

Thu. Oct 14, 2021

ROOM C

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Taku Ueda (University of Tokyo)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-01] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs**OThystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹
(1.TOHOKU UNIVERSITY)

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

OJiancang ZHUANG¹ (1.The Institute of Statistical Mathematics)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-03] Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

ONaofumi ASO¹ (1.Tokyo Institute of Technology)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-04] Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

OTaku Ueda¹, Aitaro Kato¹, Christopher W Johnson², Toshiko Terakawa³ (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Los Alamos National Laboratory, 3.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-05] Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

OTomoaki NISHIKAWA¹, Takuya Nishimura¹
(1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-06] Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

OYuta MITSUI¹, Keiji UEHARA¹, Issei KOSUGI², Koji MATSUO³ (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Graduate School of Science, Shizuoka University, 3.Geospatial Information Authority of Japan)

10:15 AM - 10:30 AM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson: Shinji Toda (Tohoku University), Kota Fukuda (University of Tokyo)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-07] Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

OHiroki TANAKA¹, Ken Umeno¹ (1.School of Informatics, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

OShinji TODA¹, Ross S Stein² (1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Temblr, Inc.)

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-09] Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

OTakaki IWATA¹, Yoshihiro Hiramatsu² (1.Prefectural University of Hiroshima, 2.Kanazawa University)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-10] Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

OSatoshi MATSUMOTO¹, Ayaho Mitsuoka², Yoshihisao Iio³, Shinichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁵ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Graduate School of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

[S09-11] Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

OKota FUKUDA¹, Takahiro HATANO², Kimihiro MOCHIZUKI¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University)

12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

PM-1

chairperson:Yuki Noda(Kyoto University), Masaru Nakano(JAMSTEC)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-12] Seismic activity around lake of Ryujin-ko

○Shin'ichi SAKAI^{1,2}, Takahiro Akiyama² (1.Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-13] Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the occurrence factor

○Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO² (1.Kyoto University Graduate School of Science, 2.Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-14] Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

○Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹, Tomoya Takano¹ (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM

[S09-15] Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

○Rina IKEDA¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi³, Yo Fukushima², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Japan Meteorological Agency)

2:15 PM - 2:30 PM

[S09-16] DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

○Masaru NAKANO¹, Hiroko Sugioka², Eiichiro Araki¹, Tomoya Nakajima¹, Aki Ito¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Takashi Yokobiki¹, Takashi Tonegawa¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Gou Fujie¹, Satoru Tanaka¹ (1.IMG, JAMSTEC, 2.KOBEC, Kobe University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-17] Seismic activity (D>10km) around the summit of Mt. Ontake (1)

○Yoshiko YAMANAKA¹ (1.Univ. of Nagoya)

2:45 PM - 3:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM C

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson:Masashi Ogiso(MRI), Lina Yamaya(University of Tokyo)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-18] Correlation on Seismicity of Regular and Very-low Frequency Earthquakes in the Northern Ryukyu Region

○Youichi ASANO¹ (1.NIED)

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-19] Rapid tremor migration revealed by a dense seismic array in the western Shikoku, Japan

○Aitaro KATO¹, Akiko Takeo¹, Kazushige Obara¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-20] Spatiotemporal distribution of tectonic tremors at off the Kii Peninsula during the period from December 2020 to January 2021 inferred from spatial distribution of seismic amplitudes

○Masashi OGISO¹, Koji TAMARIBUCHI¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-21] Characteristics of secondary slip fronts detected from deep low-frequency tremor

○Takuya Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Takanori Matsuzawa², Yusaku Tanaka³ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-22] Comprehensive detection of shallow tremor activities in the Nankai subduction zone, Japan, based on the DONET seafloor seismic data

○Kazuaki OHTA¹ (1.The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-23] Centroid moment tensor inversion using dense array of short-period OBSs at off Ibaraki region
 ○Lina Yamaya¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shunsuke Takemura¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
 10:15 AM - 10:30 AM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson:Ryosuke Azuma(Tohoku University), Satoru Baba(University of Tokyo)
 11:00 AM - 12:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-24] Low-frequency tremors activity immediately after the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0) detected by offshore aftershock observation
 ○Susumu Kawakubo¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Kazuaki Ohta³, Masanao Shinohara⁴ (1.Tohoku University, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)
 11:00 AM - 11:15 AM

[S09-25] eismicity around the subducting seamount in the Japan-Kuril trenches junction detected by a broad-band OBS array and S-net observatory
 ○Ryosuke AZUMA¹, Susumu Kawakubo¹, Hidenobu Takahashi³, Yusaku Ohta¹, Ryota Takagi¹, Syuichi Suzuki¹, Makiko Sato¹, Ryota Hino¹, Shinichi Tanaka², Masanao Shinohara² (1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.ERI, University of Tokyo, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry)
 11:15 AM - 11:30 AM

[S09-26] Quantification of characteristics of temporal change in very low frequency earthquake activity
 ○Satoru BABA¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Akiko Takeo¹, Ryo Kurihara¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
 11:30 AM - 11:45 AM

[S09-27] Fault geometry of M6-class outer-rise normal-faulting earthquakes in central Japan Trench from ocean bottom seismograph observations
 ○Koichiro OBANA¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Seiichi

Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1.JAMSTEC)
 11:45 AM - 12:00 PM

Room C | Regular session | S17. Tsunami

AM-2

chairperson:Ryosuke Azuma(Tohoku University), Satoru Baba(University of Tokyo)
 12:00 PM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-01] Outer rise Normal Faulting Earthquakes and their Aftershock Activities
 ○Nobuo HAMADA¹ (1.non)
 12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Regular session | S17. Tsunami

PM-1

chairperson:Toshitaka Baba(Tokushima University), Satoshi Kusumoto(JAMSTEC)
 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-02] A New Calculation Method of Wet/Dry Boundary for Tsunami Inundation
 ○Masaaki MINAMI¹ (1.Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute)
 1:30 PM - 1:45 PM

[S17-03] Comparison between tsunami hazard curves and exceedance rate estimated from historical tsunamis in the Nankai subduction zone
 ○Toshitaka BABA¹, Ryoichi YAMANAKA², Hiroyuki FUJIWARA³ (1.Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2.Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima University, 3.NIED)
 1:45 PM - 2:00 PM

[S17-04] Tsunami source model of the 1854 Ansei-Tokai earthquake based on crustal deformation and tsunami trace height distributions
 ○Kentarō IMAI¹, Satoshi Kusumoto¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi^{2,1}, Takashi Furumura³ (1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.ERI, The Univ. of Tokyo)
 2:00 PM - 2:15 PM

[S17-05] The 1854 CE Ansei Tokai Earthquake and Tsunami Deposits at Iruma, Minami-Izu City, Shizuoka Prefecture
 ○Satoshi KUSUMOTO¹, Kentaro Imai¹, Takane Hori¹, Daisuke Sugawara² (1.JAMSTEC, 2.Tohoku University)
 2:15 PM - 2:30 PM

[S17-06] Back-projection imaging of a tsunami source

location using S-net ocean-bottom pressure records

○Ayumu MIZUTANI¹, Kiyoshi Yomogida² (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Faculty of Science, Hokkaido University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S17-07] Interaction of tsunamis generated by successive Mw 7.4 and Mw 8.1 earthquakes on Kermadec Islands on March 4, 2021

○Yuchen WANG^{1,2}, Mohammad HEIDARZADEH³, Kenji SATAKE¹, Kentaro IMAI², Takane HORI², Gui HU⁴

(1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Department of Civil &Environmental Engineering, Brunel University London, 4.School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University)

2:45 PM - 3:00 PM

Sat. Oct 16, 2021

ROOM C

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

AM-2

chairperson:Daisuke Ishimura(Tokyo Metropolitan University), Yoshiki Shirahama(AIST)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-01] Averaged left-lateral slip rate of the Shufukuji fault revealed by surface exposure dating
○Yoshiki SHIRAHAMA¹ (1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan (GSJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

11:00 AM - 11:15 AM

[S10-02] An examination on interconnectedness between the southern part of the Lake Biwa Western Coast Fault system and Oubaku Fault, northern part of the Eastern Margin Fault system of the Nara Basin, central Japan.

○Taku KOMATSUBARA¹, Akihito Nishiyama²
(1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM

[S10-03] Paleo-seismic events on the Futagawa fault, Futa, Nishihara Village, Kumamoto Prefecture
○Daisuke ISHIMURA¹, Yoshiya Iwasa², Naoya Takahashi³, Ryuhei Oda¹, Ryuji Tadokoro⁴ (1.Tokyo

Metropolitan Univ., 2.Hiroshima Univ., 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM

[S10-04] Impact of tsunami on Hokkaido due to the 1780 Urup earthquake

○Yutaka HAYASHI¹ (1.Meteorological Research Institute)

11:45 AM - 12:00 PM

[S10-05] Damage seismic intensity distribution and damage due to the 1944 Tonankai earthquake in Suwa area

○Karan Okuyama¹, Kotoe Uchiyama, Daisuke Hirouchi² (1.Shinshu University Education grad school, 2.Shinshu University)

12:00 PM - 12:15 PM

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

PM-1

chairperson:Yoshiki Shirahama(AIST)

1:30 PM - 2:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-06] Analysis of earthquake activity in southern Miyagi prefecture in the 18th century derived from the Takano family records

○Sunao Urushibara¹, Yasuyuki Kano¹, Junzo Omura¹
(1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S10-07] Analysis of aftershock activity of the Ansei-Edo Earthquake using historical documents in Kanto-Koshinetsu

○Michito Baba¹, Yasuyuki Kano¹ (1.University of Tokyo, Earthquake Research Institute)

1:45 PM - 2:00 PM

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

PM-1

chairperson:Takehi Isse(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

2:00 PM - 2:30 PM ROOM C (ROOM C)

[S07-01] Slow anomalies atop the 410-km discontinuity oceanward of the Kurile slab

○Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Yoshio Fukao¹ (1.IMG, JAMSTEC)

2:00 PM - 2:15 PM

[S07-02] Impact of anisotropic thermal conductivity on the thermal structure of the Tohoku subduction

zone, Northeast Japan

○Manabu MORISHIGE¹, Miki TAsAKA² (1.Earthquake
Research Institute, The University of Tokyo, 2.Shizuoka
University)

2:15 PM - 2:30 PM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Taku Ueda (University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-01] Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

○Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹ (1.TOHOKU UNIVERSITY)

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

○Jiancang ZHUANG¹ (1.The Institute of Statistical Mathematics)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-03] Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

○Naofumi ASO¹ (1.Tokyo Institute of Technology)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-04] Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

○Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹, Christopher W Johnson², Toshiko Terakawa³ (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Los Alamos National Laboratory, 3.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-05] Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

○Tomoaki NISHIKAWA¹, Takuya Nishimura¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-06] Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

○Yuta MITSUI¹, Keiji UEHARA¹, Issei KOSUGI², Koji MATSUO³ (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Graduate School of Science, Shizuoka University, 3.Geospatial Information Authority of Japan)

10:15 AM - 10:30 AM

Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

*Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹

1. TOHOKU UNIVERSITY

The present study systematically examined the characteristics of successive earthquakes that are not so-called aftershocks but closely occur in space and time after the occurrence of a small, moderate or large earthquake in order to understand the triggering process. We use the Global Centroid Moment Tensor catalog for the period from 1976 to 2016. Shallow earthquakes with a moment magnitude, M_w , of larger than or equal to 5 are analyzed. We also use F-net catalog provided by NIED, Japan, for the period from 2001 to 2010 and analyze the earthquakes occurring around Japan islands with $M_w < 5.5$. We separately analyze these two data set to clarify the characteristics of successive earthquake occurrence for a wide magnitude range of $M_w \geq 3.5$. We search the earthquakes that occur within a horizontal distance (D) and a lapse time (T_a) from a source event, and group them as a cluster. We then count the number of the clusters, which represents the successive earthquakes, for different D and T_a . To examine whether or not these successive earthquakes occur randomly, we compare the results with simulations in which earthquakes are set to randomly occur in time (but at the locations same with the estimated centroid). The results show that the number of clusters for the simulation for a given T_a and a magnitude range rapidly increase with D and merge with those for real data at a short distance called triggering distance. The triggering distance increases with increasing the magnitude of source event and decreases as the lapse time increases. This implies that the seismic activity turns to become the normal condition in which the occurrence time intervals of large earthquakes obey a Poisson distribution. From the analysis of both global CMT and F-net catalogs, we found that the triggering distance increases with being almost proportional to about $1/5$ to $1/4$ of the seismic moment of source earthquake. Such moment dependency is reconstructed from the simulated data that follow ETAS model. We further derive empirical scaling relations between the seismic moment and triggering distance from the equations in ETAS model, and the observed exponent of $1/5$ to $1/4$ are well predicted from the estimated ETAS parameters reported at various regions around the world. These consistencies suggest that we may evaluate the triggering probability of earthquakes by ETAS model.

Key words: Spatio-temporal clustering, successive occurrence, triggering distance, ETAS model.

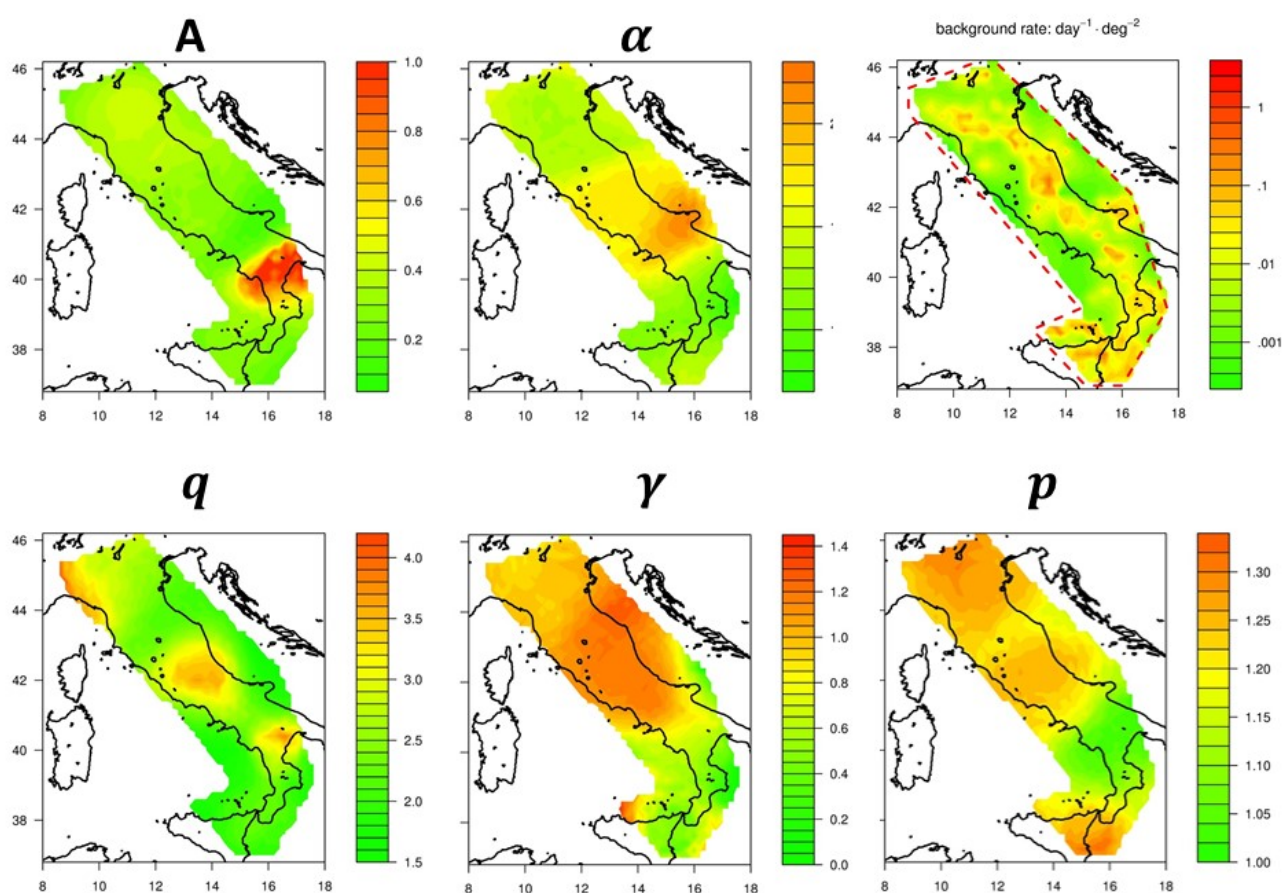
Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

*Jiancang ZHUANG¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

Based on the ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model, which is used for describing the features of short-term clustering of earthquake occurrence, this paper presents some theories and techniques related to evaluating the probability distribution of the maximum magnitude in a given space-time window, where the Gutenberg-Richter law for earthquake magnitude distribution cannot be directly applied. It is seen that the distribution of the maximum magnitude in a given space-time volume is determined in the long-term by the background seismicity rate and the magnitude distribution of the largest events in each earthquake cluster. The techniques introduced were applied to the seismicity in the Italy and Southern California regions.

Figure: Spatial variations of the ETAS parameters in the Italy region.



Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

*Naofumi ASO¹

1. Tokyo Institute of Technology

震源分布の時空間的な特徴から、あたかも震源が移動しているように見えることをマイグレーションと呼ぶ。その物理的実体は、岩石や流体がその速度で移動しているのではなく、応力や流体圧がいわば群速度として伝わっていることによるものだと考えられる。こうしたマイグレーションは、拡散的な物理現象が背後にあることを示唆しており、地球物理学的に重要な知見を与える。しかしながら、マイグレーションの特定には、高い時空間分解能をもつ地震カタログが必要になる。本研究では、ETASモデル [Ogata, 1988] の改良を行うことにより、点状クラスターなど、マイグレーションの見られないような場合においても、拡散的な物理現象を示唆する特徴を抽出できる方法を提案する。

余震活動に関するマクロな経験則である大森則により、地震間のミクロな相互作用が与えられるという仮定のもと、地震活動を説明するモデルがETASモデルである。しかしながら、群発的な活動は、うまくETASモデルでは説明できないことが知られている。その本質的な原因は、群発的な活動に潜む拡散的な物理現象がETASモデルでは説明できないからであると考えられる。そこで、ETASモデルに指数関数的な項を加えることで、拡散的な物理現象も説明できる改良ETASモデルを提案する。実際に、群発的な活動として代表的な島根県東部の準火山型深部長周期地震に適用した。もとのETASモデルとAICを指標として比較すると、パラメータ数が増えるデメリットよりも、対数尤度が改善するメリットの方が大きく、より妥当なモデルとして示された。改良ETASモデルに基づくシミュレーションも行うことで、地震発生間隔分布などの特徴も再現することができた。以上のように、群発的な活動も説明できるような改良ETASモデルを提案した。この方法を用いれば、時空間的なマイグレーションが見えなくても拡散的な特徴を抽出できるため、地震学や火山学においてさらなる活用が期待される。

Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

*Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹, Christopher W Johnson², Toshiko Terakawa³

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Los Alamos National Laboratory, 3. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

地震活動度は、降水量や灌漑などの地表や地下浅部に応力変化や強度変化をもたらす現象と相関があることが既往研究で指摘されている(e.g., Heki, 2003; Amos et al., 2014)。例えば、カリフォルニアでは地下水荷重の年変動に対応して、地震活動が季節変動を示す(e.g., Amos et al., 2014; Johnson et al., 2017)。Johnson et al. (2017)ではGPSの鉛直変位から地下水荷重が断層面に与える応力変化を計算し、カリフォルニアでの地震活動が剪断応力が増加するときに発生しやすいことを示した。日本でも地震活動の季節変動性が指摘されており、積雪荷重や降水との関係が議論されているが(e.g., Heki, 2003; Ueda and Kato, 2019)、原因として考えられる表層荷重による応力変化と直接比較した研究はほとんど行われていない。

本研究では東北地方内陸部において、地表の上下動変位データから荷重の空間分布を推定し、表層荷重による地下での応力変化と地震の発生時期との比較・検討を行った。まず、GEONETのF5解(2003/08/14-2010/12/31)の上下動成分をBedford and Bevis (2018)の手法を用いてトレンド成分、地震等による過渡的な変化、季節変動成分、残差に分離した。その後、各観測点における季節変動成分と残差を足し合わせた時系列データから、それらの中央値をcommon mode errorとして抽出した。上下動変位のデータからcommon mode errorを除いたデータに対して、再度Bedford and Bevis (2018)の手法を適用し、季節変動成分の推定を行った。推定した季節変動成分を基に、Johnson et al. (2017)の手法を用いて、月ごとの表層荷重の空間分布を推定した。その結果、積雪量の大きな日本海側の地域において冬に増加し、春に減少する荷重分布が得られた。

地殻内地震発生域の応力場(Terakawa and Matsu'ura, 2008; 2010)における最大せん断応力面をレシーバー断層として表層荷重が生み出すクーロン応力の地震発生時の変化を計算し、地震発生のタイミングと比較した。気象庁一元化処理震源カタログの1980-2010年のM3以上の地震を使用した。HIST-ETASモデル(Ogata, 2004)を用いて、各地震が背景地震活動度として発生した確率で重み付けすることで、余震活動を取り除いた背景地震活動と表層荷重による応力変化との関係を評価した。その結果、東北地方内陸部における背景地震活動はクーロン応力が高い時に発生しやすいことがわかった。

謝辞：GNSSの上下動変位のデータは国土地理院のGEONETのF5解を使用しました。上下動変位の季節変動成分の抽出にGRATSID (Bedford and Bevis, 2018)を使用しました。気象庁の一元化処理震源カタログを使用しました。HIST-ETASモデルのパラメータ推定にOgata et al. (2021)のコードを使用しました。記して感謝いたします。

Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Takuya Nishimura¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

世界各地の沈み込み帯プレート境界では、スロースリップイベント（Slow slip event; SSE）と呼ばれる低速な断層滑り現象が発生する（Obara & Kato, 2016）。スロースリップイベントは、ときに大地震や群発的な地震活動を誘発することが知られており（Ozawa et al., 2003; Radiguet et al., 2016）、各地の沈み込み帯では、SSEと地震活動の因果関係の解明が進められている（Kato et al., 2012; Nishikawa et al., 2021）。

その一方、現在、世界で標準的に使用されている地震活動統計モデルであるEpidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル（Ogata, 1988）には、SSEが地震活動に及ぼす影響（誘発効果等）が全く考慮されていない。そのため、プレート境界でSSEが発生した際、ETASモデルに基づく地震発生確率予測の結果と、実際に観測される地震活動が大きく乖離するという問題がある（Llenos et al., 2009）。この問題を回避するため、Okutani & Ide (2011)は、SSE発生期間と非SSE発生期間に、それぞれ異なるETASパラメータを割り当てることで、SSEに起因する地震発生レートの上昇を既存のETASモデルの枠組みの中で表現した。しかし、このモデルにはSSEの震源特性（モーメントマグニチュードやモーメントレートなど）が組み込まれていないため、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式は、このモデルからは直接は得られない。つまり、「あるマグニチュードのSSEが発生した際、いくつの地震が誘発されるか？」という基本的な問いに、このモデルは答えることができない。

そこで、本研究は、既存のETASモデル（Ogata, 1988）にGlobal Navigation Satellite System (GNSS) 観測データから推定したSSEのモーメントレートを陽に組み込み、新たなモデル（SSE-informed ETAS model）を作成した。このモデルは、SSEのモーメントレートと地震発生レートに線形な関係（或いはべき乗の関係）を仮定し、SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数（或いはSSEの地震モーメントと地震発生数の比例定数）を新たなETASパラメータとして直接推定する。

我々は、新たなモデルをニュージーランド・ヒ克蘭ギ海溝浅部で発生した3つのSSE（2006年8月Mw 6.8、2008年3月Mw 6.6、2011年6月Mw 6.7）とそれらの周辺で発生したM 2.5以上の地震に適用した。2006年と2011年のSSEはヒ克蘭ギ海溝中央部南より（南緯40.5度付近）に、2008年のSSEは中央部北より（南緯39度付近）に位置する。各SSEのモーメントレートはGeoNetが公開しているGNSS座標時系列データとTDEFNODE（McCaffrey, 2009）を用いて事前に推定した。

その結果、2006年と2011年のイベントでは、赤池情報量規準（Akaike information criterion; AIC）が従来のETASモデルと比べて大きく減少し、新たなモデルがより良いモデルであることが示された。また、新たに導入したパラメータ η （SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数）から、ちょうど1つの地震を誘発するのに必要なSSEのマグニチュードが計算でき、2006年のSSEではMw 6.0/event（95% CI: Mw 5.8/event ~ Mw 6.3/event）、2011年のSSEではMw 5.5/event（95% CI: Mw 5.4/event ~ Mw 5.7/event）と推定された。その一方、2008年のSSEでは、AICはむしろ増加し、従来のETASモデルのほうが良いモデルであった。

ヒ克蘭ギ海溝沿いの群発地震活動に関する先行研究（Nishikawa et al., 2021）では、SSEとそれに伴う群発地震活動に数日から1ヶ月程度の発生時間のずれがあることが報告されている。これをふまえ、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れを許容したモデルと許容しないモデルを比較した。その結果、2006年のSSEでは、18日の時間遅れがあるモデルが、時間遅れのないモデルと比べてAICが2.7減少

し、時間遅れを許容したモデルがより良いモデルあることが示唆された。加えて、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式のべき指数を1（線形）としたモデルと、べき指数を1以外としたモデルの比較も行なったが、べき指数1（線形）のモデルに比べ、AICが顕著に減少（2以上の減少）することはなかった。

本研究の新たなモデルによって、SSEに起因する地震発生レートの上昇を考慮した地震発生確率予測が可能となった。また、本モデルによって、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式を得ることができた。加えて、本モデルは、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れや、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式の関数形（べき指数等）に関する定量的な議論を可能にした。今後、本モデルを各地の沈み込み帯沿いのSSE及びそれに伴う地震活動に適用することで、各地の地震活動の予測精度向上や、SSEに伴う地震活動の特徴の定量化及びその地域差の解明につながると期待される。

Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

*Yuta MITSUI¹, Keiji UEHARA¹, Issei KOSUGI², Koji MATSUO³

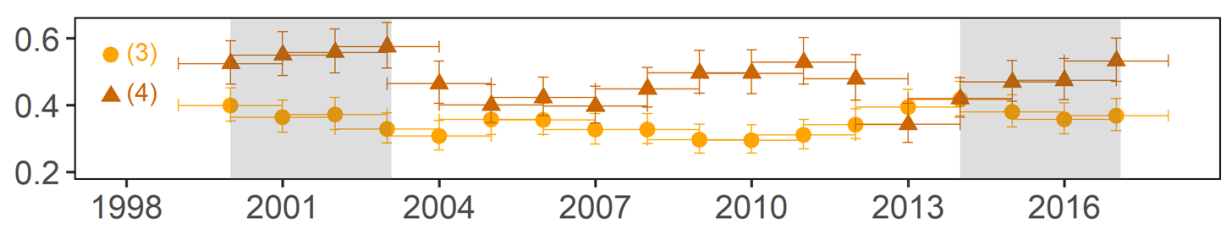
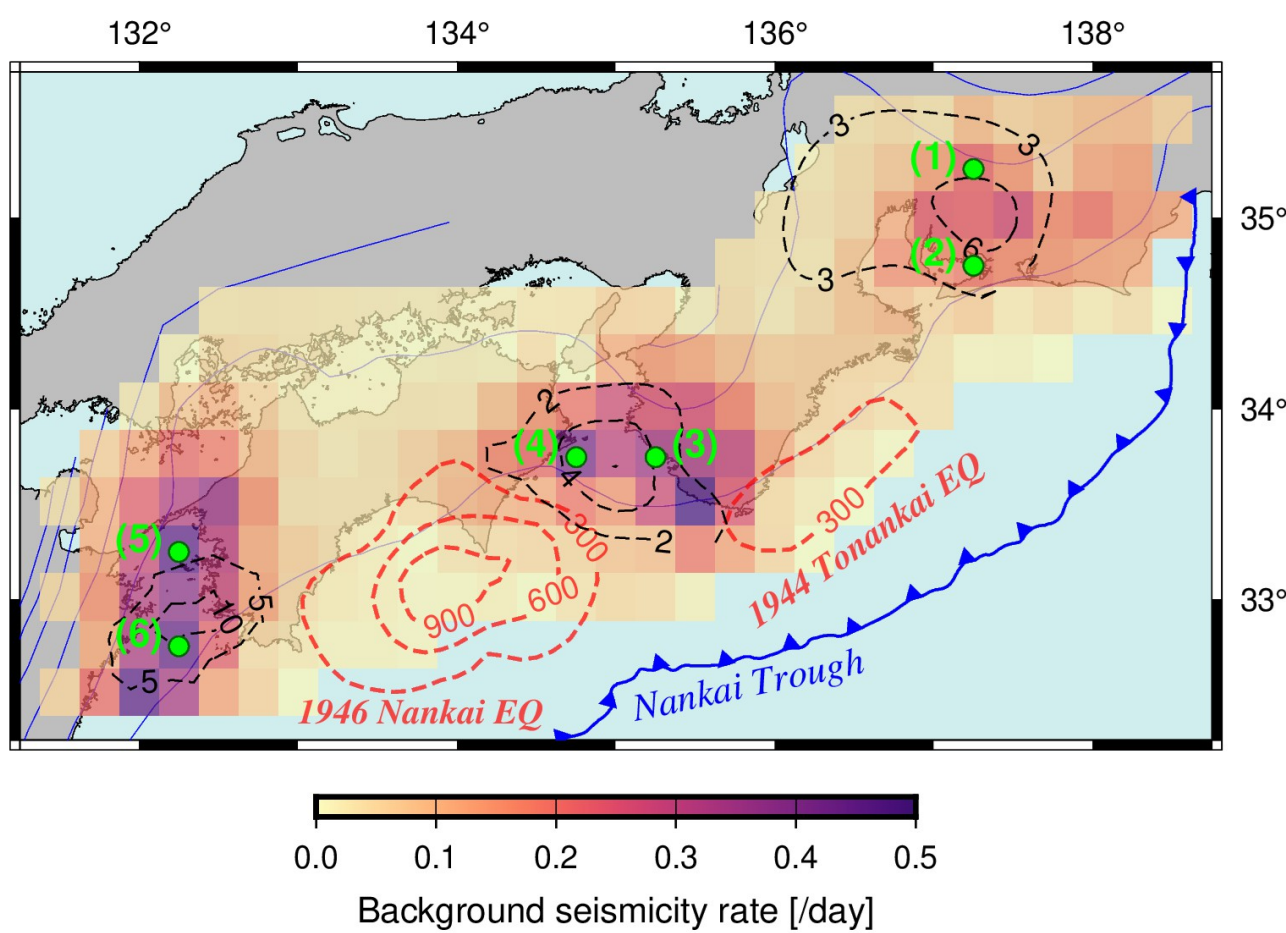
1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Graduate School of Science, Shizuoka University, 3. Geospatial Information Authority of Japan

沈み込み帯でのファスト地震とスロースリップとの間には、多種類の関係があると考えられる。一例として、スロースリップ発生時に地震活動が活発化することが報告されてきた(Hirose et al., 2012; Passarelli et al., 2021)。この性質には沈み込み帯による多様性があること、また、プレート境界地震に限らずプレート内地震まで考慮すべきであることも、指摘されてきた(e.g., Nishikawa et al., 2021)。

本研究では、南海トラフ沈み込み帯を対象として、ファスト地震とスロースリップの関係を探る。まず、気象庁の震源カタログ(1998-2017年)より、沈み込むプレート境界から鉛直方向15km以内にある地震を抽出した。M1以上の地震でG-R則が成り立っていることを確認した(b値0.82)。M3以上の初動発震機構解がほとんどプレート内地震と判断できるものだったため、M1以上の地震もほぼプレート内地震と仮定できる。これらの地震に対して、ETASモデル(Ogata, 1988)に基づく背景地震活動率の推定を行った。

全期間を通しての背景地震活動率には、along-strike方向の不均質が見られた。具体的には、浜名湖から岡崎平野の下、紀伊水道から紀伊半島南端の下、豊後水道下の3箇所で、高い値となった。この3か所は、M6.5を超える長期的スロースリップイベント(L-SSE)の発生域(Ochi and Kato, 2013; Kobayashi, 2017; Yoshioka et al., 2015)と空間的に良く対応している。これらはまたフリーエア重力異常(Matsuo and Kuroishi, 2020)の低重力域とも対応している。さらに、背景地震活動率の時間変化についても推定を行ったところ、紀伊水道の西部で、2回のL-SSE期間中と2010年頃に地震活動率が増大していた。岡崎平野の北部でも若干ながら同様の傾向があった。一方で、L-SSEとの時間的対応が明確でない場所も存在し、短波長不均質が見られた。

本結果は、第一に「プレート内地震が活発な領域でL-SSEが発生する」こと、細かく見ると「L-SSE発生に伴ってプレート内地震活動が揺らぐ」場合もあることを表す。前者については、低重力異常から想定される断層荷重の減少やスラブ傾斜角変化によるせん断応力擾乱(Mitsui and Hirahara, 2006)、後者についてはスラブ流体(圧)移動の影響が考えられる。



Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson: Shinji Toda (Tohoku University), Kota Fukuda (University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-07] Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

○Hiroki TANAKA¹, Ken Umeno¹ (1.School of Informatics, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

○Shinji TODA¹, Ross S Stein² (1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Temblor, Inc.)

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-09] Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

○Takaki IWATA¹, Yoshihiro Hiramatsu² (1.Prefectural University of Hiroshima, 2.Kanazawa University)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-10] Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

○Satoshi MATSUMOTO¹, Ayaho Mitsuoka², Yoshihisa Iio³, Shinichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁵
(1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Graduate School of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

[S09-11] Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

○Kota FUKUDA¹, Takahiro HATANO², Kimihiro MOCHIZUKI¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University)

12:00 PM - 12:15 PM

Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

*Hiroki TANAKA¹, Ken Umeno¹

1. School of Informatics, Kyoto University

地震の時間間隔分布のマグニチュード閾値依存性を検討する上で、異なるマグニチュード閾値での時間間隔の間の条件付き確率 $p_{mM}(\tau_m|\tau_M)$ を用いる方法が提案されている[1]. この条件付き確率は、マグニチュードの時系列に異なる二つの閾値($M, m(<M)$)を設定したとき、上部閾値(M)における長さ τ_M の時間間隔に含まれるという条件のもとで下部閾値(m)において長さ τ_m の間隔が見出される確率密度関数である。

この条件付き確率についてのベイズの定理を考えることで、下部閾値においてある長さ τ_m の間隔が見出された時に、それを含む上部閾値での間隔の長さについての逆確率密度関数 $p_{Mm}(\tau_M|\tau_m)$ を導ける。さらに、イベント間に相関のない重み付き点過程（ETASモデルにおけるバックグラウンドサイズシシティ）について、このベイズの定理をベイズ更新に拡張し、複数の下部閾値での間隔 $\{\tau_m^{(1)}, \dots, \tau_m^{(n)}\}$ が見出された場合の逆確率密度関数 $p_{Mm}(\tau_M|\tau_m^{(1)}, \dots, \tau_m^{(n)})$ とその近似関数が導ける。後者の近似関数は条件付き確率の積の形を含む主要な項と補正項からなり、特に主要な項は数値計算する上で便利な形をしている[2].

本発表ではこれらの結果に基づいて、イベント間に相関のあるETASモデルの時系列にベイズ更新の方法を適用して、下部閾値での間隔の情報から上部間隔の長さを推定する。その推定値と実際の発生時刻との比較を行い、ベイズ更新の方法が予測を行う上でどの程度有効であるかについて統計的に検討した結果について報告する。

まず生成したETASモデル[3]の時系列にベイズ更新を適用することで、逆確率密度関数の近似関数における補正項は最頻値にあまり影響しないことを示す。このことから、数値計算のしやすい近似関数の主要項について、その最頻値を上部間隔の推定値として用いる。この推定値と実際の発生時刻との間の相対誤差を用いて各更新時点における推定の良さを決め、良い推定が実際の発生時刻よりも十分に前から続いていることを予測の有効性として評価を行った。その結果、予測の有効性は時系列の定常性と関係があり、時系列中で定常的な活動が支配的である大イベントの直後または十分時間が経過した場合により有効な予測ができることが示された。

[1] H. Tanaka and Y. Aizawa, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 024004 (2017).

[2] 田中宏樹, 梅野健, 日本地震学会秋季大会, S09-25 (2020).

[3] Y. Ogata, J. Am. Stat. Assoc. 83, 9 (1988).

Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

*Shinji TODA¹, Ross S Stein²

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor, Inc.

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）から10年が経過したにもかかわらず、依然として余震と考えられる地震活動が続いている。特に、2月13日には福島県沖でM7.3のスラブ内地震（深さ55km）が発生し、蔵王町、国見町などで最大震度6強を記録した（気象庁、2021）。その後も、3月20日に宮城県沖でM6.9（深さ59km）、5月1日に同じく宮城県沖でM6.8（深さ51km）のプレート境界型地震が発生した。東北沖震源域周辺の今後の地震ハザード評価に資するため、本発表では余震活動の継続性について検討する。

【最近5年間（2016-2021）と東北沖地震前の比較】まず東北沖地震からの10年を5年区切りで前半（2011/3/11-2016/3/10）と後半（2016/3/11-2021/3/10）に分け、余震活動の継続性の観点から、後半の活動に注目した。特に東北沖地震前（1998/1/1-2011/3/10）を常時地震活動（background seismicity）と仮定し、後半の活動の変化を検討した。その結果を図1aに示す。常時地震活動に比べて数倍～数十倍の余震活動域が震源域を囲むようにドーナツ状に広がる。特に、三陸沖～福島沖近海と海溝軸～その東側（アウターライズ）が顕著である。対称的に、東北沖地震の震源域でも特に大すべり域（例えば、Iinuma et al., JGR, 2012）で顕著に地震活動が低下している。この震源域での活動低下については、Kato & Igarashi (GRL, 2012)による報告もあるが、後半の活動では静穏化がより明瞭になっている。また、プレート境界だけではなく震源域のスラブ内にも広がっているようにみえる（図1c）。

【東北沖本震と大規模余震によるクーロン応力モデル】次に、これらの地震活動度変化を説明するため、クーロン応力変化と速度および状態依存摩擦則（Dieterich, JGR, 1994）を組み合わせた地震活動予測モデル（以下、クーロン応力モデル。Toda et al., JGR, 1998）を適用した。クーロン応力変化は本震直後の地震活動を概ね説明するが（Okada et al., EPS, 2011; Toda et al., EPS, 2011）、今回は応力-地震活動応答の地域性や時系列を検討するため、前段のモデルを改良したToda & Stein (BSSA, 2020)の手法を導入した。同手法の特徴は、レシーバ断層として常時地震活動時のメカニズム解（ここでは防災科研、F-net）を用い、本震だけではなく前半5年間に発生したM6.5余震による応力変化も考慮して、状態変数を時空間的に時々刻々に変化させることにある。また、実際に観測された余震発生レートから摩擦則パラメータ・常時地震レートを学習・最適化するなどの工夫を行っている。さらに、同モデルではDieterich (1994)の余震継続期間 τ_a を一定にしても（ここでは20年）、多様なレシーバ断層上の応力変化の不均質分布により、地域によってこの初期値が大きく変動するのも特徴である。前半5年間までの震源データを用いて後半5年間の地震活動度変化をレトロスペクティブ（retrospective）に予測したものを図1bに示す。実際の観測結果（図1a）と概ね整合することがわかる。三次元的にみると、例えば福島県-福島県沖を横断する断面図（図1c）では、震源域の全面的静穏化とスラブ内地震、アウターライズ地震の継続的な活発化がわかる。スラブ内地震、アウターライズ地震の活動の持続化は、応力載荷速度（secular stressing rate）の速いプレート境界に比較して、プレート内の載荷速度が遅いことによる応力伝播効果の長期化とも考えられる（Stein & Liu, Nature, 2009; Toda & Stein, BSSA, 2018）。本年2月13日のスラブ内地震もこの長期的余震域で発生した。また、1896年明治三陸地震（プレート境界型）と1933年昭和三陸地震（アウターライズ型）のペアにみられるように今後長期にわたって大規模なアウターライズ地震の発生も危惧される。

謝辞：地震活動の解析・モデリングにあたっては気象庁一元化震源カタログ（暫定も含む）、防災科学技術研究所F-netメカニズム解を使用した。

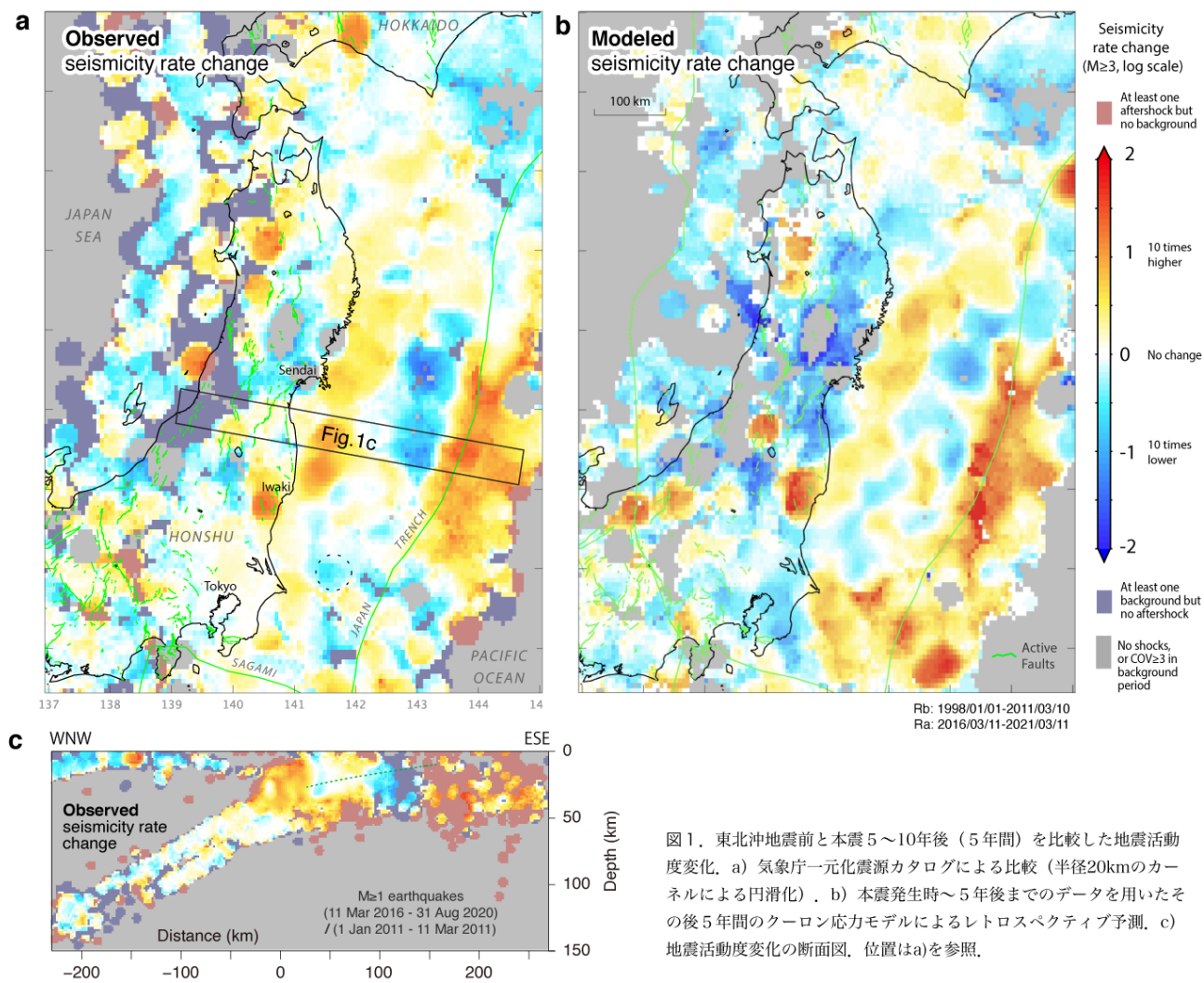


図1. 東北沖地震前と本震5～10年後（5年間）を比較した地震活動度変化. a) 気象庁一元化震源カタログによる比較（半径20kmのカーネルによる円滑化）. b) 本震発生時～5年後までのデータを用いたその後5年間のクーロン応力モデルによるレトロスペクティブ予測. c) 地震活動度変化の断面図. 位置はa)を参照.

Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

*Takaki IWATA¹, Yoshihiro Hiramatsu²

1. Prefectural University of Hiroshima, 2. Kanazawa University

深部低周波微動（DLF）を含むスロー地震の規模が従う分布としてはベキ分布 [例えばBostock et al., 2015, JGR, doi:10.1002/2015JB012195] や指数分布 [例えばChestler & Creager, 2017, JGR, doi:10.1002/2016JB012717] が提案されている。さらにより複雑な分布としてベキ分布と指数分布を掛け合わせたtapered Gutenberg-Richter (GR)則 [Vere-Jones et al., 2001, GJI, doi:10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x] を用いた研究もある [Nakano et al., 2019, GRL, doi:10.1029/2019GL083029]。これらの分布に対し、本研究では南海トラフの深部低周波微動に対して、ベキ分布と指数分布を適当な比率で足し合わせた混合分布を適用した例を示す。

適用した確率分布は以下の通りである：

$$(\text{モデルA}) \quad p_A(M_0) \propto [\gamma M_0^{-b}/C_1 + (1-\gamma)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$$

$$(\text{モデルB}) \quad p_B(M_0) \propto [\gamma(1-r(M_0))M_0^{-b}/C_1 + (1-\gamma)r(M_0)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$$

ここで M_0 は地震モーメントである。 C_1 および C_2 は各項の γ あるいは $1-\gamma$ を除いた部分を M_0 で積分して1になるようにするための正規化定数である。 γ はベキ分布と指数分布に従うイベントの個数比である。モデルAではベキおよび指数分布の混合比が M_0 に依存しておらず γ がそのまま混合比に相当する。これに対し、モデルBでは混合比自体が M_0 に依存して変化することが仮定されている。 $r(M_0)$ は正規分布の累積分布関数であり M_0 が小さければ0、大きければ1に近づく。これにより M_0 の小さい方でベキ分布、 M_0 の大きい方で指数分布に近づくような確率分布を表現することが出来る。さらに $q(M_0)$ はある M_0 におけるイベント検知率であり、Ogata & Katsura [1993, GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x] やIwata [2013, GJI, doi:10.1093/gji/ggt208]と同様、これも正規分布の累積分布関数を用いることとする。通常の解析ではSSEが完全に取れている M_0 以上の範囲のみを解析するが、 $q(M_0)$ を導入することでSSEの記録が不完全である M_0 の小さな範囲も含めた解析が可能となる。

解析に用いたデータはDaiku et al. [2018, Tectonophys., doi:10.1016/j.tecto.2017.11.016] (以下D2018) によって得られたものに基づいた。D2018では南海トラフに沿った東海地方から四国地方を5つの領域に分け、各領域で観測されたDLFのapparent momentを求めた。期間は2002年4月から2013年7月までであり、各領域で219～663個のDLFのapparent momentが得られている（領域分けについてはD2018のFigs.2および3を参照されたい）。本研究ではNakamoto et al. [2021, JGR, doi:10.1029/2020JB021138] に倣い、D2018によるDLFのapparent momentに $4\pi\rho V_s^3$ （ ρ は媒質密度、 V_s はS波速度）を掛けS波の平均的なradiation pattern係数で割ったものを M_0 として解析を行う。なお、apparent momentを M_0 に変換する際に必要となる値はMaeda and Obara [2009, JGR, doi:10.1029/2008JB006043] のものを用いた。

各領域のデータに対して上に示した2つのモデル（確率分布）を適用した。合わせて従来研究で用いられたベキ分布・指数分布・tapered GR則も適用した。各モデルのパラメータは最尤法で推定し、得られた最大対数尤度の値からAIC（赤池情報量規準）[Akaike, 1974, IEEE Trans. Auto. Control, doi:10.1109/TAC.1974.1100705] を求めて計5つのモデルに関するモデル比較を行った。

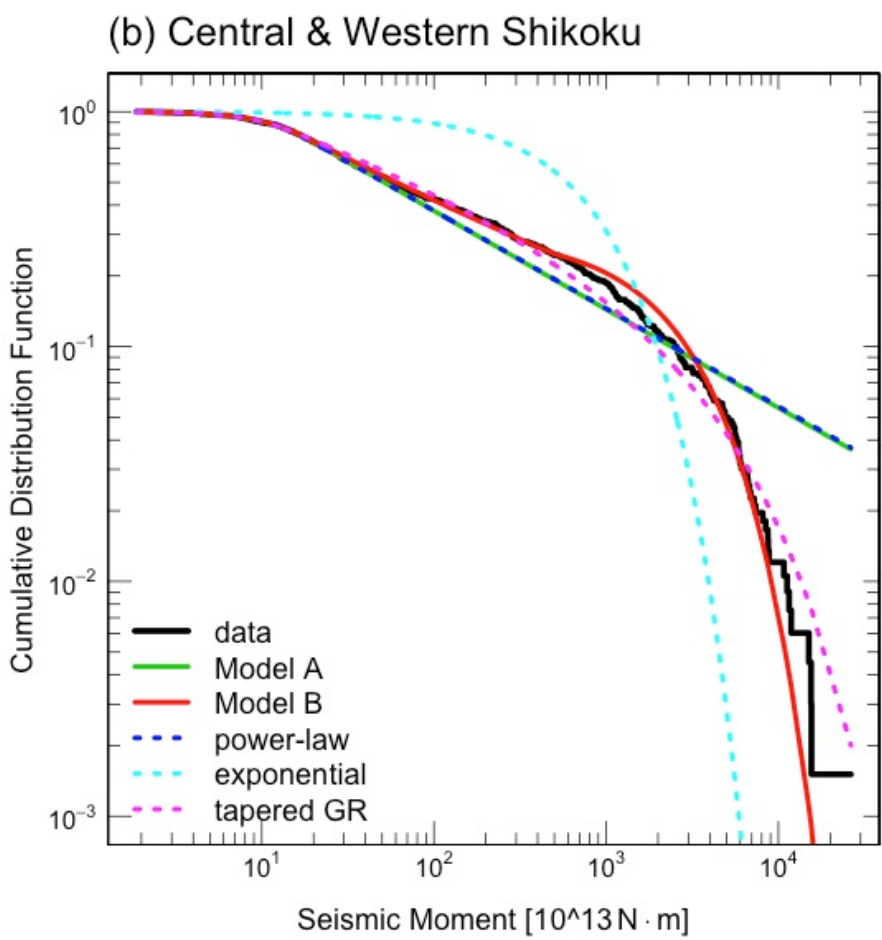
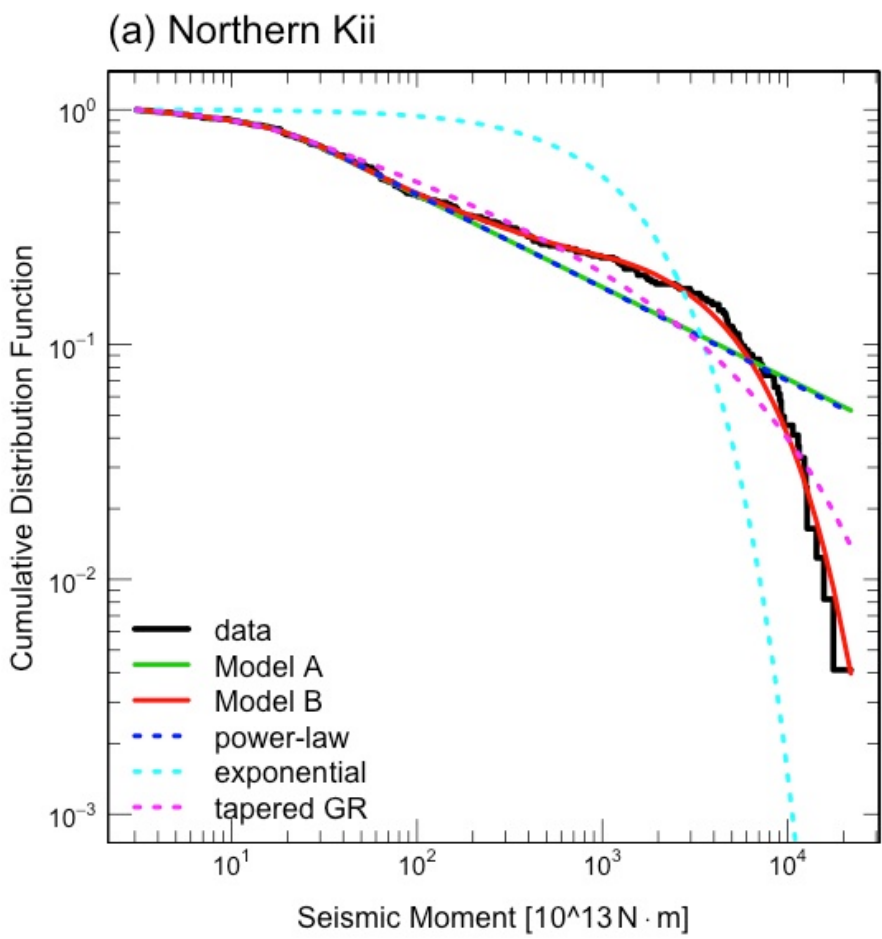
結果例として紀伊半島北部および中央・西四国に対する結果を図に示す。紀伊半島北部（図(a)）については従来研究の3モデル（青・水色・紫点線）および本研究のモデルA（緑実線）は観測された M_0 の（相補）累積分布関数（黒実線）全体には合っていない。それに対し、モデルB（赤実線）は観測された M_0 の累積分布関数に比較的良く適合している。実際、AICの値でも2番目に良かった（小さかった）tapered GR則に比べて22.0小さく、有意に優れていると言える。中央・南紀伊および東四国でも同様の結果となった。

