitalize on the wealth of seismic data generated from ground-based sensors, satellite observations, and historical records. These strategies are founded on some recent understandings of the learning mechanisms of deep learning, and the successful applications of transfer learning technologies in various science and engineering problems with limited data.

The goal of this talk is to explore the possible roles of data science in making a bridge between theoretical seismology and data-driven insights. As we stand on the cusp of this interdisciplinary revolution, collaborative efforts between seismologists and data scientists are poised to reshape the landscape of seismic research and disaster preparedness.

[Invited]Deep-Learning Seismology: Current Status and Expectations for Future Developments

*Kazuro HIRAHARA^{1,2}

1. Riken Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kagawa University

ビッグデータの蓄積と驚異的發展を遂げているAI等の情報科学の活用により、ChatGPTに象徴されるように多くの分野で新たな展開が生み出されている。「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）」（文科省）に見られるように、日本の地震学においても、情報科学が活用されている。本講演では、AI等の情報科学のうち機械学習(ML)、特に深層学習(DL)の地震学における活用に焦点をあて、私の関わる研究も含めて現状の紹介と今後の展開への期待を述べる。なお、タイトルのDeep-Learning SeismologyはMousavi & Beroza (2022 : MB2022と略)から借用したものである。

Bergen+(2019)は、固体地球科学におけるデータ駆動型ML活用を3モード（自動化・モデリング・発見）に分類している。現状最大の成果は自動化にあり、MB2022では、データ処理自動化として、地震イベント検出・P波S波検測・位相関連付け・震源決定・極性決定・発震機構決定等において多くのDLモデルが提出され、また地震動予測や緊急地震速報でも大きな成果を上げていると報告している。STAR-Eプロジェクトでも、同様なMLモデルが試みられ、反射波の検出や地震計古記録からの低周波微動検出 (Kaneko+, 2022) 等、特色ある成果が出ている。

一方、モデリングでは、地震学における順・逆問題の解法にDLが用いられ始めており、私に関わる課題として以下のものがある。

- 1) GNSSデータへの深層学習の適用による 短期的SSEの断層すべり直接推定 (中川他, 2023, JpGU) : プレート境界上に断層すべりを想定し、Okada(1992)による地表変位データを合成し (データ拡張)、短期的SSE断層すべりの時空間分布を推定する深層学習手法を開発している (逆解析DL)。これに対し、解をニューラルネットワーク(NN)で表し、偏微分方程式等の物理方程式および初期・境界条件を損失関数に組み込み、最適化により解を求める物理深層学習PINNs (Physics-Informed Neural Networks) が、Raissi+ (2019) により提唱され、多くの研究が行われている。なお、これは順問題であるが、逆問題として、観測データを損失関数に加えることにより、比較的容易に物理方程式に含まれるパラメータ推定に拡張できるのがPINNsの利点と言える。これに関連して以下の2つの研究を行っている。
 - 2) PINNsによるバネブロックモデルにおけるSSEすべりモニタリング (Fukushima+, 2023, JGR査読中 <https://doi.org/10.22541/essoar.168988460.01601423/v1>) : SSEすべりのモデリングとして1自由度バネブロックモデルを用いて、速度状態依存摩擦則に従うSSEすべりのシミュレーションに加えて、摩擦パラメータ推定・すべり発展予測を行うPINNsモデルを構築している (順・逆問題DL)。
 - 3) PINNsによる地殻変動モデリング (Okazaki+, 2022, Nat. Commun.) : 2次元反平面問題において、非平面自由境界を有する不均質弾性媒質中における曲面断層すべりに対するPINNs地殻変動モデリングを行っている。この問題は有限要素法等の数値解法でないと解けない問題であるが、それに代わるメッシュフリーの新解法となる可能性を示している (順問題DL)。
- なお、2) では逆問題を扱っているが、より一般的にはB-PINNs (Bayesian PINNs) (Yang+, 2019) を考える必要があり、事後確率の計算が議論となっている。これに対し、Agata+(2023)は、走時トモグラフィー問題において、関数空間における粒子ベース変分推論に基づくPINNsを用い、P波到達時刻を用いた速度構造とその不確かさを推定する手法を提案している。

