Sat. Oct 31, 2020

Room A | Special session：S24. Pioneering the future of seismology with machine learning

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | ROOM A

[S24]AM-1

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

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

[S24-01] Regional characteristic of seismic activity inferred from unsupervised machine learning of F-net moment-tensor catalog

○Hisahiko Kubo[1], Takeshi Kimura[1], Katsuhiko Shiomi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S24-02] Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity

Ryota Otake[1,2], Jun Kurima[2], ○Hiroyuki Goto[2], Sumio Sawada[2] (1.OC Global, 2.Kyoto University)

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

[S24-03] False alarm and its measure on the earthquake early warning for the off-Torishima earthquake on July 30, 2020

○Masumi Yamada[1] (1.DPRI Kyoto Univ.)

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

[S24-04] Attempt to detect tectonic tremors in Sanriku-oki by applying a Convolutional Neural Network to S-net data

○Keisuke Yano[1], Hidenobu Takahashi[2], Kazuya Tateiwa[2], Masayuki Kano[2] (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

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

[S24-05] Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter around Hakone with theoretical seismograms of time series as training data.

○Daisuke Sugiyama[1], Seiji Tsuboi[1], Yukutake Yohei[2] (1.JAMSTEC, 2.Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government)

Room A | Regular session：S17. Tsunami

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

[S17]AM-2

chairperson:Tatsuhiko Saito(NIED), chairperson:Ayumu Mizutani(Hokkaido University)

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

[S17-01] Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance

○Akio Katsumata[1], Masayuki Tanaka[1], Takahito Nishimiya[1] (1.Meteorological Research Institute, JMA)

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

[S17-02] Tsunami Data Assimilation of S-net Pressure Gauge Records

○Yuchen Wang[1], Kenji Satake[1] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S17-03] Frequency characteristics of bottom pressure recordings induced by a typhoon

○Hiroyuki Matsumoto[1], Emoto Kuniaki[1,2], Kentaro Imai[1], Narumi Takahashi[1,3] (1.JAMSTEC, 2.Wakayama Prefecture, 3.NIED)

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

[S17-04] A meteotsunami on 1 July 2020 recorded by the S-net deep ocean pressure gauge network

○Tatsuya Kubota[1], Tatsuhiko Saito[1], Naotaka Yamamoto Chikasada[1], Osamu Sandanbata[1] (1.NIED)

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

[S17-05] Tsunami generation by sea-surface pressure change: A 3-D model for open ocean observations

○Tatsuhiko Saito[1], Tatsuya Kubota[1], Naotaka Yamamoto Chikasada[1], Yusuke Tanaka[2], Osamu Sandanbata[1] (1.NIED, 2.JAMSTEC)

Room A | Regular session：S17. Tsunami

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

[S17]PM-1

chairperson:Yusuke Yamanaka(The University of Tokyo), chairperson:Osamu Sandanbata(NIED)

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

[S17-06] Multiple-shock Characteristic of the 1933 Showa-Sanriku Earthquake

○Nobuo HAMADA[1] (1.non)

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

[S17-07] Forward modeling of tsunami for the 1933 Showa-Sanriku earthquake using normal faults based on marine surveys

○Toshitaka Baba[1], Naotaka Chikasada[2], Yasuyuki Nakamura[3], Go Fujie[3], Koichiro Obana[3], Seiichi Miura[3], Shuichi Kodaira[3] (1.Tokushima University, 2.NIED, 3.JAMSTEC)

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

[S17-08] Study on resonance characteristics along western coasts of Japan Sea and amplification of 1833 Shonai-Oki tsunami

○Yusuke Yamanaka[1], Kiku Shimazu[2], Takenori Shimozono[1], Yukimasa Higaki[3] (1.The University of Tokyo, 2.Central Nippon Expressway Company Limited, 3.East Japan Railway Company)

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

[S17-09] Nonlinear Inversion of Tsunami waveforms, Estimation of Slip Distribution by Grid Search Part 1

○Masaaki MINAMI[1] (1.Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency)

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

[S17-10] Physical mechanism of volcanic tsunami earthquakes repeating at Curtis Island, north of New Zealand

○Osamu Sandanbata[1,2], Shingo Watada[2], Kenji Satake[2], Hiroo Kanamori[3], Luis Rivera[4], Zhongwen Zhan[3] (1.Now at NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.California Institute of Technology, 4.Université de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, F-67000 Strasbourg)

Room A | Regular session：S17. Tsunami

2:30 PM - 3:15 PM JST | 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM A

[S17]PM-2

chairperson:Yutaka Hayashi(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

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

[S17-11] Reconstruction of the inundation height by spatial interpolation method in the Sendai plain after the 2011 Tohoku Tsunami

○Yuuki Eguchi[1], Yoshinori Shigihara[1], Tsuyoshi Tada[1] (1.National Defense Academy of Japan)

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

[S17-12] Numerical study on tsunamis propagating into river channel

○Kento Koseki[1], Yusuke Yamanaka[1] (1.Department of Civil Engineering, The University of Tokyo)

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

[S17-13] Characteristics of tsunami flotsam behavior on vulnerable of embankment foundation by strong motion

○Kentaro Imai[1], Ryoko Obayashi[1], Kuniaki Emoto[2], Hiroyuki Iwase[3], Kentaro Nakai[4] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Wakayama Prefecture, 3.JIFIC, 4.Nagoya University)

Room B | Regular session：S02. Seismometry and monitoring system

9:00 AM - 9:45 AM JST | 12:00 AM - 12:45 AM UTC | ROOM B

[S02]AM-1

chairperson:Ryoichi Iwase(JAMSTEC)

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

[S02-01] Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

○Yusuke Mukuhira[1], Oleg V. Poliannikov[2], Michael C. Fehler[2], Hirokazu Moriya[3] (1.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2.Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3.School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan)

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

[S02-02] Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

○Ryoichi Iwase[1] (1.JAMSTEC)

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

[S02-03] Channel ID number expansion in WIN format

○Kenji Uehira[1], Shigeki Nakagawa[2], Hiroshi Tsuruoka[2], Taku Urabe[3] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Telemetra)

Room B | Regular session：S19. Seismology, general contribution

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

[S19]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

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

[S19-01] A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

○Satoko Murotani[1], Kenji Satake[2], Hiroshi Tsuruoka[2], Hiroe Miyake[2], Toshiaki Sato[3], Tetsuo Hashimoto[4], Hiroo Kanamori[5] (1.National Museum of Nature and Science, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Ohsaki Research Institute, Inc., 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Seismological Laboratory, California Institute of Technology)

Room B | Regular session：S18. Education and history of seismology

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

[S18]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

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

[S18-01] Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

○Shota Takeichi[1], Toshitaka Baba[1], Naoyuki Nakayama[2] (1.Tokushima University, 2.Tsuda Junior High School)

Room B | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

10:30 AM - 12:00 PM JST | 1:30 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B

[S03]AM-2

chairperson:Kosuke Heki(Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University), chairperson:Yuta Mitsui(Faculty of Science, Shizuoka University)

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

[S03-01] Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

○Takao Tabei[1], Mako Ohzono[2], Bishow R. Silwal[3], Rajendra Bhandari[3], Janak B. Chand[3], Soma N. Sapkota[3], Hiroe Miyake[4], Kazuki Koketsu[4] (1.Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2.Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.Department of Mines and Geology, Nepal, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S03-02] Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

○Yusuke Tanaka[1], Yusaku Ohta[1], Shin'ichi Miyazaki[2] (1.Tohoku University, 2.Kyoto University)

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

[S03-03] Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

○Fumiaki Tomita[1], Takeshi Iinuma[1], Ryoichiro Agata[1], Takane Hori[1] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S03-04] Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

○Yuta Mitsui[1], Hinako Muramatsu[2], Yusaku Tanaka[3] (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S03-05] Crustal deformation by a heavy rain episode

○Kosuke Heki[1], Syachrul Arief[1], Wei Zhan[2] (1.Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2.The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration)

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

[S03-06] Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

○Angela Meneses-Gutierrez[1,2], Paul Segall[3], Takeshi Sagiya[2,4] (1.Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3.Stanford University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

Room B | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

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

[S03]PM-1

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)), chairperson:Ryoya Ikuta(Shizuoka Univ.)

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

[S03-07] Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

○Hiroki Aota[1], Mako Ohzono[1,2], Hiroaki Takahashi[1], Yusaku Ohta[3] (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S03-08] A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

○Ryoya Ikuta[1], Horng-Yue Chen[2], Kiyomichi Takemoto[3], Takeru Kohmi[1], Masataka Ando[1] (1.Shizuoka Univ., 2.Academia Sinica, 3.Nagoya Univ.)

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

[S03-09] GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

○Takeshi Iinuma[1], Motoyuki Kido[2,3], Tatsuya Fukuda[1], Yusaku Ohta[3,2], Fumiaki Tomita[1], Ryota Hino[3,2] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S03-10] Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

○Yusuke Yokota[1], Tadashi Ishikawa[2], Shun-ichi Watanabe[2], Yuto Nakamura[2] (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

○Yuya Machida[1], Shuhei Nishida[1], Toshinori Kimura[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Eiichiro Araki[1] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | ROOM C

[S08]AM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), chairperson:Shunsuke Takemura(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S08-05] Campaign Observations of Deep Long-Period Earthquakes in Eastern Shimane

○Naofumi Aso[1], Nozomi Terai[1] (1.Tokyo Institute of Technology)

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

[S08-06] Uncertainty estimation for the thermal structure of subduction zones based on surface heat flow measurements

○Manabu Morishige[1], Tatsu Kuwatani[2] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S08-07] Quasi-periodic change of crustal stress field in southwest Japan suggested by earthquake focal mechanisms and crustal deformation

○Kazutoshi Imanishi[1], Akemi Noda[2] (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Meteorological Research Institute)

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

[S08-08] Ocean slab seismicity and stress state affected by episodic slow slip near a subduction-zone megathrust

○Saeko Kita[1], Heidi Houston[2], Sachiko Tanaka[3], Youichi Asano[3], Takuo Shibutani[4], Naoki Suda[5] (1.Building Research Institute, 2.USC, 3.NIED, 4.DPRI, Kyoto University, 5.Hiroshima University)

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

[S08-09] Trial study of source time function estimation for shallow low-frequency tremors based on high-frequency seismogram envelope

○Shunsuke Takemura[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Satoru Baba[1] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Tohoku University)

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

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

[S08]AM-2

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo), chairperson:Keisuke Ariyoshi(JAMSTEC)

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

[S08-10] Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories

○Keisuke Ariyoshi[1], Takeshi Iinuma[1], Masaru Nakano[1], Toshinori Kimura[1], Eiichiro Araki[1], Yuya Machida[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takehiro Nishiyama[1], Kensuke Suzuki[2], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,3], Shuichi Kodaira[1] (1.JAMSTEC, 2.Sendai Regional Headquarters, JMA, 3.NIED)

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

[S08-11] Limit cycle and period-doubling bifurcation in fault valve model

○Takahiro Hatano[1], Ryo Mizushima[1] (1.Department of Earth and Space Science, Osaka University)

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

[S08-12] Modes of deep slow earthquakes and temperature dependence of brittle-ductile mixed rheology

○Ryosuke Ando[1] (1.School of Science, University of Tokyo)

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

[S08-13] Nankai Trough earthquake cycle simulation with deep long-term slow slip event and long-term locked fault segments : discrete cell model

○Kazuro Hirahara[1,2] (1.Kagawa University, 2.Riken)

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

[S08-14] A hierarchical model of earthquake asperity

○Yoshio Fukao[1] (1.JAMSTEC)

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

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

[S08]PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.), chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University)

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

[S08-15] Dynamic Rupture Simulation on a Non-planer Fault : Pore Pressure, Stress Direction, Angle of Fault Bend and ISOtropic Component

○Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2] (1.Kyoto University Graduate school of Science , 2.DPRI, Kyoto University)

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

[S08-16] Two forms of the slip fronts and analyzing their propagation velocities by Linear Marginal Stability Hypothesis

○Takehito Suzuki[1] (1.Aoyama Gakuin University)

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

[S08-17] An analytical solution for dynamic self-similar crack with distance-weakening friction

○Shiro Hirano[1], Hiromichi Itou[2] (1.Ritsumeikan Univ., 2.Tokyo Univ. of Science)

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

[S08-18] Estimation of fracture energy of large earthquakes based on heterogeneous fault rupture process

○Nelson Pulido[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-19] Earthquake magnitude estimation under nonuniform stress and friction

○Yumi Urata[1], Eiichi Fukuyama[1,2], Chihiro Hashimoto[3] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

2:30 PM - 3:15 PM JST | 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM C

[S08]PM-2

chairperson:Yumi Urata(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-20] Friction parameter of metagabbro gauge obtained from a large-scale biaxial friction apparatus

○Akihiro Shimoda[1], Futoshi Yamashita[2], Eiichi Fukuyama[1,2], Shun Watanabe[1] (1.kyoto university, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-21] Temporally variable estimation of friction parameters using machine learning

○Ryo Ishiyama[1], Eiichi Fukuyama[2], Bogdan Enescu[1] (1.Division of Earth and Planetary Science, Kyoto University, 2.Department Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University)

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

[S08-22] Spatiotemporal Complexity of Rupture Evolution in a Fault Damage Zone with Multiple Small-Scale Cracks

○Koji Uenishi[1,2], Kunihiro Nagasawa[2] (1.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

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

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

[S14]AM-1

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

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

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

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

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

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

○Hong Peng[1], James Jiro Mori[1] (1.Kyoto University)

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

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

○Kumazawa Takao[1], Yosihiko Ogata[2] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics)

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

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

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

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

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

[S22]AM-2

chairperson:Shuichi Kodaira(JAMSTEC)

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

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

○Makoto Otsubo[1] (1.Geological Survey of Japan)

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

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

○Ban-Yuan Kuo[1], Pei-Ru Jian[1], Pei-Ying Patty Lin[2], Ching-Ren Lin[1], Yasushi Ishihara[3], Shuichi Kodaira[3], Mamoru Nakamura[4], Chau-Chang Wang[5] (1.Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 2.National Taiwan Normal University, 3.JAMSTEC, 4.University of the Ryukyus, 5.NARLabs)

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

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

○Ting-Chun Lin[1], Kai-Xun Chen[1,2], Yuancheng Gung[1], Ban-Yuan Kuo[2], Yasushi Ishihara[3], Shuichi Kodaira[3], Mamoru Nakamura[4], Pei-Ying Patty Lin[5], Ching-Ren Lin[2], Chau-Chang Wang[6] (1.National Taiwan University, Department of Geosciences, 2.Academia Sinica, 3.JAMSTEC, 4.University of the Ryukyus, 5.National Taiwan Normal University, 6.National Applied Research Laboratories)

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

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

○Takuya Nishimura[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Takeshi Matsushima[3] (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Faculty of Science, Kyushu University)

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

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

[S22]PM-1

chairperson:Mamoru Nakamura(Ryukyu University)

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

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

○Yukihiro Nakatani[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1], Hiroki Miyamachi[2], Reiji Kobayashi[2], Yusuke Yamashita[3], Hiroshi Shimizu[4], Takeshi Matsushima[4], Kazunari Uchida[4], Kazuo Nakahigashi[5], Hideji Abe[7], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[7] (1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 3.DPRI, Kyoto Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, UTokyo)

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

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

○PeiYing Patty Lin[1], Hsiu-Cheng Yeh[1], Chih-Ming Lin[1], Ban-Yuan Kuo[2], Shu-Huei Hung[3], Yuancheng Gung[3], Eh Tan[2], Kate Huihsuan Chen[1], Chau-Chang Wang[4,5], Ching-Ren Lin[2], Shuichi Kodaira[6], Yasushi Ishihara[6], Mamoru Nakamura[7] (1.Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.National Sun Yat-sen University, 6.JAMSTEC , 7.University of the Ryukyus)

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

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

○Shu-Huei Hung[1], Ban-Yuan Kuo[2], Pei-Ying Patty Lin[1], Yuancheng Gung[1], Eh Tan[2], Huihsuan Chen[3], Chau-Chang Wang[4], Shuichi Kodaira[5], Yasushi Ishihara[5], Mamoru Nakamura[6], Ching-Ren Lin[2] (1.Department of Geosciences, National Taiwan University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan Normal University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.JAMSTEC, 6.University of the Ryukyus)

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

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

○Ryuta Arai[1], Shuichi Kodaira[1], Tsutomu Takahashi[1], Ayako Nakanishi[1], Yojiro Yamamoto[1], Yuka Kaiho[1], Yasushi Ishihara[1], Seiichi Miura[1], Yoshiyuki Kaneda[1,2] (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S02. Seismometry and monitoring system

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S02P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-01] Development of the Web application for WIN system -Porting of the function of IT kyoshin seismometer-

○Takamori Ito[1] (1.aLab Inc.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-02] Development of monitoring systems using seismic intensity meters equipped with a MEMS acceleration sensor

○Jun Uchida[1], Masahiro Oi[2], Kaoru Yoshioka[3], Shoichi Shiozaki[3], Yoshiya Ouchi[1], Keizo Motohashi[1] (1.KINKEI SYSTEM CORPORATION, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Chiba Prefectural Goverment)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-03] Accuracy of time and pressure due to calibration intervals by an atomic clock in an ocean bottom pressure gauge

Ayumu Yokoyama[1], ○Toshinori Sato[1] (1.Chiba Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-04] Calibration of instrument responses in high-density broadband seismograph networks based on teleseismic waveform data

○Takeshi Kimura[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Reisilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-05] Change of social activities due to the spread of COVID-19 infections detected by seismograph networks

○Katsuhiko SHIOMI[1], Takeshi KIMURA[1], Youichi ASANO[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-06] Comparison between results of array analysis of tiltmeters and template matching analysis of broadband seismometers

○Youichi Asano[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S03P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-01] Recent long-term slow slips along the Nankai Trough detected by GNSS objective detection method

○Akio Kobayashi[1], Takahiro Tsuyuki[1] (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-02] Long-term SSE along the Nankai trough detected by GEONET

○Shinzaburo Ozawa[1], Ryouji Kawabata[1], Hiroshi Munekane[1] (1.Geospatial Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-03] Automated detection of short-term slow slips using multiple GNSS stations by trend filtering

○Keisuke Yano[1], Masayuki Kano[2] (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-04] Estimation of short-term slow slip event source model considering opening-mode dislocation

○Noa Mitsui[1], Satoshi Itaba[2], Yasuhiro Asai[1], Takanori Matsuzawa[3], Norio Matsumoto[2] (1.Tono Research Institute of Earthquake Science, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-05] Correction of initial changes in borehole type strain meter

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

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-06] Evaluation of forecasting post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake 2020

○Satoshi Fujiwara[1], Mikio Tobita[1], Shinzaburo Ozawa[1] (1.Geospatial Information Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-07] Very Long-term Post-seismic Gravity Changes due probably to Long-term Viscoelastic Relaxation

○Yusaku Tanaka[1] (1.ERI, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-08] Development of analysis tool “GARPOS” for open GNSS-A

○Shun-ichi Watanabe[1], Tadashi Ishikawa[1], Yusuke Yokota[2], Yuto Nakamura[1] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-09] A numerical simulator for the new GNSS-A data analysis software “GARPOS”

○Yuto Nakamura[1], Shun-ichi Watanabe[1], Tadashi Ishikawa[1], Yusuke Yokota[2] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-10] Effect of sound speed profile on GNSS-A seafloor positioning

○Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yusuke Yokota[2], Yuto Nakamura[1] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S08. Earthquake physics

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S08P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-01] Temporal change in the rupture velocity of repeating earthquakes occurring in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquake

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

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-02] Spatial and Temporal Variations in Rupture Processes of the Repeating Earthquake Sequences off-Iwate following the 2011 Tohoku-oki Earthquake

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

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Koichiro Suzuki[1], Musa Siphiwe Manzi[2], Hiroshi Ogasawara[1], Taku Noda[1], Lindsay Linzer[3], Raymond J Durrheim[2], Bennie Liebenberg[4] (1.Ritsumeikan University, 2.University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3.SRK(Pty)Ltd, 4.Moab Khotsong mine)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-04] ICDP DSeis: Evaluation of Spatial Stress Change by Diametrical Core Diameter Analysis of M5.5 Aftershock Zone Core

○Yoshihiro Mima[1], Ryogo Tadokoro[1], Shunsuke Yoshida[1], Mitsuya Higashi[1], Kensuke Sakaguchi[1], Bennie Liebenberg, Siyanda Mngadi[4], Yasuo Yabe[2], Akio Funato[3], Takatoshi Ito[2], Raymond Durrheim[4], Hiroshi Ogasawara[1] (1.Ritsumeikan University, 2.Tohoku University, 3.Fukada Geological Institute, 4.University of the Witwatersrand)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-05] Detection and spatial distribution of non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake by “0.1 manten” hyperdense seismic observation

○Motokoshi Takumi[1] (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-06] Validating the Method of Estimating Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field

○Takeo Ishibe[1], Toshiko Terakawa[2], Akinori Hashima[3], Masashi Mochizuki[4], Ritsuko S. Matsu’ura[1] (1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Nagoya University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-07] Temporal variation of the inelastic strain field around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

○Ayaho Mitsuoka[1], Satoshi Matsumoao[2], Azusa Shito[3], Hiroshi Shimizu[2], Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Department of Biosphere-Geosphere Science Faculty of Biosphere-Geosphere Science Okayama University of Science)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1] (1.Tokyo Institute of Technology)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-09] Investigation of multi-segment earthquake on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

○Yuko Kase[1] (1.GSJ, AIST)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-10] Dynamic earthquake sequence simulation with a spectral method without periodic boundary condition

○Hiroyuki Noda[1] (1.Kyoto University, Disaster Prevension Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Kazuki Ohtake[1,2], Nobuki Kame[2], Makiko Ohtani[2] (1.Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo , 2.Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-12] Modelling of spontaneous and periodic slow slips and a tsunami earthquake in the northern part of the Japan Trench

○Ryoko Nakata[1], Naoki Uchida[1], Ryota Hino[1] (1.Graduate School of Science, Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-13] Numerical model of slow slip events in the Nankai and Hyuganada region revisited from recent observational studies

○Takanori Matsuzawa[1], Bunichiro Shibazaki[2] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Building Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-14] Examination of constitutive relation for the fault zone along the plate boundary in subduction zone

○Takane Hori[1] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Shinichi Oba[1], YUTA Mitsui[2] (1.Grasuate School of Science and Tecnology, Shizuoka University, 2.Faculty of Science, Shizuoka University)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S14. Earthquake prediction and forecast

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S14P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S14P-01] Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

○Hironobu Kamikubo[1] (1.Hamamatsu Hokusei Jhs)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S14P-02] On the upheaval of Muroto during the Nankai earthquake and the time- predictable model

○yasuhiro umeda[1] (1.previous DPRI Kyoto univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S14P-03] The possibility to argument about the existance of "Repeating Tremor" by the log from Twitter(2020)

○Michiko Imazu[1] (1.jisin-kurumiru)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S16P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-01] Estimation of Subsurface Soil Depth Affecting Spatial Variation of Ground Motion between Adjacent Points

○Ryoichi Tokumitsu[1], Yu Yamamoto[1], Yasuo Uchiyama[1], Susumu Ohno[2] (1.Taisei Corp., 2.Tohoku Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-02] Overview of ground motions on the islands of Kagoshima, Japan -Using seismograph data of Kagoshima Prefecture-

○Nobuyuki Yamada[1], Kimiyuki Asano[2], Tomotaka Iwata[2] (1.Kochi University, 2.DPRI Kyoto University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-03] Long-period ground motion simulation in the Kanto region: effects of 3D CMT solutions

○Shunsuke Takemura[1], Kazuo Yoshimoto[2], Katsuhiko Shiomi[3] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Yokohama City University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-04] Influence of Seismic Source Locations of Interplate Earthquake along the Nankai Trough on Long-Period Ground Motions in Osaka Bay Area

○Tomohiro Oguchi[1], Masayuki Nagano[2] (1.Tokyo University of Science Graduate School , 2.Tokyo University of Science)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-05] Microtremor Array Surveys in and around the Lowland Area along the Kizu River, Kyoto

○Kimiyuki Asano[1], Masayuki Yoshimi[2], Tomotaka Iwata[1], Hirotoshi Uebayashi[3], Michihiro Ohori[4], Haruko Sekiguchi[1], Hiro Nimiya[2], Tatsuya Noguchi[5] (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSJ/AIST, 3.Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 4.Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, 5.Faculty of Engineering, Tottori University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-06] Microtremor array surveys on the Eastern Part of the Nara Basin, Japan

○Masayuki YOSHIMI[1], Kimiyuki ASANO[2], Tomotaka IWATA[2], Hiro NIMIYA[1], Takeshi SUGIYAMA (1.Geological Survey of Japan/AIST, 2.DPRI, Kyoto university)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Isamu Nishimura[1], Tatsuya Noguchi[2], Yusuke Ono[2], Masanori Kohno[2] (1.Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2.Tottori Univercity, Department of engineering)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-08] S wave seismic reflection and microtremor surveys on the Shikano fault appeared in the 1943 Tottori earthquake

○Takao Kagawa[1], Tatsuya Noguchi[1], Koji Yamada[2], Tetsuya Takameoto[2] (1.Faculty of Engineering, Tottori University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-09] Estimation of gravity basement structure in the central Tottori, Japan

○Tatsuya Noguchi[1], Isamu Nishimura[1], Takao Kagawa[1] (1.Tottori University)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S17. Tsunami

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S17P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-01] Tsunami heights along the Sea of Japan coast from active faults off-Hokkaido and off-Tohoku

○Kenji Satake[1], Iyan Mulia[1], Tomoko Goto[1], Satoko Murotani[2], Takeo Ishibe[3] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Museum of Nature and Science, 3.Association for the Development of Earthquake Prediction)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-02] Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for the Sea of Japan

○Iyan Mulia[1], Takeo Ishibe[2], Kenji Satake[1], Aditya Gusman[3], Satoko Murotani[4] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction, 3.GNS Science, 4.National Museum of Nature and Science)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-03] Consideration of tsunami source of the AD1662 Hyuga-nada earthquake occurred off Miyazaki Prefecture

○Kei Ioki[1], Yusuke Yamashita[2], Yoshihiro Kase[3] (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Miyazaki Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Takuya Saito[1], Toru Takeda[1], Kei Yamashita[2], Toshitaka Baba[1] (1.Tokushima University, 2.Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-05] Characteristics of the 1854 Tokai and Nankai Tsunamis Observed at West Coast of North America

○Satoshi Kusumoto[1], Kentaro Imai[1], Ryoko Obayashi[1], Narumi Takahashi[1,2], Takane Hori[1] (1.JAMSTEC, 2.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-06] Kinematic behavior of fault segments near the trench based on tsunami inversion source models of the 2011 Tohoku earthquake

○Yoshinori Satou[1], Masanobu Koba[2], Masafumi Matsuyama[3], Hayato Mori[4] (1.Unic, 2.EGC, 3.CRIEPI, 4.CEPCO)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-07] Sensitivity of tsunami height distribution to fault model parameters based on the 2016 off Fukushima earthquake

○Yutaka HAYASHI[1] (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-08] Quantitative evaluation of conventional magnitudes for the slow tsunami earthquakes in case of occurrence near Japan

○Takahito Nishimiya[1], Akio Katsumata[1] (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Ayumu Mizutani[1], Kiyoshi Yomogida[1] (1.Hokkaido Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-10] Real-time tsunami inundation forecast based on the multi-index method examined considering several source models

○Wataru Suzuki[1], Naotaka Chikasada[1], Takayuki Miyoshi[1], Shin Aoi[1] (1.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[1] (1.Tokushima University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-12] Real-time forecast of near-field tsunami decay based on linear regression to tide-gauge data

○Hiroaki TSUSHIMA[1] (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S18. Education and history of seismology

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S18P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S18P-01] Digital Archiving of Bromide Paper Records of Ground Tilt Observed in Kii Peninsula, Japan

○Yasuyuki Kano[1,2] (1.ERI, UTokyo, 2.CRO for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S18P-02] Activity of Children’s Summer School on Earthquake and Volcanoes in TANGO and future prospects

○Tomoya Hiiro[1], Yasuyuki Kano[2], Satoko Murotani[3], Specified Nonprofit Corporation Earth design school, Committee for Children’s Summer School on Earthquake, Volcanoes and Geology (1.Promotion Committee, 2.University of Tokyo , 3.National Museum of Nature and Science,Tokyo)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S19. Seismology, general contribution

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S19P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-01] Estimation of the fall path of the fireball fell on July 2, 2020

○Shutaro Sekine[1], Naoshi Hirata[2] (1.Association for the Development Earthquake Prediction, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Poster session (Oct. 31th) | Special session：S22. Geodyanamics of the Ryukyu arc

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S22P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-01] Complementary distribution of very low-frequency earthquakes and the interplate-coupled area in the southwestern Ryukyu Trench

○Ren Yakabu[1], Mamoru Nakamura[1] (1.University of The Ryukyus)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-02] Distribution of very low-frequency earthquakes in the Miyako Strait, central Ryukyu Trench

○Hiromu Furugen[1], Mamoru Nakamura[2] (1.Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 2.Faculty of Science, University of the Ryukyu)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-03] Spatial and temporal distribution of very low-frequency earthquakes activity in the central Ryukyu Trench using ocean-bottom seismometers

○Mamoru Nakamura[1], Shuichi Kodaira[2], Yasushi Ishihara[2], Ban-Yuan Kuo[3], Ching-Ren Lin[3], Pei-Ying Patty Lin[4] (1.Faculty of Science, University of the Ryukyus, 2.JAMSTEC, 3.Academia Sinica, 4.National Taiwan Normal University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-04] Shallow low-frequency tremor activity off Kikai Island, northern Ryukyu Trench subduction zone

○Yusuke Yamashita[1], Yukihiro Nakatani[2], Hiroshi Yakiwara[2], Shuichiro Hirano[2], Shigeru Nakao[2], Hiroki Miyamachi[3], Reiji Kobayashi[3], Hiroshi Shimizu[4], Takeshi Matsushima[4], Kazunari Uchida[4], Kazuo Nakahigashi[5], Hideji Abe[7], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[7] (1.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 2.NOEV, Kagoshima Univ., 3.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, Univ. of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-05] Migration of shallow low frequency tremors in the central Ryukyu arc

○Tsutomu Takahashi[1], Yasushi Ishihara[1], Yojiro Yamamoto[1], Aki Ito[1], Ryuta Arai[1], Ayako Nakanishi[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Yoshiyuki Kaneda[2] (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-06] CMT solutions of earthquakes around Okinawa island from strong-motion records by using a land-ocean unified 3D structure model

○Masanao Komatsu[1], Hirofumi Kowari[2], Tomotsugu Watanabe[1], Taro Okamoto[3], Takeshi Nakamura[4], Hiroshi Takenaka[1] (1.Okayama University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd., 3.Tokyo Institute of Technology, 4.Central Research Institute of Electric Power Industry)

Poster session (Oct. 31th) | Introduction of committee activities：S25.Committee activities for society

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S25P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-01] Public Relations Committee

*Public Relations Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-02] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-03] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-04] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-05] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-06] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-07] Geopark Assistance Committee

*Geopark Assistance Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-08] Kanamori Fund

*Kanamori Fund[1] (1. The Seismological Society of Japan)

Room A | Special session：S24. Pioneering the future of seismology with machine learning

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 10:15 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 12:00 AM - 1:15 AM UTC | ROOM A

[S24]AM-1

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

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

[S24-01] Regional characteristic of seismic activity inferred from unsupervised machine learning of F-net moment-tensor catalog

○Hisahiko Kubo[1], Takeshi Kimura[1], Katsuhiko Shiomi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S24-02] Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity

Ryota Otake[1,2], Jun Kurima[2], ○Hiroyuki Goto[2], Sumio Sawada[2] (1.OC Global, 2.Kyoto University)

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

[S24-03] False alarm and its measure on the earthquake early warning for the off-Torishima earthquake on July 30, 2020

○Masumi Yamada[1] (1.DPRI Kyoto Univ.)

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

[S24-04] Attempt to detect tectonic tremors in Sanriku-oki by applying a Convolutional Neural Network to S-net data

○Keisuke Yano[1], Hidenobu Takahashi[2], Kazuya Tateiwa[2], Masayuki Kano[2] (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

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

[S24-05] Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter around Hakone with theoretical seismograms of time series as training data.

○Daisuke Sugiyama[1], Seiji Tsuboi[1], Yukutake Yohei[2] (1.JAMSTEC, 2.Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government)

Regional characteristic of seismic activity inferred from unsupervised machine learning of F-net moment-tensor catalog

*Hisahiko Kubo[1], Takeshi Kimura[1], Katsuhiko Shiomi[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

〇はじめに
本研究では、防災科研F-netのモーメントテンソル解カタログを、次元削減による構造抽出やクラスタリングなどの教師なし機械学習で解析することで、地震活動の地域特性を調べる。

〇データセット
防災科研は、日本周辺で発生する地震を対象として、広帯域地震観測網F-netの地震動記録を用いたモーメントテンソル解析を1997年からルーティン的に行っており、そのカタログをWeb上で公開している。ここではF-netの観測体制がほぼ同一である2003年から2019年までの期間に発生し、モーメントマグニチュードが4以上である、計15810の地震のモーメントテンソル解を用いた。
F-netによるモーメントテンソル解は、緯度・経度・深さ・モーメントテンソル6成分の情報を持つ。このモーメントテンソル6成分をダブルカップルとCLVDに分解し、それぞれに関する情報をデータセットに登録した。ダブルカップルの情報としては、P軸のazimuthとplungeおよびT軸のazimuthとplungeを登録するとともに、P軸・T軸の単位ベクトルも登録した。さらに断層タイプに関する情報として、P軸・T軸の情報から、Kavernia et al. (1996)・Kagan (2005)によるsource-mechanismダイアグラムのxとyも登録した。xが大きいと逆断層成分が、xが小さいと正断層成分が卓越していることを意味する。またyが大きいと横ずれ成分が卓越していることを意味する。CLVDの情報としては、Aso et al. (2016)のsource-typeダイアグラムの定式化（j）によるダブルカップルとCLVDの比を登録した。

〇次元削減による構造抽出
ここでは上記データセットのうち緯度・経度・深さ・source-mechanismダイアグラムのxとyの計5成分の情報を、カーネル主成分分析によって3次元に削減し、データセット内の構造抽出を試みた結果を紹介する。地震のメカニズム解の空間分布は非線形要素が強いため、主成分分析などの線形な次元削減手法ではなく、非線形な次元削減手法であるカーネル主成分分析を用いた。カーネル主成分分析はカーネル法を用いて非線形変換を行うことができ、より柔軟な解析をすることが可能である。カーネルにはガウシアンカーネル Radius Basis Functionを用いた。なお日本周辺で発生する地震の空間分布はもともと北東-南西の方向に広がっており、緯度と経度の情報には強い相関がある。そのため、まず緯度と経度に対して主成分解析による軸変換を行った上で、次元削減を行った。また次元削減前に各成分の正規化を施した。
解析の結果、カーネル主成分分析で得られる三つの主成分と地域ごとの特徴的な地震活動が対応することが分かった。第一主成分が大きい地震グループは、西日本・南西諸島・台湾にかけた地域の内陸および海域で起きている浅い正断層型の地震で主に構成される。第一主成分が小さい地震グループは、東日本の太平沖のプレート境界付近で発生している逆断層型の地震が多い。第二主成分が大きい地震グループは、横ずれ成分を多く含む台湾周辺の地震が多い。第二主成分が小さい地震グループは、千島海溝沿いの浅い正断層型の地震で主に構成される。第三主成分が大きい地震グループは、正断層成分を多く含む、深さ100㎞以上の深い地震で主に構成される。第三主成分が小さい地震グループは、東日本の内陸および日本海溝周辺の浅い逆断層型の地震や九州・南西諸島・台湾にかけた地域の逆断層型の地震で構成される。この結果はF-netモーメントテンソル解カタログを教師なし学習することによって、似た性質を持つ地震のグループを抽出することが可能であることを示唆する。

© 日本地震学会

Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity

Ryota Otake[1,2], Jun Kurima[2], *Hiroyuki Goto[2], Sumio Sawada[2]

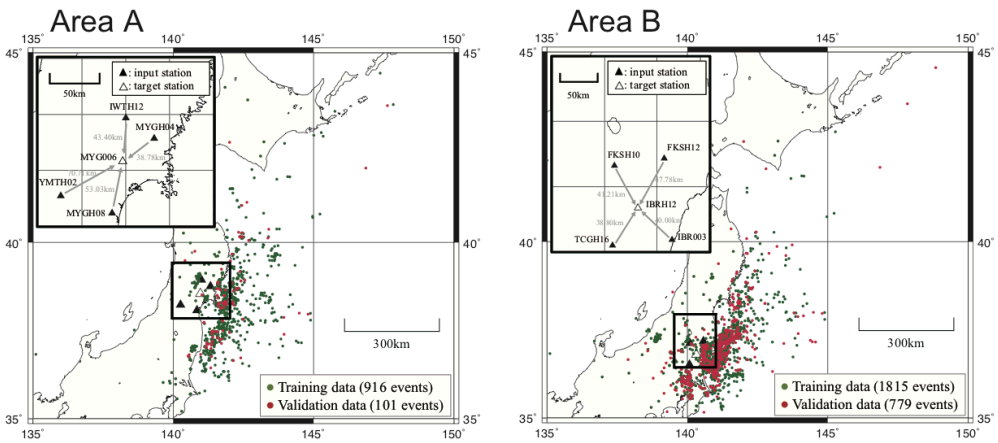
1. OC Global, 2. Kyoto University

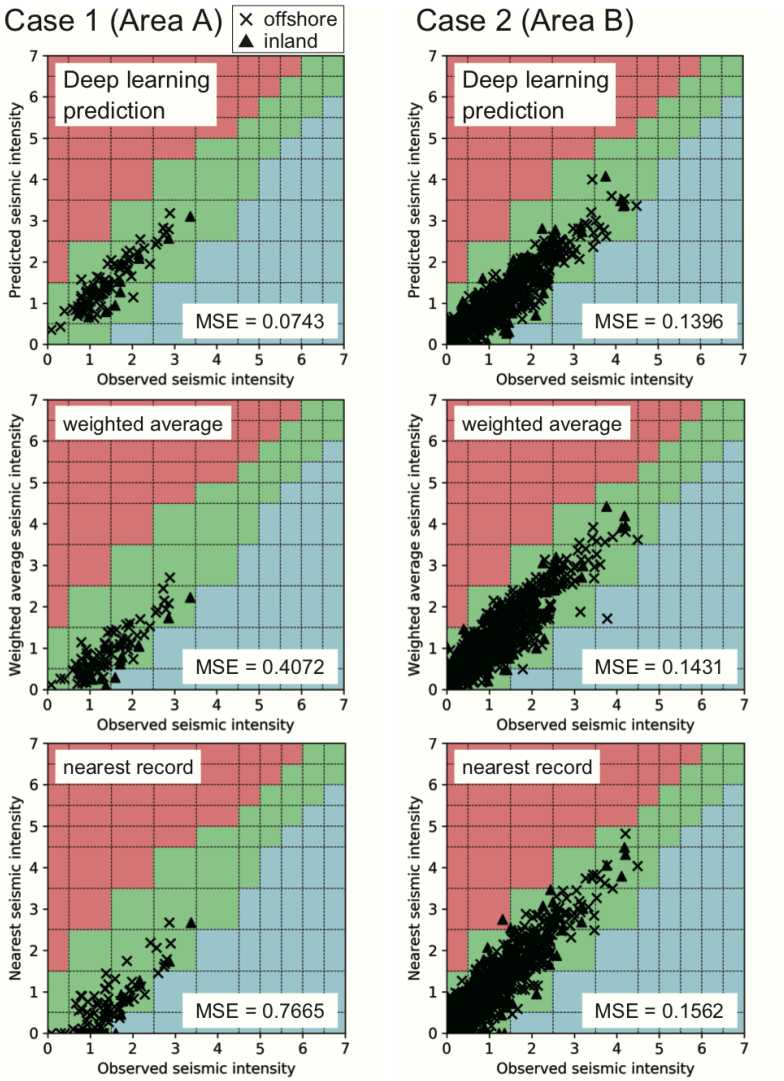
地震直後，あるいは発生後即時に震度の空間分布を把握することは，緊急対応において非常に重要である．本研究は，機械学習の一種である深層学習を利用して，ある地点における震度を周辺の地震記録から予測することを試みた．周辺と対象地点におけるリアルタイム震度をそれぞれ入力データ・出力データとし，ここでは地盤情報等は考慮しない．この問題設定は，ある地域に地震計を一定期間敷設して記録を収集し，観測終了後に周辺にある常設観測点から震度を予測する方法を想定しているが，即時予測が可能であれば緊急地震速報への応用も期待できる．

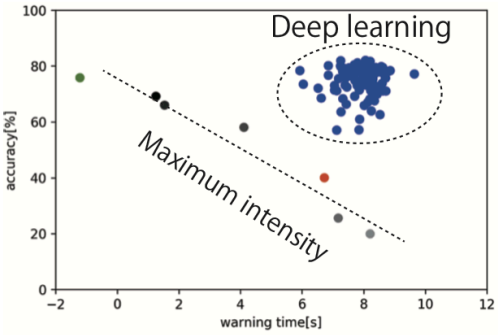
深層学習モデルは，因果関係を持つ系列データに高い有効性を持つLong Short-Term Memoryを用いて構成した．対象地点としてK-NET MYG006（Area A），KiK-net IBRH12（Area B）をそれぞれ選定し，周辺にあるK-NET/KiK-net 4観測点のリアルタイム震度を入力データに，対象地点のリアルタイム震度を出力データとしてモデルを訓練させた．なお，利用できる記録のうち70%を訓練データに，残り30%を検証データに用いている．Area A，Area Bそれぞれに対して得られた深層学習モデル（case 1，case 2）は，距離加重平均値（weighted average）や最近傍観測点の値を採用した場合（nearest record）に比べて，二乗誤差（MSE）の意味で精度が高い．地震記録を直接学習させているため，地盤増幅（サイト特性）の影響を自然に取り込めていると考えられる．

また，Area Bを対象に緊急地震速報を想定した深層学習（case 3）を試みた．訓練データとして与える出力データをステップ関数とし，リアルタイム震度の最大値をステップ値に，周辺でのリアルタイム震度値が0を超えた時刻をステップ時刻とする．これにより，周辺で有意な震動が検出された場合に対象地点の震度を予測するという問題設定となる．深層学習による推定精度は，case 2の距離加重平均値より低いがこれは即時予測という問題設定の難しさに起因するものと考えられる．猶予時間（warning time）と精度とのトレードオフで見れば，深層学習は地盤増幅や距離減衰といった地震動の性質を自然に取り込めるため，周辺で計測された最大震度値を採用する方法より精度が高いことがわかった．

© 日本地震学会


Area A
▲: input station
△: target station
50km
IWTH12
MYGH04
MYG006
YMTH02
MYGH08
300km
Training data (916 events)
Validation data (101 events)
Area B
FKSH10
FKSH12
IBRH12
TCGH16
IBR003
Training data (1815 events)
Validation data (779 events)


Case 1 (Area A)
× offshore
▲ inland
Case 2 (Area B)
Case 3 (Area B - EEW)
Deep learning prediction
MSE = 0.0743
MSE = 0.1396
MSE = 0.1623
Predicted seismic intensity
weighted average
MSE = 0.4072
MSE = 0.1431
Weighted average seismic intensity
nearest record
MSE = 0.7665
MSE = 0.1562
Nearest seismic intensity
Observed seismic intensity


Deep learning
Maximum intensity
accuracy[%]
warning time[s]

False alarm and its measure on the earthquake early warning for the off-Torishima earthquake on July 30, 2020

*Masumi Yamada[1]

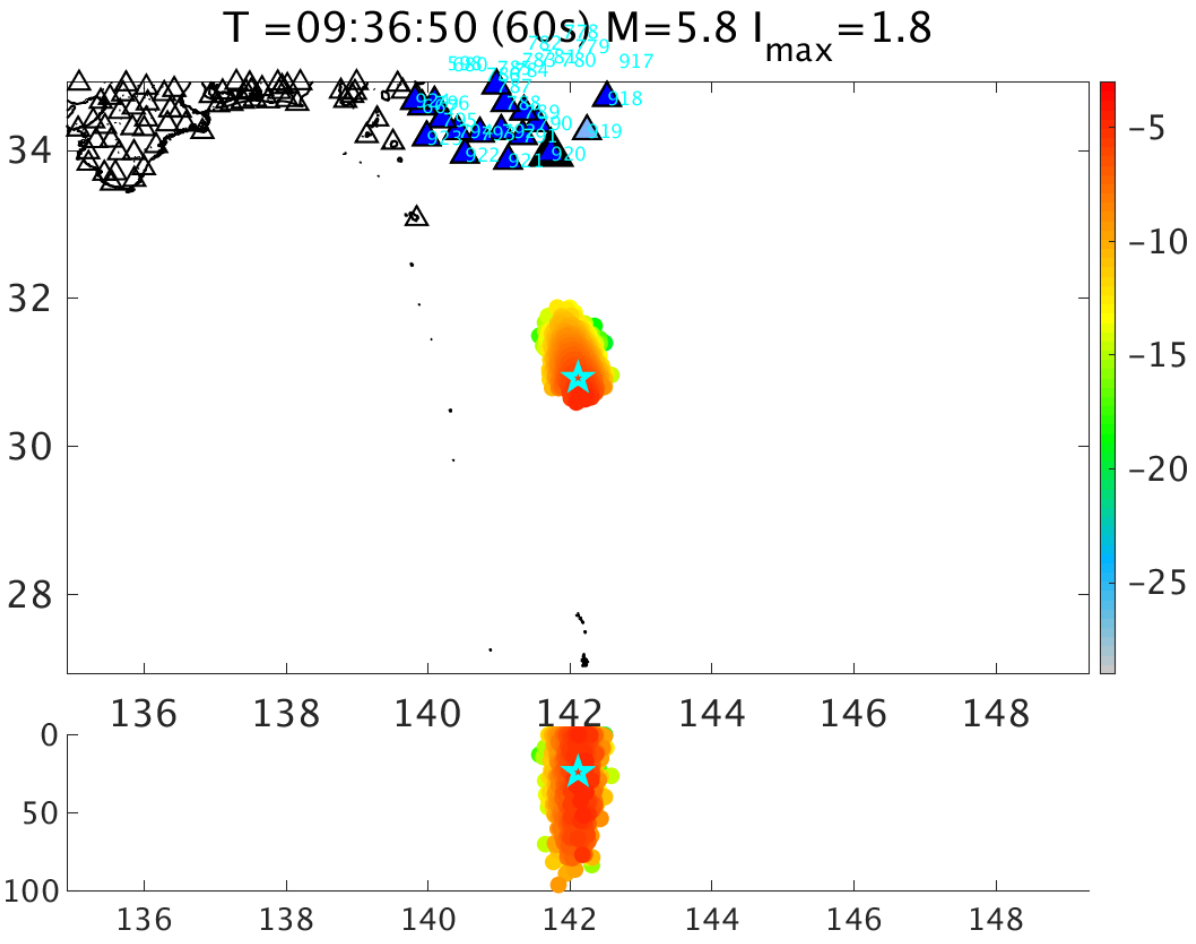
1. DPRI Kyoto Univ.

2020年7月30日に鳥島近海で発生した地震では、震度5弱以上を予測して一般向けに緊急地震速報が発表された。しかしながら、 実際には震度1を観測した地点はなく、結果的に過大な警報となった。緊急地震速報が発表された原因として、(1) 地震の場所を誤って予測し、実際の震源より400㎞以上北側に決めてしまったこと (2)誤った震源により、マグニチュードを過大評価してしまったこと、が挙げられる。

現在の緊急地震速報では、震源決定手法として、IPF法（気象庁の地震観測網+S-net）、着未着法（Hi-net観測網）、EPOSによる自動震源決定法（気象庁の地震観測網+Hi-net）と3つの手法を利用している。鳥島沖の地震では、島嶼部で観測点の数が少なかったため震源決定精度が悪く、実際の震源より400㎞以上北側に決めてしまった。これが第一の問題点である。

2つ目の問題点はマグニチュードの過大評価である。たとえ震源位置が誤っていたとしても、震源近傍の観測点を利用してマグニチュードを計算していれば、振幅が小さいため地震のマグニチュードは小さく予測されるはずである。しかしながら、マグニチュードの決定には予測震源から800㎞以上離れた小笠原諸島の母島観測点で観測されたデータを用いていた。マグニチュードの計算には閾値があり、振幅の小さい観測点(＜50μm)はマグニチュード推定に利用されない。また、2018年1月5日の茨城県沖の地震の誤報の後の改修により、理論P波到着時刻よりも前の振幅は、マグニチュード推定に利用されなくなった。おそらくこれらの制約条件によって、マグニチュードの計算に利用できたのは母島観測点のみとなり、その振幅値を利用したために、過大なマグニチュードを予測する結果となった。なお、気象庁では9月上旬より、マグニチュードの算出には震源からの距離が700km以下のものを使用する予定である。
島嶼部での震源決定精度を上げるための改善策は、観測点の密度を増やすことである。現在、気象庁の地震観測網、Hi-net、S-netのデータは上述のように別々の手法によって計算されている。しかしながら、これらのデータを統合して同じ手法で利用する事ができれば、新たな観測網を設置することなく、既存の観測網を利用して観測点密度を増やすことが可能である。本研究では、全国地震観測データ流通ネットワークを利用して、防災科学技術研究所のHi-netとS-netのデータを統合して解析した。解析には、パーティクルフィルタを利用して統合的にデータを処理するIPF法の改良版を使用している。この計算は、10秒程度のバッファを設けているが、オンラインで逐次計算されている。その結果、震源の誤差は30km程度とほぼ正確に震源決定することができ、予想されるマグニチュードも5.8と正しく推定できることが分かった。発表では詳細な解析結果について報告する。

© 日本地震学会


T =09:36:50 (60s) M=5.8 I max =1.8
34
32
30
28
136
138
140
142
144
146
148
0
50
100
-5
-10
-15
-20
-25

© 日本地震学会

Attempt to detect tectonic tremors in Sanriku-oki by applying a Convolutional Neural Network to S-net data

*Keisuke Yano[1], Hidenobu Takahashi[2], Kazuya Tateiwa[2], Masayuki Kano[2]

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University

近年，世界各地の沈み込み帯を中心に，スロー地震と呼ばれる，通常地震に比べてゆっくりとした断層の滑り現象が観測されるようになった(Obara & Kato, 2016)．低周波微動はスロー地震の一形態と考えられており，南海トラフやカスケディア，日本海溝では想定巨大地震震源域の深部や浅部で観測されている．微動は海溝型巨大地震同様，プレート境界面上の断層の滑り現象である可能性が高く，その時空間的活動の把握は巨大地震震源近傍のプレート境界面の断層のすべりを捉えるという観点から重要である．

微動検出の際，観測点間の波形のエンベロープの類似性に着目したイベント検出・震源決定手法であるエンベロープ相関法（e.g., Obara, 2002）がよく使用される．しかし，その原理として微動のみならず，通常地震も検出してしまう．この問題に対し，Nakano et al. (2018)は，畳み込みニューラルネット(CNN)を利用した通常地震・微動・ノイズの判別器を作成し，南海トラフ沿いの海域に設置されている地震・津波観測監視システム(DONET)の観測記録に対してその有効性を示した．Nakano et al. (2018)のCNNの特徴として、CNNの入力データにランニングスペクトルを利用している．ランニングスペクトルは，観測波形そのものと比較して，イベントの継続時間や震源の物理的な性質を示す周波数成分を顕著にするため，通常地震と微動の判別に適していると考えられる．

一方，近年敷設された日本海溝海底地震津波観測網（S-net）により，日本海溝における低周波微動の存在が明らかになった（Nishikawa et al., 2019）．微動検出にはエンベロープ相関法を用い，継続時間により微動と通常地震の区別をしている．S-net はDONETに比べて観測点数が多く日本海溝全域に渡って配置されており，三陸沖のみならず，襟裳沖，宮城沖，そして茨城沖など広域で発生する地震や低周波微動の検出，モニタリングが期待される．

本研究では，S-netを用いた日本海溝で発生する通常地震・微動・ノイズのリアルタイム波形分類を最終目標として据え，手始めに1観測点を対象とした波形のランニングスペクトルを入力データとするCNNに基づく通常地震，微動，ノイズの判別器を作成した．対象の観測点として微動が時空間的に続発する領域の一つである，三陸沖の観測点を使用した．この観測点で捉えられた微動，通常地震，ノイズの典型例を図1に示す．ノイズ波形では，時間窓全体でおおよそ均質にパワーが分布している．微動と通常地震では，S波到着時に最も強いシグナルが観測される．通常地震ではS波到着後もコーダ波などの観測シグナルは続くが，微動では通常地震に比べてシグナルは小さく，S波到着後ただちにノイズレベルに収束する．CNNの教師データとして，通常地震については気象庁一元化カタログに記載されている通常地震のうち震央が観測点近傍120kmにあるものを，微動についてはNishikawa et al. (2019)による微動カタログに記載されている微動のうち震央が観測点近傍120kmにあるものを利用した．観測期間は，通常地震と微動のカタログの期間が重複する2016年8月15日から2018年8月15日の2年間とした．2017年12月3日までのイベントを学習用に，以降のイベントを検証用に利用した．微動，通常地震共にS/Nの良いイベントを教師データとして学習させることを目的に，イベントを含む時間窓でのPower spectral density (PSD) のレンジが大きい上位1/4のデータを教師データとして用いた．この操作により学習に利用した通常地震・微動・ノイズの個数はそれぞれ633個,1593個,1407個となった．

CNNの構成はNakano et al. (2018)を参考にした．ただし，DONETとS-netで観測されるイベント波形の違いを考慮して，以下のような変更を行った．周波数領域の信号のパワーの大小関係ではなく，形状の違いを特徴量として抽出することを狙い，入力をPSDの最大値で規格化した．PSDが周波数方向に必ずしも細かく変化し

© 日本地震学会

ないため，周波数方向に対するプーリングを導入した．時間窓長に関して，時間分解能の向上を期待して，Nakano et al. (2018)で用いられた240秒より短い120秒の時間窓を用いた．
学習の結果、通常地震・微動・ノイズに関してそれぞれ100%,94.5%,100%の精度で分類を行うことに成功した(図2)．また，CNNの判別確率と震央距離とマグニチュードの関係を調べた結果，微動に関しては震央距離が近いほど判別確率が高くなり，通常地震に関してはMwが大きいほど，震央距離が近いほど判別確率が高くなる傾向を示した．最後に連続記録に対して適用した結果，微動全体が入力時間窓に入ると微動の判別確率が上がり，窓から外れると下がることを確認した(図3)．
謝辞：防災科学技術研究所より公開されているS-netの波形データを使用しました．

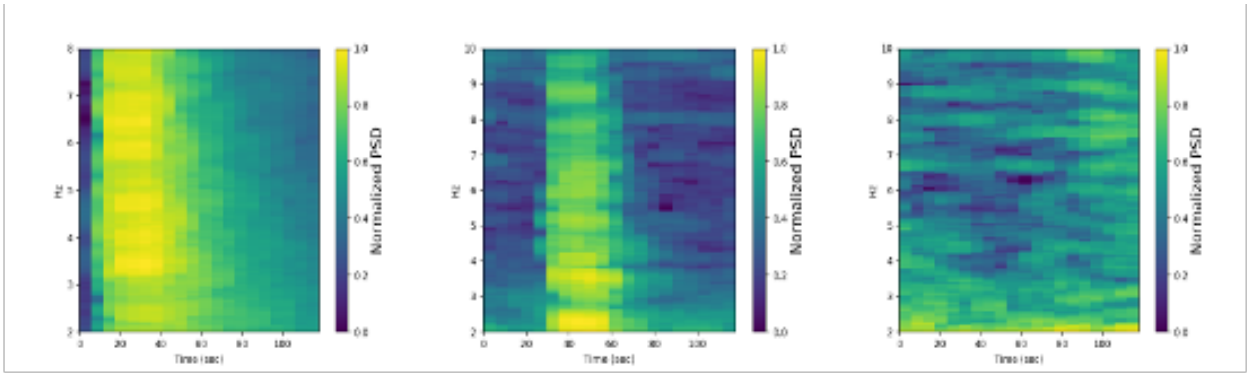


図1：規格化したPSDの例．左から順に，通常地震・微動・ノイズ．

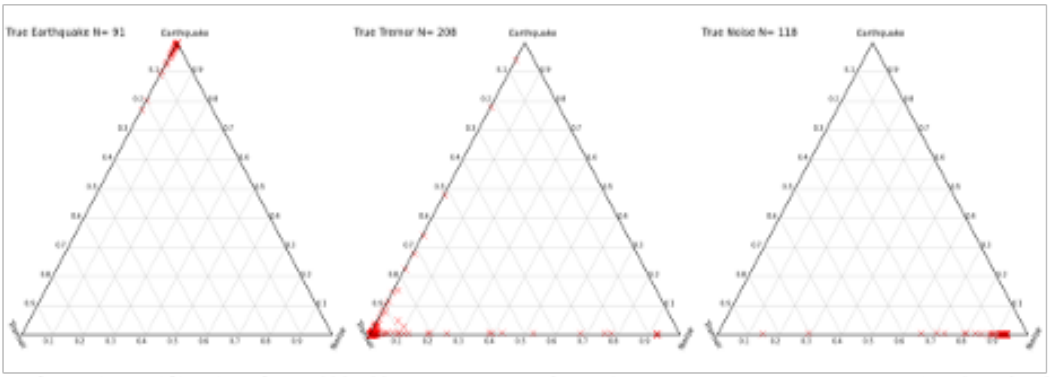


図2：正解が通常地震・微動・ノイズであるときのCNNの出力確率．

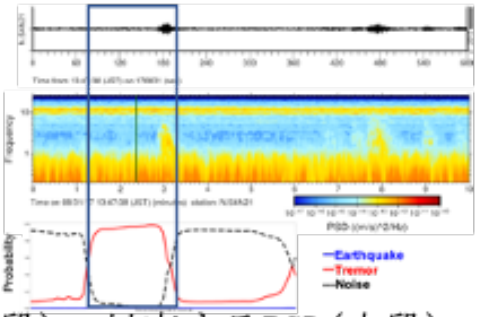


図3：連続波形(上段)，対応するPSD(中段)，CNNの出力確率(下段)．

© 日本地震学会

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

*Daisuke Sugiyama[1], Seiji Tsuboi[1], Yukutake Yohei[2]

1. JAMSTEC, 2. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government

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

我々はこのニューラルネットワークによる震源パラメータ推定を、神奈川県温泉地学研究所が保有する箱根火山地域の地震観測網（図１）に適用することを目的とし、様々な学習の試みを行った。

一般に、畳込み層を有する深層学習モデルは画像や映像など高次元データの学習に優れる特徴がある。本研究では、この深層学習での画像や映像の学習における技術を活用する方針を取った。通常の波形データとしてではなく、地震波形の各観測点での空間的広がり方を画像と考え、さらに地震波形の震源からの広がりの状況、震源近くの細かな振動など時間発展のパターンを映像として捉え、教師データの作成を行った。また我々は、このような映像的な高次元データに、地震学の知識を取りいれる試みも行った。LTA/STAの計算を行い両者の差を画像や映像とする、速度を対数スケールとする、速度のZ成分とNE成分の絶対値の差を計算するなど、地震学における特徴抽出手法を高次元データへ持ち込み応用し、教師データとした。

作成した教師データは、3次元データ及び映像の学習に特化した3次元畳込みニューラルネットワーク（3DCNN）をベースとしたモデル用いて学習を行い、実際の観測データの推定を行うことができる推論モデルを得る。ある時間範囲の理論地震波形記録の観測点における速度分布は、図２のような3次元データとして変換処理され、学習が行われる。なお、理論地震波形記録生成については、前回と同様にスペクトル要素法のSPECFEM3Dを用いている。箱根火山地域に対して用いた地下構造モデルはYukutake et al (2015)で、2304コアを用いた。理論地震波形の精度は周期5.6秒である。震源深さや位置など震源パラメータを変化させた1998個の仮想地震に対して約30秒間の理論地震波形を計算し、約60万枚の地震波伝播画像を生成した。

これを用い、32x32の空間伝搬データの6秒程度の時間発展パターンを3次元形状データとして生成し、教師データとした。もちろん、この3次元形状データは実際の地震波形観測データからも同様に自動的に生成が可能であり、自動的な震源パラメータの推定も可能である。また、先に述べた特徴抽出計算を行ったデータも同様の３次元形状データとして変換し教師データとする。

このように生成した教師データを基に、先に述べた3DCNNを用いた深層学習を行った。3層の3D畳込み層を用い、各震源パラメータを推定する推論モデルを機械学習により生成した。深層学習フレームワークはTensorFlow (https://github.com/tensorflow)を用いた。教師データの生成および機械学習は海洋研究開発機構・地球情報基盤センターが運用する計算機システムのGPGPUノードを利用して行い、ニューラルネットワークから推論モデルを構築した。

© 日本地震学会

学習は1998個の地震が混ざらないように8:2に分割し、80%を学習に用い、学習に使用しない残り20%の地震を用いて交差検証を行ったところ、概ね良好な結果が得られた。最終的に完成した推論モデルの詳しい推定結果や他手法との比較、および実際の観測データに適用した場合の推定結果について発表の際に述べる。

謝辞

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

© 日本地震学会

図１　箱根火山地域の観測点分布図

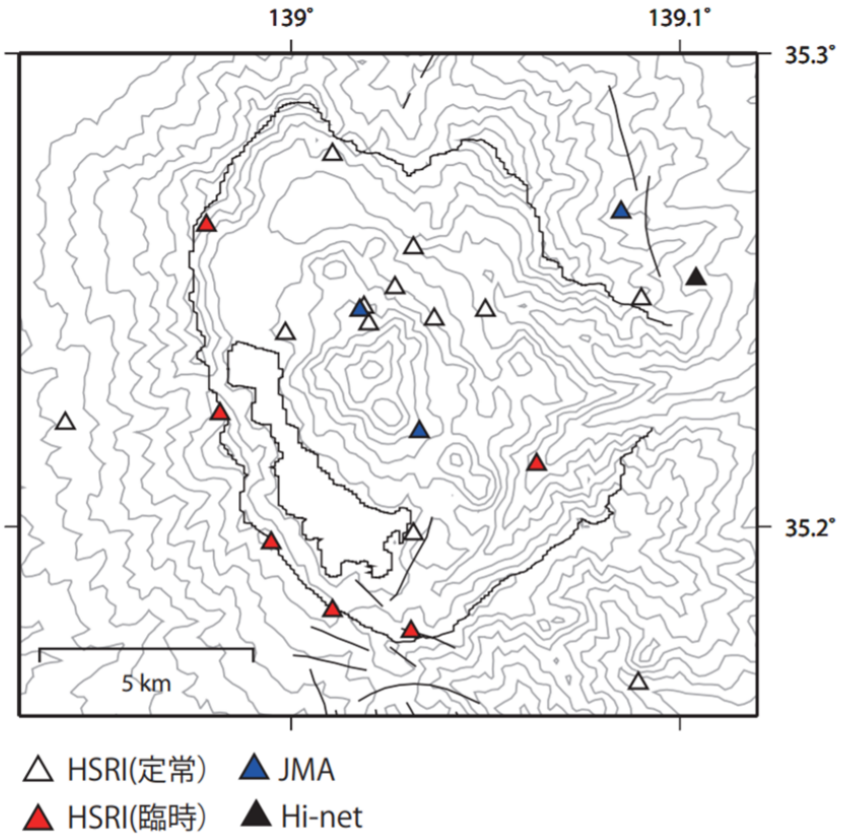
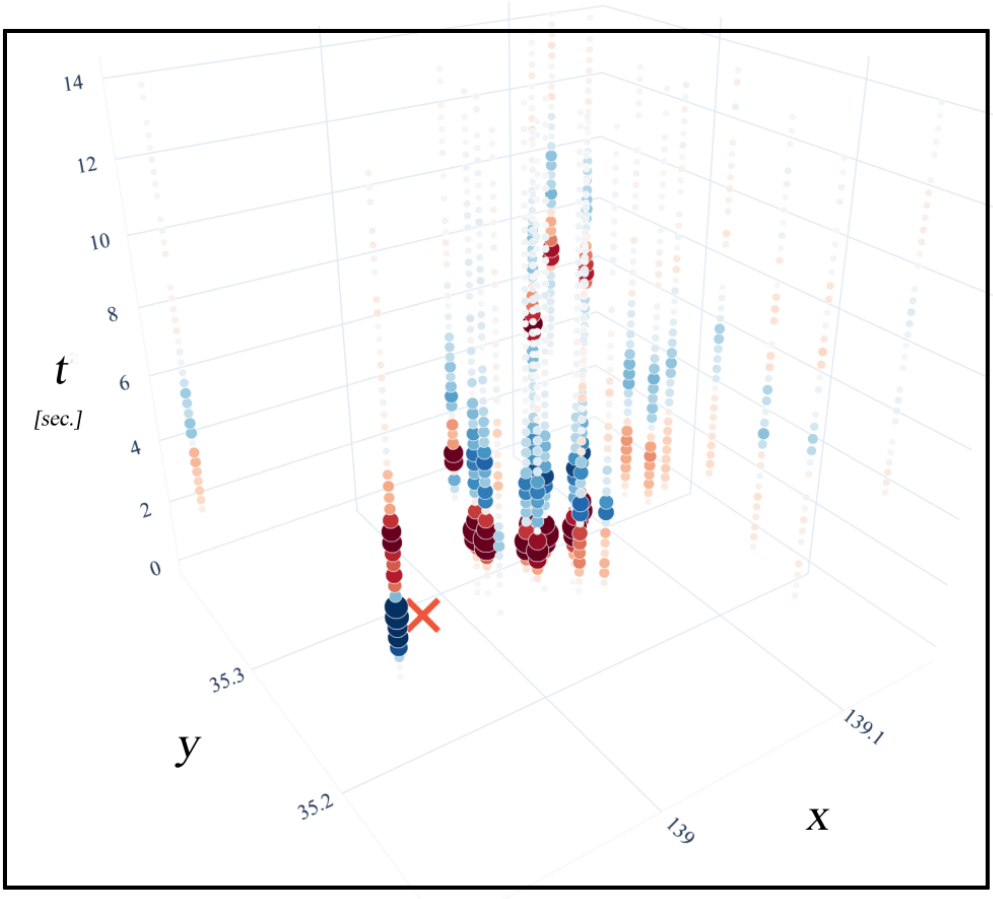


図２　地震波動伝播の3次元構造データ



© 日本地震学会

Room A | Regular session：S17. Tsunami

Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 11:45 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 1:30 AM - 2:45 AM UTC | ROOM A

[S17]AM-2

chairperson:Tatsuhiko Saito(NIED), chairperson:Ayumu Mizutani(Hokkaido University)

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

[S17-01] Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance

○Akio Katsumata[1], Masayuki Tanaka[1], Takahito Nishimiya[1] (1.Meteorological Research Institute, JMA)

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

[S17-02] Tsunami Data Assimilation of S-net Pressure Gauge Records

○Yuchen Wang[1], Kenji Satake[1] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S17-03] Frequency characteristics of bottom pressure recordings induced by a typhoon

○Hiroyuki Matsumoto[1], Emoto Kuniaki[1,2], Kentaro Imai[1], Narumi Takahashi[1,3] (1.JAMSTEC, 2.Wakayama Prefecture, 3.NIED)

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

[S17-04] A meteotsunami on 1 July 2020 recorded by the S-net deep ocean pressure gauge network

○Tatsuya Kubota[1], Tatsuhiko Saito[1], Naotaka Yamamoto Chikasada[1], Osamu Sandanbata[1] (1.NIED)

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

[S17-05] Tsunami generation by sea-surface pressure change: A 3-D model for open ocean observations

○Tatsuhiko Saito[1], Tatsuya Kubota[1], Naotaka Yamamoto Chikasada[1], Yusuke Tanaka[2], Osamu Sandanbata[1] (1.NIED, 2.JAMSTEC)

Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance

*Akio Katsumata[1], Masayuki Tanaka[1], Takahito Nishimiya[1]

1. Meteorological Research Institute, JMA

(1)はじめに
津波地震は表面波マグニチュードなどに比べて、異常に高い津波を発生させる地震である。このような比較的小さな地震波振幅の地震に伴う高い津波は破壊継続時間の長さに関連しているとされている。地震発生直後に、適切な津波予報を行うためには、その地震の規模を適切に推定する必要がある。気象庁などによる最初期の津波予報は、地震モーメントが推定される前に発表され、地震波の振幅から決まるマグニチュードに基づいている。地震波振幅に基づくマグニチュードは津波地震の場合に、規模を過小評価する可能性が高い。津波地震の規模を適正に推定するために、いくつかの手法について評価した。

(2)方法
周期200秒までの変位振幅を用いた手法(M_{D200})、積分変位の振幅を持ちた手法(カットオフ200s, M_{ID200})、長周期変位振幅を用いた手法(帯域200-400s, $M_{D200-400}$)、複数帯域振幅分布を用いた手法(M_{BA})などについて検討した。周期200秒までの変位振幅を用いた手法、積分変位の振幅を持ちた手法、長周期変位振幅を用いた手法は経験的な手法であり、日本列島周辺において発生した地震の観測振幅の対数に距離補正を加えて、モーメントマグニチュードとなるような経験式を構築した。
複数帯域振幅分布に基づく手法は、複数の帯域通過フィルターを施した記録の最大振幅の分布と理論波形の振幅分布と比較する手法である（図１）。理論波形を計算する際に震源の位置に点震源を置き、走向と傾斜角はプレート形状から仮定し、すべり角は90°を仮定した。理論波形の振幅は仮定する破壊継続時間によって大きく異なる。$10^{0.1}$倍おきの複数の破壊継続時間を仮定し、観測振幅分布と理論波形の振幅分布が最もよく合う破壊継続時間を選択した。その破壊継続時間のときの振幅から規模を推定した。

(3)結果
これらの手法を評価するため、USGSが公開している津波地震の震源過程解析結果のモデルを用いて、津波地震が三陸沖の海溝軸付近で発生したとして震源から1000kmまでの理論波形を計算し、その理論波形を模擬的な観測波形とみなして各手法によってマグニチュードを算出した。その結果を以下に示す。

	M_w	M_{D200}	M_{ID200}	$M_{D200-400}$	M_{BA}
1992 Nicaragua	7.6	6.7	6.9	7.2	7.5
1994 Java	7.8	7.5	7.5	7.2	7.6
1996 Peru	7.5	7.4	7.2	7.2	7.4
2006 Java	7.7	6.9	6.9	7.2	7.3
2010 Mentawai	7.8	7.3	7.2	7.3	7.5

結果を見ると、経験的手法では全て津波地震の規模を過小評価した。複数帯域振幅分布に基づく手法では過小評価の例もあるものの、モーメントマグニチュードに近い値が得られた。

謝辞
防災科学技術研究所及びIRISの提供する地震波形を使用した。震源過程解析結果はUSGSのサイトにて公開されているものを参照した。理論波形の計算にはTakeo(1985)のプログラムを使用した。

© 日本地震学会

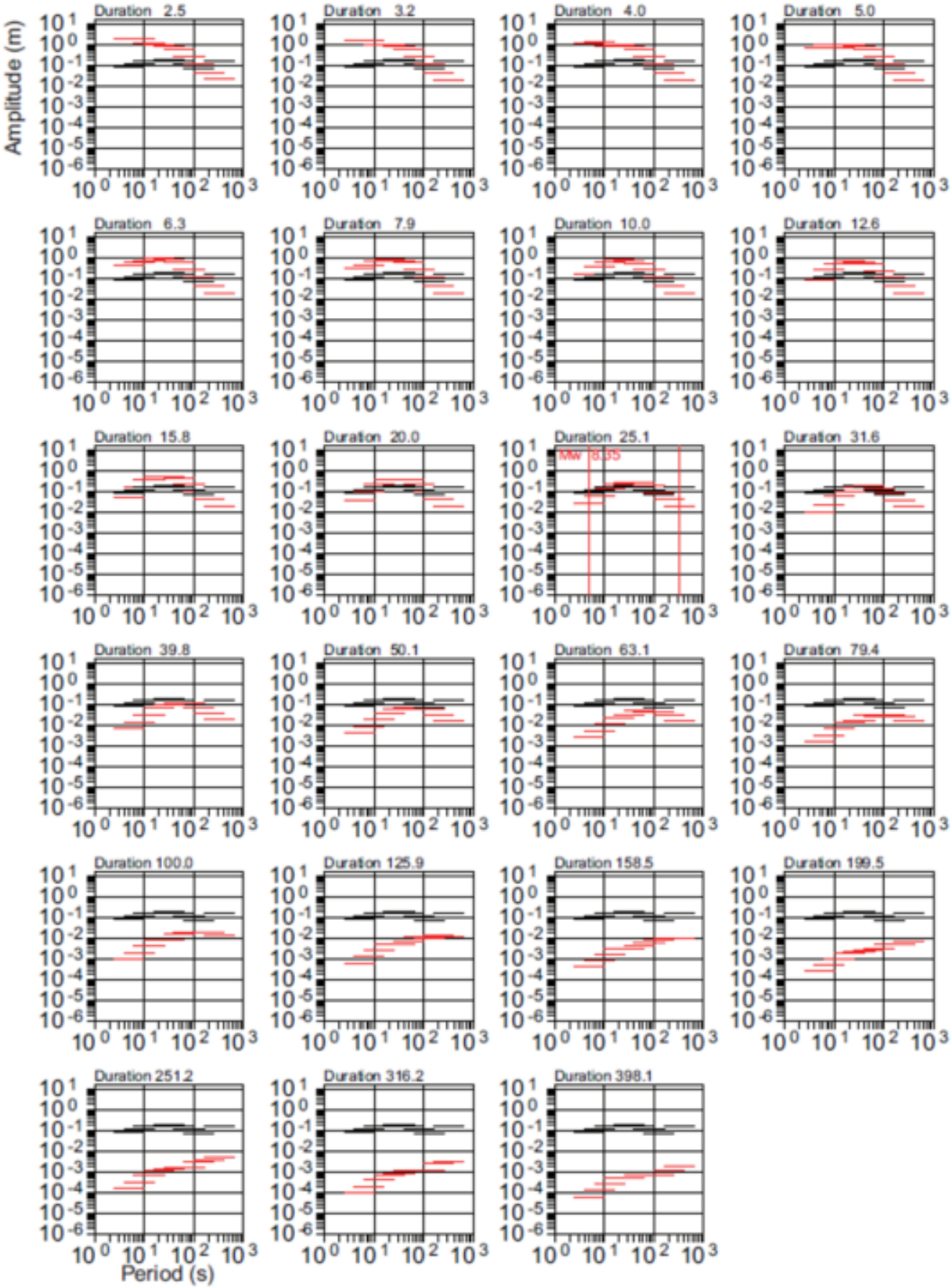


図１　複数帯域振幅分布。黒：観測、赤：理論。様々な破壊継続時間(Duration)を仮定して比較し、最適な破壊継続時間を推定している。

© 日本地震学会

Tsunami Data Assimilation of S-net Pressure Gauge Records

*Yuchen Wang[1], Kenji Satake[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The 2016 Fukushima Earthquake (M7.4) generated a moderate tsunami, which was recorded by the offshore pressure gauges of the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (S-net). The S-net has a very short distance between two neighboring stations (~30 km), and records the water pressure and transmits the data to land in real time. Hence, it enables us to forecast the tsunami by data assimilation. Tsunami data assimilation is an early warning approach based on offshore observed data. It does not need the source information (Maeda et al., 2015 *GRL*). In this study, we used the S-net pressure gauge records for data assimilation, and retroactively forecasted the tsunami waveforms at three coastal tide gauges (Ofunato, Kamaishi and Miyako) to validate our method.
We processed the S-net raw records by two methods. In the first method, we removed the tidal components by polynomial interpolation, and applied a low-pass filter. This method is widely used in retrospective studies for waveform post-processing. However, the acausal digital filters require future data to filter the past data. So this method is not applicable in real-time operation. In the second method, we used the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) real-time tsunami detection algorithm to extract the tsunami signals (Wang et al., 2020 *SRL*). EEMD decomposes the input data into several Intrinsic Mode Functions (IMFs), and separates the tsunami signals, seismic waves and tidal components automatically. The IMF2 represents the tsunami signals that are detected in real time. Then, the processed waveforms at 28 S-net pressure gauges were used for data assimilation.
The waveforms forecasted by assimilation with digital filter and EEMD were both consistent with the real observations in the first tsunami peak at coastal tide gauges. Though the assimilation results with digital filter had a better performance in the following waveforms, we note that only the EEMD results can be obtained in real-time operation. In summary, the data assimilation of S-net pressure gauge records is able to forecast the tsunami waveforms accurately, and the tsunami data assimilation approach can be really put into practice with the help of EEMD real-time detection algorithm.