一方、中央・西四国については、モデルBが観測された M_0 の累積分布関数に対して部分的に合っていない。tapered GR則（紫点線）も同様であるが、AICの値ではtapered GR則の方が3.7小さく、こちらの方が有意により。東海地域においてもtapered GR則のAICの値がモデルBのものよりも小さかった（但し、値の差は

0.7であり「有意に差がある」とまでは言えない）。

以上のように，本研究で提案した混合分布が優れている場合とtapered GR則が優れている場合とが混在している．現段階では5領域を調べただけであり，今後は解析事例を増やすなどして差異が生じる要因を調べるといったより踏み込んだ解析が必要と考えられる．

図：観測された M_0 および最尤推定値に基づく5モデルとの比較．比べやすくするため（相補）累積分布関数に直してある．(a) 紀伊半島北部，(b) 中央・西四国に対するもの．



Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

*Satoshi MATSUMOTO¹, Ayaho Mitsuoka², Yoshihisa Iio³, Shinichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁵

1. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2. Graduate School of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震は地殻に蓄積された弾性ひずみを解放するが、解放の仕方はさまざまであると考えられる。例えば、成熟した断層帯においては断層走向に沿ったすべりが卓越するであろう。一方、未成熟の場合は走向方向だけでなく様々な方向のすべりが発生すると考えられる。こういったすべり方向の多様性と断層の成熟度・強度には関係があることはある意味、明らかである。媒質がある応力状態にあった時、弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放される。一方、クーロンの破壊基準によれば内部摩擦角は摩擦係数によって変化する。そのため、最適面（最大圧縮応力軸に対して±30度、ただし摩擦係数0.6のとき）で滑りを起こす。この場合、圧縮軸に対して共役な2つの面で滑りを起こすと、結果的に弾性ひずみを減少させるが、その効率は低下する。具体的には、最大せん断方向で滑った地震のメカニズム解を考えると、このメカニズム解をもつ地震で解放されるモーメント M_0 とした場合、±30度の面を持った地震2つで解放されるモーメントは、 $2M_0$ となるはずであるが、和をとるとモーメントテンソルはその形は45°滑りと同じになり、その大きさは $2M_0$ より小さくなる（摩擦係数=0.6の時、比はおおよそ0.74）。これは、よりすべりやすい面で多数滑ることによって弾性ひずみを解放していくプロセスを示している。摩擦係数が小さくなると徐々に比は1に近づいてゆく。一方、既存の亀裂が非最適面であつ流体圧が高い場合、モーメント比は徐々に低下する。このように地震で解放されるモーメントと解放される弾性ひずみの比は地殻の成熟度・強度を示していると考えられる。ここでは、このモーメント比を実際の地震データから求めてその特性について検討する。2017年3月から2018年4月まで鳥取県西部地震震源域で行われた”0.1満点地震観測”は1000点の地震観測点をおおよそ1km間隔で展開し、余震域を取り囲んだ地震観測である。これによって余震のメカニズム解が詳細に推定された。これらを $3 \times 3 \times 2.5$ kmのブロックごとにモーメント比を求めた。その結果、1に近いところは余震域が水平に広がる部分に対応している。一方、場所によっては0.6程度以下になるブロックも存在している。位置としては鳥取県西部地震の先駆的地震活動震源位置に対応している。これは流体圧が高い可能性を示唆している。2016年熊本地震前後の地震活動について同様の解析をした。ここでは $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5$ kmのブロックで見積もった。その結果、摩擦係数が低いような場所は見られなかった。一方で、モーメント比が0.6程度以下の場所が断層周辺に存在している。さらに、地震発生後にはその部分が広がっているように見える。これは、応力場の不均質が影響している可能性はあるものの、流体が貫入したことによる影響を見ているとも解釈できる。以上のようにモーメント比を用いると、地殻の強度情報が抽出できる可能性がある。この比を用いることによって地殻の力学的応答をモデル化できる可能性があり、地殻活動のシミュレーションに将来的に貢献すると考えられる。

Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

*Kota FUKUDA¹, Takahiro HATANO², Kimihiro MOCHIZUKI¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Space Science Osaka University

従来のセルオートマトンモデルを用いた地震研究では、統計性質に主眼が置かれていた為、点過程に議論が限定されてきた。本研究では、Olami et al.,(1992)によって提案された、GR則を再現するOFCモデルに対し、破壊現象を扱えるような拡張を行った。このモデルでは、最小破壊の時定数を導入することで、モーメントレートの時系列を扱うことができる。さらに、本研究では、この最小破壊の時定数に対する応力蓄積や強度回復の時定数の比をパラメータとする事で、時定数の競合によって生じる、破壊描像と統計性質の変化に注目する。

強度回復や応力蓄積に対し、破壊伝播の遅い現象を表すパラメータ領域では、周波数の-1乗に比例したモーメントレートスペクトルが得られ、一方、破壊伝播の速い現象を表すパラメータ領域では、自己相似的な破壊と、周波数の-2乗に比例したモーメントレートスペクトルが再現される。また、応力蓄積の時定数に対し強度回復の時定数が大きくなるにつれて、微動や群発地震のような永続的なイベントを発生させるレジームから、GR則を満たす通常地震的なレジーム、繰り返し地震的挙動のレジームへの遷移が生じる。強度回復の時定数の増加は、定性的には塑性から脆性への遷移と捉えることもできる為、脆性領域に近づくことで、通常地震的な挙動や繰り返し地震的な挙動が得られることを意味している。

これらの結果は、スロー地震、群発地震、通常地震、繰り返し地震などの多様な地震活動の特徴が、「時定数の競合」という観点である程度統一的に理解できる可能性を示唆しており、この点について議論する。

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

PM-1

chairperson: Yuki Noda (Kyoto University), Masaru Nakano (JAMSTEC)

Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-12] Seismic activity around lake of Ryujin-ko

○Shin'ichi SAKAI^{1,2}, Takahiro Akiyama² (1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-13] Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the occurrence factor

○Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-14] Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

○Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹, Tomoya Takano¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM

[S09-15] Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

○Rina IKEDA¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi³, Yo Fukushima², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency)

2:15 PM - 2:30 PM

[S09-16] DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

○Masaru NAKANO¹, Hiroko Sugioka², Eiichiro Araki¹, Tomoya Nakajima¹, Aki Ito¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Takashi Yokobiki¹, Takashi Tonegawa¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Gou Fujie¹, Satoru Tanaka¹ (1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-17] Seismic activity ($D > 10$ km) around the summit of Mt. Ontake (1)

○Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Univ. of Nagoya)

2:45 PM - 3:00 PM

Seismic activity around lake of Ryujin-ko

*Shin'ichi SAKAI^{1,2}, Takahiro Akiyama²

1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo

長野県大町市龍神湖（大町ダム）周辺において、2021年3月下旬から、地震活動が続いている（図1）。この活動中の最大規模の地震は、4月13日22時53分に発生したM3.6の地震で、約6km離れた大町市役所で震度3を観測した。発震機構解は、北西－南東方向に圧縮軸を持った横ずれ型の地震で、震源の深さが約2kmと浅かったため、大町ダム周辺の道路や林道では、小規模な土砂崩れが確認されたが、人的な被害は報告されていない。この約5か月間（3月21日～7月31日）に、大町市役所では、23個の有感地震が観測されていて、無感も含めると約300個の地震が報告されている（気象庁の暫定解による）。

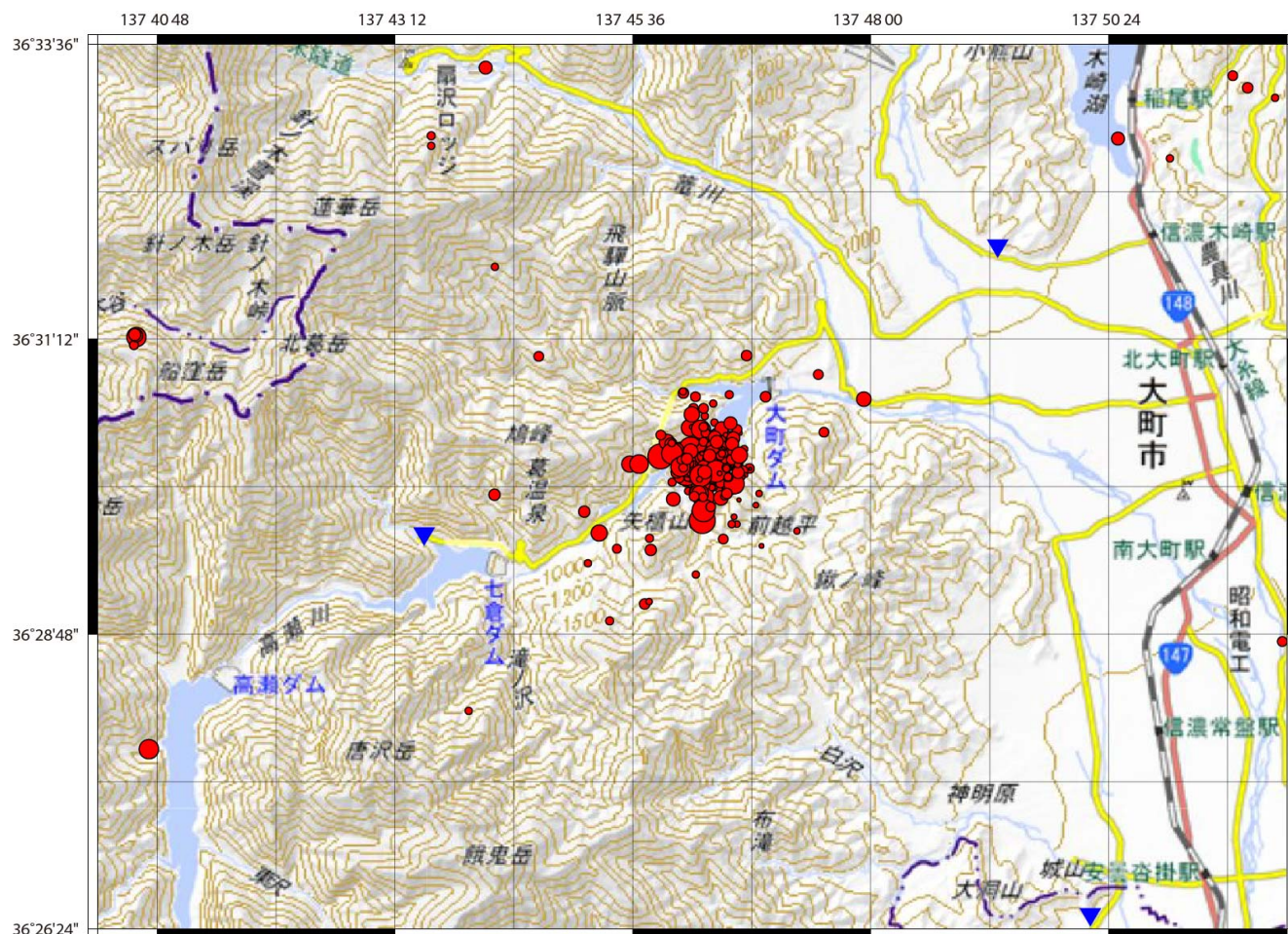
これまで、この付近に大きな活断層は知られていないが、大町市では、1918年（大正7年）11月11日に「大町地震」と呼ばれる地震が発生している。この地震では、M6.5の地震が、約13時間の間隔で続けて2回発生していた。そのときの震源地は、今回の地震活動領域から東に約10km離れたJR大糸線信濃大町駅付近で、家屋の全壊が6棟、半壊が2852棟の被害を生じさせていた。今回の地震活動が、大正時代の大町地震とどのように関係するのかは、不明であるが、この地震活動が続く原因は何なのか、周辺で発生した2014年11月の白馬の地震や糸魚川－静岡構造線と関係するのか、今後の地震活動の拡大や周辺の活動への影響等、様々な疑問が生じている。

そこで、これらを解明することを目的として、震源地の直上および震源域を取り囲む数ヶ所に地震計を設置した（2021年4月21日から）。観測機器は、固有周期1秒の地震計（レナーツ社製MK-III）とその記録を収録する装置（白山工業社製LS-8800）である。それらは、小さなボックス（約40cm程度）に収め、道路わき等に設置した。現地は携帯電話の通話圏外のため、テレメータできず、SDカードに現地収録した。単1乾電池32個で約3ヶ月稼動するため、8月に電池交換と記録媒体の交換を行った。地震活動は、何度か活発化したものの、全体としては、低調になってきた。

今回は、この3か月分の記録を用いた解析の一部を紹介する。新たな臨時観測点の読み取り値を含めて震源を決め直したところ、震源の深さは2km前後に集中していた。切り出した記録の中には、規模の小さな地震波形がたくさん見られたため、臨時観測点の波形で自動処理を行ったところ、4月21日から5月31日の約40日間で841個の地震を検知した。同じ期間の気象庁一元化震源が67個であるため、10倍以上検知された。今後は、小さな地震も含めた震源分布から、この地震活動の全体像を解明することが目的である。

図1 震源分布（2021年3月21日～4月19日）国土地理院地図に加筆

謝辞：国土交通省大町ダムおよび千年の森自然学校に臨時の観測点を設置させていただきました。この観測研究では、東京海上各務記念財団から助成をいただきました。



Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the occurrence factor

*Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO²

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

長野県西部地域では1995年6月から稠密地震観測網が展開されていて、観測点は1984年に発生した長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されている。その中で10kHzのサンプリング周波数でデータを記録しているものが最大で57ヶ所に設置された。この地域で発生する地震は震源が浅いものが多く、さらに観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいため、多数の微小地震データが得られている。

1999年4月5日に、この観測網の内側でM3.7の地震が発生した。また、その震源付近ではその発生の10日以上前から活発な地震活動が見られた。

各地震の破壊開始点について高精度な相対震源決定を行うために、この稠密地震観測で得られた10kHz波形データを使用し、各観測点における2つの地震のP波到達時刻の差を、P波初動のみを含むような0.01秒幅のウィンドウを使って相互相関により求めた。そのようにして求めたP波到達時刻の差を用いて、Ito (1985) を参考に相対震源決定を行った。

震源再決定の結果、M3.7の地震の震源に向かって地震活動が移動していく様子が確認された。また、その震源分布には空間的なギャップがあり、この地震活動は地震の発生に伴う応力変化だけでは説明できない可能性がある。さらに、これらの地震は平面的には発生しておらず、非地震性すべりがこの地震活動の原因である可能性は低い。

Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

*Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹, Tomoya Takano¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

背景と目的

群発地震は、本震と呼べる様な最大地震を持たず、非大森則的な地震活動が一定期間継続する現象である。これまでの研究で、群発地震の震源マイグレーションの拡散係数と活動継続時間の間に負の相関があることが判明した (Amezawa et al., 2021)。しかし、活動の推移に伴って地震波形がどのように変化するのか系統的に調べた研究は少ない。地震波形の時間変化は群発地震の発生メカニズムが時間的に変化したことに関する可能性がある。ゆえに、地震活動の推移と地震波形の変化の対応を調べることは重要である。本研究では、地震活動が長期に渡っている例として、発生から10年以上継続している東北日本北部の森吉山での群発地震について、地震波形がどのように変化したかを波形相関に着目して調べた。

震源再決定

近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べるためには、高精度に決定された震源位置が必要である。そこで、波形の相互相関データを用いたDouble-Difference法により、震源再決定を行なった。解析には気象庁一元化震源カタログに記載されている2011-2019年に発生した $M \geq 0$ の地震のうち、群発地震の周囲60 km以内で比較的S/N比の良い16定常観測点の半数以上において、P・S波の観測走時が得られた7213地震を用いた。気象庁検測値に加えて、弘前大学によって実施された臨時観測記録の手動検測値も用いた。さらに、気象庁・Hi-net・東北大学の観測点で記録された地震波形の相互相関係数から相対走時データを作成して用いた。相関は2-12 Hzの帯域通過フィルタをかけた波形に対し、P・S波の理論走時 ± 1 秒の時間窓で計算した。

震源再決定の結果、初期震源数の99%が再決定され、RMS残差は手動検測値では117 msから35 msへ、相対走時データでは138 msから6 msへ減少した。再決定震源の空間分布から、群発地震の震源は複数の小クラスタに分かれ、水平面内では4 km程度にひろがり、厚さ1-2 kmの東傾斜の面状分布を示すことなど、これまで以上に詳細な特徴が判明した。

波形相関の時空間変化

次に、再決定された震源位置に基づき、近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べた。ある地震を起点とし、そこから1年以内に発生した地震が震源距離0.3 km以内に10個以上ある場合、これを地震のグループとした。全ての再決定震源を起点としてグループ化を行い、得られた全てのグループについて、グループの起点とした地震とグループ内の各地震のP・S波の相互相関係数を求め、その平均をAverage Cross Correlation (ACC) とした。ACCの計算には、S/N比が12 dB以上かつ使用観測点の半数以上でP・S波が記録された波形を使用した。

得られた全ACCの分布は、平均 $\mu = 0.39$ 、標準偏差 $\sigma = 0.11$ のやや左に歪んだ正規分布となった。今回は、 $ACC \geq \mu + 1.5\sigma$ の地震グループを特に波形の類似性が高いグループとし、ACCの時空間変化と地震活動の対応を述べた。森吉山の群発地震はクラスタの南東深さ10 km付近（クラスタ底部）から始まり、約200日間はここから水平・深さ方向に約1 kmの狭い領域で活動が続いた。この活動では、ACCが高いグループが特に多くみられた。その後、地震活動の中心が北東へ移動し、約500日後には複数のバースト的な活動を伴いつつ活動中心は南西へ移動した。約1500日後になるとクラスタサイズがほぼ確定し、活動が比較的低調になった。これらの活動移行期と停滞期についてのACCは活動初期に比べて全体的に低く、波形の類似性が高いグループはほとんどみられなかった。

議論

森吉山における群発地震の初期の活動が比較的狭い領域内に限られていることは既知であったが、本研究に

より、その初期の活動においてのみ地震波形が互いに類似していることが判明した。このことから、活動初期においては近接する位置での同じような断層運動で地震が起きたことが示唆される。しかし、その後の活動では、クラスタのほとんどの領域で、震源が近接していてもACCは低い。その理由として、近接していても断層運動の仕方が微妙に異なること、震源周辺の不均質が非常に強く震源位置の僅かな違いにより波形が異なることの、一方または両方が考えられる。これらの原因が群発地震活動にあるのか、元々存在したのかは、今回の結果だけでは判然としないが、森吉山の群発地震の時空間発展が単純ではなかったことを考慮すると、群発地震域は群発地震以前から不均質な状態であった可能性がある。

謝辞

気象庁一元化震源カタログ、気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・東北大学の観測点で観測された地震波形記録を使用しました。記して謝意を表します。

Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

*Rina IKEDA¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi³, Yo Fukushima², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震以降、福島-茨城県境周辺では非常に活発な地震活動が続いている。特に、茨城県北部においては2011年3月19日と2016年12月28日にM6程度の地震が発生しており、2つの地震が同一の断層の同じ場所を繰り返し破壊した可能性が指摘されている(Fukushima et al., 2018; Uchide, 2017, JpGU)。内陸断層で地震がこのような短期間で繰り返し発生する事例は極めて珍しく、この事例を調べることは内陸地震の発生サイクルや応力蓄積・解放過程を理解する上で極めて重要であるといえる。本研究では、福島-茨城県境周辺の地震活動中の小中地震に含まれる繰り返し地震を検出し、更にその情報を震源分布の時空間変化および地震活動の情報と組み合わせることにより、M6地震の繰り返しの原因について調べた。

最初に、2003年から2018年10月31日までに福島-茨城県境周辺で発生した気象庁マグニチュード1以上の地震45988個を対象に、Double-Difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002)を用いた震源の再決定を行った。得られた震源分布は複雑な微細断層構造を示した。ただし茨城県北部地域では地震活動が西へ傾斜する一枚の面構造に集中しており、M6地震はこの断層上で発生したと考えられる。

次に、繰り返し地震の検出を行った。多くの先行研究では繰り返し地震の検出のために、波形の相互相関を用いているが、その方法では近傍で起こった地震群を繰り返し地震と見誤る可能性がある。本研究では、精密な震源再決定位置に基づき繰り返し地震の検出を行った。具体的には、全地震ペアの震源間距離を地震の断層サイズと比較することにより、次の条件に基づいて繰り返し地震の検出を行なった。(1) 地震間距離 < 平均断層半径、(2) マグニチュードの差が0.5以下となる地震ペアを繰り返し地震ペアとみなした。この際、断層サイズは、応力降下量20MPa (池田・他, 2020, JpGU)の円形断層を仮定して求めた。その結果、379個の地震ペアが見つかり、その多くが茨城県北部に分布することが分かった。これらの地震ペアの地震波形は近傍の観測点で見ても非常によく似ており、断層上の同一の場所を破壊した繰り返し地震である可能性が高いと思われる。震源再決定により得られた震源分布から、茨城県北部で2011年と2016年に発生したM6地震直後の余震の時空間分布を調べると、それぞれのM6地震の震源周辺から余震域が徐々に拡大している様子が見られた。2つのM6地震後の余効滑りに起因している可能性がある。Nadeau & Johnson (1998)による経験式に基づき、繰り返し地震間の周囲の非地震性すべり量を推定したところ、20cm前後の値が得られた。Fukushima et al.

(2018)は、2011年に発生したM6地震による余効滑り量を推定し、その大きさが数十 cm程度以上と非常に大きかったことを示しているが、研究で検出された繰り返し地震は、この余効滑りの影響により発生した可能性が考えられる。

茨城県北部で繰り返し発生したことが推定されている2つのM6地震のうち、2011年の地震の余震活動が2016年の地震のそれに比べて顕著に活発であったことが分かった。2011年の地震の余震の減衰率は通常の大森公式に比べても有意に小さかった。GPS観測点で計測された地震直後の余効変動も2011年のM6地震の場合の方が2016年の地震よりも大きかった。2011年のM6地震の余効滑り量が同規模の内陸地震に比べ異常に大きかったことが報告されているが(Fukushima et al., 2018)、その量は同じ場所で発生した2016年のM6地震に比べても大きかったことが示唆される。同一の場所にもかかわらず余効すべり量の大きさが異なった要因として、震源域の状態の時間変化が考えられる。ひとつに2011年東北沖地震による余効変動の減衰により応力増加レートが減少したことが影響しているかもしれない。あるいは、間隙水圧の時間変化が余効すべり量に影響を与えた可能性も考えられる。群発地震の解析から、東北日本のいくつかの地域では、東北沖地震後の地殻流体の上昇により間隙水圧が時間変化したことが推定されている (Yoshida et al., 2016)。茨城県北部地域においても、東北沖地震直後の2011年のM6地震の際には、上昇してきた地殻流体により地震・余効すべりが生じやすくなっていた可能性も考えられる。

DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

*Masaru NAKANO¹, Hiroko Sugioka², Eiichiro Araki¹, Tomoya Nakajima¹, Aki Ito¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Takashi Yokobiki¹, Takashi Tonegawa¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Gou Fujie¹, Satoru Tanaka¹

1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University

鬼界カルデラは130ka、95ka、そして7.3kaにカルデラ形成を伴う巨大噴火を起こした火山として知られる。鬼界カルデラは九州南方に位置し、そのほとんどが海底下にあるため、火山の構造や活動については不明な点が多い。我々はその構造調査及び現在の活動把握のための新しい観測手法開発のため、鬼界カルデラ周辺に設置された光海底ケーブルを用いた分布型音響センシング（DAS）観測を行った。DASは光ケーブルにレーザー光を入射した際に生ずる後方散乱によって、ケーブルの軸方向の歪変化を検出する技術であり、ケーブルに沿った高密度多点の振動計測が可能なことから、近年地震観測への応用が進んでいる。海域火山において光海底ケーブルを用いたDAS観測が行われたのは、我々が知る限り本研究が初めてである。鬼界カルデラ周辺の海域には、鹿児島県三島村が保有、管理する、三島村の竹島、硫黄島、黒島と本土の枕崎を結ぶブロードバンド通信のための光海底ケーブルが設置されている。我々はこれを活用し、鬼界カルデラにおいてDASによる地震動観測を行った。測器を薩摩硫黄島および枕崎に設置し、それぞれと竹島、黒島を結ぶ光海底ケーブルでのDAS観測を行った。観測はこれまでに2021年4月と7月の二回行った。4月の観測ではトカラ列島や種子島沖で起きたマグニチュード2～4クラスの地震の記録が得られた。枕崎からの測線では地震動の振幅は比較的一様であった。一方、硫黄島から延びる鬼界カルデラに近いケーブルでは、振幅に大きな地域性が見られた。これはケーブル直下の減衰構造もしくはケーブルと海底のカップリングに大きな地域性があるためであると考えられる。7月の観測では、同時に鬼界カルデラ周辺海域で行われたエアガン探査のシグナルを観測した。エアガンのチームと協力し、鬼界カルデラを挟んでDAS測線の反対側でエアガンを発振することで、カルデラ内部を通る波線のシグナルの観測を試みた。観測が終了したのは本稿作成の直前であり、今後詳しく解析を進めていく予定である。また、観測開始からエアガンが始まるまでの期間に、種子島沖や九州西方で起きた地震を多数観測した。また気象庁一元化カタログに無いローカルと思われるイベントも複数観測した。これらのイベントの解析により、鬼界カルデラ周辺の構造や火山活動を調べていく予定である。謝辞：本研究にあたっては鹿児島県三島村の光海底ケーブルを利用させていただきました。記して感謝いたします。

Seismic activity ($D > 10\text{km}$) around the summit of Mt. Ontake (1)

*Yoshiko YAMANAKA¹

1. Univ. of Nagoya

<<はじめに>>

2007年と2014年の御嶽山噴火前後の地震活動を比較するため、御嶽山山頂周辺で発生する地震活動を調べていたところ、ある限られた領域（図1）でやや深い（深さ3-35km）地震が発生していることがわかった。御嶽山山頂周辺で発生する地震は $M < 1$ の地震が多いが、これらの地震は比較的規模の大きい（ $M2-M3$ ）ものも発生している。これらの地震の内、図1の領域Dはほぼ1984年長野県西部地震の断層（図1中の四角形）下限にあたる。また図1のハッチをつけた範囲では長野県西部地震以降群発的に地震が発生している。さらに御岳湖付近の深さ30-35km（領域E）では低周波地震が発生する。

