Thu. Oct 29, 2020

ROOM C

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-1

chairperson:Gou Fujie(JAMSTEC)
1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

[S06-01] Mapping outer rise faults in the southern Kuril Trench

○Shuichi Kodaira[1], Tetsuo No[1], Gou Fujie[1], Koichiro Obana[1], Yasuyuki Nakamura[1], Seiichi Miura[1], Kentaro Imai[1], Toshitaka Baba[2], Naotaka Chikasada[3], Yuichiro Tanioka[4] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Tokushima University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Hokkaido University）

1:00 PM - 1:15 PM

[S06-02] Crustal structure in the Kuril Trench subduction zone off Hokkaido, Japan, by a dense linear OBS-array seismic survey

Ryosuke Azuma[1], Shuichi Kodaira[2], Ryota Hino[1], Go Fujie[2], Koichiro Obana[2], Fumiaki Tomita[2], ○Yusaku Ohta[1] （1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）

1:15 PM - 1:30 PM

[S06-03] 3-D structure and seismogenesis in the East Japan forearc derived from S-net data

○Dapeng Zhao[1], Y. Hua[1], G. Toyokuni[1], Z. Yu[1] （1.Tohoku University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-04] Seismogenic source fault models in and around the Sea of Japan

○Hiroshi Sato[1], Tatsuya Ishiyama[1], Testuo No[2], Kodaira Shuichi[2], Naoko Kato[1], Johan S Claringbould, Makoto Matsubara[3], Akinori Hashima[1], Masahiro Ishikawa[4], Takeshi Sato[5] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Yokohama National University, 5.Sapporo Regional Headquaters, JMA）

1:45 PM - 2:00 PM

[S06-05] High-resolution tomography analysis in north-central Kinki region

○Shinya Katoh[1], Yoshihisa Iio[2], Junichi Nakajima[3], Hiroshi Katao[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2] （1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction, 3.Dept. of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology）

2:00 PM - 2:15 PM

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-2

chairperson:ryosuke Azuma(Tohoku University)
2:30 PM - 3:30 PM ROOM C

[S06-06] Wide-angle seismic survey off Muroto in Nankai trough

○Gou Fujie[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Yasuyuki Nakamura[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1] （1.JAMSTEC）

2:30 PM - 2:45 PM

[S06-07] Temporal variation of seismic velocity structure in the vicinity of shallow plate boundary in the Kumano-nada region

○Takashi Tonegawa[1], Suguru Yabe[2] （1.JAMSTEC, 2.AIST）

2:45 PM - 3:00 PM

[S06-08] Receiver function imaging of the Philippine Sea plate subducting beneath Shikoku (3)

○Takuo Shibutani[1], Jun Nakagawa[1], Airi Nagaoka[1], Tsutomu Miura[1], Yusuke Yamashita[1], Ken'ichi Yamazaki[1], Shintaro Komatsu[1] （1.Kyoto Univ.）

3:00 PM - 3:15 PM

[S06-09] The P and S Wave Structure in the Shikoku Region from GA-based Simultaneous Determination of Hypocenters and Seismic Wave Velocity Structure

○Kota Murata[1], Motoo Ukawa[2] （1.Pacific Consultants co., Ltd., 2.Nihon University）

3:15 PM - 3:30 PM

Fri. Oct 30, 2020

ROOM C

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]AM-1

chairperson:Takashi Tonegawa(JAMSTEC)
9:00 AM - 10:00 AM ROOM C

[S06-10] 3D crustal velocity model around the source

©Seismological Society of Japan

region of the 2015 Gorkha earthquake, central Nepal

○Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2]
（1.Graduate school of Science, Kyoto University, 2.DPRI, Kyoto University, Japan）

9:00 AM - 9:15 AM

[S06-11] Persistent Long-Period Signals Recorded by an OBS Array in the Western-Central Pacific: Activity of Ambrym Volcano in Vanuatu

○Yuki Kawano[1], Takehi Isse[1], Akiko Takeo[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Daisuke Suetsugu[2], Hajime Shiobara[1], Hiroko Sugioka[3], Aki Ito[2], Yasushi Ishihara[2], Satoru Tanaka[2], Masayuki Obayashi[2], Takashi Tonegawa[2], Junko Yoshimitsu[2]（1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.JAMSTEC, 3.Kobe University）

9:15 AM - 9:30 AM

[S06-12] Frequency Dependency of the Peak Energy Ratios for Teleseismic P Waves at the Hi-net Stations

○Gugi Aucklandi Ganefianto[1], Hisashi Nakahara[1], Takeshi Nishimura[1]（1.Tohoku University Solid Earth Physics Lab）

9:30 AM - 9:45 AM

[S06-13] Application of Adjoint Waveform Inversion to Hi-net Data in Central Japan Island

○Kota Mukumoto[1], Takeshi Tsuji[1]（1.Kyushu University）

9:45 AM - 10:00 AM

Room C | Regular session | S04. Tectonics

[S04]AM-1

chairperson:Takashi Tonegawa(JAMSTEC)
10:00 AM - 10:15 AM ROOM C

[S04-01] 3-D Numerical Simulation of Island Arc Deformation Due to Steady Plate Subduction: Effects of a Bend of the Trench Axis

○Yutaro Mori[1], Yukitoshi Fukahata[2]（1.Graduate School of Science, Kyoto University., 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

10:00 AM - 10:15 AM

Room C | Regular session | S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

[S07]AM-2

chairperson:Masayuki Obayashi(JAMSTEC)
10:30 AM - 11:00 AM ROOM C

[S07-01] Mantle discontinuities oceanward of the Krile - Honshu slab

○Masayuki Obayashi[1], Yoshimitsu Junko[1], Fukao Yoshio[1]（1.JAMSTEC）

10:30 AM - 10:45 AM

[S07-02] Three dimensional shear wave structure in the upper mantle beneath the old Pacific plate

○Takehi Isse[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Hajime Shiobara[1], Nozomu Takeuchi[1], Hiroko Sugioka[2], YoungHee Kim[3], Hisashi Utada[1], Sang-Mook Lee[3], Kazunori Yoshizawa[4]（1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Kobe University, 3.Seoul National University, 4.Faculty of Science, Hokkaido University）

10:45 AM - 11:00 AM

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

[S10]AM-2

chairperson:Shinji Toda(東北大学)
11:00 AM - 11:45 AM ROOM C

[S10-01] Subsurface structure revealed by S-wave seismic reflection across the East Matsumoto Basin fault, the ISTL fault system

○Haruo Kimura[1], Hisao Kondo[2], Kouta Koshika[3], Yusuke Kawasaki[3], Yoko Yoshimi[4], Hideki Kurosawa[3]（1.Central Research Institute of Electric Power Industry, 2.Geological Survey of Japan, AIST, 3.OYO Corporation, 4.IRIDES, Tohoku University）

11:00 AM - 11:15 AM

[S10-02] Measurement of strike and dip of the Atotsugawa fault by cosmic ray muons

○Daisuke Ikeda[1], Akimichi Taketa[2], Katsuya Yamazaki[3], Kentaro Omura[4]（1.Kanagawa Univ., 2.ERI, 3.Chubu Univ., 4.NIED）

11:15 AM - 11:30 AM

[S10-03] On-fault geological fingerprint of earthquake rupture direction

○Yoshihiro Kaneko[1], Jesse Kearse[2]（1.Kyoto University, 2.Victoria University of Wellington）

11:30 AM - 11:45 AM

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

[S10]PM-1

chairperson:Juichiro Ashi(東京大学), chairperson:Haruo Kimura(電力中央研究所)
1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

[S10-04] Organization and analysis of the aftershocks of Ansei Edo earthquake recorded in various historical documents

©Seismological Society of Japan

○Baba Michito[1] （1.University of Tokyo, Earthquake Research Institute）

1:00 PM - 1:15 PM

[S10-05] Temporal variation of the number of felt earthquakes recorded in the Omihachiman Ichida Family Diary: before and after the 1854 Iga-Ueno and 1854 Tokai-Nankai earthquakes (1842–1868)

○Kentaro Hattori[1], Ichiro Nakanishi[1], Junzo Ohmura[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

1:15 PM - 1:30 PM

[S10-06] Shallow geological structure and cold seep along active faults in the eastern Sagami Bay

○Juichiro Ashi[1], Ken Ikehara[2], Toshiya Kanamatsu[3], Makoto Yamano[1], Ayanori Misawa[2] （1.UTokyo, 2.AIST, 3.JAMSTEC）

1:30 PM - 1:45 PM

[S10-07] The Nankai subduction zone paleoearthquake history reconstructions using sequential radiocarbon dating of total organic carbon of in sediment cores obtained from off Kumano

○Io Miura[1], Juichiro Ashi[1], Natsumi Okutsu[2], Yosuke Miyairi[3], Yusuke Yokoyama[3] （1.The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences, Dept. of Natural Environmental Studies, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

[S10-08] Afterslip on the northernmost Hinagu fault associated with the 2016 Kumamoto earthquake

○Shinji Toda[1], Masayuki Torii[2], Masashi Omata[3], Daisuke Sango[4], Takashi Ishizawa[1] （1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Center for Water Cycle, Marine Environment and Disaster Mitigation, Kumamoto University, 3.Pasco Corporation, 4.Former: Pasco Corporation）

2:00 PM - 2:15 PM

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]PM-2

chairperson:Naofumi Aso(Tokyo Institute of Technology)
2:30 PM - 3:30 PM ROOM C

[S08-01] Quantitative comparison between the radiation-corrected EGF and the conventional EGF

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

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-02] Initial rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake inferred from 2D/3D source imagings

○Ryo Fujimoto[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1] （1.Graduate school of natural science and technology OKAYAMA UNIVERSITY）

2:45 PM - 3:00 PM

[S08-03] Physical mechanisms of the 2017 Pohang earthquake, South Korea

○Toshiko Terakawa[1], Wooseok Seo[2], Kwang-Hee Kim[2], Jin-Han Ree[3] （1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Pusan National University, South Korea, 3.Korea University, South Korea）

3:00 PM - 3:15 PM

[S08-04] Time dependent changes in aftershock activities of the 2016 Central Tottori Prefecture Earthquake revealed by dense seismic observation

○Yoshihisa Iio[1], Satoshi Matsumoto[2], Joint aftershock observation group of the Central Tottori Prefecture earthquake （1.DPRI, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanoloty, Kyushu University ）

3:15 PM - 3:30 PM

Sat. Oct 31, 2020

ROOM C

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]AM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), chairperson:Shunsuke Takemura(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
9:00 AM - 10:15 AM ROOM C

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

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

9:00 AM - 9:15 AM

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

©Seismological Society of Japan

measurements

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

9:15 AM - 9:30 AM

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

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

9:30 AM - 9:45 AM

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

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

9:45 AM - 10:00 AM

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

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

10:00 AM - 10:15 AM

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]AM-2

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo),
chairperson:Keisuke Ariyoshi(JAMSTEC)
10:30 AM - 11:45 AM ROOM C

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

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

10:30 AM - 10:45 AM

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

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

10:45 AM - 11:00 AM

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

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

11:00 AM - 11:15 AM

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

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

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-14] A hierarchical model of earthquake asperity

○Yoshio Fukao[1] （1.JAMSTEC）

11:30 AM - 11:45 AM

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.),
chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University)
1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

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

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

1:00 PM - 1:15 PM

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

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

1:15 PM - 1:30 PM

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

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

1:30 PM - 1:45 PM

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

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

©Seismological Society of Japan

1:45 PM - 2:00 PM

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

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

2:00 PM - 2:15 PM

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]PM-2

chairperson:Yumi Urata(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
2:30 PM - 3:15 PM ROOM C

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

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

2:30 PM - 2:45 PM

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

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

2:45 PM - 3:00 PM

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

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

3:00 PM - 3:15 PM

©Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-1

chairperson:Gou Fujie(JAMSTEC)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

[S06-01] Mapping outer rise faults in the southern Kuril Trench

○Shuichi Kodaira[1], Tetsuo No[1], Gou Fujie[1], Koichiro Obana[1], Yasuyuki Nakamura[1], Seiichi Miura[1], Kentaro Imai[1], Toshitaka Baba[2], Naotaka Chikasada[3], Yuichiro Tanioka[4] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Tokushima University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Hokkaido University）

1:00 PM - 1:15 PM

[S06-02] Crustal structure in the Kuril Trench subduction zone off Hokkaido, Japan, by a dense linear OBS-array seismic survey

Ryosuke Azuma[1], Shuichi Kodaira[2], Ryota Hino[1], Go Fujie[2], Koichiro Obana[2], Fumiaki Tomita[2], ○Yusaku Ohta[1] （1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）

1:15 PM - 1:30 PM

[S06-03] 3-D structure and seismogenesis in the East Japan forearc derived from S-net data

○Dapeng Zhao[1], Y. Hua[1], G. Toyokuni[1], Z. Yu[1] （1.Tohoku University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-04] Seismogenic source fault models in and around the Sea of Japan

○Hiroshi Sato[1], Tatsuya Ishiyama[1], Testuo No[2], Kodaira Shuichi[2], Naoko Kato[1], Johan S Claringbould, Makoto Matsubara[3], Akinori Hashima[1], Masahiro Ishikawa[4], Takeshi Sato[5] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Yokohama National University, 5.Sapporo Regional Headquaters, JMA）

1:45 PM - 2:00 PM

[S06-05] High-resolution tomography analysis in north-central Kinki region

○Shinya Katoh[1], Yoshihisa Iio[2], Junichi Nakajima[3], Hiroshi Katao[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2] （1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction, 3.Dept. of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology）

2:00 PM - 2:15 PM

©Seismological Society of Japan

Mapping outer rise faults in the southern Kuril Trench

*Shuichi Kodaira[1], Tetsuo No[1], Gou Fujie[1], Koichiro Obana[1], Yasuyuki Nakamura[1], Seiichi Miura[1], Kentaro Imai[1], Toshitaka Baba[2], Naotaka Chikasada[3], Yuichiro Tanioka[4]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Tokushima University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Hokkaido University

プレート境界浅部巨大地震発生後に海溝海側斜面（アウターライズ）の海洋プレート内で地震活動が活発化することは過去の観測事例から指摘されており、1933年昭和三陸地震や2007年千島海溝地震のように海洋プレート内でM8クラスの巨大正断層地震が発生した事例もある。本研究の対象領域である千島海溝南部では今後30年以内にプレート境界巨大地震（M7.8-8.5）が発生する確率は80%程度と見積もられているが、海溝海側の領域では過去の地震に関する情報がほとんどなく地震・津波の発生評価が行われていない。そこで我々はアウターライズ地震震源断層マッピングとその情報に基づく津波評価に関するプロジェクトを開始した。震源断層マッピングに向けては、先行研究で作成した日本海溝アウターライズ断層マップと統合するため、先行研究と同様なデータ（詳細海底地形データ、地震探査データ、地震活動データ）、同様な基準に基づいて断層パラメータを決定する。これまでに詳細海底地形のコンパイル、及び根室ー釧路沖において約20km間隔で設定された海溝に直交する4本の測線で反射法地震探査データを取得し処理を進めた。データ取得にはJAMSTEC深海調査研究船「かいれい」に搭載された大容量エアガン(5850-7800 cu. inch)・長大ストリーマーケーブル（チャンネル数444 ch., チャンネル間隔12.5m）を用いた。反射法探査の結果からは海洋地殻基盤を切る明瞭な正断層群が確認でき、それらの断層は海溝軸から約40km付近から顕著になる。また、ほぼすべての断層が南東傾斜（海側に傾斜）であり海洋地殻基盤はhalf-graben構造を形成している。先行研究の日本海溝アウターライズでは東・西落ち双方の傾斜を持つ断層からなる断層系が発達しhorst-graben構造を形成していた。この断層形態の違いは、海洋地殻生成時の断層が再活動している千島海溝と、プレートの折れ曲がりにより海溝付近で形成された新しい断層が活動している日本海溝での断層形成過程の違いに規定されている可能性がある。今後、釧路ー襟裳沖で新たな地震探査データを取得し、日本海溝アウターライズ断層系との形態や活動の違いにも着目しながら、千島海溝南部アウターライズ断層の走向、傾斜、断層の落差・長さ等の断層パラメータを求めるとともに、アウターライズ断層の発生過程について考察していく。

© 日本地震学会

Crustal structure in the Kuril Trench subduction zone off Hokkaido, Japan, by a dense linear OBS-array seismic survey

Ryosuke Azuma[1], Shuichi Kodaira[2], Ryota Hino[1], Go Fujie[2], Koichiro Obana[2], Fumiaki Tomita[2], *Yusaku Ohta[1]

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

日本・千島海溝沈み込み帯は太平洋プレートの沈み込にかかわって地震・火山が活発に活動する領域である．両海溝域での地殻構造探査により，沈み込み直前に形成されるプレート曲がり断層の発達によって含水化が大きく進んでいる可能性が指摘され，火山活動に必要な水の地球内部への輸送過程が理解されつつあるが，こうした含水化の状態は陸側プレート下まで連続的に把握できていないのが現状である．一方，地震発生に着目すると，2011年東北沖地震の巨大津波の要因となった'slip to the trench'には海溝すぐ陸側の構造が関係することが，反射法探査から明らかとなりつつある．日本海溝に隣接する千島海溝ではプレート境界巨大地震の発生が今後30年以内に非常に高い確率で予測され，東北沖地震に類似して'slip to the trench'を起こす可能性がある．海溝周辺の地震学的構造の理解はこれらの固体地球現象の理解のために非常に重要であるが，日本・千島海溝とも，海底地震計（OBS）の耐圧水深の制約のために先行研究で詳しく把握されていない．本研究は巨大地震発生前の根室沖千島海溝域の構造探査を通して，東北沖地震震源域での知見をもとにプレート境界周辺構造と浅部すべりの関係を議論するとともに，太平洋プレートの沈み込み過程の理解を深めることを目的とする．本観測では大水深の海溝軸に設置可能な超深海OBSを導入し，同区間の構造イメージの分解能向上を図った．

構造探査は2019年に海洋研究開発機構の「かいれい」KR19-07航海および「よこすか」YK19-12航海により実施された。アウターライズ域から海溝軸を跨ぎ千島前弧斜面上部に至る全長208 kmの測線沿いにOBS 80台を約2 km間隔で設置し，総容量7,800 cu.in.のエアガンアレイを200 m毎に発震した．屈折法と同時に，マルチチャンネル・ハイドロフォンストリーマー（全長5.5 km、444 ch）を曳航してMCS反射法探査も行った．海溝より陸側では別途，50 m発震でも探査を行った．全てのOBSで震央距離70~200 kmにわたる連続的なP波初動が観測され，44,261個の読み取り値を得た．後続には，見かけ速度から堆積層基盤，プレート境界付近，海洋モホ面の反射波と思われる相が観測された．

本研究ではP波速度（Vp）モデルの推定に初動走時インバージョン（Fujie et al., 2013）を用い，初期モデルの依存性をモンテカルロ法（例えば，Korenaga et al., 2000）によって評価する．ここでは500個の初期モデルを生成してインバージョンを行い，$\chi^2 < 1.1$（RMS走時残差~60 ms未満）を満たした492個の平均を最終モデルとした．最終モデルの標準偏差分布および分解能テストから，海溝陸側では深さ25 km，海溝海側では深さ20 km以浅で良く解像できたといえる．さらに，走時マッピング法（TMM，Fujie et al., 2006）によって反射波分布を推定した．

先行研究（Nakanishi et al., 2004; Fujie et al., 2018）を参照し最終モデルを解釈すると，陸側斜面下の最浅部に斜面上部から海溝軸にかけて鉛直速度勾配の大きい低Vpの堆積物（2–4 km/s）が分布し，海溝から30 kmの範囲では太平洋プレート上にウェッジ状に分布する．堆積層の下に勾配の小さい白亜紀層（4–5.5 km/s）と島弧地殻（5.5–6.5 km/s）が分布する．白亜紀層上部には凸形状の特徴があり，MCS断面で確認できる陸側傾斜の正断層面の分布と一致した．前弧斜面に発達した正断層は，強いプレート境界間固着のために陸側プレート下底が浸食され沈降していることを示唆し（von Huene et al., 1994），探査海域が1973年根室沖地震の破壊域にあることと矛盾しない．同じく固着域である東北沖地震震源域にも正断層が存在する（Kodaira et al., 2017）点で共通する．今後，ウェッジ状堆積物の幅やプレート境界周辺の反射構造も含めて東北沖大すべり域と比較をすすめ，根室沖が'slip to the trench'を起こしうる場であるか考察する．

© 日本地震学会

沈み込む太平洋プレートについて，Vp分布とモホ面反射との間に興味深い関係性を見出した．堆積層基盤反射面の下に大きな速度勾配を持つ海洋地殻第２層（4.5–6.5 km/s），その下に勾配が小さく高Vp（6.5–7.5 km/s）の海洋地殻第３層がそれぞれイメージされた．MCS断面に基づくと海溝直下のモホ面下のマントルVpは約7.5 km/sで，千島海溝の沖側遠方のマントル（~8.6 km/s, Kodaira et al., 2014）より有意に低速度である．すなわち，沈み込み前に含水化したマントルがそのまま島弧下に沈み込んでいる様子が捉えられた．一方で，TMMによるモホ面がMCSモホ面に比べ往復走時で0.5秒ほど系統的に深い．この差はモホ面下数キロメートルまで達している蛇紋岩化深さ範囲（Fujie et al., 2018）とほぼ等しいことから，ひとつの解釈として，マントル最上部の蛇紋岩化により地殻ーマントル間に厚みのあるモホ面遷移層（笠原・他，2008）が形成されたことを示している可能性がある．

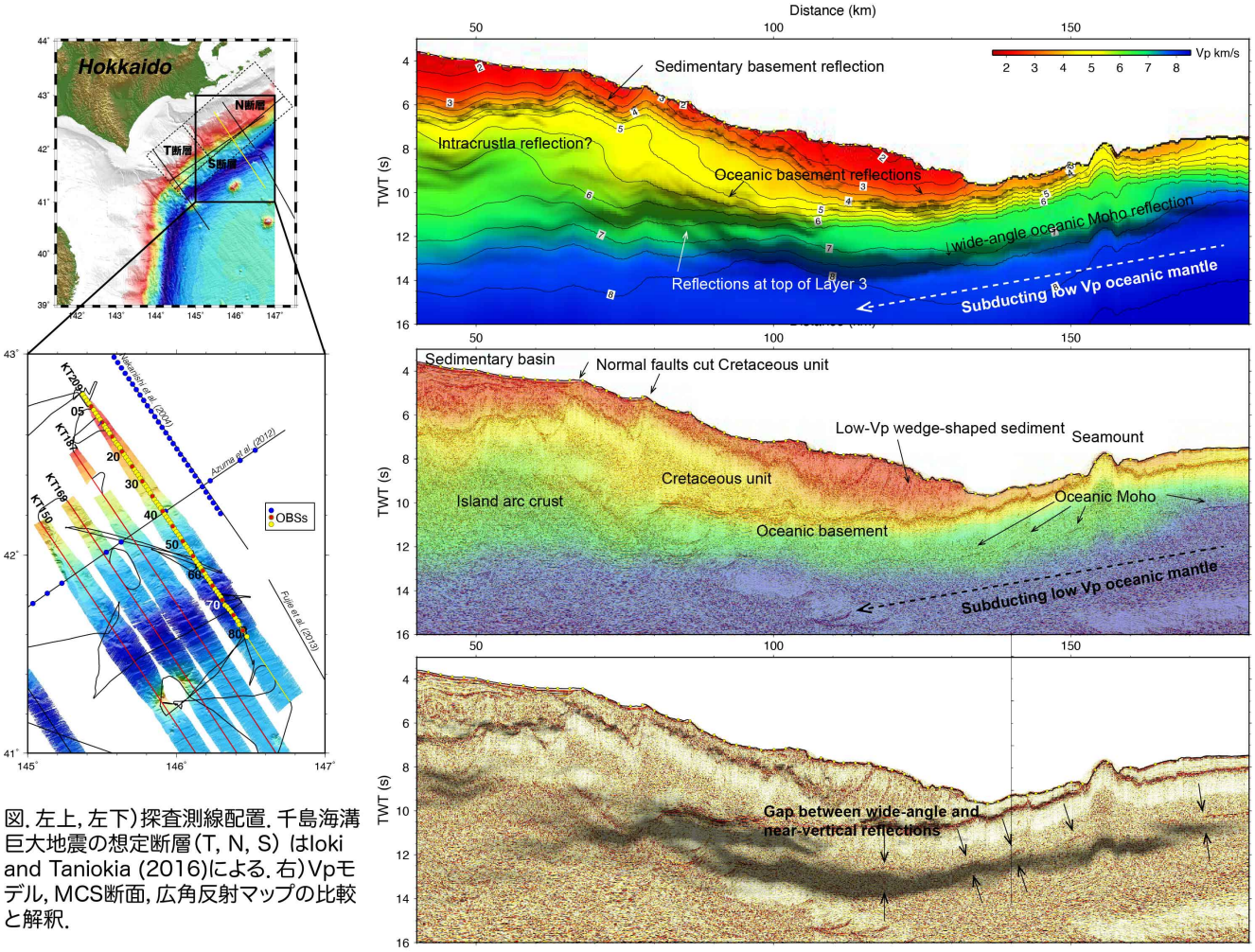


図. 左上, 左下）探査測線配置. 千島海溝巨大地震の想定断層（T, N, S）はIoki and Taniokia (2016)による. 右）Vpモデル, MCS断面, 広角反射マップの比較と解釈.

© 日本地震学会

3-D structure and seismogenesis in the East Japan forearc derived from S-net data

*Dapeng Zhao[1], Y. Hua[1], G. Toyokuni[1], Z. Yu[1]

1. Tohoku University

So far we have used the Kiban network data of suboceanic events relocated with sP depth phases to study the 3-D P and S wave velocity structure of the source zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake (Zhao et al., 2011; Huang & Zhao, 2013; Liu & Zhao, 2018). Significant structural heterogeneities are revealed in the Tohoku megathrust zone, which are correlated with the distribution and rupture processes of the large megathrust earthquakes (M > 7.0). However, the structure near the Japan Trench is still not very clear. Recently, we study the 3-D velocity structure of the entire forearc region off Eastern Japan using data recorded by both the permanent OBS network (S-net) and the Kiban seismic network on the land area (Hua & Zhao et al., 2020; Yu & Zhao, 2020). We used a large number of arrival-time data of local earthquakes during June 2002 to December 2018 recorded at 480 permanent stations of the Kiban seismic network and 120 OBS stations of the S-net. To conduct tomographic imaging of the East Japan arc, we selected many well-located local events that occurred beneath the Kiban seismic network and many suboceanic events that were recorded and located by the S-net. From the high-quality vertical-component seismograms recorded by the S-net, we picked P-wave arrival times generated by the local offshore events. The picking accuracy of the arrival times is estimated to be 0.05-0.15 s. Only arrival times of the events with well-located hypocenters (uncertainty < 3 km) are used in the tomographic inversion. The tomographic method of Zhao et al. (1992, 2011) is used to determine a high-resolution 3-D velocity model of the East Japan forearc. The well-determined geometries of the Conrad and Moho discontinuities and the upper boundary of the subducting Pacific slab are considered in the velocity model. The general pattern of the obtained tomographic model is similar to that of previous models (Zhao et al., 2011; Liu and Zhao, 2018), but our new model reveals a low-velocity (low-V) anomaly near the Japan Trench off Miyagi and Sanriku. The mainshock hypocenter of the great 2011 Tohoku-oki earthquake is located at the boundary between a down-dip high-velocity anomaly and the up-dip low-V anomaly. The slow anomaly at the shallow depths near the Japan Trench may reflect low-rigidity materials that are close to the free surface, resulting in large slips, weak high-frequency radiation, and the high tsunami on March 11, 2011. Our new tomographic model can explain not only the large slips near the trench but also weak high-frequency radiation from the shallow rupture areas.

References

Hua, Y., D. Zhao, G. Toyokuni, Y. Xu (2020). Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake. *Nature Communications 11*, 1163.

