

Thu. Oct 29, 2020

## ROOM A

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room A (S01, S15, S16)

## [SPA]PM-3

chairperson:Wataru Suzuki(NIED)

4:00 PM - 5:00 PM ROOM A

## [S01P-02] Towards the detection of the mantle-reflected

P wave using seismic interferometry

\*Shota Kato<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

## [S15P-08] Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

\*Kotaro Tarumi<sup>1</sup>, Tomotsugu Watanabe<sup>1</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>1</sup> (1. Okayama University)

4:10 PM - 4:20 PM

## [S15P-15] Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

\*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL<sup>1</sup>, Tae Woong Chung<sup>1</sup> (1. Sejong University)

4:20 PM - 4:30 PM

## [S16P-07] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Landslide Areas Derived from Microtremor Observation - Case of Ikutahara, Engaru-cho, Monbetsu-gun, Hokkaido -

\*Isamu Nishimura<sup>1</sup>, Tatsuya Noguchi<sup>2</sup>, Yusuke Ono<sup>2</sup>, Masanori Kohno<sup>2</sup> (1. Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2. Tottori University, Department of engineering)

4:30 PM - 4:40 PM

## ROOM B

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room B (S07, S08)

## [SPA]PM-3

chairperson:Makiko Ohtani(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

4:00 PM - 5:00 PM ROOM B

## [S07P-01] Seismic structure of the lithosphere-asthenosphere system beneath the oldest

seafloor- the broadband dispersion analysis of the Oldest-1 (Pacific Array) data

\*Yuki Kawano<sup>1</sup>, Takehi Isse<sup>1</sup>, Akiko Takeo<sup>1</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>1</sup>, Hajime Shiobara<sup>1</sup>, Nozomu Takeuchi<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, YoungHee Kim<sup>3</sup>, Hisashi Utada<sup>1</sup>, Sang-Mook Lee<sup>3</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University)

4:00 PM - 4:10 PM

## [S08P-03] Reinterpretation of a legacy 3D seismic reflection data to elucidate unusual sinistral M5.5 earthquake fault below a deep gold mine in a mafic sill and dike complex

\*Koichiro Suzuki<sup>1</sup>, Musa Siphwe Manzi<sup>2</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>1</sup>, Taku Noda<sup>1</sup>, Lindsay Linzer<sup>3</sup>, Raymond J Durrheim<sup>2</sup>, Bennie Liebenberg<sup>4</sup> (1. Ritsumeikan University, 2. University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3. SRK(Pty)Ltd, 4. Moab Khotsong mine)

4:10 PM - 4:20 PM

## [S08P-08] Quantitative evaluation of the effect of static stress change of large earthquakes on activity change of volcanic deep low-frequency earthquakes

\*Genki Oikawa<sup>1</sup>, Naofumi Aso<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup> (1. Tokyo Institute of Technology)

4:20 PM - 4:30 PM

## [S08P-11] Derivation of all the static XBIEM kernels for 2D earthquake cycle simulation in heterogeneous media

\*Kazuki Ohtake<sup>1,2</sup>, Nobuki Kame<sup>2</sup>, Makiko Ohtani<sup>2</sup> (1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:30 PM - 4:40 PM

## [S08P-15] Verification of conditions for intermittent events associated with powder shear using the Discrete Element Method

\*Shinichi Oba<sup>1</sup>, YUTA Mitsui<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

4:40 PM - 4:50 PM

## ROOM C

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room C (S06, S09)

[SPA]PM-3

chairperson:Yasuhiro Yoshida (Meteorological Collage)  
4:00 PM - 5:00 PM ROOM C

[S06P-01] Towards continuous seismic imaging from offshore to land along the Japan trench: effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities)

\*HyeJeong Kim<sup>1</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

[S06P-04] S-wave structure in the sediment beneath S-net stations estimated by V/H ratio of Rayleigh-wave (Scholte waves) extracted from ambient noise

\*FUKUSHIMA SHUN<sup>1</sup>, KIYOSHI YOMOGIDA<sup>1</sup> (1. HOKKAIDO UNIVERSITY)

4:10 PM - 4:20 PM

[S09P-05] Repeater earthquakes observed in seismicity around the Fukushima-Ibaraki border since the 2011 Tohoku-oki Earthquake

\*Rina Ikeda<sup>1</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Ryo Takahashi<sup>2</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>1</sup> (1. Tohoku University, 2. Meteorological Agency)

4:30 PM - 4:40 PM

[S09P-12] Stress change estimated from GNSS displacement and seasonal variations in seismicity

\*Taku Ueda<sup>1</sup>, Aitaro Kato<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

## ROOM D

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room D (S17, S24)

[SPA]PM-3

chairperson:Hiroaki Tsushima(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)  
4:00 PM - 5:00 PM ROOM D

[S17P-04] Simulation of Tsunami Sediment Movement in Kamoda Pond, Tokushima Prefecture, assuming High Tide

\*Takuya Saito<sup>1</sup>, Toru Takeda<sup>1</sup>, Kei Yamashita<sup>2</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup> (1. Tokushima University, 2.

Tohoku University)

4:00 PM - 4:10 PM

[S17P-09] Early estimation of tsunami heights with a Kalman filter: Combination of ocean-bottom pressure gauges and accelerometers

\*Ayumu Mizutani<sup>1</sup>, Kiyoshi Yomogida<sup>1</sup> (1. Hokkaido Univ.)

4:10 PM - 4:20 PM

[S17P-11] Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database

\*Masato Kamiya<sup>1</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup> (1. Tokushima University)

4:20 PM - 4:30 PM

[S24P-01] Determination of *P*-wave first motion polarities and moment tensors for hydraulically-induced AEs using CNN technique

\*Rui Tanaka<sup>1</sup>, Makoto Naoi<sup>1</sup>, Youqing Chen<sup>1</sup>, Kazune Yamamoto<sup>1</sup>, Keiichi Imakita<sup>1</sup>, Naofumi Tsutsumi<sup>1</sup>, Akihiro Shimoda<sup>1</sup>, Daiki Hiramatsu<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>2</sup>, Tsuyoshi Ishida<sup>1</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>, Hiroyuki Tanaka<sup>3</sup>, Yutaro Arima<sup>3</sup>, Shigehiro Kitamura<sup>3</sup>, Daisuke Hyodo<sup>3</sup> (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. JOGMEC)

4:30 PM - 4:40 PM

[S24P-06] Numerical experiments towards detection of deep low-frequency tremors from seismic waveform images via convolutional neural network

\*Ryosuke Kaneko<sup>1</sup>, Hiromichi Nagao<sup>1,2</sup>, Shin-ichi Ito<sup>1,2</sup>, Kazushige Obara<sup>2</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>2</sup> (1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

---

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room A (S01, S15, S16)

## [SPA]PM-3

chairperson:Wataru Suzuki(NIED)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM A

---

### [S01P-02] Towards the detection of the mantle-reflected P wave using seismic interferometry

\*Shota Kato<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

### [S15P-08] Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

\*Kotaro Tarumi<sup>1</sup>, Tomotsugu Watanabe<sup>1</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>1</sup> (1. Okayama University)

4:10 PM - 4:20 PM

### [S15P-15] Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

\*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL<sup>1</sup>, Tae Woong Chung<sup>1</sup> (1. Sejong University)

4:20 PM - 4:30 PM

### [S16P-07] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Landslide Areas Derived from Microtremor Observation - Case of Ikutahara, Engaru-cho, Monbetsu-gun, Hokkaido -

\*Isamu Nishimura<sup>1</sup>, Tatsuya Noguchi<sup>2</sup>, Yusuke Ono<sup>2</sup>, Masanori Kohno<sup>2</sup> (1. Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2. Tottori University, Department of engineering)

4:30 PM - 4:40 PM

# Towards the detection of the mantle-reflected P wave using seismic interferometry

\*Shota Kato<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo

地震波干渉法は2観測点で観測されたランダムな波動場の相互相関関数を計算することにより、片方を仮想的な震源とし、もう片方を観測点とした場合の観測波形(グリーン関数)を推定する手法である(e.g. Snieder et al., 2013)。地震波干渉法では、地震波動場がランダムかつその強度分布が等方・均質であることを仮定する。ランダムな波動場として海洋波浪起源の脈動を解析に用いる場合には、周期5-20 sの帯域で表面波が卓越することが知られている。そのため、脈動を利用した地震波干渉法による地震波速度構造推定の研究では、地殻・上部マントルの3次元構造の推定が主であった(e.g., Shapiro et al., 2005)。しかし、近年では、実体波を抽出することによってより深部の構造を推定することが試みられている。その一例として、マントルの410/660 km不連続面からの反射P波(P410P/P660P)の抽出が報告されている(Poli et al., 2012; Feng et al., 2017)。しかし、これらの反射P波を抽出した先行研究の対象地域は大陸に限られていた。本研究の目的は、防災科学技術研究所Hi-netの上下動記録に地震波干渉法を適用することによりP410P/P660Pを抽出し、反射P波の抽出における波源の空間分布の影響を調べることである。

本研究では以下の手順で各観測点ペアに対する相互相関関数を計算した。用いた波形記録は防災科学技術研究所Hi-net観測点のうち西南日本に存在する240点の上下動記録(2007年-2018年)である。まず、Hi-netの上下動記録を2 Hzにダウンサンプリングした。その上で各観測点について翌日の観測波形との差を計算して元の観測波形の代わりに用いた(Takagi et al., 2020)。これは、Hi-netの機器ノイズ(Takagi et al., 2015)の相互相関関数への影響を抑えるためである。次に、得られた1日長の波形を1024 sの時間窓に分割し、周期5-10 sおよび10-20 sの平均2乗振幅によって時間窓を選択した。選択した時間窓について周波数領域で白色化を行い、周期1-10 sの成分について全観測点ペアの相互相関関数を計算した。

脈動源分布のグリーン関数抽出への影響を調べるため、4-th root vespagramを全観測点ペアに対する相互相関関数について計算した(Rost and Thomas 2002)。その結果、P410Pがオフセット距離0-300 kmで見られ、P660Pはオフセット距離50-100 kmで見られた。また、P660PはP410Pに比べて弱かった。次にvespagramの方位角依存性を調べるため、観測点ペアを方位角により6グループに分けて各グループのvespagramを計算した。観測点ペアの方位角が0-30°、90-120°、150-180°のグループではvespagram上でP410Pが確認された。

この結果を遠地の脈動P波のスローネス分布(Nishida and Takagi, IASPEI, 2017)と比較した。観測点ペアの方位角が0-30°と150-180°のグループのP410Pはそれぞれ北大西洋や南極海の脈動源によると考えられる。しかし、観測点ペアの方位角が90-120°のグループのP410Pには対応する脈動源がなく、深部での散乱の可能性を示唆している。

地震による影響を評価するために、地震活動が活発な日のみに注目して、相互相関関数の計算を行った。手法は地震(Mw > 6.5)の起きた461日を用いる点を除き、脈動の相互相関関数の計算手法と同一である。得られた相互相関関数は脈動の相互相関関数と類似しており、この手法では地震の寄与は脈動の寄与に比べて小さい事がわかった。今後はコーダ波部分の相互相関関数を計算し、脈動の相互相関関数との比較を行う予定である。

最後に、得られた反射P波を不連続面の深度に変換するため、Common Middle Point (CMP)重合を行った(e.g., Stein and Wysession, 2003)。具体的には、オフセット距離が500 km以内の各観測点ペアについて反射点の位置でグループ分けを行い、各グループに対して不連続面が水平と仮定しCMP重合を行った。速度構造は