そこでMatched Filter法を用いて御嶽山山頂周辺でのやや深い地震および山頂直下の地震活動を2006年まで遡って調べた。

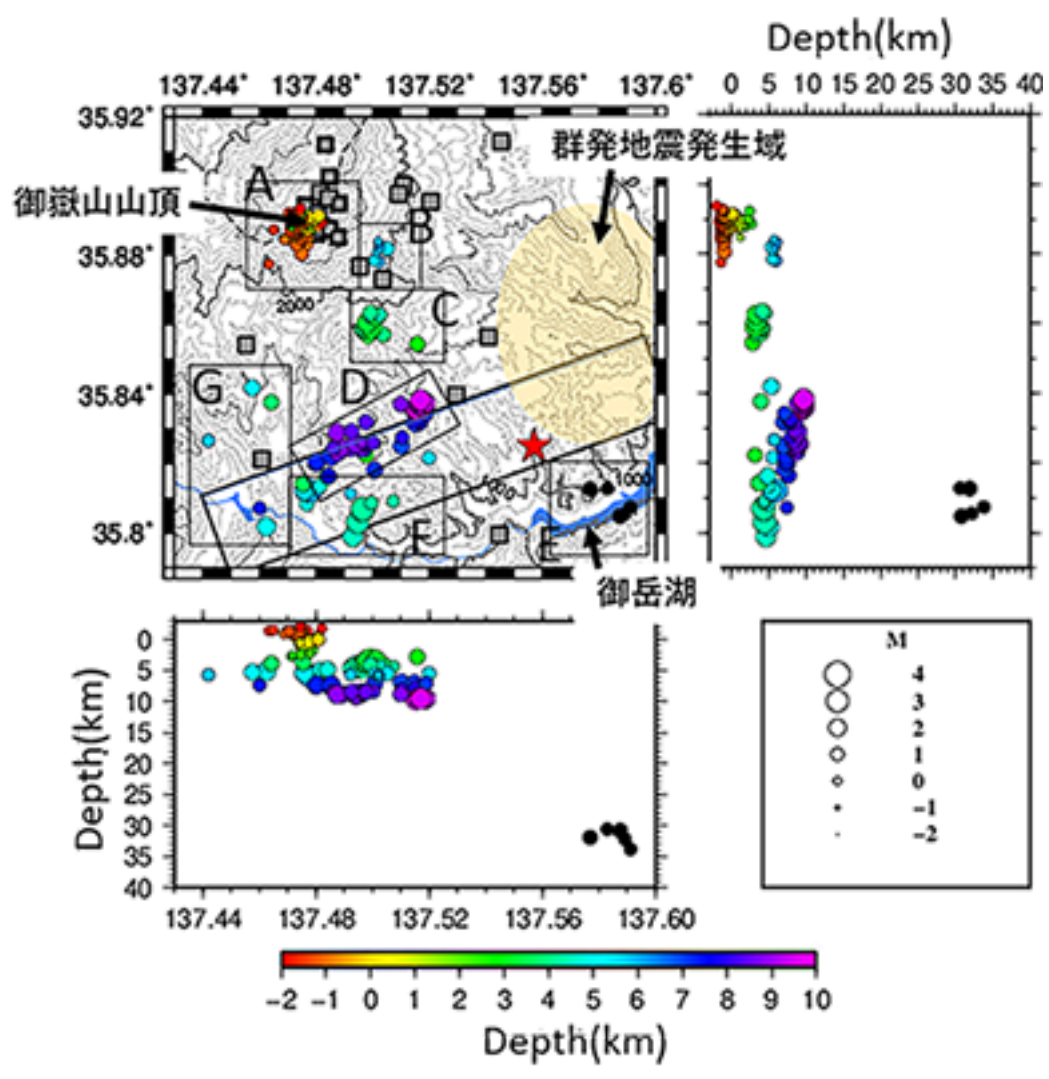
<<手法>>

2014年御嶽山噴火の直前直後の地震活動を調べたKato et al. (2014)に従い、Matched Filter法を山頂周辺の観測点に適用した。解析には御嶽山周辺の名古屋大学、気象庁、Hi-net、長野県の定常観測点の連続データ3成分を用いた。年代によってかなり観測点数が異なるが、2006年頃でも最大9点（NU.KID1, NU.MKO1, NU.MUR, NU.TKN1, V.ONTA, V.ONTN, N.KADH, TKGS, ROPW）の観測点データが使えた。テンプレート地震としては図1に示した224個の地震を用いた。

<<結果>>

1. 御嶽山山頂直下での地震活動は日頃は低調であるが、時々集中的に深さ3kmより浅部で活発化することがあり、その活動が1週間以上連続したのは2007年と2014年の噴火前だけであった。
 2. 2015年7月中旬から9月にかけて領域Dで深さ10km前後の活動が活発化した。このとき気象庁田の原観測点では火山性地震が38回観測、継続時間3分の火山性微動も1回観測され、傾斜計も僅かに山上がりを示すなど、火山活動との関連性を示唆する現象が観測されている。領域Dでの活動は2007年の噴火前の地震活動でも見られた。このときの活動も2ヶ月程度続き、その後領域BやCでの群発的な活動が発生している。これらの深さは長野県西部地震の余震活動から見えた反射面の深さ(Inamori et al, 1992)ともよく一致することから、領域D付近が深部から流体上がり口で、そこから上がってきた流体がすでに流路ができているところでは地震を起こさず流路がないところでは群発的に地震を発生しながら広がっているようにも見える。2006年以前についてはデジタル記録がそろわないためMatched Filter法を用いた解析ができないが、気象庁の震源情報によると1988年や1993年頃にも活発化しているようである。ただし2000年以前のこの付近の震源決定精度はあまり良くない。
 3. さらに深部の深さ30-35kmの地震については2010年2月3日19時代に極めて活発な活動があった。その他の時期についてはパラパラと活動があることはわかったが、あまり相関が良くない。現在テンプレートが2010年と2015年の活動の5イベントしかなく、毎回活動の場所が少しずつ異なっていることを意味しているのかもしれない。気象庁の震源情報をみると2002年8月にも深さは22-30kmとやや浅めであるが群発的に発生している。
- 今後これらの活動についても調べ、御嶽山山頂周辺のやや深い地震の活動と噴火活動、群発地震との関係を明らかにしたい。

図1 御嶽山山頂周辺の地震活動（テンプレート地震）。赤星と太い線の長方形は1984年長野県西部地震の震央と断層の位置を示す。グレーの四角は観測点、オレンジ色のハッチは群発地震発生域を示す。



Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson: Masashi Ogiso(MRI), Lina Yamaya(University of Tokyo)

Fri. Oct 15, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-18] Correlation on Seismicity of Regular and Very-low Frequency Earthquakes in the Northern Ryukyu Region

○Youichi ASANO¹ (1.NIED)

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-19] Rapid tremor migration revealed by a dense seismic array in the western Shikoku, Japan

○Aitaro KATO¹, Akiko Takeo¹, Kazushige Obara¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-20] Spatiotemporal distribution of tectonic tremors at off the Kii Peninsula during the period from December 2020 to January 2021 inferred from spatial distribution of seismic amplitudes

○Masashi OGISO¹, Koji TAMARIBUCHI¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-21] Characteristics of secondary slip fronts detected from deep low-frequency tremor

○Takuya Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Takanori Matsuzawa², Yusaku Tanaka³
(1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-22] Comprehensive detection of shallow tremor activities in the Nankai subduction zone, Japan, based on the DONET seafloor seismic data

○Kazuaki OHTA¹ (1.The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-23] Centroid moment tensor inversion using dense array of short-period OBSs at off Ibaraki region

○Lina Yamaya¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shunsuke Takemura¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM

Correlation on Seismicity of Regular and Very-low Frequency Earthquakes in the Northern Ryukyu Region

*Youichi ASANO¹

1. NIED

日向灘から南西諸島にかけてのトラフ・海溝沿いでは、活発な超低周波地震活動がしばしば観測されている。これに加えてこの地域では、プレート間で発生する通常の地震活動も比較的活発であり、M5クラス以上の地震と超低周波地震活動が同期するケースも報告されている〔例えば、Asano et al. (2019AGU)〕。このような同期のメカニズムを理解するために我々は、日向灘から南西諸島北部域の地震・超低周波地震活動の時空間的特徴をより詳細に調べた。

解析には2003年6月から2021年7月の防災科研F-net（一部、臨時観測を含む）の記録を使用し、通過帯域0.02~0.05 Hzのバンドパスフィルタを通した記録波形にAsano et al. (2015) の手法を適用した。具体的には、発生時刻と位置が既知の地震（主にセントロイド深さ20 km前後のプレート間地震）17個、超低周波地震6個をテンプレートとして、これらと類似した波形を持つ未知イベントの探索と位置推定を行った。そして、ここで検出されたイベントのリストを気象庁一元化処理震源と照合し、対応するイベントが見出された場合には通常の地震（以下、通常地震）、そうでない場合には超低周波地震と識別した。このようにして検出された通常地震と超低周波地震について、緯度・経度それぞれ0.5度の領域ごとに活動の特徴を調べた。

解析の結果、解析対象領域のほぼ全域で通常地震と超低周波地震の活動に強い相関が見られることが分かった。特に北緯30度~32度の日向灘~種子島・屋久島沖と北緯28.5度~29度の奄美大島北東沖では、エピソード的な超低周波地震活動に対応する通常地震の活発化が非常に明瞭である。このような活動の特徴は、通常地震の発生領域にまで達するようなスロースリップ・イベントが発生し、それに伴ってエピソード的な地震（場合によっては群発地震）・超低周波地震活動が生じていることを強く示唆する。より詳細に見ると、通常地震の活発化は超低周波地震活動域にごく近接した領域で特に顕著である一方で、より西側に遠く離れた領域では定常的な地震活動に埋もれて不明瞭となることも明らかとなった。すなわち、通常地震を起こしうる領域の中でも、エピソード的なイベント間にはカップリングしているとみられる領域と、イベント間にもすべりが見られる領域があることが分かった。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費 JP16H06473の助成を受けたものです。

Rapid tremor migration revealed by a dense seismic array in the western Shikoku, Japan

*Aitaro KATO¹, Akiko Takeo¹, Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1. はじめに

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートの固着域の深部では、深部低周波微動（微動）が活発に発生している。微動の発生機構の物理的理解を深めるために、微動の時空間発展をより正確かつ高精度に把握することで、微動活動の定常性・非定常性を明らかにすることが重要である。深部低周波地震の高速移動現象は、基盤的地震観測網の波形データを用いたMatched Filter法により報告されており（Shelly et al., 2007; Kato and Nakagawa, 2020）、移動速度は50 km/hr程度であることが知られている。しかしながら、震源位置の推定精度の問題があるため、高速移動現象の詳細な活動様式に関しては未解明の点が残されている。本研究では、陸域超稠密短周期地震計アレイ観測を通して、微動の高速移動現象の解明に焦点を当てる。

2. データ・解析方法

四国西部の4カ所で、短周期3成分地震計（固有周波数4.5Hz）を用いた超稠密アレイ観測を2019年12月下旬から2020年7月上旬にかけて実施し、微動の連続波形記録を取得した。データロガーとして独立型単独システムGSXを使用し、250 Hz-samplingで波形を記録した。約半年間の連続観測が可能のように電池ボックスを新たに作成し、各観測点において単一乾電池55本を用いて観測を実施した。4カ所のアレイの中で、微動域の浅部側に位置するアレイ（計100観測点：口径約2km）の連続波形記録を、Nakamoto et al. (2021)の手法を参考にして解析した。Hirose et al. (2008) によるフィリピン海プレート上面モデルを平面で近似し、その平面上に0.1 km間隔でグリッドを均等に配置した。各グリッドから、アレイの基準観測点への波線のバックアジマスと入射角を計算し、センブランス値（Neidell and Taner, 1971）を計算した。解析対象の時間窓の長さは10秒に設定し、アレイ中心の観測点の波形と波形相関値がある一定以上の値（ex. 0.3）の波形のみをセンブランス値の計算に用いた。各時間でセンブランス値の最大値が閾値（ex. 0.3）を越えた場合のみ微動の震源とした。観測期間中、微動活動が最も活発であった2020年2月下旬の活動について上記のセンブランス解析を行い、微動の時空間発展を明らかにした。

3. 結果

微動が、約10分間という短い時間内に距離約5 kmを高速に移動する現象を複数見出した。移動速度は30 km/hr程度であり、プレートの傾斜方向に対する移動が多くみられる。Matched Filter法に基づく深部低周波地震カタログ（Kato and Nakagawa, 2020; 気象庁地震カタログ）で得られた振る舞いと概ね整合的であるが、既存のカタログでは検出されていない微弱な振幅を捉えることで、微動の高速移動現象の詳細が明らかになった。特に、順方向に移動した後に、逆方向に伝播する特徴に注目して議論を行なう予定である。

謝辞） 気象庁地震カタログを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。

Spatiotemporal distribution of tectonic tremors at off the Kii Peninsula during the period from December 2020 to January 2021 inferred from spatial distribution of seismic amplitudes

*Masashi OGISO¹, Koji TAMARIBUCHI¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

はじめに

近年の地震・測地観測網の充実に伴い、プレート境界では通常の地震以外にも様々な卓越周期を持つ地震イベントの存在が明らかとなった。それらのイベントは卓越周期(周波数)が数Hzのものは低周波微動(Tectonic tremor)、数10秒のものは超低周波地震(Very low frequency earthquake: VLFE)、数日から数か月にわたるものはスロースリップと分類され、総称してスロー地震と呼ばれている。これらのスロー地震は互いに時間・空間的に相関を持った活動様式を有しており、プレート境界の状態モニタリングに重要な現象である。海域のトラフ軸付近で発生するスロー地震については、陸域観測網を用いた超低周波地震のモニタリングは行われていたものの、低周波微動のモニタリングは陸域のそれと比べるとやや立ち遅れた状況であった。しかし、自己浮上式海底地震計を用いた稠密観測によって低周波微動が発生していることが明らかとなり、また、DONETやS-netのような稠密な海底地震観測網が整備されたことから、今後は海域における低周波微動の観測もプレート境界の状態モニタリングに重要となるであろう。

紀伊半島南東沖の海溝軸付近では、Obara and Kodaira (2009)によって浅部低周波微動の存在が確認されたのち、Annoura et al. (2017)やTamaribuchi et al. (2019)によって低周波微動の活動様式が調査されている。本研究では、DONETの観測記録を用いて2020年12月から2021年1月にかけて紀伊半島南東沖の海溝軸付近で発生した浅部低周波微動の震源決定を行い、その時空間分布の特徴や外部擾乱への応答を調査する。

手法

トラフ軸付近で発生する浅部低周波微動は、速度構造や海水層の存在によって継続時間が長くなる傾向にあり(Takemura et al., 2020)、走時が不明瞭となる。そこで、本研究では地震波振幅の空間分布を用いた震源決定法(Amplitude Source Location (ASL) method; Kumagai et al., 2019)を採用した。ASL法は地震波の到達時の読み取りが不要であるという利点があるため、走時読み取りが困難な火山性微動の震源決定に広く活用されているが、浅部低周波微動の震源決定にも有効である(Tamaribuchi et al., 2019)。本研究では、Nakanishi et al. (2002)による2次元速度構造からトラフ軸付近の構造を取り出した1次元速度構造を採用し、また、減衰パラメータ及びサイト特性はYabe et al. (2021)の値を用いて、ASL法を実行する。震源計算には2-8HzのバンドパスフィルタをかけたDONETの上下動成分の連続記録を用いる。オリジンタイム及び震源の位置を仮定して、震源から観測点への計算走時から起算して60秒のタイムウィンドウにおける地震波振幅の二乗平均平方根を計算してASL法に使用する観測振幅値とした。なお、観測振幅値にはS/N比チェックや複数の周波数帯域間の振幅比チェック(Sit et al., 2012)といった品質管理を適用している。仮定するオリジンタイムを10秒ずつ移動させて連続的に震動源の位置を推定し、スクリーニングを経て最終的な震源分布を得た。

結果及び議論

得られた震源分布を図1に示す。全部で約3600個の震源を得ることができ、そのうち深さ14km以浅に決定されたものは約3300個であった。震央は、DONET1の東端付近からDONET2のEノード付近まで、約130km×50kmの範囲でトラフ軸に沿うように分布している。微動活動は12月6日、DONET1のBノード付近から始まり、トラフ軸の走向方向に約4km/日、直交方向に約3km/日の速度で震央が拡大していった。12月31日ころからDONET1と2の中間付近で発生した低周波微動の震央域は約8km/日の速度で南西方向に拡大した。また、12月28～30日頃と1月11～13日頃にかけて、10数km/日の速度で震央域が北東方向に移動する現象が確認された。

微動活動と地球潮汐との対応を確認するため、プレート境界をレシーバ断層として地球潮汐に伴う ΔCFF を計算し、微動活動と比較した。 ΔCFF が減少傾向である期間でも微動の発生レートはあまり変化せず、この期間

の微動活動は地球潮汐にはトリガーされていないと考えられる。この期間に全世界で発生したマグニチュード6.5(Global CMTプロジェクトによる)以上の地震は3つのみであった。そのうち、日本時間の12/28 6:39にチリ付近で発生したマグニチュード6.7の地震の後、数日間にわたって一時的に微動活動が活発化した。なお、この期間は上記の震央域が北東方向に移動した時期と一致している。

本発表の解析期間では、低周波微動のほか、超低周波地震活動(南海トラフ地震に関する評価検討会・東京大学地震研究所・防災科学技術研究所資料)やスロースリップを示唆する地殻変動(南海トラフ地震に関する評価検討会・海洋研究開発機構資料)が観測されているが、これらの活動と本発表で得られた低周波微動活動は非常によく対応しており、紀伊半島南東沖の浅部プレート境界で発生した一連のスロー地震活動を異なる周波数帯域で観測した事例のひとつといえる。

謝辞

本研究ではDONETの観測記録(防災科学技術研究所, 2019; doi: 10.17598/nied.0008)を使用しました。産業技術総合研究所の矢部優氏にはYabe et al. (2021)のサイト特性の値を提供していただきました。また、海底地形データはETOPO1(doi: 10.7289/V5C8276M)を参照しました。

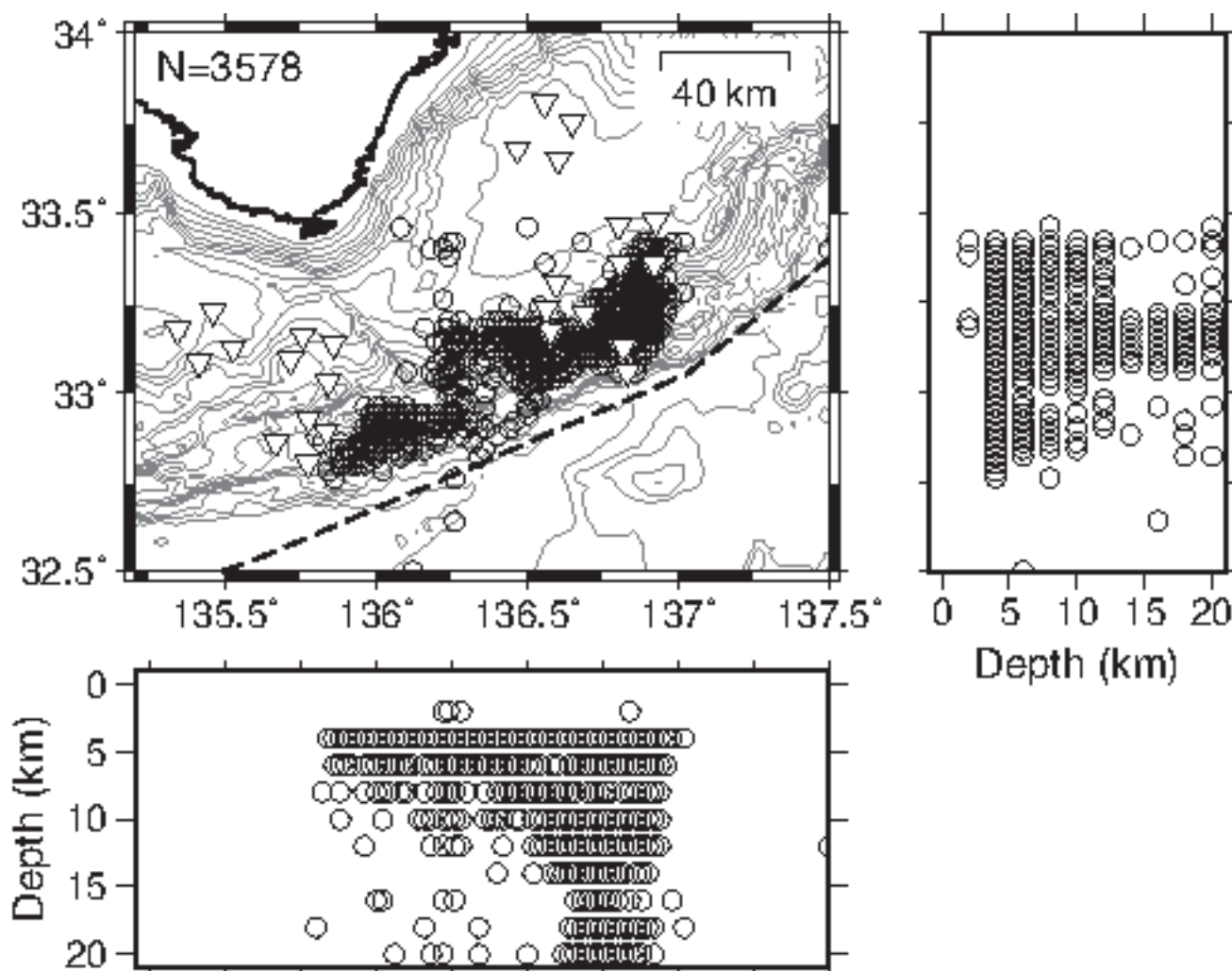


Figure 1 Hypocenter distribution of tectonic tremors derived by the ASL method.

Characteristics of secondary slip fronts detected from deep low-frequency tremor

*Takuya Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Takanori Matsuzawa², Yusaku Tanaka³

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

深部低周波微動は沈み込むプレートの境界に沿って、巨大地震発生域よりも深部側の領域で発生する。微動は短期的スロースリップイベント(SSE)とともにEpisodic Tremor and Slip (ETS) を構成し、1日約10 kmの速度で、プレート形状の走向 (strike) 方向に移動することが知られている。ETSのメインフロントが通過した後、その約10~20倍の速度でメインフロントの進行方向とは反対向きに移動するRapid Tremor Reversal (RTR)やメインフロント移動のおよそ100倍の速度でプレートの傾斜 (dip) 方向に移動するstreakなどの比較的小規模で高速な移動がしばしば確認されている。Bletery et al. (2017) は、これらの小規模な微動の移動現象を2次的スリップフロント (secondary slip front : SSF) と解釈し、CascadiaにおけるSSFを様々な時間窓で検出した。

本研究では微動移動現象の特徴をより明らかにするために、Maeda and Obara (2009)による微動カタログを用いて、紀伊半島におけるSSFを網羅的に検出した。解析期間は2001~2020年の約20年間とし、1、2、4、8、16、32、64時間の7通りの時間窓を用いて、その半分の時間長で時間窓をずらしながら解析した。ここでは、SSFを特徴づけるパラメータとして、進行方向、速度、形状の空間スケールを求めた。なお、SSFの形状は長方形を仮定した。最初に時間窓に含まれる微動分布の重心からの距離に応じて空間的な外れ値を取り除いた。SSFの進行方向は、グリッドサーチを用いて与えられた方向に投影した距離と微動の発生時刻の相関係数を最大化することによって推定し、その時空間プロットの回帰直線から速度を推定した。SSFの形状のうち進行方向の長さは、速度に時間窓スケールを乗じたものとし、直交方向の長さは、微動の空間分布の標準偏差を求めその6倍とした。また、1つの時間窓における微動数が20個未満の場合、または時間窓を4等分したいずれかにおいて微動数が3個未満の場合、SSFとしては採用しないこととした。

約20年間の微動活動をまとめて解析した結果、SSFの進行方向は時間窓が短い場合は等方的となり、時間窓が長くなるとNE-SW方向 (strikeに沿った方向) に卓越する。SSFの速度の中央値は時間窓が長くなるほど遅くなり、例えば、1時間の時間窓では265 km/day、64時間では9 km/dayとなる。SSFの形状については、ほとんどの場合で移動方向の長さに対して直交方向の長さが長くなる。この結果は、微動の移動が二次元的な現象であることを強く示唆している。

本研究ではSSFの抽出を試みたが、長い時間窓において抽出された低速度かつstrike方向の移動については、2次的な現象(SSF)ではなくETSのメインフロントそのものだと考えられる。一方、短い時間窓では、SSFはRTRと同程度及びそれよりも遅い速度を有し、偏りなくどの方向にも移動する。先行研究によって指摘されているRTRは、ETSのメインフロントの進行方向であるstrike方向に沿った時空間プロットにおいて明瞭に観測されているが、本研究結果から、RTRと同様の速度を有する微動移動現象は、全方位に対して等方的に生じていることが明らかになった。

Comprehensive detection of shallow tremor activities in the Nankai subduction zone, Japan, based on the DONET seafloor seismic data

*Kazuaki OHTA¹

1. The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

西南日本の沈み込み帯に発生する深部低周波微動は、沈み込みプレート境界において巨大地震発生領域よりも深部側で発生し、短期的スロースリップイベントや超低周波地震を伴うことがある。浅部側でも類似の現象が発生することがあり、しばしば短期的スロースリップを伴う顕著な微動活動が観測される。最近でも2020年12月から2021年1月にかけて紀伊半島南東沖において大規模な微動活動があった。本研究では、防災科学技術研究所の運用する地震・津波観測監視システムDONET1およびDONET2の広帯域地震計記録（2015年10月～2021年7月）を使用し、室戸岬沖から紀伊半島沖にかけての領域における微動活動の網羅的な検出を行った。

微動の検出・震源決定はエンベロープ相関解析によって行なった。海底地震計記録にはしばしば海洋探査によるエアガン発振等の人工ノイズが混入し、微動として誤検出されることがある。本研究ではエンベロープ波形のスペクトル振幅を用いた経験的な方法を導入し、これらを除いた。

