

Thu. Oct 29, 2020

Room D | Regular session : S01. Theory and analysis method

1:00 PM - 2:15 PM JST | 4:00 AM - 5:15 AM UTC | ROOM D

[S01]PM-1

chairperson:Daisuke Sato(DPRI, Kyoto University), chairperson:Tsutomu Takahashi(JAMSTEC)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[S01-01] Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

○Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi² (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[S01-02] Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

○Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1.DPRI, Kyoto University)

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

[S01-03] Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

○Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi² (1.DPRI, Kyoto University, 2.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

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

[S01-04] Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

○Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S01-05] Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

○Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

Room D | Regular session : S01. Theory and analysis method

2:30 PM - 3:30 PM JST | 5:30 AM - 6:30 AM UTC | ROOM D

[S01]PM-2

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), chairperson:Issei Doi(DPRI, Kyoto University)

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

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms

○Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S01-07] Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

○KAORU SAWAZAKI¹ (1.National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S01-08] Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

○Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

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

[S01-09] sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

○Masahiro Kosuga¹ (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

Fri. Oct 30, 2020

Room D | Regular session : S01. Theory and analysis method

9:00 AM - 10:00 AM JST | 12:00 AM - 1:00 AM UTC | ROOM D

[S01]AM-1

chairperson:Tomoya Takano(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), chairperson:Shuhei Tsuji(Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S01-10] Separation of temporal variation in transfer function of ACROSS source using Independent Component Analysis

ORina Suzuki¹, Koshun Yamaoka¹ (1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S01-11] Method to detect change in amplitude using an artificial seismic source, ACROSS, and its application to in-situ data

OShuhei TSUJI¹, Koshun YAMAOKA¹, Ryoya IKUTA² (1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Department of Geosciences, Shizuoka University)

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

[S01-12] Derivation of SPAC-like expressions for strains measured by DAS

OHisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO¹, Takeshi NISHIMURA¹ (1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S01-13] Detection and location methods of volcanic tremors using seismic cross-correlation: application to Sakurajima volcano

OTheodorus Permana¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹, Nikolai Shapiro² (1.Tohoku University, Japan, 2.Institut des Sciences de la Terre, Grenoble, France)

Room D | Special session : S23. Frontier of observational seismology-Future of dense seismic observation

10:30 AM - 11:45 AM JST | 1:30 AM - 2:45 AM UTC | ROOM D

[S23]AM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi(NIED)

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

[S23-01] Seismological evidence for a seamount subduction in eastern Shikoku

OKatsuhiko SHIOMI¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S23-02] Detection of deep low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone over 11 years using a matched filter technique

OAitaro Kato¹, Shigeki Nakagawa¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:00 AM - 11:30 AM JST | 2:00 AM - 2:30 AM UTC

[S23-03] [Invited] Crustal activity monitoring using ocean networks for earthquakes and tsunamis

ONarumi Takahashi¹, Takane Hori² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

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

[S23-04] Ambient noise tomography in the forearc region off northeast Japan using S-net

ORyota Takagi¹, Kiwamu Nishida² (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Room D | Special session : S23. Frontier of observational seismology-Future of dense seismic observation

1:00 PM - 2:15 PM JST | 4:00 AM - 5:15 AM UTC | ROOM D

[S23]PM-1

chairperson: Ryota Takagi (Graduate School of Science, Tohoku University)

1:00 PM - 1:30 PM JST | 4:00 AM - 4:30 AM UTC

[S23-05] [Invited] Dense seismic observation using seafloor optical fiber cable system off Sanriku by Distributed Acoustic Sensing○Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Shin'ichi Sakai¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-06] Estimation of Site Amplification of Azuma volcano: Analyses of Seismic Signals Recorded by Fiber Optic Cable and DAS○Takeshi Nishimura¹, Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹, Shunsuke Sugimura¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger)

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

[S23-07] Analysis of dense records of the DAS observation using fiber optic cable in the urban area○Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Takeshi Nishimura¹, Mare Yamamoto¹, Kodai Sagae¹, Gugi Ganefianto¹, Katsuhiro Yabu¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S23-08] Characteristics of DAS data by Artificial Vibration○Masayuki Tanaka¹, Akio Kobayashi¹, Akio Katsumata¹, Koji Tamaribuchi¹, Tsunehisa Kimura², Shunsuke Kubota³, Yukihide Yoda⁴ (1. Meteorological Research Institute, 2. Schlumberger, 3. YK Giken Co., 4. NEC Corporation)

Room D | Special session : S23. Frontier of observational seismology-Future of dense seismic observation

2:30 PM - 3:30 PM JST | 5:30 AM - 6:30 AM UTC | ROOM D

[S23]PM-2

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

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

[S23-09] 3-D S-wave velocity structure derived by ambient noise tomography using dense short-period OBS array of off Ibaraki region○Lina Yamaya¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Kiwamu Nishida¹, Tsuyoshi Ichimura¹, Kohei Fujita¹, Takuma Yamaguchi¹, Takane Hori² (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC)

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

[S23-10] High-density event locations with high-density OBS network at off-Ibaraki region○Shinji Yoneshima¹, Kimihiro Mochizuki¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:00 PM - 3:30 PM JST | 6:00 AM - 6:30 AM UTC

[S23-11] [Invited] Dense seismic observation design for capturing background of large inland earthquakes (lessons from "0.1Manten" hyper dense seismic observation)○Satoshi Matsumoto¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

Sat. Oct 31, 2020

Room D | Regular session : S14. Earthquake prediction and forecast

9:00 AM - 10:00 AM JST | 12:00 AM - 1:00 AM UTC | ROOM D

[S14]AM-1

chairperson:Takao Kumazawa(Earthquake Research Institute, University of Tokyo), chairperson:Jianchang Zhuang(The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems)

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

[S14-01] Long-term Probability of a Tohoku-Oki Earthquake along the Japan Trench

○Masajiro Imoto¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-02] Foreshocks and earthquake hazard assessment in Japan mainland.

○Hong Peng¹, James Jiro Mori¹ (1.Kyoto University)

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

[S14-03] Predictability of earthquake swarms with consideration of central nagano swarm events in 2020

○Kumazawa Takao¹, Yoshihiko Ogata² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S14-04] Incorporating focal mechanisms into the ETAS model

○Jianchang Zhuang^{1,2}, Eri Maita² (1.The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems, 2.Department of Statistical Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDai))

Room D | Special session : S22. Geodynamics of the Ryukyu arc

10:30 AM - 11:45 AM JST | 1:30 AM - 2:45 AM UTC | ROOM D

[S22]AM-2

chairperson:Shuichi Kodaira(JAMSTEC)

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

[S22-01] Overview of scientific drilling active backarc basin, Okinawa Trough: ongoing rifting of Eurasian continental margin

○Makoto Otsubo¹ (1.Geological Survey of Japan)

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

[S22-02] Vs structure of the shallow crust beneath ocean-bottom seismometers: south and north Okinawa trough

○Ban-Yuan Kuo¹, Pei-Ru Jian¹, Pei-Ying Patty Lin², Ching-Ren Lin¹, Yasushi Ishihara³, Shuichi Kodaira³, Mamoru Nakamura⁴, Chau-Chang Wang⁵ (1.Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 2.National Taiwan Normal University, 3.JAMSTEC, 4.University of the Ryukyus, 5.NARLabs)

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

[S22-03] Ambient noise tomography for northern Okinawa trough OBS array

○Ting-Chun Lin¹, Kai-Xun Chen^{1,2}, Yuancheng Gung¹, Ban-Yuan Kuo², Yasushi Ishihara³, Shuichi Kodaira³, Mamoru Nakamura⁴, Pei-Ying Patty Lin⁵, Ching-Ren Lin², Chau-Chang Wang⁶ (1.National Taiwan University, Department of Geosciences, 2.Academia Sinica, 3.JAMSTEC, 4.University of the Ryukyus, 5.National Taiwan Normal University, 6.National Applied Research Laboratories)

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

[S22-04] [Invited] Contemporary deformation and slow slip events along the Ryukyu Islands clarified by GNSS observations

○Takuya Nishimura¹, Shin'ichi Miyazaki², Takeshi Matsushima³ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Faculty of Science, Kyushu University)

Room D | Special session : S22. Geodynamics of the Ryukyu arc

1:00 PM - 2:15 PM JST | 4:00 AM - 5:15 AM UTC | ROOM D

[S22]PM-1

chairperson: Mamoru Nakamura (Ryukyu University)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[S22-05] Pattern of occurrence interval and spatial distribution of similar earthquakes in the northern Ryukyu Trench subduction zone obtained from ocean bottom seismic observation

○Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Shigeru Nakao¹, Hiroki Miyamachi², Reiji Kobayashi², Yusuke Yamashita³, Hiroshi Shimizu⁴, Takeshi Matsushima⁴, Kazunari Uchida⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Hideji Abe⁷, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁷ (1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 3.DPRI, Kyoto Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, UTokyo)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[S22-06] Surface wave imaging of the lithosphere and asthenosphere system beneath north Okinawa Trough from NOT OBS array

○PeiYing Patty Lin¹, Hsiu-Cheng Yeh¹, Chih-Ming Lin¹, Ban-Yuan Kuo², Shu-Huei Hung³, Yuancheng Gung³, Eh Tan², Kate Huihsuan Chen¹, Chau-Chang Wang^{4,5}, Ching-Ren Lin², Shuichi Kodaira⁶, Yasushi Ishihara⁶, Mamoru Nakamura⁷ (1.Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.National Sun Yat-sen University, 6.JAMSTEC, 7.University of the Ryukyus)

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

[S22-07] Upper mantle P-wave velocity structure beneath the northern Ryukyu subduction zone from multiscale finite-frequency traveltime tomography

○Shu-Huei Hung¹, Ban-Yuan Kuo², Pei-Ying Patty Lin¹, Yuancheng Gung¹, Eh Tan², Huihsuan Chen³, Chau-Chang Wang⁴, Shuichi Kodaira⁵, Yasushi Ishihara⁵, Mamoru Nakamura⁶, Ching-Ren Lin² (1.Department of Geosciences, National Taiwan University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan Normal University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.JAMSTEC, 6.University of the Ryukyus)

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

[S22-08] [Invited] Active and passive seismic investigations in the Ryukyu Trench and the Okinawa Trough: A review of 7-year achievements by JAMSTEC

○Ryuta Arai¹, Shuichi Kodaira¹, Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yuka Kaiho¹, Yasushi Ishihara¹, Seiichi Miura¹, Yoshiyuki Kaneda^{1,2} (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

Room D | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 2:15 PM JST | Thu. Oct 29, 2020 4:00 AM - 5:15 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S01]PM-1

chairperson:Daisuke Sato(DPRI, Kyoto University), chairperson:Tsutomu Takahashi(JAMSTEC)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[S01-01] Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

○Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi² (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[S01-02] Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

○Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1.DPRI, Kyoto University)

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

[S01-03] Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

○Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi² (1.DPRI, Kyoto University, 2.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

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

[S01-04] Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

○Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S01-05] Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

○Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

*Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

測地データや地震波データを用いた断層すべり推定においては、地下構造の不確かさに起因するモデル予測誤差が、しばしば推定に伴う誤差の主たる要因となる。しかし、従来の断層すべり逆解析手法では、モデル予測誤差を考慮しないか、観測に伴う誤差と区別しない定式化が一般的である。一方、過去10年間で、モデル予測誤差を陽に考慮した断層すべり推定手法が複数提案されるなど（例えばYagi & Fukahata 2008 & 2011, Duputel et al. 2014, Ragon et al. 2018）、手法開発が飛躍的に進んできた。これらの手法に共通するのは、モデル予測誤差が正規分布に従うことを仮定し、推定に必要なアルゴリズムを簡単にしている点である。本研究では、これらの研究の考え方を基礎とし、非正規分布に従うモデル予測誤差を柔軟に取り扱うことができ、同時に観測データから断層すべりだけでなく地下構造の情報も得る、という新しい断層すべり推定手法を開発する。地下構造の不確かさに関する既知の確率分布からランダムサンプルされたパラメータを基に地下構造モデルを多数生成することで、グリーン関数の不確かさを係数行列のアンサンブルにより表現する。断層すべりの事後分布を推定するベイズモデルを設定し、予測誤差に相当する積分項をこのアンサンブルを用いたモンテカルロ近似により計算する。これにより、非ガウスの予測誤差を考慮した断層すべりの事後分布推定が可能となる。さらに、モンテカルロ積分を行う過程で各係数行列に対する尤度も計算されることにより、地下構造モデルのサンプルの中から尤もらしいものの抽出を同時に行うことができる。事後分布のサンプリングにはレプリカ交換モンテカルロ法を用いる。事前に係数行列を十分数計算しておけばよいという点から、断層すべりと地下構造パラメータの事後分布を直接的に同時サンプリングする方法と比べ、計算コストにおいてアドバンテージがある。

手法の有効性を確かめるため、2次元半無限均質弾性体内の低角逆断層におけるすべり遅れレート（SDR）の測地データを用いた推定について数値実験を行った。すべり遅れレート分布の真値を設定し、真のディップ角を15度として人工データを作成した。その上で、ディップ角について、「平均18度、標準偏差3度の正規分布に従う」というバイアスを含んだ不確かな情報しかない、という状況を想定して推定を行った。このような場合、予測誤差は一般に正規分布には従わない。SDRの事後分布を推定したところ、事前知識におけるディップ角の平均値がディップ角真値と3度ずれているにもかかわらず、事後確率分布を近似するSDR分布のサンプル群がSDR分布の真値とよく整合した。ディップ角の不確かさに由来する予測誤差が精度よく推定されていることが示唆される。予測誤差を考慮しない場合はSDR分布の事後確率分布がSDR分布の真値と整合的でなかったため、手法の有効性が示されたといえる。また、SDRの事後分布のサンプリングを通じて計算された係数行列の事後確率密度を調べたところ、ディップ角15度前後に対応した係数行列の事後確率密度が特に大きくなっていった。このように、推定を通じて、データから真の地下構造に関する情報も得ることができた。同時に、ディップ角の推定精度が、事前情報の不確かさを表す、事前に設定したディップ角の標準偏差の大きさに依存することを確認した。また各観測点におけるモデル予測誤差の確率分布形状を可視化したところ、複数の観測点で、正規分布では通常表現が難しいといわれる歪度の大きな分布となっていることが確認された。

Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹

1. DPRI, Kyoto University

前回の地震学会で、モデルパラメータ数が大きくなるにつれて従来のフルベイズ推定と赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) によるベイズ推定とでモデルパラメータ推定値が乖離し、これまでフルベイズの近似とわれてきたABICの方がより適切な推定値となるという問題を報告した (佐藤・深畑, 2019). 本発表では、その原因となっていた同時事後分布の性質を精査する。

ベイズ推定では、観測方程式とモデルパラメータに関する事前分布とをベイズの定理を介して結合し、事後分布を構成する。フルベイズ推定では、さらにモデルパラメータの事前分布を規定する超パラメータについてもその事前分布 (超事前分布) を考慮し、モデルパラメータと超パラメータに関する同時事後分布を構成する。

ここで、フルベイズ推定の本来の解は同時事後分布であるのだが、多次元の確率分布そのままでは有用な情報を引き出せない (松浦, 1990). そこで、同時事後分布からモデルパラメータの有用な統計量を得るために情報の縮約が必要となる。適切な縮約の方法は自明ではなく、少なくとも3つの流儀がこれまで用いられてきた。1つは、同時事後分布から超パラメータとモデルパラメータの組を直接的に同時推定する。この立場では、事後確率最大 (MAP) 解が推定値として通常採用される。もう1つは、同時事後分布からモデルパラメータのみを推定する。これは、超パラメータに関して事後分布を積分し、モデルパラメータに関して周辺化した事後分布を用いることに相当する。Fukuda & Johnson (2008) などフルベイズ推定を行っている研究では、しばしばこの指標が用いられている。そして、最後の1つはABICで、モデルパラメータを積分することにより超パラメータに関して周辺化された事後分布を求め、その分布を基にモデルパラメータを推定する。これは、同時事後分布を超パラメータの周辺事後分布とモデルパラメータの条件付き事後分布とに因数分解し、これら2つの確率値に基づく二段推定を行うことに相当する。この方法は、地球物理では広く用いられてきた (Yabuki & Matsu'ura, 1992).

これらの縮約に関して、モデルパラメータ数の増加につれて、モデルパラメータの周辺事後分布がMAP解にデルタ関数的に収束する一方で、超パラメータの周辺事後分布はABIC推定値にデルタ関数的に収束することを我々は解析的に導いた。これは、ABIC型の多段推定を行うかどうかでフルベイズ推定のモデルパラメータ推定値がABIC型とMAP型に二分されるということを意味する。

それらの二分された推定値のうちどちらが良いかをsynthetic testで検討した。検討の際は、roughnessが小さいという事前分布を用いた。その結果、従来の報告通り、同時事後分布が、MAP解として通常採用される局所最大に加え、underfit解 [モデルパラメータ数が多い場合にはさらにoverfit解 (伊庭, 1996)] に大域最大を持つ多峰分布であることを確認した。また、モデルパラメータ数が多い場合に局所最大解がunderfit側にバイアスされ、さらには消失していくことも新たに観察された。対照的に、超パラメータの周辺分布 (ABIC) は、一貫して最適値付近にピークを持つ単峰分布だった。

このようにしてABIC型の多段推定がそれ以外の縮約された分布に比べてより適切だとわかった。しかし、いずれの縮約も同時事後分布から生成される分布関数を用いている以上、これらの分布から得られる平均値は同一でなければならない。この点で、三通りに縮約された分布関数が異なる推定値にデルタ関数的に収束するとした我々の結果は、一見奇妙である。

そこで、事後平均 (EAP) 推定値の解析的表現を導いた。その結果、モデルパラメータのABIC推定値とEAP推

定値とが同様の値をとることが見出されると共に、EAP推定値の同時事後分布での出現確率がモデルパラメーター数の指数関数として急減少していくことが明らかになった。従来、モンテカルロサンプリングは多次元標本空間がパラメーター数の指数で増加する問題（次元の呪い）を確率値の高い事象のみをサンプルすることで克服するとしたが、同時事後分布では確率の高い推定値（MAP解近傍）は適切でない以上、この処方是有効に機能しない。従来のモンテカルロサンプリングによるEAP推定値の数値近似解はMAP解の側にバイアスされていた可能性が高い。

一方、超パラメーターの周辺事後分布については、ほぼ無限大の個数で且つほぼ確率ゼロの事象が平均を支配するという同時事後分布の困難を、字義通り無限個の事象を積算することで解決していた、と考えられる。MAPのABICからのずれに相当する、同時事後分布と超パラメーターの周辺事後分布の対数差の主要項が、シャノンエントロピーと呼ばれる量（確率変数に対して拡張された事象の個数の対数（エントロピー）を表す量）であることがわかり、この予想が裏付けられた。

Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

*Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi²

1. DPRI, Kyoto University, 2. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

地震の震源過程（断層面上でのすべり分布、あるいはすべりの時空間発展）を求めるインバージョン解析では、非負の拘束条件が広く用いられてきた。非負の拘束条件とは、例えば逆断層型の地震では、逆断層成分が常に正またはゼロで、マイナスのすべり（つまりは正断層成分）が生じないという条件のことを指す。この条件は物理的に妥当であると考えられ、多くの解析において疑問を持たずに使用されてきた。

しかしながら、本講演で指摘するように、震源過程解析で非負の拘束条件を課すことには大きく二つの問題がある。

一つは、そもそもなぜ非負の拘束条件が必要となるのか、という問題である。震源過程解析において、少量の負のすべりが生じることは特に問題ないであろう。観測データや解析モデルは常に誤差を含んでいるので、推定誤差の範囲内で負のすべりが生じることはある意味自然であり、別段目くじらを立てる必要はない。そして、この場合には、非負の条件を課して、（例えば、政府への提出資料等として）結果の見栄えを良くすることは許容されるだろう（後述する2つ目の問題が重大でない場合には）。

実際のところ非負の条件が強く必要とされるのは、推定誤差を大きく越えて負のすべりが生じてしまう場合である。しかし、逆説的ではあるが、この場合には非負の拘束条件は使うべきではない。なぜなら、推定誤差を大きく越えて負のすべりが生じるということは、モデル化に重大な欠陥が隠れていることを意味するからである。つまり、何か重大な欠陥があるから、大きな負のすべりが生じてしまうのである。この場合に、非負の条件を課して一見もっともらしいすべり分布を得ることは、その重大な問題を覆い隠してしまい、真の解に近づく上ではむしろ弊害となる。但し、具体的にどのようにしてその重大な問題を解決するのは難しい問題である。一つの方策としては、グリーン関数の誤差の導入(Yagi & Fukahata, 2011, GJI)があるが、万能ではない。しかし、この難しい問題を解決していくのが、地震学の発展というものであろう。