JMA2001(上野ほか、2002)を用いた。CMP重合の結果は水平方向に連続的な410 km不連続面と断片的な660 km不連続面を示した。しかし、太平洋プレートに起因する明確な反射波は検出できなかった。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のHi-netの上下動記録を用いました。記して感謝いたします。

# Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

\*Kotaro Tarumi<sup>1</sup>, Tomotsugu Watanabe<sup>1</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>1</sup>

1. Okayama University

## 1. Introduction

2016年熊本地震では、震源断層ごく近傍で震度7を記録した地震動が観測され、地殻変動を伴った大きな被害が発生した。特に本震( $M_{JMA}$  7.3)では、西原村小森(熊本県自治体震度観測計)において、観測された加速度記録からの積分によると、地動速度では時間幅約3秒の長周期速度パルスがEW成分とUD成分で見られ、地動変位では水平動、上下動共に約2 mの永久変位が生じたと推定されている。2016年熊本地震の前震と本震に関する震源断層のすべりインバージョンの研究は複数行われており、その多くで西原村の直下にアスペリティが存在し、その内部における破壊フロントはアスペリティ下端付近から地表面に向かって進行したことが示唆されている。そのため、西原村小森で観測された長周期速度パルスの原因が、破壊フロントの進行方向で遠地S波に起因して大振幅パルスが生じる破壊指向性(Forward directivity)なのか、あるいは震源断層ごく近傍で卓越する近地項、中間項の効果なのか議論されている。そこで本研究では、震源断層を単純化したモデルを設定し、全無限均質媒質中の有限矩形断層から生じる近地項、中間項、遠地項を分離した変位の解析解(垂水・竹中, 2020, JpGU-AGU)を用いて、長周期速度パルスの成因について理論的に検討した。

## 2. Simple Asperity Model

Figure.1は本研究で設定した非常にシンプルなアスペリティモデルと西原村を模した観測点の例である。本研究では、Asano & Iwata (2016)を参考に、西原村直下と推定されたアスペリティのみをモデル化し、その寄与のみを考慮した。均質媒質中のP波速度は6.0 km/s, S波速度は3.5 km/sとし、アスペリティの長さは10 km, 幅14 km, すべり3.7 m, ライズタイム1.5 s, すべり角 $-140^\circ$ とした。アスペリティ内部を進行する破壊フロントは水平で、破壊伝播速度はS波速度の0.78倍とし、地表面に向かって進行すると仮定した。また、地表面では自由表面の効果として、振幅を2倍している。

## 3. Numerical results

Figure.2に地動速度(水平成分)の数値計算結果を示す。全変位に加えて、近地項(本研究では近地項と中間項の和)と遠地項も同様に示している。結果は、非常にシンプルなモデルを用いたにも関わらず、西原村で観測された(加速度記録から推定された)速度波形の特徴、特にEW成分とUD成分で観測された時間幅約3秒の長周期速度パルスを再現できている。この結果により、長周期速度パルスの生成には、近地項が主に寄与しているが、EW成分では遠地項(主に遠地S波)も寄与しており、破壊指向性の効果も考えられる。実際の震源過程の複雑さや背景領域の寄与等を考慮した綿密なモデリングをすることによって、より良く観測波形を再現できるかもしれない。

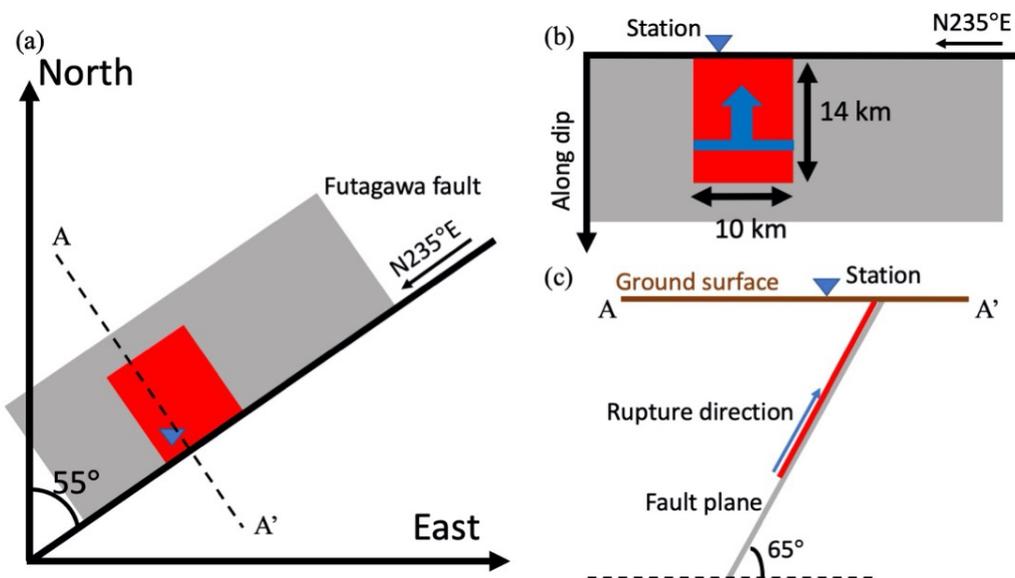


Figure.1 Simple asperity model in this study. Gray and red ((a) & (b):region, (c):line) show fault plane and asperity. Blue triangle denotes the station simulated as Nishihara-village. Blue line and vector indicate rupture front and its direction of propagation, it propagates from the bottom of the asperity to the top of that. (a)The relation between the fault plane/asperity and the station on North-East coordinate system. Strike angle is set as N235°E. (b)Cross-section of simple asperity model across fault plane. Length and width of asperity are 10 km & 14 km. (c)Cross-section across A-A' (Figure.1-(a)), showing the appearance of the fault under the ground. Dip angle is set as 65°.

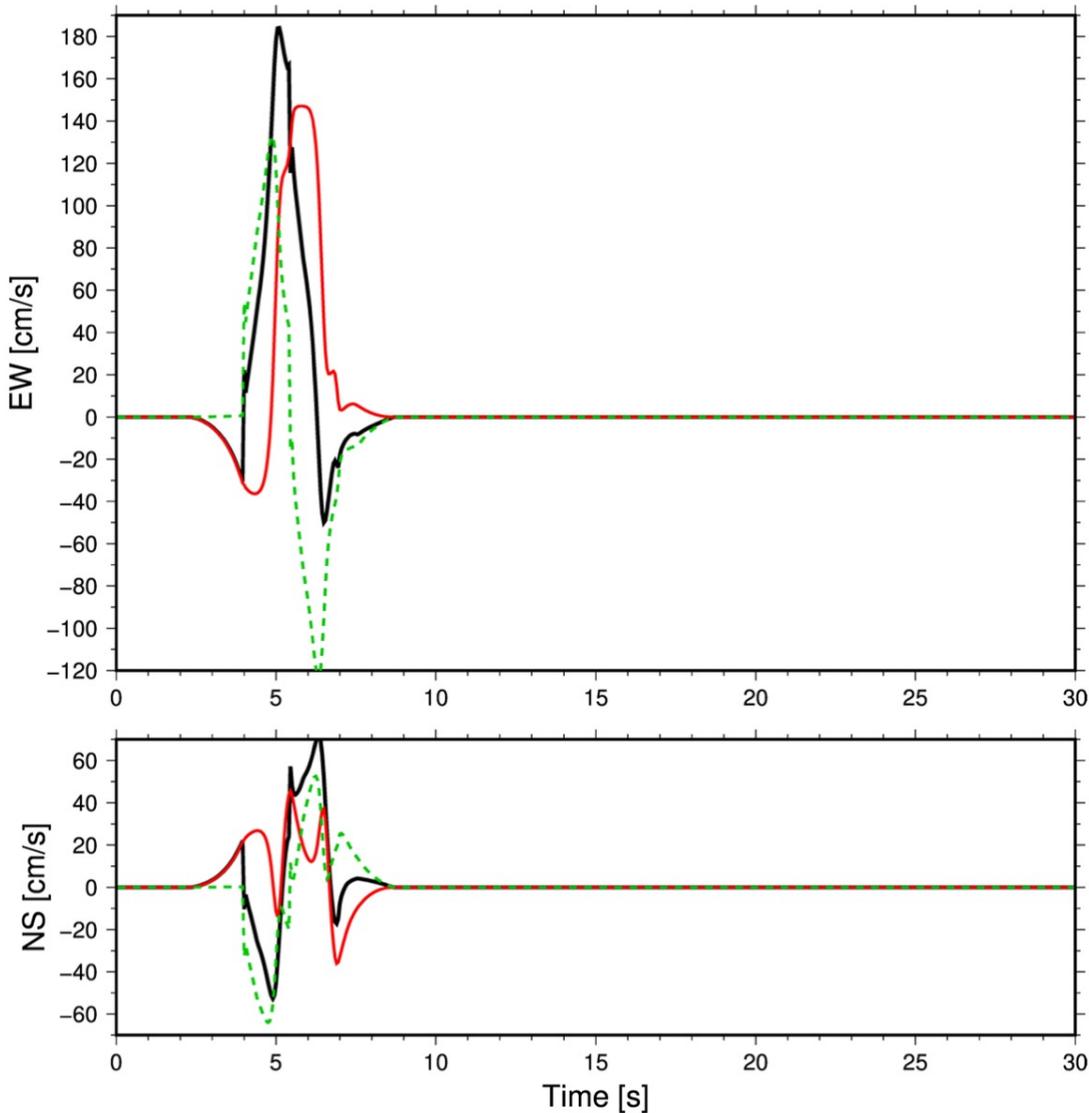


Figure.2 Numerical results of ground velocity of horizontal components. Black, red and green dashed lines indicate total displacements, the summation of near-field term and intermediate terms and far-field terms, respectively.

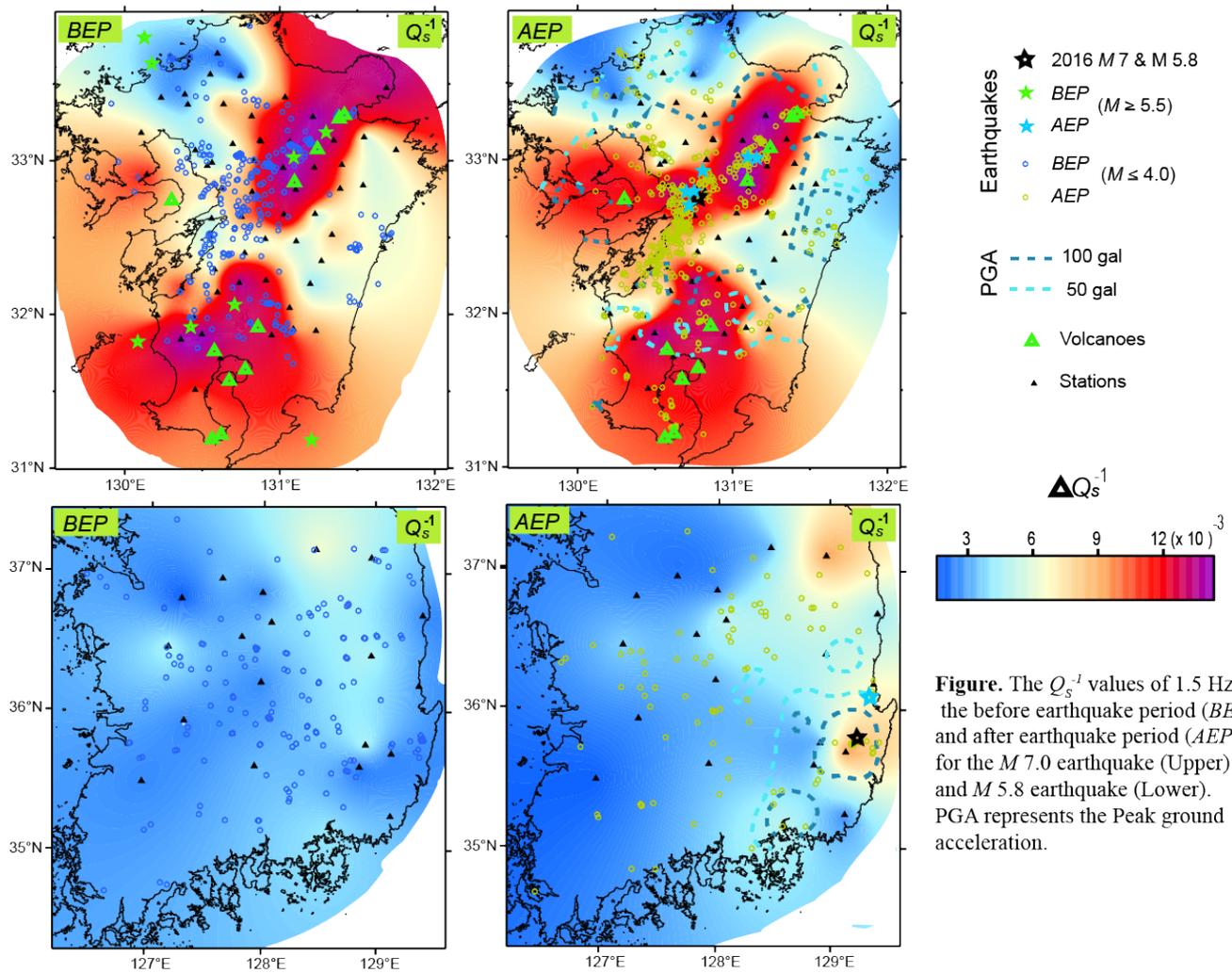
## Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