微動は大きく分けて室戸岬沖・潮岬沖・紀伊半島南島沖の3つのアスペリティ状の領域に分布し、震源移動を伴う顕著な活動が観測された。活動期間は30～60日程度で短期的スロースリップに由来すると考えられるが、活動周期は非常に長く、本観測期間内では特定できなかった。それぞれの活動は時空間に相補的であり、プレート境界面における歪みの蓄積状態を反映していると考えられる。また、先述した2020年12月から2021年1月にかけての大規模活動においては、南海・東南海地震のセグメント境界の浅部延長領域を跨ぐ震源移動も観測され、この領域で震源移動がやや加速する傾向が見られた。こうした特徴は大地震のセグメント境界付近におけるプレート境界面の摩擦特性の変化を反映しているのかもしれない。

Centroid moment tensor inversion using dense array of short-period OBSs at off Ibaraki region

*Lina Yamaya¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shunsuke Takemura¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

近年、巨大地震発生域の定常的なモニタリング等のために、沈み込み帯に沿って海底地震計 (OBS) の観測網が構築されている。沈み込み帯に沿って発生する中小規模地震のモーメントテンソル解は、巨大地震発生域周辺の応力場や地震発生メカニズムを理解する上で重要である。一般にモーメントテンソル解の推定は低周波成分 (0.1Hz以下) の解析により実施されるが、中小規模地震は低周波成分が弱く、海底地震計によって地震発生域の周辺で観測された高周波成分を解析する必要がある。高周波成分を用いてモーメントテンソル解を推定するためには、高解像度の3次元地震構造が必要である。Yamay et al. (2021) は茨城沖領域の音響基盤上の微細な堆積層構造を、深さ方向に約0.1~1.0km水平方向に約10 kmの解像度で推定した。本研究では、この地震波速度構造を用いて、茨城沖領域における中小規模地震のモーメントテンソル解の推定を行った。

2010年10月から2011年10月にかけて、短周期OBSの稠密観測網が茨城沖領域に展開された。この観測網は32台のOBSで構成されており、観測点間隔は6 kmである。観測期間中に東北地方太平洋沖地震 (東北沖地震、Mw9.0) が発生した。この最大余震 (Mw7.7) は観測網の南西で発生し、観測網の周囲で大量の余震を引き起こした (Nakatani et al., 2015)。本研究では、この観測期間中に観測網周辺で発生し、気象庁カタログに掲載されているMj2.5以上の地震に対してセントロイド・モーメントテンソル (CMT) インバージョン (Sipkin, 1982; Takemura et al., 2020) を適用した。セントロイド位置と時刻は、水平方向0.01°、鉛直方向0.5 km、時間方向0.1秒のグリッド幅でグリッドサーチにより推定した。理論波形の計算には、Open SWPC (Maeda et al., 2017) を用い、東京大学情報基盤センターOakforest-PACSを使用した。3次元地震波速度構造は、Yamay et al. (2021) 及び Koketsu et al. (2012) を結合して作成したモデルを採用した。観測及び理論波形には0.4-1.0 Hzのバンドパスフィルタを適用し、CMTインバージョンを実施した。

その結果、数百個のCMT解の推定に成功した。推定したCMT解の位置は、プレート境界と概ね調和的な傾きを示した。観測網の北側では、逆断層の地震が多く発生したことがわかった。一方、観測網の南西部では、太平洋プレート内に正断層地震が推定された。これは、太平洋プレートの上に沈み込んだフィリピン海プレート (Uchida et al., 2009) の影響であると考えられる。また、東北沖地震の発生前はプレート境界と調和的な逆断層の地震が発生していたが、東北地震の発生後は様々なタイプの地震が発生していたことがわかった。さらに、観測網の北側に比べて、南側のメカニズムがばらばらだった。これは、東北地震の本震及び大規模な余震に伴う応力場の変化及び、観測網南側に推定されている沈み込んだ海山 (Mochizuki et al., 2008) に伴う局所的な応力場の不均質に影響されていると考えられる。

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson: Ryosuke Azuma (Tohoku University), Satoru Baba (University of Tokyo)

Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 12:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-24] Low-frequency tremors activity immediately after the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0) detected by offshore aftershock observation

○Susumu Kawakubo¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Kazuaki Ohta³, Masanao Shinohara⁴ (1.Tohoku University, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-25] seismicity around the subducting seamount in the Japan-Kuril trenches junction detected by a broad-band OBS array and S-net observatory

○Ryosuke AZUMA¹, Susumu Kawakubo¹, Hidenobu Takahashi³, Yusaku Ohta¹, Ryota Takagi¹, Syuichi Suzuki¹, Makiko Sato¹, Ryota Hino¹, Shinichi Tanaka², Masanao Shinohara² (1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.ERI, University of Tokyo, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry)

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-26] Quantification of characteristics of temporal change in very low frequency earthquake activity

○Satoru BABA¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Akiko Takeo¹, Ryo Kurihara¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-27] Fault geometry of M6-class outer-rise normal-faulting earthquakes in central Japan Trench from ocean bottom seismograph observations

○Koichiro OBANA¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1.JAMSTEC)

11:45 AM - 12:00 PM

Low-frequency tremors activity immediately after the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0) detected by offshore aftershock observation

*Susumu Kawakubo¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Kazuaki Ohta³, Masanao Shinohara⁴

1. Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込んでいる北海道南方沖のプレート境界浅部では、0.01–0.1 Hzの帯域で卓越する超低周波地震 (Very Low Frequency Earthquake, VLFE) や2–8 Hzの帯域で卓越する低周波微動 (Low Frequency Tremor) などのスロー地震が観測されている。低周波微動は、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) の運用が始まった2016年以降初めて検出 (Nishikawa et al., 2019; Tanaka et al., 2019) され、Kawakubo et al. (JpGU, 2021) は2006–2007年に同海域で設置されていた海底地震計の観測データの再解析によって、2016年以降の活動と同じ場所で微動が発生していたことが明らかにされた。一方、2006–2007年の活発化の時間間隔は2–4ヶ月と、2016年以後のS-netで観測される微動活動の活発化が1年間隔であるのに対して短い。こうした活動度の違いはVLFEにも認められ (Baba et al., 2020)、その背景には、この領域で発生していた2003年十勝沖地震 (M 8.0) の余効すべり (Itoh et al., 2019) があると考えられる (Kawakubo et al., JpGU, 2021)。そこで、本研究では2003年十勝沖地震直後の期間の低周波微動の活動を、自己浮上式海底地震計による余震観測 (Shinohara et al., 2004; Machida et al., 2009) で得られた地震波形連続記録を用いて解析した。この期間中、VLFEの活動が非常に活発であったことが知られており (Asano et al., 2008; Baba et al., 2020)、微動も多発していた可能性が高い。このような背景から、本研究では2003年十勝沖地震の直後の余震観測データにエンベロープ相関法 (e.g., Ide, 2010) を適用し、微動の検出と震源決定を試みた。

本研究でデータを解析した余震観測は、気象庁、東京大学、九州大学、北海道大学、海洋研究開発機構、東北大学の共同観測として実施され、2003年10月1日から11月20日までの期間に、本震の破壊域周辺に広帯域地震計1台と短周期地震計28台が展開された。10月20日には短周期地震計が追加投入され、11月20日までの間は計37台による観測が行われた。本研究では、3成分の波形記録に2–8 Hzのバンドパスフィルターを施し、RMS振幅を計算することで3成分を合成し、0.5 Hzのローパスフィルターを適用したのちに1 Hzにリサンプルしたエンベロープ波形を解析に用いる。エンベロープ相関解析 (e.g., Ide, 2010) ではエンベロープ波形を時間窓120秒、オーバーラップ60秒で区切っていき、観測点間の時間窓同士の最大相互相関係数が0.6を超える観測点ペアが10組を超えた場合にイベントを検出したとみなした。

解析の結果、15,475個のイベントが検出され、そのうち震央誤差と時間残差がそれぞれ5 km、3秒以内でかつ、振動継続時間が20秒以上と長く、微動と考えられるイベントは614個であった。検出した微動の多くは十勝沖地震の本震すべり域より浅部側に海溝軸に沿って分布し、S-netの観測で検知されている微動の分布とおおむね一致する。本研究が解析対象としている期間中にAsano et al. (2008) やBaba et al. (2020) により検出されたVLFEは2000個以上あり、数時間から数日の間隔で活発な活動が見られるが、微動と識別・震源決定できたイベント数はVLFEの発生数と比べて非常に少ない。2006–2007年観測やS-net観測により検知された微動活動とVLFEの活動度との間にはよい相関が見られるため、上記の微動の検知数は過小であるように思われる。その原因として、観測網が通常地震の発生域側に偏っていて微動発生域の一部しか覆っていないことのほか、微動活動が非常に活発であるために異なる震源を持つ複数の微動が同時多発的に発生していて、通常のエンベロープ相関法でこれらを区別して検知・震源決定することが困難となっていることも想定される。今後は、検知できた微動の時空間分布を、余震としてすでに震源が決定されている通常地震の分布と詳細に比較するために、走時補正を導入した震源決定を行うとともに、微動の特徴の詳細を議論するために観測点の振幅補正を行って規模を推定し、微動の波形記録の周波数領域での特徴抽出も進める予定である。

seismicity around the subducting seamount in the Japan-Kuril trenches junction detected by a broad-band OBS array and S-net observatory

*Ryosuke AZUMA¹, Susumu Kawakubo¹, Hidenobu Takahashi³, Yusaku Ohta¹, Ryota Takagi¹,
Syuichi Suzuki¹, Makiko Sato¹, Ryota Hino¹, Shinichi Tanaka², Masanao Shinohara²

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. ERI, University of Tokyo, 3. Central Research Institute of Electric Power Industry

北海道襟裳岬沖の千島ー日本海溝会合部では、沈み込んだ海山 (Tsuru et al., 2005) のごく近傍に活発な浅部超低周波地震(sVLFE) 活動が陸上広帯域地震観測網F-netによって観測されている (例えば、Baba et al., 2020)。一方、sVLFEと同期し海溝に沿って帯状に分布する浅部低周波微動が日本海溝地震津波観測網S-net (2017年以降: Nishikawa et al., 2019; Tanaka et al., 2019) と機動海底地震観測 (2006-2007年: Kawakubo et al, JpGU, 2021) によって観測されているが、微動とsVLFEの空間な対応関係の議論は、海域地震に対する陸上と海域の観測網とでの震源精度の違いのために困難であった。こうした背景から、沈み込んだ海山周辺でのスロー地震活動の実態解明には、活動域の直上観測にそれらの時空間分布を把握することが重要である。著者らはこれまでに、sVLFEの発生が予想される沈み込んだ海山周辺に120秒速度計1台と1秒速度計4台で構成した海底地震計 (以降、OBS) アレイで2019年7月~2020年10月の間に観測された地震波形記録を、エンベロープ相関法 (以降、ECC, Ide, 2010) を用いて解析を行ってきた。その結果、先行研究では未検出であった海山のごく近傍に継続時間の長い微動を検出し、2020年2月中旬の一週間で特に活発であったことがわかった (Azuma et al., JpGU, 2021)。一方、微動の発生時刻においてsVLFEのシグナルが確認されていない、地震波形記録のランニングスペクトル上には検出したイベント以外にも低周波帯域に多数のシグナルが認められる、本アレイが既知の微動帯で起きたイベントに震源精度を持たないことが課題であった。そこで本研究は、既知の微動帯での活動との関連性も検討するためにOBSとS-netの併合処理を行い、会合部の地震活動の実態を明らかにしていく。

OBSアレイ観測期間中に、S-net (S4, S5ケーブルの全ノードとS6ケーブルの1~9番ノードの計60点) で観測された記録のみに対してECCを適用してイベントカタログを作成した (S-netカタログ)。ECC解析では、2-8 Hz帯域の地震波形記録から作成した3成分合成エンベロープを、時間窓120秒、60秒オーバーラップで切り出し、観測点間の最大相互相関係数が0.6以上となる観測点ペアが10ペア以上ある場合にイベント検出とみなした。次に、Azuma et al. (2021) によるOBSアレイのECC解析で得られたカタログ (OBSカタログ) とS-netカタログのそれぞれに含まれるイベントについて、微動・ローカル・遠地地震・誤検知の判別をOBS・S-netの地震波形 (時系列・スペクトル) に基づき目視で行った。通常地震と判別されたイベントについては、OBSとS-netの記録を統合してP・S波到達時刻を読み取りHYPOMH (Hirata and Matsu'ura, 1987) によって震源再決定を行った。なお、再決定ではPS-P時間から求めた堆積層補正を施し、速度構造にはJMA2001 (Ueno et al., 2002) を用いた。

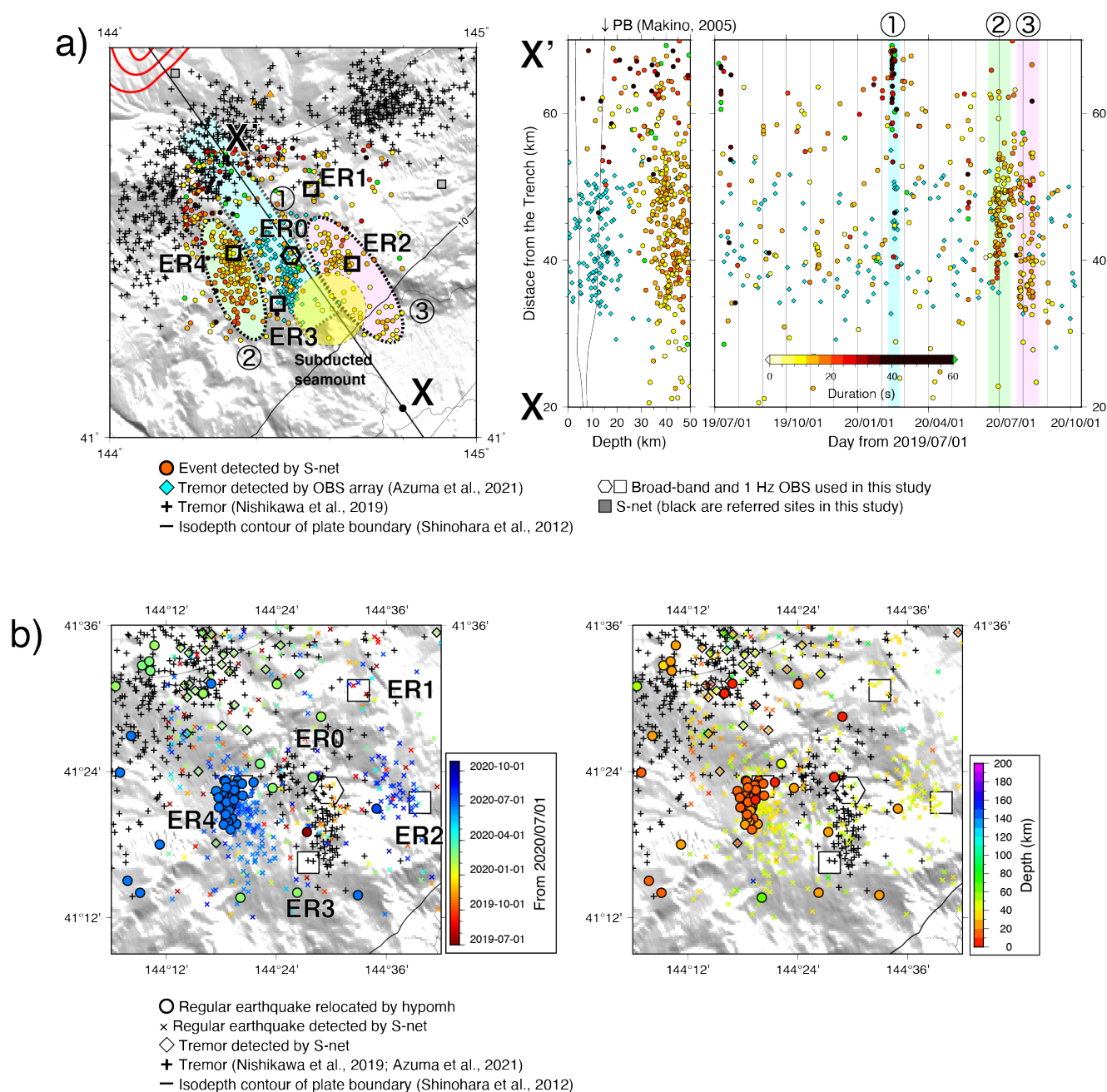
S-netデータに対するECC解析の結果、OBSアレイの周辺で450個余りのイベントが検出された。これまでに、解析対象期間中におこった3回の活発期 (図a中の①~③) に検出されたイベントを中心に、目視判別と震源再決定を行った。以下に活動の詳細および今後の課題を述べる。

①2020年2月14日からの一週間に、周波数成分と継続時間から微動と解釈できるイベントが、OBSとS-netの両カタログ合わせて40個検出された。そのうちS-netの解析で見つかったイベント (図a中○) はOBSの解析で見つかったもの (図a中◇) と異なって、微動発生帯 (図a中+) に分布し、発震時刻も一致しない。しかしながら、発生時期は一致しており、OBSとS-netの両方で目視でも低周波数帯域に未検出のイベントが多く認められることから、より活発な活動であった可能性がある。OBSとS-net観測点を併合した再解析によって未把握の微動の探索を進める。

②2020年6月末から7月上旬にかけて、明瞭なP・S相を持ちF-P時間にもとづくマグニチュードが1~2程度の微小地震がS-netカタログで多数検知された。これらはOBSによるECC解析で有意なイベントとして検出されなかったが、地震波は観測されており、再決定した震源45個 (図b中○) はどれも海山北西側にあるOBS観測点

ER4下に集中して分布した。震源深さはプレート境界周辺に相当する（図b右）が、観測点配置とS波到着走時残差を考慮すると、厳密な位置関係の議論は難しい。ただし、これらの地震波形は脈動帯域より高周波側で相似性が非常に良い傾向にあり、なんらかの特徴的な活動が起こっていた可能性がある。二重走時差や波形相関を用いた震源決定により地震間の相対位置を定量的に調べるのが課題である。

③2020年7月末からの活動は震源再決定を終えていないため詳しい考察に至らないものの、いくつかの地震は海山の北東側ER2下に分布することがわかっている。今後の解析で上記3活動の相対位置関係の検討、微動活動を手がかりとしたsVLFEの探索を進め、沈み込んだ海山の周りの地震活動を明らかにしていく。



Quantification of characteristics of temporal change in very low frequency earthquake activity

*Satoru BABA¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Akiko Takeo¹, Ryo Kurihara¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

巨大地震が発生するプレート境界では、通常の地震のほかに、スロー地震と呼ばれる通常の地震よりも遅いすべり速度の断層破壊現象が発生している。スロー地震には、巨大地震発生域の深部延長で発生する深部スロー地震と、海溝軸近くで発生する浅部スロー地震が存在する。スロー地震の一種である超低周波地震（VLFE）は、0.02–0.05 Hzの周波数帯で観測されており、深部および浅部のどちらについても、防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netで15年以上にわたる解析が可能である。Baba et al. (2020a, b) ではF-netの連続波形記録に対し、統一した手法によって網羅的にVLFEを検知した。具体的には理論波形を使ったテンプレートマッチングによって、千島海溝・日本海溝および南海トラフ沿いで2003–2018年の期間のVLFEの発生時刻、位置、モーメントを推定し、その空間変化の特徴を調べ、VLFE活動の時間変化の類似性から14の地域に分類した。VLFEのモーメントの総解放量は、西南日本の日向灘の浅部VLFEで最も大きく、西南日本の深部VLFEや東北沖の浅部VLFEは小さいという特徴があった。本研究では、各地域のスロー地震活動の時間変化の特徴を定量化することを目的として、Baba et al. (2020a, b) のVLFEカタログを用いて、Kurihara & Obara (2021, <https://doi.org/10.1002/essoar.10505063.3>) の手法に基づきVLFE活動の群発性と連続性などを評価する。

解析期間を各地域のVLFEの検出個数で割った値を平均発生間隔とし、前のイベントとの発生時間差が平均発生間隔より短いイベントが連続して10個以上継続する場合、群発的活動と定義する。この群発的活動の割合を地域ごとに評価するため、各地域のVLFE総数に対して、群発的活動に含まれるVLFEの割合を群発率とした。さらに、群発的活動の発生頻度を求めるため、時間的に連続する2つの群発的活動の時間間隔を評価した。

VLFE活動の群発率は全体的に浅部VLFEの方が深部VLFEよりも大きく、特に日向灘、紀伊半島沖、十勝沖の浅部VLFEの群発率は0.9を超えており、間欠的な活動様式を示していた。一方、四国東部や東海地方の深部VLFEは群発率が低く、0.4程度であった。群発的活動の間隔は、地域を問わず深部VLFEは数ヶ月程度であったが、浅部VLFEでは、2–3ヶ月程度から2年程度までと、地域による多様性が大きい。Baba et al. (2020a, b) の結果と合わせて考察すると、プレート境界浅部のVLFE活動は、深部と比べ時空間的な多様性が大きく、プレート境界浅部は応力蓄積と解放過程の不均質性が深部と比べて大きいことを示唆する。本発表では、群発率や群発的活動の時間間隔といったスロー地震活動の時間変化の特徴を支配する要因を検討する。

Fault geometry of M6-class outer-rise normal-faulting earthquakes in central Japan Trench from ocean bottom seismograph observations

*Koichiro OBANA¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC

2011年3月の東北沖地震発生以降、日本海溝の海溝軸付近や海溝海側のアウターライズ域では、太平洋プレート内部で発生するアウターライズ正断層地震の活動が活発化している (e.g. Asano et al. 2011)。複数のM7クラスの地震が発生しているのに加え、さらに大規模な地震の発生とそれに伴う津波の被害も懸念されている (e.g. Lay et al., 2011)。日本海溝のアウターライズ域を震源とする正断層地震では、複数の正断層が連動して破壊した事例が、主に余震分布から指摘されている。例えば、1933年昭和三陸地震では、余震分布の再解析や津波記録の検討から、東下がりと西下がりの傾斜方向が異なる2つの正断層が同時に破壊した可能性が指摘されている (Uchida et al., 2016)。また、海底地震計による観測からはM7クラスの地震において2枚の共役な正断層や横ずれ断層に沿って余震が発生している様子が観測されている (Hino et al. 2019, Obana et al., 2013)。ただし、これらの観測は本震発生以降に設置された海底地震計を用いたものであり、本震そのものや、本震直後の余震活動を捉えたものではない。JAMSTECでは、日本海溝中部の海溝軸周辺ならびに海溝海側において、超深海型を含む計45台の海底地震計 (OBS) を用いた地震観測を2017年9月から2018年7月にかけて実施したが、観測期間中にM6クラスのアウターライズ地震が3回発生している (2017年9月21日M6.3、10月6日M6.3、11月13日M6.0)。OBSによる記録を用いた解析を行い、これらの地震について本震の破壊開始点や余震分布、震源メカニズムを検討した。特に各地震の本震発生後3日間程度については、連続記録から可能な限り検測を行なった上で解析を実施した。得られた震源分布からは、いずれの地震も本震発生から約1時間の余震は、本震の破壊開始点を含む10km程度の範囲に限られていることが示された。一方、本震後1時間の余震域と比べると、その後数時間で余震域が断層走向方向に10kmから15km程度拡大していく様子も捉えられている。また、2017年9月の地震では、断層の走向とは直交方向に10kmから15km程度離れたグラーベンでも、本震から数時間以内に活動が活発化している。余震分布は、概ねGlobal CMTによるメカニズム解の走向方向に広がっている。海底地形に見られる正断層によって形成されたグラーベンや、海洋プレート形成時の構造を反映していると考えられる地磁気異常の方向とも一致しており、ホルスト・グラーベンを形成する正断層や、プレート形成時の古い構造に沿ってアウターライズ地震が発生していると考えられる。余震分布は傾斜角45度から70度の傾斜面に沿っており、広角の正断層の活動を示唆している。また、2017年10月の地震では、傾斜角や傾斜方向の異なる複数の面上の余震活動が本震直後から発生しており、M6クラスの地震であっても複数の断層が連動して破壊する可能性を示している。アウターライズ地震による津波を想定する場合、このような複雑な断層面形状も考慮に入れることが必要である。

Room C | Regular session | S17. Tsunami

AM-2

chairperson: Ryosuke Azuma (Tohoku University), Satoru Baba (University of Tokyo)

Fri. Oct 15, 2021 12:00 PM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-01] Outer rise Normal Faulting Earthquakes and their Aftershock Activities

○ Nobuo HAMADA¹ (1.non)

12:00 PM - 12:15 PM

Outer rise Normal Faulting Earthquakes and their Aftershock Activities

*Nobuo HAMADA¹

1. non

1. はじめに

1933年昭和三陸地震 (Mw 8.4)は海溝を挟んだ両側で余震活動が活発化し、海溝外側では本震と同じ正断層型の余震、海溝陸よりではプレート間の逆断層型の余震が発生したと考えられている。一方2006年の千島中部の地震では11月のプレート間地震 (Mw 8.3)の直後から海溝を挟んだ海域で昭和三陸地震の場合と似たような余震活動が発生した。この余震分布は二ヶ月後の2007年1月の海溝外側の正断層型の最大地震 (Mw8.0)発生前にはすでに形成されていたことから、昭和三陸地震の場合と似たような余震分布が海溝外側の正断層型の地震の発生にかかわらず、プレート間の逆断層地震だけでも形成されることを示している。従って余震分布の類似性を考慮すると1933年昭和三陸地震の震源過程の中にプレート間の逆断層地震の発生が含まれている可能性を、昨年秋の学会で言及した。海溝外側の正断層型地震の発生は希であるが余震分布について他にも似たような事例がないか検討した。

2. 日本海溝外側の場合

日本海溝の外側 (outer rise) で発生した正断層型の地震は、大きい方から1933年昭和三陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震の直後に宮城県沖で発生した余震 (Mw 7.6)、2005年11月に同じく宮城県沖で発生した地震 (Mw 7.0)の三つがある。これら三つの地震はいずれも海溝軸から60km前後離れた場所に震央が求められていること、余震が本震の海溝側、西よりの海域に分布するという共通の特徴がある。海溝内側、陸寄りのプレート間逆断層と考えられる余震活動は、2005年11月の地震では発生は認められていない。2011年の地震では本震自体の余震活動との区別は不可能であるためその存在は確認できない。

