

Tue. Oct 31, 2023

Room C | Regular session : S13. Crustal fluids and earthquake

9:30 AM - 10:00 AM JST | 12:30 AM - 1:00 AM UTC | Room C F202

[S13] AM-1

chairperson:Daisuke INAZU

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S13-01] Abrupt water temperature increases near seafloor after the 2011 Tohoku earthquake

*Daisuke INAZU¹, Yoshihiro ITO², Ryota HINO³, Wataru TANIKAWA⁴ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S13-02] The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging

*Ehsan Jamali Hondori¹, Jin-Oh Park² (1. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

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

10:00 AM - 10:45 AM JST | 1:00 AM - 1:45 AM UTC | Room C F202

[S03] AM-1

chairperson:Tomokazu Kobayashi

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S03-01] Detailed fault ruptures for the 2023 Turkey-Syria earthquake revealed by SAR-based crustal deformation analysis

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Hiroshi Munekane¹, Masaki Kuwahara¹, Haruna Furui¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S03-02] Numerical simulation of marine terrace at Kikai-jima: clarifying uplift history based on the interaction of EQ timing and geomorphic change

*Takeru Kamiya¹, Takeo Ito² (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S03-03] Interseismic deformation analysis due to megathrust locking using GNSS Data: A case study of southwestern Pakistan

*Shaukat Parvaiz^{1,2,3}, Yo Fukushima¹ (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University Japan, 2. Department of Earth Sciences, Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan., 3. Department of Geological Engineering, Balochistan University of I.T, Engineering and Management Sciences (BUIEMS), Quetta, Pakistan.)

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

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room C F202

[S03] AM-2

chairperson:Fumiaki Tomita(Tohoku University), Hideto Otsuka(Tohoku University)

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

[S03-04] Temporal Changes of Seismic Attenuation after the Tohoku-oki Earthquake

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

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

[S03-05] GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations and their results along the Japan-Kuril trench

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Ryota Hino³, Mako Ohzono⁴, Hiroaki Takahashi⁴, Raymondo Plata-Martínez², Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁵, Kyosuke Nakamura² (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S03-06] Estimate the interplate coupling around the Southern Kuril Trench

*Shunsuke Imai¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

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

[S03-07] Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake

*Kyosuke Hirata¹, Ryota Hino¹, Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Norihisa Usui² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S03-08] SSE detectability of OBP data using principal component analysis: Application to data from Hikurangi and Alaska

*Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Ryota Hino¹ (1. Graduate school of science, Tohoku university)

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

1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room C F202

[S03] PM-1

chairperson:Yusuke Yokota, Tadashi Ishikawa

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

[S03-09] Representation of underwater sound speed structure in GNSS-A

*Yusuke YOKOTA¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura², Koya Nagae² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-10] Trial of the detection of seafloor movement by the differential bathymetry method

*Tadashi ISHIKAWA¹, Masanao Sumiyoshi¹, Yuto Nakamura¹, Kei Imuta¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] GNSS/A seafloor geodesy using an ultralight and compact towed buoy system.

*Ryoya IKUTA¹, Yasushi Harada², Keizo Sayanagi², Keiichi Tadokoro³, Ryosuke Nakahata¹, Yusuke Yokota¹ (1. Shizuoka University, 2. Tokai University, 3. Nagoya University)

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

[S03-12] Reanalysis of GNSS-A data obtained in the Hateruma basin at the southwestern end of the Ryukyu trench

*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, keiichi Tadokoro², Yasushi Harada³ (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Tokai University)

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

[S03-13] Numerical experiment on template matching and relative strength index based on noise analysis of high-rate GNSS data

*Riko Arai¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University)

Room C | Regular session : S13. Crustal fluids and earthquake

📅 Tue. Oct 31, 2023 9:30 AM - 10:00 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 12:30 AM - 1:00 AM UTC | 🏢 Room C F202

[S13] AM-1

chairperson:Daisuke INAZU

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S13-01] Abrupt water temperature increases near seafloor after the 2011 Tohoku earthquake

*Daisuke INAZU¹, Yoshihiro ITO², Ryota HINO³, Wataru TANIKAWA⁴ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S13-02] The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging

