

Mon. Oct 24, 2022

ROOM P-1

Poster session (1st Day) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

[S03P] AM-P

9:30 AM - 12:00 PM ROOM P-1 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S03P-01] Trial of an assessment method of crustal deformation

*Hisao Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Takeyasu Yamamoto¹, Takahiro Tsuyuki¹ (1. Meteorological Research Institute)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-02] Three dimensional distribution of fault slips and density structure at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Koji MATSUO¹, Ryosuke ANDO², Takayuki NAKANO¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-03] Crustal deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS networks

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku Ohta³ (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-04] Detection by network inversion filter of long-term and short-term slow slip events, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2018-2022

*Shinzaburo Ozawa¹, Hiroshi Munekane¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-05] Slow-slip events of one-hour duration (2)

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵ (1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-06] Recent GNSS-Acoustic seafloor geodetic

observations off Tohoku and their results

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Chie Honsho³, Ryota Hino³, Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Tokyo university of Marine Science and Technology)

9:30 AM - 12:00 PM

Poster session (1st Day) | Regular session | S01. Theory and analysis method

[S01P] PM-P

3:30 PM - 6:00 PM ROOM P-1 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S01P-01] Antipodal seismic observation and sensitivity kernel for liquid region on the top of the Earth's Inner Core

*Seiji TSUBOI¹, Rhett Butler² (1. JAMSTEC, 2. University of Hawaii at Manoa)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-02] On the resolution matrix of the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-03] Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust (2)

*Jun Kawahara¹, Kazuki Kidoguchi¹, Takahiro Shiina² (1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-04] A trial application of the real-time tsunami forecasting by means of and adjoint-equation based wavefield estimation

*Takuto MAEDA¹ (1. Hirosaki University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-05] Characteristics of strain envelopes of scattered waves propagating in the 2D random heterogeneous medium

*Kentaro Emoto¹ (1. Kyushu University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-06] Effects of a seawater and sediment layers on seaquake amplifications on and under the sea surface

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi Takenaka² (1.

Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-07] Features of Time-series of Real-time Seismic Intensity at MeSO-net Station

*Hisahiko KUBO¹, Kaoru SAWAZAKI¹, Lina

YAMAYA¹, Takeshi KIMURA¹ (1. NIED)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-08] Spatiotemporal Characteristics of

Autocorrelation Functions from Seafloor Ambient Noise Records at Hyuga-nada

*Yasunori SAWAKI¹, Yusuke Yamashita², Shukei Ohyanagi¹, Emmanuel Soliman Garcia², Masanao Shinohara³, Yoshihiro Ito² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-09] Large site amplification factors observed not only along the Sea of Japan but also along the Sea of Okhotsk in the northern part of Hokkaido

*Atsushi NOZU¹ (1. Port and Airport Research Institute)

3:30 PM - 6:00 PM

ROOM P-8

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

*久田 嘉章¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

*吾妻 崇¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

*新井 隆太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

*松原 誠¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-05] Zisin Editorial Board

*三井 雄太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-06] Public Relations Committee

*篠原 雅尚¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

*松島 信一¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-08] Committee for School Education

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-10] Kanamori Fund

*中川 和之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

ROOM P-2

Poster session (1st Day) | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

[S16P] AM-P

9:30 AM - 12:00 PM ROOM P-2 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S16P-01] An investigation of improving sound pressure level and Resolution in seismic reflection survey using underwater speaker

*Naoto Kumagai¹, Kaito Kimura¹, Tetsuro Tsuru¹ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-02] Characteristics of High-frequency S-wave

and S-coda at DONET ocean-bottom seismometers

*Shunsuke TAKEMURA¹, Kentaro EMOTO², Lina YAMAYA³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyusyu University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-03] Amplitude anomalies observed in the S-wave seismic reflection survey data on the Shikano fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Takao KAGAWA¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada² (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Hanshin Consultants Co. Ltd.)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-04] Characteristics of microtremors in the vicinity of the Yoshioka fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Tatsuya NOGUCHI¹, Isamu NISHIMURA², Takao KAGAWA¹ (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-05] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground in Wakabadai, Tottori City from Microtremor and Seismic Observations

*Isamu NISHIMURA¹, Tatsuya NOGUCHI², Takao KAGAWA² (1. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-06] Investigation of Subsurface Structure in the Kochi Plain - microtremor survey and document retrieval

*Nobuyuki YAMADA¹ (1. Kochi Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-07] Estimation of shallow subsurface structure in the Oharadai area, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, using H/V spectral ratios and borehole data

*Yasuyuki IWASE¹, Kojiro Kato², Yusuke Mizuno²

(1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Japan Maritime Self-Defense Force) 9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-08] Estimation of V_{s30} using microtremor array records in Thimphu and surrounding towns, the Kingdom of Bhutan

*Takumi Hayashida¹, Nityam Nepal², Phuntsho Pelgay², Shiro Ohmi³, Karma Namgay², Dowchu Drukpa², Hiroshi Inoue⁴ (1. IISEE, Building Research Institute, 2. DGM, Ministry of Economic Affairs, Bhutan, 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. NIED)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-09] Basic study of ground amplification factor based on microtremor array observations at seismic stations.

*Shigeki SENNA¹ (1. NIED)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-10] Application of Bayesian Optimization to Estimate 1D Subsurface Layered Structure from Near-filed Seismic Waveforms

*Hisahiko KUBO¹ (1. NIED)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-11] Site investigation by surface wave measurements on subsidiary faults of 2016 Kumamoto Earthquake

*Naoto INOUE¹, Kotaro Mizutani¹, Naoko Kitada¹, Kazuki Watanabe², Noriyuki Shibuya², Masashi Omata² (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-12] Long-term monitoring of subsurface changes by a giant magnetostrictive seismic source

*Takahiro Kunitomo¹ (1. Ontake Science Lab)

9:30 AM - 12:00 PM

Poster session (1st Day) | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08P] PM-P

3:30 PM - 6:00 PM ROOM P-2 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S08P-01] Stress field and slip tendency analysis for the 2016 Mw7.8 Kaikō ura earthquake, New Zealand

*Tomomi Okada¹, Miu Matsuno¹, Ayaka Tagami¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi

Hirahara¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Clifford H Thurber⁶, Richard H Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-02] Source process analysis of the 2004 off Kii peninsula earthquake from using sparse observation network and Green functions based on a three-dimensional structure
*TAKAHITO NISHIMIYA¹ (1. Second Laboratory, Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-03] Commonality and diversity of ruptures occurring at the same asperity: the 2015 Mw6.8 Miyagi-Oki earthquake and Mw6.0-6.4 quasi-repeating earthquakes
*Keisuke YOSHIDA¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-04] Relationship Between Variations in Source Duration and Occurrence Areas of Earthquakes
*Goki Irie¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-05] Do deep low frequency earthquakes have the similar rupture growth process to ordinary earthquakes?
*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-06] What Actually is the Vertical Shock Verbally Reported for Shallow Earthquakes?
*Koji UENISHI¹ (1. Univ. of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-07] Outline and radiation efficiency of stochastic source time functions
*Shiro HIRANO¹ (1. Ritsumeikan Univ.)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-08] On shear localization by thermo-chemical pressurization and following destabilization and migration of the shear-localized zone
*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto University, DPRI)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-09] The earthquake interoccurrence time distribution in sheared granular model
*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-10] Numerical experiments using a friction law both for fast and slow sliding
*Takane HORI¹, Hideo Aochi² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey))

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-11] Investigation of earthquake source scaling laws using dynamic rupture simulations with a hierarchical patch structure
*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-12] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults
*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kearsse² (1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-13] Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation (Part 2)
*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-14] Why do Gutenberg-Richter b-values decrease with time prior to large earthquakes? Insights from rate-and-state earthquake cycle simulations with frictional heterogeneities
*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto

University)

3:30 PM - 6:00 PM

- [S08P-15] Numerically reproduced segments of short-term slow slip events in the Nankai region
*Takanori MATSUZAWA¹, Bunichiro Shibasaki² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute)

3:30 PM - 6:00 PM

- [S08P-16] **Impact of Kuroshio meanders on a stationary slow slip event and local seafloor level change around the Nankai Trough**
*Keisuke ARIYOSHI¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Takeshi Iinuma¹, Masaru Nakano¹, Demian Michael Saffer⁴, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi³, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University (now at Japan Meteorological Agency), 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. University of Texas, Austin)

3:30 PM - 6:00 PM

- [S08P-17] A possible relation between Reidel shear band and rate- and state-dependent friction parameters
*Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda¹, Shun Watanabe¹ (1. Kyoto University, 2. NIED)

3:30 PM - 6:00 PM

ROOM P-3

Poster session (1st Day) | Regular session | S17. Tsunami

[S17P] AM-P

9:30 AM - 12:00 PM ROOM P-3 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

- [S17P-01] Data assimilation using high-frequency radar for tsunami early warning: A case study of the 2022 Tonga volcanic tsunami
*Yuchen WANG¹, Kentaro Imai¹, Iyan E. Mulia², Keisuke Ariyoshi¹, Narumi Takahashi¹, Kenichi Sasaki³, Hitoshi Kaneko³, Hiroto Abe^{3,4}, Sato Yoshiaki³ (1. Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 2. RIKEN Cluster for Pioneering

Research, 3. Mutsu Institute for Oceanography, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 4. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

9:30 AM - 12:00 PM

- [S17P-02] Diversity of tsunami propagation caused by Nankai Trough earthquakes
*Yusuke Oishi¹, Takamasa Shinde¹, Takashi Furumura² (1. Fujitsu Ltd., 2. Univ. of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM

- [S17P-03] Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source generation
*Hiroaki TSUSHIMA¹ (1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

9:30 AM - 12:00 PM

Poster session (1st Day) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

[S03P] AM-P

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 12:00 PM ROOM P-1 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S03P-01] Trial of an assessment method of crustal deformation

*Hisao Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Takeyasu Yamamoto¹, Takahiro Tsuyuki¹ (1. Meteorological Research Institute)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-02] Three dimensional distribution of fault slips and density structure at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Koji MATSUO¹, Ryosuke ANDO², Takayuki NAKANO¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-03] Crustal deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS networks

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku Ohta³ (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-04] Detection by network inversion filter of long-term and short-term slow slip events, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2018–2022

*Shinzaburo Ozawa¹, Hiroshi Munekane¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-05] Slow-slip events of one-hour duration (2)

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵ (1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM

[S03P-06] Recent GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations off Tohoku and their results

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Chie Honsho³, Ryota Hino³, Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Tokyo university of Marine Science and Technology)

9:30 AM - 12:00 PM

Trial of an assessment method of crustal deformation

*Hisao Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Takeyasu Yamamoto¹, Takahiro Tsuyuki¹

1. Meteorological Research Institute

気象研究所では、地震活動の状況把握と推移予測を行うため、地震・地殻変動データの解析に基づいた地殻活動状態の指標化を目指している。この解析結果の地域特性・時間変化の特徴を調査し、最終的には現在の地殻活動の異常度を判定し、発生した地震の評価や今後の推移予測を目的としている。地震活動の指標化については、永田・他（2022, JpGU）により、規模別頻度分布・潮汐相関・地震活動度に基づいた指標値が提案されている。本発表では、地殻変動データを用いた指標値の検討状況について報告する。

地殻変動データを用いた地震活動予測としては、Nishimura（2022）による先行研究があるが、これは2005年4月から2009年12月までの期間のデータを定常状態と考え、今後の内陸地震の起こりやすさを評価する“time-independent”なものであった。ここでは、地殻変動の時間変化に注目し、定常状態からのずれと地震活動との関連性について調査したい。

地殻変動データは国土地理院のGEONET F5解日座標値を使用し、アンテナ交換等によるオフセット（岩下・他、2009）及び地震によるステップを除去した。さらに短期的な共通ノイズを各観測点の30日移動平均からの残差を求め、その平均値を差し引くことで除去した。速度は単純な階差で1か月毎に算出し、Shen et al.（1996, 2015）の手法を用いてひずみに換算した。解析期間は、永田・他（2022）との比較のため、2000年1月から2021年8月までとし、ひずみ算出のグリッド間隔も0.2°とした。

このように算出したひずみ場の時間変化から、定常的な地殻変動からのずれを検出できるかを検討した。また、観測点速度の算出については、Yokota et al.（2021）で議論されているように期間と精度にトレードオフ関係があるが、速度の算出法を変えてどの程度結果に影響があるかも検討した。本発表では、いくつかの特徴的な地域について調査した結果を紹介したい。

Three dimensional distribution of fault slips and density structure at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Koji MATSUO¹, Ryosuke ANDO², Takayuki NAKANO¹

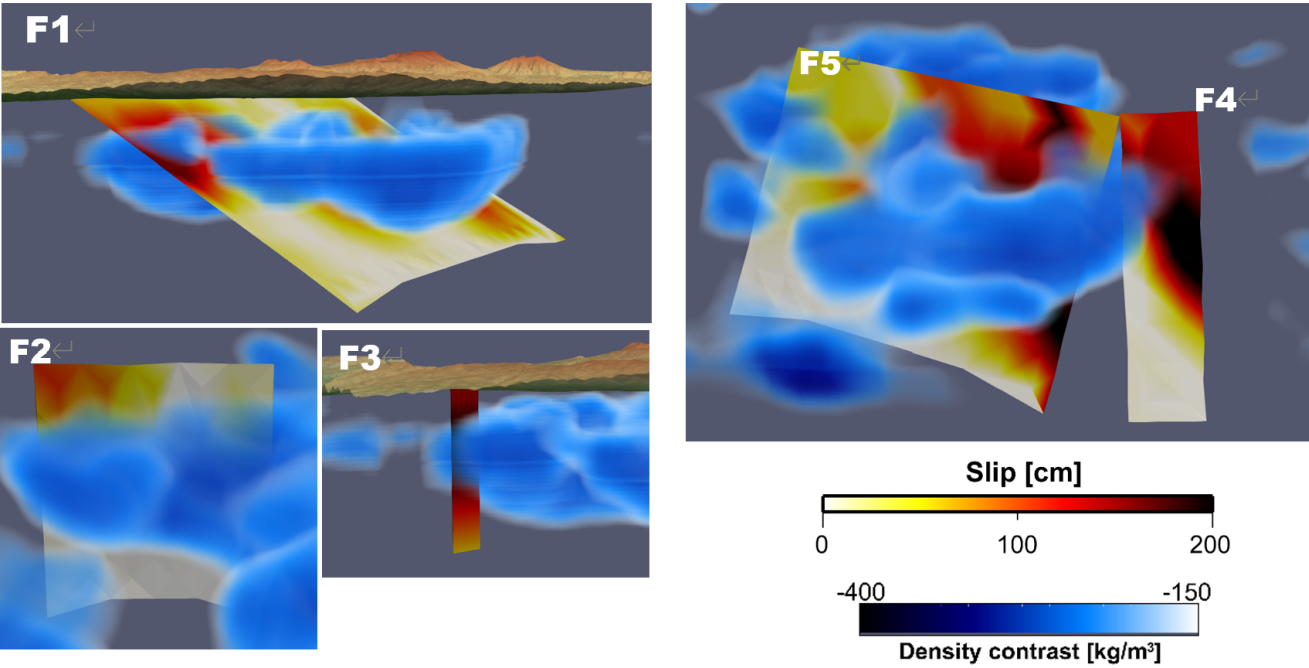
1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo

1. はじめに 本研究の目的は、断層破壊の終端部及びその周辺に特徴的な地殻構造が存在するかを調べ、断層破壊の終焉を制御する要因について議論することにある。この目的のために、本研究では、2016年熊本地震を対象に、SARによる地殻変動から推定される断層運動の詳細と重力によって推定される地殻構造との間の空間的関係を調査してきた。本発表では、これまでの計算で得られてきた断層すべりと密度構造の3次元分布を詳細に示し、両者の位置関係を明らかにする。

2. データと解析 ALOS-2衛星のSARデータを用いた解析により震源領域における変動場を獲得した。さらに、複数の軌道データから得られた変動データを用い、最小二乗法により上下、東西、南北3成分の地殻変動を得た。得られた地殻変動データを用いて断層モデルの推定を行った。日奈久断層、布田川断層沿いに加えて阿蘇カルデラ内に見られる断層運動と推察される変動に対応した断層面を設定し、計9枚の断層面の傾斜やすべり量を推定した。まず初めに、Simulated Annealing (SA) 法により断層面の形状を推定し、さらにSA法で得られた断層面を基に各断層面のすべり分布を推定した。続けて、重力データを用いた密度コントラスト構造の推定を行った。解析には、既存の重力データとキャンペーン重力観測(60点)を用いたインバージョン解析により地下の密度構造を推定した。完全ブーグ重力異常を得た後、重力インバージョン解析によって地下の密度コントラストを推定した。密度構造は、平行六面体の質量塊の引力を応答関数とし、密度コントラストを推定パラメータとする重み付き最小二乗法により3次元的に推定した。

3. 結果 地殻変動の解析から、断層運動起因と推定される変位境界が、布田川断層の東部延長上に伸展して、阿蘇カルデラ西縁部で主に2方向に分岐していることがこれまでの研究で認められている。このうち、布田川断層の延長上で右横ずれを示す断層をF1とする。一方の分岐断層は、分岐直後、約2kmの変位不連続を伴う東西走向の断層運動を示すが、その後東南東方向に走向を変化させる。ここでは、東西走向の断層をF4、その後をF5とする。このほかに、カルデラ内ではF1の走向にほぼ並行で右横ずれを示す局所的な断層であるF2、F3が認められる。図は、これら断層面上のすべり分布を推定し、密度コントラスト構造との位置関係を3次元的に示したものである。Paraviewソフトウェアを使用して3次元表示をした。F1のすべりは断層面の西端の浅部に集中している。布田川断層からすべりが進展してカルデラ内に貫入したところであるが、低密度領域に貫入したところですべりが止まり、それ以上浅部でのすべりは進展していったことが分かる。F2についても浅部にすべりが集中しているが、ちょうど同じ深さに広がる低密度領域に貫入したのちすべりが止まりそれ以上進展していったことが分かる。F3も同様であり、低密度領域の先端部に貫入した直後にすべりは止まっている。一方の分岐断層であるF4、F5も同様である。F4では西側から進展してきたすべりが低密度領域の中に接触したところで東西走向のすべりが止まり、F5のすべりに移るが、そのF5のすべりは低密度領域に貫入しその後止まる様子が分かる。

謝辞： 本報告で使用したALOS-2データの所有権は、JAXAにあります。これらのデータは、国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づいて、JAXAから提供されたものです。本研究はJSPS科研費JP18K03810の助成を受けたものです。



Crustal deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS networks

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku Ohta³

1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University

はじめに

能登半島の石川県珠洲市の地殻内では、2018年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020年12月からは活発な地震活動が2022年7月現在まで継続している（地震調査委員会, 2022）。2022年6月19日にはM5.4の地震が発生し、最大震度6弱を記録した。地震活動の活発化とともに、周辺の国土地理院の電子基準点において、震源域から遠ざかる向きの地殻変動が観測されている（国土地理院, 2022）が、有意な変動を示す観測点は3点のみであり、地殻変動の全体像は十分明らかにしていない。京大防災研と金沢大学では地震活動の活発化を受けて、群発地震震源域近傍に臨時GNSS観測点を設置し、観測を行なっている。また、ソフトバンク株式会社（以下、ソフトバンク）では、全国3,300点を超える独自のGNSS観測網を設置、稼働させており、これらのGNSS観測網で得られたデータを統合解析することによって、地殻変動の全体像が把握できることが期待される。本研究では、GNSSデータの統合解析によって得られた地殻変動の特徴とその変動源モデルの推定結果について報告し、群発地震との関係について考察を行う。

データ解析手法及び観測された地殻変動

本研究では、各機関からRINEXデータの提供を受けて、GipsyX Ver 1.4（Bertiger et al., 2020）の精密単独測位法を用いてITRF2014準拠の日座標値を計算し、地殻変動の解析を行った。解析に用いた観測点数は、ソフトバンク15点、国土地理院GEONET11点、大学6点である。群発地震発生以前のデータが十分あるGEONET観測点データに対しては、群発地震前の日座標値に対して、定常変動や東北沖地震の余効変動、季節変動成分を関数フィティングによって除去し、非定常地殻変動を抽出した。また、ソフトバンクと大学の観測点に対しては、GEONET観測点での群発地震前2年間の速度をOkazaki et al.(2021)の方法で各観測点位置での速度に補間して差し引くことにより、非定常地殻変動を抽出した。非定常地殻変動は、群発地震の震源域を中心として放射状に広がっており、震源域周辺では顕著な隆起も観測され、約1.5年間での最大隆起量は6.5cmに達している。

変動源モデルの推定及び考察

2021年2月から2022年2月までの1年間の変位3成分をデータとして、開口割れ目を仮定してそのパラメータをMatsu'ura and Hasegawa(1987)の非線形インバージョンにより推定した。その結果、4つの群発地震のクラスターのほぼ中央の地震が少ない領域に、上端深さ約14kmで西南西に約30度傾斜する開口割れ目が推定された（図）。体積変化量は $2.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ となる。開口割れ目以外に球状圧力源や南東傾斜の逆断層を仮定しても、ある程度データを説明するモデルを作成することは可能であるが、開口割れ目によるクーロン応力（ ΔCFS ）の増加域が群発地震の震源分布と対応することから、対局的には何らかの流体がシル状に地殻内に貫入していると解釈した。活動開始からの1.5年間での体積変化量は $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ に達するが、2020年12月からの3ヶ月程度においては、変動源の位置が上記の推定位置よりも南西側に推定されることから、変動源が移動、拡大している可能性も示唆される。

謝辞：本研究で使用したソフトバンク独自基準点の後処理解析用RINEXデータは、ソフトバンク株式会社・ALES株式会社より東北大学大学院理学研究科が提供頂いたものを使用しました。国土地理院の電子基準点RINEXデータ、気象庁一元化震源データを使用しました。京都大学及び金沢大学のGNSS観測点の設置にあたり、珠洲市教育委員会、珠洲市企画財政課、珠洲市産業振興課、珠洲市総務課、能登町教育委員会及び奥能登国際芸術祭実行委員会にお世話になりました。ここに記してこれらの機関に感謝いたします。

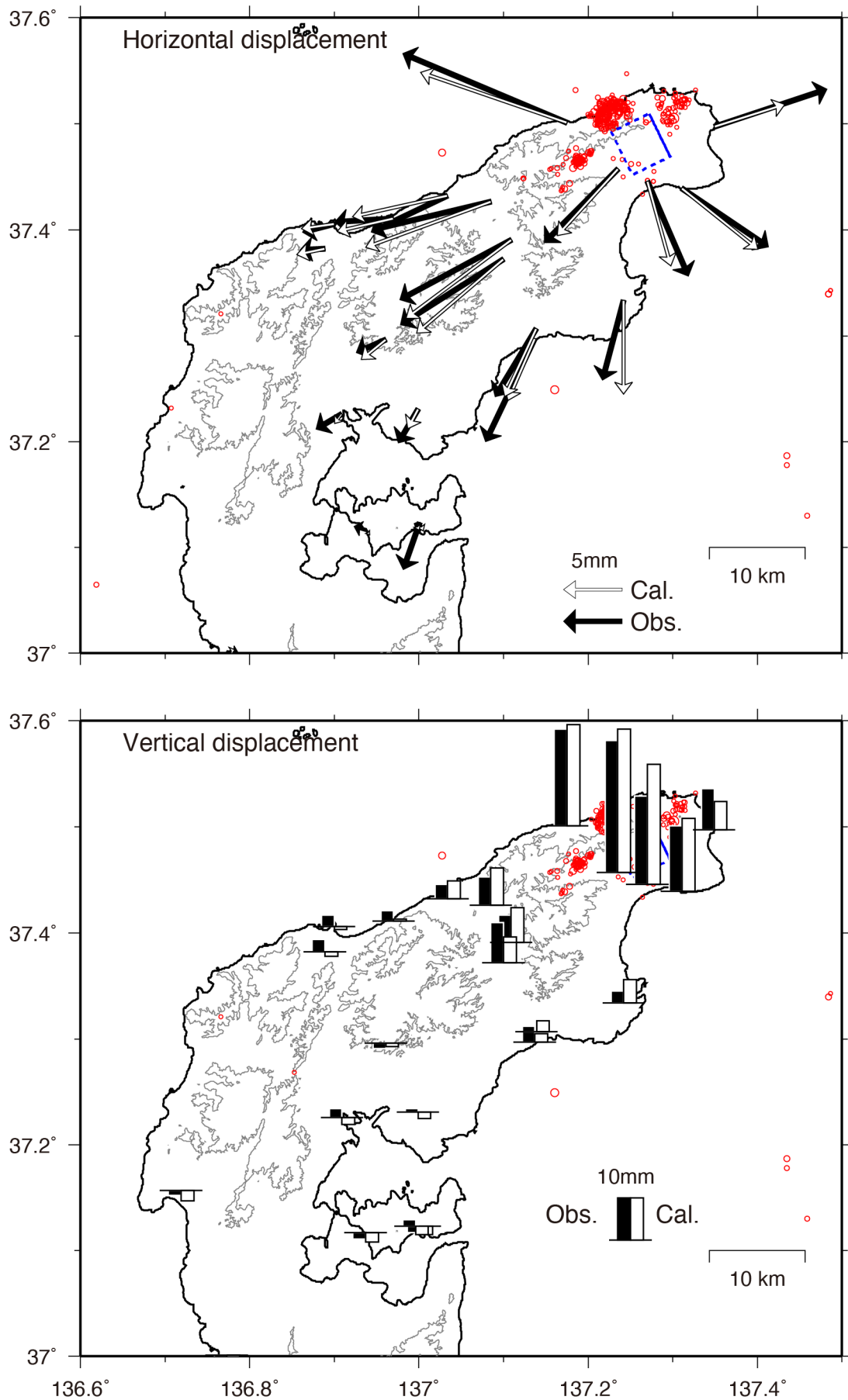


図 2021年2月から2022年2月までの非定常地殻変動と開口割れ目を仮定した変動源モデル。青の矩形領域は推定された開口割れ目の位置，赤丸は気象庁一元化震源。

Detection by network inversion filter of long-term and short-term slow slip events, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2018–2022

*Shinzaburo Ozawa¹, Hiroshi Munekane¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

要旨 2018年以降のGNSS観測データを使用し、四国域の長期的・短期的SSEを推定した。その結果、2018年10月頃から2019年8月頃にかけて、豊後水道域で長期的SSEが発生し、2019年初め頃から四国中部で長期的SSEが発生し現在も継続していること、紀伊水道で、2019年4月頃から2022年1月頃まで継続し、その後鈍化していることが示された。短期的SSEは、2018年以降14回検出されている。短期的SSE領域は低周波微動域と調和的で、一部の短期的SSEでは、滑り域の移動が明瞭に見られた。はじめに豊後水道では5～6年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している。そのような中、2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生し、四国中部で2019年初め頃から豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。紀伊水道では、2019年4月頃から遷移的な変動が発生している。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国域の長期的・短期的SSEの検出を行った。解析手法 GNSSによる、観測点の座標時系列から、年周、半年周成分を三角関数の重ね合わせで推定し、元の座標時系列からとり除いた。周期成分を取り除いた時系列から一次トレンドを除去している。一次トレンドは、2017年1月～2018年1月までで推定している。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を四国域に関して行った。観測点は南海トラフ域の観測点約140点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、20-40km程度としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。結果と考察 2018年10月頃から2019年8月頃にかけて豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2022年7月まで継続している。豊後水道SSEはMw7.0、四国中部SSEはMw6.5程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ5～6年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見える。紀伊水道のSSEは、2019年4月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。繰り返し間隔ははっきりしないように思われる。短期的SSEは2018年以降14回検出された。検出された短期的SSEは低周波微動と調和的であった。短期的SSEの幾つかには滑り域の移動が見られた。低周波微動と短期的SSEの時空間変化の相関を詳細に調べることで、低周波微動と短期的SSEの物理的な関係がより明瞭になることが期待される。

Slow-slip events of one-hour duration (2)

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵

1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.