3. その他の沈み込み帯の場合

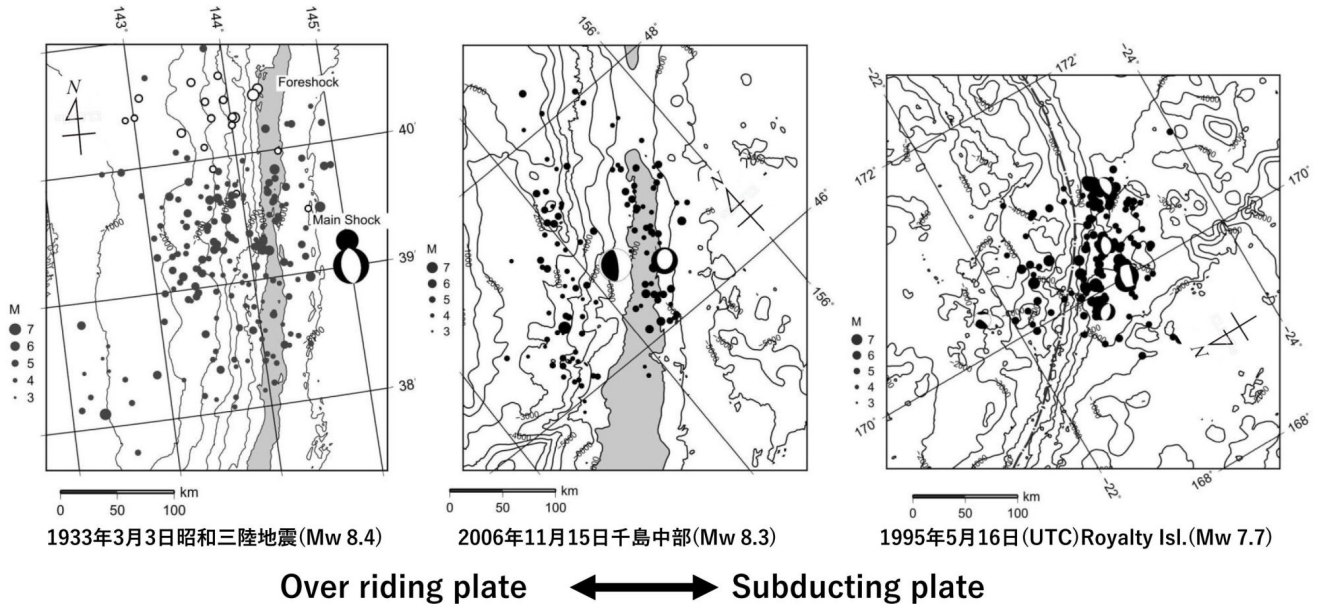
2005年の宮城県沖の地震で、海溝内側の余震活動が誘発されなかったことの原因として地震の規模 (Mw 7.0) が小さかったことが考えられることから、Mw 7.5以上の海溝外側で発生した浅い正断層型の地震の余震活動を調査した。海溝外側のプレート内で発生する地震には浅い正断層型の地震以外に、横ずれ型の地震、プレート下部のプレート内で発生する逆断層型の地震がある。

Outer riseでの横ずれ型の地震は、1988年3月のAlaska湾の地震(Mw 7.8)、1998年5月の台湾東方沖の地震(Mw7.5)、2012年4月のSumatra島沖の地震 (Mw 8.6、Mw8.2) の地震、2018年1月のAlaska Kodiak島沖の地震(Mw 7.9)などがある。これらの地震では2012年4月のSumatra島沖の地震以外には海溝内側の地震活動には何ら影響が認められない。Sumatra島沖の地震でも海溝陸側のプレート間の逆断層地震の活動は、海溝外側の余震活動に比較すれば微々たる数で、海溝外側の横ずれ断層の地震が、プレート間地震の発生に与える影響は小さいと判断される。

正断層地震については事例が少なく、資料が不十分ながら1969年11月のSumatra島沖地震 (Mw 7.6)、1995年5月のRoyalty諸島の地震(Mw 7.7)、同じく2018年12月のRoyalty諸島の地震(Mw 7.5)がある。1995年の地震では図に示すように海溝軸内側にも余震が発生していることが分かる。しかし海溝外側で発生した余震に比べその数は少数である。昭和三陸地震や、2006年千島中部の地震のような余震活動にはなかったことが分かる。地震検知能力が不十分だった1969年のSumatra島沖の地震も、報告されている余震の数は少ないが同様の傾向が伺われる。

2018年12月のRoyalty諸島の地震については約3ヶ月前の8月末に海溝内側でMw 6.9のプレート間逆断層地震が発生しその余震が海溝内側で広がっていたことから、2006年千島中部の地震のようなプレート間地震と海溝外側の正断層地震のdoubletと見ることができる。数少ない事例であるが、海溝外側の正断層地震だけでは、昭和三陸地震に伴って発生したような海溝両側での余震活動を形成することは難しいと考えられる。昭和三陸地震の発生の二ヶ月前に北部で発生した先行地震活動 (前震) が海溝内側の領域で発生したことも考え合わせると、昭和三陸地震は、海溝外側の正断層地震に、海溝内側でのプレート間逆断層地震を伴った可能性が高い。

海溝を挟んだ両側で余震活動を伴った地震の事例



Room C | Regular session | S17. Tsunami**PM-1**

chairperson: Toshitaka Baba (Tokushima University), Satoshi Kusumoto (JAMSTEC)

Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-02] A New Calculation Method of Wet/Dry Boundary for Tsunami Inundation○Masaaki MINAMI¹ (1. Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute)

1:30 PM - 1:45 PM

[S17-03] Comparison between tsunami hazard curves and exceedance rate estimated from historical tsunamis in the Nankai subduction zone○Toshitaka BABA¹, Ryoichi YAMANAKA², Hiroyuki FUJIWARA³ (1. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2. Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima University, 3. NIED)

1:45 PM - 2:00 PM

[S17-04] Tsunami source model of the 1854 Ansei-Tokai earthquake based on crustal deformation and tsunami trace height distributions○Kentaro IMAI¹, Satoshi Kusumoto¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi^{2,1}, Takashi Furumura³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. ERI, The Univ. of Tokyo)

2:00 PM - 2:15 PM

[S17-05] The 1854 CE Ansei Tokai Earthquake and Tsunami Deposits at Iruma, Minami-Izu City, Shizuoka Prefecture○Satoshi KUSUMOTO¹, Kentaro Imai¹, Takane Hori¹, Daisuke Sugawara² (1. JAMSTEC, 2. Tohoku University)

2:15 PM - 2:30 PM

[S17-06] Back-projection imaging of a tsunami source location using S-net ocean-bottom pressure records○Ayumu MIZUTANI¹, Kiyoshi Yomogida² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S17-07] Interaction of tsunamis generated by successive Mw 7.4 and Mw 8.1 earthquakes on Kermadec Islands on March 4, 2021○Yuchen WANG^{1,2}, Mohammad HEIDARZADEH³, Kenji SATAKE¹, Kentaro IMAI², Takane HORI², Gui HU⁴ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Department of Civil & Environmental Engineering, Brunel University London, 4. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University)

2:45 PM - 3:00 PM

A New Calculation Method of Wet/Dry Boundary for Tsunami Inundation

*Masaaki MINAMI¹

1. Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute

1 背景と目的 津波浸水計算では、浸水現象を水が存在するメッシュ(以下wetと表記する)と水が存在しないメッシュ(以下dryと表記する)との境界条件として取り扱うことが一般的である。その境界条件の違いは、浸水計算結果の正確性、計算安定性に大きく影響する。これまでに相田(1977)、岩崎・真野(1979)、Hibberd and Peregrine(1979)などのアルゴリズムが利用され、最近では、岩崎・真野(1979)の方法を改善した小谷ほか(1998)の方法(以下、小谷の方法という)が、研究や防災のための津波数値計算で広く利用されている(例えば、Imamura et al. 2008; 国土交通省 津波浸水想定の設定の手引きVer 2.10 2019)。小谷の方法は、計算精度に優れていることから多くの計算で用いられている。一方、小谷の方法を用いた場合に、遡上先端の計算が不安定になる場合があることも指摘されている(原子力土木委員会 津波評価部会 2007)。この計算不安定は、従来の相田(1977)の方法を用いることで回避可能である(原子力土木委員会 津波評価部会 2007)が、相田(1977)の方法は越流公式を基にした計算条件であり、その計算精度についての検証が充分でない。そこで本研究では、津波数値解析に基づいて、小谷の方法の計算不安定の原因を明らかにするとともに、それを改善して数値解析の安定性を向上させるための手法を提案する。

2 小谷の方法 小谷の方法については以下の通りである。1) wet側の波高がdry側の地盤高がよりも高い場合にのみ遡上計算を行う。(2) wet/dry境界の計算を行う際の全水深Dについて、wet側の波高とdry側の地盤高の差とする。(3) wet/dry境界の計算の移流項の計算の際に、全水深Dがゼロまたはある下限値より小さくなった場合には、その全水深を分母として持つ項のみを省略し移流項の計算を行う。

3 数値解析条件 数値解析においては、津波数値モデルJAGURS (Baba et al. 2015)を用いた。JAGURSでは、上述の小谷の方法が浸水境界条件として実装されている。

4 結果と考察：小谷の方法の数値不安定の原因 数値解析の結果、小谷の方法の数値不安定は、上記2の(2)wet側格子の波高とdry側格子の地盤高の差を全水深Dとしていることが原因であった。これは、通常wet/wet境界では、境界に接する二つのメッシュの全水深の相加平均を境界上での全水深Dとしており(例えばImamura et al. 2006)、これには両方の静水深が情報として入っている。しかしながら、小谷の方法の(2)では全水深Dでは海側(wet側)のメッシュの静水深の情報が抜け落ちており、海側のメッシュの静水深が大きければ大きいほど、wet/dryの境界条件からwet/wetでの計算に変わった際の全水深Dの不連続が大きくなり、その全水深Dの差がfluxを計算する際に大きな差となっていた。つまり、小谷の方法では、wet/dry境界のfluxが過少に評価され、次タイムステップでwet/wet境界に変わったときに、fluxの不連続が大きくなる場合があり、これが計算不安定に繋がっていると考えられる。これは、水深/地盤高の変化が小さい場合、つまりは隣接メッシュ間の水深/地盤高の差が十分小さい場合では問題にならず、水深/地盤高の変化が大きい場合に顕在しやすい。

5 新手法の提案とその性能評価 以上の考察に基づいて、以下の通り、wet/dryの境界条件についての改善を提案する。それは、wet/dry境界で用いる全水深Dについて、小谷の方法の(2)のwet側の波高とdry側の地盤高の差ではなく、wet側の全水深Dとdry側の全水深(dryなので全水深はゼロ)の相加平均、すなわちwet側の全水深Dの1/2を用いる方法である。この方法を用いることによって、wet/wetでの計算との不連続をなくすることができる。この提案手法を、小谷の方法では計算不安定(数値振動)が生じていた状況に適用した結果、数値振動は発生しなくなることを確認できた。

Comparison between tsunami hazard curves and exceedance rate estimated from historical tsunamis in the Nankai subduction zone

*Toshitaka BABA¹, Ryoichi YAMANAKA², Hiroyuki FUJIWARA³

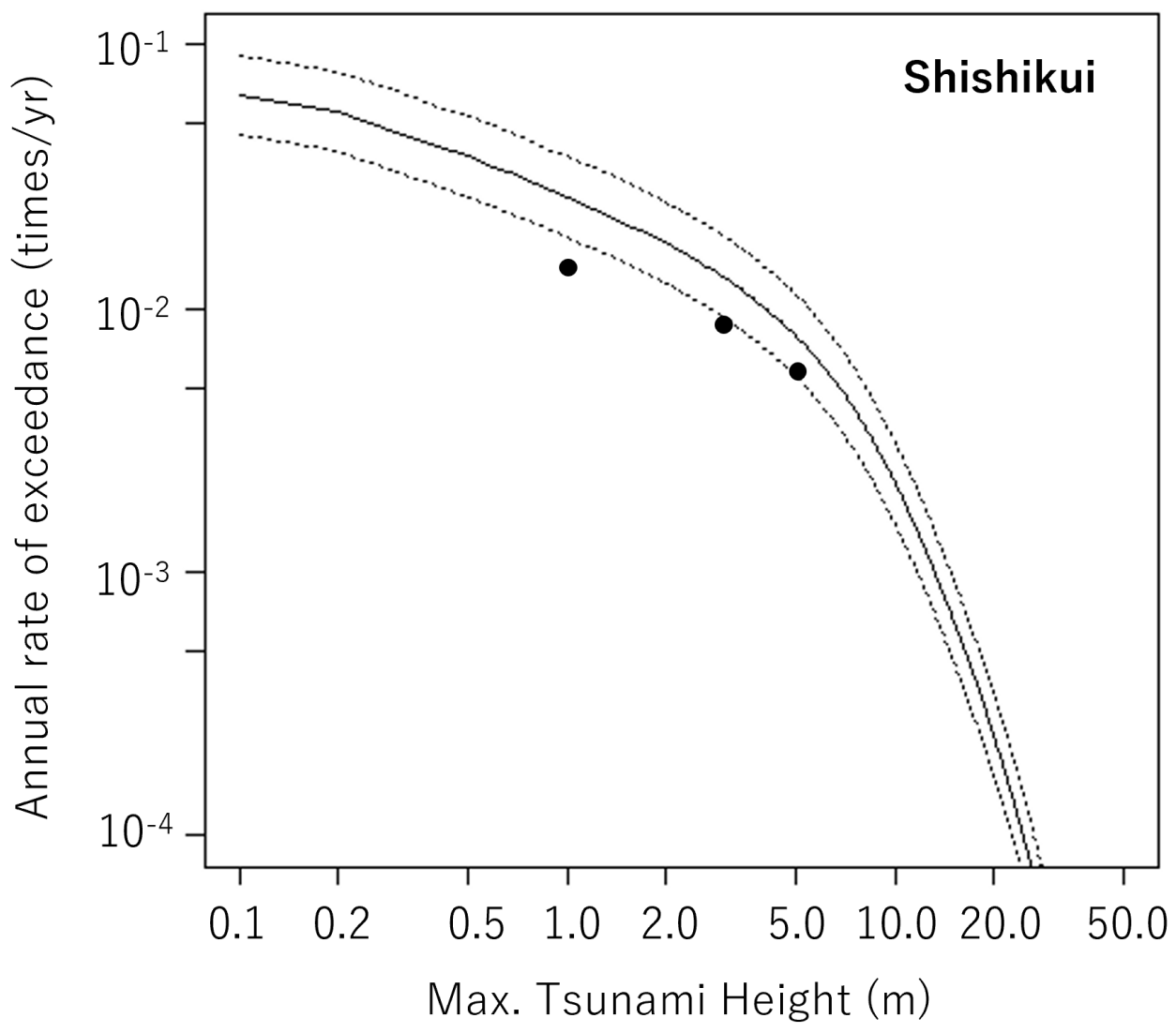
1. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2. Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima University, 3. NIED

最悪ケースの地震シナリオに基づく津波浸水想定が津波ハザードマップとして公表される。一方、地震や津波は不確実性を含んだ自然現象であるため、例えば都市計画などの分野においては津波ハザードの確率的な評価も必要である。藤原ほか（2020）は、M7.6～M9.1の3480ケースの南海トラフ地震のすべりモデルを提案し、すべての津波を計算して、海岸線での津波ハザードカーブを構築した。一般に津波ハザードカーブの妥当性評価は容易ではないが、南海トラフの海岸では過去の複数回の海溝型地震による津波記録が利用できる。そこで本研究では、津波ハザードカーブと歴史津波の超過頻度を比較する。藤原ほか（2020）では、長期評価による地震発生確率を利用して今後30年間の津波ハザードカーブを提示しているが、これでは歴史津波の超過頻度との比較が難しいので、本研究ではGR則を利用して、長期間の平均的なハザードカーブを求めた。GR式の推定には、気象庁一元化地震カタログ（確定版）の期間は1923年1月14日～2015年5月31日、範囲は東経131-139度、北緯30-36度のうち海域に震央がある地震で、かつ、マグニチュードは5.0以上、震源深さは50km以浅のデータを利用した。得られたGR式は $\log(N)=3.097-0.668M\pm0.156$ となった（誤差は標準偏差）。ここで、Mはマグニチュード、NはM毎の年頻度である。本研究では最終的に津波浸水の確率評価を目的としており、3480ケースのすべての断層モデルに対して高分解能な津波浸水計算を行った。ネスティングアルゴリズムを利用し、計算領域のうちの一部分（徳島県）で10mの空間分解能の計算格子とした。徳島県の津波浸水想定で用いられた地形データを利用した。津波ハザードカーブの作成では、偶発的不確実性を入れた最大津波高の確率密度分布とGR則に基づく発生頻度を独立事象として重ね合わせて、さらに潮位の確率密度分布を畳み込んで津波襲来時の潮位の違いによる影響も考慮した。東北大学津波痕跡データベースのデータと、欠けている部分は安中ほか（2003）の震源モデルを利用して計算し、歴史津波の超過頻度を推定した。比較地点は高分解能な津波計算を実施した徳島県海岸線とした。津波ハザードカーブと歴史津波から推定した超過頻度はほぼ矛盾ないものの、ハザードカーブの方がやや大きい（図）。これは、GR式の推定においてプレート境界型地震以外の地震も含んでいることが一因と考えられる。一方、湾口に津波防波堤が存在する地域では、歴史津波から求めた超過頻度より明らかに津波ハザードカーブの値が小さくなっており、津波防波堤による軽減効果が確認できる。

図 本研究で求めた徳島県穴喰での津波ハザードカーブ（実線）。点線はGR式の標準偏差に対応するハザードカーブのばらつき。黒点は歴史津波記録から求めた超過頻度。

謝辞：本研究の津波計算には東京大学情報基盤センターのFujitsu PRIMERGY

CX600M1/CX1640M1(Oakforest-PACS)を利用させていただきました。科研費基盤研究B（19H02409）の支援を受けています。記して感謝いたします。



Tsunami source model of the 1854 Ansei-Tokai earthquake based on crustal deformation and tsunami trace height distributions

*Kentaro IMAI¹, Satoshi Kusumoto¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi^{2,1}, Takashi Furumura³

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. ERI, The Univ. of Tokyo

南海トラフ沿いではM8クラスの巨大地震が100～200年程度の間隔で繰り返し発生し、大きな被害をもたらしてきた。一連の南海トラフ巨大地震の発生様式は、以前は一定のプレート運動速度に基づき、固有の地震断層面における再来と発生間隔が受け入れられてきた（例えば、石橋・佐竹, 1998）。一方、瀬野

（2012）は、安政東海地震と昭和東南海地震の強震動生成域が異なる（相補的である）可能性を指摘し、昭和東南海地震が安政東海地震の震源域の一部で起きたという従来の考えに疑問を呈している。今井・他

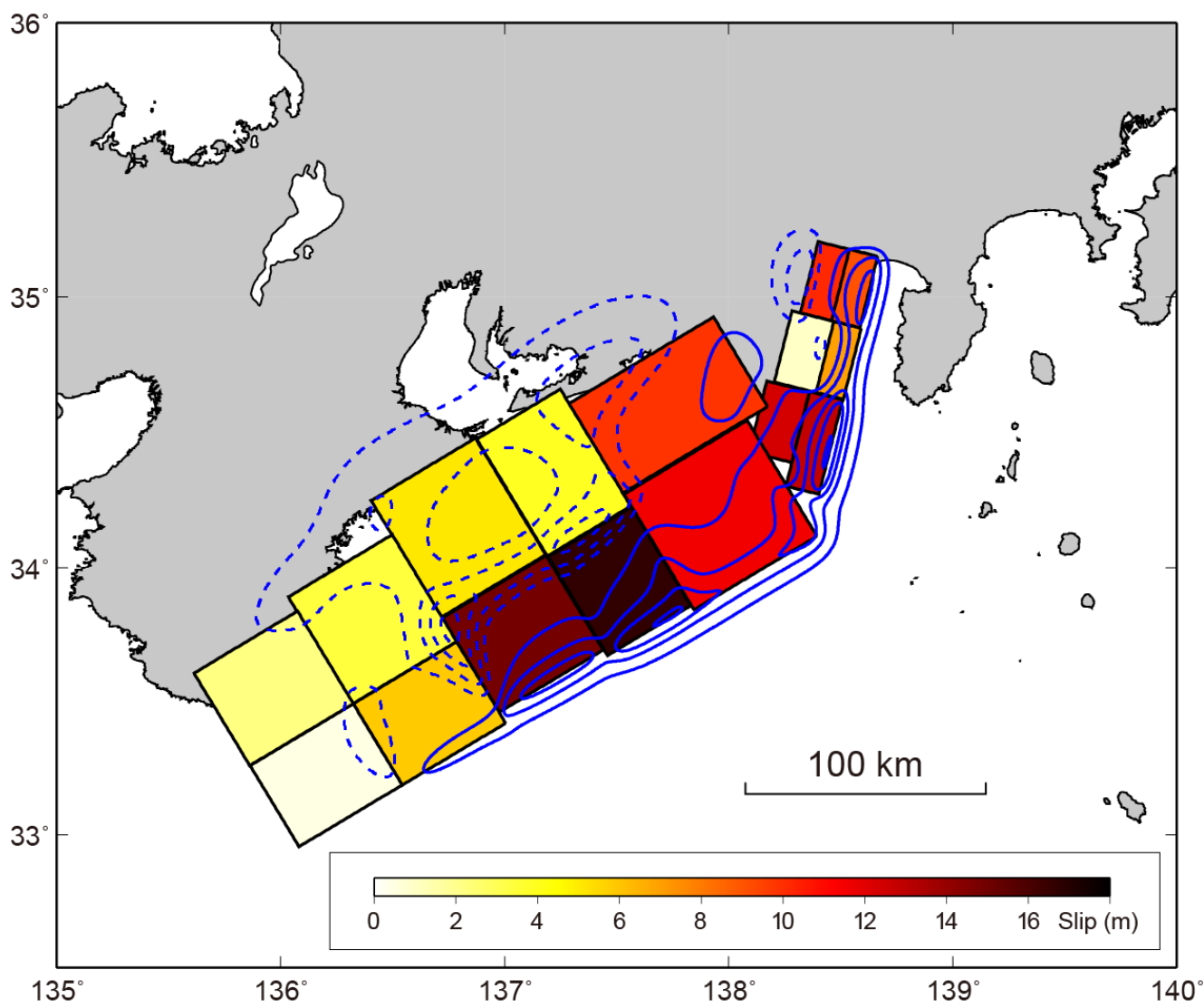
（2019）は安政東海地震の津波波源域について、津波高分布に基づいた再検討を行ったが、そこでは、地殻変動量分布や3次元のプレート構造が十分に考慮されていなかった。本研究では、これらの考慮に加えて、現在入手できる地震津波に関する履歴情報を最大限に活用して、安政東海地震の波源断層モデルの再評価を試みる。

本研究では、既往研究（羽鳥, 1977；都司・他, 1991, 行谷・都司, 2005；都司・他, 2013；都司・齋藤, 2014；今井・他, 2017）と、史料集の再精査によって得られた津波痕跡高（今井・他, 2019）を用いた。地殻変動量については既往研究（石橋, 1984；Kitamura & Kobayashi, 2014）に加え、既刊の地震史料集における本地震による地殻変動量に関する記述から評価した。

波源断層モデルは南海トラフ沈み込み帯の3次元構造モデル(Nakanishi et al., 2018)を参照し、地殻変動や津波高の痕跡点数を考慮して東海震源域については6分割、東南海震源域は10分割の合計16枚の小断層で構成されるものを仮定した。各小断層上の滑りによる地殻変動はOkada (1985)の方法、津波のグリーン関数は線形長波理論（空間格子間隔150 m, 時間間隔0.2 s）に基づき計算した。地殻変動の痕跡点は34点を利用した。津波痕跡点については既往研究のデータも含め283点あるが、空間格子間隔の問題や精緻な地形復元作業を必要とする痕跡点、内海の痕跡点（例えば、浜名湖沿岸や伊勢湾内の痕跡）を除いた45点を利用した。比較的遠浅地形となる地点では、津波伝播における非線形性の影響が無視出来ないため、各地点における線形長波と非線形長波モデルから計算された津波高の応答関係を8次の多項式を用いて近似した。地殻変動量と津波痕跡高の分布を説明する各小断層のすべり量は、再現性指標VRS (Imai et al., 2020) が最適値（≒1）に近づくようにSA (Kirkpatrick et al., 1983) を用いて推定した。地殻変動や津波痕跡高には観測誤差や本地震以外の地殻変動成分が含まれると考えられる。本解析では、この誤差を1 m程度と仮定して一様乱数により与え、1,000回試行のアンサンブル平均処理を行い、各小断層のすべり量を評価した。

求められた波源断層のすべり量分布を図1に示す。本モデルの地震規模はMw 8.5±0.1程度となった。また、VRSは0.85±0.02となり、地殻変動や津波高の分布をおおむね再現できた。津波痕跡高分布を説明するためには、御前崎沖、遠州灘沿岸および志摩半島のトラフ軸付近で大きな断層すべりが必要であり、これにより伊豆半島入間における15 mの津波高を再現できる。しかし、国崎の22 mの津波高は再現できていない。昭和東南海地震の波源断層モデル（例えば、Baba et al., 2005）には志摩半島沿岸直下で大きな断層すべりが生じていたことと照らし合わせると、瀬野（2012）が指摘した安政東海地震と昭和東南海地震の強震動生成域の相補関係は、津波励起領域においても存在が示唆される。

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



The 1854 CE Ansei Tokai Earthquake and Tsunami Deposits at Iruma, Minami-Izu City, Shizuoka Prefecture

*Satoshi KUSUMOTO¹, Kentaro Imai¹, Takane Hori¹, Daisuke Sugawara²

1. JAMSTEC, 2. Tohoku University

1854年12月23日に発生した安政東海地震に伴う津波は伊豆半島から紀伊半島の沿岸にかけて高く、伊豆半島沿岸での津波遡上高はおよそ5~6 mと推定されている(e.g., 羽鳥, 1977; 都司ほか, 2019)。一方、伊豆半島南端に位置する静岡県南伊豆町入間では15.7 mと周辺地域に比べて三倍近い大きな値が得られている。また入間の旧家である外岡家の『加美家沿革誌』の伝承には安政東海地震津波で集落に津波堆積物が打ち上げられたという記述があり、それに基づいて現地調査した結果、津波堆積物の層厚は4 m以上、場所によっては8 mに達すると推定されている(浅井ほか, 1998)。一般に陸上に堆積する津波堆積物の層厚は数十cm~1 m未満であり、この津波堆積物は異常に厚いことになる。本研究では、最新の津波波源モデルと津波土砂移動数値計算モデルを基に、津波遡上高と津波堆積物の堆積層厚について検証した。

