

Tue. Oct 25, 2022

Room B | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

10:00 AM - 11:30 AM JST | 1:00 AM - 2:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S21] AM-1

chairperson: Hisahiko Kubo(NIED), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.), Tomohisa OKAZAKI(RIKEN AIP)

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

[S21-01] [Invited] Detecting slow slip events and accompanying tectonic tremor in geodetic and seismic data, using machine learning

*Bertrand ROUET-LEDUC¹ (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S21-02] Detection of Deep Low-Frequency Tremors from Continuous Paper Records at a Station in Southwest Japan About 50 Years Ago Based on Convolutional Neural Network for Seismogram Images

Ryosuke Kaneko^{2,1}, *Hiromichi NAGAO^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Hiroshi Tsuruoka¹, Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S21-03] Application of Physics-Informed Neural Networks to spring-slider model

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

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

[S21-04] Optimal Transport Distance Measure in Geophysical Inversion

*Tomohisa OKAZAKI¹, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN AIP)

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

[S21-05] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning
-Part1 Response spectrum simulation for crustal earthquake in Kinki district, Japan-

*Hidenori KAWABE¹, Tianzeng WEI¹, Kai TERAZONO¹ (1. Osaka University)

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

[S21-06] Prediction of velocity response spectrum by using a 1-D convolutional neural network

*Daiki Taya¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

11:45 AM - 12:15 PM JST | 2:45 AM - 3:15 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] AM-2

chairperson: Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S23-01] Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake using automatic hypocenter determination

*Koji TAMARIBUCHI¹, Shota Kudo² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

1:45 PM - 2:45 PM JST | 4:45 AM - 5:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-1

chairperson:Hiromichi Nagao(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:45 PM - 2:05 PM JST | 4:45 AM - 5:05 AM UTC

[S23-03] [Invited]Short-term Forecast of Repeating Earthquakes Considering Spatiotemporal Aseismic Slip Rate along Plate Boundary*Shunichi NOMURA¹, Naoki UCHIDA², Yoshiko OGATA³ (1. Waseda University, 2. Tohoku University, 3. The Institute of Statistical Mathematics)

2:05 PM - 2:25 PM JST | 5:05 AM - 5:25 AM UTC

[S23-04] [Invited]Uncertainty quantification of seismic tomography based on physics-informed neural networks and particle-based variational inference in function space*Ryoichiro AGATA¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

2:25 PM - 2:45 PM JST | 5:25 AM - 5:45 AM UTC

[S23-05] [Invited]Data-driven reduced order model and sparse sensor optimization with its application to seismic wave field*Taku Nonomura¹ (1. Graduate School of Engineering, Tohoku University)

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

3:00 PM - 3:45 PM JST | 6:00 AM - 6:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-2

chairperson:Keisuke Yano(The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S23-06] Development of Observation Site Selection Method based on Sensitivity to Physical Model Parameters toward Process-driven Seismic Wavefield Reconstruction*Kumi Nakai^{1,2}, Takayuki Nagata², Keigo Yamada², Yuji Saito², Taku Nonomura², Masayuki Kano², Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-07] Application of compressed sensing using data-driven reduced-order model to seismic wavefield reconstruction*Takayuki Nagata¹, Kumi Nakai^{2,1}, Keigo Yamada¹, Yuji Saito¹, Taku Nonomura¹, Masayuki Kano¹, Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-08] Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources*Jiancang ZHUANG¹, Zhengya Si² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Beijing Earthquake Agency)

Room B | Regular session : S05. Geothermal science

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S05] PM-3

chairperson:Kenichi Tsuda(Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai(Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S05-01] Geophysical studies using optical fiber DTS and DAS in geothermal wells of Ohuma and Sumikawa geothermal fields In Akita*Jyunzo KASAHARA^{1,2}, Yoko Hasada^{2,3}, Hitoshi Mikada⁴, Hiroshi Ohnuma², Yoshihiro Fujise^{2,5} (1. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazard, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. Graduate School of Kyoto University, 5. WELMA)

Room B | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

4:30 PM - 5:45 PM JST | 7:30 AM - 8:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-3

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S15-01] Simple microtremor array survey at rock/hard-soil sites

*Ikko CHO¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S15-02] Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model II, Application to 2014 Northern-Nagano Earthquake

*Kenichi TSUDA¹, Hideo Aochi^{2,3}, Shohei Yoshida⁴ (1. Institute of Technology, Shimizu corporation, 2. BRGM, 3. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 4. Ohsaki Research Institute, Inc.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S15-03] Extreme ground motion in K-NET and KiK-net strong-motion data over a quarter of a century

*Shin AOI¹, Takashi KUNUGI¹, Wataru SUZUKI¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S15-04] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 7 -
- Risky ground Movement Indications of Happening These Seismic Waves -

*Hiroshi MAEHARA¹ (1. Geosystem Research Institute)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S15-05] A Study on Earthquake Damage Prevention of Cultural Properties on Display: Vibration Experiment of Japanese Sword

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO¹ (1. Nagoya University, 2. Tokai Corporation)

Room B | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

📅 Tue. Oct 25, 2022 10:00 AM - 11:30 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 1:00 AM - 2:30 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S21] AM-1

chairperson: Hisahiko Kubo(NIED), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.), Tomohisa OKAZAKI(RIKEN AIP)

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

[S21-01] [Invited] Detecting slow slip events and accompanying tectonic tremor in geodetic and seismic data, using machine learning

*Bertrand ROUET-LEDUC¹ (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S21-02] Detection of Deep Low-Frequency Tremors from Continuous Paper Records at a Station in Southwest Japan About 50 Years Ago Based on Convolutional Neural Network for Seismogram Images

Ryosuke Kaneko^{2,1}, *Hiromichi NAGAO^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Hiroshi Tsuruoka¹, Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S21-03] Application of Physics-Informed Neural Networks to spring-slider model

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

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

[S21-04] Optimal Transport Distance Measure in Geophysical Inversion

*Tomohisa OKAZAKI¹, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN AIP)

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

[S21-05] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning -Part1 Response spectrum simulation for crustal earthquake in Kinki district, Japan-

*Hidenori KAWABE¹, Tianzeng WEI¹, Kai TERAZONO¹ (1. Osaka University)

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

[S21-06] Prediction of velocity response spectrum by using a 1-D convolutional neural network

*Daiki Taya¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[Invited] Detecting slow slip events and accompanying tectonic tremor in geodetic and seismic data, using machine learning

*Bertrand ROUET-LEDUC¹

1. DPRI, Kyoto University

Faults can accommodate stress in a variety of slip modes, from dynamic rupture to slow slip events and aseismic slip. Among these slip modes, slow slip events and often-accompanying tremor remain among the most elusive and poorly understood.

Unraveling the interactions between slip modes is at stake: while laboratory experiments point to aseismic nucleation generally preceding dynamic rupture, observations in the field are far from systematic, and more the exception than the rule.

However, the difficulty in detecting transient slow slip events, either seismically or geodetically, points to a possible observational gap that may explain the rarity of slow deformation detected prior to dynamic earthquakes.

In this presentation, the use of machine learning to improve the detection of slow slip events and accompanying tectonic tremor will be explored, as a tool to fill this observational gap, both in seismic data and in geodetic data.

Detection of Deep Low-Frequency Tremors from Continuous Paper Records at a Station in Southwest Japan About 50 Years Ago Based on Convolutional Neural Network for Seismogram Images

Ryosuke Kaneko^{2,1}, *Hiromichi NAGAO^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Hiroshi Tsuruoka¹, Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

The establishment of the High Sensitivity Seismograph Network (Hi-net) in Japan has led to the discovery of deep low-frequency tremors. Since such tremors are considered to be related to large earthquakes adjacent to tremors on the same subducting plate interface, it is important in seismology to investigate tremors before establishing modern seismograph networks that record seismic data digitally. We propose a deep learning method to detect evidence of tremors from seismogram images recorded on paper more than 50 years ago. In our previous study, we constructed a convolutional neural network (CNN) based on the Residual Network (ResNet) structure and verified its performance through learning with synthetic images generated based on past seismograms. In this study, we trained the CNN with seismogram images converted from real seismic data recorded by Hi-net. The CNN trained by fine-tuning achieved an accuracy of 98.64% for determining whether an input image contains tremors. The Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) heatmaps to visualize model predictions indicate that the CNN successfully detects tremors without affections of a variety of noises, such as teleseisms. The trained CNN was applied to the past seismograms recorded at the Kumano observatory, Japan, operated by Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. The CNN shows the potential to detect tremors from past seismogram images for broader applications, such as publishing a new tremor catalog.

Application of Physics-Informed Neural Networks to spring-slider model

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

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

微分方程式を解く方法として、近年新たにPhysics-Informed Neural Networks (PINNs)が提唱された(Raissi et al., 2019)。これは物理法則に従う微分方程式と初期条件や境界条件を損失関数に取り込むことにより、その両方を満たすようなニューラルネットワーク(NN)を構成し、対象とする方程式の解を求める方法である。従って、PINNsにより得られた解は物理法則を満たすものであり、物理的に解釈が可能という点で従来のNNとは大きく異なっている。このように、PINNsによる微分方程式の解法は従来の求解法と大きく異なっているが、従来に比べて少ない計算量で大規模計算が可能、経験則を含む物理的に不完全なモデルにも対応でき柔軟なモデリングが可能、逆問題の解法が容易などの利点がある。地震学の分野においても、波動方程式を用いた地震波伝播の計算(Karimpouli et al., 2020)やdislocationモデルを用いた静的変位の計算(Okazaki et al., 2022)など、PINNsを用いた研究が行われ始めている。

本研究では、断層すべりの時空間発展の数値計算にPINNsを用いることを念頭に、PINNsをばねブロックモデルに適用しスロースリップ(SSE)の再現を試みた。初めに、時間ステップ可変のRunge-Kutta法を用いて準動的運動方程式と摩擦構成則を解き、SSEが再現可能な摩擦パラメータを試行錯誤的に探索した。その結果、再来間隔が2.5年程度、最大すべり速度がプレート速度の10倍程度、継続時間が150日程度のSSEの繰り返し再現可能な摩擦パラメータを求めた。以下で行うPINNsを用いた計算ではこの摩擦パラメータは固定する。また、再現されたSSEのうち1回のSSEのサイクルに注目し、すべり速度が最小になった時刻を初期時刻、その時のすべり速度と状態変数を真の初期値として定義し、その際計算される1回のSSEの時間発展をPINNsで再現することを目的とする。

このような設定の下、損失関数を真の初期値からのずれを表す初期条件の二乗平均誤差と、微分方程式に従った挙動からのずれの二乗平均誤差の重み付き和で定義し、損失関数が最小になるようにNNの学習を行う。初期条件の誤差と微分方程式の誤差の重みは試行錯誤的に決定した。この際、NNの入力はある1つの時刻であり、出力としてその時刻に対応したすべり速度、状態変数の2変数が返される。PINNsでは任意に選んだ多数の評価時刻を順に用いてNNの学習を行い微分方程式の解を求める。この学習に用いる評価時刻の選択には任意性があるため、ここでは、1) 事前の時間ステップ可変のRunge-Kutta法による計算から求まる不等間隔($\Delta t = 10 \sim 867$ hour)の評価時刻と、2) 時間間隔が一定($\Delta t = 50$ hour)の評価時刻、の2種類を用いて学習を行い、計算結果を比較した。なお時間をNNに入力する際は規格化を行っている。また本研究では9層の全結合NNを採用し、活性化関数としてtanh関数を用いた。各層のノード数は入力層が1、中間層がすべて20、出力層が2である。

