

Wed. Sep 18, 2019

ROOM P

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

S08P

1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

Hossein Sadeghi¹, *Sadaomi Suzuki² (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

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

*Yaping Hu¹, Yuji Yagi², Kousuke Shimizu¹, Ryo Okuwaki² (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

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

*Osamu Murakami¹ (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

1:00 PM - 2:30 PM

[S08P-04] **Fault geometry of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand inferred from high precision aftershock distribution**

*Yuta Kawamura¹, Satoshi Matsumoto¹, Tomomi Okada², Miu Matsuno², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato², Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, John Twonend⁵, Jarg Pettinga⁶, Francesca Ghisetti⁷, Richard H Sibson⁸ (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

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

*Yusuke Usui¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Tech)

1:00 PM - 2:30 PM

[S08P-06] **Detection of small non-double-couple components of tectonic earthquakes:**

Application to plate boundary earthquakes

*Kazutoshi Imanishi¹, Takahiko Uchide¹ (1.

Geological Survey of Japan, AIST)

1:00 PM - 2:30 PM

[S08P-07] **Reconsidered source model of short-term slow event:**

detection of non- fault slip components by using spatial distribution of strain change

*Noa Mitsui¹, Yasuhiro Asai¹, Satoshi Itaba² (1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Fuyuki Hirose¹, Akio Kobayashi¹, Kenji Maeda² (1.

Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yoshiki Matsuura¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Keita Nakamoto¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi² (1. Kanazawa University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Miki Aso^{1,3}, Naofumi Aso², Satoshi Ide¹ (1. Univ. of Tokyo, 2. Tokyo Tech, 3. OYO RMS Corp.)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kazuaki Ohta¹ (1. DPRI, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Ahyi Kim¹, Naoki Uchida² (1. Yokohama City University, 2. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kazuya Tateiwa¹, Tomomi Okada¹, Toshio Kono¹, Naoki Uchida¹ (1. Tohoku university)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Keiichi Imakita¹, Makoto Naoi¹, Youqing Chen¹, Kazune Tanaka¹, Yuya Morishige¹, Naofumi Tsutsumi¹, Hironori Kawakata², Tuyoshi Ishida¹, Hiroyuki Tanaka³, Yutaro Arima³, Shigehiro Kitamura³, Daisuke Hyodo³ (1. Univ. of Kyoto, 2. Univ. of Ritsumeikan, 3. JOGMEC)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Rui Tanaka¹, Makoto Naoi², Youqing Chen³, Kazune Yamamoto¹, Keiichi Imakita¹, Naofumi Tsutsumi³, Akihiro Shimoda¹, Daiki Hiramatsu³, Hironori Kawakata⁴, Tsuyoshi Ishida¹, Hiroyuki Tanaka⁵, Yutaro Arima⁵, Shigehiro Kitamura⁵, Daisuke Hyodo⁵

(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 and Engineering, Ritsumeikan University, 5. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yuki Yokoyama¹, Tetsuro Hirono¹, Hiroshi Ogasawara², Yasuo Yabe³ (1. Osaka University, 2.

Ritsumeikan University, 3. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Shiqing Xu¹ (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

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

*Koji Uenishi¹ (1. GSFS, Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Koji Uenishi^{1,2}, Yuki Fukuda², Kunihiro Nagasawa² (1. GSFS, Univ. Tokyo, 2. Sch. Eng., Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yuuki Kurihara¹, Hiroyuki Noda² (1. Kyoto Univ., 2. DPRI, KU)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hiroyuki Noda¹, Yuuki Kurihara², Saisuke Sato¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate school of Science, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kenichi Tsuda¹, Samaneh Arzpeima¹, Sachio Ogawa¹, Takahide Watanabe¹, Tetsuro Sasaki², Satoshi Iwase², Tomoki Mukudai², Jean-Paul Amouero³ (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

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

*Ryoko Nakata¹, Takane Hori¹, Mamoru Hyodo¹ (1.

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

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yasuyuki Iwase¹, Takao Eguchi² (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)

1:00 PM - 2:30 PM

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

S10P

1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II
and III)

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

*Reiji KOBAYASHI¹ (1. Graduate school of science
and engineering, Kagoshima University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kimie Norimatsu¹, Hisanori Matsuyama¹, Tsuneo
Ohsumi², Narumi Takahashi³, Hiroyuki Fujiwara² (1.
OYO Corporation, 2. NIED, 3. JAMSTEC/NIED)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Satoshi Fujiwara¹, Hiroshi Yurai¹, Tomokazu
Kobayashi¹, Yu Morishita¹, Takayuki Nakano¹ (1.
Geospatial Information Authority of Japan)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Koji Okumura¹, Prakash Pokhrel², Soma Nath
Sapkota², Hisao Kondo³, Takuya Furuhashi⁴ (1.
Hiroshima University, 2. Department of Mines and
Geology, 3. Geological Survey of Japan, 4. Taiheiyo
Cement Coporation)

1:00 PM - 2:30 PM

[S10P-05] Paleoseismic activity and fault-zone

architecture of small-scale faults developed in
the Late Cretaceous shale

Kazuo MIZOGUCHI², Toshinori Sasaki², *Takahiro
Iida¹, Takenobu Tanaka³ (1. CERES, Inc, 2. Central
Research Institute of Electric Power Industry., 3.
Hanshin Consultants)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Naoki IKEGUCHI¹, Nobuhisa MATSUTA², Kyoko
KAGOHARA³, Shinsuke Okada⁴, Daisuke HIROUCHI⁵,
Shigeru TODA⁶, Tatsuya ISHIYAMA¹, Taro KOIKE⁷,
Katsuya NODA⁷, Hiroshi SATO¹ (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

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

*Rei Arai¹, Narumi Takahashi¹, Minako Katsuyama¹,
Shigeyoshi Tanaka¹, Hiromi Kamata¹, Tomoyuki
Sato², Takahiko Inoue², Yoshiyuki Kaneda³ (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

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

*Kohei Abe¹, Ryo Tateishi², Nao Shimoyama¹, Atsushi
Miwa¹, Tomo-o Echigo³, Shinsuke Okada⁴, Toshifumi
Imaizumi⁴ (1. OYO Corporation, 2. University of
Toyama, 3. GRI Corporation, 4. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

S12P

1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II
and III)

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

estimation with high spatial resolution

*Takaki Iwata¹, Yoshihisa Iio² (1. Prefectural University of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Shunya Kaneki¹, Kiyokazu Oohashi², Tetsuro Hirono³, Hiroyuki Noda¹ (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

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

*Shion Osada¹, Tetsuro Hirono¹ (1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Shuhei Yamashita¹, Tetsuro Hirono¹ (1. Osaka University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Shin-ichi Uehara Uehara¹, Kaya Nishimura¹, Kazuo Mizoguchi² (1. Graduate school of Science, Toho University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry)
1:00 PM - 2:30 PM

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

Yuuki Yokoyama¹, *Michiyo Sawai¹, Kyuichi Kanagawa¹ (1. Chiba University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

S14P

1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

*Yicun Guo¹, Jiancang Zhuang¹, Yoshihiko Ogata¹ (1. Institute of Statistical Mathematics)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Ziyao Xiong^{1,2}, Jiancang Zhuang¹, Shiyong Zhou² (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

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

*HIRONOBU KAMIKUBO¹ (1. Hamamatsu Kisei Junior high school)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kozo Takahashi¹ (1. None)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hidemitu Kunihiro¹ (1. JYAN Research Institute)
1:00 PM - 2:30 PM

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

S21P

1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

*Kazuki Koketsu¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Asako Iwaki¹, Takahiro Maeda¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Ken Hatayama¹ (1. National Research Institute of Fire and Disaster)
1:00 PM - 2:30 PM

[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 Dhakal¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹ (1. NIED)
1:00 PM - 2:30 PM

[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

[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

[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

[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 Kataoka¹, Masayuki Nagano¹ (1. Tokyo University of Science)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Takao Kagawa¹, Shohei Yoshida², Tatsuya Noguchi¹ (1. Tottori University, Graduate School of Engineering, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)
1:00 PM - 2:30 PM

[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

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

*Nelson Pulido¹, Helber Garcia², Andrea Riaño³, Shigeki Senna¹ (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

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

*Tsunehisa Kimura¹ (1. Schlumberger)
1:00 PM - 2:30 PM

[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

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

*Misae Wakameda¹, Masaaki Kachi¹, Tsubasa Kawano¹, Yoshiaki Hisada², Masahiro Murakami² (1. A2 corporation, 2. Kogakuin University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

S22P

1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

Ahyi Kim¹, *Hiroki Uematsu¹ (1. Yokohama City University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Shota Kudo¹, Kengo Shimojo¹, Koji Tamaribuchi² (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

1:00 PM - 2:30 PM

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

learning data II

*Seiji Tsuboi¹, Daisuke Sugiyama¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hidenobu Takahashi¹, Ryota Hino¹, Yusaku Ohta¹, Naoki Uchida¹, Syuichi Suzuki¹, Masanao Shinohara² (1. Tohoku University, 2. The University of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hisahiko Kubo¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹, Shin Aoi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Tomohisa Okazaki¹, Tomoharu Iwata^{1,2}, Asako Iwaki³, Hiroyuki Fujiwara³, Naonori Ueda¹ (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

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

*Ryuichi Kunugi¹, Naoki Suda¹ (1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Takahiro Tsuyuki¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hirota Hachiya^{1,2}, Kazuro Hirahara¹, Naonori Ueda¹ (1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Faculty of System Engineering, Wakayama University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

search and regression methods

*Toshitaka Baba¹, Takuya Miyashita², Nobuhito Mori², Kenta Nakanishi³, Masato Okada⁴ (1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. NITA Consultant, 4. Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

S08P

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

Hossein Sadeghi¹, *Sadaomi Suzuki² (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

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

*Yaping Hu¹, Yuji Yagi², Kousuke Shimizu¹, Ryo Okuwaki² (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

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

*Osamu Murakami¹ (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yuta Kawamura¹, Satoshi Matsumoto¹, Tomomi Okada², Miu Matsuno², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato², Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, John Twonend⁵, Jarg Pettinga⁶, Francesca Ghisetti⁷, Richard H Sibson⁸ (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

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

*Yusuke Usui¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Tech)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kazutoshi Imanishi¹, Takahiko Uchide¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Noa Mitsui¹, Yasuhiro Asai¹, Satoshi Itaba² (1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Fuyuki Hirose¹, Akio Kobayashi¹, Kenji Maeda² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yoshiki Matsuura¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Keita Nakamoto¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi² (1. Kanazawa University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Miki Aso^{1,3}, Naofumi Aso², Satoshi Ide¹ (1. Univ. of Tokyo, 2. Tokyo Tech, 3. OYO RMS Corp.)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kazuaki Ohta¹ (1. DPRI, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Ahyi Kim¹, Naoki Uchida² (1. Yokohama City University, 2. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kazuya Tateiwa¹, Tomomi Okada¹, Toshio Kono¹, Naoki Uchida¹ (1. Tohoku university)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Keiichi Imakita¹, Makoto Naoi¹, Youqing Chen¹, Kazune Tanaka¹, Yuya Morishige¹, Naofumi Tsutsumi¹, Hironori Kawakata², Tuyoshi Ishida¹, Hiroyuki Tanaka³, Yutaro Arima³, Shigehiro Kitamura³, Daisuke Hyodo³ (1. Univ. of Kyoto, 2. Univ. of Ritsumeikan, 3. JOGMEC)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Rui Tanaka¹, Makoto Naoi², Youqing Chen³, Kazune Yamamoto¹, Keiichi Imakita¹, Naofumi Tsutsumi³, Akihiro Shimoda¹, Daiki Hiramatsu³, Hironori Kawakata⁴, Tsuyoshi Ishida¹, Hiroyuki Tanaka⁵, Yutaro Arima⁵, Shigehiro Kitamura⁵, Daisuke Hyodo⁵ (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 and Engineering, Ritsumeikan University, 5. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yuki Yokoyama¹, Tetsuro Hirono¹, Hiroshi Ogasawara², Yasuo Yabe³ (1. Osaka University, 2.

Ritsumeikan University, 3. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Shiqing Xu¹ (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

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

*Koji Uenishi¹ (1. GSFS, Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Koji Uenishi^{1,2}, Yuki Fukuda², Kunihiro Nagasawa² (1. GSFS, Univ. Tokyo, 2. Sch. Eng., Univ. Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yuuki Kurihara¹, Hiroyuki Noda² (1. Kyoto Univ., 2. DPRI, KU)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hiroyuki Noda¹, Yuuki Kurihara², Saisuke Sato¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate school of Science, Kyoto University)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kenichi Tsuda¹, Samaneh Arzpeima¹, Sachio Ogawa¹, Takahide Watanabe¹, Tetsurou Sasaki², Satoshi Iwase², Tomoki Mukudai², Jean-Paul Amouero³ (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

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

*Ryoko Nakata¹, Takane Hori¹, Mamoru Hyodo¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Yasuyuki Iwase¹, Takao Eguchi² (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)

1:00 PM - 2:30 PM

The 11 November 2018 monotonic event near Mayotte island, east Africa observed by the Iranian broadband seismic stations

Hossein Sadeghi¹, *Sadaomi Suzuki²

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 Figure 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).

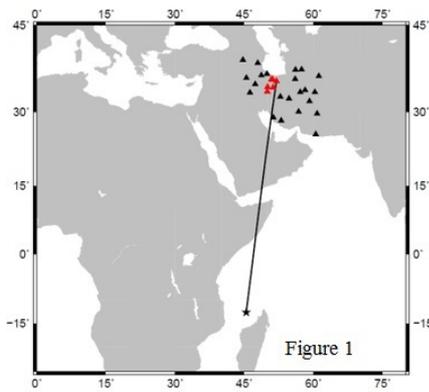
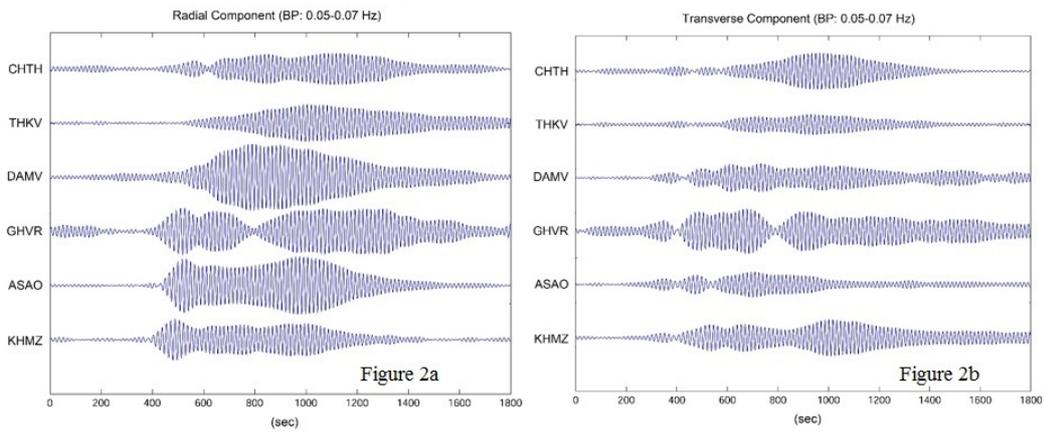


Figure 1: The broadband stations that recorded the 2018 November 11 Mayotte event are shown with triangles. The red triangles show the stations used in the semblance analysis. The assumed epicenter is indicated by a star, and the line shows the great circle connecting the epicenter and the semblance 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).