© 日本地震学会

Frequency characteristics of bottom pressure recordings induced by a typhoon

*Hiroyuki Matsumoto[1], Emoto Kuniaki[1,2], Kentaro Imai[1], Narumi Takahashi[1,3]

1. JAMSTEC, 2. Wakayama Prefecture, 3. NIED

日本の周辺海域に設置されている海底観測ネットワークの津波計（海底津波計）のリアルタイムデータは津波警報の更新だけでなく、一部の観測データは自治体が提供する津波情報へも利用されている。しかしながら台風接近時に運用上の課題が顕在化してきた。本研究では、リアルタイム津波検知手法の高度化のために、台風接近時に観測された海底津波計データを精査して、地震による津波との相違点を明らかにする。

「地震・津波観測監視システム（DONET）」の観測にもとづき自治体が提供する津波情報では、50 秒の短時間平均（STA）と300 秒の長時間平均（LTA）による判定値としきい値の比較から津波検知を自動判定する（Takahashiほか、2015）。しかしながら、台風接近時にはこの判定値が大きくなることが運用上の課題として顕在化してきた。本研究では、DONETに接近した2018年台風第24号を対象として、海底津波計のデータ解析を行った。台風がDONETに最接近したのは9月30日12時頃（時刻はUTC、以下同じ。）である（図1）。台風の接近を含む4日間のKMB05観測点の観測データを図2に示す。上から順に潮汐を除去した観測データ、STAとLTA、津波検知の判定値の変化を示す。台風が四国沖に到達する9月30日06時頃から判定値が急激に大きくなり、16時頃に最大値に到達した後、10月1日00時頃に収束する。同じ期間のスペクトログラムを図3(a)に示す。台風接近時には、長周期波（高潮）（≃ 10^{-3} Hz）、うねり（≃ 10^{-2} Hz）、脈動（≃ 10^{-1} Hz）の周波数帯域が卓越し、広帯域にエネルギーをもつ。9月30日14時頃から分散性の高潮が厳然と観測されている。台風からの距離や水深による振幅の違いを除き、卓越周波数の特徴は観測点間で一致する。

次に台風接近時と津波をともなう地震発生時に海底津波計で観測されるデータの特異性を明らかにする。2016年4月1日にDONETの直下を震源とする地震（M 6.5）が発生した（図4）。地震を含むKMD15観測点の1 時間のスペクトログラムを図3(b)に示す。02時39分頃の高周波（≃ 10^{-1} Hz）のエネルギーが地震動によるもので、直後に津波に関連する低周波（≃ 10^{-3} Hz）のエネルギーが続く。台風接近時とは異なり、それらの中間周波数帯域（≃ 10^{-2} Hz）にはエネルギーが卓越しない。

本研究では、台風接近時に観測された海底津波計データを精査して、地震による津波との相違点を明らかにした。本研究で得られた知見は以下の通りである。(1) 台風接近時と津波発生時では、海底津波計の観測波形の卓越周波数の特徴に差異がある。台風接近時は広帯域にエネルギーが分布するのに対し、津波発生時は低周波（≃ 10^{-3} Hz）のエネルギーが卓越する。(2) 運用中の海底津波計による津波検出の判定値が台風接近時に大きくなる要因は、うねり成分が卓越するためである。津波検出の判定を高度化するには、台風接近時のうねり成分（≃ 10^{-2} Hz）を除去する必要があることを示唆する。

© 日本地震学会

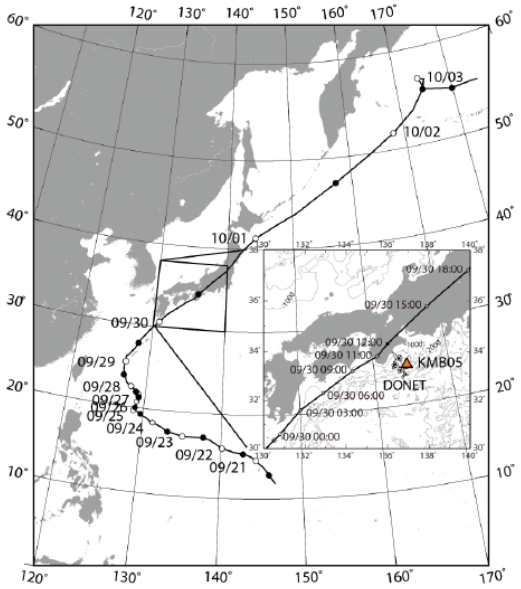


図 1：2018 年台風第 24 号経路図と DONET 観測点

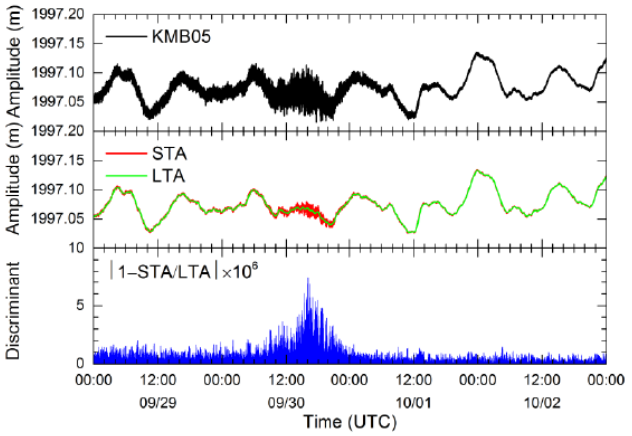


図 2：DONET 観測点の津波検知のための STA と LTA による判定値（KMB05 観測点の例）

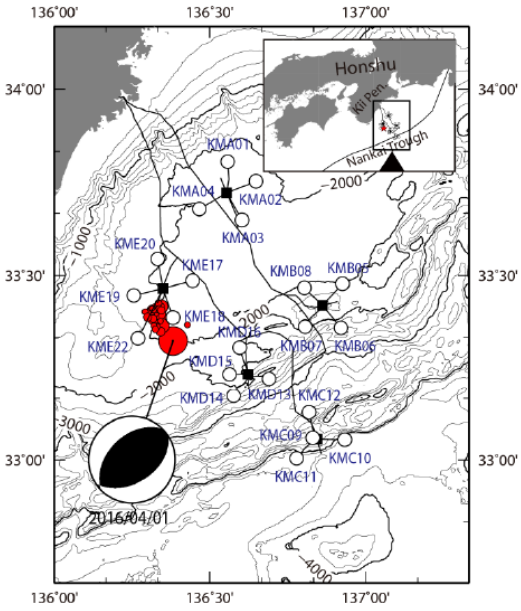


図 4：2016 年 4 月 1 日三重県南東沖地震で発生した地震と地震時に運用中の DONET 観測点

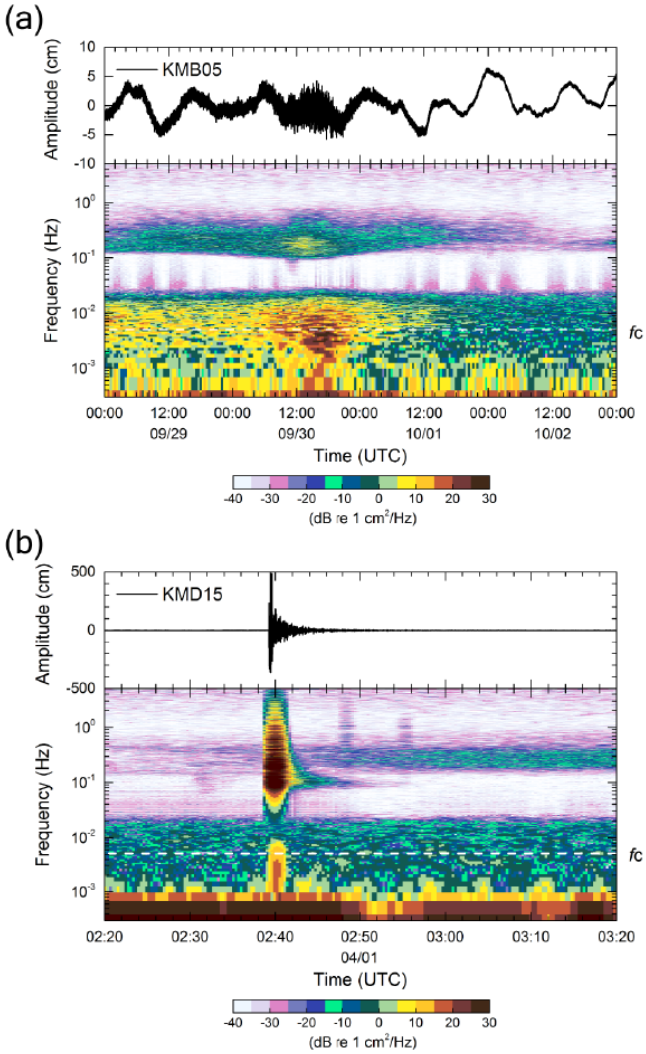


図 3：(a)2018 年台風第 24 号接近時の KMB05 観測点ならびに (b)2016 年三重県南東沖地震時の KMD15 観測点のスペクトログラム

© 日本地震学会

A meteotsunami on 1 July 2020 recorded by the S-net deep ocean pressure gauge network

*Tatsuya Kubota[1], Tatsuhiko Saito[1], Naotaka Yamamoto Chikasada[1], Osamu Sandanbata[1]

1. NIED

はじめに

近年，海底圧力計を用いた沖合の津波観測網 (e.g., Kanazawa et al. 2016) の発展により，沖合での広域・高密度な津波観測が可能になりつつある (e.g., Kubota et al. 2020)．2020年7月1日の17:00–19:00 UTC (7月2日2:00–4:00 JST)，東北日本の沖合に展開された日本海溝海底地震津波観測網S-netの海底圧力計のうち福島～岩手沖の観測点で北に向かって伝播する圧力変動波群を記録した (図1)．しかし，この時間帯に津波を励起するような顕著な地震は報告されていない．本研究では，S-netにより観測された圧力変動波群の特徴を整理し，その要因を考察した．

S-net水圧記録の特徴とその原因

まず，S-net圧力観測波形の特徴を整理した．図1aに周期100–3600 s のバンドパスフィルタを適用した観測波形を，図1b，1cにS-net観測点における最大波の振幅とその到達時刻をそれぞれ示す．水深の比較的浅い (H_0 ~1000 m) 観測点で振幅が大きい (1 hPa)．また，最大波の到達時刻 (図1c) から，ほぼ真北 (方位角 ~350–360°) に向かって見かけ速度c' ~80–90 m/sで伝播していた．この波群の押し波・引き波それぞれの継続時間はおよそ600 s (卓越周期T_0 ~1200 s) であり，押し波部分の南北方向の空間広がりを概算すると$c'T_0/2$ ~ 50 km程度と推測される．

津波を引き起こす要因としては地震時の断層すべりによって生じる海底地殻変動が最も一般的である．それ以外にも海底地すべり (e.g., Baba et al. 2019; Heidarzadar et al. 2020)，海底火山活動 (e.g., Fukao et al. 2018; Sandanbata et al. 2018) が知られているが，周辺の海陸の地震計で顕著なシグナルが検知されていないことを考慮するとこれらが原因ではないと思われる．ある空間広がりをもつ大気圧擾乱が移動すること (気圧波) によっても津波が励起されることが知られており，「気象津波」と呼ばれている (e.g., Hibiya and Kajiura 1982)．今回S-netで観測された圧力変動も，大気圧擾乱の移動によって生じた気象津波であると考えるのがもっともらしい．

気象津波シミュレーション

東北沖を北に移動する低気圧を仮定して津波シミュレーションを行い，観測を説明する大気圧変動モデルを検討した．大気圧擾乱の移動により生じる気象津波のふるまいは，津波の長波方程式に大気圧擾乱の空間微分に比例する項が加えられた形で表される (e.g., Hibiya and Kajiura 1982; Inazu et al. 2012; An et al. 2012; 齊藤・他2020 地震学会)．ここでは，東西に十分広く，南北50 kmの空間広がりをもつガウス分布型の低気圧 (ピーク振幅 -1hPa) が真北 (方位角0°) に移動すると仮定し，移動速度を様々変えて計算を行った．また，気象津波において海底水圧計が観測する圧力変化は津波 (海面高変化) だけでなく大気圧変化による成分も加わることを考慮し，両者による圧力変動を足し合わせたものを観測と比較した．

低気圧の移動速度を，V = 100 m/s と仮定することで，観測される波形の特徴や見かけ速度を再現することができる．気象津波の成長する条件として，低気圧の移動速度Vと津波の伝播速度c_0が近い値となる (c_0 ~ V) とき，低気圧の移動距離 (あるいは津波の伝播距離) の増大に伴って振幅が大きくなる (Proudman 1929)．長波近似における水深1000 mでの津波伝播速度$c_0 = (g_0 H_0)^{0.5}$ ~ 100 m/sとなることから，今回S-netにおいて観測された気象津波の波源は，水深 ~1000 mの等深線に沿って南北に分布すると考えられる．

さらに，計算された海面高変化と海底圧力変化の分布の時空間変化を比較すると，気象津波の波源域外では両者の分布は一致するが，波源域内では大気圧擾乱の影響により分布が異なっていた．この結果は，海底水圧計の気象津波記録から海面波高分布を正しく得るには，海面での大気圧分布の情報が必要であることを示している．

© 日本地震学会

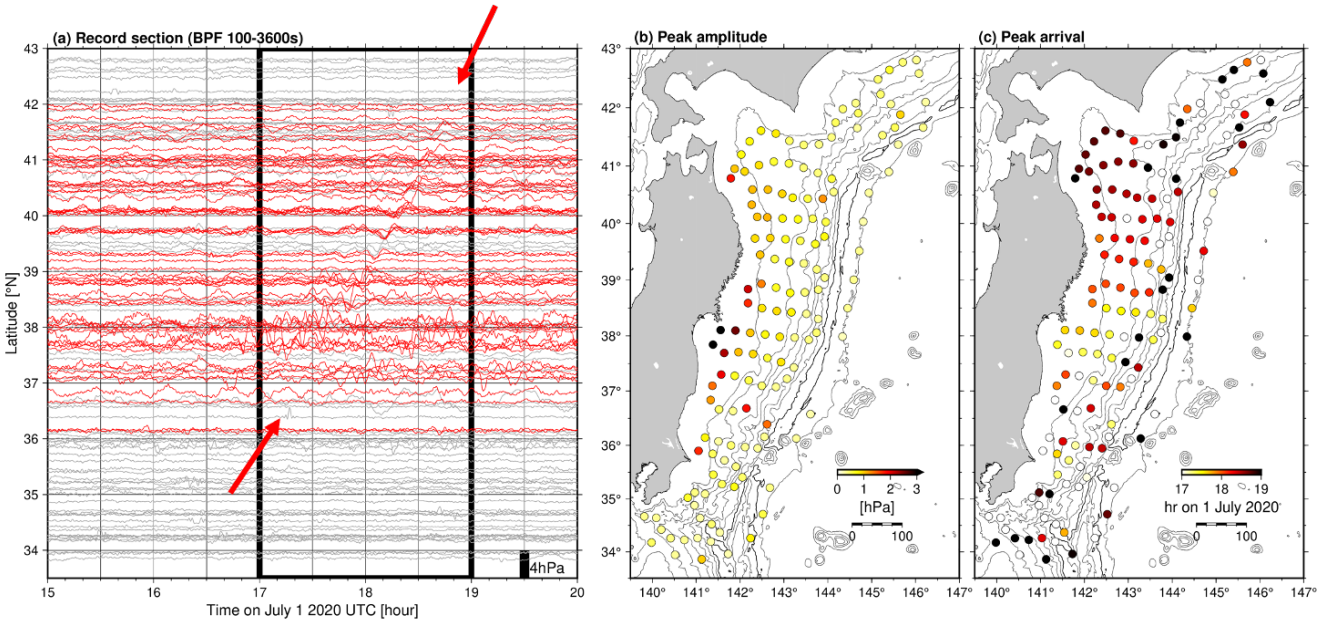


Figure 1. (a) S-net海底圧力計記録のレコードセクション (2020年7月1日 UTC，周期100–3600s のバンドパスフィルタを適用)．品質の悪い観測点の記録は灰色で示した．7月1日 17:00–19:00 (Figure 1aの黒枠内) における最大波の (b) 振幅および (c) 到達時刻．

© 日本地震学会

Tsunami generation by sea-surface pressure change: A 3-D model for open ocean observations

*Tatsuhiko Saito[1], Tatsuya Kubota[1], Naotaka Yamamoto Chikasada[1], Yusuke Tanaka[2], Osamu Sandanbata[1]

1. NIED, 2. JAMSTEC

はじめに

気圧変化によって発生する津波は気象津波と呼ばれる．観測データは験潮記録がほとんどであり，長波を想定した水平2次元のモデルが主にデータ解析に利用されている（例えば，Hibiya and Kajiura 1982; 坂本・他 2012; 久保田・他 2020地震学会）．

一方，現在では海底圧力計が広く実用化され，沖合や津波発生域での海底圧力変化が観測できるようになり，津波発生プロセスの理解が進展している．例えば，地震による津波発生の場合，震源域内に設置された海底圧力計によって，津波と海底運動の両者を含む海底圧力変化が明瞭に観測され，流体-弾性体力学のシミュレーション (例えば，Saito 2019; Maeda et al. 2020) に基づく解析から破壊継続時間や応力降下量を通常の津波解析より詳細に推定することができる (Kubota et al. 2020).

本研究では，3次元流体運動を考慮することで海面の気圧変化によって生じる津波発生の素過程を明らかにし，発生過程で観測されうる海底水圧変化を検討する．

3次元流体運動

一定水深のもと海面に圧力変化を与えることで，3次元運動方程式で記述される非圧縮流体運動を波数積分法で計算し，海面波高分布，海水流速分布，海底圧力分布を求める．発生メカニズムを理解するために，まず，移動しない気圧変化によって励起される津波を考え，後に，気圧変化が移動する場合を考える．

気圧変化が移動しない場合

急激に海面に気圧変化が起こる場合として，海面にステップ関数で表される気圧変化があるときの3次元流体応答の解を導出した．海面に急激に圧力が加わることで（高気圧の発生），高気圧直下の海面は徐々に鉛直下方に変位し，海水は脇に押し出される．その結果，高気圧の脇では海面が隆起する．隆起した海面は，重力波（津波）として伝播する．この際，高気圧の外に位置する海底圧力計では，海底地殻変動によって海面が隆起した場合と等価な圧力記録となる．一方，高気圧のある領域内の海底に位置する圧力計は，海底地殻変動によって海面が隆起した場合と異なるふるまいをする．高気圧発生と同じタイミングで圧力が増大し，その後，海面が下方に変位するにともない，徐々に圧力が下がっていく，最終的に海底圧力変化はほぼゼロになる．これは，海底の永久変位よって圧力のオフセットがのこる海底地殻変動によって海面が隆起する場合と異なる．

気圧変化が移動する場合

低気圧が移動することで津波が成長する．気圧変化の移動は，移動しない気圧変化の解の重ね合わで表現する．インパルス応答（時間・空間ともにデルタ関数震源の応答）に，一定速度で動く引張圧力源を畳み込で取り入れ，低気圧の移動による津波の発生を計算する．低気圧が平面波的に伝播する場合，3次元流体応答に関する解を得ることができる．これに，長波近似を適用すればProudman (1929) の解と同じになる．低気圧の移動速度が津波の伝播速度と同程度の場合，気圧変化が進行する方向では，海面変位分布は圧力分布の空間微分（もしくは時間微分）の形で与えられ，伝播距離の増大に伴い海面変位が増大する（例 宇野木 1993）．気圧変化の空間スケールが小さい場合，分散効果によって，より急激に波高が増大する場合もある．海底の圧力変化は，津波波高だけでなく，気圧変化による圧力変化も加わる．そして，波長が短い場合には，有限波長-水深効果が現れ，静水圧近似から期待される圧力変化より圧力変化は小さくなる．気圧変化の移動により発生する津波は海底圧力計で検知可能である．しかし，海底圧力計から波高を正確に計測するためには，海面圧力分

© 日本地震学会

布の情報が必要となる.

© 日本地震学会

Room A | Regular session：S17. Tsunami

Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 4:00 AM - 5:15 AM UTC | ROOM A

[S17]PM-1

chairperson:Yusuke Yamanaka(The University of Tokyo), chairperson:Osamu Sandanbata(NIED)

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

[S17-06] Multiple-shock Characteristic of the 1933 Showa-Sanriku Earthquake

○Nobuo HAMADA[1] (1.non)

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

[S17-07] Forward modeling of tsunami for the 1933 Showa-Sanriku earthquake using normal faults based on marine surveys

○Toshitaka Baba[1], Naotaka Chikasada[2], Yasuyuki Nakamura[3], Go Fujie[3], Koichiro Obana[3], Seiichi Miura[3], Shuichi Kodaira[3] (1.Tokushima University, 2.NIED, 3.JAMSTEC)

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

[S17-08] Study on resonance characteristics along western coasts of Japan Sea and amplification of 1833 Shonai-Oki tsunami

○Yusuke Yamanaka[1], Kiku Shimazu[2], Takenori Shimozono[1], Yukimasa Higaki[3] (1.The University of Tokyo, 2.Central Nippon Expressway Company Limited, 3.East Japan Railway Company)

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

[S17-09] Nonlinear Inversion of Tsunami waveforms, Estimation of Slip Distribution by Grid Search Part 1

○Masaaki MINAMI[1] (1.Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency)

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

[S17-10] Physical mechanism of volcanic tsunami earthquakes repeating at Curtis Island, north of New Zealand

○Osamu Sandanbata[1,2], Shingo Watada[2], Kenji Satake[2], Hiroo Kanamori[3], Luis Rivera[4], Zhongwen Zhan[3] (1.Now at NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.California Institute of Technology, 4.Université de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, F-67000 Strasbourg)

Multiple-shock Characteristic of the 1933 Showa-Sanriku Earthquake

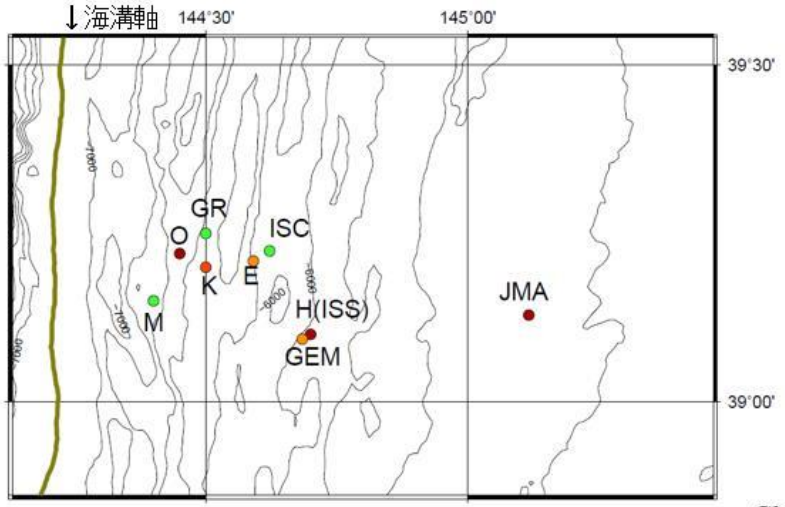
*Nobuo HAMADA[1]

1. non

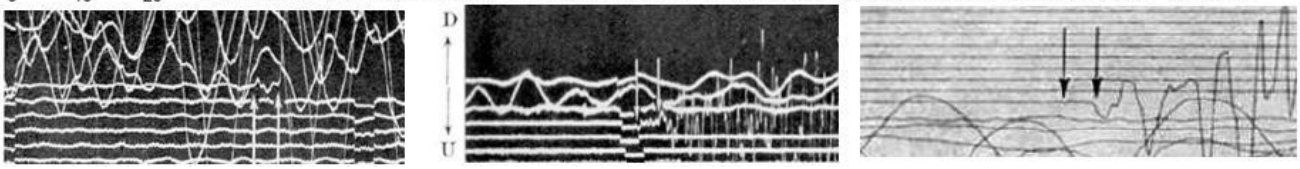
１．　はじめに
1933年昭和三陸地震の震源についてはglobalなISSのデータを用いた調査が幾つも行われて来た。しかし国内の観測データを基に決められた気象庁カタログの震源は、図に示すようにそれらの震源からは東の沖合、海溝から大きく離れた地域に位置し、かねてよりその違いに疑問を持っていた。その原因を調査し突き止めたので紹介する。なお震源の深さについては議論するだけの精度がないと判断されることから、すべて震源の深さを0kmと仮定し検討した。
２．　震央位置の違いを生じた主要因
国内外の観測データ及び地震計の記録を参照した結果、地震はM6前後の大きさの前震とその4~5秒後に起きた本震からなることが明らかとなった。Matuzawa(1935)は、当時はmultiple shockの概念はまだ存在しなかったためか、約4秒間隔で2種類のP波が遠地の8観測点で観測されたことを報告しているのみである。図の下部はMatuzawa(1935)に掲載されているPasadena(PSA)、RiverSide（RVR）、Zurich(ZUR)の記録Fig3を部分拡大したものである。当時の地震観測網の中でPAS、RVRでは倍率10000倍を超える高感度の光学式Benioff地震計の稼働が始まったばかりの頃であり、またZURの記録も機械式地震計としては最高の倍率(1000倍以上)を有するQuervain- Piccard地震計の記録であることを考えると当時観測の主力であった普通の機械式地震計では、遠地観測点で前震のP波を検知することは困難であったことが想像される。国内の地震計の記録は、倍率が低く記録の紙送りが30mm/分と遅いこと、前震の立ち上がりは必ずしも顕著ではなかったことから、時間分解能は乏しいものの、初動の3~6秒後に大きな揺れが始まっていることが共通に認められ、やはり前震に引き続き本震が起きたと解釈できる。
今回の結果はアナログ記録の保存の重要性を改めて認識させられるものであるが、ともかく、大部分の遠地観測点ではISSに本震のP波を報告し、中央気象台の観測網ではパラオ（Δ＝約3600km）を除きほとんどの観測点では前震のP波を報告したことになる。つまりJMA震源は前震の震源であり、ISSのデータを用いて決めた震源は、近くは前震の観測値と、遠くは本震の観測値を混合して決められた仮想震源ということになる。定性的に考えるだけでも、前震と本震の検測値を混ぜると、origin timeを遅くすることになり、近くの観測点の前震のP波の読み取りは、その分だけ短くなる走時を合わせるため震源を観測網の方に、この場合西側に引き寄せるように作用することが分かる。本多・竹花(1933)、JMA以外の、ISSのデータを用いて決められた各震央は、仮想震源の沖合から陸側への引き寄せ効果を見事に表している。
３．　本震の震源
本震の初動は主としてΔが7000km以上の観測点で記録されているが、これだけを用いて震源を精度良く決めることは困難であるが、前震と本震の震源は同じと考え、その時間差4～5秒を補正して合わせて震源を決めると、誤差の範囲であるがJMA震源のやや北に決められた。従って前震、本震ともに東経145度付近に震源が位置することは確実である。このことは震央が羽鳥（1974）など従来推定されていた津波波源域の外側もしくは東側の縁に位置することになる。津波波源域の再検討もしくは津波発生メカニズムについての検討が今後期待される。
４．　その他
今回の調査では次のようなことも明らかになった。
1)　昭和三陸地震の余震は本震から離れた海溝側に偏って発生している。このように海溝よりに偏った余震の分布は、同じouter riseで発生した2005年11月の宮城県沖地震（Mj7.1）、2011年東北地方太平洋沖地震の最大余震（Mj7.5）などでも認められる共通の特徴である。これらのouter riseの地震の震源域の中心は余震がほとんど起こらない強いAsperityの性質を持つことを示す。
2)　機械式地震計が主に用いられていた地震検知能力が低かった時代の、遠地地震の検測値には後続相が初動として報告されている事例が多数あるものと推定される。そのような遅延した検測値を震源決定に取り込む

© 日本地震学会

と、見かけ上、陸よりにシフトした震源を決めることになり、注意が必要である。



各種の震源の震央の違い
JMA:気象庁地震カタログ
H(ISS):本多・竹花 (1933)
M:Matuzawa(1935)
GR:Gutenberg-Richter(1954)
K:Kanamori(1971)
E:Engdahl and Villasenor(2002)
I:ISC Bulletin
GEM:ISC-GEM カタログ
O：Okal et al.(2016)
GMT(Wessel and Smith (1998))により作図



左からPAS,RVRのBenioff、ZURのQuervain-Piccard地震計の記録、Matuzawa(1935)のFig3より

Forward modeling of tsunami for the 1933 Showa-Sanriku earthquake using normal faults based on marine surveys

*Toshitaka Baba[1], Naotaka Chikasada[2], Yasuyuki Nakamura[3], Go Fujie[3], Koichiro Obana[3], Seiichi Miura[3], Shuichi Kodaira[3]

1. Tokushima University, 2. NIED, 3. JAMSTEC

津波の事前予測（想定）は，はじめに海域で発生する地震の断層を仮定する．この断層のモデル化においては，海底地形，地殻構造，微小地震分布などの海域調査の結果を総合的に判断して行われる．2011年東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生する可能性のあるアウターライズ地震の特性を理解し，津波を予測するため，海域の地形調査，地殻構造調査，地震観測が精力的に実施された．その結果を踏まえて，前報（馬場ほか，2020, JpGU）では日本海溝沿いの東経143.0度から145度，北緯36.5度から40.5度の領域において33本のアウターライズ地震の断層モデルを提案した．この領域は，1933年に発生した昭和三陸地震の震源域を含んでおり，本研究で採用した断層のモデル化が妥当であれば，提案した33本の断層のうちのいずれかが，1933年昭和三陸地震の津波を再現するはずである．本研究ではこれを目的として，1933年昭和三陸地震の津波の再現計算を行った．

比較のために利用する1933年昭和三陸地震の津波データは，東北大学と原子力安全機構まとめた津波痕跡データベースのうち，信頼度が最も良いAの痕跡データを利用した．津波の計算においては，半無限均質弾性体の解析解を利用して，断層モデルから海底地殻変動を計算し，斜面の平行移動の効果とKajiuraのフィルタを加味したうえで，それをライズタイム30秒で海面に与えた．津波伝播は非線形長波式を差分法で解いた．計算に必要な地形データは日本周辺の公開データをコンパイルして一律２秒間隔で格子化されたGlobal Tsunami Terrain Modelを利用した．ただし，効率的に計算するため，地形ネスティングにより，震源域の海域の18秒格子から沿岸2秒格子まで，空間分解能を変化させた．６時間分の津波を計算し，痕跡データと最も近い計算グリッドで得られた最大津波高を，Aida (1978)の信頼度指標（K，κ）を利用して評価した．なお，Kは1に近いほど，κは小さいほど精度がよい．

前報で提案した33本の断層モデルのうち，10番（断層長218km, Mw 8.3）の断層モデルが最もよく昭和三陸地震の痕跡データを再現した（K＝0.92, κ=1.47）．すでに既往研究で昭和三陸地震の断層モデルがいくつか提案されており，それらについても上記と同様の手法で計算し，痕跡データと比較した．Kanamori (1971)の断層モデルではK=1.16，κ=1.53，相田（1977）のモデルではK=1.02，κ＝1.49，Abe (1978)の断層モデルではK=1.31，κ＝1.71，Uchida et al. (2016)の１枚断層モデルでK=0.61，κ＝1.49，２枚断層モデルでK=0.71，κ=1.55であったので，本研究で提案した10番の断層は既往研究と比べてそん色ない再現性であった．

© 日本地震学会

Study on resonance characteristics along western coasts of Japan Sea and amplification of 1833 Shonai-Oki tsunami

*Yusuke Yamanaka[1], Kiku Shimazu[2], Takenori Shimozono[1], Yukimasa Higaki[3]

1. The University of Tokyo, 2. Central Nippon Expressway Company Limited, 3. East Japan Railway Company

これまでに日本海東縁部で発生した地震津波は，日本海西部沿岸域で大きく増幅して浸水被害を発生させたことがある．本研究では日本海で過去に発生した大規模地震津波の一つである1833年庄内沖(山形沖)地震津波を対象とし，日本海東縁部で発生した津波が日本海西部沿岸域において増幅するメカニズムを推定することを研究の目的とする．
まず，1833年津波の痕跡高とそれが観測された時間を既往研究の分析結果に基づき精査し，比較的信頼性の高い痕跡高を抽出した結果、鳥取県境港市においては0.5mの浸水が発生していたことがわかった．さらに，同浸水が発生したのは日没後であることが歴史史料から示唆されており、1833年津波の沿岸挙動の解明の一助となる離散的な時間情報が得られた．
次に，1833年地震の発震日時は12月7日14時頃であり，津波の位相特性を考慮すれば同日16時半頃までに第一波目の津波が境港市沿岸域に到達することが推察された．これを念頭に置きながら，1833年12月7日の境港市に対する太陽位置及び恒星時を略算して日没時刻を推定すると，同日同市における日没時刻は16時54分となった．これらのことから， 歴史史料に記述されている境港市における浸水は，津波の後続波が増幅したことによって発生したことがわかった．
境港市沿岸域は美保湾内に位置し，また周辺海域には隠岐海峡が位置するため，湾スケールや海峡スケールの固有振動による津波増幅が1833年津波の氾濫に関与した可能性が考えられる．そこで，数値実験に基づき美保湾や隠岐海峡を含む日本海西部域の固有振動特性を推定することを念頭に置き，境港市境港に容量式波高計を設置して水深変化の時系列データを取得した．そのデータの周波数解析に基づきピーク周期を推定するとともに，数値実験に基づき同海域の波の周期応答特性を推定して前述のピーク周期と比較した．これらの分析結果に基づき，同海域の固有振動特性を実証的に推定した．
上述の分析結果を踏まえながら，1833年庄内沖地震の断層モデルに基づきそれによる津波の伝播及び増幅特性を推定した．まず境港市沿岸域における推定水位の最大値及び出現時刻が観測値と概ね整合していることを確認した．推定された波形では，津波の第一波目の水位上昇量よりも後続波の水位上昇量の方が有意に大きく，後続波が浸水被害を拡大させたことが確認された．さらに，周波数解析に基づき推定水位波形を詳細に分析した結果，湾スケールの固有振動が津波によって励起されていたこと，また複数の固有振動モードが湾内で重合し，津波の後続波を大きく増大させていたことがわかった．

© 日本地震学会

Nonlinear Inversion of Tsunami waveforms, Estimation of Slip Distribution by Grid Search Part 1

*Masaaki MINAMI[1]

1. Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency

津波波形を用いたインバージョン計算においては、計算量の制約などから、多くの既往研究では線形の逆問題としてこれを解いている。しかしながら、津波数値計算においてはその非線形の効果は大きく、それが、津波波形を用いたインバージョン計算の精度を大きく削ぐ原因となっている。そこで、本研究では、津波の非線形性も評価することのできる手法として、同一のイベントに対し、様々なすべり量分布で非線形長波方程式での津波数値計算（順計算）を行い、その数値計算結果と観測値との比較から、最も観測値を説明する地震のすべり量分布を求め方法について検討した。つまり、グリッドサーチによる非線形津波インバージョンである。具体的には、今回は2010年チリ中部の地震(Mw8.8)について、Fujii et al.(2013)などの既往研究で用いられている小断層の配置、大きさを用い、そのすべり量だけを変え1万例以上のすべり量分布を作成、その鉛直変位を津波の初期値とし、JAGURS(Baba et al. 2015)を用い、非線形長波方程式で計算した。計算領域は太平洋全域を90秒メッシュとしΔtは3secとした。比較のための観測値としてはNOAAのDART((Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)の波形を、津波到達時刻から2~5時間程度用いた。比較の方法として観測値(15秒値)と計算値(15秒値)の、V.R.を計算し、V.R.が高いほど波形の一致率が高く良い解とした。これらの計算は1事例の計算に2時間/node程度かかった。計算に使用した気象研究所スーパーコンピュータは880node構成で、そのうち200nodeを使用した場合、1万事例を計算するためには、概ね100時間程度で計算が終了する。
以上のような条件で1万事例の計算を行ったが、その事例の取り方が本研究の最も重要なポイントとなる。まず総当たり的に計算することが考えられるが、今回の事例ですべり量のパターンを8通りとしても、その全パターンは10^32であり、計算量が全く足りていない。つまりもっと早く解を収束させるためには何らかの統計学的、機械学習的処理が必要になる。ここでは様々な手法が考えられるが、本稿ではその第一段階として、まず人間の目で波形を確認し、波形の合致が高いと思われるすべり量分布を作成し計算する、試行錯誤的な手法で計算し、その結果600回程度で概ねある値に収束した。次に、試行錯誤的に求められた値、既往研究(Fujii et al.2013とYoshimoto et al. 2016)の津波インバージョン結果を初期値とし、それらに摂動を与え新たなすべり量分布を作成、それらの計算結果でV.R.を求め、初期値より良い解があれば、その解を次の初期値とし新たに計算する方法を用いた。加えて全くランダムにすべり量を与える方法でも1000事例計算を行った。
以上の方法で1万事例以上を計算した結果、V.R.は既往研究等の初期値からある一定程度は上がるが、それほど顕著には上昇せず、頭打ちをした。さらに全ての計算結果のV.R.を検討したところ、すべり量の空間分布がより滑らかなものが、V.R.が高かった。また、梶浦フィルタ(Kajiura 1963)を用い、海面変動をより滑らかにした場合もV.R.が上がることが分かった。地震波による震源過程解析においても、すべりの時空間分布がなめらかであるという拘束条件がかかっている(例えばFukahata et al. 2003)が、本計算結果からも、すべりの空間分布がよりなめらかであるほど津波波形のV.R.が高いことが示唆された。
これまでは計算量の制約からこのような非線形の津波インバージョンは試みられていなかったが、今回の結果から、最新のスーパーコンピュータを用いることによって、計算量の観点からは非線形の津波インバージョンも可能であることを示すことが出来た。しかしながら、今回の結果が真のすべり量分布を示すものであるとは言えず、さらなる手法の改善や、レゾリューションの向上などが必要である。

© 日本地震学会

Physical mechanism of volcanic tsunami earthquakes repeating at Curtis Island, north of New Zealand

*Osamu Sandanbata[1,2], Shingo Watada[2], Kenji Satake[2], Hiroo Kanamori[3], Luis Rivera[4], Zhongwen Zhan[3]

1. Now at NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. California Institute of Technology, 4. Université de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, F-67000 Strasbourg

(1) はじめに

New Zealand北方沖に位置する直径1km未満の離島火山・Curtis島近くの海底において、地震マグニチュード５–６級の非ダブルカップル成分に富むCMT解を持つ火山性地震（以降、「Curtis地震」と呼ぶ）が、2009年・2017年に発生し、地震規模から経験的に推定されるよりも大きな津波を引き起こした（最大40 cmの津波が観測）。これらの地震は、日本南方沖の鳥島近海の海底カルデラ火山において約10年間隔で繰り返す「火山性津波地震」と類似した特徴を持つ（Sandanbata et al., 2020a–b, JpGU）。Gusman et al. (2020, GRL)は、二つのCurtis地震に対して、地下1.5 km程度の津波励起源と深さ約10 kmの地震波励起源の二つのソースから成る震源モデルを提案している。本研究では、2017年のCurtis地震の津波および長周期地震波の観測記録を統一的に再現する運動学的震源モデルを構築することで、効率的に津波を引き起こす特異な地震発生の物理メカニズムの解明を目指した。

(2) 津波記録を用いた地震による初期海水面変動分布の推定

まず、New Zealandの北島および離島の潮位計に記録された津波観測波形を用いて、地震によって発生した初期海水面変動分布を推定した。初期海水面変動のおおよその位置を推定するため、震源周辺に約10 km間隔に配置した９つの鉛直軸対称の海水面隆起波源モデルから予測される津波波形をJAGURS（Baba et al. 2015, PAGEOPH）を用いてそれぞれ計算した。その結果、Curtis島のごく近傍に与えた波源モデルが、観測記録の到達時間および波形を最も良く表した。

次に、より詳細な初期海水面変動分布推定のため、Curtis島付近に多数の海水面上の小波源を仮定して計算した津波グリーン関数を用いて、津波波形インバージョンを行った。その結果、直径5–６km程度の楕円形領域に、最大振幅１m超の海水面隆起が推定された。隆起域直下の海底地形には、カルデラ火山の地形的特徴が見られ、この地震が海底カルデラ火山における現象であることが示唆された。

(3) 津波・長周期地震波記録に基づく運動学的震源モデルの構築

続いて、地震による津波・長周期地震波の波形記録を用いて、運動学的震源モデルを構築した。ここでは、地震の物理メカニズムを、「カルデラ下に水平方向に薄く広がるマグマだまりに蓄積した高圧マグマが生成する応力場によって、カルデラ壁の一部分に沿った環状断層が破壊」という仮説を立てた。この物理メカニズムを、環状断層でのDip方向すべりと、地下約3kmに位置する水平クラック断層の開口/閉塞から成る、複合的断層すべり現象としてモデル化した。このとき、環状断層のDip角を可変の断層パラメータとして、複数の断層モデルを仮定した。

仮定した複数の断層モデルに対して津波波形インバージョンを行い、それぞれの断層モデル上でのすべり分布を決定した。(2)の解析同様に潮位計記録を観測記録として用いた。また、断層構造を三角形メッシュで分割した多数の小断層すべりから予測される津波波形を計算し、津波グリーン関数として用いた。その結果、様々なDip角を持った複数の断層モデルで、環状断層における逆断層すべり(最大約4m)と、水平クラック断層の非対称的な開口(最大約4m)／閉塞(最大約2m)が推定され、観測記録を再現した。この結果は、物理メカニズムの仮説の妥当性を津波発生の観点から示した一方で、環状断層のDip角の特定は津波波形記録のみでは困難で

© 日本地震学会

あった。

そこで、地震波励起の観点からの物理メカニズムの妥当性の評価と、環状断層のDip角制約のため、複数の断層モデルでのすべり分布に対して、点震源仮定のもとで長周期地震波をフォワード計算した。各すべり分布のCMT解を点震源モデルとして与え、一次元速度構造に基づく地震波グリーン関数を用いて震央距離8–29˚に位置する観測点における長周期地震波（周期：57–143秒）をフォワード計算し、IRISで入手した同観測点での観測記録と比較した。その結果、環状断層のDip角によって計算波形の振幅が敏感に変化する傾向が見られ、Dip角が70˚程度の断層モデルにおけるすべり分布が観測記録を十分に再現し、他の断層モデルに比べて明瞭に計算波形と観測波形の一致度が高くなった。このことから、物理メカニズムの仮説の妥当性が地震波励起の観点から確認されたとともに、環状断層のDip角が70˚程度と制約された。

(4) 議論・結論

以上の結果から、2017年のCurtis地震の物理メカニズムとして、海底カルデラ火山地下直下に水平方向に薄く広がるマグマだまりに蓄積した高圧マグマによって環状断層破壊が発生する、"Trapdoor faulting（引き上げ戸状断層破壊）"を提案する。また2009年のCurtis地震についても、地震規模・津波波形・CMT解の類似性から、2017年地震との同様の現象が繰り返していることが示唆される。これらCurtis地震の物理メカニズムは、我々が先行研究において鳥島近海の火山性津波地震に対して提案したものと同等である（Sandanbata et al., 2020a–b, JpGU）。この二つの海底カルデラ火山での地震・津波現象にまたがる類似性は、"特異"な火山性津波地震が、海底カルデラ火山においてある条件下で発生しうる"普遍的"な現象であることを示唆している。

© 日本地震学会

Room A | Regular session：S17. Tsunami

Sat. Oct 31, 2020 2:30 PM - 3:15 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM A

[S17]PM-2

chairperson:Yutaka Hayashi(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

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

[S17-11] Reconstruction of the inundation height by spatial interpolation method in the Sendai plain after the 2011 Tohoku Tsunami

○Yuuki Eguchi[1], Yoshinori Shigihara[1], Tsuyoshi Tada[1] (1.National Defense Academy of Japan)

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

[S17-12] Numerical study on tsunamis propagating into river channel

○Kento Koseki[1], Yusuke Yamanaka[1] (1.Department of Civil Engineering, The University of Tokyo)

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

[S17-13] Characteristics of tsunami flotsam behavior on vulnerable of embankment foundation by strong motion

○Kentaro Imai[1], Ryoko Obayashi[1], Kuniaki Emoto[2], Hiroyuki Iwase[3], Kentaro Nakai[4] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Wakayama Prefecture, 3.JIFIC, 4.Nagoya University)

Reconstruction of the inundation height by spatial interpolation method in the Sendai plain after the 2011 Tohoku Tsunami

*Yuuki Eguchi[1], Yoshinori Shigihara[1], Tsuyoshi Tada[1]

1. National Defense Academy of Japan

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では，北海道から関東に至るまで広大な範囲で津波の浸水被害を発生させた．東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（以下，TTJS）は，多くの研究者の現地調査によって収集された津波の痕跡の情報を集約し，実際の浸水状況を把握するためのデータベースを構築した．
一方で，津波の浸水範囲が広く人手が不足したことや，田畑が広がっているなどそもそも痕跡になりえるものがない等，様々な理由により痕跡が密なエリアと疎なエリアが存在したり，信頼度を確保できなかったりする．そのため，津波の遡上計算における再現性の確認では，可能な限り万遍なく分布した痕跡高を使用することが望ましいが，実際には分布の密度や信頼度を考慮せずに使用せざるを得ない状況になっている．
本研究においては，津波による痕跡をもとに様々な内挿補間方法で作成された浸水高分布を作成し，数値シミュレーションによる遡上計算の結果と比較することで，津波の浸水高分布の再現に最適な内挿補間方法と痕跡の選択について提案を行う．仙台の沿岸部を対象とした本研究では，津波の浸水高分布の特徴を内挿補間によって再現できることが確認された．

内挿補間は，離散的に分布するデータから連続的な分布を作成し，空間全体の状態を把握するために使用され，扱う現象やその性質により，いくつかの方法が提案されている．本研究の痕跡を用いた浸水高分布の内挿補間による再現においては，ArcGISにおいて３D Analystツールで実装されている「Inverse Distance Weighted（以下，IDW）」，「Natural Neighbor（以下，NN）」，「クリギング」，「スプライン」，「トレンド」の５種類を使用した．このうち，IDWとクリギング，スプラインについては，内挿補間の際に用いる周囲の情報の点の数を設定できるが，用いる点の数を変化させることにより，空間分布に与える影響も確認した．
また，内挿補間に使用する痕跡については，TTJSによって収集された七北田川以南の仙台平野の痕跡を全て使用した場合，このうち多田ら（2018）によって信頼度が高いと分類された痕跡のみを道いる場合の２ケースと，これらのケースに浸水域のデータから遡上限界に点を追加した２ケースの，計４ケースで内挿補間を行い，浸水高分布を比較した．
内挿補間によって作成された空間分布は，非線形長波モデルで計算された津波遡上計算と比較して特徴の分析を行った．本研究では離散的な浸水高との比較において幾何平均K と幾何平均偏差κが良好であった，藤井・佐竹モデルVer.8.0（2013）を断層モデルとして使用し，遡上計算を行った．マニングの粗度係数は，津波浸水前の土地利用に基づき，小谷（1998）の粗度係数を使用した．

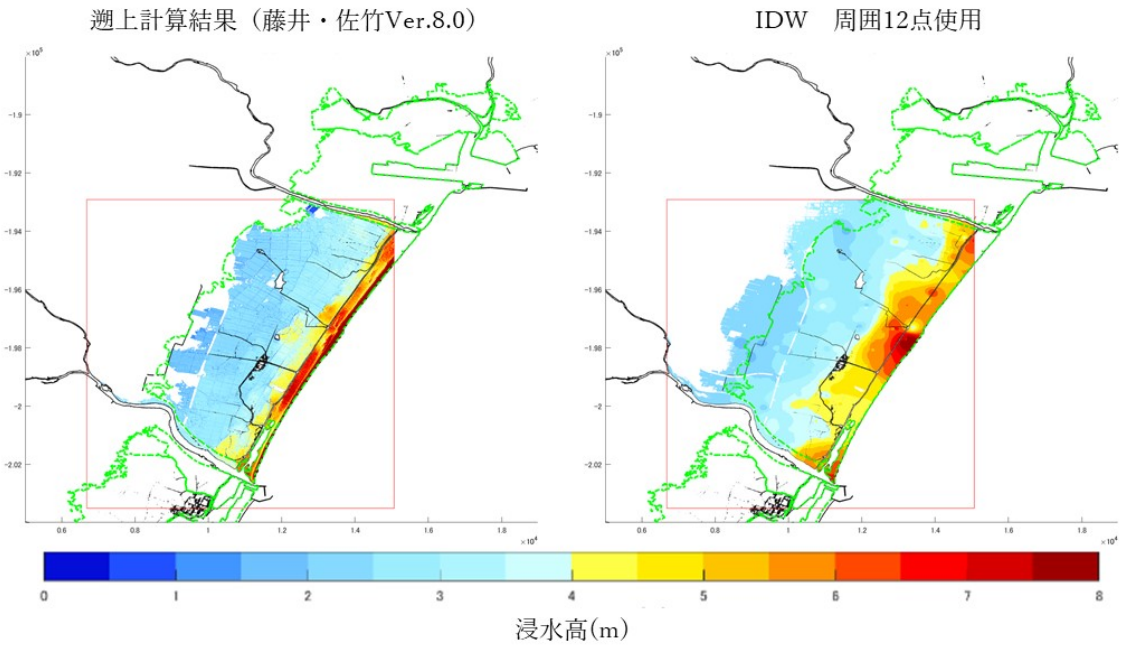
各内挿補間の方法により作成された浸水高分布の概要は，以下のようになった．

・IDW：痕跡が少ないエリアは沿岸部であっても浸水高が減少するが，内陸部に行くにつれ浸水高が確実に減少した．なお，補間に用いた点の数による変化はほとんど見られなかった（下図）．
・NN：浸水高が沿岸部から内陸部にかけ減少していく傾向を再現した．ただし，痕跡の高さに比べて過大計算する傾向が見られた．
・クリギング：IDWの結果とほぼ同じであるが，使用する近傍の点を増やすほど沿岸部の浸水高が減少し，再現性が悪化した．
・スプライン：痕跡が少ない点をマイナスとするなど，局所的に高い浸水高の痕跡を含む今回の内挿補間には不適であった．

© 日本地震学会

・トレンド：浸水域全体で関数に近似できるような傾向がなく，浸水高分布の再現はできなかった．

また，使用する痕跡については，多田らが行った分類を用い，遡上限界点を追加しない組み合わせが，浸水域を最もよく再現した．これは，特に遡上限界点付近の痕跡における遡上高が，その痕跡よりも海側の痕跡の浸水高よりも高い場合があり，内陸部の浸水高分布を押し上げるように寄与するためである．
浸水高の分布はIDW，NN，クリギングが，内陸部に行くにつれて減少しており，遡上計算に類似した結果となった（下図）．一方で，遡上計算では仙台東部道路の盛土が津波をとどめることになり，その東西において急激に浸水高が変化している．このように，浸水高が急激に変化するような状況を，今回の痕跡の分布では内挿補間によって再現することはできなかった．ただし，急激な浸水高の変化も，その周辺において痕跡が多数収集されていれば，再現できる可能性がある．
各内挿補間方法と遡上計算の結果における，浸水域全体の浸水高の頻度分布を比較すると，ピークの値やその周辺の分布から，IDWが最も遡上計算に近い結果となった．本研究において，クリギングでは痕跡が少ないエリアが遡上計算結果と外れやすく，NNでは全体的に浸水高を過大計算していた．



© 日本地震学会

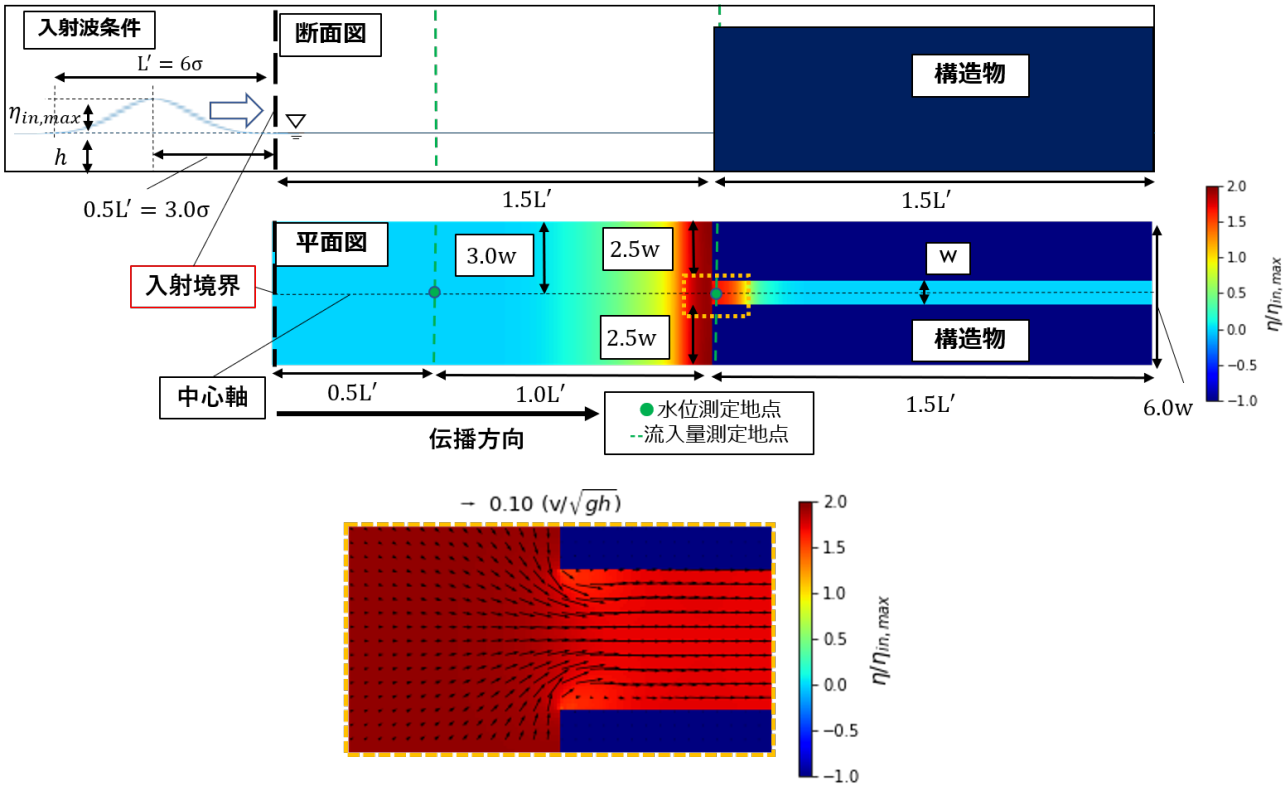
Numerical study on tsunamis propagating into river channel

*Kento Koseki[1], Yusuke Yamanaka[1]

1. Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

河口域に来襲した津波は，海域と河道の接続領域における複雑な流体運動を経ての河道に侵入し，その上流域で津波の氾濫被害を引き起こすことがある．しかしながら，定量的な観測データの不足から，その接続領域における津波の挙動については未だ限られた知見しか得られていない．本研究では，複数の数値モデルを用いて，海域と河道の接続領域における津波の流体特性の基礎的な分析を行うことを目的とする．
本研究では図に示す中心軸を基準とした軸対称の計算領域を設定し，沖側境界から最大水位と波長でパラメタライズしたガウス分布の津波を入射させることで，河道を模した狭窄水路に侵入する津波の挙動を分析する．数値モデルとして線形長波モデル，非線形長波モデル，非線形分散波モデルを用い，側方境界の線流量に対する境界条件としていずれの数値モデルに対してもSommerfeld放射条件を与えた．なお計算領域内における水深は一様であり，入射波は沖側境界において長波条件を満たしている．また水陸境界では鉛直壁を仮定しているため津波の水路外への氾濫は考慮していない．このような条件の下で，入射津波の波高や波長，水深や狭窄水路幅などの地形条件，格子解像度などの数値計算条件を変化させながら，狭窄水路に侵入する津波の挙動を分析した．
本研究で得られた津波の伝播過程及びその特性を以下に示す．なお，本研究ではガウス分布の標準偏差(σ)を用いて，6σを入射津波の波長L'と定義する．また，図においてhは初期水深，ηは初期水位からの水位変動，$\eta_{in,max}$は入射波高，wは狭窄水路幅，vは流速を示す．本研究においては、初期水深(h)，初期水深に対する入射波高($\eta_{in,max}/h$)、初期水深に対する波長(L'/h)、狭窄水路幅(w)をパラメータとして設定した．まず狭窄水路に向かって伝播する津波は，狭窄地点の鉛直壁前面において水位を増大させた．ここで，鉛直壁前面位置(中心軸上)で観測される最大水位と入射波高の比を波高比と定義すると，波高比は最大で2程度となった．また，狭窄水路幅や入射津波の波長と狭窄水路幅の比(相対水路幅)，波の非線形強度などが波高比を決定する要因となることがわかった．次に，鉛直壁全面で増大した水位は，狭窄水路周辺の水位よりも大きくなるために圧力勾配が生じ，それによって狭窄水路に津波が侵入した．狭窄地点と沖側境界地点において，狭窄水路に流入する流量の累積値(侵入方向線流量の時間積分)と入射地点におけるそれとの比を侵入率と定義すると，その値は最大で33%程度となった．狭窄水路幅は計算領域幅の1/6であるため，狭窄水路に侵入する以前に比べて単位幅あたりの流量の累積値は2倍程度に増加したことに相当する．さらに，波高比を決定するパラメータの中で，相対水路幅の侵入率に与える影響は小さく，また入射波が狭窄水路に侵入する過程で波面が先鋭化することでその分散性が大きくなったが，本研究で適用した条件ではその影響は無視できることがわかった．
最後に，上述の数値計算格子を4倍に高解像度化して同様の分析を行い，上述の結果と比較した．高解像度化することにより，狭窄水路幅と格子解像度の比が4~20から16~80に増加することで，狭窄地点周辺で生じる縮流の流速場の推定精度が全ケースにおいて大きく向上した．その結果として波高比は最大で14%程度，侵入率は最大で7%程度上述の実験よりも増大した．本実験及び上述の実験ともに，入射波の波長と格子解像度の比は数百以上を維持している．これらのことから，狭窄水路に侵入する以前の入射津波の伝播の推定においてはいずれの場合においても十分な精度で推定できていることが推察される．また，非線形強度が小さい入射波条件においてもその他の入射波条件と同様に縮流の推定精度が向上したことから，狭窄水路幅の解像度が縮流の推定に影響する主要因の一つであることがわかった．
以上の結果から，河口域に来襲した津波が河道内に侵入する過程及び侵入後の挙動を高精度に推定するためには，河道に侵入する過程で発生する縮流を高精度に推定する必要があることがわかった．その推定精度が不十分である場合には上述の波高比及び侵入率を過小に推定し，河道内の津波による水位上昇量及び流量を過小評価する可能性がある．

© 日本地震学会



図．数値実験の概要図（上）及び狭窄部の拡大図（下）
（$h = 10[cm]$, $\eta_{in,max}/h = 0.1$, $L'/h = 60$, $w = 10[cm]$のケース）

© 日本地震学会

Characteristics of tsunami flotsam behavior on vulnerable of embankment foundation by strong motion

*Kentaro Imai[1], Ryoko Obayashi[1], Kuniaki Emoto[2], Hiroyuki Iwase[3], Kentaro Nakai[4]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Wakayama Prefecture, 3. JIFIC, 4. Nagoya University

１．研究目的

既報（例えば，今井・他，2018）において，矢作川河口域において高度な土地利用展開されてきた愛知県碧南市を対象として，南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析（Noda et al., 2008）を津波氾濫解析に組み込んだ氾濫解析を実施し，堤体基礎の強震動脆弱性を考慮した氾濫解析の重要性を示した．解析対象とした蜆川下流部には河道内にプレジャーボートが停泊しており，より現実的な津波被害予測には津波漂流物の影響についても検討する必要がある．本研究では，建物を地形と底面摩擦として取り扱う合成地形モデル（今井・他，2013）を用い，プレジャーボートを対象とした津波漂流物の拡散解析を行い，河岸堤体基礎の強震動脆弱性，建物の影響による漂流物の拡散過程，その影響範囲と集積状況について検討を行う．

２．研究内容

本研究の解析対象領域である愛知県碧南市において地震動応答解析を行い，堤体の沈下量を津波氾濫解析に反映させた．津波氾濫解析には，蜆川河岸の堤体高およびその周辺の地盤高はGEOASIAによる解析結果，詳細建物データ（碧南市），5 mDEM（国土地理院）とGNSS測量に基づいて最小空間分解能3.3 mの合成地形モデルを利用し，堤体天端のパラペット被害の有無，河口から約2.5 km上流にある樋門の開閉についてを計算条件とした．波源は内閣府モデルの津波断層Case 9とし，朔望平均満潮位（T.P. +1.0 m）とした．対象とする漂流物は蜆川下流部に係留されているプレジャーボートとし，その配置や船体諸元について現地調査を行った．漂流物の拡散解析には後藤（1983）による漂流物拡散モデルを適用した．漂流物の水平方向の運動は慣性力，水流の圧力勾配，付加質量，流水抵抗と拡散により記述される，本解析では拡散を除く4種類の力の釣り合いを決定論的に扱い，拡散については決定論的に定まる漂流物の位置を踏まえて確率論的に取り扱った．漂流物の移動および停止について，漂流物（船舶）諸元で設定した喫水0.5 m（浸水深0.5 m）以上の場合で移動し，それ以下では停止条件とした．

３．主な結論

蜆川流域の堤体基礎の被害状況に応じた浸水過程や浸水域の拡大に対応して，漂流物の拡散過程や集積状況も大きく変化することを明らかにした．とくに，樋門の開閉の影響は大きく漂流過程に影響することを示した．また，合成地形モデルによる建物構造物の水流遮蔽効果の影響により津波氾濫の流束が道路に沿うようになるため，漂流物もそれに従って漂流するようになる．合成地形モデルと漂流物拡散解析を組み合わせることで，より現実的な漂流予測が可能となる．中小河川や一部の港湾施設を擁する地域においては，これら構造物の耐震化の重要性を示していることはもちろんのこと，強震動による海岸・河岸構造物や堤体基礎部の脆弱性が津波ハザード評価に与える影響を無視できないことを示している．

謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構　小平秀一）の一環として行われました．

© 日本地震学会

Room B | Regular session：S02. Seismometry and monitoring system

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 9:45 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 12:00 AM - 12:45 AM UTC | ROOM B

[S02]AM-1

chairperson:Ryoichi Iwase(JAMSTEC)

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

[S02-01] Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

○Yusuke Mukuhira[1], Oleg V. Poliannikov[2], Michael C. Fehler[2], Hirokazu Moriya[3] (1.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2.Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3.School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan)

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

[S02-02] Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

○Ryoichi Iwase[1] (1.JAMSTEC)

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

[S02-03] Channel ID number expansion in WIN format

○Kenji Uehira[1], Shigeki Nakagawa[2], Hiroshi Tsuruoka[2], Taku Urabe[3] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Telemetra)

Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

*Yusuke Mukuhira[1], Oleg V. Poliannikov[2], Michael C. Fehler[2], Hirokazu Moriya[3]

1. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2. Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3. School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan

Detection and analysis of small magnitude events are valuable for better characterization and understanding of reservoirs in addition to developing strategies for mitigating induced seismicity. Three-component (3C) receivers, which are now widely used, are commonly deployed in boreholes to provide continuous seismic data amenable to novel and powerful analysis. Using multicomponent continuous records of ground motion, we utilize two principal features of the direct P-wave arrival: (1) linearity and (2) polarization in the direction along the ray path to the source region to detect small magnitude events undetectable by conventional methods. We evaluate the linearity of polarization and direction of arrival in the time and frequency domains by introducing the spectral matrix analysis method and combine them into a scalar characteristic function that is thresholded for event detection purposes. We boost the signal-to-noise ratio by stacking characteristic functions obtained at different 3C receivers along an empirical moveout of a master event known to have occurred in an area of interest. This allows us to detect smaller events and spatially tie them to a relatively small area around the large event. We apply our method to field data recorded at the Groningen gas field in the Netherlands. Our method detects all catalog events as well as several previously undetected events.

© 日本地震学会

Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

*Ryoichi Iwase[1]

1. JAMSTEC

海洋研究開発機構(JAMSTEC)が1993年に相模湾初島南東沖水深1175mの海底に設置した海底ケーブル型観測システム「深海底総合観測ステーション」（初島沖ステーション）は，深海環境の多面的な観測を目的としており，地震計のほか，ハイドロフォン，ビデオカメラ，CTD（海水の電気伝導度・水温・深度）センサや電磁流向流速計等の多種類のセンサを搭載していた．初島沖ステーションは，1999年7月に海底ケーブルの地絡障害により一度観測を停止し，その後2000年に更新されている．
海底に設置されたハイドロフォンの信号は，海底ケーブルを通じ初島陸上局においてアナログ信号として出力され，設置当初から1999年7月の停止までの期間は，ペンレコーダに記録されるとともにアナログデータレコーダに連続記録されていた．しかしながら，これまで当該データは本格的に再生・解析されていなかった．ハイドロフォンは，地震に伴うT波をはじめ，水中を伝搬する音響信号を検出することが可能である．岩瀬(2017)では，ビデオカメラによる海底観察の際，ビデオテープの音声トラックに録音されたハイドロフォン信号から，伊豆半島東方沖地震時の泥流に伴う礫の衝突音と推定される信号やホワイトノイズ的な信号を検出している．ビデオカメラによる観察は間欠的に実施されているため，ビデオカメラによる泥流の観測は，複数回発生したうちの一部に限られている．このため，未再生のハイドロフォンデータの解析は泥流や混濁流の解明等にも資する可能性がある．
ハイドロフォン信号の収録には，TEAC製カセットデータレコーダ XR-5000WBが使用された．当該レコーダは，14チャネルのアナログ信号入力インタフェースを有し，VHSビデオテープを記録媒体として周波数変調方式で記録する．通常無人の初島陸上局にて1週間毎にテープを回収するため，全チャネルに同一信号を入力し，テープ（VHS 160分テープ）の走行速度を0.6 cm/sとし，テープの順方向走行時は奇数チャネルに，逆方向走行時は偶数チャネルの信号を順次記録する設定により，1週間の連続記録を可能としていた．収録テープは約300本に及ぶ．時刻はJJYで校正されており，ボタンの手動押下によりBCD(Binary-coded decimal)表現の日付・時刻情報が重畳されることに加え，毎正時と毎時30分にはそれぞれ2個と1個の短時間パルスが観測信号に自動的に重畳されていた．再生手段は当該レコーダに限られるが，はるか以前に生産終了となっており，今回は収録に使用していたレコーダを用いてテープを再生し，出力信号をリニアPCMレコーダ（OLYMPUS LS-100）に収録した．再生時，テープ走行速度を収録時と同じ0.6 cm/sとすると，テープ走行の揺らぎが原因と推定されるノイズが大きい．再生効率も考慮して，テープ走行速度を収録時の8倍の4.76 cm/sとしたところ，同ノイズの低減が見られた．なお，当該レコーダの仕様では，テープ走行速度0.6 cm/s時の収録可能周波数帯域は0.977 kHz以下となっている．図1は，1997年3月3日23:09に発生した伊豆半島東方沖地震(M5.5)を観測した波形例である．
今後，順次再生を進めていく予定であるが，当該レコーダの劣化が著しく，走行が不安定であることに加え，電解コンデンサやその周辺の基板の焼損等の故障も発生し，困難に直面している．使用可能なTEAC製データレコーダ XR-5000WBについての情報があればお知らせ頂けると幸いである．

参考文献

岩瀬，2017年地震学会秋季大会講演予稿集，S11-01，2017.

