

Mon. Sep 16, 2019

ROOM C

Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]AM-1

chairperson: Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Motoyuki Kido(IRiDeS, Tohoku University), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

9:30 AM - 10:30 AM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-01] Compliant volcanic arc and backarc crust in southern Kurile suggested by interseismic geodetic deformation

*Yuji Itoh¹, Kelin Wang², Takuya Nishimura³, Jiangheng He² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

9:30 AM - 9:45 AM

[S03-02] Introduction of data covariance in slip inversion with land and seafloor geodetic observations

*Ryoichiro Agata¹, Takeshi Iinuma¹ (1. JAMSTEC)

9:45 AM - 10:00 AM

[S03-03] Models for crustal deformation associated with seismovolcanic event in and around Miyakejima and Kozushima in 2000 inferred from GNSS data

*Takahiro Akiyama¹, Shoichi Yoshioka^{2,1} (1. Graduate School of Science, Kobe university, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S03-04] Estimation of block boundary around the base of the Izu Peninsula by soft clustering of GNSS data

*Yuta Mitsui¹, Satoru Watanabe² (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. formerly at Faculty of Science, Shizuoka University)

10:15 AM - 10:30 AM

Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]AM-2

chairperson: Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Motoyuki Kido(IRiDeS, Tohoku University), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:45 AM - 12:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-05] Direct detection of postseismic slip

heterogeneity after the 2011 Tohoku Earthquake by using direct path ranging

*Ryusuke Yamamoto¹, Ryota Hino¹, Motoyuki Kido², Chie Honsho¹, Yukihito Osada^{1,3}, Shuichi Kodaira⁴,

Yasuyuki Nakamura⁴ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. ENABLER Ltd., 4. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

10:45 AM - 11:00 AM

[S03-06] A possible strike-slip motion along the Nankai oblique subduction zone --direct-path acoustic ranging at the Shionomisaki Canyon--

*Motoyuki Kido¹, Eiichiro Araki², Takeshi Tsuji³, Ryusuke Yamamoto⁴, Yoshifumi Kawada¹ (1. IRiDeS, Tohoku University, 2. R&D CEAT, JAMSTEC, 3. Dept. Earth Resources Engineering, Kyushu University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S03-07] Width of the strain concentration in the San-in Shear Zone as observed by a dense GNSS network

*Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Takuya Nishimura³ (1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM

[S03-08] Attempt to detect intra-plate SSEs based on GEONET data (F3 solution)

*Yusaku Tanaka¹ (1. ERI, UTokyo)

11:30 AM - 11:45 AM

[S03-09] Detection of seafloor crustal deformation due to shallow SSE using ocean bottom pressure with long-period tidal variability corrections

*Tomohiro Inoue¹, Tomoya Muramoto², Daisuke Inazu³, Yoshihiro Ito⁴, Ryota Hino⁵, Kazuaki Ohta⁴, Syuichi Suzuki⁵ (1. Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Tohoku University)

11:45 AM - 12:00 PM

Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]PM-2

chairperson: Yo Fukushima(IRiDeS, Tohoku University), Shun-ichi Watanabe(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

2:45 PM - 3:45 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-10] Construction of the sea-floor geodesy network in Nemuro-Oki, the southwestern part of the Kuril Trench

*Yusaku Ohta¹, Motoyuki Kido², Ryosuke Azuma¹, Makiko Sato¹, Syuichi Suzuki¹, Ryusuke Yamamoto¹, Hidenobu Takahashi¹, Yukiho Kimura¹, Hideto Otsuka¹, Chie Honsho¹, Ryota Hino¹, Mako Ohzono³, Kazumi Okada³, Yuki Aota³, Hiroaki Takahashi³, Shinohara Masanao⁴, Fumiaki Tomita⁵, Toshiya Kanamatsu⁵, Kan-Hsi Hsiung⁵, Takeshi Ilnuma⁵ (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Toho University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. ISV, Hokkaido University, 4. ERI, University of Tokyo, 5. JAMSTEC)
2:45 PM - 3:00 PM

[S03-11] Preliminary Report of the GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation

*Takeshi Ilnuma¹, Motoyuki Kido², Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda¹, Fumiaki Tomita¹, Iwao Ueki¹ (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)
3:00 PM - 3:15 PM

[S03-12] Validation of SSE detection capability of the present GNSS-A observation network

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
3:15 PM - 3:30 PM

[S03-13] A compatible format for preprocessed GNSS-A seafloor geodetic data

*Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)
3:30 PM - 3:45 PM

Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]PM-3

chairperson: Takao Kumazawa (Earthquake Research Institute, University of Tokyo), Yo Fukushima (IRIDeS, Tohoku University), Shun-ichi Watanabe (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
4:00 PM - 4:30 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-14] Creep rates along the Philippine fault, Leyte

Island, and possible repeating of Mw~6.5 earthquakes on an isolated locked patch

*Yo Fukushima¹, Manabu Hashimoto², Masatoshi Miyazawa², Naoki Uchida³, Taka'aki Taira⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. DPRI, Kyoto University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley)
4:00 PM - 4:15 PM

[S03-15] Geodetically estimated location and geometry of fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake

*Tomokazu Kobayashi¹, Kyonosuke Hayashi¹, Hiroshi Yari¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)
4:15 PM - 4:30 PM

Room C | General session | S19. Seismology General and Miscellaneous Contribution

[S19]PM-3

chairperson: Takao Kumazawa (Earthquake Research Institute, University of Tokyo), Yo Fukushima (IRIDeS, Tohoku University), Shun-ichi Watanabe (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
4:30 PM - 5:15 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S19-01] About action of disaster prevention measures research of NPO Research Organization For Catastrophic Disaster Reduction (CDR)

*Kazuo Yoshida¹ (1. NEWJEC Inc.)
4:30 PM - 4:45 PM

[S19-02] Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake

*Takao Kumazawa¹, Yoshihiko Ogata², Hiroshi Tsuruoka¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics)
4:45 PM - 5:00 PM

[S19-03] Disaster prevention administration that can not reach a huge earthquake

*kazunobu tani¹ (1. bujisoukenkabusikigaisya)
5:00 PM - 5:15 PM

Tue. Sep 17, 2019

ROOM C

Room C | General session | S17. Tsunami

[S17]AM-1

chairperson:Shingo Watada(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Akio Katsumata(Meteorological Research Institute, JMA)

9:15 AM - 10:30 AM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S17-01] Mechanism of the 2018 Sunda Strait Tsunami

*Shingo Watada¹, Masumi Yamada², Iyan Mulia¹, Karyono Karyono³, Arif Aditya⁴, Dimas Sinipar⁵ (1. Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Meteorological Climatological and Geophysical Agency, 4. Geospatial Information Agency of Indonesia, 5. National Central University, Taiwan)

9:15 AM - 9:30 AM

[S17-02] Tsunami simulation due to the Anak Krakatau Volcano activities on 22 December 2018 and analyses on the potential future observing systems

*Iyan E. Mulia¹, Shingo Watada¹, Tung-Cheng Ho¹, Kenji Satake¹, Yuchen Wang¹, Arif Aditya² (1. The University of Tokyo, 2. Geospatial Information Agency of Indonesia)

9:30 AM - 9:45 AM

[S17-03] Investigation for the Tsunami and Earthquake Source of the 2018 M7.5 Sulawesi Earthquake

*Tung-Cheng Ho¹, Kenji Satake¹, Shingo Watada¹, Iyan E. Mulia¹, Yosuke Aoki¹, Ray Y. Chuang² (1. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 2. Dept. Geography, NTU, Taiwan)

9:45 AM - 10:00 AM

[S17-04] A Method of Real-Time Tsunami Detection

*Yuchen Wang¹, Kenji Satake¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM

[S17-05] Rapid magnitude estimation method for slow tsunami earthquakes (4)

*Akio Katsumata¹, Masayuki Tanaka¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA)

10:15 AM - 10:30 AM

Room C | General session | S17. Tsunami

[S17]AM-2

chairperson:Tatsuya Kubota(NIED), Satoshi Kusumoto(JAMSTEC)

10:45 AM - 12:15 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S17-06] Near-field array observation of the 2015 Mw6.0

Bonin Trench earthquake: from foreshock to post-seismic seafloor deformation

*Yoshio Fukao¹, Hiroko Sugioka², Aki Ito¹, Mikiya Yamashita^{1,5}, Takashi Tonegawa¹, Hajime Shiobara³, Tatsuya Kubota⁴, Tatsuhiko Saito⁴ (1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. ERI/Univ. Tokyo, 4. NIED, 5. GSJ/AIST)

10:45 AM - 11:00 AM

[S17-07] Near-field array observation of the 2015 Mw6.0

Bonin Trench earthquake: Modeling in-situ tsunami generation field

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Yoshio Fukao², Hiroko Sugioka³, Aki Ito², Mikiya Yamashita^{2,4}, Takashi Tonegawa², Hajime Shiobara⁵ (1. NIED, 2. JAMSTEC, 3. Kobe Univ., 4. GSJ, AIST, 5. ERI, Univ. Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM

[S17-08] New phase correction method for accurate numerical computation of shorter-period tsunamis

*Osamu Sandanbata^{1,2}, Shingo Watada¹, Tungcheng Ho¹, Kenji Satake¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Department of Science, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S17-09] Estimation of Roughness Length by Comparison of Observations at Onshore Tide Gauges and Numerical Calculation Results

*Masaaki MINAMI¹ (1. Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute)

11:30 AM - 11:45 AM

[S17-10] Origin Time of the 1854 Tokai Earthquake

Estimated from Distant Tsunami Waveforms

*Satoshi Kusumoto¹, Kentaro Imai¹, Ryoko Obayashi¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi^{2,1}, Yuichiro Tanioka³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Hokkaido University)

11:45 AM - 12:00 PM

[S17-11] An evaluation of tsunami occurrence probability based on tsunami deposit in eastern Hokkaido

*Makoto NEMOTO¹, Takashi YOKOTA² (1. OYO Corporation, 2. Aichi Institute of Technology)

12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Emergency session | S24. Off Yamagata Earthquake of 18 June 2019

[S24]PM-1

chairperson:Masanao Shinohara(Earthquake Research Institute,

The University of Tokyo, Kazuki Miyaoka(Japan Meteorological Agency)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S24-01] An outline of 2019 Off-Yamagata earthquake

*Kazuki Miyaoka¹, Kiyoshi Takeda¹, Yuzo Ishigaki¹, Koji Nakamura¹, Satoshi Harada¹, Fujio Kusano², Nobuo Harada¹ (1. Japan Meteorological Agency, 2. CeMI)

1:30 PM - 1:45 PM

[S24-02] Spatiotemporal distribution of aftershocks of the 2019 M6.7 Yamagata-ki earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Satoshi Hirahara¹, Takashi Nakayama¹, Naoki Uchida¹, Tomomi Okada¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S24-03] Yamagata offshore Earthquake in view of Historical Earthquakes and Crustal Movements

*Kazuo Kawauchi¹ (1. NIIGATA UNIVERSITY OF PHARMACY AND APPLIED LIFE SCIENCES)

2:00 PM - 2:15 PM

[S24-04] Onshore temporal aftershock observation for the 2019 Yamagata-Oki earthquake

*Tomomi Okada¹, Shin'ichi Sakai², Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Toru Matsuzawa¹, Ryota Hino¹, Masanao Shinohara², Richard Sibson³ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. University of Otago)

2:15 PM - 2:30 PM

[S24-05] Aftershock observation of the 2019 Off-Yamagata Earthquake using anchored buoy ocean bottom seismometers

*Masanao Shinohara¹, Shin'ichi Sakai¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Ryota Hino², Yusuke Yamashita³, Hiroshi Sato¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruption, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S24-06] Active period of eastern margin of the Japan Sea

*Yuzo Ishikawa¹ (1. Geological Survey of Japan)

2:45 PM - 3:00 PM

Room C | Emergency session | S24. Off Yamagata Earthquake of 18 June 2019

[S24]PM-2

chairperson:Naoki Uchida(Graduate School of Science Tohoku University), Hiroshi Sato(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Atsushi Nozu(Port and Airport Research Institute)

3:15 PM - 4:30 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S24-07] Characterization of the crustal structure in the epicentral area of the 2019 Off-Yamagata prefecture earthquake, northern Honshu, Japan

*Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Masanao Shinohara¹, Shin'ichi Sakai¹, Akinori Hashima¹, Tetsuo No², Shuichi Kodaira², Takeshi Sato³, Makoto Matsubara⁴ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Sapporo Regional Headquarters, JMA, 4. NIED)

3:15 PM - 3:30 PM

[S24-08] The relationship between 2019 Off the coast of Yamagata prefecture earthquake and 1964 Niigata earthquake

*Taku Ueda¹, Lina Yamaya¹, Aitaro Kato¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM

[S24-09] Long-period strong ground motion observed in the Echigo Plain during the Yamagata-ken-oki event of June 18, 2019

*Tomiichi Uetake¹, Kazuhito Hikima¹, Shutaro Sekine² (1. Tepco Research Institute, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., 2. Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:45 PM - 4:00 PM

[S24-10] Rupture Process of the 2019 Off Yamagata Prefecture Earthquake Based on Waveform Inversion with Empirical Green's Functions

*Atsushi Nozu¹ (1. Port and Airport Research Institute)

4:00 PM - 4:15 PM

[S24-11] Science literacy of Twitter users considered from "tweets" for earthquake clouds before and after the Yamagata Offshore earthquake

*Yoshiaki Orihara¹ (1. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM

Room C | General session | S04. Tectonics

[S04]PM-2

chairperson:Naoki Uchida(Graduate School of Science Tohoku University), Hiroshi Sato(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Atsushi Nozu(Port and Airport Research Institute)

4:30 PM - 5:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S04-02] **3-D thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate along the Ryukyu Trench**

*Nobuaki Suenaga¹, Shoichi Yoshioka^{2,1}, Yingfeng Ji^{3,4}

(1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research center for Urban Safety and security, Kobe University, 3. Center of Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Chinese Academy of Sciences, 4. Key laboratory of continental collision and plateau uplift, Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences)

4:45 PM - 5:00 PM

Wed. Sep 18, 2019

ROOM C

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

[S22]AM-1

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

9:15 AM - 10:30 AM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

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

*Jun Ogata¹ (1. Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy)

9:15 AM - 9:45 AM

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

*Hiroki Kuroda¹, Jun Ogata¹, Hidenori Sakanashi¹, Takahiko Uchide² (1. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

9:45 AM - 10:00 AM

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

*Shota Hara¹, Yukitoshi Fukahata², Yoshihisa Iio² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:00 AM - 10:15 AM

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

*Keisuke Yano¹, Takahiro Shiina², Sumito Kurata¹, Aitaro Kato², Fumiyasu Komaki¹, Shin'ichi Sakai², Naoshi Hirata² (1. Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM

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

[S22]AM-2

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

10:45 AM - 12:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S22-05] Development of 3D Convolutional Neural

Network to locate hypocenter with theoretical seismograms of time series as training data.

*Daisuke Sugiyama¹, Seiji Tsuboi¹ (1. JAMSTEC)

10:45 AM - 11:00 AM

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

*Masaru Nakano¹, Daisuke Sugiyama¹, Takane Hori¹, Tatsu Kuwatani¹, Seiji Tsuboi¹ (1. JAMSTEC)

11:00 AM - 11:15 AM

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

*Yuki Kodera¹, Shin'ichi Sakai², Takahito Nishimiya¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan

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

11:15 AM - 11:30 AM

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

*Toru Ishii¹, Atsuko Oana¹, Kensuke Wada¹ (1. Shimizu Corporation)

11:30 AM - 11:45 AM

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

*Atsuko Oana¹, Toru Ishii¹, Kensuke Wada¹ (1. Shimizu Corporation)

11:45 AM - 12:00 PM

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

[S22]PM-1

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

2:30 PM - 4:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

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

*Loic Viens¹, Tomotaka Iwata¹ (1. Kyoto University, DPRI)

2:30 PM - 2:45 PM

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

*Yu Yamamoto¹, Kazuro Hirahara^{1,3}, Hirotaka Hachiya^{1,2}, Atsushi Takahashi¹, Naonori Ueda¹ (1.

Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2.
Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa)

2:45 PM - 3:00 PM

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

*Naoto Mizuno¹, Satoshi Ide¹ (1. School of Science,
The University of Tokyo)

3:00 PM - 3:15 PM

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

*Norifumi Yamaga¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School
of Integrated Science and Technology, Shizuoka
University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

3:15 PM - 3:30 PM

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

*Junki Komori¹, Ryosuke Ando¹, Masanobu Shishikura²
(1. The University of Tokyo, 2. The National Institute
of Advanced Industrial Science and Technology)

3:30 PM - 3:45 PM

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

*Sho Akagi¹, Toshihiko Hayakawa¹ (1. Mitsubishi
Space Software Co., Ltd.)

3:45 PM - 4:00 PM

Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]AM-1

chairperson: Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Motoyuki Kido(IRIDeS, Tohoku University), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Mon. Sep 16, 2019 9:30 AM - 10:30 AM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-01] Compliant volcanic arc and backarc crust in southern Kurile suggested by interseismic geodetic deformation

*Yuji Itoh¹, Kelin Wang², Takuya Nishimura³, Jiangheng He² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

9:30 AM - 9:45 AM

[S03-02] Introduction of data covariance in slip inversion with land and seafloor geodetic observations

*Ryoichiro Agata¹, Takeshi Iinuma¹ (1. JAMSTEC)

9:45 AM - 10:00 AM

[S03-03] Models for crustal deformation associated with seismovolcanic event in and around Miyakejima and Kozushima in 2000 inferred from GNSS data

*Takahiro Akiyama¹, Shoichi Yoshioka^{2,1} (1. Graduate School of Science, Kobe university, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S03-04] Estimation of block boundary around the base of the Izu Peninsula by soft clustering of GNSS data

*Yuta Mitsui¹, Satoru Watanabe² (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. formerly at Faculty of Science, Shizuoka University)

10:15 AM - 10:30 AM

Compliant volcanic arc and backarc crust in southern Kurile suggested by interseismic geodetic deformation

*Yuji Itoh¹, Kelin Wang², Takuya Nishimura³, Jiangheng He²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

北海道東部の第四紀火山列とその周囲からなる火山弧域では、GNSS観測により地震間に短縮ひずみが集中していることが知られてきた。火山弧域における高い地殻熱流量、地震波速度構造や減衰構造からは、火山弧域の地殻が前弧や典型的な大陸地殻より変形しやすいことが期待される。千島海溝では2003年十勝沖地震 (M_w 8.0) 等のM8-9級プレート境界型地震が繰り返し発生してきており、地震間にはそれらの震源域が固着していることが知られてきた。したがって、観測された地震間の短縮ひずみの集中は、プレート境界の固着による圧縮力により火山弧沿いに変形が集中した結果と考えられる。そこで本研究では、地震間における地殻の力学的挙動を、変形しやすさを表すパラメタとして地殻の厚さと剛性率に着目してモデル化する。その上で、地震間のGNSSデータから、これらのパラメタの水平不均質分布を求めた。

本研究では有限要素法を用いて単純化した沈み込み帯の3次元地下構造モデルを構築した。海溝付近のマントルウェッジの一部で、弾性的に振る舞うCold Noseよりも陸側の弾性地殻の底面の深さ (25 km) と剛性率 (48 GPa) が前弧から背弧まで一様である「標準モデル」を構築した。マントルウェッジと海洋マントルにはBurgers Rheologyを仮定し、そのMaxwell粘性率はそれぞれ 1.0×10^{19} Pa s, 1.0×10^{20} Pa sとし、Maxwell粘弾性体の剛性率は64 GPaとした。地震間の地殻変動として、海溝から深さ40 kmまでのプレート境界をプレート収束速度 (8 cm/年) で500年間固着させた場合の粘弾性変形を計算した。標準モデルを用いた場合の計算結果を、1998年3月から2003年9月のGEONET F3解から計算した地震間の地殻変動速度と比較したところ、前弧側の観測点では計算値が観測値よりも顕著に小さかった。その一方で、背弧の観測点では変動が概ね説明された。また、深さ70 kmまで完全に固着させた場合も前弧の残差は改善しなかった。このことは、地殻の底面の深さや剛性率を一様とする仮定に問題がある可能性を示唆している。そこで、スラブ上面の深さを基準にCold Noseよりも陸側の地殻を前弧域・火山弧域・背弧域に分割し、火山弧域・背弧域の地殻の底面の深さや剛性率を標準モデルから小さく設定したモデル計算を実施し、観測データと比較した。その際、それぞれのパラメタの影響を検討するために、底面の深さ (すなわち地殻の厚さ) と剛性率を別々に変化させた。火山弧域のパラメタのみを小さくした場合、背弧域の計算値が観測値より著しく小さくなった。これは、火山弧域の地殻が緩衝材のように振る舞うためと考えられる。そこで、火山弧域と背弧域の両方が変形しやすい、すなわち底面の深さや剛性率が標準モデルより小さく設定したところ、前弧から背弧までの観測データを十分説明することができた。具体的には、底面の深さか剛性率のどちらか一方を火山弧域と背弧域でそれぞれ標準モデルの10%と40%程度とした場合に観測データを説明する。しかし、どちらのパラメタを変化させた場合もモデル計算された地表変動パターンが似ていたため、地震間のGNSSデータのみからどちらのパラメタが変化しているかを区別することはできないことがわかった。そこで、各モデルの構造を用いて2003年十勝沖地震時の弾性応答を計算し、観測データと比較したところ、底面の深さを変化させたモデルや標準モデルと比べ、剛性率を変化させたモデルでは火山弧付近での計算値が観測値と整合的ではなかった。したがって、火山弧の剛性率が10%まで低いことは現実的でないと考えられる。最後に、前弧と背弧のパラメタを固定し、火山弧の地殻の剛性率と厚さを同時に変化させた。その結果、火山弧の剛性率と厚さの積が標準モデルの10%程度のとき同等のモデル計算値が得られた。パラメタ間のトレードオフを考えると、地震間と地震時のGNSSデータのみから剛性率と厚さの分布を一意に決定することは不可能であるが、例えば、火山弧の地殻の底面の深さが7.5 km (標準モデルの30%) で、剛性率が16 GPa (標準モデルの1/3 ~ 33%) であるモデルは、90%の地殻内地震が発生する深さ下限 (D90) と調和的である。このモデルでは火山弧の下部地殻が地震間に粘弾性的に変形することを示しており、Hasegawa et al. (2005, *Tectonophysics*) による火山弧の変形モデルと調和的である。

Introduction of data covariance in slip inversion with land and seafloor geodetic observations

*Ryoichiro Agata¹, Takeshi Iinuma¹

1. JAMSTEC

全球測位衛星システム（GNSS）による陸域地殻変動観測と、GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）などによる海底地殻変動観測が組み合わされることで、海底下の断層における固着・すべりの測地逆解析の解像度は近年飛躍的に向上してきた。一方で、陸域と海域の観測点の双方を用いる場合、観測点分布やその密度には空間的偏りが生じる。この偏りを適切に扱わない場合、データへの過剰適合による不自然な短波長成分が推定すべり分布に含まれることがしばしば問題となる。対策として、観測データの重みづけや観測点の間引きを行うことが考えられるが、個々のデータに対して重みや使用・不使用を客観的に決めることは難しい。地震波によるすべり逆解析に関しては、Yagi and Fukahata (2008, 2011)が、高サンプリングレートの地震波データ、つまり時間方向に密なデータへの過剰適合が、データ同士の時間方向の共分散を適切に導入することによって避けられることを指摘した。すべり分布の測地逆解析においては、データどうしの共分散を導入しない、すなわちデータ共分散行列の非対角成分を0として逆問題を定式化することが多い。本研究は、Yagi and Fukahata (2008, 2011)と同様の考えを空間方向に偏りを持った測地データに適用し、データどうしの適切な空間的共分散を導入することで、過剰適合のないすべり逆解析を行うことを目的とする。

すべり分布の測地逆解析は多くの場合、すべての確率変数が正規分布に従うと仮定した線形逆問題として定式化される。観測データの共分散行列は、観測誤差そのものと、モデル誤差に由来する成分に大別することができる。観測誤差そのものの共分散(例えばFukahata and Wright 2008, Iinuma et al. 2015)だけでなく、モデル誤差による共分散を適切に評価することが重要となる。Yagi and Fukahata (2011)、Duputel et al. (2014)などは、モデル誤差の要因が単位すべり応答関数（グリーン関数）の不確かさにあるとみなした。この場合、データ共分散行列はモデルパラメータを用いて表せるため、彼らはそれを解くための非線形逆解析問題を定式化した。本研究ではもう一つのアプローチとして、データ共分散行列をグリーン関数自体で直接表わすことを考える。これはYagi and Fukahata (2008)の考え方に近く、逆問題を従来通りの線形逆解析として扱えるため、Yabuki and Matsu'ura (1992)などの広く使われている手法に対して、追加計算をほとんど必要とせずに応用できることが利点である。

プレート境界を想定した低角逆断層を対象とした人工データを用いた数値実験に本手法を適用し、その有効性を確かめた。仮定したすべり分布を基に地表変位を合成する際に、断層の傾斜角にずれを与えてグリーン関数を計算することにより、数値実験にモデル誤差を導入した。データ共分散行列を対角行列とした場合、傾斜角の違いが大きくなるにつれ推定されたすべり分布が振幅の大きな短波長成分を含むようになった。一方、本研究の手法で共分散を導入した場合だと、ある程度傾斜角の違いが大きくなっても、真のすべり分布により近い滑らかな分布が得られることが分かった。

本手法を、南海トラフ域におけるすべり欠損分布の推定に適用した。地殻変動データとして、Nishimura et al. (2018)によって推定されたGEONETの陸上観測点と海上保安庁などのGNSS-A海底観測点(Yokota et al., 2016)における変位速度データを用いた。グリーン関数の計算には、半無限弾性体における三角形断層に対する弾性応答の解析的表現（Comninou & Dundurs 1975）を用いた。したがって、逆問題には少なくとも、1. 剛体ブロック運動による変位、2. 弾性・粘弾性の3次元不均質構造、を考慮しないことによるモデル誤差が含まれることになる。本手法を用いた推定結果として、観測データの位置に依存しない滑らかなすべり欠損分布を得た。また、観測データと推定されたすべり欠損分布から計算される変位の残差には、四国地方南部などに比較的大きな西向き成分が含まれていた。これらのことは、観測データ、とくにモデル化されていない、中央構造線の南側のブロックに生じている剛体変位に対し、推定結果が過剰適合していないことが示唆

される。これらの結果は、適切なデータ共分散の導入の重要性を示す。一方他の領域には、原因の説明が困難である系統的な残差分布もみられた。より真のものに近いグリーン関数を作成するためのモデル化を同時に行っていく必要があることも示唆される。

Models for crustal deformation associated with seismovolcanic event in and around Miyakejima and Kozushima in 2000 inferred from GNSS data

*Takahiro Akiyama¹, Shoichi Yoshioka^{2,1}

1. Graduate School of Science, Kobe university, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

1. はじめに

2000年6月26日より三宅島直下で群発地震が発生し始め、時間の経過とともに岩脈の貫入を伴ってその活動領域は北西方向へ広がっていった。また、Mw 6程度の地震が5回発生した。三宅島のGNSS観測点では3ヶ月間で最大で約90 cmの収縮に伴う変位や、本州でも通常とは異なる変位を観測するなど非定常地殻変動が広域で観測された。この一連の地震・火山活動を三宅－神津イベントと呼ぶ。

このイベントについて、Seno(2005)は山岡(2000)の岩脈貫入モデルと伊豆半島下に設定したデタッチメントモデルによって本州の地殻変動の水平成分を説明したが、伊豆諸島の観測データを説明できていない可能性がある。また、Nishimura et al. (2001)は伊豆諸島と本州の30以上のGNSS観測点の3成分データを用いて4つの力源を推定したが、本州の地殻変動を説明できていない可能性がある。そこで、本研究では、GNSSの水平・上下データを用いて、伊豆諸島、および本州で観測された地殻変動を同時に説明しうるモデルの構築を試みた。

2. データと解析手法

解析に用いたデータは国土地理院の日々の座標値、F3解の1998年1月1日から2003年12月31日までの伊豆諸島と東海地方、中部地方、関東地方の243のGNSS観測点の時系列データである。固定点は新潟県にある大潟(950241)と柏崎2(960567)の2点とした。まず、解析に使用した全観測点の時系列データから求めた共通誤差成分とトレンドを時系列データから除去した。トレンドの推定期間は1998年5月1日から2000年6月6日までとした。同イベントによる変位量は2000年6月7日から9月5日までの時系列データから求めた。さらに、得られた変位量から、三宅－神津イベントで発生した上記の Mw 5.9-6.5の5つの地震による地震時の変位を除去した。さらに、同イベントに伴う各観測点での変位から、Nishimura et al. (2001)の断層モデルから計算される変位を除去し、本州の残差の変位データに対して、他の力源によるすべり量をインヴァージョン解析によって推定することを試みた。

3. 結果と考察

このようにして得られた本州での水平・上下の変位データに対して Seno(2005)のデタッチメントモデルのすべり域の大きさと位置を仮定して、インヴァージョンによりすべりの空間分布を求めた。その結果、最大すべり量は6.9 cm、平均のすべり量は3.9 cmと求まり、等価なモーメントマグニチュードは6.4と推定された。すべりの方向は Seno(2005)とほぼ一致したが、同研究では20 cmの様なすべりが得られており、すべり量の大きさに違いがみられた。また、インヴァージョンによるすべり分布から求めた計算変位と観測変位を比較すると、伊豆半島以外の本州の観測点ではほとんど一致しなかった。

本講演では、さらに伊豆諸島の変位と本州の地殻変動データをよりよく説明するモデルを提案する予定である。

Estimation of block boundary around the base of the Izu Peninsula by soft clustering of GNSS data

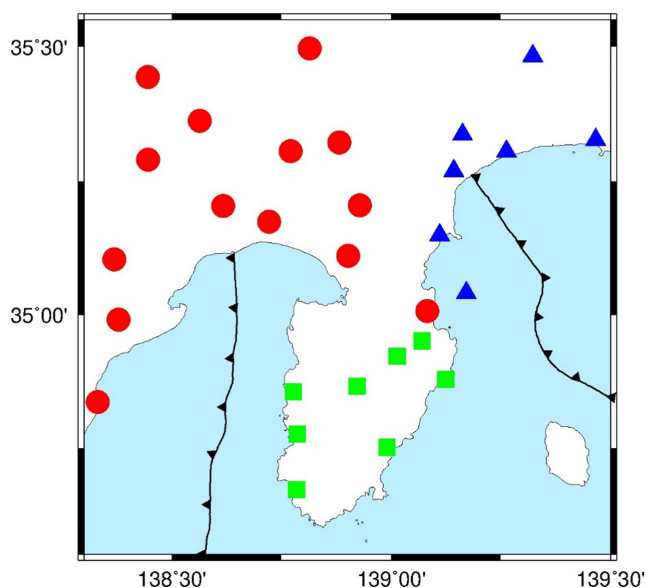
*Yuta Mitsui¹, Satoru Watanabe²

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. formerly at Faculty of Science, Shizuoka University

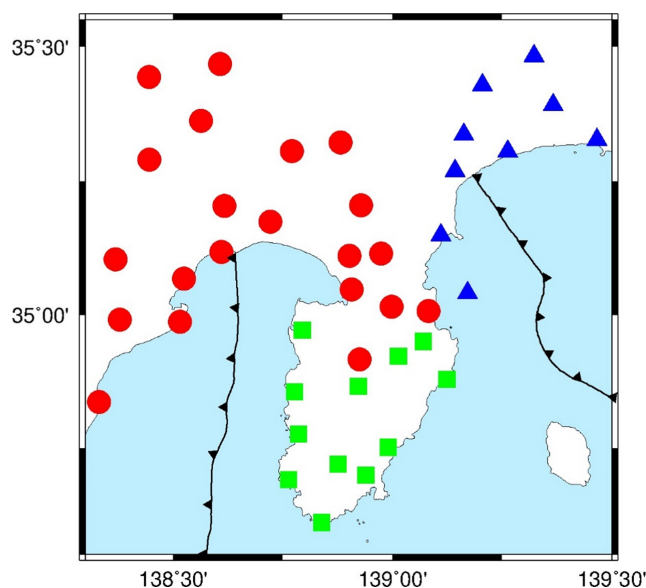
本研究では、複数の先行研究(e.g., Loveless and Meade, 2010; Nishimura, 2011)で設定にバラツキのあった、伊豆半島基部のブロック境界の位置を、国土地理院のGNSSデータ(水平成分)に基づいて推定する。手法として、近年導入が進んでいるクラスター分析(e.g., Simpson et al., 2012; Savage, 2018; Takahashi et al., 2019)を用いる。特に、各観測点データを1つのクラスターへ完全に所属させることなく、各クラスターへの帰属度を推定するソフトクラスタリング法を適用することで、どのクラスターに所属するかが曖昧なデータを除去することを可能にした。GNSSデータの期間として、1997年5月-2000年5月、および、2007年1月-2011年1月の2期間に着目する。この2期間の合間には、東海スロースリップイベントや三宅島周辺の火山活動、2004年伊豆半島沖地震の余効変動などの非定常変動が、同地域の地殻変動に大きな影響を及ぼしている。

本州側のブロック数を3としたソフトクラスタリング分析を行い、いずれかのブロックへの帰属度が高い観測点のみを表示した結果を図に示す。上記イベント前後の2期間において、ブロック同士の境界の位置は不動とみなせることがわかった。ブロックは、「伊豆半島南部」「伊豆半島北部～駿河湾西岸」「伊豆半島基部東～相模湾北岸」の3つとなった。既往研究とは異なり、伊豆半島の北側(いわゆる衝突域)ではなく、伊豆半島南部と北部を分断するような境界が推定された。地表地形としては、水抜一与市坂断層や達磨山断層に対応している。また、「伊豆半島南部」「伊豆半島北部～駿河湾西岸」ブロックの境界と、「伊豆半島基部東～相模湾北岸」「伊豆半島北部～駿河湾西岸」ブロックの境界は、伊豆東部火山群付近で交わることもわかった。「伊豆半島南部」ブロックのアムールプレートに対するオイラー回転を推定したところ、2期間に有意な差は見られなかった。同地域のブロック運動は現在安定していると考えられる。

(a) 1997-2000



(b) 2007-2011



Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]AM-2

chairperson: Ryoichiro Agata(JAMSTEC), Motoyuki Kido(IRIDeS, Tohoku University), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Mon. Sep 16, 2019 10:45 AM - 12:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-05] Direct detection of postseismic slip heterogeneity after the 2011 Tohoku Earthquake by using direct path ranging

*Ryusuke Yamamoto¹, Ryota Hino¹, Motoyuki Kido², Chie Honsho¹, Yukihito Osada^{1,3}, Shuichi Kodaira⁴, Yasuyuki Nakamura⁴ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. ENABLER Ltd., 4. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

10:45 AM - 11:00 AM

[S03-06] A possible strike-slip motion along the Nankai oblique subduction zone -- direct-path acoustic ranging at the Shionomisaki Canyon--

*Motoyuki Kido¹, Eiichiro Araki², Takeshi Tsuji³, Ryusuke Yamamoto⁴, Yoshifumi Kawada¹ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. R&D CEAT, JAMSTEC, 3. Dept. Earth Resources Engineering, Kyushu University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S03-07] Width of the strain concentration in the San-in Shear Zone as observed by a dense GNSS network

*Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Takuya Nishimura³ (1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM

[S03-08] Attempt to detect intra-plate SSEs based on GEONET data (F3 solution)

*Yusaku Tanaka¹ (1. ERI, UTokyo)

11:30 AM - 11:45 AM

[S03-09] Detection of seafloor crustal deformation due to shallow SSE using ocean bottom pressure with long-period tidal variability corrections

*Tomohiro Inoue¹, Tomoya Muramoto², Daisuke Inazu³, Yoshihiro Ito⁴, Ryota Hino⁵, Kazuaki Ohta⁴, Syuichi Suzuki⁵ (1. Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Tohoku University)

11:45 AM - 12:00 PM

Direct detection of postseismic slip heterogeneity after the 2011 Tohoku Earthquake by using direct path ranging

*Ryusuke Yamamoto¹, Ryota Hino¹, Motoyuki Kido², Chie Honsho¹, Yukihiro Osada^{1,3}, Shuichi Kodaira⁴, Yasuyuki Nakamura⁴

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. ENABLER Ltd., 4. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の余効変動は、粘弾性緩和が卓越していることが、複数の研究から明らかになった。例えば、海底測地観測の一つであるGNSS-音響結合方式（GNSS-Acoustic）では、測地観測による粘弾性緩和の直接検出に成功し、特に、地震時変動の大きかった宮城県沖で粘弾性緩和が支配的であることを明らかにした（例えば、Sun et al., 2014; Watanabe et al., 2014; Tomita et al., 2017）。一方で、浅部余効すべりについては、海底測地観測網が海溝軸近傍まで及んでいないため、これまで実測ができなかった。本研究では、海底間音響測距（Direct Path Ranging; 以下DPR）という手法を用いて、東北沖地震の浅部余効すべりの実測を目指した。これは海底に設置した2つの音響トランスポンダ間で音波の送受信を行い、その往復時間と海中音速との積を計算することで基線長を求める手法である。海中音速は、温度、圧力、塩分を変数とする経験式で表されるが、深海においては温度と圧力の変動の影響が大きいため、これらも測距と同時に計測する。また、1脚型の機器の場合は海流によって、また3脚型の場合は堆積物中に徐々に沈み込むことによって、機器の姿勢変化が生じる。この傾斜変化の影響を、機器に搭載された傾斜計と方位計を用いて幾何的に補正する。DPRは、海底の局所的変動を精密かつ連続的に捉えることに長けている。例えば1 km程度の基線ならばミリメートルオーダーの精度で計測ができる（McGuire and Collins, 2013; Yamamoto et al., 2019）。このような高精度の観測を実現するには上述の各種補正が不可欠である。

観測は、地震時すべりが卓越していた宮城県沖と、顕著な余効すべりが示唆されている福島県沖の2箇所で、それぞれ2013–2016年（2013, 2014–2015, 2015–2016年の計3回に分けて実施）と2017–2018年に行われた。宮城県沖の海溝軸を跨ぐ基線に関して変位レートを計算したところ、いずれの観測期間中においても顕著な短縮は認められず、少なくとも本観測期間中は浅部余効すべりに起因する短縮はなかったと見られる。一方の福島県沖における観測では、 27.0 ± 5.5 mm/yrという有意な基線長の短縮が認められた。基線が海溝軸となす角度を考慮すると、 31.4 ± 6.4 mm/yrで海溝に沈み込んでいることになる。

海溝軸近傍は複数の断層が存在しており、そのどこで収束を賄っているかは不明である。我々はまず、反射法地震探査のデータから、本観測の基線がそれらを跨いでいるかを調べた。宮城県沖に関しては、海溝軸近傍の堆積層内に逆断層が認められる一方で、下部陸側斜面下の堆積層内には逆断層と解釈できる顕著な反射面が見られないことから、本DPR観測の基線が、この海域でのプレート境界断層のほぼすべてを跨いでいる可能性が高いことがわかった。従って、本観測期間中には顕著な浅部余効すべりは起きていなかったと言って良いだろう。一方の福島県沖は、海溝軸も含めて堆積層内に明瞭な反射面が見られない場所が多く、どこにプレート境界断層が出てきているかが現時点では不明である。従って、本観測がこの海域における浅部余効すべりの全てを捉えているかどうかはまだ不確定であり、もし本観測の基線が跨いでいない断層でさらなる収縮が生じていれば、実際の短縮レートは本観測で推定された値以上である可能性もある。また福島県沖では、海底地形に音響パスが阻まれて、DPR観測が行えなかった基線が多くある。そこで、DPR観測と並行して、海底局の中間に海中に漂うノードを置き、これを中継させることで音響パスを通す間接音響測距（Indirect Path Ranging）を実施した。これを併用することで、今後、福島県沖の浅部余効すべりの解明が期待される。

A possible strike-slip motion along the Nankai oblique subduction zone --direct-path acoustic ranging at the Shionomisaki Canyon--

*Motoyuki Kido¹, Eiichiro Araki², Takeshi Tsuji³, Ryusuke Yamamoto⁴, Yoshifumi Kawada¹

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. R&D CEAT, JAMSTEC, 3. Dept. Earth Resources Engineering, Kyushu University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University

フィリピン海プレートは南西日本に対し41-65 cm/yr の速度で斜めに沈み込んでいる。その斜交角は潮岬沖では直交方向から30-50度にもなり、横ずれ成分は26-50 mm/yrに達すると推定される。この横ずれ成分は、巨大地震時に直交成分とともに解消される可能性もあるが、地震時には解消されずに、純粋な横ずれ成分として、内陸部の中央構造線の活動、あるいは海溝付近で非地震時にクリープ等により解消されている可能性もある。Tsuji et al. (2014) では、熊野海盆の外縁帯に平行する、wedge boundary strike-slip fault (WBSF) の存在を指摘しており、潮岬海底谷のWBSFに沿う方向の地形的なオフセット量から、WBSFでの横ずれ運動の大きさが地質学的時間の平均値として~20 mm/yr 程度あると見積もっている。しかし、それが定常クリープなのか間欠的な動きであるかは、地質情報からだけでは判定ができない。それで、我々は海底間音響測距による地殻変動の実測を試み、クリープの有無を調べることにした。

WBSFと潮岬海底谷が交差する水深約3000mの海底に3台の測器を設置し、2016年6月から約2年間の連続観測を実施した。各基線は1000-2500 m で溪谷・WBSFをまたぐように設置し、WBSFに平行する横ずれ運動があれば、基線長変化として捉えられる配置とした。実際の地形は急峻な崖となっており、音響パスを通しつつ急傾斜地を避けるために、ROVを用いて確実に設置した。

2019年1月に機器を音響切り離しにより回収し、データ解析を行った。バッテリーが切れるまでの2年間、すべての基線で質の良い連続データが得られた。一方で音速補正に用いる温度計のデータは3000 mの水深にしては極めて大きい最大で0.2°Cに達する擾乱が見られた。正確な音速補正を適用するためには、基線両端での温度変化がコヒーレントであることが前提となるが、両端の温度変化の違いも0.1°C程度あり、線形な温度場空間変化の仮定が困難で、音速補正後も見かけの基線長の擾乱が1000 mの基線で10 cm 程度、2500 mの基線で20 cm 程度残ってしまった。しかし、1年間の長期データのため線形回帰による基線長変化速度は概ね1-2 cm/yrの精度で議論が可能である。暫定的な解析結果からは、観測精度内での定常的なクリープの存在は見られず、横ずれ運動は地質学的時間の中で間欠的に発生していることを支持する結果となった。現在、大きな温度擾乱を効果的に補正する方法を試行中であり、今後より精度の高い議論が可能になると期待される。

Width of the strain concentration in the San-in Shear Zone as observed by a dense GNSS network

*Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Takuya Nishimura³

1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The San-in Shear Zone (SSZ) is a ~N80°E right-lateral shear zone in southwest Japan with a 30- to 50-km width, where seismic activity and high strain rates have been observed. Although no major active fault is identified in the SSZ, deformation in the area can be modeled by assuming a 5 mm/yr deep creep on a vertical fault with right-lateral motion and conjugate Riedel shears within the shear zone can reconcile the seismotectonics in the area (Nishimura and Takada, 2017). GNSS velocities are well explained by a model having a deep creep on a vertical fault plane, however, it is not clear the extent of the shear zone in the lower crust or how the overall E-W trending right-lateral slip is accommodated by the active faults within it. Thus, we evaluate the width of the shear zone beneath the SSZ utilizing the available GNSS data in the area.