New insight into rupture process and generating mechanism of the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou earthquake

*Yaping Hu¹, Yuji Yagi², Kousuke Shimizu¹, Ryo Okuwaki²

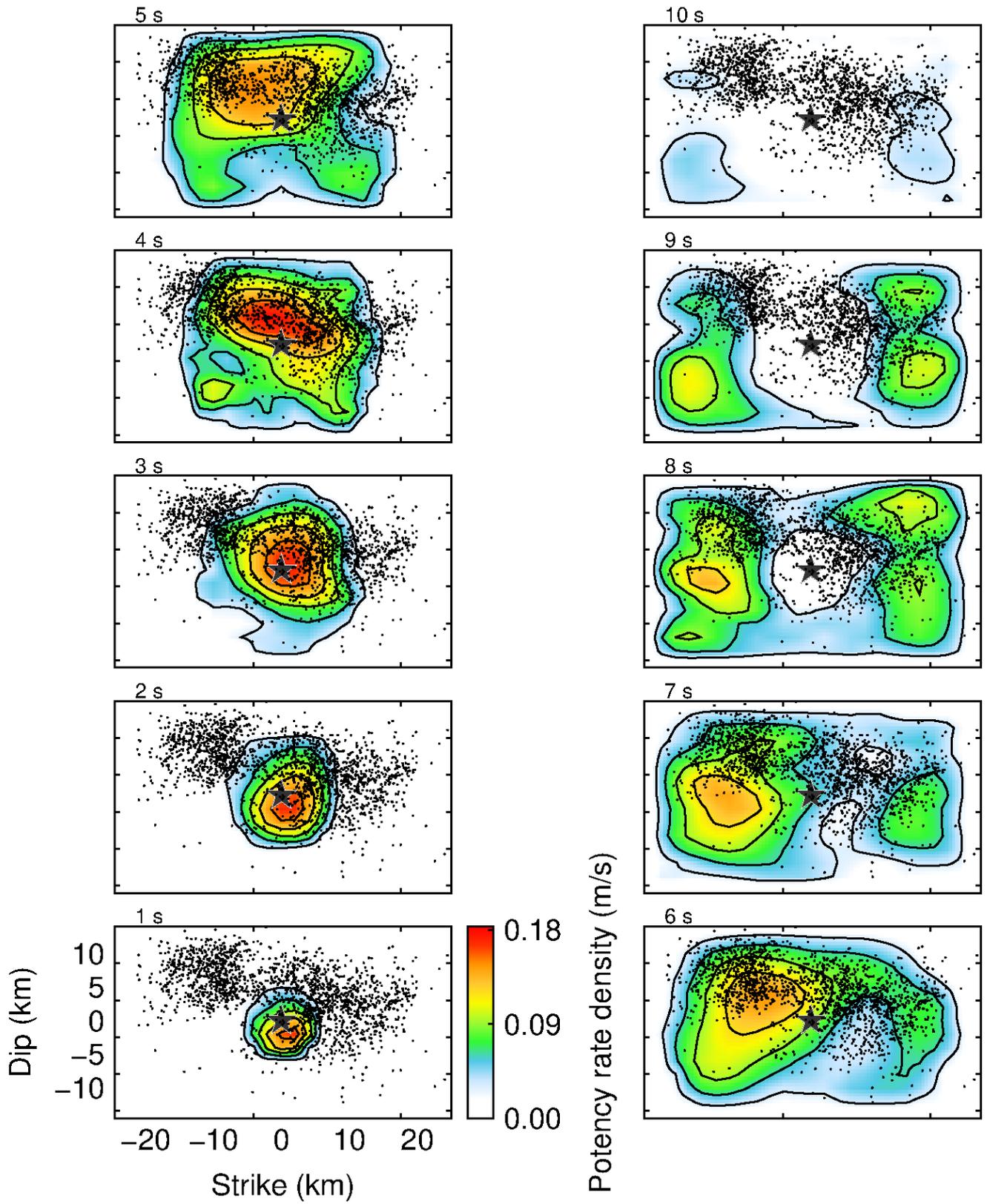
1. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan., 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

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 $\sim 7.36 \times 10^{18}$ 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 below the hypocenter. Then, the rupture propagated up-dip along the fault near the hypocenter from 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 amounts of low velocity areas are observed in the western and lower regions of the hypocenter, which was related 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.



Source parameters of the aftershocks of the Western Nagano prefecture Earthquake in 1984

*Osamu Murakami¹

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 (f_c) を推定した。図1の例では、M4.6のイベントの f_c は1.26Hz、M3.9のEGFの f_c 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。

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。

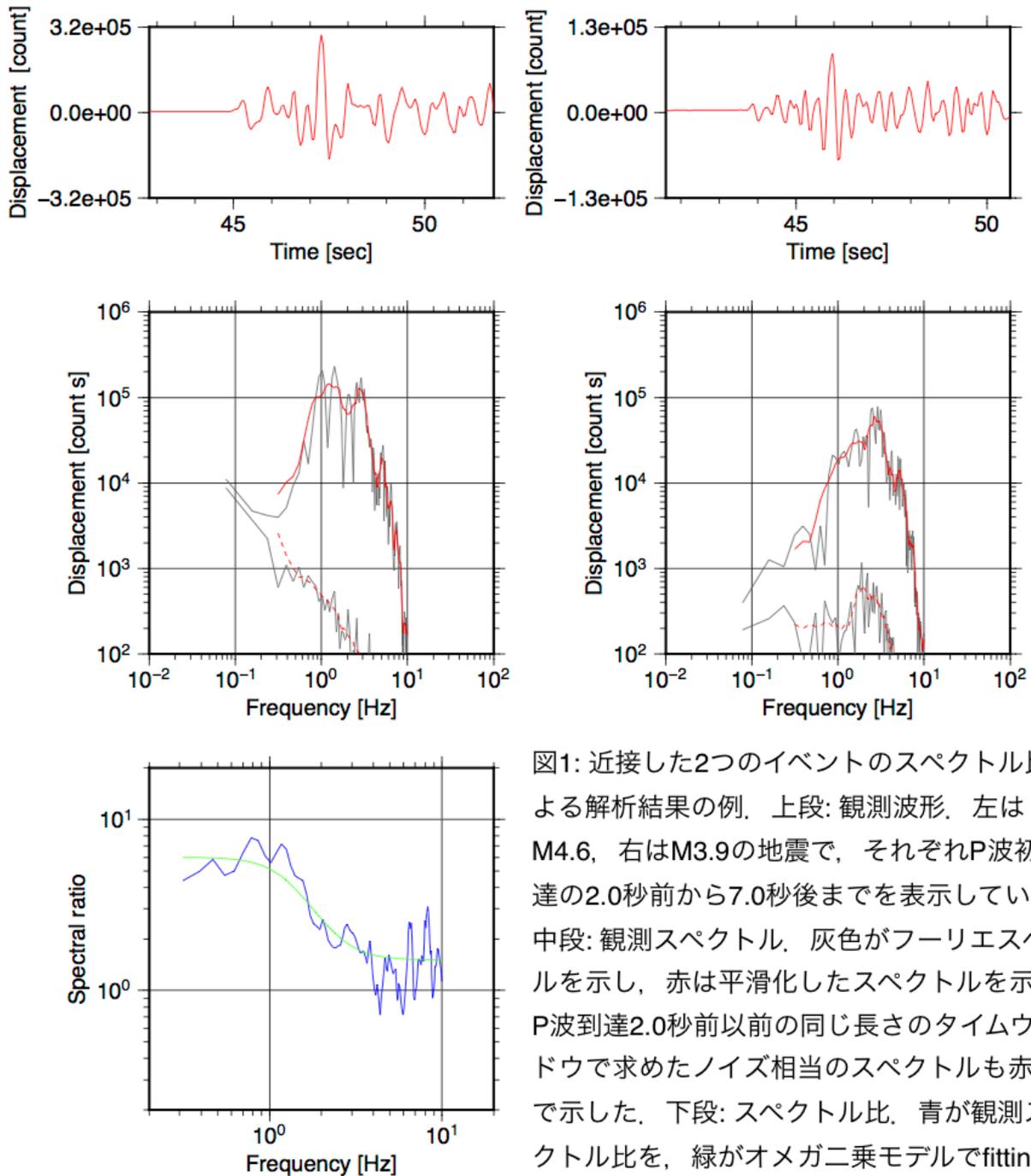


図1: 近接した2つのイベントのスペクトル比による解析結果の例。上段: 観測波形。左はM4.6, 右はM3.9の地震で, それぞれP波初動到達の2.0秒前から7.0秒後までを表示している。中段: 観測スペクトル。灰色がフーリエスペクトルを示し, 赤は平滑化したスペクトルを示す。P波到達2.0秒前以前の同じ長さのタイムウィンドウで求めたノイズ相当のスペクトルも赤破線で示した。下段: スペクトル比。青が観測スペクトル比を, 緑がオメガ二乗モデルでfittingした理論スペクトル比を示す。

Fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand inferred from high precision aftershock distribution

*Yuta Kawamura¹, Satoshi Matsumoto¹, Tomomi Okada², Miu Matsuno², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato², Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, John Twonend⁵, Jarg Pettinga⁶, Francesca Ghisetti⁷, Richard H Sibson⁸

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、我々が現地にも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-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 generation process of seismic clusters in the slab

*Yusuke Usui¹, Junichi Nakajima¹

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張場が、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。

Detection of small non-double-couple components of tectonic earthquakes: Application to plate boundary earthquakes

*Kazutoshi Imanishi¹, Takahiko Uchide¹

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か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き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で、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

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。

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

*Noa Mitsui¹, Yasuhiro Asai¹, Satoshi Itaba²

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源は、断層の破壊強度の知見から、温度-圧力条件の深さ依存に伴う脆性-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.

Temporal change of tidal correlation of deep low frequency tremors in Bungo Channel: Relation with LSSEs and deep VLFs

*Fuyuki Hirose¹, Akio Kobayashi¹, Kenji Maeda²

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 $\Delta \tau$ 、法線応力 $\Delta \sigma$ 、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 $\Delta \tau$ 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は目視による検出であるため、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（dVLF）が発生している。dVLF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。

Estimation of source spectra of deep low frequency tremors from waveforms recorded by array observation

*Yoshiki Matsuura¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Keita Nakamoto¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi²

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プランス解析し、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

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。

Focal Mechanisms of LFEs in Parkfield by the amplitude inversion using synthetic waveforms

*Miki Aso^{1,3}, Naofumi Aso², Satoshi Ide¹

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、地震発生の際の物理を探るため、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。

A comparative study on the source process of ambient and triggered tremor based on a slip inversion analysis

*Kazuaki Ohta¹

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、同じスケール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($\sim 1.5 \times 10^{11}$ Nm/s)と遅いモーメント解放($0.3 \sim 0.5 \times 10^{11}$ 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。

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

*Ahyi Kim¹, Naoki Uchida²

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。

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

*Kazuya Tateiwa¹, Tomomi Okada¹, Toshio Kono¹, Naoki Uchida¹

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载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十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めた地震数は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。

Estimation of moment magnitude and corner frequency of Acoustic Emission during hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Keiichi Imakita¹, Makoto Naoi¹, Youqing Chen¹, Kazune Tanaka¹, Yuya Morishige¹, Naofumi Tsutsumi¹, Hironori Kawakata², Tuyoshi Ishida¹, Hiroyuki Tanaka³, Yutaro Arima³, Shigehiro Kitamura³, Daisuke Hyodo³

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碎技術が用いられている。水圧破碎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、室内水圧破碎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、水圧破碎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. 室内水圧破碎実験と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。水圧破碎時に生じる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_0 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、水圧破碎試験中に得られた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_0 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)。

5. まとめ

室内水圧破碎実験中に生じる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。

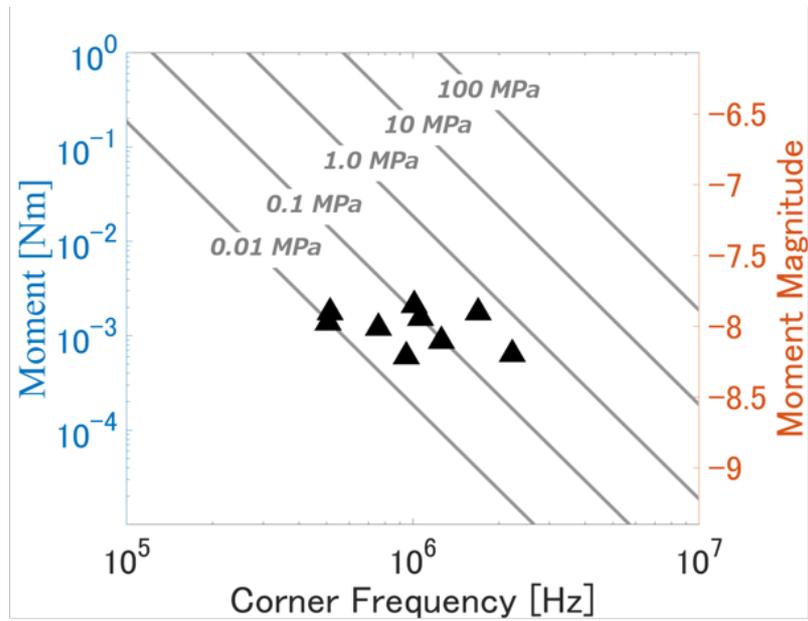


図. M_0 とスペクトル比法で推定した f_c の関係。灰色線は応力降下量がそれぞれ0.01, 0.1, 1, 10, 100 MPaとなる場合に対応している。

Investigation of fluid viscosity effects on laboratory hydraulic fracturing based on AE measurement and moment tensor analysis

*Rui Tanaka¹, Makoto Naoi², Youqing Chen³, Kazune Yamamoto¹, Keiichi Imakita¹, Naofumi Tsutsumi³, Akihiro Shimoda¹, Daiki Hiramatsu³, Hironori Kawakata⁴, Tsuyoshi Ishida¹, Hiroyuki Tanaka⁵, Yutaro Arima⁵, Shigehiro Kitamura⁵, Daisuke Hyodo⁵

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 and 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の一軸圧縮载荷下で行い (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、 $t \sim 400$ 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。

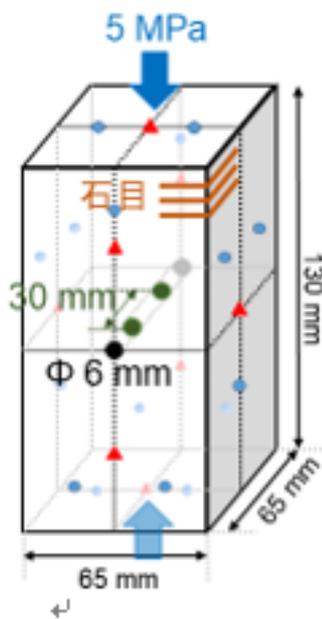


図 1. 実験に用いた供試体。石目が载荷軸に直交するように供試体を設置した。+

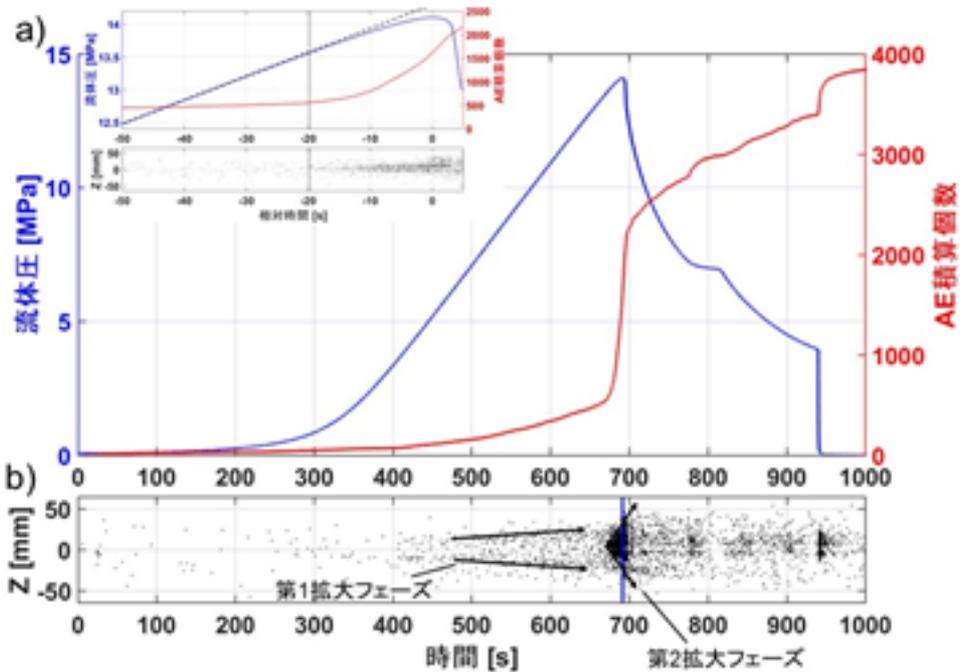


図 2. AE 解析結果 a) 流体圧と AE 積算個数の時間変化 b) AE 震源の z 座標(一軸载荷軸方向) inset) 第 2 拡大フェーズ開始前後の流体圧と AE 積算個数の時間変化. 黒の縦線は第 2 拡大フェーズ開始時刻. 横軸は breakdown 時刻を t=0 とした相対時間. +