© 日本地震学会

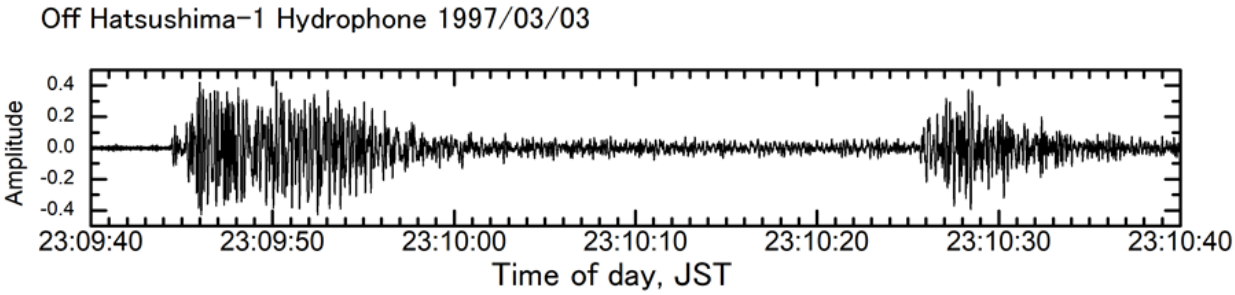


図1　ハイドロフォンで観測した伊豆半島東方沖地震の波形例

© 日本地震学会

Channel ID number expansion in WIN format

*Kenji Uehira[1], Shigeki Nakagawa[2], Hiroshi Tsuruoka[2], Taku Urabe[3]

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

WINシステム（卜部・束田，1992など）は地震のフェーズの検測や震源決定等の解析，大学・気象庁・防災科学技術研究所などの機関間のデータ流通に広く使われている多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで，UNIX上で動作するプログラム群である．WINシステムではWINフォーマットと呼ばれるデータフォーマットを定義している．WINフォーマットにおいてデータの区別を16ビット長のチャンネル番号（channel ID）によって行っており，最大65536チャンネルまで扱うことが出来る．

卜部（データ流通ワークショップ，2013）で言及があった通り，JDXnetで流通しているのは10000チャンネル弱であり，85%程度は空いているが，多くが虫食い状態であり大きなブロックは残っていない．一方で，陸上や海底でのオフライン観測で得られた観測データをJDXnetの流通データと統合して解析を行ったり，複数機関でのデータ共有，高感度地震計以外の地殻変動・火山・強震等の多項目観測データを同一システムで取り扱う機会が増えており，チャンネル空間の枯渇が課題となっていた．そこで，チャンネル番号の桁数を現行の16ビット長から32ビット長へ増加することにした．

WINフォーマットは観測点での収録から，伝送流通網，収録系にまで幅広く使用されている．チャンネル空間の拡張にあたっては新しいフォーマットが必要となる．運用中の機器との互換性や，これまで収録されてきた既存データとの相互運用性を考えると，ネットワーク上やファイルシステム上で新旧両フォーマットが混在可能であることが望ましい．またソフトウェアについても両フォーマットを混在した状態を扱えることが望ましい．そこで，現行のWINフォーマットを拡張することとした．

WINフォーマットは1秒のブロックが基本単位になっている（図上段）．先頭に6バイト長の時刻情報があり，その後に複数のチャンネルブロックが連なっている．各チャンネルブロックの先頭には4バイト長のチャンネルヘッダがついており（図中段の黄色ハッチ部），その後ろにデータの本体が続く．チャンネルヘッダには2バイト長のチャンネル番号（channel ID）が含まれる（図中段赤枠）．現行フォーマットでは，チャンネル番号（channel ID）として0x0000から0xFFFFまでの値を取ることが出来る．0xFFXXのチャネル番号は32ビット拡張用として予約されていたが，それを利用することとした．即ち，先頭バイトが0xFFであったら拡張フォーマットであることを表し，更に続く2バイト目が0x00の時(図下段青枠)は，引き続く32ビット（図下段赤枠）が新たなチャンネル番号（channel ID）を示すと定義した．なお，チャンネルヘッダの先頭2バイトが0xFF01～0xFFFFの場合は現在未定義であり，将来の拡張用とすることにした．

以上，今回拡張したチャンネル番号の割り振り方をまとめると，

1．0x0000～0xFEFF (0x0000 0000～0x0000 FEFF)は新旧どちらのフォーマットでも表現出来るチャンネル．ただし，基本は16ビット長で作成．

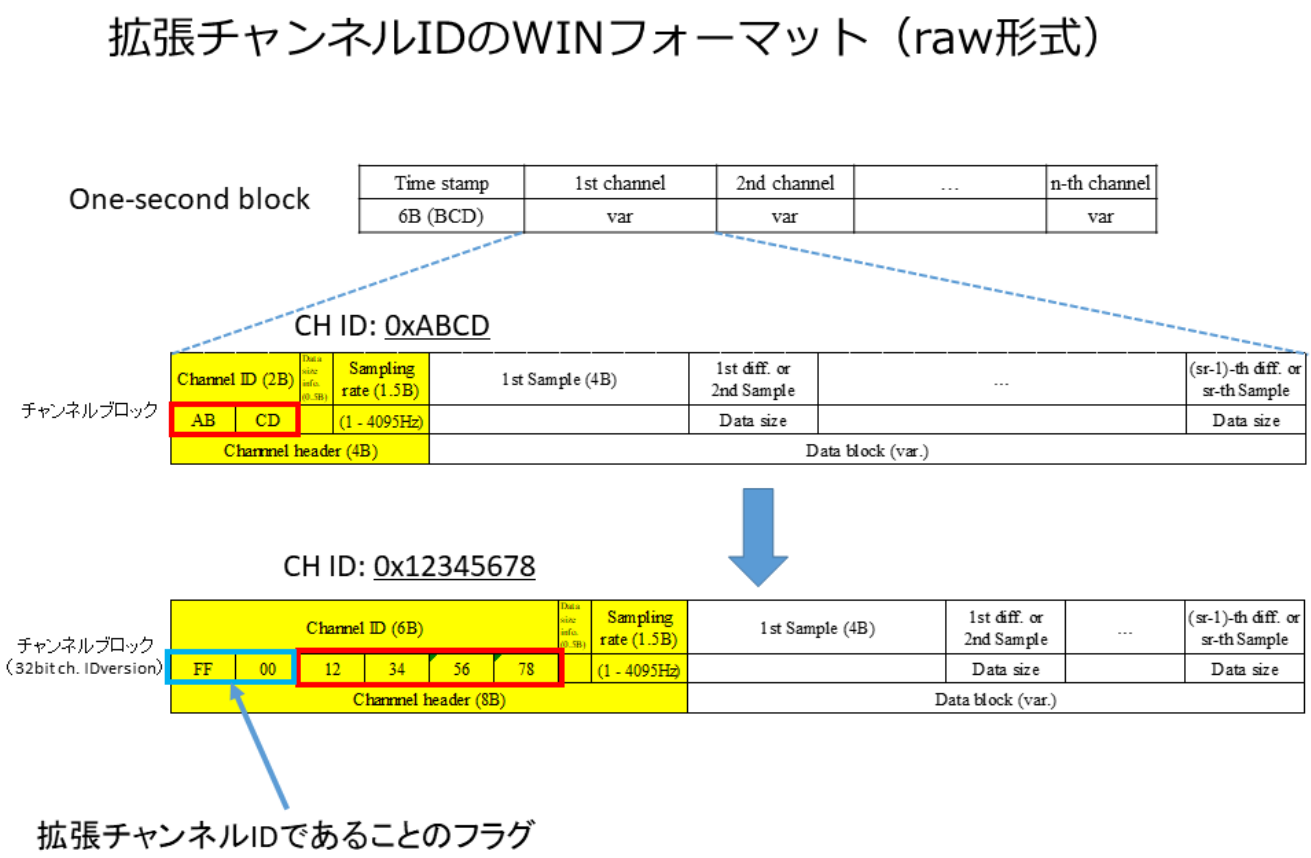
2．0xFF00以降 (0x0000 FF00～0xFFFF FFFF)は拡張フォーマットでのみ表現できるチャンネル．

となる．なお，チャンネルヘッダには，4096Hz以上のデータを扱える高サンプリングレート等のバージョンもあるが，チャンネル番号の拡張については上で述べた方法で対応可能である．

現在，チャンネル番号32ビット拡張化については，WINシステムの基本ライブラリの対応が完了し，順

© 日本地震学会

次，個々のソフトウェアの対応を進めている．今後，伝送流通網や収録系のテスト環境の下で検証を行う．



© 日本地震学会

Room B | Regular session：S19. Seismology, general contribution

Sat. Oct 31, 2020 9:45 AM - 10:00 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 12:45 AM - 1:00 AM UTC | ROOM B

[S19]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

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

[S19-01] A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

○Satoko Murotani[1], Kenji Satake[2], Hiroshi Tsuruoka[2], Hiroe Miyake[2], Toshiaki Sato[3], Tetsuo Hashimoto[4], Hiroo Kanamori[5] (1.National Museum of Nature and Science, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Ohsaki Research Institute, Inc., 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Seismological Laboratory, California Institute of Technology)

A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

*Satoko Murotani[1], Kenji Satake[2], Hiroshi Tsuruoka[2], Hiroe Miyake[2], Toshiaki Sato[3], Tetsuo Hashimoto[4], Hiroo Kanamori[5]

1. National Museum of Nature and Science, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Ohsaki Research Institute, Inc., 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Seismological Laboratory, California Institute of Technology

我が国には明治以来130年以上に渡る地震計・検潮儀による地震・津波観測の歴史があり，膨大な記録が残されている．気象庁や大学機関などの甚大なる努力によって蓄積されてきた地震・津波波形に関するアナログ記録は，所蔵リストや画像のデータベースとして公開され，誰もが利用しやすいよう整備されてきている（Furumura et al., 2020, SRL; Matsu’ura et al., 2020, SRL; Satake et al., 2020, SRL）．しかしその一方で，観測機器で得られたアナログ記録を数値化し，科学的な解析に耐えうるデジタルデータとするためにはかなりの精査時間と労力が必要であるため，波形記録が数値化されたデータベースは極めて少ない（例えば，消防庁消防大学校消防研究センターによる「気象庁1倍強震計記録の数値化データ公開システム」がある）．近年，地震の解析手法の高度化や計算機の高性能化が進み，速度構造等の新しい知見も得られており，貴重な歴史観測データを用いて過去の被害地震について再解析することにより，地震や津波の発生メカニズムや防災に対する新たな研究成果が生み出されることが期待される．そこで，1920年代～1940年代の歴史的に重要な被害地震・津波（例えば，1923年関東地震や1944年東南海，1946年南海地震）に関する記録の画像化・数値化を行い，将来発生が懸念される大地震に対する防災・減災対策への一助となるよう学術データベースの構築を進めているところである．

このデータベースは地震名や観測点名などで検索できるようにしており，可能な限り大振幅の波形の円弧補正を施し，地震計の特性も併せて提供する．大地震の場合，中央気象台や各地測候所の記録紙には地震計の特性が一緒に書かれていることが多い．しかし，東京大学地震研究所に残る帝国大学時代からの記録紙には特性は書かれておらず，別途観測帳などを参照する必要があり，時期によっては値にばらつきも見られる．いつの情報なのかということも，できるだけ付記する必要がある．公開は数年後を目指しており，国立科学博物館と東京大学地震研究所で公開することを計画している．科博での公開は広く一般の方々に，東大地震研での公開は研究者にとって有用であろう．地震学分野においては，過去の地震の震源パラメータ等の解明や，各地での震度や長周期地震動の検証等への利用，地震工学，社会防災学などの分野では，公開された地震波形や津波波形の数値が，建物構造物等に関連する耐震設計や沿岸域での津波防災対策等に利用されることが期待される．学校教育や博物館分野においては，数値化されたデータを提供することにより，専門的な知識や計算機等を必要とせずに容易に波形データを利用することができ，地震に関する展示や教育の普及への利用価値はかなり高いと思われる．さらには，歴史分野や防災教育の分野でも利用できるであろう．

日本は歴史的な観測記録が充実している数少ない地震大国であり，国際的にも重要な研究対象である．歴史観測データ保存と活用の重要性は国際的にも認識されており，本データベースは貴重な歴史観測データを数値的に提供するとともに，元画像を保存公開することで研究の再現性担保やデータのバックアップとなる意義もある．海外の研究者から東大地震研に問い合わせが多いのは，海外で発生した大地震を本郷の地震計で記録した波形の利用についてである．英語でのページも作成予定であるので，日本で観測した海外の大地震などの記録も数値化できれば，より多くの海外の研究者にとっての利便性も高まるだろう．当面は1920年代～1940年代に日本周辺で発生した主要な歴史地震記象の数値化を行うが，将来的には，1950年以降の記録や海外で記録された波形記録についても蓄積できればと考えている．本データベースに関しては，Murotani et al., (2020), Seismol. Res. Lett., doi: 10.1785/0220190287においても紹介している．

© 日本地震学会

謝辞：本データベースの作成は，国立科学博物館における2017年度館長支援経費，JSPS科研費JP18HP8037，JP18H01289，東京大学地震研究所共同利用（2020-G-16）によって実施されています．記して感謝いたします．

© 日本地震学会

Room B | Regular session：S18. Education and history of seismology

Sat. Oct 31, 2020 10:00 AM - 10:15 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 1:00 AM - 1:15 AM UTC | ROOM B

[S18]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

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

[S18-01] Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

○Shota Takeichi[1], Toshitaka Baba[1], Naoyuki Nakayama[2] (1.Tokushima University, 2.Tsuda Junior High School)

Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

*Shota Takeichi[1], Toshitaka Baba[1], Naoyuki Nakayama[2]

1. Tokushima University, 2. Tsuda Junior High School

初等中等教育における防災教育は将来の災害軽減に必要不可欠であり、いくつかの学校では地域住民と連携も含めて意欲的に行われている。例えば、徳島県徳島市津田中学校では防災クラブを結成し、中学校周辺地域の事前復興計画の作成をしている。一方、AIに代表される情報通信技術の進展は著しく、今後、防災分野においても主要な役割は果たすであろうと考えられる。本研究では、このような観点からコンピュータ上で津波避難シミュレーションを中学生に実施してもらい、それによる彼らの考察をもって、有効な防災意識向上効果ついて調査したので報告する。

はじめに、津波避難シミュレーションの概要を説明する。津波避難シミュレーションにマルチエージェントモデルのCrowdWalkを用いた。CrowdWalkは一次元空間モデルを用いた大規模群衆流動にも対応したマルチエージェント歩行者シミュレータであり、実際の花火大会や劇場での避難訓練で群衆移動の検証が行われている。防災クラブの生徒らは、学校周辺地区内の住民に対して、津波避難先として利用する避難場所とそこまでの経路の調査を実施した。（ちなみに、住民は必ずしも最短経路を使って最寄りの避難場所に避難するとは限らない。）調査をもとに、学生らが自ら作成した避難シミュレーションモデルで、エージェントの避難経路を設定し、シミュレーションを行った。その結果、主要な道路で避難やの混雑（渋滞）が発生する可能性が示唆された。避難完了時間は2112秒であった。また、単に最寄りの避難場所に最短経路で避難する場合のシミュレーションも実施し、この場合は、避難完了時間は852秒であった。避難シミュレーションモデルの作成開始から、シミュレーション実施完了まで、およそ２か月かかった。その期間においては、メール等で利用法を説明するだけでなく、防災クラブの活動に数回訪問して、作業を手助けした。

生徒らに、今回の活動についてヒアリング調査を行った。シミュレーションを用いたことで、避難時に混雑が起こる場所がわかったことや避難のイメージをつかめやすくなったなどの回答があった。これらから、生徒たちにとって、避難シミュレーションの実施は防災活動や事前復興計画を考える上で有効なツールとなる可能性があることが分かった。一方、今回利用したCrowdWalkは専門的なツールで、説明書も中学生向けに書かれているわけではないため、シミュレーションの実施には相当のサポートが必要だった。しかし、要点をつかむと入力作業の速度は一気に上がった。これは、情報ツールを使うことに幼いころから慣れ、興味関心が高いからだと考える。

© 日本地震学会

Room B | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 12:00 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 1:30 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B

[S03]AM-2

chairperson:Kosuke Heki(Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University), chairperson:Yuta Mitsui(Faculty of Science, Shizuoka University)

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

[S03-01] Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

○Takao Tabei[1], Mako Ohzono[2], Bishow R. Silwal[3], Rajendra Bhandari[3], Janak B. Chand[3], Soma N. Sapkota[3], Hiroe Miyake[4], Kazuki Koketsu[4] (1.Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2.Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.Department of Mines and Geology, Nepal, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S03-02] Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

○Yusuke Tanaka[1], Yusaku Ohta[1], Shin'ichi Miyazaki[2] (1.Tohoku University, 2.Kyoto University)

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

[S03-03] Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

○Fumiaki Tomita[1], Takeshi Iinuma[1], Ryoichiro Agata[1], Takane Hori[1] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S03-04] Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

○Yuta Mitsui[1], Hinako Muramatsu[2], Yusaku Tanaka[3] (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S03-05] Crustal deformation by a heavy rain episode

○Kosuke Heki[1], Syachrul Arief[1], Wei Zhan[2] (1.Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2.The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration)

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

[S03-06] Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

○Angela Meneses-Gutierrez[1,2], Paul Segall[3], Takeshi Sagiya[2,4] (1.Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3.Stanford University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

*Takao Tabei[1], Mako Ohzono[2], Bishow R. Silwal[3], Rajendra Bhandari[3], Janak B. Chand[3], Soma N. Sapkota[3], Hiroe Miyake[4], Kazuki Koketsu[4]

1. Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2. Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Department of Mines and Geology, Nepal, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

ネパールの国土の大部分はインドプレートとユーラシアプレートの収束境界域の上盤側に位置し，直下で発生する逆断層型地震は直接的な脅威である．最近では2015年Gorkha地震 (Mw 7.8) が記憶に新しいが，この地震の震源域の西方には，過去数百年間にわたって顕著な地震が発生していない広大な地震空白域が広がっている．2016年に開始された地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム「ネパールヒマラヤ巨大地震とその災害軽減の総合研究」(通称NERDiM)の一環として，我々はネパール中部・中西部に計10点のGNSS連続観測点を設営した．我々の観測網は，ネパール国内に既設のGNSS観測網を補間しながら，地震空白域における観測強化を目指している．最終的には，既設観測網のデータも含めてネパール全土の詳細な変位速度場とひずみ速度場を算出し，測地学的側面からヒマラヤ主要断層帯の地震ポテンシャル評価を行うことを目標としている．

UNAVCO経由でデータ入手可能なネパール国内のGNSS観測点の総数は50に近いが，安定して観測が継続されているものは半数に満たない．今回は，GIPSY/OASIS II ver.6.4のPPP-AR法を用い，NERDiM観測点を加えた2004-2019年の期間のすべてのデータより日々の座標解を算出し，観測期間の長短に関わらず観測点の平均変位速度を求めた．さらに，変位速度場を空間補間し，ひずみ速度場を導いた．結果を要約すると，ユーラシアに対するインドプレートの北進を反映して，ネパール国内では南北方向の10-15 mm/yrの短縮変形が卓越する．ひずみ速度に換算して約0.1 ppm/yrとなる．すなわち，インド-ユーラシアの相対運動速度 (36-37 mm/yr，DeMets et al., 2010) の約30-40%がヒマラヤ前縁域の短縮変形に費やされている．NERDiM観測網は，とくにインド国境に近いプレート境界周辺の空間分解能の向上に大きく貢献している．

GNSS平均変位速度場を用い，インド・ユーラシアプレート境界面における地震間の固着分布を推定した．従来の推定では，ほぼ平坦な断層面が北へ向かって10°程度の緩やかな角度で傾き下がるモデルが用いられてきた (例えばStevens and Avouac, 2015)．それによると，地表から深さ20 km程度までほぼ一様な強い固着が求められている．一方，2015年Gorkha地震発生の構造地質学的考察から，深さごとに急傾斜の断層セグメントと緩傾斜のセグメントが交互につながってプレート境界面を構成するモデルが提唱されている (Hubbard et al., 2016)．今回は，この後者のモデルを採用した．固着するプレート境界面の下限を深さ35 kmと仮定し，深さ5 kmごとの等深線に沿って30-40 km間隔にノードを設定した．TDEFNODE (McCaffrey, 2009) を用い，各ノードにおけるすべり欠損速度を推定した．プレート相対運動速度で規格化した固着率は，プレート境界面の形状と強い相関を持つ．すなわち，緩傾斜のセグメント上では非常に強い固着を，急傾斜のセグメント上ではほぼゼロに近い弱い固着を示す．今回の結果は予備的な解析によるものであるが，単純なプレート境界面形状を用いた従来の結果とは大きく異なる．プレート間固着が境界面形状のみに規定されるものかどうか，今回採用したモデルが実際の広域の構造を正しく反映したものかどうか，さらなる検証が必要である．

© 日本地震学会

Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

*Yusuke Tanaka[1], Yusaku Ohta[1], Shin'ichi Miyazaki[2]

1. Tohoku University, 2. Kyoto University

地震発生サイクルの一連の過程に伴う断層すべり現象は幅広い時間スケールで発生するため，その統一的な理解のためには広帯域な観測手段が必要不可欠である．しかしながら現在のGNSS測位解析は，1時間から半日程度の時間帯域で精度が大きく低下する．これは主に地表変位と，大気遅延等の他の未知パラメータとの分離の困難性による．そこで我々は新たな手段として，GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法 (以降PTS (Phase To Slip)) を用いた広帯域断層すべりモニタリング技術の開発に取り組んでいる．PTSでは座標推定を行わず，搬送波位相変化をグリーン関数と視線方向への幾何学的変換を介して直接断層すべりに結びつける．そして，断層すべりと大気遅延等の各種パラメータの，初期時刻からの相対変化を一括で推定する．このため，未知パラメータの分離精度の評価と改善に有利であると考えられる．

本研究では広帯域な断層すべり推定手段としてのPTSの性能評価を目的として，同手法による2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続的な推定を試みた．推定では東日本の69のGEONET点の搬送波1秒データを使用し，3月11日の14時から16時 (JST，本震発生は14時46分) の2時間について解析した．その結果，本震と茨城沖で発生した最大余震について，通常の測位解析を用いた推定とよく一致するすべり分布やマグニチュードが推定された．得られたすべり分布から計算される地表変位場についても，測位による推定と良好に一致する値となった．さらに岩手沖で発生した余震のすべりも検出された．これらの結果から，短時間に連続して発生する地震時すべりをPTSで安定して推定できることが示された．

一方で本震後の時間帯に注目すると，推定された断層すべり時系列には上記の3つの地震時すべりとは別に，ゆっくりした逆断層すべりの増加が見られた．増加を示すのは主に本震で大きくすべった領域に隣接する陸寄りの深い側の小断層であり，岩手から茨城までの沿岸付近に複数のすべり域が推定された．これらのすべり域はそれぞれ異なる時間発展を示し，本震後の39分間で最大0.8mのすべりが推定された．また全領域の合計ではM_w7.60相当となった．これらはMitsui and Heki (2013) 等の先行研究と比べて明らかに大きな値であるが，初期の余効すべりを捉えたものであると考えられる．
以上の結果から，PTSを用いた地震時から地震後のすべりの連続的な推定の可能性が示された．発表ではPTSの原理や推定結果の詳細を解説し，それらの妥当性についても議論する．

© 日本地震学会

Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

*Fumiaki Tomita[1], Takeshi Iinuma[1], Ryoichiro Agata[1], Takane Hori[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

地殻変動観測データを用いた断層すべり分布の推定には，一般的にすべりの平滑化条件を課した最小二乗法が行われ，その度合いを調整するハイパーパラメータをABICやLカーブ等の基準により決定する．しかし，解の直接的な拘束条件（非負拘束等）を課した最小二乗法を行う場合， ABICが解析的に正しく計算できないことや，解の事後確率分布の非ガウス性に対応できないなどの問題点に対応するため，マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法の活用が望まれる [Fukuda & Johnson, 2008]．更に，従来の手法ではすべりの平滑化条件として，解析空間で一様な拘束条件を課す場合がほとんどであり，断層すべりの広がりの非一様性に対応できていない．また，観測点分布の空間的な粗密の違い等により，断層すべりのモデル誤差が空間的に大きく異なり，インバージョン結果の確からしさ・解釈が難しい [Kimura et al., 2019] といった問題点が挙げられる．

上記の問題の解決のため，我々は，Reversible-jump MCMC法 [Green, 1995] によるTrans-dimensional inversion（TDI）手法の開発に取り組んでいる [e.g., Tomita et al., 2020, JpGU-AGU]．本手法では，Bodin & Sambridge [2009]と同様にVoronoi cell 空間分割により断層面を区切り，cell毎の未知パラメータ（すべり量）とcell自体の数（未知パラメータ数）を同時に探索する．これにより，観測データから求め得る空間解像度とすべり分布自体の空間スケールに合わせた空間分割がなされ，最小限の未知パラメータ数で断層すべり分布が求められるとともに，非一様な断層すべりの広がりの表現も可能となる．また，本手法はMCMC法の一種であるため，解の直接的な拘束条件を課すことや解の事後確率分布の非ガウス性を表現することも可能である．Tomita et al. [2020, JpGU-AGU] では，このTDI法を測地データを用いた沈み込み帯での巨大地震時すべりの推定に適用し，非一様な断層すべりの広がりや解の事後確率分布の非ガウス性の表現が可能であることを確かめた．

本研究では，上記のTDI法を沈み込み帯での固着分布の推定に適用した．固着分布の推定では巨大地震時すべりと比較して観測データのSN比が小さくなりがちであるため，そうした悪条件下でのTDI法の挙動を確認するとともに，従来のABICによりすべりの平滑化拘束を最適化した最小二乗法（ABIC-LSM）に基づく推定結果との比較から，固着分布の推定にTDI法が適しているかどうかを検証した．このような手法の有用性を確認するため，Syntheticデータを用いて仮定した固着分布の再現度合いの検証を行った．Syntheticデータは，均質半無限弾性媒質 [Okada, 1992] を仮定したバックスリップに対する応答として求めた．沈み込み帯プレート境界断層を模した傾斜角15度・幅300 km・長さ500 kmの矩形断層を仮定し，20 km ×20 kmの小断層を配置した．なお，TDI法では，この小断層をVoronoi cellにより空間的にグループ分けすることで未知パラメータ数を調整することになる．観測点配置は，海溝から200 kmの距離を海岸線として，①150陸上観測点＋25海底観測点．②150陸上観測点のみ，の2パターンを用意し，固着分布の推定をそれぞれ行った．Syntheticデータは，円形の滑らかな固着パッチを海溝に沿って３つ並べた複雑な固着分布から計算された地表面変位に対して，実観測成果に沿った観測誤差を与えることで作成した．TDI法の実行にあたっては，初期状態として20個のVoronoi cellを配置し，すべり量の初期値は従来の最小二乗法による推定結果を元に設定することで，初期収束を早める方策をとった．また，初期値の影響を軽減し計算時間を短縮するため，複数鎖の並列計算を行い（今回は2000並列鎖で実施），合計で1×10^6サンプルのアンサンブルにより推定を行った．

ABIC-LSMによる固着分布の推定結果は，どちらの観測点分布でも仮定した固着分布よりも滑らかな分布を示した．これは，観測点分布の粗さや観測データのSN比の低さから，十分な空間解像度が得られず，強い平滑化拘束が課された結果であると考えられる．一方で，TDI法による推定結果は，ABIC-LSMの結果に比べて，全体的により仮定した固着分布に近い滑らかさの分布が得られた．特に，観測点分布が密でモデル解像度が高いと

© 日本地震学会

考えられる領域の滑らかさがよく再現され，逆にモデル解像度が低いと考えられる領域でやや仮定した固着分布よりも滑らかな分布が推定された．これは観測点分布の粗密による空間解像度に合わせて，Voronoi cellの広がり（平滑化度合い）が調整されたためと考えられる．こうした特徴は，空間的に一様な平滑化条件を置かないTDI法による利点であると考えられる．また，観測点分布が疎な領域では，解の事後確率分布が非ガウス性になる傾向が得られるなど，MCMC法による推定の利点も確認することができた．こういった特徴により，TDI法では観測データの持つモデルパラメータへの感度をより生かした解析が可能であると考えられる．

発表では，より詳細なSyntheticデータの解析結果の報告を行う．また，今後南海トラフでの実データを用いた解析を実施し，その結果も踏まえて報告する見込みである．

© 日本地震学会

Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

*Yuta Mitsui[1], Hinako Muramatsu[2], Yusaku Tanaka[3]

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

本研究では、世界で最も深発地震が活動的なトンガ海溝沈み込み帯における、地殻変動と地震活動に注目する。データとしては、GNSS変位時系列(Blewitt et al., 2018)とANSS地震カタログを用いる。トンガのGNSSデータには、2006年5月3日に海溝近傍で発生したM8.0のスラブ内地震による地震時変位と余効変動が明確に記録されている。そのため、それ以前のデータを定常変動と仮定してデトレンドを行い、非定常変動の推定を行った。これと比較するため、地震カタログから沈み込み帯の浅部～深部にかけての背景地震活動率(ETAS model; Ogata, 1988)を1年ごとに推定し、その時間変化を追った。

我々は、トンガのトンガタプ島・ヴァヴァウ島のGNSS観測点において、2009年9月29日に数百km北方のサモア諸島沖で発生したM8.1のスラブ内地震直後から非定常変動(～数cm)が発生していることを発見した。この非定常変動は海溝方向を向いており、2009年サモア地震の余効変動(Han et al., 2019)そのものというよりは、別種の独立したスローイベントが2009年サモア地震によって誘発されたと考えられる。このイベントは、プレート境界の逆断層すべり(スロースリップイベント)としても解釈できるが、2006年スラブ内地震の余効変動が再加速したという見方も可能である。この非定常変動は数年継続し、2013年5月23日のスラブ内地震(M7.4)の発生時期には収束していた。一方、地震活動の解析からは、2009年サモア地震から2013年のスラブ内地震の時期にかけて、前後の時期よりも深さ400km以深の背景地震活動率が数十%低下していたことがわかった。

以上のことから我々は、2009年サモア地震(M8.1)から2013年スラブ内地震(M7.4)にかけて、トンガ海溝沈み込み帯の少なくとも一部で、浅部から深部にまで影響を与える"スローイベント"が発生していたと考える。その実態は、プレート境界でのスロースリップイベントやプレート沈み込みの一時的加速など、他の場所で報告されてきた現象と同種のものであるかもしれないが、沈み込み帯における浅い地震と深い地震の関連性についても新たな知見を与えるものである。

© 日本地震学会

Crustal deformation by a heavy rain episode

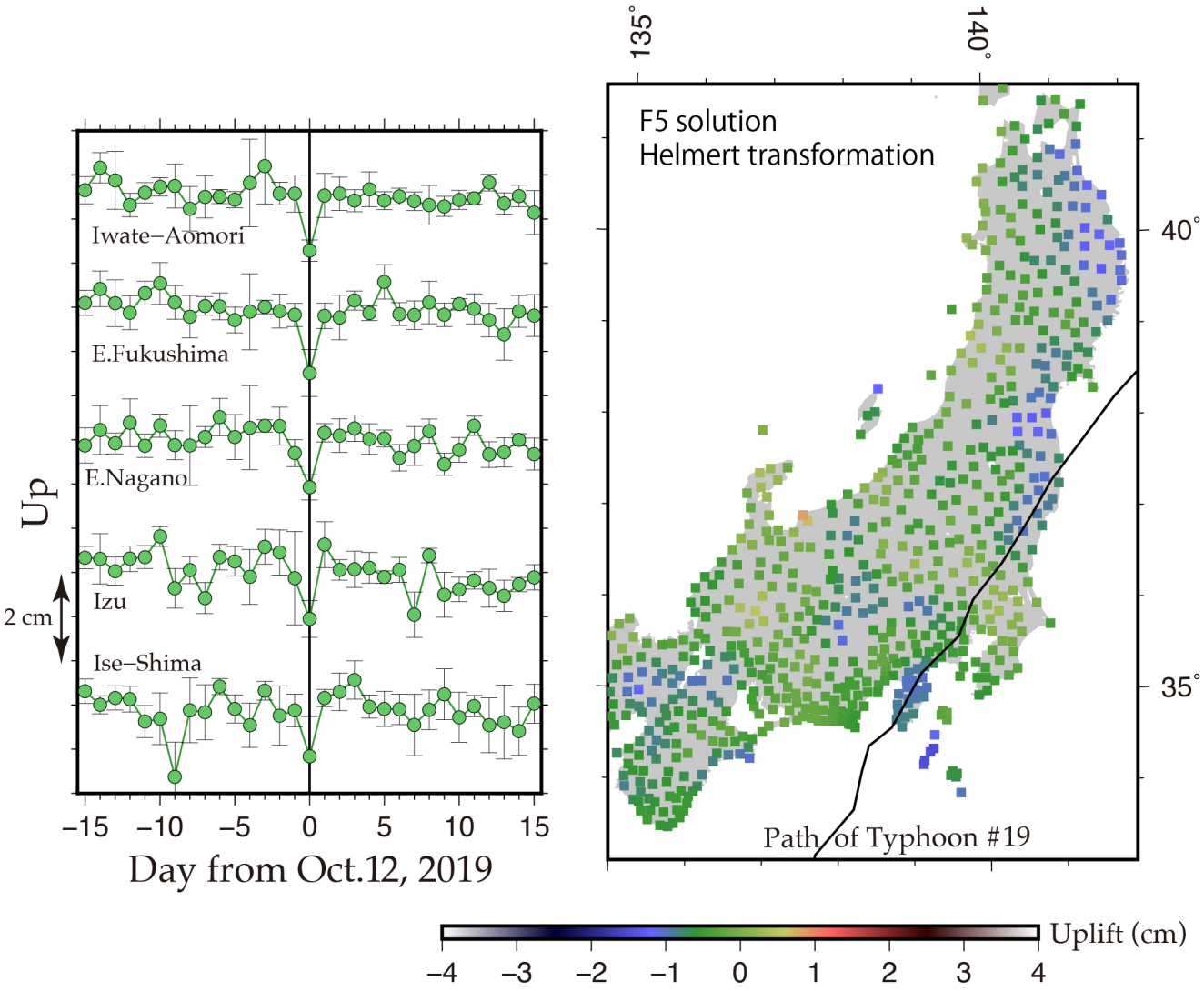
*Kosuke Heki[1], Syachrul Arief[1], Wei Zhan[2]

1. Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration

地表に置かれた荷重は固体地球の弾性変形をもたらす。古くから知られる海洋潮汐荷重変形に加え、大気荷重、積雪荷重、非潮汐性海洋荷重、ダムの湛水等が、全球衛星航法システム(GNSS)でしばしばみられる季節的地殻変動の要因として考慮され、GRACE衛星による重力季節変化とも定量的に対応づけられている。本研究では2019年10/12に日本列島を襲った令和元年台風19号(Hagibis, Category 5) を主に取り上げ、台風がもたらした多大な降水荷重による固体地球の変形を議論する。雨量はアメダス降雨計に加え、レーダーを用いた高空間分解能の解析雨量を併用した。GEONET測位データは国土地理院のF5解を用いた。全国から選んだ約百点の座標を用いて台風前後±15日間の中央値からの偏差を最小にするようなHelmert変換パラメータ（平行移動、回転、膨張）を日々推定した。それらの変換をGEONET全体に施し、測位解全体に共通な系統誤差を取り除いた。その結果台風の進路に沿った伊豆、福島浜通り、岩手沿岸部などで1-2 cmの沈降が台風上陸日に確認された。また沈降は翌日にはほぼ回復し、雨水が海洋に流出する時定数が1-2日であることがわかる。次にFarrell (1972)の荷重グリーン関数（剛性率は30 GPaとした）を用いてGNSS局の沈降を入力データとして、降水荷重分布を最小二乗法で推定した。台風の低気圧に起因する負の荷重は地殻の隆起をもたらすが、それらはアメダス気圧計のデータから計算した日平均気圧を用いて補正した。台風Hagibisがもたらした本州東部の総降雨量は、解析雨量を時空間的に積分すると約33 Gtとなる。一方、地殻上下変動から推定された荷重はそれをはるかに超える40 Gt程度となる。実際の荷重は、降雨量から一日の流出分を差し引いたものになるはずであり、雨量を超える荷重が実在することは考えられない。この矛盾の原因には、(1) GNSS局が立地する地域の地殻岩石の剛性率が局地的に低い、(2) GNSS局が凹地に選択的に配置されているため雨水が局地的に集中し、地域的な平均より大きな沈降がもたらされた、の二つが考えられる。GNSS局の標高を、GNSS局を中心とする一辺20 kmの正方形の中の平均地形高度(ETOPO1モデルから計算)と比べると、GNSS局の方が平均して数百m低いことがわかった。従って本研究では(2)が主原因と考えている。発表ではさらに台風15号(Faxai, Category 4)や、梅雨前線が例年のようにもたらす西日本の豪雨についても、同様な地殻上下変動と解析雨量を比較する。

Figure: (left) Average time series of 7 GNSS stations around 2019 Oct. 12 from each of the 5 regions, Ise-Shima, Izu, Eastern Nagano, Eastern Fukushima, and Iwate-Aomori, along the path of the typhoon Hagibis (#19 in 2019). We can see significant subsidence on the day of the landfall and recovery on the next day. (right) Subsidence of GNSS stations on 2019 Oct. 12 relative to their median position of the period shown in the left figure. Spatially smoothed with the averaging radius of 20 km. We used the GSI F5 solutions and removed common mode errors by performing daily Helmert transformation to adjust the daily positions to the median positions.

© 日本地震学会


Iwate–Aomori
E.Fukushima
E.Nagano
Izu
Ise–Shima
Up
2 cm
−15 −10 −5 0 5 10 15
Day from Oct.12, 2019
135°
140°
40°
35°
F5 solution
Helmert transformation
Path of Typhoon #19
Uplift (cm)
−4 −3 −2 −1 0 1 2 3 4

© 日本地震学会

Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

*Angela Meneses-Gutierrez[1,2], Paul Segall[3], Takeshi Sagiya[2,4]

1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Stanford University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Crustal deformation has been transformed in the past decades by the availability of continuous GPS data. Time series analysis of GPS data often assumes strain accumulation at a steady rate. In the case of NE Japan, analysis of horizontal GPS data from 1996-2010 revealed a decrease in trench perpendicular strain-rate in the decade prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mavrommatis et al., 2014). However, the limited duration of the observations makes it difficult to assess how these transients relate to the full interseismic period. Importantly, we do not know whether the strain-rate at the beginning of the GPS era (1996-1998) is typical of the preceding decades or not. It could be that strain-rate during this period was anomalously high.

Conventional geodetic data (triangulation and trilateration) are available in Japan since the end of the 19th century. The data consist of two first-order triangulation surveys (1883-1901; 1946-1972) and two trilateration campaigns in the latter half of the 20th century (1973-1985; 1977-1994), including second-order surveys. Examination of historical data in combination with GPS data can provide a way to evaluate the velocity and strain distributions in the last 100 years and elucidate whether the acceleration observed prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake represents a short-term transient deformation or not. Thus, we analyze horizontal deformation in NE Japan utilizing all the geodetic sets available.

We estimate horizontal displacement fields in NE Japan for the conventional geodetic data using the method developed by Yu and Segall (1996). In this, a denuisancing procedure is performed so that the dependency of the data on station coordinates is projected out of the system of equations and the horizontal displacement fields can be estimated directly. We solve for the inner coordinate or minimum norm estimate, representing the essential displacement after removing rigid motion and scale factor (in the case of triangulation) which fall in the null space of the observations. These results are transformed into average velocities by assuming steady deformation over the survey period and average shear strain rates are calculated for the region. The null space inherent in trilateration and triangulation data is constrained by GPS velocities in either the early GPS period or the period prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake.

We found that the maximum shear strain rate in South-Central Tohoku from 1884-1984 was not higher than those observed during the GPS era. Thus, suggesting that the transient deformation described by Mavrommatis et al. (2014) did not begin prior to 1996. Furthermore, the maximum shear strain rates from conventional geodetic data are consistent with those prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake, while the shear strain rate in the early stage of the GPS data may represent an anomalously high strain rate from the average interseismic situation, having geophysical implications related to precursory phenomena of the giant earthquake.

© 日本地震学会

Room B | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 4:00 AM - 5:15 AM UTC | ROOM B

[S03]PM-1

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)), chairperson:Ryoya Ikuta(Shizuoka Univ.)

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

[S03-07] Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

○Hiroki Aota[1], Mako Ohzono[1,2], Hiroaki Takahashi[1], Yusaku Ohta[3] (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S03-08] A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

○Ryoya Ikuta[1], Horng-Yue Chen[2], Kiyomichi Takemoto[3], Takeru Kohmi[1], Masataka Ando[1] (1.Shizuoka Univ., 2.Academia Sinica, 3.Nagoya Univ.)

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

[S03-09] GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

○Takeshi Iinuma[1], Motoyuki Kido[2,3], Tatsuya Fukuda[1], Yusaku Ohta[3,2], Fumiaki Tomita[1], Ryota Hino[3,2] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S03-10] Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

○Yusuke Yokota[1], Tadashi Ishikawa[2], Shun-ichi Watanabe[2], Yuto Nakamura[2] (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

○Yuya Machida[1], Shuhei Nishida[1], Toshinori Kimura[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Eiichiro Araki[1] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

*Hiroki Aota[1], Mako Ohzono[1,2], Hiroaki Takahashi[1], Yusaku Ohta[3]

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

千島海溝沿いにある北海道根室沖は，陸域のGNSSデータ解析から大きなすべり欠損速度分布が推定されており(例えば，Hashimoto et al., 2009)，次のプレート境界型大地震が発生する可能性が高い場所として注目されている地域である．また，この地域の津波の痕跡からは，17世紀に十勝沖から根室沖にわたる広範囲で超巨大地震が発生し，2011年東北地方太平洋沖地震のようにプレート境界浅部の断層がすべった可能性が示唆されている(Ioki and Tanioka, 2016)．そのため，このような海溝近くのプレート境界浅部の固着状態を推定することは，起こりうる地震の規模を予測するためにも重要であるが，距離が離れた陸域の観測のみからの推定には限界がある．このため，2019年7月に北海道大学・東北大学・東大地震研の共同研究により，根室沖の海底に3点のGNSS-A観測点が設置され，1回目の観測点の座標値推定が実施された（太田・他，2019地震学会）．2020年10月に2回目の航海が予定されており，順調に行けば今年中に最初の地殻変動速度が得られると期待される．
これに先立ち本研究では，陸域のGNSS観測点による固着分布の検出限界を調べるとともに，新設されたGNSS-A観測点が，陸域のGNSS観測点では検出できない地域の固着分布推定にどのように貢献しうるのかを定量的に検討する．まずは陸域のGNSS観測点が，固着分布の違いによってどの程度変化するのかを調べる．本研究では，より現実的なプレート形状を仮定するため，ブロック断層モデルの１つであるTDEFNODE(McCaffrey, 2009)を用いて各点のノードにIwasaki et al. (2015)のプレート形状を与えて，試行錯誤的なフォワード計算から推定を行った．ブロックの相対的な剛体回転はプレート運動モデルGSRMv2(Kreemer et al., 2014)で定義し，ブロック境界となる断層に様々な滑り欠損分布を与え，半無限均質弾性体を仮定したOkada (1992)によって各点での変位場，速度場を求めた．
先行研究等から固着の下限を60 kmと仮定してそれ以浅の固着率を１としたが，陸域の観測点から遠い深さ0-10 km，0-20 kmのプレート境界面の固着率を0.5や0.0のように変化させた場合と，深さ0-60 kmにおいてフルカップリングさせた場合の計算値を比較すると，深さ0-10kmの固着率を変化させても陸域のGNSS観測点の速度場に大きな変化は生じないことがわかった．深さ0-20kmについては，固着率を0.5に変化させても深さ0-10kmの場合と同様に大きな変化はなかったが，固着率を0.0とした場合は陸域のGNSS観測点で最大1.5cm/yほどの変化が生じた．海溝近くのプレート境界浅部の固着状態を変化させても陸域の観測網のみからはそのシグナルの検出能力が低下することが報告されているように(Yokota et al., 2016)，本研究においても特に深さ10kmよりも浅いところについては陸域のみの観測網では固着状況を推定することが難しいことを確認した．一方で，同様の変化を与えてプレート境界浅部に近いGNSS-A観測点の予測値を見ると，深さ0-10 kmの領域で，0.5程度の固着率の変化させた場合，それに対応して水平成分では3cm/y以上，上下成分では最大0.8cm/y程度の違いが生じる．海底地殻変動の観測精度は，他の地域の先行研究などから水平成分で2-3cm/y程度と考えられているため，この誤差を考慮しても観測点周辺の固着率を検出可能と考えられる．上下成分については，水平成分よりも誤差が大きくなるため，固着率の細かい違いについては議論が難しいかもしれないが，今後の繰り返し観測による精度向上により，水平成分の結果をサポートする情報が得られる可能性がある．現在，プレート境界に沿って一様な固着分布を与えて簡易的な計算を行っているが，今後，17世紀型の超巨大地震(Ioki and Tanioka., 2016)におけるプレート境界浅部の固着分布を設定して計算するなど，走行方向にも変化する固着分布に対してGNNS-A観測点がどのような感度を持つか検討し，プレート境界浅部の固着の可能性やその状態について検討を行う．

© 日本地震学会

A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

*Ryoya Ikuta[1], Horng-Yue Chen[2], Kiyomichi Takemoto[3], Takeru Kohmi[1], Masataka Ando[1]

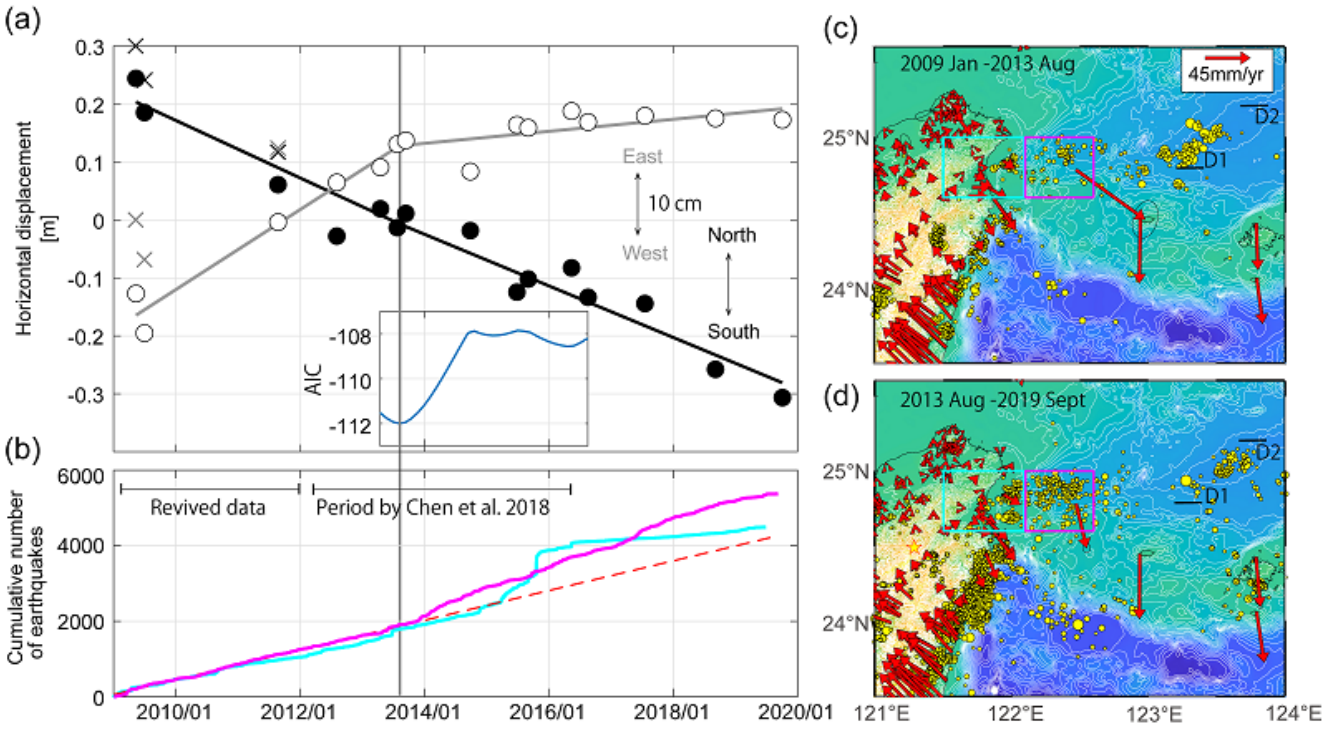
1. Shizuoka Univ., 2. Academia Sinica, 3. Nagoya Univ.

The sustained seafloor geodetic measurement is crucial, even yet sparse in time and space, to constrain the undersea crustal deformation near the plate boundaries versus time. We present an integrated analysis of a decade of GNSS/Acoustic data collected at the site 60 km to the east of the northeast coast of Taiwan near the opening axis of the Okinawa trough back-arc basin. As a result, we obtained the horizontal and vertical positioning time series of the benchmark by the eighteen measurements from 2009 to 2019. The positioning time series of the benchmark shows a southeastward movement at a rate of 44±3 mm/yr, with respect to the Yangtze plate, following the potential offset in 2012. The horizontal motion can be explained by the clockwise block rotation of the Yonaguni block united with the northern part of the Central Range. In addition, the vertical displacement of the transponder array shows the rapid subsidence of 20±7 mm/yr from 2012 to 2019. The fast subsidence rate and the negative free-air gravity anomaly in this region indicate that the crustal thinning is compensated mainly by the surface deformation instead of the upward migration of the Moho. Considering the offset in 2012 due to the change of transponder array, the horizontal positioning time series of our site is best explained by two linear lines with a slope change in August 2013. The timing of the velocity change roughly coincides with the change of the periphery seismicity rate and the dike intrusion 150 km away from the site. The results show the potential of our seafloor geodesy site in accessing the temporal variation in the deformation rate near the spreading center of the Okinawa Trough, which is not accessible by on-land GNSS stations.

==========Figure caption==========

Time series of the OILN benchmark position relative to the stable part of Yangtze plate. (a) Same with Figures 3a and 3b. North-south (solid circles) and east-west (open circles) components. The coordinates for the revived data before 2012 are shifted assuming an offset at 2012. The original north-south and east-west coordinates are shown by black and gray crosses. Each time series is fitted by linear lines with a break at August 7, 2013 (vertical line) which is determined by AIC which is shown by the imposed diagram. The data for the middle eight campaigns are common with Chen et al. 2018 but solved by our new procedure. (b) Cumulative seismicity larger than M2.0 detected within the corresponding colored rectangular shown in Figures 6c and 6d. The red dashed line fits the seismicity during the period from January 2009 to July 2013. (c) Horizontal velocity vectors and seismicity larger than M3.0 during the period from Jan 1, 2009 to August 7, 2013. D1 and D2 show the location of dike intrusion modeled by Nakamura & Kinjo (2018) which occurred in the end of 2002 and April 2013, respectively. (d) Horizontal velocity vectors and seismicity during the period from August 8, 2013 to September 30, 2019.

© 日本地震学会


(a)
Horizontal displacement [m]
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
East
10 cm
West
North
South
AIC
-108
-110
-112
(b)
Cumulative number of earthquakes
6000
4000
2000
0
Revived data
Period by Chen et al. 2018
2010/01
2012/01
2014/01
2016/01
2018/01
2020/01
(c)
2009 Jan -2013 Aug
45mm/yr
D2
D1
25°N
24°N
(d)
2013 Aug -2019 Sept
D2
D1
25°N
24°N
121°E
122°E
123°E
124°E

© 日本地震学会

GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

*Takeshi Iinuma[1], Motoyuki Kido[2,3], Tatsuya Fukuda[1], Yusaku Ohta[3,2], Fumiaki Tomita[1], Ryota Hino[3,2]

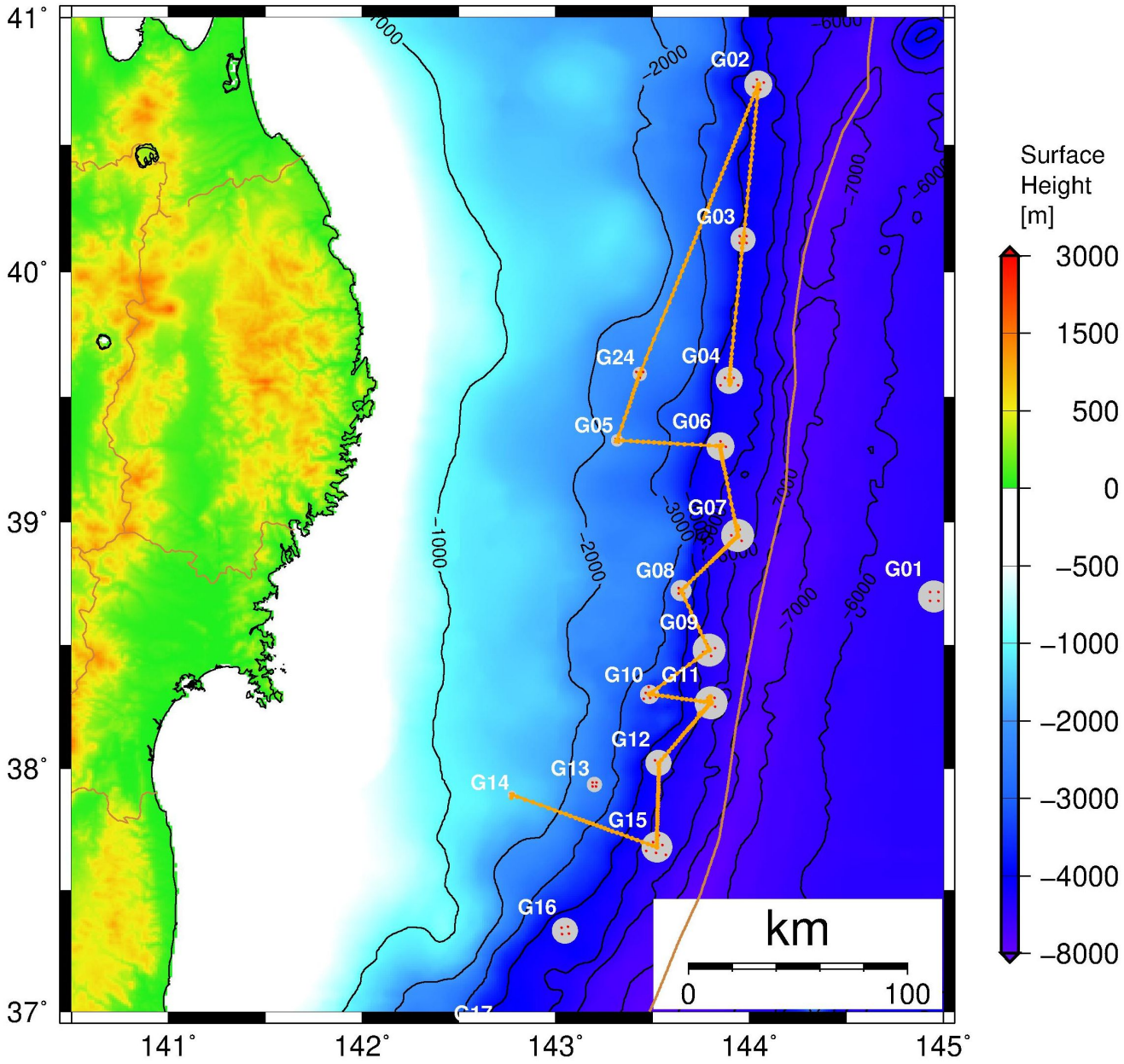
1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

GNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（以下，GNSS-A観測）によって，プレート間の固着や地震時すべりによる地殻変動を海底で捉えることができ，多くの重要な知見が得られてきた．しかしながら，GNSS-A観測の実施には海上プラットフォームが不可欠であることがコスト面の問題を生んでいる．海上プラットフォームとしての有人船舶や係留ブイは，その運用に多額の費用がかかるため，経時的な地殻変動を検出するための高頻度観測や，多くの観測点を巡回しての観測を実施するのに限界がある．この点を克服して，多数の観測点における高頻度GNSS-A観測を行うため，海洋研究開発機構と東北大学では，無人機を用いた長期自律的GNSS-A観測を実施するための技術開発に共同で取り組んでいる．2019年7月に実施されたKS-19-12航海において，ウェーブグライダーを用いたGNSS-A観測を試験的に行った結果については，昨年の地震学会秋季大会で報告した通り，海底地殻変動観測点G02において，データの収録及び海底局の起動に無事成功した．また，大会後の解析によって，船舶を用いた場合と同程度のばらつきで海底局アレイ位置の推定が可能であることも示された[富田・他, 2019, 日本測地学会第132回講演会; Iinuma et al., 2019, AGU 2019 Fall Meeting].

昨年の試験の結果を踏まえ，今年度上半期においては，1か月程度ウェーブグライダーを実海域で運用して，日本海溝沿いに設置されている海底地殻変動観測点を巡回し，各観測点でのGNSS-A観測を実施する，長期運用試験を行った．昨年度のシステムを一部改良して，スラーヤ衛星を利用した通信機能を付加し，ウェーブグライダーに搭載した制御装置に陸上から接続できるようにした．これによって，一部のデータの取得状況を確認したり，音響船上局へ手動でコマンドを送信したりできるようになった．当初は，2020年5月に，東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海（KS-20-7）において，ウェーブグライダーを投入し，1か月余り後に傭船航海によって回収する予定であったが，新型コロナウイルスの感染拡大による機構船舶の運航停止によって，KS-20-7航海はキャンセルとなってしまった．このため，6月20日から23日にかけて東北大学が実施した「第三開洋丸」を用いた傭船航海での投入に切り替えて準備作業を行い，6月21日にG04観測点でウェーブグライダーを投入した．38日間の運用を経て，7月28日に「第八開洋丸」を傭船しての航海を実施して同機を回収した．

図にウェーブグライダーの航跡を示す．東北大学が2012年に設置した，G01～G20までの観測点のうちの13点，及び2019年に設置したG24の計14観測点を巡回し，GNSS-A観測を実施した．途中天候に恵まれない時期があり，太陽光パネルによる発電が不足したため，G13観測点での観測を断念した．取得したデータの解析は現在実施中ではあるが，各観測点における海底局アレイの位置を求めるのに十分な質・量のデータは得られており，大会当日は解析結果の詳細についての紹介する見込みである．

© 日本地震学会


41°
40°
39°
38°
37°
141°
142°
143°
144°
145°
G01
G02
G03
G04
G05
G06
G07
G08
G09
G10
G11
G12
G13
G14
G15
G16
G17
G24
-1000
-2000
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
km
0
100
Surface Height [m]
3000
1500
500
0
-500
-1000
-2000
-3000
-4000
-8000

© 日本地震学会

Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

*Yusuke Yokota[1], Tadashi Ishikawa[2], Shun-ichi Watanabe[2], Yuto Nakamura[2]

1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

GNSS-A 観測では，海中音速度場が精度に重大な影響を与える．しかし，その影響について，場所・時期による違いの検証や定量的な評価は十分になされてこなかった．渡邉・内田 [2016, 研究報告] では，それぞれの海底局における実際に観測された鉛直音速度プロファイルの比較を行い，局ごとのばらつきの大小を評価した．しかし，GNSS-A 観測では音速度構造の水平傾斜や時空間変化が観測精度に強く影響する．その影響を考慮して，観測値に対して，観測機会，観測点ごとに異なる環境依存の誤差量が与えられるべきである．このことは，GNSS-A 時系列の精度評価のみならず，時系列解析を実施する上でも必要であり，課題となっている．本稿では，観測中に得られる海洋場の状態を新しく定義し，その値を明示的かつ定量的に抽出できる新しいソフトウェア GARPOS を用いて，数値シミュレーション結果等との比較を行う．

海面を海上局が移動する手法を採用した GNSS-A 観測では，海上局の位置の違いから抽出される海中音速度変化 $\boldsymbol{g}_1$ と海底局の位置の違いによって抽出される音速度変化 $\boldsymbol{g}_2$ がそれぞれ取り出される [Yokota et al., 2019, MGR; Yokota & Ishikawa, 2019, SNAS]．これら 2 つのパラメータを複素平面上に配置した $\boldsymbol{g}_1 + i\boldsymbol{g}_2$ ($\mathbf{G}$と定義する) を考慮することで観測時の海中音速度傾斜構造の定性的な状態が把握できる．傾斜層が多くて 2 層までと仮定すると，たとえば，$\mathbf{G}$ の偏角 $arg\,\mathbf{G} \sim 0$ となる場合，傾斜構造は単純かつ浅部側に寄っていると推定できる．$arg\,\mathbf{G} \sim \pi/2$ の場合，2 層かつお互いが逆向きの傾斜を持っていると推定される．$arg\,\mathbf{G} \sim \pi, 3\pi/2$ の場合は $arg\,\mathbf{G} \sim 0$，$\pi/2$ の場合と同様であるが向きが反転している．$\mathbf{G}$ の絶対値 $|\mathbf{G}|$ は傾斜場の強度を表している．$\mathbf{G}$ は水平 2 方向に取り出され，立体的な場を反映する．$\mathbf{G}$ は，観測時のあらゆるタイミングで推定されるが，海上局が移動する測線の形状などに拘束され，現状では 1500 m 深度の観測局で 1 時間程度の分解能しか持たないと考えられる [Yokota et al., 2020, Frontiers in ES].

観測値 $\mathbf{G}$ の例をいくつか紹介する．紀伊水道の沖合に位置する MRT2 では，2017 年以降の黒潮大蛇行時とそれ以前では明らかに観測時間中の $arg\,\mathbf{G}$ の平均値が変化している．また，南海トラフ側では $arg\,\mathbf{G}$ の平均値が観測機会ごとにばらつかず安定しているのに対して，日本海溝側ではばらつきが大きく，観測機会ごとの海洋場の大きな変動が観測されている．

海底局の場所や観測時期による $\mathbf{G}$ の変化は，局ごとの観測時の海洋場の状態を表現しており，各観測時の観測精度を議論する上で重要である．新たに開発された GARPOS [Watanabe et al., submitted] を用いることで，この値が明示的に取り出せるようになり，数値シミュレーション等を利用した比較を簡便かつ高速に行うことができるようになった．本稿では，アイコナール方程式に基づいた海中音響伝播の数値シミュレーション結果との比較を通して，上記の音速場の状態について定量的に議論する．

© 日本地震学会

A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

*Yuya Machida[1], Shuhei Nishida[1], Toshinori Kimura[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Eiichiro Araki[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

南海トラフ地震発生帯では，海洋プレートの沈み込みより年間1cm程度の海底上下地殻変動が予想される．巨大地震発生帯における海底地殻変動を捉えることは，プレート間の固着強度分布，巨大地震の発生過程，およびその推移を理解する上で非常に重要な情報である．このような現象を高精度で捉えるために南海トラフに展開されている地震・津波観測監視システム（DONET: Dence Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis，Kaneda et al., 2015; Kawaguchi et al., 2015）に接続された水圧計により，長期的な変動を捉えることが期待されるが，それぞれの水圧計は年間最大10hPa（=10cm）の固有のドリフト持っており，地殻変動成分とドリフト成分を切り分けるためには水圧計の校正が必要である．そこで私たちは海底に設置している水圧計を校正し，水圧計に固有なドリフト成分を把握するための移動式水圧校正装置を開発してきた（Machida et al., 2019）．移動式水圧校正装置は内部の水圧計の計測の不確かさの主要因である圧力ヒステリシス，温度特性，姿勢の影響を最小にするように設計されており，実験室においても海底においても1hPa（1cm相当）以下の精度で圧力を計測することができる．現場における校正時にはDONET水圧計との水準差を計測することができ，その水頭差を把握することでDONET水圧計に対して絶対圧力を値付けすることができる．海洋研究開発機構では移動式水圧校正装置の精度評価を行うため，DONET1, DONET2においてそれぞれ1観測点ずつ（KMB08, MRC10）の校正を繰り返し行ってきた．MRC10観測点においては2018年10月，2019年2月，2019年5月，2020年2月に校正を行った．その結果MRC10観測点の水圧計の機器的なドリフト成分は7.3hPa/yearとなり，2015年以降からの長期的な連続水圧データについて線形的に補正した結果，MRC10観測点では0.48hPa/year（速報値）の沈降を示した．また，2020年以降，観測域の拡大，および稠密化を目的としてDONET水圧計の校正観測点を順次拡大している．本講演ではこれまでのDONET水圧計の校正結果，および今後の展望について紹介を行う．

※DONETは構築終了後の2016年4月1日より海洋研究開発機構から防災科学技術研究所に移管され、陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS: Monitoring of Waves on Land and Seafloor）の一環として両者が連携して運用・保守を行っている。

© 日本地震学会

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 10:15 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 12:00 AM - 1:15 AM UTC | ROOM C

[S08]AM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), chairperson:Shunsuke Takemura(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S08-05] Campaign Observations of Deep Long-Period Earthquakes in Eastern Shimane

○Naofumi Aso[1], Nozomi Terai[1] (1.Tokyo Institute of Technology)

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

[S08-06] Uncertainty estimation for the thermal structure of subduction zones based on surface heat flow measurements

○Manabu Morishige[1], Tatsu Kuwatani[2] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S08-07] Quasi-periodic change of crustal stress field in southwest Japan suggested by earthquake focal mechanisms and crustal deformation

○Kazutoshi Imanishi[1], Akemi Noda[2] (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Meteorological Research Institute)

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

[S08-08] Ocean slab seismicity and stress state affected by episodic slow slip near a subduction-zone megathrust

○Saeko Kita[1], Heidi Houston[2], Sachiko Tanaka[3], Youichi Asano[3], Takuo Shibutani[4], Naoki Suda[5] (1.Building Research Institute, 2.USC, 3.NIED, 4.DPRI, Kyoto University, 5.Hiroshima University)

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

[S08-09] Trial study of source time function estimation for shallow low-frequency tremors based on high-frequency seismogram envelope

○Shunsuke Takemura[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Satoru Baba[1] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Tohoku University)

Campaign Observations of Deep Long-Period Earthquakes in Eastern Shimane

*Naofumi Aso[1], Nozomi Terai[1]

1. Tokyo Institute of Technology

深部長周期地震（低周波地震）は、深さ10–45km程度で発生し、マグニチュード2以下と規模が小さいにも関わらず、2–8Hzの低周波の地震波を放出する地震である。プレート境界型の低周波地震と並んで、火山地域で発生する長周期地震は、ゆっくりと変形する特異な現象である。プレート境界型の低周波地震が滑り現象である一方で、火山型の長周期地震の物理メカニズムはよく分かっていない。特に、現象を駆動する励起プロセスと、単色的な地震波を放出する共鳴プロセスについて、整合的な説明が必要である。励起プロセスとしては、プレート運動による歪みの蓄積や、マグマ起源の流体の移動のほか、不均一に冷却するマグマに発生する非等方的な熱応力も加担しているかもしれない［Aso and Tsai, 2014］。
火山型深部長周期地震を物理的に理解するためには、様々な観測事実を積み上げる必要がある。殆どが活火山周辺に分布していること、一部は火山フロントから離れて活動があること［Aso et al., 2011, 2013; Vidale et al., 2014］、深さ方向にはモホ面周辺に幅広く分布していること［Hasegawa et al., 1991; Nichols et al., 2011］、しばしば震源メカニズム解には非等方成分が含まれること［Nakamichi et al., 2003; Aso and Ide, 2014; Oikawa et al., 2019］、等方成分の潮汐応力に応答する可能性［Han et al., 2018］などである。
火山型の深部長周期地震の発生原因を探るためには、現象による変動を運動学的に理解することが本質的に重要である。特に、初期の励起プロセスの解明には、地震波の初動を正確に捉える必要がある。そのために今年、広島県庄原市にて臨時観測を行った。Aso and Ide［2014］により求められた震源メカニズム解によると、この地域では大きなP波の射出が期待される。4つの地震計を約200m間隔で配置することで小規模なアレーを構成し、200Hzサンプリングで収録した。7月現在で4ヶ月間のデータを取得し、深部低周波地震による波形がいくつか確認された。また、連発する特徴や、複数のフェーズの混在が確認された。

© 日本地震学会

Uncertainty estimation for the thermal structure of subduction zones based on surface heat flow measurements

*Manabu Morishige[1], Tatsu Kuwatani[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

沈み込み帯における多様な地震活動を議論する際の最も基本的な情報の1つは、温度である。そして温度構造を推定する手法の1つとして、物理モデリングが良く用いられる。この手法では多くの場合、フォワード計算を繰り返し行うことで観測データからの制約を満たすようなモデルパラメータの組み合わせ(さらにそこから得られる温度構造)を求めるが、(1)モデルパラメータの不確かさを評価することが難しい、(2)観測データをより良く説明するモデルパラメータの組み合わせが存在する可能性がある、(3)観測データの誤差を考慮していない、といった問題点がある。本発表ではこれらの問題に取り組むための枠組みとして、東北地方とカスカディアの地殻熱流量データを用いてベイズの定理に基づき5つのモデルパラメータを同時推定する例を紹介する。

熱流量の予測は2次元定常状態における質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則に基づく方程式を解くことで行う。推定するモデルパラメータは、(1)スラブとその直上のマントルの運動がデカップルする深さ(D_{dec})、(2)大陸上部地殻内の放射性元素の崩壊による発熱量(H_{UCC})、(3)沈み込むプレート境界における有効摩擦係数(μ')、(4, 5)マントルウェッジ内の粘性率の温度依存性と絶対値をそれぞれ支配するパラメータ、である。マルコフ連鎖モンテカルロ法の1つであるメトロポリス法を用いて、事後確率分布に従うようなモデルパラメータのサンプリングを約3万回行う。

そのようにして得られたモデルパラメータの集合は多くの情報を持つ。例えば東北地方ではD_{dec}は80±10 km程度であり、これは先行研究によって報告された値と合っている。また東北地方ではH_{UCC}とμ'の間に強い負の相関関係があり、これは地殻熱流量データからだけではこの2種類のモデルパラメータを同時に推定することが難しいことを示唆している。さらに我々が物理モデリングによって予測した熱流量は観測データの平均よりも少し低い値となることが分かった。これは熱伝導率の不確かさを考慮して、観測データの誤差を一定値ではなく、データの値の15%と仮定したためである。

今回は地殻熱流量データのみに焦点を当てているが、ここで用いた手法を複数の種類の観測データに対して適用することで、温度構造をより高い信頼度(より小さな不確かさ)で決定することができる。そのようにして得られた温度構造を用いることで、地震活動に対する理解がさらに大きく進むと期待できる。

© 日本地震学会

Quasi-periodic change of crustal stress field in southwest Japan suggested by earthquake focal mechanisms and crustal deformation

*Kazutoshi Imanishi[1], Akemi Noda[2]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

1．はじめに
西南日本、特に近畿地方では、ほとんどの被害地震が南海トラフ沿いの大地震前後（概ね発生前50年から発生後10年）の間に発生していることが知られている（宇津 1974; Hori & Oike 1996）。この観測事実は、内陸地震がプレート境界の固着の状態に呼応して発生していることを示唆している。言い換えると、日常的に発生している小地震も含めて発生状況を調べることでプレートの固着状態をモニタリングできる可能性がある。今西・野田（JpGU-AGU Joint Meeting 2020）は、内陸で発生している地震の発震機構解がプレート境界のすべり欠損により作られる応力場に調和的かどうかを判定し、内陸の応力場の時間変化を調べる方法を提案した。この方法を西南日本に適用したところ、数年ほどの周期で応力場が時間変化していることが示された。彼らは西南日本を4つの領域に区分して検討を行ったが、区域分けには任意性が残されていた。本研究ではこの任意性を排除したうえで、改めて時間変化の特徴について調べた結果を報告する。

2．手法およびデータ
ある地震が参照とする応力場に調和的に発生しているか否かを評価するパラメータとして、ミスフィット角（仮定した応力場から計算されるすべり角とメカニズム解のすべり角との角度差）が有効であることが示されている（Terakawa et al., 2016; Yukutake et al., 2020）。本研究でもこのパラメータに着目し、南海トラフのプレート間固着と内陸の応力場との関連を調べる。解析手順は以下のとおりである。
（1）プレート境界のすべり欠損により作り出される陸域の深さ10kmにおける応力テンソルを0.1°毎に計算する。
（2）それぞれの発震機構解の震源位置に最も近いグリッドの応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。
（3）ミスフィット角の移動平均（1年）を取り、時間変化を推定する。誤差はブートストラップ法により計算する。
本研究では区域分けの任意性を排除するため、西南日本に0.5°間隔のグリッドを配置し、それぞれのグリッドの半径100km以内の地震を用いて上記の計算を行う。
発震機構解は気象庁一元化カタログ（1997年10月～2020年7月）に加えてJUNECカタログ（Ishibe et al, 2004）（1985年7月～1998年12月）を使用した。2つを統合することで、35年間に及ぶ発震機構解カタログとなる。実際の解析では、デクラスタリング（Reasenberg, 1985）処理後の深さ25km以浅の地震を使用した。すべり欠損モデルについては、2005年3月～2011年2月のGNSSデータを用いて推定されたNoda et al. (2018)のモデルを使用した。

3．結果と解釈
発震機構解が十分あるメッシュにおいては、いずれもミスフィト角は数年ほどの周期で変動していることが明らかとなった。変動の振幅は10～30°程度である。この周期性の変化は誤差を考慮しても有意である。本研究では南海トラフのすべり欠損に対する応答を見ていることから、この観測結果は、南海トラフ沿いの固着が数年周期で強くなったり弱くなったりしていることを反映しているのかもしれない。このような周期性の応力変化は、近畿北部における原位置応力の繰り返し測定からも報告されている（田中ほか, 1998）。もし応力場の時間変化が真実であれば、地殻変動観測データにもその影響を見いだすことができるはずである。そこで、1996～2011年（東北沖地震直前まで）のGNSS時系列データから１年ごとの変位速度（水平2成分）を求め、さらにShen et al. (1996)の方法により歪み速度（水平歪み3成分）を計算した（グリッド間隔：0.05°、距離減衰定数（DDC）：35km）。多くの領域で時間変化は不明瞭であったものの、プレート境界に近い紀伊半

© 日本地震学会

島先端付近ではミスフィット角の周期性変化と調和的な南北成分の歪速度の変動が確認できた。
また、中部及び近畿地方のメッシュでは、2013年頃からミスフィット角が減少傾向を示すことがわかった。2011年東北地方太平洋沖地震による粘弾性緩和の影響が含まれている可能性もあるが、南海トラフの東側の固着が徐々に強くなっていると解釈することもできる。2013年淡路島の地震（M_j6.3）や2018年大阪府北部の地震（M_j6.1）が発生しているタイミングとも重なっており、その関連性は興味深い。
ミスフィット角の周期性変化の解釈は、引き続き様々な観点から検討を進める必要があるが、本手法は微弱な応力場の時間変化の検出及びプレート間固着のモニタリングに有効な方法になりうる。

謝辞：本研究では気象庁一元化カタログ、JUNECカタログ（Ishibe et al., 2014）、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。記して感謝します。

© 日本地震学会

Ocean slab seismicity and stress state affected by episodic slow slip near a subduction-zone megathrust

*Saeko Kita[1], Heidi Houston[2], Sachiko Tanaka[3], Youichi Asano[3], Takuo Shibutani[4], Naoki Suda[5]

1. Building Research Institute, 2. USC, 3. NIED, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Hiroshima University

Slow slip phenomena sometimes occur at the timings of large intraslab earthquakes, but detailed relationships between intraslab earthquakes, slow slip phenomena and geofluids are not known. We examined time variations in seismicity rates, b-values, and stress regimes in the Philippine sea slab associated with times of episodic tremors and slip (ETS) beneath Kii peninsula, southwestern Japan. At 1 month before the ETS times, seismic rate and b-value become high, which is similar to characteristics of fluid-induced seismicity. Stress regimes in the oceanic crust suggest that the plate boundary just beneath the slow slip zone is partially coupled before the times and the plate coupling degree decreased after that, whereas updip of the zone, it increased after ETS. Results of 200 times bootstrap resampling tests of focal mechanisms support that stress after the ETS times change from that before the ETS times. Results of our study show that monitoring of intraslab earthquakes would be a new approach to detect time change of plate coupling degree and slow slip phenomena.