その結果、等間隔・不等間隔の両方の評価時刻において、それぞれ適切な重みパラメータ下では安定して学習が行われ、正確にSSEの時間発展を再現することができた。また、等間隔においては用いる間隔の大きさを $\Delta t = 50$ hourから長めに变化させてそれぞれ計算を行ったが、最初に仮定した時間間隔の8倍($\Delta t = 400$ hour)を用いても正しい解が求められた。加えて、評価時刻以外の時刻、すなわちNNの学習に用いていない時刻を入力にした場合においても、正しくSSEのすべり速度を再現することに成功した。

Optimal Transport Distance Measure in Geophysical Inversion

*Tomohisa OKAZAKI¹, Naonori Ueda¹

1. RIKEN AIP

地震学の逆解析において、波形間の距離指標の定義が推定結果や計算効率に重要である。近年、確率分布間の距離であるWasserstein距離が従来のL2距離の欠点を解消しうる指標として注目されている。Sambridge ら (2022)は波形のグラフを2次元確率分布に変換した後、時間軸・振幅軸に周辺化した1次元確率分布のWasserstein距離を計算することで、波形を自然に確率分布に変換するとともに高い計算効率を実現した。しかし、正負の値を取る地震波形を確率分布に変換する方法に依然課題がある。

本研究ではSambridgeらの手法では、1次元確率分布への周辺化により距離指標に顕著な縮退が生じ、例えば、逆位相の正弦波の間の距離が0となるという問題を指摘する。その解決法として、計算効率を維持しつつ距離の頑健性を高めるため、sliced Wasserstein距離(Bonneel et al. 2015)の適用を提案する。Sliced Wasserstein距離は一般次元の確率分布に対し、ある方向に射影して得られる1次元確率分布のWasserstein距離を全方向にわたって積分平均することにより定義され、実用上は有限個の方向に対する平均で近似される。本研究では、Sambridge ら (2022)による時間軸・振幅軸に加え、それらと45度をなす2方向に射影した計4方向の1次元 Wasserstein距離の平均を用いることで、正弦波に対し距離の頑健性が向上することを示す。

Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning

-Part1 Response spectrum simulation for crustal earthquake in Kinki district, Japan-

*Hidenori KAWABE¹, Tianzeng WEI¹, Kai TERAZONO¹

1. Osaka University

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、強震観測網の整備が進み、強震記録の数が大幅に増えている。膨大な強震観測記録を用い精度の高い地震動予測を行う方法として、近年、機械学習が注目されている。大規模な地震の際に構造物の被害を軽減するためには、構造物の建設地点において精度の高い地震動予測が必要である。そこで、本研究では耐震設計を行う際に一つの指標として用いる擬似速度応答スペクトルを対象として、機械学習を用いた予測モデルの構築を目指す。その1（本稿）では、近畿地方の地殻内地震について、対象地域の全ての観測点を対象として予測モデルを構築を目指す。その2では、九州地方を対象として2016年熊本地震の記録を用い、観測地点ごとの最適な予測モデルについて検討する。その3では、東日本を対象として、地殻内地震の予測モデルについて検討する。

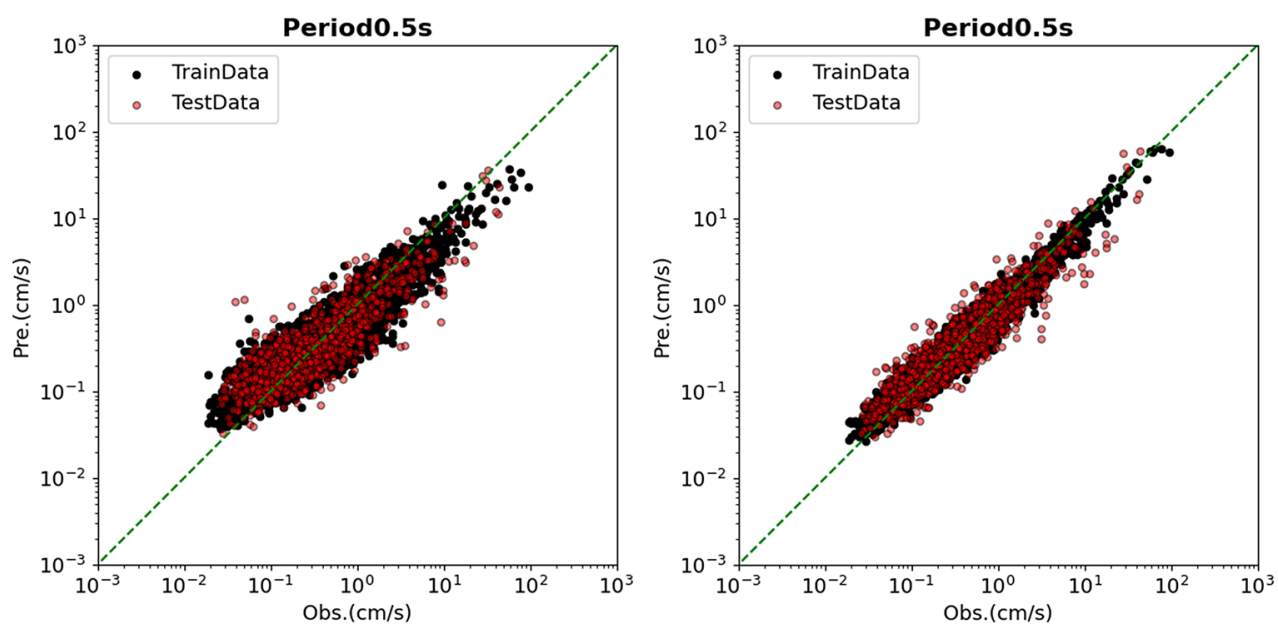
2. 検討対象地震及び観測記録

検討対象の地震は、1997年1月から2021年11月までに近畿地方で発生したMj4以上の地殻内地震とする。具体的には、東経134度から137度、北緯33度から36度、深さ20km以浅で発生した地震を対象とする。観測記録は、防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの地表の記録を用いる。なお、P波の立ち上がりが記録されていない波形及びSN比が悪い波形は除外する。結果として、98の地震に対して、計5580個の観測記録を選定した。

3. 解析の概要及び解析結果

予測の対象は水平2成分の減衰5%の擬似速度応答スペクトルとする。本検討では、擬似速度応答スペクトルの予測対象周期は0.25秒から10秒までとし、周期間隔は周期0.25秒とする。ここでは、機械学習のアルゴリズムのうち、深層学習とXGBoostを用いて目的変数とする周期毎の擬似速度応答スペクトルの値の最適な予測モデルの作成を目指す。両手法の周期毎の予測精度を比較し、精度がより高い手法を用いて近畿地方の擬似速度応答スペクトルの予測モデルを構築する。震源の位置及びマグニチュード、震源のメカニズム解、観測点の位置、観測点の地下構造などの情報を組み合わせて複数の入力変数の組み合わせを設定する。一例として、深層学習とXGBoostを用いて計算した観測点ごとの周期0.5秒の擬似速度応答スペクトルと観測記録から計算した擬似速度応答スペクトルの比較を図1に示す。なお、この図の計算では、入力変数（特徴量）を震央距離、方位角、Mj、震源深さ、AVS30、地震基盤深さとしたときの結果である。この図から、XGBoostを用いたほうが、観測記録の再現精度がよいことがわかる。本発表ではこれらの検討結果と最適な予測モデルについて紹介する。

謝辞：本研究では、気象庁および防災科学技術研究所のF-netの震源情報、K-NETおよびKiK-netの地震記録、ならびにJ-SHISの地下構造モデルを使用させて頂きました。ここに記して感謝いたします。



(a) 深層学習

(b) XGBoost

図 1 周期0.5秒の計算結果の比較

Prediction of velocity response spectrum by using a 1-D convolutional neural network

*Daiki Taya¹, Takashi Furumura¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

大地震が生じた際に長周期地震動の早期予測を行うことは、高層ビルが密集する大都市圏の防災において重要な役割を持つ。2004年新潟県中越地震では関東平野において周期数秒の長周期地震動が強く生成し、都心の超高層ビルのエレベーターケーブルが一部損傷するなど被害が生じた。

機械学習は画像認識や自然言語処理の分野で広く活用されており、近年、地震学の分野でも機械学習の活用が進み、地震波形データからマグニチュード推定 (Ristea et al., 2021) や広域の最大加速度 (PGA) の予測 (Jozinović et al., 2020 ; Kubo et al., 2020) などへの活用が進められている。本研究ではこれらの既往研究を発展させ、震源域近傍での強震観測データから遠地の平野の評価地点の速度応答スペクトルを予測する機械学習モデルを検討した。

2. データ・手法

本研究では、新潟県周辺地域で発生した地震を対象として、Hi-net高山観測点 (TAYH : 群馬県高山村) での速度波形データから、Hi-net富岡観測点 (YFTH : 横浜市金沢区) の速度応答スペクトルの予測を行った。2観測点間は約150 km離れており、長周期地震動を形成する表面波の到達には約55 秒の時間差がある。なお、事前調査によりYFTHとTAYHとの観測波形とのコヒーレンシーが高い (0.9) ことを確認し、TAYHを予測の入力データ地点として選定した。

学習データには、東経136.4度~139.1度、北緯36.9~38.7度の範囲で2004年4月~2007年10月に発生したMw4.5以上の地震33個について、5分間のHi-net速度波形データを用いた。これらの震源およびMw分布を図1に示す。前処理として、Hi-net波形データには地震計特性補正フィルタ (Maeda et al., 2011) をかけて広帯域化し、0.05~2 Hzのバンドパスフィルターをかけた後に20 Hzにリサンプリングした。また、予測地点における周期0.05~100秒の範囲の速度応答スペクトル (減衰定数5%) を求め、入力波形データとペアとなる教師データセットを用意した。なお、入力波形データは最大速度 (PGV) 値で規格化を行った後に、 $\log(\text{PGV})$ を乗じて振幅の大小の情報を一部残した。また、速度応答スペクトル値も対数化し、振幅を1/10にすることで、予測データの値が0~1の範囲に収まるようにした。

予測モデルは、先行研究のJozinović et al. (2020) によるCNNモデルの構成を参考にしてPythonのKerasライブラリを用いて作成した。本モデルでは1次元データ長6000ポイントの地震波形を3段の畳み込み層に入力し、畳み込み結果を平滑化したのち全結合層を通してデータ長200ポイントの速度応答スペクトルを出力する。活性化関数にはRelu関数を用い、最後の全結合層は学習の収束のために ± 1 で頭打ちとなるtanh関数を用いた。損失関数は観測と予測応答スペクトルの二乗誤差を評価するものを用い、バッチサイズ32で70エポック数の学習を行い、損失率の収束を確認した。なお、ここでは1成分 (EW成分) の予測を行うものとするが、平行して他成分の予測も同様に行うことができる。