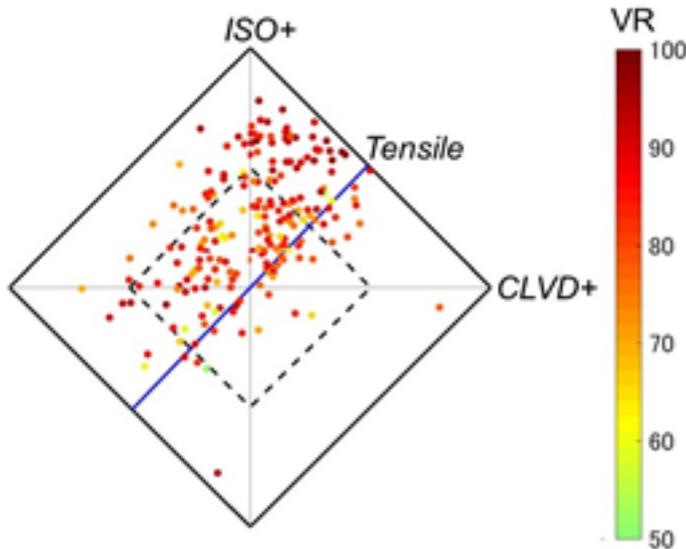


図 3. MT 解析により得られた source type plot (Vavryšuk et al. 2015). プロットカラーは各イベントの variance reduction に対応している。+

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

*Yuki Yokoyama¹, Tetsuro Hirono¹, Hiroshi Ogasawara², Yasuo Yabe³

1. Osaka University, 2. Ritsumeikan University, 3. Tohoku 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(モアブ鉱山)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、モアブ鉱山の地下約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いる。

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囲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。

Cascade-up process simulated in large-scale rock friction experiments

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Shiqing Xu¹

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えるものである。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)により提案されたゴ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ルに則して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、载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、単に载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。

Dynamic Aspects of Rupture Propagation at a Subsonic but Near-Rayleigh Wave Speed

*Koji Uenishi¹

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, Rossmannith 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 (Rossmannith, Uenishi and Kouzniak, *Fragblast*, 1997; Uenishi and Rossmannith, *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.

Secondary Rupture at a Distance from the Primary One without Further External Loading

*Koji Uenishi^{1,2}, Yuki Fukuda², Kunihiro Nagasawa²

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.

Dynamic rupture simulation on a non-planer fault allowing fault-normal displacement discontinuity

*Yuuki Kurihara¹, Hiroyuki Noda²

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律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。

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

*Hiroyuki Noda¹, Yuuki Kurihara², Saisuke Sato¹

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、 $0.40 \leq hT \leq 1.14$ 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。

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。

A Preliminary Analysis of the Fault Behavior of Shallow Part of the Fault based on the Dynamic Model

*Kenichi Tsuda¹, Samaneh Arzpeima¹, Sachio Ogawa¹, Takahide Watanabe¹, Tetsuro Sasaki², Satoshi Iwase², Tomoki Mukudai², Jean-Paul Amouero³

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を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。

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

*Ryoko Nakata¹, Takane Hori¹, Mamoru Hyodo¹

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に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。

Relationship between size and frequency of earthquakes by modified Olami-Feder-Christensen model

*Yasuyuki Iwase¹, Takao Eguchi²

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-Christense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。

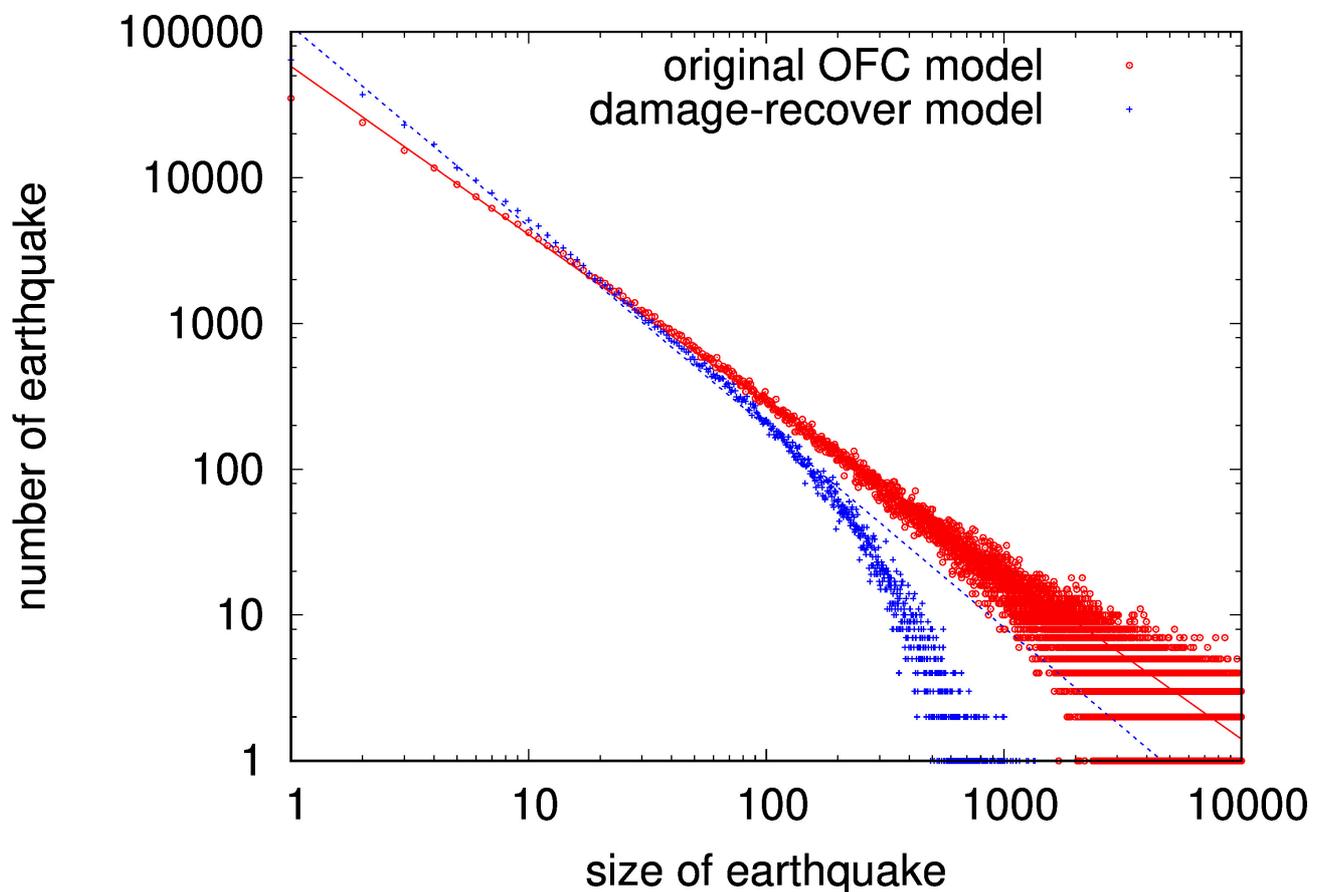
1. 2次元の正方形、または長方形の断層を考え、これをセルに分割し、各セルに初期ひずみ（エネルギー）、または応力としてランダムな数値を与える。
2. すべてのセルでひずみを増加させる。
3. あるセルでひずみが予め設定してある臨界値に達したら、そのセルはひずみを開放し、隣接するセルに開放したひずみを分配する。なお、断層の境界の隣接セルがないセルは、境界方向へのひずみの伝達は行なわない（ひずみは失われる）。
4. もし、3の結果、分配を受けたセルでひずみが臨界値に達したら、そのセルでもひずみの解放・分配を行なう。
5. 4をすべてのセルが持つひずみが臨界値未満となるまで繰り返す。
6. すべてのセルに対して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

来のOFCモデル（図の○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%ず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増加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。



S10P

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

- [S10P-01] Compiling descriptions on tsunami accompanied with the 1914 Sakurajima earthquake
*Reiji KOBAYASHI¹ (1. Graduate school of science and engineering, Kagoshima University)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S10P-02] Construction of fault models in the Izu-Bonin Islands area and evaluation of Tsunami
*Kimie Norimatsu¹, Hisanori Matsuyama¹, Tsuneo Ohsumi², Narumi Takahashi³, Hiroyuki Fujiwara² (1. OYO Corporation, 2. NIED, 3. JAMSTEC/NIED)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S10P-03] Relationship between linear surface displacements of the 2016 Kumamoto earthquake sequence and distribution of aftershocks
*Satoshi Fujiwara¹, Hiroshi Yurai¹, Tomokazu Kobayashi¹, Yu Morishita¹, Takayuki Nakano¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S10P-04] The Timing and Extent of the Last Surface Rupture Event on the Himalayan Frontal Thrust in Central Nepal around Butwal
*Koji Okumura¹, Prakash Pokhrel², Soma Nath Sapkota², Hisao Kondo³, Takuya Furuhashi⁴ (1. Hiroshima University, 2. Department of Mines and Geology, 3. Geological Survey of Japan, 4. Taiheiyō Cement Corporation)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S10P-05] Paleoseismic activity and fault-zone architecture of small-scale faults developed in the Late Cretaceous shale
Kazuo MIZOGUCHI², Toshinori Sasaki², *Takahiro Iida¹, Takenobu Tanaka³ (1. CERES, Inc, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry., 3. Hanshin Consultants)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S10P-06] Shallow geometry of the Kamishiro fault by high-resolution seismic reflection profiling
*Naoki IKEGUCHI¹, Nobuhisa MATSUTA², Kyoko KAGOHARA³, Shinsuke Okada⁴, Daisuke HIROUCHI⁵, Shigeru TODA⁶, Tatsuya ISHIYAMA¹, Taro KOIKE⁷, Katsuya NODA⁷, Hiroshi SATO¹
(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
- [S10P-07] Fault Distribution and Structural Characteristic in the Nankai Trough Area, Japan
*Rei Arai¹, Narumi Takahashi¹, Minako Katsuyama¹, Shigeyoshi Tanaka¹, Hiromi Kamata¹, Tomoyuki Sato², Takahiko Inoue², Yoshiyuki Kaneda³ (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

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

*Kohei Abe¹, Ryo Tateishi², Nao Shimoyama¹, Atsushi Miwa¹, Tomo-o Echigo³, Shinsuke Okada⁴, Toshifumi Imaizumi⁴ (1. OYO Corporation, 2. University of Toyama, 3. GRI Corporation, 4. Tohoku University)

1:00 PM - 2:30 PM

Compiling descriptions on tsunami accompanied with the 1914 Sakurajima earthquake

*Reiji KOBAYASHI¹

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ニ回来レリト云フ。」

・「大正二年桜島大爆震記」（鹿児島新聞記者十餘名共纂, 1914）：「折柄水上警察署下海岸には、震動の爲め大波寄せ来り、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。又稻荷川筋の避難船は大波の爲め破壊せるもあり、かつ海上航行中の汽船は殆んど顛覆せしやに感じたりと。」

・「始良町郷土史 平成7年10月増補改訂版」（始良町, 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）：「大正三年桜島爆発の後潮水激増を来せしが（後略）」

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始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、始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、津波と表現されていないことから、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過して始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。

Construction of fault models in the Izu-Bonin Islands area and evaluation of Tsunami

*Kimie Norimatsu¹, Hisanori Matsuyama¹, Tsuneo Ohsumi², Narumi Takahashi³, Hiroyuki Fujiwara²

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・小笠原海域のアウト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、「認識論的不確実性」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ルリング則の平均的な値に $+1\sigma$ 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、不確実性を考慮した、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、アウトライズ領域の断層分布が明瞭に示された。アウトライズ地震は、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ト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、不確実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。アウト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、不確実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5km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ト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。アウトライズ領域の断層から想定される津波は島嶼

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。

Relationship between linear surface displacements of the 2016 Kumamoto earthquake sequence and distribution of aftershocks

*Satoshi Fujiwara¹, Hiroshi Yarai¹, Tomokazu Kobayashi¹, Yu Morishita¹, Takayuki Nakano¹

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で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

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。

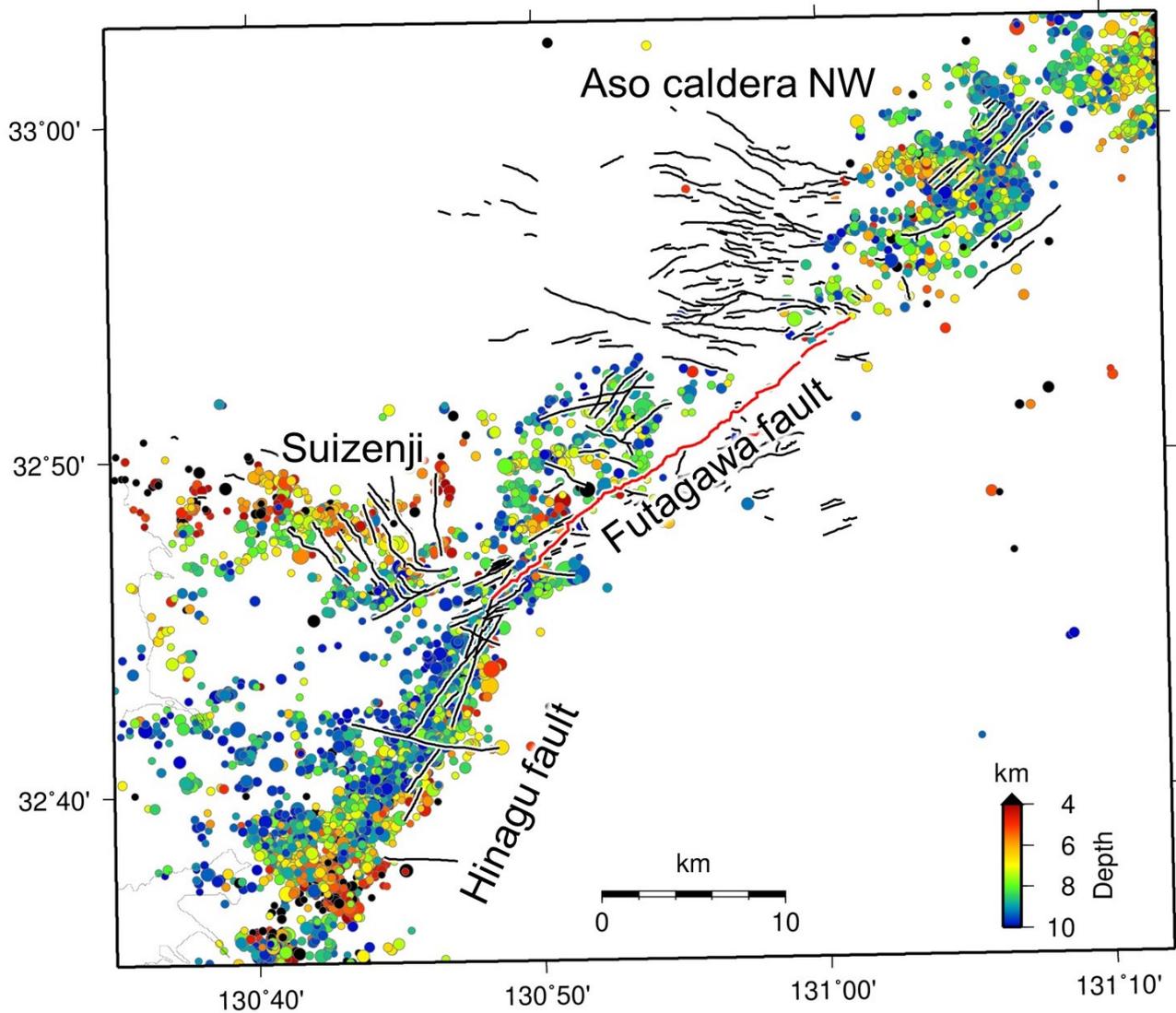


Figure Linear surface displacements and aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake sequence
April 14 – Dec. 31, 2016; $0 < \text{depth} < 10\text{km}$; $M > 1.5$
after JMA catalog

The Timing and Extent of the Last Surface Rupture Event on the Himalayan Frontal Thrust in Central Nepal around Butwal

*Koji Okumura¹, Prakash Pokhrel², Soma Nath Sapkota², Hisao Kondo³, Takuya Furuhashi⁴

1. Hiroshima University, 2. Department of Mines and Geology, 3. Geological Survey of Japan, 4. Taiheiyo Cement Corporation

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 Bayesian 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 Susto trench as well as results from investigation in further west in the boundary area between 1344 CE and 1505 CE event will be reported.