(B-)PINNsの今後の展開への期待として、例えば、不均質非線形粘弾性媒質中での速度状態依存摩擦則に従う地震発生サイクル計算・データ同化が挙げられる。通常、地震サイクル計算における媒質応答はすべり応答関数を用いて行うが、(準)解析解は半無限均質弾性体や成層線形粘弾性媒質のものに限られる。

Barbot (2020) は、積分法により非線形粘弾性媒質中での地震サイクル計算を行っているが、弾性定数は均質に限られている。従って有限要素法等の数値解法に頼らざるを得ないが、計算負荷等の問題であまり行われていない。(B-) PINNsによる解法は、原理的には課題(2)と(3)を組み合わせれば良いと考えられるが、現状では計算負荷等解決すべき技術的問題があり、今後多くの研究が必要とされる。

Simultaneous estimation of fault geometry and slip distribution from crustal deformation data using deep operator learning

*Tomohisa OKAZAKI¹, Kazuro Hirahara¹, Naonori Ueda¹

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project

震源過程の理解のために、地震時地殻変動データから断層面上のすべり分布を推定する逆解析が実施される。断層面を仮定すると、すべり分布を求める線形問題となり解析的表式が得られるが(Yabuki & Matsu'ura 1992)、断層形状を同時に推定する場合は非線形問題となる。矩形断層を仮定すると、傾斜角のみを求める特殊な場合(Fukahata & Wright 2008)を除き、一般的にMCMC等の手法が用いられる(Fukuda & Johnson 2010)。

本研究では、地表変位データから曲がった断層を含む断層形状と、その断層上のすべり分布を同時に推定する深層学習モデルを検討した。一様半無限媒質における平面歪み問題において様々な断層形状・すべり分布に対する地表変位を順解析し訓練・テスト用のデータセットを作成した。近年、ベクトルを変換する関数を学習する一般的な深層学習と異なり、関数を変換する作用素を学習する深層学習の研究が行われている。その代表例であるDeepONet (Lu et al. 2021)を使用し、単純な全結合ニューラルネットワーク(FNN)と比較した。

まず、観測データが正確で密に得られる場合で数値実験を行った。一定の傾斜角をもつ断層で傾斜角を推定する場合は、傾斜角が極めて高精度で推定された。傾斜角が深さとともに変化する一般の曲線断層を推定する場合は推定誤差が大きくなるが、断層の大局的な形状は良く推定された。長波長のすべり分布は精度良く推定されたが、短波長のすべり変化は特に深部において平滑化される傾向があった。DeepONetとFNNはほぼ同等の性能であったが、訓練データセットと大きく異なる断層形状に対してはDeepONetの方がやや推定精度が高い傾向が見られた。発表では、観測点密度や観測誤差の大きさに対する依存性を併せて議論する。

Physics-Informed Neural Networks for monitoring slow slip events in a spring-slider system

*Rikuto Fukushima¹, Masayuki Kano², Kazuro Hirahara^{3,4}

1. Faculty of Science, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. RIKEN, 4. Kagawa University

The episodic transient fault slips called slow slip events (SSEs) have been observed in many subduction zones. These slips often occur in regions adjacent to the seismogenic zone during the interseismic period, making monitoring SSEs significant for understanding large earthquakes. Various fault slip behaviors, including SSEs and earthquakes, can be explained by the spatial heterogeneity of frictional properties on the fault. Therefore, estimating frictional properties from geodetic observations and physics-based models is crucial for fault slip monitoring. In this study, we propose a Physics-Informed Neural Network (PINN; Raissi et al., 2019)-based new approach to simulate fault slip evolutions, estimate frictional parameters from observation data, and predict subsequent fault slips. PINNs, which integrate physical laws and observation data, represent the solution of physics-based differential equations using a neural network (NN). As a first step, we validate the effectiveness of the PINN-based approach using a single-degree-of-freedom spring-slider system obeying a rate and state friction law (Yoshida & Kato, 2003) to model SSEs.

In the PINN-based approach, we construct NN for solving the physics-based differential equations as a forward problem. NN learns the behavior of the equation by defining the loss function considering the misfit between target equations and derivatives of the network output calculated by automatic differentiation. To calculate the temporal evolution of the slip velocity v and state variable θ in a spring-slider model, we constructed NN using the loss function as $L = L_{\text{ini}} + L_{\text{ode}}$ where L_{ini} and L_{ode} represent the residuals of the initial conditions and those of the governing equations, respectively. We optimized NN parameters to minimize the loss function L by the L-BFGS method. The calculation result indicates that the PINN-based method can calculate the temporal evolution of SSE similar to the ordinal numerical integration approach.