We analyze daily coordinates from continuous GNSS stations in southwest Japan from 1 January 2014 to 31 December 2018. The network is composed by GEONET stations and original stations in the SSZ operated by Kyoto University since December 2014 near the source regions the 2000 Western Tottori and the 2016 Central Tottori earthquakes. Precise daily coordinates for the GNSS sites are calculated with the GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software (GIPSY-OASIS), version 6.2 using the Precise Point Positioning processing strategy with ambiguity resolution (Zumberge et al., 1997; Bertiger et al., 2010).

We utilize the horizontal displacement rates distribution with respect to site 0344 (35.09°N, 134.59°E) for our analysis. Two major earthquakes affected the crustal deformation in the area during the analyzed period: the 2016 Kumamoto earthquakes (M_w 7.0) and the 2016 Central Tottori earthquake (M_w 6.2). Coseismic and postseismic corrections are applied for the perturbed stations.

We estimate the width of the SSZ for Eastern, Central, and Western Tottori by assuming parallel vertical dislocations below 13 km depth (Omuralieva et al., 2012) in the shear zone. Optimized models based on the horizontal displacement along three profiles reveal different widths of the shear zone (i.e., 72 km in Western Tottori, 38km in Central Tottori and 55 km in Eastern Tottori). They suggest that ductile flow in the lower crust is distributed in a channel beneath the SSZ. However, models with a single vertical fault in the middle of the shear zone are within the data 2 sigma confidence interval. Current GNSS network provides a limited contribution to constraining the width of the shear zone in the lower crust.

Attempt to detect intra-plate SSEs based on GEONET data (F3 solution)

*Yusaku Tanaka¹

1. ERI, UTokyo

スロー地震と呼ばれる、同規模の通常の地震より長い時定数で発生する地震は、その時定数に応じて超低周波地震、低周波地震・微動、スロースリップイベント(SSE)に分けられる。この中でもSSEは最も長い時間スケールで進行し、その観測には主としてGNSSが用いられている。スロー地震データベース(<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>)によれば、SSEは、これまで主にプレート境界で観測されており、内陸での検出例は北海道で観測された事例しかない(池田・日置, 2014, JpGU; Ozono et al., 2015)。プレート境界型のSSEは、例えばプレート境界上にSSEを起こす矩形断層を仮定する事で地上の観測点各々の位置における地殻変動が予測できる上に、ある程度まとまった数の観測点が同じ方向に動く事が期待できる。プレート境界型のSSEは、この予測に従ってシグナルを探す事で検出が可能である。一方、内陸SSEは、発生する断層を仮定する事が困難であり、地殻変動観測点の移動方向の予測も難しく、内陸SSEが浅部で発生した場合はシグナルを捉える観測点の数も限定的なものになる。このような点が、これまで内陸SSEの検出事例がごく限られていた理由である。

そこで本研究では、国土地理院が提供するGNSSデータ(GEONET, F3解)を用いて、下で述べる[手法概略]に沿って日本の地殻変動を包括的に調査し、その他の内陸SSEの検出を試みる。本研究は予稿投稿時点で[手法概略]の(8)まで進行しており、これまでに内陸SSEの可能性が疑われる数十の地殻変動の検出に成功した。学会講演では、この成果について報告する。

ただし、本研究は地殻変動データにのみ基づいており、検出した地殻変動が内陸SSE起源であると断定することは現時点では不可能である。内陸SSE起源の可能性が非常に高いことを示すためには、今後、例えば同時期における同じ場所での低周波微動の発生の有無などを確認していくことが必要である。

[手法概略]

(1) 第一に、F3解を利用して日本中の水平方向の地殻変動量の時系列を作成する。この段階では誤差の大きい鉛直方向は使わない。 $(dE)^2 + (dN)^2$ の平方根(dE, dN は各々東向き変動量と北向き変動量)を用いる事で、地殻変動の発生方向に依存せずにシグナルが検出できる。

(2) 作成した時系列に対して、一ヶ月幅の移動時間窓を作成し、その時間窓の中で(中央値 $\pm$ $3 \times$ 中央絶対偏差)の外側に位置したデータを外れ値として除外する。

(3) F3解の時系列にはアンテナ交換や、地震時の地殻変動、火山活動による地殻変動などによって不連続が含まれる。この不連続は本研究ではノイズとなるため、この補正を行う。まず移動時間窓を作成し、この時間窓を前半と後半に分割する。そして前半と後半の各々に最小二乗法で二次関数をフィッティングする。前半の終端と、後半の始端の値を見積もり、その差を取る。この差が、ある閾値を超えていた場合、その差の分だけ不連続が存在すると見做して、時間窓の後半以降すべてのデータから、その値を差し引く。ただし、これには閾値が大きいと小さな不連続が見逃され、小さいと大きな不連続が上手く補正できないという問題がある。そこで大きく設定した閾値を徐々に小さくしながら補正を繰り返し行う。

(4) 不連続を補正した時系列に対し、(2)と同じ方法で、再度、外れ値の除去を行う。

- (5) $\sigma = 10$ 日のガウシアンフィルターを適用し、時系列を平滑化する。
- (6) 平滑化した時系列の中で、ジグザグ型の地殻変動が存在する部分を抽出する。
- (7) ジグザグ型の地殻変動が抽出された観測点を含む、その近傍5観測点の内、4観測点以上で同時にジグザグ型の地殻変動が抽出された場合、そこで地殻変動を検出したとする。
- (8) 検出された地殻変動について、各観測点で東西方向・南北方向・上下方向の地殻変動量を見積もる。
- (9) 見積もられた地殻変動を内陸SSEによるものと仮定し、その地殻変動を説明可能な断層を数値計算で求める。

Detection of seafloor crustal deformation due to shallow SSE using ocean bottom pressure with long-period tidal variability corrections

*Tomohiro Inoue¹, Tomoya Muramoto², Daisuke Inazu³, Yoshihiro Ito⁴, Ryota Hino⁵, Kazuaki Ohta⁴, Syuichi Suzuki⁵

1. Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Tohoku University

近年海底下での地殻変動検出を目的とした海底圧力観測が重要視されている。特に海底下の浅部で発生するスロースリップの変動源の推定に際して、陸上のGNSS観測のみでは不十分であり、直上の海底圧力計が重要な役割を果たす。本研究では深海域に設置された海底圧力計記録に含まれる海洋起源の圧力変動に着目する。特に長周期潮汐成分（周期2日以上）を除去することで浅部スロースリップに伴う、海底の上下変動を精度よく検出する手法について述べる。

海底で観測される水圧は機器直上の海水の量に大きく依存する。海底圧力計は海底の地殻変動（上下動）を高い分解能で観測する一方で、観測される圧力値には直上の気圧や海水量など地殻変動以外の成分も含まれる。海洋起源の圧力変化は、観測される非地殻変動成分の中でもその割合が大きく、潮汐成分および潮汐以外の要因からなる非潮汐成分に分けられる。さらに潮汐成分は短周期の成分（2日未満）と長周期の成分（2日以上、以後「長周期潮汐成分」）が含まれる。本研究で研究対象とするスロースリップに伴う地殻変動（数週間から数ヶ月の変動）の解析では、地殻変動成分と長周期潮汐成分の周波数成分はほぼ一致するため、長周期潮汐成分の除去が不可欠となる。しかしながら、先行研究（Muramoto et al., 2019; Hino et al., 2013など）では観測された圧力値から短周期の潮汐成分と非潮汐成分を取り除いており、長周期潮汐成分は除去していない。

ニュージーランドヒ克蘭ギ沈み込み帯に2014年から2017年の期間に設置された海底圧力計記録を解析に用いた。非潮汐成分の補正には海洋モデル（Inazu et al., 2012）を使用し、長周期潮汐成分の補正にはBAYTAP-L（Tamura et al., 1991）を使用した。その結果、長周期潮汐を観測記録から除去することで、ある観測点では、長周期潮汐を除去する前の圧力値の時系列に比べて標準偏差が10%程度（0.1hPa程度）減少した。議論では、推定された長周期潮汐とモデル計算による長周期潮汐を比較し、推定された値の妥当性を検証する。さらに、長周期潮汐を除去した圧力値を用いて、観測期間に発生したスロースリップ（2015年9月、2016年11月など）に対して、海底地殻変動の推定を行った結果を示す予定である。

Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]PM-2

chairperson:Yo Fukushima(IRIDeS, Tohoku University), Shun-ichi Watanabe(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

Mon. Sep 16, 2019 2:45 PM - 3:45 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-10] Construction of the sea-floor geodesy network in Nemuro-Oki, the southwestern part of the Kuril Trench

*Yusaku Ohta¹, Motoyuki Kido², Ryosuke Azuma¹, Makiko Sato¹, Syuichi Suzuki¹, Ryusuke Yamamoto¹, Hidenobu Takahashi¹, Yukiho Kimura¹, Hideto Otsuka¹, Chie Honsho¹, Ryota Hino¹, Mako Ohzono³, Kazumi Okada³, Yuki Aota³, Hiroaki Takahashi³, Shinohara Masanao⁴, Fumiaki Tomita⁵, Toshiya Kanamatsu⁵, Kan-Hsi Hsiung⁵, Takeshi Ilnuma⁵ (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tooh University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. ISV, Hokkaido University, 4. ERI, University of Tokyo, 5. JAMSTEC)

2:45 PM - 3:00 PM

[S03-11] Preliminary Report of the GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation

*Takeshi Ilnuma¹, Motoyuki Kido², Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda¹, Fumiaki Tomita¹, Iwao Ueki¹ (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)

3:00 PM - 3:15 PM

[S03-12] Validation of SSE detection capability of the present GNSS-A observation network

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

3:15 PM - 3:30 PM

[S03-13] A compatible format for preprocessed GNSS-A seafloor geodetic data

*Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM

Construction of the sea-floor geodesy network in Nemuro-Oki, the southwestern part of the Kuril Trench

*Yusaku Ohta¹, Motoyuki Kido², Ryosuke Azuma¹, Makiko Sato¹, Syuichi Suzuki¹, Ryusuke Yamamoto¹, Hidenobu Takahashi¹, Yukiho Kimura¹, Hideto Otsuka¹, Chie Honsho¹, Ryota Hino¹, Mako Ohzono³, Kazumi Okada³, Yuki Aota³, Hiroaki Takahashi³, Shinohara Masanao⁴, Fumiaki Tomita⁵, Toshiya Kanamatsu⁵, Kan-Hsi Hsiung⁵, Takeshi Inuma⁵

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Toho University, 2. IRiDeS, Tohoku University, 3. ISV, Hokkaido University, 4. ERI, University of Tokyo, 5. JAMSTEC

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0, 以下東北沖地震)ではGNSS-音響結合方式(以下, GNSS-A)や, 海底水圧計による海底地殻変動観測によって, プレート境界の深さ十数km以浅で50mを超える大きな断層すべりが生じていたこと, さらにその断層すべりが海溝軸まで到達していたことが高い確度で明らかになった. こうしたプレート境界浅部での大すべりを規定する要因をさまざまな側面から理解することは, 超巨大地震の発生様式の理解を深める上で重要であり, 特に他の地域における超巨大地震との比較研究を行うことは地震の多様性理解のために必須である.

千島海溝は, 日本海溝と同じ太平洋プレートが沈み込む場であり, M8クラスの巨大地震が十勝沖や根室沖といった各セグメントで繰り返し発生している. 一方, 津波堆積物の分布等から, 17世紀に, 十勝・根室沖の両セグメントを破壊し, さらにプレート境界浅部で大きなすべりが生じるような巨大地震が発生していた可能性が指摘され, そのすべり様式の2011年東北沖地震との類似性が示唆されている(Ioki and Tanioka, 2016).

こうした観点から, 東北大学と北海道大学では, 千島海溝根室沖における現在のプレート間固着の実測を目指した海底測地観測網の整備を共同で実施した. 具体的には2019年7月に実施された東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海KS-19-12航海において, 3箇所のGNSS-A観測点および1箇所の海底間音響測距(ADM)観測点の設置を行った.

本航海では併せて, ピストンコアを用いた採泥による乱泥流堆積物調査を2箇所で実施した. また, 海底水圧計の長期ドリフトの除去を目的とした自己校正機能付きの海底水圧観測システムのプロトタイプ機の動作実証試験を行った. さらに, 日本海溝-千島海溝会合部の地震・微動活動を把握することを目的とし, 自己浮上式海底地震計5台の設置も実施している. またウェーブグライダーによる長期自律的GNSS-A観測のための試験観測も実施した(飯沼・他, 本大会).

図にKS-19-12観測において根室沖に新設したGNSS-A観測点, ADM観測点等の観測点分布を示す. GNSS-A観測点は, 海溝軸に直交する方向に3観測点を新設した. そのうちの2点は陸側斜面に設置し, 1点は沈み込む太平洋プレートの移動速度の実測を目的として, 海溝軸よりも南側に設置した. 各観測点は3局もしくは4局のトランスポンダーによって構成され, 設置後に新青丸の船底トランスデューサーを用いた移動観測による各トランスポンダー位置の計測および, 各アレイの初期位置推定のための定点観測を実施した.

ADM観測点は, 海溝軸を跨いで3海底局を設置し, うち2局は沈み込む太平洋プレート上に, 1局を陸側斜面に設置した. ADMでは, 海底局間で音線のパスが通る必要があるため, あらかじめ予定した箇所に正確に設置する必要がある. そのためウィンチで観測装置を吊り下げ, 潮流の影響が少ない深度で切り離すことによって, 予定した箇所に正確に設置を行った. 設置後, 船上から単発の測距指示を行い, ADM海底局間で, 相互に測距に成功していることを確認した.

今後, GNSS-A観測点については, 1年に1回程度の頻度で繰り返し観測を行い, 特にプレート境界浅部における固着について明らかにすることを目指す. ADM観測点については, 2年間程度の連続観測によって, プレート境界最浅部におけるひずみ蓄積の定量評価を目指す. 発表では, より詳細な観測内容等および, 現時点までに得られているデータの暫定的な解析結果等について報告する予定である.

謝辞: 本研究の一部は, 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)の支援を受けて行われました. またKS-19-12航海の実施において, 東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の乗組員には多くの支援を

頂きました。深く感謝いたします。

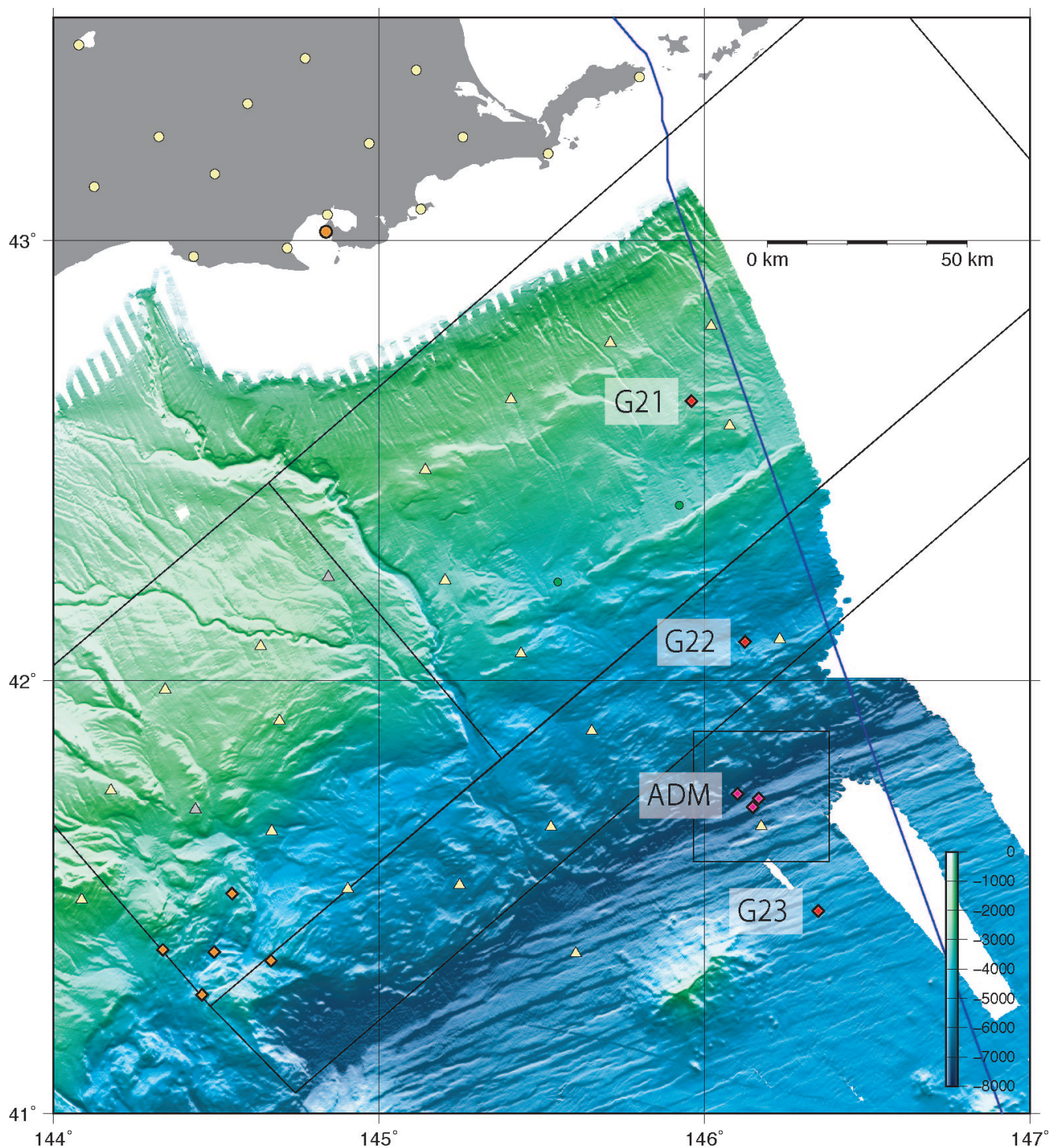


図:KS-19-12航海で設置したGNSS-A観測点およびADM観測点の分布図. 赤ひし形が新設GNSS-A観測点, ピンク色のひし形がADM観測点をそれぞれ示す. 図中の黒矩形はIoki and Tanioka (2016)で示された十勝・根室連動型地震の断層面を示す. 黄色三角形はS-net, 黄色丸はGEONET, オレンジ色の丸印がGNSS-A観測における陸上基準GNSS観測点をそれぞれ示す.

Preliminary Report of the GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation

*Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido², Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda¹, Fumiaki Tomita¹, Iwao Ueki¹

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

近年、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が海底で捉えられるようになってきた。しかしながら、GNSS-A観測の実施には、海上でのGNSS測位、及び、海底トランスポンダーとの間の音響測距を行うための海上プラットフォームが必要であり、これまででもっぱら船舶もしくは船舶の制御下にあるブイが用いられてきたが、有人船舶の必要性が、観測の高頻度化に限界を設けるとともに、観測実施コストの低廉化を妨げてしまっているのが現状である。これに対し、海底地殻変動観測点の直上に係留されたブイを用いてGNSS-A観測を行うことによって、リアルタイムに海底地殻変動の検出を行うための技術開発が進められているが、日本近海だけでも現在60点を超えている海底地殻変動観測点すべてにブイを設置するには膨大な費用が必要となる。そこで、海洋研究開発機構と東北大学では、多数の観測点におけるGNSS-A観測の高頻度化を達成すべく、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むこととし、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。

ウェーブグライダーは洋上に浮かぶフロート部と水中のグライダー部から構成される。太陽光発電による電力によって制御を行い、波浪によるフロート及びグライダーの上下動を推進力に変えて自律的に航行する無人観測プラットフォームである。燃料を必要としないため長期間の洋上運用が可能であるとともに、観測点における定点保持や海底局アレイ内での移動観測、観測点間の移動やAIS搭載船舶との衝突回避といった運動を自動的に行うことができる。衛星通信を介して陸上からのミッション管理が可能であり、内部ペイロードの電源のオン・オフや航路の設定が随時可能である。今回は以下の点を目指としてシステムの開発を行い、試験観測を実海域で実施した。

1. 海底地殻変動観測点において、

(ア) フロート上に設置したGNSSアンテナ及びフロート内のジャイロからのデータを取得すること

(イ) 各観測点に設置されている海底トランスポンダーを起動させること

(ウ) 十数時間のあいだ、一定時間間隔で音響測距信号を発信し、各トランスポンダーからの音響測距信号を受信し、記録すること

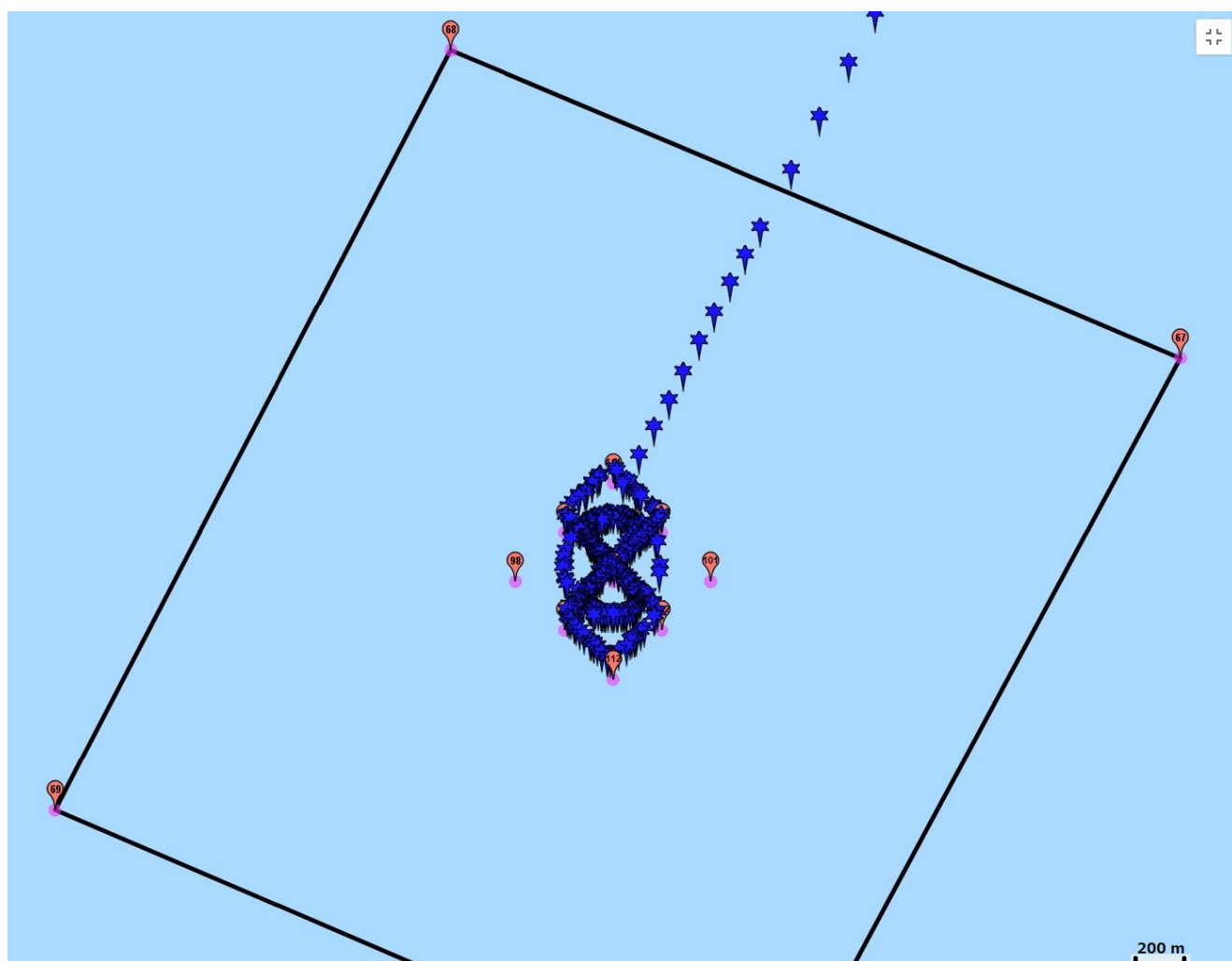
2. 海底地殻変動観測点間を自律的に移動し、観測点においては設定された範囲内にとどまること

2019年7月3日から13日にかけて行われた、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海

(KS-19-12) において、関連機材を搭載したウェーブグライダーを用いた試験観測を実施した。東北大学が青森県沖に設置したG02観測点において投入してGNSS-A観測を開始し、終了後は岩手県沖に設置されたG03観測点に移動させてGNSS-A観測を実施する、という計画のもとに各種設定を行った。結果として、海況に恵まれず、G03観測点への移動及びそこでの観測を断念せざるを得なかったが、G02観測点での観測、並びに、十勝沖の海底地震計設置点への移動によって、前述の目標を達成することができた。図にG02観測点におけるウェーブグライダーの航跡を示す。外側の黒実線の四角形は各海底局を頂点としており、中心定点付近に設定された地点を通る8の字もしくは半径200mほどの円形の航路をほとんど外れることなく辿っていたことが良く分かる。取得したデータについては現在解析中であり、秋季大会当日においては、暫定的な解析結果についても報告する予定である。

謝辞：本研究の一部は文科省科研費26109007の助成を受けて行われました。また、ウェーブグライダーの整備及び運用に際してご尽力・ご協力いただいた、株式会社マリン・ワーク・ジャパンの長濱徹哉氏、藤井信宏

氏，松永浩志氏及び横田牧人氏，並びに，東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の乗組員及びKS-19-12航海乗船研究者各位に深く感謝いたします。



Validation of SSE detection capability of the present GNSS-A observation network

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa²

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

GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測技術は長期的スケールにおける海底の精密な地殻変動場を連続的に検出することができる唯一の観測技術である。これまでに、東北沖地震の巨大な地殻変動場、その余効変動場、南海トラフ沿いや南西諸島海溝沿いの固着状態などのきわめて重要な地震学的知見を提供しており、地震学において重要な役割を持っている。

近年、GNSS-Aは観測システムの高度化と洗練、解析システムの開発が進み、cmオーダーの観測精度で年スケールの地殻変動場を検出できるようになった。たとえば、観測頻度を向上させるための音響システム開発やシミュレーション研究、海中音速構造の複雑性の理解とその検出などが進められた。2019年時点では、地点によって違いが大きいものの、頻度は4-10回/年、精度は1.5-2.5 cm (1- σ) を達成している。これにより、従来は捉えられなかった非地震性の海底地殻変動場をある程度の感度で検知することが可能となった。

2018年までの観測結果には、南海トラフ沿いのいくつかの観測地点で非地震性の地殻変動と考えられる信号が見られており、かなり明瞭なものから不明瞭なものまで観測点や時期によってさまざまな信号が得られている。そこで、Nishimura et al. [2013, JGR] を参考に c-AIC [Akaike, 1974, IEEE TAC; Sugiura, 1976, CSTM] を用いた識別方法によって、これらの信号の分析を行い、豊後水道沖、紀伊水道沖、熊野灘沖の3領域について非地震性の地殻変動は統計的に尤もらしく、SSEによるものと推定されることがわかっている。

これらの信号は数多くあるはずのSSEによる地殻変動のうち巨大な信号のみが検出されていると考えられる。今後、観測網の整備、他の観測手法による結果との議論や検出の可否の議論を行っていく上で、GNSS-A観測網のSSE検出能力を適切に把握しておく必要がある。本稿では、疑似データによる数値試験と実際のデータに対する統計検定の結果から、海底地殻変動場の検出能力についての評価を行う。

現状のGNSS-A観測網において、最高の精度が達成されている場合における観測感度を疑似データによる試験で調査した。疑似データは現在の観測能力に合わせて数値的に誤差を与えて生成する。得られた1000ケースほどの疑似データに対して、c-AICによる識別を行い、地殻変動を含むかどうかを検定していく。その結果からは、4-5 cm 程度の地殻変動を検知することはできるが、それ以下の場合、誤検知率や空振り率が高くなってしまうことが示された。またいくつかの時定数の地殻変動を含む疑似データに対してモデルによる時定数の推定精度を調査したところ、時定数の決定精度が低いことも示された。これは現在の観測頻度が隔月程度であることが主な原因と考えられる。

合わせて、それぞれの観測点の個別の感度検証も行った。観測点ごとの時系列データから、いくつかのデータを省いて地殻変動の有無を検定した時の各パラメータの決定精度を検証した。この時、省いたデータが多くなっても地殻変動に関する推定パラメータが安定している場合は高感度の観測地点、データの除去により簡単に推定パラメータが不安定になる場合は低感度の観測地点である。この検証により、たとえばASZ1 (足摺岬の沖合) とHYG1 (日向灘の沖合) の2点を比較すると、ASZ1がより不安定であることがわかる。近傍2点でも生じてしまうこの違いの原因については、海中音速構造以外の要因も含めて今後検証する必要がある。

また、現状のGNSS-A観測網の能力を考慮して、水藤 [2016, 測地学会誌] と同様の手法でSSEの検出範囲の推定も実施した。この結果からは沖合の海底観測点近傍でのSSEの検出能力が新たに得られたと解釈できる

が、検出不能な領域も広く、観測網の拡張が求められる。

参考文献：

Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe (2018): Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, Scientific Data, 5:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182

Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe (2018): Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography, Mar. Geophys. Res., doi:10.1007/s11001-018-9362-7

A compatible format for preprocessed GNSS-A seafloor geodetic data

*Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹

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

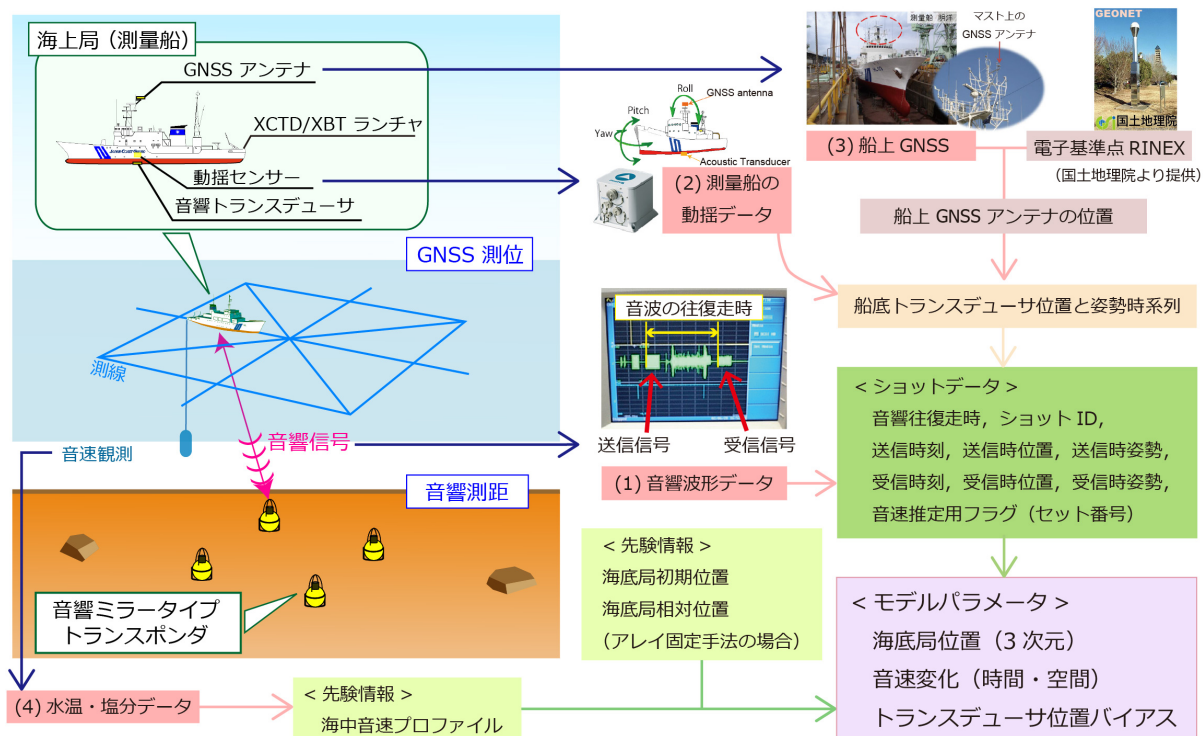
GNSS-A技術を用いた海底測地観測は、海上保安庁や大学等、複数の機関で実施されている。各機関で得られたGNSS-Aデータはそれぞれ独自のフォーマットで収集され、独自のルーチンで処理・解析される。他方で、GNSS-A解析において必要となるデータは原則として観測手法によらない。そのため、もし互換性のあるGNSS-Aのデータフォーマットが作成されれば、複数の観測主体のデータを直接比較したり、それぞれの解析ストラテジで処理したりするといった連携が可能になる。さらに、データフォーマットが定まれば、GNSS観測のRINEXのように、GNSS-A観測を実施していない研究者もGNSS-A解析を直接行うことが容易になり、研究の裾野が広がることも期待される。そこで、本研究ではまず、GNSS-Aの解析において必要となるデータセットを以下のように整理した。

2019年現在において、海上保安庁の実施する海底地殻変動観測で測量船において取得される生データは、（１）音響波形データ（200 kHzサンプリング）、（２）動揺計測データ（10-20 Hzサンプリング）、（３）GNSSのRINEXデータ（2 Hzサンプリング）、（４）音速測定用XBT/CTDデータ（1 m層の水溫・塩分濃度プロファイルデータ）である（図中ピンク背景）。海底局位置の解析（以下、局位置解析）においては、まずこれらの生データから、各ショットに関するデータを抽出する必要がある。具体的には、現行の局位置解析において必要なデータとして、ショットごとに、ショットID（海底局番号）、ショット発信時及び受信時の、時刻、トランスデューサ位置及び測量船の姿勢（それぞれ3成分）、並びに音波往復走時に加え、そのショットが含まれる観測セット番号（一般にはフラグとして扱う変数）の17パラメータを抽出する（図中緑背景）。なお、ここで時刻が必要になるのは音速補正を時間の連続関数としてモデル化しているため、及び固体地球潮汐の効果を補正するためであり、測量船の姿勢が必要になるのはGNSSアンテナ・トランスデューサ間の測定誤差（トランスデューサ位置バイアス）を推定するためである。また、ショット発信時刻と受信時刻に加えて往復走時が必要なのは、海底局において設定される返答シグナルの発射ディレイが、海底局ごとに異なるためである。

これらショットごとのデータセットをCSV等にまとめたファイルを、GNSS-A一次処理データフォーマットとして定義できる。実際の解析においては、これらショットデータに加え、音速プロファイルデータ及び初期局位置データ等の広い意味での先験情報が必要になる（図中薄緑背景）。ただし、前者は実測値に限らずモデルによっては統計値でも代用可能であり、後者については本質的にショットデータから抽出可能であるため、データセットとしての重要性は低く、あくまで解析の再現性を担保するための情報に過ぎないともいえる。そのため、これらはショットデータとは別ファイルとして与えるようにしている。

今回作成したデータセットは観測の生データからかなりの容量が圧縮されたものであり、データ読み込みの高速化の点や、将来のデータ交換時にも有利に働く。他方で、データセットにおいて捨象される情報、中でも特に重要と思われるのはGNSS解析が一次処理に含まれておりその手法が観測者に依存してしまうこと、をどう扱うべきかについては、今後議論する必要があると考える。

本発表では、上記データセットについて、海上保安庁で収集されるデータを基に紹介する。また、作成したデータセットに合わせて、局位置解析プログラムを全面的に改修・簡略化し、容易にモデルを変更することを可能としたので、当プログラムにおいて試みた複数の音速モデルによる結果も示し、その内容についても議論する。



Room C | General session | S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

[S03]PM-3

chairperson: Takao Kumazawa (Earthquake Research Institute, University of Tokyo), Yo Fukushima (IRIDeS, Tohoku University), Shun-ichi Watanabe (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
Mon. Sep 16, 2019 4:00 PM - 4:30 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S03-14] Creep rates along the Philippine fault, Leyte Island, and possible repeating of Mw~6.5 earthquakes on an isolated locked patch

*Yo Fukushima¹, Manabu Hashimoto², Masatoshi Miyazawa², Naoki Uchida³, Taka'aki Taira⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. DPRI, Kyoto University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley)

4:00 PM - 4:15 PM

[S03-15] Geodetically estimated location and geometry of fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

*Tomokazu Kobayashi¹, Kyonosuke Hayashi¹, Hiroshi Yarai¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

4:15 PM - 4:30 PM

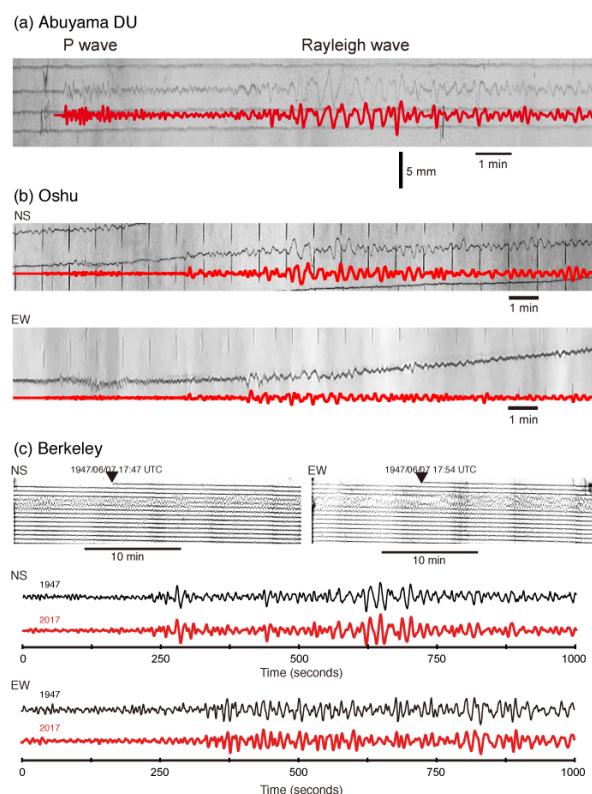
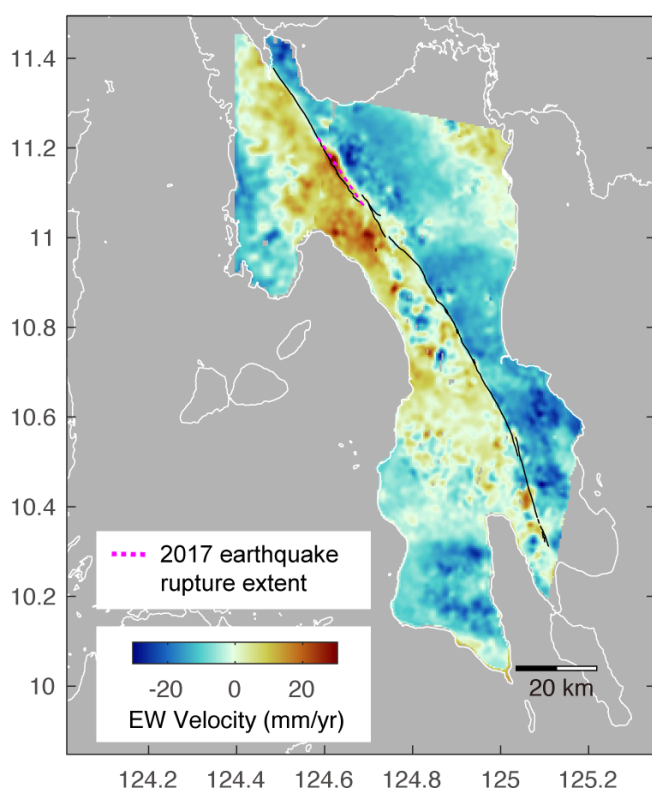
Creep rates along the Philippine fault, Leyte Island, and possible repeating of Mw~6.5 earthquakes on an isolated locked patch

*Yo Fukushima¹, Manabu Hashimoto², Masatoshi Miyazawa², Naoki Uchida³, Taka'aki Taira⁴

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. DPRI, Kyoto University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley

Shallow active faults commonly repeat cycles of sudden rupture and subsequent silence of hundreds to tens of thousands of years, but some parts of well-developed faults exhibit continuous creep accompanied by many small earthquakes. Discovery and detailed examination of such fault creeps on land have been in a rapid progress with the advent of synthetic aperture radar interferometry applied to satellite data.