\*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL<sup>1</sup>, Tae Woong Chung<sup>1</sup>

1. Sejong University

A remarkable increase of scattering attenuation ( $Q_s^{-1}$ ) at low frequency was found associated with hazardous earthquakes in Japan and Korea in 2016. Applying Multiple Lapse Time Window Analysis (*MLTWA*) to N-S component seismograms recorded in the before earthquake period (*BEP*) and after an earthquake period (*AEP*), the  $Q_s^{-1}$  values were compared for M7.0, 6.6, and 5.8, occurred in Kumamoto (*K*), Tottori (*T*), and Gyeongju (*G*). The *BEP* and *AEP* were set to obtain enough data; while *G* was 5 and 14 years, *K* and *T* event was 5 and 5 years, and 4 and 3 years, respectively. The obtained events of the periods were 186 and 117 for Korea, whereas 501 and 619, 176 and 194 for two Japan events, respectively. To find the crustal variation associated with earthquakes, focal depths of events were shallower than 30 km and the hypocentral distance of seismograms was shorter than 80 km. The observed stations were applied by coda normalization to correct different earthquake sources and site amplification factors. The magnitude range of events was selected between 2.0 and 4.0. For band-pass filtered with five central frequencies of 1.5, 3, 6, 12, and 24 Hz, the best fit values for  $Q_s^{-1}$  and  $Q_i^{-1}$  (intrinsic attenuation) were obtained by comparison between observed energy curves and theoretical energy curves derived from direct simulation Monte Carlo method (Yoshimoto, 2000) with a focal depth of 10 km. The error bars of the values, derived from Fisher's *F* distribution with the confidence value of 60 %, shows reliably shorter lengths with more than 20 observations. Between *BEP* and *AEP* of the  $Q_s^{-1}$  values, the higher difference was observed at lower frequencies –remarkable at 1.5 Hz and negligible for 24 Hz. Whereas *G* event being the greatest difference in the epicentral region, the *T* event showed reliable difference with over the error bar range. However, *T* events showed little relevance of differences in the epicentral region.

The crustal inhomogeneity caused by open cracks had been observed in the seismically active area by coda analysis using tomography developed by Nishigami (1991). *MLTWA* also showed the seismic inhomogeneity by comparison of difference of  $Q_s^{-1}$  between *BEP* and *AEP*. The difference corresponds well to event magnitude represented by peak ground acceleration (*PGA*). The high difference in *K* and *G* events generally correlated with the high *PGA* area. However, the *T* event shows less relevance despite the large magnitude. This may be due to earthquakes with a comparable magnitude that occurred in the vicinity, such as *M* 7.0 in 1943 and *M* 6.7 in 2000. In the *K* event, six earthquakes ( $M > 6.0$ ) occurred in inland since 1920, but only one earthquake (1975 *M* 6.1) occurred near the event region. On the other hand, the Korean peninsula, including the *G* event region has been quite seismically stable land until *G* event - the largest event is only *M* 4.2 since 1905 and no inland events with estimated  $M > 5.2$  for 270 years. Thus the duration period of seismic silence also strongly correlates with the difference of  $Q_s^{-1}$  between *BEP* and *AEP*.



# Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Landslide Areas Derived from Microtremor Observation - Case of Ikutahara, Engaru-cho, Monbetsu-gun, Hokkaido -

\*Isamu Nishimura<sup>1</sup>, Tatsuya Noguchi<sup>2</sup>, Yusuke Ono<sup>2</sup>, Masanori Kohno<sup>2</sup>

1. Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2. Tottori University, Department of engineering

近年、地震による地すべりによって大規模な被害が生じている。地すべりは過去の活動履歴より、繰り返し同じ場所で発生することが多く、地すべり地域の地盤震動特性の把握は重要である。地すべり地域の地盤の状態を知る手段として、微動探査を用いた評価がこれまで数多く行われている（たとえば島，1981）。これはすべり面上部の堆積物は非常に柔らかく、速度コントラストが明瞭である可能性が高いためである。本研究では古期地すべり地形が確認されている北海道紋別郡遠軽町の生田原公園にて微動観測を行い、地すべり堆積物をどの程度評価できるのかを検討した。

生田原公園は地すべり防止区域に指定されており、地質図から地山は碎屑岩及び火山碎屑岩であること、ボーリングデータから風化岩の上に砂、シルト、泥を含む地すべり堆積物が8-15m程度存在することが分かっている。観測は2019/9/24、25の日中に実施した。3成分単点観測を観測時間10分程度として42点で行った。アレイ観測は地震計を円の中心に1台、円周上に3台が正三角形になるように4台配置し、アレイ半径は1-80mの範囲で、5地点で実施した。観測には加速度地震計JU410を4台、およびセンサに速度計ジオフォン（UD成分のみ観測、固有周波数4.5Hz）4台とデータロガーに分解能27bitのHKS9700を用いた。サンプリング周波数はともに200Hzとした。

微動の3成分観測記録より、20.48秒を10区間以上選定し、3成分のフーリエスペクトルを算出、対数ウィンドウ（係数20）で平滑化し、水平動のスペクトルと上下動のスペクトルの比(H/V)を求めた。またボーリングデータのあるライン上で、麓の観測点を基準とする水平動のスペクトル比(H/H)を求めた。アレイ観測記録は、CCA法（Cho et. al., 2006）によりセグメント長10.24秒、Parzenウィンドウ（バンド幅0.3Hz）でスペクトルを平滑化し、位相速度分散曲線を求めた。位相速度分散曲線とH/Vを用いて、レイリー波基本モードを仮定して、試行錯誤で地盤構造モデルを推定した。

解析の結果、山麓の平坦な場所ではH/Vスペクトルのピークが明瞭な点が多く、卓越周期が0.1-0.3秒であった。地すべり堆積物が確認されている場所のH/Vはフラットな形状であり、ピーク値が2.0を下回る点が多く、卓越周期が不鮮明である傾向がみられた。H/H比から各ラインでピークのある周期帯が異なっており、近傍の観測点でスペクトルの形状が多様であることがわかった。アレイ観測より表層に $V_s=130-200\text{m/s}$ の低速層がみられ、これが地すべり堆積物に相当すると考えられる。一部の観測点において、山間部で微動の振幅レベルが小さいことから明瞭な位相速度が推定できなかった。今後は人工的に振源を与えるなど、観測方法を工夫して実施する予定である。

本研究は日本学術振興会科研費18H01523の助成を受けたものです。

---

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room B (S07, S08)

### [SPA]PM-3

chairperson: Makiko Ohtani (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM B

---

[S07P-01] Seismic structure of the lithosphere-asthenosphere system beneath the oldest seafloor– the broadband dispersion analysis of the Oldest-1 (Pacific Array) data

\*Yuki Kawano<sup>1</sup>, Takehi Isse<sup>1</sup>, Akiko Takeo<sup>1</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>1</sup>, Hajime Shiobara<sup>1</sup>, Nozomu Takeuchi<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, YoungHee Kim<sup>3</sup>, Hisashi Utada<sup>1</sup>, Sang-Mook Lee<sup>3</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University)

4:00 PM - 4:10 PM

[S08P-03] Reinterpretation of a legacy 3D seismic reflection data to elucidate unusual sinistral M5.5 earthquake fault below a deep gold mine in a mafic sill and dike complex

\*Koichiro Suzuki<sup>1</sup>, Musa Siphwe Manzi<sup>2</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>1</sup>, Taku Noda<sup>1</sup>, Lindsay Linzer<sup>3</sup>, Raymond J Durrheim<sup>2</sup>, Bennie Liebenberg<sup>4</sup> (1. Ritsumeikan University, 2. University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3. SRK(Pty)Ltd, 4. Moab Khotsong mine)

4:10 PM - 4:20 PM

[S08P-08] Quantitative evaluation of the effect of static stress change of large earthquakes on activity change of volcanic deep low-frequency earthquakes

\*Genki Oikawa<sup>1</sup>, Naofumi Aso<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup> (1. Tokyo Institute of Technology)

4:20 PM - 4:30 PM

[S08P-11] Derivation of all the static XBIEM kernels for 2D earthquake cycle simulation in heterogeneous media

\*Kazuki Ohtake<sup>1,2</sup>, Nobuki Kame<sup>2</sup>, Makiko Ohtani<sup>2</sup> (1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:30 PM - 4:40 PM

[S08P-15] Verification of conditions for intermittent events associated with powder shear using the Discrete Element Method

\*Shinichi Oba<sup>1</sup>, YUTA Mitsui<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

4:40 PM - 4:50 PM

## Seismic structure of the lithosphere-asthenosphere system beneath the oldest seafloor—the broadband dispersion analysis of the Oldest-1 (Pacific Array) data

\*Yuki Kawano<sup>1</sup>, Takehi Isse<sup>1</sup>, Akiko Takeo<sup>1</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>1</sup>, Hajime Shiobara<sup>1</sup>, Nozomu Takeuchi<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, YoungHee Kim<sup>3</sup>, Hisashi Utada<sup>1</sup>, Sang-Mook Lee<sup>3</sup>

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University

太平洋プレート上に地震・電磁気観測のアレイのアレイを設置し、海洋マントル構造の年代依存性や太平洋プレートの成長過程の解明を目標とした国際協力計画「Pacific Array」が2018年に始動した。日韓合同観測チームは、2018年から2019年に、マリアナ海溝沖の太平洋底における「Oldest-1アレイ」の設置・回収作業を行った。このアレイは太平洋最古の海洋底(170 Ma)に位置するため、直下のリソスフェア-アセノスフェア構造には、太平洋プレートの成長過程が記録されていると期待され、Pacific Arrayの目標達成に向けて重要な役割を担う。