*Ehsan Jamali Hondori¹, Jin-Oh Park² (1. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

Abrupt water temperature increases near seafloor after the 2011 Tohoku earthquake

*Daisuke INAZU¹, Yoshihiro ITO², Ryota HINO³, Wataru TANIKAWA⁴

1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2011年東北地震の震源直上海底における圧力観測の圧力データは、その地震で発生した地殻変動や津波の評価に多く用いられてきた。その際、圧力値の算出のために、海底圧力計内部の温度データも取得されているが、こうした（温度）補償のための補足的なデータはほとんど利用されてこなかった。

Inazu et al. 2023 PEPSでは、まず、これらの温度データが機器周辺の水温のプロキシーとして利用できることを確認し、次いで、2011年東北地震を経験した宮城県沖合の8点の海底圧力観測（水深1-6 km）の温度データを精査した。水深約3 km（GJT3）と6 km（TJT1）の2点（Hino et al. 2014 MGR参照）では、地震（本震）発生から数時間後に約0.1℃の温度上昇が見られ、その異常は2週間以上継続していた。考察の結果、その異常は本震時の大すべり域の深海（水深3-6 km）の海底下から温かな流体が湧出し、それが海底近傍の海水中で拡散したことよると述べた。

この温湧水が海水に与えた熱量を概算したところ、 4×10^{16} Jであった。観測された水温上昇の時間スケールも考慮しその起源を考察した結果、大すべり域の上盤内のいくつかの主要な断層（分岐正断層、および、より海溝軸近傍の逆断層群）の、海底下数kmに及ぶ破碎帯に閉じ込められていた流体が、本震発生から数時間の時間内で、ほぼ全て放出されたと推察される。このときの海底下から海底までの流体の移流速度は、数十cm/sに達していたと見積もられる。

GJT3とTJT1で見られた水温異常の約2週間の推移（上昇から減衰）は大局的には似ていたが、GJT3での異常がなだらかな減衰を見せた一方、TJT1での異常は、何回かの間欠的な上昇と下降を見せながら減衰していた。TJT1での間欠的な温度上昇は、周辺海域の海洋潮汐荷重の低下と同期していたため、本震発生後の数時間で海底近傍まで上昇してきたより深部の流体の一部が、潮汐荷重の低下に伴い間欠的に湧出したことが示唆される。

講演では、本震時からその後にかけての、海底下の流体・熱の移流・拡散の過程について、詳しく紹介する。

引用文献

Inazu, Ito, Hino, Tanikawa (2023) Abrupt water temperature increases near seafloor during the 2011 Tohoku earthquake. *Prog Earth Planet Sci*, 10, 24. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00556-0>

Hino, Inazu, Ohta, Ito, Suzuki, Iinuma, Osada, Kido, Fujimoto, Kaneda (2014) Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter. *Mar Geophys Res*, 35, 181–190. <https://doi.org/10.1007/s11001-013-9208-2>

The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging

*Ehsan Jamali Hondori¹, Jin-Oh Park²

1. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Previous comparative seafloor observations by the manned submersible Shinkai 6500 within the coseismic slip area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (M 9.0) showed several seafloor deformations, open fissures, and collapsed biological colonies associated with the earthquake. Differential bathymetry studies also showed that seafloor experienced a horizontal displacement of around 69 m near the Japan Trench, where the Pacific plate subducts beneath the Okhotsk plate. Despite these clear observations of the seafloor deformations, and many other researches using various types of geoscientific data, there are yet no detailed structural comparisons on sub-seafloor depth domain images of seismic reflection data before and after the earthquake. In this research, we did a time-lapse analysis between two seismic survey lines acquired on the same trajectory, but before and after the Tohoku-Oki earthquake, by applying Reverse Time Migration (RTM) on the multichannel seismic reflection data. For the baseline dataset we used 2D seismic line MY101, which had been acquired in 1999 using a streamer cable of 132 live channels at 25 m intervals with a maximum offset of 3400 m and shot intervals of 50 m. The monitor dataset is the 2D seismic line D13, which has been acquired in May 2011, just two months after the earthquake, using a similar shot spacing but a more advanced seismic acquisition system including a streamer cable of 444 channels at 12.5 m intervals with a maximum offset of 5700 m. Both surveys have been conducted by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC).