Next, we extend a forward problem for simulating fault slips to an inverse problem for estimating unknown frictional parameters from the observation data. We estimate three frictional parameters a , $a-b$, and d_c by giving the slip velocity as the observation data into the neural network. To extend to the inverse problems, we add a misfit term related to observed data L_{data} to the loss function used in the forward problem, allowing us to simultaneously learn from the observation data and physical laws. We optimized three frictional parameters and NN parameters to minimize the loss function, which enables us to obtain the estimated frictional parameters and the solution of the differential equation simultaneously. We utilized synthetic slip velocity data to verify whether we can estimate the frictional parameters using the PINN-based approach. After the training, we successfully estimated true frictional parameters and obtained the true solutions. This indicates that PINNs have the great potential for frictional parameter estimation.

Furthermore, we discussed the potential of the predictability of the subsequent fault slips using limited observation data. We consider situations where slip velocities are partially observed, meaning that SSE is currently ongoing, and we aim to predict its future evolution. Finally, we achieved the evaluation of the probability of future fault slip using the PINN-based approach, and the likelihood of accurate fault slip prediction increased with longer observation periods.

Reference

Rikuto Fukushima, Masayuki Kano, Kazuro Hirahara. Physics-Informed Neural Networks for fault slip monitoring: simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring-slider system. ESS Open Archive. July 20, 2023.

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

📅 Thu. Nov 2, 2023 3:00 PM - 4:15 PM JST | Thu. Nov 2, 2023 6:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 Room B F201

[S21] PM-2

chairperson:Kodai Sagae, Kosuke Morikawa(Osaka University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S21-14] Two-stage approach for transfer learning of seismic-phase detection model to a small sample size data via multiple clustering

*Tomoki Tokuda¹, Hiromichi Nagao^{1,2} (1. ERI, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

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

[S21-15] ETN Detector by Convolution Neural Network Using All S-net Stations

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

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

[S21-16] Development of a method for determining the hypocenter of tectonic tremors using Score-CAM

*Amane Sugii¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi² (1. Kanazawa University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S21-17] Self-Excited Detection Probability: Applications to Estimating Time-Variant b-Value Functions Immediately After Main Shocks

*Kosuke Morikawa¹, Hiromichi Nagao², Naoshi Hirata^{3,2} (1. Osaka University, 2. Univ. of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S21-18] Detection of changes in global background and clustering seismicity

*Jiancang ZHUANG^{1,2}, Ziyao Xiong³ (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI, 3. Institute of Geology, China Earthquake Administration)

Two-stage approach for transfer learning of seismic-phase detection model to a small sample size data via multiple clustering

*Tomoki Tokuda¹, Hiromichi Nagao^{1,2}

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

近年、地震検出のために深層学習モデルが使われるようになってきた。多量の地震波形データを用いて深層学習モデルを学習することにより、効果的に地震波形の特徴を捉え、これまでよりも精度よく地震を検出することが可能になった。しかし、研究、あるいは実用上の対象となる地域でそのような多量の地震波形データが利用可能であるとは限らない。この問題の対処策として、他地域のデータを使って学習させたモデルを対象地域に適用させる転移学習の枠組みが有効である。転移学習の代表的な手法はアップデートするパラメータ数を少なくした上でモデルを再学習する方法である。しかし、この方法では依然として少なからず多くの学習データが必要となり、数十から数百程度の学習データしか利用できない場合、その適用は困難である。本研究ではこのように少量のデータしか利用できない場合の転送学習を二段階アプローチで効果的におこなう手法を提案する。第一段階では、他地域のデータを用いて学習済みのモデルを対象地域の波形データに適用する。第二段階では、陽性（例えばp波）と判定された波形について、さらなる判別器を用いて真陽性・偽陽性を判定する。この二段階アプローチの着眼点は、学習済みの深層学習モデルで陽性と判定された波形について、少量のデータで学習可能な非深層学習モデルを用いて判定結果の精緻化をおこなう点である。本研究の主要な貢献は第二段階の判別器に対して、安定性の高い、新しい手法を導入したことである。提案手法はマルチプル・クラスタリング手法を用いてデータ駆動的に波形データの特徴量を抽出することにより、波形データの次元を削減し、効果的に判別することが可能になった。実データを用いた適用例では、通常の教師あり学習手法と比較して、異なるデータセットに対してより安定的に地震検出ができることが示された。特に、地震波形データが極めて限られている場合、提案手法は他の地域で得られた地震波形データを有効に活用し、効果的に地震を検出できることがわかった。

