Wed. Sep 18, 2019

Nankai Trough Earthquake | Special session：S25. Panel discussion

2:30 PM - 5:10 PM JST | 5:30 AM - 8:10 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S25][PM-1]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

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

[S25] 基調講演

山岡耕春（日本地震学会会長）
中埜良昭（日本地震工学会会長）

3:40 PM - 5:10 PM JST | 6:40 AM - 8:10 AM UTC

[S25] パネリスト講演

堀高峰（海洋研究開発機構）
井出哲（東京大学）
三宅弘恵（東京大学）
馬場俊孝（徳島大学）
護雅史（名古屋大学）
奥村与志弘（関西大学）

Nankai Trough Earthquake | Special session：S25. Panel discussion

5:15 PM - 6:00 PM JST | 8:15 AM - 9:00 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S25][PM-2]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

5:15 PM - 6:00 PM JST | 8:15 AM - 9:00 AM UTC

[S25] Panel discussion

話題提供・討論
・山岡耕春（日本地震学会会長）
・中埜良昭（日本地震工学会会長）
・堀高峰（海洋研究開発機構）
・井出哲（東京大学）
・三宅弘恵（東京大学）
・馬場俊孝（徳島大学）
・護雅史（名古屋大学）
・奥村与志弘（関西大学）

joint session | Special session：S21. Long-Period Ground Motion -Generation Mechanism and Structural & Social Response-

9:15 AM - 10:30 AM JST | 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S21]AM-1

chairperson:Shin Aoi(NIED), Kuninori Okamoto(Japan Meteorological Agency)

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

[S21-01] [INVITED] Long-period ground motion and earthquake engineering

*福和 伸夫[1] (1. 名古屋大学減災連携研究センター)

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

[S21-02] Hazard and risk assessment for the long-period ground motion of megathrust earthquakes

*Takahiro Maeda[1], Asako Iwaki[1], Nobuyuki Morikawa[1], Shin Aoi[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. NIED)

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

[S21-03] How to Estimate Long-Period Ground Motions near Surface Ruptures during Crustal Earthquakes

*Kojiro Irikura[1], Susumu Kurahashi[1], Yasuhiro Matsumoto[2] (1. Aichi Institute of Technology, 2. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

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

[S21-04] Early forecast of long-period ground motions for Nankai trough earthquake: effects of site-amplification factors at offshore stations

*Atsuki Oba[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

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

[S21-05] [INVITED]Information on long-period ground motion by JMA

*Masaki Nakamura[1] (1. JMA)

joint session | Special session：S21. Long-Period Ground Motion -Generation Mechanism and Structural & Social Response-

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S21]AM-2

chairperson:Yoshiaki Hisada(Kogakuin University), Takeshi Kimura(NIED)

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

[S21-06] Toward Practical Use of Realtlime Long-Period Ground-Motion Prediction Information

*Shin Aoi[1], Takeshi Kimura[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Yadab P. Dhakal[1], Naoto Koja[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency)

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

[S21-07] リアルタイムスロッシング評価システムが捉えた長周期地震動

*大保 直人[1]、高田 史俊[2] (1. 地震予知総合研究振興会、2. エイシンシステム株式会社)

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

[S21-08] Software for Predicting Damage and Supporting Emergency Response of High-Rise Building Considering Long-Period Ground Motion

*Yoshiaki Hisada[1], Masahiro Murakami[1], Akira Kuriyama[2], Yui Matsumoto[2], Yuya Miyauchi[2] (1. Kogakuin University, 2. RC Solution Co.)

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

[S21-09] 近年発生した大地震時の強震記録に基づく国内の超高層集合住宅を対象とした広域的な非線形地震応答推定

*村田 将一[1]、王 欣[2]、永野 正行[3] (1. 東京理科大学大学院　理工学研究科建築学専攻、修士課程、2. 東京理科大学　理工学部建築学科、助教　博士（工学）、3. 東京理科大学　理工学部建築学科、教授　博士（工学）)

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

[S21-10] [INVITED]Problems to broadcast long-period earthquake motion information on TV

*Kazunori Tanihara[1] (1. Nippon Television Network)

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

9:15 AM - 10:30 AM JST | 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-1

chairperson:Takuji Yamada(Ibaraki University), Nana Yoshimitsu(University of Tokyo)

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

[S08-18] Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

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

[S08-19] Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana[1], Masatoshi Miyazawa [2], James Jiro Mori[2] (1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

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

[S08-20] **Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method**

*Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Tomonari Sei[3] (1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo)

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

[S08-21] Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada[1], Meitong Duan[1], Jun Kawahara[1] (1. Ibaraki University)

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

[S08-22] Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1] (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan)

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-2

chairperson:Toshiko Terakawa(Nagoya University), Keisuke Yoshida(Tohoku University)

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

[S08-23] **Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake**

*Keisuke Yoshida Yoshida[1], Tatsuhiko Saito[2], Taka'aki Taira[3], Kentaro Emoto[1], Toru Matsuzawa[1] (1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley)

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

[S08-24] CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1], Taro Okamoto[2], Takeshi Nakamura[3] (1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-25] **Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake**

*Yoshihisa Iio[1], Hiroshi Katao[1], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Takuo Shibutani[1], Airi Nagaoka[1], Jun Nakagawa[1], Shukei Ohyanagi[1], Shota Hara[1], Mitsu Sakaguchi[1], Abuyama Supporters[1], Satoshi Matsumoto[2], Takeshi Matsushima[2], Megumi Kamizono[2], Shin-ichi Sakai[3], Masataka Masuda[3], Shin-ichi Tanaka[3], Yoshinari Hayashi[4] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University)

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

[S08-26] A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2], Akemi Noda[3] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED)

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

[S08-27] Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura[1], Toshiko Terakawa[2], Akemi Noda[3] (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univerisity, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Room B | General session：S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

2:30 PM - 3:15 PM JST | 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S12]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

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

[S12-01] Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells - Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura[1], Weiren Lin[2], Takatoshi Ito[3], Akio Funato[4] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute)

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

[S12-02] Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke[1], Tetsuro Hirono[1], Shunya Kaneki[2] (1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University)

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

[S12-03] Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Osaka University)

Room B | General session：S11. Various Phenomena Associated with Earthquakes

3:15 PM - 4:15 PM JST | 6:15 AM - 7:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S11]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

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

[S11-01] What are Posibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara[1] (1. Geosystem Research Institute)

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

[S11-02] Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki[1], Ihsan Naufal Muafiry[2] (1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University , 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University)

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

[S11-03] Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto[1], Osamu Murakami[1], Yasuhiro Asai[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

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

[S11-04] Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto[1], Tsuneaki Yamabe[1], Shigeki Sugiura [2], Hitoshi Kondo[2] (1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.)

Room C | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

9:15 AM - 10:30 AM JST | 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM C Research Bldg No 8 NS Hall

[S22]AM-1

chairperson:Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST), Hisahiko Kubo(NIED)

9:15 AM - 9:45 AM JST | 12:15 AM - 12:45 AM UTC

[S22-01] [INVITED]Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy

*Jun Ogata[1] (1. Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy)

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

[S22-02] Seismic Phase Picking based on Sparsity-Aware Change Detection

*Hiroki Kuroda[1], Jun Ogata[1], Hidenori Sakanashi[1], Takahiko Uchide[2] (1. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S22-03] Automatic P-wave detection using deep learning and visualization of the decision process

*Shota Hara[1], Yukitoshi Fukahata[2], Yoshihisa Iio[2] (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S22-04] Application of convolutional neural networks to continuous seismic network records

*Keisuke Yano[1], Takahiro Shiina[2], Sumito Kurata[1], Aitaro Kato[2], Fumiyasu Komaki[1], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2] (1. Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Room C | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C Research Bldg No 8 NS Hall

[S22]AM-2

chairperson:Hisahiko Kubo(NIED), Yuki Kodera(Meteorological Research Agency, JMA)

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

[S22-05] Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter with theoretical seismograms of time series as training data.

*Daisuke Sugiyama[1], Seiji Tsuboi[1] (1. JAMSTEC)

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

[S22-06] Discrimination of earthquakes and tectonic tremor signals by applying a convolutional neural network to running spectral images

*Masaru Nakano[1], Daisuke Sugiyama[1], Takane Hori[1], Tatsu Kuwatani[1], Seiji Tsuboi[1] (1. JAMSTEC)

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

[S22-07] An unsupervised automatic classification algorithm for continuous seismic records using a nonparametric Bayesian approach

*Yuki Kodera[1], Shin'ichi Sakai[2], Takahito Nishimiya[1] (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S22-08] **Study on Site-specific Ground Motion Evaluation Models Utilizing Machine Learning Method Considering Epicentral Directions**

*Toru Ishii[1], Atsuko Oana[1], Kensuke Wada[1] (1. Shimizu Corporation)

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

[S22-09] Study on Ground Motion Evaluation Models for Kanto Region Utilizing Machine Learning Method

*Atsuko Oana[1], Toru Ishii[1], Kensuke Wada[1] (1. Shimizu Corporation)

Room C | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

2:30 PM - 4:00 PM JST | 5:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM C Research Bldg No 8 NS Hall

[S22]PM-1

chairperson:Yuki Kodera(Meteorological Research Agency, JMA), Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S22-10] Improving the symmetry of ambient seismic field correlation functions with machine learning

*Loic Viens[1], Tomotaka Iwata[1] (1. Kyoto University, DPRI)

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

[S22-11] A hybrid approach of Machine learning and Ensemble Kalman Filter for estimating frictional parameters in Nankai megaquake cycle simulator

*Yu Yamamoto[1], Kazuro Hirahara[1,3], Hirotaka Hachiya[1,2], Atsushi Takahashi[1], Naonori Ueda[1] (1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa)

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

[S22-12] Acceleration of matched-filter search and slip inversion of deep tectonic tremor using nearest neighbor search

*Naoto Mizuno[1], Satoshi Ide[1] (1. School of Science, The University of Tokyo)

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

[S22-13] Machine learning of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on recurrent neural network

*Norifumi Yamaga[1], Yuta Mitsui[2] (1. Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

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

[S22-14] Automatic detection and classification of the uplifted marine terrace by clustering DEM dataset

*Junki Komori[1], Ryosuke Ando[1], Masanobu Shishikura[2] (1. The University of Tokyo, 2. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S22-15] Investigation of Prediction Model for Engineering Geomorphologic Classification using Convolutional Neural Network

*Sho Akagi[1], Toshihiko Hayakawa[1] (1. Mitsubishi Space Software Co., Ltd.)

Room D | General session：S10. Active Faults, Historical Earthquakes

9:15 AM - 10:30 AM JST | 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM D International Conference Halls I

[S10]AM-1

chairperson:Kentaro Imai(JAMSTEC), Takashi Hirai(Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S10-01] Development of historical earthquake activity database using hisitrical source journals in Japan

*Akihito Nishiyama[1,2], Masaharu Ebara[3,2], Rei Mizuno[1,2], Seiya Yoshioka[1,2], Akihiko Katagiri[4], Yusuke Oishi[5,1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Collaborative Research Organization for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, The University of Tokyo, 3. Historiographical Institute, The University of Tokyo, 4. Faculty of Humanities, Niigata University, 5. Fujitsu Laboratories Ltd.)

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

[S10-02] Ansei Tokai and Nankai Earthquakes Depicted on Kawaraban Newspapers: Mainly on Those Stored in the Disaster Management Library

*Takashi Hirai[1] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S10-03] Re-examination of the tsunami source for the 1854 Ansei Tokai earthquake along the Nankai Trough

*Kentaro Imai[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,2], Ryoko Obayashi[1], Satoshi Kusumoto[1], Takashi Furumura[3] (1. Research Institute for Marine Geodynamics, Reserch and Development Center for Earthquake and Tsunami Forcasting, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

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

[S10-04] Numerical simulation on formation of normal faults based on elasto-plastic mechanics

*Eiji Yamada[1], Toshihiro Noda[2], Kentaro Nakai[2], Akira Asaoka[3] (1. Chubu Electric Power, 2. Nagoya Univ., 3. ADEP)

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

[S10-05] Bayesian inference for recurrent earthquake sequences with uncertain occurrence times

*Shunichi Nomura Nomura[1], Yosihiko Ogata[1] (1. The Institute of Statistical Mathematics)

Room D | General session：S10. Active Faults, Historical Earthquakes

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM D International Conference Halls I

[S10]AM-2

chairperson:Kyoko Kagohara(Faculty of Education, Yamaguchi University), Tetsuro Tsuru(Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S10-06] **An example of subsea and subseafloor imaging by seismic reflections in Uchiurawan off Numazu**

*Tetsuro Tsuru[1], Jin.-O. Park[2], Kosaku Arai[3], Seishiro Furuyama[1], Kazuo Amakasu[1], Keiichi Uchida[1], Mayu Ogawa[1], Shio Shimizu[1], Tetsuo No[4], Yasuyuki Nakamura[4] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S10-07] Offshore active fault survey on Tokachi-Heiya fault zone: Characteristics and distribution of the active structures

*Takashi Ogami[1], Shintaro Abe[2], Yashito Uchida[3], Kenji Nishina[3], Ryoyu Arai[4], Takahiro Kubo[4], Kenjiro Mukaiyama[4] (1. AIST, 2. ADEP, 3. HRO, 4. KGE Co., Ltd.)

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

[S10-08] Offshore active fault survey on Tokachi-Heiya fault zone: Paleosesimic activities based on vibrocoring surveys

*Yasuhito Uchida[1], Kenji Nishina[1], Takashi Ogami[2], Shintaro Abe[3], Ryoyu Arai[4], Takahiro Kubo[4], Kenjiro Mukaiyama[4] (1. HRO, 2. AIST, 3. ADEP, 4. KGE Co., Ltd.)

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

[S10-09] Active tectonics in the northern part of Yamagata Basin, northeast Japan.

*Kyoko Kagohara[1], Shinsuke Okada[2], Hideki Kosaka[3], Atsushi Miwa[6], Kohei Abe[6], Tomoo Echigo[5], Toshifumi Imaizumi[4] (1. Faculty of Education, Yamaguchi University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. Kankyo Chishitsu Co., Ltd, 4. Emeritus professor of Tohoku University, 5. Geo-Research Institute, 6. OYO Corporation)

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

[S10-10] Are "the long-term evaluations of active faults" consistent with the Quaternary crustal movements in the Osaka plain and the Nara basin ?

*Ichiro Kawasaki[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

Room D | General session：S14. Earthquake Prediction and Forecast

2:30 PM - 4:00 PM JST | 5:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM D International Conference Halls I

[S14]PM-1

chairperson:Yoshinari Hayashi(Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.), Masajiro Imoto(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] Social Responses to Expert Questionnaires on the Possibility of Earthquake Short-term Prediction

*Yoshinari Hayashi[1] (1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.)

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

[S14-02] Earthquake predictions by the atmospheric ion of different points

*Kenta Watanabe[1], Naoyuki Yada[2] (1. Graduate school of Kanagawa Institute of Technology, 2. Kanagawa Institute of Technology)

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

[S14-03] Measurements of Animal Abnormal Actions for Earthquake predictions

*Naoyuki Yada[1], Kenta Watanabe[2] (1. Kanagawa Institute of Technology, 2. Graduate school of Kanagawa Institute of Technology)

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

[S14-04] Reinvestigation of correlation between groundwater anomalies and earthquakes carried out by an amateur network “Namazu-no-kai” in Japan

*Yoshiaki Orihara[1], Toshiyasu Nagao[1] (1. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.)

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

[S14-05] **High resolution seismicity models using interpolation with Delaunay triangulation**

*Yosihiko Ogata[1] (1. Institute of Statistical Mathematics)

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

[S14-06] Long-term Probability of a Great Earthquake along the Kurile Trench, Japan and its epistemic uncertainty

*Masajiro Imoto[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Poster session (Sept. 18th) | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S08P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-01] **The 11 November 2018 monotonic event near Mayotte island, east Africa observed by the Iranian broadband seismic stations**

Hossein Sadeghi[1], *Sadaomi Suzuki[2] (1. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-02] New insight into rupture process and generating mechanism of the 2017 M_W 6.5 Jiuzhaigou earthquake

*Yaping Hu[1], Yuji Yagi[2], Kousuke Shimizu[1], Ryo Okuwaki[2] (1. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan., 2. Fault of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-03] Source parameters of the aftershocks of the Western Nagano prefecture Earthquake in 1984

*Osamu Murakami[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-04] Fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand inferred from high precision aftershock distribution

*Yuta Kawamura[1], Satoshi Matsumoto[1], Tomomi Okada[2], Miu Matsuno[2], Yoshihisa Iio[3], Tadashi Sato[2], Stephen Bannister[4], John Ristau[4], Martha Savage[5], John Twonend[5], Jarg Pettinga[6], Francesca Ghisetti[7], Richard H Sibson[8] (1. Kyushu University, Shimabara, Japan, 2. Tohoku University, Sendai, Japan, 3. Kyoto University, Uji, Japan, 4. GNS Science, Lower Hutt, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. TerraGeologica, Ruby Bay, New Zealand, 8. University of Otago, Dunedin, New Zealand)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-05] The generation process of seismic clusters in the slab

*Yusuke Usui[1], Junichi Nakajima[1] (1. Tokyo Tech)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-06] Detection of small non-double-couple components of tectonic earthquakes: Application to plate boundary earthquakes

*Kazutoshi Imanishi[1], Takahiko Uchide[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-07] Reconsidered source model of short-term slow event:
detection of non- fault slip components by using spatial distribution of strain change

*Noa Mitsui[1], Yasuhiro Asai[1], Satoshi Itaba[2] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-08] Temporal change of tidal correlation of deep low frequency tremors in Bungo Channel: Relation with LSSEs and deep VLFEs

*Fuyuki Hirose[1], Akio Kobayashi[1], Kenji Maeda[2] (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-09] Estimation of source spectra of deep low frequency tremors from waveforms recorded by array observation

*Yoshiki Matsuura[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Keita Nakamoto[1], Takahiko Uchide[2], Kazutoshi Imanishi[2] (1. Kanazawa University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-10] Focal Mechanisms of LFEs in Parkfield by the amplitude inversion using synthetic waveforms

*Miki Aso[1,3], Naofumi Aso[2], Satoshi Ide[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. Tokyo Tech, 3. OYO RMS Corp.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-11] A comparative study on the source process of ambient and triggered tremor based on a slip inversion analysis

*Kazuaki Ohta[1] (1. DPRI, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-12] Rupture processes of the repeating earthquake sequences off-Iwate that occurred after the 2011 Tohoku oki earthquake

*Ahyi Kim[1], Naoki Uchida[2] (1. Yokohama City University, 2. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-13] Spatiotemporal change of source parameters of repeaters due to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (2)

*Kazuya Tateiwa[1], Tomomi Okada[1], Toshio Kono[1], Naoki Uchida[1] (1. Tohoku university)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-14] Estimation of moment magnitude and corner frequency of Acoustic Emission during hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Keiichi Imakita[1], Makoto Naoi[1], Youqing Chen[1], Kazune Tanaka[1], Yuya Morishige[1], Naofumi Tsutsumi[1], Hironori Kawakata[2], Tuyoshi Ishida[1], Hiroyuki Tanaka[3], Yutaro Arima[3], Shigehiro Kitamura[3], Daisuke Hyodo[3] (1. Univ. of Kyoto, 2. Univ. of Ritsumeikan, 3. JOGMEC)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-15] Investigation of fluid viscosity effects on laboratory hydraulic fracturing based on AE measurement and moment tensor analysis

*Rui Tanaka[1], Makoto Naoi[2], Youqing Chen[3], Kazune Yamamoto[1], Keiichi Imakita[1], Naofumi Tsutsumi[3], Akihiro Shimoda[1], Daiki Hiramatsu[3], Hironori Kawakata[4], Tsuyoshi Ishida[1], Hiroyuki Tanaka[5], Yutaro Arima[5], Shigehiro Kitamura[5], Daisuke Hyodo[5] (1. Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Department of Energy Science and Technology, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, 4. College of Science aand Engineering, Ritsumeikan University, 5. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-16] Mineral Composition and Microstructure of Host Rock and Fault Rock That Caused M5.5 Orkney Earthquake (ICDP DSeis Project)

*Yuki Yokoyama[1], Tetsuro Hirono[1], Hiroshi Ogasawara[2], Yasuo Yabe[3] (1. Osaka University, 2. Ritsumeikan University, 3. Touhoku University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-17] Cascade-up process simulated in large-scale rock friction experiments

*Futoshi Yamashita[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Shiqing Xu[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Dept. Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-18] Dynamic Aspects of Rupture Propagation at a Subsonic but Near-Rayleigh Wave Speed

*Koji Uenishi[1] (1. GSFS, Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-19] Secondary Rupture at a Distance from the Primary One without Further External Loading

*Koji Uenishi[1,2], Yuki Fukuda[2], Kunihiro Nagasawa[2] (1. GSFS, Univ. Tokyo, 2. Sch. Eng., Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-20] Dynamic rupture simulation on a non-planer fault allowing fault-normal displacement discontinuity

*Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2] (1. Kyoto Univ., 2. DPRI, KU)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-21] On stability of time-marching schemes for simulation of dynamic rupture using a boundary integral equation method

*Hiroyuki Noda[1], Yuuki Kurihara[2], Saisuke Sato[1] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate school of Science, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-22] A Preliminaryu Analysis of the Fault Behavior of Shallow Part of the Fault based on the Dnamic Model

*Kenichi Tsuda[1], Samaneh Arzpeima[1], Sachio Ogawa[1], Takahide Watanabe[1], Tetsurou Sasaki[2], Satoshi Iwase[2], Tomoki Mukudai[2], Jean-Paul Amouero[3] (1. Ohsaki Research Institute, 2. Chubu Electric Power Company, 3. Université Côte d'Azur and Institut de Recherche pour le Développement)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-23] Re-examination of possible scenarios for large earthquake in the Hyuga-nada region based on numerical simulations

*Ryoko Nakata[1], Takane Hori[1], Mamoru Hyodo[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-24] Relationship between size and frequency of earthquakes by modified Olami-Feder-Christensen model

*Yasuyuki Iwase[1], Takao Eguchi[2] (1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Formerly at Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy)

Poster session (Sept. 18th) | General session：S10. Active Faults, Historical Earthquakes

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S10P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-01] Compiling descriptions on tsunami accompanied with the 1914 Sakurajima earthquake

*Reiji KOBAYASHI[1] (1. Graduate school of science and engineering, Kagoshima University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-02] Construction of fault models in the Izu-Bonin Islands area and evaluation of Tsuami

*Kimie Norimatsu[1], Hisanori Matsuyama[1], Tsuneo Ohsumi[2], Narumi Takahashi[3], Hiroyuki Fujiwara[2] (1. OYO Corporation, 2. NIED, 3. JAMSTEC/NIED)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-03] Relationship between linear surface displacements of the 2016 Kumamoto earthquake sequence and distribution of aftershocks

*Satoshi Fujiwara[1], Hiroshi Yarai[1], Tomokazu Kobayashi[1], Yu Morishita[1], Takayuki Nakano[1] (1. Geospatial Information Authority of Japan)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-04] The Timing and Extent of the Last Surface Rupture Event on the Himalayan Frontal Thrust in Central Nepal around Butwal

*Koji Okumura[1], Prakash Pokhrel[2], Soma Nath Sapkota[2], Hisao Kondo[3], Takuya Furuhashi[4] (1. Hiroshima University, 2. Department of Mines and Geology, 3. Geological Survey of Japan, 4. Taiheiyo Cement Coporation)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-05] Paleoseismic activity and fault-zone architecture of small-scale faults developed in the Late Cretaceous shale

Kazuo MIZOGUCHI[2], Toshinori Sasaki[2], *Takahiro Iida[1], Takenobu Tanaka[3] (1. CERES,Inc, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry., 3. Hanshin Consultants)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-06] Shallow geometry of the Kamishiro fault by high-resolution seismic reflection profiling

*Naoki IKEGUCHI[1], Nobuhisa MATSUTA[2], Kyoko KAGOHARA[3], Shinsuke Okada[4], Daisuke HIROUCHI[5], Shigeru TODA[6], Tatsuya ISHIYAMA[1], Taro KOIKE[7], Katsuya NODA[7], Hiroshi SATO[1] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Education, Okayama University, 3. Faculty of Education, Yamaguchi University, 4. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 5. Faculty of Education, Shinshu University, 6. Faculty of Education, Aichi Education University, 7. GEOSYS Inc.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-07] Fault Distribution and Structural Characteristic in the Nankai Trough Area, Japan

*Rei Arai[1], Narumi Takahashi[1], Minako Katsuyama[1], Shigeyoshi Tanaka[1], Hiromi Kamata[1], Tomoyuki Sato[2], Takahiko Inoue[2], Yoshiyuki Kaneda[3] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Kagawa University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-08] Current status and issues of active fault research as seen from digital active fault map of Japan [Revised edition]

*Kohei Abe[1], Ryo Tateishi[2], Nao Shimoyama[1], Atsushi Miwa[1], Tomo-o Echigo[3], Shinsuke Okada[4], Toshifumi Imaizumi[4] (1. OYO Corporation, 2. University of Toyama, 3. GRI Corporation, 4. Tohoku University)

Poster session (Sept. 18th) | General session：S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S12P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-01] Estimation of the spatial stress pattern of San-in region: a preliminary analysis towards estimation with high spatial resolution

*Takaki Iwata[1], Yoshihisa Iio[2] (1. Prefectural University of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-02] Amorphization of synthetic fault gouge by rotary-shear friction experiments

*Shunya Kaneki[1], Kiyokazu Oohashi[2], Tetsuro Hirono[3], Hiroyuki Noda[1] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3. Graduate School of Science, Osaka University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-03] Experimental reproduction of sintering process in a fault during an earthquake

*Shion Osada[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-04] Experimental investigation of chemical kinetic effect on thermal maturation of carbonaceous material in a fault during an earthquake

*Shuhei Yamashita[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Osaka University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-05] Experimental constraints on origins of high Vp/Vs anomalies in slow slip regions

*Shin-ichi Uehara Uehara[1], Kaya Nishimura[1], Kazuo Mizoguchi[2] (1. Graduate school of Science, Toho University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-06] Effects of ambient temperature on the frictional strength and frictional heating of dolerite in an argon atmosphere

Yuuki Yokoyama[1], *Michiyo Sawai[1], Kyuichi Kanagawa[1] (1. Chiba University)

Poster session (Sept. 18th) | General session：S14. Earthquake Prediction and Forecast

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S14P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-01] Spatial heterogeneity of aftershock productivity on the Kumamoto earthquake rupture modeled by the finite source ETAS model

*Yicun Guo[1], Jiancang Zhuang[1], Yosihiko Ogata[1] (1. Institute of Statistical Mathematics)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-03] Comparison of Models of Long-term Seismic Hazard and with An Application to North China

*Ziyao Xiong[1,2], Jiancang Zhuang[1], Shiyong Zhou[2] (1. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan, 2. School of Earth and Space Sciences, Peking university, Beijing, China)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-04] Water temperature change in the western region of Shizuoka Prefecture

*HIRONOBU KAMIKUBO[1] (1. Hamamatsu Kisei Junior high school)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-05] Prediction method to develop the method of detecting earthquake precursers

*Kozo Takahashi[1] (1. None)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-06] We will present the theory and mechanism of earthquake prediction with attached electromagnetic observation data as the basis.

*Hidemitu Kunihiro[1] (1. JYAN Research Institute)

Poster session (Sept. 18th) | Special session：S21. Long-Period Ground Motion -Generation Mechanism and Structural & Social Response-

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S21P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-01] Near-Fault Long-Period Ground Motion

*Kazuki Koketsu[1] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-02] Characteristic source model with rupture heterogeneity for long-period ground motion prediction of megathrust (M8-9) earthquakes

*Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-03] Numerical Experiments toward Simplified Prediction of Short-Distance Variation of Long-Period Strong Ground Motion Amplitudes

*Ken Hatayama[1] (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-04] A preliminary analysis of long-period response spectra (1-10s) at S-net for the 2016 Mj7.4 off Fukushima earthquake

*Yadab Prasad Dhakal[1], Wataru Suzuki[1], Takeshi Kimura[1], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1] (1. NIED)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-05] Long-period strong ground motion from the 2016 Mie-ken nanto-oki earthquake observed in the Tokyo bay area

*植竹 富一[1] (1. 東京電力ホールディングス株式会社)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-06] Evaluation about variation of long-period ground motion in the Kanto Plain due to source location using the reciprocity theorem

*寺島 芳洋[1]、福和 伸夫[2] (1. 竹中工務店技術研究所、2. 名古屋大学減災連携研究センター)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-07] 関東平野の堆積層における長周期成分のQ値推定

*吉田 治雄[1]、佐藤 吉之[1] (1. 竹中工務店技術研究所)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-08] 3-D Simulation Considering Shallow and Deep Ground and Mechanism of Later Phase at the KiK-net Konohana during 2018 Osaka Earthquake

*Takuya Kataoka[1], Masayuki Nagano[1] (1. Tokyo University of Science)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-09] Long period ground motion observed at Sakai-minato city, Tottori, prefecture

*Takao Kagawa[1], Shohei Yoshida[2], Tatsuya Noguchi[1] (1. Tottori University, Graduate School of Engineering, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-10] Elucidation of localized/enormous seismic damage induced by the stratum irregularity~An example of fissure zone emerged at the Aso caldera in association with the 2016 Kumamoto earthquake~

*中井 健太郎[1]、野田 利弘[1]、村尾 英彦[2]、福田 慎也[1]、浅岡 顕[3] (1. 名古屋大学、2. 村尾地研、3. 地震予知総合研究振興会)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-11] 3D velocity model of the Bogota basin (Colombia) based on dense microtremors arrays measurements, gravity, and geological data

*Nelson Pulido[1], Helber Garcia[2], Andrea Riaño[3], Shigeki Senna[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Servicio Geológico Colombiano, 3. Universidad de los Andes)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-12] Monitoring of large structure and observation of long period ground motion using DAS and existing optical fiber cables installed

*Tsunehisa Kimura[1] (1. Schlumberger)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-13] 貯蔵タンクのスロッシングによる液面上昇量の観点からみた既往3地震における長周期地震動の特徴

*山本 鐘太[1]、庄司 学[2] (1. 筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻、2. 筑波大学システム情報系)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-14] An effort for the demonstration experiment to provide forecast information of long period ground motion through an application development

*Misae Wakameda[1], Masaaki Kachi[1], Tsubasa Kawano[1], Yoshiaki Hisada[2], Masahiro Murakami[2] (1. A2 corporation, 2. Kogakuin University)

Poster session (Sept. 18th) | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S22P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-01] Detection of seismic signals under low SNR condition using an artificial neural network: Toward the development of low cost seismic network

Ahyi Kim[1], *Hiroki Uematsu[1] (1. Yokohama City University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-02] Earthquake/Noise Discrimination with Convolutional Neural Network

*Shota Kudo[1], Kengo Shimojo[1], Koji Tamaribuchi[2] (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-03] Development of neural network to locate hypocenter with theoretical seismograms as learning data II

*Seiji Tsuboi[1], Daisuke Sugiyama[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-04] Attempt to detect LFTs by clustering short-period OBS records

*Hidenobu Takahashi[1], Ryota Hino[1], Yusaku Ohta[1], Naoki Uchida[1], Syuichi Suzuki[1], Masanao Shinohara[2] (1. Tohoku University, 2. The University of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-05] Insight into machine-learning model and prediction result: Case of random forest predictor for ground-motion intensit

*Hisahiko Kubo[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Takeshi Kimura[1], Shin Aoi[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-06] site2vec: A Ground-Motion Predictor Learning Site Conditions from Data

*Tomohisa Okazaki[1], Tomoharu Iwata[1,2], Asako Iwaki[3], Hiroyuki Fujiwara[3], Naonori Ueda[1] (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. NTT Communication Science Laboratories, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-07] Time series analyses of amplitude of the Earth's background free oscillations

*Ryuichi Kunugi[1], Naoki Suda[1] (1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-08] An Attempt to Classify a Pattern of Changes in Strain Observation Data by Machine Learning

*Takahiro Tsuyuki[1] (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-09] Machine Learning Approach for Integration of Multiple Relative Intensity Models

*Hirotaka Hachiya[1,2], Kazuro Hirahara[1], Naonori Ueda[1] (1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Faculty of System Engineering, Wakayama University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-10] Optimal distribution of offshore observation points for tsunami prediction using scenario search and regression methods

*Toshitaka Baba[1], Takuya Miyashita[2], Nobuhito Mori[2], Kenta Nakanishi[3], Masato Okada[4] (1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. NITA Consultant, 4. Univ. of Tokyo)

Nankai Trough Earthquake | Special session：S25. Panel discussion

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 5:10 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 5:30 AM - 8:10 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S25][PM-1]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

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

[S25] 基調講演

山岡耕春（日本地震学会会長）
中埜良昭（日本地震工学会会長）

3:40 PM - 5:10 PM JST | 6:40 AM - 8:10 AM UTC

[S25] パネリスト講演

堀高峰（海洋研究開発機構）
井出哲（東京大学）
三宅弘恵（東京大学）
馬場俊孝（徳島大学）
護雅史（名古屋大学）
奥村与志弘（関西大学）

Nankai Trough Earthquake | Special session | S25. Panel discussion

[S25][PM-1]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 5:10 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

2:30 PM - 3:30 PM

[S25]基調講演

山岡耕春（日本地震学会会長）

中埜良昭（日本地震工学会会長）

©Seismological Society of Japan

Nankai Trough Earthquake | Special session | S25. Panel discussion

[S25][PM-1]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 5:10 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

3:40 PM - 5:10 PM

[S25]パネリスト講演

堀高峰（海洋研究開発機構）
井出哲（東京大学）
三宅弘恵（東京大学）
馬場俊孝（徳島大学）
護雅史（名古屋大学）
奥村与志弘（関西大学）

©Seismological Society of Japan

Nankai Trough Earthquake | Special session：S25. Panel discussion

Wed. Sep 18, 2019 5:15 PM - 6:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 8:15 AM - 9:00 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S25][PM-2]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

5:15 PM - 6:00 PM JST | 8:15 AM - 9:00 AM UTC

[S25] Panel discussion

話題提供・討論
・山岡耕春（日本地震学会会長）
・中埜良昭（日本地震工学会会長）
・堀高峰（海洋研究開発機構）
・井出哲（東京大学）
・三宅弘恵（東京大学）
・馬場俊孝（徳島大学）
・護雅史（名古屋大学）
・奥村与志弘（関西大学）

Nankai Trough Earthquake | Special session | S25. Panel discussion

[S25][PM-2]パネルディスカッション「南海トラフ巨大地震」

Coordinator: Shinichi Matsushima (Kyoto University)

Wed. Sep 18, 2019 5:15 PM - 6:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

5:15 PM - 6:00 PM

[S25]Panel discussion

話題提供・討論

・山岡耕春（日本地震学会会長）
・中埜良昭（日本地震工学会会長）
・堀高峰（海洋研究開発機構）
・井出哲（東京大学）
・三宅弘恵（東京大学）
・馬場俊孝（徳島大学）
・護雅史（名古屋大学）
・奥村与志弘（関西大学）

©Seismological Society of Japan

joint session | Special session：S21. Long-Period Ground Motion -Generation Mechanism and Structural & Social Response-

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM JST | Wed. Sep 18, 2019 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S21]AM-1

chairperson:Shin Aoi(NIED), Kuninori Okamoto(Japan Meteorological Agency)

For some of the lectures, we will update the lecture information at a later date.

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

[S21-01] [INVITED] Long-period ground motion and earthquake engineering

*福和 伸夫[1] (1. 名古屋大学減災連携研究センター)

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

[S21-02] Hazard and risk assessment for the long-period ground motion of megathrust earthquakes

*Takahiro Maeda[1], Asako Iwaki[1], Nobuyuki Morikawa[1], Shin Aoi[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. NIED)

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

[S21-03] How to Estimate Long-Period Ground Motions near Surface Ruptures during Crustal Earthquakes

*Kojiro Irikura[1], Susumu Kurahashi[1], Yasuhiro Matsumoto[2] (1. Aichi Institute of Technology, 2. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

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

[S21-04] Early forecast of long-period ground motions for Nankai trough earthquake: effects of site-amplification factors at offshore stations

*Atsuki Oba[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

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

[S21-05] [INVITED]Information on long-period ground motion by JMA

*Masaki Nakamura[1] (1. JMA)

Long-period ground motion and earthquake engineering

*- -[1]

1. -

T2019-027

© The Seismological Society of Japan

Hazard and risk assessment for the long-period ground motion of megathrust earthquakes

*Takahiro Maeda[1], Asako Iwaki[1], Nobuyuki Morikawa[1], Shin Aoi[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. NIED

千島海溝南部で発生した2003年十勝沖地震、日本海溝沿いで発生した2011年東北地方太平洋沖地震によるタンク火災や超高層建物の被害により長周期地震動の重要性が再認識された。今後、南海トラフや相模トラフ沿いで発生する海溝型巨大地震による長周期地震動やその影響を事前に検討しておくことは重要である。気象庁による「長周期地震動に関する観測情報」の発表や、気象庁と防災科研による「長周期地震動の予測情報に関する実証実験」など、地震発生時の長周期地震動情報に関する検討が進められている。一方で、防災科研では、事前の準備に資する情報として長周期地震動のハザードやリスクに関する検討を行っている。本発表では、防災科研における長周期地震動のハザードリスク評価に関する研究について概観する。
平野や盆地などでは震源から遠く離れていても長周期地震動が長時間継続することが知られている。震源からの距離に依存せず、3次元地下構造に強く影響を受ける長周期地震動の評価に対しては地震波伝播シミュレーションが有効である。地震動シミュレーションに用いる震源モデルに関しては、強震動予測と同様に特性化震源モデルを用いており、過去の地震の知見を参考に、断層面の拡がりやアスペリティの配置、破壊開始点の位置などの多様性を考慮するとともに、アスペリティサイズよりも小スケールの断層破壊のランダム不均質を導入し、周期1秒程度まで適用可能な多数の震源モデルを構築している。シミュレーションに使用可能な全国規模の地下構造モデルとして、J-SHISで公開されている深部地盤モデルや、地震本部による長周期地震動予測地図（試作版）のために構築された全国1次地下構造モデルがある。一方、防災科研では関東地域や東海地域などを対象に浅部・深部統合地盤モデルを構築している。膨大なボーリングデータや稠密な微動探査に基づいており、地点毎の3次元地下構造による地盤特性が反映された地震動シミュレーションが可能となっている。防災科研では差分法による地震動シミュレータ（GMS）を公開し、継続的に更新を続けている。GMSでは計算格子数を低減する工夫として不連続格子が採用されており、長時間の地震動計算を効率的に行う工夫がなされている。これに加え、高並列化やGPGPUへ対応することで更なる効率化を図っている。さらに、タイムステップの増大に伴い生じる計算の不安定性（発散）への対応の検討も進めている。これらは主に差分法計算についての改良であるが、プレ処理や可視化を含めたポスト処理についても改良を続けており、有効性が確認された機能については、公開版のプログラムに反映している。
これまでに南海トラフ、相模トラフ沿いで発生するプレート間地震を対象とした大量の地震動シミュレーションデータが蓄積されている。大量のデータから重要な情報を抽出する手法についての検討も進めており、機械学習のひとつであるクラスタリングの手法を用いることで、多数のシナリオによる面的な地震動分布を10ケース程度のシナリオで代表させることが可能となっている。
これまでは主としてハザードに関する検討を行ってきているが、ハザード情報をリスク評価へ繋げる一例として、シミュレーションによる時刻歴波形を用いた超高層建物への影響評価について検討を行っている。多様な震源モデルによる地震動シミュレーション結果を入力とした建物応答と、長期評価を参考に設定した地震の発生確率を対応付けることで、超高層建物の確率論的なリスク評価を試行している。
今後は、千島海溝や日本海溝など、日本周辺の海溝型地震や内陸の長大な断層を対象とした長周期地震動の検討を進めるとともに、リスク評価のためのデータ整備や手法開発を進める必要がある。

© The Seismological Society of Japan

How to Estimate Long-Period Ground Motions near Surface Ruptures during Crustal Earthquakes

*Kojiro Irikura[1], Susumu Kurahashi[1], Yasuhiro Matsumoto[2]

1. Aichi Institute of Technology, 2. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

はじめに：2016年熊本地震（Mj 7.3,Mw 7.0）では、活断層として知られていた布田川断層沿いに約28 km、日奈久断層沿いに約6 kmの地表断層が現れた（Shirahama et al., 2016）。地表断層に極めて近い最短距離約0.5 kmに位置していた西原村役場観測点での加速度記録から、積分で得られた速度震動は大きなパルス状の震動（最大速度約260 cm/s）を示し、2回積分による変位震動は、水平成分は東に約2 m、上下動成分は下方に約2 mの永久変位を示した。地表断層から約１kmの益城町役場でも、顕著な速度パルス（最大速度約175 cm/s）と永久変位（東に約120 cm、 北に50 cm、下に 70 cm）が得られている（岩田,2016）。2010年Darfield地震（Mw 7.1）のときも、地表地震断層の極近傍域で観測点の記録から、大きな速度パルス（最大速度 159 cm/s）や永久変位(水平110 cm, 下方48 cm)が得られている。同様の現象は、2014年長野県北部地震（Mw 6.3）、1999年台湾集集地震（Mw 7.6）など地表地震断層地震のとき、地震断層近傍の観測点においで観測されている。2016年熊本地震や2010年Darfield地震で得られた長周期速度パルスや永久変位を有する強震動は従来の特性化震源モデルでは再現できない。地表断層近傍の長周期地震動の推定のため、特性化震源モデルの拡張が必要とされている。

強震動生成域と長周期地震動生成域：2016年熊本地震について、従来の特性化震源モデル（入倉・三宅, 2001）を用いて強震動の再現が試みられ、震源断層面内に強震動生成域（SMGA）を設定することで、地表断層の極近傍域を除いて広域の強震動の再現が可能であることが示された(Irikura et al., 2017)。しかしながら、地表断層に近い（最短距離2 km 以下）西原村役場や益城町役場で観測された長周期の速度震動や永久変位はこれまでの震源モデルでは再現できず、地表と地震発生層の間に長周期地震動生成域（LMGA）の存在を考慮する必要があることがわかってきた（例えば, Irikura et al., 2019）。

ここで指摘されるLMGAからの地震動は、Hisada and Bielak (2003)により開発された地表ずれを含む断層すべり(Fault Displacement)による平行層構造中の極近傍地震動の計算のための波数積分法を用いて、精度良い評価が可能である。2016年熊本地震の時に顕著な速度パルスや永久変位が得られたのは、西原村役場、益城町役場、KiK-net益城に加えて、南阿蘇村河陽やJR立野、さらにやや離れたK-NE大津などで、地表断層から約5 km離れた地域一体と考えられる。これらの観測点はすべて布田川断層沿いの観測点で、日奈久断層に近い観測点では顕著な長周期パルスや永久変位は得られていない。

ここでは、SMGAと背景領域からなる特性化震源モデルに加え、上記のLMGAを設定した拡張特性化震源モデルを用いて、長周期地震動および永久変位のシミュレーションがなされる。この地震の長周期地震動の生成モデルを構築するには、これらの観測点で得られた速度や変位震動に加えて、InSARで観測された地表変位分布を満足する必要がある。試行錯誤で得られた最適モデルのLMGAは、長さ約20 km、幅については地表から地震発生層の上端まで約3 kmである。LMGAのパラメータは、最大すべり量は4 m、すべり速度関数はsmoothed ramp、ライズタイムは2.5 sである。

シミュレーション波形は、SMGA s からの寄与、LMGAからの寄与、背景領域からの寄与の重ね合わせで表現される。長周期速度パルス波は、震源極近傍（1 km 以下）の観測点ではほぼLMGAの寄与で決まるが、やや離れると、SMGAの寄与が少しづつ大きくなり、５km離れると、ほぼ同じオーダーとなる。背景領域は距離によらずほとんど寄与しない。永久変位も同様に、震源極近傍（1 km 以下）の観測点ではほぼLMGAの寄与で決まるが、距離が離れると背景領域からの寄与も少しずつ大きくなる。５ｋｍの観測点での永久変位は、LMGAと背景領域がほぼ同程度の寄与になる（Fig. 1参照）。

© The Seismological Society of Japan

2010年Darfield地震についても、観測された速度波形および永久変位を再現する最適なモデルが構築された。LMGAのパラメータは、最大すべり量は2 ～ 3 m、すべり速度関数はsmoothed ramp、ライズタイムは4.0 sである。

特性化震源モデルの拡張：巨視的パラメーターの断層面積に基づく地震モーメントや平均応力降下量などの設定は従来のレシピが適用可能。微視的パラメータに関しても、強震動生成域およびそれに付随するパラメータは従来のレシピを用いる。長周期地震動生成域（LMGA）に関係するパラメータについては、新たな経験的な関係式の構築が必要である。LMGAの面積（長さ*Ls*と幅*Lw*）と位置に加えて、LMGAでの最大すべり量 (D_b)、すべり速度時間関数、すべりのライズタイム(T_b) が必要とされる。D_b や T_bは経験的関係式（Murotani et al., 2015; Tanaka et al., 2018）から与えられる。

参考文献：Irikura, K., S. Kurahashi, and Y. Matsumoto (2019): Extension of Characterized Source Model for Long-Period Ground Motions in Near-Fault Area, Pure Appl. Geophys., DOI: 10.1007/s00024-019-02283-4

© The Seismological Society of Japan

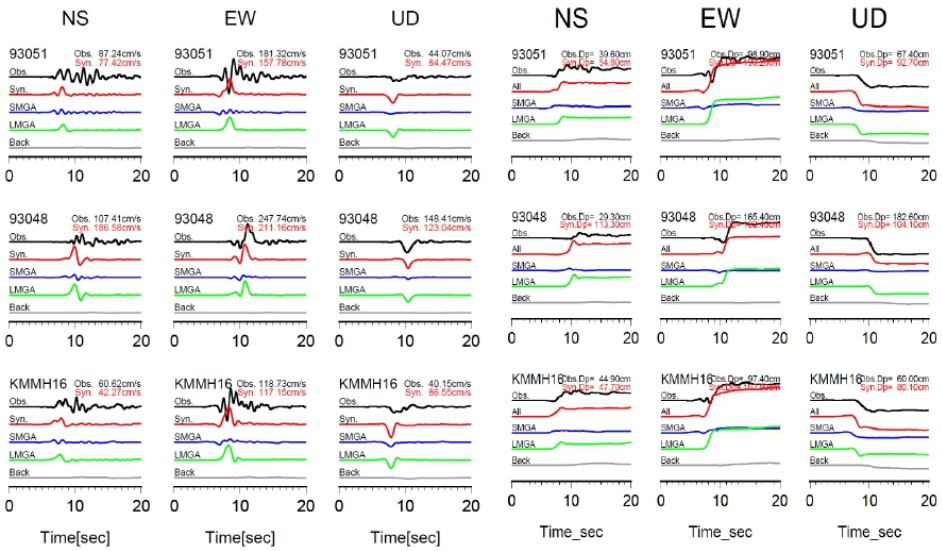


Fig.1. Comparison of observed ground motions and synthetic ones of three components for Model K3 at near-fault stations (93051, 93048, and KMMH16. Observed (black), synthetic (red, total sum of contributions from a long-LMGA, two SMGAs and a background), contribution from the SMGAs, contribution from the LMGA, and contribution from the background are denoted from top to bottom in each trace.

© The Seismological Society of Japan

Early forecast of long-period ground motions for Nankai trough earthquake: effects of site-amplification factors at offshore stations

*Atsuki Oba[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2]

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

１．データ同化に基づく長周期地震動の即時予測とその課題

南海トラフ沿いの大地震により、震源域近傍の大阪、濃尾平野に限らず、数百キロメートル離れた関東平野でも長周期地震動の発生が心配される。Furumura, Maeda & Oba (2019, GRL)は、強震観測データと３次元差分法シミュレーション結果の同化による長周期地震動の即時予測手法を開発した。しかし、同化波動場に基づいて、数十秒～数分先の長周期地震動の予測を即座に進めるには高速スパコンが必須である。そこで、大峡・古村。前田（2019, JpGU）は、同化波動場(観測と計算の残差)に対し、事前に計算したグリーン関数をコンボリューションすることで、評価地点の長周期地震動を瞬時に予測する改良を行った。本研究では、これらのデータ同化・長周期地震動予測手法を、南海トラフ沿いの大地震に適用するとともに、DONET等の海底ケーブル強震観測網の利用で課題となる、海域観測点の強いサイト増幅特性の影響を検討する。

２．海域観測点における強いサイト増幅の影響

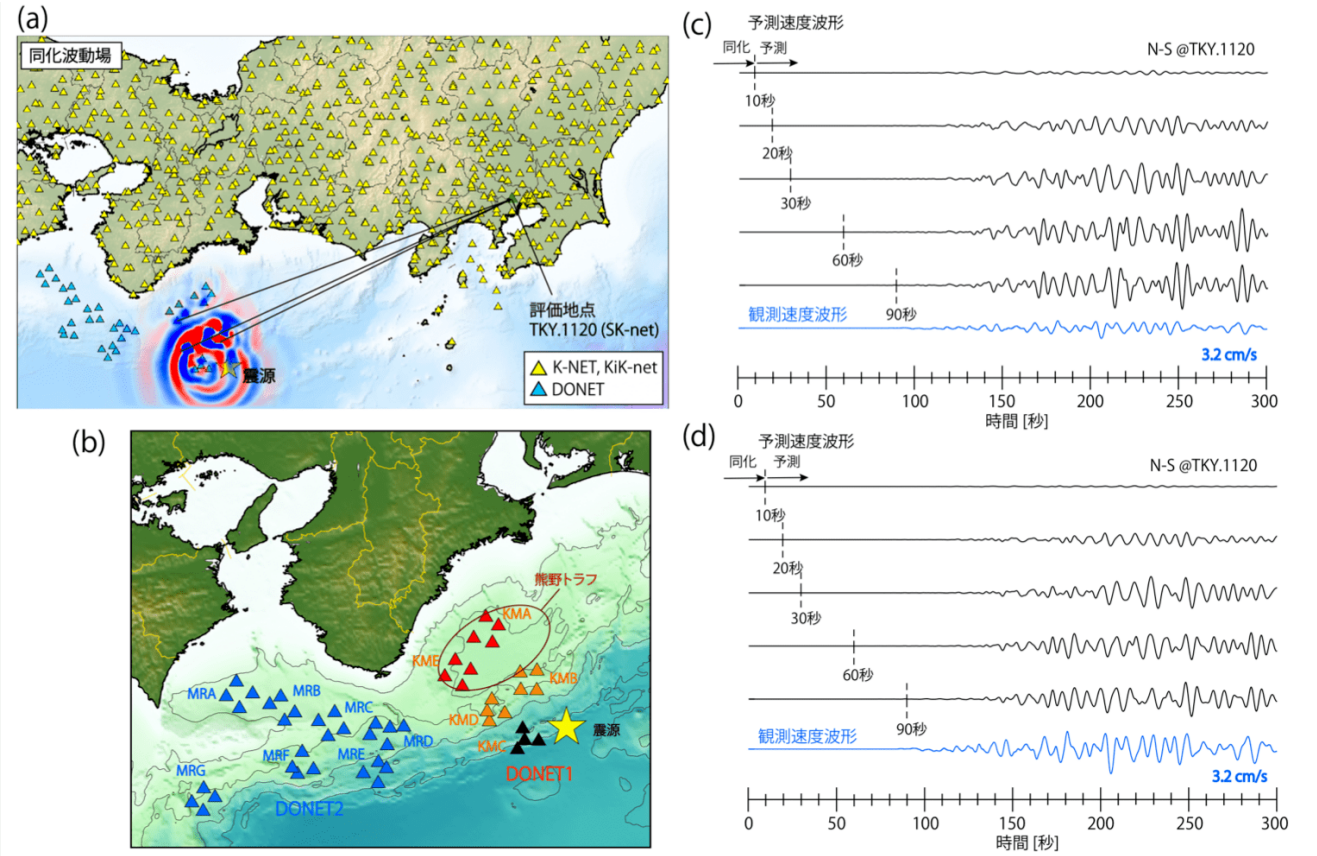
波動場のデータ同化は、J-SHIS地下構造モデルを用いた３次元差分法計算の結果と、強震観測データとの差を最適内挿法により空間補間して、計算結果を補正することで進められる。時間経過とともに同化が進展し、計算波動場が実際の波動場に十分近づいた後に、高速計算またはグリーン関数の利用により、遠地の評価地点における長周期地震動の予測を行う。南海トラフ沿いの地震のデータ同化には、三重県～徳島県沖のDONET1&2、そして高知県沖～日向灘に設置が計画されているN-net等の海底ケーブル強震観測網の活用が期待できる。しかしながら、震源域近傍での強震観測では、海底の厚い堆積物による強いサイト増幅や(例えば、Guo et al., 2016, BSSA)、今日神事の地盤の非線形応答による負のサイト増幅の影響（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018, PEPS）がデータ同化と予測計算に与える影響が心配される。

３．海域観測データを用いたデータ同化と予測実験

2004年紀伊半島南東沖地震(Mw7.4)のK-NET, KiK-net強震観測データを用いて、関東平野の長周期地震動の即時予測の数値実験を行った。DONET観測点の強震データは存在しないため、F-netによる震源モデルとJ-SHISモデルを用いた３次元差分法計算により合成した。海域観測点の強いサイト増幅の影響を評価するために、熊野トラフ上の２観測点(図b赤三角)の加速度波形の振幅を４倍、その縁の２観測点(オレンジ三角)の振幅を２倍にした。震源ごく近傍の１観測点(黒三角)では、強震動による地盤の非線形応答を考慮して振幅を1/2倍にした。これらのK-NET, KiK-net実波形データと、DONET地点の合成波形データを用いたデータ同化により、関東平野(都心のSK-net; TKY.1120地点)の長周期地震動の予測を行なった。結果、海域観測点の強いサイト増幅により震源域周辺の広範囲にわたって同化波動場が過大評価され、関東平野の長周期地震動予測結果も２倍以上に過大評価となった(図c)。時間経過とともに、陸域での強震観測結果がデータ同化に反映されても、過大な同化波動場の修正は進まないことがわかった。この問題は、データ同化の最適内挿法で観測と計算の誤差を空間補間する際に用いる、観測誤差とシミュレーション誤差の標準偏差の比を表すパラメータρを考慮し、陸域観測点では観測誤差を小さく(ρ=0.4)、海域観測点では逆に大きく(ρ=10)設定することで、改善が

© The Seismological Society of Japan

確認できた(図d)。本来は、サイト増幅を適切に評価できる、詳細な地下構造モデルの利用が必要だが、不確定性の高いモデルであっても、想定される計算と観測の誤差の差異を評価することで、実用的なデータ同化と予測の実現可能性が示された。



(a) 2004年紀伊半島南東沖地震に対する長周期地震動の予測実験における同化波動場。K-NET, KiK-net(黄色三角)およびDONET(青三角)のデータを同化し、関東平野内の評価地点TKY.1120(SK-net)における長周期地震動を予測した。(b) DONETの観測点分布。本研究ではDONET1におけるサイト増幅が同化に与える影響を評価した。(c) TKY.1120における予測速度波形(黒)と観測速度波形(青)の比較。(d) DONETと陸域観測点(K-NET, KiK-net)で同化パラメータ ρ (観測と計算の誤差の比)を変えた時のTKY.1120における予測速度波形(黒)と観測速度波形(青)の比較。

© The Seismological Society of Japan

Information on long-period ground motion by JMA

*Masaki Nakamura[1]

1. JMA

長周期地震動は、規模の大きな地震が発生したときに生じる周期が長い揺れで、高層ビル等の長大構造物を長時間にわたって大きく揺らすとともに、あまり減衰せず遠くまで伝わりやすいという性質があり、特に大都市圏での被害の発生が懸念されている。

地震による揺れの大きさや被害の程度を表す指標としては震度が幅広く利用されているが、震度は長周期地震動を測る指標としては不十分であることが以前より課題とされてきた。このため、気象庁は、地震工学、地震防災、建築や放送･情報の各分野の有識者、関係団体、行政機関からなる「長周期地震動に関する情報のあり方検討会」（*1、平成23年11月～平成24年３月、座長：翠川三郎東京工業大学名誉教授）及び「長周期地震動に関する情報検討会」(*2、平成24年10月～平成31年３月、座長：福和伸夫名古屋大学減災連携研究センター長)を開催し、長周期地震動に関する情報の基本的なあり方、長周期地震動階級の作成、観測情報や予測情報の実用化のための技術的検討等を進めてきた。

これらの検討会の議論等を踏まえ、平成25年3月には、長周期地震動による高層ビルの室内の様相や体感の程度を示すため、絶対速度応答に基づく「長周期地震動階級」(*3)を策定するとともに「長周期地震動階級関連解説表」(*3)を作成した。また、「長周期地震動に関する観測情報」(*4)について、気象庁のウェブサイトでの公表を開始し、地域ごと、観測点ごとの長周期地震動階級や、観測波形等を掲載した。加えて、アプリ事業者、消防機関等から、より早いタイミングで確実にデータを受領できるオンラインでのデータ提供を求められていることから、電文形式での情報発表についても予定している。

一方、緊急地震速報のように長周期地震動に対しても事前に予測情報を提供できれば、高層ビル等における災害の防止･軽減に効果を発揮することが期待できる。このため、気象庁では、平成25年度以降、長周期地震動の予測技術についての検討を行ってきた。平成29年３月に取りまとめられた長周期地震動に関する情報検討会の報告書においては、長周期地震動について「広く国民に警戒・注意を呼びかける予測情報」は気象庁が担うべきとされ、現行の緊急地震速報（警報）を発表する基準に長周期地震動階級の予測値（階級3以上）を追加することが適切とされた(図参照)。気象庁では、緊急地震速報で推定された震源要素を用いて、距離減衰式から即時的に予測地点の長周期地震動階級を予測する手法(*5)を用いる予定である。今後は、この方針に従って、気象庁による予測情報の発表に向けて準備を進めていく。

加えて、個別ビル等への固有周期や地盤を考慮した多様なニーズに対応する予測情報の提供については、緊急地震速報（予報）と同様、民間の役割が重要である。平成29年11月より、気象庁と防災科学技術研究所が共同で予測情報の実証実験(*6)を行っており、本年度以降は、民間事業者からも予測情報を提供する予定である。気象庁では、民間事業者による長周期地震動の予測情報を国民が安心して使っていけるための制度作りを併せて行っていく。

文献

*1) https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_kentokai/index.html

*2) https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_joho_kentokai/index.html

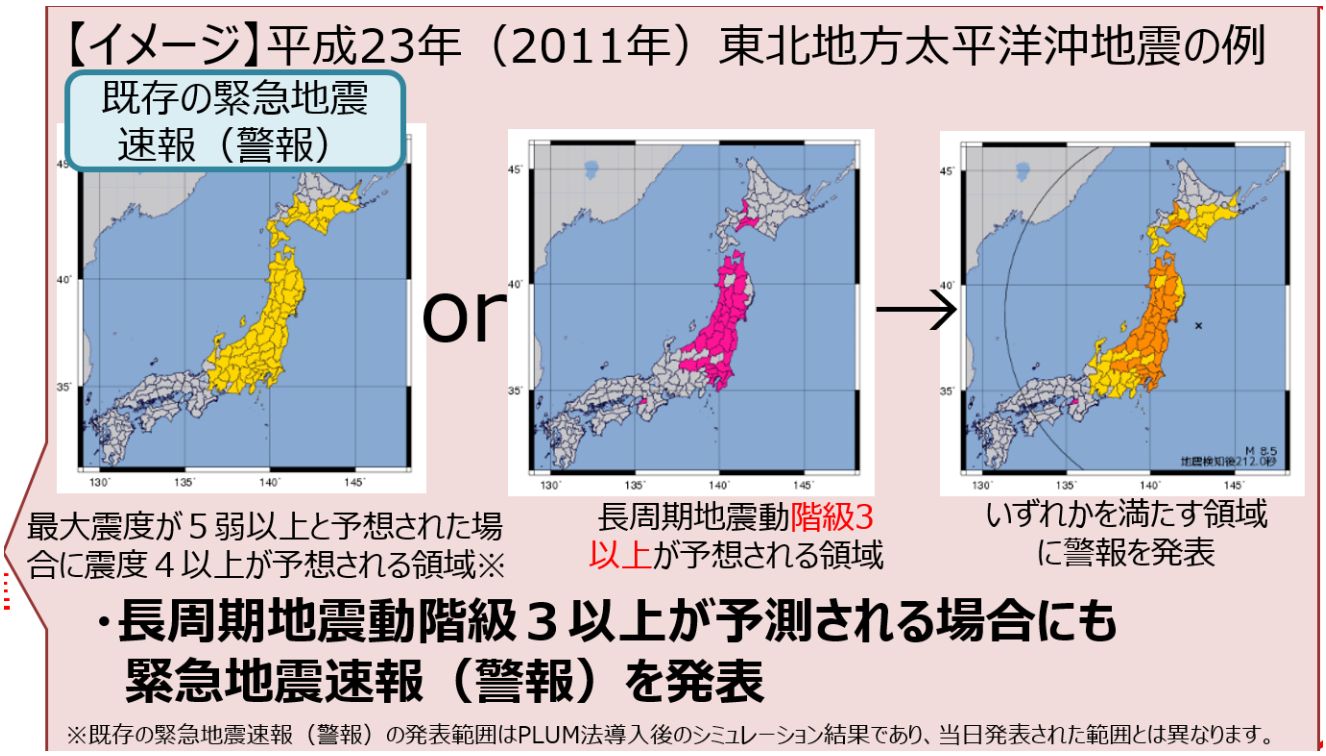
© The Seismological Society of Japan

*3) https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm_explain/about_level.html

*4) https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm/index.html

*5) Dhakal et al.(2015), 日本地震工学会論文集, 15, 91-111.

*6) https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_joho_kentokai/ex/index.html



© The Seismological Society of Japan

joint session | Special session：S21. Long-Period Ground Motion -Generation Mechanism and Structural & Social Response-

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM A Clock Tower Centennial Hall

[S21]AM-2

chairperson:Yoshiaki Hisada(Kogakuin University), Takeshi Kimura(NIED)

For some of the lectures, we will update the lecture information at a later date.

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

[S21-06] Toward Practical Use of Realtlime Long-Period Ground-Motion Prediction Information

*Shin Aoi[1], Takeshi Kimura[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Yadab P. Dhakal[1], Naoto Koja[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency)

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

[S21-07] リアルタイムスロッシング評価システムが捉えた長周期地震動

*大保 直人[1]、高田 史俊[2] (1. 地震予知総合研究振興会、2. エイシンシステム株式会社)

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

[S21-08] Software for Predicting Damage and Supporting Emergency Response of High-Rise Building Considering Long-Period Ground Motion

*Yoshiaki Hisada[1], Masahiro Murakami[1], Akira Kuriyama[2], Yui Matsumoto[2], Yuya Miyauchi[2] (1. Kogakuin University, 2. RC Solution Co.)

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

[S21-09] 近年発生した大地震時の強震記録に基づく国内の超高層集合住宅を対象とした広域的な非線形地震応答推定

*村田 将一[1]、王 欣[2]、永野 正行[3] (1. 東京理科大学大学院　理工学研究科建築学専攻、修士課程、2. 東京理科大学　理工学部建築学科、助教　博士（工学）、3. 東京理科大学　理工学部建築学科、教授　博士（工学）)

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

[S21-10] [INVITED]Problems to broadcast long-period earthquake motion information on TV

*Kazunori Tanihara[1] (1. Nippon Television Network)

Toward Practical Use of Realtlime Long-Period Ground-Motion Prediction Information

*Shin Aoi[1], Takeshi Kimura[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Yadab P. Dhakal[1], Naoto Koja[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

規模の大きな地震に伴い発生する周期数秒程度の長周期地震動は、周期1秒前後の揺れに比べて減衰しにくく、震源から離れた地点であっても大きな揺れをもたらすことがある。特に、大都市が位置する関東平野や大阪平野などの軟弱な地盤からなる大規模な堆積平野により大きく増幅され、高層ビルなどの長大構造物に被害をもたらすこともあことから、社会的影響が大きい。長周期地震動による被害の軽減には即時予測情報が重要であるが、現在の緊急地震速報の発表指標は震度のみであり、長周期地震動への対応はなされていない。気象庁では近い将来に、緊急地震速報と同様な予報・警報を長周期地震動に関しても出すことを計画しており、長周期地震動に関する情報検討会に多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループを設置するなどして検討を行なってきた。この中で長周期地震動に関する予測情報の将来の在り方として、国民にあまねく警戒・注意を呼びかけるために気象庁が直接提供する予測情報に加え、気象庁以外の事業者による利用者のニーズに応じた地点や高層ビル各階に対する予測情報やリアルタイムの観測データを利用した予測情報が必要であるとされた。我々は、気象庁以外の事業者による予測情報の提供について、予測情報の効果及び利活用方法の検証や課題の抽出・整理などを行うことに加え、長周期地震動の理解促進や長周期地震動階級の周知などを目指した実証実験を実施した。気象業務法における予報業務を行う場合には気象庁の許可が必要なため、防災科研は気象庁と連携し、将来の予報業務許可事業者としての役割を防災科研が担うことで長周期地震動に関する予測情報を試験的に配信した。実証実験は大きく2種類から成っており、1つは「機械処理可能な予測結果を利用した実験」（以下、実験Ａ）で、もう1つは「予測結果の分布図を利用した実験」（以下、実験Ｂ）である。

実験Ａでは、Dhakal et al. [2015]による予測手法を実装した即時予測システムを開発し、緊急地震速報発報時に周期1.6～7.8秒の絶対速度応答スペクトルや長周期地震動階級の予測値をAPIにより配信した。また、リアルタイムの観測情報としてK-NET及びKiK-netによる地震波形データから1秒毎に逐次的に計算した絶対速度応答スペクトルと長周期地震動階級も同様に配信した。このシステムにより、利用者は時刻と位置や観測点名を指定し各値を取得できる。実験には11組12機関が参加し、配信した情報をもとに高層ビルの在館者や防災センターで勤務する人が地震時に配信情報を活用するためのシステム開発や、エレベーター制御システムでの活用の検討などが行われた。

実験Ｂでは、実験Ａと同様の長周期地震動の予測値と観測値を1枚の地図上に合わせて可視化して長周期地震動による今の日本列島の揺れを把握できるWebサービスである長周期地震動モニタを開発し、このモニタを実際に利用するユーザーの募集を行った。募集は2017年11月～2018年3月と2018年10月～2019年3月の2期に渡って行い、それぞれ1,440名、1,924名の参加があった。また、利用状況や改善意見などを確認するためにユーザーに対するアンケート調査を行った。

実証実験では、予測情報を活用した高層ビルなどの施設管理関係者の情報収集やエレベーターの管理・制御を目的としたシステム開発が参加機関により実施され、長周期地震動の即時予測情報の必要性が改めて確認できた。さらに2011年東北地方太平洋沖地震を再現した予測情報と実測値の比較や検証も行われ、現地における観測で長周期地震動が検知されるよりも早い段階で対応判断に利用できる情報が入手できるなど、有効性も確認できた。また、実験Ｂのアンケート結果より、長周期地震動やその予測情報に対する参加者の理解促進に効果があったことも分かった。一方で、高層ビルなどが多く立地する首都圏をはじめとする大都市では大きな長周期地震動は実証実験期間中には観測されておらず、実地震によるリアルタイムでの効果の検証は行なわれて

© The Seismological Society of Japan

いない。長周期地震動をリアルタイムで観測し即時予測する技術はほぼ確立しており、また、それらを有効に活かして防災につなげる官民での取り組みも進みつつある。今後も継続して情報の有効な利活用法を模索すると共に、早い段階で実用化につながることが望まれる。

© The Seismological Society of Japan

--

*- -[1], - -[2]

1. -, 2. --

T2019-098

© The Seismological Society of Japan

Software for Predicting Damage and Supporting Emergency Response of High-Rise Building Considering Long-Period Ground Motion

*Yoshiaki Hisada[1], Masahiro Murakami[1], Akira Kuriyama[2], Yui Matsumoto[2], Yuya Miyauchi[2]

1. Kogakuin University, 2. RC Solution Co.

１．はじめに
近年、南海トラフ巨大地震等の長周期地震動による超高層建築への被害が懸念されており、防災・減災のための事前のハード対策だけでなく、地震後に速やかに揺れや被害状況を把握し、適切な対応行動を可能とする事後のソフト的な対応策の推進が求められている。著者らは2018年度より工学院大学新宿校舎（28階建てS造）を対象として、防災科学技術研究所から得られた長周期地震動の予測・観測情報をもとに、各階の長周期地震動階級・層間変形角等の推定結果をタブレット端末に通知する等により、適切な初動対応を支援するシステム開発を行っている。ここでは開発した超高層建築の応答・損傷予測アプリ「びるゆれコール」のプロトタイプの報告を行う。

２．超高層建築の応答・損傷予測アプリ「びるゆれコール」
図１に2018年度版の「びるゆれコール」の概念図を示す。まずアプリ側サーバには事前に対象建物の構造種別や階数、固有周期・刺激関数・減衰定数、さらに被害程度の判断基準値（構造的被害の基準となる層間変形角、および、室内被害の基準値となる震度・長周期地震動階級など）の情報を登録しておく。次にアプリ側サーバは常に防災科研の長周期地震動指標APIにより予測・観測情報をモニタリングしており、地震時には対象サイトの応答スペクトル等の情報を速やかに入手する。ここで予測情報とは、気象庁による緊急地震速報（震源データ）と長周期地震動の強震動予測式（Dhakalほか、2015）を用いて、250mメッシュごとに長周期地震動階級や絶対速度応答スペクトル等の情報である。一方、観測情報とはK-Net等による最寄りの観測データによる同様な情報である。

一方、対象となる超高層建築の応答・損傷予測として、地震時に更新される最新の予測・観測情報を用いて、建物各階の最大応答値や長周期地震動階級・震度（相当値）、層間変形角等の推定値をサーバにて計算し、その結果をタブレット端末に通知する。建物各階の応答値は、予測・観測情報による絶対速度応答スペクトルから応答スペクトル法よりサーバ側で計算する。今回対象としている工学院大学新宿校舎の1～3 次の固有周期が約3, 1, 0.5秒であり、提供される長周期地震動の最小周期が1.6秒であるため、ここでは1次モードのみで計算を行う。刺激関数等は経験式（例えば、2014大宮ほか、）を用いて、ここでは減衰定数は3%とした。

計算された建物の応答推定値は、タブレット端末でのクライアント側アプリに自動的に表示・更新される。例として図２は予測情報受信時の画面であり、受信者がいる階（低～高層階）に対応した長周期地震動階級・震度（相当値）、揺れの到達予測時間、想定される層間変形角と震度等による構造・室内被害程度と、事前に計画した望まれる対応行動を促すメッセージが表示される（現在、震度は防災科研提供の地表震度のみ表示）。さらに観測情報受信時にも同様な情報が自動的に表示される。一方、管理者用アプリの画面では、サーバにアクセスすることで過去３日分の全ての予測・観測情報による応答推定値を確認し、初動対応に活用することができる。

３．おわりに
今後、開発アプリは工学院大学新宿校舎で試験運用され、その後、一般ユーザーへの適用を検討する予定である。発表当日は適用と検証事例等も紹介する予定である

謝辞：本研究は、官民連携研究開発投資拡大プログラム（PRISM）に基づき、防災科学技術研究所が主催して

© The Seismological Society of Japan

いる公募研究「長周期地震動に関する観測・予測情報の利活用技術開発に関する研究」として実施しています。

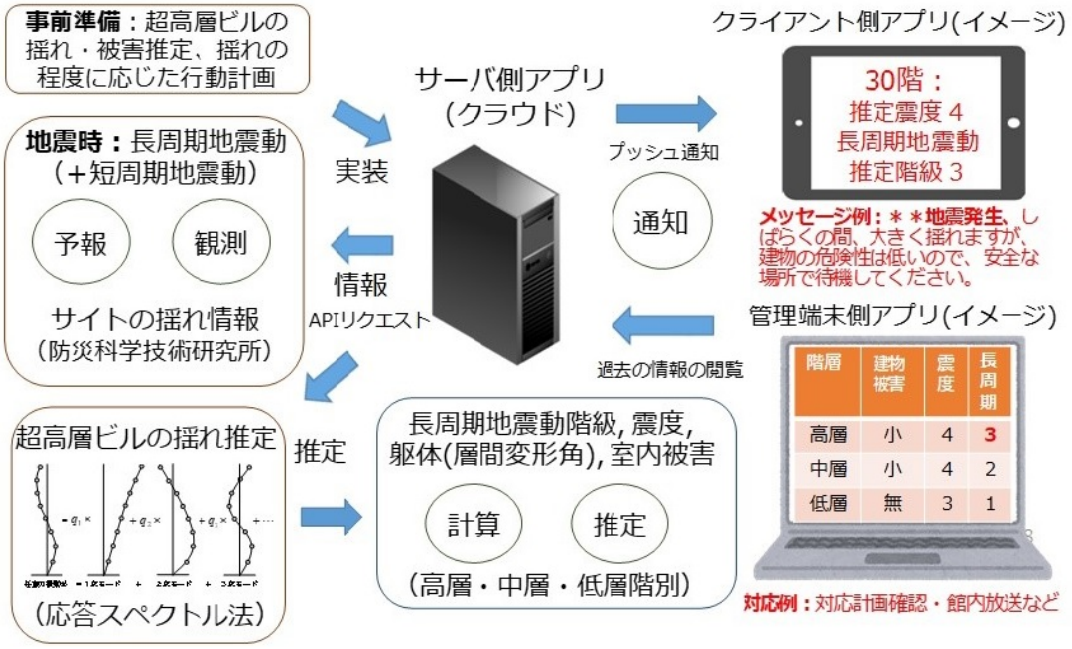


図１ 長周期地震動による超高層建築の応答・損傷予測アプリ「びるゆれコール」の概念図



図２ 「びるゆれコール」プロトタイプのクライアントアプリ画面（タブレット端末：予測値受信時）

© The Seismological Society of Japan

-

*- -[1], - -[2], - -[3]

1. -, 2. --, 3. ---

T2019-096

© The Seismological Society of Japan

Problems to broadcast long-period earthquake motion information on TV

*Kazunori Tanihara[1]

1. Nippon Television Network

テレビは「即座に」「不特定多数に対して」「映像と音声でわかりやすく」伝えることが得意なメディアである。それゆえ災害時の情報伝達としては**「被災地の生命を守る」**役割を担ってきた。一番わかりやすい例は、一定震度以上の地震が起きると、どんなテレビ番組の放送中でも画面の上位置に「震度○　□□県△部」などの文字情報が表示去れる速報スーパーだ。震度の速報スーパーは、既に地震が発生して地上が揺れた「後（あと）」に発表される情報だが、緊急地震速報や津波警報などは、揺れ発生や津波到達の「前」に発表される可能性があり「被災地の生命を守る」という点では、より迅速性が求められるため、民放ではＣＭ中でも速報スーパーが放送される。

近い将来、ここに長周期地震動情報が加わることになった。これまでの震度情報をテレビで伝える場合は「場所による揺れの違い」という“二次元”でなんとか処理出来た。しかし長周期地震動情報は、それに加えて**「高さによる揺れの違い」**をどう伝えるか？　という新たな課題をクリアすることが、テレビに求められる。

長周期「予測情報」をどう伝えるか？

強い揺れの予測情報、つまり緊急地震速報（警報）について、テレビ局は気象庁から電文が届くと、人間の手を介さず「そのままコンピューターで解析、画面を作成し放送する」自動放送を行っている。これは秒単位の猶予時間しかない場合でも、可能な限り「被災地の生命を守る」放送を行うためである。

長周期地震動の予測情報も「揺れに備える」という性格は緊急地震速報と同じだ。気象庁は階級３以上のものについては、緊急地震速報（警報）に含めることにした。情報を受け取った際の防災行動についても、気象庁は「安全な場所で揺れに備えるという行動は、長周期地震動でも（従来からの）緊急地震速報と同じ」としている。

では伝え方はどうだろうか？　緊急地震速報は図のように、文字情報と地図情報の組み合わせで伝えられている。情報の受け手である視聴者が取るべき防災行動が同じなのだから、従来からの緊急地震速報も長周期も**「ひとまとめ」**で伝えても支障がない、という考え方も成り立つ。一方、通常の揺れでは対象外でも長周期では対象となるエリアの場合、防災行動を取る必要があるのはビルやマンションの高層階にいる人だが、「ひとまとめ」で伝えると、普通の民家に住む人も慌てるかもしれない。丁寧に説明すれば良いと言われればその通りだが、「秒単位の猶予」が前提の緊急地震速報の放送に時間的な余裕はない…　従来の緊急地震速報は「情報に名前が挙がったエリアでは、全ての人が行動指示の対象者」だったが、**「高さによる揺れの違い」**がある長周期地震動の予測情報では「地名だけでは過不足なく伝えられない」という課題が生まれる。

長周期「観測情報」では、さらに…

長周期地震動では、もうひとつ、長周期で「揺れた結果」である観測情報も発表される。気象庁によると、地震発生から約10分後という「震度に続く」早いタイミングで出るそうで、地震直後の高層階の被害確認や救助

© The Seismological Society of Japan

対応のためには、広く知ってもらうことが必要な情報だ。

だが情報文の構成を見ると、揺れの発表単位は「ブロック別（□□県△部）」で、揺れの程度は「階級４～１」と数字であらわす。「震度に続く」タイミングに**「極めて震度と似た」**形で発表される。テレビやラジオの音声で、両方とも大きい方から順に読んだ場合、震度情報と長周期地震動観測情報、どこがどう違うのか？　識別するのは困難だ。そして、震度情報はこれまで“慣れ親しんできた積み重ね”のアドバンテージがあるため、“新参者”の長周期の観測情報が埋没してしまうおそれがある。その対策として今回、長周期観測情報のなかに**“特出し”**の段落が作られた。「震度４以下だけど、長周期階級３以上」というグルーピングだ。

さらに「極めて震度と似た」という悩みは、地図を使った表示でも同じだ。長周期地震動を「わかりやすく」伝えるための試行錯誤は尽きない。



© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM JST | Wed. Sep 18, 2019 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-1

chairperson:Takuji Yamada(Ibaraki University), Nana Yoshimitsu(University of Tokyo)

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

[S08-18] Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

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

[S08-19] Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana[1], Masatoshi Miyazawa [2], James Jiro Mori[2] (1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

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

[S08-20] **Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method**

*Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Tomonari Sei[3] (1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo)

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

[S08-21] Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada[1], Meitong Duan[1], Jun Kawahara[1] (1. Ibaraki University)

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

[S08-22] Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1] (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan)

Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2]

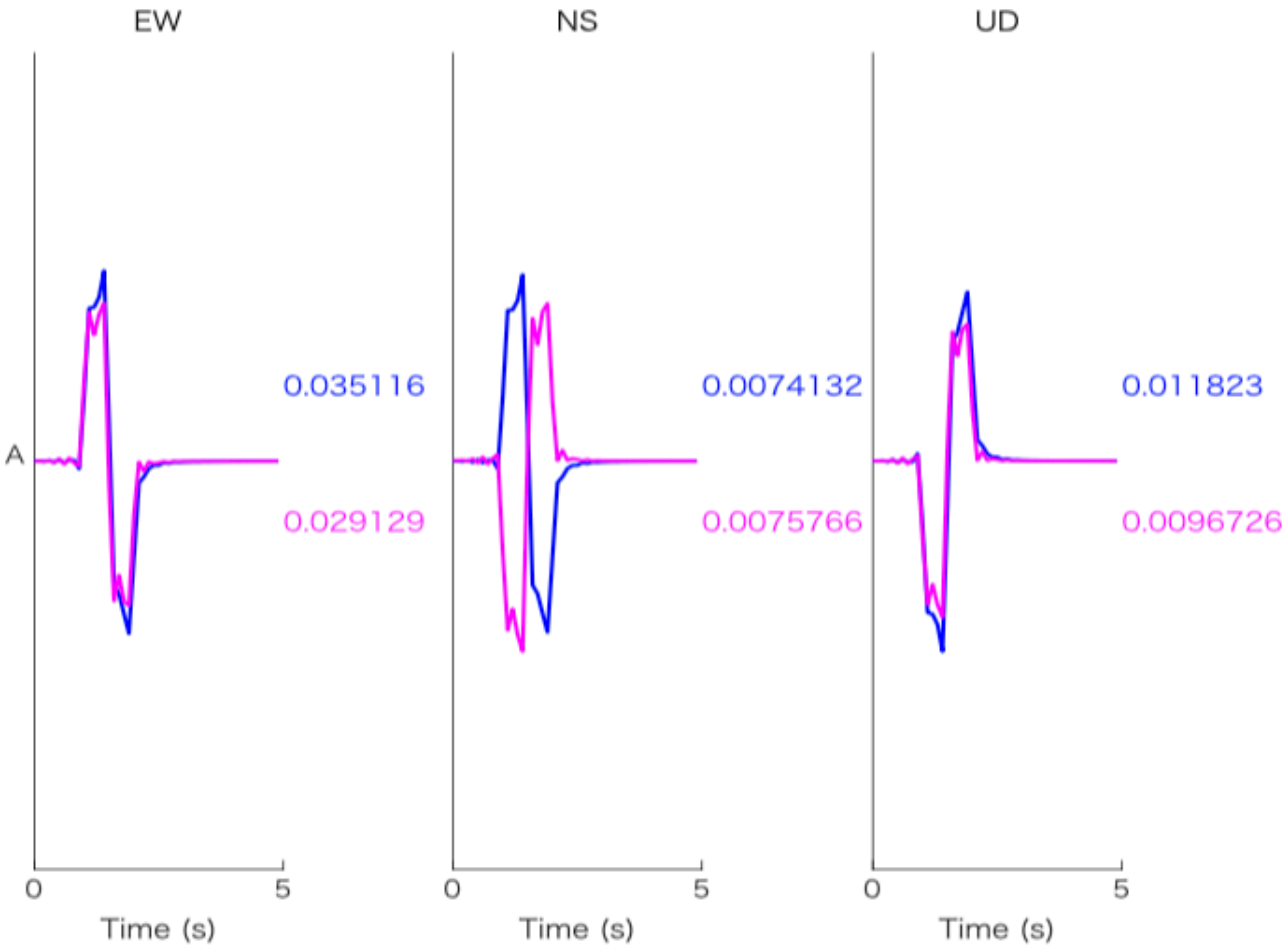
1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

震源過程を解析する手法として波形インバージョンが広く用いられている。この波形インバージョンは、グリーン関数と滑り量を時空間でコンボリューションして生成される理論波形で観測波形を再現するアプローチであり、その波形残差を最小にするような各小断層の時間ステップごとの滑り量を最小二乗的に求めるのが一般的である。このとき、グリーン関数として、仮定した速度構造から理論的に求められるグリーン関数 (例えばBouchon, 1981; 武尾, 1985) を用いる場合と、近傍で発生した同様のメカニズムの地震波形を経験的グリーン関数 (例えばHartzell, 1978) として用いる場合がある。経験的グリーン関数は、実際の複雑な速度構造の影響を説明できる一方で、両者の震源が十分に近いことやメカニズムの類似性が要求されるため、解析対象とする地震の震源近傍に本震と似たメカニズムの地震が存在しなければ適用できないという欠点がある。

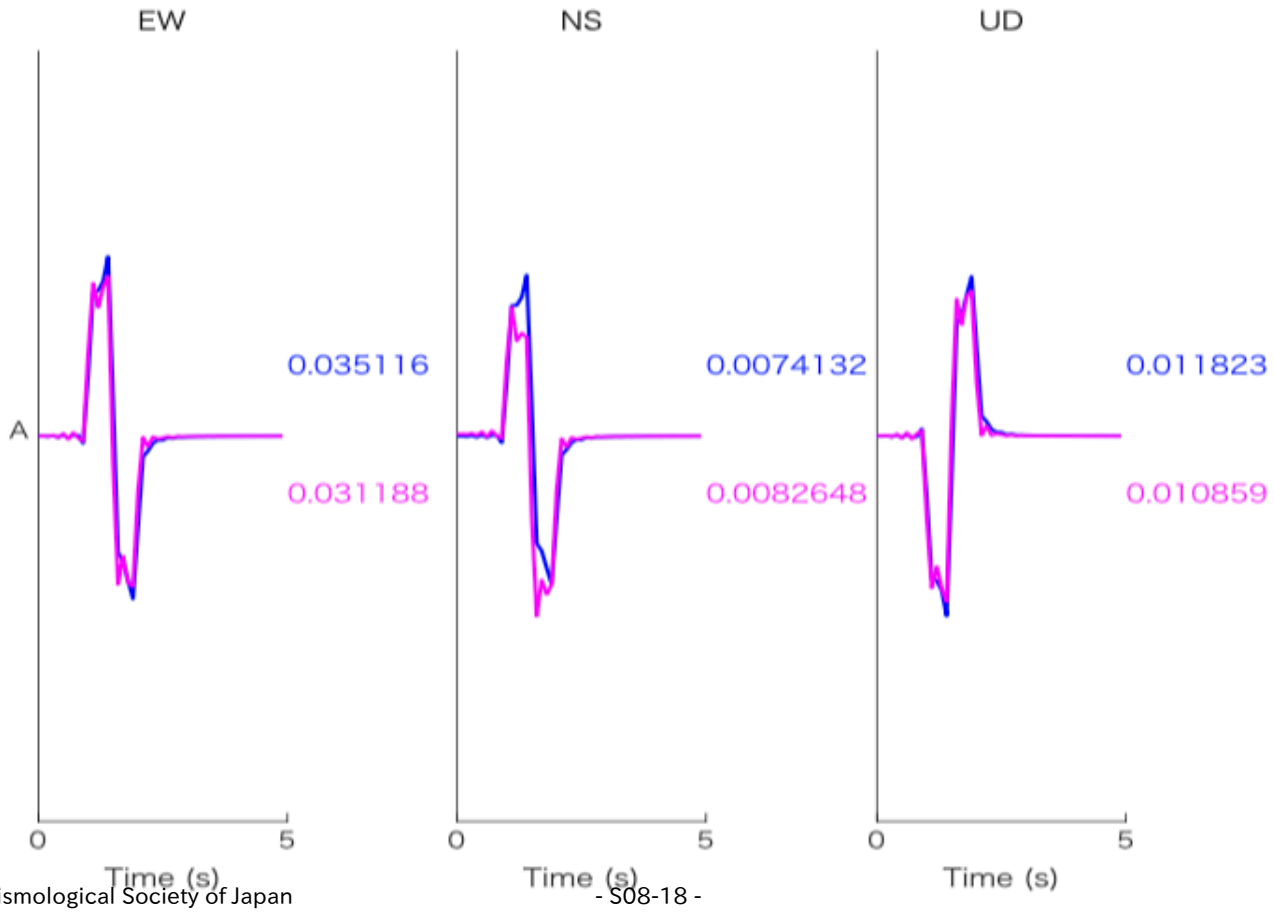
しかしながら、地震波形の複雑性に大きく寄与する観測点近傍の経路がほぼ共通であれば、震源位置やメカニズムが多少異なる地震の波形でも、放射パターンの影響を補正した上でグリーン関数として用いることができる可能性がある。そのような補正が実用的であれば、経験的グリーン関数の適用範囲を広げることが期待される。そこで本研究では、放射パターンを考慮した経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン手法を開発し、理論波形を用いてテストを行った。

具体的には、波線理論を仮定して、射出角とモーメントテンソルの情報から、対象とする地震の小断層での滑りと経験的グリーン関数に用いる地震について理論的な放射パターン（Aki and Richards, 2002）を計算し、その比を用いてP波・SH波・SV波のそれぞれについて観測点毎に補正をおこなった。放射パターンには、メカニズムが異なることによる直接的な影響と、震源位置が異なることによるみかけ上の影響があるので、一番単純なケースとして、震源位置が同じでメカニズムが異なる点震源同士、メカニズムが同一で震源位置が異なる点震源同士について、本手法による補正の効果を確認した。後者の例として、北緯40度・東経141度で深さ50kmと200kmで発生し、北緯41度・東経141.5度の地表で観測される理論地震波形を、それぞれ赤色・青色で図に示す。なお、メカニズムは走向0度・傾斜90度の左横ずれ断層を仮定している。本研究で提案した補正により、振幅が正しく評価できていることが確認できる。今後、矩形断層でのテストを行ったうえで、実データへの適用を目指す。

© The Seismological Society of Japan



放射パターンによる補正をかけなかった場合の波形



© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana[1], Masatoshi Miyazawa [2], James Jiro Mori[2]

1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

This abstract is the result of the study carried out on two earthquakes that occurred on 12th and 13th April 2014 in the Solomon Islands., The pair of earthquakes with magnitudes Mw 7.6 and Mw7.4, respectively, occurred near Makira Island (San Cristobal). The depth of the main event (Mw 7.6) was 27 km and depth of the second event (Mw 7.4) was 37 km (Global Centroid Moment Tensor (GCMT). The second event occurred 16 hours later after the Mw 7.6, approximately 20km southwest of the location of the hypocenter of the first event. our study aims to analyze and evaluate the source mechanism for the doublet earthquakes and evaluate the interrelation between the two events, especially to investigate "Why the Solomon Islands has a high rate of doublet earthquakes" (Lay and Kanamori, 1979; Schwartz et al., 1989; Felzer et al., 2004, Yamamoto et al., 2002 and Xu and Schwartz, 1993). The study aims to establish a framework in which to understand the mechanisms of the triggering process for these large doublet events. The study uses static Coulomb stress function to evaluate if the Mw 7.4 earthquake was triggered by static stress changes. Initially, the slip distributions of ruptured faults for the two events was determined to evaluate their source process. This was done by the inversion method of Kikuchi and Kanamori (1991). The teleseismic P waveform data from more than 20 stations Global Seismographic Network in a distance range of 30° *to* 90°, were used in the inversions for both events. The P-waveform data were band-passed filtered between 0.04 and 0.10 hz to obtain the best-fits between the observed waveform and the synthetic waveform. The Green's functions were calculated and used to determine the slip distribution on the fault planes. Based on an assumed fault plane with fixed strike and dip angles placed in the region of the earthquake hypocenter and divided into subfaults, a constant rupture velocity of 2.5 km/s is assumed and the telseismic data inverted for the slip of each subfaults

The results show that the mechanism for the Mw 7.6 first event is left-lateral strike-slip faulting for a fault plane of strike 116, dip 74, and rake 24 degrees. , The results for the mechanism of the Mw7.4 event indicates thrust faulting on a fault plane-oriented WNW –ESE with two dip angles, i.e. a south dipping fault plane with strike 104 degree, dip 46, rake 86 (Fig 1.7) and a north dipping fault with strike 279, dip 44 and rake 94.