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

Kazuo MIZOGUCHI², Toshinori Sasaki², *Takahiro Iida¹, Takenobu Tanaka³

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10cm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10cmで、5 mm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

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碎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。

Shallow geometry of the Kamishiro fault by high-resolution seismic reflection profiling

*Naoki IKEGUCHI¹, Nobuhisa MATSUTA², Kyoko KAGOHARA³, Shinsuke Okada⁴, Daisuke HIROUCHI⁵, Shigeru TODA⁶, Tatsuya ISHIYAMA¹, Taro KOIKE⁷, Katsuya NODA⁷, Hiroshi SATO¹

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―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―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）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GEOSYS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、スイープ長は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、スイープ長は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

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。

Fault Distribution and Structural Characteristic in the Nankai Trough Area, Japan

*Rei Arai¹, Narumi Takahashi¹, Minako Katsuyama¹, Shigeyoshi Tanaka¹, Hiromi Kamata¹, Tomoyuki Sato², Takahiko Inoue², Yoshiyuki Kaneda³

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4,853km²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3 km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。

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

*Kohei Abe¹, Ryo Tateishi², Nao Shimoyama¹, Atsushi Miwa¹, Tomo-o Echigo³, Shinsuke Okada⁴, Toshifumi Imaizumi⁴

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—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、その繰り返しの結果、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—更新統が分布することが予想され

る。この鮮新-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-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—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.

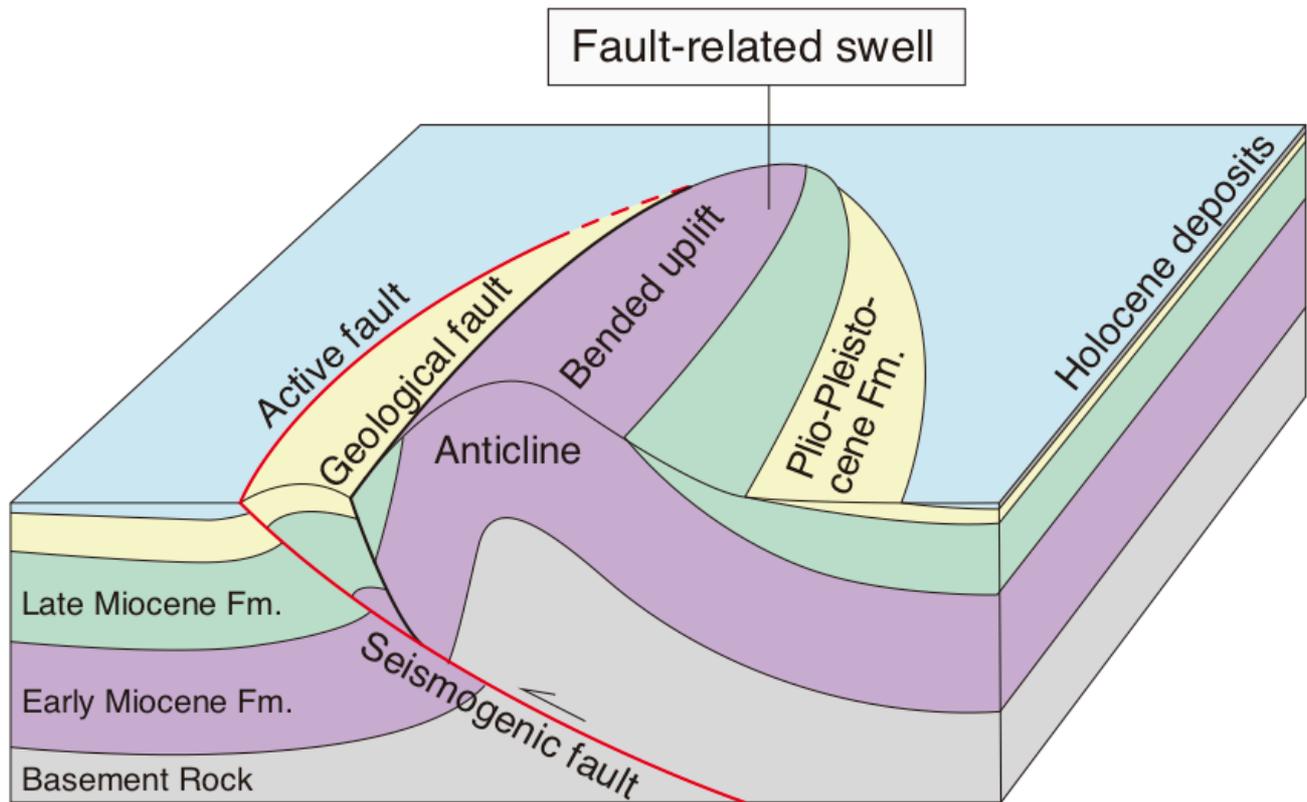


Fig. 1 Schematic diagram of fault-related swell for reverse fault.

S12P

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

- [S12P-01] Estimation of the spatial stress pattern of San-in region: a preliminary analysis towards estimation with high spatial resolution
*Takaki Iwata¹, Yoshihisa Iio² (1. Prefectural University of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S12P-02] Amorphization of synthetic fault gouge by rotary-shear friction experiments
*Shunya Kaneki¹, Kiyokazu Oohashi², Tetsuro Hirono³, Hiroyuki Noda¹ (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
- [S12P-03] Experimental reproduction of sintering process in a fault during an earthquake
*Shion Osada¹, Tetsuro Hirono¹ (1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S12P-04] Experimental investigation of chemical kinetic effect on thermal maturation of carbonaceous material in a fault during an earthquake
*Shuhei Yamashita¹, Tetsuro Hirono¹ (1. Osaka University)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S12P-05] Experimental constraints on origins of high Vp/Vs anomalies in slow slip regions
*Shin-ichi Uehara Uehara¹, Kaya Nishimura¹, Kazuo Mizoguchi² (1. Graduate school of Science, Toho University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S12P-06] Effects of ambient temperature on the frictional strength and frictional heating of dolerite in an argon atmosphere
Yuuki Yokoyama¹, *Michiyo Sawai¹, Kyuichi Kanagawa¹ (1. Chiba University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Takaki Iwata¹, Yoshihisa Iio²

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。

Amorphization of synthetic fault gouge by rotary-shear friction experiments

*Shunya Kaneki¹, Kiyokazu Oohashi², Tetsuro Hirono³, Hiroyuki Noda¹

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、1 m 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、1 m 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。

Experimental reproduction of sintering process in a fault during an earthquake

*Shion Osada¹, Tetsuro Hirono¹

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 °C、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 °Cで加熱した試料では粒子間の結合が観察されないが、900 °Cでは焼結特有のネック構造が観察され、さらに1000 °C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 °C~1000 °C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 °C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。

Experimental investigation of chemical kinetic effect on thermal maturation of carbonaceous material in a fault during an earthquake

*Shuhei Yamashita¹, Tetsuro Hirono¹

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碎化・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°Cで100°C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。

Experimental constraints on origins of high V_p/V_s anomalies in slow slip regions

*Shin-ichi Uehara¹, Kaya Nishimura¹, Kazuo Mizoguchi²

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 V_p/V_s 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 V_p/V_s 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 V_p/V_s 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 V_p 、 V_s を測定する実験をおこない、 V_p/V_s 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、 V_p/V_s 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 V_p/V_s 比(南海トラフで観測される高 V_p/V_s 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 V_p/V_s 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>.

Effects of ambient temperature on the frictional strength and frictional heating of dolerite in an argon atmosphere

Yuuki Yokoyama¹, *Michiyo Sawai¹, Kyuichi Kanagawa¹

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熔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で速度弱化的傾向を示し、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、わずかに速度弱化的傾向を示すものの、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的性質を示したのに対し（ $\mu = 0.75 \sim 0.79$ ）、300°C以上では明瞭な速度弱化的傾向を示した（ $\mu = 0.67 \sim 0.76$ ）。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 $\mu = 0.1 \sim 0.38$ ）。つまりドレライトは、比較的低速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（弱化的）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的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。

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

S14P

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

*Yicun Guo¹, Jiancang Zhuang¹, Yoshihiko Ogata¹ (1. Institute of Statistical Mathematics)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Ziyao Xiong^{1,2}, Jiancang Zhuang¹, Shiyong Zhou² (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

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

*HIRONOBU KAMIKUBO¹ (1. Hamamatsu Kisei Junior high school)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Kozo Takahashi¹ (1. None)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Hidemitsu Kunihiro¹ (1. JYAN Research Institute)

1:00 PM - 2:30 PM

Spatial heterogeneity of aftershock productivity on the Kumamoto earthquake rupture modeled by the finite source ETAS model

*Yicun Guo¹, Jiancang Zhuang¹, Yosihiko Ogata¹

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.

Comparison of Models of Long-term Seismic Hazard and with An Application to North China

*Ziyao Xiong^{1,2}, Jiancang Zhuang¹, Shiyong Zhou²

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.

Water temperature change in the western region of Shizuoka Prefecture

*HIRONOBU KAMIKUBO¹

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。

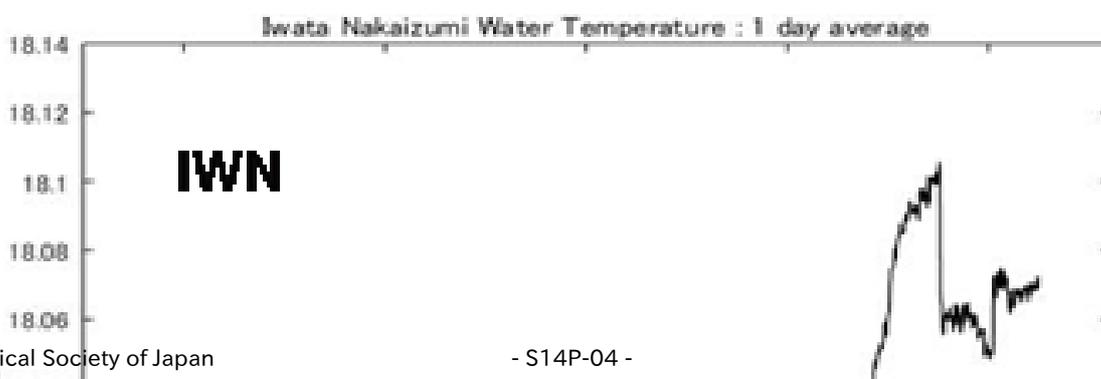
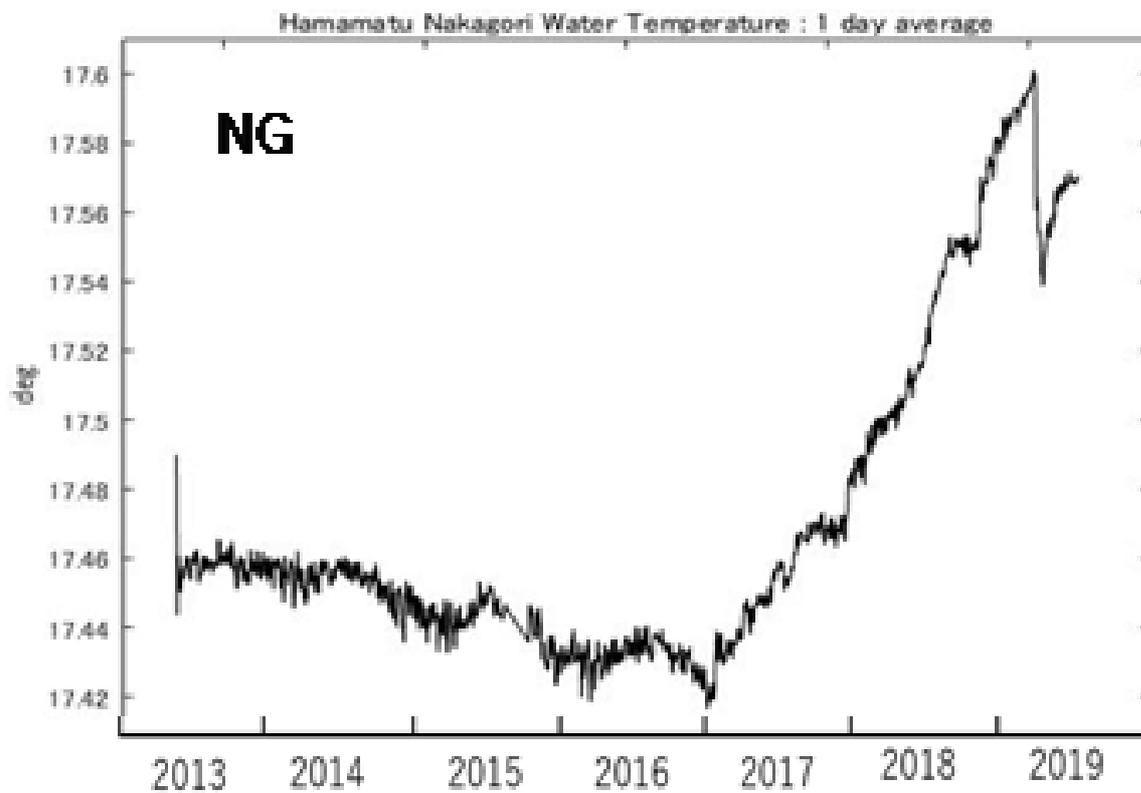
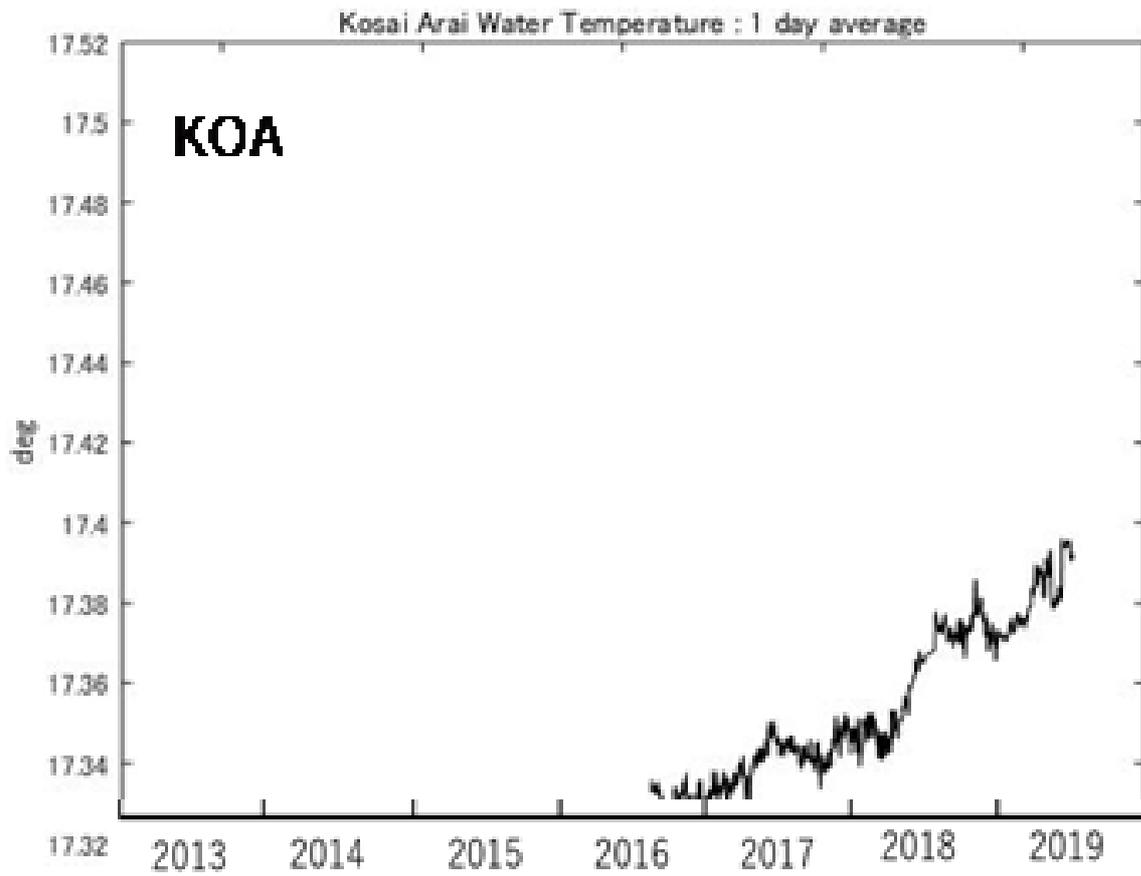
「剪断応力が集中する周辺では岩盤にねじれの歪が現れる.そこでは収縮場と膨張場が隣り合わせで生成される」（例えば, 佃:2018）ので, 圧縮場により生じる水温の上昇と収縮場により生じる水温の下降が隣り合う地域で観測された静岡県西部地域では地下の岩盤に不均等な力が加わり剪断応力の増加が進行していると考えられる。

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度変化,日本地震学会講演予稿集S13-P02,2018.