In this study, we measured the spatial variation of the creep rate along the Philippine fault on Leyte Island using ALOS/PALSAR data acquired between October 2006 and January 2011. Prominent creep of 27 ± 10 mm/year was estimated in northern and central parts of the island except for a locked portion in the middle. We compared the creep rate distribution along the fault with the slip distribution of the 2017 Mw 6.5 Ormoc earthquake that occurred in northern Leyte, estimated from the displacements mapped by ALOS-2/PALSAR-2 interferometric data. The estimated slip of the 2017 earthquake amounted up to 2.5 meters and to moment magnitude of 6.51, with the dominant rupture area coinciding with the locked portion identified from the creep analysis. Teleseismic waveforms of the 2017 earthquake and another event that occurred in 1947 (Ms 7.0) exhibit close resemblance, indicating the same locked portion ruptured repeatedly with a time interval of 70 years.



Geodetically estimated location and geometry of fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake

*Tomokazu Kobayashi¹, Kyonosuke Hayashi¹, Hiroshi Yari¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

1. はじめに

平成30年（2018年）9月6日3時8分頃、北海道胆振地方中東部でマグニチュード6.7の地震が発生し、最大震度7を記録した。胆振東部地震の震源域近傍には、活断層である石狩低地東縁断層帯が分布している。胆振東部地震では、国土地理院が運用するGNSS連続観測システム（GEONET）及びだいち2号によって地殻変動が捉えられた。本発表では、これら地殻変動から推定された震源断層モデルについて報告する。

2. データと解析

GNSS（GEONET）及びSAR（だいち2号）で観測された地殻変動を基に震源断層モデルを推定した。モデル解析では、GEONETの定常解析の最終解（F3解）を用いた。この地震に伴い苫小牧観測点で東方向へ約4cm変位する等、震央周辺の観測点で地殻変動が観測されたが、電子基準点「門別（950141）」及び「厚真（950132）」では、地震に伴いピラーが傾斜したことが現地観測により分かっている。そこで本解析では、傾斜測定の結果から推定される見かけの変位を補正してモデル計算に利用した。干渉SARのデータについては、南行右観測及び北行左観測の軌道から撮像した2018年8月23日と同年9月6日の画像ペア、北行右観測の軌道から撮像した2018年8月25日と同年9月8日の画像ペアを使用した。モデル計算ではこれらの干渉SARデータを位相連続化した後、データをリサンプリングし、モデル計算に適したデータセットを作成した。これらGNSS及びSARデータを用いて、1枚の矩形断層における一様滑りを仮定した震源断層モデルを構築した。震源断層の各パラメータは、Simulated Annealing法による解探索から最適解を得た。

3. 結果

モデル計算の結果、以下の特徴が得られた。断層は震央付近から南に約10km延び、ほぼ南北の走向を持つ。断層の上端深さは約16kmであり、一般的な内陸の地殻内地震より深い位置に断層面が求まっているのが特徴である。傾斜角は74度と高角の断層面であり、東に傾斜する断層面上での逆断層運動が推定された。これら震源断層モデルの諸特徴を概念図として図1に示す。すべり量は約1.3mで、地震モーメントは 8.68×10^{18} Nm（モーメントマグニチュード（Mw）：6.56）である。これは、気象庁や防災科学技術研究所等の各機関で地震波形から推定されたマグニチュード（いずれもMw6.6）と調和的である。なお、地震モーメントの計算には、剛性率30 GPaを仮定した。

震源領域付近には石狩低地東縁断層帯が存在するが、断層面は高角で、断層の浅部延長は石狩低地東縁断層帯より東に位置し、既知の断層トレースとは繋がらない。このことは本地震の断層面が石狩低地東縁断層帯とは異なる、もしくは同断層帯の構成要素であるが浅部に向かう途中で低角になっている、ということを示唆しているのかもしれない。

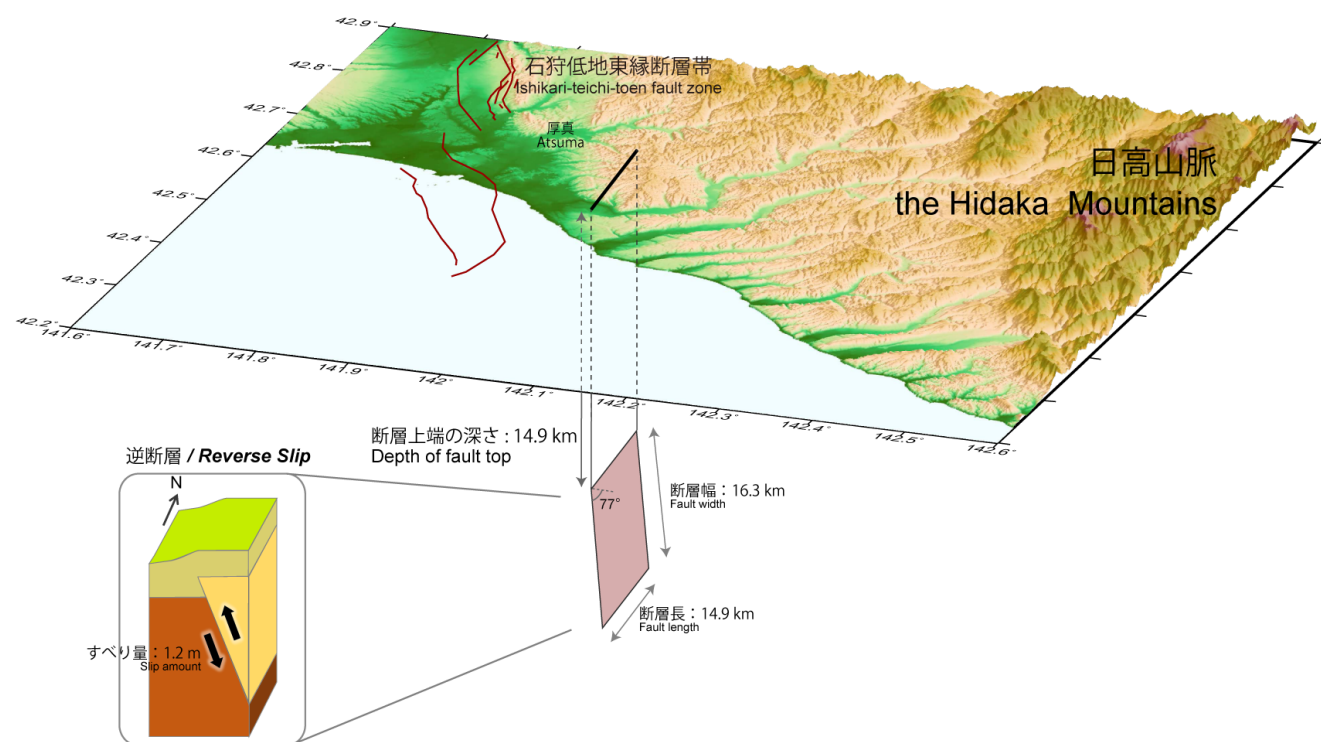
地震波速度構造と比較すると、推定された断層面は速度構造が空間的に不均質な場に位置することがわかった。断層面の東側にはP波速度が小さい領域が鉛直方向に厚く分布しており、P波速度の大きな層と小さな層の境界面は東に傾き下がっている。本地震の断層面は、こうした東に傾き下がる速度構造の境界付近に沿うように位置している。

謝辞： 本報告で使用したALOS-2データの所有権は、JAXAにあります。これらのデータは、国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づいて、JAXAから提供されたものです。地震データは気象庁の一元化震源を用いました。速度構造との比較に防災科学技術研究所のHi-net 3D Tomography Viewer (Ver. 3.0)を用いました。ここに記して感謝いたします。

参考文献：

Kobayashi, T., K. Hayashi, H. Yurai (2019), Geodetically estimated location and geometry of the fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, *Earth Planets Space*, 71:62, doi:10.1186/s40623-019-1042-6.

【概念図 / Schematic view】



Room C | General session | S19. Seismology General and Miscellaneous Contribution

[S19]PM-3

chairperson: Takao Kumazawa (Earthquake Research Institute, University of Tokyo), Yo Fukushima (IRIDeS, Tohoku University), Shun-ichi Watanabe (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
Mon. Sep 16, 2019 4:30 PM - 5:15 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S19-01] About action of disaster prevention measures research of NPO Research Organization For Catastrophic Disaster Reduction (CDR)

*Kazuo Yoshida¹ (1. NEWJEC Inc.)

4:30 PM - 4:45 PM

[S19-02] Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

*Takao Kumazawa¹, Yosihiko Ogata², Hiroshi Tsuruoka¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics)

4:45 PM - 5:00 PM

[S19-03] Disaster prevention administration that can not reach a huge earthquake

*kazunobu tani¹ (1. bujisoukenkabusikigaisya)

5:00 PM - 5:15 PM

About action of disaster prevention measures research of NPO Research Organization For Catastrophic Disaster Reduction(CDR)

*Kazuo Yoshida¹

1. NEWJEC Inc.

まえがき

東海・東南海・南海地震など大規模災害の発生が危惧され、危機管理の重要性が訴えられている。安全で持続的な地域社会を形成していくためにも、日頃より災害対策情報を知り、予防策をとると同時に、情報ネットワークを構築する必要がある。

そこで、大規模災害によって広域的な発生が予想される人的・物的被害を軽減することを目的として、河田恵昭教授（関西大学社会安全研究センター長、特別任命教授、京都大学名誉教授）らが平成9年に「任意団体 東海・東南海・南海地震津波研究会（以下「研究会」という）」を、平成18年に「特定非営利活動法人 大規模災害対策研究機構（CDR）（以下「CDR」という）」を設立した。

ここでは、このCDR活動の概要を紹介する。そして、大規模災害対策研究に関わる多くの研究者や実務担当者の方に参加していただき、共に我が国の自然災害に対する防護力の向上を目指すものである。

1. 研究会および研究機構の設立経緯

1.1. 研究会の発足

南海トラフでは100～150年周期でM8以上の巨大地震と津波災害が必ず発生しており、近い将来かならず次の巨大地震が起こると予測されている。そこで、広域的な人的・物的被害を軽減することを目的として、太平洋沿岸地域の津波防災などをテーマに、官・民・学が継続的に情報や意見交換、さらには相互啓発できる場を提供して、国民の防災意識の向上と同地域の津波防災への寄与を図るために、平成9年7月に「任意団体東海・東南海・南海地震津波研究会」を発足させた。

発足に際しては、中央防災会議において東海地震や東南海・南海地震に関する専門調査会を立ち上げる4年も前に、河田が南海トラフ巨大地震津波による広域かつ大規模災害のメカニズムや被害シナリオ、その対策に対する研究の必要性を訴え、地震津波研究のトップレベルの研究者、国、自治体の行政機関の要職の方々とともに、国、自治体、教育・研究機関、ゼネコン、建設コンサルタント、ライフライン企業等から構成する研究会を立ち上げた。

1.2. CDRへの移行

平成18年4月に、従来の活動基盤をさらに充実させ、関連学会、研究機関、行政などの公的機関との連携・協力体制の構築を目指すとともに、災害予防および発生時の減災、救援対策について、各方面への情報発信を行うことを目的として、「特定非営利活動法人 大規模災害対策研究機構（CDR）」に移行した。なお、研究会は「任意団体」として継続させ、行政機関が研究活動に参加しやすいようにした。

2. 活動概要

主な年間行事は以下の通りである。

(1)企画委員会と理事会・総会

(2)大規模災害対策に関する現地調査（日本全国で実施）

調査の一例：①歴史地震や津波に関する痕跡、行政・民間企業による対策、復興状況調査（北海道南西沖地震津波（1993）、明治・昭和三陸津波（1896、1933）、宝永・安政・昭和東南海・南海地震津波（1707、1854、1944、1946）、新潟県中越大震災（2004）、東日本大震災（2011）、熊本地震（2016））、②火山災害（有珠山噴火（2003）、雲仙普賢岳噴火（1991））、③高潮（佐渡島寄り回り波（2008）、八代海高潮（1999）、大阪湾高潮（2018））、等

(4)大規模災害対策セミナー

一般国民向けに、国内外で発生した地震、津波、高潮、洪水、土砂災害等の発生メカニズムや被害予測等を解説、被害軽減・抑止対策の計画、実施状況等の紹介、地元行政機関や住民等立場が変わることによる問題点や課題、対処方法の違いについても紹介。

(5)ワーキンググループ活動（大阪市域における津波危険度と津波対策に関する研究、他）

(6)研究会

「東海・東南海・南海地震津波」をメインテーマとし、行政および企業の防災担当者向けに、より専門性の高いセミナーを開催。

3. CDR活動がもたらすメリット

研究活動を通じて得られるメリットは以下の通り。

①我が国の防災研究の名だたる研究者や国土交通省や内閣府、自治体の防災のトップの方々とは面識ができ、事業協力や研究協力につながる。

②防災に関する先進の研究成果、対策事例に関する一般では入手困難な情報が入手可能。また、非公開の現場や施設内でも特別に立ち入りが許可され、説明を受けられる。

③中央省庁や学会、委員会に委員やオブザーバーとして参画できる。

4. あとがき

長きにわたる研究活動を通じて、①災害現場、復旧復興状況を直に見て、聞くこと、②最新の研究成果、行政機関等の取り組みを聞き、学び、発展させること、③様々な業種、立場の人たちと交流をもち、多種多様なも

のの見方を学ぶこと、等の重要性を感じており、一人でも多くの命を救えるよう使命感をもって活動が続けていく所存である。

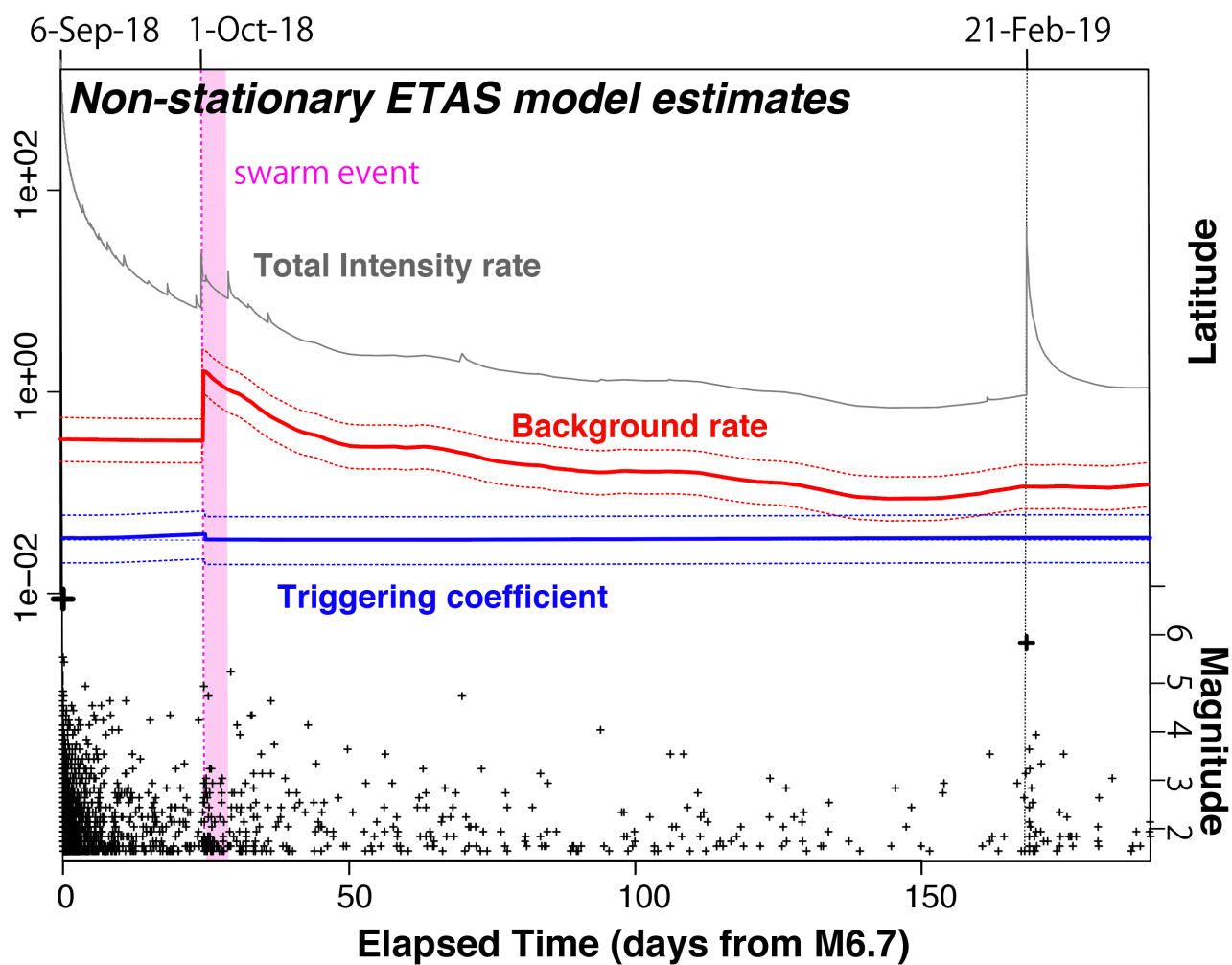
最後に、是非とも多くの研究者、実務担当者の方々にもご参加いただき、我が国の防災研究、防災事業への貢献にご協力を賜りたい。

Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

*Takao Kumazawa¹, Yoshihiko Ogata², Hiroshi Tsuruoka¹

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

In this study we investigated seismic activity in the Eastern Iburi region, before and after the M6.7 earthquake on September 16, 2018, based on earthquake data from after October 1997. First, after the 2003 M8.0 Tokachi-Oki earthquake, seismic activity in the Eastern Iburi region reduced relative to the Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model. During this period, the depth ranges of the seismicity were migrating towards shallow depths, where a swarm cluster, including a M5.1 earthquake, finally occurred in the deepest part of the range. This swarm activity was well described by the non-stationary ETAS model until the M6.7 main shock. The aftershocks of the M6.7 earthquake obeyed the ETAS model until the M5.8 largest aftershock, except for a period of several days when small, swarm-like activity was found at the southern end of the aftershock region. However, when we focus on the medium and larger aftershocks, we observed quiescence relative to the ETAS model from 8.6 days after the main shock until the M5.8 largest aftershock. For micro-earthquakes, we further studied the separated aftershock sequences in the naturally divided aftershock volumes. We found that the temporal changes in the background rate and triggering coefficient (aftershock productivity) in respective subvolumes were in contrast with each other. In particular, relative quiescence was seen in the northern deep zones that includes the M5.8 largest aftershock. Furthermore, changes in the b-values of the whole aftershock activity showed an increasing trend with respect to the logarithm of elapsed time during the entire aftershock period, which is ultimately explained by the spatially different characteristics of the aftershocks. This research is supported by Tokyo Metropolitan Resilience Project.



Non-stationary ETAS model applied to the aftershock sequence of M6.7.

Disaster prevention administration that can not reach a huge earthquake

*kazunobu tani¹

1. bujisoukenkabusikigaisya

§ 1. はじめに

震災事後よく聞く「考えられない災害でした」は天災ではなく考えられるのに考えようとしなかった人災、過分にあります。震度5強（強震）以上に遇えば立っていることも困難。震度7（激震）となれば須らく置物は「跳ねる」「飛び交う」グランドピアノも「横転する」事態。自治体お薦めのつっぱり棒、L型金具等の定番グッズでは耐える代物ではありません。メーカー品質保証も曖昧、驚くべきは問合わせ先不明のグッズあり、データ表示は概ね主導する所轄機関（消防）です。

§ 2. 非力、粗い防災対策

「揺れたら机の下へ」「火を消しましょう」の決まり文句。巨大地震に遇っては動きもままならない15秒前後の瞬時の圧死です。避難・救助訓練も共助に欠かせませんが、確かな安全空間がなければこれらのステップは踏めません。死傷者必至の巨大地震に遇っても一括りの粗い防災マニュアル、重視すべきは犠牲者を極力出さない、生き延びる、確かな減災対策でなければ備蓄品も訓練等も活かされません。旧態依然。防災行政は専ら起床時、生存を前提にした事後対策が主体になっています。

抑制的な発信、上廻る犠牲者。兵庫県南部地震、東日本大震災等々しかり、惨事の情報は瞬時に伝わるに係らず、過去を知り、体験者は語る教訓に学んでいるとはとは言えず、真に市民の生命と財産を守る気概はあるのか甚だ疑問。巨大地震の想定訓練、対策は危機をあり、不安を増幅させる。或いは地震対策の支出の呼び水なるためか、ありえないが如くスルー、生存を左右する巨大地震を含めた防災の配慮が未だ伺えません。巨大地震に届かず、儀礼的。事ほど左様に防災行政、大いなる問題あり。事は命の明暗を分ける一大事。過信、丸投げは危ない橋を渡りかねない。

減災対策は優る対策。熊本地震、大阪北部地震、北海道胆振（いぶり）地震、山形県沖地震等々と明日は我地域。M6以上の地震は世界の約2割は私達の住む列島日本で起こっています。90年～150年のサイクルで定期的に繰り返されている巨大地震。既に臨界点を超えていると想われます。エネルギーは増幅。連動も予測される東南海、南海地震等あり、惨事は広域に及ぶ可能性大。活断層、判っているだけで2千余り。兵庫南部地震、長期評価30年以内に8%で起こりましたが、連動、触発が想定され、確率が低いからと言って今や何処にあっても油断出来ない状況に。

首都圏直下型地震、政府発表は死者2万3千人と予測されていますが、密集する家屋・人口、網の目の様に張り巡らされた交通網、幾層にも重なるライフラインの地下壕、東京湾沿岸の危険物タンク群の集積、150万人が住むゼロメートル地帯。広範な軟弱地盤の関東ローム層、とてもそんな数値で収まるとは想えません。首都圏にも及ぶ必至の東海地震もあり。

§ 3. 結論

多様な地震対策、情報があれば自らの判断で選択、対策をする市民は多いはず。出向けなければ、求めなければ知り得ない地震対策の情報は多様に在り、精査は可能。

所轄の消防庁、自治体に防災課もしくは危機管理課。担う、謳う防災にあるも専ら許認可等の定型的な業務。減災対策を図る器具の開発、物理的な強度を研究する専門家集団ではありません。人事異動もあり。過信、慢心は禁物。薦めるに談合の指摘に躊躇あり。

惜しむ些少な支出、無防備であっては明暗を分ける事に、孫の代まで負荷負わすことになりかねません。命

あつての物種、自己実現。いつかその内では悔いあり。超えられない防災行政、命拾いに叶うは自分の身は自分で守る一刻も早い自立、自衛です。

平成7年の兵庫県南部地震をきっかけに地震から身と財の無事を図る減災対策、予知に関心を持ち現在まで研究に取り組む、市民目線でアウトプット。

文献

朝日新聞アエラ. 1995. 「大震災100人の瞬間」.

石橋克彦・他. ニュートン. 2005. 科学雑誌. ニュートンプレス. 26-55

岩瀧幸則. 2009. ぼうさい. 内閣府防災担当(編). 11月号. 30pp

岩瀧幸則. 2010. ぼうさい. 内閣府防災担当(編). 7月号. 21pp

木村 学・他. ニュートン. 2008. 「連動して発生する巨大地震(別冊)」. 科学雑誌. ニュートンムック. 6-171pp

気象庁. 2009. 震度階級の解説書が新しくなりました. 震度の揺れ等の状況.

東條充敏・他. NHKスペシャル取材班. 2016. 「震度7 何が生死を分けたのか」.

日本経済新聞. 1995. 阪神大震災の犠牲者死因.

山村武彦. 2006. 大地震発生. 公的支援くるまで200時間を生きの延びる知識と知恵. 小学館. 159pp.

谷 和信. 2015. 「カウントダウン巨大地震」.

文部科学省. 研究開発局 地震・防災研究課. 地震調査研究推進本部事務局(編).

無事総研株式会社

*192-0362 東京都八王子市南大沢大沢3-15-1-103

Room C | General session | S17. Tsunami

[S17]AM-1

chairperson: Shingo Watada (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Akio Katsumata (Meteorological Research Institute, JMA)

Tue. Sep 17, 2019 9:15 AM - 10:30 AM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S17-01] Mechanism of the 2018 Sunda Strait Tsunami

*Shingo Watada¹, Masumi Yamada², Iyan Mulia¹, Karyono Karyono³, Arif Aditya⁴, Dimas Sinipar⁵
(1. Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Meteorological Climatological and Geophysical Agency, 4. Geospatial Information Agency of Indonesia, 5. National Central University, Taiwan)
9:15 AM - 9:30 AM

[S17-02] Tsunami simulation due to the Anak Krakatau Volcano activities on 22 December 2018 and analyses on the potential future observing systems

*Iyan E. Mulia¹, Shingo Watada¹, Tung-Cheng Ho¹, Kenji Satake¹, Yuchen Wang¹, Arif Aditya² (1. The University of Tokyo, 2. Geospatial Information Agency of Indonesia)
9:30 AM - 9:45 AM

[S17-03] Investigation for the Tsunami and Earthquake Source of the 2018 M7.5 Sulawesi Earthquake

*Tung-Cheng Ho¹, Kenji Satake¹, Shingo Watada¹, Iyan E. Mulia¹, Yosuke Aoki¹, Ray Y. Chuang²
(1. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 2. Dept. Geography, NTU, Taiwan)
9:45 AM - 10:00 AM

[S17-04] A Method of Real-Time Tsunami Detection

*Yuchen Wang¹, Kenji Satake¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
10:00 AM - 10:15 AM

[S17-05] Rapid magnitude estimation method for slow tsunami earthquakes (4)

*Akio Katsumata¹, Masayuki Tanaka¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA)
10:15 AM - 10:30 AM

Mechanism of the 2018 Sunda Strait Tsunami

*Shingo Watada¹, Masumi Yamada², Iyan Mulia¹, Karyono Karyono³, Arif Aditya⁴, Dimas Sinipar⁵

1. Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Meteorological Climatological and Geophysical Agency, 4. Geospatial Information Agency of Indonesia, 5. National Central University, Taiwan

2018年12月22日UT14時30分頃、インドネシアスダ海峡周辺のジャワ島・スマトラ島を津波が襲い

400名余が犠牲となった。この津波の発生とほぼ同時期にAnak Krakatau火山が噴火し、火山の標高が噴火前後で300mから100mへと低下したと報告されているため、津波は陸上または海中の山体崩壊が引き起こしたと考えられている。噴火直後のSAR画像から南西方向に山頂部を含め山体が崩落し海中に消失している。周辺の検潮記録から、津波の発生は13時58分頃と推定される。インドネシア国内では火山噴火や津波発生時に強い地震の発生の報告はないが、日本を含むインドネシア国内外の広帯域地震計には周期50-100秒の長周期の地震波（S波・レイリー波）が明瞭に記録されている。S波は14時11分に日本の南西諸島へ、14時16分に北海道へ到達している。表面波も14時27分に北海道を通過している。どの地震波も13時56分頃にAnak Krakatau火山付近で長周期の地震波発生イベントがあったことを示している。遠地実体波から震源時間関数は100秒以内（1分程度）であり、スダ海峡周辺の4観測点の地震波形3成分は、最大 5×10^{11} Nの力が、最初に

20秒間でほぼ北東方向わずかに上向き、さらに50秒で南西方向に方向でわずかに下向き向きに働いたことで説明できる。力の方向と角度は、Krakatau海底カルデラ外縁部に成長していたAnak Krakatau山体の低角（8度）南西方向へ水深250mのカルデラ底へ崩壊とそれに伴う津波の可能性を指摘していたGiachetti et al. (2012, Geol. Soc. London) の山体崩壊モデルとほぼ一致する。山体崩壊の質量はEkstrom and Startk (2013, Science) が経験的に求めた陸上地滑りの最大力と質量の比例式から 3×10^{11} kgと推定され、山体の密度を 2 gr/cm^3 を仮定すると山体崩壊体積はおよそ 0.15 km^3 となり、検潮記録から推定されている海底地滑りを引き

起こした体積 0.2 km^3 とおよそ一致している。

津波を引き起こすような地震が現地では検知されなかったため、津波警報は発令されなかった。一方、津波の発生と共に発生したと考えられる長周期地震波は地震発生イベントの40秒後にはJakartaに到達した。もし

今回観測されたような長周期地震動が定常的にインドネシアでモニターされていれば、Anak Krakatau山体崩壊の早期検知とそれに伴う津波発生の可能性は津波被害発生前に把握できたかもしれない。

Tsunami simulation due to the Anak Krakatau Volcano activities on 22 December 2018 and analyses on the potential future observing systems

*Iyan E. Mulia¹, Shingo Watada¹, Tung-Cheng Ho¹, Kenji Satake¹, Yuchen Wang¹, Arif Aditya²

1. The University of Tokyo, 2. Geospatial Information Agency of Indonesia

A deadly tsunami occurred on 22 December 2018 claimed hundreds of lives, as well as injured and displaced thousands of people living across the Sunda Strait regions. The tsunami was associated with the Anak Krakatau volcano, which according to the Indonesian Centre for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, had exhibited an increase in seismic activity followed by explosions and volcanic ash emissions prior to the event (<https://magma.vsi.esdm.go.id/>, last accessed 22 May 2019). However, the Anak Krakatau had never been known to generate significant tsunami. During the 2018 event, the edifice formed by the accumulation of pyroclastic material partly collapsed and slid down the water, triggering an impulsive wave.

We use numerical models to reveal the generation (NHWAVE, Ma et al., 2012) and propagation (FUNWAVE-TVD, Shi et al., 2012) of the tsunami caused by the southwest flank collapse of the Volcano. With the estimated volume of 0.24 km³ and the relatively short duration (~3 to 5 min), the landslide of volcanic edifices triggers the tsunami of approximately 40 m in the vicinity. The tsunami, however, attenuates rapidly as it propagates away from the generation area resulting in <2 m wave heights at tide gauges around the Sunda Strait. The observed tsunami waveforms at these tide gauges are well reproduced by our model. The maximum tsunami energy is mainly distributed towards the west coast of Java leading to significant number of casualties compared to other areas.

To mitigate future tsunami disasters in the region, we assess the efficacy of potential tsunami observations using ship height positioning and oceanographic radars. We demonstrate that the relatively small tsunami amplitudes of the event are still considerably larger than the noise level of a typical observation by ship height positioning. Furthermore, applying a tsunami data assimilation (Maeda et al., 2015) to the tsunami velocity field detected by radars can produce accurate forecasts of coastal tsunami heights.

Investigation for the Tsunami and Earthquake Source of the 2018 M7.5 Sulawesi Earthquake

*Tung-Cheng Ho¹, Kenji Satake¹, Shingo Watada¹, Iyan E. Mulia¹, Yosuke Aoki¹, Ray Y. Chuang²

1. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 2. Dept. Geography, NTU, Taiwan

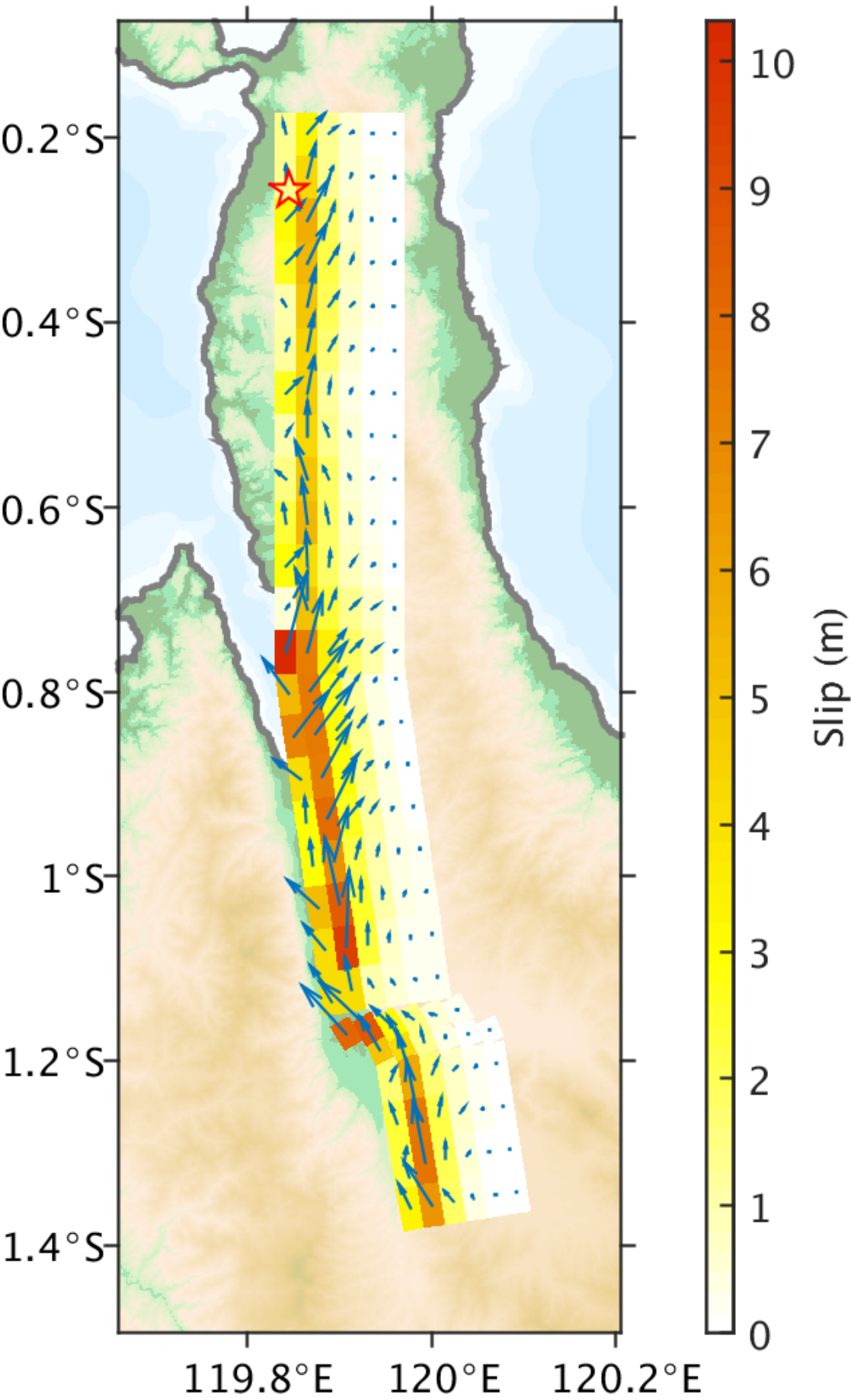
A devastating tsunami struck the bay of Palu, Indonesia after the M7.5 (U.S. Geological Survey; USGS) Sulawesi (Palu) earthquake. This earthquake mechanism was a left-lateral strike slip fault. Large horizontal offsets of up to 5 meters were measured near the bay area by satellite images. According to the researches of Bao et al. (2019, Nat. Geosci.) and Socquet et al (2019, Nat. Geosci.) a rupture velocity 4.1 km/s was suggested indicating that this earthquake was a supershear event. The tsunami was recorded by two tide gauges: 2-m wave height was observed by a tide gauge at the port of Pantoloan in the Palu bay, and 20 cm wave height observed by a ~200-km-far tide gauge at Mamuju port. In addition to the tide gauges, up to 10 m runups were measured near the coastal area by field surveys (Omira et al., 2019, *Pageoph*; Muhari et al., 2019, *JDR*). Other than the earthquake, landslide events were captured by videos which also induced local tsunamis.

Our analyses showed that the tsunami leading wave at the Pantoloan port may have directly induced by the earthquake rupture deformation, but the initial tsunami waves at Mamuju port should be from the source outside the bay or the earthquake source area. We applied the back-tracing method and the result indicates that the potential tsunami source for Pantoloan located inside the bay but the source for Mamuju should located outside the bay at about 2°S, 119.3°E.

To understand the tsunami induced only from the fault deformation, we utilized the InSAR data and tsunami waveform at Pantoloan to estimate the source of the earthquake. Two InSAR datasets of ascending and descending data from Sentinel-1 operated by the European Space Agency were used in this study.