そのなかで本研究は、アレイ直下のマントルの地震波速度構造の解明を目指し、広帯域表面波アレイ解析を行う。まず、地震波記録のS/N比向上のために、鉛直成分記録について、傾斜ノイズおよびコンプライアンス・ノイズの低減処理を行い、次に、表面波アレイ解析により、アレイ内平均位相速度を計測する。短周期(<40秒)では地震波干渉法を用い、4成分(鉛直成分, 圧力成分, Radial成分, Transverse成分)から、基本モード及び1次モード・レイリー波と基本モード・ラブ波の位相速度を計測した。長周期(>30秒)では遠地地震波解析から、基本モード・レイリー波の位相速度を計測した。さらに、レイリー波のアレイ内平均位相速度(7-100秒)から、深さ150 kmまでの1次元等方 $\beta_v$ (Vs)構造を推定した。得られた構造は「ふつうの海洋マントル」計画の海域B(140 Ma)の構造(Takeo et al., 2018)とよく似たものであった。今後は方位異方性やより長周期の位相速度の計測を行い、過去のプレート拡大方向や現在のマントルの流れ場を推定するとともに、より深部の構造の解明を目指す。

## Reinterpretation of a legacy 3D seismic reflection data to elucidate unusual sinistral M5.5 earthquake fault below a deep gold mine in a mafic sill and dike complex

\*Koichiro Suzuki<sup>1</sup>, Musa Sipiwe Manzi<sup>2</sup>, Hiroshi Ogasawara<sup>1</sup>, Taku Noda<sup>1</sup>, Lindsay Linzer<sup>3</sup>, Raymond J Durrheim<sup>2</sup>, Bennie Liebenberg<sup>4</sup>

1. Ritsumeikan University, 2. University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3. SRK(Pty)Ltd, 4. Moab Khotsong mine

2014年、南アフリカ・オークニー市付近でM5.5の地震が発生した。この地域の典型的なM>4の金鉱山誘発地震は、深さ3 km以浅の鉱山採掘深度で北東-南西走向の正断層で発生する。しかし、このM5.5地震は、金鉱山の採掘深度よりも下の、北北西-南南東走向のほぼ鉛直な未確認の構造における、3~7 kmの深度範囲を左横ずれ的に破壊した。

このM5.5地震の破壊域は、南アフリカのKaapvaal Cratonの上に29年前に堆積し変成した、Witwatersrand Super Group内のWest Rand Groupであった。この上から地表(海拔約1.3 kmの準平原)までは、金鉱脈の地層を持ち、主に珪岩からなるCentral Rand Group、洪水玄武岩 (Ventersdorp Super Group; 27億年前)、主にドロマイトからなるTransvaal Group(26-27億年前)の順に折り重なっている。一部には、さらに若いPretoria GroupやKaroo Super Group (約2億年前)も地表付近で見られる。

金鉱山は、開発前に反射法地震探査を行っており、採掘深度(地下2~3km)の解釈が行われていた。小笠原ら(2017 AGU)は、M5.5地震の余震発生帯と交差する4本の二次元側線の1992年の探査データを再解析し、M5.5地震の余震発生帯とほぼ一致するVertical Zone of Disruption (VZD)を確認することができた。またこのVZDが、採掘レベルの既知の断層に切られていないことも確認した。しかし、M5.5の地震発生場所は、幾世代もの断層運動やSill・Dikeの貫入を経験し、地質構造が非常に複雑であったため、二次元データだけでより詳細を議論することができなかった。

Manzi et al.とLinzer et al.(2018地震学会)は、上記の4本の二次元側線と余震発生帯のより広い範囲を含む3次元反射法探査データ(範囲15km×8km; TWT4秒; binサイズ25m×25m; 以下3Dキューブ)が再解析できる状態であることを見つけ、野田(2020 立命館大修士論文)は、West Rand Group中の反射体の三次元形状やVZDをより明瞭に描き出すことに成功した。この3Dキューブには、ICDP・DSeis計画(小笠原他、ディーブマイニング2019、EGU 2020、JpGU 2020a)が、地下2.9kmから余震発生帯まで掘削した3つの孔井(総延長1.6km)が含まれていた。本研究では、DSeis計画のコアや孔内検層や、鉱山内でマップされている地質情報と、3Dキューブ内の反射体を詳しく比較する。余震発生帯の東側は、金鉱脈を含むCentral Rand層群が深く落ち込んでいることが知られているが、野田(2020)はその構造解釈を行うことができていなかった。3Dキューブと比較するための地表探査掘削のデータが見つかっていなかったからである。それを入手できたため、本研究では、余震発生帯の東側の構造解析も行う。本ポスターではこれらを報告する。

謝辞 ICDP, JSPS (Core-to-Core; SA NRF bilateral), 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画, 立命館大学, AngloGold Ashanti, Harmony

# Quantitative evaluation of the effect of static stress change of large earthquakes on activity change of volcanic deep low-frequency earthquakes

\*Genki Oikawa<sup>1</sup>, Naofumi Aso<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup>

1. Tokyo Institute of Technology

## 背景

近年のHi-netなどの地震観測網の発達により、下部地殻及び上部マントルで発生する微小地震が観測されてきた。この地震は規模が小さいにも関わらず2-8Hzの低周波成分が卓越することから低周波地震と呼ばれ、主に火山周辺やプレート境界で観測されている。本研究で対象とする東北日本では、活火山周辺の深さ20~40kmで低周波地震が発生している。2011年に発生した東北沖地震以降、蔵王などの火山地域では低周波地震活動が活発化した一方で、ほとんどの地域で活動が静穏化しているという特徴がある(小菅・他2017)。これらの活動変化は東北沖地震で生じた応力変化に起因していると考えられているが、未だ定量的な解析はなされていない。そこで、本研究では巨大地震の断層モデルから計算された応力テンソルと低周波地震のメカニズムの類似度を評価することによって、巨大地震の静的応力変化と低周波地震活動の関係を調べた。

## 手法

最初に、東北日本の26個の火山領域について低周波地震のメカニズムを決定した。メカニズムの決定にはS波とP波の振幅比を用い、自由表面とサイト特性の影響を補正した。サイト特性の補正にはメカニズムが既知である通常の地震を用いた。補正された振幅比に対し、グリッドサーチによって理論振幅比との残差が最小となるモーメントテンソルを推定し、イベント毎に100回のブートストラップテストによって精度が良いイベントのみを抽出した。次に、フリーソフトのCoulomb 3.3 (Toda et al., 2005; Lin et al., 2004) を用いて領域ごとに巨大地震から期待される応力テンソルを計算した。東北地方で発生した巨大地震として、2011年東北沖地震、東北沖地震のafterslip、2008年岩手宮城内陸地震を考慮した。得られた応力テンソルと低周波地震のメカニズムのモーメントテンソル間の距離をTape and Tape(2012)(eq.67)に基づいて計算し、3年毎に移動平均を取ってメカニズム間の距離の時間変動を調べた。

## 結果

まずメカニズム解析によって262個の解を決定した。得られたメカニズムは最も多い蔵王で40個以上、その他ほとんどの地域では5-10個程度であった。メカニズムに含まれるCLVD成分を見てみると有意なCLVD成分を持つイベントもあるものの、その多くはDouble-Couple成分が卓越していることがわかった。このことから、低周波地震の初動の破壊プロセスは普通の地震とあまり変わらない可能性が示唆される。次に、応力変化と低周波地震のメカニズムについて、蔵王と鳴子で特徴的な結果が得られた。活発化した蔵王では東北沖地震による応力変化に応答し、2012年頃から応力変化に似たメカニズムに変化していることが分かった。また、2014年ごろからafterslipに対応した若干の変動も見られた。蔵王では活発化するまでに1-2年ほど期間があることを考えると、粘弾性的に応力変化が伝わり、地震後のafterslipや粘弾性緩和といった長期的な変動が地震活動に影響していると考えられる。一方、静穏化した鳴子では蔵王と逆のトレンドを示しており、東北沖地震による応力変化を見てみると、2012年頃は2つのテンソルがあまり似ていないという傾向が得られた。この結果を踏まえると、鳴子では変化した応力場が、LFEのメカニズムに整合的でなかったために静穏化したと考えられる。

# Derivation of all the static XBIEM kernels for 2D earthquake cycle simulation in heterogeneous media

\*Kazuki Ohtake<sup>1,2</sup>, Nobuki Kame<sup>2</sup>, Makiko Ohtani<sup>2</sup>

1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

## 1. はじめに

地震観測の高密度化・高精度化により地下の構造不均質と地震の破壊過程の関連性が明らかになりつつある。一方、そのような地震発生機構の理解に必要となる地震破壊の理論的研究は、その数学的困難さから均質媒質中に限られてきた。不均質媒質の地震破壊の理論的研究の確立は地震学における喫緊の課題であり、Kame and Kusakabe (2012) は、非平面断層破壊に適した境界積分方程式法 (BIEM) を不均質媒質に拡張する拡張境界積分方程式法 (eXtended BIEM: XBIEM) を提案した。2次元動的破壊問題で必要となる動的XBIEM核関数を導出し、媒質コントラストに支配される動的破壊過程の局面を明らかにした (Kusakabe and Kame, 2017)。

動的破壊問題では一様な初期応力場を仮定することが一般的であるが、構造不均質の存在は地震発生に至る応力場の形成過程にも当然影響を及ぼすはずである。しかしながら、これに関する理論的研究は未だほとんど進んでいない。そこで、本研究では、構造不均質中の断層周辺の応力場形成過程から地震の破壊過程までの地震サイクルシミュレーション (Earthquake Cycle Simulation: ECS) の計算コードをXBIEMを用いて開発し、この未解決の問いに答えたいと考える。ここでは、その第一歩として、XBIEM-ECSの計算コード開発に必要な2次元静的XBIEM核関数を解析的に閉じた形で導出する。

## 2. XBIEMのECSへの適用

ECSでは通常、静的弾性平衡方程式に動的慣性項を近似的に導入した「準動的スキーム」が用いられる。XBIEMを準動的ECSに展開するためには、静的XBIEM核関数を導出する必要がある。媒質境界を考慮した静的な表現定理 (e.g., Aki and Richards, 2002) は、式(1)の通りである。BIEMでは断層面の滑りが震源になるが (右辺第1項。従来の無限媒質中のBIEMはこの項のみ)、XBIEMではさらに媒質境界でのトラクション (第2項) 及び変位 (第3項) が震源になる。第3項の変位応答関数は従来のBIEM核関数を用いて表すことができるので、第2項のトラクション応答の核関数を新たに導出する必要がある。

## 3. 2次元面外・面内変形における全ての静的XBIEM核関数の導出

2次元面外変形・面内変形のそれぞれにおいて、離散化された媒質境界要素震源 ( $x_a < \xi_1 < x_b$ ,  $\xi_2=0$ ) 上で区間一定値をとるトラクション入力に対する、媒質内部の任意の受信点での変位及び応力に対するトラクション応答関数 (静的XBIEM核関数) を導出する。変位に対しては、静的グリーン関数 (e.g., Tada and Yamashita, 1997) の積分のみで表されるが、応力に対しては、グリーン関数の微分・積分関数として表される。これらの計算結果は全て初等関数のみで陽に表される。例えば、面外変形の変位  $u_3$  と応力  $\sigma_{32}$  のトラクション応答関数は式(2), (3)のように表せる。同様の計算を変位と応力の全成分に対して行うことにより、2次元静的XBIEMのトラクション応答関数の解析表現式を完全に得ることができる。

