

Sat. Oct 16, 2021

Award lecture | Regular session : S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

9:00 AM - 10:30 AM JST | 12:00 AM - 1:30 AM UTC | ROOM A ROOM A

AM-1

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

9:00 AM - 9:01 AM JST | 12:00 AM - 12:01 AM UTC

[3A01-03-1add] Award ceremony

9:01 AM - 9:04 AM JST | 12:01 AM - 12:04 AM UTC

[3A01-03-2add] President speech

9:04 AM - 9:19 AM JST | 12:04 AM - 12:19 AM UTC

[3A01-03-3add] Award ceremony

9:19 AM - 9:39 AM JST | 12:19 AM - 12:39 AM UTC

[S20-01] [Invited] Seismic Source Physics from Multiple Perspectives

○Naofumi ASO¹ (1.Tokyo Institute of Technology)

9:39 AM - 9:59 AM JST | 12:39 AM - 12:59 AM UTC

[S20-02] [Invited] Earthquake cycle simulations toward an understanding of earthquake nucleation mechanisms and forecasting

○Makiko OHTANI¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:59 AM - 10:19 AM JST | 12:59 AM - 1:19 AM UTC

[S20-03] [Invited] Study of broadband variations inside the earth based on multi-station continuous seismic and geodetic observations

○Ryota TAKAGI¹ (1.Graduate School of Science, Tohoku University)

10:19 AM - 10:20 AM JST | 1:19 AM - 1:20 AM UTC

[3A01-03-7add] Award ceremony

10:20 AM - 10:30 AM JST | 1:20 AM - 1:30 AM UTC

[3A01-03-8add] Discussion

Room A | Regular session : S01. Theory and analysis method

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | ROOM A ROOM A

AM-2

chairperson: Akiko Takeo (ERI, University of Tokyo), Yuta Maeda (Nagoya University)

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

[S01-01] Finite difference calculation of constant-Q seismic ground motion using Rayleigh damping

○Kazuki KOKETSU¹, Hongqi DIAO² (1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S01-02] Dependency of a priori information for radiation-corrected empirical Green's function in waveform inversion

○Ritsuya Shibata¹, Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹, Satoshi Ide² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S01-03] Evaluating errors in autocorrelation functions for reliable estimates of a reflection profile

○Yuta MAEDA¹, Toshiki Watanabe¹ (1. Nagoya University)

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

[S01-04] Passive seismic reflection imaging for local earthquakes: RTM application to MeSO-net data

○Kazuya SHIRAIISHI¹, Toshiki Watanabe² (1. JAMSTEC, 2. Nagoya University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S01-05] Three-dimensional shear-wave velocity structure and shallow very-micro earthquakes above sea level in the Showa-shinzan volcano

○Akiko TAKEO¹, Kiwamu Nishida¹, Motoko Ishise¹, Hiroshi Aoyama², Yosuke Aoki¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Room A | Regular session : S01. Theory and analysis method

1:30 PM - 2:15 PM JST | 4:30 AM - 5:15 AM UTC | ROOM A ROOM A

PM-1

chairperson: Tomoya Takano (Hiroshima University)

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

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms: a comparison with the wave model WAVEWATCH III

○Kiwamu NISHIDA¹, Ryota TAKAGI² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S01-07] Seismic velocity response to tidal deformation at shallow crust in Japan

○Tomoya TAKANO¹, Kiwamu NISHIDA² (1. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S01-08] Seismic noise observed by an ocean bottom seismometer revealed glacier sliding velocity in Greenland

○Yoshio MURAI¹, Evgeny A. Podolskiy², Naoya Kanna³, Shin Sugiyama^{4,2} (1. Faculty of Science, Hokkaido Univ., 2. Arctic Research Center, Hokkaido Univ., 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, 4. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.)

Room A | Regular session : S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

2:15 PM - 3:00 PM JST | 5:15 AM - 6:00 AM UTC | ROOM A ROOM A

PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S12-01] Regional stress field in the northern Kinki district investigated by dense seismic observation

○Toshio Tanaka¹, Yoshihisa Iio², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction)

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

[S12-02] In-situ stress at the basement under Osaka plain(3) -Re-evaluation using rock core samples with DCDA method-

○Kentaro OMURA¹, Akio Funato², Takatoshi Ito³ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Fukada Geological Institute, 3.Institute of Fluid Science, Tohoku University)

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

[S12-03] Experimental evaluation under hydrous condition on thermal maturation of carbonaceous materials as a proxy of frictional heating in a fault during an earthquake

○Keita IWAGAKI¹, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University)

Room B | Regular session : S08. Earthquake physics

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | ROOM B ROOM B

AM-2

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.)

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

[S08-18] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

○Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kearsse² (1.Kyoto University, 2.Victoria University of Wellington)

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

[S08-19] Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

○Takumi MOTOKOSHI¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S08-20] Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

○Makoto NAOI¹, Keiichi IMAKITA¹, Youqing CHEN¹, Kazune YAMAMOTO¹, Rui TANAKA¹, Hironori KAWAKATA², Tsuyoshi ISHIDA¹, Eiichi FUKUYAMA¹, Yutaro ARIMA³ (1.Kyoto Univ., 2.Ritsumeikan Univ., 3.JOGMEC)

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

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○Keisuke YOSHIDA¹, Hiroo Kanamori² (1.Tohoku University, 2.California Institute of Technology)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-22] Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

○Kantaro Kawai¹, Nobuki Kame¹ (1.ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)

Room B | Regular session : S08. Earthquake physics

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC | ROOM B ROOM B

PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.)

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

[S08-23] Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2} -model, the cube law, and the GR law○Shiro HIRANO¹ (1.College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.)

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

[S08-24] **Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor**○Satoshi IDE¹ (1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

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

PM-1

chairperson:Noa Mitsui(Nagoya University)

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

[S18-01] Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

○Satoko MUROTANI¹ (1.National Museum of Nature and Science)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S18-02] Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

○Noa MITSUI¹, Takeshi Sagiya¹ (1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University)

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

[S18-03] Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

○Yoshiaki ORIHARA¹ (1.Tokyo Gakugei University)

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

[S18-04] Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

○Hiroo NEMOTO¹ (1.Ritsumeikan Univ.)

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

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | ROOM C ROOM C

AM-2

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

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

[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))

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

[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)

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

[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.)

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

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

○Yutaka HAYASHI¹ (1.Meteorological Research Institute)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[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)

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

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC | ROOM C ROOM C

PM-1

chairperson:Yoshiki Shirahama(AIST)

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

[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)

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

[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)

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

2:00 PM - 2:30 PM JST | 5:00 AM - 5:30 AM UTC | ROOM C ROOM C

PM-1

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

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

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

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

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[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)

Award lecture | Regular session : S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

📅 Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM JST | Sat. Oct 16, 2021 12:00 AM - 1:30 AM UTC | 🏠 ROOM A

AM-1

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

9:00 AM - 9:01 AM JST | 12:00 AM - 12:01 AM UTC

[3A01-03-1add] Award ceremony

9:01 AM - 9:04 AM JST | 12:01 AM - 12:04 AM UTC

[3A01-03-2add] President speech

9:04 AM - 9:19 AM JST | 12:04 AM - 12:19 AM UTC

[3A01-03-3add] Award ceremony

9:19 AM - 9:39 AM JST | 12:19 AM - 12:39 AM UTC

[S20-01] [Invited] Seismic Source Physics from Multiple Perspectives

○ Naofumi ASO¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

9:39 AM - 9:59 AM JST | 12:39 AM - 12:59 AM UTC

[S20-02] [Invited] Earthquake cycle simulations toward an understanding of earthquake nucleation mechanisms and forecasting

○ Makiko OHTANI¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:59 AM - 10:19 AM JST | 12:59 AM - 1:19 AM UTC

[S20-03] [Invited] Study of broadband variations inside the earth based on multi-station continuous seismic and geodetic observations

○ Ryota TAKAGI¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

10:19 AM - 10:20 AM JST | 1:19 AM - 1:20 AM UTC

[3A01-03-7add] Award ceremony

10:20 AM - 10:30 AM JST | 1:20 AM - 1:30 AM UTC

[3A01-03-8add] Discussion

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

9:00 AM - 9:01 AM

[3A01-03-1add]Award ceremony

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

9:01 AM - 9:04 AM

[3A01-03-2add] President speech

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

9:04 AM - 9:19 AM

[3A01-03-3add]Award ceremony

[Invited] Seismic Source Physics from Multiple Perspectives

*Naofumi ASO¹

1. Tokyo Institute of Technology

地震現象は、断層すべりという一見単純な現象として知られているが、実際には複雑で多様な現象である。そうした中にも普遍性を見出し、物理的な理解を目指すのが震源物理学である。私はこれまで、データ解析・シミュレーション・物理モデリング・臨時観測といった多様なアプローチにより、狭義の地震現象を主たる研究対象としながらも、広義の地震波動源の物理的理解に取り組んできた。

火山型深部低周波地震は、地殻下部での唯一の地震波動生成現象であり、その物理メカニズムの解明は、地殻深部からの流体供給過程等の理解に必要不可欠である。私は、このような特殊な地震を対象として、震源メカニズムや地震活動という観点から普遍的な特徴を探り [Aso et al., 2013; Aso and Ide, 2014]、そうした特殊な地震の発生を駆動する物理モデルとして、マグマの冷却による熱応力の影響を提唱した [Aso and Tsai, 2014]。

また、断層破壊力学分野において、確率論的な考え方の導入を進めた。地震発生に関わる物理量や物理法則をすべて厳密に決定することは不可能で、決定論的議論には限界がある。こうした不確定性を確率論的な擾乱として考慮することで、より現実的な地震のモデル化手法を提案した [Aso et al., 2019]。シンプルなモデルながらも、クラック的・パルス的な通常地震のほか、スロー地震の細かな特徴まで再現することができ、断層破壊力学の常識を一変させる可能性を秘める。

多様な対象やアプローチを取り扱う中で、意識しつつけていることは、従来の固定観念にとらわれない多角的な視点である。例えば、アクティブなマグマティズムに起因する地震現象ではなく、マグマが冷える過程で地震が発生する可能性を提唱したり、決定論的な運動方程式が用いられ続けてきた断層破壊力学において、確率論的な運動方程式を導入したりするなど、従来の固定観念にとらわれずに、新たな方向性を切り開こうとしてきた。

今回の発表では、上記の研究内容を初めての方にもわかりやすく紹介したい。また、これまでの研究生活を取り巻いてきたエピソードに加え、私の考える研究像や研究者像についてもお話することで、特に学生をはじめとした若手の研究者にとって、研究の方向性や研究への取り組み方について考えるきっかけとなれば幸いである。

[Invited] Earthquake cycle simulations toward an understanding of earthquake nucleation mechanisms and forecasting

*Makiko OHTANI¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

断層面上では、様々なサイズの地震やゆっくりすべり(SSE)を含む多様な時空間スケールのすべり現象が密に分布し、これらのすべり現象の相互作用を通して巨大地震がどのような発生過程を辿るかを調べることは、地震発生予測に繋がる可能性がある。実験できない地震の発生機構を調べるには、数値計算が強力な研究手段である。著者は、巨大地震発生領域近傍の様々な断層すべり活動から巨大地震の発生を予測することを目指して、地震の繰り返しを計算機上で模擬する地震発生サイクルシミュレーション(Earthquake Cycle Simulation; ECS)を行ってきた。本講演では、著者がこれまで行ってきた、ECS計算手法の高度化、地震発生機構の解明とそれに基づく地震発生予測に関する取り組みを紹介する。

1. 計算手法の高度化

異なるすべり現象の相互作用を考慮したECS計算の実施には、計算の大規模化が問題であり、現実的な計算コストの新手法開発が必要であった。著者は応用数理分野で提案された密行列圧縮手法であるH行列法(Hackbush, 1999)を導入することにより、ECSの計算時間・メモリ量を離散小断層数 N に対して $O(N^2)$ から $O(N) \sim (M \log N)$ へと大幅に削減することに成功した(Ohtani et al., 2011)。

また、この大規模ECSに地表面形状を導入する新たな手法の構築を行った。全無限媒質を仮定し、地表面の位置に地表境界条件を満たす仮想的な断層を配置することで、任意の地表面形状下でのすべり応答関数を数値的に求める(Ohtani and Hirahara, 2015)。本手法は上記H行列の適用を妨げず、沈み込み帯の現実的な幾何形状を考慮した大規模ECSが実施可能である。

2. 地震発生機構の解明と地震発生予測

著者はこれまでECSモデルの構築を通して、特に巨大地震とその近傍で発生する長期的SSEとの関係を明らかにし、巨大地震発生予測に繋がる知見が得られないか調べる研究を行ってきた。2011年東北地方太平洋沖地震(M9)に関する研究では、SSEを含む断層すべりの時系列を定性的に説明するモデルを構築し、本震発生に至る過程を調べた(Ohtani et al., 2014)。SSEは地震のサイクル後半に発生するが、M9地震の発生タイミングは震源域内大すべり域の固着状態が最終状態に近いかどうか強く支配され、SSE発生が巨大地震の前兆現象とは言えない結果となった。本研究はH行列を適用したECSによって初めて実施可能となったものである。

また1946年昭和南海地震で観測された可能性のある顕著な前駆的すべりについて、カットオフ速度以上のすべりで摩擦強化する摩擦則を用いて深部SSEと巨大地震が自発的に発生するECSモデルを構築した。このモデルでは、カットオフ速度の脆性延性遷移域での深さ変化が原因となり深部SSEが巨大化し、巨大地震の発生に至る前駆すべりとなった(Ohtani et al., 2019a)。ここでも、深部巨大SSEは必ずしも直後の地震を誘発するとは限らない結果となったが、網羅的な事例計算に基づき算出した巨大SSE後の地震発生確率は、SSE直後3日間は警報レベルに高いがそれ以後定常载荷レベルに戻ることがわかった。この数字を直接現実当てはめることはできないが、本研究は地震の物理モデルに依拠した地震発生警報の発出・解除の仕方の一つの方方向性を示すものではないかと考えている。

SSEの周期性に注目した研究では、同期現象と呼ばれる非線形物理現象が現れることが見出された(Ohtani et al., 2019b)。近傍の周期的に発生するSSEによって周期的に変化する応力载荷レート下で発生する大地震のタイミングを一自由度モデルで調べたところ、地震の発生間隔が応力载荷のリズムに支配され、地震周期がSSE周期の丁度整数倍に同期する現象(同期現象)が観察された。一定応力载荷レート下では地震発生間隔は摩擦強度に比例するが、周期的応力载荷下では少しの摩擦強度の変化よりも、载荷のリズムが優先される。このような現象が現実でも起きている可能性がある。