Prediction method to develop the method of detecting earthquake precursors

*Kozo Takahashi¹

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小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、震源域での微小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。2 σ 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事が可能であり、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

We will present the theory and mechanism of earthquake prediction with attached electromagnetic observation data as the basis.

*Hidemitsu Kunihiro¹

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、地中で縞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1km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。

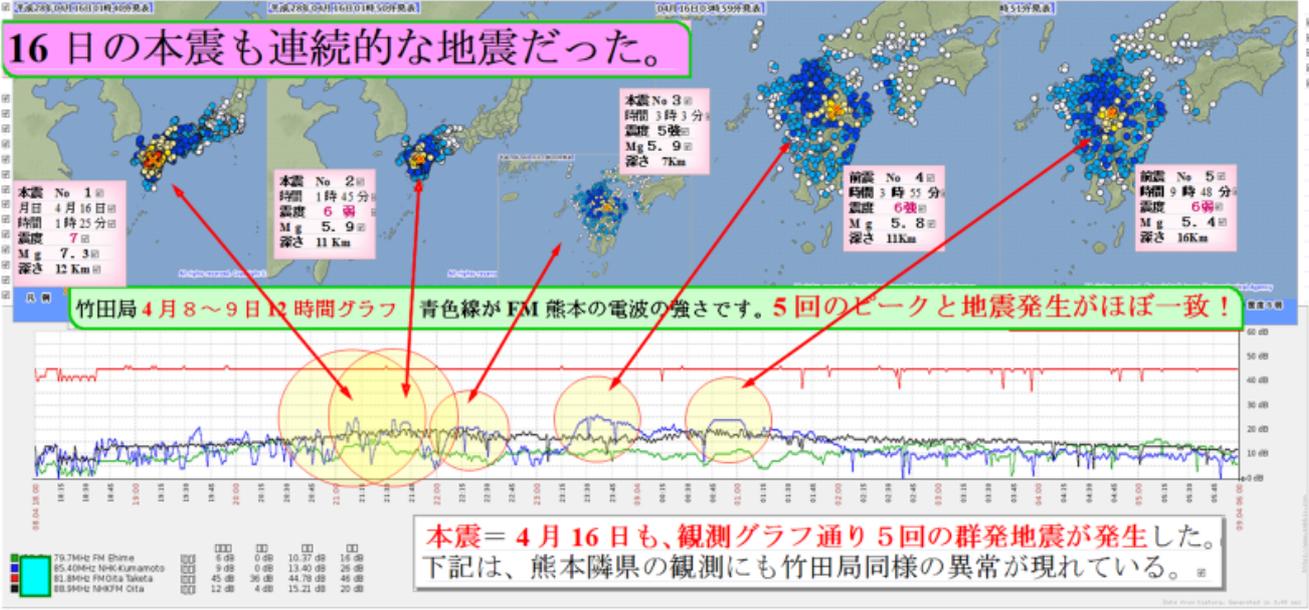
地中深くの高圧域で生まれた圧力（PE塊）は、上層まで伝播し地表に近付くと、周囲の岩盤圧力が極端に減るので、PE塊の規模によって、岩盤等が膨張を起こす為、周囲の岩盤を破壊し、地震動を起こし、断層を作るのです。

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様子が一致するのは、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km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。）

こんな地震の観測記録は **世界初!** なんです!



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

S21P

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

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

*Kazuki Koketsu¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Asako Iwaki¹, Takahiro Maeda¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Ken Hatayama¹ (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

1:00 PM - 2:30 PM

[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 Dhakal¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹ (1. NIED)

1:00 PM - 2:30 PM

[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

[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

[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

[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 Kataoka¹, Masayuki Nagano¹ (1. Tokyo University of Science)

1:00 PM - 2:30 PM

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

*Takao Kagawa¹, Shohei Yoshida², Tatsuya Noguchi¹ (1. Tottori University, Graduate School of Engineering, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

1:00 PM - 2:30 PM

[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

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

*Nelson Pulido¹, Helber Garcia², Andrea Riaño³, Shigeki Senna¹ (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

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

*Tsunehisa Kimura¹ (1. Schlumberger)

1:00 PM - 2:30 PM

[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

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

*Misae Wakameda¹, Masaaki Kachi¹, Tsubasa Kawano¹, Yoshiaki Hisada², Masahiro Murakami² (1. A2 corporation, 2. Kogakuin University)

1:00 PM - 2:30 PM

Near-Fault Long-Period Ground Motion

*Kazuki Koketsu¹

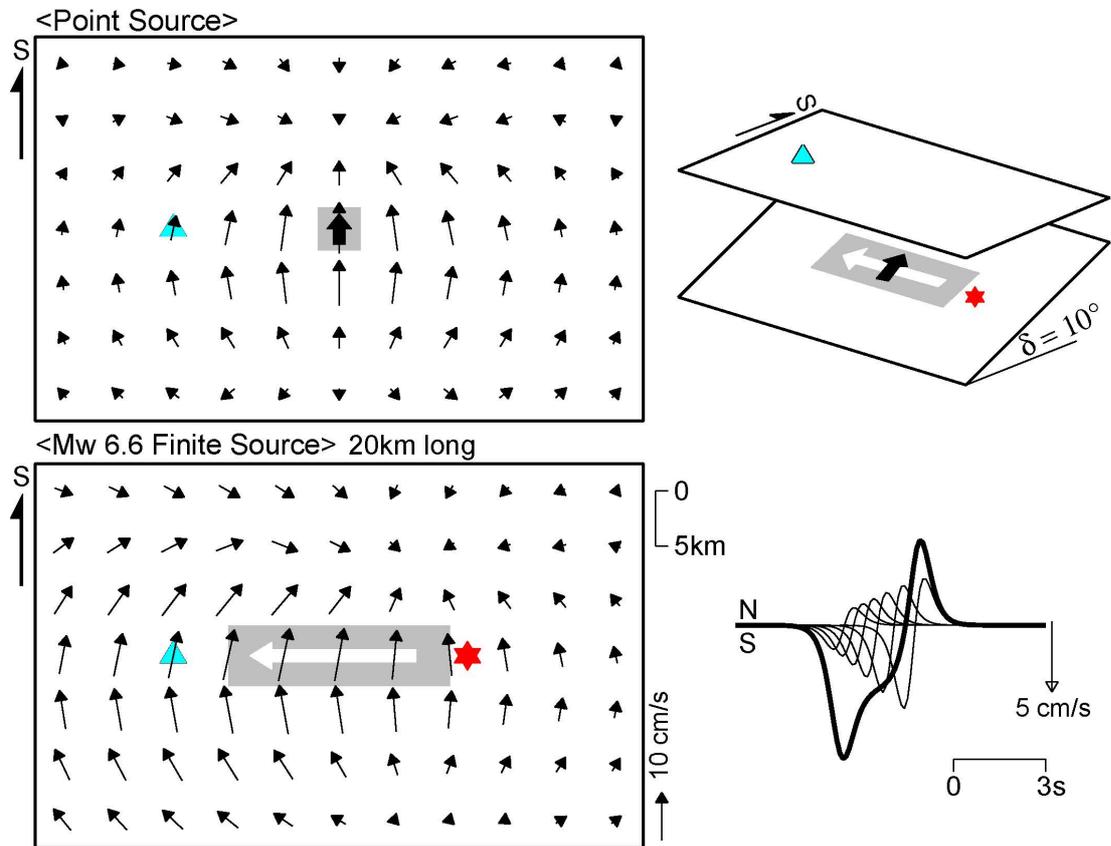
1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

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、ディレクティブ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 (瀬藤, 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、ディレクティブティ効果は、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になっている。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ブ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ブ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ブ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、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。



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

*Asako Iwaki¹, Takahiro Maeda¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹

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一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

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。

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

*Ken Hatayama¹

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という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。

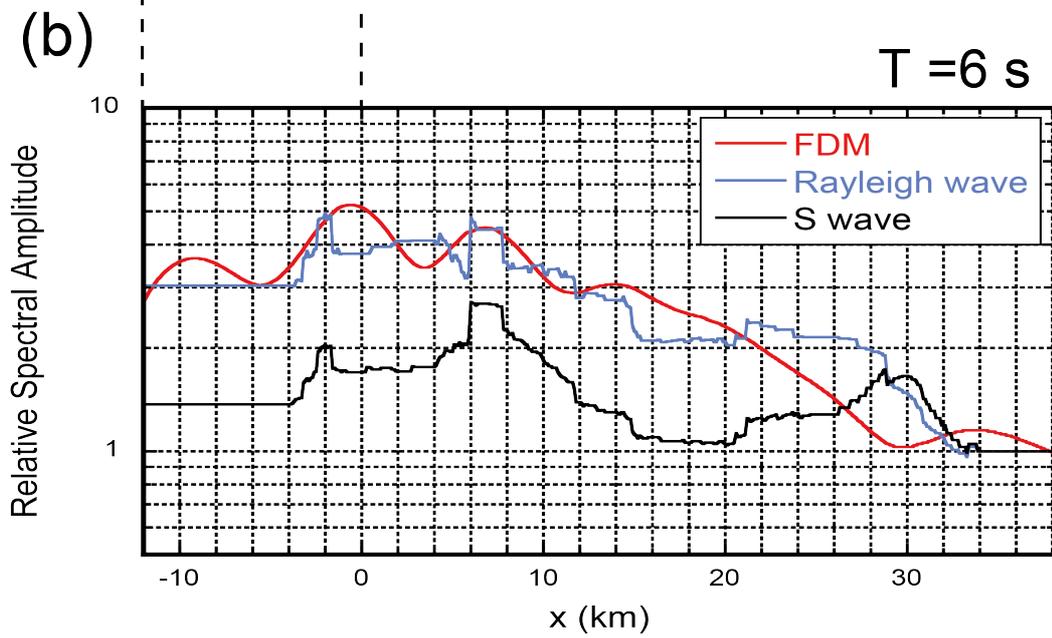
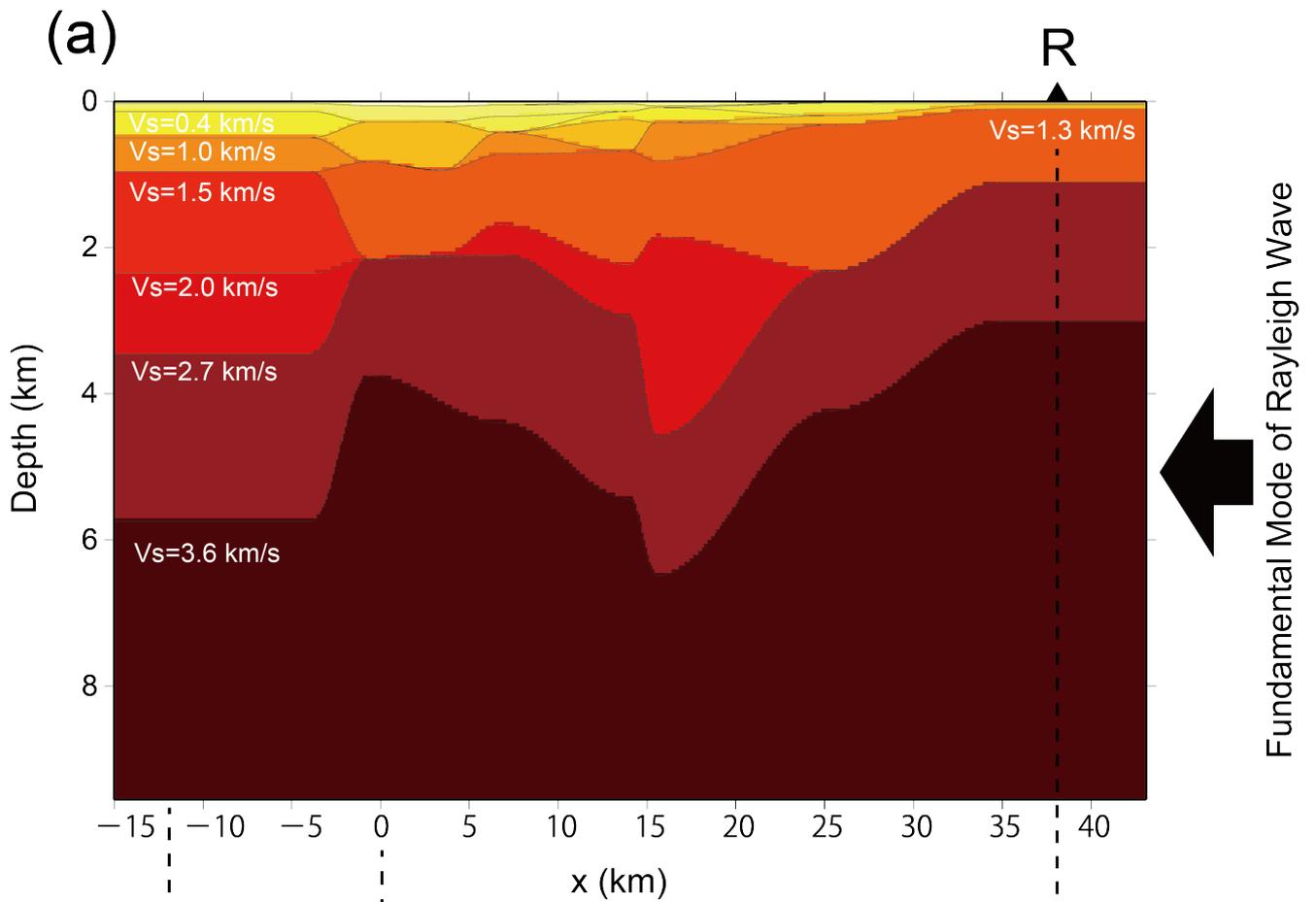
横方向に不規則な構造における表面波の伝播に関しては、グローバルな長周期（周期20秒以上）表面波を対象として、波線理論を用いた研究がなされてきた。Tromp and Dahlen(1992)は、エネルギー流速の保存則から、ある波線上の地表面上の2地点間における表面波のスペクトル振幅の比は、幾何減衰の影響を無視できる場合には、それぞれの地点の直下の1次元速度構造から計算される(i)地表における表面波固有関数の値、(ii)群速度、(iii)エネルギー積分による簡単な代数演算で表現できることを導いた（以下、表面波伝達関数という）。