もう一つの問題は、非負の拘束条件を課すと、震源域から離れたモデル領域において、そのすべり量の推定が不偏推定とならないことである。”不偏推定”とは、推定量の期待値が真値に一致することを意味し、どのように統計的推定を行うかの上で、最も重視される指標と言って良い。通常、震源過程解析では、モデル領域の設定がすべり量の推定に影響を及ぼさないように、すべりが実際に生じた範囲よりもある程度広くモデル領域を設定する。このとき、前述のようにモデル領域の端の近くの大抵の場所では、滑り量 u がゼロとなることが期待される。一方、非負の条件を課すと、必然的に、 $E(u(\mathbf{x})) > 0$ となる。ここで、 $\mathbf{x}$ は空間座標、 E は期待値を表す。つまり、すべりがほぼゼロのところでは、正の方向にバイアスされた値が選ばれてしまうのである。実際の解析において、すべりがゼロの領域を含まないように断層面の設定をすることはまず不可能である。しかし、非負の条件付きの場合、すべりがゼロの領域では常に正の方向にバイアスされた値が得られる。そのため、地震モーメントを一定にするために最大すべりを含む他の領域のすべり量が減少し、すべり分布の形自体にも影響を与えるといったことが起こる。

要するに、非負の条件だけを取り上げれば物理的に自然なものと言えるが、震源過程解析に非負の条件を用いることは、モデル化に含まれる重大な欠陥を覆い隠し、すべり分布にも無視できないバイアスを与えるという問題がある。

Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

*Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3. Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

We need accurate 3D structure model to study the correlation between the physical properties of the materials and the seismicity as well as the rupture processes of earthquakes. Currently available 3D structure model in and around the 2011 Tohoku-Oki source area is not sufficient in terms of the accuracy of the synthetic waveforms generated based on the model: we found that short period (< 10 s) synthetics for land stations in northeastern Japan do not reproduce the characteristics in the observed full waveforms from shallow earthquakes occurred there (Okamoto et al. *Earth Planets Space (EPS)* 2018). This research suggests the short wavelength features in the current model are not sufficient. Thus we attempt to improve the 3D model using the waveform tomography. We select shallow earthquakes ($M_w \sim 6$) in and around the source area. In this study, we re-analyze six events that we have previously reported (SSJ Fall Meeting 2019) and newly add five more shallow events. The observed full waveforms recorded by land seismic network (F-net, KiK-net) in northeastern Japan are used. A land-ocean unified 3D structure model including oceanic water layer is used as the initial model. First, we re-determine the source parameters (the moment tensor, source time function, source location, and origin time) based on the initial model using First-motion Augmented Moment Tensor analysis method (Okamoto et al. *EPS* 2017, 2018) to minimize the biases due to one-sided (i.e., only on land) station distribution. Then we simulate the forward (using the earthquake source) and the adjoint (using a single force at the station location) wave propagations based on the initial model. The simulations are performed on TSUBAME super computer of GSIC, Tokyo Institute of Technology using a multi-GPU version (Okamoto et al. in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering* 2013) of HOT-FDM (Nakamura et al. *BSSA* 2012). The simulated waveforms are Fourier transformed and multiplied to generate waveform sensitivity kernels of relaxed modulus for P- and S-waves, density, Qp and Qs in frequency domain. For example, the kernels for a pair of a F-net station (TYS) and an outer-rise event (2017/10/06 M_w 6.2) show an asymmetric pattern with respect to the straight path even at a period of 9.8 s. At a period of 7.1 s, large amplitude pattern is observed along the oceanic trench, suggesting scatterings due to strong heterogeneity there. We will discuss the kernel features in other examples, and the results of the attempts of tomographic inversion.

Acknowledgements: The authors are grateful to Japan Meteorological Agency, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), and Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project for providing the earthquake parameters, to K Kisimoto for providing the topography models, to Headquarters for Earthquake Research Promotion and NIED for providing the structure models, and to NIED for providing the waveform records of KiK-net, and F-net. This study is supported by the Japan Society for the Promotion of Science (KAKENHI grant no.16K05535 and 20K04101), and Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures in Japan (JHPCN) (Project ID: jh200059-NAH).

Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

*Tutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda²

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

断層面の形状は幅広い空間スケールで不均質性（以下、面粗さ）を示す。露頭の断層面形状の調査などでは、面粗さのパワースペクトル密度が波数のべき乗に依存し、ハースト指数 H が0.6~0.9程度の自己アフィン性を示すことが報告されている(e.g., Brown & Scholtz 1985; Candela et al. 2011)。面粗さの統計的性質は表面の摩擦係数などを理解する上で重要な要素の一つであるが、地下の断層の面粗さは速度構造の空間分解能の制約などからこれまで推定されていない。この推定を行うには、断層周辺の速度構造の分解能を適切に把握した上で、解析可能な波数域が狭い場合でも安定した結果が得られる手法を用いることが重要となる。本研究では、ウェーブレット変換を用いた解析法の適用可能性を検討し、南海トラフ西部において沈み込んだフィリピン海プレートの面粗さを評価した。

解析に用いるプレート形状のデータは、JAMSTECが南海トラフ周辺で調査を行った構造探査測線のうち、海底地震計を用いた屈折法地震探査とMCS反射法探査がともに実施され、観測点間隔やエアガン発振間隔が密な6測線で得られたものである。屈折法探査の初動走時トモグラフィで得られた速度構造を用い、MCS記録の海洋地殻上面からの反射波走時を深度変換してプレート形状を得た。測線長は100km前後で、形状データは0.1km間隔である。上盤側の地震波速度の水平変化を調べた結果、そのパワースペクトル密度は低波数側ではべき乗則に従うが、観測点間隔よりやや小さい約4.5kmに対応する波数より高波数側でべき乗則から外れ、パワースペクトル密度が小さくなる傾向が見られた。このずれはトモグラフィの正則化項などの影響と考えられることから、面粗さの推定は約4.5kmよりも大きな空間スケールのみを対象とすることとした。

ウェーブレット変換を用いた面粗さの解析には、Wavelet Transform Modulus Maxima (以下、WTMM)と呼ばれる連続ウェーブレット変換の極大値に着目し、データ全体のスケール依存性が単一のハースト指数で特徴づけられることを仮定した解析法 (Audit et al. 2002) を用いた。これは本研究で用いるサンプル数が少ないデータでも安定する手法とされている。しかしサンプリング間隔から数オクターブ程度の範囲では安定した結果が得られるものの、それ以上のスケールでは推定誤差が増大する。この推定誤差を抑制するため、本研究では複数測線のデータを統合し、その平均的な面粗さを推定することとした。非整数ブラウン運動の人工データを使って検証を行った結果、1000サンプルの形状データが3つ程度あれば概ね安定してハースト指数を推定できることが確認された。

南海トラフ西部の各探査測線では、WTMMによる解析でもハースト指数を十分な精度で推定することはできないが、全6測線を統合することで南海トラフ西部におけるフィリピン海プレート表面のハースト指数は0.87程度と推定された。また沈み込んだプレートの南北でrms振幅が系統的に異なり、北側のrms振幅が大きな領域では $H \sim 0.57$ 、南側のrms振幅が小さな領域では $H \sim 0.86$ と推定された。単一測線での面粗さの推定精度を向上させるには、測線長が速度構造の空間分解能を数倍以上にすることが必要となる。しかし形状データのrms振幅とWTMMを併用することで、現状の探査精度でも面粗さの大きさやハースト指数の空間変化を安定して推定することが可能となった。今後、測線数の増大とともにハースト指数やその空間変化をより詳細に把握できるようになると期待される。

Room D | Regular session : S01. Theory and analysis method**📅 Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM JST | Thu. Oct 29, 2020 5:30 AM - 6:30 AM UTC | 🏠 ROOM D****[S01]PM-2**

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), chairperson:Issei Doi(DPRI, Kyoto University)

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

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms○Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S01-07] Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram○KAORU SAWAZAKI¹ (1.National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S01-08] Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan○Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

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

[S01-09] sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district○Masahiro Kosuga¹ (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

A centroid catalog of P-wave microseisms

*Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

■はじめに

地動の脈動の存在自体は1940年代から知られている。励起源が海洋波浪であることは既に確立されており、その励起の特徴から大きく2つに分類される。1つ目は、primary microseisms と呼ばれる約 0.07 Hz の特徴的な周波数を持つ振動である。この周波数が海洋波浪の特徴的な周波数と対応している事と Love波の振幅が卓越していることから、海岸線付近の斜面に打ち寄せる海洋波浪 が励起源だと考えられている。2つ目は secondary microseisms と呼ばれ、海洋波浪のちょうど倍の卓越周期 (0.15 Hz) をもつ。海洋波浪の非線形効果が励起に寄与していると考えられている[Longuet-Higgins, 1950. とともに海洋波浪が励起源のため、表面波が卓越していることがよく知られている。

■解析手法

脈動の起源メカニズムを系統的に理解するためには理解するためには、脈動P波の重心位置のカタログ化は情報は重要である。backprojection法は、脈動P波の重心位置を特定するのに有効な手法である。この手法は、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を利用している。また、多くのphase (P, PP, core phase等)の情報を利用することも可能である。しかし全ての情報を同時に使用するため、どの情報が震源位置を抑えているのか検証することが難しい。また、10年以上にわたるグローバルなカタログを作成するためには、計算コスト大きな問題となる。一方、beamforming法の計算コストは実用的であるが、この方法では、slownessベクトルの情報のみを利用しているため、P波とPP波を区別することが原理的にできない。本研究では、beamforming法の自然な拡張として、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を抽出できる新しい手法を提案する。

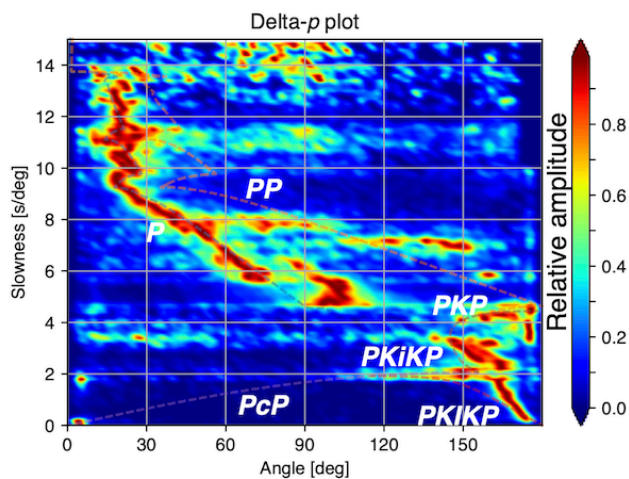
この手法では、まず、従来のbeamforming法に基づいて、アレー中心でのslowness ベクトルの初期値推定を行う。次のステップでは、slowness ベクトルを固定して、波面の曲率を変化させbeam power が最大化することによって波面の曲率を推定する。これらの値をアレー中心での初期値とし、摂動理論に基づいて、slownessベクトルと波面の曲率の値を反復的に更新していく。波面の曲率から、アレー中心と励起源の重心位置との距離を推定することができる。波面の曲率はslownessよりも水平方向の不均質に敏感なため、推定精度は悪くなる。しかし推定された距離情報に基づいて(図1)、検出されたスローネスを対応する相(例えば、P, PP)に分類する事が可能となる。この分類された位相に基づいて、推定したslowness ベクトルの値から震源の重心位置を推定する。

■解析

2004年から2018年までに防災科学技術研究所が運用によって展開されているHi-net (速度計 鉛直成分約750点)を解析した。機器応答は時間領域 で補正し[Maeda et al., 2011]、収録機器起源のコヒーレントなノイズは予め差し引いた[Takagi et al., 2015]。解析には、これら” 広帯域化” した速度計記録を用いた。時系列を512秒ごとに切り出し、地震の影響を取り除き解析から除外した。遠地の地震はglobal CMTカタログ[Ekström et al., 2012]を用い除外し、近地の地震は平均自乗振幅の時間変化の大きさから判断し除外した。さらに、観測点ごとの平均自乗振幅の大きさに閾値を設定し、局所的なノイズの影響を受けているとして解析から除外した。選択したデータを用い、0.1-0.2Hzの帯域で解析を行った。

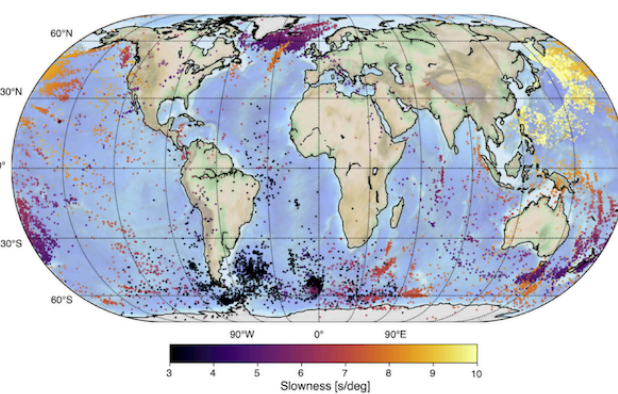
■結果と展望

推定された重心位置は季節的な変動を示しており、過去の研究結果とも調和的である。P, PP, PKP, PKIKP等の多くの相を同定できたため、1箇所のアレーデータから全球点な脈動P波の重心位置のカタログ化(図2)に成功した。本発表では、推定された脈動P波の重心位置のカタログから、脈動の励起メカニズムについて議論する予定である。



まず推定した震源毎に、震央距離とslownessに対して点をプロットし、その数密度を計算する。次に、各slowness毎に最大値で規格化する。P, PP, core phaseを同定することができる。

図 1



決定した重心位置をプロットしたず。色はイベントごとのslownessを表している。例えばグリーンランド近くではP波によって震源が決まっている。少し南側ではP波がshadowに入るため、PP波によって震源位置が決まっている様子が見て取れる。

図 2

Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

*KAORU SAWAZAKI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

昨年度は、観測された連続地震動記録の統計的特徴を用いることで、地震カタログを用いることなく、余震による最大振幅の発生確率を早期に予測する手法を提案した（澤崎、2019）。今回は、任意の閾値を超える最大振幅の発生数を確率的に表現する手法について報告する。具体的には、「期間 T_1 から T_2 の間に閾値 z 以上の振幅が n 回以上観測される確率は $Q\%$ 」と表される超過確率 Q を、任意の T_1 、 T_2 、 z 、 n の組み合わせについて算出する。ここでは n を閾値超過振幅数と呼ぶ。 n を1とする場合、この超過確率は「期間 T_1 から T_2 の間に観測される最大振幅が z 以上である確率は $Q\%$ 」と言い表すことができ、最大振幅の予測は閾値超過振幅数の予測の特殊な場合に相当する。

連続地震動記録の区間最大振幅（一定時間 T ごとの最大振幅。今回は T を1分に固定）は、Frechet分布と呼ばれる極値分布の一種にしたがう。この分布は、地震活動の活発さや伝播経路特性等を反映するパラメータ A と、Gutenberg-Richter式の b 値等を反映するパラメータ m とで特徴づけられる。地震数が大森-宇津則にしたがい時間減衰する場合、大森-宇津式の p 値もパラメータとなる。加えて、地震動記録は地震以外の雑微動を含み区間最大振幅は下限を持つため、その下限 $x_{\min}$ もパラメータとなる。以上4個のパラメータを用いると、区間最大振幅がしたがうFrechet分布の累積分布関数 G は

$$G(z, t, t+T) = \exp[-ATm^{-1}(z-x_{\min})^{-m}t^p] \quad (1),$$

確率密度関数 g は

$$g(z, t, t+T) = ATt^{-p} \exp[-ATm^{-1}(z-x_{\min})^{-m}t^p](z-x_{\min})^{-m-1} \quad (2)$$

と表される。ただし1、2式とも本震からの経過時間 t が T よりも十分大きいという条件の下で成り立つ。観測された区間最大振幅に最尤法を用いてFrechet分布をあてはめ、4個のパラメータを推定する。最尤推定値 $\theta = (A, p, m, x_{\min})$ を用いると、超過確率 Q は

$$Q_n(z, T_1, T_2; \theta) = 1 - \exp[-(N_{\infty} - N)] \sum_{n'=1}^n (N_{\infty} - N)^{n'-1} / (n'-1)! \quad (3)$$

$$N_{\infty} - N = (z - x_{\min})^{-m} A (T_2^{1-p} - T_1^{1-p}) / [m(1-p)] \quad (4)$$

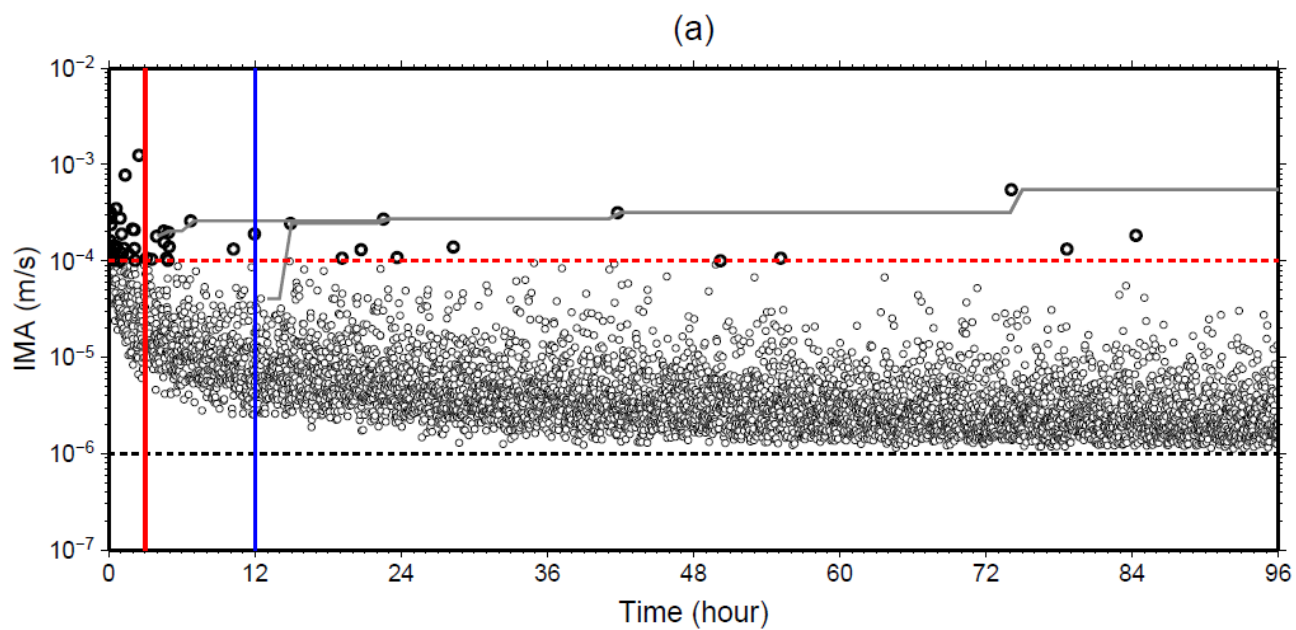
と表される。 N_{∞} は期間 T_1 から T_2 の間に発生する全地震数を、 N はその中で最大振幅が閾値 z を超えない地震数を表す。超過確率 Q は、 z についてFrechet分布、 n についてポアソン分布にしたがう。実際の予測においては、推定値の不確定性を考慮したベイズ予測（例えば、Omi et al., 2015）を用いる。

図aは、G-R式と大森-宇津式にしたがう余震活動を乱数を用いて生成し、マグニチュードと最大振幅の関係式から算出した区間最大振幅の推移（白丸）を表す。最大振幅の閾値は 10^{-4} m/s（赤点線）に設定し、これを超える区間最大振幅は太い丸印で示している。区間最大振幅の下限 $x_{\min}$ は 10^{-6} m/s（黒点線）に設定した。灰色の実線は評価時点以降に観測された最大振幅を表す。この疑似余震記録について、本震発生の5分後から3時間後（赤縦線）までのデータを用いてパラメータを推定し、超過確率曲線を描いた図がb（最大振幅）とc（閾値超過振幅数）である。赤丸が3時間後以降に発生した最大振幅（図b）と、閾値 10^{-4} m/sを超えた振幅の数（図c）の推移を表す。黒線は3時間後時点で評価した96時間後までの10%、50%、90%超過確率曲線を示す。最大振幅、閾値超過振幅数共に、予測の範囲で推移している。評価時点が12時間後（図a青縦線）の場合（図d、e）、使用できるデータ数が増えるためにパラメータの推定精度が上がり、特に閾値超過振幅数の予測幅は