The InSAR images revealed clear traces of the rupture. We assumed a fault plane consisted of 27 by 6 subfaults along the traces and performed a source inversion. In our inversion, the two InSAR datasets constrained horizontal land deformations in two different azimuths and the tsunami waveform constrained the vertical deformation at the offshore area. The combination of the InSAR and tsunami data provided complete information for the rupture deformations.

Our result suggested that the rupture extended southward from the epicenter and changed its direction or strike at the bay where also showed a large asperity of a 10 m slip (Figure 1). The rupture changed the strike again at near 1.2°S and had an offset slip there. In addition to the dominant strike-slip components, normal fault components were also estimated at the asperity area which agrees with the finite fault solution of USGS and the plate motion recorded by GPS (Socquet et al., 2006, *JGR*). Our model reconstructed the tsunami waveform at Pantoloan and the offset data by InSAR. However, we underestimate the inundations and runups for the coastal area. The local landslides may explain for the high inundations and runups.



A Method of Real-Time Tsunami Detection

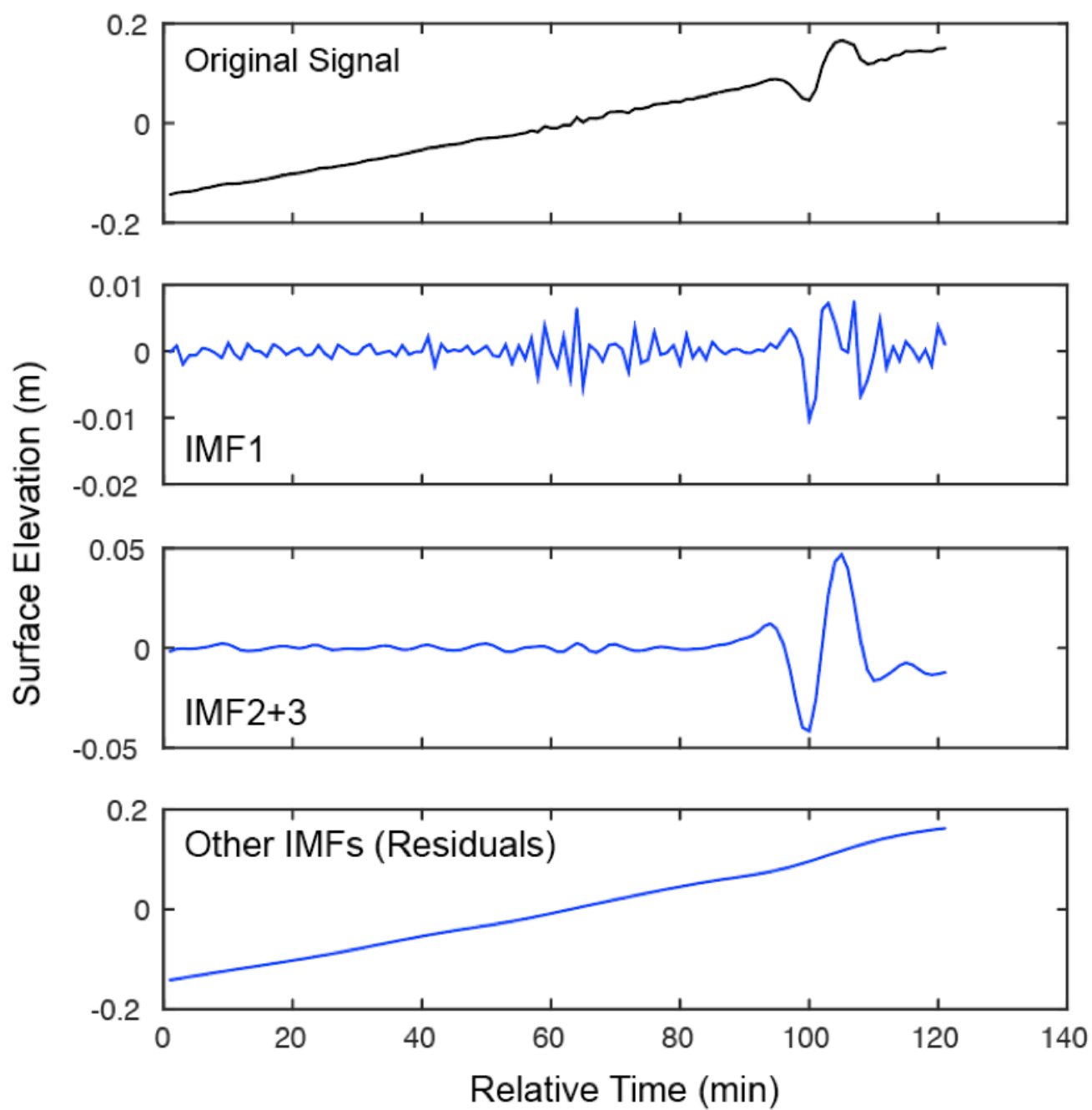
*Yuchen Wang¹, Kenji Satake¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Real-time tsunami detection plays a key role in tsunami early warning system. The best way to confirm the tsunami arrival is to use the ocean bottom pressure gauges (OBPGs) (Sanderson, 2008). A reliable tsunami detection algorithm for OBPGs should be able to identify the tsunami signals and characterize the tsunami amplitude accurately, at a small computational cost. Traditional methods, like the DART algorithm adopted by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), or the Algorithm based on artificial neural network (Beltrami, 2008), have to rely on the prediction of the tides and other lower frequency signals. These algorithms can detect a tsunami by subtracting predicted pressures from the observation, but they cannot properly identify its waveform. And they are unable to capture the feature of the background sea noise.

In our research, we propose a method of real-time tsunami detection based on Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD). EEMD decomposes the time series into a set of intrinsic mode functions (IMFs) (Huang et al., 1998; Wu, 2005). Unlike Fast Fourier Transform or wavelet analysis, it does not need a priori basis. Instead, it adaptively determines the natural oscillatory modes embedded in the original signal. Therefore, it is applicable to nonlinear, non-stationary data like tsunami signals. In our practice, we use the series of the OBPG record of the past three hours, and then we conduct EEMD and obtain the IMFs. The tsunami signals can be separated from the tide signals, seismic signals, as well as background noise. By comparing the value with the threshold, we could decide whether the tsunami has arrived or not.

We apply our method to the tsunami record of OBPGs of the 2016 Fukushima earthquake (M7.4; Gusman et al., 2017). Five OBPGs owned and operated by the Earthquake Research Institute recorded the tsunami generated by the earthquake. We retroactively conduct EEMD to the data. Our method separates the high-frequency components and extracts tsunami signals automatically, without the need of predicting the tides. The tsunami arrival is easily determined by comparing with a threshold. In addition, the tsunami waveforms are also characterized in the IMFs, without the need of filtering. Because our method uses an ensemble with the help of white noise, it becomes robust to background noise.



Rapid magnitude estimation method for slow tsunami earthquakes (4)

*Akio Katsumata¹, Masayuki Tanaka¹

1. Meteorological Research Institute, JMA

(1)はじめに

継続時間が長く地震波の励起が相対的に小さいが、高い津波を発生させる地震(スロー津波地震)対策として、これまで変位を積分した波形の振幅から規模を推定する手法を開発してきた。これは地震発生後最初期の津波警報に役立てるために検討してきた。最初の津波警報は地震検出後3分以内に発表されるため、規模の推定には通常振幅に基づくマグニチュードが用いられている。地震モーメントは津波警報の更新に役立てられている。変位振幅はおおよそモーメントレートに比例しているために、スロー津波地震に対しては過小評価を与えると考えられる。変位を積分した値に基づけば、モーメントに比例した値が求められると期待される。発想としてはTsuboi et al.(1995)と同じであるが、ここで対象とする地震波は観測点近傍で観測されるものであり、P波もS波も表面波も混ざって観測点に到来するような波動である。

これまでに、F-net速度型強震計などで記録されてきた日本国内のデータを用いて、経験的な回帰式を提案してきた。この経験式を用いてこの積分変位マグニチュードが即時な利用可能であることを確認してきた。しかし、実際のスロー津波地震の震源近傍のデータを用いた確認は十分にはできていなかった。スロー津波地震としては、1992年ニカラグア地震、1994ジャワ沖地震、1996年ペルー沖地震、2006年ジャワ沖地震などが知られている。ところがここで対象とするような震源距離数100km以内の記録はIRISのサイトでみても2,3しかない。そこで、ここでは理論波形を用いた検討と、少し距離のある観測点における観測波形の振幅比の検討を行った。

(2)方法と結果

理論波形を用いた検討としては、まず、2003年十勝沖地震において浦幌(URH)観測点において得られた記録とある程度似た理論波形記録を求めた。理論波形の計算には、点震源・三角形の震源時間関数を仮定した。その震源時間関数のモーメントは維持したまま、震源時間関数の時間幅を伸ばしてゆき、変位及び積分変位の振幅がどのように変化するかを確認した。その結果、理論波形の変位及び積分変位の振幅は震源時間関数の時間幅が大きくなるにつれて、減少していった。震源時間関数が約10倍になると理論変位振幅は1/100以下に、理論積分変位振幅は1/10以下になった(Fig. 1)。変位ばかりでなく積分変位の振幅が減少したのは、時間幅の広い震源時間関数によってグリーン関数の移動平均が計算されてしまったためと見られる。期待したような破壊の継続時間によらず一定となるような結果とはなっていないが、積分変位振幅は少なくとも変位振幅を用いたときに現れるほどの振幅減少となっていない。

1992年ニカラグア地震(Mw 7.6)の地震記録は、震央距離約1500kmのUNM観測点において得られている。1992年の地震と震央位置(140km以内)と発震機構(Kagan角14度以内)が比較的近い地震の振幅を比較した。対象とした地震は2012年Mw 7.3の地震と2004年Mw 6.9の地震である。その結果をFig. 2に示す。変位振幅の比較では1992年(Mw7.6)の地震と2012年(Mw7.3)の地震の関係が逆転していたが、積分変位で比較した場合には振幅はMwの違いに応じた値となっていた。

以上のように積分変位に基づく規模推定手法は、スロー津波地震の規模を即時に適正には求めることは難しい可能性はあるものの、変位振幅に基づいた手法に比べるとその過小評価を低減する効果がある。

謝辞

当調査において、国立研究法人防災科学技術研究所及びIRISによって保管されている地震記録を用いた。理論波形の計算にはTakeo (1985)によるプログラムを用いた。

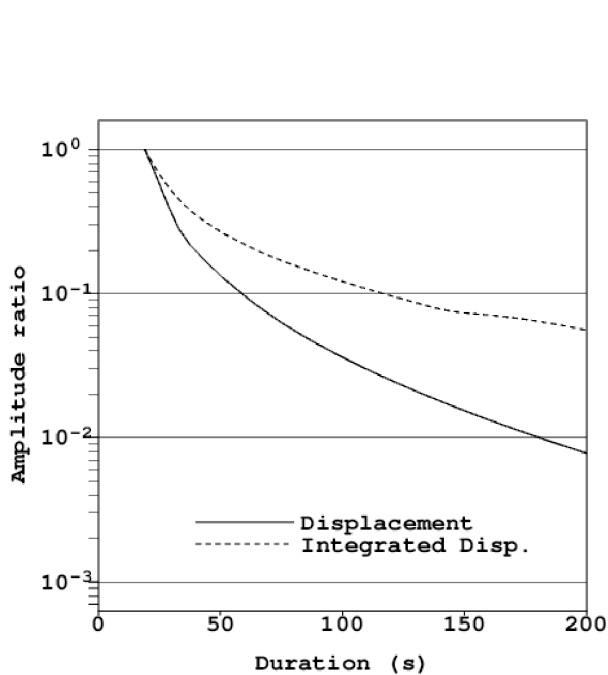


Fig. 1 Relationship between amplitude and source duration obtained for synthetic records.

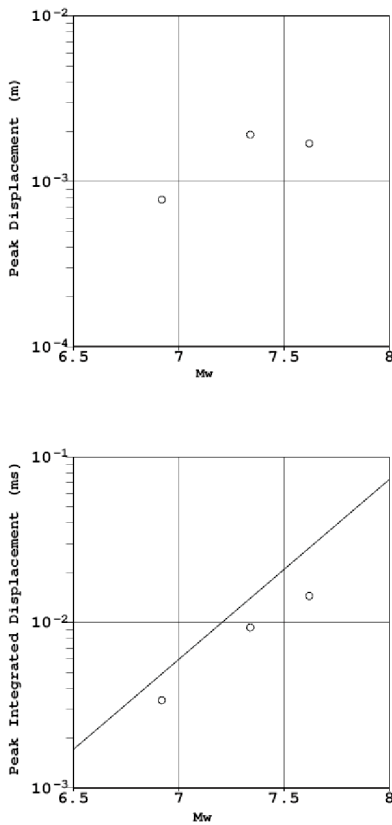


Fig. 2 Observed amplitudes at UNM station for earthquakes off Nicaragua. The solid line indicates the relationship obtained for earthquakes around Japan.

Room C | General session | S17. Tsunami**[S17]AM-2**

chairperson:Tatsuya Kubota(NIED), Satoshi Kusumoto(JAMSTEC)

Tue. Sep 17, 2019 10:45 AM - 12:15 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S17-06] Near-field array observation of the 2015 Mw6.0 Bonin Trench earthquake: from foreshock to post-seismic seafloor deformation

*Yoshio Fukao¹, Hiroko Sugioka², Aki Ito¹, Mikiya Yamashita^{1,5}, Takashi Tonegawa¹, Hajime Shiobara³, Tatsuya Kubota⁴, Tatsuhiko Saito⁴ (1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. ERI/Univ. Tokyo, 4. NIED, 5. GSJ/AIST)

10:45 AM - 11:00 AM

[S17-07] Near-field array observation of the 2015 Mw6.0 Bonin Trench earthquake: Modeling in-situ tsunami generation field

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Yoshio Fukao², Hiroko Sugioka³, Aki Ito², Mikiya Yamashita^{2,4}, Takashi Tonegawa², Hajime Shiobara⁵ (1. NIED, 2. JAMSTEC, 3. Kobe Univ., 4. GSJ, AIST, 5. ERI, Univ. Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM

[S17-08] New phase correction method for accurate numerical computation of shorter-period tsunamis

*Osamu Sandanbata^{1,2}, Shingo Watada¹, Tungcheng Ho¹, Kenji Satake¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Department of Science, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S17-09] Estimation of Roughness Length by Comparison of Observations at Onshore Tide Gauges and Numerical Calculation Results

*Masaaki MINAMI¹ (1. Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute)

11:30 AM - 11:45 AM

[S17-10] Origin Time of the 1854 Tokai Earthquake Estimated from Distant Tsunami Waveforms

*Satoshi Kusumoto¹, Kentaro Imai¹, Ryoko Obayashi¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi^{2,1}, Yuichiro Tanioka³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Hokkaido University)

11:45 AM - 12:00 PM

[S17-11] An evaluation of tsunami occurrence probability based on tsunami deposit in eastern Hokkaido

*Makoto NEMOTO¹, Takashi YOKOTA² (1. OYO Corporation, 2. Aichi Institute of Technology)

12:00 PM - 12:15 PM

Near-field array observation of the 2015 Mw6.0 Bonin Trench earthquake: from foreshock to post-seismic seafloor deformation

*Yoshio Fukao¹, Hiroko Sugioka², Aki Ito¹, Mikiya Yamashita^{1,5}, Takashi Tonegawa¹, Hajime Shiobara³, Tatsuya Kubota⁴, Tatsuhiko Saito⁴

1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. ERI/Univ. Tokyo, 4. NIED, 5. GSJ/AIST

1. 序

小笠原海溝に沿っては巨大地震が歴史的に知られておらず、プレート沈み込みは大部分が非地震性滑りによるとされるがその実態はよくわかっていない。2015年9月1日の鳥島はるか東方沖地震（Mw=6.0）は、海溝すぐ内側に発生した低角逆断層地震で、たまたま、震央の至近距離で海底水圧計のアレー観測を実施していた。このアレーが「前震→本震→海底の隆起・沈降→津波の発生・伝播→海底余効変動→余効変動の再来」を記録した。こうした一連の現象がM6規模の地震で観測されたのは稀有なことであるが、小笠原海溝では普通に起こっていることかもしれない。本発表ではこの地震の上記一連の過程の概要を報告する。津波解析の詳細は別途発表（久保田ほか2019SSJ）する。

2. 観測の概要

アレーは自由落下・自己浮上式の海底絶対圧力計（APG）（PARO-8B7000-I-005）を備えた10観測点B01-B10からなり、B05には広帯域海底地震計（BBOBS）と海底差圧計（DPG）が併設されている。このアレーを鳥島はるか東方沖、小笠原海溝内側の水深4794-5670mの深海底に展開した（B04は記憶媒体の障害によりデータ未回収、またB05はAPGの事前不具合のため海底未設置）。APGのサンプリング周波数とカットオフ周波数は4 Hzと0.7 Hzに設定した。アレーの最小単位は辺長10kmの正三角形、最大は辺長30kmの正三角形である。

3. 地震の概要

2015年9月1日（UTC）Mw6.0地震の震源はUSGSによれば（31.18N, 141.60E, 8.0km）とされB06のほぼ直下に位置するが精度は低い。本震の1分前にはmb=5.6の前震が発生している（図1・図2）。アレーの北端には同一緯度に沿って東から西にB10, B09, B8, B07が設置されており、別途発表（久保田ほか2019SSJ）の津波解析の結果によればB10は低角逆断層面のほぼ中央に位置し、B09は断層面西端に、B08, B07はその更に西側に位置する。図1と図2は、周期50秒のLowpass filtering後のB10及びB09, B08, B07における水圧記録である。断層運動に伴い海底が隆起したB10と沈降したB09, B08, B07とでは、水圧変動の極性が互いに逆を示す。

4. 本震に伴う海底上下変動と津波の発生・伝播

ステップ的あるいはランプ的な海底変動を検出するためには水圧記録から潮汐変動の影響を差し引くことが必須である。本研究においては地震をはさむ40000秒の前半15000秒と後半15000秒をベースラインの違いを許して正弦関数fittingすることにより近似潮汐変動を求めた。この時間幅は試行錯誤の結果に基づき設定した。図1及び図2は、（近似潮汐変動+サンプリング時間前半に対応するベースライン）を記録から差し引いた残差変動を示す。図1のB10には、海底隆起→海面隆起に伴う静的水圧減（<0）と重なって動的水圧増（>0）と動的水圧減（<0）の対が記録されている。生じた海面変位が津波の発生源となる。図2のB09, B08, B07には、海底沈降→海面沈降に伴う静的水圧増（>0）と重なって動的水圧減（<0）と動的水圧増（>0）の対が記録されている。生じた海面変位が津波の発生源となるが、その大きさを表すオフセット的な水圧変化はB09, B08, B07の順に小さくなり、周囲から津波として到来する水圧変化がより卓越するようになる。図1・図2のように震源域ごく近傍での津波の発生から伝播への過程がAPGアレーにより詳細に捉えられたのは今回が初めてである。

5. 海底余効変動

図1を見ると本震後にゆっくりと海底が隆起している。B10に限らず、時間軸を長く取ると何れの観測点においても、数千秒程度の時定数をもって隆起が起きていることがわかる。隆起量は地震時と同程度ないしそれ以下であった。沈降した観測点が見られないことから、断層滑りは主に地震時の断層面の下方延長で起きたことが推測される。類似の時定数・振幅の海底変動は地震発生4日後及び4か月後にも発生した。このような非地震性滑りが多発するのは小笠原海溝の1つの特徴かもしれない。

6. 謝辞

鳥島はるか東方沖へのアレーの設置はYK15-08航海（R/Vよこすか, JAMSTEC）で、回収はMR16-E02航海（R/Vみらい, JAMSTEC）にて行った。本研究はJSPS科研費（2524707, 17K05646及び19K14818）と日本科学協会の笹川科学研究助成によるサポートを受けた。

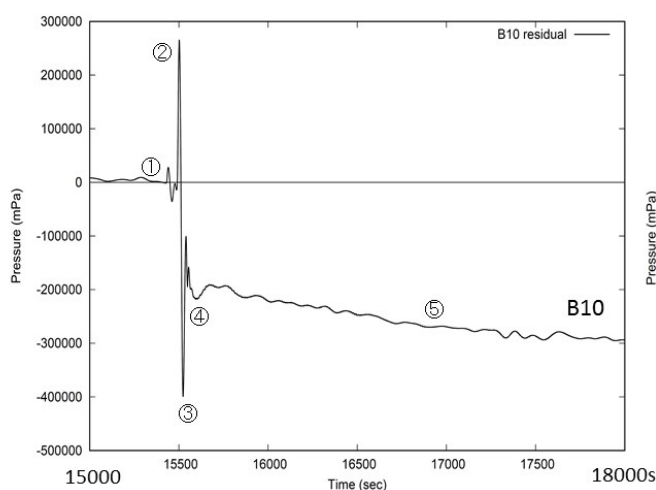


Fig.1. Lowpass-filtered seafloor pressure record at site B10.

①Foreshock, ②③Positive and negative dynamic pressure changes due to accelerations of water mass. Negative static pressure change due to uplifts of seafloor and sea-surface is included. ④Tsunami, ⑤Post-seismic seafloor uplift.

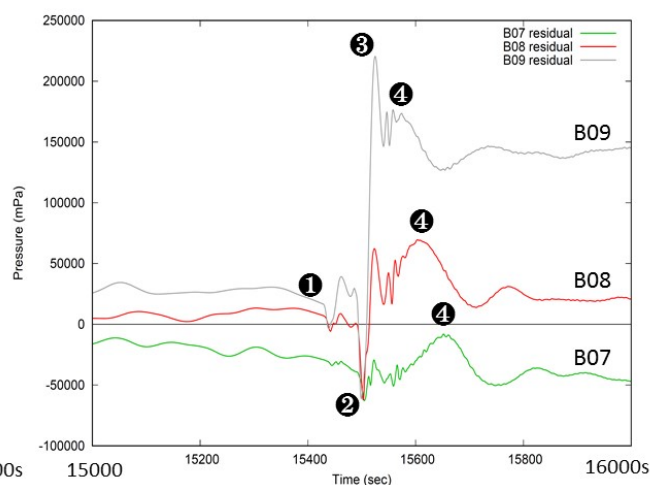


Fig.2. Records at B09, B08 and B07, where the initial polarity is

opposite to that at B10, ①Foreshock, ②③ Negative and positive dynamic pressure changes due to accelerations of water mass. Positive static pressure change due to depressions of seafloor and sea-surface is included. ④Propagating tsunamis.

Near-field array observation of the 2015 Mw6.0 Bonin Trench earthquake: Modeling in-situ tsunami generation field

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Yoshio Fukao², Hiroko Sugioka³, Aki Ito², Mikiya Yamashita^{2,4}, Takashi Tonegawa², Hajime Shiobara⁵

1. NIED, 2. JAMSTEC, 3. Kobe Univ., 4. GSJ, AIST, 5. ERI, Univ. Tokyo

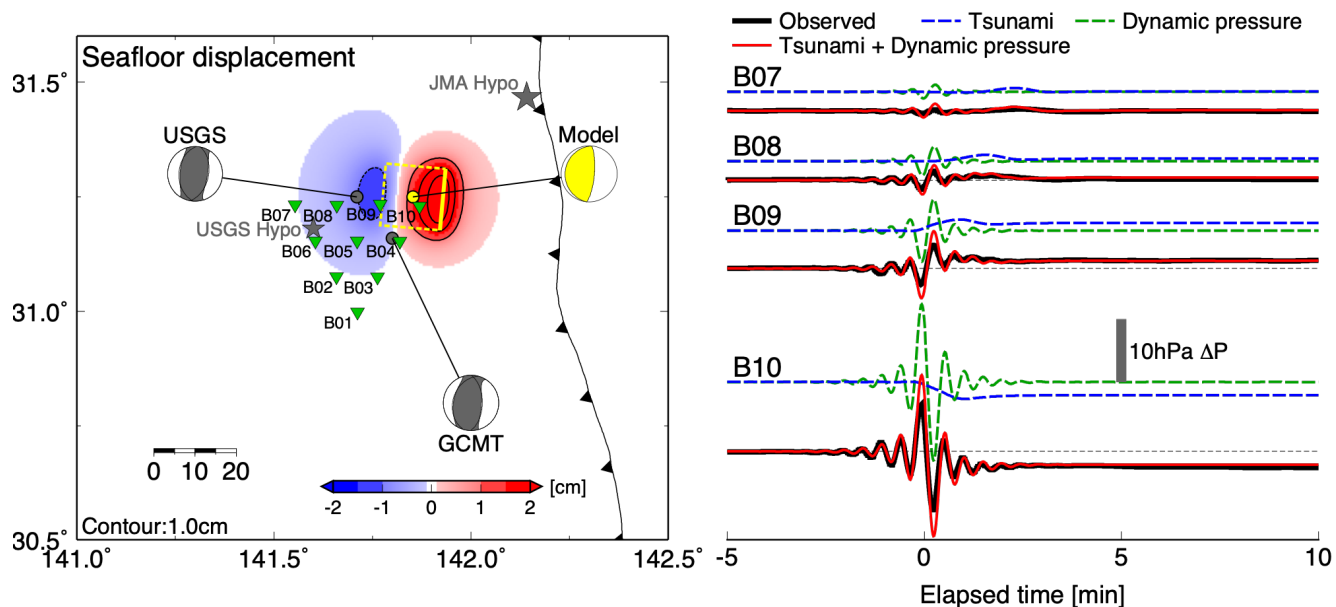
海底圧力計 (PG) は、沖合で発生した地震による津波 (海面の変動, 周期 $T \sim 10^2 - 10^3$ s) の観測に広く用いられてきた (e.g., González et al. 2005). それと同時に, PGは, 海洋音響波の卓越周期 (~ 10 s) を超える周期の周波数帯域 ($T \sim 10^1 - 10^2$ s) では, $p = \rho_0 h_0 a_z$ (ρ_0 : 海水密度, h_0 : 水深, a_z : 海底の鉛直加速度) と表される, 海底上下動加速度に比例する動的な圧力変動 (e.g., Kubota et al. 2017; Matsumoto et al. 2018; Saito 2019) も観測することが知られている (e.g., Filloux 1982). 2015年9月1日(UTC), 小笠原海溝においてMw6.0の低角逆断層型地震が発生し, 震源域直上に展開された絶対海底圧力計 (APG) アレイが地震波, 津波, 地殻変動による圧力変動を同時に観測した (深尾ほか2019SSJ). これほどの観測点密度で「津波発生現場の水圧変化」を記録した事例は希少である. 本研究では, 地震波, 津波, および地殻変動が混在する津波発生場を理解するため, 観測された圧力変動の再現を試みる.

震源域直上, 直近のアレイで観測されているAPG記録に対して, 潮汐変動成分を取り除いたのち, 短周期の海洋音響波や地震波成分を除去するために, カットオフ周期30sのローパスフィルタを適用する. 震源域直上に大振幅のパルス的な圧力変化や観測点間をゆっくりと伝播する圧力変動成分, 水圧オフセットの変化が観測されている.

APGの記録を再現するため, まず, 1枚の矩形断層を仮定し, 線形長波方程式 (e.g., Satake 2002) に基づいて津波を計算した. 矩形断層の水平位置, 深さ, モーメント, 幾何 (strike, dip, rake) や断層サイズなどのパラメータはGlobal CMT解を参考にしつつ観測波形を再現するように試行錯誤的に決定した. また, 計算された海面高変動の時系列から海底地殻変動に伴う水圧オフセット変化分を差し引くことにより, 地殻変動の影響を考慮した. この津波シグナルのモデリングで, 震源直上観測点でみられる圧力のオフセットやアレイで観測された伝播速度 ~ 0.2 km/sで現れる長周期 ($T > \sim 3$ min) の波動現象を再現できる (図中, 青線). しかしながら, 直上観測点の震源時に現れる比較的短周期な大振幅パルス ($T < \sim 100$ s) を再現することはできない.

次に, 津波計算に用いた矩形断層を, 同じ地震モーメント, strike, dip, rakeをもつCMT解で近似し, 破壊継続時間を10秒と設定して, 震源からの弾性波の伝播を計算し (e.g., Saikia 1994), 海底の圧力変動を計算した (図中, 緑線). これによって震源直上に現れる大振幅パルスを再現することができる. 津波計算による海底圧力変化は重力に起因し, 弾性波計算による圧力変化は重力とは関係なく発生する圧力変化であるため, 両者を足し合わせることで過不足無く永久変位・津波・地震波成分を含む海底圧力変動を合成することができる (Saito & Tsushima 2016).

合成した海底の圧力変動によって, 観測された海底の圧力変動を良く再現できた (図中, 赤線). また, 観測記録を再現した断層は, 気象庁震源より50kmほど南西, およびUSGS, GCMTのCMT解の10kmほど北東の, 観測点B10のごく近傍に位置していた.



(左図) フォワード計算に用いたメカニズムと矩形断層 (黄色) および海底上下変動分布. 観測点配置, USGSとGCMTのCMT解, およびUSGSと気象庁の震源も示した

(右図) 観測点B07, B08, B09, B10における, 観測波形 (黒) と合成波形の比較. 津波, 動的圧力, および両者を足し合わせた波形をそれぞれ青, 緑, 赤線で示した. 観測, 計算ともにカットオフ周期30sのローパスフィルタをかけている.

New phase correction method for accurate numerical computation of shorter-period tsunamis

*Osamu Sandanbata^{1,2}, Shingo Watada¹, Tungcheng Ho¹, Kenji Satake¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Department of Science, the University of Tokyo

巨大地震で発生する津波の多くは数十kmから数百kmの空間スケールをもつ海底面変動によって引き起こされ、観測される津波波形の周期帯は1000秒を超える。一方で、より小規模な地震や海底地すべりなどに伴い、500秒以下のより短周期成分に富んだ津波が観測されることがある。こうした短周期成分に富んだ津波の海洋伝播計算に対しては、Peregrine (1967, J. Fluid Mech.) で導出された標準的な線形ブシネスク方程式を数値的に解く、線形ブシネスク型分散波 (linear Boussinesq-type waves: LBW) モデルがしばしば用いられる (Saito et al., 2010, JGR; Fukao et al., 2018, Sci. Adv.など)。しかしながら、この津波モデルが用いている分散項の近似による位相速度の誤差や、近年の研究 (Watada et al., 2014, JGR; Ho et al., 2017, JGRなど) で明らかにされた海水の圧縮性・地球の弾性・海水密度成層・重力変動による津波の位相速度低下の効果について、海域を伝播する津波の短周期帯域における影響を詳しく調べた研究はほとんどない。

そこでまず、LBWモデルと非圧縮・非粘性の線形重力波 (linear gravity wave: LGW) モデルの分散関係を反復法によって計算し (Sandanbata et al., 2018, PAGEOPH), 両者を比較することでLBWモデルの分散項近似による位相速度の誤差の影響を考察した。LBWモデルの分散関係は、LGWモデルの分散関係の展開式を kD (k は波数, D は水深) の二次の項までを近似したものに相当する。両分散関係の比較によって、長周期成分では近似による位相速度の誤差は小さい一方で、短周期になるにつれて急激に誤差が増大し、LBWモデルの位相速度が低下する。そのためLBWモデルを用いた数値計算においては、短周期成分が極端に遅く伝播するという問題が示唆される。

次に、津波の分散性に加えて、海水の圧縮性・地球の弾性・海水密度成層・重力変化による速度低下の効果を含む津波モデル (the PREM Earth model with stratified oceanic layers: sPREMモデル) の分散関係を計算し (Ho et al., 2017), LGWモデルとの比較によって上記四つの要因による速度低下の影響を調べた。Fig.1a で示すように短周期帯域においては位相速度低下の絶対値は長周期帯域に比べて小さい。しかしながら、津波が一樣水深の海域を100 km伝播することで蓄積する走時遅れを各周期で規格化すると、一周期に対する相対的な走時遅れは短周期帯域 (100-500秒) でより大きな値をとる (Fig.1b)。このことは、短周期の津波の方が長周期の津波に比べて、速度低下効果による波形変化がより波源に近い観測点で顕著に現れることを示唆する。例えば、津波が4 km水深の海域を進む際に、周期の10 %の走時遅れが蓄積するのに必要な伝播距離を周期1,000秒と周期300秒についてそれぞれ計算すると、周期1,000秒では約3,333 km ($=10\%/0.3\%/100\text{km}$) であるのに対し、周期300秒では約833 km ($=10\%/1.2\%/100\text{km}$) と計算される。

本研究では、上記で示した (A) 分散項の近似による位相速度誤差と、(B) 圧縮性海水・弾性体地球・海水密度成層・重力変化による速度低下効果の双方を考慮した「短周期津波の位相補正手法」を提案する。まず有限差分法による津波計算コード・JAGURS (Baba et al., 2015) を用いて、LBWモデルに基づく津波波動場を計算する。その際、海底水圧計での津波観測記録との比較のため、近貞ほか (2018, SSJ) の手法にならってタイムステップごとに津波波動場に $1/\cosh(kD)$ の二次元空間フィルターをかけることで、短周期津波に伴う水深による圧力変動の減衰効果を考慮する。さらに Ho et al. (2017) の位相補正項を修正した式を用いて、伝播中に蓄積するLBWモデルとsPREMモデルの位相差を分散関係から評価し、LBWの計算波形に対して位相補正を施し、sPREMモデルの分散関係に基づく津波計算波形を得る。

本手法を、2015年鳥島近海の火山性津波地震で発生した津波の波源モデル (Fukao et al., 2018) を用いた津波計算波形に適用し、DONET・DART・臨時観測点から成る37の海底水圧計での津波波形を計算した。その結

果, sPREMモデルの分散関係を持つ位相補正波形は, LBWモデルに基づくJAGURS計算波形と比較して以下の特徴が得られた; (1) 後続波の短波長に富んだエネルギー波束の走時が短くなるとともに, 波形が大きく変化する, (2) 伝播距離が500 km以上の観測点においては, 伝播距離が長くなるほど顕著な走時遅れが見られる. 以上で示した位相補正による計算波形の変化はそれぞれ, (A) 分散項の近似と (B) 位相速度低下の効果が, 短周期津波の波形計算において無視できない影響を与えていることを示している. 本手法を用いることで, これらの効果を数値計算に組み込み, 短周期成分に富んだ津波波形をより高精度に計算することができる. さらに本手法で計算したグリーン関数を用いた津波波形インバージョンによって, 短周期津波を発生させる小規模な地震や海底地すべりに対してより高精度な波源解析が可能になる.

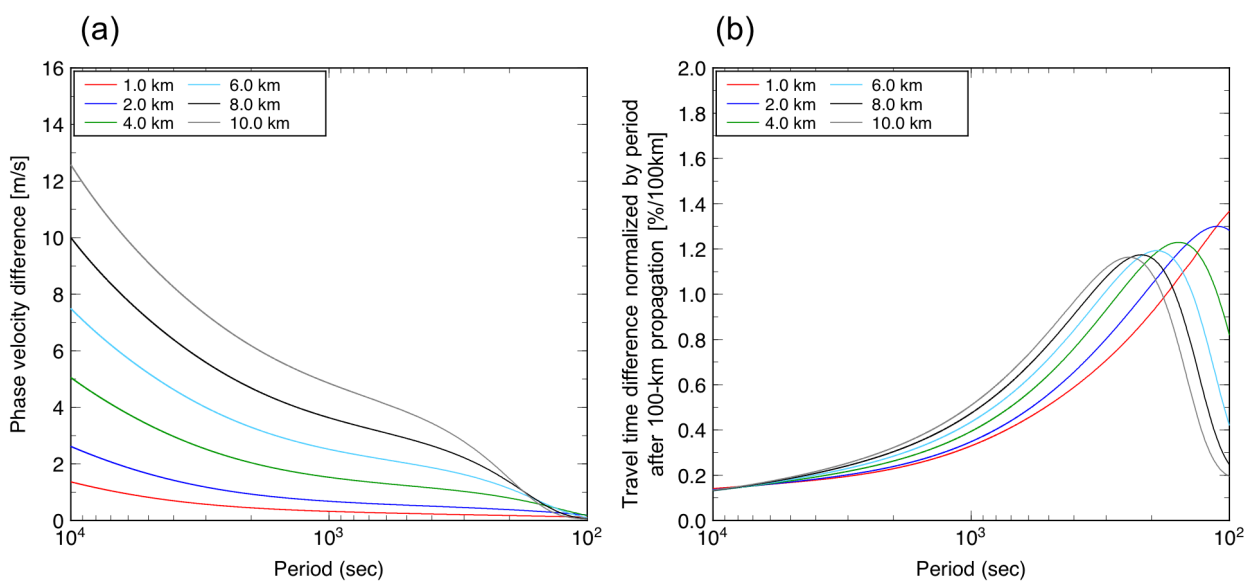


Fig.1 Velocity reduction effect due to the elastic Earth with density-stratified compressible oceanic layer. (a) Phase velocity difference between linear gravity wave (LGW) and the PREM with stratified oceanic layers (sPREM) models at uniform water depth. (b) Travel time delay normalized by wave period after 100-km propagation over uniform depth.