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

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。



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

*Yadab Prasad Dhakal¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹

1. NIED

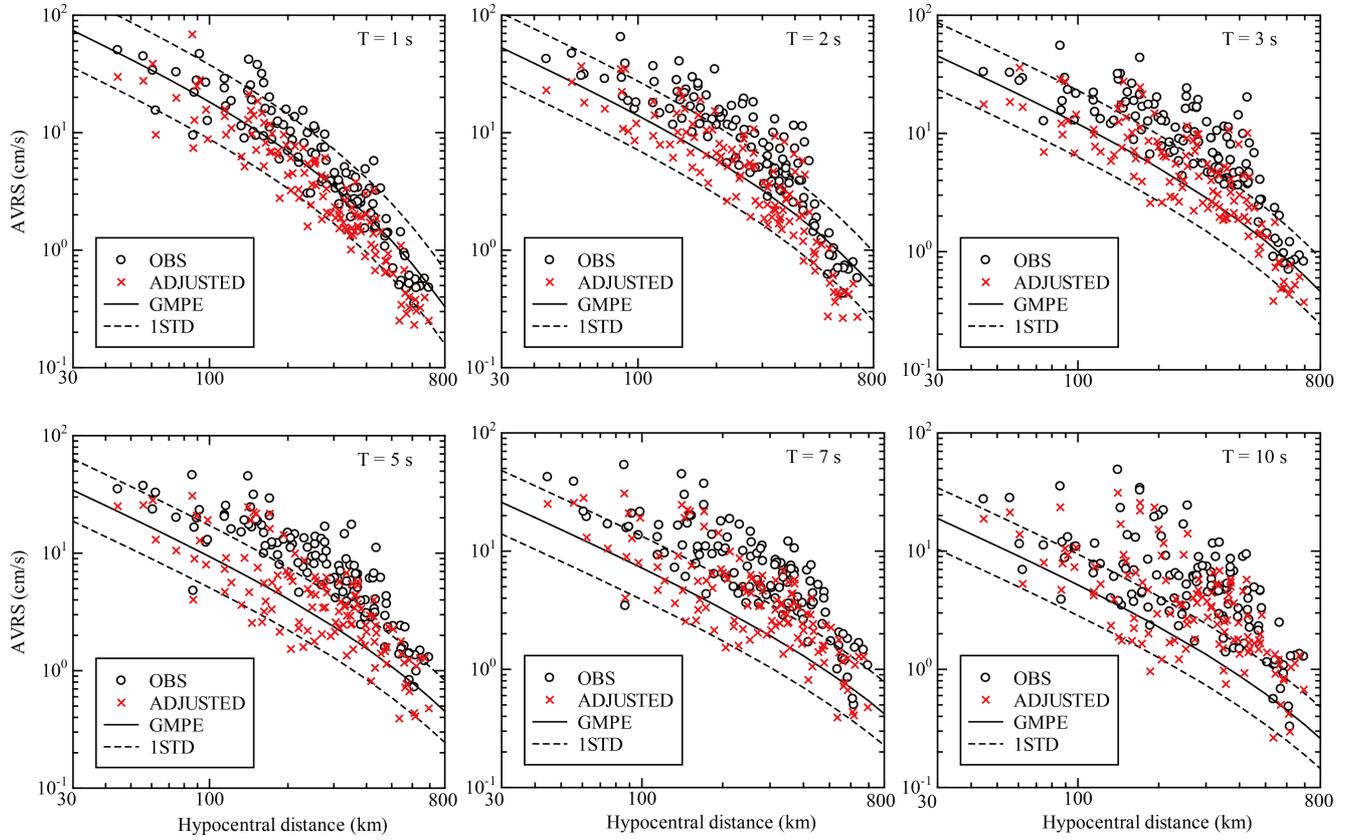
The 2016 Mj 7.4 off Fukushima earthquake occurred on November 22, 05:59 JST. An Mw value of 7.0 was assigned for the earthquake by F-net NIED. The Mw values determined by USGS and GCMT were equal to 6.9. The Japan Meteorological Agency (JMA) focal depth was approximately 24 km. The event was a normal 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.

Dhakai, 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

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

--

*--1, --1

1.-

T2019-095

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

*Takuya Kataoka¹, Masayuki Nagano¹

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 ($M_j 6.1$) 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。

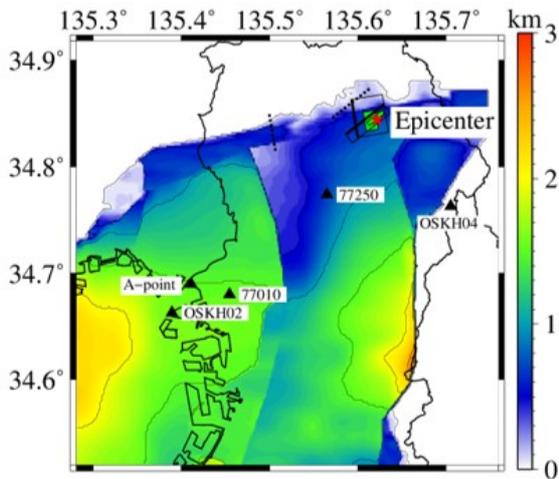


図1 地震基盤深さ

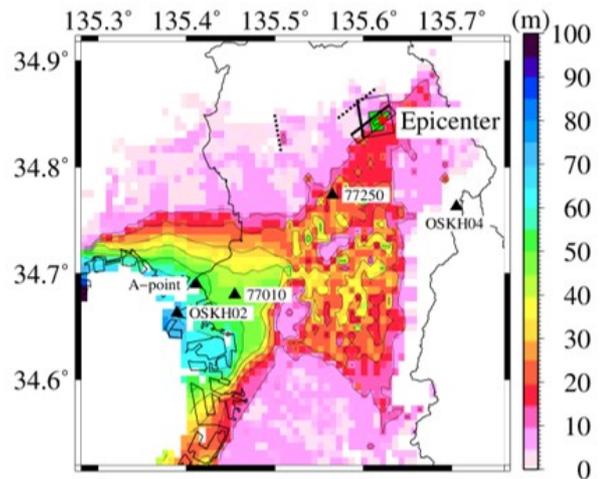


図2 工学的基盤深さ

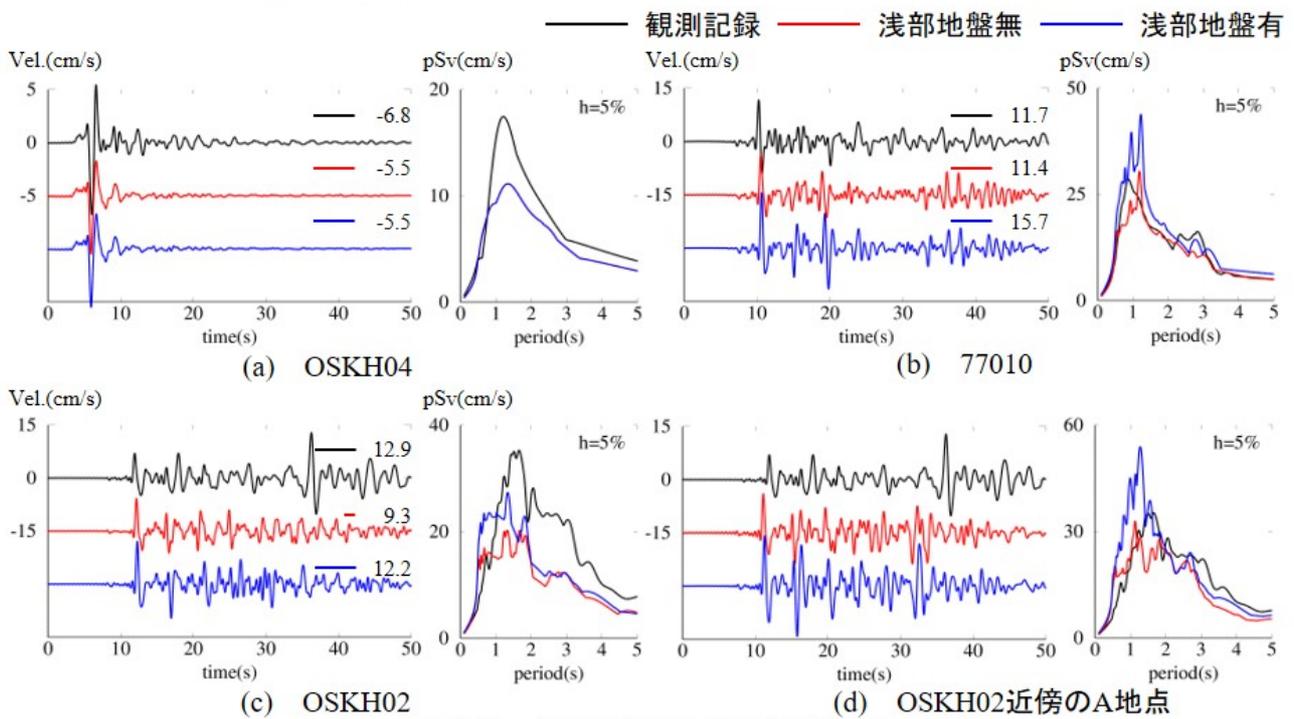


図3 EW方向における観測記録と解析結果の比較

Long period ground motion observed at Sakai-minato city, Tottori, prefecture

*Takao Kagawa¹, Shohei Yoshida², Tatsuya Noguchi¹

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のに含まれる。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.

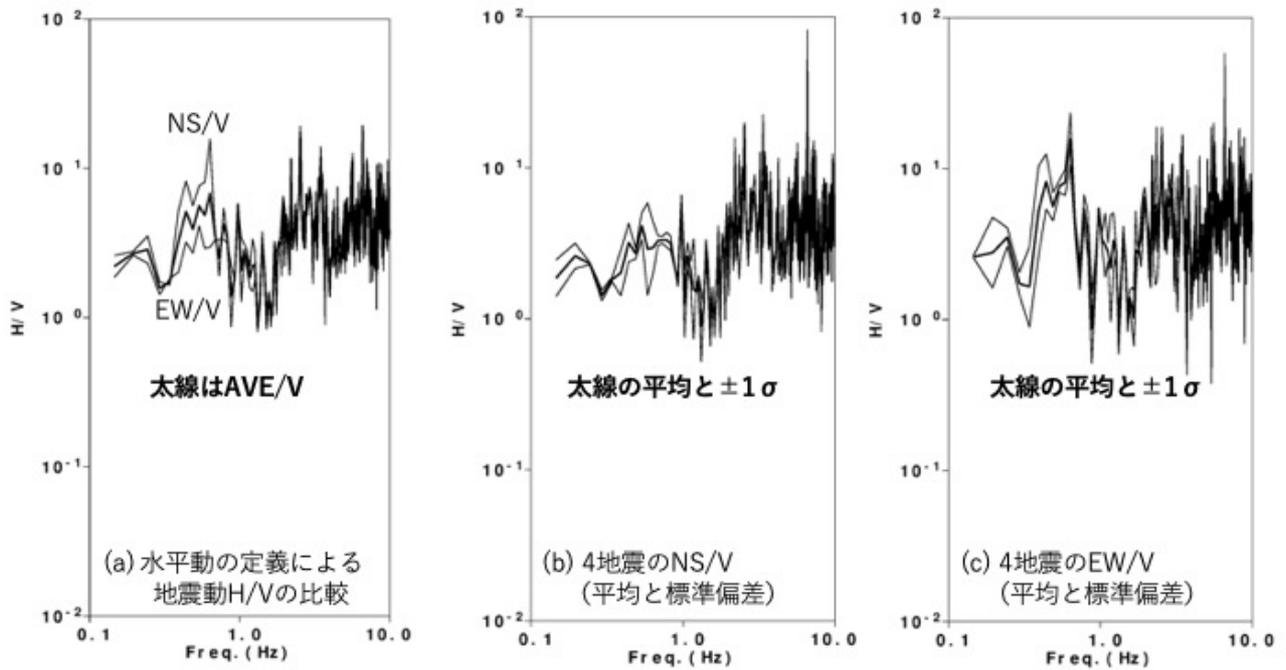


図 気象庁境港観測点における成分毎の地震動H/V. 地震の違いよりも成分の違いが有意.

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

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

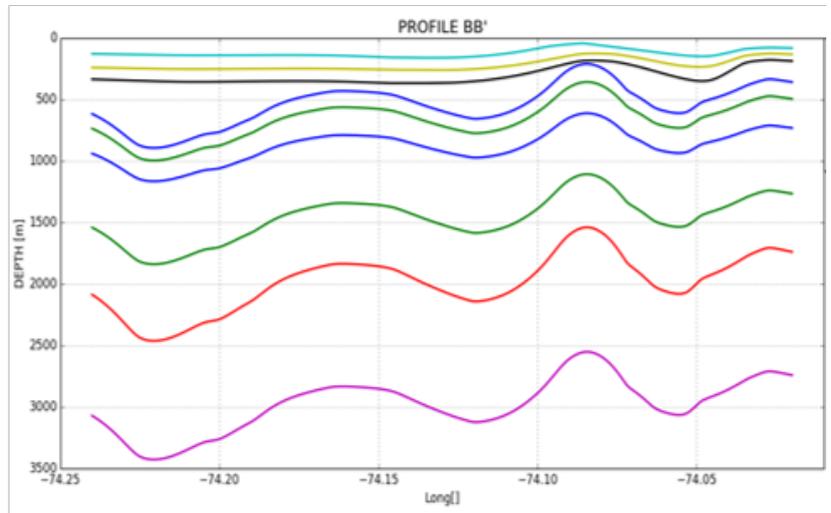
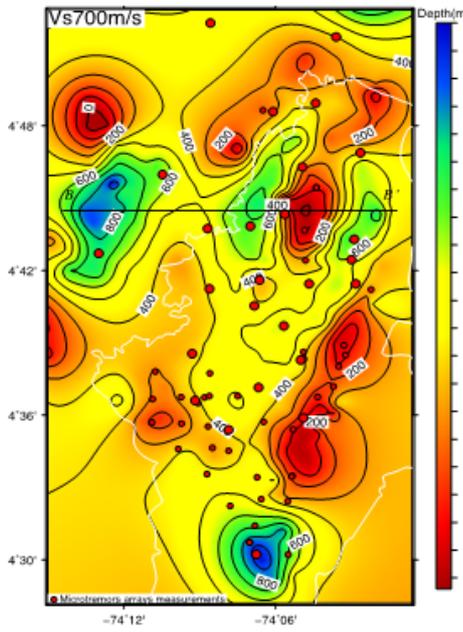
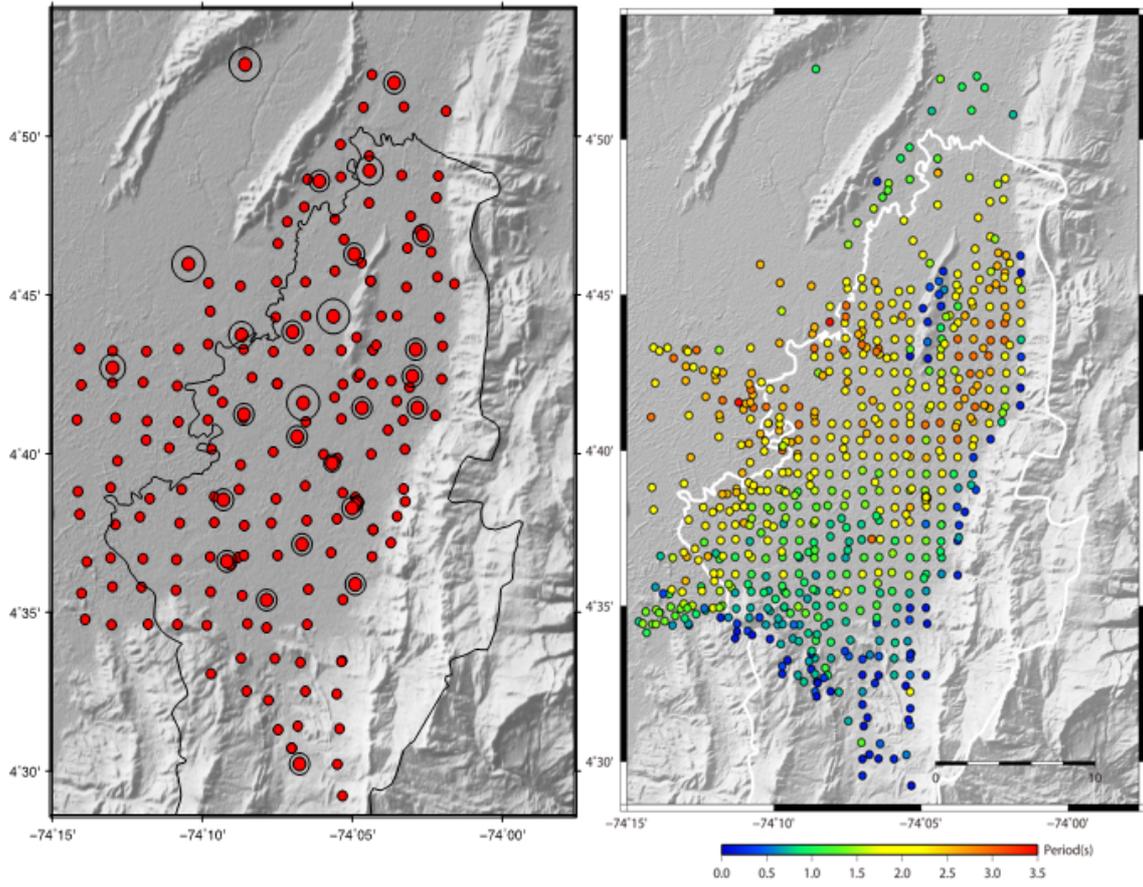
*Nelson Pulido¹, Helber Garcia², Andrea Riaño³, Shigeki Senna¹