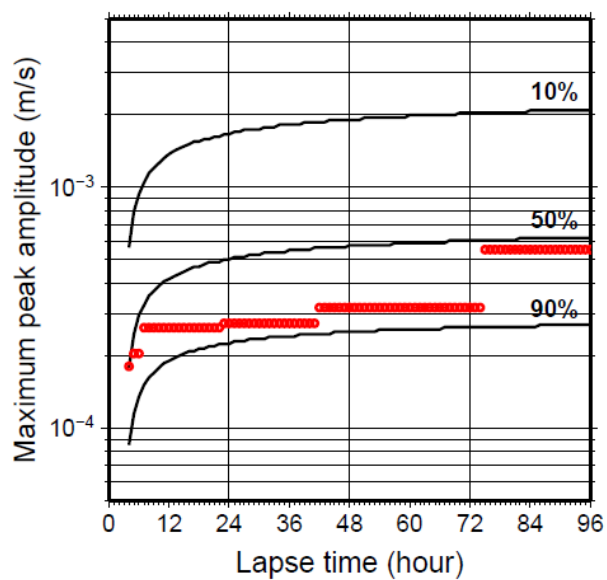
より絞り込まれる。この場合も3時間後の場合と同様に、超過確率曲線から予測される範囲内で最大振幅、閾値超過振幅数とも推移する。

異なる乱数列を用いて図b~eと同様の図を1000通り描くと、最大振幅や閾値超過振幅数が10%超過確率曲線を上回るケースと90%超過確率曲線を下回るケースはそれぞれ100ケース程となり、全ケースの10%程度となった。同様に、10%と50%超過確率曲線の間および50%と90%超過確率曲線の間を推移するケースはそれぞれ400ケース程で、全体の40%程度であった。以上の結果から、パラメータが時間変化しない理想的な状況下では、区間最大振幅を用いることで、大地震発生後数時間以内にその後の最大振幅と閾値超過振幅数を確率的に予測できることが分かった。

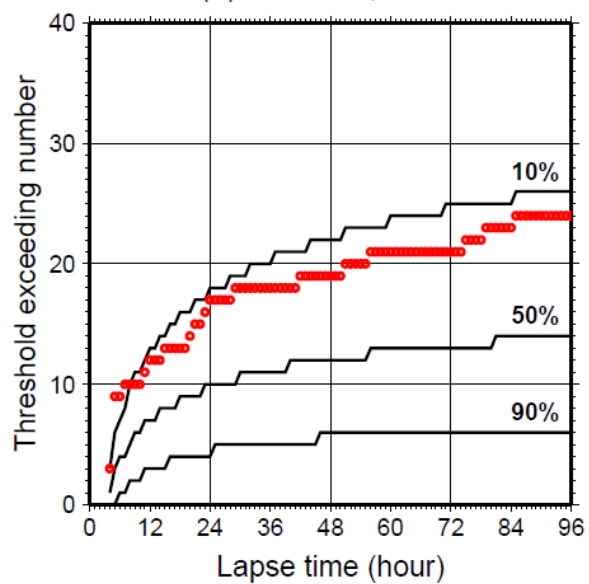
謝辞：本研究は科研費・若手研究B「連続地震波形記録を用いた準リアルタイム余震活動予測手法の開発」（課題番号17K14385）からの支援を受けています。



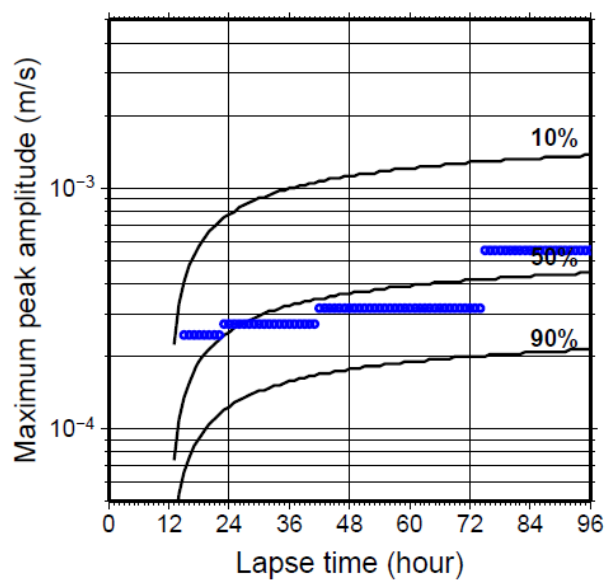
(b) Amplitude, 3 hrs



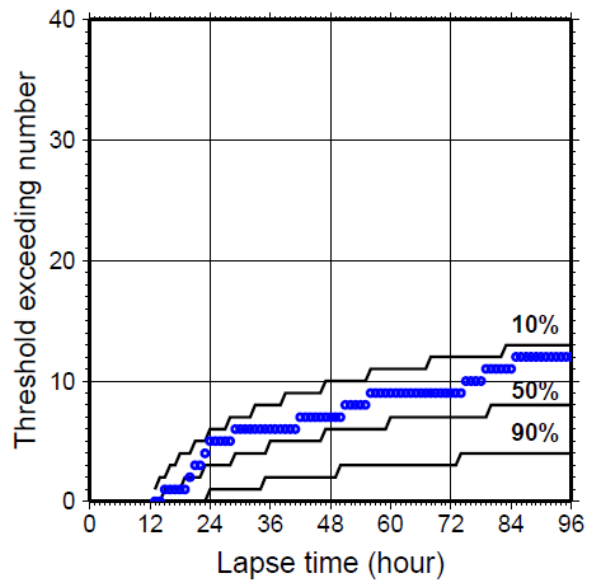
(c) Number, 3 hrs



(d) Amplitude, 12 hrs



(e) Number, 12 hrs



Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

*Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

2017年九州北部豪雨によって大分県日田市小野地区において7月6日午前9時45分ごろに大規模な斜面崩壊が発生した。この斜面崩壊によると思われる地震動が、約1分の間隔をおいて2回、定常地震観測網の4-5点の地震観測点において捉えられた。継続時間は40-60秒程度、卓越周波数は0.5-3 Hzであり既往研究（e.g. Dammeier et al., 2011）による斜面崩壊の地震波形記録と矛盾しない特徴を示した。また、崩壊地から約3 km/sの見かけ速度で伝播していたことから、本崩壊によって励起された地震動が捉えられたことが窺えた。

このように、比較的規模の小さな斜面崩壊であっても、高感度地震観測網にはその震動が記録されていることがあり、高周波連続地震観測記録が斜面崩壊の監視に重要な役割を果たすと期待される。しかし、それらの記録は一般にS/Nが低く、しかも通常の地震と違い明瞭なP波S波相がみられることはほとんどない。そこで、本研究ではこのような地震動が定常地震観測網で捉えられた際に、斜面崩壊に関する事前情報なしにどの程度震源を推定できるのかを調べた。

Doi and Maeda (2020) は、火山性の低周波微動の震源を観測点間の振幅比から推定した振幅震源決定法（ASL法、Kumagai et al., 2010）を、定常地震観測網で記録された2017年長野県飯山市の斜面崩壊による10観測点以上の地震波形データに適用し、推定精度約5 kmで崩壊斜面の周辺に震源を決定することに成功した。しかし、本研究で対象とする日田市小野地区における斜面崩壊はそれよりも規模が小さい。そのため、この手法をそのまま本研究の波形データにあてはめ震源決定をおこなったところ、高いS/N比を有する地震観測点が4点程度と少なく、そのままでは震源位置の拘束がうまくいかなかった。そこで、本研究では、S/N比が低い観測点におけるデータを有効活用するため、仮想震源位置に応じて利用するデータを動的に変更する2段階法を採用した。まず、グリッドサーチで仮定する仮想震源位置に対し、観測記録のS/N比の高い点のみの記録と振幅の理論予測曲線との比較から、すべての観測点における振幅の予測値を算出する。そして、信号のS/N比が低い観測点であっても、仮定した仮想震源位置からの振幅の理論予測値がノイズレベルの2倍以上であれば、その観測点では仮想震源位置からの地震動をノイズレベルよりも有意に大きな振幅で記録できるはずであると考えデータとして算入し、理論予測曲線と観測振幅との残差を計算する。このようにして得られた残差がもっとも小さな仮想震源位置を斜面崩壊の波源とし、その周辺の残差の空間分布から誤差範囲を推定した。その結果、2回の地震動に対して、推定精度5 km程度で崩壊斜面の周辺に震源が求められた。

本研究で扱った小野地区の斜面崩壊は、観測点間隔が平均20-30 km 程度である定常地震観測網に囲まれるような場所で発生した。そのため、一般に日本国内の内陸部で発生する斜面崩壊においても、同様の観測条件が満たされることが予想される。したがって、本研究で採用した観測点選定基準を用いることで、高感度定常地震観測網の観測記録から、国内の多くの地域において同程度の斜面崩壊を事前情報無しに検知できることが期待される。

謝辞：防災科学技術研究所の高感度地震観測網の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

*Masahiro Kosuga¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirotsuki University

はじめに

地震観測網から離れた位置で発生した地震の震源深さを精密に決定するために、sP変換波を用いることがよく行われる。この波は、震源から放射されたS波が海底面などでP波に変換されて観測点に届いたもので、sP-P時間が震源深さの関数となる性質を震源決定に利用する。先行研究での変換波の検出は、主に目視と観測点ごとの波動特性によるものであった。しかし、特性の揃ったHi-net観測網のデータを用いると、sP変換波やその他の変換波を空間的に連続した波動として検出することが可能である。そこでここでは、地震計の特性を補正して低周波成分を用いると変換波が極めて明瞭に検出できることと、震源位置やメカニズム解の違いによって波形がどのように異なるのかを示す。

方法

地震計の特性補正は、Hi-net地震計特性でのデコンボリューションとF-net地震計特性のコンボリューションを行う再帰型数値フィルタ (Maeda et al., 2011) を作用させて行なった。変換の妥当性はF-net観測点での波形と比較して確認した。この変換により、地震計の固有周波数よりも低周波成分の波形の利用が可能になる。さらに、地震波形をwiggle表示して振幅の符号に応じて波形に着色する視覚化と、振幅の大小に応じて表示振幅を変えるauto gain controlを導入した。これらの処理を施した波形記録のペーストアップを作成して、変換波の出現の有無と波動の特徴を調べた。

また、変換波の起源を検討するために、OpenSWPC (Maeda et al., 2017) による3次元波動伝播シミュレーションも用いた。この目的には、観測波形と同様なペーストアップに加えて、スナップショットでの波動の追跡が有効である。

今回の検討は東北地方太平洋沖合で発生した地震を対象とした。気象庁CMT解カタログを基に、以下の2通りの地震群を抽出した。マグニチュードの範囲は4.3から6.4である。

- (1) 宮城県沖にほぼ東西に並ぶ低角逆断層型地震。これらはプレート境界で発生していると考えられる。同じ領域でのその他の断層タイプの地震も加えた。
- (2) 岩手県沖で発生している低角逆断層型地震。震央が近く断層タイプは同じでも、セントロイド深さが15 km程度異なるものを含むように抽出した。

変換波とその特徴

多くのペーストアップ記録において明瞭なsP変換波を検出することができた。sP波は震央距離100 km程度においてS波波群から分離し、震央距離とともに見かけ速度が増加してP波のそれに漸近し、震央距離400 km程度まで追跡することができる。sP波の空間的連続性には周波数依存性があり、フィルタの周波数が0.1-0.5 Hzにおいて最も明瞭で、高周波になるにつれて不明瞭になる。これは、低周波成分ほど地殻の不均質構造の影響を受けにくいため、短周期地震計記録を広帯域化することの効果をよく示している。また、震源位置に近い地震に対するペーストアップ記録の再現性は、非常に高いことも確認できた。

宮城県沖の地震は東西方向に並ぶように選択したが、sP波やその他の変換波の出現状況は経度とともに変化する。震源位置が東経142.5°以西では、sP波やpP波などの限られた変換波が見られる。震源位置がそれ以东になると、P波と同程度の見かけ速度を持つ変換波が繰り返し現れるようになる。これは海底面と海面の間での多重反射波と考えられる。この多重反射波以降の位相は、震源位置が東経143.5°付近では極めてインコヒーレントである。これは、この付近の海底面下の構造が広い波長範囲にわたって不均質であるためと考えられる。また、メカニズム解が異なると、P波とsP波の相対的振幅の空間分布が明瞭に変化することも確認できた。

岩手県沖ではセントロイド深さが異なる地震についての比較を行なった。深さが異なると変換波の出現時刻が

変わるようにも見えるが、震央位置の違いも影響するため、低周波の波形から目視で確認するのは困難であった。

おわりに

短周期地震計記録を広帯域化して視覚化の工夫を加えることで、sP波は広い震央距離にわたって明瞭に追跡できることがわかった。sP-P時間を精密に読み取ることができれば、震源深さの再決定や地殻構造の推定に有用なデータとなる。その読み取りは、sP波の波形が空間的に連続である性質を用い、平均的波形との相関を用いることで可能となる。

謝辞

本研究では防災科研H-netおよびF-netの観測波形と、気象庁CMT解カタログを使用した。波動伝播シミュレーションには東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用した。（公財）地震予知総合研究振興会からは研究費の援助をいただいた。以上の機関に感謝します。

Room D | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Fri. Oct 30, 2020 9:00 AM - 10:00 AM JST | Fri. Oct 30, 2020 12:00 AM - 1:00 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S01]AM-1

chairperson:Tomoya Takano(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo),
chairperson:Shuhei Tsuji(Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S01-10] Separation of temporal variation in transfer function of ACROSS source using Independent Component Analysis

○Rina Suzuki¹, Koshun Yamaoka¹ (1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S01-11] Method to detect change in amplitude using an artificial seismic source, ACROSS, and its application to in-situ data

○Shuhei TSUJI¹, Koshun YAMAOKA¹, Ryoya IKUTA² (1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Department of Geosciences, Shizuoka University)

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

[S01-12] Derivation of SPAC-like expressions for strains measured by DAS

○Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO¹, Takeshi NISHIMURA¹ (1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S01-13] Detection and location methods of volcanic tremors using seismic cross-correlation: application to Sakurajima volcano

○Theodorus Permana¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹, Nikolai Shapiro² (1.Tohoku University, Japan, 2.Institut des Sciences de la Terre, Grenoble, France)

Separation of temporal variation in transfer function of ACROSS source using Independent Component Analysis

*Rina Suzuki¹, Koshun Yamaoka¹

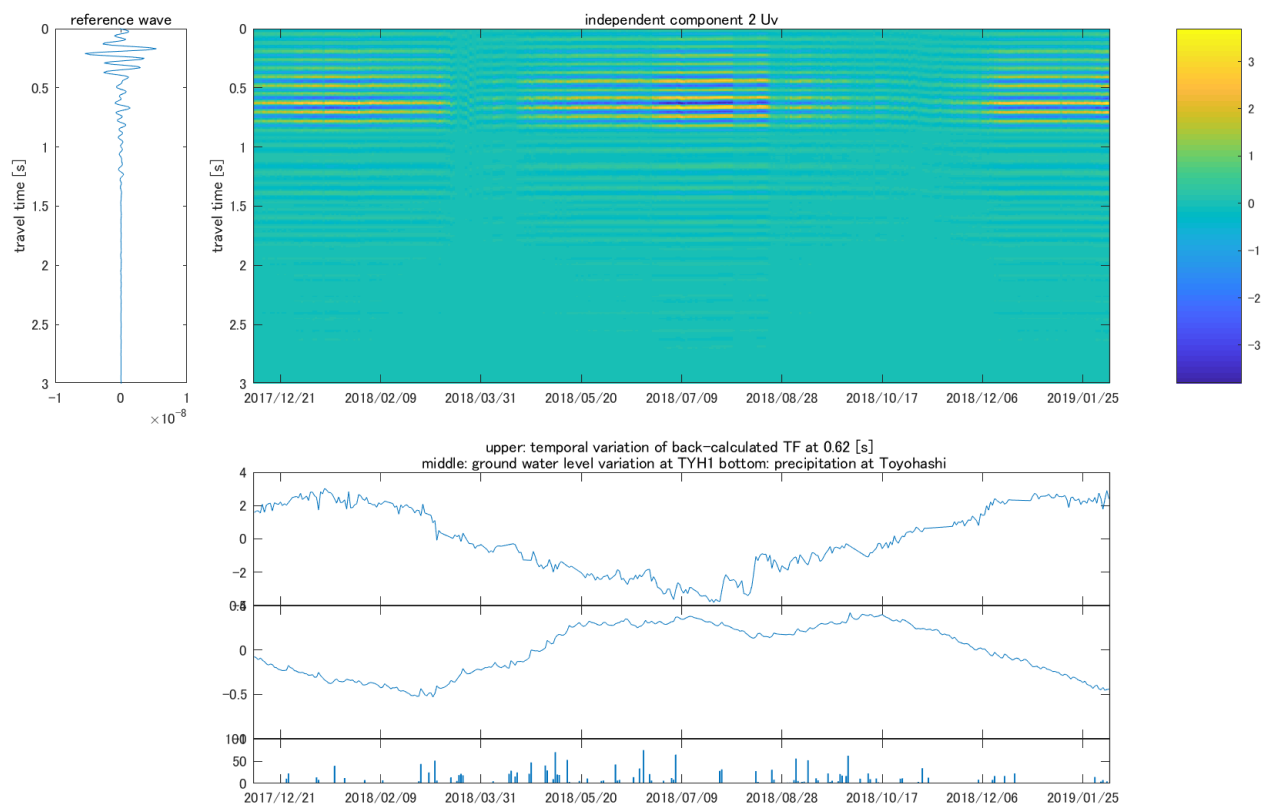
1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

ACROSS source is a vibration source that can generate seismic wave of constant frequency band by accurately controlled rotation of eccentric weight. This source can gain a signal with high signal-to-noise ratio by taking advantage of stable operation for long period. Therefore, it is suitable for continuous monitoring of the propagation property of seismic wave. The ACROSS source is used for monitoring temporal variation of seismic velocity in many studies. Ikuta et al. (2002) reported that observed velocity change was caused by multiple factor such as rainfall and strong motion by earthquake. In this study, we applied Independent Component Analysis (ICA) for the observation data using the ACROSS vibrations in Mikawa Observatory of Nagoya University in Toyohashi City, Aichi Prefecture. We try to separate independent variation in order to research influence of each factor to the temporal variation of transfer function

ICA is a method to extract statistically independent signal from the mixing of multiple signals. By an assumption that the variation of transfer function by each factor is independent and observed variation of transfer function is linearly mixed by these variations, we can extract variation by each factor using ICA.

In this study we used fourteen-month long data for monitoring temporal variation of transfer function at stations around the ACROSS source installed at Mikawa Observatory of Nagoya University. There are six components in the transfer function: up-down, north-west, and east-west components by vertical excitation (Uv, Nv, and Ev component) and those components by horizontal excitation (Uh, Nh, and Eh component). For our analysis, we synthesized horizontal component at seismometer which is parallel to the vibration direction using Nh and Eh, named Hh. Uv and Hh component mainly include P and S wave, respectively. For the analysis, we used transfer function in frequency domain and performed data whitening and dimension compression as a preprocessing. Data whitening maximizes the performance of signal separation by ICA. Dimension compression is made by Principal Component Analysis to reduce noise that may be included less important components. We applied ICA to the preprocessed transfer function and succeeded to obtain independent components. Among many methods of ICA, we adopted AMUSE method (Tong et al., 1991, Nemoto and Kawakatsu, 2005) that is often applied to time series signals.

Independent components obtained by ICA show same temporal variations but show difference in travel time part in Uv and Hh. Comparing each independent component with ground water level data, independent components show high correlation with ground water level variation. The temporal variation of this independent component mainly appeared in later wave.