[Invited] Study of broadband variations inside the earth based on multi-station continuous seismic and geodetic observations

*Ryota TAKAGI¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University

はじめに

近年の高密度地震・地殻変動観測網における連続観測データは、新たな解析手法の開発や発展を促し、また新現象の発見につながるなど、地震学の発展の基礎となっている。筆者は、地球内部構造の時空間変化やプレート境界における非地震性すべりなどの地球内部における変動現象の解明のため、多点連続観測データに基づく解析手法の開発や高度化、およびそれらを大量の実データへ適用した研究を行ってきた。講演では、これまでの研究で得られた知見に加えて研究の背景や経緯についても紹介したい。

地震波干渉法の高度化と地球内部構造の時空間変化に関する研究

地震波干渉法は、多点連続観測データを有効利用し地球内部構造の時空間変化を明らかにするための有力なツールである。地震波干渉法の利点は地球内部構造の時間変化の検出である。筆者らは、地震波干渉法を用いて2008年岩手・宮城内陸地震と2011年東北地方太平洋沖地震による地震波速度低下を検出するとともに、地震波速度変化の空間分布や強震動と相関から速度低下の原因として強震動の寄与が大きいことを示した (Takagi & Okada 2012; Takagi et al. 2012)。地震波干渉法のもう一つの利点は構造解析周波数の広帯域化であるが、短周期地震計を用いた稠密観測では観測記録に含まれるコヒーレントな機器ノイズが解析上の問題となる。筆者らは、ノイズの精査と理論的な考察に基づき機器ノイズの効果的な除去手法の開発し、地震波干渉法の適用範囲を拡大させることに成功した (Takagi et al. 2015; 2021)。さらに、筆者らによる波動理論に基づく実体波と表面波の分離手法の開発 (Takagi et al. 2014) や脈動の指向性推定手法の開発 (Takagi et al. 2018) も、地震波干渉法をさらに発展させ、今後の地球内部構造の時空間変化のさらなる理解につながると期待される。

スロースリップイベント活動様式に関する研究

スロー地震は、地震・地殻変動の多点連続観測による最大の発見の一つである。筆者らは、地殻変動データの観察から、スロー地震の中でも数ヶ月から数年程度と最も時間スケールの長い長期的スロースリップイベント（長期的SSE）が四国中部の微動発生域と固着域の間の領域において繰り返し発生すること示した (Takagi et al. 2016)。また、長期的SSEを系統的に検出する新たな手法を開発し、南海トラフにおける詳細な長期的SSE活動様式を明らかにした (Takagi et al. 2019)。これまで一部の領域でのみ検出されていた長期的SSEが普遍的な現象であることを示すとともに、長期的SSEと固着分布の空間相関性および長期的SSEの大規模移動現象を発見した。これらは巨大地震と長期的SSEとの関連性を示唆する結果である。また、長期的SSEの活動は、隣接領域で発生する深部低周波微動や繰り返し地震活動の時間変化を理解する上でも重要である (Takagi et al. 2016; Uchida et al. 2020)。

おわりに

多点観測ではシグナルの空間的相関性を用いることで普通では見えない微小なシグナルを捉えることが可能になる。また、観測研究の最先端では必然的にノイズとの戦いになることも多いため、大量の観測データを上手く、有効に、効率的に使う手法が必要である。S-net等の海域における新たな観測網やDASに代表される新技術を用いた観測、超多点稠密観測等の発展が進む中で、観測データのもつ情報を可能な限り引き出し、地球内部の様々な変動現象の解明に貢献できるような研究を今後も行なっていきたいと考えている。

謝辞

防災科学技術研究所、国土地理院、気象庁、東北大学のデータを用いました。観測網の構築・維持・管理に関わる皆様に記して感謝致します。

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

10:19 AM - 10:20 AM

[3A01-03-7add] Award ceremony

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

10:20 AM - 10:30 AM

[3A01-03-8add] Discussion

Room A | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏠 ROOM A

AM-2

chairperson: Akiko Takeo (ERI, University of Tokyo), Yuta Maeda (Nagoya University)

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

[S01-01] Finite difference calculation of constant-Q seismic ground motion using Rayleigh damping

○Kazuki KOKETSU¹, Hongqi DIAO² (1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S01-02] Dependency of a priori information for radiation-corrected empirical Green's function in waveform inversion

○Ritsuya Shibata¹, Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹, Satoshi Ide² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S01-03] Evaluating errors in autocorrelation functions for reliable estimates of a reflection profile

○Yuta MAEDA¹, Toshiki Watanabe¹ (1. Nagoya University)

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

[S01-04] Passive seismic reflection imaging for local earthquakes: RTM application to MeSO-net data

○Kazuya SHIRAI¹, Toshiki Watanabe² (1. JAMSTEC, 2. Nagoya University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S01-05] Three-dimensional shear-wave velocity structure and shallow very-micro earthquakes above sea level in the Showa-shinzan volcano

○Akiko TAKEO¹, Kiwamu Nishida¹, Motoko Ishise¹, Hiroshi Aoyama², Yosuke Aoki¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Finite difference calculation of constant-Q seismic ground motion using Rayleigh damping

*Kazuki KOKETSU¹, Hongqi DIAO²

1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

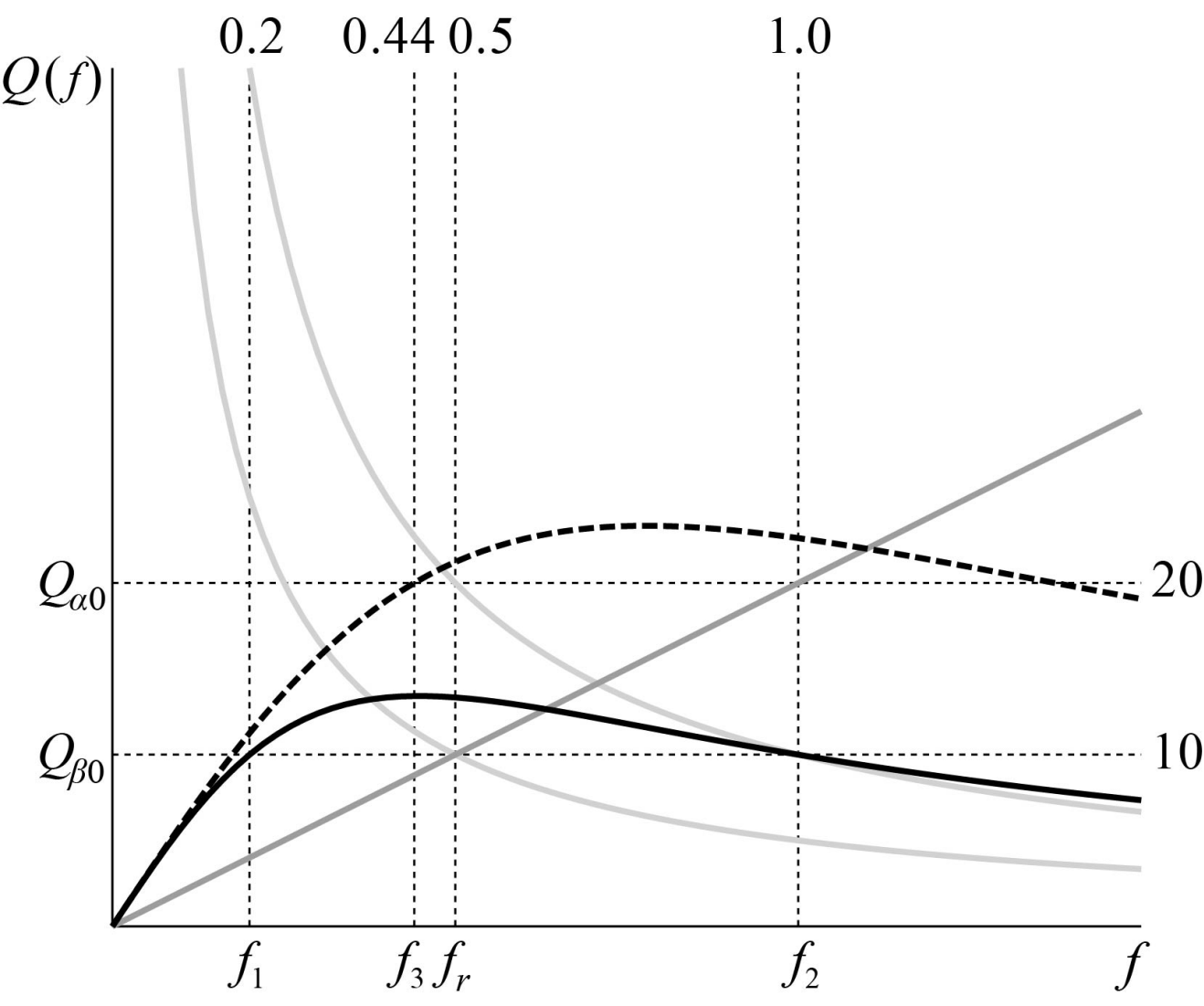
地震動を含む振動現象の減衰は、振動のエネルギー E が1周期の間に ΔE だけ変化するとき $Q^{-1} = -\Delta E / 2\pi E$ と定義されるQ値で表される。1次元の減衰振動が(1) $u = A e^{i(\omega t - kx)} = a e^{-\eta t} e^{i(\omega t - kx)}$ と表されるならば、一般に E は A^2 に比例することから、 $t=0$ と $t=T$ (T は周期)の間のエネルギーとその変化は $E \propto A^2 \approx a^2$, $\Delta E \propto a^2 e^{-2\eta T} - a^2$ になる。従って、 $Q^{-1} = (1 - e^{-2\eta T}) / 2\pi \approx \eta T / \pi = \eta / \pi f$ である。一方、 t に従って減衰するのではなく、 x に従って減衰するとした場合、(2) $u = a e^{-\gamma x} e^{i(\omega t - kx)}$ とすることができる。このとき、 E , ΔE は $x=0$ と $x=L$ (L は波長)の間のエネルギーとその変化となり、 $L = v/f$ を用いると $Q^{-1} = \gamma v / \pi f$ である。

1次元媒質が完全弾性体ならば応力-ひずみ関係が $\tau = \gamma e$ と表わされるとする。減衰のためにその関係が $\tau = \gamma^* \partial e / \partial t$ (γ^* はコンボリューション)となるとき、運動方程式は(1)式を解とした減衰振動方程式となる。方程式の中の減衰係数は $2\pi f \rho / Q$ となるから、この減衰は質量比例減衰と呼ばれる(質量は密度を意味する)。上記から $Q^{-1} = \eta / \pi f$ で、参照周波数 f_r においてQ値が Q_r ならば $\eta = 1 / \pi f Q_r$ であるから、Q値スペクトルは $Q(f) = Q_r f / f_r$ になる(図の濃い灰色実線)。一方、応力-ひずみ関係を $\tau = \gamma e + \Gamma \partial e / \partial t$ とすると、運動方程式は(2)式を解とする減衰振動方程式となる。その減衰係数は Γ に関係し、 Γ は γ (弾性定数、剛性とも呼ばれる)に比例すると考えられるので、この減衰は剛性比例減衰と呼ばれる。(2)式を代入した方程式を解いて得られる $\gamma = \omega^2 \Gamma / 2 v \gamma$ と上記の $Q^{-1} = \gamma v / \pi f$ から、 $Q^{-1} = 2\pi f \Gamma / \gamma$ となる。参照周波数 f_r においてQ値が Q_r ならば $\Gamma / \gamma = 1/2 \pi f_r Q_r$ であるから、Q値スペクトルは $Q(f) = Q_r f_r / f$ になる(図の薄い灰色実線)。

現実の地震動の減衰では、質量比例減衰と剛性比例減衰が、ある割合で組み合わされて実現されるとする(Rayleigh 減衰)。1次元媒質の場合、この割合は、それぞれの減衰振動((1)式と(2)式)の中の減衰項の指数にかかる重み w_ρ , w_v で表わされるとする。その結果と $x = vt$ からRayleigh 減衰の減衰振動方程式は $u = a \exp\{-(w_\rho \eta / v + w_v \gamma) x\} e^{i(\omega t - kx)}$ と表わされるはずである。剛性比例減衰と同様の導出で、Rayleigh減衰のQ値が $Q^{-1} = (w_\rho \eta / v + w_v \gamma) v / \pi f$ と得られる。参照周波数 f_r が与えられ、そこにおける質量比例減衰と剛性比例減衰のQ値をそれぞれ $Q_{\rho r}$, $Q_{v r}$ とすると、 $Q(f) = 1 / (w_\rho f_r / f Q_{\rho r} + w_v f / f_r Q_{v r})$ が得られる。

以上を3次元媒質に拡張すると、Rayleigh 減衰の中の剛性比例減衰はP波とS波に分けられ、それらの減衰項の指数への重みを w_α , w_β , 参照周波数におけるQ値を $Q_{\alpha r}$, $Q_{\beta r}$ とする。目標とするQ一定減衰もP波とS波に分けられ、一定値を $Q_{\alpha 0}$, $Q_{\beta 0}$ とすると、Q一定減衰がRayleigh 減衰で実現されるならば(3) $Q_{\alpha 0} = Q_\alpha(f)$, $Q_{\beta 0} = Q_\beta(f)$ が成り立つはずである。さらには $Q_{\alpha r} = Q_{\alpha 0}$, $Q_{\beta r} = Q_{\beta 0}$ を仮定し、地震動は主にS波で構成されるので、質量比例減衰では $Q_{\rho r} = Q_{\beta 0}$ とする。3つの周波数 f_1 , f_2 , f_3 において(3)式のうちのひとつが成り立つとして3本の連立方程式を立てられれば、3つの重み w_ρ , w_α , w_β を決めることができる。S波を重視して、周波数 $2f_1$, f_2 はS波の方程式に割り当てるとする。

池上(2009)が挙げている計算例から $Q_{\alpha 0}=20$, $Q_{\beta 0}=10$, $f_r = 0.5$ Hz, $f_1 = 0.2$ Hz, $f_2 = 1.0$ Hz, $f_3 = 0.44$ Hzの場合を考えると、図の中に黒色の太い点線および太い実線で示されているP波Rayleigh減衰とS波Rayleigh減衰が得られる。後者は f_1 以上で概ね $Q_{\beta 0}$ に近く、前者は f_3 以上で概ね $Q_{\alpha 0}$ に近くなっている。このほか、重みを最小二乗法で決める計算例も行った。Rayleigh減衰を導入した2次元差分法を、標準線形固体1つまたは5つを導入した2次元差分法と比較すると、標準線形固体1つと同程度の計算時間で同5つと同程度の精度が得られた。