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 (V_s) 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 V_s 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 ($V_s=3000$ 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)”



Monitoring of large structure and observation of long period ground motion using DAS and existing optical fiber cables installed

*Tsunehisa Kimura¹

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。

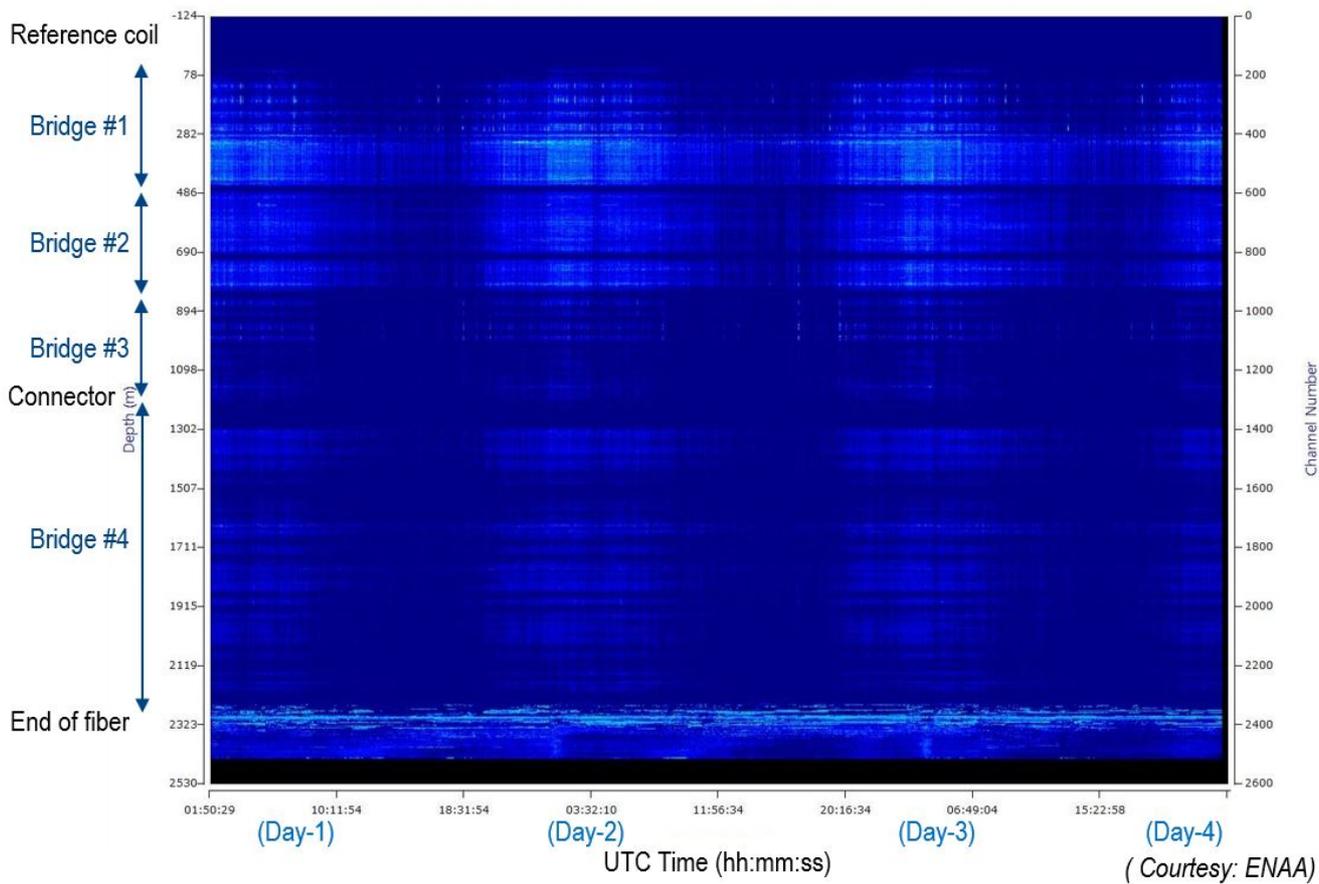
交通量が多い日中は振動が多く、交通量が少ない夜間は振動が少ない日周期があることが認められた。4日間の連続記録で得られた振動記録の一例を図に示す。また、橋梁によっては振動の大きい部分と小さい部分があることがわかった。それは橋梁内における光ファイバー敷設位置の違いのほか、路面状態の違いや橋梁の振動特性の違いによるものと考えられる。

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



-

*--1, --2

1., 2.--

T2019-100

An effort for the demonstration experiment to provide forecast information of long period ground motion through an application development

*Misae Wakameda¹, Masaaki Kachi¹, Tsubasa Kawano¹, Yoshiaki Hisada², Masahiro Murakami²

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($V_s=1.4\text{km/s}$ 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、情報利用者には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。

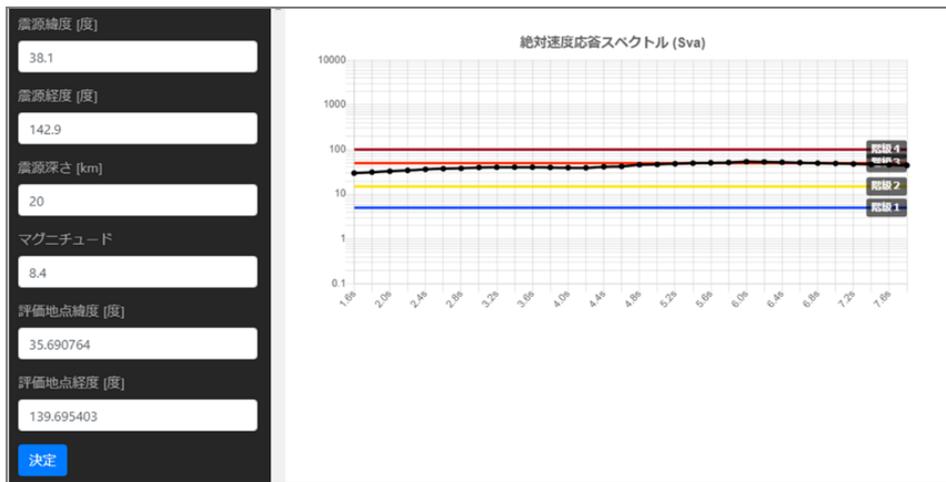


図1：あるビルの位置における1.6–7.8秒の絶対速度応答。
ビルの固有周期は2.6秒より、周期別階級は2。

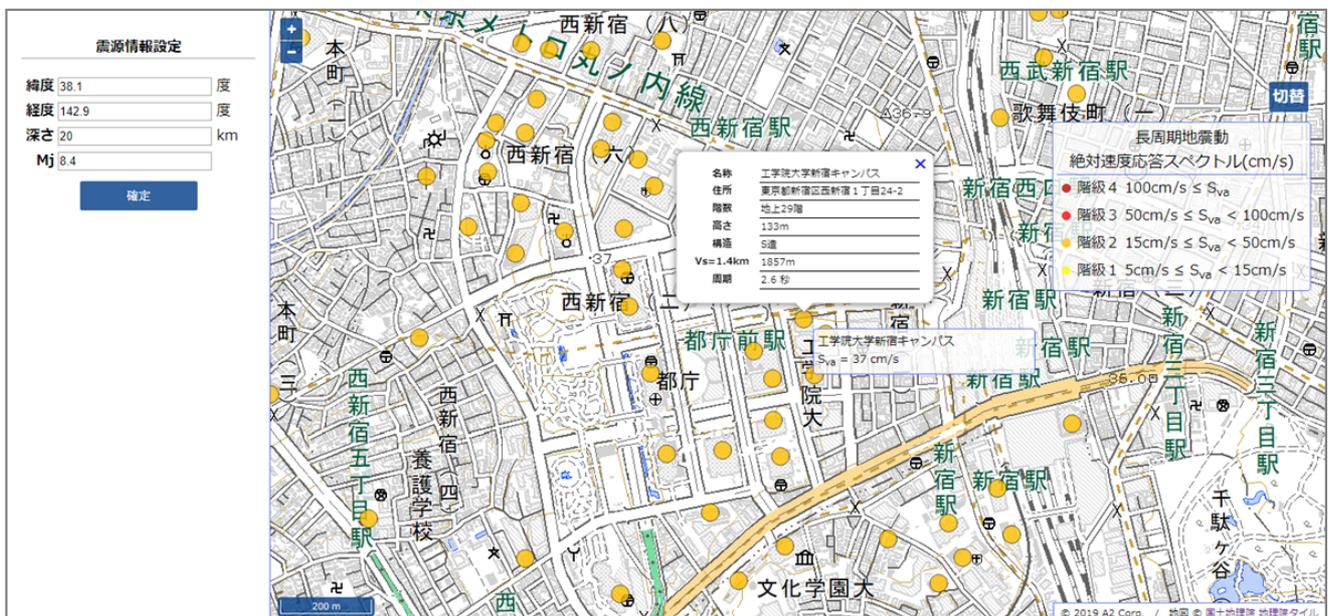


図2：周期別階級表示ツール画面。色つきの円はビルの位置と周期別階級を示す。
マウスオーバーでビルの固有周期における絶対速度応答を、
クリックでビルの基礎情報をポップアップ表示する。
地図は地理院タイル(<https://www.gsi.go.jp/LAW/2930-index.html>)を使用。

S22P

Wed. Sep 18, 2019 1:00 PM - 2:30 PM ROOM P (International Conference Halls II and III)

- [S22P-01] Detection of seismic signals under low SNR condition using an artificial neural network: Toward the development of low cost seismic network
Ahyi Kim¹, *Hiroki Uematsu¹ (1. Yokohama City University)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-02] Earthquake/Noise Discrimination with Convolutional Neural Network
*Shota Kudo¹, Kengo Shimojo¹, Koji Tamaribuchi² (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-03] Development of neural network to locate hypocenter with theoretical seismograms as learning data II
*Seiji Tsuboi¹, Daisuke Sugiyama¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-04] Attempt to detect LFTs by clustering short-period OBS records
*Hidenobu Takahashi¹, Ryota Hino¹, Yusaku Ohta¹, Naoki Uchida¹, Syuichi Suzuki¹, Masanao Shinohara² (1. Tohoku University, 2. The University of Tokyo)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-05] Insight into machine-learning model and prediction result: Case of random forest predictor for ground-motion intensit
*Hisahiko Kubo¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹, Shin Aoi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-06] site2vec: A Ground-Motion Predictor Learning Site Conditions from Data
*Tomohisa Okazaki¹, Tomoharu Iwata^{1,2}, Asako Iwaki³, Hiroyuki Fujiwara³, Naonori Ueda¹ (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
- [S22P-07] Time series analyses of amplitude of the Earth's background free oscillations
*Ryuichi Kunugi¹, Naoki Suda¹ (1. Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-08] An Attempt to Classify a Pattern of Changes in Strain Observation Data by Machine Learning
*Takahiro Tsuyuki¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)
1:00 PM - 2:30 PM
- [S22P-09] Machine Learning Approach for Integration of Multiple Relative Intensity Models
*Hirotaka Hachiya^{1,2}, Kazuro Hirahara¹, Naonori Ueda¹ (1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Faculty of System Engineering, Wakayama University)
1:00 PM - 2:30 PM

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

*Toshitaka Baba¹, Takuya Miyashita², Nobuhito Mori², Kenta Nakanishi³, Masato Okada⁴ (1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. NITA Consultant, 4. Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM

Detection of seismic signals under low SNR condition using an artificial neural network: Toward the development of low cost seismic network

Ahyi Kim¹, *Hiroki Uematsu¹

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.

Earthquake/Noise Discrimination with Convolutional Neural Network

*Shota Kudo¹, Kengo Shimojo¹, Koji Tamaribuchi²

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。

Development of neural network to locate hypocenter with theoretical seismograms as learning data II

*Seiji Tsuboi¹, Daisuke Sugiyama¹

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

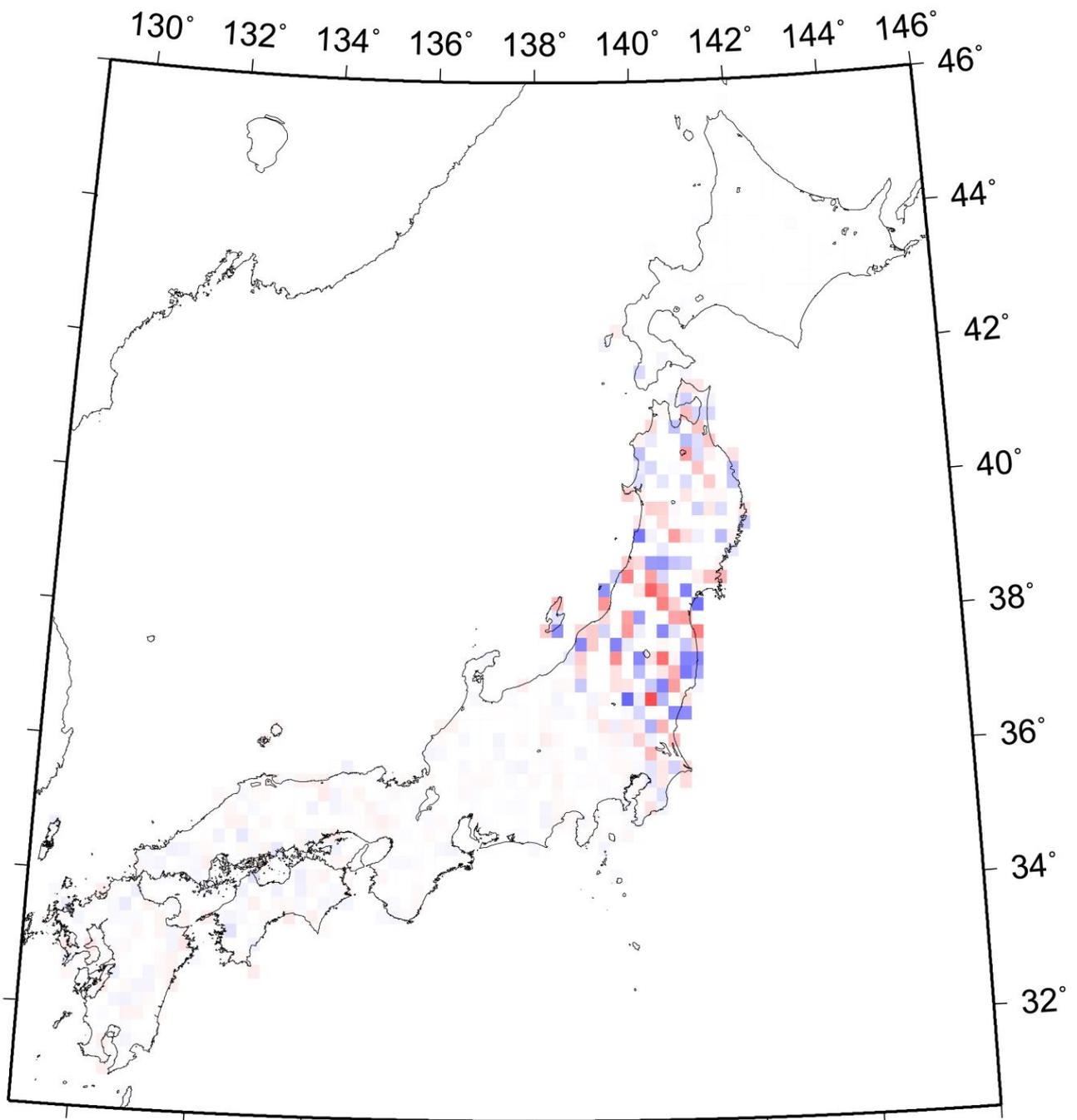
SPECFEM3D_GLOBE(https://geodynamics.org/cig/software/specfem3d_globe/)を用い、256コアを使って1 chunkを用いて計算した。モデルの精度を表すパラメータであるNEXは256で、用いた3次元地球モデルはS20RTS、精度は周期17秒である。2分間の理論地震波形を約4200個の地震に対して計算し、約300万枚の地震波伝播画像を生成した。教師データとして用いた画像の例を図1に示す。