We calculated the values for the Coulomb Failure Stress function at the hypocenter for the second event and obtained a value of +48.59 kPa for the north dipping fault and a value of +18.20.64 kPa for the south dipping plane.

The spatial distribution of aftershocks for 16 hours seems to be more consistent with the northern dipping fault for the triggered event. Both cases, however, show increase of stress changes which encourages the likelihood that the second event was triggered by static Coulomb stress. We proposed a model that might support the complexicity of the region to produce these doublet events.

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method

*Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Tomonari Sei[3]

1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo

Stress drop is an important factor to express earthquake source characteristics, and it is utilized for the hazard assessment. To estimate the stress drop, we usually compare the theoretical source spectrum representation with the spectrum of the observed waveforms. In this process, we estimate seismic parameters (corner frequency and seismic moment) that are necessary to calculate the stress drop. Previously, the estimation error of these parameters decreased the reliability of the stress drop estimates. For evaluating the estimation accuracy and trade-off among parameters, we used Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method in the Bayesian framework for stress drop analysis (Yoshimitsu et al., SSJ, 2018) instead of grid search.

In this study, we introduce F-distribution into MCMC as a probability density function instead of normal distribution. To estimate the stress drop, we use the spectral ratio of co-located two earthquakes to cancel the path effect. The ratio of power spectrum between observed and theoretical spectrum is represented by chi-square, and the ratio of two chi-squares is represented by F-distribution. Thus, the ratio of the observed power spectrum of two earthquakes divided by the ratio of the theoretical power spectrum of two earthquakes is represented by F-distribution.

We focused on a cluster consisted of 36 earthquakes that occurred from 2015 May to 2016 November in Oklahoma. The spectral ratios between the large event (M_L = 4.1) and co-located small events (2.2 < M_L < 3.7; < 2 km from the large event) were formed to remove path effects. We analyzed 5.12 seconds after twice the S-arrival time with the band-pass filter of 0.5 to 30 Hz. To examine the probability of corner frequencies and moment ratio of each event pair, we applied the Metropolis-Hastings algorithm of the Markov Chain Monte Carlo method that is a random walk adaptation. Each event observed a different number of stations, and we used as many stations as possible. To calculate the likelihood, we use all spectral ratios simultaneously. We update the value of moment ratio and two corner frequencies with 200,000 iterations.

Sampling distribution showed strong trade-off among all three parameters. Moment ratio has a negative correlation with f_{c1} and f_{c2}. f_{c1} has a positive correlation with f_{c2}. The histogram of the sampling showed a single peak in most cases, but some events showed multimodal histogram.

We compared the results obtained from MCMC with F-distribution and normal distribution. Both calculations showed almost similar estimates, but the sampling distribution was different. In this analysis, F-distribution is suitable for probability density function than normal distribution because sampling distribution is reasonable.

Acknowledgements : NY, TM and TS are supported by JST CREST Grant Number JPMJCR1763.NY is supported by JSPS KAKENHI, Grant Number 19K14812.

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada[1], Meitong Duan[1], Jun Kawahara[1]

1. Ibaraki University

1. はじめに

東北地方東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う大地震が繰り返し発生している。本研究では、2003年1月から2018年12月に東北地方東方沖で発生した中規模地震（4.4 Mw 5.0）のうち、2.で説明するとおり、プレート境界面の摩擦特性を反映していると考えられる1735地震を選び出し、応力降下量の解析を行った。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0；以下では2011年東北地震と略す）を含む過去のMw 7.0 の地震時すべり分布との関連を議論することにより、応力降下量の空間分布が示唆するプレート境界面の摩擦特性の時空間分布およびその物理的背景について考察を行った。

2. 解析地震の選択基準

本研究では深さ方向の震源決定精度を考慮して、Nakajima and Hasegawa (2006)の推定した太平洋プレート境界面から±15 km の深さで起きた中規模地震（4.4 Mw 5.0）を選び、解析対象とした。なお本研究では、気象庁によって決定されたマグニチュードMjmaがモーメントマグニチュードMwに等しいと仮定しているが、この仮定の妥当性についても検討済みである。また、解析対象地震のうち、防災科学技術研究所によってメカニズム解が求められている地震については、太平洋プレートの沈み込み角度と調和的な節面を持つことを確認済みである。

3. 応力降下量解析

Yamada *et al.* (2010, 2015, 2017) の手法を用いて、応力降下量の解析を行った。まず、2012年から2018年に発生したMw3.5の地震のうち、解析対象の中規模地震（4.4 Mw 5.0）の震源から最短距離にある地震の観測波形を経験的グリーン関数とした。次に、解析対象の地震の観測波形スペクトルを経験的グリーン関数のスペクトルでデコンボリューションし、震源スペクトルがオメガ2乗モデルに従うとの仮定のもと、解析対象地震のコーナー周波数を求めた。最後に、断層面が円形であり、かつ破壊伝播速度がS波速度の90%であると仮定して、Madariaga (1976) のモデルを用いてコーナー周波数から応力降下量を計算した。

4. 結果および考察

各地震の応力降下量の解析結果をもとに、緯度・経度それぞれ0.1度ごとに平滑化した応力降下量分布をFig. 1に示す。Fig.1aより、応力降下量の解析結果には空間的な不均質性がみられ、Iinuma *et al.* (2012)による2011年東北地震の地震時すべり分布と比較すると、地震時すべり域周辺に大きな応力降下量が分布していることがわかる。この結果は、摩擦強度の大きい領域が2011年東北地震時にバリアとして働いたことを示唆している。2011年東北地震前後での時間変化を調べると（Fig.1bc）、宮城県沖および福島県沖におい

© The Seismological Society of Japan

て、2011年東北地震後に応力降下量が低下した領域が見られる。現時点でこれらの原因は不明だが、より詳細な時間変化の調査から原因究明を図りたい。なお、本研究の解析対象領域については、Uchide *et al.* (2014)が2011年東北地震前の応力降下量の空間分布を求めている。本研究とは解析手法が異なるが、本研究はUchide *et al.* (2014)の結果と調和的である（Fig. 1b）。このことは、本研究の解析結果の信頼性の高さを示唆している。

謝辞：本研究では、Hi-net（防災科学技術研究所）、気象庁、北海道大学、東北大学、東京大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

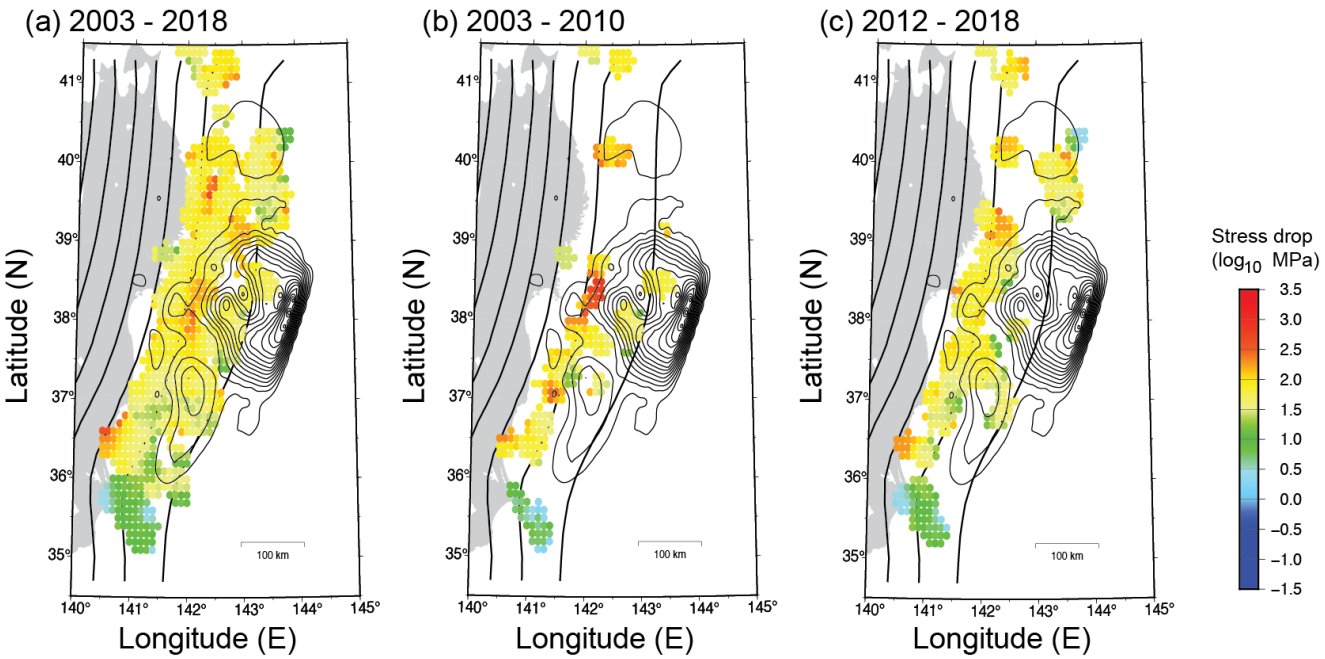


Figure 1. Spatial pattern of stress drops estimated from moderate-sized earthquakes with 4.4 ≤ Mw ≤ 5.0 that occurred (a) in 2003 through 2018, (b) from 2003 to 2010, and (c) from 2012 to 2018. Contours indicate the coseismic slip distribution of the 2011 Tohoku earthquake with Mw 9.0 (Iinuma *et al.*, 2012) at intervals of 2 m. Bold lines in NS direction express the depth of the upper surface of the subducting Pacific Plate (Nakajima and Hasegawa, 2006) at intervals of 20 km.

© The Seismological Society of Japan

Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1]

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

地震の発生要因としては，断層上のせん断応力の増加の他に，摩擦強度の低下が考えられる．このことは，地震の発生に間隙水圧の変化が深く関わっていることを示唆する (例えば，Hasegawa, 2017; Hubbert and Rubey, 1959; Nur and Booker, 1972; Sibson, 1992)．従って，地下の流体の挙動を調べることは地震の発生メカニズムを考える上でとても重要である． 震源 migration は，地下に存在する流体の移動や面に沿っての非地震性の滑りのような非地震的な現象に起因するとよく説明される．このように，詳細な震源の時空間分布は，地殻や上部マントルで生じている非地震的な現象を調べるための重要な手がかりとなる．

2017 年 7 月 11 日 11:56 (JST) に，鹿児島湾の深さ約 10 km を震源とする M 5.3 の地震が発生した．本震震源の周辺では，前年の2016 年 12 月頃を境に地震活動が活発化していたことがわかっている．本研究では，M 5.3 の地震の前後で発生した地震について，波形相関を用いた精密な震源再決定により求めた詳細な震源分布を用いて，振幅比によって決定されたメカニズム解との比較や本震の断層サイズとの比較等を行うことで，一連の地震活動活発化の原因について調べた．

まず，気象庁一元化震源カタログに記載されている 2010 年1月から2018年4月の期間において鹿児島湾南部の本震震源周辺で発生した地震を対象にして，波形相関を用いることで精密な到達時刻差を求めた．この波形相関を用いて得られた到達時刻差データとカタログ記載の検測値の到達時刻差データに対し，Double-Difference 震源決定法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002) を適用した．初期震源としては，気象庁一元化震源カタログデータを用いた．

震源再決定により，気象庁一元化カタログデータでは雲状にばらついていた震源が，複数枚の面上に集中した．それらのうちの主要な面の方向は，気象庁による本震や余震の初動発震機構解や波形の振幅比を用いた手法 (Dahm, 1996) によって推定された多くの余震のメカニズム解の節面の一つと整合的であることから，これらの地震は震源のならぶ面上を破壊したと考えられる．

特に，前駆的活動の震源の多くは 1 枚の面上に集中し，震源が時間と共に面上を広がるような明瞭な震源 migration の特徴を示した．震源 migration の原因として，非地震性すべり (e.g. Lohman & McGuire, 2007) や流体の移動 (e.g. Parotidis, 2003)，地震発生準備過程 (e.g. Kato et al. 2016) 等が考えられているが，この震源 migration は，水頭拡散率が 0.05 (m^2/s) の流体拡散モデルによる流体の移動で説明できる． 余震の震源は複数枚の面状構造を示し，その活動が時間とともに浅部から深部へと移動する傾向がみられる．このような深部から浅部へと向かう震源移動の特徴は，流体の関与が指摘されている，東北沖地震後にstress shadowである東北地方中部で発生した群発地震活動の特徴 (Yoshida & Hasegawa, 2018) と良く似ている．

次に，Lin & Shearer (2007) の手法により，波形相関を計算して求めたイベント間の到達時刻差を使用して震源域におけるP波とS波の地震波速度比 Vp/Vs の推定を行った．その結果，前駆的活動について推定した Vp/Vs の値は，早期の余震よりも高い値を示す傾向がみられた．また，本震発生から 20 日以降の余震についての Vp/Vs も前駆的活動と同じような高い値を示した．これらの結果と震源分布や地震活動の時間変化との比較から，Vp/Vs の時間変化は本震発生による流体圧の変化を反映していることが示唆される．以上の結果から，鹿児島湾の地震活動の発生には，流体による関与が考えられる．

© The Seismological Society of Japan

さらに，前駆的活動の震源が形成する「面」の中には震源の空白域がみられ，本震震源は空白域の端に位置する．余震の震源もまた空白域を避けるように分布することから，本震の主要なすべり域がこの空白域に対応する可能性がある．スペクトル比法を用いて推定した本震震源スペクトルのコーナー周波数から求めた本震の断層サイズはこの空白域の大きさと整合的であった． このことは，本震のすべり域が空白域に位置することを支持し，断層上の摩擦強度の不均質を示しているのかもしれない．
以上の前駆的活動と余震活動にみられた震源の空白域および震源の migration などの特徴は，次のように考えると説明できるかもしれない．(1) 本震の発生に先立ち既存の亀裂等の弱面に流体が浸入し，弱面の摩擦強度が減少することで，活発な前駆的活動が生じた．そして，流体が弱面に沿って移動することに伴い，前駆的活動の発生場所も徐々に移動した. この際，トリガーされた非地震性すべりや本震の前駆的すべりも生じて地震発生・震源移動に貢献したかもしれない．(2) 前駆的活動がさらに進行し，前駆的活動では地震すべりが生じなかった空白域においてもついに本震すべりに至った． (3) 本震に伴う応力変化により広範囲で余震が生じた．また前駆的活動や本震に関与した流体が複数枚の弱面を伝わりながら浅部へ移動していった結果，震源も深部から浅部へと移動した．

© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-2

chairperson:Toshiko Terakawa(Nagoya University), Keisuke Yoshida(Tohoku University)

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

[S08-23] **Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake**

*Keisuke Yoshida Yoshida[1], Tatsuhiko Saito[2], Taka'aki Taira[3], Kentaro Emoto[1], Toru Matsuzawa[1] (1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley)

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

[S08-24] CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1], Taro Okamoto[2], Takeshi Nakamura[3] (1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-25] **Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake**

*Yoshihisa Iio[1], Hiroshi Katao[1], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Takuo Shibutani[1], Airi Nagaoka[1], Jun Nakagawa[1], Shukei Ohyanagi[1], Shota Hara[1], Mitsu Sakaguchi[1], Abuyama Supporters[1], Satoshi Matsumoto[2], Takeshi Matsushima[2], Megumi Kamizono[2], Shin-ichi Sakai[3], Masataka Masuda[3], Shin-ichi Tanaka[3], Yoshinari Hayashi[4] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University)

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

[S08-26] A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2], Akemi Noda[3] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED)

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

[S08-27] Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura[1], Toshiko Terakawa[2], Akemi Noda[3] (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univerisity, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake

*Keisuke Yoshida Yoshida[1], Tatsuhiko Saito[2], Taka’ aki Taira[3], Kentaro Emoto[1], Toru Matsuzawa[1]

1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley

Stress release process ongoing along a crustal fault examined through the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen, NE Japan, earthquake

Keisuke Yoshida, Tatsuhiko Saito, Taka’ aki Taira, Kentaro Emoto, Toru Matsuzawa

Stress accumulation and release processes in the crust are less understood compared to those in the plate boundary. One difficulty in examining the temporal evolution of stress along a crustal fault comes from weakness of geodetic signal due toaseismic slip possibly proceeding along a crustal fault. Spatiotemporal variations in foreshock and aftershock activities can provide key constraints on time-dependent stress and deformation processes in the crust.

The 2017 M 5.2 Akita-Daisen intraplate earthquake in NE Japan was preceded by an intense foreshock activity and triggered a remarkable sequence of aftershocks. In this study, we examine the spatiotemporal distributions of foreshocks and aftershocks and determine the coseismic slip distribution of this earthquake. In this study, we examine the spatiotemporal distribution of precisely relocated hypocenters of foreshocks and aftershocks and the coseismic slip distribution of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake in NE Japan, to shed light on processes that release stress in the crust.

Our result indicates that the seismicity concentrates forming a planar distribution with N-S strike dipping slightly eastward consistent with their focal mechanisms. We find a migration of foreshocks towards the mainshock rupture area, suggesting that they were triggered by aseismic phenomena such as fluid migrations and episodic aseismic slip events. Alternatively, the foreshock migration might be related to the quasi-static expansion of the slow slip associated with the nucleation phase of the mainshock.

The mainshock rupture was propagated primary toward north with lower coseismic slip in foreshock regions. Aftershocks were intensely triggered near the edge of large coseismic slip regions where shear stress increased after the mainshock. The aftershock region expanded along the fault strike with the logarithm of time, which would be attributed to the post-seismic slip of the mainshock.

The postseismic slip possibly triggered repeating earthquakes with M ~3. We applied the relationship between fault slip and earthquake magnitude proposed by Nadeau & Johnson (1996, BSSA) to the observed repeating earthquakes in this study for exploring post-seismic slip. The resultant post-seismic slip amount is comparable or slightly larger than the maximum coseismic slip amount of 28 cm. Our observation is consistent with previous work for California micro-earthquakes (Hawthorne et al.. 2016, JGR).

© The Seismological Society of Japan

As a whole, foreshocks, the mainshock, aftershocks and post-seismic slip released stress at different segments on the fault, which might reflect the difference in frictional properties. Furthermore, there are probably aseismic slip behind the occurrences of aftershocks and foreshocks, which also contributed to the redistribution of stress. Such observations are similar to those observed for interplate earthquakes, which is consistent with the model that the deformation processes along plate boundaries and the crustal fault are not essentially different.

The static stress drop of the mainshock is estimated to be 4.7 MPa, the apparent stress is 1.3 MPa, and the radiation efficiency is 0.55. The radiation efficiency might be relatively high compared to recent observations of crustal earthquake. It might suggest that the present earthquake occurred on a rather mature fault. The similarity to interplate earthquake might be relevant to the maturity of the fault.

© The Seismological Society of Japan

CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1], Taro Okamoto[2], Takeshi Nakamura[3]

1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年4月16日1時25分に熊本県を震源とするM_{JMA}7.3の熊本地震が発生し, 約32秒後に大分県の由布を震源とするM_{JMA}5.7の地震を誘発した。誘発地震発生後1ヶ月以内に, 大分県由布から別府湾にかけて, 誘発地震の余震と考えられるM_{JMA}3.6からM_{JMA}5.4のイベントが4回発生した（図1）。我々はこれらの余震のうち規模の大きい2つのイベント：2016年4月16日7時11分（event1, M_{JMA}5.4）, 4月29日15時9分（event2, M_{JMA}4.5）の強震波形記録に3次元構造モデルを用いたCMTインバージョンを適用した（小割・他, 2018, JpGU）。本研究では, 先の2つのイベントの再解析の他に, 残り2つのイベント：2016年4月16日8時27分（event3, M_{JMA} 3.7）, 同日23時26分（event4, M_{JMA}3.6）の解析を行い, 地震の位置, 規模, 震源メカニズムを推定する。インバージョンにはOkamoto *et al.*（2017）のコード, グリーン関数の計算には陸上・海底地形を考慮できるNakamura *et al.*（2012）の3次元差分法コードを用いる（計算領域は, 図2 a）。このとき3次元構造モデルには, 地震基盤より上は地形とともに3次元地盤構造モデル（吉見・他, 2017）, 地震基盤より下は地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル（暫定版）を使用する（図2 b）。本研究で使用した波形データは, 気象庁の震度観測計と防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測点で記録された加速度波形を積分した速度波形のうち, 3点以上の観測点（×3成分）の波形を使用した。小割・他（2018, JpGU）では帯域を一律周期10秒から30秒としたが, 本研究で対象としたイベントは規模が小さいことを考慮して, 周期数秒のより短周期の成分までインバージョンに含めた。
ここで, 結果の例として, event3（4月16日8時27分のM_{JMA}3.7のイベント）の結果を記す。帯域は周期4秒から30秒を用い, 観測記録は別府市鶴見（気象庁）, 別府市天間（同）, 湯布院（OIT009, K-NET）の3観測点を用いた。セントロイドの位置は, 気象庁一元化震源の震央位置より南西方向約2 kmで, 海水準からの深さ2 km（地表面からの深さ2.5 km）と求まった。セントロイドの深さは, 気象庁一元化震源（7.0 km）, F-net CMT（5 km）と比較して浅い。この地域は火山の影響で地震発生層の下限が非常に浅いと考えられている（例えば Matsumoto *et al.*, 2016, EPS）ことと整合的である。この地震の規模はM_W3.8と推定された。発表ではこの他のイベントの結果も示し, これらの地震の発生位置, 震源メカニズムや周辺の断層分布の関係から, 応力場及び誘発地震のメカニズムについて議論する。

謝辞：本研究では気象庁, 防災科学技術研究所の強震記録を使用しました。

© The Seismological Society of Japan

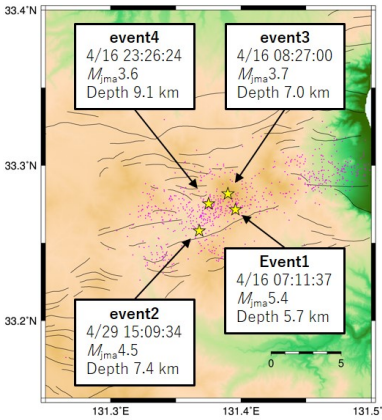
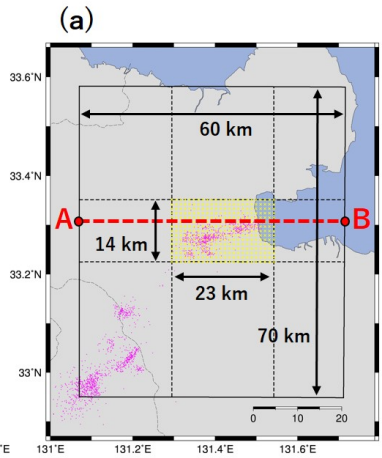


図1. 解析イベントの震央分布（星印）。紫点は2016年熊本地震の発震後24時間以内に発生した地震の震央，黒線は活断層の地表トレースを表す。



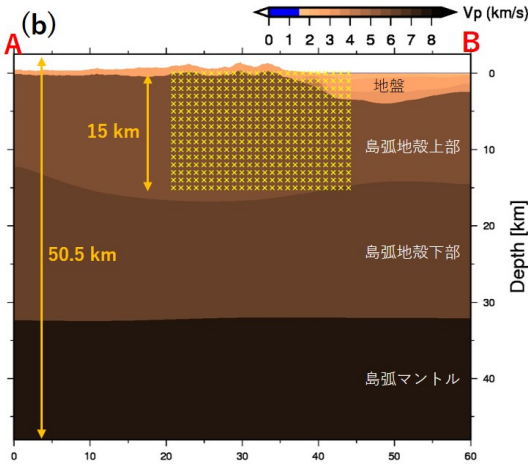


図2. (a) 計算領域（黒実線）。紫点は2016年熊本地震の発震後24時間以内に発生した地震の震央，黄色×印はセントロイド位置の候補点を表す。
(b)(a)におけるA-B直下の構造モデルの断面。

© The Seismological Society of Japan

Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake

*Yoshihisa Iio[1], Hiroshi Katao[1], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Takuo Shibutani[1], Airi Nagaoka[1], Jun Nakagawa[1], Shukei Ohyanagi[1], Shota Hara[1], Mitsu Sakaguchi[1], Abuyama Supporters[1], Satoshi Matsumoto[2], Takeshi Matsushima[2], Megumi Kamizono[2], Shin-ichi Sakai[3], Masataka Masuda[3], Shin-ichi Tanaka[3], Yoshinari Hayashi[4]

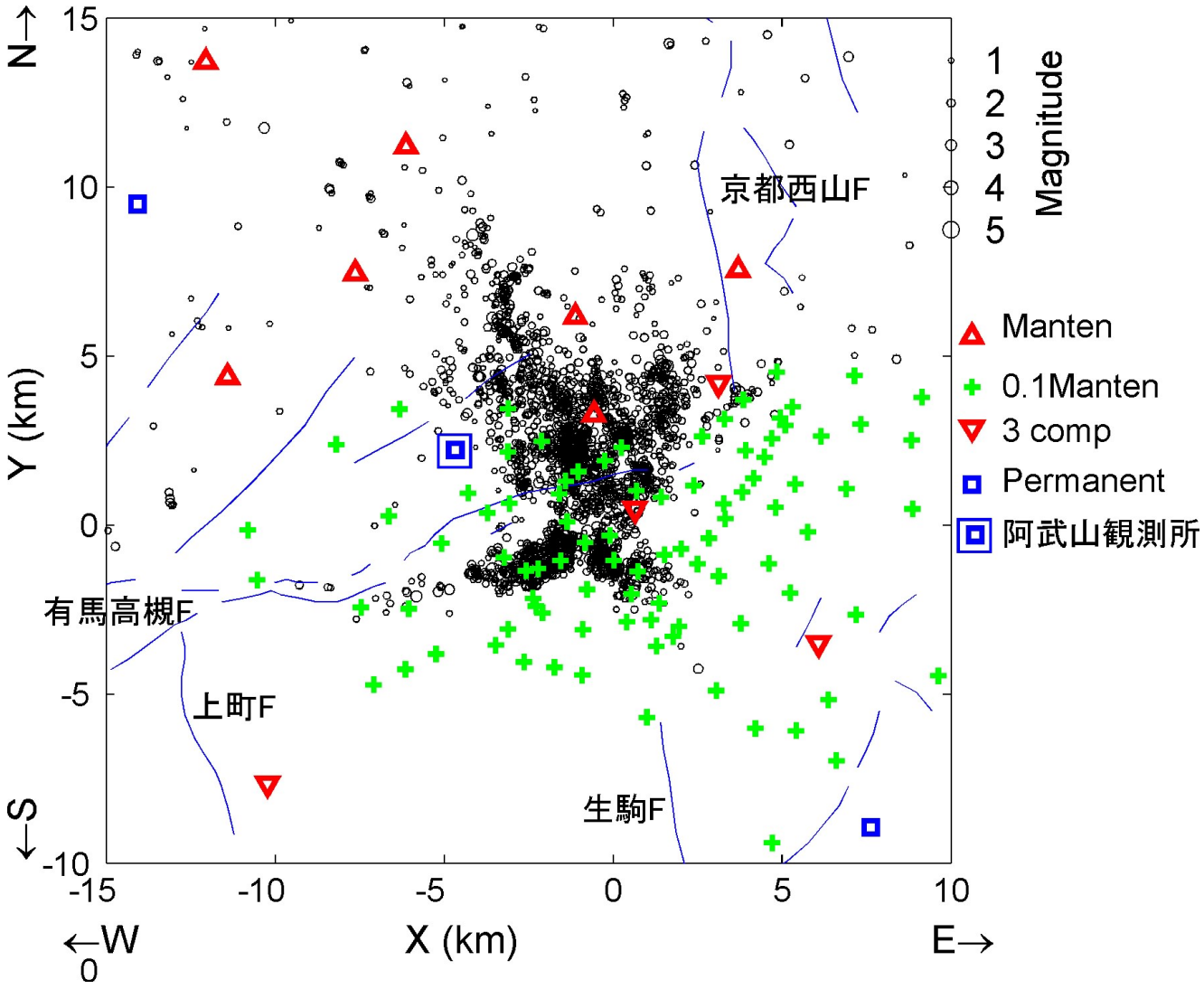
1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

1.　はじめに
大阪府北部の地震（Mj 6.1）は、有馬高槻断層帯(ATL)の東端部付近、京都西山断層帯(KNF)、生駒断層帯、宇治川断層など活断層が集中する地域で2018年6月18日に発生した。余震域とその周辺の104か所において臨時地震観測を行い、周辺の「満点計画」の観測点および定常観測点のデータと統合して、詳細な余震の震源分布、地震メカニズム解の空間分布、および応力場を推定した。さらに、地震発生の約10年前から継続している満点計画による地震データを用いて、震源域周辺の広域の応力場を推定した。これらの推定結果と、浅野(2018)による震源モデルから推定される今回の地震による応力変化を組み合わせて、震源断層の両端部等における応力状態の推定を試みた。

2.　結果
余震の震央分布(2018年6月18日～9月1日)と観測点の分布を図に示す。余震は、阿武山観測所の直下、ATLとKNF付近に広く分布している。ATLの南側には微小地震のリニアメント(線状分布)が知られていたが(京都大学, 1995)、分布の南西端付近では、余震はそれに沿って延びているように見える。ATLの北方にも広く延びている。これらは、水平成層構造を用いて観測点補正値を考慮して決定されたものであるが、ATLとKNFを境にして浅部の速度構造が大きく異なっているため、震源の絶対位置については、３次元の速度構造を考慮して検討する必要がある。地震のメカニズム解は、基本的には南部で横ずれ型、北部で逆断層であり、２枚の断層が関係している震源モデル(例えば、浅野,2018)と調和的である。
余震のメカニズム解を用いた応力逆解析によると、余震域の応力場は、最大圧縮応力の向きが西北西-東南東の横ずれ型であり、近畿地方で一般的な東西方向より時計回りに回転している。余震域の北部では逆断層型となっている。満点計画データによる広域の応力場もこれと調和的であり、ATLの深部延長のすべりによる応力集中の可能性が示唆される。余震域の南部と北部における典型的なメカニズム解を示す地震(南部は横ずれ型、北部は逆断層型)に着目すると、その下限は、余震活動が延びている南西方向および北方に向かって浅くなるお椀型を示しており、これらの端部において応力集中が発生していない可能性が示唆される。
謝辞：地元の皆さまには臨時観測に際して大変お世話になっております。記して感謝申し上げます。

図　余震の震央分布と観測点の分布 余震分布は2018年6月18日から9月1日まで。
＋と▽が104カ所の臨時点、＋は0.1満点の1成分観測点(松本・他, 2018)、▽はオンラインの3成分観測点。△は満点計画の3成分観測点、□は高感度の定常観測点。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2], Akemi Noda[3]

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED

最近，社会のあらゆる分野において，機械学習や深層学習（Deep Learning, DL）を取り入れた人工知能技術が活躍の幅を広げている．地震学の分野では，DLにより世界中で発生した多数の本震ー余震活動のペアをトレーニングデータとした余震分布の推定が行われ，その推定能力は古典的なクーロン破壊応力変化（Δ*CFS*）よりも高精度であるという衝撃的な結果が報告された（DeVries et al., 2018）．さらに，余震の発生は，Δ*CFS*よりも地震時の偏差応力変化の最大剪断応力（$\Delta\tau_{max}$）や2次不変量（ΔJ_2）に支配されているという物理的な解釈が示された．これらの物理量を理論的に分析すると，$\Delta\tau_{max}$とΔJ_2は共に地震時偏差応力テンソルから計算される剪断歪エネルギーと結びつき，これは剪断歪エネルギーがゼロである等方応力状態から地震によって引き起こされた剪断歪エネルギー変化（増加）に相当する．したがって，DLによる余震分布の推定結果は本震の発生によって剪断歪エネルギーが至る所で増加することを意味し，地震の発生原理に矛盾する．その背景には，地震は絶対応力を反映して発生するにも拘らず，トレーニングデータが地震による応力変化に関する量に限られていたという根本的な問題がある．

本研究では，絶対応力場を考慮して余震の発生を理解するために，弾性歪エネルギー $E=E_s$（剪断歪エネルギー）+ E_v（体積ひずみエネルギー）に基づく新しい地震破壊規準（Energetics-based Failure Stress, *EFS*）を提案する（Terakawa, Matsu'ura & Noda, in prep.）：

$$EFS = \mathrm{sqrt}(2GE_s) - \mu\{\mathrm{sqrt}(2\kappa E_v) - P_f\} \quad (1)$$

ここでG，κ，μ，P_fは剛性率，体積弾性率，岩石の摩擦係数，間隙流体圧を表す．本式の第一項は偏差応力の2次不変量J_2の平方根と一致し，剪断応力のスカラー計量である．第二項の sqrt($2\kappa E_v$) は応力の1次不変量I_1の1/3（平均垂直応力）であり，第二項全体は断層強度に相当する．つまり，本震によるE_s及びE_vの増減は，それぞれ剪断応力及び断層強度の増減を意味し，絶対偏差応力場及び絶対等方応力場を反映する（Matsu'ura, Noda & Terakawa, under review）．従って，式(1)で定義される*EFS*の本震前後の変化（Δ*EFS*）が正ならば余震を促し，負ならば余震を抑制すると考えることは合理的である．*EFS*の特長は，剪断応力と断層強度を不変量であるエネルギーを用いて記述した点にある．このため，従来のΔ*CFS*のように特定の面を対象とすることなく，3次元応力空間内の任意の点で地震破壊を評価することが可能となる．

Δ*EFS* の余震発生推定能力を調べるために，1992年ランダース地震に続く1年間の余震データ12673個に対して，震源周辺域の現実的な絶対応力場（Terakawa & Hauksson, 2018）を設定して Δ*EFS* を計算し，ROC（Receiver Operating Characteristic）解析を実施した．まず，理論から予想される通り，ΔE_s及びΔE_vは余震の発生に正及び負の相関があること，双方の影響を取り入れたΔ*EFS* はΔE_sの推定能力を上回ることが確認された．次に，地震前の偏差応力レベルを現実的な値よりも低くすると，AUC値と真陽性率（正しく余震発生を推定した割合）が上昇するが，同時に偽陽性率（余震発生と推定したが実際にはない割合）も上昇することがわかった．これは，地震前の偏差応力が低いと，地震後にE_sの増加する領域が本震断層近傍で顕著に増え，その結果Δ*EFS* を過大評価してしまうことに原因がある．一方，本震前後の間隙流体圧場の変化を評価し（Terakawa et al., 2010），Δ*EFS* の計算に取り入れてROC解析を実施すると，AUC値と真陽性率は上昇し，偽陽性率は低下した．これらの結果は，本震断層近傍の応力変化では説明できない多数の余震の発生には，間隙流体圧の上昇が重要な役割を果たした可能性があることを示している．

また，$\Delta\tau_{max}$とΔ*EFS*のROC解析の結果を比較したところ，真陽性率も偽陽性率も$\Delta\tau_{max}$の方がΔ*EFS*より高

© The Seismological Society of Japan

かった．$\Delta\tau_{max}$ は，地震前の絶対応力場を等方的（偏差応力ゼロ），地震による応力変化を純粋剪断であるとした場合のΔ*EFS*の特殊ケースである．つまり，DLによる余震分布の推定では，暗に，地震前の偏差応力の絶対レベルを非現実的に低く（ゼロ）仮定していたことになり，これが見かけの余震推定的中率を上げるものの，同時に余震の発生を過大評価する結果を招いたことがわかった．

© The Seismological Society of Japan

Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura[1], Toshiko Terakawa[2], Akemi Noda[3]

1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univerisity, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震の発生は地殻に蓄えられた弾性歪みエネルギーを断層運動によって解放する過程である。弾性歪みエネルギーは，一般に，体積歪みエネルギー＝(応力テンソルの第１次不変量)^2/18κ と 剪断歪みエネルギー＝(偏差応力テンソルの第２次不変量)/2μ の和として表せる。但し，κは体積弾性率，μは剛性率である。Terakawa, Matsu'ura & Noda (in preparation) は，応力テンソルの第１次不変量は平均垂直応力の３倍であり，偏差応力テンソルの第２次不変量の平方根は剪断応力のスカラー計量（例えば，法線応力が平均垂直応力に等しい面に働く剪断応力の $(3/2)^{1/2}$ 倍）であることに着目して，既存断層の剪断破壊に関するモール・クーロンの規準 (Mohr-Coulomb fracture criterion) に擬えたエネルギー論的考察に基づく断層破壊応力 (Energetics-based Failure Stress)，EFS = (2μ×剪断歪みエネルギー)$^{1/2}$ − μ_r×[(2κ×体積歪みエネルギー)$^{1/2}$ −P_f]，を導入した。ここで，μ_r 及び P_f はそれぞれ岩石の摩擦係数及び間隙流体圧である。従って，EFS の右辺第２項は断層の実効的な摩擦強度に相当する。

大地震の発生は震源断層周辺域の応力場及び間隙流体圧場の変化を引き起こす。Matsu'ur, Noda & Terakawa (under review) は，地震発生前の地殻応力場（背景応力場）と地震時の応力変化から剪断歪みエネルギーと体積歪みエネルギーの変化を分離して個別に評価する一般公式を導いた。この公式により，地震発生に伴う断層破壊応力 EFS の変化分 ΔEFS は，間隙流体圧の変化を ΔP_f として，ΔEFS = [(2μ×地震後の剪断歪みエネルギー)$^{1/2}$ −(2μ×地震前の剪断歪みエネルギー)$^{1/2}$] − μ_r×[(2κ×地震後の体積歪みエネルギー)$^{1/2}$ −(2κ×地震前の体積歪みエネルギー)$^{1/2}$ −ΔP_f] と書き表すことができる。本講演では，この ΔEFS を剪断破壊のエネルギー論的考察に基づく新しい余震発生評価規準量として，それがこれまで提案されてきた様々な余震発生評価規準量（良く知られているクーロン破壊応力変化量から最近の深層学習解析の結果が推奨する最大剪断応力変化量或いは偏差応力変化テンソルの第２次不変量の平方根まで）を特殊ケースとして包含する合理的一般化であることを数学的に解説する。

例えば，あまりに非現実的ではあるが，背景応力場の等方成分も偏差成分もゼロの場合，つまり解放すべき弾性歪みエネルギーが全く無いにも拘らず地震が起きてしまった場合，地震による等方応力成分の変化も間隙流体圧の変化も無視すれば，ΔEFS の表現式は偏差応力変化テンソルの第２次不変量の平方根に帰着する。ちなみに，偏差応力変化テンソルの第２次不変量は常に至るところで正となるので，それを余震発生評価規準量として採用すると (e.g., Devries et al., 2018)，本震発生後の地震活動の活性化は説明できても，静穏化は説明できない。更に，地震時の偏差応力変化テンソルが純粋剪断的であると仮定すれば，ΔEFS の表現式は最大剪断応力変化量に帰着する。一方，地殻の背景応力レベルはある程度以上深いところでは地震による応力変化に比べて充分に高いと考えられる。そのような場合，地震時の偏差応力変化テンソルが純粋剪断的で，間隙流体圧変化が断層法線応力変化に比例すると仮定すれば，ΔEFS は近似的に古典的なクーロン破壊応力変化量 ΔCFS に帰着する。但し，その場合のターゲット断層としては背景応力場の最大剪断面を選ばなければならない。

© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 3:15 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S12]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

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

[S12-01] Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura[1], Weiren Lin[2], Takatoshi Ito[3], Akio Funato[4] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute)

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

[S12-02] Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke[1], Tetsuro Hirono[1], Shunya Kaneki[2] (1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University)

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

[S12-03] Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Osaka University)

Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura[1], Weiren Lin[2], Takatoshi Ito[3], Akio Funato[4]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute

地震発生過程やテクトニック変動を理解する上で，重要な物理量である地殻の原位置の絶対応力に関するデータは，陸域においても，地震観測や地殻変動観測データに比べて乏しい状況にある．主要な原位置地殻応力測定手法では，掘削と特殊な孔内計測が必要で，広域にわたる系統的な測定が難しいという要因がある．本研究では，掘削で採取された岩石コアの計測から原位置地殻応力値を推定する方法である「コア変形法(DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法)」を既存の岩石コアに適用して，原位置地殻応力を推定することを試みた．コア変形法は，掘削孔内で特殊な計測をする必要がなく，既存の岩石コアに適用できることから，例として足尾で採取された深部岩石コアに適用することで，原位置地殻応力データの得られることが示された(小村他，2018年地震学会秋季大会S11-03)．コア変形法では，コア周にそった形状を計測するとともに，応力値の推定には岩石の弾性定数が，応力方位の推定には岩石コアの方位つけが必要である．
今回，防災科研の7地点のHi-net観測井で深度が100m～200m（1地点だけ2000m）から採取した硬岩の岩石コアを利用した．無定方位の岩石コアのため，応力方位の推定はできなかった．Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計された装置でコア外周にそった直径を測定した．測定された岩石コアは，採取後，10年以上経過したものではあるが，外周にそって直径がサインカーブ状に変化した．これは，岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形していることが推測され，コア変形法の適用可能性がみられた．一方で，堆積岩コアのように，明確に層理面がある場合には，層理面に相対した楕円状の断面形状が計測され，岩石コアの性状を考慮する必要があることがわかった．地殻応力値を推定するため，コア岩石の弾性定数は，直接岩石試験によるデータがないため，同じ掘削井で実施されたPS検層による地盤のP波速度，S波速度から，密度を仮定して計算される弾性定数を適用することを試みた．定性的には既存観測井岩石コアにコア変形法を適用して，広域的に原位置地殻応力を推定できる見込みがあることが示された．

© The Seismological Society of Japan

Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke[1], Tetsuro Hirono[1], Shunya Kaneki[2]

1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University

先行研究において，主要岩石及び鉱物の摩擦係数は，1 nm/sの低すべり速度から1 m/sの高すべり速度まで，広いすべり速度範囲で系統的に調べられてきた (Di Toro et al., 2011)．多くの岩石の最大摩擦係数は，Byerlee則にならい0.6-0.85の間に収まるが，0.1 m/s以上の高速域での定常摩擦係数は0.1-0.4程度にまで低下する．このような高速域での断層の動的弱化は，地震時における応力降下量を増加させ，地震時のモーメントマグニチュードの増大に繋がることから，非常に重要な現象である．
断層の動的弱化機構については，サーマルプレシャライゼーションやシリカゲル潤滑などの様々なメカニズムが先行研究により提案されている（例えばSibson, 1973; Goldsby and Tullis, 2002）．しかし，これらの弱化メカニズムも含め，断層岩の摩擦係数及び動的弱化機構が作用した場合の寄与の程度は，厳密な意味では断層岩を構成する鉱物種に依存すると考えられる．例えば，タルクやスメクタイトなどの層状ケイ酸塩鉱物は，動的弱化を伴わない低速域においても，Byerlee則から外れた低い摩擦係数を示すことが室内摩擦実験から報告されている（Moore and Lockner, 2004）．同様に，日本海溝のように層状ケイ酸塩鉱物を含む天然の断層から採取した試料においても，顕著に低い摩擦係数を示すことが確認されている（Remitti et al., 2015）．
さらに，前述のような弱い鉱物だけでなく，断層滑りによって生成された非晶質物質が水和したものも，摩擦強度の低下をもたらすと考えられている（Nakamura et al., 2012）．また，回転摩擦実験においても，非晶質ナノシリカの形成に起因した動的弱化が確認されている（Rowe et al., 2019）．このような非晶質物質は，火山ガラスとして火山灰に多く含まれており，一部の地層群において火山砕屑性堆積物を形成しているが，火山砕屑性堆積物の摩擦特性は未だ不明となっている．
そこで本研究では，非晶質物質（火山ガラス）の影響を考慮することによって，火山砕屑性堆積物の摩擦特性及びその微小構造の変化との依存性を調べた．過去の房総沖プレート境界断層の天然試料について0.0002–1.0 m/sの速度領域で摩擦実験を行った．その結果，乾燥条件では，0.1 m/s以下の速度領域において定常摩擦係数が0.48–0.65という値を示していたが，1.0 m/sにおいて0.16-0.21にまで弱化した．一方，湿潤条件では，0.001 m/s以下の速度領域において定常摩擦係数が0.44-0.65という値を示していたが，0.1 m/s以上の速度領域において0.14–0.30にまで弱化した．乾燥状態の結果は，従来までの他の主要鉱物を用いた実験結果の傾向に準拠しているが，湿潤状態において0.01 m/sで弱化するという結果は，極めて特異である．
これらの剪断摩擦実験前後試料についてX線粉末回折を行った結果，スペクトルから非晶質物質の存在を示す2θ=20–30˚のハローピークの存在が確認された．また，XRDプロファイルからRockJockソフトを用いて鉱物組成定量解析を行った結果，母岩には，どの鉱物にも分類されない鉱物（Unfiited component）が50.0±2.0 wt.%含まれていることが明らかになった．これは火山ガラスに由来するものと考えられる．摩擦実験後の試料では，Unfitted componentが5.0–18.0 wt.%増加しており，低速滑りであるほどその増加量は大きかった．また，湿潤状態よりも乾燥状態における増加量の方が大きかった．次に，剪断摩擦実験前後の試料について薄片を作成し，微小構造観察を行ったところ，摩擦係数の低下に伴いY面の形成が確認され，高速すべりはせん断応力の局所集中を引き起こしうることが明らかになった．このすべり速度と応力集中の関係は，水和した火山ガラスの存在により，他の鉱物と比較してより低速域にシフトしている可能性がある．
以上，火山性砕屑物では火山ガラスの水和や摩耗による強度低下が起こっている可能性を示唆し，これは，火山性弧に位置するプレート沈み込み断層での地震時の破壊伝播及びそのすべり挙動に影響を与えているかもしれない．

© The Seismological Society of Japan

Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura[1], Tetsuro Hirono[1]

1. Osaka University

地震発生時に断層で開放されるエネルギーの大部分が熱であり(Chester et al.2005)、この摩擦熱が断層弱化メカニズムや地震のエネルギー収支に直接関係している。そのため、断層に記録されている摩擦熱の検出は、これらの理解において極めて重要である。摩擦熱の検出手法の1つとして、炭質物の熱熟成に伴う有機化学的特性の変化が注目を集めている。これまでに、赤外分光法・ラマン分光法(Hirono et al.2015; Kaneki et al.2016,2018)や質量分析法(Savage et al.,2014)元素組成分析(Kaneki et al.2016)、ビトリナイト反射率測定(Sakaguchi et al.2011)などを使用することによる様々なアプローチが行われてきた。しかし、摩擦熱のより定量的に推定するためには、剪断により促進されるメカノケミカル効果だけのみならず、繰り返し加熱を考慮した化学反応速度論を検討する必要がある。地震イベントは、地質学的タイムスケールでは何度も繰り返すため、断層における多数の加熱イベントが断層に含まれる炭質物の熱熟成反応に与える影響はいまだ未解決である。そこで、本研究では炭質物の熱熟成反応における繰り返し加熱の影響の解明を目的とし、複数の地震イベントを模擬した室内実験および実験前後試料の分光分析を実施した。

研究手法として、まず瀝青炭と無煙炭の炭質物2種類をそれぞれガラス管に真空封入、そのガラス管を管状電気炉の中に挿入し、100, 300, 500, 600, 700, 900,1100, 1300℃の温度で40秒間、繰り返す地震イベントを模擬して、10, 100回の加熱を行なった。また、瀝青炭のみ上記の実験に加え、500℃における8,16時間加熱を、600℃における8時間加熱を行なった。その後、実験前後試料において、赤外分光分析およびラマン分光分析を行なった。

結果、各温度において赤外・ラマン両分光分析ともに加熱回数による熱熟成度の有意な差は認められなかった。但し、500℃における長時間加熱では脂肪族CH鎖の吸収帯が8時間では消失せず、16時間でようやく消失することが確認できた。地震時の短いタイムスケールの滑り事象では何度繰り返しても化学反応速度的制約より熱熟成が促進されることはないと結論づけることが出来る。すわなち、断層に保存されている炭質物の最高到達温度は、かつてその断層が履歴した最大規模の地震イベントを示していると言える。

© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S11. Various Phenomena Associated with Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 3:15 PM - 4:15 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 6:15 AM - 7:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S11]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

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

[S11-01] What are Posibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara[1] (1. Geosystem Research Institute)

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

[S11-02] Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki[1], Ihsan Naufal Muafiry[2] (1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University , 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University)

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

[S11-03] Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto[1], Osamu Murakami[1], Yasuhiro Asai[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

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

[S11-04] Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto[1], Tsuneaki Yamabe[1], Shigeki Sugiura [2], Hitoshi Kondo[2] (1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.)

What are Posibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara[1]

1. Geosystem Research Institute

強力な鉛直地震動が構造物を損壊させる事は，120年程も前に海震の震度階表（ルドルフの表[1898]，シーベルグの表[1923]）が作られていたことから知られていた筈だが，ここ60年程陸の地震関係者はそのことを忘れていたようで，船舶工学者から「地震で船舶が損壊する時の地震波は疎密波であることは常識である．」と，兵庫県南部地震の被害事例を見直している時にこの指摘を受けた．
それまで，構造物の破壊経過と体験証言を基に，構造物を破壊する強力な鉛直地震動が存在することを証明しようと活動していたが，問題の地震波形がまだ正確には観測できていない事から，なかなか理解が浸透しにくかった．ところが海震度階級表と船舶工学者の指摘を紹介すると雰囲気は大きく変わり始めた．しかしながら，構造物を破壊する威力を持つ鉛直地震動による被災事例を調べるにつれ，その現象の複雑さと捉えにくさも明らかになってきた．最近感じている視点から，問題の波の特徴を掻い摘んで表すと次のようになる．
1. 従来の地震計では捉えられない高周波だが破壊力も持つ疎密波の地震動である．
2. 地震の主体的な面と随伴的な面の両面性を持つ現象である．
3. 被害形態が線状で百ｍ程の場合もあるが，多くは局在波の突き上げ力による被害形態を示す．
4. 波形頭部の外形が平坦な場合とか，釣鐘型の場合もある．
5. 衝撃的な鉛直波動と構造物の状態により被害形態は多様性を示す．
6. 強力な鉛直波動が主震動より3分程後に生じる場合等（後発鉛直キラーパルス）がある．
7.発震原因は岩盤の割れでなく，物質の相変化によると予想される．
以上のような特徴を踏まえて，大規模な地滑りの被害が生じた事例を見直してみる．岩手・宮城内陸地震では荒砥沢ダム上流で大規模な地滑りが生じた(図1(a))．この地震では，1.一の関西の地震計の鉛直震動は3866galの過去最大の記録値が得られた．しかしこの記録の解釈には，ある地層幅を持って地盤が持ち上がるトランポリン効果が想定されている．2.それは鉛直波動による突き上げ作用が地表近くで増幅されたことを連想させる．3.震源断層は鉛直に近い形状で逆断層の動きを示す．4.県境に近い栗駒衣川線沿い河川のブロック護岸に，かなり長い水平亀裂が複数個所ある．以上の事象から軽石層の存在だけが被害の規模を大きくしたのではなく、巨大な威力の鉛直地震動の影響が加わった事が予想される．
次に北海道胆振東部地震では広範囲に亘り，一定の方向性が見られない，山の斜面の滑り崩壊が生じた(図1(b))．ここでは火山灰層の存在が斜面崩壊の特徴をなすものと考えられている．しかし震源断層は深さ16km以深と深いものの，鉛直面に近い状況で，逆断層の動きが顕著である．明確な鉛直地震動によるとみられる災害事例は未確認であるが，斜面崩壊の形態と震源断層の特性から，強力な鉛直地震動が散在的に作用した可能性は高いと思われる．
このような大規模な地滑りを起こすことに関与する，鉛直地震動の威力は大きいことが予想され，安全対策上，観測体制を工夫することはもちろん，詳しい調査と解析が望まれる．

© The Seismological Society of Japan





(a) 岩手・宮城内陸地震 (2008. M7.2)

1) なゐふる No.114,p4,井上先生の報文写真1を加工

(b) 北海道胆振東部地震 (2018. M6.7)

2) 国際航業(株)提供写真資料を加工

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

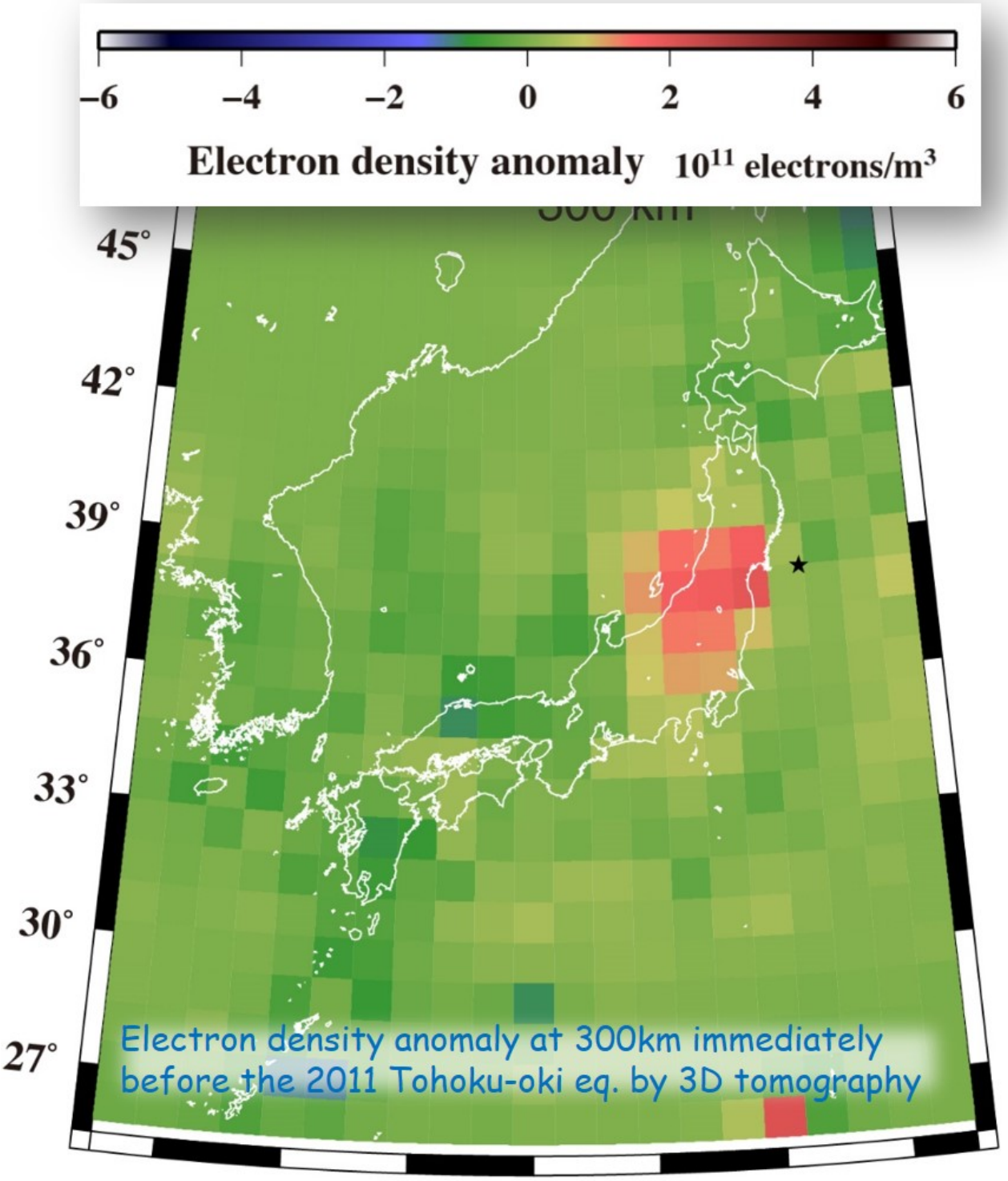
*Kosuke Heki[1], Ihsan Naufal Muafiry[2]

1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University , 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University

Based on the ionospheric total electron content (TEC) observations using Global Navigation Satellite System (GNSS) satellites, we reported that TEC showed anomalies immediately before large earthquakes (Heki, 2011GRL; Heki & Enomoto, 2013JGR; 2015JGR). The leading times and the intensities of the anomalies in the 18 earthquakes of Mw7.3-9.2 (He & Heki, 2017JGR) showed clear scaling laws, i.e. they scale with the fault lengths and fault areas, respectively, suggesting that large earthquakes know their final sizes when the fault ruptures start. He & Heki (2018JGR) studied the three-dimensional (3D) distribution of the electron density anomalies before the 2015 Illapel earthquake (Mw8.3), Central Chile, and showed that the positive/negative electron density anomalies emerged in lower/upper ionosphere along the geomagnetic field. This let us hypothesize that the ionospheric electrons were redistributed in response to electric fields made by positive electric charges that appeared on the subaerial surface above the epicenter. These charges would have been mobilized by micro-scale cracks and dislocations as positive holes.

Here we apply the 3D tomography technique using the slant-TEC residual data in Japan and South Korea for the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). We found that the positive electron density anomaly appeared ~300 km above NE Japan (the anomaly does not extend to the sea, see attached figure). At the same time, a diffuse negative electron density anomaly appeared in the higher ionosphere. The electric current that flowed upward along the geomagnetic field makes an eastward geomagnetic field change of a few nT to the south of the epicenter, which is consistent with the change started ~40 minutes before the earthquake in Kakioka, NE Japan (Heki & Enomoto, 2013JGR). We also try to identify the 3D structure of the tsunamigenic ionospheric hole made by the 2011 Tohoku-oki earthquake.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto[1], Osamu Murakami[1], Yasuhiro Asai[1]

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

地震波通過に伴い電磁気変動が発生することについて，これまでにも多くの報告がなされている．それらの発生機構として，地殻内を起源とするものについては，岩体の圧電現象や圧磁現象，導電性を持つ物質としての岩体の運動による電磁誘導，そして空隙弾性体内の界面動電現象など，様々な性質や現象が提案されてきている．

これまでに報告されている地殻内を起源とする電磁場の変動現象は，主に周波数1Hz 程度やそれ以上の短周期帯域のものである．一方周期数十秒程度の帯域の変動としては，大気音波を経由した電離層の擾乱に伴うものなどについては報告されているが，地殻内を起源とするものはほとんどない. 地殻内を起源とする電磁気変動の機構や関連する地下構造を知る上で，より広い帯域での検出は重要であると考えられる．本研究では2011年東北地方太平沖地震およびその余震などを利用して，大振幅のやや長周期表面波に同期した磁気変動が見られることを報告する．

地震動と地磁気の観測計器は，東濃地震科学研究所により岐阜県瑞浪市に設置された，水圧計（瑞浪超深地層研究所立穴，深度200m)と３成分磁力計（ボアホール，深度500m)である．両計器の水平方向の距離は約200mであり，ほぼ同一の観測点と見なすことができる．データのサンプリング間隔は両者とも1/20秒である．なお，地震動の計測に地震計を利用していないのは，コイル等を内蔵する地震計自体が磁気変動を混入させる可能性を持つためである．

解析に利用した地震波は，東北地方太平洋沖地震の本震（Mw=9.0)と直後に発生した最大余震（Mw=7.8)，およびM=7クラスの前震１個と余震5個である．各地震からの直達Rayleigh波(以下R波）の振幅は大きいが，対象とした周波数帯域では通常の地磁気変動そのものが大きい．そのため本震においても波形同士の直接比較では，地震動と地磁気変動には明確な対応は見られない．特に本震時には磁気嵐が発生しており地磁気変動が大きい．そこで，各地震の地震動と磁気変動の相互相関関数により，同期した信号が含まれているかを検討した．使用したデータは，直達R波以降のコーダ部分20分間を利用した．コーダ部分を用いることで，安定した相互相関関数を求めるのに適した，ある程度定常的な波動場になっていると期待される．また直達R波部分を除いたのは，振幅が突出して大きいため，定常性が保てなくなると考えたからである．使用したコーダ部分には，周期20秒程度のR波を主として，より長周期成分が含まれていると考えられる．なお，地震波データとして水圧を利用しているので，地震波データ中にSH波やLove波成分は含まれていないことになる．

地震波と磁気変動データについて周波数15 mHz程度より高周波側でいくつかのバンドパスフィルターをかけ，各帯域の出力時系列間で相互相関関数を計算した．図１に示したのは　本震後のコーダ部分の水圧と地磁気の鉛直成分の25 - 30 mHz帯域の相互相関関数である．横軸のlagが正の値は，地震波に対して磁気変動が遅れることを表している．図から明らかなように，相互相関関数はlag=0 においてピークを持っている．このことは地震波と磁気変動には同期した成分があることを示している．同様のピークは　15 ~ 40 mHz の帯域で見られる．しかし，40 mHz より高周波帯域ではlag=0 で明瞭なピークは現れない．一方15 mHz より低周波側でもピークはlag=0 にはない．

最大余震　(Mw=7.8) についても，相互相関関数は同様の帯域でlag=0 にピークを持っており，大きな振幅の場合での再現性はあるように見える．一方，それより小さい振幅になる前震(Mw=7.2) やMw<7.5クラスの余震では，lag=0 における明瞭なピークは見られない．

© The Seismological Society of Japan

本震と最大余震においては，鉛直以外の地磁気水平２成分においても水圧と同期した変動が見られる．地磁気の３方向成分との相互相関関数から地震動と同期した磁気変動の偏光の様子を知ることができる．偏光は直線的で，南東下向き一北西上向きとなる．そして地下水圧が最大（= 岩盤の最大圧縮時）の時，地磁気は南東下向きで最大になる．

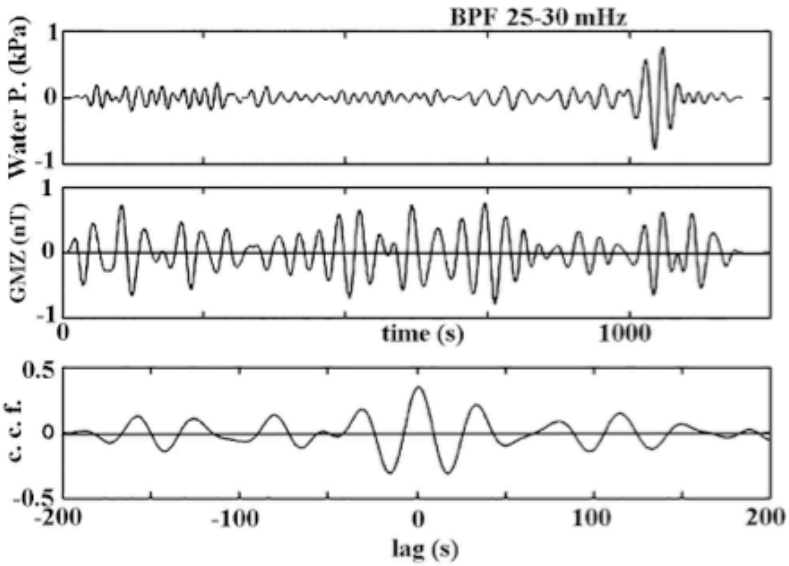


図1　本震コーダ波の相互相関関数
水圧（上段），地磁気（中段）にバンドパスフィルターをかけたもの．サンプリングは 14h55m−15h15m の 20 分間．下段はそれらの相互相関関数．

© The Seismological Society of Japan

Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto[1], Tsuneaki Yamabe[1], Shigeki Sugiura [2], Hitoshi Kondo[2]

1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.