ETN Detector by Convolution Neural Network Using All S-net Stations

*Kodai SAGAE¹, Masayuki KANO², Takahiko UCHIDE¹

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

1. はじめに

スロー地震の一種である微動は、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ため、微動活動を把握することは巨大地震発生域周辺の断層すべり現象のモニタリングにつながる点で重要である。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 (e.g., Obara, 2002) が広く適用されている。この手法は、微動のようにP波・S波の位相が不明瞭な連続波形に対しても震源決定を行えるが、通常地震も微動と区別することなく検出してしまう。一方、スペクトログラムを用いた畳み込みニューラルネットワーク (CNN) は、イベントの継続時間や周波数成分の特徴を学習するため、通常地震と微動を区別して検出できる利点をもつ (e.g., Nakano et al., 2019; Nakano & Sugiyama, 2022). Takahashi et al. (2021) では S-netの単独観測点 (N.S4N21) を対象に、スペクトログラムを入力としたCNNに基づく通常地震・微動・ノイズ判別器を作成した。しかし、作成したモデルを近傍観測点に適用しても微動の判別精度が低いため、複数観測点を使った学習が必要であることが指摘されている (Kano et al., 2021, JpGU). そこで本研究では、防災科研のS-net全観測点 (150観測点) を使ったスペクトログラムを入力とするCNNを構築し直すことで、S-net全体で使える汎用的なモデルの作成を試みた。

2. データ・手法

3成分のスペクトログラムを入力し、通常地震・微動・ノイズの判別確率を出力するモデルを作成する。本研究では時間分解能の向上を期待し、Takahashi et al. (2021) で用いられた約120秒の時間窓よりも短い60秒の時間窓を用いた。機器特性を取り除いた後、2-20 Hz の周波数帯域において、パワースペクトルで正規化したスペクトログラムと3成分合成エネルギーを通常地震・微動・ノイズごとに計算した。通常地震は気象庁の検測値データをもとにS波到達時刻を含む時間窓で計算を行った。微動はNishikawa et al. (2023) の微動カタログをもとに、震央距離 30 km 以内のイベントについて微動の発震時を含む時間窓で計算を行った。震央距離による制限を与えたのは、Takahashi et al. (2021) より震央距離の増加に伴う微動の検出能力の低下が指摘されているためである。ノイズは時間窓の1分前後に通常地震の検測値がない、かつ1時間前後に微動が起きていない場合に計算した。データの作成期間は、通常地震・ノイズについては2020年9月から2021年12月、微動については2016年8月から2021年12月である。

100以上のデータが作成できている観測点について、3成分合成エネルギーによるデータ選別を行った。通常地震・微動はエネルギーの値が小さいもの、ノイズはエネルギーの値が大きすぎるものを取り除いた。最終的に、微動のサンプル数に合うように通常地震・ノイズのサンプル数を調整し、通常地震: 24,384 (146観測点)、微動: 24,309 (33観測点)、ノイズ: 24,391 (149観測点) のデータセットを作成した。

データセットを学習データ(80%)・検証データ(10%)・テストデータ(10%)に分割して使用した。CNNの構成は、畳み込み層とプーリング層を3回繰り返し、グローバル平均プーリング、softmax関数を適用することで通常地震・微動・ノイズの判別確率 (0-1) を出力し、判別確率が0.5以上のものに分類を行った。

3. 結果・議論

学習の結果、通常地震・微動・ノイズについてそれぞれ 97.6%, 97.0%, 98.6% の再現率で分類することができた。微動について観測点ごとの再現率を計算したところ、学習に用いたほぼ全ての観測点で95 % を超えていることが分かった。再現率 95 % 以下の観測点は微動発生域の端に位置していることから、震央距離の増加に伴う検出能力の低下を示していると考えられる。