## 4. 今後の展望

まず、導出された静的XBIEM核関数が正しいことを確認するため、mode IIIで表層堆積層がある横ずれ断層を静的XBIEMでシミュレーションして、FEMでシミュレーションしたKame et al. (2008) の結果と比較する。次にXBIEMをECSに適用し、XBIEM-ECSを均質媒質中で行って、既往のECSの結果と比較してモデルの妥当性を検証する。そして不均質媒質中のXBIEM-ECSに進む。

## References

- Kame and Kusakabe, 2012, Proposal of Extended Boundary Integral Equation Method for Rupture Dynamics Interacting With Medium Interfaces, *Journal of Applied Mechanics*, doi: 10.1115/1.4005899.
- Kusakabe and Kame, 2017, Derivation of 2-D XBIEM kernels and their application to a rupture crossing a bimaterial interface, *Geophysical Journal International*, 210(3), 1374-1387
- Aki and Richards, Quantitative Seismology, 2nd. Ed., pp.700, University Science Books, Sausalito, California
- Tada and Yamashita, 1997, Non-hypersingular boundary integral equations for two-dimensional non-planar crack analysis, *Geophysical Journal International*, 130(2), 269-282
- Kame, Saito, and Oguni, 2008, Quasi-static analysis of strike fault growth in layered media, *Geophysical Journal International*, 173(1), 309-314

$$\begin{aligned}
 u_q(\mathbf{x}) = & \int_{\Gamma} d\Gamma(\mathbf{y}) \Delta u_i(\mathbf{y}) n_j(\mathbf{y}) c_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial}{\partial y_l} G_{qk}(\mathbf{x}; \mathbf{y}) \\
 & + \int_S dS(\boldsymbol{\xi}) T_i(\boldsymbol{\xi}) G_{qi}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\xi}) \\
 & - \int_S dS(\boldsymbol{\xi}) u_i(\boldsymbol{\xi}) n_j(\boldsymbol{\xi}) c_{ijkl}(\boldsymbol{\xi}) \frac{\partial}{\partial \xi_l} G_{qk}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\xi})
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$u_3^{t_3}(x_1, x_2) = \frac{t_3}{2\pi\mu} \left[ (x_1 - x_b)(\log r_b - 1) + x_2 \arctan \frac{x_1 - x_b}{x_2} - (x_1 - x_a)(\log r_a - 1) - x_2 \arctan \frac{x_1 - x_a}{x_2} \right] \tag{2}$$

$$\sigma_{32}^{t_3}(x_1, x_2) = \frac{t_3}{2\pi} \left[ \arctan \frac{x_1 - x_b}{x_2} - \arctan \frac{x_1 - x_a}{x_2} \right] \tag{3}$$

## Verification of conditions for intermittent events associated with powder shear using the Discrete Element Method

\*Shinichi Oba<sup>1</sup>, YUTA Mitsui<sup>2</sup>

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

自然地震(数十m以上の規模)では、すべり変位 $D$ は断層長 $L$ でスケールされることが知られている(Scholz, 1982; Dawers et al., 1993)。この種の地震のスケーリング関係は、小さい側には、室内実験における岩石の微小破壊(AE)まで延長できるのかもしれない(Yoshimitsu et al., 2014)。一方、室内実験におけるスティックスリップは地震現象の有力なアナログと考えられてきたが、我々は、実験研究者により出版されている18の論文のデータから、自然地震の $L$ - $D$ スケーリング関係との乖離を発見した。具体的には、自然地震のスケーリング関係の延長よりも実験のすべり変位 $D$ は大きくなる傾向にある。とりわけ、人工的なガウジを挟んだすべり実験では、この傾向が顕著に見られた。

この結果に基づいて、本発表では、粉体の摩擦にコントロールされたスティックスリップについて理解を深めるため、3次元個別要素法に基づく粉体せん断の数値シミュレーション(e.g., Hazzard and Mair, 2003)による数値実験を行う。事前の予備実験により、ある種の条件下では自発的にスティックスリップのような間欠的なイベントが発生することを確認できた。このための条件やその様態の変化について、粉体の大きさ(粒径)・回転の有無・パッキングの状態などを変えながら調べる。現在のところ、イベントの最大すべり速度に対して、粒径が負の相関を示すこと、および、パッキングの強さが複雑に影響を及ぼすことがわかっている。また、この2つのパラメータと比較して、背景のせん断速度の影響は小さいことを確認している。

---

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room C (S06, S09)

### [SPA]PM-3

chairperson: Yasuhiro Yoshida (Meteorological Collage)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM C

---

[S06P-01] Towards continuous seismic imaging from offshore to land along the Japan trench: effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities)

\*HyeJeong Kim<sup>1</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

[S06P-04] S-wave structure in the sediment beneath S-net stations estimated by V/H ratio of Rayleigh-wave (Scholte waves) extracted from ambient noise

\*FUKUSHIMA SHUN<sup>1</sup>, KIYOSHI YOMOGIDA<sup>1</sup> (1. HOKKAIDO UNIVERSITY)

4:10 PM - 4:20 PM

[S09P-05] Repeater earthquakes observed in seismicity around the Fukushima-Ibaraki border since the 2011 Tohoku-oki Earthquake

\*Rina Ikeda<sup>1</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Ryo Takahashi<sup>2</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>1</sup> (1. Tohoku University, 2. Meteorological Agency)

4:30 PM - 4:40 PM

[S09P-12] Stress change estimated from GNSS displacement and seasonal variations in seismicity

\*Taku Ueda<sup>1</sup>, Aitaro Kato<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

# Towards continuous seismic imaging from offshore to land along the Japan trench: effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities)

\*HyeJeong Kim<sup>1</sup>, Hitoshi Kawakatsu<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Kim et al. (2019, AGU) have reported receiver function common conversion point (CCP) stacking image from ocean to land beneath Japan by collecting data from the land seismometers and the ocean bottom seismometers (OBSs). OBSs lie on thick (few kilometers) and low velocity ( $V_p \sim 2$  km/s) sediments along the Japan trench (e.g., Nakamura et al. 2014, Takahashi et al. 2004). The sediment layer makes a time delay of energy arrivals between the vertical component and the horizontal component upon an incident teleseismic P wave, which is measurable. The continuous image was made by correcting the time delay of the image from the OBS records. However, there are two more issues left to be understood toward continuous seismic imaging. First is the amplitude affected by the seafloor sediment. The second is the lateral heterogeneities offshore that deviate from the land 1D velocity.

The receiver function CCP stacking imaging with OBS show amplitudes larger ( $\sim 5$  times stronger) than those with the land seismometers (Kim et al. 2019, AGU). The amplification due to sediments may cause bias in the interpretation of the deeper structure phase amplitudes unless properly separated. We examined various sediment models to understand and retrieve the large amplitude scale observed in the OBS CCP stacking image. The amplification of the converted phases at the vicinity of the slab top is insufficient to explain with single-layered sediment. Preliminary results show that a very-low shear wave velocity thin layer on the top of the sedimentary layers increases the overall amplitude of the phases in the receiver functions.

The offshore region of the Japan trench has a heterogeneous velocity structure (Matsubara et al. 2019, Intech Open). Due to the  $\sim 10\%$  velocity perturbation existing in tomography models offshore and the systematic difference along subduction direction, an approximation of the structure as a 1D velocity model cannot be held. The different velocity models utilized in offshore receiver function migration affect the connectivity of the slab structure along the dipping direction of the slab. Comparisons of the travel times between the 3D structure from tomography (Matsubara et al. 2019) and various 1D velocity profiles are tested. For instance, using the JMA model for migrating the receiver functions from OBS data makes the image stretch to deeper depths whereas structures from active source experiments are limited to a certain profile. The comparisons show that using a station-wise 1D velocity showed a good approximation of the 3D structure for migration.

The two effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities) done in this work are essential components for continuous seismic imaging from offshore to land, which will enable imaging along the entire Japan trench.

# S-wave structure in the sediment beneath S-net stations estimated by V/H ratio of Rayleigh-wave (Scholte waves) extracted from ambient noise

\*FUKUSHIMA SHUN<sup>1</sup>, KIYOSHI YOMOGIDA<sup>1</sup>

1. HOKKAIDO UNIVERSITY

近年、DONETやS-netなどの海底地震計技術の発達により、地震波干渉法による高解像度な浅部、地震波速度構造推定が可能となりつつある。また、沈み込み帯における、プレートの折り曲がりにより生じるクラックや間隙水の移動に伴う浅部速度構造と異方性構造の時空間変化を推定することが可能になりつつある。表面波の波形記録から地球表層の速度構造を推定する際、表面波が伝搬する2点間の位相速度や群速度の分散曲線がこれまで用いられてきた。これとは別にレイリー波の鉛直・水平振幅の比(V/H)からも観測点の近くでの地震波速度構造を推定できることが知られている(e.g., Lin et al., 2014)。

本研究では、まず海水が存在する場合のV/Hの感度カーネルを定式化し、いくつかのモデルに対して求めた。次に、S-netの観測点はケーブルに固定されているため、観測された、3成分波形は上下・東西・南北成分(E, N, U)とは一致しない。そこで、Takagi et al., (2019)の手法により、元の3成分波形からE, N, U成分波形へと補正した。このようなデータに対して、2017年1月から3月までの3ヶ月間において、S-netのサブアレイS3内の微動記録に対して相互相関関数を計算し表面を抽出した。このための処理として、100hzから4hzにダウンサンプリングを行い、2秒から40秒のバンドパスフィルターを適用し、さらに1 bit化を行なった(e.g., Bensen et al., 2007)。一例を図1に示すが、このように、群速度0.2-0.3 km/sで伝搬する表面波の抽出に成功した。この波は堆積層中のS波速度が海水中のP波速度(1.5km/s)よりも遅い時、堆積層と海水の境界を伝搬するScholte wavesに対応する。

抽出した表面波に対して、安定したV/H値を得るために、抽出した表面波に対して、周期4秒から20秒までの各周期ごとにgaussian filterを適用し、transverse方向とヒルベルト変換を行なったradial方向のzero-lag cross-correlations coefficientを計算した(e.g., Tanimoto and Rivera., 2007)。その値が0.7以上の波形に対して、V/H値とそれらの中央値を各周期ごとに計算した。その結果、周期5.5秒から7.5秒において、堆積層中の低速度層が存在するにも関わらず、V/Hの水平動に比べて上下動が卓越していることを明らかになった(図2)。これは、観測点の上側にP波だけが存在する層(海水)があると上下動成分だけが選択的に大きくなるという、感度カーネルでの計算結果とも調和的である。

最後に、V/Hデータの中央値に対して線形インバージョンを行い、浅部速度構造を求めた。海底から深さ3kmまでのS波速度の構造決定を図3に示す。推定した海底面表層のS波速度は0.65 km/sであり、Scholte wavesが伝搬する条件の低速度層が存在が確認された。