Method to detect change in amplitude using an artificial seismic source, ACROSS, and its application to in-situ data

*Shuhei TSUJI¹, Koshun YAMAOKA¹, Ryoya IKUTA²

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University

我々は、伝播振幅の変化を人工震源装置「アクロス」を用いて取得した伝達関数から検出する手法を開発し、その手法を先行研究Ikuta et al. (2002)で取得された伝達関数に適用した。その結果、地震時の強振動や注水実験に伴う振幅変化等を含めて、ノイズの影響を考慮して連続的に振幅変化を推定できることを確認した。

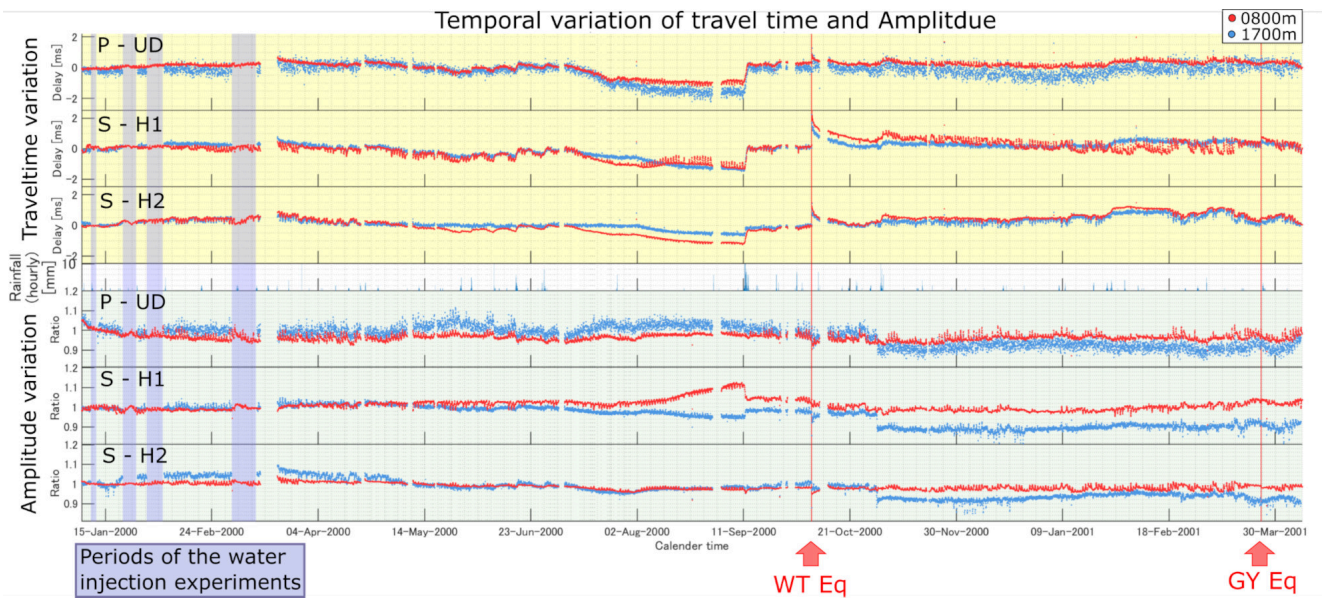
減衰の時間変化は、間隙流体の移動やクラックの開閉といった地下構造の変化を反映すると考えられる。従来は自然地震のスペクトルの傾きを比較する手法で主に調べられ、地震の発生に伴う減衰の増加(Chun et al. 2004; Kelly et al. 2013)や、火山活動に伴う減衰の時間変化(Titzschkau et al. 2010)が報告されている。

本研究は、このような減衰の時間変化を、人工震源装置「アクロス」の特長を利用して推定する新手法を開発した。本手法の特徴は、ノイズの変化に影響されずに減衰変化を推定できることにある。周波数領域ではアクロスの信号は飛び飛びの周波数成分で表現できるため、隣接する周波数成分の分散はその周波数の伝達関数に含まれているノイズの分散と同一であると仮定することができる。信号の周波数成分の2乗からノイズ分散を差し引いたものが、求める信号の2乗の推定値となる。これにより、エンベロープの比を計算する手法や、単純にエネルギーの比を計算する手法に比べてノイズの影響を受けずに推定することが可能になった。

新たに開発した手法が実データに適用できることを確認するためIkuta et al. (2002)で取得され、Ikuta and Yamaoka (2004)で走時変化に基づいて発生した現象の詳細な検討が行われている伝達関数に適用した。この伝達関数は、2000年1月から2001年4月にかけて、野島断層の分岐断層近傍に設置されたテストサイトで得られた。この期間には、比較的規模が大きな地動を伴う地震が4回発生しており、また、断層に水を圧入する注水実験が合計4回行われた。この伝達関数は、走時変化に関して詳細に解析がなされており、地震時の変化に関しては、Ikuta et al. (2002)で走時変化の解析が行われ、2000年鳥取県西部地震($M_w=6.6$, 震央距離165km)と、2001年芸予地震($M_w=6.4$, 震央距離215km)の2回の地震に関して走時変化が起こったことが、注水実験に関しては、山岡・生田(2001)で4回行われた実験のうち、2回目と4回目の注水に伴う走時変化が報告されている。さらに、地震時の変化の原因については、Ikuta and Yamaoka (2004)で異方性に注目した詳細な検討が行われ、間隙流体圧の上昇によるクラックの選択的な開口が原因であったと推測されている。

本研究の手法を適用して得られた振幅変化の結果には、地震時の振幅変化と注水実験に伴う変化、および降雨に伴う変化や長期的な変化が見られた。振幅変化は、鉛直成分のP波と、水平2成分のS波に着目して計算を行い、同時に、先行研究の手法で計算した走時変化も計算した。求めた振幅変化と走時変化を図に示す。地震時の振幅変化は、2000年鳥取県西部地震に関しては、最大で5%にも及ぶ振幅の急激な減少と、その後約1週間程度で振幅がもとの水準に回復する様子が見られたが、芸予地震に関してはわずかなステップ上の振幅変化が見られたのみであった。注水実験に伴う変化は、最大で5%程度で、4回行われた注水実験のうち、2回目と4回目のみに顕著な変化が観測された。その変化は、どちらの回でも一度振幅が上昇し、その後元に戻るような変化であった。

Ikuta and Yamaoka (2004)で指摘されているように、地震時の変化がクラックへの流体の流入によって起こったならば、粘性損失によって振幅の減少が期待される。我々の解析でも、地震時には振幅が減少し、彼らの考えと矛盾しない。一方、注水実験に伴う変化は、振幅の増大と、それに引き続く振幅減少とみなすことができる。振幅の増加は注水による応力の増大によって周辺岩石中のクラックが閉じることが原因、振幅の減少は注水された水が拡散することで粘性損失の範囲が拡大することが原因と解釈できる。



Derivation of SPAC-like expressions for strains measured by DAS

*Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO¹, Takeshi NISHIMURA¹

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

はじめに

光ファイバーケーブルを用いた分散型音響計測（DAS）は、1次元式的ではあるが大変稠密に歪（あるいは歪速度）を計測できるため、地震学の分野でも近年利用され始めている。DASで計測される物理量はケーブルに沿った軸歪であり、通常測定される地動並進成分とは異なるため、地震学でこれまでに使用されてきた解析手法を軸歪にも適用できるように拡張する必要がある。例えば、地震波干渉法についてはすでに適用がはじめられている（例えば、Martin et al., 2018）。本研究では、DASのデータを用いて微動探査を行うことを目指して、表面波のみを考慮して、2観測点における動径方向の軸歪のクロススペクトルと複素コヒーレンス（SPAC法で用いられる物理量）の解析的導出に成功したので、ここに報告する。

定式化

定式化の流れは、Haney et al. (2012)に従う。彼らは観測点に様々な方向から入射するレイリー波、ラブ波に対して、2観測点の変位場のクロススペクトル行列の全成分の定式化を行ったが、本研究では2観測点の動径方向の軸歪のクロススペクトルを求める。表記はTakagi et al. (2014)に従う。レイリー波とラブ波は互いに無相関であるとする。入射波動場は非等方的で、方位角についてフーリエ級数展開を行う。地形は考慮せずケーブルは水平に設置されているとする。この時、2つの観測点における動径方向の軸歪のクロススペクトルには、レイリー波だけでなくラブ波も寄与し、それぞれ以下のように導出できる：

レイリー波部分

$$H^2 (k^R)^2 / 8 * [a_0^R \{ 3J_0(k^R r) - 4J_2(k^R r) + J_4(k^R r) \} + \sum C_m^R(\phi) i^m \{ J_{m+4}(k^R r) - 4J_{m+2}(k^R r) + 6J_m(k^R r) - 4J_{m-2}(k^R r) + J_{m-4}(k^R r) \}]$$

ラブ波部分

$$(k^L)^2 / 8 * [a_0^L \{ J_0(k^L r) - J_4(k^L r) \} + \sum C_m^L(\phi) i^m \{ -J_{m+4}(k^L r) + 2J_m(k^L r) - J_{m-4}(k^L r) \}]$$

ここで、 k は波数、 r は2観測点間の距離、 a_0 , c_m は入射方位角に関するフーリエ級数の展開係数、 ϕ は2観測点を結ぶ方位角、 H はレイリー波のH/V比、上付きのR, Lはレイリー波、ラブ波を意味する。 $J_m(\cdot)$ は m 次の第1種ベッセル関数である。レイリー波とラブ波の寄与の和が、求めるクロススペクトルになる。さらに、それをゼロラグでの値で規格化することにより、複素コヒーレンスを導出することができる。

議論

導出した複素コヒーレンスは、光ファイバーケーブルが完全に直線であると仮定できれば、そのままの形で使用可能である。もちろん実際のケーブルは道路等に沿って配置されていることが多く、直線的ではないことも考えられるが、ケーブルが比較的直線的な部分のデータのみを用いて解析することが可能であろう。もし入射波の等方性を仮定できると、上の2式で c_m が0になり、 a_0 の項のみが残る。観測された軸歪の複素コヒーレンスの合わせこみにより、レイリー波とラブ波の位相速度、レイリー波とラブ波のエネルギー比の3つのパラメータを推定する逆問題を構築できる。動径方向の軸歪1成分だけでレイリー波とラブ波をどこまで適切に分離できるかが鍵になる。

入射波の非等方性を仮定する場合には、入射方位角に関するフーリエ級数展開の次数によって決めるべきパラメータ数が異なる。また、一つの方向のケーブルだけでは、入射方位角依存性を完全には決定できないため、少なくとも2つ以上の方向を向いた直線部分のデータが必要になる。

ケーブルの曲折が強い場合は、ケーブルの接線方向が2観測点を結ぶ方位からずれてしまうため、歪の座標変

換が必要となる．定式化には動径方向の軸歪だけではなく歪の他の成分も現れるため，さらに複雑な形になる．

結論

本研究では，動径方向の軸歪の2観測点におけるクロススペクトルと複素コヒーレンスの解析的導出に成功した．この式に基づくと，DASの歪記録の複素コヒーレンスから，レイリー波とラブ波の位相速度を原理的に推定できる．実際問題として，動径方向の軸歪1成分だけからレイリー波とラブ波をどの程度うまく分離できるかは，今後，実データの解析を通して確認する予定である．

Detection and location methods of volcanic tremors using seismic cross-correlation: application to Sakurajima volcano

*Theodorus Permana¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹, Nikolai Shapiro²

1. Tohoku University, Japan, 2. Institut des Sciences de la Terre, Grenoble, France

Volcanic tremors are associated with the movement of volcanic fluids such as magma and gas in the conduit of a volcano. Determination and monitoring of their source locations are important to understand the mechanism that controls the eruptive behavior. However, seismic records of volcanic tremors are known to have complex waveforms with unclear seismic phases and variations in the amplitude and duration. We develop and evaluate methods to detect volcanic tremor signals from continuous seismic records and determine the source location. We employ cross-correlation analysis to avoid reading the arrival time of seismic phases and assume the propagation of direct S-wave. The calculated cross-correlation functions (CCFs) contain information on signal coherency and relative travel time that are useful for detection and location. The method is applied for every 10-minute of the seismic data of six JMA stations at Sakurajima volcano.

For the detection, we adopt a detection method called the network covariance matrix analysis that measures the signal coherency over the seismic network, referred to as the “spectral width”. However, this method does not specifically detect volcanic tremors, since any signal that is coherent across the seismic network may also be detected. We extend the network covariance matrix method by further computing a classification measure. To specifically target volcanic tremors, a weight function is defined, where the weight is set to be non-zero at the frequencies where the tremor signal is the most coherent. For the location method, we apply the CCF-based source scanning algorithm (CCF-based SSA) that locate the source by finding a location that maximizes the “brightness” function in a grid-search scheme. The location method has been evaluated in the previous study by using volcano-tectonic earthquakes and simulated tremors (Permana et al., 2020). Therefore, application to real seismic data is new.

We analyze continuous seismic data during the period of April-September 2017 in the frequency range of 1-4 Hz. Catalog and reports of activities at Sakurajima volcano by the JMA are used for validation. For each source location, the corresponding spectral width value is used as a measure of location reliability. For further interpretation, we select only reliable source locations by imposing a criterion of the spectral width and correlation coefficient that is computed from CCFs calculated between component pairs of the seismometer. We successfully detect two time periods where volcanic tremors mostly occurred associated with the increase in eruptive activity. In the first time period in May, the tremors are characterized by long-duration signals, the source locations are mostly distributed at depths of 0-6 km beneath the Minamidake and Showa craters, and the eruptions are characterized by continuous ash emission. Changes in source location preceding and following an eruption are also observed. In the second time period is in August-September, the tremors are mostly short-duration and intermittent, but we are able to detect a continuous tremor that accompanies an episode of Strombolian eruption and their sources are determined at shallow depths (<2 km depth). Comparison with magma supply system from various studies shows that the estimated depth distribution of the source location appears to consistent with the movement of magma from the shallow magma chamber at about 5 km depth to beneath Showa crater. Our results show that the detection and location methods based on cross-correlation analysis can be very useful to monitor tremor activity at a volcano and provide insights into the movement of magma and eruptive behavior.

Room D | Special session : S23. Frontier of observational seismology-Future of dense seismic observation

🗓️ Fri. Oct 30, 2020 10:30 AM - 11:45 AM JST | Fri. Oct 30, 2020 1:30 AM - 2:45 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S23]AM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi(NIED)

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

[S23-01] Seismological evidence for a seamount subduction in eastern Shikoku

○Katsuhiko SHIOMI¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S23-02] Detection of deep low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone over 11 years using a matched filter technique

○Aitaro Kato¹, Shigeki Nakagawa¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:00 AM - 11:30 AM JST | 2:00 AM - 2:30 AM UTC

[S23-03] [Invited] Crustal activity monitoring using ocean networks for earthquakes and tsunamis

○Narumi Takahashi¹, Takane Hori² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

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

[S23-04] Ambient noise tomography in the forearc region off northeast Japan using S-net

○Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida² (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Seismological evidence for a seamount subduction in eastern Shikoku

*Katsuhiko SHIOMI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

前回、我々は、四国東部下に沈み込むフィリピン海プレート内の海洋モホ面の傾斜方向を詳細に解析し、明瞭な凹凸が存在する可能性があることを報告した（汐見・他, 2019年度地震学会秋季大会）。本講演では、解析範囲を四国全域に拡大するとともに、四国東部についても新たなデータを追加し、その特徴をより明確に捉えるとともに、改めてその解釈を行った。

解析方法・データ

解析には、四国全域に設置されている定常観測点ならびに臨時観測点計153地点で収録された遠地地震波形記録（M5.8; $30^\circ \Delta 90^\circ$ ）を用いた。目視等によりS/Nの良い波形を抽出したのち、0.1-1.0Hzの帯域通過フィルタを適用し、レシーバ関数を求めた。各観測点で求められたradial成分のレシーバ関数で確認される最も顕著な変換波位相に着目し、その位相が変換した面の概略深さと面の傾斜方向を、Harmonic decomposition法（Bianchi et al., 2010）を用いて推定した。この際、Matsubara & Obara (2011)による三次元速度構造モデルを用いた。

結果・議論

四国中部から西部ならびに室戸岬周辺の観測点では、速度不連続面はおおむね北西方向に深くなる傾向を示した。この方向は既存のスラブモデルと整合していることから、解析対象とした顕著な不連続面は海洋モホ面であると解釈した。一方、徳島県北部周辺の観測点では、いずれも、南方すなわち南海トラフに向かって深くなる速度不連続面を検出した。この特徴は従来のモデルからは説明出来ない。しかし、Harmonic decomposition法は各観測点を独立に解析する方法であり、観測環境の異なる近接した複数観測点で同様の結果が得られるということは、その地域の実際の特徴を表していると考えられる。では、この南傾斜の顕著な速度不連続面は何を意味するのか。

過去の構造探査等から、スラブに接する陸側モホ面がトラフ軸側に傾き下がる不連続面として存在しうることが知られている。この場合、陸側モホ面のより深部に、やはり明瞭な不連続面であるはずの海洋モホ面が存在するはずであるが、レシーバ関数からは、後続位相に顕著な変換波を確認することが出来なかった。また、前述の通り室戸岬周辺では北西方向に傾斜する海洋モホ面を検出したと考えているが、徳島県北部の観測点で陸側モホ面を検出したとした場合、南側の観測点に対し、海洋地殻の厚さ（~10 km程度）分、浅く検出される必要があるが、本解析で求めた概略深度はトラフ軸から離れるに従って単調に増加する傾向となっている。以上の特徴から、徳島県北部で検出した南傾斜の不連続面は陸側モホ面ではない。

四国東部沖での構造探査により、室戸岬沖に沈み込む海山が存在することが発見されており、この海山の北側底部に相当する海洋モホ面は南方に傾斜している（Kodaira et al., 2002）。この海山は、四国海盆の過去の拡大軸である紀南海山列の延長上にあり、今回検出した南傾斜の不連続面はさらにその北部延長に位置する。一方、四国東部は深部低周波地震（微動）活動が、四国西部や紀伊半島に比べて低調であるとともに、香川県内と香川・徳島県境付近の2列に分かれて分布するという特徴がある。このうち、県境付近の活動域の南端が本研究で南傾斜の不連続面を検出した観測点の分布とほぼ一致する。このことから、香川県内の活動がスラブ上面と陸側モホ面が接する場所、県境付近の活動は沈み込む海山のような海洋地殻内の構造異常と陸側地殻の接する場所と解釈することが可能である。なお、この地域のレシーバ関数断面は複雑であり、スラブ上面の形状をレシーバ関数から同定することは、現時点では困難である。また、トモグラフィ解析（例えば、弘瀬・他, 2007）でも十分な解像が得られておらず、スラブ上面の形状を解明することは今後の課題である。

謝辞：本研究には、防災科研Hi-net/F-net観測点のほか、気象庁、産総研VA-net、東大地震研究所、京大防災

研究所，高知大による定常観測点ならびに文部科学省「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として設置した臨時観測点のデータを使用しました．本臨時観測の実施にあたって，武田哲也氏，上野友岳氏に多大なるご協力を頂きました．本研究の一部はJSPS科研費JP16H06475およびJP16H06473の助成を受けました．

Detection of deep low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone over 11 years using a matched filter technique

*Aitaro Kato¹, Shigeki Nakagawa¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

To improve our understanding of the long-term behavior of low-frequency earthquakes (LFEs) along the tremor belt of the Nankai subduction zone, we applied a matched filter technique to continuous seismic data recorded by a dense and highly sensitive seismic network over an 11 year window, April 2004 to August 2015. We detected a total of ~510,000 LFEs, or ~23× the number of LFEs in the JMA catalog for the same period. During long-term slow slip events (SSEs) in the Bungo Channel, a series of migrating LFE bursts intermittently occurred along the fault-strike direction, with slow hypocenter propagation. Elastic energy released by long-term SSEs appears to control the extent of LFE activity. We identify slowly migrating fronts of LFEs during major episodic tremor and slip (ETS) events, which extend over distances of up to 100 km and follow diffusion-like patterns of spatial evolution with a diffusion coefficient of $\sim 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$. This migration pattern closely matches the spatio-temporal evolution of tectonic tremors reported by previous studies. At shorter distances, up to 15 km, we discovered rapid diffusion-like migration of LFEs with a coefficient of $\sim 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$. We also recognize that rapid migration of LFEs occurred intermittently in many streaks during major ETS episodes. These observations suggest that slow slip transients contain a multitude of smaller, temporally clustered fault slip events whose evolution is controlled by a diffusional process.