歴史地震史料で辿ると”渦巻く雲", ”白気立つ”など竜巻状の雲に関連すると推測される記述が多い．例えば887年五畿七道の地震では「有気，如煙非煙，如虹非虹，飛上蜀天」『三大実録』や1847年善光寺地震では，「真の闇空，飯綱山の方に火の如き雲出候間，不思議に存見つめて居り候処，其雲くるくると廻り消える否山鳴致し..」『時雨の袖』などである．史料に見られるこれらの記述に加え，最近では写真や衛星画像でも捉えられ，さまざまな観測とも関連づけられる可能性がでてきて，その実体を明らかにできる情報が揃ってきた．これらの史料の記述と最近の情報を集約して見えてきた”渦巻く雲”の実体は」次のようである．1)渦巻きながら突然空に屹立する，2)地震前後に観察されることが多い，3)雲のできる高度（約1km)から渦巻く，4)夜であれば光って見える，5)陸上に限らず海上でも発生する．以上の事実と既知の物理現象とを比較参照し，”渦巻く雲”の生成原因は，地殻の亀裂や断層に沿って浸入してきた深層流体に含まれるRn222誘起のプラズマが大気電場で加速されて上昇，”ウイルソンの霧箱”効果で雲を形成し，Kink Instability効果で渦を巻いたものと考察した．2011年東北沖地震の約10分後に生じた震源上空の電離層電子の急な濃集は、この帯電した”渦巻く雲”による静電気誘導効果の可能性がある．

© The Seismological Society of Japan

Room C | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM JST | Wed. Sep 18, 2019 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM C Research Bldg No 8 NS Hall

[S22]AM-1

chairperson:Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST), Hisahiko Kubo(NIED)

9:15 AM - 9:45 AM JST | 12:15 AM - 12:45 AM UTC

[S22-01] [INVITED]Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy

*Jun Ogata[1] (1. Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy)

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

[S22-02] Seismic Phase Picking based on Sparsity-Aware Change Detection

*Hiroki Kuroda[1], Jun Ogata[1], Hidenori Sakanashi[1], Takahiko Uchide[2] (1. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S22-03] Automatic P-wave detection using deep learning and visualization of the decision process

*Shota Hara[1], Yukitoshi Fukahata[2], Yoshihisa Iio[2] (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S22-04] Application of convolutional neural networks to continuous seismic network records

*Keisuke Yano[1], Takahiro Shiina[2], Sumito Kurata[1], Aitaro Kato[2], Fumiyasu Komaki[1], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2] (1. Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy

*Jun Ogata[1]

1. Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy

本講演では，機械学習に基づくデータ駆動型異常検知技術，さらにそれらの実用化（どのように実環境・実現場で利用していくか）について，風力発電スマートメンテナンスの取り組みを事例として紹介する．

風力発電機等の大型産業機械の故障停止は，産業・社会に大きな影響を与える．現状は，こうした機器の維持管理のために法令に準拠した定期メンテナンスが実施されることが多い．一方で，機器の劣化，損傷等の経年変化をより正確に，かつ早期に把握することができれば，機器の不具合による危険事象を回避できるだけでなく，機器の状態に応じた費用対効果の高いメンテナンスが可能となる．そこで，近年のセンシング技術や情報通信技術の発展に伴い，遠隔での状態監視システム（Condition Monitoring System; CMS）への期待が高まっている．我々は，CMSにおいて加速度ピックアップから得られる振動データを解析の対象として，信号処理と機械学習に基づくデータ駆動型アプローチにより，異常予兆を精度良く検出するシステムの構築に取り組んでいる．これまでに，NEDO事業「スマートメンテナンス技術研究開発（分析）」（2013～2017年度）において，国内の複数の事業者の協力により，全国27サイト，43基の風車にCMSを設置させていただき，そこで収集された加速度振動データを活用して異常検知の研究開発を行ってきた．センサは風車の主要要素である主軸部，増速機，発電機に対して合計10箇所設置されており，異常検知システムは，各主要要素の異常発生箇所を詳細に特定するために，振動データごとに個別に学習・構築を行っている（1風車につき10の異常検知システムが稼働）．異常検知手法としては，正常稼働状態の振動データのみを学習・モデル化し，そこから乖離したときに異常と判断するアプローチ（外れ値検知）を適用している．本研究ではとくに，特徴量として時間・周波数領域の独自特徴量である「FLAC（フーリエ局所自己相関特徴量）」を導入することで，従来の振動分析法では困難であった主軸受や増速機低速部など低速回転の機器に対しても異常検知が十分可能となることを示した．以上の異常検知システムを実機風車の振動データに適用することで，部品交換意思決定の1～3ヶ月前での異常兆候検知を実現し，90%以上の異常予兆検出性能を達成できた．

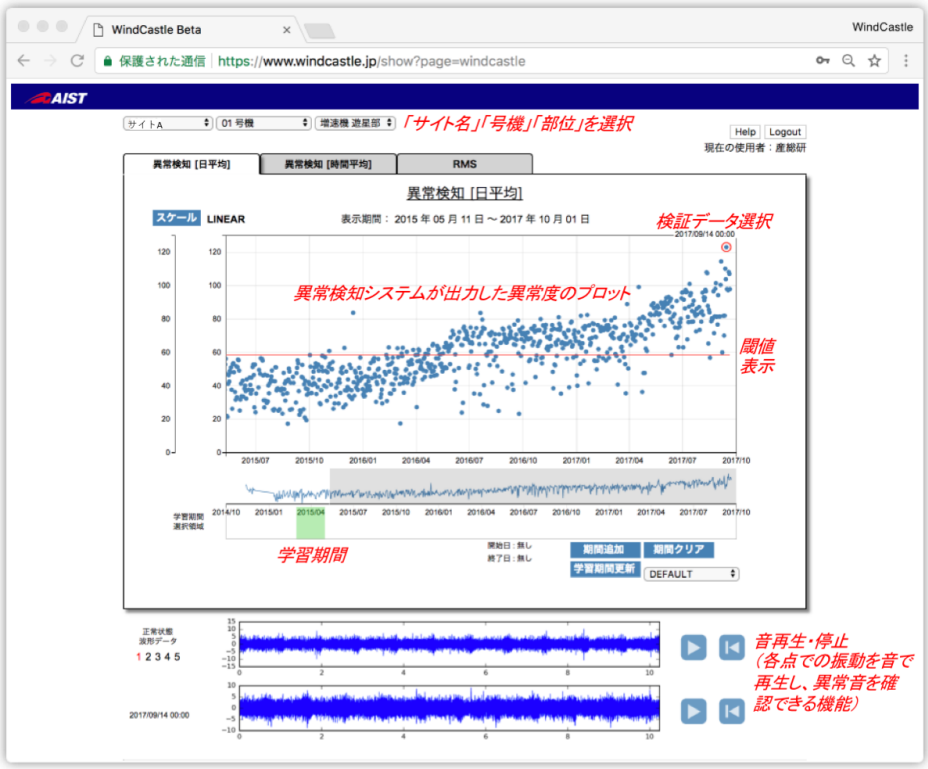
一方，このようなデータ駆動型異常検知技術の実用化を進めるうえでは，システムの早期立ち上げ・運用が重要となる．例えば新しい監視対象機種やセンサを変更した場合など，一からデータを大量に蓄積して学習し直すのではなく，すでに他の環境で学習したモデル・結果を何らかの形で利用（転用）して，新たな環境で異常検知システムを効率的かつ早期に運用可能にできる技術が必要不可欠となる．このような枠組みは，機械学習では転移学習と呼ばれ，現在ホットな研究領域となっている．我々は現在NEDO事業「風車運用高度化技術研究開発」において，こうしたアプローチ（システム転用）を活用することで，あらゆる風車環境において異常検知の早期適用・運用を可能とする技術の研究開発を進めている．

前述の異常検知技術は異常予兆を早期に検知する能力としては有効であるといえるが，実際の風力発電事業の中で誰が，どのように利活用するか，その最良な利用形態を確立することが重要である．我々は，異常検知技術（AI技術）と風力事業者（風車運用現場）をつなぎ，日々の風車メンテナンスを支援するためのインタフェースの研究開発を行っている．具体的には，異常検知の実行結果を各実機風車・機器ごとに可視化することで，いつでも・どこでも風車の状態を把握・検証できるWebアプリケーション「WindCastle」の実装・公開を行っている．異常検知技術の基礎的研究だけでなく，こうしたインタフェースの応用的研究開発を同時に進めるもう一つの狙いは，異常検知システムを，最新の情報（最新データ，ユーザからのフィードバック等）を活用することで継続的に更新・高度化していくことにある．異常検知をはじめとする人工知能技術では，一般的にその検知性能は学習に利用するデータの量や質に大きく依存する．前述の異常検知システムは特定のデータセットによる実験において高い性能を示したものの，実機風車では自然環境・条件の変動ならびに運用

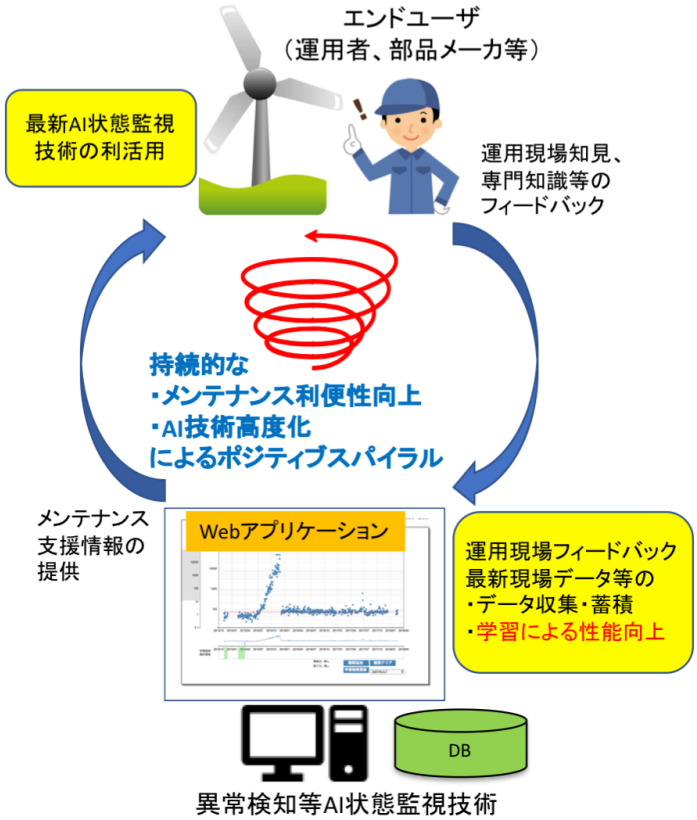
© The Seismological Society of Japan

状況の変化等，学習データ中にはない未知の特性・パターンに対していかに対処するかが大きな課題となる．すなわち，こうした「データからの学習」に基づく異常検知システムは，特定のデータセットで一度学習してそれを継続的に使い続ける，ではなく，実運用中においても性能を保つために，様々な変動に追従できるようシステムを逐次更新（実データによる再学習）していくことが重要となる．

© The Seismological Society of Japan



異常検知結果例ならびにWindCastleインタフェース画面



Webアプリケーションを通じた「メンテナンス利便性向上」と「持続的なシステム高度化」

© The Seismological Society of Japan

Seismic Phase Picking based on Sparsity-Aware Change Detection

*Hiroki Kuroda[1], Jun Ogata[1], Hidenori Sakanashi[1], Takahiko Uchide[2]

1. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

P波・S波の初動時刻の自動検測は、特に微小地震の地震波データ解析の第一歩として、地震学の重要な課題の一つに位置づけられる。最近、地震カタログデータを用いた深層学習が自動検測で良好な検測精度を達成することが報告されている(e.g. Ross et al., 2018)。しかしながら、深層学習等の教師付き学習手法は、大量の学習データならびにそれらに対する正確なラベル（教師）情報が必要になる等、システム構築における労力が大きい。一方、入力された地震波形データから直接自動検測を行うアプローチは、深層学習以前より多くの研究がなされており、例えば、地震波形の短時間/長時間パワー比に基づくSTA/LTA法(e.g. Bungum et al., 1971)、自己回帰モデルに基づく手法(e.g. Takanami and Kitagawa, 1988; Leonard and Kennett, 1999)、これらを組合せた手法(Akazawa, 2004)が提案されている。こうした教師付き学習を介さないアプローチは、大量データが存在しない、あるいは地震カタログが整備されていない環境（臨時観測点等）においてもシステムを適用できるといった利便性がある。しかしながら、一定の検測精度を得るためには入力波形データごとに多数のパラメータの調整が必要となる等、システム適用時の問題があった。
信号処理・機械学習分野においても、変化検知問題（または信号セグメンテーション問題）として、地震波自動検測と共通の構造を持つ問題が活発に研究されてきた。とくに近年、時系列信号の潜在的スパース性を変化検知問題に活用するアプローチが注目を集めている(e.g. Angelosante and Giannakis, 2012; Han et al., 2015; Kuroda et al., 2018)。これらの研究は、変化検知問題がスパースベクトル（大半の成分が０のベクトル）の推定問題に帰着できることを明らかにしている。スパースベクトルの推定問題に対してはL1ノルム正則化等の強力な解法が知られているため、これらの解法の応用による精密な変化検知の実現が期待できる。このアプローチの利点として、時系列信号全体から主要変化を検知するため、ノイズへの頑健性が期待できることが挙げられる。また、手法が有するチューニングパラメータは一つのみであり、しかも所望の変化検知数を基準に決定できる。ただし、信号中のスパース性を精度良く顕在化させることは一般的に容易ではない。Kuroda et al. (2018)は低次元表現空間でスパース性を顕在化させることに成功しており、このスパース性を活用する手法はAngelosante and Giannakis (2012)やHan et al. (2015)等の手法と比べて計算コストが低く、数値実験でより優れた検知精度を達成することが確認されている。
本研究では、潜在的スパース性の顕在化による変化検知アルゴリズム(Kuroda et al., 2018)を地震波形データに適用し、自動検測における有効性を検証する。この手法で仮定する信号モデルとしては、次数2の区分的自己回帰モデルを与えた。実験例として、気象庁一元化処理震源カタログから2018年5月3日19時59分に茨城県北部で発生したM 1.6の地震を選び、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)の3観測点（足尾(N.ASOH)、伊南(N.INAH)、大子(N.DGOH)）で測定された東西方向速度データに提案法を適用した。提案法が有するパラメータは、簡単のため、気象庁検測値付近の変化を含む条件の下で変化検知数が最小になるように決定した。足尾、伊南観測点については気象庁検測値がないため、気象庁一元化処理震源カタログの震源位置から理論的に計算した走時を使って、地震波到達時刻の目安とした。図１の結果から、提案法が気象庁検測値（または理論値）付近を含む少数の地震波変化を検知していることが確認できる。特に、足尾観測点と伊南観測点ではS/N比が悪いが、このような微小地震の波形データに対して、提案法はノイズ部分には変化を検出せず、地震に伴う変化のみを取り出すことができた。今後の課題として、情報量基準等の客観的指標を用いた変化検知数決定法の開発が挙げられる。また、多数の地震波形データに提案法を適用し、気象庁検測値との比較による性能評価を行う予定である。

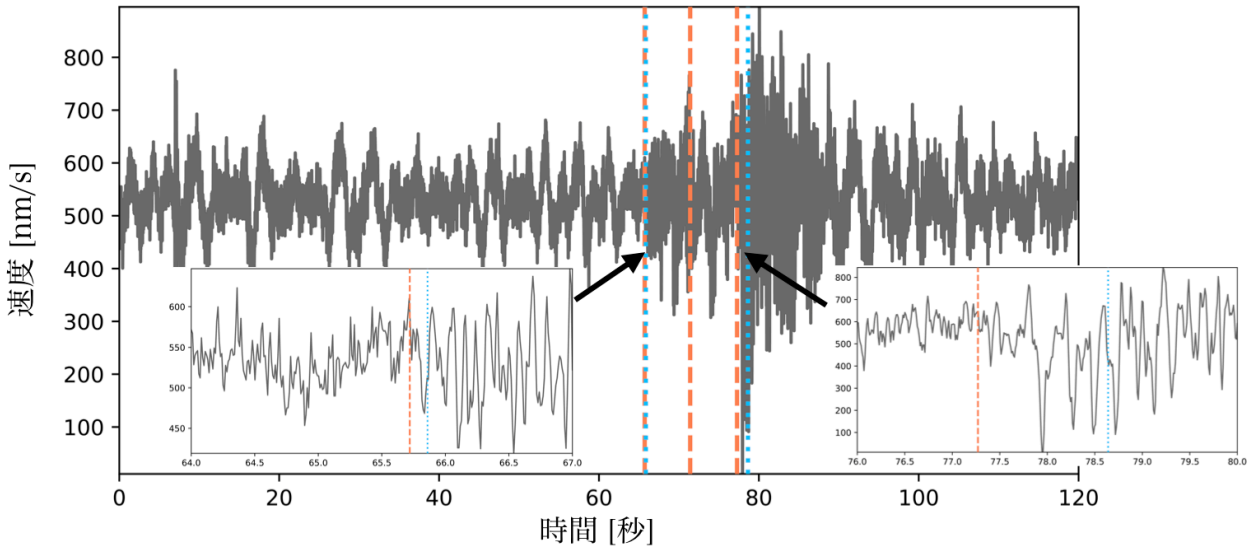
謝辞 本研究では気象庁一元化処理検測値と防災科学技術研究所のHi-netの地震波形記録(doi:10.17598/NIED.0003)を使用しました。

© The Seismological Society of Japan

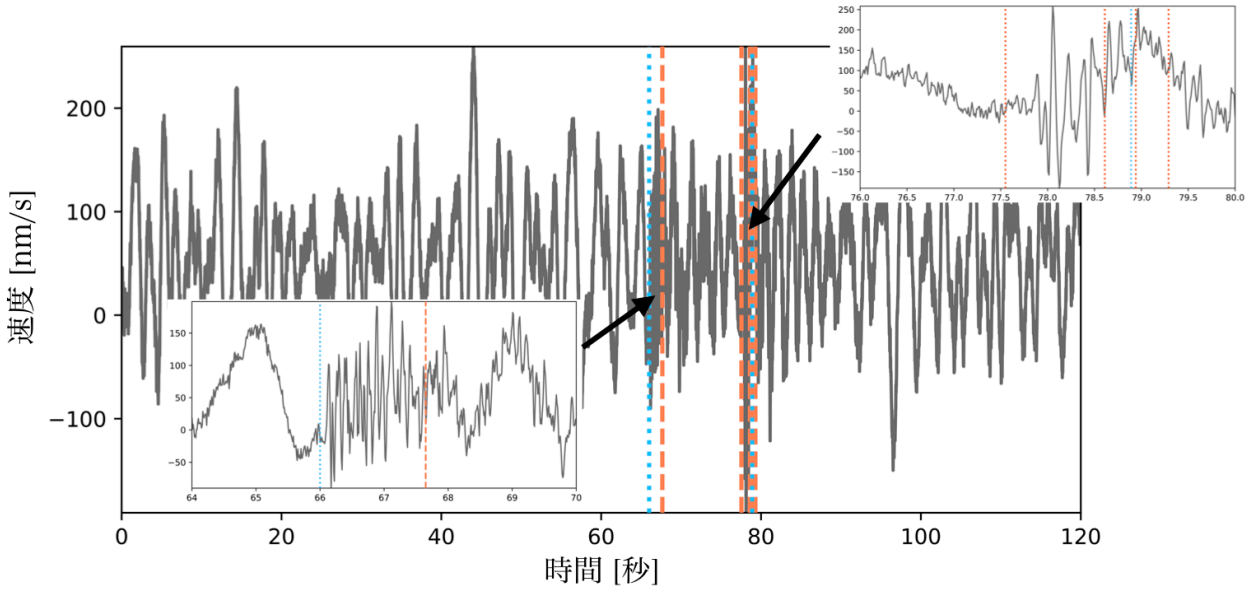
参考文献

Kuroda, H., M. Yamagishi, and I. Yamada, Exploiting Sparsity in Tight-Dimensional Spaces for Piecewise Continuous Signal Recovery, IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, doi:10.1109/TSP.2018.2876328.

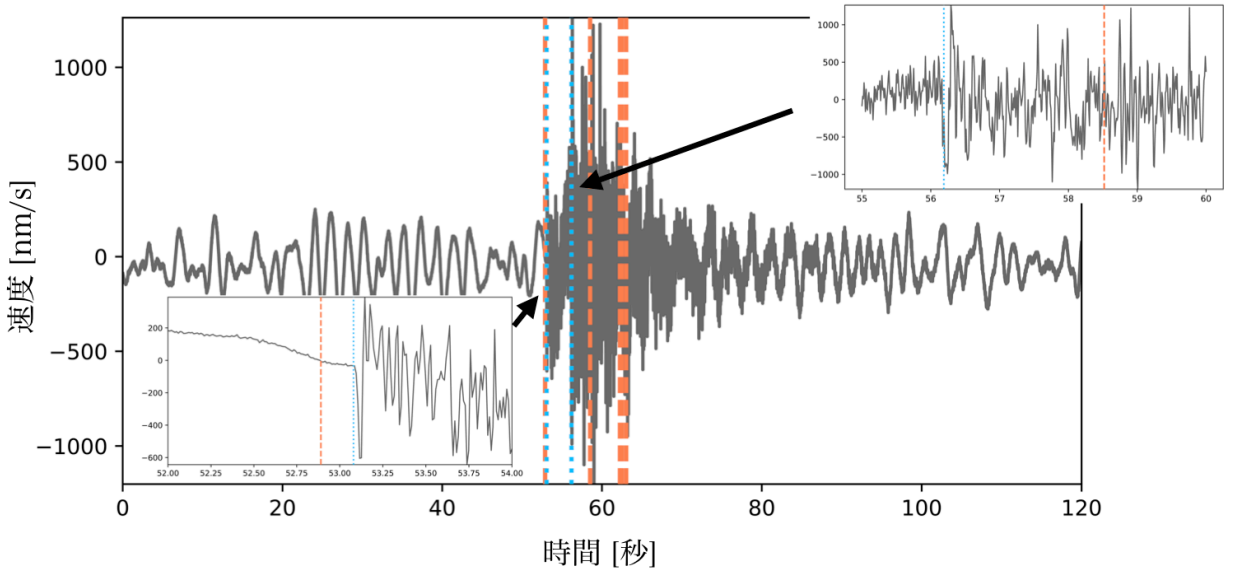
© The Seismological Society of Japan



(a) 足尾観測点(N.ASOH)



(b) 伊南観測点(N.INAH)



(c) 大子観測点(N.DGOH)

図1: 東西方向速度データに対する提案法の適用結果。オレンジの破線と水色の点線はそれぞれ提案法により検知された変化点と気象庁検測値または地震波伝播計算による到達推定時刻に対応する。

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Automatic P-wave detection using deep learning and visualization of the decision process

*Shota Hara[1], Yukitoshi Fukahata[2], Yoshihisa Iio[2]

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

P波の到達時刻と初動極性は、震源位置やメカニズム解を決定する上で必須の情報である（Hardebeck & Shearer, 2002, Yang et. al., 2012）。P波の到達時刻の検出を自動で行うアルゴリズムは以前より盛んに研究が進められており、例えば、STA/LTAアルゴリズム（Allen, 1978）、AR-AIC法（Sleeman & Van Eck, 1999）などがある。最近ではZhu & Beroza (2018) やRoss, et. al. (2018) が深層学習を用いた方法を提案した。一方、初動極性の判別について、既存の手法は人間の専門家よりも精度が低いという問題があった。本研究では、観測された地震波形データからP波の到達時刻と初動極性を検出することの可能な畳み込みニューラルネットワーク（CNN; Convolutional Neural Network）のモデルを開発した。観測データとしては、西日本（山陰地方、近畿地方北部）の稠密地震観測網で得られた250 Hzの地震波形（約13万個）と定常観測網で得られた100 Hzの地震波形（約4万個）を使用し、到達時刻と初動極性の正解データとしては専門家による検出結果を用いてCNNの訓練を行った。その結果、訓練に用いていない地震波形に対するCNNによる到達時刻について、専門家とCNNの検出時刻の差の平均と標準偏差はそれぞれ、-0.002 sと0.040 s（250 Hz）、-0.009 sと0.071 s（100 Hz）となった。また、初動極性の検出結果は専門家が検出した結果に対し，約98 %（250 Hz）と約95 %（100 Hz）の一致精度を有した。これはRoss et. al. (2018) の結果と同等である。次に、初動極性検出結果について地域ごとの再訓練の必要性を調べるため、地震波形を観測地域で分け、片方の地域の波形データを用いてCNNを訓練し、もう一方の地域のデータに適用した。その結果、一致精度は最大でも約2 %の減少に留まり，地域ごとにCNNを再訓練させる必要性が低いことが分かった。また、現在の深層学習を用いた研究では、ニューラルネットワーク部分がブラックボックス的、つまりCNNがどのように結果を出力するかがわかりづらいという課題がある。そこで本研究では、Selvaraju, et. al. (2017) のGrad-CAMと呼ばれる可視化技術を用いて、CNNによる初動極性検出の決定プロセスの可視化を試みた。CNNが重視している箇所を可視化することにより、訓練されたCNNが到達時刻の検出結果のズレに柔軟に対応していることが分かった。また、多くの波形に対して初動到達直後よりもむしろ直前を重視していることも分かった。この特徴は、初動極性検出の専門家の判断基準に極めて近く、初動極性そのものの定義をCNNには与えていないにも関わらず、人間と同等の判断力を身につけていると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Application of convolutional neural networks to continuous seismic network records

*Keisuke Yano[1], Takahiro Shiina[2], Sumito Kurata[1], Aitaro Kato[2], Fumiyasu Komaki[1], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2]

1. Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. 背景
現在，首都圏には，稠密に配置された約300 個の観測点をもつ首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network; 通称MeSO-net) があり，地震波形が連続的に収集されている．必ずしも地震観測点として適していない首都圏での測定のため、収集されたデータには，通常の地震波形に加えて地表面付近の様々な環境ノイズが含まれている．しかし、それらの環境ノイズは、観測点個別のものが多く複数の観測点で比較することにより軽減することが期待される．そこで、これらのデータの中から複数観測点の波形の情報を統合し，効率的かつ徹底的に地震波形だけを検知することを試みた．本発表では，畳み込みニューラルネットとグラフ分割を用いた複数観測点での地震検知法を提案し，MeSO-net データを用いてその精度を検証する．
2. 提案手法
畳み込みニューラルネットとグラフ分割を用いた複数観測点連続波形での地震検知法を提案する．畳み込みニューラルネットは「膨大な数のフィルタとの畳込み・プーリングと呼ばれるダウンサンプリング法・全結合ニューラルネット」を利用した学習器であり、画像処理・波形処理において広く活用されている．地震学においても畳み込みニューラルネットの単観測点連続波形への適用は広く検討されている．しかし，畳み込みニューラルネットは，画像のように入力の各要素が等間隔で配置されていることを想定しており，複数観測点連続波形にそのまま利用してしまうと，観測点の空間配置の不等間隔性を考慮することができない．そのため，単に畳み込みニューラルネットを適用しただけでは，複数観測点を用いることによる検知精度の向上および誤検知率の減少はそれほど期待できないと考えられる．
そこで，本研究では，グラフ理論の分野で研究されているグラフ分割の技法を畳み込みニューラルネットに導入し，観測点の空間配置を考慮した畳み込みニューラルネットを提案する．観測点間のグラフの構成法には自由度が存在するが，交差検証法を用いることでデータから決定することができる．
3. 解析結果
提案手法の精度検証を2011 年9 月4 日から16 日のMeSO-net 連続観測波形を用いて行った．複数観測点として成田付近の13 観測点を選択し，畳み込みニューラルネットの時間入力長を20 秒(50Hz までダウンサンプリング) とした．提案手法の精度を既存手法と精度を比較し，特に誤検知率を抑えることに成功した．解析結果の詳細については当日報告する．

© The Seismological Society of Japan

Room C | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C Research Bldg No 8 NS Hall

[S22]AM-2

chairperson:Hisahiko Kubo(NIED), Yuki Kodera(Meteorological Research Agency, JMA)

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

[S22-05] Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter with theoretical seismograms of time series as training data.

*Daisuke Sugiyama[1], Seiji Tsuboi[1] (1. JAMSTEC)

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

[S22-06] Discrimination of earthquakes and tectonic tremor signals by applying a convolutional neural network to running spectral images

*Masaru Nakano[1], Daisuke Sugiyama[1], Takane Hori[1], Tatsu Kuwatani[1], Seiji Tsuboi[1] (1. JAMSTEC)

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

[S22-07] An unsupervised automatic classification algorithm for continuous seismic records using a nonparametric Bayesian approach

*Yuki Kodera[1], Shin'ichi Sakai[2], Takahito Nishimiya[1] (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S22-08] **Study on Site-specific Ground Motion Evaluation Models Utilizing Machine Learning Method Considering Epicentral Directions**

*Toru Ishii[1], Atsuko Oana[1], Kensuke Wada[1] (1. Shimizu Corporation)

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

[S22-09] Study on Ground Motion Evaluation Models for Kanto Region Utilizing Machine Learning Method

*Atsuko Oana[1], Toru Ishii[1], Kensuke Wada[1] (1. Shimizu Corporation)

Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter with theoretical seismograms of time series as training data.

*Daisuke Sugiyama[1], Seiji Tsuboi[1]

1. JAMSTEC

我々は、昨年の地震学会秋季大会において、理論地震波形記録を生成し、これを教師データ（ある入力データとその正解となるデータを対応付けたもの）として機械学習を行うことにより、震源パラメータの推定を行うニューラルネットワークを構築する試みについて報告した。前回の発表では、関東地方領域にて、震源や規模の異なる多数のパターンの仮想地震を網羅的に計算し、得られた理論地震波形記録から、ある時刻における地表の空間的な地震波伝播画像を生成して、この画像を用いて深層学習を行い、震源パラメータを自動推定するニューラルネットワークを構築することが出来ることを示した。

我々は、このニューラルネットワークによる震源パラメータ推定精度をさらに高めることを目的とし、学習対象を時系列方向に発展させる試みを行った。例えば、地震波形の広がり方から震源近くの細かな振動など、前回用いた地表の変位分布だけでなく、その映像的な時間発展のパターンも学習の対象とする。このような時間発展パターンを学習するため、我々は、ある時間範囲の理論地震波形記録の地表の変位分布を、図１のような3次元形状データに変換した。このようなデータを、3次元形状データ及び映像における動きの学習に特化した3次元畳込みニューラルネットワーク（3D CNN）を用いて学習を行い、実際の観測データの推定を行うことができる推論モデルを得る。

なお、理論地震波形記録生成については、前回と同様にスペクトル要素法のSPECFEM3D_GLOBE(https://geodynamics.org/cig/software/specfem3d_globe/)を用いているが、今回は対象範囲について関東地方から日本列島規模まで広げ、256コア、1 chunkを用いて計算した。用いた3次元地球モデルはS20RTSで、モデルの精度の設定値であるNEXは256、周期は17秒である。震源深さや位置など震源パラメータを変化させた4,200個の仮想地震に対して約5分間の理論地震波形を計算し、約300万枚の地震波伝播画像を生成した。これを用い、数十秒程度の時間発展パターンを3次元形状データとして生成し、教師データとした。もちろん、この3次元形状データはk-Netなどの実際の地震波形観測データからも同様に自動的に生成が可能であり、自動的な震源パラメータの推定も可能である。

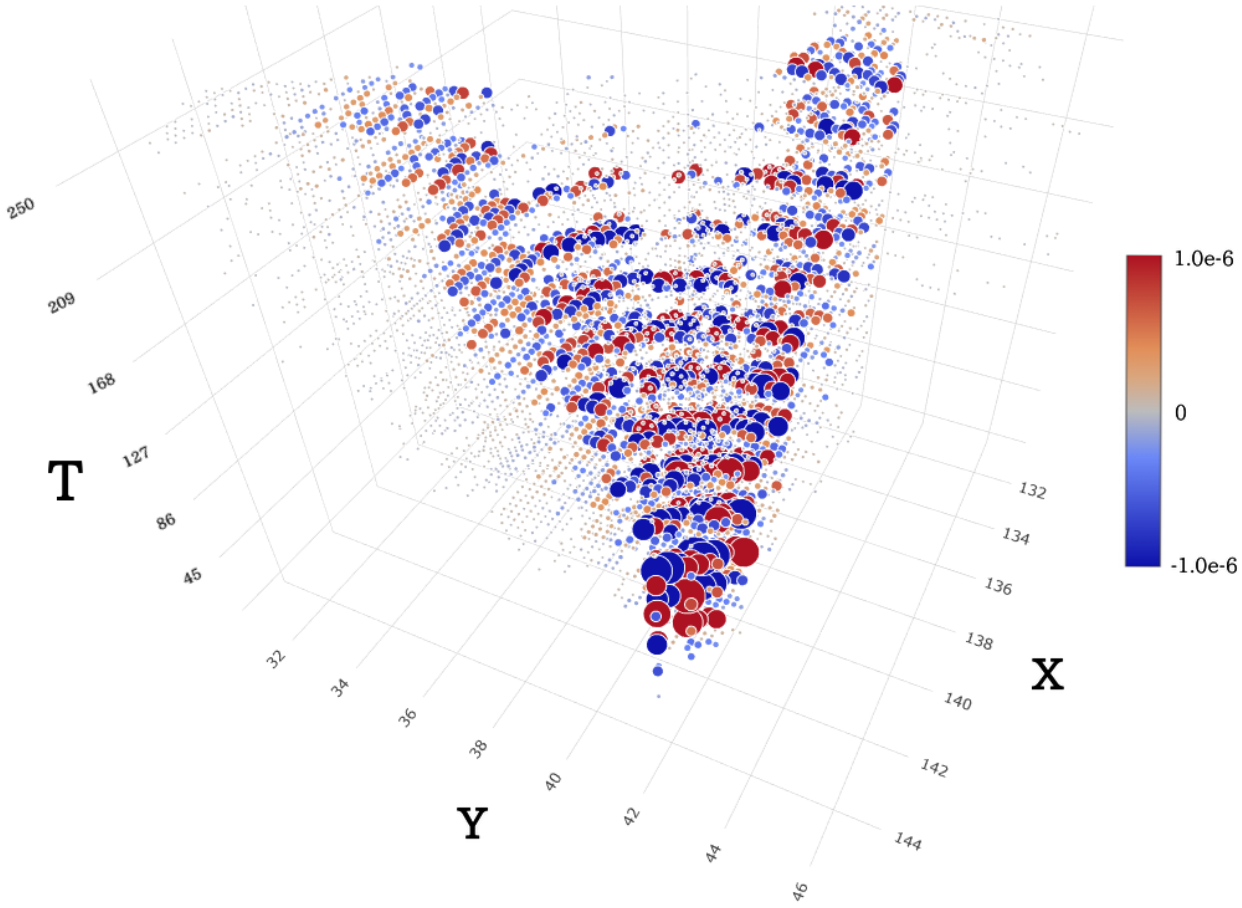
このように生成した教師データを基に、先に述べた3D CNNを用いた深層学習を行った。3層の3D畳込み層を用い、86x86の空間伝搬データを時系列方向に20個用い、各震源パラメータを推定する推論モデルを機械学習により生成した。深層学習フレームワークはTensorFlow (https://github.com/tensorflow)とnnabla（https://github.com/sony/nnabla）を用いた。教師データの生成および機械学習は海洋研究開発機構・地球情報基盤センターが運用する計算クラスタであるDAシステムのGPGPUノードを利用して並列に行い、ニューラルネットワークから推論モデルを構築した。

学習は4,200個の地震の各イベント85:15に分割し、85%である3,570個を学習に用い、学習に使用しない残り15%の630個の地震を用いて交差検証を行ったところ、概ね良好な結果が得られた。最終的に完成した推論モデルの詳しい推定結果、および実際の観測データに適用した場合の推定結果について発表の際に述べる。

謝辞

© The Seismological Society of Japan

本研究は科研費19K12011の助成を受けたものです。また、海洋研究開発機構・地球情報基盤センターの計算機システムを用いました。記して感謝いたします。



© The Seismological Society of Japan

Discrimination of earthquakes and tectonic tremor signals by applying a convolutional neural network to running spectral images

*Masaru Nakano[1], Daisuke Sugiyama[1], Takane Hori[1], Tatsu Kuwatani[1], Seiji Tsuboi[1]

1. JAMSTEC

近年の地震・地殻変動観測網と観測データ解析技術の発達により、プレート境界地震の震源域周辺において、低周波微動、超低周波地震、スロースリップ等のスロー地震が発生していることが明らかになっている。スロー地震の発生メカニズムを解明し、発生状況をモニタすることで、巨大地震の発生メカニズムと準備過程について理解が深まると期待されている。その中でも低周波微動は、低周波成分が卓越し、数十秒以上継続するシグナルとして観測される。低周波微動の検知には主にエンベロープ相関法が用いられるが、この手法では通常の地震動も同時に検出してしまうため、地震カタログを用いたり、目視によるチェックによって、低周波微動のイベントだけを抽出する必要がある。

一方で、低周波微動と通常の地震動のシグナルは卓越する周波数成分と継続時間が異なり、これらの情報からシグナルを判別できると考えられる。すなわち、低周波微動は通常の地震動と比べて10Hz程度以下の低周波成分が卓越し、またシグナルの継続時間は数十秒以上と、ローカルな地震と比べて長時間シグナルが継続する。シグナルに含まれる周波数成分と継続時間を同時に表現する手法として、ランニングスペクトルがある。そこで本研究では、ランニングスペクトルの画像認識によって低周波微動および通常の地震動を判別する手法を開発した。

画像に含まれる共通した特徴を自動で学習、認識し、判別する技術として、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）が主に用いられる。通常のCNNによる画像認識では、シグナルの特徴が画像のどこに現れても認識できるように設計する。一方地震動の場合、シグナルの現れる時刻、すなわちランニングスペクトル画像の横方向の位置はどこでも構わないが、周波数成分については震源の物理プロセスを反映しているため、周波数の絶対値（画像の縦方向の位置）はシグナルの判別に重要な情報となる。従って、本研究では画像の縦方向（＝周波数）には位置感度を持たせつつ、横方向（＝時刻）の位置には影響を受けない、非対称な画像認識手法を新たに考案し、低周波微動と通常の地震を判別する手法を開発した（SRSpec-CNN; Nakano et al., 2019 SRL）。

CNNによる画像認識では通常、画像に含まれるシグナルの特徴を抽出する畳み込み層と、シグナルの位置感度を軽減するためのプーリング層、これらの層の出力とシグナルの関連付けを行う全結合層から構成される。通常のプーリング層は、画像の縦横の両方向に適用し、シグナルの特徴が画像のどこに現れても適切に認識できるように構成する。しかし今回開発したSRSpec-CNNでは、プーリング層を画像の横（時間）方向のみに適用することで、縦方向（周波数）には位置感度を持つよう構成した。この点が通常のCNNとは異なる。

今回開発したSRSpec-CNNをDONETで観測された低周波微動と通常の地震動、ノイズの記録から作成したランニングスペクトル画像を用いて学習させ、シグナルの判別精度評価を行った。画像は64×64ピクセルとし、横方向は時間（225秒）、縦方向は周波数（2-10 Hz）に対応する。この時、二つの観測点（KMB06とKMD13）のデータは学習に用いず、新しく観測点が追加された場合を想定した性能評価試験に用いた。また、比較のためにプーリング層を通常のCNNと同じ構成とした場合のシグナル判別も行った。

その結果、通常のCNNの場合は正解率（予測結果全体の中で、答えが正解と一致している割合）が95.9%だったのに対し、今回開発したSRSpec-CNNでは97.4%に向上した。さらに学習パラメータを最適化することで、最終的に99.5%の正解率を達成した。また、除外した二つの観測点のデータに対し、学習済みのネットワークを用いてシグナル判別を行ったところ、正解率は99.2%と、やはり高い判別性能を示した。つま

© The Seismological Society of Japan

り、既に観測網を展開している領域でのシグナルの一般的な特徴を学習しているため、観測網に新しい観測点を追加しても改めて学習をやり直す必要はない。

本研究ではシグナルの学習と判別において、シグナルが明瞭でないものや一つの画像に複数イベントが含まれているような、ノイジーなデータは除去した。今後はノイジーなデータにおける判別率の向上についても検討していく必要がある。

© The Seismological Society of Japan

An unsupervised automatic classification algorithm for continuous seismic records using a nonparametric Bayesian approach

*Yuki Kodera[1], Shin'ichi Sakai[2], Takahito Nishimiya[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

地震計の連続波形記録には，地震，人為的活動，機器ノイズなどの様々な要因で生じた信号が記録されている．これらの信号を自動的に抽出・分類することができれば，地震計付近で発生している定常的・非定常的な自然現象の自動検出や，リアルタイム処理に用いている地震計の自動ヘルスモニタリング等につながると期待される．本研究では，これらへの第一歩として，機械学習を用いて連続波形記録を自動的に分類する手法の開発に取り組んでいる．個々の地震計の観測環境は様々であることから，教師データがあらかじめ存在することは想定せず，教師なし学習を前提として手法を構築する．
小寺・酒井（2018，地震学会）は，10次元に集約した離散的な周波数スペクトルを特徴量として，周波数領域および時間領域で多段階のクラスタリングを行うことで，連続波形記録を10種類の時系列データに分類する手法を提案し，自然地震，鉄道ノイズ，バックグラウンドノイズが自動的に分類可能であることを示した．しかしながら同手法は，時間領域でのクラスタリングを行う際にスペクトラルクラスタリングを用いているという問題点がある．スペクトラルクラスタリングは，分類されるクラスタ数をハイパーパラメータとして陽に与える必要があるため，その値を設定する際に恣意的な判断が入り得る．そこで本研究では，分類の客観性をより高めるため，ノンパラメトリックベイズモデルのひとつである無限関係モデル（IRM; Kemp et al., 2006）を用いて時間領域のクラスタリングを行った．IRMは無限個のクラスタの存在を許容した生成モデルであり，学習データに基づいて有効なクラスタ数が自動的に計算される．先行研究同様，時系列データがマルコフモデルで遷移すると仮定して遷移行列を生成し，その行列に対してIRMを適用した．
上記手法をMeSO-netの観測点E.JDJM（川北・酒井，2009）および気象庁の紀伊半島沖OBSの臨時観測点TN042A（山崎・他，2008）における72時間の連続波形記録（期間はそれぞれ2017年3月1～3日，2004年9月22～24日）に適用した．IRMにより，E.JDJMは10種類，TN042Aは6種類のクラスに分類され，学習データに応じてクラス数が自動的に調整されることを確認した．E.JDJMにおける地震と鉄道ノイズ，TN042Aにおける振幅の大きな余震と低周波微動は別々のクラスに分類された．一方で，それぞれの信号とクラスは基本的には一対一の対応にはなっておらず，例えばE.JDJMの鉄道ノイズは5種類程度のクラスに細分化されるといったことが生じた．より直観的に理解しやすい分類とするためには，細分化されたクラスを更にまとめ上げるといった処理が必要になるだろう．

© The Seismological Society of Japan

Study on Site-specific Ground Motion Evaluation Models Utilizing Machine Learning Method Considering Epicentral Directions

*Toru Ishii[1], Atsuko Oana[1], Kensuke Wada[1]

1. Shimizu Corporation

新たな観点の地震動評価による新たな知見獲得を目指し、堆積平野内や周辺で得られた水平地震動観測記録を教師データとする機械学習により、地点固有の地震動評価モデルの作成を試みた。各地点では地盤特性が共通なので、震源・伝播特性を記述する各パラメータを入力する「特徴量」とし、観測記録から求められた地震動指標を「目的変数」とすることにより、両者を関連付けて機械学習を実施した。

機械学習には、勾配ブースティングと決定木を組み合わせた手法「勾配ブースティング木」を用いた。「目的変数」として、地震動の最大加速度PGA[cm/s^2]および複数の周期T[s]での減衰定数h＝5%の擬似速度応答スペクトル${}_{\mathrm{P}}S_{\mathrm{V}}$[cm/s]と速度応答継続時間スペクトル$TS_{\mathrm{V}}$[s]（パラメータ$p1$＝0.03，$p2$＝0.95）を検討した。大振幅になるとデータ数が減るPGAと${}_{\mathrm{P}}S_{\mathrm{V}}$は、モデル精度を高めるために機械学習に適した解析上のデータ分布となる常用対数（$\log_{10}PGA$，$\log_{10}{}_{\mathrm{P}}S_{\mathrm{V}}$）に変換して入力した。「特徴量」としては、地震のモーメントマグニチュードM_{W}、震源深さH[km]、震源距離X[km]、震央方位Λ [degree]を与えた。Λは真北を0°として時計回りに定めたが、真北を境に不連続量となるので、解析上のデータには$\sin\Lambda$と$\cos\Lambda$のペアを与えた。一特徴量のデータ列のみシャッフルして置き換え機械学習により再評価した時に評価精度の悪化した度合いにより、モデルへのその特徴量の「影響度」とした。

K-NET観測点TKY028での「地震動評価モデルT」の検討例を図1～4に示す。Λの影響度は特にTS_{V}で大きく、周期によってはM_{W}・X・Hと同等以上になった。この例では、評価値／観測値の比の平均は約1.1、その常用対数標準偏差は振幅では0.2強、継続時間では0.1強で、評価値の大半は観測値の倍半分以内に収まった。従来の距離減衰式等で扱われなかった震央方位や応答継続時間を考慮し、地点・周期毎に地震動特性が変化する様子の定性的・定量的な分析・検討も可能で、地震波の三次元伝播特性の違いを簡便な評価モデルに反映出来る可能性がある。

AIとBig Dataを生かす上で良質・大量のデータと情報の得られる地点毎に地震動評価モデルを作成することには大きな利点がある。今後、データの粗密に起因するモデル精度のアンバランスを改良するための工夫や、データ数が少なく外挿領域に当たる大地震・大振幅地震動・長時間地震動の評価上の工夫も必要となろう。

© The Seismological Society of Japan

謝辞
本研究には、気象庁の地震情報と防災科学技術研究所の陸海統合地震津波火山観測網の公開データ、および、機械学習ツール DataRobot と描画ツール GMT を使用した。これらの開発・運用・管理に携われた全ての皆様に心より感謝申し上げる。

参考文献
石井・小穴・和田，日本地震工学会大会 2019 梗概集（投稿中）

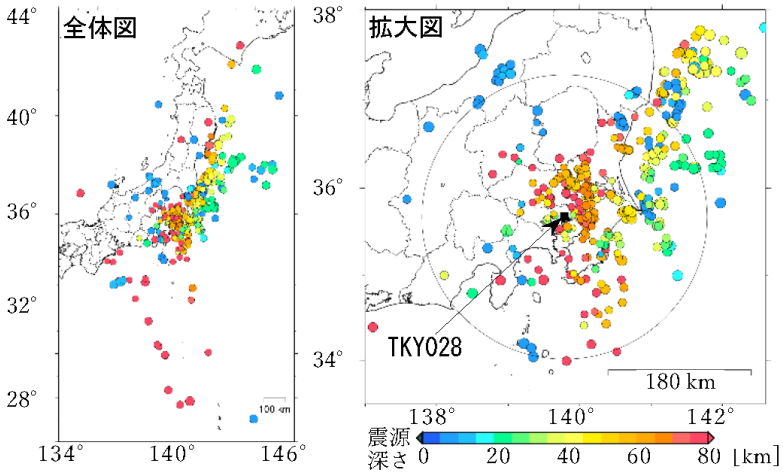


図 1　TKY028 で観測されたモデル T 検討用地震の震央

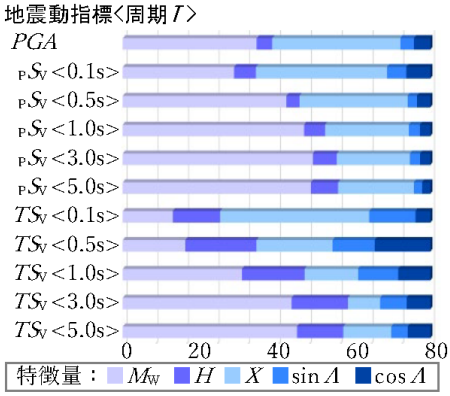


図 2　モデル T の各地震動指標に対する各特徴量の影響度

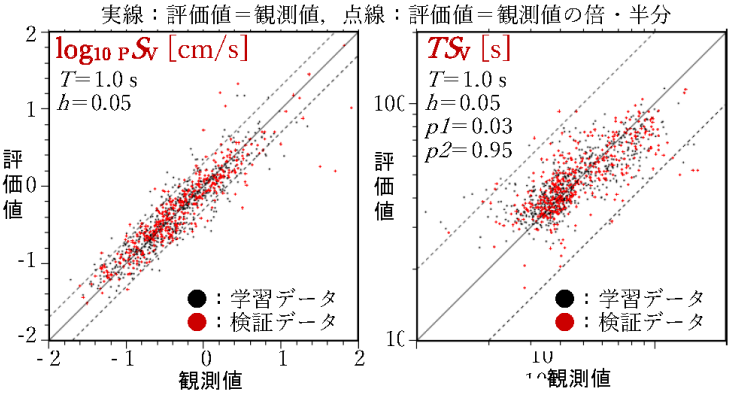
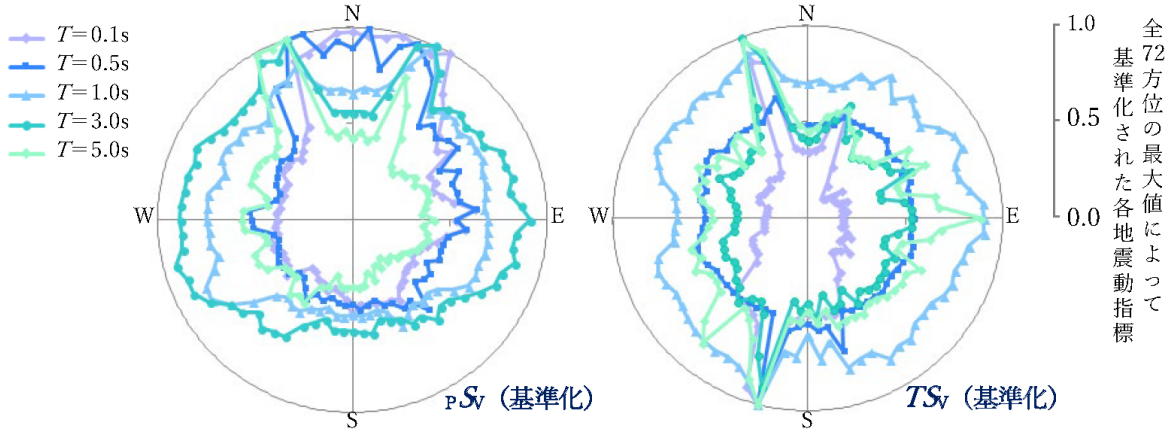


図 3　モデル T の地震動指標（目的変数）の観測値と評価値の相関図（散布図）の例



MW=6, H=10km, X=180km の条件で Δ を 5° 刻みで変化させて最大値により基準化して示したもの

図 4　モデル T の地震動指標（目的変数）の評価値の震央方位依存性の検討例

© The Seismological Society of Japan

Study on Ground Motion Evaluation Models for Kanto Region Utilizing Machine Learning Method

*Atsuko Oana[1], Toru Ishii[1], Kensuke Wada[1]

1. Shimizu Corporation

日々蓄積されていく地震動観測記録が最大限に活用され随時更新される地震動予測モデルの構築を目指し、その予備的な検討として、関東地方において過去に得られた地震動観測記録を用いて、機械学習による地震動評価モデルの作成を試みた。
検討には、防災科学技術研究所のK-NETのうち関東地方に展開された強震観測点138地点（図1）で得られた地表記録を用いた。具体的には、気象庁の震度データベースで1996年～2019年1月15日に最大震度が4以上でかつ東京都千代田区で震度2以上となった地震のうち、関東地方で震度が記録された地点数が非常に少ない地震を除いた上で、地震規模と震源位置が偏り過ぎないように代表的な地震を選んだ。選択した地震は、関東地方を中心に一部遠方にまで広がっている（図2）。これらの地表記録のうち、加速度三成分合成振幅最大値が1 cm/s^{2}以上の観測点での水平二成分の波形データを選択し、データに含まれるノイズや別地震を判別して、検討に用いることが適切な波形を取捨選択した結果、総計11488波形となった。選択したデータの震源距離X [km]とモーメントマグニチュードM_Wの分布を図3に示す。
地震動評価モデルの目的変数は、最大加速度PGA[cm/s^2]と複数の周期T[s]における減衰定数5%の擬似速度応答スペクトル${}_pS_v$[cm/s]および速度応答継続時間スペクトルTS_v[s]（石井, 2012）とした。なお、PGAと${}_pS_v$は振幅の大きなデータが少なく、絶対値のままではデータの分布形状が偏っていたため、機械学習ではそれぞれの常用対数を与えることにした。地震動評価モデルの特徴量（説明変数）は、モーメントマグニチュードM_W、震源深さH[km]、震源距離X[km]、震央方位Λ[degree]、地震基盤面深さ$D28$[m]（J-SHISで公開されている深部地盤モデルの第28層の下面深さ）、表層30m平均S波速度$AVS30$[m/s]の6種類とした。Λは真北を0°として時計回りに定めたが、真北を境に不連続量となるので、$\sin\Lambda$と$\cos\Lambda$のペアを与えた。機械学習手法には、勾配ブースティングと決定木を組み合わせた勾配ブースティング木を用いた。
ある特定の特徴量のみをランダムに並べ替え、その他の特徴量を元のままとしたときの目的変数の評価精度の変化の度合いにより、目的変数に対する各特徴量の影響度を調べた（図4）。M_Wの影響度は周期と共に増大し、Xの影響度やTS_vに対するHの影響度は周期と共に減少した。$AVS30$の影響度は周期1秒で相対的にやや大きめ、$D28$の影響度は周期1秒以上で大きめ、Λの影響度は相対的には周期1秒以下で大きめとなった。目的変数の観測値と評価値の分布の例を図5に示す。評価値／観測値の比の平均はほぼ1、その常用対数標準偏差は地震動の振幅では0.2弱程度、応答継続時間では0.1程度で、評価値の大半は観測値の倍半分以内に収まり、全体として良くモデル化された。
作成した地震動評価モデルを用いて、M_Wに応じたPGAの距離減衰特性を検討した例を図6(a)に示す。特徴量の与条件は、茨城方面を震源とする地震をSIT006秩父で観測する場合等を考慮して設定し、プレート境界地震による岩盤サイトでの揺れを想定した。参考として、Morikawa and Fujiwara(2013)の距離減衰式（M_W6とM_W6.5）の平均も重ね描いた。M_WとXに応じたPGAの傾向は、大局的には既往の距離減衰式と同様にモデル化されていると言える。ただし、M_W5やM_W6の場合に比べてM_W6.5の場合は、X＜60 kmの傾きが小さく、ステップ関数状になっている。M_W6.5ではX＜60 kmの学習データが少なかった（図3）ため、十分な信頼性が確保できていない可能性がある。Λによる${}_pS_v$(T=1秒)の距離減衰特性の検討例を図6(b)に示す。ここでは、都心からみて北東・南・南西方向（Λ=45, 160, 230°）のプレート境界地震および北西方向（Λ=320°）の内陸地震を念頭に置いた。これら4ケースを比べると、同じM_WとXでもΛによって振幅の大きさに差が生じている。プレート境界地震を想定した3ケースでは南方向が最も小さく、北東方向と南西方向の大小関係は50 km程度を境に入れ替わっている。また、北西方向は距離減衰の傾きが相対的に小さい。X＜100 kmでは顕著に振幅が小さいが、X＞150 kmでは南方向を上回っている。このような違いは、震源特性の地域性や伝播経路特性の違いがモデルに反映された結果と考えられ、Λを考慮することによって、既往式よりも細かな地域特性を考慮した地震動評価モデルを作成できる可能性を示唆している。一方で、データの偏りがモデルに影響を及

© The Seismological Society of Japan

ぼしている可能性もあるため、今後さらなる検討が必要である。

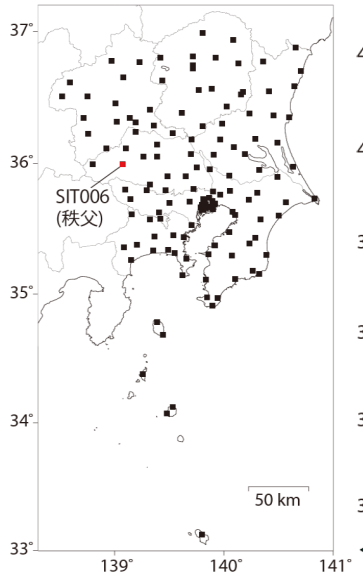


図 1　関東地方の K-NET 観測点

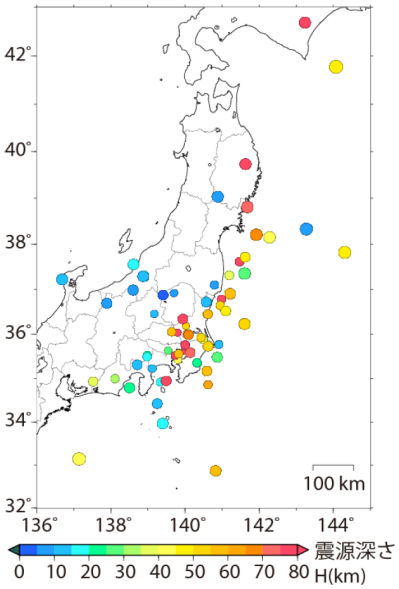


図 2　検討地震の震央

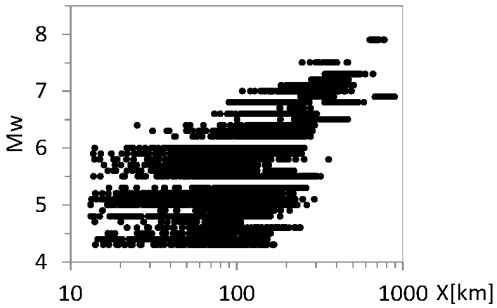
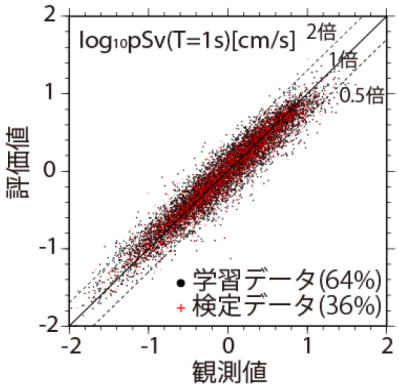


図 3　震源距離 X と M_w の分布



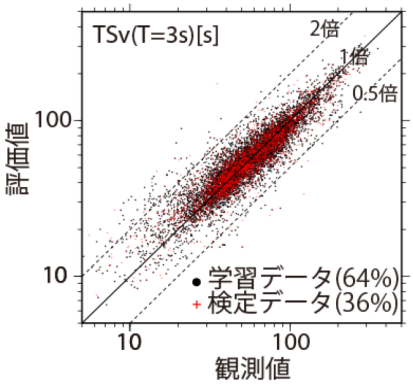


図 5　目的変数の観測値と評価値の例

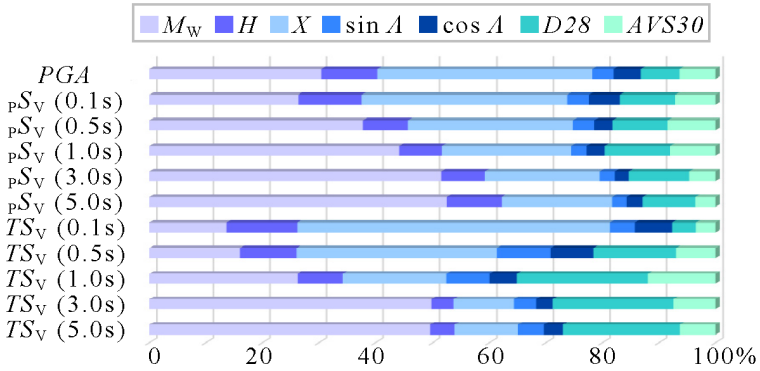
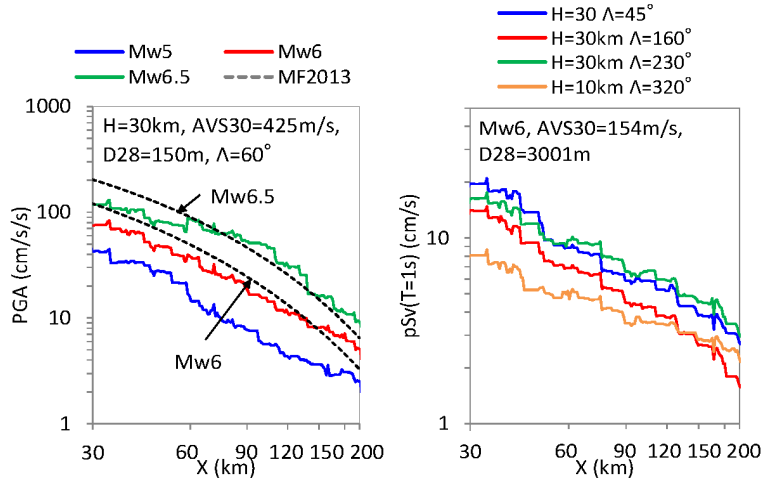


図 4　地震動評価モデルの各地震動指標に対する各特徴量の影響度



(a)M_w に応じた PGA　　(b) Λ に応じた ${}_pS_V(T=1s)$

図 6　距離減衰特性に関する検討例

参考文献：石井(2012)：日本建築学会構造系論文集，第77巻，第676号，pp.843-850. Morikawa and Fujiwara(2013): Journal of Disaster Research, Vol.8, No.5, 2013, pp.878-888.

謝辞：気象庁の地震情報と防災科学技術研究所による公開データ、および機械学習ツール DataRobot と描画ツール GMT を使わせて頂きました。心より感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 5:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM C Research Bldg No 8 NS Hall

[S22]PM-1

chairperson:Yuki Kodera(Meteorological Research Agency, JMA), Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S22-10] Improving the symmetry of ambient seismic field correlation functions with machine learning

*Loic Viens[1], Tomotaka Iwata[1] (1. Kyoto University, DPRI)

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

[S22-11] A hybrid approach of Machine learning and Ensemble Kalman Filter for estimating frictional parameters in Nankai megaquake cycle simulator

*Yu Yamamoto[1], Kazuro Hirahara[1,3], Hirotaka Hachiya[1,2], Atsushi Takahashi[1], Naonori Ueda[1] (1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa)

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

[S22-12] Acceleration of matched-filter search and slip inversion of deep tectonic tremor using nearest neighbor search

*Naoto Mizuno[1], Satoshi Ide[1] (1. School of Science, The University of Tokyo)

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

[S22-13] Machine learning of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on recurrent neural network

*Norifumi Yamaga[1], Yuta Mitsui[2] (1. Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

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

[S22-14] Automatic detection and classification of the uplifted marine terrace by clustering DEM dataset

*Junki Komori[1], Ryosuke Ando[1], Masanobu Shishikura[2] (1. The University of Tokyo, 2. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S22-15] Investigation of Prediction Model for Engineering Geomorphologic Classification using Convolutional Neural Network

*Sho Akagi[1], Toshihiko Hayakawa[1] (1. Mitsubishi Space Software Co., Ltd.)

Improving the symmetry of ambient seismic field correlation functions with machine learning

*Loic Viens[1], Tomotaka Iwata[1]

1. Kyoto University, DPRI

Seismic interferometry is a well-established method to retrieve the seismic wave propagation between a pair of seismic stations. Under the assumption that the ambient seismic wavefield is equipartitioned, the correlation function between the two sensors should yield the inter-station Green's function. However, such a condition is rarely fulfilled on Earth, as the ambient seismic field is generated by uneven distributions of sources, for example from ocean waves at low frequencies (<1 Hz). This uneven source distribution generally leads to non-symmetric correlation functions which can also be corrupted with non-physical wave arrivals. We focus on one year of continuous data recorded by Hi-net stations located in the Kii peninsula, Japan, and compute correlation functions between station pairs using short 15-min time-windows and stack them over 30 minutes. As the source of the ambient seismic field varies through the year, the raw stack of correlation functions over one year is strongly asymmetric for most station pairs. We propose to use machine learning techniques (e.g., Principal Component Analysis (PCA) and autoencoders) to reduce the dimensionality of the correlation function dataset for each station pair. By selecting correlation functions from the latent/low-dimension space of both methods, we show that the symmetry between the acausal and causal parts of the correlation functions can be improved. This additional processing step could help us to retrieve a better approximation of inter-station Green's functions, and therefore be useful for imaging purposes.

© The Seismological Society of Japan

A hybrid approach of Machine learning and Ensemble Kalman Filter for estimating frictional parameters in Nankai megaquake cycle simulator

*Yu Yamamoto[1], Kazuro Hirahara[1,3], Hirotaka Hachiya[1,2], Atsushi Takahashi[1], Naonori Ueda[1]

1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa

はじめに

南海トラフ沿いに沈み込むフィリピン海プレートは、繰り返し巨大地震を引き起こし。次の巨大地震発生が危惧されている。岩石の摩擦則に基づいて、南海トラフ巨大地震発生サイクルシミュレーション（ECS）研究が行われている。しかし、従来研究では、摩擦パラメータを手動で調整し、南海トラフ巨大地震履歴を再現しようとしているが、200年~90年と大きく変動する地震間隔をうまく再現できていない (Hyodo et al., 2006)。

そこで、複雑な地震間隔を説明する摩擦パラメータを自動的に探索するために、本研究では、機械学習のニューラルネットワーク(NN)と逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)とを組み合わせたハイブリッド手法を提案する。具体的には、シミュレーションによる断層のすべり速度履歴から摩擦パラメータを予測する逆関数を定義し、機械学習を用いて、汎化的な摩擦パラメータ分布を推定する。さらに、得られた摩擦パラメータ分布をEnKFの初期アンサンブルに用いて、真の南海トラフ巨大地震履歴から摩擦パラメータの周辺化分布を求める。

予備的な研究段階ではあるが、ECSデータと真の南海トラフ巨大地震履歴データを用いた単純な離散３セルモデル実験を通して、提案法が多様に変化する真の南海トラフ巨大地震をより正確に再現できる可能性があることを示す。

データ　＆　解析手法

通常のECSでは、プレート境界面を臨界サイズより細かいセルに分割するが、多大な計算コストが必要である。そこで、本研究では、南海トラフ沿いのプレート境界面の破壊断層セグメント（南海・東南海・東海）に対応する相互作用を有する離散３セルモデルを用いる。具体的には、プレートのすべり発展は速度状態依存則に、また状態変数の時間発展はスローネス則に従うとし（Dieterich,1979; Ruina,1983）、準動的（Rice,1993）に計算を行った。

各セルの摩擦パラメータに応じて、相互的に地震サイクルが変化する。また、摩擦パラメータのうち、本研究では、A,Lを固定し、Bを所定の区間で動かすことにより、B-Aを変化させている。摩擦パラメータ以外の各種パラメータは固定する。

真の南海トラフ巨大地震履歴データは、1400年に及ぶ地震発生時のみの時系列データである。時間予測（TP）およびすべり予測（SP）を仮定して、地震発生時のすべり量を推定し、地震発生履歴データに累積変位データを付加した真値模擬データを作成した。また、すべり継続時間は一定としてすべり速度データに変換してデータとした。南海トラフ巨大地震履歴にはその発生が不確かな地震データも含まれるため、不確かな地震データを含む/含まない場合の組み合わせを考慮した256通りの履歴を用いた。

© The Seismological Society of Japan

まず、機会学習を用いた解析について述べる。単独セルにおける地震間隔と摩擦パラメータとの関係に基づき、3セルのBのサンプリング範囲はそれぞれ0.625から0.85、0.6から0.825および0.6から0.825（MPa）とした。そして、サンプリング範囲を0.025(MPa)間隔で刻み、約80万回のシミュレーションにより、各セルにおけるすべり速度データと摩擦パラメータB−Aとの対データを作成し、すべり速度データに時系列解析の手法である高速フーリエ変換(FFT)を用いて周波数スペクトラムに変換する。そして、各ウィンドウで周波数スペクトラムの最大値を抽出し、NNの特徴量とした。これにより、摩擦パラメータB-Aの変動の影響を受ける、地震の最大間隔を抽出することができる。学習時には、地震の最大間隔の特徴量から、対となる摩擦パラメータを推定する。評価時には、学習したモデルを使用して、真の南海トラフ巨大地震履歴データから、摩擦パラメータを推定する。摩擦パラメータの微小な値を推定するために、分類で荒く摩擦パラメータの範囲を推定し、拡大された残差を回帰する2段階のNNを用いる。

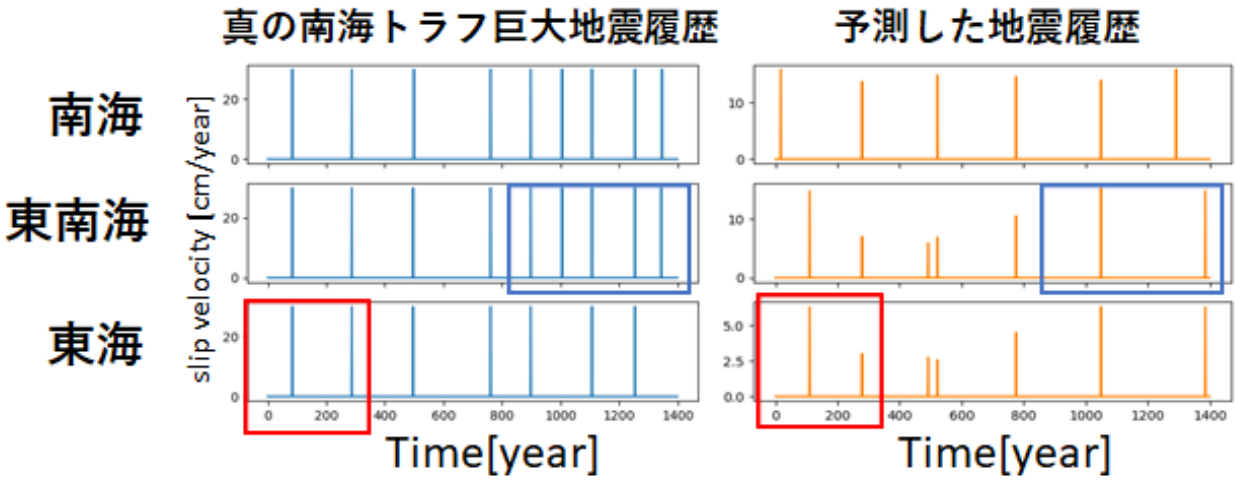
次に、EnKFを用いた解析について述べる。256通りの南海地震履歴データから機械学習により推定された値を256個の初期アンサンブル値とする。同化間隔は、2年間として南海トラフ巨大地震履歴上で地震が発生した年で更新が発生する。EnKFにおける摩擦パラメータの結果は、最後に予測した摩擦パラメータのアンサンブルの平均とする。

最終的に予測したセルそれぞれのB値を当該シミュレーションに入れ、8000年分のすべり速度を求める。そして、8000年分のすべり速度から、真の南海トラフ巨大地震履歴との地震発生時年数と予測した地震履歴の地震発生時年数の誤差の合計が最短になる1400年を取得し、真の南海トラフ巨大地震履歴の地震発生時年数との誤差を比較する。

結果 & 考察

図. 1が示すように、赤枠で囲まれた東海の比較的大きな間隔で起きる巨大地震は、平均地震年数誤差約10年以下の誤差に抑えることができているが、青枠で囲まれた比較的小さな間隔で起きる巨大地震は推定するのが難しい。

これは、NNの特徴量として、地震間隔の最大間隔を用いているため90年の比較的小さな間隔を推定するのが困難になっていることがあげられる。



© The Seismological Society of Japan

Acceleration of matched-filter search and slip inversion of deep tectonic tremor using nearest neighbor search

*Naoto Mizuno[1], Satoshi Ide[1]

1. School of Science, The University of Tokyo

世界各地の沈み込み帯などにおいてスロー地震の一種である低周波地震やその群発的活動と考えられている深部微動が観測されている。低周波地震の検出には、典型的な低周波地震のテンプレート波形を用意し、それと相互相関の高い波形を検出するマッチドフィルターが広く用いられている。この手法ではテンプレート波形と類似性のないシグナルは検出されないため、シグナルの取り逃しを減らすためには用いるテンプレート波形の数を増やす必要がある。しかし、マッチドフィルターはテンプレート波形の数に比例した計算量がかかるため、大量のテンプレート波形を用いると必要な計算コストが非常に大きくなってしまう。また、低周波地震からグリーン関数を作成し深部微動のすべりインバージョンを行う手法（Ohta and Ide, 2017）では、マッチドフィルターを応用し深部微動のすべり発展を捉えることが可能であるが、大量のテンプレート波形に対するマッチドフィルターを繰り返し行うことと同等の処理が必要となるため、長期間のデータを扱うことは計算コストの点で困難であった。
本研究では近似最近傍探索を用いたマッチドフィルターの高速化を行い、これを応用することですべりインバージョンを高速化した。通常のマッチドフィルターではS波やP波の到達時刻の前後数秒を用いるが、本研究では発生時刻からの数十秒の時間窓を用いた。これによりテンプレート波形と観測波形が最近傍探索におけるデータ点とクエリ点にそれぞれ対応し、マッチドフィルターを最近傍探索として定式化できる。この定式化ではデータの次元が時間窓の長さと観測成分数の積であるので、1万次元程度の高次元データを扱うこととなる。このようなデータの次元が大きい場合における最近傍探索は古典的には愚直な探索より高速化することが困難であったが、近年の研究によって近似解においては大幅な改善が行われている（e.g. Johnson et al., 2017）。本研究では特異値分解を用いた次元削減・近似最近傍探索による枝刈・GPUを用いた高速化等の工夫を行い大幅な高速化を達成した。Ohta and Ide (2017) のインバージョン手法はマッチドフィルターの拡張として捉えることができるので、マッチドフィルターと同様の方法で近似最近傍探索に帰着し高速化することが可能である。本研究の手法によって先行研究と比較して1000倍以上の高速化が達成され、長期間のデータに対する解析が可能となった。

© The Seismological Society of Japan

Machine learning of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on recurrent neural network

*Norifumi Yamaga[1], Yuta Mitsui[2]

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

2011年東北地方太平洋沖地震以来，余効変動が続いている．この余効変動の影響により，各種スローイベントの小さなシグナルが隠れている可能性がある．余効変動は，一般に，対数関数や指数関数，またその組み合わせによってフィッティングされている．この余効変動をより正確に表現するために，機械学習手法の1つであるニューラルネットワークを導入し，既存のデータから特徴を学習する．余効変動の時系列データとして，国土地理院のGNSS(Global Navigation Satellite System)観測網に基づく東西成分，南北成分の変位を用いる．観測点数は191点である．191の観測点のうち，153点を学習用の観測点とし，残りの38点をテスト用の観測点とした．テスト用の観測点は，空間的な偏りが生じないよう，緯度・経度それぞれを0.5度ずつ区切ったグリッドごとに，1点ずつ選択した．学習時には,観測点ごとに，時系列の前半90%を使用する．学習で用いるデータを用いて，観測点ごとに変位量を0.1～0.9に値を正規化した．時系列データを365日ごとに区切り，連続した365日を入力データとし，その次の日の値を出力データとした．ニューラルネットワークの層は，単純化のために1層に固定し，LSTMを32個設定した．ここでLSTMは，複数のニューロンから構成されるユニットであり，長期時間依存性を学習できる．損失関数には平均絶対誤差を，最適化アルゴリズムにはAdamを用いた．学習したモデルを用いて，2種類の予測実験を行う．実験1では，38点のテスト点で，東北沖地震後365日経過した時点からの余効変動を期間の最後まで予測して，実データと比較する．実験2では，191の全観測点に対し，学習へ使用していない時系列の後半10%について，余効変動の予測および実データとの比較を行う．2種類の実験の両方で、従来の回帰分析を上回る結果を得られた.特に,実験１の結果の時空間分布からは、太平洋側の，特に岩手県沖・福島県沖の領域で，2013年中頃から，予測よりも実データが西向きにずれていくことがわかる．これは，東北沖地震後の余効変動の減衰と，プレート境界の固着状態変化の和を表すと考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Automatic detection and classification of the uplifted marine terrace by clustering DEM dataset

*Junki Komori[1], Ryosuke Ando[1], Masanobu Shishikura[2]

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

標高数値モデル（DEM）を使用した新たな海岸段丘の解析手法を開発し、房総半島に分布する完新世海岸段丘である沼段丘に適用した。沼段丘は過去7000年間に相模トラフ沿いで発生したプレート間地震（関東地震）による隆起で形成されたと考えられており、災害発生予測の観点からも調査が重要視されている地形である。しかし近年実施された年代測定調査などから、関東地震について従来の固有地震的な解釈に疑問が呈されてきたため、その形成履歴に関して再評価が求められていた。本研究では、従来の測量や航空写真判読に代わり、より定量的な手法としてDEMを用いた段丘区分を提案した。この手法では、旧汀線アングルを指示する崖基部の地形を抽出した点群データに対し、クラスタリングを使用して年代ごとの標高分布を取得する。解析の結果、房総半島南端部の海岸線沿い約30kmの長さにわたり、連続的に４段の旧汀線アングルの標高分布を得ることができた。今回得られた沼段丘のそれぞれの比高は互いによく一致した分布を示しており、同様な地殻変動を経験したことが示唆される。しかし年代測定から推定された発生間隔が互いに大きく異なっていることを考慮すると、プレート間のすべりの繰返しモデルでは段丘形成の説明が困難である。これらの地質データを総合して、プレート内断層の寄与も含めた地殻変動履歴モデルを構築することが今後求められる。

© The Seismological Society of Japan

Investigation of Prediction Model for Engineering Geomorphologic Classification using Convolutional Neural Network

*Sho Akagi[1], Toshihiko Hayakawa[1]

1. Mitsubishi Space Software Co., Ltd.

地形・地盤分類メッシュマップ（若松・松岡 2013）は、工学的な分類基準に基づく地形・地盤分類（微地形区分）のデータベースであり、地震動の増幅、液状化、土砂災害などのハザード評価において微地形を参照することを想定して定義されており、各種自然災害に対する防災上の重要な基盤情報となっている。地形・地盤分類メッシュマップは、日本全国を覆う約250m単位のメッシュに対して、標準化された地形分類基準に従う人の判読によって地形の区分（24種類）を決定している。地形分類基準における地形等の情報は分布データ確認による人の判定に基づいている。

本研究では、標高データが持つ地形に関する情報を抽出して微地形区分を予測することを目的として、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network）を用いた微地形区分の予測モデルの開発を試みた。人の判読によって構築された微地形区分を機械学習に基づく手法で予測できるようになることで、個人差や時間経過により生じる地形分類の判定のゆらぎの検知と是正、既存の微地形区分の更新や微地形区分が作成されていない地域での新たな地形分類、メッシュスケールの異なる地形分類の構築に役立つと考えられる。また、数値標高データの分布を入力とした予測モデルから得られる特徴量の特性を理解することで、地形にまつわる様々な問題に対して数値標高データを有効に活用するための知見を得ることができると期待される。

畳み込みニューラルネットワークは、入力サンプルである画像データの中で特徴的な形状を抽出し、画像中において特定の形状を持つ文字や物体の識別に効果的な特徴空間に射影する畳み込み層を含むニューラルネットワークの一種である。近年の深層学習の高度化に伴って急速に発展し、画像認識を代表とする多くの分野で応用手法が提案されている。

本研究では、面的な数値標高データを画像データと見做して畳み込みニューラルネットワークに入力し、標高の分布が有する特徴的な形状を学習させて微地形区分の予測に反映することを試みた。微地形区分の識別に有効な形状を学習するため、250mメッシュに割り当てられた微地形区分を教師データとし、予測対象メッシュを含む周辺地域の数値標高データを説明変数に含めた教師あり学習による予測モデルを構築した。

予測モデルは、数値標高データが持つ形状の情報と周辺メッシュの微地形区分の情報をともに取り入れるため、まず数値標高データに対して畳み込み層を適用し、畳み込み層の出力と微地形区分の入力層をマージして予測ラベルを決める出力層に接続する構成とした。予測の汎化性能を考慮し、説明変数とする数値標高データは予測対象メッシュの標高との差分値とした。説明変数とする微地形区分は標高が高い山側のメッシュとし、山側から標高の低い平野のメッシュに向かって逐次的に微地形区分を予測していく手法を採用した。標高が高い地域は地形分類の区分数が少なく比較的容易に地形分類を決定できるため、本手法は地形分類の構築に有効である。

本研究で構築した予測モデルを、北海道十勝平野を覆う約8万の250mメッシュのデータを用いて学習・予測し、本手法の有効性を検証した。予測対象メッシュを中心とした250mメッシュ数値標高データ（9×9メッシュ）と予測対象メッシュより北側にある微地形区分データ（9×4 メッシュ）を説明変数とし、予測対象領域の北端から逐次予測した結果を示す。予測結果が南方向に大きく影響している箇所があるものの、入力した微地形区分が逐次予測により概ね再現されており、対象とした範囲の数値標高と微地形区分の関係が学習されていることが確認できた。

© The Seismological Society of Japan

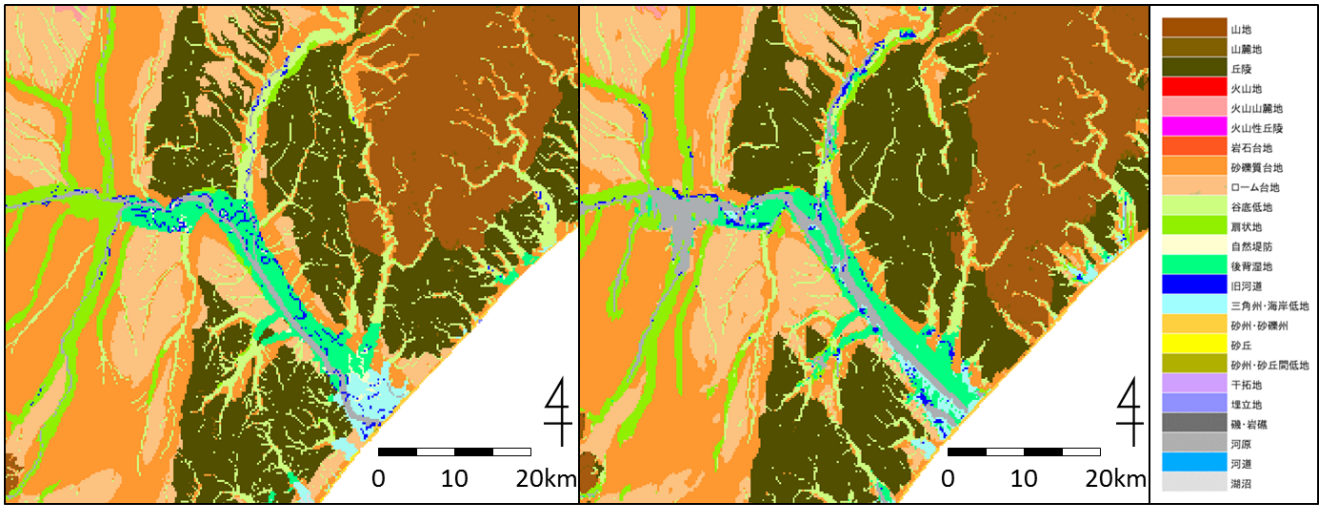


図　検証に使用した十勝平野の微地形区分（左）と北端から逐次予測された微地形区分（右）。

© The Seismological Society of Japan

Room D | General session：S10. Active Faults, Historical Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM JST | Wed. Sep 18, 2019 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM D International Conference Halls I

[S10]AM-1

chairperson:Kentaro Imai(JAMSTEC), Takashi Hirai(Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S10-01] Development of historical earthquake activity database using hisitrical source journals in Japan

*Akihito Nishiyama[1,2], Masaharu Ebara[3,2], Rei Mizuno[1,2], Seiya Yoshioka[1,2], Akihiko Katagiri[4], Yusuke Oishi[5,1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Collaborative Research Organization for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, The University of Tokyo, 3. Historiographical Institute, The University of Tokyo, 4. Faculty of Humanities, Niigata University, 5. Fujitsu Laboratories Ltd.)

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

[S10-02] Ansei Tokai and Nankai Earthquakes Depicted on Kawaraban Newspapers: Mainly on Those Stored in the Disaster Management Library

*Takashi Hirai[1] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S10-03] Re-examination of the tsunami source for the 1854 Ansei Tokai earthquake along the Nankai Trough

*Kentaro Imai[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,2], Ryoko Obayashi[1], Satoshi Kusumoto[1], Takashi Furumura[3] (1. Research Institute for Marine Geodynamics, Reserch and Development Center for Earthquake and Tsunami Forcasting, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

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

[S10-04] Numerical simulation on formation of normal faults based on elasto-plastic mechanics

*Eiji Yamada[1], Toshihiro Noda[2], Kentaro Nakai[2], Akira Asaoka[3] (1. Chubu Electric Power, 2. Nagoya Univ., 3. ADEP)

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

[S10-05] Bayesian inference for recurrent earthquake sequences with uncertain occurrence times

*Shunichi Nomura Nomura[1], Yosihiko Ogata[1] (1. The Institute of Statistical Mathematics)

Development of historical earthquake activity database using hisitrical source journals in Japan

*Akihito Nishiyama[1,2], Masaharu Ebara[3,2], Rei Mizuno[1,2], Seiya Yoshioka[1,2], Akihiko Katagiri[4], Yusuke Oishi[5,1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Collaborative Research Organization for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, The University of Tokyo, 3. Historiographical Institute, The University of Tokyo, 4. Faculty of Humanities, Niigata University, 5. Fujitsu Laboratories Ltd.

