

Thu. Oct 14, 2021

ROOM D

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-1

chairperson: Ayako Nakanishi (JAMSTEC)

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

- [S06-01] Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku
 ○Shun FUKUSHIMA¹, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)
 9:00 AM - 9:15 AM
- [S06-02] Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net
 ○Takashi Tonegawa¹, Ryota Takagi², Kaoru Sawazaki³, Katsuhiko Shiomi³ (1. JAMSTEC, 2. Tohoku Univ., 3. NIED)
 9:15 AM - 9:30 AM
- [S06-03] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling
 ○Takaya IWASAKI¹, Hiroshi Sato^{2,3}, Eiji Kurashimo², Hirokazu Ishige⁴, Hidehiko Shimizu⁴, Tatsuya Ishiyama², Takashi Iidaka², Masanao Shinohara², Shinji Kawasaki⁴, Susumu Abe⁴, Naoshi Hirata^{5,2}
 (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4. JGI, Inc., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
 9:30 AM - 9:45 AM
- [S06-04] Lithosphere– asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions
 ○Takeshi AKUHARA¹, Kazuo Nakahigashi², Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Hajime Shiobara¹,

Yusuke Yamashita³, Kimihiro Mochizuki¹, Kenji Uehira⁴
 (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:45 AM - 10:00 AM

- [S06-05] A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave
 ○Motoko ISHISE¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai¹, Shigeki Nakagawa¹, Naoshi Hirata² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
 10:00 AM - 10:15 AM
- [S06-06] Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan
 ○Makoto MATSUBARA¹, Katsuhiko Shiomi¹, Hsatoshi Baba², Hiroshi Sato³, Takahito Nishimiya⁴ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)
 10:15 AM - 10:30 AM

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-2

chairperson: Motoko Ishise (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

- [S06-07] Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan
 ○Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Motoko Ishise², Shin'ichi Sakai^{3,2}, Yohei Yukutake², Ryosuke Doke¹ (1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)
 11:00 AM - 11:15 AM
- [S06-08] Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough
 ○Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi

Takahashi^{1,2}, Takeshi Nakamura³, Toshiya Fujiwara¹
(1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.CRIEPI)

11:15 AM - 11:30 AM

[S06-09] Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

OGou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹ (1.JAMSTEC)

11:30 AM - 11:45 AM

[S06-10] Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

ORyuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Yuka Kaiho¹, Shuichi Kodaira¹, Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Kyoko Okino³ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

OYanxue Ma¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Seiichi Miura², Yasuyuki Nakamura², Ryuta Arai², Gou Fujie², Yuka Kaiho², Shuichi Kodaira² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

12:00 PM - 12:15 PM

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

PM-1

chairperson:Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S06-12] **Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal**

OChintan Timsina¹, James Mori², Masumi Yamada²
(1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-13] **Extinction in genetic algorithms: application to**

receiver functions inversion

OAdmore Phindani MPUANG^{1,2}, Takuo SHIBUTANI²

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

1:45 PM - 2:00 PM

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

PM-1

chairperson:Tomokazu Kobayashi(Geospatial Information Authority of Japan), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

2:00 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S03-01] Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

OSatoshi FUJIWARA¹ (1.Geospatial Information Authority of Japan)

2:00 PM - 2:15 PM

[S03-02] Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

OYusaku TANAKA¹, Takeshi Sagiya¹ (1.Nagoya Univ.)

2:15 PM - 2:30 PM

[S03-03] Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

OSatoshi ITABA¹, Kazuaki OHTA², Hiroshi HASEGAWA³
(1.AIST, 2.NIED, 3.JMA)

2:30 PM - 2:45 PM

[S03-04] Slow-slip events of one-hour duration

OAkio KATSUMATA¹, Kazuki Miyaoka³, Takahiro Tsuyuki⁵, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka⁵, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori², Akito Araya² (1.Univ. of Toyama, 2.ERI, Univ. of Tokyo, 3.JMA, 4.AIST, 5.MRI, JMA, 6.Nagoya Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM D

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

AM-1

chairperson:Fumiaki Tomita(IRIDeS, Tohoku University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-05] Spatial and temporal characteristic of the early

afterslip following the 2011 Tohoku-Okii earthquake deduced from onshore and offshore geodetic data

Putra MAULIDA¹, OYusaku OHTA¹, Ryota HINO¹, Takeshi IINUMA², Ryoichiro AGATA² (1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.JAMSTEC)

9:00 AM - 9:15 AM

- [S03-06] Spatio-temporal evolution of the slow slip event in Kumano-nada occurred during December 2020 to January 2021

OTakeshi Iinuma¹, Eiichiro Araki¹, Ryoichiro Agata¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Yuya Machida¹, Keisuke Ariyoshi¹, Tsuyoshi Ichimura², Takane Hori¹, Syuichi Kodaira¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

- [S03-07] Seafloor crustal deformation off the east coast of Izu-Oshima volcano using the Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder

OYuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹ (1.JAMSTEC)

9:30 AM - 9:45 AM

- [S03-08] Application of a method for detections of slow slip events in Nankai region using ocean bottom pressure recorded by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)

OTomohiro Inoue¹, Yoshihiro Ito², Tatsuya Kubota³, Katsuhiko Shiomi³, Kazuaki Ohta³ (1.Division of earth and planetary sciences, Graduate school of science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:45 AM - 10:00 AM

- [S03-09] GNSS-Acoustic observations using a Wave Glider and the recent seafloor crustal deformation off Tohoku

OFumiaki TOMITA^{1,2}, Takeshi Iinuma², Motoyuki Kido¹, Chie Honsho³, Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda² (1.IRiDeS, Tohoku University, 2.JAMSTEC, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

10:00 AM - 10:15 AM

- [S03-10] Time stability of sound speed structure affecting the GNSS-A seafloor geodetic observation and

observation accuracy

OYusuke YOKOTA¹, Shun-ichi Watanabe², Tadahi Ishikawa², Yuto Nakamura² (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

10:15 AM - 10:30 AM

Room D | Regular session | S11. Various phenomena associated with earthquakes

AM-2

chairperson:Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada(Tohoku University)

11:00 AM - 11:15 AM ROOM D (ROOM D)

- [S11-01] Turbidity current associated with 2003 Tokachi-oki earthquake revisited

ORyoichi IWASE¹ (1.JAMSTEC)

11:00 AM - 11:15 AM

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

AM-2

chairperson:Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada(Tohoku University)

11:15 AM - 12:15 PM ROOM D (ROOM D)

- [S02-01] **An investigation of mechanical characteristics of energy source in seismic reflection survey using underwater speaker**

OKazuki Takanaka¹, Rema Kurosawa¹, Tetsurou Turu¹ (1.Tokyo university of Marine science and Technology)

11:15 AM - 11:30 AM

- [S02-02] Long-term test for practical mobile tilt

observation at the seafloor off Boso Peninsula 2

OHajime SHIOBARA¹, Toshinori Sato², HyeJeong Kim¹, Yuki Kawano¹, Haruka Nagai¹, Aki Ito³, Masanao Shinohara¹, Hiroko Sugioka⁴ (1.ERI, Univ. Tokyo, 2.Chiba Univ., 3.JAMSTEC, 4.KOBEC, Kobe Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM

- [S02-03] To what extent can stationary seismic

observation network detect small landslides using short-period seismic waves?

OIssei DOI¹, Takuto MAEDA², Aitaro KATO³, Tatsuya TAKEDA⁴, Hidehiko MURAO⁵ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Murao Chiken)

11:45 AM - 12:00 PM

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (1)

○Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Naoki UCHIDA⁴, Mare YAMAMOTO⁴, Kazuo OHTAKE⁵, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Yuta MAEDA⁶, Shiro OHMI⁷, Haruhisa NAKAMICHI⁷, Makoto OKUBO⁸, Takeshi MATSUSHIMA⁹, Hiroshi YAKIWARA¹⁰, Katsuhiko SHIOMI¹¹, Kenji UEHIRA¹¹, Hideki UEDA¹¹, Kazuki MIYAOKA¹², Koji TAMARIBUCHI¹³, Ryou HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Hokkaido University, 3.Hirosaki University, 4.Tohoku University, 5.Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6.Nagoya University, 7.Kyoto University, 8.Kochi University, 9.Kyushu University, 10.Kagoshima University, 11.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12.Japan Meteorological Agency, 13.Meteorological Research Institute, JMA, 14.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15.Association for the Development of Earthquake Prediction)

12:00 PM - 12:15 PM

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

PM-1

chairperson:Satoshi Katakami(Center for Railway Earthquake Engineering Research)

1:30 PM - 2:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S02-05] Seafloor seismic observation using long-distance DAS technology

○Hiroyuki MATSUMOTO¹, Eiichiro Araki¹, Takashi Yokobiki¹, Kinzo Kishida², Daiji Azuma² (1.JAMSTEC, 2.Neubrex Co., Ltd.)

1:30 PM - 1:45 PM

[S02-06] Long-period noise reduction on fiber optic distributed acoustic sensing (DAS)

○Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹ (1.JAMSTEC IMG)

1:45 PM - 2:00 PM

[S02-07] Long term DAS acquisition using Toyohashi-Oki seafloor cable

○Toshinori KIMURA¹, Eiichiro Araki¹, Takashi Yokobiki¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji², Toshiki Watanabe² (1.JAMSTEC IMGFEAT, 2.Nagoya

University)

2:00 PM - 2:15 PM

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

PM-1

chairperson:Fuyuki Hirose(Meteorological Research Institute)

2:15 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S14-01] Application of weighted likelihood method to the Brownian Passage Time model for recurrent earthquakes with uncertain origin times and an analytical solution of the maximum likelihood estimate

○Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:15 PM - 2:30 PM

[S14-02] Trial calculation of long-term probability for crustal earthquakes using GNSS data

○Takuya NISHIMURA¹ (1.DPRI, Kyoto Univ.)

2:30 PM - 2:45 PM

[S14-03] **Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data**

○Yosihiko OGATA¹, Koichi Katsura¹ (1.The Institute of Statistical Mathematics)

2:45 PM - 3:00 PM

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-1

chairperson: Ayako Nakanishi (JAMSTEC)

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

[S06-01] Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

○Shun FUKUSHIMA¹, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

9:00 AM - 9:15 AM

[S06-02] Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

○Takashi Tonegawa¹, Ryota Takagi², Kaoru Sawazaki³, Katsuhiko Shiomi³ (1. JAMSTEC, 2. Tohoku Univ., 3. NIED)

9:15 AM - 9:30 AM

[S06-03] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

○Takaya IWASAKI¹, Hiroshi Sato^{2,3}, Eiji Kurashimo², Hirokazu Ishige⁴, Hidehiko Shimizu⁴, Tatsuya Ishiyama², Takashi Iidaka², Masanao Shinohara², Shinji Kawasaki⁴, Susumu Abe⁴, Naoshi Hirata^{5,2} (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4. JGI, Inc., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 9:45 AM

[S06-04] Lithosphere– asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions

○Takeshi AKUHARA¹, Kazuo Nakahigashi², Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Hajime Shiobara¹, Yusuke Yamashita³, Kimihiro Mochizuki¹, Kenji Uehira⁴ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:45 AM - 10:00 AM

[S06-05] A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave

○Motoko ISHISE¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai¹, Shigeki Nakagawa¹, Naoshi Hirata² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

[S06-06] Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan

○Makoto MATSUBARA¹, Katsuhiko Shiomi¹, Hsatoshi Baba², Hiroshi Sato³, Takahito Nishimiya⁴ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of

Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University,
3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.Meteorological Research Institute,
Japan Meteorological Agency)
10:15 AM - 10:30 AM

Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

*Shun FUKUSHIMA¹, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences

近年、光ファイバをセンサとして、歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）。東京大学地震研究所では、三陸沖に設置した光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用して、DAS観測を行ってきた。Spica et al. (2020) では、このDAS観測データから短周期（周期2秒以下）レイリー波の位相速度を計測し、深さ約3kmまでの堆積層のS波速度構造を推定している。観測システムが敷設されている三陸沖は2011年東北沖地震の震源域北部に位置し、また、深さ約50kmのプレート境界で繰り返し地震の発生が報告されている（e.g., Matsuzawa et al., 2002）。この領域での地震発生様式の理解には、高分解能な島弧側上側プレートの構造が必要である。そこで、DAS観測データに対して地震波干渉法を適用し、プレート境界付近の深さまで感度を有する周期10秒程度までの表面波位相速度の推定を試みた。

本研究では、堆積層及び、島弧側上部地殻構造の地震波速度構造の高分解能推定を目指し、DASデータに対して地震波干渉法を用いて表面波の抽出を行い、frequency-wavenumber法（F-K法）を用いて周期10秒程度までの位相速度推定を行った。本研究で使用したデータは、2020年2月に行われた観測のうち、約12時間のDASデータである。このDASデータは観測点間隔が約5mで、最大観測距離が約100km、約20000チャンネルで構成される。

図1は、仮想震源を10000チャンネルとし、観測点8000-15000チャンネルペアに対し地震波干渉法を適用し得られた2点間距離ごとの波形群を示す。DAS観測点は非常に密に配置されているため、地震波干渉法をDASデータに適用した場合、従来の海底地震計と比較し、短時間のデータでSN比の良い表面波が抽出できることが分かった。もっとも顕著な波群はレイリー波と考えられる。DASはケーブル方向の歪み速度成分を記録するので、ケーブル方向に伝播するradial成分に感度が高いため、通常地震計よりも地震波干渉法によって、レイリー波が選択的に検出できると考える。

図2は図1のレイリー波に対してF-K法を適用し得られた位相速度の分散曲線である。図2中の実線は、光ファイバ近傍で行われた制御震源探査から得られたP波速度(Takahashi et al., 2004)のモデルに対して、Disper80 (Saito 1988) により計算したレイリー波の基本モード位相速度である。ここで、密度とS波速度はBrocher (2005) の経験式を使用しP波速度から計算した。また、破線は基準モデルから堆積層のみS波速度を±20%としたモデルのレイリー波の理論分散曲線である。その結果、このモデルから得られる分散曲線が、解析した範囲で信号がもっとも大きな基本・1次モードでそれぞれ周期9秒と5秒までよく一致する。

以上より地震波干渉法をDASデータに応用することで、12時間の観測データで周期約9秒程度までの表面波位相速度を推定できた。DASアレイの場合、様々な大きさのアレイサイズに対してFK法を適用することができるので、対象となる周期・波長に合わせてアレイサイズを変えて位相速度を測定することができ、高分解能かつ高精度な測定が期待される。今後、DASデータから得られた位相速度から速度構造を求めることで、従来よりも空間的に分解能が高い島弧側上部地殻地震波速度の推定をめざす。

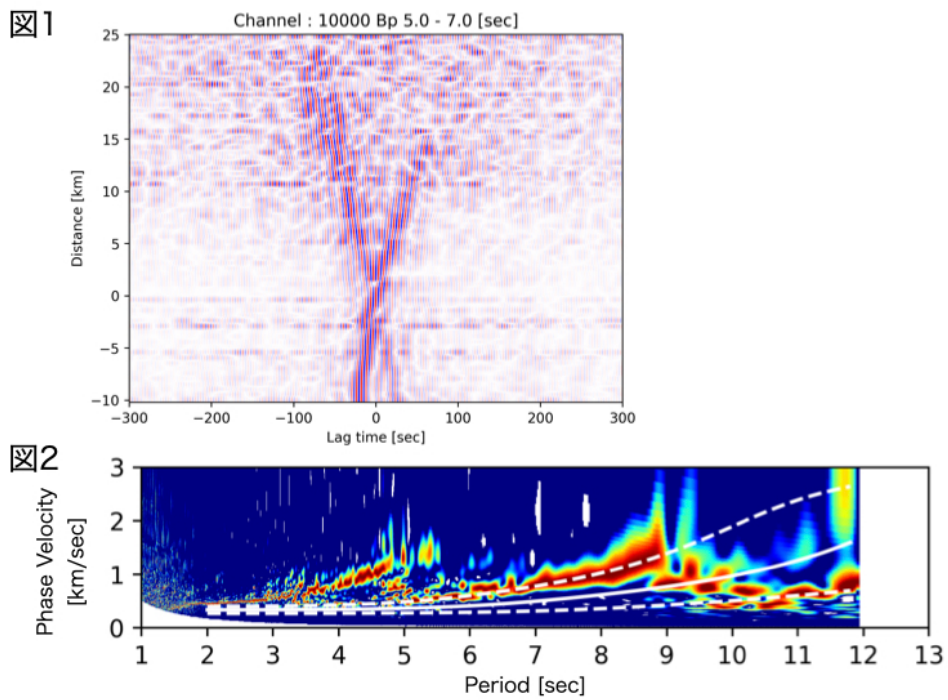


図1: 仮想震源10000と観測点8000-15000チャンネルペアに対し地震波干渉法を適用し得られた表面波。周期5~7秒のband-pass filterを適用。

図2: 図1の表面波にF-K法を適用し得られた位相速度の分散曲線。実線は、Takahashi et al., 2004により得られたP波速度を基準モデルとして計算したレイリー波の基本モード位相速度を示し、破線は基準モデルから堆積層のみ $\pm 20\%$ したモデルの位相速度を示す。

Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

*Takashi Tonegawa¹, Ryota Takagi², Kaoru Sawazaki³, Katsuhiko Shiomi³

1. JAMSTEC, 2. Tohoku Univ., 3. NIED

常時ノイズ記録に地震波干渉法を適用して二点間を伝播する波動場を抽出し、その波動場の時間的な変化を抽出することで、構造の時間的な変化を調べることが可能である。このような研究を実施するためには長期間観測された連続記録が必要であるため、海域ではそれほど実施されてこなかった。しかし、近年、海域でも定常観測網が設置され、海底下の構造の時間変化を抽出する研究例が南海トラフで報告されるようになった（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018; Tonegawa et al. 2020, JpGU）。また、日本地球惑星科学連合2021年大会ではS-net記録を用いた構造の時間変化を発表し（Tonegawa et al. 2021, JpGU）、東北沖の海溝軸付近で浅部の地震波速度が少しずつ速くなっていることを報告した（データは2020年6月末まで）。本研究では、そのデータ使用期間を2021年6月末まで延長し、2021年に東北沖で発生した3つの地震（2月福島県沖地震：Mw7.1, 3月宮城県沖地震：Mw7.0, 5月宮城県沖地震：Mw6.95）に伴う変化も抽出したので報告する。連続記録の期間は2016年6月～2021年6月で、観測点は海溝より陸側の観測点を使用した（ただし、S6ケーブルの観測点は除く）。連続記録の3成分波形はTakagi et al. (2019)の方法を用いて合成した。相互相関関数はスペクトルホワイトニングを行い、0.5-1.0 Hzの帯域で計算した。このとき、機器ノイズを除去するため、1時間分の連続記録と次の1時間分の連続記録の差分波形を用いて相互相関関数を計算した（Takagi et al. 2021）。それらを30日間毎にスタックし、リファレンス波形は全期間スタックした波形を使用した。構造の時間変化の抽出にはストレッチング法を用いた（Wegler and Sens-Schönfelder, 2007）。結果では、海溝軸に近い（海側）観測点では少しずつ速度が上昇することが検出され、その一方で、陸に近い（陸側）観測点ではそのような上昇はあまり顕著ではなかった。海側観測点では4.5年で0.3-0.4 %ほど速度が上昇し、その後、2021年の地震によって0.4 %ほど低下した。S-netの観測開始以来、海側観測点では、2016年福島県沖地震（M7.4、深さ25 km、正断層）のときも含めて大きな地震による速度構造の変化を検出したことがなかったため、今回が初めての観測例となる。また、もちろん陸側観測点でも、震源により近い場合、この2021年のイベントによる速度減少を検出できた。

Data citation S-net: doi:10.17598/NIED.0007

The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

*Takaya IWASAKI¹, Hiroshi Sato^{2,3}, Eiji Kurashimo², Hirokazu Ishige⁴, Hidehiko Shimizu⁴, Tatsuya Ishiyama², Takashi Iidaka², Masanao Shinohara², Shinji Kawasaki⁴, Susumu Abe⁴, Naoshi Hirata^{5,2}

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4. JGI, Inc., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

In 2019, an extensive onshore-offshore seismic expedition was undertaken from the Yamato bank to the Japan Trench across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). This expedition was supported by several funds from MEXTs' projects of "Integrated Research Project on Seismic and Tsunami Hazards around the Sea of Japan" and "2nd Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program", and from ERI, the University of Tokyo. The onshore seismic line in the NE Japan Arc was laid out from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast, crossing the Dewa Hills, Shinjo Basin, Ou Backbone Range and Kitakami River Valley from west to east. The total length of the profile is about 155 km, on which 1,667 receivers were set to record 24 large energy shots. As seismic sources, we used explosives at 3 shot points and 4 vibroseis trucks with 150 stationary sweeps at the other 21 points.

The preliminary results beneath the onshore line and offshore part of the Pacific side were presented by tomography analyses (Sato et al, 2020a, b, Kurashimo et al., 2021) and ray-tracing technique (Iwasaki et al., 2021). In the present paper, we proceed to model the whole crust and uppermost mantle under the onshore profile from the combined interpretation on tomography and ray-tracing analyses. For the travel-time analysis, we carefully reconstructed the travel time data both for first arrivals and later phases. In the modelling for the crooked part of the onshore profile, "the distance correction" was applied to correct the systematic travel-time shifts arising from the inadequateness of the simple 2D ray-tracing. Deeper structures of the middle/lower crust and uppermost mantle were constructed from travel times of first arrivals and later phases both from land and air-gun shots.

The features of the obtained velocity model were summarized as follows;

- (1) The uppermost part of the crust is composed of 4 layers of $V_p = 1.6\text{-}2.0$, $1.8\text{-}3.5$, $3.7\text{-}5.0$ and $4.5\text{-}5.5$ km/s, respectively, representing sedimentary and volcanoclastic rocks. Their geometry shows significant change along the profile line. Actually, their total thickness is 2-5 km in the western and middle parts of the onshore profile, but only 0.5 km beneath its eastern edge. Such structural undulation is well correlated with fault and caldera systems developed in the surveyed region, representing successive tectonic processes in the NE Japan arc since Miocene.
- (2) The crystalline part of the upper crust has a velocity of $5.8\text{-}6.1$ km/s, which was underlain by the middle crust with V_p of $6.3\text{-}6.4$ km/s. The thicknesses of the upper and middle crusts are 5-9 and 5-7 km, respectively.
- (3) The lower crust with a velocity of $6.5\text{-}7.1$ km/s is situated in a depth range of 15-30~32 km. This part is composed of 2 or 3 parts and considered to be reflective. Its reflective property, however, shows regional change both in horizontal and vertical directions. The seismic activity in the lower crust is considerably

low as compared with those of the upper/middle crust. The velocity in the lowermost part may exceed 7.0 km/s.

(4) The Moho depth is around 30-32 km, beneath which the upper mantle velocity is estimated to be about 7.7 km/s. These characteristics are rather well constrained both from the onshore-offshore tomography and ray-tracing analysis of the onshore line.

References

Iwasaki et al., 2021. The upper crustal structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling, JpGU Meeting, SCG49-05.