[Invited] Crustal activity monitoring using ocean networks for earthquakes and tsunamis

*Narumi Takahashi¹, Takane Hori²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology

南海トラフ沿いの大規模地震の発生の可能性が相対的に高まったと評価された場合等に、気象庁は臨時情報を発表する。この場合、日頃からの地震の備えの再確認やできるだけ安全な防災行動をとることが推奨されている。2011年東北地方太平洋沖地震は甚大な被害をもたらしたが、「通常と異なる動き」があったことがb値、p値、地殻変動、地震活動、前震の余効変動等から示された(内閣府、2012)。この「大規模地震の発生の可能性が相対的に高まった」ことを南海トラフ域で示すために、定常的な地殻活動のモニタリングが必要であると考えている。

南海トラフ域は東北沖と異なりマグニチュード(M)2以上を持つ地震活動が低調である。そのため、できるだけ小さい地震を捉え、それらの地震活動の背景である地殻内の応力場変化を把握することが重要である。海底地震・津波観測監視システム(DONET)は稠密な観測体制を構築している。M0.7以上の地震を観測しているが、それらの地震の震源位置、具体的にはプレート境界、上盤、下盤のいずれに分布するか知ることが必要である。これまで海域における断層情報総合評価プロジェクトを通して構築してきた南海トラフ域の三次元速度構造を用いてDONETの走時データから震源位置を評価し直した。その結果海洋性地殻内の断層イメージを得、また、2016年4月1日三重県南東沖の地震の位置がプレート境界であることを確認した。海域構造探査による断層評価と海域観測網によるゆっくりすべりを含めた地震活動を直接比較することが実現しつつある。南海トラフ域の観測体制としては、地殻変動成分も含む超広帯域かつ稠密な観測環境が望ましい。それは、連動発生を考慮すれば余効変動の把握は必要不可欠であるからである。しかし、海底水圧計にはドリフトノイズが含まれ、また、南海トラフ域には海水密度が異なる黒潮が時には位置を変えながら分布する。このドリフトの校正技術や、海面ブイ等を用いた気象と海象の両方の同時観測が行われ、地殻変動観測実現に向けて検討を進めている。

現在、防災科研では、海域観測網は南海トラフ域の土佐沖から日向灘にかけて新たな南海トラフ地震津波観測網(N-net)を構築中である。DONET, S-netやN-netといった海域観測網と高感度地震観測網(Hinet)を組み合わせ、広帯域な地殻活動モニタリングを実現していきたい。これらの情報は、推移予測シミュレーションにつながり、地域の防災減災に貢献することになる。これらの情報を利用して、「地震の備え」や「安全な防災行動」を各地域でカスタマイズしながら取り入れて避難訓練を実施するような形が望ましいと考えている。

Ambient noise tomography in the forearc region off northeast Japan using S-net

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網（S-net）によって、東北日本前弧海域下におけるスロー地震活動や沈み込み帯浅部の構造に関する新たな知見が得られるようになった [e.g., Tanaka et al., 2019; Nishikawa et al., 2019]。しかし、地震発生場の理解に重要だと考えられるS波速度構造の理解は限られている。本研究では、S-netで観測された常時微動の相互相関解析から表面波を抽出し、東北日本前弧海域におけるS波速度構造を推定することが目的である。解析では、2016年8月から2019年8月までの3年分の加速度計データを使用し、センサー設置姿勢の補正 [Takagi et al., 2019] と地震を含むセグメントの除去を行った後、観測点間の相互相関関数を計算した。また、対象とする0.1 Hz以下の周波数帯域では常時微動振幅が機器ノイズレベル以下であるため、Takagi et al. [2020] の方法により観測点間でコヒーレントな機器ノイズの影響を除去した。0.04–0.1 Hzにおいて表面波を抽出でき、SPAC法 [Aki, 1957; Nishida et al., 2008] により位相速度を推定してモードを特定した。Vertical成分同士（VV成分）の相互相関関数とVertical成分とRadial成分（VR成分）の相互相関関数にはレイリー波の基本モードが卓越し、Transverse成分同士の相互相関関数にはラブ波の基本モードが卓越する。また、Radial成分同士の相互相関関数ではレイリー波の卓越モードが海底面の深さによって変化し、浅海域では基本モード、深海域では約0.06 Hzより高周波数帯域において1次高次モードが卓越する。本研究では、まずVV成分とVR成分を用いて、レイリー波基本モードの位相速度マップを推定した。観測点ペア毎の位相速度測定には Nagaoka et al. [2012] の方法、トモグラフィーには Rawlinson and Sambridge [2003] の方法を用いた。0.04–0.06 Hzにおいて、海溝陸側斜面下部では約北緯38度より北部が高速度、南部が低速度と推定された。また、海溝陸側斜面中部では約北緯37度から約北緯39度の範囲で高速度、それより北部と南部で低速度と推定され、特に日高沖と房総沖の低速度領域が顕著である。推定された位相速度分布は主に上盤内のS波速度不均質構造を反映すると考えられるが、レイリー波の1次高次モードおよびラブ波の使用することで、S波速度構造をより拘束できると考えられる。

Room D | Special session : S23. Frontier of observational seismology-Future of dense seismic observation

📅 Fri. Oct 30, 2020 1:00 PM - 2:15 PM JST | Fri. Oct 30, 2020 4:00 AM - 5:15 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S23]PM-1

chairperson: Ryota Takagi (Graduate School of Science, Tohoku University)

1:00 PM - 1:30 PM JST | 4:00 AM - 4:30 AM UTC

[S23-05] [Invited] Dense seismic observation using seafloor optical fiber cable system off Sanriku by Distributed Acoustic Sensing

○Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Shin'ichi Sakai¹
(1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-06] Estimation of Site Amplification of Azuma volcano: Analyses of Seismic Signals Recorded by Fiber Optic Cable and DAS

○Takeshi Nishimura¹, Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹, Shunsuke Sugimura¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger)

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

[S23-07] Analysis of dense records of the DAS observation using fiber optic cable in the urban area

○Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Takeshi Nishimura¹, Mare Yamamoto¹, Kodai Sagae¹, Gugi Ganefianto¹, Katsuhiro Yabu¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S23-08] Characteristics of DAS data by Artificial Vibration

○Masayuki Tanaka¹, Akio Kobayashi¹, Akio Katsumata¹, Koji Tamaribuchi¹, Tsunehisa Kimura², Shunsuke Kubota³, Yukihide Yoda⁴ (1. Meteorological Research Institute, 2. Schlumberger, 3. YK Giken Co., 4. NEC Corporation)

[Invited] Dense seismic observation using seafloor optical fiber cable system off Sanriku by Distributed Acoustic Sensing

*Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Shin'ichi Sakai¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

光ファイバをセンサとして用いるDistributed Acoustic Sensing(DAS)計測は、空間的に高密度なデータが取得可能であることから自然地震観測に応用されており、海底ケーブルによる先駆的な観測例もある。DAS計測は、光ファイバセンシング技術の一つで、コヒーレントなレーザー光の短いパルスを送信し、シングルモードファイバに連続して送信し、後方散乱を観測する。ファイバ近傍で発生した振動により発生したファイバの微小な変形が後方散乱波のパターンを変化させることから、振動を検出する。パルスを送出してから時間が観測点までの距離に対応する。また、後方散乱波のパターン変化検出には干渉測位を用いており、散乱源の距離変化（歪変化）を計測する。干渉させる散乱波の散乱源の距離（ゲージ長）が空間的な分解能に相当し、地震観測の場合はゲージ長は数十mに設定することが多い。すなわち、地震計を数十m間隔で、長さが敷設されているファイバに対応するアレイ観測が行うことができる。

地震研究所は、1996年に三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムを設置し、2011年東北地方太平洋沖地震の被災による中断を経て、現在も観測に用いている。このシステムは将来の拡張用として、6本（3組）のファイバが用意されている。このファイバは、分散シフト・シングルモードファイバであり、DAS計測が適用可能なファイバである。そこで、次期海底ケーブル式観測システムの新技術として、三陸沖光ケーブル観測システムを用いてDAS技術を用いた地震観測を行うこととした。DAS技術による海底観測は、これまで「点」であった観測を、「線」での観測に変化させる画期的なものである。

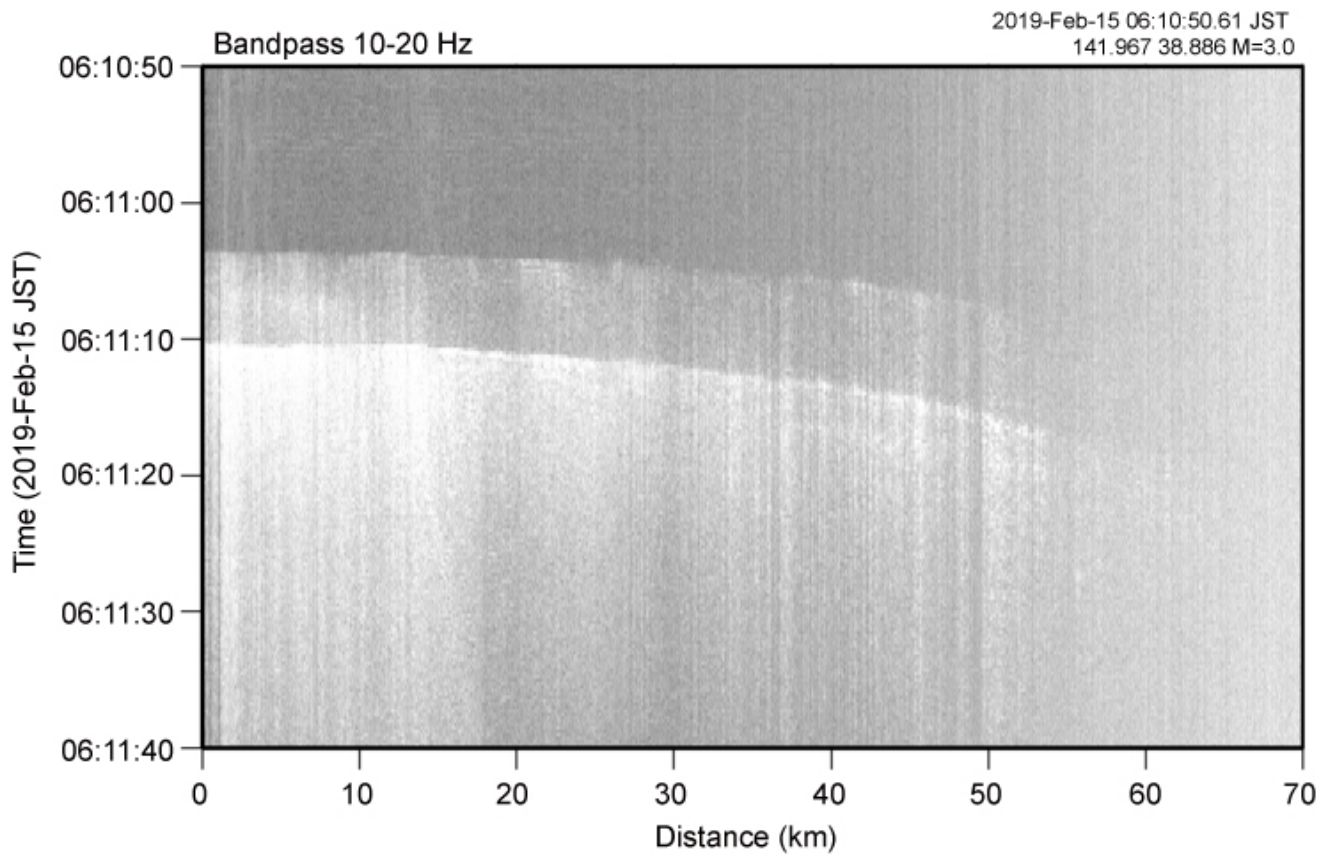
パイロット観測として最初のDAS計測を、2019年2月13日から15日までに実施した。DAS計測の計測器を陸上局に設置し、陸上局から100kmまでの区間において、サンプリング周波数500Hz、ゲージ長(空間分解能)10mまたは40mで連続収録した。収録チャンネル間隔は5mとしたので、全20,000チャンネルのデータとなった。収録期間は約46時間である。その結果、マグニチュード1クラスの微小地震を始め観測システム近傍で発生した小さな地震や深発地震など多数の地震が観測された(図)。また、陸上局から70km程度までの区間において地震波の到達を確認することができた。また、雑微動のノイズスペクトルを求めたところ、陸上の歪計に比較可能なレベルであることもわかった。

DAS計測技術は発展中の技術であり、計測装置についても、各社からそれぞれの特徴がある装置が提案されている。そこで、複数の会社の装置をもって試験観測を実施し、開発を進めることとした。2019年6月25日から28日にかけては、1回目とは異なる計測器により、約72時間の観測を行った。計測装置の特徴により、6月の測定では、計測全長は5kmと短くなったが、チャンネル間隔1m、ゲージ長は7mから32mとして高精度の観測とした。この観測においても、観測システム近傍で発生した比較的規模の小さな地震や、深発地震など多数の地震が観測され、検出性能としては二つの計測装置にほぼ違いがないこと、また、ノイズスペクトルの比較からも異なる計測装置間でもノイズレベルは同等であることがわかった。

2回のパイロット観測により、海底ケーブルを用いたDAS計測による地震観測は有用であることが明らかとなった。海底におけるモニタリング観測のためには、さらに長期の収録期間が必要となる。また、DAS計測データの評価には、より長期間のデータが必要である。そこで、モニタリング観測を意識して、できる限り長期間で連続したDAS計測を、2019年11月18日から12月2日にかけて実施した。記録期間は記録装置の容量に依存しており、現状は2週間が最長となった。収録パラメータの多くは、2月の実験と同じとした。ただし、収録容量を削減するために、全計測長を18日は約48kmとし、2日目からは70kmとした。データの総容量は15テ

ラバイトとなった。同じく、深発地震を含む多くの地震が収録され、良好な記録が得られた。今後は、このデータを用いて、DAS計測データの評価を進めるとともに、長期モニタリングのためのデータ処理・収録システムの開発を検討する。

図 2019年2月に実施した三陸沖光ケーブル観測システムにおけるDAS計測により収録された地震記録例。横軸は陸上局からの距離、縦軸は時間である。



Estimation of Site Amplification of Azuma volcano: Analyses of Seismic Signals Recorded by Fiber Optic Cable and DAS

*Takeshi Nishimura¹, Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹, Shunsuke Sugimura¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger

通信用に開発された光ファイバー内を伝播する光は、ファイバーコア内の欠陥や不純物などにより後方散乱される。その散乱波を利用したDistributed Acoustic Sensing(DAS)systemを用いることで、ファイバーに生じた歪みの時間変化を数メートルから数十メートル間隔で測定することができる。今回、このシステムを利用して地盤増幅特性を推定したので報告する。

解析に用いたデータは、2019年秋季大会、2020年JpGUで報告した、磐梯吾妻スカイラインの道路に沿った光ファイバーケーブルとDASによるものである。土湯温泉ゲートから浄土平までの総長14.2kmにわたり、間隔10m、ゲージ長40mで歪み速度を記録している。道路はほぼ南北方向に伸びているが、その中程と南側でつづら折りとなっている箇所もある。光ファイバーケーブルは、深さ50cmほどに埋設された管内に設置されている。2019年7月4日から、南端にある土湯温泉ゲートに、シュルンベルジェ社のheterodyne Distributed Vibration Sensing (hDVS)を設置し、サンプリング周波数1000Hzで約3週間の連続観測を行った。

自然地震のコーダ波は、十分時間が経過すると空間的にほぼ一様に分布すると考えられる。そこで、コーダ波の相対振幅を測定することで、観測箇所の地盤増幅特性を評価する。用いたデータは、観測期間中に観測された、太平洋沖や内陸で発生した震央距離50-100km、深さ100km以浅の自然地震11個である。コーダ波による解析ではS波走時の2倍以降のデータを利用することが一般的であるが、観測箇所の分布範囲に比べて震源距離が十分大きい。そこで、S波の着信時から50秒後までの波形に対して、10秒間の解析窓を10秒ずつずらしながらRMS振幅を読み取り、測線の中央付近に設定した基準点に対する相対振幅を読み取った。解析周波数は2-6Hzである。解析に用いた地震波は、S波着信時から50秒後までのコーダ波であるが、解析窓の位置の違いによる地盤増幅特性の顕著な違いは認められなかった。

解析の結果、S波増幅特性は、全体として、敷設されている光ケーブルの北側の地域で大きく、南側の地域で小さいことが明らかとなった。地盤増幅特性の大きい北側の光ファイバーが敷設されている場所は、吾妻小富士、一切経山、東吾妻山、高山などの山麓に位置し、比較的平坦な地形の上である。過去の溶岩流や火砕堆積物が積もっていると考えられることから、浅部表層は軟弱地盤で構成されており、増幅特性が大きくなったと推察される。一方、小さい地盤増幅特性が推定された南側の地域は、深い谷地形や尾根筋に光ケーブルが敷設されている。火砕堆積物が浸食されるなど、浅部に軟弱地盤がないと想定される。北側の小河川沿いも、地盤増幅特性が周辺に比べてやや小さい箇所が認められる。

光ファイバーケーブルとDASを利用して自然地震を記録することにより、数10m間隔で容易に地震動が記録できることから、長基線にわたって詳細な地盤増幅特性を調べることが可能であることがわかった。

謝辞

国土交通省の光ファイバーを借用した。観測に当たって、国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。

Analysis of dense records of the DAS observation using fiber optic cable in the urban area

*Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Takeshi Nishimura¹, Mare Yamamoto¹, Kodai Sagae¹, Gugi Ganefianto¹, Katsuhiro Yabu¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University

近年、光ファイバーケーブルを用いたDAS (Distributed Acoustic Sensing) が地震学において用いられるようになってきた。これは、光ファイバーケーブルを伝わる光パルスの後方散乱波の変化から、ケーブルが変形した位置とその地点におけるひずみを検出するものである。一つの計測装置と一本のケーブルで、数十kmを数m間隔で計測できることが最大の利点である。既存のケーブルを用いる際の地面とケーブルのカップリングや、計測される物理量がひずみテンソルの1成分のみといった制約があるものの、地震学での利用を目的とした手法開発や、観測事例の蓄積が行われてきている。我々は、宮城県内を通る国道4号線沿いに敷設されている通信用の光ファイバーケーブルを利用し、DAS観測を行った。得られた波形記録や、雑微動に地震波干渉法を適用した結果等を紹介する。

計測装置は国土交通省古川国道維持出張所内に設置し、光ファイバーケーブルは、そこから南方向に国道4号線に沿って約50km伸びている。ケーブルは途中で長町利府断層を横切る。ゲージ長・チャンネル間隔は共に5mとし、合計約1万箇所において、500Hzサンプリングで、ケーブルに沿った方向のひずみ速度を記録した。計測は2020年1月から2月にかけての1ヶ月間行った。国道4号線は昼夜を問わず交通量が多いため、全ての時間帯で交通ノイズの影響が見られた。孤立した車の走行ではなく、何台もの車がまとまって通過するため、交通ノイズの波形は複雑で、単純に分離することはできない。期間中に発生したいくつかの地震も記録されたが、交通ノイズの影響は避けられないものであった。また、橋梁部分では、車の通行により橋全体が揺れる振動が見て取れた。長町利府断層の北側で行われていた工事の影響で、光信号の減衰が生じ、長町利府断層付近を含めてその南側ではノイズが大きい記録となった。

得られた1ヶ月間の連続記録に対し、地震波干渉法を適用した。約1万チャンネルを200チャンネルごとのセグメントに分け、各セグメント内のペアで相互相関関数を計算した。計算の際には、時間領域での1bit化と、周波数領域でのホワイトニングを行った。相互相関関数の収束はセグメントによって異なるものの、S/Nのよいセグメントでは、2Hzから8Hzの周波数帯で対称性のよい相互相関関数が得られ、550m/sから600m/s程度で伝播する波が検出された。この周波数帯は、交通ノイズによるシグナルのパワーが強いため、ケーブルのほぼ真上を通る車によるノイズにより、伝播する波が検出されているのだと考えられる。今後、セグメントごとの伝播速度の違いや、相互相関関数の収束性に関する議論を行う予定である。

謝辞

国土交通省所有の光ファイバーを使用させていただいた。観測に当たって、仙台河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。

Characteristics of DAS data by Artificial Vibration

*Masayuki Tanaka¹, Akio Kobayashi¹, Akio Katsumata¹, Koji Tamaribuchi¹, Tsunehisa Kimura², Shunsuke Kubota³, Yukihide Yoda⁴

1. Meteorological Research Institute, 2. Schlumberger, 3. YK Giken Co., 4. NEC Corporation

近年、分布型音響センシング（DAS; Distributed Acoustic Sensing）の技術を用いた地震観測について多数報告されている。DASは、光ファイバ（コア部分）の一端から非常にコヒーレントな短波長の光パルスを入射し、コア内に存在する多くの分子レベルの不純物や欠陥に衝突して発生する後方散乱光が入射端に戻るまでの時間を計測する。光ファイバは振動や温度等の外乱で変形し、変形した場所で光パルスに位相差が生じる。光パルスの波長変化はひずみ変化速度に対応し、光パルスを等間隔で連続的に入射することにより、ピコストレインレベルのひずみの時間変化が観測できる。しかも、一回のパルスでファイバ全域を細かい間隔で観測できる。