§1．はじめに
これまでの歴史地震研究においては，『新収日本地震史料』など既刊地震史料集に収められている諸史料に基づいて，主として特定の被害地震に関する研究が実施され，被害地震のカタログが整備されてきた（宇佐美・他，2013）．その一方で，日記史料から採録され，既刊地震史料集に収められている数多くの有感地震（被害を及ぼさないものの人が揺れを感じることができる地震）の記録については，現状ではほとんど研究の対象とされていない．そこで本研究では，有感地震の記録が数多く含まれている日記史料に着目し，既刊地震史料集ではなく日記史料の原本に基づいて，新機軸のデータベースを構築している．以下では，このデータベースの構成とそれを活用した今後の歴史地震研究の展開について述べていく．

§2．日記史料と有感地震
日記史料には，記主（日記史料の記述者）が記した日々の様々な出来事だけでなく，日付の後もしくは文中に，その日の天気や地震・天文現象といった自然現象が記されている．日記史料にある有感地震の記録（以下，有感記録）は，揺れを感じたという体験とほぼ同時期に，揺れを感じた記主の手で記されているために，記述内容の信頼性は高い．また，ほとんどの日記史料の記主は特定されており，記された場所についてはその屋敷地まで詳細に特定できる場合も多い．さらに，同じ場所で同一の記主によって，十数年から数十年の比較的長期間にわたって書き継がれているために，他の史料に比べて記録内容が安定しているという特徴がある．
日本列島には古代から近世まで約900年という長期間にわたって，膨大な数量の日記史料が現存している．古代・中世については，政治の中心地であった京都や奈良で記された公家や寺家・社家の手による日記史料が圧倒的に多い．江戸時代中期以降は政治体制の確立・安定に伴って，各地の藩の政庁や城下町などでも武士や商人などが日記史料を残すようになり，日記史料の空間分布は全国的に拡大してくる．
日記史料にある有感記録は，記主が揺れを感じた場所における地面や建物の揺れ方を表現しており，揺れによる被害の記述を伴わない場合には，揺れの強さまでは明確にわからない場合が多い．けれども，日記史料が記録された場所において，記主が地震を感じたか感じなかったかは明確である．そのため，人が地震を感じたか感じなかったという有感記録について，広範囲に長期間にわたって集積・分析することで，有感範囲の空間分布や時間変化の検討が可能になってくる．

§3．日記史料有感地震データベースの構築
本研究では，数多くの日記史料を調査・閲覧し，長期間にわたる天気の記述があり，地震の記述が散見されるものを選定している．また，各地の史資料保存機関には未整理の日記史料も収蔵されており，これらについても新規に調査・撮影を行い，データベースの構築に必要な時期や地域の日記史料を収集している．このようにして収集した日記史料の内容を分析し，年月日（太陰暦・太陽暦），時刻（時間帯），天気，地震，自然現象，史料本文（記述の抜粋），所在地といった記述を抽出している．なお本研究では，日記史料の記録の連続性に着目し，有感記録のない日についてもデータ化しており，一ヶ月や一年ごとの有感地震の頻度も把握できるようにしている．
以上のようにして抽出した複数の日記史料データを組み合わせて，日記史料有感地震データベースを構築している．さらに，データベースを地理情報システム上に表示する機能を開発し，有感場所の時空間分布図を作成

© The Seismological Society of Japan

している．現在公開している試作版（2019年5月更新）では，33点の日記史料にある嘉永七年（1854年）～安政三年（1856年）の有感記録が収録されている（http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/eri-hi-cro/database/index.html）．今後は，日記史料の点数と収録期間を順次増やしていき，それに応じてデータベースの構成も改良していく予定である．

§4．おわりに

日記史料有感地震データベースでは，南海トラフ沿いの巨大地震や，それに前後して日本列島で大地震の発生が相次いだ19世紀中頃の期間について，集中的にデータ化を実施しており，当該期の日本列島における地震活動の時空間分布の解明を目指している．また，本データベースを活用して，19世紀中頃の有感範囲のデータと，気象庁の震度データベースにある有感範囲のデータとを比較し，19世紀中頃に日本列島で発生した中・小規模の地震に関する震源決定の可能性も検討している．

© The Seismological Society of Japan

Ansei Tokai and Nankai Earthquakes Depicted on Kawaraban Newspapers: Mainly on Those Stored in the Disaster Management Library

*Takashi Hirai[1]

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

1. はじめに

かわら版は, 江戸時代に普及した時事性の高い内容を扱った印刷物であり, 特に幕末のころに質・量ともに飛躍的な発展を遂げた. おりしも, 江戸時代末期は安政東海・南海地震や安政江戸地震をはじめ災害が頻発した時期でもあり, かわら版は当時の災害報道の媒体のひとつとして研究の対象になってきた（たとえば, 北原 [1] など）. かわら版は無許可の出版物であり, 発行者や発行時期を詳細に特定できることは少ない. そのため, 歴史地震研究に供する史料としての有用性を担保することは難しい. しかしながら, 当時の人々が震災の状況をどのように把握したか, あるいは, どのように対応したかという観点においては, 見るべきものがあるようにも思われる.

本稿では, 名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会の活動の一環として, 公益社団法人全国市有物件災害共済会防災専門図書館所蔵のかわら版の翻刻を進めていることを紹介し, 特に多数を占める安政東海・南海地震についてのかわら版の内容吟味と利用について報告する.

2. 防災専門図書館所蔵のかわら版

公益社団法人全国市有物件災害共済会防災専門図書館は, わが国で唯一の災害関係の資料を専門に扱う図書館である. 火災や地震をはじめとした災害に関するかわら版も多数収蔵しており, ホームページ上で閲覧することができる [2]. 内容の内訳は, 火災35点, 風水害6点, 地震49点である. 地震の中では1855年安政江戸地震19点, 1854年安政東海・南海地震16点, その他の地震14点である. 名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会では, 安政東海・南海地震に関するものを中心に翻刻を進めており, その成果を名古屋大学減災館の一般公開スペースに展示している. なお, 一部のかわら版は東京大学情報学環の小野秀雄コレクション [3] に同様のものが収蔵されており, 翻刻にあたり参考にした.

先述の通り, 発行者や発行時期を特定できるかわら版は少ないが, 「諸国大地震並大津浪」と「諸国大地震大津波弐編」については, 発災翌月の安政元年十二月二十日までの間に発行されたと推定される. これは, 豊橋市美術博物館所蔵「柴田家文書」にかわら版と同じ文章が引用されており, 末尾に「安政元年十二月廿日写之」とある [4] ことから判明したものである.

3. 利用例

防災専門図書館所蔵のかわら版のひとつ「諸国大地震大津波末代噺」を取り上げる（図1）. これは, 安政東海・南海地震による各地の被害状況などを36ますのすごろくに仕立てたものである. 振り出しと上がりはともに大阪であり, 「世直り」や「目出度い」などの文言が多いことから, おそらく大阪で出版されたものであろう（「世直り」または「世直し」は当時近畿地方で唱えられた地震除けの呪文とされる [5]）.

著者らは, これをA0サイズの布に印刷し, 名古屋大学減災館の一般公開時間やイベント「キッズデー」において, 実際にすごろく遊びを行った（図2）. 各ますに書かれている内容は, そのままでは一般には解読が難しいため, あらかじめ翻刻した資料を作成して配布した. また, 必ず古文書勉強会のメンバーが付き添い, 駒が止まったますごとに解説を行った. 参加者からは, 「止まったますごとの解説があるからおもしろい. 解説カードなどを作るとよいのではないか」などの意見が聞かれた.

4. 課題

今後も引き続き, 防災専門図書館所蔵のかわら版を中心に, 翻刻を進める. 同時に, 新たな史料も発見しつつある

© The Seismological Society of Japan

ので, これについても翻刻を行う. すごろく「諸国大地震大津波末代噺」については, さらに内容の調査を行い, 解説を充実させていく予定である.

謝辞
本稿の作成にあたり, 防災専門図書館所蔵のかわら版を参照した. 解読にあたっては, 名古屋大学大学院文学研究科・石川寛特任准教授の指導と名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会のメンバーの協力をいただいた. それぞれ, ここに記して感謝の意を表する. なお, 本稿は古文書勉強会の一員でもある元名古屋大学大学院生・森脇美沙氏の報告 [6] をもとに再構成したものである.

参考文献
1) 北原糸子：地震の社会史ー安政大地震と民衆ー, 吉川弘文館 (2013)
2) 防災専門図書館：火災・地震関係かわら版, https://www.city-net.or.jp/htmls/ (2019年7月17日閲覧)
3) 東京大学情報学環：小野秀雄コレクション, http://www.lib.iii.u-tokyo.ac.jp/collection/ono.html (2019年7月17日閲覧)
4) 平井敬：柴田家文書に記された安政東海・南海地震, 日本地震学会2017年秋季大会, S10-P06 (2017)
5) 武者金吉：地鯰居士雑筆, 地震学会誌11, 2, pp.85-86 (1939)
6) 森脇美沙：防災専門図書館所蔵 災害関係かわら版の減災啓発教材としての活用 ー名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会の活動報告ー, 中部「歴史地震」研究年報7, pp.169-177 (2019)

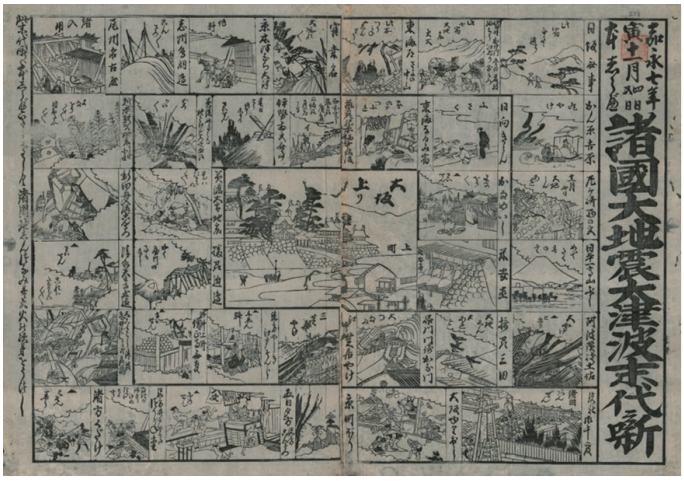


図 1　諸国大地震大津波末代噺



図 2　すごろく遊びの様子

© The Seismological Society of Japan

Re-examination of the tsunami source for the 1854 Ansei Tokai earthquake along the Nankai Trough

*Kentaro Imai[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,2], Ryoko Obayashi[1], Satoshi Kusumoto[1], Takashi Furumura[3]

1. Research Institute for Marine Geodynamics, Reserch and Development Center for Earthquake and Tsunami Forcasting, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo

1．研究の目的　南海トラフではM8クラスの巨大地震が90～150年程度の間隔で繰り返し発生し，地震動や津波による大きな被害をもたらしてきた．1707年宝永地震の際には強震動による震害と巨大津波が南海トラフ沿岸に来襲した．強震動と巨大津波による被害は，1854年に発生した安政東海・南海地震，1944年昭和東南海地震，1946年昭和東海地震においても南海トラフの沿岸部で繰り返し起きている．これらの南海トラフ巨大地震の周期性として，これまでは一定のプレート運動速度に基づき，固有の地震断層面における再来発生間隔が受け入れられてきた（例えば，石橋・佐竹, 1998）．一方，瀬野（2012）は，安政東海地震と昭和東南海地震の強震動生成領域が相補的であった可能性を指摘し，昭和東南海地震が安政東海地震の一部で起きたという従来の考えに疑問を呈している．津波波源域についても同様の観点から再解釈が必要である．安政東海地震の波源モデルについては既往研究（Ando，1975; Ishibashi, 1981; 相田, 1981; 安中・他, 2003）で検討されているが，いずれも１～2枚の矩形断層モデルであり，昭和東南海地震の波源域との相補関係を比較できる分解能ではない．本研究では，安政東海地震の震源域に近い紀伊半島から伊豆半島に至る太平洋沿岸における津波痕跡分布を説明するための波源について再検討を行い，昭和東南海地震の波源域との関係性について議論する．

2．研究内容　本地震による津波痕跡高は既往研究（羽鳥，1977；都司・他，1991，行谷・都司，2005；都司・他，2013；都司・齋藤，2014；今井・他，2017）と，史料集の再精査によって得られた史料とそれに基づいた津波痕跡高（今井・他，2019）を用いた．これらによる安政東海地震津波の津波痕跡高さ分布には2つのピークがあり，志摩半島東端の国崎で22 mに達していた．もう一つのピークは伊豆半島南東の入間で，津波痕跡高さが15mを超えていた．

波源断層モデルは安中・他（2003）の2枚の矩形断層で構成されるモデルを基に，東海震源域では走向方向に3分割，傾斜方向に2分割，東南海震源域では走向方向に5分割，傾斜方向に2分割の小断層を設定した．各小断層による津波のグリーン関数は線形長波理論（空間格子間隔150 m，時間間隔0.2 s）で計算し，津波高分布を説明するための断層のすべり量分布はSA（Kirkpatrick et al., 1983）を用いて推定した．津波痕跡高には，誤差に基づくバラツキを一様乱数で考慮し，10,000回の試行から各小断層のすべり量を評価した．

3．主な結論　本研究で得られた波源断層のすべり量分布（図１）の特徴として，御前崎沖，遠州灘沿岸および志摩半島沖では10 mにおよぶ大きな断層すべりとなった．一方，志摩半島沿岸ではほとんどすべりが生じていない領域が存在することがわかった．昭和東南海地震の波源モデル（例えば，Baba et al., 2005）では志摩半島沿岸では大きな断層すべりが生じていたことを照らし合わせると，津波励起領域の一部においては相補関係が示唆される．

謝辞　本研究はJSPS科研費（16H03146），H25-R1年度文部科学省「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構　金田義行）の一環として行われました．

© The Seismological Society of Japan

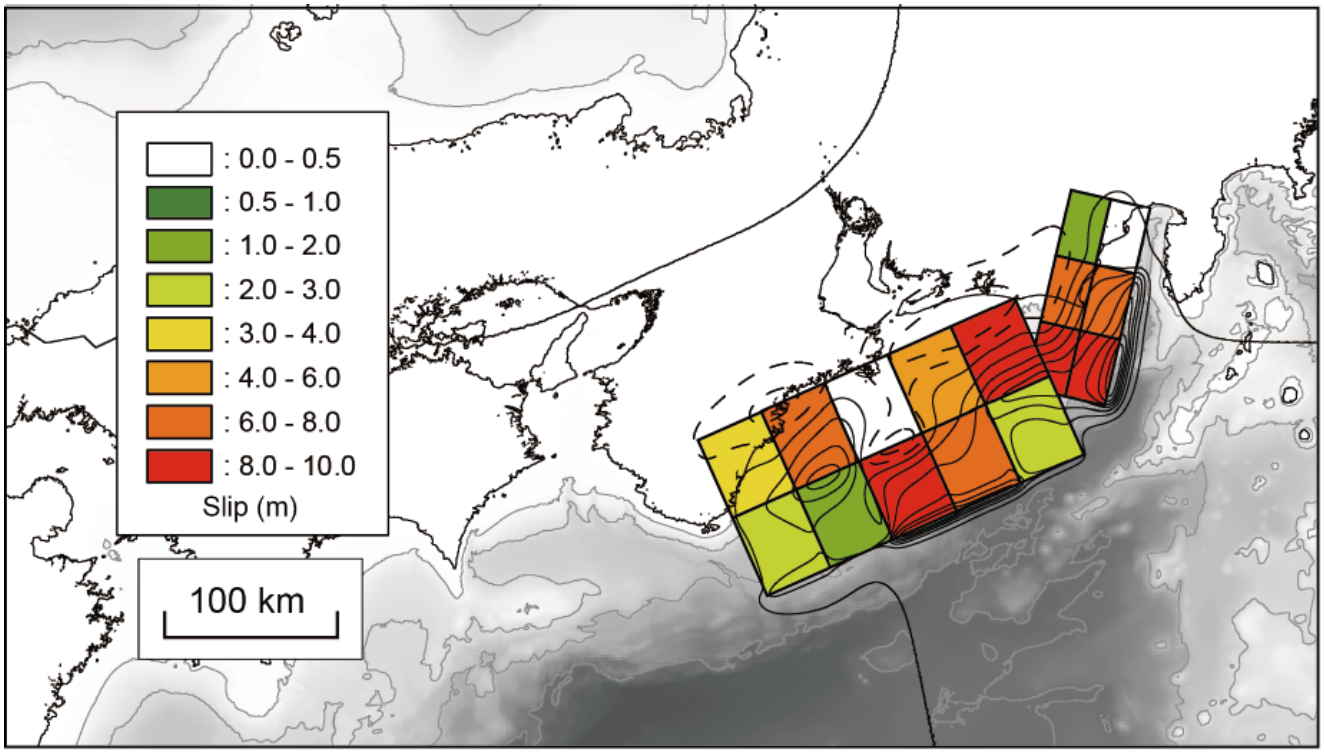


図 1　本研究による安政東海地震の波源断層モデル . 図中のコンターは地殻変動量を示し，実線は隆起，破線は沈降，その間隔は 0.5 m である.

© The Seismological Society of Japan

Numerical simulation on formation of normal faults based on elasto-plastic mechanics

*Eiji Yamada[1], Toshihiro Noda[2], Kentaro Nakai[2], Akira Asaoka[3]

1. Chubu Electric Power, 2. Nagoya Univ., 3. ADEP

１．はじめに

地盤内に「正断層」が確認されると，それが「活断層」であるかどうかの判定が難しく，その成因が争点となることもある。本報告では，地盤の隆起に伴う傾斜によって形成されたと考えられる正断層群についての数値ミュレーション結果を紹介する。**図１**に示す水平堆積海底地盤を対象とし，地盤の堆積後は続成作用により固結が進行して強度が増加する点に注目して，固結状況が異なる３種類の地盤が傾斜する際の地盤挙動を調べた。計算には，骨格構造の働きに着目した土の弾塑性構成式SYS Cam-clay model[1)]を搭載し，慣性力を考慮した水～土骨格連成有限変形解析コードGEOASIA[2)]を用いた。

２．計算の前提

堆積直後のふわふわの未固結の粘土の状態から，現在の固結した軟岩のような状態まで続成作用が進行して粘土の物性が変化するには，500万年とも言われる大変長い時間経過が必要である。地盤の隆起とそれに伴う傾斜などのイベントは，それが地震によるものか緩慢な地殻変動によるものか原因はいろいろ考えられても，それに要する時間は，500万年から見れば短時間のイベントとみなすと，地盤傾斜の進行中には地盤の「硬さ」が変化することは考えなくてもよい。

３．計算結果

以上を前提に，未固結から固結まで続成作用が進行中の様々な状態の粘土を弾塑性構成式上で再現し，傾斜が進行する地盤でどのようなすべりが生じるかを調べた。**図２**は，未固結～半固結状態にある地盤が傾斜する際のせん断ひずみ分布を示す。傾斜が進行すると，せん断ひずみの局所化が進展し，すべり線が地表面から深部に向かって発生する。すべり線は経時的に位置を変えて次々と地盤内に発生し，シャベルを掘り入れた時のような形のリストリックな正断層群が形成される（**図４【地盤２】**）。**図３**は，正断層群形成時の地盤状態を示す。すべり線に沿ってブロックは後方回転し，砂分優勢として設定した地盤下層では圧縮領域が広がることによって浅部の変位が吸収され，すべり線は不明確になっている。**図４**は，地盤の固結状態ごとの正断層群形成状況を示すが，リストリックな正断層群が形成される地盤物性は「ごく限定的」であることが計算によって確かめられた。未固結～半固結状態より軟らかい堆積直後の状態では，地盤は流れるだけ（**図４【地盤１】**）であり，それより硬ければ，すべり線は現れない（**図４【地盤３】**）。

４．おわりに

以上の計算結果は，（１）未固結～半固結状態で形成された正断層群は，時間が経過して固結が進行すると再度すべりが起こらないことを示すとともに，（２）続成作用による固結化の経年的進行の度合いと照らし合わせることにより，リストリックな正断層群が発現した年代を推定する新しい力学的な手法が存在することを示唆している。

【参考文献】

1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, 42(5), pp.47-57.
2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil skeleton-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay mode, Soils and Foundations, 48(6), pp.771-790.

© The Seismological Society of Japan

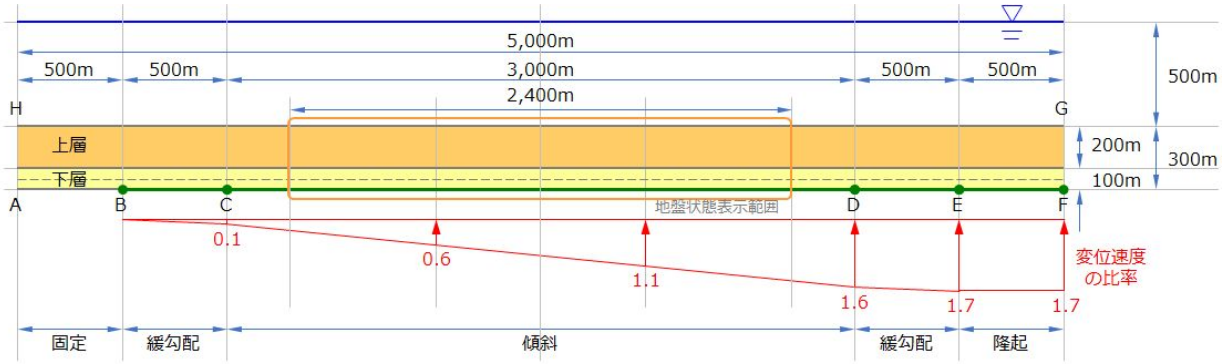


図１　計算領域

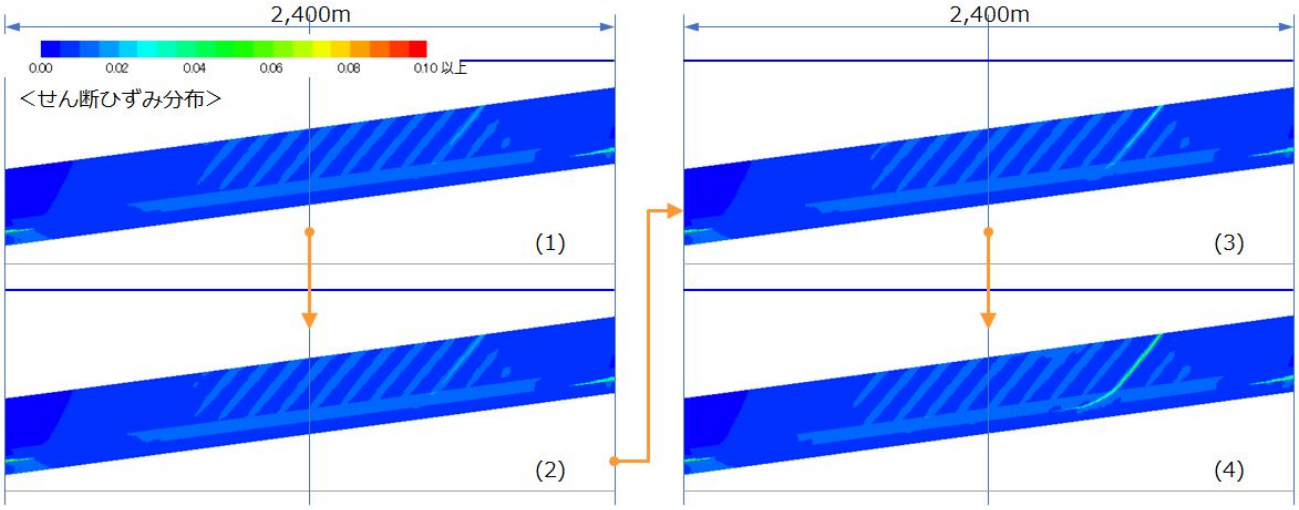


図２　正断層の形成過程

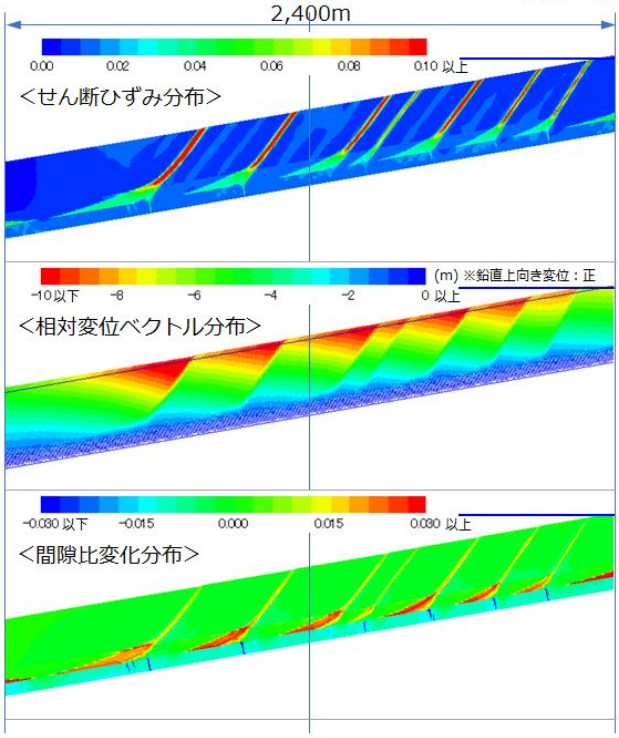


図３　正断層群形成時の地盤状態

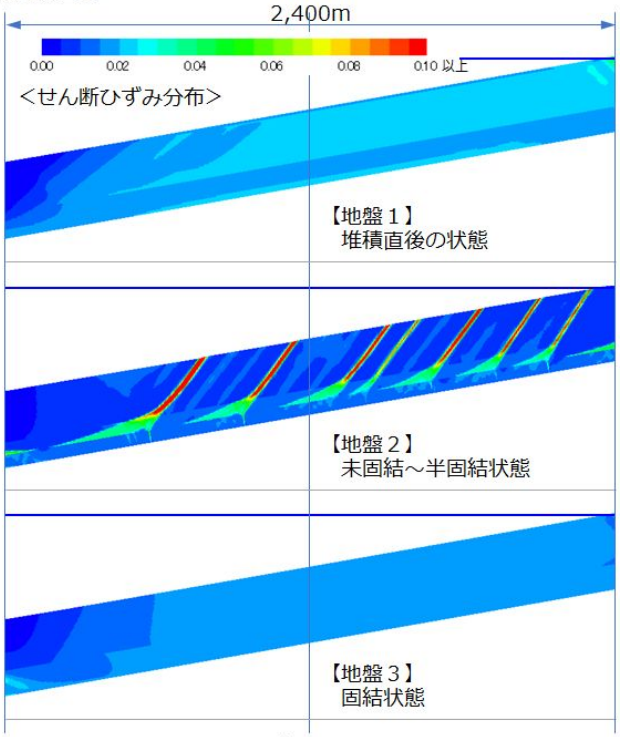


図４　固結状態ごとの正断層群形成状況

© The Seismological Society of Japan

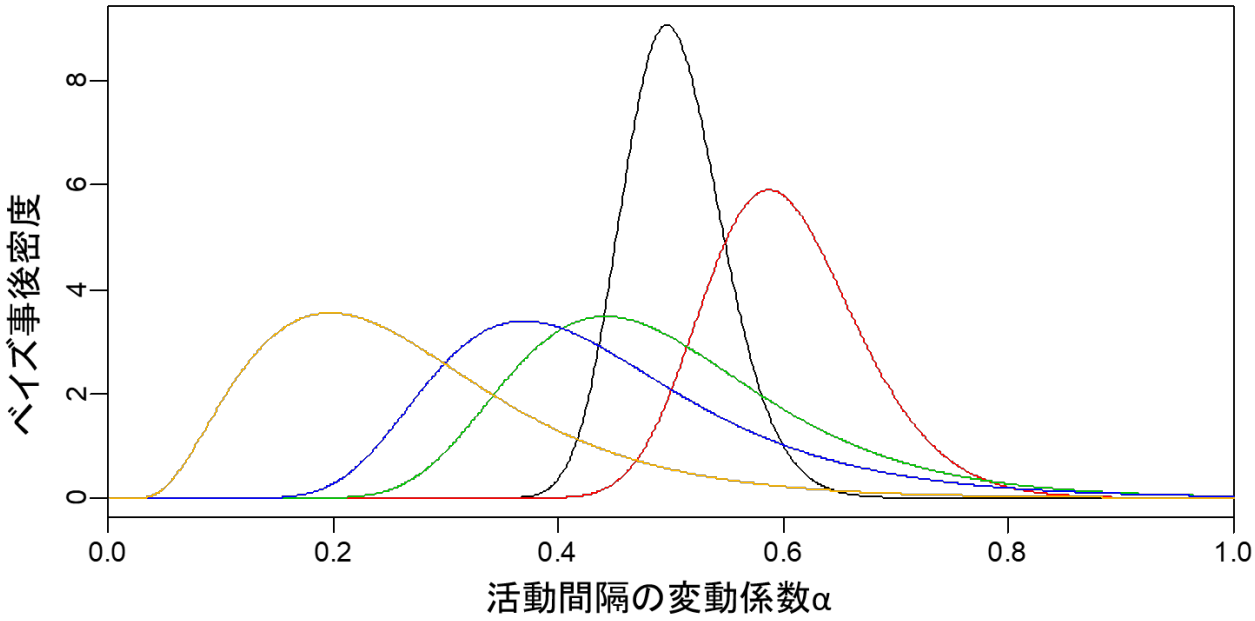
Bayesian inference for recurrent earthquake sequences with uncertain occurrence times

*Shunichi Nomura Nomura[1], Yosihiko Ogata[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

不確定な発生時期をもつ繰り返し地震の更新過程におけるパラメータ推論について議論する。点過程理論における厳密な尤度および将来発生確率の評価は、不確定な発生年代に関する多重積分を含むため、数値的に計算することさえしばしば困難となる。代わりに、不確定な発生履歴のモンテカルロシミュレーションは、それぞれのシミュレートされた履歴について尤度や将来確率を計算し、それらの単純平均をとることによって評価に利用することができる。本稿ではBrownian Passage Time (BPT)分布更新過程をベースとしたベイズモデルを提案し、地震本部が公開する日本の内陸主要活断層カタログのうち、少なくとも2つ以上の最新のイベントが特定されたセグメントへと適用する。モンテカルロシミュレーションは数値積分とほぼ同じ結果をもたらすことが示される。パラメータ推論では、地震本部と同様に全国の内陸主要活断層で共通した再来間隔の変動係数を仮定する。日本の73の内陸主要活断層のカタログから、共通の変動係数として0.50というベイズ推定値が得られる。これは、地震本部による長期評価で現在適用されている0.24という変動係数の推定値よりも相当に大きい。変動係数の推定値の違いは、いくつかのセグメントにおける長期確率予測に重大な影響を及ぼす。また、仮想活断層のパラメータ推論と予測の数値実験を示し、ベイズ推定およびベイズ予測を最尤推定に基づくプラグイン法と比較する。さらに、変動係数を全国一律に設定するのが適切であるかどうかについて検討を行い、断層別あるいは集約された地域別での変動係数のベイズ推定を行う。

© The Seismological Society of Japan



図：地震本部により最新活動時期と1つ前の活動時期が推定されている73セグメントから導出される、変動係数のベイズ事後分布。黒線は全国共通とした変動係数の事後密度を表し、赤、緑、青、黄線はそれぞれ関東地方＋中部地方、近畿地方、四国地方、九州地方に位置するセグメントで共通とした変動係数の事後密度を表す。

© The Seismological Society of Japan

Room D | General session：S10. Active Faults, Historical Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM D International Conference Halls I

[S10]AM-2

chairperson:Kyoko Kagohara(Faculty of Education, Yamaguchi University), Tetsuro Tsuru(Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S10-06] **An example of subsea and subseafloor imaging by seismic reflections in Uchiurawan off Numazu**

*Tetsuro Tsuru[1], Jin.-O. Park[2], Kosaku Arai[3], Seishiro Furuyama[1], Kazuo Amakasu[1], Keiichi Uchida[1], Mayu Ogawa[1], Shio Shimizu[1], Tetsuo No[4], Yasuyuki Nakamura[4] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S10-07] Offshore active fault survey on Tokachi-Heiya fault zone: Characteristics and distribution of the active structures

*Takashi Ogami[1], Shintaro Abe[2], Yashito Uchida[3], Kenji Nishina[3], Ryoyu Arai[4], Takahiro Kubo[4], Kenjiro Mukaiyama[4] (1. AIST, 2. ADEP, 3. HRO, 4. KGE Co., Ltd.)

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

[S10-08] Offshore active fault survey on Tokachi-Heiya fault zone: Paleosesimic activities based on vibrocoring surveys

*Yasuhito Uchida[1], Kenji Nishina[1], Takashi Ogami[2], Shintaro Abe[3], Ryoyu Arai[4], Takahiro Kubo[4], Kenjiro Mukaiyama[4] (1. HRO, 2. AIST, 3. ADEP, 4. KGE Co., Ltd.)

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

[S10-09] Active tectonics in the northern part of Yamagata Basin, northeast Japan.

*Kyoko Kagohara[1], Shinsuke Okada[2], Hideki Kosaka[3], Atsushi Miwa[6], Kohei Abe[6], Tomoo Echigo[5], Toshifumi Imaizumi[4] (1. Faculty of Education, Yamaguchi University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. Kankyo Chishitsu Co., Ltd, 4. Emeritus professor of Tohoku University, 5. Geo-Research Institute, 6. OYO Corporation)

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

[S10-10] Are "the long-term evaluations of active faults" consistent with the Quaternary crustal movements in the Osaka plain and the Nara basin ?

*Ichiro Kawasaki[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

An example of subsea and subseafloor imaging by seismic reflections in Uchiurawan off Numazu

*Tetsuro Tsuru[1], Jin.-O. Park[2], Kosaku Arai[3], Seishiro Furuyama[1], Kazuo Amakasu[1], Keiichi Uchida[1], Mayu Ogawa[1], Shio Shimizu[1], Tetsuo No[4], Yasuyuki Nakamura[4]

1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

１．はじめに

海底下の地質構造を高精度に映像化する手法として、反射法地震探査がよく用いられる。また、この手法は、海水の温度や塩分の違いで生じる反射波を利用することによって海洋物理学的研究にも応用されている（中村, 2008；横田ほか, 2010）。しかしながら、これらは、海底下あるいは海中のいずれかを探査対象としてデータ解析が行われており、海中から海底下までを統一的に映像化するための手法は未だ開発の余地がある。筆者らは、海底から湧出する流体およびその湧出経路のイメージングを目的として海中海底下統合イメージングの開発を目指しており、今回、沼津沖内浦湾において反射法地震探査データを使った海中海底下イメージングを試みた。

沼津沖内浦湾は駿河湾の北東奥部に位置し、東に富士川河口断層帯および西には丹那断層が南北に走っていることから、活構造を目的とする調査海域として適している。また、音波探査等による既存研究において、いくつかの断層の存在が明らかになっている（たとえば、佐藤, 2014）。

２．手法

海中海底下統合イメージングの最終目標は、計量魚群探知機データと反射法地震探査データとの統合である。従来、計量魚群探知機は音波で海中の生物を、反射法地震探査は地震波で海底下の地質構造を観測する手法であり、各々、探査対象のイメージングに適した分解能を有している。すなわち、前者では数10～数100kHz、後者では10～数100Hzの周波数帯域が使われることが多い。そのため、振源（音源）としては、前者では圧電素子、後者では主にエアガンが用いられる。本研究における探査対象が湧出流体および湧出経路であることから、必要な周波数帯域としては数10～数10kHzであろうと考えている。よって、まずは、数10～数kHzの周波数帯域を有し、安価な価格で購入できる水中スピーカーを振源として利用している。

データ処理については、現時点では従来型の反射法地震探査データ処理のみを適用しており、計量魚群探知機と反射法地震探査データの統合処理については、分解能の違いを克服する手法を現在検討中である。また、従来型の地震探査データ処理に加え、今回は、減衰特性をマッピングする減衰プロファイリング法（Tsuru et al., 2017; Shimizu, 2018）を実施した。これは、反射波が不明瞭な場所で断層の解析を容易にするためである。

３．実験概要

2018年8月7日、沼津沖内浦湾の水深約80mの海域において、測線長約560mの東西測線20本の反射法地震探査データを収録した。測線間隔は10mである。発振は6sおきに水中スピーカーから非パルス波を出力し、受振は16chのストリーマーケーブルを使用した。グループ間隔は3.125mである。なお、ストリーマーケーブルは産業技術総合研究所殿からお借りした。収録されたデータは、発振波形との相互相関を計算することにより、パルス波に変換した。調査に使用した船舶は、株式会社オキシーテックの計測船「第二いこい丸」（17トン）である。

４．結果

観測データを処理した結果、面積にして約560m×200mのミニ3D地震探査データが得られた。まず、海底下の構造については、連続性の良い反射波が見える場所では、反射断面上での反射波のずれにより活断層と解釈される断層の発達が観察され、タイムスライス上でそれらの走向が確認できた。一方、反射波が不明瞭な場所

© The Seismological Society of Japan

では、従来型のタイムスライスでは断層は確認できないが、減衰プロファイリングから作成したQスライス上で断層の発達が確認できた。
海中については、1測線（ND1808-10）において海底から上昇する流体であろうと考えられる音波の散乱現象が見られた。速度解析により、その場所の海中音速を調べた結果、1600m/sと周囲の平均音速1500m/sより優位に大きいことが明らかになった。海中音速は、温度と塩分の関数であり、温度による変化の方が大きいことから、今回観測された流体は現時点では海底下から湧出した流体（水）であろうと推定している。また、興味深いことに、その流体は断層が途切れた場所から湧出しているように見える。

５．まとめ
反射法地震探査データを用いて、海中海底下イメージングを試みた。その結果、海底下に発達する断層および断層近傍から湧出したと推定される流体を観測によって捉えることができた。今後は、計量魚群探知機データとの統合イメージングによる、より高精度な湧出流体の観測手法の開発を目指す。

© The Seismological Society of Japan

Offshore active fault survey on Tokachi-Heiya fault zone: Characteristics and distribution of the active structures

*Takashi Ogami[1], Shintaro Abe[2], Yashito Uchida[3], Kenji Nishina[3], Ryoyu Arai[4], Takahiro Kubo[4], Kenjiro Mukaiyama[4]

1. AIST, 2. ADEP, 3. HRO, 4. KGE Co., Ltd.

平成30年度文部科学省委託「内陸及び沿岸海域の活断層調査」の一環として，十勝平野断層帯の海域延長部における活断層の分布・性状および活動性を明らかにすることを目的として，海底活断層調査を実施した．本講演では，調査によって明らかになった海底活断層の分布・性状について報告する．

十勝平野断層帯は，陸域において断層帯主部と光地園断層に区分されている（地震調査研究推進本部，2005）．それらのうち光地園断層は，北西–南東走向を持ち，断層の北東側が相対的に隆起する逆断層によって構成されている．光地園断層は海岸線まで達していると推定されるが，海域延長部における活断層の分布は不明である．そのため，さらに沖合の海域において海底地質図（辻野・他，2014）に記述されている活構造と，陸域の光地園断層との関係も不明である．したがって，光地園断層の海域延長部における地質構造および活構造の分布を高い空間分解能で明らかにすることによって，断層帯の南端位置を明らかにする必要がある．

光地園断層の海域延長部における地質構造を精度良く把握するため，マルチチャンネル反射法音波探査を実施した．探査測線は，推定される海底活断層の走向に直交する向きに，水深50 m以浅の海域ではブーマーを音源として8測線（陸側から順に，B1～B8測線），水深50～600 m程度の海域では容積15 inch^{3}のウォーターガンを音源として7測線（陸側から順に，W1～W7測線）を配置した．構造を対比できるようにB8測線とW1測線を同一線上に配置し，検測線をそれぞれの海域に1測線配置した．受信部にはチャンネル間隔2.5 mの12 chストリーマーケーブルを使用した．ウォーターガンを音源とした探査測線W2における断面図を図に示す．

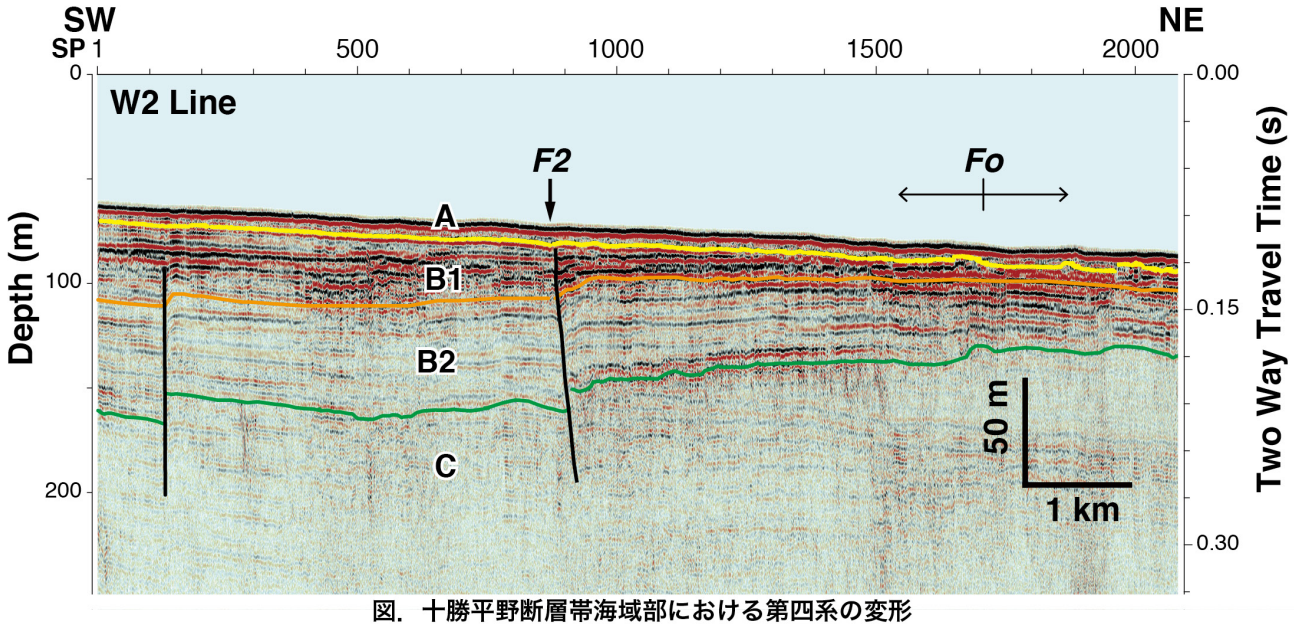
調査対象海域の層序は，音響層序および既存の海底地質図の成果にもとづき，沖積層（A層），上部更新統（B1層），中部更新統（B2層），下部更新統ないし鮮新統以下（C層）に区分できる（図）．ブーマーを音源とした探査記録断面にもとづいて，光地園断層の海域延長部において，B1層を累積的に上下変位させる逆断層（F1断層およびF2断層）が確認できる．また，ウォーターガンを音源とした探査記録断面にもとづいて，ブーマー探査で確認できたF2断層を追跡できる（図）．さらに，B2層およびB1層の累積的な褶曲変形にもとづいて，逆断層（F3断層）が推定できる．これらの断層は断層の北東側を相対的に隆起させている．F1断層およびF2断層は，最も陸側の測線（B1測線）まで連続的に認識できるため，陸域の光地園断層に連続すると判断される．これらの断層は，海域によっては2～3条に分岐している．F2断層およびF3断層の北東側には活背斜（Fo背斜）が分布している（図）．Fo背斜は非対称性（背斜の南西翼の傾斜が相対的に急勾配）を有しており，F2断層およびF3断層の関連褶曲であると判断される．これらの活構造による変位はA層／B1層境界（侵食面）およびA層には確認できない．F2断層はB1層を累積的に上下変位させており， B8測線およびW1測線におけるB1層基底面の上下変位量は約14 mである．

断層帯の海域延長部には，活背斜（Fo背斜）の南西側にF1断層，F2断層，F3断層が並走して分布していることが明らかになった．断層帯の海域部における活構造の配置は，十勝平野断層帯主部と類似している．このことは，両者が同様の応力場で形成されてきたことを示唆する．本研究で明らかになったF1断層はB1測線～B6測線の範囲，F2断層はB1測線～W4測線の範囲，F3断層はW3測線～W5測線の範囲，Fo背斜はW1測線～W5測線の範囲に，それぞれ連続的に確認できる．一連の活構造はW6測線に至って認識できなくなる．そのため，断層帯の海域延長部に分布する活構造の南端位置は，W5測線とW6測線の間にあると推察される．以上にもとづくと，断層帯の海域部の長さ（海岸線から活構造の南端）は，最長で約33 kmとなる．また，陸域

© The Seismological Society of Japan

における光地園断層と断層帯の海域部を合わせると，その断層長は約58 kmとなる．

地震調査研究推進本部（2005）：十勝平野断層帯の評価．23 pp.
辻野・他（2014）：襟裳岬沖海底地質図，海洋地質図，no.83(CD)，産業技術総合研究所地質調査総合センター．



図．十勝平野断層帯海域部における第四系の変形

F2 断層は上部更新統（B1 層）および中部更新統（B2 層）を累積的に変位させる．完新統（A 層）の変位は確認できない．Fo 背斜は F2 断層に伴う断層関連褶曲と判断される．

© The Seismological Society of Japan

Offshore active fault survey on Tokachi-Heiya fault zone: Paleosesimic activities based on vibrocoring surveys

*Yasuhito Uchida[1], Kenji Nishina[1], Takashi Ogami[2], Shintaro Abe[3], Ryoyu Arai[4], Takahiro Kubo[4], Kenjiro Mukaiyama[4]

1. HRO, 2. AIST, 3. ADEP, 4. KGE Co., Ltd.

講演者らは平成30年度文部科学省委託「内陸及び沿岸海域の活断層調査」の一環として，十勝平野断層帯の海域延長部における活断層の分布・性状および活動性を明らかにすることを目的とした海底活断層調査を実施した．本講演では主に，完新世～後期更新世における断層の活動性に関して得られた結果を報告する．

十勝平野断層帯は，北海道十勝平野にほぼ南北に分布する東側隆起の逆断層を主体とする活断層帯である．本断層帯の陸域はその分布形態から主部と光地園断層とに区分されている（地震調査研究推進本部，2005）．南部の光地園断層の長さは約26 kmで北西−南東方向に延びており，その南端は海岸付近に達している可能性が指摘されていた．これまで光地園断層の海域延長部における活構造の分布に関する資料は確認されていなかったが，講演者らによる調査によって，その分布・性状が初めて明らかになった（本学会，同セッションにおける講演：大上・他，2019）．

これまで陸域で実施された調査によって，光地園断層における活動時期や活動に伴う上下変位量に関するデータが得られてきているものの（地震調査研究推進本部，2005；産業技術総合研究所，2013），将来の活動を明確にするためには平均活動間隔を精度良く求める必要がある．しかしながら，海域における断層の活動履歴や変位量に関する情報は得られていない．そのため，本調査では海底下浅部の堆積構造を高分解能で把握するとともに，堆積物を採取して具体的な年代軸を入れることによって，活動履歴や変位量に関する情報を取得することを目的とした．本調査によって海域で取得した情報と陸域での結果を総合することによって，断層帯の活動性をより明確にできる可能性がある．

本調査では，陸域の光地園断層の想定される延長部海域において，高分解能音波探査および柱状採泥調査を実施した．音波探査測線は，底質採取調査が可能な海域（概ね水深50 m以浅）において，推定される海底活断層の走向に直交方向に８本の測線と検測線を１本設置した．音波探査は，ブーマーを音源としたマルチチャンネル音波探査（大上・他，2019）に加えて，海底表層を高解像度で探査が可能な高周波音源を用いたパラメトリック方式シングルチャンネル高分解能音波探査を実施した．得られた反射記録断面に基づいて，底質採取地点を選定し，合計5地点の底質採取地点においてバイブロコアラーを用いた柱状採泥をおこなった．採取した堆積物試料は肉眼およびCTスキャナを用いた観察を実施し，堆積物試料から得られた年代試料の年代測定を実施した．

高分解能音波探査結果と海底地質図等の既存資料からは，本調査対象海域の海底下浅部には上位からA層，B1層が分布している．ブーマーマルチチャンネル記録断面によれば，陸域の光地園断層の海域延長部において，大上・他（2019）に述べられているように，B1層を累積的に上下変位させるF1，F2の二条の逆断層が確認できる．これらF1，F2断層は調査域の最も陸側の海岸線付近まで連続的に認識されることから，陸域の断層に連続している可能性が高い．しかし，F1，F2断層による変位はＢ１層内部にとどまりA層／B1層境界面やA層内部においては確認できないことから，B1層の形成期間中にF1，F2断層による断層活動が2回以上存在したものの，A層／B1層境界面が形成されて以降は両断層による断層活動は存在しないと判断される．

さらに，後期更新世以降における断層の活動時期を検討するために，A層，B1層の具体的な年代決定を目的として堆積物中から得られた貝化石及び植物化石を対象とした放射性炭素年代測定をおこなった．堆積物コア試料の観察，音波探査記録断面との対比によって，コア試料を下位からb～a2～a1の3つの堆積ユニットに区分

© The Seismological Society of Japan

した．堆積ユニットbはMIS 3に相当する放射性炭素年代（46.3 cal kBP）を示す氾濫原堆積物を含んでいる．探査記録断面と比較すると，本ユニットはF1断層によって変形を受けているB1層に対比される．上位の堆積ユニットa2（放射性炭素年代4.16－7.35 cal kBP）および堆積ユニットa1（放射性炭素年代1.54－0.73 cal kBP）は，砂礫によって構成される．探査記録断面と比較すると，本ユニットは海進に伴う侵食面（A層／B1層境界面）を介してＢ1層に累重しているA層に対比される．沖側のB7測線上の柱状採泥地点（TKC-8）地点の水深（約－37m）およびA層／B1層境界面の深度（約−65ｍ）と，相対的海水準変動曲線を比較することにより，この侵食面が形成された年代は約12.5 kaと見積もられた．これらから，光地園断層の海域延長部における最新活動は，少なくとも12.5 cal kBP以前でかつ46.3 cal kBP以降にあったと推定される．

地震調査研究推進本部（2005）：十勝平野断層帯の評価．23 pp.
産業技術総合研究所（2013）：十勝平野断層帯（光地園断層）の活動性および活動履歴調査．「活断層の補完調査」成果報告書 No.H24-1．25pp.
大上・他（2019）：十勝平野断層帯海域延長部における活断層調査：高分解能音波探査記録に基づく分布・性状の把握．日本地震学会2019年度秋季大会講演予稿集.

© The Seismological Society of Japan

Active tectonics in the northern part of Yamagata Basin, northeast Japan.

*Kyoko Kagohara[1], Shinsuke Okada[2], Hideki Kosaka[3], Atsushi Miwa[6], Kohei Abe[6], Tomoo Echigo[5], Toshifumi Imaizumi[4]

1. Faculty of Education, Yamaguchi University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. Kankyo Chishitsu Co., Ltd, 4. Emeritus professor of Tohoku University, 5. Geo-Research Institute, 6. OYO Corporation

1. はじめに

仙台湾から奥羽脊梁山脈・出羽丘陵を横断して庄内平野に至る地域は，東北日本弧の中でも南北走向の逆断層や活褶曲が密集する地域である．その中に位置する山形盆地の西縁には，南北約60 km，主に西側隆起の逆断層帯が存在する．このうち山形県大石田町田沢から山形県河北町弥勒寺付近に至る約15 kmの区間では，活断層の地表トレースが複雑に併走・雁行している．さらに，断層群の低下側となる盆地中央部には，河島山丘陵が地形的な高まりとして存在し，その東側を通る活構造の存在も指摘されている（今泉ほか，2001；池田ほか,2002；瀬崎ほか，2016）．本研究では，地表形態が複雑な活断層帯の構造とその発達史を明らかにすることを目的として，地形・地質調査ならびに反射法地震探査及び重力探査を実施した．

本地域の活構造を把握するため，既存研究を踏まえて，本地域の地質を下位より中部中新統の楯岡層，上部中新統の本郷層，鮮新統の左沢層，葉山火山岩類，下部更新統の北山層，中部更新統の山屋層および沖積層とし，これらの分布と構造を調査した．また，本地域の段丘面は，空中写真判読と現地調査，新庄・尾花沢地域の火山灰編年に基づいて高位よりH面，M1面，M2面，L1面，L2面，L3面の6面に区分し，これらを基準として断層変位地形を判読した．反射法地震探査および重力探査は，山形盆地北部を横切るように2本の測線（Line AとLine B）を設定した．Line Aは，村山市西郷地区から大槇までの4.11km，Line Bは，村山市樽石地区から碁点までの3.75kmである．Line AとLine Bは南北に約1.2km程度離れているが，両測線を合わせることで山形盆地北部の断層群を横断する．

2. 地形と地表地質からみた活構造

本研究では，段丘面の分布や形態，断層変位地形，地表地質に基づき，本地域の活断層を5つの断層群（西からF0～F4）に区分した．F0は，出羽丘陵の山地高度不連続に沿って，大高根山北東縁から寒河江川北岸付近に分布する．断層は楯岡層と本郷層の境界に推定され，楯岡層はほぼ直立している．F0を挟んだ山地高度の差は300～500mであるが，断層をまたぐ河岸段丘には変位が認められない．

F1は，丘陵地と盆地の地形境界に沿って，大石田町横山から河北町沢畑付近まで分布する．断層付近でほぼ直立した左沢層が認められる．代表的な変位地形は，樽石川扇状地に発達する北北東-南南西方向のテクトニックバルジであり，断層を挟んだH面とL1面との比高は約40 mである．またL1面の上下変位量は約4 mである．

F2は最上川と丘陵地・盆地境界の間にある逆断層群で，断層に沿って非対称な褶曲や段丘面の山側への傾動が認められる．この断層群には高森山断層（F2a）とその東側に約1 km程度離れて並走する断層（F2b）が含まれる．F2aの代表的な変位地形は，樽石川右岸側の高森山東縁であり，断層を挟んだH面とL2面の比高は約79 mである．また，L1面の上下変位量は約4 mである．F2bの代表的な変位地形は，稲下東側の樽石川右岸側にみられる断層崖であり，その上下変位量はM2面で12 m，L1面で約5 mである．

F3は，河島山東縁に分布する逆断層で，断層の上盤側に非対称な背斜構造がみられ，最上川沿いの段丘面に西への傾動を与えている．最上川は概ねF2とF3との間を穿入蛇行している．代表的な変位地形は，浮沼周辺のL1面に認められる断層崖で，その上下変位量は約5 mである．

F4断層は，地質調査および後述する反射法地震探査から，明らかになった西傾斜の逆断層である．地表に明瞭な変位地形は認められないが，低地内にM面が残存していることやL面のわずかな傾斜変換などが，F3東側の低地が隆起していることの傍証とみることができる．

3. 地下構造と構造発達史

© The Seismological Society of Japan

反射法地震探査および重力探査から，F1～F4は，いずれも西傾斜の逆断層であり，断層面の傾斜を考慮するといずれもF0に収斂することが分かった．F1とF2は，下位よりF2b，F2a，F1と重なるthrust sheetを形成して，地下500～800mのデタッチメントに，F3とＦ4は地下1200～1500mのデタッチメントに収斂することから，分岐する深度を基準として，大きくF1・F2とF3・F4というグルーピングが可能である．断層運動に伴う成長層に基づいて各断層の活動開始時期を推定すると，F1が北山層堆積期，F2が山屋層堆積期となり，過去にF1からF2への前進が起きたことが示唆される．また，F3およびF4の成長層は北山層にみられることから，F2に先行してこれらの断層が活動していたことも推定される．このことは最上川の流路固定に影響したと推察される．今後，総変位量や変位速度にも着目しながら，本地域の構造発達史をより詳細に検討していく．

© The Seismological Society of Japan

Are "the long-term evaluations of active faults" consistent with the Quaternary crustal movements in the Osaka plain and the Nara basin ?

*Ichiro Kawasaki[1]

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

●1970年代の活断層研究の発展期には，大規模活断層の第四紀後半における活動度の等速性が強調された（松田，1977）。しかし，活断層の長期評価を単純に数10万年程度まで線形で外挿すると，等速性の考えや多くの地質学的知見と大きく矛盾するように見える。この矛盾の理由を考えるヒントを得る目的で，上町断層，生駒断層，奈良盆地東縁断層の活断層の長期評価に基づいて累積地震性地殻変動の上下成分を180万年程前まで遡って計算し，間氷期ごとに形成されてきた大阪平野（吉川・他，1987）と奈良盆地（奥村・他，1997）の海成粘土層堆積構造や第四紀基底深度（小池・町田，2001）や，堀家・他（1996）の人工地震探査による地殻構造モデルと比較した。累積地震性地殻変動の計算では，活断層の長期評価に与えられている限りはその断層パラメータを用い，与えられていない場合（主として断層の長さや傾き）は適宜仮定した。計算には，Okada(1985)のプログラムを用いた。
●大阪平野と奈良盆地の海成粘土層堆積構造や人工地震探査の結果などによると，第四紀基底深度は，上町断層西側で1.5km～1.6km，上町断層で0.7km程，東大阪（大阪平野東縁部）で1.6km程，奈良盆地で0.4km程である。
最初のチェックとして，180万年程の累積地震性地殻変動の落差と，第四紀基底深度の落差を比較したが，おおむね調和的である。しかし，深度／高度そのものはまったく調和的でない。それは，弾性論的計算では，縦ずれ断層では，断層ずれの多くは上盤側が受け持ち，下盤側の沈降は小さいからである。
●奈良盆地の海成粘土層堆積構造を見ると，最近80万年程の海成粘土層が欠けている。それは，奈良盆地は，80万年程前以前は，定常的沈降が卓越していたが，80万年程前以降になると定常的沈降が停滞したか，あるいは隆起に転じたことを意味している。吉川・他（1987）の大阪平野の海成粘土層堆積構造も，80万年程以降，堆積速度は遅くなったように見受けられれる。
そこで，堆積速度が変化した時期は80万年前から50万年前まで10万年間隔，それ以前と以降の沈降速度は10m/10万年の間隔で変化させ，「海成粘土層Ma3（86万年程前），Ma6（61万年程前），Ma10（33万年程前）などの堆積時点の深度が100mから0mの間」という拘束条件を満たす解を求めるために試行錯誤を行ったところ，次の「２段階定常的地殻変動説」に至った。
【180万年前から50万年前まで】広域的に70m/10万年程の沈降，
【50万年前から現在まで】広域的沈降は無し。
●この２段階定常的地殻変動と累積地震性地殻変動によって上町断層の下盤側と上盤側の各年代の基底面の深度と地表面の深度を復元すると表１のようになる。＜＞で括った深度は上記の拘束条件を満たしていないものである。生駒断層下盤側（東大阪）と生駒山，奈良盆地中央部に対してもそれなりにプロセスを復元することができる。もちろん拘束条件に矛盾する点も多々あるが，発表者には，予想外に，上記の海成粘土層構造や先行研究によって推定された古地理とあらまし調和的であるように思われた。
あらましにせよ，調和的であるという事実は，「２段階定常的地殻変動仮説を媒介に，１万年程の証拠によって求められた活断層の活動度が、近似的には，100万年のオーダーまで線形で外挿可能である」ことを示しているように思われる。また，六甲変動は50万年程前頃に始まったとされているが，「断層運動の縦ずれ成分は，50万年程前以前は定常的地殻変動（沈降）によって埋没してきたが，50万年程前以降には地表に顕在化した」ということかも知れない。
もちろん「２段階定常的地殻変動説」による復元案には不確実性は大きいが，定常的地殻変動が無いモデル化や，１段階のモデル化では，海成粘土層の堆積構造を到底説明できないことを強調しておきたい。
●残された主たる問題点は，①断層面の幅と深部の傾斜が不明の場合は適宜仮定したこと，②地殻変動をモデル計算したとき，断層滑りは断層面上で均一としたが，実際には揺らぎがあると考えられること，③断層面の幅が30 kmで，累積断層ずれが1000mだと，弾性歪み0.03になる。こんな大きな歪みは通常の線形弾性理論の

© The Seismological Society of Japan

適用限界から外れること，④堆積層底部における地層の圧密などは考慮していないこと，⑤定常的地殻変動（速度）が50万年程前頃に変化したのなら，活断層の活動度，従って地震性地殻変動も変化した可能性があることなどであろう。

参考文献
堀家・他，地震第2輯，第49巻，193ー203，1996.
小池・町田編，『日本の海成段丘アトラス』，2001.
松田時彦，地団研専報，20，213-225，1977.
岡田篤正，第四紀研究，19，3，263-276, 1980.
Okada,Y., BSSA, 75, 1135-1154, 1985.
奥村・他，地質調査所，51-62，1997.
吉川・他，物理探査学会第77回講演論文集, 114-117, 1987.

表１　上町断層の下盤側と上盤側の各年代における第四紀基底と地表堆積面の深度復元案

年代	上町断層				堆積した地層
	下盤側基底	堆積面	上盤側基底	堆積面	
【180 万年前頃】	−275m 程		−295m 程		
【100 万年前頃】	−975m 程	−35m 程	−675m 程	−25m 程	ピンク火山灰層
【86 万年前頃】	−1098m 程	−8m 程以浅	−742m 程	＜+28m 程＞	Ma3 層
【61 万年前頃】	−1317m 程	−87m 程	−861m 程		Ma6 層
【50 万年前頃】	−1413m 程	沈降速度急減	−913m 程	隆起に転じた	
【33 万年前頃】	−1442m 程	−52m 程			Ma10 層
【12 万年前頃】	−1480m 程		−827m 程	−2m 程	浅海性化石層
【現在】	−1500m 程		−800m 程	+25m 程	中位段丘に成った
現在の深度	ピンク火山灰層 −560m 程 Ma3 層 −410m 程 Ma6 層 −270m 程 Ma10 層 −110m 程		ピンク火山灰層 −150m 程		

直感的に分かりやすいように，沈降はー，隆起は+の符号を付けた。

© The Seismological Society of Japan

Room D | General session：S14. Earthquake Prediction and Forecast

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 5:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM D International Conference Halls I

[S14]PM-1

chairperson:Yoshinari Hayashi(Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.), Masajiro Imoto(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] Social Responses to Expert Questionnaires on the Possibility of Earthquake Short-term Prediction

*Yoshinari Hayashi[1] (1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.)

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

[S14-02] Earthquake predictions by the atmospheric ion of different points

*Kenta Watanabe[1], Naoyuki Yada[2] (1. Graduate school of Kanagawa Institute of Technology, 2. Kanagawa Institute of Technology)

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

[S14-03] Measurements of Animal Abnormal Actions for Earthquake predictions

*Naoyuki Yada[1], Kenta Watanabe[2] (1. Kanagawa Institute of Technology, 2. Graduate school of Kanagawa Institute of Technology)

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

[S14-04] Reinvestigation of correlation between groundwater anomalies and earthquakes carried out by an amateur network “Namazu-no-kai” in Japan

*Yoshiaki Orihara[1], Toshiyasu Nagao[1] (1. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.)

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

[S14-05] **High resolution seismicity models using interpolation with Delaunay triangulation**

*Yosihiko Ogata[1] (1. Institute of Statistical Mathematics)

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

[S14-06] Long-term Probability of a Great Earthquake along the Kurile Trench, Japan and its epistemic uncertainty

*Masajiro Imoto[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Social Responses to Expert Questionnaires on the Possibility of Earthquake Short-term Prediction

*Yoshinari Hayashi[1]

1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.

地震の直前予知の可能性について、多くの地震研究者は「難しい」という見解を繰り返し述べているが、市民や行政担当者と研究者の間で難しさについての共通認識が得られているとは言い難い。研究者の中でも地震予知に関する認識は様々で、「破壊現象は偶然に支配される部分が大きいため原理的に無理」ということを強調する人、「科学的には地震予知の可能性があるので今は難しいが研究を続けなければならない」という視点を強調する人、「社会対応まで含めると実用的地震予知の実現は無理」と考える人などがいて、地震予知の難しさについての統一見解のようなものがあるわけではない。また、研究者の間でも認識に幅があるということは、正解や見本のある問題に慣れすぎてしまった人や、強力なリーダーシップに期待しがちな人々には受け入れがたいことであり、このことが社会対応まで含めた地震予知の議論が暴走しやすい一因とも思われる。そこで林(2019, 地球惑星科学連合大会)では、地震予知に至るまでの過程を科学的および社会的要素に分解したアンケート調査を行い、地震研究者が考える地震予知の難しさの定量化・可視化を試みた。

アンケートは日本地震学会の理事15人と代議員123人の合計138人を対象とし、メールまたは対面で依頼し記名での回答を求めた。最終的に90人から有効な回答を得た（有効回答率65%）。

地震予知に至るまでのプロセスは「1.地震前の異常現象の有無」、「2.異常現象の観測可能性」、「3.観測されたデータから短時間で異常を判定できる可能性」、「4.判定した結果を即座に社会に向けて発表できるか否か」という４つの要素に分けて、それぞれについて0%から100%まで10%刻みの数値で回答を求めた（＝予知率）。また、地震予知に関連する情報が発表された時に、地震が発生する確率についても同様に0%から100%まで10%きざみの数値で回答を求めた（＝的中率）。各数値に理論的根拠や観測記録に基づいた根拠を求めることは困難であるが、研究者の経験や直感は無視できないと考えて、擬似的な定量的評価を試みた。

地震予知に至る４つの要素はいずれも地震研究者が考える成功率の幅は大きく、当初想定していたように地震研究者の統一見解は得られなかった。例えば「地震前に異常現象が存在する」は平均値49.3%、中央値50%、標準偏差30.5で0%から100%まで回答の幅があった。

４要素の中で最も困難だと考えられていたのは、観測されたデータから短時間で異常を判定することで、平均値27.9%、中央値20%、標準偏差26.5であった。また、研究者間でもっとも評価がわかれたのは、判定された結果を即座に発表できるか否かであった（平均値40.9%、中央値50%、標準偏差34.6）。これは科学とは関係しない部分で、地震研究者の行政組織への信頼感に幅があることを反映しているものと考えられる。

各研究者が評価した予知率（1×2×3×4）の平均値は5.8%（中央値では1.2%）で非常に低い値となった。また予知情報が出されたときに地震が実際に発生する確率（的中率）の見積もりは平均で19.7%となり、５回情報が出ても４回は地震が起きないだろうという評価になった。

予知に至るまでの４つの要素をそれぞれ単独で見れば、いずれも30%から50%程度は可能性があると評価されており、ある程度は期待できる数値である。この値は静岡県による市民の地震予知への期待値に関する調査における平均値に近い値でもある。しかし地震予知を成功させるには、４つのプロセス全てが成功しなければならないため、最終的な予知率は極めて低くなる。

このような内容についての発表が新聞記者の目にとまり、連合大会の発表前にK通信とY新聞から取材を受け

© The Seismological Society of Japan

た。K通信の配信記事は全国の地方紙や日本経済新聞などに掲載されるとともに、Yahoo!ニュースのトップにも掲載された。取材対応においては研究者の認識に幅が大きいことと、各要素を単独で取り出すと30%から50%と考える研究者が多く、これだけに注目すると地震予知に期待がもてるような印象を与え、それが誤った印象を市民にあたえがちなことを強調したが、記事になる時にはわかりやすさが優先され、予知率の平均値5.8%に、的中率の平均値19.7%をかけた地震予知の成功率は1%という見出しになった。多様性があり、回答の幅もあるので、単純な平均値で結果を説明するのは難しいということを、社会に伝えることの難しさを味わうとともに、ややヒステリックなメールやSNSの反応も多数いただいた。またK通信の配信記事では、見出しの変更や独自取材による識者のコメントの追加が認められており、同じ内容の記事であっても地方によって与える印象に大きな差が見られた。

一方、Y新聞については日本地震学会の会長や、評価検討会の委員長が地震予知は難しいと言っていること、そのものですよねという反応で、こちらは記事になることはなかった。

© The Seismological Society of Japan

Earthquake predictions by the atmospheric ion of different points

*Kenta Watanabe[1], Naoyuki Yada[2]

1. Graduate school of Kanagawa Institute of Technology, 2. Kanagawa Institute of Technology

1. はじめに

我が国は世界でも有数の地震大国であり、大規模地震による被害は甚大である。地震発生前には様々な前兆現象が報告されている(1)。そこで本研究では、地震前兆現象のひとつとされる大気イオン濃度の異常(2)に着目した。

NPO法人e-PISCOでは、全国規模で大気イオン濃度の測定を継続的に行っており、本研究では全国9ヶ所の測定データを使用し、地震発生日時の予測に加えて震央の予測について考察を行った。

2. 測定装置および予測方法

大気イオン濃度の異常値は、地震発生日が近づくに従って減少していく傾向がある。一例として、北海道河東郡音更町における2019年3月から4月の大気イオン濃度のグラフを図1に示す。本研究では、2つの基準値を設定して異常値を判断した。初めに計測された最大異常値をA、その後に再び計測された異常値をBとし、2つの異常値を直線で結ぶことにより、日付軸と交わった前後72時間を地震発生の予測期間とした。

測定期間は2017年3月1日から2019年6月30日までの27ヶ月である。本研究では予測の対象とする地震を「対象地震」と呼称し、各測定地点から半径500 km圏内で発生したマグニチュード (以下Mと略す) 5.0 以上の地震と定めた。なお、発生した地震の情報については、気象庁発行の週間地震概況(3)を参考にした。また、予測期間に複数の対象地震が発生した場合には、最も規模が大きいものを選択した。さらに、複数の測定地点の予測が同時期を示した場合には、「最大異常値 Aの発生が遅かった測定地点が最も震央に近い」と推論を立て簡易的な震央の予測を行った。

3. 測定結果

前述の予測方法を用いた結果、測定期間中に発生した対象地震は114回であり、そのうち56回については、は時間的予測（事前の捕捉）に成功した。また予測の総数174回のうち、79回が的中した。本研究では予測に関する評価基準として、予測的中率および地震捕捉率を算出して評価を行った。予測的中率とは、予測を行った総数のうち、予測が的中して対象地震が発生した割合であり、地震捕捉率とは、発生した対象地震の総数のうち、予測が的中した割合である。

表1に測定地点別の予測的中率および地震捕捉率を示す。測定器の故障により、測定を長期間行うことができなかった札幌測定点、小山測定点、飯田測定点を除き、対象地震数に大きな差はなかった。予測回数については、連続した異常値などが原因となり、予測方法を適用できない測定地点が存在したため、予測回数に大きな差違が生じた。また、対象地震数と比較して予測回数が少ないことから、地震捕捉率は全体的に低い結果となった。一方で、予測的中率については測定地点ごとにばらつきがみられたが、複数の測定地点にて予測が同時期を示し、異なる測定点から同じ地震について予測に成功した。

的中した予測の一例として、2019年4月11日17時18分頃に三陸沖を震源として発生したM 6.2の地震に着目する。

表2は同時期に複数地点で異常が見られた時の予測を示している。表2のように複数の測定地点において地震発生予測が同時期を示した場合には、最大異常値 Aの発生が最も遅かった音更測定点から半径500km圏内にて4月10日前後の地震発生を予測した。

実際の地震発生は各予測の前後72時間以内の4月11日17時18分頃であることから、時間的予測は成功したといえる。また、発生場所についても音更測定点が震央に最も近かったことから、簡易的ではあるが発生場所の予測に成功した。

同様に複数の測定地点で地震発生予測が同時期を示したのは20回であり、そのうち8回は簡易的な震央の予測に成功した。しかし、対象地震の範囲が広過ぎることや、長期間のデータを使用したにもかかわらず、発生し

© The Seismological Society of Japan

た対象地震の総数に対して震央の予測を行うことができた回数がかなり少ないことから、現状では地震発生日時と震央の予測を同時に行うことは困難であるといえる。

4. おわりに

大気イオン濃度の異常より対象地震の約45%の発生日時を事前に予測することができたが、震央の予測については複数の測定地点のデータを用いても現状は不十分な確度であった。
測定に使用したCOM-3700において、地震前兆現象となる異常を示す地震の発生範囲は半径300 km圏内とされているが、本研究では震央の予測について広域での検証を行うため、対象地震を各測定地点より半径500 kmとした。そのため、より正確に震央の予測を行うには、対象地震の範囲を限定しても現在の対象地震と同等の範囲をカバーできるよう測定地点を増やすなど、データを蓄積していく必要がある。
地震予知には「時間」、「規模」、「場所」の3要素全てが備わらなければならないため、天気予報のように地震予知が身近な存在になるのには、時間を要するであろう。

参考文献

(1) 弘原海弘, 前兆証言1519!, 東京出版, ISBN4-924644-49-8, 1995.
(2) NPO法人 大気イオン地震予測研究会 e-PISCO, http://www.e-pisco.com/ (2019).
(3) 気象庁, 週間地震概況 No.1678 ~ No.1800 (2017-2019).

© The Seismological Society of Japan

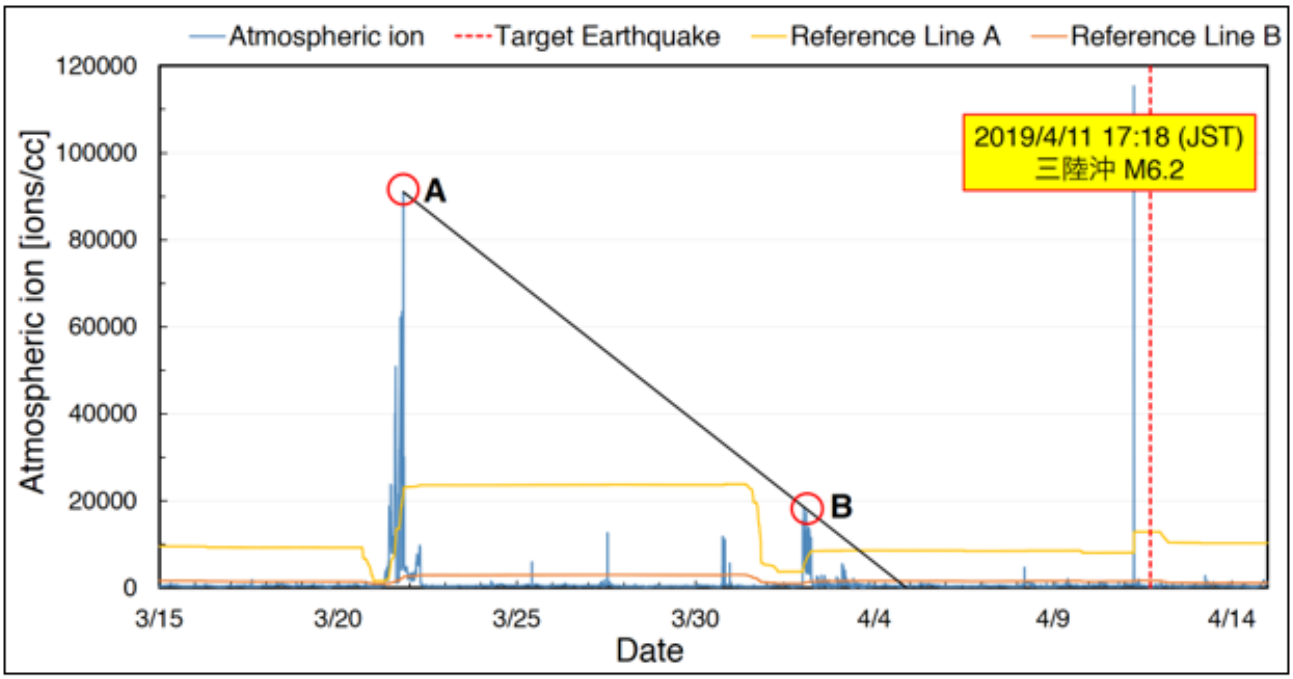


図1 予測方法
(北海道 河東郡音更町 2019年3月15日～4月15日)

表1 測定地点別の予測的中率および地震捕捉率

測定地点	対象地震数	予測回数	予測的中数	予測的中率 [%]	地震捕捉率 [%]
音更	52	26	13	50.0	25.0
札幌	44	15	10	66.7	22.7
柴田町	66	14	9	64.3	13.6
小山	39	25	10	40.0	25.6
松本	56	8	3	37.5	5.4
飯田	45	25	8	32.0	17.8
厚木	58	9	3	33.3	5.2
沼津	56	17	10	58.8	17.9
清水	55	35	13	37.1	23.6

表2 複数地点において同時期に重なった地震予測

測定地点	北海道 音更町	宮城県 柴田町	静岡県 沼津市	静岡県 清水区

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Measurements of Animal Abnormal Actions for Earthquake predictions

*Naoyuki Yada[1], Kenta Watanabe[2]

1. Kanagawa Institute of Technology, 2. Graduate school of Kanagawa Institute of Technology

1. はじめに

動物と地震の関係には、昔から様々な伝承や記述が存在しており、最近の大規模地震に関しても報告がされている[(1)(2)]。しかしながら、動物の異常行動を活用して地震の予知に役立てようとする研究例は、世界的にも非常に珍しく、本研究グループの研究に対しても海外メディアが取材に来るほどである[(3)]。その一方で地震前に顕れる動物の異常行動の報告例は、いずれも定性的な報告例であり、地震予知に応用するためには、平常時から定常的に動物の行動を、定量的に計測する必要がある。

本研究では動物の異常行動の定義として、以下の(1)式を用い、本研究で予測を行う対象としての地震は、マグニチュード4.5 以上の半径350 km 以内で発生する地震とした。

動物の行動回数> 1 ヶ月前までの平均行動回数＋標準偏差の1.5 倍　(1)

2. 動物の行動測定装置

本研究では多地点での動物の異常行動情報を収集するために、図1に示すような行動測定キットを制作して協力者または協力機関に提供した。本研究で行動を計測した動物のうち、犬やネコ以外の動物は、このシステムを使用した。すなわち、水槽Cの両側にD のセンサーを配置して、その間を動物Bが横切る回数をカウンターAで記録する装置である。鳥やヘビの場合には、水槽Bの替わりに鳥かごやプラスチックケースを使用している。

3. 2019年5月までの測定結果

地震が発生する予測情報に関する評価基準としては、的中率と捕捉率の二つをあげることができる。すなわち、的中率とは、異常行動を示した回数のうち実際に地震が発生(的中)した回数の割合であり、本研究では当日も含めて3日以内に発生したものを的中とした。また捕捉率とは、予測対象とした地震の回数のうち、3日前までに動物が異常行動を示した回数の割合である。なお、予測対象とした地震の回数は測定地点によって異なる。

表1には、2018年3月～2019年5月の本研究の研究成果として、各動物の異常行動回数と発生した対象地震の関係をまとめた。表中の測定地点の記していない動物は神奈川工科大学 (神奈川県厚木市) で飼育している動物である。

表1から明らかなように、2019年5月までの計測では、的中率が平均で 34 %、捕捉率が平均で 25 % であり、この数値は測定地点を増やすことで、さらに上昇するものと考えている。

4. 動物の異常行動計測ネットワーク

多地点によって動物の行動計測が遂行されるようになった場合、大きな問題となるのが計測データの収集・整理である。また、全国から提供された計測データを如何に公表して、それに基づく地震発生予測を如何に伝達するかも重要な課題の一つである。

計測協力者には、児童・生徒などの子供たちの参加も想定しているため、誰でも気軽にアクセスして自分たちの計測データを報告できるシステムの構築が必要となる。本研究グループでは、2016年度から計測データの収集にGoogleから提供されているフリーのクラウド上のドライブファイルを使用している。

このシステムを利用することにより、インターネット環境とGoogleアカウントさえあれば、各地の計測協力者が指定の箇所にデータを書き込むことが可能である。

書き込まれた計測データに基づいて、動物の異常行動を判断することは、本研究責任機関である神奈川工科大学で行う。また、計測協力者のうち希望する方には、異常行動の判別に使用するExcelファイルの提供も予定し

© The Seismological Society of Japan

ている。

5. おわりに

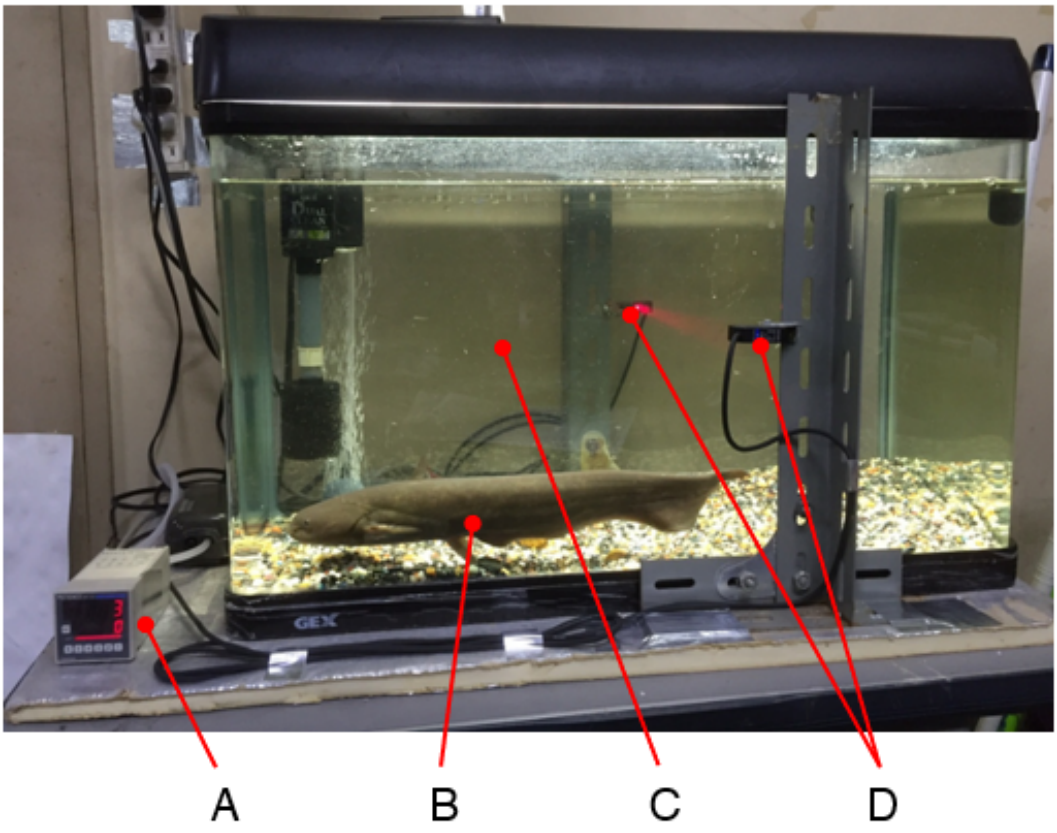
日本のように毎年のように人的被害をもたらすような大規模な地震が発生している国においては、そのような地震を、その発生前に予測することができれば防災上だけでなく、経済的な面からも大きなメリットがある。地震予知は様々な研究機関において種々の手法で試みられており、その予測精度はこの半世紀でかなり上がってきている。しかし、未だに確実な予測手法が確立されているわけではなく、多くの研究者が試行錯誤しながら挑戦しているのが現状である。

そのような現状において、子供たちにも協力をしていただく「動物の異常行動の計測」による地震予知は、防災意識の啓蒙活動の面からも、予測が外れた際の非難を躱す面からも、期待できる手法の一つと考えられ、そのためのインターネット環境を利用した情報収集および収集した情報に基づく予知情報の発信は、未だに「天気予報」のように「地震予報」が発表されない「地震予知」の分野に、大きな一石を投じることになると考えている。

参考文献

(1) 弘原海弘, 前兆証言1519!, 東京出版, ISBN4-924644-49-8, 1995.
(2) 矢田直之, 自然災害-この予兆に気をつけろ！（地震予知に挑む②）, ネコ・パブリッシング社, ISBN 978-4-7770-1872-7, 2015.
(3) for example, FRANCE24, environment animals all the answers earthquake prediction pollution detection cats tadpoles cows, English version:http://www.france24.com/en/20130126-environment-animals-all-the-answers-earthquake-predictions-pollution-detection-cats-tadpoles-cows (2013).