Huang, Z., D. Zhao (2013). Mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) and tsunami: Insight from seismic tomography. *J. Asian Earth Sci.* 70, 160-168.

Liu, X., D. Zhao (2018). Upper and lower plate controls on the great 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science Advances* 4, eaat4396.

Yu, Z., D. Zhao (2020). Seismic evidence for water transportation in the forearc off Northern Japan. *J. Geophys. Res.* 125, e2019JB018600.

Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, H. Kanamori (2011). Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). *Geophys. Res. Lett.* 38, L17308.

© 日本地震学会

Seismogenic source fault models in and around the Sea of Japan

*Hiroshi Sato[1], Tatsuya Ishiyama[1], Testuo No[2], Kodaira Shuichi[2], Naoko Kato[1], Johan S Claringbould, Makoto Matsubara[3], Akinori Hashima[1], Masahiro Ishikawa[4], Takeshi Sato[5]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Yokohama National University, 5. Sapporo Regional Headquaters, JMA

とくに2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波災害以降、日本海沿岸での津波災害についても着目されるようになった。どの程度の規模の津波が発生するのかという点については、資料の不足から不明な点が多く残されていた。2013年から開始された文部科学省の「日本海地震・津波調査プロジェクト」では、反射法地震探査を基軸とした地殻構造探査により、波源・震源断層モデルを構築し、津波・強震動を評価するという方法で検討を重ねてきた。ここでは、8カ年のプロジェクトによって得られた震源断層の矩形モデルと、それらの地殻構造上の特徴について述べる。

反射法地震探査データについては、海洋研究開発機構の長大ストリーマーと大容量エアガンにより取得し、沿岸については地震研が二船式を交えて、2-4 kmのストリーマや1950 cu.inchのエアガンにより取得した。また、海陸統合測線として海底地震計と陸上の受振システムを展開し、エアガン・バイブロサイスの共通受振を行った。こうして得られた速度構造のデータは、石油公団などの既存の反射法地震探査データと合わせて、地殻・地質構造を理解する上で重要な資料となった。

震源断層の形状は、日本海形成時のテクトニクスと大きな関連を有している。日本海形成時に海洋地殻が形成された日本海盆と大和海盆、そして大陸地殻内のリフト帯の存在が弾性波速度構造の点から明らかになったことは大きな成果である。大陸地殻の伸展によるネッキングと海洋地殻を構成する苦鉄質岩の上昇により、大陸地殻との境界部には、リフトの外側に傾斜した緩傾斜の境界面が形成される。この面がその後の短縮変形場で逆断層となり、大規模な震源断層となる。1983年日本海中部地震はこうした地震の例である（No et al., 2014,EPSL）。日本海の拡大は、複数のリフト軸の活動によって達成され、とくに北日本の日本海側では秋田-山形堆積盆地や新潟-北部フォッサ堆積盆地、富山トラフ(Ishiyama et al., 2017, Tectonophys.)などにリフト構造が分布する。北日本では関東平野北西や鬼怒川低地帯など、分布が広範である。これらのリフト軸は帯状の周辺よりも高いP波速度を示す中・下部地殻を構成し、また地殻上部では厚い堆積層の分布により全体としては大陸地殻の薄化を示す。リフト軸と大陸地殻の境界には物質境界に起源をもつ低角度の震源断層が形成され、2007年中越沖地震はこうした地震の例である。また、大陸地殻内のリフト帯では地殻強度の低下により、褶曲断層帯が形成されている。リフト帯の縁辺以外の通常の伸展された大陸地殻部では、ハーフグラーベンが普遍的に形成され、多くの震源断層は中角度の逆断層となっている。日本海東縁-北日本の日本海沿岸では、反時計回りの回転をともなう日本海の拡大により、リフト期に形成された正断層群が、その後大きな横ずれ成分を示さない逆断層となり、断層のセグメントは伸張変形時の横断断層によって規制されている。

西南日本沖の日本海南部では、西南日本弧の時計回りの回転にともなって広く伸展された大陸地殻が分布し、西南日本弧と平行な正断層群が形成された。東北日本と大きく異なるのは、南海トラフでの熱い四国海盆の沈み込みが開始する6Ma程度まで、強い南北方向からの短縮変形を受けたことである。6Ma以降もNNW-SSE方向の圧縮応力は継続し、ほぼ垂直な同方向の断層を生み出した。その後、1Ma以降はフィリピン海プレートの運動方向の変化により、西南日本弧と平行な断層群は横ずれ断層として再活動しているが、日本海東縁に比べ再活動している断層の数は圧倒的に少ない。

震源断層の矩形モデルの構築に当たっては、音波探査などによって確認されている海底活断層の情報を重視し、その他、海底地形のパターンやより深部の情報により伏在断層を抽出した。断層の下限は、基本的には

© 日本地震学会

Hi-netなどの観測網により求められD90に従ったが（松原ほか, 2020地震学会）、海域部分では観測網が未整備であるため、陸域の自然地震トモグラフィにもとづく推定構成岩石のレオロジーも考慮して推定した。大陸地殻内のリフトでは伸展された大陸地殻部分に比べ、苦鉄質岩が迸入した領域ではD90が深く、こうした値を断層モデルにも反映させている。また断層のすべり角については、断層の姿勢をもとに、Terakawa & Matsu’ura (2010)の応力テンソルから求めている。とくに日本海南部では過去に応力場が大きく転換したために、すべり角の扱いが重要である。これらの震源断層モデルは、津波・強震動予測のみならず、測地データに基づく広域的な上盤プレートの三次元モデルでの応力状態の予測と合わせて、上盤プレート内地震の発生予測についても貢献するものである。

© 日本地震学会

High-resolution tomography analysis in north-central Kinki region

*Shinya Katoh[1], Yoshihisa Iio[2], Junichi Nakajima[3], Hiroshi Katao[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2]

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction, 3. Dept. of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

近畿地方中北部は微小地震活動が活発な地域である。この微小地震活動は特定の断層帯に沿って生じず面的に広がる活動であるということが知られているが、その成因は明らかになっていない。また、この微小地震活動が生じている直下の下部地殻には地震波低速度の薄い層である顕著なS波反射面の存在が明らかになっている(片尾. (1994), 加藤・他. (2019))。この地震波低速度のS波反射面の成因として流体の関与が指摘されていることから、この微小地震活動も流体の関与が考えられる。そこで、本研究ではこの微小地震が生じている近畿地方中北部の上部地殻における地震波速度構造を求め等価アスペクト比モデル(Takei. (2002))から流体量を推定し、特徴的な微小地震活動の成因を明らかにすることを目的として解析を行った。

近畿地方中北部には観測点間隔約5 kmの稠密地震観測網(満点システム; 三浦・他. (2000))が展開されている。本研究では、この稠密地震観測網とHi-netなどによる定常観測網で2009年から2013年の間に収録された地震波形を用いて、Zhao et al. (1992)による速度トモグラフィー解析を行った。

従来の定常観測網を用いたトモグラフィー解析のグリッド間隔は、その観測点間隔である約20 kmに制限されてしまうが、本研究では観測点間隔約5 kmの稠密地震観測網によるデータも用いることでグリッド間隔を5 kmに設定することができる。そのため、本研究ではトモグラフィー解析を行うときのグリッド間隔を水平方向5 km、鉛直方向2 kmに設定し、先行研究よりも高解像度で近畿地方中北部の地震波速度構造を求めた。

本発表では、高解像度で求めた地震波速度構造から等価アスペクト比モデルを用いて詳細な流体量を推定した結果を紹介し、微小地震活動の成因について議論する。

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-2

chairperson:ryosuke Azuma(Tohoku University)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM C

[S06-06] Wide-angle seismic survey off Muroto in Nankai trough

○Gou Fujie[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Yasuyuki Nakamura[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1] （1.JAMSTEC）

2:30 PM - 2:45 PM

[S06-07] Temporal variation of seismic velocity structure in the vicinity of shallow plate boundary in the Kumano-nada region

○Takashi Tonegawa[1], Suguru Yabe[2] （1.JAMSTEC, 2.AIST）

2:45 PM - 3:00 PM

[S06-08] Receiver function imaging of the Philippine Sea plate subducting beneath Shikoku (3)

○Takuo Shibutani[1], Jun Nakagawa[1], Airi Nagaoka[1], Tsutomu Miura[1], Yusuke Yamashita[1], Ken'ichi Yamazaki[1], Shintaro Komatsu[1] （1.Kyoto Univ.）

3:00 PM - 3:15 PM

[S06-09] The P and S Wave Structure in the Shikoku Region from GA-based Simultaneous Determination of Hypocenters and Seismic Wave Velocity Structure

○Kota Murata[1], Motoo Ukawa[2] （1.Pacific Consultants co., Ltd., 2.Nihon University）

3:15 PM - 3:30 PM

©Seismological Society of Japan

Wide-angle seismic survey off Muroto in Nankai trough

*Gou Fujie[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Yasuyuki Nakamura[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC

プレート沈み込み帯では、巨大地震から、微小地震、低周波微動、そして非地震性滑りまで、海洋プレートと陸側プレートの境界部で多種多様な滑り現象が発生している。低周波微動や非地震性滑りは通常の地震発生域周辺で観測されるなど、これらの多様なプレート境界滑り現象はお互いに何らかの関連性があり、巨大地震の発生メカニズムを理解するという視点からも、多様な滑り現象をプレート境界部で生じる滑り現象として包括的に理解することの重要性が指摘されている。

フィリピン海プレートが日本列島下に沈み込む南海トラフ・プレート沈み込み帯は、日本全国に展開されている稠密な陸上観測網に加え、海域定常観測点も世界に先駆けて展開されているなど、地震観測研究が充実した海域である。その結果、M8クラスの巨大地震が100～200年間隔で繰り返し発生してきたこと、その震源域はセグメントに分けられるが時に複数のセグメントが連動する場合があること、また低周波微動やスロースリップなど多様なゆっくり滑り現象が発生していることなど、世界でもっともプレート境界滑りに関する活動把握が進んでいる海域の一つである。加えて、海洋研究開発機構などによって多数の海域地下構造探査研究も実施されてきたことで、沈み込むフィリピン海プレートの大局的な3次元構造が明らかになっていることなど、地下構造研究も非常に充実した沈み込み帯である。

しかし、これらの研究の進展に伴い、海陸プレートの相対運動、プレート境界断層の形状や物性、温度構造など、さまざまな要因の複合的な影響によって決定付けられる多様なプレート境界滑り現象を包括的に理解するには、従来よりもさらに詳細にプレート境界断層の形状や物性などを把握していく必要性があることも分かってきた。

そこで、海洋研究開発機構では南海トラフ域全体の地下構造研究の刷新を目指し、2018年度から新たな大規模で稠密な構造探査観測研究を開始している。この調査研究は、長大ストリーマーケーブルを用いた稠密二次元地震波反射法構造探査研究と、多数の海底地震計を用いた稠密地震波屈折法構造探査研究からなる。この一環として、2019年11月～12月、我々は室戸沖の土佐碆と呼ばれる海底地形の高まりを横切る海域で海底地震計を用いた地震波屈折法構造探査観測を実施した。土佐碆は海山の沈み込みに関係して形成された海底地形の高まりであると考えらており(たとえば Kodaira et al., 2000, 2002)、本調査観測では沈み込む海山付近の詳細なプレート境界断層の実態や海山沈み込みが前弧域の発達に与える影響などを把握し、この周辺で確認されている浅部低周波微動などプレート境界地震活動と比較議論することを目指し、2km間隔の稠密さで海底地震計を設置する調査測線を2km間隔で2本設定した。

海底地形の高まりである土佐碆は、その中央部を東西に横切る谷によって二つの高まりに分かれているが、本調査で得られた新しいデータを用いた走時トモグラフィー解析の結果から、この中央部の谷間には顕著な地震波速度の低速度域があることが分かってきた。この結果は、海底地形の高まりである土佐碆は従来考えられていたよりも複雑なプロセスによって形成されていることを示唆している。本講演では、初動走時を用いた地震波トモグラフィー解析により得られた大局的な2次元地震波速度構造モデルを元に議論を行う。

今後は、波形も用いたインバージョン解析により2次元地震波速度構造モデルを高精度化していく。将来的には、全てのデータを用いて3次元的な解釈にも進める計画である。

© 日本地震学会

Temporal variation of seismic velocity structure in the vicinity of shallow plate boundary in the Kumano-nada region

*Takashi Tonegawa[1], Suguru Yabe[2]

1. JAMSTEC, 2. AIST

海底定常観測網の設置により、海底下における地震波速度構造の時間変化の事例が報告されつつある（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018; 利根川・他, 2020, JpGU）。しかし、先行研究では表面波を使用しているため、どの深さで構造の時間変化が起きているかの特定が難しいという問題点もある。そこで本研究では、南海トラフ域に設置された地震・津波観測監視システム（DONET）のノイズ記録に地震波干渉法を適用し、海底下からの反射波の抽出が可能かどうかを検証した。もし反射波を定常的に抽出することができれば、その近傍の構造の時間変化に関する情報を抽出することが可能となる。

使用した記録はDONET1（熊野灘）の広帯域地震計記録で、期間は2011-2019年末までである。サンプリング間隔は100 Hzで、サイト増幅率を補正した後（Yabe et al. 2019）、80秒間ごとに上下動成分と水平成分を用いてデコンボリューションし、その処理後の波形を30日間スタックすることでPs反射波の抽出を試みた。このとき、水平成分はプレートの傾斜方向（N30ºW）に回転させた。スタック波形に現れる振幅がどの深さから到来したのかを調べるため、時間領域のスタック波形を各観測点下の地震波速度構造（Tonegawa et al. 2017）を用いて深さ方向に変換し、その結果と構造探査による結果を比較することで反射波の特定を行った。

結果では、付加体先端部に設置された６観測点において、構造探査で得られた付加体内部の反射面（ここではデコルマと仮定）、分岐断層、海洋性地殻に対応すると考えられる北傾斜のPs反射波を抽出することができた。ここで、デコルマや分岐断層に対応するものは周波数帯域3-6 Hzで、海洋性地殻に対応するものは2-4 Hzで抽出できた。この周波数帯域の違いはそれぞれの境界面のシャープネスを反映していると考えられる。また、このようなPs反射波が本当に発生するのかどうかを確認するため、熊野灘で行われた構造探査の記録を用いてPs反射波の抽出を試みたところ、3-6 Hzで北傾斜の反射面を確認できた。このことから、ノイズ記録で抽出したものはPs反射波であると考えられる。

時間変化の結果を議論するために、まず、デコルマおよび分岐断層からのPs反射波をPs_1、海洋性地殻上面からのものをPs_2と定義し、これらの走時やそれらの差の時間変化を調べることで、付加体上部とプレート境界近傍の時間変化を議論する。まず、付加体先端部に設置されたKMB, KMC, KMDでは、T(Ps_1)とT(Ps_2)が長期的に減少傾向（速度上昇）にあることがわかった。これは利根川・他（2020、JpGU）で得られた付加体が長期的に速度上昇しているという結果と調和的である。また、2016年ごろに見られるT(Ps_1)やT(Ps_2)の上昇（速度減少）は2016年4月1日の三重県沖地震に対応するものである。その一方で、T(Ps2)–T(Ps1)では長期的に単調変化するようなものは確認できなかったが、観測点KMD13ではスロー地震の前に変化する短期的な現象を確認することができた。これは利根川・他（2020, JpGU）で確認されたものとよく似ているが、本研究によって、デコルマやその下でも地震波速度が変化しうることが示された。

謝辞　本研究では、DONET（防災科学技術研究所：https://doi.org/10.17598/NIED.0008）および「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト」によって取得されたデータを使用しました。また、新学術研究領域スロー地震学　公募研究「浅部スロー地震に伴う流体挙動の解明」（19H04632）の助成を受けました。記して感謝申し上げます。

© 日本地震学会

Receiver function imaging of the Philippine Sea plate subducting beneath Shikoku (3)

*Takuo Shibutani[1], Jun Nakagawa[1], Airi Nagaoka[1], Tsutomu Miura[1], Yusuke Yamashita[1], Ken'ichi Yamazaki[1], Shintaro Komatsu[1]

1. Kyoto Univ.

１．はじめに

南海トラフ域で発生する巨大地震について、震源域や強震動生成域の広がりを的確に推定し、地震規模や強震動の予測の確度を上げるためには、震源域となるフィリピン海スラブ周辺域や巨大地震から発せられた地震波の伝播経路にあたる領域の構造を高精度に推定することが必要である。

我々は、リニアアレイ観測、レシーバ関数解析および地震波走時トモグラフィ解析により、紀伊半島、南九州および四国の地下構造を高精度に推定することを試みてきた。

今回は、前回に引き続き、四国でのレシーバ関数解析の結果について報告する。

２．リニアアレイ観測

四国では、徳島県海陽町と鳥取県米子市を結ぶ海陽－米子測線の四国側（海陽－綾川区間）と徳島市と愛媛県西予市を結ぶ徳島－西予測線でリニアアレイ観測を行った。いずれも測線近傍の定常観測点も含めて、観測点間隔が約5 kmになるように臨時観測点を配置した。

海陽－綾川区間では2014年12月から2017年2月まで、徳島－西予測線の東側（神山－大豊区間）では2015年12月から2018年12月まで、徳島－西予測線の西側（いの－西予区間）では2017年3月から2019年1月まで、いずれも7点の臨時観測点を設置した。

各臨時観測点では、固有周期1秒の高感度地震計（L-4-3D、Sercel社製）の地動速度出力をデータロガー（LS-7000XT、白山工業製、100 Hzサンプリングまたは EDR-X7000、近計システム製、250 Hzサンプリング）に連続収録した。データロガーは自動車用バッテリーで駆動し、太陽電池で充電するオフライン観測を行った。

2020年4月に高知県土佐清水市大岐から四万十市西土佐奥屋内までの土佐清水ー西土佐奥屋内区間に7点の臨時観測点を設置した。2022年3月まで2年間観測を行う予定である。

３．レシーバ関数解析

海陽－米子測線と徳島ー西予測線の観測点で記録された遠地地震波形を用いてレシーバ関数を求めた。レシーバ関数とは、観測点下のS波速度不連続面で生成されるPS変換波を抽出した波形である（澁谷・他, 2009）。

© 日本地震学会

さらに、気象庁の地震波速度構造JMA2001（上野・他, 2002）を用いて、レシーバ関数の時間軸を深さ変換し、多数の観測点で多数の地震に対して得られたレシーバ関数の振幅を共通の変換点上で重合することにより、S波速度不連続面のイメージを求めた。

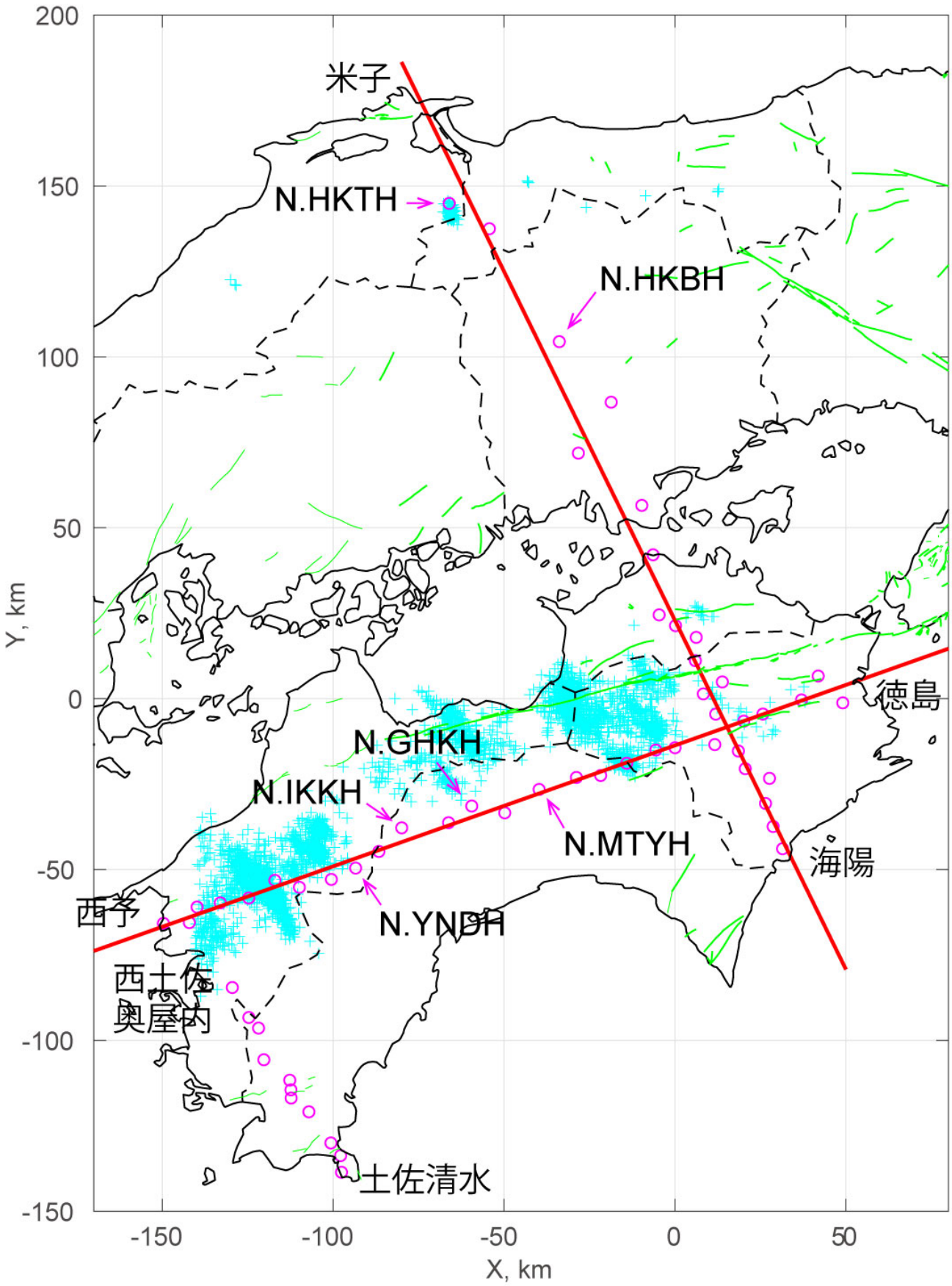
海陽ー米子測線でのレシーバ関数イメージにおいては、高速度層の上面と考えられるフィリピン海スラブ内の海洋モホ面が、海陽町付近の深さ30 km弱から岡山県真庭市の北房観測点（N.HKBH）付近の深さ45 kmまで明瞭である。その6〜8 km上方には、低速度である海洋地殻の上面、すなわちフィリピン海スラブの上面も明瞭に見られる。この結果から四国東部下のフィリピン海プレートは、6°程度の傾斜角で沈み込んでいることが分かった。これに対して、大陸モホ面は、やや不明瞭ではあるが、島根県安来市の伯太観測点（N.HKTH）付近の深さ35 kmから海陽町付近の深さ15 kmまでフィリピン海プレートの上方をせり上がるように分布していることが示唆された。

徳島ー西予測線でも海洋モホ面は明瞭であり、徳島市付近では深さ33 kmに、西予市付近では深さ44 kmに見られる。高知県仁淀川町の池川観測点（N.IKKH）〜愛媛県久万高原町の柳谷観測点（N.YNDH）では深さ30 kmまで浅くなっている。フィリピン海スラブの上面に対応する低速度層上面は、海洋モホ面の6〜8 km上方に見られるが、高知県いの町の吾北観測点（N.GHKH）を中心として、高知県本山町の本山観測点（N.MTYH）から池川観測点までの区間には、フィリピン海スラブの上面のさらに上方により明瞭な低速度層上面が見られる。大陸モホ面は、不明瞭ながらも、20 km弱の深さに見られる。

謝辞

防災科学技術研究所、気象庁、産業技術研究所、高知大学、京都大学の定常観測点の地震データを使用しました。

© 日本地震学会


米子
N.HKTH
N.HKBH
徳島
N.GHKH
N.IKKH
N.MTYH
海陽
西予
N.YNDH
西土佐
奥屋内
土佐清水
Y, km
X, km
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-150
-100
-50
0
50

© 日本地震学会

The P and S Wave Structure in the Shikoku Region from GA-based Simultaneous Determination of Hypocenters and Seismic Wave Velocity Structure

*Kota Murata[1], Motoo Ukawa[2]

1. Pacific Consultants co., Ltd., 2. Nihon University

1.はじめに

水平成層地震波速度構造は、震源決定や3次元地震波速度構造推定の標準地震波速度構造として、現在でも重要な役割を果たしている。自然地震を用いた水平成層地震波速度構造の推定においては、震源と地震波速度を同時決定する手法（例えばCrosson, 1976, JGR）がしばしば利用されているが、層厚を固定しなければならない。本研究ではGA（遺伝的アルゴリズム）を活用し、層厚も未知数とし、地震波速度構造を推定する手法を開発し、四国地方に適用した。その結果、安定した解として層厚、P波・S波地震波速度、観測点補正値を得ることができた。

2.手法

複数の観測点のP波とS波到着時刻データを観測値とし、震源と観測点補正値、P波・S波速度、層厚を推定する。地震波速度と層厚はGAを活用して推定する。震源と観測点補正値は、GAにおいて試行する各地震波速度構造について、鵜川・他（1985、地震）の手法により同時決定する。今回は四国地方の深さ50㎞以浅の地震を対象に地殻・最上部マントルの地震波速度構造を推定することを試みた。
地震波速度構造は図に示すような6層構造とし、浅部構造（第1層と第2層）及び最深部の第6層は地震波速度、層厚とも固定した。GAの計算では、各未知数について、捜索範囲を設定し、その範囲内にランダムな数値を生成する実数値遺伝的アルゴリズムを採用した。今回の推定では各世代の子孫数を5000、世代数を10世代とし、捜索範囲は世代を重ねると狭くなるように設定している。
なお、初期値として与えた地震波速度構造の第1世代の捜索範囲は、第3層～第5層は、層厚が5～10 km、P波速度が6.0～8.0 km/s、S波速度が2.5～4.5 km/sである。また観測点補正値は、綾上観測点(AYKH)のP波観測点補正値を0とした。

3.対象地域と使用データ

本研究では水平成層構造に近いと考えられる四国地方を対象とした。対象とした地震は気象庁一元化震源データから選択し、気象庁の検測値及び防災科学技術研究所のHi-net連続波形データから自身で検測した値を観測データとした。
深さが50km以浅の地震から対象地域にできるだけ偏らずに分布し、P波とS波ともに検測できる規模としてM2～4の範囲の地震18個を選択した。Hi-net観測点は四国地方の35観測点を選択し、各観測点の地震波到達時刻を気象庁の検測値がある場合は地震波形を確認し、検測値がない場合は検測した。

4.結果

得られた地震波速度構造を図に示す。繰り返し計算の後、第3層及び第4層の地震波速度と層厚はそれぞれ上部

© 日本地震学会

地殻及び下部地殻に対応している値が安定して得られた。上部地殻と下部地殻の境界の深さは21.3㎞である。第5層はモホ面の深さを推定するための層であるが、得られた結果はP波が7.5 km/sで最上部マントルの地震波速度としてはやや小さい。この層をマントル最上層と考えるとモホ面の深さは33.3 kmである。
Vp/Vsに注目すると地殻（第3層と第4層）は1.71～1.73と比較的低く、最上部マントル（第5層）は1.84と高い値が得られた。
観測点補正値（走時残差に対する補正値）は図に示すように、四国中央部で負、中央部から離れると正という傾向がP波、S波とも見られる。

5.議論

木村・岡野(1991,高知大学学術研究報告)によるP波速度構造では、上部地殻と下部地殻の境界は20km、上部地殻のP波速度は5.5km/sから6.4km/sまで増加、また、モホ面の深さを35km、最上部マントルの速度を7.8km/sとしている。今回の結果は地震波速度、層厚とも調和的である。木村・岡野(1991)では下部地殻の地震波速度は上部地殻に比べ低速度層になると示唆しているが、今回の結果は下部地殻の地震波速度の平均値は上部地殻より大きいことを示している。
観測点補正値の地域性は、四国中央部から離れるにしたがって観測走時が速いことを示すことから、沈み込んだフィリピン海プレートの形状が影響していることが考えられる。