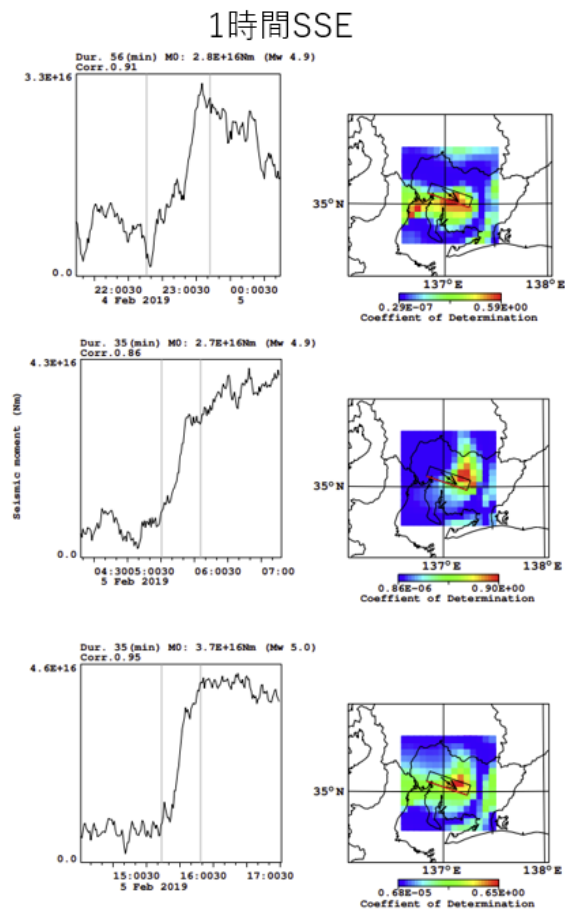
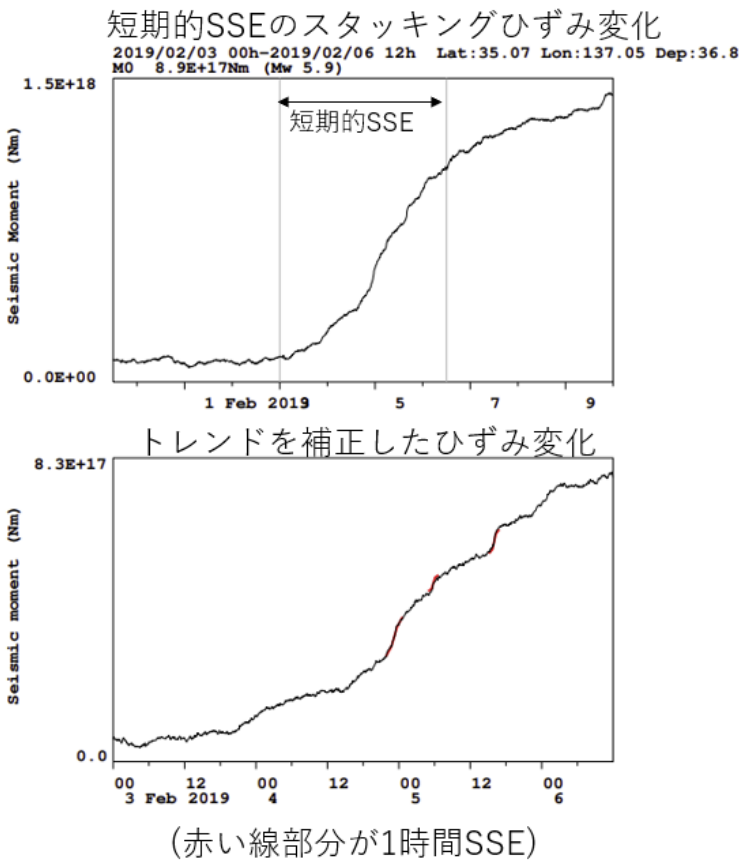
(1) はじめに

継続時間約1時間のスロースリップ(以後1時間SSE)現象について調査している。用いているのは、犬山観測点(名古屋大・東大地震研究所)及び天竜船明観測点(気象研究所)に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置しているボアホール型多成分ひずみ計のデータである。1時間SSEは、短期的スロースリップ発生中の一時的なすべり速度増加現象と見られる(例えば、勝間田・他, 2021)。これまでのところ、見つかっている1時間SSEの規模はMw5前後の値となっている。これはIda et al.(2007)によって提唱されたスロー地震のスケーリング則に調和的である。

(2) 方法と結果

短期的SSEの発生期間中のデータについて、宮岡・横田(2012)によるスタッキング手法によりS/Nを向上させたデータを用いた。スタッキング法においては、断層位置・すべり方向を仮定して、ノイズレベルに基づいて重みをつけて複数観測点のデータを足し合わせた。なお、検出された信号のレベルはノイズに比べて明確に大きなものでなく、降雨のある期間ではその影響により1時間SSEは検出困難である。スタッキングしたデータとランプ関数との間で相関係数が高くなる部分について、そのステップ量からの規模推定、ソースの位置推定などを行った。ソースの位置推定は、露木・他(2017)と同様の決定係数に基づく方法を用いた。ランプ関数との相関係数が高く、ひずみにステップ状の変化が認められる場合でも、ソースの位置推定が困難な場合があり、そのような場合には実際の現象ではない可能性が高いと考えた。

2015年から2020年まで解析した結果において、もっとも明瞭に認められる1時間SSEは2019年2月3日～6日に発生した短期的スロースリップ発生した現象である(図参照)。このイベント中では短期的SSE発生中に3回の1時間SSEの発生が認められる。3回のイベントの発生位置はほぼ同じ場所に求められている。2019年2月の他にも1時間SSEと見られる現象はあるが、必ずしも2019年2月ほど明瞭ではなかった。S/Nが十分な1時間SSE現象が起きる頻度は、あまり大きくないのかもしれない。



Recent GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations off Tohoku and their results

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Chie Honsho³, Ryota Hino³, Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁴

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Tokyo university of Marine Science and Technology

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、宮城県沖のプレート境界浅部まで達する巨大な断層すべりが発生し、地震後には主に余効すべりと粘弾性緩和による顕著な余効変動が生じている。陸上の地殻変動観測に加え、GNSS音響結合方式による海底地殻変動観測（GNSS-A観測）により、余効変動の空間パターンが明らかになってきている（e.g., Honsho et al., 2019; Watanabe et al., 2021）。

東北大学では、2012年に20点のGNSS-A観測点を東北沖に設置し、観測を実施しており、2016年9月までは各観測点で年に1～2回程度の船舶を海上プラットフォーム（海上局）として活用したキャンペーン観測を実施しており、その観測成果はHonsho et al. (2019)にまとめられている。それ以降は、船舶の運用コストの問題で高頻度の観測は実施できない状態となっていた。しかし、2019年より波の力により無人で航行可能なウェーブグライダーを海上局として運用する試みを開始し（Iinuma et al., 2021）、2020年以降は多観測点を巡る運用を年に2回実施することに成功している。ただし、ウェーブグライダーは海流の強い海域での運用が困難であるため、黒潮続流の影響の無い宮城県沖以北の観測点でしか運用できておらず、茨城・福島県沖の観測点については、従来通り船舶を海上局とした観測を実施している。しかし、共同利用の船舶や傭船以外にも、船底に海底地殻変動観測用の音響トランスデューサーを装備したJAMSTECのかいめいや東京海洋大学汐路丸での協力観測を仰ぐ体制が整い、船舶での観測も補強されつつある。本発表では、2022年7月までに実施したウェーブグライダーおよび船舶を用いたGNSS-A観測成果について紹介する。

上記の観測データを解析し、各観測点での水平・上下変位を推定した。地震時の主破壊域に位置する宮城県沖の観測点は、概ね2016年9月までの変動の傾向に沿うもの粘弾性緩和によると考えられる西向きの変動が得られた。この変動は時間変化が小さく、時定数の長い粘弾性緩和の影響であることが示唆される。また、宮城県沖では海溝近傍まで沈降傾向が見られているが、こうした変動は既存の粘弾性緩和モデル（e.g., Sun et al., 2014）では説明できない。そのため、GNSS-A観測で得られた上下変動も踏まえた粘弾性緩和モデルの改訂が必要であると考えている。岩手県沖・青森県沖の観測点は、宮城県沖に比べ変動量が小さいが、近年では西向きの傾向が強くなっている様子が見られ、余効すべりの減衰等によりプレート間固着や粘弾性緩和の影響が現れていると考えられる。福島・茨城県沖の観測点は、2016年9月の観測までで見られていた余効すべりの影響と考えられる東向きの挙動が概ね収束している様子が見られた。これらの結果は、余効変動モデルの改訂や今後のプレート境界での歪み蓄積の把握につながるものであると考えられる。

本稿の執筆時点では、2022年5-7月に実施したウェーブグライダーによる観測成果は海中音速の水平成層構造を仮定した手法により解析した暫定的なものである。本発表では、観測データの精査と海中音速の水平不均質を考慮した解析を行い、より確度の高い推定結果を報告する。

参考文献

Honsho et al. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135

Iinuma et al. (2021), Frontiers in Earth Science, 9:600946, doi:10.3389/feart.2021.600946

Sun et al. (2014), Nature, 514, 84-87, doi:10.1038/nature13778

Watanabe et al. (2021), Earth, Planets and Space, 73:162, doi:10.1186/s40623-021-01487-0

Poster session (1st Day) | Regular session | S01. Theory and analysis method

[S01P] PM-P

Mon. Oct 24, 2022 3:30 PM - 6:00 PM ROOM P-1 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S01P-01] Antipodal seismic observation and sensitivity kernel for liquid region on the top of the Earth's Inner Core

*Seiji TSUBOI¹, Rhett Butler² (1. JAMSTEC, 2. University of Hawaii at Manoa)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-02] On the resolution matrix of the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-03] Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust (2)

*Jun Kawahara¹, Kazuki Kidoguchi¹, Takahiro Shiina² (1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-04] A trial application of the real-time tsunami forecasting by means of and adjoint-equation based wavefield estimation

*Takuto MAEDA¹ (1. Hirosaki University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-05] Characteristics of strain envelopes of scattered waves propagating in the 2D random heterogeneous medium

*Kentarō Emoto¹ (1. Kyushu University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-06] Effects of a seawater and sediment layers on seaquake amplifications on and under the sea surface

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi Takenaka² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-07] Features of Time-series of Real-time Seismic Intensity at MeSO-net Station

*Hisahiko KUBO¹, Kaoru SAWAZAKI¹, Lina YAMAYA¹, Takeshi KIMURA¹ (1. NIED)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-08] Spatiotemporal Characteristics of Autocorrelation Functions from Seafloor Ambient Noise Records at Hyuga-nada

*Yasunori SAWAKI¹, Yusuke Yamashita², Shukei Ohyanagi¹, Emmanuel Soliman Garcia², Masanao Shinohara³, Yoshihiro Ito² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM

[S01P-09] Large site amplification factors observed not only along the Sea of Japan but also along the Sea of Okhotsk in the northern part of Hokkaido

*Atsushi NOZU¹ (1. Port and Airport Research Institute)

3:30 PM - 6:00 PM

Antipodal seismic observation and sensitivity kernel for liquid region on the top of the Earth's Inner Core

*Seiji TSUBOI¹, Rhett Butler²

1. JAMSTEC, 2. University of Hawaii at Manoa

The Earth's inner core is thought to have been formed by the precipitation of iron from the fluid outer core. It is considered that a part of the inner core surface where iron in the fluid outer core is precipitated may be melted and formed a mushy region, but its position is not well understood seismologically. We recently analyzed seismic waveforms observed at the antipodal station of the seismic source and showed that there are clearly observed precursors to reflections beneath the inner core boundary from deeper in the inner core (Butler and Tsuboi, 2021). It has been found that this precursory wave can be successfully modeled as a reflection under the liquid / solid interface at a depth of 100 km below the inner core boundary. In this study, we use these precursor waves of the lower reflection at the inner core boundary observed at the antipodal station ($> 179^\circ$). The sensitivity kernel for the shear wave velocity structure on the inner core surface was calculated by the adjoint method corresponding to these precursor waves, using theoretical seismic waveforms. The location of the fluid region was identified using the obtained sensitivity kernel. Our results show two regions of the inner core surface where the shear wave velocity is close to zero and is considered fluid. These results may provide seismological evidence and new insights to the origin of the earth's magnetic field.

On the resolution matrix of the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

日本列島周辺が代表例であるプレートの沈み込み帯は、海水層・不規則海底地形・厚い堆積物層・沈み込む海洋プレートなどから構成されており、地球内部構造の3次元不均質性が強い。その効果は地震波動場に伝播経路の屈曲などとして強く表れる。そのため周期が10秒程度以下の短周期地震波では理論波形による観測波形の再現性が低下し、震源パラメータ推定にも影響を及ぼしうる (Okamoto et al. 2018)。地震波波形を用いた震源物理研究では、これらの強い不均質構造の効果を検討した地震波伝播シミュレーションが必要になる。

そこで我々は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域を対象として、大規模地震波シミュレーションによって初期3次元不均質構造モデルのもとで理論波形を計算し、その結果を用いた全波形トモグラフィーによって3次元不均質構造モデルを改良する研究を進めている。この研究では、改良した3次元構造モデルを用いることによって短周期の波形再現性を向上させて震源パラメータや破壊過程の解析を高精度化し、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究を短波長域に拡張することを目標としている。

本研究では波形トモグラフィーにおいて構造パラメータ摂動に対する波形の摂動量を示す感度カーネルを、高周波近似の波線理論等によらず波動論に基づいて計算する。この感度カーネルは解析対象地震の震源パラメータをもとにして計算される。しかし上述のように、沈み込み帯では短周期地震波に関する計算波形の精度を保つことが難しくなる。さらに、沈み込み帯は海域であるため震源近くの観測点数が極めて少なくなり、観測点は陸域にのみに分布するなど空間的に偏った観測点分布になる。これも海域の地震の震源パラメータ推定にバイアスをもたらす要因となり得る。そこで我々は独自の FMT (First-motion Augmented Moment Tensor) 解析 (Okamoto et al. 2017, 2018) を用いることによって、不確定さをできる限り小さくした震源パラメータ推定を行い、その結果を感度カーネルの計算に反映させるようにする。

これまでに、海域の浅いM6前後の地震15個と F-netの7観測点での広帯域3成分波形データ (全体で282成分) を用いて波形トモグラフィーの試行を進めている。この試行では対象領域 (水平方向491.4km × 352.8km、鉛直方向42.0km) を12.6km × 12.6km × 8.4kmのブロック39 × 28 × 5=5460個に分割し、ブロック内の平均的な物性パラメータ改良値を求める。パラメータはP波弾性率、S波弾性率、密度、 Q_p 、 Q_s の5つを対象にできるが、試行ではP波弾性率・S波弾性率、密度の3個を用いた。大規模波形計算はHOT-FDM (Nakamura et al. BSSA 2012) のマルチGPU対応版 (Okamoto et al. 2013) を用いて東工大TSUBAME-3.0で実行した。FDMパラメータは計算領域734km × 504km × 120km、格子間隔150m、上限周波数0.39Hzであり、GPU (Tesla P100) 126基を用いた。これらの大規模計算で生成した波動場をもとにして逆問題で用いる周波数領域の感度カーネルを生成する。試行では周期8.90~40.96秒の37周波数ポイントについて282 × 37個の感度カーネルを生成した。

逆問題は非線形であり、ここでは逐次計算1回目における分解能行列を検討した。まず本研究ではKubina et al. (2018) を参考にして感度カーネル行列に前処理 (規格化) を施している。この前処理によって分解能行列も平滑化され、極端に大きな値を取る要素がなくなるという効果がある。そしてS波弾性率 (剛性率) の分解能が他のパラメータよりも相対的に大きく、またS波弾性率の中でも最も浅い第1層ブロック (0~8.4km) での分解能が深い層のものよりも大きいことがわかった。これは浅い層の地震波速度が遅いために層内の波動場の振幅が他の層よりも相対的に大きくなることや、波動場の主要な成分が表面波であることを反映していると考えられる。第1層ブロックでのS波弾性率の分解能は海岸線付近から東北沖地震震央付近までが相対的に大き

い。海溝に近いところでは相対的に小さくなり、海溝を越えると非常に小さくなる。これは解析に用いた震源分布に依存するものと考えられる。逐次計算1回目における第1層ブロックのS波弾性率は、東北沖地震震源域の周辺で負の摂動量がやや卓越する傾向が見られた。これらの試行ではデータ量が少ないので、発表ではデータを増やした結果などについて議論する予定である。

謝辞 気象庁と防災科学技術研究所からは震源パラメータや地震波形データ、地盤構造モデルデータを提供していただきました。またGlobal CMTプロジェクトのCMT解を利用いたしました。本研究は科研費(課題番号:20K04101)および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(課題番号:jh220060)の支援によって実施しました。記して感謝いたします。

Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust (2)

*Jun Kawahara¹, Kazuki Kidoguchi¹, Takahiro Shiina²

1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

沈み込む海洋性地殻の近傍で地震が発生すると、その内部にトラップされて伝わる地震波が地表で観測されることがある(e.g., Fukao, 1983; Hori et al., 1985; Miyoshi et al., 2012)。日高山脈西部では、北海道東部の太平洋スラブ内地震によって発生し、スラブの海洋性地殻内部を海溝軸と平行に伝わるガイド波が、明瞭な後続波群として観測される (Shiina et al., 2014)。日高山脈直下のマントルウェッジに相当する深さには地震波の低速度域が存在しており (Kita et al., 2010, 2012)、この低速度域と海洋性地殻が接触することにより、ガイド波の一部が地表に向けて放出されると推測されている。椎名(2015)はこの地域の地下構造を反映した2次元構造モデルに基づく数値シミュレーションを行い、ガイド波が地表で観測されるためには、日高山脈下の低速度域が太平洋スラブ直上付近にまで分布している必要があることを示した。一方で、ガイド波の地表観測波形の詳しい特徴と地下構造との関係は未だ詳細な検討がなされていない。

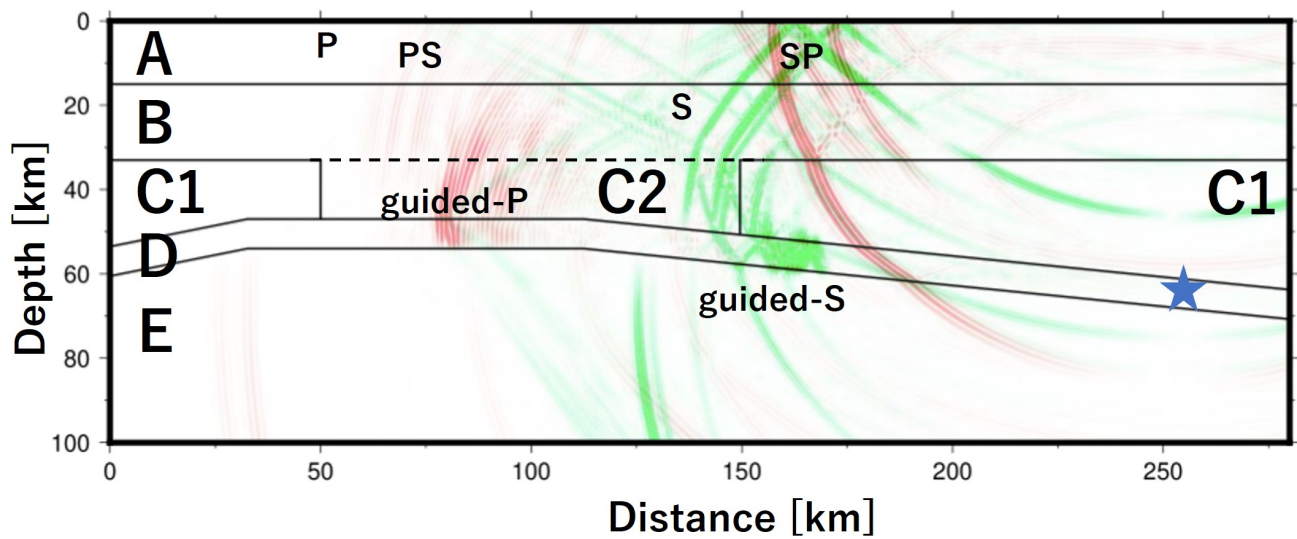
前回 (2021年度秋季大会S01P-01)、我々は椎名(2015)と同様なシミュレーションを行い、海洋性地殻内部を伝播するガイド波の地表観測波形に対して、海洋性地殻の地震波速度や内部構造の違いが与える影響を調べた。地下構造モデルとして大陸上部地殻、大陸下部地殻、マントルウェッジ、海洋性地殻、スラブマントルの5層を仮定し、マントルウェッジ層の一部を低速度域 (地震波速度が大陸下部地殻と同じ) に置き換えた。ただし椎名(2015)と異なり、各層の厚さは一定とした。各層のパラメータも椎名(2015)を参考としたが、海洋性地殻についてはP波速度6.5 km/sまたは7.0 km/sの単一層、もしくは平均P波速度がこれらに等しい2層構造の場合を検討した。海洋性地殻内にダブルカップル点震源を与え、2次元P-SV波 (卓越周波数2.0 Hz) を放射して、差分法による波形合成を行い、地表で観測されるガイドP、S波 (P、S波それぞれの後続波) の特長を調べた。その結果、海洋性地殻の地震波速度や内部構造の違いはガイド波の走時や振幅に明瞭な影響を与えること、特に2層構造ではガイド波の継続時間が顕著に伸び、波形も複雑になることが示された。

日高山脈西部でガイド波が観測される地震の震源と観測点を含む鉛直断面に沿って、実際の海洋性地殻は上向きに凸に湾曲していると推測される (Shiina et al., 2014; 椎名, 2015)。このような湾曲・屈曲も海洋性地殻内部のガイド波が地表に漏れ出る一因となり得る(e.g., Martin and Rietbrock, 2006)。そこで今回、椎名(2015)のモデルと同様に屈曲した海洋性地殻を仮定してシミュレーションを行い、屈曲がガイド波に与える効果を調べた (図)。その結果、震央により近い距離でガイド波が明瞭に観測されるとともに、特にガイドS波について振幅や継続時間を増加させる効果が認められた。

これまでのシミュレーションで得られたガイド波の振幅や波形は、仮定する点震源の放射特性にも強く依存する。そこでガイド波の観測波形に対して、最大ピーク着震時を中心とする5.12秒間の振幅スペクトルを求め、その形状とピーク周波数を震源時間関数 (卓越周波数2.0 HzのRicker wavelet) と比較した。得られたスペクトルの形状は仮定したモデル間で多様に変化し、多峰性を示す場合もあり、系統的な特徴は見いだせなかった。ただしガイドP波の最大ピーク周波数は入射波の卓越周波数より高く (3 Hz前後)、ガイドS波については入射波と大差ない傾向が見られた。

結論として、観測されるガイド波の波形や継続時間に対して、海洋性地殻の内部構造だけでなくその形状も強く影響することが示唆された。一方、ガイド波のスペクトル特性と海洋性地殻の内部構造等の間に単純な関係は見られなかった。

図：シミュレーションの一例：A：大陸上部地殻、B：大陸下部地殻、C1：マントルウェッジ、C2：マントルウェッジ内の低速度領域、D：海洋性地殻、E：スラブマントル。星印は震源。赤はP波、緑はS波を表す。



A trial application of the real-time tsunami forecasting by means of and adjoint-equation based wavefield estimation

*Takuto MAEDA¹

1. Hirosaki University

地震発生直後の観測からその地震動や津波を予測する即時予測手法は、断層運動あるいはそれに付随する量を推定もしくはカタログから探索する初期値探索型と、刻一刻と変動する波動場そのものを推定する現況把握型に大きく分類できるだろう。このうち、近年の後者に基づく研究からは、即時予測のためには地震発生時刻における震源パラメタは必ずしも必要とされず、現況さえを正しく把握できれば有効な即時予測ができることが示されつつある。ただし、現在地震波や津波に用いられている最適内挿法は静的な補間法の一つであり、現在時刻のみにおける予測値と観測値の残差を最小化するように設計されている。そのため、波動場の時間発展が間接的にしか評価されず、一定時間区間における観測波形全体を説明する逆問題と比べると、推定に用いられるデータ量が相対的に少ないという欠点があった。本研究ではこの欠点を克服すべく、波動伝播の支配方程式のアジョイント方程式に基づいた、地震発生時にはかぎらない任意時刻における波動場状態の推定法について検討した。