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。



Attempt to detect LFTs by clustering short-period OBS records

*Hidenobu Takahashi¹, Ryota Hino¹, Yusaku Ohta¹, Naoki Uchida¹, Syuichi Suzuki¹, Masanao Shinohara²

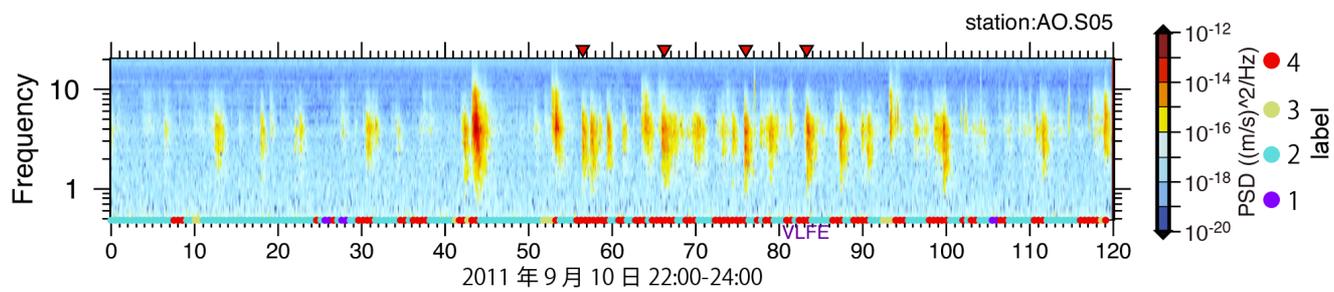
1. Tohoku University, 2. The University of Tokyo

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(VLFE)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 の検出を試みる。

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 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-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○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 に立ち回り確認する。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。



Insight into machine-learning model and prediction result: Case of random forest predictor for ground-motion intensity

*Hisahiko Kubo¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹, Shin Aoi¹

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あり、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の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。

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。

site2vec: A Ground-Motion Predictor Learning Site Conditions from Data

*Tomohisa Okazaki¹, Tomoharu Iwata^{1,2}, Asako Iwaki³, Hiroyuki Fujiwara³, Naonori Ueda¹

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、観測記録の経験的關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になってしまう。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

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。

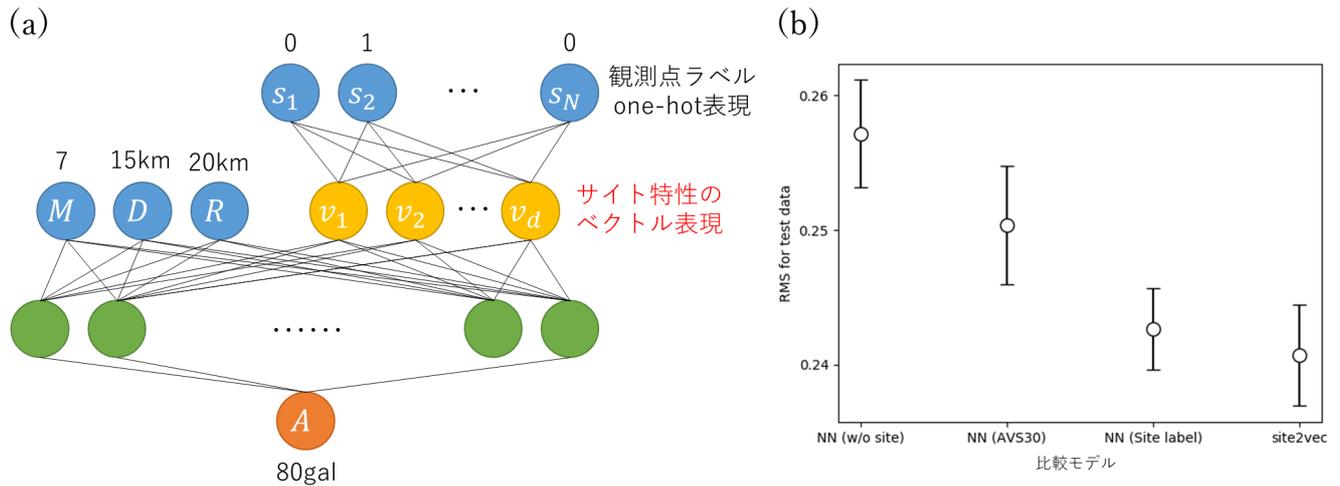


図. (a) 地震動予測モデル“site2vec”のネットワーク構成。

(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。

Time series analyses of amplitude of the Earth's background free oscillations

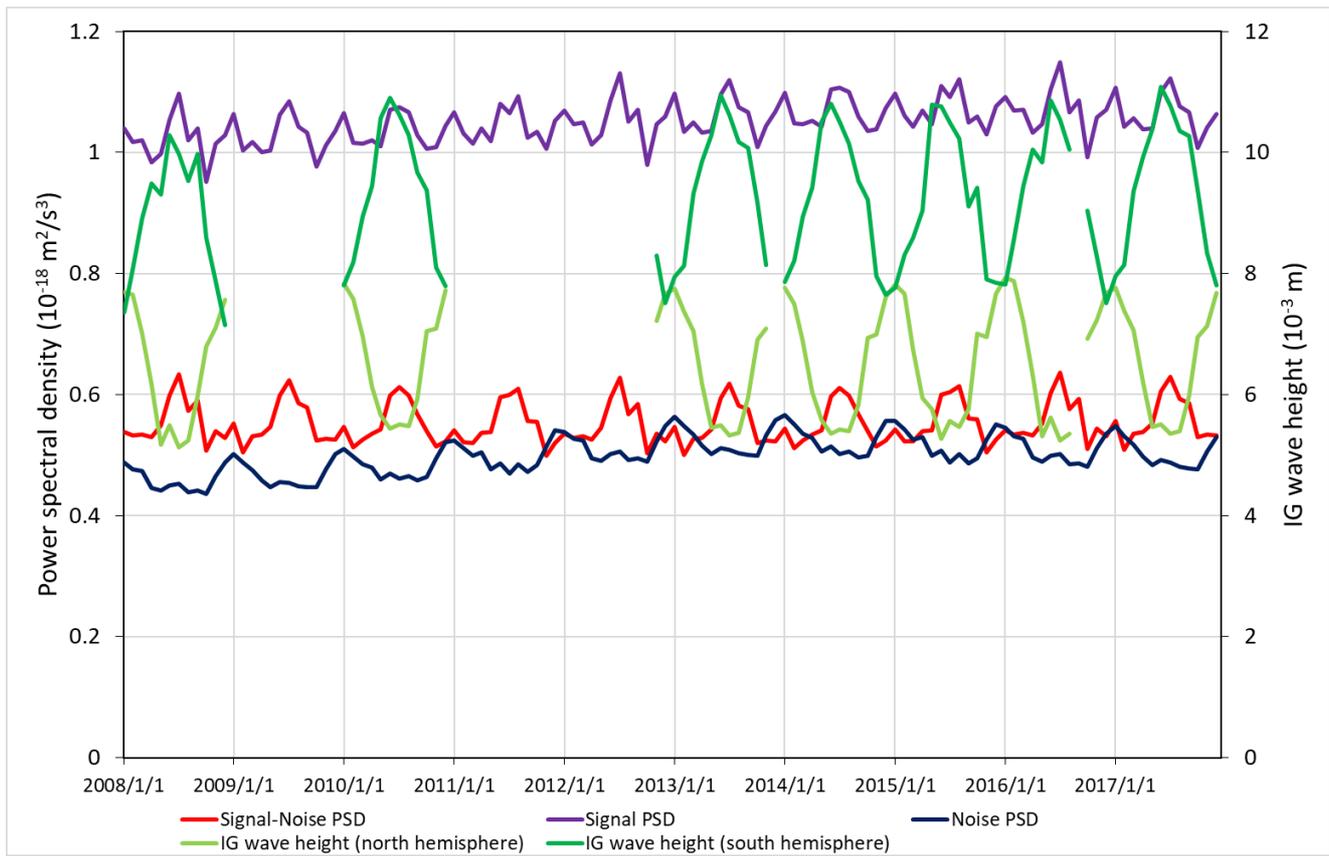
*Ryuichi Kunugi¹, Naoki Suda¹

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日ずらして切り出し、FFTで時間領域から周波数領域に変換するとともに、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。



An Attempt to Classify a Pattern of Changes in Strain Observation Data by Machine Learning

*Takahiro Tsuyuki¹

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マックなステップ、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Attention[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、緩和的变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ェアを使用

させていただきました。

Machine Learning Approach for Integration of Multiple Relative Intensity Models

*Hirotaka Hachiya^{1,2}, Kazuro Hirahara¹, Naonori Ueda¹

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.

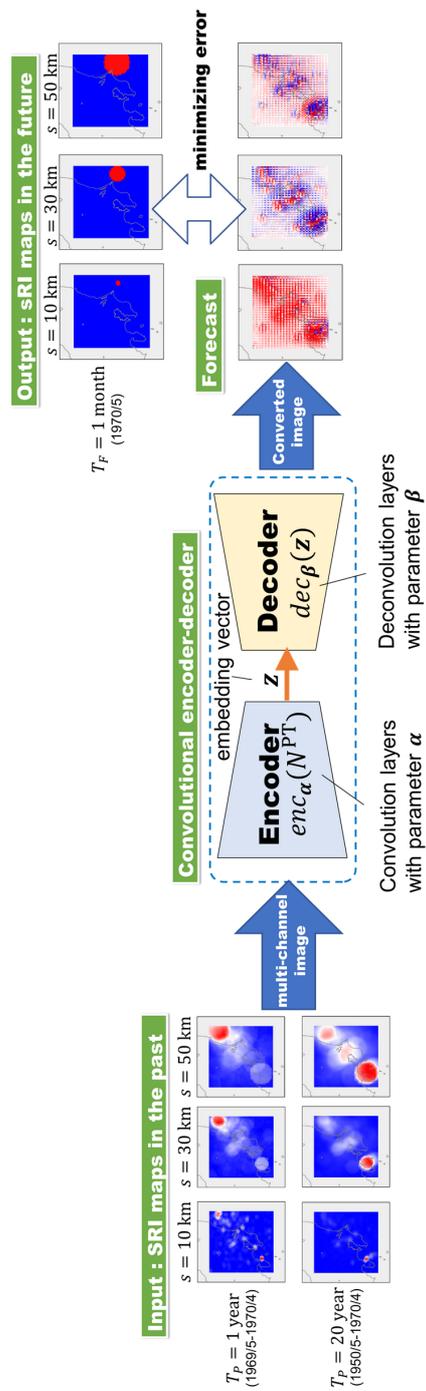


Figure: Proposed framework for converting SRI (smoothed relative intensity) maps in the past to the maps in the future.

Optimal distribution of offshore observation points for tsunami prediction using scenario search and regression methods

*Toshitaka Baba¹, Takuya Miyashita², Nobuhito Mori², Kenta Nakanishi³, Masato Okada⁴

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を選ばれるのに対して、回帰型では海岸に近い観測点を選ばれた。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好まれるためと考えられる。

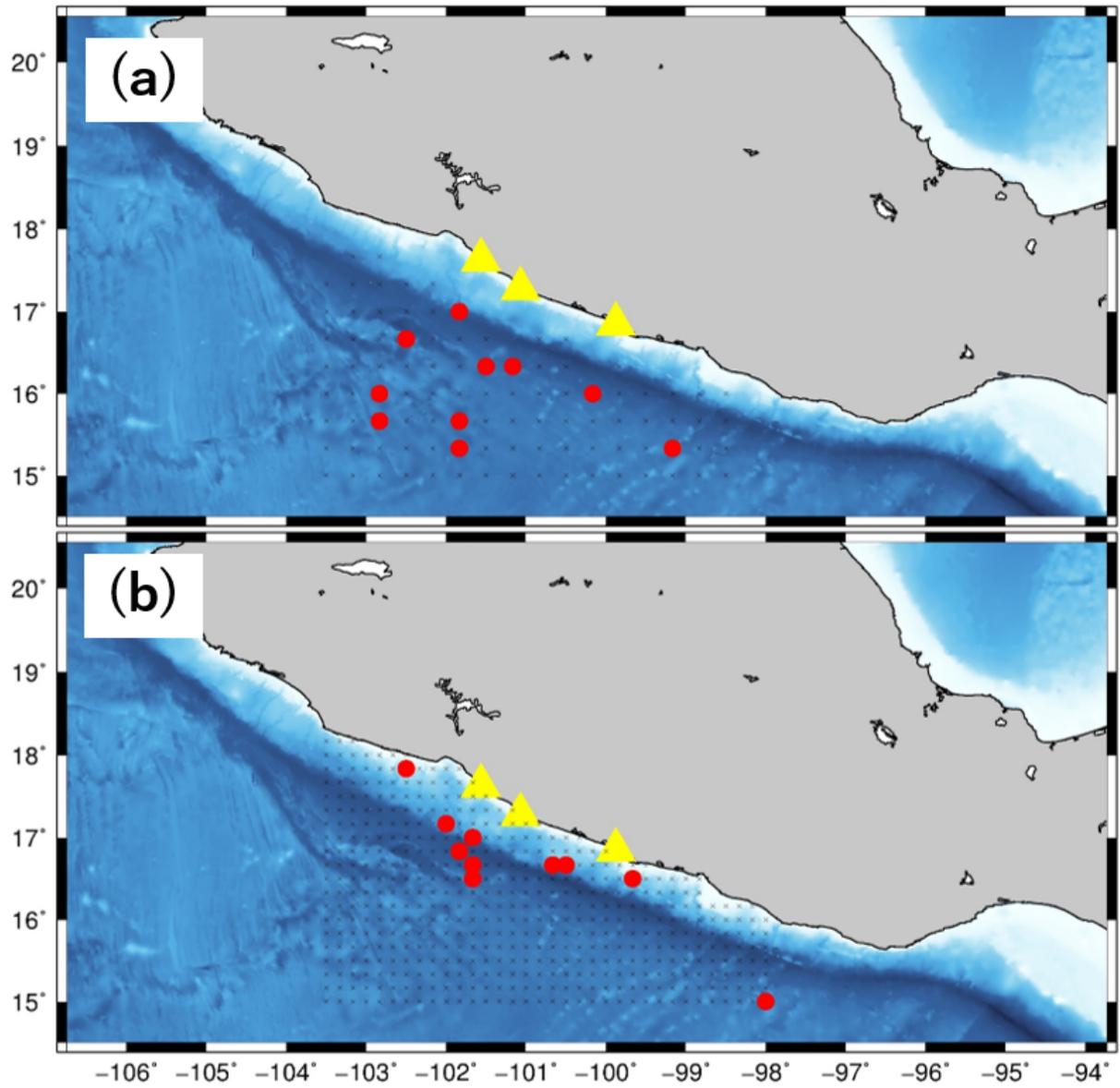


図 設置箇所を10点に制限した場合の沖合津波計の最適配置（赤丸）(a)はデータベース検索法，(b)はべき乗則による回帰法．黄色三角は津波予測ポイント．