Kurashimo et al., 2021. Seismic structure from the forearc region off Miyagi to the central part of Northern Honshu arc, Japan, revealed by onshore-offshore seismic experiment. submitted to 2021 JpGU Meeting, SCG49-04.

Sato et al., 2020a. Seismic transect across the central part of Northern Honshu, Japan, 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05.

Sato et al., 2020b. Deep seismic reflection profiling across the Shonai and Shinjo basins, northern Honshu, Japan, 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

Lithosphere–asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions

*Takeshi AKUHARA¹, Kazuo Nakahigashi², Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Hajime Shiobara¹, Yusuke Yamashita³, Kimihiro Mochizuki¹, Kenji Uehira⁴

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The evolution history of the Sea of Japan back-arc basin remains under debate, involving the opening of sub-basins such as the Japan and Yamato Basins. Detailed knowledge of the lithospheric structure will provide the key to understanding tectonic history. This study identifies the lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath the Sea of Japan back-arc basin using S-receiver functions (S-RFs). The study area, including the Japan and Yamato Basins, has been instrumented with broadband ocean-bottom seismometers (OBSs). S-RFs from these OBSs show negative S_p phases preceding the direct S arrivals, suggesting the LAB. The S-RFs also show abnormally reduced amplitudes. For further qualitative interpretation of these findings, we conduct transdimensional Bayesian inversion for S-wave velocity models. This less-subjective Bayesian approach clarifies that the low-velocity seafloor sediments and damped deconvolution contribute to the amplitude reduction, illuminating the necessity of such considerations for similar receiver function works. Inverted velocity structures show a sharp velocity decrease at the mantle depths, which we consider the LAB. The obtained LAB depths vary among sites: ~45 km beneath the Japan and Yamato Basins and ~70 km beneath the Yamato Rise, a bathymetric high between the two basins. The thick lithosphere beneath the Yamato Rise most likely reflects its continental origin. However, the thickness is still thin compared to that of eastern Asia, suggesting lithosphere extension by rifting. Notably, the Japan and Yamato Basins show a comparable lithospheric thickness, although the crustal thickness beneath the Yamato Basin is known to be anomalously thick. This consistency in the lithospheric thickness implies that both basins undergo similar back-arc opening processes.

A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave

*Motoko ISHISE¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai¹, Shigeki Nakagawa¹, Naoshi Hirata²

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

■はじめに

首都圏とその周辺域では、伊豆弧のオホーツク/北米プレートへの衝突、相模トラフからのフィリピン海プレート東端部の沈み込み、日本海溝からの太平洋プレートの沈み込み、そして相模トラフから沈み込んだフィリピン海スラブ東端部と日本海溝から沈み込んだ太平洋スラブの相互作用（近接～接触）といった、地球上まれに見る多様なテクトニクスが展開されている。この一帯では非常に活発で多様な地震活動が見られ、歴史的に様々なタイプの大地震に見舞われてきていることが知られている。また、近い将来においても、プレートの沈み込みに伴うM7程度の地震の発生確率が非常に高いとされている（地震調査委員会, 2014）。このようなテクトニクスと地震活動を解明すべく、1980年代から地震活動と3次元地震波速度構造解析研究が精力的に進められ、複数の構造モデルが提案されてきている（中村・島崎, 1981; 野口, 1985; 笠原, 1985; Ishida, 1992; Nakajima et al., 2009; 酒井, 2012など）。しかし、既往研究が示すフィリピン海スラブ上面の形状・深さ、およびフィリピン海スラブの北東端の位置と形状は、モデルによって大きく異なっている。そこで本研究では、これまで注目されてこなかった「地震波異方性」の観点から、首都圏下のプレート構造を求めその解釈を行う。

■データと解析方法

解析に使用した地震は、2010年～2013年に関東地方で発生したM3以上の1877地震であり、これらの地震の初動P波到達時刻をデータとした異方性トモグラフィー解析（Ishise et al., 2015）を実施した。観測点は、高感度地震観測網および首都圏に密に配備された首都圏地震観測網（MeSO-net）であり、観測点数はそれぞれ294点と296点で、合計500点である。なお、到達時刻は、防災科研で作成されたマニュアルピックの初動P波到達時刻データ（441,170個）を使用した。

■等方性構造の特徴

異方性を考慮したトモグラフィー解析で得られた等方性構造の特徴は、概して既往の等方性トモグラフィー研究（例えばNakajima et al., 2009）によるものと調和的であった。一方で、MeSO-netのデータを用いたことで浅部の構造の分解能が格段に向上し、これまでは明らかでなかった構造を検出することができた。例えば、深さ20km以浅において、東西方向に伸びるいくつかの帯状の構造が得られた。これらは、関東平野の下に存在すると推定されている古い付加体の分布とよく対応している。帯状構造の深さ変化を追跡することで、付加体の深部構造についての知見が得られると期待される。

■異方性構造の解釈

得られた異方性の方向の特徴から、大陸地殻の異方性（R1）、海洋性地殻の異方性（R2）、スラブマンツルの低速度異常領域の異方性（R3）、大陸マンツルの異方性（R4）、スラブマンツルの高速度異常領域の異方性（H）を定義した（Ishise et al., 2021 JGR）。

R1, R2, R3, R4, Hの異方性の方向は、それぞれWNW-ESE, NW-SE, NS, WNW-ESE, NSで特徴付けられ、これらは大陸プレートの縁辺部に形成された付加体の走向方向、相模トラフの走向、地震メカニズムで卓越した断層面の走向、太平洋プレートの沈み込み方向、地震メカニズムで卓越した断層面の走向と一致しており、R1は付加体の層構造、R2はプレートbendingによる亀裂の配列、R3とHはスラブマンツル内の弱面の配列、マンツル物質の結晶格子選択配向に起因した異方性であると推定される。

■首都圏下のフィリピン海スラブについての新たな知見

上記の解釈を用いることで、フィリピン海プレートの構造について次の新たな知見が得られた。

（１）北緯35.7-36度付近で東西方向に伸びる一連の低速度異常領域は、これまでは蛇紋岩化したマントルウェッジ（Kamiya and Kobayashi, 2000）や大陸地殻とマントルウェッジ（Nakajima et al., 2009）と解釈されてきた。しかし、本研究で得られた異方性構造から、この低速度異常領域は、大陸プレート、フィリピン海プレートの海洋性地殻、大陸プレートのマントルで構成されていることがわかった。

その結果フィリピン海プレートの北東端は、既往研究（Uchida et al., 2009）による北東端と比べて南側に位置する可能性が示された。

（２）房総半島に分布する南北方向に伸びた深さ20km以深の低速度異常領域は、これまでは大陸プレートの地殻深部構造として解釈されてきた。しかし、本研究で得られた異方性構造から、スラブマントル内の低速度異常領域であることが新たに示された。

その結果、フィリピン海プレートの上面深さが既往のモデルと比べ浅くなった。

Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan

*Makoto MATSUBARA¹, Katsuhiko Shiomi¹, Hsatoshi Baba², Hiroshi Sato³, Takahito Nishimiya⁴

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの境界では、海溝型巨大地震が繰り返し発生してきた。巨大地震に伴う強震動予測やプレート間での固着状況を解明するためには、沈み込むフィリピン海プレートの高精度な形状を明らかにしていく必要がある。本研究では、防災科学技術研究所(防災科研)の高感度地震観測網(Hi-net)や気象庁、大学等の定常観測網に加えて海底の臨時観測点で得られたデータを合わせて解析した地震波トモグラフィーの結果や、微小地震の震源分布、低角逆断層型の地震の分布等を考慮して、フィリピン海プレート上面の形状を推定するとともにレシーバー関数解析も行い、その結果と比較した。

2. データ・手法

解析領域は駿河湾や東海地域を覆う東経136°-139°および北緯34°-36°である。陸域の定常観測網のデータと東海大学や気象研究所等により駿河湾内に設置された臨時海底地震計のデータを合わせて用いた。陸域定常観測網では2000年10月から2017年12月まで97,369個の地震を捉えていた。その中から、水平0.01°(約1km)四方、深さ1kmの領域から読取数最大の地震を1個ずつ、36,632個の地震を解析に用いた。2018年1~8月に行われた海底観測点のデータから得られた、定常観測網ではトリガーされない228個の微小地震を解析に用いた。海底地震計により捉えられた地震については定常観測網の連続データから切り出したデータと合わせて再読取りを行った。さらに、陸域で実施された4発の人工地震探査からの到達時刻データも用いた。36,632個の地震からの1,573,094個のP波、1,532,330個のS波、4発の人工地震探査からの92個のP波、228個の地震からの3,958個のP波、4,809個のS波の到達時刻データを解析に用いた。

地震波速度構造解析には、Zhao et al. (1992)の手法にスムージングや観測点補正値を導入した地震波トモグラフィー法(Matsubara et al., 2004; 2005)を用いた。水平方向に0.05°(約5km)間隔、深さ方向に2.5~30km間隔で三次元的にグリッドを配置した。初期速度構造は防災科研Hi-netにおける震源決定に用いられている一次元速度構造(鶴川・他, 1984)を用いた。

レシーバー関数解析は、速度不連続面の検出に有効な手法である。116個の地震を解析に用いた。観測機器の方向補正を行い(汐見, 2013)、周波数領域でのレシーバー関数解析を行った(Park and Levin, 2000)。時間領域における深さ変換には、本解析で得られた三次元地震波速度構造を用いた。

3. 結果と議論

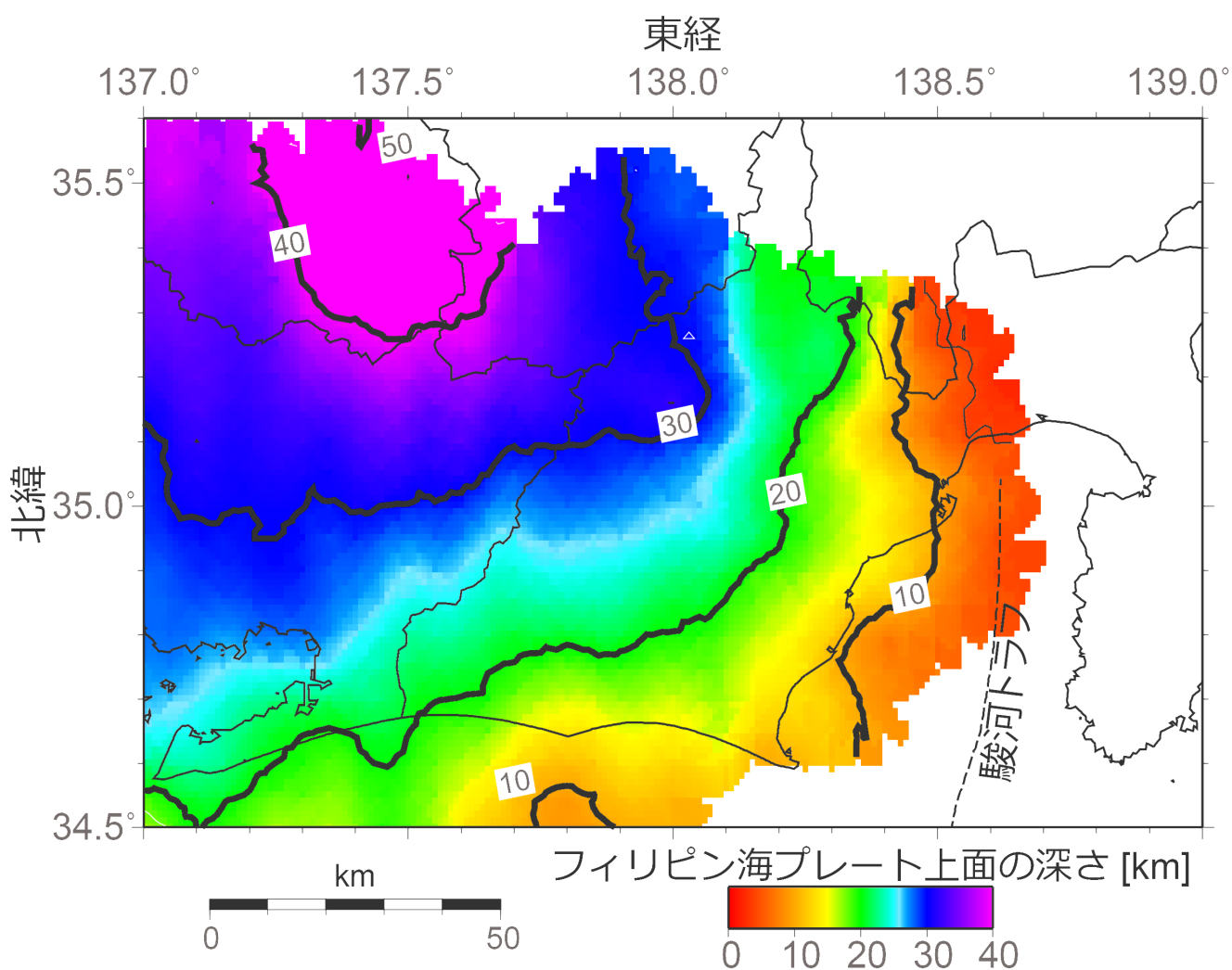
日本全体の解析では、水平方向の分解能は0.2°であるが(Matsubara et al., 2019)、チェッカーボードテストの結果、多くの観測点が存在し多くの地震が発生する東海地域では水平方向に0.1°の分解能があることが分かった。海域の臨時観測点のデータを活用したことにより、海域下の深さ5kmや10kmの浅い領域の解像度が向上した。

水平断面図を見ると深さ10kmや20kmでは中央構造線の北側の高速度域と南側の低速度域が明瞭にイメージングされた。西南日本では中央構造線は緩やかな北傾斜であるが、東海地域では急傾斜となっている。これは、伊豆弧衝突帯でのフィリピン海プレートの浮揚性沈み込みにより上盤側のユーラシアプレートの隆起運動を伴う短縮変形により生じたものである。Kano et al. (1990)では水平回転が議論されたが、本解析ではフィリピン海プレートの衝突による上盤のユーラシアプレートの三次元的な変形がイメージングされた。

鉛直断面図では、沈み込むフィリピン海プレートの低速度かつ高Vp/Vsな海洋地殻と低Vp/Vsな海洋マント

ルがイメージングされた。この海洋地殻の結果や微小地震の震源分布、プレート境界で発生していると考えられる低角逆断層型の地震の分布からフィリピン海プレート上面境界を構築した。この形状はレシーバー関数法による結果と調和的であった。駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートは深さ20km程度までが既往のモデルより沈み込む角度が緩やかになり、上面の深さは6-10km程度浅くなった。特に深さ10kmの等深線の位置は5~10km程度西側になった。また、深さ10kmや20kmの等深線の位置は静岡県三保半島から山梨県にかけての陸域下では5~20km程度西になった。定常観測点と臨時海底地震計を組み合わせることにより、プレート境界を交差する波線を用いた解析ができるようになり、浅い沈み込み帯の形状が明らかになった。

Matsubara, M., Shiomi, K., Baba, H., Sato, H., & Nishimiya T. (2021). Improved geometry of the subducting Philippine Sea plate beneath the Suruga Trough. *Global and Planetary Change*, 204, 2021, 103562, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103562>



Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-2

chairperson: Motoko Ishise (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S06-07] Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan

○Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Motoko Ishise², Shin'ichi Sakai^{3,2}, Yohei Yukutake², Ryosuke Doke¹
(1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM

[S06-08] Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough

○Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi^{1,2}, Takeshi Nakamura³, Toshiya Fujiwara¹ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI)

11:15 AM - 11:30 AM

[S06-09] Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

○Gou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹ (1. JAMSTEC)

11:30 AM - 11:45 AM

[S06-10] Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

○Ryuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Yuka Kaiho¹, Shuichi Kodaira¹, Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Kyoko Okino³ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

○Yanxue Ma¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Seiichi Miura², Yasuyuki Nakamura², Ryuta Arai², Gou Fujie², Yuka Kaiho², Shuichi Kodaira² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

12:00 PM - 12:15 PM

Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan

*Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Motoko Ishise², Shin'ichi Sakai^{3,2}, Yohei Yukutake², Ryosuke Doke¹

1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

はじめに

フィリピン海プレートはその北縁で大陸プレートに対し年間3 - 4 cmの速度で収束しており、南海トラフや相模トラフでは大陸プレートに対して沈み込んでいる。そのため、伊豆半島の東では関東地震が発生し、西では東海地震が発生する。一方、伊豆半島の付け根付近の伊豆衝突帯では、下部地殻は沈み込んでいるが上部地殻などは衝突し、浮揚性沈み込みが起きているため、周辺とは異なる地殻活動が生じている。伊豆衝突帯のプレートの収束様式や地震活動などは、伊豆島弧の地殻の厚さや物性によって大きく影響を受けていると考えられるが、その空間的な分布は未解明である。これまでに伊豆衝突帯を含む領域でレシーバ関数による構造解析が行われた(Kinoshita et al., 2015, J. Geophys. Res.)がフィリピン海プレート及びスラブのモホ面の3次元形状は推定されていない。そこで本研究では、レシーバ関数解析と地震波トモグラフィにより得られた結果からモホ面や地殻の形状を3次的に捉え、この領域での地震活動との関係について考察した。

モホ面の探索

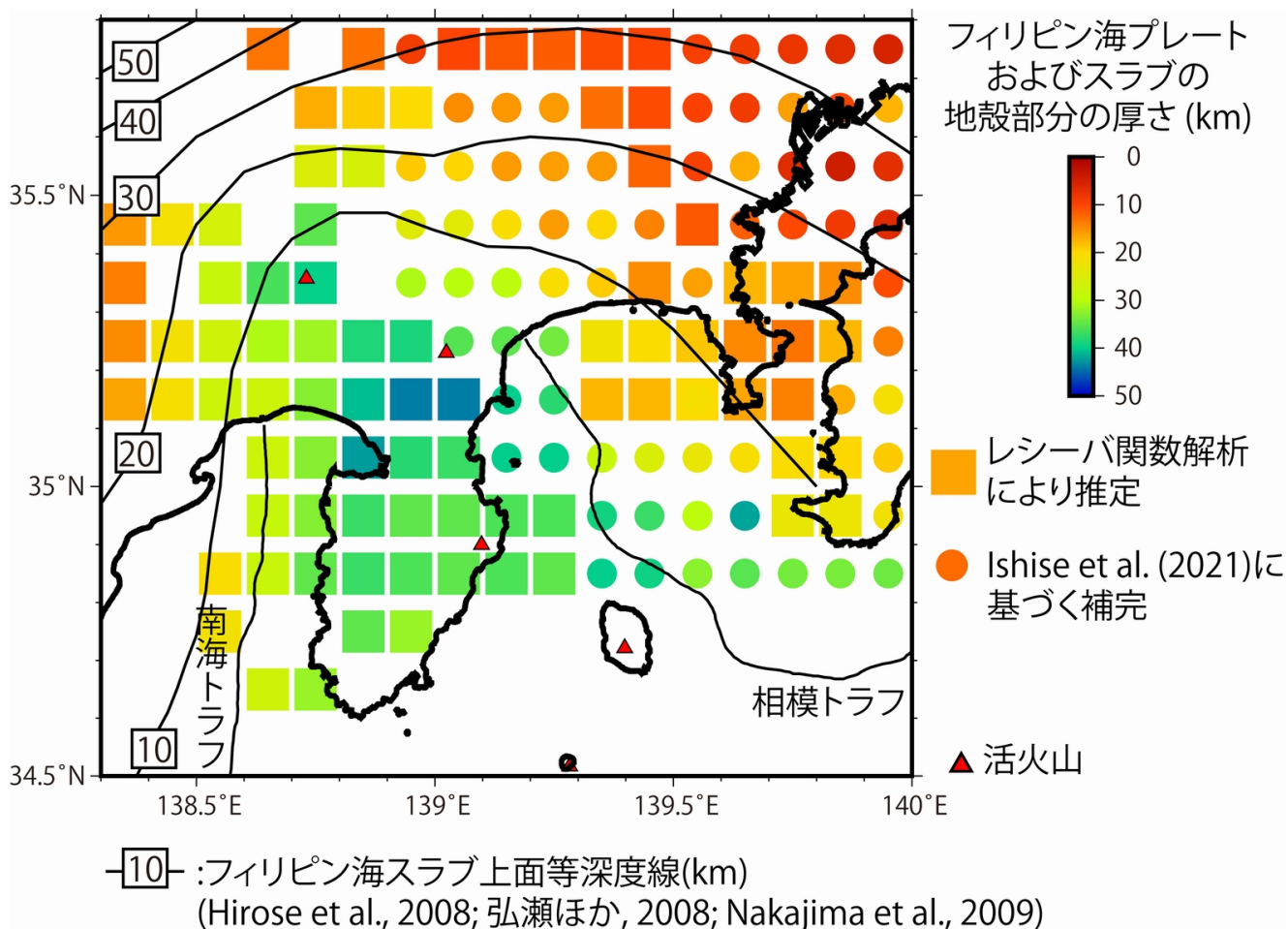
2007年から2017年までの期間に神奈川県とその周辺地域の観測点で得られた遠地地震(震央距離30-90、M6以上)の波形から、P波レシーバ関数とS波レシーバ関数を作成した。レシーバ関数は、時間拡張型マルチテーパ(Shibutani et al., 2008, Bull. Seismol. Soc. Am.)を用いて作成し、Matsubara et al. (2019, InTech Open)の3次元地震波速度分布と防災科学技術研究所の浅部・深部統合地盤モデルを仮定して深さ変換し空間的に平均した。その結果、解析領域の広範囲の深さ20 - 60 kmに不連続面の存在が示された。この不連続面は、これまでに推定されているフィリピン海スラブ上面(Hirose et al., 2008, J. Geophys. Res.; 弘瀬ほか, 2008, 地震; Nakajima et al., 2009, J. Geophys. Res.)に比べて深くモホ面と解釈するのが妥当である。ただし、原因については断定できていないが、丹沢山地付近ではモホ面に対応するレシーバ関数のピークが検出できなかった。そこで、丹沢山地付近のモホ面深度を別のデータを用いて補完することを試みた。Kodaira et al. (2007, J. Geophys. Res.)が人工地震探査データから推定した伊豆島弧の速度構造では、地殻の底部のP波速度が7.5 km/s程度である。それを参考に、Ishise et al. (2021, J. Geophys. Res.)が地震波トモグラフィにより推定したモデルからP波速度7.5 km/sの等速度面の深度分布を抜き出したところ、その分布はレシーバ関数で検出したモホ面の分布とおおよそ一致した。このことからその等速度面がこの地域のモホ面深度の指標になると判断し、レシーバ関数でモホ面が検出できなかった領域をその等速度面で補完した。