3. 結果

学習済みモデルを用いて、新潟県周辺で2011年以降に発生したMw4.5以上の11個の地震の予測性能を確認した。性能評価は、速度応答スペクトルの予測/観測比を周期1~15秒の範囲で平均した値を用いて行った。図2(a)に、2011年3月12日に新潟/長野県境で発生した長野県北部地震 (栄村地震) の予測結果 (赤) と観測値 (黒) を比較する。予測性能の評価値は0.96となり、速度応答スペクトルの良い予測が確認された。図2(b)に、予測を行った11個の地震の性能評価値の範囲の四分位数を、箱ひげ図を用いて示す。予測の四分位は0.6~1.4の範囲に入っており、やや幅はあるものの実用上十分な予測精度を持つと言える。

次に、地震観測期間とともに学習データを増やすことで予測精度の変化を確認した。2004~2007年の観測データを用いた学習済みモデルに対して、さらに2007~2010年に発生した24個の地震を学習データに追加した。追加学習は、先の学習済みモデルに対して、新たな学習データで再学習する転移学習により行った。図

2(b)右に転移学習モデルによる予測性能の評価値を示す。先の予測モデルによる結果と比較して、予測性能の四分位範囲が0.7～1.2に狭まっており、転移学習による予測性能の向上が確認された。

4. まとめと今後の展望

本研究で作成した機械学習モデルにより、震源近傍の観測点での波形データから遠地の平野の長周期地震動の速度応答スペクトルの予測を行った。地震観測データの蓄積に伴い、日常的に転移学習を繰り返し進めることで、予測性能の向上が期待できる。一方で、本予測モデルでは2019年山形県沖地震（Mw6.8）など、予測性能評価値が低い（0.59）ケースも確認され、これは転移学習後（0.55）も大きく改善されなかった。これは、山形県付近の地震活動が低いことが原因と考えられる。転移学習においても学習データのMw分布の偏りに注意が必要であり、Mwの小さな学習データを増やしすぎるとかえって大地震の予測性能が低下する可能性がある。

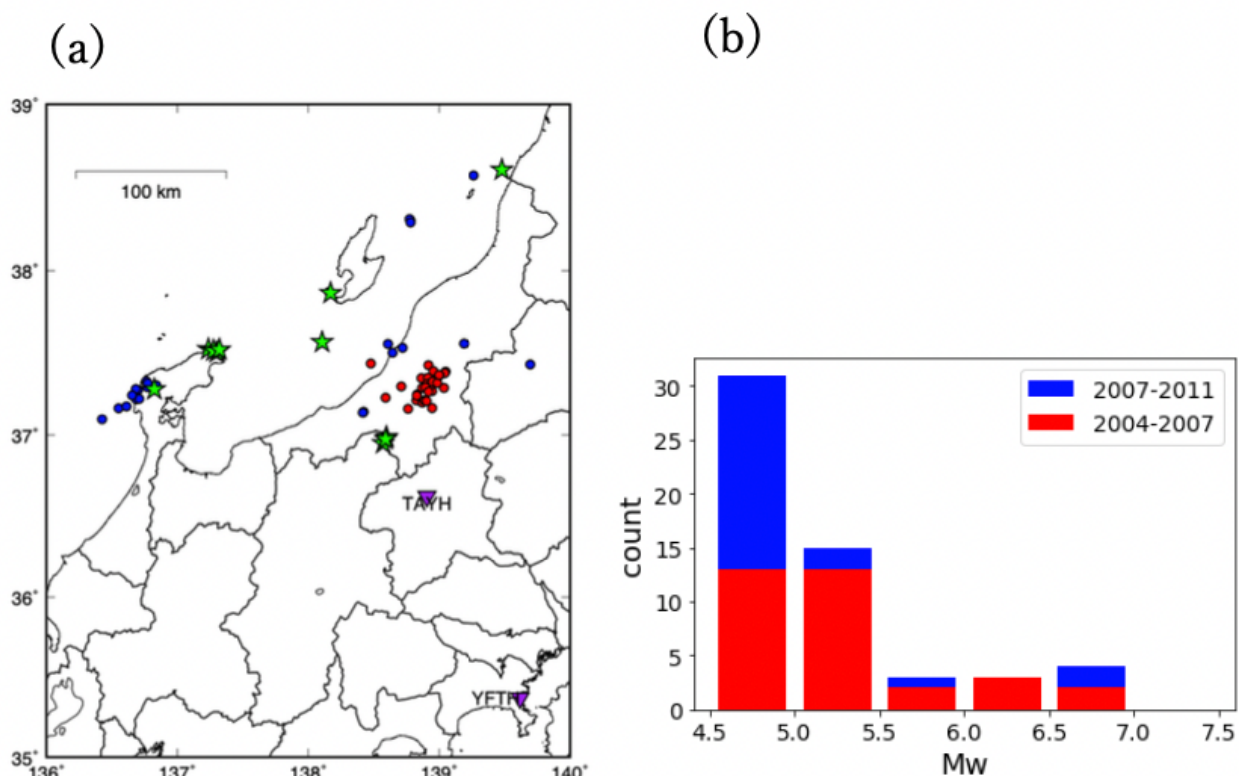


図1 (a) 学習に用いた地震の震源分布。赤○は2004～2007年の33個の地震、青○は転移学習に用いた2007～2011年の24個の地震。黄☆はテストに用いた11個の地震。(b)それぞれの地震の規模分布。

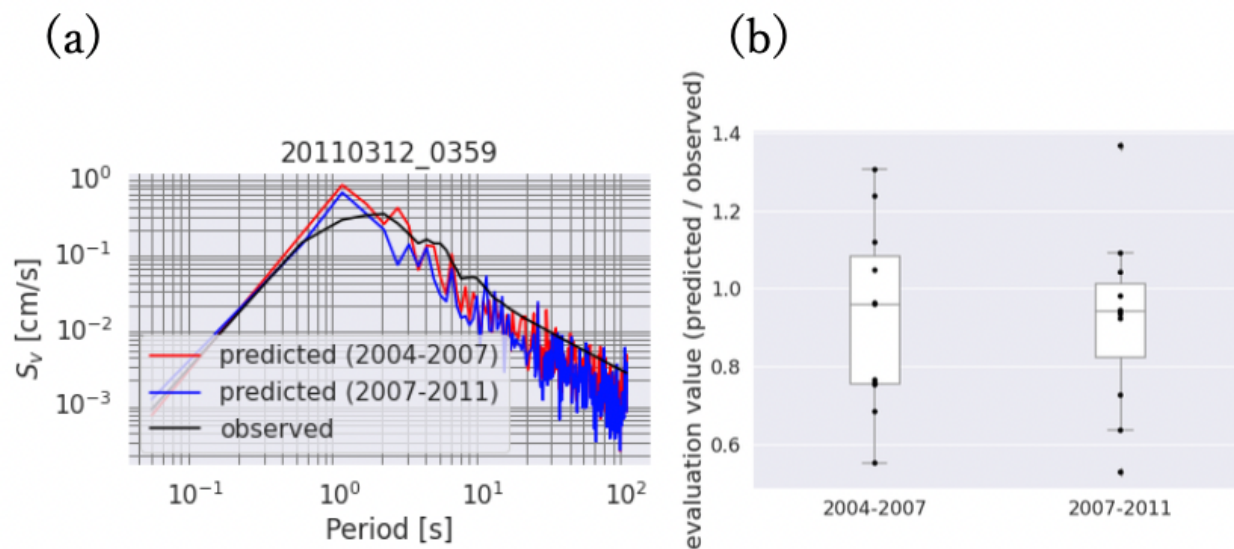


図2 (a) 横浜地点 (YFTH) における速度応答スペクトルの予測結果 (赤) と観測 (黒) の比較 (2011年3月12日長野県栄村の地震の例)。青線は、2007年～2011年の転移学習データを用いた予測結果。(b)11個の地震の速度応答スペクトルの予測結果の分布 (左:2004～2007年の地震による学習、右:2007～2011年の地震による転移学習)。

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:45 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:45 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] AM-2

chairperson:Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S23-01] Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake using automatic hypocenter determination

*Koji TAMARIBUCHI¹, Shota Kudo² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake using automatic hypocenter determination

*Koji TAMARIBUCHI¹, Shota Kudo²

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency

地震の発生時刻、場所、規模を記録した地震カタログは、地震研究や地震防災において、極めて重要なビッグデータである。しかし、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震以降は、膨大な地震が発生して処理M下限(余震域において海域M3、陸域M2)を設けたため、それ未満の微小地震は未だ十分にカタログ化されていない。そのような未カタログイベントを検出するため、溜淵・中川(2020)は同時多発地震に対応した自動震源決定手法(PF法)を2011年3月の地震波形に適用し、従来の一元化地震カタログの2倍以上に相当する自動震源カタログを作成した。さらに自動震源には数~10%程度の誤検出が含まれるため、機械学習の一種である教師ありアンサンブル学習を得られた自動震源の検測値に適用して誤検出の除去を試み、96.9%の正答率で地震とノイズを分類できることを示した(溜淵, 2021, JpGU)。本発表では、上記に加えて、深層学習の一種であるConvolutional neural network(CNN)を地震波検測のP, S, N(ノイズ)判別に活用することで、更なる誤検出の抑制に効果があるか検証したので報告する。

データ: 2011年3月から2012年2月までの1年間の地震波形(主に高感度速度波形)、約1400地点を解析に用いる。ここでは主に2011年3月の1か月の結果に着目する。なお、2011年3月11日から数日間、観測網の広域欠測により一時的に使用観測点数が3月11日17時台をボトムに1129地点まで低下した。

手法: 自動震源決定は、(1) 相読み取り、(2) 相組合せ探索(phase association)、(3) 震源計算、(4) 品質管理の主に4つのプロセスからなる。(1) 相読み取りはAR-AIC等の従来の検測手法を用いて検測した後、検測時刻周辺4秒間の3成分地震波形をCNNに入力して、P/S/N確率を得る。P/S/N確率のいずれが閾値以上の場合、それぞれ ± 2 秒間に検測されたそれ以外の相を削除した。いくつか変更しながら震源決定数を検証し、閾値を0.9とした。具体的には、例えばP確率0.9以上の場合、 ± 2 秒以内のS相を削除した。CNNは工藤・他(2020, 地震学会)が学習したモデルを用いた。(2)(3) 重点サンプリングを用いて最適な相の組合せを探索(PF法)し、震源決定は気象庁一元化震源と同じプログラムを用いた。(4) 品質管理では、震源検測値の各種特徴量(震源誤差、P/S検測値等)を入力とし、LightGBMにより品質ラベル分類を行った。教師データは溜淵・中川(2020)で作成した自動地震カタログ(3月1日~16日の約2万イベント)を目視で波形を確認し、4つのラベルに分類した(A: 震源近傍で誤検測がない, B: 誤検測数が1~2つ, C: 誤検測数が3つ以上, D: ノイズ)。Tamaribuchi et al. (2021)ではモデルとしてAdaBoostを採用したが、その後さまざまなモデルで検討した結果、最も正答率が高かったLightGBMをここでは採用した。検測値だけでは、ラベルA, B, Cの判別ができず全体の正答率は81.9%だが、ラベルA, Dに限って正答率を算出すると97.8%であった。

結果: CNNデノイザの効果を検証するため、地震多発時(3月11日12-24時)と平常時(3月1日0-12時)のそれぞれ12時間の自動震源を、震源時5秒以内かつ震央距離50 kmの条件で一元化震源と比較した。その結果、相読み取りの総数は地震多発時も平常時もともに約3割削減されたにも関わらず、一元化震源と一致する自動震源の数はほぼ変わらなかった。これはノイズの誤検測を適切に除去できていることを示している。