© 日本地震学会

Trial study of source time function estimation for shallow low-frequency tremors based on high-frequency seismogram envelope

*Shunsuke Takemura[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Satoru Baba[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tohoku University

本研究では，DONETの観測記録と3次元地震動シミュレーションで評価したGreen関数に基づき，紀伊半島南東沖で発生する浅部低周波微動の震源時間関数の正確な推定を目指す．Green関数は全国１次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）と付加体構造（Tonegawa et al., 2017）を利用し，OpenSWPC（Maeda et al., 2017）により評価した．仮定した構造による地震動シミュレーションは，DONET1域周辺で発生する微小な地震性すべり現象による観測波形エンベロープの特徴を再現することが確認されている（Takemura et al., 2020）．シミュレーションセッティングにより5 Hzまでの地震動が評価可能なことから，シミュレーションにより得られたGreen関数に1-5 Hzのバンドパスフィルターをかけた3成分合成RMSエンベロープを合成し，様々なライズタイムの規格化された震源時間関数を畳み込む．Ji et al. (2003)による非対称cos関数を仮定し，tsとte（継続時間$t_0 = t_s+t_e$）により様々な形状の関数を実現する．観測された1-5 HzのRMSエンベロープとの相互相関係数が一番高くなるパラメータを探索し，最適なt_sとt_eを推定した．その後，Variance reductionにより地震モーメントを推定し，震源時間関数（モーメントレート関数）を直接得る．

手法の妥当性を検討するために，まずはGreen関数にYabe et al. (2019) のFig. 6の震源時間関数を畳み込んだ合成波形を作成し，この合成波形に対し手法を適用した．相互相関係数の評価の結果，t_s = 2.75 sとt_e = 10.25 sが最適と推定された．本手法では，仮定した震源時間関数のもっとも大きなモーメント解放についてはモデル化できているが，マイナーなモーメント解放については再現できていない．

今後はサイト増幅特性を考慮した上で浅部低周波微動の観測記録への適用，マイナーなイベントの影響を評価することでより正確な震源時間関数の推定を目指す．

手法に関する参考文献

Yabe et al., 2019 JGR, https://doi.org/10.1029/2018JB016815
Takemura et al., 2020 https://doi.org/10.31223/osf.io/ngy2j

謝辞　防災科学技術研究所DONET（https://doi.org/10.17598/NIED.0008）の波形記録を利用しました．地震動計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用しました。本研究は、JSPS科研費19H04626および18K13639により実施されました。

© 日本地震学会

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 11:45 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 1:30 AM - 2:45 AM UTC | ROOM C

[S08]AM-2

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo), chairperson:Keisuke Ariyoshi(JAMSTEC)

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

[S08-10] Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories

○Keisuke Ariyoshi[1], Takeshi Iinuma[1], Masaru Nakano[1], Toshinori Kimura[1], Eiichiro Araki[1], Yuya Machida[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takehiro Nishiyama[1], Kensuke Suzuki[2], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,3], Shuichi Kodaira[1] (1.JAMSTEC, 2.Sendai Regional Headquarters, JMA, 3.NIED)

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

[S08-11] Limit cycle and period-doubling bifurcation in fault valve model

○Takahiro Hatano[1], Ryo Mizushima[1] (1.Department of Earth and Space Science, Osaka University)

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

[S08-12] Modes of deep slow earthquakes and temperature dependence of brittle-ductile mixed rheology

○Ryosuke Ando[1] (1.School of Science, University of Tokyo)

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

[S08-13] Nankai Trough earthquake cycle simulation with deep long-term slow slip event and long-term locked fault segments : discrete cell model

○Kazuro Hirahara[1,2] (1.Kagawa University, 2.Riken)

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

[S08-14] A hierarchical model of earthquake asperity

○Yoshio Fukao[1] (1.JAMSTEC)

Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories

*Keisuke Ariyoshi[1], Takeshi Iinuma[1], Masaru Nakano[1], Toshinori Kimura[1], Eiichiro Araki[1], Yuya Machida[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takehiro Nishiyama[1], Kensuke Suzuki[2], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,3], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC, 2. Sendai Regional Headquarters, JMA, 3. NIED

１．はじめに

海洋研究開発機構は、南海トラフで発生する地震・津波を常時観測することを目的とした地震・津波観測監視システム(DONET: Dense Oceanfloor Nework system for Earthquake and Tsunamis) の構築を熊野灘から室戸沖にかけて実施してきた (Kaneda et al., 2015; Kawaguchi et al., 2015)。DONETは、構築終了後の2016年4月1日より海洋研究開発機構から防災科学技術研究所に移管され、陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS: Monitoring of Waves on Land and Seafloor) の一環として両者が連携して運用・保守を行っている。

これに加えて、海洋研究開発機構では、国際深海科学掘削計画 (IODP: International Ocean Discovery Program) の一部として、長期孔内観測点 (LTBMS: Long-Term Borehole Monitoring System) の構築を行い、海底下に地震計・間隙水圧計・体積歪計を東南海地震の想定震源域直上に２点設置した (C0002: 2013年1月、C0010: 2016年4月)。

これらの間隙水圧計および地震計を活用することにより、陸上の観測網では捉えきれなかった南海トラフ沖合のスロースリップイベントについて、海底下の間隙圧変化から捉えられるようになった (Araki et al., 2017)。2018年3月には、海溝に近い C0006 が新たに設置され、孔内観測がDONETに接続したことで、リアルタイムでのスロースリップイベントの監視が可能となった。そのような状況下で、2020年3月にC0002とC0010 の２つの観測点で間隙圧が同期して変化すると共に、DONETの広帯域地震計からは超低周波地震が観測された。本講演では、このスロースリップイベントの概要について報告する。

２．解析手法

シグナルが卓越しているC0002 に着目し、深さが異なる３つの間隙圧時系列に対して、開始・終了時刻を未知数とする最小絶対値法による回帰直線をスロースリップイベントの前後で求めた。これにより、時刻と同時に間隙圧の変化量を定量的に推定することに成功した。一方で、C0006には特異な変化がみられなかった。C0010についてはノイズが大きいため、過去のスロースリップイベントおよび超低周波地震の活動履歴に基づいて観測結果と矛盾しない時系列を推定することにした。

超低周波地震のメカニズム解は、Nakano et al. (2018) の手法をスロースリップイベント期間中のDONET地震波形データに適用することで推定した。断層モデルの構築に関しては、Okada (1992) を適用して沈み込みプレート境界面上での逆断層型すべり（傾斜角６度）に対する孔内間隙圧応答グリーン関数を計算したうえで、位置（緯度・経度・深さ）、断層サイズ及びすべり量を推定した。

３．結果

© 日本地震学会

推定されたスロースリップイベントの開始・終了時刻により、超低周波地震がその期間中に起きていることが定量的に確かめられた。深さの違いを比べると、深い方の２点では、開始・終了時刻および間隙圧の変化量に関して差異は見られなかったが、浅い点に関しては、海洋変動に起因するノイズ成分が大きかったものの、間隙圧の変化量が大きいことが示された。

C0006で変化がなかったことと、超低周波地震がスロースリップイベントの発生期間の後半に発生したことから、断層モデルを用いて検討した結果、今回のスロースリップイベントは、C0010 を跨ぐように海溝側に向かってすべりが伝播した現象であったと結論づけた。この場合、推定された断層モデルは、2015年のスロースリップイベントよりも小規模なものがC0010近傍において発生したと考えられるが、超低周波地震活動の特徴などを整合的に説明できるものとなった。

この断層モデルではから期待されるすべり量は約4cmとなり、海底地殻変動は上下成分で1~4mm 程度であり、実際のDONET海底圧力計からは検出することが出来なかった。今回の結果は、海底圧力計でさえも捉えきれなかった海溝付近 のMw5程度のスロースリップイベントを早期検知した成功例の第一歩であり、今後、音響測距結合方式による海底地殻変動観測 (GNSS-A観測) をはじめとする多角的な検証が期待される。

４．謝辞

本研究成果の一部は、科学研究費補助金 (JP16H06477, JP19H02411, JP20H02236) からの助成を受けました。

© 日本地震学会

Limit cycle and period-doubling bifurcation in fault valve model

*Takahiro Hatano[1], Ryo Mizushima[1]

1. Department of Earth and Space Science, Osaka University

スロー地震の発生様式は多様であるが、その物理的機構はいまだ謎に包まれている。地震波観測によってスロー地震発生帯における低速度・高ポアソン比領域の存在が明らかにされ、流体はスロー地震発生に深く関与していると考えられている。従って、流体が如何にしてスロー地震発生に影響を及ぼすか、その機構については様々なモデルが提案されてきた。
多くのモデル、特に速度状態依存摩擦則の枠組では、スロー地震を説明するのはそれほど容易ではない。通常知られている発展法則（aging lawとslip law）を使うと、放射による散逸（radiation damping）を入れない限りリミットサイクルは存在せず、軌道は発散してしまう。とはいえ地震波を放射しないスロースリップイベントでのradiation dampingの導入は正当化し難い。また、スロースリップイベントの再現には非常に高い流体圧を（実効法線応力がゼロに近くなる程度まで）仮定する必要がある。例えば微動の潮汐依存性を説明するためには実効法線応力がkPaオーダーでなければならない。そのように極めて高い流体圧がスロー地震発生に本質的なのかどうかは興味深い問題である。
他方、パークフィールドにおける低周波地震の繰り返し周期については3年周期と6年周期のものにきれいに分かれるという観測例も知られている[Shelly 2010]。速度状態依存摩擦法則の観点からは、ホップ分岐の周期は摩擦パラメタに連続的に依存するので、このような倍周期の存在は従来のモデルからは直ちには理解できない。
本研究では、流体圧が滑りと相互作用して変化する一種の断層バルブモデルを仮定し、それを速度状態依存摩擦法則と組み合わせた断層モデルを提案する。滑りパッチを仮定して連続体を1自由度系に落とすことで、滑り量・状態変数・流体圧の3変数からなる常微分方程式系に帰着した。このモデルはパラメタに応じて超臨界ホップ分岐と亜臨界ホップ分岐の両方を示すが、超臨界領域においては通常のホップ分岐に引き続いて周期倍加分岐を経てカオス転移を起こすことを紹介する。最後に、周期倍加分岐が実際のパークフィールドの様子を説明できるかどうか議論する。また、倍周期分岐を繰り返して到達するカオス的状態について議論し、スロー地震発生における意義について考える。

© 日本地震学会

Modes of deep slow earthquakes and temperature dependence of brittle-ductile mixed rheology

*Ryosuke Ando[1]

1. School of Science, University of Tokyo

A wide spectral range of observations has become to clarify the various modes of slow earthquakes particularly characterized as, from the slow to fast, Long-term Slow Slip Events (LSSEs), Short-term Slow Slip Events (S-SSEs), Low-frequency earthquakes (LFEs) and tremor. Observations show these events tend to exhibit the depth dependence on the locations of their source areas. The slow earthquakes are generally considered as the results of the brittle-ductile transition of the fault rheology due to increasing pressure and temperature in the depths of the earth's surface. However, available physical models propose a variety of mechanisms to explain the slowly slipping behaviors, such as velocity-strengthening and weakening mixed rheology, the dilation induced strengthening and the neutral frictional stability, none of them have successfully explained the intrinsic mechanisms of the depth-dependent features without artificially tuning free model parameters to fit geodetic observations traced these depth-dependent features. We here demonstrate that the depth-dependent characteristics are explained as a natural consequence of the temperature-dependent rheological properties of the fault zones at the transition depth based on the brittle-ductile mixed fault heterogeneity model. We consider the macroscopic brittle and ductile strengths taking into account the temperature dependence in the fraction of the brittle area over the ductile area together with the viscosity. As a result, we successfully reproduce the occurrence of S-SSEs with smaller slip and larger acceleration at the down-dip portion of L-SSEs with larger slip and smaller acceleration. Further deep, stable slide occurs.

© 日本地震学会

Nankai Trough earthquake cycle simulation with deep long-term slow slip event and long-term locked fault segments : discrete cell model

*Kazuro Hirahara[1,2]

1. Kagawa University, 2. Riken

１．はじめに
南海トラフ巨大地震発生予測および発生履歴の再現を目指して、速度状態依存則に基づく地震サイクルシミュレーションが行われてきた。また、様々なスロー地震と巨大地震の相互作用の重要性が認識され、スロー地震を含むシミュレーションも行われている。しかしながら、現状では依然として複雑な地震発生履歴の再現には至っていない。本講演では、２．に述べるの最近の知見を踏まえ、複雑な南海トラフ地震履歴を作り出す摩擦モデル、及び巨大地震発生サイクル中におけるL-SSEの変動について議論する。

２．深さ20-30kmにおける深部長期的スロースリップイベント（L-SSE）発生域と長期固着域
L-SSEは南海トラフ巨大地震震源域下部から短期的SSEや深部低周波微動発生域の間の深さ20-30㎞で発生しており、豊後水道や東海L-SSEに加えて、南海トラフ全域においての発生様式が明らかにされつつある（Kobayashi and Tsuyuki, 2019）。最近、Okamura and Shishikura(2020)は、紀伊半島沿岸における隆起生物遺骸群衆高度分布から紀伊半島下深さ20-30km域に400-600年間の長期固着域が存在し、100年程度の繰り返し間隔を持つ各南海トラフ地震セグメントの破壊域に加えて、広域破壊する1707年宝永地震タイプの地震を作り出している可能性を指摘した。この長期固着域は紀伊水道および志摩半島L-SSE領域に挟まれた領域に対応しているように見える。また、赤石山地隆起に関連して赤石山地と駿河湾の間の深さ20-30kmにも同様の長期固着域が存在する可能性を指摘している。この深さ20~30㎞のプレート境界面ではこの二つの長期固着域以外はL-SSE等により応力が解放されその蓄積レートは小さいと思われる。なお、南海地震震源域の浅部でもスロー地震の発生が報告されているが、本講演では議論に含めない。

３．離散セル摩擦モデル
速度状態依存則に基づく地震サイクルシミュレーションではプレート境界を臨界セルサイズ以下の小断層セルに分割し計算を行うが、南海トラフ全域を扱うとセル数が多く、また繰り返し間隔が5~20年程度のL-SSEの発生まで含めると時間ステップ数が多くなり、万年に及ぶ計算を多くの摩擦モデルで行うには多大な計算資源を要する。
そこで、試行段階として図1(左)に示したR11-R62 の12セルから成る離散セルモデルを用いる。Mitsui and Hirahara (2004)は破壊セグメントに対応する5個のブロックからなるバネーブロックモデルを用いて南海トラフ地震サイクルを計算しているが、ここでは通常のセルモデルの延長としての離散セルモデルを用い、準動的近似を用いた計算を行った。まずプレート境界をkm程度の三角小断層セルに分割し、各12セル内で同一すべりを仮定して、各セルの中心におけるすべり応答関数(Kij)を作成した。対角項Kiiの大きさは、0.02-0.5MPaの大きさとなり、相互作用を規定する非対角項Kijは隣接セルで最大0.5Kii程度となっている。
摩擦パラメータの設定としては、浅部セルRi1（深さ5-20km）では相互作用無しの繰り返し間隔（フリー間隔と略）を150-200年程度、すべり応答関数Kiiの臨界弾性定数Kcriiに対する比Kii/Kcriiを0.03程度とし、 深部セルRi2（深さ20-30km）では、紀伊半島(R42)と赤石山地と駿河湾間(R62)下では、フリー間隔を400年程度、Kii/Kcriiを0.1、それ以外の深部セルRi2ではL-SSEのフリー間隔5-10年、Kii/Kcriiを 0.9程度に設定し、20000年のシミュレーションを行った。

４．結果と議論
図１(右)に19000-20000年における各セルにおけるすべり速度を示す。このように、浅部セルでの地震発生とL-SSEの発生は同期するようになり、L-SSEの繰り返し間隔は倍程度に延び、大きい場合には数年程度のばらつきを示し始める。しかしながら、このすべり応答関数をセル中心で評価した離散セルモデルでは巨大地震セル

© 日本地震学会

同士の相互作用が弱く、地震発生はあまり同期せず、宝永タイプの広域を破壊するような地震は発生していない。
R42とR62以外の深部セルではL-SSEが発生している。浅部巨大地震発生サイクル中における深部L-SSEの活動は、巨大地震の発生予測に重要であるが、これまでの研究では巨大地震サイクル中のL-SSE活動は多様な変動を示している。巨大地震発生後活動が抑えられ、次期地震発生が近づくにつれ発生間隔が短くなり活発化することが示されているが、すべり速度が大きくなるモデルと小さくなるモデルが存在する。この離散セルモデルでも地震後の活動の低下と次期地震発生に向けて活動が活発化する様子が得られたが、単純に速度が増すセル（R12）や各地震間で速度の増減が変動するセル(R22, R32, R52)が見られ複雑である。 連続モデルと離散セルモデルは基本的に異なる振舞をすることが知られているため、解釈には注意が必要であるが、L-SSEの活動では興味深い結果が得られた。
しかしながら、現状のモデルでは、期待した各巨大地震セグメントの連動がうまく表せていない。破壊伝播に対応するセル間のKijの大きさを調整する等の検討を要する。

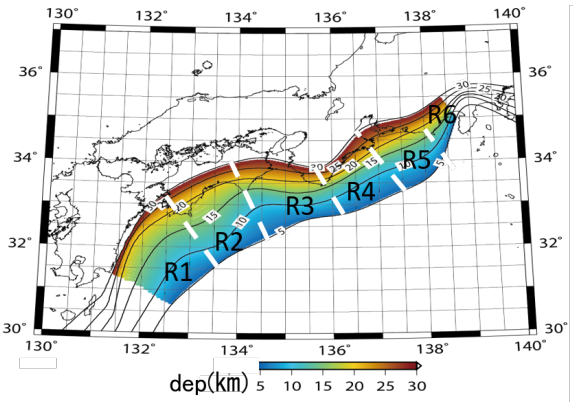


図１（左）　離散セル　セルRiは更に深さ5-20kmと20-30kmのRi1とRi2に分割される。

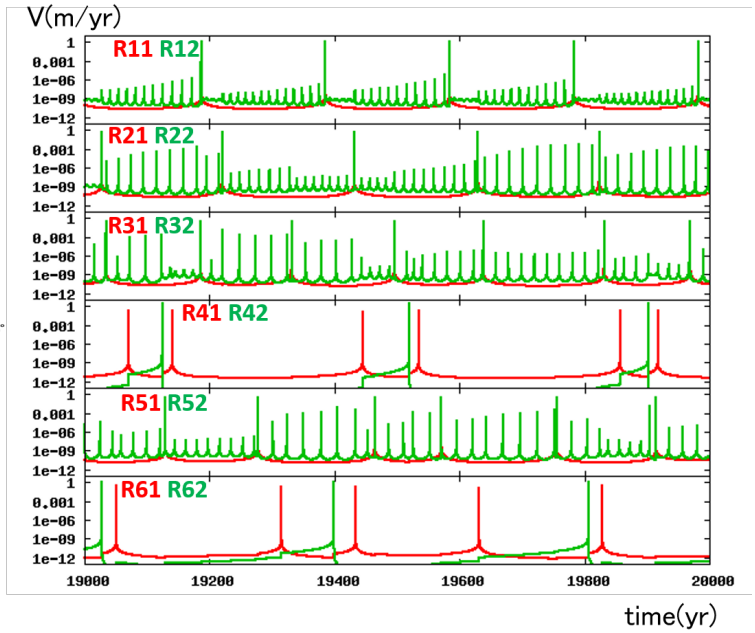


図１（右）　シミュレーション結果　19000～20000年での各セルにおける速度（V:m/s）

© 日本地震学会

A hierarchical model of earthquake asperity

*Yoshio Fukao[1]

1. JAMSTEC

１．序

従来の地震アスペリティモデルは、固着域の周囲に非地震性滑り域を想定し、周囲の非地震性滑りにより固着域で応力増加することをもって地震発生の原因とみなしてきた。このモデルは巨大地震の地域性や繰り返し地震の存在などを良く説明する。しかし一方で、地震の階層的な破壊成長や地震規模と発生頻度の間の統計的関係（GR則）などを一般的に説明することは困難だった。本報告では、周囲の非地震性滑りを想定しないアスペリティモデルを提案し、それが地震の階層的破壊成長やGR則を説明できることを示す。

２．モデル

上盤プレートと下盤プレートとの摩擦面は、大アスペリティとその周囲に点在する小アスペリティとで構成される（図１）。摩擦強度はアスペリティの大小に依らない。下盤プレートは剛体と考える。上盤プレートは、変形しない一様な上面と大小アスペリティで分割された下面とを繋ぐバネの集合体と考える。どのスケールで見ても大アスペリティを囲んで小アスペリティが点在するフラクタルモデルとしてSierpinski carpetを採用する（図３：白色は既に滑ったアスペリティ、青色は未だ滑ってないアスペリティ）。図３は上盤プレートの上面に一様な力を加えたときに起こる階層的な破壊成長を示す。１つの階層は中央の大アスペリティと周囲の小アスペリティとで構成される。どの階層の破壊も周囲の小アスペリティの１つが滑ることから始まる。周囲の小アスペリティが全て滑ると、中央の大アスペティに負荷が集中しここが滑る。この滑りは１つ上の階層では周囲の小アスペリティの１つが滑ったことに対応する。

３．モデルの定量化

１つのアスペリティがバネの力Fによって滑る確率を$p_o=p_o(F/F_o)$とし、p_oは2次のWeibull分布に従うとする。但し$F_o=\sigma_o \cdot S$（σ_oはレファレンス摩擦強度、Sはアスペリティの面積）。図３において、(1,0)はどのアスペリティも滑っていない状態、(1,8)は周囲の全ての小アスペリティが滑った状態である。(1,0)では全てのアスペリティに均等にバネ力Fが働いている。(1,8)では全バネ力$9F$が中央の大アスペリティに集中している。周囲8個の小アスペリティのうちn個以上が滑る確率を$P_n(F/F_o)$として、$P_8(F/F_o)= p_o(F/F_o)$が成立するとき（図２）アスペリティの滑りは階層的に発展する（図３）。等式が成立するのはF/F_o=0.90396, p_o =0.55831の場合である。

４．モデルからの帰結

（１）図３において第１階層の小アスペリティの面積をS_oとする。第１階層では面積SS_oのアスペリティ9個が滑る間に$S9S_o$のアスペリティは1個滑る。第２階層においては面積$S9S_o$のアスペリティ9個が滑る間に$S9^2S_o$のアスペリティ1個が滑る。第３階層では面積$S9^2S_o$のアスペリティ9個が滑る間に$S9^3S_o$のアスペリティ1個が滑

© 日本地震学会

る。即ち面積が*S*よりも大きなアスペリティが滑る頻度*N*は*1/S*に比例する。これは地震のb値が1のGR則に相当する。

（２）同一階層において、周囲の複数の小アスペリティの滑りが時間的に接近して起こり中央の大アスペリティの滑りに繋がると、観測的には初期破壊と主破壊と認識される。初期破壊フェーズでは主破壊に近づくほど応力変化量（バネ力の変化量とアスペリティ面積との比）は増加する。主破壊の応力変化量は初期破壊フェーズの応力変化量よりも小さい（大アスペリティも小アスペリティもレファレンス摩擦強度は同じだが応力変化量は破壊過程に依存する）。

５．図の説明

第1図：アスペリティモデル：アスペリティが滑る確率はバネ力の大きさに依存する。破壊は周囲の小アスペリティの滑りで始まり、中心の大アスペリティに応力が集中することにより大アスペリティにも滑りが起こる。

第２図：周囲の8個の小アスペリティのうち *n*個以上が滑る確率$P_n(F/F_o)$。但し*F/Fo*=0.90396で、このとき$P_8(F/F_o)=p_o(F/F_o)$= 0.55831。但し、p_oは1個のアスペリティが力*F/Fo*の下で滑る確率。

第3図：階層的アスペリティ破壊。周囲の小アスペリティが全て滑ると、力が中央の大アスペリティに集中する。中央の大アスペリティの滑りは１つ上の階層においては周囲の小アスペリティ1個の滑りに相当する。

６．謝辞

このテーマを示唆して下さった金森博雄博士に感謝する。

© 日本地震学会

Figure 1

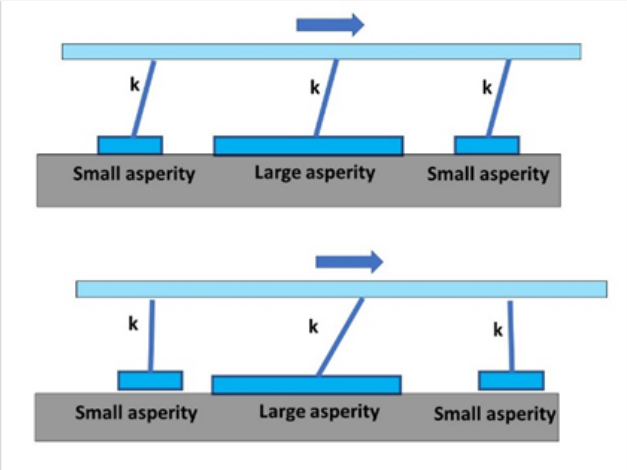


Figure 2

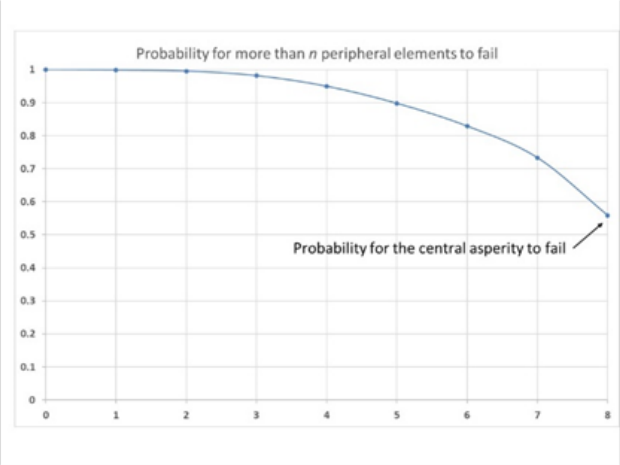
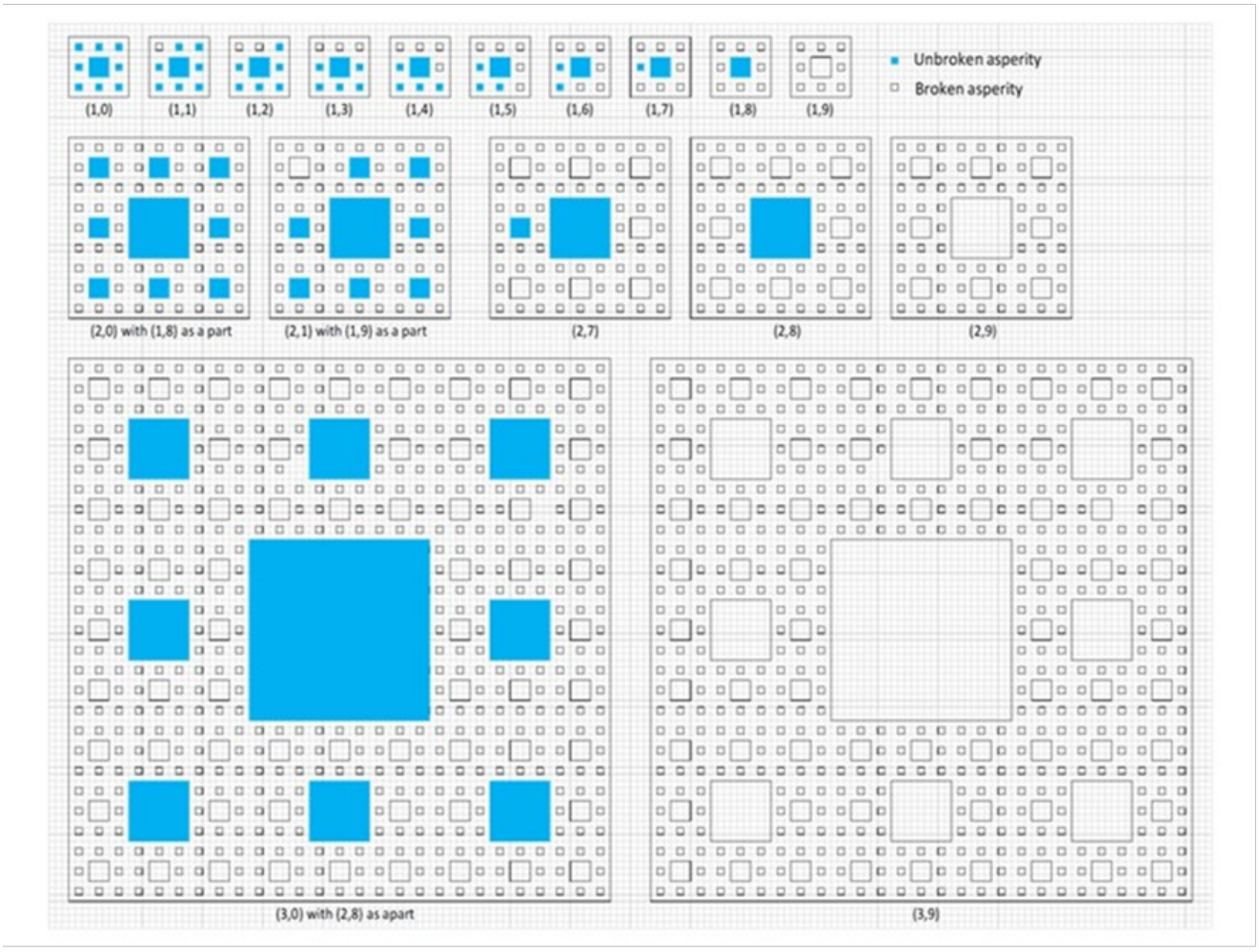


Figure 3



© 日本地震学会

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 4:00 AM - 5:15 AM UTC | ROOM C

[S08]PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.), chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University)

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

[S08-15] Dynamic Rupture Simulation on a Non-planer Fault : Pore Pressure, Stress Direction, Angle of Fault Bend and ISOtropic Component

○Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2] (1.Kyoto University Graduate school of Science , 2.DPRI, Kyoto University)

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

[S08-16] Two forms of the slip fronts and analyzing their propagation velocities by Linear Marginal Stability Hypothesis

○Takehito Suzuki[1] (1.Aoyama Gakuin University)

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

[S08-17] An analytical solution for dynamic self-similar crack with distance-weakening friction

○Shiro Hirano[1], Hiromichi Itou[2] (1.Ritsumeikan Univ., 2.Tokyo Univ. of Science)

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

[S08-18] Estimation of fracture energy of large earthquakes based on heterogeneous fault rupture process

○Nelson Pulido[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-19] Earthquake magnitude estimation under nonuniform stress and friction

○Yumi Urata[1], Eiichi Fukuyama[1,2], Chihiro Hashimoto[3] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

Dynamic Rupture Simulation on a Non-planer Fault : Pore Pressure, Stress Direction, Angle of Fault Bend and ISOtropic Component

*Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2]

1. Kyoto University Graduate school of Science , 2. DPRI, Kyoto University

近年、非火山性の地震に関して、モーメント解に等方(ISO)成分を多く持つ震源の存在が示唆されている。ISO成分は非弾性変形による体積変化を表し、断層面において顕著な開口が生じると高い割合を示す。例えばStierle et al.(2014)では、1999年に発生したイズミット地震の震源域において、ISO成分が15%を超える余震が捉えられたと報告されている。また、Hayashida et al.(2020)では、開口を仮定した断層破壊モデルを用いると、鳥取県西部地震の余震のうち、非DC成分の卓越したものについてうまく説明できると報告されている。このような観測例は、非火山性の地震であっても開口成分の変位を持ちうることを示唆している。本研究においては、ISO成分の卓越した破壊を発生させるために必要な条件について、混合Modeの2次元動的破壊シミュレーションを用いて調べた。

計算には２次元の境界積分方程式法を利用した。滑り速度(区分的に一定値を取る基底関数で離散化)から応力変化を求めるためにTada & Madariaga(2001)で示されている積分核を利用した。また、時間発展の手法にはNoda et al.(2020)で提案された予測子-修正子法を利用した。この計算手法の特色は、非平面断層を扱える点、また混合Modeでの安定的な計算が実現されたことにより、剪断方向だけでなく開口方向の変位を持つ破壊が扱える点である。

断層の形状は、平行な２枚の断層(L,R)が、角度Φで斜交した断層(C)によって繋がっている非平面断層を想定した。また、広域応力場を設定する際には、Andrews(1976)で定義されているS値に着目した。S値は、初期条件から破壊が生じるために必要な剪断応力の増加($\mu_s \sigma_n - \tau_{ini}$)と、破壊が生じたときの応力降下量($\tau_{ini} - \mu_d \sigma_n$)の比であり、この値が小さいほど破壊が進行しやすい。また、応力のスケールとして差応力を一定値とすると、S値の減少は間隙水圧の増加として解釈できる。このS値と、断層の斜交する角度(Φ)、Cに対する最大応力軸の角度(Ψ)の３つをそれぞれパラメータとしてパラメータスタディを行った。

仮定した断層上で破壊を発生させるため、破壊核として、中央の面に臨界クラックサイズで応力擾乱を与えた。応力擾乱パッチの内側ではせん断応力が周囲より高く設定されており、降伏応力を上回るため、このパッチから破壊が開始して、両方向に進展すると期待できる。しかしながら、一部のパラメータの組み合わせにおいて、応力擾乱パッチを与える前から、斜交した断層が破壊条件を満たしているケースがあった。このような「何もしなくても割れてしまう」断層は、天然では存在しえないと考え、ill-posedな条件設定として考察からは除外している。

パラメータスタディの結果、S値が小さいほど、すなわち間隙水圧が増加するほどISO成分が増える傾向がほぼすべてのケースで見られた。パラメータスタディに際してΨは15°から75°まで15°刻みに与えたが、最大応力軸の角度(Ψ)が低角なときは、いくら間隙水圧を上げてもISO成分が10%を超えない例が見られた。逆にΨを高角で与えたときはill-posedに分類される例が多かった。計算に用いた中で、最も高いISO成分を得られたパラメータはΨ=60°かつΨ=-Φで、S値が小さいときであった。このような結果から、ただ間隙水圧が上昇しさえすれば必ずISO成分を伴う破壊になるのではなく、応力の向きや断層の形状の影響も重要であると考えられる。

また、摩擦係数や応力擾乱パッチのサイズといった、上述のパラメータスタディでは定数として扱ってきたパラメータを変更したときの影響についても述べる。特に、ここまでは$\mu_s \gg \mu_d$として設定していた動摩擦係数を$\mu_s \sim \mu_d$へ変更した場合 、ill-posedな条件となるパラメータ領域が格段に広がり、本来であれば高いISO成分を

© 日本地震学会

得られるはずのパラメータセットがill-posedとなってしまう場合が見られた。ISO成分の高い破壊の存在は、$\mu_s \gg \mu_d$であることを示している可能性がある。

© 日本地震学会

Two forms of the slip fronts and analyzing their propagation velocities by Linear Marginal Stability Hypothesis

*Takehito Suzuki[1]

1. Aoyama Gakuin University

２つの媒質間の滑りの伝播は理学的・工学的に重要な問題であり、特にその伝播端の伝播速度の決定機構は長く興味を集めてきた。これにはもちろん断層面上の滑りの伝播速度の理解も含まれる。著者も基板上に置いた無限に長い粘弾性ブロックを端から押すというモデルにおいて、滑り速度に非線形に依存する摩擦則の仮定の下、定常状態の滑り端の伝播速度の下限を得ている（Suzuki and Matsukawa, 2019）。本発表ではこの結果を拡張し、滑りにも依存する摩擦力を導入して、滑り端の伝播速度について解析的に考察する。

解析には線形臨界安定性解析(Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH)を用いる。これは伝播速度を求める際に、支配方程式系を伝播端の近傍で線形化してしまうというものである。ここで伝播端にはintruding frontとextruding frontの二通りがあることに注意する（Suzuki and Matsukawa, 2019）。１次元系を考え、ある物理量sの伝播を考える。sがゼロと正の定常状態があるとし、一方が安定、もう一方が不安定であるとする。この時、s=0が不安定でs>0の領域が侵入していく場合をintruding front, s>0が不安定でs=0の領域が侵入していく場合をextruding frontと呼ぶ。sの時間発展方程式において、拡散に相当する項が存在すると、これらのフロントは対称性を失い、異なった伝播速度を生じる。

伝播端ではu~exp(\pm i (kx-omega t))の平面波を考え（uは変位、k, omegaはそれぞれ複素波数と複素周波数、また複号は上がextruding front, 下がintruding frontである）、kの実部k_r, 虚部k_i, omegaの実部omega_r, 虚部omega_iの４つの未知数を求めることになる。そしてこのためには分散関係の実部・虚部、そして伝播・成長の安定性条件という４つの関係式が必要となる。求めるべき伝播速度はomega_i/k_iであり、k_iとomega_iは正の実数でなければならないことに注意する。

LMSHの考え方に基づき、摩擦力の滑り・滑り速度に対する非線形な依存性を、-C1 u+C2 \dot{u}と線形化する。ここでC1とC2は定数であり、ここでは両者をまとめて摩擦パラメータと呼ぶ。このように符号を定義することで、C1>0かつC2>0の場合がそれぞれMyers and Langer (1993)やSuzuki and Matsukawa (2019)と対応することになる。なお、今回は弱化・強化のあらゆるパターンを考えるため、摩擦パラメータには正負どちらの値も許すことにする。

LMSHに従った結果、omega_iが３次方程式を満たすことが分かった。各項の係数には摩擦パラメータが現れ、それによって正の実数解の個数を分類することができた。特に摩擦パラメータ空間で解の挙動が12個の空間に分類されることが明らかになったのが重要である。これに加えてk_iの解空間も求め、伝播端の速度を統一的に理解するのが将来的な目標となる。伝播の速い地震とゆっくりな地震が摩擦パラメータの観点から統一的に説明されることが期待される。

© 日本地震学会

An analytical solution for dynamic self-similar crack with distance-weakening friction

*Shiro Hirano[1], Hiromichi Itou[2]

1. Ritsumeikan Univ., 2. Tokyo Univ. of Science

断層破壊の成長過程が自己相似的であることは多くの観測研究により知られている通りである (例えば Uchide & Ide, 2010, *JGR*). 破壊伝播速度 c が一定で, 亀裂内部の stress drop が一様であるとき, 破壊開始点を原点とする断層面上の位置 x, および破壊開始からの時間 t の関数として, この性質を満たす滑り速度分布は, $V(x,t) = V(x/(ct))$ とモデル化される. Kostrov (1964, *PMM*) は, 亀裂内部の動摩擦力を一定として, 端点で square-root-singularity を持つ V を提案している. これだけでも破壊伝播速度とエネルギー解放率の関係など, 震源物理学にとって有用な理解が得られるが, もしも摩擦の弱化過程を導入することで, 亀裂先端で滑り速度が無限大ではなくゼロであるような解が得られれば, 物理的に妥当であり, かつ摩擦パラメタ, 破壊伝播速度, および初期応力などの関係を議論する上で有益であろう. ただし震源過程の数値シミュレーションなどで頻繁に用いられる滑り弱化型摩擦則は, 破壊が成長しても臨界滑り量 D_c が一定であるとしてモデル化される事が多い. このような摩擦則では, 滑り速度の最大値が破壊成長と共に増大し (Andrews, 2005, *JGR*), 従って観測と整合する自己相似性が実現できない. また, 滑り速度最大値を一定に保つ以外に, 破壊伝播速度を理論的上限（例えば面内亀裂なら Rayleigh 波速度）未満に保つことも, 観測との整合性から要請される性質である. これらを満たす方法として, 断層面外の非弾性変形を考慮するモデル化が有効であるが, 線形弾性破壊力学の範疇でも, 人為的に滑り速度に上限値を設ければ, 破壊伝播速度やエネルギー解放率の観点から等価な破壊を実現できることが数値的に確かめられている (Andrews, 2005, *JGR*).

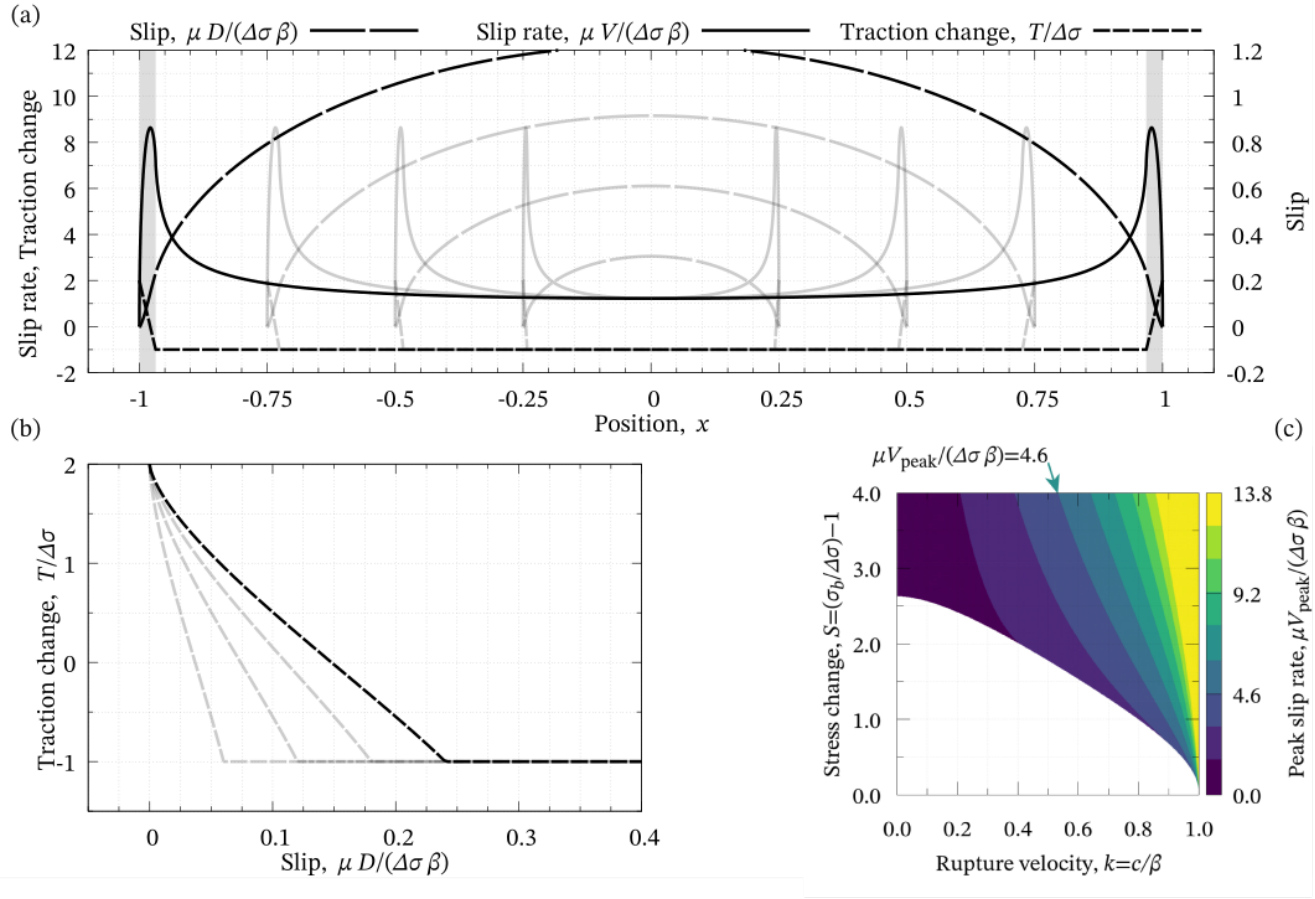
そこで本研究では, 自己相似に拡がる動的亀裂の面外問題を考え, 亀裂先端近傍に摩擦の弱化領域を設けることで, 亀裂端での滑り速度がゼロであり, かつ破壊が拡大しても滑り速度最大値が一定に保たれる解析解を求めた. 類似の解析は定常パルス型破壊モデルの場合に Rice *et al.* (2005, *BSSA*) によって実施され, 摩擦パラメタ, 破壊伝播速度, および初期応力などの関係が明らかにされている. 本研究はそれを自己相似亀裂の場合について考えたものであり, Rice *et al.* の解析よりも遥かに複雑な, 特異微積分方程式の計算を要するが, 結果的にはやはりそれらパラメタ間の関係が明らかになった. 自己相似亀裂独自のモデル化として, 摩擦の弱化領域の長さが各時刻の亀裂長さに比例すると仮定したため, 結果として D_c も亀裂長さに比例する. これはパルス型破壊や多くの数値シミュレーション研究における D_c =一定 の仮定と異なるが, 観測から推定された D_c は滑り量に比例するため (たとえば Mikumo *et al.*, 2003, *BSSA*), 滑り量と破壊長さが比例することと併せれば, 観測に見合う仮定である.

本研究の主要な結果の1つ目として, 破壊伝播速度が決定されるメカニズムを提唱する. 亀裂端での滑り速度をゼロに抑えるという条件から, 破壊伝播速度, 応力比 S および滑り速度最大値 V_{peak} の3者間で満たされるべきトレードオフの関係式が導かれる. S = (strength excess) / (stress drop) であり (Andrews, 1976, *JGR*), これは地殻応力, 強度, および摩擦係数で決まるため, 予め場に与えられたパラメタであると仮定する. そして Andews (2005) が提唱したように, 断層面外の非弾性変形を模擬するべく V_{peak} を一定値 (たとえば ~5.7 m/s) とすると, トレードオフの関係式から破壊伝播速度が自動的に決まる. 現実の破壊伝播速度は断層面外の非弾性変形によるエネルギー散逸過程に支配されていると考えられるが, その影響と等価なモデルを線形弾性破壊力学の範疇で理解できることが, 解析的にも示されたと言える.

2つめの結果は, 地震学的可観測量から断層面の破壊エネルギーを推定する方法の提案である. ただし本モデルではエネルギー解放率も破壊長さに比例するので, 推定可能なのは「破壊が単位距離進んだ際の, 破壊エネルギーの増加率」であり, エネルギー解放率を G ($\propto x$)とすれば, G/x を推定することに相当する. この推定に必要な量は, k, V_{peak}, および V_{peak} を迎えた瞬間の滑り量 D_c' (Mikumo *et al.*, 2003) であり, これらはいずれも震源

© 日本地震学会

インバージョンによって推定可能な量であることから, 本モデルを通じて G/x の推定も可能となる.



(a) Slip, slip rate, and traction on the fault for S=2 and k=0.9. Curves for ct = 0.25, 0.5 , 0.75 (gray), and 1.0 (black) are plotted.
(b) Slip-stress curve for S=2 and k=0.9. Curves for x = 0.25, 0.5, 0.75 (gray) and 1.0 (black) are plotted.
(c) Normalized peak slip rate as a function of S and k. The blank region indicates absence of solution that satisfies $V(\pm1)$=0.

© 日本地震学会

Estimation of fracture energy of large earthquakes based on heterogeneous fault rupture process

*Nelson Pulido[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Fracture energy (G) is a fundamental physical property of earthquakes governing its nucleation, rupture growth and arrest. The most widely used approach to estimate fracture energy is based on the seismic energy budget (usually referred to the “seismological” fracture energy). To that purpose average values of displacement and stress on the fault plane have to be assumed. However these values can be highly variable for large earthquakes. To estimate fracture energy I use the linear elastic fracture mechanics approach (LEFM), and assume that heterogeneous fault rupture can be described as the superposition of anti-plane and in-plane fault rupture modes. I systematically calculated fracture energy of large earthquakes (M>7) based on variable fault rupture velocities and stress drops, for an extensive database of slip models of NEIC. I first calculate the stress drops and local rupture velocity distributions using the slip models and sub-faults rupture times in the database. My results show highly heterogeneous distributions of stress drops and local fault rupture velocities. Fault ruptures largely take place in the sub-shear domain for the majority of slip models but can locally become super-shear. My results indicate that fracture energy G is highly correlated with fault slip. However the rate of growth of G with increasing slip for large earthquakes is weaker compared to the growth for small earthquakes. Finally, I calculated D_c values based on my estimations of G and S for all the slip models in this study, and show that D_c accounts for a significant fraction of the final fault slip.

© 日本地震学会

Earthquake magnitude estimation under nonuniform stress and friction

*Yumi Urata[1], Eiichi Fukuyama[1,2], Chihiro Hashimoto[3]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

We investigated the earthquake magnitude (Mw) under the nonuniform initial shear stress and friction laws by comparing theoretical estimates based on static fracture mechanics with those by 3-D dynamic rupture simulations.

For rupture growth, the energy release rate must be equal to or larger than the fracture energy (Gc). Theoretical works on rupture initiation have assumed the uniform or axisymmetric shear stress distribution and the uniform friction properties (e.g., Andrews, 1976, JGR; Uenishi & Rice, 2003, JGR; Galis et al., 2015, GJI). Under the uniform stress and friction, once a rupture propagates dynamically, it does not stop. However, stress and friction distributions are considered to be heterogeneous (e.g., Olsen et al., 1997, Science; Aochi & Ide, 2014, EPS), and the heterogeneity would contribute to the stopping of ruptures.

In this study, we evaluated the Gc/Gst, where Gst is the static energy release rate at elliptical static crack rim under the nonuniform shear stress and friction. Because it is difficult to obtain Gst analytically, we calculated Gst numerically. In the calculation, we used triangular elements same as those used in the dynamic rupture simulations. First, we calculated the static slip distribution in the crack using the solution of the triangular dislocation by Nikkhoo & Walter (2015, GJI) so that the stress drop and slip amount satisfy the friction law at each element. From the static stress changes at the outside of the crack caused by the obtained static slip and the shortest distance between each adjacent element and the crack elements, we estimated the static stress intensity factor (Kst) and thus Gst, which is proportional to Kst^2, along the crack rim. The axial length of the elliptical crack was set every 10 km. The nonuniform stress and friction distributions were same as those used in the dynamic rupture simulations.

We computed the dynamic rupture propagation by the boundary integral equation method with triangular elements (Hok & Fukuyama, 2011, GJI). Nonuniform stress and friction distributions were obtained by the simulations of quasi-static stress accumulation along the Nankai trough (Hashimoto et al. 2017, JpGU-AGU Joint Meeting 2017) under the slip- and time-dependent constitutive law (Aochi & Matsu’ura 2002, Pageoph). A rupture started at a localized elliptic region stressed beyond the peak stress of the friction laws (initial crack). We examined 16 cases: eight hypocenter locations and two sizes of the initial crack for each hypocenter location. A rupture did not grow outside the initial crack in the cases with smaller size of the initial crack, but it propagated in the cases with larger size of the initial crack, for all hypocenter locations. In the latter cases, the region where slip grew and thus Mw varied with the hypocenter locations (Urata et al., 2017, IAG-IASPEI 2017).

We revealed that the Gc/Gst distributions can predict a rupture growth. The rupture did not grow outside the initial crack in the dynamic rupture simulations if the Gc/Gst values were larger than a certain value, α, at the almost whole rim of the static crack whose size is the same as the initial crack size of the dynamic rupture simulation. Otherwise, the rupture grew. For the nucleated cases, the Gc/Gst and local rupture velocity had negative correlation. The Gc/Gst distribution also predicted the rupture growth to

© 日本地震学会

~M8. If the Gc/Gst values are larger than α at the almost whole rim of the static crack with the axial length of 60-80 km, Mw was smaller than 7.5 in the dynamic computations. Otherwise, Mw was larger than 7.5. The α value was larger than 1 in this study. This might be related to the coexistence of the modes II and III, the friction law, and the element size. These results would be useful in the study on the earthquake rupture scenarios.

© 日本地震学会

Room C | Regular session：S08. Earthquake physics

Sat. Oct 31, 2020 2:30 PM - 3:15 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM C

[S08]PM-2

chairperson:Yumi Urata(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-20] Friction parameter of metagabbro gauge obtained from a large-scale biaxial friction apparatus

○Akihiro Shimoda[1], Futoshi Yamashita[2], Eiichi Fukuyama[1,2], Shun Watanabe[1] (1.kyoto university, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-21] Temporally variable estimation of friction parameters using machine learning

○Ryo Ishiyama[1], Eiichi Fukuyama[2], Bogdan Enescu[1] (1.Division of Earth and Planetary Science, Kyoto University, 2.Department Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University)

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

[S08-22] Spatiotemporal Complexity of Rupture Evolution in a Fault Damage Zone with Multiple Small-Scale Cracks

○Koji Uenishi[1,2], Kunihiro Nagasawa[2] (1.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

Friction parameter of metagabbro gauge obtained from a large-scale biaxial friction apparatus

*Akihiro Shimoda[1], Futoshi Yamashita[2], Eiichi Fukuyama[1,2], Shun Watanabe[1]

1. kyoto university, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

シェールガス・オイルをはじめとした非在来型化石燃料資源は水圧破砕法を用い地下深くの岩盤に亀裂を入れることで採掘を行う．その際，岩盤内へ破砕流体を注入することにより誘発地震が発生することがあり，断層摩擦の理解が重要となる．本研究では，防災科学技術研究所（NIED）の大型試験機を用いて2018年度に実施したガウジを挟まない岩石摩擦実験，2020年の2月から4月にかけて実施したガウジを挟んだ岩石摩擦実験で得られたデータを用いて速度状態依存法則の摩擦パラメータであるb-aの推定を行なった．ここでは主にガウジを挟んだ実験結果を報告する．

実験では1.5×0.5×0.5 m^3（上）および2.0×0.1×0.5 m^3（下）の変斑レイ岩を上下に積み重ね（有効断層面積は0.15m^2），下部の岩石試料は振動台に固定し上部の岩石試料は振動台外の反力床に反力棒を通して固定した．上下の岩石試料の間にガウジを散布して実験を行った．ガウジ層の厚さは3 mmとなるように調整した．ガウジは変斑レイ岩を破砕機により粉砕した後，超微粉砕機ナノジェットマイザー（（株）アイシンナノテクノロジーズ）で平均粒径が10 μm，最大粒径が200 μmとなるように粉砕した．実験は垂直応力3.3 MPaもしくは6.5 MPaを載荷し振動台を水平方向に移動させることで行なった．載荷速度を段階的に変化させるvelocity step testを行い，1 mm/sで8 s，0.1 mm/sで30 s，0.01 mm/sで150 s，0.1 mm/sで30 sを1セットとして3回繰り返したのち，最後に1 mm/sで8 s，0.01 mm/sで150 s，1 mm/sで8 sで載荷させた．上記の載荷速度において垂直応力3.3 MPをかけた実験を2回，6.5 MPaかけた実験を2回，計4回の実験を行った．各実験前には前の実験で用いたガウジを全て取り除き，新しいガウジを散布しガウジ層を作って行った．実験時に生じたすべり量として，岩石試料の両端に設置したレーザー変位計とそのターゲットによって相対変位を計測した．すべり面にかかる垂直応力とせん断応力は岩石試料外部に取り付けたロードセルを用いて測定し，ガウジの摩擦係数はそれぞれの比を取ることにより推定した．

載荷速度を段階的に変化させたvelocity step testの際の摩擦係数と上下の岩石試料間の相対変位の関係が速度状態依存摩擦則に従うとして，摩擦パラメータb-aを求めた．velocity step change前後の摩擦係数の差を，velocity step change前後の載荷速度の比の自然対数で除することによりb-aを求めた．これより垂直応力を6.5 MPaとした実験におけるb-aは正で1.5×10^{-4}～1.5×10^{-3}であり，垂直応力を3.3 MPaとした実験におけるb-aも正で9.0×10^{-4}～2.3×10^{-3}と推定することができた．これらの値は2018年度に行った岩石間にガウジを挟まずに行った実験データから推定したb-aの値（1.4×10^{-3}）（下田他，JpGU-AGU Joimt Meeting 2020）に近い値をとることがわかった．

Gu et al. (1984)では不安定すべりを引き起こす臨界有効法線応力を定義している．またMcLaskey & Kilgore (2013)では臨界有効法線応力とすべり弱化距離から不安定すべりを引き起こすcritical stiffness（K_{crit}）を定義している．Critical stiffnessは測定データを説明するパラメータa，b，Lcと岩石にかかる垂直応力から推定することができる．岩石にかかる垂直応力は実験条件から，b-aは今回の解析から推定できたため，今後，Lcを推定することで不安定すべりを引き起こす条件について議論できると考えられる．

© 日本地震学会

Temporally variable estimation of friction parameters using machine learning

*Ryo Ishiyama[1], Eiichi Fukuyama[2], Bogdan Enescu[1]

1. Division of Earth and Planetary Science, Kyoto University, 2. Department Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

Earthquakes occur due to frictional stick-slip instabilities on faults (e.g., Scholz, 1998), thus knowing the behavior of friction on a fault is important to understand the earthquake occurrence process. The rate-and-state dependent friction law (e.g., Dieterich, 1979, JGR) is widely used to model laboratory observations of rock friction. The law is characterized by three friction parameters, *a*, *b* and the critical slip distance *Lc*, which are usually considered time independent. Urata et al. (2017, PAGEOPH) estimated these parameters by using simulations that reproduce the stick-slip event occurrence in a biaxial rock friction experiment. The results show that the friction parameters may change as slip progresses. In this study we estimate temporally variable friction parameters using a machine learning approach. Our final goal is to propose a new friction law that can account for the temporally variable friction parameters. We consider such intrinsic variability to be primarily a consequence of changes in the fault rock environment conditions during repeated stick-slip.

The experiment data and simulation method of this study are the same as in Urata et al. (2018). The simulations of a spring-slider model with one-degree-freedom are used as the training dataset for our machine learning algorithm to estimate the friction parameters based on the experiment data. Machine learning enables us to reduce the calculation costs when dealing with large datasets and predict parameters more accurately. We employed the random forest algorithm (Breiman, 2001, Machine Learning), which is also used in other earthquake related studies (e.g., Rouet-Leduc et al., 2017, GRL). The algorithm is known for its accuracy, despite its simple formulation, and the capability to account for multiple variables. In order to quantify the temporally-dependent friction parameters, we set time windows spanning from one stick-slip event to the next and estimate the parameters in each time window. We finally predict the parameters *b* and *Lc* out of the three friction parameters (the *a* parameter is considered a material constant), using the experiment data. The steps used in the estimation are presented in detail below.

We first obtain two relationships of shear-stress divided by normal stress with respect to time and slip, for each time window, using the simulation data and calculate window-length (i.e., duration of a stick-slip event), variance, skewness and kurtosis corresponding to each time window. We associate this dataset, consisting of seven values for each time window, to the combination of parameters *b* and *Lc* used in the simulation. The parameters *b* and *Lc* are taken from a grid of 50x50 values that sample a large range of parameter values. The same seven values are also estimated from the observation data, for successive stick-slip events in the rock friction experiment. Finally, the *b* and *Lc* are estimated (predicted) from the experiment data, using a random forest decision tree and the training dataset from simulations.

© 日本地震学会

Our predicted *b* and *Lc* values agree in general with those estimated by Urata et al. (2017). The evolution of *b* and *Lc* are connected one with each other. The *b* parameter has relatively slow changes, while the *Lc* variations are rapid. We could not find a clear temporal trend yet in the data for a 18-second interval analyzed in this study, as we would have expected based on simple physical considerations (i.e., gradual increase of parameters *b* and *Lc* with increase of strength on the fault when stick-slip events occur repeatedly and the gouge layer on the fault becomes thicker). However, we may be able to get significant environment-dependent friction parameters when parameter estimation will be conducted using experiment data for longer time intervals.

© 日本地震学会

Spatiotemporal Complexity of Rupture Evolution in a Fault Damage Zone with Multiple Small-Scale Cracks

*Koji Uenishi[1,2], Kunihiro Nagasawa[2]

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

By using a high-speed digital video camera and a tensile testing machine, in this series of experimental study (*SSJ Fall Meeting*, 2017, 2018, 2019; *JpGU Meeting*, 2019), we have been trying to comprehend more deeply the relation between the local and global mechanical characteristics of sets of small-scale cracks that are densely distributed in a certain area of a brittle solid medium. These cracks, subjected to quasi-static loading, are preset in order to model a geological fault damage zone. Contrary to the rupture of (one single or a few) large-scale geological fault planes that can generate low-frequency waves and has been extensively investigated, the interaction of multiply extending small-scale cracks may radiate higher-frequency waves and its mechanical details have not been fully clarified yet.

So far, through dynamic photoelastic observations, we have found spatiotemporally complex but ordered rupture development in two-dimensional brittle polycarbonate specimens. Every rectangular specimen is under external tensile loading that is acting parallel to the free surfaces at a constant strain rate. Small-scale cracks, parallel to each other and having some dip angle, are prepared with a digitally controlled laser cutter. In the case if the parallel cracks dip vertically, for instance, as preliminarily reported earlier (*SSJ Fall Meeting*, 2019), upon surfacing of an upward-moving primary rupture, the rupture jumps on the top free surface to remote positions and the secondary ruptures start traveling downward into the opposite direction. It is noteworthy that the secondary and significantly delayed further ruptures, that is, a cluster of ruptures, are generated and propagated even without applying additional external loading. Seemingly, they are due to dynamic waves associated with the primary rupture, especially Rayleigh surface waves produced upon rupture surfacing. The experimental findings and a crucial role of Rayleigh surface waves in inducing the secondary and further ruptures can be confirmed with numerical simulations based on a spatiotemporally second-order finite difference technique.

For other different experimentally-set dip angles, it seems that the rupture evolution can become either fully dynamic (for larger dip angles; behavior similar to the vertically dipping one) or quasi-static (for smaller angles; ruptures tend to bridge the gaps between the preexisting cracks in a step-by-step manner).

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

© 日本地震学会

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

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 10:00 AM JST | Sat. Oct 31, 2020 12:00 AM - 1:00 AM UTC | ROOM D

[S14]AM-1

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

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

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

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

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

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

○Hong Peng[1], James Jiro Mori[1] (1.Kyoto University)

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

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

○Kumazawa Takao[1], Yosihiko Ogata[2] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics)

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

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

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

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

*Masajiro Imoto[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

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

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

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

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

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

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

© 日本地震学会

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

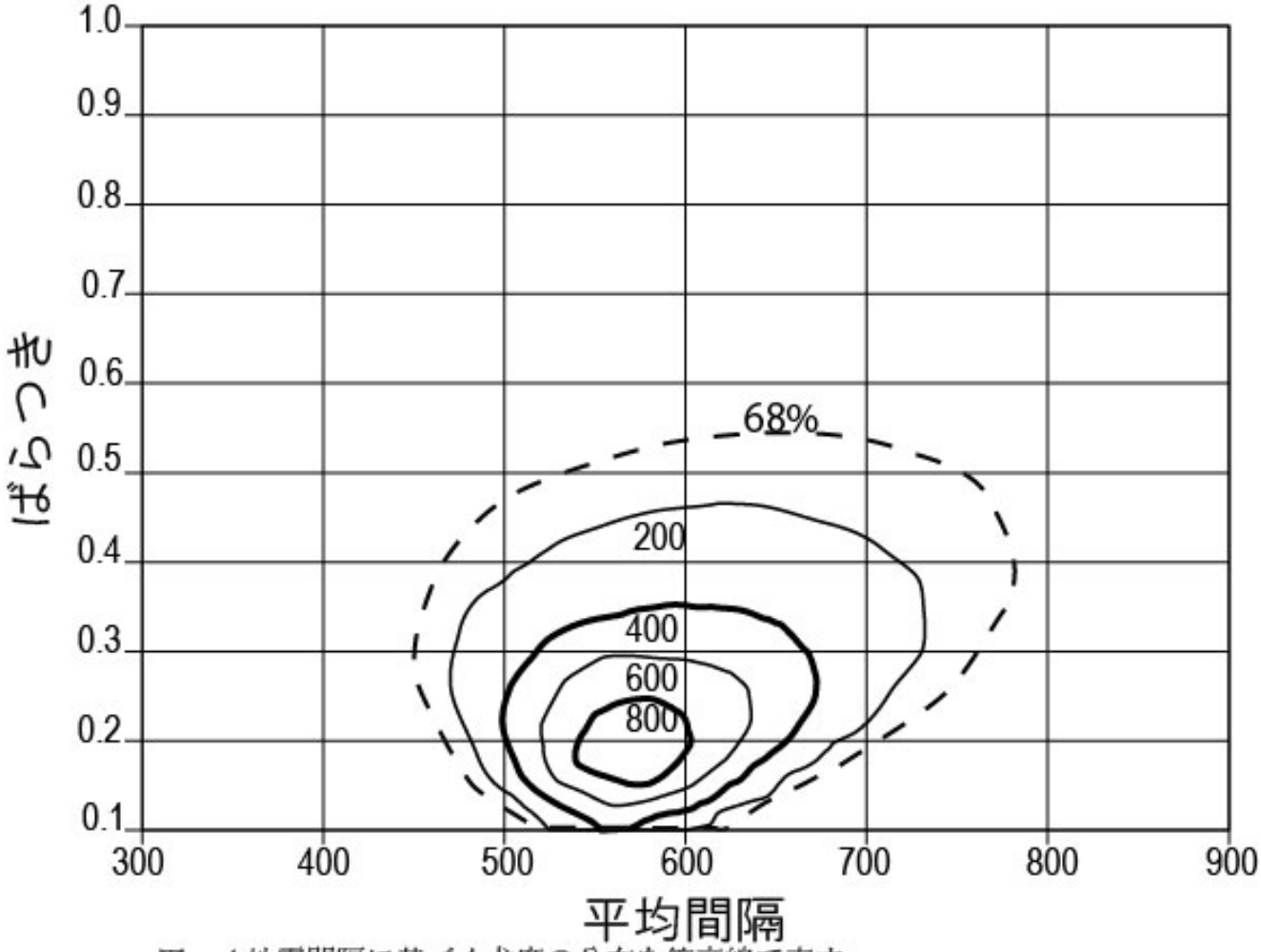


図　4地震間隔に基づく尤度の分布を等高線で表す。
破線は信頼区間68%で推定されるパラメータ範囲を示す。

© 日本地震学会

Foreshocks and earthquake hazard assessment in Japan mainland.