Dependency of a priori information for radiation-corrected empirical Green's function in waveform inversion

*Ritsuya Shibata¹, Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹, Satoshi Ide²

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

経験的グリーン関数(EGF; e.g. Hartzell, 1978)は、解析対象とする地震(Target event)の近傍で発生した、メカニズムが似ている地震(EGF event)の観測波形を、Target eventのグリーン関数とする手法である。EGFは、理論的な手法で要求されるような複雑な速度構造を仮定する必要があるという利点がある一方で、解析に適した地震が存在しないと使うことができないという制約がある。この制約を軽減するために、我々は放射パターンを補正した経験的グリーン関数(Radiation-corrected EGF)を導入した。Radiation-corrected EGFは従来のEGFの振幅を、Target eventとEGF eventの理論的な放射パターンの比を用いて補正することで得られる。しかし、本手法では、メカニズム解・震源位置・速度構造という3つの先験情報を与える必要があり、Radiation-corrected EGFの実データへの適用可能性を評価するためには、これらの先験情報の不確定さが結果に与える影響を調べることが不可欠である。そこで、本研究では先述の先験情報の影響を調べるために、波形インバージョンを用いた2種類のテストを行った。

本テストでは、日本の内陸部で発生した3つのM5クラスの地震に対して解析を行った。解析においては防災科学技術研究所(NIED)の設置しているKiK-netの地中観測点のうち、Target eventから震央距離45km以内の観測点を使用した。また、簡単のためTarget eventとEGF eventをそれぞれ点震源とみなせるように、解析周波数帯を0.1-1.0 Hzに設定した。放射パターンの計算には初期構造としてJMA2001(上野ほか, 2002)を与え、メカニズム解の初期値としてF-net (NIED)のCMTインバージョン解を、震源位置の初期値として気象庁カタログに記載された震源情報をそれぞれ設定した。また、波形インバージョンによる推定解は、波形の再現具合を表すVariance Reduction (VR)によって比較する。

まずは、みかけのメカニズムを直接的に回転させる要因となるメカニズム解・震源位置の誤差が解に与える影響を、実観測波形を用いて調べた。ここでは、先ほどの初期設定のうちメカニズム解(回転軸・回転角)と震源位置(移動方向・移動距離)にそれぞれ一様にランダムな摂動を加え、そのメカニズム解・震源位置において計算された放射パターンを用いて、インバージョンを行った。このテストの結果、メカニズム解の回転角・震源位置の移動距離が大きくなるにつれて、低VRを得る確率が高くなることが確認された。また、メカニズム解の回転の影響の方が、震源位置の移動による影響よりも大きいことが確認された。

続いて、速度構造の違いによる変換波や反射波などの直達波以外のフェーズが与える影響を、理論波形を用いて調べた。理論波形の計算には速度構造を除いて、実データの初期設定を用いている。速度構造については、JMA2001に堆積層を追加した構造を5種類用意し、各観測点にランダムに5種類の構造を割り当てる。以上の設定において理論波形を計算し、インバージョンを行った。ここで、放射パターンはオリジナルのJMA2001を仮定して計算を行っている。このテストの結果、堆積層が追加されたことによる変換波や反射波などの影響は周波数依存するものであり、本研究の解析周波数帯である0.1-1.0 Hzでは結果への寄与が小さいことが確認された。

本研究の結果、メカニズムの差異が認められる場合には、従来のEGFよりもRadiation-corrected EGFを適用する方がより良い推定解を得られることが、実データにおいても確認された。また、先験情報の不確定さが結果に与える影響は確認されたものの、その影響は地震ごとに異なるものである。このようなテストを行うことにより、各ケースにおけるradiation-corrected EGF適用の妥当性を論ずることができることも確認された。

Evaluating errors in autocorrelation functions for reliable estimates of a reflection profile

*Yuta MAEDA¹, Toshiki Watanabe¹

1. Nagoya University

1. はじめに

鉛直入射する地震波の自己相関関数を用いると地表の力源に対する同一地点での反射応答を疑似的に得ることができる(Claerbout, 1968)。この原理を用いた反射断面の推定が多数行われている(e.g., Tsutsui, 1992; Watanabe et al., 2011; Sun and Kennett, 2016; Chimoto and Yamanaka, 2020)。これらの研究において反射応答の誤差評価はあまり行われていない。反射応答の波形には多数の山と谷が含まれ、その中から真の反射波に対応するものを見分けるには誤差評価が有用であると思われる。そのための手法を考案し、検証を行ったので報告する。

2. 手法

観測点直下で発生した地震のP波の波形を使用する。この波形が地震による真のシグナルとランダムノイズの重ね合わせであると考え。平均が0でP波到着前のノイズ部分と等しい標準偏差を持つランダムノイズ波形を多数生成し、観測波形からこれらを差し引いたものを真のシグナルの候補とし、それらの自己相関関数を計算する。各観測点において、地震1つにつき生成したランダムノイズ波形と同数の自己相関関数が得られるので、その標準偏差が自己相関関数の誤差を表すと考え。次に各観測点においてすべての地震の自己相関関数を分散で重みづけしてスタッキングする。これにより観測点毎の自己相関関数を誤差評価付きで得ることができる。

3. 検証

首都圏地震観測網(MeSO-net)のデータに本手法を適用した。まずHi-net下総観測点に近接するMeSO-netのE.STHM観測点において詳細な検証を行った。下総観測点では掘削時の検層によって深さ2300 mまでの地震波速度・密度構造が求められており、堆積層(P波速度2000 m/s、密度2000 kg/m³)と基盤(P波速度5000 m/s、密度2600 kg/m³)の2層でよく近似できること、その境界が深さ1500 mにあることが知られている(太田他, 1978; 鈴木他, 1983)。MeSO-netのE.STHM観測点は下総観測点から水平距離1.6 kmと近接しているため、ほぼ同様の2層構造で近似できると思われる。そこで本手法によって深さ1500 mに単一の反射面をイメージできるかを試した。その結果、10 Hz以下の周波数帯においては深さ1500 mからの反射波が標準偏差の3倍を有意に超える振幅で得られる一方、他の深さからの反射波振幅は標準偏差の3倍程度以内に収まるものであった。また、深さ1500 mからの反射波はスタッキング数を増やすと標準偏差に対する相対振幅が増大したが、他の深さに見られる振幅の小さな山や谷ではそのような傾向が見られなかった。このことから本手法で真の反射面を識別できると考えられる。一方、10 Hzよりも高周波では標準偏差の3倍をやや超える振幅の山や谷が様々な深さに現れ、深さ1500 mからの反射波振幅もそれらと同程度になり、識別は困難であった。次に他のMeSO-net観測点にも本手法を適用し、標準偏差の3倍以内の振動をマスクする色付けでプロットを行った。誤差を考慮せずにスタッキングとプロットを行う従来手法と比較した。その結果、本手法の方が全体的な縞模様を抑制でき、堆積層・基盤岩境界などの強い反射面をより強いコントラストで得ることができた。

4. 議論

Hi-net府中観測点、日高観測点においても掘削時に深部までの構造が得られており、近傍にMeSO-net観測点が存在する。しかしこれらの観測点では明瞭な反射波は得られなかった。原因として、府中観測点では3層構造で近似され、各層内も均質ではなく深さとともに速くなる傾向が顕著なこと、日高観測点では更に複雑な速度構造であることが考えられる。他のMeSO-net観測点においても全般に東関東では明瞭な反射面が得られたが西関東では不明瞭であった。このことから強いインピーダンスコントラストが無いと明瞭な反射面を得るの

は難しい可能性がある。また、高周波帯において不明瞭になる原因としては細かい不均質による多重反射等が考えられる。このように顕著な反射面が無い場合やスタック数の不足等によって十分なS/N比を実現できていない場合において、従来手法では反射波振幅の相対値しか分からないために有意でないシグナルを強調してしまう場合があるが、提案手法では標準偏差との比較に基づいて有意性を判断できる。これにより、信頼性の高い反射断面の描像を得ることに寄与すると考えられる。

謝辞

本研究では首都圏地震観測網(MeSO-net)の波形データと気象庁一元化震源カタログを使用した。波形データのダウンロードにはHinet-Py (Tian, 2020)を用いた。本研究はJSPS科研費JP19K04016の助成を受けた。

Passive seismic reflection imaging for local earthquakes: RTM application to MeSO-net data

*Kazuya SHIRAISHI¹, Toshiki Watanabe²

1. JAMSTEC, 2. Nagoya University

地震観測網の整備が進み、地震計の稠密展開や光ファイバーケーブルを用いた地震観測など、リアルタイム地震観測の機会とその重要性が増している。そのデータは、地震活動のモニタリングに加え、地震トモグラフィやレシーバ関数、雑微動解析など、地下構造の解析にも活用される。しかし、自然地震の反射波を用いた地下構造イメージングは一般的には行われていない。自然地震は地中を伝わるエネルギーが大きく、人工震源では調査の難しい深部の構造情報を得られる可能性がある。また、反射波を利用することで、地震波トモグラフィや同じ周波数帯を用いたレシーバ関数よりも高分解能な地下構造プロファイルの獲得が期待できる。そこで、自然地震記録に含まれる反射波を用いた地下構造のイメージングを目的として、これまでに、観測点の情報だけにに基づくイメージング手法を開発し、数値シミュレーションを通じて理論的検証を行ってきた

(Shiraishi, 2015; Shiraishi and Watanabe, 2021)。本研究では、首都圏地震観測網MeSO-netによる近地震の観測データへ適用し、関東地方の深部構造イメージングを試みる。

自然地震を対象とする受動的反射波イメージング (Shiraishi and Watanabe, 2021) では、地中で生じた地震波が地表面と地下の境界面の間で反射する波群を構造イメージングに利用する。反射法地震探査で用いられるリバースタイムマイグレーション (reverse time migration, RTM) を応用し、地表付近の観測点で得られた波形記録を入力にして、すべての観測点から時間の進む方向に順伝播させた波動場と、時間を巻き戻す方向に逆伝播させた波動場をそれぞれモデリングし、各時間ステップにおける波動場の相関結果を時間積分する。この方法では、正確な震源情報を必要とせず、地震イベント毎に得られる構造断面イメージを多数加算することにより、有意な反射境界が結像して地下構造プロファイルが得られる。

本研究では、陸上稠密地震観測網の一つであるMeSO-netにより観測された近地震データに対して提案手法を適用した。関東地方ではこれまでに、地震波トモグラフィやレシーバ関数解析を中心に、フィリピン海スラブと太平洋スラブの深度や形状ならびにそれらの相互関係、地殻内部の構造推定が行われてきたものの、反射波による深部構造の解析例は稀である。ここでは、MeSO-net観測点が概ね線形に配置されている西南西-東北東に190kmの解析測線を設定し、測線から5kmの距離範囲にある72観測点を利用した。まず、2017年4月から2020年3月までの気象庁一元化震源リストに基づき、観測点を含む180km×110kmの範囲内に震央がある、マグニチュード2.5以上の近地震722イベントを抽出し、そのうち信号ノイズ比の高い方から200イベントを選択して解析に用いた。次に、信号を含む60秒間の鉛直方向成分記録に対して、0.5H-3Hzのバンドパスフィルタと自動振幅補償を適用した。波形記録の中には、構造不均質に起因する反射波と考えられるコヒーレントな波群を初動以降に確認することができた。解析に用いる二次元モデルは、Matsubara et al. (2019)の三次元地震トモグラフィによるP波速度構造から、測線に沿って水平距離190km×深度100kmを抽出し、グリッド間隔100m×100mに空間内挿した。そして、P波反射波を解析対象とし、スカラー波動方程式の有限差分法による音響波RTMを適用した。

解析の結果、深度20-40kmに複数の連続的な反射面がイメージングされた。これらは、地震波トモグラフィによる速度構造と調和的であり、また、既往研究で報告されているフィリピン海スラブの深度域に対応することから、スラブに起因する反射面を含む深部地殻構造を示唆するものと考えられる。この結果は、近地震に含まれる反射波を利用することで、従来よりも高分解能な深部のイメージが得られ、詳細にスラブ形状の推定ができる可能性を示すものである。今後はイメージ品質の改善に向けた工夫や三次元的な解析により、自然地震を用いた従来の解析結果と相補的に、かつより詳細に深部構造の推定に貢献することが期待される。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費基盤研究C (JP19K04028) の助成を受けたものです。また、気象庁一元化震源リストおよび防災科学技術研究所のMeSO-net観測データを解析に利用しました。

Three-dimensional shear-wave velocity structure and shallow very-micro earthquakes above sea level in the Showa-shinzan volcano

*Akiko TAKEO¹, Kiwamu Nishida¹, Motoko Ishise¹, Hiroshi Aoyama², Yosuke Aoki¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

有珠火山の東に位置する昭和新山は1943-1945年の噴火及び隆起において形成された標高398mの火山である。最上部にはマグマが露出した溶岩ドームが存在し、標高約200mで比較的平らな屋根山と呼ばれる部分は植生が回復している(図)。現在でも山頂周辺では噴気が見られるほか、山体の収縮が続いている。昭和新山の形成・冷却過程を明らかにするため、本研究では先行研究の表面波解析手法を拡張して内部の3次元S波速度構造を推定し、内部で見つかった微小地震活動と合わせて解釈を行う。