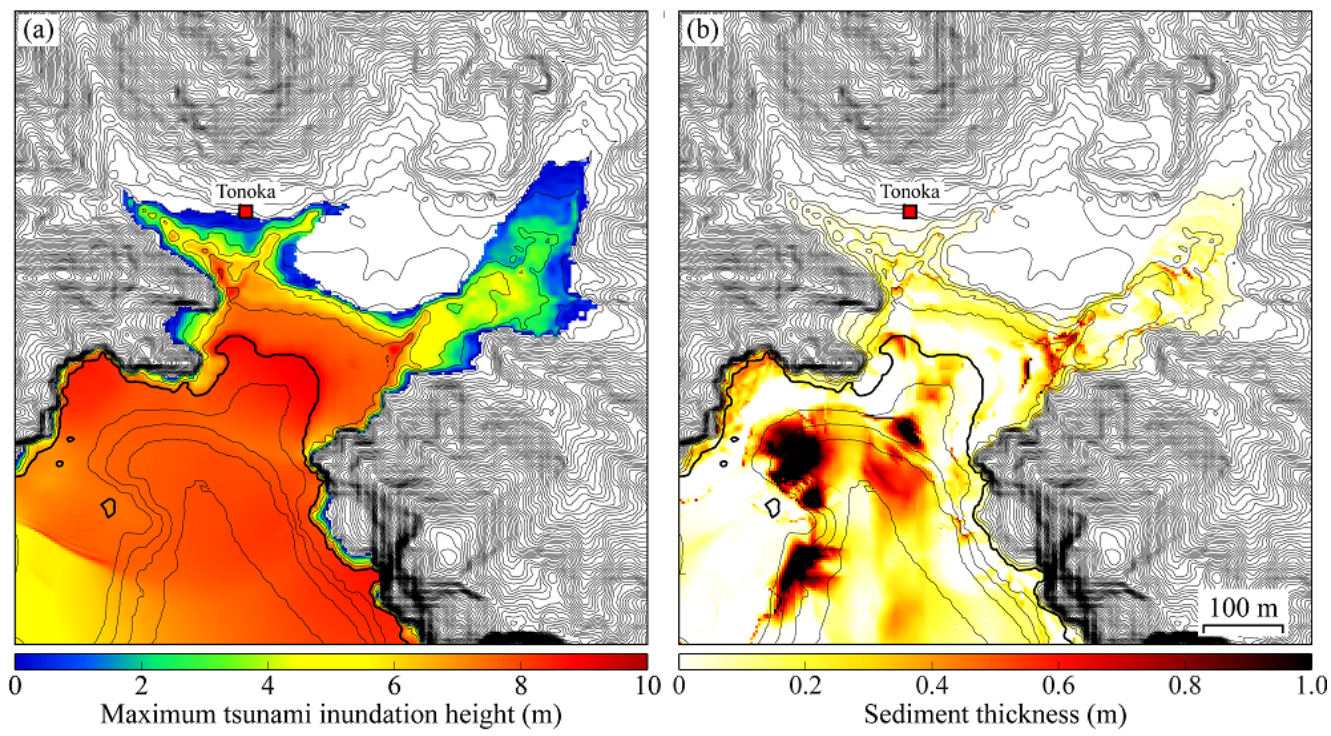
本研究の解析対象地域は静岡県南伊豆町入間である。入間集落は北・東・西の三方を山に囲まれた谷の出口にあり、南は海に面している(図1)。谷の出口をふさぐように砂堆が存在しており、この砂堆の標高は高い場所では16 m以上ある。『加美家沿革誌』によると、この砂堆上部は人工改変を受けていて、現在の集落は1924年1月11日に30数軒を焼く大火の焼け跡を均して再建されている。入間での津波高(15.7 m)は集落西側の外岡家の近傍にある木の枝に浮遊物が漂着した高さである。

津波伝播・浸水・土砂移動の数値解析には、エネルギー平衡に基づく浮遊砂濃度評価式(Sugawara et al., 2019)を採用した津波土砂移動数値解析モデル(高橋ほか, 1999)を使用した。中央粒径は0.267 mmとし、モデルパラメータは高橋ほか(2011)とGusman et al(2018)に準拠した。本解析では、既往研究と再精査した津波痕跡高を基に再評価した最新の安政東海地震を津波波源モデルとして採用した(今井ほか, 2021)。砂堆の標高は藤原ほか(2008; 2009)を参考に現在の地表面から6 m取り除いた場合(ケース①, 標高10 m)と砂堆が存在しない場合(ケース②, 標高6 m)の二種類で計算を実行した。

津波浸水の数値計算結果を図1aに示す。ケース②で砂堆が存在しない場合、外岡家まで津波は到達しない。すなわち、外岡家に津波が到達した原因は砂堆によって地形が狭まっていたことで津波が増幅したためと推察される。また砂堆は安政東海地震以前から存在していたことも示唆される。数値計算により求めた津波堆積物の堆積層厚は厚いところでも1 m程度で、浅井(1998)の報告と大きく異なる結果が得られた(図1b)。一方、入間で地質試料を採取・分析した藤原ほか(2008; 2009)はおよそ1 m程度の粗粒砂礫層を安政東海地震の津波堆積物と認定しており、これは我々の研究成果と概ね調和的である。浅井ほか(1998)の主張は『加美家沿革誌』と「津波以前には現在の集落地の西方に位置する外岡家から集落の東側に位置する畑が見渡せたが、現在は集落に阻まれてその畑は見えない」という現地の聞き取り調査に基づくもので、人工改変などの盛土を津波堆積物と誤認した可能性がある。

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

図1 安政東海地震津波の(a)推定最大浸水深分布と(b)計算堆積層厚分布。赤四角は外岡家の位置を示す。



Back-projection imaging of a tsunami source location using S-net ocean-bottom pressure records

*Ayumu MIZUTANI¹, Kiyoshi Yomogida²

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University

地震学においてバックプロジェクション(BP: back-projection)法は、アレイ観測による波形記録を足し合わせるといった簡便な操作によって地震の破壊伝播過程を推定することが可能であるため、これまでに多くの巨大地震に適用されてきた(e.g., Ishii et al., 2005; Honda et al., 2011)。またFukahata et al. (2014)はBP法についての理論的な考察をおこない、各観測点におけるグリーン関数の足し合わせをデルタ関数で近似できる場合には、BP法で精度の良い推定が可能であることを示した。

近年、日本列島太平洋沖にはS-netやDONETといった海底観測網が整備され、津波の伝播を面的に捉えることが可能になってきた。本研究では、S-netで得られた水圧記録に対してBP法を適用することで、津波波源の位置推定をおこなった。地震波記録を対象としたBP法では、想定する断層面上の点と各観測点の間での理論走時だけ観測記録の時間軸をずらしてスタックし、得られた波形がその点における地震波の放射強度を表しているとして断層すべりの時空間変化を推定する。これに対して、津波を対象とした場合、線形長波仮定の下では、津波の伝播速度は水深と重力加速度のみで決まり、伝播補正が正確に行えるため、地震波の場合と比較して正確な理論走時が得られる。またBP法で得られる結果は、津波を励起する海面変動に関係していると考えられる。

本研究では、まず初めに、津波記録にBP法を適用した場合の理論走時の影響を確認した。津波数値シミュレーションコードのJAGRUS (Baba et al., 2015)を用いて、幅2 kmの2次元ガウス関数を波源とした津波を計算し、各観測点におけるグリーン関数とした。水深データにはETOPO1 (Amante and Eakins, 2009)を、観測波形をスタックする際に必要な理論走時の計算にはFast Marching Method (Sethian, 1999)を用いた。S-netのS1-S5の観測点におけるグリーン関数を足し合わせた結果を図1に示す。実際の水圧データを用いて足し合わせた波形は $t=0$ にピークを持っており、デルタ関数によって近似できる。つまり、理論走時を精度良く計算することができる場合は、単純な足し合わせで直達波を抽出することができると考えられる。次に実際のデータの例として、2016年11月22日の福島県沖地震(Mw6.9)に伴って発生した津波のS-net海底水圧記録に対してBP法を適用した。S-netのS1-S5のサブシステムの中で、生の水圧記録とNAOTIDE (Matsumoto et al., 2000)で計算した理論潮汐との相関が0.8以上となった94観測点を解析に用いた(図2(a))。観測記録の前処理として、(1)理論潮汐を除き、(2)全体の平均値を引くことでDC成分を取り除き、(3)100-3000秒のバンドパスフィルタを適用し、(4)それぞれの最大振幅によって各波形を正規化した。図2(b)に、BP法でスタックして得られた波形を2乗し、最初の300秒を積分した結果を正規化してプロットした。図2(b)における破線は津波インバージョン(Gusman et al., 2017; Adriano et al., 2018)と気象庁による遠地実体波を用いた震源過程解析によって推定された断層すべりによる海底変位を示しており、本研究で得られた振幅分布はそれらと良く一致している。

BP法は対象とする領域と観測点との間の理論走時のみを用いて推定をおこなうため、グリーン関数や逆行列の計算が不要であり、津波波源推定で一般的におこなわれている波形インバージョン(e.g., Satake, 1987)と比べて計算コストが非常に低い。また、津波到達時刻を元にした逆伝播による波源推定(e.g., Hatori, 1969)は走時情報のみを用いるため波源域内での振幅分布を十分に復元できない。したがって、本研究が提案する津波を対象としたBP法は、簡便かつ精度の良い津波波源の推定手法として有用であると考えられる。

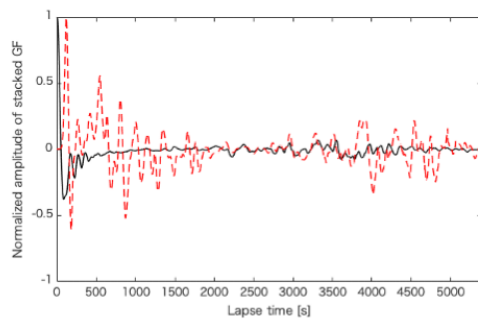
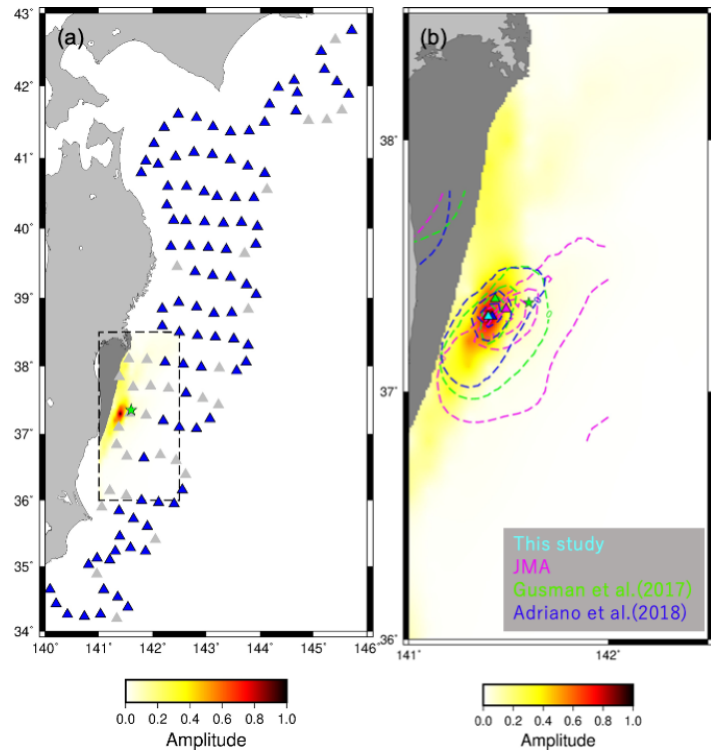


図1

S1-S5の各観測点におけるグリーン関数のスタック波形。理論走時を計算する際に実際の水深を用いたものを黒線で、一定値(2500m)を用いた場合を赤破線で示している。津波の波源は図2(a)における震源の位置とした。

図2

2016年11月22日の福島県沖地震(Mw6.9)による津波記録にバックプロジェクション(BP)法を適用した結果。
(a)解析に使用した観測点(青)と震源(緑)。黒破線はBP法の対象とした領域を示している。
(b)(a)の破線で囲まれた領域を拡大した図。水色の三角形は本研究によって推定された振幅のピークを、紫、緑、青のコンターと三角形は気象庁、Gusman et al. (2017), Adriano et al. (2018)によって推定された断層すべりによる海底変位の絶対値とそのピークを示している。コンターの間隔は0.5 mとした。



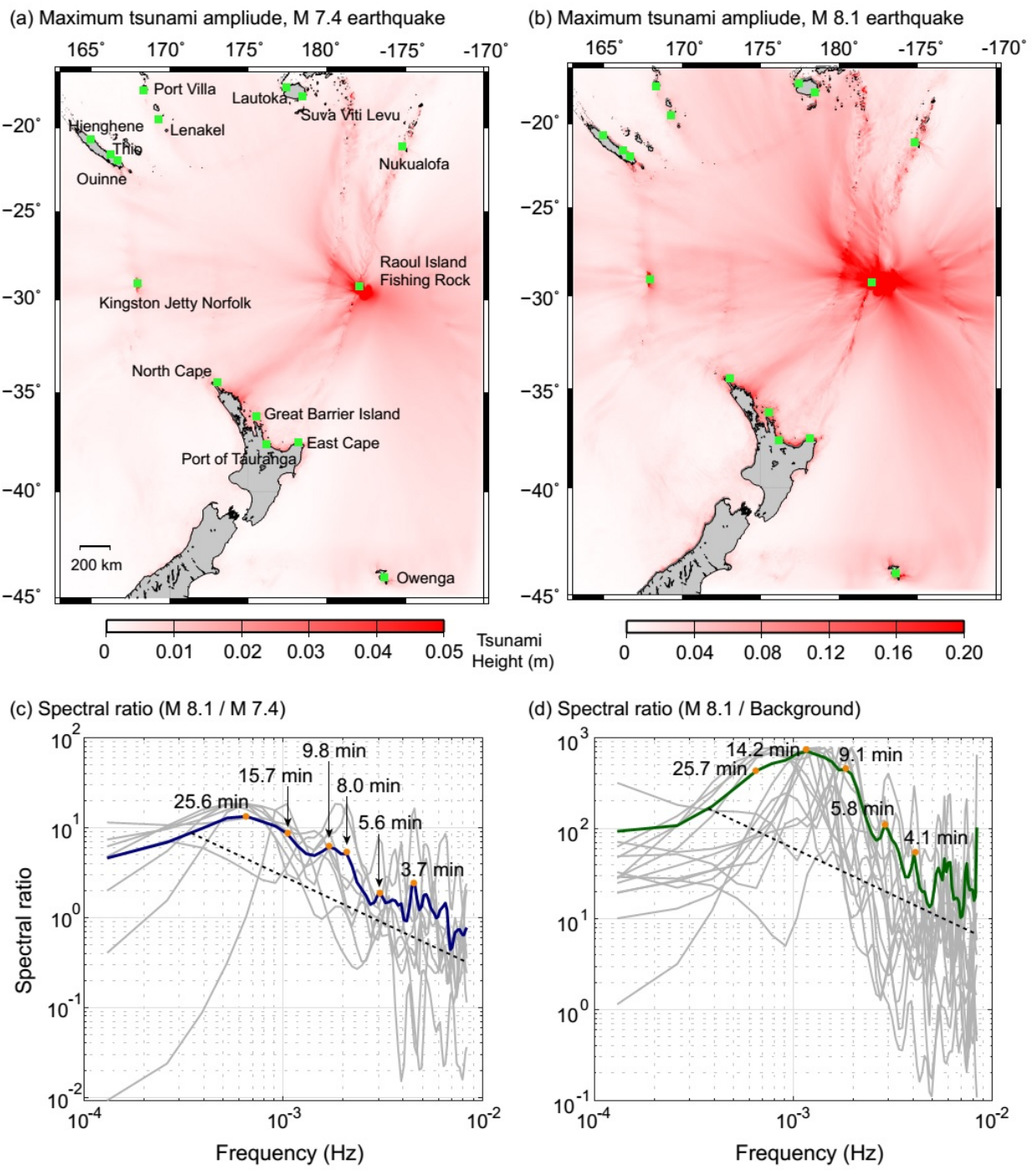
Interaction of tsunamis generated by successive Mw 7.4 and Mw 8.1 earthquakes on Kermadec Islands on March 4, 2021

*Yuchen WANG^{1,2}, Mohammad HEIDARZADEH³, Kenji SATAKE¹, Kentaro IMAI², Takane HORI², Gui HU⁴

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Department of Civil & Environmental Engineering, Brunel University London, 4. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University

On March 4, 2021, two earthquakes occurred successively on Kermadec Islands, New Zealand. The foreshock (Mw 7.4) happened at 17:41:23 (UTC) whose epicenter was at 29.58°S, 177.03°W with a depth of 41 km. It had a thrust mechanism and generated a small tsunami. The mainshock (Mw 8.1) happened at 19:28:33 (UTC), approximately two hour later after the foreshock. The epicenter was located at 29.11°S, 176.77°W with a depth of 37 km. It generated a moderate tsunami affecting New Zealand and other Polynesian countries. The epicenters of two earthquakes are very close (~55 km) and their focal mechanisms are similar. The occurrence of two successive tsunamigenic earthquakes provides us with a rare opportunity to study the tsunami interaction.

We collected sea surface elevation records at 15 tide gauges: North Cape, Great Barrier Island, Port of Tauranga, East Cape, Owenga, Nukualofa, Suva Viti Levu, Lautoka, Lenakel, Port Villa, Ouinne, Thio, Hienghene, Kingston Jetty Norfolk, and Raoul Island Fishing Roack. We conducted spectra analysis to these records. The spectra of Fourier analysis show that the dominant period ranges of the first and second tsunamis are 5–17 and 8–28 min, respectively. In addition, wavelet analysis show that two distinct oscillation patterns with different period ranges are visible on the wavelet plots of most stations. We observed that after the arrival of the second tsunami, the oscillation in the period range of the first tsunami still persists and becomes sometimes stronger at some tide gauges, indicating the interaction of the two tsunamis. We calculated the source spectrum of second tsunami by two different approaches: empirical Green's function (EGF) method (Heidarzadeh et al., 2016) and tsunami/background ratio method (Rabinovich, 1997). Using the first tsunami as the EGF, spectral deconvolution indicates that energy of the second tsunami is mainly distributed in the period range of 8–30 min, with spectral peaks at 25.6, 15.7, and 9.8 min. The method of tsunami/background ratio presents similar results: The period range of main energy of the second tsunami is 7–28 min, with spectral peaks at 25.7 min, 14.2 min and 9.1 min. These results are also consistent with the dimensions of USGS source models. It indicates that the short axis has stronger effects on tsunami source spectrum.



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

AM-2

chairperson:Daisuke Ishimura(Tokyo Metropolitan University), Yoshiki Shirahama(AIST)

Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-01] Averaged left-lateral slip rate of the Shufukuji fault revealed by surface exposure dating

○Yoshiki SHIRAHAMA¹ (1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan (GSJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))
11:00 AM - 11:15 AM

[S10-02] An examination on interconnectedness between the southern part of the Lake Biwa Western Coast Fault system and Oubaku Fault, northern part of the Eastern Margin Fault system of the Nara Basin, central Japan.

○Taku KOMATSUBARA¹, Akihito Nishiyama² (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)
11:15 AM - 11:30 AM

[S10-03] Paleo-seismic events on the Futagawa fault, Futa, Nishihara Village, Kumamoto Prefecture

○Daisuke ISHIMURA¹, Yoshiya Iwasa², Naoya Takahashi³, Ryuhei Oda¹, Ryuji Tadokoro⁴
(1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Hiroshima Univ., 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ.)
11:30 AM - 11:45 AM

[S10-04] Impact of tsunami on Hokkaido due to the 1780 Urup earthquake

○Yutaka HAYASHI¹ (1.Meteorological Research Institute)
11:45 AM - 12:00 PM

[S10-05] Damage seismic intensity distribution and damage due to the 1944 Tonankai earthquake in Suwa area

○Karan Okuyama¹, Kotoe Uchiyama, Daisuke Hirouchi² (1.Shinshu University Education grad school, 2.Shinshu University)
12:00 PM - 12:15 PM

Averaged left-lateral slip rate of the Shufukuji fault revealed by surface exposure dating

*Yoshiki SHIRAHAMA¹

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan (GSJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

野坂・集福寺断層帯集福寺断層は北西―南東方向に約10 km延びる左横ずれ断層である。本研究では、文部科学省委託事業「活断層評価の高度化・効率化のための調査」の一環として集福寺断層の左横ずれ変位速度の解明を試みた。集福寺断層に沿う滋賀県長浜市沓掛地区周辺において、沓掛面と呼ばれる河成段丘が分布する。それらを下刻する小河谷には、断層を横切る箇所において系統的な左横ずれ変位が認められる。

まず、沓掛面や周辺の山岳地形や変動地形を把握するため、断層に沿う長さ4 km、幅1.5 kmの範囲を対象に航空レーザー測量を実施し、数値地形データ（1 mメッシュ）を作成した。地形データを元にした判読の結果、沓掛面を下刻する河川に約100 mの系統的な左横ずれ変位が確認された。また、沓掛面を構成する沓掛砂礫層及び基盤の花崗岩の分布や変形を把握するため、断層周辺の踏査を行った。結果、沓掛砂礫層が断層の両側に分布していることが確認され、沓掛面が離水して以降の変位が蓄積されていることが明らかとなった。したがって、沓掛面の離水年代が得られれば、平均変位速度が推定できる。

沓掛面は地形学的には高位面相当との分類がなされているものの、これまで定量的な編年は試みられていない。そこで、被覆層中の火山灰分析、表面照射年代測定、ESR年代測定を実施した。まず、沓掛面上においてピット掘削を行い、段丘堆積物とその被覆層を採取した。被覆層について火山灰分析を行った結果、始良Tn火山灰が検出されたものの、高位面相当に対応するそれより古い広域テフラは確認できなかった。被覆層と段丘堆積物について表面照射年代測定を行い、得られた宇宙線生成核種蓄積量を分析した結果、予察的な結果として、後期更新世以前に離水したことが推定された。ここから求められる平均変位速度は集福寺断層の活動度がB級以下であること示唆している。本発表では、表面照射年代測定やESR年代測定の結果を元に沓掛面の地形発達過程と離水年代について議論し、平均変位速度について考察する。

An examination on interconnectedness between the southern part of the Lake Biwa Western Coast Fault system and Oubaku Fault, northern part of the Eastern Margin Fault system of the Nara Basin, central Japan.

*Taku KOMATSUBARA¹, Akihito Nishiyama²

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1 はじめに

奈良盆地東縁断層帯北部・黄檗断層は、琵琶湖西岸断層帯南部の比叡断層と、直線状の谷を介して約2.5 kmの間隔で近接している。これらが連動するか否かは、奈良盆地東縁断層帯の活動性評価に当たって重要な項目の1つである。演者らは、地形・地質学と歴史学および考古学の面から、これらの断層が最新活動時に連動したか否かを検討した。

2 琵琶湖西岸断層帯南部・堅田断層および比叡断層の最新活動

琵琶湖西岸断層帯南部の堅田断層のジオスライサー調査(Kaneda et al., 2008)は、この断層が¹⁴C年代測定(暦年補正年代値)より西暦1060年~1260年に最新活動を行ったことを示した。堅田断層対岸の守山市赤野井湾遺跡では、考古学的調査により鎌倉時代初頭ごろに湖岸が沈水したことが明らかにされている(濱, 1998)。

一方、堅田断層の最新活動の年代幅中の、1185年元暦(二年)京都地震では、京都盆地北東部の左京・白河および東山で大きな被害が生じたほか、比叡山延暦寺や比叡山東麓の日吉大社で建物倒壊が生じた(西山, 2000)。このような地震被害分布から、西山(2000)は元暦京都地震の震源を琵琶湖西岸南部周辺と推定した。上記期間内に京都に大きな被害をもたらした地震は、この元暦京都地震以外に確認できない。

以上から、堅田断層・比叡断層を含む琵琶湖西岸断層帯南部は、1185年に最新活動を起こした可能性が高く、年代幅をとって見積もったとしても11世紀中期~13世紀中期に活動したことは確実である。

3 黄檗断層の最新活動の上限年代

京都市山科区大宅地区では、黄檗断層による変位を受けていない谷底低地の堆積物の¹⁴C年代から、西暦600年以降には断層変位が生じていない可能性が高いことが示された。また黄檗断層直上の大宅廃寺遺跡からは縄文時代晩期(滋賀里Ⅴ期：紀元前5世紀ごろ)の甕棺が完全復元可能な状態で出土していること(京都市埋蔵文化財研究所, 1988)、同じく断層直上の醍醐古墳群では7世紀前半の古墳の石室から高坏などの安定性の良くない遺物が完全な形でかつ直立した状態で見だされていること(京都市埋蔵文化財研究所, 1987)から、歴史時代に黄檗断層が活動した可能性は極めて低いと考えられる。

一方、西山(2000)は元暦京都地震による、黄檗断層直上・直近の建造物被害状況について、①平等院の損傷は軽微とみられること、②醍醐寺とその近傍の東安寺では築地塀や門の倒壊の記録はあるものの、堂塔の倒壊の記録は見つかっていないこと、を報告している。中でも平等院や醍醐寺五重塔は現存しており、11世紀中期以降に黄檗断層が活動していないことを強く支持する。

以上から、黄檗断層の最新活動は西暦600年以前と考えられ、少なくとも琵琶湖西岸断層帯南部の最新活動時に両断層は連動しなかったと考えられる。

謝辞

京都市埋蔵文化財研究所の内田好昭管理課長および京都府埋蔵文化財調査研究センターの小池寛調査課長より遺跡発掘調査に関して多くのご教示をいただきました。本研究は 文部科学省委託事業「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」としておこないました。

文献

- ・ 濱修(1998)赤野井湾遺跡発掘調査報告書第4分冊, 314-324.
- ・ Keneda et al., (2008) Jour. Geophys. Res., B5, 113, B05401.
- ・ 京都市埋蔵文化財研究所(1987)醍醐1号墳調査概要報. 29 p.
- ・ 京都市埋蔵文化財研究所(1988)昭和60年度京都市埋蔵文化財調査概要. 103-108.
- ・ 西山昭仁(2000)歴史地震, 16, 163-184.