2011年3月の期間に得られた自動震源は、112,004個であった。CNNデノイザ前後の震源分布を比較すると、島しょ部などで従来見られた誤検出が抑制されている。そのうち、品質管理処理による分類結果はA: 100,265, B: 5,882, C: 5,055, D: 802であった。CNNデノイザ導入前の自動震源(溜淵・中川, 2020)を同様に分類したところA: 104,253, B: 7,545, C: 6,848, D: 3,707であったので、導入前後の個数比はA: -4%, B: -22%, C: -26%, D: -78%となり、誤検測がないラベルAもわずかに減少したものの、誤検測を含むラベルB, C, Dを大きく減らすことができた。得られた自動震源のうちラベルA, Bの震源のうち、一元化震源カタログと一致しない(すなわちカタログ未掲載)の地震は67,438個であった。一元化震源は本期間で55,112個(低周波フラグ除く)だったので、両者をマージすることで従来の倍以上の地震数が得られた。自動震源(ラベルA, B)を一元化震源にマージしたカタログの規模別頻度分布を地域別にみると、多くの領域でMc(completeness magnitude)が低下し、秋田県などの東北地方の内陸では最大約8倍の震源数となった。

DD法でこれらの地域の相対震源決定を行うと、微細な断層構造を見ることができる。今後、さらに長期間の微小地震を含めたカタログを作成、解析することにより、巨大地震後の微小地震活動の特徴を調査する予定である。

謝辞

防災科学技術研究所，大学，関係機関，および気象庁の地震波形を使用しました。解析には東京大学地震研究所共同利用 (2022-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用しました。一元化震源を使用しました。

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

🏠 Tue. Oct 25, 2022 1:45 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 4:45 AM - 5:45 AM UTC | 🏠 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-1

chairperson: Hiromichi Nagao (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:45 PM - 2:05 PM JST | 4:45 AM - 5:05 AM UTC

[S23-03] [Invited] Short-term Forecast of Repeating Earthquakes Considering Spatiotemporal Aseismic Slip Rate along Plate Boundary

*Shunichi NOMURA¹, Naoki UCHIDA², Yosihiko OGATA³ (1. Waseda University, 2. Tohoku University, 3. The Institute of Statistical Mathematics)

2:05 PM - 2:25 PM JST | 5:05 AM - 5:25 AM UTC

[S23-04] [Invited] Uncertainty quantification of seismic tomography based on physics-informed neural networks and particle-based variational inference in function space

*Ryoichiro AGATA¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

2:25 PM - 2:45 PM JST | 5:25 AM - 5:45 AM UTC

[S23-05] [Invited] Data-driven reduced order model and sparse sensor optimization with its application to seismic wave field

*Taku Nonomura¹ (1. Graduate School of Engineering, Tohoku University)

[Invited]Short-term Forecast of Repeating Earthquakes Considering Spatiotemporal Aseismic Slip Rate along Plate Boundary

*Shunichi NOMURA¹, Naoki UCHIDA², Yoshihiko OGATA³

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

プレート境界などで見られる小繰り返し地震は大規模な繰り返し地震と比べてはるかに多く観測されており、なおかつ、はるかに短い周期で繰り返されている。それゆえ、小繰り返し地震は短期の予測でも高い発生確率が得られ、短期間で予測と実績とを比較して予測手法を検証することが可能である。予測手法の有効性が小繰り返し地震について実証されれば、大地震の予測への活用も期待できる。

しかし一方で、小繰り返し地震の予測は、周辺の大地震による余効すべりや、スロースリップと呼ばれる非地震性すべりの加速などの影響を受けて繰り返し周期が変化するという難点を抱えている。一定の繰り返し周期を仮定した定常なモデルによる予測は、そのような状況下では容易に破綻してしまう。そこで本研究では、非定常な更新過程モデルを用いた小繰り返し地震の予測手法を提案する。

提案モデルでは、プレート境界沿いに分布する小繰り返し地震群の活動変化から、その周辺域におけるプレート間非地震性すべり速度の時空間変化を推定する。すべり速度の時空間変化はテンソル積スプライン関数により表現した上で、平滑化罰則付き尤度の最大化により推定を行う。さらに、観測期間以降のすべり速度の時空間変化を線形補外することにより、短期的な将来期間における小繰り返し地震の発生確率を評価することができる。提案モデルを東北日本太平洋沖の小繰り返し地震カタログに適用し、小繰り返し地震の将来発生確率評価を試みる。

[Invited]Uncertainty quantification of seismic tomography based on physics-informed neural networks and particle-based variational inference in function space

*Ryoichiro AGATA¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

人工・自然の地震波の走時から地球内部の地震波速度構造を知るための地震波トモグラフィにおいては、速度構造自体の推定は当然ながら、推定値の不確かさを定量化することも、解析結果の信頼性を担保する上で重要である。ベイズ推定を地震波トモグラフィに導入することで、走時の観測データ、走時データに含まれるノイズ、対象地域の地震波速度に関する事前知識などに基づき、推定した速度構造の事後確率分布を求めた研究例は多く存在する（Bodin et al., GJI, 2009など）。他方、微分方程式から拘束を与えた深層ニューラルネットワーク（DNN）により微分方程式や逆問題を解くPhysics-informed neural networks (PINN)(Raissi et al., JCP, 2019)が注目を集めている。PINNは、方程式に含まれる関数をDNNで直接近似し、関数が方程式を満たすようにDNNを自動微分を用いて最適化して求解を行う。地震波トモグラフィに関しても適用が進められ、拡張性の高さ、メッシュフリーであること、推定の際に地震波速度の初期モデルを必要としないこと、などの利点が示されている(Waheed et al., arXiv, 2021)。これより、PINNに基づいた地震波トモグラフィを、ベイズ統計学に基づく不確かさ定量化に拡張することは有意義であると考えられる。

本研究では、PINNに基づいた地震波トモグラフィにベイズ推定を導入することを試みる。これは、DNNを構成する重みパラメータをベイズ推定するベイズニューラルネットワーク(BNN)の問題に分類される。対象とする問題は、地震波トモグラフィに対するPINNのベイズ定式化と、適切なBNNの推定、の二つに分解できる。後者について、大規模問題への拡張を見据え、粒子ベース変分推論（例えばStein variational gradient descent, Liu et al., NIPS, 2016)のPINNへの導入(Sun et al., TAML, 2020)を考える。粒子ベース変分推論は、多数の粒子で近似的に表現した確率分布と真の事後確率分布との差を表す汎関数を、粒子を逐次アップデートしながら最小化し、近似的な事後確率分布を得る。BNNによく用いられるハミルトニアンモンテカルロ法などのサンプリング手法に比べ、アルゴリズムの並列性が高い点、またより少ない粒子（サンプル）数で効率よく事後確率分布を近似できる点で、大規模問題への拡張性が高いと考えられる。ただ、DNNがある程度複雑で、重みパラメータの事後確率分布の多峰性が強くなりやすい場合、粒子ベース変分推論によるBNNでは不確かさを過小評価しやすくなるとの報告がある(Wang et al., ICLR, 2019など)。そこで本研究では、重みの空間ではなく、DNNで近似する地震波速度などの関数の空間において、ベイズ・粒子ベース変分推論の定式化を行う。最適化の毎ステップにおいて、関数の値に対して計算される更新幅を重み空間に逐次変換することで、各DNN粒子を最適化していく(Wang et al., ICLR, 2019)。関数空間においては、事後確率分布の形状がより単純だと考えられることから、粒子ベース変分推論による事後分布推定がより容易に実施できると期待される。

既往研究（Zhang et al., JGR, 2020）を参考に、P波速度が2km/sの領域の中に1km/sの円形低速度領域が一つ存在する速度構造を、低速度領域を囲む発振点・観測点を用いて推定する数値実験を設定した。速度構造の事前分布には一様分布を用いた。提案手法である、関数空間における粒子ベース変分推論に基づくPINNを用い、P波到達時刻を用いた速度構造とその不確かさの推定を行った。重み空間についてベイズ推定する通常の粒子ベース変分推論に基づく手法を用いて同じ問題を解き、結果を比較した。双方について、速度構造の推定値として妥当なものが得られた。また不確かさ推定においては、波線の通る部分・通らない部分でそれぞれ不確かさが大きく・小さく推定された。一方、通常の粒子ベース変分推論に基づく手法では、波線の通る・通らないに関わらず、不確かさが過小評価されていることが示唆される結果を得た。提案手法において導入された関数空間に注目したベイズ推定が、PINNを用いた地震波トモグラフィの不確かさ定量化に対してより有効であることが示唆される。一方、提案手法であっても、従来の数値シミュレーションベースの推定結果（Zhang et al., JGR, 2020）と比べ、全体として不確かさが小さめに推定されたことは特徴的であった。これは、対象領域

のうち、走時データからの拘束が弱い（つまりデータの説明度合いに影響しない）領域について、DNNがより少ないパラメータで速度構造を表現するように学習した結果、不確かさが小さく推定されたものと考えられる。これはPINNによる速度構造や走時の関数の学習がブラックボックスなパラメータ化を伴っていることに起因しており、地震波トモグラフィ等の推定にPINNを用いる際にユーザが注意すべき点も併せて示唆されたといえる。

[Invited]Data-driven reduced order model and sparse sensor optimization with its application to seismic wave field

*Taku Nonomura¹

1. Graduate School of Engineering, Tohoku University

近年、流体力学などの大規模自由度場に対してデータ駆動型低次元モデルやスパースセンサ最適化技術を利用した解析が提案されつつある。講演者のグループではこれらの技術を地震波動場再構成に活用する研究を行っている。本発表では、これらの技術の概要を説明したうえで、流体力学におけるアプリケーションおよび地震波動場へ適用例を示したい。

本予稿では、データ駆動型低次元モデル、スパースセンサ最適化技術、地震波動場への適用に関して概説する。

【データ駆動型低次元モデル】流体力学場や地震波動場は非常に多くの自由度を持つが一方で少数のモードでこれらが表現できることが知られている。このようなデータ駆動型の解析で得られる空間モードを用いて全体場を少数の潜在変数で表現することで、低次元モデルを構築できる。ここでは固有直交分解（主成分分析）を利用して、空間モードを抽出し、モード係数を潜在変数として低次元モデルを構築する方法を説明する。

【スパースセンサ最適化技術】上述の低次元モデルで場が表現されるとすると、場の再構成にはモード係数（潜在変数）を同定すれば良いこととなる。このモード係数を求めるには、場のすべてを観測する必要はなく、モード係数を求めるために感度の高い疎な（スパースな）センサ点のみの観測で良い。この際に感度の高いセンサ点を求めるのがスパースセンサ最適化技術となる。具体的には、本問題はモード係数（潜在変数）の大きさを求める線形逆問題として定式化ができるため、実験計画法に基づき線形逆問題に対して、スパースセンサ点を最適化することができる。

【地震波動場への適用】上述の技術を利用して、プロセス駆動型およびデータ駆動型地震波動場再構成の研究を行っている。プロセス駆動型地震波動場再構成では、地震動シミュレーションの入力パラメタの変化に対して感度の高い観測点を選択し、未知のパラメタで実施したシミュレーションに対してこれらの観測値を利用することで入力パラメタがより精度よく求まることを示す。また、データ駆動型地震波動場再構成では、モード分解により少ない観測点の情報から精度よく地震波動場再構成ができること、さらにセンサ最適化技術と組み合わせることでより効率が上がることを示す。