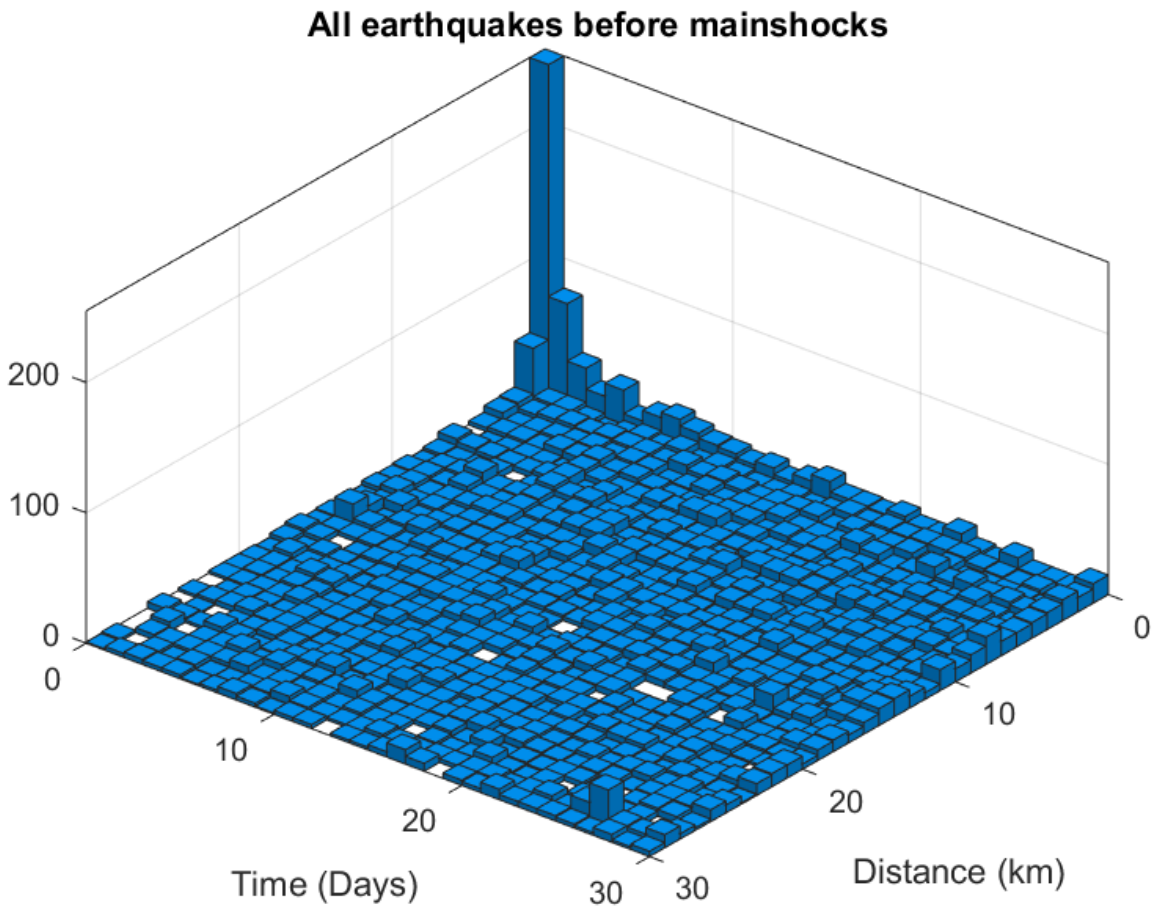
*Hong Peng[1], James Jiro Mori[1]

1. Kyoto University

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

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

© 日本地震学会


All earthquakes before mainshocks
200
100
0
0
10
20
30
Time (Days)
0
10
20
30
Distance (km)

© 日本地震学会

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

*Kumazawa Takao[1], Yosihiko Ogata[2]

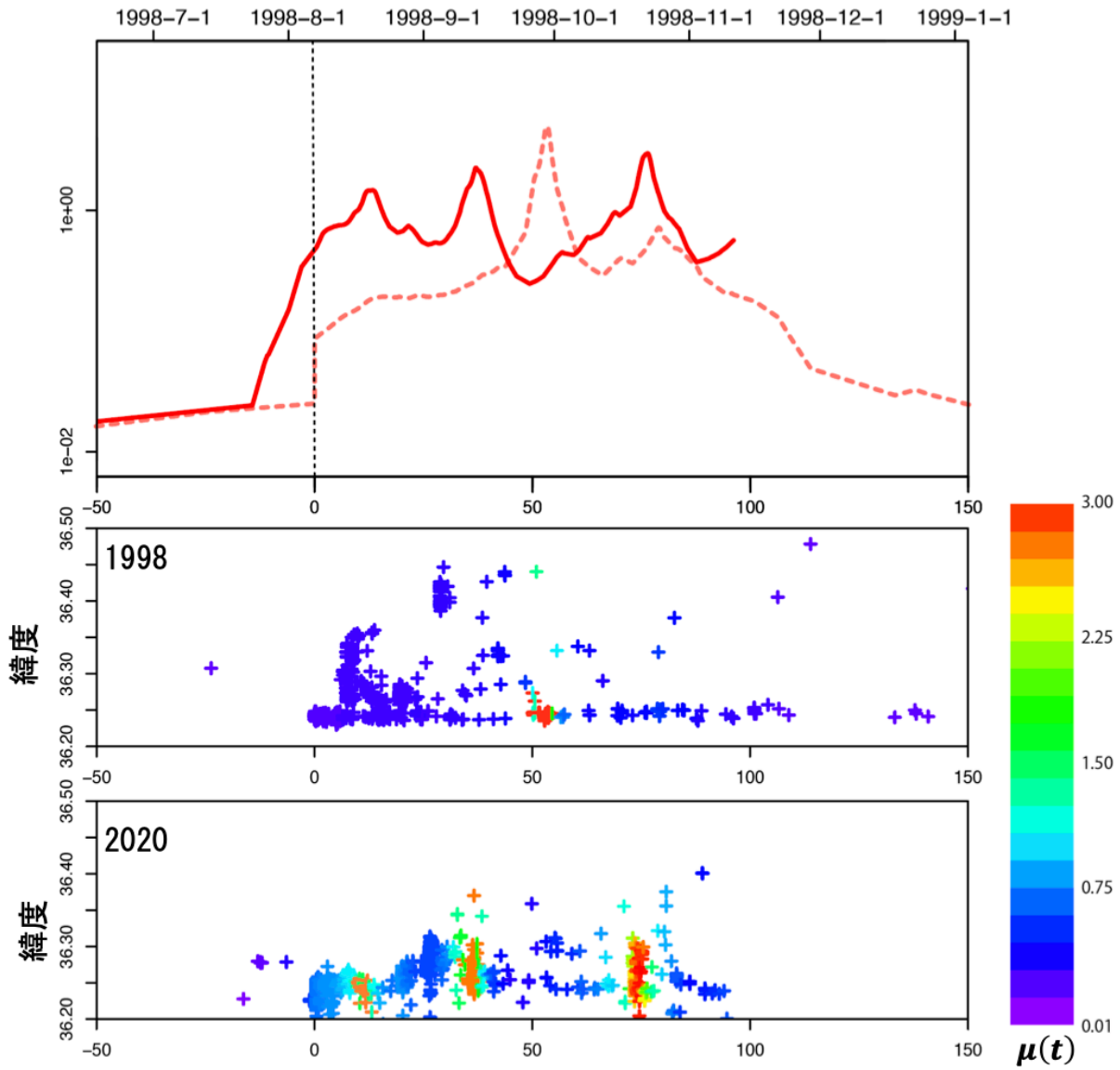
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics

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

© 日本地震学会

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

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



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

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

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

© 日本地震学会

Incorporating focal mechanisms into the ETAS model

*Jiancang Zhuang[1,2], Eri Maita[2]

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

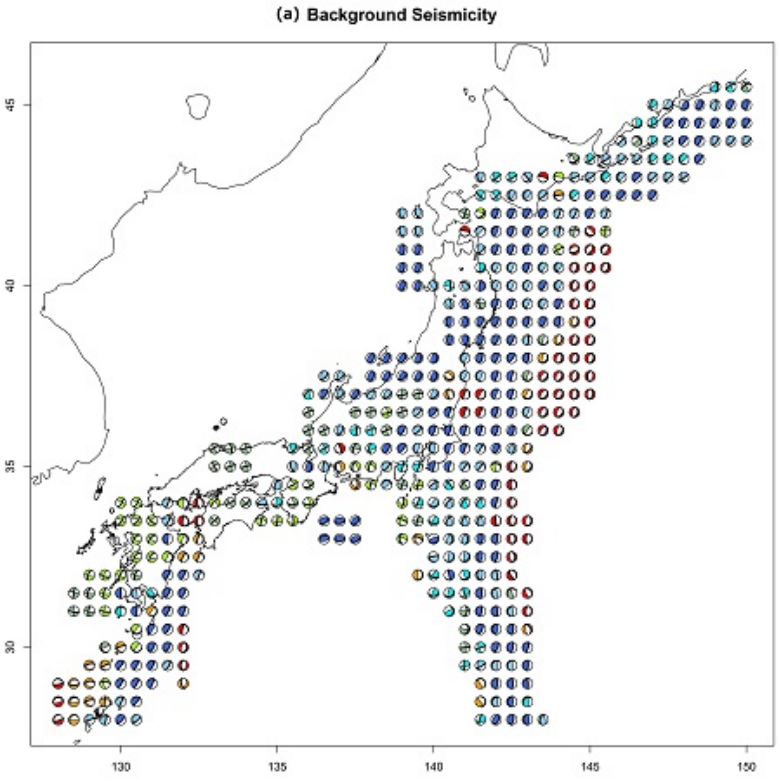
This study tries to find the probability distributions of focal mechanisms in background seismicity and earthquake clusters in Japan by analyzing F-net data. To describe the probability distribution, each focal mechanism is discomposed as the result of a rotation about a particular pole starting from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

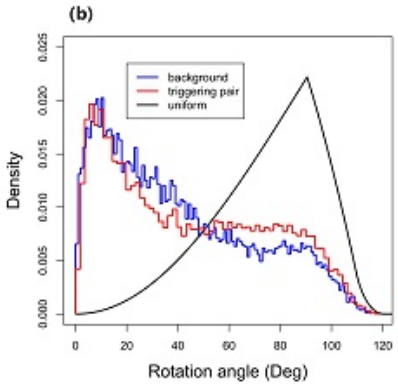
For the background events, the reference focal mechanism is taken as the average focal mechanism in each area, calculated by the method in Kagan and Jackson (2014, GJI). The rotation angles between a background event and the mean focal mechanisms at (x, y) is reconstructed by histogram of rotation angles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

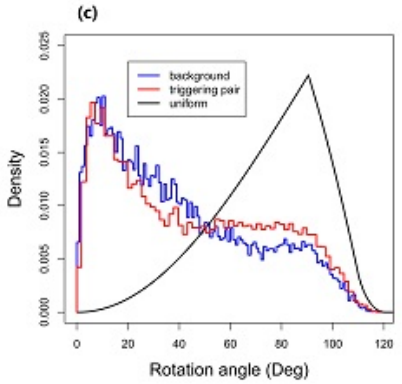
We then plug the reconstructed focal mechanisms distribution into the space-time ETAS model and apply it to the F-net data. The results show that focal mechanism plays an important role in earthquake triggering and incorporation with focal mechanism greatly improves model fitting.

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

© 日本地震学会


(a) Background Seismicity
45
40
35
30
130
135
140
145
150


(b)
background
triggering pair
uniform
Density
0.000
0.005
0.010
0.015
0.020
0.025
0
20
40
60
80
100
120
Rotation angle (Deg)


(c)
background
triggering pair
uniform
Density
0.000
0.005
0.010
0.015
0.020
0.025
0
20
40
60
80
100
120
Rotation angle (Deg)

© 日本地震学会

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

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

[S22]AM-2

chairperson:Shuichi Kodaira(JAMSTEC)

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

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

○Makoto Otsubo[1] (1.Geological Survey of Japan)

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

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

○Ban-Yuan Kuo[1], Pei-Ru Jian[1], Pei-Ying Patty Lin[2], Ching-Ren Lin[1], Yasushi Ishihara[3], Shuichi Kodaira[3], Mamoru Nakamura[4], Chau-Chang Wang[5] (1.Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, 2.National Taiwan Normal University, 3.JAMSTEC, 4.University of the Ryukyus, 5.NARLabs)

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

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

○Ting-Chun Lin[1], Kai-Xun Chen[1,2], Yuancheng Gung[1], Ban-Yuan Kuo[2], Yasushi Ishihara[3], Shuichi Kodaira[3], Mamoru Nakamura[4], Pei-Ying Patty Lin[5], Ching-Ren Lin[2], Chau-Chang Wang[6] (1.National Taiwan University, Department of Geosciences, 2.Academia Sinica, 3.JAMSTEC, 4.University of the Ryukyus, 5.National Taiwan Normal University, 6.National Applied Research Laboratories)

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

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

○Takuya Nishimura[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Takeshi Matsushima[3] (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Faculty of Science, Kyushu University)

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

*Makoto Otsubo[1]

1. Geological Survey of Japan

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

© 日本地震学会

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

*Ban-Yuan Kuo[1], Pei-Ru Jian[1], Pei-Ying Patty Lin[2], Ching-Ren Lin[1], Yasushi Ishihara[3], Shuichi Kodaira[3], Mamoru Nakamura[4], Chau-Chang Wang[5]

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

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

© 日本地震学会

Ambient noise tomography for northern Okinawa trough OBS array

*Ting-Chun Lin[1], Kai-Xun Chen[1,2], Yuancheng Gung[1], Ban-Yuan Kuo[2], Yasushi Ishihara[3], Shuichi Kodaira[3], Mamoru Nakamura[4], Pei-Ying Patty Lin[5], Ching-Ren Lin[2], Chau-Chang Wang[6]

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

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

© 日本地震学会

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

*Takuya Nishimura[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Takeshi Matsushima[3]

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

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

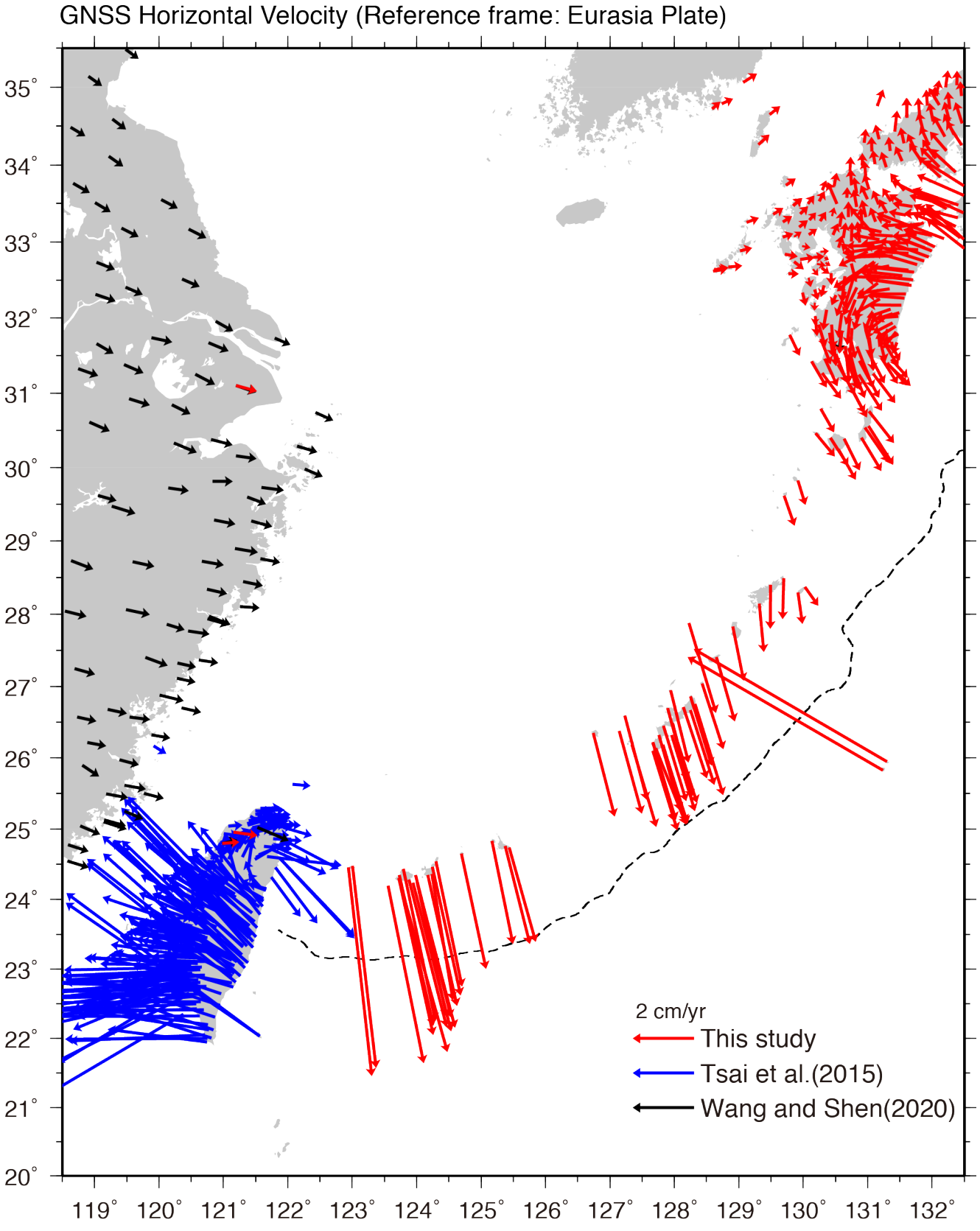
The secular GNSS velocity shows rapid backarc spreading along the Okinawa Trough and the spreading rate increases toward south (e.g., S. Nishimura, 2004; Nakamura, 2004; Watanabe and Tabei, 2004). Internal deformation of the island arc is rather small and modeled by rigid block rotation of three or four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

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

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

© 日本地震学会

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



© 日本地震学会

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

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

[S22]PM-1

chairperson:Mamoru Nakamura(Ryukyu University)

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

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

○Yukihiro Nakatani[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1], Hiroki Miyamachi[2], Reiji Kobayashi[2], Yusuke Yamashita[3], Hiroshi Shimizu[4], Takeshi Matsushima[4], Kazunari Uchida[4], Kazuo Nakahigashi[5], Hideji Abe[7], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[7] (1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 3.DPRI, Kyoto Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, UTokyo)

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

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

○PeiYing Patty Lin[1], Hsiu-Cheng Yeh[1], Chih-Ming Lin[1], Ban-Yuan Kuo[2], Shu-Huei Hung[3], Yuancheng Gung[3], Eh Tan[2], Kate Huihsuan Chen[1], Chau-Chang Wang[4,5], Ching-Ren Lin[2], Shuichi Kodaira[6], Yasushi Ishihara[6], Mamoru Nakamura[7] (1.Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.National Sun Yat-sen University, 6.JAMSTEC , 7.University of the Ryukyus)

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

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

○Shu-Huei Hung[1], Ban-Yuan Kuo[2], Pei-Ying Patty Lin[1], Yuancheng Gung[1], Eh Tan[2], Huihsuan Chen[3], Chau-Chang Wang[4], Shuichi Kodaira[5], Yasushi Ishihara[5], Mamoru Nakamura[6], Ching-Ren Lin[2] (1.Department of Geosciences, National Taiwan University, 2.Academia Sinica, 3.National Taiwan Normal University, 4.National Applied Research Laboratories, 5.JAMSTEC, 6.University of the Ryukyus)

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

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

○Ryuta Arai[1], Shuichi Kodaira[1], Tsutomu Takahashi[1], Ayako Nakanishi[1], Yojiro Yamamoto[1], Yuka Kaiho[1], Yasushi Ishihara[1], Seiichi Miura[1], Yoshiyuki Kaneda[1,2] (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

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

*Yukihiro Nakatani[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1], Hiroki Miyamachi[2], Reiji Kobayashi[2], Yusuke Yamashita[3], Hiroshi Shimizu[4], Takeshi Matsushima[4], Kazunari Uchida[4], Kazuo Nakahigashi[5], Hideji Abe[7], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[7]

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

南西諸島海溝のプレート境界面上では，プレート沈み込みに伴う通常の地震に加え，低周波微動や短期的SSEといったスロー地震も発生しており，他の沈み込み帯と同様に両者の空間分布が議論されている．これまで，海溝軸から100 km以上離れた島嶼部が主な観測網であったため，隣接する南海トラフと比べても，地震とスロー地震の対応関係やプレート境界におけるすべり特性の理解は遅れていたが，近年において短期～中長期的な海底地震観測網の展開が進展しつつある．
本研究チームは，トカラ列島東方海域において長期収録型海底地震計を用いた繰り返し海底地震観測を実施した．2014年に3台体制で開始した本観測は，2015年以降，6台の自己浮上型海底地震計を約1年周期で回収・設置を繰り返しながら継続し，2019年11月の回収をもって第一次観測を完了した．観測点間隔が約40–60 kmとやや疎であるが，観測空白域であった当該海域において，約5ヶ年にわたる準定常的な観測網を構築したのが特徴である．
本研究では，2016年7月～2018年3月の上記観測データを用いて，プレート境界周辺で発生する波形のよく似た地震（相似地震）を，その発生間隔に応じて分類し，活動様式を議論した．相似地震の検出にはMatched-Filter法を採用し，6台の海底地震計および島嶼観測点の3成分連続波形データに適用した．テンプレート地震には，鹿児島大学南西島弧地震火山観測所が決定したマグニチュード3以上の地震を選択し，海底地震観測点の検測データを統合して震源再決定した．相似地震群は，発生間隔から次の3つの活動様式に分類された．群発地震型，小繰り返し地震型，そして両者の混合型である．本講演では，検出イベントとテンプレート地震の相対震源位置を評価した上で，微動分布や構造との空間関係について議論する．
2019年4月からは観測点間隔20 km（計8台）のより稠密な第二次海底地震観測を開始し，2020年8月に一回目の回収・再設置を完了した．本講演では当該観測計画についても報告する．

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

© 日本地震学会

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

*PeiYing Patty Lin[1], Hsiu-Cheng Yeh[1], Chih-Ming Lin[1], Ban-Yuan Kuo[2], Shu-Huei Hung[3], Yuancheng Gung[3], Eh Tan[2], Kate Huihsuan Chen[1], Chau-Chang Wang[4,5], Ching-Ren Lin[2], Shuichi Kodaira[6], Yasushi Ishihara[6], Mamoru Nakamura[7]

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

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

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

© 日本地震学会

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

*Shu-Huei Hung[1], Ban-Yuan Kuo[2], Pei-Ying Patty Lin[1], Yuancheng Gung[1], Eh Tan[2], Huihsuan Chen[3], Chau-Chang Wang[4], Shuichi Kodaira[5], Yasushi Ishihara[5], Mamoru Nakamura[6], Ching-Ren Lin[2]

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

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

© 日本地震学会

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

*Ryuta Arai[1], Shuichi Kodaira[1], Tsutomu Takahashi[1], Ayako Nakanishi[1], Yojiro Yamamoto[1], Yuka Kaiho[1], Yasushi Ishihara[1], Seiichi Miura[1], Yoshiyuki Kaneda[1,2]

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

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

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

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

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

© 日本地震学会

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

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S02. Seismometry and monitoring system

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S02P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-01] Development of the Web application for WIN system -Porting of the function of IT kyoshin seismometer-

○Takamori Ito[1] (1.aLab Inc.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-02] Development of monitoring systems using seismic intensity meters equipped with a MEMS acceleration sensor

○Jun Uchida[1], Masahiro Oi[2], Kaoru Yoshioka[3], Shoichi Shiozaki[3], Yoshiya Ouchi[1], Keizo Motohashi[1] (1.KINKEI SYSTEM CORPORATION, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Chiba Prefectural Goverment)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-03] Accuracy of time and pressure due to calibration intervals by an atomic clock in an ocean bottom pressure gauge

Ayumu Yokoyama[1], ○Toshinori Sato[1] (1.Chiba Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-04] Calibration of instrument responses in high-density broadband seismograph networks based on teleseismic waveform data

○Takeshi Kimura[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Reisilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-05] Change of social activities due to the spread of COVID-19 infections detected by seismograph networks

○Katsuhiko SHIOMI[1], Takeshi KIMURA[1], Youichi ASANO[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-06] Comparison between results of array analysis of tiltmeters and template matching analysis of broadband seismometers

○Youichi Asano[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Development of the Web application for WIN system -Porting of the function of IT kyoshin seismometer-

*Takamori Ito[1]

1. aLab Inc.

WINシステムは無料で利用でき、充分な実績もあるため、外部とのデータ交換の必要性の有無にかかわらず、廉価に新たなテレメータシステムを構築する際には有力な候補となり得る。ただし、WINシステムはもとよりWebを利用した運用を考慮して実装されていないため、データを公開するような場合でも標準的に使用できる無料のツールは存在していない。また、unix上で表示にはX Windowを使用する前提のため、一部の研究者以外にとっては利用しづらいものになっていると考えられる。
これに対して、IT強震計(鷹野他 2004)ではWebを用いた表示を表示を当初から実装しており、内部で扱う波形データもWINフォーマットを使用してきた。ただし、データファイルの格納ルール等が独自のものであり、表示に使用していたJavaアプレットもIT強震計用に特化した仕様で、WINシステムで汎用的に使用できるものではなかった。Javaアプレットのサポート終了に対応するため、波形表示用のJavaアプレットを代替するJavaScriptを開発した(伊藤 2018)が、その際、IT強震計に限らずWIN汎用で使用可能になるよう考慮した。
IT強震計では、CGIとJavaアプレットが連携してWebアプリケーションとして動作していた。現在JavaアプレットをJavaScriptに置き換える作業を進めているが、CGIを整理するとともにWINシステムと連携して運用できるように開発を進めている。これにより、WINシステムをインストールしたサーバにapache等Webサーバをインストールし、いくつかの実行ファイルとCGIをコピーするだけで、収録データにWebからアクセスして表示できるようになった。
今後、サーバ側のプログラムと連携して各種の処理を行い結果を表示・継続処理につなげることで、より高度な運用をunixでない通常のPC、場合によってはスマートホン等から行えるように開発を進める。

(参考)
鷹野・伊藤・原(2004), IT強震計-その概念と試作-，地震学会，2004.10
伊藤(2018), JavaScriptによる地震波形表示の試み, 連合大会, 2018.5
伊藤(2018)，WINシステムで利用可能なWeb利用のリアルタイム波形表示，地震学会，2018.10
伊藤 他(2019)，廉価・容易に構築できる地震計ネットワークの提案，連合大会，2019.5
ITK Wave Viewer (winPrint.js), (http://seism.jp)

© 日本地震学会

Development of monitoring systems using seismic intensity meters equipped with a MEMS acceleration sensor

*Jun Uchida[1], Masahiro Oi[2], Kaoru Yoshioka[3], Shoichi Shiozaki[3], Yoshiya Ouchi[1], Keizo Motohashi[1]

1. KINKEI SYSTEM CORPORATION, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Chiba Prefectural Goverment

前回、私達はアナログデバイセズ社の3軸MEMS加速度センサを内蔵した普及型計測震度計を開発し、千葉県内の高層建築物に設置して振動モニタリングを行っていることを報告した。
本報告では、防災科学技術研究所との共同研究「高層建築物の振動モニタリングシステムの構築」において、クラウド環境を用いたリアルタイム波形表示機能の開発とLTE通信における課題解決について報告する。

【地震動の観測】

開発した普及型計測震度計（以下、MEMS計測震度計）は、モバイル通信機能を内蔵することが可能であり、LTE通信でクラウドにデータ送信を行うことができる。そのため、MEMS計測震度計の設置は、電源が供給できれば場所を選ばず容易に設置して、地震動のモニタリングを開始することができるという特徴がある。私達は、千葉県内の高層建築物の高層階、低層階、地表面、地下にMEMS計測震度計を平成31年3月に設置し、これまでの1年6か月間に複数の地震動を観測した。
千葉県周辺では、5月の連休期間中の4日に千葉県北東部の地震（M5.6、深さ48km）、6日に千葉県北西部の地震（M5.0、深さ68km）に発生し、6月25日には千葉県東方沖の地震（M6.1、深さ36km）が発生している。千葉県北東部や千葉県東方沖の地震では、地表面の観測波形の卓越周期が高層建築物の１次固有周期に近いこともあり、高層階の観測波形には共振が見られた。しかし、千葉県北西部の深い地震では、地表面の観測波形の卓越周期が高層建築物の１次固有周期よりも短周期側であったため、高層建築物の観測波形には明瞭な共振は見られなかった。

【リアルタイム波形表示機能の開発】

MEMS計測震度計で観測された加速度波形データは、1分毎にwinフォーマットのファイルとしてクラウドサーバに送信されており、利用者はクラウドサーバからwin形式の波形データをダウンロードして、波形表示することができる。本開発では、利用者がWEBブラウザ経由でクラウドサーバにアクセスし、連続データのリアルタイムモニタリングやイベントデータをCSV形式等でダウンロードできるクラウド環境を構築した。イベントデータは過去の地震について選択表示することが可能である。

【LTE通信の課題解決】

1年6か月間の試験運用では、LTE通信における障害が多く発生した。現在、LTE通信はどこでも可能であるが、MEMS計測震度計は、高層建築物の地下階やEPS室内に設置されており、電波環境の良い環境下にあるとは言えない。そのため、一時的に通信が途切れた場合の再送処理をはじめ、バッファ機能の確保による長時間の基地局保守の対応、さらに通信レベルの最も良い基地局と必ず接続されるわけではないことに起因する障害への対応などを行い、より確実な通信環境を実現できるようにした。

© 日本地震学会

Accuracy of time and pressure due to calibration intervals by an atomic clock in an ocean bottom pressure gauge

Ayumu Yokoyama[1], *Toshinori Sato[1]

1. Chiba Univ.

１．はじめに

海底圧力計（OBP）は、海底の隆起沈降を連続的に観測でき、スロースリップ（SSE）の観測等に非常に有用である。例えば、Sato et al. (GRL, 2017)は、2014年の房総沖SSEによる上下変動（約２cm）を捉えることに成功した。また、村田　他（JpGU, 2020）は、2018年の房総沖SSEの変動を多点特異スペクトル解析を用いて捉えている。OBPに用いている圧力計は、Paroscientific社のセンサーで、圧力を水晶発振の周波数として出力している。周波数はOBP内部のクロックによって計測している。従って、このクロックが正確でないと、正しい圧力観測が行えないことになる。我々のOBPでは、クロックの精度を保つため、原子時計（Microsemi社CSAC SA.45s）を用いて一定間隔でクロックを較正している。理想的にはクロックを原子時計で常時較正すればよいが、電力の限られるOBPでは、原子時計の常時使用は、観測期間の短縮になってしまう。本研究は、様々な較正間隔でのクロックの精度を測定し、観測精度と観測期間が両立する較正間隔を見出すことを目的としている。

２．計測方法と評価方法

計測は、実際の観測と同じくOBPをセットして、そこから時間信号（1分パルス）を取り出してGPS時計との時間差を取ることで行った。１つの較正間隔に対して約4週間の長期計測を行った。

評価方法は、以下の通りである。クロックの規定周波数をf_0とする。このクロックの実際の周波数が、$f=f_0+f_d$であるとすると、このクロックの1秒はf_0/fとなる。

1（このクロックの1秒）：$f_0/f = S$（このクロックの秒）：1（真の1秒）

より

$S = f/f_0 = 1+f_d/f_0 = 1+r$

となる。これは、例えば周波数が10%（r = 0.1）大きくなればクロックの進みも10%早くなることを意味する。

測定した時間差dは、S-1を積分したものになるので、d = rt となる。実際はクロックの周波数は時間変化するので、それをr(t)とすると、測定した時間差d(t)はr(t)を積分したものになる。つまり、時間差を時間で微分するとクロックの周波数変化r(t)を出すことができる。この周波数変化が小さいほど精度が良いことになる。

３．結果

© 日本地震学会

計測は室内で行った。較正間隔は、常時較正、1時間間隔で5分間較正、12時間間隔で5分間較正、無較正の4種類、それぞれ約4週間の計測を行った。同時に室温の計測も行っている。周波数変化は時間差の差分を取ることで算出した。

計測の結果、周波数変化は、常時較正の場合 -3.3×10^{-9} ~ 1.0×10^{-9}、1時間の場合 -6.3×10^{-9} ~ 3.0×10^{-9}、12時間の場合 -8.0×10^{-9} ~1.5×10^{-8}、無較正の場合 -3.8×10^{-8} ~ 3.7×10^{-8}で変化した。この周波数変化による圧力の見かけの変化は水深換算すると、最大0.22 mm（常時較正）、0.47 mm（1時間）、1.17 mm（12時間）、3.80 mm（無較正）となる。Sato et al. (GRL, 2017)の結果からOBPによる水深変化の誤差は10 mm程度であるので、12時間間隔以下ならば十分な精度で観測できることになる。我々のOBP（40 cmガラス球）の稼働可能期間は、9か月（常時較正）、14か月（1時間）、15か月（12時間、無較正）であるので、観測期間を1年とすれば、1時間または12時間間隔較正で設定するのが良いということになる。

謝辞

海底圧力計とGPS時計の稼働につきましては株式会社東京測振の方々にご協力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

© 日本地震学会

Calibration of instrument responses in high-density broadband seismograph networks based on teleseismic waveform data

*Takeshi Kimura[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Reisilience

広帯域地震計は広い周期帯域の地動速度に対して平坦な応答特性を持ち，その観測データは地震学における重要なツールの１つである．一方で，観測データから地動への変換に必要な地震計の応答特性が製造者からの提供情報と異なるケースが報告されており，このような特性の異常を判定する手法がいくつか提案されている（例えば，Kimura et al. [2015]）．これらの手法は観測網を運用する際の監視ツールとして有用であることに加えて，データのユーザーにとっても該当データを解析に使用するかどうか判断する上で重要な情報をもたらす．さらに，異常な状態の地震計特性を推定しデータを適切に補正することができれば，解析に利用できるデータ量が増え結果の精度向上等に貢献することが見込まれる．本研究では，観測点間隔が約100kmという広帯域地震観測網としては高密度なF-netを対象に，遠地地震時の表面波記録を観測点間で相互に比較することにより，地震計の応答特性のキャリブレーションを行った．

Kimura et al. [2015]により特性異常が明らかになっているF-netの斜里（N.SHRF）と泊（N.TMRF）観測点を対象にキャリブレーションを行った．Global CMTカタログより2000年から2018年の間に発生した深さ50km以浅，Mw6.5以上の471地震のうち，震央距離2000-14000kmの観測記録（1Hzサンプリング，上下動成分）を用いた．製造者から提供されている応答特性により観測データを補正した後，表面波部分（データ長2048秒）の振幅スペクトルについて対象観測点から200km以内の複数観測点での観測データとのスペクトル比を利用した．互いに近接した観測点の遠地地震波形はほぼ同一であるため，このスペクトル比は地震計の応答特性が正常であれば全ての周期で１になり，異常があれば1から外れることが見込まれる．本研究では，このスペクトル比から対象観測点の地震計特性の感度，長周期側のコーナー周期，ダンピング定数の補正値を推定する．計算したスペクトル比は時系列に沿って50記録ずつスタックし補正値の推定に用いた．スタックの際にはBootstrap法により200のBootstrapサンプルを生成し，推定値の誤差評価に用いた．

上述の解析の結果，N.SHRF観測点では2002年の観測開始から2012年まで，コーナー周期，ダンピング定数に明らかな異常はなかったが，感度が提供情報の約0.5であったことが推定できた．また，N.TMRF観測点では，感度に異常は見られなかったが，コーナー周期とダンピング定数が2000年から2011年まで時間変化しており，特にダンピング定数が2011年には2程度にまで増加していることが分かった．

このような補正値の推定を観測網全体に対して行うことで，観測データの品質の向上につながるような情報の提供が可能になることが見込まれる．

© 日本地震学会

Change of social activities due to the spread of COVID-19 infections detected by seismograph networks

*Katsuhiko SHIOMI[1], Takeshi KIMURA[1], Youichi ASANO[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

新型コロナウィルス感染症拡大防止を目的として社会活動が制限されたことに伴い，世界各地の地震観測点でのノイズレベル低減が報告されている(例えば，Lecocq et al., 2020)．日本国内において，Yabe et al. (2020)は首都圏地震観測網MeSO-netのデータを解析し，3月上旬頃と3月下旬～4月上旬頃の2段階のノイズレベル低減があることを確認するとともに，それぞれ学校の臨時休校，都の活動自粛要請ならびに国の緊急事態宣言発令と関係するとした．本稿では，日本全国に設置された防災科研Hi-netとF-netの観測データを概観し，新型コロナウィルス感染症拡大に伴う影響の有無について，ノイズレベルならびに砕石発破による人工地震数の観点から確認を行った．

Hi-netやF-netでは，社会活動等によるノイズを避けるため，観測井の底や山間部に地震計を設置している．多くの観測点では，ノイズレベルは冬季に高く，夏季に低くなる季節変化の影響が大きいが，日単位や週単位といった社会活動に関連するノイズレベル変化を記録する観測点も存在する．このような観測点のうち，住環境に近い地域に設置されている観測点では，MeSO-netの事例同様，3月下旬から5月中旬にかけてRMS値が小さくなる傾向が見られた．日別の変化を確認すると，昼夜のRMS値の差が小さくなる，すなわち昼間の社会活動レベルの低下と関連する変化が明瞭であった．一方，山間地や感染者がほぼ報告されていない地域では，RMS値の日あるいは週単位の変動に大きな変化は見られない点もあった．日本で発令された「緊急事態宣言」は法的に社会活動制限するものではなく，交通サービスや流通網は通常レベルが維持されたため，このような地域性が生じたものと考えられる．

一方，感染の拡大に伴う経済活動の停滞も話題となっている．岡田(1996)は，景気動向指数と砕石発破に関連する人工地震数に強い関連があることを報告した．防災科研ではリアルタイムで流通する高感度地震観測データを用いて独自にイベント検出ならびに自動震源決定を行っており，発破が頻発する地域・時間に震源が決まった場合は「発破」フラグを付与してデータベースに格納している(汐見，2017)．ただし，自動震源カタログでは，精度の悪い震源情報に対してフラグが適切に振られているとは限らない．まず，活動状況変化の概観を把握することを目的として，自動処理カタログに登録された震源深さが浅いイベント数の推移に着目した．通常の地震は昼夜の差なく発生しているのに対し，発破は主に7時から19時までの12時間に集中する．2016年4月から2020年7月末までを対象に，上記12時間にトリガーしたイベントが同日24時間で検出した総イベント数に占める割合の変化を調べた．その結果，2020年3月以前はおおむね60%程度で推移していたが，同年4月初旬に50%台前半に低下したことを確認した．この変化は国内の観測網で見られるノイズレベルの変化傾向と一致するほか，内閣府が公表する景気動向指数の変化とも対応しているように見える．自然地震のみを収録している気象庁一元化震源カタログで同様の処理を行ったところ，全期間を通じておおむね45%～50%程度で一定であり，このような変化は見えない．このことから，この変化は砕石発破等の人工地震によるイベント数の変化を反映していると考えられる．本調査では広域を対象にイベント数の比のみを評価したため地域の平均的な特徴を捉えたに過ぎない．また，2016年熊本地震のように通常の地震活動数が極端に増加した場合，必然的に割合は50%に近づくため検知は困難になる．そこで，一部の発破クラスタについて、その活動状況を個別に確認したところ，変化の有無を含めクラスタごとに異なる特徴が見られた．ただし，それぞれのクラスタで検知されるイベント数のゆらぎも大きく，客観的な判断は困難であった．経済活動状況モニタリングのための指標とするためには，発破頻発地域を対象としたイベント検出状況の精査を行うとともに，イベントの自動検知能力の向上と安定運用が不可欠である．

謝辞：本研究の実施に際し，気象庁，北海道大学，弘前大学，東北大学，東京大学，名古屋大学，京都大

© 日本地震学会

学，高知大学，九州大学，鹿児島大学，産業技術総合研究所，国土地理院，海洋研究開発機構，地震予知総合研究振興会，青森県，東京都，静岡県，神奈川県温泉地学研究所の観測波形データならびに気象庁・文部科学省が協力してデータを処理した結果を使用しました．

© 日本地震学会

Comparison between results of array analysis of tiltmeters and template matching analysis of broadband seismometers

*Youichi Asano[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

我々は、防災科研高感度地震観測網（Hi-net）に併設された高感度加速度計記録のアレイ解析によって、海溝・トラフ近傍で発生する超低周波地震の検出と位置決定を行ってきた［Asano et al (2008)］。また、既知イベント記録と連続記録との波形相関解析によって、観測点密度が比較的疎な広帯域地震観測網（F-net）の広帯域速度計記録からも超低周波地震の検出と位置決定を行ってきた［Asano et al (2015)］。

前者のアレイ解析では南西諸島に観測点が無いことから、日向灘以南における超低周波地震の位置決定精度が悪い。それに対して後者の波形相関解析では、南西諸島にも一定の観測網カバリッジを有することから、日向灘以南においても超低周波地震の位置決定精度が比較的良い。その一方で、既知イベントを必要としないアレイ解析とは対照的に、既知イベント近傍で発生する発震機構解の類似したイベントを探索する波形相関解析では、検出すべきイベントに波形が似た既知イベントがなければ検出漏れも発生しうる。このような観測網カバリッジや手法の違いによる評価するために本研究では、アレイ解析と波形相関解析の結果の比較を行った。具体的には、2003年6月～2020年7月の期間内における北緯28～33度、東経129～134度の範囲内でそれぞれの手法によって検出されたイベントを比較した。波形相関解析ではF-net 15点に加えて臨時観測点３点も用い、21イベントの既知イベントとの類似イベントを探索した。

解析の結果、波形相関解析では日向灘、種子島沖から奄美大島沖にかけての広い範囲で検出されたイベントが、アレイ解析ではそのほぼ全てが日向灘、種子島沖付近に位置決定されていることが分かった。また、アレイ解析ではコヒーレントな波群が捉えられているにも関わらず波形相関解析ではイベントが検出できないケースもしばしば見られることも分かった（例えば、2019年1月の活動）。これの原因については、検出すべきイベントと相似な波形を持つ既知イベントがないことによる検出漏れが考えられるが、震源時間関数の複雑さや媒質の不均質の影響を受けて、近傍の既知イベントとの相関係数が高い値をとりづらい状況となっている可能性も考えられる。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費 JP16H06473の助成を受けたものです。

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S03P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-01] Recent long-term slow slips along the Nankai Trough detected by GNSS objective detection method

○Akio Kobayashi[1], Takahiro Tsuyuki[1] (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-02] Long-term SSE along the Nankai trough detected by GEONET

○Shinzaburo Ozawa[1], Ryouji Kawabata[1], Hiroshi Munekane[1] (1.Geospatial Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-03] Automated detection of short-term slow slips using multiple GNSS stations by trend filtering

○Keisuke Yano[1], Masayuki Kano[2] (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-04] Estimation of short-term slow slip event source model considering opening-mode dislocation

○Noa Mitsui[1], Satoshi Itaba[2], Yasuhiro Asai[1], Takanori Matsuzawa[3], Norio Matsumoto[2] (1.Tono Research Institute of Earthquake Science, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-05] Correction of initial changes in borehole type strain meter

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

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-06] Evaluation of forecasting post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake 2020

○Satoshi Fujiwara[1], Mikio Tobita[1], Shinzaburo Ozawa[1] (1.Geospatial Information Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-07] Very Long-term Post-seismic Gravity Changes due probably to Long-term Viscoelastic Relaxation

○Yusaku Tanaka[1] (1.ERI, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-08] Development of analysis tool “GARPOS” for open GNSS-A

○Shun-ichi Watanabe[1], Tadashi Ishikawa[1], Yusuke Yokota[2], Yuto Nakamura[1] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-09] A numerical simulator for the new GNSS-A data analysis software “GARPOS”

○Yuto Nakamura[1], Shun-ichi Watanabe[1], Tadashi Ishikawa[1], Yusuke Yokota[2] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S03P-10] Effect of sound speed profile on GNSS-A seafloor positioning

○Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yusuke Yokota[2], Yuto Nakamura[1] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

Recent long-term slow slips along the Nankai Trough detected by GNSS objective detection method

*Akio Kobayashi[1], Takahiro Tsuyuki[1]

1. Meteorological Research Institute

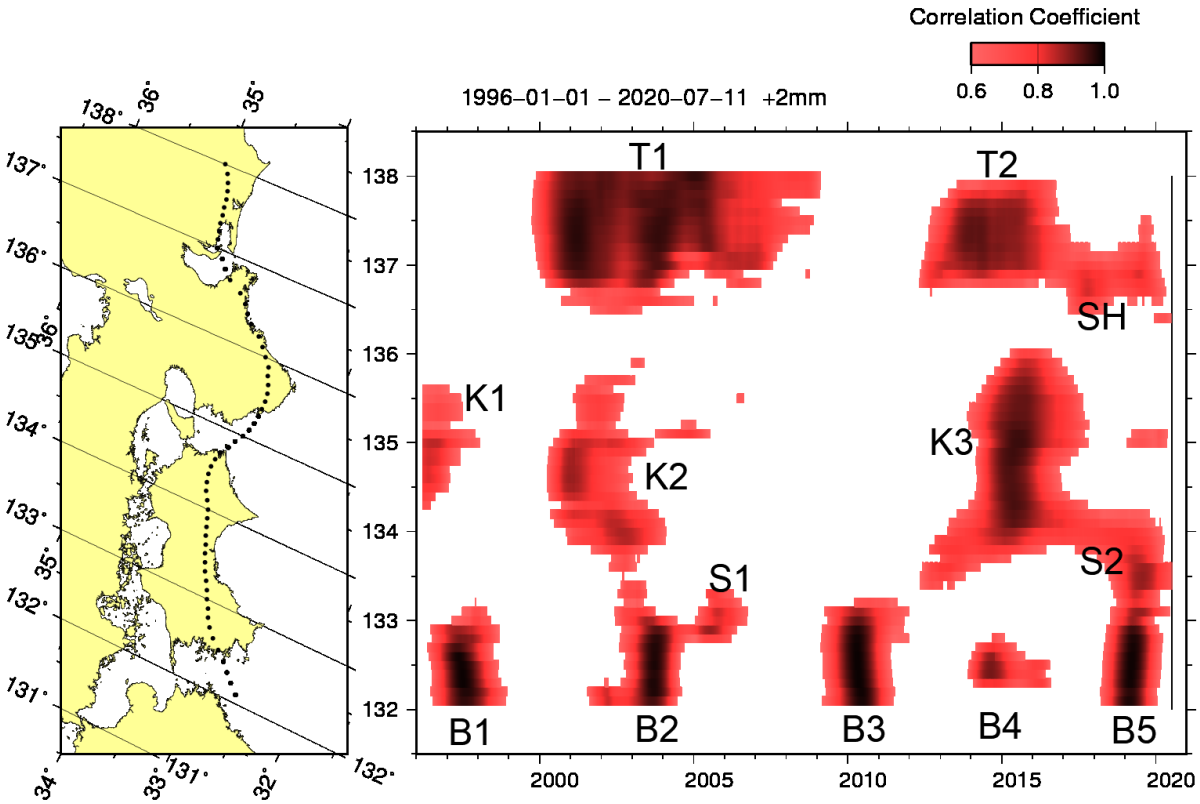
南海トラフ沿いでは短期的スロースリップイベント(SSE)や長期的SSEなどのスロー地震が発生しており、その分布や規模、発生頻度などを均質的に把握することは、プレート境界の特性の時空間変化に関する理解をもたらすことが期待される。Kobayashi (2017)は南海トラフ沿いの長期的SSEについて、GNSSによる客観的検知手法を開発した。この方法を最新データまで適用し、検出された志摩半島付近と四国中部の長期的SSEについて報告する。

Kobayashi (2017)の手法を簡潔に書くと以下の通りである。GEONETのF3解座標値を用い、各点について一次トレンド、アンテナ交換などによるオフセット、地震によるオフセットの補正を行った。次に、長期的SSEの影響がほぼ見られない中国地方の観測点について1日ずつの領域内中央値を求め、各点の座標値から領域内中央値を差し引いた。各点の水平成分からフィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分を計算し、南海トラフ沿いのプレート等深線25 kmに設定した経度0.1度間隔の地点を中心とする50×100 kmの矩形範囲内の各点の平均値の時系列を得た。さらに2004年三重県南東沖の地震(M7.4)、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)、および2016年熊本地震(M7.3)の余効変動を除去した。この時系列と1年間の傾斜期間を持つランプ関数との相互相関値と2年間の変化量を求めた。

2013～2016年の東海長期的SSEが落ち着いた2017年春から2018年秋にかけて、志摩半島付近の長期的SSEに伴う高相関値があり、その後も2020年春まではやや高い値が同地域で継続していた。志摩半島の各点と北西方向の丹後半島付近の地点との基線長変化を見ると、2017～2018年の伸びが一度おさまった後、2019年半ばから2020年春まで再び伸びている様子が見られる。2017年春から2年間のすべりの規模はMw6.4相当、3年間のすべりの規模はMw6.6相当で、すべりの中心はいずれも志摩半島にある。また、2019年の豊後水道長期的SSEにやや遅れて2019年に四国中部で高相関値が見られる。豊後水道長期的SSEによる非定常変位が四国中部にも及んでおり、これを簡易的に除去するため2010年豊後水道長期的SSE時の変位を差し引くと、四国中部に南東向きの非定常変位が現れる。この非定常変位からプレート境界上のすべりを推定すると四国中部に中心があり、2019年1年間のすべりの規模はMw6.1相当であった。

本調査には国土地理院GEONETの座標値およびオフセット値を使用させていただきました。

© 日本地震学会


Correlation Coefficient
0.6
0.8
1.0
1996-01-01 – 2020-07-11 +2mm
T1
T2
SH
K1
K2
K3
S1
S2
B1
B2
B3
B4
B5
2000
2005
2010
2015
2020

© 日本地震学会

Long-term SSE along the Nankai trough detected by GEONET

*Shinzaburo Ozawa[1], Ryouji Kawabata[1], Hiroshi Munekane[1]

1. Geospatial Authority of Japan

要旨

GNSS観測により、2018年以降、九州・四国・紀伊水道・志摩半島域で遷移的な地殻変動が観測された。観測された地殻変動から南海トラフ域のプレート間滑りを推定した。その結果、2018年６月頃から2019年８月頃にかけて、日向灘北部・豊後水道域でSSEが発生し、2019年初めころから2020年７月にかけて四国中部でSSEが発生していること、2019年４月頃から2020年初めころにかけて紀伊水道でSSEが発生し、2019年初めころから2020年４月頃にかけて志摩半島でSSEの発生が推定された。2019年の一時期には、日向灘北部・豊後水道・四国中部・紀伊水道・志摩半島で長期的SSEが同時に発生していたことがわかった。

はじめに

豊後水道では５～６年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している。志摩半島SSEは、2017-2018年に発生していた。そのような中、2018年6月頃から、九州北部で遷移的な地殻変動が発生し、その後2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生している。また四国中部で2019年初めころから豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。紀伊水道周辺では2019年４月頃から遷移的な地殻変動が観測され、志摩半島域では、2019年初めころから遷移的な地殻変動が捉えられている。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国・九州・紀伊水道・志摩半島域のプレート間滑りの時空間変化を推定した。

解析手法

GNSSによる、観測点の座標時系列から、2013-2019年間の年周、半年周成分を三角関数の重ね合わせで推定し、元の座標時系列からとり除いた。周期成

分を取り除いた時系列から九州・四国域、紀伊水道域の解析では2017-2018年間の一次トレンドを志摩半島の解析では2016年３月から2017年３月の一次トレンドを差し引いている。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を九州・四国域、紀伊水道域、志摩半島域で行った。観測点は南海トラフ域の観測点約250点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、凡そ20-40km程としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。

結果と考察

2018年６月頃から2019年８月頃にかけて日向灘北部・豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2020年７月まで継続している。紀伊水道のSSEは、2019年４月頃から発生し、2020年初めころに終息している。志摩半島SSEは2019年初めころから発生し、2020年４月ころに終息している。2019年の一時期には、日向灘北部・豊後水道、四国中部、紀伊水道、志摩半島で長期的SSEが同時に発生していたことがわかった。豊後水道SSEはMw6.9、四国中部SSEはMw6.1、紀伊水道SSEはMw6.1、志摩半島SSEはMw6.2程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ５－６年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見え

© 日本地震学会

る。紀伊水道SSEも発生間隔は周期的に見えない。志摩半島SSEは繰り返し間隔はわかっておらず、2017-18年に発生していたものが2018年に収まって2019年に発生しており、一連のSSEなのか、別々のSSEなのかはっきりしない。

© 日本地震学会

Automated detection of short-term slow slips using multiple GNSS stations by trend filtering

*Keisuke Yano[1], Masayuki Kano[2]

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University

本研究では複数のGlobal Navigation Satellite System(GNSS)の観測点を用いた短期的スロースリップイベント(SSE)の自動検知を考える．短期的SSEは通常の地震よりもゆっくりとした速度の断層すべり現象のことで，一般に継続期間が数日から数週間程度である(Obara and Kato, 2016)．これまでGNSSや傾斜計といった測地学的観測によって，プレートの沈み込み帯付近で多くの短期的SSEが発生していることが分かった(例えばSekine et al. 2010, Nishimura et al. 2013)．SSEは巨大地震や低周波地震などの他の種類の地震と関係しており(Kano et al., 2019)，その発生を検知することは重要である．

GNSSで観測される短期的SSEの信号は微弱であることが多く，複数の観測点の信号をうまく統合する必要がある．Nishimura et al. (2013)は，赤池情報量規準(AIC)の空間平均に基づく短期的SSE検知手法を提案し，西南日本で発生した短期的SSEの自動検知を行った．

本研究では，トレンドフィルタリングに基づいた複数のGNSS観測点からの検知手法を提案する．提案手法は短期的SSEをGNSS変位データにおける区分変化点として捉え，変化点の確からしさを複数の観測点を利用して検証する手法である．人工データによる双子実験および四国西部のGNSSデータを用いた検証により手法の精度検証を行った．

提案手法は，トレンドフィルタリング・隣接観測点を用いた検定・検定結果の統合を段階的に行う．図1は提案手法の概要図である．まず，l1トレンドフィルタリング(Kim et al., 2009)により観測時系列に区分線形関数を当てはめる．当てはめた関数の節点情報を集めて節点の前後の区間で速度が変化しているかどうかの仮説検定を行う．l1トレンドフィルタリングの節点を利用することで，節点前後の区間の長さはデータから自動決定される．最後に複数の観測点での検知の疑わしさを表す検定のp-値を統合する．l1トレンドフィルタリングは，高次全変動正則化とも呼ばれるスパース推定の手法であり，与えられた入力の中に潜む区分多項式関数を精度良く推定することができる．正則化の度合いを表すハイパーパラメータはMallowsのCp規準を用いてデータから決定することができる．後続する検定では，l1トレンドフィルタリングで得られた区分点を利用する．

提案手法の精度検証のため，2004年4月1日から2009年3月31日の期間における四国西部のGNSSデータと，このデータから生成した人工データを利用した．観測点として，図1の赤い逆三角のうち緑・オレンジの影がかかっている6観測点を使用した．また，GNSSのコモン・モードエラーの除去は五島列島の3観測点の平均を差し引くことで行い(Kano et al., 2019)，二次元の変位データをアムール海プレートに対するフィリピン海プレートの沈み込み方向（N45W）に射影して利用した．

人工データを利用した比較によって，以下のことが分かった．AICの空間平均は窓幅によってイベント見逃し率・ノイズ誤検知率が変化する．一方，提案手法は，適切に窓幅を設定したAICの空間平均と同程度の性能をもつことがわかった．

提案手法を実データに利用した結果は以下である．図2は1観測点におけるGNSSの変位(黒丸)，l1トレンドフィルタリングで得られた区分線形関数(赤線)，検知点(青い縦線)を表示している．図で示しているのはプ

© 日本地震学会

レートの沈み込み方向への射影成分なので，l1トレンドフィルタリングの結果により，全体的にはプレートの沈み込み方向に向かっているが，一部の時間帯でその反対側に動いている様子が分かる．一方で，隣接観測点の情報を利用して検知を行うため，一つの観測点で反対側に動いているからといって検知しているわけではない様子も分かる．検知点の確からしさを評価するため，四国西部の低周波微動(LFE; Kato and Nakagawa, Research Square)の一日平均個数との同期を確認した(図3)．図3は検知日±5日のLFEの個数の箱ひげ図(図中Our detections)とそれ以外の日のLFEの個数の箱ひげ図(図中No detection)を表している．図3から，検知している日の近辺で明らかにLFEが活発に起こっていることが分かる．

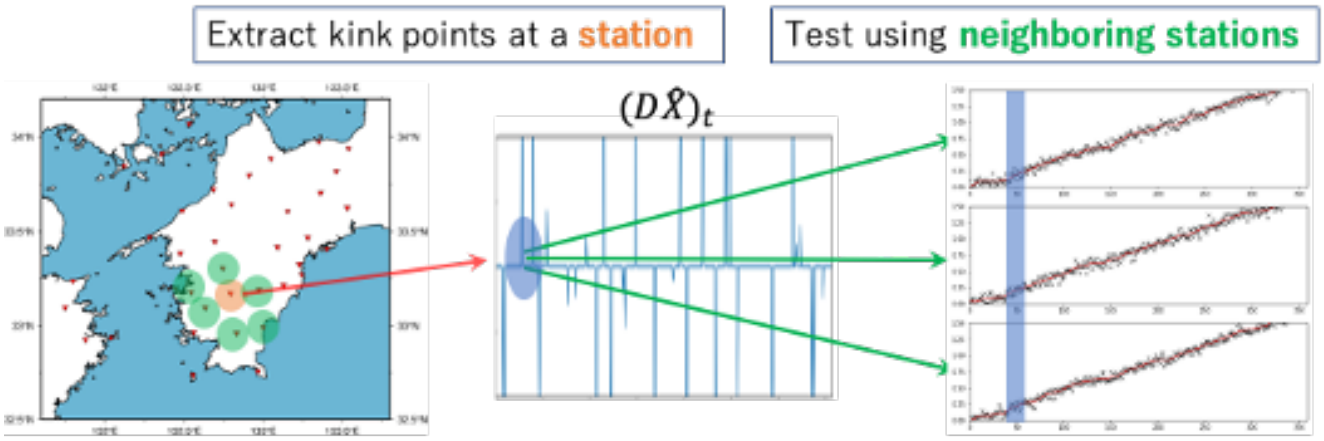


図1：提案手法の概要図.

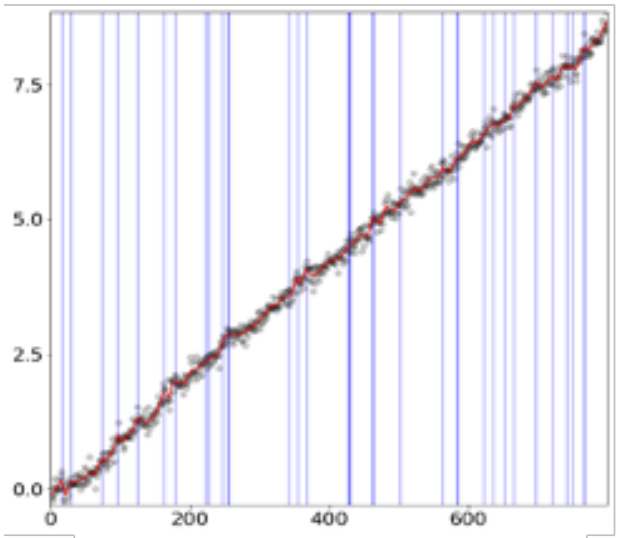


図2：2004年4月1日から800日間の変位[cm](黒丸)，トレンドフィルタリングの結果(赤線)，検知点(縦線)

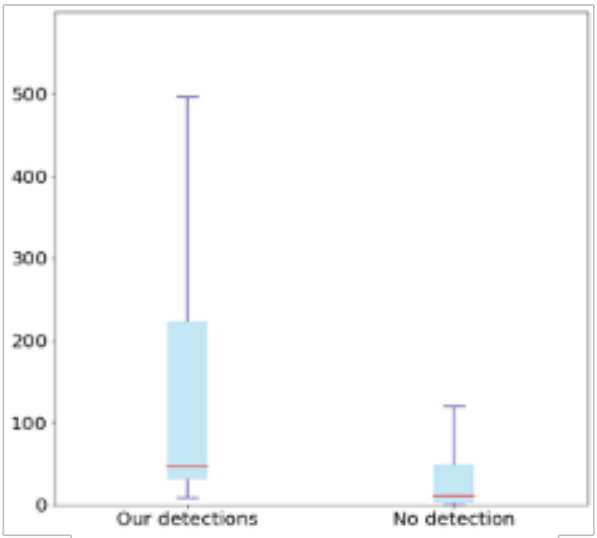


図3：検知日±5日のLFEの個数(Our detections)とそれ以外の日のLFEの個数(No detection)の箱ひげ図

© 日本地震学会

Estimation of short-term slow slip event source model considering opening-mode dislocation

*Noa Mitsui[1], Satoshi Itaba[2], Yasuhiro Asai[1], Takanori Matsuzawa[3], Norio Matsumoto[2]

1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

沈み込み帯で検出される各種スロー地震は、通常の地震と同様に断層運動としてモデル化されるが、これらがスローかつ非定常な現象となるメカニズムは不明である。そこで本研究では、深部スロー地震の一つである短期的スロースリップイベント（S-SSE）について、発生域における変形様式を考慮して、発生源モデルの再推定を行った。

S-SSE発生源における変形様式

まず、断層の破壊強度や地質学的な知見に基づいて、S-SSE発生源における変形様式を検討した。

断層の破壊強度の知見から、深部スロー地震発生域は温度ー圧力条件の深さ依存に伴う脆性ー延性遷移域であると示唆される。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る。一般的に塑性変形は、3次元の偏差応力によって生じるため、平面で生じる断層すべりと異なる変形成分をもつ可能性がある。この場合、断層すべりで近似できない塑性変形は断層面に対して垂直な伸長変形（または圧縮変形）として検出され得る。
一方、かつての沈み込み帯で形成されたメランジュの露頭調査に基づき、S-SSE発生源での断層すべりおよび法線方向への伸張変形が示唆されている（Ujiie et al., 2018）。現在のS-SSE発生源でも同様の変形が生じているならば、それらの変形量を地殻変動データから推定できる。

したがって本研究では、S-SSE発生源で断層すべりならびに断層面に対して法線方向への変形が生じると仮定し、それらの変形量を歪計・傾斜計のデータから推定した。

S-SSE発生源モデルの再推定

本研究では東海地域のS-SSEを研究対象とした。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が（例えば産総研・防災科研、2017）、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すべり角の方向（沿岸側）に位置する。発生源の位置をより良く推定するため、従来のデータに加えて、S-SSE発生源の内陸側である岐阜県瑞浪市・土岐市に位置する東濃地震科学研究所（TRIES）所有の歪計・応力計データの併用を検討した。理論潮汐歪を用いた観測値のキャリブレーションおよびその信頼性評価(Matsumoto et al., 2010)に基づき、本研究では屏風山観測点(BYB)における歪計データを併用した。

本発表では、2017年2月に発生したS-SSE発生源モデルの再推定結果を報告する。S-SSE発生源は矩形断層モデル(Okada, 1985)で表す。産総研・防災科研（2017）のモデルと異なる点は、伸長変形（または圧縮変形）を開口変位でモデル化する点のみである。下記の3ケースについて、それぞれモデルパラメタを推定した。
・Case１．開口変位なし
・Case２．開口変位あり（あらかじめ1㎜単位で与える）、
長さ・幅・すべり量の探索範囲は産総研・防災科研(2017)と同じ

© 日本地震学会

・Case３．開口変位あり、探索範囲の制限なし
なお、開口変位は負の値も与えて、圧縮変形の可能性を検討した。
結果の概要は下記の通りである。
・Case１では産総研・防災科研(2017)と同じ結果が得られた。
・Case２,３では、すべり量と同程度の正の開口変位が推定された。
・観測値と計算値の残差は、Case１が最大、Case３が最小となった。
発表では、結果の考察やモデルの評価方法にも言及する。

謝辞
本研究の実施にあたり、気象庁および静岡県の多成分歪計の記録ならびに気象庁によるキャリブレーション係数を使用しました。ここに記して感謝します。

引用文献

Matsumoto, N., O. Kamigaichi, Y. Kitagawa, S. Itaba, and N. Koizumi (2010) In-situ Calibration of Borehole Strainmeter Using Green’s Functions for Surface Point Load at a Depth of Deployment, Eos, Trans. AGU, Abstract G11A-0626.

Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 82, 1018-1040.

産業技術総合研究所・防災科学技術研究所（2017）東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント（2016年11月～2017年4月）、地震予知連絡会会報、第98巻、263-274.

Ujiie, K., Saishu, H., Fagereng, Å., Nishiyama, N., Otsubo, M., Masuyama, H., and Kagi, H. (2018) An explanation of episodic tremor and slow slip constrained by crack-seal veins and viscous shear in subduction mélange. Geophysical Research Letters, 45, 5371–5379.

© 日本地震学会

Correction of initial changes in borehole type strain meter

*Takahiro Tsuyuki[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

ボアホール式ひずみ計は、埋設初期には数ヶ月から数年程度にわたって、大きな伸びまたは縮みの緩和的変化が続く。これは、主として地中センサーと岩盤を固着するためにセメントに膨張剤を用いることによる変化と考えられる。また、体積ひずみ計の場合には、センサー内部にシリコンオイルが用いられていることから、セメント硬化に伴う温度低下によって、見かけ上の伸びの変化を示すこともある。

こうした変化は、沈み込むプレート境界面で発生する長期的SSEのように、数か月程度から数年にわたる地殻変動を解析する場合には大きな支障となる。たとえば、2001年～2007年にかけて東海地域で発生した長期的SSEについては、体積ひずみ計の多くが1990年代に更新されていたことや、石井式多成分ひずみ計が1990年代後半に設置されたことから、その埋設初期変化が大きく、長期的SSEによる変化は客観的に見いだせていない。同様に、2013年～2016年にかけて東海地域で発生した長期的SSEについても、スタッキングの手法などにより長期的SSEを見出すことはできているが、個々の成分をみた場合に、その変化が長期的SSEに伴うものであるかを判別するのは困難である。

ボアホール式ひずみ計の長期的な安定性が、GNSSなどに比べて相対的に高くないこともその一因ではあるが、降水に伴う変化の補正などひずみ計自体の補正技術は、以前に比べて格段に進歩しているので、このような埋設直後の初期変化を何らかの方法で補正することができれば、長期的SSEに伴う変化が明瞭に見えてくるのではないかという期待もある。そのために、たとえば指数関数を用いて埋設初期の変化を近似して取り除くことが行われている。しかし、埋設初期の変化は非常に複雑で、これを一つの特定の関数系にフィッティングすることが適当なのかどうか、必ずしも定かではない。

本発表では、埋設初期の変化を特定の関数形にフィッティングするのではなく、埋設直後の数ヶ月間のデータ変化を使って、再帰型ニューラルネットワーク（LSTM）を用いた非線形回帰を行った。これにより、その先の変化を予測することを試みた。この方法によって埋設直後の変化を除去した場合に、補正後のデータから何か新しいものが見えてこないかどうかを検討する。

© 日本地震学会

Evaluation of forecasting post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake 2020

*Satoshi Fujiwara[1], Mikio Tobita[1], Shinzaburo Ozawa[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列に関数近似を行うという予測実験を通して、広域にわたる余効変動の将来推移予測の実力と課題を示す。東北沖地震の余効変動は，主にプレート境界面上の余効すべりと上部マントルの粘弾性緩和により生じていると考えられており、こうした物理現象発生過程のより正確な推定のためにも有効と考えられる。本報告では、2020年初頭までの地殻変動データを用いて、余効変動予測の検証を行った

Tobita (2016)により，下記の式で表される対数・指数関数の混合モデルを用いることで、短・中期的な時間推移とともに、場所によって異なる余効変動の空間分布も予測できることが示されている。

$$D(t)=a\ln(1+t/b)+c+d\ln(1+t/e)-f\exp(-t/g)+Vt$$

ここで、$D(t)$は余効変動時系列の各成分、tは地震後の日数、lnは自然対数、b, e, g は全観測点に共通の対数関数または指数関数の緩和時定数、Vは観測点ごとの定常速度である。

図１に、電子基準点「宮古」の東西及び上下成分の観測値・予測値及び2年間の予測に基づく残差を示した。予測値は観測値に対して2015年2月まではほぼ1cm以内で一致していたが、その後、2015年2月の三陸沖の地震（M6.9）、5月の宮城沖の地震（M6.8）の頃から異なった傾向となった。つまり、2015年に、それまで続いていた東北地方大洋沖地震の余効変動とは異なる別の事象が発生し、余効変動の予測モデルの前提が崩れてしまったことが覗える。このことを図２の範囲の電子基準点全体でみてみると、2年間の予測に基づく3.9年後の残差の標準偏差は水平で1.3mm、上下で3mm程度であったが、8.9年後では水平で1.7cm、上下で1.2cm程度と拡大している。

しかしながら、中部地方から北海道南部にかけて、1mを超える東北地方太平洋沖地震の余効変動を8.9年後においても数cm程度の精度で予測できており、房総半島のSSE等の余効変動ではない別のローカルな事象の発生の検出に本予測は極めて有効である。

求められた時定数のうち短周期（時定数1.5日程度。上式第１項）の地震後3年時での空間分布を図２に示す。この成分は三陸及び銚子付近で大きくなり、余効すべりの影響を表している。別途、粘弾性モデルから計算された余効すべり成分（Suito 2017）と比べてみると、空間分布の傾向はよく似ている。予測に用いた時空間関数は純粋に統計的に求められたものであるものの、地下の物理過程を反映しており、余効変動以外の予測への応用が期待される。

参考文献

Suito H (2017) Earth Planets Space. https://doi.org/10.1186/s40623-017-0611-9
Tobita M (2016) Earth Planets Space. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4

© 日本地震学会

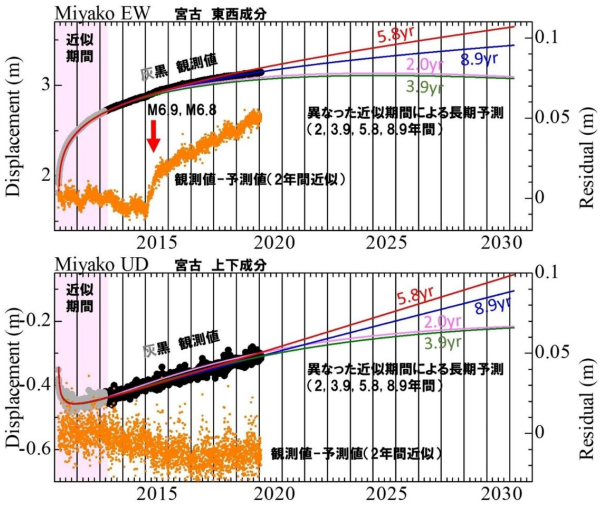


図１　電子基準点「宮古」東西・上下成分の観測値、予測値と残差

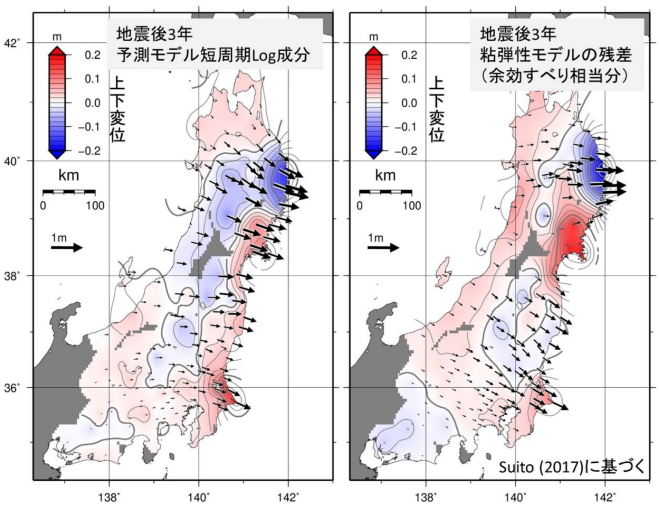


図２　予測モデルの短周期Log成分及び粘弾性モデルの残差
（余効すべり相当分）

© 日本地震学会

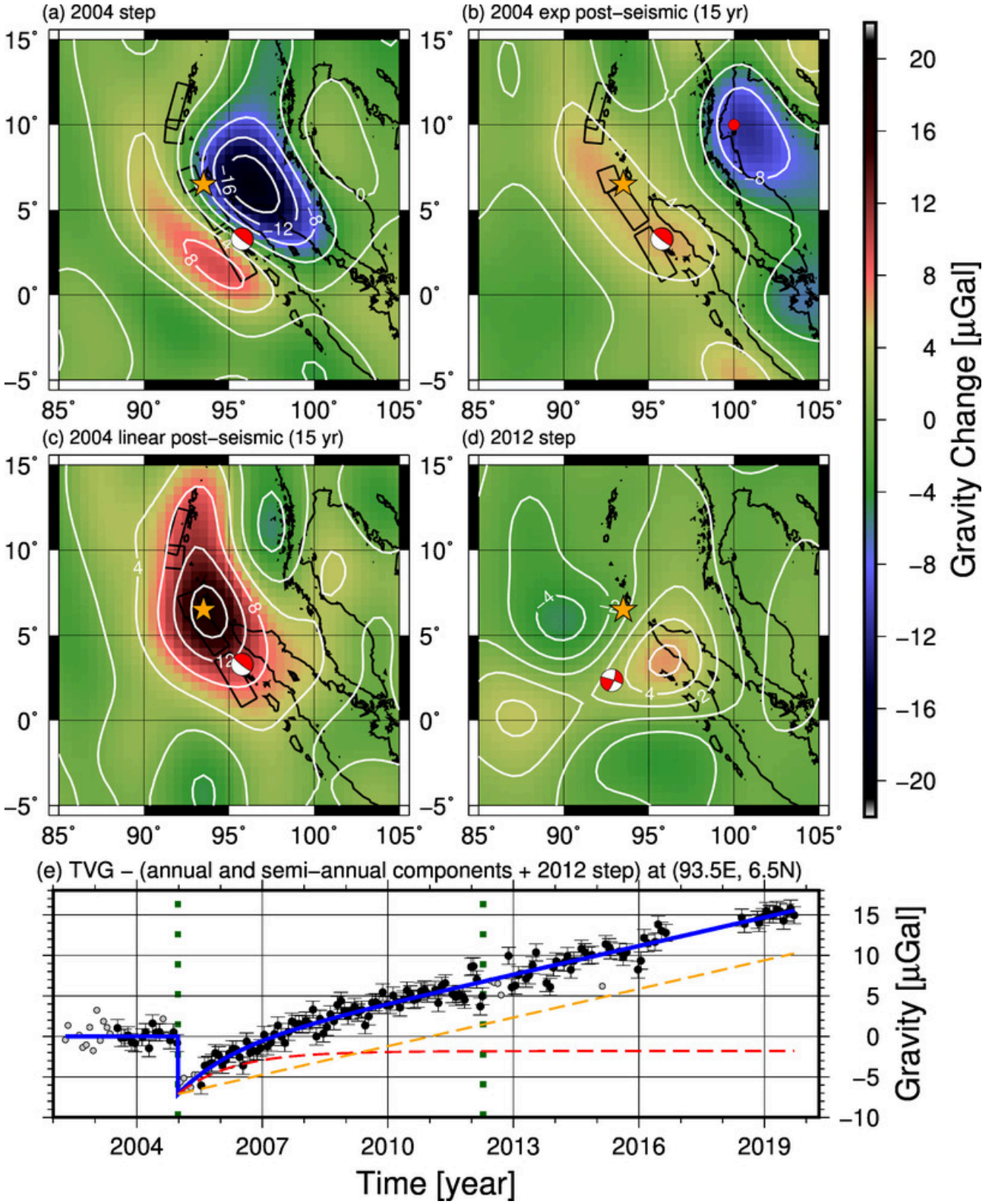
Very Long-term Post-seismic Gravity Changes due probably to Long-term Viscoelastic Relaxation

*Yusaku Tanaka[1]

1. ERI, UTokyo

Long-term post-seismic gravity change of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw9.1-9.3) detected by GRACE + GRACE-FO is modeled sufficiently by an exponential function until the 2012 Indian-Ocean earthquake (Mw8.8) but gravity increasing became constant after that. An interpretation is post-seismic gravity change of the 2004 earthquake was almost completed in 2012 and that of the 2012 earthquake proceeded constantly. Assuming this, I calculate their spatial distributions. Post-seismic gravity change of the 2012 earthquake was expanded along the faults of the 2004 earthquake and the peaks of post-seismic gravity changes of the two earthquakes appeared at a same location. This suggests another interpretation, namely, post-seismic gravity change of the 2004 earthquake has another long-term component expected by Burgers rheology and post-seismic gravity change of the 2012 earthquake is slight. Spatial distributions of post-seismic gravity change on this assumption support this interpretation. This also shows Burgers rheology is appropriate to consider the viscosity of upper mantle based only on satellite gravimetry. This does not conflict with post-seismic gravity changes of other earthquakes.