2020年3月、静岡県浜松市天竜区船明地区にある延長約900mの船明トンネル内にて、シングルモード4芯1kmの光ファイバケーブルを敷設し、アダプタで芯同士を接続して総延長4kmのファイバケーブルでDASの試験観測を実施した。これまでの調査で、DASと地震計の双方で観測された近地自然地震の波形記録を比較したところ、地震計記録で見られるP相、S相の実体波はDAS記録でも見られる。また、DASの波形記録はファイバに沿う方向と同じ南北方向の地震計記録と相関が強い。ファイバ近傍で稼働中の真空ポンプのモーター振動及びその高調波などが明瞭に観測された。

しかしながら、DASのデータは、①ゲージ長で区間平均された値である、②不純物や欠陥に当たり発生する散乱光は非常に微弱で、入射する光パルスの強度には上限があり、かつファイバには伝送損失があるため、より遠方の散乱光の信号強度は装置近傍よりも弱くなり、そして、より遠方ほど測定精度は劣るため、S/N比を上げるため加算平均等の処理が行われている、③DASで観測されるデータの物理量はひずみ速度である、など、地震計とは異なる点がある。地震観測で規模推定にDAS記録を用いるには、少なくとも同じ地点で入力振動に対して観測値が線形性を有していることが必要である。また、通常地震波動解析を行う上で再現性が重要である。

船明トンネル内に敷設したファイバは、約30mを2往復半折返している箇所があり、固有周期1秒の三成分速度型地震計が1台設置されている。そこで、敷かれているファイバと直角に30、60、100、130、160、200cm離れた場所で、ハンマーで地面を叩いて振動を起こし、DASの記録に、地震計のように振動源からの距離に応じて振動の減衰が見られるか、同じ設置環境にある同じ場所の異なるファイバで観測される記録と大きく変わらないかなどについて調べたので紹介する。

Room D | Special session : S23. Frontier of observational seismology-Future of dense seismic observation

📅 Fri. Oct 30, 2020 2:30 PM - 3:30 PM JST | Fri. Oct 30, 2020 5:30 AM - 6:30 AM UTC | 🏢 ROOM D

[S23]PM-2

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

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

[S23-09] 3-D S-wave velocity structure derived by ambient noise tomography using dense short-period OBS array of off Ibaraki region

○Lina Yamaya¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Kiwamu Nishida¹, Tsuyoshi Ichimura¹, Kohei Fujita¹, Takuma Yamaguchi¹, Takane Hori² (1.ERI, Univ. of Tokyo, 2.JAMSTEC)

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

[S23-10] High-density event locations with high-density OBS network at off-Ibaraki region

○Shinji Yoneshima¹, Kimihiro Mochizuki¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:00 PM - 3:30 PM JST | 6:00 AM - 6:30 AM UTC

[S23-11] [Invited] Dense seismic observation design for capturing background of large inland earthquakes (lessons from "0.1Manten" hyper dense seismic observation)

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

3-D S-wave velocity structure derived by ambient noise tomography using dense short-period OBS array of off Ibaraki region

*Lina Yamaya¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Kiwamu Nishida¹, Tsuyoshi Ichimura¹, Kohei Fujita¹, Takuma Yamaguchi¹, Takane Hori²

1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC

本研究では、茨城沖領域に約6km間隔で展開された短周期海底地震計による数ヶ月間の観測波形に地震波干渉法を適用することで、工学的基盤から地殻上部までの3次元S波速度構造を推定した。2010年10月17日(一部は2011年2月14日)から2011年10月7日にかけて、約6km間隔の短周期海底地震計 (Lenartz 3-D Lite) 32台からなる稠密観測網が茨城沖領域に展開されていた。地震波干渉法 (e.g., Bensen et al., 2007) ではノイズ源の空間的な等方分布を仮定する必要があるため、地震の数が比較的少ない2011年3月8日まで(三陸沖地震(2011年3月9日)及び東北地方太平洋沖地震(同3月11日)の発生前)の観測波形を用いた。

鉛直成分及びradial成分同士の相互相関関数を計算し、鉛直成分からレイリー波の基本モード、radial成分からレイリー波の基本モードと1次高次モードを確認した。まず、spatial auto-correlation (SPAC) 法 (Aki 1957; Nishida et al., 2008)を用いて平均的な分散曲線を測定し、trans-dimensional Markov chain Monte Carlo法 (e.g., Bodin et al., 2012)を用いて平均的な1次元構造を推定した。その結果、最上部に厚さ500mの堆積層 (V_s : 360 m/s)、その下に厚さ1.6kmの堆積層 (V_s : 930 m/s)を推定した。これらの堆積層の下は音響基盤と考えられ、この深さは構造探査によるP波速度構造 (e.g., Tsuru et al., 2002; Mochizuki et al., 2008) とおおよそ一致している。さらに、位相速度の平均からの摂動を推定し (following Nagaoka et al., 2012)、位相速度mapを作成した。その後、各空間グリッドに対して1次元S波速度構造の線形インバージョン (Herrmann, 2013)を行い、これを足し合わせることで3次元のS波速度構造を推定した。堆積層の厚さの変化は摂動としては大きかったが、変化の絶対値は海底面の起伏より小さかった。一方で、上部地殻の構造については、領域の北側より南側の方が複雑であった。本研究領域の南側には海山が推定されており (Mochizuki et al., 2008)、Sun et al. (2020)により海山の沈み込みが上部地殻の構造を複雑にすることが示されている。したがって、本研究領域でも、海山沈み込みに伴い上部地殻が複雑になったと考えられる。

また、本研究の結果を用いた3次元理論波形計算を行った。本観測領域は海底深度が2000から3000mと幅広く、また表面にS波速度の遅い層が厚く堆積しているため、地形の効果が無視できないと考えられる。そのため、本研究で推定した構造を用いて3次元理論波形計算を行い、構造の効果を解釈する。

High-density event locations with high-density OBS network at off-Ibaraki region

*Shinji Yoneshima¹, Kimihiro Mochizuki¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Until 2011 Tohoku-oki earthquake, off-Ibaraki region has been known to be seismically inactive, not only large but even small-to-moderate earthquakes. In this region, a subducting seamount was discovered by Mochizuki et al (2008) in this low seismicity area, and a weak coupling was suggested to account for this low seismicity.

Just after 2011 Tohoku-oki earthquakes, many earthquakes had occurred including the largest aftershock (Mw7.8) of Tohoku-oki earthquake. This suggests that this region is seismically active, presumably as an interaction with the seamount subduction.

Six months before and after the Tohoku-oki e.q. a high-density OBS survey had been conducted from October 2010 to September 2011 with quite dense (6km) spacing. In this OBS experiment, quite a large number of earthquakes (>60,000) were recorded and ~20000 events were located.

A tomography with a double difference hypocenter relocation was applied to obtain the velocity structure and especially the precise hypocenter locations.

The relocated hypocenters formed some clusters in a three-dimensional space. We focused on a cluster that was aligned along the near-vertical direction, whereas many clusters are aligned along the dip and strike directions of the subducting oceanic plate.

This vertically aligned cluster ranges from approximately 8 to 24 km depth, corresponding to above the plate boundary to below the plate boundary, perhaps below Moho. We made a common station gather for these events, which is analogous to a zero-offset reverse VSP (station is located on the seafloor and sources in the underground along a near-vertical trajectory).

We will discuss whether there are any featured converted phases in this gather such as a reflection from the plate boundary so as to gain an insight about the precise depth information of these earthquakes in conjunction with the subducting seamount.

[Invited] Dense seismic observation design for capturing background of large inland earthquakes (lessons from "0.1Manten" hyper dense seismic observation)

*Satoshi Matsumoto¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

はじめに

内陸領域で発生するマグニチュード7クラスの地震は大きな被害を周辺領域に与える。このような地震の発生場をとらえ、その特徴を抽出することが将来の内陸地震発生ポテンシャル評価につながると考えられる。このクラスの地震は断層長が30km程度であり、断層を取り巻く構造や地震活動、応力、変形を詳細にとらえることは広域の地震観測網がおおよそ20km間隔であることから難しい。このため、断層周辺により稠密な地震観測網などを展開し、詳細な特徴の把握が試みられている。その結果、速度構造が破壊の開始点や大すべり域に関連していることや断層周辺では応力場が不均質であり、さらに地震前後での変化が検出されている。この場合でも数キロメートルの分解能、発震機構解では数度以上の誤差を持っているため詳細な議論ができなかった。そこで、我々は2000年鳥取県西部地震震源域において1000点の地震観測点を設置し、地震検出能力、発震機構解の精度、構造分解能の向上を目指した（0.1満点地震観測）。ここでは、得られた成果を紹介するとともに今後の内陸大地震発生場解明のための地震観測について検討する。

0.1満点地震観測

2017年3月から2018年4月まで、鳥取県、島根県、岡山県にまたがる領域（直径約35km）に1000点の上下動地震計を設置した。これらは現地調査、観測、保守、撤収まで京大、東大、九大を中心とした多くの研究者と現地のボランティアによって実行された。得られたデータを自動読み取り処理を施し、精度の高いもので1年間のうちに約5000個のイベントが検出された。マグニチュード（M）マイナス1程度まで十分に検出され、また、M>0.5程度の発震機構は精度良く決めることができた。これらのデータをより詳細に解析した結果、火山や地熱地帯で観測されるノンダブルカップル成分を持つ地震が多数発生していることが明らかになった。これは観測点数が500点以上ないと十分検知できないことも分かった。また、本震発生直後と約18年経過した地震活動、メカニズム解を調べた結果、地殻応答がべき乗流体として近似できることや異常なすべりの存在が示唆された。また、構造分解能は1km以下となり、地質構造に対応する詳細な速度異常も発見された。このように詳細な構造・活動特性はこの地震が断層上でもかなり不均質な特性を持ち、流体との関連も強く示唆された。

今後の課題

このように1000点もの観測を行うことにより従来見えなかった多くの知見が得られた。この程度のスペックを持つ観測をM7クラスの地震断層について行うことが、発生した背景や活動特性への理解すすめ、将来へのポテンシャル評価へつながると考えられる。一方では、現状ではボランティアベースのため、多数を行うことには困難が伴う。現在の定常地震観測網（20km間隔）の中でより稠密な観測をするべき地域、調査する内容などを適切に考え、観測デザインすることやそれができる人材を育成することが最も重要だと考えられる。

Room D | Regular session : S14. Earthquake prediction and forecast

🗓 Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 10:00 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 12:00 AM - 1:00 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S14]AM-1

chairperson:Takao Kumazawa(Earthquake Research Institute, University of Tokyo),
chairperson:Jiancang Zhuang(The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of
Information and Systems)

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

[S14-01] Long-term Probability of a Tohoku-Oki Earthquake along the Japan Trench

○Masajiro Imoto¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹ (1.National Research Institute for Earth
Science and Disaster Resilience)

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

[S14-02] Foreshocks and earthquake hazard assessment in Japan mainland.

○Hong Peng¹, James Jiro Mori¹ (1.Kyoto University)

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

[S14-03] Predictability of earthquake swarms with consideration of central nagano swarm
events in 2020

○Kumazawa Takao¹, Yosihiko Ogata² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.The
Institute of Statistical Mathematics)

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

[S14-04] Incorporating focal mechanisms into the ETAS model

○Jiancang Zhuang^{1,2}, Eri Maita² (1.The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of
Information and Systems, 2.Department of Statistical Science, The Graduate University for Advanced
Studies (SOKENDai))

Long-term Probability of a Tohoku-Oki Earthquake along the Japan Trench

*Masajiro Imoto¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

東北地方太平洋沖を震源とする超巨大地震（東北地方太平洋沖型）について、政府地震調査委員会は、繰り返し発生する地震に対するBrownian Passage Time 分布(BPT分布)モデルを用いて、今後50年における地震発生の確率を評価している。長期評価報告書(平成31.2.26)によると、仙台平野で採取された5層の津波堆積物に基づき、5回の地震発生が確認されている。最初の2回の発生時期には、200年程度の不確実性がある。第3番の地震は869年の貞観地震、第5番は2011年の東北地方太平洋沖地震であるが、第4番については2つの歴史地震（1454年享徳地震、1611年慶長三陸地震）が候補とされている。報告書では、発生年が不確定な3個の地震については乱数により発生年を仮定し、再現し得る多数の時系列についてBPTパラメータを最尤法で求め、その出現頻度を基に最適解を求めている。

地震発生年の不確実性に関しては、別の報告書「長期的な地震発生確率の評価手法について」（評価手法、平成13年6月）で、モデルパラメータ推定のための尤度関数が多重積分の式で与えられている（Ogata,1999 JGR）。この手法の適用対象と見られる地震として、東北地方太平洋沖型の他に、相模トラフ沿いのM8クラス地震（関東M8：調査委員会報告書、平成26年4月）と、千島海溝沿いの超巨大地震（17世紀型：平成29年12月）が挙げられる。このうち関東M8の評価では、評価手法に記載された多重積分と同等なモンテカルロ法（Parsons,2008）によって最尤パラメータが推定されている。その後の報告書（17世紀型,東北地方太平洋沖型）ではこれとは異なる方法（上記）が採用されている。ここでは、評価手法記載の方法によって、BPTモデルパラメータの最尤解を求め、報告書の値と比較する。

モデルパラメータの最尤解を推定する際に、第3番目の貞観地震を境に計算を分ける。第1番～第3番では、評価手法の方法に従い尤度を数値積分により求める。第1番と第2番の地震発生年が、積分変数となる。尤度は、平均発生間隔300年～900年、ばらつきパラメータ 0.1～2.0の範囲でデタラメに選んだ10,000点において計算する。また、後半の第3番～第5番については、重み付き尤度法に従って、2通りの第4番発生年に対応する2個の尤度の相乗平均を尤度とする。後半については、この期間における最尤値を基準として、先に選んだ10,000点における尤度の相対値を求める。この相対値と第1番～第3番の数値積分との積として、第1番～第5番における尤度を得る。

検算として、第1番～第3番の数値積分に代えてParsons(2008)によるモンテカルロ法を実施する。計算時間短縮のため時間軸を反転し、第3番地震から遡ることとする。パラメータの各点において5000時系列を生起し、不確定期間に合致する時系列を計数する。合致時系列数は第1番～第3番の積分値とよい比例関係を示す。尤度は 平均間隔560年ばらつき0.2で最大となる。全期間に対する尤度の分布を図に示す。

報告書(平成31.2.26)の図4-10と比較すると、違いは次の通りである。報告書では、平均発生間隔は全て約550年から約600年の50年間に収まっている。今回の結果では、800の等高線がほぼ同じ範囲になっている。尤度400の等高線では、約500年から670年の範囲に広がっている。報告書の方法では再現可能な時系列の平均間隔が最尤解となるため、第1地震の不確実性200年が50年（4分の1，地震間隔数の逆数）に縮小したと推察できる。これに対して、評価手法の方法では、任意のパラメータ値に対して尤度が計算される。また、ばらつきパラメータについては、図4-10では0.22付近に頻度の不連続が見られる。第4の地震が1611年慶長三陸地震の場合には、ばらつきパラメータが0.22以上となるため不連続が生じたと推察される。

平均的な発生確率は、各パラメータに対する発生確率の加重（通常は尤度）平均で表される。図4-10と今回の

結果を比べると、ばらつきパラメータ0.22以下や平均間隔約550年以下あるいは約600年以上のパラメータに対する確率の寄与が、報告書の方法では少ないことになる。今回の例では最新地震(2011年)からの経過年数が短いため平均的確率値に差は生じていないが、経過年数の長い地震で有意な差が生じることもあり得る。手法の妥当性について検討が必要である。

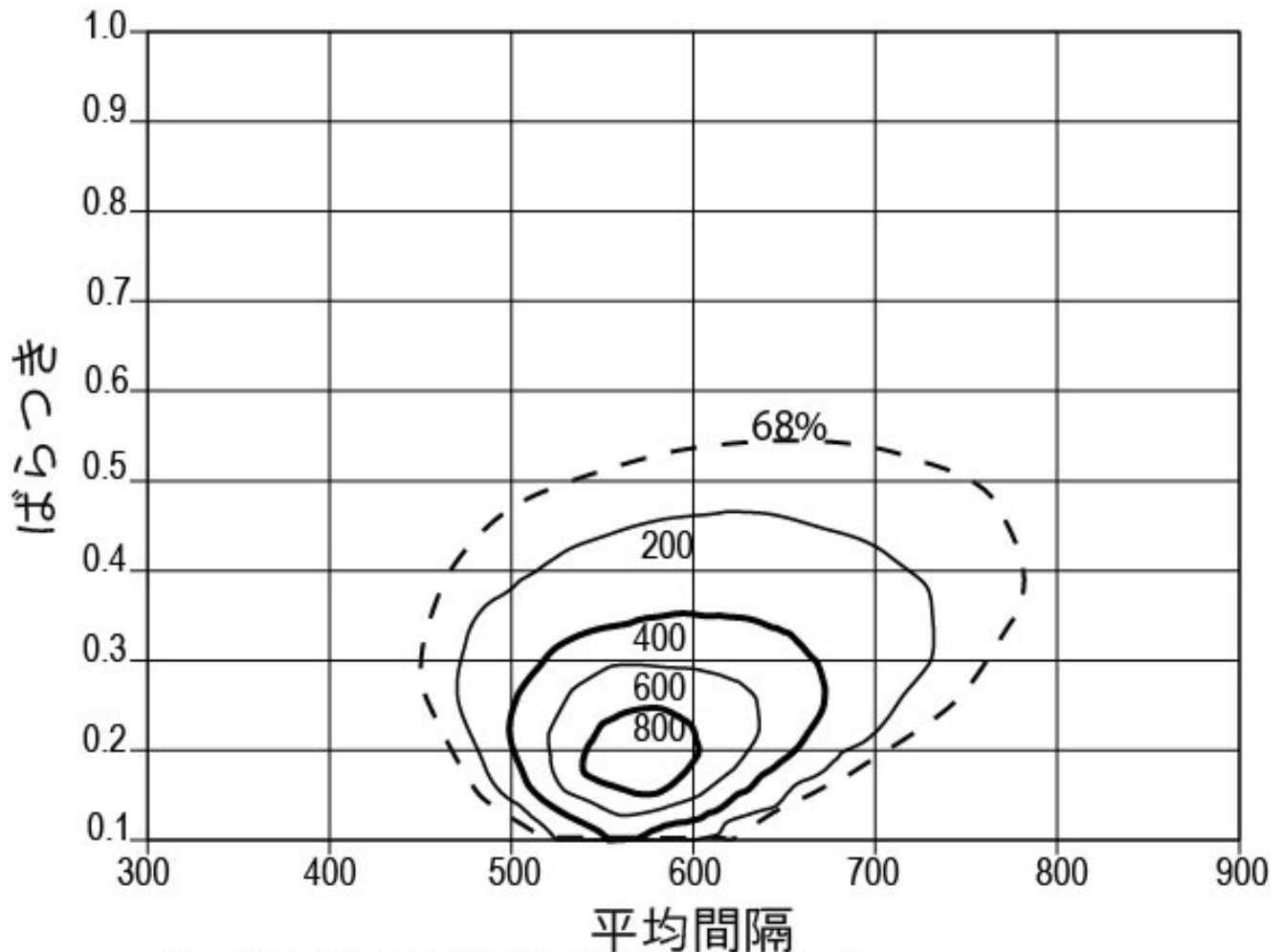


図 4 地震間隔に基づく尤度の分布を等高線で表す。
破線は信頼区間 68%で推定されるパラメータ範囲を示す。

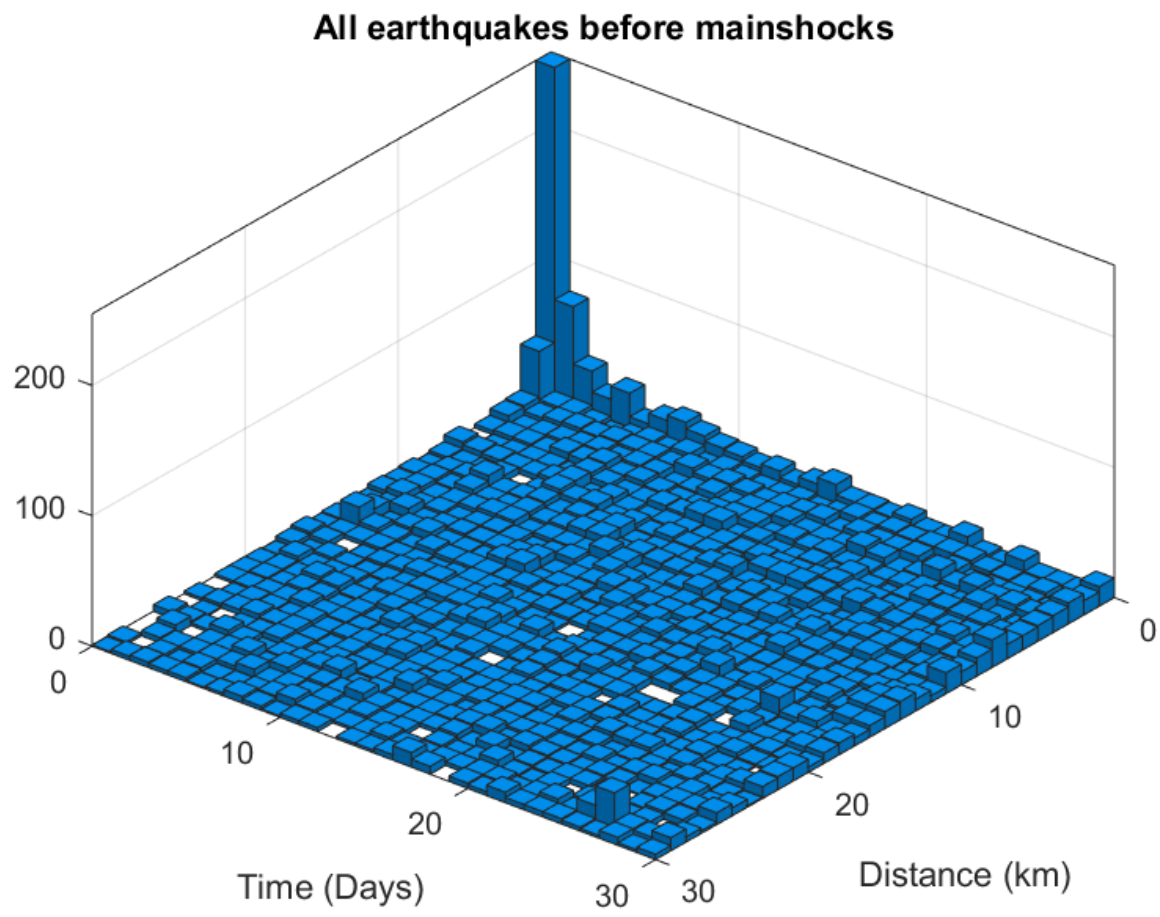
Foreshocks and earthquake hazard assessment in Japan mainland.