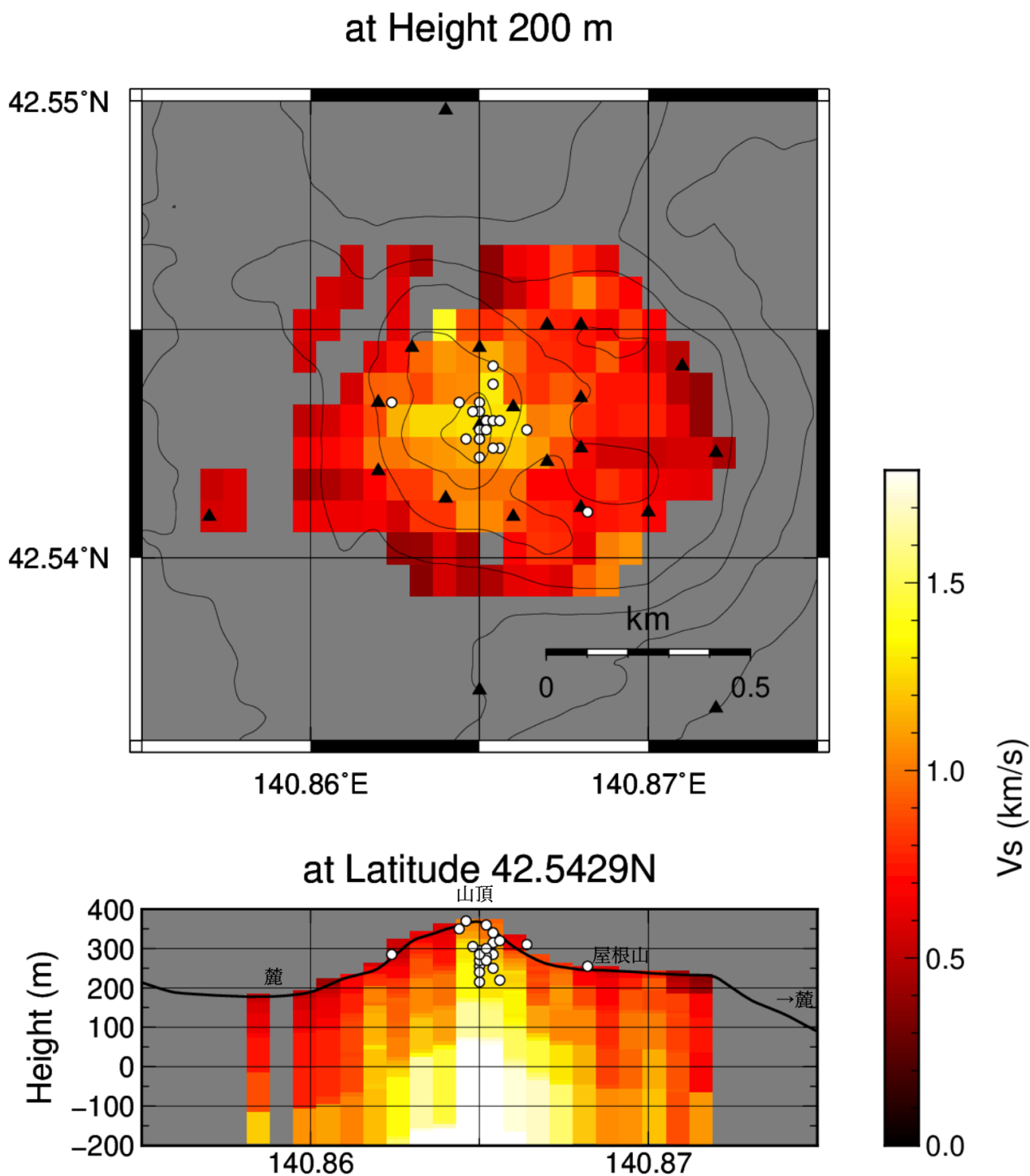
先行研究Takeo et al. (GJI改訂中)では、昭和新山上や周辺の22箇所(図の三角)に短周期地震計を1ヶ月設置した。地震波干渉法を用いてRayleigh波を解析し、山頂付近・屋根山・麓の3地域毎に平均的な1次元S波構造を推定した。位相速度を自動測定するため、全10層のS波速度をモデルパラメータとして地震波干渉法の相互相関関数を波形フィッティングする方法を開発した。波長と観測点配置の影響のため、位相速度が測定できる周波数帯域は地域毎に異なる。一方、地下構造が地域毎に異なるため、ある周波数のRayleigh波がS波速度構造に感度をもつ深さも地域毎に異なる。これらが組み合わさった結果、全地域共通の深さ範囲(地表から深さ約20-500 m)においてS波速度を推定することができた。

本研究では、この先行研究の手法を拡張し、3次元S波速度構造を推定した。まず、各観測点ペアの相互相関関数に対して波形フィッティングによって10層のS波速度構造を推定した。日中と夜間でノイズスペクトルの形が異なるため、毎日同時観測のデータを用いて24通りの相互相関関数を計算し、ブートストラップ法による誤差推定も行った。精度良く位相速度が推定できる周波数帯は上述のように観測点ペアによって異なるため、通常の表面波トモグラフィーの様に2次元位相速度分布のインバージョンを行うことは難しい。そこで、波形フィッティングで得られた観測点ペア毎のS波速度構造をパス平均の構造と見なし、2通りの方法で3次元構造推定を行った。1つ目は緯度・経度を0.0007度毎のグリッドに分け、各グリッドを通るパスのS波速度重み付き平均を標高毎に求めた(図)。重みはパスの長さで定義した。2つ目は、角周波数毎の位相速度分布推定で通常用いられている波線追跡法(Rawlinson and Sambridge 2003)を適用して地表からの深さ毎にインバージョンを行った。どちらの手法においても高低差が150mを超えるパスは取り除いた。

2通りの解析結果に共通して、山頂直下のS波速度は全ての深さで他の領域よりも速くもとまった。この結果は先行研究(Takeo et al. GJI改訂中)と調和的であり、噴火・隆起時の地下のマグマは水平方向に狭く分布したと解釈できる。加えて波線追跡インバージョン結果から山頂直下でも特に露出した溶岩ドームの東側でS波速度が速いことが明らかになった。当時の写真記録などから最も噴火活動が活発であった第四火口の火道に対応する可能性がある。先行研究では山頂直下のS波速度はNishiyama et al. (2017)が推定した密度と経験的なスケールリングで予想されるより約40%小さく推定されており、未だ溶岩ドーム内部が高温であることや空隙が存在することなどを低速度の原因として挙げている。本研究の結果は、溶岩ドーム内にも水平不均質が存在し、例えば溶岩ドーム東側は空隙が少なかったり低温であったりすることを示唆する。

この3次元構造推定には技術的な問題が2つ存在する。1つ目は周波数毎の位相速度分布推定で通常仮定する様な破線理論を本来適用してはいけないことである。2つ目は地形の影響を十分に考慮していないことである。本研究のように深さ毎にインバージョンするアプローチは他の火山地域にも応用できる可能性があり、今後新たな技術開発をしていく必要がある。

本研究では、以上の結果に加えて昭和新山内部ではほぼ毎日発生しているマグニチュード-3から-2.5の極微小地震活動(竹尾他 2020 JpGU)にも着目する。一様P波速度を仮定した暫定震源推定結果によると、溶岩ドーム直下の海拔200–350mすなわち深さ50–200m付近に位置している(図の白丸)。複数観測点の到達走時の違いから少なくとも2箇所以上で発生しており、今後3次元構造を仮定した震源決定や相対位置再決定などにより空隙・温度分布と地震活動の関係性など議論できると期待できる。



標高 200m および緯度 42.5429°N での S 波速度分布。
三角は観測点、丸は極微小地震の暫定震源位置を示す。

Room A | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:15 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 4:30 AM - 5:15 AM UTC | 🏠 ROOM A

PM-1

chairperson:Tomoya Takano(Hirosaki University)

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

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms: a comparison with the wave model
WAVEWATCH III

○Kiwamu NISHIDA¹, Ryota TAKAGI² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,
2.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science,
Tohoku University)

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

[S01-07] Seismic velocity response to tidal deformation at shallow crust in Japan

○Tomoya TAKANO¹, Kiwamu NISHIDA² (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki
University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S01-08] Seismic noise observed by an ocean bottom seismometer revealed glacier sliding
velocity in Greenland

○Yoshio MURAI¹, Evgeny A. Podolskiy², Naoya Kanna³, Shin Sugiyama^{4,2} (1.Faculty of Science, Hokkaido
Univ., 2.Arctic Research Center, Hokkaido Univ., 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of
Tokyo, 4.Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.)

A centroid catalog of P-wave microseisms: a comparison with the wave model WAVEWATCH III

*Kiwamu NISHIDA¹, Ryota TAKAGI²

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

■はじめに

地動の脈動の存在自体は1940年代から知られている。励起源が海洋波浪であることは既に確立されており、その励起の特徴から約 0.07 Hz の卓越周期を持つ Primary microseisms と約 0.15 Hz の卓越周期をもつ secondary microseisms である。Secondary microseisms は海洋波浪のちょうど倍の卓越周波数を持ち、海洋波浪の非線形効果が励起に大きく寄与している事が知られている (Longuet-Higgins, 1950)。ともに海洋波浪が励起源のため表面波が卓越しているが、脈動の遠地実体波も観測される。

■解析手法

脈動の起源メカニズムを系統的に理解するためには理解するためには、脈動P波の重心位置のカタログ化は情報は重要である。本研究では、beamforming法の自然な拡張として、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を抽出できる新しい手法 (auto-focusing法) を適用した。

■解析

2004年から2018年までに防災科学技術研究所が運用によって展開されているHi-net (速度計 鉛直成分約750点) を解析した。機器応答は時間領域 で補正し (Maeda et al., 2011)、収録機器起源のコヒーレントなノイズは予め差し引いた (Takagi et al., 2015)。解析には、これら広帯域化した速度計記録を用いた。時系列を512秒ごとに切り出し、地震の影響を取り除いたセグメントは解析から除外した。遠地の地震はglobal CMTカタログ (Ekström et al., 2012) を用い除外し、近地の地震は平均自乗振幅の時間変化の大きさから判断し除外した。さらに、観測点ごとの平均自乗振幅の大きさに閾値を設定し、局所的なノイズの影響を受けているとして解析から除外した。選択したデータを用い、0.1-0.25Hzの帯域でcentroid single force (CSF) を推定した。解析はP波、PP波、PKP波、PKIKP波を対象とた。また3次元構造の補正を、3次元波線追跡プログラムLLNL (Simmons et al., 2012)を用いて行った。

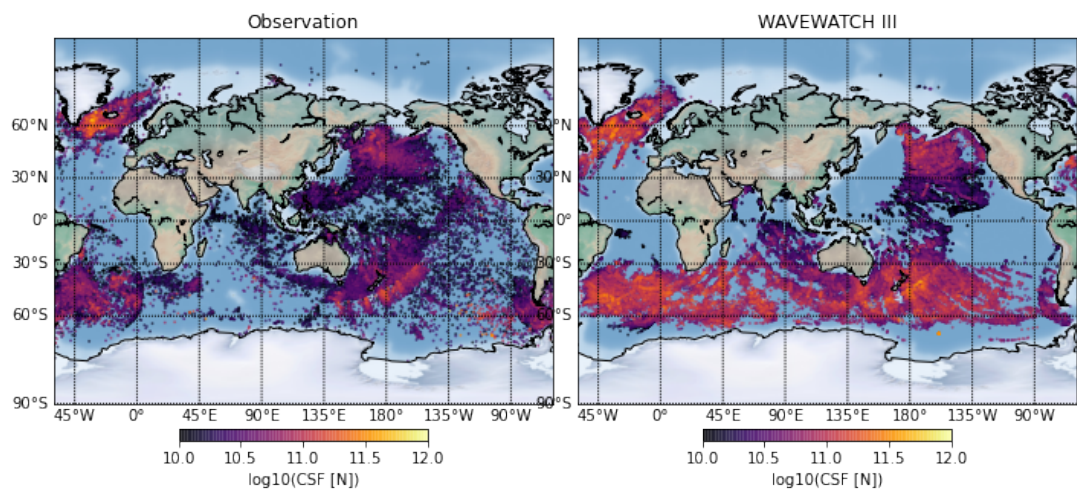
■WaveWatch IIIに基づくcentroid カタログの推定

より定量的に理論を検証するため、海洋波浪モデル (WAVEWATCHIII) を使ってP波の理論的な予想値と比較した (c.f., Nishida and Takagi, 2016)。海洋波浪による励起はArdhuin et al. (2011)に従い計算し、波線理論によるP波のGreen関数はFarra et al. (2016)に従った。

■解析結果とWaveWatch IIIの比較

Centroidの時空間分布を比較したところ、Hi-netによる解析結果とWAVEWATCH III は大局的に調和的であった。Centroidは北半球の冬の期間、主に北西太平洋・北大西洋に分布していた。南半球の冬の期間には、主に南太平洋・南極海に分布していた (図参照)。

本研究では、P波、PP波、コアフェイズを解析したが、PP波の検出数はWAVEWATCH III に比べて優位に少なかった。また、PP波によって決定したCSFの大きさも優位に小さいことが分かった。これは、PP波が浅部の不均質構造の影響をより強く受けるために、3次元構造の影響を補正しきれなかった事が原因だと考えられる。解析結果とモデルの間の最も大きな違いは、オーストラリア北部 (カーペンタリア湾) のP波脈動である。毎年夏に顕著な脈動活動が観測されている。この違いは、WAVEWATCHIIIがLonguet-Higginsメカニズムで重要となってくる海岸での波浪の反射を上手くモデリングできていない事に起因しているかもしれない。ただカーペンタリア湾は閉じた湾であるために、海洋波浪活動があまり活発でないことが知られている。また水深も約50mと浅いために、Longuet-Higginsメカニズムとは違った非線形効果を考える必要があるかもしれない。



Seismic velocity response to tidal deformation at shallow crust in Japan

*Tomoya TAKANO¹, Kiwamu NISHIDA²

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地殻内の歪みの蓄積・解放過程を調べることは地震や火山活動の発生機構を理解する上で重要である。地殻内の歪み変化は、地殻を伝播する地震波速度の時間変化を観測することで調べることができる。観測された地震波速度変化から地殻構造の歪み変化を推定するためには、歪み変化に対してどのくらい地震波速度変化が生じるのか理解する必要がある。近年、歪み変化のみによる地震波速度変化を調べるために、高精度に理論計算できる地球潮汐に伴う地震波速度変化の検出が地震波干渉法により行われている。しかしながら、先行研究では限られた地域での観測結果しか報告されておらず、地球潮汐に伴う地震波速度変化の地域性などの空間的な特徴はまだよくわかっていない。そこで本研究では、Hi-net観測点で記録された常時微動を利用して、拡張カルマンフィルタに基づき地球潮汐による地震波速度変化のみを抽出し、日本全国における速度変化の潮汐応答の空間分布について調べる。

防災科学技術研究所のHi-net（速度計3成分，878観測点）において、2010年から2011年までに記録された連続記録を解析する。データロガーによるノイズの影響を除去した(Takagi et al., 2015)後に、時間領域で機器応答を補正し(Maeda et al., 2011), 20Hzにリサンプリングする。各観測点において、1時間ごとに常時微動の自己相関関数3成分（NN, EE, ZZ成分）と同一観測点での相互相関関数6成分（ZE, ZN, EN, EZ, NZ, NE成分）を計算する。得られた相関関数に対し0.2-0.5Hzの帯域でフィルターを適用する。Nishida et al., (2020)に基づき、線形化したストレッチング法に対して拡張カルマンフィルタを適用することで、1時間ごとの9成分の相関関数から潮汐に対応する地震波速度変化を抽出する。ここで、異なる周期の潮汐による速度変化をcosine関数の重ね合わせによりモデル化し、説明変数としてカルマンフィルタの中の状態-空間モデルに組み込む。カルマンフィルタの処理過程において、説明変数である地球潮汐による速度変化を最尤法により決定する。

分潮の中で振幅が最も大きいM2分潮に対する速度変化の空間分布を調べたところ、海洋荷重による歪み量の大きい湾周辺や島の観測点で速度変化が大きくなることがわかった。また、各観測点でのM2分潮に対する地震波速度変化とGOTIC2（Matsumoto et al., 2001）により計算した潮汐歪量を用いて、地震波速度変化の歪感度を推定した。地震波速度変化の歪感度は 10^3 から 10^5 の間で分布し、これまで先行研究で推定された速度変化の歪感度値と整合的であった。得られた歪感度値を地殻浅部におけるS波速度（Nishida et al., 2008）と比較したところ、速度変化の歪感度値はS波速度の低い領域において大きくなることがわかった。

本研究では、防災科学技術研究所のHi-netの連続データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

Seismic noise observed by an ocean bottom seismometer revealed glacier sliding velocity in Greenland

*Yoshio MURAI¹, Evgeny A. Podolskiy², Naoya Kanna³, Shin Sugiyama^{4,2}

1. Faculty of Science, Hokkaido Univ., 2. Arctic Research Center, Hokkaido Univ., 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, 4. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.