アジョイント方程式に基づく方法は、いわゆる逆伝播法と密接な関係がある。以下では、その導出法の概略を通じてそのことを説明する。本研究では、津波のモデルとして線形浅水波方程式を題材とし、最適制御理論に基づいてアジョイント方程式を導出した。まず、観測される津波記録とその地点における浅水波方程式からの水位の予測値の2乗残差を考える。その残差の現在時刻から一定時間前までの対象時刻までの時間積分値を目的関数と定義し、それを最小化するような対象時刻の波高と積分流速の空間分布を推定する。水位と積分流速に対応するアジョイント変数ともの浅水波方程式に対する波動場の変分との関数内積の時間積分を評価すると、目的関数の波動場に対する偏微分係数がアジョイント変数の対象時刻の値の符号を反転したものとして得られる、さらに適切な変数変換により、このアジョイント変数が従う微分方程式（アジョイント方程式）は、線形浅水波方程式に一致することが示される。アジョイント方程式は、観測記録とシミュレーションに基づく予測値の残差を等価波源項にもつ。このアジョイント方程式を時間を現在時刻から対象時刻まで逆方向にさかのぼって解くことで、目的関数を最小化させるための情報である偏微分係数が推定できる。この方法に基づく手続きは、観測値と予測値の残差を対象時刻まで逆伝播させた結果を初期水位および流速とし、再び時間の順方向に予測をして観測値と比較をする、ということを繰り返すことに相当する。Furumura and Maeda (2021)は、観測点近傍において最適内挿法を用いて地震波動場を補間しつつ逆伝播させることで震源を効率的にイメージングする方法を提案したが、この方法は、観測点周辺における最適内挿重みをつけた地震波動場の空間平均と観測記録との差の2乗和を最小化するという目的関数を採用したアジョイント法の一つであったと理解できる。

この定式化に基づき、津波波動場を逐次的に推定する数値実験を行なった。25 km間隔の津波計アレイの外側に仮想波源を置いてシミュレーションした結果を仮想観測記録とし、その記録の時間ステップ1秒毎の現在時刻に対して、300秒前の状態をしつつ時間発展させる、という問題を考えた。本来のアジョイント法に基づく推定では、逆伝播と順伝播を一定の時間区間で繰り返すことにより対象時刻における状態を推定するが、ここでは逆伝播を一回行うごとに時間区間全体を1時間ステップ進めるという手続きを行う。このことにより、時間区間のほとんどの情報を繰り返し推定に活用しつつ、地震発生の初期条件や位置を仮定したグリーン関数に頼ることなく、波動場の一定時間前の状況とそこから予測される現況を推定し、さらにはシミュレーションによる将来の状態予測もできる。数値実験からは、初期条件を推定する対象時刻が刻々と変わるにもかかわらず、仮定した波動場が観測されるにつれて、観測点近傍における津波波動場が素早く再現され、本手法の有効性が示唆された。一方、順方向と逆方向シミュレーションを繰り返すうちに、仮想観測点を起源とする高周波振動が発生し数値不安定が発生した。これについては波動場に対してグリッドサイズ5x5のガウシアン平滑化

フィルタを適用することで、効果的に不安定を抑えられることが明らかになった。本研究では試みに津波に対して定式化を行なったが、地震波の問題についてもその拡張は容易であると期待される。一方、本研究で提案したような逐次的な現況推定にこの方法を用いるためには、対象時刻を現在時刻からどれだけ前取るべきか、というチューニングが不可欠である。これは観測点配置や波動場の複雑性によると予想されるため、今後はより現実的な構造での大規模シミュレーションを通じた検証が不可欠となるであろう。

Characteristics of strain envelopes of scattered waves propagating in the 2D random heterogeneous medium

*Kentaro Emoto¹

1. Kyushu University

近年普及してきた光ファイバーケーブルを利用したDAS (Distributed Acoustic Sensing) 観測では、一本の光ファイバーケーブルで、数十kmの距離を数m間隔で計測することが可能であり、海底や火山、そして市街地などでの超高密度地震観測を行う新たな観測手法として期待が高まっている。低コストで超高密度観測ができるメリットの一方で、得られるデータには制約がある。DASでは、光ファイバーケーブルに沿った各場所での歪（もしくは歪速度）が出力される。これは従来の地震計の出力の空間微分に相当する物理量であり、従来の波形解析手法をDASのデータにそのままでは適用できない場合もある。また、3成分地震計と異なり、ケーブルに沿った一方向の歪しか得ることができない。

地震波が微細不均質媒質中を伝播すると、散乱の影響で波形が崩れ、エンベロープ幅が広がったり、長く続くコーダ波が励起されたりする。江本・他 (2022JpGU) では、多重前方散乱近似に基づき、歪波形のエンベロープは、速度波形のエンベロープに比べて、微細不均質媒質を強く受け、エンベロープ幅が広がることが示された。本研究では、2次元差分法シミュレーションを用いて、歪エンベロープのコーダの特徴を調べる。一般に、S波走時の2倍以降のコーダは、等方的な散乱波によって構成されているとみなされるが、速度と歪では、散乱波の入射方向に対する感度が異なるため、速度と歪のエンベロープ形状が同様の特徴を示すかどうかは自明ではない。

不均質媒質として、特徴的スケール1km、ゆらぎのRMS値5%の指数関数型自己相関関数で特徴づけられるランダムなゆらぎを考える。平均P波速度、S波速度をそれぞれ、6km/s、3.46km/sとし、2次元弾性体でのP-SVの運動方程式を有限差分法により解く。媒質のサイズは、一辺が約400kmの正方形とし、中心に震源時間関数 (3Hz) の等方P波震源を設置する。震源から同心円上に100kmまで10km間隔で観測点を設置する。各距離においては10度間隔で36個の観測点が存在する。各観測点で、動径方向 (R方向) とそれに直行する方向 (T方向) の速度波形に加えて、RR成分、TT成分、RT成分の歪波形を出力する。シードを変えた50個のランダム不均質媒質でシミュレーションを行い、統計的な特徴を議論する。

各伝播距離での平均二乗エンベロープは、速度のR成分はP波のピーク後単調減少となるが、T成分はPS変換散乱により、一度減少したP波コーダの振幅が徐々に大きくなり、S波到達時刻付近で2つ目のピークが現れる。歪のRR成分やTT成分では、PS変換散乱の影響は少なく、P波のピーク後は、ほぼ単調減少となる。エンベロープの比を調べると、R/TはP波のピーク後からS波走時にかけて一度減少し1以下となるが、その後徐々に増加し1に収束する。歪エンベロープの比 (RR/TT) は、P波のピーク後に単調減少し1へと収束する。速度と異なり、歪の場合は、S波の入射方向に対して4象限型の感度を持つ。これにより、PS変換された散乱波に対しても、RR成分とTT成分で差が出にくくなっていると考えられる。R/TもRR/TTも、S波走時の2倍の時刻では、ほぼ1.1以内に収まっており、この時刻以降の解析では、光ファイバーケーブルの向きを気にする必要がない。コーダ部分におけるエンベロープの減少率を示すコーダQは、速度のR成分・T成分、歪のRR成分・TT成分で、有意な差はなかった。今回のシミュレーションでは内部減衰を入れていないが、内部減衰はどの成分も同様に減衰させるとすると、この結果は、歪エンベロープから推定したコーダQも、従来の地震計で推定したコーダQと同様の解釈が可能であることを示唆する。これらの結果から、コーダ部分であれば、物理量が歪であることやケーブルの形状を考慮しない解析が可能であると言える。ただし、コーダは広い領域をサンプルする統計的な量であり、DASの超高密度観測という利点を鈍らせるため、どの場所の構造を反映しているのか、感度カーネルの考察が重要となる。また、歪のRT成分のエンベロープ形状は、速度のT成分と同様に、2つのピークを持つ。この速度のT成分と歪のRT成分のエンベロープ形状の類似性は、多重前方散乱近似から導出した数式表現と同様の特徴である。

Effects of a seawater and sediment layers on seaquake amplifications on and under the sea surface

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi Takenaka²

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University

近年の海底地震観測網の充実により、海底における地震動の特性を示した成果が多く出ている（例えば、Nakamura et al. (2015); Kubo et al. (2018)）。また、CTBTOのIMSをはじめとする海中のハイドロフォン観測点のデータを使い、T相を含む、遠方から伝播した海中の地震波（もしくは水中音響波）の特徴を示した成果も出ている（例えば、Yildiz et al. (2013)）。一方、海震を含む、海面や海中における震源近傍の地震動（もしくは水中音響波による振動）は、観測例が非常に少なく（例えば、塩谷・笹 (2013)）、理論的評価も限られている。前回の日本地震学会秋季大会において、我々はpropagator行列法（Haskell, 1953）に基づく、海面・海水・海底における海震波形の半解析解コードの開発を行い、波形計算例の紹介を行った（中村・竹中, 2021）。本大会では、開発したコードおよび3次元差分法（Nakamura et al., 2012）を用いた計算を行い、計算波形を用いて海水層の厚さおよび海底下の地盤の速度構造が波形振幅に与える影響について調べたので報告する。

計算では、海水層と、海底下に1~5層の数の固体層から成る構造を使用した。海水層は0, 200 m, 375 m, 1000 m, 2000 mの5種類の厚さを用意し、海水層厚0 mの場合は、固体層の上端を地表とした陸上における地震動のケースを想定した。震源は点震源とし、震源時間関数のパルス幅1.0秒と0.1秒の2つのケースを設定した。複数の構造モデルに対して計算を行った結果、海面での圧力がほぼ0であるために海面および海面近傍において水平動より上下動の振幅が大きい結果となり、陸上や海底の地震動と異なる特徴を示した。また、海底下の構造によっては、地表や海底の水平動とほぼ同程度の海面の上下動振幅となった。これは、地表では反射係数が入射角に依存するが、海面では入射角に関わらずP波の反射係数が常に-1であり、入射波に対して海面での上下動振幅が倍になることと、海水層が均質の低速度構造であり、層厚に対応した周波数帯における共振により海水中でP波が増幅するためである。さらに、観測点においてSH波の放射パターンが節面付近となるメカニズムを計算で使用した場合、地表や海底の水平動と比べて海面の上下動振幅が大きくなることを示した。地表だけでなく海底とも異なる海面の地震動の特徴の把握は、海域における地震波動場を理解する上で重要である。

Features of Time-series of Real-time Seismic Intensity at MeSO-net Station

*Hisahiko KUBO¹, Kaoru SAWAZAKI¹, Lina YAMAYA¹, Takeshi KIMURA¹

1. NIED

本研究では、MeSO-net観測点における連続観測記録の時系列的な特徴を、地震時および非地震時を含めて考察し、その時系列の予測可能性に関する議論を行う。非地震時のMeSO-net連続観測記録を解析した研究としてはYabe et al. (2020)やNimiya et al. (2021)が挙げられる。それらの研究では2020年以降を対象として、主に数Hz以上の周波数帯域における振動レベルに着目した解析を行うことで、コロナ禍における首都圏の社会活動の変化との対応を調べている。先行研究と本研究の違いとしては、本研究では2011年東北地震も含める形で観測点設置時からの記録を扱う点がまず挙げられる。また本研究では地震波形記録そのものでなく、それから求めたリアルタイム震度（功刀ほか2008）の時系列を解析対象とする。震度およびリアルタイム震度は0.5~2 Hzの周波数帯域に高い感度を持つ地震動指標であり、先行研究とは着目する周波数帯域が異なると言える。

時系列データは次の流れで作成した。各MeSO-net観測点の1日間の連続波形記録3成分から、功刀ほか（2008）に従って1秒ごとのリアルタイム震度時系列を求めた。そして1時間ごとの最大値および中央値を算出し、それらを複数年分まとめた。以下ではE.ICEM（東京都江戸川区一之江）における観測記録での結果を示す。

1時間ごとの中央値の時系列からは、昼間の振動レベルが高く、夜間の振動レベルが低いという日変動が見て取れる。また平日は振動レベルが高く、日曜の振動レベルが低いという傾向も見られた。これらの傾向は、24時間および168時間（7日間）で自己相関係数および偏自己相関係数の絶対値が大きくなるという自己相関解析の結果と整合する。また日曜だけでなく、休日にも振動レベルが低くなる傾向が見られ、特に正月を挟む年末年始・春の大型連休・お盆の期間における振動レベルの低下は顕著である。日曜および休日の日変動の幅は平日のそれよりも小さい。これらの結果はより高い周波数帯域に着目していた先行研究の結果と整合する。なお先行研究で見られたコロナ禍での振動レベルの低下は、今回の解析では明瞭には見られなかった。この違いは解析対象としている周波数帯域の違いを反映している可能性があるが、他の観測点での解析も行い、さらなる検討を行う必要がある。最大値時系列も日変動および週変動、休日の振動レベル低下の傾向を有するが、それらは中央値時系列よりも相対的に弱い。また地震による擾乱が顕著にあり、多くは瞬間的な増加として見られる。2011年東北地震およびその後しばらくは、活発な余震活動の影響を受けたことによる最大値時系列の増加およびその緩やかな減衰の傾向が見られており、その上がり幅は非地震時の日変動を大きく超えている。同様の傾向は中央値時系列でも見られたが、通常の変動に戻るまでに要する時間は中央値時系列の方が短く、最大値時系列の方がより長いタイムスケールで影響が見られた。各時系列の差分の平均はどの期間でもほぼゼロであり、差分のばらつきは最大値時系列の方が大きい。

以上の結果は、中央値時系列は日変動・休日変動を加味することでの予測が可能であることを意味する一方で、最大値時系列は日変動・休日変動を加味したとしても地震起因の地震動の影響が大きく、予測が難しいことを意味する。またLippiello et al. (2019)やSawazaki (2021)などで予測が試みられている大地震後の振動レベルの増加およびその減衰の傾向がリアルタイム震度の中央値および絶対値の時系列でも見られた。ただしMeSO-netのE.ICEMにおいては2011年東北地震の後に明瞭に見られたのみで、他の期間では確認できなかった。

謝辞：本研究は、文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）JPJ010217の助成を受けたものです。

Spatiotemporal Characteristics of Autocorrelation Functions from Seafloor Ambient Noise Records at Hyuga-nada

*Yasunori SAWAKI¹, Yusuke Yamashita², Shukei Ohyanagi¹, Emmanuel Soliman Garcia², Masanao Shinohara³, Yoshihiro Ito²

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

日向灘海域で2013年から継続的に行われている海底地震観測によって、浅部微動や超低周波地震が数多く検出されている(Tonegawa et al., 2020; Yamashita et al., 2015, 2021). 日向灘で検出されたこれら浅部スロー地震の発生には、九州パラオ海底(KPR)の沈み込みが大きく関与しており(Tonegawa et al., 2020), 上盤の構造が複雑になっていることが指摘されている(e.g., Nishizawa et al., 2009). Akuhara et al. (in revision)では、浅部微動発生領域で行われた最大半径2 kmほどの超稠密海底地震観測の記録から、遠地地震グリーン関数(Akuhara et al., 2019)と表面波分散曲線の transdimensional インバージョンを行うことで観測点直下の一次元S波構造を推定したところ、KPR直上の海底下3–4 km における顕著な低速度層(LVZ)の存在を明らかにした。LVZがKPRから上昇した地殻流体で形成されているなら、LVZの空間的広がりや深さを制約することは、Slow-to-Fast地震の発生環境やメカニズムを推定していく上でのカギと成り得るかもしれない。そこで我々は、自己相関関数(以降、ACF)を用いた地震波干渉法に着目した。ACFは地震波干渉法で一般に用いられる相互相関関数と違い、観測点直下における大地震前後の地震波速度変化(e.g., Ohmi et al., 2008; Uemura et al., 2018)や主要な速度境界の推定(e.g., Becker & Knapmeyer-Endrun, 2018; Ito & Shiomi, 2012)などに用いられてきた。本研究では2014年から2017年の常時微動記録からACFを計算し、堆積層底面におけるLVZなどの検出を試みた。

まずは、連続波形から120秒長のACFを計算した(120-s ACF)。周波数帯域は、0.2–4.0 Hzの中で複数選択した。なお、短周期地震計の場合は機器特性の補正も行った。120-s ACFは次の2通りの方法で計算した：①1–4秒の時間窓をずらしながら相関値を計算し、それを120秒分行う(e.g., Ito et al., 2012)。なお、事前処理として、絶対振幅が3MADを超えた場合は振幅値をゼロとし、その後、1-bit化によって振幅情報を落とす(Campillo & Paul, 2003)。②1-bit化処理を行わない代わりに波形の瞬時位相を計算し、瞬時位相に対して①と同様な計算を行う(Schimmel, 1999)。120-s ACFからそれぞれ①線形スタック②phase-weighted スタック(Schimmel & Gallart, 2007)によって、1時間トレース及び1日トレースを計算した。ACFは上下動成分と水平動成分でそれぞれ計算した。

高周波帯域(2–4 Hz)でACFを計算したところ、LVZに対応する明瞭な反射波は確認できなかった。日本海溝アウターライズで行われた同様の解析では、350 mほどの厚さの海底堆積層が遅れ時間3秒付近に確認されているが(Tonegawa et al., 2013), 日向灘は全体で10倍程度の厚さを持つ複数層からなる堆積層が推定されていることから(Akuhara et al., in revision), LVZから海底面までの構造で生じる反射波が複雑なのかもしれない。低周波帯域(0.2–1 Hz)のACFからも、LVZに対応する明瞭な反射波は確認できなかったが、遅れ時間約2秒付近に出現する第一反射相が、夏から秋にかけて大幅に遅れていることを確認した。このことは、secondary microseismsの励起源がこの期間にかけて凡そ周期的に変動している可能性を示唆している。

Large site amplification factors observed not only along the Sea of Japan but also along the Sea of Okhotsk in the northern part of Hokkaido

*Atsushi NOZU¹

1. Port and Airport Research Institute

全国には約1,000の港湾があり、著者はそれらのサイト特性に興味を持って研究を進めている。その際、北海道の港湾も当然ながら視野に入っている。北海道のうち道北の日本海側は、関東平野や新潟平野と同様に、長周期地震動の卓越する地域であることが知られている。例えば中央防災会議の参考資料である「長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周期」(http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/pdf/shiryoku4.pdf)の図4.19では、道北の日本海側は赤～ピンクとなっており、長周期地震動の卓越する地域であることがわかる。ただし、中央防災会議の資料では、道北のオホーツク海側は周期1秒以下の卓越する地域とされている。一方、著者は以前にスペクトルインバージョンを道北等の強震観測記録に適用し、サイト増幅特性の評価を行った(野津・菅野, 2010, <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no1214.pdf>)。その結果、道北の日本海側では低周波側(0.2–1Hz)で10倍を超えるような非常に大きなサイト増幅特性が得られ、中央防災会議の資料と整合する結果となったが、オホーツク海側でもサイト増幅特性は軒並み低周波側で10倍を超える結果となり、中央防災会議の資料と整合しない結果となった。著者が道北を対象に実施した解析では、地震数は多いとは言えず、個々の地震のラディエーションパターン等が結果に影響を及ぼしている可能性があり、結果に対して確信を持つに至らなかった。ところで、2013年5月24日14:44頃、カムチャッカ半島西方のオホーツク海においてMw8.3の地震が発生し、北海道から九州に至る広い範囲で揺れが観測された。遠方で発生した地震であり、北海道でも震央距離が1300kmを超えているため、北海道の各地点間では、ラディエーションパターン等の震源特性の違いや伝播経路における減衰の違いは十分に小さいことが期待できる。そこで、各地点間の揺れの違いはサイト増幅特性の違いを反映しているとみなし、この地震の記録をサイト増幅特性の検証に用いることとした。遠方の地震であり、P波とS波が完全に分かれて到来しており、P波のみが観測されている地点やS波のみが観測されている地点もあることに注意し、S波が観測されている地点のみに着目して検討を行った。過去に実施した解析(野津・菅野, 2010)では、道北に隣接した地域で比較的岩盤に近い観測点としてABSH05(滝上南)があり(サイト増幅特性は広い周波数帯にわたり2–3倍程度)、2013年5月24日の地震の記録も得られている。そこで、この地点の記録のフーリエスペクトルと道北の各地点の記録のフーリエスペクトル(すべて地表、水平2成分の自乗和平方根、バンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用)を比較した。道北のオホーツク海側に位置するHKD002(宗谷岬)におけるフーリエスペクトルをABSH05(滝上南)にけるフーリエスペクトルと比較して図1に示す。HKD002(宗谷岬)におけるフーリエスペクトルは低周波側(0.2–1Hz)ではABSH05(滝上南)に比べ10倍程度大きくなっている。図2は同じく道北のオホーツク海側に位置するSOYH02(猿払南)とHKD004(上猿払)に関する同様の比較であるが、ABSH05(滝上南)とのフーリエスペクトルの違いはさらに大きくなっている。このように、道北のオホーツク海側の観測点では軒並み、フーリエスペクトルが低周波側で大きな値を示していることから、既往の研究(野津・菅野, 2010)で道北のオホーツク海側の観測点で軒並み低周波側で大きなサイト増幅特性が得られていたことは妥当であったと考えられる。なお、低周波側の増幅が見られる範囲についても検討を行ったが、ABSH05(滝上南)に近いABSH02(興部西)やKKWH02(美深東)でのフーリエスペクトルはABSH05(滝上南)と大きくは異ならないのに対し(図3)、やや北に位置するSOYH10(歌登南)やSOYH09(歌登北)でのフーリエスペクトルはABSH05(滝上南)と既にかなり異なっている(図4)。したがって、かつての宗谷支庁に入ったあたりから、低周波側の大きな増幅が始まると言える。本研究によると、道北の日本海側だけでなくオホーツク海側も、関東平野のように、長周期地震動を増幅させる深い構造が存在するものと考えられる。中央防災会議による資料「長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周

期」は、このような点を踏まえて、今後見直しがなされることが望ましいと考えられる。謝辞：防災科学技術研究所の強震記録を利用しました。記して謝意を表します。

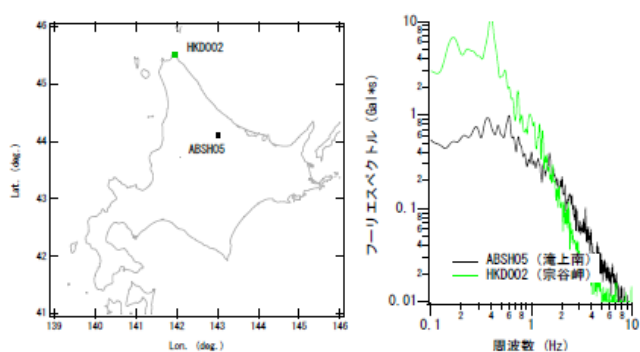


図1 HKD002 (宗谷岬)

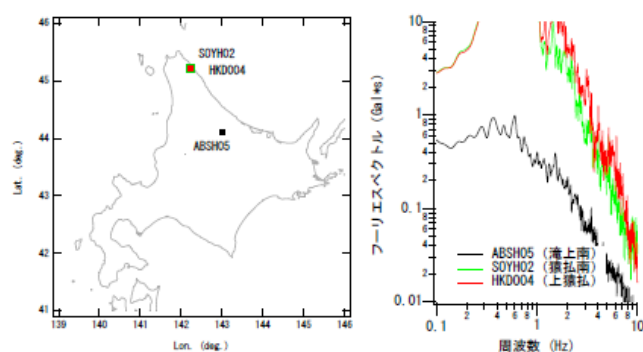


図2 SOYH02 (猿払南) と HKD004 (上猿払)

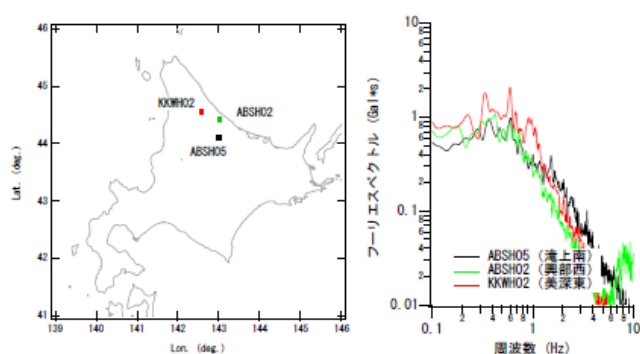


図3 ABSH02 (興部西) と KKWH02 (美深東)

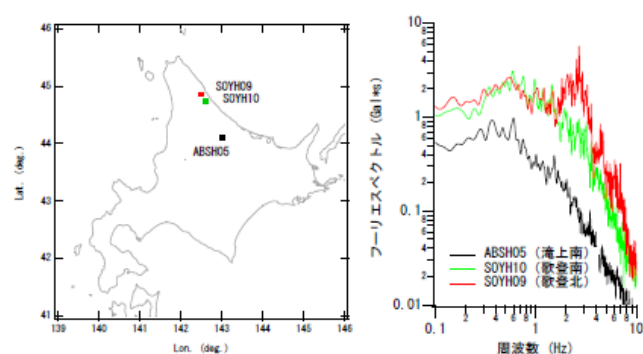


図4 SOYH10 (歌登南) と SOYH09 (歌登北)

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

*久田 嘉章¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

*吾妻 崇¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

*新井 隆太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

*松原 誠¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-05] Zisin Editorial Board

*三井 雄太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-06] Public Relations Committee

*篠原 雅尚¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

*松島 信一¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-08] Committee for School Education

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-10] Kanamori Fund

*中川 和之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

*久田 嘉章¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

*吾妻 崇¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

*新井 隆太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

*松原 誠¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-05] Zisin Editorial Board

*三井 雄太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-06] Public Relations Committee

*篠原 雅尚¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

*松島 信一¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-08] Committee for School Education

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 6:00 PM (Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8)

[S24P-10] Kanamori Fund

*中川 和之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (1st Day) | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

[S16P] AM-P

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 12:00 PM ROOM P-2 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S16P-01] An investigation of improving sound pressure level and Resolution in seismic reflection survey using underwater speaker

*Naoto Kumagai¹, Kaito Kimura¹, Tetsuro Tsuru¹ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-02] Characteristics of High-frequency S-wave and S-coda at DONET ocean-bottom seismometers

*Shunsuke TAKEMURA¹, Kentaro EMOTO², Lina YAMAYA³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyusyu University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-03] Amplitude anomalies observed in the S-wave seismic reflection survey data on the Shikano fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Takao KAGAWA¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada² (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Hanshin Consultants Co. Ltd.)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-04] Characteristics of microtremors in the vicinity of the Yoshioka fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Tatsuya NOGUCHI¹, Isamu NISHIMURA², Takao KAGAWA¹ (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-05] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground in Wakabadai, Tottori City from Microtremor and Seismic Observations