*Hong Peng¹, James Jiro Mori¹

1. Kyoto University

In the past, studies of foreshocks have estimated the rate of foreshock occurrence before moderate and large earthquakes in high seismicity areas such as California. Those studies also show that it is possible to calculate the significant probability that a larger earthquake follow a specific event. In our study, we use the earthquakes recorded on land in the Japan Meteorological Agency catalogue from 2004 to 2019 to study foreshock. We looked at the temporal and spatial distributions of pairs of earthquakes where a smaller earthquake is followed by a larger earthquake. There is a clear peak for pairs of events that are located with 5 days and 2 km of each other. Therefore our definition of a foreshock is an event that is followed by a larger event within 5 days and located within 2 km. In this analysis, we removed aftershocks and sequences of earthquake swarms.

According to our results, about 40% of mainshocks ($M \geq 3.0$) have foreshocks. This is consistent with previous studies that foreshocks could be a useful tool for the short-term earthquake hazard assessment. Also, we also estimated that the average probability that an earthquake will be followed by an earthquake of large magnitude is $\sim 10\%$.



Predictability of earthquake swarms with consideration of central nagano swarm events in 2020

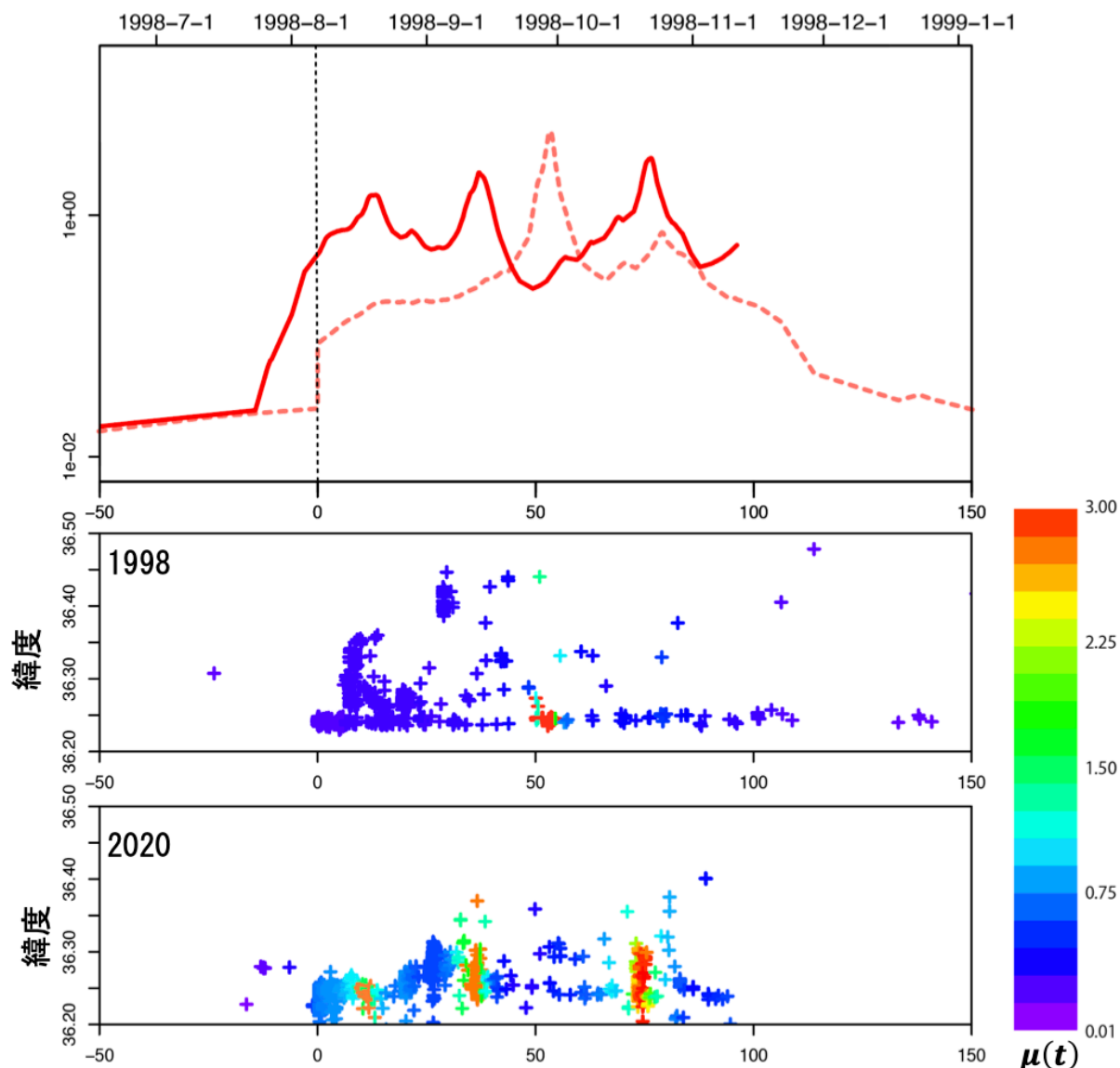
*Kumazawa Takao¹, Yosihiko Ogata²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics

ゆっくりと断層が滑るスロースリップや、火山活動時の流体貫入などによる断層の弱化はしばしば群発地震活動を誘発する。このタイプの地震活動は、地震の予測に一般的に使用されるETASモデルが想定する、時間的に先行する地震による誘発の連鎖とは異なる因果関係で発生するため、地震カタログのみからの予測が困難であることが知られている。しかしながら、誘発源である地殻内現象の測地学的データを用いることで、短期的な予測が可能になると考えられる。鍵となるのは単位時間あたりの地震の期待発生数(強度)のうち、他の地震と独立な成分：常時地震活動(background seismicity)、を感度良く推定することであり、我々の研究ではこれをベイズ法による非定常ETASモデル(Kumazawa and Ogata, 2013)で実践する。さらに非定常ETASモデルを今年4月から続く長野県中部の群発地震に適用し、常時地震活動の時間変化とそこから得られる特徴について議論する。

常時地震活動の比較 非定常ETAS: $\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i:S \leq t_i < t\}} K_0(t) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$

$\lambda_{\theta}(t|H_t)$, $\mu(t)$, $K_0(t)$ の単位は地震数/日



推定期間はそれぞれ1998年8月7日の群発開始(M2.2)と2020年4月23日のM5.5を時刻0と置いてその前50日、その後150日を対象期間とした。
2020年の群発は7月24日までのデータを含む。領域は経度(137.55, 137.72), 緯度(36.20, 36.50)。

1998年の群発は約4ヶ月後に以前のレベルに戻った。
注意点として、群発初期のバックグラウンドは過小評価している可能性がある。t=50 辺りのバックグラウンドの上昇は南部クラスターのごく一部に比較的小さな地震が集中して発生したことによる。

2020年の群発は4月23日のM5.5をt=0としたが、先行する地震があるのでバックグラウンドもt=0以前から上昇する。検知率は1998年と比べて高いので、安定した推定結果と思われる。1998年と同規模と仮定すればそろそろ収束に向かう時期だが、もう少しデータを加えて様子を見る必要があると思われる。

Incorporating focal mechanisms into the ETAS model

*Jiancang Zhuang^{1,2}, Eri Maita²

1. The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems, 2. Department of Statistical Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDai)

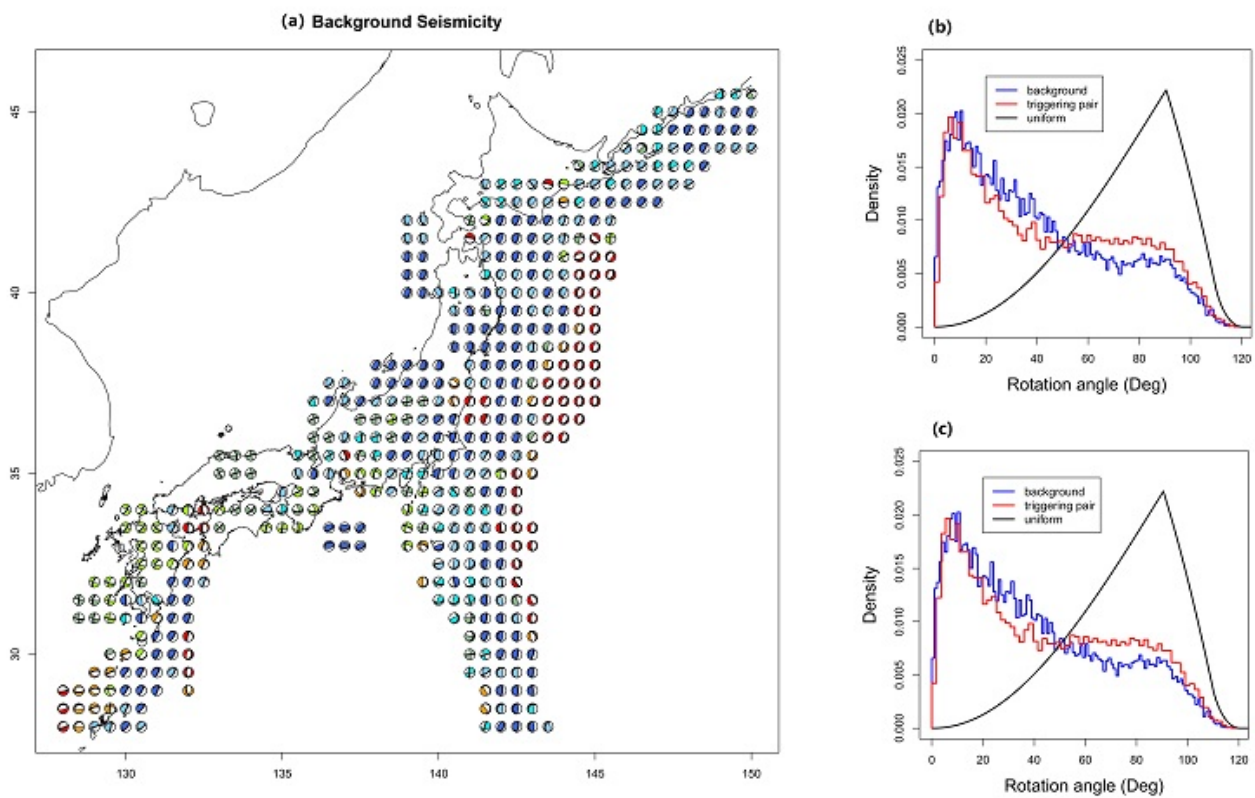
This study tries to find the probability distributions of focal mechanisms in background seismicity and earthquake clusters in Japan by analyzing F-net data. To describe the probability distribution, each focal mechanism is decomposed as the result of a rotation about a particular pole starting from a reference focal mechanism. In this study, DC4 symmetry is considered, i.e., either nodal-plane can be the fault plane and the two sides of the fault plane are distinguishable. To separate the background and clustering seismicity, we fit the space-time ETAS model (e.g., Zhuang, 2011, EPS) to the earthquakes with magnitude 4.2+ from 1997 to 2017 in the F-net catalog, and use the stochastic declustering method to estimate the background probabilities that each event is a background event and the triggered probabilities that each event is triggered by other events.

Figure caption:

For the background events, the reference focal mechanism is taken as the average focal mechanism in each area, calculated by the method in Kagan and Jackson (2014, GJI). The rotation angles between a background event and the mean focal mechanisms at (x, y) is reconstructed by histogram of rotation angles between each earthquake and the local mean focal mechanism, weighted by its background probability estimated from the ETAS model. For a triggered event, the reference focal mechanism naturally takes the value of the focal mechanism of the event which triggers it. The rotation angles between the parent event and its direct offspring are also reconstructed by histogram of rotation angles between each triggering pair, weighted by the probability that the 2nd event is triggered by the first event in the pair. We also find that the rotation poles are almost uniformly distributed.

We then plug the reconstructed focal mechanisms distribution into the space-time ETAS model and apply it to the F-net data. The results show that focal mechanism plays an important role in earthquake triggering and incorporation with focal mechanism greatly improves model fitting.

Fig. 1 (a) shows the mean focal mechanisms of background seismicity in Japan, (b) gives the reconstructed probability density functions of rotation angles for focal mechanisms in the background seismicity and triggered seismicity, and (c) gives the cumulative distribution functions corresponding to the pdfs in (b).



Room D | Special session : S22. Geodynamics of the Ryukyu arc

📅 Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 11:45 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 1:30 AM - 2:45 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S22]AM-2

chairperson: Shuichi Kodaira (JAMSTEC)

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

[S22-01] Overview of scientific drilling active backarc basin, Okinawa Trough: ongoing rifting of Eurasian continental margin

○ Makoto Otsubo¹ (1. Geological Survey of Japan)

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

[S22-02] Vs structure of the shallow crust beneath ocean-bottom seismometers: south and north Okinawa trough

○ Ban-Yuan Kuo¹, Pei-Ru Jian¹, Pei-Ying Patty Lin², Ching-Ren Lin¹, Yasushi Ishihara³, Shuichi Kodaira³, Mamoru Nakamura⁴, Chau-Chang Wang⁵ (1. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 2. National Taiwan Normal University, 3. JAMSTEC, 4. University of the Ryukyus, 5. NARLabs)

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

[S22-03] Ambient noise tomography for northern Okinawa trough OBS array

○ Ting-Chun Lin¹, Kai-Xun Chen^{1,2}, Yuancheng Gung¹, Ban-Yuan Kuo², Yasushi Ishihara³, Shuichi Kodaira³, Mamoru Nakamura⁴, Pei-Ying Patty Lin⁵, Ching-Ren Lin², Chau-Chang Wang⁶ (1. National Taiwan University, Department of Geosciences, 2. Academia Sinica, 3. JAMSTEC, 4. University of the Ryukyus, 5. National Taiwan Normal University, 6. National Applied Research Laboratories)

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

[S22-04] [Invited] Contemporary deformation and slow slip events along the Ryukyu Islands clarified by GNSS observations

○ Takuya Nishimura¹, Shin'ichi Miyazaki², Takeshi Matsushima³ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Faculty of Science, Kyushu University)

Overview of scientific drilling active backarc basin, Okinawa Trough: ongoing rifting of Eurasian continental margin

*Makoto Otsubo¹

1. Geological Survey of Japan

We introduce the outline of scientific drilling for the Okinawa Trough, active backarc basin. Active backarc basins are unique tectonic features which divide the margin of continents, generate complex subduction geometries, and host a large number of hydrothermal systems that harbour unique mineralization and diverse biological communities. The mechanisms controlling the initiation and evolution of backarc basins has been a long-standing question in global tectonics. Our targets are to perform coring, logging, and monitoring at the Okinawa Trough backarc basin, the Ryukyu arc. The Okinawa Trough is a ~1500-km long continental rift in the East China Sea parallel to and behind the Ryukyu Arc. The Okinawa Trough, together with Bransfield Strait which is in a challenging Antarctic environment and therefore we do not think it is prospective target for a scientific drilling, is the only active and accessible continental backarc basin on earth which has not produced oceanic crust via seafloor spreading yet. Here we propose a new hypothesis on the driving force of the backarc opening: Backarc spreading accelerates with fluids and heat-induced weakening and strain concentration in the rift zone. We propose 3 shallow (200–700 m below the seafloor) riserless boreholes in the southern part of the Okinawa Trough. The drilling of these boreholes aims to recover sediments, volcanic rocks, and pore fluids, collect geophysical logs, and make downhole measurements. The objectives of the riserless program are two-fold: (1) Examine the fluid circulation process in shallow crust by documenting and analysing the physical, hydrogeological and chemical properties, lithology, geometry, microstructure, and thermal state of the fault; and (2) Observe volcanics that are extruded before oceanic basalts are exposed by characterizing the entire sedimentary and volcanic facies under the trough axis (Yaeyama Graben) including the top of a potentially basaltic volcanic intrusion observed in the seismic surveys. This proposal is the first milestone of our future drilling project which ultimately aims to core and monitor in both of the seismogenic rifts zone in the Okinawa Trough and the onland Ryukyu arc.

Vs structure of the shallow crust beneath ocean-bottom seismometers: south and north Okinawa trough

*Ban-Yuan Kuo¹, Pei-Ru Jian¹, Pei-Ying Patty Lin², Ching-Ren Lin¹, Yasushi Ishihara³, Shuichi Kodaira³, Mamoru Nakamura⁴, Chau-Chang Wang⁵

1. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 2. National Taiwan Normal University, 3. JAMSTEC, 4. University of the Ryukyus, 5. NARLabs

We employ a P-wave polarization method to estimate the Vs of the shallow crust beneath ocean-bottom seismometer (OBS) arrays in Okinawa trough. In comparison, we applied this method to F-net in the Tohoku region, Japan. We found that the seafloor beneath OBSs is characterized by Vs of hundreds of m/s, while Vs of the shallow crust of Tohoku is typically 2-4 km/s with the about 1 km/s at volcano sites. The OBSs along the Okinawa trough were probably deployed on the very soft oceanic crust first layer composed of young, uncompact sediment. The observed Ps following the P phase attests to this hypothesis. We are in the process of extending this research to OBSs on old seafloor of the Pacific basin.

Ambient noise tomography for northern Okinawa trough OBS array

*Ting-Chun Lin¹, Kai-Xun Chen^{1,2}, Yuancheng Gung¹, Ban-Yuan Kuo², Yasushi Ishihara³, Shuichi Kodaira³, Mamoru Nakamura⁴, Pei-Ying Patty Lin⁵, Ching-Ren Lin², Chau-Chang Wang⁶

1. National Taiwan University, Department of Geosciences, 2. Academia Sinica, 3. JAMSTEC, 4. University of the Ryukyus, 5. National Taiwan Normal University, 6. National Applied Research Laboratories

From September 2018 to June 2019, IES, TORI, and JAMSTEC deployed broadband OBSs in the north Okinawa trough and its neighboring sea (NOT). Data from OBS vertical component combined with that from F-net stations and five temporary stations are suitable to ambient noise study. We perform ambient noise tomography using these array data to map the upper crust to shallow mantle structures of this part of the Ryukyu subduction zone. Cross-correlation functions were calculated and phase velocities of 5-30 s were measured, followed by a one-step, wavelet-based multiscale inversion for 3-D models of both Vs and its azimuthal anisotropy. Preliminary results show correlation between the resolved azimuthal anisotropy and the measured shear-wave splitting from local slab events. We are especially interested in whether medium-sized melt mush zone in the crust can be identified beneath the OT as evidence for late stage of continental rifting and early stage of seafloor spreading.