地殻の厚さ分布

上述の先行研究により推定されたフィリピン海スラブ上面の深度分布を考慮してフィリピン海スラブの地殻の厚さの分布を推定した。その結果、地殻は伊豆半島と富士山、箱根火山付近の直下では35 km以上の厚さを持ち、その領域から遠ざかるにつれて薄くなるように分布することが分かった(図)。伊豆島の北西延長ではスラブ内の地震活動は不活発であるが、相模トラフとその北西延長に沿う領域の周辺ではやや活発な地震活動があり、その中でも丹沢山地東部ではスラブの沈み込みと整合的なメカニズムの震源が分布する(Yukutake et al., 2012, Earth Planets Space)。またその領域は、剪断歪の集中域(Doke et al., 2020, Geol. Soc. Spec. Publ.)に近接し、さらに1923年関東地震のアスペリティの西端近傍でもある。つまり相模トラフとその北西延長に沿う領域付近では歪、応力、プレート境界のカップリング強度の空間変化が大きい。本研究で推定した地殻の厚さには、相模トラフとその北西延長を挟んで南西側から北東側へ厚さが20 km以上減少する、という特徴がある。地殻の厚さが急変する領域には、地殻を構成する岩石の組成や密度・浮力などの空間変化の存在が示唆さ

れ、それが歪、応力、カップリング強度の分布に影響を与えて収束様式を変化させる原因になっていると考えられる。

謝辞 防災科学技術研究所、東京大学、気象庁の地震波形データを使用させていただきました。本研究の一部は、首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクトの助成を受けて実施いたしました。記して感謝いたします。



Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi^{1,2}, Takeshi Nakamura³, Toshiya Fujiwara¹

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI

南海トラフ巨大地震震源域における地震・津波ハザード評価、強震動予測、高精度震源決定などに用いる地下構造標準化の試みとして、沈み込むフィリピン海プレートの形状を含む3次元地震波速度構造モデルが提案された(Nakanishi et al., 2018)。このモデルは、主に、屈折法地震探査により推定された地震波速度構造に基づくものであるが、海域における震源決定、海域で発生する地震による陸域の地震動（特に長周期地震動）の予測や地震発生シミュレーションの信頼性の向上のためには、3次元構造モデルの高精細化のみならず、S波速度構造、密度構造を反映する必要がある。しかし、現時点では、地震探査においてS波を射出可能な制御震源の活用が困難であり、海域におけるS波速度構造の詳細な把握の事例は限られている（例えばTakahashi et al., 2002）。密度についても掘削調査による局所的な情報に限られており、空間的な構造は把握できていない。本研究では、屈折法地震探査に限らず、反射法地震探査や自然地震トモグラフィー、表面波の解析などから成果として得られる様々な地震波速度情報を統合した3次元地震波速度構造モデルとこれに基づく3次元密度構造モデルの構築を目指す。モデルの構築にあたってS波速度と密度の情報が現段階では十分ではないため、最初に、既存の3次元P波速度構造から、経験式（例えば、Brocher, 2005、Ludwig et al., 1970）によってS波速度や密度に変換することとした。提案されている様々な経験式の中から、南海トラフ域に適用できるものについて整理し、これまでに、地殻最浅部の堆積層とそれ以下の深部の構造について、それぞれ別の変換式を適用した構造モデルを作成した。今後、付加体と沈み込むプレート側の構造を構成する岩石の性質との関連を考慮して、各地層区分に対する変換式の適用を検討するとともに、調査観測の成果から得られたS波速度情報や地震調査および重力データとの比較等による変換式の検証方法の検討を進める。

本研究は、文部科学省による科学技術試験研究委託事業「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」の一環として実施している。また、本研究の一部は、JSPS科研費JP19H01982の助成を受けたものである。

Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

*Gou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹

1. JAMSTEC

フィリピン海プレートが日本列島下に沈み込む南海トラフ海域は、世界でもっとも地震観測研究が充実しているプレート沈み込み帯の一つであり、M8クラスの巨大地震から、微小地震、さらには各種スロー地震(低周波微動、非地震性滑りなど)まで、さまざまなプレート境界断層すべり現象が時空間的に不均質に分布していることが知られている。スロー地震は通常の地震が発生する周辺に分布する傾向があるなど、これら多様な断層すべりは何らかの関連性を持っており、プレート境界断層で発生する現象として包括的に理解することの重要性が指摘されている。

最近の地震活動研究や地下構造研究の進展から、海山の沈み込みなどプレート境界断層形状の複雑さや断層付近の物性(低速度層)などローカルな構造不均質が、スロー地震活動分布などと興味深い相関を示すことが分かってきた。そこで、海洋研究開発機構では南海トラフ沈み込み帯全域のプレート境界断層の詳細な実態把握を目指した大規模地下構造調査研究を2018年から進めている。この一環で、2019年11月～12月、我々は室戸岬沖の土佐簗と呼ばれる海底地形の高まり付近において、制御振源(エアガン)と稠密な海底地震計アレイ(2km間隔)を用いた構造調査観測を実施した。土佐簗の下には、大きな海山が沈み込んでいると考えられており、その陸側(北側)では巨大地震が、トラフ側(南側)ではスロー地震(低周波微動)が観測されるなど、本海域は海山の沈み込みがプレート沈み込み帯の発達や断層すべり挙動の多様性に与える影響を研究する上で理想的な条件を揃える。

本研究では、プレート境界断層形状に加えてプレート境界付近の流体分布や underthrust sediment などの実態把握を進め、プレート境界断層すべり挙動の多様性を支配する構造要因を解明することを目指して、下記の手順で地震波速度構造モデルを構築している。まず、初動走時トモグラフィによって長波長地震波速度構造モデルを構築し、その結果を初期構造として波形インバージョン(周波数領域、音響場、Full-waveform Inversion, FWI)によって高解像度地震波速度構造のモデリングを行う。FWI解析は、入力データのノイズ抑制やインバージョン・パラメータの調整など、モデルの最適化に向けた課題が残っている状況ではあるが、海洋地殻上面形状やBSRのほか、デコルマを示唆するような地震波速度の逆転など、興味深い構造的な特徴が描き出されている。

特に注目すべきは、上盤内の地震波速度の不均質である。たとえば、土佐簗海盆下のプレート境界上面は顕著な低速度になっている一方、そのトラフ側(海側)には明瞭な高速度帯が形成されているなど、プレート境界断層上面の地震波速度はトラフ軸から陸側に向かって単調に上昇しているわけではないことが分かってきた。観測された構造不均質とプレート境界断層すべり挙動の関連性については、今後、さまざまな角度から検討を加えていく必要があるが、地震波速度の不均質性が強い場所で低周波微動が観測されているなど興味深い相関が見られており、我々の構造解析結果は、プレート境界断層のすべり挙動の理解には、断層形状にとどまらず断層物性の不均質性についても考慮していく必要があることを示唆している。

Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

*Ryuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Yuka Kaiho¹, Shuichi Kodaira¹, Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Kyoko Okino³

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

南海トラフ西端に位置する日向灘海域では低周波微動や超低周波地震などの多様なスロー地震活動が発生している (Yamashita et al., 2015; Tonegawa et al., 2020)。これらの地震活動域は九州パラウ海嶺が沈み込んでいる場所に対応しており、沈み込む海山と一連の地震活動との関係について活発な議論がなされている。例えば、微動活動は地磁気異常データ等から推定される海山の縁に分布し、またプレート境界の等深度線に沿って震央が移動することが知られている。こうした活動場所や移動を支配する要因を理解するためには、活動が発生する場所の断層形状や物性、摩擦特性を詳細に把握する必要がある。

海洋研究開発機構では南海トラフ域全体のプレート沈み込み構造を高精細化し、スロー地震活動を含むプレート境界断層での多様なすべり現象の発生要因を包括的に理解することを目指し、2018年度から大規模かつ稠密な地震波構造探査研究を実施してきている。2020年度には新学術研究領域「スロー地震学」および「日向灘掘削計画」との共同研究として、海底地震計 (OBS) を用いた稠密屈折法探査と5.6 km長のストリーマケーブルを用いた反射法探査を日向灘海域で実施した。屈折法探査では、OBS100台を海溝に平行な測線 (HYU01) と沈み込み方向の測線 (HYU02) の2測線に稠密 (2 km間隔) で展開し、エアガン発振による地震波データを取得した。反射法探査では、これらの測線に加えてHYU01に直交する2測線 (HYU18、HYU22) でもデータを取得した。本発表では主に、海溝平行測線 (HYU01) のデータ解析から明らかとなった上盤プレート内およびスラブ沈み込み構造とスロー地震活動の関係について議論する。

OBSおよびストリーマケーブルデータを用いた走時トモグラフィ解析から、プレート境界周辺の地震波速度がプレート境界に沿って変化することがわかってきた。最も注目されるのは、九州パラウ海嶺の沈み込み域にはプレート境界に比高1~2kmほどの高まりがあり、その高まりの東縁部に周囲に比べて顕著な低速度域 ($V_p \sim 4.0 \text{ km/s}$) が存在する点である。この低速度域は低周波微動の活動度が測線の中で最も高い場所に一致することから、プレート境界断層周辺の物性の不均質性が微動活動と相関していることが示唆される。今後は、OBSデータへ波形インバージョン解析を適用することで、特にプレート境界周辺の不均質構造をより高解像度で明らかにしていく計画である。

High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

*Yanxue Ma¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Seiichi Miura², Yasuyuki Nakamura², Ryuta Arai², Gou Fujie², Yuka Kaiho², Shuichi Kodaira²

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

Various types of slow earthquakes including slow slip events (SSEs), very low frequency earthquakes (VLFs) and tectonic tremors occur around the segment boundary off the Bungo Channel located between the Kyushu and Shikoku Islands. Their distributions appear to vary along depth of the subduction of the Philippine Sea Plate. The VLFE and tremor activities have been observed to occur around a subducted seamount of the Kyushu Palau Ridge (KPR, Yamashita et al., 2017; Tonegawa et al., 2020; Nakata et al., 2020). We processed two seismic reflection profiles; one existing KR0114-8 profile (Park et al., 2008) and the other HYU-02 profile newly acquired by JAMSTEC in 2020 to investigate the relationship between the distribution of the tremor activity, the morphology and physical properties along the plate interface. The HYU-02 line is parallel to the subduction direction, and the KR0114-8 line runs along the strike of the Nankai Trough near the deformation front extending further to the west across the KPR. The HYU-02 line was processed, and a pre-stack depth migration image was obtained. We performed denoise, deghost and designature on the seismic reflection data of KR0114-8. Then, we applied pre-stack time migration to the dataset and imaged in high resolution complex geological structures, the topography of the subducting oceanic crust including the KPR, decollement and faults. The KPR is imaged as a complex topographic high. We compared these structures seen in the seismic images and distributions of the 2013 and 2015 tremor activities. During the 2015 episode, the tremor activity around the KR0114-8 profile apparently concentrates to the east of the KPR reaching near the trough axis where typical accretionary prisms are formed. On the other hand, most of 2013 tremors occurred in the west of the KPR. Tremors are considered to occur along the plate interface. The spatial relationships between the tremor distribution and the subducting KPR suggests that the geometry of the plate interface and surrounding structural disturbances induced by the KPR subduction may have a primary control on the tremor generation.

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

PM-1

chairperson:Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S06-12] **Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal**

○Chintan Timsina¹, James Mori², Masumi Yamada² (1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-13] **Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion**

○Admore Phindani MPUANG^{1,2}, Takuo SHIBUTANI² (1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1:45 PM - 2:00 PM

Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

*Chintan Timsina¹, James Mori², Masumi Yamada²

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

We imaged the three-dimensional upper crustal attenuation structure of central Nepal in the source region of the 2015 Gorkha earthquake (Mw 7.8) by analyzing more than 35000 seismic waveforms from local earthquakes. We used P- and S-wave spectra of the Gorkha earthquake sequence recorded by a temporary network of 42 stations deployed for 11 months. We modeled the amplitude spectra for the path-averaged attenuation operator (t^*) using a non-linear least square technique by assuming a ω^{-2} source model for the frequency band of 1-30 Hz. This procedure depends on finding an optimal fit between observed spectra and theoretically computed spectra based on low-frequency spectral level (Ω_0), corner frequency (f_c), and t^* . During the fitting, station site responses are estimated by stacking together all the residual for each station. After removing the site response, the fitting procedure is repeated and the weighting of each t^* measurement is also estimated based on how well the spectrum is modeled. We obtained more than 25,000 high-quality t^* measurements which are then inverted for frequency-independent Q_p and Q_s structure using SIMUL2000 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) code. For the ray tracing, we used the 3D velocity models and hypocenter locations from the result of our previous velocity tomography of the region. In general, preliminary results of the attenuation structure agree with the velocity structure, where the high-velocity regions are consistent with high Q-values (low attenuation). In this presentation, we will further discuss the lateral variations on velocity and attenuation structure of the region and their implications for the 2015 Gorkha earthquake.

Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

*Admore Phindani MPUANG^{1,2}, Takuo SHIBUTANI²

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

The use of genetic algorithms in receiver functions inversion for crustal and uppermost mantle velocity-depth structure is well established (e.g. Shibutani et al., 1996). Their operation is analogous to the evolution of biological species through the use of (pseudo)random numbers to control the selection, crossover and mutation processes in their search for an optimal model(s). Despite their robustness, one drawback of the standard genetic algorithms is that towards the end of a 'run', only a few new solution ideas are explored which may lead to the stagnation of the optimization process. This can be an especially major drawback for large model dimensions, such as in the inversion of receiver functions for dipping and anisotropic structures. To mitigate this problem, this study introduces an extinction concept to genetic algorithm inversion of receiver functions for crustal shear wave velocity structure. With extinction, parts of the explored model population are regularly replaced to exploit highly fit models as well as random explorations of other domains. The concept of self-organized criticality, which has similarly been used to explain the extinction of biological species (e.g. Newman, 1996), is applied to control the size and frequency of the extinction events in the genetic algorithm following Krink et al. (2000).

Three different model replacement strategies are tested against the standard genetic algorithm of Shibutani et al. (1996) for performance comparison on both synthetic and real data problems. In random replacement, extinct models are replaced by randomly generated models. Survivor mutant replacement comprises replacing extinct models with randomly generated mutations of the surviving population. Lastly, in best-model mutant replacement, extinct models are replaced with mutations of the current best model, mutated at 2, 3 or 4 points selected at random positions. Preliminary results show that random replacement achieves the most extensive model space exploration but with the least exploitation of fitter models, consequently resulting in a less fit 'best model'. Greater exploitation of fitter models is achieved by survivor mutant and best-model mutant replacement strategies which obtain fitter best models in fewer generations compared to the standard genetic algorithm. A combination of the three replacement strategies may offer the best balance between exploitation of 'fitter' models and exploration of the whole model space without affecting the efficiency of the algorithm as shown by the results from the synthetic tests. The difference in computational costs between the standard genetic algorithm and the genetic algorithm with extinction was insignificant during these tests. These results show that extinction in genetic algorithm inversion of receiver functions can be tuned to improve the efficiency of the optimization process in escaping local minima as well as reducing convergence time. This technique can prove very useful for optimization problems with large dimension model spaces.

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

PM-1

chairperson: Tomokazu Kobayashi (Geospatial Information Authority of Japan), Yusaku Tanaka (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 2:00 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S03-01] Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Satoshi FUJIWARA¹ (1.Geospatial Information Authority of Japan)

2:00 PM - 2:15 PM

[S03-02] Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

○Yusaku TANAKA¹, Takeshi Sagiya¹ (1.Nagoya Univ.)

2:15 PM - 2:30 PM

[S03-03] Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

○Satoshi ITABA¹, Kazuaki OHTA², Hiroshi HASEGAWA³ (1.AIST, 2.NIED, 3.JMA)

2:30 PM - 2:45 PM

[S03-04] Slow-slip events of one-hour duration

○Akio KATSUMATA¹, Kazuki Miyaoka³, Takahiro Tsuyuki⁵, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka⁵, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori², Akito Araya² (1.Univ. of Toyama, 2.ERI, Univ. of Tokyo, 3.JMA, 4.AIST, 5.MRI, JMA, 6.Nagoya Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM

Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Satoshi FUJIWARA¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

地殻変動の空間的分布を求めるためには、観測点ごとに抽出目的の地殻変動が含まれる期間の前後の差をとることによって求められるのが通常である。ところが、対象となる地域の範囲が広がると、例えばプレート運動に伴うような広域の地殻変動も含まれてくるために、単純に2時期の差をとるだけでは、抽出目的以外の変動がノイズとなって現れてしまう。本報告では、国土地理院の電子基準点を200点以上利用し、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による余効変動を時間と空間両方で関数モデル（時空間モデル）化することで、実際の観測値からの差分を求めるだけで余効変動以外の微小な地殻変動を精度よく、かつ非常に簡便に求められることを示す。

Tobita (2016)により、下記の式で表される、2つの対数と1つの指数関数の混合モデルを用いることで、東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列が短・中期的な時間推移とともに、場所によって異なる余効変動の空間分布も予測できる時空間モデルが作成できることが示されている。

$$D(t)=a \ln(1+t/b)+c+d \ln(1+t/e)-f \exp(-t/g)+Vt$$

ここで、 $D(t)$ は余効変動時系列の各成分、 t は地震後の日数、 $\ln$ は自然対数、 b 、 e 、 g は全観測点に共通の対数関数または指数関数の緩和時定数、 V は観測点ごとの定常速度である。

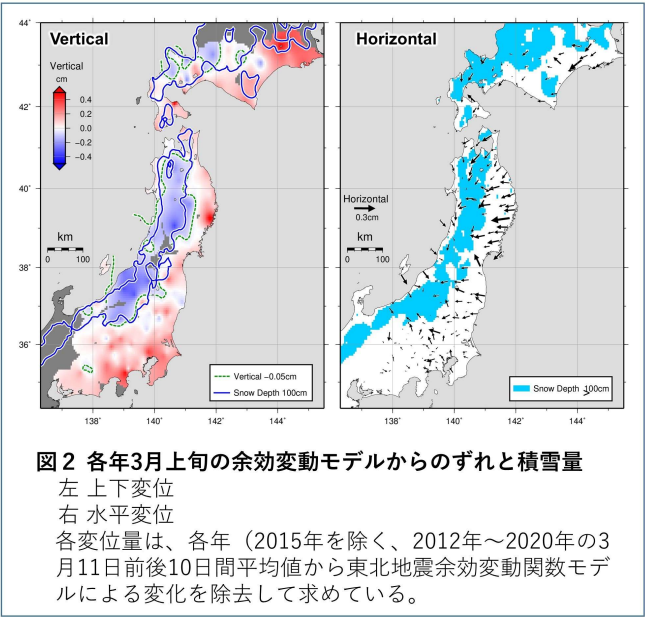
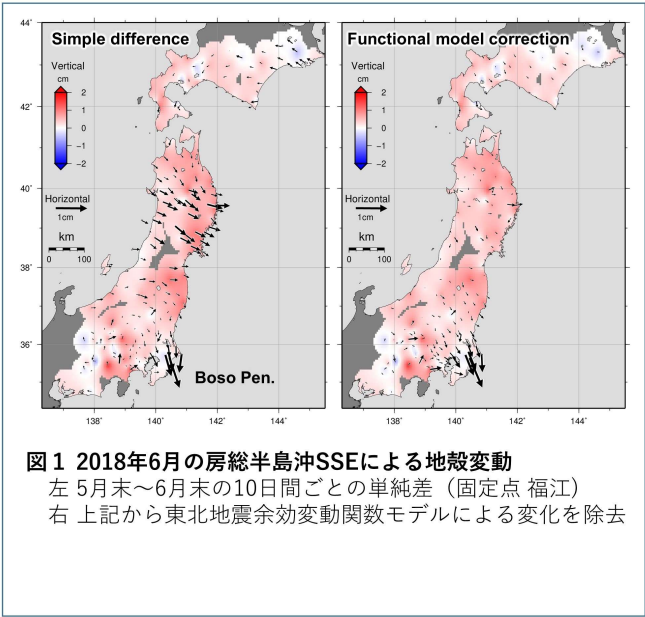
この時空間モデルを利用して2020年までの余効変動の時系列を精査したところ、2015年2月以降に北海道から中部地方にかけての広域において一定速度で進行する新たな変動が見いだされた。この一定速度成分も新たな関数項として追加することで、時空間モデルの余効変動の推定精度を向上させた。

一般に、微小な地殻変動を時系列から検出するためには、対象となる場所や時期に合わせて近傍に基準となる固定点を設定したり、広域の変動を除去するためにトレンドを観測点ごとに推定したりといったモデル化をその都度ごとに行う必要がある。本報告は、このモデル化を時空間モデルであらかじめ与えてしまうものである。最初にローカルな変動の抽出例として、2018年5月末～7月に発生した房総半島SSEについて図1に示す（固定点 福江）。数十日間の短期ではあるが、単純に2時期の差分をとった図1左では東北沖地震の余効変動があちこちに含まれており、そのパターンも一様でない。しかし、改良した時空間モデルを使用して時間変化を求めた図1右では房総半島のSSEのみがきれいに抽出されており、単純の2時期の差とは比べものにならない地殻変動抽出力を持っている。

この時空間モデルはさまざまな微小な変位現象を抽出するのに有効である。もちろん、上記のようなローカルな現象にも使えるが、ローカルな範囲内では大地震の余効変動という広域の現象は均一的に現れるため、ローカルな範囲内のみの差分でも十分なことが多い。したがって、本時空間モデルが真価を発揮するのは広域にわたる微小な現象の抽出である。こうした広域で微小な変動を検出する例として積雪による荷重変形による変動を図2に示す。この図は、例年3月上旬頃が最深積雪になることから地震後の各年（2015年を除く）3月11日前後の実測値から時空間モデルの残差を求め、その平均値を描いたものである。1~2mmという非常に小さな変化を求めてこうした図を作成するには各点で変化をモデル化するなど複雑な操作が必要になるが、時空間モデルを差し引くだけでこうした図が簡単に描くことができる。

この時空間モデルの特徴は、広域（北海道～中部地方）、高精度、簡便（観測値から差し引くだけ）、将来予測可能（新たな広域の現象が現れなければ使い続けられる）であり、変動検出には応用範囲も広い強力なツールである。

参考文献 Tobita M (2016) Earth Planets Space. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4>