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Tue. Oct 25, 2022 3:00 PM - 3:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:00 AM - 6:45 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-2

chairperson: Keisuke Yano (The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S23-06] Development of Observation Site Selection Method based on Sensitivity to Physical Model Parameters toward Process-driven Seismic Wavefield Reconstruction

*Kumi Nakai^{1,2}, Takayuki Nagata², Keigo Yamada², Yuji Saito², Taku Nonomura², Masayuki Kano², Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-07] Application of compressed sensing using data-driven reduced-order model to seismic wavefield reconstruction

*Takayuki Nagata¹, Kumi Nakai^{2,1}, Keigo Yamada¹, Yuji Saito¹, Taku Nonomura¹, Masayuki Kano¹, Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-08] Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources

*Jiancang ZHUANG¹, Zhengya Si² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Beijing Earthquake Agency)

Development of Observation Site Selection Method based on Sensitivity to Physical Model Parameters toward Process-driven Seismic Wavefield Reconstruction

*Kumi Nakai^{1,2}, Takayuki Nagata², Keigo Yamada², Yuji Saito², Taku Nonomura², Masayuki Kano², Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震学におけるデータ駆動型モデリングやデータ同化を効率よく実施するため、観測点選択技術の開発は重要課題の一つである。これは、新たに観測点を設置する場合の最適位置や、大地震発生時の震度分布を十分な精度で推定するために必要な観測点セットを明らかにできる。そこで本研究では、流体力学分野で近年発展してきたスパースセンサ位置最適化技術を地震波動場に応用することで、プロセス駆動型アプローチによる高精度な地震波動場再構成のための観測点選択手法を提案する。

本提案手法は、地震動シミュレーションの入力である物理モデルパラメタの高精度推定に適した観測点を選択する。具体的には、各観測点候補の推定対象パラメタに対する感度を表す感度行列を作成し、感度行列の特徴量を最適実験計画法におけるD最適指標に基づき評価する貪欲法により、パラメタ感度の高い観測点を選択する。そして、選択された観測点における観測データに基づき物理モデルパラメタを推定、推定値を用いた地震動シミュレーションを実施し、地震波動場を再構成する。

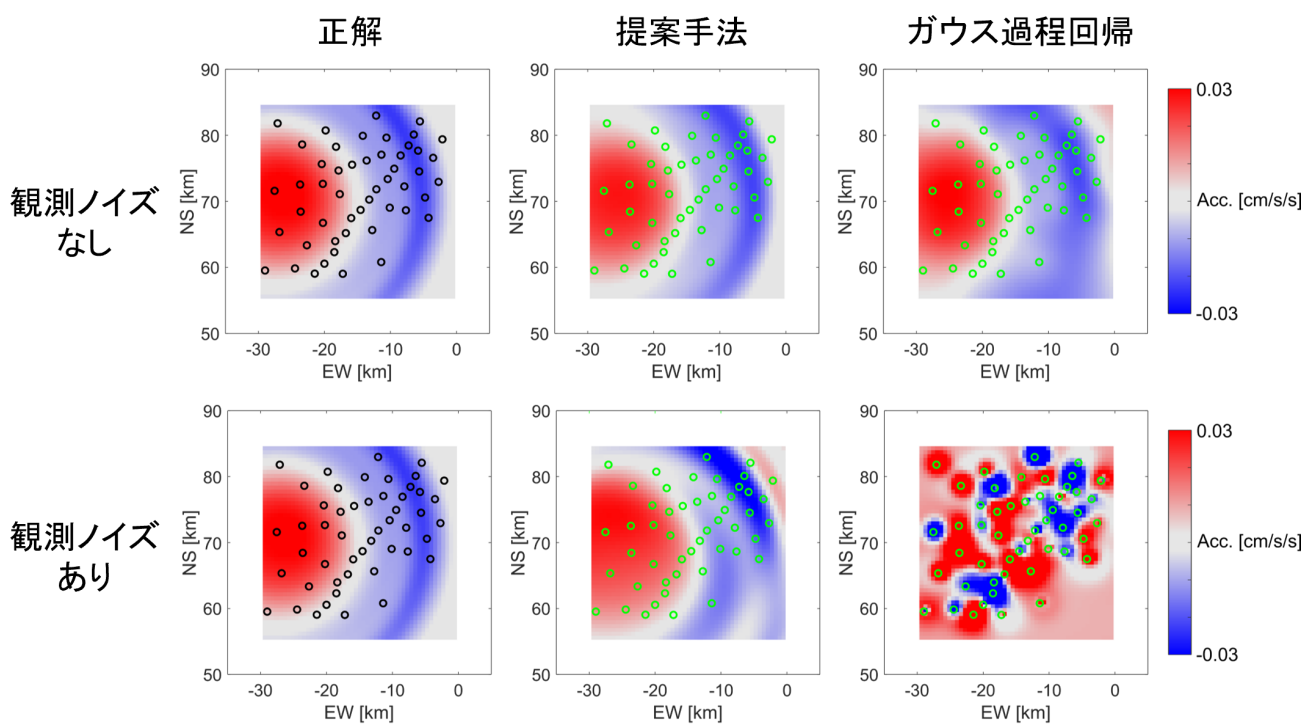
本研究では、地震動の理論波形を計算する低コストシミュレーションを用い、提案手法による観測点選択および地震波動場再構成の数値実験を、東京23区内のMeSO-net観測点50点を模擬した観測点群で行った。提案手法によって選択された観測点を用いた地震波動場再構成の精度を検証し、提案手法の有効性を示した。さらに、観測点候補の感度特性を調査し、地震波の伝播速度や地下構造の層の厚さ、震源位置などのパラメタ感度に対する物理的知見を得た。

Application of compressed sensing using data-driven reduced-order model to seismic wavefield reconstruction

*Takayuki Nagata¹, Kumi Nakai^{2,1}, Keigo Yamada¹, Yuji Saito¹, Taku Nonomura¹, Masayuki Kano¹, Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³

1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震動分布の推定は、大地震発生時の被害予測における重要技術の1つである。特に、空間的に連続な波動場の即時再構成は、現地調査なしに被害状況を把握することを可能とし、災害対応の初期段階における意思決定に有益なツールとなり得る。高速・高精度の再構成には、事前情報の利用が不可欠である。近年、流体力学分野では、データ駆動型の低次元モデルを用いてスパースな観測から全場の状態を再構成する技術が発展してきた。本研究では、流体力学の分野で開発され、発展してきたデータ駆動型の低次元モデルを用いた圧縮センシングによる再構成フレームワークを地震波動場の再構成に適用し、その適用性を数値実験によって調査した。地震動のデータは計算コストを抑えるため、理論波形を計算する簡便なシミュレーションで生成した。数値実験では、東京都23区直下および茨城県南部を震源とし、東京23区に設定した矩形領域内の波動場をMeSO-netの観測点50点の情報から再構成した。データ駆動型低次元モデルは、一定の範囲内でランダムにパラメタを振った多数ケースの波動場データセットから特異値分解を使用して生成した。空間的に連続な地震波動場は、観測点での観測値とデータ駆動型低次元モデルを用いて再構築される。また、再構成に使用する観測点は、貪欲法に基づく線形逆問題のためのセンサー位置最適化手法によって選択した。数値実験では、提案手法による再構成とガウス過程回帰による再構成を比較した。ノイズのない観測に基づく再構成の場合、提案手法では再構成に使用する観測点数が制限され、かつランダムに選択された場合でも、再構成誤差は数点の観測点でモデル誤差まで減少する。これは、事前に生成する波動場の基底の恩恵により観測点の密度が疎でも高波数の波動場まで精度良く再構成できることを意味する。また、提案手法で得られる再構成誤差は、ガウス過程回帰により得られる再構成誤差よりも小さい。強い観測ノイズがある場合では、再構成された波動場は観測ノイズの影響により劣化し、ガウス過程回帰を用いた再構成では波動場の定性的な特徴さえ復元できないが、提案手法では一定の精度で再構成が可能である。また、全観測点を用いた場合よりも再構成誤差は大きいものの、観測点選択手法と組み合わせることで、再構成結果の劣化や推定結果のばらつきを最小限に抑えながら、より少数の観測点で再構成できることが分かった。



再構成結果の例:ある時刻の瞬時南北方向加速度分布

Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources

*Jiancang ZHUANG¹, Zhengya Si²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Beijing Earthquake Agency

For the same earthquake, different seismic networks may give different solutions for its time, location, and magnitude. In particular, the differences in the estimated magnitudes are large due to many factors including correction of site responses, determination methods, and operation modes. Therefore, earthquake catalogs that are compiled by different networks cannot be merged into one by some simple operations. To solve this problem, we propose a Bayesian algorithm to solve this problem. By assuming that an observed magnitude follows a Gaussian distribution, with a mean of its unknown true value and a certain variance, both of which are dependent on the network and that the true magnitude follows a uniform trivial prior, we derive the posterior probability density of the true magnitude, based on the framework of Bayesian inversion. We use this method to merge the earthquake catalog recorded by a local temporary seismic network into the standard CENC catalog and to combine several Italian catalogs. The proposed method is fast and improves the stability and accuracy of the estimated magnitudes. The key point of this technique is making use of the consistency in magnitudes recorded by each network.

Figure 1: Revised magnitudes for the INGV ISIDe catalog (IV) and the Regional Seismic Network of North Western Italy catalog (GU).

Room B | Regular session : S05. Geothermal science

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:15 PM - 4:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S05] PM-3

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S05-01] Geophysical studies using optical fiber DTS and DAS in geothermal wells of Ohuma and Sumikawa geothermal fields in Akita

*Jyunzo KASAHARA^{1,2}, Yoko Hasada^{2,3}, Hitoshi Mikada⁴, Hiroshi Ohnuma², Yoshihiro Fujise^{2,5} (1. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazard, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. Graduate School of Kyoto University, 5. WELMA)

Geophysical studies using optical fiber DTS and DAS in geothermal wells of Ohuma and Sumikawa geothermal fields In Akita

*Jyunzo KASAHARA^{1,2}, Yoko Hasada^{2,3}, Hitoshi Mikada⁴, Hiroshi Ohnuma², Yoshihiro Fujise^{2,5}

1. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazard, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. Graduate School of Kyoto University, 5. WELMA

2018年以来、光ファイバーを用いて地熱坑井内でのDAS (Distributed Acoustic Sensor)による地震波の計測とDTS (Distributed Acoustic Sensor)による温度計測を行い、高精度の地熱探査を目指した研究開発を実施してきた。本報告では調査の方法と秋田県大沼、秋田県澄川で得られた結果を示し、その解釈の概要について述べる。2018年には南九州のメディポリス地熱フィールドにおいて、地熱坑井に光ファイバーを設置しても温度や地震波の計測ができるかどうかを確かめ、有効な温度と地震波の計測ができることが分かった。2019年に同じメディポリスの地熱坑井において人工震源による地震探査を行った結果、付近の深さ3.6 kmに地震波を反射する領域があることがわかり (Kasahara et al., 2020a), その領域が水の超臨界状態(374°C, 22.1MPa)にある可能性が示唆された(Kasahara et al., 2020b)。2020年には秋田県鹿角市大沼の地熱発電所の地熱坑井を利用しDASとDTSを用いた地熱フィールドの探査実験を実施した。その結果、深さ2.8-3.0 kmに地震波を強く反射する領域があることが分かった(笠原他, 2022a)。地震波の反射振幅からその領域は流体を含んでいると考えられる。2021年には北海道森町の濁川地区にある森地熱発電所のF-01地熱坑井を用いDASを用いた地熱探査を行った結果、深さ1,000 mの還元層に対応してDAS記録中のP波初動走時の異常があり、その深さでのP波の減衰が認められた(Kasahara et al., 2022)。同年10月には秋田県大沼地熱フィールドの西側に位置する澄川地熱フィールドにおいても同様な調査を行った。その結果南部の生産ゾーンと北部の還元ゾーンに対応する深さ1,500-2,000 mの領域に反射ゾーンがみられた。2022年5月大分県九重町の滝上地熱発電所周辺、同8月～9月秋田県木地山で同様な調査を実施している。

引用文献

Kasahara, J., Hasada, Y., and Kuzume, H. (2020a): Possibility of high Vp/Vs zone in the geothermal field suggested by the P-to-S conversion, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Kasahara, J., Hasada, Y., Kuzume, H., Mikada, H., and Fujise, Y. (2020b): The second seismic study at the geothermal field in southern Kyushu, Japan using an optical fiber system and surface geophones, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Kasahara, J., Hasada, Y., Kuzume, H., Ohnuma, H., Mikada, H., and Fujise, Y. (2022): A field experiment of temperature-tolerant distributed acoustic sensor in deep geothermal reservoir prospecting, *The Leading Edge*, **41**, 306-312.