6.まとめ

四国地方のP波・S波速度構造を水平成層構造と仮定し、遺伝的アルゴリズムを活用して推定した。得られたP波速度構造は、これまでの研究と調和的であり、本研究の手法が地殻・最上部マントルの地震波速度構造推定に有効なことを示している。今後、地震波速度構造の誤差の評価が課題である。
今回の得られたS波速度から、四国地方の地殻内は低Vp/Vs（低ポアソン比）であることが分かった。

7.謝辞

本研究では、防災科研のHi-net地震観測網の波形データを使用した。また図の作成にはGMTを使用した。記してここに感謝いたします。

© 日本地震学会

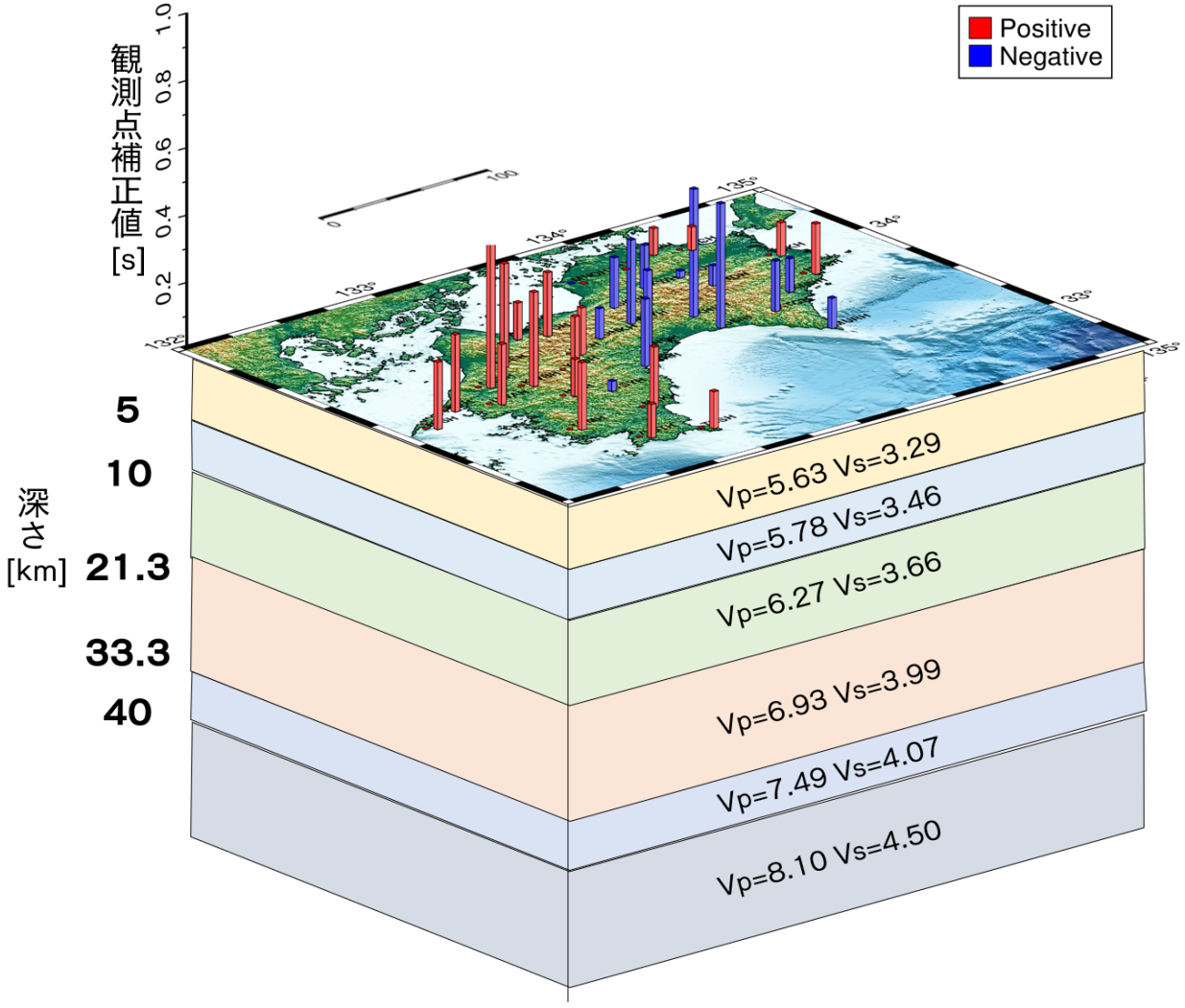


図.得られた地震波速度構造と P 波観測点補正値

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]AM-1

chairperson:Takashi Tonegawa(JAMSTEC)

Fri. Oct 30, 2020 9:00 AM - 10:00 AM ROOM C

[S06-10] 3D crustal velocity model around the source region of the 2015 Gorkha earthquake, central Nepal

○Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2] （1.Graduate school of Science, Kyoto University, 2.DPRI, Kyoto University, Japan）

9:00 AM - 9:15 AM

[S06-11] Persistent Long-Period Signals Recorded by an OBS Array in the Western-Central Pacific: Activity of Ambrym Volcano in Vanuatu

○Yuki Kawano[1], Takehi Isse[1], Akiko Takeo[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Daisuke Suetsugu[2], Hajime Shiobara[1], Hiroko Sugioka[3], Aki Ito[2], Yasushi Ishihara[2], Satoru Tanaka[2], Masayuki Obayashi[2], Takashi Tonegawa[2], Junko Yoshimitsu[2] （1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.JAMSTEC, 3.Kobe University）

9:15 AM - 9:30 AM

[S06-12] Frequency Dependency of the Peak Energy Ratios for Teleseismic P Waves at the Hi-net Stations

○Gugi Aucklandi Ganefianto[1], Hisashi Nakahara[1], Takeshi Nishimura[1] （1.Tohoku University Solid Earth Physics Lab）

9:30 AM - 9:45 AM

[S06-13] Application of Adjoint Waveform Inversion to Hi-net Data in Central Japan Island

○Kota Mukumoto[1], Takeshi Tsuji[1] （1.Kyushu University）

9:45 AM - 10:00 AM

©Seismological Society of Japan

3D crustal velocity model around the source region of the 2015 Gorkha earthquake, central Nepal

*Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2]

1. Graduate school of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University, Japan

We investigate the 3D crustal structure of central Nepal in the source region of the 2015 Gorkha earthquake (M_w 7.8) by applying a seismic tomography inversion method. We use P- and S-wave traveltime data of the Gorkha earthquake sequence recorded by a temporary aftershock monitoring network of 42 stations and 1406 events, to determine Vp and Vp/Vs models of the region. Seismicity forms two separate east-west seismic belts located north and south of the main coseismic slip area. The width of the northern belt varies along-strike. First, we calculate a 1D velocity model of the area following the approach of Kissling et al. (1994) and relocate all the events in the database. With this 1D velocity model, we then use SIMUL2000 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) to determine a coarse 3D velocity model. Finally, the grid spacing is made smaller to determine a detailed 3D velocity model. This study contributes to our knowledge of seismo-tectonics by providing a detailed velocity structure within the source region of the Gorkha earthquake. In addition, we hope to identify structural features that controlled the rupture limit of the main event.

Key words: *Seismic tomography, crustal structure, Nepal Himalaya, Gorkha earthquake*

© 日本地震学会

Persistent Long-Period Signals Recorded by an OBS Array in the Western-Central Pacific: Activity of Ambrym Volcano in Vanuatu

*Yuki Kawano[1], Takehi Isse[1], Akiko Takeo[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Daisuke Suetsugu[2], Hajime Shiobara[1], Hiroko Sugioka[3], Aki Ito[2], Yasushi Ishihara[2], Satoru Tanaka[2], Masayuki Obayashi[2], Takashi Tonegawa[2], Junko Yoshimitsu[2]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kobe University

地殻および最上部マントル構造の解明には雑微動の相互相関解析が有用である. 一般的な解析では, 雑微動源が空間的に均質に分布することが仮定される. しかし, 持続的に地震波信号を生み出す微動源(例えば阿蘇山)が空間に局在すると, 前述の仮定が崩れるため, 構造解析の結果にバイアスをもたらす可能性がある. 全地球規模の解析からギニア湾や西中央太平洋においてもこのような微動源が報告されているが, 地震波信号の発生メカニズムはいずれも未解明なままである.

2014年から2017年にかけて, オントンジャワ海台の構造の解明を目的に, 地球物理観測網(OJPアレイ)が西中央太平洋に展開された. 海底地震計(OBS)の鉛直成分に記録された雑微動に対し, 相互相関解析をおこなったところ, 観測点間を伝播するレイリー波よりも見かけ群速度の速い波束が観測された. その波束の卓越周期は25秒と18 秒であり, 信号の強さは季節性変動を示さないものの, 大きく時間変動をする. 相互相関関数を用いたback projection解析と, 地震波データのスペクトログラムの比較から, 信号の発生源はOJPアレイ中心部から南東方向に～1900 km離れたバヌアツのアンブリム火山にあると推定された. アンブリム火山の活動的な火口付近にある1点の中周期地震計データを用いてpolarization解析をおこなった. 1点の観測点のみでは震源の位置を一意に決定できないが, 例えば火口直下に震動源が存在すると仮定すると, 2つの周期の信号の震源は, 互いに～2 km離れており, ともに海面下～0–1 kmにあると推定される.

このような火山起源の持続的な地震波信号は, 阿蘇山周辺でも広域(～2500 km)にわたって観測されており, 火山性流体の流れが引き起こしたクラックの持続的な振動に起源をもつことが知られている. 一方, アンブリム火山においても, InSARデータを用いた先行研究により, 火口直下浅部にダイクが存在すると推定されている. 本研究で観測されたアンブリム火山の地震波信号も, 阿蘇山のようなクラックやダイクの持続的な振動に起源をもつ可能性がある. 地震波信号の発生メカニズムをより詳細に解明するためには, アンブリム火山の火口近傍に地震計観測アレイを展開する必要がある.

© 日本地震学会

Frequency Dependency of the Peak Energy Ratios for Teleseismic P Waves at the Hi-net Stations

*Gugi Aucklandi Ganefianto[1], Hisashi Nakahara[1], Takeshi Nishimura[1]

1. Tohoku University Solid Earth Physics Lab

Subsurface heterogeneity in seismic velocity is an important aspect for understanding the seismotectonic setting of a region. Large scale heterogeneities are often studied using for example seismic tomography. On the other hand, smaller scale heterogeneities can be inferred from the scattering of seismic waves.

Peak energy ratio is a measure for the strength of small-scale heterogeneities, and is defined as the ratio of the maximum energy of P wave in the transverse component seismogram, to the sum of the maximum energy in the transverse, radial, and vertical components. According to Sato (2006), the peak ratio can be approximated as $1.81\,\varepsilon^2 z/a$ where ε, z, and a are fractional fluctuation in seismic velocity, thickness of the heterogeneous medium, and correlation distance respectively. Kubanza et al., (2007) used the peak ratio to quantify small-scale velocity heterogeneities on a global scale. In Japan, Nishimura (2012) estimated the peak ratios and found that non-active regions such as those far from volcanoes, yield smaller peak ratio, albeit still larger than at stable continents. Nishimura (2012) noted that the peak ratios generally increase with frequency, but did not quantify this observation. In this study, we quantify the frequency dependency of the peak ratio and discuss its relations to Japan's tectonic setting.

Data from 803 stations and 99 earthquakes, recorded for the period between 2010 and 2019, were considered for this study. Teleseismic events with magnitude and depth of 5-6.5 and >300 km respectively were used, ranging between 0^{o}-60^{o} epicentral distance. We discarded any source-receiver pair with less than 10 signal-to-noise ratio, and calculated the mean-squared envelopes. Finally, we stacked the envelopes for all stations that record >10 earthquakes.

Results show that there is a divide in scattering properties over Japan, where larger peak ratios can be found on east Japan. This was previously obtained by Nishimura (2012) and successfully replicated here. Uncertainty is calculated using the Jack-Knife test, presented as the coefficient of variation, with error on average considerably less than 5%. We perform the analysis under four frequency bands: 0.5-1; 1-2; 2-4; and 4-8 Hz, and observe an overall increase in peak ratio with frequency similar to Nishimura (2012). To analyse the frequency dependency in our results, we define *frequency gradient* as the gradient, m of the trendline $\log p = m \log f_c + a$ where p is the peak ratio, and f_c is the central frequency of each frequency band.

There is a seeming pattern of the frequency dependency in relation to the volcanic front. Stations located on the West/back-arc show steeper frequency gradient hence stronger frequency dependency. We look into Kanto-Tokai, Tohoku, and Kyushu where the traces of the volcanic front are more conspicuous. We performed the t-value test to determine that statistically, western peak ratios are more dependent on frequency, for Kanto-Tokai, Tohoku, and Kyushu. We also did the Pearson's χ^2 test to confirm the perceived visual pattern of high correlation to the West and vice versa at Kanto-Tokai and Tohoku. For Kyushu, the visual impact is not as discernible as the others even though the difference in East and West frequency gradients is statistically significant.

There are possible scenarios that might explain this frequency dependency. If the pattern mostly reflects the scattering in the deeper lithosphere, then this contrast can be attributed to the more inhomogeneous

© 日本地震学会

velocity structure of the mantle wedge in the back-arc where rich small-scale heterogeneity region scatters high frequency seismic components more strongly than lower frequencies. This accordingly increases the profoundness of the scattered P wave contribution into the transverse seismogram at higher frequencies. On the other hand, the makeup of the transverse seismogram is mostly influenced by scattering in the shallow depth, which would imply impressions from shallow structures such as sedimentary plains. This only further emphasizes the needs to study the depth dependency in scattering heterogeneity, for example, by combining teleseismic and local events to model the seismogram envelope using the Monte Carlo simulation. This will be the premise for our future works.

Acknowledgement: We would like to thank the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), Japan, for their data of high sensitivity seismograph network (Hi-net).

© 日本地震学会

Application of Adjoint Waveform Inversion to Hi-net Data in Central Japan Island

*Kota Mukumoto[1], Takeshi Tsuji[1]

1. Kyushu University

Since 2000, seismic velocity structures have been resolved by waveform-based tomography technique due to growth of computational resource. Waveform inversion problem can be solved by using adjoint technique. Adjoint technique takes advantage of full numerical simulation and finite frequency sensitivity kernels (banana-doughnut sensitivity kernels). These advantages can give more accurate estimation and fine structures in crustal and global seismic tomography model (Tape et al., 2009, Zhu et al., 2012).

In Japan, ray tomographic method mainly has been used for imaging crustal structures as P-wave velocity and S-wave velocity model (Matsubara et al., 2019). Seismic interferometry by using seismic ambient noise also has been implemented for S-wave velocity structures (Nimiya et al., 2020, Nishida et al., 2008). More recently, adjoint method was used to estimate velocity model in Kanto region and found more heterogeneous structures compared to models which was estimated by using ray-based technique (Miyoshi et al., 2016). In this research, adjoint tomography was employed to estimate S-wave velocity model in central Japan. In central Japan, existing velocity models were estimated by inverting either surface or first arrival of body wave. On the other hand, our velocity model was estimated by jointly inverting both surface and body waveforms.

We used 84 earthquakes and 35,065 waveforms data that recorded by 358 Hi-net stations. Because the signals with high signal to noise ratio were required, this study used earthquakes that have magnitude over than 4. Here, we tried to fit time-frequency phase misfit between observed and synthetic seismograms with period band of 30~5 second. Surface wave is dominant component in our data, therefore, synthetic data was obtained by spectral element method which can accurately estimate the effects of free surface topography. We found that the final model is similar to S-wave velocity model estimated by seismic interferometry (Nishida et al., 2008). Our results show velocity anomalies related with volcanos, Median Tectonic line and Niigata-Kobe Tectonic line.

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S04. Tectonics

[S04]AM-1

chairperson:Takashi Tonegawa(JAMSTEC)

Fri. Oct 30, 2020 10:00 AM - 10:15 AM ROOM C

[S04-01] 3-D Numerical Simulation of Island Arc Deformation Due to Steady Plate Subduction: Effects of a Bend of the Trench Axis

○Yutaro Mori[1], Yukitoshi Fukahata[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University., 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

10:00 AM - 10:15 AM

©Seismological Society of Japan

3-D Numerical Simulation of Island Arc Deformation Due to Steady Plate Subduction: Effects of a Bend of the Trench Axis

*Yutaro Mori[1], Yukitoshi Fukahata[2]

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

島弧海溝系は、島弧で高く海溝で低い重力異常および地形で特徴づけられる。このような特徴は、沈み込み帯において例外なく観測されるが、その変形の物理的メカニズムは未解明の問題として残されている。
Fukahata and Matsu’ura (2016)は、プレートの定常沈み込みによって引き起こされる島弧リソスフェアの変形を弾性-粘弾性2層構造における変位の食い違い理論に基づいて理論的に計算し、島弧-海溝系の2次元的な変形メカニズムをリソスフェアの回転運動と重力の組み合わせで説明した。
しかし、実際の沈み込み帯における島弧-海溝系の形成過程においては、沈み込む海洋プレートの3次元的な形状による効果も重要と考えられる。例えば、豊後水道や日本海溝と千島海溝の接合部(津軽海峡沖)など、海溝軸が屈曲している場所で屈曲部付近に大きな負のフリーエア重力異常が観測される(Sandwell and Smith, 1997)。この効果は数値モデルにより再現されている(Hashimoto et.al., 2004, 2008)が、重力異常が生じる物理的メカニズムは説明されていない。

本研究では、変位の食い違い理論(Fukahata and Matsu’ura, 2005, 2006)に基づいて定常沈み込みによる島弧リソスフェアの変形を計算する3次元数値モデルを実装した。このモデルを用いて、走向の異なる2本の直線的な海溝軸がなめらかに繋がる形状を持つプレート境界における定常沈み込みによって引き起こされる島弧リソスフェアの変形を計算した。ここで、2本の海溝軸の交わる角度を20度から80度まで変化させてその影響を調べた。

数値計算の結果、いずれの角度においても海溝軸の屈曲部付近に大きな沈降が生じることが再現された。この結果は、実際の沈み込み帯において観測される重力異常と調和的である。また、海溝軸の屈曲する角度が大きくなるほど沈降の空間スケール及び沈降量が大きくなることが分かった。
このような沈降のパターンは、水平方向の運動に基づいて以下のように合理的に説明される。2本の海溝軸のそれぞれに対し、海洋プレートはななめ沈み込みをする。そのななめ沈み込みの横ずれ成分の方向は、海洋プレートから見て海溝軸の屈曲部に対し右側で右横ずれ、左側で左横ずれとなる。これにより、島弧リソスフェアは屈曲部付近で左右に開く方向に運動をする。このような水平方向の運動に伴って海溝軸の屈曲部付近において質量が不足した結果、島弧リソスフェアで大きな沈降が生じたと考えられる。この考えは、2本の海溝軸の交わる角度が大きくなるほど横ずれ成分が大きくなり、屈曲部周辺の沈降量が大きくなることとも調和的である。

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

[S07]AM-2

chairperson:Masayuki Obayashi(JAMSTEC)

Fri. Oct 30, 2020 10:30 AM - 11:00 AM ROOM C

[S07-01] Mantle discontinuities oceanward of the Krile - Honshu slab

○Masayuki Obayashi[1], Yoshimitsu Junko[1], Fukao Yoshio[1] （1.JAMSTEC）

10:30 AM - 10:45 AM

[S07-02] Three dimensional shear wave structure in the upper mantle beneath the old Pacific plate

○Takehi Isse[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Hajime Shiobara[1], Nozomu Takeuchi[1], Hiroko Sugioka[2], YoungHee Kim[3], Hisashi Utada[1], Sang-Mook Lee[3], Kazunori Yoshizawa[4] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Kobe University, 3.Seoul National University, 4.Faculty of Science, Hokkaido University）

10:45 AM - 11:00 AM

©Seismological Society of Japan

Mantle discontinuities oceanward of the Krile - Honshu slab

*Masayuki Obayashi[1], Yoshimitsu Junko[1], Fukao Yoshio[1]

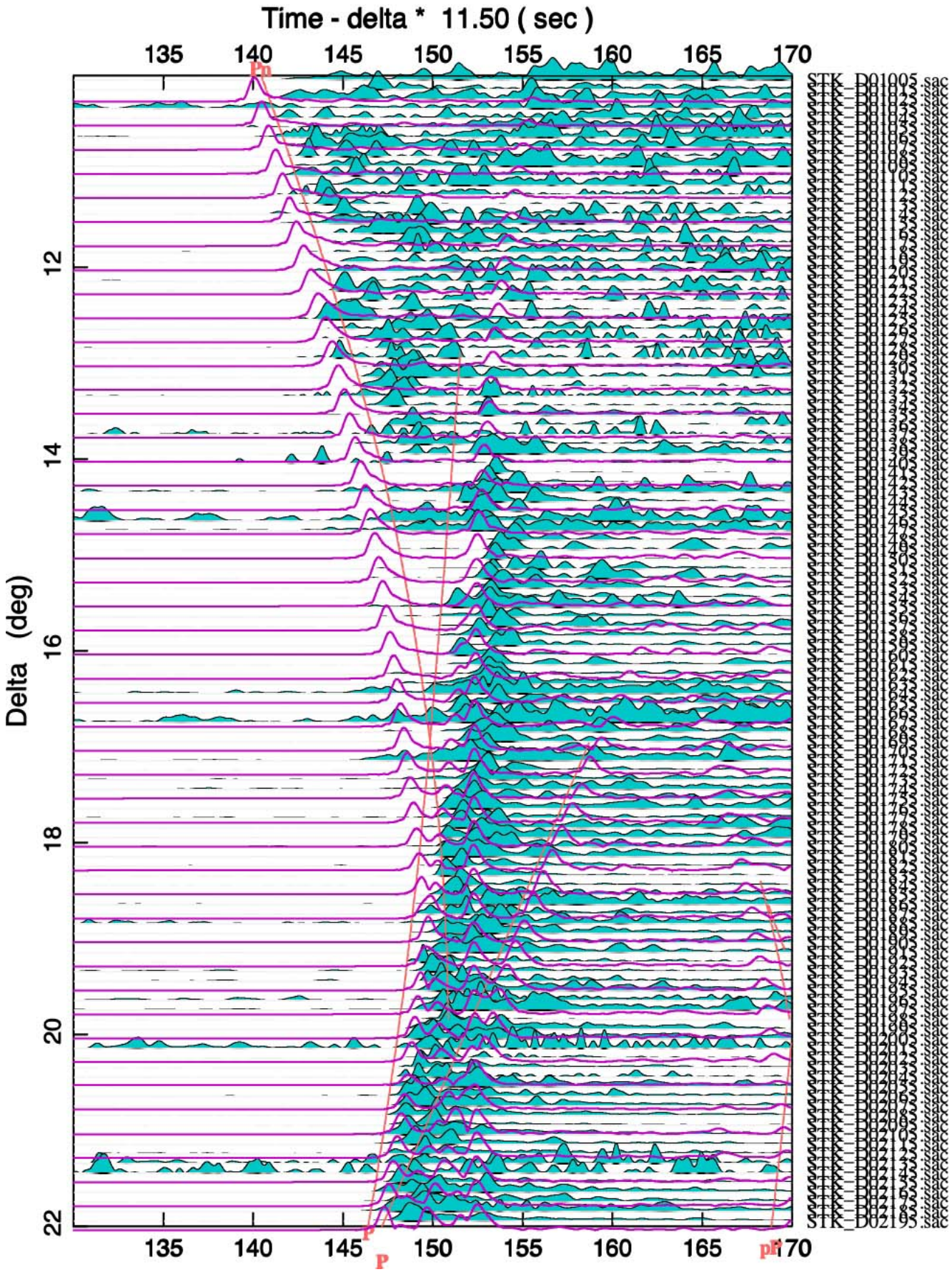
1. JAMSTEC

本州スラブの下の410-km分連続面の直上には低速度異常があり，高温の異常に起因することが示唆されている（e.g. Obayashi et al, 2006; Bagley & Revenaugh, 2008）. しかしそこで示された低速度異常域は本州スラブおよび伊豆–小笠原スラブの北端付近と限定的であり、その広がりは未だ明らかでない。我々はJpGU-AGU joint meeting 2020において千島海溝付近で起きた11地震を解析し、南千島から本州にかけても２–３％の低速度異常が410-km不連続面の直上にあるが、660-km不連続面付近では顕著な異常が見られないことを示した。そこでは11地震の自乗エンベロープ波形を震源深度が120kmとなるように補正後スタックした波形を用い、スタック波形の走時を説明する１次元速度構造をフォワードモデルリングによって示した。

今回、Obayashi et al.（2006）で示された１次元速度モデルM200M（200℃高温及び１％未満のメルトに起因する410-km不連続面直上の低速度異常および410-km不連続面の沈降）に基づく波形を計算し、スタック波形との比較を行った（図）。このモデルでは深さ310～460kmでM200Mを採用し、他の深さでは解析に使用したすべての地震–観測点間波線に沿った３次元速度構造（GAP_P4；obayashi et al., 2013）の平均で１次元構造を求めている。図が示すようにモデルM200Mによる合成波形は410-km 不連続面に関連するトリプリケーション波形を非常に再現している．従って沈み込むスラブの下の410-km不連続面付近の異常は本州スラブに限られたものではなく千島から本州にかけても見られる一般的な現象と考えられる。ただし、410km不連続面より浅い最深点を持つ初動波形の振幅は観測に比べて非常に小さく、トモグラフィーの平均では説明できず、スラブに対応する高速異常は改良しなくてはならないことを示唆している。

図：11個の地震をスタックした自乗エンベロープ波形（青色で塗りつぶされたもの）とM200M１次元速度構造をもとに合成された波形（マゼンタ）。

© 日本地震学会


Time - delta * 11.50 (sec)
135
140
145
150
155
160
165
170
Pu
P
pP
Delta (deg)
12
14
16
18
20
22
STK_D01005.sac
STK_D02195.sac

© 日本地震学会

Three dimensional shear wave structure in the upper mantle beneath the old Pacific plate

*Takehi Isse[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Hajime Shiobara[1], Nozomu Takeuchi[1], Hiroko Sugioka[2], YoungHee Kim[3], Hisashi Utada[1], Sang-Mook Lee[3], Kazunori Yoshizawa[4]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University, 4. Faculty of Science, Hokkaido University

多国間連携による海底地球物理観測イニシアティブ「太平洋アレイ」計画は，太平洋の年代の異なる様々な海域で1～2年のアレイ観測を展開することで，10～15年程度の期間で太平洋全体をカバーする「アレイによるアレイ」観測を実現し，海洋リソスフェア・アセノスフェアの理解を統合的に深化させることを構想している．

この太平洋アレイの第1期アレイとして，2018年秋から2019年秋にかけ，グアム東方沖の深海盆（海洋底年代約1.7億年）において，海底地震電磁気観測（Oldest-1アレイ）を日韓合同で実施した．このアレイは，太平洋最古の海洋底に位置しており，プレート成長の端成分を実証的に制約すると共に，太平洋プレート生成初期のプレート成長を明らかにすることを目的としている．観測は，日本側が観測機器（広帯域海底地震計(BBOBS)12台，海底電位差磁力計7台）を供出し，機器の設置・回収は韓国の研究船を使用して実施された．この観測では従来のBBOBSに微差圧計（DPG）を追加し，さらに錘の足の長さを従来の1mから2mに延長する改良を加えたものを使用した．BBOBS 12台中11台は良好な記録を取得し，1台はDPG記録のみ取得であった．傾斜ノイズ・コンプライアンスノイズ除去を施した鉛直成分を解析に用いた．

本研究は，表面波インバージョン手法を用いた上部マントルS波速度構造から，西太平洋の古い海洋底(1.2-1.8億年）の特徴を明らかにすることを目的としている．

Oldest-1アレイで得られた地震波形記録を用い，４次の高次モードまでの表面波位相速度を測定し，既存の測定データ(Isse et al., 2019, EPSL等)に追加し，鉛直異方性を考慮した太平洋全体の3次元上部マントルS波速度構造を求めた．