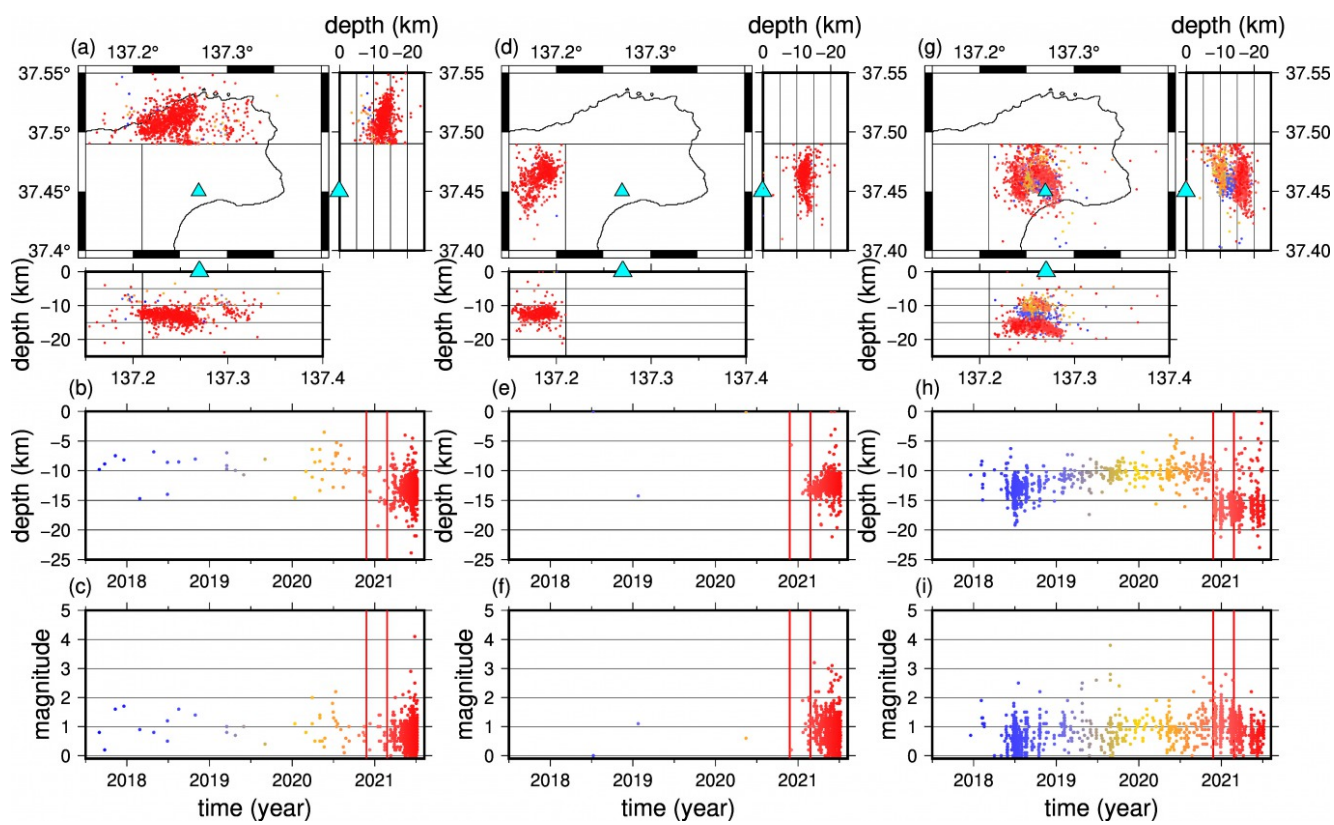


Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

*Yusaku TANAKA¹, Takeshi Sagiya¹

1. Nagoya Univ.

地震、すなわち断層すべり運動の進行速度は幅広い帯域で観測される。このうち、非常にゆっくりとした速度で進行するものをスロー地震と呼び、特に、地震波の検出が困難であるため地殻変動を通して検出されるものをスロースリップイベント（SSE）と呼ぶ。SSEはこれまで環太平洋の多くの沈み込み帯で観測されているが、内陸においての検出事例はほとんど報告されていない。これには内陸でSSEが発生しづらい何らかの物理的要因が存在する可能性が考えられるが、それに加えて、SSEが内陸で発生したとしても、その地殻変動の振幅や空間スケールが小さく、明確にそのシグナルがSSEであると判断することが困難であるという事情もある。これまでに報告された数少ない内陸SSEの観測報告としては、2012年に北海道で発生した群発地震と同時期に観測された局地的な地殻変動を、群発地震を引き起こしたSSEによるものとみなして説明を試みた Ohzono et al., (2015) があるが、内陸で発生した群発地震に伴ってSSEによると見られる地殻変動が発見された事例は他に無かった。本発表では、2018年から現在まで引き続き発生している能登半島における群発地震と、その活動の変化に伴って2020年11月から進行し始めた、ゆっくりとした地殻変動について報告する。当該群発地震は2018年に能登半島北部、深さ約 13 km の地点で発生し、その後、非常にゆっくりと深さ約 8 km までマイグレーションした様子が観測されている。そのマイグレーションは2020年11月に終息したが、それとほぼ同時に、その下部、深さ約 17 km の地点で群発地震が発生した。更に、この群発地震の下方移動と同時に、その直上のGNSS観測点(GEONET, 珠州)で地殻変動が進行を開始した。この地殻変動は、水平方向の変動は2021年2月ごろ終息したものの、上下方向については2021年7月末においても隆起を続けている。また、2021年2月ごろ及び3月ごろのそれぞれに、それまでに群発地震が観測されていた領域の西部と北部で、別の群発地震が開始した。これまでの多くの研究で、群発地震やSSEの発生には、断層中の流体移動が関与していることが示唆されている。能登半島については、火山地帯ではないものの温泉が湧くことで有名であり、また、マントルからヘリウムガスが湧き出てくとも知られている(Umeda et al., 2009)。このように、能登半島の地下には多くの流体が存在することが分かっている。また、多くの先行研究で、能登半島の地下には多くの断層が存在することも分かっているため、今回観測された現象には、能登半島地下の断層中の流体移動が関与していることが疑われる。そこで、本発表では、この現象の詳細と、それを説明するモデルを提唱する予定である。



Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

*Satoshi ITABA¹, Kazuaki OHTA², Hiroshi HASEGAWA³

1. AIST, 2. NIED, 3. JMA

2020年12月上旬から翌1月下旬にかけて、紀伊半島沖熊野灘において活発な浅部微動活動が観測された[太田ほか, 2021]。2020年12月中旬～翌1月中旬にかけては、産総研のボアホール歪観測3点においてわずかな変化が観測された。観測された歪変化からプレート境界面上におけるすべりを仮定して断層面を推定したところ、微動発生域のうち西側・深部側においてMw6.2のすべりが推定された(図1 model A)。微動発生域全体がすべったと仮定して断層面を推定したところ、その規模はMw6.6と推定された(図1 model B)。

海域のボアホールにおける間隙水圧観測などによると、この領域では繰り返し浅部SSEが発生していることが報告されている[Araki *et al.*, 2017]。観測条件が良好な場合（SSEの規模が大きい、降雨・気圧変化が少ない、深部SSEが発生していない等）については陸域のボアホール歪観測でも有意な変化が検出され断層モデルの推定が可能であることが分かっている（例えば2016年4月）。スタッキング手法[宮岡・横田, 2012]を用いて過去の観測波形を網羅的に調査したところ、これらのイベント以外にもいくつかの浅部SSE発生の可能性がある事例が検出された。陸域の観測網は、浅部SSE発生領域からは大きく離れており、海溝軸（dip）方向へのすべりの広がり把握することは困難である。一方でstrike方向の広がりなど、大まかな全体像を把握するには有用であると考えられる。

本講演では、上述の2020年末～2021年初めのイベントのほか、いくつかの浅部SSE検出事例を紹介する。

参考文献

Araki, E., D. Saffer, A. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, IODP Expedition 365 shipboard scientists (2017), *Science*, 356(6343), 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120.

太田和晃, 松澤孝紀, 汐見勝彦 (2021), 紀伊半島南東沖の微動活動（2020年12月～2021年1月）, 地震予知連絡会会報, 106, 印刷中。

宮岡一樹, 横田崇 (2012), 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発ー東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用ー, 地震 2, 65, 205-218.

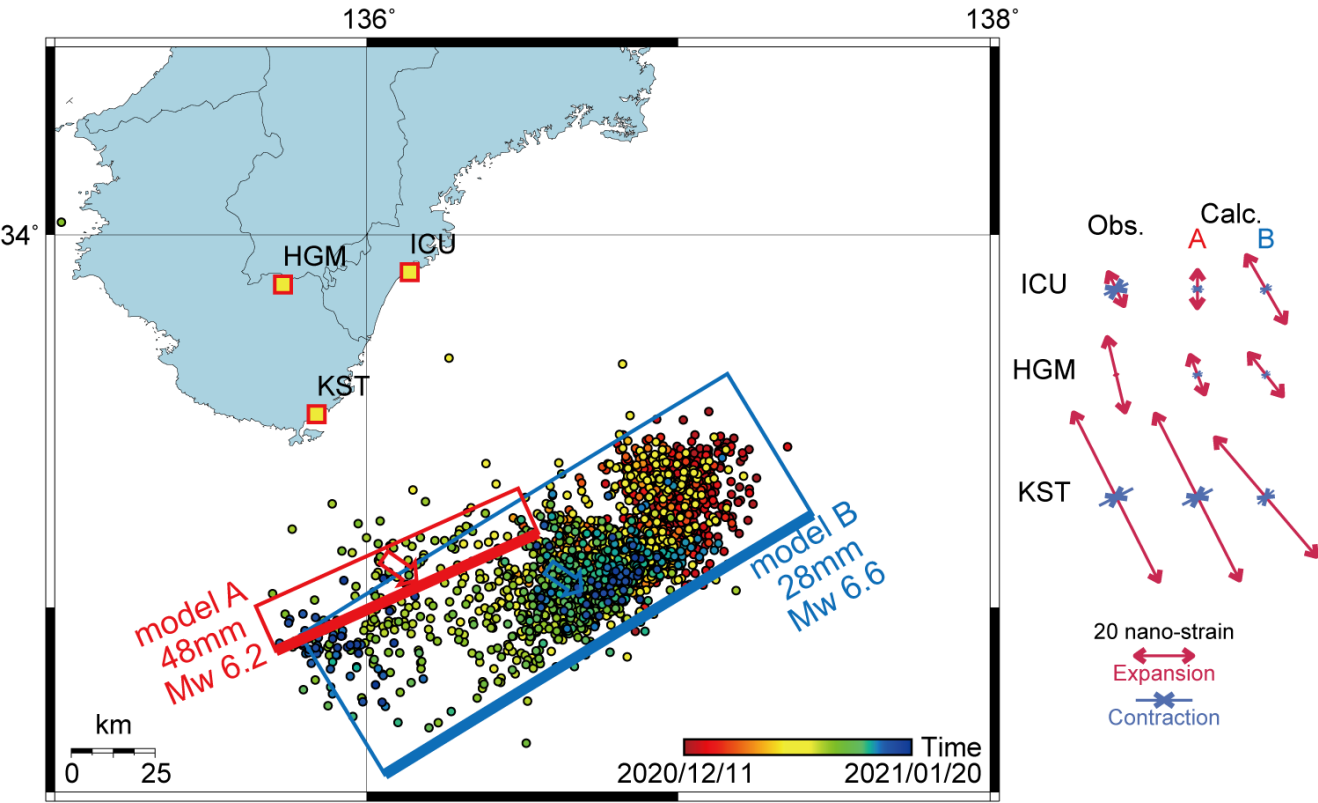


図1 2020年末～2021年初めに発生した浅部SSEの推定断層モデル(赤色矩形: model A, 青色矩形: model B) および浅部微動の震央分布. 右側は, 主歪の観測値および理論値の比較.

Slow-slip events of one-hour duration

*Akio KATSUMATA¹, Kazuki Miyaoka³, Takahiro Tsuyuki⁵, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka⁵, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori², Akito Araya²

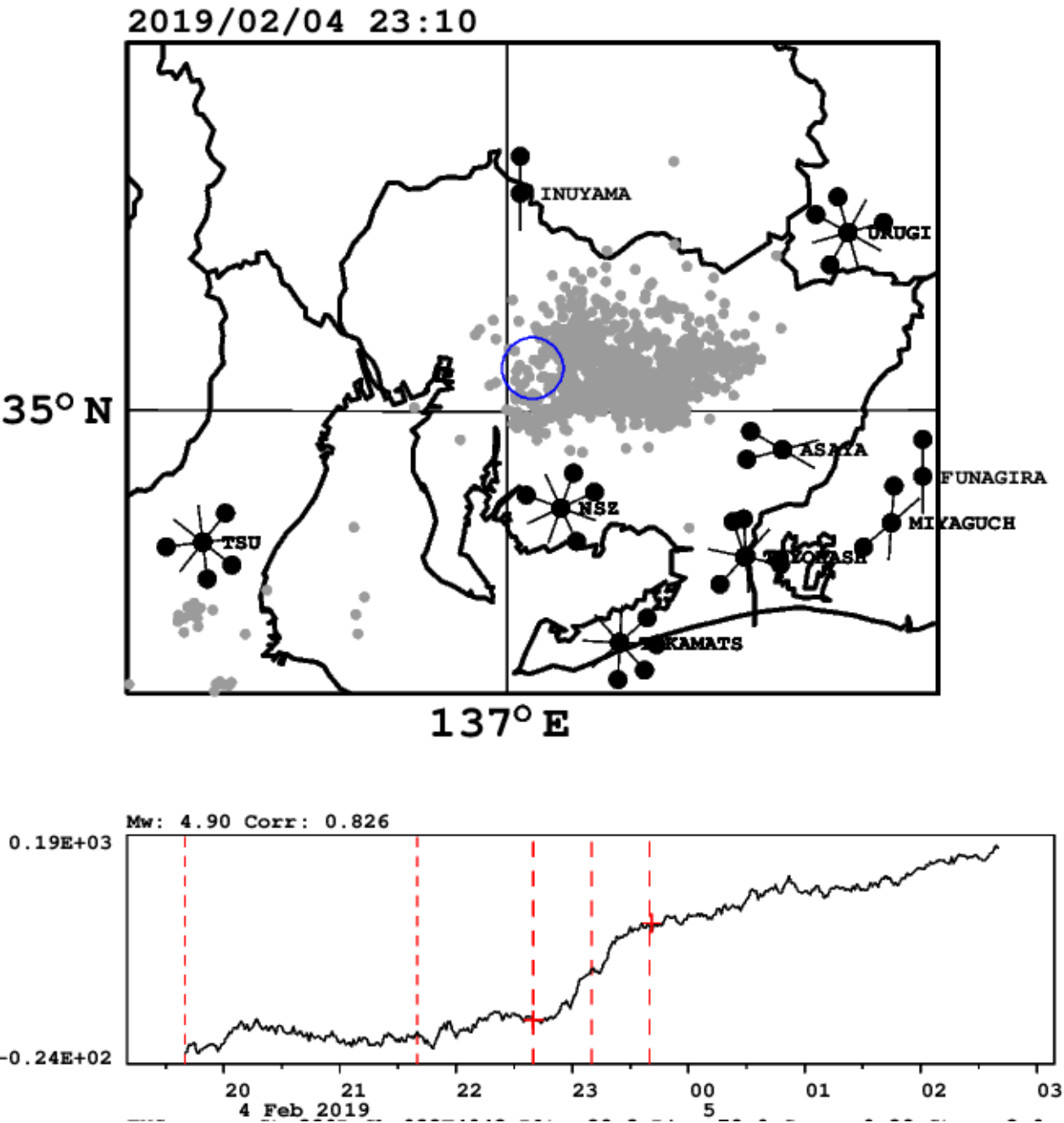
1. Univ. of Toyama, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. JMA, 4. AIST, 5. MRI, JMA, 6. Nagoya Univ.

これまで様々な継続時間のスロースリップ現象が報告されている。継続時間が数十秒より短い深部低周波微動・地震や超低周波地震は地震計によって検知されている。また、継続時間数日の短期的スロースリップはボアホール型ひずみ計や傾斜計あるいはGNSSなどにより検知されている。継続時間が数十秒と数日の間のスロースリップ現象はあまり知られていない。ここでは、その間の継続時間を持つスロースリップ現象についてレーザー伸縮計とひずみ計のデータを用いて調査した。

我々は犬山観測点及び天竜船明観測点に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置している及びボアホール型多成分ひずみ計のデータを用いて、継続時間1時間のスロースリップ現象を解析した。まず、観測ひずみデータとランプ関数との間の相関をとり、複数観測点において同時に相関が高くなる時間帯を見つける。その時間帯について宮岡・横田(2012)によるスタッキング手法により規模等を推定した。スタッキング法においては、断層位置・すべり方向を仮定して、ノイズレベルに基づき重みをつけて複数観測点のデータを足し合わせた。ノイズは対象とする時間帯の1～3時間前の範囲の値を評価した。推定された規模はM4.7からM5.0程度であった(図)。この規模は、Ida et al.(2007)によって提唱されたスロー地震のスケーリング則に調和的である。ただし、検出された信号のレベルはノイズに比べて明確に大きなものでなく、ソースの位置やすべり方向をデータだけから推定することは困難であった。ここでは短期的スロースリップの場所を仮定して規模を求めた。そのため解析対象は短期的スロースリップの発生時間帯に限られている。なお、微動活動の位置・発生時間帯を参照して検出を試みたが、有意な結果は得られていない。

図の説明

地図の青丸の位置は仮定した震源断層の位置を表す。用いた観測点の場所も示す。観測点に示す線分はひずみ計の方位を表している。灰色の点は、産業技術総合技術研究所が求めた深部低周波微動の震央である。下の図はスタッキングの結果を示す。中央の部分が検出した継続時間1時間のスロースリップ現象であり、規模はMw4.9と推定された。左側の2本の赤い波線で示す範囲でノイズレベルを評価した。



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

AM-1

chairperson: Fumiaki Tomita (IRIDeS, Tohoku University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-05] Spatial and temporal characteristic of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake deduced from onshore and offshore geodetic data

Putra MAULIDA¹, OYusaku OHTA¹, Ryota HINO¹, Takeshi IINUMA², Ryoichiro AGATA²
(1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.JAMSTEC)

9:00 AM - 9:15 AM

[S03-06] Spatio-temporal evolution of the slow slip event in Kumano-nada occurred during December 2020 to January 2021

OTakeshi Iinuma¹, Eiichiro Araki¹, Ryoichiro Agata¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Yuya Machida¹, Keisuke Ariyoshi¹, Tsuyoshi Ichimura², Takane Hori¹, Syuichi Kodaira¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S03-07] Seafloor crustal deformation off the east coast of Izu-Oshima volcano using the Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder

OYuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹ (1.JAMSTEC)

9:30 AM - 9:45 AM

[S03-08] Application of a method for detections of slow slip events in Nankai region using ocean bottom pressure recorded by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)

OTomohiro Inoue¹, Yoshihiro Ito², Tatsuya Kubota³, Katsuhiko Shiomi³, Kazuaki Ohta³
(1.Division of earth and planetary sciences, Graduate school of science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:45 AM - 10:00 AM

[S03-09] GNSS-Acoustic observations using a Wave Glider and the recent seafloor crustal deformation off Tohoku

OFumiaki TOMITA^{1,2}, Takeshi Iinuma², Motoyuki Kido¹, Chie Honsho³, Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda² (1.IRIDeS, Tohoku University, 2.JAMSTEC, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S03-10] Time stability of sound speed structure affecting the GNSS-A seafloor geodetic observation and observation accuracy

OYusuke YOKOTA¹, Shun-ichi Watanabe², Tadahiko Ishikawa², Yuto Nakamura² (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

10:15 AM - 10:30 AM

Spatial and temporal characteristic of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake deduced from onshore and offshore geodetic data

Putra MAULIDA¹, *Yusaku OHTA¹, Ryota HINO¹, Takeshi IINUMA², Ryoichiro AGATA²

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. JAMSTEC

The Tohoku-Oki earthquake (M_w 9.0) struck northeast Japan on March 11, 2011. A dense onshore geodetic network in tandem with seafloor geodetic observations captured large coseismic and postseismic deformation. An understanding of the spatial and temporal evolution of the early afterslip, beginning immediately after such a massive interplate earthquake, is essential to understanding the frictional properties of the plate boundary. On this basis, we investigated the spatial and temporal evolution of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake using on- and offshore geodetic data. To identify the distribution of early afterslip, we utilized geodetic observations from onshore Global Navigation Satellite System (GNSS) and Ocean Bottom Pressure gauge (OBP) sites to quantify postseismic deformation. We adopted the kinematic GNSS analysis to obtain a higher temporal resolution. We applied the common-mode error analysis and principal component analysis to improve the signal-to-noise ratio of the kinematic GNSS time series. To estimate early afterslip distribution, we utilized L1-norm regularization, which is characterized by regularization without smoothing. The main area of the estimated early afterslip was located off the shores of Iwate, Miyagi, Fukushima, and Ibaraki at a depth of 30–60 km. The slip was narrow along the dip direction with an along-strike variation. Several fault patches were estimated to occur offshore. These were estimated to explain the subsidence at the OBP sites. We examined the spatial relationship between the early afterslip with the down-dip limit of the interplate earthquakes and the distribution of the aftershocks. The estimated early afterslip distribution was consistent with the down-dip limit of the interplate earthquakes off Miyagi and Iwate. Several cross-sections along the strike direction clearly showed the different characteristics and locations of the afterslip and aftershock activities. For example, off Miyagi and Iwate, the location of afterslip tended to be in the up-dip portion of the larger afterslip area. In contrast, off Fukushima, the distribution of aftershocks was in the down-dip of the larger afterslip area. This discrepancy is attributed to along arc-variation with different structural characteristics. Based on the temporal evolution of afterslip, we emphasized the relationship between early afterslip evolution and the number of aftershocks. Aftershock–afterslip temporal evolution is consistent in almost every region, although the regions off Iwate and Miyagi showed a lack of aftershocks 30 hours after the mainshock, in contrast with the estimated early afterslip.