今後、さらに多くの観測点や異なる観測期間で同様な計算を行えば、堆積層中の地震波速度の時空間変動が求められると考える。

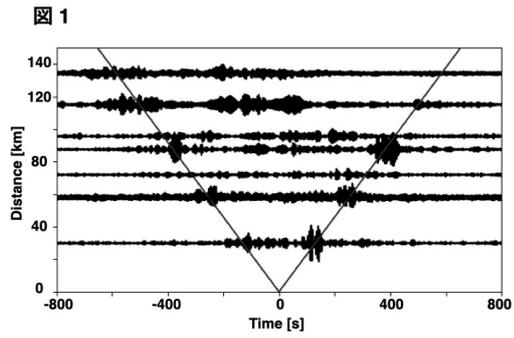


図1：サブアレイS3の観測点01とその他の観測点（02から11）におけるVV成分の相互相関記録。実線は伝搬速度 0.23km/s を示す。

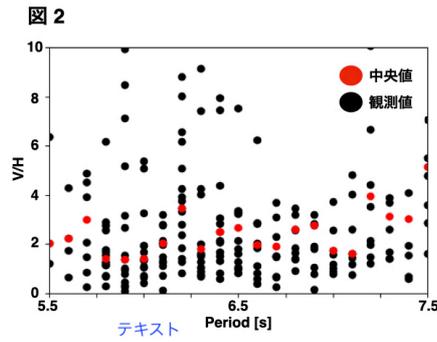


図2：サブアレイS3の観測点01で観測されたV/Hの観測値（黒）とそれらの中央値（赤）。

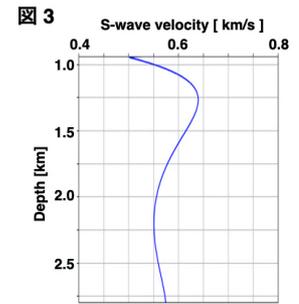


図3：サブアレイS3の観測点01で推定されたS波の速度構造（海底面より深い部分）。

# Repeater earthquakes observed in seismicity around the Fukushima-Ibaraki border since the 2011 Tohoku-oki Earthquake

\*Rina Ikeda<sup>1</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Ryo Takahashi<sup>2</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>1</sup>

1. Tohoku University, 2. Meteorological Agency

茨城県北部では2011年3月19日と2016年12月28日にM6程度の地震が発生しており、2つの地震は同一の断層面上で発生している可能性が指摘されている(Fukushima et al., 2018; Uchide, 2017, JpGU)。内陸の断層でこのような短期間に地震がくり返される事例は大変珍しいため、内陸地震の発生サイクルや応力蓄積・解放過程を理解する上で極めて重要な事例である。小中地震の中にも繰り返し地震が存在する場合、それらは非地震性滑りの指標となる(Nadeau & Johnson, 1998)。多くの先行研究では、繰り返し地震の検出のために波形の相互相関を用いている。しかし、その方法では近傍で起こった地震群を繰り返し地震と見誤る可能性がある。本研究では、2011年3月の東北地方太平洋沖地震の発生後に福島-茨城県境周辺において活発に発生している小中地震を用いて精密な震源再決定を行い、それに基づき繰り返し地震の存在を調べた。

本研究では2003年から2018年10月31日までに福島-茨城県境周辺で発生したMJMA1の地震46002個を対象に震源の再決定を行った。手法はYoshida & Hasegawa (2018)と同様に、Double-Difference法(Waldhauser & Ellsworth, 2002)を用いた。これは、波形の相互相関により高精度に求めたP,S波の相対到達時刻差データから震源位置を推定する手法であり、その精度を大幅に向上することができる。Takahashi et al. (2019, JpGU)が同じ活動を対象に小中地震の震源の再決定を行っているが、彼らが用いた地震のマグニチュード範囲はMJMA2である。本研究ではより多くの地震の再決定を行うことにより、より詳細な断層構造を求めた。

得られた震源分布から、茨城県北部に西へ傾斜する明瞭な一枚の面構造が見られた。これはTakahashi et al. (2019, JpGU)がM6地震が繰り返したことを推定したのと同じ面構造である。

繰り返し地震の検出のために、46002個の地震の全ペアの地震間距離と応力降下量20MPa(池田・他, 2020, JpGU)を仮定した際の断層サイズ(半径)を計算した。そして、地震間距離\*10<平均断層サイズ(半径)、マグニチュードの差が0.5以下となる地震ペアを繰り返し地震とみなした。茨城県北部の断層上にはそのような地震が2 MJMA 3で1000個弱、MJMA3で数100個見つかった。これまで繰り返し地震はプレート境界沿いで発見されることが多かったが、この結果は内陸でも繰り返し地震は発生しうることを示唆している。

# Stress change estimated from GNSS displacement and seasonal variations in seismicity

\*Taku Ueda<sup>1</sup>, Aitaro Kato<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震活動度は、降水量や灌漑などの地表や地下浅部に応力変化や強度変化をもたらす現象と相関があることが既往研究で指摘されている(e.g., Heki, 2003; Amos et al., 2014)。例えば、カリフォルニアでは地下水(荷重)の年変動による応力変化に対応して、地震活動が季節変動していることが報告されている(e.g., Amos et al., 2014; Johnson et al., 2017)。Johnson et al. (2017)では、GPSの鉛直変位から地下水荷重が断層面に与える応力変化を計算し、カリフォルニアでの地震活動が剪断応力が増加するときに発生しやすいことを示した。日本でも地震活動の季節変動性が指摘されており、積雪荷重や降水との関係が議論されているが(e.g., Heki, 2003; Ueda and Kato, 2019)、その原因として考えられる表層荷重による応力変化と直接比較した研究はほとんど行われていない。

本研究ではHeki (2003)で地震活動の季節変動性が指摘されている積雪領域において、地表の変位データから推定される地下での応力変化と地震活動の発生時期との比較・検討を行う。まず、GEONETの水平成分から Bedford and Bevis (2018)の手法を用いて地震や余効滑り等の過渡的な変化を除くことで季節変動成分を抽出する。次にSagiya et al. (2000)の手法を用いて季節変動する歪の時系列を推定し、Okada et al. (1985)の手法を用いて地下での応力変化を計算する。その後、観測された地震(気象庁一元化処理震源カタログ)のメカニズム解に対する剪断応力、法線応力、 $\Delta CFS$ などの地震発生時の応力変化を計算し、Johnson et al. (2017)と同様に、地震が季節変動する応力変化に対し、どういうタイミングで発生するか定量的に評価する。

---

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room D (S17, S24)

### [SPA]PM-3

chairperson:Hiroaki Tsushima(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM D

---

#### [S17P-04] Simulation of Tsunami Sediment Movement in Kamoda Pond, Tokushima Prefecture, assuming High Tide

\*Takuya Saito<sup>1</sup>, Toru Takeda<sup>1</sup>, Kei Yamashita<sup>2</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup> (1. Tokushima University, 2. Tohoku University)

4:00 PM - 4:10 PM

#### [S17P-09] Early estimation of tsunami heights with a Kalman filter: Combination of ocean-bottom pressure gauges and accelerometers

\*Ayumu Mizutani<sup>1</sup>, Kiyoshi Yomogida<sup>1</sup> (1. Hokkaido Univ.)

4:10 PM - 4:20 PM

#### [S17P-11] Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database

\*Masato Kamiya<sup>1</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup> (1. Tokushima University)

4:20 PM - 4:30 PM

#### [S24P-01] Determination of *P*-wave first motion polarities and moment tensors for hydraulically-induced AEs using CNN technique

\*Rui Tanaka<sup>1</sup>, Makoto Naoi<sup>1</sup>, Youqing Chen<sup>1</sup>, Kazune Yamamoto<sup>1</sup>, Keiichi Imakita<sup>1</sup>, Naofumi Tsutsumi<sup>1</sup>, Akihiro Shimoda<sup>1</sup>, Daiki Hiramatsu<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>2</sup>, Tsuyoshi Ishida<sup>1</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>, Hiroyuki Tanaka<sup>3</sup>, Yutaro Arima<sup>3</sup>, Shigehiro Kitamura<sup>3</sup>, Daisuke Hyodo<sup>3</sup> (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. JOGMEC)

4:30 PM - 4:40 PM

#### [S24P-06] Numerical experiments towards detection of deep low-frequency tremors from seismic waveform images via convolutional neural network

\*Ryosuke Kaneko<sup>1</sup>, Hiromichi Nagao<sup>1,2</sup>, Shin-ichi Ito<sup>1,2</sup>, Kazushige Obara<sup>2</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>2</sup> (1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

## Simulation of Tsunami Sediment Movement in Kamoda Pond, Tokushima Prefecture, assuming High Tide

\*Takuya Saito<sup>1</sup>, Toru Takeda<sup>1</sup>, Kei Yamashita<sup>2</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup>

1. Tokushima University, 2. Tohoku University

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震からもわかるように、今後起こりうる巨大地震・津波を想定するためにはできるだけ過去に遡り地震・津波の発生をより正確に調査することが求められる。この過去の地震・津波の調査においては、津波堆積物は物的証拠として重要な情報となる。東日本大震災以降、津波堆積物調査は精力的に行われ、津波堆積物を予測するための土砂移動シミュレーションモデルも高橋ら

(1999, 2000, 2011) や藤井ら (1998) によって開発されているものの、調査結果とシミュレーション結果の比較はまだ十分ではない。著者らはこれまでに、それらのモデルのうち、高橋らの土砂移動モデル

(STM) を用いて南海トラフ沿いの沿岸湖沼での津波堆積物調査結果 (岡村ら, 2012) と比較した。震源モデルは内閣府が想定した最大クラスの南海トラフ地震と1707年宝永地震 (Furumura et al., 2011) を利用した。なお、STMシミュレーションにおける潮位はT.P.=0mとした。その結果、岡村らによる調査地点の一つである蒲生田大池では数千年前に一度、層厚およそ10cmの津波堆積物が確認されているが、シミュレーションではどの震源モデルにおいても湖内の土砂の移動は確認できなかった。

そこで、STMシミュレーションにおける潮位を満潮位として計算を実施したところ、内閣府の震源モデルでも蒲生田大池への津波の浸水は起こりうるということが分かった。しかし、蒲生田大池内での土砂堆積量を見るとおよそ数cm程度であり、岡村らの調査結果にくらべかなり低い値を示した。

前報 (齋藤ほか, 2020, JpGU) までに確認したように、Hirata et al.(2017)の南海トラフ域の3967個の地震シナリオには、研究対象地域のも蒲生田大池に限って言えば、内閣府の震源モデルよりも大きな津波を発生させるモデルが含まれている。それらの震源モデルを使って満潮位仮定でSTMシミュレーションを実施したところ、蒲生田大池の土砂堆積量は最大で10cmとなった。こちらも岡村らで示された津波堆積物の厚さを再現できるほどではなかった。

現状、蒲生田大池の津波堆積物を再現できるSTMシミュレーションには至っていないが、現在と蒲生田大池に津波が襲来した時期とでは地形が異なる可能性がある。また、平常潮位面の高さも異なるかもしれない。古地形や潮位の再現は容易ではないが、次に地形標高やすべり量をいくつか変えた計算を行うことで蒲生田大池の津波堆積物を再現できるケースを調査する予定である。

謝辞：本研究では高橋ら (1999, 2000, 2011) によって開発された土砂移動モデルを利用させていただきました。本研究はJSPS科研費19H02409の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

# Early estimation of tsunami heights with a Kalman filter: Combination of ocean-bottom pressure gauges and accelerometers

\*Ayumu Mizutani<sup>1</sup>, Kiyoshi Yomogida<sup>1</sup>

1. Hokkaido Univ.

日本列島太平洋沖に近年整備されたDONETやS-netといった観測網によって、断層近傍における津波観測が可能になった。一方で、津波発生時に発生する水圧変化には水深変化や海底加速度変化などの非津波成分が重畳することが指摘されており(e.g., Saito and Tsushima, 2016)、水圧計による津波即時把握には課題が残されている。

本研究では、DONET・S-netの各観測点に設置されている水圧計・加速度計の記録をKalmanフィルタを介して組み合わせることで海底変位の逐次推定手法を提案する。これまでの研究で開発した、地震時水圧記録から津波・変位成分のみを抽出する手法(Mizutani et al., in press)により得られた波形に対して、そこに含まれる津波成分をノイズ、変位成分をシグナルとみなしてKalmanフィルタを適用した。また、推定した海底変位とMizutani et al.の手法で抽出した水圧波形を比較することで、津波波高の即時推定を試みた。