Estimation of Roughness Length by Comparison of Observations at Onshore Tide Gauges and Numerical Calculation Results

*Masaaki MINAMI¹

1. Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute

気象研究所では、津波の減衰過程を正しく推定するための研究を行っている。これは津波警報の解除時期の判断や、津波の見通し情報の発表のためには、津波の減衰過程を正確に把握する必要があるからである。しかしながら、それらに足る精度を有する津波数値計算はこれまで行われていない。

これまでに、既存の津波数値計算方法(非線形長波方程式)でスーパーコンピュータを用いた大規模で高精度の津波計算を行った(南・他,2018,日本地震学会秋季大会等)が、それらの計算においても、津波の減衰過程の精度は充分ではなかった。そこで津波減衰過程の精度向上のため、非線形長波方程式の差分式の改良

(南,2019,JpGU)を行ったが、差分式の改良による減衰の精度向上は大きくなかった。それらの改良は減衰への影響は小さかったが、その改良過程において、様々に粗度係数を変えて津波数値計算を行った結果と、観測値との比較から、最も観測値を説明する粗度係数を推定することが可能であることが分かった。

そこで本稿では、様々な津波イベントにおいて、粗度係数を変えて津波数値計算を行い、それらの計算結果と観測値との比較を行い、それらの結果から日本での沿岸の検潮所における粗度係数の推定を行った。ま

ず、2001年ペルー沿岸の地震(Mw8.4)、2010年チリ中部沿岸の地震(Mw8.8)、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)、2015年チリ中部沿岸の地震(Mw8.3)、等のイベントについて粗度係数を変えて、津波数値計算を行った。粗度係数以外の計算条件は全く同一とし、その計算条件として、太平洋全域を含む(東経100度~西経90度)領域全てを30秒メッシュ(GEBCO2014)とし、北海道、本州、四国、九州を囲む領域では、10秒メッシュでネスティングを行い、減衰過程を見るために、長時間(72時間分)の計算を行った。計算コードにはJAGRUS(Baba et al., 2015)を用い、非線形長波計算(地殻の弾性と海水の密度効果を考慮)とした。比較のための観測値は、各イベントに対応する、気象庁の沿岸検潮所での観測値(気象庁地球環境・海洋部による品質管理済みの15秒値)を使用した。

これらの計算結果と観測値について、単純に波高を比較するのではなく、時間ごとのエネルギーとして比較するために、それぞれ振幅の2乗で積分し、時間当たりの各地点での津波エネルギーの累積として求めた。それらを1時間毎に全観測点で積分した結果(2010チリの事例)が、fig.1である。fig.1から粗度係数ごとの計算結果は明らかに規則的に変化していることがわかる。そこで、その関係式を(対数変換し直線近似とした)最小二乗法によって求めた(fig.2)。求められた式は、ある粗度係数 x での計算結果の津波エネルギー $E(x)$ は、摩擦がない場合(摩擦によってエネルギーが散逸しないとした場合)のエネルギー E_0 に、粗度係数を減衰定数とした exponential decayで表現出来ることを示している。つまり、粗度係数を何度か変えて津波数値計算を実施し、exponential decayの式が求めれば、各津波イベントでの観測値でのエネルギー E が分かっている時、その E を式に当てはめることによって、実際の観測値から粗度係数を推定することが出来る。

以上の方法を、各事例に適用した結果、求められる粗度係数が0.05程度になることが分かった、これらは観測地点ごとに異なるが、イベント毎に大きく異なることはなかった。以上の結果から、実際の沿岸域での粗度係数は、通常の津波計算で用いられている粗度係数0.025より大きいことが強く示唆される。

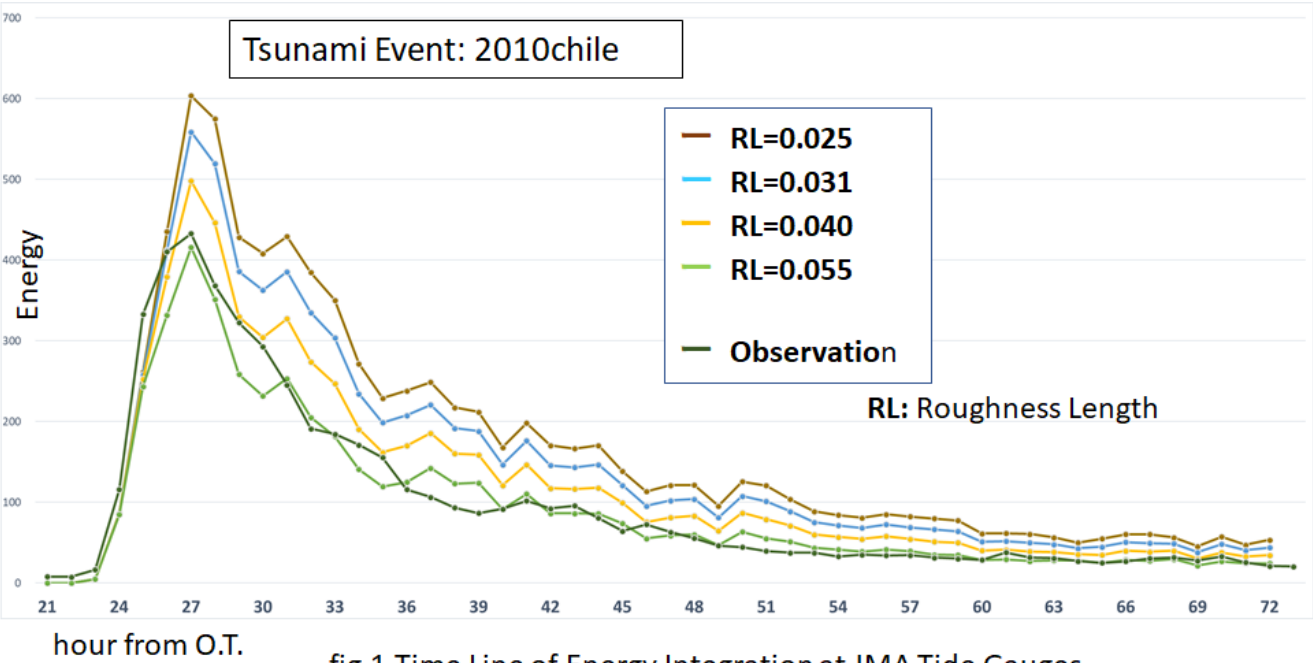


fig.1 Time Line of Energy Integration at JMA Tide Gauges

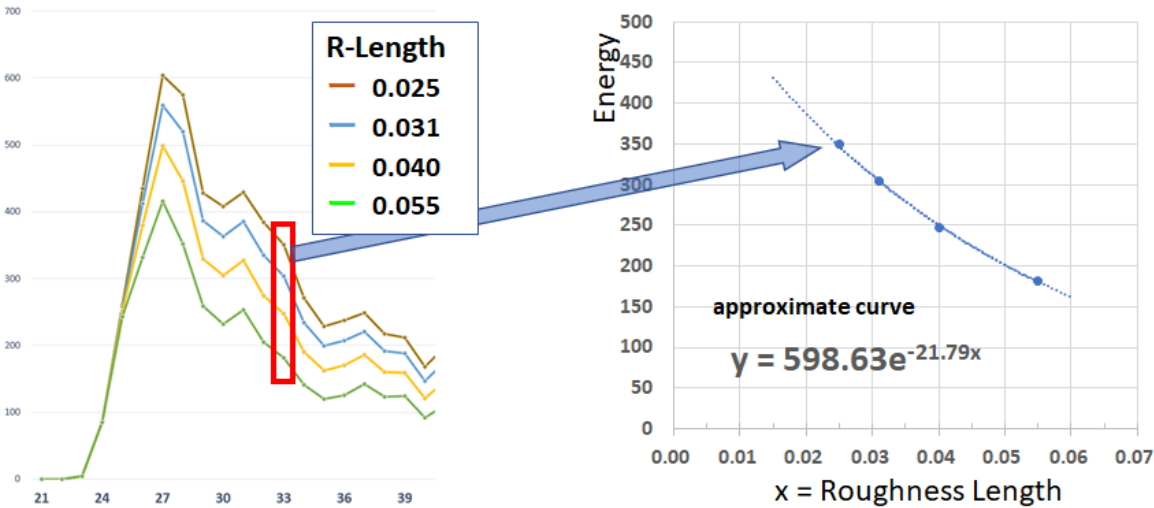


fig.2 Relationship between Energy and Roughness Length

Origin Time of the 1854 Tokai Earthquake Estimated from Distant Tsunami Waveforms

*Satoshi Kusumoto¹, Kentaro Imai¹, Ryoko Obayashi¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi^{2,1}, Yuichiro Tanioka³

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

南海トラフ沿いの沈み込み帯では、巨大地震と津波がおおよそ100から200年の間隔で繰り返し発生している。このうち1854年安政東海地震は12月23日午前9時15分頃に発生し、その後およそ30時間後に安政南海地震が発生したことが史料調査から明らかとなっているが、その正確な津波励起時刻については未だ意見が分かれている（例えば、日本地震史料, 1951; 中央防災会議, 2005）。これらの地震によって生じた津波はアメリカ西岸の検潮所で観測されていることが分かっており（例えば、Uno et al., 2018, ACES），本研究では、大森(1913)に記載されたオレゴン州アストリア、カルフォルニア州サンフランシスコ及びサンディエゴの潮位記録をデジタル化し、津波伝播の数値シミュレーションと比較することで安政東海地震の津波励起時刻の推定を試みた。

まず、紙面媒体の潮位記録に対してGolden Software製Didger 4を用いて等間隔で数値化を行った。次にデジタル化した潮汐記録と理論潮汐を比較することで時刻補正を行い、その後0.0005 Hzのハイパスフィルターにより潮汐成分を取り除いた。津波伝播の数値シミュレーションにはJAGURS（Baba et al., 2015）を使用し、非線形長波理論と津波荷重による地球の弾性変形や海水密度効果を考慮した非線形分散波理論に基づいてそれぞれの検潮所で津波波形を計算した。観測津波波形と計算津波波形を比較するにあたって、記録が紙媒体であることや開発初期の潮位計で振幅に対する感度が悪いこと、数値計算には人工構造物を含んだ現在の地形データを使用していることを踏まえて、津波の第一～三波の相互相関係数に基づいて津波初動の到達時刻を推定した。

デジタル化した潮位波形には安政東海地震の津波波形が明瞭に記録されていた。計算波形と観測波形を比較したところ、振幅はどの潮位計でも観測より大きくなった。この原因は数値計算に用いた現在の地形と安政東海津波が来襲した当時の地形が大きく異なることに起因するものと考えられる。本発表では、これらの検潮記録と数値シミュレーションの結果を基に安政東海地震の津波励起時刻について議論する。

謝辞：本研究はJSPS科研費（16H03146），H25-R1年度文部科学省「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構 金田義行）の一環として行われました。

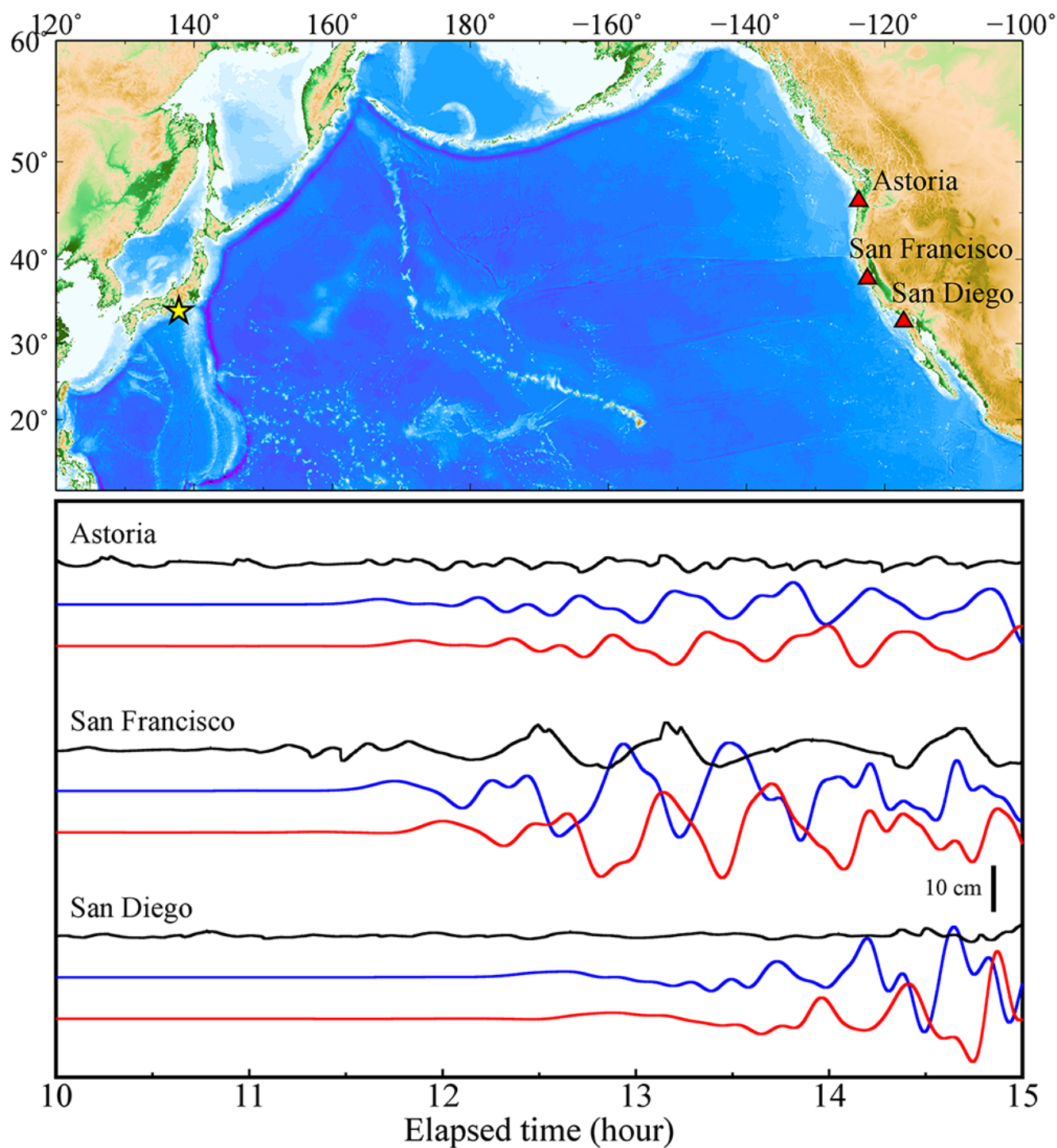


図1. 安政東海地震の観測津波波形(黒線)と計算津波波形(青線:非線形長波, 赤線:非線形分散波)の比較. 数値計算の津波励起時刻は午前9時とした.

An evaluation of tsunami occurrence probability based on tsunami deposit in eastern Hokkaido

*Makoto NEMOTO¹, Takashi YOKOTA²

1. OYO Corporation, 2. Aichi Institute of Technology

津波の想定では、従来から想定断層モデルに基づくシナリオ型のハザード評価が行われてきたが、最近では多数の発生確率を考慮した断層モデルに基づいて確率論的な津波ハザード評価が行われるようになってきている。その一方で、長期間を対象とした確率論的な津波評価結果を観測データと比較することは難しく、その妥当性の評価が課題となっている。本研究では、長期間の津波堆積物データに基づいて、観測データの面から津波発生確率の評価を試みた。

西村・中村（2011）による根室市別当賀の津波堆積物調査では、テフラTa-c以降の2700年間の津波堆積物として、10枚のイベント砂層が見つかった。そのイベント砂層の標高を整理した。津波堆積物標高と津波遡上高の関係は、2011年東北地方太平洋沖地震の観測データに対する検討が仁科ほか（2013）によって行われている。それに対して、本研究では仁科ほか（2013）の観測データに対して津波シミュレーションを併用することで両者の関係をより精度良く調べ、細礫の津波堆積物標高に対して2mを加算した高さを津波遡上高と推定出来ることを示した。その関係を用いて別当賀の津波堆積物に基づく推定津波遡上高の累積頻度分布を整理した上で、阿部（1982）の式を使って遡上高をマグニチュードに変換し、マグニチュードの累積頻度分布を整理した。その際、阿部（1982）の式は海岸における浸水高の予測式であるが、別当賀における津波浸水予測を行い、浸水高と遡上高がほぼ等しいことを確認した。

また、近世以降のデータとして、東北大学「津波痕跡DB」から、根室市別当賀付近に津波をもたらした千島海溝の地震について、別当賀から半径30km以内の最寄り地点の津波痕跡高データを抽出した。抽出した津波痕跡高データの最高値は1973年根室半島沖地震の6.0 mであり、次に高いのは1843年天保根室沖地震の3.0 mである。データが得られている期間が1843年～2018年の175年間であるため、津波堆積物データの2,700年間と合わせるため、累積頻度を15倍（ $2700 \div 175 \div 15$ ）した。

更に、近代のデータとして、気象庁の一元化震源データ（1923～2017）から、地震本部による千島海溝の評価領域のうち別当賀から半径350km以内のイベントを抽出して、マグニチュードに関する累積頻度分布を調べた。b値は1.05である。一元化震源のデータ期間は、1923年以降の約95年間であるため、津波堆積物データの2,700年間と合わせるため、累積頻度を28倍（ $2700 \div 95 \div 28$ ）した。

以上のように、約2700年前からの津波堆積物データが得られている北海道東部の根室市別当賀に対して、津波堆積物データ、津波痕跡高データおよび地震活動データに基づいてマグニチュードの累積頻度分布を作成した。その結果、各データの累積頻度分布は概ね一つの線で表すことができ、Mw8.0のイベントの再現期間は50年、Mw9.0のイベントの再現期間は約1,000年から2,000年と評価できる（図1）。また、Utsu（1974）の改良G-R式を適用すると、最大規模のマグニチュードは9.05と推定された。

本研究で得られた実観測データに基づく津波遡上高の確率評価は津波堆積物データが得られている限られた地点でしか行えないものの、国や自治体から公表されるハザード評価結果がその地域の津波履歴の中でどの程度の規模であるのかを相対的に評価することが出来るとともに、今後の確率論的津波ハザード評価の妥当性を検証し、より信頼性の高いハザード評価を行うために必要なデータとなる。同様の検討を別の地域でも実施していくことが期待される。

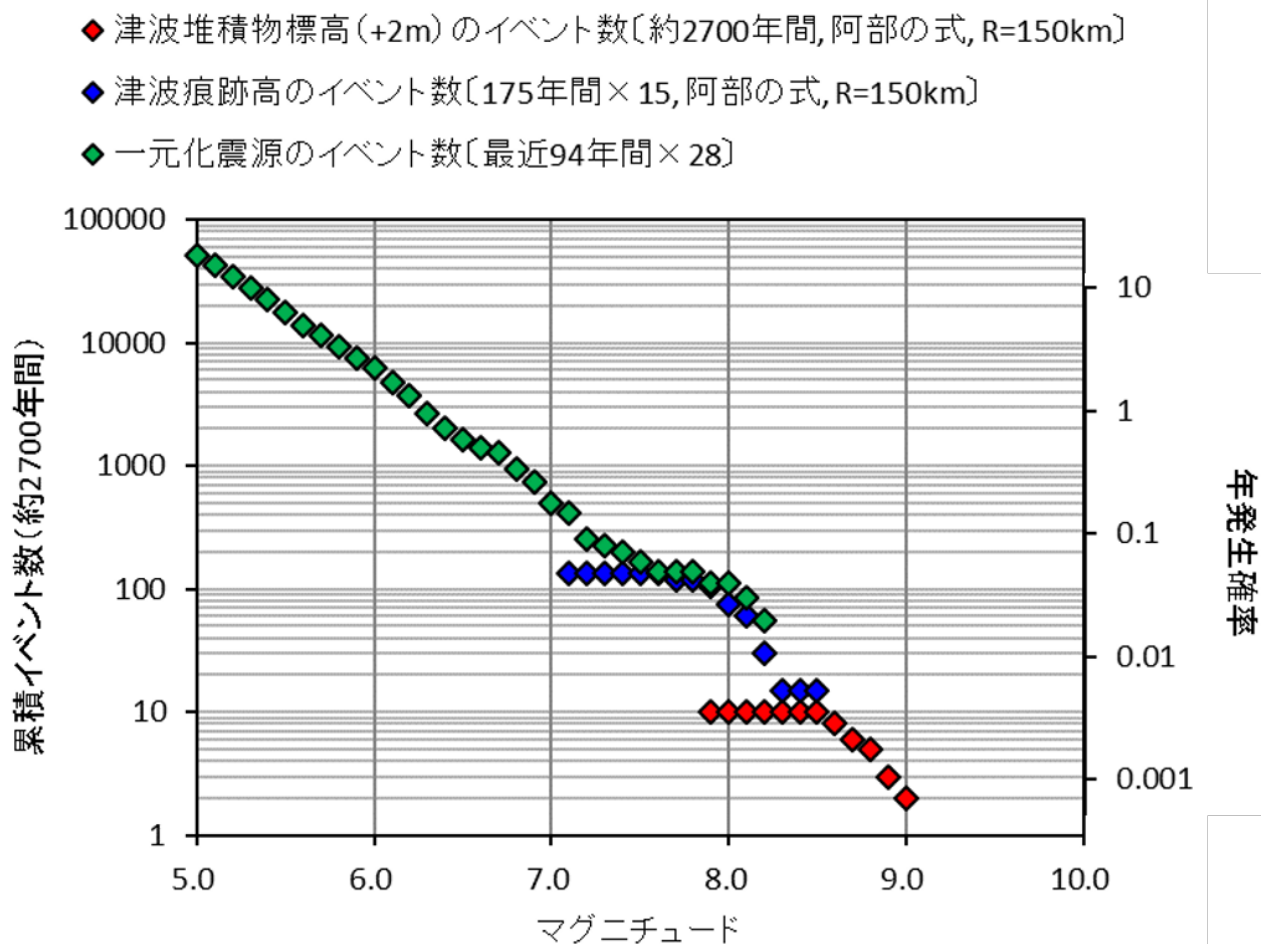


図1 津波堆積物・津波痕跡高・地震活動に基づく別当賀における地震マグニチュードの累積頻度分布.

Room C | Emergency session | S24. Off Yamagata Earthquake of 18 June 2019

[S24]PM-1

chairperson: Masanao Shinohara (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Kazuki Miyaoka (Japan Meteorological Agency)

Tue. Sep 17, 2019 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S24-01] An outline of 2019 Off-Yamagata earthquake

*Kazuki Miyaoka¹, Kiyoshi Takeda¹, Yuzo Ishigaki¹, Koji Nakamura¹, Satoshi Harada¹, Fujio Kusano², Nobuo Harada¹ (1. Japan Meteorological Agency, 2. CeMI)

1:30 PM - 1:45 PM

[S24-02] Spatiotemporal distribution of aftershocks of the 2019 M6.7 Yamagata-ki earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Satoshi Hirahara¹, Takashi Nakayama¹, Naoki Uchida¹, Tomomi Okada¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S24-03] Yamagata offshore Earthquake in view of Historical Earthquakes and Crustal Movements

*Kazuo Kawauchi¹ (1. NIIGATA UNIVERSITY OF PHARMACY AND APPLIED LIFE SCIENCES)

2:00 PM - 2:15 PM

[S24-04] Onshore temporal aftershock observation for the 2019 Yamagata-Oki earthquake

*Tomomi Okada¹, Shin'ichi Sakai², Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Toru Matsuzawa¹, Ryota Hino¹, Masanao Shinohara², Richard Sibson³ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. University of Otago)

2:15 PM - 2:30 PM

[S24-05] Aftershock observation of the 2019 Off-Yamagata Earthquake using anchored buoy ocean bottom seismometers

*Masanao Shinohara¹, Shin'ichi Sakai¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Ryota Hino², Yusuke Yamashita³, Hiroshi Sato¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruption, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

2:30 PM - 2:45 PM

2:45 PM - 3:00 PM

[S24-06] Active period of eastern margin of the Japan Sea

*Yuzo Ishikawa¹ (1. Geological Survey of Japan)

2:45 PM - 3:00 PM

An outline of 2019 Off-Yamagata earthquake

*Kazuki Miyaoka¹, Kiyoshi Takeda¹, Yuzo Ishigaki¹, Koji Nakamura¹, Satoshi Harada¹, Fujio Kusano², Nobuo Harada

1. Japan Meteorological Agency, 2. CeMI

2019年6月18日22時22分に、山形県沖の深さ14kmでMj6.7の地震が発生した。震央は山形県・新潟県県境の沖合約10kmで、新潟県村上市で震度6強、山形県鶴岡市で震度6弱を観測した。またこの地震により鶴岡市鼠ヶ関で11cmなど、秋田県、山形県、新潟県、石川県で津波を観測した。発震機構は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。

その後の地震活動域は概ね北東－南西方向の長さ20km程度の領域で、活動は本震－余震型で推移している。最大Mj4.3を含め、Mj4.0以上の余震が7月15日までに5回発生している。ただし、陸域および沿岸域で発生した同程度の地震の余震活動としては比較的低調である。

日本海の東縁では平成5年(1993年)北海道南西沖地震、昭和58年(1983年)日本海中部地震、1964年の新潟地震（以下、新潟地震）、平成16年(2004年)新潟県中越地震（以下、中越沖地震）など、規模の大きな地震が発生している。これらの地震はそれぞれ、東西もしくは北西－南東方向の圧縮による逆断層型であるが、その断層面の傾斜方向は一樣でないばかりか、余震分布などから複数の断層面が推定されるなど、複雑な構造で発生した地震であることが指摘されている。上記を踏まえ、ここでは Double Difference法（以下、DD法）を用いた詳細な余震分布による断層面推定および新潟地震との位置関係等についての考察をおこなった。

Fig.1 には波形相関を併用したDD法による震央分布図とその全体および領域毎の断面図を示した。本震は南東側の最も深い場所に位置しており、また本震の周辺では余震が少ない様子が見られる。余震は全体的には低角で南東側に傾斜する面に分布しており、発震機構の2枚の節面のうち、南東傾斜の低角な節面と調和的である。領域毎の分布を見た場合、本震を含む大半の部分では南東傾斜であるものの、南西端の領域ではこれとは異なる北西側に傾斜する余震の分布が見られており、中越沖地震などと同様に、複数の断層面の存在が示唆される。

Fig.2には今回の地震活動と新潟地震の余震分布（草野・浜田, 1991）との位置関係を示した。今回の活動域は新潟地震の活動域に隣接しており、新潟地震の余震がほとんど発生していない場所で今回の活動が発生したことがわかる。新潟地震の断層面については西傾斜、東傾斜などいくつかのモデルが提案されているが、その中で草野・浜田（1991）は余震分布から、高角の西傾斜（N70°W）の面で発生したことを指摘している。Fig.1に見るように新潟地震の余震活動の活発な部分に接している今回の地震活動の南西部分が北西傾斜の面に分布していることは、草野・浜田（1991）の指摘を支持しているものと考えられる。

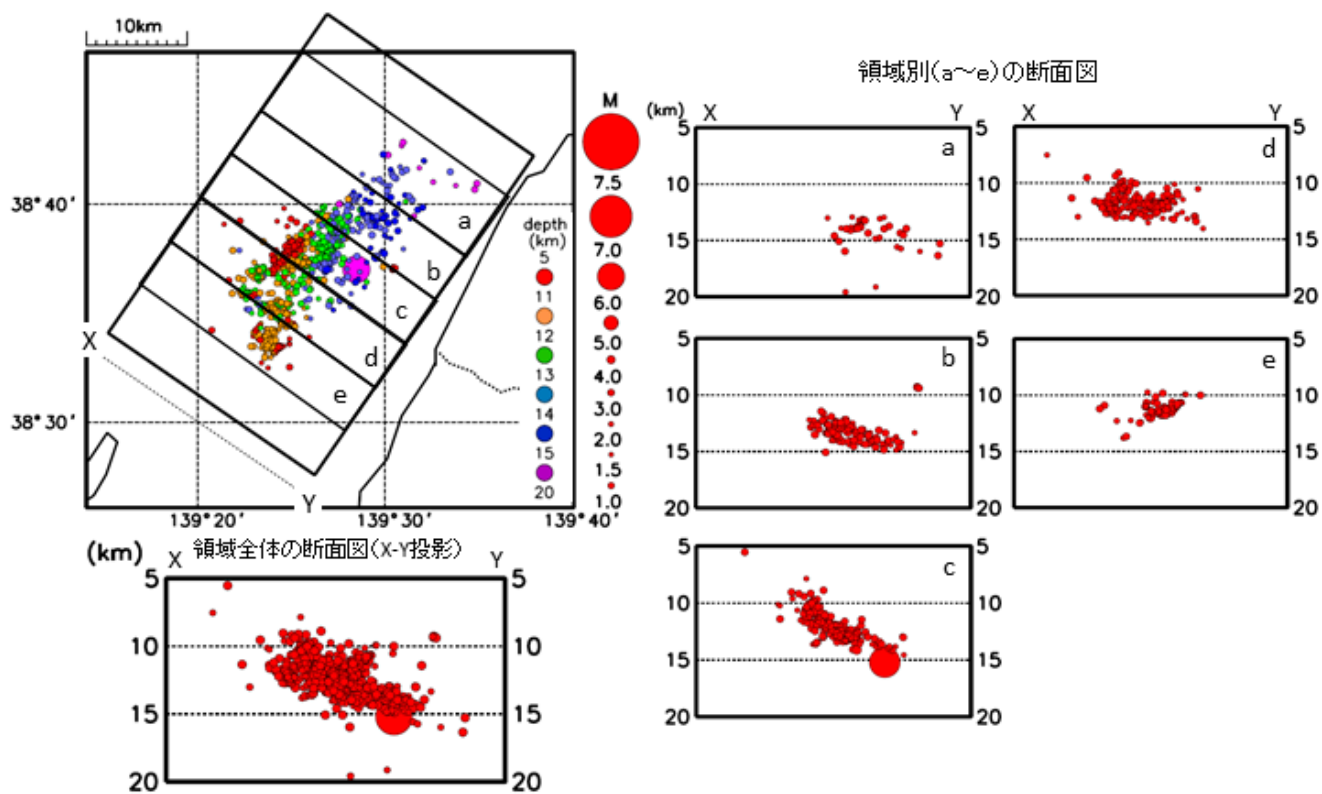


Fig.1 DD法による今回の地震活動の震央分布図および断面図

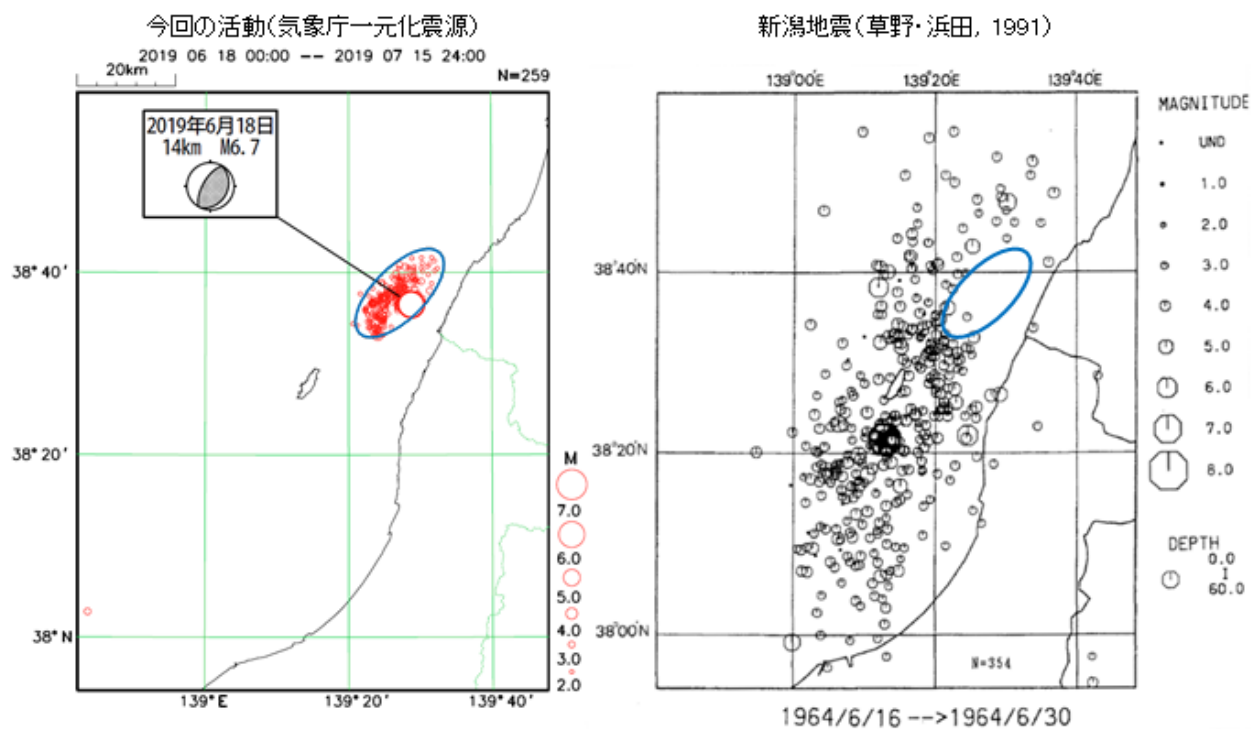


Fig.2 今回の地震活動と新潟地震の余震分布比較

Spatiotemporal distribution of aftershocks of the 2019 M6.7 Yamagata-ki earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Satoshi Hirahara¹, Takashi Nakayama¹, Naoki Uchida¹, Tomomi Okada¹, Toru Matsuzawa¹

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

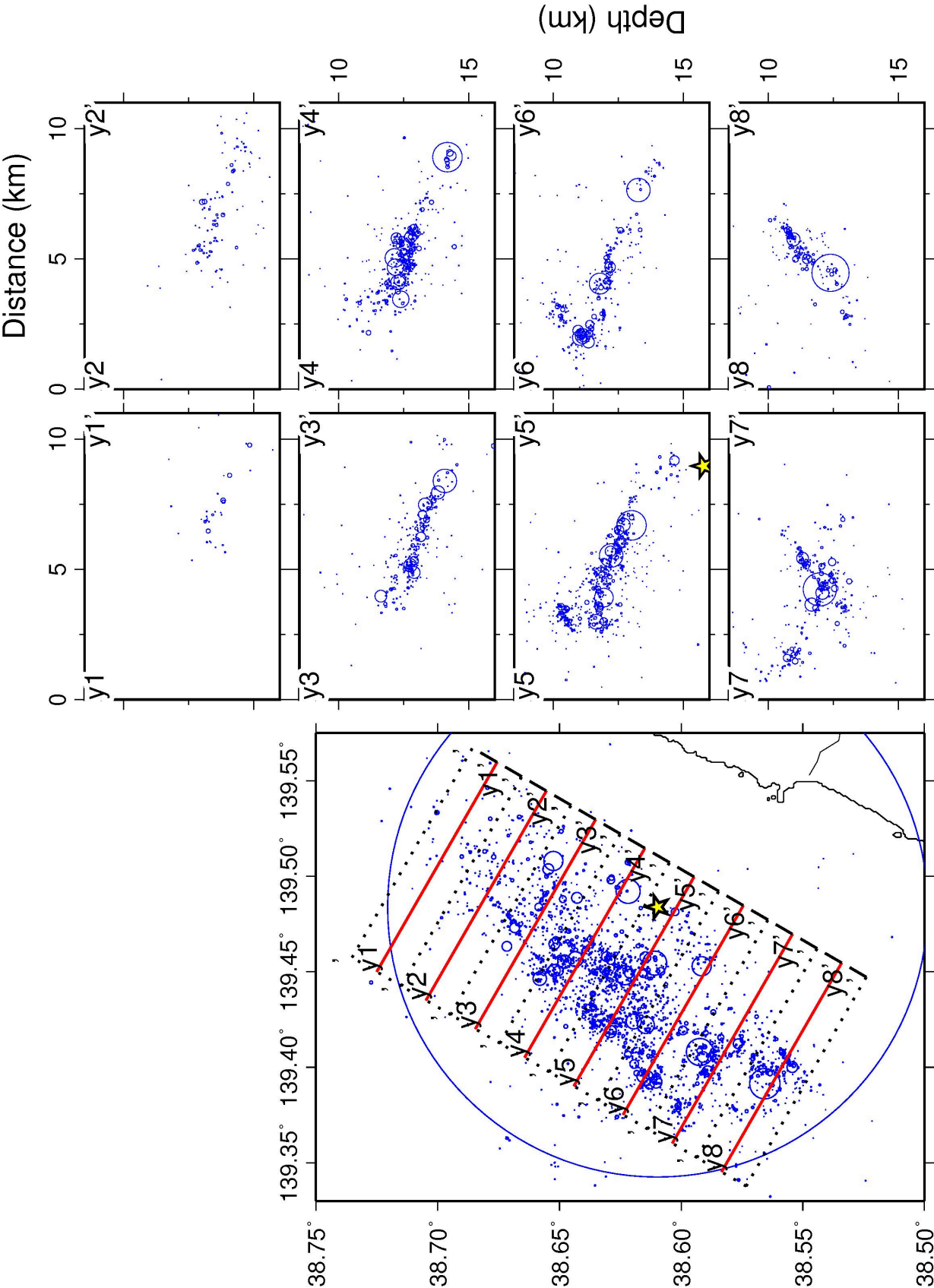
東北日本では2011年東北沖地震の発生により東西圧縮応力が減少したにも拘わらず、多数の誘発地震活動が生じた。それらの余震活動の多くは特異な共通点を持つ次の2つに大別することができる (Yoshida et al., 2018): (1) 東西圧縮とは顕著に異なるメカニズム解を持つ活動。それらのメカニズム解の主方向は、2011年東北沖地震時の応力変化の主方向とよく一致する。例えば、秋田県中南部や、福島-茨城県境で生じた地震活動。(2) 東西圧縮と調和的なメカニズム解を持ち、震源が深部から浅部へと migrationする群発地震活動。例えば、山形-福島県境や仙台大倉、山形月山周辺で生じた群発地震活動。Yoshida et al. (2018) は、(1)のタイプの誘発地震活動が応力の空間不均質に起因する局所的な応力増加を主要因とし、(2)のタイプの誘発地震活動は地震後の流体圧増加に伴う強度低下を主要因とすると考えることにより、その多くの特徴を理解できることを示した。

2019年山形沖で発生した M6.7の地震は、およそ東西方向に P軸を持つ逆断層型のメカニズム解を持つ。この地震が、前述した (2)のタイプに属するのか、あるいは異なる要因により引き起こされたのかは自明ではない。本研究では、2019年山形沖の M6.7の地震の発生機構について理解の深める目的で、余震の詳細な震源分布を調べているので、その結果について報告する。

震源の再決定は、波形相関により得られた時間差データを、一元化震源記載のP, S波到達時刻データに加えて Double-Difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002)を適用することにより行った。最初に、震央距離 3 km以内の地震間で、カタログ記載あるいは計算したP波とS波到達時刻の0.1s前から始まるそれぞれ 2.5s, 4.0sの長さのwindowを用いて、相互相関関数を計算し、それが最大になる時の値と時間差を求めた。読み取り誤差の影響を取り除くために、イタレーションの後半では、波形相関により得られた時間差データに高い重みを掛けて震源位置を推定した。イタレーションの過程で、波形相関により得られた走時差残差は 120msecから20 msec程度まで減少した。

震源再決定の結果(図1)、震源の分布は、cloud状から数枚のsharpな面状構造へと大きく変化した。主要な面構造は東傾斜であるものの、南部には西傾斜するものも見られる。本震震源は、東傾斜する面構造の下端周辺に位置する。その周囲には余震の空白域が見られ、本震時の大すべり域を反映しているかもしれない。そのサイズは、応力降下量 3MPaを仮定した際に予想される断層サイズに比べて非常に小さい。

本震直後の余震からは、時間とともに移動していく傾向が見られ、余効すべりや間隙水圧の拡散を反映している可能性が挙げられる。震源の移動は深さ方向に最も顕著であり、(2)のタイプに見られる特徴と類似する。このことは、今回の地震が、深部からの流体移動による断層強度低下により発生したことを示唆するのかもしれない。東北沖地震後の粘弾性緩和の影響 (Hu et al., 2016)や深部でのクリープに伴う応力増加による影響 (Meneses-Gutierrez & Sagiya, 2016), 今回の地震が1964年新潟県沖地震の余震であるなどの可能性も含めより詳細に検討する必要があるだろう。



Yamagata offshore Earthquake in view of Historical Earthquakes and Crustal Movements

*Kazuo Kawauchi¹

1. NIIGATA UNIVERSITY OF PHARMACY AND APPLIED LIFE SCIENCES

2019年6月18日山形県沖地震(M6.7)は、1964年新潟地震(M7.5)を含むM7-8級の歴史地震が繰り返されてきた領域内で発生した。この領域は佐渡島と新潟山形県境の中間に位置する新潟県粟島周辺の海域で、日本海東縁変動帯の南端部に位置する。1833年庄内沖地震は、これまでの研究で新潟地震の震源域の北半分を共有して酒田沖に達すると考えられている。1762年佐渡沖地震はImamura(1947)以来小佐渡南東方の越佐海峡の地震とされていた。これを羽鳥(1990)が大佐渡北方沖、さらに河内(2000)がそれまで引用されていた地名の取り違えを指摘して、大佐渡「北東」沖の粟島付近と修正した。河内(2000)に従えばこの領域のM7前後を含めた繰り返しの数は4つとなる。

1964年新潟地震の震源域は、余震分布から粟島を中心とした北北東-南南西走向の長円の形状と推定され、この南端は信濃川河口に達している(図1)。越後平野はここからさらに南南西方向に調和的に延びる構造平野で、東西の周縁には平野の方向と直交する西北西-東南東方向からの圧縮応力で形成された「褶曲丘陵」や「逆断層地塊」が平野と並列している。平野中央部を流れる信濃川、上流の千曲川さらに長野盆地から支流犀川の流路は、この褶曲軸や断層線の屈曲に支配されて松本盆地に至っている。越後平野中央部の歴史地震では、1828年三条地震が知られており、河内・大木(1996)はこの地震の北半分が重なる1670年西蒲原地震(四万石地震)の存在を指摘した(図1)。2004年中越地震、2007年中越沖地震、2011年長野県北部地震はさらに南方ないし南西方で発生した。5つとも広義の「信濃川=越後平野」の地震である。けだし、大森(1921)の「信濃川流域地震帯」は的を射た命名と言える。近時の活動を中部地方全体に敷衍してみると、信越地方から北陸、近畿地方へ延びる活動帯を見出すことができる。

檀原(1973)の新潟地震の水準変動は主に地震の前兆的地殻変動に注目したものであるが、これは見方を変えると震源域に近い地塊全体が地震時に沈降しながら西へ傾動したことを示している[河内・大木(1997)]。粟島が同じく西へ傾動しながら隆起したことを考えれば、粟島の東方に断層線のある西傾斜の逆断層(西側の地塊が東側の地塊にのし上がった断層)が震源断層であることは明らかである。これは今回の地震の地理院による地殻変動の速報や気象庁の発震機構解とも、また2004年・2007年・2011年の地震のそれとも調和的である。

歴史地震や近時の被害地震の活動履歴および地殻変動の特徴から考えて、日本海東縁変動帯は佐渡沖から糸魚川-静岡構造線へ達するようにはみえない。むしろ今回の地震の震源域を含むの粟島周辺地域からストレートに越後平野、信越褶曲帯へと延びている。そしてそれは西傾斜の逆断層が卓越した衝突境界の性質を持っており、「新潟-神戸歪み集中帯」に連続することを示唆している。

[引用文献]

檀原(1973), 新潟地震前・時・後の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 9, 93-96.