Spatio-temporal evolution of the slow slip event in Kumano-nada occurred during December 2020 to January 2021

*Takeshi Iinuma¹, Eiichiro Araki¹, Ryoichiro Agata¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Yuya Machida¹, Keisuke Ariyoshi¹, Tsuyoshi Ichimura², Takane Hori¹, Syuichi Kodaira¹

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

1. はじめに

2020年12月から2021年1月にかけて、紀伊半島南東沖のプレート境界においてスロースリップイベントが発生した。南海トラフからフィリピン海プレートが沈み込むこの領域においては、直上の海底ではDONET（Dense Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis、地震・津波観測監視システム）が運用されるとともに、IODP（International Ocean Discovery Program、国際深海科学掘削計画）の一部として構築された、LTBMS（Long-Term Borehole Monitoring System、長期孔内観測システム）によって、地震及び地殻変動の観測が行われている。LTBMSの備える間隙水圧計や地震計により、陸上の観測では十分に検出できなかった、南海トラフ近傍のプレート境界浅部で発生するスロースリップイベントが捉えられるようになってきており、今回のイベントに際しては、3つの孔内観測点（C0002、C0006及びC0010における間隙水圧変化や傾斜変動が観測された。さらに、同海域に設置された別の傾斜計（BMS1）やDONETの海底水圧計によっても、スロースリップイベントによると考えられる地殻変動が記録されている。本講演では、これらのデータを用いて、プレート境界面におけるすべり分布の時空間発展を推定した結果について紹介する。

2. 解析手法

海底地殻変動データをもとにスロースリップイベントの時空間発展を把握するためには、プレート境界でのすべりと海底面及び海底下における地殻変動を結びつけるグリーン関数が必要である。今回の解析対象のように、変動源であるプレート境界と観測点との距離が近く、また、構造的な不均質が著しい場合には、それらの影響を正しく取り込んだグリーン関数を用いることが、精確なすべり分布の推定には不可欠である。さらに、特に傾斜変動には海底地形の効果も大きく表れると考えられるため、これらの情報を取り込んだ有限要素法モデルを構築して、プレート境界に配置した単位すべりによる各観測点での応答を計算し、これをグリーン関数として用いて解析を実施することとした。解析には、3か所（C0006、C0010及びBMS1）での傾斜観測データ、LTBMS3点（C0002、C0006及びC0010）での間隙水圧観測データ、並びに、11点のDONET観測点での海底水圧データを用いた。海底水圧データに関しては、複数観測点からなるノードごとに基準点を選定し、それ以外の観測点の水圧データと基準点の水圧データとの差分をとることで、相対的な上下変位を見積ったうえで解析に使用した。観測期間全体を、観測データに見られる特徴によって9つの区間に分割し、それぞれの区間における傾斜・ひずみ・変位速度データをもとに、すべり速度の分布を推定した。すべりの空間分布及び時間変化が滑らかになるように拘束をかけ、重みをABICによって最適化する逆解析手法を用いてすべりの時空間発展を推定したが、観測項目ごと及び観測点ごとのデータの重みづけなどに任意性が残ること、また、正断層型のすべりが顕著に求まることなどから、逆解析によって得られた結果を1次的なものとし、同時期に発生していた超低周波地震の震源分布も参考にしつつ順解析を2次的に実施して、最終的なすべり分布を得た。

3. 結果

推定されたすべり分布からは、プレート境界の深い側から始まったスロースリップイベントが、深い側でのすべりを継続的に発生させつつ領域を浅い側へと広げ、南海トラフごく近傍（もしくは海底にまで）すべりが到達した様子が見て取れる。また、トラフ軸近傍にすべりが到達したのちも、同領域では2週間程度にわたってすべりが継続していたと考えられることも分かった。今後、プレート境界面以外でのすべりの可能性や、グ

リーン関数を計算するためのプレート境界面上のノード位置の影響等について検討し、得られた最終的な結果に基づいて発表を行う見込みである。

Seafloor crustal deformation off the east coast of Izu-Oshima volcano using the Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder

*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹

1. JAMSTEC

海底における長期精密圧力計測は地震火山活動に伴う長期的な地殻変動の検知や、気象・海象などの長期的変動などの地球物理的な知見を得るために重要である。海洋研究開発機構では、伊豆大島直下にあるとされるマグマ溜まりへのマグマの供給プロセスを捉えることを目的とし、長期海底設置用水圧計（LT-OBPR: Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder）の開発を行い、2021年7月に伊豆大島東方沖に設置、観測を開始した。

1. はじめに

伊豆大島火山は観測体制が整備された火山の1つであり、これまで1968年の噴火時を含めて地震活動や火山活動が詳細に捉えられてきた。特にGNSS観測網が整備されて以降、カルデラより深さ4-5 km程度にある圧力源（マグマ溜まり）が2-3年の周期で伸縮/膨張を繰り返していること（例えば地震研、第148回火山噴火予知連絡会）、それより深い約7 kmの位置に別の圧力変動源があることなどがわかっている（気象研技術報告69号）。また伊豆大島の南東沖5 km、深さ30 km~には深部低周波地震が発生しており、深部低周波地震の活発化と山体の膨張（歪変化）が同期するなど、より深部からのマグマの供給・蓄積プロセスが示唆されている（渡辺2012）。しかしながら伊豆大島火山の地殻変動を捉えるための観測網は島内にあり、特に深さ30km程度で示唆されている深部の圧力源の位置、深さを推定するのは難しい。そこで伊豆大島周辺海域において長期水圧観測を行い、深さ数kmにあるとされる浅部マグマ溜まりを圧力源とする長期的な地殻変動、さらにより深部を圧力源とする変動を捉え、そのマグマ供給・蓄積過程を明らかにすることを目的として伊豆大島における長期精密水圧計測を開始した。さらに伊豆大島の南東沖は1968年の噴火時に大きな地殻変動が見られたとされている領域であり、伊豆大島における火山発生のプロセスにおいてこの領域での長期的な地殻変動を捉えるこの意義は大きい。そこでLT-OBPRを基点として地殻変動が大きく見られるとされる領域に測線を設定し、その測線上に基準マーカーを3点設置し、その基準マーカーの水準を計測することで測線上における長期的な地殻変動を捉える試みを行う。

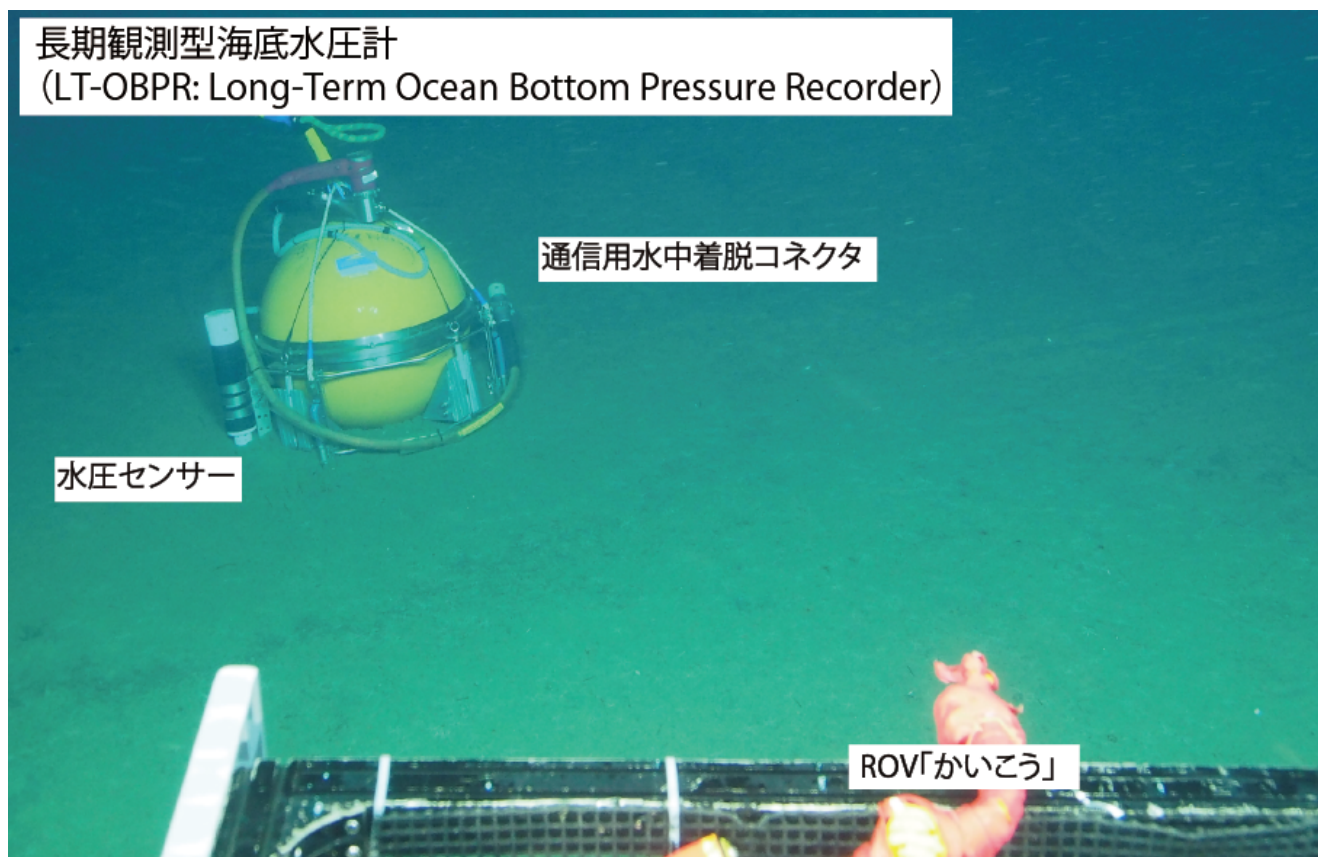
2. 長期海底設置用水圧計

長期水圧計測システムは南海トラフに設置されている地震・津波観測監視システム（DONET）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）などで代表されるオンライン型の水圧計が多く展開されているが、伊豆大島周辺海域にはネットワーク観測網が展開されていないためオフライン型とした。このためLT-OBPRは低消費電力型で5年間の連続観測ができるようにした。LT-OBPRは直径650mmのチタン合金で作られた耐圧容器内に計測口ガー、バッテリーを組み込み、外側に圧力センサー、データ回収を行うための水中着脱コネクタ、浮力を調整するための錘が取り付けられている。LT-OBPRで使用する圧力センサーはParoscientific社の8B7000-2-005（周波数出力タイプ）を用い、実験室にて現場を模擬した環境（低温、高圧下）における長期ドリフト評価、および圧力ヒステリシス試験を実施した。また圧力センサーの基準周波数源として内部のクロックを使用し、内部クロックと原子時計（Microsemi社、CSAC SA.45s）を定期的に比較校正することで計測する圧力の精度を保証する仕様とした。

3. 設置、および今後の計画

LT-OBPRは2021年7月に実施されたKR21-08航海において伊豆大島東方沖、カルデラよりおよそ10 kmの位置に設置した。安定した計測を実施できるため比較的傾斜の緩い領域を選定した。設置はR/Vかいれいの観測ウインチを用いて海底面より数10mの位置まで降ろし、切り離しを行って自由落下により設置を行った。その後、ROV「かいこう」にてLT-OBPRの位置調整を行い、計測開始とした。今後は1年間隔程度で連続データの

回収を行うとともに、水晶水圧計に見られる年間数hPa程度 ($1 \text{ hPa} = 1 \text{ cm}$) の機器的なドリフトを取り除くため、校正用水圧計 (Machida et al., 2020) による校正を行うことを計画している。さらに基準マーカ―も定期的に校正装置を用いて圧力の値付けを行い、LT-OBPRとの水準差を定期的に計測することを計画している。



Application of a method for detections of slow slip events in Nankai region using ocean bottom pressure recorded by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)

*Tomohiro Inoue¹, Yoshihiro Ito², Tatsuya Kubota³, Katsuhiko Shiomi³, Kazuaki Ohta³

1. Division of earth and planetary sciences, Graduate school of science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

海底圧力計(以降、OBP)は、スロースリップ(以降、SSE)に伴う海底の上下地殻変動をGNSS-A (GNSS音響結合方式)に比べ、時空間的に高解像度で連続的に観測可能な機器である。しかしながら、OBPにはスロースリップによる地殻変動に加えて、海洋起源の圧力変動が地殻変動と同程度またはそれ以上の振幅で記録される。また、長周期潮汐や海洋変動に伴う非潮汐変動の成分のいくつかは、その変動周期がSSEの継続期間と近い。このため、SSEに伴う海底地殻変動の検出に際して、海洋起源の圧力変動の適切な除去が必要となる。OBPから海洋起源の圧力変動を取り除く方法として、これまでに主に二つの手法 (i)単独観測点手法。(ii)複数観測点手法)が提案されている。(i)では、個々の観測点の時系列に対して海洋物理モデルを適用することで海洋起源の圧力変動(以降、非潮汐変動)を除去する(例えばMuramoto et al., 2019)。(ii)では、観測網内の非潮汐変動がコモモードとして共通に観測されると仮定して、2つの観測点における時系列を差し引くことで相対変動を得る手法である(例えばIto et al., 2013; Wallace et al., 2016)。これまで観測点間の距離の増加に伴い、2点間の非潮汐変動の相関が低下すると考えられていた。最近、等水深に設置された観測点間で非潮汐変動の相関が高く、同等の水深に設置された観測点間の時系列記録について差を取ることで非潮汐変動を効率よく低減できることが指摘された(カスカディア: Fredrickson et al., 2019; ヒクラング: Inoue et al., 2021)。

本発表では、潮岬一室戸岬沖に設置されているDONET2観測網によって観測される海底圧力記録を使用し、主に2つの内容について報告する。1)同海域における非潮汐変動の水深依存性と距離依存性。2)先行研究においてGNSS-Aによって検出されたSSE(2017.2-2018.4年, Yokota & Ishikawa, 2020)に対して、Nishimura et al. (2013)で使用されている ΔAIC を用いたSSE検出手法のOBPへの適用可能性。海底圧力記録の事前処理について述べる。始めに、生データを平均化することにより1時間値を得る。次に、ローパスフィルターを適用し、2日未満の周期を持つ短周期潮汐、機器ドリフト及び年周半年周成分をそれぞれ除去した後、日平均値を1時間値から求めた。1)について、得られた時系列のうち欠測がない期間(2017年5月から2017年8月まで)について、全ての組み合わせの観測点ペアについて差分圧力時系列記録を得た。明瞭なSSEが含まれない期間において、差分時系列記録の平均値と標準偏差を求め、観測点ペア毎に得られる標準偏差をその水深差及び距離で比較することで、非潮汐変動の水深依存性と距離依存性を調べた。結果、潮岬一室戸岬沖において観測される非潮汐変動は、強い水深差依存を示すことがわかった。全ての観測点ペアの水深差と標準偏差の値の分布から得られるR値は、高い相関値が得られた。また、観測点ペアの深い方の観測点の水深を4つの範囲(2000m以下、2000-2500m、2500-3000m、3000m以上)で区分しR値を推定した結果、それぞれ0.62、0.84、0.93、0.84となり比較的浅水に比べて深水中で相関が高くなる傾向が見られた。これらの特徴は、カスカディアやヒクラングで得られた水深依存性と同様の傾向を示す。また、他の海域と同様に、距離依存性は水深差と比べて小さく、標準偏差と観測点ペアの距離と標準偏差で得られるR値は ~ 0.3 となった。

2)について、解析方法を述べる。まず、事前処理後の時系列を使用して、設置水深が近い観測点間の差分圧力時系列を得る(例えば、M.MRE20(水深3603m)についてはM.MRG28(水深2499m)に対する相対圧力値)。次に、各観測点ペアにおいて ΔAIC を計算する。 ΔAIC の値は、差分時系列を単純な一次関数と、線形トレンドとステップ関数を組み合わせた関数による近似でそれぞれ得られるAIC(赤池情報量規準)の差分として計算される。なお ΔAIC の算出時には、Yokota&Ishikawa(2020)で報告されているSSE期間(2017.2-2018.4)の時系列は除外し、SSE前後それぞれ8ヶ月間の差分時系列を用いた。Yokota&Ishikawa(2020)で推定された

SSE断層モデルから期待される地殻変動が大きい観測点で得られた相対圧力変動は約-5hPaであり、 ΔAIC に基づく評価でも有意な変動として検出された。得られた相対圧力変動量は、モデルから期待される地殻変動と調和的である。一方、期待される変動が小さな観測点では、得られた相対地殻変動も小さく、明瞭な変動とはならない。つまり、2017年2月から2018年4月に潮岬―室戸岬沖で発生したSSE(Yokota&Ishikawa, 2020)に伴う圧力変動を本手法でも検出できた可能性を示す。すなわち、OBP記録を用いた ΔAIC に基づくSSE検出手法の妥当性を示す結果と言える。今後は、既存SSEの期間外にも ΔAIC を適用し、小規模のSSEも含めたイベントの検出に取り組み、このDONET2海域で発生するSSEとプレート沈み込みによる滑り収支を解明する。

GNSS-Acoustic observations using a Wave Glider and the recent seafloor crustal deformation off Tohoku

*Fumiaki TOMITA^{1,2}, Takeshi Iinuma², Motoyuki Kido¹, Chie Honsho³, Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda²

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. JAMSTEC, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

GNSS音響測距結合方式の海底地殻変動観測（GNSS-A観測）により、地震サイクルに伴う海域における地殻変動が捉えられるようになってきている [e.g., Honsho et al., 2019, JGR]. GNSS-A観測では、海上でのGNSS測位及び海上-海底間の音響測距を行うための海上プラットフォーム（海上局）が必要であり、一般的に船舶を海上局とした観測が行われてきた。しかし、船舶を使用したGNSS-A観測は、人的・金銭的なコストが高いことが問題である。こうした高いコストが、近年増設が進んでいる多数のGNSS-A観測点において観測を高頻度で実施する上での障害となっている。海洋研究開発機構と東北大学では、波の力により無人航行可能なウェーブグライダーを海上局とした長期自律型のGNSS-A観測システムの開発に取り組んでいる。2019年7月に単独観測点での短期間の試験観測を実施し、ウェーブグライダーを用いた観測によって船舶と同程度の精度で海底地殻変動の検出が可能であることを示した [Iinuma et al., 2021, Frontiers in Earth Science]. その後、1ヶ月程度の長期的なウェーブグライダーの運用による複数点での網羅的な観測を含め、2020年中に北三陸沖合の観測点において計3回の観測（6-7月・10月・11-12月）の実施に成功した [富田・他, JpGU2021]. 本発表では、上記の観測とその成果に加え、2021年4-5月に新たに実施した長期観測とその成果について紹介する。

ウェーブグライダーには、GNSS-A観測用機器として、2つのGNSSアンテナ（海上局位置計測及びGNSSジャイロによる姿勢2成分（Heading, pitch）計測用）、音響船上装置、音響トランスデューサ（音響測距データ取得用）、MEMSジャイロ（姿勢3成分計測用）を搭載した他、観測データの取得状況の確認及び陸上転送のためのThuraya衛星通信機器を搭載している。2021年4-5月の観測において、ウェーブグライダーは、新青丸 KS-21-05航海にて4月6日に根室沖のG22観測点で投入され、48日間の観測を経て、傭船航海にて5月25日に宮城県沖のG14観測点で回収された。この間、合計で17観測点にてGNSS-A観測を実施した。北三陸沖において、局所的な強い海流の影響を受け、ウェーブグライダーが観測点から流されることが数回発生したものの、網羅的な観測の実施に成功した。また、これまでのウェーブグライダーを用いた観測では、同機の移動速度を考慮して中心での定点（具体的には、100 m程度の半径での8の字航走）観測のみを実施していたが、音速勾配や上下変動成分の検出のため、海底局アレイの広がり程度の半径の円に沿った航走観測も実施した。

ウェーブグライダーによって取得した観測データを処理し、海底局アレイ変位の推定を行った。推定では、Honsho et al. [2019]の手法に基づき、海面から一定深度までの音速勾配層を仮定した解析を実施した。2016年以前の東北沖におけるGNSS-A観測はどの観測点でも年1回程度は行われていたが、2016年以降は上記の運用コスト等の問題によりほとんど観測を行うことができていなかった。しかし、ウェーブグライダーの導入により2020年以降、宮城県沖～青森県沖の観測点で網羅的に観測を行うことができた。その結果、岩手県沖以北の観測点では、変動自体は小さいものの、2015年に発生したSSEの影響もあるために、変動の向きが2016年以降やや変わっている様子が見られた。また、宮城県沖の観測点は粘弾性緩和による顕著な陸向きの変動が継続的に生じている様子が確認された一方、その変動速度はやや小さくなっている傾向が見られた。本発表では、上記のウェーブグライダーによる観測の概要に加え、その結果を基にした東北沖北部の余効変動の水平成分についての議論を行う。

Time stability of sound speed structure affecting the GNSS-A seafloor geodetic observation and observation accuracy

*Yusuke YOKOTA¹, Shun-ichi Watanabe², Tadahiko Ishikawa², Yuto Nakamura²

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

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測では、海中の音速構造の傾斜状態が精度に大きく影響する。GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）では海面を移動する海上局と海底局間距離を利用した2つのパラメータで傾斜による影響を抽出しており、それによって海底局位置の決定精度の向上と海中構造の概観を捉えることができる（Yokota et al., 2018, MGR; Yokota and Ishikawa, 2019, SNAS）。これまでの調査でこの2つの傾斜構造パラメータのうち、海底局間距離による抽出パラメータを実軸（ ReG ）、海上局の移動による抽出パラメータを虚軸（ ImG ）にとった場合の複素数 G の角度 $\arg G$ はほとんどの観測機会において、 $\pi/3 \sim \pi/2$ （ $\pi/4 \sim \pi/3$ ）の範囲に収まることがわかっている。その中でも、 $\pi/2$ や $0 \sim \pi/3$ （ $\pi/3 \sim \pi/2$ や $\pi/4 \sim \pi$ ）の範囲を取る場合に局位置のばらつきが大きいことが確認されている（横田ほか, 2020, 地震学会）。本稿では、その原因について考察する。

各観測エポックにおける G の状態を調べたところ、局位置のばらつきが大きい場合には、観測時間内における $\arg G$ が変化し、 G の虚軸に対する切片が0周辺にないケースが多いことがわかった。またこの時、 G の傾き（ $\kappa = \Delta ReG / \Delta ImG$ ）を $\arg G$ として拘束した上で、改めてGARPOSによる解析を行うことで、局位置のばらつきが軽減されることもわかった。

これらの結果はすなわち、 ReG と ImG の絶対値の推定には誤りがあったが、 κ は正しく推定できていたと解釈できる。GARPOSでは ReG と ImG はそれぞれ時間方向に滑らかな関数で推定している。その中で、 ReG と ImG はそれぞれ何らかの要因によってバイアス誤差を持つ可能性がある。一方で、それらの時間変化の比に当たる κ はバイアス誤差影響を受けても影響がないため、 ReG と ImG に比べると正しい推定となっていると考えられる。 G の傾きを $\arg G$ として拘束した場合に局位置のばらつきが軽減されるということは、多くのエポックで G の傾きの時間変化は観測時間（4～12時間程度）内で安定していたことを示唆する。 $\arg G$ がある範囲を取る場合に局位置のばらつきが大きくなるのは、このような G の推定における誤りが局位置推定に反映されやすい範囲だからであると考えられる。

上記の議論と検証によって、傾斜パラメータの時間変化の特徴を考慮することでGNSS-A解析の精度が向上することがわかった。ただし、ここで検証に用いた方法では2段階の解析（ κ を決めるための1st cycleと $\arg G$ を拘束した2nd cycle）を要する。また、観測点ごとに時間変化の安定性が異なることも想定される。今後は、上記の海洋場の特徴量を直接推定する解析方法について考察する必要がある。

Room D | Regular session | S11. Various phenomena associated with earthquakes

AM-2

chairperson: Shigeki Nakagawa (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada (Tohoku University)

Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 11:15 AM ROOM D (ROOM D)

[S11-01] Turbidity current associated with 2003 Tokachi-oki earthquake revisited

○ Ryoichi IWASE¹ (1. JAMSTEC)

11:00 AM - 11:15 AM

Turbidity current associated with 2003 Tokachi-oki earthquake revisited

*Ryoichi IWASE¹

1. JAMSTEC

2003年9月26日04:50 JSTに発生した十勝沖地震(MJ 8.0)の際、震央の東南東約25 kmの海底に位置する釧路・十勝沖「海底地震総合観測システム」先端観測ステーション（水深：2540 m、以下「先端観測ステーション」）では、電磁流向流速計により最大流速が約1.5 m/s に達する混濁流が捉えられた。通常より流速が大きい状態は17時間以上継続し、この間サンプリング周波数 100 Hzのハイドロフォン信号上では特異な信号が検出された。その特徴は混濁流の到達後8時間は10 Hz未満の比較的広帯域の信号だが、その後はピーク周波数が 1 Hz程度の信号が約4時間継続している。後者のピーク周波数に関しては、衝突理論(Impact theory)を基にした河床土砂移動の研究において報告されている関係式から音源を構成する物体の直径を推定すると数十 mの巨岩となってしまう（岩瀬, 2017）。

一方、同じ先端観測ステーションに取り付けられている音響層別流速計(acoustic Doppler current profiler, ADCP)について、1999年の設置以来2016年まで取得されたデータの復旧を進めている（岩瀬, 2021）。データ取得時の伝送エラーに起因するビットエラー等によりメーカー（Teledyne RDI Instruments）提供ソフトウェアWinADCPでは再生できないデータについても、メーカーのドキュメントを基にして直接ascii変換することにより、一部の再生不能データについても再生可能となっている。十勝沖地震時のデータについても同ソフトウェアでは混濁流の到達後の5時間までしか再生できない状態であったが、それ以降のデータも再生可能となった。そこで今回、この混濁流について改めて考察を行った。

ADCPは48層の鉛直流速プロファイルを取得している。各層の厚さは8 mで、最下層の海底からの高度は12 mである。サンプリング間隔は30分としている。Fig.1及びFig.2にそれぞれ最下層（高度12 m）及び高度76 mの流速プロファイル（水平流速、流向、及び鉛直流速）を示す。Fig.1では7時に混濁流が到達し、7時半に水平流速が1.5 m/s弱に達し、同時に下向きの流速が増加している。流向は当初南西向きの流れであり、18時以降徐々に西向きの流れが卓越している。一方、Fig.2で大きな流速はないものの、混濁流到達時には東向きの流れが卓越し、12時頃以降には北向きの流れが卓越しており、低層と上層での流れが異なる状況を示している。一方、海底地形を見ると先端観測ステーション付近は南下がりの斜面となっており、必ずしも混濁流の流向と整合しているとは言えない。また最下層では観測期間を通じて西向きの流れが卓越している。

ADCPは流速だけでなく、音響信号の後方散乱強度も計測している。この散乱強度は、懸濁物量と相関がある。観測期間全体の傾向として、散乱強度は、春から初夏にかけてピークを有する傾向が見られる。岩瀬(2021)では静止画による海底画像観測における底生生物の増加傾向から、海面におけるスプリングブルームとの関係を指摘したが、その後、十勝川および釧路川水系の流量変化と比較したところ、比較的良い相関が見られることが分かった。このことから、雪解けや大雨による物質流入の可能性も考えられる。

以上の状況を整理して報告する。

参考文献

岩瀬(2017)、2017年度地震学会秋季大会講演予稿集、S11-01.