*Isamu NISHIMURA¹, Tatsuya NOGUCHI², Takao KAGAWA² (1. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-06] Investigation of Subsurface Structure in the Kochi Plain - microtremor survey and document retrieval

*Nobuyuki YAMADA¹ (1. Kochi Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM

[S16P-07] Estimation of shallow subsurface structure in the Oharadai area, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, using H/V spectral ratios and borehole data

*Yasuyuki IWASE¹, Kojiro Kato², Yusuke Mizuno² (1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Japan Maritime Self-Defense Force)

9:30 AM - 12:00 PM

- [S16P-08] Estimation of V_{s30} using microtremor array records in Thimphu and surrounding towns, the Kingdom of Bhutan
*Takumi Hayashida¹, Nityam Nepal², Phuntsho Pelgay², Shiro Ohmi³, Karma Namgay², Dowchu Drukpa², Hiroshi Inoue⁴ (1. IISEE, Building Research Institute, 2. DGM, Ministry of Economic Affairs, Bhutan, 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. NIED)
9:30 AM - 12:00 PM
- [S16P-09] Basic study of ground amplification factor based on microtremor array observations at seismic stations.
*Shigeki SENNA¹ (1. NIED)
9:30 AM - 12:00 PM
- [S16P-10] Application of Bayesian Optimization to Estimate 1D Subsurface Layered Structure from Near-filed Seismic Waveforms
*Hisahiko KUBO¹ (1. NIED)
9:30 AM - 12:00 PM
- [S16P-11] Site investigation by surface wave measurements on subsidiary faults of 2016 Kumamoto Earthquake
*Naoto INOUE¹, Kotaro Mizutani¹, Naoko Kitada¹, Kazuki Watanabe², Noriyuki Shibuya², Masashi Omata² (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)
9:30 AM - 12:00 PM
- [S16P-12] Long-term monitoring of subsurface changes by a giant magnetostrictive seismic source
*Takahiro Kunitomo¹ (1. Ontake Science Lab)
9:30 AM - 12:00 PM

An investigation of improving sound pressure level and Resolution in seismic reflection survey using underwater speaker

*Naoto Kumagai¹, Kaito Kimura¹, Tetsuro Tsuru¹

1. Tokyo University of Marine Science and Technology

1. はじめに

反射法地震探査は資源探査や地盤構造の推定、地震防災に至るまで幅広い活用がされている。東京海洋大学探査工学研究室では、海上での反射法地震探査において、振源に水中スピーカーを利用した探査システムの開発に取り組んでいる。水中スピーカーの採用によって、探査システムの小型化、海洋生物への負荷低減が実現でき、東京湾等の船舶輻輳海域における調査が可能となった。実際に東京湾北部を調査した結果、海底下数十m程度まで地下構造を映像化することができ、ガス層の存在も明らかとなった(Tsuru et al. 2019, EPS)。

当研究室では発振波形として非パルス波である、疑似乱数列を用いたランダム波形を使用している。ただし、データ解析の際、取り扱う波形データはパルス波である必要があるため、発振波形と観測波形で相互相関処理を行うことで非パルス波をパルス波に圧縮処理する。

相関波形で得られるパルス波を解析に用いるため、この波形はサイドローブが小さく、シグナル値（ピーク値）が大きいことが望ましい。ここで、相互相関波形は発振波形によって形状が変化するが、どのような発振波形を用いた場合、最もデータ品質の向上に繋がる相互相関波形が得られるかについては検証が不十分である。そこで、本研究では観測データの音圧レベル・分解能向上を目的として、発振波形の最適化を試みた。

2. 発振波形の最適化検討

最適化を検討するうえで、まず過去の東京湾での調査データより、減衰(Q値)を推定した。作成した発振波形にその減衰効果を適用して得られた波形を観測波形と仮定し、この2つの波形に対して相互相関処理を行い、波形を評価する。

本研究では、波形を音圧レベルと分解能の2つの観点で評価するために、相互相関波形のシグナル値と発振波形の振幅の比を「音圧レベル評価値」、シグナル値とサイドローブの比を「分解能評価値」として、2種類の評価値を導入した(Figure.1)。

発振波形は、サンプリング間隔や波形長等の条件を変更して複数作成し、それぞれの条件における評価値の傾向を調査した。

3. 河川の川底調査

2のシミュレーションで良い評価を得られた発振波形を実際に実地調査で使用した。2022/6/2~6/4の期間で東京湾北部に流入する河川の川底探査を実施し、そこで得られた観測結果を速報として報告する。

4. 結果・まとめ

発振波形の最適化検討の結果、サンプリング間隔・波形長の一方のみを変化させた場合、評価値は共に一次関数的な変化をした。波形長は1s増加するごとに、音圧レベル評価値は38.8%向上、分解能評価値は8.4%向上し、サンプリング間隔は0.1ms短縮するごとに、音圧レベル評価値は33.3%向上、分解能評価値は20.7%向上した。

川底調査では、断層やガス層と考えられる地下構造が確認された。一方で、観測データ解析の際に波形長の増加による水平分解能の低下、シミュレーション上ほど音圧レベルが向上していないといった問題が見受けられた。音圧レベルに関しては振源に用いた水中スピーカーの機械特性が原因として考えられ、今後の留意すべき課題といえる。

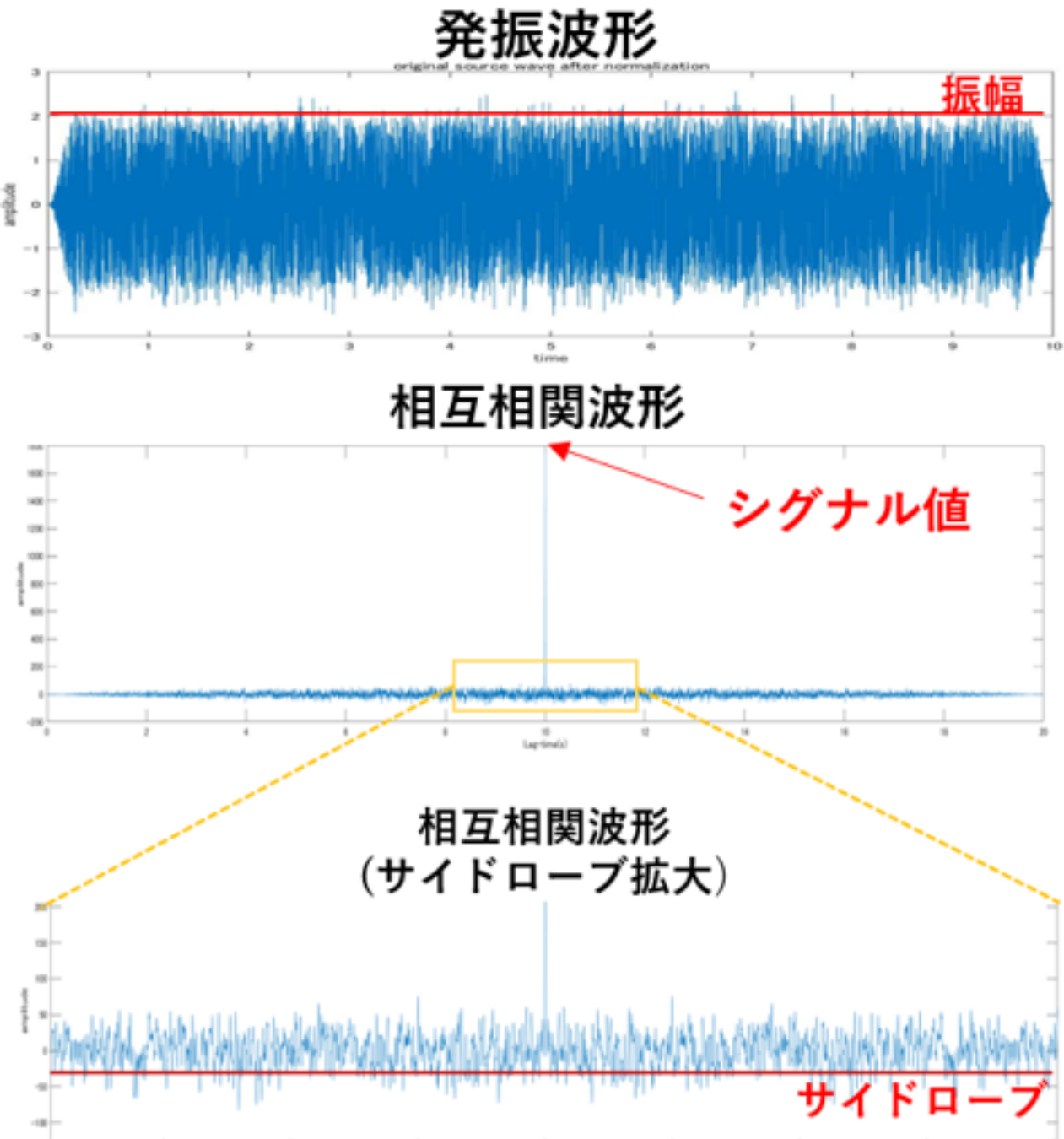


Figure 1. 評価値基準

Characteristics of High-frequency S-wave and S-coda at DONET ocean-bottom seismometers

*Shunsuke TAKEMURA¹, Kentaro EMOTO², Lina YAMAYA³

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyusyu University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフや日本海溝の巨大地震発生域周辺の地震活動をモニタリングする上で、特にDONETやS-netなどの海底地震計で観測される1 Hz以上の高周波数帯の解析が重要となる（例えば、Yabe et al., 2021）。しかし、海底地震計で記録される地震波形は、沈み込む海洋プレート、厚く堆積した海洋堆積物、海水、海底地形などの影響を受け複雑化したものである。特に、厚い（> 2km）海洋堆積物内に地震波のエネルギーがトラップされ、大きなピーク遅延やエンベロープ拡大現象が引き起こされる（Takemura, Yabe & Emoto, 2020）。本研究では、南海トラフに敷設されたDONETの記録解析と大規模地震波伝播シミュレーションを基に、海底地震計で得られるS波およびS波コーダの特徴を明らかにする。

2014年10月以降にDONET1周辺で発生したM 3.5以上の地震について、DONET強震計記録とF-net広帯域地震計記録を用いてS波最大振幅とS波コーダ振幅の解析を行った。発震時刻からの経過時間が70-90秒の時間窓で速度波形エンベロープの平均を計算し、それらをS波コーダ振幅とした。すると、DONETのS波コーダ振幅は、水平動および上下動の両方についてF-netよりS波コーダ振幅より数倍から数十倍大きく、これはDONET下の地盤によるサイト増幅の影響と考えられる（例えば、Philipps & Aki 1986; Takemoto et al., 2012）。しかし、上下動のS波最大振幅はDONETとF-netで同様の減衰特性を示しており、コーダ振幅から予測される結果と矛盾する。OpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いて地震波伝播シミュレーションをすることで、この矛盾について検討した。シミュレーション結果は、S波振幅はF-netとDONETで同様の減衰曲線に乗り増幅が見られないのに対し、S波コーダ振幅のみDONETで大きくなるという観測の特徴を再現した。地下構造モデルから海水や堆積層を除いたモデルを作成しシミュレーションを実施したところ、厚い（> 2 km）堆積層がDONETのコーダ振幅に大きく寄与していることがわかった。

南海トラフ域だけでなく、堆積層の厚い陸域の平野においてもコーダ規格化法によるサイト増幅特性の評価は過大評価となる可能性がある。この可能性は、出射・堀家・岩田（1985）で指摘されていたが、本研究の観測データ解析および数値シミュレーションにより原因が明らかとなった。堆積盆地外の岩盤点の観測点と異なり、DONETなどの厚い堆積層直上の観測点のコーダ波は空間的にランダムに分布した散乱体ではなく、堆積層内にトラップされたS波エネルギーにより構成されており、コーダ規格化法の基本となる伝播経路一様の仮定が成り立たなくなる。そのため、岩盤点を基準としてコーダ規格化法により推定されたサイト増幅特性は、過大評価の傾向となる。

文献

出射・堀家・岩田, 1985, 地震 第2輯, https://doi.org/10.4294/zisin1948.38.2_217

Takemura, Yabe, & Emoto, 2020, GJI, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa404>

Takemura, Emoto, & Yamaya, 2022, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1674758/v1>

謝辞

防災科学技術研究所が管理・運用するDONET <https://doi.org/10.17598/NIED.0008> とF-net <https://doi.org/10.17598/NIED.0005> の波形記録を利用しました。地震波伝播シミュレーションは海洋研究開発機構の地球シミュレータと東京大学 情報基盤センターのWisteria/BDEC-01を利用しました。本研究は、JSPS科研費21K03696および21H05205の助成により実施されました。

Amplitude anomalies observed in the S-wave seismic reflection survey data on the Shikano fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Takao KAGAWA¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada²

1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Hanshin Consultants Co. Ltd.

1. はじめに

1943年鳥取地震 (Mj7.2) で出現した鹿野断層を横断してS波反射法地震探査を実施した (香川・他, 2020)。この探査では、S波震源として油圧による板叩き機材を用い、ショット間隔1 m、地震計間隔1 mで201チャンネル (測線長200m) の記録を得た。今回、人工震源を用いたこれらの稠密観測記録の減衰特性を解析し、地表地震断層近傍で有為に小さい振幅が観測されたので報告する。

2. 解析の概要

観測では2KHzサンプリングで4000データ (2秒間) が保存されており、それぞれ1震源毎に複数回の発震がスタックされたものとなっている。全201チャンネルの中間 (101チャンネル) 付近が地表断層の露頭部に相当するが、反射断面ではやや北寄りの110から115チャンネル (CMP220から230) に地下構造の変化が観察されている。まず、各波形のオフセットを取り除いた最大値を求め、断層露頭部を含む51から151チャンネルの振幅を震源からの距離 (x) に対する累乗近似 ($b \cdot x^a$) で表現した。念のため200m/sの速度フィルターで表面波の影響が小さいことを確認している。図の上側に結果の例を示すが、太実線が近似式と適用範囲を示している。決定係数 (R^2) は概ね0.8以上で近似された。次に、観測振幅を近似式で除した比率を求め、対象区間の各チャンネルで平均値を求めた。なお、あまりにショットに近いデータは採用せず、ショット1から41 (南から) とショット161から201 (北から) の82データを用いた。

3. 解析結果

結果を図の下側に示す。南からショットした場合 (細実線) と北からの場合 (破線)、および全平均 (太線) を示している。どちらから波動が到来した場合も、チャンネル90から120程度で振幅比が1を切っており、断層帯部分で大きく減衰していることが分かる。それよりも遠いチャンネルでは振幅比が1以上となっている。ここで卓越する波群が深部からの反射波であることから、地表付近の破碎帯に影響されない、より深部を通過した波群による影響と考えられる。断層帯近傍では常時微動の卓越周期が不明瞭になる傾向も見られ、このような断層破碎帯が振動特性に大きく影響しているものと考えられる。一方で断層破碎帯は地震動を効率よく伝達するため破碎帯での振幅が大きくなるとの報告もあるが (伊藤・他, 2020など)、破碎帯に直交して伝播する場合は波動を減衰する効果を示すことが改めて示唆された。

4. おわりに

過去に地表地震断層を生じた断層帯で実施した人工地震探査記録を解析したところ、破碎帯部で有為な減衰傾向が見られた。次のステップとして、波形に見られる特性などより詳細な解析を試みたい。

謝辞

S波反射法地震探査の実施は、日本学術振興会科研費 19H02406の助成を受けたものです。記して感謝致します。

参考文献

伊藤・他(2000), 日本地球惑星科学連合2000年大会.

香川・他(2020), 日本地震学会2020年度秋季大会.

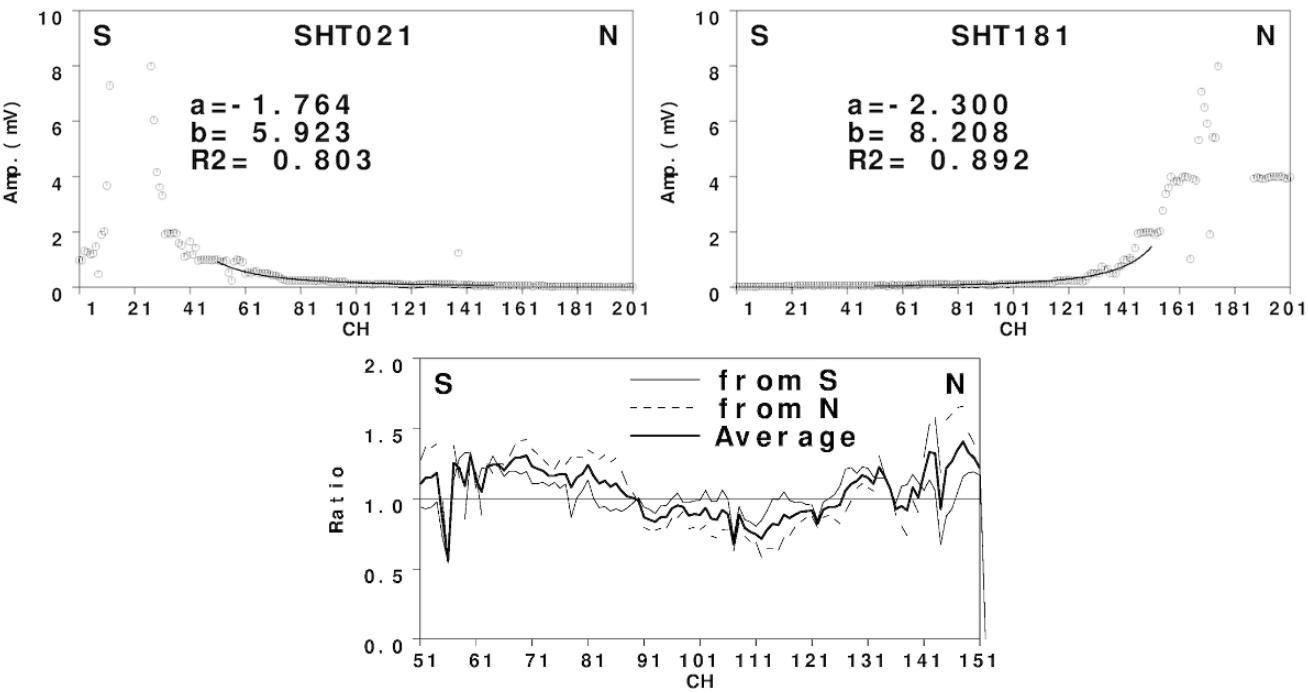


図 観測振幅の累乗近似（上）と近似モデルと観測の振幅比（下）

Characteristics of microtremors in the vicinity of the Yoshioka fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Tatsuya NOGUCHI¹, Isamu NISHIMURA², Takao KAGAWA¹

1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University

1. はじめに

1943年の鳥取地震で生じた吉岡断層において、地震断層ごく近傍の地盤震動特性を把握するために、微動探査や重力探査が実施されており、断層に伴う地下構造の変化が確認されている（野口・他，2022）。本研究では、その際に実施された大塚地区で稠密な微動観測データを詳細に分析し、地表地震断層の位置と微動特性の関係を調べた。

2. 観測データ

微動観測データ（野口・他，2022）は、1943年鳥取地震で生じた地表地震断層が確認された（金田・他，2002）鳥取市大塚地区で実施した単点3成分観測（167点）のデータである。複数のライン上（道路沿い）に10～20m間隔で観測点を設け、11台の地震計を用いた同時観測したデータが含まれる。地震計はJU410（白山工業）を用い、サンプリング周波数は200Hzとし、観測時間は単点3成分観測では1か所につき10分間としている。

3. 解析

各地点の3成分記録について、20.48秒間の区間を5区間以上選定し、各成分のフーリエスペクトルを求め、平均スペクトルとし、水平動2成分に対する上下動のスペクトル比（H/V）を求めた。H/Vの卓越周期、ピーク値、形状などの特徴を詳細に調べた。同一地点で水平動2成分（東西、南北方向）に対するH/Vの形状が異なる事例があったため（野口・他，2022）ズレの大きさを指標化した。これらのH/Vの特徴や指標について分布図を作成した。また、断層を横切るライン上の観測点では、微動波形から10秒間抽出し、0.1～0.5秒のバンドパスフィルターをかけ粒子軌跡を求めた。

4. 微動特性

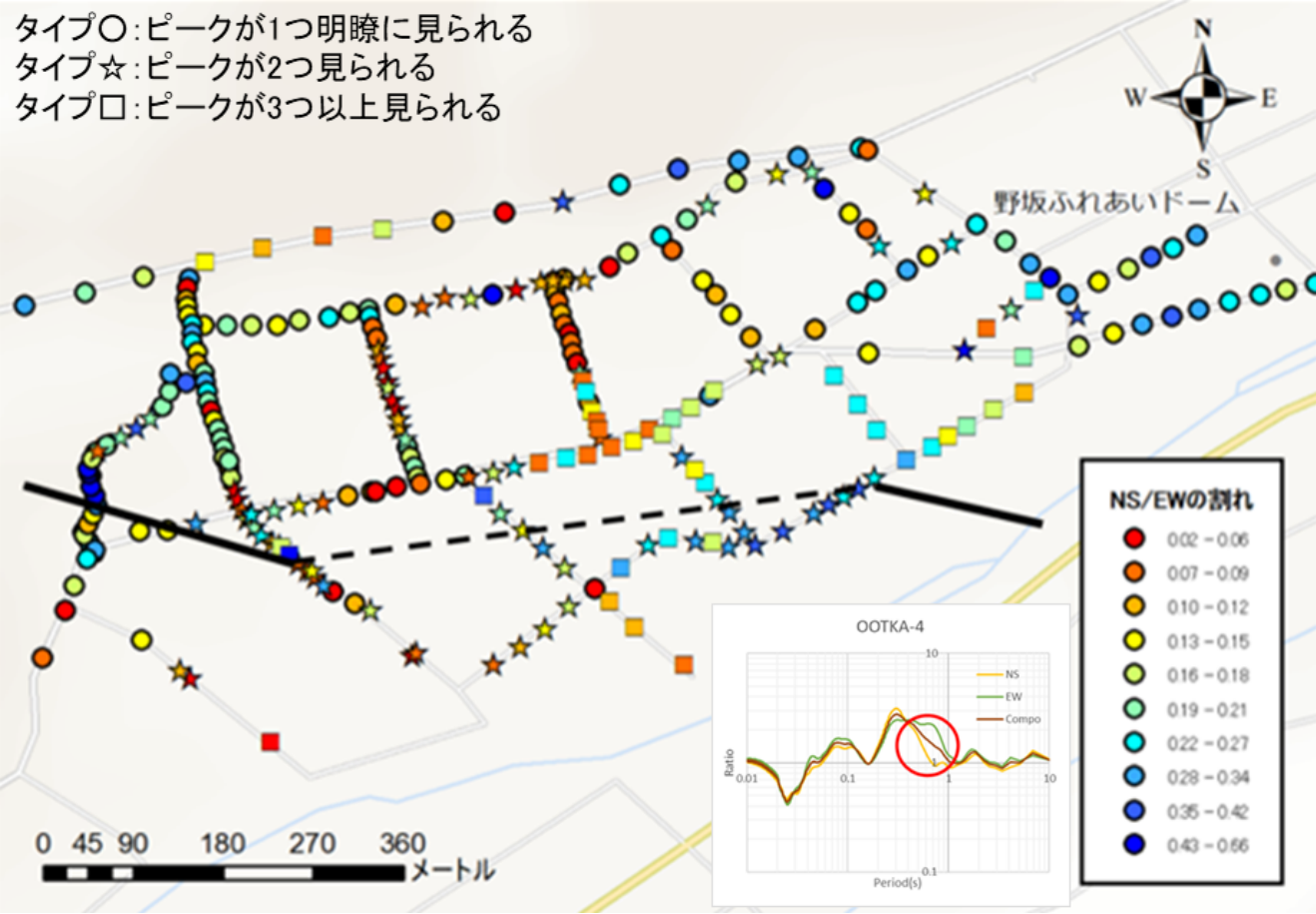
H/Vの形状の違いは局所的に特定の地域に分布している。特に東西の方向に走る1943年鳥取地震の断層線（推定断層線）を直交するラインで比較すると、断層線を境にH/Vの形状が変化するラインがあった。また、断層線の近傍では、水平動成分が断層走行方向と直交方向でH/Vの形状が異なる様子もみられた。粒子軌跡も断層線の直上で水平動の振幅が大きく、断層の走行方向に大きくなる地点があった。

5. まとめ

吉岡断層のごく近傍において実施された微動観測データの分析より、微動H/Vの形状などの特性について詳しく調べた結果、断層線の近傍やそれを境に特徴が異なることがわかった。今後は線上に配置した同時観測記録から、2点間の記録を用いて位相速度分散曲線を算出し、断層線近傍の速度変化を調べるなど、H/Vの形状が変化する原因について検討する予定である。

参考文献

- 野口・他（2022）：日本地球惑星科学連合2022年大会，SSS10-P12.
金田・他（2002）：活断層研究，Vol.2002，No.21.



Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground in Wakabadai, Tottori City from Microtremor and Seismic Observations

*Isamu NISHIMURA¹, Tatsuya NOGUCHI², Takao KAGAWA²

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

高度経済成長期以降、丘陵地の斜面や山麓地域に盛土などの人工的な造成地が次々と開発され、そのような地域では地震被害が懸念されている。近年の一連の地震災害では軟弱な盛土地盤による被害が顕著であり、大地震において周辺の切土地盤よりも被害が大きいことが報告されている。これは谷埋め部と土切り部ではS波速度が低く、地震動を増幅しやすいなど地盤の性質が異なるためである。また都市近郊ではニュータウン建設などの大規模な宅地開発が行われ、人工的に造成された平坦な地形が広がっている。これらの地域では、切土や盛土が複雑に分布しており、地盤震動特性や地震による住宅被害の可能性が地点によって大きく異なることが想定される。

著者らは既往研究にて、大規模盛土造成地に指定されている鳥取市若葉台地区にて微動観測を実施し(図1)、切土地点と盛土地点で微動H/Vの卓越周期や表層のS波速度など、地盤震動特性が異なることを確認した。本研究では切土と盛土が複雑に分布している地点にて微動アレイ観測および地震観測を行い、既往研究を含めた観測結果を基に2次元地盤構造モデルを作成した。そのモデルを用いて2次元有限要素法を実施しモデルの妥当性を検証した。

観測について、微動アレイ観測を切土地点(AR4)と盛土地点(AR3)で各1点の計2地点で行った。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1-30mの範囲で、サンプリング周波数は200Hz、観測時間はアレイ半径ごとに15分程度とした。使用機器には加速度型微動計JU410を4台用いた。地震観測は2022年5月からアレイ観測点と同一地点である切土地点(AR4)と盛土地点(AR3)の各1点で実施しており、2022年8月現在も稼働中である。使用機器にはセンサに速度型地震計KVS300(近計システム)とデータレコーダーにHKS9700(計測技研)を用いて、測定方向を水平動2成分(NS, EW)成分、上下動成分の3成分とし、サンプリング周波数100Hzで常時収録、GPSクロックによる時刻校正する仕様とした。

微動アレイ探査では観測記録よりSPAC法(Aki K., 1957.)およびCCA法(Cho et. al., 2006.)により位相速度分散曲線を求めた。レイリー波基本モードに基づく理論的な曲線が位相速度分散曲線と微動H/Vスペクトルの両方を満たすよう、地盤構造モデルを試行錯誤で決定した。解析の結果、切土地点では表層に $V_s=500\text{m/sec}$ の層が推定されたが、盛土地点ではその層の上部に $V_s=200\text{m/sec}$ の層が9m確認された。

地震観測記録より、S波初動の20.48秒の区間を切り出し、テーパー処理を施した後、バンド幅0.3HzのParzenウィンドウでスペクトルを平滑化し、各成分のフーリエスペクトルを算出した。図2より切土地点を基準にした盛土地点との水平動の比(盛土/切土)を取ると、0.10秒と0.22-0.26秒の範囲にピークがみられ、盛土地点ではこれらの周期帯で切土地点よりも揺れやすいことが判明した。

推定した微動アレイ観測による地盤構造モデルと既往研究における微動H/Vの卓越周期から4分の1波長則で表層の層厚を推定した。卓越周期が読み取れなかった切土地点の層厚は一律0mとして内挿補完して層厚分布を作成した。層厚分布を基に対象地域の2つのアレイ観測地点を通るように2次元地盤構造モデルを切り出し(図3)、そのモデルを基に2次元有限要素法でシミュレーションを実施した。

モデルは盛土層と基盤層からなる2層地盤とし、表層地盤のS波速度を200m/sec、密度を1.83g/cm³、基盤のS波速度を500m/sec、密度を2.22g/cm³とした。また非線形解析には修正Ramberg-Osgoodモデルを用い、入力地震波には鳥取県の自治体観測点国府における2016年鳥取県中部の地震を使用した。モデルの側面および底面には粘性境界を用いて地震波の逸散を考慮している。図4より地震動解析と同様に切土地点を基準にした盛土地点の水平動スペクトル比(盛土/切土)を取ると、0.1-0.2秒の範囲と0.2-0.3秒の範囲にそれぞれ1つのピークがみられ、地震動解析の結果と概ね一致することがわかった。

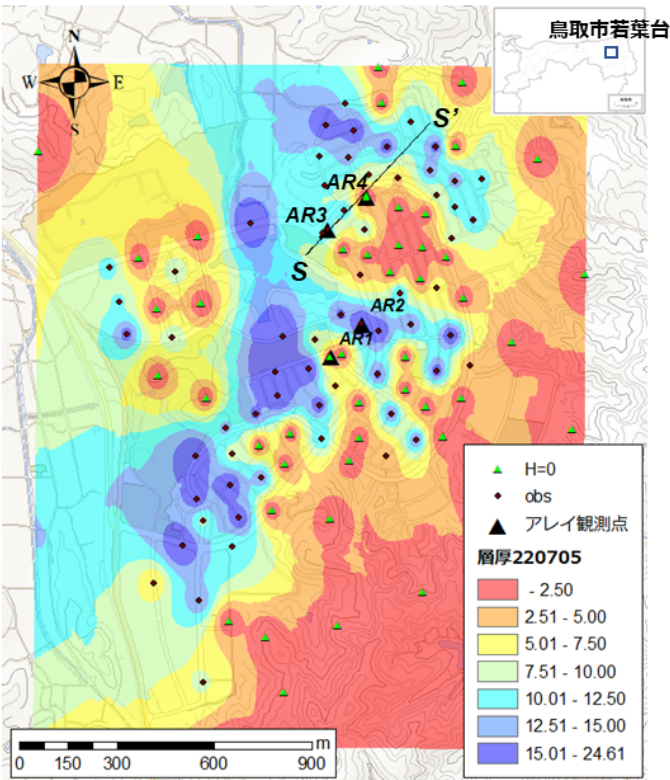


図1 鳥取市若葉台における微動H/V卓越周期から推定した表層地盤の層厚分布

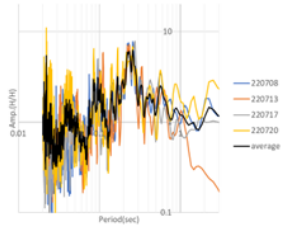


図2 地震観測記録から得られた水平動比(盛土/切土)

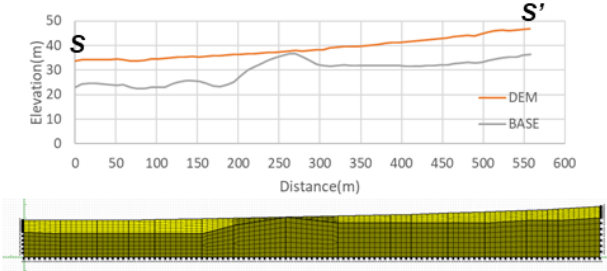


図3 FEM解析に使用した2次元地盤モデル

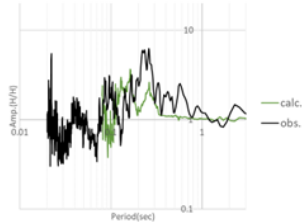


図4 図2の観測記録とFEM計算結果の比較

Investigation of Subsurface Structure in the Kochi Plain - microtremor survey and document retrieval

*Nobuyuki YAMADA¹

1. Kochi Univ.

高知平野は、南北数km東西20～30km程度の小さな平野であり、四国南部地域の地形や地質の成因[例えば、産総研(2018)]からは、変化に富んだ複雑な地質・地下構造であることが窺える。こうした小規模な平野においては、平野規模や地形の変化具合に見合った密度での面的な速度構造情報の把握やモデル化およびその修正手法の検討は必要なことであると考えられる。こうした点を踏まえ、平野端部に注目して、山田(2021)に引き続き、新たに検討した内容について報告する。

(1)高知平野西端部での地盤震動調査

平野西端部に位置するボーリング測線では、工学的基盤相当層(軟岩層に区分)の上面形状に、10m超の段差構造(東下りの段差:西側で上面深さ10m弱、東側で同20数m)が示されていた。そこで、段差付近での単点常時微動観測(15分程度の収録を30か所、同一箇所でも日時を変えて複数回実施)を、3成分強震計を用いて行った。得られた微動データを用い、主に1～10 Hzを対象にH/Vスペクトル比(以下、H/V)や最西端の地点を基準にしたスペクトル比(増幅度)の算出を行った。H/Vでは、形状に明瞭な山谷が現れず、注目した段差周辺での顕著な差異もみられなかった。増幅度では、段差の周辺での変化は小さく、むしろ段差の西の表層厚の小さいところで増幅度が大きくなる傾向が見られた。ボーリングデータでは、段差の西側は、泥質層(層厚数m)と砂礫層(約5m)、東側は、砂礫層が大半を占める(約20 m)地質構造となっており、微動データの結果は、ごく表層の泥質層が反映されたものと考えられる。

(2)平野西部・中央部での小規模微動アレイ観測

微動アレイ観測は、(a)高知大学朝倉キャンパス(上記(1)の測線の近隣)1ヶ所と、(b)平野の南北端部から高知城付近を通る平野を縦断する測線(山田(2021)で報告してきた測線)上の10ヶ所で実施した。観測は、(a)(b)ともに円周上(正三角形の各頂点)とその重心の計4点に地震計を配置し、円の半径を1～2 mから十数mと複数設定し、それぞれ15～20分間程度、100Hzサンプリングで微動の収録を行った。それには、加速度計(アカシ製JEP6A3)と無線LAN振動計(白山工業SU101)を組み合わせた機器を用いた。得られたデータをもとにBID02.0(長(2010))を用いて周波数毎の位相速度の算出を行った。(a)では、7～15 Hzの帯域で周波数毎の連続性のある位相速度が得られ、その値は300～800 m/sであった。また、ボーリングデータと大堀ほか(2013)などによる物理定数をもとにした理論位相速度を算出し、観測位相速度と比較した。詳細な検討を要するが、320, 700, 1500, 3200 m/sの4層を主とした構造のモデルを仮定した場合、観測データから算出した位相速度との対応が最もよくなった。(b)では、3～15Hzの帯域で位相速度が得られ、その値は150～600m/sで、(a)に比べて広い帯域で得られ、位相速度は高周波で低い値となった。このことは表層地盤の層厚が大きい、又は、物性値が小さいことを反映しているといえる。今後、表層地盤構造の推定や速度構造のモデル化に繋げたい。

(3)高知平野における地盤震動に関する文献調査

既往の研究の現状実態を把握するために、地盤震動による構造調査などのワードをタイトルに含む関連学会の論文および発表要旨を検索(各学会誌の検索システムやCiNiiを利用)した。これによると、現在のところ、54件ほどが該当した。ボーリング調査結果も含むが、その大部分は、常時微動のH/V比に関するもので、H/V比のピーク周期をもとに表層地盤の層境界深さを推定するものもあった。ここまでの調査では、前述した大堀・他らの論文などが微動アレイ探査によるもので、S波速度構造にまで触れられている数少ない文献であった。更なる文献の掘り起こしと既往の研究結果を概観し、今後のモデル化等の作業に反映させたい。この報告の内容の一部は、高知大学理工工学部の2021年度卒業研究:鈴木嵩大氏、原拓也氏らの成果によるものです。また、この研究の一部は、科学研究費基盤研究(A)(課題番号:22H00234)の補助を受けています。関係者各位に記して、感謝いたします。

Estimation of shallow subsurface structure in the Oharadai area, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, using H/V spectral ratios and borehole data

*Yasuyuki IWASE¹, Kojiro Kato², Yusuke Mizuno²

1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Japan Maritime Self-Defense Force

神奈川県横須賀市にある標高80m～90mの台地の小原台は約10万年前の海岸段丘である。地質学的な調査により地表から、主に、火山灰（ローム層）、砂礫（小原台砂礫層）、礫（走水礫層）の順の地質構造であることが明らかとなっている（例えば、江藤、1998）。小原台砂礫層の分布域である小原台の最上部は防衛大学校によるボーリング調査により、約100地点で地下浅部構造が詳細に記録されている。

ところで、常時微動H/Vスペクトル比を用いると表層地盤の厚さを推定することができる（中村・上野、1986）。この手法で必要とされる常時微動データは厚さを推定する地点の1点のみで良いことが特徴であるが、表層地盤のS波速度が既知でなければならない。また地層ごとのインピーダンス比が大きければ地層の厚さを推定することも可能である。

本研究では、小原台でボーリング調査が行われている地点のうち、比較的データの信頼できる59地点の半径5m以内で常時微動観測を行った。観測には白山工業JU-410微動計を用い、サンプリング周波数100Hzで各観測地点でそれぞれ15分間の計測を行った。得られたデータは10.24秒、20.48秒、40.96秒ごとのタイムウィンドウに分割し、各タイムウィンドウの東西・南北・上下動のフーリエスペクトルを計算し、バンド幅0.05Hz～1HzのParzenウィンドウにより平滑化後、相加平均または相乗平均を計算した。さらに東西成分と南北成分の2乗和平方根を水平方向成分とし、水平方向成分を上下方向成分で割ることでH/Vスペクトル比を求めた。また、タイムウィンドウごとにH/Vスペクトル比を算出し、相加平均をH/Vスペクトル比とする計算も行った。

H/Vスペクトル比が最大となる周期はローム層（地表の埋土などを含む）に対応していると考えられるため、最近接のボーリング調査地点のローム層の厚さと周期の関係から最小二乗法によりローム層のS波速度を求めた。その結果、H/Vスペクトル比の計算方法やパラメータによらず、ローム層のS波速度は約145～約150m/sと計算された。このときの決定係数はほとんどが約0.97であった。この値は、道路橋示方書（社団法人日本道路協会、2002）の推定式にボーリングデータの平均N値を代入して求めたS波速度である約160m/sと大きく矛盾はしない。

次にH/Vスペクトル比が最大となるピークよりも低周波で、かつ、最大ピークとなる周期は小原台砂礫層と走水礫層との境界深度に対応していると仮定し、ローム層および小原台砂礫層の厚さから小原台砂礫層のS波速度を求めた。この結果はパラメータや計算手法に依存し、約140m/s～約700m/s（決定係数は0.58～0.77）が得られたが、多くは200m/s～300m/sであった。しかし、最小二乗法の決定係数が0.73を超える場合には、約265m/s～約270m/sと安定した数値が得られた。なお、ボーリングデータの平均N値（約30）から推定したS波速度は約250m/sである。

最後にボーリングデータ調査地点から離れた地点での常時微動データに本研究で得られたS波速度を用いて小原台のローム層と小原台砂礫層のそれぞれの層厚分布を推定した。ローム層は全領域に渡ってほぼ10m程度の厚さであり、小原台砂礫層は約5m～約10mの厚さという結果となった。ローム層ではボーリングデータと常時微動データから推定される層厚に大きな違いはなかったが、小原台砂礫層は両者の差異が大きい

(～5m) 地点があった。小原台砂礫層と走水礫層に対するH/Vスペクトル比のピークを正しく検出できていないことが原因かもしれない。

本研究では、H/Vスペクトル比のピークの読み取りに主観を排除するために機械的に地表からの第一境界層を最大ピーク、第二境界層を最大ピークより低周波の最大ピーク（以下、第二ピークと呼ぶ）とした。その結果、最大ピークの検出には本研究で試みた方法やパラメータには大きな依存性はないことが分かった。一方で、第二ピークの検出には大きな誤差が見られた。この原因は、小原台砂礫層（第二層）と走水礫層（第三層）の速度コントラスト（走水礫層のN値を50とすると速度コントラストは約1.2）が、ローム層（第一層）と小原台礫層の速度コントラスト約1.8倍よりも小さいことからくるのかもしれない。複数のパラメータでS波速度の計算を試み、決定係数の高い結果を採用するのが最適であると考えられる。常時微動観測は簡単に観測密度を高くすることができ、層厚の計算も複雑ではないため最適なパラメータを探索することで、必要な精度の地下構造を得ることができる可能性がある。

Estimation of V_{s30} using microtremor array records in Thimphu and surrounding towns, the Kingdom of Bhutan

*Takumi Hayashida¹, Nityam Nepal², Phuntsho Pelgay², Shiro Ohmi³, Karma Namgay², Dowchu Drukpa², Hiroshi Inoue⁴

1. IISEE, Building Research Institute, 2. DGM, Ministry of Economic Affairs, Bhutan, 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. NIED

Bhutan is a landlocked country located in the eastern Himalayas, one of the most seismically active regions in the world. Thimphu and surrounding towns (Isuna, Paro, and Ura) are located in the western central part of Bhutan at altitudes of >2000 m, and settlements are distributed along river valleys. The global V_{s30} map calculated from the ground slope (Heath *et al.*, 2020) indicates decreasing V_{s30} values along the valleys. Recent seismic intensity observations also show large ground shakings in the valley areas compared to mountainous sites. To evaluate the effect of subsurface soil structure on the ground motion, we conducted microtremor measurements in the areas. We used four portable broadband seismometers (CMG-40T: Guralp Systems Ltd.) with 24-bit recorders (Centaur: Nanometrics Inc.) for the measurements. Microtremor arrays with radii of 5–30 m were deployed in the valleys and uphill areas, and the measurements were taken for >15 minutes for each array. We applied the spatial autocorrelation (SPAC) method (Aki, 1957; Okada, 2003) for velocity structure estimations and derived microtremor horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios to identify dominant frequencies at each site. We found the microtremor measurement below 10 Hz was difficult due to stiff subsurface soil as well as weak microtremor power in the target areas, but the SPAC results indicate dispersive characteristics of Rayleigh wave phase velocity above 10 Hz, and the estimated structure models show S-wave velocity profiles down to several tens of meters. We estimated V_{s30} values using the estimated S-wave velocity models or by applying the directly V_{s30} estimation method with SPAC coefficients (Hayashida *et al.*, 2022; in review). Our results showed no apparent difference in deeper soil structures between the valley and uphill areas but a slight difference in the shallower part (several meters below the ground surface) due to fluvial sediments. The estimated V_{s30} values range from 300–900 m/s, which are comparative with those calculated using topographic features, and our results contribute to the development of more detailed hazard maps.

Acknowledgments:

This study was supported by Japan Science and Technology Agency (JST) and Japan International Cooperation Agency (JICA) under the "Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS): Project for Evaluation and Mitigation of Seismic Risk for Composite Masonry Buildings in Bhutan (FY2017-2022)".

Basic study of ground amplification factor based on microtremor array observations at seismic stations.

*Shigeki SENNA¹

1. NIED

防災科学技術研究所では、広帯域の強震動評価を行う事を目的として、関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデルを構築し、構築した地盤モデルによるAVS30や地盤増幅率（最大速度増幅率）を地震本部およびJ-SHISより2021年3月26日に公開されている。このモデルの作成では、関東地方全域において、約31万本のボーリングデータで初期モデルを作成し、低地・台地を基本として約1km間隔（3次メッシュ単位）で約14,000地点の解析結果に基づいて250mメッシュ間隔の地盤モデルが構築され、地盤増幅率の評価がなされている。関東地方およびその周辺地域における、K-NETおよびKiK-net等の地震観測点においては、微動アレイ観測も実施されており、地震観測記録と微動アレイのS波速度構造に基づく地震動応答計算による周期毎の増幅特性の検証もなされ（地震本部2017, 2021）、その結果、微動アレイ観測に基づいたS波速度構造の精度は非常に高いことが確認されている。現在の表層地盤モデルによる地盤増幅率の評価は、藤本・翠川（2006）で実施されているが、地盤増幅率に使用されているAVS30はK-NETやKiK-netのPS検層を基に計算されているものである。本研究では、地盤モデルによるAVS30による地盤増幅率の精度検証の一環として、微動アレイから得られるS波速度構造に基づくAVS30と地盤増幅率の関係を評価し、今後において、微動アレイ観測が実施されていれば最適な地盤増幅率が評価できる事、新しい地盤増幅率の提案すること等を目的としている。本件等では、手始めに関東地方およびその周辺地域（山梨県・長野県・福島県等）を含むK-NET、KiK-netの海域および離島を除く全観測点（587地点）および自治体震度計（千葉県・茨城県を中心として130地点）、MeSO-net（293地点）の合計1010観測地点のベリポイントにおいて、半径20m程度以下の中心点のない三角形・L字および半径60cmのそれぞれのアレイ探査を実施した。観測したほぼ全ての地点においてAVS30が評価可能な良好な結果を得ることが出来ている。AVS30の計算は長尾・紺野（2002）に基づく波長40m(C40)に基づく方法、1/3波長則に基づく方法(Ballard(1964))、および、Arai and Tokimatsu(2004, 2005)の手法を参考とした位相速度とH/Vによるインバージョン解析、Cho and Iwata(2019)のベイズ理論に基づいた手法のそれぞれのS波速度構造を求め、PS検層や、N値とS波速度構造の変換式で換算したS波速度構造（例えば太田・後藤(1978)等）と、AVS30から得られる最大速度増幅率（藤本・翠川(2006)）等を計算し比較した。また、工学的基盤相当層(V_s400)上面から伝達関数関数を計算し、地震観測記録から計算されるスペクトル増幅率（地表地震記録の速度応答スペクトル／距離減衰式における速度応答スペクトル）を用いてS波速度構造の精度の検証を行った。

（参考文献）

- 藤本一雄・翠川三郎 (2006) : 近接観測点ペアの強震観測記録に基づく地盤増幅率と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 6, 1, 11-22.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017) : 「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル説明資料.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2021) : 「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル説明資料.
- 長尾毅, 紺野克昭 (2002) : 常時微動アレイ観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No.696, I-58, pp.225-235.
- Arai, H., and K. Tokimatsu (2004) : S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 94, no.1, pp.53-63.
- Cho, T. Iwata(2019) : A Bayesian Approach to Microtremor Array Methods for Estimating Shallow S Wave Velocity Structures: Identifying Structural Singularities, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(1), pp.527-553.

Application of Bayesian Optimization to Estimate 1D Subsurface Layered Structure from Near-filed Seismic Waveforms

*Hisahiko KUBO¹

1. NIED

三次元地下速度構造モデルに基づく地震波伝播シミュレーションは昨今では一般的となっているが、近地地震波形の理論的な計算には一次元地下成層構造モデルが近年でもよく用いられている。これは計算の手軽さという理由が大きいが、観測地点直下の速度構造を深さ方向に複数の層で構成されるモデルで近似しても近地地震波形記録がよく再現できるケースが多いという側面もある。一次元地下成層構造モデルの作成においては、既存の三次元地下速度構造モデルからの観測点直下の構造の切り出しやボーリング調査に基づくモデル構築だけでなく、アレイ探査や地震観測などに基づくモデル推定も行われており、例えば中小規模の地震における近地観測波形記録のモデリングを通じた構造推定は有力なアプローチの一つである（e.g., Ichinose et al. 2003; Kakehi 2004; Asano and Iwata 2009）。既存研究では、一次元地下成層構造の推定に、グリッドサーチや勾配法、遺伝的アルゴリズム、焼きなまし法、マルコフ連鎖モンテカルロ法などが用いられてきた。本研究では、近地地震波形に基づく一次元地下成層構造の推定問題に、ブラックボックス最適化問題における効率的な探索手法として近年注目されているベイズ最適化（Mockus 1989; Jones et al. 1998; Frazier 2018）を適用する。一次元地下成層構造モデルは各層の厚さと物性値の組み合わせで構成されるが、各パラメータの間にはトレードオフがあり、どのような組み合わせが観測波形を最もよく再現できそうかを予め予想することは困難である。そのため同推定問題は、波形残差というブラックボックス関数を最小にするモデルパラメータの組み合わせを最適化するブラックボックス最適化問題と言える。ベイズ最適化は可能な限り少ない試行回数でブラックボックス関数の性質を解明し、それを最適化することを目的とした機械学習手法である。具体的には、それまでの試行結果に基づいてガウス過程などによりブラックボックス関数を近似した代理モデルを作成した上で、その代理モデルにおける期待値や標準偏差などに基づく獲得関数を最大化するように次の試行を行う、という流れを繰り返していく。なお既存の研究では各層の厚さもしくは物性値のどちらかを固定した上で、もう片方を推定するということが行われてきた。それに対して本研究では各層の厚さと物性値を同時に解くことにも挑戦している。

本手法における一次元成層地下構造モデルは各層の厚さと5つの物性値（P波速度 V_p ・S波速度 V_s ・密度・P波減衰係数 Q_p ・S波減衰係数 Q_s ）で構成される。これらの物性値の間には緩やかな対応関係があることが分かっているため、経験式を用いることで推定すべき物性値の数を減らす。本研究では V_s を推定パラメータとし、 V_p および密度はBrocher (2005)の経験式により V_s から求める。また Q_p および Q_s はKawabe & Kamae (2008)およびKoketsu et al. (2009)を参考にして V_s から求める。層の数に関してはあらかじめ設定する。一次元成層地下構造モデルから理論波形を求める際には、離散化波数積分法（Bouchon 1981）と反射・透過係数行列法（Kennett & Kerry 1979）を用いた。ベイズ最適化のツールとしてPreferred Networksによるオープンソースのハイパーパラメータ自動最適化フレームワークOptuna（Akiba et al. 2019）を用いる。Optunaはdefine-by-runスタイルのユーザAPIを有するpythonライブラリであり、各種のベイズ最適化アルゴリズムを備えているほか、様々な可視化や枝刈り、並列化の機能も有する。ベイズ最適化のアルゴリズムにはTree-structured Parzen Estimator（Bergstra et al. 2011, 2013）を用いた。

予備的な理論テストからは、各層の V_s を一定範囲内でフリーに探索するよりも、深いほど V_s が大きくなるという制約を入れる形で解の探索範囲を絞った方が、同じ試行回数でより真値に近い解にたどり着くことが分かった。今後さらなる理論テストや実記録を用いた解析を通じて手法のアップデートを図るとともに、同手法の妥当性やその有用性を検証する。

謝辞：本研究はJSPS科研費21K14019の助成を受けたものです。

Site investigation by surface wave measurements on subsidiary faults of 2016 Kumamoto Earthquake

*Naoto INOUE¹, Kotaro Mizutani¹, Naoko Kitada¹, Kazuki Watanabe², Noriyuki Shibuya², Masashi Omata²