笠原順三・羽佐田葉子・久詰晴康・三ヶ田均・藤瀬吉博 (2022a) : 秋田県大沼地熱発電所地熱井内のDASを用いた地熱探査, *日本地熱学会誌*, **44**, 73-84.

Room B | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:30 PM - 5:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:30 AM - 8:45 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-3

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S15-01] Simple microtremor array survey at rock/hard-soil sites

*Ikuo CHO¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S15-02] Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model II, Application to 2014 Northern-Nagano Earthquake

*Kenichi TSUDA¹, Hideo Aochi^{2,3}, Shohei Yoshida⁴ (1. Institute of Technology, Shimizu corporation, 2. BRGM, 3. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 4. Ohsaki Research Institute, Inc.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S15-03] Extreme ground motion in K-NET and KiK-net strong-motion data over a quarter of a century

*Shin AOI¹, Takashi KUNUGI¹, Wataru SUZUKI¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S15-04] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 7 -
- Risky ground Movement Indications of Happening These Seismic Waves -

*Hiroshi MAEHARA¹ (1. Geosystem Research Institute)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S15-05] A Study on Earthquake Damage Prevention of Cultural Properties on Display:
Vibration Experiment of Japanese Sword

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO¹ (1. Nagoya University, 2. Token Corporation)

Simple microtremor array survey at rock/hard-soil sites

*Ikuo CHO¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

これまで微動アレイ探査は堆積層の厚い沖積低地・市街地では有効に活用されてきているが、岩盤・硬質地盤での適用例は少なかった。その一因として、岩盤では地震動の増幅が小さいことからサイト評価の優先度が低かったことが挙げられるかもしれない。しかし、ひとくちに「岩盤・硬質地盤」と言っても、全て同一の地震基盤S波速度（例えば、3 km/s）を持つわけではないし、風化や薄い堆積層の影響により、サイトごとに応答特性が異なるはずである。特に重要な構造物の周辺では詳細に評価したい場合もある。

発表者の推定になるが、岩盤・硬質地盤での適用例が少ない最大の理由は、「岩盤・硬質地盤サイトでは表面波が励起されない」ため微動アレイは不可と考えられてきたことにあるのではないだろうか。そして、実際に実施してもうまくいかないことが多かったため、問題が据え置かれてしまった可能性がある（「適用不可」という暗黙の了解）。実は、世界的には、この10年の間に、岩盤・硬質地盤での微動アレイ探査の問題に深く立ち入って問題を診断し、適用の可否を検討するような報告が見られるようになってきた。それらの成果を総括すると、「岩盤・硬質地盤での微動アレイ探査は可能」である。しかし、SNRが低いので慎重な観測が必要である。つまり、岩盤で表面波は励起されないのではなく、励起されているが、とても小さいので失敗しやすいということである。過去の成功例の多くは比較的大掛かりな微動アレイを用いており、これがSNRの問題の克服の要となっているとの考えが浸透しつつあるようである。

以上の背景により、本研究では、岩盤・硬質地盤サイトにおける微動アレイ探査の適用性を検証するとともに、それが非常に簡単なアレイで可能であることを示したい。SNRの問題は、微動アレイの規模（センサー数）ではなく、データ処理法の選択によって克服できる。具体的には、空間自己相関法（SPAC）の派生法であるゼロクロス法を適用すれば良い。ゼロクロス法はAki (1957)により発案され、地震波干渉法分野で多く用いられてきている方法である。著者は近年微動アレイ探査分野での利用可能性を検証した。

この方法はSPAC係数のスペクトル（以降、単にSPAC係数）—SPAC係数は第1種0次Bessel関数でモデル化されるのでそのスペクトルは一般に0線の周辺で振動する形状となる—がゼロを横切る周波数を用いて位相速度を同定する。SPAC係数はSNRが低いと振幅が過小評価されるので、SPAC係数から位相速度に変換する時にバイアスが生じる。しかし、ゼロクロス点の周波数はSNRに依存しないため、ゼロクロス法はバイアスを受けない。低SNRのサイトでは非常に効果的である。

簡易な微動アレイの適用については、直線アレイほどに単純（簡易）なアレイでは、岩盤・硬質地盤の微動アレイには波動場の方向性に起因するバイアス（方位エリアジング）が生じる可能性がある。岩盤・硬質地盤は一般に静穏なので、特定の振動源が卓越する可能性が高いからである。その場合、波動場の等方性の仮定が成り立たない可能性が高い。既存研究ではこれに大規模なアレイで対処したと考えることができるが、本研究では、方位エリアジングの系統的・理論的な評価に基づいて、簡単で実用的な微動アレイ形状を決定し、SPAC係数のゼロクロス点の読み取り法を改善した。

その結果によれば、3個のセンサからなる三角アレイでは、波動場によってはSPAC係数の最初の最小値よりも高周波数側（すなわち、第1ゼロクロス点よりもやや高い周波数側）でバイアスが生じる可能性がある。また、2つの独立な直線アレイ（別々の時刻に実施）からなるL字型アレイの場合、SPAC係数の最初のゼロクロス点よりすぐ上の周波数帯域でバイアスが生じる可能性がある。本研究では、この結果を踏まえ、バイアスの可能性を示す指標、すなわちゼロクロス点直後のSPAC係数の振幅によっては、後続のゼロクロス点を読み取らないことにした。また、系統的調査により、L字型アレイでは最初のゼロクロス点が不明瞭になることがあるが（例えば、ゼロラインを横切らずに触れるだけに見える）、2つの直線アレイの交差角が直角に近づくと方位エリアジングの影響が減少することが示された。そこで、本研究では、最もシンプルで実用的なアレイとして直角のL字型アレイを選択するとともに、最初のゼロクロス点の読み取り基準を工夫することとした。

上記の知見（理論）を観測データで検証するために北関東の15地点で取得された微動アレイデータを用いて位相速度の評価を行った。速度記録データに基づく深度30mまでの平均S波速度（Vs30）は182m/sから

1433m/sであり、14地点は岩盤・硬質地盤、1地点は比較的柔らかい地盤のサイトとなっている。微動アレイは、長さ 24 m の2つの独立した直線アレイ（別々の時刻に実施）で構成されるL字型アレイであった。各直線アレイは、4.5Hzのジオフォン7台の不等間隔配置で構成した。微動はそれぞれ約 20 分間記録された。得られた位相速度分散曲線に基づき、地盤パラメータ V_s10 、 V_s20 、 V_s30 とS波速度構造モデルを評価した。微動アレイデータの解析結果は、速度検層に基づく値と良く一致した。

Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model II, Application to 2014 Northern-Nagano Earthquake

*Kenichi TSUDA¹, Hideo Aochi^{2,3}, Shohei Yoshida⁴

1. Institute of Technology, Shimizu corporation, 2. BRGM, 3. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 4. Ohsaki Research Institute, Inc.

The influence of the depth-dependent stress variation on the rupture behaviour is important aspect for quantitative estimation of ground motions, although this feature has been rarely incorporated into ground motion simulation. Previously, we proposed the assumption that the stress is loaded according to the medium rigidity (Aochi and Tsuda, in revision, 2022). Consequently, stress is loaded only on a limited layer if a 1D structure model is applicable. On the accompanying presentation (Aochi et al., SSJ fall meeting, 2022), we numerically demonstrated the dynamic rupture process through 3D numerical simulations, particularly for the moderate size event, 2019 Mw 4.9 LeTeil (France) earthquake, showing a very shallow ruptured area with ground surface displacement. In this study, we extended this idea by making heterogeneous distribution of model parameters and apply it to the 2014 Northern-Nagano Earthquake (Mw 6.4). First, the depth-dependent stress distributions have been constructed based on the known layered structures derived from adjacent stations. We then allow heterogeneous distribution of dynamic stress level to be consistent with the simple characterised source model containing two asperity areas (Hikima *et al.*, SSJ meeting abstract, 2015). We used the Spectral-Element Method (e.g., Galvez *et al.*, GJI, 2014), reassuring the effective frequencies lower than 0.5 Hz. The resultant slip distribution is shown in Figure 1(a). The maximum slip is 3.8m and resultant moment magnitude considering area with over 0.1m slip as the fault surface is 6.4. We also show slip-rate functions at two typical points on the fault in Figure 1(b). Point 1, located around the edge of the asperity in the shallow, shows a very steep slip-rate function with large amplitude. This steep shape is different from Point 2, which shows a typical slip time function in the numerical simulations, namely a steep onset and the following decay). This fact might have big influence on the mechanism to generate short-period ground motions on the site close to the fault.