連続記録にモデルを適用した結果、まとまった複数観測点で微動を検出できているだけでなく、カタログにイベントがない時間帯でも微動を検出できていることが分かった。しかし、遠地地震のように高周波成分に乏しいイ

ベントを微動と誤判別してしまっている場合も確認された。微動カタログにあるイベントについて、観測点ごとの判別確率を入力とした教師なし学習 UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection; McInnes et al., 2018) を適用したところ、大局的に3つのクラスに分かれ、それぞれ襟裳沖・三陸沖・茨城沖の微動を検出した観測点分布に対応することが分かった。今後は、同時刻に微動を検出した観測点分布の特徴を精査することで微動の誤判別を効率的に取り除く方法を検討する。

謝辞：本研究では気象庁一元化震源，防災科研のS-netの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。

Development of a method for determining the hypocenter of tectonic tremors using Score-CAM

*Amane Sugii¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi²

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

・はじめに

繰り返し発生するスロースリップイベント（SSE）は、世界各地のプレート境界で観測されている。数値シミュレーションなどの結果から、巨大地震発生前にSSEの発生間隔が変化することが指摘されている（Matsuzawa et al., 2010）。そのため、SSEのモニタリングは巨大地震のメカニズム解明に欠かせない。SSEはテクトニック微動（以下、微動）と時空間的に同期して発生することが知られている。微動は地震計で容易に観測可能であり、SSEのモニタリングに適している。しかし、多観測点の波形相関を用いた微動の検出手法では、微動だけでなくノイズや地震も誤検出する可能性がある。さらに、微動活動が活発な時間帯の震源決定は難しい。この問題に対する解決策として、深層学習手法の一つである畳み込みニューラルネットワーク（CNN）が有望とされており、その有効性は複数の研究で報告されている（e.g. Nakano et al., 2019）。CNNの出力結果と入力画像の関係性の解釈は難しいが、入力画像内での出力結果に寄与する部分の可視化手法が存在する。この手法を利用することで、微動の特徴的周波数成分を抽出することが可能である（e.g. Rouet-Leduc et al., 2019）。本研究では、CNNを用いてノイズ、微動、地震の分類モデルを開発し、モデルが予測時に注目する部分の可視化を通じて微動の抽出を試み、震源決定の精度向上を目指す。

・データと方法

使用データは産業技術総合研究所が紀伊半島に設置したアレイ観測網の3成分速度波形である。アレイ観測網は39個の観測点から構成され、各観測点は東西南北を網羅する形で十時に配置されている。使用した期間は2011年4月から2015年12月までである。作成したCNNモデルは、この3成分速度波形の時間窓1分間のスペクトログラム（周波数軸2-12Hz）を入力とし、ノイズ、微動、地震を確率的に識別する。本モデルの予測に寄与する入力画像部分の可視化には、Score-CAM（Wang et al., 2019）を採用した。39の観測点の中から微動と判定された観測点のスペクトログラムを基に、Score-CAMを計算し、これを平均化及び二値化して周波数フィルターを作成した。NS成分波形に対してこのフィルターを適用し、微動の抽出を行った。その後、抽出した波形を2-4Hzまたは2-10Hzのバンドパスフィルタを適用し、波形群の周波数帯を揃えてセンブランス解析を実施した。

・結果と考察

目視で選定した74,100個のデータ（ノイズ・微動・地震それぞれ24,700個）で学習したCNNモデルは、目視選定の7,275個のテストデータ（各2,425個）に対して、精度、適合率、再現率の全てで95%以上を達成し、地震の再現率は最大となる98%であった。Score-CAMの処理後に2-10Hzのバンドパスフィルタを適用し、微動と判定された観測点が25個以上の場合にセンブランス値を計算した。微動が活発な時間帯における1日分の波形の解析では、Score-CAMを利用した場合はしない場合と比較して、平均値で0.08のセンブランス値の増加が確認され、最大で0.31大きかった。最大差が生じた波形では、Score-CAMのフィルターを使用することで高振幅な微動が抽出され、微動と考えられる波形が強調されることが確認できた。2-4Hzのバンドパスフィルターを適用して比較したところ、センブランス値の差は平均値で0.03大きくなり、最大で0.11大きかった。2-4Hzのバンドパスフィルターを適用した場合では、Score-CAMのフィルタよりもバンドパスの影響が大きいため差が小さくなったと考えられる。また、予備的解析として中心観測点を基準に、1分の時間窓の中心から0.3秒間のデータを20Hzにダウンサンプリングし、バンドパス2-8Hzを適用した（Nakamoto et al., 2021）。その後、相互相関係数が0.3以上の観測点のみを選択して同様の処理を施した場合、未処理時よりもセンブランス値が高まる結果が得られた。