1. はじめに

近年、地震波ノイズの励起に関して、地震波ノイズと海洋潮汐 [Becker et al. (2020)] や風による気圧変化 [Tanimoto and Wang (2021)] などとの関係が調べられている。Podolskiy et al. (2021)は、グリーンランド・ボードイン氷河直前の海底に海底地震計を設置して、地震波ノイズと氷河の流動速度を比較することによって、地震波ノイズパワーと流動速度の間に高い相関があることを発見した。このことから、地震波ノイズは氷河がすする時に生じる微動であると考えられ、地震波ノイズの観測から氷河の流動速度を推定できることが示された。氷が陸上から海に流入すると海水準が上昇するので、海底地震観測によって氷河から海に流入する氷と融け水をモニタリングできれば、地球温暖化による海面上昇の解明に役立つことが期待される。一方、氷河の流動では基盤上を氷がすする現象が重要であり、固体と固体の接触面での安定すべり実験と見なすこともできる。本研究では、Podolskiy et al. (2021)による観測結果をレビューし、氷河が流動する際に、どのようにして地震波が励起されるかについて地震学的に考察する。

2. 観測と解析結果

グリーンランド北西部のボードイン氷河は、海洋に流れ込む氷河の1つである。Podolskiy et al. (2021)では、2019年7月21日～8月6日の期間に、ボードイン氷河の氷河末端から約640 m離れたフィヨルドの海底に海底地震計1台を設置して観測を行った。センサーには、固有周波数4.5Hzの3成分速度計を使用した。また、氷河と陸上にもGPS受信機と速度型地震計を設置した。解析では、地震計の記録から機器特性を除去し、power spectral density (PSD)を計算した。PSDはいくつかの周波数帯で積分し、各周波数帯域での時系列を作成した。PSDの時系列はばらつきが大きかったので、PSDの最小値をノイズレベルの最小値として、氷河上のGPSで観測された氷河の流動速度との比較を行った。氷河の流動速度は約1 m/dayの速さで、海洋潮汐の影響による約12時間周期の変動に加えて、融解水が氷河の底に供給される夕方に速くなる傾向がある。地震波ノイズパワーの時系列は、3.5 Hz～14.0 Hzの周波数帯で氷河の流動速度との間に相関が見られ、特に海底地震計では、氷河上で発生する氷の破壊や強風によるノイズの影響を抑えることができたため、高い相関があることが明らかになった。以上のことから、地震波ノイズは氷河がすする時に生じる微動であると考えられる。

3. 解釈

なぜ微動振幅と氷河の流動速度との間に相関が見られるのか、その原因について考察する。ボードイン氷河では、氷に縦孔を掘削して氷内部の変形を直接調べたところ変形量が小さいことが明らかになっており、氷河の流動速度と氷河底面のすべり速度はほぼ同じと仮定できる。Aki and Richards (2002)の式(4.32)によると、断層すべりによる変位場の遠地項は、地震モーメントの時間微分に比例する。地震モーメントは断層すべりに比例するので、変位場はすべり速度に比例する。観測では速度型地震計を使用しているので、観測された地震波の速度場はすべり加速度に比例することになる。ここで、3.5 Hz～14.0 Hzの周波数帯での微動は、同じ周波数帯でのすべり加速度によって励起されることになるが、GPSから得られた氷河の流動速度は15分間の平均値から計算されたもので、微動のような高周波成分のすべり速度やすべり加速度は検出できないことに注意する必要がある。したがって、以下では定性的に議論する。

氷河がすする時に高周波の微動を励起するためには、氷河は滑らかに流動するのではなく、高周波の速度ゆらぎを伴いながら流動していると考えられる。そのような高周波の速度ゆらぎが、高周波のすべり加速度の原因となり、微動による速度場が励起される。その際、氷河の流動速度が速くなると、高周波の速度ゆらぎによるすべり加速度が大きくなるため、微動による速度場も振幅が増大してノイズレベルが上昇すると考える

と、観測結果を説明することができる。氷河の底面には氷河堆積物が付着していて、その中に含まれる砕屑岩が氷河の流動によって引きずられて、基盤の硬い部分を通過する時に氷河の流動速度にゆらぎが生じて、すべり加速度が発生し、微動が励起される。氷河の流動速度が速くなると、氷河の底面の砕屑岩が基盤の硬い部分をより頻繁に通過するようになるので、氷河の流動速度のゆらぎが大きくなり、強いすべり加速度と微動が励起されるのかもしれない。

文献

Podolskiy et al., 2021, Nat. Commun., 12, doi:10.1038/s41467-021-24142-4.

Room A | Regular session : S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

📅 Sat. Oct 16, 2021 2:15 PM - 3:00 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 5:15 AM - 6:00 AM UTC | 🏠 ROOM A

PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S12-01] Regional stress field in the northern Kinki district investigated by dense seismic observation

○Toshio Tanaka¹, Yoshihisa Iio², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction)

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

[S12-02] In-situ stress at the basement under Osaka plain(3) -Re-evaluation using rock core samples with DCDA method-

○Kentaro OMURA¹, Akio Funato², Takatoshi Ito³ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Fukada Geological Institute, 3.Institute of Fluid Science, Tohoku University)

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

[S12-03] Experimental evaluation under hydrous condition on thermal maturation of carbonaceous materials as a proxy of frictional heating in a fault during an earthquake

○Keita IWAGAKI¹, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University)

Regional stress field in the northern Kinki district investigated by dense seismic observation

*Toshio Tanaka¹, Yoshihisa Iio², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka²

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

近畿地方の北部には、有馬－高槻断層帯、三峠・京都西山断層帯、花折断層帯、琵琶湖西岸断層帯などの活断層が分布しており、日本で活断層が集中している有数の地域の一つである。これらのうち、有馬－高槻断層帯は、北側の北摂山地と、南側の大阪平野や六甲山地の境界部に沿って、ほぼ東北東－西南西に延びる活断層帯である。その長さは、高槻市街地北部から神戸市北区の有馬温泉西方まで、約55kmある。有馬－高槻断層帯の南西側には、兵庫県南部地震(1995 M7.3)を引き起こした六甲・淡路島断層帯があり、断層帯の近傍では、大阪府北部の地震(2018 M6.1)が発生した。

有馬－高槻断層帯の北側の丹波地域では、活発な微小地震活動が長期間継続している。この地震活動は大地震の後の余震活動とは異なっている。また、特定の断層の近傍で発生しているのではなく、広い範囲で発生している。地震活動には地殻内流体が関連していることが示唆されており、近畿地方北部における下部地殻内のS波の反射面の解析を通して、断層帯深部の地震学的構造の解明がなされてきている(Aoki et al., 2016 ; Katoh et al., 2018)。

近畿地方北部は近畿三角帯の西縁側の一部に位置し、また、新潟－神戸歪集中帯の南西端の一翼を担う場所でもある。したがって、広域のテクトニクスを考察する上でも重要な場所である。地殻の応力の状態をより正確に把握することは、考察を深めるために欠かせないだけでなく、将来の地震活動を予測する上でも極めて重要である。

琵琶湖西岸から丹波山地周辺には、2008年以降、満点システムと名づけられた、80点を超える稠密観測網が整備されてきている(三浦ほか, 2010)。平均観測点間隔は約5kmで、従来の定常観測網の約20kmと比較するとはるかに稠密である。近畿地方北部の応力場については、既に藤野・片尾(2009)や青木ほか(2012)により解析がなされているが、この満点システムから得られた多数のデータ、および周辺の高感度定常観測点から得られたデータを用いて、応力場の解析を行った。解析に用いた地震は北緯34.4～35.7°、東経134.5～136.6°の範囲内で2008年11月から2018年3月までに発生した約2万個の地震である。一つのメカニズム解を求める際に地震の観測点の下限は15とした。メカニズム解に複数の解がある場合は10個以下の場合のみを用いた。インバージョン解析においては、以下のパラメータなどで解析した。

Kagan角の最大値：35°、Score値の最小値：0.9、グリッド内の地震数：16以上50以下、グリッドの大きさ：x軸10km、y軸10km、z軸2.5km

これらのうち、z軸(鉛直)方向の距離については、応力の上下方向の変化を詳しく調べるために2.5kmに設定した。藤野・片尾(2009)は、深さ、東西、南北とも10kmの立方体を解析対象としたが、2.5km間隔で設定できたのは、稠密観測網により膨大な数の地震波形データが得られたからである。解析に際しては、変化の連続性を保つため、原則としてグリッドの大きさの半分ずつの距離を移動させ、各データを2回使用した。

地殻にはたらく最大主応力の方位は、西南日本では一般的に東西方向である。しかし、有馬－高槻断層帯の主体は、かなり東西に近い走向の横ずれ型の断層であり、広域的な応力場とは必ずしも調和的でないように見える(飯尾, 2020)。大阪府北部の地震の後の余震観測などによると、P軸の方位は、東－西方向だけでなく、南東－北西方向にも向いていることが計測されている(飯尾, 2020)。

本研究の結果、有馬－高槻断層帯付近にある、大阪府北部の地震の震源地付近の最大主応力の方位は、深度10kmの地点において、東－西方向から、南東－北西方向に、時計回りに20°回転していた。また、丹波地域でも角度は異なるが、時計回りに回転している場所があった。応力方位の上下方向での変化については、有馬－高槻断層帯周辺では、地震の発生深度が限られていて数も少ないので、推定は困難であった。一方、丹波地域ではより深い場所でも発生し数も多いので、上下方向での変化も推定できた。その結果、特徴的な変化を示す場所があることも分かった。一例として、大阪府北部の地震の震央点の北方40kmの地点から東方に20kmにわ

たる範囲の地域では、深度が7.5、10、12.5kmと深くなるにつれ、応力方位が時計回りに回転していた。角度は、東を基準として時計回りの方向を正とした場合、7.5kmでは-10または-15°、10kmでは10°、12.5kmでは15°であった。

最大主応力方位の角度の変化を引き起こす要因については、詳しい分析を今後継続して行う予定である。

In-situ stress at the basement under Osaka plain(3) -Re-evaluation using rock core samples with DCDA method-

*Kentaro OMURA¹, Akio Funato², Takatoshi Ito³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Fukada Geological Institute, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University

日本列島の原位置の絶対応力に関するデータ、特に深さ100mを越える深部データは、陸域においても、数少ない状況にあるなか、掘削で採取された既存の岩石コアを用いた地殻応力測定法を適用し、信頼性の高い地殻応力データをはばひろく取得することを目指してきた。本発表では、一例として、防災科学技術研究所の、大阪平野にある深層地殻活動観測井における原位置地殻応力測定の結果を報告する。本観測井では、ボアホールテレビュア検層から、ボアホールブレイクアウトが観察され、すでに応力方位が推定されているが（小村，地震学会秋季大会2020），Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計され，防災科研に整備された装置でコア形状を再計測し，コア変形法（DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法）を適用して応力値を推定した。コア変形法では，地下深部から採取された岩石コアが，応力解放により弾性変形することから，その弾性変形を計測し，岩石の弾性定数と掛け合わせて応力値を推定する。先行研究により，1000mを超えるような深部岩石コアでは，採取後の弾性変形が大きく，コア変形法の適用できることが示されている。

大阪府の此花観測井(北緯34°39'45.92", 東経135°23'22.53", 掘削深度約2033m)の基盤に達する深度2035.5mコアと田尻観測井(北緯34°23'52.14", 東経135°17'01.24", 掘削深度約1532m)の同じく基盤となる深度1202.4mおよび1494.8mコアにおいて，採取後，10年以上経過したものではあるが，外周にそって直径がサインカーブ状に変化し，岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形していることが示され，コア変形法の適用可能と判断した。採取された岩石コアのP波速度，S波速度，密度測定から計算される弾性定数を適用し，応力値を求めたところ，～60 MPaから100MPaを越える差応力値となった。過去の，周辺の原位置地殻応力測定の結果と比べて，大きな値となっている。一方でボアホールブレイクアウトから求めた応力方位は，周辺の広域応力方位に整合的である。大きな差応力に意味があるかどうか，今後，岩石コアの亀裂の存在の影響などを考慮していかなければならないと考える。

本結果をふまえ，一般に，観測井などの孔井掘削と岩石コア採取し，あわせて孔内検層実施し，条件が適合して，ボアホールブレイクアウトが観察されれば，原位置地殻応力の値と方位をとくに計測可能であることが示されたものといえる。

Experimental evaluation under hydrous condition on thermal maturation of carbonaceous materials as a proxy of frictional heating in a fault during an earthquake

*Keita IWAGAKI¹, Tetsuro Hirono¹

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震性滑りの指標として、断層中に含まれる炭質物の熱熟成反応が挙げられる。この反応は断層中の摩擦発熱による温度上昇の推定に広く用いられる、温度上昇に伴う不可逆的な反応である。しかし、実際の地震発生時の断層は水で満たされているにもかかわらず、水が炭質物の熱熟成反応に及ぼす影響についてはこれまで精査されていない。そこで本研究では、初期熟成度の異なる2種の炭質物（褐炭、瀝青炭）を用い、水と共にガラス管に真空封入し、加熱処理を実施し、水の炭質物の熱熟成度の変化への影響を実験的に精査した。加熱実験では、炭質物-水量比（乾燥状態, 2:1, 1:4）、ターゲット温度（350, 700, 1050 °C）、最高温度保持時間（40 s, 1, 3, 5 h）を変化させて加熱を施し、その後、実験後試料において、赤外・ラマン分光分析による分子構造の解析を行った。その結果、炭質物-水量比が2:1における350, 700, 1050 °Cでの40秒~5時間の加熱、1:4における350 °Cでの1, 3, 5時間の加熱による官能基の離脱に、水の有無による有意な差が認められなかった。また、ラマン分光分析については現在解析中である。赤外分光分析の結果から、水は炭質物の熱熟成反応に影響を及ぼさないと言える。本発表ではさらに現在解析中のラマン分光分析の結果も踏まえ、これまで構築されてきた地震時の摩擦発熱指標としての炭質物の熱熟成反応を評価する。

Room B | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏠 ROOM B
AM-2

chairperson: Keisuke Yoshida (Tohoku University), Makoto Naoi (DPRI, Kyoto Univ.)