1. Geo-Research Institute, 2. PASCO

地震により地表地震断層が発生すると、副次的な断層が時には断層主部(主断層)から数km離れて発生することもある。特に主断層から離れた場所に発生する副次的な断層には、既存断層構造との関係が指摘されている(Boncio et al., 2018, Nurminen et al., 2020, 高橋・他, 2020)。そこで、副次的な断層が発生した地点の地下構造を明らかにすべくトレンチ調査を行ってきた(例えば渋谷・他, 2018)が、トレンチ調査では検討できる深度に限度があるため、物理探査により浅部地下構造の検討を行った。2016年熊本地震の際にSARにより抽出された微小な地表変状が示唆された箇所(小俣・他, 2017)で表面波探査やGPR探査を行い、浅部地下構造の検討を行った。本発表では表面波探査の結果について報告する。表面波探査は浅部地質構造調査に有効な手法の一つである。地表付近を伝播する表面波はS波速度構造に敏感であり、減衰しにくいいため測定が容易である(例えば三浦, 2017や林・他, 2001など)。岩石の堅さとS波速度には相関性があり、堅い岩石ほどS波速度が大きくなる。探査機材はMcSEIS-SXWを用い、受震点・発信点はいずれも2m間隔とした。震源には10kgの掛矢を用いた。解析はSeisImager(Geometrics, 2019)を用いた。計測したデータから表面波の位相速度を求め、これを説明する地下構造を逆解析により推定を行った。ほとんどの測線で深くなるにしたがい速度は速くなる傾向にある。得られた浅部速度構造からは、断層構造を示唆するような明瞭な速度コントラストはみられなかった。しかしながら、多くの箇所で側方に速度構造が変化している(低速度層が厚くなる)傾向がみられた。したがって、地震時に副次的な断層に相当するような変状を呈する場所は、地下に不均質構造を有する可能性が考えられる。一方、地表で微小な変状が確認されたところでも速度構造に側方変化がみとめられなかった測線もあったが、表面波探査ではとらえることができないスケールの不均質構造があるのか、それとも明瞭な不均質構造みられないものの副次的な断層が発生しているのかは今回の限られた表面波探査の結果からのみで考察することは困難であった。GPR探査やトレンチ調査等の各種浅部地下構造調査結果の蓄積が必要と考えられる。

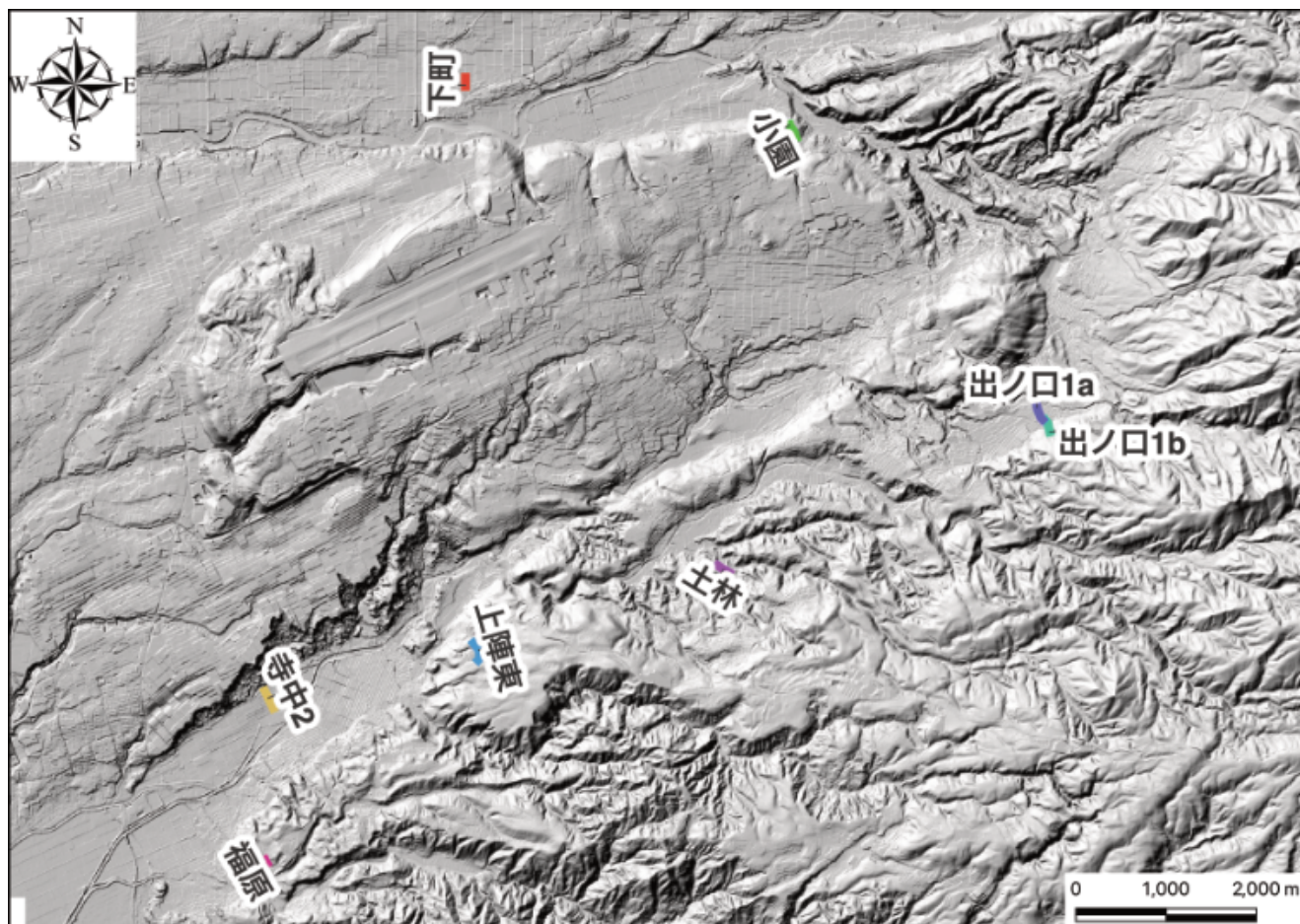
謝辞:表面波探査の際には現地の方々にご協力いただいた。なお、本検討の一部は令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査)事業によるものである。

参考文献: Boncio, P. et al. (2018): Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 1, pp. 241–256.

Geometrics (2019): https://www.geometrics.com/wp-content/uploads/2021/05/SeisImagerSW_Documentation.zip.

Nurminen, F. et al. (2020): Frontiers in Earth Science, 8, p. 456, DOI: 10.3389/feart.2020.581605. 高橋直也・他(2020):活断層研究, 2020, 53, pp.51-65, DOI: 10.11462/afr.2020.53_51. 三浦みなみ(2017):博士論文, URL:<https://ci.nii.ac.jp/naid/500001054729>.

渋谷典幸・他(2018):日本地質学会学術大会講演要旨. 小俣雅志・他(2017):日本活断層学会2017年度秋季学術大会講演予稿集, P-4. 林宏一・他(2001):応用地質技術年報. 応用地質.



図：表面波探査測線位置図

Long-term monitoring of subsurface changes by a giant magnetostrictive seismic source

*Takahiro Kunitomo¹

1. Ontake Science Lab

東濃地震科学研究所（2022年3月31日閉所）で、2015年度にGPSに同期した任意波形を発生できるシングルフォース型の超磁歪震源を開発した。最大発生力が91kgf（890N）、上限周波数が1.25kHzで、一人でもハンドリングできる小型の震源装置である。直線距離約700mのボアホール観測点でも、1時間程度のスタッキングを行うことで、明瞭なP波の到来を確認できる。この震源装置を、瑞浪地殻変動観測壕内の地震計検定用のコンクリート基台に設置し実験を行ってきた。2016年4月8日から地下の常時モニタリング（弾性波の走時や波形変化の観測）を開始し、研究所の閉所に伴い実験場所を撤収した2021年11月2日までの期間、約5年半にわたって送信実験を継続した。その間、停電やGPS時計の受信不良の対策期間などを除けば、加振部には一度も触れることなく、メンテナンスフリーで稼働を行うことができた。本報告では、これまでの期間で得られた地下の変化について述べる。ボアホール地震計（土岐花崗岩内に設置）を用いた観測では、熊本地震（2016/04/16 M=7.3）によるP波およびSV波の走時変化が検出され、地震後の走時変化の推移が、土岐花崗岩中の間隙水圧の変化と良く一致していることが判明した（P波については2016年地震学会で報告済み）。送信は地震計のサンプリング周波数（400Hz）を考慮して100-200Hzの帯域で行い、観測データを1日間スタッキングし、クロススペクトル法による走時変化の検出を行った。TRS（深度505m、水平距離490m）では、P波走時に熊本地震に伴う60 μ sの遅延が観測された。また、TGR350（深度350m、水平距離50m）では、P波の走時変化は25 μ s以下であったが、後続のSV波の走時には155 μ sの遅延が観測された。走時遅延の原因は、地震による間隙水圧の上昇に伴うクラックの開口に起因する速度低下であると推定され、また、観測点の方向や波により遅延量が異なるのは、本地域の土岐花崗岩のクラックの卓越方向と弾性波の波線および振動方向により説明できる。地震後の走時変化は、P波SV波ともに、土岐花崗岩中に設置された間隙水圧計（瑞浪超深地層研究所の立坑内、深度200m）による間隙水圧の変化と相関しており、間隙水圧が上昇すると走時は遅れ、下降すると早まった。同様の変化は、瑞浪超深地層研究所の立坑埋め戻しに伴って土岐花崗岩内の間隙水圧が変化する場合も検出されると期待されたが、埋め戻し開始直後に周囲のボアホール観測点が撤収されたため観測を行うことはできなかった。なお、2017年8月から送信を停止する2021年11月2日まで、瑞浪観測壕内に設置した小規模な地震計アレイによる瑞浪層群内の地下構造変化のモニタリングを行っており、1時間毎の差分波形を並べるだけでイベントに伴う波形変化が観測された。一つは、壕壁付近の岩盤破壊現象に伴う波形変化であり、後続波の変化から散乱構造の変化を捉えていると見られる。もう一つは、降雨後の波形変化である。降雨後に特定のフェーズが変化し、時間をかけて徐々に変化が解消されていく。また、より深い場所からの反射波もしくは屈折波であると考えられるフェーズでは、降雨から遅れて波形変化が見られる。こうした変化は、降雨後の地下水流動に対応しているのではないかと考えられる。（謝辞）実験期間中にアドバイスを頂いた元東濃地震科学研究所の石井紘博士と浅井康広博士に感謝致します。

Poster session (1st Day) | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08P] PM-P

Mon. Oct 24, 2022 3:30 PM - 6:00 PM ROOM P-2 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S08P-01] Stress field and slip tendency analysis for the 2016 Mw7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand

*Tomomi Okada¹, Miu Matsuno¹, Ayaka Tagami¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Clifford H Thurber⁶, Richard H Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-02] Source process analysis of the 2004 off Kii peninsula earthquake from using sparse observation network and Green functions based on a three-dimensional structure

*TAKAHITO NISHIMIYA¹ (1. Second Laboratory, Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-03] Commonality and diversity of ruptures occurring at the same asperity: the 2015 Mw6.8 Miyagi-Oki earthquake and Mw6.0-6.4 quasi-repeating earthquakes

*Keisuke YOSHIDA¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-04] Relationship Between Variations in Source Duration and Occurrence Areas of Earthquakes

*Goki Irie¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-05] Do deep low frequency earthquakes have the similar rupture growth process to ordinary earthquakes?

*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-06] What Actually is the Vertical Shock Verbally Reported for Shallow Earthquakes?

*Koji UENISHI¹ (1. Univ. of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-07] Outline and radiation efficiency of stochastic source time functions

*Shiro HIRANO¹ (1. Ritsumeikan Univ.)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-08] On shear localization by thermo-chemical pressurization and following destabilization and migration of the shear-localized zone

*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto University, DPRI)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-09] The earthquake interoccurrence time distribution in sheared granular model

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-10] Numerical experiments using a friction law both for fast and slow sliding

*Takane HORI¹, Hideo Aochi² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey))

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-11] Investigation of earthquake source scaling laws using dynamic rupture simulations with a hierarchical patch structure

*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-12] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kears² (1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-13] Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation (Part 2)

*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-14] Why do Gutenberg-Richter b-values decrease with time prior to large earthquakes? Insights from rate-and-state earthquake cycle simulations with frictional heterogeneities

*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-15] Numerically reproduced segments of short-term slow slip events in the Nankai region

*Takanori MATSUZAWA¹, Bunichiro Shibasaki² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-16] **Impact of Kuroshio meanders on a stationary slow slip event and local seafloor level change around the Nankai Trough**

*Keisuke ARIYOSHI¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Takeshi Inuma¹, Masaru Nakano¹, Demian Michael Saffer⁴, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi³, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University (now at Japan Meteorological Agency), 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. University of Texas, Austin)

3:30 PM - 6:00 PM

[S08P-17] A possible relation between Reidel shear band and rate- and state-dependent friction parameters

*Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda¹, Shun Watanabe

¹ (1. Kyoto University, 2. NIED)

3:30 PM - 6:00 PM

Stress field and slip tendency analysis for the 2016 Mw7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand

*Tomomi Okada¹, Miu Matsuno¹, Ayaka Tagami¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Clifford H Thurber⁶, Richard H Sibson⁷

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand

2016年11月13日にニュージーランドで発生したMw7.8 Kaikōura地震は約20枚の複数断層による連動破壊により生じた。本研究 (Matsuno et al., 2022) では、Kaikōura地震の発生に対する応力の影響を理解することを目的とする。そのためには震源域の応力場を精度良く推定することが必要である。そこで、2013年4月から2018年12月、すなわちKaikōura地震前後における地殻応力場を推定した。臨時地震観測網により得られたP波初動による震源メカニズム解とGeoNetのモーメントテンソル解の両方を用いた。その際、本震の断層面以外で発生した地震を選択した。そして、選択した震源メカニズムの解に対して、応力テンソルインバージョンを行った。Kaikōura地震前の応力状態は震源域全体で概ね横ずれ型であり、応力テンソルの最大圧縮軸方向(σ_1)はWNW-ESEの方向であった。地震後、応力場の向きは大きく変化していなかった。このことは、Kaikōura地震の際の応力変化が応力方位を変えるには小さすぎたことを示唆しており、Kaikōura地震地震の前に大きな差応力が存在していた可能性を示唆している。しかし、地震後、それぞれの領域の応力比は増加あるいは減少の2つの異なるパターンで変化しており、差応力の大きさの領域による違い、あるいは間隙水圧が領域によって異なる変化をした可能性を示唆している。応力テンソルインバージョンの結果を用いて、Slip tendency (ST) の計算を行った。破壊開始点の断層では、高いSTが求められた。震源域中央に位置する断層 (Jordan thrustに相当する断層) は低いSTであったが、大きなすべりを起こした周辺の断層では高いST値が推定されており、破壊過程が周辺の断層に伝播していることと調和的である。震源域北端の断層はSTが最も低く、そのために破壊過程が停止したことを示唆される。また、各断層のすべり方向は推定した応力場により概ね再現することができた。以上の結果からは、地震前の応力がKaikōura地震の連動破壊過程を説明できることを示唆している。

Reference:

Matsuno, M., Tagami, A., Okada, T., Matsumoto, S., Kawamura, Y., Iio, Y., Sato, T., Nakayama, T., Hirahara, S., Bannister, S., Ristau, J., Savage, M.K., Thurber, C.H., Sibson, R.H., 2022. Spatial and temporal stress field changes in the focal area of the 2016 Kaikōura earthquake, New Zealand: A multi-fault process interpretation. *Tectonophysics* 835, 229390. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229390>

Source process analysis of the 2004 off Kii peninsula earthquake from using sparse observation network and Green functions based on a three-dimensional structure

*TAKAHITO NISHIMIYA¹

1. Second Laboratory, Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

気象庁は、南海トラフで異常な現象が観測され調査を開始すると南海トラフ臨時情報を発表する。特に南海トラフのプレート境界で M_w 7.0以上の地震が発生したと認識すれば速やかに巨大地震への注意・警戒を速やかに呼びかけることとしている。このため南海トラフで地震が発生した場合、プレート境界のどこからどこまで破壊に至ったのか速やかに把握したい。

破壊領域を知る手段の1つに震源過程解析がある。気象庁の地震観測網はリアルタイムで地震波形が伝送され、それを用いて24時間体制で地震活動を監視している。それら波形データを用いることで速やかに震源過程解析に着手することができるが震源過程にはやや疎な観測網であるかもしれない。

やや疎な観測網のデータであっても、地震波についての3次元構造を反映したより正確と思われるGreen関数を解析に用いることで妥当な震源過程が得られる可能性がある(西宮, JpGU Meeting 2022)。

そこで 2004/09/05 19:07(JST)に紀伊半島沖で発生した地震(M_j 7.1)について、当時の気象庁の地震観測網の波形データと3次元構造を反映したGreen関数を用いて震源過程解析を行った。

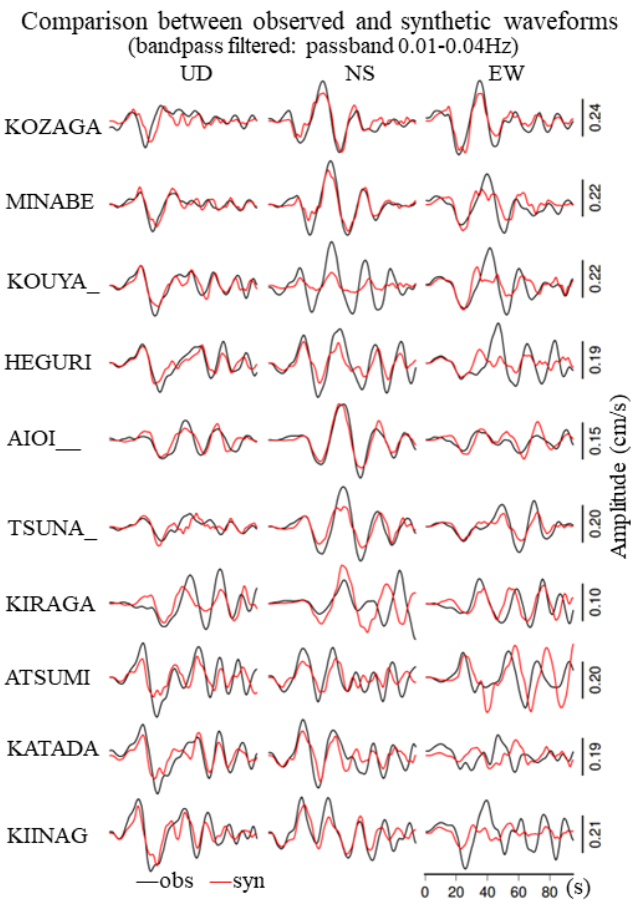
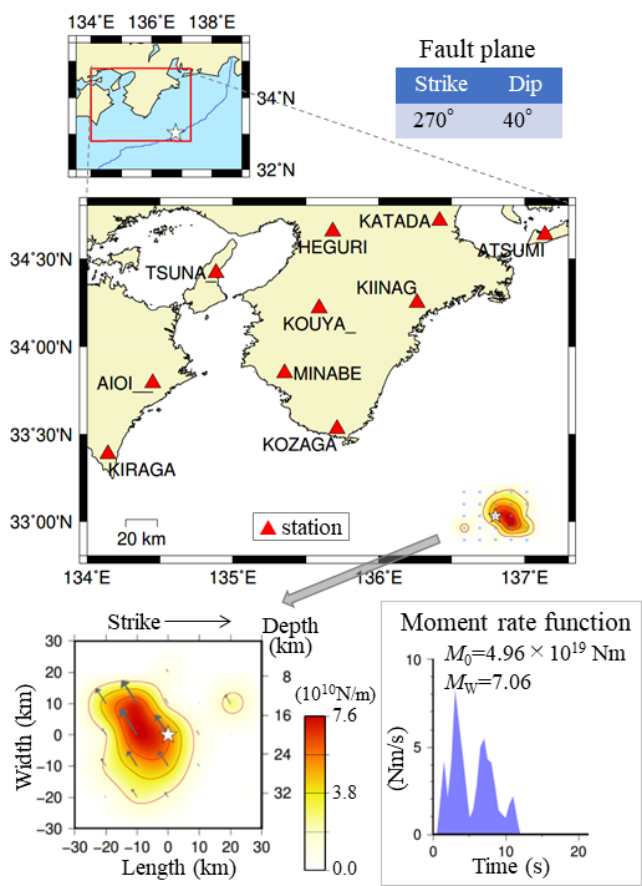
破壊開始点や断層パラメータについては、この地震について遠地P波を用いて震源過程解析を行っているPark and Mori(2005)の値を用いた。Park and Mori(2005)は南落ち・北落ちなど様々な走向・傾斜を持つモデルで解析を行い、その上で適切な断層パラメータを設定している。

設定した断層面上にグリッドを配置し、3次元構造として全国1次地下構造モデル(JIVSM)(Koketsu et al., 2012)を用いて、OpenSWPC(Maeda et al., 2017)の相反定理モードにより各グリッドと各観測点間のGreen関数を計算した。

そしてグリッドごとにGreen関数とすべりの基底関数から理論的な地震波を計算し断層面全体にわたって重ねて得た合成波形と、観測波形とを用いたマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン(たとえばIde et al., 1996)により震源過程を得た。インバージョンでは、各グリッドでのすべり方向を断層すべりから ± 45 度の範囲内に拘束し、またすべり量が滑らかになるような制約を課した。すべりの基底関数には継続時間2秒の三角形関数を用いた。滑らかさのパラメータはABIC最小となるよう選んだ(Fukahata et al., 2003)。

結果、震源から東方向へ破壊が進行する、まとまった破壊領域が得られた(図参照)。これをPark and Mori(2005)の結果と比べると、破壊領域の広さなど傾向はよく似ているが、Park and Mori(2005)の結果に比べて東方向へ破壊が伝播する傾向が顕著に現れた。なお、この地震の東側で約5時間後に M_j 7.4の地震が発生している。

3次元構造でのGreen関数は計算に時間を要することから短時間で震源過程解析の結果を得る場合にはGreen関数をあらかじめ用意しておく必要がある。このため、断層パラメータを変えるなどの臨機応変な解析や得られた結果の誤差評価等について課題がある。



Commonality and diversity of ruptures occurring at the same asperity: the 2015 Mw6.8 Miyagi-Oki earthquake and Mw6.0-6.4 quasi-repeating earthquakes

*Keisuke YOSHIDA¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

2011年M9東北沖地震後、宮城沖北部地域では2015年Mw6.8の地震を含む複数のMw>~6のプレート境界地震が、その規模を少しずつ変えて、繰り返し発生している。本研究では、同一のアスペリティを共有して発生する異なる地震の発生過程の共通点と相違点、そしてその原因について知見を得る目的で、Mw6-6.8地震の震源過程および周辺域で発生する繰り返し地震の発生頻度の時間発展とについて調べた。

最初に、対象域周辺地震の相対位置を、地震の波形相関とカタログ値を用いた Double-difference法により求めた。その結果、この地域においては、東北沖地震直後から繰り返し地震が非常に短い繰り返し間隔で発生していることが分かった。東北沖地震の余効すべりに伴う loading rateの増加により、周辺域の地震活動が活発化していると考えられる。2002年の Mw6.4地震、2011年3月の Mw6.0地震、2011年7月の Mw6.3地震、2012年の Mw6.3地震、2020年4月の Mw6.3、2015年 Mw6.8地震、2020年の Mw6.3地震が、非常に近い位置で破壊を開始したプレート境界型地震であることが分かった。

次に、観測波形の deconvolutionにより 2015年 Mw6.8の地震および近接する5つの Mw6.0-6.4地震のみかけの震源時間関数を求め、source inversionにより、震源過程を推定した。その結果、これら6つの Mw6.0-6.8地震が、震源から西側にある同一のパッチを繰り返し破壊していたことが分かった。6つの地震のいずれの場合でも、破壊は、最初、西側パッチで開始して、主として西側に伝播した。2002年 Mw6.4と2012年 Mw6.3の地震、2015年 Mw6.8地震の場合には、西側パッチの破壊後に、更に東側のパッチも破壊したのに対して、それ以外の地震は、西側パッチのみしか破壊しなかった。

西側パッチにおけるモーメント解放量は、東北沖地震前後、破壊の連動の有無にかかわらず、同様の 2.5×10^{18} Nm (Mw6.3)程度が多かった。ただし、2011年3月の Mw6.0の地震の場合では、 9.1×10^{17} 程度で、滑り量・応力降下量がそれ以外の時期の半分程度に小さかった。この地震は、東北沖地震時に一回滑った直後に発生したため、強度の回復量が平時にの地震時に比べて小さいままだったことにより説明できるかもしれない。

2015年 Mw6.8の地震の場合にも、西側パッチのモーメント解放量は約 7.3×10^{18} Nm程度となり、同じパッチの滑り量・応力降下量が平時よりも数倍大きくなった。西側パッチ破壊の直後に生じた東側パッチの滑り量も大きく、両パッチで同程度のモーメント解放が行われた。この地震の際に、小繰り返し地震から示唆される loading rateが、他の地震の際と大きく変わっていたようには見えなかった。一方で、この地震と前回の地震の間の繰り返し時間は3年程度と比較的長く、同じ系列の繰り返し地震の発生個数は、前の繰り返し時間のその2~3倍程度になっていた。

2015年の地震の際にだけ滑り量が大きくなった理由は明らかではないが、一つの可能性として、西側パッチと東側パッチの連動でトータルの断層サイズが大きくなったことに伴い、滑り量も大きくなったことが考えられる。2015年の地震の前には、西側パッチ・東側パッチが間の領域と共に滑り遅れることにより、同じ loading rateでもせん断応力の増加量は小さくなり、地震の再来にも時間が掛かったのかもしれない。ただし、2002年や2020年の地震の際にも、二つのパッチの連動破壊が生じたが、その際には西側パッチの滑り量は平時と大きく変わらなかった。また、2015年の地震時にも西側パッチと東側パッチの間の領域ではパッチ内に比べて小さな滑りしか生じさせなかった。異なる可能性として、2015年 Mw6.8地震発生前には、それ以

外のMw6-6.4地震よりも、パッチ内のせん断応力・断層強度が高いレベルになっていたのかもしれない。2012年の地震の際には、破壊が西側パッチだけでなく、東側の浅部側にも伝播した。流体が破壊域を通過して浅部側に移動し、間隙水圧が減少するようなことが起こったのかもしれない。2015年 Mw6.8地震前の断層サイズが平時よりも大きくなっていたために、繰り返し期間および繰り返し地震の個数がそれ以外の時よりも大きくなり、地震前のパッチ内せん断応力も大きくなり、大すべりを生じさせた可能性が考えられる。

Relationship Between Variations in Source Duration and Occurrence Areas of Earthquakes

*Goki Irie¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

地震の震源過程は、地震モーメント放出の時間変化を表す震源時間関数を推定することで議論されることが多い。一般にM6以上の規模の大きな地震については詳細に震源過程が調べられることが多いが、中小規模の震源時間関数を系統的に調べた研究は多くない。また地震ごとの破壊継続時間の違いについて、マグニチュードとの関係性は頻繁に議論されているが、例えば内陸地殻とプレート境界、スラブ内などの発生場所によるの違いはあまり理解されていない。

本研究では、地殻内地震として2008年岩手・宮城内陸地震の余震、プレート境界地震として茨城県南西部のフィリピン海プレート上部境界の地震と千葉県北西部の太平洋プレート上部境界の地震、スラブ内地震として宮城県沖のスラブ内地震（2003年宮城沖地震の余震）について、それぞれの領域で発生した $3.7 \leq M \leq 3.9$ について、Yoshida(2019)の手法に従い時間領域繰り返しデコンボリューション法を用いて震源時間関数を求め、そこから破壊継続時間を推定した。本講演では、各領域の相対的な継続時間の違いについてなど議論する。

Do deep low frequency earthquakes have the similar rupture growth process to ordinary earthquakes?