In order to maintain consistent survey geometry for both lines, we selected a subset of the monitor dataset which covers the same offset range as the baseline survey and skipped every other channel to have the same CMP (Common Mid-Point) fold coverage. Consequently, we used a similar pre-processing flow for both surveys to enhance the signal to noise ratio before imaging. For building a reliable RTM velocity model, we applied a layer-stripping migration velocity analysis approach followed by a reflection travel-time tomography using the full-offset monitor dataset, which provided us with a reasonable accuracy for constraining the velocity of the deeper reflections. We then used the velocity model and applied RTM with a maximum frequency of 20 Hz for both baseline and (offset-limited) monitor datasets.

The resulting seismic depth images show several distinct differences, which could be summarized as follows. (1) The plate boundary fault (i.e., decollement) reflection near the trench is continuously visible in the baseline but seems to be weak and partially broken in the monitor survey. Especially, the decollement reflectivity above a graben near the trench seems to be dimmed out in the monitor dataset, which implies that the seismic impedance contrast at this boundary has dramatically changed after the earthquake. (2) A number of thrust faults with strong reflectivity appear in the monitor line, which are not clearly visible in the baseline survey. Previously we have calculated pore-fluid pressures along the decollement and backstop interface, and observed that the backstop interface and several thrust faults in the accretionary wedge contribute to the fluid drainage from the underthrust sediments to the seafloor. The sharp reflections from the thrust faults observed in the monitor data may be caused by the impedance contrast of the fluid drainage paths along those faults. (3) The sedimentary units in the forearc of monitor line are partially deformed with different dips compared to the baseline survey. These structural deformations have not been reported before and we believe the complex rupture propagation pattern and coseismic slip of the Tohoku-Oki earthquake caused those unique features.

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

📅 Tue. Oct 31, 2023 10:00 AM - 10:45 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 1:00 AM - 1:45 AM UTC | 🏠 Room C F202

[S03] AM-1

chairperson: Tomokazu Kobayashi

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S03-01] Detailed fault ruptures for the 2023 Turkey-Syria earthquake revealed by SAR-based crustal deformation analysis

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Hiroshi Munekane¹, Masaki Kuwahara¹, Haruna Furui¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S03-02] Numerical simulation of marine terrace at Kikai-jima: clarifying uplift history based on the interaction of EQ timing and geomorphic change

*Takeru Kamiya¹, Takeo Ito² (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S03-03] Interseismic deformation analysis due to megathrust locking using GNSS Data: A case study of southwestern Pakistan

*Shaukat Parvaiz^{1,2,3}, Yo Fukushima¹ (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University Japan, 2. Department of Earth Sciences, Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan., 3. Department of Geological Engineering, Balochistan University of I.T, Engineering and Management Sciences (BUITEMS), Quetta, Pakistan.)

Detailed fault ruptures for the 2023 Turkey-Syria earthquake revealed by SAR-based crustal deformation analysis

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Hiroshi Munekane¹, Masaki Kuwahara¹, Haruna Furui¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

1. はじめに

2023年2月6日01時17分 (UTC), トルコでMw7.7の地震が発生した。その約9時間後には、本震の北で、Mw7.6の地震が発生した。本発表では、ALOS-2衛星の緊急観測データによるSAR干渉解析で得られた両地震の地殻変動の詳細とそれらから推定した断層モデルについて報告する。また、得られた断層モデルを基に、今回の地震で放出されたエネルギーと前回の大地震以降蓄積されたエネルギーの収支を比較し、各断層セグメントの地震発生サイクルに関する議論を試みる。

2. データと解析

本研究では、Lバンド合成開口レーダー衛星であるALOS-2のデータを用いた。本解析では、軌道番号path77 (南行軌道・右観測) 及びpath184 (北向軌道・右観測) のScanSARモード観測によるデータの干渉処理により、東西約350kmにわたる広域の地殻変動を調べた。地殻変動の計測には、標準的なSAR干渉処理に加えて、南北方向の変動を検出するために、MAI法も適用した。最終的には、これら解析により得られた変動を用いて、3方向成分 (東西, 南北, 上下) の変動を算出した。さらに、得られた変動データを用いて、断層面上の滑り分布も推定した。後述するように、得られた変動場からは、断層破壊に相当するとみられる変位の不連続や急変帯が検出された。これらの情報を基にして、走向方向に4km、深さ方向に2kmのサイズの小断層で構成される断層面を設定し、最小二乗法により滑り方向及び滑り量を推定した。各断層の滑りは空間上で滑らかに分布すると仮定して、Laplacian Operatorによるスムージング処理の拘束をかけた。滑らかさを制御する超パラメータはABICにより決定した。