得られた構造は以前のモデル(Isse et al., 2019)と大局的には似ているが，西太平洋域に注目するとOldest-1アレイ直下では以前のモデルよりリソスフェアが高速度かつ厚いという違いが得られた．海洋底年代毎の上部マントルの速度構造を求めたところ，1.2-1.4億年までは海洋底が古くなるほど高速度であるが，1.4億年より古い海洋底では年代依存は不明瞭であった．

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

[S10]AM-2

chairperson:Shinji Toda(東北大学)

Fri. Oct 30, 2020 11:00 AM - 11:45 AM ROOM C

[S10-01] Subsurface structure revealed by S-wave seismic reflection across the East Matsumoto Basin fault, the ISTL fault system

○Haruo Kimura[1], Hisao Kondo[2], Kouta Koshika[3], Yusuke Kawasaki[3], Yoko Yoshimi[4], Hideki Kurosawa[3] （1.Central Research Institute of Electric Power Industry, 2.Geological Survey of Japan, AIST, 3.OYO Corporation, 4.IRIDES, Tohoku University）

11:00 AM - 11:15 AM

[S10-02] Measurement of strike and dip of the Atotsugawa fault by cosmic ray muons

○Daisuke Ikeda[1], Akimichi Taketa[2], Katsuya Yamazaki[3], Kentaro Omura[4] （1.Kanagawa Univ., 2.ERI, 3.Chubu Univ., 4.NIED）

11:15 AM - 11:30 AM

[S10-03] On-fault geological fingerprint of earthquake rupture direction

○Yoshihiro Kaneko[1], Jesse Kearse[2] （1.Kyoto University, 2.Victoria University of Wellington）

11:30 AM - 11:45 AM

©Seismological Society of Japan

Subsurface structure revealed by S-wave seismic reflection across the East Matsumoto Basin fault, the ISTL fault system

*Haruo Kimura[1], Hisao Kondo[2], Kouta Koshika[3], Yusuke Kawasaki[3], Yoko Yoshimi[4], Hideki Kurosawa[3]

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geological Survey of Japan, AIST, 3. OYO Corporation, 4. IRIDES, Tohoku University

糸魚川−静岡構造線断層帯北部区間は，主に神城断層および松本盆地東縁断層北部によって構成されるほぼ南北走向の活動セグメントであり，その変位センスは東側隆起の逆断層成分が主体となっている（例えば，地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2015, 糸魚川ー静岡構造線断層帯の長期評価（第二版）, 60p）．本研究では，糸魚川−静岡構造線断層帯北部区間の松本盆地東縁断層北部の活動に伴う地震時断層変位量を明らかにすることを目的とし，深度50 m程度までを対象としたS波反射法地震探査を実施した．

本探査地点は，松本盆地東縁断層北部のほぼ中央付近である長野県北安曇郡池田町花見に位置する（図a. 探査地周辺の活断層分布．近藤・谷口（2014, 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, 地質調査総合センター速報, 66, 147–158）に加筆）．測線周辺には大峰山地から西流する扇状地面群が分布し，東側隆起の低断層崖および撓曲崖が生じている（例えば，丸山ほか, 2010, 糸魚川-静岡構線断層帯における重点的な調査観測 平成17～21年度 成果報告書, 文科省研究開発局・国交省地理院・東大地震研, 230–254）．また，測線周辺ではこれまでにも，トレンチ調査や群列ボーリング調査が実施され，活動履歴や地震時上下変位量が検討されている（遠田ほか, 2010, 糸魚川ー静岡構造線断層帯における重点的な調査観測 平成20年度 成果報告書, 文科省研究開発局・国交省地理院・東大地震研, 109–122; 丸山ほか, 2010, 前出; 近藤・谷口, 2014, 前出; 丸山ほか, 2015, 活断層研究, 15, 87–92）．

本探査測線群は，測線長130～500 mの東西3本と南北3本の合計6本の測線で構成される（図b. S波反射法地震探査測線および既存ボーリング掘削地点の詳細位置．ボーリング掘削地点は近藤・谷口（2014, 前出）および近藤・木村（2018, 活断層の評価に関する調査観測 「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」 平成29年度 成果報告書, 文科省研究開発局・産総研, 3–54）による．基図には池田町発行の1:2,500都市計画図を用いた）．現場探査データ取得は，一般的な共通中間点重合法（例えば，物理探査学会, 2016, 物理探査ハンドブック 増補改訂版, 1045p）によって行った．発震点間隔・受振点間隔は共に2 m（標準）で，震源にはOYO CAG製のポータブルバイブレータを使用し，受振器にはOYO Geospace製のGS-20DM（固有周波数14 Hz）を使用した．各測線共に固定展開によって，Geometrics Inc.製のGEODEを用いてサンプリング間隔0.5 ms，記録長2 sでデータ収録を行った．取得した探査データに対して，SeisSpace ProMAX （Halliburton Energy Services製）を用いて，一般的な共通中間点重合法（例えば，物理探査学会, 2016, 前出）による各種のデータ編集・フィルタ処理を施し，地質・構造解釈に資する探査断面を得た．

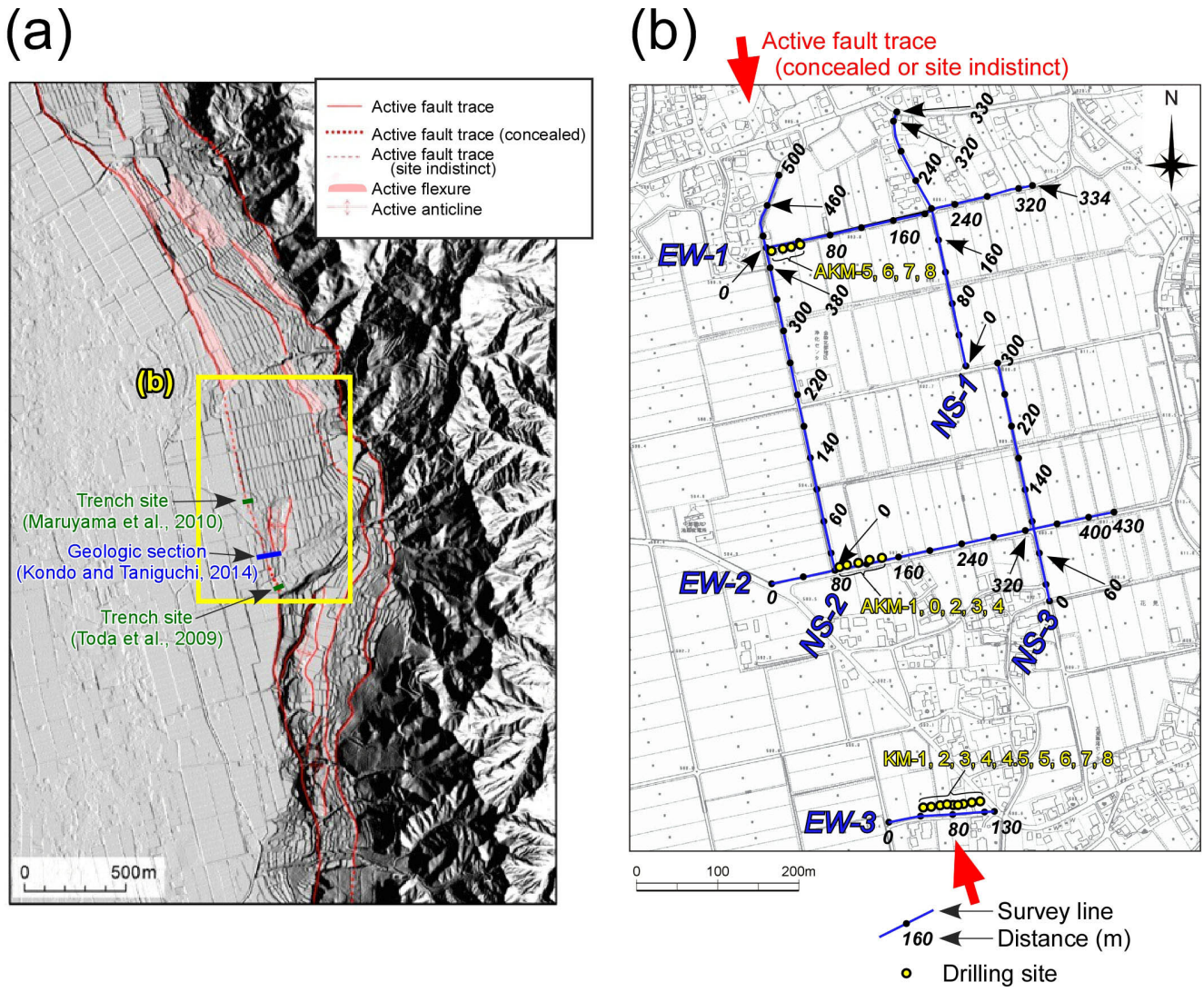
得られた深度変換断面に対する地質学的解釈の結果，断層にほぼ直交する3本の東西測線のそれぞれにおいて，約20度で東傾斜する断層，あるいは断層に伴う東側隆起の変形構造が認められた（図c. 探査結果断面の解釈の例．3本ある東西測線のうち，最も北側の測線の断層付近を拡大したもの）．こうした断層の傾斜角と既存研究で得られている地震時上下変位量（近藤・谷口, 2014, 前出）から，本地点における断層傾斜方向沿いの地震時変位量は約5.3 mと算出された．さらに，完新世の断層活動履歴（丸山, 2010, 前出; 近藤・谷口, 2014, 前出）も考慮して断層傾斜方向に沿った平均変位速度を算出すると，約1.5～2.1 mm/yrとなった．

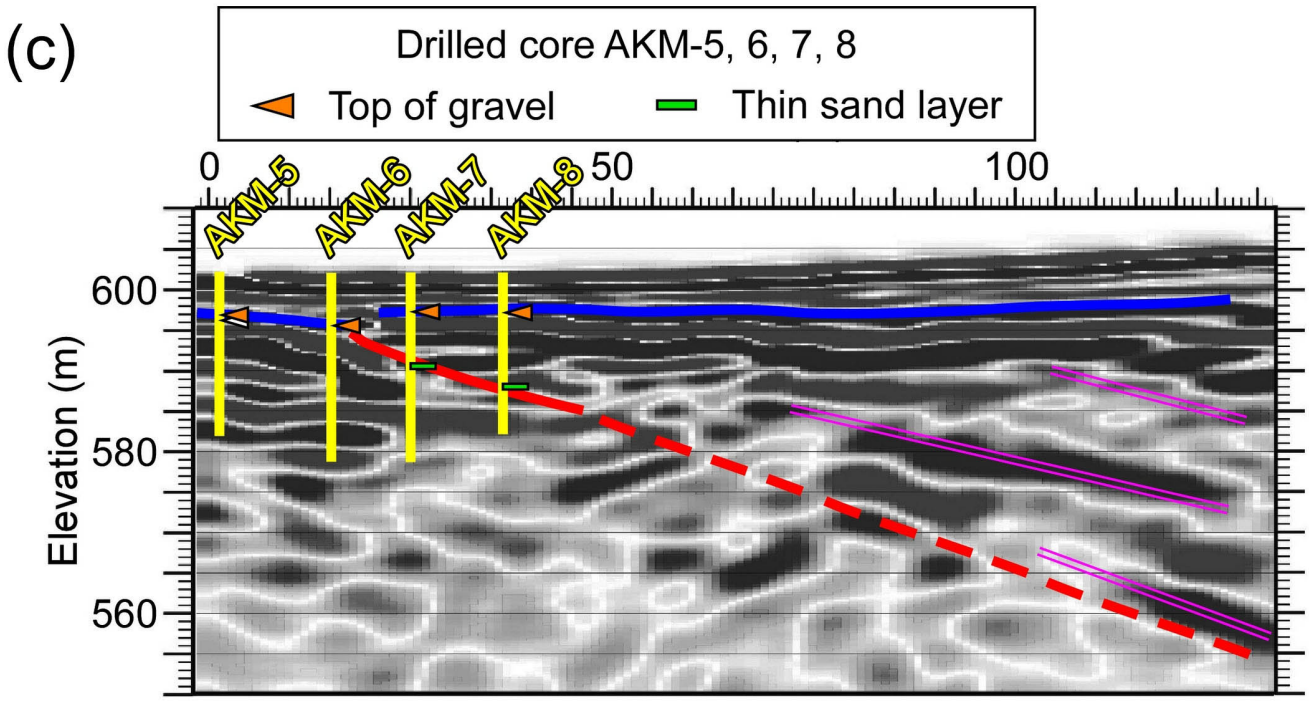
【謝辞】本探査の現場作業においては，地元官公庁・住民および応用地質株式会社の関係各位に御理解・御協力いただいた．本研究は文部科学省「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」プロジェクトの一部として実施した．前記プロジェクトのメンバー及び外部評価委員の皆様には多くの御協力と

© 日本地震学会

議論をいただいた．以上，ここに記して謝意を表する．

© 日本地震学会


(a)
Active fault trace
Active fault trace (concealed)
Active fault trace (site indistinct)
Active flexure
Active anticline
(b)
Trench site (Maruyama et al., 2010)
Geologic section (Kondo and Taniguchi, 2014)
Trench site (Toda et al., 2009)
0 500m
(b)
Active fault trace (concealed or site indistinct)
N
EW-1
AKM-5, 6, 7, 8
NS-1
EW-2
NS-2
AKM-1, 0, 2, 3, 4
NS-3
EW-3
KM-1, 2, 3, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8
0 100 200m
Survey line
160 Distance (m)
Drilling site


(c)
Drilled core AKM-5, 6, 7, 8
Top of gravel
Thin sand layer
AKM-5
AKM-6
AKM-7
AKM-8
Elevation (m)
600
580
560

© 日本地震学会

Measurement of strike and dip of the Atotsugawa fault by cosmic ray muons

*Daisuke Ikeda[1], Akimichi Taketa[2], Katsuya Yamazaki[3], Kentaro Omura[4]

1. Kanagawa Univ., 2. ERI, 3. Chubu Univ., 4. NIED

地震時の強振動分布や津波の規模と挙動の予測には断層の姿勢とすべり量が必要であるが、地下数10mから数100mまでの断層の姿勢については、測定が困難である場合も多く、観測の空白域となることがある。本研究ではボアホール内に設置可能な宇宙線ミューオン検出器を開発し、地下浅部の3次元密度構造の測定を可能とした。また本手法で跡津川断層の破砕帯において密度構造測定を行ない、断層の姿勢の測定を行なった。この手法により、断層破砕帯や上盤下盤に密度差がある断層浅部の姿勢を測定することが可能である。
宇宙線ミューオンを用いた透視技術はミュオグラフィと呼ばれ、数十mから数kmまでの構造物の内部構造（平均密度）を非破壊的に測定できる事、一地点から広範囲の領域を測定する事が可能である事から、火山等巨大な構造物の透視が行われてきた。一方で宇宙線ミューオンは上空から飛来するため測定対象は検出器より上方に位置する物に限られる事、既存のシンチレータを用いた検出器はその大きさや電源から設置箇所が限られる事から、地下の構造測定には不向きであった。そこでボアホール内に挿入可能な小型のミューオン検出器を開発した。この検出手法は特定の仰角（約55±15度）に感度があるため、ボアホール内を深さ方向にスキャンすることで、地下浅部の3次元密度構造を測定する事を可能とした。この探査は密度に感度のある測定であり、断層破砕帯や上盤下盤に密度差がある断層の姿勢を測定することができる。
観測は防災科学技術研究所の跡津川ドリリングプロジェクトにより掘削したボアホールで行なった。ボアホールの直径は15cmであり、シンチレータを用いたミューオン検出器設置空間としては極小である。開発したミューオン検出器を図1に示す。検出器は長さ1mのシンチレータ16枚で構成されており、方位角ごとに到来ミューオン数を測定可能である。本測定器を用いて2016年から2017年にかけて、地下100mまで10m刻みに測定を行なった。
観測された各深さ各方向からのミューオン数から断層の姿勢の情報を得るためには、本観測状況を反映したミューオン数期待値モデルが必要である。モデルは地表におけるミューオンのエネルギースペクトル、詳細地形データ（DEM）による地中通過距離と地中での減衰量、検出器応答を組み合わせて構築されており、断層の影響の少ない浅部でその妥当性を検証している。このモデルに断層を加え、断層の位置、姿勢を変えた場合のミューオン数期待値と、観測データの一致度を比較することで、断層の姿勢を推定する。一例として、断層を1枚板だと仮定し、走行、傾斜、深さ、幅、密度をパラメータとして、それぞれ走行傾斜を10度刻み、深さ、幅を10m刻み、密度を0.1 g/cm^{3}刻みで動かした結果、最も観測データと一致したパラメータと、走行-傾斜平面でのχ2乗/自由度の様子を図2に示す。この結果は既知の大局的な走行や、ボアホール近傍の露頭に見られる傾斜と良く一致している。
本研究で構築したボアホール内ミューオン検出器を用いた断層浅部の探査手法は、既存の測定手法では得る事が難しかった地下数10mから数100mにおける広域の断層破砕帯や上盤下盤に密度差がある断層の姿勢を測定するユニークな手法となる。現在、本検出器の改良型として、検出器直径を120mmから86mmへと小型化することで、陸上掘削において最も多用される86コアで使えるようにし、かつ到来天頂角にも感度を持つ測定器を開発中である。

© 日本地震学会

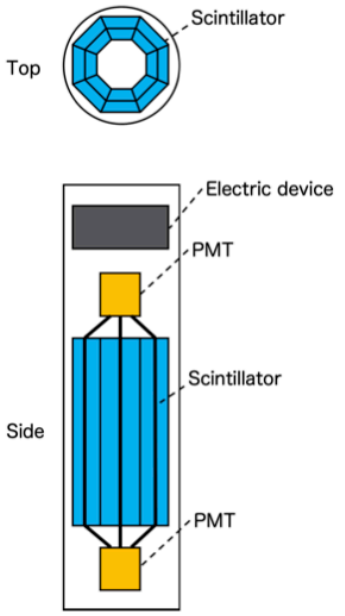


図 1: ボアホール設置型ミューオン検出器の模式図

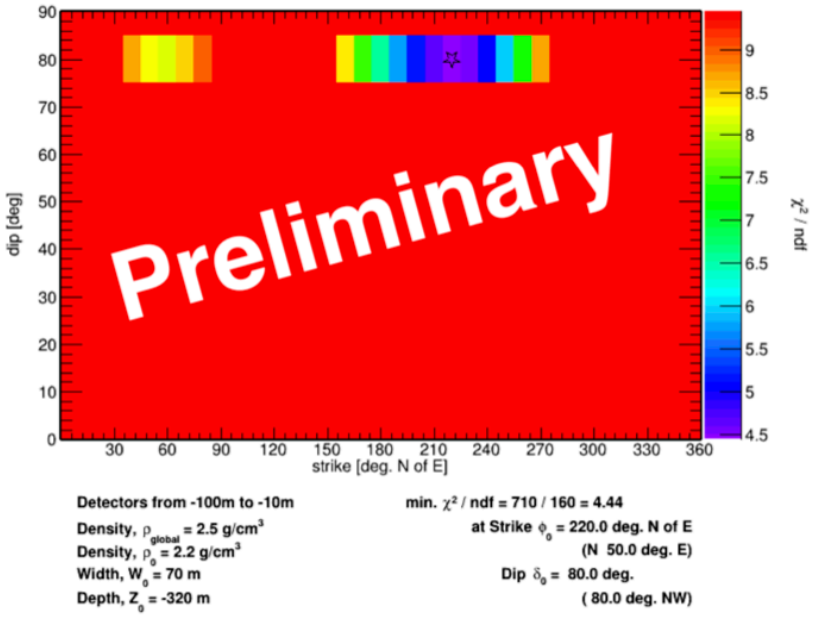


図 2:断層を 1 枚板であると仮定した場合に最も観測データと一致した断層のパラメータと、走行-傾斜平面における χ2 乗/自由度の様子

© 日本地震学会

On-fault geological fingerprint of earthquake rupture direction

*Yoshihiro Kaneko[1], Jesse Kearse[2]

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

How earthquake ruptures evolve and propagate are major outstanding questions in seismology. Our current understanding is limited to modern events captured by seismic networks, making it impossible to observe rupture propagation that occurred during earthquakes in the distant past. Here we propose a new method to discern the rupture propagation directions of past large earthquakes based on geological features preserved on fault slip planes. These features—called slickenlines—are striations formed during seismic slip and record dynamic fault movement during past surface-breaking earthquakes. We develop a theoretical framework that links slickenline curvature with rupture mode and rupture propagation direction for all faulting types and test our model using a global catalogue of historical surface-rupturing earthquakes with seismologically constrained rupture directions. Our results reveal that historical observations are consistent with theoretical predictions, thus providing a robust way to uncover the rupture directions of large earthquakes that lack instrumental data.

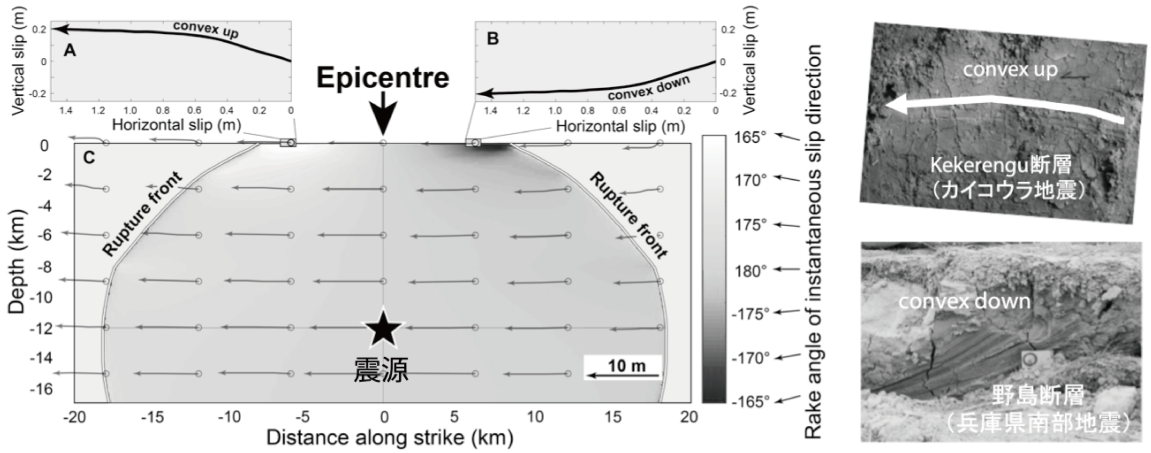


図１：動的破壊シミュレーションから見る断層面上の条線（太い黒の矢印）の特性。背景の色は地震開始から７秒後の条線の方向（レイク角）を表している。震源の左側の方向**A**の地表にある条線はConvex upを示しているが、反対側（方向**B**）はConvex downである。条線の特性は破壊伝播方向に依存し、実際に記録された断層条線の湾曲（右側の写真）と一致する。

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

[S10]PM-1

chairperson:Juichiro Ashi(東京大学), chairperson:Haruo Kimura(電力中央研究所)

Fri. Oct 30, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

[S10-04] Organization and analysis of the aftershocks of Ansei Edo earthquake recorded in various historical documents

○Baba Michito[1] （1.University of Tokyo, Earthquake Research Institute）

1:00 PM - 1:15 PM

[S10-05] Temporal variation of the number of felt earthquakes recorded in the Omihachiman Ichida Family Diary: before and after the 1854 Iga-Ueno and 1854 Tokai-Nankai earthquakes (1842–1868)

○Kentaro Hattori[1], Ichiro Nakanishi[1], Junzo Ohmura[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

1:15 PM - 1:30 PM

[S10-06] Shallow geological structure and cold seep along active faults in the eastern Sagami Bay

○Juichiro Ashi[1], Ken Ikehara[2], Toshiya Kanamatsu[3], Makoto Yamano[1], Ayanori Misawa[2] （1.UTokyo, 2.AIST, 3.JAMSTEC）

1:30 PM - 1:45 PM

[S10-07] The Nankai subduction zone paleoearthquake history reconstructions using sequential radiocarbon dating of total organic carbon of in sediment cores obtained from off Kumano

○Io Miura[1], Juichiro Ashi[1], Natsumi Okutsu[2], Yosuke Miyairi[3], Yusuke Yokoyama[3] （1.The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences, Dept. of Natural Environmental Studies, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

[S10-08] Afterslip on the northernmost Hinagu fault associated with the 2016 Kumamoto earthquake

○Shinji Toda[1], Masayuki Torii[2], Masashi Omata[3], Daisuke Sango[4], Takashi Ishizawa[1] （1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Center for Water Cycle, Marine Environment and Disaster Mitigation, Kumamoto University, 3.Pasco Corporation, 4.Former: Pasco Corporation）

2:00 PM - 2:15 PM

©Seismological Society of Japan

Organization and analysis of the aftershocks of Ansei Edo earthquake recorded in various historical documents

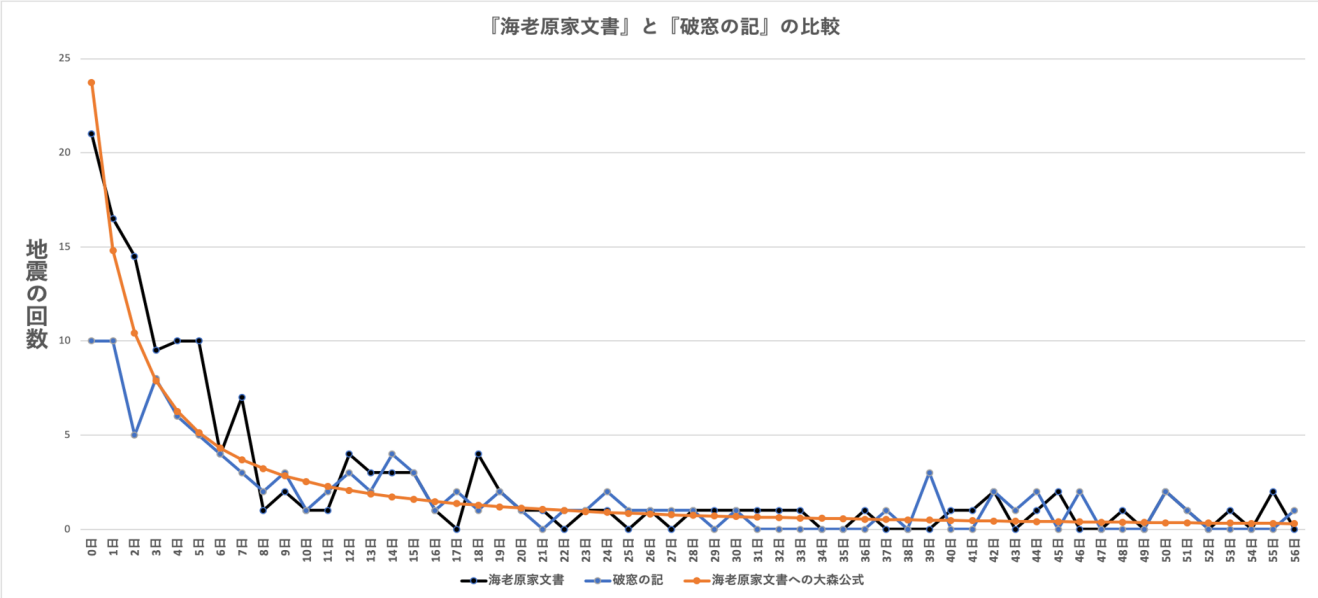
*Baba Michito[1]

1. University of Tokyo, Earthquake Research Institute

安政江戸地震は西暦1855年11月11日の午後10時ごろに発生した地震で,江戸市中で地震動による家屋の倒壊や火災を引き起こした他,関東一円にも大きな被害をもたらした.
安政江戸地震の本震や被災状況の分析は多くの研究で行われている一方で,安政江戸地震の余震活動についての研究は多くない.本研究では,様々な江戸で記録された史料中の余震記録を整理するとともに、それらの史料と江戸近郊で特に詳細な余震記録を含む『海老原家文書』(千葉)を比較することで安政江戸地震の余震活動の分析を試みた.
安政江戸地震の余震活動は様々な史料で記録されており,例えば余震の発生時間や揺れの程度を詳細に記録した『破窓の記』(江戸)や揺れの程度について特に詳細な『なゐの日並』(江戸)などがある.他にも,余震記録を含む資料のうち江戸から離れた地点で記録されたものには『俊純日記』(群馬)や『豊田家日記』(千葉),『飛騨地震年表』(岐阜),『海老原家文書』(千葉)などがある.
『海老原家文書』は千葉県史料財団が『千葉県史』の編さん事業の一環として平成11年(1999)年から平成15年(2003)年12月までの4年5ヶ月にわたり本埜村(現印西市)の海老原文彦家を調査した際に発見された史料の一つで,『安政地震書留之事』として,竜腹寺村(印西市)の海老原善兵衛によって安政江戸地震による被害や余震が記録されている.石瀬他(2019)では『海老原家文書』や『成田村組合村々潰家破損書上帳』などを用いて,安政江戸地震の際の成田市や佐倉市における震度を再決定した.
本研究では上記の史料に加えて,『なゐの後見艸』(江戸),『斉藤月岑日記』(江戸),『山口直毅日記』(江戸),『安政二年乙卯珍話』(江戸),『大沼氏記録』(長野),『中村仲蔵記録』(江戸),『巷街贅説』(江戸),『日記抄』(江戸),『村垣淡路守範政公務日記』(江戸),『別本藤岡屋日記』(江戸),『安政乙卯地震紀聞』(江戸),『大地震大風見聞記』(江戸),『自身の噂』(江戸),『津軽藩御日記』(江戸)なども用いた.
余震について特に詳細に記録された史料のうち,『破窓の記』では丸の大きさ,丸の下に記録された時間で,それぞれ揺れの大きさと発生時を記録している.『海老原家文書』では基本的に「何月何日、昼(または夜)何時に(揺れの大きさ)が何回あった」という形式で余震を記録している.『破窓の記』と『海老原家文書』に記録されている余震記録を1日ごとにプロットすると以下の事が分かった.
まず,安政元年十月から十一月の間に『海老原家文書』にはおよそ140回,『破窓の記』には97回の揺れを記録しているが,安政元年十月二日から十日までの期間で,２つの史料中の余震の記録の数には大きな差があった,また.十月十日以降の揺れの記録数は両史料ともによく一致している.
本研究では,余震活動を評価する方法の一つとして存在する大森・宇津公式(Ustu 1957)を用いた.海老原家文書の余震記録のうち,本震発生直後から十一月末日までの期間で大森・宇津公式をフィッティングしたところ図のようになり,フィッティングした曲線は『破窓の記』で記録された余震記録と本震から３日目以降でよく一致した.このことから,十月二日から五日の間で江戸の史料で見落とされた余震が,『海老原家文書』で記録されている可能性があると考えられる.
『海老原家文書』や『豊田家日記』などの江戸から離れた地域の史料と江戸で記録された史料中の余震記録を比較した.その結果,印西市では,中村(2011)で最大余震とされた十月六日の地震による揺れは大きくなかった可能性がある.また,中村(2011)では十月十二日の余震も最大余震に準ずる揺れとされていたが,『海老原家文書』を記録した地域では大きな揺れを記録していない.他にも,十月七日,十二日,十七日,二十二日,二十五日,十一月一日,の地震が複数の史料で記録されいた.
異なる史料に同一の時間で揺れが記録されていても,異なる地震を記録している可能性がある一方で,余震について詳細に記録した史料を複数比較することで,歴史地震の余震についても震央をより詳しく推定できるかもしれない.
本研究において熱心なご指導をいただいた神戸大学の杉岡裕子教授と『海老原家文書』を紹介していただいた

© 日本地震学会

地震研究所の石瀬素子氏に感謝の意を表します.