*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹

1. Tokyo Institute of Technology

地震のスケーリング則は地震の破壊プロセスを特徴づける基本的な経験則である。通常の地震については、地震モーメント(M_0)が継続時間(T)の3乗に比例するスケーリング則 ($M_0 \propto T^3$) が成り立つことが知られている一方で、プレート境界で発生するスロー地震については、Ide et al. (2007)により、低周波地震(LFE)からスロースリップイベント(SSE)に至るまで広帯域なスケーリング則として、継続時間が地震モーメントに比例する関係 ($M_0 \propto T$) が提唱されている。しかしながら、通常の地震は微小地震から巨大地震まで連続的に存在していることから、一連の自己相似的な破壊の成長で説明できる一方で、スロー地震については、全く異なるスケールのスロー地震（例えばLFEとSSE）がそれぞれ別の成長過程を持つ可能性がある。そこで本研究では、プレート境界および火山深部の両方で発生するLFEに関して、地震モーメントと継続時間を精度良く推定し、その関係から成長過程について考察する。

以下の3つのステップで地震モーメントと継続時間を推定した。まず、地震波形のエンベロープに階段状関数をフィッティングさせることで、継続時間と振幅を推定した。コーダ波形を模擬するため、階段状関数には指数関数的減衰も考慮した。エンベロープは1-20 Hzのフィルターをかけたtransverse成分の波形から作成した。次に、理論波形を用いて同じ解析をすることで、震源での継続時間と地震モーメントと、ここで推定されるパラメータとの関係を経験式として推定した。最後に、この経験式を用いて、LFEについて推定された継続時間と振幅から、継続時間と地震モーメントを求めた。このように本研究では、実波形の解析にはロバストな推定のために単純化された関数を用いる一方で、理論波形を用いたキャリブレーションを行うことで、グリーン関数の畳み込みの影響やフィルターのバンド幅の影響を除去していることが特徴である。

この解析を蔵王火山の深部で発生しているLFEと愛媛県西部のプレート境界で発生しているLFEに適用した。得られた関係は、火山型・プレート境界型ともに、通常の地震 ($M_0 \propto T^3$) に近かった。この結果から、LFEが通常の地震と同じような成長過程をもつ破壊プロセスであることが示唆される。また、得られた地震モーメントは同程度の継続時間を持つ通常の地震と比較して2桁程度小さく、破壊伝播速度が同程度であるとする、応力降下量も2桁程度小さくkPaオーダーであることを意味している。

What Actually is the Vertical Shock Verbally Reported for Shallow Earthquakes?

*Koji UENISHI¹

1. Univ. of Tokyo

Currently we are investigating the mechanical backgrounds behind two different types of distinct seismic shaking that we may directly experience, even at the same place. One has rather long duration arising from interlocking earthquakes, seismic clusters or earthquake swarms. For example, the recent off the Coast of Fukushima Prefecture earthquake at 23:36 JST on 16 March 2022 itself (moment magnitude 7.3) has records of long duration of shaking of about two minutes, and in addition, it had a foreshock just two minutes before, at 23:34 JST. Hence, the total duration of shaking for this earthquake might be considered to be as long as four minutes. For a deeper understanding of the generation mechanism of this and other seemingly complex rupture processes, we are performing global observations of large-scale material behavior and more local, smaller-scale tracing of development of ruptures and waves in two-dimensional linear elastic brittle solids. The solid materials have sets of digitally fabricated small-scale multiple cracks modeling large-scale geological fault planes that are under quasi-static external loading and dynamic impact (see e.g. Uenishi and Nagasawa, *SSJ Fall Meeting, 2020, Procedia Struct. Integr.*, 2022, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 2022).

The other shaking we are paying attention to is the sudden vertical shock that can be felt near the epicenters of shallow earthquakes, even with smaller magnitudes. The strong shock, including that experienced onboard a ship at sea (seaquakes), has been verbally reported quite often for recent earthquakes. However, as reported in Uenishi (*Physics Today*, 2021), while the shaking of long duration caused by (interlocking) earthquakes occurring usually in the far field seems to be relatively correctly (i.e. similar to what we feel) recorded, the abrupt shock coming directly from "bottom" does not seem to have become rightly "visible" in seismograms so far. Rather, the presence of strong shock has been only indirectly supported by several elastodynamic analyses (Uenishi and Sakurai, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 2000, *Int. J. Prot. Struct.*, 2014; Uenishi, *ASME J. Appl. Mech.*, 2012) of the unique failures of surface and underground structures generated by the seismic waves in the near field. Here, we shall try to describe some advancement in "unveiling" the mechanical characteristics of the shock by treating recent earthquake swarms attracting considerable attention and other small earthquakes probably drawing much less attention.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680. The author is grateful to the generous support provided by the Construction Engineering Research Institute Foundation in Kobe, Japan.

Outline and radiation efficiency of stochastic source time functions

*Shiro HIRANO¹

1. Ritsumeikan Univ.

地震時の断層滑り速度を断層面に渡って積分した震源時間関数 (STF) は、個々の地震の特徴を表わし、かつ地震波形インバージョンによる可観測量であるため、多くの研究において着目されてきた。また、個々の STF は高周波の擾乱に富み複雑かつ個性的であるが、統計的には多数の経験則が知られ、それらの特徴を再現するための物理モデルや近似式も古くから多数提案されてきた。Hirano (2022: Web リンク参照) は、ある種の確率微分方程式の解2つの畳み込みを STF と見做すことで、確率的に揺らぐ高周波成分を持った STF (以下、このモデルを S-STF と呼ぶ) を理論的に生成することを提案した。従来の決定論的あるいは確率論的モデルの多くは、STF についての経験則をごく部分的にしか満たさないものであったが、S-STF モデルでは、STF が ω^{-2} モデルに従うこと、モーメント (すなわち STF の時間積分) の時間発展が時間の3乗に比例すること、およびモーメントの規模別頻度が GR 則に従うことが確認された。

S-STF モデルは純粋に数理的なモデルであり、その物理的実体が何であるかは議論の余地がある。Hirano (2022) が提案したひとつの可能性は、2つの確率過程が、断層面上で空間積分された応力降下速度と、同じく断層面上で空間積分された Green 関数ではないかというものであった。そこで本研究では、その可能性の下で成立する震源の力学的性質を明らかにする。

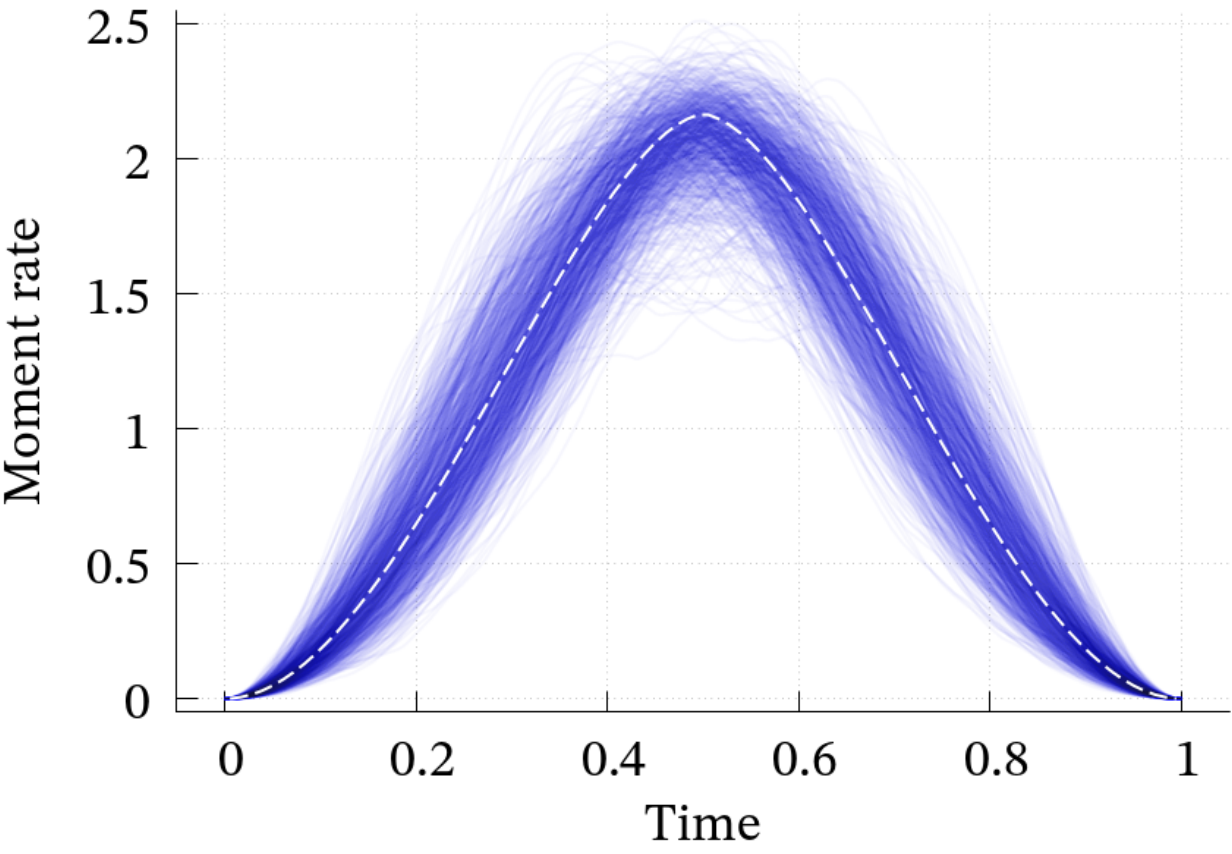
断層面上で空間積分された応力降下速度が S-STF モデルで仮定される確率過程ならば、断層面全体に渡る巨視的な滑り弱体化曲線までもが再現されることが、既に判明している。そこで今回は、巨視的な破壊エネルギーを計算する。これは積分量なので、確率過程に特有の高周波数ノイズにはさほど依拠しないであろう。そこで数学的・数値的な考察により、S-STF の低周波数成分だけを近似するモデルを考案した。これを用いると、S-STF は2つの楕円型分布 $(a^2 - t^2)^{1/2}$ の畳み込みで近似され、それが先述の、多数の数値解の平均とよく一致することも確認できる (図)。ただしここで定数 a は確率過程の持続時間であり、2つの異なる値を取りうる。そこで応力降下速度の持続時間を a_1 、Green 関数の持続時間を a_2 として、比 $A := a_1/a_2$ が様々な値を取る状況を考える。 A が小さいほど、応力の弱体化が滑りの初期に終わってしまうことを意味する。言い換えれば A は、地震の最終滑りを $D_{\max}$ とするとき、臨界滑り量の割合 $D_c/D_{\max}$ と正の相関を持つ。これに加えて、震源物理学において頻繁に用いられる指標である応力比 $S = (\text{strength excess})/(\text{stress drop})$ を与えると、震源からの放射効率 η が定まる。そこで関数 $\eta(A, S)$ の特徴に基づいて、震源の物理的特徴を議論することが可能になる。

まず、関数 $\eta(A, S)$ の特徴が示す事実を列挙する：

- 1) 応力降下に要する時間の比 ($=A$) が長いほど、放射効率 η は下がる。
- 2) η が非負という制約から、応力比 S が大きいほど A の取りうる値は小さくなる。

以下、これらについて物理的解釈を考える。 A は $D_c/D_{\max}$ と正の相関を持つことから、上記2つにおいて A を $D_c/D_{\max}$ と読み替えれば、これらは定性的に既知の事実と一致する。よって物理的に大きな瑕疵は無いであろう。その上で、 $D_c/D_{\max}$ ではなく A について上記が言えるということは、 A , η , S の3者間に関係があり、2つを決めれば残り1つが自動的に決まりうることを意味する。既存研究において、 A がどのように決定されるかは未知であったが、ここではそれを理解するための有益な制約条件が得られたことになる。また A はインバージョン解析によって得られる STF の低周波数成分から推定可能な量であるため、個々の地震についてもパラメータ間の関係を議論する筋道が示された。

謝辞: 本研究はJSPS科研費18K13637, 22K03782の助成を受けたものである。



On shear localization by thermo-chemical pressurization and following destabilization and migration of the shear-localized zone

*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto University, DPRI

地震時の断層帯では、高速滑りに伴う摩擦熱によって鉱物の化学反応が進行する場合がある。Platt et al. (2015)は、左右対称な断層帯の高速滑り時の一次元モデルを考えて、既存の間隙流体および鉱物の熱分解反応によって生じる流体の圧力上昇（thermo-chemical pressurization）によって、断層中心にピークを持つ剪断集中帯の厚みが数十マイクロメートルとなることを報告した。Platt et al. (2014)およびRice et al. (2015)は、同じ力学モデルを用いた数値計算をより長い時間スケールで行い、剪断集中帯のピーク位置が断層中心から移動することを報告した。この挙動は流体の拡散と未反応の鉱物の枯渇によって引き起こされたとされているが、その詳細な原理については不明な点が多い。

Platt et al. (2015)のモデルで考慮されている主な機構は、慣性と体積力を無視した連続体の運動方程式（力学平衡）、速度依存摩擦構成則、流体の質量保存則、エネルギー保存則、反応速度論に従う鉱物の熱分解反応である。本研究ではPlatt et al. (2015)に倣い、代表的な化学反応として方解石の熱分解反応に着目した。時間について一次の前進差分、空間について二次の中心差分をとった数値積分を、上述の機構を表現した偏微分方程式について実行することで、Platt et al. (2015)の計算結果を再現するコードを自作した。再開発したコードを用いた数値実験の結果、Platt et al. (2014)およびRice et al. (2015)によって報告された剪断集中帯の移動が再確認された。また、剪断集中帯が移動する方向は常に一定ではなく、採用するグリッドサイズやステップ数によって左右どちらにもなりうることがわかった。この事は、左右対称な解がある時点で不安定化し、数値計算の丸め誤差の増大が数値解を選択している事を示唆する。すなわち、剪断集中帯の移動が観測されたこれらの数値解は、今回のモデルの解析解に対する適切な近似解として扱うことができないと言える。「初期反応率が一樣」といった単純な条件の問題設定では、滑り速度履歴や応力履歴を与えても、地震性滑り後の反応率の空間分布は一意には定まらない。

この問題を解決する手段の一つは、予め初期条件の対称性を崩してやることである。そこで、初期反応率を空間不均質とした場合の解について調べた。初期反応率が空間座標の線形関数であるとした場合、時間ステップの増加に伴って剪断集中帯のピークが初期反応率が低い側へと移動する挙動が確認された。これは、断層中心の両隣のグリッドで初期反応率が異なる場合、より反応率が低いグリッドにおいて反応が進行しやすいため、断層強度がより弱化することで剪断集中のピークがそちらに移動するためであると解釈できる。移動が発生した解の収束性テストを実施した結果、空間グリッドのサイズについて二次のオーダーで数値誤差が小さくなることが確認された。これは、二次の中心差分を取ったことによって生じる数値誤差の理論値と調和的である。これらの結果から、初期設定で対称性を崩してやることにより、解の一意性が担保された問題設定となり、本モデルの数値解を解析解の近似として扱う事ができる様になると言える。

本講演では上述の内容に加えて、初期反応率の空間不均質性を導入したモデルを用いて予想的に実施した数値実験の結果についても発表する予定である。

The earthquake interoccurrence time distribution in sheared granular model

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹

1. Osaka University

地震の発生間隔の分布を明らかにすることは、長期的な地震発生確率の予測精度を高める上で重要である。このため、地震の発生間隔の分布関数を決定する研究がこれまで多数行われてきた。ここで、地震の発生間隔は大きく2つに分類することが出来る。1つはinteroccurrence timeであり、1つの断層で発生する最大級の地震(固有地震)の発生間隔のことである。もう1つはrecurrence timeであり、1つの断層で発生する全ての地震の発生間隔である。近年の観測は、interoccurrence timeがワイブル分布に従うことを示唆している(Abaimov et al., 2008; Hasumi et al., 2009)。一方、そうした分布が、地震のダイナミクスに重要な役割を果たす可能性がある、断層ガウジのstick-slipにおいても観測されるかは未だ明らかにされていない。そこで、我々は個別要素法により剪断粉体をモデル化し、interoccurrence time分布が観測と同様、ワイブル分布に従うかを調べた。更に、interoccurrence time分布は外部からの応力摂動によってどのように変化するかを調べた。本発表ではこれらの結果を報告する。

Numerical experiments using a friction law both for fast and slow sliding

*Takane HORI¹, Hideo Aochi²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey)

To realize various fault slip behavior as regular and slow earthquakes, I assume a simple friction law. In the friction law, the frictional strength decreases due to fault slip and recovers with time. These two processes along the fault, slip-weakening and healing are the intrinsic ones to model regular and slow earthquake sequences. Here, an evolution equation of the frictional strength proposed by Nielsen et al. (2000) is used. In this equation, there are two frictional parameters, d_c and t_c , which represent a characteristic displacement for slip-weakening and a characteristic time for healing, respectively. The balance of these two parameters controls how frictional strength evolves depending on the fault slip history. To examine fault slip behavior with the evolution equation, a single degree of freedom elastic system, composed of a block and a spring with constant loading is introduced. The block starts to slip following the strength evolution equation when the shear stress acting on the contact surface of the block reaches the strength. On the other hand, the block is in stationary contact if the shear stress is less than the strength. Note that this is a classical constitutive law without direct effect in a rate- and state-dependent friction law (Nakatani, 2001). To examine the slip behavior depending on the above system, I modified a simulation code used in Aochi and Matsu'ura (2002), which introduces more complex evolution equation of fault strength. Some preliminary results show that both fast and slow fault slip sequences can be demonstrated depending on the two frictional parameters. These slip behaviors are similar with regular and slow earthquakes. One interesting behavior in slow fault slip sequences here is that both the stress drop and the recurrence time interval are much smaller than those of the fast fault slip sequences but the peak strength is identical. Furthermore, the slow slip behavior is similar with that found at Izu-Bonin Trench (Fukao et al., 2021).

Investigation of earthquake source scaling laws using dynamic rupture simulations with a hierarchical patch structure

*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹

1. Kyoto University

地震破壊の成長過程とそれに伴う地震波の放射を理解することは、地震の物理や地震災害のために重要である。地震の震源パラメータのスケーリング則は、地震破壊の成長やその抑制に対する物理的過程を示唆しているが、スケーリング則の成り立ちが断層帯の物性の不均質性によるものかスケールに依存する摩擦構成則の特性によるものかどうかは明らかでない。そこで、本研究では、すべり弱化摩擦構成則に基づき、破壊エネルギー G_c の階層構造を取り入れた断層上の自発的な動的破壊モデルが、震源パラメータに関するいくつかのスケーリング則を説明できるという仮説を検証する。このシミュレーションはスペクトル要素法で行われており、Aochi and Ide (2003)によって提案された効率的な計算手法を取り入れることで、数オーダーのスケールの地震破壊を扱うことができる。まず、破壊エネルギー G_c の階層的なパッチで特徴づけられた断層上で、幅広いマグニチュード（M2からM6）の地震のシミュレーションを行った。次に、計算した地震の震源パラメータに関する様々なスケーリング則（地震モーメントと震源継続時間、マグニチュードと発生頻度の関係、モーメントの成長と時間、破壊エネルギーと地震性すべりなど）を定量化した。そして、モデルパラメータの値を変化させたときにこれらのスケーリング則がどのように変化するかを分析した。予備的な結果として、今回調べたモデルパラメータのうち、 S 値がスケーリング則のトレンドに大きな影響を与えており、スケーリング則がモデルパラメータの取りうる値の範囲を限定することが示唆された。今回得られたスケーリング則に影響を与える重要なモデルパラメータを特定し、このモデルを2次元断層で実装したときの取り組みを報告する。

Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kears²

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

地震の強震動分布を決定する要因の1つである地震の破壊伝播方向を、古地震に対して決めることは重要な課題である。近年、過去の地震の際に観測された条線と単純な平面断層の動的破壊モデルから、地震時に断層面上で記録される条線の湾曲の向きと断層の破壊伝播方向との間に関係性があり（Kears et al., 2019; Kears and Kaneko, 2020）、古地震学的な観測から地震の破壊伝播方向を推定できる可能性が提示された。一方で複雑な形状を持つ断層で観測された条線には、平面断層モデルから得られた関係性とは湾曲の凹凸が逆向きになっているものも報告されている。本研究ではこのような逆向きの湾曲をabnormal convexityと呼ぶ。このような逆向きな湾曲の条線を説明するため本研究では地表付近に形状を与えた断層や断層全体に複雑な形状を持つ断層モデル（rough fault model）を用いて地震破壊のシミュレーションを行った。その結果、abnormal convexityを持つ条線が再現された。断層が平面でない場所では断層面上の初期応力が変化し、特に横ずれ断層については断層の傾斜が急激に変化する場所でせん断応力の鉛直成分が変化することによって、平面の場合とは逆向きの湾曲が起きていた。また、初期応力が深さとともに増加するモデルでは地表近くでabnormal convexityが得られるようなパラメータ範囲が狭く、地表付近で湾曲の凹凸を逆にするのは難しいこともわかった。本研究の結果から、急激な断層形状の変化がある地点では条線の湾曲が逆向きになることもあるため、条線の湾曲から断層の破壊伝播方向を推定する際には断層の形状が比較的単純な場所での観測を用いるべきであると考えられる。

Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation (Part 2)

*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

中央構造線断層帯は、日本で最も活動的な断層帯のひとつである。この断層帯のうち、讃岐山脈南縁東部区間、同西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間を対象として、連動可能性とその条件を検討するため、断層帯の置かれた条件を反映した動力学的震源モデルを構築し、動的破壊シミュレーションをおこなう。前回報告（加瀬・浦田，2021）では、既存情報を基にプロトタイプの震源モデルを構築し、試計算をおこなった。今回は、断層モデルと媒質モデルを見直すとともに、より現実的な応力場モデルを考慮した震源モデルを用いた結果を報告する。

断層モデル各区間の走向と長さは、都市圏活断層図（後藤・他，1998；中田・他，1998；岡田・他，1998；堤・他，1998；後藤・他，1999；中田・他，1999；岡田・他，1999；堤・他，1999；中田・他，2009；岡田・他，2009；岡田・他，2014）を基に、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間が並行する部分について修正を加えた。傾斜角と地震発生層の深さについては、地震調査研究推進本部（2017）では中角度と高角度を併記しているが、有限要素法による静的解析により、中角度を設定した場合には、断層運動により相当の上下変位が生じ、地表での変位分布に関する既往の調査結果、および、変位様式や地形と整合しないことが示されている（文部科学省・産総研，2022）ことから、高角度（鉛直）のみを扱い、断層幅は20 kmとした。媒質モデルは水平3層構造とし、伊藤・他（1996）、Nakajima and Hasegawa（2007）の紀伊半島・中国四国地方のモデル、文部科学省・東京大学地震研究所（2020）、日本列島基盤岩類物性データベース（大熊・金谷，2007）を参考に決定した。

主応力軸の向きは、佐々連における応力解放法による応力測定データ（Tanaka, 1986；斎藤・他，1988）より、最大主圧縮応力（ σ_1 ）は東西方向、最小主圧縮応力（ σ_3 ）は南北方向とした。 σ_1 と σ_3 の大きさは応力測定データを参照、また、中間主応力（ σ_2 ）は鉛直でかぶり圧に等しいとし、それぞれ深さに比例するとした。更に、応力降下量と強度の初期値の深さプロファイルを、深さ10 kmまで応力降下量、強度ともに深さに比例し、10 km以深では強度は一定値、応力降下量は深さとともに減少し、深さ15 kmでゼロ、15 km以深では負の応力降下量となるように設定した。その上で、予察的な数値計算で断層長とすべり量のスケージング則（松田・他，1980）を満たす応力降下量のプロファイルを求め、動摩擦係数を得た。また、静摩擦係数は、強度と応力降下量の比（Andrews, 1976；Das and Aki, 1977）を1.3と仮定して求めた。摩擦係数は破壊の始まる領域の走向によって異なるが、動摩擦係数は概ね0.1～0.5程度となった。臨界すべり量は、地表で2.5 m、深さ1 kmまで深さとともに減少して、1～10 kmでは0.50 m、10 km以深では深さとともに増加するとした。

断層面の境界条件には、Coulombの破壊基準とすべり弱化的摩擦構成則（Ida, 1972；Andrews, 1976）を仮定し、弾性体の運動方程式を差分法（Kase and Day, 2006）で解くことによって、断層面上の破壊伝播過程を求めた。

σ_1 の向きと破壊の始まる領域の走向によって各区間の応力状態が異なるため、それに対応した様々な連動パターンが得られた。例えば、讃岐山脈南縁東部区間東端から破壊が始まる場合には、4区間のほぼ全域にわたって破壊が広がり、石鎚山脈北縁区間から破壊が始まる場合には、石鎚山脈北縁西部区間が連動する。それに対し、石鎚山脈北縁西部区間から破壊が始まる場合には、破壊はこの区間に留まる。連動性は、初期応力状態に強く支配されるが、初期応力状態が同じでも、破壊開始点が異なると連動のパターンが異なる場合もある。また、複数区間の連動が生じるのは、連動する区間の強度が小さく、応力降下量が大きい場合であること

が多いため、すべり量がスケーリング則で得られる値よりも大きくなりがちであるが、観測値とは整合的である場合もあり、詳細に検討する必要がある。

今後、応力場推定の結果を参照して、断層走向に沿った主応力軸の向きの変化を反映させた応力場モデルや、上記と異なる応力降下量と強度の深さプロファイルを用いたシミュレーションもおこない、1回の活動によるすべり量を説明しうる地震シナリオを求めるとともに、震源モデルの違いによる地震シナリオのばらつきについても検討する。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」として実施されました。

Why do Gutenberg-Richter b-values decrease with time prior to large earthquakes? Insights from rate-and-state earthquake cycle simulations with frictional heterogeneities

*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹

1. Kyoto University

前震活動のメカニズムを理解することは、震源物理学の根本的な理解のみならず地震の予測にもつながりうる重要な問題である。大地震前の地震活動の観測により、Gutenberg-Richterの累積地震数とマグニチュードの関係における傾き、すなわちb値が、大地震の発生前に減少することが多数観測されている。例えば2011年Mw9.0東北地方太平洋沖地震では、震源域におけるb値が本震前に減少したことが報告された(Nanjo et al., 2012)。しかし、観測されたb値の時間変化を物理的に解釈することは依然として困難である。そこで本研究では、摩擦不均質性を伴う地震サイクルシミュレーションを用いてb値の時間変化の再現を試みるとともに、b値の時間変化の要因について検証する。まず、本震開始前に活発化する前震がみられるような摩擦パラメータの範囲を特定し、モデル内の前震の時空間分布に注目すると、観測と定性的に類似した複雑に遷移する前震分布が現れた。また、得られた前震を統計的に解析しb値を求めたところ、モデル内においても本震前にb値が減少することを確認できた。さらに、活発化する前震活動がみられる際の断層面のせん断応力は、安定すべり領域においては時間とともに増加していた一方、断層全体の平均せん断応力はほぼ一定であった。これらの結果から、大地震の前にb値が減少する要因は、多くの前震によって安定すべり領域内のせん断応力が増加し、安定すべり領域内においても地震性すべりが起こりやすくなったことで、より大きな地震が時間とともに起こりやすくなったためであると考えられる。

Numerically reproduced segments of short-term slow slip events in the Nankai region

*Takanori MATSUZAWA¹, Bunichiro Shibazaki²

1. National Reserach Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute

1. はじめに

南海トラフにおける深部微動の発見(Obara, 2002)以降, 世界各地のプレート境界においてスロー地震に関する研究が精力的に進められてきた. 活発な微動に同期して短期的スロースリップイベント(以下, 短期的SSE)が観測されるため, これらは合わせてEpisodic Tremor and Slip(以下, ETS)とも呼ばれる. また, 微動は短期的SSEを含めた, 地下のすべりや応力の状況を知るうえでの指標となっているとも考えられている(Obara and Kato, 2016). 南海トラフにおいては, 様々なスロー地震に関する知見が得られるとともに, 微動の発見から20年以上経過したこともあり, 長期のスロー地震活動のカatalogが利用可能となっている. 本研究では, 南海トラフで発生するSSEの数値シミュレーションにおいて, 長期間(複数地震サイクルのスケール)にわたって計算した結果をもとに, 再現された短期的SSEのセグメント形成について, 実際のスロー地震活動とも比較しつつ, 議論する.