3. 結果

東アナトリア断層の西部は、南側及び北側に断層帯が分岐している。解析の結果、Mw7.7及びMw7.6の地震に伴う地殻変動はそれぞれ、南側及び北側の分岐断層帯に沿って分布していることが分かった。南側の分岐断層沿いには、断層運動に相当するとみられる変位の不連続が約350kmの長さにわたり確認できる。不連続は、震源付近から東では走向約N60°Eの方向に伸びる一方、西側ではTürkolu付近でその走向を南東方向に変えてAntakya付近で終了している。この分岐断層帯は幾つかの断層セグメントで構成されていることが知られているが、変位不連続の位置から、Erkenek, Pazarck, Amanosセグメントが破壊されたと推察される。これらセグメントの全てで水平変位が卓越しており、左横ずれ運動と整合的である。一方、Mw7.6の地震を引き起こしたと推定される北側の分岐断層帯では東西約150kmにわたり変位の不連続が確認でき、それらも水平成分が卓越し、左横ずれ運動と整合的である。この変位不連続は、主にÇardakセグメントに沿ってほぼ一直線上に見られるが、東端及び西端でその走向を変えている。Çardakセグメントの東延長部にはSürgüセグメントがErkenekセグメントまで伸びているが、変位不連続はSürgüセグメント上には進まず北東方向に向きを変えほぼ一直線に伸びる。今回の地震でSürgüセグメント上での破壊の進展を示唆する地殻変動は特段認められない。西端では、走向が南東に変わるがその延長上にあるSavrunセグメントにまでは明瞭な不連続は認められない。滑り分布の結果では、全ての断層面上でほぼ純粋な左横ずれの断層運動が推定された。断層面上の滑りは、両地震の断層とも概ね10km以浅に集中している。東アナトリア断層本体では10m前後の滑り量が推定されている一方、Çardak断層では10mを超える滑りが推定されている。得られた断層モデルを基に、今回の地震で放出されたエネルギーと前回の大地震以降蓄積されたエネルギーの収支を比較したところ、PazarckとErkenekセグメントでは、解放されたエネルギーと蓄積されたエネルギーの収支が一致せず、2023年の地震に相当するすべり量を蓄積するためには、前回の地震と今回の地震の期間より長い年数が必要であることが分かった。このことは2023年の地震が古典的な固有地震モデルを支持しないことを示唆している。過去の地震

におけるすべり残りが断層上のカップリングとして歴史的に蓄積され、より長い間隔をかけて巨大地震として放出されるとするスーパーサイクルモデルの考えが本内陸地震に適用できるのかもしれない。

謝辞： これらのデータは、地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ（地震WG）を通じて、（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました。ここで使用しただいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。本研究はJSPS科研費22K21372の助成を一部受けたものです。

Numerical simulation of marine terrace at Kikai-jima: clarifying uplift history based on the interaction of EQ timing and geomorphic change