© 日本地震学会

Temporal variation of the number of felt earthquakes recorded in the Omihachiman Ichida Family Diary: before and after the 1854 Iga-Ueno and 1854 Tokai-Nankai earthquakes (1842–1868)

*Kentaro Hattori[1], Ichiro Nakanishi[1], Junzo Ohmura[2]

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

The Ichida Family Diary contains the records from 1804 to 1906, and the earthquake records from 1804 to 1872 are transcribed and have been used by several authors to study earthquakes and seismic activity during the period of nineteenth century. The Diary for 1804 to 1872 had been written by four heads (9th to 12th) of the Ichida Family, a merchant based in Omihachiman, Shiga Prefecture and having their branch office in Takasaki, Gunma Prefecture.
Hattori et al. (2020) have noticed the presence of the Takasaki office and also frequent business trips of the heads between Omihachiman and Takasaki and long stay of the heads in Takasaki. They have examined the earthquake records for 1804 to 1841 in the Ichida Family Diary and shown that the observation points of earthquakes in the Diary are divided into Omihachiman, Takasaki, and points on the trips between the two office towns, depending on the location of the writer of the Diary (the 9th and the 10th head).
Figure 1 shows the number of felt earthquakes and the locations where the writer felt the earthquakes for each year of 1804 to 1841 in the Ichida Family Diary. All the earthquakes recorded in the Ichida Family Diary were considered to be felt in Omihachiman and used in earthquake studies. However, a significant number of earthquakes felt in Takasaki are found in the Diary.
In the present paper, we study the earthquake records for 1842 to 1868 in the Ichida Family Diary. This period is fairly different in the situation of the Diary from the preceding period of 1804 to 1841. The 10th head retired and transferred the business of the Ichida Family including the Takasaki office to the 11th head, but the 10th head continued writing the diary after the retirement. Two kinds of diaries written by the 10th and 11th heads exist for 1847 to 1862 and we obtain homogeneous records of felt earthquakes in Omihachiman. Thus the earthquake records of Omihachiman during 1842 to 1868 may be considered much better in quality than those for 1804 to 1841.
Figure 2 shows the yearly number of the earthquakes felt in Omihachiman for 1842 to 1868. The number of the earthquakes may have a peak in 1848 and decrease to once or twice a year right before the occurrence of the 1854 Iga-Ueno earthquake or the 1854 Tokai-Nankai earthquakes. Spatial characteristics of this seismic activity will also be discussed.

© 日本地震学会

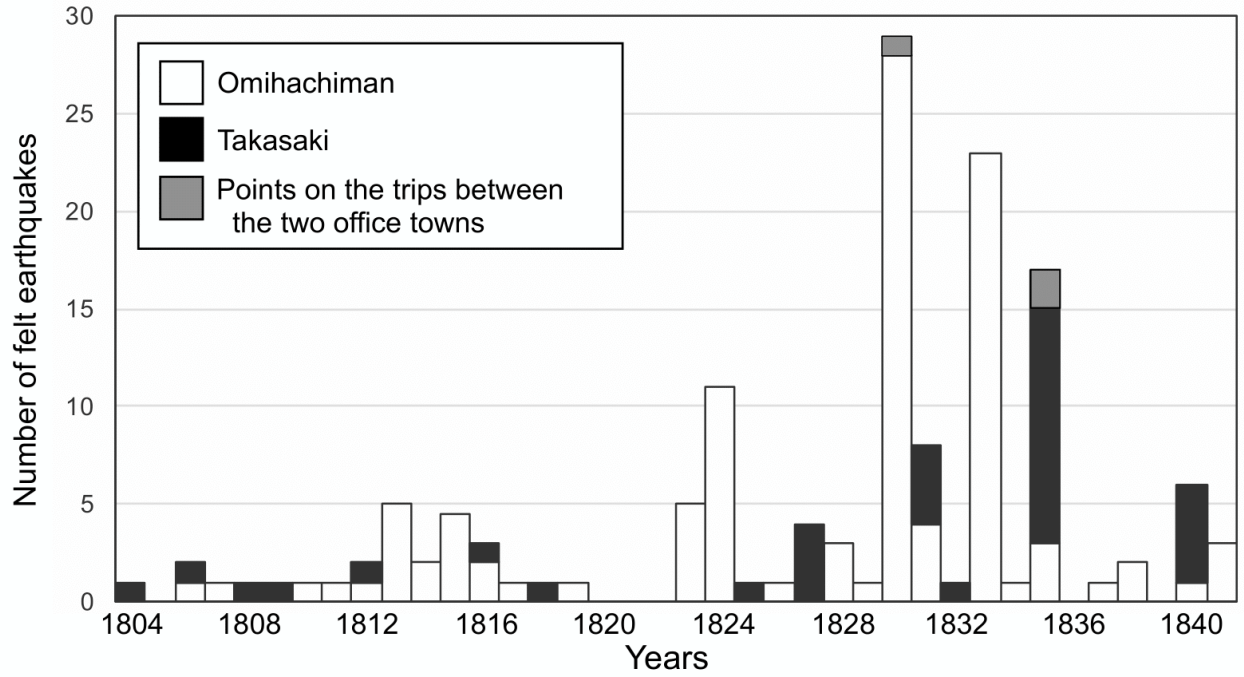


Fig.1 Number of felt earthquakes in the Ichida Family Diary (1804～1841). When the Diary records frequent earthquakes without the number of times, we consider it as three times.

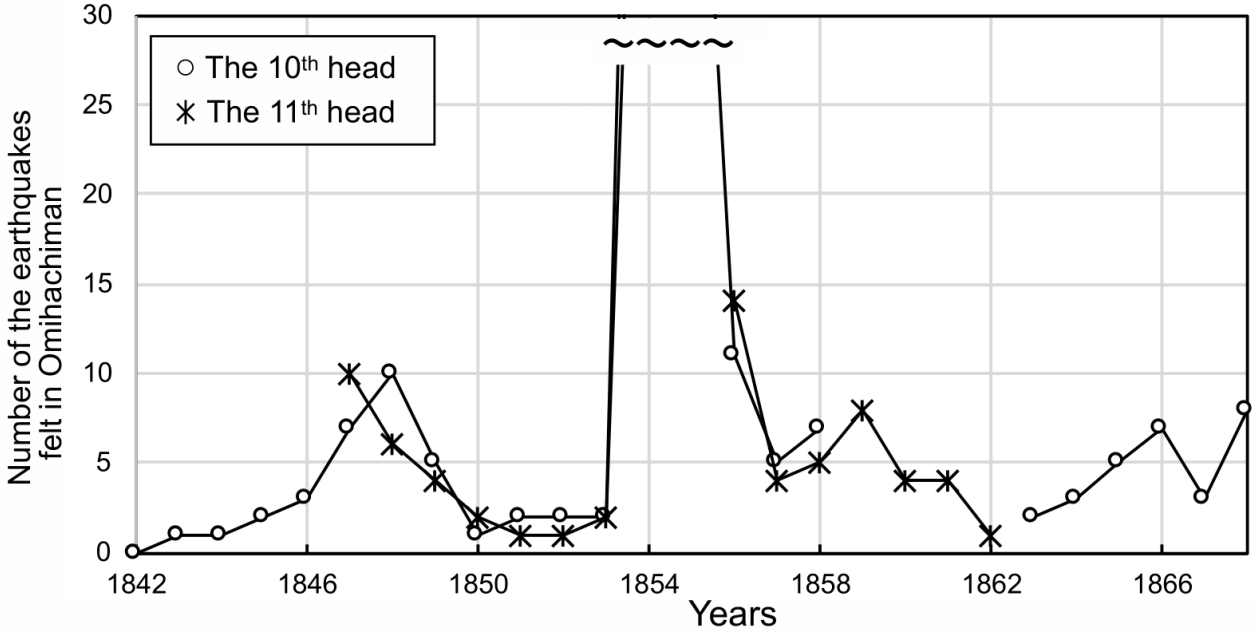


Fig. 2 Number of the earthquakes felt in Omihachiman in the Ichida Family Diary (1842～1868).
When the Diary records frequent earthquakes without the number of times, we consider it as three times.

© 日本地震学会

Shallow geological structure and cold seep along active faults in the eastern Sagami Bay

*Juichiro Ashi[1], Ken Ikehara[2], Toshiya Kanamatsu[3], Makoto Yamano[1], Ayanori Misawa[2]

1. UTokyo, 2. AIST, 3. JAMSTEC

相模トラフ沿いでは巨大地震が繰り返し発生しており1923年大正関東地震の震源域である相模湾東部では，北西－南東方向に海丘が並び，その麓を繋げた相模構造線（木村, 1973, 科学）に活断層が推定されている（活断層研究会編, 1991, 新編日本の活断層）．海陸統合地殻構造調査では，国府津-松田断層の南東延長部に東傾斜の反射面が確認され，プレート境界断層とそこから分岐した断層が捉えられている（佐藤ほか，科学，2010）．しかし，最近の断層活動を議論するに足る海底浅部の変形構造と試料に基づく年代データは得られていない． 海底浅部構造は高周波を用いたサブボトムプロファイラー（以下SBP）で探査されるが，複雑な地形の所では音波が散乱・減衰して構造を捉えることが困難である．本研究は，高分解能の浅部構造探査と断層試料の採取により最近の断層の活動を明らかにすることを目的とした．
白鳳丸KH-10-3，KH-11-9, KH-16-5次航海では，無人探査機NSSに周波数1.5～6kHzのチャープ式音源と受信機を搭載し，海底から高度10 m 程度で深海曳航を行い高解像度のSBP記録を得た．三浦海丘南西斜面の探査では，複数の断面において斜面麓に断層とみられる北東へ約30度で傾斜した反射面を捉えた（Misawa et al., 2020, Geo-Marine Letters）．反射面の上盤側はいずれの地点も無構造であるが，下盤側はほぼ水平な成層構造が認められる地点と崖錐堆積物によるカオティックな構造の地点があった． KH-16-5次航海では，SBPで位置を特定し，ピストンコアラーで断層試料の採取を行った．コア試料は，深度1.2 mまでは暗緑色のシルト質粘土とシロウリガイの貝殻片を含んだ含礫泥層の互層からなる．深度1.2 mから2.6 mまではシルト質の薄層が15 cm前後の間隔で暗緑色の粘土中に挟在する．断層とみられる厚さ約5 mm のゾーンは，深度2.25 mに認められ，シルト質粘土と砂～細礫サイズの岩片から構成される．このゾーンは古地磁気による方位補正の結果，北～東の方向へ30度の傾斜を示し，SBP断面に見られた傾斜した反射面に相当すると解釈される．また，ゾーンの上下の浮遊性有孔虫の放射性炭素年代は，一部逆転がみられるものの，年代差は小さく，変位の小さい副断層である可能性が高い．複数の測線でのSBP記録から，北西－南東方向の断層はミ型の雁行配列をしているとみられ，ジョグの部分のSBP記録ではほぼ鉛直の断層が発達しており横ずれ変位が生じているものとみられる．
コア試料には，シロウリガイの貝殻片と礫からなる層が複数認められ，メタンを含んだ流体の過去の湧出を示す．白鳳丸KH-19-5次航海では，斜面基部を中心に生きたシロウリガイが広く分布し，限定的な分布ではあるがシンカイヒバリガイの生息も確認した．一般的にシンカイヒバリガイは高濃度のメタン湧出域に生息していることから，この地点でのメタン湧水が活発であることを示唆する． この地点では，冷湧水の湧出変動を調べるため，自己浮上式熱流量計を設置し約1年間の長期観測を実施中である．

© 日本地震学会

The Nankai subduction zone paleoearthquake history reconstructions using sequential radiocarbon dating of total organic carbon of in sediment cores obtained from off Kumano

*Io Miura[1], Juichiro Ashi[1], Natsumi Okutsu[2], Yosuke Miyairi[3], Yusuke Yokoyama[3]

1. The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences, Dept. of Natural Environmental Studies, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

南海トラフ沿岸における古地震履歴は，Garrett et al.（2016, Quaternary Science Reviews）によってまとめられ，各地域(セグメント)の地震発生履歴を概観することができる．しかし，コンパイルされた先行研究の多くは陸域のデータを用いたものであり，震源近傍の海域のデータを用いた例は限られる．

海底堆積物は，洪水や海底地すべり，地震といったイベントを記録しており，その堆積物の年代を調べることでイベントの発生年代が推定される．通常，海底堆積物の年代は，火山灰との対比，浮遊性有孔虫の放射性炭素（^{14}C）年代などを用いて推定することが多い．しかし，浮遊性有孔虫化石の産出に乏しく，浮遊性有孔虫の^{14}C ($^{14}C_{foram}$)年代測定に必要な量を得られない場合がある．また，地震履歴を推定するために，洪水性などの他の要因のものを排除し，イベントが地震性であることを確認する必要がある．

本研究では，浮遊性有孔虫化石の産出の少ない南海トラフの試料において，全有機炭素の放射性炭素($^{14}C_{TOC}$)年代測定を高密度で測定することにより，地震性イベントの発生年代を高精度で推定した．本研究で用いた試料は，学術研究船「新青丸」のKS-14-8航海において，熊野沖の閉鎖型海盆から採取されたマルチプルコア試料，およびピストンコア試料である．この試料採取地点は，熊野川河口から南東に約80kmの地点に位置する外縁隆起帯に発達した小海盆であり，海底谷に直結していないことから，洪水などの陸からの直接的な土砂の影響を受けにくい．本研究では，海盆内の凹地(2372 m 地点)と凸地(2255m地点)からそれぞれ試料を採取した．これらの試料を，肉眼観察，X線CT画像による内部構造観察を行った後に，$^{14}C_{TOC}$年代測定用の試料をサンプリングした．測定は東京大学大気海洋研究所に設置されているシングルステージ型加速器質量分析装置を用いた．その後，得られた年代は年代較正プログラムOxCal 4.4にて補正した．補正後に得られた放射性炭素年代とOkutsu et al. (2020, JpGU Abstract)によって得られた火山灰，$^{14}C_{foram}$年代を比較し，高密度測定$^{14}C_{TOC}$年代の有用性について検討した．

凹地のピストンコア(全長6.7m)のX線CT画像観察には，イベント層が18枚，火山灰層が1枚観察された．コアの深度に対する年代モデルにおいて，火山灰，$^{14}C_{foram}$年代を用いて堆積速度を推定すると，深度2.5 - 3.1mで，およそ40 cm /kyrであり，それ以外の深度では，およそ70 cm/kyrである．$^{14}C_{TOC}$年代モデルでもほとんど同様の堆積速度であるが，深度2.5 - 3.1 mにおいて堆積速度が変化する傾向も見られた．

凸地のピストンコア(全長7.1m)では，イベント層が14枚，火山灰層が2枚観察された．コアの深度に対する年代モデルにおいて，火山灰，$^{14}C_{foram}$年代を用いて堆積速度を推定すると，約30 cm/kyrであり，$^{14}C_{TOC}$年代も同様の堆積速度であった．

このことから，高密度の$^{14}C_{TOC}$年代と限定された層準における$^{14}C_{foram}$年代，火山灰から推定された年代を組み合わせ，$^{14}C_{TOC}$年代との年代差(炭素リザーバー効果)を差し引くことで，高分解能な年代決定ができることが示された．

現在，得られているデータから，$^{14}C_{foram}$年代との年代差は，凹地ではタービダイト層をのぞいて，813 - 1501年，凸地では1656 - 2071年古くなっており，深くなるほど年代差が広がるという傾向が見られてい

© 日本地震学会

る．今後はそれらをさらに検討することで，より高精度な年代決定が期待される．

© 日本地震学会

Afterslip on the northernmost Hinagu fault associated with the 2016 Kumamoto earthquake

*Shinji Toda[1], Masayuki Torii[2], Masashi Omata[3], Daisuke Sango[4], Takashi Ishizawa[1]

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Center for Water Cycle, Marine Environment and Disaster Mitigation, Kumamoto University, 3. Pasco Corporation, 4. Former: Pasco Corporation

平成28年4月16日に発生した熊本地震（M7.3）では，日奈久断層帯高野–白旗区間北部（日奈久断層北端）から布田川断層帯布田川区間沿い約30kmにわたって地表地震断層が出現した（熊原ほか，2016）．地震断層沿いの最大右横ずれ変位は2.2mであるが，国土地理院電子基準点やALOS-2による干渉SAR解析からは，広域での地震時変動が捉えられた．さらに，衛星測地の結果からは，地震後も地震時変位と同じセンスの余効変動がさらに広域に継続的に生じていることがわかり，震源断層の余効すべりと下部地殻の粘弾性変形によってモデル化された（例えば，Pollitz et al, 2017）．また，中尾ほか（2018）は，GNSS臨時観測から日奈久断層帯で約21cmの余効すべりを推定した．今回，著者らは本震後約４年間に不定期に地震断層を確認した結果，日奈久断層北端の御船町高木地区において目視判別できるほどの顕著な余効すべりを確認したので報告する．

地震後１年間の最も明瞭な変化が確認されたのは，高木地区給油所裏のブロック塀である（図１）．テープ計測のため精度は高くないが，地震時には50cmだった右横ずれ（図１c）が１年後には約70cmにまで成長し，ブロックの剥離も確認されている（図１d）．また，本震の10ヵ月後に新設されたブロック塀にも約５cmの右横ずれが生じている（2020年８月時点）．さらに，その他３箇所で地震後に修復されたアスファルト上に右横ずれに整合的な杉型雁行亀裂や1-2cm程度の上下変位，最大3cm程度の右横ずれ変位が認められた．

GNSSデータによる推定ではあるが，一般にプレート境界型の巨大地震では余効すべりの報告例は多い（例えば，1994年三陸はるか沖地震や2011年東北沖地震）．陸上では，サンアンドレアス断層帯上の1966年，2004年パークフィールド地震や2014年南ナパ地震が顕著で，地震時変位と同等かそれ以上の数10cmもの変位が確認されている（Lienkaemper & McFarland, 2017; Lienkaemper et al., 2016）．一方，日本列島内陸では，これまで余効すべりが地震断層上で目視確認されたことはない．間接的に1974年伊豆半島沖地震（M6.9）石廊崎断層にて断層を挟む四辺長計測の結果，地震後２年間に7-25mmの余効すべりが報告されているのみである（宮沢・衣笠，1977）．なお，干渉SARからは布田川断層・出ノ口断層沿いにも部分的に余効すべりが確認されているが，現地で目視判別できる地点は認められない．「不完全な破壊」に終わった日奈久断層側で顕著な余効すべりが発生している事実は，今後の地震活動を評価するうえで重要であり，未破壊区間の長期評価にも影響する可能性がある．

謝辞：本研究に用いたALOS-2データは、ALOS-2PIプロジェクト（PI No.3183）のもと、JAXAより提供を受けたものである．

文献：Lienkaemper & McFarland (2017) BSSA, 107, 1082. Lienkaemper et al. (2016,) SRL., 87, 609.　熊原ほか（2016）日本地球惑星科学連合大会要旨．宮沢・衣笠（1977）地質調査所特別報告，6, 105. 中尾ほか（2018）平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査報告書．Pollitz et al. (2017) GRL., 2017, 44, 8795.

© 日本地震学会

図１．余効すべりが確認された地点. a)矢印が確認地点. 基図は熊原ほか（2016）. b）地震後に修復された路面に出現した雁行亀裂群. c）地震直後のブロック塀の変位, d）１年後のブロック塀の変位.

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]PM-2

chairperson:Naofumi Aso(Tokyo Institute of Technology)

Fri. Oct 30, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM C

[S08-01] Quantitative comparison between the radiation-corrected EGF and the conventional EGF

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

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

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-02] Initial rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake inferred from 2D/3D source imagings

○Ryo Fujimoto[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1] （1.Graduate school of natural science and technology OKAYAMA UNIVERSITY）

2:45 PM - 3:00 PM

[S08-03] Physical mechanisms of the 2017 Pohang earthquake, South Korea

○Toshiko Terakawa[1], Wooseok Seo[2], Kwang-Hee Kim[2], Jin-Han Ree[3] （1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Pusan National University, South Korea, 3.Korea University, South Korea）

3:00 PM - 3:15 PM

[S08-04] Time dependent changes in aftershock activities of the 2016 Central Tottori Prefecture Earthquake revealed by dense seismic observation

○Yoshihisa Iio[1], Satoshi Matsumoto[2], Joint aftershock observation group of the Central Tottori Prefecture earthquake （1.DPRI, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanoloty, Kyushu University ）

3:15 PM - 3:30 PM

©Seismological Society of Japan

Quantitative comparison between the radiation-corrected EGF and the conventional EGF

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

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

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

しかしながら、地震波形の複雑性に大きく寄与する観測点近傍の経路がほぼ共通であれば、震源位置やメカニズムが多少異なる地震の波形でも、放射パターンの影響を補正した上でグリーン関数として用いることができる可能性がある。そこで本研究では、波形インバージョンの放射パターンを考慮した経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン手法を開発し、理論波形を用いてテストを行った。具体的には、波線理論を仮定して、射出角とモーメントテンソルの情報から、対象とする地震の小断層での滑りと経験的グリーン関数に用いる地震について理論的な放射パターン(Aki and Richards, 2002)を計算し、その比を用いてP波・SH波・SV波のそれぞれについて観測点毎に補正をおこなった。

我々はこの新手法を、本震(target event)と経験的グリーン関数として用いる地震(reference event)の理論波形を用いた合成テストに適用した。この合成テストでは、放射パターンを補正した経験的グリーン関数(新手法)を用いた場合と補正しない経験的グリーン関数(従来手法)を用いた場合の結果を、各地震の震源位置とメカニズム、観測点の配置の設定が同じ条件で比較した。我々はこの試行を下記に示す①と②をそれぞれ組み合わせた9つのケースについてそれぞれ200回ずつ繰り返した。

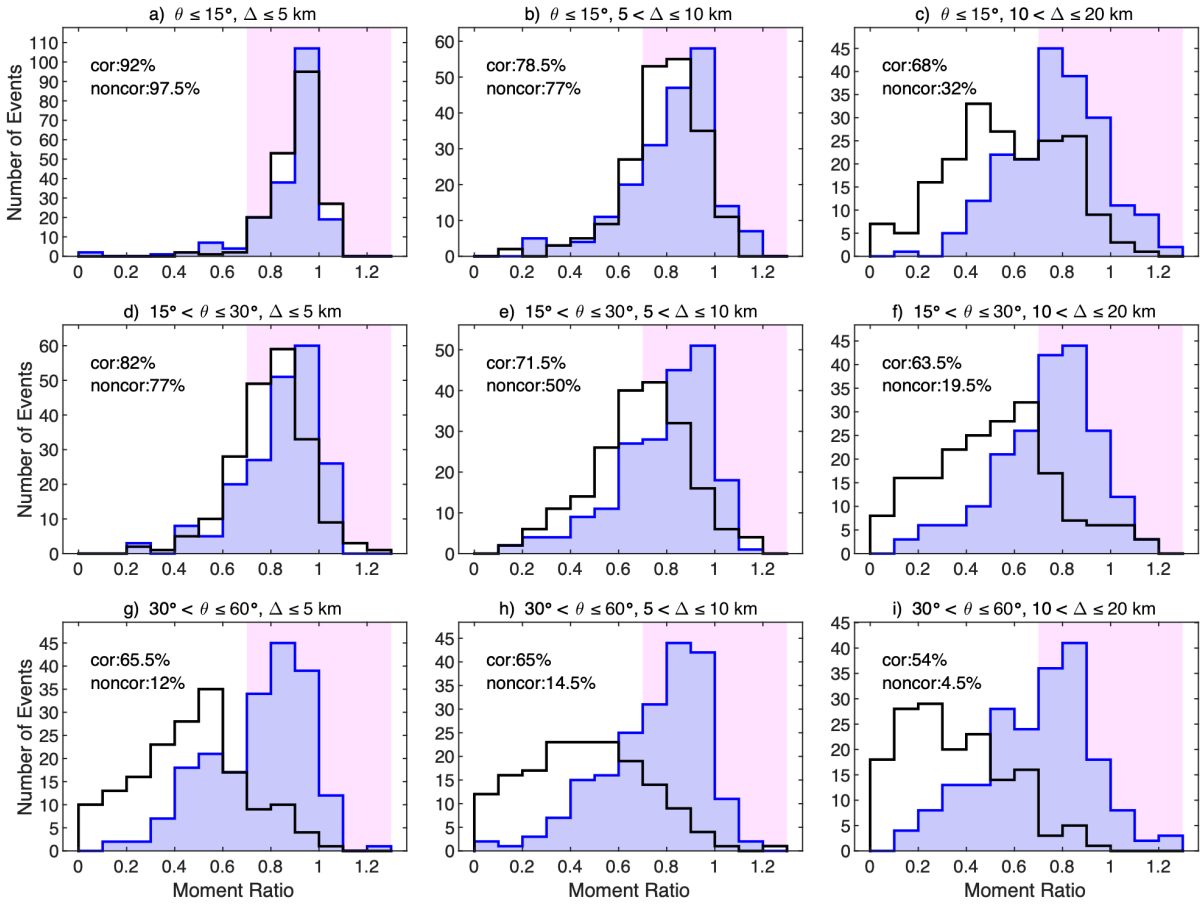
①target eventとreference eventの震央間の距離(Δ)についてΔ ≦ 5 km、5 < Δ≦ 10 km、10 < Δ≦ 20 kmの3ケース
②target eventとreference eventのカガン角(θ)についてθ ≦ 15 度、15 < θ≦ 30 度、30 < θ≦ 60 度の3ケース