岩瀬(2021)、JpGU2021、AOS19-02.

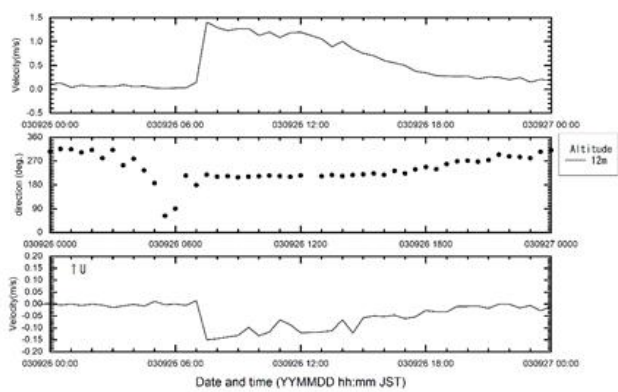


Fig.1 ADCP pprofile (altitude: 12 m)

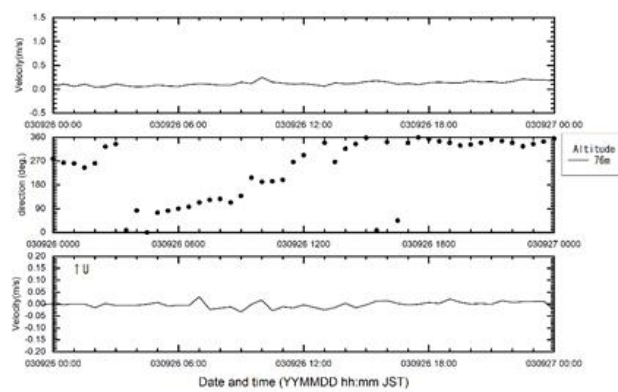


Fig.2 ADCP pprofile (altitude: 76 m)

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

AM-2

chairperson: Shigeki Nakagawa (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada (Tohoku University)

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

[S02-01] An investigation of mechanical characteristics of energy source in seismic reflection survey using underwater speaker

○Kazuki Takanaka¹, Rema Kurosawa¹, Tetsurou Turu¹ (1. Tokyo university of Marine science and Technology)

11:15 AM - 11:30 AM

[S02-02] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor off Boso Peninsula 2

○Hajime SHIOBARA¹, Toshinori Sato², HyeJeong Kim¹, Yuki Kawano¹, Haruka Nagai¹, Aki Ito³, Masanao Shinohara¹, Hiroko Sugioka⁴ (1. ERI, Univ. Tokyo, 2. Chiba Univ., 3. JAMSTEC, 4. KOBE, Kobe Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM

[S02-03] To what extent can stationary seismic observation network detect small landslides using short-period seismic waves?

○Issei DOI¹, Takuto MAEDA², Aitaro KATO³, Tetsuya TAKEDA⁴, Hidehiko MURAO⁵ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Murao Chiken)

11:45 AM - 12:00 PM

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (1)

○Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Naoki UCHIDA⁴, Mare YAMAMOTO⁴, Kazuo OHTAKE⁵, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Yuta MAEDA⁶, Shiro OHMI⁷, Haruhisa NAKAMICHI⁷, Makoto OKUBO⁸, Takeshi MATSUSHIMA⁹, Hiroshi YAKIWARA¹⁰, Katsuhiko SHIOMI¹¹, Kenji UEHARA¹¹, Hideki UEDA¹¹, Kazuki MIYAOKA¹², Koji TAMARIBUCHI¹³, Ryou HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

12:00 PM - 12:15 PM

An investigation of mechanical characteristics of energy source in seismic reflection survey using underwater speaker

*Kazuki Takanaka¹, Rema Kurosawa¹, Tetsurou Turu¹

1. Tokyo university of Marine science and Technology

1. はじめに

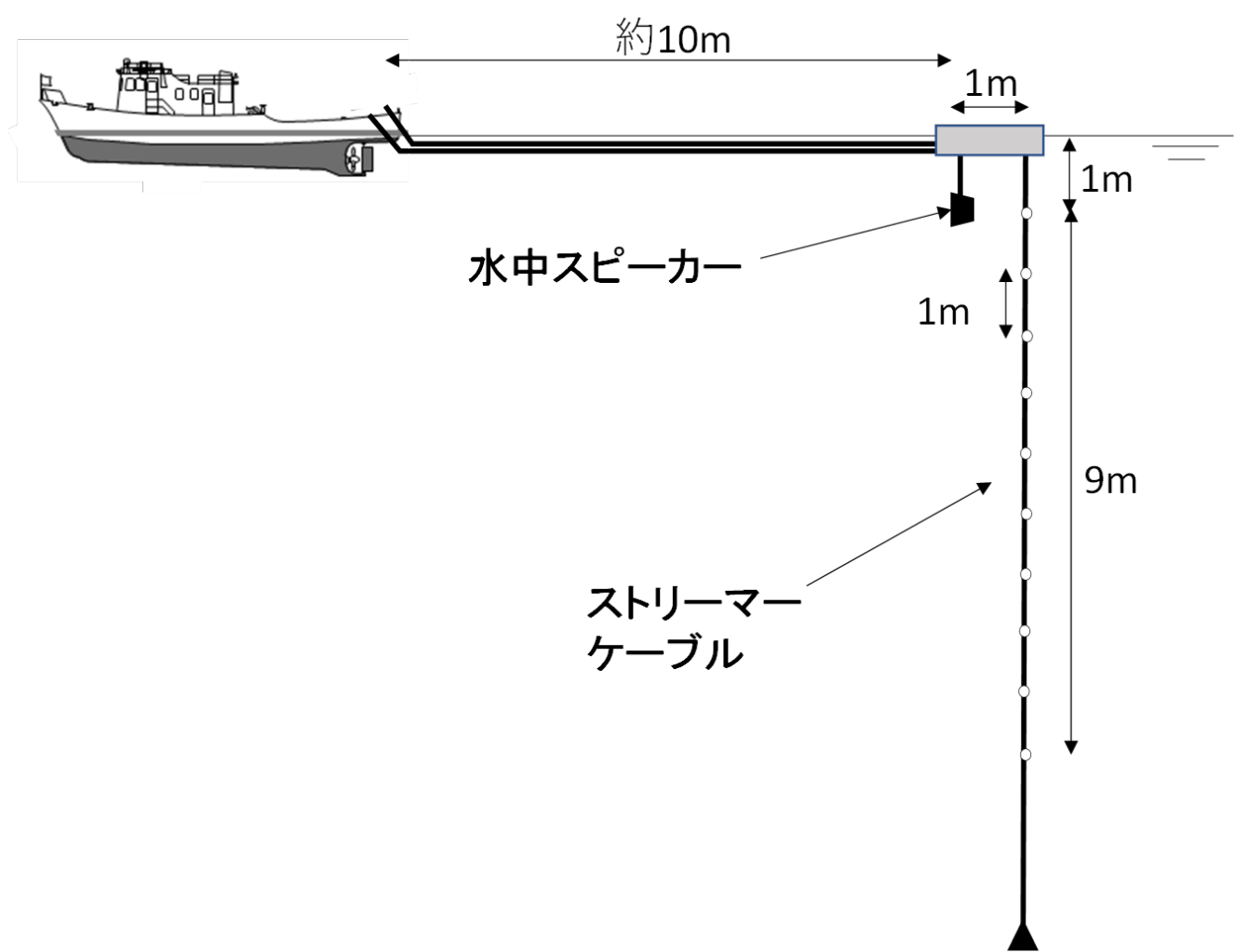
近年、沿岸域を震源とする地震の活断層調査や海洋開発に向けた地盤調査など、沿岸域での地下構造探査需要が増加している。地下の構造形態を高精度に映像化する手法として、地殻構造探査や石油探査分野で広く使用されて来た反射法地震探査は、人工的に地震波を発生させ、地層境界面から跳ね返ってくる反射波を受振し解析することによって、地下構造を推測する探査手法である。この探査手法の問題点として、振源から発振されるパルス波によって海洋性哺乳類や生態系への影響があると考えられていること、そして大規模な探査システムであることから、船舶の交通の障害となるため探査海域が制限されてしまうことの二点が挙げられる。これらの問題点を解決すべく、東京海洋大学探査工学研究室では、従来振源と比較して音圧が小さいため海洋生物への影響が小さく、また、小型で安価なため沿岸域での複数振源としての運用が可能といった利点をもつ水中スピーカーを振源に利用した探査システムの開発に取り組んでいる。これまで、東京湾などでの海上試験において、二次元地震探査データの取得および三次元データ取得のための波動場分離精度の検証などを実施した。前者としては、海底下数十mまでの地下構造を映像化できることを実証した (Tsuru et al. 2019, EPS)。後者においては、3個の水中スピーカーを用いた同時発振実験で問題なく波動場分離ができることが検証された (小川, 2021)。観測データの品質の更なる向上を目指し、振源波形の最適化に関する研究を実施している。たとえば、陸上のパイプロサイズ振源で使用されている周波数を変化させるスイープ波に対し、当研究室では疑似ランダム波を用いている。それにより、観測波形との相互相関後の記録におけるサイドローブを抑制することができる。しかし、水中スピーカーが、疑似ランダム波を正確に発振しているかどうかは未だ検証されていない。すなわち、振源波形として疑似ランダム波を用いる場合、水中スピーカーの機械特性に起因する発振波形の歪がどの程度生じるのかは不明である。もし、実際の発振波形が歪んでいるとしたら、相互相関後の波形におけるS/N比を低下させているはずである。そこで、本研究では、水中スピーカーの機械特性による発振波形の歪の検証を目的として、発振波形の観測を試みた。さらに、観測した発振波形を利用することによりデータ品質の向上を図った。

2. 発振波形観測実験の概要

2021年7月20日、沼津沖内浦湾の水深80~100mの海域において、発振波形の観測実験を行った。測定仕様は右図に示す通り、10チャンネルのストリーマーケーブルを鉛直方向に展開した状態で、複数回発振を行った。それらの記録を重合することにより、海底面などからの反射波が抑制され、ノイズの少ない観測波形が得られる (東京海洋大学, 2021 ; 特願2020-217557)。調査に使用した船舶は、株式会社オキシーテックの計測船「ひびき」(19トン)である。

3. 結果およびまとめ

実験結果によれば、疑似ランダム波を使用する場合、水中スピーカーから発振される波形はオリジナル波形 (発振用に作成された振源波形) とはかなり異なっていた。また、観測した発振波形を用いて観測波形と相互相関した結果は、オリジナル波形との相互相関と比べ、明らかな品質向上効果が見られた。



Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor off Boso Peninsula 2

*Hajime SHIOBARA¹, Toshinori Sato², HyeJeong Kim¹, Yuki Kawano¹, Haruka Nagai¹, Aki Ito³, Masanao Shinohara¹, Hiroko Sugioka⁴

1. ERI, Univ. Tokyo, 2. Chiba Univ., 3. JAMSTEC, 4. KOBE, Kobe Univ.

1. はじめに

機動的な海底傾斜変動観測の実用化に向け、新型の広帯域海底地震計(BBOBS-NX)[1]を基にしたBBOBST-NXによる長期観測について2014年・2017年の地震学会で報告した[2][3]。今回は、2015年に設置し5年ぶりに回収した房総半島南東沖に設置していたBBOBST-NXの観測結果を紹介する。

2. 計測・処理方法

BBOBS-NXでは独立した広帯域センサー部が海底面に大半埋設されており、底層流の影響による傾斜変動はほぼ無い。自由落下して貫入するため海底堆積層との結合も良好である。広帯域センサーの水平動2成分のマスポジション信号(加速度出力)を速度信号3成分と併せ連続記録するBBOBST-NXは、広帯域地震・傾斜変動を同時観測できる。実際に得られた記録には、広帯域センサーの経時変化とマスのセンタリングによるシフトが見られる。シフトの前後で記録はほぼ連続しており、シフト分を補正した後に適当な関数(1次+対数)をgnuplotを使い当てはめ、経時変化を差し引き、傾斜変動の記録を得る。海底での潮汐による傾斜変動は約 $0.1\mu\text{rad}$ と小さいがbaytap08プログラム[4]を適用して潮汐成分を取り除く。

3. 長期試験観測

本観測は房総半島南東沖で繰り返しSSEが発生している領域で2015年7月から2年間の長期試験観測を予定した。これまでの同様な観測時には数10~100m離れた場所に流向流速計を設置して水温等も記録していたが、この観測では自記式精密水温計(10分サンプリング)のみをBBOBST-NXの外装に取り付けた。2017年・2019年に回収航海があったが悪天候などで作業出来ず、2020年10月のYK20-15S「よこすか・しんかい6500」航海でやっと回収し、観測を継続するために新規のBBOBST-NXと海底電磁流向流速計(OBEMC、距離25m)、および別2地点での海底圧力計(OBP)の設置も行った。BBOBST-NXは設置から5年経過していたが内部時計はバックアップ電池で稼働しており、データの時刻精度も確保出来た。水温データは4年以上取得されていた。

4. 水温変化と傾斜変動

今回のマスポジションデータは、2年間でマスのセンタリングがほぼ無いほどに安定していた。基本的な処理を済ませた傾斜変動には、2成分共に水温変化との明確な関連性が見えた(図)。以前、同じ個体のセンサーで取得した結果[5]では、傾斜変動と水温変化の関係が明確に示せなかったが、今回はセンサー近傍での水温計測のためか温度依存性(ほぼ $-30\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$)が確認できた。過去の傾斜変動と水温変化の関係を見て、全て共通して負の温度係数で傾斜値が変化していることから、水塊移動によるものではなく、センサー自体の機械的溫度依存性であると判断できる。この水温変化の影響を傾斜変動から除去する方法を試し、周波数領域で温度係数を推定してその分を差し引くことにした。同じセンサーによる過去2回の傾斜記録に対しても同様な処理を行ったが、水温計測地点が離れていたためか、温度係数がやや異なった。この処理後でも2014年のSSE時の傾斜変動は明確にあると見える。

5. まとめ

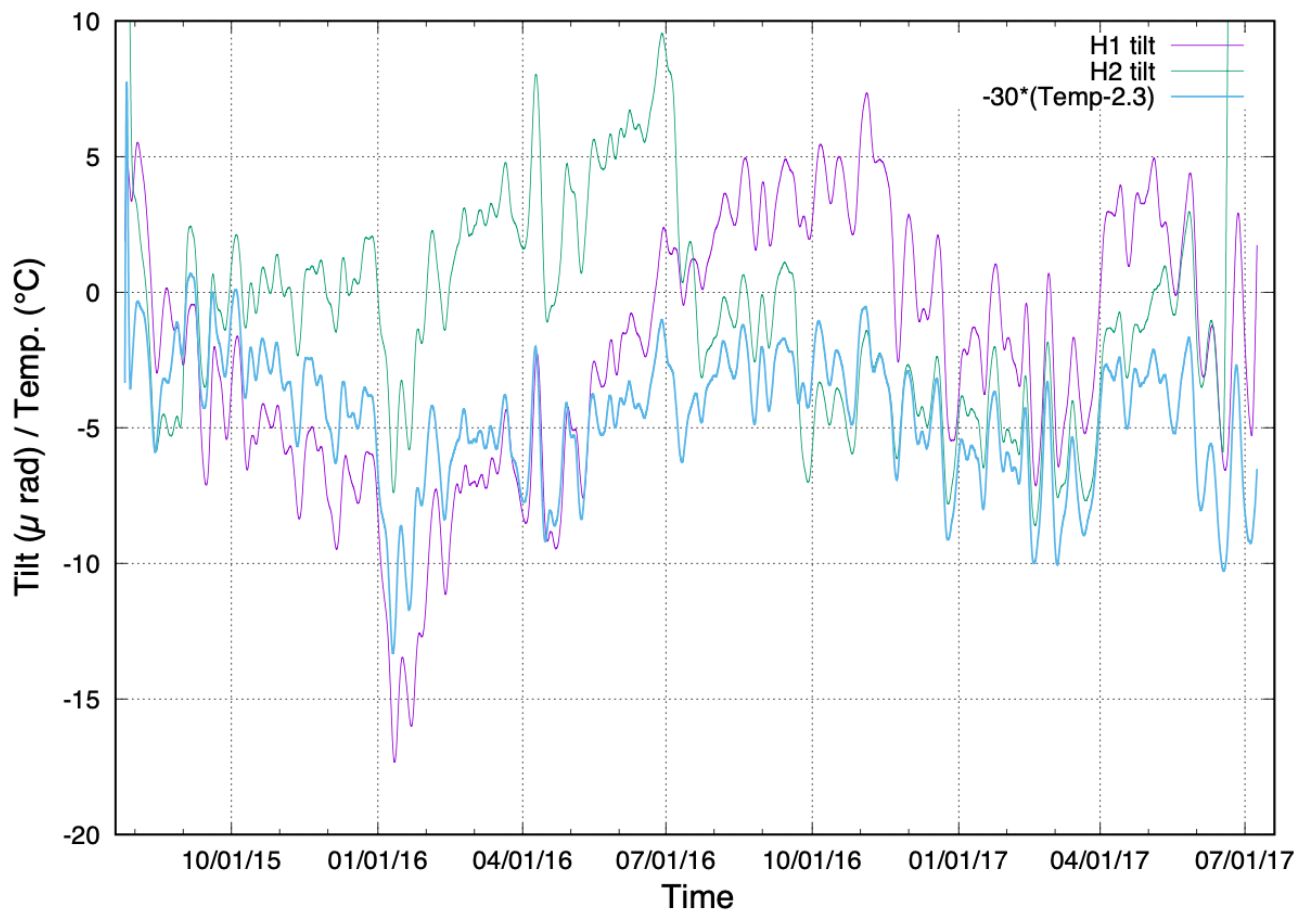
今回はSSEが起きていない2年間のBBOBST-NXによる傾斜観測から、水温変化の計測と温度係数の推定が重要なことが明確となった。温度係数のオーダーから、水温変動が 0.1°C にも達しないような深海底では問題にならないかもしれないが、今後、傾斜変動観測するには、埋設される広帯域センサー部内での精密温度測定が

必要になると考えている。

参考文献

- [1] Shiobara, H., T. Kanazawa and T. Isse, *IEEE-JOE*, 38, 396-405, 2013.
- [2] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, C32-09, 2014.
- [3] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-07, 2017.
- [4] Tamura, Y., et al., *GJI*, 104, 507-516, 1991.
- [5] Shiobara, H., et al., *Front. Earth Sci.*, 8:599810, 2021.

BBOBST-NX @KAP3-2 (after baytap w/temp, ma:1w)



To what extent can stationary seismic observation network detect small landslides using short-period seismic waves?