© The Seismological Society of Japan



A : カウンター　B : 動物 (ナマズ)　C : 水槽　D : センサー

図1　水槽を用いた行動回数計測システム

表1　2019年5月までの動物の異常行動と発生した地震

	的中率 [%]	捕捉率 [%]	対象地震
ナマズ	32.5	22.0	59
ウズラ	32.7	30.5	
ヘビ1	33.3	23.7	
ヘビ2	25.0	20.3	
白ネコ	43.8	35.6	
黒ネコ	36.4	25.5	47
文鳥	33.3	22.7	22
ナマズ (神奈川県横須賀市)	40.5	27.4	62
ウーパールーパー (東京都練馬区)	29.6	12.7	63

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Reinvestigation of correlation between groundwater anomalies and earthquakes carried out by an amateur network “Namazu-no-kai” in Japan

*Yoshiaki Orihara[1], Toshiyasu Nagao[1]

1. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.

1976年に設立された「なまずの会」は、地震予知を目指した一般民間人による地下水観測のグループである。多いときには、神奈川県・東京都・静岡県を中心に、のべ200以上の個人や団体が参加していた。「なまずの会」では主に浅井戸の水位観測が行われ、観測者は定期的に観測結果をハガキで事務局へ報告し、神奈川県温泉地学研究所報告（観測だより）でデータが公表されていた。このデータは観測者ごとに分けられ、日毎に異常あり・なしの形で示されている。この形式のデータは、1977年2月から1987年12月までの10年10ヶ月分が残っている。期間中に地震先行異常を捉えたとされる地震は、1978年の伊豆大島近海地震（M7.0）、同年の宮城県沖地震（M7.4）などである。これらの地下水異常と地震との関係については、Oki and Hiraga (1988) などで既に紹介されている。しかし、いずれも地震前に着目した分析が中心であった。そこで、本研究ではマグニチュード(M)6.0以上M6.5未満の地震は、観測点から半径100km以内、M6.5以上M7.0未満は半径150km以内、M7.0以上M7.5未満は半径200km以内、M7.5以上M8.0未満は半径250km以内で発生した地震を対象にして、地震前の異常あり・なし、異常後の地震あり・なしを調べた。その結果、地震前の異常があった観測点の割合は、全体の3～4割程度であった。また、対象となる19個の地震について、地震7日前までに地下水異常があった地震は10個だった。仮に好成績観測点の基準をAAR (Anomaly Appearance Rate: 予知率)≧50%、かつEOR (Earthquake Occurrence Rate: 適中率)≧50%、かつ確率利得≧20、かつp値≦5.0% とした場合、6観測点（全体の4.5%）がそれに該当した。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所共同利用（2019-Y-地震（中短期予測）2）の援助をうけました。

© The Seismological Society of Japan

High resolution seismicity models using interpolation with Delaunay triangulation

*Yosihiko Ogata[1]

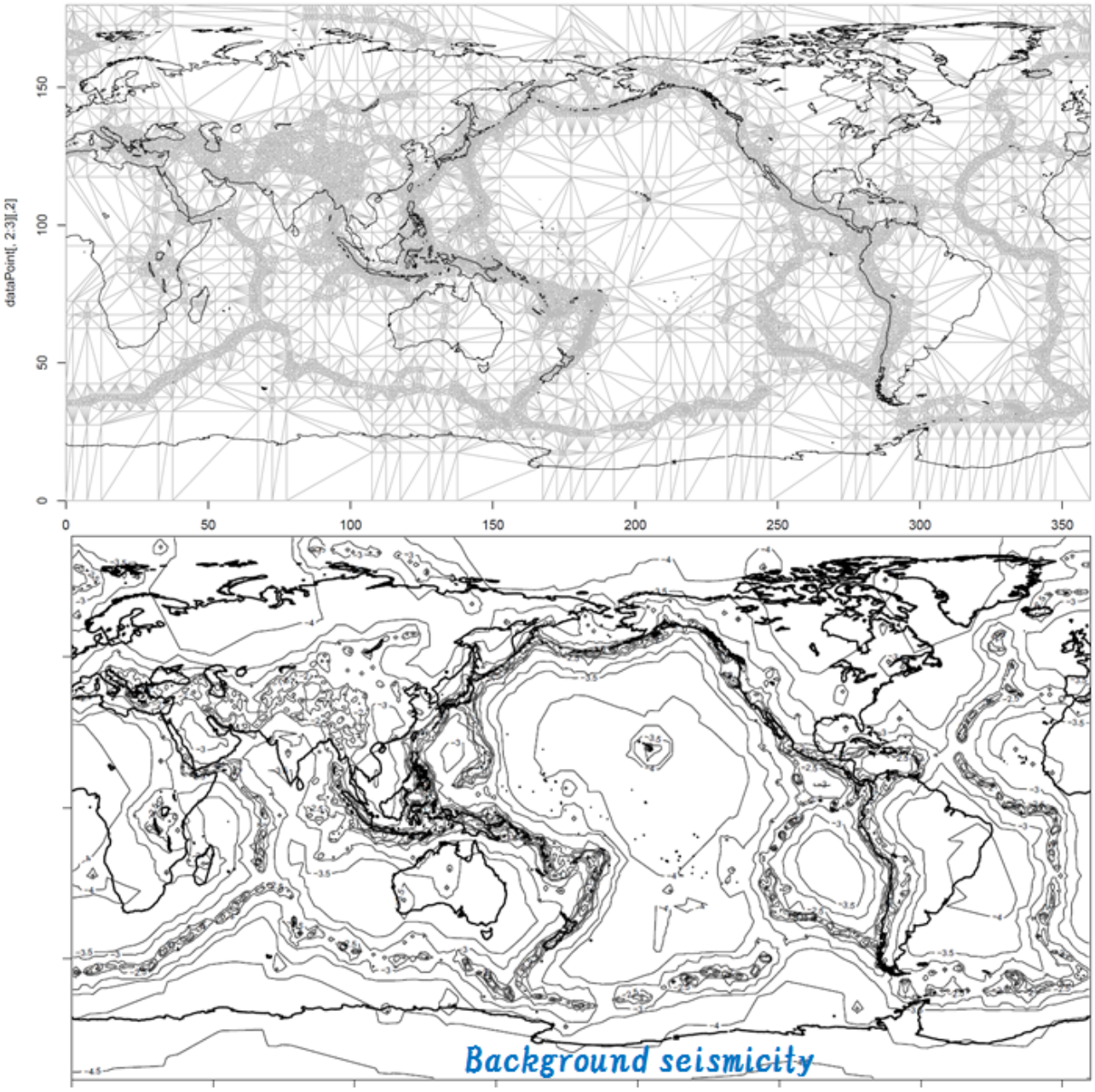
1. Institute of Statistical Mathematics

階層的時空間ETAS（HIST–ETAS）モデルは、地震活動の空間的非一様性を表すために、位置に依存する係数を用いた時空間ETAS地震活動モデルです。任意の位置での値が、地震位置と追加点で構成したDelaunay網の各三角形の端点での3つの値（係数値）によって線形補間される区分線形関数となります。係数値の数が膨大なので、推定には区分線形関数の適切な制約の下で罰則付き対数尤度を最大化することによって最適解を得ます。これは地震の集中地域での高解像度の変化を提供し、地震活動の活発な段階で地域性の違いに対応した高解像な時空間予測を提供します。

このモデルは余震や群発地震の非等方性を再現し、短期時空間予測を提示するのに役立ちます。また、背景地震活動のインバージョン解は地震多発帯周辺では空間強度が数桁の違いで変化するが、大地震の長期的な位置予測に有用であることが確認されている。

本発表はDelaunay三角網を使った２次元HIST–ETASモデルやその他のモデルの階層的時空間プロセスモデル（HIST-PPM）の推定のフリーソフトウェアの紹介を兼ねています。また３次元版の階層的モデルで関東直下の地震予測についても言及したいと思います。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Long-term Probability of a Great Earthquake along the Kurile Trench, Japan and its epistemic uncertainty

*Masajiro Imoto[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

北海道東部の津波堆積物の調査から，十勝沖から根室沖を震源とする超巨大地震（17世紀型）が繰り返し発生したことが推定されている．政府地震調査委員会は，BPT分布モデルを用いて今後30年以内の地震発生確率は７～40%と評価した．また，震源域が不特定な地震として，ポアソン過程モデルを適用して5 ～9%と評価した．

発生確率の不確定性に関しては，調査委員会報告書(2017　表7)の地震発生時期を用いて， 1) Parsons (2008)の方法に準じたBPT分布モデルとポアソン分布モデルの適合度比較や，2) 異なる関数形を仮定して，発生時期確率密度関数の影響を検討し，これまで次のような結果を得た．

1)ポアソン分布モデルに対するBPT分布モデルの尤度比は藻散布沼の系列で0.70-0.79となり，ポアソン分布モデルの尤度が高い．これに対し，霧多布湿原の系列では尤度比は約2.0となりBPT分布モデルの方が高い．
2)確率密度関数の違いによる尤度比の変動は1割程度である．BPT分布モデルに基づく今後30年間に地震が発生する確率の平均値は，藻散布系列で 約11%，霧多布系列で21%前後である．平均値は，モデルパラメータの尤度（合致数）を重みとした加重平均である．密度関数の違いによる確率値の変動は僅かである．ポアソン分布モデルでは，データや確率密度関数の関数形の影響は僅かで，平均値は約8%である．

藻散布沼系列と霧多布湿原系列で最適モデルが異なることや確率値に大きな差があることから，これら２カ所の系列を統合して解析することを試みた．表７に記載された各地点２つの推定堆積期間(68%および95%区間)に基づき推定した確率密度分布を比較する（図１）．ここで，縦軸はそれぞれ最大値で正規化してある．また，密度関数はそれぞれの区間で68%あるいは95%を満たす一様な関数として求めた．実線は藻散布沼の系列であり，点線は霧多布湿原の系列である．

２地点の推定発生期間を比較すると，５回のイベントのうち４回で発生期間の一部が重なるが，残り１回（No. 4）では全く重なっていない．２地点の推定堆積期間に重なりが認められる場合には，信頼度の高い発生時期を特定することが可能となるが，No.4ではそれが困難となる．このため，藻散布沼系列と霧多布湿原系列を相異なる独立した時系列として処理する．

統合処理の結果，BPT分布モデルでは確率の平均値は約14%となった．この計算では，藻散布沼系列と霧多布湿原系列を独立な時系列としているが，これらの堆積物が同一の地震を対象としていることを考慮すると，独立でない場合を検討する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

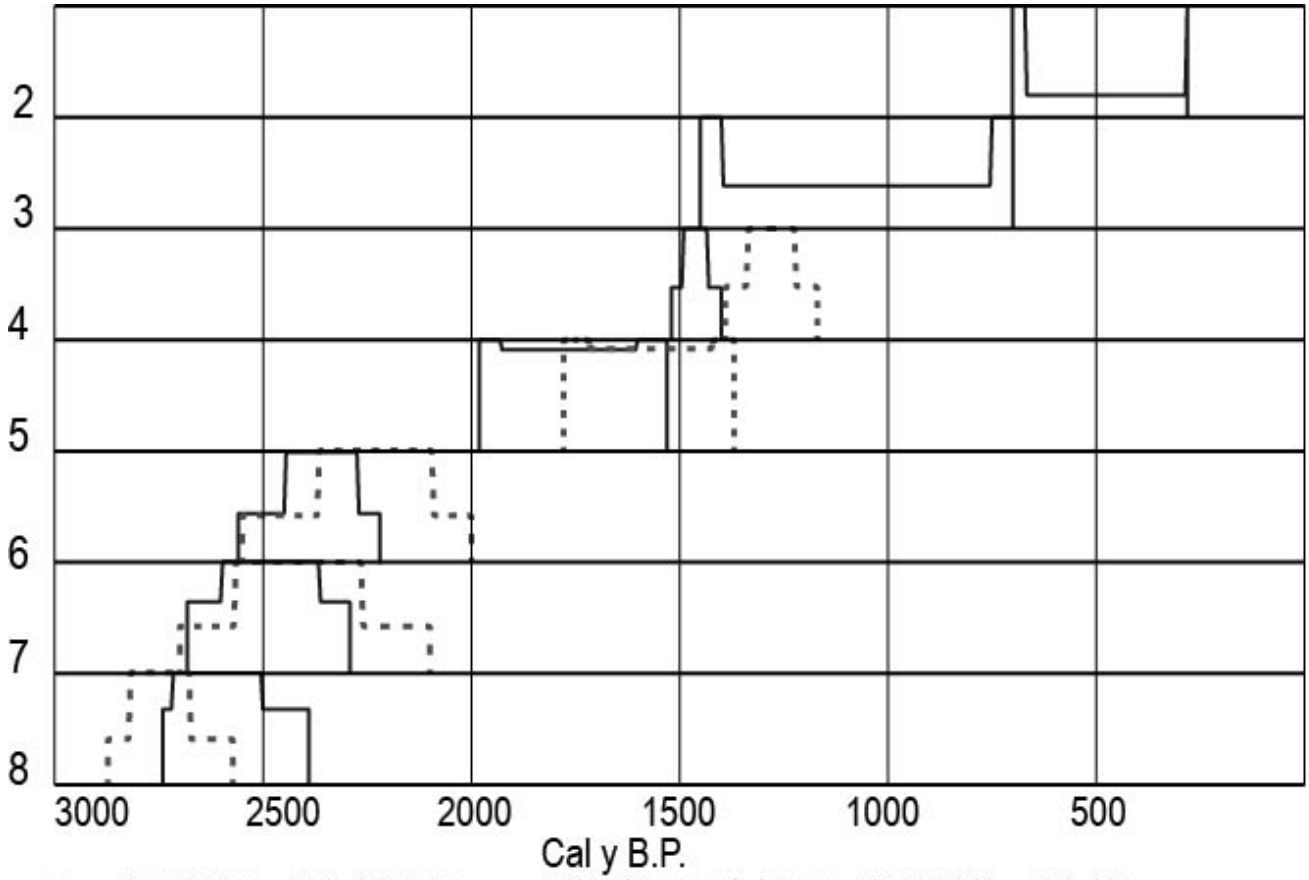


図１　超巨大地震の発生確率評価に用いた藻散布沼と霧多布湿原の津波堆積物の堆積時期.
表7の68%および95%区間から 密度関数を階段関数で推定. 各密度関数の最大値で正規化されている.
実線は藻散布沼系列で波線は霧多布湿原系列である.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 18th) | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S08P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-01] **The 11 November 2018 monotonic event near Mayotte island, east Africa observed by the Iranian broadband seismic stations**

Hossein Sadeghi[1], *Sadaomi Suzuki[2] (1. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-02] New insight into rupture process and generating mechanism of the 2017 M_W 6.5 Jiuzhaigou earthquake

*Yaping Hu[1], Yuji Yagi[2], Kousuke Shimizu[1], Ryo Okuwaki[2] (1. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan., 2. Fault of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-03] Source parameters of the aftershocks of the Western Nagano prefecture Earthquake in 1984

*Osamu Murakami[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-04] Fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand inferred from high precision aftershock distribution

*Yuta Kawamura[1], Satoshi Matsumoto[1], Tomomi Okada[2], Miu Matsuno[2], Yoshihisa Iio[3], Tadashi Sato[2], Stephen Bannister[4], John Ristau[4], Martha Savage[5], John Twonend[5], Jarg Pettinga[6], Francesca Ghisetti[7], Richard H Sibson[8] (1. Kyushu University, Shimabara, Japan, 2. Tohoku University, Sendai, Japan, 3. Kyoto University, Uji, Japan, 4. GNS Science, Lower Hutt, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. TerraGeologica, Ruby Bay, New Zealand, 8. University of Otago, Dunedin, New Zealand)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-05] The generation process of seismic clusters in the slab

*Yusuke Usui[1], Junichi Nakajima[1] (1. Tokyo Tech)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-06] Detection of small non-double-couple components of tectonic earthquakes: Application to plate boundary earthquakes

*Kazutoshi Imanishi[1], Takahiko Uchide[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-07] Reconsidered source model of short-term slow event:
detection of non- fault slip components by using spatial distribution of strain change

*Noa Mitsui[1], Yasuhiro Asai[1], Satoshi Itaba[2] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-08] Temporal change of tidal correlation of deep low frequency tremors in Bungo Channel: Relation with LSSEs and deep VLFEs

*Fuyuki Hirose[1], Akio Kobayashi[1], Kenji Maeda[2] (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-09] Estimation of source spectra of deep low frequency tremors from waveforms recorded by array observation

*Yoshiki Matsuura[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Keita Nakamoto[1], Takahiko Uchide[2], Kazutoshi Imanishi[2] (1. Kanazawa University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-10] Focal Mechanisms of LFEs in Parkfield by the amplitude inversion using synthetic waveforms

*Miki Aso[1,3], Naofumi Aso[2], Satoshi Ide[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. Tokyo Tech, 3. OYO RMS Corp.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-11] A comparative study on the source process of ambient and triggered tremor based on a slip inversion analysis

*Kazuaki Ohta[1] (1. DPRI, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-12] Rupture processes of the repeating earthquake sequences off-Iwate that occurred after the 2011 Tohoku oki earthquake

*Ahyi Kim[1], Naoki Uchida[2] (1. Yokohama City University, 2. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-13] Spatiotemporal change of source parameters of repeaters due to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (2)

*Kazuya Tateiwa[1], Tomomi Okada[1], Toshio Kono[1], Naoki Uchida[1] (1. Tohoku university)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-14] Estimation of moment magnitude and corner frequency of Acoustic Emission during hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Keiichi Imakita[1], Makoto Naoi[1], Youqing Chen[1], Kazune Tanaka[1], Yuya Morishige[1], Naofumi Tsutsumi[1], Hironori Kawakata[2], Tuyoshi Ishida[1], Hiroyuki Tanaka[3], Yutaro Arima[3], Shigehiro Kitamura[3], Daisuke Hyodo[3] (1. Univ. of Kyoto, 2. Univ. of Ritsumeikan, 3. JOGMEC)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-15] Investigation of fluid viscosity effects on laboratory hydraulic fracturing based on AE measurement and moment tensor analysis

*Rui Tanaka[1], Makoto Naoi[2], Youqing Chen[3], Kazune Yamamoto[1], Keiichi Imakita[1], Naofumi Tsutsumi[3], Akihiro Shimoda[1], Daiki Hiramatsu[3], Hironori Kawakata[4], Tsuyoshi Ishida[1], Hiroyuki Tanaka[5], Yutaro Arima[5], Shigehiro Kitamura[5], Daisuke Hyodo[5] (1. Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Department of Energy Science and Technology, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, 4. College of Science aand Engineering, Ritsumeikan University, 5. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-16] Mineral Composition and Microstructure of Host Rock and Fault Rock That Caused M5.5 Orkney Earthquake (ICDP DSeis Project)

*Yuki Yokoyama[1], Tetsuro Hirono[1], Hiroshi Ogasawara[2], Yasuo Yabe[3] (1. Osaka University, 2. Ritsumeikan University, 3. Touhoku University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-17] Cascade-up process simulated in large-scale rock friction experiments

*Futoshi Yamashita[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Shiqing Xu[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Dept. Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-18] Dynamic Aspects of Rupture Propagation at a Subsonic but Near-Rayleigh Wave Speed

*Koji Uenishi[1] (1. GSFS, Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-19] Secondary Rupture at a Distance from the Primary One without Further External Loading

*Koji Uenishi[1,2], Yuki Fukuda[2], Kunihiro Nagasawa[2] (1. GSFS, Univ. Tokyo, 2. Sch. Eng., Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-20] Dynamic rupture simulation on a non-planer fault allowing fault-normal displacement discontinuity

*Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2] (1. Kyoto Univ., 2. DPRI, KU)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-21] On stability of time-marching schemes for simulation of dynamic rupture using a boundary integral equation method

*Hiroyuki Noda[1], Yuuki Kurihara[2], Saisuke Sato[1] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate school of Science, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-22] A Preliminaryu Analysis of the Fault Behavior of Shallow Part of the Fault based on the Dnamic Model

*Kenichi Tsuda[1], Samaneh Arzpeima[1], Sachio Ogawa[1], Takahide Watanabe[1], Tetsurou Sasaki[2], Satoshi Iwase[2], Tomoki Mukudai[2], Jean-Paul Amouero[3] (1. Ohsaki Research Institute, 2. Chubu Electric Power Company, 3. Université Côte d'Azur and Institut de Recherche pour le Développement)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-23] Re-examination of possible scenarios for large earthquake in the Hyuga-nada region based on numerical simulations

*Ryoko Nakata[1], Takane Hori[1], Mamoru Hyodo[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S08P-24] Relationship between size and frequency of earthquakes by modified Olami-Feder-Christensen model

*Yasuyuki Iwase[1], Takao Eguchi[2] (1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Formerly at Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy)

The 11 November 2018 monotonic event near Mayotte island, east Africa observed by the Iranian broadband seismic stations

Hossein Sadeghi[1], *Sadaomi Suzuki[2]

1. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

The 11 November 2018 Mayotte event was first introduced in the media by Maya Wei-Haas (2018) on National Geographic Magazine as a strange earthquake of which seismic waves were recorded by instruments around the world, but unusually nobody felt them. The Mayotte event in the absence of body waves caused long-period surface waves traveling around the globe. Tono Research Institute of Earthquake Science recorded the data with the broadband seismometer (STS-1) and gravimeter (gPhone) installed in Mizunami (Murakami et al., 2019). The records by Iranian broadband stations clearly showed the long period seismic signals around 10 (UTC) on November 11, 2018. We studied records by 28 stations (Figure 1) distributed throughout the country. Among them, 26 stations were operated by National Center of Broadband Seismic Network of Iran, while two other stations were operated by the Ferdowsi University of Mashhad. Since the frequency content of Fourier amplitude spectra appeared the signal of the surface waves as a peak around 0.06 Hz, we applied a bandpass filter of 0.05-0.07 Hz to the waveform data. To separate Rayleigh from love in surface waves, the filtered horizontal components were rotated to the radial and transverse components based on an assumed epicenter location at the latitude of 12.7S and longitude of 45.4E degrees. The stations considered as an array and the investigation was carried out in two ways. First, the position of each station was taken as the reference point of the array coordinate, and arrival delay times at the other stations relative to the reference were calculated. The phase velocity and the back-azimuth of each station were estimated through the least-square regression method. The estimated back azimuths were within 13 degrees from the back azimuths from the assumed epicenter. The average phase velocity for Rayleigh (Figure 2a) and Love phases (Figure 2b) are calculated as 3.31 and 2.97 km/sec, respectively. Second, we applied semblance analysis to six stations (red triangles in Fugure 1) with the shortest spacing distances. However, the distance between the adjacent stations relative to the signal wavelength was not enough short to prevent spatial aliasing. Nevertheless, the interesting was that the semblance results were different for radial and transverse components.

(References)

Maya Wei-Haas (2018) Strange waves rippled around the world, and nobody knows why, National Geographic, published November 28, 2018.

Murakami O., Tanaka T., and Asai Y. (2019) Observation of the extremely monotonic seismic waves generated on November 11, 2018 at the Tono Research Institute of Earthquake Science, Report of the Tono Research Institute of Earthquake Science, Seq. No.42, 17-22 (in Japanese).

© The Seismological Society of Japan

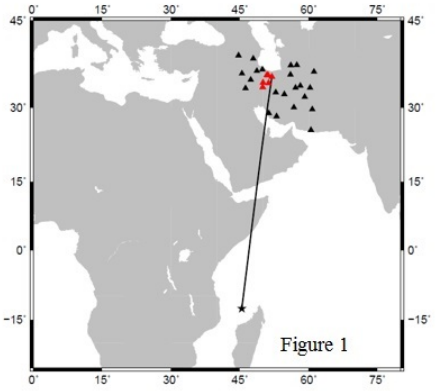
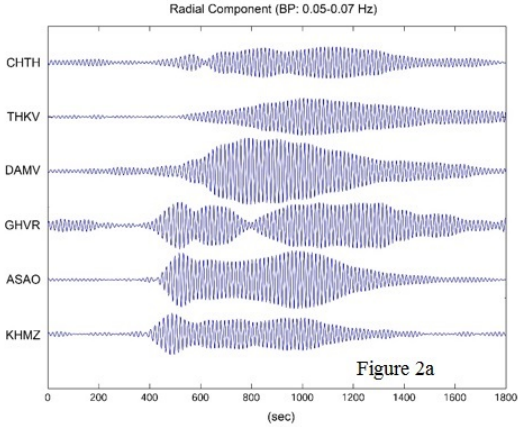
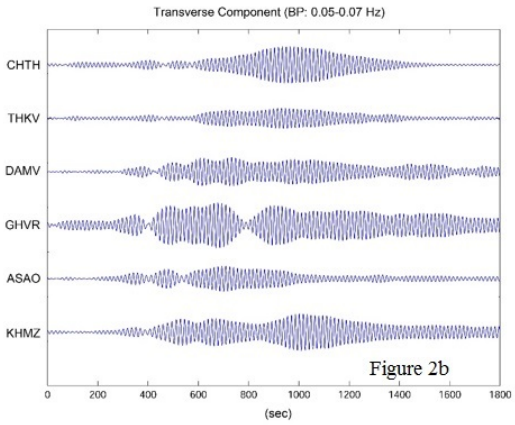


Figure 1: The broadband stations that recorded the 2018 November 11 Mayotte event are shown with triangles. The red triangles show the stations used in the semblance analysis. The assumed epicenter is indicated by a star, and the line shows the great circle connecting the epicenter and the semblance array.

Figure 2a: Filtered seismograms of the radial component recorded at the stations used in the semblance analysis with the start time at 09:50:0 (UTC).

Figure 2b: Filtered seismograms of the transverse component recorded at the stations used in the semblance analysis with the start time at 09:50:0 (UTC).





© The Seismological Society of Japan

New insight into rupture process and generating mechanism of the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou earthquake

*Yaping Hu[1], Yuji Yagi[2], Kousuke Shimizu[1], Ryo Okuwaki[2]

1. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan., 2. Fault of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

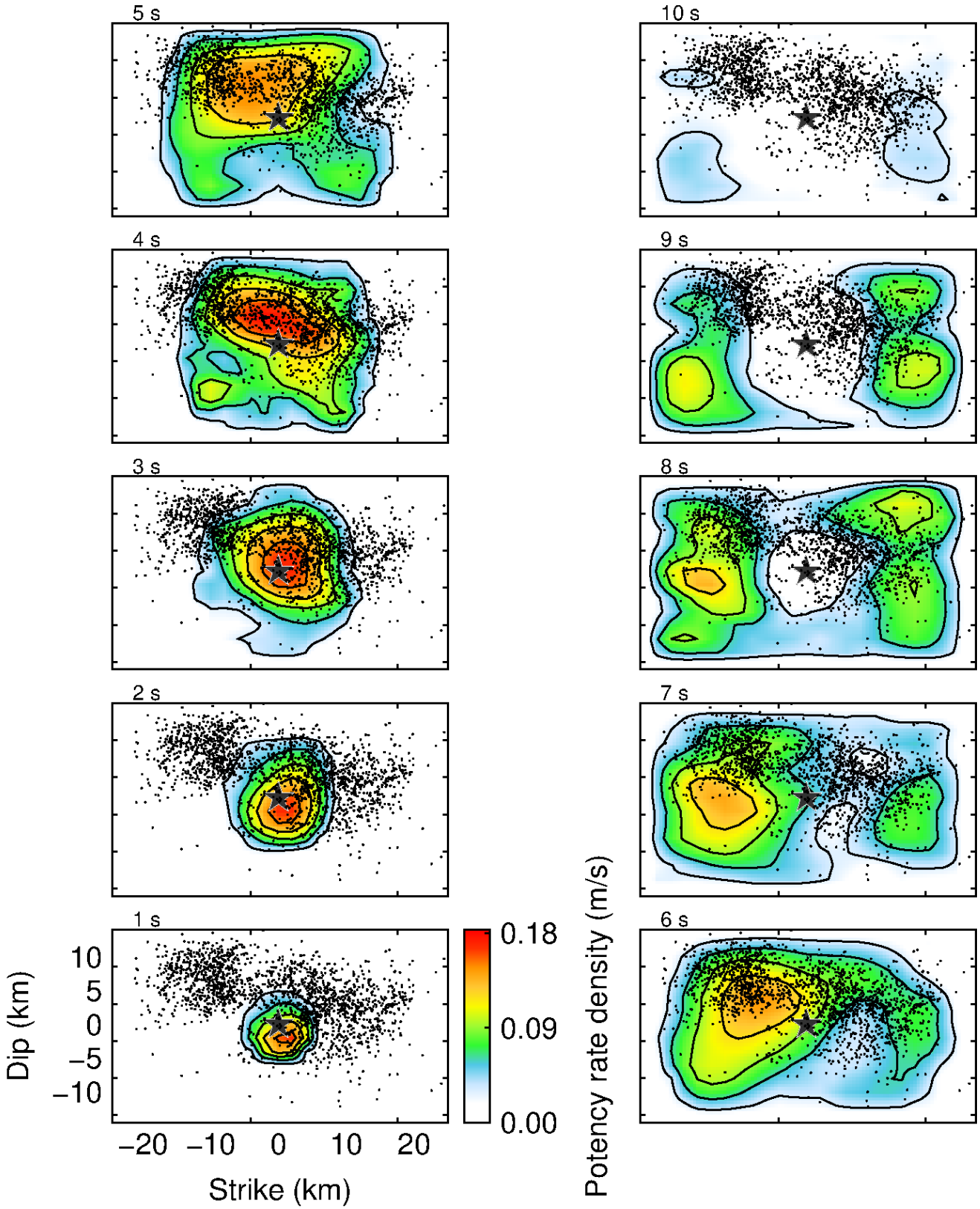
On August 8th, 2017, a large earthquake occurred on a blind fault in the Jiuzhaigou Village, Sichuan Province, China, whose epicenter is just 170km away from the epicenter of the biggest earthquake in Sichuan Province, the 2008 Wenchuan earthquake. The focal mechanism showed a strike-slip fault event. According to the field investigation, there was no significant surface rupture around the epicenter, making it hard to identify the seismogenic fault and speculate the rupture zone of this event. A new inversion method was developed to extract information on fault geometry along with the slip-rate function from observed teleseismic waveforms (Shimizu et al. under review). In the method, they developed the potency-density tensor from two basis components to five basis components, resulting in estimating arbitrary fault slip that occurred underground. In this study, we applied this developed inversion method to the Jiuzhaigou earthquake and obtained reasonable results, because both the modelling errors of uncertainty of Green's function and uncertainty of fault geometry have been taken into account. Our results indicated that the estimated total seismic moment of this strike-slip event is ~$7.36X10^{18}$ Nm, associated with a 46 km long and 26 km wide fault plane. For the hypocenter depth of this event, previous studies showed great differences, ranging from 5.0 km to 22 km. In our study, the best waveform match was obtained at the hypocenter depth of 13 km. The source duration is 10s and there are three-stage rupture processes (Fig. 1). During the first 2s, the rupture is mainly concentrated in the region blow the hypocenter. Then, the rupture propagated up-dip along the fault near the hypocenter form 3s to 6s after the initial break. Since 5s, the rupture propagated to the northwest direction and the slip became smaller than before. Subsequently, the rupture propagated to northwest and southeast directions from 6s to 10s and such rupture feature lasted until the rupture stopped. In addition, we also obtained the velocity structure near the hypocenter by tomography method (Zhao et al., 1992). The tomography results showed that Jiuzhaigou earthquake started in the high velocity area, while large mounts of low velocity areas are observed in the western and lower regions of the hypocenter, which was realted to crustal flow.

Keywords: Jiuzhaigou earthquake, Waveform inversion, Rupture process, Crustal flow, Generating mechanism

References

[1] K. Shimizu, Y. Yagi, R. Okuwaki, Y. Fukahata, Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data, *Geophys. J. Int.,* under review.
[2] D. P. Zhao, A. Hasegawa, S.Horiuchi, Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events, *J. Geophys. Res.*,1992, 97, 19909-19928.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Source parameters of the aftershocks of the Western Nagano prefecture Earthquake in 1984

*Osamu Murakami[1]

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

1984年長野県西部地震（M6.8）は，1984年9月14日08:48 (JST)に御嶽山の南東で発生し，地滑りなどによる被害をもたらした．本震断層については， Yoshida and Koketsu (1990)により，東北東-西南西方向の右横ずれ断層と解釈されているが，本震の約23時間後に発生した最大余震（M6.2）は，本震断層とは共役な左横ずれ断層の地震と考えられている（e.g., Ooida et al., 1989）．

この地震の震源域では地震活動が活発なため，本震発生後の臨時地震観測（e.g., 1986年長野県西部合同地震観測班, 1989）のみならず，1995年以降，高密度な地震観測が行われている（Iio et al., 1999）．この高密度地震観測データを活用して，この領域で発生した地震の震源パラメータの推定も多く行われている（Imanishi et al., 2004; Venkataraman et al., 2006など）．しかしながら，1984年の本震発生直後の余震の震源パラメータの解析事例は少ない．そこで，本研究では，1984年の本震後の余震の震源パラメータの推定を行った．

本研究では，Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS (1976)による，Modified High Gain Long Period Observatory (ASRO)の観測網で展開されていた観測点MAJOのSHZ成分の波形データを使用した．ただし，1983年3月3日に地震計の感度設定の変更が行われており，1988年8月23日に地震計の変更が行われている．このような設定変更をまたいだデータも利用可能であるが，簡単のため，本研究では地震計やその感度設定が一定かつ，1984年長野県西部地震の本震と多くの余震を含む期間である，1983年3月3日から1988年8月22日の約5年間のデータを用いた．気象庁カタログでは，この期間に1984年長野県西部地震の震源域で発生したM3.5以上のイベントは81個ある．なお，使用した波形データのサンプリングレートは20Hzであり，後述のスペクトル比法の適用にあたり，微小地震のコーナー周波数の分離は困難なことが想定されるため，使用するイベントをM3.5以上に限定した．

本研究では，基本的にBaltay et al. (2011)のスペクトル比法に従い，震源パラメータを推定した．ただし，このスペクトル比法を適用するためには，解析対象とする地震と経験的グリーン関数（EGF）として使用する地震の震源位置が互いに近く，さらにそれらのメカニズム解が類似している必要がある．気象庁カタログに掲載されている震源位置は，特に深さ方向の拘束が良くないが，観測点MAJOまでの震央距離は100km程度あるため，2つの地震の間の距離が5km以内であれば，スペクトル比法の適用にあたっての波線経路の近似が可能であると仮定した．また，メカニズム解については，特にEGFとして使用する地震については推定されていない場合が多いので，観測波形の相関の高いイベントのみを使用した．図1に，1984年9月16日に発生したM4.6の地震について，1985年5月28日に発生したM3.9の地震をEGFとして使用した例を示した．ここでは，P波初動到達の2.0秒前から7.0秒後までのP波部分を使用した例を示す（S波到達はP波初動到達の約12秒後）．この9.0秒間のタイムウィンドウについて，両端10%のコサインテーパーを適用した後にFFTを行い，7ポイント移動平均によりスペクトルを平滑化した．そして，2つのイベントの観測スペクトルの比について，オメガ二乗モデルをグリッドサーチでfittingすることで，2つの地震の震源スペクトルのコーナー周波数（fc）を推定した．図1の例では，M4.6のイベントのfcは1.26Hz，M3.9のEGFのfcは2.51Hzと推定された．

発表では，その他のイベントについての解析結果も示し，上述の高密度地震観測で得られた結果と比較する．また，本研究では単一観測点のデータしか使用できないため，放射パターン等の補正についても検討する．

© The Seismological Society of Japan

謝辞：本研究では，IRIS-DMCの波形データ，気象庁震源カタログ，ISC Bulletinを使用させていただきました．

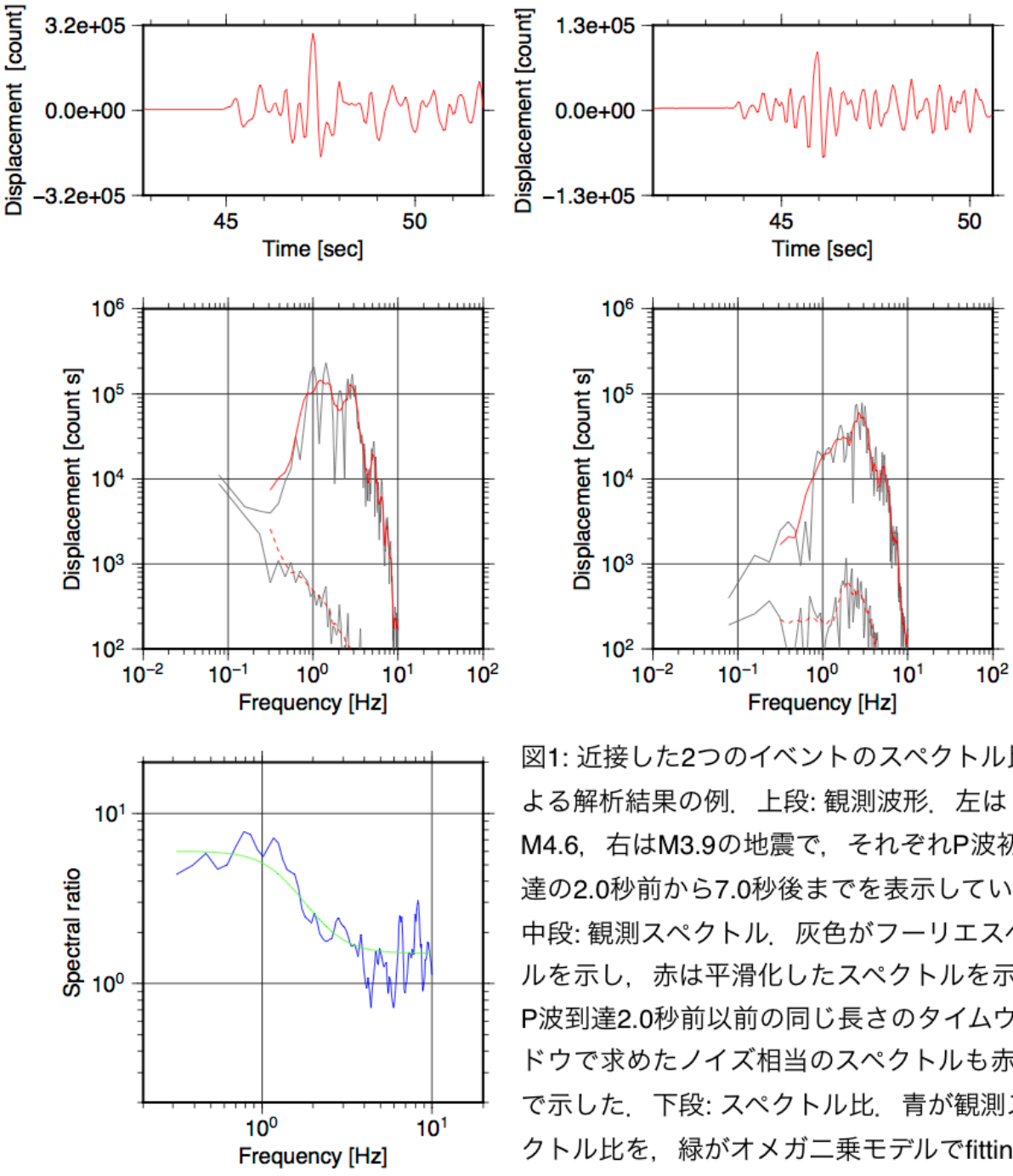


図1: 近接した2つのイベントのスペクトル比による解析結果の例．上段: 観測波形．左はM4.6，右はM3.9の地震で，それぞれP波初動到達の2.0秒前から7.0秒後までを表示している．中段: 観測スペクトル．灰色がフーリエスペクトルを示し，赤は平滑化したスペクトルを示す．P波到達2.0秒前以前の同じ長さのタイムウィンドウで求めたノイズ相当のスペクトルも赤破線で示した．下段: スペクトル比．青が観測スペクトル比を，緑がオメガ二乗モデルでfittingした理論スペクトル比を示す．

© The Seismological Society of Japan

Fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand inferred from high precision aftershock distribution

*Yuta Kawamura[1], Satoshi Matsumoto[1], Tomomi Okada[2], Miu Matsuno[2], Yoshihisa Iio[3], Tadashi Sato[2], Stephen Bannister[4], John Ristau[4], Martha Savage[5], John Twonend[5], Jarg Pettinga[6], Francesca Ghisetti[7], Richard H Sibson[8]

1. Kyushu University, Shimabara, Japan, 2. Tohoku University, Sendai, Japan, 3. Kyoto University, Uji, Japan, 4. GNS Science, Lower Hutt, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. TerraGeologica, Ruby Bay, New Zealand, 8. University of Otago, Dunedin, New Zealand

2016年11月14日、ニュージーランド南島北東部においてMw.7.8の地震が発生した。この地震の特徴は、多数の断層が関与した複雑断層破壊の過程によって生じた地震であるということである。これまでに多くの先行研究がなされているが、その中でもClark et al., 2017では、逆断層、横ずれ断層型の余震が活発に起きており、領域全体で20以上の断層破壊が生じたと指摘されている。また、Cesca et al., 2017においては、余震活動の分布から北部、中央部、南部の地域に分けて、3つの代表的な断層面を仮定して複雑なすべりを考察している。しかし、これらの研究では観測点間隔が50km程度の観測網のデータを用いているため、詳細な断層形状を議論することが困難であると考えられる。本研究では、我々が現地に本震前から展開している臨時地震観測網のデータを加えることで、震源決定の精度向上を図った。さらに、hypoDD(Waldhauser and Ellsworth, 2000)に波形相関法(Poupinet et al., 1984)を適用し、震源決定の精度を高めた。

この結果、震源分布のばらつきが減少し、深さもおおむね15km以浅に集中する分布が得られた。全体をみると、主に北東一南西走向の指向性があり、1辺10km程度の小規模なクラスターが帯状に連なっている。余震配列から見られる断層面は10枚以上に上ることが明らかになった。また、余震の配列と発震機構も整合的である結果が得られた。

© The Seismological Society of Japan

The generation process of seismic clusters in the slab

*Yusuke Usui[1], Junichi Nakajima[1]

1. Tokyo Tech

1. はじめに

東北日本弧に沈み込む太平洋スラブ内では, 深さ60~180 kmにおいて二重深発地震面が形成されている. この二重深発地震面の応力場は, 上面が圧縮場で下面が伸張場である. 二重深発地震面上面に位置する沈み込むスラブ地殻内では, 含水鉱物の相転移（浅い側(深さ80 km~130 km)：jadeite lawsonite blueschist→lawsonite amphibole eclogite, 深い側(深さ110~150 km): lawsonite amphibole eclogite→eclogite）により体積減少が生じることが期待される. この体積減少により, 二重深発地震面上面においても局所的に伸張場が形成されることが示唆されている[Igarashi et al. (2001); Kita et al. (2006)]. Nakajima et al. (2013)では深さ150 kmで密集して発生する地震クラスターを解析し, 逆断層地震の約1 km浅部で正断層地震が発生することから, 深い側の相転移で生じる体積減少による伸張場の形成がこの地震クラスターの発生に関係しているというモデルを提案した. 本研究では, 浅い側の相転移境界付近で発生する地震クラスターの高精度震源決定およびメカニズム解の推定により, 詳細な起震応力場に関する知見を得ることを目的とする.

2. 解析手法

2004年から2017年に東北日本弧下の二重深発地震面上面で発生したM1.0以上の地震に対して Double-Difference hypocenter location method [Waldhauser and Ellsworth (2000)]（以下DD法と表記）を用いた震源再決定を行い正確な震源位置を求め, その震源分布の数密度を計算することで地震クラスターの検出を行なった. その結果, 深さ~110 kmと~150 kmのプレート境界等深線に沿って地震クラスターが点在していることがわかった. 続いて, 検知できた各地震クラスターについて地震波形のクロススペクトル解析を用いて, 地震ペアの正確な相対走時差を求め, この相対走時差を用いたDD法により震源を高精度で決定した. さらに, P波初動極性を読み取り, 地震クラスターのメカニズム解を決定するとともに, 地震波形に対して相関係数を用いることで, グルーピングを行なった.

3. 結果・議論

東北日本弧の深さ110 kmおよび150km付近のスラブ地殻内の地震クラスターでは, 逆断層型の地震群の浅部に正断層型の地震群が非常に近接して(~100 m)発生することが明らかになった. このような100 mスケールでの起震応力場の変化はプレートのアンベンディングに起因する広域の圧縮応力だけでは説明できないため, 局所的な応力変化を生じさせる別の要因があると考えられる. その一つの解釈として, Nakajima et al. (2013)で示唆された相転移による体積減少が挙げられる. つまり, 地震クラスターの間に相転移のreaction frontが位置し, 浅い側では体積減少により伸長場が, 深い側ではアンベンディングによる広域応力場(圧縮場)で地震が発生していると考えると観測されたメカニズム解の特徴を説明できる. しかし, この要因のみで地震が発生するのであれば, プレート境界等深線に沿って帯状に密集して地震が発生するはずなので, クラスターの生成には, 他の要因も寄与していると考えられる. 本発表では, 深さ150kmでは, Nakajima et al. (2013)で解析されたものに他領域の解析結果を加え, 深さ110kmでは, 本研究の複数のクラスターの解析結果を統合して, その発生要因についても議論する.

謝辞 ： 解析には気象庁一元化の読み取り値を使用しました. 解析に用いた波形の一部は, 東北大地震・噴火予知研究観測センターで収録されたものを使用しました. 記して感謝いたします.

© The Seismological Society of Japan

Detection of small non-double-couple components of tectonic earthquakes: Application to plate boundary earthquakes

*Kazutoshi Imanishi[1], Takahiko Uchide[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

テクトニックに発生する地震はダブルカップルで説明できることが理論的に認められてから半世紀が過ぎた。その後、観測データの分析からもこの理論は支持され、ダブルカップルを前提に様々な議論が進められてきた。しかしながら、観測データも充実してきた現代において、「テクトニック地震＝ダブルカップル」という常識を再考してみる意義がある。

我々はこれまで、微小な非ダブルカップル成分であっても十分な精度で推定することを目指し、解析手法の開発に取り組んできた。非ダブルカップル成分を推定する上で一番の障害になってきたのは、グリーン関数の不確実さに起因する見掛けの非ダブルカップル成分の存在である。Dahm（1996）は近接する地震ペアの同一観測点における振幅比をデータとすることで、共通する伝播経路の効果をキャンセルし、グリーン関数を計算せずにモーメントテンソル解を推定する手法（相対モーメントテンソル法）を提案した。この手法は非常に有効であるが、推定されるのはマスター地震のモーメントテンソル解に対する相対値であるため、マスター地震のモーメントテンソル解の精度が十分でないと正確な結果が得られないという根本的な欠点を抱えていた。我々はこの問題点を解決するため、以下の手順による逐次相対モーメントテンソル法を提案した（Imanishi and Uchide, in preparation; 今西・内出, 日本地震学会秋季大会, 2018）。

（1） ある程度拘束できているメカニズム解（初期解）を持つN個の近接地震を抽出する。
（2） 推定対象とする地震（ターゲット地震）を一つ選び、それ以外の地震をマスター地震（N-1個）とし、相対モーメントテンソル法を適用する。ターゲット地震を変えながら同様の計算を行い、全ての地震のモーメントテンソル解を推定する。
（3） 推定された解を新たなモーメントテンソル解（修正解）とし、再び（2）を行う。
（4） 残差の総和に変化が見られなくなるまで（2）、（3）を繰り返す。

重要なポイントは、（2）のステップで、1個のターゲット地震に対して複数のマスター地震を取ることにより、推定精度が十分でないマスター地震の影響を軽減させる効果がある点である。また、逐次的に推定していくことで個々のモーメントテンソル解の推定精度を上げるのと同時に地震間の相対精度も改善させていく効果がある。この方法がうまく機能することは、数値実験で確認済みである。

本研究ではテクトニック地震の代表例として、茨城県南西部のフィリピン海プレート境界で発生する地震クラスターに適用した。このクラスターは幅10kmほどの線状分布をしており、関東地域で地震が特に多い場所として知られている。予察的な解析として、2010年10月から2018年5月に発生したM_j 3.3以上の16イベントを解析対象とした。入力データとして変位スペクトルの低周波レベルから推定したP波とSH波の振幅値を与え、P波については極性がわかるものは極性付きの振幅値とした。逐次法の適用に先立ち、ダブルカップルを仮定したメカニズム解推定を行ったところ、いずれもフィリピン海プレートの沈み込みに調和的な低角逆断層型の解が得られた。P波初動極性は概ね説明できているが、振幅値は若干説明できない地震があることがわかった。次に、このダブルカップル解を初期解とし、逐次法を適用した。ここでは簡単のため、震源モデルとしてshear-tensileモデルを仮定した。このモデルでは、tensile成分（クラックの開口角 α）が非ダブルカップル成分に相当する。ブートストラップ法による誤差評価により、αは数度以内の精度で推定可能であることがわかった。推定されたαはほとんどが±2度以内であり、これらは純粋なダブルカップルの地震と見なせる。一方、推定誤差を考慮しても有意に意味のある正のα（クラックが開くセンス）を持つ地震も複数存在することがわかった。αの空間分布をみると、正のαを持つ地震は地震クラスターの端で起きている傾向が確認でき

© The Seismological Society of Japan

た。クラックの開口は流体の関与が示唆される。クラスターの端は流体が排水されにくく、流体圧が高くなっているのかもしれない。今後クラスター内の多くの地震に適用し、αの時空間分布の特徴を見ていくことで、プレート境界における流体および流体圧の実態が明らかになる可能性がある。

謝辞：解析には気象庁一元化震源ならびに防災科学技術研究所 Hi-net の波形データを使用させていただきました。

© The Seismological Society of Japan

Reconsidered source model of short-term slow event: detection of non- fault slip components by using spatial distribution of strain change

*Noa Mitsui[1], Yasuhiro Asai[1], Satoshi Itaba[2]

1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

沈み込み帯で検出される各種スロー地震は、いずれも、通常の地震と同様に地殻中の断層運動としてモデル化されている。しかし、これらがスローかつ非定常な現象となる物理的メカニズムは不明である。
この問題について光井・伊藤（2019）は、長期的スロースリップイベント（LSSE）に着目し、発生源で生じる変形について次のように再考した。LSSEを含む深部スロー地震発生域は、断層の破壊強度の知見から、温度ー圧力条件の深さ依存に伴う脆性ー延性遷移域で発生すると示唆されている。この脆性破壊から延性破壊（延性流動）への遷移に伴い、プレート境界岩における塑性変形の増加が予想され、その変形モードは平面で生じる断層すべりと異なり、体積的な変形モードとして生じ得る。この体積的な変形が断層すべりと異なる変形として顕著に現れる場合、その変形成分は断層すべり面に対して法線方向の成分になると予想される。この予想に基づき、GNSSデータを用いて2001年東海SSEの震源モデルを推定したところ、断層すべりに加えて法線方向への伸張が存在する結果を得た。また、断層面に対して断層すべりの方向（東海SSEの場合は南東方向）に位置する観測点では法線方向への伸張の有無による変位の差は見られなかった一方、逆方向（北西方向）の観測点では上下成分を主として顕著な差がみられた。

もし、上記研究で示唆された非断層すべり成分が深部スロー地震発生源に共通する変形成分として存在するならば、短期的スロースリップイベント（S-SSE）発生源においても存在しうる。S-SSEの継続期間は数日から一週間程度であるため（Obara & Kato, 2016）、従来同様、歪計や傾斜計のデータによる検証が望ましい。
東海地域における深部S-SSEはこれまでに多数報告されている（例えば産総研・防災科研, 2018）。これらの震源モデル推定に使用された観測点は、いずれも断層面に対して沿岸側（断層すべりの方向）に位置する。したがって、上記LSSEと同様に、S-SSE発生源における非断層すべり成分の検出を行うには、断層面に対して内陸側の観測点を併用する必要がある。東濃地震科学研究所所有の地殻活動総合観測点はS-SSE発生源の内陸側（岐阜県瑞浪市・土岐市）に位置し、S-SSE発生に伴う歪の変化が観測されている。そのため、これらの歪計データを併用してS-SSEの震源モデルを推定することで、非断層すべり成分の有無を議論できる。
観測データを用いた震源モデル推定を行う前の予備計算として、過去のS-SSEで推定された断層モデルに法線方向の変位を加えた場合に各観測点で生じる水平歪の変化を計算し、断層すべり成分のみの場合の計算結果と比較した。例として2017年11月26-27日に発生したS-SSEについて、震源モデルの変位成分（断層すべり成分：法線方向への伸張）を1.0:0.0（産総研・防災科研, 2018）, 0.9:0.1, 0.8:0.2の３通り与えた。その結果、断層面に対して内陸側に位置する東濃地震科学研究所所有の観測点は、法線方向への伸張成分が増加するにつれて主歪の方向が時計回りに回転する等の顕著な違いが見られた。一方、断層面に対して沿岸側に位置する観測点では主歪の方向に顕著な差は見られなかったものの、歪の変化量に差が見受けられた。これらの予備結果から、内陸側の観測データを併用した震源モデル推定を行うことで、S-SSE発生源の変形機構がより適切に理解される可能性が示唆される。

[参考文献]
光井・伊藤（2019）日本地球惑星科学連合2019年大会予稿集、SSS16-P18.
Obara & Kato (2016) Science, 353 (6296), 253-257.
産総研・防災科研（2018）地震予知連絡会会報、第100巻、165-182.

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Temporal change of tidal correlation of deep low frequency tremors in Bungo Channel: Relation with LSSEs and deep VLFEs

*Fuyuki Hirose[1], Akio Kobayashi[1], Kenji Maeda[2]

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency

豊後水道では，長期的スロースリップイベント（LSSE）が数年間隔で繰り返し［例えば，Kobayashi, 2017, EPS; Takagi et al., 2019, JGR］，それに同期して深部低周波微動（LFT）・深部低周波地震（LFE）が活発化している［Obara, 2010, JGR; Hirose et al., 2010, Science］．弘瀬・他 [2019, JpGU]は，気象庁LFEの潮汐相関がLSSE前に大きくなる傾向を示し，この変化はLSSEによる応力擾乱の影響が小さくなるためと解釈した．ただし，気象庁の目視によるLFEの検知能力の時間的安定性はエンベロープ相関法で決定されたLFTに比べると低い［Obara, 2010］ため，人為的な影響が含まれている可能性もある．

そこで本研究では，エンベロープ相関法で検出された防災科研
LFT［https://hinetwww11.bosai.go.jp/auth/tremor/auto_hypo_catalog］の潮汐相関の時間変化についても調査した．用いたLFTは，2001年1月1日～2017年4月30日に豊後水道直下（LSSEに隣接する領域Ba［Obara, 2010に準拠］）で発生した1507個である．理論潮汐応答を計算する際には，位置・発生時刻・断層の情報が必要となる．LFTの位置については，震央はカタログ情報をそのまま用いたが，深さは，LFTはプレート境界で発生していると考えプレート形状［Hirose et al., 2008, JGR］を考慮して決めた．発生時刻については，カタログ値をそのまま用いたが，分解能は1時間である．領域Ba内で同時刻に発生したとされたLFTは39ペアあった．断層パラメータについては，LFTはプレート境界における応力解放現象の一つという解釈を前提とし，プレート形状とプレート収束方向［DeMets et al., 2010, GJI］を考慮してLFT毎に設定した．

LFTの震源における理論潮汐応答は，固体地球潮汐と海洋潮汐荷重効果の両方を考慮し，潮汐指標として体積歪ΔV，仮定した断層面上のせん断応力Δτ，法線応力Δσ，及びΔCFF（見掛けの摩擦係数は0.1, 0.4, 0.7）の6成分を解析対象とした．体積歪及び法線応力については膨張・拡張を正，収縮・圧縮を負とした．せん断応力及びΔCFFについては断層すべりを促進する方向を正，抑制する方向を負とした．潮汐位相角は，各時系列についてイベント前及び後の極小値の位相を-180°及び180°，極小値間の極大値の位相を0°とし，その間は等分割した位相と定義した．潮汐位相角に基づき，LFTと潮汐との相関度を*p*値［Schuster, 1897］で評価した．*p*値は小さい方が高い潮汐相関度を示す．

解析の結果，LFTはΔτの潮汐位相角が0°（すべりを促進）であるときに発生しやすいことが明らかとなった．同様の結果は，気象庁LFEでもみられていた．この結果は見掛けの摩擦係数が極めて小さく，間隙水圧が極めて高いことを示唆しており，地震波速度構造から推測される流体の存在［Hirose et al., 2008］とも整合する．

解析期間中にLSSEは複数回発生している［例えば，Kobayashi, 2017, EPS; Takagi et al., 2019, JGR］．*p*値はそれらLSSE時に極めて小さく（潮汐との相関が高く）なった．同様の結果は，気象庁LFEでもみられていた．しかし，LFTでは*p*値がLSSE前に小さくなる傾向は認められなかった．気象庁LFEは目視による検測であるため，イベントの見落としの可能性はある．ただし，LFEはLFTの中でも継続時間が特に短く孤立的なイベントであるため，この特性の違いが，LFTとLFEの*p*値の時間変化における違いの要因である可能性は否定できない．細かく見ると，LSSE期間中でも*p*値が大きい（潮汐相関が低い）時期が見られ，そのタイミングでは，深部超低周波地震（dVLFE）が発生している．dVLFEも全期間ではLFTよりは低いながらも潮汐相関を持つが，上記期間の潮汐相関は低かった．

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Estimation of source spectra of deep low frequency tremors from waveforms recorded by array observation

*Yoshiki Matsuura[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Keita Nakamoto[1], Takahiko Uchide[2], Kazutoshi Imanishi[2]

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

1.はじめに

2000年頃から世界各地の沈み込み帯において、深部低周波微動(微動)やスロースリップイベント(SSE)と呼ばれる、通常の地震と比べて低周波の振動やゆっくりとした断層運動といった特徴的な滑り現象が地震学的・測地学的観測によって発見されている(e.g. Obara, 2002; Rogers and Dragert, 2003)。これら2つの現象はプレート境界面およびその周辺でのせん断滑りであると考えられているが、その発生メカニズムについては未だに不明な点がある。

微動の発生メカニズムを解明するため、その震源特性を表す震源スペクトルの推定が試みられている。しかし、そのスペクトルの形状は、高周波数で周波数の-1乗に比例して減衰する例(Ide et al., 2007)と周波数の-2乗に比例して減衰する例(Fletcher et al., 2011; Zhang et al., 2011)の2種類が報告されており、微動の震源スペクトルが高周波数でどのような減衰を示すのかという議論は未だに決着はついていない。

本研究ではアレイ観測で得られた波形データを用いることにより、微動の波形データのS/Nを上げ、震源スペクトルの形状を明らかにすることを目的とする。

2.データ・手法

解析には、産業技術総合研究所によって三重県松阪市飯高の林道に設置された、高密度地震計アレイで観測された速度波形データを利用する。林道は2本がそれぞれほぼ東西方向と南北方向に直交するような形で走っており、アレイを構成する地震計は林道沿いに十字状となるよう50～100 m間隔で計39個設置された。各地震計のサンプリング周波数は200 Hzである。解析期間は2011年02月18日～2016年11月09日までである。イベントは紀伊半島で発生したものを中心に、ハイブリッド法による低周波地震カタログに15個以上のイベントを含むような微動(8個)と、さらに気象庁一元化カタログに含まれる低周波地震(18個)、通常の地震(7個)の3種類を解析した。

微動は2～8 Hzでバンドパスフィルタをかけた速度波形データをセンブランス解析し、S/Nを高めるために波形の到来方向に基づいてスタックを行う。その後、微動の最大振幅を含むような時間窓10秒間の波形を切り出し、オフセット、トレンド処理、時間窓の両端5%にコサインテーパーを施し、時間積分して変位波形にする。変位波形はフーリエ変換して変位振幅スペクトルを得る。イベント時とノイズ時の、変位振幅スペクトルにおける振幅を比較し、イベントの振幅が卓越する1～10 Hzの周波数帯で形状を議論した。非弾性減衰の補正は Yabe and Ide (2014) を参考にして、Q値を300として行った。

3.結果

© The Seismological Society of Japan

微動の変位振幅スペクトルは両対数グラフで-2よりも-1に近い傾きを持つ。これは微動の震源スペクトルが高周波数では周波数の-1乗に比例して減衰することを示す。また、低周波地震においても震源スペクトルが周波数の-1乗に比例して減衰することが示された。

一方、通常の地震では、高周波数において変位振幅スペクトルの傾きが-2に近く、ω^{-2}モデル(Aki, 1967)に従う結果となった。

以上の結果から、微動の震源スペクトルは通常の地震の震源スペクトルとは異なる減衰特性を持つことが明らかになった。これは微動の発生メカニズムが通常の地震とは異なることを示唆している。

一方、カスケーディアの微動を扱った研究(Zhang et al., 2011)においては3～8 Hzよりも高周波数側で変位振幅スペクトルが周波数の-2乗に比例して減衰することが報告されている。今後、紀伊半島周辺で発生する微動においてもより広い周波数の範囲で変位振幅スペクトルを推定することを目的に、高周波数帯においてノイズレベルを抑える研究を進めていく予定である。

4.謝辞

本研究を進めるにあたり、気象庁の一元化震源カタログを利用させていただきました。また、ハイブリッド法による震源データは防災科学技術研究所の松澤孝紀博士より提供していただきました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Focal Mechanisms of LFEs in Parkfield by the amplitude inversion using synthetic waveforms

*Miki Aso[1,3], Naofumi Aso[2], Satoshi Ide[1]

1. Univ. of Tokyo, 2. Tokyo Tech, 3. OYO RMS Corp.

サンアンドレアス断層中央部に位置するパークフィールドでは、通常の地震のほか、深部では低周波微動・低周波地震やスロースリップイベントといった多数のスロー地震も発生している。特に、Nadeau and Dlenc (2005)によるパークフィールドでの低周波微動の発見の後、Shelly et al. (2009)により低周波地震が検出され、同じ震源で繰り返し発生する88の低周波地震ファミリーとして詳細に調べられている。最近では、Thomas et al. (2012)によって潮汐応力による応答性の違いなど、ファミリー間の多様性が報告されている。また、通常の地震の震源メカニズムは、サンアンドレアス断層直下でプレート運動に整合的な右横ずれ型を示す一方で、Coalinga地震やSan Simeon地震など、サンアンドレアス断層から数十km離れた場所では逆断層型の震源メカニズムで発生しており、一見単純そうに見える成熟した横ずれ断層帯にも多様性がある。

このような背景から、地震発生の場の物理を探るため、低周波地震の震源メカニズムの推定が試みられてきたが、西南日本等他の地域で発生する低周波地震よりも規模が小さく、震源メカニズムの推定が困難であった。

そこでAso et al. (2019, JpGU)では、最近18年間で記録された低周波地震について、パークフィールド周辺の5つの地震計ネットワークを用いて、スタック波形から震源メカニズムを推定する手法を考案した。具体的には、スタック波形のSH波最大振幅から、距離減衰・内部減衰・サイト特性および放射パターンを評価する手法を開発し、震源メカニズム解の推定を行った。

しかしながら、直達波しか考慮していなかったため、本研究では波数積分法を用いた理論波形を利用することで、反射波や後続波の影響も考慮した形で、より信頼できる震源メカニズムの推定を試みた。理論波形の計算には、Zhu and Rivera (2002)による波形計算プログラムを使用し、地盤構造として、Eberhard-Phillips (2016)により推定されたパークフィールド周辺の速度構造・減衰構造を一次元水平成層構造に置き換えて用いた。そして、三成分の振幅二乗平均の時間的な最大振幅から、サイト特性と放射パターンを評価することで、各ファミリーの震源メカニズムを推定した。

発表では、推定された多様な震源メカニズム解と、以前の手法との差異を報告する。

© The Seismological Society of Japan

A comparative study on the source process of ambient and triggered tremor based on a slip inversion analysis

*Kazuaki Ohta[1]

1. DPRI, Kyoto University

世界各地の沈み込み帯で発生するテクトニックな微動には，プレート運動による歪みを自発的に解放する自然発生微動と他の地震によって励起される誘発微動がある．自然発生微動が数ヶ月サイクルの周期的な活動を示すのに対して，誘発微動は遠地の大地震の表面波や近地地震の実体波の到達後に発生し，しばしば自然発生微動よりも大きい振幅を示す．自然発生微動と誘発微動はほぼ同じ場所で発生し，同様のすべりメカニズムを持っていると考えられるが，本当に同じところがすべっているのか，同じスケーリング則に従っているのかは定かではない．そこで本研究では断層すべり解析手法を用いて自然発生微動と誘発微動のすべりの時空間発展を調べ，詳細なすべり分布とモーメント解放過程を比較する．
四国西部の深部微動クラスタに注目し，2008年四川・汶川地震(M7.9)と2012年4月スマトラ島沖地震(M8.6)の表面波によって励起された誘発微動と，それぞれの地震の前の期間に発生した自然発生微動を解析対象とした．プレート境界面上に20 km×20 kmの震源領域を仮定し，低周波地震の波形をスタック合成した合成テンプレート波形を経験的グリーン関数として用いる微動のすべりインバージョン法(Ohta and Ide, 2017, JGR)をHi-netの3成分速度波形データに適用してそれぞれ800秒間の微動のすべりの時間発展を計算した．
微動のすべりは3つの主なパッチ状領域で起こり，800秒の間にパッチからパッチへすべりが遷移していく様子が捉えられた．これらのパッチはいずれの微動でも安定して存在しており，自然発生微動と誘発微動で棲み分けや特定のパッチを選択的に壊すというような傾向は見られなかった．モーメント解放に注目すると，これらの微動には速いモーメント解放(~1.5×10^{11} Nm/s)と遅いモーメント解放(0.3~0.5×10^{11} Nm/s)の2種類のフェーズがあり，四川地震とスマトラ島沖地震のレイリー波による誘発微動は速いモーメント解放を，スマトラ島沖地震のラブ波による誘発微動と自然発生微動は遅いモーメント解放を示すことがわかった．レイリー波励起の微動は体積歪み変化の寄与が大きいと考えられ，微動の発生に流体が関与していることが示唆される．一方で，ラブ波励起の微動と自然発生微動のモーメント解放はほぼ同じであり，これらの微動の発生にはせん断歪み変化の寄与が支配的であることが示唆される．

© The Seismological Society of Japan

Rupture processes of the repeating earthquake sequences off-Iwate that occurred after the 2011 Tohoku oki earthquake

*Ahyi Kim[1], Naoki Uchida[2]

1. Yokohama City University, 2. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）後，岩手県沖では既存の繰り返し地震の再来間隔や規模の変化が見られた他，新たな系列の発生が観測された．それらの破壊過程を詳しく調べることによってその変化の原因を検証することは，プレート境界型地震の規模や発生間隔などの発生様式を決定づける要因の理解を深めるために重要である. 本研究では岩手県沖において東北沖地震以降新たに出現した系列のうちマグニチュードの変化があった一つの系列に着目し，それらについて経験的グリーン関数(EGF)を用いた波形インバージョンを適用し破壊過程を解析し比較した．解析対象とした9つの地震について1-5Hz, 1-10Hzの帯域で解析を行った. すべり量分布は大まかには帯域によって大きな違いは無いが，細かな波形の違いは高周波でより顕著に見られ，それらがすべり分布図の詳細に現れている．すべり量分布の比較では，すべての地震が破壊開始点から下方に破壊が進行し，マグニチュード毎に平均，最大すべり量は違うが，主な破壊領域は重なる事が明らかとなった．震源位置とマグニチュードから，クラックモデル等を仮定して算出される破壊領域と実際の破壊領域の間にはズレがあり, 地震の発生様式を理解するためには波形を用いた詳細な解析が必要である事も示唆される．またすべり量分布から求められた応力降下量にも地震ごとに変化があり，平均値とピーク値両方において東北沖地震直後に高く, 後になるにつれて低くなる傾向が見られた. 波形インバージョンから求められた破壊領域はスペクトル比から求められた断層半径や応力降下量の変化とも調和的であることを確かめた. 発表ではこれらの破壊過程と周辺の地震活動や非地震性すべりとの関係について考察する.

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal change of source parameters of repeaters due to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (2)

*Kazuya Tateiwa[1], Tomomi Okada[1], Toshio Kono[1], Naoki Uchida[1]

1. Tohoku university

東北日本の太平洋プレート沈み込み帯では多くの小繰り返し地震が発生している。これら繰り返し地震の震源特性やその時空間変化を理解することは、プレート運動に伴う載荷速度や繰り返し地震と同じ構造で発生すると考えられるプレート境界での大規模地震の発生メカニズムなどを理解するうえで重要な手掛かりとなる。本研究では2011年東北地方太平洋沖地震（本震）の前後（2011年の前後５年）にプレート境界で発生した繰り返し地震について、地震観測波形を用いて推定される震源パラメータの変化について調べた。なお、本研究で解析対象となる繰り返し地震は3595系列で総数は10569個である。本発表では応力降下量の時空間変化について述べる。

本研究では応力降下量をスペクトル比法により推定した。この手法では、近接して発生した２つの地震に対して同一の観測点で得られるスペクトルの比をとることで放射特性・経路特性・サイト特性・機器特性をキャンセルでき震源特性のみを抽出することができる。なお、マグニチュード4.5以下の地震に対しては Hi-net で得られた波形を用い、マグニチュード4.6以上の地震に対しては F-net で得られた波形を用いた。コーナー周波数をグリッドサーチにより求め、Brune, 1970, 1971 および Eshelby, 1957 のモデルを用いて応力降下量を推定した。ただし、観測されるスペクトル比と理論スペクトル比のミスフィットが大きな場合はその地震を解析には用いないことにした。

本震前と本震直後１年間の応力降下量の空間分布を比較すると、岩手県中部沖から岩手県南部沖にかけてと宮城県中部沖から福島県中部沖にかけての領域では、本震後に発生する地震の応力降下量が本震前のものに比べて小さくなることが分かった。また、青森・岩手県境沖と宮城県北部沖では本震後に応力降下量が大きくなったことも分かった。これら本震後に応力降下量が大きくなった領域は本震後に応力降下量が小さくなった領域の縁にあたる。応力降下量が減少した領域は概ね Ozawa et al., 2012 によって推定された東北沖地震の余効すべりの大きな領域と対応する。このことは、余効すべりの影響で応力が充分に蓄積される前に不安定性が生じ、地震性すべりが起こったことを表していると考えられる。今後、応力降下量の時空間変化と余効すべり分布の比較のみならず、他の震源パラメータ変化との関係も調べたい。また、コーナー周波数が比較的精度よく求まった地震数は743個と少ないため、空間分解能を上げるためにもスペクトル比をとる地震ペアの選択やミスフィットの評価手法などの改良・改善を行い、地震数を増やす予定である。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of moment magnitude and corner frequency of Acoustic Emission during hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Keiichi Imakita[1], Makoto Naoi[1], Youqing Chen[1], Kazune Tanaka[1], Yuya Morishige[1], Naofumi Tsutsumi[1], Hironori Kawakata[2], Tuyoshi Ishida[1], Hiroyuki Tanaka[3], Yutaro Arima[3], Shigehiro Kitamura[3], Daisuke Hyodo[3]

1. Univ. of Kyoto, 2. Univ. of Ritsumeikan, 3. JOGMEC

1．研究背景

シェールガス・オイルの開発では，貯留層の透水性の向上のために水圧破砕技術が用いられている．水圧破砕によって亀裂が造成される際には微小地震が生じるので，地表でどの程度の震動が生じるかを適切に評価することが重要である．この強震動評価においては，コーナー周波数や応力降下量などの震源パラメタが重要である（e.g., Atkinson, 2015）．そこで本研究では，室内水圧破砕実験中に生じる微小弾性波動（Acoustic Emission，以下AE）を計測し，AEの絶対規模及びコーナー周波数を推定することで，水圧破砕で誘発される地震性イベントの震源パラメタが，通常の地震とどのような関係にあるかを評価した．

2．室内水圧破砕実験とAEモニタリング

実験には，シェールガス・オイル開発が行われている米国テキサス州のイーグルフォード層の露頭サンプル（以下，イーグルフォード頁岩）を65x65x130 mmの直方体に成形した供試体を用いた．水圧破砕時に生じるAEを，高感度・広帯域型の富士セラミックス製M304Aセンサ16個と200–750 kHzに感度を持つPhysical Acoustic Corporation製Pico センサ8個，計24個のAEセンサで計測し，P波走時から個々のイベントの震源を推定した．その後，推定された震源を初期震源として，Double Difference法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）を適用し，AE震源の再決定を行った．

3．AEセンサの周波数特性，および地震モーメントM_oの推定

AEセンサの絶対感度及び周波数特性を測定するため，ステンレス製の供試体を用意し，ある面に発振子を取り付けてパルス波を発振し，対面における振動をレーザードップラー速度計（電子技研工業株式会社製，Melectro Laser Vibrometer V100；以下LDV）で測定する試験を実施した．その後，同じ信号をAEセンサでも記録し，これをLDVの記録でdeconvolutionしてAEセンサの周波数特性を求めた．AEセンサの感度・周波数特性は供試体とのカップリング状況に依存すると考えられるので，受振側のAEセンサは12回貼り直して試験を繰り返し，得られた結果を平均化することで，AEセンサの特性を評価した．発振側のAEセンサは試験中一度も取り外さず，カップリングの影響は一定と仮定して解析を行った．

上記の手法で得られた周波数特性を用い，水圧破砕試験中に得られたAEスペクトルを補正することで個々のAEの地動変位スペクトルを推定した．これらに対してAEの理論変位スペクトルを最小二乗法でフィッティングすることで，個々のAEの地震モーメントM_O及びモーメントマグニチュードM_Wを求めた．

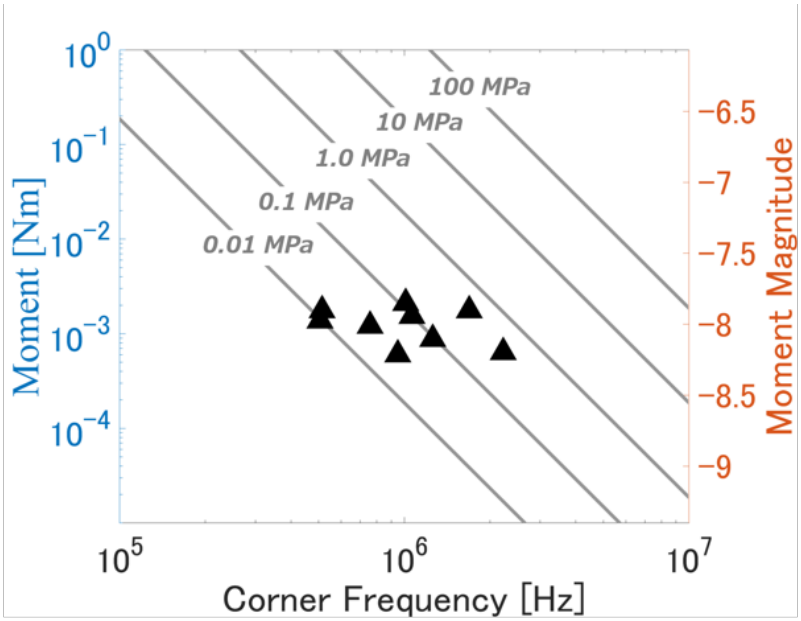
4．コーナー周波数推定

次に，近接して発生したイベントペアのP波スペクトル比を用いてコーナー周波数f_cの推定を行った（例えばIde et al. 2003）．解析は，M304Aセンサで得られた記録のみを使用し，震源間距離が3 mm以下，相互相関係数が0.8以上，観測点数が6点以上の条件を満たすイベントペアに対して実施した．一般に，自然地震において推定される応力降下量は地震の規模によらず，およそ0.1-100 MPaの間に分布することが繰り返し確認されている（e.g., Yoshimitsu et al., 2014）．本研究で得られたAEは，通常の地震とは異なりほぼ全てが引張型イベントであることがモーメントテンソル解析から確かめられているが（今北 2018），得られたコーナー周波数と地震モーメントの関係は，従来報告されている自然地震に対するスケーリング則と概ね調和的であることがわかった（図）．

© The Seismological Society of Japan

5. まとめ

室内水圧破砕実験中に生じるAEを測定し，絶対規模及びコーナー周波数を推定した．本研究で得られたAEは引張型イベントが卓越することがわかっているが，コーナー周波数と地震モーメントの関係は，従来繰り返し報告されている自然地震に対するスケーリング則と概ね調和的であることがわかった．



図．M_Oとスペクトル比法で推定したfcの関係．灰色線は応力降下量がそれぞれ0.01, 0.1, 1, 10, 100 MPaとなる場合に対応している．

© The Seismological Society of Japan

Investigation of fluid viscosity effects on laboratory hydraulic fracturing based on AE measurement and moment tensor analysis

*Rui Tanaka[1], Makoto Naoi[2], Youqing Chen[3], Kazune Yamamoto[1], Keiichi Imakita[1], Naofumi Tsutsumi[3], Akihiro Shimoda[1], Daiki Hiramatsu[3], Hironori Kawakata[4], Tsuyoshi Ishida[1], Hiroyuki Tanaka[5], Yutaro Arima[5], Shigehiro Kitamura[5], Daisuke Hyodo[5]

1. Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Department of Energy Science and Technology, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, 4. College of Science aand Engineering, Ritsumeikan University, 5. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

シェールオイル・ガスなどの非在来型資源開発や地熱開発においては，岩盤の透水性を向上させ資源の流路を確保する手法として，水圧破砕が重要な役割を果たしている．破砕流体の粘度は破砕プロセスに強く影響を及ぼすことが知られており，高粘度の流体を用いると，より広い開口幅の水圧破砕き裂が造成され（Stanchits et al. 2015），破壊時の流体圧（breakdown圧）が上昇するとともに，引張破壊がより卓越する（Ishida et al. 2016）と報告されている．本研究では，紫外線照射下で発光する蛍光剤を添加した樹脂MMA（methyl methacrylate）を破砕流体として花崗岩供試体を用いた室内水圧破砕実験を行い，破砕中に生じる微小破壊（acoustic emission; 以下AE）活動のモニタリングやそのモーメントテンソル（MT）解の評価，及び流体浸入域の直接観察を行うことで，水圧破砕における破砕流体粘度の影響を検討した．

実験には，65 x 65 x 130 mmの直方体形状の黒髪島花崗岩供試体を用い，一定レートで破砕流体（樹脂MMA）を圧入し水圧破砕を行なった．実験は5 MPaの一軸圧縮載荷下で行い（図1），破砕流体の粘度は，0.8，50，300，1000 mPa･sの4パターンで，各粘度2供試体ずつ，計8供試体で水圧破砕実験を実施した．試験中に生じるAEを供試体に設置した24個のAEセンサで測定し，得られたデータから震源カタログを作成した．また，得られたAE波形のP波初動振幅値と極性を読み取り，それらを用いて各イベントのMT解を推定した．一般にAEセンサは貼り付け状態によって感度が変わるため，各実験毎に，あるAEセンサからパルス波を発振し別のAEセンサで受振するというテストを全AEセンサに対して行い，得られたP波初動振幅値を用いてカップリング係数を推定・補正した上でMT解析を行なった．破砕後，円孔に垂直な断面を作成し，紫外線照射下で流体浸入域を発光させて観察を行なった．

図2に破砕流体粘度0.8 mPa･sの実験において得られた破砕流体圧力及びAE活動の例を示す．この実験では，圧入開始から流体圧がゆっくりと上昇し，約14.1 MPaで破砕に伴う流体圧の急降下（breakdown）が発生した．AE震源の時空間分布からは，t ~400 sから破砕孔からゆっくりとAE活動域が広がったことがわかる（第1拡大フェーズ）．また，breakdownの20秒ほど前からは，より高密度のAE集中域が破砕孔から広がった（第2拡大フェーズ）．第2拡大フェーズの開始は，流体圧がそれまでの線形上昇傾向から乖離するタイミングに一致しており，AE発生レートもこの時刻に急増する（図2 inset）．第1拡大フェーズは既存の空隙を利用して破砕流体が岩体中に浸透する過程，第2拡大フェーズは破砕孔から新規き裂が進展する過程に対応すると考えられるが，第2拡大フェーズの継続時間は破砕流体の粘度が高いほど短い傾向がみられており，破壊がより急激に進展したようである．また，流体浸入域の直接観察からは，低粘度ほど破砕流体の浸透域が広いことが確認された．MT解析結果からは（図３），全実験でせん断型に比べ引張型の方が多いという結果が得られたが，低粘度の破砕流体を用いた実験ではせん断型の割合が大きい傾向がみられた．微小既存き裂への流体の浸入が容易になることにより，せん断すべりが多く発生したことを示唆している．

© The Seismological Society of Japan

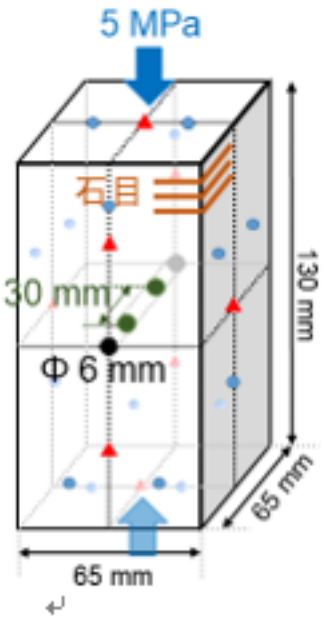


図 1. 実験に用いた供試体. 石目が載荷軸に直交するように供試体を設置した.