Self-Excited Detection Probability: Applications to Estimating Time-Variant b-Value Functions Immediately After Main Shocks

*Kosuke Morikawa¹, Hiromichi Nagao², Naoshi Hirata^{3,2}

1. Osaka University, 2. Univ. of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本震直後は地震活動が活発になるため、非常に多くの余震が発生する。特に、本震と同程度の比較的マグニチュードの大きな余震も多く観測されるため、防災上の観点から“余震活動の特徴”を一早くデータから推測可能な手法を開発することが喫緊の課題となっている。これまでの地震学の見地から、余震活動の特徴は余震の発生頻度及びそのマグニチュードでおおよそ記述できることが分かっている。そのため、余震の発生頻度及びそのマグニチュードの確率分布をデータから推定すれば良い。しかし、実際のデータでは本震直後の余震活動が活発過ぎるため、地震計から正しく余震の数を計測することができず、余震の数が過小に計測されてしまう。特に、マグニチュードの小さな余震は見逃される傾向にある。本震直後にそのようなデータを用いて余震の頻度及びマグニチュードの分布を推定すると、偏りのある推測となってしまう。そこで余震の到達時刻及びそのマグニチュードに依存した余震の検出確率を導入し統計モデルに組み込むことで、余震数の過小評価によるバイアスを考慮した推測法の構築が可能となる。これまでにさまざまな分布形を事前に定めなければならないノンパラメトリックな余震検出確率が提案されている。

一方、地震学では余震の頻度分布の確率則として大森・宇津の法則が知られている。この確率則は大域的には概ね成立しているが、パラメトリックモデルであるため局所的な細かい確率則を表現するには不向きである。そのため、ETAS(Epidemic Type Aftershock Sequence)モデルでは、過去のイベント情報を利用した自己励起性のあるモデルを用いることで、頻度分布の確率則を局所的にも十分表現可能とした。本研究では余震の検出確率に対して、ETASモデルと同様に過去の余震データを利用した自己励起性のあるモデルを用いることで、パラメトリックモデルでも十分な表現力を持つ余震の検出確率を提案する。

さらに、余震検出確率がパラメトリックモデルであるため、本研究で推定された余震検出確率を用いることで本震直後におけるさまざまな複雑な事象をバイアスを補正しつつ解析することが容易に可能となる。例えば、本震直後におけるバイアスを補正しつつ、b値の時間変化をノンパラメトリックに推定することも可能となる。当日は、2004年新潟県中越地震や2016年熊本地震において、本震前後でb値がどのように変化したかを報告する。

Detection of changes in global background and clustering seismicity

*Jiancang ZHUANG^{1,2}, Ziyao Xiong³

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI, 3. Institute of Geology, China Earthquake Administration

The ETAS model is a convenient effective tool to separate background and clustering seismicity from the catalog. While most studies on seismicity modelling focus on a local area, we have developed a spherical version of the ETAS (SETAS, spherical ETAS) model to fit the global seismic events and to detect the global interactive between seismic events from the perspective of the occurrence of earthquake sequences. By fitting the SETAS (spherical ETAS) model to the global seismic events (GMT catalog Mw5.15+), we separate the background seismicity and the earthquake clusters triggered by the major earthquakes in the global scale. The results show that about 1/3 of the global earthquakes with magnitude 5.15 or above are triggered and that the global background seismicity is stationary during the past twenty years. However, locally the background seismicity is tuned by mega earthquakes.

Figure caption: Cumulative frequencies of total seismicity (black), background seismicity (blue) and triggered seismicity (red). Dashed lines represent the occurrence times of Mw8+ earthquakes.