[Invited] Contemporary deformation and slow slip events along the Ryukyu Islands clarified by GNSS observations

*Takuya Nishimura¹, Shin'ichi Miyazaki², Takeshi Matsushima³

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Faculty of Science, Kyushu University

The Ryukyu Islands lie on a 1200-km-long island arc from Kyushu to Taiwan. Contemporary deformation of the Ryukyu Islands is characterized by subduction of the oceanic plate and active backarc spreading. The Philippine Sea plate subducts from the Ryukyu Trench beneath the islands. Numerous earthquakes and slow slip events (SSEs) occur along the subduction plate interface. Active backarc spreading along the Okinawa Trough also causes many shallow earthquakes in the island arc. The permanent GNSS observation network named GEONET was started in the 1990's and it has greatly contributed our understanding on ongoing deformation due to these tectonic processes. Recently, our group has been constructed additional 15 GNSS stations in the islands, particularly the Yaeyama Islands, southernmost parts of the Ryukyu Islands. In this presentation, we review the previous geodetic studies on the contemporary deformation and SSEs as well as our new results of recent GNSS observations.

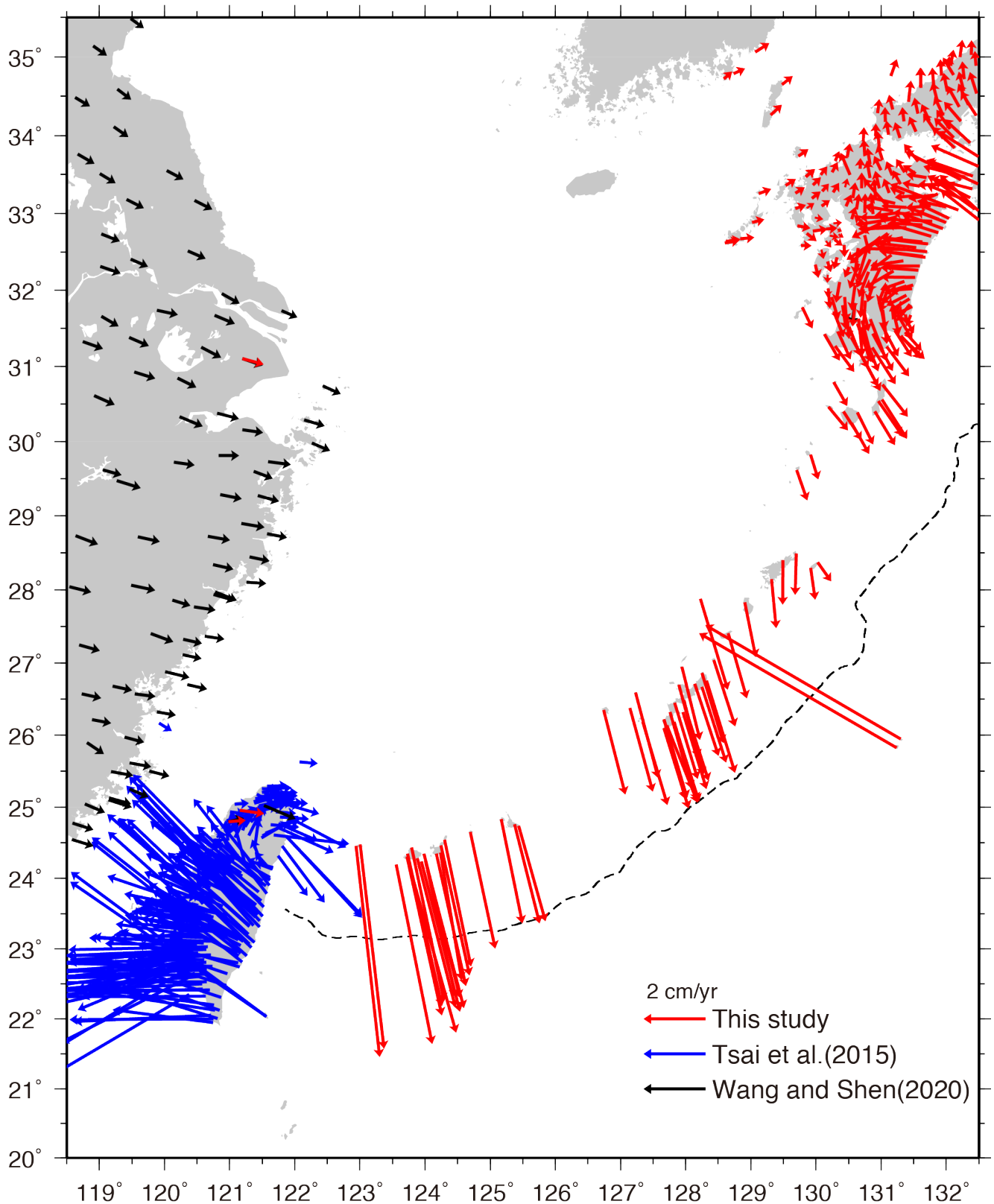
The secular GNSS velocity shows rapid backarc spreading along the Okinawa Trough and the spreading rate increases toward south (e.g., S. Nishimura, 2004; Nakamura, 2004; Watanabe and Tabei, 2004). Internal deformation of the island arc is rather small and modeled by rigid block rotation of three or four independent tectonic blocks. No significant contraction along the plate convergence was found, which suggests low coupling on the subduction plate interface. However, land geodetic data cannot resolve offshore coupling near the trench (e.g., Watanabe and Tabei, 2004). On the other hand, significant expansion along the arc was revealed by Nakamura (2004).

It is probable that SSEs as well as earthquakes accommodate a significant part of relative plate motion along the Ryukyu Trench. T. Nishimura (2014) conducted a systematic search of short-term SSEs using GNSS data and found 223 possible SSEs for 16 years. Detected SSEs distributes from the trench to the island arc with a depth range between 10 and 60 km shows highly heterogeneous along the trench. The most distinctive activity is bi-annual $M_w \sim 6.6$ SSEs in the Yaeyama Islands (Heki and Kataoka, 2008; Tu and Heki, 2017; Kano et al., 2018). The cluster of SSEs locates southeast off southern Okinawajima, east off Kikaijima, and east of Tanegashima. Correlations between SSEs and other slow and regular earthquakes (e.g., low-frequency earthquakes, very-low-frequency earthquakes, and earthquake tremors) have been also found (Nakamura, 2015; Nakamura, 2017) but their relation is not simple and unlike the episodic tremor and slip events along Nankai Trough.

We estimated secular velocity at continuous stations including new stations from August 2017 to July 2020 in and around the Ryukyu Islands (Figure). This new velocity confirmed previous studies and gave us some additional insights on ongoing deformation. Expanded internal deformation in directions of both along and perpendicular to the trench are dominant in the Yaeyama Islands and Okinawajima but contraction along the relative plate motion is observed in a part of the Yaeyama Islands. Southeastward velocity of Ito-torishima suggests volcanic inflation of the island.

Acknowledgment: GNSS RINEX data are provided by the Geospatial Information Authority, Japan Coast Guard, and International GNSS Service. This study is supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16H06474 in Scientific Research on Innovative Areas “Science of Slow Earthquakes” .

GNSS Horizontal Velocity (Reference frame: Eurasia Plate)



Room D | Special session : S22. Geodynamics of the Ryukyu arc

📅 Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 4:00 AM - 5:15 AM UTC | 🏠 ROOM D
[S22]PM-1

chairperson: Mamoru Nakamura (Ryukyu University)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[S22-05] Pattern of occurrence interval and spatial distribution of similar earthquakes in the northern Ryukyu Trench subduction zone obtained from ocean bottom seismic observation

○Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Shigeru Nakao¹, Hiroki Miyamachi², Reiji Kobayashi², Yusuke Yamashita³, Hiroshi Shimizu⁴, Takeshi Matsushima⁴, Kazunari Uchida⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Hideji Abe⁷, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁷ (1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 3.DPRI, Kyoto Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, UTokyo)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[S22-06] Surface wave imaging of the lithosphere and asthenosphere system beneath north Okinawa Trough from NOT OBS array

○PeiYing Patty Lin¹, Hsiu-Cheng Yeh¹, Chih-Ming Lin¹, Ban-Yuan Kuo², Shu-Huei Hung³, Yuancheng Gung³, Eh Tan², Kate Huihsuan Chen¹, Chau-Chang Wang^{4,5}, Ching-Ren Lin², Shuichi Kodaira⁶, Yasushi Ishihara⁶, Mamoru Nakamura⁷ (1.Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.National Sun Yat-sen University, 6.JAMSTEC, 7.University of the Ryukyus)

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

[S22-07] Upper mantle P-wave velocity structure beneath the northern Ryukyu subduction zone from multiscale finite-frequency traveltimes tomography

○Shu-Huei Hung¹, Ban-Yuan Kuo², Pei-Ying Patty Lin¹, Yuancheng Gung¹, Eh Tan², Huihsuan Chen³, Chau-Chang Wang⁴, Shuichi Kodaira⁵, Yasushi Ishihara⁵, Mamoru Nakamura⁶, Ching-Ren Lin² (1.Department of Geosciences, National Taiwan University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan Normal University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.JAMSTEC, 6.University of the Ryukyus)

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

[S22-08] [Invited] Active and passive seismic investigations in the Ryukyu Trench and the Okinawa Trough: A review of 7-year achievements by JAMSTEC

○Ryuta Arai¹, Shuichi Kodaira¹, Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yuka Kaiho¹, Yasushi Ishihara¹, Seiichi Miura¹, Yoshiyuki Kaneda^{1,2} (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

Pattern of occurrence interval and spatial distribution of similar earthquakes in the northern Ryukyu Trench subduction zone obtained from ocean bottom seismic observation

*Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Shigeru Nakao¹, Hiroki Miyamachi², Reiji Kobayashi², Yusuke Yamashita³, Hiroshi Shimizu⁴, Takeshi Matsushima⁴, Kazunari Uchida⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Hideji Abe⁷, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁷

1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. SEVO, Kyushu Univ., 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6. JMA, 7. ERI, UTokyo

南西諸島海溝のプレート境界面上では、プレート沈み込みに伴う通常の地震に加え、低周波微動や短期的SSEといったスロー地震も発生しており、他の沈み込み帯と同様に両者の空間分布が議論されている。これまで、海溝軸から100 km以上離れた島嶼部が主な観測網であったため、隣接する南海トラフと比べても、地震とスロー地震の対応関係やプレート境界におけるすべり特性の理解は遅れていたが、近年において短期～中長期的な海底地震観測網の展開が進展しつつある。

本研究チームは、トカラ列島東方海域において長期収録型海底地震計を用いた繰り返し海底地震観測を実施した。2014年に3台体制で開始した本観測は、2015年以降、6台の自己浮上型海底地震計を約1年周期で回収・設置を繰り返しながら継続し、2019年11月の回収をもって第一次観測を完了した。観測点間隔が約40–60 kmとやや疎であるが、観測空白域であった当該海域において、約5ヶ年にわたる準定常的な観測網を構築したのが特徴である。

本研究では、2016年7月～2018年3月の上記観測データを用いて、プレート境界周辺で発生する波形のよく似た地震（相似地震）を、その発生間隔に応じて分類し、活動様式を議論した。相似地震の検出にはMatched-Filter法を採用し、6台の海底地震計および島嶼観測点の3成分連続波形データに適用した。プレート地震には、鹿児島大学南西島弧地震火山観測所が決定したマグニチュード3以上の地震を選択し、海底地震観測点の検測データを統合して震源再決定した。相似地震群は、発生間隔から次の3つの活動様式に分類された。群発地震型、小繰り返し地震型、そして両者の混合型である。本講演では、検出イベントとプレート地震の相対震源位置を評価した上で、微動分布や構造との空間関係について議論する。

2019年4月からは観測点間隔20 km（計8台）のより稠密な第二次海底地震観測を開始し、2020年8月に一回目の回収・再設置を完了した。本講演では当該観測計画についても報告する。

謝辞：観測航海は、長崎大学水産学部附属練習船長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施されました。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および「同計画（第2次）」の支援を受けました。また、東京大学地震研究所共同利用の援助を受けました。記して感謝いたします。

Surface wave imaging of the lithosphere and asthenosphere system beneath north Okinawa Trough from NOT OBS array

*PeiYing Patty Lin¹, Hsiu-Cheng Yeh¹, Chih-Ming Lin¹, Ban-Yuan Kuo², Shu-Huei Hung³, Yuancheng Gung³, Eh Tan², Kate Huihsuan Chen¹, Chau-Chang Wang^{4,5}, Ching-Ren Lin², Shuichi Kodaira⁶, Yasushi Ishihara⁶, Mamoru Nakamura⁷

1. Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, 2. Academia Sinica, 3. National Taiwan University, 4. National Applied Research Laboratories, 5. National Sun Yat-sen University, 6. JAMSTEC, 7. University of the Ryukyus

The NOT experiment is an ocean bottom seismic experiment conducted at the north part of the Okinawa Trough as a collaboration between Taiwan and Japan. The NOT experiment is designed to image the structure of the Ryukyu subduction system which consists of trench-arc-backarc extending from Japan to Taiwan. The Okinawa Trough (OT), the backarc basin in the Ryukyu subduction system, is unique due to its extensive active rifting. Here we present surface wave analysis data from the ~21 broadband ocean bottom seismograms and 3 land-stations from the F-net network of Japan. With the passive seismic imaging using this seismic array with the aperture ~260 km, we can have local constraints on the seismic model in the lithosphere and asthenosphere system. Noise levels in vertical components of the most OBS sit within the global reference new high- and low- noise models with significant tilt and compliance noises contaminations. Tilt and compliance noises arise from instrument tilting under bottom current flow due to coupling problems and seafloor deformation caused by the infragravity wave respectively. We first characterize the temporal variations of tilt and compliance noises for each station. We then remove tilt and compliances noises from vertical recordings sequentially to retrieve true ground motions due to the structural properties. We utilize an intra-array cross-correlation analysis to measure Rayleigh-wave phase velocities for the teleseismic events with noises corrected vertical data. Phase velocity maps from the shorter period (< 32s sec) show low velocities beneath the volcanic arc. In the mid-period (40- 70s), the low phase velocity anomaly is seen beneath Okinawa Trough. We plan to show regional dispersion patterns beneath the backarc basin and volcanic arc to understand the seismic structure within the lithosphere and asthenosphere system.

Keywords: Ryukyu subduction, broad-band ocean-bottom seismograph (BBOBS), seismic noise, compliance and tilt corrections, Rayleigh wave phase velocity

Upper mantle P-wave velocity structure beneath the northern Ryukyu subduction zone from multiscale finite-frequency traveltime tomography

*Shu-Huei Hung¹, Ban-Yuan Kuo², Pei-Ying Patty Lin¹, Yuancheng Gung¹, Eh Tan², Huihsuan Chen³, Chau-Chang Wang⁴, Shuichi Kodaira⁵, Yasushi Ishihara⁵, Mamoru Nakamura⁶, Ching-Ren Lin²

1. Department of Geosciences, National Taiwan University, 2. Academia Sinica, 3. National Taiwan Normal University, 4. National Applied Research Laboratories, 5. JAMSTEC, 6. University of the Ryukyus

We conduct a multiscale finite-frequency tomography of upper mantle structure beneath the northern Ryukyu subduction zone, where the Philippine Sea Plate (PSP) subducting beneath the Eurasian continent forms a trench-forearc-arc-backarc system. The data comprises of vertical-component P waveforms of teleseismic earthquakes with epicentral distance of 30° - 95° and magnitude greater than 5.5 recorded by 3 island stations from the F-net network of Japan and 26 broadband ocean-bottom seismometers from the Taiwan-Japan collaborative experiment deployed between Sept. 2018 and June 2019 in the study area. Relative traveltime residuals between the recording stations for each event are measured by cross correlating the band-pass filtered waveforms at periods of 8-20 s. Those with the cross-correlation coefficients > 0.8 are retained for the tomographic inversion of 3-D P-wave velocity perturbations at least down to the depth of 300 km. Data-adaptive, finite-frequency traveltime kernels in conjunction with multiscale wavelet-based parameterization are adopted to resolve the multi-resolution velocity structure. The resulting model reveals a low-velocity anomaly in the forearc wedge and a high-velocity lid in the uppermost 80-km depth beneath the northern Okinawa Trough (NOT) and Ryukyu arc which may correspond to the overriding Eurasian continental lithosphere. Besides, a trench-parallel elongated fast anomaly extending at least down to ~ 200 km depth and most likely associated with the subducted PSP slab is observed under the NOT. Further appraisal of model resolution and S-velocity structure will be undertaken to verify these resulting seismic features.

[Invited] Active and passive seismic investigations in the Ryukyu Trench and the Okinawa Trough: A review of 7-year achievements by JAMSTEC

*Ryuta Arai¹, Shuichi Kodaira¹, Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yuka Kaiho¹, Yasushi Ishihara¹, Seiichi Miura¹, Yoshiyuki Kaneda^{1,2}

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

The Ryukyu subduction zone in southwestern Japan hosts a variety of slow earthquakes and thus is an ideal study field to understand the physical controls on slip behaviors along the plate boundary. The Okinawa Trough, an active back-arc basin behind the Ryukyu arc, also provides a superb site for studying the lithospheric evolution associated with the continental rifting process. However, the background structure of this trench-arc-backarc system and physical properties of faults accommodating the plate subduction and back-arc rifting have been poorly documented. To better understand the seismogenic, volcanic and tectonic processes around the Ryukyu arc, JAMSTEC have been conducting intensive seismic investigations since 2013 as part of “Research Project for compound disaster mitigation on the great earthquakes and tsunamis around the Nankai Trough region”. This project consists of across-arc active-source seismic surveys, including multichannel seismic reflection profiling and refraction studies using ocean bottom seismographs, and passive onshore/offshore seismic observations. In this presentation, we will give a brief review of our achievements over the last seven years.

In the southern Ryukyu Trench off Ishigaki Island where a large tsunami earthquake occurred in 1771 (Nakamura, 2009), we found evidence for thin low-velocity zones along the plate interface at 5-22 km depths and interpreted them to be caused by high fluid pressure (Arai et al., 2016). This fluid-rich plate boundary hosts low-frequency earthquakes at 15-18 km depths and suggests that a strongly-coupled zone, which is typical at these depths in other subduction zones, may be missing. The passive seismic observations also confirmed that the low-frequency earthquakes are located close to but do not overlap regular earthquakes (Yamamoto et al., 2018). This spatial pattern of seismicity suggests that the frictional properties along the plate boundary may vary not only in the dip direction but also along the strike.

On the back-arc side of the southern Ryukyu arc, we revealed symmetrical rift system across the rift axis (Yaeyama Rift) characterized by dense inward-dipping normal faults in the back-arc basin (Arai et al., 2017a). The rift structure accompanies narrow axial intrusions resulted from passive upwelling of magma which drive hydrothermal venting at the seafloor and seismic swarms at the shallow crustal depths.

In the northern Ryukyu Trench off Amami-Oshima Island where the Amami Plateau collides with the overriding plate, we found that the subducting plate is vertically displaced and forms obvious normal-fault steps of over 1 km at the plate interface (Arai et al., 2017b). This slab-intersecting faults are located at the downdip of the subducting seamount and are active as evidenced by large normal-fault earthquakes in 1995. These findings suggest that internal heterogeneities of the slab, especially significant buoyancy acting on the thick oceanic plateau, can produce sufficient differential stress leading to high-angle normal-fault earthquakes within the slab. We also found a number of slab seismicity in the forearc region east off Tanegashima Island and suggest that, same as the southern Ryukyu Trench, there is a clear spatial separation between regular earthquakes and slow earthquakes (Yamamoto et al., 2020).

In contrast to the southern Okinawa Trough, the overall faulting style in the northern Okinawa Trough is significantly asymmetric and rapidly transitions from normal faults to strike-slip faults (Arai et al., 2018). We also detected evidence for active magmatic intrusions around the volcanic front, suggesting that the volcanism in the northern Ryukyu arc is robustly supported by magmatic supply from the subducting slab. The overall rift system in the Okinawa Trough are thought to be controlled by the along-trough variation in extension rate as well as the strength and thermal structure of the plate.