速度構造としてJMA2001(上野ほか, 2002)を仮定し、target eventとreference eventの深さは全て9.99kmとした。target eventとreference eventの理論波形はfkアプリケーション(Zhu and Rivera, 2002)を用いて計算した。また、target eventとreference eventのモーメントマグニチュードは同じ値としており、推定されるモーメント比(モデルパラメータ)は1になるはずである。

以下の図は、上述した9つのケースごとに、２００サンプルのインバージョンのモーメント比の分布を示したものである。各ケースについて、Δとθが所定の範囲内になるようにサンプルを生成している。青と白の分布は、それぞれ放射パターンを補正した新手法と補正しない従来手法による結果の分布を表している。赤く塗ったゾーンは推定されたモーメント比が0.7～1.3の範囲であり、cor:、noncor:の後に記された数値はそれぞれ新手法と従来手法のうち赤いゾーンに入った割合を示している。

© 日本地震学会

合成テストの結果、多くのケースで放射パターンの補正によりモーメント比が改善された。しかしながら、本研究では直達波のみについて放射パターンの補正を行なっている一方で、自由表面には直達波とは異なる放射を持つ比較的大きな変換波や反射波が存在するため、多くのサンプルではモーメント比が正確に1とはならないことがわかった。そこで、本研究では、各ケースについて結果を比較して、経験的グリーン関数として用いることが妥当な範囲を検討した。



© 日本地震学会

Initial rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake inferred from 2D/3D source imagings

*Ryo Fujimoto[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1]

1. Graduate school of natural science and technology OKAYAMA UNIVERSITY

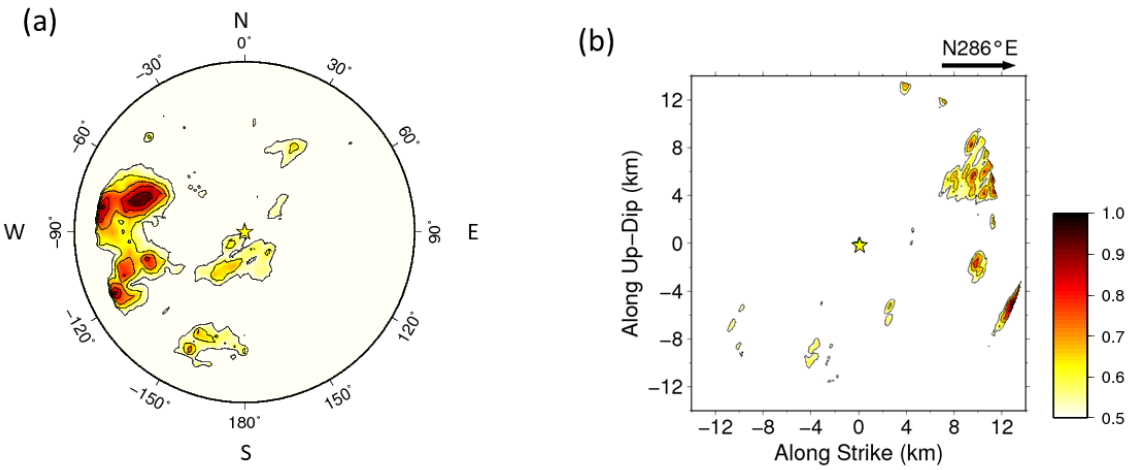
2018年9月6日北海道胆振東部を震源とする*M*JMA6.7 の地震が発生した。本研究ではソースイメージング法(Takenaka *et al*, 2009, EPS)を用い、地震波の放射強度の時空間変化から、初期の破壊過程を推定する。

この地震は震源近傍の地下構造や余震分布が複雑であるため、その破壊過程も複雑であると考えられる。そこではじめに、破壊過程の推定に断層面の仮定を必要としない3次元のソースイメージング法を、発震から4秒間に対して適用した。次に、気象庁初動発震機構解の断層パラメータを基に仮定した、走向286˚、傾斜48˚の断層面で2次元のイメージングを実施した。解析には気象庁、北海道、札幌市の震度観測点、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net観測点で記録された加速度波形記録を積分した、速度波形の上下動成分のP波部分を使用した。また、震源は気象庁一元化震源(北緯42.691˚、東経142.007˚、深さ37.0 km)を採用した。

発震から4秒までの3次元イメージングの結果、発震から約3秒以降に、震源の北西から南西方向で放射強度の強い領域が見られた。この3次元イメージングの結果は気象庁初動発震機構解の北傾斜の節面と調和的であった。そこで、これを断層面と仮定した2次元のイメージングを実施した。その結果、同じく発震後から約3秒以降に震源の北西から南西方向で、放射強度の大きな領域が見られた。これらの結果より、発震後に震源から広がっていった破壊が発震から約3秒後に、震源の北西から南西方向で大きなすべりを引き起こしたと推定される。この震源の北西から南西方向の放射強度の大きな領域は、気象庁の推計震度分布図における震央西側の揺れの大きな領域の存在と調和している。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net及び気象庁、北海道、札幌市の強震観測データを使用しました。

© 日本地震学会



発震後4秒間のイメージング結果.放射強度の変化を色の濃淡で示す.図中央部の黄色の星印は震源.(a)3次元のイメージング結果.イメージング範囲は半径16 km,震源から鉛直上下に15 kmの円筒状領域で,放射強度の鉛直方向の最大値を表示. (b) 2次元のイメージング結果.走向286°,傾斜48°の断層面を仮定.

© 日本地震学会

Physical mechanisms of the 2017 Pohang earthquake, South Korea

*Toshiko Terakawa[1], Wooseok Seo[2], Kwang-Hee Kim[2], Jin-Han Ree[3]

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Pusan National University, South Korea, 3. Korea University, South Korea

浦項（ポハン）地震は，2017年11月15日に韓国南東部の浦項市を震源に発生した中規模地震（M_w5.5）である．プレート境界から数百km以上離れた韓国において，この浅い地殻内の地震は2016年慶州地震と共に韓国観測史上最大級の地震であり，韓国社会に数世紀内で最も甚大な被害を引き起こした．しかも，この最大級の地震は，韓国国家プロジェクトとして進められていた浦項地熱開発の発電所内で発生した．このため，この地震は，学界だけでなく一般社会からも大きな注目を集めている．韓国政府により地震後直ちに組織された国際調査団は，詳細な調査・研究を基に，2019年3月，この地震は地熱開発による注水（最大坑口圧：PX1: 27.2 MPa, PX2: 89.2 MPa）が原因で発生したものであると結論付けた（Korean Government Commission, 2019; Ellsworth et al., 2019）．この結論の最も重要な根拠は，浦項地震が約0.5 km^{2}という局所的な注水域内（注水井の到達深度： 4.2 ～ 4.3 km）を震源に発生したという事実である．しかし，震源域での間隙流体圧レベルや，本震に続く活発な地震活動の駆動メカニズムはよくわかっていない．

本研究では，地震のメカニズム解から応力場と間隙流体圧場を推定する２つの逆解析を通じて，この地震の発生メカニズムを考察する（Terakawa et al., 2020）． まず，Kim et al. (2020) による91個の地震のメカニズム解（データ期間：2017年11月15日～2018年3月18日，前震2個，本震，余震88個）をデータに，CMTデータインバージョン法（Terakawa and Matsu’ura, 2008）により，震源域周辺域（東西：14 km，南北：11 km，深さ：7 km）の応力場のパターンを推定した．対象地域の応力場は東西圧縮の横ずれ断層型と推定され，これは浦項地震発生前のより長い期間（6～20年間）のデータを用いた応力インバージョンの結果（Chang et al., 2010; Soh et al., 2018）とよく一致する．本研究で用いたデータの大部分は余震であるが，浦項地震前後で応力場のパターンに大きな変化が見られないことは，震源域の絶対応力が応力降下量に比べて有意に大きいレベルにあることを示唆する．また，この応力場の特徴は，西南日本の応力場とよく似ており，フィリピン海プレートの沈み込み運動が海溝から数百km以上も離れた背弧の応力場を形成する原因であることを示唆し，大変興味深い．

次に，この応力場と対象領域での応力直接測定により推定された摩擦係数の値（0.4）（Hofmann et al., 2019）を基に，同じデータセットから地震メカニズムトモグラフィー法（e.g., Terakawa et al., 2010）により対象領域の平均的な間隙流体圧場を推定した．震源の近傍には，注水井の開口部付近にピークを持つ間隙流体圧の高まりがあり，最大間隙流体圧（の静水圧からの超過圧力）は8 ±3MPaであった．これは注水による最大坑口圧の1/10程度に相当し，静水圧からの超過圧力を静岩圧と静水圧の差で規格化した無次元量（間隙流体圧係数C）ではC = 0.12となる．

浦項地震本震のメカニズム解は，走向227度，傾斜75度，すべり角143度の逆断層成分を含む右横ずれ断層タイプであった．この断層は，震源域の応力場に対する最適面の補助面に近い向きであり，十分な剪断応力を蓄積しながら，法線応力が高いために滑りにくい断層であった．簡易的に震源域での間隙流体圧の時間発展を調べたところ，前震の発生から本震の発生まで間隙流体圧レベルが増加する傾向が見られた．その後，間隙流体圧は急速に減少し，本震発生から8時間程度で静水圧に戻ることがわかった．本震の断層強度の低下量は約7 MPaと見積もられ，これは数千年間の応力蓄積量に対応する大きな値である．この結果は，注水が浦項地震の発生に重要な役割を果たしたことを支持する．浦項の南方40 kmでは，2016年に慶州地震（M_w 5.4）が発生しており，浦項にも地震を引き起こすに足る十分な応力が蓄積されていただろう．点震源で考えると，最適面とその補助面でのすべりは同じ変形を引き起こす．つまり，注水で弱くなった補助面で地震すべりが始まれば，周辺域の応力は効率よく解放され，これにより浦項地震は注水量に比べて規模の大きな地震へと成長した

© 日本地震学会

可能性がある.

Terakawa et al. (2020), doi:10.1029/2019GL085964

© 日本地震学会

Time dependent changes in aftershock activities of the 2016 Central Tottori Prefecture Earthquake revealed by dense seismic observation

*Yoshihisa Iio[1], Satoshi Matsumoto[2], Joint aftershock observation group of the Central Tottori Prefecture earthquake

1. DPRI, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanoloty, Kyushu University

2016年10月21日に発生した鳥取県中部地震(Mj6.6)の余震域に、本震発生の翌日早朝から設置を開始した69点の高感度地震計および周辺の高感度定常観測点のデータを用いて、10月22日から12月15日までの約2か月間に発生した余震の震源とメカニズム解を正確に決定し、地震発生と応力場や流体との関係の解明を目指して、それらの時間変化を調べた。

最初に、余震数がほぼ同じとなるように解析期間を2分割し、メカニズム解のパラメータの時間変化を調べた。断層付近を境に余震域を東部と西部に分け、5km×5km×5kmの領域毎に、T,P軸の方位と傾斜角の変化の有無を、KS-testによって検討した。その結果、ほとんどの領域においては、各パラメータの分布が前半・後半の2つの期間で同一であるという帰無仮説が棄却されなかったが、余震域西部の浅部、深さ0～5kmにおいて、T,P軸の方位角の両方において、帰無仮説が棄却された領域が見つかった。つまり、そこでは、T,P軸の方位角が時間変化していることが示された。深部においても、いくつかの領域で帰無仮説は棄却されたが、複数のパラメータで系統的にみられておらず、また、サンプル数が少ないため、その解釈は難しい。

上記では、時間変化の有無を定量的に調べるために、5km×5km×5kmの領域毎というやや広い領域における分布の形を検討したが、T軸の方位の空間分布とその時間変化をより細かく見てみると、浅部において断層からやや離れた地域で、かつ、本震における静的な応力変化が圧縮場となっているところで、T軸の方位の特に大きなものが時間とともに減少している傾向が見られた。これらは、数が少ないため、上記のtestでは検知されなかったものと推定される。また、本震断層近傍における時間変化の有無をKS-testにより検討したところ、本震断層近傍ほど、帰無仮説が棄却されない傾向が見られた。本震断層に近いほど余震数が多いので、この結果の解釈は慎重に行うべきだが、これらの結果は、本震断層近傍では余震活動は時間的に安定しているが、本震断層から離れたところでは、時間変化している可能性が示唆される。
以上のように、鳥取県中部地震の余震域において、特に本震断層に近い余震が多く発生しているところでは、本震の数日後から約2か月間は、震源分布やメカニズム解の時間変化は見られなかった。このことは、鳥取県中部地震の余震活動が、基本的には、高い流体圧による強度低下によってコントロールされていないことを示している。しかしながら、5km×5km×5kmのいくつかのサブ領域では時間変化が検出された。また、本震断層から離れた浅部の本震における静的な応力変化が圧縮場となっているところでは、サンプル数が少ないため有意であることを定量的には示すことが出来ていないが、時間変化している可能性が示唆された。時間変化している可能性のある領域が静的な応力変化と関係することは、時間変化が応力変化に起因することを示唆しているが、本震断層近傍ではなくやや離れたところで見出されたことは、この時間変化が本物であるとしても、単純に静的な応力変化だけで説明できるものではないことを示唆している。

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]AM-1

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

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 10:15 AM ROOM C

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

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

9:00 AM - 9:15 AM

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

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

9:15 AM - 9:30 AM

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

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

9:30 AM - 9:45 AM

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

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

9:45 AM - 10:00 AM

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

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

10:00 AM - 10:15 AM

©Seismological Society of Japan

Campaign Observations of Deep Long-Period Earthquakes in Eastern Shimane

*Naofumi Aso[1], Nozomi Terai[1]

1. Tokyo Institute of Technology

深部長周期地震（低周波地震）は、深さ10–45km程度で発生し、マグニチュード2以下と規模が小さいにも関わらず、2–8Hzの低周波の地震波を放出する地震である。プレート境界型の低周波地震と並んで、火山地域で発生する長周期地震は、ゆっくりと変形する特異な現象である。プレート境界型の低周波地震が滑り現象である一方で、火山型の長周期地震の物理メカニズムはよく分かっていない。特に、現象を駆動する励起プロセスと、単色的な地震波を放出する共鳴プロセスについて、整合的な説明が必要である。励起プロセスとしては、プレート運動による歪みの蓄積や、マグマ起源の流体の移動のほか、不均一に冷却するマグマに発生する非等方的な熱応力も加担しているかもしれない［Aso and Tsai, 2014］。
火山型深部長周期地震を物理的に理解するためには、様々な観測事実を積み上げる必要がある。殆どが活火山周辺に分布していること、一部は火山フロントから離れて活動があること［Aso et al., 2011, 2013; Vidale et al., 2014］、深さ方向にはモホ面周辺に幅広く分布していること［Hasegawa et al., 1991; Nichols et al., 2011］、しばしば震源メカニズム解には非等方成分が含まれること［Nakamichi et al., 2003; Aso and Ide, 2014; Oikawa et al., 2019］、等方成分の潮汐応力に応答する可能性［Han et al., 2018］などである。
火山型の深部長周期地震の発生原因を探るためには、現象による変動を運動学的に理解することが本質的に重要である。特に、初期の励起プロセスの解明には、地震波の初動を正確に捉える必要がある。そのために今年、広島県庄原市にて臨時観測を行った。Aso and Ide［2014］により求められた震源メカニズム解によると、この地域では大きなP波の射出が期待される。4つの地震計を約200m間隔で配置することで小規模なアレーを構成し、200Hzサンプリングで収録した。7月現在で4ヶ月間のデータを取得し、深部低周波地震による波形がいくつか確認された。また、連発する特徴や、複数のフェーズの混在が確認された。

© 日本地震学会

Uncertainty estimation for the thermal structure of subduction zones based on surface heat flow measurements

*Manabu Morishige[1], Tatsu Kuwatani[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

沈み込み帯における多様な地震活動を議論する際の最も基本的な情報の1つは、温度である。そして温度構造を推定する手法の1つとして、物理モデリングが良く用いられる。この手法では多くの場合、フォワード計算を繰り返し行うことで観測データからの制約を満たすようなモデルパラメータの組み合わせ(さらにそこから得られる温度構造)を求めるが、(1)モデルパラメータの不確かさを評価することが難しい、(2)観測データをより良く説明するモデルパラメータの組み合わせが存在する可能性がある、(3)観測データの誤差を考慮していない、といった問題点がある。本発表ではこれらの問題に取り組むための枠組みとして、東北地方とカスカディアの地殻熱流量データを用いてベイズの定理に基づき5つのモデルパラメータを同時推定する例を紹介する。

熱流量の予測は2次元定常状態における質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則に基づく方程式を解くことで行う。推定するモデルパラメータは、(1)スラブとその直上のマントルの運動がデカップルする深さ(D_{dec})、(2)大陸上部地殻内の放射性元素の崩壊による発熱量(H_{UCC})、(3)沈み込むプレート境界における有効摩擦係数(μ')、(4, 5)マントルウェッジ内の粘性率の温度依存性と絶対値をそれぞれ支配するパラメータ、である。マルコフ連鎖モンテカルロ法の1つであるメトロポリス法を用いて、事後確率分布に従うようなモデルパラメータのサンプリングを約3万回行う。

そのようにして得られたモデルパラメータの集合は多くの情報を持つ。例えば東北地方ではD_{dec}は80±10 km程度であり、これは先行研究によって報告された値と合っている。また東北地方ではH_{UCC}とμ'の間に強い負の相関関係があり、これは地殻熱流量データからだけではこの2種類のモデルパラメータを同時に推定することが難しいことを示唆している。さらに我々が物理モデリングによって予測した熱流量は観測データの平均よりも少し低い値となることが分かった。これは熱伝導率の不確かさを考慮して、観測データの誤差を一定値ではなく、データの値の15%と仮定したためである。

今回は地殻熱流量データのみに焦点を当てているが、ここで用いた手法を複数の種類の観測データに対して適用することで、温度構造をより高い信頼度(より小さな不確かさ)で決定することができる。そのようにして得られた温度構造を用いることで、地震活動に対する理解がさらに大きく進むと期待できる。

© 日本地震学会

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

*Kazutoshi Imanishi[1], Akemi Noda[2]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

1．はじめに
西南日本、特に近畿地方では、ほとんどの被害地震が南海トラフ沿いの大地震前後（概ね発生前50年から発生後10年）の間に発生していることが知られている（宇津 1974; Hori & Oike 1996）。この観測事実は、内陸地震がプレート境界の固着の状態に呼応して発生していることを示唆している。言い換えると、日常的に発生している小地震も含めて発生状況を調べることでプレートの固着状態をモニタリングできる可能性がある。今西・野田（JpGU-AGU Joint Meeting 2020）は、内陸で発生している地震の発震機構解がプレート境界のすべり欠損により作られる応力場に調和的かどうかを判定し、内陸の応力場の時間変化を調べる方法を提案した。この方法を西南日本に適用したところ、数年ほどの周期で応力場が時間変化していることが示された。彼らは西南日本を4つの領域に区分して検討を行ったが、区域分けには任意性が残されていた。本研究ではこの任意性を排除したうえで、改めて時間変化の特徴について調べた結果を報告する。

2．手法およびデータ
ある地震が参照とする応力場に調和的に発生しているか否かを評価するパラメータとして、ミスフィット角（仮定した応力場から計算されるすべり角とメカニズム解のすべり角との角度差）が有効であることが示されている（Terakawa et al., 2016; Yukutake et al., 2020）。本研究でもこのパラメータに着目し、南海トラフのプレート間固着と内陸の応力場との関連を調べる。解析手順は以下のとおりである。
（1）プレート境界のすべり欠損により作り出される陸域の深さ10kmにおける応力テンソルを0.1°毎に計算する。
（2）それぞれの発震機構解の震源位置に最も近いグリッドの応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。
（3）ミスフィット角の移動平均（1年）を取り、時間変化を推定する。誤差はブートストラップ法により計算する。
本研究では区域分けの任意性を排除するため、西南日本に0.5°間隔のグリッドを配置し、それぞれのグリッドの半径100km以内の地震を用いて上記の計算を行う。
発震機構解は気象庁一元化カタログ（1997年10月～2020年7月）に加えてJUNECカタログ（Ishibe et al, 2004）（1985年7月～1998年12月）を使用した。2つを統合することで、35年間に及ぶ発震機構解カタログとなる。実際の解析では、デクラスタリング（Reasenberg, 1985）処理後の深さ25km以浅の地震を使用した。すべり欠損モデルについては、2005年3月～2011年2月のGNSSデータを用いて推定されたNoda et al. (2018)のモデルを使用した。

3．結果と解釈
発震機構解が十分あるメッシュにおいては、いずれもミスフィト角は数年ほどの周期で変動していることが明らかとなった。変動の振幅は10～30°程度である。この周期性の変化は誤差を考慮しても有意である。本研究では南海トラフのすべり欠損に対する応答を見ていることから、この観測結果は、南海トラフ沿いの固着が数年周期で強くなったり弱くなったりしていることを反映しているのかもしれない。このような周期性の応力変化は、近畿北部における原位置応力の繰り返し測定からも報告されている（田中ほか, 1998）。もし応力場の時間変化が真実であれば、地殻変動観測データにもその影響を見いだすことができるはずである。そこで、1996～2011年（東北沖地震直前まで）のGNSS時系列データから１年ごとの変位速度（水平2成分）を求め、さらにShen et al. (1996)の方法により歪み速度（水平歪み3成分）を計算した（グリッド間隔：0.05°、距離減衰定数（DDC）：35km）。多くの領域で時間変化は不明瞭であったものの、プレート境界に近い紀伊半

© 日本地震学会

島先端付近ではミスフィット角の周期性変化と調和的な南北成分の歪速度の変動が確認できた。
また、中部及び近畿地方のメッシュでは、2013年頃からミスフィット角が減少傾向を示すことがわかった。2011年東北地方太平洋沖地震による粘弾性緩和の影響が含まれている可能性もあるが、南海トラフの東側の固着が徐々に強くなっていると解釈することもできる。2013年淡路島の地震（M_j6.3）や2018年大阪府北部の地震（M_j6.1）が発生しているタイミングとも重なっており、その関連性は興味深い。
ミスフィット角の周期性変化の解釈は、引き続き様々な観点から検討を進める必要があるが、本手法は微弱な応力場の時間変化の検出及びプレート間固着のモニタリングに有効な方法になりうる。

謝辞：本研究では気象庁一元化カタログ、JUNECカタログ（Ishibe et al., 2014）、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。記して感謝します。

© 日本地震学会

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

*Saeko Kita[1], Heidi Houston[2], Sachiko Tanaka[3], Youichi Asano[3], Takuo Shibutani[4], Naoki Suda[5]

1. Building Research Institute, 2. USC, 3. NIED, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Hiroshima University

Slow slip phenomena sometimes occur at the timings of large intraslab earthquakes, but detailed relationships between intraslab earthquakes, slow slip phenomena and geofluids are not known. We examined time variations in seismicity rates, b-values, and stress regimes in the Philippine sea slab associated with times of episodic tremors and slip (ETS) beneath Kii peninsula, southwestern Japan. At 1 month before the ETS times, seismic rate and b-value become high, which is similar to characteristics of fluid-induced seismicity. Stress regimes in the oceanic crust suggest that the plate boundary just beneath the slow slip zone is partially coupled before the times and the plate coupling degree decreased after that, whereas updip of the zone, it increased after ETS. Results of 200 times bootstrap resampling tests of focal mechanisms support that stress after the ETS times change from that before the ETS times. Results of our study show that monitoring of intraslab earthquakes would be a new approach to detect time change of plate coupling degree and slow slip phenomena.