羽鳥(1990), 宝暦12年(1762年)・享和2年(1802年)佐渡地震の規模と津波, 歴史地震, 6, 1-7.

Imamura(1947), Seismic Activity on Both Sides of Fossa magna, Proc.Imp.Acad., 22, 314-317.

河内・大木(1996), 1670年西蒲原地震(M6 3/4)の震央の再検討, 地震2, 49, 337-346.

河内・大木(1997), 1964年新潟地震による地塊の傾動と信濃川地震帯のテクトニクス, 地震2, 50, 303-314.

河内(2000), 宝暦佐渡沖地震(1762年, M7.0)の震央の再検討, 歴史地震, 16, 107-112.

大森(1921), 大正7年信州大町地方激震調査報告, 震災予防調査会報告第94号, 震災予防調査会, 16-69.

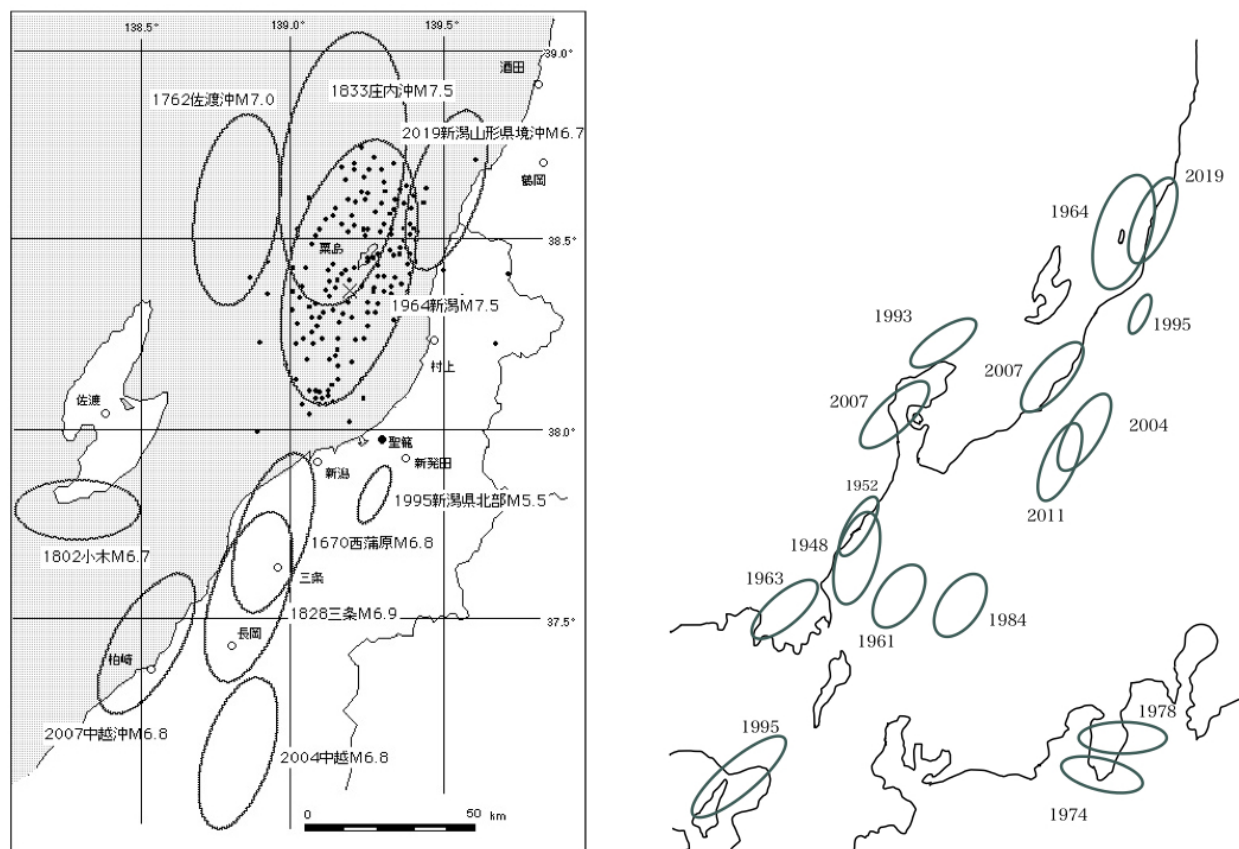


図1 新潟県中・北部の過去400年間（左 $M > 6.7$ ），中部地方の過去71年間（右 $M > 6.5$ ）の被害地震．震源域の広がりの意味を示すため，1964年新潟地震の余震分布（気象庁による）を左図に示した．1995年新潟県北部地震は参考のため掲載．

Onshore temporal aftershock observation for the 2019 Yamagata-Oki earthquake

*Tomomi Okada¹, Shin'ichi Sakai², Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Toru Matsuzawa¹, Ryota Hino¹, Masanao Shinohara², Richard Sibson³

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. University of Otago

1. はじめに

2019年6月18日22時22分に、山形県沖においてM6.7の地震が発生した。本震のメカニズム解（気象庁および防災科研）は、P軸が東南東-西北西方向を向く逆断層型の解であり、東傾斜の節面の傾斜は約30°、西傾斜の節面の傾斜は約60°である。

この地震の余震分布を得る際には震源域近傍での高密度観測を行なうと共に3次元速度構造を用いることで精度を上げることができると期待される。また、震源域周辺の地震波速度構造は、この地震の発生機構を知る上で重要な情報となる。東北大学と東大地震研究所は本震発生後震源域近傍において臨時地震観測を行った。本研究では、臨時地震観測データを用いて得られた余震分布や地震波速度構造について報告する。

2. データ・方法

陸上の臨時地震観測は本震発生後約2日後から開始した。観測はオンライン観測点（東大地震研：4点、東北大：2点）とオフライン観測点（東北大：3点）から構成され、およそ余震域に沿った海岸線沿いに設置した。得られた波形データを定常観測によるデータと合わせて解析に用いた。震源決定は、Okada et al. (2015)の地震波速度構造を初期構造とし、Double-Differenceトモグラフィ法により行なった。

3. 結果

定常観測点を用いた余震の震源決定（吉田・他、本学会）同様、余震分布は主に東にゆるやかに傾斜した分布として得られた。従って、本震のメカニズム解の2つの節面のうち、東に傾斜した節面が断層面に対応すると考えられる。本震は東に傾斜した余震の並びに最深部に位置している。この東に傾斜した余震分布の浅部延長は栗島隆起帯の西端付近に対応するように見える。一方、震源域（余震域）南部では、余震分布はやや複雑であり、西にやや高角で傾斜していると見られる余震分布も得られた。この西傾斜の余震の並びは、本震のメカニズム解の2つの節面のうち、西に傾斜した節面に対応していると考えられる。

4. 議論

2011年東北沖地震発生後に東北地方などのいくつかの領域で東北沖地震により誘発されたと考えられる地震が発生している（Okada et al., 2011, 2015, Yoshida et al., 2018 など）。それらの地震に対するクーロン応力変化は正であり、東北沖地震による応力変化の正の影響を受けていると考えられる。一方、山形県沖地震の2つの節面での東北沖地震によるクーロン応力変化はどちらも負であった。Uchida et al. (2018) は、今回の地震の震源域を含む領域において東北沖地震後の地震活動の低下を指摘しており、山形県沖地震に対する負のクーロン応力変化と整合しているように考えられる。ただし、東北沖地震の地震後変動や南に隣接する1964年新潟地震の影響も考慮する必要がある。一方、2011年東北沖地震発生後の誘発地震群については、震源域の時間拡大などから間隙流体圧の上昇も原因として考えられている。既往研究および本研究による地震波速度トモグラフィの結果から山形県沖地震の震源域の深部において低Vp・低Vs・高Vp/Vsの領域が確認できる

ことから、山形県沖地震の発生原因として流体の関与も考えられる。

On June 22 (JST), a M6.7 earthquake occurred off Yamagata Prefecture in NE Japan. This Yamagata-Oki earthquake is located within the East Margin of the Japan Sea (EMJS) strain/deformation concentration zone.

To obtain more reliable aftershock distribution of the 2019 Yamagata-Oki earthquake, we deployed temporal seismic stations. It began about two days after the earthquake. We used the double-difference tomography method (Zhang and Thurber, 2003, 2006) for relocation. Initial velocity structure is from Okada et al. (2015).

We can see major eastward-dipping alignment with a dip angle of 30 degrees. In southern area of aftershock area, aftershock distribution seems to be complex and we can see westward-dipping alignment with a dip angle of about 60 degrees.

Focal mechanism of the 2009 Yamagata-Oki earthquake is reverse-type with P-axis oriented NNW-SSE (e.g., F-net, NIED; JMA). One of nodal planes is eastward dipping with a dip angle of about 30 degrees, and another is westward dipping with a dip angle of 60 degrees. These nodal planes of focal mechanism seem to correspond well with the aftershock distribution.

Aftershock observation of the 2019 Off-Yamagata Earthquake using anchored buoy ocean bottom seismometers

*Masanao Shinohara¹, Shin'ichi Sakai¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Ryota Hino², Yusuke Yamashita³, Hiroshi Sato¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruption, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

2019年6月18日22時22分頃、山形県酒田市沖の深さ約14kmを震源とするMj6.7の地震が発生した。この地震により、新潟県村上市で震度6強を観測し、山形県、新潟県、石川県に津波注意報が出され、被害が発生した。発震機構は西北西―東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、いわゆる内陸地震と考えられている。日本海東縁部にはひずみ集中帯と呼ばれる活構造が存在しており、今回の地震はこの構造の一部が関係していることが推定されている。今回の地震の震源域は、陸域既設地震観測網の近傍であるが、震源域は海域となっている。そのために、精密な余震分布を求めるためには、震源域直上における海底地震計による観測が必要不可欠である。そこで、今回の地震活動とその地震発生場の特徴を正確に把握するために、震源域直上において、海底地震計を用いた臨時観測および震源域近傍の海岸線付近において臨時テレメータ観測を実施することとした。しかしながら、震源域直上の海底は水深100mより浅く、水産活動等が活発な海域となっており、通常海底観測に用いられる自由落下自己浮上式海底地震計による海底観測が難しい。今回、海域部については浅海であることを利用し、簡便な係留ブイ方式による海底地震計による観測を実施した。

2. 観測

今回使用した海底観測装置は、米国Geospace社のOcean Bottom Recorder (OBX-750) である。この観測装置は、固有周波数15Hz 3成分速度型地震計(GS-ONE OMNI)とハイドロフォンを搭載して、750mまでの水深で独立した観測が可能である。搭載している地震計は置かれている姿勢に関係なく計測可能であるために、レベリング装置を搭載していない。地震計の姿勢を知るために、2軸の傾斜計と方位計が付加されている。ハイドロフォンは10Hz以上の周波数について、平坦な特性となっている。地震計およびハイドロフォンからの信号は24bit-A/Dされ、メモリーに連続収録される。内蔵電池により約30日間の連続観測が可能である。大きさは、52 x 21 x 11cmであり、重量は空中約11kg、水中約4kgの小型な装置である。刻時については、OVCXO（恒温電圧制御水晶発振子）を用いている。設置については係留ブイ式とした。ブイが海上にあることにより、海底に設置物があることを周知する。係留システムは、まず、ロープ先端に安定のための錘（重量2kg程度）をつけ、約1.5m離して、OBXを取り付ける。その先に2m間隔に、船止め用のアンカー（重さ8kg程度）を2個取り付け、海底部とする。船止め用アンカーを用いることにより、風や波浪による位置の移動を防止することができる。その後約175mのロープ末端に、ロープ沈降用の錘（重量2kg程度）を付け、さらに20mのロープを介して、ブイを取り付けた。この浅海用係留ブイ方式海底地震計3台を、5kmおよび8.5km程度の間隔で震源域直上に設置した。水深は70mから80mである。余震観測であること、設置水深が100m以下と浅いことを考慮し、OBXのアナログ部の増幅度は下げ、500Hzのサンプリング周波数にて収録を行った。7月5日に設置を実施し、回収は7月13日に行った。回収前日の12日に係留ブイ方式海底地震計1台のブイが流失していることが確認され、12日及び13日に回収作業及び搜索作業を行ったが、残念ながら現時点では回収されていない。2台の海底地震計は13日に回収され、良好なデータが収録されている。一方、陸上テレメータ臨時観測には、固有周期1秒の3成分速度型地震計を用いた。震源域の海岸付近において、海底臨時観測と観測期間が重なるように観測を実施し、こちらも良好なデータが得られた。今後は、海底地震計による臨時観測点と震源域の海岸付近に設置した臨時観測点を含む陸域観測点からのデータを併せて、精度のよい震源分布を求める予定である。

Active period of eastern margin of the Japan Sea

*Yuzo Ishikawa¹

1. Geological Survey of Japan

今年6月18日に山形県沖でM6.7の地震が発生した。この場所は、石川(1994)が地震空白域と指摘していた秋田沖沿岸の「A」領域の南に隣接した位置であった。日本海東縁変動帯でのM6を越える地震は、2014年11月22日M6.7長野県北部の地震以来であった。この地震は、北部フォッサマグナで発生しており、日本海東縁変動帯には含まれない場合もある。純粋な意味での日本海東縁変動帯では、3-11地震直後に起きた長野・新潟県境の地震M6.7と秋田・青森県境起きの地震M6.4以来である。

日本海東縁では、1939年男鹿地震M6.8,M6.7の発生以来地震活動期に入っていると指摘してきた(石川,1994)。ただ、日本海東縁での地震発生の繰り返しは、南海トラフや日本海溝・千島海溝のような巨大地震の繰り返し発生のパターンとは全く異なっている。これは、日本海東縁では両側のプレートの相対速度が遅いため、地震発生の繰り返し間隔が長いと思われる。そのため過去の地震活動資料から同じ震源域での繰り返し発生した事例はほとんど知られていない。

地震の繰り返し発生のパターンは明らかでは無いが、活動期と静穏期が繰り返していることは指摘されている。それぞれの期間は明確では無いが、前回の活動期が1741年に始まり1833年庄内地震で終わっていると考えられるので、92年間となる。今回の活動期が1939年に始まっているので、もし同じ期間続くのであれば、地震空白域もいくつか存在するのでまだしばらく警戒する必要がある。

参考文献

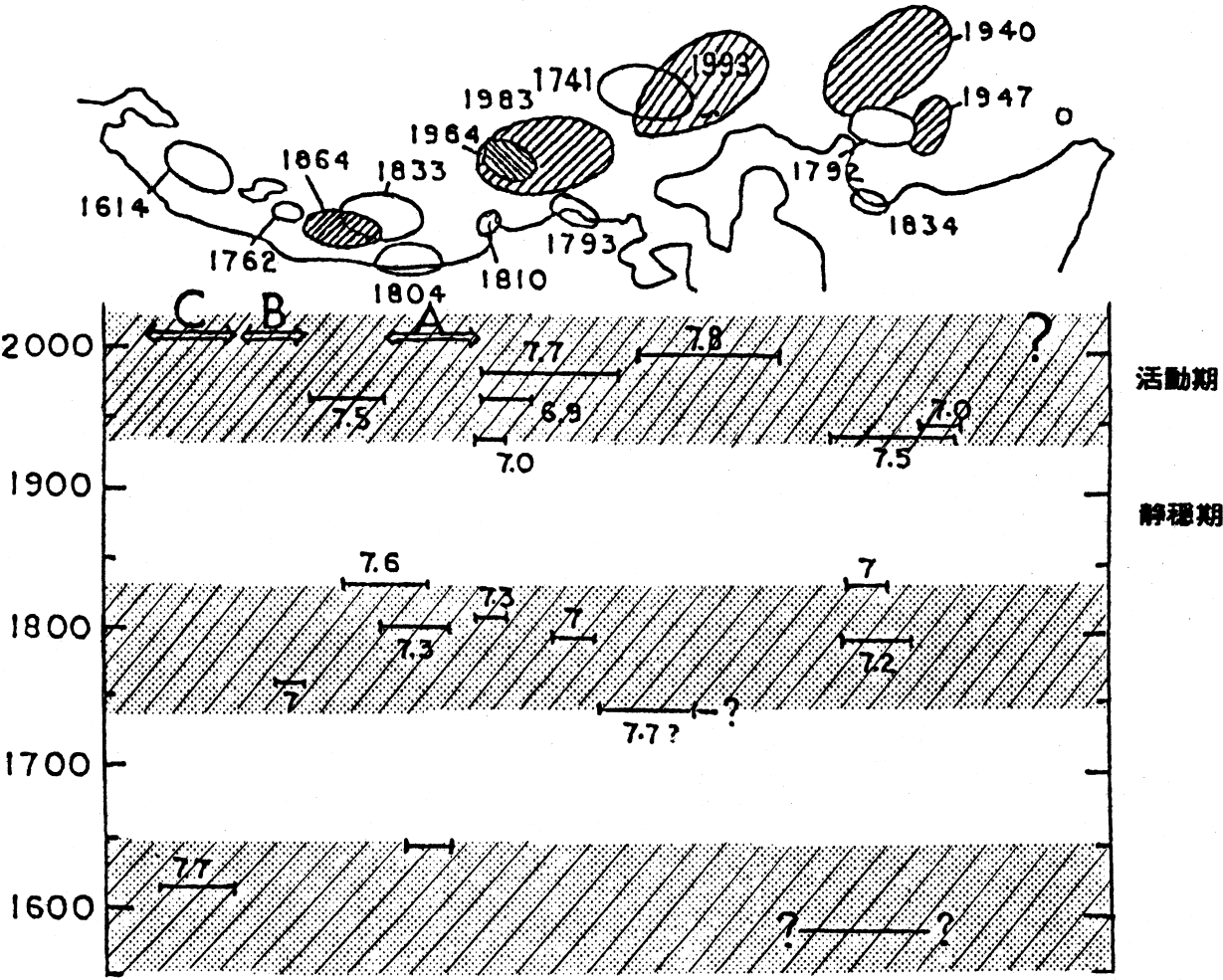
石川有三,1994,残された空白域,月刊「海洋」1994,号外7,102-107.

羽鳥徳太郎,1994,北海道南西沖地震津波と空白域,月刊「海洋」,号外7,211-218.

図の説明：日本海東縁の地震活動が活動期（斜線域）と静穏期（白色域）が繰り返している（石川,1994の図に加筆）。

上の地図は、過去に起きた地震の津波発生域（羽鳥,1994による）。

下図は、時空間図で水平位置は上図の地図にほぼ対応している。縦軸は、下端が西暦1550年で上に来るほど現代に近い。横棒線は、過去に起きた地震の震源域を起きた年代に対応して書いてある。その横の数値はその地震のマグニチュード。



Room C | Emergency session | S24. Off Yamagata Earthquake of 18 June 2019

[S24]PM-2

chairperson: Naoki Uchida (Graduate School of Science Tohoku University), Hiroshi Sato (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

Tue. Sep 17, 2019 3:15 PM - 4:30 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S24-07] Characterization of the crustal structure in the epicentral area of the 2019 Off-Yamagata prefecture earthquake, northern Honshu, Japan

*Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Masanao Shinohara¹, Shin'ichi Sakai¹, Akinori Hashima¹, Tetsuo No², Shuichi Kodaira², Takeshi Sato³, Makoto Matsubara⁴ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Sapporo Regional Headquarters, JMA, 4. NIED)

3:15 PM - 3:30 PM

[S24-08] The relationship between 2019 Off the coast of Yamagata prefecture earthquake and 1964 Niigata earthquake

*Taku Ueda¹, Lina Yamaya¹, Aitaro Kato¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM

[S24-09] Long-period strong ground motion observed in the Echigo Plain during the Yamagata-ken-oki event of June 18, 2019

*Tomiichi Uetake¹, Kazuhito Hikima¹, Shutaro Sekine² (1. Tepco Research Institute, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., 2. Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:45 PM - 4:00 PM

[S24-10] Rupture Process of the 2019 Off Yamagata Prefecture Earthquake Based on Waveform Inversion with Empirical Green's Functions

*Atsushi Nozu¹ (1. Port and Airport Research Institute)

4:00 PM - 4:15 PM

[S24-11] Science literacy of Twitter users considered from "tweets" for earthquake clouds before and after the Yamagata Offshore earthquake

*Yoshiaki Orihara¹ (1. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM

Characterization of the crustal structure in the epicentral area of the 2019 Off-Yamagata prefecture earthquake, northern Honshu, Japan

*Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Masanao Shinohara¹, Shin'ichi Sakai¹, Akinori Hashima¹, Tetsuo No², Shuichi Kodaira², Takeshi Sato³, Makoto Matsubara⁴

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Sapporo Regional Headquarters, JMA, 4. NIED

1.はじめに

2019年6月18日、山形県の沖合でMj 6.7の地殻内地震が発生した。地震研究所は、本地震発生直後から陸域での自然地震観測、浅海型の海底地震計を用いた海底地震観測 [1] を行ってきた。また海洋研究開発機構は震源域西側での地殻構造を実施している [2]。本地震については、既知の活断層・地殻構造とどのような関係があるのか、2011年東北太平洋沖地震の余効変動が進行している時期に、どうして圧縮性の規模の大きい地震が発生したのかなど、現時点では解決できていない問題がある。ここでは、山形堆積盆地と新潟堆積盆地に位置する震源域の構造地質学的特徴について述べ、発表時には余震分布などにもとづく震源断層の地学的な位置づけについて述べる。

2. 震源域周辺の地質構造

震源域は羽越山地と栗島隆起帯に挟まれたNNE-SSW方向の堆積盆地内に相当する。ブーゲ異常からは高密度層が低下した厚い新第三系の堆積層の存在が示唆される。羽越山地内にはNNE-SSW方向の断層が卓越するが、これらは日本海形成初期につくられた幅の狭いハーフグラベンやグラベンを規制する正断層群である [3]。その後の日本海拡大期には、山形県北西部から秋田にかけての堆積盆地と、新潟から北部フォッサマグナに至る大規模な堆積盆地が形成され、震源域周辺はこれら大きな堆積盆地の接合部に位置する。両堆積盆地地下には、日本海形成期に噴出した大規模な玄武岩の分布が知られており、震源域東方の沿岸に露出する珧質泥岩中には大規模な粗粒玄武岩が進入している。こうした観点から、震源域の中下部地殻には、苦鉄質岩が卓越する可能性がある。羽越山地の日本海沿岸では、その後の短縮変形によって幅の広い西傾斜の急傾斜帯が形成されている。海盆内の堆積層は、ほぼ水平な構造を示すことから [4]、探査が実施されていない海陸境界部に東方の陸地を隆起させる東傾斜の断層が想定される。この断層の隆起側では海岸段丘が存在し、推定される東傾斜の逆断層が第四紀後期においても、活動的であることを示している [5]。この海盆の西側には栗島隆起帯が分布する。栗島隆起帯の東縁は、北北東-南南西走向の西傾斜の逆断層によって境されている [4, 6]。これらの断層と1964年新潟地震の震源断層との関係は明らかではないが、山形県沖地震の震源域 [7] は新潟地震の震源域 [8] の北北東端に位置する。

3. 震源断層と活構造との関係

山形県沖地震の余震分布域は、栗島隆起帯と羽越山地の間に位置し、羽越山地の沿岸に推定される東傾斜の断層と、栗島隆起帯の東縁の断層の東方に位置することになるため、既知の海底活断層の延長として捉えることが難しい。海底地震観測結果を用いて [1]、より詳細に震源断層と既存構造との関係について報告する。

4. 東北太平洋沖地震後の応力変化との関係

2011年東北太平洋沖地震後の地殻変動についての三次元粘弾性有限要素モデル [9] に基づく検討では、島弧と直交方向からの圧縮応力は、地震後には長期にわたって減衰するものと想定される。山形県沖地震の震源域は、M9のすべり量の大きな領域の影に相当し、応力緩和の影響を受けるため、圧縮応力の増大による地震発生については説明が難しい。

文献

[1]篠原雅尚ほか, 2019: 浅海用係留ブイ方式海底地震計による2019年山形県沖の地震の余震観測, 2019年日本

地震学会（投稿中）. [2]野徹雄ほか, 2019: 2019年6月18日山形県沖の地震震源域の地殻構造. 2019地震学会（投稿中）. [3] Yamaji, A., 1990: *Tectonics*, 9, 365-378. [4]岡村行信ほか, 1996: 海洋地質図47,地質調査所. [5] 伊倉久美子・大田陽子, 2003: 地学雑誌, 112, 394-406. [6] 日本海における大規模地震に関する調査検討会,2013:国土交通省, 470p. [7] 防災科学技術研究所, 2019: 2019年山形県沖の地震の震源分布と初動解 (<http://crs.bosai.go.jp/DynamicCRS/index.html?appid=627aeb82a4774af8a706dd407db31dec> , July 16, 2019). [8] 茅野一郎,1973:地震研究所速報, 12,83-98. [9] Freed A. et al., 2017:*Earth and Planetary Science Letters*, 459, 279-290.

The relationship between 2019 Off the coast of Yamagata prefecture earthquake and 1964 Niigata earthquake

*Taku Ueda¹, Lina Yamaya¹, Aitaro Kato¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

2019年6月18日に山形県沖でMj6.7の地震が発生した。今回の地震の震源域は1964年6月16日に発生した新潟地震(Mj7.5)の震源域に隣接しているものの、新潟地震直後の余震活動はほとんど起きておらず(地震調査委員会, 2019)、また近年の地震活動度も極めて低調な領域である。この観測事実は、山形県沖地震発生域は新潟地震によって破壊されなかったことを示唆するが、その原因は明らかにされていない。これら2つの領域の関係性を理解するため、本研究では2つの領域の地震波速度構造と地震活動の特徴に注目して比較・検討を行った。

山形県沖地震及び新潟地震の発生域を、Matsubara et al. (2017)によって得られた地震波速度構造(防災科学技術研究所により公開)と比較した。その結果、山形県沖地震発生域は、新潟地震発生域と比べ、 V_p 及び V_p/V_s 比がともに低い値を示すことがわかった。

次に山形県沖地震発生域を含む低速度領域及び新潟地震発生域を含む高速度領域の地震活動のb値の推定を行った(Wiemer and Wyss, 2000)。1998年1月1日から2019年6月30日までの気象庁一元化処理震源カタログ(Mc1.3)において、低速度領域の方がb値が有意に低いことがわかった。

最後に、地震活動の数理モデルの1つである時空間ETAS(Epidemic Type Aftershock Sequence)モデル(e.g., Ogata, 1998)の各パラメータの空間依存性を考慮したHIST(Hierarchical Space Time)-ETASモデル(e.g., Ogata, 2004)を用いて、1998年以降の地震活動(Mc1.3)に対して、背景地震活動度 μ 、大森一宇津則のパラメータ(K, p)の空間分布の推定を行なった。その結果、低速度領域は高速度領域と比べて、 μ 、K、pの値が低いことがわかった。

地震波速度や地震活動の表す主要なパラメータが2つの領域において異なることから、山形県沖地震発生域と新潟地震発生域は構造や岩石組成が異なると考えられる。上記の構造や岩石組成の違いが新潟地震発生時に山形県沖地震発生域に破壊が進展しなかった原因の1つと考えられる。山形県沖地震発生域でb値が低いのは、破壊はしなかったが、新潟地震によって応力が载荷されたことで差応力が相対的に大きくなっていると解釈できる。p値はMikumo and Miyatake (1979)やUtsu (1961)で断層強度の不均質の度合いとして解釈されており、より不均質だとp値が低くなる。山形県沖地震発生域の方がp値が低いことから、この領域は新潟地震発生域と比べ、微小な断層面やクラックが周囲よりも多く発達していると解釈できる。この結果は V_p の違いとも整合的である。

Long-period strong ground motion observed in the Echigo Plain during the Yamagata-ken-oki event of June 18, 2019

*Tomiichi Uetake¹, Kazuhito Hikima¹, Shutaro Sekine²

1. Tepco Research Institute, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., 2. Association for the Development of Earthquake Prediction

1. はじめに

2018年6月18日に新潟-山形県県境付近でMj6.7の浅発地震（深さ14km）が発生した。この地震により新潟県中越から下越に広がる越後平野では、震度5弱～震度4、長周期地震動階級2～1を観測した。越後平野では過去の大地震時（1964年新潟地震、1983年日本海中部地震など）（例えば工藤・坂上(1984)）の事例から、長周期地震動が卓越することが知られている。一方、長周期地震動であっても、地盤物性や地下構造に応じた空間変化を示すことが知られている。山形県沖の地震で得られた強震記録を基に、越後平野周辺の長周期地震動特性を検討した。

2. 検討対象記録

検討に用いた観測記録は、新潟県内に設置されている防災科研のK-NET、KiK-netの記録、気象庁が長周期地震動評価に用いている震度計の記録、そして(公財)地震予知総合研究振興会が中越地域に設置しているAN-netの記録である。すべてサーボ型加速度計による記録であるが、長周期での波形の特徴をわかりやすくするため加速度波形を積分して速度波形にしもちいた。その際、加速度フーリエスペクトルの形状を考慮し、周波数0.05Hz～20Hzのバンドパスフィルターを掛けた。

3. 記録の特徴

図に、速度波形（NS成分）を越後平野の西側、越後平野、越後平野の東側の3地域に分けて示す。なお、各図の振幅のスケールは合わせてある。震央距離60km以内の新潟県北部の地域には、広い平野部は無く、得られた強震動の継続時間は概ね10秒から20秒で顕著な後続波群は見られない。南側の越後平野が広がる地域でも、周期1秒以下の短周期の地震動継続時間は10秒から20秒であるが、平野内の観測点では長周期（周期2～10秒）の後続波群が長時間（3分以上）継続する。後続波群の振幅は、平野下流部では大きいですが、上流の中越地域（震央距離140km付近：長岡周辺）では小さくなる。また、下流部でも東側の平野の縁では後続波の振幅がやや小さい。平野を取り囲む東西丘陵部の観測点では、長周期の後続波の振幅は小さいが、S波の直後に周期10秒を超える波群が確認できる観測点もある。また、S波到達前に、上下動とRadial成分で顕著なPL波と考えられる長周期の波が確認できる観測点も存在する。

周期2～10秒のフーリエスペクトル振幅を、平野西側の角田山から東に向かう線上で比較すると、平野内は外に対して5倍から10倍と顕著に大きい。また、平野の西側丘陵部は、東側より1.5倍程度大きい。

なお、今回の震源の東側、山形県から宮城県におけるK-NET観測点の記録を確認すると、同程度の距離の越後平野内観測点に比べて後続波の励起が弱く、フーリエスペクトル振幅は周期2～10秒の周期帯で10分の一以下である。越後平野内では長周期の地震動が卓越している。

4. おわりに

2019年6月18日の山形県沖の地震で得られた強震記録から、越後平野内で周期2～10秒の長周期地震動が長時間継続していることが確認された。ただし、平野内でもその特性には空間変化が見られた。また、平野外は平野内に比べ長周期地震動は小さいが、西側と東側を比べると長周期地震動振幅には差が見られ、地域の地下構造の違いが影響していると考えられる。

謝辞

防災科研のK-NET及びKiK-net、気象庁の長周期地震動に関する観測情報のデータを利用いたしました。記して

文献

工藤・坂上(1984), 1983年日本海中部地震による石油タンク被害と地震動の特徴について:新潟における石油溢流の問題点, 震研彙報, 59, 361 - 382.

Figure 1 consists of three panels, (a), (b), and (c), each showing seismic waveforms at various epicentral distances (0 to 180 km) and times (0 to 300 s). The y-axis for all panels is 'Epicentral distance (km)' ranging from 0 to 180. The x-axis for all panels is 'time(s)' ranging from 0 to 300. Panel (a) is titled '(a) West side of the Echigo Plain' and shows waveforms for stations including HRSW, FMOJ, ENJI, JRKR, TMOK, UINAH, UMSA, UMSB, UMSD, UMSF, UMSG, UMSH, UMSI, UMSJ, UMSK, UMSL, UMSM, UMSN, UMSO, UMSQ, UMSR, UMSU, UMSV, UMSW, UMSX, UMSY, UMSZ, UMSA, UMSB, UMSD, UMSF, UMSG, UMSH, UMSI, UMSJ, UMSK, UMSL, UMSM, UMSN, UMSO, UMSQ, UMSR, UMSU, UMSV, UMSW, UMSX, UMSY, UMSZ. Panel (b) is titled '(b) the Echigo Plain' and shows waveforms for stations including NIGH05, JMA47253, NIGH10, JMA47254, NIGH11, JMA47255, NIGH12, JMA47256, NIGH13, JMA47257, NIGH14, JMA47258, NIGH15, JMA47259, NIGH16, JMA47260, NIGH17, JMA47261, NIGH18, JMA47262, NIGH19, JMA47263, NIGH20, JMA47264, NIGH21, JMA47265, NIGH22, JMA47266, NIGH23, JMA47267, NIGH24, JMA47268, NIGH25, JMA47269, NIGH26, JMA47270, NIGH27, JMA47271, NIGH28, JMA47272, NIGH29, JMA47273, NIGH30, JMA47274, NIGH31, JMA47275, NIGH32, JMA47276, NIGH33, JMA47277, NIGH34, JMA47278, NIGH35, JMA47279, NIGH36, JMA47280, NIGH37, JMA47281, NIGH38, JMA47282, NIGH39, JMA47283, NIGH40, JMA47284, NIGH41, JMA47285, NIGH42, JMA47286, NIGH43, JMA47287, NIGH44, JMA47288, NIGH45, JMA47289, NIGH46, JMA47290, NIGH47, JMA47291, NIGH48, JMA47292, NIGH49, JMA47293, NIGH50, JMA47294, NIGH51, JMA47295, NIGH52, JMA47296, NIGH53, JMA47297, NIGH54, JMA47298, NIGH55, JMA47299, NIGH56, JMA47300, NIGH57, JMA47301, NIGH58, JMA47302, NIGH59, JMA47303, NIGH60, JMA47304, NIGH61, JMA47305, NIGH62, JMA47306, NIGH63, JMA47307, NIGH64, JMA47308, NIGH65, JMA47309, NIGH66, JMA47310, NIGH67, JMA47311, NIGH68, JMA47312, NIGH69, JMA47313, NIGH70, JMA47314, NIGH71, JMA47315, NIGH72, JMA47316, NIGH73, JMA47317, NIGH74, JMA47318, NIGH75, JMA47319, NIGH76, JMA47320, NIGH77, JMA47321, NIGH78, JMA47322, NIGH79, JMA47323, NIGH80, JMA47324, NIGH81, JMA47325, NIGH82, JMA47326, NIGH83, JMA47327, NIGH84, JMA47328, NIGH85, JMA47329, NIGH86, JMA47330, NIGH87, JMA47331, NIGH88, JMA47332, NIGH89, JMA47333, NIGH90, JMA47334, NIGH91, JMA47335, NIGH92, JMA47336, NIGH93, JMA47337, NIGH94, JMA47338, NIGH95, JMA47339, NIGH96, JMA47340, NIGH97, JMA47341, NIGH98, JMA47342, NIGH99, JMA47343, NIGH100, JMA47344, NIGH101, JMA47345, NIGH102, JMA47346, NIGH103, JMA47347, NIGH104, JMA47348, NIGH105, JMA47349, NIGH106, JMA47350, NIGH107, JMA47351, NIGH108, JMA47352, NIGH109, JMA47353, NIGH110, JMA47354, NIGH111, JMA47355, NIGH112, JMA47356, NIGH113, JMA47357, NIGH114, JMA47358, NIGH115, JMA47359, NIGH116, JMA47360, NIGH117, JMA47361, NIGH118, JMA47362, NIGH119, JMA47363, NIGH120, JMA47364, NIGH121, JMA47365, NIGH122, JMA47366, NIGH123, JMA47367, NIGH124, JMA47368, NIGH125, JMA47369, NIGH126, JMA47370, NIGH127, JMA47371, NIGH128, JMA47372, NIGH129, JMA47373, NIGH130, JMA47374, NIGH131, JMA47375, NIGH132, JMA47376, NIGH133, JMA47377, NIGH134, JMA47378, NIGH135, JMA47379, NIGH136, JMA47380, NIGH137, JMA47381, NIGH138, JMA47382, NIGH139, JMA47383, NIGH140, JMA47384, NIGH141, JMA47385, NIGH142, JMA47386, NIGH143, JMA47387, NIGH144, JMA47388, NIGH145, JMA47389, NIGH146, JMA47390, NIGH147, JMA47391, NIGH148, JMA47392, NIGH149, JMA47393, NIGH150, JMA47394, NIGH151, JMA47395, NIGH152, JMA47396, NIGH153, JMA47397, NIGH154, JMA47398, NIGH155, JMA47399, NIGH156, JMA47400, NIGH157, JMA47401, NIGH158, JMA47402, NIGH159, JMA47403, NIGH160, JMA47404, NIGH161, JMA47405, NIGH162, JMA47406, NIGH163, JMA47407, NIGH164, JMA47408, NIGH165, JMA47409, NIGH166, JMA47410, NIGH167, JMA47411, NIGH168, JMA47412, NIGH169, JMA47413, NIGH170, JMA47414, NIGH171, JMA47415, NIGH172, JMA47416, NIGH173, JMA47417, NIGH174, JMA47418, NIGH175, JMA47419, NIGH176, JMA47420, NIGH177, JMA47421, NIGH178, JMA47422, NIGH179, JMA47423, NIGH180, JMA47424, NIGH181, JMA47425, NIGH182, JMA47426, NIGH183, JMA47427, NIGH184, JMA47428, NIGH185, JMA47429, NIGH186, JMA47430, NIGH187, JMA47431, NIGH188, JMA47432, NIGH189, JMA47433, NIGH190, JMA47434, NIGH191, JMA47435, NIGH192, JMA47436, NIGH193, JMA47437, NIGH194, JMA47438, NIGH195, JMA47439, NIGH196, JMA47440, NIGH197, JMA47441, NIGH198, JMA47442, NIGH199, JMA47443, NIGH200, JMA47444, NIGH201, JMA47445, NIGH202, JMA47446, NIGH203, JMA47447, NIGH204, JMA47448, NIGH205, JMA47449, NIGH206, JMA47450, NIGH207, JMA47451, NIGH208, JMA47452, NIGH209, JMA47453, NIGH210, JMA47454, NIGH211, JMA47455, NIGH212, JMA47456, NIGH213, JMA47457, NIGH214, JMA47458, NIGH215, JMA47459, NIGH216, JMA47460, NIGH217, JMA47461, NIGH218, JMA47462, NIGH219, JMA47463, NIGH220, JMA47464, NIGH221, JMA47465, NIGH222, JMA47466, NIGH223, JMA47467, NIGH224, JMA47468, NIGH225, JMA47469, NIGH226, JMA47470, NIGH227, JMA47471, NIGH228, JMA47472, NIGH229, JMA47473, NIGH230, JMA47474, NIGH231, JMA47475, NIGH232, JMA47476, NIGH233, JMA47477, NIGH234, JMA47478, NIGH235, JMA47479, NIGH236, JMA47480, NIGH237, JMA47481, NIGH238, JMA47482, NIGH239, JMA47483, NIGH240, JMA47484, NIGH241, JMA47485, NIGH242, JMA47486, NIGH243, JMA47487, NIGH244, JMA47488, NIGH245, JMA47489, NIGH246, JMA47490, NIGH247, JMA47491, NIGH248, JMA47492, NIGH249, JMA47493, NIGH250, JMA47494, NIGH251, JMA47495, NIGH252, JMA47496, NIGH253, JMA47497, NIGH254, JMA47498, NIGH255, JMA47499, NIGH256, JMA47500, NIGH257, JMA47501, NIGH258, JMA47502, NIGH259, JMA47503, NIGH260, JMA47504, NIGH261, JMA47505, NIGH262, JMA47506, NIGH263, JMA47507, NIGH264, JMA47508, NIGH265, JMA47509, NIGH266, JMA47510, NIGH267, JMA47511, NIGH268, JMA47512, NIGH269, JMA47513, NIGH270, JMA47514, NIGH271, JMA47515, NIGH272, JMA47516, NIGH273, JMA47517, NIGH274, JMA47518, NIGH275, JMA47519, N