Paleo-seismic events on the Futagawa fault, Futa, Nishihara Village, Kumamoto Prefecture

*Daisuke ISHIMURA¹, Yoshiya Iwasa², Naoya Takahashi³, Ryuhei Oda¹, Ryuji Tadokoro⁴

1. Tokyo Metropolitan Univ., 2. Hiroshima Univ., 3. Tohoku Univ., 4. Chiba Univ.

2016年熊本地震の際には、主断層である布田川断層沿い以外にも広範囲に地表地震断層（以後、地震断層）が出現した。我々の研究グループでは、それら副次的な断層（以後、副断層）の活動履歴を明らかにするとともに、主断層である布田川断層との同時性を議論するために、2019年に熊本県西原村布田でトレンチ掘削調査を行った。本発表では、そのトレンチ調査結果を報告するとともに、我々がこれまでにに行った副断層上でのトレンチ調査結果との比較を行う。

2016年熊本地震では、数多くの地震断層が出現した（Fujiwara et al., 2016）。主断層である布田川断層と日奈久断層の北部に加え、出ノ口断層や阿蘇カルデラ北西部の断層群といった事前に位置が推定されていた断層と事前に位置が推定されていなかった断層上にも地震断層が出現した。これら副断層の活動履歴に関して、Ishimura et al. (2021)により阿蘇カルデラ北東部の宮地断層上で掘削されたトレンチ調査から、約2000年前に2016年と同様の変位を示す断層活動が認められた。また、Fukushima and Ishimura (2020)は、この宮地断層のすべりは深度1.5 km以浅に限られることを指摘し、地下構造としては布田川断層からは独立したものであることを示した。このように2016年熊本地震で出現した副断層の少なくとも一部は、非常に小さな変位であったとしても過去にも繰り返し活動しており、さらにその活動時期は主断層である布田川断層と同時である可能性を指摘できる。

一方、布田川断層の古地震調査に関しては、2016年熊本地震で認識されるようになった活断層トレースである東端部（カルデラ内）や益城町にかけて連続する分岐断層上で行われたものが多く、布田川断層の中央部での活動履歴は不明であった。そこで本研究では、布田川断層中央部の古地震履歴を明らかにするとともに、副断層の活動履歴と比較可能な高精度な活動履歴情報取得を目的として、西原村布田でトレンチ調査を行った。

トレンチ位置は、石村（2019）で報告された布田川右岸の断層露頭の東延長部にあたる。トレンチサイトでは、右横ずれを示す雁行配列した地震断層と南落ちの地震断層の2条が認められる。本研究では、より確実度の高い活動履歴解明を目的としているため、2条の断層を横断する計5つのトレンチを掘削した。このような手法により、各トレンチで共通する断層活動履歴の確実度が増し、また1つのトレンチでは不確実な断層活動を他のトレンチで検討することが可能となる。

断層トレンチ壁面では、鬼界アカホヤ（K-Ah：7,300年前）テフラ、始良Tn（AT：30,000年前）テフラ、草千里ヶ浜軽石（Kpfa：32,500年前）が確認された（年代は、Smith et al. (2013) と Mclean et al. (2020)）。いずれのトレンチでも、2016年の変位に加えて、3万年前以降の断層活動が認められた。特にK-Ah以降には、2016年熊本地震を含めて計4回の活動履歴が認められた。活動履歴は、各トレンチで共通して認められた断層イベントを中心に、断層による上下変位の累積性や亀裂充填堆積物から推定された。それらの年代を、放射性炭素年代結果に基づき推定した。K-Ahテフラより古い断層イベントに関しては、1つの地層に多くの断層活動が記録されているため、その地層堆積中に活動した1つ1つの断層活動を区別できていない可能性があるため、詳細な年代推定は行っていない。

次に、副断層上で行ったトレンチ調査の古地震履歴との比較を行う。我々が掘削した宮地断層（Ishimura et al., 2021）と出ノ口断層上でのトレンチ調査結果と比較すると、K-Ah以降の活動履歴はほぼ重なる。放射性炭素年代の誤差を考えると別のタイミングで活動した可能性を棄却することはできないが、2016年熊本地震で起きた現象を考えると、主断層である布田川断層と2016年に出現した副断層は過去にも同時に活動してきたことが推定される。さらに各トレンチの活動年代が重なる部分を布田川断層の活動年代とすると、その活動間隔は概ね2,000年程度である。このことは最近4回は比較的同じ時間間隔で発生していること示唆する。

【引用文献】Fujiwara et al. (2016) EPS, 68, 160. Fukushima and Ishimura (2020) EPS, 72, 175. Ishimura

et al. (2021) EPS, 73, 39. 石村 (2019) 活断層研究, 50, 33-44. Mclean et al. (2020) Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21, e2019GC008874. Smith et al. (2013) QSR, 67, 121-137.

Impact of tsunami on Hokkaido due to the 1780 Urup earthquake

*Yutaka HAYASHI¹

1. Meteorological Research Institute

1. 背景

1780年6月29日千島列島のウルップ島での地震に伴う津波の様子は、島の東海岸に停泊中に津波に遭ったロシア船聖ナタリア号の航海日誌に詳述されている (Soloviev and Ferchev, 1961)。航海日誌からは、1月から有感地震が多発したこと、5~6サージェン(1サージェン=2.133m)の高さの津波で船が流され陸に乗り上げたこと、津波が夜明け前から日没まで継続したこと、浸水は島の南部と東部にあり北部にはなかったこと、北東側の三島(チルポイ、シムシル、ケトイ)まで津波(ウルップ島よりも小さい)と余震があったこと、などを読み取れる。

NOAAの津波データベースは、ウルップ島とその北東側の三島に加え、Iida(1984)のカatalogを引用して北海道東岸でも津波があったと記し、ウルップ島での高さも記載している。いずれも高信頼度の津波記録と判定している。ロシアのノボシビルスク津波研究所(NTL)のデータベースは、さらに択捉島も加え、全場所の津波高も記載している。地震のマグニチュードは、NOAAのデータベースは7.5、NTLでは8.2、最新の「日本被害地震総覧」(宇佐美・他, 2013)では7.0など、カatalogによる差が大きい。

ウルップ島とその北東側各島への津波は、当事者の調査記録に基づく明らかに高信頼度の情報だが、択捉島と北海道東岸への津波については、Iida(1984)にもNOAAとNTLのデータベースにも典拠が示されず、信頼性と根拠が不明確である。択捉島以西の津波の状況は、マグニチュードの推定にも、津波堆積物との対比(例えば、Minoura et al., 1994)の妥当性の検討にも重要である。

本研究では、1780年ウルップ島地震による択捉島以西の津波の情報の根拠を文献調査した。

2. 1780年ウルップ島地震に関する日本の史料

松前藩の主な編年史・家系図(『福山旧事記』、『松前家記』など8点)を調べたが、1780年の地震・津波に関する記述はなかった。一方、地震から6年後の天明六年には、幕府から蝦夷地探検に派遣された最上徳内らが択捉島とウルップ島を訪れた。『蝦夷草紙 付録』(最上, 1790)には、ウルップ島で最近に大津波があったと聞き、津波で山に打ち上げられたロシア船も目にしたことが記されている。この発見は、当探検で初めて和人が公式に1780年のウルップ島での津波を知ったことを示唆している。本調査範囲からは、松前藩が1780年ウルップ島地震の情報を把握していた根拠は見当たらなかった。

『大日本地震史料』(震災予防調査評議会編, 1943)には、安永九年四月(1780年)の項目に、『北海道の津浪に就て』(河野, 1913)、『北海道史』(北海道庁編, 1918)、『本邦大地震概表』(大森, 1919)の三文献の該当箇所を収録している。大森(1919)からの抽出箇所は、津波後に島に残ったロシア人が「厚岸、根室、国後、択捉の蝦夷と交易」したという津波の二次的な影響も含んでいる。これら三文献は、行政区としての北海道が千島列島を含む時代に記され、各文献とも1780年ウルップ島地震を道内(国内)の地震として扱ったが、ウルップ島以外、すなわち、現在の北海道・日本における直接的な津波の影響の情報は全く含まない。なお、これら三文献の地震津波の発生日(5月; 日本の旧暦で四月)の根拠は判明しなかった。

3. 北海道への津波の誤解

1960年チリ地震津波後に刊行された気象庁技術報告の中の表(湯村, 1961)では、1780年ウルップ島地震が「北海道東岸へも波及した」とし、日本における津波の階級1(波高が2m内外等の基準に該当)を与えている。「北海道東岸」は、大森(1919)が示す津波の二次的な影響が及んだ範囲「厚岸、根室」ほかと整合する。このため、湯村(1961)による北海道東岸への津波の記述と津波の階級は、二次的な影響と津波の直接被害を混同したとも考えられ、誤解を招きやすい情報である。

Iida(1984)のカatalogにおける北海道東岸への津波の記述も、湯村(1961)の情報の直接または間接的な影響を受けて創られた誤情報の可能性が非常に高い。

4. 結論

1780年ウルップ島地震とその津波に遭遇したロシア船の航海日誌には、津波について信頼度の高い情報が記録されている。しかし、ウルップ島より南西側の各島に津波が及んだことを記録する一次資料の存在は、全く確認できない。和人による同地震の把握は、1786年の蝦夷地探検より前には遡れなかった。現在、国内外で広く利用されているデータベースやカタログには、北海道東岸などへの津波到達・高さの情報を含むものが多い。しかし、択捉島以西への津波は誤情報だと判断するのが妥当であり、修正が必要である。

Damage seismic intensity distribution and damage due to the 1944 Tonankai earthquake in Suwa area

*Karan Okuyama¹, Kotoe Uchiyama, Daisuke Hirouchi²

1. Shinshu University Education grad school, 2. Shinshu University

1. はじめに

地震の被害やゆれの大きさは地盤条件などに大きく左右されるため（武村，2003），その場所の地盤特性とゆれの関係を事前に調べ備えることが重要である。特に過去の地震時における地形条件とゆれの関係は，将来起こり得る地震の被害予測にダイレクトに関わることから，詳細な調査が必要である。例えば1995年兵庫県南部地震で甚大な被害が出た“震災の帯”における被害差については，地質，地盤特性が及ぼす影響について検討されている（石川ほか，2000）。昭和19年東南海地震は12月7日に三重県志摩半島沖（遠州灘）を震源として発生し，震央から遠く離れた諏訪市で最大震度6を記録し異常震域として発表された（中央気象台，1945）。これは諏訪地域の歴史上で最も大きい地震であるが，戦時中であつたことから詳細な公的記録はほとんどなく被害の全貌は確認できない。そこで本研究では，昭和19年東南海地震が諏訪地域でどのような被害をもたらしたのかを復元し，詳細震度分布と被害を明らかにすることを目的とし，地形条件と関連づけて被害差の要因について考察する。

2. 研究方法

本研究では，まず1947年米軍撮影の空中写真を用いて地形判読を行い，地形分類図を作成した。その後，岡谷市・下諏訪町・諏訪市の3市町で当時の新聞や学校日誌等の資料収集を行った。また3市町の80歳以上の全員にアンケートを送付し，有効な回答者に対してヒヤリング調査を行った。ヒヤリングでは，当時の地図や空中写真を使いながら，地震時の行動や被害情報を位置情報を含め詳細に収集し地図化した。さらに被害の様子を気象庁震度階級関連解説表に基づいて震度に直して数値化してプロットし，GISを用いて地形分類図と重ねて分析を試みた。

3. 諏訪地域で新たに明らかになった被害

今回の調査によってこれまでにない精度と密度で諏訪地域における震度分布や被害の詳細が明らかになった。

1 岡谷市：諏訪湖沿岸の岡谷東高校では，校庭が凹凸になるほどの地盤被害が明らかになった。また諏訪湖畔から離れた建物でも壁に亀裂が入るなど大きな被害が確認できた。諏訪湖西岸湊地区の湊小学校では，液状化被害が確認された。

2 下諏訪町：諏訪湖沿いの赤砂地区で庭の地割れ被害が認められた。一方，ヒヤリングでは高木・大門地区では目立った被害は確認できなかった。

3 諏訪市：上諏訪駅の西側で建物のガラスが割れるなどの証言があり大きな被害があつた一方で，東側はほとんど揺れを感じなかった・電灯がゆれただけという証言もあり，ゆれの強さや被害は場所によって大きな差がみられた。特に旧村部である豊田地区では家屋が潰れ，2階が1階になる被害が確認できた。

4. 震度分布と地形との関係

諏訪地域における震度推定から，岡谷市や下諏訪の諏訪湖沿岸及び諏訪市の豊田地区付近で最大震度6程度であることが明らかとなった。また地形条件と震度の関連では，震度6のゆれは埋立地，自然堤防，後背湿地に分類されることが多い。また段丘や扇状地等では震度4～5程度と比較的小さくなることが多い。埋立地，自然堤防では液状化が確認され，後背湿地でも諏訪湖沿岸の下諏訪の赤砂，諏訪市南部の上川付近で液状化と思われる地面の亀裂等の被害を確認した。本調査は諏訪市で未だ継続中であり，今後地点数を増やして更なる検討を行う予定である。一方当時は住宅がなかった場所での被害を明らかにすることが難しいなどの課題や，被害は建物の構造や強度も影響する。今後のアンケートとヒヤリング調査でデータの数を増やし，さらに詳細な分析をおこなっていく。

引用文献

石川浩次・細矢卓志ほか（2000）：地震災害と地形・表層地形・地盤特性－“震災の帯”の中の被害差の原因について－．第四紀研究39

武村雅之（2003）：『関東大震災 大東京圏の揺れを知る』．鹿島出版会

中央気象台（1945）：『昭和十九年十二月七日東南海地震調査概報』．中央気象臺

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

PM-1

chairperson:Yoshiki Shirahama(AIST)

Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-06] Analysis of earthquake activity in southern Miyagi prefecture in the 18th century derived from the Takano family records

○Sunao Urushibara¹, Yasuyuki Kano¹, Junzo Omura¹ (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S10-07] Analysis of aftershock activity of the Ansei-Edo Earthquake using historical documents in Kanto-Koshinetsu

○Michito Baba¹, Yasuyuki Kano¹ (1.University of Tokyo, Earthquake Research Institute)

1:45 PM - 2:00 PM

Analysis of earthquake activity in southern Miyagi prefecture in the 18th century derived from the Takano family records

*Sunao Urushibara¹, Yasuyuki Kano¹, Junzo Omura¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

日記史料を用いた歴史地震研究として、東京の日記に書かれた地震記録の検出閾値を推定し長期的な地震活動の変化を考察したSatake and Ishibe (2020)が上げられる。また、宇佐美・他(2001)は盛岡での日記に記録された地震について現代のカatalogと比較し、震度について検討している。

宮城県の主な地震は、大きく分けると日本海溝沿いで発生する地震や内陸で発生する地震に分けられる。日本海溝沿いで発生する地震の場合、宮城県沖以外にも茨城県沖～青森県沖までの太平洋沖合での地震でも宮城県南部で被害が生じることがある。内陸の地震は、長町-利府線断層帯や福島盆地西縁断層帯等の活断層に起因するものや、栗駒山や蔵王山などの火山性の群発地震も知られている。現在、蔵王町平沢付近に蔵王町円田観測点が2002年3月～設置されており、現在までに震度1～震度6強まで観測されている。また、2003年～2020年までの平均で1年間に震度1が94回、震度2が33回観測されている。

本研究では日本の歴史地震史料拾遺5ノ上に収録されている「高野家記録」の地震記事の有感地震数に着目をした。高野家は蔵王町平沢に領地を持ち江戸時代250年に渡ってこの地を治めた。「高野家記録」は元禄九年(1696年)～天明二年(1782年)の86年間に渡って仙台藩の家臣である高野家に由来する記録である。特に高野家19代当主の高野倫兼による記録が大半を占め、主に仙台や蔵王町平沢での日々の生活や天候、地震の記録が細かく記載されている。

史料集に載っている蔵王町平沢と仙台での有感地震数は、86年間で合計約450回であった。そのうち、蔵王町平沢で記録されている地震数は約220である。この「高野家記録」で記録されている地震記録と現代の観測により記録された地震の比較を行った。その結果「高野家記録」の筆者は震度2以上の地震は記録しており、震度1の地震も一部は記録していると考えられる。

次に、史料集の「高野家記録」に記載されている地震について、他の史料に記載されている有感記録も加味して発生タイプ別の分類を行った。発生タイプとしては「日本海溝での地震」、「内陸・日本海側の地震」、「その他」とした。その結果、「高野家記録」で記録された地震のうち、約半数が分類でき、4割が日本海溝での地震、1割が内陸・日本海側の地震であると考えられる。分類できなかった地震は、史料集に他の有感記録のある史料がなかったためである。これらのうち、特に明和六年八月三十日(1769年9月29日)～明和六年十一月一日(1769年11月28日)までの61日間のうち18日間で蔵王町平沢において有感地震が記録されており、その総有感回数は19回である。明和六年は「高野家記録」による1年間の有感地震数が24回であり、この61日間に1年の約8割の有感地震が記録されていたことになる。これらは福島盆地西縁断層帯や蔵王山での群発性の地震活動の可能性が考えられる。

Analysis of aftershock activity of the Ansei-Edo Earthquake using historical documents in Kanto-Koshinetsu

*Michito Baba¹, Yasuyuki Kano¹

1. University of Tokyo, Earthquake Research Institute

安政江戸地震は安政二年十月二日の夜四ツ時（1855年11月11日午後9時頃）に発生し、江戸市中を中心に関東一円に地震動被害をもたらした。宇佐美(2001)では本震の震央を東京湾北部と推定している。安政江戸地震において、本震についてはもちろんのこと、余震活動の詳細がわかる史料が多数残されている。そこで、本研究では既刊の地震史料集に加え、2000年代初頭に発見された『海老原文庫』や、都司(2003)が紹介した『大屋家日記』などを用いて、安政江戸地震の余震活動の分析を行った。

本研究では、まず安政江戸地震における余震活動の時間変化に注目した。『海老原文庫』に記録されている『安政地震書留之事』に残る安政江戸地震本震後の地震の記録と、江戸で記録された『破窓の記』などの余震が詳細に記されている史料の記録の比較や、日中と夜間の有感記録数の差についての議論を行った。また、『破窓の記』は安政江戸地震後の地震活動について特に詳細に記録しているが、その他の既刊の地震史料集に収録されている史料との比較を通じて、『破窓の記』が記録している余震がどの程度他史料に記録されているかを検討した。その結果、『安政地震書留之事』では江戸で記録されなかった本震直後の地震を記録している可能性があることや、今回比較に用いた2史料では夜の地震の記録数が少ない訳ではないことが分かった。史料ごとの余震の記録数の違いの理由としては、史料ごとの地震の発生時刻の分解能の違い、余震ごとの震央や規模の違いによる有感範囲の違いなどが考えられる。震央に近い江戸では多数発生する余震を区別して記録できない場合があり、少し離れた場所では、区別して記録できた場合があったとも考えられる。

次に、安政江戸地震における余震活動の空間的变化に注目した。既刊の地震史料集に収録されている史料について、記録の内容から「余震当日の記事なし」「余震当日の記事はあるが地震の記録なし」「余震当日の記事があり、地震の記録もある」「余震当日の記事があり、大きな地震の記録がある」の4つに分類した。これを関東地方の地図上にプロットすることで、安政江戸地震の最大余震とされる安政二年十月七日の地震を含む複数の余震について有感記録分布図を作成した。最大余震と考えられる安政二年十月七日に発生した地震に着目し、それぞれの史料に残っている地震の発生時間や揺れの特徴を比較したところ、暮頃と夜に2度の地震があり、暮の地震の方が揺れは大きかったと推定できる。夜の地震のみを記録している史料は、記録の時間のばらつきの範囲内で、暮の地震を記録していると考えられる。

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

PM-1

chairperson: Takehi Isse (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 2:00 PM - 2:30 PM ROOM C (ROOM C)

[S07-01] Slow anomalies atop the 410-km discontinuity oceanward of the Kurile slab

○Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Yoshio Fukao¹ (1.IMG, JAMSTEC)

2:00 PM - 2:15 PM

[S07-02] Impact of anisotropic thermal conductivity on the thermal structure of the Tohoku subduction zone, Northeast Japan

○Manabu MORISHIGE¹, Miki TASAKA² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Shizuoka University)

2:15 PM - 2:30 PM

Slow anomalies atop the 410-km discontinuity oceanward of the Kurile slab

*Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Yoshio Fukao¹

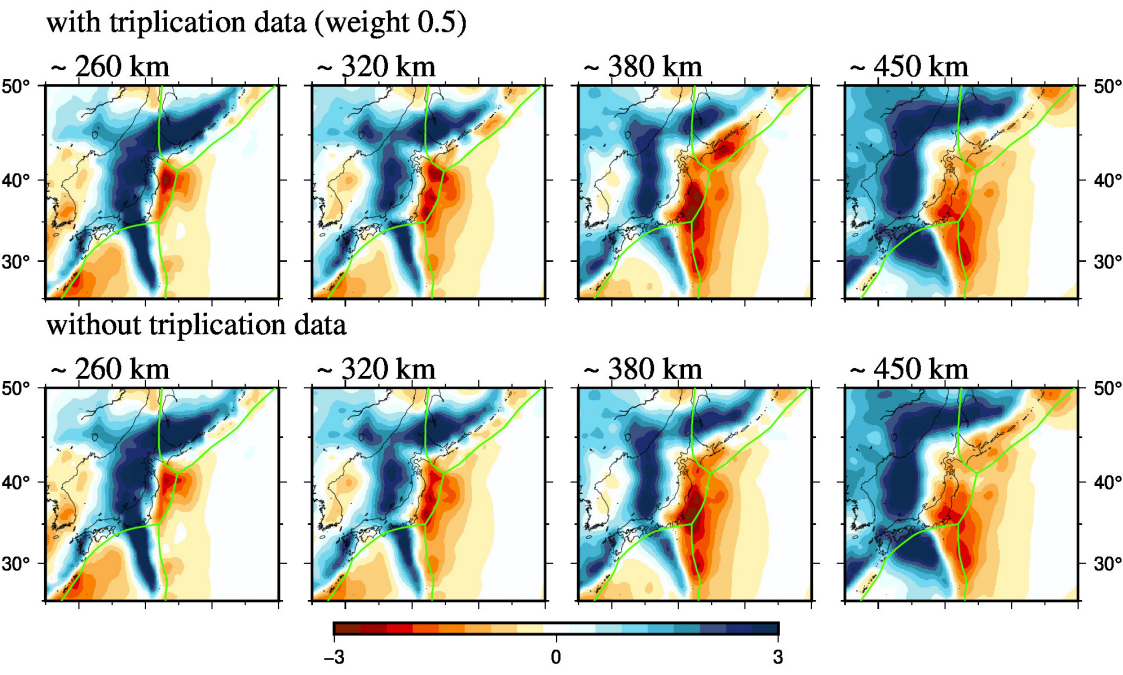
1. IMG, JAMSTEC

本州スラブの下410-km不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、その広がりはまだ明らかでない。我々は JpGU-AGU joint meeting 2020, において千島海溝付近で起きた11地震のHi-netデータを解析し、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り、Obayashi et al. (2006) で示された1次元速度モデルM200M (200°C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) で説明できることを示した。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、初動走時及び初動と410-km不連続面triplicationのretrograde相間の走時差を用いたトモグラフィーで410-km不連続面付近のP波速度構造を明らかにした。上記スタック波形作成に用いた11地震から波形がシンプルで明瞭な8地震を選び、初動到達時刻はhand-pickにより測定し、走時差は自乗エンベロープ波形の初動と後続波のピーク間の時間を測定した。トモグラフィーの初期モデルは1次元速度モデルIASP91に3次元速度モデルGAP_P4 (Obayashi et al., 2016) のperturbationを加えたモデルとした。2000年以降のInternational Seismological Centre (ISC) の初動走時データ約1,500万パスと上記測定値それぞれ約1500パスをIASP91モデルを基に波線計算し有限波長効果を考慮したカーネルを用いた。その際、初動走時データについては2.0Hz、走時差データに関しては自乗エンベロープ波形作成時に使用したフィルタ0.3-2.0Hzを仮定した。千島海溝付近8地震で得られたデータの重みはISCデータのみで得られる高速スラブ異常に変化がないように0.5 (ISCデータの重み1に対し) と設定した。

図は得られた結果をISCデータのみを使用したトモグラフィー結果と比較したものである。千島列島下の410-km不連続面直上にはObayashi et al. (2006) で示された本州スラブおよび伊豆-小笠原スラブの北端付近の異常と同程度の強度の低速度異常が得られた。従って沈み込むスラブの下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。

図：(上) 千島海溝付近の8個の地震の初動走時データと初動と410-km不連続面triplicationのretrograde相間の走時差データをISC初動走時データと共にインバージョンした結果。(下) ISC初動走時データのみをインバージョンした結果。



Impact of anisotropic thermal conductivity on the thermal structure of the Tohoku subduction zone, Northeast Japan

*Manabu MORISHIGE¹, Miki TASAKA²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Shizuoka University

(背景・目的)

マントルでは主に転位クリープによる変形に伴い、その構成鉱物の結晶軸がある特定の方向に揃っていく。これは結晶選択配向と呼ばれる。その結果、マントル内部には地球物理学的な観測、例えば地震波速度や電気伝導度で見られるような異方性が生じる。一方、結晶選択配向による岩石の異方性がマントルの流れや温度に及ぼす影響に着目した研究例は少なく、粘性率の異方性を取り扱ったものが数件ある程度である。そこで本発表では、熱伝導率の異方性に焦点を当てる。マントル主要構成鉱物であるかんらん石の熱伝導率は結晶軸の方向により最大2倍程度異なることが知られている。研究対象地域は東北地方沈み込み帯とし、マントルウェッジにおける熱伝導率の異方性を取り入れることで、等方的な熱伝導率の場合に比べて温度構造がどの程度変わるのかを評価する。

(手法)

モデルは簡単のため2次元定常状態を仮定し、マントル構成鉱物としてかんらん石のみを考える。同じ変形様式に対しても、温度・応力・含水量などによって結晶選択配向が大きく異なる可能性が報告されている。そこでマントルウェッジ内かんらん石の結晶選択配向として、従来支配的であると考えられてきた[100](010)すべり系(Aタイプ)に加え、[001](100)すべり系(Cタイプ)、[100](001)すべり系(Eタイプ)も考慮する。また近年発表された地震学的解析結果を踏まえ、東北地方の前孤マントルは等方的である(つまり結晶軸がランダムな方向を向く)と仮定する。

(結果・議論)

熱伝導率の異方性が最も大きくなるのは上盤プレート底部とスラブ上面近傍となった。これらはマントルの歪みが最も大きくなる場所に一致する。またスラブ表面近傍の温度構造はスラブ表面に対して垂直な方向の熱伝導率によって主に決まる。例えばAタイプの場合ではスラブ表面に対して垂直な方向の熱伝導率が小さくなり、その結果熱伝導率が等方的な場合に比べて、スラブ直上マントルウェッジの温度が上昇、スラブ最上部の温度が低下する。ただしスラブ内部の温度は熱伝導率が等方的な場合に対して最大でも30℃程度しか変化しない。そのため、少なくとも今回のモデル設定下では熱伝導率の異方性の影響は限定的であると言える。しかし今後、沈み込むスラブに対しても熱伝導率の異方性を考慮することで温度構造が大きく変わる可能性がある。