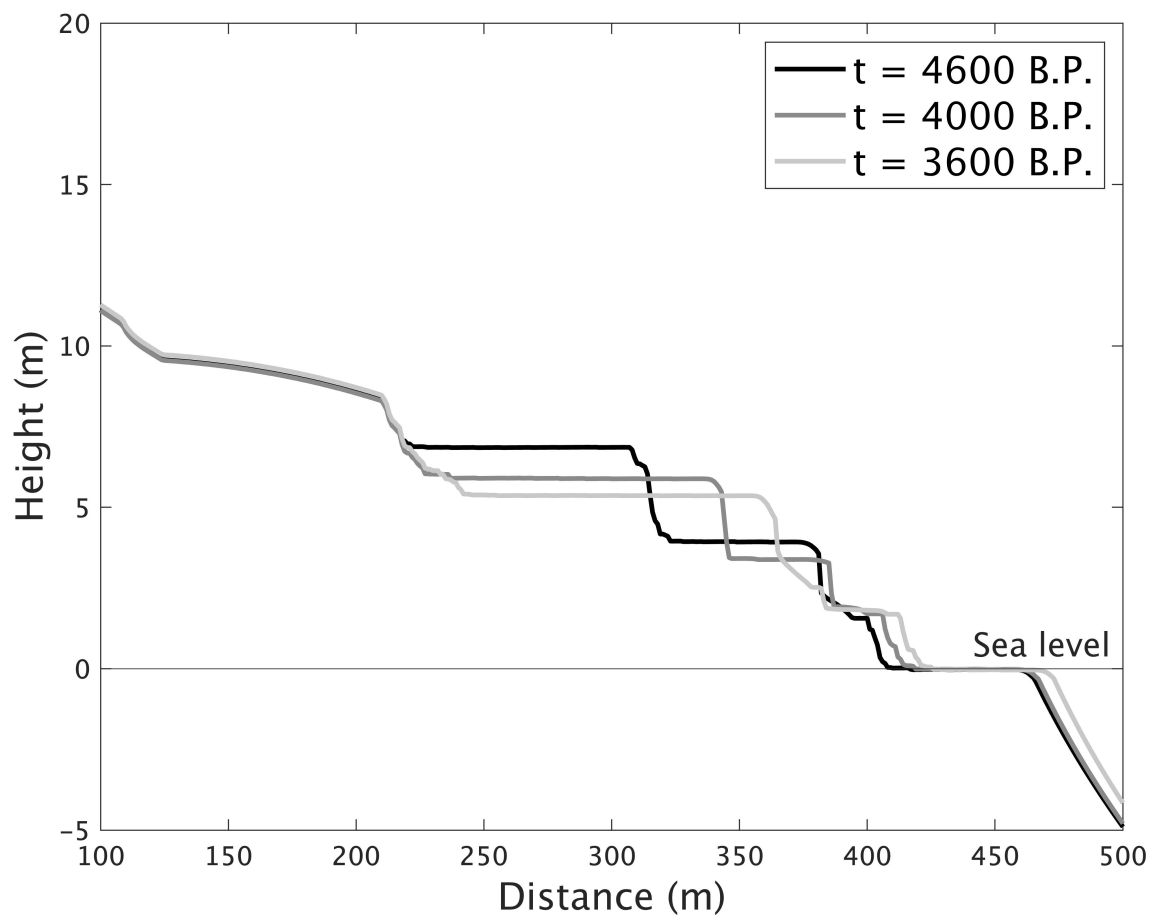
*Takeru Kamiya¹, Takeo Ito²

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

南西諸島地域では、東側から沈み込んでいるフィリピン海プレートの影響により巨大地震の発生が危惧されているが、明瞭な地震の痕跡が少ないために地震の発生ポテンシャルの評価は困難とされている。その中でも喜界島の完新世海岸段丘は地震の痕跡として指摘され、この段丘上のサンゴ化石の放射年代を用いて海水準変動や各段丘面の形成期間について現在に至るまで議論が行われている。喜界島は海溝の近くに位置することや奄美海台が沈み込んでいる影響で、鉛直方向の変動の時間変化は複雑であり、さらに海岸付近の地形の侵食や堆積、サンゴの生育といった海岸段丘の形成プロセスとが共に密に関係しているため、未だに喜界島の地殻変動史は明らかになっていない。本研究では地震学・地質学を踏まえ、喜界島の4段の海岸段丘を数値シミュレーションによって再現することを目的とし、その結果から喜界島の地殻変動史を明らかにすることで、南西諸島における地震活動の推定やそれを元にした防災計画の策定に寄与すると考えられる。