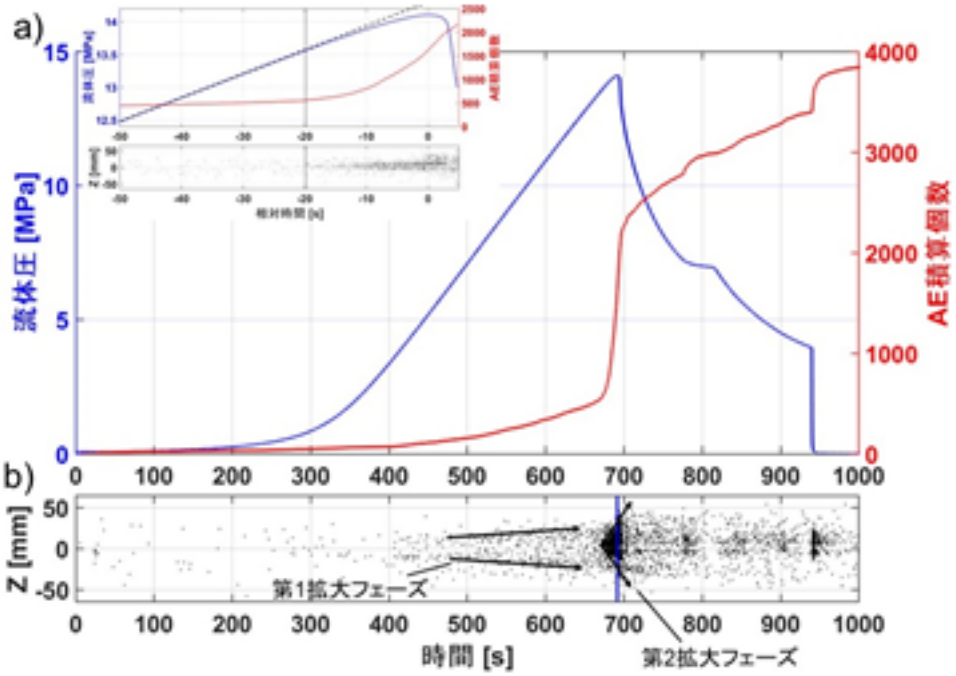


図 2. AE 解析結果 a)流体圧と AE 積算個数の時間変化 b)AE 震源の z 座標(一軸載荷軸方向) inset)第 2 拡大フェーズ開始前後の流体圧と AE 積算個数の時間変化. 黒の縦線は第 2 拡大フェーズ開始時刻. 横軸は breakdown 時刻を t=0 とした相対時間.

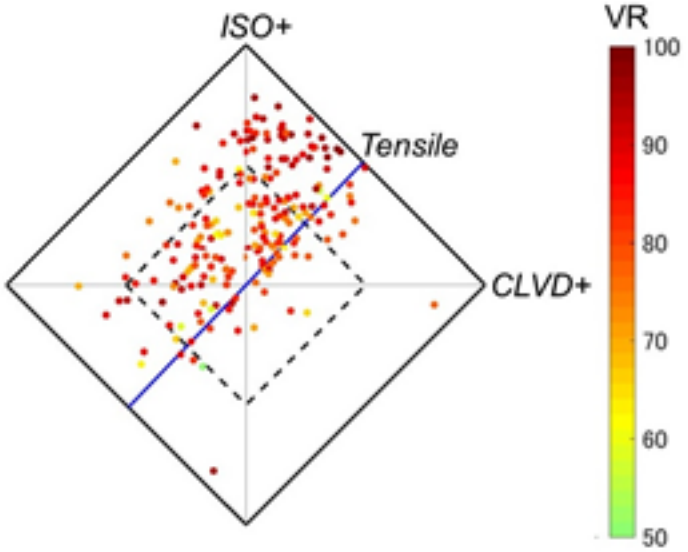


図 3. MT 解析により得られた source type plot(Vavryčuk et al. 2015). プロットカラーは各イベントの variance reduction に対応している.

© The Seismological Society of Japan

Mineral Composition and Microstructure of Host Rock and Fault Rock That Caused M5.5 Orkney Earthquake (ICDP DSeis Project)

*Yuki Yokoyama[1], Tetsuro Hirono[1], Hiroshi Ogasawara[2], Yasuo Yabe[3]

1. Osaka University, 2. Ritsumeikan University, 3. Touhoku University

2014年8月5日、南アフリカ共和国のオークニーにて、M5.5の地震(オークニー地震)が発生した。本震の震源は地下4.7±1.2kmに位置しており(Midzi et al. 2015)、余震は地下3.5-7.0kmに分布している(Ogasawara et al. 2017)。震源域の近傍には”Moab Khotsong”鉱山(モアプ鉱山)があり、より近い位置から震源断層に向けて直接掘削が可能であることから、モアプ鉱山の地下約3kmの坑道に掘削機器を設置し、この地震発生帯に向けての掘削が2017年に実施された(ICDP DSeis Project)。
DSeis Projectでは現在、３つの採掘孔の採掘が完了している。そのうち断層帯を貫通した採掘孔HoleBにて、断層岩および周辺の母岩より試料を採取し分析を進めているところである。現時点では、粉末X線回折(XRD)分析による構成鉱物の同定およびRock Jockプログラムによる鉱物の定量、そして二軸摩擦試験機を用いた実験が完了している。XRD分析の結果、断層岩を含む断層周囲の貫入岩にて黒雲母・滑石といった摩擦係数の低い鉱物が豊富に含まれていることが判明した。また、摩擦実験により、断層帯の試料では、他の母岩試料と比較して摩擦係数が極端に低いということも判明してる。
本研究では、XRD-Rock Jock解析の結果の妥当性を評価するべく、薄片での光学顕微鏡観察を実施した。珪岩では、石英・長石・少量の緑泥石がRock Jock解析で検出され、また薄片でも観察できた。断層から離れた貫入岩では、緑泥石・透閃石などが薄片で観察され、これもRock Jock解析の結果と整合的である。玄武岩では、Rock Jock解析で石英・長石が多く検出されているが、薄片ではそれらの結晶は観察できなかった。玄武岩は大部分が石基になっており、顕微鏡では観察できない微細な石英・長石の結晶が石基に多量に含まれているかもしれない。断層岩および断層を含む貫入岩では、黒雲母・方解石がRock Jock解析および薄片の両方で確認できた。一方で、Rock Jock解析では検出されなかったピークの成分は普通角閃石の一種によるものであると考えられ、薄片にて角閃石が観察された。
本研究によって、M5.5の地震を引き起こした断層および断層周辺の鉱物組成をより正確に同定することができた。ここまでの研究にて、断層岩の鉱物組成・非晶質物質量・摩擦特性と、断層岩の物理化学的性質が少しずつ明らかになってきているといえる。今後の研究展望としては、断層構成物質のさらなる精査のため、主要・微量元素分析を行い、最終的には、地震発生および滑り挙動の物質科学的な描像の理解を目指したい。

© The Seismological Society of Japan

Cascade-up process simulated in large-scale rock friction experiments

*Futoshi Yamashita[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Shiqing Xu[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Dept. Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University

地震がどのように始まるかについてはこれまで数多くの議論があり，二つの代表的なモデルが提案されている（Ellsworth and Beroza, 1995, Science）．一つはPreslipモデルであり，断層面上のある場所から非地震性すべりが始まり，そのすべり域が加速度的に拡大して断層面全体が不安定にすべるとされるものである．もう一つはCascadeモデルであり，断層面上で自発的に発生した小さな地震にともなう応力変化によって，直接/間接的に新たな地震が次々と引き起こされ，最終的に本震に至るというものである．防災科学技術研究所では，このような地震発生のメカニズム解明を目的とした大型岩石摩擦実験を実施しており，初期断層面の状態を変えることで上記の二つのモデルをそれぞれ再現することに成功している（Yamashita et al., 2017, AGU fall meeting）．本講演では特に，本震に至る前のCascade-upプロセスに注目して発表をおこなう．実験に用いた試料は変はんれい岩であり，模擬断層面は長さ1.5 m，幅0.1 mである．断層面に6.7 MPaの垂直応力を加えた後，せん断荷重を加えるとスティックスリップイベントが繰り返し発生した．その際の摩擦すべりによって断層面上に条線と摩耗物が生成され，実験を重ねる毎に断層面が粗くなっていった．これまでの実験により，摩耗物を取り除いて実験をおこなうと各スティックスリップイベント（本震）前にpreslipとそのすべり域の拡大が発生する一方で，大量の摩耗物を不均質に分布させた状態で実験を始めた場合は極微小地震（前震）が加速度的に増加し本震に至る，いわゆるCascade-upが発生することが分かっている．前震の観測は64個のピエゾ素子アレイによっておこない，それぞれのイベントの震源を決定するとともに，モーメントマグニチュード（M_w）を推定した．M_wの推定にはMcLaskey *et al.* (2015, BSSA)により提案されたボールドロップによるキャリブレーション法を採用し，前震のM_wの範囲はおよそ-7.0から-4.5と推定された．また，Bruneのモデルを適用すると応力降下量は0.1 MPaから10 MPaと推定され，他の室内実験と同様，自然地震と同じスケーリング則に従うことが明らかとなった（例えばMcLaskey *et al.*, 2014, PAGEOPH; Yoshimitsu *et al.*, 2014, GRL）．各スティックスリップイベントのサイクルにおいて本震に近づくにつれ前震の数が増加していき，また相対的に大きなイベントが増加していることがb値の減少により示された．本震の発生に向けたb値の減少は他の室内実験でも示されており（例えばGoebel et al., 2014, GRL; Rivière et al., 2018, EPSL），その理由として，b値が差応力に対して負の相関を持つ（Scholz, 1968, BSSA）ことから，載荷しているせん断応力の増加に対してb値が減少しているためと解釈されている．しかしながら本実験では，模擬断層に加えている巨視的なせん断荷重が最大値に達し一定となった後もb値が減少し続けており，単に載荷応力との関係性からではb値の減少の理由が説明できないことが示されている．そこで模擬断層の相対変位を調べたところ，断層は完全に固着しておらずゆっくりとすべり続けており，さらに本震に向けてそのすべりが加速していることが明らかとなった．また，巨視的なせん断荷重が最大値に達した後も断層はすべり続けていることから，Cascade-upの最終プロセスにおいては前震の発生による断層面上の応力の再配分が自発的に促進され，外部からの応力増加がなくても前震の規模が成長しすべりが加速して本震に至っていることが示された．今後，これらのデータを再現可能な定量モデルを構築する予定である．

© The Seismological Society of Japan

Dynamic Aspects of Rupture Propagation at a Subsonic but Near-Rayleigh Wave Speed

*Koji Uenishi[1]

1. GSFS, Univ. Tokyo

In seismology, instead of using the terminology "Doppler effect" referring to frequency variations in observed waves, waves radiated from moving seismic sources are usually evaluated in light of change in radiation pattern, directivity or the finiteness factor, despite the fact that the variation in the wave field related to seismic pulses radiated from sources propagating at certain speeds is a straight outcome of the Doppler effect (Douglas, Hudson and Pearce, *BSSA*, 1988; Uenishi, *IUGG*, 2019). Here, dynamics of rupture propagation is briefly described in view of this Doppler effect or wave field that changes with the relative rupture propagation speed, namely, the Mach numbers. It is indicated that if the speed of rupture propagation is in a supershear or supersonic range exceeding one or both of the body wave speed(s), Mach front(s) and accompanying intense seismic oscillations can be induced (e.g. Uenishi, *Ph.D. thesis*, 1997, Uenishi, Rossmanith and Scheidegger, *BSSA*, 1999). The physical phenomena can be visibly depicted by taking into account an energy source (line load) steadily moving at a constant speed V over an isotropic, homogeneous linear elastic half-space, with longitudinal and shear wave speeds being V_P and V_S, respectively. The characteristics of the solution to this problem are governed by the two Mach numbers M_P and M_S or V/V_P and V/V_S, respectively, and three cases (a) supersonic ($1 < M_P < M_S$ or $V_S < V_P < V$), (b) transonic or supershear ($M_P < 1 < M_S$ or $V_S < V < V_P$) and (c) subsonic ($M_P < M_S < 1$ or $V < V_S < V_P$) can be recognized. While the isochromatic fringe pattern (contours of the maximum in-plane shear stress) or wave field for the (a) supersonic case is composed of only two singular lines or Mach fronts, in the (b) supershear case there is one single Mach front due to the shear wave and the longitudinal wave information is widely spread in the asymmetric wave pattern. In the case of (c) subsonic energy source propagation, the fringe patterns are symmetric like static ones although the source is dynamically traveling. However, unlike sound propagation in the air, even in the subsonic case, at the Rayleigh wave speed ($V = V_R$), the stresses become infinite (Rossmanith, Uenishi and Kouzniak, *Fragblast*, 1997; Uenishi and Rossmanith, *Fragblast*, 1998). That is, rupture propagation at a near-Rayleigh speed can cause very severe, resonance-like seismic motion. Thus, dynamically, in order to have strong seismic motion, the fault rupture need not be supershear. It can be still subsonic. This viewpoint is reinforced by the theoretical investigation of the stress field around a dynamically propagating rupture, as described by both singular elastic crack models and slip-weakening rupture models (Poliakov, Dmowska and Rice, *JGR*, 2002) where the rupture speed V, especially that close to V_R, is shown to play a crucial role in the prediction of the change of the size of damage regions around a rupturing fault. However, this resonance or the generation of larger damage regions due to dynamic rupture at a near-Rayleigh wave speed, or some 90 percent of the relevant shear wave speed, seems to be nearly ignored, even though such a speed in the subsonic range is frequently assumed in kinematic seismic inversions.

Acknowledgements: The fruitful discussion with Professor James R. Rice and Doctor R. Dmowska at Harvard University is kindly acknowledged.

© The Seismological Society of Japan

Secondary Rupture at a Distance from the Primary One without Further External Loading

*Koji Uenishi[1,2], Yuki Fukuda[2], Kunihiro Nagasawa[2]

1. GSFS, Univ. Tokyo, 2. Sch. Eng., Univ. Tokyo

In this series of experimental investigation into deeper understanding of the relation between the local and global behavior of multiple cracks - here, equivalent to potential rupture nucleation areas - that are broadly distributed in a brittle solid medium, we are tracing each individual mechanical interaction of cracks while measuring collective stress-strain curves and physical properties like tensile strength of the medium. For this purpose, we are using a high-speed digital video camera and a tensile testing machine with two-dimensional, initially linear elastic rectangular polycarbonate specimens. So far, we have experimentally confirmed parts of the theoretical predictions such as the change in the stress-strain relation with the prescribed constant strain rate externally applied to the specimen, including the increase of the overall tensile strength with the given strain rate, at least in a relatively smaller strain rate range (*SSJ Fall Meeting*, 2017, 2018; *JpGU*, 2019). Here, our attention is paid more to the secondary rupture that is initiated due to the expansion of the primary rupture and its possible effect on the global nature of the medium considered. By varying the initial distribution pattern and density of cracks, together with the experimental technique of dynamic photoelasticity, we investigate how actually the main rupture elongates and propagates, and how the primary rupture-induced waves can generate secondary ruptures, which will probably not be recognized simply by the examination of the global stress-strain relation. Although some researchers do insist that rupture can develop only when external load (e.g. gas generated by ignition of explosives) is directly applied to the solid specimen, we have found that after a total split of the specimen into two, the initiation and propagation of the secondary rupture can occur at a distant position from the primary rupture, i.e. rupture may jump even without presence of further external load. Surprisingly, in our observations, the direction of propagation of the secondary rupture is opposite to that of the primary one. Thus, the start of the secondary rupture propagation is apparently not driven by additionally applied external energy, but it is owing to dynamic waves induced by the primary rupture. Because the primary rupture completely divides the specimen, the external remote load quasi-statically applied to the specimen until the total split becomes zero when the secondary rupture is initiated. In other words, the expansion or influence of the secondary rupture really cannot be traced by the global stress-strain relation collected by the tensile testing machine. The results indicate the importance of observing not only the global or collective behavior but also the local individual interaction or dynamic stress change / wave motion if the specimen is of finite size.

Acknowledgements: We are grateful to the generous support provided by the Construction Engineering Research Institute Foundation in Kobe, Japan.

© The Seismological Society of Japan

Dynamic rupture simulation on a non-planer fault allowing fault-normal displacement discontinuity

*Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2]

1. Kyoto Univ., 2. DPRI, KU

はじめに

非平面断層の動的破壊を数値計算によってシミュレートした先行研究は数多くあるものの、断層の「開く」影響を考慮に入れたものは少ない。しかしながら地震時の破壊プロセスについて考える際、断層の開口の影響を必ずしも無視できるとは限らない。たとえば火山地域などで見られるTensile-shearクラックモデル(e.g., Shimizu et al., 1987)では 、斜めに２枚の亀裂が接続するような幾何形状になっており、一方ですべりが、もう一方で開口が生じる。また、2000年鳥取県西部地震の余震域において、Non-double couple 成分を持つ微小地震が観測されており、部分的な開口の可能性が指摘されている(Hayashida et al., 2019, JpGU)。特に非平面断層を考える場合において、部分的な開口が破壊過程に影響を及ぼす可能性があると考えられる。断層が開くことで断層面の接触がなくなれば、せん断方向の降伏応力がゼロになるため、滑りが伝播しやすくなる。この効果を定量的に考えるため、シミュレーションを用いて開口を含む断層の破壊を再現した。

計算手法

二次元面内問題を仮定し、境界積分方程式法を用いた。離散化には時空間的に区分的に一様な滑り速度を考えたTada and Madariaga (2001) の手法を用いた。しかし、Mode IおよびMode IIの両方が安定的に解ける数値計算条件は限られており、開口を許す破壊の計算は困難である。そのため、Noda and Lapusta (2010) の Predictor-Corrector 法を用いたより安定性の高い時間発展手法 (野田 他, 2019, 本学会) を用いた。
断層の構成則には、Slip-weakening law を仮定し、摩擦的である、すなわち降伏応力が圧縮の法線応力（引張が正）に比例するとした。また、法線応力が正の値にならないように開口が生じるとした。

断層形状の設定

破壊シミュレーションを行う断層として、折れ曲がりを含む区分的に直線的な断層を想定した。断層形状および初期応力を適切に設定することで、断層の屈曲部で開口が生じる問題設定を作ることができる。本発表では、開口が生じたケースと生じないケースを比較した結果について論じる。

© The Seismological Society of Japan

On stability of time-marching schemes for simulation of dynamic rupture using a boundary integral equation method

*Hiroyuki Noda[1], Yuuki Kurihara[2], Saisuke Sato[1]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate school of Science, Kyoto University

動的破壊の数値計算において境界積分方程式法（BIEM）は、半解析的であり精度の良い計算が可能であること、境界面のみを離散化すればよいので数値資源的に有利であること、等の利点により現在広く利用されている重要な手法の一つである。空間領域におけるグリーン関数を用いたBIEMは、断層面の複雑な形状を表現する事が可能であり、様々な地球物理学的に重要な問題への応用が可能である。例えば、火山地帯におけるダイクの貫入イベントや水圧破砕、高圧間隙流体の関与や示唆される非ダブルカップル成分に富む（断層の開口が示唆される）地震のモデリングが考えられる。本発表では、我々が断層の開口を許す数値計算を試みる際に問題となった数値振動の増大に関する解析の報告と、数値振動を抑えることのできる時間発展手法の提案を行う。

断層が開口を伴い変位する問題を考える場合、混合モードの破壊を扱う事となる。単純化した２次元問題において、Tada and Madariaga (2001)（T&M）は時空間的に区分的に一様な滑り速度に対するグリーン関数をまとめ、それを用いた時間発展法の性質を調べた。彼らの手法にはhT、etの２つの無次元パラメータが存在する。hTは１時間ステップにS波が進む空間グリッド数であり、etは応力を評価する時点の時間ステップ内での位置（0が過去端、1が未来端）である。彼らは自己相似破壊を計算した際の数値解の振動から、数値計算手法の安定性を定義しパラメータスタディを行った。結果の特筆すべき点として、安定な (hT, et) の領域は複雑な形状を呈しており、安定な数値計算の為にはこれら無次元パラメータのチューニングが必要である事が示された。またこの安定領域は破壊のモードによって異なり、混合モード破壊を考える際に使える共通部分の (hT, et) は大変限られる事となる。更にBIEMの利点の一つとして、大きさの異なる要素を柔軟に用いて数値資源を節約する事が想定されるが、この様な場合に使用可能な (hT, et) が存在するかどうかは自明ではない。数値粘性の導入により数値解の振動発散を抑える手法 (e.g., Kame et al., 2003) が提案されているが、粘性係数の設定等のチューニングが必要となる。

T&Mの意味で不安定な条件で滑り弱化則を用いた動的破壊の計算を行った場合、破壊内部の自由表面的になった部分で、数値振動が指数関数的に増大する。この事から、自由表面のシミュレーションにおいて問題が生じるのではないかと仮説を立てた。２次元問題において線分状の自由表面を離散化し、初期の載荷（変位速度Vをゼロに拘束した場合の応力）を乱数で与えたシミュレーションを行った所、数値解として得られたVの対数増加・減少速度が (hT, et) に依存することがわかった。また全てのモードに関して、この対数増加速度とT&Mの安定性に明確な逆相関が確認された。対数増加速度が負の領域が、T&Mの安定領域に対応する。この事から上の仮説は正しかったと言える。

Noda and Lapusta (2010) は波数空間でのグリーン関数を用いたスペクトル境界積分方程式法（SBIEM）に関して、Lapusta and Liu (2009) の手法を微修正した数値解の振動が軽減される予測子修正子法を提案した。この手法では、応力を定義する時点は時間ステップの過去端（et = 0）に置くが、変位速度履歴として記憶するVは時間ステップの中央で定義される。予測子ステップとしてはT&Mにおける et = 0 と同様の時間ステップを行い、得られたVと１つ過去の時間ステップのVの平均をこのステップ中の変位速度履歴とする。次に修正子ステップとして、更新された履歴を用いて再び時間ステップを行ってより良いVとその履歴を計算し、これらを最終的な計算結果として採用する。本手法の持つ無次元パラメータはhTのみである。パラメータスタディの結果、0.40 ≦ hT ≦ 1.14 の広い条件において全てのモードに対して数値振動の減衰が確認された。数値計算の安定性に関しては、今回調べた自由表面のみならず、断層形状や摩擦構成則に起因する様々な要因が影響を与える可能性がある。今回調べた条件は、滑り弱化則や自由表面を用いる場合の必要条件である。

© The Seismological Society of Japan

今回提案する手法では１時間ステップを２段階に分けて行うが、修正子ステップで更新するのが最新の履歴のみであるので、過去の履歴に関する畳み込み積分を行う回数は増加しない。それ故、追加で必要となる計算資源は無視できる量である。本手法は経済的に数値解の質を向上させる事のできる、実用的な提案ではないかと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

A Preliminaryu Analysis of the Fault Behavior of Shallow Part of the Fault based on the Dnamic Model

*Kenichi Tsuda[1], Samaneh Arzpeima[1], Sachio Ogawa[1], Takahide Watanabe[1], Tetsurou Sasaki[2], Satoshi Iwase[2], Tomoki Mukudai[2], Jean-Paul Amouero[3]

1. Ohsaki Research Institute, 2. Chubu Electric Power Company, 3. Université Côte d'Azur and Institut de Recherche pour le Développement

プレート境界巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震では，浅部において数10mオーダーの大すべりが推定されたことや，その領域からは短周期の地震動の励起が小さいといった特徴が報告されている。また，内陸地殻内地震の2016年熊本地震では，破壊メカニズムが東北地方太平洋沖地震の様な低角な逆断層ではないものの，断層近傍の地点(西原村)において観測された特徴的な大振幅の長周期パルスの生成に断層浅部の破壊が影響した可能性も指摘されている。このように，断層浅部での地震時の破壊挙動を理解することは，想定地震の破壊メカニズムや地震動を考える上で重要であるものの，実際に発生した地震で得られた観測記録の蓄積はまだ充分でないため，数値シミュレーションに基づくアプローチが必要となる。そこで本研究では，断層浅部での地震時の破壊挙動の理解を目指すことを目的として，動力学的断層破壊シミュレーションを用いて逆断層と横ずれ断層での断層浅部での地震時の破壊挙動の違いと，地表面での地震波の励起特性に関する検討を行った。　まず，応力降下量の大きな(10MPa)領域(SMGA)を3つ設定した平面断層(傾斜角65°)モデルを作成し，横ずれ断層のメカニズムを仮定したシミュレーションを行った。次に，逆断層と横ずれ断層で対象とする地震の規模を揃えるため，横ずれ断層のシミュレーション結果から計算した地震のマグニチュード(Mw7.0)と同じになるように，逆断層のモデルのSMGAの応力降下量を調節(8MPa)した。なお，応力比(=強度超過/応力降下量)等，他の計算条件については横ずれ断層のモデルと同様とした。
横ずれ断層と逆断層とのシミュレーション結果の比較から，すべり分布やすべり速度時間関数について全体的な傾向に大きな違いは見られず，地表付近の浅部領域でのすべり速度の時間関数の継続時間について，いずれのモデルでも断層破壊の進展方向で長くなる傾向が見られた。また，地表面での地震動(最大速度)について，横ずれ断層の断層近傍において断層並行成分が大きくなる傾向が見られた。今後は，断層浅部の傾斜角やDc等に関してより詳細な検討を実施していく。

© The Seismological Society of Japan

Re-examination of possible scenarios for large earthquake in the Hyuga-nada region based on numerical simulations

*Ryoko Nakata[1], Takane Hori[1], Mamoru Hyodo[1]

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

日向灘では近年、スロー地震やＭ５～６の地震が発生するなど、地殻活動が活発である。日向灘から豊後水道にかけて分布している長期的スロースリップイベントのすべり域は３つのセグメントに分けられるが、活動の中心が隣接するセグメントに移動しているように見える。つまり、プレート間の固着があまり強くなく、すべりが走向方向に伝播できる状況であることを示唆している。長期的スロースリップイベントのupdip側は、過去に大地震が発生している場所である。この領域で、2019年3月と5月に、M5.4～6.3の地震が5回発生した。ともに、過去のＭ７前後の地震（3月の地震は1970年の地震、5月の地震は1996年10月の地震）の震源域とほぼ同じエリアで発生したと見られる。

将来の大地震の震源域となりうる強く固着した領域の端では、応力集中が生じやすい。それまで比較的静穏であった領域で地殻活動が活発になってきたということは、それまで強く固着していた領域で、固着がはがれてきていることを示唆していると考えられる。つまり、その付近で大地震発生が近くなっている可能性がある。日向灘単独で起きうる大地震としては、２タイプある。約200年に1回の頻度で発生しているM7.5以上の地震（1662年・1968年）と、10数年～数十年間隔で発生しているM7前後(6.7～7.2)の地震（1970年・1996年など）である。また、1968年の地震の震源域を含む日向灘の北側は、南海トラフで発生するM＞8地震の震源域の西端になる可能性もある。1662年の地震の震源域を含む日向灘の南側は、2011年東北地方太平洋沖地震前の状況との類似点もみられる。どのような地殻活動が、どのタイプの地震発生が近いことを示唆しているのか、起こりうるシナリオを今から検討しておく必要がある。

そこで、我々は日向灘に注目し、過去や近年の地殻活動についてまとめるとともに、新たなモデル構築および地震発生サイクルシミュレーションに取り掛かっている。本講演では、日向灘における地殻活動のまとめと、新たなシミュレーション結果に加えて、南海トラフ[Nakata et al., 2012; 2014; Hyodo et al., 2016; Nakano et al., 2018]および日本海溝 [Nakata et al., 2016]での地震発生サイクルシミュレーションで得られた知見をもとに、日向灘におけるプレート固着の現状や今後起こりうるシナリオについて検討する。

© The Seismological Society of Japan

Relationship between size and frequency of earthquakes by modified Olami-Feder-Christensen model

*Yasuyuki Iwase[1], Takao Eguchi[2]

1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Formerly at Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy

実際の地震は再現は困難であることが多いので、数値シミュレーションによる研究は欠かせない。地震発生サイクルの数値シミュレーションとは、テクトニックな運動、地殻の構造・強度、岩石の構成則などを元に構築された力学的なモデルを数値的に解くことであり、岩石破壊実験や地震観測から得られる地殻の構造などの情報が高精度化することや計算機の高性能化によって、より大規模・高精度、つまり、現実に近いシミュレーションが可能となりつつある。

一方で地震発生サイクルを簡単な数理モデルで理解しようという試みも行なわれている。Olamiらによって考案されたOlami-Feder-Christensenモデル（以下、OFCモデル）は地震を2次元のセルオートマトンによってモデル化したもので、最も簡単な地震発生サイクルモデルのひとつである。OFCモデルでは、各セルのひずみ（エネルギー）または応力の蓄積・開放・伝達のみを考慮している。
従来のOFCモデルおよびその派生モデルでは、グーテンベルグ・リヒターの法則と同様に、地震の規模とその発生頻度との間にべき乗の関係が成り立つことが多い。また、実際の地震と同様に大規模地震の周期性や余震発生頻度の変移が見られるという報告もある。このことは、OFCモデルが単純ながらも地震発生サイクルの本質を捉えている可能性を示している。しかし、実際の地球上で発生する地震発生は上に挙げた力学的な諸条件にも依存する。そこで、本研究では、OFCモデルの結果をより地震学的な立場から評価可能にするために、数理モデルとしての特徴を残しながら力学的な条件のいくつかをモデルに組み込み、条件による地震発生の変化を調査した。

一般的なOFCモデルによる計算手順は以下の通りであり、我々のモデルもこの流れに従っている。
1. 2次元の正方形、または長方形の断層を考え、これをセルに分割し、各セルに初期ひずみ（エネルギー）、または応力としてランダムな数値を与える。
2. すべてのセルでひずみを増加させる。
3. あるセルでひずみが予め設定してある臨界値に達したら、そのセルはひずみを開放し、隣接するセルに開放したひずみを分配する。なお、断層の境界の隣接セルがないセルは、境界方向へのひずみの伝達は行なわない（ひずみは失われる）。
4. もし、3の結果、分配を受けたセルでひずみが臨界値に達したら、そのセルでもひずみの解放・分配を行なう。
5. 4をすべてのセルが持つひずみが臨界値未満となるまで繰り返す。
6. すべてのセルに対して3〜5を行なう。ひとつのセルのひずみが臨界値に達したことにより、連鎖的に発生したひずみ開放の回数をひとつの地震の規模とする。
7. 終了時間（回数）に達するまで2〜6を繰り返す。

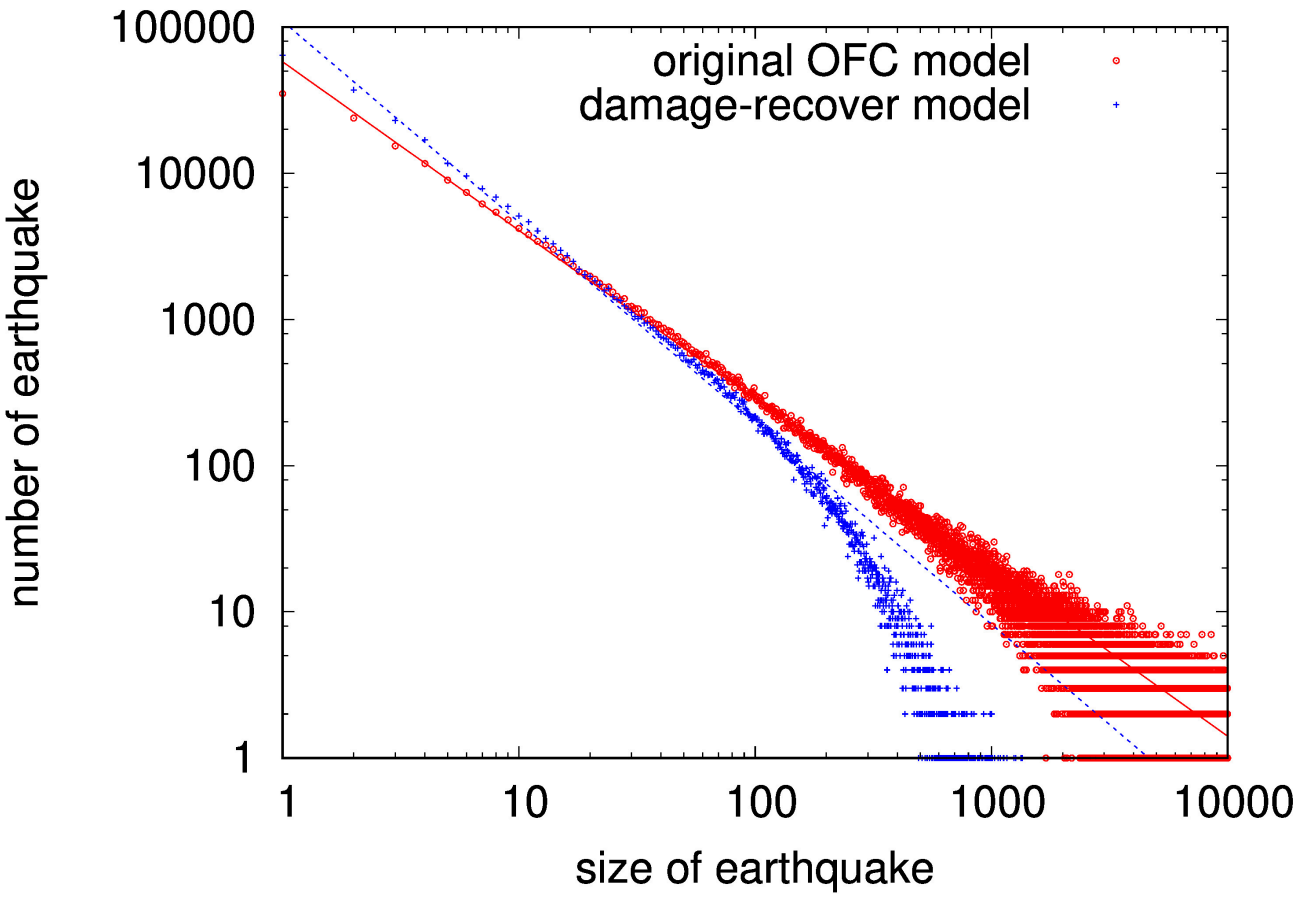
今回は、一部の領域で断層破壊強度（つまり、ひずみの臨界値）を変化するモデル、セルごとの破壊強度が時間に依存して変化するモデル、さらにセルごとのひずみの蓄積率および開放率が時簡・空間に依存して変動するモデルなどを作成し、破壊強度やひずみの蓄積・開放の空間的・時間的な変化を考慮していない従来のOFCモデルとの比較を行なった。その際に、主に、地震の規模とその発生頻度に着目して解析を行なった。

作成したモデルはすべてでグーテンベルグ・リヒター則と同様にべき乗則が成り立ち、そのべき指数は-1.0〜-1.6程度であった。断層の破壊強度を空間的にのみ変化させたモデルのべき指数は約-1.2となり、従

© The Seismological Society of Japan

来のOFCモデル（図の〇印）のべき指数とほぼ一致した。しかし、断層の破壊強度を時間的に変化させたモデルではべき指数の変化が見られた。例えば、一度地震の発生したセルの臨界値を80%に減少させ、時間ステップごとに1%づつ回復させたモデル（図の＋印）ではべき指数は約-1.4となった。また、ひずみの蓄積率や開放率が変化する場合でもべき指数に変化が生じることが示された。時間とともにひずみの蓄積率が大きくなる場合は関数の形によらずべき指数の絶対値が減少した。ひずみの開放が複数の時間ステップに渡って継続するモデルでは、小規模地震が発生しなくなったが、大規模地震に関してはべき乗則が見られ、べき指数の絶対値は大きくなった。

従来のOFCモデルでもひずみの隣接セルへの分配率を変化させるとべき指数が変化することが知られている。これらのことから、べき指数は、同一時間ステップ、異なる時間ステップに関わらず、系全体が保持し得るひずみ量に対する系全体の保持しているひずみの量に依存していることが示唆される。グーテンベルグリヒター則の傾き（b値）の変化をもたらす地下構造の不均質性や大地震の前後でのひずみ蓄積率の変化はこれに相当する可能性が考えられる。



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 18th) | General session：S10. Active Faults, Historical Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S10P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-01] Compiling descriptions on tsunami accompanied with the 1914 Sakurajima earthquake

*Reiji KOBAYASHI[1] (1. Graduate school of science and engineering, Kagoshima University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-02] Construction of fault models in the Izu-Bonin Islands area and evaluation of Tsuami

*Kimie Norimatsu[1], Hisanori Matsuyama[1], Tsuneo Ohsumi[2], Narumi Takahashi[3], Hiroyuki Fujiwara[2] (1. OYO Corporation, 2. NIED, 3. JAMSTEC/NIED)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-03] Relationship between linear surface displacements of the 2016 Kumamoto earthquake sequence and distribution of aftershocks

*Satoshi Fujiwara[1], Hiroshi Yarai[1], Tomokazu Kobayashi[1], Yu Morishita[1], Takayuki Nakano[1] (1. Geospatial Information Authority of Japan)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-04] The Timing and Extent of the Last Surface Rupture Event on the Himalayan Frontal Thrust in Central Nepal around Butwal

*Koji Okumura[1], Prakash Pokhrel[2], Soma Nath Sapkota[2], Hisao Kondo[3], Takuya Furuhashi[4] (1. Hiroshima University, 2. Department of Mines and Geology, 3. Geological Survey of Japan, 4. Taiheiyo Cement Coporation)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-05] Paleoseismic activity and fault-zone architecture of small-scale faults developed in the Late Cretaceous shale

Kazuo MIZOGUCHI[2], Toshinori Sasaki[2], *Takahiro Iida[1], Takenobu Tanaka[3] (1. CERES,Inc, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry., 3. Hanshin Consultants)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-06] Shallow geometry of the Kamishiro fault by high-resolution seismic reflection profiling

*Naoki IKEGUCHI[1], Nobuhisa MATSUTA[2], Kyoko KAGOHARA[3], Shinsuke Okada[4], Daisuke HIROUCHI[5], Shigeru TODA[6], Tatsuya ISHIYAMA[1], Taro KOIKE[7], Katsuya NODA[7], Hiroshi SATO[1] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Education, Okayama University, 3. Faculty of Education, Yamaguchi University, 4. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 5. Faculty of Education, Shinshu University, 6. Faculty of Education, Aichi Education University, 7. GEOSYS Inc.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-07] Fault Distribution and Structural Characteristic in the Nankai Trough Area, Japan

*Rei Arai[1], Narumi Takahashi[1], Minako Katsuyama[1], Shigeyoshi Tanaka[1], Hiromi Kamata[1], Tomoyuki Sato[2], Takahiko Inoue[2], Yoshiyuki Kaneda[3] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Kagawa University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S10P-08] Current status and issues of active fault research as seen from digital active fault map of Japan [Revised edition]

*Kohei Abe[1], Ryo Tateishi[2], Nao Shimoyama[1], Atsushi Miwa[1], Tomo-o Echigo[3], Shinsuke Okada[4], Toshifumi Imaizumi[4] (1. OYO Corporation, 2. University of Toyama, 3. GRI Corporation, 4. Tohoku University)

Compiling descriptions on tsunami accompanied with the 1914 Sakurajima earthquake

*Reiji KOBAYASHI[1]

1. Graduate school of science and engineering, Kagoshima University

1. はじめに
1914年1月12日桜島大正噴火と呼ばれる噴火が継続している中、18時30分頃、マグニチュード(M)7.1の地震（以降、1914年桜島地震と呼ぶ）が発生した［例えば、今村 (1920)，Omori (1922)、阿部 (1981)］。震源はOmori (1922)、Gutenberg and Richter (1954)、宇津 (1979)、阿部 (1981)、緒方・他 (2016)によって推定されている。Gutenberg and Richter (1954)は、他の震源に比べ大きく東に外れている。他の研究の震央は桜島の西から南の海岸付近、または海域に位置している。

この地震では、津波も観測されている。このことから、震源断層は海域に存在していると考えられる。震源断層についてはまだよく分かっていない。M7.1であれば、地表面や海底面に震源断層が到達していてもおかしくない。しかし、地表面や海底面に現れたという報告はない。物理探査で見つかったという報告もない。また余震分布も不明である。このあたりでは、活断層と推定されている断層もない。

鹿児島市街地での震度は最大で6弱～6強と推定される（小林・他, 2017, JpGU）。震源が鹿児島市街地に近く、M7.1とされるわりに、この震度は小さい。その原因の候補の1つとして、震源付近では地震波の放射が弱く、震源から離れた場所で地震波の放射が強い、ということが挙げられる。

震源断層の位置についてなんらかの拘束条件が得られることを期待して、本研究では、さまざまな文献における津波に関する記述を集めることにした。この過程で、疑問点が出てきた。本発表では、これまで集められた記述の整理と、そこから推察できることや疑問点について考察を行う。

2. 津波の記述の例
すべてを取り上げることができないので、代表的なものを4つ挙げる。

・気象要覧臨時増刊「桜島山噴火概況報告」（長谷川, 1914）：「爆発ニ伴ヒ津浪ハ起コラサリシモノノ如シ、只十二日午後六時二十九分ノ地震ニ際シ小津浪ヲ伴ヒタリ。波止場ニ於テ地震ト同時ニ水ノ往来ヘ上リタル所アリ此時刻ニ船中ニ居リタル船頭ノ話ニヨレハ小ナル波起コリテ二十分程度経テ更ニ大ナル波二回来レリト云フ。」

・「大正二年櫻島大爆震記」（鹿兒嶋新聞記者十餘名共纂, 1914）：「折柄水上警察署下海岸には、震動の為め大波寄せ来り、岸岐の敷石開いて石畳海中に陥入せんかと危ぶましめぬ。然り大波は石段階上に襲来し、石段階に延長ある著しき亀裂生じぬ。尚ほ當時田之浦附近に在りし人の談に徴するに、確かに海波は三段を形成して陸岸に襲来せりと。又稲荷川筋の避難船は大波の爲め破壊せるもあり、かつ海上航行中の漾船は殆んど顚覆せしやに感じたりと。」

・「姶良町郷土史 平成7年10月増補改訂版」（姶良町, 1995）：「大正三年一月一二日、突如桜島爆発が起こり、続発する大地震のために大津波が襲来して、さしもの丈夫な堤防もたちまち決壊し、今までの塩田は一瞬にして一面の海と化し、その惨状は想像もできないありさまであった。」

・「加治木町郷土史」（加治木町, 1918）：「大正三年櫻島爆発の後潮水激増を来せしが（後略）」

© The Seismological Society of Japan

3. 考察
先の3つの記述から、鹿児島市沿岸からその北にある姶良町の沿岸にかけて、船が壊れたり、堤防が決壊するような津波が襲ったことが分かる。ただし、姶良町の塩田で一面の海と化したのは、マグマだまりの縮小に伴う地盤沈降の影響もあるのではないかと思われる。鹿児島湾北岸に面する加治木町においては、爆発の後潮水激増とある。これは、地震の後と明記していないことと、津波と表現されてないことから、地盤沈下によるものである可能性がある。もしそうだとすれば、加治木町では顕著な津波がなかった可能性がある。

桜島と薩摩半島の間と、桜島と大隅半島の間は、海が狭くなっている（噴火後しばらくのちに溶岩によって桜島と大隅半島がつながった）。津波が桜島より南で発生した場合、桜島と薩摩半島の間を通って姶良町に達したときに、堤防を壊すほどの勢いがあるのか、を確かめる必要があるだろう。津波が桜島より北で発生した場合、加治木町で顕著な津波がなかった可能性があるのかを確かめる必要がある。

長谷川 (1914)において、小さな津波のあと、20分後に大きな津波が2回きたことが述べられている。また「災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1914 桜島噴火報告書」（中央防災会議・災害教訓の継承に関する専門調査会, 2011）では地震発生の1時間後に小規模な津波が発生したと書かれている。これについてはオリジナルの報告を探しているところである。いずれにしても、地震から20分～1時間後に津波が襲っていることになる。これについて考えられる原因の候補は2つある。1つめの候補は、津波の第1波が小さく、その後の第2波、第3波、と続く波のうち、20分～1時間後の波が大きかった可能性である。内湾特有の固有振動も関係しているかもしれない。2つめの候補は、本震発生後、余震などで海底地滑りが誘発された可能性である。2つのうちどちらが適切であるかは今後の検証する必要がある。

© The Seismological Society of Japan

Construction of fault models in the Izu-Bonin Islands area and evaluation of Tsuami

*Kimie Norimatsu[1], Hisanori Matsuyama[1], Tsuneo Ohsumi[2], Narumi Takahashi[3], Hiroyuki Fujiwara[2]

1. OYO Corporation, 2. NIED, 3. JAMSTEC/NIED

１．まえがき

本研究では音波探査等の観測から得られた断層情報にもとづき、津波および地震動の予測計算で利用可能な断層モデル群を構築するための手法を検討している。これまで、日本海海域および南西諸島海域について、断層パラメータの設定方法を検討し、断層モデルの設定を行い、報告してきた（乗松ほか，2018：地震学会秋大会など）。今回は伊豆・小笠原海域のアウターライズ領域および小笠原海台周辺、島弧周辺、相模湾、銭洲海嶺周辺の断層473本について、断層下端深度の設定方法が異なる断層モデル、合計946モデルを設定した。

２．断層モデルの設定

断層モデルの設定にあたって、本研究では別途解釈される観測結果をもとに、先行研究における既往の断層モデルの設定方法も参照し、断層の巨視的特性をあらわすパラメータ（断層の位置、長さ、上端および下端の深度、走向、傾斜角、すべり角、幅、平均すべり量）を設定した。用いた断層データには、観測手法や条件に起因する不確実性や断層および地震などの自然現象そのものに含まれるばらつきがある。これらについては「偶然的ばらつき」として断層モデルにばらつきの範囲を与えることにより考慮している。一方、データを解釈し、断層モデルとして単純化、規格化する際に複数の考え方や方法があり、一義的に決定できないものについては、「認識論的不確定性」として複数パターンのパラメータを設定した。平均すべり量については、断層面積とモーメント量の経験的関係をあらわすスケーリング則の平均的な値に＋１σ程度のばらつきの範囲を想定することで、偶然的ばらつきを考慮している。断層下端深度の設定については、平均的な深さとして設定する場合と、不確定性を考慮した、より安全側の設定とする場合の2通りとして設定した。

３．伊豆・小笠原海域の断層モデル

伊豆・小笠原海域においては、「海域における断層情報総合評価プロジェクト（海域断層ＰＪ）」で、アウターライズ領域の断層分布が明瞭に示された。アウターライズ地震は、海溝型地震の発生に深く関係し、大きな津波を引き起こす可能性があると考えられているものの、このような観測にもとづく断層データに乏しく、知見が不足している地震である。本研究では、海域断層ＰＪで得られた断層データを用いて、先行研究も参照し、断層下端深度の設定を検討した。平均的な下端深度を設定する方法としては、東北地方太平洋沖地震後に岩手県沖のアウターライズ領域で発生した正断層地震の発生深度を参照して設定することとし、不確定性を考慮した設定では、剛性/塑性遷移の深度として設定することとした。アウターライズ以外の領域の断層下端深度は、この地域の島弧の性質が大陸地殻と類似しているとの既往研究による知見から、平均的な下端深度として海域断層ＰＪで得られた3次元速度構造分布より、コンラッド面として設定し、不確定性を考慮した設定としては「下端をコンラッド面としたときの断層幅に5㎞を加算したときの深さ」として設定した。

４．断層モデルを用いた津波の概略予測

設定した断層モデルを用いた津波予測計算の概略的な計算結果では、島弧および相模湾、銭洲海嶺周辺の断層による津波は、複数断層の連動的破壊を考慮してもアウターライズ領域の断層から想定される津波のほうがはるかに大きな影響を引き起こすという結果が得られた。アウターライズ領域の断層から想定される津波は島嶼

© The Seismological Society of Japan

部で20ｍを越えることが予想され、本州においても、関東周辺のみならず、四国や沖縄本島にも数ｍ～5ｍ程度の津波が予想された。

５．まとめ

本研究の結果は、従来、情報が不足していたアウターライズ領域の断層について、観測データをもとにした網羅的な断層モデルの設定を行い、伊豆・小笠原地域の津波防災を検討する際の新しい知見が得た。特に、アウターライズ地震により断層近傍の地域のみでなく、距離的に離れている地域においても、比較的大きな津波が到来し得るということは、今後、津波によるハザード評価を検討する上で、アウターライズ地震を考慮することの重要性を示す結果となった。

（謝辞）　この研究は文部科学省による「海域における断層情報総合評価プロジェクト」の一環として実施しました。

© The Seismological Society of Japan

Relationship between linear surface displacements of the 2016 Kumamoto earthquake sequence and distribution of aftershocks

*Satoshi Fujiwara[1], Hiroshi Yarai[1], Tomokazu Kobayashi[1], Yu Morishita[1], Takayuki Nakano[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan

１．はじめに

2016年熊本地震では地表の広範囲で地殻変動による変位が生じており、筆者らはALOS-2のSARを用いてその変位を面的に検出している。これらの地表変位の大部分は震源断層の断層運動で説明できるものの、地表には震源断層の動きでは説明できない地表断層群（お付き合い地震断層）が数多く現れている（Fujiwara et al. 2016, EPS）。
本報告では、余震分布との関係から地表断層群がどのように生じたのかを考察する。

２．地表断層群と余震分布

図に地表断層群と2016年4月14日から2016年末までの震央分布（主に余震と考えられる）を示した。余震は、日奈久断層帯から布田川断層帯の西部にかけてと、 阿蘇カルデラの北東側に集中して存在している。地表断層群もこれらの余震活動が活発な場所に存在しているものが多い。

(1) 日奈久断層帯
断層帯の北部で地表断層群と余震分布はよく一致している。日奈久断層帯に直交し、共役関係にあると考えられる中部の地表断層付近の余震活動も一致している。南部では地表断層は見られないが余震は多い。

(2) 水前寺付近
布田川断層帯に直交する地表断層群の存在が特徴的であり、余震活動とよく一致している。この場所は震源断層モデルによるΔCFFの増加とも一致している。

(3) 阿蘇カルデラ北東
阿蘇カルデラ内からカルデラの縁を越えて北東に延びる地表断層群と余震活動が一致している。さらに北東延長にも余震活動は続いているが地表断層は見いだされていない。

(4) 阿蘇カルデラ北西・布田川断層帯東部
阿蘇カルデラの北西部は、その変位断面がのこぎりの歯のように規則的に連なる特徴的な地表断層群が数多く現れた場所である。しかし、他の地表断層群とは異なり、余震活動がまったく見られない。その南の布田川断層帯の東部やさらに南の阿蘇カルデラの南西部の地表断層帯でもまったく余震が観測されていない。

３．考察

地表断層群の出現は、熊本地震をトリガーとして発生していることは事実である。しかしながら、熊本地震の震源断層が作り出した新たなひずみ場だけからは地表断層群の動きを説明できないため、熊本地震発生前までに地表断層群を動かすひずみの蓄積があったことが必要である。余震活動の存在は、少なくとも熊本地震後にひずみが存在している証拠でもあるので、余震活動と地表断層群の成因に何らかの関連があると考えられる。

(1) 地表断層と余震が一致
水前寺付近のように、熊本地震の発生によって生じた地殻変動と地表断層の動きが一致する場所であり、震源断層によって生じた地殻変動によるひずみが余震活動も活発化させていると考えられる。

(2) 地表断層があっても余震がない

© The Seismological Society of Japan

余震活動がないのは、もともとひずみがたまっていない、熊本地震でひずみがほぼ解消された、もしくは地震が発生しにくい構造になっている、のいずれかであろう。ただし、地表断層群が発生していることから、もともとひずみがたまっていないとは考えられない。ここで注目すべきは、阿蘇カルデラの北西部に接している布田川断層帯東部でも余震活動がほとんどみられないことである。これらの場所は阿蘇カルデラ縁の西側にまとまって存在しており、火山に影響を受けた構造であることが推定される。その火山性構造も相まって、布田川断層帯東部及び地表断層群が熊本地震時に一気にひずみを解消したという仮説が考えられる。

(3) 地表断層がなく余震が活発
図の北東端や南西端にあたる。余震活動があることからひずみはある程度たまっている場所ではある。しかし、震源断層から遠くなることより、地表断層群を熊本地震がトリガーする効果が小さかったことが推測される。

謝辞
本報告で使用したALOS-2データの所有権はJAXAにあります。これらのデータは、国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づいて、JAXAから提供されたものです。地震データは気象庁の一元化震源を用いました。

© The Seismological Society of Japan

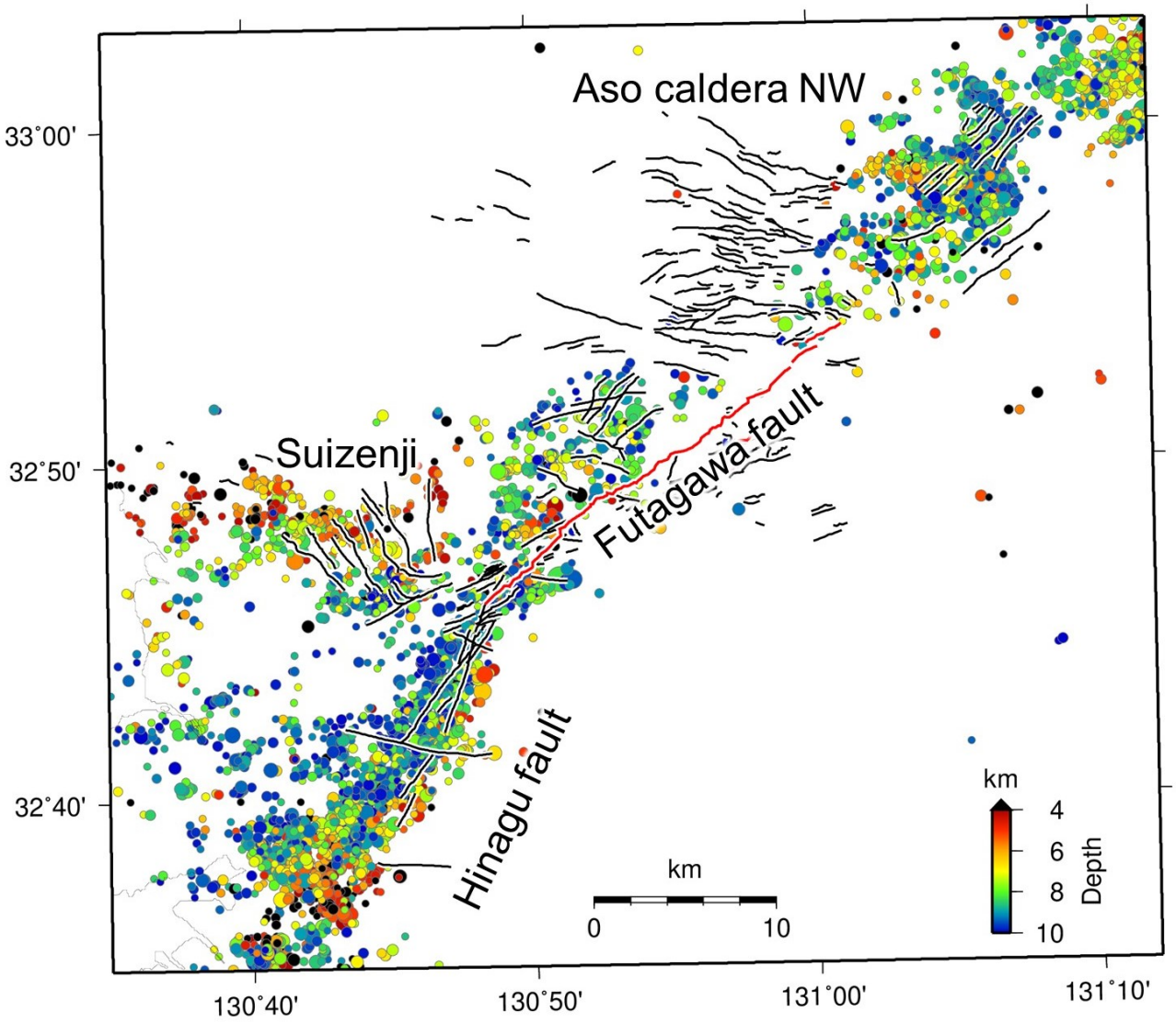


Figure Linear surface displacements and aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake sequence
April 14 – Dec. 31, 2016; 0 < depth < 10km; M > 1.5
after JMA catalog

© The Seismological Society of Japan

The Timing and Extent of the Last Surface Rupture Event on the Himalayan Frontal Thrust in Central Nepal around Butwal

*Koji Okumura[1], Prakash Pokhrel[2], Soma Nath Sapkota[2], Hisao Kondo[3], Takuya Furuhashi[4]

1. Hiroshima University, 2. Department of Mines and Geology, 3. Geological Survey of Japan, 4. Taiheiyo Cement Coporation

The 2015 Gorkha earthquake ruptured only the deeper northern part of the thrust during the Mw 7.8 earthquake, but did not rupture the surface and shallow portion of the Himalayan Frontal Thrust (HFT) in south. Since then, the evaluation of the potential of the future surface rupture event on the HFT in central Nepal in south of 2015 rupture became an important task for paleoseismology. Mishra et al. (2016), Bollinger et al. (2016), and Wesnousky et al. (2017) proposed respective 1100 CE, 1344 CE and/or 1408 CE, and 1221 CE to 1262 CE (possibly 1255 CE) for the timing of the last surface-rupture event. Each report eliminates the timing of earthquake proposed by the other authors. Therefore, it is necessary to think over the possibility of multiple events in short (less than 100 km) segments or of misleading radiocarbon dates. Also, the existence and the east termination of 1505 CE Indian central seismic gap event (Malik et al., 2017) are not certain yet. In order to solve the rupture history and rupture extents in central and western Nepal, we excavated two trenches across the HFT around the city of Butwal. One is at 12 km west of Butwal at Sorauli (27.70˚N 83.36˚E) and another is at 60 km ESE of Butwal at Susto (27.48˚ N 83.86˚E). Around the Sorauli trench site there is no clear continuous scarp along the Siwalik hill front, but ~100 m wide zone of alluvial surface adjacent to the foot of the hills tilt toward south and juxtaposed to flat alluvial surface. The boundary between the tilted surface and the flat plain is continuous and looks like the active front of a flexure scarp. The trench across a small scarp on the tilted surface did not expose any fault, but a fine sand layer was tilted towards the boundary. An Baesian model of radiocarbon dates indicates the timing of tilting is between 1328 CE and 1435 CE. This period coincides with the 1344 CE earthquake (Bollinger et al., 2016). The Susto trench in the east of Butwal was dug into the foot of ~20 m high fault/flexure scarp below an uplifted terrace surface. In this trench also, 13˚ south-dipping fine sand layers appeared but the fault was below the water table and not exposed. The timing of the tilt in Susuto trench as well as results from investigation in further west in the boundary area between 1344 CE and 1505 CE event will be reported.

© The Seismological Society of Japan

Paleoseismic activity and fault-zone architecture of small-scale faults developed in the Late Cretaceous shale

Kazuo MIZOGUCHI[2], Toshinori Sasaki[2], *Takahiro Iida[1], Takenobu Tanaka[3]

1. CERES,Inc, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry., 3. Hanshin Consultants

１．はじめに

断層破砕帯は，現在までの長い活動を通して，岩石の破砕，摩耗，変質などを経て形成されており，断層が経てきた地下環境（温度圧力や酸化還元状態）や形成史を明らかにする上で，その構成鉱物や岩石組成は重要な情報源の一つである［1,2］．しかしこれまでに行われてきた断層破砕帯の研究は，歴史地震や近年発生した地震の地震断層など活動性の高い断層に偏っており，最近10万年間活動していない，活動性の低い断層に関する研究は少ない．そこで，我々は，このような低活動度な断層における破砕帯性状の特徴を抽出する目的で調査を行ってきた［3,4,5］．今回，大分県大分市端登において，段丘堆積物に覆われている，活動度の低いと考えられる断層破砕帯の露頭を見出し，地形判読，断層破砕帯構造の記載，粉末X線回折（XRD）分析を行った．

２．露頭周辺の踏査結果および地形判読結果

断層露頭は，大分県大分市端登の竹中駅南方であり，大野川の河床と，県道631号沿い西側斜面の2か所に認められた．大野川河床沿いには犬飼層の砂岩層が分布しており，砂岩層中に礫岩層，泥岩層が数か所で挟まれているが，この泥岩層中に走向N50°E，傾斜90°，破砕帯幅10㎝程度の断層が発達しているのを確認した．また県道を挟んだ西側斜面の断層は，砂岩優勢の層に挟在する泥岩層中に発達していること，断層の走向，傾斜，破砕帯幅が，河床で認められた断層と同一の特徴を有していることから，河床の断層延長上部であると判断でき，断層は段丘堆積物によって不整合に覆われていることを確認した．地形判読の結果，この断層を不整合で覆う，河成段丘は，標高（約30 m）に位置することから，寺岡ほか（1992）［6］における中位Ⅲ面に相当すると考えられた．

３．段丘礫層と断層との関係性

露頭観察からは，断層直上の段丘礫層中に断層面の延長部は認められず，断層内にも上位の段丘礫起原の礫が揉みこまれていたりはしない．また段丘礫層の円礫の長軸方向は堆積方向を向いており断層直上部で変化したりはしない．これらのことから断層活動の影響は段丘礫層には達していないと考えられた．さらに詳細に段丘礫層と断層面の関係性を検証するため，断層面と段丘礫層を含む境界部の試料を露頭から採取し，研磨片の作成，CT撮影，薄片観察を行ったが，いずれの観察においても，断層面直上における段丘礫層中での，断層面の延長や，礫の長軸方向の変化など断層活動による影響を示す構造は認められなかった．

４．室内分析結果

破砕帯は幅10㎝で，５㎜程度の断層ガウジと，より粗粒な断層角礫で構成される．ここから断層ガウジ，断層角礫，断層破砕帯の原岩である頁岩を採取し，XRD分析および全岩化学組成分析を行った．XRD分析の結果，原岩，断層岩ともに，構成鉱物の違いはなく，石英・長石が主体で，粘土鉱物としてイライト，緑泥石，スメクタイトを含んでいる．XRDチャートのピーク強度から相対的な量比を比較しても，原岩との明瞭な

© The Seismological Society of Japan

差は認められなかった．今後さらに解析を進めて，低活動度断層における破砕部性状について鉱物学的・地球化学的特徴を明らかにする．

引用文献：［1］長友晃夫・吉田英一，2009，地質学雑誌，Vol．115，No．10，512-527．［2］丹羽正和・島田耕史・黒澤英樹・三輪敦志，2008，地質学雑誌，Vol．114，No．10，495-515．［3］飯田高弘・岡崎和彦・溝口一生，2015，日本地質学会第122年学術大会講演要旨，R12-P-12，P267．［4］岡崎和彦・飯田 高弘・溝口 一生・酒井 亨・鈴木 悠爾・稲田 徳之・亀高 正男，2015，日本地質学会第122年学術大会講演要旨，R12-P-10，P266．［5］飯田高弘・溝口一生・佐々木俊法・田中竹延，2018，日本地質学会第125年学術大会講演要旨，R13-P-11，P268．［6］寺岡易司・宮崎一博・星住英夫・吉岡敏和・酒井彰・小野晃司，1992，地域地質研究報告，地質調査所，130p．

© The Seismological Society of Japan

Shallow geometry of the Kamishiro fault by high-resolution seismic reflection profiling

*Naoki IKEGUCHI[1], Nobuhisa MATSUTA[2], Kyoko KAGOHARA[3], Shinsuke Okada[4], Daisuke HIROUCHI[5], Shigeru TODA[6], Tatsuya ISHIYAMA[1], Taro KOIKE[7], Katsuya NODA[7], Hiroshi SATO[1]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Education, Okayama University, 3. Faculty of Education, Yamaguchi University, 4. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 5. Faculty of Education, Shinshu University, 6. Faculty of Education, Aichi Education University, 7. GEOSYS Inc.

1. はじめに
2014年に発生した長野県北部の地震（Mw 6.2）は，糸魚川ー静岡構造線活断層系北部においていわゆる固有地震説に基づいて想定されている地震（例えば，地震調査研究推進本部, 2015）よりも短い区間で発生した規模の小さい地震であった．大陸地殻内の地震をより正確に評価することに関しては，断層の活動特性を明らかにすることが重要な課題となっている．そのためには，断層の地表近傍から深部にかけての断層の形状と変位量を求める必要がある．
2014年の地震時には，糸魚川ー静岡構造線活断層系の一部である神城断層沿いに地表地震断層が出現した（例えば，廣内ほか，2014）．その後の現地踏査やトレンチ掘削調査・航空レーザー測量など（例えば，Okada et al., 2015；Ishimura et al., 2019）により，地表変位の分布と地表近傍の鉛直変位量が詳細に調査された．また，強震動や地殻変動の観測から，深部の震源断層の形状・滑り量も推定されている（例えば，Panayotopoulos et al., 2016；Kobayashi et al., 2018）．これに加え，断層の地下数10 m（以下，極浅層と記する）における正確な位置・形状をイメージングすることができれば，地表近傍の鉛直変位量を，断層面上の実変位量に置き換えることが可能になり，神城断層系の活動特性をより深く理解することができる．
そこで，筆者らは，今回出現した地表地震断層の極浅層における断層の形状および地質構造を高分解能にイメージングすることを目的として，極浅層S波反射法地震探査を実施した．また，極浅層と浅層の構造の繋がりを明らかにするために，浅層P波反射法地震探査も併せて実施した．

2. 反射法地震探査
S波探査は，2017年11月3～10日および2018年11月1～9日にかけて，長野県白馬村内の地表地震断層を横切る6測線（塩島測線・大出北測線・大出南測線・ウイング21測線・飯森測線・堀之内測線）において実施した．震源にはGEOSYM社製の可搬型S波電磁式バイブレーター型震源ELVISを用いた．スイープ周波数は20～120 Hz，スィープ長は10秒である．受振には96チャンネルのSH波用ジオフォン（固有周波数14 Hz）を装備したランドストリーマーを使用した．発震点間隔は1 m（ウイング21測線のみ発震点間隔2 m），受振点間隔は50 cm，サンプリング間隔は1 msecとして観測を行った．
P波探査は2018年10月29～31日にかけて，神城断層を横切る佐野地域から内山地域における約1 kmの測線で実施した．なお，この地域では2014年の地震時には地表地震断層が出現しなかった．震源には地震研究所所有のミニバイブレーター（IVI社製）を用いた．スイープ周波数は10～120 Hz，スィープ長は18秒である．受振には144チャンネルの独立型レコーダーGSRを使用した．発震点間隔は5 m，受振点間隔は10 m，サンプリング間隔は1 msecとして観測を行った．
解析は，S波測線・P波測線共に一般的な共通反射点重合法に従って行った．

3. 神城断層先端部の構造と地表地震断層の関係
解析で得られた深度断面図と対比可能な測線近傍のボーリング資料や表層地質に基づき，反射パターンの変化及び変形構造に注目して，地表近傍から最大で深度100 mまでの断層の規模・形状および地質構造を推定した．それぞれの反射法地震探査断面において，2014年の地表地震断層（例えば，Okada et al., 2015）に対応する断層構造を把握することができた．この他，これまで確認されておらず，2014年の地震時にも活動していない伏在逆断層の存在も推定される．ウイング21測線では，小疇ほか（1974）などのボーリング資料や重

© The Seismological Society of Japan

力異常データを統合的に検討することで，探査地域の西側に少なくとも二条の東傾斜の伏在断層の存在が推定される．これらの深度断面図の検討により得られた地表地震断層の極浅層部における傾斜角は，航空レーザー測量（Ishimura et al., 2019）で推定された傾斜角より有意に小さい．

謝辞
本研究では，2018年度科研費新学術領域JP17H05315（代表：松多信尚）及び「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の経費を使用した．
また，ボーリングデータの使用と発表の許可を頂いた北陽建設株式会社に厚く御礼を申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Fault Distribution and Structural Characteristic in the Nankai Trough Area, Japan

*Rei Arai[1], Narumi Takahashi[1], Minako Katsuyama[1], Shigeyoshi Tanaka[1], Hiromi Kamata[1], Tomoyuki Sato[2], Takahiko Inoue[2], Yoshiyuki Kaneda[3]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Kagawa University

JAMSTECは平成25年度より、文部科学省からの委託事業として、「海域における断層情報総合評価プロジェクト」を実施している。このプロジェクトでは、日本周辺海域の断層情報を統一的な基準で整備し、津波ハザード評価のための基礎資料を提供することを目的とし、既存の反射法地震探査データや赤色立体海底地形図等を利用して断層分布図を作成している。これまで、平成25・26年度に日本海全域、平成27・28年度に南西諸島海域、平成29年度に房総沖～伊豆・小笠原諸島海域について断層分布図を作成した。平成30年度より、南海トラフ海域を対象に断層解釈作業を実施しており、現在までに同海域東部における断層分布を明らかにしている。本プロジェクトにおいては、断層分布図を作成するにあたり、経済産業省の国内石油・天然ガス基礎調査の一環としてJOGMECが受託した基礎物理探査・基礎試錐、AISTの浅層反射法探査、JAMSTECや海上保安庁の海底下構造探査などの地震探査データを収集し、それらを解釈の基礎データとした。なお、収集した一部の反射法地震探査データについては品質および深部イメージングを向上させるため、ノイズ除去手法など最新のデータ処理技術を適用する再解析を実施し、処理結果の統一化を図った。断層解釈作業にはDecision Space Geoscience（Landmark社製ソフトウェア）を利用し、解釈に供した反射法データは、本発表の海域を含む伊豆・小笠原～南海トラフ海域の既往調査を対象に、経済産業省／JOGMEC、AIST、海上保安庁、JAMSTEC、民間石油会社の2D MCS/SCS測線合計1,625・総測線長173,878km、3D MCS調査数８・総調査面積4,853km^{2}に及ぶ。

このプロジェクトでは、断層特定の第一の基準を海底面下の地質構造における変位（堆積層のずれや撓曲など）の有無とし、第二の基準を海底地形における変位の有無とした。ただし、断層の空間的な発達や分布域を特定することができない場合は、海底地形図を用いてそのリニアメントをマッピングする方法で特定できた断層の空間的連続性を判断した。また、断層の種類（正/逆断層、横ずれ断層）については応力パターンやF-net（防災科学技術研究所提供）による地震のメカニズム解から深度30km以浅のデータを参考にして、地震活動と整合する断層解釈を行った。

紀伊半島南東方海域には熊野海盆が広がり、厚い堆積物で覆われる平坦面が分布している。この堆積物が被覆する古付加体は熊野海段と呼ばれる高まりで隆起し、海盆を閉塞させている。この高まりを隆起させる圧縮構造は、北東－南西方向に伸長し、その南部は潮岬南方の潮岬海底谷まで続いている。潮岬海底谷では、海底谷下の基盤深度は相対的に西側が浅くなっていることが知られており（Mochizuki et al., 1998）、海底谷に沿った深部断層構造が示唆される。なお、上盤側の圧縮構造は海底谷を越えて連続しており、海底谷は構造に影響を受けて蛇行したものと考えられる。

室戸岬沖から紀伊水道沖には、陸側に凸に曲がる外縁隆起帯の土佐ばえが発達する。比高３km以上の海山が沈み込んでいることが知られており（Kodaira et al., 2000）、その沈み込みによる圧縮応力により深部に逆断層が確認されている。隆起帯の頂部や海側基部には、地形的な窪みが隆起帯に並行して分布しており、海山の沈み込みによって上盤側に引張応力が生じ、正断層が発達したものと考えられる。

本発表では、南海トラフ海域紀伊半島沖から紀伊水道にかけての断層分布・構造的特徴を、解釈反射記録断面や詳細海底地形図を用いて解説し、海域断層分布図情報を提供する。

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Current status and issues of active fault research as seen from digital active fault map of Japan [Revised edition]

*Kohei Abe[1], Ryo Tateishi[2], Nao Shimoyama[1], Atsushi Miwa[1], Tomo-o Echigo[3], Shinsuke Okada[4], Toshifumi Imaizumi[4]

1. OYO Corporation, 2. University of Toyama, 3. GRI Corporation, 4. Tohoku University

1．新編の概要と本論の目的

「活断層詳細デジタルマップ」の初版（以下，旧版と呼ぶ）の改訂版を「新編」として2018年3月に刊行した．新編では，ビューアを一新し，基図を国土地理院の電子地形図に刷新した．さらに電子地形図とDEMから立体地形図を作成し，その上に活断層線を載せた立体活断層図を収録した．その他，伏在活断層及び1891年濃尾地震以降に生じた主な地表地震断層を新たに図示した．また，活断層帯に関連する文献を属性情報として整理した．さらに，断層関連情報として，断層変位量に関する情報，トレンチ調査位置，主要な活断層を横切る反射法地震探査の測線を表示した．これらの断層関連情報の収録数は，文献情報が約6,000点，断層変位量に関する情報が約8,000点，トレンチ調査の位置が約750点，反射法地震探査測線の位置が約500点である．本論は，新編の編集作業で収集・整理した情報に基づいて戦後の活断層調査研究の推移と成果を振り返り，主に震源断層モデル構築に向けた課題を解決するための提案を示す．

2．戦後の活断層調査研究の進展

戦後から2016年までの活断層研究に関連する文献数，トレンチ調査数，反射法地震探査数の推移を見ると，活断層の基本的な特徴を明らかにした黎明期（1950年代～1960年代），全国の活断層分布の把握が進んだ揺籃期（1970年代），活断層を対象としたトレンチ調査と反射法地震探査が始まった確立期（1980年代～1994年），1995年兵庫県南部地震を契機に調査が大きく進んだ発展期（1995年～2006年），大型研究プロジェクトが中心となっている成熟期（2007年～2016年）の5つの時代に概ね分けられ，長年活断層調査の主要な手法であったトレンチ調査と反射法地震探査は減少傾向にあることが分かった．

3．これまでの活断層調査から得られた震源断層に関するデータの整理

地震調査研究推進本部により選定されている主要活断層帯（114断層帯）のうち主として陸域に分布する108断層帯を対象として，これまでに得られた活断層の分布と長さ，平均変位速度，単位変位量，また震源断層とは直接関連しないが最新活動時期，活動間隔について整理した．その結果，活断層の分布と長さについては伏在活断層とセグメンテーションの問題が残っていることが分かった．平均変位速度については，横ずれ断層で判明率が低く，断層変位基準の年代を知る方法がないという問題が依然残されている．単位変位量については，横ずれ断層や正断層が卓越する中国地方や九州地方で判明率が低いことが課題として挙げられる．最新活動時期と活動間隔については，トレンチ調査が主要活断層帯に対してほぼ網羅的に実施されているにも関わらず未解明のものが残っている．また，両者が判明しているものについても，年代の幅が活動度から推測される活動間隔を超えており，地震が何時起こるかを予測するために必要な精度を満たしていない．

4．地震動予測のための新たな震源断層モデル作成手法の提案

ここまで，活断層調査が収束傾向にあるにも関わらず，震源断層モデルの構築にあたっていくつかの課題が残されていることを示した．これらの課題はいずれも調査手法の前提に関わるものであり，解決するためには新たな概念を導入する必要がある．ここでは，その一例として，「震源断層ー活断層システム」（佐藤ほか，2001など）をベースとした，大局的な地形と地質から震源断層モデルを構築する新たな方法を提案する．上部地殻にひずみが蓄積され，地震発生層で震源断層がずれ動いた結果，地震が発生し，その繰り返しにより，低地や段丘，尾根・谷等の地形に変位が記録され，長期的には山地や盆地が形成される．この考え方に基づけば，断層運動に伴う変位の長期的な累積によって形成される山地などの地形が震源断層の推定につながる可能性がある．本論では，高まりに着目してこの地形を「断層関連山地」と呼ぶ（図1）．震源断層の活動が累積して活断層が地表に現れるとともに断層関連山地が形成され，これを構成する地層が褶曲する．その背斜軸の位置は，断層関連山地の山稜と一致すると考えられる．断層関連山地の前縁は相対的な沈降場となり，そこに現在と同じ応力場となった時代以降の地層，すなわち鮮新ー更新統が分布することが予想され

© The Seismological Society of Japan

る．この鮮新一更新統も，その堆積・埋積過程で断層活動の影響を受けて変形する．断層関連山地と鮮新一更新統の境界では，圧縮された地層が高角に傾斜し，地質断層，あるいは座屈褶曲が形成される．このように，大局的な地形と地質構造の両方を照合することで，断層関連山地を抽出することができる．断層関連山地は震源断層の長期的な繰り返しの断層活動を反映して形成されると考えられるため，周辺の地下構造を踏まえてその発達過程を考慮することで，震源断層の大きさや形状，活動セグメントを推定できる可能性がある．

引用文献：佐藤ほか（2001）震源断層一活断層システムのイメージングの意義と現状．地学雑誌，110，838-848.