カルマンフィルタを用いた地震時変位の推定は、陸上観測点においてGNSS観測と加速度計を組み合わせる形でおこなわれており(e.g., Bock et al., 2011)、フィルタの設計はこれらの先行研究の結果を参考におこなった。GNSS観測と水圧計記録の相違点として、GNSS観測の場合はノイズが定常的に加わっていると考えられるのに対して、水圧記録に含まれるノイズである津波が観測されるのは有限の時間のみであることがあげられる。そのため本研究では、ノイズの非定常性を考慮した適応Kalmanフィルタ(e.g., 佐藤・竹井, 1998; Hu et al., 2003)を用いた。さらに、結果の発散を抑制するために、通常のKalmanフィルタを平方根形式に変形した、平方根Kalmanフィルタを用いた(e.g., Haykin, 1996)。

本手法を2016年4月1日に三重県南東沖で発生した地震(Mw 6.0)によるDONET記録に適用した結果、図1のように変位成分(オフセット成分)を低減させることに成功した。しかし、このような結果を得るためには、適応Kalmanフィルタの調節パラメータである忘却係数をあらかじめ適切に設定する必要がある。現段階では、オフセットを十分低減させるためには忘却係数の設定を事後的におこなう必要があるため、実用的な津波即時把握のためには、最適な忘却係数の決定を即時把握に適用できるように改善する必要がある。

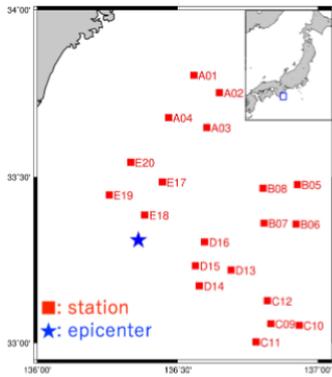
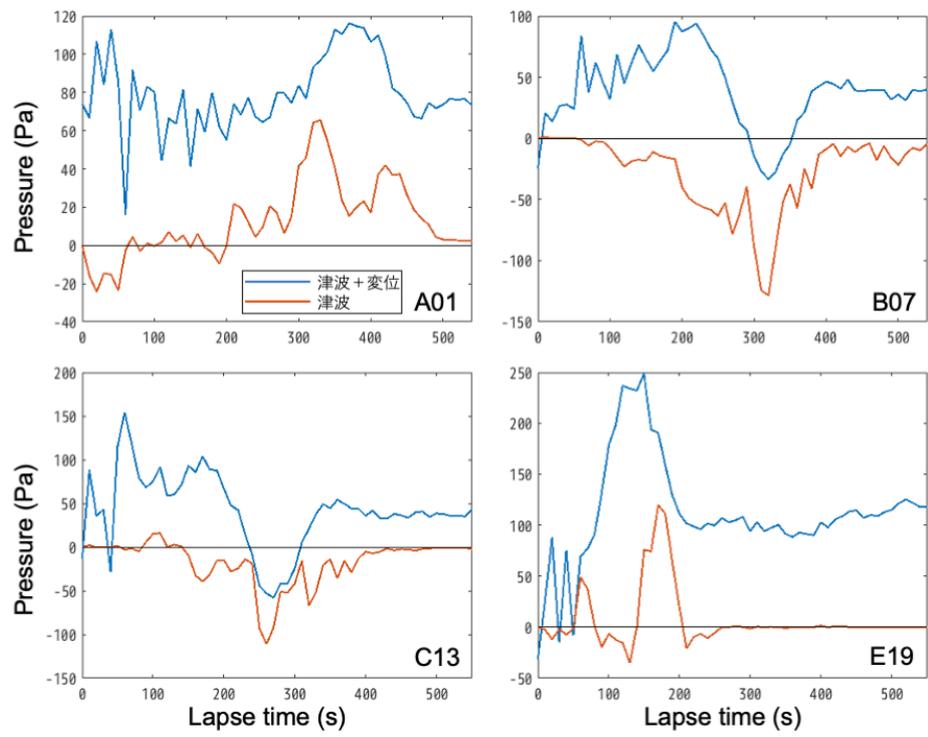


図1  
 (上)震源と観測点の分布  
 (右)観測点A01, B07, C13, E19  
 における津波+変位波形(青)と  
 その中からKalmanフィルタに  
 より抽出された津波波形(橙)



# Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database

\*Masato Kamiya<sup>1</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup>

## 1. Tokushima University

日本では沖合を伝播する津波は海底水圧計やGPS波浪計で海岸に到達する前に観測可能である。エネルギー保存則より得られるグリーンの法則を用いれば、沖合津波高から沿岸津波高を簡単に推定できる。さらに発展した手法として、多数の津波シミュレーション結果に基づいて回帰するモデル（以降、回帰モデル）が知られており、Baba et al. (2014)やYoshikawa et al. (2019)などがある。これらはシンプルであるが実用的で、処理速度の割に高精度な予測が可能である。しかし、回帰モデルは海岸の任意の1点のみの高さを予測するだけで、最大浸水深分布のような面的な分布を求めるに至っていない。津波災害発災後の応急対応などを考えた場合、沿岸津波高だけでなく、浸水深分布も予測できることが望ましい。既存の回帰モデルで浸水深分布を求めるには、単純には空間上のすべての点について予測を実施すればよいわけだが、予測点が膨大となるため処理時間が長くなるという問題がある。解決策として、津波による浸水深が常に類似しているエリアを予めグループ化して予測点を減らすことが挙げられる。本研究ではこの実現を目的とする。津波による浸水深が常に類似しているエリアを予めグループ化するために、ここではクラスタリング解析の非階層的手法の代表例であるk-means法を用いた。解析対象は、徳島県阿南市周辺地域とし、浸水深データは内閣府シナリオの11ケースによるものを使った。k-means法はクラスタ分割数をあらかじめ分析者が設定する必要があり、恣意性が残る。このため、分割数を変えて何回か解析し、あるひとつのクラスタの浸水深データの平均値で規格化した標準偏差（NSD）を調査した。ここで任意ながらNSDが0.2未満を目安とした。分割数を9とした場合、NSDが0.2未満を満たしたクラスタは全体の55.6%であった。分割数を18とした場合では63.6%、クラスタ数を27とした場合では64.6%であった。分割数18と27の場合あまり違いが見られなかったので、分割数18を最終的に採用した。重回帰分析により浸水エリアの浸水深を予測する手法として、べき乗の回帰モデル（Yoshikawa et al., 2019）を用いた。回帰モデルを構築するクラスタは、NSDが0.177であった分割数18の第17クラスタとした。回帰モデルの構築に利用したデータは、津波浸水データベース（武田, 2019）の3967ケース中、予測エリアでの最大浸水深が高いシナリオを順に100個用いた。目的変数として当該クラスタ内の浸水深データの平均値、最大値、標準偏差を、説明変数としてDONET（地震・津波観測監視システム）の海底水圧計51箇所での最大津波高を利用した。最後に構築した回帰モデルを使って、当該クラスタの内閣府シナリオケース3の浸水深の平均値、最大値、標準偏差を予測した。それぞれ1.76m、4.46m、2.23mとなった。正解は1.58m、3.03m、0.28mであり、必ずしも精度が良いとは言えない。今回、回帰モデルの構築に利用したシナリオの個数は100個であり、かつ、大津波のシナリオに偏っていた。これが低精度の原因かもしれない。引き続き調査する予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費19H02409の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

## Determination of *P*-wave first motion polarities and moment tensors for hydraulically-induced AEs using CNN technique

\*Rui Tanaka<sup>1</sup>, Makoto Naoi<sup>1</sup>, Youqing Chen<sup>1</sup>, Kazune Yamamoto<sup>1</sup>, Keiichi Imakita<sup>1</sup>, Naofumi Tsutsumi<sup>1</sup>, Akihiro Shimoda<sup>1</sup>, Daiki Hiramatsu<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>2</sup>, Tsuyoshi Ishida<sup>1</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>, Hiroyuki Tanaka<sup>3</sup>, Yutaro Arima<sup>3</sup>, Shigehiro Kitamura<sup>3</sup>, Daisuke Hyodo<sup>3</sup>

1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. JOGMEC

シェールオイル・ガス開発や地熱開発では、岩盤の透水性を向上させ、資源の流路を確保するために水圧破碎技術が利用されている。本研究では、水圧破碎による亀裂造成プロセスを明らかにするため、室内水圧破碎実験を実施し、実験中に生じるacoustic emission event（以下AE）を測定して、そのモーメント・テンソル（MT）解を推定した。大量のAEのMT推定を効率よく行うために、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）によるP波初動極性の読み取りを行い、得られた結果をもとに個々のAEのMT解を推定した。

実験は、65 x 65 x 130 mmの直方体形状の黒髪島花崗岩10個に対して5 MPaの一軸圧縮載荷下で実施した。供試体中央部に穿孔した破碎孔に1 cc/min ( $1.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ ) で破碎流体を圧入することで水圧破碎を行い、試験中に生じるAEを、供試体に設置したプリアンプ内蔵型の高感度・広帯域のM304Aセンサ16個、共振型のPICOセンサ（共振周波数550 kHz）8個の計24個のAEセンサを用いて14bit, 10 MHzで連続収録した。得られたAEデータからSTAとLTAの比を用いる手法（Allen 1978）による波形抽出を行い、供試体の速度異方性を考慮した非線形最小二乗法（Rothman et al. 1974）を用いてAEの震源位置・発震時刻を推定した。さらに、得られた震源を初期震源としてdouble difference法（Waldhauser & Ellsworth 2000）により震源を再決定した。

上記の処理で得られたすべてのイベントのうち、14個以上のM304Aセンサでシグナルノイズ比15以上の波形が得られたイベントに対してP波初動極性を手動で読み取り、得られた49375個の読み取り結果をCNNの訓練に用いた。図1に本研究で構築したCNNと訓練結果を示す。このネットワークでは、理論走時周辺の150サンプル分の波形を入力とし、その波形の初動極性を0（引き）から1（押し）の連続量で出力する。訓練は、手動読み取りデータの80%を訓練データ、20%を検証データとして行った。M304Aで得られた波形に対する結果ではepoch=72, PICOではepoch=47で訓練・検証データに対する損失の差が最小となった。この時の精度は出力値の閾値を0.5（0.5以上を押し、0.5未満を引き）とした場合、それぞれ95.30%, 96.83%, 閾値を0.05（0.95以上を押し、0.05未満を引き）とした場合、それぞれ99.22%, 99.11%であった。初動極性の自動読み取りにはこれらのepochでの重みパラメータを用い、また、出力値の選定には閾値0.05を採用し、出力値が0.05-0.95である読み取り結果は以降の解析に用いなかった。CNNにより1399767個の波形の初動極性の自動読み取りに成功し、この読み取り結果を元に各波形の理論走時周辺の30サンプルから初動振幅値を読み取り、これらを用いて49299イベントのMT解を推定した。

AEの時空間分布からは、破碎孔での流体圧の急降下（breakdown）を伴う最終的な亀裂造成の準備過程として2つのフェーズが確認された。最初のフェーズ（第1拡大フェーズ）は、破碎孔での流体圧が、breakdownが生じる圧力の10-30%で始まり、破碎孔から時間とともに三次元的に広がるAE活動で特徴づけられる。2つ目のフェーズ（第2拡大フェーズ）は、breakdown圧の90-99%で始まり、破碎孔から最大圧縮軸方向に二次元的に進展するAE活動で特徴づけられる。得られたMT解析結果からは、第1拡大フェーズでは様々な方向の開口型AEが起こったことが示唆された。第2拡大フェーズでは、AE震源が描き出す面上での開口に対応するメカニズム、すなわち古典的水圧破碎理論から予想される開口型のイベントが支配的であることがわかった。また、第2拡大フェーズでは開口型AEに加え、せん断型AEも生じたことが確認された。これらの結果から、第1拡大フェーズは、既存の空隙を利用して破碎流体が岩体に浸透する過程、第2拡大フェーズは、boreholeから主亀裂が生じ進展する過程に対応すると解釈できる。