TEPCO research Institute

Rupture Process of the 2019 Off Yamagata Prefecture Earthquake Based on Waveform Inversion with Empirical Green's Functions

*Atsushi Nozu¹

1. Port and Airport Research Institute

経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより2019年6月18日山形県沖の地震（ M_j 6.7）の破壊過程を推定した。対象周波数は0.2-2Hzとした。グリーン関数としては、本震波形と余震波形の位相特性の類似性をあらかじめ検討しておき、2019年6月19日0:57の余震1（ M_j 4.2、深さ12km）と2019年6月21日5:33の余震2（ M_j 4.0、深さ13km）の記録を併用した。余震2はF-netによるモーメントテンソル解が得られており、本震と圧縮応力軸はやや異なるが逆断層型の地震（走向49°、傾斜63°、すべり角83°）である。一方、余震1のモーメントテンソル解は得られていない。しかし位相特性は余震2よりも余震1の方が全体に本震と良く合っている。

本震の震源断層をできるだけ取り囲むように、K-NETおよびKiK-netの7地点（図）を対象地点として選定した。沖合で発生した地震であるため内陸の地震ほどcoverageは良くないが、幸い上記の2つの余震の記録が佐渡島のNIG003で得られていたためこの地点を対象地点に含めた。KiK-netの観測点に関しては表層地盤の非線形挙動の影響が相対的に小さいと考えられる地中での記録を使用した。EW成分とNS成分の速度波形（0.2-2Hzの帯域通過フィルタを適用した波形）、計14成分をターゲットとした。インバージョンに使用したのはS波を含む10秒間（図の横棒）である。

仮定した断層面の位置を図に示す。断層面は、気象庁による本震の震源（北緯38.607°、東経139.478°、深さ14km）を含むように設定し、走向と傾斜は、F-netによる本震のモーメントテンソル解の二つの節面のうち、余震分布とより整合する東南東傾斜の面を選んだ（走向23°、傾斜36°）。長さおよび幅については余震分布を参考に長さ20km、幅15kmとした。余震1と余震2のそれぞれの発生位置を考慮し南側の長さ8kmの区間には余震1を、北側の長さ12kmの区間には余震2を割り当てた。

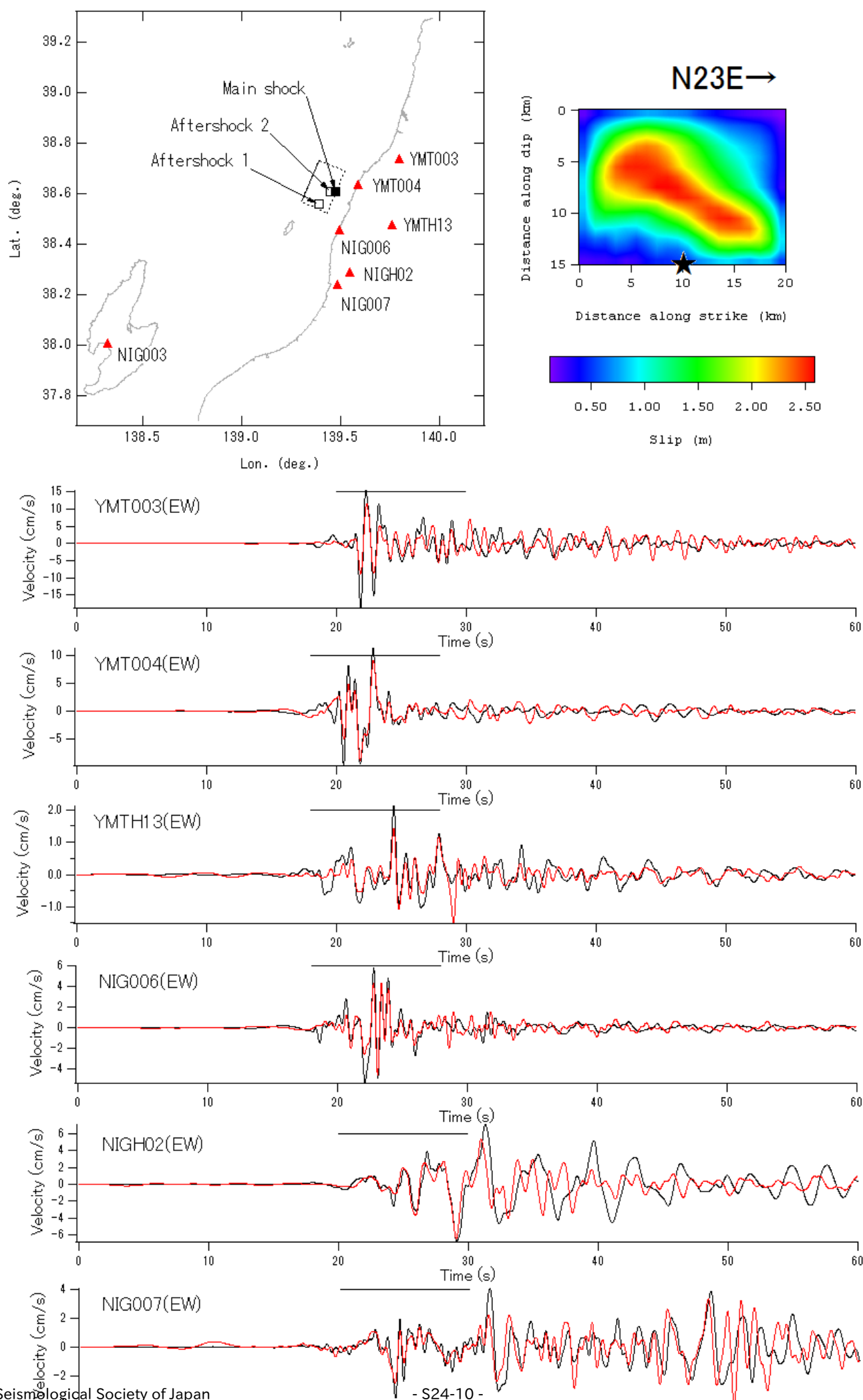
インバージョンの手法としてはHartzell and Heaton（1983）によるマルチタイムウインドウ法を経験的グリーン関数に適用できるように改良した手法（野津，2007；Nozu and Irikura，2008）を用いた。この方法では、各々の小断層でのモーメントレート関数は小地震のモーメントレート関数とインパルス列との合積で表される。そのときのインパルス列の高さがインバージョンの未知数となる。破壊フロント（first-time-window triggering front）は、気象庁の破壊開始点から同心円状に拡大するものとした。その拡大速度については、最も残差の小さかった2.7km/sを採用した。その他、非負の最小自乗解を求めるためのサブルーチン（Lawson and Hanson，1974）を用い、すべりの時空間分布を滑らかにするための拘束条件を設けた。観測波と合成波を比較する際には記録のヘッダに記載された絶対時刻の情報を用いている。

インバージョンに用いた観測点における観測波（黒）と合成波（赤）の比較（0.2-2Hzの速度波形）を図に示す。全体に観測波と合成波は良く一致している。新潟県側の村上付近の観測（NIGH02とNIG007）や佐渡島の観測点（NIG003）では複雑な地下構造に起因すると考えられる後続位相の発達が著しいが、この部分はインバージョンに用いていないにも関わらず観測波と合成波は良く一致している。これは経験的グリーン関数の中に地下構造の影響が含まれているためと考えられる。

図にはインバージョンの結果として得られた最終すべり量の分布を示している。この結果を得るために余震1と余震2のモーメントが必要であるが、余震1については前述の通りモーメントテンソル解が得られていないため、余震1と余震2の観測フーリエスペクトルの低周波側での比に基づき、余震1のモーメントは余震2の1.46倍と推定した。図に示すように、破壊開始点（★）より北側では相対的に深部のすべりが大きく、南側で

は相対的に浅部のすべりが大きいとの結果が得られた。

謝辞：本研究では国立研究開発法人防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netの強震記録，F-NETのMT解，気象庁の震源データを使用しています．ここに記して謝意を表します．



Science literacy of Twitter users considered from "tweets" for earthquake clouds before and after the Yamagata Offshore earthquake

*Yoshiaki Orihara¹

1. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.

2019年6月18日22時22分頃、山形県沖でマグニチュード（M）6.7（暫定値）の地震が発生し、新潟県村上市で震度6強、山形県鶴岡市で震度6弱を観測した。6月21日の朝に秋田魁新報社と共同通信社は、「地震雲？18日夕方に目撃情報 太い棒状の雲、由利本荘市で」といったタイトルのWeb newsを配信した。これに対してTwitter上では地震雲を配信したメディアを批判するツイート（つぶやき）がみられた。そして、両社は短時間でこの記事の配信を取りやめた。記事の配信を取りやめたことと、Twitter上における批判的ツイートとの因果関係は明らかではないが、大半のTwitterユーザーは地震雲の記事を配信した既存メディアを批判していた。

Yahoo!リアルタイム検索は、Twitterに投稿されたツイートをキーワードから検索できるサービスである。本稿ではこのサービスを利用して、山形県沖の地震後に「地震雲」を検索した。そして、地震が発生した6月18日の前後3日を含む計7日間の記録から、地震前後のツイートの変化を調べた。ツイート数は地震翌日の19日に4000件以上と、地震前に比べ2～3桁増えていた。また、ツイートの内容を大まかに地震雲に対して肯定的、否定的、どちらともいえない、の3つに分類した場合、地震発生前は肯定的なツイートの割合が比較して多かったが、地震後は否定的なツイート割合が大半を占める結果となった。このことから、Twitter上では常時見られる地震雲のツイートに対して、山形県沖の地震発生後には地震雲肯定派の主張を封じ込めようとする動きが活発化していたといえる。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所共同利用（2019-Y-地震（中短期予測）2）の援助を受けました。

Room C | General session | S04. Tectonics

[S04]PM-2

chairperson: Naoki Uchida(Graduate School of Science Tohoku University), Hiroshi Sato(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Atsushi Nozu(Port and Airport Research Institute)

Tue. Sep 17, 2019 4:30 PM - 5:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

[S04-02] **3-D thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate along the Ryukyu Trench**

*Nobuaki Suenaga¹, Shoichi Yoshioka^{2,1}, Yingfeng Ji^{3,4} (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research center for Urban Safety and security, Kobe University, 3. Center of Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Chinese Academy of Sciences, 4. Key laboratory of continental collision and plateau uplift, Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences)

4:45 PM - 5:00 PM

3-D thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate along the Ryukyu Trench

*Nobuaki Suenaga¹, Shoichi Yoshioka^{2,1}, Yingfeng Ji^{3,4}

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research center for Urban Safety and security, Kobe University, 3. Center of Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Chinese Academy of Sciences, 4. Key laboratory of continental collision and plateau uplift, Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences

1. はじめに

琉球海溝の沈み込み帯では、短期的スロースリップイベント(Nishimura, 2014)や深部低周波地震(Ando et al., 2012)、浅部超低周波地震(Nakamura et al., 2015)などのスロー地震が観測されている。その分布の特徴のひとつとして、沖縄本島周辺と八重山諸島周辺下のプレート境界面上で発生している短期的スロースリップイベント及び深部低周波地震の深さが両地域で異なっていることが挙げられる。そこで、本研究では、沖縄本島から八重山諸島周辺を含む3次元領域をモデル化し、琉球海溝からのフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場及び流れ場、さらには相図から得られるスラブ由来の脱水について数値シミュレーションを行い、観測された地殻熱流量のデータを用いて現実的なモデルを構築し、スロー地震の発生との関連性について議論した。

2. モデル設定

数値計算では、プレート回転モデル(Mathews et al., 2016)及び海溝軸の運動モデル(Heuret and Lallemond, 2005)を参照して、フィリピン海プレートの沈み込み史を導入し、過去15Myrの流れ場及び温度場を時間発展問題として求めた。x, y, z軸方向に対して、それぞれ、モデルサイズは500 km, 800 km, 300 km、グリッド間隔は10 km, 10 km, 5 kmとした。流れ場の境界条件は、+x, -x, +y, -y, -zの境界面では流れは透過条件とし、+z軸の境界面では剛体(付加体、大陸プレート)が存在するため、流れは生じないものとした。温度場の境界条件は、+x, +y, -y, -zの境界面では断熱条件を与え、-xの境界面の温度はプレート冷却モデル(McKenzie, 1969)を用い、沈み込むフィリピン海プレートの海溝軸上の年齢の変化に応じ、各タイムステップで深さの関数として温度分布を与えた。+zの境界面の温度は0°Cと仮定した。また、琉球海溝には過去に海溝の後退が起こった期間があることが知られているが、その詳細はわかっていない。そこで、数値計算から得られた地殻熱流量と観測データが最もよく一致するような、海溝の後退期間と後退速度をグリッドサーチで求めたところ、それぞれ5 Ma~0 Ma、2.0 cm/yrと求まった。

3. 結果と考察

最終的に得られた現在(計算終了時)のシミュレーション結果から、モデル領域内で沖縄本島から八重山諸島へと南西方向に行くにしたがって、プレート相対運動速度が速くなることにより、プレート境界面での温度分布が低温化する傾向がみられた。この効果により、八重山諸島周辺では沖縄本島周辺に比べて等深度でのプレート境界面温度が低くなり、どちらの領域下でも短期的スロースリップイベント及び深部低周波地震の発生域での温度は約500-650°Cと推定された。一方、Ji et al.(2016)は同様の手法を用いた3次元熱対流数値モデリングにより、フィリピン海プレート上面で発生していると考えられている四国西部と豊後水道下での深部低周波地震の発生領域の温度をそれぞれ400~700°C、350~500°Cと見積もった。本研究で得られた上記の温度範囲は、四国西部と豊後水道の中間程度となった。プレート境界面上では、350~450°Cの範囲で不安定すべりから安定すべりへ移行する(Hyndman et al., 1993)と考えられており、本研究で得られた温度範囲はこの遷移領域の温度範囲より200°C程度高くなった。

また、本数値計算で得られた温度-深さの関係と、海洋地殻中の含水MORBの相図(Omori et al., 2009)を用いて、スラブ上面付近の含水量分布を求めたところ、沖縄本島付近下で、epidote eclogite相からamphibole eclogite相への相転移(含水量変化:約1.4 wt%)が、八重山諸島付近下で、amphibole eclogite相からeclogite相への相転移(含水量変化:約0.7 wt%)がみられた。また、フィリピン海プレートの沈み込み方向の単位距離当たりの脱水勾配をみると、八重山諸島付近の短期的スロースリップイベント発生域で最大の脱水勾配(約

0.4-0.5 wt%/km)が得られた。以上より、琉球海溝では、スラブ上面付近の含水MORB由来の脱水がプレート境界面上のスロー地震の発生に寄与していると考えられる。

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

[S22]AM-1

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

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

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

*Jun Ogata¹ (1. Data-Driven Anomaly Detection Based on Machine Learning: Smart Maintenance for Wind Energy)

9:15 AM - 9:45 AM

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

*Hiroki Kuroda¹, Jun Ogata¹, Hidenori Sakanashi¹, Takahiko Uchide² (1. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

9:45 AM - 10:00 AM

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

*Shota Hara¹, Yukitoshi Fukahata², Yoshihisa Iio² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:00 AM - 10:15 AM

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

*Keisuke Yano¹, Takahiro Shiina², Sumito Kurata¹, Aitaro Kato², Fumiyasu Komaki¹, Shin'ichi Sakai², Naoshi Hirata² (1. Department of Mathematical Informatics, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM

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

*Jun Ogata¹

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

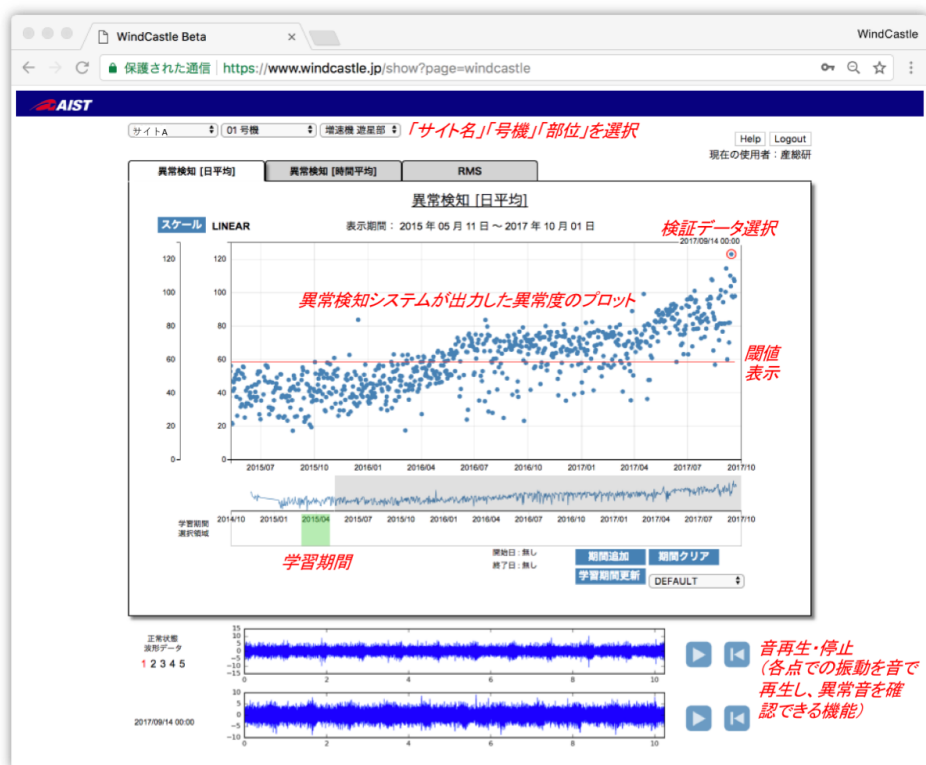
本講演では、機械学習に基づくデータ駆動型異常検知技術、さらにそれらの実用化（どのように実環境・実現場で利用していくか）について、風力発電スマートメンテナンスの取り組みを事例として紹介する。

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

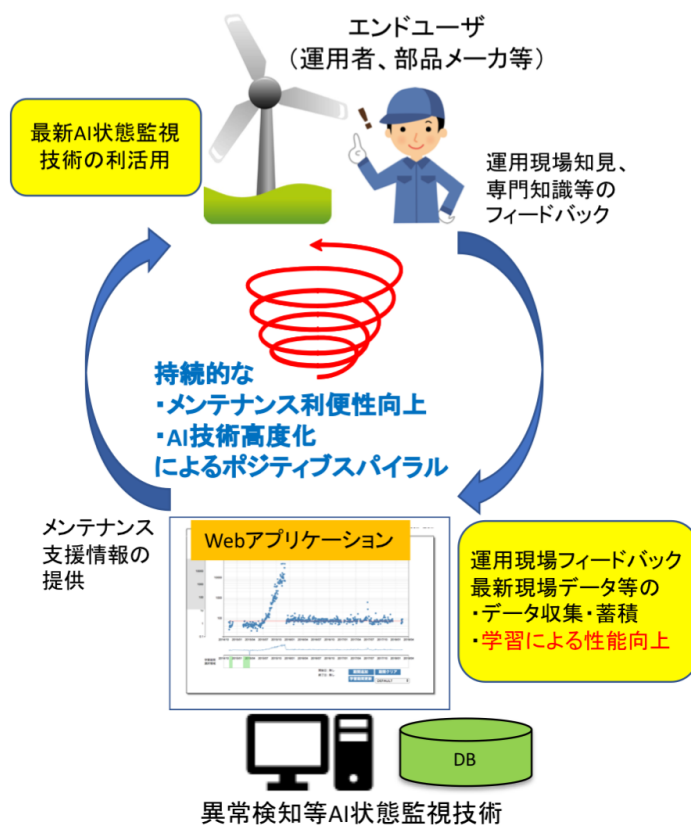
一方、このようなデータ駆動型異常検知技術の実用化を進めるうえでは、システムの早期立ち上げ・運用が重要となる。例えば新しい監視対象機種やセンサを変更した場合など、一からデータを大量に蓄積して学習し直すのではなく、すでに他の環境で学習したモデル・結果を何らかの形で利用（転用）して、新たな環境で異常検知システムを効率的かつ早期に運用可能にできる技術が必要不可欠となる。このような枠組みは、機械学習では転移学習と呼ばれ、現在ホットな研究領域となっている。我々は現在NEDO事業「風車運用高度化技術研究開発」において、こうしたアプローチ（システム転用）を活用することで、あらゆる風車環境において異常検知の早期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

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

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



異常検知結果例ならびにWindCastleインタフェース画面



異常検知等AI状態監視技術

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

Seismic Phase Picking based on Sparsity-Aware Change Detection

*Hiroki Kuroda¹, Jun Ogata¹, Hidenori Sakanashi¹, Takahiko Uchide²

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

P波・S波の初動時刻の自動検測は、特に微小地震の地震波データ解析の第一歩として、地震学の重要な課題の一つに位置づけられる。最近、地震カタログデータを用いた深層学習が自動検測で良好な検測精度を達成することが報告されている(e.g. Ross et al., 2018)。しかしながら、深層学習等の教師付き学習手法は、大量の学習データならびにそれらに対する正確なラベル（教師）情報が必要になる等、システム構築における労力が大きい。一方、入力された地震波形データから直接自動検測を行うアプローチは、深層学習以前より多くの研究がなされており、例えば、地震波形の短時間/長時間パワー比に基づくSTA/LTA法(e.g. Bungum et al., 1971)、自己回帰モデルに基づく手法(e.g. Takanami and Kitagawa, 1988; Leonard and Kennett, 1999)、これらを組合せた手法(Akazawa, 2004)が提案されている。こうした教師付き学習を介さないアプローチは、大量データが存在しない、あるいは地震カタログが整備されていない環境（臨時観測点等）においてもシステムを適用できるといった利便性がある。しかしながら、一定の検測精度を得るためには入力波形データごとに多数のパラメータの調整が必要となる等、システム適用時の問題があった。

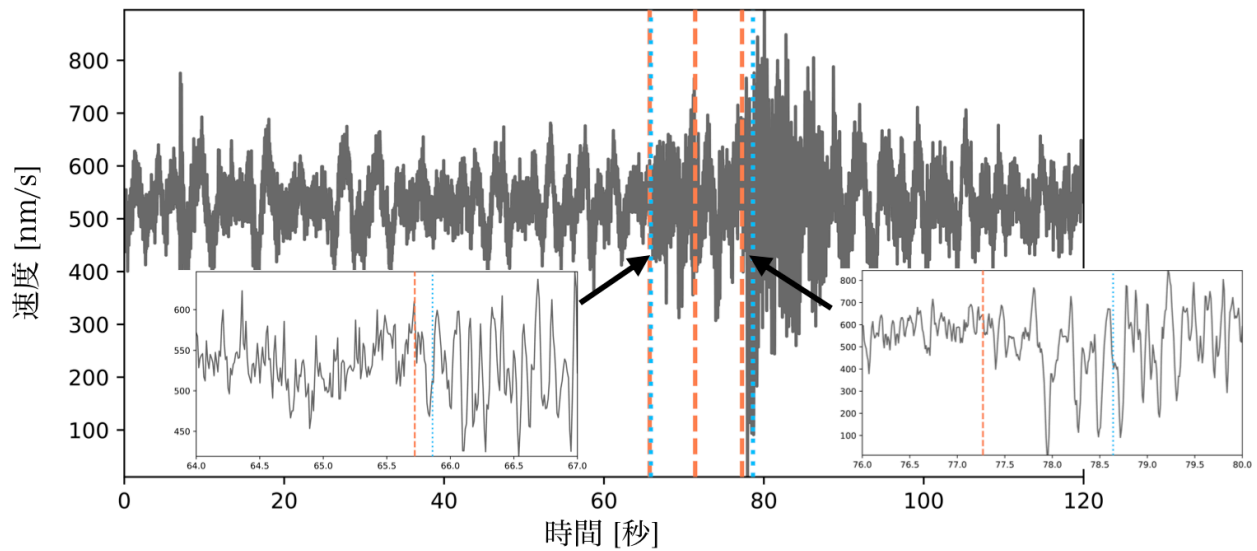
信号処理・機械学習分野においても、変化検知問題（または信号セグメンテーション問題）として、地震波自動検測と共通の構造を持つ問題が活発に研究されてきた。とくに近年、時系列信号の潜在的スパース性を変化検知問題に活用するアプローチが注目を集めている(e.g. Angelosante and Giannakis, 2012; Han et al., 2015; Kuroda et al., 2018)。これらの研究は、変化検知問題がスパースベクトル（大半の成分が0のベクトル）の推定問題に帰着できることを明らかにしている。スパースベクトルの推定問題に対してはL1ノルム正則化等の強力な解法が知られているため、これらの解法の応用による精密な変化検知の実現が期待できる。このアプローチの利点として、時系列信号全体から主要変化を検知するため、ノイズへの頑健性が期待できることが挙げられる。また、手法が有するチューニングパラメータは一つのみであり、しかも所望の変化検知数を基準に決定できる。ただし、信号中のスパース性を精度良く顕在化させることは一般的に容易ではない。Kuroda et al. (2018)は低次元表現空間でスパース性を顕在化させることに成功しており、このスパース性を活用する手法はAngelosante and Giannakis (2012)やHan et al. (2015)等の手法と比べて計算コストが低く、数値実験でより優れた検知精度を達成することが確認されている。

本研究では、潜在的スパース性の顕在化による変化検知アルゴリズム(Kuroda et al., 2018)を地震波形データに適用し、自動検測における有効性を検証する。この手法で仮定する信号モデルとしては、次数2の区分的自己回帰モデルを与えた。実験例として、気象庁一元化処理震源カタログから2018年5月3日19時59分に茨城県北部で発生したM 1.6の地震を選び、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)の3観測点（足尾(N.ASOH)、伊南(N.INAH)、大子(N.DGOH)）で測定された東西方向速度データに提案法を適用した。提案法が有するパラメータは、簡単のため、気象庁検測値付近の変化を含む条件の下で変化検知数が最小になるように決定した。足尾、伊南観測点については気象庁検測値がないため、気象庁一元化処理震源カタログの震源位置から理論的に計算した走時を使って、地震波到達時刻の目安とした。図1の結果から、提案法が気象庁検測値（または理論値）付近を含む少数の地震波変化を検知していることが確認できる。特に、足尾観測点と伊南観測点ではS/N比が悪いが、このような微小地震の波形データに対して、提案法はノイズ部分には変化を検出せず、地震に伴う変化のみを取り出すことができた。今後の課題として、情報量基準等の客観的指標を用いた変化検知数決定法の開発が挙げられる。また、多数の地震波形データに提案法を適用し、気象庁検測値との比較による性能評価を行う予定である。

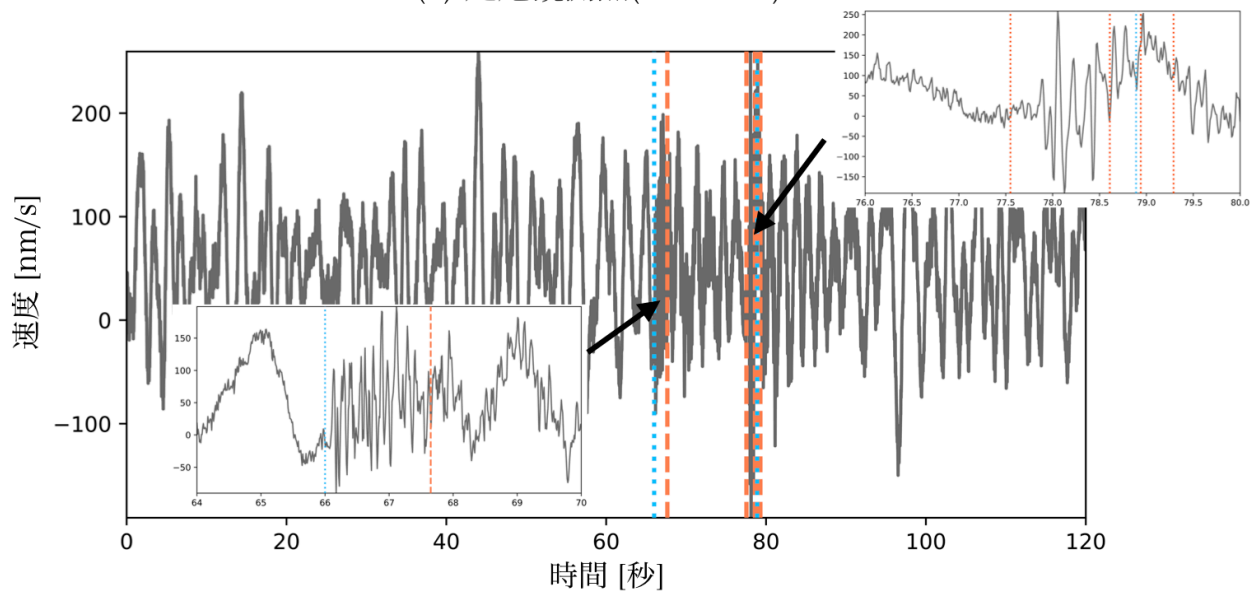
謝辞 本研究では気象庁一元化処理検測値と防災科学技術研究所のHi-netの地震波形記録 (doi:10.17598/NIED.0003)を使用しました。

参考文献

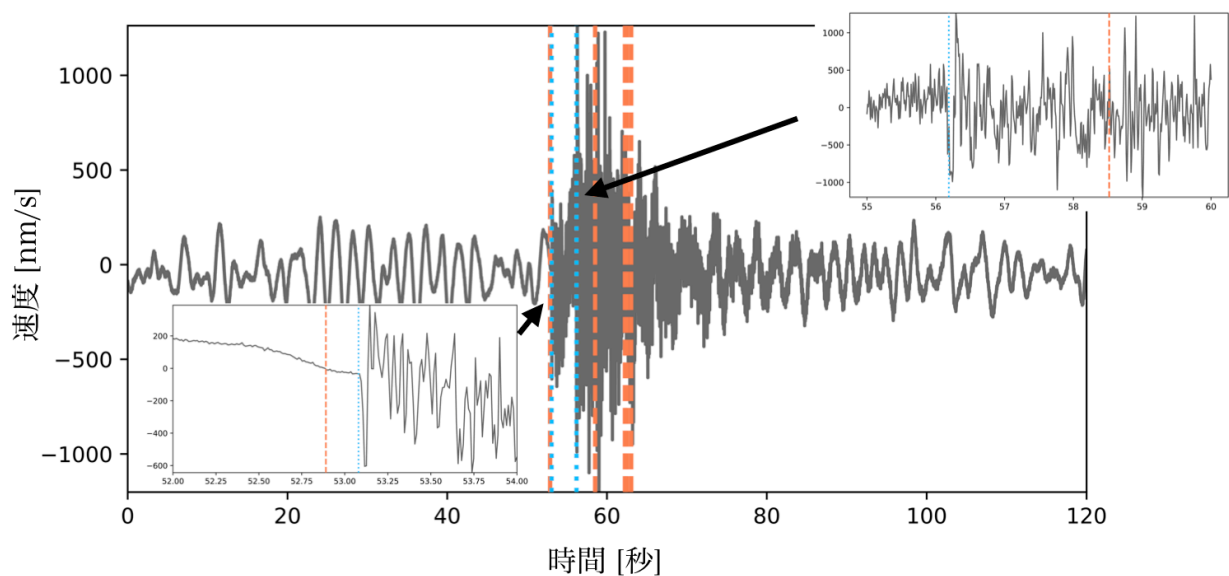
Kuroda, H., M. Yamagishi, and I. Yamada, Exploiting Sparsity in Tight-Dimensional Spaces for Piecewise Continuous Signal Recovery, IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, doi:10.1109/TSP.2018.2876328.



(a) 足尾観測点(N.ASOH)



(b) 伊南観測点(N.INAH)



(c) 大子観測点(N.DGOH)

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

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

*Shota Hara¹, Yukitoshi Fukahata², Yoshihisa Iio²

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

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

Application of convolutional neural networks to continuous seismic network records

*Keisuke Yano¹, Takahiro Shiina², Sumito Kurata¹, Aitaro Kato², Fumiyasu Komaki¹, Shin'ichi Sakai², Naoshi Hirata²

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

1. 背景

現在、首都圏には、稠密に配置された約300個の観測点をもつ首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network; 通称MeSO-net) があり、地震波形が連続的に収集されている。必ずしも地震観測点として適していない首都圏での測定のため、収集されたデータには、通常の地震波形に加えて地表面付近の様々な環境ノイズが含まれている。しかし、それらの環境ノイズは、観測点個別のものが多く複数の観測点で比較することにより軽減することが期待される。そこで、これらのデータの中から複数観測点の波形の情報を統合し、効率的かつ徹底的に地震波形だけを検知することを試みた。本発表では、畳み込みニューラルネットとグラフ分割を用いた複数観測点での地震検知法を提案し、MeSO-net データを用いてその精度を検証する。

2. 提案手法

畳み込みニューラルネットとグラフ分割を用いた複数観測点連続波形での地震検知法を提案する。畳み込みニューラルネットは「膨大な数のフィルタとの畳み込み・プーリング」と呼ばれるダウンサンプリング法・全結合ニューラルネット」を利用した学習器であり、画像処理・波形処理において広く活用されている。地震学においても畳み込みニューラルネットの単観測点連続波形への適用は広く検討されている。しかし、畳み込みニューラルネットは、画像のように入力の各要素が等間隔で配置されていることを想定しており、複数観測点連続波形にそのまま利用してしまうと、観測点の空間配置の不等間隔性を考慮することができない。そのため、単に畳み込みニューラルネットを適用しただけでは、複数観測点を用いることによる検知精度の向上および誤検知率の減少はそれほど期待できないと考えられる。

そこで、本研究では、グラフ理論の分野で研究されているグラフ分割の技法を畳み込みニューラルネットに導入し、観測点の空間配置を考慮した畳み込みニューラルネットを提案する。観測点間のグラフの構成法には自由度が存在するが、交差検証法を用いることでデータから決定することができる。

3. 解析結果

提案手法の精度検証を2011年9月4日から16日のMeSO-net 連続観測波形を用いて行った。複数観測点として成田付近の13観測点を選択し、畳み込みニューラルネットの時間入力長を20秒(50Hzまでダウンサンプリング)とした。提案手法の精度を既存手法と精度を比較し、特に誤検知率を抑えることに成功した。解析結果の詳細については当日報告する。

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

[S22]AM-2

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

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

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

*Daisuke Sugiyama¹, Seiji Tsuboi¹ (1. JAMSTEC)

10:45 AM - 11:00 AM

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

*Masaru Nakano¹, Daisuke Sugiyama¹, Takane Hori¹, Tatsu Kuwatani¹, Seiji Tsuboi¹ (1. JAMSTEC)

11:00 AM - 11:15 AM

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

*Yuki Kodera¹, Shin'ichi Sakai², Takahito Nishimiya¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

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

*Toru Ishii¹, Atsuko Oana¹, Kensuke Wada¹ (1. Shimizu Corporation)

11:30 AM - 11:45 AM

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

*Atsuko Oana¹, Toru Ishii¹, Kensuke Wada¹ (1. Shimizu Corporation)

11:45 AM - 12:00 PM

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

*Daisuke Sugiyama¹, Seiji Tsuboi¹

1. JAMSTEC

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

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

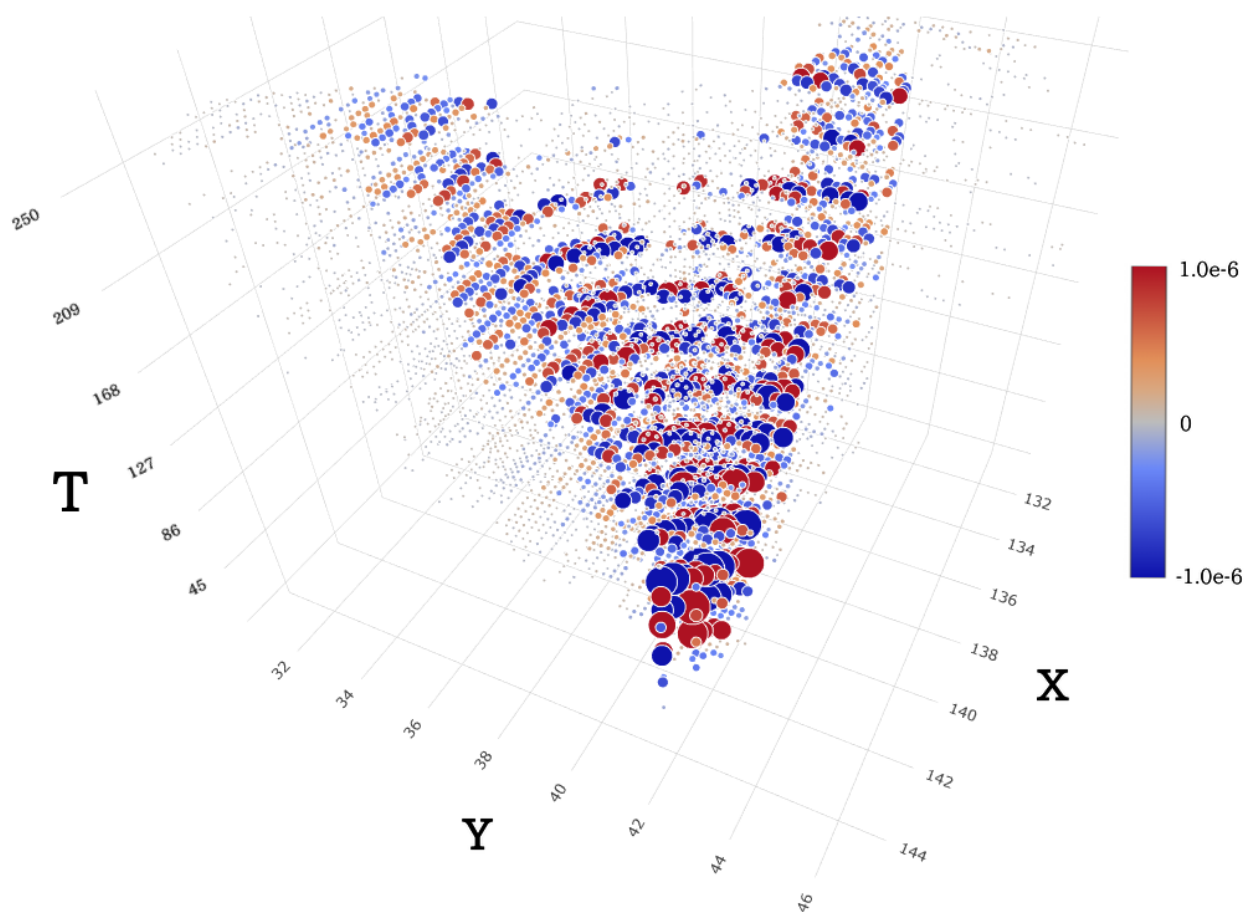
なお、理論地震波形記録生成については、前回と同様にスペクトル要素法のSPECFEM3D_GLOBE(https://geodynamics.org/cig/software/specfem3d_globe/)を用いているが、今回は対象範囲について関東地方から日本列島規模まで広げ、256コア、1 chunkを用いて計算した。用いた3次元地球モデルはS20RTSで、モデルの精度の設定値であるNEXは256、周期は17秒である。震源深さや位置など震源パラメータを変化させた4,200個の仮想地震に対して約5分間の理論地震波形を計算し、約300万枚の地震波伝播画像を生成した。これを用い、数十秒程度の時間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