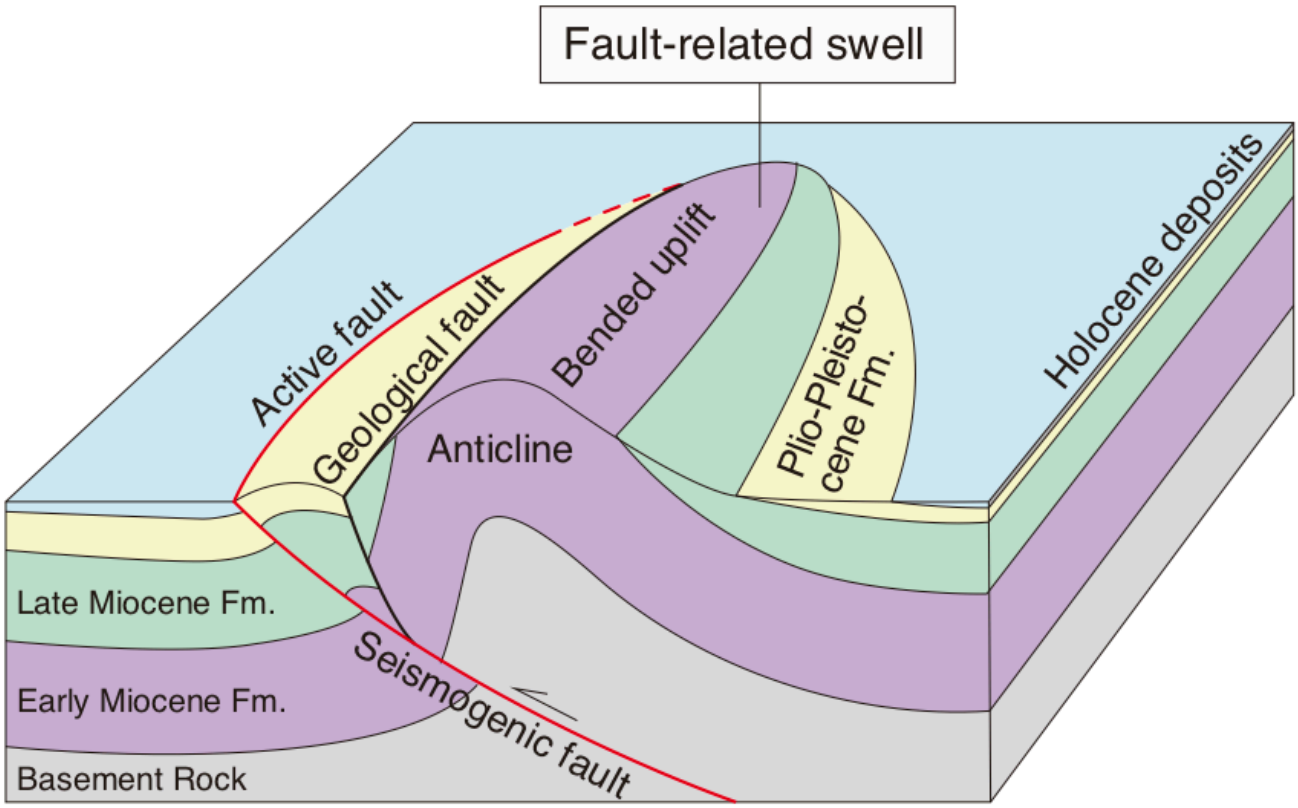


Fig. 1 Schematic diagram of fault-related swell for reverse fault.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 18th) | General session：S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S12P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-01] Estimation of the spatial stress pattern of San-in region: a preliminary analysis towards estimation with high spatial resolution

*Takaki Iwata[1], Yoshihisa Iio[2] (1. Prefectural University of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-02] Amorphization of synthetic fault gouge by rotary-shear friction experiments

*Shunya Kaneki[1], Kiyokazu Oohashi[2], Tetsuro Hirono[3], Hiroyuki Noda[1] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3. Graduate School of Science, Osaka University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-03] Experimental reproduction of sintering process in a fault during an earthquake

*Shion Osada[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-04] Experimental investigation of chemical kinetic effect on thermal maturation of carbonaceous material in a fault during an earthquake

*Shuhei Yamashita[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Osaka University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-05] Experimental constraints on origins of high Vp/Vs anomalies in slow slip regions

*Shin-ichi Uehara Uehara[1], Kaya Nishimura[1], Kazuo Mizoguchi[2] (1. Graduate school of Science, Toho University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S12P-06] Effects of ambient temperature on the frictional strength and frictional heating of dolerite in an argon atmosphere

Yuuki Yokoyama[1], *Michiyo Sawai[1], Kyuichi Kanagawa[1] (1. Chiba University)

Estimation of the spatial stress pattern of San-in region: a preliminary analysis towards estimation with high spatial resolution

*Takaki Iwata[1], Yoshihisa Iio[2]

1. Prefectural University of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University

山陰地方は，2000年鳥取県西部地震を始めとする大地震が度々発生していることが示す通り，日本において活発な内陸地震活動が見られる地域の1つである．後述する最近の解析により，その応力場の空間的な複雑さが徐々に分かりつつあるが，まだ不明瞭な点も多い．そのため，この地域の応力空間パターンを高解像度で求めることは重要と考えられる．それに向けた予備的な解析として本研究では，近年開発した推定手法により比較的粗い空間解像度で，応力空間パターンを求めることを試みた．
データには京大防災研の満点システム[飯尾・他, 京都大学防災研究所年報, 2017; Iio et al., Tectonophysics, 2018]（一部に定常観測点を含む）によって得られたP波初動を用いた．解析対象地域は2000年鳥取県西部地震の本震震央を囲む東西160 km・南北90 kmの領域である．2014年1月から2016年9月における波形記録から，読み取り精度のよいものとして，*P*波の理論走時と実際のそれとの差（O-C time）が0.1秒以内，また*S*波については読み取りがされていれば，そのO-C timeが0.2秒以内のものを選んだ．その結果，8384個の地震から得られた207,581個のP波初動データを解析した．
解析手法はIwata [JGR, 2018]によるものである．これは，事前にメカニズム解を求めることなく，P波初動から直接応力場を推定するHoriuchi et al. [JGR, 1995]やAbers et al. [JGR, 2001]の手法を拡張し，応力場の空間変動を連続的に求められるようにしたものである．なお，ここで言う「応力場」とは最大（σ_1）・中間（σ_2）・最小（σ_3）主応力軸の向きのことを指す．観測されたP波初動をよく説明する応力場の空間パターンを，ベイズ推定の枠組みで空間平滑化の拘束を課した上で求める．主応力軸の向きの空間変動は3次のB-スプラインで表現しており，今回はスプラインのknot間隔を10 kmと設定した．また、応力比（$\sigma_1 - \sigma_2$）/（$\sigma_1 - \sigma_3$）も求められるが，これについては解析領域内で空間一定とした．
推定結果について以下に記す．解析領域の端や地震がなく推定誤差が大きいところを除いて，σ_1およびσ_3軸は解析領域全体に亘って概ね水平である．σ_1軸はほぼ東西であるが，地震発生帯において東南東-西北西にいくらか回っている傾向が見られる．特に，島根県東部においては，地震発生帯の北から南に掛けて，σ_1軸が東西方向から比較的大きく回って東南東-西北西を向き，再び東西へと戻る傾向が見て取れる．このことは，2002年から2004年におけるデータを解析したKawanishi et al. [JGR, 2009]の結果や，2009年から2011年におけるデータを解析したIio et al. [Tectonophysics, 2018]と調和的であり，時期が変わっても定常的に応力の空間不均質状態が続いていることが分かる．なお，今回の解析では，推定の空間解像度に相当するスプラインのknot間隔が比較的広い故，従来の結果を再確認したに留まっているが，今後はより解像度を上げた解析により，この地域の空間応力パターンを詳細化出来る可能性がある．

© The Seismological Society of Japan

Amorphization of synthetic fault gouge by rotary-shear friction experiments

*Shunya Kaneki[1], Kiyokazu Oohashi[2], Tetsuro Hirono[3], Hiroyuki Noda[1]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3. Graduate School of Science, Osaka University

地震時に解放される歪エネルギーは遠地へ放射される地震波エネルギーと他の散逸に分割され、散逸の一部は断層面上の鉱物の非晶質化によって消費される。このような鉱物の非晶質化は、天然および室内実験の断層岩において広く確認されており（例えばYund et al., 1990；Ozawa & Takizawa, 2007）、地震時の断層の動的弱化過程に影響を与えうる可能性が指摘されている（Wada et al., 2016）。この影響を定量的に評価するためには、（１）地震性滑りによる鉱物の非晶質化量と摩擦仕事量の関係式、（２）地震間の熱水との相互作用による非晶質物質の溶解反応の速度論、（３）非晶質物質の存在が断層岩の摩擦特性に及ぼす影響、を明らかにする必要がある。本発表では（１）のテーマに関連して、模擬断層ガウジの非晶質化実験の結果について報告する。

実験には山口大学に設置の回転剪断型摩擦試験機を用いた。模擬断層ガウジとしては、代表的な非粘土鉱物として石英の粉末試料（粒径75 μm以下）、代表的な粘土鉱物としてカオリナイトの粉末試料（粒径75 μm以下）を用意した。模擬断層ガウジを2つの円柱形斑れい岩ブロック（外径25 mm）の間に挟み込み、垂直応力1もしくは3 MPa、等価滑り速度0.001もしくは1 m s^{-1}、等価滑り距離1–100 m、室温・大気乾燥条件下で回転剪断摩擦実験を行った。また実験前後試料のXRD測定を行い、得られたプロファイルから非晶質化した質量の指標となるハローピーク面積を算出した。その結果、石英は1 m s^{-1}の実験では実験前後でほとんどハロー面積に変化がなかった一方、同程度の摩擦仕事量を与えた1 mm s^{-1}の実験後試料ではハロー面積が顕著に上昇した。カオリナイトでは、１m s^{-1}の実験時の摩擦仕事量が上昇するにつれてハロー面積も増加するものの、その値はある漸近値に向かっていく傾向が見られた。カオリナイトの1 mm s^{-1}の実験後試料では、１m s^{-1}の実験と同程度の摩擦仕事量を与えた試料と比較して、わずかに大きいハロー面積が確認された。いずれの試料でも、低速の変位速度でより顕著な非晶質化が認められた。またカオリナイトは石英と比較して非晶質化しやすく、これは粘土鉱物が多く存在する断層では、より小さな摩擦仕事量でより多くの非晶質物質が生成される可能性を示唆している。今後、さらに摩擦実験・XRD測定および実験後試料の薄片観察を進め、摩擦仕事量と鉱物の非晶質化量の関係式の構築を目指す予定である。

© The Seismological Society of Japan

Experimental reproduction of sintering process in a fault during an earthquake

*Shion Osada[1], Tetsuro Hirono[1]

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震発生メカニズムを物質科学的に理解するため、断層の分析が極めて有効である。中でも、主に摩擦溶融によって形成された断層岩”シュードタキライト”は地震の化石と呼ばれる。しかし、その発生は地震のイベント数や分布と比較して極めて稀に産出し、より普遍的な指標の確立のため、新しいタイプの地震の化石の発見・確立が望まれる。そこで、本研究では溶融が生じる温度から若干低い温度で生じる焼結に着目する。焼結とは、融点以下、近傍の温度で固体の粒状体を加熱した時に、表面エネルギーの減少を駆動力とし、元素の表面拡散もしくは固体内拡散を経て、粒子間が結合する現象である。しかし、焼結が地震時に断層で生じ得るのかどうか、未だ全く研究されていない。そこで、本研究では固体の粒状体を室内摩擦実験で滑らせ、その構造変化を追跡し、さらにはそれが摩擦係数などの力学的特性にどのように影響するのかを解明することを目的とする。しかし、摩擦実験を実施する前段階として、使用する試料選定のために本発表では白浜砂岩に着目し、単純加熱実験による焼結現象の発生の有無の確認を行った。
白浜砂岩を粉末化し、直径30 mm・高さ2 mmのペレットに整形、石英管に真空封入し、その石英管を管状加熱炉で加熱した。温度と加熱時間は、700, 800, 900, 1000, 1100 ℃、90秒である。また、実験前後の試料においてX線回折装置と走査型電子顕微鏡を用いた、鉱物組成の分析と微細構造の観察を行った。
結果、700, 800 ℃で加熱した試料では粒子間の結合が観察されないが、900 ℃では焼結特有のネック構造が観察され、さらに1000 ℃以上では溶融構造が観察された。したがって、白浜砂岩における焼結温度は800 ℃～1000 ℃であると言える。また、本研究に先駆けてインド砂岩において同様の実験を行ったが、同様の700～1100 ℃の温度領域において明瞭な焼結および溶融構造は観察されなかった。インド砂岩は粘土鉱物をほとんど含まないことから、焼結が白浜砂岩で観察されるがインド砂岩で観察されない違いは、粘土鉱物の有無に起因すると考えられる。今後は、白浜砂岩を用いて摩擦実験を実施し、当初の目的である地震時の摩擦滑りに伴う焼結現象の発生と力学的挙動への影響を調べる予定である。

© The Seismological Society of Japan

Experimental investigation of chemical kinetic effect on thermal maturation of carbonaceous material in a fault during an earthquake

*Shuhei Yamashita[1], Tetsuro Hirono[1]

1. Osaka University

地震時に解放されるエネルギーの大部分は摩擦発熱によって占められる (Chester et al. 2005)．そのため，断層に記録されている過去の地震での摩擦発熱の情報を抽出することは重要である．具体的な温度検出指標には，多くが提案されているが，炭質物の熱熟成反応は不可逆的であるため，極めて有効である（Hirono et al., 2015）．一方で，地震時の断層では断層滑りに伴い，剪断・発熱に伴い結晶構造の変化や粒子の粉砕化・細粒化などのメカノケミカル効果が生じ，このメカノケミカル効果が炭質物の熱熟成を促進させる可能性が指摘されている（Kitamura et al. 2012 , Kaneki et al. 2018）．しかし，炭質物の初期熟成度への影響や加熱時の昇温速度の影響は未だ精査されていない．

そこで本研究では酸処理を行った山口県美祢市桃ノ木の大嶺炭田産の無煙炭と和光純薬工業株式会社のグラファイトに対して大気下のもと，軸荷重1 MPa, 3 MPaで滑り速度1 mm/sの実験条件で高速摩擦試験機を用いて摩擦実験を行った．その後，摩擦実験を行った試料と行っていない試料をガラス管に真空封入したものに対して管状電気炉で300～1300℃で100 ℃ ごとの温度にて，数10 K/秒の昇温速度で10秒間加熱と0.1 K/秒の昇温速度で加熱する２パターンの実験を実施した．加熱前後試料では赤外分光分析，ラマン分光分析を実施し，加熱に伴う炭質物の分子構造の変化について調べた．具体的には，各試料と各温度にて，Aliphatic C-H, Aromatic C-H, C=C bondsの状態変化について赤外分光分析で，グラファイト構造の発達についてラマン分光分析で解析した．

結果，高い昇温速度において無煙炭の赤外分光分析では摩擦後試料の方が低い温度でのピーク消失が確認された．一方グラファイトでは有意な差が得られなかった．すなわち，メカノケミカル効果の炭質物の熱熟成反応に与える影響は炭質物の初期熟成度に依存していると言える．

© The Seismological Society of Japan

Experimental constraints on origins of high Vp/Vs anomalies in slow slip regions

*Shin-ichi Uehara Uehara[1], Kaya Nishimura[1], Kazuo Mizoguchi[2]

1. Graduate school of Science, Toho University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry

世界各地のプレート沈み込み帯のプレート境界では、地震発生領域の下限付近でスロースリップが観測されている。このスロースリップのメカニズムを理解することは、地震防災や、断層メカニズムのさらなる理解などに関連して重要である。この現象の発生メカニズムにおいて、高間隙流体圧が重要な役割を果たすと、しばしば考えられてきた。そう考える根拠の一つは、この現象が起きているプレート境界付近の海洋地殻内で高Vp/Vs比(P波速度とS波速度の比)異常が観測されていることである。過去の室内実験により、高間隙流体圧と高Vp/Vs比異常が関係づけられている。しかし、断層周辺の岩石はせん断変形に伴うダメージを被っていると予想されるが、そのような岩石においても、高Vp/Vs比異常は、直接的に高間隙圧を意味するのか否かについては、未だ不明瞭である。本研究では、まず、深部のプレート沈み込み帯境界での海洋地殻中のダメージの度合いのひとつの指標として、南海トラフの四万十帯付加体中の変成玄武岩内部の鉱物脈密度を測定した。そして、ドレライト(粗粒玄武岩)を加熱冷却することで内部に亀裂を発生させた試料について、等方圧条件(封圧50MPa、間隙水圧0～49MPa)でVp、Vsを測定する実験をおこない、Vp/Vs比の応力およびダメージ依存性について検討した。ダメージの度合いが大きいほど、また封圧と間隙圧の差が小さいほど、Vp/Vs比は大きくなる傾向がみられた。本実験結果をスロースリップの発生領域に外挿できたとすると、岩石中の亀裂密度が1.5 mm^{-1}よりも大きい場合(これは、測定した変成玄武岩中の鉱物脈密度と同程度)、1.85程度のVp/Vs比(南海トラフで観測される高Vp/Vs比の下限値)は、間隙圧が静水圧であったとしても説明できる。このことは、スロースリップ発生域における高Vp/Vs比異常の主な要因として、高間隙圧だけでなく、岩石中のダメージの度合いも挙げられることを示唆する。Please see in detail Nishimura et al. (2019).

Reference: K. Nishimura, S. Uehara, and K. Mizoguchi, JGR Solid Earth, 124, https://doi.org/10.1029/2018JB016929.

© The Seismological Society of Japan

Effects of ambient temperature on the frictional strength and frictional heating of dolerite in an argon atmosphere

Yuuki Yokoyama[1], *Michiyo Sawai[1], Kyuichi Kanagawa[1]

1. Chiba University

大地震の発生時には断層が高速で大きく変位するため、断層内部に顕著な摩擦熱が発生する。この発熱によって、断層内の物質が瞬時に溶融や熱分解をすることで、断層が著しく弱くなることが90年代以降明らかとなってきた（例えばTsutsumi and Shimamoto, 1997）。地震時の断層挙動に対する温度の重要性は広く認識されてきたが、震源核が形成され地震発生時のすべり速度に至るまでの中速度領域（数mm/s ~ 数cm/s）に対する温度効果の見積もりはこれまで数例しかなく（Noda et al., 2011）、すべり速度依存性に与える背景温度の効果は明らかではない。またYao et al. (2015) では、熱伝導率の異なる母岩に同じ断層ガウジを挟み高速摩擦実験をおこなった結果、熱伝導率の違いによって摩擦係数が大きく異なることが示された。これは断層周辺の温度が断層の強度に大きく影響する可能性があることを示唆するものである。そこで本研究では、高温条件下での中速摩擦実験を実施し、岩石の摩擦特性が背景温度の変化に伴いどのように変化するのかを検証する。

実験には比較的熱破壊に強いベルファスト産ドレライトを使用し、千葉大学設置の回転式高温摩擦試験機を用いた。地下の断層は酸素に乏しい環境下にあることを考慮し、アルゴン雰囲気下（酸素濃度0.2 %程度）で、垂直応力1 MPa、すべり速度1 ~ 300 mm/s、各速度におけるすべり量10 ~ 20 mの条件で実験をおこなった。試料ホルダーを高周波コイルによって加熱することにより、背景温度20°C ~ 500°Cの条件下で力学挙動および摩擦発熱にどのような変化が見られるかを調べた。

比較的低速のすべり速度1 ~ 30 mm/sでは、背景温度20°Cおよび100°Cで速度弱化の傾向示し、摩擦係数は1 mm/sで約0.81 ~ 0.83から30 mm/sで約0.73へ低下した。一方背景温度300°C以上では、わずかに速度弱化の傾向を示すものの、摩擦係数はおよそ0.81 ~ 0.85の値を示し大きな変化が見られなかった。しかしすべり速度100 mm/sになると20°Cおよび100°Cでは摩擦係数がわずかに上昇し速度強化の性質を示したのに対し（μ = 0.75 ~ 0.79）、300°C以上では明瞭な速度弱化の傾向を示した（μ = 0.67 ~ 0.76）。さらに300 mm/sになるとすべての温度条件で摩擦係数が低下し、その低下量は背景温度が高くなるほど大きくなることがわかった（摩擦低下量μ = 0.1 ~ 0.38）。つまりドレライトは、比較的低速度では温度条件によって力学挙動にわずかな違いは見られるものの、背景温度が大きく変化しても摩擦係数には大きく影響しない一方、高速になると背景温度が高温なほどより低速で顕著に弱化する傾向が認められる。これは断層の強度（弱化）を考える際に、摩擦発熱だけでなく、真の接触面積に対する背景温度の効果などを考慮する必要性を示唆するものと考えられる。
また摩擦発熱に関しては予察的段階ではあるが、力学挙動と良い対応関係を示しており、特に高速域での著しい速度弱化時には断層面での温度上昇が認められることが低温条件下だけでなく高温条件下でも認められている。現在温度測定に関しては進行中であり、講演ではこちらも合わせて報告する予定である。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 18th) | General session：S14. Earthquake Prediction and Forecast

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S14P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-01] Spatial heterogeneity of aftershock productivity on the Kumamoto earthquake rupture modeled by the finite source ETAS model

*Yicun Guo[1], Jiancang Zhuang[1], Yosihiko Ogata[1] (1. Institute of Statistical Mathematics)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-03] Comparison of Models of Long-term Seismic Hazard and with An Application to North China

*Ziyao Xiong[1,2], Jiancang Zhuang[1], Shiyong Zhou[2] (1. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan, 2. School of Earth and Space Sciences, Peking university, Beijing, China)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-04] Water temperature change in the western region of Shizuoka Prefecture

*HIRONOBU KAMIKUBO[1] (1. Hamamatsu Kisei Junior high school)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-05] Prediction method to develop the method of detecting earthquake precursers

*Kozo Takahashi[1] (1. None)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S14P-06] We will present the theory and mechanism of earthquake prediction with attached electromagnetic observation data as the basis.

*Hidemitu Kunihiro[1] (1. JYAN Research Institute)

Spatial heterogeneity of aftershock productivity on the Kumamoto earthquake rupture modeled by the finite source ETAS model

*Yicun Guo[1], Jiancang Zhuang[1], Yosihiko Ogata[1]

1. Institute of Statistical Mathematics

We implemented an extended version of the space-time ETAS model, which simultaneously incorporates earthquake focal depths and rupture geometries of large earthquakes and applied to the 2016 Kumamoto earthquake sequence. Results show that the new model corrects the estimation biases of model parameters due to the isotropic response function of aftershock locations adopted in the point source ETAS model, and that the reconstructed patterns of aftershock productivity density along the mainshock rupture plane show significant migrations in space and time along the mainshock fault. Another interesting phenomenon is that large aftershocks tend to nucleate at the edges of high productivity areas. The decay of direct aftershocks near the mainshock rupture is consistent with static stress changes caused by the mainshock. In simulations, the incorporation of focal depths improves the forecasting resolution. Through comparisons between aftershock productivity and slip distribution of the mainshock, we find that high aftershock productivity forms complementary patterns for coseismic slips in space, indicating that aftershocks play a role in the postseismic relaxation process.

© The Seismological Society of Japan

Comparison of Models of Long-term Seismic Hazard and with An Application to North China

*Ziyao Xiong[1,2], Jiancang Zhuang[1], Shiyong Zhou[2]

1. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan, 2. School of Earth and Space Sciences, Peking university, Beijing, China

In this study, we used two variable kernel function estimation methods, proposed by Stock and Smith, and Zhuang, the Bayesian Delaunay tessellation smoothing method by Ogata (ODTB), and a newly proposed Incomplete Centroidal Voronoi tessellation (ICVT) method, to calculate the total and background seismic spatial occurrence rates for the study area. And we apply these four methods to obtain optimal estimates of the earthquake hazard in North China based on the modern earthquake catalogue.

The results were compared and analyzed through the cross-validation method, to ensure accurate reflection of the seismic activity in North China. The sophisticated ODTB method is more stable than the others, but is relatively expensive, in terms of computation demands, while Zhuang et al.’ s kernel estimate and the new ICVT method are able to provide reasonable estimates and easier to implement.

We also calculated the spatial variations of the b-value, using the Bayesian method with smoothness prior proposed by Ogata. By combining the results of seismicity rate distribution and b-value distribution, we simulate the earthquake catalogue. Compared with the original catalogue, it turns out that these four models are effective in reproducing the seismicity of the study region, suggesting their feasibility of estimating future seismic hazard.

Using comparative analyses and simulation experiments, we show that all of methods give similar spatial patterns of seismic occurrences.

© The Seismological Society of Japan

Water temperature change in the western region of Shizuoka Prefecture

*HIRONOBU KAMIKUBO[1]

1. Hamamatsu Kisei Junior high school

静岡県西部地域では2013年5月から浜松市中郡（NG）,2016年8月から湖西市新居（KOA）,磐田市中泉（IWN）,掛川市徳泉（KAT）にて白金測温抵抗体の水温センサーを用いた長期水温観測を行っている.

NGでは2014年後半から下降を続けていた水温が2016年12月末から上昇に転じ,その後急激な温度上昇が観測されている.

この時期は浜名湖周辺の長期スロースリップの収束時期と重なり地下応力が圧縮場に転じた可能性が考えられる.

2016年12月末からの浜松中郡（NG）と磐田中泉（IWN）の水温上昇が目立つがこの隣接した地域では水温の上昇と停滞が同時期に観測されている.
2016年12月末から浜松中郡（NG）で水温が上昇を始めた時期,磐田中泉（IWN）では水温の上昇が2017年半ばまで停滞している.

2017年下旬に浜松中郡（NG）で水温変化が停滞した時期,磐田中泉（IWN）では水温の上昇が観測されている.

2018年中旬に浜松中郡（NG）で水温変化が停滞した時期,磐田中泉（IWN）では水温の上昇が観測されている.

2018年下旬に磐田中泉（IWN）で水温変化が停滞・下降した時期,浜松中郡（NG）では水温の上昇が観測されている.

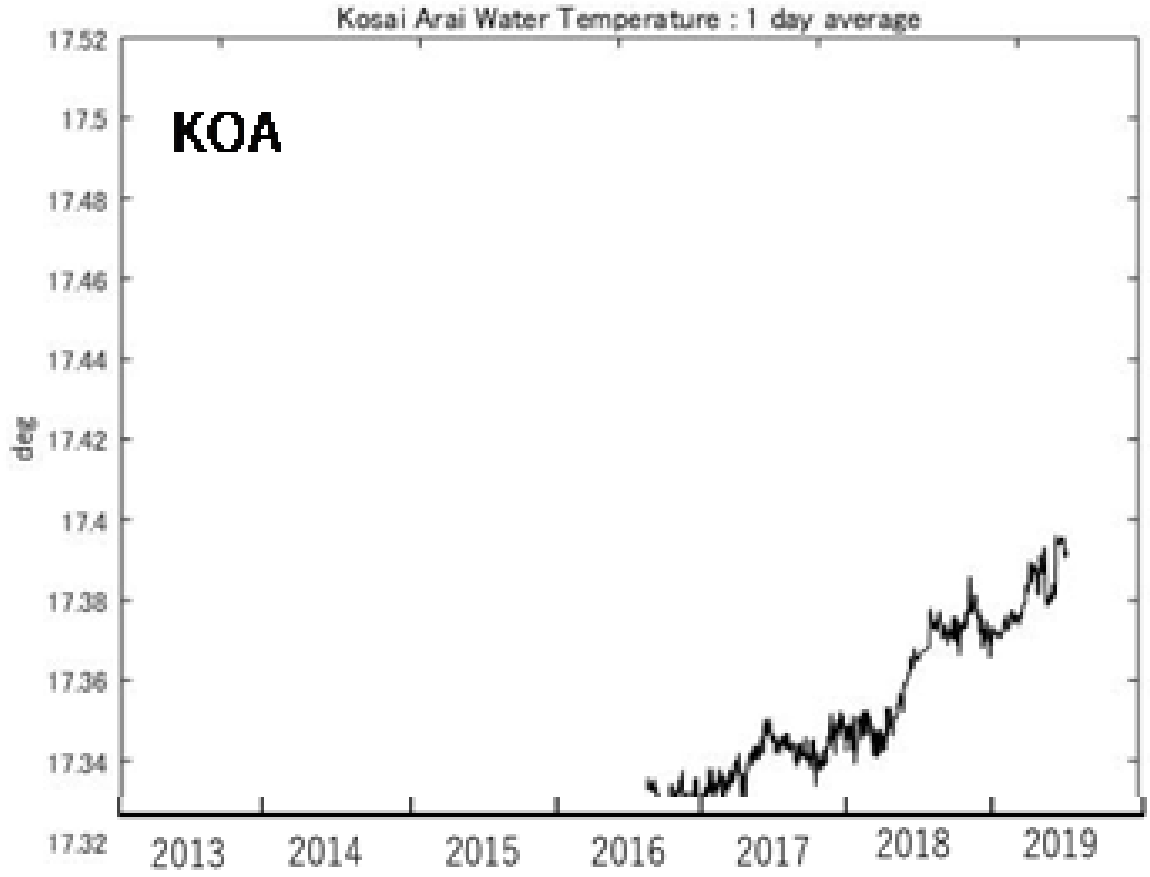
「剪断応力が集中する周辺では岩盤にねじれの歪が現れる.そこでは収縮場と膨張場が隣り合わせで生成される」（例えば, 佃:2018）ので, 圧縮場により生じる水温の上昇と収縮場により生じる水温の下降が隣り合う地域で観測された静岡県西部地域では地下の岩盤に不均等な力が加わり剪断応力の増加が進行していると考えられる.

図.上から湖西市新居(KOA)浜松市中郡(NG)磐田市中泉(IWN)掛川市徳泉(KAT)の長期水温変化

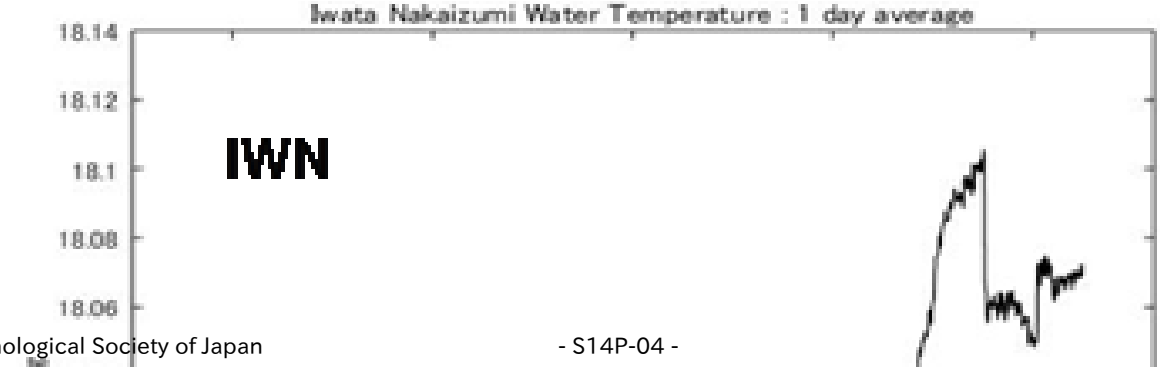
参考文献：
佃　為成，南海トラフ巨大地震発生域陸地最前線とその後方での最近の地下水変動,日本地球惑星科学連合2018年大会,SSS13-03.

上久保廣信・阿部郁男,静岡県西部地域の長期的地下水温変化,日本地震学会講演予稿集S13-P02,2018.

© The Seismological Society of Japan







© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Prediction method to develop the method of detecting earthquake precursers

*Kozo Takahashi[1]

1. None

はじめに：地震予知は、１００年以上の歳月、千億円以上の経費、多数の人材を投入して試みられてきたが、明らかになったことは、地震予知は、不可能・若しくは困難と云うことであった。今後も、従来の手法を継続すれば、同じ様な結果しか得られないであろう。地震予知には、震源域の変形・歪の程度・その場所・規模・動きを知る必要があるが、現時点及び近い将来にこれらを推定することは不可能であろう。一方、地震前には、種々の地震前兆が観測されており、それらの殆どは、地震前の震源域での微少亀裂の発生に起因するものと推定できる（付図１参照）。それ故、震源域での微少亀裂発生を検出できれば、直接・間接に地震の予知につなげることが可能になる。そこで、発想を変え、当面の目標を地震予知では無く、地震前兆の検出に置くことにする。
１．微小亀裂の検出
震源域で微小亀裂が発生すれば、地電位・地電流が変化するものと推定する。しかし、地震予知は「地震の、場所・規模・日時が分かっているときしかできない」と言われており、前もって電位・抵抗の測定場所を決めることができないから、費用が無視できても、場所の推定が困難であり、何時・何処で地震が起きるかを予知することは、費用／効果の点で不可能でありるが、予知を必要とする地域全体に電極を多数設置して、電位・抵抗を測定し（海底も含め）４次元的に、MRIと同じ手法で、前兆の微小亀裂の発生場所を検出できれば、地震が起きないことは予知可能となる。このためには、各観測点は安価で、測定・保守が容易なsystem （付図２参照）である必要がある。
２．観測Systemの説明
想定震源域全面に、約100km程度の間隔で、Local 観測点（LPC）を設置する。各LPCで、10m程度の間隔で３個の電極を設置し、各電極間の地電位・地電流を測定する。その出力から、先ず、避雷器で、空電による雑音を除去する。次に、定電圧ダイオードで、人工雑音も除去する。空電・人工雑音が除去された信号を増幅・検波しPCに入力し、１分間平均値（ｍ）・標準偏差（σ）を計算し、これらの値が、これらの10分平均値よりも、σ以上に大きい場合（σ異常値）は、近隣のLPCのそれらと比較する。2個以上のLPCで、この様なことが起こった場合は、各LPCが異常信号を出力する。
Center PCは、各LPCのｍ・σの一分値と、σ異常値を入力するとともに、σ異常値の Map を作成し出力する。2σ異常値があれば、そのMap と警報を出力する。 終わりに：
噴火が想定される場所に観測装置を重点的に配置し、Magmaの位置・規模・変化を推定して予知を試みることが可能であり、地震予知も、想定した震源域では、地電位・地電流の異常が無い場合は、前兆の微小亀裂の発生場所は無く、一定期間は地震は起きないと予知することは可能となろう。 参考文献
高橋耕三　地震直前に観測される電磁界の発生メカニズム　JpGU S-SS024-13

© The Seismological Society of Japan

Fig. 2

Fig. 2. A plan of detecting earth potential and current caused by micro cracks.

We will present the theory and mechanism of earthquake prediction with attached electromagnetic observation data as the basis.

*Hidemitu Kunihiro[1]

1. JYAN Research Institute

地震予知は困難と言われていますが、地下からの電磁波や電磁気を観測すれば予知可能です。１１年前からノイズや電磁波の異常を観測網で捕らえて解析し公開していますが、熊本地震等では、約１週間前に特異な変動があると添付図の通り、１週間後には異常変化通りの地震が発生しているのです。

淡路島や長野県北部、福島や大阪地震等々多くのデータから、日頃に無い異常変化があれば地震が発生する。と言う経験則もできました。また、３種類の観測網で捉えた異常変化を、自動的にデータ解析させる事も可能で、地震予知の３原則は元より、簡単な視覚情報として危険度を発表できます。

電磁的観測による「地震予知の理論とメカニズム」は以下の通りです。

１　地震は、地中で縒や歪み等の軋轢が発生し、岩盤等に加減圧や擦れ等が起きると、電磁気（正負や摩擦電気等）が発生し、直ちに地表迄伝わります。そこで、電磁気変化を地上で観測すれば、深層迄の地殻変動が判ります。

２　地下で起きた、軋轢や圧力集中による応力波のパワーエネルギー（以下PE塊という。）は、波状に周囲へ伝導しますが、力の伝播速度は遅く１日に約１㎞程度しか伝わりません。（深度１０Kmから表層迄は約１週間必要）

３　地震の主なメカニズムとなる「振原」は、以下の通りです。

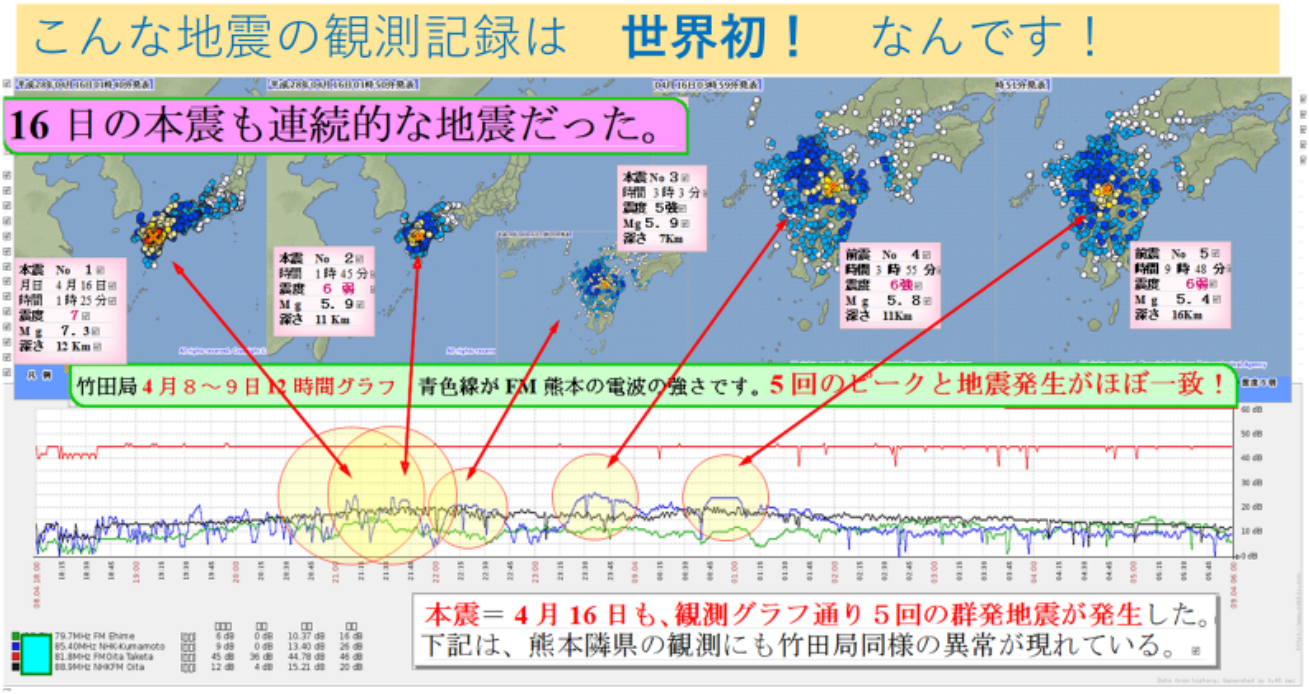
地中深くの高圧域で生まれた圧力（PE塊）は、上層まで伝播し地表に近付くと、周囲の岩盤圧力が極端に減るので、PE塊の規模によって、岩盤等が膨張を起こす為、周囲の岩盤を破壊し、地震動を起こし、断層を作るのです。

結論　地震予知ができる理由は、地中の震源で異常変動が起きたとき、電磁波等は即伝わって予知できるが、振原となるPE塊の力波は伝播が遅いので、その時間差だけ早く予知できます。また、添付図の通り、予知した電磁気の変化と、実際に起きた地震の模様が一致するのは、電磁波とPE塊の力波が、同じ生成である証拠となり、正確で詳細な予報ができる根拠なのです。

振原　現在の震源深度は、PE塊の発生場所と推定できても、地下数十㎞は超高圧域なので、余程のパワーが無いと地震動迄は起きません。しかし、表層なら、圧縮塊の膨張で、岩盤を破壊し、地震を起こす事ができます。

（上記は一部仮説を含みますが、各項の根拠データがあります。）

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 18th) | Special session：S21. Long-Period Ground Motion -Generation Mechanism and Structural & Social Response-

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S21P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-01] Near-Fault Long-Period Ground Motion

*Kazuki Koketsu[1] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-02] Characteristic source model with rupture heterogeneity for long-period ground motion prediction of megathrust (M8-9) earthquakes

*Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-03] Numerical Experiments toward Simplified Prediction of Short-Distance Variation of Long-Period Strong Ground Motion Amplitudes

*Ken Hatayama[1] (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-04] A preliminary analysis of long-period response spectra (1-10s) at S-net for the 2016 Mj7.4 off Fukushima earthquake

*Yadab Prasad Dhakal[1], Wataru Suzuki[1], Takeshi Kimura[1], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1] (1. NIED)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-05] Long-period strong ground motion from the 2016 Mie-ken nanto-oki earthquake observed in the Tokyo bay area

*植竹 富一[1] (1. 東京電力ホールディングス株式会社)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-06] Evaluation about variation of long-period ground motion in the Kanto Plain due to source location using the reciprocity theorem

*寺島 芳洋[1]、福和 伸夫[2] (1. 竹中工務店技術研究所、2. 名古屋大学減災連携研究センター)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-07] 関東平野の堆積層における長周期成分のQ値推定

*吉田 治雄[1]、佐藤 吉之[1] (1. 竹中工務店技術研究所)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-08] 3-D Simulation Considering Shallow and Deep Ground and Mechanism of Later Phase at the KiK-net Konohana during 2018 Osaka Earthquake

*Takuya Kataoka[1], Masayuki Nagano[1] (1. Tokyo University of Science)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-09] Long period ground motion observed at Sakai-minato city, Tottori, prefecture

*Takao Kagawa[1], Shohei Yoshida[2], Tatsuya Noguchi[1] (1. Tottori University, Graduate School of Engineering, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-10] Elucidation of localized/enormous seismic damage induced by the stratum irregularity~An example of fissure zone emerged at the Aso caldera in association with the 2016 Kumamoto earthquake~

*中井 健太郎[1]、野田 利弘[1]、村尾 英彦[2]、福田 慎也[1]、浅岡 顕[3] (1. 名古屋大学、2. 村尾地研、3. 地震予知総合研究振興会)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-11] 3D velocity model of the Bogota basin (Colombia) based on dense microtremors arrays measurements, gravity, and geological data

*Nelson Pulido[1], Helber Garcia[2], Andrea Riaño[3], Shigeki Senna[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Servicio Geológico Colombiano, 3. Universidad de los Andes)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-12] Monitoring of large structure and observation of long period ground motion using DAS and existing optical fiber cables installed

*Tsunehisa Kimura[1] (1. Schlumberger)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-13] 貯蔵タンクのスロッシングによる液面上昇量の観点からみた既往3地震における長周期地震動の特徴

*山本 鐘太[1]、庄司 学[2] (1. 筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻、2. 筑波大学システム情報系)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S21P-14] An effort for the demonstration experiment to provide forecast information of long period ground motion through an application development

*Misae Wakameda[1], Masaaki Kachi[1], Tsubasa Kawano[1], Yoshiaki Hisada[2], Masahiro Murakami[2] (1. A2 corporation, 2. Kogakuin University)

Near-Fault Long-Period Ground Motion

*Kazuki Koketsu[1]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

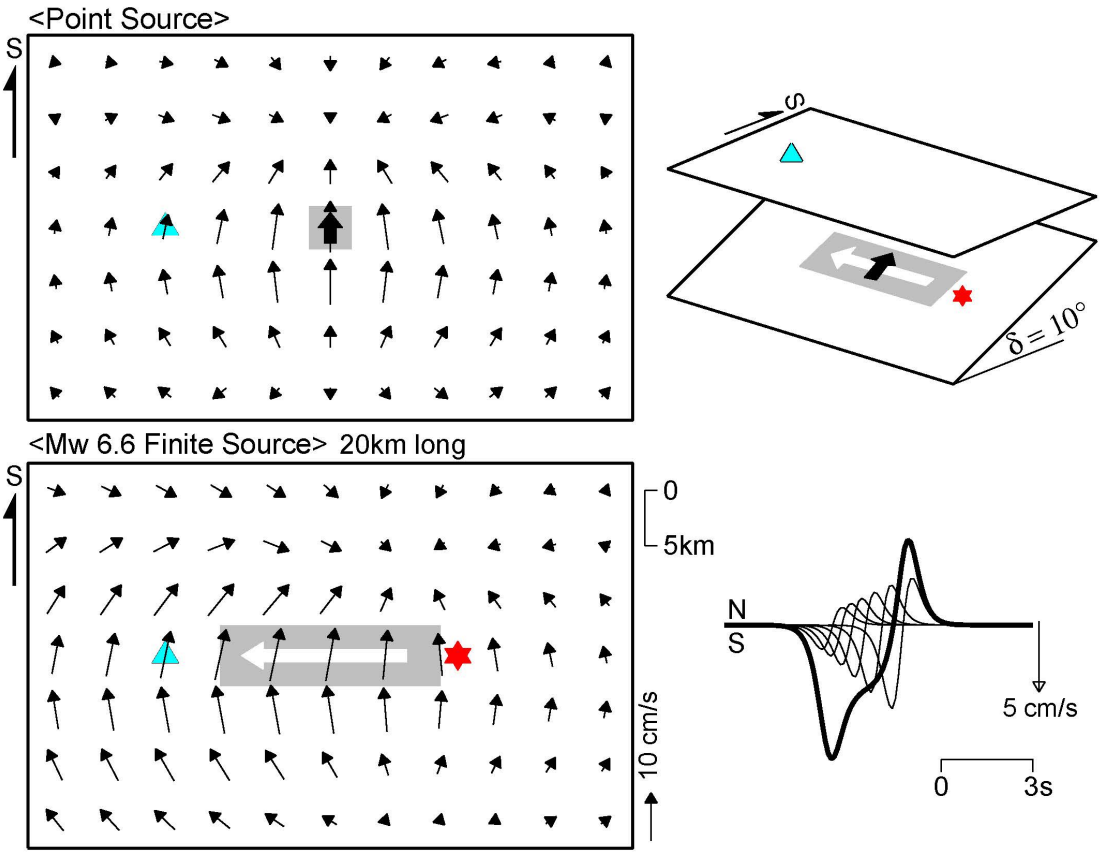
Koketsu and Miyake (2008)では通常の意味合いの長周期地震動だけでなく，断層近傍の長周期地震動 Near-Fault Long-Period Ground Motion があるべきことを指摘した．通常の意味合いの長周期地震動を区別して震源遠方の長周期地震動 Far-Source Long-Period Ground Motion と呼ぶとすれば，規模の大きな地震がパス効果やサイト効果により遠方の平野や盆地においてそれを生み出す．これに対して，断層近傍の長周期地震動は主に，ディレクティビティ効果と呼ばれる震源効果により生み出される．

断層近傍の長周期地震動の観測例としては1966年Parkfield地震（Aki, 1968），1971年San Fernando地震（Hanks, 1975），1992年Landers地震，1994年Northridge地震（Somerville et al., 1997），1995年兵庫県南部地震（纐纈, 1996），1999年Kocaeli地震，1999年Chi-Chi地震（Somerville, 2003）が挙げられる．2008年以降では2015年Gorkha地震と2016年熊本地震で観測された．こうした断層近傍の長周期地震動が高層建物や免震建物に及ぼす影響はHeaton et al. (1995)などにより研究された．

Somerville et al. (1997) によれば，ディレクティビティ効果は，横ずれ断層の破壊が走向方向に伝播したとき，あるいは逆断層の破壊が傾斜方向に伝播したときに現れるとされ，2008年以前の観測例ではすべてそうなっている．ところが，2015年Gorkha地震では逆断層の破壊が走向方向に伝播し，2016年熊本地震では横ずれ断層の破壊が主に傾斜方向に伝播した．そのため，これらの地震で発生した断層近傍の長周期地震動の原因はディレクティビティ効果ではないという議論がある．しかし，2015年Gorkha地震は低角な逆断層のメカニズムで，その放射パターンから走向方向の伝播でもディレクティビティ効果が現れることが示された（図，Koketsu et al., 2016）．また，2016年熊本地震の断層近傍の長周期地震動分布は，横ずれ断層の傾斜方向破壊伝播によるディレクティビティ効果で生成されることを示した（Kobayashi et al., 2017）．

これら2地震に加えて1999年Chi-Chi地震に対しては，フリング効果（Bolt and Abrahamson, 2003）によるという議論がある．しかし，Dreger et al. (2011)は地震動シミュレーションにより，大きなすべりが500 mより浅いところにあり，そこからのfault distanceが100 m以内の地点にフリング効果が現れることを示した．3地震の断層近傍の長周期地震動を観測した地点には，この条件を満たすものは存在しない．このほか，2016年熊本地震では，浅いすべりの時間関数が深いすべりに比べて長周期であったことが原因であるという議論がある．しかし，震源断層の近くで観測された強震動記録を含めた震源インバージョン結果では，そのような傾向は見えていない．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Characteristic source model with rupture heterogeneity for long-period ground motion prediction of megathrust (M8-9) earthquakes

*Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

M8程度以上の巨大地震の長周期地震動シミュレーションにおいてアスペリティサイズより小さいスケールの破壊不均質性を付与することで周期数秒程度以下の地震動の過小評価を解消する方法が提案されている（Sekiguchi et al. 2008）．地震調査研究推進本部による相模トラフの長周期地震動評価（同, 2016）では，2003年十勝沖地震の記録を用いた検証に基づき特性化震源モデルに破壊不均質性が付与された．
南海トラフ地震についても，震源パラメータの不確実性を考慮した多様な震源モデル群に基づく長周期地震動評価を進めている．本検討では，M9級を含む南海トラフ地震についての特性化震源モデル構築についての知見を得るため，M9級の海溝型巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震の既往の震源モデルを参照して特性化震源モデルを構築する．おおむね周期2-20秒を対象として地震動シミュレーションを実施し，不均質導入の効果や観測記録の再現性を調べる．

2011年東北地方太平洋沖地震については，周期10秒程度を境にして短周期側と長周期側で震源像が異なること示唆されており，それらは互いに相補的であるとの見方もある（三宅・他2016）．本検討では，海溝軸付近の浅い領域に位置し比較的長周期に寄与する大すべり域，それより深い領域に位置し短周期に寄与するSMGA，そして背景領域からなる特性化震源モデルを構築する．SMGAの位置，すべり量，応力降下量は川辺・釜江(2013)を参照する．海溝軸付近の大すべり域は津波レシピ（地震調査委員会, 2017）を参考に2つの領域を設定する(以下，LMGAとSLMGA)．全体の震源域及び地震モーメントをインバージョン解析による震源モデル(Suzuki et al. 2011)から設定し，全体からSMGA，LMGA，SLMGAを除いた残りの領域を背景領域とする．
すべり速度時間関数はSMGAおよび背景領域内は中村・宮武(2000)式，LMGAとSLMGAでは背景領域と同じライズタイムを持つ三角形関数とした．
この地震では，不連続的な破壊や同じ場所の繰り返し破壊など複雑な破壊進展が示唆されており，断層全体の破壊終了までには時間がかかっている．本検討では，単純化した震源モデルでできるだけ観測波形を説明するため，各SMGA内部は川辺・釜江(2013)による破壊開始点と破壊遅れを用いて一定速度（S波速度の72%）で，またSMGA以外の領域では全体の破壊開始点からSMGA内よりも10%遅い速度で破壊が伝播するものとした．
以上により設定した特性化震源モデル（均質モデル）に，Iwaki et al. (2016)と同様の方法で最小SMGAサイズ以下のスケールですべり量，すべり角，破壊伝播速度に不均質性を付与した（不均質モデル）．

全国一次地下構造モデル（地震調査委員会, 2012）を用いて周期2秒以上を対象に三次元差分法（GMS；青井・他2004）により青森県～静岡県にかけた領域で工学的基盤上の地震動を計算した．
不均質性導入の効果をフーリエ振幅スペクトル(FAS)で見ると，不均質モデルは周期6 - 8秒程度以下で均質モデルよりも系統的に振幅が大きく，周期2秒では計算領域内の平均で2倍強の振幅になった．周期10秒以上では，空間的なばらつきは大きいものの平均としては均質モデルとの比は 1 に近い．
観測記録との比較では，周期10秒以下で見るとどちらのモデルも速度波形の主な波群の到来時刻などは観測記録と整合的だが，波形の振幅は均質モデルよりも不均質モデルの方が大きく観測記録との整合性もよい．関東平野内や日本海側の堆積層の厚い観測点でも，不均質モデルの方が継続時間の長い地震動の振幅をよりよく再現している．なお，川辺・釜江(2013)による破壊遅れと破壊開始点位置の設定は波形の特徴の再現に大きく貢献している．これらを考慮しない場合，単純な同心円状破壊よりはmulti-hypocenterの破壊様式のほうが

© The Seismological Society of Japan

FASの再現性が周期10秒以下で系統的によいことも分かった．
周期10-20秒の帯域については，東北地方や日本海側ではFASの再現性は良かったが，関東以南では観測記録を過小評価傾向となった．この帯域に寄与しているSMGA以外の震源域のモデル化について今後検討する．

以上により東北地方太平洋沖地震の既往震源モデルを参照して破壊不均質性を含む特性化震源モデルを構築し，周期2－20秒の地震動を概ね再現できることを示した．南海トラフ地震への適用に際しては，M9級地震の破壊進展の複雑さや，周期帯で異なる震源特性が課題としてあげられる．

本研究は，文部科学省・平成30年度長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業「長周期地震動ハザードマップ作成のための基礎調査・モデル作成等」により実施した．

© The Seismological Society of Japan

Numerical Experiments toward Simplified Prediction of Short-Distance Variation of Long-Period Strong Ground Motion Amplitudes

*Ken Hatayama[1]

1. National Research Institute of Fire and Disaster

堆積盆地で観測される周期数秒から十数秒の長周期地震動の主成分を表面波であるとした場合，その波長は水平方向におおむね数kmから20ないし30kmと見積もられるが，この波長に比べて1波長にも満たないような短い距離で長周期地震動のスペクトル振幅が大きく異なる（例えば1.5倍とか）事例またはそれを示唆するような事例がしばしば観測される．

このような短い距離で長周期地震動特性の違いが生じる仕組み・要因を理解することは，長周期地震動予測の精度向上の方策を探る上で有意義と考える．この見地から，2017年と2018年の本学会秋季大会では，予備的検討として，横方向に不規則な地下構造の中を伝播するLove波とRayleigh波に関する簡単な数値実験を行い，次のような結果を発表した．

（１）長周期地震動を構成する地震波の波長に比べて1波長にも満たないような短い距離でも，地震動のスペクトル振幅が数倍程度異なりうることが理論的な計算から確認された．

（2）横方向に不規則な地下構造において形成される長周期地震動の波動場の深さ方向のフーリエスペクトル振幅分布は，入射波の条件や周期によっては，その地点直下の1次元地下構造から計算される表面波の固有関数の形状と概ね一致する場合がある．

（3）この性質をうまく利用すれば，対象地点直下の1次元地下構造モデルから簡易な方法で，長周期地震動の増幅特性を粗くではあるかもしれないが推定することが可能かもしれない．

横方向に不規則な構造における表面波の伝播に関しては，グローバルな長周期（周期20秒以上）表面波を対象として，波線理論を用いた研究がなされてきた．Tromp and Dahlen(1992)は，エネルギー流速の保存則から，ある波線上の地表面上の2地点間における表面波のスペクトル振幅の比は，幾何減衰の影響を無視できる場合には，それぞれの地点の直下の1次元速度構造から計算される(i)地表における表面波固有関数の値，(ii)群速度，（iii）エネルギー積分による簡単な代数演算で表現できることを導いた（以下，表面波伝達関数という）．

Bowden and Tsai(2016)は，この表面波伝達関数は，横方向の速度構造の変化が十分緩やかな場合には，周期数秒程度の表面波にも適用可能であると考えた．また，元々はある一つの波線上で成立する関係式ではあるものの，その条件を大胆に緩め，任意の2地点間（といっても堆積盆地内とその周辺の地震波動場における任意の2地点程度の意）の振幅比を与えうるものと仮定し，Los Angeles盆地で観測された表面波の周期2.5秒成分の増幅特性が，各地点直下の1次元速度構造に対するS波鉛直入射から計算される増幅特性（以下，S波伝達関数という）よりも，表面波伝達関数により，よく説明できることを定性的に示した．彼らは，差分法による2次元波動伝播シミュレーションに基づく検討から，表面波伝達関数の適用可能性が確認されたと主張しているが，Bowden and Tsai(2016)にはそのデータが示されていない．また，表面波伝達関数の実際問題への定量的な適用可能性の評価には，3次元波動伝播シミュレーションに基づく精度の検証が必要である．このようなことから，まず，2次元波動伝播シミュレーションで計算した表面波波動場の増幅特性が，表面波伝達関数によってどの程度説明できるか調べることにした．

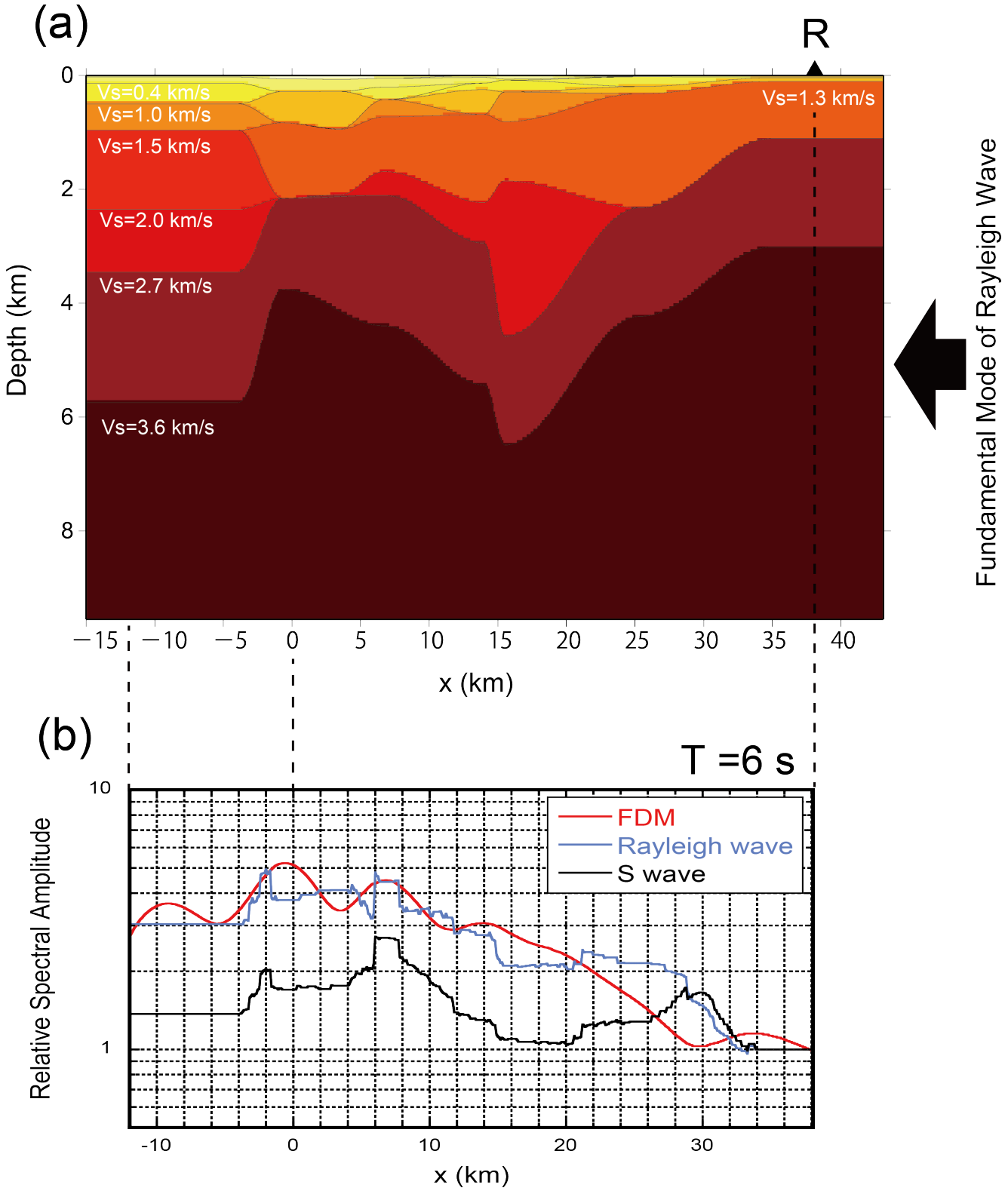
図(a)は，波動伝播シミュレーションを行った2次元速度構造モデルである．これは，2003年十勝沖地震の際の

© The Seismological Society of Japan

苫小牧における長周期地震動のシミュレーションのために用いた勇払平野の地下構造モデルである．このモデルの右側（南東側）の水平成層部分からRayleigh波基本モードを入射させた場合の面内波動場を差分法により計算し，地表各点の水平動のフーリエスペクトル振幅をR地点のそれで除したものを疑似観測データ（観測増幅率）とした．図(b)に周期6秒における観測増幅率（赤線）を示す．同じく図(b)に，表面波伝達関数（青線）とS波伝達関数（黒線）による周期6秒におけるR地点に対する計算増幅率を示す．この検討例では，観測増幅率は，S波伝達関数よりも，表面波伝達関数によってよく説明できている．このケースについて差分法で計算された波動場は，(2)で述べている場合に該当しており，「横方向の速度構造の変化が十分緩やかである」という条件が満足された設定になっていると考えられる．

以上のような比較を，さまざまな周期について行う．また，単純な2次元速度構造モデルやLove波が主体的な波動場も検討対象とする．これらのことにより，横方向に不規則な構造における周期数秒程度の表面波の増幅率の評価に対する1次元速度構造に基づく表面波伝達関数の適用可能性を定量的に調べる．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

A preliminary analysis of long-period response spectra (1-10s) at S-net for the 2016 Mj7.4 off Fukushima earthquake

*Yadab Prasad Dhakal[1], Wataru Suzuki[1], Takeshi Kimura[1], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1]

1. NIED

The 2016 Mj 7.4 off Fukushima earthquake occurred on November 22, 05:59 JST. An Mw value of 7.0 was assigned for the earthquake by F-net NIED. The Mw values determined by USGS and GCMT were equal to 6.9. The Japan Meteorological Agency (JMA) focal depth was approximately 24 km. The event was a normal fault event based on moment tensor solutions by the organizations mentioned above. The above earthquake was the largest event that occurred off Fukushima after the deployment of S-net. One hundred twenty-five stations of five segments of S-net except for the outer rise segment, which was not in operation during the earthquake, successfully recorded the seismic motions during the earthquake. In our previous paper (Dhakal et al. 2018), we compared the observed absolute velocity response spectra (AVRS) for the earthquake at the K-NET and KiK-net stations with the ground motion prediction equation (GMPE) constructed by Dhakal et al. (2015) and found that the data were generally explained well by the GMPE. In this paper, we compared the AVRS computed from the ocean bottom strong-motion recordings at S-net stations with the GMPE by Dhakal et al. (2015).

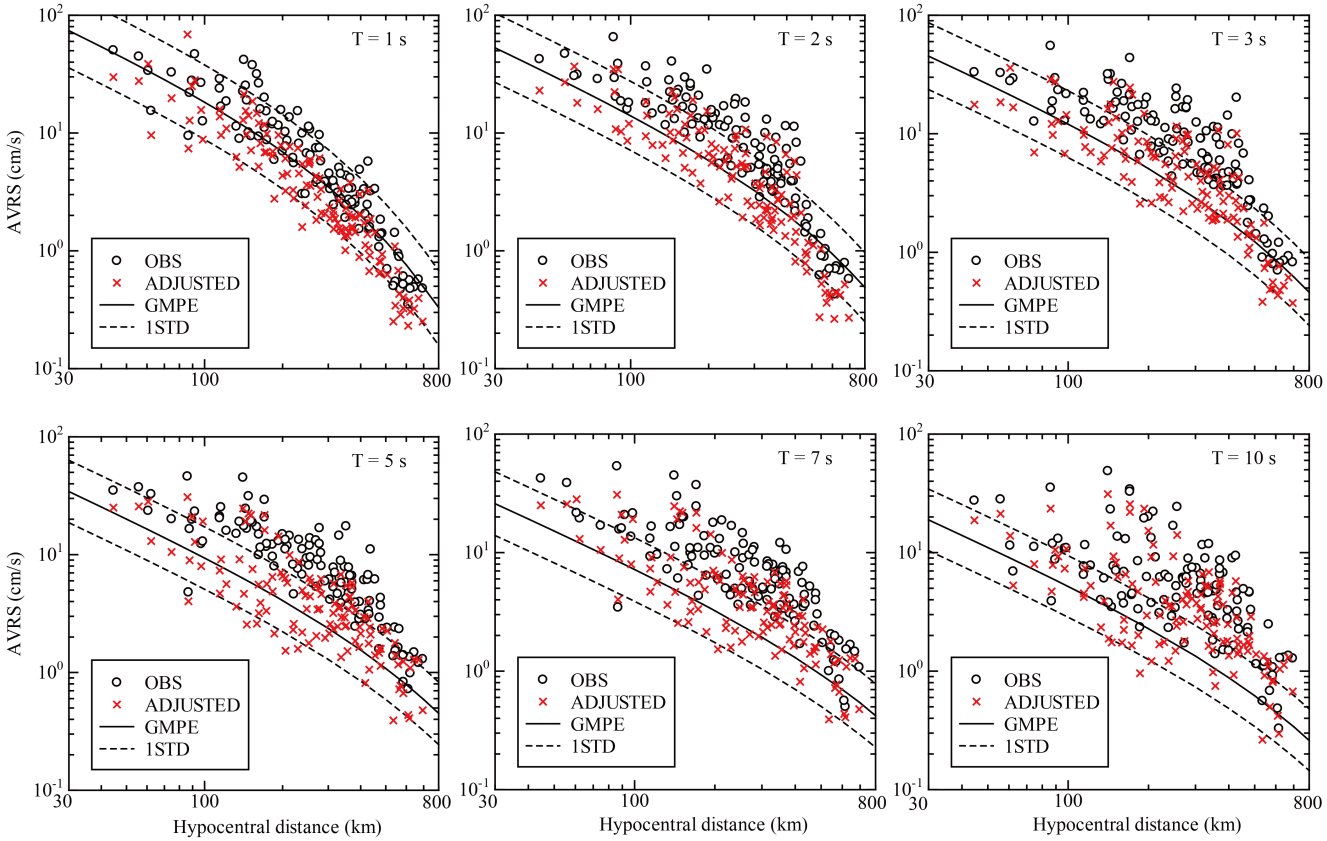
We first examined orientations of the sensors from one-minute time windows before the earthquake and when the shakings subsided after the earthquake. We found that five stations namely, S2N12, S2N13, S2N14, S2N15, and S2N16 of S2 segment (off Ibaraki and Fukushima) located close to the epicenter, suffered rotations approximately between 0.1 and 10 degrees during the earthquake. The recordings from these five stations were not used in this study, and AVRS were computed following the method explained in Dhakal et al. (2015) from the ten-minute time window starting one minute before the earthquake origin time. The computed response spectra at the S-net sites were corrected for the site amplification effect of deep sediments using the J-SHIS subsurface velocity model following the method described in Dhakal et al. (2015). The spectra without correction (circles) and with correction for the site amplification are plotted in the attached figure as a function of hypocentral distance for the periods of 1, 2, 3, 5, 7, and 10 s, respectively. The plots show that the observed data at the periods of 1 to 5 s are generally within plus-minus one standard deviation of the median prediction curves after correction for the site amplification. With the increase of periods > 5 s, the plots indicate that the data deviate increasingly from the median prediction curves, especially at distances between about 100 and 500 km. The difference seems to be the largest at the period of 10 s among the analyzed periods. However, the difference is not systematic after correcting for site amplification and may be attributed to the velocity structure or the other factors such as the effect of oceanic water layer or the source effect such as the radiation pattern effect at the longer periods or their combinations. In conclusion, the observed response spectra at the S-net sites generally agree with the GMPEs by Dhakal et al. (2015) at periods of 1-5 s and differ increasingly at many sites with the increasing periods. Further analysis is ongoing, and we report the results in our future papers.

References

Dhakal, YP, Suzuki W, Kunugi T, Aoi S (2018) Performance evaluation of ground motion prediction equations for absolute velocity response spectra (1-10 s) in Japan for an earthquake early warning. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 18(No.2), pp. 203-216.

© The Seismological Society of Japan

Dhakal, YP, Suzuki W, Kunugi T, Aoi S (2015) Ground motion prediction equations for absolute velocity response spectra (1-10 s) in Japan for earthquake early warning. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 15(No.6), pp. 91-111.



Long-period strong ground motion from the 2016 Mie-ken nanto-oki earthquake observed in the Tokyo bay area

*- -[1]

1. -

T2019-022

© The Seismological Society of Japan

Evaluation about variation of long-period ground motion in the Kanto Plain due to source location using the reciprocity theorem

*- -[1], - -[2]

1. -, 2. --

T2019-040

© The Seismological Society of Japan

--

*- -[1], - -[1]

1. -

T2019-095

© The Seismological Society of Japan

3-D Simulation Considering Shallow and Deep Ground and Mechanism of Later Phase at the KiK-net Konohana during 2018 Osaka Earthquake

*Takuya Kataoka[1], Masayuki Nagano[1]

1. Tokyo University of Science

2018年6月18日7時58分頃に大阪府北部を震源とする地震（M_J6.1）が発生した。この地震では大阪市北区、高槻市、茨木市、枚方市及び箕面市で震度6弱が記録された。大阪府内で震度6弱が観測されたのは、記録が残る限り初めてのことであり、この観測記録を分析することは大阪平野の地震動評価を行う上で重要である。大阪平野における観測記録の最大擬似速度応答スペクトル分布から、この地震の主な卓越周期は1秒以下であった。また、震央から大阪湾沿岸部の測線上における観測地点における観測記録の速度波形と擬似速度応答スペクトルから、大阪平野内に位置する観測記録は主な卓越周期が1秒以下であった。一方、大阪湾沿岸部の埋立地に位置するKiK-net此花（OSKH02）では卓越周期が1~2秒に長周期化していた。また、OSKH02におけるEW方向の速度波形はS波初動の約25秒後の後続部に他の観測地点で見られない特異なパルス波が観測された。

2018年大阪府北部の地震に関する既往の研究では、震源断層面が2枚存在していたと浅野・他、染井・他が報告している。尼崎観測地点の繰り返し後続波群の生成要因は地表面と盆地基盤面のS波の多重反射であると岩田・他が報告している。一方、OSKH02で観測された特異な後続波群について定性的に説明している例は無いように思われる。

本稿では、まず初めにOSKH02で得られた全観測記録を分析し、特異な後続波群が他の地震においても見られるか調べた。次に、三次元差分法を用いて2018年大阪府北部の地震のシミュレーション解析を実施し、震央から大阪湾沿岸部の測線上における観測記録の再現を行うとともに、OSKH02で観測された後続波群の再現を試みた。シミュレーション解析を行うにあたって、浅部地盤が短周期地震動の増幅に大きな影響を与える可能性があると考えられる。浅部地盤の地震動応答は計算機タスクの理由等から工学的基盤までを三次元差分法等で計算し、そこから一次元重複反射理論等で計算を行うのが一般的である。しかし、堆積盆地となっている大阪平野の深部地盤と大阪湾沿岸部の厚い浅部地盤で三次元的な連成効果が現れる場合には、浅部・深部地盤を一体とした解析モデルによる地震動計算が不可欠である。以上より、地震動シミュレーションは浅部・深部地盤を一体とした三次元解析を実施する。最後に、大阪湾沿岸部に仮想の観測地点を設け沿岸部の地震動を評価し、後続波群の生成要因分析を行う。

謝　辞

本稿で地盤モデルを構築するにあたり大阪府、産総研の三次元地下構造モデル、関西圏DBのボーリングデータ、国土地理院による50m標高データを利用させて頂きました。また、F-netのモーメントテンソル解、防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net）、関西地震観測研究協議会（CEORKA）、建築研究所（BRI）、気象庁（JMA）、大阪府地方公共団体、港湾空港技術研究所（PARI）の強震記録を利用させて頂きました。図の作成にはGMT4を利用させて頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

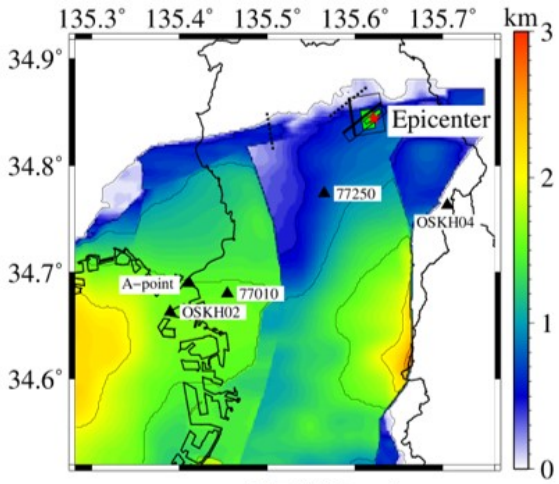


図1　地震基盤深さ

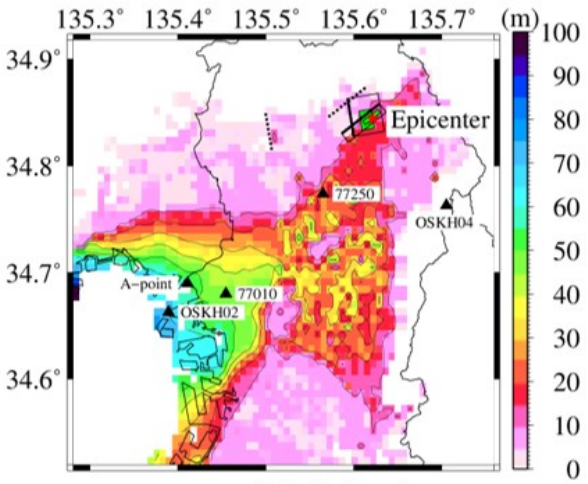


図2　工学的基盤深さ

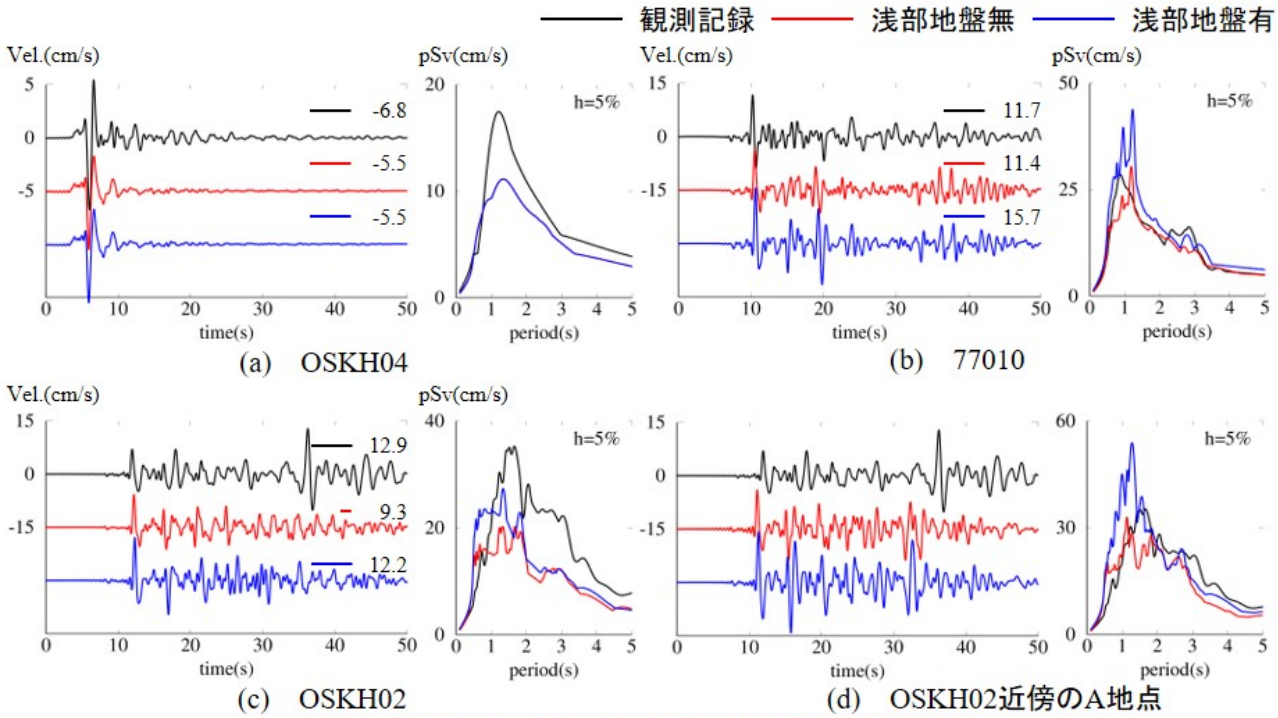


図3　EW方向における観測記録と解析結果の比較

© The Seismological Society of Japan

Long period ground motion observed at Sakai-minato city, Tottori, prefecture

*Takao Kagawa[1], Shohei Yoshida[2], Tatsuya Noguchi[1]

1. Tottori University, Graduate School of Engineering, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

1.はじめに　2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震（M5.9）では，震源域の大阪府北部，兵庫県南東部，奈良県において長周期地震動階級２が観測された．南東部を除く兵庫県の階級は０であったが，鳥取県西部（境港市）では中国地域唯一の階級１が観測された（星山・他, SSJ Fall Meeting, 2018）．一方，隣接する米子市では階級０であった．境港市では，2000年鳥取県西部地震（M7.3）で長周期地震動階級４（震度6強, 6.0）が観測されている．同地震を対象としたアンケート震度調査（小山・他, 2001）では，市域北部にほぼ東西に広がる岩盤山系である島根半島に平行して，震度の大きい帯状の領域が見られ，上記震度を観測した気象庁観測点はそこに含まれる．一方で，同観測点から南南西に約800ｍ離れた境港市役所（鳥取県管理）の震度は6弱（5.6）であったが，残念ながら本震観測記録は残されていない．
気象庁観測点では，2013年淡路島の地震（M6.3），2016年鳥取県中部の地震（M6.6），2018年島根県西部の地震（M5.8），2018年大阪府北部の地震（M6.1）のデータが公開されており，境港市役所でも記録が得られている．これらについて，長周期地震動特性の検討をおこなったので報告する．
2.検討内容　気象庁による長周期地震動階級は，加速度波形から減衰h=0.05（5%）の一自由度系による周期1.5から8.0秒（暫定的に1.6から0.2秒刻みで7.8秒までで試行）の絶対速度応答スペクトルを算出し，その最大値から階級を決定している．2016年熊本地震本震の西原村小森で階級４が観測されたが，2000年鳥取県西部地震における気象庁境港観測点でもこれに匹敵する値が得られていたことになる．ただし，応答スペクトルで見ると，気象庁境港で卓越するのは周期1.8秒程度であり，長周期地震動としては周期が短い帯域にあたる．
気象庁境港における地震動のH/Vスペクトル比を見ると，2000年鳥取県西部地震本震が約1.9秒，その他の4地震（最大震度4）では約1.6秒と，2000年鳥取県西部地震本震では長周期化が見られ，非線形地盤応答の影響が示唆される．また，いずれの場合もEW/UDがNS/UDよりも大きくなっている（図参照）．
地震動の粒子軌跡を見ると，2000年鳥取県西部地震本震はほぼ東西に偏向した震動となっており，横ずれの震源断層のほぼ延長に位置することからＳ波の放射特性を反映したものと考えられる．その他の４地震は東から西までの広い入射方位となっており，距離も離れることから放射特性の影響はそれほど大きいとは考え難い．にもかかわらず，2018年島根県西部の地震（西から入射）を除けば，東西方向の震動が卓越した特性を有している．
この卓越方向は北部に広がる弓ヶ浜半島に平行であり，既往の反射法地震探査（西田・他, 2002）では南部の米子市域から島根半島に向かってハーフグラーベン状の断面が得られており，地下構造の影響による特徴的な地盤増幅を示しているものと考えられる．ただし，反射断面から推定される境港市街域の基盤深度は約3,000ｍであり，上述の卓越周期２秒弱がこの境界に依拠するものとは考え難い．反射法地震探査では，2000年鳥取県西部地震本震で地震動が大きかった領域で反射面散乱層が表層付近で推定されており，より表層部に特徴的な地震動を生じる要因の存在が示唆される．
境港市街では，常時微動単点３成分観測も実施しており，最も北の島根半島側の約0.8秒から南へと卓越周期が2秒を超えて長くなる，基盤岩までの構造とは逆の傾向が見られるが，気象庁境港観測点付近では1.2秒程度であり，地震観測記録との乖離も興味深い現象となっている．
4.おわりに　地震動H/Vスペクトル比を説明する地下構造の解析などを通じて，気象庁境港観測点周辺で見られる特徴的な地盤震動について検討を進めたい．
謝辞　本研究では，気象庁が公開している震度観測点の加速度データを利用しました．また，鳥取県のご厚意により鳥取県震度計ネットワークの記録を利用させて頂きました．記して感謝します．
参考文献　星山・他, 日本地震学会秋期大会, 2018. 小山・他, 地球惑星科学連合大会, 2001. 西田・他，物理探査, 55(6), 2002.