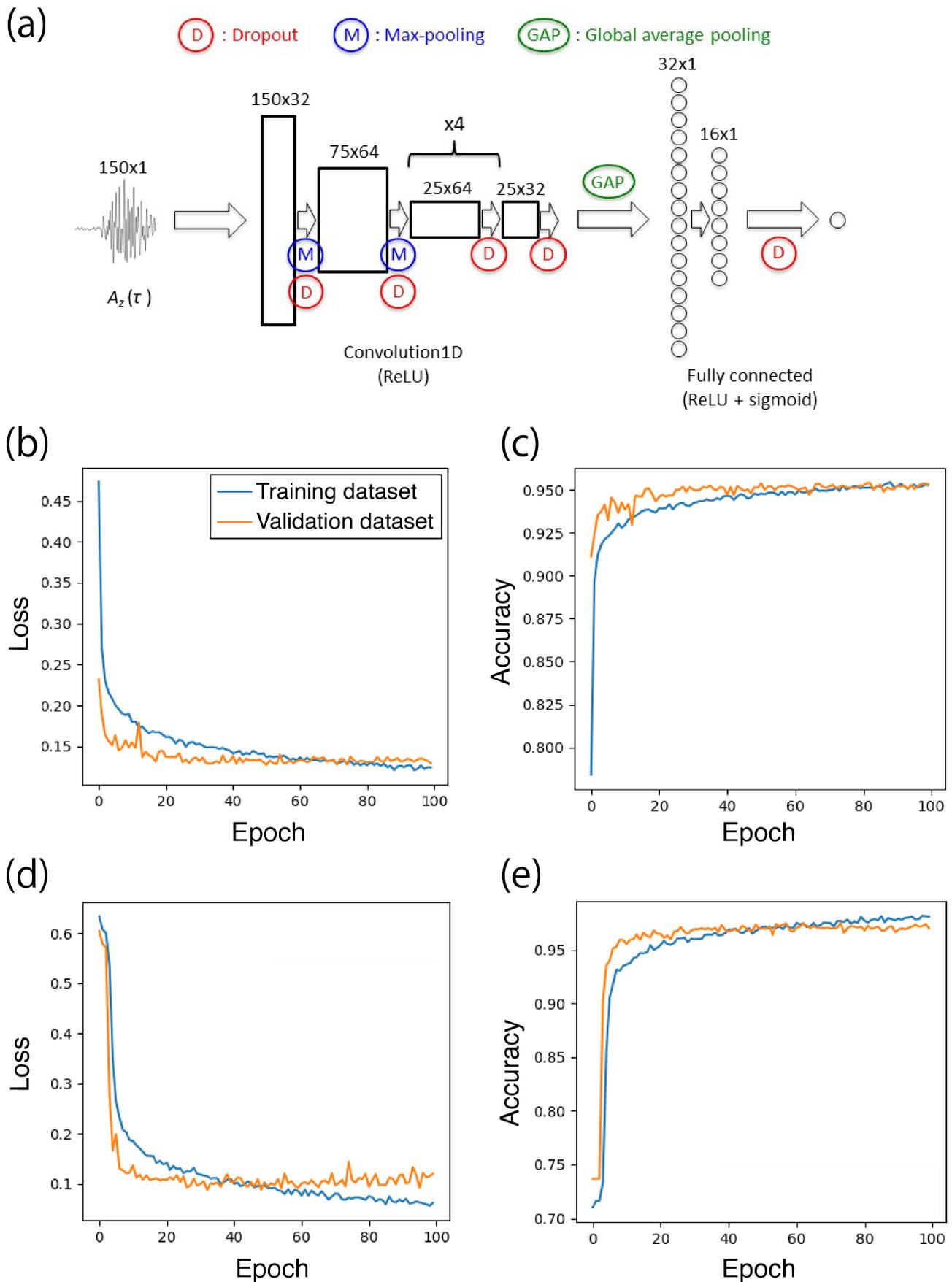


図1 (a) P波初動極性読み取り用のCNN. (b, c) M304Aで受振された波形を用いた訓練の結果. (d, e) PICOで受振された波形を用いた訓練の結果.

# Numerical experiments towards detection of deep low-frequency tremors from seismic waveform images via convolutional neural network

\*Ryosuke Kaneko<sup>1</sup>, Hiromichi Nagao<sup>1,2</sup>, Shin-ichi Ito<sup>1,2</sup>, Kazushige Obara<sup>2</sup>, Hiroshi Tsuruoka<sup>2</sup>

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

## 概要：

深部低周波微動は防災科学技術研究所高感度地震観測網Hi-netの構築によって初めて観測的に見出された[1]ため、それに関するデジタルデータは直近の約20年分しか存在しない。数十年～数百年という地震発生サイクルの時間スケールを考えると、過去の地震波形データにスロースリップイベントに伴う深部低周波微動が記録されているかどうかを詳しく調べ、その特徴をさらに明らかにすることは、地震学において当然検討すべき重要課題である（例えば [2]）。

現在のようなデジタル記録以前においては、地震波形データはペンによって振動を連続的に記録紙に直接書き記したドラム式のアナログ紙記録として保存されていた。このようなアナログ紙記録には、深部低周波微動や通常の地震などの自然現象や、波浪起源の脈動や人為的振動などに由来するノイズの振動が記録されているだけでなく、一定時間ごとに挿入される刻時のためのパルス波形、ペンまたは記録紙の駆動部分の不具合が原因と思われる不自然な波形、ペンの消耗や記録紙の交換によって発生したと思われるデータの欠損なども含まれる。そのため、深部低周波微動を解析対象とする場合、その振幅は微弱でノイズとほぼ同等であり、しかも刻時パルスなどが重畳するため、微動の波形をデジタイズし解析に用いることは極めて困難である。

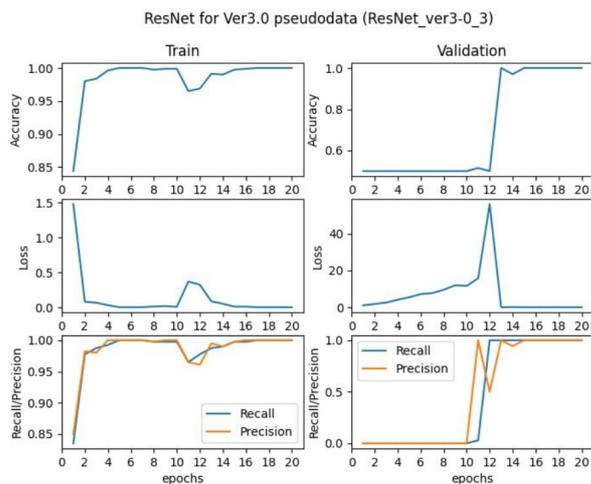
本研究では、畳み込みニューラルネットワークに基づき、アナログ紙記録から深部低周波微動を自動で検出するためのアルゴリズム開発を目指す。畳み込みニューラルネットワークとは、主に画像認識や手書き文字認証などで用いられる深層学習の手法の一種であり、人間の視覚細胞のはたらきを層の重なりによって数理的なモデルとして表現するのが特徴である。2010年代に入ってから画像認識のタスクにおいて従来の手法を遥かに上回る性能を発揮したことで注目されるようになり、現在ではスマートフォンのアプリなど我々の身近なものまで支える技術である。畳み込みニューラルネットワークの学習において人間が指定するのは主にモデルの構造のみであり、画像から特徴を抽出するために必要な内部のパラメータのチューニングはすべてコンピュータによって自動的に行われるため、人間の労力をあまり必要としない上に人間の画像認識の精度を上回る結果を得られることが期待される。そのため、モデルの構造や学習手法に関する研究は現在も盛んに行われている。例えば、2016年に発表されたResidual Network (ResNet) [3]においては、残差学習の考え方を取り入れており、一定数の層を通過したあとの出力値に元々の入力値を足し合わせるShortcut Connectionと呼ばれるシンプルな構造をモデルに組み込むことによって、深層化による過学習やパラメータ数の増加などのデメリットを軽減しつつ汎化性能を向上させることに成功している。

はじめから多種多様のノイズが入った実データを用いて一からモデルを学習させるのは困難であるため、まずは実際のアナログ記録を参考に振動現象や観測ノイズを模した疑似データを作成し、ノイズの大きさや種類を変えながらモデルの学習を行う。背景ノイズとして脈動を再現した波形と正規ノイズを加え、深部低周波微動が観測された場合と観測されなかった場合の疑似画像をそれぞれ作成し、ResNetと同じくShortcut Connectionの構造を持ったモデルにおいて学習を行った。脈動および微動を再現する波形については、正規ノイズを実際の周波数帯域に合わせてバタワースフィルタに通過させることによって作成した。その結果、図(a)のように学習済みモデルは微動の観測の有無をほぼ確実に正しく判定することができた。また、Grad-CAM [4]に基づきモデルの判定に影響を与えた部分を可視化したヒートマップを作成したところ、図(b)のように微動が観測された場合のデータに関して微動の発生時間帯まで正しく検出できることが確認できた。最終的には実データと同レベルのノイズが入った疑似データで学習させたモデルを初期モデルとして、そこから実データによる学習を行うというファインチューニングと呼ばれる手法を用いる。本研究の目標であるアナログ紙記録

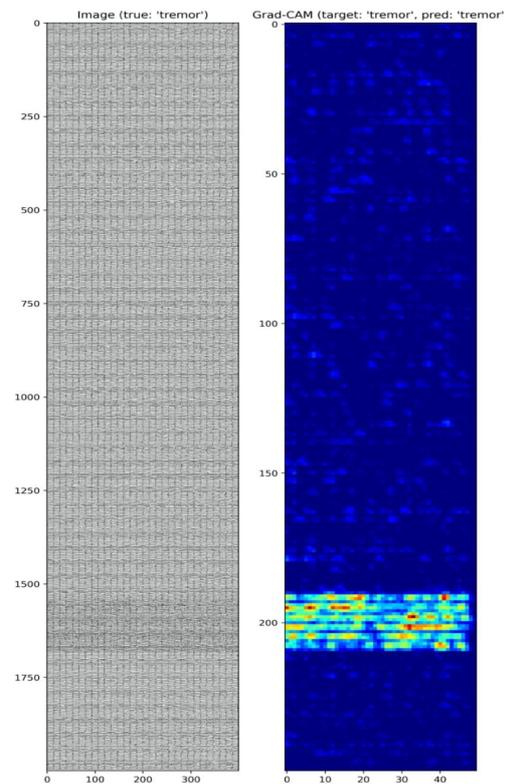
からの深部低周波微動の自動検出が達成されれば、現在よりも長期間の深部低周波微動に関するデータベースの構築が可能になることが期待される。

#### 参考文献

- [1] K. Obara, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681, 2002.
- [2] M. Kano and Y. Kano, Possible slow slip event beneath the Kii Peninsula, southwest Japan, inferred from historical tilt records in 1973, *Earth, Planets and Space*, 71(95), 2019.
- [3] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, Deep residual learning for image recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.
- [4] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh and D. Batra, Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization, *International Journal of Computer Vision*, 128, 336-359, 2020.



(a) モデルの学習結果



(b) Grad-CAM に基づくヒートマップ