© 日本地震学会


(a) 2004 step
(b) 2004 exp post−seismic (15 yr)
(c) 2004 linear post−seismic (15 yr)
(d) 2012 step
Gravity Change [μGal]
(e) TVG − (annual and semi−annual components + 2012 step) at (93.5E, 6.5N)
Gravity [μGal]
Time [year]

© 日本地震学会

Development of analysis tool “GARPOS” for open GNSS-A

*Shun-ichi Watanabe[1], Tadashi Ishikawa[1], Yusuke Yokota[2], Yuto Nakamura[1]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS-A（GNSS-音響測距結合方式）による海底測地観測は，海上保安庁や大学等，複数の機関で実施されているが，データはそれぞれ独自のフォーマットで収集され，独自のルーチンで処理・解析される．他方で，GNSS-A解析において必要となるデータは原則として観測手法によらないため，GNSS観測のRINEXのような互換性のある共通データフォーマットを作成することで，データ交換や検証を促進することができる．渡邉・他（2019, 地震学会秋季大会）は，具体的なフォーマットを提案したが，こうした取り組みを進めることで，観測機関以外の研究者にも広くデータが提供され，解析技術の高度化にもつながることが期待される．本研究では，提案した共通フォーマットを扱うベースソフトウェアGARPOS（GNSS-Acoustic Ranging combined POsitioning Solver）を新たに開発した．本講演では，その概要について紹介する．

既存のGNSS-A解析手法と比較した際のGARPOSの最大の特徴は，海底局アレイ上の海域を広く移動しながら観測を行う移動型GNSS-A観測のデータから，海洋音速場の空間的な傾斜構造とその変化を，海底局位置と同時に推定できる点にある．初期の解析手法であるFujita et al. (2006, EPS) や Ikuta et al. (2008, JGR) のアルゴリズムでは，船が移動することによる音速場の位置変化も，見かけの時間変化として推定していた．その後，2010年代になると，海洋のより深部における傾斜構造も誤差因として注目されるようになった．例えば，Yasuda et al. (2017, GRL) や Honsho et al. (2019, JGR) が所与の深さまでの一次元傾斜を推定するモデル（一次傾斜モデル）を構築している．また，Yokota et al. (2019, MGR) は，傾斜を仮定しない従来の推定結果の残差をさらに詳細に解析することで，個々の海底局位置に依存した音線の違いによる音速変化を抽出する手法を開発した．それに対し，提案手法では，具体的な傾斜構造をあらかじめモデル化することなく，あくまで音線の両端位置と時刻の関数として取り扱い，その摂動場を海底局位置と同時に推定する．提案したモデルは，既存の一次元傾斜モデルをその特殊な例として包含しており，より複雑な場も推定することができる．

ただし，このような複雑な音速場の同時抽出は，データに対する過剰適合を容易に引き起こす．そこで，提案手法では，データ誤差の分散共分散の非対角成分を導入することで，時空間的に近い音線を取るデータの相関が高くなるという仮定を表現した．その相関長はハイパーパラメータとして制御し，音速摂動場の時間変化の滑らかさ等を制御する他のハイパーパラメータも含め，適切なモデルをABIC（赤池ベイズ情報量基準; Akaike, 1980）を最小化するように選択するスキームとした．これにより，過剰適合を抑制することに成功し，時間的になめらかに変動する音速摂動場を得ることができた．

海底測位解については，実際のGNSS-A観測データを用いた解析から，既存の手法（Yokota et al., 2019, MGR）と同等の安定性で解を得られることを確認した．さらに，ブイ等を用いて定点で音響観測をする構成のデータについても，分解能がないために音速場の推定はできないものの，GARPOSを用いて適切に解析できることも確認した．

本研究で開発したGARPOSはオープンソースソフトウェアとして公開している（https://doi.org/10.5281/zenodo.3992688）．

© 日本地震学会

A numerical simulator for the new GNSS-A data analysis software “GARPOS”

*Yuto Nakamura[1], Shun-ichi Watanabe[1], Tadashi Ishikawa[1], Yusuke Yokota[2]

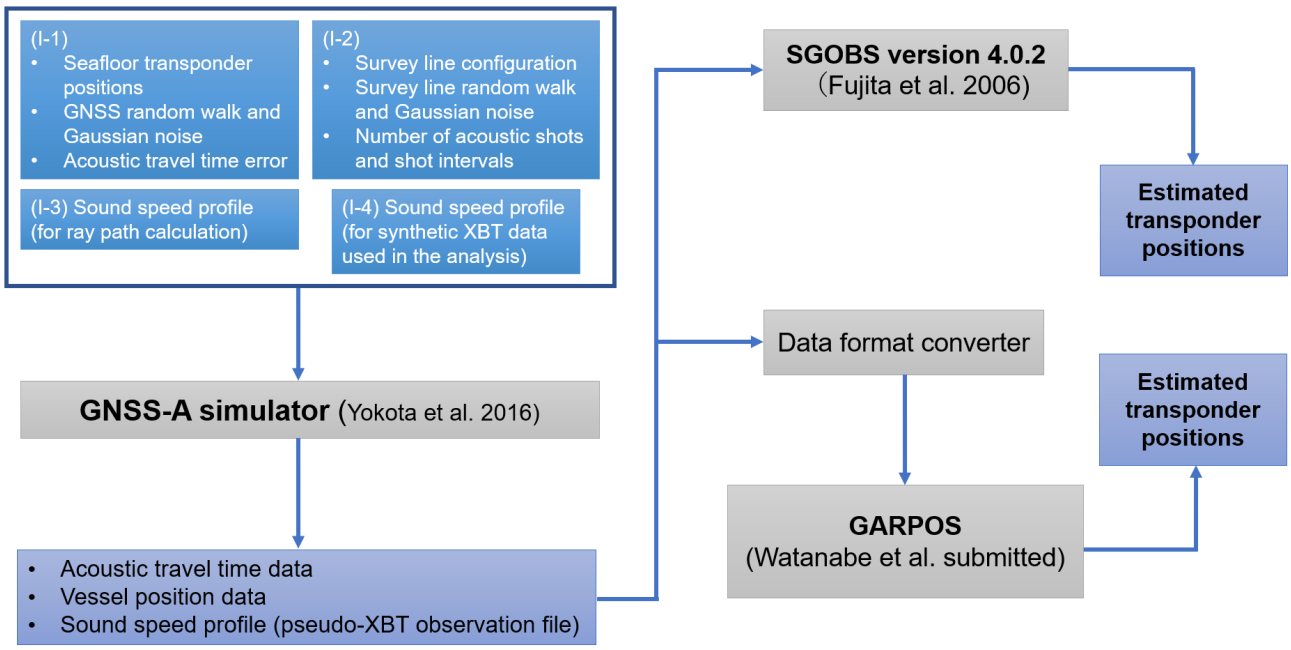
1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）を用いた海底地殻変動観測により，海底の絶対位置をセンチメートル単位で測定することが可能となった．GNSS-A観測によってこれまでに2011年東北地方太平洋沖地震に関連するプレート境界浅部における地殻変動の検出，南海トラフ周辺海域におけるプレート境界面の固着分布の推定やスロースリップの検出など様々な地震学・測地学的成果が得られてきた．

GNSS-A観測には様々な誤差要因があるが，中でも大きなウェイトを占めているのが海中の音速場の擾乱である．これまでに，音速場の水平傾斜構造を推定するために様々な解析手法が開発されてきた（Yasuda et al. 2017; Yokota et al. 2019; Honsho et al. 2019）．新たに開発されたGNSS-Aデータ解析ソフトウェアGARPOS（GNSS-Acoustic Ranging combined POsitioning Solver）では，ベイズ統計的手法を用いることによりデータの過剰適合を防ぎつつ海洋場をより直接的に抽出することを可能としている（Watanabe et al. submitted）．

本発表では，GNSS-Aデータ解析ソフトウェアGARPOSで得られる音速場と海底局位置の推定精度を評価するための数値シミュレーター及び数値実験の結果について紹介する．実際のGNSS-A観測データは音速場の擾乱以外にもGNSSのバイアスや誤差，船体動揺等様々な誤差要因を含むため，観測データの解析から個別の誤差要因を評価するのは困難である．そこで，海上保安庁で現在使用している解析ソフトウェアSGOBS（Fujita et al. 2006）で解析可能なGNSS-A疑似データを作成する数値シミュレーターが開発された（Yokota et al. 2016）．この数値シミュレーターでは任意の誤差等を設定でき，誤差要因を個別に評価することが可能である．本研究ではGNSS-A疑似データをGARPOSのフォーマットに変換することで同一の疑似データをSGOBS version 4.0.2とGARPOSで解析した．本発表ではこれらの解析結果を比較し，それぞれの局位置推定精度について議論する．

© 日本地震学会


(I-1)
• Seafloor transponder positions
• GNSS random walk and Gaussian noise
• Acoustic travel time error
(I-2)
• Survey line configuration
• Survey line random walk and Gaussian noise
• Number of acoustic shots and shot intervals
(I-3) Sound speed profile (for ray path calculation)
(I-4) Sound speed profile (for synthetic XBT data used in the analysis)
GNSS-A simulator (Yokota et al. 2016)
• Acoustic travel time data
• Vessel position data
• Sound speed profile (pseudo-XBT observation file)
SGOBS version 4.0.2 (Fujita et al. 2006)
Estimated transponder positions
Data format converter
GARPOS (Watanabe et al. submitted)
Estimated transponder positions

© 日本地震学会

Effect of sound speed profile on GNSS-A seafloor positioning

*Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yusuke Yokota[2], Yuto Nakamura[1]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

GNSS-A海底地殻変動観測では、海中音速度の擾乱が測位精度に大きな影響を与える。センチメートルレベルの測位のためには、音線の通った場所・時間における音速を正確に与える必要があるが、時間・空間で複雑に変化する海中の音速場を要求精度内で計測することは事実上不可能である。一方で、計測された音波の往復走時には、距離だけではなくその途中経路の音速場の情報も含まれているため、解析を工夫することで、音速場の情報を取り出すことが可能となる。

時間・空間の4次元で変化する音速場に対する音線計算は複雑で計算コストも多大になるため、現在の解析では、4次元の変動は基準となる水平成層の音速プロファイルに対する補正項として表現し、音線はSnellの法則によって2次元面内で計算している。インバージョン解析では、補正項を時間・空間でなめらかな関数であるとした先験情報のもとでベイズ的に推定することによって、過適合を防ぎつつ適当な音速場モデルが得られる（Watanabe et al., submitted）。推定された補正項が十分に小さいときは、音速場の時間・空間変動を基準プロファイルからの摂動として近似的に表現できていると解釈される。一方で、方程式系としては補正項の大きさに制限はなく、補正項が大きくなる場合も許される。そうした場合は基準プロファイルの設定が適切でないと想定されるが、結果の解釈は必ずしも明らかではない。また、プロファイル自体の変動は考慮していない。

基準プロファイルはCTD等による水温・塩分の実観測から求めた音速値を基に設定しているが、時間・空間的に密な観測は難しく、また水深2,000m以深については、過去の統計値を外挿するなど、必ずしも正確なプロファイルを反映しているとは言えない。渡邉・内田(2016、海洋情報部研究報告)では、各観測点における過去の水温・塩分観測データから、水温・塩分構造の安定性を評価している。そこでは、1,200m以深では1σで0.2℃程度という測定機器の精度程度に収まる安定性を見せている一方で、800m以浅では海域によって複雑な変化が顕れることがあることが確認された。

本観測における音波の射出角では、海中における音線の屈折が小さくほぼ直線で進むため、こうしたプロファイル形状の違いが、特に水平位置の測位に対して、大きな影響を与えることがないと期待される。そのため、その影響の定量的な評価はこれまで十分に検討されてこなかった。しかしながら、近年南海トラフ浅部のSSEによる非定常変動や、日本海溝における東北地方太平洋沖地震の余効変動における鉛直変動の重要性など、さらなる精度の向上が求められているなかで、改めてその影響を評価する必要がある。また、その影響の多寡によっては、現在の音速・塩分観測の頻度等の観測計画の再設計も必要となることが想定される。本講演では、プロファイル形状が測位結果に与える影響について定量的に評価した結果について議論する。

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S08. Earthquake physics

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S08P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-01] Temporal change in the rupture velocity of repeating earthquakes occurring in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquake

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

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-02] Spatial and Temporal Variations in Rupture Processes of the Repeating Earthquake Sequences off-Iwate following the 2011 Tohoku-oki Earthquake

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

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Koichiro Suzuki[1], Musa Siphiwe Manzi[2], Hiroshi Ogasawara[1], Taku Noda[1], Lindsay Linzer[3], Raymond J Durrheim[2], Bennie Liebenberg[4] (1.Ritsumeikan University, 2.University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3.SRK(Pty)Ltd, 4.Moab Khotsong mine)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-04] ICDP DSeis: Evaluation of Spatial Stress Change by Diametrical Core Diameter Analysis of M5.5 Aftershock Zone Core

○Yoshihiro Mima[1], Ryogo Tadokoro[1], Shunsuke Yoshida[1], Mitsuya Higashi[1], Kensuke Sakaguchi[1], Bennie Liebenberg, Siyanda Mngadi[4], Yasuo Yabe[2], Akio Funato[3], Takatoshi Ito[2], Raymond Durrheim[4], Hiroshi Ogasawara[1] (1.Ritsumeikan University, 2.Tohoku University, 3.Fukada Geological Institute, 4.University of the Witwatersrand)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-05] Detection and spatial distribution of non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake by “0.1 manten” hyperdense seismic observation

○Motokoshi Takumi[1] (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-06] Validating the Method of Estimating Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field

○Takeo Ishibe[1], Toshiko Terakawa[2], Akinori Hashima[3], Masashi Mochizuki[4], Ritsuko S. Matsu’ura[1] (1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Nagoya University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-07] Temporal variation of the inelastic strain field around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

○Ayaho Mitsuoka[1], Satoshi Matsumoao[2], Azusa Shito[3], Hiroshi Shimizu[2], Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Department of Biosphere-Geosphere Science Faculty of Biosphere-Geosphere Science Okayama University of Science)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1] (1.Tokyo Institute of Technology)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-09] Investigation of multi-segment earthquake on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

○Yuko Kase[1] (1.GSJ, AIST)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-10] Dynamic earthquake sequence simulation with a spectral method without periodic boundary condition

○Hiroyuki Noda[1] (1.Kyoto University, Disaster Prevension Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Kazuki Ohtake[1,2], Nobuki Kame[2], Makiko Ohtani[2] (1.Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo , 2.Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-12] Modelling of spontaneous and periodic slow slips and a tsunami earthquake in the northern part of the Japan Trench

○Ryoko Nakata[1], Naoki Uchida[1], Ryota Hino[1] (1.Graduate School of Science, Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-13] Numerical model of slow slip events in the Nankai and Hyuganada region revisited from recent observational studies

○Takanori Matsuzawa[1], Bunichiro Shibazaki[2] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Building Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S08P-14] Examination of constitutive relation for the fault zone along the plate boundary in subduction zone

○Takane Hori[1] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Shinichi Oba[1], YUTA Mitsui[2] (1.Grasuate School of Science and Tecnology, Shizuoka University, 2.Faculty of Science, Shizuoka University)

Temporal change in the rupture velocity of repeating earthquakes occurring in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Kazuya Tateiwa[1], Tomomi Okada[1], Naoki Uchida[1], Toshio Kono[1]

1. Tohoku University

１．はじめに

規模の大きな地震が発生した後、その余効すべりがもたらす載荷速度変化の影響を受けて、周囲で発生する小繰り返し地震では震源パラメータの変化が観測されることがある。釜石沖繰り返し地震系列を例にとると、2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の発生前は繰り返し間隔 T_r が約5年、マグニチュードが約4.8で一定であったが、東北沖地震発生直後は T_r が数十日程度にまで減少しマグニチュードは約5.8に増加した。その後は時間の経過とともに T_r は増加し、マグニチュードは減少することで東北沖地震前の状態に近づいていった。これは東北沖地震の余効すべりによる載荷速度変化で説明される（Uchida et al., 2015）。
東北沖で発生する小繰り返し地震の繰り返し間隔 T_r と地震モーメント M_0 の関係はq-valueという指標を導入することで評価される。立岩・他 (2020) では、T_r–M_0 を両対数プロットしたときの回帰直線の傾きをq-valueとして定義し、東北沖で発生する繰り返し地震系列のq-valueを求め、その空間分布を調べた。その結果、宮城県沖・岩手県沖（Region 1）では負のq-value（繰り返し間隔が短くなるほど地震モーメントが大きくなる傾向）が卓越し、日高沖（Region 2）では正のq-value（繰り返し間隔が短くなるほど地震モーメントが小さくなる傾向）が卓越していることが明らかとなった。速度状態依存摩擦則を用いたChen et al. (2010)の数値シミュレーションでは、速度弱化パッチ半径 r と臨界破壊核サイズ h^* の比、つまり r/h^* が1程度のときに負のq-value、r/h^* が1より大きいときに正のq-valueになることが示されている。彼女らの結果を用いるとRegion 1では r/h^* が1程度であることやRegion 2では r/h^* が1より大きいことが示唆される。一方、これらの繰り返し地震のコーナー周波数 f_c を求め $M_0 f_c^3$ を調べたところ、Region 1では東北沖地震前は $M_0 f_c^3$ が小さく、Region 2では $M_0 f_c^3$ が大きかった。このことは、r/h^* が小さいときに破壊伝播速度 V_r が遅く低周波に卓越し、r/h^* が大きいときには V_r が速く高周波に卓越すると考えれば説明可能であり、Region 1は東北沖地震直後の $M_0 f_c^3$ が大きく求まっており、東北沖地震の余効すべりによる載荷速度上昇が臨界破壊核サイズの縮小をもたらし V_r が大きくなったのだと考えられる（Kaneko et al., 2016, Guérin-Marthe et al., 2019）。そこで、本研究では東北沖の小繰り返し地震の V_r を求め、それが各繰り返し地震系列内でどのように時間変化するのか調べる。

２．データおよび解析手法

対象とする繰り返し地震は東北日本太平洋プレート境界上で2006年4月11日から2016年8月31日の間に発生したものであり、全1737系列、5426イベントである。まず、繰り返し地震をマスターイベント、その近傍で発生した規模の小さな地震をEGFイベントとし、スペクトル比法でコーナー周波数 f_c を推定する。f_c 推定にはマスターイベントから震央距離が200 km以内にあるHi-net観測点を使用する。次に、本研究では線震源を仮定し、各観測点で推定される f_c の方位角変化から破壊伝播方向 α と破壊伝播速度 V_r をグリッドサーチで決定する。本研究の手法は、震源時間関数の継続時間を用いるAbercrombie et al. (2017)の手法を改良し周波数領域で行ったものである。その際、各観測点の f_c を独立に用いるときには α と V_r に加えて線震源の長さもグリッドサーチで決定する必要があるが、本研究では2観測点の f_c の比を用いることで α と V_r のみが推定量となるため、推定が容易となる。

３．結果および議論

© 日本地震学会

解析を行った結果、多数の同一繰り返し地震系列内の地震に対して V_r の系統的な時間変化が見られたものが2系列見つかった。これらはRegion 1内の東北沖地震後のみ地震が発生している系列であり、東北沖地震直後から約1-1.5年の間は破壊伝播速度 V_r とS波速度 V_s の比 V_r/V_s が約0.7であったが、その後は V_r/V_s が約0.5程度にまで低下していた。なお、破壊伝播方向 α は時間によらず概ね一定であった。Region 1では r/h^*~1となっていること、東北沖地震の余効すべりが大きいことを考慮すると、東北沖地震直後は載荷速度が大きく臨界破壊核サイズが小さくなったため大きな V_r が推定されたと解釈される。一方で、その後は載荷速度がそれほど大きくないため臨界破壊核サイズが比較的大きくなり V_r は遅くなったと考えられる。さらにKaneko and Shearer (2015)の破壊モデルが示すような Vr が大きくなるほどP波とS波のコーナー周波数の比が小さくなるという傾向が観測されたため、Vr の時間変化は確かに起きていると示唆される。
以上に示すように、同一繰り返し地震系列内での V_r の時間変化は、q-valueから推測される r/h^* の大きさおよび余効すべりの大きさから予想されるものと整合的であった。すなわち、V_r は載荷速度とは正の関係に、臨界破壊核サイズとは負の関係にあると考えられる。このことは、先行研究で行った、繰り返し地震のq-valueが実際の r/h^*、つまり摩擦特性を反映していることを示唆しているとする考えを支持するものである。

© 日本地震学会

Spatial and Temporal Variations in Rupture Processes of the Repeating Earthquake Sequences off-Iwate following the 2011 Tohoku-oki Earthquake

*Ahyi Kim[1], Naoki Uchida[2]

1. Yokohama City University, 2. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）後，大規模な余効変動が観測された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. 本研究ではこのような規模や再来間隔に変化のあったものや新たに出現した様々な繰り返し地震系列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推定し比較した．すべり量分布の比較では, 同じ系列においてはマグニチュード毎に平均，最大すべり量は異なっても，主な破壊領域は重なる事が明らかとなった．しかしその系列の近傍に新たな系列が発生すると最初単独で発生していた系列の破壊領域がやや縮小し、新しい系列と破壊領域の中心部が重ならないように棲み分けているという現象が見られた。さらにこれらの地震について、破壊伝播速度を調べたところ、東北地震後の早い時期に発生した系列については震源域のS波速度の85%-90%値が最適解として得られたが、後に発生したものについいてはうまく求まらなかった。これらについてはタイムウィンドウ数や断層のサイズなどのパラメターを変えてさらに詳しく調べていく必要がある。また、繰り返し地震の規模と平均すべり量の関係について調べた先行研究において、両者には線形的な関係が示唆されていた（Chen et. al., 2016）が, 本研究では東北地震後の早い時期に発生した系列で滑り量の平均値、ピーク値が共に低く見積もられ, 後に発生したものはこれまでの線形の関係と調和的な結果となった。これらすべり量の平均値を決める（もしくは破壊領域の大きさを決める）要素の一つとして、東北沖地震による余効すべりによる載荷速度の大小が影響することが示唆される.

© 日本地震学会

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

*Koichiro Suzuki[1], Musa Siphiwe Manzi[2], Hiroshi Ogasawara[1], Taku Noda[1], Lindsay Linzer[3], Raymond J Durrheim[2], Bennie Liebenberg[4]

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

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

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

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

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

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

© 日本地震学会

ICDP DSeis: Evaluation of Spatial Stress Change by Diametrical Core Diameter Analysis of M5.5 Aftershock Zone Core

*Yoshihiro Mima[1], Ryogo Tadokoro[1], Shunsuke Yoshida[1], Mitsuya Higashi[1], Kensuke Sakaguchi[1], Bennie Liebenberg, Siyanda Mngadi[4], Yasuo Yabe[2], Akio Funato[3], Takatoshi Ito[2], Raymond Durrheim[4], Hiroshi Ogasawara[1]

1. Ritsumeikan University, 2. Tohoku University, 3. Fukada Geological Institute, 4. University of the Witwatersrand

地震発生場では，母岩や地震断層系の不均質が破壊の核形成・伝播・停止をコントロールすると考えられている。しかし、地震発生場に掘削を到達させ、十分な量のコア試料が回収された事例がなかったため、実際の地震発生場で何が起こっているかを詳細に議論できる機会がこれまでなかった。

2014年、地下約2～3kmを採掘する南アフリカMoab Khotsong金鉱山の下で、左横ずれ型のM5.5の地震が発生した(Midzi et al. 2015)。この地震では、鉱山坑内の46台の地震計と地表の15台の強震計が、本震の破壊域と余震発生域が地下3～7kmに広がる様子を詳細に記録した。ICDP DSeis計画(2017-2019; Ogasawara et al. DeepMining 2019)は、この鉱山の地下2.9kmから、三本（Hole A, B, C）の総延長約1.6 kmのFull Core掘削に成功した。そして、この余震発生帯上縁部（マントルを起源とし変質したマフィックなシルとダイク；Vp > 約5.0～6.4 km/s）とその周囲の母岩（太古代の堆積変成岩；Witwatersrand Super Group; West Rand Group; Vp > 5.5 km/s）を回収することができた。 2017年に掘削されたHole A（817m）は、孔が曲がり、余震発生帯の上縁部よりも200～300下まで到達したが、余震発生帯との距離を約100mよりも縮めることができなかった。しかし掘削孔は安定していたので、コアのほぼ100%を採取することができた。2018年に掘削が始まったHole B（700m長）はM5.5断層上部と交差させることができた。そこで、Hole Bが交差した断層部の開始地点の手前から分岐してM5.5断層部を掘り抜くHole C（96m長）の掘削（核心部はトリプルチューブ）を行い、より多くの断層部のコアサンプルを手に入れることができた。

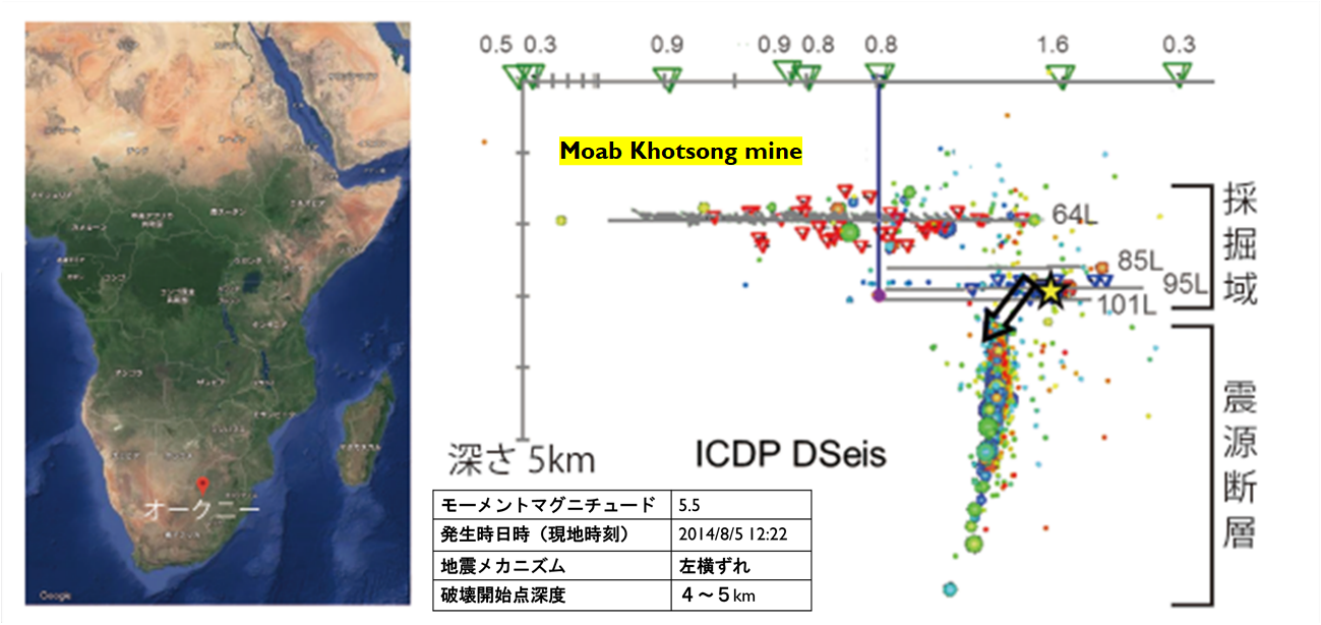
Funato and Ito (2017)は，十数cm長のコアさえあれば，非破壊で短時間で応力を測定できる方法（Diametrical Core Deformation Analysis; 以下、DCDA法）を開発した。この方法では、以下のようにして応力を測定する。（1）ドリリング中にコアが母岩から切り出されて解放されたときに生じる、コア軸に直交する断面が弾性的に楕円変形したコアの直径の変化を測定する。（2）測定されたコアの最小直径と最大直径の値の差から歪を計算する。（3）弾性変形を仮定し、その岩石の剛性率（あるいはヤング率とポアソン比）からコア軸に直交する面内の差応力を推定する。船戸が所有するこの測定システムを用い、南アフリカにおいて、石田(2018修士論文）は、可能な限り多くのコア（186個）のDCDA応力測定を行った。当時測定できたのは，余震発生帯上縁部よりも大きな深度まで到達したが余震発生帯とは交差できなかったHole A(817m長；NQダブルチューブ）のコアであった。しかし，石田は、岩相によって残差の分散とその要因が異なる場合でも，統計的に統一した基準で測定結果を採用したり棄却したりする基準をつくることができた。また，Hole Aの軸に垂直な平面内の差応力の，空間変動を描き出すことに成功した。そして、intrusives（シルとダイクの交差部；湧水部，および，余震帯上縁部付近の深度の付近）に応力集中があるのを発見した。杉村(2020修士論文）は，Hole Aの応力集中が著しい深さのコアと、その後掘削され余震発生帯上縁部と交差したHole B（700m長；NQダブルチューブ）とそのSide track孔（Hole C; 96ｍ長；核心区間はNQトリプルチューブ）のコアの計86個のDCDA応力測定を追加した。追加測定されたデータにより、石田の測定からM5.5余震発生帯の上縁部周辺の深さにおけるintrusivesで見つかった応力集中が異常値ではないことを確認できた。本研究では，漏れていた箇所のDCDA応力測定を追加した。Hole A, B, Cの核心部、総延長140mのコアが高知コアセンターに輸入され、MSCLやX線CTスキャン、XRDやXRF分析などによって、余震発生帯の断層構造と物質の詳細の解析が始まった（Ogasawara et al. 2020 JpGU; 横山 2020 修士論文）。

本ポスターでは、これまでの先行研究の結果と本研究で2019年にHole A, B, Cのコアについて追加測定した

© 日本地震学会

137個のデータから、M5.5断層と交差するHole Bと交差しなかったHole Aの空間応力分布を示し、それぞれの違いや関連性を報告するとともに、Hole Bから分岐して断層部を掘削したHole Cのデータから得られた結果についても報告する。

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



© 日本地震学会

Detection and spatial distribution of non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake by “0.1 manten” hyperdense seismic observation

*Motokoshi Takumi[1]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University

通常の断層運動（ダブルカップル型地震:DC地震）では説明できない地震を非ダブルカップル型（NDC）地震と呼ぶ。NDC地震は、これまで主に火山地域や地熱地帯で報告されており、NDC成分は、断層や破壊の複雑さや流体の存在などを示すものとして考えられている。NDC地震の研究は、断層運動のプロセスや地震の発生機構を理解するために重要であり、地殻の応力や強度に関する新しい情報を得る機会を提供すると考えられる。

2000年に発生した鳥取県西部地震震源域に2017年3月から2018年4月まで1000点の地震計を設置する観測を行った（0.1満点地震観測）。Hayashida et al. (2020)は0.1満点地震観測網の地震計と定常観測点であるHi-net観測点の記録を用いて、手動でP波の走時と極性を読み取り、震源決定を行った。発震機構解を推定すると節面やヌル軸付近にDCでは上手く説明できない極性分布があり、内陸地震発生場でNDC地震が観測されたことが示された。本研究では、さらに多くの地震について読み取りを行うと同時に自動読み取りのデータも併せて，断層面でのNDS成分の大きさの分布とその特徴の把握を目的とする。

本研究では、Hayashida et al. (2020)と同様にtensile-shearモデルを仮定し、NDC成分をグリッドサーチと相関解析により推定する。ここでは，震源球上のデータ密度を均質化することで，よりもっともらしい値を推定できると考え，サーチの際に各観測点に重みを与えることにより最適解の推定を試みた。グリッドサーチによって計算される極性と観測された極性を比較し、極性がミスフィットする観測点の重みの合計が最小となる解を求めた。複数ある場合は，その中でHi-net観測点の３成分波形記録から，解から期待される直達S波/P波振幅比と観測値を比較して相関係数最大のものを最適解とした。

解析した地震のうちほとんどの地震が開くクラックを伴ってせん断破壊が起きていることが分かった。また、観測点に重みを与えることによって得られる最適解は、重みづけ無しの解析で得られる最適解よりもNDC成分が大きくなる傾向があることが分かった。さらに、断層面の全体でNDC成分が大きいイベントが発生しており、余震域のうち北部の地震の発生数の多い場所では特に大きなNDC成分をもつイベントが発生しているという傾向があることが分かった。しかしながら、この傾向は自動読み取りで震源決定したイベントも含まれていることに加え、手動読み取りイベントの分布に偏りがあるため、今後は断層面の全体に分布するように手動読み取りイベントを増やすことで、より正確な傾向をつかむ。

© 日本地震学会

Validating the Method of Estimating Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field

*Takeo Ishibe[1], Toshiko Terakawa[2], Akinori Hashima[3], Masashi Mochizuki[4], Ritsuko S. Matsu’ura[1]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Nagoya University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

活断層調査に基づき将来発生する地震の現実的な強震動・津波予測には、入力データとなる断層形状や断層すべり角（ずれの向き）、断層すべり量などが実際に発生する地震のそれらと乖離しない事が求められ、その高精度化を目的とした調査研究が日々進められている。特に断層すべり角の設定が津波の予測に与える影響は大きく、その適切な設定は防災上においても重要な課題である。近年では，地震は断層面に働く応力ベクトルの剪断成分の方向にすべるという考え方（Wallace-Bott仮説）に基づき、活断層調査から得られた断層形状と地震データから推定された広域応力場の情報から断層すべり角が推定され、これらが強震動・津波予測に活用されてきた（例えば、日本海における大規模地震に関する調査検討会，2014；武田・他，2014；岩田・他，2020；佐竹・他，2020）。

しかしながら、広域応力場ならびにWallace-Bott仮説から推定した断層すべり角を強震動あるいは津波予測に用いる事の妥当性の検証ならびに精度（誤差）について、十分に検討が行われているとは言い難い。また一般に、活断層で発生する固有地震規模の地震の平均再来間隔は数千年から数万年のオーダーであると推定されており、その期間に蓄積された応力が解放される現象が地震である事を鑑みると、10年程度の非常に限られた期間における地震学データから推定された広域応力場をどの程度、長期間のテクトニックな応力場のプロキシとして用いる事ができるのか、検討する必要がある。

地震調査研究推進本部（以下、地震本部）は、基盤的な調査対象として現在、114の主要活断層帯を選定し、これらの活断層（帯）における過去の活動履歴や位置形状等を調査し、断層の幾何形状に関する情報（断層長さ、幅、傾斜角、走向等）や断層のずれの向きと種類（逆断層、正断層、左横ずれ断層、右横ずれ断層等）、平均再来間隔、将来の地震発生確率等の長期評価を公表している（例えば、地震本部地震調査委員会，2017）。また、長期評価による断層の幾何形状（長さ、幅、傾斜角、走向等）ならびにずれの向きと種類に基づいて、その断層が活動した場合にどういった地震動に見舞われるのか、強震動評価が行われている。そこで本研究では、Terakawa and Matsu’ura (2010) による広域的三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説から推定されるすべり角を気象庁による分類方法に準拠し、左横ずれ断層（－45°～45°）、逆断層（45°～135°）、右横ずれ断層（135°～180°または－180°～－135°）、正断層（－135°～－45°）に分類し、変動地形学的に推定された断層のずれの向きと種類と比較する事で、上記手法の適用可能性に関する考察を行った。なお、主要活断層帯に対する断層モデルとして、地震ハザードステーション（J-SHIS）を用いた。

その結果、安芸灘断層帯など一部の断層帯を除き、三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説によって推定された断層すべり角（断層のずれの向きと種類）は、変動地形学的に推定された断層のずれの向きと種類と一致した。防災科学技術研究所によるF-netメカニズム解ならびに国立大学地震観測網初動メカニズム解カタログ（JUNEC FM[2]；Ishibe et al., 2014）を用いた検証からは、2011年東北地方太平洋沖地震後に東北日本内陸において活発化した群発的活動など一部の地震を除き、上記手法から推定されたすべり角とメカニズム解のすべり角が概ね整合的である事が示されている（Ishibe et al., 2020）。これらの結果は、限られた観測期間の地震学データから推定された三次元広域応力場を長期間のテクトニックな応力場のプロキシとして用い、Wallace-Bott仮説により断層すべり角を推定する手法について、一定の妥当性を示すものと考えられる。一方で、三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説によって推定された断層すべり角からは、Obliqueなす

© 日本地震学会

べりが期待される断層も多く、すべり角の設定が強震動・津波予測に及ぼす影響について、今後、具体的に検討する必要がある。

謝辞：本研究では、地震調査研究推進本部による主要活断層帯に対する長期評価結果ならびに防災科学技術研究所による地震ハザードステーション（J-SHIS）の断層モデルを用いた。本研究は文部科学省からの委託事業である「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一部として実施した。ここに記して関係者に感謝申し上げる。

© 日本地震学会

Temporal variation of the inelastic strain field around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

*Ayaho Mitsuoka[1], Satoshi Matsumoao[2], Azusa Shito[3], Hiroshi Shimizu[2], Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Department of Biosphere-Geosphere Science Faculty of Biosphere-Geosphere Science Okayama University of Science

大地震発生後の非弾性歪み場は、地震発生による地殻内での応力再配分を理解するための鍵となる。大地震発生後の余震活動について、改良大森公式(宇津(1957, 1999); Utsu (1961))に示されているように、地震発生率は時間のべき乗則に従う。また非弾性歪み速度も時間のべき乗則($d\varepsilon/dt \propto t^{-p}$)に従うことが示されており、これらの時間変化についてモデル化が行われている(たとえばNanjo et al,, 2019; 楠城, 2007)。そのモデル化のためにまずは、非弾性歪み速度の時間変化を調べる必要がある。本研究では、2016年熊本地震の震源域で地震活動による非弾性歪みの時間変化を調べた。

震源域周辺を約10km四方の領域に分割し、いくつかの時間ウィンドウを設定し、モーメント密度テンソルと非弾性歪みテンソルの関係(Noda and Matsu'ura, 2010)を用いて、非弾性歪み速度の時空間変化を調べた。

地震前後ともに、震源域北部は正断層型、南部は右横ずれ型の不均質な歪み場を持つ。本震発生後、非弾性歪み速度が時間のべき乗則($d\varepsilon/dt \propto t^{-p}$)に従うと考え、各小領域で、p値を最小二乗法により推定した。震源断層周辺はp>1となり、この領域の変形は、べき乗流体を考えた時の弾性歪みへの応答として解釈できる(楠城, 2007)。

一方、p値が1より小さくなる領域が確認された。この領域では、非弾性歪みが時間経過とともに増加することになり、最大前震・本震が発生したことによる弾性変形によって生じた応力ステップへの応答だけでは、地震活動を説明できないことがわかる。そこで、その領域について議論を行う。

一連の地震活動では、最大前震(Mj=6.5)と本震(Mj=7.3)の2つの大きな地震が発生したことが知られており、それらのすべり分布モデルがいくつか示され、Asano and Iwata (2016)の本震断層モデルは、日奈久・布田川断層両側に2枚モデル化されている。p値が1より小さい領域は、この本震断層モデルの日奈久断層の南延長部、あるいは布田川断層の西延長部に位置することがわかった。

日奈久断層南延長部の領域について、この領域のp値は、深さが増すと小さくなり、また、浅部ではさらに南側に低p値の領域が広がることがわかった。このことから、上部地殻下部(7.5 –15 km付近)とより南側の浅部に影響する、例えばアフタースリップのような地震後の変動がある可能性が示唆される。また、この領域ではM5を超える地震が本震後に発生していることもあり、その地震が及ぼす弾性歪みに対する非弾性歪みを検出している可能性も考えられる。
流れ則に従い、非弾性歪みの主歪みの方向に応力が働き、変形が進んでいると仮定すると、この領域で働く主応力の向き、それに最適な断層の形状を推定することができる。日奈久断層は右横ずれの運動を生じていることを考慮し、この領域で断層モデルを仮定した。震源分布(平成２８年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査報告書)を見ると、この断層面上で発生したと考えられる地震活動が確認される。この断層モデルの形状を持つ断層がすべることによって周囲に及ぼす応力変化や変位について議論する。

© 日本地震学会

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

*Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1]

1. Tokyo Institute of Technology

背景

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

手法

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

結果

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

© 日本地震学会

Investigation of multi-segment earthquake on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

*Yuko Kase[1]

1. GSJ, AIST

The Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone (ISTL) in central Japan is one of the most active fault zone in Japan. To discuss the possibility and condition of multi-segment earthquakes in the ISTL, we construct dynamic rupture models for the north-central and south-central portions of the ISTL based on geological and geophysical data.

The previous studies based on seismic reflection, seismic refraction, and gravity surveys suggested that the north-central and south-central portions of the ISTL are east-dipping(e.g. Hagiwara et al., 1986; Ikami, et al., 1986; Sato et al., 2004) and west-dipping (e.g. Hirakawa et al., 1989; Kumamoto and Ikeda, 1993; Karino et al., 2004) faults, respectively, however, the dip angles were obscure. Using FEM modelling, the Ministry of Education, Science, Sports and Culture (MEXT) and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) (2020) proposed that the dip angles of the portions were vertical. Based on the proposed fault geometry, the north-central and south-central portions of the ISTL are modeled as vertical left-lateral strike-slip fault planes in this study. The lengths of the fault planes are 34 km and 26 km, respectively, and the south-central portion bend at 5 km from the northern end.

Azimuth of the maximum principal stress and stress ratio are assumed, considering the stress inversion result (MEXT et al., 2010) and the FEM modelling (MEXT and AIST, 2020). Surface slips of the latest events on each portion were observed at three locations of the north-central portion (Okumura et al., 1994; Kondo et al., 2006; Kondo et al., 2019) and a location of the south-central portion (Miura et al., 2004) by trench surveys. Four initial crack locations, the north and south ends of both portions, are assumed. Varying depth coefficient of stress drop, we calculate dynamic rupture processes by a finite-difference method (Kase and Day, 2006), and compare the left-lateral slips with the observed ones.

The ruptures initiating at the north or south end of the north-central portion can jump to the south-central portion. Even a multi-segment rupture on the north-central and south-central portions, however, needs quite a large stress drop for surface slips on the north-central portion to be consistent with the observed ones. The result implies that the latest event on the north-central portion was likely a multi-segment earthquake including the north portion, which agrees with paleoseismological data (MEXT and AIST, 2020). On the other hand, the ruptures initiating at the north or south end of the south-central portion cannot jump to the north-central portion. The slip of the single event on the south-central portion needs a large stress drop to be consistent with the observed one. The latest event on the south-central portion may be a multi-segment earthquake on the south-central and south portions, which is suggested by paleoseismological data (MEXT and AIST, 2020).

Acknowledgement: This research was funded by the Research Project for Long-term Evaluation Methods of Active Faults related to Multi-segment Earthquake in FY2019 by MEXT.

© 日本地震学会

Dynamic earthquake sequence simulation with a spectral method without periodic boundary condition

*Hiroyuki Noda[1]

1. Kyoto University, Disaster Prevension Research Institute

動的地震サイクルシミュレーション (例えばLapusta et al., 2000) は、地震間の準静的な応力蓄積過程、震源核の形成、地震破壊の動的な伝播、余効滑りと再固着、といった異なる時間スケールの現象を同一のフレームワークでシームレスに扱う事のできる手法であり、地震を繰り返す断層の運動のダイナミクスを調べる上で重要な手法である。Lapusta et al. (2000) は離散化の為にフーリエ基底を採用し、Geubelle and Rice (1995) が導出された積分核を用いた。スペクトル法であるため滑らかな問題に対して近似誤差が早く収束し、また高速フーリエ変換を用いて空間方向の畳み込み積分を波数空間で行うため、計算コストが低く抑えられる、といった利点がある。一方で、この手法では滑り δ や滑り速度Vの分布に対して周期境界条件を仮定し、無限媒質中の無限平面断層に対する解をグリーン関数として用いるため、周期境界条件を興味対象の領域から十分遠くに設定する必要がある。滑りによる静的な応力変化は遠くまで伝わるため、この周期境界の間隔をどの程度に取る必要があるのか、考慮が必要となる。本研究では、同様にフーリエ基底と高速フーリエ変換を用いながら、周期境界条件を仮定する必要のないスペクトル法の地震サイクルシミュレーションを構築した。

境界積分方程式法では、断層面でのトラクション τ は断層滑りが過去と現在に無い場合のトラクション τ_0、過去に断層がすべった事による寄与 f、及び現在その場に滑り速度がある影響（インピーダンスの効果）$-V\mu/2cs$ の和で表現できる。ここで μ は剛性率、cs はS波速度である。f は過去の δ もしくは V と積分核の時空間的な畳み込みで表現できる。動的地震サイクルシミュレーションでは f を現在の滑り分布に依存する静的な効果 fst とそれ以外 fdyn = f −fst に分ける。fdyn は十分過去の滑り速度に関してその影響がゼロに漸近する。そのため、fdyn を V に関する積分で計算し、この積分を十分長い時間窓 tw で打ち切ってやることにより、過去を忘れながら（すなわち有限のメモリーで）数値計算を進めていく事ができる。これが Lapusta et al. (2000)による動的地震サイクルシミュレーションの仕組みである。

f の空間フーリエ変換 F は滑り量の空間フーリエ変換 D と積分核 K をかけた物を時間積分する事によって得られる。この K に関して、Cochard and Rice (1997) は周期境界条件を取り除く手法を提案した。彼らの手法では、滑りを許す領域（$0 < x < L$）の２倍の長さの領域（$0 < x < 2L$）を準備し、その半分（$L < x < 2L$）をゼロで埋める。その上で、滑りを許す領域でのみ正しい f の波数空間での表現が導出されている。ただし Geubelle and Rice (1995) に比べて積分する回数が１回多く、これを数値的に評価すると計算コストが大きくなる。しかし今回、この積分核の全時間の積分（静的な積分核）に関しては積分を解析的に実行する事が可能である事を見出した。波数 k (>0)のフーリエモードに関し、静的な積分核は $-\mu k\, \mathrm{Si}(kL)/\pi$ と表す事ができる。ここで Si( ) はサイン積分関数であり、高波数では積分核が周期境界条件を仮定した場合の $-\mu k/2$ に漸近する。

今回提案する手法では、f を Lapusta et al. (2000) と同様に Geubelle and Rice (1995) の表現を用いて計算する。ただし、周期境界の向こう側からの弾性波が興味対象の領域（$0 < x < L$）に達する事が無い様、周期境界の間隔は十分に広く取る。ソースと評価点の相対位置 $-L < x < L$ に関して積分核を評価し、このフーリエ変換を波数空間でのグリーン関数として持っておく。ここから Cochard and Rice (1997) から求めた静的な積分核を差し引く事により、fdyn = f −fst を計算する。これを用いると、周期境界を取り除いた地震サイクルシミュレーションが可能となる。発表では手法の説明に加え、Aging law によって支配される孤立した断層の地震サイクルシミュレーションを紹介し、その途中で加えた動的および静的な応力擾乱の影響を議論する。

© 日本地震学会

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

*Kazuki Ohtake[1,2], Nobuki Kame[2], Makiko Ohtani[2]

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

1. はじめに

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

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

2. XBIEMのECSへの適用

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

3. 2次元面外・面内変形における全ての静的XBIEM核関数の導出

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

4. 今後の展望

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

© 日本地震学会

References

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

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

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

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

© 日本地震学会

Modelling of spontaneous and periodic slow slips and a tsunami earthquake in the northern part of the Japan Trench

*Ryoko Nakata[1], Naoki Uchida[1], Ryota Hino[1]

1. Graduate School of Science, Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0)の海溝近傍のすべり域は、日本海溝中部に限定されていた [e.g., Iinuma et al., 2012]。その南側の福島県沖では、余効すべりや低周波微動・超低周波地震 [Nishikawa et al., 2019]などのスロー地震が観測されている。一方、北側の三陸沖では、津波地震として知られている1896年明治三陸地震 (Mw8.0) [Tanioka & Satake, 1996; Satake et al., 2017]が過去に発生したほか、スロースリップ (SSE)やM5程度の地震 [Uchida et al., 2016]が数年周期で観測されている。2011年東北沖地震のすべり域がなぜ南北に広がらなかったのか、このようなすべりのすみわけがなぜ起こるのかを理解するために、日本海溝において地震発生サイクルの数値シミュレーションを行ってきた。これまでに、中部でのM9地震時すべり域と南部での余効すべりとのすみわけを、地下構造の明瞭な違いを反映した摩擦パラメタ分布を用いて説明したり [Nakata et al., preparing]、三陸沖で自発的に発生する周期4~5年のSSEを小さなパッチで近似し、このSSE領域全体で発生する津波地震を小さなSSEパッチの集合体でモデル化したりしてきた [Nakata et al., 2020, JpGU]。

本研究では、階層構造モデル [Ide & Aochi, 2005]やスロー地震の物理モデル [Ando et al., 2010; 2012; Nakata et al., 2011]などを参考にし、周期数年のSSEと、その付近で発生する繰り返し間隔100年以上の津波地震との共存等の観測と調和的なすべりの時空間分布を再現する。今後は、このモデルを、M9地震とその余効すべりを含むモデル [Nakata et al., preparing]と組み合わせ、日本海溝北部におけるスロースリップや津波地震が、2011年東北沖地震のような巨大地震発生履歴の中で果たす役割を明らかにする。

© 日本地震学会

Numerical model of slow slip events in the Nankai and Hyuganada region revisited from recent observational studies

*Takanori Matsuzawa[1], Bunichiro Shibazaki[2]

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

１．はじめに

深部低周波微動の発見(Obara, 2002)以来，世界各地のプレート境界で発生するスロー地震について，精力的に研究が進められてきている．近年，南海トラフにおいては，とりわけスロースリップイベント(SSE)に関する新たな知見が多く得られている．例えば，プレート固着域の深部延長上のプレート境界で発生する長期的SSEについては，従来知られていた東海地方や豊後水道，四国中西部だけでなく，日向灘や紀伊水道，志摩半島でも発生が報告されている（例えば，Ozawa et al., 2017; Kobayashi, 2017; Kobayashi and Tsuyuki, 2019）．また，Takagi et al. (2019)は長期的SSEが日向灘において，2～3年間隔で発生している可能性を指摘している．これらの研究は，短期的SSEと同様に，長期的SSEについても沈み込み帯で広く発生している普遍的な現象であることを示している．さらには，固着域を挟んで浅部側の領域においてもSSEが発生していることが，近年の海底地殻変動観測の進展により明らかとなった(Araki et al., 2017; Yokota and Ishikawa, 2020)．我々はこれまで南海トラフにおいて発生する深部の長期的および短期的SSEの数値シミュレーション研究を実施してきた．本発表においては，対象領域を種子島沖まで拡張したモデルに基づいて，数値シミュレーション結果と観測結果の比較を行うとともに，地震サイクル内における挙動についても議論を行う．

２．計算手法・モデル

数値モデルにおいては，フィリピン海プレート上面の形状を約17万個の三角形要素で表現し，Matsuzawa et al. (2013)と同様にカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を仮定して，各要素上でのすべり速度および摩擦の時間発展を計算した．短期的SSEの領域設定においては，低い有効法線応力を仮定するとともに，観測された微動活動の分布に基づいて(a-b)が負となる領域を設定した．東海地域および豊後水道の長期的SSE領域については，Matsuzawa et al. (2013)と同様に，有効法線応力が周囲よりやや低い領域の沈み込み方向の幅を広く設定した．加えて日向灘領域については，この幅を他地域より広く，東海地域や豊後水道の長期的SSE領域よりも狭い，中間的な幅に設定した．

３．結果・議論

数値シミュレーション結果においては，短期的SSEに加え，長期的SSEが報告されている深さ25～29kmにおいて，長期的SSEの繰り返し発生が広範囲で再現された．豊後水道および東海地域においてはそれぞれ6年および10年程度の間隔で長期的SSEが発生し，観測と同様の比較的周期的な発生挙動を示した．日向灘地域においては，再来間隔が数年程度となり，Takagi et al. (2019)の観測結果と調和的であった．豊後水道，東海地域，日向灘以外の領域における長期的SSEは発生間隔が10年以上となるものが多く，発生領域が地震サイクルの後半になるにつれ，浅部へと拡大する傾向がみられた．一方，東海地域および豊後水道の長期的SSEについて，その発生域は地震サイクルを通じてほぼ一定であった．我々の数値シミュレーション結果は，長期的SSEが普遍的に発生しうることを示すとともに，有効法線応力がやや低い領域の幅が長期的SSEの発生挙動の違いを生じさせる可能性を示唆する．

加えて数値シミュレーション結果では，とくに紀伊半島南方沖の浅部領域において長期的SSEが繰り返し発生した．同領域においては活発なスロー地震活動が観測されており，数値シミュレーションによって同様な地域性を再現することができた．我々の数値モデルはトラフ軸に沿う方向の摩擦特性の変化を仮定していないものの，同領域では大地震の固着域が狭くなっており，こうした差異が浅部のSSE挙動を規定している可能性も示唆される．

© 日本地震学会

Examination of constitutive relation for the fault zone along the plate boundary in subduction zone

*Takane Hori[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

沈み込み帯プレート境界に沿った断層帯では、巨大地震をはじめとした様々な規模の地震が発生するとともに、様々な規模のゆっくり地震（通常の地震よりも周波数の低い地震や地震波をほとんど伴わないゆっくりした断層すべり）も発生する。このように時空間的に多様な振る舞いを示す断層帯をどのようにモデル化するのが適切だろうか？実体そのものを忠実にモデル化することは、観測・観察不能なことが多すぎて困難なので、目的に応じて単純化したモデルを構築する必要がある。ここでは、時空間的に多様な地下の断層の振る舞いをモニタリングしつつ、その後の推移を予測することを目的としたモデル化を考える。モニタリングし、かつ、予測をするということは、モデルに使う変数やパラメータが観測データによって十分に拘束される必要がある。地下（しかも多くは海底下）数km～数十kmにある断層帯で発生している現象のモニタリングと予測をするために我々が用いることができる観測データは、断層帯での動きを反映した地表（海底）での変位・歪変化などに限られる。そのため、断層帯内部で生じている様々な物理・化学過程を直接モデルに取り込むことは無理がある。観測データから拘束できるのは、高々、断層帯の厚さ方向全体の歪（あるいは相対変位）の時空間分布やその周辺の弾性体の物性であり、それすらも限られた空間解像度で推定できるに過ぎない。そこで、断層帯に沿った歪（あるいは相対変位）の時空間分布をモニタリングと予測の対象とすることを考える。モニタリングについては、従来から行われているインバージョン解析そのものであるが、予測をするには、断層帯に沿った歪（あるいは相対変位）がどのような発展則に従うのかを考える必要がある。つまり、断層帯の構成関係を、歪（あるいは相対変位）と断層帯に働く応力との関係でどう記述するかが問題となる。通常の地震に対しては、断層すべり時の弱化と、弱化後の強度回復過程を表現できることが必要である。また、様々な規模の地震発生を表現するためには、スケール依存性や階層性を取り入れることが必要と考えられる。一方、ゆっくり地震に対しても、部分的にはそれらの組み合わせで表現できる場合がある。しかし、ゆっくり地震のモデル化で従来必須と考えられることが多い、すべり速度依存性の導入の必要性や導入する場合の定式化が、まず検討すべき課題と考えている。この課題について、単純な系を用いた数値実験の検討結果について紹介する予定である。

© 日本地震学会

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

*Shinichi Oba[1], YUTA Mitsui[2]

1. Grasuate School of Science and Tecnology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University

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

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

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S14. Earthquake prediction and forecast

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S14P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S14P-01] Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

○Hironobu Kamikubo[1] (1.Hamamatsu Hokusei Jhs)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S14P-02] On the upheaval of Muroto during the Nankai earthquake and the time- predictable model

○yasuhiro umeda[1] (1.previous DPRI Kyoto univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S14P-03] The possibility to argument about the existance of "Repeating Tremor" by the log from Twitter(2020)

○Michiko Imazu[1] (1.jisin-kurumiru)

Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

*Hironobu Kamikubo[1]

1. Hamamatsu Hokusei Jhs

図1は静岡県西部地域で白金測温抵抗体の水温センサーを用いて行っている長期水温変化である.観測開始は浜松市中郡（NG）が2013年5月, 湖西市新居（KOA）,磐田市中泉（IWN）,掛川市徳泉（KAT）が2016年8月である.
NGでは2014年後半から下降を続けていた水温が2017年から上昇に転じ,その後急激な温度上昇が観測されていたが2020年頃より上昇が停滞しているように見える.
図2はNGの浜名湖周辺の長期スロースリップ終息後の2017年1月1日から2020年8月5日までの水温変化である.
図3は同時期の静岡県西部地域の深さ20km-25kmのM1.0以上の地震活動の積算図である.図中の2018.6.12,2018.11.3,2020.1.30,2020.6.25はこの間に地震活動が活発化し始めた日である.
これらの地震活動の活発化した時期に対応して水温の上昇率の高まりが見られる.
また,地震活動が活発化した後に活動が停滞する期間が見られるが,地震活動の停滞終息後にやや遅れて水温変化の停滞（2018.6.12）や下降（2018.11.3, 2019.8.13）が見られる. 2020.1.30からの地震活動の急増はクラスターの発生によるものである.
浜名湖周辺で観測された長期スロースリップが2016年末頃に終息したことから浜名湖以東への応力の増加がもたらされ,この地域の地震活動が活発化したと考えられる.特に浜松中郡（NG)と磐田中泉（IWN)で水温の上昇が顕著に見られることからこの地域への地下応力の増加が進んでいると考えられる.
地震活動の増加をもたらした地下応力の変化と水温変化との間にみられる同期性は,佃が提唱した地殻の岩盤の応力が強まると深部の高圧流体は低圧環境である地殻上部へ移動し浅層地下水に混じり地下水温を上昇させるとした深部流体上昇仮説(Tsukuda et al.2005)と調和する.

【参考文献】
Tsukuda,T.,K.Goto and O.Sato,2005, Bull.Earthq.Res.Inst,80,105-131.
上久保廣信,静岡県西部地域の地下水温変化,日本地震学会講演予稿集S14-P04,2019.

図１　上から湖西市新居（KOA),浜松中郡(NG),磐田市中泉（IWN),掛川市徳泉（KAT)の水温変化（1日平均値）（2013年6月～2020年8月11日まで）の地下水温変化
図２　浜松中郡（NG)の2017年1月から2020年8月5日までの地下水温変化（1日平均値）
図３　静岡県西部地域の地震累積回数（2017年1月～2020年8月5日まで　Ｍ１以上　深さ20-25ｋｍ）と地震活動が活発化し始めた日
図の作成には東大地震研究所TSEISweb版の気象庁データJMA--_PDEを使用した

© 日本地震学会

図 1

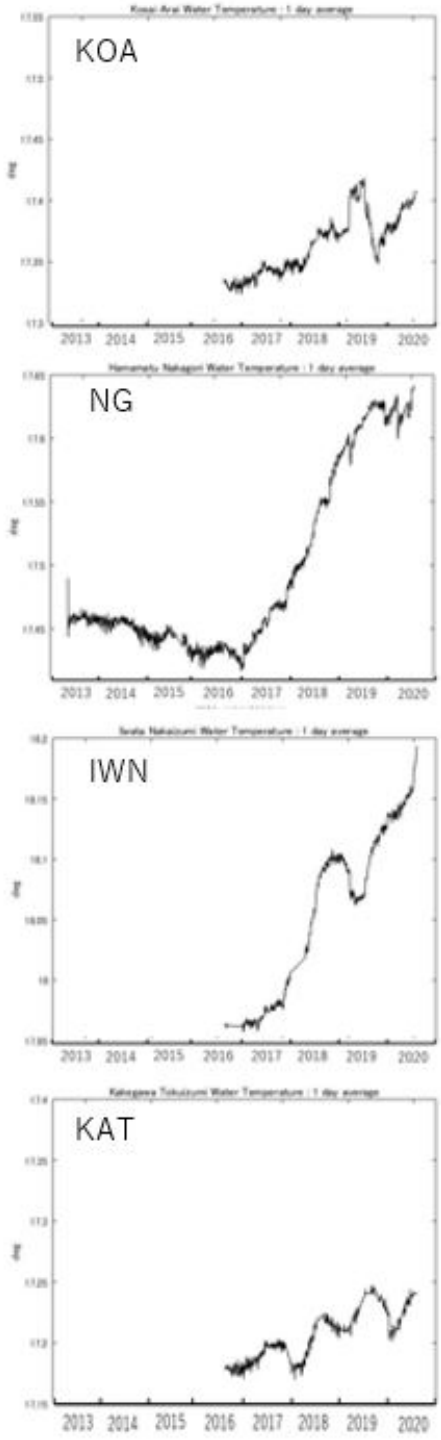
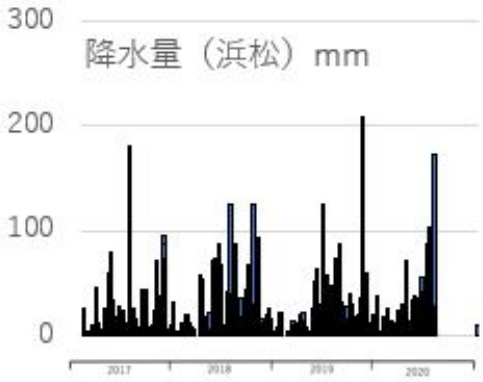


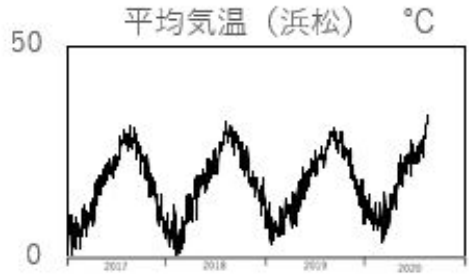
図 2



図3







© 日本地震学会

On the upheaval of Muroto during the Nankai earthquake and the time- predictable model

*yasuhiro umeda[1]

1. previous DPRI Kyoto univ.

１．はじめに
過去３回の南海地震の室津（室戸市）の隆起量を基に，Shimazaki and Nakata(1980)は南海地震の時間予測モデル（time- predictable model ）を提唱した．このモデルの図では，縦軸に地震毎の断層変位とその積算を採るのが元々の考えになっているので，室戸の隆起量を縦軸に採る場合は，それが断層変位（滑り量）に比例しているという仮定がある．
安政南海地震（M8.4）と昭和南海地震（M8.0）とでは地震規模が異なるにも関わらず，室戸の隆起量は前者が1.2 m，後者は1.15 mとほぼ同じになっている．断層の滑り量と室戸の隆起量は比例していない可能性がある．

２．上下変動と滑り量および断層の幅との関係
地表の上下変動は断層の滑り量と断層の幅の2つの要素によって決まる．添付図の上は南海トラフにほぼ直交方向の断面図である．斜め曲線はプレート境界で，境界上に昭和南海地震の断層（細長い黒の矩形）と安政南海地震（細長い点線の矩形）を設定した．図下の実線は昭和南海地震の滑り量を5 mとした時の地表の上下変動，点線は安政南海地震の滑り量を8 mとした場合の地表の上下変動である．滑り量は1.5倍異なるにもかかわらず，室戸の隆起は両地震でほぼ同じになっていることがわかる．高知の沈降も同様，両地震共ほぼ同じである．その理由は断層幅も約1.5倍に広げたためである．断層幅を広げた結果，地表の隆起のピークはトラフ側へ，沈降のそれは陸側へシフトし，安政南海地震の室戸や高知の上下変動は相対的に小さくなっている．このように断層の滑り量と地表の上下変動は比例しない場合がある．

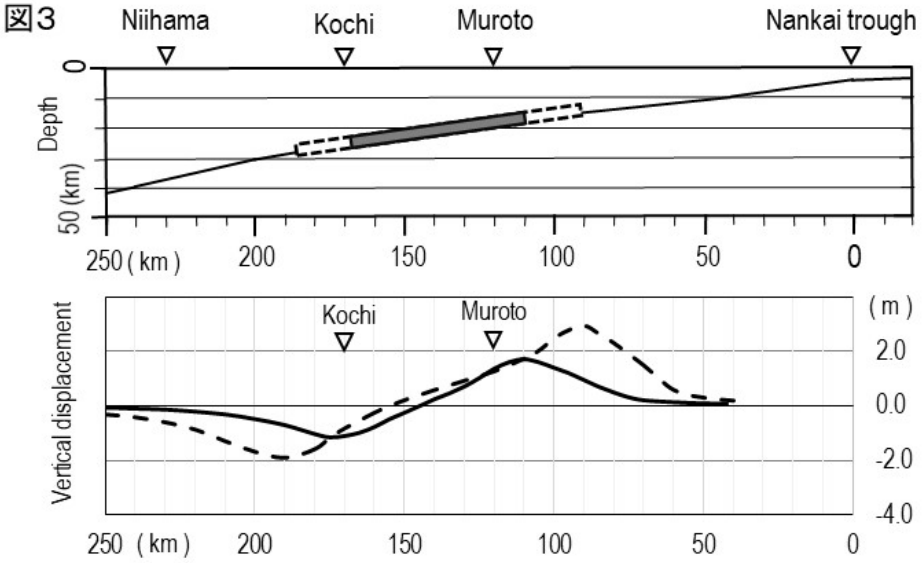
３．議論
内陸地震の場合はトレンチ調査によって過去の地震の滑り量を直接測定できるが，プレート境界の地震では直接測定ができない．そのため地表で測定された上下変動が時間予測モデルに採用されているが，南海地震のように過去3回の地震データで，その一つの変動量が小さく評価されると，予測時期は大きく変わってしまうことがある．
上下変動に代わる簡便法として，マグニチュードから滑り量を推定し，時間予測モデルに準拠した図を作ることはできる．過去3回の地震データだけを使うと最短で2004年，最長でも2019年になる．地震数（データ数）によって次の地震発生の予測年が変わる．1361年正平地震以降の6回の地震を用いると，次の地震は2050年頃になる．また地震数（データ数）が増えると，時間予測モデルと滑り予測モデルとの違いがなくなり，どちらのモデルが適当かはわからなくなる．

© 日本地震学会

地震	M	室戸	高知
昭和	8.0	1.15	-1.2
安政	8.4	1.2	-1.1

表：2回の地震のマグニチュードと
室戸・高知で測定された上下変動
（単位は m）.
地震規模は異なるが上下変動は
両地震でほぼ同じ.