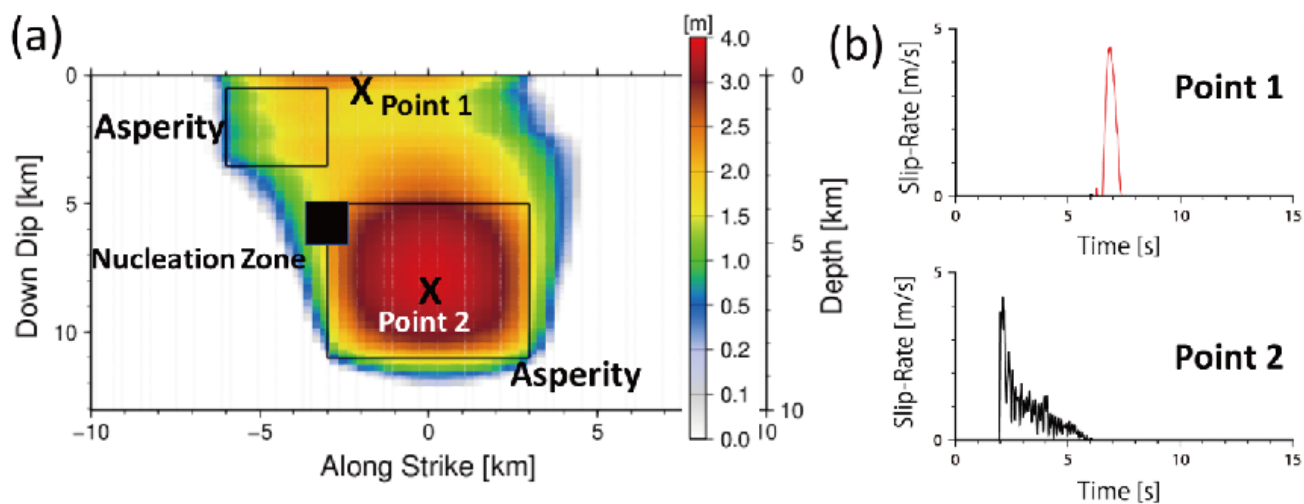


Figure1 (a) Simulated slip distribution based on the characterized source model by Hikima *et al.* (2015) (b) Slip-rate functions at two on-fault points whose positions are illustrated in Panel (a)

Extreme ground motion in K-NET and KiK-net strong-motion data over a quarter of a century

*Shin AOI¹, Takashi KUNUGI¹, Wataru SUZUKI¹, Hiroyuki FUJIWARA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

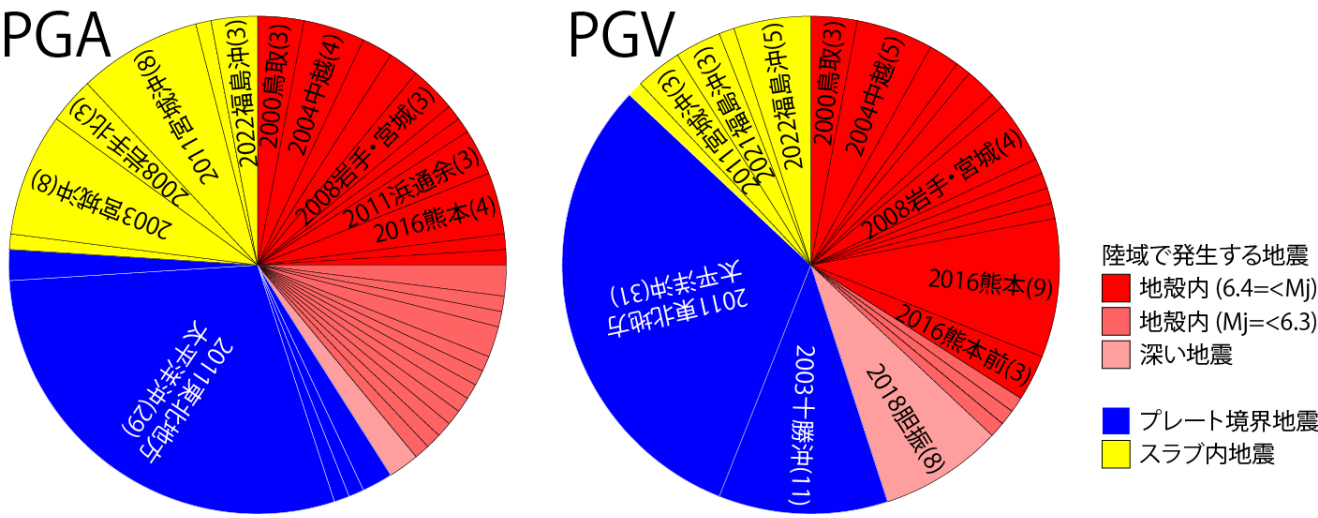
地震によるハザード・リスク評価にとって、地震動の上限とその特性を知ることは極めて重要な課題である。阪神・淡路大震災を契機に、全国を均質にカバーする1,750観測点余りからなる強震観測網K-NET及びKiK-netは、四半世紀余りの間に総地震数18,070、総記録数882,606に及ぶ膨大な強震記録を記録し蓄積してきた（1996/6/1～2022/6/30、以下同様）。K-NET及びKiK-netによる稠密な観測を持続的に実施することにより、過去知られていたよりかなり振幅の大きな地震動（いわゆる極大地震動）の存在が明らかになってきた。

地表における3成分合成の最大加速度（PGA）及び最大速度（PGV、0.1 Hzハイパスフィルター適用）の上位100記録（以下、Top100）のうち、PGAの最大と最小は2008年岩手・宮城内陸地震及び同地震の余震のIWTH25における4,022 cm/s/sと824 cm/s/sであり、PGVの最大と最小は2018年北海道胆振東部地震のHKD126における151 cm/s及び2021年福島県沖の地震FKSH11における53 cm/sである。本講演ではどのような地震で大振幅地震動が記録されたのかを知るため、Top100のデータを、陸域で発生する地震、プレート境界地震、スラブ内地震の三つに分類し、その特徴を考察する。

陸域で発生する地震の多くを占める地殻内地震は浅い場所で発生するため、特に大きな地震動が記録されるのは、地盤条件にもよるが、断層近傍である場合が多い。Mjが概ね6後半より大きな地震では複数の観測点でTop100内のPGAやPGVが記録されることがある。また、震央距離と震源深さがともに10 km程度以下の地震規模のやや小さな地震においても1gを越えるPGAが記録された地震が7地震ある。このような震源近傍の大振幅地震動の様相は、継続的に稠密観測網を行うことで観測機会が増えたことにより初めて捉えられるようになったと言える。また、陸域で発生し震源が深い地震として、2018年北海道胆振東部地震においてPGAは8観測点、PGVは2観測点でTop100内の地震動を記録している。

プレート境界地震としては、Mj9.0の2011年東北地方太平洋沖地震は極めて広域で大きな地震動が記録されており、PGAで29記録、PGVで35記録と、一つの地震としては圧倒的に多くの記録がTop100に入っている。PGVでは長周期が効きやすいため2003年十勝沖地震で11記録がTop100に入り、この二つの地震で半分近くを占めている。ただし、プレート境界地震は規模の大きな地震も多く発生するが、陸域から遠いあるいは深いなど震源距離が長い場合が多く、地震規模の割には必ずしも大振幅の地震動にはならず、他に大きな地震動を記録した地震は比較的少ない。

スラブ内地震は地殻内地震にくらべ震源が深いため、2003年及び2011年の宮城県沖の地震ではそれぞれ8観測点でTop100内のPGAを記録するなど、地震規模の割には比較的広域で大きな地震動が生じることがある。短周期が卓越する傾向があるためTop100の割合はPGAの方が多いがPGVが大きな地震も複数ある。2001年芸予地震と2022年日向灘の地震以外は全て東北地方で起きた地震である点も特徴的である。



Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 7 - - Risky ground Movement Indications of Happning These Seismic Waves -

*Hiroshi MAEHARA¹

1. Geosystem Research Institute

1.はじめに

昨年に続いて同じシリーズの主題の下に、副題を変えて発表します。昨年の予定では-その8-として、「衝撃的鉛直地震波動の新しい定義とその発生原因」を話すことでした。しかし、一つ前の発表の採択に手続きミスが生じたのと、現在の地殻変動の兆候は悠長な話をしている事態ではないことに、後述の通り5月になり気付きました。すでに-その5~7-は投稿済で、-その7-は採択漏れでしたので、2回の発表はそれぞれの副題に簡単に触れ、危険な地殻変動の後述の状況を緊急の話題として報告しました。ここでは-その7-として、表記の副題で緊急の報告をさせて戴きます。

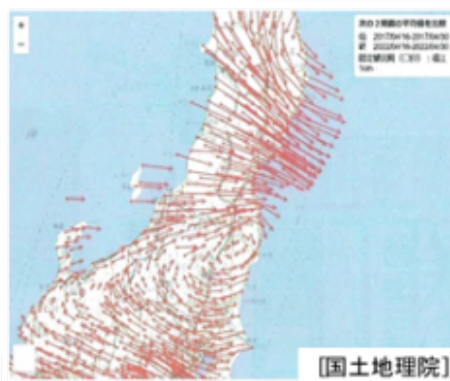
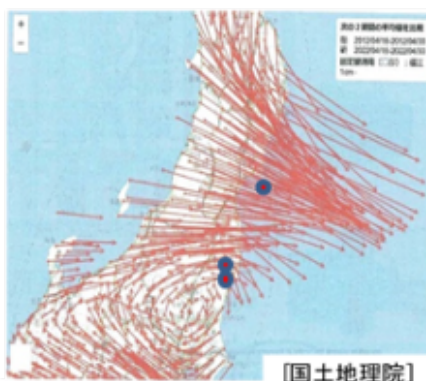
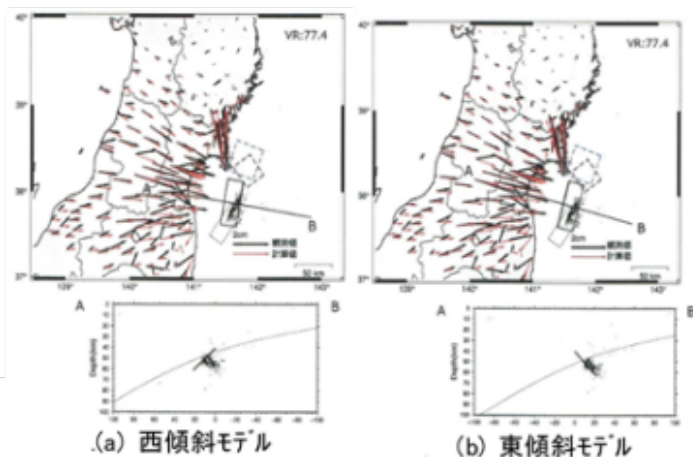
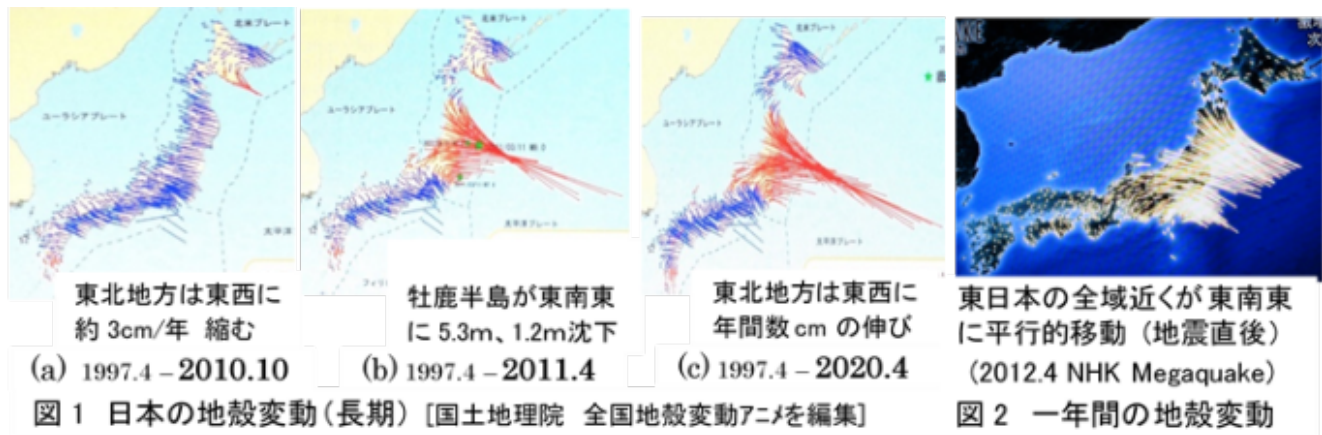
2.衝撃的鉛直地震波動の発生メカニズムの骨子