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

[S08-18] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

○Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kears² (1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)

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

[S08-19] Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

○Takumi MOTOKOSHI¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴
 (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University,
 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention
 Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S08-20] Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

○Makoto NAOI¹, Keiichi IMAKITA¹, Youqing CHEN¹, Kazune YAMAMOTO¹, Rui TANAKA¹, Hironori KAWAKATA², Tsuyoshi ISHIDA¹, Eiichi FUKUYAMA¹, Yutaro ARIMA³ (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC)

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

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○Keisuke YOSHIDA¹, Hiroo Kanamori² (1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-22] Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

○Kantaro Kawai¹, Nobuki Kame¹ (1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)

Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kears²

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

地震の強震動分布を決定する要因の1つである地震の破壊伝播方向を、古地震に対して求めることは重要な課題である。近年、過去の地震で観測された条線と単純な平面断層での動的破壊モデルによって、地震時に断層面上に記録される条線の湾曲と破壊伝播方向との間の関係性が示され (Kears et al., 2019; Kears and Kaneko, 2020)、地質的観察から破壊伝播方向を推定できる可能性が提示された。一方で複雑な断層面で記録された条線には、この関係性と湾曲の凹凸が逆向きになっているものも報告されている。このような湾曲が逆向きになっている条線を説明するため、本研究では地表付近に形状を与えた断層や複雑な形状を持つ断層モデルを用いて地震破壊のシミュレーションを行った。その結果、平面断層の場合と逆向きの凹凸を持つ条線が得られた。これは断層に形状を与えることで断層面上の初期応力が変化し、特にその鉛直成分の変化によって逆向きの湾曲が得られたと考えられる。また本研究では、特に初期応力が深さとともに増加するようなモデルでは地表面近くで逆向きの湾曲が得られるようなパラメータ範囲が狭く、地表付近で湾曲の向きを逆にすることが難しいことも分かった。本研究の結果から、複雑な断層形状を持つ地点での条線の解釈には地形の影響を考慮する必要があり、条線の湾曲から破壊伝播方向を推定する際には断層形状が単純な地点での観察を用いるべきであると考えられる。

Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

*Takumi MOTOKOSHI¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

通常の断層運動（ダブルカップル型地震：DC地震）では説明できない地震を非ダブルカップル型（NDC）地震と呼ぶ。NDC地震は、これまで主に火山地域や地熱地帯で報告されており、NDC成分は、断層の破壊の複雑さや流体の存在などを示すものとして考えられている。NDC地震の研究は、断層運動のプロセスや地震の発生機構を理解するために重要であり、地殻の応力や強度に関する新しい情報を得る機会を提供すると考えられる。

2000年に発生した鳥取県西部地震震源域では様々な研究がされており、この地域では2017年3月から2018年4月まで1000点の地震計を設置する観測が行われた（0.1満点地震観測）。Hayashida et al. (2020) は0.1満点地震観測網の地震計と定常観測点であるHi-net観測点の記録を用いてP波の走時と極性を読み取り、震源決定を行った。発震機構解を推定すると節面やヌル軸付近にDCでは上手く説明できない極性分布があり、内陸地震発生場でNDC地震が観測されたことが示された。本研究は、P波のスペクトルからNDC地震とDC地震の特徴を比較することで、NDC地震への理解を深めることを目的とする。

本研究では、NDC地震とDC地震について、観測点ごとにP波到達時間前後のスペクトルを求め、これらをコーダ波のスペクトルで規格化することで、各観測点のスペクトルの特徴を見た。また、震源球上でP軸、T軸を通る観測点を選択し、スペクトルの変化を確かめた。観測点選択の際はコーダ波/ノイズのスペクトル比が2以上となる周波数が多い観測点を選択した。

解析の結果、DC地震とNDC地震で震源スペクトルに大きな違いは見られなかった。そのうえ、地震によってはノイズが大きく、広い周波数域でスペクトルの特徴を正確に見ることができなかった。そのため、近接するDC地震とNDC地震について、各観測点のP波スペクトルとその比の特徴をみたが、同様に観測点の位置とスペクトルの関係は見られなかった。今回は少数の地震について震源スペクトルの特徴を確認したため、今後はより多くの地震とDC地震・NDC地震の組み合わせの震源スペクトルの特徴を確かめることで、NDC地震の発生過程を考察していく。

Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

*Makoto NAOI¹, Keiichi IMAKITA¹, Youqing CHEN¹, Kazune YAMAMOTO¹, Rui TANAKA¹, Hironori KAWAKATA², Tsuyoshi ISHIDA¹, Eiichi FUKUYAMA¹, Yutaro ARIMA³

1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC

圧電素子を用いたAE (Acoustic Emission) センサは、数cm規模の室内実験から数十m規模の現場計測において破壊現象の監視に用いられる。数100 kHz以上の高周波で高い感度を得られるので、地震計では検知できない微小な破壊を検出できるが、その周波数特性は複雑であり、かつ設置状態の影響を大きく受けるので、波形記録やスペクトルを用いて詳細な解析を行うことは簡単ではない。例えば、個々のセンサの微妙な接着状態の違いによってその感度が倍半分程度変化するので、振幅を用いた解析にはそれぞれのセンサの感度評価・補正が必要であるし、絶対感度が不明であるため波形記録から破壊の規模を求めることも困難である。本研究では、1) AEセンサの指向性を独自推定、2) 実際に用いる設置方法における周波数特性をレーザー・ドップラー速度計を用いて評価、3) 実験毎に全センサの相対感度を音波透過試験によって評価、することでこれらの問題を解決し、室内水圧破碎実験で得られたAEの地震モーメント M_0 を評価するとともに、Multiple Empirical Green function法 (MEGF法; Hough et al. 1999) によってそのコーナー周波数 f_c を評価した。

解析には、Tanaka et al. (2021; GJI) が実施した山口県産黒髪島花崗岩を用いた実験と、Naoi et al. (2020; GJI) が実施した米国産イーグル・フォード頁岩を用いた実験で得られたAEデータを用いた。実験は、65x65x130 mmの直方体形状に整形した供試体を用いて実施し、供試体長手方向に5 MPaの一軸載荷を加えた状態で、供試体中央部に穿孔した破碎孔に流体を圧入することで実施した。AEデータは、供試体表面に設置した24個のAEセンサ (共振型AEセンサ8個、プリアンプ内蔵高感度AEセンサ16個) によって、10 MHz sampling, 14bitの連続収録によって取得した。得られた連続波形データから、波形切り出し、走時自動検測、震源決定を行ってAEカタログを作成し、これらのイベントに対して、 M_0 と f_c の推定を実施した。

個々のAEのP波スペクトルに対し、1) - 3) の影響を補正した観測スペクトルに、理論スペクトルをフィッティングして M_0 , M_w (モーメント・マグニチュード) を評価したところ、-9.2から-6.8の M_w を得た。 M_0 の評価に必要な放射パターン係数の補正は、Naoi et al. (2020; GJI), Tanaka et al. (2021; GJI) が、各センサの相対感度とセンサ指向性を評価・補正した上で求めたモーメント・テンソル解を用いて行った。これらの先行研究では、イーグルフォード頁岩ではほぼすべてのAEが開口型であること、黒髪島花崗岩の実験では、剪断・開口・閉合型を含む多様なメカニズムのAEが生じたことがわかっている。

次に、AEセンサの周波数特性や媒質の伝達関数のモデリング誤差の影響を軽減可能なMEGF法を用いて個々のイベントの f_c を推定したところ、100-1000 kHzの範囲の値を得た。測定帯域が狭いことや、AEの震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスが複数かかるために、結果の解釈に注意が必要であるが、得られたAEに対して、1) せん断型破壊に対して繰り返し報告されている応力降下量一定則と調和的な M_0 - f_c 関係を持つイベントが震源メカニズムによらず多発した、2) 特に開口成分が卓越するものに対して、上記スケーリング則から予想されるよりも低周波成分が卓越するイベントが多発した、という結論が得られた。2) からは、震源における高い間隙流体圧の存在が、開口変位の発生と低周波成分の卓越に寄与することが示唆される。

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) および、科研費 (16H04614), 京都大学教育研究振興財団の援助により行われました。

Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

*Keisuke YOSHIDA¹, Hiroo Kanamori²

1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology

Although the corner frequency is widely used in earthquake source studies, its relation to physical source parameters is often ambiguous. Specifically, the source corner frequency or source duration does not explicitly include information about the complexity of the source process. The radiated energy is a more direct physical quantity for studying the dynamic characteristics of earthquake rupture. In Japan, high-quality seismic waveform records are available from the dense national seismic networks, which allow the determination of detailed source time functions even for small earthquakes ($M_w > 3.3$) (Yoshida, 2019). We systematically examined the radiated energy of small earthquakes in Japan using the abundant source time function data.

We estimated the radiated energy of earthquakes for which the moment tensor is listed in the F-net moment tensor catalog from 2004 to 2019 ($M_w 3.3-5.5$). The waveform data were derived from the stations of national universities, JMA, NIED Hi-net, F-net, and V-net. We applied the deconvolution algorithm developed by Ligorria and Ammon (1999) that employs the method of Kikuchi and Kanamori (1982) to SH waves and estimated the apparent source time functions (ASTFs). We used the waveforms of smaller earthquakes that occurred close to the target earthquake (< 3 km) with magnitude differences from 1 to 2 as the empirical Green's functions (eGFs). We first applied a low-pass filter to the raw velocity waveforms, with a cut-off frequency increasing with $M_0^{-1/3}$ of the target earthquake.

For approximately 1300 earthquakes ($M_w 3.3-5.5$), we derived ASTFs at more than ten stations. Many earthquakes show a coherent azimuthal dependence of AMRFs. Some earthquakes are characterized by distinct multiple pulses (Fig. 1), indicating complex ruptures of multiple patches. Then, we estimated the radiated energy E_R from each AMRF using the method of Vassiliou & Kanamori (1982). We also measured the source duration T and computed the radiated energy enhancement factor (REEF; Ye et al., 2018). As representative values of E_R , source duration T , and REEF for each earthquake, we used the median of the results estimated from the different AMRFs.

The estimated values of E_R are generally proportional to M_0 , with a typical ratio E_R/M_0 of about 3.6×10^{-5} . The duration cubed, T^3 , tends to be proportional to M_0 , with a typical value of M_0/T^3 about 3.9×10^{16} (in SI unit). This corresponds to a stress parameter of 2.0 MPa in Brune's (1970) model. REEF is typically ~ 3 but tends to be larger for multiple shocks. We do not see significant spatial variations of E_R/M_0 , M_0/T^3 and REEF, or any clear dependence of these parameters on depth, focal mechanism, and seismicity type.

The scaled energy $E_R M_0 = 3.6 \times 10^{-5}$ obtained in this study for small earthquakes ($M_w < 5.5$) is comparable to the estimates for larger earthquakes (e.g., Kanamori et al., 2020) in Japan. E_R/M_0 in our dataset does not significantly vary with the earthquake size, as suggested by Ide et al. (2001). The typical values of $T/M_0^{1/3}$ and REEF in our data set tend to be smaller than those of larger global earthquakes (Duputel et al., 2013; Ye et al., 2018). At face value, this suggests that small earthquakes have simpler source processes than large ones. However, this trend may be affected to some extent by our low-pass filter with a relatively low cut-off frequency.

Although the median values of E_R/M_0 and M_0/T^3 are fairly constant with M_0 (or Mw), the individual values do vary over an approximately 1.5 order of magnitude. E_R/M_0 in our dataset generally increases with M_0/T^3 with an approximate slope of 0.5 on the log-log plot. This suggests that M_0/T^3 or stress parameter can be used to approximately estimate the scaled energy. However, the proportionality relationship does not hold for complicated ruptures (high REEF events). The variation of REEF ranging from 1 to 40 obtained in this study suggests that considerable rupture complexity is involved in small earthquakes too.



Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

*Kantaro Kawai¹, Nobuki Kame¹

1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO

地震の動的破壊は断層周辺に質量再分配を引き起こし、また地震波は岩石の密度変動を伴いながら伝播する。両過程はP波到達前に過渡的な重力変動を引き起こす。このようなP波前重力信号は、既往研究において複数の大地震のデータ中に検出されてきた。しかし、検出は垂直成分に限定されノイズの高い水平成分は利用されてこなかった。

木村(2020, 学位論文)は、Hi-net水平加速度計(tiltmeter)アレイデータ解析から2011年の M_w 9.1 東北沖地震におけるP波前重力信号の水平成分を初めて検出した。これを、広域帯地震計の信号垂直成分と組み合わせ3成分全波形を用いて震源パラメータのグリッドサーチを行ったところ、断層の傾斜角 δ を 11.5° - 15.3° 、 M_w 8.75-8.92 に制約することに成功した。地球自由振動の理論研究において地震波の励起は、 δ が小さく震源が浅い地震に対して地震モーメントを M_0 とすると $M_0 \sin(2\delta)$ に近似的に比例し、 δ と M_w はそれぞれ独立に決定できない量であることが示される(Kanamori and Given, 1981)。木村の研究は従来の自由振動理論では説明されていないP波前信号の震源励起依存性を示している。そこで本研究では、この新たに見いだされた信号特性を理解することを目指して、理論波形合成計算コードを用いた数値実験を行った。

数値実験には Zhang et al. (2020)と Wang et al. (2017)によって開発された計算コード QSSPEGS_potential_Code を用いた。この計算コードは、従来の長周期地震波波形合成計算と同じ弾性重力完全結合の方程式を用いて現実的な地球構造におけるP波前重力信号の波形合成を可能にする。これまでに提案されてきた計算法と異なり、一切の近似計算をしていないことが特徴であり、また現実的な時間で実用制度の波形を得ることができる。ここでは、2011年 M_w 9.1 東北沖地震の傾斜角を系統的に変化させた模擬P波前重力信号波形を合成し、振幅の傾斜角依存性を調べた。点震源を仮定し、 $M_w = 9.1$ に固定し、 $\delta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ と変化させた。観測点を神岡として、地動加速度 $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ 、重力場の変化 $\delta \mathbf{g}$ のそれぞれの成分を合成し、これらを用いて観測されるP波前重力信号を求めた。ここで、加速度センサーの出力 $\mathbf{s}$ は重力変化そのものではなく、地動加速度の影響を受け $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta \mathbf{g}$ となることに注意が必要である。

結果、 $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ と $\delta \mathbf{g}$ の水平成分は共に $\sin(2\delta)$ の依存性を示すが、信号出力 $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta \mathbf{g}$ には $\sin(2\delta)$ とは異なる傾斜角依存性がみられた。計算前の想定通りに $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ と $\delta \mathbf{g}$ は $M_0 \sin(2\delta)$ で震源励起され、これらの差をとると新しい傾斜角依存性が現れる結果となった。一方、想定とは異なり $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ と $\delta \mathbf{g}$ の垂直成分の振幅は共に、 $\sin(2\delta)$ の依存性を示さなかった。逆に、 $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta \mathbf{g}$ は $\sin(2\delta)$ の依存性を示す結果となった。このP波前重力信号 $\mathbf{s}$ の δ 依存性は水平成分と垂直成分ともに木村(2020)の実データ解析結果と調和的である。しかし、数値実験の垂直成分の結果は想定しておらず、今後、地球自由振動の理論との整合性との検討が必要である。

Room B | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:00 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 4:30 AM - 5:00 AM UTC | 🏠 ROOM B
PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.)

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

[S08-23] Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2} -model, the cube law, and the GR law

○Shiro HIRANO¹ (1.College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.)

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

[S08-24] **Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor**

○Satoshi IDE¹ (1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2} -model, the cube law, and the GR law

*Shiro HIRANO¹

1. College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.

震源時間関数(STF)は、地震時の断層面上の滑り速度分布を空間積分した時系列である。多くの震源過程インバージョンの結果がデータベースに集積された結果、STF について以下の経験則が明らかにされている:

経験則1) STF は連続で、有限の持続時間を持ち、多くは非負かつ単峰。

経験則2) STF を時間積分したモーメント関数は、破壊開始からの経過時間の3乗に比例して成長。

経験則3) STF の Fourier 振幅スペクトルは ω^2 モデルで良く近似される。

経験則4) 最終的なモーメントの出現頻度は Gutenberg-Richter 則に従う。

経験則1については、ごく最近定量化され、STF の8割は単峰、2割は複峰であることが分かっている [Yin+ 2021 SRL]. この傾向と例外の存在は、震源過程のモデルが概ね単純でありながら、ある程度の複雑さもまた要求されることを示唆している。また、個々の事例においては充分滑らかな関数というわけではなく、多少の擾乱を伴う時系列であることも明らかである。経験則2および3については、古くから知られ、これらを説明する様々な震源モデルが提唱されてきた。しかし古典的な亀裂モデルなどは前述の擾乱を容易に再現できない。一方で非平面断層などの動力学的モデルは、パラメタ数と計算機負荷の双方に難があり、データを高精度に説明するには不可欠であるものの、全く別の単純なアプローチもまた、困難を補い理解に資する可能性がある。更に経験則4も踏まえると、現象の細部は割愛するとして、統計的に経験則を満たす確率論的アプローチが有効であろうと考えられる。

地震にまつわる統計的性質を理解するための確率論的方法として、確率微分方程式(SDE)によるモデル化が複数試みられてきた。SDE とは、微分方程式にノイズ項を加えて積分することにより、ランダムさを内包した系をモデル化するものである。先駆的なものは繰り返し地震の間隔 [Matthews+ BSSA 2002] やスロー地震 [Ide 2008 GRL] について、いずれも長時間を意識したものである。これらは通常地震イベントの STF をモデル化するものではないが、地震学における SDE の有効性を示唆している。より短時間の現象としては、破壊の最中における断層面上の運動方程式に摩擦法則とノイズを導入した事例 [Wu&Chen 2019 arXiv; Wu+ 2019 Chaos] があるが、残念ながら定常状態を意識したものであり、地震の開始と停止については度外視されている。

そこで本研究においては、地震時の STF を SDE に基づいてモデル化し、経験則1-4を満足することを示す。ただし SDE の性質から必然的に、確率変数の時系列は、その振幅スペクトルが ω^{-1} に漸近するブラウン運動である。従って1つの確率変数の時系列だけでは、通常地震についての経験則3を満たすことはできない。そこで、スペクトルが ω^{-1} に漸近する時系列を2つ用意し、その畳込み積分が STF であると解釈することで、経験則3を満たすことができる。これを発想の起点として、Bessel 過程と呼ばれる SDE を考える。Bessel 過程の解は必ず非負で、かつパラメタを適切に設定すれば有限持続時間を持つことが数学的に示されているため、経験則1を満たす上で都合が良い。また、パラメタ如何では持続時間の出現頻度がべき分布で近似され、従って経験則4も満足する。残された経験則3については、本研究の数値計算により統計的に満たされることが明らかになった。従って、4つの経験則は全て、2つの Bessel 過程の畳込み積分によって説明可能である。なお、2つの Bessel 過程の持続時間は確率によって決まるためそれぞれに異なるが、両者が大きく異なる場合には経験則3が満たされない。そこで両者の比を2以内(case A)に制限した場合と10以内(case B)に制限した場合を考え、後者のほうが STF に多様性が生じることが分かった(Figure 1)。

最後に、2つの Bessel 過程の畳込み積分が持つ物理的意味について考察する。Aki&Richards の表現定理から、STF は断層面上の応力降下速度の空間積分と、それに対する断層滑りの自己応答関数の畳込み積分で記述でき

る. 前者の応力降下速度が Bessel 過程だとすると, 断層全体で積分した滑りと応力の時系列は, 臨界滑り量が最終滑り量の20–50%程度であるような滑り弱化則と等価であることがわかった. 後者については, 今なおその意味が自明ではないが, 少なくとも断層の自己応答が線形弾性体のものではなく, 断層破碎帯などに起因する散乱波などのランダムネスが卓越するものであると予想される.

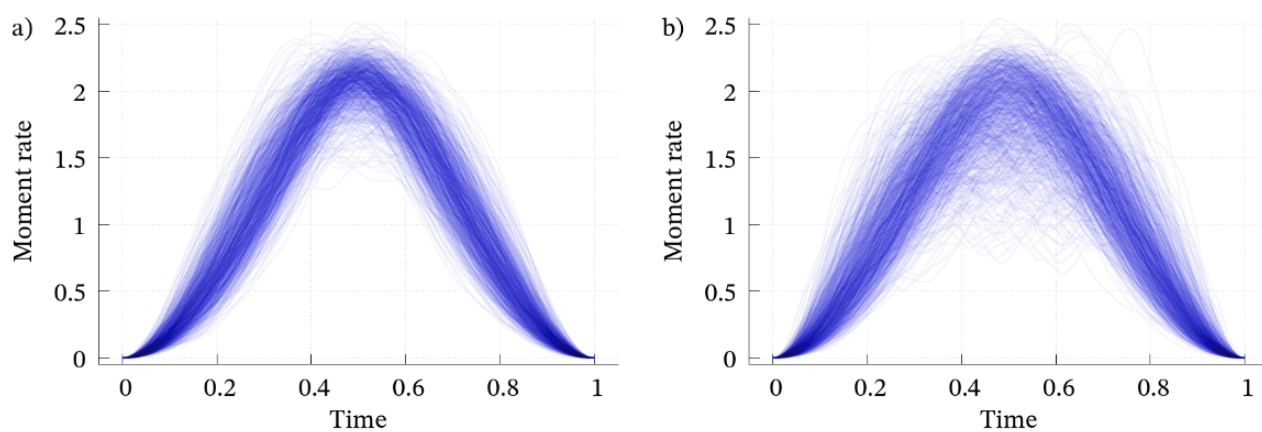


Figure 1. The 1,000 computed convolutions of the two Bessel processes for (a) case A and (b) case B. Time scale and total moment are normalized.

Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor

*Satoshi IDE¹

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

テクトニック微動と低周波地震（LFE）は、広帯域スロー地震の高周波（1Hz以上）成分の異なる表現であり、様々な地域で発見されている。LFEは微動の構成要素と考えられているが、長時間続く微動の中には、構成要素とみなせるLFEを見つけることが困難な場合も多い。そこで本研究では一般的に微動中から合成LFE、つまり微動発生地域におけるインパルスの震源からの地動応答を抽出する新しい手法を開発した。合成LFEは、多くの観測点で同時に発生する微動信号のインパルス性を用いて定義され、規格化してスタックした微動波形の絶対振幅最大値を最大化することで抽出される。この最大化関数は、極めて多峰的なので、遺伝的アルゴリズムと反復的改善を組み込んだ最適化手法を用いて最大化する。まず、この手法の妥当性をテストデータに適用して検証した後、近隣でLFEがほとんど検出されていない微動活動に適用する。一例は、潮汐応力に非常に敏感であることが知られている岡山の微動である。この微動に対して抽出した合成LFEは、正確な震源位置の決定や、マッチドフィルター解析による長期にわたる包括的な微動活動の把握に役立つ。具体的には海溝軸から遠く離れているにもかかわらず、岡山の微動の深さは約26kmと極めて浅いことがわかる。このように、LFEを微動のインパルス性を用いて新たに定義できることは、連続する微動活動は、ランダムな揺らぎで構成されているという仮説を支持する。スロー地震の挙動をより深く理解するためには、このようなランダム性を定量的に特徴づけることが重要である。

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

📅 Sat. Oct 16, 2021 2:00 PM - 3:00 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 5:00 AM - 6:00 AM UTC | 🏠 ROOM B

PM-1

chairperson: Noa Mitsui (Nagoya University)

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

[S18-01] Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

○ Satoko MUROTANI¹ (1. National Museum of Nature and Science)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S18-02] Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

○ Noa MITSUI¹, Takeshi Sagiya¹ (1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University)

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

[S18-03] Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

○ Yoshiaki ORIHARA¹ (1. Tokyo Gakugei University)

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

[S18-04] Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

○ Hiroo NEMOTO¹ (1. Ritsumeikan Univ.)

Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

*Satoko MUROTANI¹

1. National Museum of Nature and Science

2021年は東日本大震災から10年となる年である。国立科学博物館（以下、科博）では、地震発生日である3月11日を含む約1か月間（3月9日～4月11日）を会期として、企画展「東日本大震災から10年－あの日からの地震研究－」を開催した。災害を風化させないため、当時の被害や復興の様子を振り返るとともに、この10年間の地震調査研究の成果や科博がこの10年間でやってきた標本レスキュー活動や復興支援事業についても紹介した。科学系博物館での展示であるため、ただ東日本大震災のことを振り返るだけではなく、地震調査研究というサイエンスの部分に重点を置き、私たちは前を見て進んでいるということを示す展示を目指した。コロナ禍の中、入場人数や展示場所の制限を行うなかでの開催ではあったが、約3万人の方に足を留めていただいた。

本展示は第1会場5章＋第2会場という構成とした。1章は「東北地方太平洋沖地震と東日本大震災」として、地震の概要や当時の被害状況を岩手県の津波被災資料（東北地方整備局より借用）とともに振り返った。2章は「地震調査研究の貢献」として、この10年間の大きな成果と言える日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や緊急地震速報の改良、2020年から導入された津波フラッグ（気象庁より借用）の紹介など、震災以降に巨大地震に対する防災・減災に向けて行われてきている調査研究の一部を紹介した。この企画展の目玉となったのは海底地震津波観測装置（日本電気株式会社・防災科学技術研究所より借用）で、展示ホール中央に展示したが、かなりのインパクトを与えたようである。来場者からは、津波フラッグの取り組みを始めて知ったというコメントが多かった。3章は「くり返し起こる地震・津波」として、東北地方をくり返し襲った地震・津波について紹介した。日本三代実録における869年貞観地震の記述や、明治三陸地震、昭和三陸地震に関する資料、ならびに仙台平野での津波堆積物のはぎ取りとその調査風景（産業技術総合研究所より借用）を展示した。また、今年は1891年濃尾地震から130年という節目の年でもある。4章では「いつでもどこでも地震は起こる」として、海域で発生した観測史上最大の地震である2011年東北地方太平洋沖地震に対して、陸域で発生した観測史上最大の地震である1891年濃尾地震の写真を展示した。5章は「国立科学博物館の取り組み」として、この10年間に科博として行った被災地の標本レスキュー活動や復興コラボミュージアム活動について紹介した。さらに第二会場では「東日本大震災からの復興と伝承」として、この10年間の三陸地方の復興の様子を辿った映像や写真（NHKテクノロジーズより借用）とともに、東日本大震災に関する伝承施設の紹介パネルを展示した。

展示できたのは震災に関するほんの一部であり、関連する講演会を開催することもできなかったが、会期中は春休みだったということもあり、親子連れや友人同士で観に来られた方が多かった。展示を見ていく中で、改めて思い出したことや自分がすべきことを考えることができた、という感想も見られた。今後も博物館という強みを生かし、展示等を通して、来館者に地震・津波や防災に関する教育や普及に努めていきたい。最後に、本展示にあたっては多くの方々にお世話になりました。深く感謝申し上げます。

Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

*Noa MITSUI¹, Takeshi Sagiya¹

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

活断層で起きる地震に備えるには、ハザード情報の適切な提供が必要である。しかし、活断層の情報は不確実性を有する。例えば、一つの断層帯における震源断層の区間を正確に決定できないという不確実性が、マグニチュードや再来間隔、地震動の大きさの不確実性を生じる。