2. 計算手法・モデル

使用した数値モデルにおいては, Matsuzawa et al. (2010, 2013)と同様にカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を仮定して, 各要素上でのすべり速度および摩擦の時間発展を計算した. 計算領域は東海地域から日向灘の範囲とし, 沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートの境界面の形状を約17万個の三角形要素で表現した. 短期的SSEの再現においては, 短期的SSEの発生している深さ(28km以深)において低い有効法線応力を仮定するとともに, 観測された微動活動の分布に基づいて, 摩擦則における(a-b)値が負となる領域を短期的SSE領域として設定した. 東海地域, 豊後水道および日向灘の長期的SSE領域については, Matsuzawa et al. (2013)と同様に, 有効法線応力が周囲よりやや低い領域の沈み込み方向の幅を広く設定した.

3. 結果・議論

数値計算結果から短期的SSEを抽出するため, 各断層要素上で基準すべり速度(以下の場合, 载荷レートの10倍)以上の速度を示した時間帯を短期的SSEとして定義した. さらに同時帯に周辺5km以内の断層要素において同様の基準を満たすすべりがある場合に, 同一イベントとした. これを, 新たな同一イベントの判定がなくなるまで繰り返した. こうして得られた短期的SSEのうちMw4.5以上のイベントについて, すべり領域のstrike方向の両端の位置を取り出し, 地震サイクル2回分(約217年)の計算結果から空間の頻度分布をとったところ, 局所的なピークをもつ分布が得られた. このピークは短期的SSEのセグメント境界に対応するものとなる. このセグメント境界は微動分布が不連続となる箇所および, dip方向の微動分布(短期的SSE領域)の幅Wが大きく変化する箇所と対応しており, Wの分布のstrike方向の変化が数値モデリングによる短期的SSEのセグメント境界を特徴づけていることを示唆する. この結果を防災科研によって推定されている微動活動カatalog(Maeda and Obara, 2009; Obara et al., 2010)と比較したところ, 大局的な特徴については類似性がみられたものの, 例えば, 紀伊半島中北部などにおいて, 実際の微動活動はより細かくセグメント化されている傾向がみられた. これは, 実際の活動にさらなる不均質性が関与している可能性を示唆する. また, 地震サイクルスケールにおける活動セグメントの変化は顕著でなかった. ETSのセグメントの形成においては, 地震サイクルを通じた応力状況の違いは大きな影響を与えず, Wによって強く特徴づけられている可能性が示唆される.

Impact of Kuroshio meanders on a stationary slow slip event and local seafloor level change around the Nankai Trough

*Keisuke ARIYOSHI¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Takeshi Iinuma¹, Masaru Nakano¹, Demian Michael Saffer⁴, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi³, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC, 2. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University (now at Japan Meteorological Agency), 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. University of Texas, Austin

南海トラフ近傍に設置されたDONETや長期孔内観測システムによって、海溝型巨大地震固着域の浅部延長上のプレート境界面上において、スロースリップイベント (SSE) が繰り返し起きていることが明らかとなっている (Araki et al., 2017; Ariyoshi et al., 2021a)。昨年の秋季大会の講演では、2020年3月に発生したSSEについて、黒潮蛇行によってトラフ軸付近の海底圧力が減少したことで浅部側まですべりが延伸し、SSEが終息するタイミングで海底圧力がすべり域全体で増加したことを指摘した (Ariyoshi et al., 2021b)。本講演は、この特徴が過去の事例についても当てはまるのか検証することを目的としている。

その中で今回は、2012年2月のSSEと、2013年3～7月のイベントに着目した。2012年のSSEは、規模が同程度の他のSSEに比べて継続時間が有意に長い特徴がある。2013年のイベントは、DONETのBノード付近で海底圧力計に局所的な変化が生じたことが指摘されているが (Suzuki et al., 2017)、プレート境界面上でのすべりであるとすると、Mw 6程度のSSEであったことが期待される一方で、スロー地震活動に顕著な活発化はみられていないという矛盾を抱えている。

そこで、海洋モデル (JCOPE) を適用し、海底圧力の海洋変動成分を算出した。その結果、両期間中に黒潮蛇行が通過し、中規模渦と呼ばれる時空間スケール (数十～数百km、数日～数十日程度) で海洋擾乱が生じていることを確認した。2012年2月のSSEでは、海面高度の低下と共に海底圧力が減少し続けており、これが長い継続時間をもたらした要因の一つと考えられる。2013年のイベントでは、急激な海底圧力の変動がみられており、これによりBノード直下にある海山周辺の地殻流体が移動し、局所的な膨張が生じたと考ええると、局所的な海底隆起が説明できると考えられる。

これらの解析を検証する際に、スロースリップイベントや余効すべりは、海洋擾乱の中規模渦と同程度の時空間スケールとなっていることが分かった。このことは、海底地殻変動の多様性を理解するために、気象海象の擾乱などの影響も考慮する必要があることを示している。そこで我々は、スロースリップイベントの誤検知リスクの軽減や終息時期の予測向上を図るため、統合的な解析環境の構築を進めている。

A possible relation between Reidel shear band and rate- and state-dependent friction parameters

*Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda¹, Shun Watanabe¹

1. Kyoto University, 2. NIED

ガウジ層を挟んだ岩石摩擦実験を行うと、すべり方向に並行な剪断面(Y面やB面)だけでなく、すべり方向と斜交するRiedel shear band (R1面)と呼ばれる剪断面が形成される。R1面は、すべりの初期に生成され、定常になるとY面やB面でのすべりに移行することが、これまでの実験的な研究で知られている(e.g., Logan et al., 1992)。しかしながら、すべり距離が長くなると振る舞いが異なってくることも報告されている(Beeler et al., 1996)。本研究においては、大型2軸岩石摩擦試験機を用いたガウジ層を含む試料のvelocity step change testから得られたデータ(下田・他, 2020, 地震学会)と、実験後にサンプリングされたガウジ層の薄片観察結果(渡辺・他, 2021, 地震学会)との関係を議論する。大型岩石摩擦試験のメリットは、試料長が長いこと、回転剪断摩擦試験のように同じところを何度もすべらせることなくすべり量を長くできることであり、また、試料が大きいこと、すべり面の不均質状態を観察できるという特徴がある。実験は、長さ1.5m幅0.1m 初期厚さ3mm(実験中厚さ1-2mm)に敷設した変斑れい岩ガウジをおなじ変斑れい岩試料により上下から挟み防災科学技術研究所の大型2軸摩擦試験機を用いて行われた。3.3MPaあるいは6.5MPaの法線応力をかけたのち0.01mm/s, 0.1mm/s, 1mm/s の速度を行き来するvelocity step change testが行われた(下田・他, 2020, 地震学会)。実験中はAEセンサーによりstick slip eventから発せられる波動の測定も行われた。実験後、上側試料を垂直に持ち上げ、ガウジ層を露出させたのち、ガウジ層の採取が行われた。採取したガウジ層試料はエポキシ樹脂溶液につけられ、すべり方向断面の薄片が作成された。薄片には明瞭な境界すべり面(B面)とR1面が認められた(渡辺・他, 2021, 地震学会)。実験後にガウジ層上部から撮影した写真より、すべり面はR1面があまり発達していないと考えられる部分と、R1面が非常に発達している部分(およそ4箇所)に分けられ、いずれの実験においてもその位置に大きな違いはなかった。また、velocity step change testの際にAE eventの発生が認められ、その震源位置を推定すると、いずれもR1面が発達している部分と符合した。また、単位すべり量当たりのAE event発生数は、1mm/sへと速度を変化させた直後が最も多く~1.0個/mmであり、0.1mm/sでは~0.3個/mm、0.01mm/sでは~0.1個/mmと载荷速度依存性が見られた(渡辺・他, 2021, 地震学会)。上記の測定結果より、R1面の生成に関して以下のシナリオが考えられる。velocity step changeの直後からR1面の形成が始まりAE eventが発生する。R1面の形成が終わりB面によるすべりが卓越し定常状態となる。速度変化直後の摩擦係数の変動から摩擦パラメータの推定が行われることから、R1面の生成はa, b, Dcなどの摩擦パラメータに何らかの関連があると考えられる。

Poster session (1st Day) | Regular session | S17. Tsunami

[S17P] AM-P

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 12:00 PM ROOM P-3 (10th floor (Conference Room 1010-1070))

[S17P-01] Data assimilation using high-frequency radar for tsunami early warning: A case study of the 2022 Tonga volcanic tsunami

*Yuchen WANG¹, Kentaro Imai¹, Iyan E. Mulia², Keisuke Ariyoshi¹, Narumi Takahashi¹, Kenichi Sasaki³, Hitoshi Kaneko³, Hiroto Abe^{3,4}, Sato Yoshiaki³ (1. Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 2. RIKEN Cluster for Pioneering Research, 3. Mutsu Institute for Oceanography, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 4. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

9:30 AM - 12:00 PM

[S17P-02] Diversity of tsunami propagation caused by Nankai Trough earthquakes

*Yusuke Oishi¹, Takamasa Shinde¹, Takashi Furumura² (1. Fujitsu Ltd., 2. Univ. of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM

[S17P-03] Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source generation

*Hiroaki TSUSHIMA¹ (1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

9:30 AM - 12:00 PM

Data assimilation using high-frequency radar for tsunami early warning: A case study of the 2022 Tonga volcanic tsunami

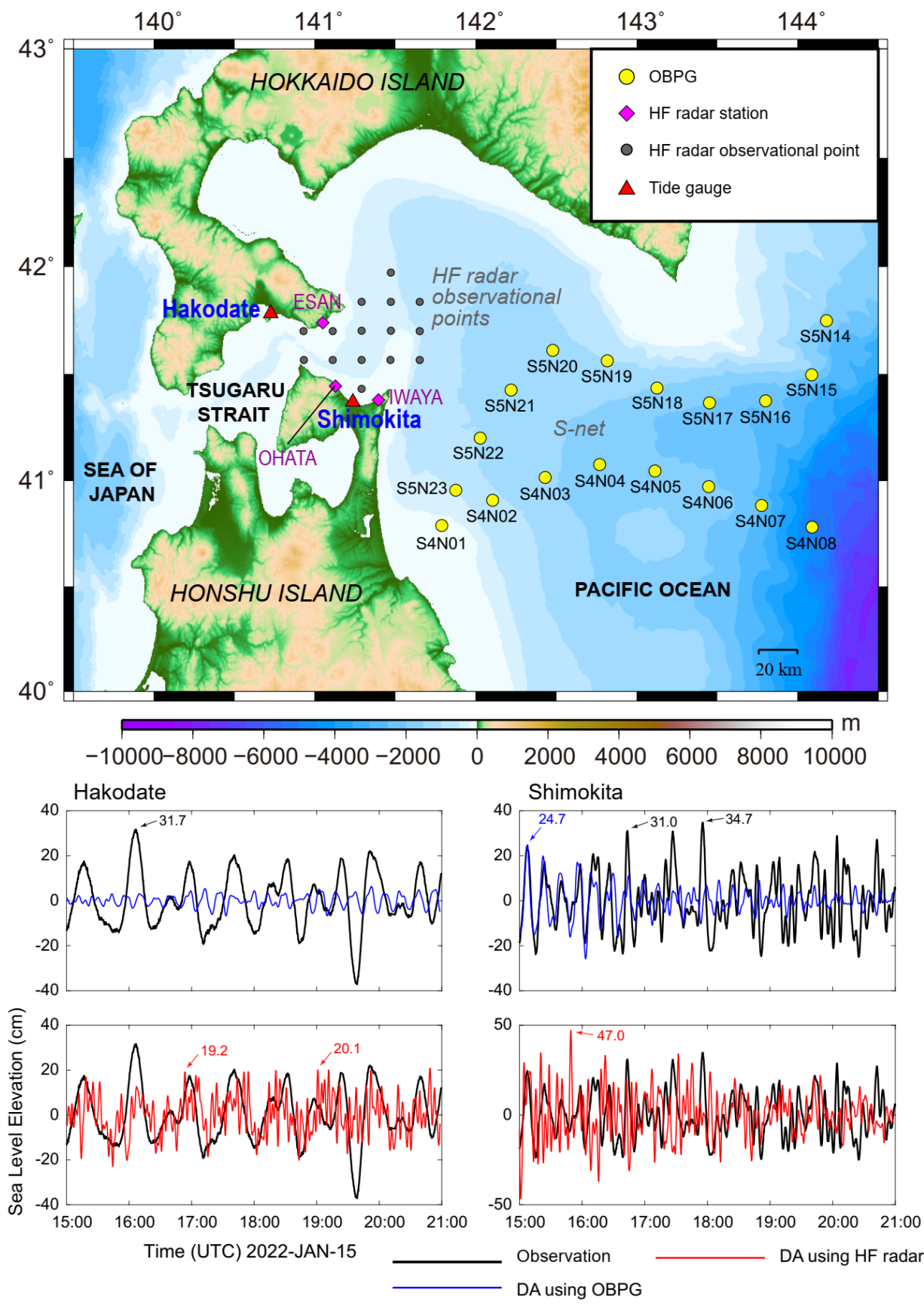
*Yuchen WANG¹, Kentaro Imai¹, Iyan E. Mulia², Keisuke Ariyoshi¹, Narumi Takahashi¹, Kenichi Sasaki³, Hitoshi Kaneko³, Hiroto Abe^{3,4}, Sato Yoshiaki³

1. Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 2. RIKEN Cluster for Pioneering Research, 3. Mutsu Institute for Oceanography, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 4. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

High-frequency (HF) radar monitors the sea surface current velocity and provides information for tsunami early warning. SeaSondeR, an HF ocean radar system in the eastern Tsugaru Strait, Japan, measured the tsunami-induced current velocity during the 2022 Tonga volcanic tsunami. This event was triggered by the eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano on January 15, 2022. As an air-coupled tsunami, the generating mechanism was complex, making it difficult to predict coastal tsunamis using traditional early warning methods.

We adopted the tsunami data assimilation approach, which reconstructs the tsunami wavefield using offshore data and does not require source information, to forecast the coastal tsunami waveforms. Observations from the HF radar and offshore bottom pressure gauges (OBPGs) were used as the input for tsunami data assimilation. The assimilation process started at 09:00 (UTC, hereafter) and forecasts were made at 14:00 and 15:00. The surface current velocity recorded by the HF radar reached the maximum (~ 0.25 m/s) at 13:00, which corresponded to a negative phase of ~ 2 cm sea level variation observed by OBPGs.

The forecasted waveforms were compared with the observed waveforms at Hakodate and Shimokita tide gauges. The assimilation results using OBPG accurately forecasted the tsunami waveforms at Shimokita, especially for the next 2 h after the forecast. However, the forecast underestimated the waveforms at Hakodate. The assimilation results using HF radar matched well with the observations at both Shimokita and Hakodate. Furthermore, for quantitative analysis, we adopted an accuracy index that considers the maximum amplitude in the next 2 h and 6 h after the forecast. At 14:00, the accuracy indices were 91% and 67% for the next 2 h and 6 h, respectively. At 15:00, it was 63% and 70% for the next 2 h and 6 h, respectively. The accuracy indices of the forecast using HF radar were higher than those using OBPG. Thus, we demonstrated the applicability of HF ocean radar system in tsunami data assimilation. This study is the first to apply tsunami data assimilation to early warning using real HF radar observations. The HF ocean radar system could be a good supplement to OBPG for monitoring tsunamis and providing information for data assimilation.



Diversity of tsunami propagation caused by Nankai Trough earthquakes

*Yusuke Oishi¹, Takamasa Shinde¹, Takashi Furumura²

1. Fujitsu Ltd., 2. Univ. of Tokyo

近い将来に高確率で発生が予測されている南海トラフ巨大地震に関して、中央防災会議により最大クラス（Mw9.1）の地震モデルが11ケース提案されており、被害想定や防災計画の基準となっている。一方で、14万平方kmに及ぶ想定震源域における実際の地震発生シナリオはより多様であることが想定され、これにより生じる津波の波高分布や到達時間にも高い多様性が想定される。そのため、より適切な津波対策に向けては、限られた最大クラスケースのみならず、南海トラフ域で発生する可能性のある様々なケースの津波の性質を統計的に理解しておくことが重要である。そこで本研究では、中央防災会議モデルを拡張することで多様な津波波源モデルを生成して津波シミュレーションを実施し、結果の統計的な性質を整理し、南海トラフ域で発生しうる津波に関する包括的な理解を目指す。始めに、中央防災会議モデルによる南海トラフ沿いの約5 km四方の大きさを持つ約5,700の小断層を組み合わせる様々な波源モデルを生成した。波源域の面積は1.6~14万平方kmの範囲で変更し、中央防災会議モデル同様に、南海トラフ沿いの各地の断層滑り量は、プレートの沈み込み速度に比例する設定とした。断層面上の滑り量分布についても、中央防災会議モデルの設定方針に倣い、波源域の背景領域の2倍の滑り量を持つ大滑り域を波源域の12~32%の面積で設定し、さらに背景領域の4倍の滑り量を持つ超大滑り域を波源域の2~9%の面積で海溝軸付近に設定した。なお、超大滑り域についてはある／ない場合の双方について検討した。大滑り域の位置については、波源域内を南北（深さ）方向、東西方向に移動したケースを想定した。以上により、Mw8.19~9.16の744ケースの津波波源モデルを生成した。次にこれらの波源モデルに基づく津波シミュレーションを実施した。ライズタイムは60秒として、断層全体が同時に破壊する設定とした。シミュレーションは解像度810 mで行い、地震により生成される津波の性質を理解するため、土佐湾、大阪湾、伊勢湾、東京湾に向かう湾外の地点における津波の波形について詳細な解析を行なった。各地点における最大波高は、Mwの増加とともにほぼ線形に増大する傾向が得られ、地震規模ごとの最大の津波波高の目安が得られた。また、超大滑り域がないMw9以上の地震による津波の各湾周辺の最大波高は、土佐湾、大阪湾、伊勢湾、東京湾でそれぞれ、2.79~5.13 m, 1.40~3.32 m, 0.39~0.67 m, 1.30~2.73 mであった。同じMw9以上の地震であっても、発生状況の違いによって、津波波高が41.2~57.9%小さくなるケースもあり、津波の多様性が高いことが確認された。さらに、超大滑り域を設定した場合の各湾周辺の最大波高はそれぞれ、5.84 m, 4.80 m, 1.11 m, 3.69 mであり、超大滑り域がない場合に比べ13.9~64.4%の津波波高の増大が確認され、特に伊勢湾での増大が大きかった。津波の波高には、Mwに加え、震源域からの距離の影響が大きいことが考えられる。大滑り域の中心を震央として、各湾周辺の地点と震央との東西距離と津波波高の関係性に着目すると、震央が各湾から遠いほど津波が小さくなる傾向は確認できたものの、距離に対して単調減少ではなかった。特に東京湾周辺の波高は和歌山県沖よりも高知県沖の震央に対してより大きくなる傾向もみられ、陸との反射を繰り返しながら津波が伝播する過程で、津波が効率的に増幅されるケースがあることが影響していた。また、超大滑り域による津波の増強の度合いは局所性が強く、超大滑り域がある場合の震央距離の減少に対する津波波高の増加は、超大滑り域がない場合に比べて大きい結果となった。最大波高の到達時間については、土佐湾沖や大阪湾沖では30分以内にそれぞれ744ケースのうちの51.6%と68.6%が集中し、東京湾沖では2時間から3時間の間に80.2%のケースが集中した。一方で、伊勢湾沖では特定の時間への到達時間の集中は見られず、地震発生から4時間後までに広く分布し、津波到来時間の事前予測の難しさが確認された。

Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source generation

*Hiroaki TSUSHIMA¹

1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

背景と目的

津波を早期に直接観測できる沖合の津波観測は、津波の即時予測に有効である。東日本大震災後、日本近海に海底観測網が急速に拡充され、その観測データを用いた津波予測の研究も格段に進んだ。本研究では、その1つであるリアルタイム津波波形逆解析に基づく予測手法に注目する。この手法では、地震発生時に瞬時に波源分布(初期水位分布)が形成されると仮定することが多い。一方、巨大地震では、断層破壊が長時間に及ぶなど、波源生成の時空間発展が複雑なことがあり、瞬時の波源形成の近似が不十分な場合がありうる。Tomita and Takagawa (2014)は、波源生成の時空間発展を考慮した波形逆解析に基づく津波予測を提案し、数値実験を通して巨大地震への有効性を示した。一方、波源の時間発展を表現するためのモデル・パラメータが増えると、時空間的なトレードオフが生じやすくなるため、瞬時破壊とみなせるような中小規模の地震津波に対して、かえって波源推定や津波予測の品質が低下するおそれがある。津波即時予測の場面では、破壊継続時間などがまだ明らかではないことも想定されるため、時空間発展を考慮した逆解析に基づく津波予測をより効果的に行うには、そもそも稠密な沖合津波観測データから波源の時間発展をどのくらい拘束しうるのかを把握しておくことが重要と考えられる。本研究では、数値実験でこの感度を調べるとともに、その実験結果に基づいて津波予測に適した津波波形逆解析について議論する。

実験方法

稠密な沖合観測網S-netがある日本海溝沿いを対象領域に、数値実験を実施した。まず、2011年東北沖地震の断層モデル(Fujii et al., 2011)から初期水位分布(実験での正解波源)を計算し、それを基にした津波伝播数値計算で得られた波形を観測波形だとみなした。そして、沖合津波観測点約170点の波形を用いて、波源の時間発展を考慮した津波波形逆解析で初期水位分布を推定し、正解波源をどのくらい復元できるかを評価した。とくに、逆解析で仮定した時間発展の長さが、正解波源のそれと異なる場合に、波源の時間発展をどのくらい拘束できるかに着目した。正解波源の時間発展としては、問題を単純にするため、破壊伝播速度は無限大とし、ライズタイムのみ様々な値を仮定した(最長5分)。波源推定には、Tsushima et al. (2009)の津波即時予測向けの波形逆解析を、波源の時間発展を考慮できるように改良したものをを用いた。具体的には、初期水位の発生を表現する基底関数を時間方向に1分間隔で複数配置した。実験では、基底関数の個数を増減させて、逆解析における波源生成の総時間長をさまざまに変化させた(最長10分)。破壊伝播速度は無限大を仮定した。拘束条件としては、Tsushima et al. (2009)と同様、初期水位の空間分布に関する拘束を課し、時間方向の拘束は課していない。観測波形だけで波源を時間方向にどのくらい拘束できるかを調べるためである。また、十分な時間長の波形から時間発展をどのくらい抑えられるかを知ることがまずは重要だと考え、地震発生から30分間のデータを逆解析に用いた。

実験結果と考察

実験結果のうちの大半のケースでは、正解波源よりも長時間にわたって基底関数を展開しても、前後の時間帯に偽波源が若干求まることはあるものの、概ね正解の波源生成時間帯の範囲で初期水位が求まった。一方、時間的に隣り合う初期水位分布が逆符号の顕著な変位を持つなどして、時間方向に初期水位のトレードオフが起きてしまい、正解波源よりも長時間にわたって初期水位が求まるケースもみられた。これらのことは、稠密観測データを用いることで、波源生成の時間帯を一定程度は拘束できる可能性はあるものの、解析条件によっては過度なモデル・パラメータ設定になって波源解の推定精度が低下しうることを示唆する。こうした時間発展への拘束力の違いが生じる要因・条件についてはさらなる検討が必要である。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費JP21K04621の助成を受けている。