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

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

謝辞

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。



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

*Masaru Nakano¹, Daisuke Sugiyama¹, Takane Hori¹, Tatsu Kuwatani¹, Seiji Tsuboi¹

1. JAMSTEC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Yuki Kodera¹, Shin'ichi Sakai², Takahito Nishimiya¹

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

地震計の連続波形記録には、地震、人為的活動、機器ノイズなどの様々な要因で生じた信号が記録されている。これらの信号を自動的に抽出・分類することができれば、地震計付近で発生している定常的・非定常的な自然現象の自動検出や、リアルタイム処理に用いている地震計の自動ヘルスマニタリング等につながると期待される。本研究では、これらへの第一歩として、機械学習を用いて連続波形記録を自動的に分類する手法の開発に取り組んでいる。個々の地震計の観測環境は様々であることから、教師データがあらかじめ存在することは想定せず、教師なし学習を前提として手法を構築する。

小寺・酒井（2018，地震学会）は、10次元に集約した離散的な周波数スペクトルを特徴量として、周波数領域および時間領域で多段階のクラスタリングを行うことで、連続波形記録を10種類の時系列データに分類する手法を提案し、自然地震、鉄道ノイズ、バックグラウンドノイズが自動的に分類可能であることを示した。しかしながら同手法は、時間領域でのクラスタリングを行う際にスペクトラルクラスタリングを用いているという問題点がある。スペクトラルクラスタリングは、分類されるクラスタ数をハイパーパラメータとして陽に与える必要があるため、その値を設定する際に恣意的な判断が入り得る。そこで本研究では、分類の客観性をより高めるため、ノンパラメトリックベイズモデルのひとつである無限関係モデル（IRM; Kemp et al., 2006）を用いて時間領域のクラスタリングを行った。IRMは無限個のクラスタの存在を許容した生成モデルであり、学習データに基づいて有効なクラスタ数が自動的に計算される。先行研究同様、時系列データがマルコフモデルで遷移すると仮定して遷移行列を生成し、その行列に対してIRMを適用した。

上記手法をMeSO-netの観測点E.JDJM（川北・酒井，2009）および気象庁の紀伊半島沖OBSの臨時観測点TN042A（山崎・他，2008）における72時間の連続波形記録（期間はそれぞれ2017年3月1～3日，2004年9月22～24日）に適用した。IRMにより、E.JDJMは10種類，TN042Aは6種類のクラスに分類され、学習データに応じてクラス数が自動的に調整されることを確認した。E.JDJMにおける地震と鉄道ノイズ，TN042Aにおける振幅の大きな余震と低周波微動は別々のクラスに分類された。一方で、それぞれの信号とクラスは基本的には一対一の対応にはなっておらず、例えばE.JDJMの鉄道ノイズは5種類程度のクラスに細分化されるといったことが生じた。より直観的に理解しやすい分類とするためには、細分化されたクラスを更にまとめ上げるといった処理が必要になるだろう。

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

*Toru Ishii¹, Atsuko Oana¹, Kensuke Wada¹

1. Shimizu Corporation

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

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

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

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

謝辞

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

参考文献

石井・小穴・和田, 日本地震工学会大会 2019 梗概集 (投稿中)

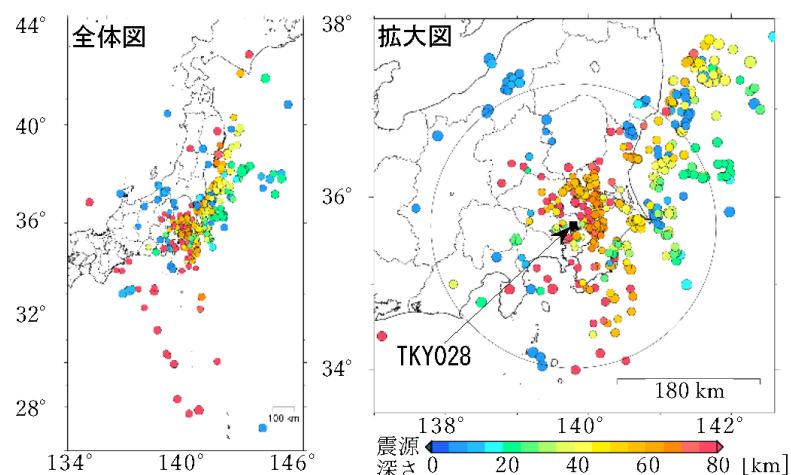


図 1 TKY028 で観測されたモデル T 検討用地震の震央

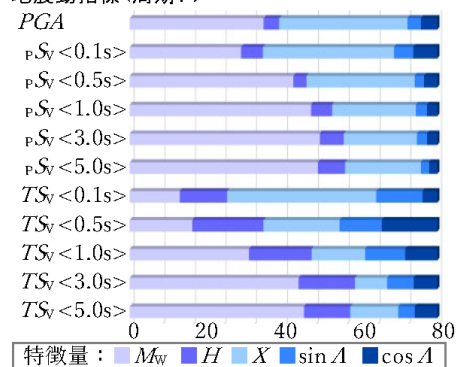
地震動指標<周期 T >

図 2 モデル T の各地震動指標に対する各特徴量の影響度

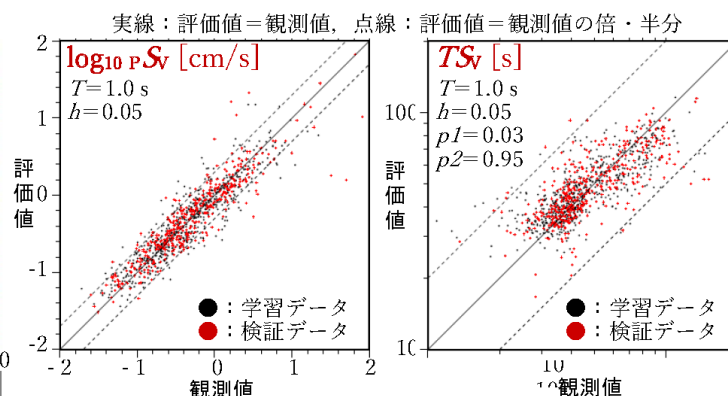


図 3 モデル T の地震動指標(目的変数)の観測値と評価値の相関図(散布図)の例

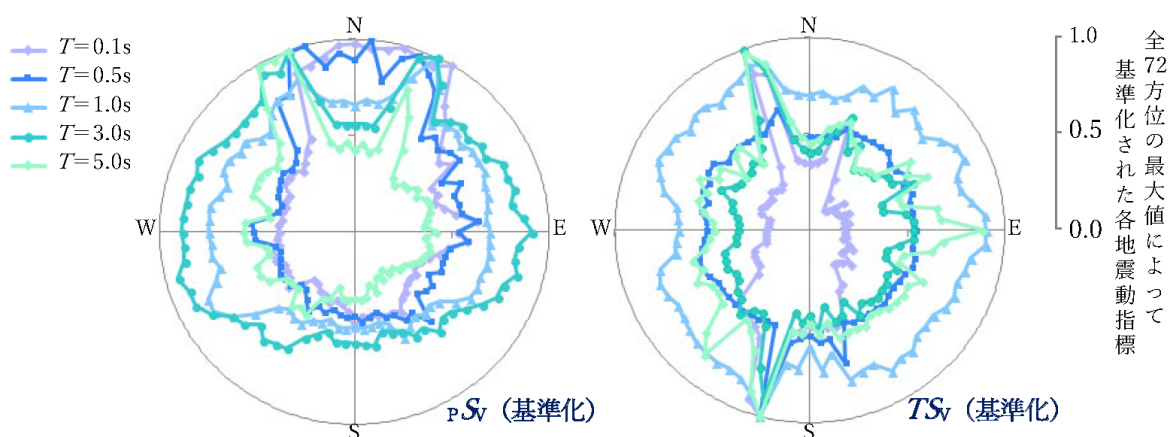


図 4 モデル T の地震動指標(目的変数)の評価値の震央方位依存性の検討例

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

*Atsuko Oana¹, Toru Ishii¹, Kensuke Wada¹

1. Shimizu Corporation

日々蓄積されていく地震動観測記録が最大限に活用され随時更新される地震動予測モデルの構築を目指し、その予備的な検討として、関東地方において過去に得られた地震動観測記録を用いて、機械学習による地震動評価モデルの作成を試みた。

検討には、防災科学技術研究所のK-NETのうち関東地方に展開された強震観測点138地点（図1）で得られた地表記録を用いた。具体的には、気象庁の震度データベースで1996年～2019年1月15日に最大震度が4以上でかつ東京都千代田区で震度2以上となった地震のうち、関東地方で震度が記録された地点数が非常に少ない地震を除いた上で、地震規模と震源位置が偏り過ぎないように代表的な地震を選んだ。選択した地震は、関東地方を中心に一部遠方にまで広がっている（図2）。これらの地表記録のうち、加速度三成分合成振幅最大値が 1 cm/s^2 以上の観測点での水平二成分の波形データを選択し、データに含まれるノイズや別地震を判別して、検討に用いることが適切な波形を取捨選択した結果、総計11488波形となった。選択したデータの震源距離 X [km]とモーメントマグニチュード M_w の分布を図3に示す。

地震動評価モデルの目的変数は、最大加速度 $PGA[\text{cm/s}^2]$ と複数の周期 $T[\text{s}]$ における減衰定数5%の擬似速度応答スペクトル $S_v[\text{cm/s}]$ および速度応答継続時間スペクトル $TS_v[\text{s}]$ （石井, 2012）とした。なお、 PGA と S_v は振幅の大きなデータが少なく、絶対値のままではデータの分布形状が偏っていたため、機械学習ではそれぞれの常用対数を与えることにした。地震動評価モデルの特徴量（説明変数）は、モーメントマグニチュード M_w 、震源深さ H [km]、震源距離 X [km]、震央方位 Λ [degree]、地震基盤面深さ $D28$ [m]（J-SHISで公開されている深部地盤モデルの第28層の下面深さ）、表層30m平均S波速度 $AVS30$ [m/s]の6種類とした。 Λ は真北を 0° として時計回りに定めたが、真北を境に不連続量となるので、 $\sin \Lambda$ と $\cos \Lambda$ のペアを与えた。機械学習手法には、勾配ブースティングと決定木を組み合わせた勾配ブースティング木を用いた。

ある特定の特徴量のみをランダムに並べ替え、その他の特徴量を元のままとしたときの目的変数の評価精度の変化の度合いにより、目的変数に対する各特徴量の影響度を調べた（図4）。 M_w の影響度は周期と共に増大し、 X の影響度や TS_v に対する H の影響度は周期と共に減少した。 $AVS30$ の影響度は周期1秒で相対的にやや大きめ、 $D28$ の影響度は周期1秒以上で大きめ、 Λ の影響度は相対的には周期1秒以下で大きめとなった。目的変数の観測値と評価値の分布の例を図5に示す。評価値／観測値の比の平均はほぼ1、その常用対数標準偏差は地震動の振幅では0.2弱程度、応答継続時間では0.1程度で、評価値の大半は観測値の倍半以内にとまり、全体として良くモデル化された。

作成した地震動評価モデルを用いて、 M_w に応じた PGA の距離減衰特性を検討した例を図6(a)に示す。特徴量の与条件は、茨城方面を震源とする地震をSIT006秩父で観測する場合等を考慮して設定し、プレート境界地震による岩盤サイトでの揺れを想定した。参考として、Morikawa and Fujiwara(2013)の距離減衰式（ M_w6 と $M_w6.5$ ）の平均も重ね描いた。 M_w と X に応じた PGA の傾向は、大局的には既往の距離減衰式と同様にモデル化されていると言える。ただし、 M_w5 や M_w6 の場合に比べて $M_w6.5$ の場合は、 $X < 60\text{ km}$ の傾きが小さく、ステップ関数状になっている。 $M_w6.5$ では $X < 60\text{ km}$ の学習データが少なかった（図3）ため、十分な信頼性が確保できていない可能性がある。 Λ による $S_v(T=1\text{秒})$ の距離減衰特性の検討例を図6(b)に示す。ここでは、都心からみて北東・南・南西方向（ $\Lambda=45, 160, 230^\circ$ ）のプレート境界地震および北西方向（ $\Lambda=320^\circ$ ）の内陸地震を念頭に置いた。これら4ケースを比べると、同じ M_w と X でも Λ によって振幅の大きさに差が生じている。プレート境界地震を想定した3ケースでは南方向が最も小さく、北東方向と南西方向の大小関係は50 km程度を境に入れ替わっている。また、北西方向は距離減衰の傾きが相対的に小さい。 $X < 100\text{ km}$ では顕著に振幅が小さいが、 $X > 150\text{ km}$ では南方向を上回っている。このような違いは、震源特性の地域性や伝播経路特性の違いがモデルに反映された結果と考えられ、 Λ を考慮することによって、既往式よりも細かな地域特性を考慮した地震動評価モデルを作成できる可能性を示唆している。一方で、データの偏りがモデルに影響を及

ばしている可能性もあるため、今後さらなる検討が必要である。

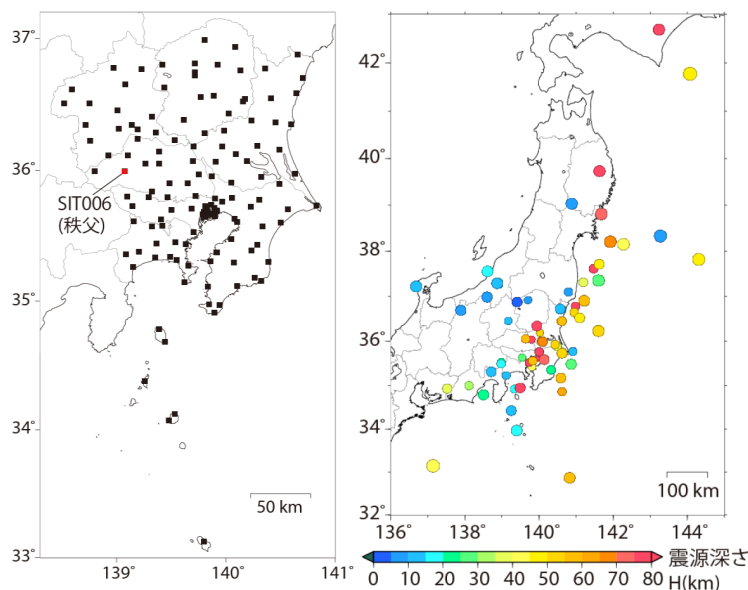


図1 関東地方の K-NET 観測点 図2 検討地震の震央

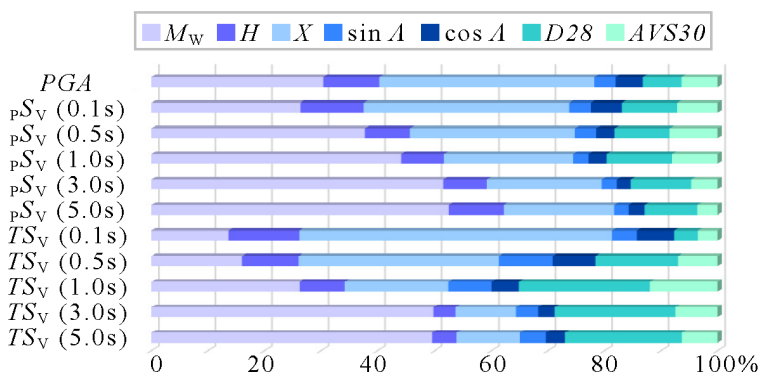
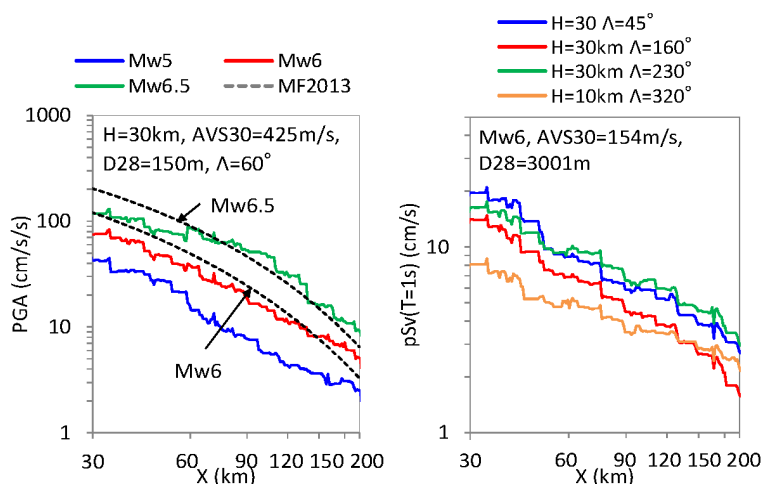


図4 地震動評価モデルの各地震動指標に対する各特徴量の影響度



(a) M_w に応じた PGA (b) Λ に応じた $pS_v(T=1s)$

図6 距離減衰特性に関する検討例

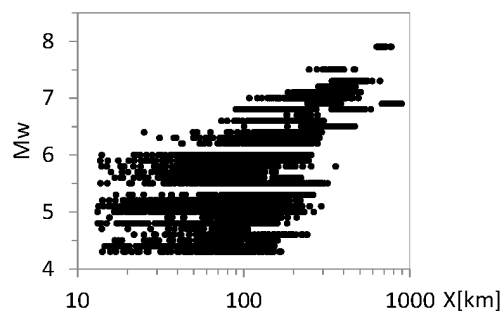


図3 震源距離 X と M_w の分布

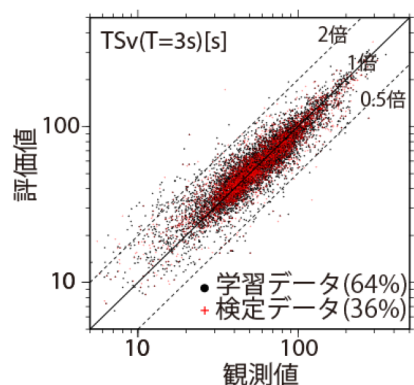
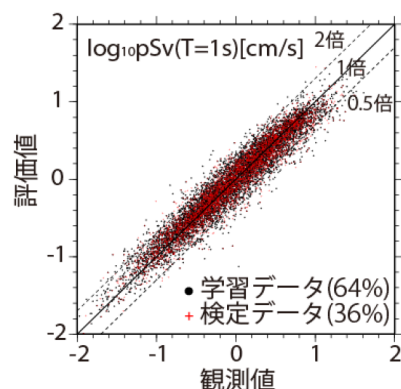


図5 目的変数の観測値と評価値の例

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

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

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

[S22]PM-1

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

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 4:00 PM ROOM C (Research Bldg No 8 NS Hall)

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

*Loic Viens¹, Tomotaka Iwata¹ (1. Kyoto University, DPRI)

2:30 PM - 2:45 PM

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

*Yu Yamamoto¹, Kazuro Hirahara^{1,3}, Hirotaka Hachiya^{1,2}, Atsushi Takahashi¹, Naonori Ueda¹ (1.

Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa)

2:45 PM - 3:00 PM

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

*Naoto Mizuno¹, Satoshi Ide¹ (1. School of Science, The University of Tokyo)

3:00 PM - 3:15 PM

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

*Norifumi Yamaga¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

3:15 PM - 3:30 PM

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

*Junki Komori¹, Ryosuke Ando¹, Masanobu Shishikura² (1. The University of Tokyo, 2. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

3:30 PM - 3:45 PM

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

*Sho Akagi¹, Toshihiko Hayakawa¹ (1. Mitsubishi Space Software Co., Ltd.)

3:45 PM - 4:00 PM

Improving the symmetry of ambient seismic field correlation functions with machine learning

*Loic Viens¹, Tomotaka Iwata¹

1. Kyoto University, DPRI

Seismic interferometry is a well-established method to retrieve the seismic wave propagation between a pair of seismic stations. Under the assumption that the ambient seismic wavefield is equipartitioned, the correlation function between the two sensors should yield the inter-station Green's function. However, such a condition is rarely fulfilled on Earth, as the ambient seismic field is generated by uneven distributions of sources, for example from ocean waves at low frequencies (<1 Hz). This uneven source distribution generally leads to non-symmetric correlation functions which can also be corrupted with non-physical wave arrivals. We focus on one year of continuous data recorded by Hi-net stations located in the Kii peninsula, Japan, and compute correlation functions between station pairs using short 15-min time-windows and stack them over 30 minutes. As the source of the ambient seismic field varies through the year, the raw stack of correlation functions over one year is strongly asymmetric for most station pairs. We propose to use machine learning techniques (e.g., Principal Component Analysis (PCA) and autoencoders) to reduce the dimensionality of the correlation function dataset for each station pair. By selecting correlation functions from the latent/low-dimension space of both methods, we show that the symmetry between the acausal and causal parts of the correlation functions can be improved. This additional processing step could help us to retrieve a better approximation of inter-station Green's functions, and therefore be useful for imaging purposes.

A hybrid approach of Machine learning and Ensemble Kalman Filter for estimating frictional parameters in Nankai megaquake cycle simulator

*Yu Yamamoto¹, Kazuro Hirahara^{1,3}, Hirotaka Hachiya^{1,2}, Atsushi Takahashi¹, Naonori Ueda¹

1. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 2. Univ. of Wakayama, 3. Univ. of Kagawa

はじめに

南海トラフ沿いに沈み込むフィリピン海プレートは、繰り返し巨大地震を引き起こし。次の巨大地震発生が危惧されている。岩石の摩擦則に基づいて、南海トラフ巨大地震発生サイクルシミュレーション（ECS）研究が行われている。しかし、従来研究では、摩擦パラメータを手動で調整し、南海トラフ巨大地震履歴を再現しようとしているが、200年~90年と大きく変動する地震間隔をうまく再現できていない (Hyodo et al., 2006)。

そこで、複雑な地震間隔を説明する摩擦パラメータを自動的に探索するために、本研究では、機械学習のニューラルネットワーク(NN)と逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)とを組み合わせたハイブリッド手法を提案する。具体的には、シミュレーションによる断層のすべり速度履歴から摩擦パラメータを予測する逆関数を定義し、機械学習を用いて、汎化的な摩擦パラメータ分布を推定する。さらに、得られた摩擦パラメータ分布をEnKFの初期アンサンブルに用いて、真の南海トラフ巨大地震履歴から摩擦パラメータの周辺化分布を求める。

予備的な研究段階ではあるが、ECSデータと真の南海トラフ巨大地震履歴データを用いた単純な離散3セルモデル実験を通して、提案法が多様に変化する真の南海トラフ巨大地震をより正確に再現できる可能性があることを示す。

データ & 解析手法

通常のECSでは、プレート境界面を臨界サイズより細かいセルに分割するが、多大な計算コストが必要である。そこで、本研究では、南海トラフ沿いのプレート境界面の破壊断層セグメント（南海・東南海・東海）に対応する相互作用を有する離散3セルモデルを用いる。具体的には、プレートのすべり発展は速度状態依存則に、また状態変数の時間発展はスローネス則に従うとし（Dieterich,1979; Ruina,1983）、準動的（Rice,1993）に計算を行った。

各セルの摩擦パラメータに応じて、相互的に地震サイクルが変化する。また、摩擦パラメータのうち、本研究では、A,Lを固定し、Bを所定の区間で動かすことにより、B-Aを変化させている。摩擦パラメータ以外の各種パラメータは固定する。

真の南海トラフ巨大地震履歴データは、1400年に及ぶ地震発生時のみの時系列データである。時間予測（TP）およびすべり予測（SP）を仮定して、地震発生時のすべり量を推定し、地震発生履歴データに累積変位データを付加した真値模擬データを作成した。また、すべり継続時間は一定としてすべり速度データに変換してデータとした。南海トラフ巨大地震履歴にはその発生が不確かな地震データも含まれるため、不確かな地震データを含む/含まない場合の組み合わせを考慮した256通りの履歴を用いた。

まず、機会学習を用いた解析について述べる。単独セルにおける地震間隔と摩擦パラメータとの関係に基づき、3セルのBのサンプリング範囲はそれぞれ0.625から0.85、0.6から0.825および0.6から0.825 (MPa) とした。そして、サンプリング範囲を0.025(MPa)間隔で刻み、約80万回のシミュレーションにより、各セルにおけるすべり速度データと摩擦パラメータB-Aとの対データを作成し、すべり速度データに時系列解析の手法である高速フーリエ変換(FFT)を用いて周波数スペクトラムに変換する。そして、各ウィンドウで周波数スペクトラムの最大値を抽出し、NNの特徴量とした。これにより、摩擦パラメータB-Aの変動の影響を受ける、地震の最大間隔を抽出することができる。学習時には、地震の最大間隔の特徴量から、対となる摩擦パラメータを推定する。評価時には、学習したモデルを使用して、真の南海トラフ巨大地震履歴データから、摩擦パラメータを推定する。摩擦パラメータの微小な値を推定するために、分類で荒く摩擦パラメータの範囲を推定し、拡大された残差を回帰する2段階のNNを用いる。

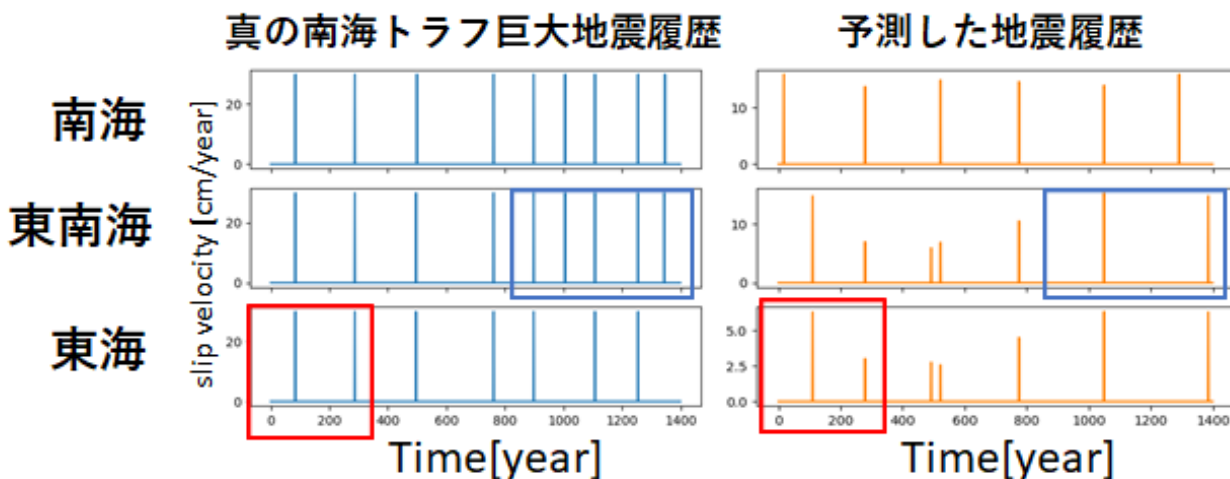
次に、EnKFを用いた解析について述べる。256通りの南海地震履歴データから機械学習により推定された値を256個の初期アンサンブル値とする。同化間隔は、2年間として南海トラフ巨大地震履歴上で地震が発生した年で更新が発生する。EnKFにおける摩擦パラメータの結果は、最後に予測した摩擦パラメータのアンサンブルの平均とする。

最終的に予測したセルそれぞれのB値を当該シミュレーションに入れ、8000年分のすべり速度を求める。そして、8000年分のすべり速度から、真の南海トラフ巨大地震履歴との地震発生時年数と予測した地震履歴の地震発生時年数の誤差の合計が最短になる1400年を取得し、真の南海トラフ巨大地震履歴の地震発生時年数との誤差を比較する。

結果 & 考察

図. 1が示すように、赤枠で囲まれた東海の比較的大きな間隔で起きる巨大地震は、平均地震年数誤差約10年以下の誤差に抑えることができているが、青枠で囲まれた比較的小さな間隔で起きる巨大地震は推定するのが難しい。

これは、NNの特徴量として、地震間隔の最大間隔を用いているため90年の比較的小さな間隔を推定するのが困難になっていることがあげられる。



Acceleration of matched-filter search and slip inversion of deep tectonic tremor using nearest neighbor search

*Naoto Mizuno¹, Satoshi Ide¹

1. School of Science, The University of Tokyo

世界各地の沈み込み帯などにおいてスロー地震の一種である低周波地震やその群発的活動と考えられている深部微動が観測されている。低周波地震の検出には、典型的な低周波地震のテンプレート波形を用意し、それと相互相関の高い波形を検出するマッチドフィルターが広く用いられている。この手法ではテンプレート波形と類似性のないシグナルは検出されないため、シグナルの取り逃しを減らすためには用いるテンプレート波形の数を増やす必要がある。しかし、マッチドフィルターはテンプレート波形の数に比例した計算量がかかるため、大量のテンプレート波形を用いると必要な計算コストが非常に大きくなってしまう。また、低周波地震からグリーン関数を作成し深部微動のすべりインバージョンを行う手法（Ohta and Ide, 2017）では、マッチドフィルターを応用し深部微動のすべり発展を捉えることが可能であるが、大量のテンプレート波形に対するマッチドフィルターを繰り返し行うことと同等の処理が必要となるため、長期間のデータを扱うことは計算コストの点で困難であった。

本研究では近似最近傍探索を用いたマッチドフィルターの高速化を行い、これを応用することですべりインバージョンを高速化した。通常のマッチドフィルターではS波やP波の到達時刻の前後数秒を用いるが、本研究では発生時刻からの数十秒の時間窓を用いた。これによりテンプレート波形と観測波形が最近傍探索におけるデータ点とクエリ点にそれぞれ対応し、マッチドフィルターを最近傍探索として定式化できる。この定式化ではデータの次元が時間窓の長さで観測成分数の積であるので、1万次元程度の高次元データを扱うこととなる。このようなデータの次元が大きい場合における最近傍探索は古典的には愚直な探索より高速化することが困難であったが、近年の研究によって近似解においては大幅な改善が行われている（e.g. Johnson et al., 2017）。本研究では特異値分解を用いた次元削減・近似最近傍探索による枝刈り・GPUを用いた高速化等の工夫を行い大幅な高速化を達成した。Ohta and Ide (2017) のインバージョン手法はマッチドフィルターの拡張として捉えることができるので、マッチドフィルターと同様の方法で近似最近傍探索に帰着し高速化することが可能である。本研究の手法によって先行研究と比較して1000倍以上の高速化が達成され、長期間のデータに対する解析が可能となった。

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

*Norifumi Yamaga¹, Yuta Mitsui²

1. Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University

2011年東北地方太平洋沖地震以来、余効変動が続いている。この余効変動の影響により、各種スローイベントの小さなシグナルが隠れている可能性がある。余効変動は、一般に、対数関数や指数関数、またその組み合わせによってフィッティングされている。この余効変動をより正確に表現するために、機械学習手法の1つであるニューラルネットワークを導入し、既存のデータから特徴を学習する。余効変動の時系列データとして、国土地理院のGNSS(Global Navigation Satellite System)観測網に基づく東西成分、南北成分の変位を用いる。観測点数は191点である。191の観測点のうち、153点を学習用の観測点とし、残りの38点をテスト用の観測点とした。テスト用の観測点は、空間的な偏りが生じないように、緯度・経度それぞれを0.5度ずつ区切ったグリッドごとに、1点ずつ選択した。学習時には、観測点ごとに、時系列の前半90%を使用する。学習で用いるデータを用いて、観測点ごとに変位量を0.1~0.9に値を正規化した。時系列データを365日ごとに区切り、連続した365日を入力データとし、その次の日の値を出力データとした。ニューラルネットワークの層は、単純化のために1層に固定し、LSTMを32個設定した。ここでLSTMは、複数のニューロンから構成されるユニットであり、長期時間依存性を学習できる。損失関数には平均絶対誤差を、最適化アルゴリズムにはAdamを用いた。学習したモデルを用いて、2種類の予測実験を行う。実験1では、38点のテスト点で、東北沖地震後365日経過した時点からの余効変動を期間の最後まで予測して、実データと比較する。実験2では、191の全観測点に対し、学習へ使用していない時系列の後半10%について、余効変動の予測および実データとの比較を行う。2種類の実験の両方で、従来の回帰分析を上回る結果を得られた。特に、実験1の結果の時空間分布からは、太平洋側の、特に岩手県沖・福島県沖の領域で、2013年中頃から、予測よりも実データが西向きにずれていくことがわかる。これは、東北沖地震後の余効変動の減衰と、プレート境界の固着状態変化の和を表すと考えられる。

Automatic detection and classification of the uplifted marine terrace by clustering DEM dataset

*Junki Komori¹, Ryosuke Ando¹, Masanobu Shishikura²

1. The University of Tokyo, 2. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

標高数値モデル（DEM）を使用した新たな海岸段丘の解析手法を開発し、房総半島に分布する完新世海岸段丘である沼段丘に適用した。沼段丘は過去7000年間に相模トラフ沿いで発生したプレート間地震（関東地震）による隆起で形成されたと考えられており、災害発生予測の観点からも調査が重要視されている地形である。しかし近年実施された年代測定調査などから、関東地震について従来の固有地震的な解釈に疑問が呈されてきたため、その形成履歴に関して再評価が求められていた。本研究では、従来の測量や航空写真判読に代わり、より定量的な手法としてDEMを用いた段丘区分を提案した。この手法では、旧汀線アングルを指示する崖基部の地形を抽出した点群データに対し、クラスタリングを使用して年代ごとの標高分布を取得する。解析の結果、房総半島南端部の海岸線沿い約30kmの長さにわたり、連続的に4段の旧汀線アングルの標高分布を得ることができた。今回得られた沼段丘のそれぞれの比高は互いによく一致した分布を示しており、同様な地殻変動を経験したことが示唆される。しかし年代測定から推定された発生間隔が互いに大きく異なっていることを考慮すると、プレート間のすべりの繰返しモデルでは段丘形成の説明が困難である。これらの地質データを総合して、プレート内断層の寄与も含めた地殻変動履歴モデルを構築することが今後求められる。

Investigation of Prediction Model for Engineering Geomorphologic Classification using Convolutional Neural Network

*Sho Akagi¹, Toshihiko Hayakawa¹

1. Mitsubishi Space Software Co., Ltd.

地形・地盤分類メッシュマップ（若松・松岡 2013）は、工学的な分類基準に基づく地形・地盤分類（微地形区分）のデータベースであり、地震動の増幅、液状化、土砂災害などのハザード評価において微地形を参照することを想定して定義されており、各種自然災害に対する防災上の重要な基盤情報となっている。地形・地盤分類メッシュマップは、日本全国を覆う約250m単位のメッシュに対して、標準化された地形分類基準に従う人の判読によって地形の区分（24種類）を決定している。地形分類基準における地形等の情報は分布データ確認による人の判定に基づいている。

本研究では、標高データが持つ地形に関する情報を抽出して微地形区分を予測することを目的として、畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network）を用いた微地形区分の予測モデルの開発を試みた。人の判読によって構築された微地形区分を機械学習に基づく手法で予測できるようになることで、個人差や時間経過により生じる地形分類の判定のゆらぎの検知と是正、既存の微地形区分の更新や微地形区分が作成されていない地域での新たな地形分類、メッシュスケールの異なる地形分類の構築に役立つと考えられる。また、数値標高データの分布を入力とした予測モデルから得られる特徴量の特性を理解することで、地形にまつわる様々な問題に対して数値標高データを有効に活用するための知見を得ることができると期待される。

畳み込みニューラルネットワークは、入力サンプルである画像データの中で特徴的な形状を抽出し、画像中において特定の形状を持つ文字や物体の識別に効果的な特徴空間に射影する畳み込み層を含むニューラルネットワークの一種である。近年の深層学習の高度化に伴って急速に発展し、画像認識を代表とする多くの分野で応用手法が提案されている。

本研究では、面的な数値標高データを画像データと見做して畳み込みニューラルネットワークに入力し、標高の分布が有する特徴的な形状を学習させて微地形区分の予測に反映することを試みた。微地形区分の識別に有効な形状を学習するため、250mメッシュに割り当てられた微地形区分を教師データとし、予測対象メッシュを含む周辺地域の数値標高データを説明変数に含めた教師あり学習による予測モデルを構築した。

予測モデルは、数値標高データが持つ形状の情報と周辺メッシュの微地形区分の情報をともに取り入れるため、まず数値標高データに対して畳み込み層を適用し、畳み込み層の出力と微地形区分の入力層をマージして予測ラベルを決める出力層に接続する構成とした。予測の汎化性能を考慮し、説明変数とする数値標高データは予測対象メッシュの標高との差分値とした。説明変数とする微地形区分は標高が高い山側のメッシュとし、山側から標高の低い平野のメッシュに向かって逐次的に微地形区分を予測していく手法を採用した。標高が高い地域は地形分類の区分数が少なく比較的容易に地形分類を決定できるため、本手法は地形分類の構築に有効である。

本研究で構築した予測モデルを、北海道十勝平野を覆う約8万の250mメッシュのデータを用いて学習・予測し、本手法の有効性を検証した。予測対象メッシュを中心とした250mメッシュ数値標高データ（9×9メッシュ）と予測対象メッシュより北側にある微地形区分データ（9×4メッシュ）を説明変数とし、予測対象領域の北端から逐次予測した結果を示す。予測結果が南方向に大きく影響している箇所があるものの、入力した微地形区分が逐次予測により概ね再現されており、対象とした範囲の数値標高と微地形区分の関係が学習されていることが確認できた。

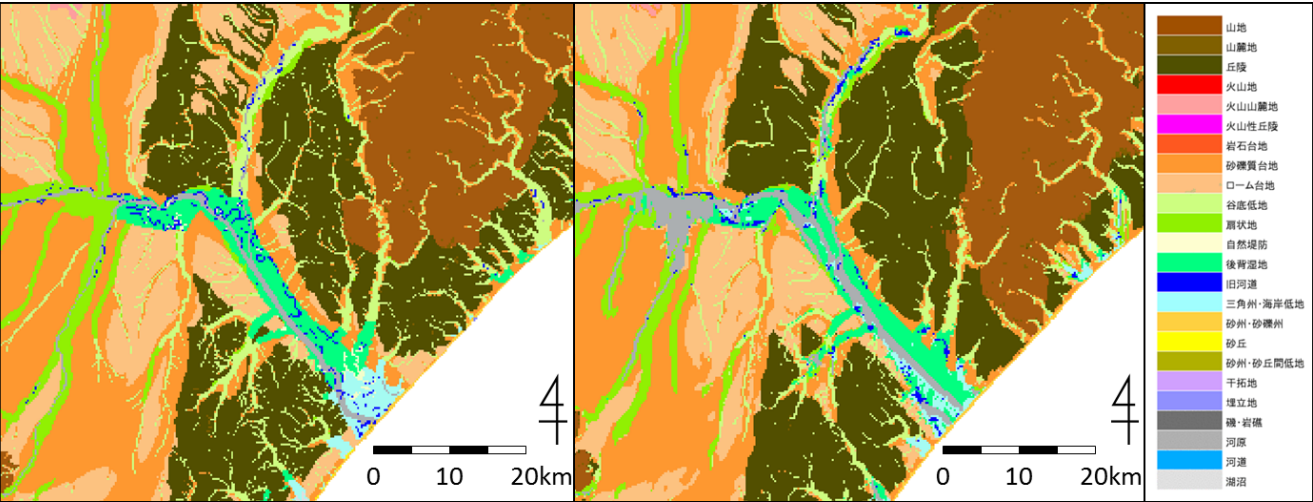


図 検証に使用した十勝平野の微地形区分(左)と北端から逐次予測された微地形区分(右)。