この問題の地震波の発生原因自体は物質の相変化であることは明確なことです。未解明なのはそのメカニズムの詳細です。しかし、これまでの研究から地盤は弾性や塑性的な変形だけでなく、剛体的なブロックの動きをすることが分かりました。そしてこの波動は主震動の前、初期、最中及び終息後も発生し、多くは断層帯部や山体の境界部で生じており、そのメカニズムの骨子は次のように定まります。

- ・①地盤のブロック的な動きで、②ブロック境界の一部に周囲より低圧部(間隙)が発生し、③その低圧部内の遷移点や臨界点を超える物質の相変化が起き、④相変化に伴い体積が膨張し、⑤低圧部の収容体積を超える部分が、周囲より圧力が低い上方に噴出(膨張-の流動)して、⑥噴出物質が上方の閉塞面にぶつかり、上向きの圧縮波動(非線形的性質)として伝播する。

3.強烈な衝撃的鉛直地震波動が発生し易い場所(危ぶまれる地盤変動の兆候)

問題の地震波動は地盤ブロックの境界で発生するので、地表の基準点の移動状況を分析すると、その候補地が探せるとの発想から、国土地理院の地殻変動情報を探しました。図1a-cは3.11東日本太平洋沖地震の、前後の日本の地殻変動図で少し長期間の図です。この地震直後は図2に示す図柄の印象(関東を含む東日本の大部分が並行的に東南東に移動)があるのですが、現実には図1b,cの通り東北部が酒田-石巻付近を軸に東南東に漏斗状に変動をしています。今年3月16日に福島県沖地震(M7.4)が起き、図3はその地表変動図で、福島県の海岸部は阿武隈山地とは動きが違っています。図4は震源断層の推定図です。ほぼ同じ場所で、昨年2月13日に地震(M7.3)が起き、牡鹿半島沖では昨年3月20日(M6.9)と5月1日(M6.8)に起き、近年大地震が続いています。図5, 6は東北地方の10年前と、5年前から現在の地殻変動状況で、酒田-石巻付近を軸にした東南東に漏斗状の変動の他に、その南側に渦状の変動があります。今年5月22日に茨城県沖地震(M5.8)起き、図7はその震度分布です。この図と町名の資料より猪苗代町から富岡町や双葉町の、内陸部から沿岸部に直線的な地盤の伏在弱線があることが分かりました。図7は図6の地盤変動図を拡大して、沿岸部の活断層位置[紫破線]と伏在弱線[青破線]を記入したものです。細い赤矢印は地盤変動で、青の丸印は原発の位置です。活断層と地盤の弱線が交わる付近は、地盤が小ブロック化します。地殻の渦変動で沿岸部は地盤の拡大域で地震を誘発し易くなっています。地殻の大余効変動の影響で、この周辺で大地震が起きると、強烈な衝撃的鉛直地震波動が多発することが危惧されます。この問題の地震波は耐震基準にはないので、地殻の大変動の現状から、柏崎や女川も含めた、原発と関連施設の衝撃的鉛直地震波動に対する安全性の確認と検証が急務です。



* 渦中心が移動 * 猪苗代町-富岡町付近に伏在弱線



印は福島第1, 第2原発(地盤拡張域)
5年間の変位 [赤矢印]
海岸部の活断層 [紫破線],
推定地盤伏在弱線 [青破線]

←図 8 福島沿岸部の変動状況と地盤の弱点

【緊急提言】 * 活断層と伏在弱線の交差部付近は地盤の小ブロック化が予想され、地盤は拡張場にある。付近で大地震が起きると強烈な衝撃的鉛直地震波動の多発が危惧され、近くの原発と関連施設等の冷却設備を含めた安全性の確認が急務です。

A Study on Earthquake Damage Prevention of Cultural Properties on Display: Vibration Experiment of Japanese Sword

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO¹

1. Nagoya University, 2. Token Corporation

近年、建物の耐震性の向上や制振構造・免震構造の普及にともない、地震時の建物の構造的な損傷による犠牲者は減少傾向にある。一方、建物内の設備や什器等の損傷防止については、人命にかかわる建物倒壊の防止と比較すると、優先度の低い課題として取り扱われてきたことは否めない。人命の保護が第一に重要であることは論をまたないが、人命を守ることができたならば、加えて建物内にある財産等の被害を抑えることにより、地震後の生活水準の維持や復興の促進に資することができる。発災直後にもっとも重要となるのは官公庁・医療機関・社会インフラ等の機能維持にかかわる設備の保護であろうが、長期的な視点に立てば、文化財等の価値あるものの保護もまた重要である。文化財は人類共通の宝であり、これを破損することなく次代へ伝えることが、国家および人類全体の文化水準の維持と向上をはかることになる。

本研究では、文化財の中でも特に刀剣類について、展示状態における地震時挙動の把握と損傷防止のための方策について検討する。刀剣類の特徴として、テグスによる展示台への固定が困難であることが挙げられる。これを地震の揺れから保護するには、建物や免震構造とすることや、免震台上での展示とすることが効果的である。しかし、文化財、それも刀剣類の場合は特に、個人所有のものが少なくなく、所有者の経済力も様々であるため、必ずしも免震建物や免震台等の整備を行うことができない場合もある。

そこで、本研究では、刀掛けを用いて展示されている状態の日本刀について、地震時の揺れに対する挙動の把握から始めることとし、振動台実験を行った。図1に実験の様子を示す。名古屋大学減災連携研究センター所有の水平2成分振動台「パレットぶるる」（白山工業株式会社製可搬型地震動シミュレーター「地震ザブトン」[1]）に台枠を取り付け、小型の家具転倒実験を可能としたもの）を使用し、アクリル製の一体型の刀掛けに模造刀を載せた状態で加振を行った。このとき、刀掛けをそのまま振動台に載せたものと、滑り止めマットを介して載せたものの2種類を用意した。加振波形は1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での強震記録（JMA神戸波）とその建物応答（固有周期1 s, 減衰定数5%）および2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET築館での強震記録とし、振動台、刀掛け、刀身それぞれの加速度を測定した。

詳細な分析結果は紙面の都合上割愛し、ここではJMA神戸波の建物応答について、振幅倍率20%と40%での加振結果について記す。振幅倍率20%（振動台の計測震度5.7）では、滑り止めマットなしの刀掛けは振動台上で滑動し、載せていた刀身が落ちた。一方、滑り止めマット上の刀掛けは活動せず、刀身も落ちなかった。それに対して、振幅倍率40%（振動台の計測震度6.4）では、滑り止めマット上の刀掛けは滑動しなかったものの、刀身は落ちる結果となった。いずれの場合も、刀身は刀掛け上で長さ方向に大きく滑動し、切先側またはその反対側のどちらか一方から滑り落ちるという挙動を示した。刀身が長さ方向と直交する方向へ跳躍して落ちるという挙動はみられなかった。これは、用いた振動台の仕様上上下振動がなかったこと、アクリル製刀掛けと刀身との間の摩擦係数が小さいことが関係していると考えられる。上下振動の入力や木製刀掛けの使用によって異なる結果となる可能性がある。

今後、上下動を含む加振や正弦波による加振を行って刀掛けおよび刀身の詳細な振動挙動を把握するとともに、刀身の落下を防ぐ方策について継続的に検討を行っていく。

[1] 白山工業株式会社：可搬型地震動シミュレーター地震ザブトン,
https://www.hakusan.co.jp/products/eq_simulator/ (2022年8月18日閲覧)

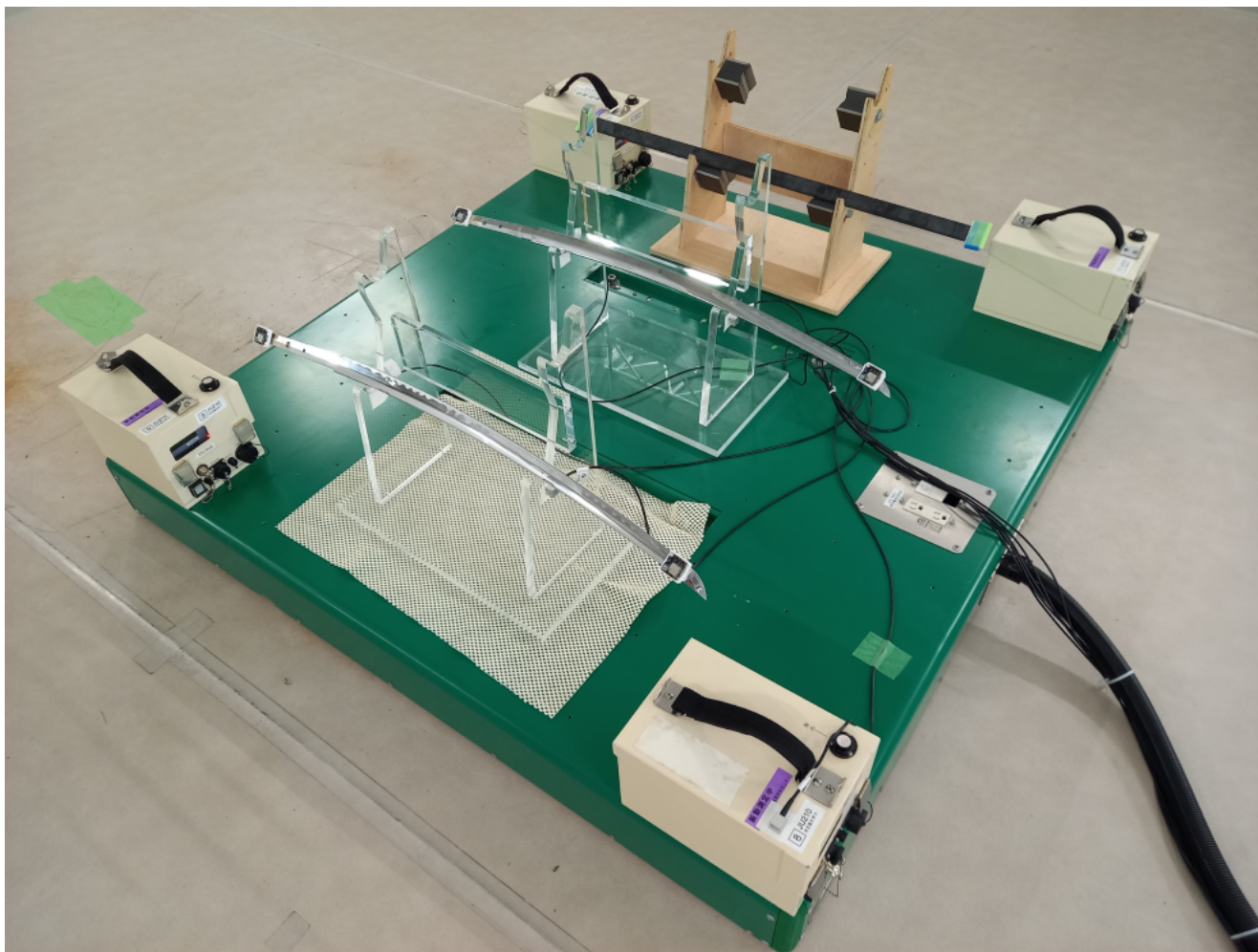


図 1 振動台実験の様子