© The Seismological Society of Japan

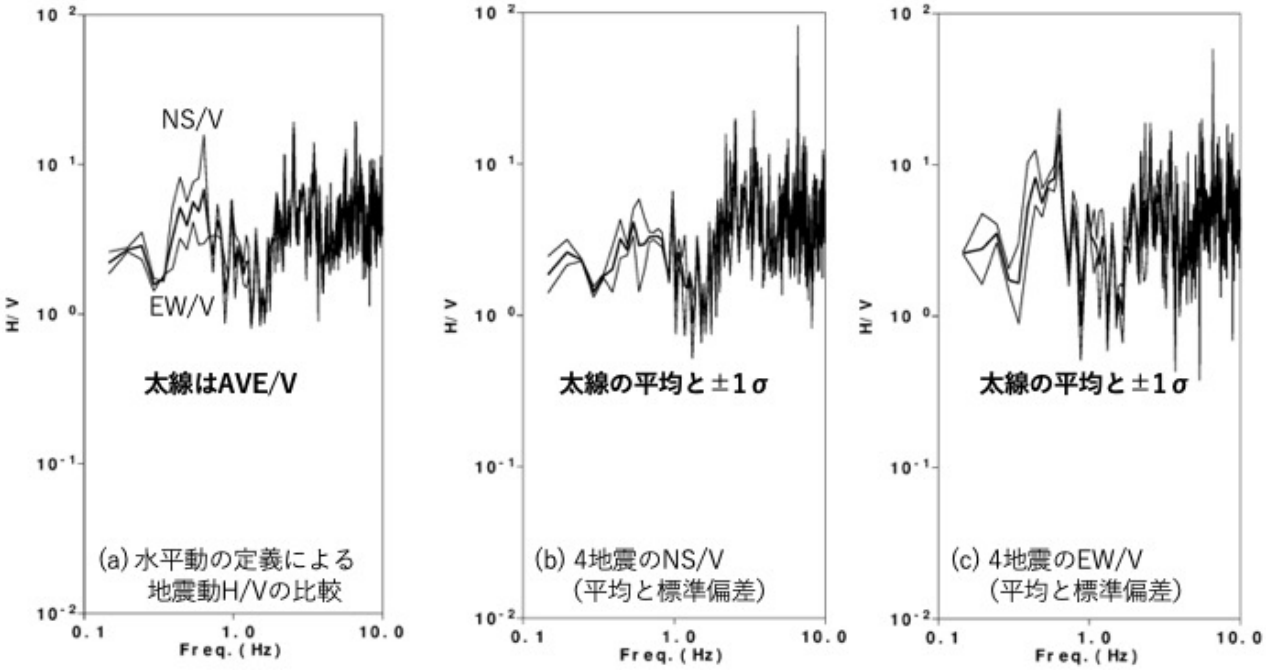


図 気象庁境港観測点における成分毎の地震動H/V．地震の違いよりも成分の違いが有意．

© The Seismological Society of Japan

Elucidation of localized/enormous seismic damage induced by the stratum irregularity~An example of fissure zone emerged at the Aso caldera in association with the 2016 Kumamoto earthquake~

*- -[1], - -[1], - -[2], - -[1], - -[3]

1. -, 2. --, 3. ---

T2019-097

© The Seismological Society of Japan

3D velocity model of the Bogota basin (Colombia) based on dense microtremors arrays measurements, gravity, and geological data

*Nelson Pulido[1], Helber Garcia[2], Andrea Riaño[3], Shigeki Senna[1]

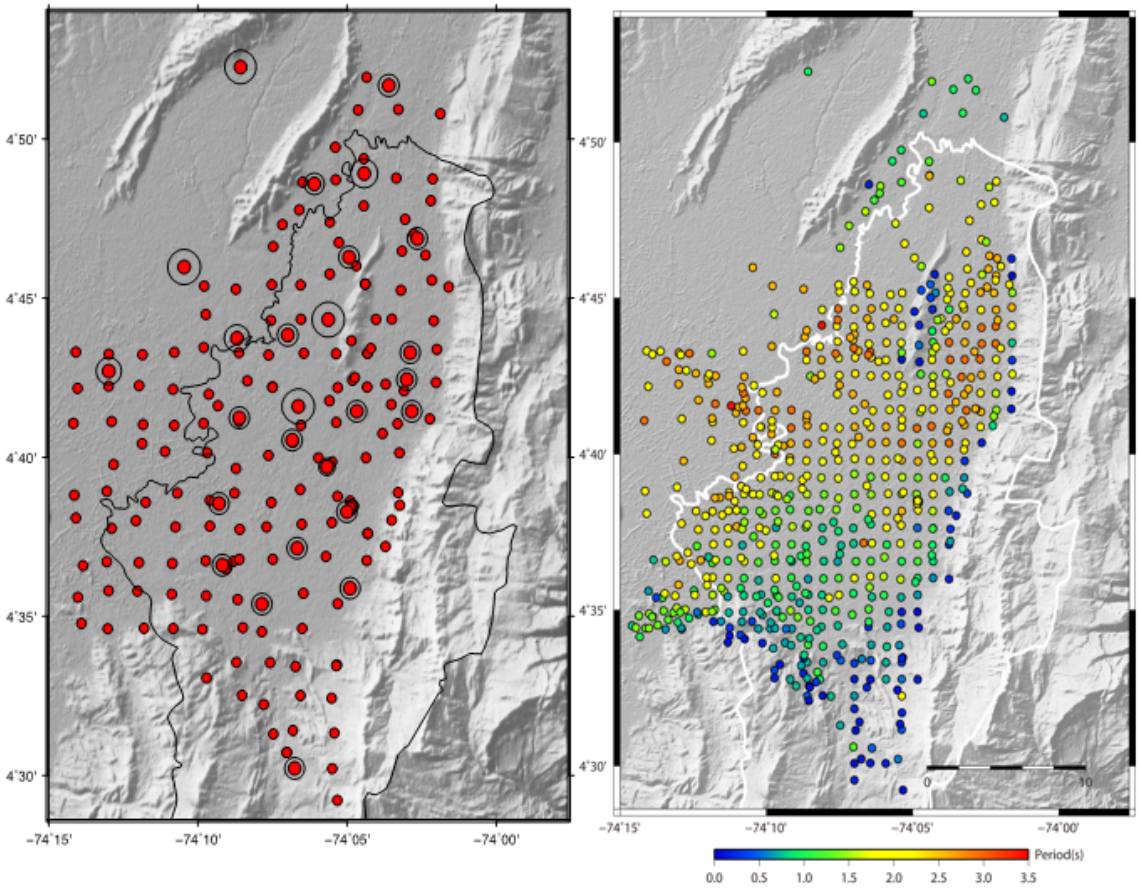
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Servicio Geológico Colombiano, 3. Universidad de los Andes

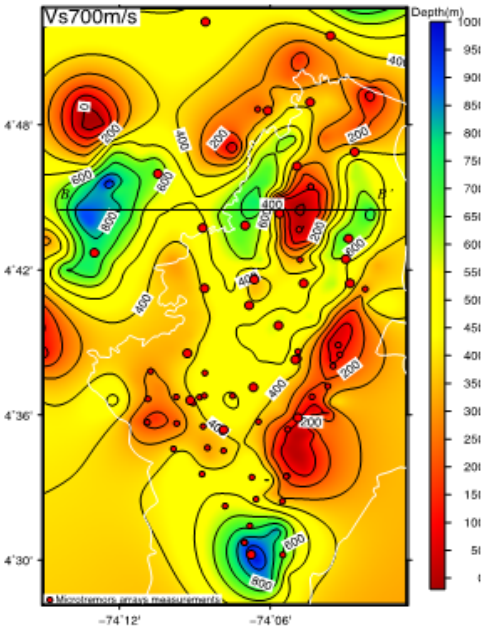
Bogotá, a megacity with almost 8 million inhabitants is prone to a significant earthquake hazard due to nearby active faults as well as subduction megathrust earthquakes. The city has been severely affected by many historical earthquakes in the last 500 years, reaching MM intensities of 8 or more in Bogotá. The city is also located at a large lacustrine basin composed of extremely soft soils which strongly amplify the ground shaking from earthquakes. The basin extends approximately 40 km from North to South and East to West, is bounded by the Andes range to the East and South, and sharply deepens towards the West of Bogotá. We construct a velocity model of the basin based on dense microtremors arrays measurements (radius from 60 cm to 1700 m) at 200 sites within the basin (Figure 1a), as well as single microtremors measurements at 600 points. Horizontal to vertical ratios of microtremors show large predominant peaks for periods as large as 3.5 seconds, near the center of the basin (Figure 1b). The 3D velocity model of the basin for layers with S-wave velocities (Vs) smaller than 700 m/s were directly interpolated from profiles obtained from dense microtremors array data (2 km spacing). To constraint the velocity model for deeper layers (layers with Vs from 700 to 3000 m/s) we use available gravity data (~800 points with 1 km spacing), as well as available geological information from boreholes within the basin. Our results show that the Bogota basin is composed of a deep Neogene-Quaternary deposits (deepest point at the center of the basin ~850 m), mainly composed of clays for the upper 300 m and clays with gravels and sand for the lower part, with a bottom S wave velocity of 700 m/s (Figure 2a). The seismic bedrock (Vs=3000 m/s) reach a depth of 3400 m at the deepest point of the basin (Figure 2b). Seismic records from shallow earthquakes as well as preliminary strong motion simulations of the basin indicate the generation of large amplitude and long duration surface waves generated at the basin edge.

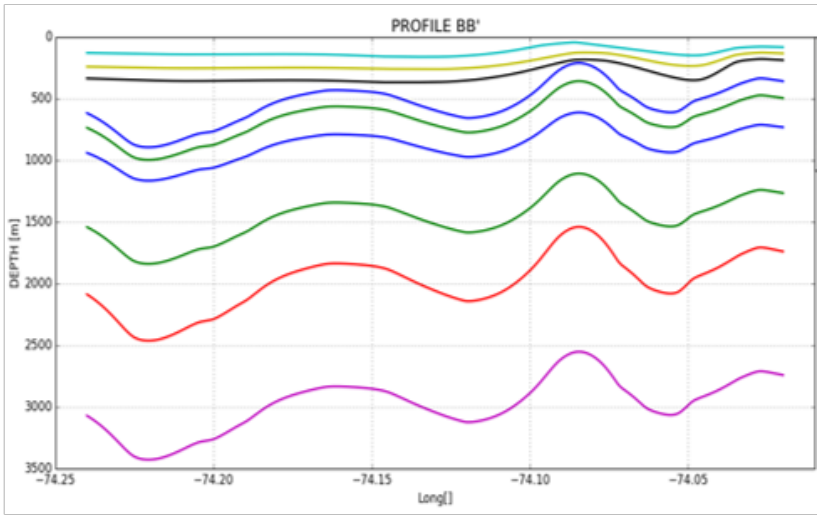
Acknowledgments

This research is funded by the SATREPS project “Application of state of the art technologies to strengthen research and response to seismic, volcanic and tsunami events and enhance risk management in Colombia (2015-2019)”

© The Seismological Society of Japan







© The Seismological Society of Japan

Monitoring of large structure and observation of long period ground motion using DAS and existing optical fiber cables installed

*Tsunehisa Kimura[1]

1. Schlumberger

光ファイバーを振動センサーとして用いるDASテクノロジーは、近年、日本においても3DVSPを含むサイズミックデータを良好に記録することができるようになり[1)]、確立された新しい物理探査技術として地下の構造を調査するために石油・ガス、二酸化炭素貯留、地熱分野で使われている。VSPの場合、人工震源の位置を同じにして数回発震させることによりデータのスタッキングが可能で、発震数を増やすことでS/Nを向上させることができる。地震等の自然現象観測の場合、スタッキングをすることができない。光ファイバーのバックスキャッターの位相差データを用いるDASを『hDVS』と呼んでいるが、振幅の変化を主に用いる通常のDASと比べデータが欠損するFadingの影響が少なくデータのS/Nが良いことと[2)]、ゲージ長や空間サンプリングをパラメータとして観測の目的によって自由に変化させることができる利点があり、自然現象の観測に向いていることを地震学会やJpGUで述べてきた。長大構造物をモニタリングする場合も同じことが言える。

2018年10月に一般財団法人エンジニアリング協会（以下、ENAA）の依頼で、阪神高速道路の橋梁をhDVS Tier-3と既存の通信用光ファイバーケーブルを用いて振動モニタリングの実証実験を行った。観測を行った橋梁は1991年に供用した橋梁で、1995年の阪神・淡路大震災の際、特に大きな被害は受けなかった。それらの橋梁内には通信用の光ファイバーケーブルが張られており、約2.3kmの長さのスペアファイバーを用いて4日間の連続記録を行った。空間サンプリング1m、ゲージ長4m、時間サンプリング1msで記録した。

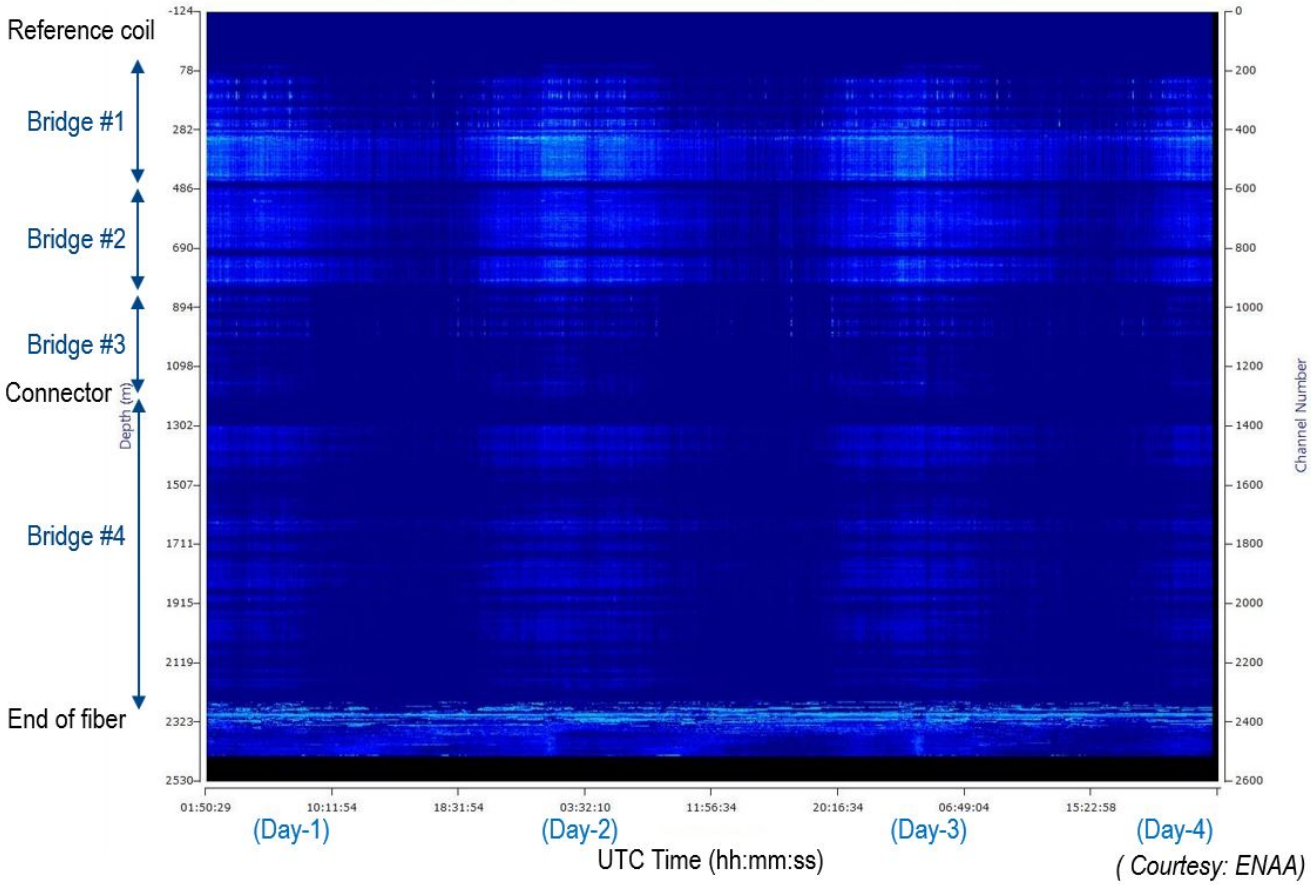
交通量が多い日中は振動が多く、交通量が少ない夜間は振動が少ない日周期があることが認められた。４日間の連続記録で得られた振動記録の一例を図に示す。また、橋梁によっては振動の大きい部分と小さい部分があることがわかった。それは橋梁内における光ファイバー敷設位置の違いのほか、路面状態の違いや橋梁の振動特性の違いによるものと考えられる。

長周期地震動が長大構造物に影響を及ぼすことが懸念されているが、hDVSと既存の光ファイバーを使う場合、まず、静かな環境下で長周期地震を観測することができる。それに加え懸念される長大構造物全体の振動そのものを観測できるので、地震やそれに準ずる現象により振動が起きた場合、より定量的な評価が可能である。

発表では、hDVSを使って観測されたデータのまとめを行うとともに、どのようなイベントが記録されたかの説明を行う。

引用文献：
１）M. Fujisawa et al, Acquisition and Imaging of the Kijiyama DAS-VSP + SSP Experiment Data, SEG-J 2019
２）A. Hartog et al., The Use of Multi-Frequency Acquisition to Significantly Improve the Quality of Fibre-Optic Distributed Vibration Sensing, EAGE Vienna 2016

© The Seismological Society of Japan



(Courtesy: ENAA)

© The Seismological Society of Japan

-

*- -[1], - -[2]

1. -, 2. --

T2019-100

© The Seismological Society of Japan

An effort for the demonstration experiment to provide forecast information of long period ground motion through an application development

*Misae Wakameda[1], Masaaki Kachi[1], Tsubasa Kawano[1], Yoshiaki Hisada[2], Masahiro Murakami[2]

1. A2 corporation, 2. Kogakuin University

１．はじめに

強い長周期地震動は、（1）地震規模が大きく震源が浅い、（2）地震波伝播経路に軟らかい地盤がある、（3）平野規模の地盤構造が堆積地盤である場合に発生する（建築研究所、2013）。今後発生しうる南海トラフ地震時には、高層ビルが多い都市にて長周期地震動により什器の移動・転倒やエレベータの故障・閉じ込め事故等の被害が多数生じると懸念されている。このような被害を低減させるために長周期地震動の詳細な予測情報が必要とされることから、予報業務化の実現に向けて、気象庁・緊急地震速報利用者協議会・予報業務許可事業者・情報利用者による予測情報提供の実証実験が開始された。本実証実験を実施している
我々は、高層ビル居住・管理者や巨大地震発生時の救出支援活動者に有用な予測情報を提供することを目的とし、ビルごとにその固有周期における長周期地震動階級（周期別階級）を算出して地図上に表示するツールを開発した。本発表では、開発した表示ツールを紹介し、長周期地震動の予測情報提供における利活用方法や発展性について検討する。

２．データ・方法

高層ビルが集中する東京都23区を対象領域とし、次の手順でビルごとに周期別階級を算出した。まず、Dkahal et al. (2015) の距離減衰式を用いて、ビル位置における1.6-7.8秒の絶対速度応答を0.2秒ごとに求めた（図1）。入力情報は震源位置、気象庁マグニチュードである。サイト補正はJ-SHIS深部地盤情報（Vs=1.4km/s 上面深さ）を用いて行った。次に、ビルの固有周期 T [s] をビルの高さH [m] と固有周期の関係（地震調査研究推進本部、2016）より算出した。ビルの高さは東京都の超高層ビルデータベース（全1261棟、http://www.blue-style.com/area/tokyo/）、構造は超高層ビル部（https://skyscraperclub.com/?cat=11）等を参照した。最終的にビルの固有周期に対応する絶対速度応答を長周期地震動階級と照らし合わせて周期別階級とし、ビルの基礎情報と合わせて地図上に表示した。

３．結果・今後の課題

本ツール利用時の一例として、2011年東北地方太平洋沖地震の震源情報（2011年3月11日16時00分 気象庁発表、気象庁マグニチュード暫定値）を入力したときの新宿駅周辺における周期別階級を図2に示す。本ツールは震源情報さえあればビルごとの周期別階級を一覧できることから、地震発生時におけるビル居住者の適切な避難行動やビル管理者の状況把握、救出支援者の救出支援優先度検討に資すると考えている。また、即時的な利用以外にも、長周期地震動階級の周知や今後発生しうる地震動に備えるための教材として活用することができるだろう。
本ツールは、現時点では震源情報とビルのおよその固有周期から算出した予測情報のみを提供する簡易的なものである。今後は（株）エイツーが新規開発中の地震計内蔵緊急地震速報受信機による地震動観測データに基づいた予測情報と組み合わせ、ビルの階層ごとに周期別階級を提供するなど、予測情報の高度化と機能拡張を行う方針である。また、情報利用者に本ツールや情報提供方法についてヒアリングを行い、ニーズに応じて改良を行っていく。

© The Seismological Society of Japan

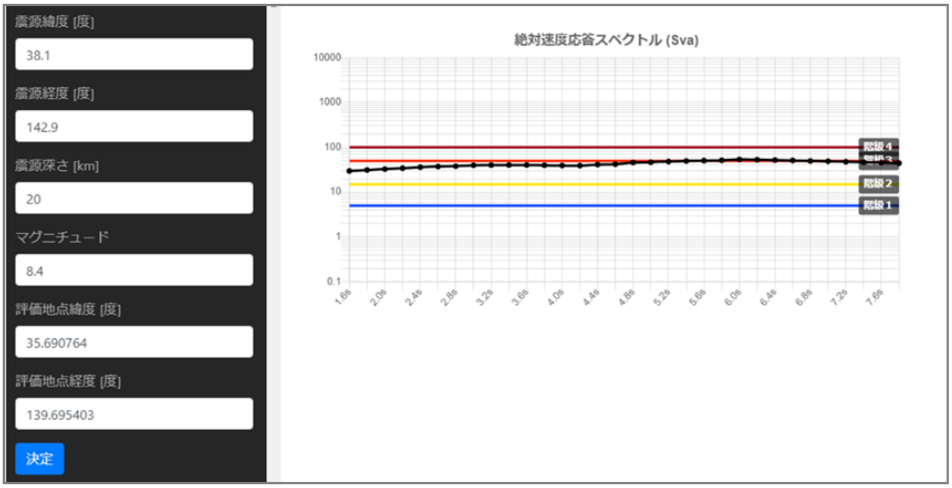


図1：あるビルの位置における1.6–7.8秒の絶対速度応答。
ビルの固有周期は2.6秒より、周期別階級は2。

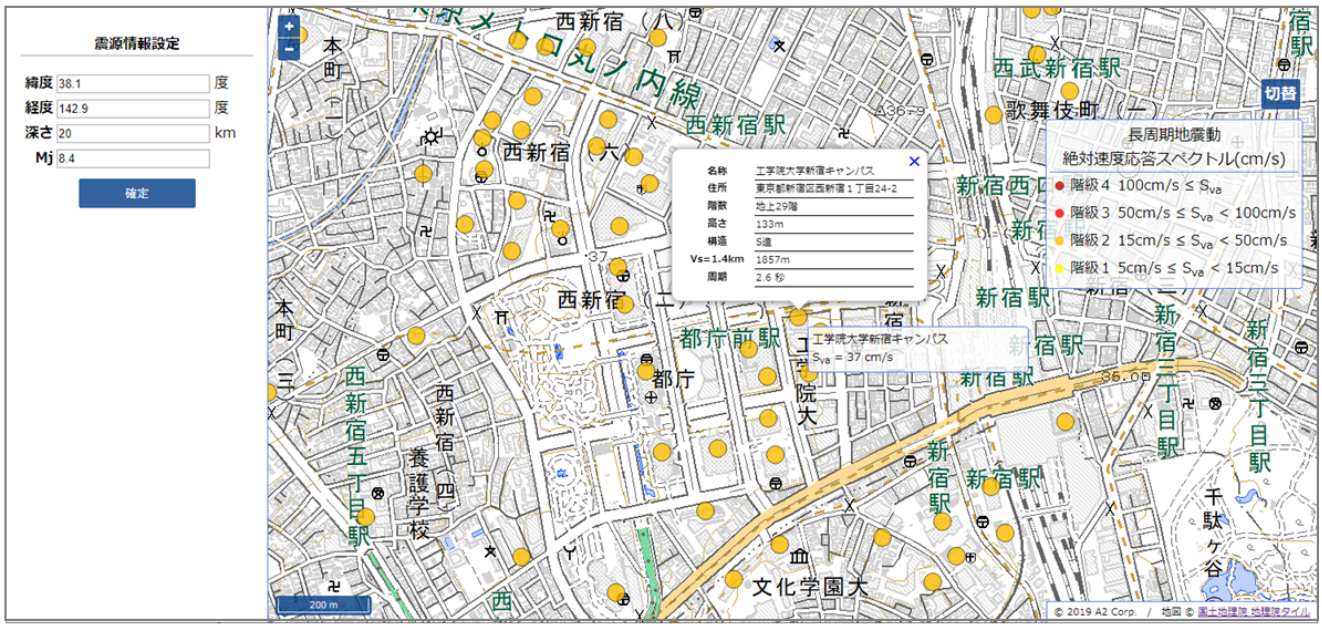


図2：周期別階級表示ツール画面。色つきの円はビルの位置と周期別階級を示す。
マウスオーバーでビルの固有周期における絶対速度応答を、
クリックでビルの基礎情報をポップアップ表示する。
地図は地理院タイル(https://www.gsi.go.jp/LAW/2930-index.html)を使用。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 18th) | Special session：S22. Potentiality of Machine Learning in Seismology

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 4:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S22P

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-01] Detection of seismic signals under low SNR condition using an artificial neural network: Toward the development of low cost seismic network

Ahyi Kim[1], *Hiroki Uematsu[1] (1. Yokohama City University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-02] Earthquake/Noise Discrimination with Convolutional Neural Network

*Shota Kudo[1], Kengo Shimojo[1], Koji Tamaribuchi[2] (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-03] Development of neural network to locate hypocenter with theoretical seismograms as learning data II

*Seiji Tsuboi[1], Daisuke Sugiyama[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-04] Attempt to detect LFTs by clustering short-period OBS records

*Hidenobu Takahashi[1], Ryota Hino[1], Yusaku Ohta[1], Naoki Uchida[1], Syuichi Suzuki[1], Masanao Shinohara[2] (1. Tohoku University, 2. The University of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-05] Insight into machine-learning model and prediction result: Case of random forest predictor for ground-motion intensit

*Hisahiko Kubo[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Takeshi Kimura[1], Shin Aoi[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-06] site2vec: A Ground-Motion Predictor Learning Site Conditions from Data

*Tomohisa Okazaki[1], Tomoharu Iwata[1,2], Asako Iwaki[3], Hiroyuki Fujiwara[3], Naonori Ueda[1] (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. NTT Communication Science Laboratories, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-07] Time series analyses of amplitude of the Earth's background free oscillations

*Ryuichi Kunugi[1], Naoki Suda[1] (1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-08] An Attempt to Classify a Pattern of Changes in Strain Observation Data by Machine Learning

*Takahiro Tsuyuki[1] (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-09] Machine Learning Approach for Integration of Multiple Relative Intensity Models

*Hirotaka Hachiya[1,2], Kazuro Hirahara[1], Naonori Ueda[1] (1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Faculty of System Engineering, Wakayama University)

1:00 PM - 2:30 PM JST | 4:00 AM - 5:30 AM UTC

[S22P-10] Optimal distribution of offshore observation points for tsunami prediction using scenario search and regression methods

*Toshitaka Baba[1], Takuya Miyashita[2], Nobuhito Mori[2], Kenta Nakanishi[3], Masato Okada[4] (1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. NITA Consultant, 4. Univ. of Tokyo)

Detection of seismic signals under low SNR condition using an artificial neural network: Toward the development of low cost seismic network

Ahyi Kim[1], *Hiroki Uematsu[1]

1. Yokohama City University

We have developed a community based low cost seismic network in Yokohama, Japan, called Citizen Seismic Network (CSN), to monitor local scale strong motion which is closely linked to community’ s life. Each sensor unit composed of 12 bit MEMS accelerometer and Raspberry Pi. Since the units are supposed to be installed under high-noise condition such as inside of house where spiky noise made by human activities often misinterpreted as seismic signal, it is difficult to discriminate the seismic signals from other noises. In such condition, applying conventional detection method using amplitude ratio (e.g. STA/LTA) is problematic. To overcome the issue, we employed an artificial neural network (ANN) that utilizes pattern recognition to retrieve seismic signals. To make the ANN work, we trained it using numerical data set produced by seismic records obtained from conventional seismometer adding CSN sensor noise. As the network input, vector modulus of three components of accelerogram are used.

Firstly we explore the optimum number of input units and training data. Secondly, using the trained ANN, we tried to identify the numerical seismic signals which are not used in the training process. As a result, 95% of the P-wave is successfully detected. The comparison with the performance of STA/LTA using real data observed by our sensor indicates that our method reduce the false detection significantly.

Detection is further improved with multiple stages training: noise data detected as “seismic signal” is included in the next training process as “noise”. The ANN trained with multiple stages stably detects P-wave for Japan Meteorological Agency seismic intensity scale above 3. It indicates that our method can make low cost MEMS sensor not only as reasonable strong motion detector but also as P-wave detector for the intensity above 3. It means our sensor network can be used as a complementary of the conventional seismic network for earthquake early warning.

© The Seismological Society of Japan

Earthquake/Noise Discrimination with Convolutional Neural Network

*Shota Kudo[1], Kengo Shimojo[1], Koji Tamaribuchi[2]

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute

自動震源決定では, インパルス的なノイズをP相として誤検測することにより, 誤った震源を決定してしまったり, 震源精度を低下させてしまったりする場合がある. 検測した波形が地震であるかノイズであるかを正確に識別することができれば, 自動震源の決定性能向上につながると期待される.
近年, 幅広い分野で機械学習, とりわけディープラーニングを用いた手法が著しい成果を挙げている. Meier et al. (2019, JGR)においては, 地震波形とインパルス的なノイズ波形を高精度で識別できる機械学習モデルを作成している. 本研究では, Meier et al. (2019)の中でもとりわけ性能の良い畳み込みニューラルネットワークを用いたモデルを, 気象庁の保有するデータによって訓練し, より微小な地震についても, このモデルが高精度の地震／ノイズ識別能力を有するかを検証する.
データは, 地震／ノイズの二値分類を行うため, P相周辺の地震波形とインパルス的なノイズ波形データ(3成分, 100Hz)をそれぞれ収集した. 期間は, 気象庁の自動震源決定手法であるPF法の運用開始以降となる2016年4月～2019年4月とした. 地震波形については, 一元化震源のうち精度良く決定された震源(震源決定フラグ: K, k, A)を計算するのに用いられた検測値に対応する波形データを収集した. ノイズ波形については, PF法が誤検知した震源を計算するのに用いられた検測値に対応する波形データを収集した. 集めたデータは訓練, 検証, テストデータに8:1:1の割合で分配した. この際, 同じ地震についての波形が訓練, 検証, テストデータに分配されないように配慮した. 全ての波形データには遮断周波数が0.5Hzのハイパスフィルタを適用した. 波形データは検測値を含む4秒間の波形に切り出し, 振幅の最大絶対値で割って波形を規格化した. モデルの頑健性を増やすため, 4秒間に切り出す際には, 検測値の位置が1～3秒の間にランダムに位置するように切り出した.
モデルは, Meier et al. (2019)と同様に, 4秒間3成分の波形を入力とし, 1次元畳み込み層・バッチ正規化・活性化・最大値プーリングを1まとまりとして3つ重ねた後, 全結合層・バッチ正規化・活性化のまとまりを2つ重ね, 出力層では入力波形が地震である確率を出力とした. 1次元畳み込み層のフィルタ数は順に32, 64, 128で, フィルタ幅はどれも16とし, プールサイズは2とした. 全結合層は2つとも80ユニットとし, 出力層は1ユニットとした. 出力層以外の活性化関数はReLU関数とし, 出力層の活性化関数はシグモイド関数とした. このモデルの前半3つの畳み込み層では地震波形に反応する特徴抽出システムが学習され, 後半2つの全結合層ではその特徴量から地震／ノイズへの分類器が学習されると考えられる. 損失関数はバイナリ交差エントロピーとし, 最適化手法はAdam, 学習率は0.001とした. バッチサイズ48のミニバッチ学習を行い, 検証データに対する損失値が5エポック以上続けて改善しない場合に学習を早期終了した. この学習プロセスを複数回繰り返し, 検証データに対する損失が最小となるモデルを最良モデルとして選択した. なお, Meier et al. (2019)のモデルとは出力層のユニット数・活性化関数および損失関数の設定が異なるが, 本質的な差はないと考えられる.
最良モデルについて, 地震であると分類する確率の閾値を0.5としたときの適合率, 再現率を求めると95%以上となった. これは1観測点の波形のみから地震／ノイズを識別した場合の値であるので, 複数観測点の波形を組み合わせて識別すれば, ノイズによる地震の誤検知を劇的に減らすことができると予想される. 発表では, 作成した地震／ノイズ識別モデルによる処理をPF法に盛り込むことにより, PF法の震源決定性能がどの程度向上するかについても触れる予定である.

© The Seismological Society of Japan

Development of neural network to locate hypocenter with theoretical seismograms as learning data II

*Seiji Tsuboi[1], Daisuke Sugiyama[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

我々は、昨年の地震学会秋季大会において、現実的な3次元地球モデルを用いた理論地震波形記録を教師データとして機械学習を行うことにより、震源パラメータの推定を行うニューラルネットワークを構築する試みについて報告した。
前回の発表では、仮定した地震に対して計算した理論地震波形記録から、ある時刻における地表の変位分布を表し、そのような画像を基にした機械学習から、震源パラメータを推定するニューラルネットワークを構築することが出来ることを示した。地表の変位分布を理論地震波形記録から構築する際には、関東地方規模の領域を選び、地表における変位を0.05°毎に計算して変位分布を作成したが、関東地方では、観測点の分布も十分稠密であるため、観測データから変位分布を構築することは比較的容易に実施可能であった。一方、日本列島規模の領域を考えた場合は、観測点は陸上に限定されるため、観測データから構築する変位分布は偏ったものになることが予想される。ここでは、日本列島規模の領域について、陸上の観測点を想定した理論地震波形記録に基づく地表の変位分布画像を用いて、機械学習によりニューラルネットワークを構築することを試みた。

理論地震波形記録は、前回と同様にスペクトル要素法のSPECFEM3D_GLOBE(https://geodynamics.org/cig/software/specfem3d_globe/)を用い、256コアを使って1 chunkを用いて計算した。モデルの精度を表すパラメータであるNEXは256で、用いた3次元地球モデルはS20RTS、精度は周期17秒である。2分間の理論地震波形を約4200個の地震に対して計算し、約300万枚の地震波伝播画像を生成した。教師データとして用いた画像の例を図1に示す。

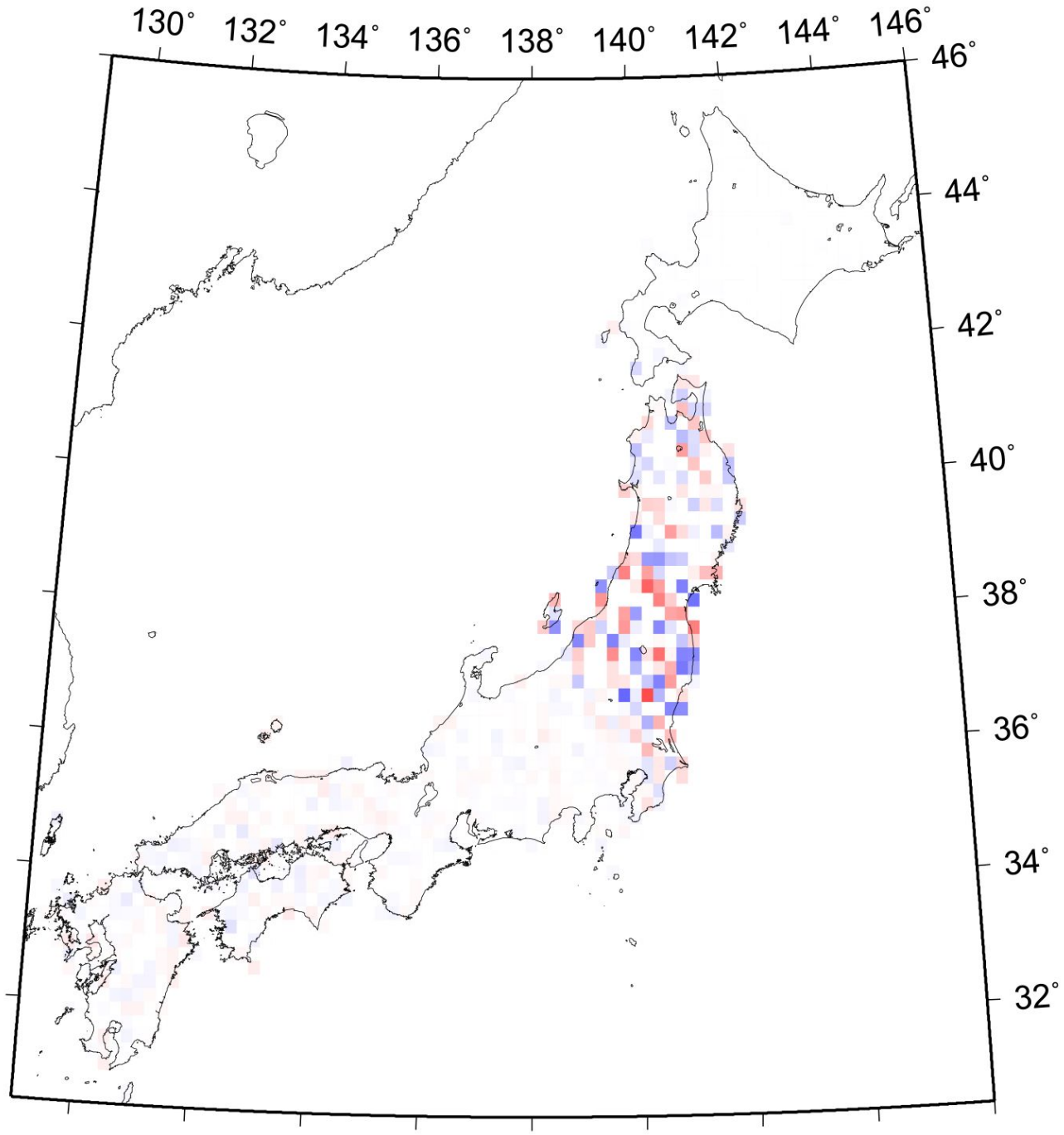
生成した画像を基に、震源パラメータを推定するニューラルネットワークの構築を試みた。ニューラルネットワークは深層学習でよく使われるConvolutional Neural Network (CNN)で、convolutionは2層とし、86x86の画像から，各パラメータを推定するネットワークを機械学習により生成した。ニューラルネットワークのフレームワークはTensorFlow (https://github.com/tensorflow)を用いた。機械学習は画像の85%を用い、学習のパラメータ設定を海洋研究開発機構・地球情報基盤センターが運用するDAシステムのGPGPUノードを使用して行った。学習により構築したニューラルネットワークに対して残り15%の画像を用いて検証を行った。検証結果は推定した緯度と経度の誤差の標準偏差がそれぞれ0.045°と0.063°であり、日本列島規模の陸上観測点分布による地表の速度分布画像から震源パラメータを推定するニューラルネットワークを構築することが可能であることが分かった。

構築したニューラルネットワークを実際の観測データに適用した場合の推定の結果および、構築したニューラルネットワークの応用の可能性については発表の際に述べる。

謝辞

この研究では海洋研究開発機構・地球情報基盤センターの計算機システムを用いました。記して感謝いたします。本研究は科研費19K12011の助成を受けました。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Attempt to detect LFTs by clustering short-period OBS records

*Hidenobu Takahashi[1], Ryota Hino[1], Yusaku Ohta[1], Naoki Uchida[1], Syuichi Suzuki[1], Masanao Shinohara[2]

1. Tohoku University, 2. The University of Tokyo

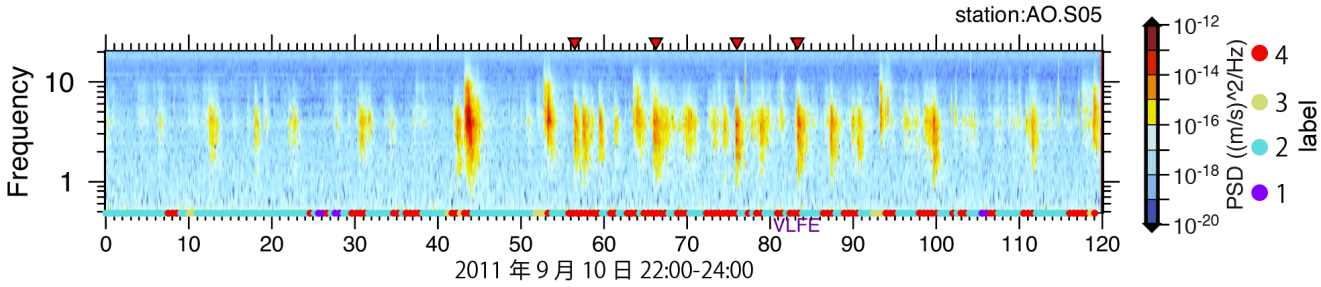
近年構築された日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) により，東北沖における低周波微動(LFT)活動の 存在が明らかになりつつある. しかし，S-net の観測開始は東北地方太平洋沖地震の 5 年後であり，LFT の巨 大地震発生前や発生直後の活動を明らかにするには，短周期 OBS (SP-OBS)を用いた臨時観測のデータを活 用する必要がある. 過去の臨時観測では，S-net のように広域多点でデータが取得されているとは限らず，LFT検出でよく使用されるエンベロープ相関法を適用しても，S/N が十分でないイベントを効率よく検知することが難 しい.Takahashi et al. (2019) は，東北沖で発生した超低周波地震(VFLE)の震源近傍に展開された5台の SP- OBS データから，VLFE 活動域近傍で LFT がしばしば発生していることを見出した. この場合には，LFT はVLFE 発生時に検出されたイベントをテンプレートとし，それとの共通性にもとづいた検索を行ったため，からなずしも網羅的に LFT を検出できているとはいえない. 本研究では，過去の臨時観測で得られた SP-OBS の記録から LFT を網羅的に捉えることを想定して，教師なしでデータを分類する手法であるクラスタ解析を応用することで，特定のテンプレートを設定せずに LFT の検知を試みる.

本研究では，Takahashi et al. (2019)が解析に用いたのとおなじ東北沖地震後に日本海溝北部に展開された 5台の SP-OBS 記録に対し，クラスタ解析の一つである K-means++ (David and Vassilvitskii., 2007) を適用した. この観測データに含まれる LFT は通常地震に比べて 1–8 Hz でのパワースペクトルの減衰パターンが異なっていることから，クラスタ解析に入力するデータベクトルとして，Power Spectral density (PSD) を用いた.全観測点において 60 秒の時間窓で計算した 1–8 Hz の PSD を1つの入力ベクトルとし，30 秒間ずつずらしながら半年間にわたるデータアンサンブルを準備して，これに対してクラスタ解析を行った. LFT の特徴は PSD の形状にあることから，その違いが強調されることを期待して，データベクトルをその最大要素の絶対値 (5観測点における の PSD の最大値) で規格化した.また，こうした規格化をすることで，震源ー観測点間距離の違いを反映する観測点間での振幅の違いの情報も加味したデータの分類がなされることが期待される.

Takahashi et al. (2019)が検出した 4 つの LFT を含む2時間のランニングスペクトルとクラスタ分類結果を図で示す.クラスタ数は，クラスタ内の誤差平方和を基にしたエルボー法による検討にもとづき，4とした. 図の下部 の〇の色は，右の label のカラーにおけるクラスタ分類番号に対応する. 赤逆三角で示された LFT の検出時間で同じクラスタに分類されていることがわかる. Takahashi et al. (2019)で LFT のテンプレートとした特に S/N が高い6つの LFT も，これらと同一クラスタに分類された.

今後はこれらクラスタの分類結果がどのようなデータの性質を反映しているか検証する. 既知の LFT と同一のクラスタに属するものは全体の 35 % 程度あるが，それらが全て LFT に対応すると考えてよいのか，あるいは通常地震のコーダ波部分や遠地地震も含まれているのか，などを同一クラスタに分類された PSD に立ち返り確認する. また，LFT が属するクラスタに分類されたデータを，異なる特徴量にもとづいて再度クラスタ解析することも検討している.これらの作業により，これまでのテンプレートとの類似性から検知されたものとは別の LFT の検出可能性を検討する.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Insight into machine-learning model and prediction result: Case of random forest predictor for ground-motion intensit

*Hisahiko Kubo[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Takeshi Kimura[1], Shin Aoi[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

１．はじめに
機械学習を用いたアルゴリズムは我々の日常の中に浸透しつつおり、地球物理学の分野でも様々な場面で活躍の場を広げている（e.g., Kong et al. 2018; Bergen et al. 2019）。他方で、機械学習、特にニューラルネットワークに関しては、「ブラックボックス」問題が往々にして指摘されている。機械学習を用いたシステムを社会実装していく際には、ブラックボックス問題に関連する様々な社会的要請を答えていく必要があり、透明性や説明責任が今後の機械学習関連の研究開発ではますます重要になっていくと想定される（e.g., 福島・他 2017）。本研究ではこれまで著者らが行ってきた地震動指標のランダムフォレスト予測器（e.g., 久保・他 2018a 人工知能学会; 久保・他 2018b 地震学会; 久保・他 2019 人工知能学会）を題材として、その機械学習モデルと予測結果の解釈を行う。
久保・他（2018a）では、地震動指標の一つである地表最大加速度（PGA）を予測対象とし、震央距離・モーメントマグニチュード（Mw）・震源深さ・予測地点でのS 波速度1400m/s層の深さ（D1400）・予測地点の地下深さ30m までの平均S 波速度（Vs30）の5つを説明変数とする予測器をランダムフォレスト（RF）によって構築している。RFは、木構造を模したモデルによって回帰・分類を行う決定木を複数用いて、決定木の森を構成し予測を行うアンサンブル学習アルゴリズムである（e.g., Breiman 2001; Zhou 2017）。決定木自体はif文の集合体であり、ホワイトボックス型の手法である。しかしながら複数の決定木を組み合わせるRFの場合、一つ一つのif文が最終的な予測結果にどのように効いているのかわかりづらく、ニューラルネットワークほどではないにしてもブラックボックス的な要素を多く含む手法とみなすことができる。特に木構造が深い決定木を多数用いる場合には、その傾向が顕著となる。

２．ランダムフォレスト予測器
久保・他（2018a）と同様のやり方で、RF予測器を用意した。本研究で用いたRFは、最大深さ100 の決定木計100で構成される。学習データは、久保・他 (2019)で用いたデータセットを一部リバイスしたものを利用した。

３．説明変数の重要度
作成した予測器において「どの説明変数が重要なのか」を知ることは、その機械学習モデルと予測結果を理解する第一歩である。RFおよび決定木では木構造における各説明変数へのアクセス頻度から、各説明変数の重要度を算出できる。以下ではこれをアクセス重要度と呼ぶ。２．のRF予測器におけるアクセス重要度は [震央距離, Mw, 震源深さ, D1400, Vs30] = [0.40, 0.26, 0.10, 0.12, 0.12] となる。震源距離とMwの値が他に比べて大きく、二つを合わせると全体の三分の二を占めていることがわかる。これは震源からの距離と地震の規模でPGAの大きさの大体が決まることを示しており、これまでの地震学の知見と整合する。
ただしアクセス頻度に基づく重要度の計算はconsistencyを満たさないことが先行研究によって指摘されている(e.g., Lundberg et al. 2018)。そこでPermutation Importance (PI; Breiman 2001; Fisher et al. 2018)を用いた重要度の評価を行った。PIは、ある一つの説明変数に関してデータ配列の順序をシャッフルしたデータを用意し、シャッフルしたことがモデルの精度にどの程度影響を与えるかを評価することで、重要度を求めるものである。ELI5を用いて計算したところ、[震央距離, Mw, 震源深さ, D1400, Vs30] = [0.9038±0.0083, 0.4836±0.0074, 0.1035±0.0015, 0.1498±0.0020, 0.1372±0.0023] が得られ、PIでもアクセス重要度と同じ傾向が見られた。ただし、震央距離・Mw・その他三つの間の重要度の差がより強調されている。なおPermutation Importanceが負の値だと、その説明変数の順序を変えた場合に予測器のパフォーマンスが向上したことを示すが、今回はそのような変数はなかったことがわかる。

© The Seismological Society of Japan

加えてShap (SHapleyAdditive exPlanations; Lundberg and Lee 2017; Lundberg et al. 2018)を用いた評価も行った。Shapはゲーム理論のShapley valueに基づき、各特徴量が個々の予測にどの程度寄与しているかを測る指標であるが、アクセス重要度・PIと同様の結果が得られた。

© The Seismological Society of Japan

site2vec: A Ground-Motion Predictor Learning Site Conditions from Data

*Tomohisa Okazaki[1], Tomoharu Iwata[1,2], Asako Iwaki[3], Hiroyuki Fujiwara[3], Naonori Ueda[1]

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. NTT Communication Science Laboratories, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

目的

簡便な地震動評価のために、観測記録の経験的関係に基づく地震動予測式が広く利用されている。震源特性、伝播特性、観測点のサイト特性を説明変数、最大加速度などの地震動強さの指標を目的変数とする回帰式を設定して統計的にパラメータ推定をするのが一般的であるが、近年ではニューラル・ネットワーク(NN)を用いたノンパラメトリックな手法も提案されている(e.g. Derras et al., 2012)。

従来の予測式では、説明変数を事前に選択してモデル化が行われてきた。しかし、特にサイト特性については適した特徴量が自明ではない。深さ30mまでの平均S波速度(AVS30)や基盤深さなどの指標が経験的に用いられているが、必ずしも地震動に対する性質を代表しているとは言えない。また、これらの物性値を得るにはボーリング調査や物理探査を必要とし、高精度の値が得られない場合もある。

本来、地震動に寄与するサイト特性は強震記録に反映されているはずである。そこで本研究では、観測点ラベルそのものを入力とすることで、サイト特性を強震動データから自動的に学習するNNモデルを開発した。その際、各観測点のサイト特性に対するベクトル表現が得られるようにネットワークを設計した。これにより、強震記録に基づいて学習されたサイト特性を分析することが可能となる。

手法

図(a)に示す2段構成の予測モデル“site2vec”を提案する。まず、観測点ラベルをネットワークによりベクトルに変換し、得られたベクトルと他の説明変数を入力とする順伝播型NNにより地震動指標を出力する。これは、自然言語処理の分野で広く用いられるword2vec (Mikolov et al., 2013)に着想を得たものである。word2vecでは文章データの学習を通して、各語彙が、全語彙数に一致する次元のone-hot表現（ある要素が1で他の要素が0のベクトル）から低次元のベクトルに変換される。同様にsite2vecでは、観測点数の次元をもつ観測点ラベルのone-hot表現から、サイト特性のベクトル表現が得られる。2つのネットワークは同時に学習を行うため、地震動予測に即したベクトル表現を獲得できる。

ここで、観測点ラベルを直接NNの入力とすることも可能だが、これではサイト特性がブラックボックスとなってしまう。site2vecを介することで、学習されたサイト特性を可視化・分析できる点が本モデルの特長である。

実験

マグニチュード、震源深さ、震央距離、AVS30、観測点ラベルのいくつかを用いて最大加速度を予測する問題を考えた。茨城県内18のK-NET観測点で1996年6月～2018年9月に観測された深さ200km未満、最大加速度10gal以上の記録を用いた。期間により、訓練データ：1996～2012年（9276記録）、検証データ：2013～2014年（1425記録）、テストデータ：2015～2018年（2110記録）に分割した。

site2vecの他、入力変数を変えたNNを用いてテストデータに対する予測性能の比較実験を行った（図b）。NNでは、サイト特性を与えないよりAVS30を入力するほうが高性能だが、AVS30の代わりに観測点ラベルを入力するとさらに良い結果が得られた。この観測点ラベルを入力するNNとsite2vecでは、同程度の性能を示した。site2vecでは学習したサイト特性のベクトル表現が得られるため、ベクトル表現がもつ地盤情報について

© The Seismological Society of Japan

も考察を行った。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所のK-NETの強震データを使用した。AVS30の値はJ-SHIS地震ハザードステーションを参照した。機械学習の実装にはFacebook社が開発したPyTorchを使用した。

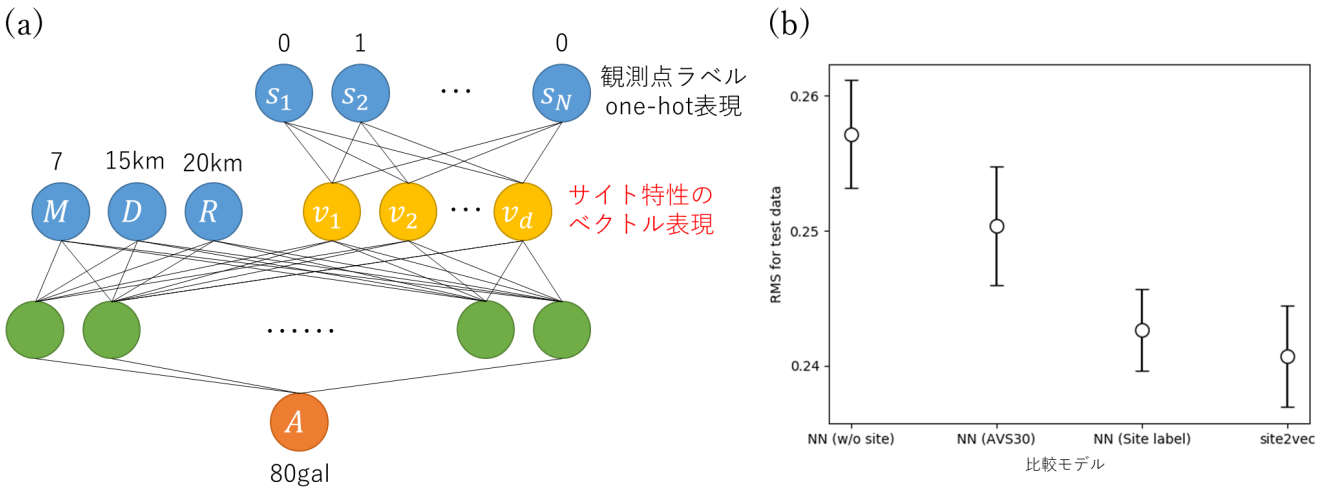


図. (a) 地震動予測モデル“site2vec”のネットワーク構成。
(b) 実験結果。各モデル100回独立に学習し、テスト誤差の平均と標準偏差をプロット。

© The Seismological Society of Japan

Time series analyses of amplitude of the Earth's background free oscillations

*Ryuichi Kunugi[1], Naoki Suda[1]

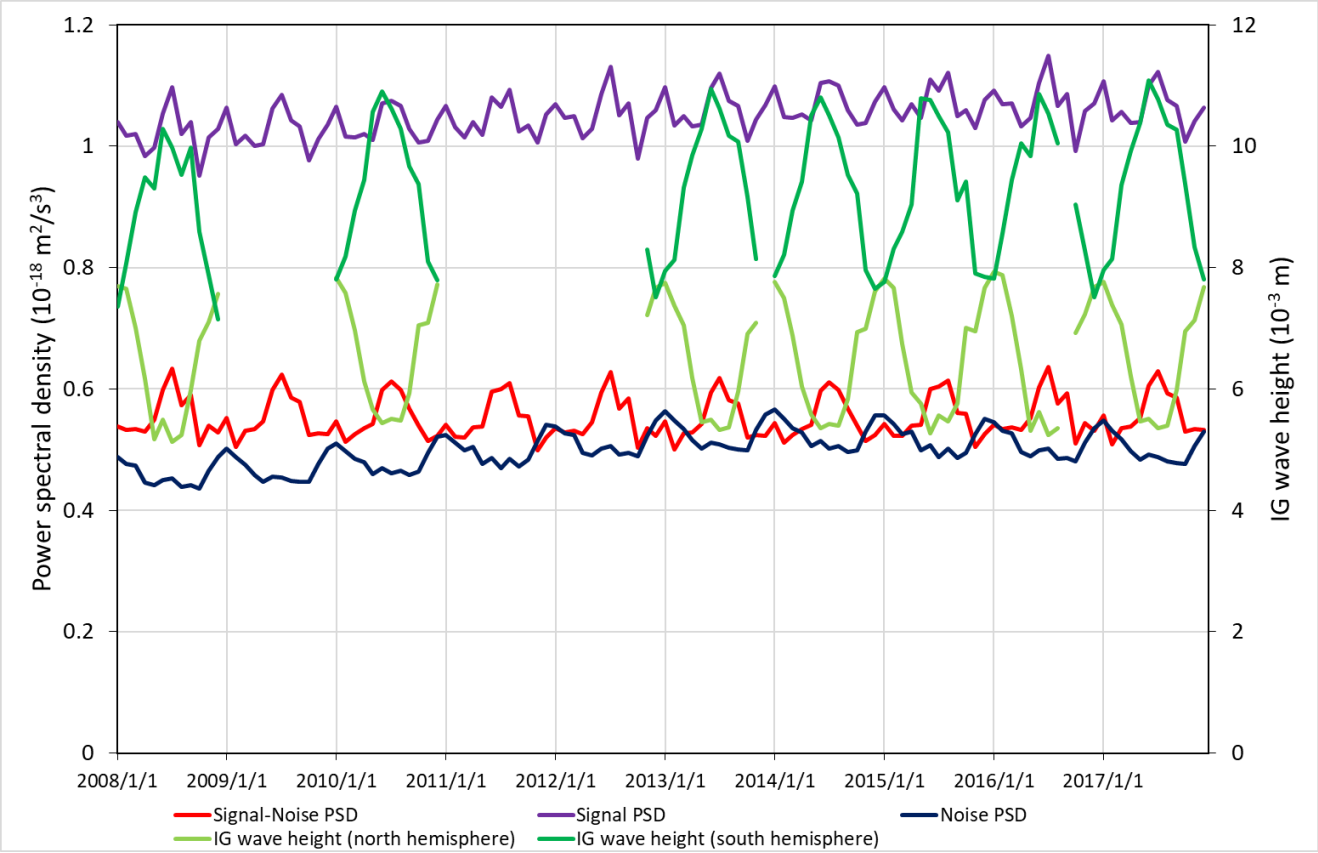
1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

常時地球自由振動とは地震の有無にかかわらず固体地球が常に微弱に自由振動している現象のことであり[e.g. Suda et al. 1998] 、大気や海洋が固体地球に及ぼす力によって励起されている [e.g. Nishida 2013] 。また常時地球自由振動の振幅は季節変動することが知られている [Nishida et al. 2000] 。長周期重力波（IG波）は海洋で発生する長周期の波（周期：30-300秒）であり [e.g. Munk 1949] 、海岸に到達した短周期波により生成され、海底面に向かって伝播する [Longuet-Higgins and Stewart 1962] 。またIG波は固体地球の周期50-300秒の表面波を励起することがわかっている [e.g. Rhie and Romanowicz, 2004, 2006] 。前回の研究では常時地球自由振動の振幅とIG波の高さの永年変動を調べたが、有意な対応関係は見られなかった。そこで本研究では常時地球自由振動の振幅とIG波の高さの年周変動を比較し、両者に年周変動の対応関係が見られるか調べた。

常時地球自由振動のデータとしてSTS-1型広帯域地震計（63観測点）の上下動記録を用いた。解析期間は2000-2017年である。連続時系列データから3日長のデータを1日ずらしで切り出し、FFTで時間領域から周波数領域に変換するともに、計測システムのレスポンスを周波数領域で補正して、各観測点のパワースペクトル密度（PSD）を求めた。ノイズのあるデータを排除し、周波数帯域をシグナル帯とノイズ帯に分割して、Signal-Noise PSD、Signal PSD、Noise PSDの1ヵ月平均をそれぞれ計算した。IG波はWaveWatch-III [Tolman et al. 1996] のIG波の高さのグリッドデータを用いた。解析期間は2008-2017年で3時間間隔のデータをそれぞれ北半球、南半球に分けて平均し、それらを1ヵ月ごとに平均し1ヵ月平均のIG波の高さを求めた。また両者の年周変動を見るために、統計モデルであるProphet [Taylor and Letham, 2017]を用いた。Prophetは加法モデルを用いて機械学習から時系列解析を行うモデルである。R言語のProphetパッケージを用いて解析した。

Prophetで推定された各月のPSDの大きさについて年周変動の特徴をみると、Signal PSD（紫線）は7月と12月にピークがある半年周変動が見られた。Noise PSD（青線）は12月または1月にピークがある年周変動が見られた。Signal PSDからNoise PSDを引いたSignal-Noise PSD（赤線）は7月にピークがある年周変動が見られた。IG波の高さについては、北半球平均（黄緑線）は12月または1月にピークがある年周変動が見られ、南半球平均（緑線）では7月にピークがある年周変動が見られた。Signal-Noise PSDと南半球平均のIG波の高さの相関係数をとると0.73と強い正の相関があることが分かった。これはSignal-Noise PSDの年周変動のピークをもたらす原因が南半球のIG波であることが示唆される。またNoise PSDと北半球平均のIG波の高さの相関係数をとると0.56と正の相関があることが分かった。これはNoise PSDの年周変動のピークをもたらす原因が北半球のIG波であることが示唆される。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

An Attempt to Classify a Pattern of Changes in Strain Observation Data by Machine Learning

*Takahiro Tsuyuki[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Sacks-Evertsonタイプの体積ひずみ計や石井式多成分ひずみ計の観測データに現れる現象には，フィリピン海プレート深部でのゆっくりすべりにともなう変化や大きな地震のコサイスミックなステップ，火山活動にともなう変化などの「本来の」地殻変動による変化のほか，観測点周辺での地下水のくみ上げによる変化などの観測点固有のローカルな変化がみられる場合もあり，様々な変化のパターンが存在する．

木村・他(2013)は，ひずみ計などの地殻変動データに現れた現象の分類とデータベース化を試みた．これに基づいて気象庁ではルーチン的に変化パターンの分類が続けられているが，何らかの現象による変化を検知した場合に，その変化パターンや原因を分類するのは，あくまでも人の判断によっている．その判断の背景には，地震や深部低周波微動の情報や，過去の観測履歴等があるわけであるが，これまでの40年近い観測で蓄積された膨大な時系列データを機械的に分類することができれば，人の経験による分類では見出し得ない新たな発見があるかもしれない．その手法として，機械学習による変化のパターンの分類は有効な手段となる可能性がある．

山室・他(2018)は，時系列データをDeepLearningにより分類するためのアルゴリズムとして，DEEPPLAITとよばれるモデルを提案している．このモデルは，まず時系列パターンの変化点と種類を自動的に把握し，データセット全体の要約情報を抽出した上で，得られた情報を基に，畳み込みニューラルネットワーク（CNN）や再帰型ニューラルネットワーク（RNN)とAttension[Bahdahnau et al., 2015]を組み合わせて深層学習を行うものである．この手法では，学習結果から得られた重要度を確認することで，人の直感に合った重要な時系列パターンを発見できるとしている．

DEEPPLAITにおいて，時系列データのパターンを表現する情報を抽出する技術として使われているのがAutoPlait[Matsubara et al. 2014]である．AutoPlaitでは，隠れマルコフモデルの拡張である多階層連鎖モデルによりパターンのグループ化を行い，最小記述長の概念を用いて，与えられた時系列データを適切に表現するモデルを見つけるアルゴリズムを提案している．

ひずみ観測データの変化のパターンを機械学習によって分類する第一段階として，このAutoPlaitをひずみ観測の時系列データに適用してみて，その有用性の検証を試みた．用いたデータは，前述の木村・他(2013)のデータベースに登録されている現象の時間値である．変化の期間をはさむ前後数日分の時間値を用いた．多成分ひずみ計については，全成分を同時にデータセットとした．また，気圧や潮汐等の影響は補正されているが，気圧と降水のデータも合わせてデータセットとすることで，時系列の要約情報に違いが出るかも確認した．

それぞれの変化現象は，緩和的変化やステップ状変化などの変化の形状のパターンとその原因が調べられているが，ここでは変化の形状には着目せず，原因を12種類に分類してあらかじめラベル付けを行った．AutoPlaitによる要約情報と与えられたラベルとの比較を行った結果，何らかの原因によって変化が起きているという人の目による分類とAutoplaitによる現象の要約情報はおおむね一致しているものと考えられる．このことから，次の段階として深層学習を行うことによって，ひずみ観測データの変化のパターンの機械的な分類が可能ではないかと考えている．

謝辞：https://www.dm.sanken.osaka-u.ac.jp/technology/autoplait/で公開されているソフトウエアを使用

© The Seismological Society of Japan

させていただきました.

© The Seismological Society of Japan

Machine Learning Approach for Integration of Multiple Relative Intensity Models

*Hirotaka Hachiya[1,2], Kazuro Hirahara[1], Naonori Ueda[1]

1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Faculty of System Engineering, Wakayama University

Among the models submitted to the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) Japan experiment, smoothed relative intensity (SRI) method (Nanjo,2011), provides a high performance, assuming large earthquakes more likely occur in the future at locations with higher seismicity in the past. SRI generates a grid map, each cell of which has the normalized number of earthquakes occurred in a circle centered at the cell during a past training period.

However, SRI would have two potential limitations. Firstly, spatial and temporal parameters, the radius of the circle, and the past training period are fixed over entire regions and manually tuned by users. Secondly, the distribution of earthquakes in the future testing period could differ from the past training period one, since the future testing period is usually much shorter, e.g., 3-month and 1-year in comparison with the past training periods, e.g., 20-year.

To mitigate these limitations, we propose to define the earthquake forecast problem as an image conversion problem where a multi-channel image each of which corresponds to an SRI map with different spatio-temporal parameter in the past, is converted to an SRI map in the future testing period. By training convolutional deep encoder-decoder networks with paired input-output images, multiple SRI forecasts can be combined adaptively so as to minimize the future SRI reconstruction error.

We show the effectiveness of our proposed method through earthquake forecast experiment for the Kanto region in the CSEP Japan, using the data of years from 1923 to 2017, in comparison with SRI methods. In addition, we extend our proposed method with data augmentation transferred from other regions and show its effectiveness.

© The Seismological Society of Japan

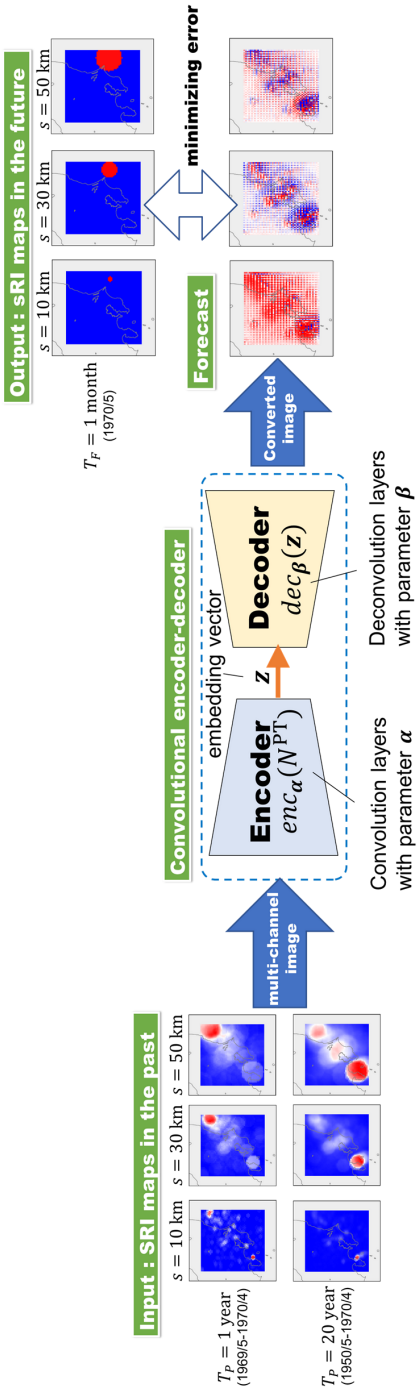


Figure: Proposed framework for converting SRI (smoothed relative intensity) maps in the past to the maps in the future.

© The Seismological Society of Japan

Optimal distribution of offshore observation points for tsunami prediction using scenario search and regression methods

*Toshitaka Baba[1], Takuya Miyashita[2], Nobuhito Mori[2], Kenta Nakanishi[3], Masato Okada[4]

1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. NITA Consultant, 4. Univ. of Tokyo

リアルタイム沖合津波観測は海岸に到達する前の津波を直接観測できるため津波警報に果たす役割は大きい．日本周辺海域においてはGPS波浪計観測網，S-net，DONETを代表として大規模稠密観測網の構築が進んでいる．我々は日本の先進的沖合津波観測技術を同じように津波災害に悩む環太平洋，インド洋などの沿岸各国に提供したいと考えている．しかし，日本のような高密度な沖合観測網の構築はコスト面から不可能であると常に反論される．このため，数少ない海域観測点でも高精度に津波を予測できる方法についての検討が必要である．

本研究では，日本と同様に津波災害の軽減を目指すメキシコを研究対象地域として，沖合観測網の最適配置を求める方法について検討した．解析手順は次のとおりである．メキシコ沖で発生しうる多数の震源断層モデルを構築し，それによる津波をシミュレートし，データベース化する．作られたデータベースに対して，適当な沖合津波観測網を仮定して，疑似観測データとする．疑似観測データを用いて海岸での津波高を予測し，データベース内の真値との残差と求めて予測性能を評価する．多数の震源断層モデルには，過去にメキシコ沖で発生した海溝型地震の幾何学的特徴とすべりの空間分布の波数特性を再現するように，自動ですべり分布をランダムで再構築する方法で作られた確率震源モデル（Goda et al., 2014; 2016; Mori et al., 2017）を利用した．M7.8からM8.6までM0.2刻みで500シナリオずつ，計2500シナリオを準備した．津波計算には非線形浅水波式を差分法で解いた．なお，沖合から海岸に向かってネスティング法により地形分解能を270mから90mへ向上させた．津波予測点は，集落や町が形成されているZihuatanejo，Puerto Vicente，Acapulcoの3地点とした．津波を予測する方法として，シナリオ検索型（Yamamoto et al., 2016）とべき乗則の回帰型（Yoshikawa et al., 2019）の2つを採用し，シナリオ検索型では焼きなまし法によって，回帰型ではL1型正則化項を用いて，設置できる沖合観測点数を制限した場合の最適な観測点配置を求めた．ここで言う最適配置とは予測残差が最小となる配置のことである．なお，海岸への津波到達時間が12分未満の近い観測点は避難猶予時間が短すぎるため観測点候補から除外した．

沖合観測点の設置数を３，５，10に制限した場合，予測値と真値の残差二乗和平方根（RMSE）は，シナリオ検索型では0.93m，0.88m，0.85m，回帰型では0.82m, 0.73m, 0.69mとなった．シナリオ型では比較的沖合の観測点が選ばれるのに対して，回帰型では海岸に近い観測点が選ばれた．選ばれた観測点分布の違いは，シナリオ検索型では波源全体を抑えられるように広域な観測点が必要とされ，回帰型では相関の強い海岸近くの観測点が好まれるためと考えられる．

© The Seismological Society of Japan

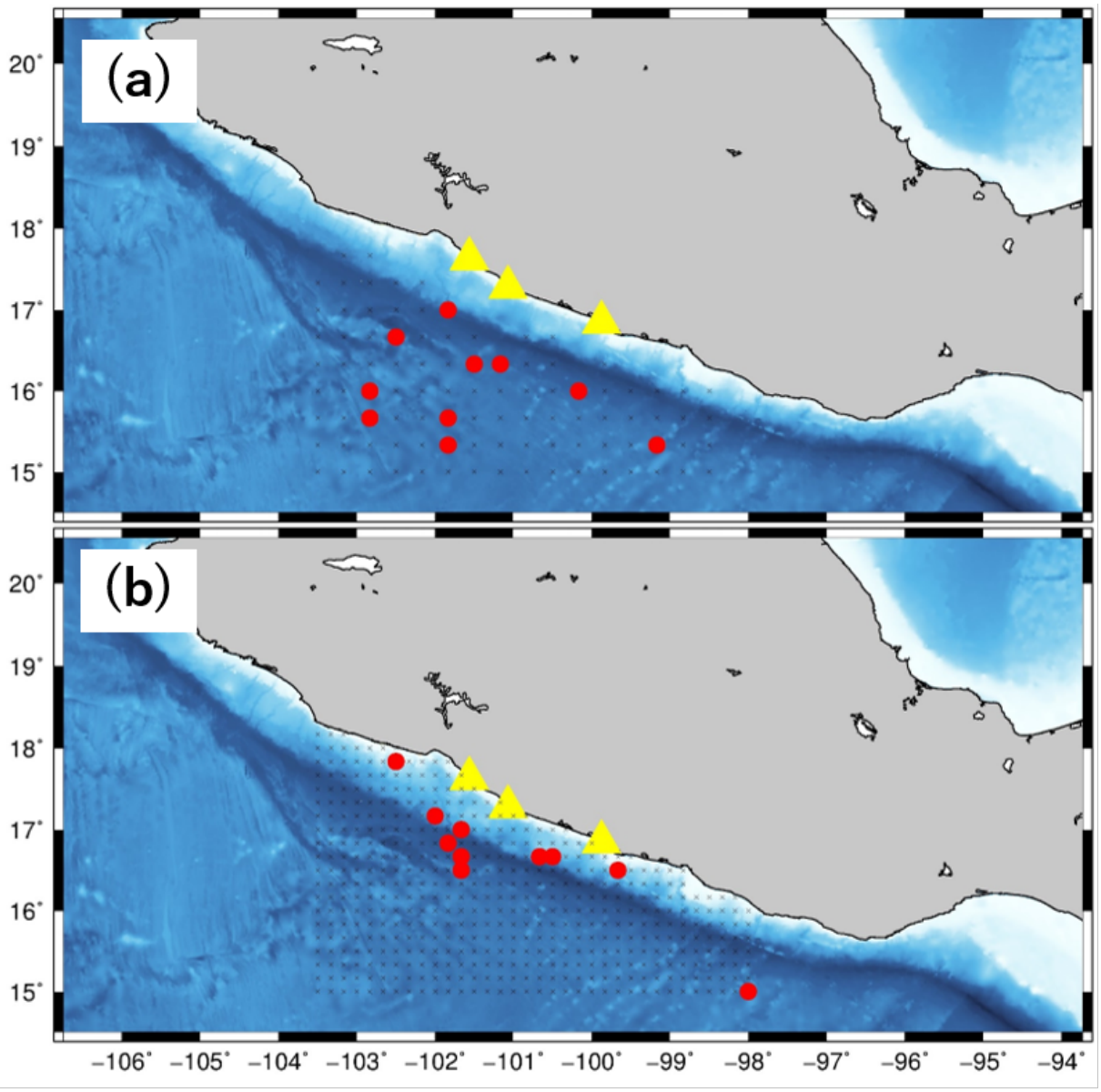


図 設置箇所を10点に制限した場合の沖合津波計の最適配置（赤丸）(a)はデータベース検索法，(b)はべき乗則による回帰法．黄色三角は津波予測ポイント．

© The Seismological Society of Japan