図3



図上：南海トラフ軸にほぼ直行方向のプレート境界（細い斜め実線）と断層面の断面．黒の細長い矩形は
昭和南海地震（断層幅 60 km），点線の細長い矩形は安政南海地震（断層幅 95 km）．
下：実線は昭和南海地震（滑り量 5 m），点線は安政南海地震（滑り量 8 m）による地表の上下変動．
後者の滑り量は 前者の1.6倍だが，室戸の隆起も高知の沈降もふたつの地震共同じになっている．

滑り量と地表の上下変動は比例しない場合がある

© 日本地震学会

The possibility to argument about the existance of "Repeating Tremor" by the log from Twitter(2020)

*Michiko Imazu[1]

1. jisin-kurumiru

1994年に体感による微動を捕捉し1995年兵庫県南部地震が発生した、最初の発見から一歩進んで
2012年、加速度センサーによる捕捉を試みたが、かろうじて捕捉できたサンプルは不明瞭かつ微小で説得力に欠けており壁にぶつかっていた。その後、体感による微動記録をブログからTwitterに変えた。このなかで地震速報をフォローすることで、体感できた微動と実際に発生した地震の時間的、規模、場所、メカニズムの相関をTLで記録し、Twilogで客観的検証ができることに気づき、今回はその記録をもとに、2020前半のいくつかの局面を例に「地震発生の先行現象としての”規則微動”が確かに存在している」このと論証を試みる。今回は期間内に日本での陸域直下の被害地震に先行するものは入っていないが、ほかに、よく発生している海外の大型地震に先行する一時的な微動がある。それぞれについて傾向を説明しつつ例示する。

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S16P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-01] Estimation of Subsurface Soil Depth Affecting Spatial Variation of Ground Motion between Adjacent Points

○Ryoichi Tokumitsu[1], Yu Yamamoto[1], Yasuo Uchiyama[1], Susumu Ohno[2] (1.Taisei Corp., 2.Tohoku Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-02] Overview of ground motions on the islands of Kagoshima, Japan -Using seismograph data of Kagoshima Prefecture-

○Nobuyuki Yamada[1], Kimiyuki Asano[2], Tomotaka Iwata[2] (1.Kochi University, 2.DPRI Kyoto University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-03] Long-period ground motion simulation in the Kanto region: effects of 3D CMT solutions

○Shunsuke Takemura[1], Kazuo Yoshimoto[2], Katsuhiko Shiomi[3] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Yokohama City University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-04] Influence of Seismic Source Locations of Interplate Earthquake along the Nankai Trough on Long-Period Ground Motions in Osaka Bay Area

○Tomohiro Oguchi[1], Masayuki Nagano[2] (1.Tokyo University of Science Graduate School , 2.Tokyo University of Science)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-05] Microtremor Array Surveys in and around the Lowland Area along the Kizu River, Kyoto

○Kimiyuki Asano[1], Masayuki Yoshimi[2], Tomotaka Iwata[1], Hirotoshi Uebayashi[3], Michihiro Ohori[4], Haruko Sekiguchi[1], Hiro Nimiya[2], Tatsuya Noguchi[5] (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSJ/AIST, 3.Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 4.Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, 5.Faculty of Engineering, Tottori University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-06] Microtremor array surveys on the Eastern Part of the Nara Basin, Japan

○Masayuki YOSHIMI[1], Kimiyuki ASANO[2], Tomotaka IWATA[2], Hiro NIMIYA[1], Takeshi SUGIYAMA (1.Geological Survey of Japan/AIST, 2.DPRI, Kyoto university)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Isamu Nishimura[1], Tatsuya Noguchi[2], Yusuke Ono[2], Masanori Kohno[2] (1.Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2.Tottori Univercity, Department of engineering)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-08] S wave seismic reflection and microtremor surveys on the Shikano fault appeared in the 1943 Tottori earthquake

○Takao Kagawa[1], Tatsuya Noguchi[1], Koji Yamada[2], Tetsuya Takameoto[2] (1.Faculty of Engineering, Tottori University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S16P-09] Estimation of gravity basement structure in the central Tottori, Japan

○Tatsuya Noguchi[1], Isamu Nishimura[1], Takao Kagawa[1] (1.Tottori University)

Estimation of Subsurface Soil Depth Affecting Spatial Variation of Ground Motion between Adjacent Points

*Ryoichi Tokumitsu[1], Yu Yamamoto[1], Yasuo Uchiyama[1], Susumu Ohno[2]

1. Taisei Corp., 2. Tohoku Univ.

１．はじめに

表層地盤の不均質性に伴う地震動の空間変動には、建物への入力地震動の低減効果が期待される。耐震設計において地震動の空間変動特性の影響を考慮し、建物の地震応答の精度向上を図るためには、表層地盤の不均質パラメータを明確にするとともに、設計において地震動の空間変動の影響を適切に評価するためにモデル化すべき地盤深さを把握することが重要である。

本検討では不均質地盤モデルによる地震動シミュレーションから得られた隣接地点間における応答波形を解析対象とし、Ritter et al.(1998)[1)]に基づき、地盤の平均S波速度および平均S波速度に対する変動係数、相関距離をパラメータとして、隣接地点間における地震動の空間変動に影響を与える表層地盤の深さを推定する。

２．地震動の空間変動と地盤の不均質パラメータとの関係

Ritter et al.(1998)[1)]は地震動の空間変動 $\varepsilon(f)$ を散乱係数および伝播距離との関係式で示すとともに、Shapiro et al.(1993)[2)]の散乱係数と地盤の不均質性の相関関数との関係式に基づき、$\varepsilon(f)$ を地盤の不均質パラメータとの関係式で表現している。例えば地盤の不均質パターンがガウス型に従う場合、(1)式で表現される。

$$\ln(<\varepsilon(f)^2>+1) = (4\pi^{2.5} \cdot (\sigma^2 a) \cdot L \cdot f^2) / c^2 = \gamma \cdot f^2 \cdots\cdots(1)$$

ここで左辺の$<\varepsilon(f)^2>$のうち、$<\ >$は平均を示す。右辺の σ は不均質地盤における地盤物性の変動係数、aは相関距離、Lは地盤中の地震波の伝播距離すなわち地盤深さ、fは周波数、cは地盤の平均伝播速度を示す。(1)式は地震動の空間変動$<\varepsilon(f)^2>$は係数を γ とするfの2次関数で表現されることを示しているとともに、地盤調査により σ、a、cを把握できた場合、観測記録より$<\varepsilon(f)^2>$が求まれば、Lすなわち$<\varepsilon(f)^2>$に影響を与える地盤深さを推定できることを示している。なお、(1)式は地震動の散乱の程度が強くない範囲において有効であるとしている。

３．不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーション

解析に使用した不均質地盤モデルの例を図 1に示す。本検討では2次元のFEMモデルを使用した。モデルのサイズは水平方向を500m、深さ方向を200mとし、メッシュサイズは1m×1mとした。地盤の平均S波速度は300m/sとし、ガウス型の自己相関関数に従うようにS波速度を変動させ、相関距離は等方的に10m、変動係数は15%とした。また、本検討では初期乱数を変化させることにより、10パターンの地盤モデルを作成した。なお、地盤の内部減衰は0.5%とした。入力地震動はインパルス的な地震動を与えるため、加振時間0.02秒の三角型関数を地盤モデルの底面よりSH方向に平面入射した。応答波は図 1に示すとおり、モデル両端から150mの範囲を除く幅200mの地表面の領域において、1.0m間隔で抽出した。抽出時間は地震動の入力直後より約10秒間とした。また(1)式の $\varepsilon(f)^2$ はRitter et al.(1998)[1)]を参考に、隣接する2観測点より抽出した時刻歴波形の振幅を平均した波形と、もとの波形から平均した波形の差分の波形のパワースペクトル比で定義した。

４．空間変動に影響を与える表層地盤深さ

10種類の不均質地盤モデルより抽出したすべての応答波を対象に、離間距離が5m、10m、15m、30m、60mとなる2観測点の$\ln(<\varepsilon(f)^2>)$とfとの関係を図 2に示す。Ritter et al.(1998)[1)]は$\ln(<\varepsilon(f)^2>)$が0未満の範囲は散乱が強くないとしていることから、本検討では観測点間の離間距離ごとに、$\ln(<\varepsilon(f)^2>)$が0未満の周波数帯を解析対象とした。図2に基づき$\ln(<\varepsilon(f)^2>+1)$とfとの関係を描いた結果を図 3に示す。また解析対象の周波数帯において回帰分析し、$\ln(<\varepsilon(f)^2>+1)$をfの2次関数で表現した結果を図 3に点線で示す。回帰係数により求めた回帰係数を(1)式の γ に代入し、$\sigma^2 a$とLとの関係を描いた結果を図 4に

© 日本地震学会

示す。図 4には本検討で使用した不均質地盤モデルのσ^2aに相当する値を黒の点線で示す。σ^2aおよびLとの関係の線と不均質地盤モデルのσ^2aに相当する黒の点線との交点が地震動の空間変動に影響を与える地盤深さLに相当する。図4に基づき、観測点間の離間距離と地震動の空間変動に影響を与える地盤深さLとの関係を描いた結果を図5に示す。観測点間の離間距離が大きくなるほどLも深くなるが、離間距離が30m以上になると、Lが大きく変化しなくなる傾向が見られる。

参考文献

1) Ritter et al.(1998): Geophys. J. Int., 134, pp.187-198
2) Shapiro et al.(1993): Geophys. J. Int., 114, pp.373-391

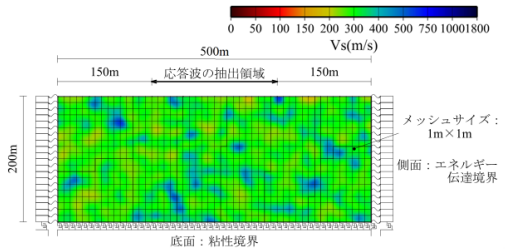


図 1 不均質地盤モデルの例

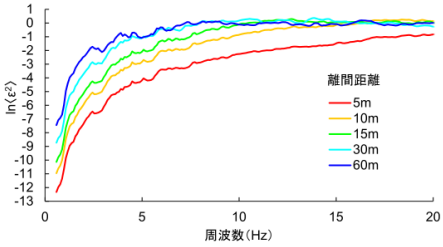


図 2 $\ln\langle\varepsilon(f)^2\rangle$と f との関係

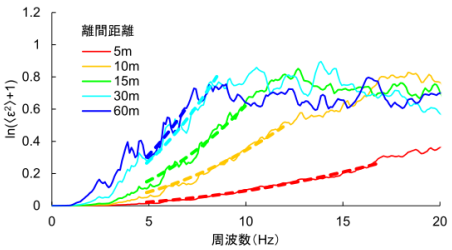


図 3 $\ln\langle\varepsilon(f)^2+1\rangle$と f との関係

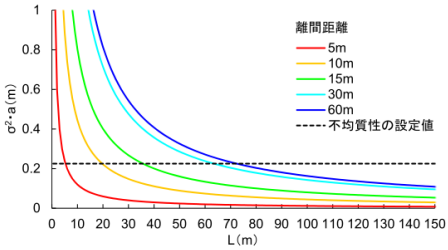


図 4 $\langle\varepsilon(f)^2\rangle$に影響を与える地盤深さ

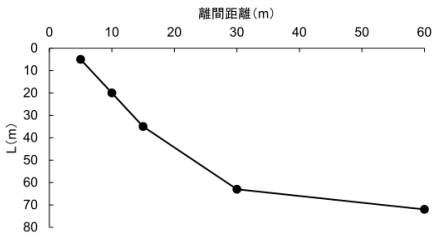


図 5 離間距離と$\langle\varepsilon(f)^2\rangle$に影響を与える地盤深さとの関係

© 日本地震学会

Overview of ground motions on the islands of Kagoshima, Japan -Using seismograph data of Kagoshima Prefecture-

*Nobuyuki Yamada[1], Kimiyuki Asano[2], Tomotaka Iwata[2]

1. Kochi University, 2. DPRI Kyoto University

鹿児島県は，南北約500kmにわたる広範囲に奄美群島，吐噶喇列島，大隅諸島および甑島列島など大小多数の島々を行政区に有する。これらの地域では，沖縄トラフや琉球海溝などでの地震によりたびたび強い揺れに見舞われ，過去には地震被害も発生している（例えば，1911年の喜界島近海の地震M: 8.0[宇佐美(1996)]など）。さらに，将来被害をもたらす地震の発生も危惧され，有人島における地震防災を考える上で，精度の高い地震動評価は必要である。

これら点在する島々には，各市町村に震度観測点（計測震度計は，国際計測器製KSG-T2030）があり，各観測点で得られた加速度波形データ（期間2010年10月～2018年2月）の取りまとめがなされている[地震調査研究推進本部：平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 (2019)]。また，山田(伸)ほか(2018)では，奄美群島と吐噶喇列島の一部での微動アレイ探査を実施しており，深部地盤構造の概略を推定している。こうした経緯から，本研究では，この震度計データを主に活用し，鹿児島県の島嶼部の地震動を概観し，強震観測点の無い島や地域の地震動特性を明らかにするとともに，今後の南西諸島における地震動評価のための一資料とすることを目指す。

鹿児島県が設置する震度計は73地点あり，３成分を１個とした地震動記録数（観測点×イベント数）は3339個で，そのうち，島嶼部のものは，25地点で1312個であった。地点毎の記録数は，十島村小宝島で最多の162個，同村悪石島で112個，反面，十島村平島で9個，三島村硫黄島で8個，同村黒島で3個であり，記録数に偏りは大きい。記録長は，60～90秒前後のものが多い。

本報告の第1段階として，できるだけ多くの震度観測点での記録が得られている地震（最大で12地点で5地震が該当）や記録数の少ない地点の記録を含む地震の計20地震を選び，各島での地震動の性状の把握を行った。この20地震については，防災科学技術研究所のK-NET（計13地点）によるデータも参照した。対象となった地震の中には，2011年11月8日の東シナ海の地震(Mj: 7.0, 深さ217km)や2015年11月14日の九州西方沖の地震(Mj: 7.1，深さ17km)などがあり，2016年4月16日の熊本地震も含めた。地震の発生場所や規模はばらばらであるが，概ね地域単位での地震動特性の把握ができそうである。いくつかの地震の速度波形によると，喜界町(喜界島)や三島村(硫黄島)などは，Ｓ波以降の後続位相が他地点と比して常に顕著であった。これらの島については，例えば，前者は竹中ほか(1997)，後者は山田(雅)ほか(2016)で地震動等についての記載がある。また，これらの記録の一部について，Ｓ波の立ち上がりを目視またはS波速度を3.4 km/s（山田(伸)ほか(2018)の平均基盤速度を利用）として走時を計算して，そこから40.96s間を切り出し，高速フーリエ変換によりスペクトルの水平動成分の合成を上下動で除したスペクトル比(H/V)も計算した。現段階では，H/Vの形態が地震毎にばらつきが大きい地点もあるためデータ区間の設定など再考を要する点があると考えられるが，多くの地点でそのピーク周期は0.2～0.5 s（喜界島や硫黄島は1.0 s前後）であった。今後さらにこれら震度計等のデータの処理と精査を行い，鹿児島県の島嶼部の地震動特性を明らかにするとともに，表層地質や島の成因などを考慮しながら地震動評価のための地盤構造モデルの推定に活用できるか模索したい。

本研究で使用した地震動波形データについて，震度計によるものは，鹿児島県震度情報ネットワークシステム[鹿児島県危機管理局危機管理防災課]によるもの，K-NETのデータは，防災科学技術研究所によるものです。関係者各位に記して感謝申し上げます。

© 日本地震学会

Long-period ground motion simulation in the Kanto region: effects of 3D CMT solutions

*Shunsuke Takemura[1], Kazuo Yoshimoto[2], Katsuhiko Shiomi[3]

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

長周期の変位波形は不均質構造に対してロバストであると考えられており，1次元構造がCMT解析で広く用いられている．しかし，海域などの不均質の強い地域ではその限りではなく，3次元地下構造の考慮が必要であることが報告されている（例えば，Hejrani et al., 2017; Takemura, Okuwaki et al., 2020; Wang & Zhan, 2020）．本研究では， 関東地方で2017年4月から2020年3月の間に発生したMw 4.5以上かつ50 km以浅の地震について，F-net広帯域地震計の記録から得られた周期25-100秒の変位波形を利用したCMT解析実施した．そして，本研究で得られた3次元CMT解を利用した地震動シミュレーションを行い，周期数秒以上の長周期地震動（以下、単に長周期地震動）の再現性を評価した．

3次元CMT解析および長周期地震動シミュレーションでは，全国１次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）を利用し，OpenSWPC（Maeda et al., 2017）により地震波伝播を評価した．CMT解の推定には，Takemura, Okuwaki et al. (2020)のグリッドサーチ3次元CMT解析手法を採用した．関東平野における長周期地震動の観測記録とシミュレーション結果の比較にはMeSO-netの記録を利用した．手法やシミュレーションに関する詳細は，Takemura, Yoshimoto & Shiomi (2020)に記されている．

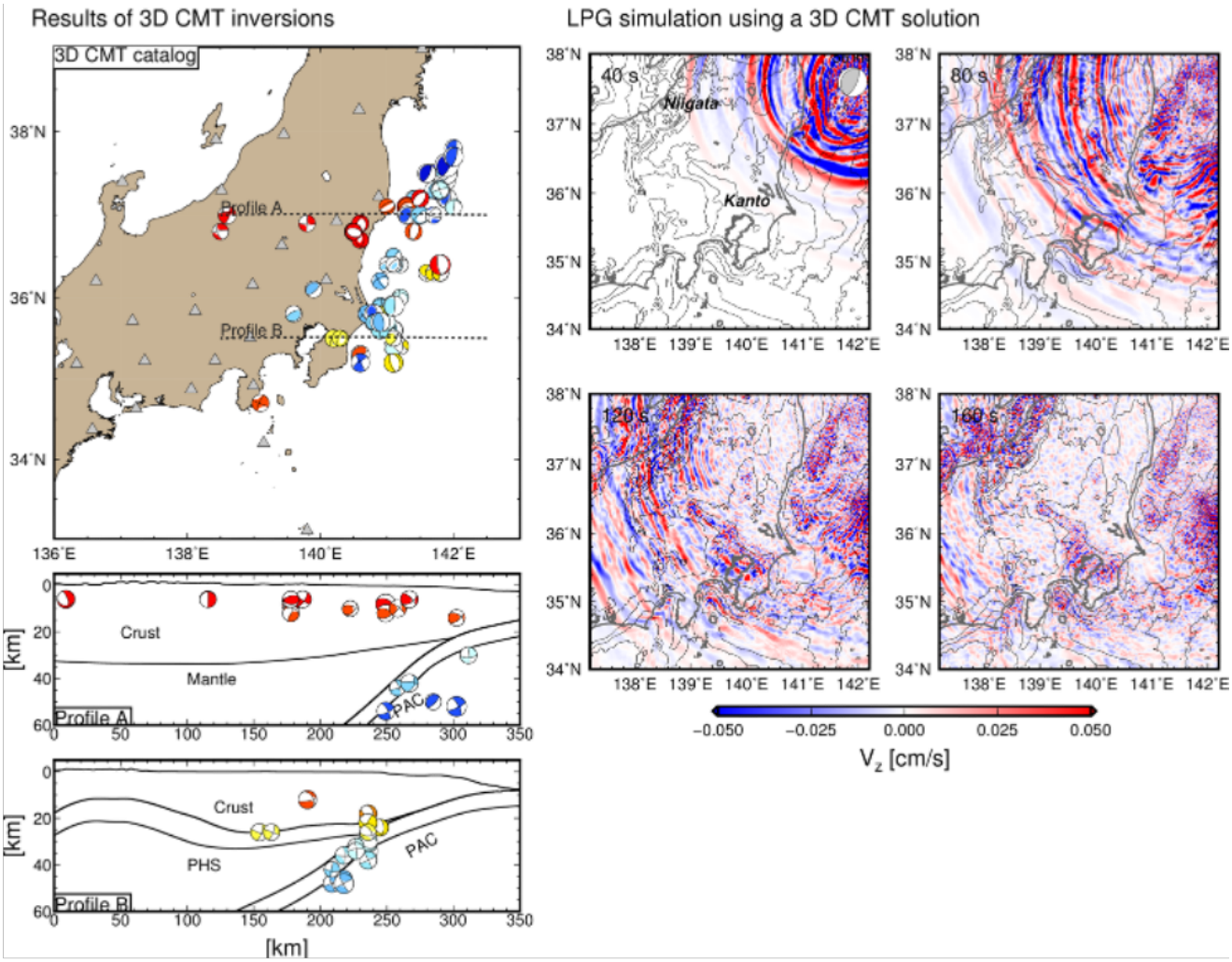
本研究による3次元CMT解（図左側）とF-net MT解を比較すると，震源の深さやメカニズム解に大きな差はなかった．しかし，3次元CMT解では，特にスラブ内で発生する地震についてMwがF-net MT解と比較して最大で0.3程度異なることがわかった．Takemura, Okuwaki et al. (2020)による南海トラフの3次元 CMTカタログでも同様の傾向が見られた．F-net 1次元構造（Kubo et al. 2002）を含む様々な不均質構造を用いた地震動シミュレーションにより，スラブ内地震で見られたF-net MT解と3次元 CMT解のMwの差は，震源域の剛性率構造に起因することが明らかになった．3次元地下構造モデルでは沈み込む海洋性地殻（低剛性率体）と海洋性マントル（高剛性率体）が含まれているのに対し，1次元構造ではMoho面以深では一様な剛性率構造となっており，そのためにMwの推定で系統的な差異が発生した．Mwの大きさは地震動シミュレーションの地震動の振幅と直接的に関係する．本研究の結果は，正確な長周期地震動のモデル化を目指すには，利用する3次元地下構造モデルに調整されたCMT解（例えば，3次元CMT解）を利用する必要があることを示唆している．本研究による3次元CMT解を利用した地震動シミュレーション（図右側）は，CMT解析に使用していないMeSO-net観測点との比較を含め，周期10秒以上の長周期地震動を概ね再現することに成功した．

手法とCMTカタログに関する参考文献

Takemura, Okuwaki et al., 2020 GJI https://doi.org/10.1093/gji/ggaa238
Takemura, Yoshimoto & Shiomi 2020 https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-43689/v1
本研究によるCMTカタログ https://doi.org/10.5281/zenodo.3926883

謝辞　防災科学技術研究所F-net（https://doi.org/10.17598/NIED.0005）とMeSO-netの波形記録を利用しました．地震動計算には東京大学地震研究所　地震火山情報センターの計算機システムおよび東京大学　情報基盤センターのOakforest-PACSを利用しました。本研究は、東京大学地震研究所 共同利用（2020-S-04）およびJSPS科研費19H04626により実施されました。

© 日本地震学会



図．３次元CMT解析および長周期地震動シミュレーションの結果．右側は本研究で得られた3次元CMT解の分布図．プロファイルAおよびBの断面におけるプレート構造は全国１次地下構造モデル（Koketsu et al. 2012）を参照．左側は2019年8月4日に発生したMw6.3の地震の3次元CMT解を利用した地震動シミュレーションの結果．上下動成分の速度場のスナップショットを示し，背景の等深線は全国１次地下構造モデルの地震基盤深度．

© 日本地震学会

Influence of Seismic Source Locations of Interplate Earthquake along the Nankai Trough on Long-Period Ground Motions in Osaka Bay Area

*Tomohiro Oguchi[1], Masayuki Nagano[2]

1. Tokyo University of Science Graduate School , 2. Tokyo University of Science

2011年東北地方太平洋沖地震 (以下，3.11本震) の際には，震源から遠く離れた大阪湾沿岸部で周期6～8秒の成分が卓越する長周期地震動が発生した。これにより，超高層建物内で国内最大級の応答変位が観測され，スプリンクラーの破損やエレベーターの停止などの建物被害の発生が報告された。3.11本震時の強震記録の分析や計算から，大阪平野内の堆積地盤により沿岸部で周期6～8秒の地震動成分が増幅したことが指摘されている。今後，南海トラフを震源とするM 8～9クラスの巨大プレート境界地震の発生が危惧されている中で，2025年には大阪府夢洲において大阪・関西万博の開催が予定されており，大阪湾沿岸部での地震動予測は重要な課題といえる。

不整形な地盤構造を有する堆積平野では長周期地震動の最大振幅や卓越周期が震源位置によって変動することが指摘されており，変動の一因として不整形な地盤構造への地震波の入射方向による伝播経路の違いが挙げられている。大阪平野は上町断層帯などが伏在する複雑な地盤構造を有しており，震源位置によって長周期地震動の性状が変動することが推察される。天藤・他 (2015) は大阪湾沿岸部における長周期地震動の地震波入射方向の影響について，水平SH波入射による地盤応答解析を三次元差分法により行い，南海トラフ沿いを想定した方向から地震波が入射した場合，3.11本震時と比較して長周期地震動が励起される可能性を示唆している。一方，南海トラフ沿いで発生するプレート境界地震について，断層面内の震源位置が大阪湾沿岸部における長周期地震動評価に与える影響を評価した例は少ない。

本稿では、図1に示す大阪湾沿岸部の埋立地に位置するKiK-net此花 (OSKH02) を対象地点とし，南海トラフ沿いで発生するプレート境界地震の震源位置が大阪湾沿岸部における影響を数値計算により評価した。大阪平野の堆積層やプレート境界の地盤構造を考慮した地震動評価には三次元差分法[永野(2004)]を利用し，相反定理に基づき多数の震源点に対するグリーン関数を算定し地震動を評価した。震源位置が与える影響を検討するため，震源は全て点震源とし，フィリピン海プレートの上面付近に震央位置を10km間隔で設定した。震源域は，地震調査研究推進本部 (2013) において示された，南海トラフ沿いの想定震源域とした。以上より，計算された速度波形について水平二方向の合成を行い，それぞれの震源での最大速度を求めることで震源位置が与える影響を評価した(図2)。設定した震源の中から，図2に示す震源1および震源2を選択し，通常の三次元差分法を用いた順解析を行った(図3および図4)。以下に得られた知見をまとめる。①僅かな震源位置の違いで，OSKH02および大阪平野内の地震動の空間分布が大きく変動した(図2～図4)。②特にOSKH02の南東方向の位置からの地震動が大きく増幅した。南北方向に縞状の速度分布がみられた(図2)。③南海トラフ沿いの付加体(図5)を地震基盤(V_S=3200m/s)に置換したところ，縞状の速度分布はみられなかった(図6)。

図の作成にGMT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。

© 日本地震学会

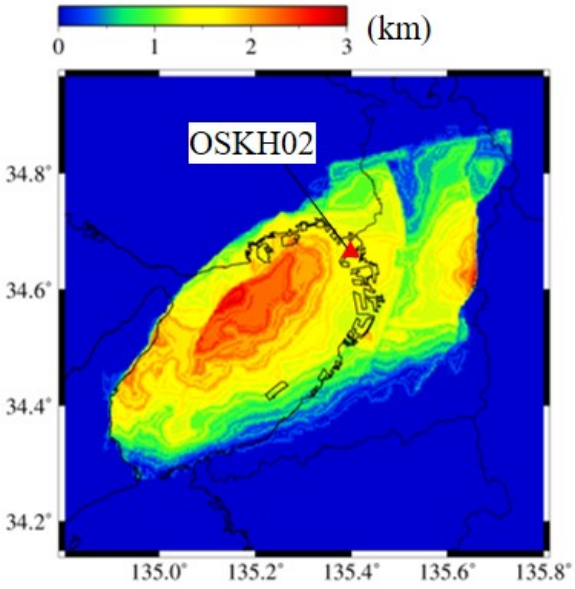


図1　大阪湾沿岸部の地震基盤深さ

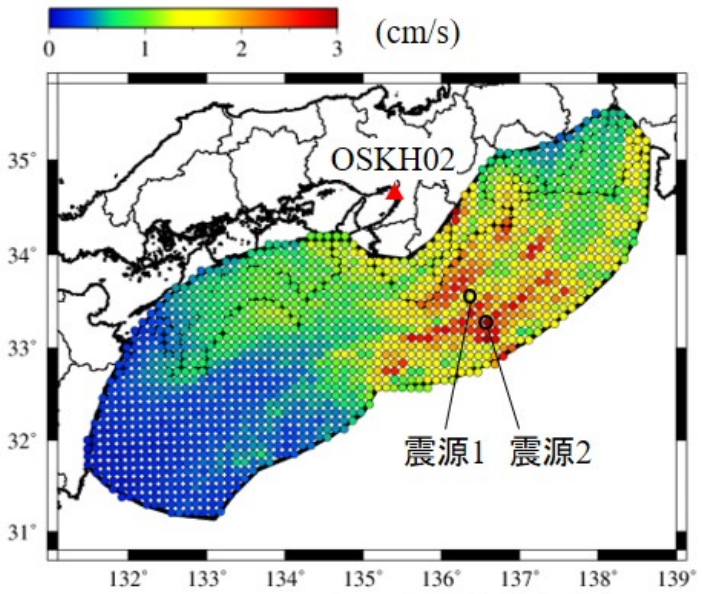


図2　OSKH02における最大速度分布

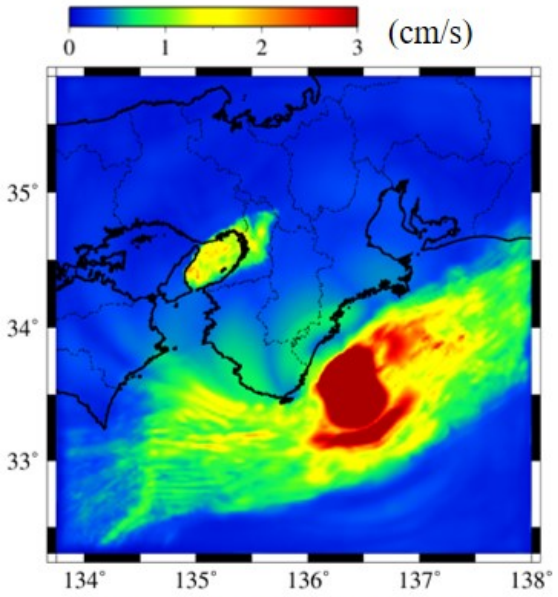


図3　震源1の地表面最大速度

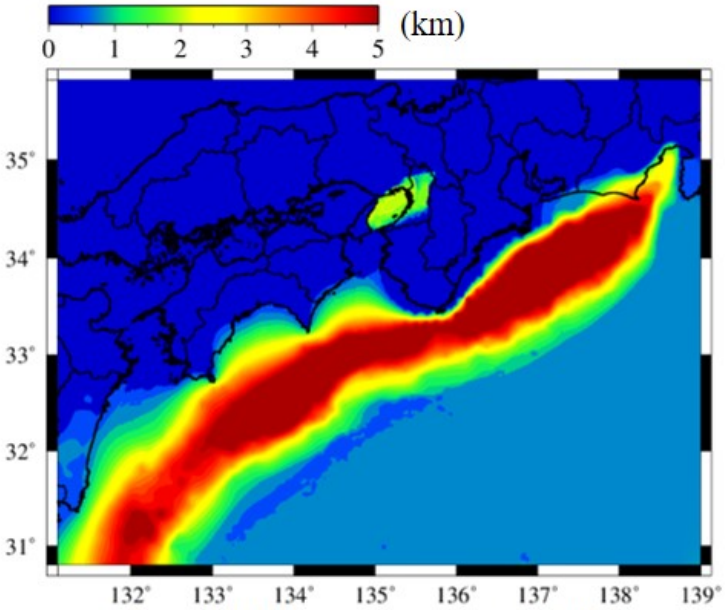


図5　付加体 (V_S=1000m/s) 下面深さ

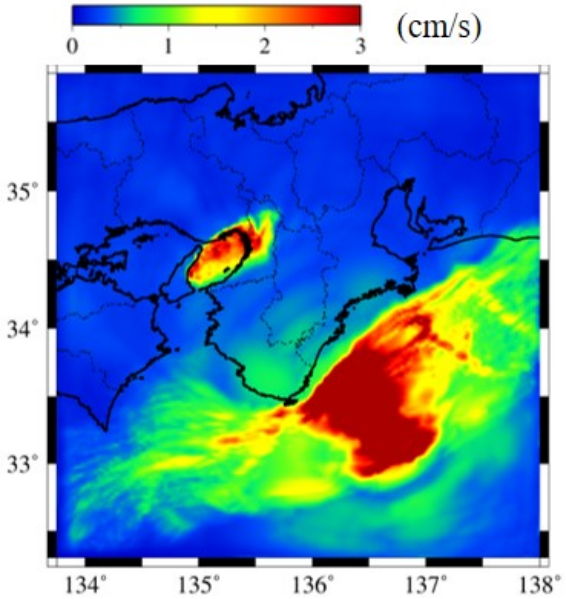


図4　震源2の地表面最大速度

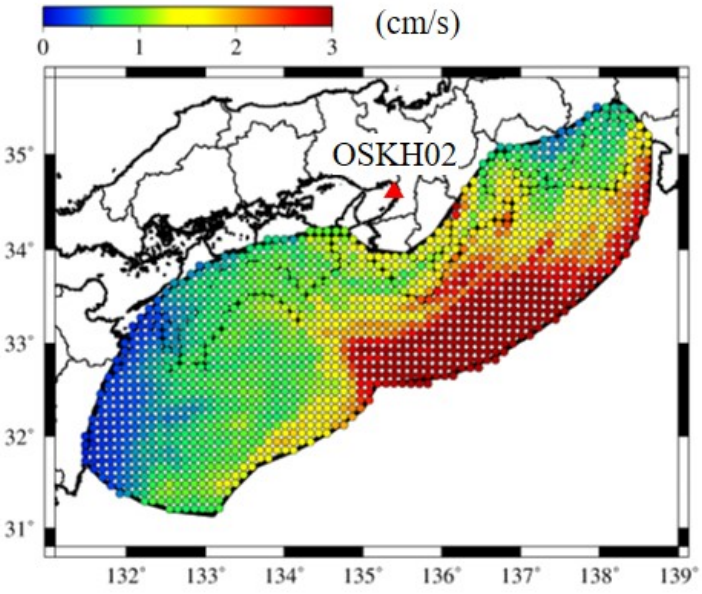


図6　付加体を地震基盤に置換した場合の
OSKH02における最大速度分布

© 日本地震学会

Microtremor Array Surveys in and around the Lowland Area along the Kizu River, Kyoto

*Kimiyuki Asano[1], Masayuki Yoshimi[2], Tomotaka Iwata[1], Hirotoshi Uebayashi[3], Michihiro Ohori[4], Haruko Sekiguchi[1], Hiro Nimiya[2], Tatsuya Noguchi[5]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSJ/AIST, 3. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 4. Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, 5. Faculty of Engineering, Tottori University

文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」（代表：岩田知孝）サブテーマ3では，奈良盆地東縁断層帯が活動した場合の強震動予測の高度化を目指し，京都盆地や奈良盆地における地盤構造の調査とモデル化のための研究を進めている．京都盆地においては，京都市内から巨椋池にかけての15地点で大半径の微動アレイ探査［京都市, 2001］がなされ，基盤までのS波速度構造が調査されているものの，京都府南部の木津川沿いの低地帯周辺では，これまで深部までのS波速度構造を把握するための調査はほとんどなされていなかった．本研究では，木津川低地での深部地盤構造モデルの改訂に資するため，京都府南部の木津川沿いの低地帯で最小半径0.6 mから最大半径500～600 mまでの微動アレイ観測を実施し，各地点のS波速度構造モデルを推定した．観測計画やアレイ設計を吉見が主に担当し，解析を浅野が主に担当した．微動観測や結果の議論には著者全員が参加した．

微動アレイ観測は，久世郡久御山町佐山から木津川市木津にかけての6地点（KZ01～KZ06）で実施した（Fig. 1）．現地での観測は，2020年3月5～7日に実施した．また，データを補うための追加調査を2020年7月15日に実施した．追加調査では比較のため，KZ06の約2 km南に位置する丘陵上の奈良市佐保台（SHD）でも新たに微動アレイ観測（アレイ半径 2～300 m）を行った．微動観測システムは東京測振製速度計SE-321（5 V/(cm/s)）と白山工業製収録装置LS-8800（アンプゲイン8倍）を組み合わせたシステムを主に使用した．小半径のアレイの一部では白山工業製ポータブル微動観測装置JU410（2 V/G，アンプゲイン100倍）を使用した．サンプリング周波数は200 Hzとした．いずれも正三角形アレイによる4点同時観測とし，アレイ半径を変えて1地点あたり6～7組の観測を行った．アレイ設計に際しては，竿本・吉見(2020)による微動アレイ探査における地震計設置場所選定プログラムを使用した．プログラムに必要なOpenStreetMapの道路情報が不足していた地域（農地など）については，地図情報を追加した．観測はすべて日中に行い，半径10 m以下の小アレイでは少なくとも20分以上，中規模の半径のアレイでは30分以上，半径200 m以上の大アレイでは1時間以上測定した．

微動アレイ観測で得られた上下動記録にSPAC法を適用し，位相速度を推定した．例えば，1 Hzでの位相速度を比べると，北からKZ01とKZ02では約0.7 km/s，KZ03とKZ04では約1.2～1.3 km/s，KZ05では約0.9 km/s，KZ06とSHDでは約1.0 km/sと地域による違いが見られた．なお，KZ06とSHDの分散曲線は低周波数帯（< 1.5 Hz）では似ており，丘陵部と低地で深部構造の違いは小さい可能性がある．木津川沿いの低地帯での高周波数側（約10～20 Hz）の位相速度は，各地点で0.10～0.15 km/sであり，木津川沿いの沖積層の存在に対応する．

位相速度分散曲線をRayleigh波基本モードでモデル化することにより，各地点の一次元S波速度構造を推定した．J-SHIS V2やJIVSMなどを参考にして，層構造モデルを仮定した上で，第1層からV_S 2.7 km/s層までの各層の層厚と第1層のV_SをMCMC法で推定した．上部地殻はJ-SHIS V2，上部／下部地殻境界～上部マントルはJIVSMから一次元構造として与えられるモデルに固定した．V_S 2.7 km/s層の上面深度は，KZ01とKZ02では約640～650 mと深く（参考：京都盆地最深部の巨椋池での基盤深度は約700 m［京都市, 2003］），木津川沿いのKZ03，KZ05，KZ06とSHDでは約400～440 mの深さと推定された．KZ04ではより浅い．推定された基盤深度は既往の反射法探査結果［横倉・他, 2002; 京都府, 2006］とも大きく矛盾しないものであった．木津

© 日本地震学会

川左岸の相楽郡精華町周辺のKZ05では，V_S 0.8～0.9 km/sの層が堆積層全体に占める割合（約80%）が，低地帯の他の地点（59～66%）に比べて大きかった．この地点付近では，大阪層群の最下部層の占める割合が相対的に大きいのではないかと推測される．

今後，本研究の微動アレイ探査結果やその他の調査結果（反射法地震探査，ボーリング資料など）を取り入れて，奈良盆地東縁断層帯周辺の3次元地盤構造モデルの改訂が進められていく予定である．
謝辞：本研究は文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」の一環で実施しました．現地での微動アレイ観測では，対象地域の土地改良区や実行組合はじめ，地域の皆様にお世話になりました．記して感謝いたします．

© 日本地震学会

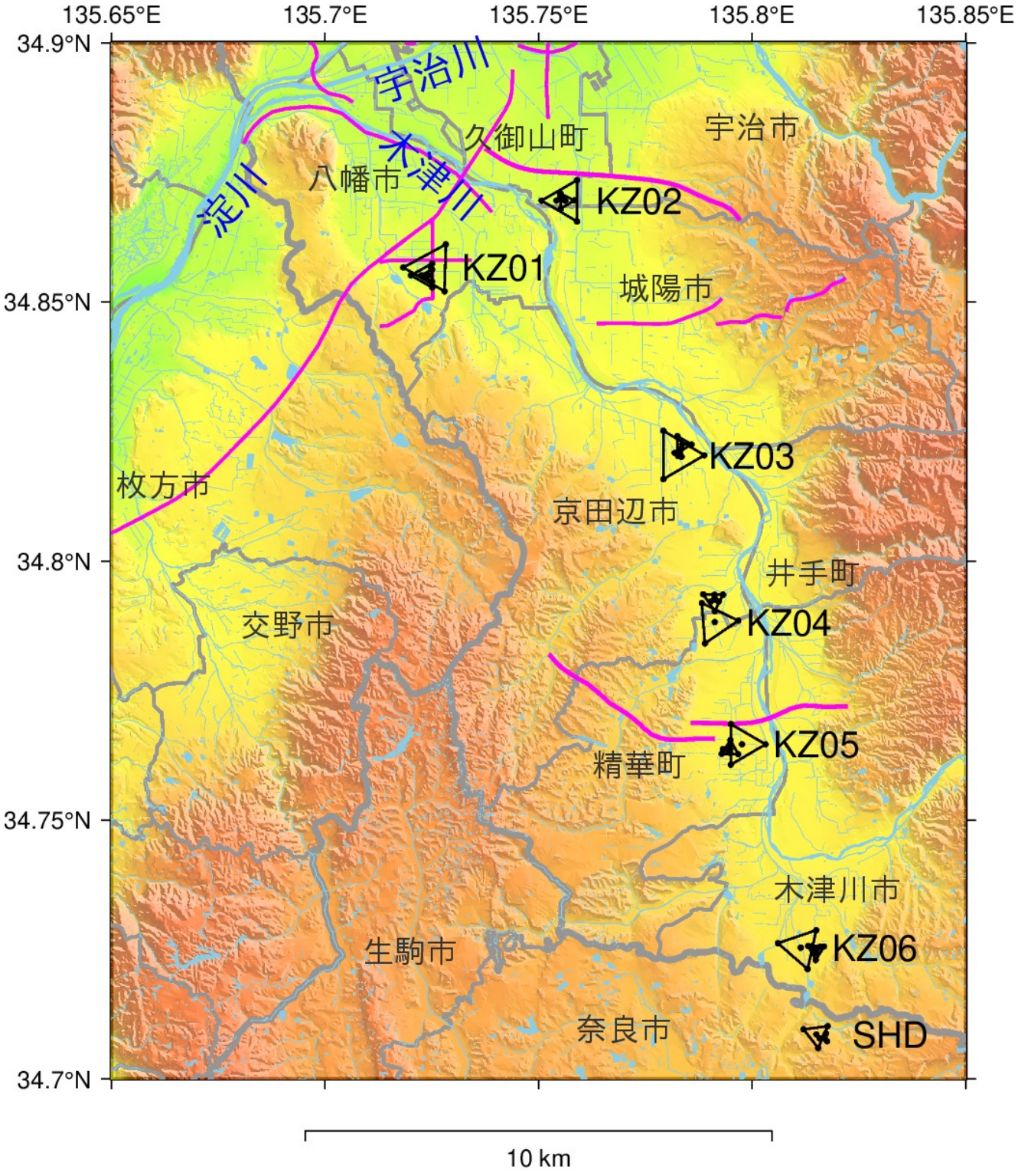


Fig.1: Map of the microtremor array survey sites along the Kizu river, Kyoto. The purple lines represent the seismic reflection survey lines in the literature.

© 日本地震学会

Microtremor array surveys on the Eastern Part of the Nara Basin, Japan

*Masayuki YOSHIMI[1], Kimiyuki ASANO[2], Tomotaka IWATA[2], Hiro NIMIYA[1], Takeshi SUGIYAMA

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. DPRI, Kyoto university

文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」（代表：岩田知孝）サブテーマ2では，奈良盆地東縁断層帯の地殻活動の現状把握に基づく震源断層形状と活動形態の推定を目的とした研究を進めている．奈良盆地東縁断層帯のうち奈良盆地周辺部に着目すると，奈良盆地の北部では断層・撓曲が東西3 kmに渡って並走するが，南端の桜井付近では0.5 kmほどの幅に収斂する．これらの断層位置は主に変動地形により判断されており，その実在を検討するには基盤岩の高度分布の推定も重要である．天理市帯解地区にて実施されたP波反射法地震探査（奥村ほか，1997）では，分岐断層・撓曲に対応した基盤岩の高度差が明瞭に見いだされた．そこで，基盤岩深度を推定するため，奈良盆地内の断層・撓曲をまたぐ３測線（帯解測線：NRO，天理測線：NRT，桜井測線：NRS）にて微動アレイ探査を実施した．帯解測線（NRO）は反射法測線とその延長に沿うよう設定し，天理測線（NRT）はNROの約5 km南，桜井測線（NRS）はさらに約10 km南に設定した．測線は東西走向で，それぞれの測線に断層線を跨がないよう５つの観測アレイを配置した．奈良盆地の基盤深度は１km以内であると推定されることから，最大半径を400 mとし，７点同時観測の大アレイと，半径4 m～60 mの４点正三角形アレイを設定した．観測には，３成分速度計（東京測振製SE-321，5V/kine，固有周期10秒）を小型低消費電力データロガー（白山工業製 LS-8800，GPS時刻校正，24 bit AD変換）に接続し，サンプリング周波数200 Hz，最小位相フィルター，8倍アンプをかけてデータ収録した．なお，全観測点にてX方向を磁北に合わせ，水平動を用いた解析にも対応するようにした．長時間の観測にあたっては微動計をバケツで覆い風雨等の影響を避けた．観測は夜間に大半径観測を，昼間に小半径観測を実施した．観測日は2020年1月20日から2月5日である．

微動アレイ観測で得られた速度時刻歴データについて，微動アレイ解析ツール「BIDO2.0」ソフトウェアを用いて解析した．ここでは，Rayleigh波を対象とし，観測記録のうち上下動成分のみを解析に用いた．大アレイ（半径150 m以上）のデータは20.48秒（データ数4096）を小アレイのデータは10.24秒（データ数2048）を基本区間長として波形を切り出し，SPAC法にて解析した．その結果，概ね0.5 Hzから20 Hzの周波数範囲で，0.2 km/sから2 km/sの観測位相速度が抽出された．活断層位置より東に位置する各測線の東端の観測アレイ（NRO-1，NRT-1，NRS-1）の位相速度は他点よりも大きく，深い地下構造を反映する低周波数側（概ね2 Hz以下）の位相速度は，概ね断層から離れるほど小さくなる傾向が見いだされた．

観測位相速度をもとに，山中・石田（1995）の遺伝的アルゴリズムにより1次元Ｓ波速度構造モデルを探索した．探索する速度構造の設定においては，奈良盆地では大阪層群下部および最下部の比較的硬い堆積層が厚く分布することからVs=600 m/s以上の層が厚いＳ波速度構造を想定した．暫定的な結果ではあるが，帯解測線ではNRO-1からNRO-3にかけて基盤深度が増大する反射法探査結果と矛盾しない基盤深度が推定された．天理測線，桜井測線では推定断層位置を境にした基盤深度の違いについては，今後精査を進める予定である．

謝辞

この研究は文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」の一環として実施されたものです．微動アレイ観測にあたっては，天理市，大和郡山市，桜井市，田原本町および地域の方々のご協力をいただきました．

参考文献

奥村晃史・寒川 旭・須貝俊彦・高田将志・相馬秀廣，奈良盆地東縁断層系の総合調査，平成8年度活断層研究調査概要報告書, 地質調査所研究資料集，51-62，1997.

関口春子・浅野公之・岩田知孝，奈良盆地の３次元速度構造モデルの構築と検証，地質学雑誌，125，715–730，2019.

Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of

© 日本地震学会

Technology.(http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publications/Doc/conference_7th.pdf)，2010.
山中浩明・石田 寛，遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，466，9-17，1995

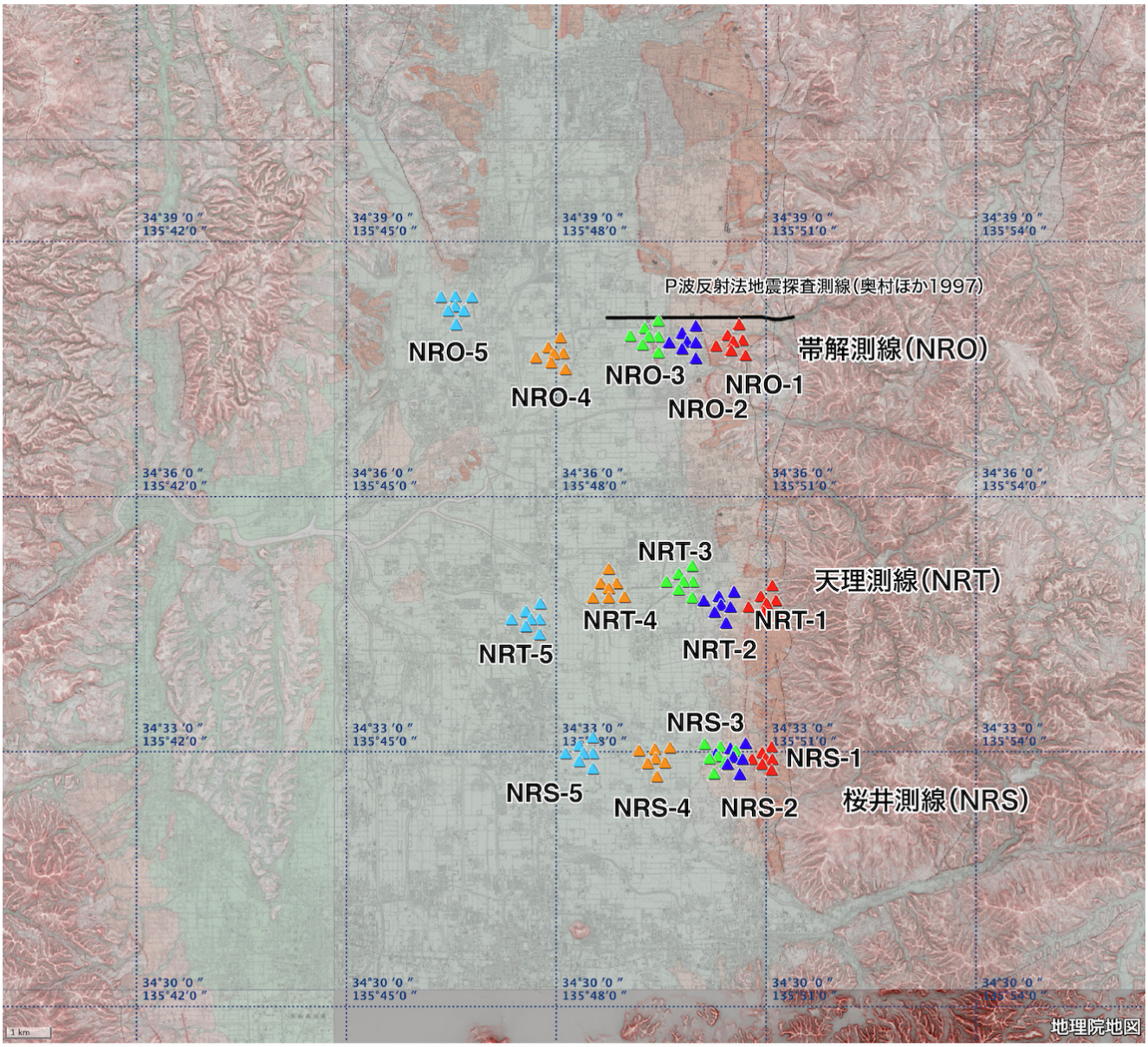


Fig 1: Location map of the microtremor array surveys on the eastern part of the Nara Basin. (GSi Map service is used.)

© 日本地震学会

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

*Isamu Nishimura[1], Tatsuya Noguchi[2], Yusuke Ono[2], Masanori Kohno[2]

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

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

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

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

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

本研究は日本学術振興会科研費18H01523の助成を受けたものです．

© 日本地震学会

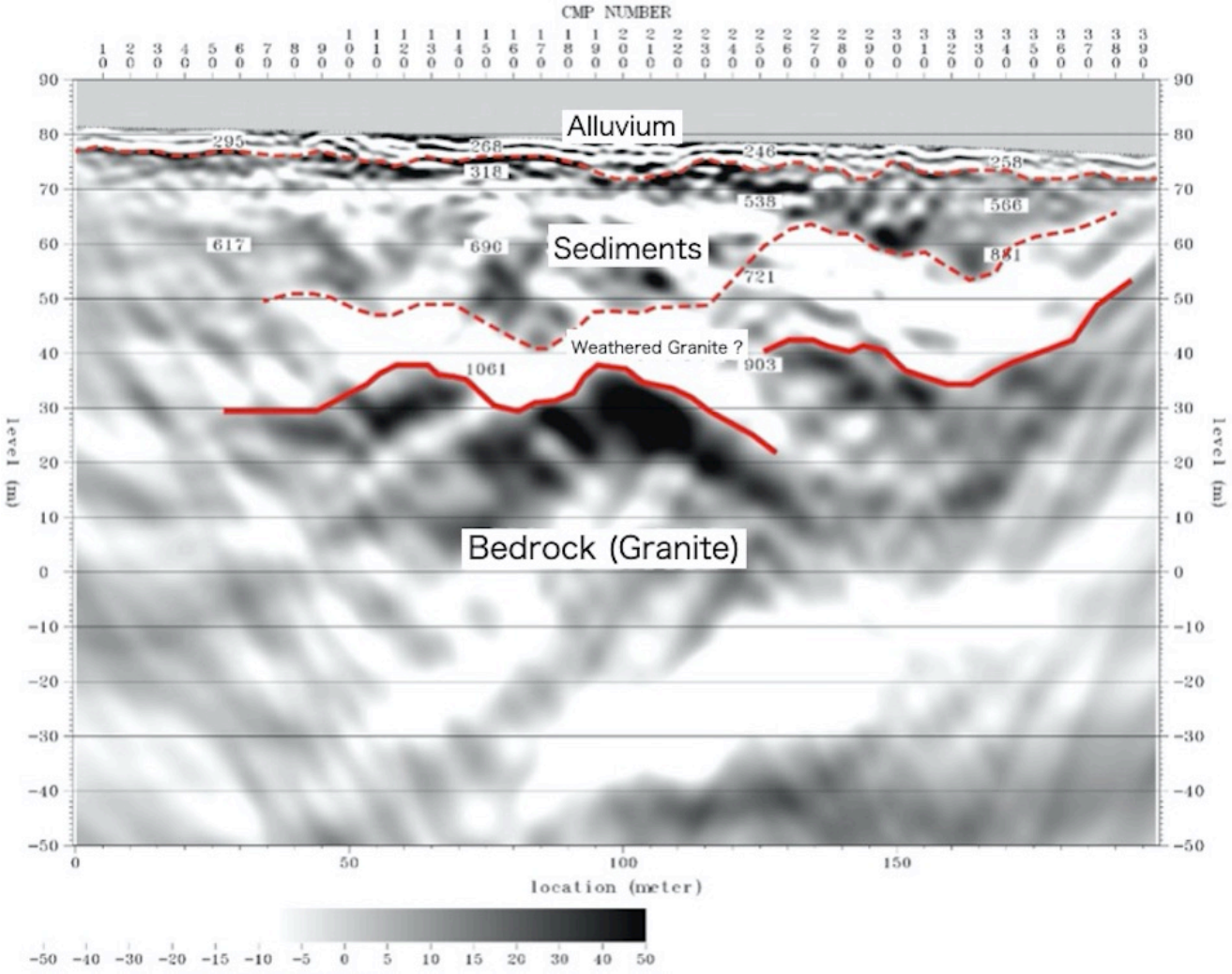
S wave seismic reflection and microtremor surveys on the Shikano fault appeared in the 1943 Tottori earthquake

*Takao Kagawa[1], Tatsuya Noguchi[1], Koji Yamada[2], Tetsuya Takameoto[2]

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

１．はじめに
1943年鳥取地震（Mj7.2）では，震源断層の東側にあたる鳥取市街において，倒壊率からは震度7に相当する被害を生じた。東側には地表地震断層が現れなかったが，西側では明瞭な地表地震断層として吉岡・鹿野断層が断続的に出現した。鹿野断層の西縁部にあたる鳥取市鹿野町法楽寺地区では，家屋の基礎が断層変位によって寸断されたものの，揺れによる倒壊を免れた事例が残されている。一方，この断層出現位置からやや離れた鹿野町中心部では多くの家屋倒壊が発生した。
２．調査の概要
今回，鹿野町法楽寺地区の上記地表地震断層出現部を横断して，Ｓ波反射法地震探査および常時微動探査を実施した。S波震源には油圧による板叩き機材を用い，ショット間隔１ｍ，地震計間隔１ｍで，0.5ｍの共通中間点（CMP）の記録を，測線長200ｍにわたって取得した。あわせて，同測線周辺において常時微動を用いた単点３成分観測およびアレイ観測を実施し，卓越周期の変化と浅層地盤構造を推定したので，その結果を報告する。
３．解析結果
得られデータに一般的に反射法解析処理を施したS波反射断面（図）からは，鹿野断層に相当するCMP番号（200）付近で表層部の乱れが確認されたが，鹿野断層が横ずれを主とするため明瞭な段差構造は見られなかった。深さ45ｍあたりに強い反射面が確認され，速度解析によって得られたそれ以浅のＳ波速度から，この反射面が常時微動探査から得られた卓越周期に対応しているものと考えられる。また，反射法探査で得られたデータの多チャンネル表面波探査（MASW）解析による位相速度と微動アレイによる位相速度も良く対応しており，反射断面で得られた浅層地下構造を常時微動を用いて周辺に外挿することで，より広範囲の地下構造をモデル化することが期待される。
４．おわりに
今回の調査では，S波人工震源によるショット波形を，反射法地震探査測線上のピックアップだけでなく常時微動３成分観測用の複数の微動計でも取得しており，これらを用いて地表地震断層ごく近傍での地盤震動特性，地表地震断層を通過した波動の変化などについて総合的な解釈を試みたい。
謝辞：本研究は日本学術振興会科研費 19H02406の助成を受けたものです。

© 日本地震学会


CMP NUMBER
Alluvium
Sediments
Weathered Granite ?
Bedrock (Granite)
295
268
318
246
538
258
566
617
690
721
881
1061
903
level (m)
location (meter)

© 日本地震学会

Estimation of gravity basement structure in the central Tottori, Japan

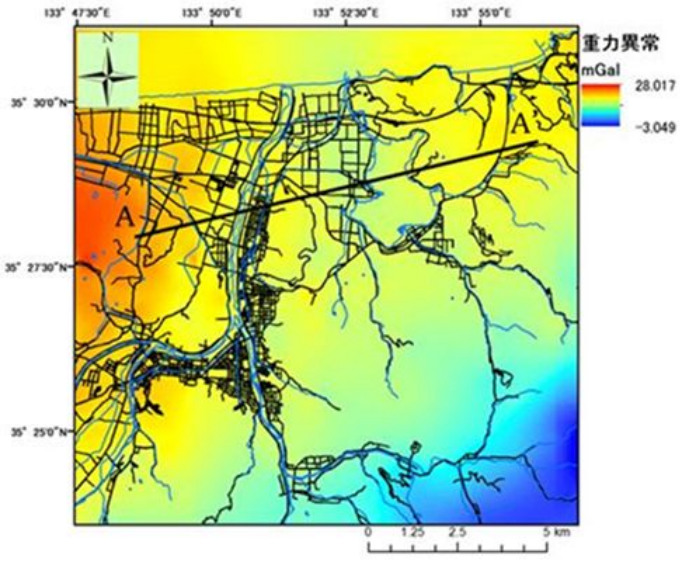
*Tatsuya Noguchi[1], Isamu Nishimura[1], Takao Kagawa[1]

1. Tottori University

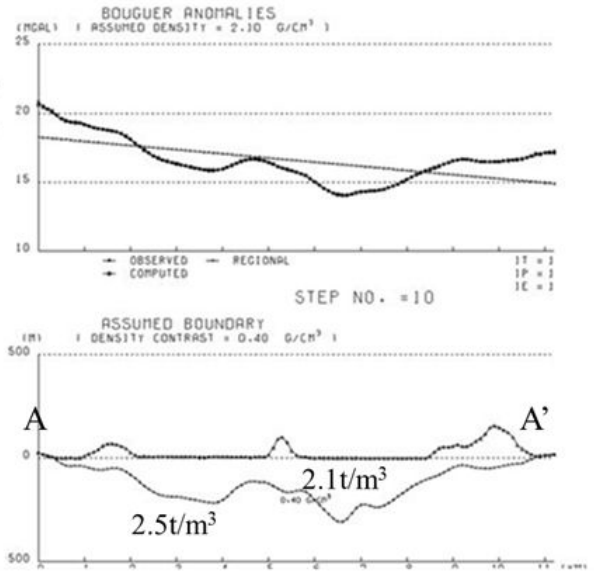
鳥取県中部では2016年鳥取県中部の地震が発生し，広範囲で建物被害が発生した．被害要因を検討や地震動評価を行うためには，地盤構造の情報が必要となる．この地域では，微動観測や重力観測（例えば，野口・香川，2014），鳥取県中部の地震直後には臨時余震（強震）観測（野口他，2019）が実施され，それらのデータに基づき，地盤構造の推定がなされている．本研究では，既往の重力異常データを用いて，微動観測や余震観測による地盤構造モデルを参考にして，各層に対応する層境界を拡張することにより基盤構造を推定した．

重力基盤のモデルとしては，3層の密度構造モデルを想定し，重力異常を用いた2次元解析を行った．各層の密度としては，第1層を2.1t/m^3（Vs=100～500m/s層に相当），第2層を2.2t/m^3（Vs=700m/s～1300m/s層に相当），第3層を2.5t/m^3（Vs=2500m/s層に相当）と仮定した．地震観測点での微動および余震観測に基づく地盤構造モデルより，仮定した密度に対応する層までの基盤深度を参考に，重力異常を説明するように試行錯誤で密度構造モデルを推定した．また，微動や地震動による結果を融合的に用いて，3次元構造に拡張する方法も試みた．さらに，得られた基盤構造の基盤面起伏と地震による被害分布との関係も調べた．

参考文献：野口・香川（2014）：土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.70，No.4，[特]地震工学論文集，野口・他（2019）：日本地震工学会論文集，特集号「第15回日本地震工学シンポジウム」その2，19巻，6号．



ブーゲー異常図（仮定密度：2.5t/m^3）



2次元解析結果（2層均質モデル）

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S17. Tsunami

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S17P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-01] Tsunami heights along the Sea of Japan coast from active faults off-Hokkaido and off-Tohoku

○Kenji Satake[1], Iyan Mulia[1], Tomoko Goto[1], Satoko Murotani[2], Takeo Ishibe[3] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Museum of Nature and Science, 3.Association for the Development of Earthquake Prediction)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-02] Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for the Sea of Japan

○Iyan Mulia[1], Takeo Ishibe[2], Kenji Satake[1], Aditya Gusman[3], Satoko Murotani[4] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction, 3.GNS Science, 4.National Museum of Nature and Science)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-03] Consideration of tsunami source of the AD1662 Hyuga-nada earthquake occurred off Miyazaki Prefecture

○Kei Ioki[1], Yusuke Yamashita[2], Yoshihiro Kase[3] (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Miyazaki Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Takuya Saito[1], Toru Takeda[1], Kei Yamashita[2], Toshitaka Baba[1] (1.Tokushima University, 2.Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-05] Characteristics of the 1854 Tokai and Nankai Tsunamis Observed at West Coast of North America

○Satoshi Kusumoto[1], Kentaro Imai[1], Ryoko Obayashi[1], Narumi Takahashi[1,2], Takane Hori[1] (1.JAMSTEC, 2.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-06] Kinematic behavior of fault segments near the trench based on tsunami inversion source models of the 2011 Tohoku earthquake

○Yoshinori Satou[1], Masanobu Koba[2], Masafumi Matsuyama[3], Hayato Mori[4] (1.Unic, 2.EGC, 3.CRIEPI, 4.CEPCO)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-07] Sensitivity of tsunami height distribution to fault model parameters based on the 2016 off Fukushima earthquake

○Yutaka HAYASHI[1] (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-08] Quantitative evaluation of conventional magnitudes for the slow tsunami earthquakes in case of occurrence near Japan

○Takahito Nishimiya[1], Akio Katsumata[1] (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Ayumu Mizutani[1], Kiyoshi Yomogida[1] (1.Hokkaido Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-10] Real-time tsunami inundation forecast based on the multi-index method examined considering several source models

○Wataru Suzuki[1], Naotaka Chikasada[1], Takayuki Miyoshi[1], Shin Aoi[1] (1.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

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

○Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[1] (1.Tokushima University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S17P-12] Real-time forecast of near-field tsunami decay based on linear regression to tide-gauge data

○Hiroaki TSUSHIMA[1] (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Tsunami heights along the Sea of Japan coast from active faults off-Hokkaido and off-Tohoku

*Kenji Satake[1], Iyan Mulia[1], Tomoko Goto[1], Satoko Murotani[2], Takeo Ishibe[3]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Museum of Nature and Science, 3. Association for the Development of Earthquake Prediction

平成25年度～令和2年度にかけて実施されている、文部科学省受託研究「日本海地震・津波調査プロジェクト」（以下、日本海PJ）では、陸域・海域での構造調査や古地震・古津波・活構造調査などに基づき得られた断層モデルから日本海沿岸における津波シミュレーションにより日本沿岸での津波高を予測するとともに、個々の断層モデルに基づくシナリオモデルの他に、各地に影響を及ぼす可能性のある断層からのシナリオを組み合わせた確率論的な津波予測を実施している（Mulia・他，2020；本大会）。これまで、北陸沖海域（Gusman・他， 2016；地震学会秋季大会）、北陸沖～山陰沖（Gusman・他，2017；地震学会秋季大会）、山陰沖～九州沖（佐竹・他，2018；地震学会秋季大会）の海底活断層よる津波シミュレーションを実施し、その津波高について整理してきた。

本研究では、北海道沖から東北沖の海底活断層を対象としてシナリオ型津波シミュレーションを実施し、日本海沿岸部における津波高分布を調査した。これらのうち、北海道沖に対しては断層長が20 km 以上の断層に対してそれぞれの断層が単独で活動すると想定した41 モデル、長さ20 km 以下の断層も含めて複数の断層・セグメントが連動する28 モデルの合計69 モデルに対し、津波伝播解析を実施した。一方、東北沖に対しては単独67モデル、連動123モデルに対して実施した。

断層すべり量については、地震調査研究推進本部地震調査委員会による震源断層を特定した地震の強震動予測手法 （以下「レシピ」）による①入倉・三宅（2001；地学雑誌）式（以下、旧レシピ（ア））、②松田（1975；地震）式＋武村（1990；地震）式（以下、レシピ（イ））、ならびに③武村（1998；地震）式の3通りのスケーリング則から算定し、その影響について調査した。「レシピ」は、日本海PJの実施期間中に改訂され、断層面積が1800 (km^2) 以上となる断層に対して、第3 ステージのスケーリング則（Murotani *et al.*, 2015；PAGEOPH）が導入された（以下、レシピ（ア））。そのため、北海道沖は旧レシピ（ア）によってすべり量を計算していたが、断層面積が1800 (km^2) 以上に該当する断層モデル（単独4 モデル、連動23 モデル）に対しては、レシピ（ア）によるすべり量を用いた津波伝播計算についても実施した。なお、レシピ（イ）によるすべり量ならびに津波高は概ね旧レシピ（ア）と同程度であった事から、レシピ（イ）を除く2通りによるすべり量を用いて津波伝播計算を実施した。

また、当該海域で発生した顕著な津波を伴った地震（1833 年天保庄内沖、1940年積丹半島沖、1964 年新潟、1983 年日本海中部ならびに1993年北海道南西沖地震）を対象に、実測された津波痕跡高とこれらの断層モデルから計算された津波高とを比較した。実測された津波痕跡高は東北大学と原子力規制庁による「津波痕跡データベース」（岩渕・他，2012；土木学会論文集）を参照した。さらに、9秒メッシュを用いた概略津波伝播解析の結果、それぞれの3秒メッシュ領域内における沿岸の津波高が最大となる波源断層モデルを選定し、沿岸域における主な構造物ならびに陸上への遡上を含む詳細津波伝播解析を実施した。なお、津波シミュレーションの基礎方程式には非線形長波式を用い、9秒メッシュを用いた計算では陸上遡上は考慮しなかった。時間格子間隔は0.5秒とし、マニングの粗度係数はn=0.025 $m^{-1/3}$/sを与えた。計算は地震発生後5時間まで行い、平均潮位面を基準面とした。

以下、北海道沖に分布する断層に対する結果を示す。北海道南西沖に分布する断層を中心に、北海道沿岸域だけでなく能登半島や隠岐諸島北岸等において高くなる傾向が見られ、これは日本海中央部における大和碓など、海底地形の影響によるものと考えられる。1983年日本海中部地震など、近年に発生した地震津波に対し

© 日本地震学会

て実測された津波高も、能登半島や隠岐諸島で高い津波高となっている。また、多くの断層モデルに対して、ロシア沿岸域にも高い津波が到達する結果が得られた。このことは、当該海域において過去に発生した大地震の断層モデルの構築やその発生頻度に関する研究に対して、ロシア沿岸における調査の重要性を示唆する（例えば、室谷・他，2019；地震学会秋季大会）。

また、断層モデルによって大きな津波高となるスケーリング則は異なった。傾斜が緩やかで面積が大きい断層モデルに対しては、（旧）レシピ（ア）による断層すべり量の方が武村式に比べて大きくなり、その結果、津波高も大きくなった。一方で、高角な断層に対しては、山陰沖～九州沖に分布する断層（高角横ずれ断層が主）と同様に、武村式による断層すべり量を用いた津波高の方が、（旧）レシピ（ア）によるものに比べて大きい傾向となった。

謝辞：本研究は、文部科学省受託研究「日本海地震・津波調査プロジェクト」の一環として実施されました。記して感謝いたします。

© 日本地震学会

Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for the Sea of Japan

*Iyan Mulia[1], Takeo Ishibe[2], Kenji Satake[1], Aditya Gusman[3], Satoko Murotani[4]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction, 3. GNS Science, 4. National Museum of Nature and Science

The Sea of Japan is known to host large tsunamis generated by earthquakes (M>7) on several active fault systems: the 1993 South-west Hokkaido (M7.8), 1983 Japan Sea (M7.7), 1964 Niigata (M7.5), 1940 Shakotan-oki (M7.5), and 1833 Shonai-oki (M7.5). The aforementioned tsunamis were responsible for severe destructions and many casualties in the coast of the Sea of Japan region. As part of disaster countermeasures, we conducted a probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) at 154 coastal locations for municipalities along the Sea of Japan coast, divided into six regions: Hokkaido, Tohoku, Chubu, Kinki, Chugoku, and Kyushu. The study was supported by the Integrated Research Project on Seismic and Tsunami Hazards Around the Sea of Japan from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

Here we analyzed the regional tsunami hazard associated with 60 active faults beneath the eastern margin of the Sea of Japan, which were identified based on seismic reflection surveys (MLIT, 2014). In our PTHA study, we set a minimum magnitude of *M*w 6.5 at all faults, while a maximum magnitude at each fault varies from *M*w 6.8 to 7.9 according to the estimated fault sizes. We discretized the faults into a 10 km ×10 km subfault size to take into account the slip heterogeneity and to facilitate the Green’s function summations. We generated a large number of stochastic slip realizations using a Monte Carlo approach at each fault. The method is implemented in a software package called SlipReal (http://equake-rc.info/cers-software/rupgen/, accessed 1 April 2020) developed by Mai and Beroza (2002). The corresponding tsunamis at the 50-m isobaths were calculated by applying the precalculated Green’s function to the randomly generated slip. Subsequently, we applied an amplification factor by the Green’s Law, assuming that the final tsunami heights were calculated at a water depth of 1 m. Based on the Monte Carlo convergence analysis, the total number of considered scenarios is 76,685. Such a large number of samples is expected to account for the epistemic uncertainty on the slip distribution of faults. Furthermore, the variance parameter (β) representing aleatory uncertainty in the PTHA was determined from the comparison with four most recent historical tsunamis using a logarithmic standard deviation κ of Aida (1978), such that $\beta=\ln(\kappa)$. The β values for the four events are: 0.615 for the 1940 and 1983 events, 0.713 for the 1964 event, and 0.784 for the 1993 event. We then applied a logic-tree approach to incorporate those β values in the PTHA with weights of 0.5 for the β of 0.615, and 0.25 for the remaining β of 0.713 and 0.784. Lastly, we estimated the earthquake recurrence rate of each fault based on *a* and *b* values of the Gutenberg-Richter frequency magnitude distribution (Gutenberg and Richter, 1944) derived from observed seismicity in the study area from the Japan Meteorological Agency unified hypocenter catalog over a period of 1997-2017. Additionally, we also analyzed the effect of variations of *a* and *b* values to the tsunami hazard assessment, which in this study, is apparently not very sensitive.

Our probabilistic analysis indicates that the tsunami hazard generally increases from southwest to northeast, which is consistent with the number and type of the identified fault systems, i.e. many reverse faults exist in the northeastern parts whereas strike-slip faults dominate the southwestern parts. More specifically, tsunami hazard in Chubu, Tohoku, and Hokkaido regions are considerably higher than that of

© 日本地震学会

Kyushu, Chugoku, and Kinki regions. The highest maximum coastal tsunamis of approximately 3.7, 7.7, and 11.5 m for the return periods of 100-, 400-, and 1000-year, respectively, are expected to occur at a coastal point in Niigata prefecture of Chubu region. Most coastal points in Tohoku, several in Chubu, and one in Hokkaido have more than 10% probability of experiencing maximum coastal tsunami of higher than 0.5 m at any given year, while in Kyushu, Chugoku, and Kinki, the probability is generally less than 5%. Furthermore, the deaggregation of hazard suggests that tsunamis in the northeast are predominated by local sources, while the southwestern parts are likely affected by several regional sources. These local sources raise concerns on the appropriate measure for tsunami mitigation, because near-field tsunamis render a timely warning less effective due to the extremely short lead time. Therefore, more attention should be given to Chubu, Tohoku, and Hokkaido regions in ensuring an efficient and effective regional tsunami disaster mitigation strategy for the Sea of Japan coast.