*Issei DOI¹, Takuto MAEDA², Aitaro KATO³, Tetsuya TAKEDA⁴, Hidehiko MURAO⁵

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Murao Chiken

1. はじめに

斜面崩壊の発生をいち早く知ることは、被災者の迅速な把握や交通の安全な運行の確保など斜面災害の防災、減災にとって大変重要である。近年、斜面崩壊が励起する震動を定常地震観測網の地震計が記録する事例が報告されている。Suwa et al. (2010) は奈良県王塔村における大規模な岩盤地すべりによる震動を周辺の複数の地震計が捉えたことを報告した。さらに、定常高感度地震観測網の地震波形記録を用いてそれらの発生場所が数 km の精度で推定できることが例証されてきた (e.g. Yamada et al., 2012; Doi and Maeda, 2020)。これらのことから、地震観測によって斜面崩壊がリアルタイムに検知されることが期待されるが、どの程度の大きさの斜面崩壊がどのくらい離れて検知可能か、どのようなタイプの斜面崩壊であれば検知されやすいかなど、解明されていないことが多々残されている。これらの解決にはさらなる事例の蓄積が必要である。そこで本研究では、これまで発生したさまざまなスケールの斜面崩壊に対して、周辺の定常地震観測網の観測点の網羅的な調査をおこなった。斜面崩壊による地震動が検知されていないかを調べ、検知されていた場合には、震源決定によって崩壊源の推定が可能かを明らかにした。

2. 方法

斜面の崩壊範囲の大きさが数十メートル四方以上であり、斜面崩壊の発生時刻が文献などによって1時間程度の範囲でわかっている2011年から2021年までの全22事例に対して検討をおこなった。まず、近傍のHi-netと気象庁の地震観測点における地震波形記録やそのランニングスペクトルから、既往研究 (例えば、Dammeier et al., 2011) において観察されている斜面崩壊に由来する地震波形の特徴と照合した。「崩壊発生時刻と合致すること」「卓越周波数が 0.5-10 Hz の中に含まれること」「継続時間が10秒以上であること」のすべての条件を満たした波形について斜面崩壊を検知した可能性があるものとした (一つでも満たさないものは「検知されず」とした)。続いて、同一事例に対して斜面崩壊を記録した可能性がある観測点数と、波群の伝播や振幅の特徴から、斜面崩壊を検知したかどうかについて、下記のような確度に応じて分類した。

- ・ 確度Ⅰ：観測点3点以上で検知され、ASL法 (Kumagai et al., 2010) あるいはレコードセクションにおける震源が斜面崩壊位置と矛盾しない。
- ・ 確度Ⅱ：観測点2点で検知される、または、観測点3点以上で検知されたものの震源決定ができない。
- ・ 確度Ⅲ：観測点1点で検知され、当該波群の特徴に類似する波群が前後の時間帯に存在しない。
- ・ 不明：確度ⅠからⅢ以外。

3. 結果

解析した22事例のうち、確度Ⅰが5事例、確度Ⅱが2事例、確度Ⅲが3事例、その他の12事例は検知されずとなった。確度Ⅰの事例において崩壊体積は 10^4 m^3 (斜面崩壊位置から地震観測点までの最小距離は約 7 km) から 10^6 m^3 であった。また、地震計で検知されなかった12事例における崩壊体積は $2 \times 10^3 \text{ m}^3$ から $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ (斜面崩壊位置から地震観測点までの最小距離は約 4 km) であった。斜面崩壊位置から観測点までの距離が極端に小さい場合を除き、体積 10^4 m^3 程度の斜面崩壊から定常地震観測網によって検知されうる一方で、崩壊体積が大きくとも検知されないか確度が落ちる場合が見られた。本研究によって斜面崩壊と地震動の関係の有無が数多くの事例について明らかになった。今後は地震観測記録に基づく斜面崩壊の自動検知を目指し、斜面崩壊の形態や特徴との対応、ノイズレベルの検討などを進めていく。

謝辞) 防災科学技術研究所高感度地震観測網および気象庁の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。なお、本研究はJSPS科研費 JP21K18792の助成を受けたものです。

Development of multi-platform next-generation WIN system (1)

*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Naoki UCHIDA⁴, Mare YAMAMOTO⁴, Kazuo OHTAKE⁵, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Yuta MAEDA⁶, Shiro OHMI⁷, Haruhisa NAKAMICHI⁷, Makoto OKUBO⁸, Takeshi MATSUSHIMA⁹, Hiroshi YAKIWARA¹⁰, Katsuhiko SHIOMI¹¹, Kenji UEHARA¹¹, Hideki UEDA¹¹, Kazuki MIYAOKA¹², Koji TAMARIBUCHI¹³, Ryou HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction

1. はじめに

地震・地殻変動等の時系列データの伝送や検測処理に広く用いられているWINシステム（卜部・束田, 1991；卜部・束田, 1992；卜部, 1994など）は、開発から25年以上が経過しUnix上のX-window環境でなければ動作しないという制限があるにも関わらず、代替となるソフトウェア群がないために大学等の基幹システムとして使い続けられており、伝送系や自動処理系における設定等は扱いに熟練したスタッフの口伝や試行錯誤に大きく依存しているのが現状である。特に現在の対話検測処理ソフトウェアは機能向上を図ることが難しく、検測処理の高度化や迅速な情報発表を図る上での障害となりつつある。一方、この四半世紀で、ハードウェアの性能が大幅に向上したほか、マルチプラットフォームに対応した言語や対話処理に優れた入力デバイスの開発・淘汰が進み、ハードウェア環境に依存しないソフトウェア群の構築が可能になってきた。そこで、WIN形式データのリアルタイム伝送が機関の枠を超えた全国規模のデータ流通の基盤となっていることを踏まえ、定期的に更新が進められてきた防災科研や気象庁のデータ伝送システムや対話検測処理システムを参考にしながら、マルチプラットフォームのソフトウェア群（次世代WIN）の開発を進めることとした。

2. 現行システムの課題と次世代システムへの要望

開発を進めるにあたり、まず、現WINシステムにおける課題と次世代システムへの要望の意見集約を行った。WINシステムに関連の深い研究者や技術者にメール等によりアンケート調査を実施し、18機関（北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、琉球大学、防災科学技術研究所、神奈川県温泉地学研究所、気象庁、気象大学校、地震予知総合研究振興会、企業4社）から回答を得た。

調査の結果、次のような課題と要望が寄せられた。昨今の観測網の高密度化に伴うデータ量（チャンネル数）の増大、観測項目の多様化、通信の高速化、再送機能の充実、高精細かつ多色表示可能な操作環境への対応が検討事項として挙げられていた。また、WINシステムでは標準的にhypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987)が震源計算に使われているが、それ以外の震源計算プログラムや他の解析プログラム（メカニズム解析など）への対応、WINシステムのチュートリアルの実装なども課題として挙げられていた。

3. 対話検測処理系システムの試作と今後の展望

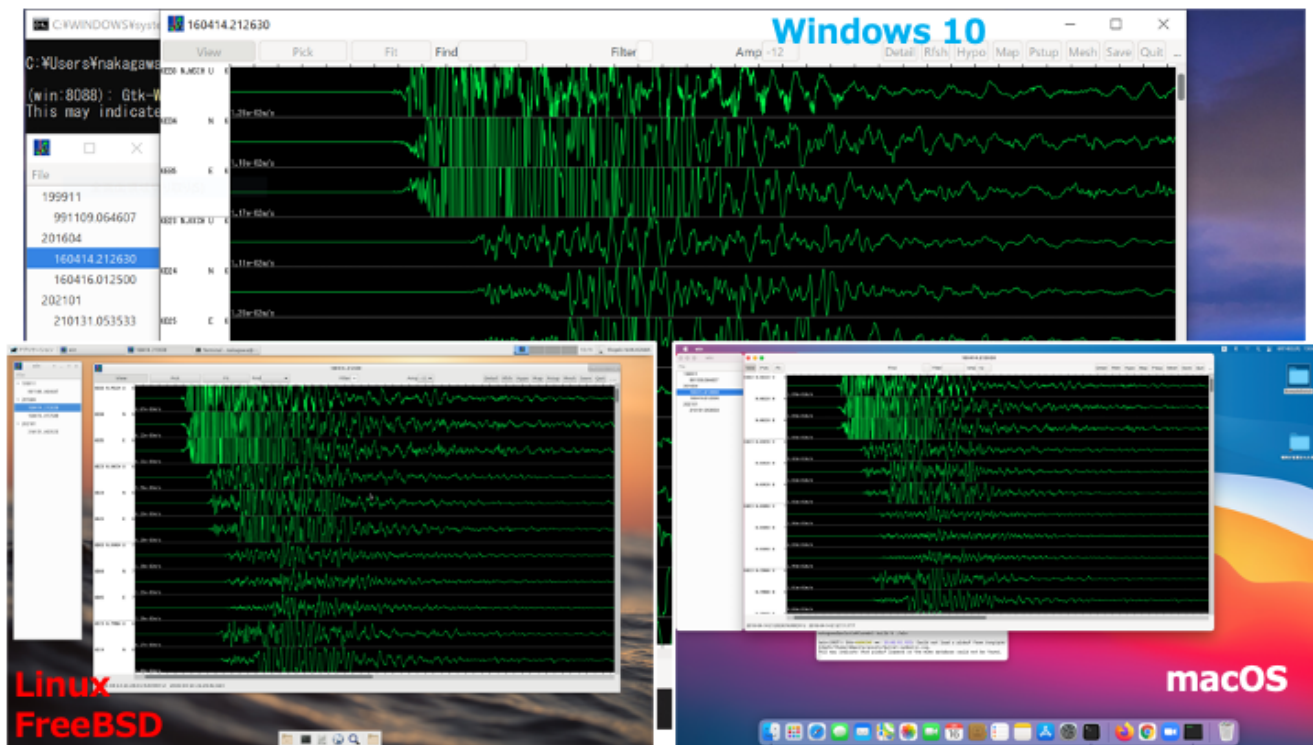
前項の調査を参考にして、次世代の対話検測処理系システムの試作を開始し、対話検測ソフトウェアの基礎部分を作成した。最大の特徴は、1つのソースコードからUnix (Linux, FreeBSD), Windows, macOS の複数プラットフォーム上で動作するネイティブバイナリをそれぞれの環境下でコンパイルできることである

（図）。現在は、波形表示と手動検測の最小限の機能しか備えていないが、今後の機能拡張が可能な設計となっている。

今後は、この試作したプログラムを基にして、震源決定プログラムなどの外部コマンド実行機能などの実装

を進めていきたい。また、伝送系システムの仕様について検討を進めたい。

謝辞：本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学及び気象庁の地震観測データを用いました。ここに記して感謝します。なお、本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の支援を受けました。



Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

PM-1

chairperson:Satoshi Katakami(Center for Railway Earthquake Engineering Research)

Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 2:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S02-05] Seafloor seismic observation using long-distance DAS technology

○Hiroyuki MATSUMOTO¹, Eiichiro Araki¹, Takashi Yokobiki¹, Kinzo Kishida², Daiji Azuma²
(1.JAMSTEC, 2.Neubrex Co., Ltd.)

1:30 PM - 1:45 PM

[S02-06] Long-period noise reduction on fiber optic distributed acoustic sensing (DAS)

○Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹ (1.JAMSTEC IMG)

1:45 PM - 2:00 PM

[S02-07] Long term DAS acquisition using Toyohashi-Oki seafloor cable

○Toshinori KIMURA¹, Eiichiro Araki¹, Takashi Yokobiki¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji², Toshiki Watanabe² (1.JAMSTEC IMGFEAT, 2.Nagoya University)

2:00 PM - 2:15 PM

Seafloor seismic observation using long-distance DAS technology

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Eiichiro Araki¹, Takashi Yokobiki¹, Kinzo Kishida², Daiji Azuma²

1. JAMSTEC, 2. Neubrex Co., Ltd.

光ファイバセンシング技術の一つである光ファイバ分散型音響センシング（DAS : Distributed Acoustic Sensing）は、入射光に対して光ファイバ内の発生する散乱光から散乱体の位置変化を計測するものである。光ファイバの一部がひずむと、散乱光の位相が変化する。DASは、光ファイバの散乱体の相対位置変化の分布を光ファイバ全長にわたって観測する。DASの特徴は長距離にわたり空間分解能が高い連続データが観測できることである。本研究では、DASを海底ケーブルに適用して光ファイバ長100 kmまでの観測を行い、DASによる地震発生帯での地震動の検出能力について考察した。本研究で利用した光ファイバは、図1に示す「高知県室戸岬沖海底地震総合観測システム」の海底ケーブルである。この観測システムは、2019年3月に運用を停止して以降、主にDAS観測のテストサイトとして利用している。ケーブル長は、陸上局から先端観測ステーション（DSO）まで約128kmあり、6心の光ファイバをもつシステムである。海底ケーブルの途中に2台の海底地震計（OBS）と2台の津波計（PG）が設置されている。まずDAS観測の地震観測への適用性を調べるために、DSOラインを用いて60 km計測レンジにより概ね15 km～30 kmのセクションについて38時間の連続観測を行った。連続観測を行った期間に、紀伊水道でM 2.5の地震が発生した（図1）。地震の発生時刻は2020年3月24日00時31分54.1秒である。震央からDAS観測のケーブルセクションまで概ね120 kmであった。DASによる地震観測例として、10.5 mの空間分解能で計測（decode）したデータセットを50 m毎にスタッキングして、10～20 Hzのバンドパスフィルタを適用したものを図2に示す。海底面とのカップリングが強いセクションは高感度の観測ができている。P波はS波に比べるとS/N比は下がるが、カップリングが強いセクションではP波も識別できる。DASは光ファイバの軸方向ひずみへの感度が高いため、S波の到達はより明瞭に観測されている。次に、光ファイバの結合部（CPL）が120.7 kmに存在するPG1ラインを用いて120 km計測レンジにより概ね0 km～60 kmおよび40 km～100 kmの2セクションの観測を行い、光ファイバ長100 kmまでのノイズレベルを比較した。上記と同様のデータ処理を施し、0.1～10 Hzのバンドパスフィルタを適用した。図3にそれぞれの光ファイバセクションの3分間のDAS観測の記録を示す。図3(a)に沿岸に近いセクションの観測を示すが、海岸線から2 km付近までは海底ケーブルが波浪の影響を受けるためノイズレベルが高い。海底面とのカップリングがよいセクションでは脈動が明瞭に観測されている。図3(b)に沖合のセクションの観測を示すが、70 kmより遠方のセクションはノイズレベルが高くなる。図4に10 km毎に計算したパワースペクトル密度を示す。30 kmを除き、70 kmまでは脈動の帯域にピークがある。図3(a)からもわかるように、30 kmは海底面とのカップリングが弱いセクションであることを示唆する。また2回の観測でオーバーラップする40 kmならびに50 kmは同等のノイズレベルとなっている。計測距離が長くなるにつれて入射光の減衰が大きくなるため、広帯域でノイズレベルが高くなる傾向にあり、80 kmと90 kmのPSDには脈動のピークは認識できない。したがって現在のところ、光ファイバ長70 kmまでのセクションで海底地震観測に適用可能と考えられる。

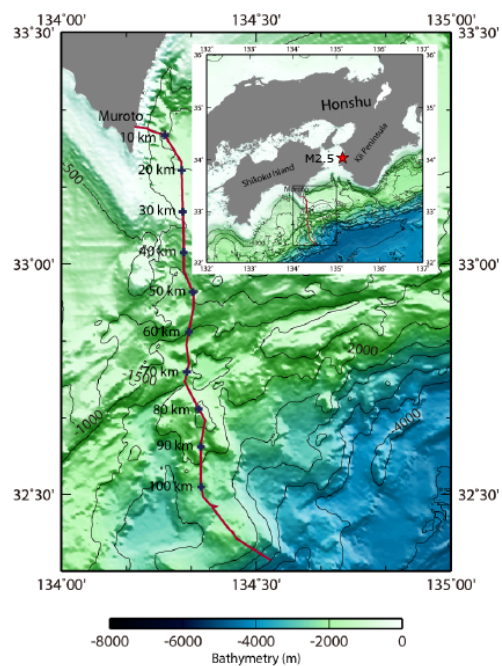


図 1 : JAMSTEC 室戸海底ケーブルの敷設位置
(☆は紀伊水道で発生した地震の震央)

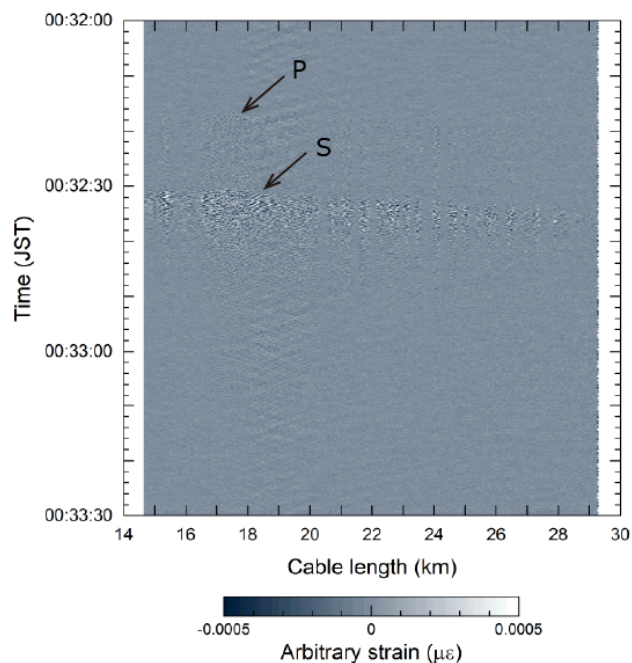


図 2 : 2020 年 3 月 24 日に紀伊水道で発生した地震の
シグナル (10 - 20 Hz バンドパスフィルタを適用)

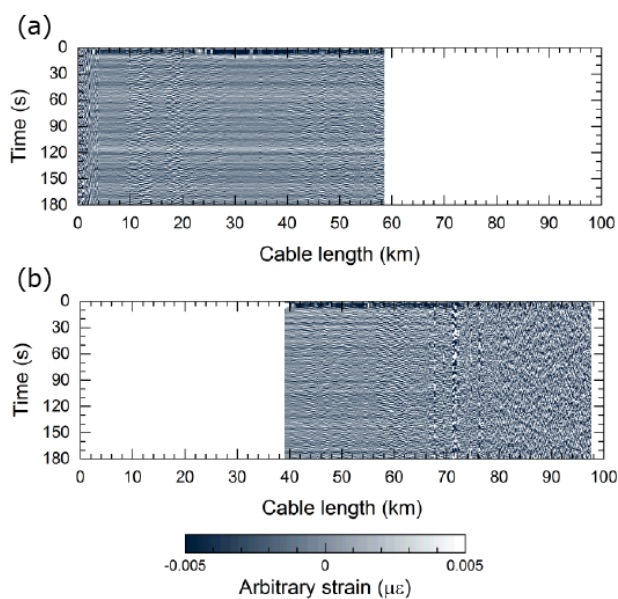


図 3 : (a) 0 - 60 km、(b) 40 - 100 km セクションの DAS
観測 (0.1 - 10 Hz バンドパスフィルタを適用)

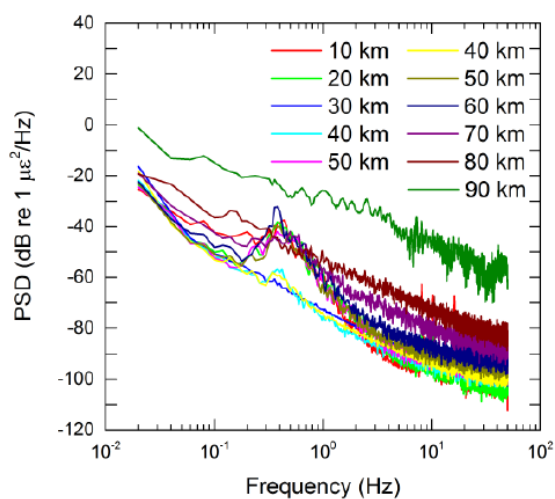


図 4 : 10 km 毎のパワースペクトル密度

Long-period noise reduction on fiber optic distributed acoustic sensing (DAS)

*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹

1. JAMSTEC IMG

我々は、南海トラフ室戸沖に展開された120kmの海底光ファイバーケーブルを用い、分布型音響センシング（DAS）計測を展開している。DASは、光ファイバーの光ファイバー歪変化を多点・高密度に計測できるのが特長であり、室戸沖海底ケーブルでは、ローカルな地震だけでなく、長周期地震動に富んだ遠地地震の観測も行えている（Ide, Araki, Matsumoto, 2021）が、0.1秒より長い長周期においては、機器ノイズが多いため、近傍のDONET海底広帯域地震計と比べて長周期地震動の観測限界は高くない。同じ南海トラフに展開している200m長の1本の光ファイバー歪計による観測結果（Araki et al., 2021）を考えると、このDAS機器ノイズを減少させることができれば、海底光ファイバーケーブルでも、海底広帯域地震計と同様の高感度・広帯域観測が行えることが期待できるため、DASの長周期観測ノイズの原因を考察するとともにその観測ノイズを補正して長周期における観測限界を高めることを意図した実験を行ったので報告する。

DASでの10秒より長周期での観測ノイズは、光ファイバーが実際に温度変化等により見掛けの伸縮を起こしていることの他に、DAS装置に用いられているレーザー光源の波長の揺らぎが見掛けのファイバー伸縮として見える効果が主要なノイズ源であると考えられる。この後者の効果を測定することができれば、観測記録を補正することによって長周期観測限界を高めることができるのではないかと考えた。レーザー波長の揺らぎは、光ファイバーの1回の計測（通常1ms程度）の間は小さいと考えられるため、揺らぎの影響は、光ファイバー観測記録全体に共通の成分として現れると考えられる。そこで、観測ファイバーに「歪変化のない」区間を挿入し、その区間の計測結果をレーザー波長揺らぎの効果として、他の計測区間の記録を補正した。

「歪変化のない」観測ファイバーの区間は、石英管に巻き付けた光ファイバー約140mを断熱容器に収納することによって実現した。また、「歪変化のない」光ファイバー区間にそれで生じているちいさな「歪変化」をも、並行して高安定レーザー光を用いた光干渉法によって計測することにより、さらなる補正を行うことも試みた。この計測に用いる高安定度レーザー光源は、高真空環境で断熱されたキャビティに周波数ロックした周波数ドリフト率が10⁻¹⁰/日程度のものを用いたので、「歪変化のない」光ファイバー区間の実際の歪変化を0.1nstrainより高い精度で把握することが十分に可能である。

これらの実験装置：DAS観測装置（AP Sensing N5226A 50km range）、「歪変化のない」光ファイバー（自作）、高安定度レーザー光源（Stable Laser Systems社SLS-INT-1550-1）、光干渉計測装置（自作）を海洋研究開発機構の室戸沖海底ケーブルの陸揚げ局舎内に設置を行い、試験観測を2021/3/4-3/31の期間連続的に実施した。

得られたDAS観測記録では、0.01-0.1Hzの長周期地震動の帯域において「歪変化のない」光ファイバー区間と30kmまでの計測範囲での記録は非常によく相関しており、「歪変化のない」区間の記録を用いることで、これらの計測範囲において観測ノイズを少なくとも1/10程度に減らすことが可能と考えられる結果が得られた。それより先の区間ではやや相関が低くなっているが、これはDAS装置で観測しているレイリー散乱光の強度が小さいため、光ファイバーの歪変化を完全にトラッキングできていないことによるものと考えられる。いずれにしても、観測装置の計測区間のかなりの範囲で、記録の長周期ノイズを減少させることができることが示された。高安定度のレーザーを用いた光干渉計測の結果によれば、「歪変化のない」光ファイバー区間も、設置場所の温度変化の影響を受け、日変化に卓越した歪変化が観測された。したがって、DASの観測データをより長周期（～日）で活用しようとする場合には、今回実験をしたような方法でDAS観測の長周期計測の精度を高めることが必要になると示唆された。

Long term DAS acquisition using Toyohashi-Oki seafloor cable

*Toshinori KIMURA¹, Eiichiro Araki¹, Takashi Yokobiki¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji², Toshiki Watanabe²

1. JAMSTEC IMGFEAT, 2. Nagoya University

1. はじめに

光ファイバ分散型音響センシング (DAS: Distributed Acoustic Sensing) は光ファイバ内に光パルスを連続的に送信し、ファイバ内にランダムに分布する散乱点からの後方散乱光を観測・処理することにより光ファイバ上の数m間隔での分散歪を連続的に観測する。DASは主に資源探査分野での稠密構造探査・モニタリングなどを対象として技術開発が進められてきたが、近年は自然地震観測等、地球科学分野への適用も進み、従来型の地震計では実現不可能であった超稠密地震観測の可能性を示す研究成果が多数報告されている。DASによる観測は光ファイバに光源および処理装置を接続するのみで実現できるため、既存の光ファイバを利用することで観測コストを従来の手法と比較して大幅に低減することができる。特に、海底等の受振装置を設置することが困難な海域観測ではこのメリットは大きい。また、固定された光ファイバの利用により繰り返し探査・モニタリングが容易に実現できる。一方で、DASをこれらの地震観測・モニタリングの観測に適用するためには、精度等の観測性能を明らかにする必要があるが、現状観測例・議論は十分でない。

2. データ観測

本研究では、愛知県豊橋沖の海底ケーブルを用いDASの長期観測を行い、観測された地震記録、常時微動記録などを利用してDASの観測データ・観測性能の議論を行う。2021年5月1日～7月11日にJAMSTEC所有の豊橋沖ケーブルにAPsensing社製のDAS収録装置 (N5226A R50) を接続し、2か月以上の連続データの観測に成功した。陸側から23kmまでのケーブル区間を観測区間に設定し、ゲージ長40m, 空間サンプリング間隔5m, 時間サンプリング間隔 2ms での観測を行った。観測開始時に複数のゲージ長 (5-40m) の試験観測を短時間実施し、最適な観測パラメータを決定した。観測装置一式は陸上のケーブル局舎に設置し、収録データは大容量NASに保存された。また、データQC, 処理を円滑に行うため、観測と並行して時間・空間サンプルをそれぞれ 10ms, 50m にダウンサンプルするデシメーション処理をリアルタイムで実施した。

3. データ確認・処理

観測された時系列データには、常時微動、近地・遠地地震記録などの信号が確認された。観測データの時系列を目視で確認すると、常時微動成分は陸側の振幅が沖側と比較して相対的に強いことが分かった。定量的な議論のために常時微動成分のパワースペクトル密度 (PSD) を計算したところ、複数の明瞭なピークが確認された。0.08-0.1 Hz付近、および0.4-0.5 Hz 付近に明瞭なピークが確認された。複数のケーブル距離で観測されたデータのPSDを確認したところ、低周波数側0.08-0.1 Hzのピークは陸側から沖側にかけて振幅が減少することが分かった。一方、0.4-0.5 Hz のピークはケーブル距離が変化してもそれほど振幅が変化しないことが確認された。これらのシグナルの由来を議論するために、F-Kスペクトルを算出しそれぞれの波群の見かけ速度を確認した。F-Kスペクトルの計算の結果、低周波数側のシグナルは、傾き10-20 m/s程度の傾きで伝わる波群、高周波数側のシグナルは300-500 m/s程度で伝わる波群であることが分かった。これらはそれぞれ海洋波浪の伝播速度、表面波の伝播速度に対応していることから、前者は海洋波浪の伝播自体により励起される圧力変動由来のシグナル、後者は脈動セカンダリ成分由来の表面波・境界波であると考えられる。地震記録としても、震央距離数km～3500 km, マグニチュード2～7程度までの複数の近地・遠地地震が観測された。例えば2021年5月3日7時57分に岐阜県で発生したM2.4の近地地震、5月22日3時4分に中華人民共和国青海省で発生したM7.3の遠地地震についても、明瞭にとらえられていることを確認した。

4. さいごに

本研究では豊橋沖海底ケーブルを利用した長期間のDAS観測および観測データの初期解析を行った。初期解析

の結果、海底ケーブルによるDAS観測では波浪伝播、脈動由来の信号が明瞭に観測されること、広範囲での近地・遠地地震が観測されることを確認した。今後、陸上の観測点に設置された地震計の比較などにより、観測性能の定量的な評価を行う予定である。また、将来的なDAS観測と定常震源を組み合わせた地震波速度構造モニタリング実現に向けた取り組みとして、付近に設置されたACROSSによる信号抽出の取り組みを今後行う予定である。

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

PM-1

chairperson:Fuyuki Hirose(Meteorological Research Institute)

Fri. Oct 15, 2021 2:15 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S14-01] Application of weighted likelihood method to the Brownian Passage Time model for recurrent earthquakes with uncertain origin times and an analytical solution of the maximum likelihood estimate

○Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:15 PM - 2:30 PM

[S14-02] Trial calculation of long-term probability for crustal earthquakes using GNSS data

○Takuya NISHIMURA¹ (1.DPRI, Kyoto Univ.)