この問題に対して現在は、活断層地震に関する確率を計算し、公表する方法で対処している。具体的には、各活断層帯において今後30年以内に発生するM7.0以上の活断層地震を確率で表し、確率に応じたランクで発表する方法（主要活断層の長期評価）ならびに、各地域におけるM6.8以上の活断層地震の発生確率を発表する方法（活断層の地域評価）が地震調査研究推進本部（以降、地震本部）によって行われている。

確率を用いた対処方法について、活断層の長期評価内容を国民にわかりやすく伝えられるように表現を工夫してきたことを高く評価する声もある（山口、2008）。一方、これらの評価が適切に理解されず、本来の意図とは異なる形で使用される事例が指摘されている。また、別の視点からの批判として、Geller（2011）は、確率論的地震動予測地図で高い発生確率を示す場所が過去約30年間の被害地震の発生場所と一致しないことを示している。地球科学的に算出される地震動予測地図と、人間の時間スケールで把握できる被害地震が一致しないということは、地震動予測地図は元々人間が理解しにくい情報である可能性を示す。

これらの状況を考慮して我々は、最初の取り組みとして、現在の活断層情報の伝え方、すなわち、地震本部による公表結果（活断層の長期評価と地震動予測）の適切さを検討する。公表結果の受け止め方に関する調査は、地震本部が一般国民や地方公共団体を対象に行っている（文部科学省、2011-2019）。一方、活断層や地震に関する専門家の意見は、長期評価や地震動予測の作業過程では反映されているが、公表結果の認知度や評価は明らかになっていない。

そこで本研究では、長期評価や地震動予測地図の公表結果について、活断層や地震の専門家へのアンケート調査を実施した。調査対象は、日本活断層学会会員262人および日本地震学会代議員123人である。調査期間は令和3年2月22日～令和3年3月4日（日本活断層学会は令和3年2月24日～令和3年3月4日）である。インターネット上のセルフアンケートサイトQuestantを利用したウェブ調査を行い、各学会のメーリングリストを通じて、回答の協力を依頼した。有効回答数は全体47件（うち、回答者の所属学会は、活断層学会のみ36.2%、地震学会のみ27.7%、両学会34.0%）であった。

アンケート結果から、まず、自治体職員には活断層に関する情報を幅広く知っていて欲しい、という期待の高さが読み取れた。また、改善案の検討で参考にすべき下記の回答傾向が得られた。

1. 科学的妥当性&信頼性を重視
2. 長期評価等の発信方法：改善の余地が多い
3. 他機関との連携の必要性
4. 評価と災害と関係を述べる必要がある
5. 公表結果の活用方法について言及することが必要
6. 外部の知見を取り入れることが必要

その他、情報提供先の区別や新手法への評価など、意見が分かれる検討課題の存在も明らかになった。例え

ば、委員経験の有無によって「活断層の地域評価」の認知度の違いや、他機関との連携に関する考え方の違いが見られた。後者について、委員経験のない回答者は「情報を受け取る側（住民や自治体）」の視点に立ち、利便性の改善や知識の理解度を考慮した意見が多かった。一方、委員経験者は「情報の発信側（政府）」の視点に立ち、各省庁の目的の違いや、情報を統一する正当性を考慮した意見がしばしば見られた。このように、専門家間でも一つの問題に対して視点の違いに基づく意見の違いがみられたことは重要である。また、このような意見の違いは、専門家間の議論によって、解決策を示せる可能性が考えられる。

上記の意見を、一般国民ならびに地方公共団体を対象とした調査結果（文部科学省、2011-2019）と比較した。その結果、住民は知識より予測される災害を重視する点、地方公共団体は情報源の信頼性や発信方法の改善を求める点など、専門家と共通する意見が多くみられた。また、これらの比較により、専門家を含めた情報発信側の課題も明らかになった。例えば、知識を得る重要性を含めて住民に伝えるよう工夫する、市区町村の防災が中央防災会議や都道府県の指針に沿って行われていることをふまえて情報提供方法を改善する、などの課題が挙げられる。

上記の意見や検討課題は、多角的な視点から具体的な改善策を検討すべきである。そのため、地震動や災害関連などの専門家や地方公共団体の防災担当者、防災関連団体、地域住民への調査を行い、意見を集約して改善案の提案につなげることが今後の課題である。

謝辞

本調査研究においてアンケート調査にご協力いただいた日本活断層学会ならびに日本地震学会の皆様には感謝の意を表します。

Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

*Yoshiaki ORIHARA¹

1. Tokyo Gakugei University

週刊ポストでは年に数回、株式会社地震科学探査機構（JESEA）による地震予知情報に近い「MEGA地震予測」を掲載している。2021年4月26日に“予測的中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア”と題したWeb記事がNEWSポストセブンから配信された（NEWSポストセブン, 2021）。「MEGA地震予測」は、データの扱い方から予測の出し方、自己評価など様々な点で問題があると指摘されている（織原・長尾, 2015; 川崎・加藤, 2016; 横山, 2020）。しかし、週刊誌などのメディアによる宣伝の影響もあり、否定的な主張は世間になかなか広まらない。

今回のNEWSポストセブンの記事はYahoo Newsでも取り上げられた（Yahoo, 2021）。Yahoo Newsの大半は記事ごとに読者のコメントが掲載されている。この「MEGA地震予測」の記事についても、肯定的、否定的両方のコメントが掲載されていた。そこで、本研究ではこのコメントから、なぜ信じるのか、または信じないのか、その理由を探ることを試みた。肯定的なコメントとしては、注意喚起としてこのような活動を受け入れる意見や、「MEGA地震予測」の村井俊治氏を専門家として応援する意見などがみられた。一方、否定派のコメントは、データの扱い方に関する問題点の指摘、必ず当たるような言い方への批判などであった。また、今回の記事については、予測対象期間であるGW（ゴールデンウィーク）中に該当する地震が発生している（2021年5月1日宮城県沖で最大震度5強の地震）。地震発生後、肯定派のコメントは予想が当たったと賞賛する声が多かった。これに対し否定派は、予測範囲の広さを問題視するコメントが多くみられた。

<引用文献>

NEWSポストセブン, 2021, 予測的中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア,
<https://www.news-postseven.com/archives/20210426_1654811.html?DETAIL>, (参照2021-5-6).
織原義明・長尾年恭, 2015, 地震前兆現象を科学する, 祥伝社新書, 232pp.
川崎一朗・加藤照之, 2016, 科学史・科学哲学の枠組みを借りた 地震予知研究についての論点整理の試み, 地震2, **69**, 11-22.
横山裕道, 2020, 迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい, 地震ジャーナル, **70**, 55-58.
Yahoo, 2021, 予測的中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア, <
<https://news.yahoo.co.jp/articles/a9f45647b8ce8b00189151ea0b80afe8514b7715>>, (参照2021-5-6).

<謝辞>

本研究は東京大学地震研究所共同利用（2020-KOBO08）の援助を受けました。

Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

*Hiroo NEMOTO¹

1. Ritsumeikan Univ.

1. はじめに

平成20（2008）年改訂小学校学習指導要領（以下、旧小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下、旧中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は、旧小中学習指導要領と記す）の告示以降、平成29（2017）年に改訂された小学校学習指導要領（以下、現行小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下、現行中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は、現行小中学習指導要領と記す）が告示されるまでの間に、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震や平成28年（2016年）熊本地震など最大震度7を記録する大震災を伴う事象が発生している。気象事例でも、平成24年（2012年）九州北部豪雨、平成26年（2014年）8月豪雨、平成27年（2015年）9月関東・東北豪雨など激甚な被害をもたらした気象災害が発生してきている。こうした自然災害の多発を受け、小中学校にて地震や気象、および自然災害に関して旧小中学習指導要領による学びから現行小中学習指導要領による学びにて具体的にどのような変更があったのかを調査分析しておくことは、今後の地震教育、地震防災・減災教育等を考える上で必要であると考え、現行課程の教科書分析を行った。なお、高等学校での学びに関しては、平成30（2018）年改訂の高等学校学習指導要領による学習開始が令和4（2022）年以降であることから、2021年時点では取り上げられない。

2. 資料

本発表では、自然現象、自然災害のうち、小中学校「理科」での地震、地震防災・減災の学びに焦点をあて、旧小中学習指導要領および現行小中学習指導要領での課程（以下、順に旧課程、現行課程と記す）による「理科」教科書の記載内容の比較分析および考察を行った結果を報告する。よって、用いた資料は旧課程および現行課程での小中学校「理科」の全教科書（小学校6種類、中学校5種類）である。なお、旧課程での分析に関しては根本（2015a：2015b）にて報告済みである。例えば、旧課程小学校「理科」では、6種類の教科書に共通して使われている地震に係る用語は僅かに2語（地震、断層）だけであったことを報告している〔根本（2015a）〕。

3. 結果および考察

現行課程の小学校「理科」教科書では、6種類の教科書に共通して使われている地震に係る用語は“地震”，“断層”，“津波”の3語となっている。平成23年（2011）年東北地方太平洋沖地震による津波の影響を受けた結果と考えられる。“断層”と“地震”との説明が地震学におかしな記述となっている教科書が旧課程の小学校「理科」教科書では6種類中5種類あったが〔根本（2015a）〕，現行課程の教科書では6種類中1種類と改善が進んでいる。この1種類の教科書の説明文も、地震学的に正しい記載であるとも読み取れなくは無いことから、日本語の問題と言えるのかもしれない。

現行小学習指導要領では内容の取扱いにて『自然災害についても触れること。』と旧小学習指導要領には記されていなかった文言が加わった。これを受け、6種類の教科書ともに震災、火山災害の記述が行われるようになったが、取扱いの分量には差が生じている。ページ数で比較すると、火山災害と合わせて3ページの教科書もあれば7ページの教科書もある。使われている用語も教科書により大きく異なっており、例えば、緊急地震速報は4種類の教科書で使われている一方、防災倉庫、稲むらの火、ハザードマップなどは1種類の教科書で使われているだけである。こうした現状は、小学校段階で伝えるべき地震防災・減災に関わる用語選択が、各教科書出版社の判断によっているために生じている可能性が高い。「理科」にて取り扱う地震防災・減災に係る用語や内容の整理が必要である。

字数制限の関係で「社会科」や現行課程の中学校「理科」教科書の内容に関して本予稿では触れないが、小学校「理科」教科書と同様の課題が浮かび上がってきている。

4. まとめ

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書の分析から、地震に関する記載の改善が見られていること、および小中学学習指導要領での記載の変化により震災、地震防災・減災に関する記述が加わったが、その内容は教科書毎に開きのあることが明らかとなった。今後、小学校段階および中学校段階にて「理科」にて取り扱うべき、地震防災・減災、震災に関して使用する用語および内容の整理を行い提案する必要がある。

参考文献

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書。

根本泰雄, 2015a, (公社)日本地震学会モノグラフ, 4, 44-48.

根本泰雄, 2015b, (公社)日本地震学会モノグラフ, 4, 56-60.

< <https://www.zisin.jp/publications/pdf/monograph4.pdf> >

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

📅 Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏠 ROOM C
AM-2

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

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

[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))

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

[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)

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

[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.)

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

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

○Yutaka HAYASHI¹ (1.Meteorological Research Institute)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[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)

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)のカタログ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、カタログによる差が大きい。

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)のカタログ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，戦時中であっ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った一方で，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

📅 Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:00 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 4:30 AM - 5:00 AM UTC | 🏠 ROOM C
PM-1

chairperson:Yoshiki Shirahama(AIST)

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

[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)

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

[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)

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

📅 Sat. Oct 16, 2021 2:00 PM - 2:30 PM JST | Sat. Oct 16, 2021 5:00 AM - 5:30 AM UTC | 🏠 ROOM C

PM-1

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

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

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

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

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[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)

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

*Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Yoshio Fukao¹

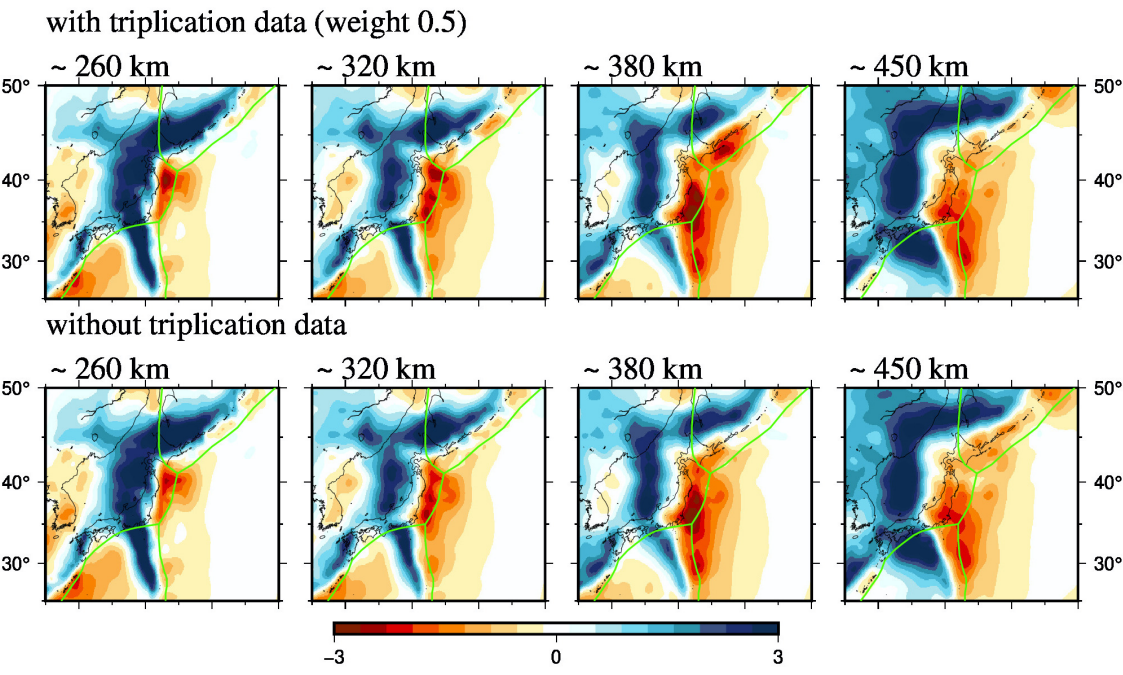
1. IMG, JAMSTEC

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。