© 日本地震学会

Consideration of tsunami source of the AD1662 Hyuga-nada earthquake occurred off Miyazaki Prefecture

*Kei Ioki[1], Yusuke Yamashita[2], Yoshihiro Kase[3]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Miyazaki Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization

南海トラフ西端部に位置する日向灘では，フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込むため，M7クラスのプレート境界型地震が繰り返し発生している．歴史記録上，日向灘で発生した最大規模の地震は西暦1662年日向灘地震（外所地震）とされている．この地震により津波が発生し，宮崎市沿岸部では津波の高さが4-5 mと推定され，大きな被害をもたらした．また日向灘は，浅部スロー地震活動が活発な地域である．2011年東北地方太平洋沖地震の震源域に含まれる浅部スロー地震の震源域は，巨大津波生成の要因の１つと考えられている．1662年津波は，日向灘における通常のM7クラスの地震により発生した津波より，はるかに大きな津波となった．これをもとに本研究では，1662年津波は，浅部スロー地震域が1662年日向灘地震の震源域となって巨大津波が発生した可能性を考え，その検証を予察的に行った．はじめに，日向灘で観測された最近の地震活動をもとに，1662年日向灘地震の断層モデルを仮定した．次に，1662年津波の波源を推定するため，宮崎県の太平洋沿岸一帯（延岡市から串間市）で津波堆積物調査を行った．その結果，複数地点において1662年津波の可能性があるイベント堆積物を確認した．仮定した断層モデルを用いて津波の数値計算を行い，宮崎県の宮崎市宮崎平野と日南市小目井で，確認されたイベント堆積物の分布と計算浸水範囲を比較した．その結果，大きな津波を発生させるには，プレート境界浅部のすべりが必要であることが分かった．一方で，歴史記録より揺れによる建物被害も大きいことから，強震動を生成させるには，陸に近いプレート境界深部のすべりも必要である．これらの考察から仮定した断層モデルにより計算された浸水範囲は，地質調査により確認されたイベント堆積物の分布を説明することができた．今後，他の地域においても津波堆積物の分布や歴史記録と，計算浸水範囲を比較することで，仮定した断層モデルの精度を上げる．

© 日本地震学会

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

*Takuya Saito[1], Toru Takeda[1], Kei Yamashita[2], Toshitaka Baba[1]

1. Tokushima University, 2. Tohoku University

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震からもわかるように，今後起こりうる巨大地震・津波を想定するためにはできるだけ過去に遡り地震・津波の発生をより正確に調査することが求められる．この過去の地震・津波の調査においては，津波堆積物は物的証拠として重要な情報となる．東日本大震災以降，津波堆積物調査は精力的に行われ，津波堆積物を予測するための土砂移動シミュレーションモデルも高橋ら（1999，2000，2011）や藤井ら（1998）によって開発されているものの，調査結果とシミュレーション結果の比較はまだ十分ではない．著者らはこれまでに，それらのモデルのうち，高橋らの土砂移動モデル（STM）を用いて南海トラフ沿いの沿岸湖沼での津波堆積物調査結果（岡村ら，2012）と比較した．震源モデルは内閣府が想定した最大クラスの南海トラフ地震と1707年宝永地震（Furumura et al., 2011）を利用した．なお，STMシミュレーションおける潮位はT.P.=0ｍとした．その結果，岡村らによる調査地点の一つである蒲生田大池では数千年前に一度，層厚およそ10cmの津波堆積物が確認されているが，シミュレーションではどの震源モデルにおいても湖内の土砂の移動は確認できなかった．

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

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

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

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

© 日本地震学会

Characteristics of the 1854 Tokai and Nankai Tsunamis Observed at West Coast of North America

*Satoshi Kusumoto[1], Kentaro Imai[1], Ryoko Obayashi[1], Narumi Takahashi[1,2], Takane Hori[1]

1. JAMSTEC, 2. NIED

1854年12月23日及び25日に南海トラフ沿いの沈み込み帯で安政東海地震及び安政南海地震が発生した．これらの地震に伴う津波は太平洋を横断し，北米西岸の検潮所でその波形が記録されている（例えば，Bache 1856; Kusumoto et al., 2020）．これまでの研究で津波伝播の数値シミュレーションから求まった計算波形と観測波形の比較を基に安政東海・南海地震の津波励起時刻を推定する試みが行われている一方で，観測波形に対する解析は十分ではない．そこで本研究では，サンフランシスコ及びサンディエゴで記録された安政東海・南海地震津波の観測波形に対して波形解析を行い，その特徴を調べた．
観測波形として，大森 (1913)の潮位記録をデジタル化して理論潮汐曲線の山谷を基に時刻補正した潮汐波形を使用した（図1；Kusumoto et al., 2020）．いずれの波形も湾口部から約5 km離れた検潮所で記録されたものである．まず1.3E−4 Hzをカットオフ周波数とするハイパスフィルターで潮汐成分を除去し，次に短波長のノイズを除去するため，振幅スペクトルを基に5.0E−4 Hzのローパスフィルターを適用した．振幅は地震発生当時の潮位計の水理フィルターが不明のため最大値で規格化した．
図1にサンフランシスコ及びサンディエゴの検潮所における安政東海・南海地震津波の観測波形を示す．安政東海地震津波は初動より後続波の振幅が大きく，最大波の出現時刻は初動到達からおよそ2〜3時間後である．観測波形の卓越周期はどちらの検潮所でも40〜50分前後である．安政南海地震津波の初動到達時刻ははっきりとしない．サンフランシスコの検潮所では12月25日の午前2時〜午後2時（GMT），サンディエゴの検潮所では12月25日の午前2時〜午後6時（GMT）にかけて大きな振幅を持つ長波が記録されている．これらは安政南海地震の後続波であると考えられる．
安政南海地震津波は安政東海津波と比較して，どちらの検潮所でも振幅がやや大きく波長もわずかに長い．これらの特徴は安政東海地震及び安政南海地震の津波波源に起因している可能性がある．本発表では，以上の解析結果を基に安政東海・南海地震津波の観測波形の特徴について議論する．

謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構　小平秀一）の一環として行われました．

参考文献

Bache, A.D. (1856) Notice of earthquake waves on the western coast of the United States, on the 23rd and 25th of December, 1854, *American J. Sci. Arts*, 21, 37–43.
Kusumoto, S., Imai, K., Obayashi, R., Hori, T., Takahashi, N., Ho, T.–C., Uno, K., Tanioka, Y., & Satake, K. (2020) Origin time of the 1854 Ansei–Tokai tsunami estimated from tide gauge records on the west coast of North America, *Seismol. Res. Lett.*

© 日本地震学会

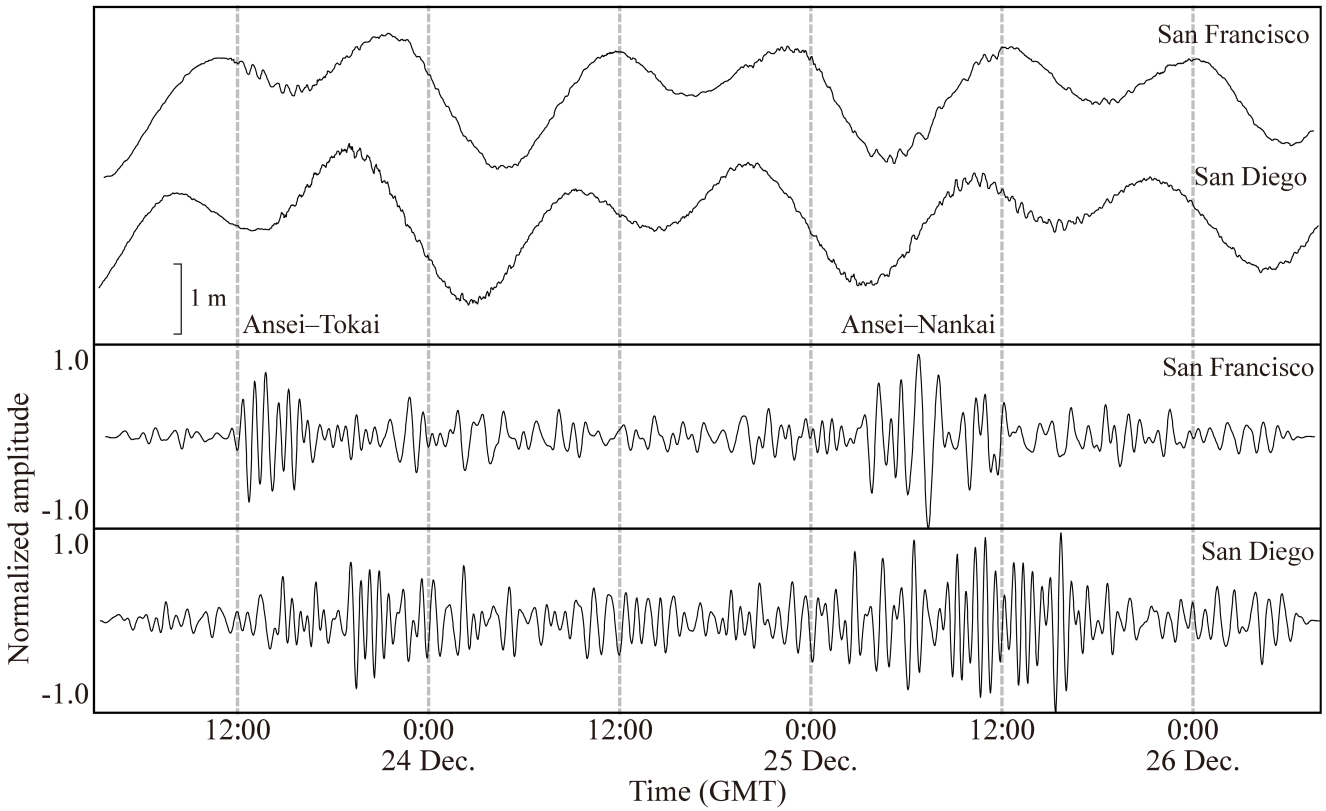


図1　北米西岸における安政東海・南海地震津波の観測波形

© 日本地震学会

Kinematic behavior of fault segments near the trench based on tsunami inversion source models of the 2011 Tohoku earthquake

*Yoshinori Satou[1], Masanobu Koba[2], Masafumi Matsuyama[3], Hayato Mori[4]

1. Unic, 2. EGC, 3. CRIEPI, 4. CEPCO

1. はじめに

M9クラスの2011年東北地方太平洋沖地震の津波の再現では，断層のライズタイム（断層面のある場所のすべりの継続時間）の影響を無視できず，特に海溝軸付近の断層の破壊過程は沿岸に到達する津波挙動に大きく影響を及ぼすことが既往研究（例えばSatake et al.(2013)など）より明らかとなっている．既往研究の津波波源モデルのライズタイムは，マルチタイムウィンドウインバージョン解析によって推定されており，タイムウィンドウの設定条件等によって規定されている可能性がある．そこで本研究では，津波波源のライズタイムに着目したインバージョン解析を実施するとともに，本検討および既往研究の津波波源における海溝軸付近の断層の運動学的挙動を考察した．

2. 津波波源のライズタイムに着目したインバージョン解析

2011年東北地方太平洋沖地震での津波波形の再現において，津波波源のライズタイムがどの程度必要となるのかを検討するため，タイムウィンドウの合計時間Tを60～300秒まで変化させたマルチタイムウィンドウインバージョン解析を実施した（タイムウィンドウ幅は10秒とし，ウィンドウ数を変化）．波源モデルの断層形状はSatake et al.(2013)を使用し，再現対象はGPS波浪計の津波波形と陸域の最終地殻変動量とした．破壊伝播速度V_rは1.5～3.0km/sの範囲で4パターン設定し，各小断層は震源からの破壊フロント到達後に各々設定したタイムウィンドウの範囲内で破壊可能とした．図1に本検討結果を示す．図1(a)に示す波形残差平方和は，タイムウィンドウが増加するほど解の自由度が増加するため値が小さくなることは当然であるが，T210（タイムウィンドウの合計時間210秒）以降でほぼ収束している．一方，T60やT90では波形残差平方和は大きく，観測波形を十分に再現することができない．図1(b)に示すライズタイムは，各小断層のすべり量が0.1m以上となるタイムウィンドウを集計し，その最大値を示したものであるが，240秒程度で頭打ちとなる．これらの結果より，津波を再現するうえで必要となる津波波源のライズタイムは200秒程度と判断される．

3. 津波波源モデルにおける海溝軸付近の断層の運動学的挙動

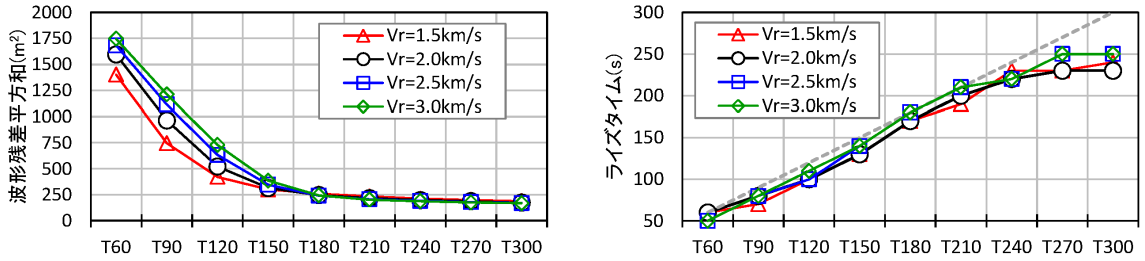
本検討結果と同様に，津波観測記録や最終地殻変動量を再現対象とした波源モデルに，内閣府(2012)，杉野ほか(2013)およびSatake et al.(2013)がある．また，上記の観測記録に加え，陸域のGNSS連続観測データ（1秒間隔地殻変動データ）を用いた波源モデルに，金戸ほか(2019)と根本ほか(2019)がある．これらの波源モデルについて，小断層ごとのすべり量とライズタイムの関係を図2に示す．本検討結果(T210, V_r=2.0km/sのケース)では，ライズタイムがタイムウィンドウの合計時間に達しておらず，タイムウィンドウの制約を殆ど受けていないといえるが，既往研究結果ではタイムウィンドウの合計時間に達している断層が多数存在している．つまり，既往研究結果では，各モデルで設定されたライズタイムの上限値の影響が含まれていることとなるが，内閣府(2012)以外での海溝軸付近の断層のすべり速度（近似直線の傾き）は本検討結果と同程度といえる．なお，内閣府(2012)のみすべり速度の傾向が異なっているのは，断層の深さが実際よりも深めに設定されていることが一因と考えられる．金戸ほか(2019)や根本ほか(2019)では、GNSS連続観測データの再現のため、陸域に近い海溝軸付近以外の断層で大きなすべり速度を示したものと思われるが、海溝軸付近の断層のすべり速度は本検討結果と同程度である．以上より，いずれのモデルでも，すべり量が大きい小断層ほどライズタイムも大きく，津波波形への影響が大きいとされる海溝軸付近の断層に着目すると，海溝軸付近の断層における津波波源としてのすべり速度は，平均的に0.2～0.3m/s程度といえる．

謝辞　本研究は電力11社による原子力リスクセンター共研として実施した成果であることを付記するとともに，土木学会 原子力土木委員会 津波小委員会（委員長 高橋智幸関西大学教授）の委員各位に研究成果をご議

© 日本地震学会

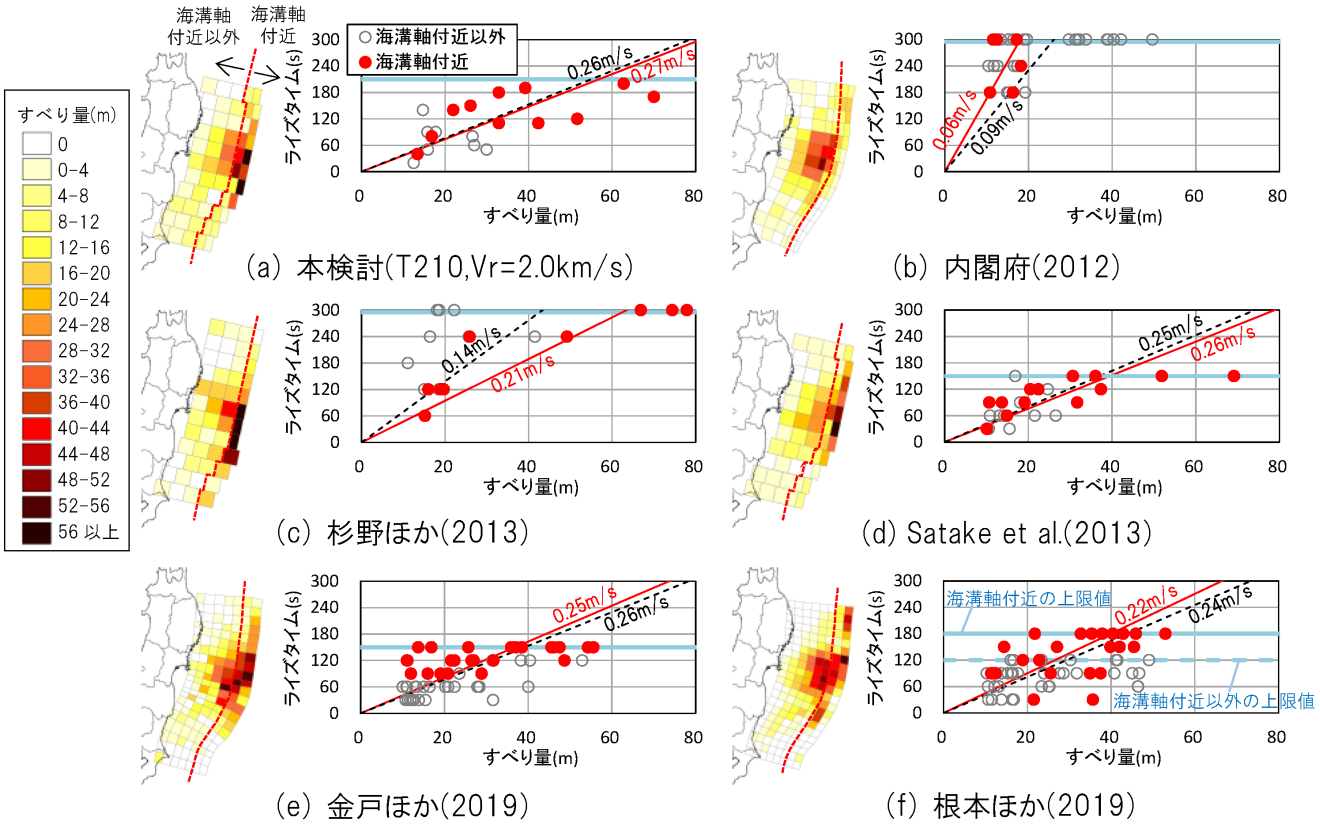
論頂き，有益なご助言を賜りました．また，東京電力ホールディングス株式会社の金戸俊道氏および応用地質株式会社の根本信氏からは波源モデルに関するデータをご提供いただきました．記して関係各位に謝意を表します．

注記　本研究に示す金戸ほか(2019)は下記情報の修正前データを使用したものである．
https://www.tepco.co.jp/press/release/2019/1516534_8709.html
（福島第一原子力発電所波高計の設置箇所情報の誤りについて）



（a）波形残差平方和　（b）ライズタイム

図 1　本検討によるインバージョン解析結果



（a）本検討(T210,Vr=2.0km/s)　（b）内閣府(2012)

（c）杉野ほか(2013)　（d) Satake et al.(2013)

（e）金戸ほか(2019)　（f）根本ほか(2019)

図 2　津波波源モデルのすべり量分布およびすべり量 10m 以上の断層によるすべり量とライズタイムの関係．各波源モデルのグラフ内の直線と数値は，すべり量 10m 以上の断層による近似直線とすべり速度（近似直線の傾き）を示し，赤が海溝軸付近のみを対象とした場合，黒が全範囲を対象とした場合である．さらに，グラフ内の青の太線は，インバージョン時に設定されたタイムウィンドウの合計時間（ライズタイムの上限値）を示す．

© 日本地震学会

Sensitivity of tsunami height distribution to fault model parameters based on the 2016 off Fukushima earthquake

*Yutaka HAYASHI[1]

1. Meteorological Research Institute

1. 背景
2016年11月22日に福島県沖の深さ12kmを震源とするマグニチュード(M)7.4の北西一南東方向に張力軸を持つ正断層型の地震が陸のプレート内で発生し、宮城県の仙台港で 144cmをはじめ北海道から和歌山県にかけての太平洋沿岸などで津波が観測された（気象庁, 2016）。この海域では、かつては逆断層型の地震が主体だったが、東北地方太平洋沖地震の発生以降は正断層型の地震が比較的多く発生するようになった（気象庁, 2016）。気象庁が量的津波予報に用いるデータベース（以下、津波DB）では、2016年当時、この海域ではほぼ南北方向の逆断層を想定した津波計算結果が収録されていた。事前計算と異なる走向の地震であったことが2016年福島県沖の地震で宮城県における津波高さの過小評価の原因であることと、津波予報の精度低下の大きな要因となる計算条件の改善の必要性が指摘されている（例えば、倉本ほか，2018）。気象庁では、過去に発生した地震のCMT解とその海域で津波DB作成に用いた地震シナリオの間で、走向が大きく異なる海域について全国的に調査し、2018年までに津波DBに収録するシナリオを一部追加する改善を施した。

2. 手法
想定と異なる地震の発生が津波予測に与える影響を検討するため、2016年福島県沖の地震を基準に、走向を含む断層モデルパラメータに対する津波高分布の感度を分析した。まず、「津波レシピ」（地震調査委員会, 2017）を参考に、CMT解、Mwと断層長・断層幅・平均すべり量のスケーリング則、アスペリティの面積とすべり量の規模の経験則で特性化した断層モデル（基準モデル）を作成した。次に、走向、傾斜、断層中央位置のいずれか一つだけが基準モデルから異なる断層モデル（派生モデル）群を作成した。その際、断層中央位置を震源から断層長の1/2程度の範囲で変化させるなど、パラメータの変化の許容範囲が、津波予報時点までの即時地震解析で知りえない不確実さの範囲に相当するように決定した。基準モデルと各派生モデルに基づく津波伝播計算を実施し、牡鹿半島から福島県の5検潮所の位置での津波の高さの最大値等を抽出し、モデル間の計算値を比較し、各パラメータに対する津波高分布の感度を測定した。ここでは、各パラメータの単位変化量（走向・傾斜では1°、断層面中央位置では1km）に対する、5か所の津波の高さの最大値の相乗平均を感度として求めた。

3. 結果と議論
基準モデルからは、従来（例えば、倉本他、2018; Nakata et al., 2019）から指摘されてきたように、仙台港での比較的高い津波が、波源から福島県の海岸に達した後に反射した波による津波後続相によることが確認できた。一方、どの断層モデルパラメータを変化させた場合であっても、派生モデル群の中に、仙台港の津波の高さの最大値の出現が第一波による場合と第二波以降による場合があった。これは、2016年福島県沖の地震は、津波予報時点までに即時解析で知りうる地震学的情報のみに基づく限り、津波の最大波出現要因は原理的に予測不可能な事象であったことを意味する。
傾斜角を変化させた場合は、5か所の測定点とも津波が高く（あるいは低く）なりやすいため、トレンドを除去する方法でも測定したところ、低角度と高角度で感度が大きく異なることが分かった。得られた各パラメータに対する感度の大きさの比較から解釈すると、走向の想定と45°異なることによる津波高分布の典型的な予測誤差は、傾斜角を45°と鉛直の場合で取り違える、あるいは、震源を断層面からも外れる程度（断層長の1/2以上）ずれて決定される場合の予測誤差の大きさに匹敵する。
本研究は2016年福島県沖の地震を標準とした場合のみに基づく感度測定結果に基づいた。このような断層モデルパラメータに対する津波の高さ分布の感度測定の考え方は、今後も想定外の地震が発生した後に、津波DBを修正する方針を合理的に決定する目的で活用できるだろう。また、津波DBを新たに設定する場合に

© 日本地震学会

は、各シナリオの配置間隔（空間的位置に加えて地震規模・走向・傾斜なども）が隣接シナリオ間の予測の違いが均等に近くなる設定であれば効率的だが、本研究で示した考え方は、計算量に応じた予測精度の最適化を図る事前調査に利用できるだろう。

文献

地震調査委員会 (2017): 波源断層を特性化した津波の予測手法（「津波レシピ」）.
気象庁(2016): 平成28年11月地震・火山月報（防災編）.
倉本和俊, ほか(2018): 土木学会論文集B2(海岸工学), 74(2), I_535-I_540.
Nakata, K., et al. (2019): Earth, Planets Space, 71(1), 30.

© 日本地震学会

Quantitative evaluation of conventional magnitudes for the slow tsunami earthquakes in case of occurrence near Japan

*Takahito Nishimiya[1], Akio Katsumata[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

地震発生後、最初期段階の津波予測は通常、震源近傍で観測された地震波振幅から推定した震源の位置、マグニチュード（M）に基づく。これは、気象庁では最初の津波警報を地震検知後およそ3分程度で出すこととしており、その時点ではモーメントテンソル解は通常得られていないためである。地震波振幅からだけでも多くの場合、モーメントマグニチュード（M_W）に近い値が得られている。
通常の地震に比べて高周波帯域で地震波エネルギーが極端に小さいスロー型津波地震（slow tsunami earthquake）については、前述の震源近傍の地震波振幅に基づくMはM_Wに対して過小な推定値になってしまうと考えられるが、震源近傍の地震波形記録があまりないため、その定量的評価が難しい。
そこで我々はこれまでも、遠地広帯域波形記録をもとに震源スペクトルを推定（西宮・勝間田,JpGU Meeting 2018）したり、得られたスペクトルに基づきスロー型津波地震が日本近海で発生したと仮定して武尾（1985）を用いて近地地震波形を合成（西宮・勝間田,地震学会2018秋季大会）し、それによりMを推計（西宮・勝間田,JpGU Meeting 2019）し、Mの過小推定の問題を定量的に評価しようと試みてきた。対象としたMは、気象庁マグニチュード（M_J）、気象庁が巨大地震の過小評価対策として導入している100秒マグニチュード（M_{100}: Katsumata et al.(2013)の100秒low-cut filter 波形によるマグニチュード）である。

今回、発生を仮定する津波地震の震源時間関数について、これまで試みてきた簡易なものではなく、先行研究などにおいて推定されたものを用いることによって、より信頼性のある解析結果が得られたので報告する。
発生を仮定した津波地震は、1992年ニカラグア沖（M_W7.6）、1994年ジャワ島沖（M_W7.8）、1996年ペルー沖（M_W7.5）、2006年ジャワ島沖（M_W7.7）、2010年スマトラ島沖（M_W7.8）の5地震で、まとめると次のとおり。
(1) M_Jについては過小推定となる。場合によっては1以上も過小に推定されてしまう。
(2) M_{100}については推定値がM_Jに比べて大きく改善する場合もあるが、百数十秒やそれ以上の長い破壊継続時間である地震（例えば2006年ジャワ島沖）の場合では0.5以上過小になるなどあまり改善しない。
(3) 巨大地震の判断材料として気象庁において使用している長周期成分モニター（広帯域波形記録の100～500秒バンドパスフィルタ波形の合成振幅を監視）では、それ自体はMを推定する手段ではないが、スロー型津波地震であってもM_Wの大きな地震であると認識できる可能性が高い。ただし、破壊継続時間がさらに長い地震であった場合は過小な規模の地震とみなしてしまうおそれも出てくる。

謝辞
IRISのWebサイトから入手した広帯域地震波形/Global CMTのデータを使用しました。（国研）防災科学技術研究所の広帯域地震観測網(F-net)の波形データを使用しました。SCARDEC及びUSGSが公開している震源時間関数の時系列データを使用しました。

© 日本地震学会

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

*Ayumu Mizutani[1], Kiyoshi Yomogida[1]

1. Hokkaido Univ.

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

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

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

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

© 日本地震学会

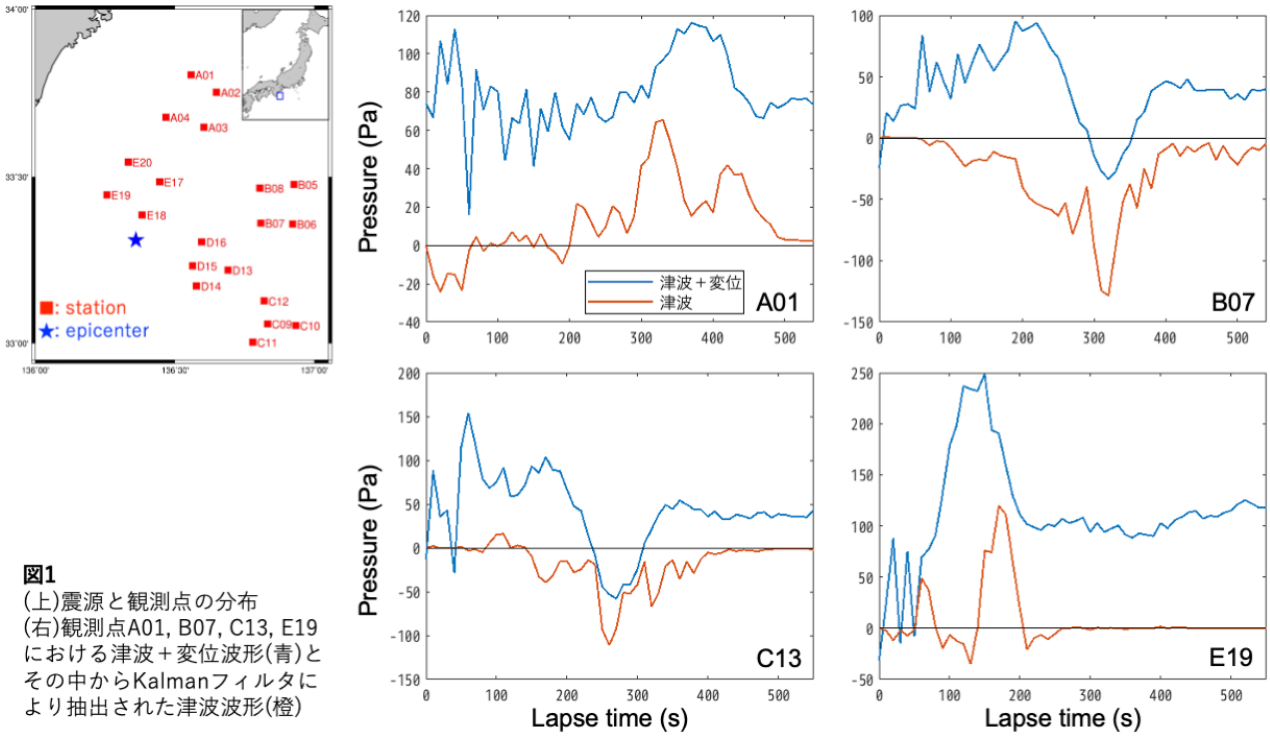


図1
(上)震源と観測点の分布
(右)観測点A01, B07, C13, E19における津波＋変位波形(青)とその中からKalmanフィルタにより抽出された津波波形(橙)

© 日本地震学会

Real-time tsunami inundation forecast based on the multi-index method examined considering several source models

*Wataru Suzuki[1], Naotaka Chikasada[1], Takayuki Miyoshi[1], Shin Aoi[1]

1. NIED

海底水圧計データを用いた津波即時予測のため、データベース（津波シナリオバンク）から観測された海底水圧計データに近いシナリオ群を選別するMulti-index法が提案されている（Yamamoto et al., 2016, EPS）。Multi-index法では評価時刻での水圧変動の絶対値の最大値について、観測値で正規化したVR（Variance Reduction）、シナリオの値で正規化したVR及び相関係数の3つの指標により、観測とシナリオの類似度の評価を行う。Multi-index法を用いることで、事前に準備したシナリオを即時に選び出すことで計算負荷の高い津波遡上まで予測対象とすることができ、S-netデータを用いた津波遡上即時予測システムとしてシステム実装されている（Aoi et al., 2019, JDR）。津波遡上即時予測システムでは震源情報の不確実性に左右されないように、毎時刻Multi-index法での評価を行い、閾値を満たすシナリオが選別されると予測を開始する。そのためYamamoto et al. (2016)では検討されていなかった、リアルタイムデータ処理のための帯域制限フィルタ、オフセット除去及び最大値を取る区間の設定やシナリオデータが地震発生から何分後にあたるかを様々に変えて検索する機能が津波遡上即時予測システムでは採用されている。本研究では、沖合にS-netが敷設された東日本太平洋沿岸での概観的な津波予測のために構築した津波シナリオバンク（近貞・他, 2019, 防災科研研究資料）を用い、津波遡上即時予測システムと同じ検索処理により選別されたシナリオ群に基づき、Multi-index法による津波遡上即時予測の検証を行う。検証には既往研究で推定された波源断層モデルから計算した模擬データ（S-net水圧計データ及び陸域浸水深分布）を用いるが、推定された波源断層モデルに固有の特性、バイアス等のため、生成される模擬データが必ずしも実際の津波現象全てを代表できる訳ではない。そこである1つの波源断層モデルの例に最適化するのではなく、大局的な予測性能を向上することを目的に、1つの地震に対して異なる研究による波源断層モデルに基づく複数の模擬データを用いて検証を行う。
概観的な予測のための津波シナリオバンクでは、伊豆諸島から根室半島の沖合をカバーするように太平洋プレートのプレート間地震とアウターライズ地震を設定し、沿岸で90m格子の地形モデルを用いて津波浸水計算を行ったシナリオを有している。断層面内では一様すべりを仮定しているが、プレート間地震については地震規模と断層面積の関係式を3パターン用いることにより、多様な震源特性を考慮している。波源断層モデルの走向方向位置と沿岸波高分布の感度解析結果を基に、プレート間地震は走向方向に約25kmずらして設定している。模擬データとして2011年東北地方太平洋沖地震についての27波源断層モデルから計算されるデータを用いた。これらの波源断層モデルは主に津波データもしくは地震波形データの解析に基づき推定されている。なお海底水圧計データについては波源断層モデルによるシミュレーション波形に、2018年台風13号襲来時の観測波形をノイズとして付加している。
北緯38.3度～38.5度、東経141.1度～141.4度の領域（宮城県石巻市から東松島市付近）での地震発生から10分後までのデータから予測される最大浸水深分布を確認したところ、Multi-index法で選別されたシナリオ群のうち観測値とシナリオの両方で正規化したVRが最大となるシナリオは6模擬モデルに対して過小な予測となる傾向が見られた。一方でMulti-index法で選別されたシナリオ群から計算される平均値を予測とすると、過小となるのは1模擬モデルのみとなった。また平均値を、選別されたシナリオ群全てから求める場合と、VRが全シナリオの最大値から0.1以内となるシナリオ群から求める場合では、予測の傾向は概ね似ているが、シナリオ群全体から求める方が過小予測の傾向が小さかった。なお、模擬データの推定に用いられたデータ（津波データか地震波形データか）と、良好な予測結果が得られたかどうかには関連性は見られていない。津波遡上即時予測システムでは、VR最大シナリオによる予測と、選別されたシナリオ群の平均値による予測の双方に対応している。他領域や他地震に対する検証、予測精度評価方法や予測の時間発展の整理を行い、適切な津波予測に向けて検証結果をシステムに反映していくことが今後の課題である。
謝辞：本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）の成果を利用した。

© 日本地震学会

Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database

*Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[1]

1. Tokushima University

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

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

© 日本地震学会

Real-time forecast of near-field tsunami decay based on linear regression to tide-gauge data

*Hiroaki TSUSHIMA[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

はじめに

近地巨大地震や遠地地震では，津波の収束までに時間を要するため，津波警報・注意報が発表された状態が長時間継続する．たとえば，2011年東北地方太平洋沖地震では，津波警報・注意報がすべて解除されたのは地震から48時間後であった．津波警報の解除の見通しをたてて，防災対応に資するうえで，津波の減衰予測は重要である．

本研究では，近地津波の減衰に着目し，過去の津波観測データから判明している統計的な特徴に基づく予測を試みる．林・他（2011，海岸工学）は，2003年十勝沖地震（Mw 8.3）等の際に日本沿岸で観測された津波波形の減衰部を統計的に解析し，減衰部の包絡線の時間推移は，地震からの経過時間tに概ね反比例すること（1/t）を見出した．また，2011年東北地方太平洋沖地震の津波波形の観察によれば，同地震の津波の減衰過程も1/tで概ね近似できうる．そこで，本研究は，この特徴に着目し，リアルタイムに得られる沿岸観測波形から，その後の津波の時間推移を予測する手法を考案する．

データと解析手法

沿岸潮位観測点の潮位時系列の波形データを使用する．この波形データに一定幅の時間窓をかけて移動二乗平均振幅（MRMS振幅）（林・他，2010，海岸工学）を算出し，減衰予測解析に用いる．ここではMRMS振幅算出の窓幅は2時間とした．

本研究が提案する津波減衰予測手法は，減衰の時間推移は関数1/tにしたがうものと仮定し，津波のおおよその規模を観測データから推定して，その後の時間推移を予測するものである．具体的には，現時刻の直近の時間窓内のMRMS振幅（を定数倍した）時系列に関数k/tを当てはめて振幅係数kを推定し，それを関数k/tに代入することで，それ以降の津波減衰の時間推移を予測する．減衰の時間推移を表す関数を1/tに固定するため，逆問題の未知数が振幅係数のみとなり，予測結果が安定することが期待できる．ここでは，当てはめの対象とするMRMS振幅は3倍している．これは，林・他（2010，海岸工学）による遠地津波の統計解析に基づく知見「減衰過程においては，津波高さがMRMS振幅の3倍を超えることは稀である」ことを参考にした．また，当てはめの時間窓は6時間とした．

結果

本提案手法の減衰予測性能を検証するため，2011年東北地方太平洋沖地震に適用した．一例として，北海道の釧路の予測結果を示す（図１）．本手法による推移予測曲線（赤線）が，観測波形（灰線）の上限付近を概ね予測できている．こうした推移予測曲線に基づき，日本の太平洋沿岸の潮位観測点において50 cmの津波の高さが最後に観測される時刻（最終観測時刻）を，地震発生後15時間の時点（多くの沿岸潮位観測点でMRMS振幅の最大ピークが出現してすでに減衰過程に移行した段階）でどのくらい予測できるかを評価した．その結果，ほとんどの観測点において，最終観測時刻の±12時間の減衰見込み時刻が得られることがわかった（図２）．

謝辞

本研究では，国土交通省港湾局及び気象庁の沿岸潮位観測データを使用しました．記して感謝します．

引用文献

林　豊・他（2010），海岸工学論文集，66, 1, I_211-I_215.
林　豊・他（2011），海岸工学論文集，67, 2, I_216-I_220.

© 日本地震学会

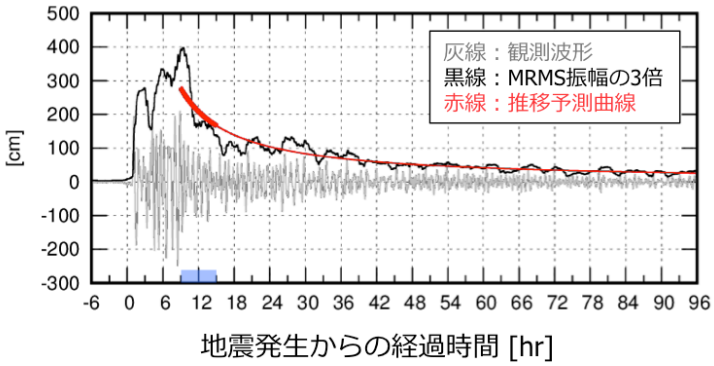


図1　地震発生後15時間における釧路港での津波の減衰予測結果．青色部のMRMS振幅を当てはめに用いた．

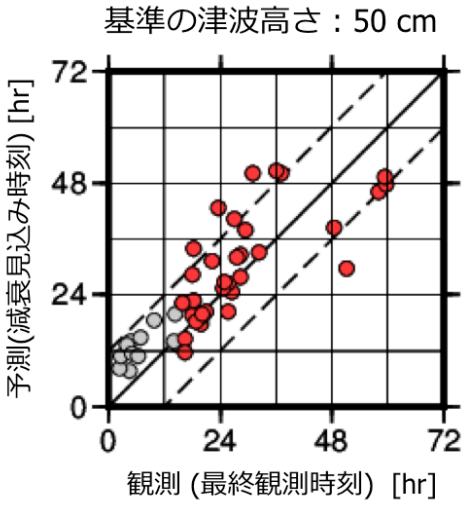


図2　地震発生後15時間における日本の太平洋沿岸の潮位観測点での津波高さ50cmの最終観測時刻の予測結果．丸印は沿岸検潮所で，赤色が予測実施時刻よりも未来，灰色が過去をそれぞれ示す．

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S18. Education and history of seismology

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S18P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S18P-01] Digital Archiving of Bromide Paper Records of Ground Tilt Observed in Kii Peninsula, Japan

○Yasuyuki Kano[1,2] (1.ERI, UTokyo, 2.CRO for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S18P-02] Activity of Children's Summer School on Earthquake and Volcanoes in TANGO and future prospects

○Tomoya Hiiro[1], Yasuyuki Kano[2], Satoko Murotani[3], Specified Nonprofit Corporation Earth design school, Committee for Children's Summer School on Earthquake, Volcanoes and Geology (1.Promotion Committee, 2.University of Tokyo , 3.National Museum of Nature and Science,Tokyo)

Digital Archiving of Bromide Paper Records of Ground Tilt Observed in Kii Peninsula, Japan

*Yasuyuki Kano[1,2]

1. ERI, UTokyo, 2. CRO for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, UTokyo

紀伊半島の2か所の観測点の土地傾斜の記録について，デジタルアーカイブを構築した．これらの観測は主として京都大学防災研究所によって実施されたものである．紀州観測点（三重県熊野市）と由良観測点（和歌山県日高郡由良町）では，1974年頃までは土地傾斜の観測記録にブロマイド紙（感光紙）が用いられていた．現在は，このブロマイド記録は京都大学阿武山観測所で保管されている．観測点ごとに，適当な観測期間ごとに束にまとめられている．これらのブロマイド記録を利用する際の利便性向上のため，順次記録を撮影し，デジタル画像を作成してきている．

紀州観測点では1947年に水平振子型の傾斜計が設置された．1951年に異なる鉱区に移設されているが，これは現在の水管傾斜計の設置地点のごく近傍である．1974年までは横30 cm，縦8.5 cmのブロマイド紙に記録されている．紙送りの速度は時期によって変更されているが，1970年代には約0.2 cm/hに設定されていた．各ブロマイド紙の裏面には，記録番号，記録期間，振り子の固有周期，紙送り速度，期間中に発生した地震に関するメモが残されている．紀州観測点のブロマイド記録を用いて，スロースリップイベントの可能性がある傾斜変化について検討がなされた．

今回のデジタルアーカイブ（「地殻変動ブロマイド記録」https://www.dheq.org/repo/s/bromide/）の構築には，Omeka（https://omeka.org/）を用いた．Omekaは，デジタルコレクションを共有するためのWeb上での出版プラットフォームで，多くの博物館，美術館，図書館，文書館，あるいは研究プロジェクトなどのデジタルアーカイブに用いられている．オープンソースソフトウェアであるOmekaを用いることで，デジタルアーカイブ構築にかかる費用や技術的要求を大幅に減らすことが可能になった．

ブロマイド紙のデジタル写真とメタデータ（ここでは，記録紙裏面の情報および観測者・観測点に関する情報）をOmekaに登録した．記録の検索を容易にするため，メタデータ中の観測点と観測期間に関する情報を各画像に結びつけた．Omekaでは，画像をInternational Image Interoperability Framework (IIIF)に準拠して公開することができる．これを利用して，閲覧者はIIIFに対応した好みの画像ビューアでブロマイド記録を表示することができる．また，将来的には，IIIFを利用して，オンラインでブロマイド紙記録を画像処理し，以後の分析を実施するような仕組みを構築できる可能性がある．

© 日本地震学会

Activity of Children’s Summer School on Earthquake and Volcanoes in TANGO and future prospects

*Tomoya Hiiro[1], Yasuyuki Kano[2], Satoko Murotani[3], Specified Nonprofit Corporation Earth design school, Committee for Children’s Summer School on Earthquake, Volcanoes and Geology

1. Promotion Committee, 2. University of Tokyo , 3. National Museum of Nature and Science,Tokyo

地震火山こどもサマースクールは、日本地震学会、日本火山学会、日本地質学会に加えて開催地団体を主催として、災害だけでなく災害と不可分の関係にある自然の大きな恵みを伝えることを目的とし、1999年から毎年夏休みに全国各地で開催している。2020年より前身の地震火山こどもサマースクールから地震火山地質こどもサマースクールに名称を変更した。
2019年度は特定非営利活動法人地球デザインスクールが主体となり、8月10～11日の2日間にわたり京都府北部の京丹後市および宮津市、伊根町で実施した。開催にあたり、地震火山こどもサマースクールin TANGO実行委員会を設置し、実行委員長に加納靖之（東京大学地震研究所）を選出した。また、講師には尾池和夫氏（京都造形芸術大学）、松原典孝氏（兵庫県立大学）、横山光氏（北翔大学）、大邑潤三氏（東京大学地震研究所）、室谷智子（国立科学博物館）を迎えた。「丹後半島のヒミツを解きあかそう！」をテーマに、日本海拡大期から現在までの歴史やそこに成立した地域社会との関係について、野外観察や身近な材料を使った実験、研究者との対話を通して理解し、自然の恵みや観光、自然災害についての理解を深めるとともに、丹後半島の形成過程や丹後地域の過去、現在、そして未来を考えることを活動の目的とした。
丹後地域が含まれる山陰海岸ジオパークは、平成22年10月に世界ジオパークネットワークへの加盟が認定されたジオパークである。京都府、兵庫県、鳥取県にまたがる東西約120km、面積2458.44㎢の大きさをもち、丹後地域はその東端に位置する。地質学的な知見から、丹後地域は主に基盤岩である白亜ー古第三系の宮津花崗岩類、それらと不整合関係および貫入関係にあたる新第三系中新統の北但層群、および中部更新統以降の地層より構成される。また、1927年に北丹後地震を引き起こしたとされる郷村断層帯と山田断層帯が分布する。
現地では、20人のこどもたちを4つのチームに分け、天橋立、新井崎神社、丹後海と星の見える丘公園、Hi-net 網野観測点、郷村断層、京丹後市郷土資料館などを回った。天橋立、新井崎神社、丹後海と星の見える丘公園など周辺の地形観察や実験観察から、どこに断層地形が見られるのか、それぞれの地形にはどのような特徴がありどのように形成されたのか、などをグループごとに考えた。特に実験では、日本海の拡大、北但層群中のハイアロクラスタイトのでき方、断層の形成、天橋立の形成と成長など、丹後半島の自然について身近なものを用いて考察した。さらに、国指定の天然記念物である郷村断層と京丹後市郷土資料館では、1927年の北丹後地震による被害や復興ついて学んだ。プログラムの最後には、こどもたちがチームごとに学んだことをまとめ、「丹後半島はどうできた？」「この丹後半島で、どう遊び、どう暮らす？」について発表を行った。発表では、大地震が生じたことでより強固で安全な街づくりが進行するきっかけとなる、自然景観を保ちながら天橋立の侵食を防ぎたい、地元の丹後のいい所を守りたいなどの意見が挙げられ、プログラムを通じて、深く考察していることがうかがえる。
今年度は浅間北麓ジオパークでの開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染症拡大と感染防止の観点から来年度に延期とした。この企画は、こどもたちが現地で自然と触れ合いながら、その地域の環境や災害について考えることができることが最大の特徴である。サマースクールの継続的な実施のためにも、来年度開催に向けて、今情勢に合致した開催形式を検討していく予定である。

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Regular session：S19. Seismology, general contribution

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S19P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-01] Estimation of the fall path of the fireball fell on July 2, 2020

○Shutaro Sekine[1], Naoshi Hirata[2] (1.Association for the Development Earthquake Prediction, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Estimation of the fall path of the fireball fell on July 2, 2020

*Shutaro Sekine[1], Naoshi Hirata[2]

1. Association for the Development Earthquake Prediction, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

地球に落ちてくる流星のうち，明るい流星を火球と呼ぶが，火球は落下する際には衝撃波を発生させながら落ちていく事が知られている．今までに落ちた火球でも，そのいくつかにおいては，その衝撃波を地震計が捉え，落下経路等が推定されている（石原・他（2001））．

2020年7月2日の2時32分に関東上空を大きな火球が飛び話題になった．火球は神奈川の上空で光り始め，東に向かって目撃された．火球はいくつかに分割し，それらは習志野市に落ちて回収された（国立博物館プレスリリース）．火球から発生した衝撃波は首都圏一円に展開されている首都圏地震観測網（MeSO-net）の地震計に広範囲で観測された．そこで，本研究では，火球が通った際に発する衝撃波を解析することによりその落下方向等を推定することにした．

データおよび解析手法

火球が見えていた時間前後のMeSO-netの波形データを用い，火球が通過した際に生じた衝撃波を地震計が捉えた時刻の読み取りを行った．経路の推定においては，石原・他（2001）で用いられた手法を用い，火球の入射角や速度等のパラメータをグリッドサーチで推定した．その際に大気圏突入後の火球の運動を等速直線運動とし，大気は等温大気であると仮定した．

結果および考察

MeSO-net で明瞭に捉えられた衝撃波の読み取りの時間を図に示す．火球は衝撃波を出している間は超音速であるが，その衝撃波は音速で伝わっている為，火球の高度が高い位置での衝撃波が観測点に到達するのは，より低い位置で発生した衝撃波よりも後に到着するため，到着時の等時線を描くと楕円を描くことになる．図内では西側の方がより遅く到着している為，火球は西から飛来している事がわかる．また，千葉県側では，衝撃波の到達は確認出来ず，習志野で隕石が見つかった事を考えると，衝撃波は火球の経路前方には飛んでいかないという事も示している．

このデータを用いて，グリッドサーチで経路の推定を行ったところ，火球の入射角は，33度から40度で，方位は東から北方向に5度から15度ぐらいに推定された．一般的に大気圏に突入する高度約80kmで火球が光り始めたとすると，神奈川の上空で光り始めたとされる火球はこの入射角で東京上空まで火球が光っていたという観測結果から，高度約20km程度までは衝撃波を出していたと推定できる．また，火球の速度は大体30km/s

© 日本地震学会

付近で推定したが，過去の火球の解析と比較すると，火球速度が速く推定されている．

なお，8月21日の22時30分頃に，落下した別の火球においても，MeSO-net で衝撃波の波形が観測されているので，同様に経路等を推定し，比較をする事にする．

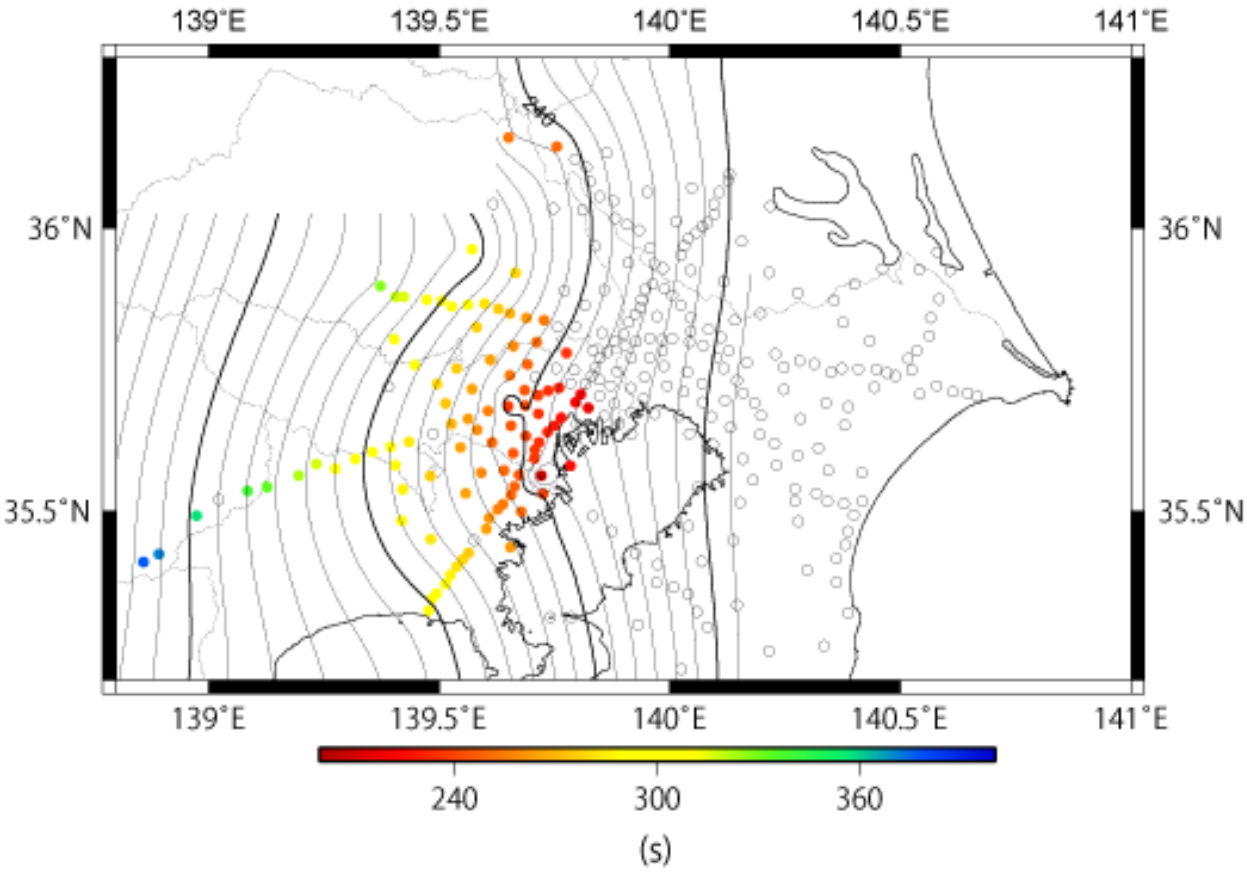
謝辞

この研究においては，MeSO-net の波形データを使用いたしました．ここに記して感謝いたします．

参考文献

石原吉明，東田進也，酒井慎一，平松良浩，古本宗充，稠密地震観測網記録による火球経路の決定，地震研究所彙報Vol.76, 87-92, 2001.

国立科学博物館，各地で観測された火球が隕石であることを確認，国立科学博物館プレスリリース，(https://www.kahaku.go.jp/procedure/press/pdf/421874.pdf) ,2020.



図：火球衝撃波の到達時刻（2020年7月2日2時30分を起点）

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Special session：S22. Geodyanamics of the Ryukyu arc

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S22P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-01] Complementary distribution of very low-frequency earthquakes and the interplate-coupled area in the southwestern Ryukyu Trench

○Ren Yakabu[1], Mamoru Nakamura[1] (1.University of The Ryukyus)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-02] Distribution of very low-frequency earthquakes in the Miyako Strait, central Ryukyu Trench

○Hiromu Furugen[1], Mamoru Nakamura[2] (1.Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 2.Faculty of Science, University of the Ryukyu)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-03] Spatial and temporal distribution of very low-frequency earthquakes activity in the central Ryukyu Trench using ocean-bottom seismometers

○Mamoru Nakamura[1], Shuichi Kodaira[2], Yasushi Ishihara[2], Ban-Yuan Kuo[3], Ching-Ren Lin[3], Pei-Ying Patty Lin[4] (1.Faculty of Science, University of the Ryukyus, 2.JAMSTEC, 3.Academia Sinica, 4.National Taiwan Normal University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-04] Shallow low-frequency tremor activity off Kikai Island, northern Ryukyu Trench subduction zone

○Yusuke Yamashita[1], Yukihiro Nakatani[2], Hiroshi Yakiwara[2], Shuichiro Hirano[2], Shigeru Nakao[2], Hiroki Miyamachi[3], Reiji Kobayashi[3], Hiroshi Shimizu[4], Takeshi Matsushima[4], Kazunari Uchida[4], Kazuo Nakahigashi[5], Hideji Abe[7], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[7] (1.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 2.NOEV, Kagoshima Univ., 3.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, Univ. of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-05] Migration of shallow low frequency tremors in the central Ryukyu arc

○Tsutomu Takahashi[1], Yasushi Ishihara[1], Yojiro Yamamoto[1], Aki Ito[1], Ryuta Arai[1], Ayako Nakanishi[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Yoshiyuki Kaneda[2] (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S22P-06] CMT solutions of earthquakes around Okinawa island from strong-motion records by using a land-ocean unified 3D structure model

○Masanao Komatsu[1], Hirofumi Kowari[2], Tomotsugu Watanabe[1], Taro Okamoto[3], Takeshi Nakamura[4], Hiroshi Takenaka[1] (1.Okayama University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd., 3.Tokyo Institute of Technology, 4.Central Research Institute of Electric Power Industry)

Complementary distribution of very low-frequency earthquakes and the interplate-coupled area in the southwestern Ryukyu Trench

*Ren Yakabu[1], Mamoru Nakamura[1]

1. University of The Ryukyus

We investigated the distribution of very low-frequency earthquakes (VLFEs) in the southwestern Ryukyu Trench and clarified its relationship with interplate-coupled area. In the southwestern Ryukyu Trench, the cluster of VLFEs is distributed from the south of the Yaeyama Islands to the east of Taiwan (Nakamura and Sunagawa, 2015). It is important to clarify the positional relationship between the region of slow earthquakes, interplate coupling region, and source regions of past earthquakes and tsunamis in the Ryukyu Trench, to understand the strain accumulation process. The western part (approximately 123˚) of the VLFE cluster overlaps the interplate coupling zone (Hsu et al., 2012). The source area of the 1771 Yaeyama tsunami is located in the east of the cluster (approximately 125˚). However because of the inaccurate determination of the VLFE epicenters, it was not previously possible to compare the positional relationships in detail. To clarify the relationship between the VLFE distribution and the coupling region in the southwestern Ryukyu Trench, we performed a detailed epicenter determination of the VLFEs. We used four stations of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience's F-net and seven stations of the Broadband Array in Taiwan for Seismology (BATS) from 2005 to 2013. The seismographs of the vertical component were 0.02–0.05 Hz band-pass filtered, and the waveforms at 2 or 3 neighboring stations were computed by semblance analysis to determine the epicenter. The results showed that the VLFEs were distributed between south of Yonaguni Island and south of Miyako Island. The distribution of VLFEs between south of Yonaguni Island and Iriomote Island was elongated east-west direction. However, the VLFEs in the south of Ishigaki Island and south of Miyako Island formed the isolated clusters. The location of the VLFE cluster corresponds to a slab depth of 10-15 km. The distribution of the VLFEs were similar to that of the LFEs (Nakamura, 2017). The distribution of VLFE did not overlap with the interplate coupling zone near Taiwan. Although moderate-size thrust-type earthquakes occur commonly in the down-dip part of the coupled area near Taiwan, there is no VLFE activity in this area. This suggests that the distribution of VLFEs is complementary to the cluster of moderate-size interplate earthquakes associated with the coupled zone.

© 日本地震学会

Distribution of very low-frequency earthquakes in the Miyako Strait, central Ryukyu Trench

*Hiromu Furugen[1], Mamoru Nakamura[2]

1. Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 2. Faculty of Science, University of the Ryukyu

The distribution of very low frequency earthquakes (VLFEs), which are one type of slow earthquake, illuminates the heterogeneous stress accumulation at the subducting plate interface. VLFEs are known to occur in the Ryukyu Trench (Ando et al., 2012); however, their detailed distribution has not been clarified because there are few broadband seismic stations along the Ryukyu arc. In particular, the detection ability is poor in the Miyako Strait, between Miyako Island and Okinawa Island, where the spacing of seismic stations is 300 km. In this study, we determined the epicenters of the VLFEs in the Miyako Strait using waveform data from temporary stations in the central Ryukyu Islands. We used the F-net stations of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience and temporary stations on Okinoerabu Island, Kume Island, Miyako Island, Tarama Island, and Hateruma Island, which were set up by the Association for the Development of Earthquake Prediction. We performed band-pass filtering at a frequency range of 0.05–0.1 Hz for the seismogram using Seismic Analysis Code software. We then determined the epicenters of the VLFEs using the template matching method described by Asano et al. (2015). For the template, we selected the thrust events of regular earthquakes near Ryukyu Trench in the Miyako Strait. We determined the epicenters of VLFEs that occurred between January 2017 and December 2017. The results showed that the epicenters formed one cluster near the Ryukyu Trench. Although the locations were similar to the results of Nakamura and Sunagawa (2015), the VLFE epicenters of each cluster were concentrated in a narrow area. The characteristics of the spot-like distribution of the VLFEs are similar to those observed around Okinawa Island and the Yaeyama Islands. The VLFE cluster in the center of the Miyako Strait was distributed apart from the cluster of regular interplate earthquakes, without overlapping. The location of the VLFE cluster corresponds to a slab depth of 15 km. This suggests that the distribution of VLFEs is similar to that of regular earthquakes. However, VLFE activity was activated in this cluster during the activated period of regular earthquakes (January-March 2017). This suggests that the VLFE activity was triggered by stress changes caused by the regular earthquakes.

© 日本地震学会

Spatial and temporal distribution of very low-frequency earthquakes activity in the central Ryukyu Trench using ocean-bottom seismometers

*Mamoru Nakamura[1], Shuichi Kodaira[2], Yasushi Ishihara[2], Ban-Yuan Kuo[3], Ching-Ren Lin[3], Pei-Ying Patty Lin[4]

1. Faculty of Science, University of the Ryukyus, 2. JAMSTEC, 3. Academia Sinica, 4. National Taiwan Normal University

We investigated the spreading process of the slow earthquake induced by regular earthquakes using the spatio-temporal variation of the very low-frequency earthquakes (VLFEs) swarm in the central Ryukyu Trench. We used the waveforms of the ocean bottom broadband seismometers (OBSs) in the central Okinawa Trough and central Ryukyu Trench and F-net broadband seismometers. We bandpass-filtered at 0.05-0.1 Hz for the vertical component waveforms and analyzed using cross-correlation with template events to determine their relative positions. The analysis period was from September 2018 to June 2019. During this period three major VLFE swarms (November 2018, January 2019, and March 2019) occurred in and near the OBS network. Among them, November 2018 VLFE swarm, which occurred in the northeast of Amami Island, accompanied the migration of the VLFE activity. The detailed distribution of the VLFE swarm and regular earthquakes showed that the cluster of the VLFE swarm was distributed west and south of the cluster of regular earthquakes. The VLFE swarm started in the west of the cluster of regular earthquakes after the swarm-like earthquake activity (maximum magnitude of 4.9) occurred on November 5-7, 2018 in the cluster of regular earthquakes. The area of the VLFE swarm spread northeast and southwest direction, which is along the strike of the subducting plate. After November 14, the VLFE swarm migrated to the shallower part. On the other hand, in the case of March 2019 swarm in the south of Amami Island, the VLFEs were concentrated in several very small patches. From the spatio-temporal distribution of the low-frequency earthquakes, the slow earthquakes did not migrate south of Amami Island and that they occur in isolation (Nakamura, 2017). These suggest that the condition of the interplate coupling on the subducted plate interface or the connectivity of the region which can cause slow earthquakes differs between the north and south of the region.

© 日本地震学会

Shallow low-frequency tremor activity off Kikai Island, northern Ryukyu Trench subduction zone

*Yusuke Yamashita[1], Yukihiro Nakatani[2], Hiroshi Yakiwara[2], Shuichiro Hirano[2], Shigeru Nakao[2], Hiroki Miyamachi[3], Reiji Kobayashi[3], Hiroshi Shimizu[4], Takeshi Matsushima[4], Kazunari Uchida[4], Kazuo Nakahigashi[5], Hideji Abe[7], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[7]

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

南海トラフから南西につながる南西諸島海溝では，フィリピン海プレートの沈み込みに伴う活発な地震活動が昔からよく知られている．近年のGNSS観測や海底観測により，南西諸島海溝ではスロー地震活動も非常に活発であることが分かってきており，大局的には南西諸島海溝の北に接する日向灘から活動が連続しているように見えている．その一方で，細かく見ると海溝の走向方向の活動度に時空間的な変化が見られる事が明らかになりつつあり，陸域の観測網が脆弱な南西諸島海溝において，海底観測を継続的に実施する事はこの地域の様々なスケールにおける地震活動を知る上で必要不可欠である．
我々は，2019年4月より南西諸島海溝北部域の喜界島東方海域において，20 kmスパンの海底地震観測を開始した．この海域は，通常の地震活動が周囲に比べて低調な領域が広がっており，1911年喜界島沖の地震（M 8.0）の震源域に対応している可能性が指摘されている．一方，最近の観測からは，短期的スロースリップや浅部低周波微動活動が活発なことが明らかになってきており，巨大地震・通常の微小地震活動・スロー地震との関係について調査する格好のフィールドである．我々は，今後数年の間に，1年間の観測を複数回実施し，少しずつ観測点配置をずらして，地震活動が低調な領域とその周辺領域を覆う形で観測を実施することにしている．その上で，通常の地震と浅部低周波微動の時空間な関係を明らかにすることが大きな目的の1つである．
本研究で使用している海底地震計は8台で，すべて1 Hz のセンサーを搭載した東京大学地震研究所所有の長期観測型海底地震計である．8台の海底地震計は正六角形の各頂点と中心およびいずれからの頂点から20km離れた1点に位置している．1回目の観測は，本来2020年4月に回収予定であったが，COVID-19流行の影響を受け，2020年8月に回収を実施した．観測期間中には，陸上観測網より観測海域直下と考えられる浅部スロー地震活動があったことが確認されている．過去に実施した海底観測でも同じ機材を用いて観測を実施しており，浅部低周波微動そのものの観測には成功していたが，観測点間隔が30kmより広く，収録トラブル等の影響もあり，震源分布は十分な精度では得られていない．現在，8月に回収したデータの1次処理を進めており，今後，観測データの精査を進め，浅部低周波微動についてエンベロープ相関法による解析を行い，浅部微動の活動領域を明らかにする予定である．

謝辞：海底地震計の設置・回収は，長崎大学水産学部練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づく航海によって実施されました．また，本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」および東京大学地震研究所共同利用の支援を受けました．記して感謝申し上げます．

© 日本地震学会

Migration of shallow low frequency tremors in the central Ryukyu arc

*Tsutomu Takahashi[1], Yasushi Ishihara[1], Yojiro Yamamoto[1], Aki Ito[1], Ryuta Arai[1], Ayako Nakanishi[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Yoshiyuki Kaneda[2]

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

Ryukyu arc, southwestern Japan, shows high activities of various slow earthquakes such as slow slip events (SSEs) (e.g., Heki & Kataoka 2008; Nishimura 2014), very low frequency earthquakes (VLFEs) (e.g., Ando et al. 2012) and shallow low frequency tremors (e.g., Yamashita et al. 2015). In this area, offshore seismic observations have important roles to improve accuracies of their locations and spatial extents. We conducted a passive seismic survey around Amami islands to elucidate detailed activities of regular and slow earthquakes and seismic structures. We deployed 30 short-period ocean bottom seismographs (OBSs) and 5 temporal onshore stations at 25~40 km interval. Deployed OBSs recorded ground motion from Mar. 2019 to July or Aug. 2019.

During this observation, we observed many regular earthquakes and several sequences of shallow low frequency tremors. We estimated epicenters of about 630 tremors by the envelope correlation method. Focal depths are fixed at 15km with consideration for our seismic refraction survey in this area (Takahashi et al. 2020, JpGU). All tremors distribute between Amami islands and Ryukyu trench. Distance from the Ryukyu trench to tremors is about 20~80km. Most tremors locate at the source area of 1995 Amami earthquake (M7.1) (e.g., Yamada et al. 1997). Many aftershocks of the Amami earthquake distribute in the subducted slab. Arai et al. (2017) found large normal faults intersecting the subducted slab at north of tremor area. These imply a complex geometry of plate surface and fractured structures in the slab at the tremor area.

The most active sequence of tremors occurred from 3/5/2019 to 19/5/2019. This activity started at southern part of the tremor area, and migrated north for about 70 km. Migration speed is about 4.0~4.5km/day. Similar migration speed was observed for shallow VLFEs in Hyuga-nada (Tonegawa et al. 2020) and Kumano-nada (Nakano et al. 2018) at Nankai subduction zone. Yamashita et al. (2015), in contrast, observed fast migrations (30~60 km/day) of shallow low frequency tremors in Hyuga-nada. They also pointed out rapid reverse migrations. Such reverse migration was not clearly seen in our case.

A large cumulative slip of SSEs is observed near the Amami plateau (Nishimura 2014). In this large slip area, we observed low actively of shallow tremors. Tremor migration we observed stopped at south of the large slip area. Arai et al. (2017) found a subducted seamount near the large slip area of SSEs. It implies that the subducted seamount affects tremor migration. We may say that complex geometries of plate surface or fractured structures in the subducted slab may have important roles for slow earthquake activities in the central Ryukyu arc.

Acknowledgement: This study was partially supported by “Research Project for Compound Disaster Mitigation on the Great Earthquakes and Tsunamis around the Nankai Trough Region” of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan. We are grateful for Amami-city, Tokunoshima-town, Amagi-town, China-town and Toshima-village for their kind corporation for onshore seismic observations.

© 日本地震学会

CMT solutions of earthquakes around Okinawa island from strong-motion records by using a land-ocean unified 3D structure model

*Masanao Komatsu[1], Hirofumi Kowari[2], Tomotsugu Watanabe[1], Taro Okamoto[3], Takeshi Nakamura[4], Hiroshi Takenaka[1]

1. Okayama University, 2. Hanshin Consultants Co., Ltd., 3. Tokyo Institute of Technology, 4. Central Research Institute of Electric Power Industry

沖縄本島近海では地震活動が活発である．本研究では2007年10月から2013年6月に発生したM_{JMA}5.2～5.8の7つの地震の強震波形データから，CMTインバージョンを行い，地震の位置，規模，震源メカニズムを推定した．

CMTインバージョンにはFAMT (Okamoto *et al.*, 2017, EPS)の方法を用い，グリーン関数の計算には陸上，海底地形を考慮できる3次元差分法の計算コードHOT-FDM (Nakamura *et al.*, 2012, BSSA)を使用した．沖縄本島南東沖に南北方向，東西方向，鉛直方向に各2 km間隔でセントロイド震源の候補点を設定し，相反定理を用いてグリーン関数を計算した．グリーン関数の計算に用いた海陸統合の3次元地下構造モデルは以下のように構築した．陸上地形は国土地理院の250 mメッシュ(標高)を，海底地形はJTOPO30を導入し，海水層を考慮した．モホ面は反射法探査の結果 (Nishizawa *et al.*, 2019, EPSなど)の結果をコンパイルし，モデル化した．フィリピン海プレート上面はIwasaki *et al.* (2015, AGU)のモデルを採用した．これらの地震波速度や密度は公開されている広域モデル(たとえば，全国1次地下構造モデル)を参考に設定した．上部地殻より上の地盤はJ-SHIS深部地盤モデルを採用した．

本研究で使用したデータは防災科学技術研究所が展開する強震観測網(K-NET)の8観測点(KGS033, KGS034, KGS035, OKN001, OKN002, OKN003, OKN004, OKN005)で観測された強震波形である．これらを速度波形に積分しバンドパスフィルタをかけて使用した．

解析した結果をFigure 1に示す．イベント番号は発生日時の順に付けた．セントロイド震源はF-netによるものと比べて北西側に移動した．また，深さのばらつきはF-netによるものよりも小さくなった．メカニズムはイベント①と⑥の横ずれ成分を除き，北西・南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型であり，圧縮軸の方向はフィリピン海(PHS)プレートの沈み込む方向に対応する．本研究で求まった震源はイベント①と⑥は海洋マントル，それ以外は海洋地殻内に位置している．なお，発表ではさらに最新のイベントやマグニチュードの小さなイベントを含めて解析数を増やす予定である．

謝辞：本研究では，防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)の強震波形記録，国土地理院の数値地図250 mメッシュ(標高)，JTOPO30，J-SHIS深部地盤モデルを使用しました．プレート境界モデル(Iwasaki *et al.*, 2015, AGU)は，国土地理院の数値地図250mメッシュ（標高），日本海洋データセンターによる500mメッシュ海底地形データ(J-EGG500, http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html)及びGeographic Information Network of Alaska（アラスカ大学）の地形・水深データ(Lindquist *et al.*, 2004, Eos Trans. AGU)から作成したものです．グリーン関数の計算は学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援により(課題番号: jh190075-NAH)，名古屋大学情報基盤センターの超並列スパコンFX100を利用し，および東京大学地震研究所の共同利用における援助を受け(課題番号：2020-S-08)，同大情報基盤センターのシステム(Oakforest-PACS)を利用しました．

© 日本地震学会

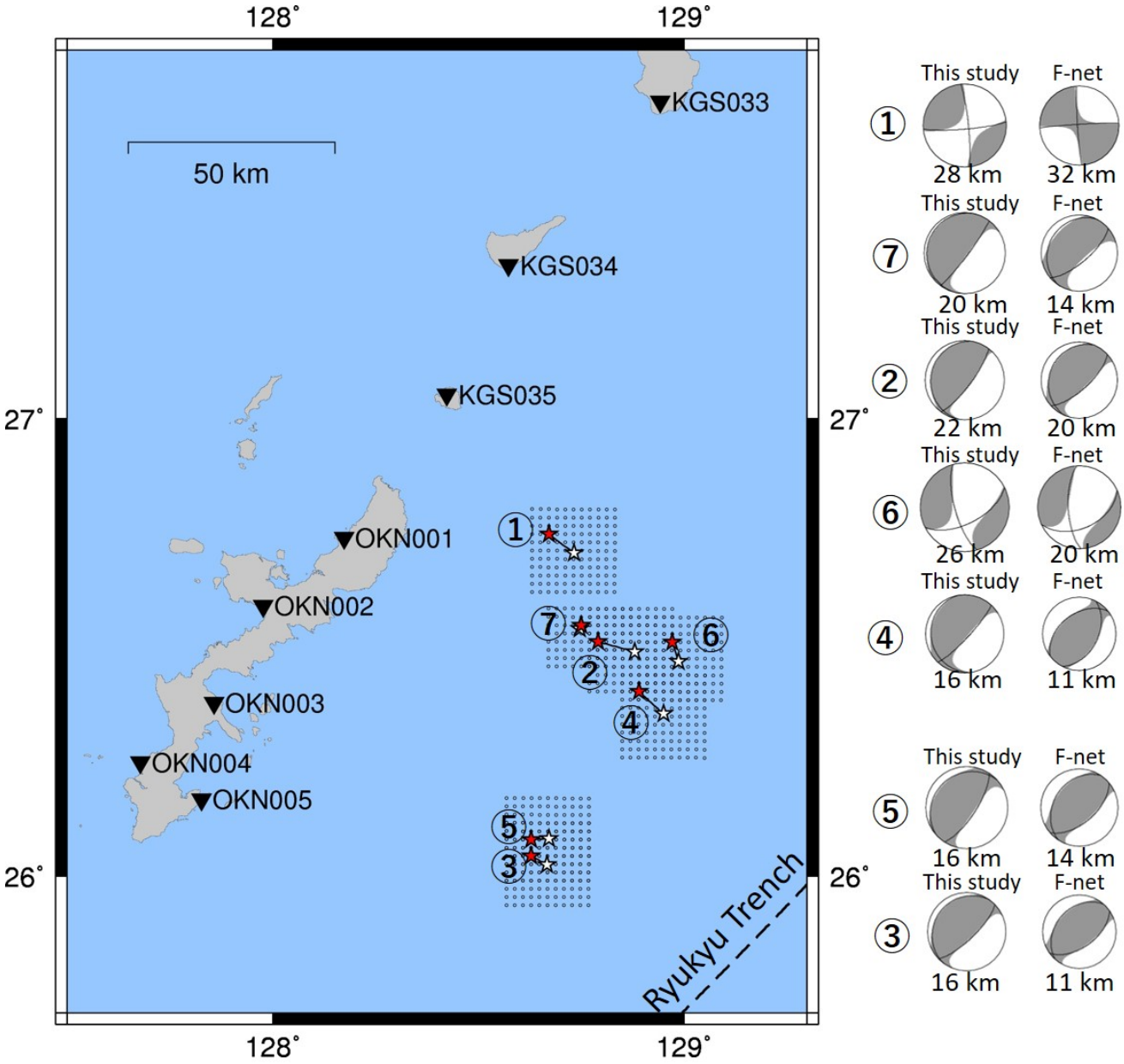


Figure 1. Location of the 7 events analyzed in this study. Red and white stars indicate epicenters determined in this study and reported by NIED, respectively. Black points are ranges of grid searches for the CMT. Inverse triangles denote K-NET stations in NIED. Black dashed line indicates Ryukyu trench. The obtained moment tensor solutions and centroid depths are shown on the right.

© 日本地震学会

Poster session (Oct. 31th) | Introduction of committee activities：S25.Committee activities for society

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM JST | Sat. Oct 31, 2020 7:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P

S25P

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-01] Public Relations Committee

*Public Relations Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-02] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-03] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-04] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-05] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-06] SSJ Committee

*SSJ Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-07] Geopark Assistance Committee

*Geopark Assistance Committee[1] (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM JST | 7:00 AM - 8:30 AM UTC

[S25P-08] Kanamori Fund

*Kanamori Fund[1] (1. The Seismological Society of Japan)

Public Relations Committee

*Public Relations Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

広報委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

SSJ Committee

*SSJ Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

SSJ Committee

*SSJ Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

強震動委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

SSJ Committee

*SSJ Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

学校教育委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

SSJ Committee

*SSJ Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

災害調査委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

SSJ Committee

*SSJ Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

普及行事委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

SSJ Committee

*SSJ Committee[1]

1. The Seismological Society of Japan

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

© 日本地震学会

Kanamori Fund

*Kanamori Fund[1]

1. The Seismological Society of Japan

金森基金の活動を紹介します

© 日本地震学会