2:30 PM - 2:45 PM

[S14-03] **Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data**

○Yosihiko OGATA¹, Koichi Katsura¹ (1.The Institute of Statistical Mathematics)

2:45 PM - 3:00 PM

Application of weighted likelihood method to the Brownian Passage Time model for recurrent earthquakes with uncertain origin times and an analytical solution of the maximum likelihood estimate

*Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

繰り返し地震として複数の時系列が候補とされ、一つの時系列に特定できない場合がある。このような場合、各時系列の信頼性に応じた重み付き尤度関数を用いて、平均的なモデルパラメータを推定することができる (Imoto and Fujiwara, 2012, EPS)。離水地形や津波堆積物など地形地質学的手法により特定される地震には、標本の年代測定に起因する発生時期の不確実性がある。このような場合も、発生年が連続的に変化する複数の時系列として重み付き尤度法を適用できる。発生年不確定な地震時系列の更新過程モデルについてはすでに尤度関数が提案されているが (Ogata, 1999, JGR), この式による最尤推定値は偏ることが報告されている (井元他, 2021, JPGU)。ここでは、発生年不確定の繰り返し地震更新過程モデルに適用した重み付き尤度法を紹介し、地震間隔分布がBrownian Passage Time (BPT) 分布の場合の最尤推定値解析解を導く。得られた関係式を用いて、相模トラフ沿いのM8クラス地震について離水地形データからBPT分布モデルの最尤推定値を求める。

重み付き尤度法

Imoto and Fujiwaraは、M8クラス関東地震の複数の歴史地震時系列への重み付き尤度法の適用で、各時系列の対数尤度関数を重み付き加算し対数尤度関数としている。発生年不確定な時系列では地震発生年が連続的に変化するため、地震発生年を積分変数とした対数尤度関数の多重積分により重み付き尤度関数を表現できる。重み付き尤度法では、データに対する信頼度に応じて重みをつける。年代測定の結果として発生年の確率密度関数が報告されている場合には、それを重みとして用いることができる。確率密度がわからない場合には、発生年は一様分布であると考え、この場合には、重み付き尤度関数は(1)式(表1)で表される。積分範囲は各地震の不確定期間 $((a_i, b_i), i=1, 2, \dots, n)$ となる。不確定期間が相互に一部重なる場合には、発生年の逆転を避ける $(t_1 < t_2 < \dots < t_n)$ 条件付き積分となる。地震間隔の確率密度関数は(2)式BPT分布で与える。モデルパラメータ μ および α をそれぞれ平均間隔およびばらつきと呼ぶ。尤度関数をモデルパラメータにより微分し連立方程式を解く。多重積分と微分の順序を入れ替え、多重積分を(3)式(4)式で表すと(5)式(6)式を得る。

相模トラフ沿いM8クラス地震

地震調査研究推進本部地震調査委員会報告書(調査委員会報告書, 2014)では、2400calyBP~5400calyBPの間に推定される9回の地震を用いて今後発生する地震について評価している。これら9回の不確定期間は相互に重ならないので、(3)式の多重積分は被積分関数に含まれる変数に関する2重積分となる。地震間隔およびその逆数の2重積分は(7)式(8)式で与えられる。(7)式から不確定期間中央値の差が平均間隔となることがわかる。(5)式と(6)式から最尤推定値として平均間隔363年ばらつき0.49を得る。

調査委員会報告書ではOgata(1999)と同等なParsons(2008, JGR)に従ったモンテカルロ法により地震系列を生起し、平均間隔とばらつきの中央値や平均値を求めている。このモンテカルロ法における最尤推定値は記載されていないが、我々の計算では平均間隔360年程度ばらつき0.28程度となっている。重み付き尤度法の結果に比べばらつきが0.2ほど小さい。この比較からもOgata(1999)やParsons(2008)ではばらつきが小さく決まることがわかる。ある時点から30年間に地震が発生する確率(30年確率)の比較を図1に示す。一般に経過年数が短い時点では、ばらつきが小さいと大きい場合に比べ確率は小さくなる。図1によると大正関東地震(1923年)から100年程度経過で、ばらつきが小さいParsonsでは確率値はほぼ0%であるが、重み付き尤度法では1~2%になる。98年経過時点(2021年9月1日)における30年確率は、重み付き尤度法では1.6%、Parsonsで

0.01%以下，3歴史地震(応仁，元禄，大正)で 2.4% となる．このようにParsonsではばらつきが小さく決まる結果，現時点の30年確率は過小評価となる．上記モンテカルロ法の時系列はParsonsの偏りを引き継いでいるため，モデルパラメータ中央値や平均値，確率値のベイズ推定等も偏っていると推測する．

表 1

(1)	$\ln L^w(\theta) = \int_{a_1}^{b_1} \cdots \int_{a_n}^{b_n} \ln \{ [\prod_{i=2}^n f_{\theta}(t_i - t_{i-1})] \prod_{i=1}^n \frac{1}{b_i - a_i} dt_n \cdots dt_1 \}$
(2)	$f_{\theta}(t) = f(t, \mu, \alpha) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp \left\{ -\frac{(t - \mu)^2}{2\mu\alpha^2 t} \right\}$
(3)	$E[F(t_{i-1}, t_i)] = \int_{a_1}^{b_1} \cdots \int_{a_n}^{b_n} F(t_{i-1}, t_i) \prod_{l=1}^n \frac{1}{b_l - a_l} dt_n \cdots dt_1$
(4)	$E[1] = \int_{a_1}^{b_1} \cdots \int_{a_n}^{b_n} \prod_{l=1}^n \frac{1}{b_l - a_l} dt_n \cdots dt_1$
(5)	$\hat{\mu} = \frac{1}{n-1} \frac{1}{E[1]} \sum_{i=2}^n E[(t_i - t_{i-1})]$
(6)	$\hat{\alpha}^2 = \frac{1}{n-1} \frac{1}{E[1]} \sum_{i=2}^n E \left[\left(\frac{1}{t_i - t_{i-1}} \right) \right] \cdot \hat{\mu} - 1$
(7)	$\frac{1}{(b_1 - a_1)(b_2 - a_2)} \iint_{a_1 a_2}^{b_1 b_2} (t_2 - t_1) dt_2 dt_1 = \frac{(a_2 + b_2) - (a_1 + b_1)}{2}$
(8)	$\begin{aligned} & \frac{1}{(b_1 - a_1)(b_2 - a_2)} \iint_{a_1 a_2}^{b_1 b_2} \frac{1}{t_2 - t_1} dt_2 dt_1 \\ &= \frac{1}{(b_1 - a_1)(b_2 - a_2)} \{ (b_2 - a_1) \ln(b_2 - a_1) - (b_2 - b_1) \ln(b_2 - b_1) \\ & \quad - (a_2 - a_1) \ln(a_2 - a_1) + (a_2 - b_1) \ln(a_2 - b_1) \} \end{aligned}$

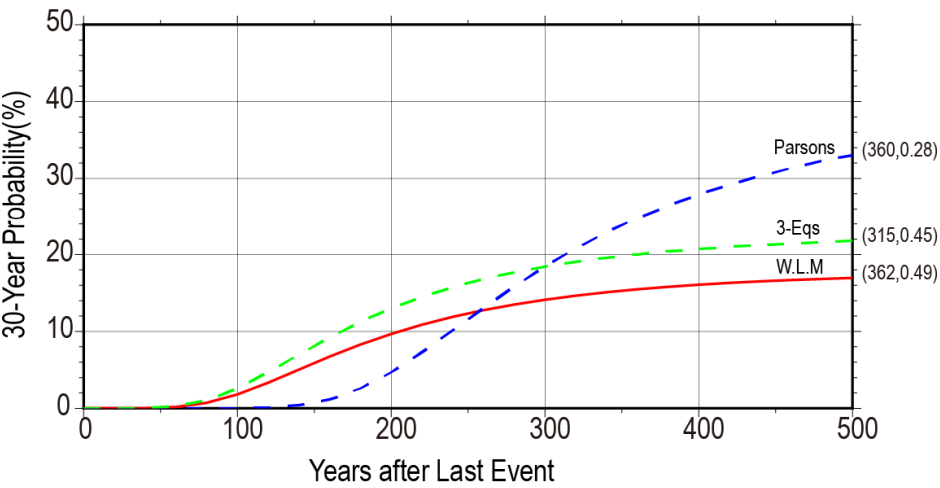


図 1 30 年確率の推移. 重み付き尤度法最尤推定値に基づく 30 年確率の推移を赤線で示す.
Parsons と 3 地震(永仁, 元禄, 大正)による推移を青破線, 緑破線で示す.

Trial calculation of long-term probability for crustal earthquakes using GNSS data

*Takuya NISHIMURA¹

1. DPRI, Kyoto Univ.

はじめに

我が国では地震の長期的な確率予測として地震調査委員会による長期評価が行われており、地殻内で発生する地震（以下、内陸地震）に関しては地形・地質学的手法による活断層に基づく評価が行われていて測地データは用いられていない。一方、諸外国の地震長期予測モデル（例えば、Field et al., 2017）には、GNSS等の測地データが広く用いられている。日本列島で稠密なGNSS観測網が整備されているので、測地データを用いて内陸地震の長期予測を試算し、既存のモデルと比較することは、より信頼性の高い地震の確率予測モデルを構築するために有益であると考えられる。本研究では、西南日本のGNSSデータを用いて内陸地震の長期発生確率を試算し、実際の地震活動との比較を行った。

地震長期発生確率の計算方法

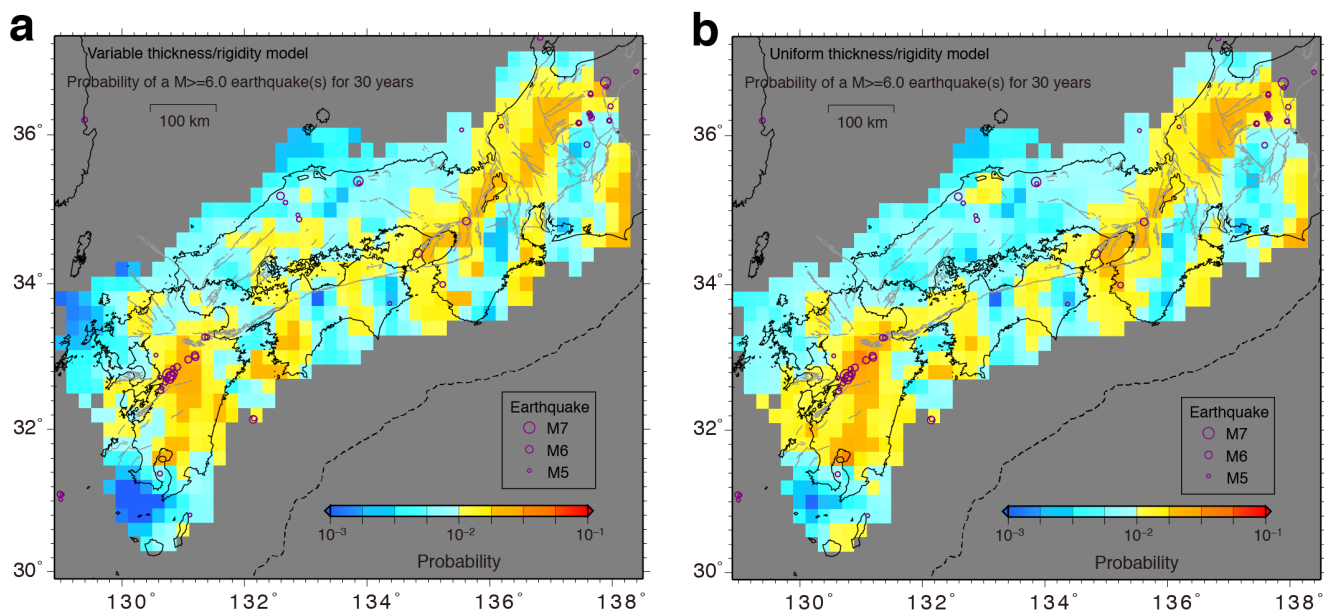
本研究では、最も単純な地震発生予測モデルとして、内陸地震の発生はポアソン過程に従うと仮定し、地震の発生率はその地域の地震モーメント速度と規模別発生頻度から計算した。地震の規模別頻度分布は、切断グーテンベルグ・リヒター則に従うものとし、最大地震の気象庁マグニチュードを8.0、b値は0.9と解析地域で一定の値を仮定した。地震モーメント速度は、以下のようにGNSSデータから計算した。まず、大地震の発生が少なかった2005年4月から2009年12月までの水平速度を推定し、南海トラフ沿いのプレート間固着による弾性変形をNishimura et al.(2018)のモデルを用いて除去した。プレート間固着による弾性変形を除去した理由は、この弾性変形はプレート間地震の発生によって解消されるものであり、内陸地震の発生の原動力そのものではないと考えたからである。次に、補正を行った水平変位速度からOkazaki et al.(2021)の手法を用いて0.2度グリッドの中心位置でのひずみ速度を計算した。ひずみ速度から地震モーメント速度への換算式は先行研究で提案された3つのモデルで試算し、換算式中の地震発生層の厚さ、剛性率については解析領域で一様のモデルと総地震数の90%の地震が発生する深さ（Omuralieva et al., 2012）とJ-SHIS深部地盤構造モデルを用いて可変とするモデルで計算を行った。測地学的ひずみ速度は、過去の地震活動から推定されるひずみ速度に比べて数倍から1桁程度大きいことが指摘されており（例えば、Shen-Tu et al., 1993）、測地学的ひずみ速度は海溝型地震によって解放されるひずみ速度を含むことや内陸域での非弾性ひずみを含むことが原因であると考えられてきた。本研究では前者のひずみ速度は前処理で除去したが、内陸の非弾性変形がどの程度生じているかは内陸地震として解放されるモーメント速度に大きく影響する。そのため、ここでGNSSひずみ速度データから換算した地震モーメント速度と過去の地震によって解放されたモーメント速度の割合を計算した。M6以上の内陸地震の地震モーメント速度は、大地震の記録が概ね残っていると思われる天正地震以降の期間（西暦1586-2019年）で、測地データから換算したモーメント速度の13-20%程度であり、この割合を測地ひずみ速度から地震モーメント速度への変換に用いた。

地震長期確率モデルの試算結果と比較

M6以上の内陸地震について30年間の発生確率を試算した結果を図に示す。過去の地震分布ともっとも整合的であったモーメント速度の換算式は、水平方向の2つの主ひずみ速度の絶対値及び面積ひずみ速度の絶対値の最大値を用いるSavage and Simpson(1997)の換算式であり、地震発生層の厚さと剛性率が可変のモデル（図a）と一様のモデル（図b）は、過去地震との整合度において大きな差はなかった。地震発生層の厚さ一様のモデルで0.2度グリッドの発生確率の最大値は九州中部の3.5%で、最小値は薩摩半島沖の0.1%であった。試作したモデルと実際の内陸地震の分布を比べると、地震の空間分布は一樣であるという参照モデルに対して、地震1個あたりの確率利得では1.1-1.3程度であるが、ひずみ速度が上位25%のグリッドに地震数で43%以上、地震モーメントで62%以上の地震が発生しており、ひずみ速度の高い場所で地震が多発する傾向は明らかである。よって、測地データを用いた長期予測は、新たな地震発生予測手法として有効であると考えられる。

謝辞：本研究では、国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業(IGS)のGNSSデータ、気象庁一元化カタログ

グ、世界の被害地震の表 (<https://iisee.kenken.go.jp/utsu/>) を利用しました。地殻内地震発生確率評価手法検討ワーキンググループ、特に加藤愛太郎、尾形良彦両博士との議論は有益でした。ここに記して感謝いたします。



Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data

*Yosihiko OGATA¹, Koichi Katsura¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

1. 要約：本研究では、階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いて、日本全国や内陸部などの広領域で、地域依存の地震活動を短期予測するとともに、背景地震率を分離する。予測や背景地震率の分解能を高めるためには、気象庁震源カタログの下限マグニチュード値を適切に下げることが考えられる。しかし、これによって長期的には人為的なデータの時空間的不均一性を考慮する必要がある。同時に、大地震の直後には数多くの連発余震が発生し、余震の波形が重なり、小さめの余震の欠落が起こる。それゆえ大地震発生後に低下する余震検出率を推定することによってHIST-ETASモデルの偏りのないパラメータを再推定できる。結果、地震活動度の大地震後の地震活動がどのように補正されるかを可視化し、時空間の地震発生率を準リアルタイムで予測し、アニメーションで示すことができる。

2. 階層ベイズ型時空間ETASモデルと地震予測の補正：震源データベースから階層ベイズ型的時空間 Epidemic-Type Aftershock Sequence (HIST-ETAS) モデルを推定する。ここで、準リアルタイム (例えば1時間以内) で検出地震群からAICで、余震や群発地震の非等方性の短期空間予測を近似する。時間経過に依存しない常時活動度は地域的に数桁の違いで変化し、大地震の長期的予測に有用である。すなわち常時活動度の高い地域は、大地震の予測結果や歴史地震の多発域と調和的である。余震生産性のパラメータは短期確率予測に必須である。この他にもHIST-ETASモデルの主要パラメータは、地震活動パターンの地域的非一様性を表すために地震の位置に依存する。これは任意の位置での主要パラメータの値が、デロネ三角形網の各頂点での値 (デロネ係数) によって線形的に補間 (区分的線形関数) されるものである。地震の数に比例して係数の数が膨大になるので、適切な推定には区分線形関数に滑らかさの制約を課して、「罰則付き対数尤度」を最大化する逆問題 (インバージョン) として、ベイズ最適解 (MAP解) を求める。宇津カタログを準備データとし、1926年以降の気象庁カタログをターゲットのデータとして使った対数尤度は、次節で求められる下限マグニチュード M_c 地震検出率関数を重みに使う。

3. 時空間地震検出率：下限マグニチュードを十分下げてデータを増やし、予測の解像度を上げたい。その場合、長期的なデータの非一様性を補うと同時に、大きな地震直後の余震検出率の低下によるバイアスを補正して、正しいHIST-ETASモデルの推定と予測が出来るようにしなければならない。そのために震源から作ったドロネ (Delaunay) 4面体ネット上での時空間検出モデルを準備する。ここでマグニチュード分布係数 b 値の時空間変化の指数関数と次の正規分布の累積分布関数を掛け合わせる。すなわち平均パラメータが50%検出のマグニチュードに対応し、標準偏差は部分的に検出されるマグニチュードの範囲を示す。かくして下限マグニチュード M_c の検出率を全ての時空間で補間できる。1926年以降の気象庁カタログの震央と発生時刻に関する結果を示す。そのため地震カタログデータを頂点としたドロネ4面体の時空間分割を効果的に構成する。とくに、一元化後の膨大なデータを克服するドロネ4面体分割の作成や、大地震の直後に発生する急激な検出率低下を定量化できるように工夫し、尤度関数が設計される。各ドロネ4面体上で線形な多面体スプライン関数でG-R則の、検出率のおよびの時空間関数を表現し、平滑化の空間的制約と時間的制約の其々の重みを最適化する赤池ベイズ情報量基準 (ABIC) で決定する。こうして求めた日本内陸部と沖合周辺部のマグニチュード時空間検出率や b 値変化の計算結果を動画で可視化できる。

参考文献およびソフトウェアとマニュアル：

- 1) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993). Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogues, *Geophys. J. Int.*, **113**, 727-738.
- 2) Ogata, Y. and Katsura, K. (2006). Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys.*

Res. Lett., **33** (10), L10305, doi:10.1029/2006GL025888.

3) Ogata et al. (2021) Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM): Software Documentation and codes, *Computer Science Monographs*

https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html No. 35, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo; or temporally available in <http://bemlar.ism.ac.jp/ogata/HIST-PPM-V3/>.

図の説明：階層ベイズ型時空間ETASモデルの地震活動がどのように補正されているかを可視化している。HIST-ETASの時空間intensity rateの比の時空間等高面（左）と東経141度38分で切った緯度変換時間の平面のintensity ratesの比の画像と等高線（右）。いずれも対数スケール。