© 日本地震学会

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

*Shunsuke Takemura[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Satoru Baba[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tohoku University

本研究では，DONETの観測記録と3次元地震動シミュレーションで評価したGreen関数に基づき，紀伊半島南東沖で発生する浅部低周波微動の震源時間関数の正確な推定を目指す．Green関数は全国１次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）と付加体構造（Tonegawa et al., 2017）を利用し，OpenSWPC（Maeda et al., 2017）により評価した．仮定した構造による地震動シミュレーションは，DONET1域周辺で発生する微小な地震性すべり現象による観測波形エンベロープの特徴を再現することが確認されている（Takemura et al., 2020）．シミュレーションセッティングにより5 Hzまでの地震動が評価可能なことから，シミュレーションにより得られたGreen関数に1-5 Hzのバンドパスフィルターをかけた3成分合成RMSエンベロープを合成し，様々なライズタイムの規格化された震源時間関数を畳み込む．Ji et al. (2003)による非対称cos関数を仮定し，tsとte（継続時間$t_0 = t_s+t_e$）により様々な形状の関数を実現する．観測された1-5 HzのRMSエンベロープとの相互相関係数が一番高くなるパラメータを探索し，最適なt_sとt_eを推定した．その後，Variance reductionにより地震モーメントを推定し，震源時間関数（モーメントレート関数）を直接得る．

手法の妥当性を検討するために，まずはGreen関数にYabe et al. (2019) のFig. 6の震源時間関数を畳み込んだ合成波形を作成し，この合成波形に対し手法を適用した．相互相関係数の評価の結果，t_s = 2.75 sとt_e = 10.25 sが最適と推定された．本手法では，仮定した震源時間関数のもっとも大きなモーメント解放についてはモデル化できているが，マイナーなモーメント解放については再現できていない．

今後はサイト増幅特性を考慮した上で浅部低周波微動の観測記録への適用，マイナーなイベントの影響を評価することでより正確な震源時間関数の推定を目指す．

手法に関する参考文献

Yabe et al., 2019 JGR, https://doi.org/10.1029/2018JB016815
Takemura et al., 2020 https://doi.org/10.31223/osf.io/ngy2j

謝辞　防災科学技術研究所DONET（https://doi.org/10.17598/NIED.0008）の波形記録を利用しました．地震動計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用しました。本研究は、JSPS科研費19H04626および18K13639により実施されました。

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]AM-2

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo), chairperson:Keisuke Ariyoshi(JAMSTEC)
Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 11:45 AM ROOM C

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

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

10:30 AM - 10:45 AM

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

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

10:45 AM - 11:00 AM

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

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

11:00 AM - 11:15 AM

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

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

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-14] A hierarchical model of earthquake asperity

○Yoshio Fukao[1] （1.JAMSTEC）

11:30 AM - 11:45 AM

©Seismological Society of Japan

Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories

*Keisuke Ariyoshi[1], Takeshi Iinuma[1], Masaru Nakano[1], Toshinori Kimura[1], Eiichiro Araki[1], Yuya Machida[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takehiro Nishiyama[1], Kensuke Suzuki[2], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[1,3], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC, 2. Sendai Regional Headquarters, JMA, 3. NIED

１．はじめに

海洋研究開発機構は、南海トラフで発生する地震・津波を常時観測することを目的とした地震・津波観測監視システム(DONET: Dense Oceanfloor Nework system for Earthquake and Tsunamis) の構築を熊野灘から室戸沖にかけて実施してきた (Kaneda et al., 2015; Kawaguchi et al., 2015)。DONETは、構築終了後の2016年4月1日より海洋研究開発機構から防災科学技術研究所に移管され、陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS: Monitoring of Waves on Land and Seafloor) の一環として両者が連携して運用・保守を行っている。

これに加えて、海洋研究開発機構では、国際深海科学掘削計画 (IODP: International Ocean Discovery Program) の一部として、長期孔内観測点 (LTBMS: Long-Term Borehole Monitoring System) の構築を行い、海底下に地震計・間隙水圧計・体積歪計を東南海地震の想定震源域直上に２点設置した (C0002: 2013年1月、C0010: 2016年4月)。

これらの間隙水圧計および地震計を活用することにより、陸上の観測網では捉えきれなかった南海トラフ沖合のスロースリップイベントについて、海底下の間隙圧変化から捉えられるようになった (Araki et al., 2017)。2018年3月には、海溝に近い C0006 が新たに設置され、孔内観測がDONETに接続したことで、リアルタイムでのスロースリップイベントの監視が可能となった。そのような状況下で、2020年3月にC0002とC0010 の２つの観測点で間隙圧が同期して変化すると共に、DONETの広帯域地震計からは超低周波地震が観測された。本講演では、このスロースリップイベントの概要について報告する。

２．解析手法

シグナルが卓越しているC0002 に着目し、深さが異なる３つの間隙圧時系列に対して、開始・終了時刻を未知数とする最小絶対値法による回帰直線をスロースリップイベントの前後で求めた。これにより、時刻と同時に間隙圧の変化量を定量的に推定することに成功した。一方で、C0006には特異な変化がみられなかった。C0010についてはノイズが大きいため、過去のスロースリップイベントおよび超低周波地震の活動履歴に基づいて観測結果と矛盾しない時系列を推定することにした。

超低周波地震のメカニズム解は、Nakano et al. (2018) の手法をスロースリップイベント期間中のDONET地震波形データに適用することで推定した。断層モデルの構築に関しては、Okada (1992) を適用して沈み込みプレート境界面上での逆断層型すべり（傾斜角６度）に対する孔内間隙圧応答グリーン関数を計算したうえで、位置（緯度・経度・深さ）、断層サイズ及びすべり量を推定した。

３．結果

© 日本地震学会

推定されたスロースリップイベントの開始・終了時刻により、超低周波地震がその期間中に起きていることが定量的に確かめられた。深さの違いを比べると、深い方の２点では、開始・終了時刻および間隙圧の変化量に関して差異は見られなかったが、浅い点に関しては、海洋変動に起因するノイズ成分が大きかったものの、間隙圧の変化量が大きいことが示された。

C0006で変化がなかったことと、超低周波地震がスロースリップイベントの発生期間の後半に発生したことから、断層モデルを用いて検討した結果、今回のスロースリップイベントは、C0010 を跨ぐように海溝側に向かってすべりが伝播した現象であったと結論づけた。この場合、推定された断層モデルは、2015年のスロースリップイベントよりも小規模なものがC0010近傍において発生したと考えられるが、超低周波地震活動の特徴などを整合的に説明できるものとなった。

この断層モデルではから期待されるすべり量は約4cmとなり、海底地殻変動は上下成分で1~4mm 程度であり、実際のDONET海底圧力計からは検出することが出来なかった。今回の結果は、海底圧力計でさえも捉えきれなかった海溝付近 のMw5程度のスロースリップイベントを早期検知した成功例の第一歩であり、今後、音響測距結合方式による海底地殻変動観測 (GNSS-A観測) をはじめとする多角的な検証が期待される。

４．謝辞

本研究成果の一部は、科学研究費補助金 (JP16H06477, JP19H02411, JP20H02236) からの助成を受けました。

© 日本地震学会

Limit cycle and period-doubling bifurcation in fault valve model

*Takahiro Hatano[1], Ryo Mizushima[1]

1. Department of Earth and Space Science, Osaka University

スロー地震の発生様式は多様であるが、その物理的機構はいまだ謎に包まれている。地震波観測によってスロー地震発生帯における低速度・高ポアソン比領域の存在が明らかにされ、流体はスロー地震発生に深く関与していると考えられている。従って、流体が如何にしてスロー地震発生に影響を及ぼすか、その機構については様々なモデルが提案されてきた。
多くのモデル、特に速度状態依存摩擦則の枠組では、スロー地震を説明するのはそれほど容易ではない。通常知られている発展法則（aging lawとslip law）を使うと、放射による散逸（radiation damping）を入れない限りリミットサイクルは存在せず、軌道は発散してしまう。とはいえ地震波を放射しないスロースリップイベントでのradiation dampingの導入は正当化し難い。また、スロースリップイベントの再現には非常に高い流体圧を（実効法線応力がゼロに近くなる程度まで）仮定する必要がある。例えば微動の潮汐依存性を説明するためには実効法線応力がkPaオーダーでなければならない。そのように極めて高い流体圧がスロー地震発生に本質的なのかどうかは興味深い問題である。
他方、パークフィールドにおける低周波地震の繰り返し周期については3年周期と6年周期のものにきれいに分かれるという観測例も知られている[Shelly 2010]。速度状態依存摩擦法則の観点からは、ホップ分岐の周期は摩擦パラメタに連続的に依存するので、このような倍周期の存在は従来のモデルからは直ちには理解できない。
本研究では、流体圧が滑りと相互作用して変化する一種の断層バルブモデルを仮定し、それを速度状態依存摩擦法則と組み合わせた断層モデルを提案する。滑りパッチを仮定して連続体を1自由度系に落とすことで、滑り量・状態変数・流体圧の3変数からなる常微分方程式系に帰着した。このモデルはパラメタに応じて超臨界ホップ分岐と亜臨界ホップ分岐の両方を示すが、超臨界領域においては通常のホップ分岐に引き続いて周期倍加分岐を経てカオス転移を起こすことを紹介する。最後に、周期倍加分岐が実際のパークフィールドの様子を説明できるかどうか議論する。また、倍周期分岐を繰り返して到達するカオス的状態について議論し、スロー地震発生における意義について考える。

© 日本地震学会

Modes of deep slow earthquakes and temperature dependence of brittle-ductile mixed rheology

*Ryosuke Ando[1]

1. School of Science, University of Tokyo

A wide spectral range of observations has become to clarify the various modes of slow earthquakes particularly characterized as, from the slow to fast, Long-term Slow Slip Events (LSSEs), Short-term Slow Slip Events (S-SSEs), Low-frequency earthquakes (LFEs) and tremor. Observations show these events tend to exhibit the depth dependence on the locations of their source areas. The slow earthquakes are generally considered as the results of the brittle-ductile transition of the fault rheology due to increasing pressure and temperature in the depths of the earth's surface. However, available physical models propose a variety of mechanisms to explain the slowly slipping behaviors, such as velocity-strengthening and weakening mixed rheology, the dilation induced strengthening and the neutral frictional stability, none of them have successfully explained the intrinsic mechanisms of the depth-dependent features without artificially tuning free model parameters to fit geodetic observations traced these depth-dependent features. We here demonstrate that the depth-dependent characteristics are explained as a natural consequence of the temperature-dependent rheological properties of the fault zones at the transition depth based on the brittle-ductile mixed fault heterogeneity model. We consider the macroscopic brittle and ductile strengths taking into account the temperature dependence in the fraction of the brittle area over the ductile area together with the viscosity. As a result, we successfully reproduce the occurrence of S-SSEs with smaller slip and larger acceleration at the down-dip portion of L-SSEs with larger slip and smaller acceleration. Further deep, stable slide occurs.

© 日本地震学会

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

*Kazuro Hirahara[1,2]

1. Kagawa University, 2. Riken

１．はじめに
南海トラフ巨大地震発生予測および発生履歴の再現を目指して、速度状態依存則に基づく地震サイクルシミュレーションが行われてきた。また、様々なスロー地震と巨大地震の相互作用の重要性が認識され、スロー地震を含むシミュレーションも行われている。しかしながら、現状では依然として複雑な地震発生履歴の再現には至っていない。本講演では、２．に述べるの最近の知見を踏まえ、複雑な南海トラフ地震履歴を作り出す摩擦モデル、及び巨大地震発生サイクル中におけるL-SSEの変動について議論する。

２．深さ20-30kmにおける深部長期的スロースリップイベント（L-SSE）発生域と長期固着域
L-SSEは南海トラフ巨大地震震源域下部から短期的SSEや深部低周波微動発生域の間の深さ20-30㎞で発生しており、豊後水道や東海L-SSEに加えて、南海トラフ全域においての発生様式が明らかにされつつある（Kobayashi and Tsuyuki, 2019）。最近、Okamura and Shishikura(2020)は、紀伊半島沿岸における隆起生物遺骸群衆高度分布から紀伊半島下深さ20-30km域に400-600年間の長期固着域が存在し、100年程度の繰り返し間隔を持つ各南海トラフ地震セグメントの破壊域に加えて、広域破壊する1707年宝永地震タイプの地震を作り出している可能性を指摘した。この長期固着域は紀伊水道および志摩半島L-SSE領域に挟まれた領域に対応しているように見える。また、赤石山地隆起に関連して赤石山地と駿河湾の間の深さ20-30kmにも同様の長期固着域が存在する可能性を指摘している。この深さ20~30㎞のプレート境界面ではこの二つの長期固着域以外はL-SSE等により応力が解放されその蓄積レートは小さいと思われる。なお、南海地震震源域の浅部でもスロー地震の発生が報告されているが、本講演では議論に含めない。

３．離散セル摩擦モデル
速度状態依存則に基づく地震サイクルシミュレーションではプレート境界を臨界セルサイズ以下の小断層セルに分割し計算を行うが、南海トラフ全域を扱うとセル数が多く、また繰り返し間隔が5~20年程度のL-SSEの発生まで含めると時間ステップ数が多くなり、万年に及ぶ計算を多くの摩擦モデルで行うには多大な計算資源を要する。
そこで、試行段階として図1(左)に示したR11-R62 の12セルから成る離散セルモデルを用いる。Mitsui and Hirahara (2004)は破壊セグメントに対応する5個のブロックからなるバネーブロックモデルを用いて南海トラフ地震サイクルを計算しているが、ここでは通常のセルモデルの延長としての離散セルモデルを用い、準動的近似を用いた計算を行った。まずプレート境界をkm程度の三角小断層セルに分割し、各12セル内で同一すべりを仮定して、各セルの中心におけるすべり応答関数(Kij)を作成した。対角項Kiiの大きさは、0.02-0.5MPaの大きさとなり、相互作用を規定する非対角項Kijは隣接セルで最大0.5Kii程度となっている。
摩擦パラメータの設定としては、浅部セルRi1（深さ5-20km）では相互作用無しの繰り返し間隔（フリー間隔と略）を150-200年程度、すべり応答関数Kiiの臨界弾性定数Kcriiに対する比Kii/Kcriiを0.03程度とし、 深部セルRi2（深さ20-30km）では、紀伊半島(R42)と赤石山地と駿河湾間(R62)下では、フリー間隔を400年程度、Kii/Kcriiを0.1、それ以外の深部セルRi2ではL-SSEのフリー間隔5-10年、Kii/Kcriiを 0.9程度に設定し、20000年のシミュレーションを行った。

４．結果と議論
図１(右)に19000-20000年における各セルにおけるすべり速度を示す。このように、浅部セルでの地震発生とL-SSEの発生は同期するようになり、L-SSEの繰り返し間隔は倍程度に延び、大きい場合には数年程度のばらつきを示し始める。しかしながら、このすべり応答関数をセル中心で評価した離散セルモデルでは巨大地震セル

© 日本地震学会

同士の相互作用が弱く、地震発生はあまり同期せず、宝永タイプの広域を破壊するような地震は発生していない。
R42とR62以外の深部セルではL-SSEが発生している。浅部巨大地震発生サイクル中における深部L-SSEの活動は、巨大地震の発生予測に重要であるが、これまでの研究では巨大地震サイクル中のL-SSE活動は多様な変動を示している。巨大地震発生後活動が抑えられ、次期地震発生が近づくにつれ発生間隔が短くなり活発化することが示されているが、すべり速度が大きくなるモデルと小さくなるモデルが存在する。この離散セルモデルでも地震後の活動の低下と次期地震発生に向けて活動が活発化する様子が得られたが、単純に速度が増すセル（R12）や各地震間で速度の増減が変動するセル(R22, R32, R52)が見られ複雑である。 連続モデルと離散セルモデルは基本的に異なる振舞をすることが知られているため、解釈には注意が必要であるが、L-SSEの活動では興味深い結果が得られた。
しかしながら、現状のモデルでは、期待した各巨大地震セグメントの連動がうまく表せていない。破壊伝播に対応するセル間のKijの大きさを調整する等の検討を要する。

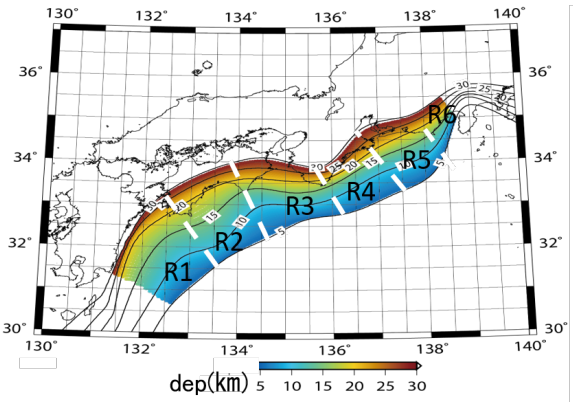


図１（左）　離散セル　セルRiは更に深さ5-20kmと20-30kmのRi1とRi2に分割される。

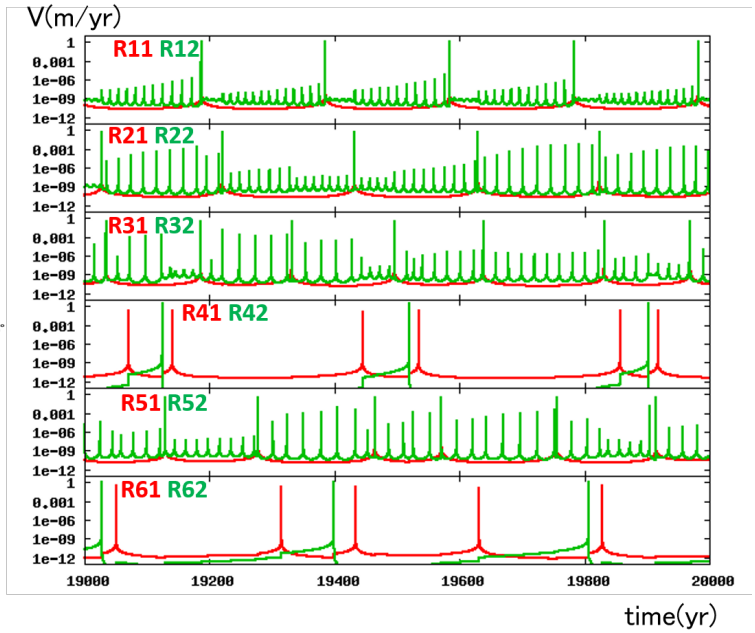


図１（右）　シミュレーション結果　19000～20000年での各セルにおける速度（V:m/s）

© 日本地震学会

A hierarchical model of earthquake asperity

*Yoshio Fukao[1]

1. JAMSTEC

１．序

従来の地震アスペリティモデルは、固着域の周囲に非地震性滑り域を想定し、周囲の非地震性滑りにより固着域で応力増加することをもって地震発生の原因とみなしてきた。このモデルは巨大地震の地域性や繰り返し地震の存在などを良く説明する。しかし一方で、地震の階層的な破壊成長や地震規模と発生頻度の間の統計的関係（GR則）などを一般的に説明することは困難だった。本報告では、周囲の非地震性滑りを想定しないアスペリティモデルを提案し、それが地震の階層的破壊成長やGR則を説明できることを示す。

２．モデル

上盤プレートと下盤プレートとの摩擦面は、大アスペリティとその周囲に点在する小アスペリティとで構成される（図１）。摩擦強度はアスペリティの大小に依らない。下盤プレートは剛体と考える。上盤プレートは、変形しない一様な上面と大小アスペリティで分割された下面とを繋ぐバネの集合体と考える。どのスケールで見ても大アスペリティを囲んで小アスペリティが点在するフラクタルモデルとしてSierpinski carpetを採用する（図３：白色は既に滑ったアスペリティ、青色は未だ滑ってないアスペリティ）。図３は上盤プレートの上面に一様な力を加えたときに起こる階層的な破壊成長を示す。１つの階層は中央の大アスペリティと周囲の小アスペリティとで構成される。どの階層の破壊も周囲の小アスペリティの１つが滑ることから始まる。周囲の小アスペリティが全て滑ると、中央の大アスペティに負荷が集中しここが滑る。この滑りは１つ上の階層では周囲の小アスペリティの１つが滑ったことに対応する。

３．モデルの定量化

１つのアスペリティがバネの力Fによって滑る確率を$p_o=p_o(F/F_o)$とし、p_oは2次のWeibull分布に従うとする。但し$F_o=\sigma_o \cdot S$（σ_oはレファレンス摩擦強度、Sはアスペリティの面積）。図３において、(1,0)はどのアスペリティも滑っていない状態、(1,8)は周囲の全ての小アスペリティが滑った状態である。(1,0)では全てのアスペリティに均等にバネ力Fが働いている。(1,8)では全バネ力$9F$が中央の大アスペリティに集中している。周囲8個の小アスペリティのうちn個以上が滑る確率を$P_n(F/F_o)$として、$P_8(F/F_o)= p_o(F/F_o)$が成立するとき（図２）アスペリティの滑りは階層的に発展する（図３）。等式が成立するのはF/F_o=0.90396, p_o =0.55831の場合である。

４．モデルからの帰結

（１）図３において第１階層の小アスペリティの面積をS_oとする。第１階層では面積SS_oのアスペリティ9個が滑る間に$S9S_o$のアスペリティは1個滑る。第２階層においては面積$S9S_o$のアスペリティ9個が滑る間に$S9^2S_o$のアスペリティ1個が滑る。第３階層では面積$S9^2S_o$のアスペリティ9個が滑る間に$S9^3S_o$のアスペリティ1個が滑

© 日本地震学会

る。即ち面積が*S*よりも大きなアスペリティが滑る頻度*N*は*1/S*に比例する。これは地震のb値が1のGR則に相当する。

（２）同一階層において、周囲の複数の小アスペリティの滑りが時間的に接近して起こり中央の大アスペリティの滑りに繋がると、観測的には初期破壊と主破壊と認識される。初期破壊フェーズでは主破壊に近づくほど応力変化量（バネ力の変化量とアスペリティ面積との比）は増加する。主破壊の応力変化量は初期破壊フェーズの応力変化量よりも小さい（大アスペリティも小アスペリティもレファレンス摩擦強度は同じだが応力変化量は破壊過程に依存する）。

５．図の説明

第1図：アスペリティモデル：アスペリティが滑る確率はバネ力の大きさに依存する。破壊は周囲の小アスペリティの滑りで始まり、中心の大アスペリティに応力が集中することにより大アスペリティにも滑りが起こる。

第２図：周囲の8個の小アスペリティのうち *n*個以上が滑る確率$P_n(F/F_o)$。但し*F/Fo*=0.90396で、このとき$P_8(F/F_o)=p_o(F/F_o)$= 0.55831。但し、p_oは1個のアスペリティが力*F/Fo*の下で滑る確率。

第3図：階層的アスペリティ破壊。周囲の小アスペリティが全て滑ると、力が中央の大アスペリティに集中する。中央の大アスペリティの滑りは１つ上の階層においては周囲の小アスペリティ1個の滑りに相当する。

６．謝辞

このテーマを示唆して下さった金森博雄博士に感謝する。

© 日本地震学会

Figure 1

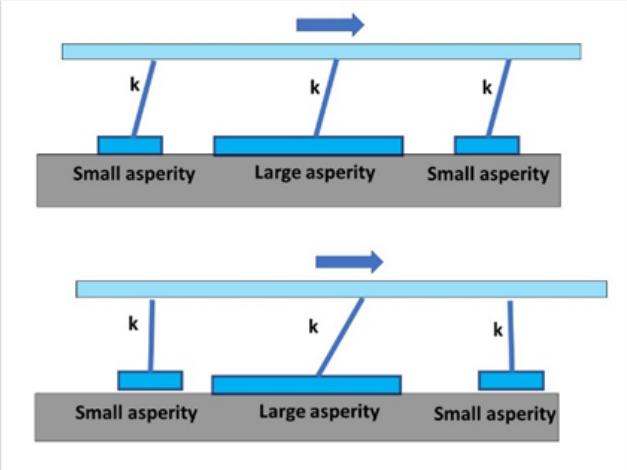


Figure 2

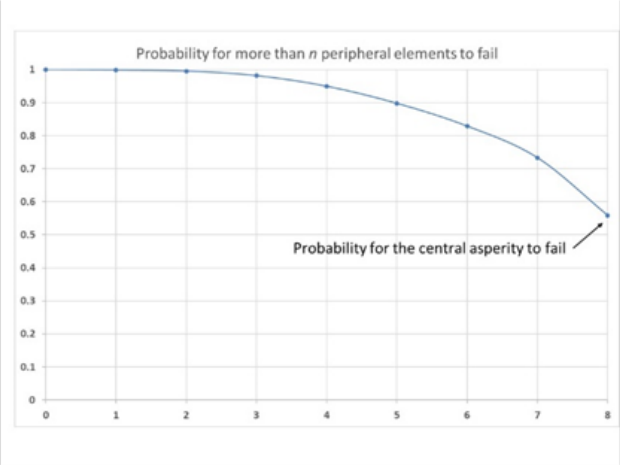
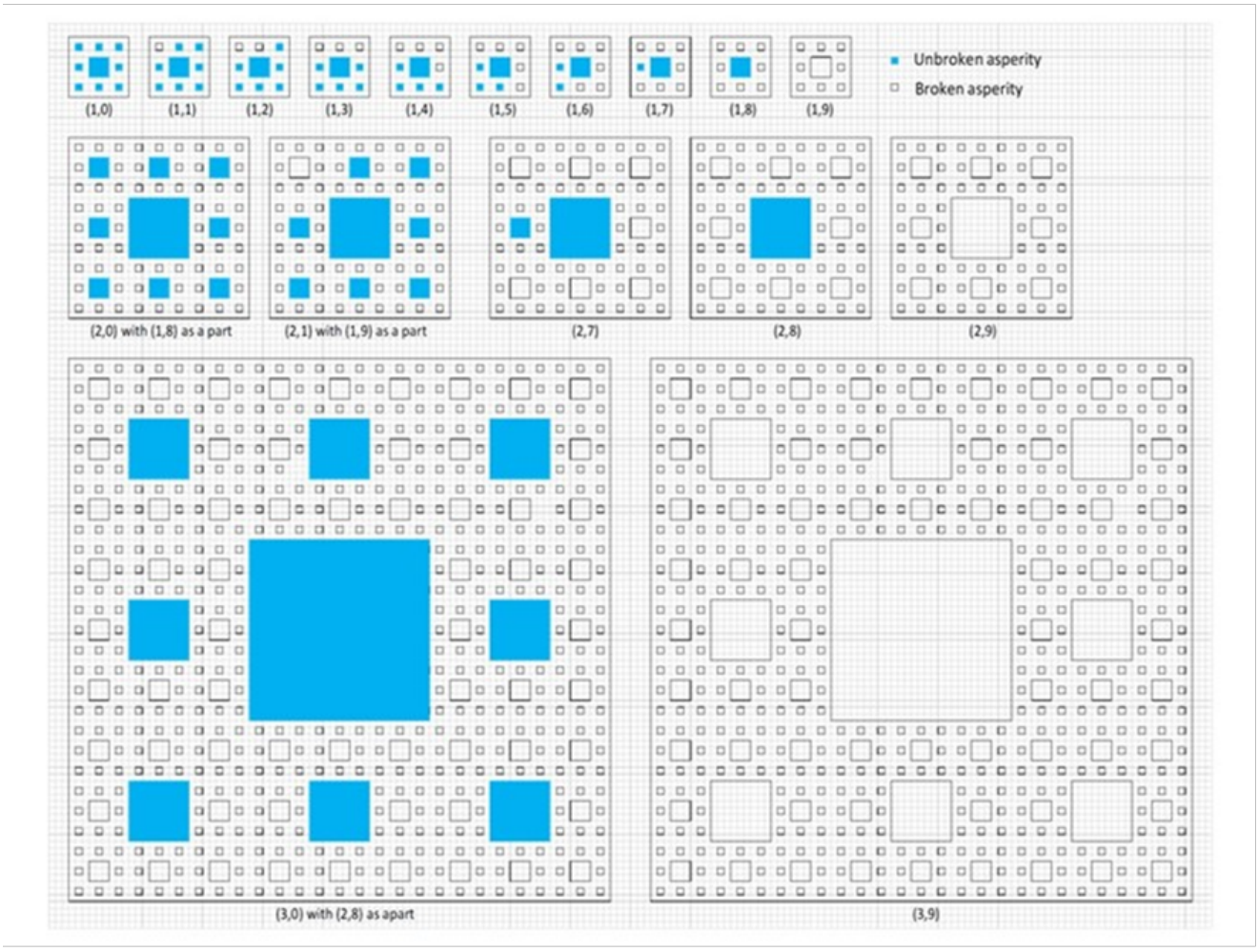


Figure 3



© 日本地震学会

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.), chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University)
Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

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

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

1:00 PM - 1:15 PM

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

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

1:15 PM - 1:30 PM

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

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

1:30 PM - 1:45 PM

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

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

1:45 PM - 2:00 PM

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

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

2:00 PM - 2:15 PM

©Seismological Society of Japan

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

*Yuuki Kurihara[1], Hiroyuki Noda[2]

1. Kyoto University Graduate school of Science , 2. DPRI, Kyoto University

近年、非火山性の地震に関して、モーメント解に等方(ISO)成分を多く持つ震源の存在が示唆されている。ISO成分は非弾性変形による体積変化を表し、断層面において顕著な開口が生じると高い割合を示す。例えばStierle et al.(2014)では、1999年に発生したイズミット地震の震源域において、ISO成分が15%を超える余震が捉えられたと報告されている。また、Hayashida et al.(2020)では、開口を仮定した断層破壊モデルを用いると、鳥取県西部地震の余震のうち、非DC成分の卓越したものについてうまく説明できると報告されている。このような観測例は、非火山性の地震であっても開口成分の変位を持ちうることを示唆している。本研究においては、ISO成分の卓越した破壊を発生させるために必要な条件について、混合Modeの2次元動的破壊シミュレーションを用いて調べた。

計算には２次元の境界積分方程式法を利用した。滑り速度(区分的に一定値を取る基底関数で離散化)から応力変化を求めるためにTada & Madariaga(2001)で示されている積分核を利用した。また、時間発展の手法にはNoda et al.(2020)で提案された予測子-修正子法を利用した。この計算手法の特色は、非平面断層を扱える点、また混合Modeでの安定的な計算が実現されたことにより、剪断方向だけでなく開口方向の変位を持つ破壊が扱える点である。

断層の形状は、平行な２枚の断層(L,R)が、角度Φで斜交した断層(C)によって繋がっている非平面断層を想定した。また、広域応力場を設定する際には、Andrews(1976)で定義されているS値に着目した。S値は、初期条件から破壊が生じるために必要な剪断応力の増加($\mu_s \sigma_n - \tau_{ini}$)と、破壊が生じたときの応力降下量($\tau_{ini} - \mu_d \sigma_n$)の比であり、この値が小さいほど破壊が進行しやすい。また、応力のスケールとして差応力を一定値とすると、S値の減少は間隙水圧の増加として解釈できる。このS値と、断層の斜交する角度(Φ)、Cに対する最大応力軸の角度(Ψ)の３つをそれぞれパラメータとしてパラメータスタディを行った。

仮定した断層上で破壊を発生させるため、破壊核として、中央の面に臨界クラックサイズで応力擾乱を与えた。応力擾乱パッチの内側ではせん断応力が周囲より高く設定されており、降伏応力を上回るため、このパッチから破壊が開始して、両方向に進展すると期待できる。しかしながら、一部のパラメータの組み合わせにおいて、応力擾乱パッチを与える前から、斜交した断層が破壊条件を満たしているケースがあった。このような「何もしなくても割れてしまう」断層は、天然では存在しえないと考え、ill-posedな条件設定として考察からは除外している。

パラメータスタディの結果、S値が小さいほど、すなわち間隙水圧が増加するほどISO成分が増える傾向がほぼすべてのケースで見られた。パラメータスタディに際してΨは15°から75°まで15°刻みに与えたが、最大応力軸の角度(Ψ)が低角なときは、いくら間隙水圧を上げてもISO成分が10%を超えない例が見られた。逆にΨを高角で与えたときはill-posedに分類される例が多かった。計算に用いた中で、最も高いISO成分を得られたパラメータはΨ=60°かつΨ=-Φで、S値が小さいときであった。このような結果から、ただ間隙水圧が上昇しさえすれば必ずISO成分を伴う破壊になるのではなく、応力の向きや断層の形状の影響も重要であると考えられる。

また、摩擦係数や応力擾乱パッチのサイズといった、上述のパラメータスタディでは定数として扱ってきたパラメータを変更したときの影響についても述べる。特に、ここまでは$\mu_s \gg \mu_d$として設定していた動摩擦係数を$\mu_s \sim \mu_d$へ変更した場合 、ill-posedな条件となるパラメータ領域が格段に広がり、本来であれば高いISO成分を

© 日本地震学会

得られるはずのパラメータセットがill-posedとなってしまう場合が見られた。ISO成分の高い破壊の存在は、$\mu_s \gg \mu_d$であることを示している可能性がある。

© 日本地震学会

Two forms of the slip fronts and analyzing their propagation velocities by Linear Marginal Stability Hypothesis

*Takehito Suzuki[1]

1. Aoyama Gakuin University

２つの媒質間の滑りの伝播は理学的・工学的に重要な問題であり、特にその伝播端の伝播速度の決定機構は長く興味を集めてきた。これにはもちろん断層面上の滑りの伝播速度の理解も含まれる。著者も基板上に置いた無限に長い粘弾性ブロックを端から押すというモデルにおいて、滑り速度に非線形に依存する摩擦則の仮定の下、定常状態の滑り端の伝播速度の下限を得ている（Suzuki and Matsukawa, 2019）。本発表ではこの結果を拡張し、滑りにも依存する摩擦力を導入して、滑り端の伝播速度について解析的に考察する。

解析には線形臨界安定性解析(Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH)を用いる。これは伝播速度を求める際に、支配方程式系を伝播端の近傍で線形化してしまうというものである。ここで伝播端にはintruding frontとextruding frontの二通りがあることに注意する（Suzuki and Matsukawa, 2019）。１次元系を考え、ある物理量sの伝播を考える。sがゼロと正の定常状態があるとし、一方が安定、もう一方が不安定であるとする。この時、s=0が不安定でs>0の領域が侵入していく場合をintruding front, s>0が不安定でs=0の領域が侵入していく場合をextruding frontと呼ぶ。sの時間発展方程式において、拡散に相当する項が存在すると、これらのフロントは対称性を失い、異なった伝播速度を生じる。

伝播端ではu~exp(\pm i (kx-omega t))の平面波を考え（uは変位、k, omegaはそれぞれ複素波数と複素周波数、また複号は上がextruding front, 下がintruding frontである）、kの実部k_r, 虚部k_i, omegaの実部omega_r, 虚部omega_iの４つの未知数を求めることになる。そしてこのためには分散関係の実部・虚部、そして伝播・成長の安定性条件という４つの関係式が必要となる。求めるべき伝播速度はomega_i/k_iであり、k_iとomega_iは正の実数でなければならないことに注意する。

LMSHの考え方に基づき、摩擦力の滑り・滑り速度に対する非線形な依存性を、-C1 u+C2 \dot{u}と線形化する。ここでC1とC2は定数であり、ここでは両者をまとめて摩擦パラメータと呼ぶ。このように符号を定義することで、C1>0かつC2>0の場合がそれぞれMyers and Langer (1993)やSuzuki and Matsukawa (2019)と対応することになる。なお、今回は弱化・強化のあらゆるパターンを考えるため、摩擦パラメータには正負どちらの値も許すことにする。

LMSHに従った結果、omega_iが３次方程式を満たすことが分かった。各項の係数には摩擦パラメータが現れ、それによって正の実数解の個数を分類することができた。特に摩擦パラメータ空間で解の挙動が12個の空間に分類されることが明らかになったのが重要である。これに加えてk_iの解空間も求め、伝播端の速度を統一的に理解するのが将来的な目標となる。伝播の速い地震とゆっくりな地震が摩擦パラメータの観点から統一的に説明されることが期待される。

© 日本地震学会

An analytical solution for dynamic self-similar crack with distance-weakening friction

*Shiro Hirano[1], Hiromichi Itou[2]

1. Ritsumeikan Univ., 2. Tokyo Univ. of Science

断層破壊の成長過程が自己相似的であることは多くの観測研究により知られている通りである (例えば Uchide & Ide, 2010, *JGR*). 破壊伝播速度 c が一定で, 亀裂内部の stress drop が一様であるとき, 破壊開始点を原点とする断層面上の位置 x, および破壊開始からの時間 t の関数として, この性質を満たす滑り速度分布は, $V(x,t) = V(x/(ct))$ とモデル化される. Kostrov (1964, *PMM*) は, 亀裂内部の動摩擦力を一定として, 端点で square-root-singularity を持つ V を提案している. これだけでも破壊伝播速度とエネルギー解放率の関係など, 震源物理学にとって有用な理解が得られるが, もしも摩擦の弱化過程を導入することで, 亀裂先端で滑り速度が無限大ではなくゼロであるような解が得られれば, 物理的に妥当であり, かつ摩擦パラメタ, 破壊伝播速度, および初期応力などの関係を議論する上で有益であろう. ただし震源過程の数値シミュレーションなどで頻繁に用いられる滑り弱化型摩擦則は, 破壊が成長しても臨界滑り量 D_c が一定であるとしてモデル化される事が多い. このような摩擦則では, 滑り速度の最大値が破壊成長と共に増大し (Andrews, 2005, *JGR*), 従って観測と整合する自己相似性が実現できない. また, 滑り速度最大値を一定に保つ以外に, 破壊伝播速度を理論的上限（例えば面内亀裂なら Rayleigh 波速度）未満に保つことも, 観測との整合性から要請される性質である. これらを満たす方法として, 断層面外の非弾性変形を考慮するモデル化が有効であるが, 線形弾性破壊力学の範疇でも, 人為的に滑り速度に上限値を設ければ, 破壊伝播速度やエネルギー解放率の観点から等価な破壊を実現できることが数値的に確かめられている (Andrews, 2005, *JGR*).

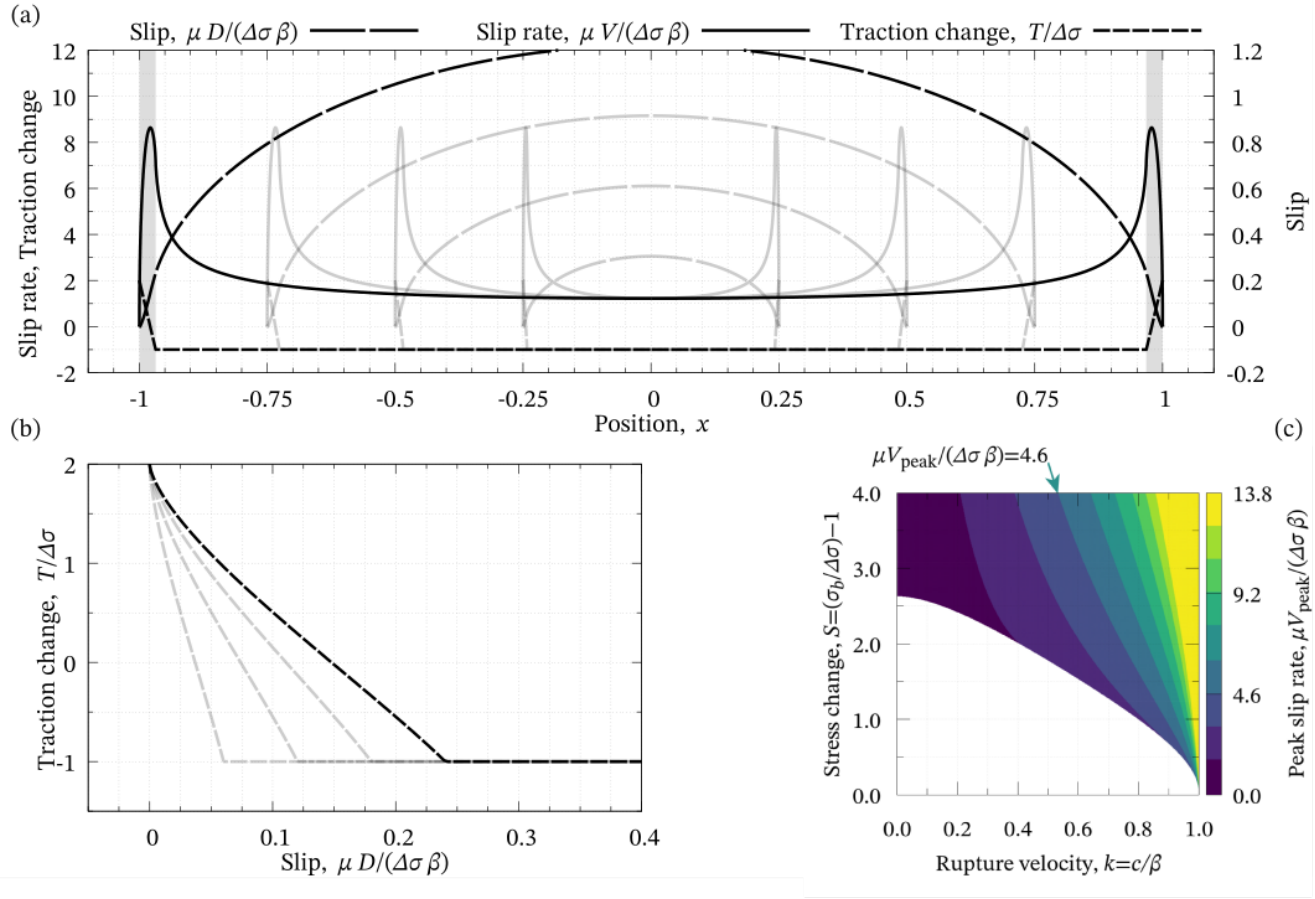
そこで本研究では, 自己相似に拡がる動的亀裂の面外問題を考え, 亀裂先端近傍に摩擦の弱化領域を設けることで, 亀裂端での滑り速度がゼロであり, かつ破壊が拡大しても滑り速度最大値が一定に保たれる解析解を求めた. 類似の解析は定常パルス型破壊モデルの場合に Rice *et al.* (2005, *BSSA*) によって実施され, 摩擦パラメタ, 破壊伝播速度, および初期応力などの関係が明らかにされている. 本研究はそれを自己相似亀裂の場合について考えたものであり, Rice *et al.* の解析よりも遥かに複雑な, 特異微積分方程式の計算を要するが, 結果的にはやはりそれらパラメタ間の関係が明らかになった. 自己相似亀裂独自のモデル化として, 摩擦の弱化領域の長さが各時刻の亀裂長さに比例すると仮定したため, 結果として D_c も亀裂長さに比例する. これはパルス型破壊や多くの数値シミュレーション研究における D_c =一定 の仮定と異なるが, 観測から推定された D_c は滑り量に比例するため (たとえば Mikumo *et al.*, 2003, *BSSA*), 滑り量と破壊長さが比例することと併せれば, 観測に見合う仮定である.

本研究の主要な結果の1つ目として, 破壊伝播速度が決定されるメカニズムを提唱する. 亀裂端での滑り速度をゼロに抑えるという条件から, 破壊伝播速度, 応力比 S および滑り速度最大値 V_{peak} の3者間で満たされるべきトレードオフの関係式が導かれる. S = (strength excess) / (stress drop) であり (Andrews, 1976, *JGR*), これは地殻応力, 強度, および摩擦係数で決まるため, 予め場に与えられたパラメタであると仮定する. そして Andews (2005) が提唱したように, 断層面外の非弾性変形を模擬するべく V_{peak} を一定値 (たとえば ~5.7 m/s) とすると, トレードオフの関係式から破壊伝播速度が自動的に決まる. 現実の破壊伝播速度は断層面外の非弾性変形によるエネルギー散逸過程に支配されていると考えられるが, その影響と等価なモデルを線形弾性破壊力学の範疇で理解できることが, 解析的にも示されたと言える.

2つめの結果は, 地震学的可観測量から断層面の破壊エネルギーを推定する方法の提案である. ただし本モデルではエネルギー解放率も破壊長さに比例するので, 推定可能なのは「破壊が単位距離進んだ際の, 破壊エネルギーの増加率」であり, エネルギー解放率を G ($\propto x$)とすれば, G/x を推定することに相当する. この推定に必要な量は, k, V_{peak}, および V_{peak} を迎えた瞬間の滑り量 D_c' (Mikumo *et al.*, 2003) であり, これらはいずれも震源

© 日本地震学会

インバージョンによって推定可能な量であることから, 本モデルを通じて G/x の推定も可能となる.



(a) Slip, slip rate, and traction on the fault for S=2 and k=0.9. Curves for ct = 0.25, 0.5 , 0.75 (gray), and 1.0 (black) are plotted.
(b) Slip-stress curve for S=2 and k=0.9. Curves for x = 0.25, 0.5, 0.75 (gray) and 1.0 (black) are plotted.
(c) Normalized peak slip rate as a function of S and k. The blank region indicates absence of solution that satisfies $V(\pm1)$=0.

© 日本地震学会

Estimation of fracture energy of large earthquakes based on heterogeneous fault rupture process

*Nelson Pulido[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Fracture energy (G) is a fundamental physical property of earthquakes governing its nucleation, rupture growth and arrest. The most widely used approach to estimate fracture energy is based on the seismic energy budget (usually referred to the “seismological” fracture energy). To that purpose average values of displacement and stress on the fault plane have to be assumed. However these values can be highly variable for large earthquakes. To estimate fracture energy I use the linear elastic fracture mechanics approach (LEFM), and assume that heterogeneous fault rupture can be described as the superposition of anti-plane and in-plane fault rupture modes. I systematically calculated fracture energy of large earthquakes (M>7) based on variable fault rupture velocities and stress drops, for an extensive database of slip models of NEIC. I first calculate the stress drops and local rupture velocity distributions using the slip models and sub-faults rupture times in the database. My results show highly heterogeneous distributions of stress drops and local fault rupture velocities. Fault ruptures largely take place in the sub-shear domain for the majority of slip models but can locally become super-shear. My results indicate that fracture energy G is highly correlated with fault slip. However the rate of growth of G with increasing slip for large earthquakes is weaker compared to the growth for small earthquakes. Finally, I calculated D_c values based on my estimations of G and S for all the slip models in this study, and show that D_c accounts for a significant fraction of the final fault slip.

© 日本地震学会

Earthquake magnitude estimation under nonuniform stress and friction

*Yumi Urata[1], Eiichi Fukuyama[1,2], Chihiro Hashimoto[3]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

We investigated the earthquake magnitude (Mw) under the nonuniform initial shear stress and friction laws by comparing theoretical estimates based on static fracture mechanics with those by 3-D dynamic rupture simulations.

For rupture growth, the energy release rate must be equal to or larger than the fracture energy (Gc). Theoretical works on rupture initiation have assumed the uniform or axisymmetric shear stress distribution and the uniform friction properties (e.g., Andrews, 1976, JGR; Uenishi & Rice, 2003, JGR; Galis et al., 2015, GJI). Under the uniform stress and friction, once a rupture propagates dynamically, it does not stop. However, stress and friction distributions are considered to be heterogeneous (e.g., Olsen et al., 1997, Science; Aochi & Ide, 2014, EPS), and the heterogeneity would contribute to the stopping of ruptures.

In this study, we evaluated the Gc/Gst, where Gst is the static energy release rate at elliptical static crack rim under the nonuniform shear stress and friction. Because it is difficult to obtain Gst analytically, we calculated Gst numerically. In the calculation, we used triangular elements same as those used in the dynamic rupture simulations. First, we calculated the static slip distribution in the crack using the solution of the triangular dislocation by Nikkhoo & Walter (2015, GJI) so that the stress drop and slip amount satisfy the friction law at each element. From the static stress changes at the outside of the crack caused by the obtained static slip and the shortest distance between each adjacent element and the crack elements, we estimated the static stress intensity factor (Kst) and thus Gst, which is proportional to Kst^2, along the crack rim. The axial length of the elliptical crack was set every 10 km. The nonuniform stress and friction distributions were same as those used in the dynamic rupture simulations.

We computed the dynamic rupture propagation by the boundary integral equation method with triangular elements (Hok & Fukuyama, 2011, GJI). Nonuniform stress and friction distributions were obtained by the simulations of quasi-static stress accumulation along the Nankai trough (Hashimoto et al. 2017, JpGU-AGU Joint Meeting 2017) under the slip- and time-dependent constitutive law (Aochi & Matsu’ura 2002, Pageoph). A rupture started at a localized elliptic region stressed beyond the peak stress of the friction laws (initial crack). We examined 16 cases: eight hypocenter locations and two sizes of the initial crack for each hypocenter location. A rupture did not grow outside the initial crack in the cases with smaller size of the initial crack, but it propagated in the cases with larger size of the initial crack, for all hypocenter locations. In the latter cases, the region where slip grew and thus Mw varied with the hypocenter locations (Urata et al., 2017, IAG-IASPEI 2017).

We revealed that the Gc/Gst distributions can predict a rupture growth. The rupture did not grow outside the initial crack in the dynamic rupture simulations if the Gc/Gst values were larger than a certain value, α, at the almost whole rim of the static crack whose size is the same as the initial crack size of the dynamic rupture simulation. Otherwise, the rupture grew. For the nucleated cases, the Gc/Gst and local rupture velocity had negative correlation. The Gc/Gst distribution also predicted the rupture growth to

© 日本地震学会

~M8. If the Gc/Gst values are larger than α at the almost whole rim of the static crack with the axial length of 60-80 km, Mw was smaller than 7.5 in the dynamic computations. Otherwise, Mw was larger than 7.5. The α value was larger than 1 in this study. This might be related to the coexistence of the modes II and III, the friction law, and the element size. These results would be useful in the study on the earthquake rupture scenarios.

© 日本地震学会

Room C | Regular session | S08. Earthquake physics

[S08]PM-2

chairperson:Yumi Urata(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
Sat. Oct 31, 2020 2:30 PM - 3:15 PM ROOM C

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

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

2:30 PM - 2:45 PM

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

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

2:45 PM - 3:00 PM

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

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

3:00 PM - 3:15 PM

©Seismological Society of Japan

Friction parameter of metagabbro gauge obtained from a large-scale biaxial friction apparatus

*Akihiro Shimoda[1], Futoshi Yamashita[2], Eiichi Fukuyama[1,2], Shun Watanabe[1]

1. kyoto university, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

シェールガス・オイルをはじめとした非在来型化石燃料資源は水圧破砕法を用い地下深くの岩盤に亀裂を入れることで採掘を行う．その際，岩盤内へ破砕流体を注入することにより誘発地震が発生することがあり，断層摩擦の理解が重要となる．本研究では，防災科学技術研究所（NIED）の大型試験機を用いて2018年度に実施したガウジを挟まない岩石摩擦実験，2020年の2月から4月にかけて実施したガウジを挟んだ岩石摩擦実験で得られたデータを用いて速度状態依存法則の摩擦パラメータであるb-aの推定を行なった．ここでは主にガウジを挟んだ実験結果を報告する．

実験では1.5×0.5×0.5 m^3（上）および2.0×0.1×0.5 m^3（下）の変斑レイ岩を上下に積み重ね（有効断層面積は0.15m^2），下部の岩石試料は振動台に固定し上部の岩石試料は振動台外の反力床に反力棒を通して固定した．上下の岩石試料の間にガウジを散布して実験を行った．ガウジ層の厚さは3 mmとなるように調整した．ガウジは変斑レイ岩を破砕機により粉砕した後，超微粉砕機ナノジェットマイザー（（株）アイシンナノテクノロジーズ）で平均粒径が10 μm，最大粒径が200 μmとなるように粉砕した．実験は垂直応力3.3 MPaもしくは6.5 MPaを載荷し振動台を水平方向に移動させることで行なった．載荷速度を段階的に変化させるvelocity step testを行い，1 mm/sで8 s，0.1 mm/sで30 s，0.01 mm/sで150 s，0.1 mm/sで30 sを1セットとして3回繰り返したのち，最後に1 mm/sで8 s，0.01 mm/sで150 s，1 mm/sで8 sで載荷させた．上記の載荷速度において垂直応力3.3 MPをかけた実験を2回，6.5 MPaかけた実験を2回，計4回の実験を行った．各実験前には前の実験で用いたガウジを全て取り除き，新しいガウジを散布しガウジ層を作って行った．実験時に生じたすべり量として，岩石試料の両端に設置したレーザー変位計とそのターゲットによって相対変位を計測した．すべり面にかかる垂直応力とせん断応力は岩石試料外部に取り付けたロードセルを用いて測定し，ガウジの摩擦係数はそれぞれの比を取ることにより推定した．

載荷速度を段階的に変化させたvelocity step testの際の摩擦係数と上下の岩石試料間の相対変位の関係が速度状態依存摩擦則に従うとして，摩擦パラメータb-aを求めた．velocity step change前後の摩擦係数の差を，velocity step change前後の載荷速度の比の自然対数で除することによりb-aを求めた．これより垂直応力を6.5 MPaとした実験におけるb-aは正で1.5×10^{-4}～1.5×10^{-3}であり，垂直応力を3.3 MPaとした実験におけるb-aも正で9.0×10^{-4}～2.3×10^{-3}と推定することができた．これらの値は2018年度に行った岩石間にガウジを挟まずに行った実験データから推定したb-aの値（1.4×10^{-3}）（下田他，JpGU-AGU Joimt Meeting 2020）に近い値をとることがわかった．

Gu et al. (1984)では不安定すべりを引き起こす臨界有効法線応力を定義している．またMcLaskey & Kilgore (2013)では臨界有効法線応力とすべり弱化距離から不安定すべりを引き起こすcritical stiffness（K_{crit}）を定義している．Critical stiffnessは測定データを説明するパラメータa，b，Lcと岩石にかかる垂直応力から推定することができる．岩石にかかる垂直応力は実験条件から，b-aは今回の解析から推定できたため，今後，Lcを推定することで不安定すべりを引き起こす条件について議論できると考えられる．

© 日本地震学会

Temporally variable estimation of friction parameters using machine learning

*Ryo Ishiyama[1], Eiichi Fukuyama[2], Bogdan Enescu[1]

1. Division of Earth and Planetary Science, Kyoto University, 2. Department Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

Earthquakes occur due to frictional stick-slip instabilities on faults (e.g., Scholz, 1998), thus knowing the behavior of friction on a fault is important to understand the earthquake occurrence process. The rate-and-state dependent friction law (e.g., Dieterich, 1979, JGR) is widely used to model laboratory observations of rock friction. The law is characterized by three friction parameters, *a*, *b* and the critical slip distance *Lc*, which are usually considered time independent. Urata et al. (2017, PAGEOPH) estimated these parameters by using simulations that reproduce the stick-slip event occurrence in a biaxial rock friction experiment. The results show that the friction parameters may change as slip progresses. In this study we estimate temporally variable friction parameters using a machine learning approach. Our final goal is to propose a new friction law that can account for the temporally variable friction parameters. We consider such intrinsic variability to be primarily a consequence of changes in the fault rock environment conditions during repeated stick-slip.

The experiment data and simulation method of this study are the same as in Urata et al. (2018). The simulations of a spring-slider model with one-degree-freedom are used as the training dataset for our machine learning algorithm to estimate the friction parameters based on the experiment data. Machine learning enables us to reduce the calculation costs when dealing with large datasets and predict parameters more accurately. We employed the random forest algorithm (Breiman, 2001, Machine Learning), which is also used in other earthquake related studies (e.g., Rouet-Leduc et al., 2017, GRL). The algorithm is known for its accuracy, despite its simple formulation, and the capability to account for multiple variables. In order to quantify the temporally-dependent friction parameters, we set time windows spanning from one stick-slip event to the next and estimate the parameters in each time window. We finally predict the parameters *b* and *Lc* out of the three friction parameters (the *a* parameter is considered a material constant), using the experiment data. The steps used in the estimation are presented in detail below.

We first obtain two relationships of shear-stress divided by normal stress with respect to time and slip, for each time window, using the simulation data and calculate window-length (i.e., duration of a stick-slip event), variance, skewness and kurtosis corresponding to each time window. We associate this dataset, consisting of seven values for each time window, to the combination of parameters *b* and *Lc* used in the simulation. The parameters *b* and *Lc* are taken from a grid of 50x50 values that sample a large range of parameter values. The same seven values are also estimated from the observation data, for successive stick-slip events in the rock friction experiment. Finally, the *b* and *Lc* are estimated (predicted) from the experiment data, using a random forest decision tree and the training dataset from simulations.

© 日本地震学会

Our predicted *b* and *Lc* values agree in general with those estimated by Urata et al. (2017). The evolution of *b* and *Lc* are connected one with each other. The *b* parameter has relatively slow changes, while the *Lc* variations are rapid. We could not find a clear temporal trend yet in the data for a 18-second interval analyzed in this study, as we would have expected based on simple physical considerations (i.e., gradual increase of parameters *b* and *Lc* with increase of strength on the fault when stick-slip events occur repeatedly and the gouge layer on the fault becomes thicker). However, we may be able to get significant environment-dependent friction parameters when parameter estimation will be conducted using experiment data for longer time intervals.

© 日本地震学会

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

*Koji Uenishi[1,2], Kunihiro Nagasawa[2]

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

By using a high-speed digital video camera and a tensile testing machine, in this series of experimental study (*SSJ Fall Meeting*, 2017, 2018, 2019; *JpGU Meeting*, 2019), we have been trying to comprehend more deeply the relation between the local and global mechanical characteristics of sets of small-scale cracks that are densely distributed in a certain area of a brittle solid medium. These cracks, subjected to quasi-static loading, are preset in order to model a geological fault damage zone. Contrary to the rupture of (one single or a few) large-scale geological fault planes that can generate low-frequency waves and has been extensively investigated, the interaction of multiply extending small-scale cracks may radiate higher-frequency waves and its mechanical details have not been fully clarified yet.

So far, through dynamic photoelastic observations, we have found spatiotemporally complex but ordered rupture development in two-dimensional brittle polycarbonate specimens. Every rectangular specimen is under external tensile loading that is acting parallel to the free surfaces at a constant strain rate. Small-scale cracks, parallel to each other and having some dip angle, are prepared with a digitally controlled laser cutter. In the case if the parallel cracks dip vertically, for instance, as preliminarily reported earlier (*SSJ Fall Meeting*, 2019), upon surfacing of an upward-moving primary rupture, the rupture jumps on the top free surface to remote positions and the secondary ruptures start traveling downward into the opposite direction. It is noteworthy that the secondary and significantly delayed further ruptures, that is, a cluster of ruptures, are generated and propagated even without applying additional external loading. Seemingly, they are due to dynamic waves associated with the primary rupture, especially Rayleigh surface waves produced upon rupture surfacing. The experimental findings and a crucial role of Rayleigh surface waves in inducing the secondary and further ruptures can be confirmed with numerical simulations based on a spatiotemporally second-order finite difference technique.

For other different experimentally-set dip angles, it seems that the rupture evolution can become either fully dynamic (for larger dip angles; behavior similar to the vertically dipping one) or quasi-static (for smaller angles; ruptures tend to bridge the gaps between the preexisting cracks in a step-by-step manner).

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the “KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)” Program under grant number 20K04680. KU is grateful to the generous support provided by the Construction Engineering Research Institute Foundation in Kobe, Japan.

© 日本地震学会