本研究では、喜界島の海岸段丘が奄美海台による沈み込みと海溝型地震から構成される隆起モデルと沿岸付近の侵食等の相互作用であるとして地形の時間発展をモデル化した。シミュレーションには、地形の侵食速度・堆積速度・サンゴの成長速度をそれぞれStorms et al. (2002)、Noda et al. (2018)、Shikakura (2014)、地殻の隆起速度については伊藤・他 (2015)の手法を採用した。海水準変動速度は6~8 kaの間に11 m上昇して現水準に達し、それ以降は変動がないものと仮定した。初期地形として、Webster et al. (1998)のボーリング結果と、8000年以前は海水準がかなり低い位置にあり、波や生物等の影響を受けないと仮定し、一様に3°傾いた地形を採用した。各時間ステップでの各変動速度を場所ごとに計算して積算することで地形の時空間発展を計算し、8000年間の地形変化量と現在の地形とを比較することでモデルの検証を実施した。

本研究では、多くの先行研究で推定された地震発生時期データに基づき、4回の地震発生時期を可能な範囲において変更し、有限要素法を用いて得られた粘弾性応答を考慮した隆起モデルを採用し、それに基づき評価した。沿岸プロセスモデルにおいても、最大侵食速度、波浪の陸側到達限界、サンゴの最大成長速度の3つのパラメータを変更し、算出した隆起モデルと組み合わせてグリッドサーチ的な数値解析法により最適な3つのパラメータの推定を実施した。2023年日本地球惑星科学連合大会での発表時点では、4段の海岸段丘の再現には至らなかったが、形成されない原因を地震発生時期にあるとし、2回目の地震の発生年を、1回目と3回目の地震の発生時期の間、つまり3600~5300年前で変更することによって4段の海岸段丘の再現が可能になった(図)。また、1回目の地震の発生時期によっては1面が残存しない事象が生じたが、同様に6050~6250年前の間で数値シミュレーションを行うことによって1面が残存する閾値についても特定することができた。これらの結果から、喜界島における海岸段丘面の形成に必要な地震のマグニチュードや地震発生時期の推定が可能であることが示された。さらに、マンツルの粘性率を $1.0 \times 10^{20} \sim 2.0 \times 10^{19}$ Pa・sの間で変更させつつ、沿岸プロセスの3パラメータを変更して網羅的に解析を行った。この解析により、より現実的なパラメータの推定が可能となる見通しが得られた。今後の研究では、これらの考察を基に粘性率や侵食速度の推定などを行い、関連する条件について詳細な考察を進める予定である。



Interseismic deformation analysis due to megathrust locking using GNSS Data: A case study of southwestern Pakistan

*Shaukat Parvaiz^{1,2,3}, Yo Fukushima¹

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University Japan, 2. Department of Earth Sciences, Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan., 3. Department of Geological Engineering, Balochistan University of I.T, Engineering and Management Sciences (BUIEMS), Quetta, Pakistan.

Pakistan lies on the region where three plates collide with each other along with a triple junction near Karachi city. In south, the Arabian plate subducts beneath the Eurasian plate off the southern coast of Iran and Pakistan. At the western end of the subduction megathrust, it is connected to the Zagros thrust system of Iran through Minab fault, whereas it is connected to the southern Chaman fault system along with Murray Ridge transtensional zone at its eastern end. The Makran Subduction Zone (MSZ) has produced the world's largest arc-trench gap (500-600 km) and wedge system with splay faults (both on and offshore), having ~7 km thick sedimentary strata. Convergence across the MSZ is complex and poorly understood, yet potentially the largest source of earthquakes and tsunami hazards in the region. The increasing convergence rates between Arabia and Eurasia from west to east across the subduction zone divides the MSZ into eastern and western parts with high and low seismicity, respectively. Historical seismicity shows that the eastern part of MSZ has experienced at least six large earthquakes ($M > 7$) rupturing the plate boundary in the last 500 years, including the tsunamigenic 1945 M8.1 event (the second worst tsunami in the Indian Ocean after 2004 Sumatra tsunami). Following the 1945 earthquake, tsunami runups of up to 15 m were reported at Pasni, 1.4 m at Karachi, and 2 m at Mumbai (Byrne et al., 1992; Heidarzadeh et al., 2008). This zone has the potential to generate 8.7–9.2 (Mw) earthquakes (Smith et al., 2013; Frohling and Szeliga, 2016). We use Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements of crustal motion across the Makran megathrust to investigate the fault coupling distribution and fault geometry. Specifically, we estimate the slip deficit rates and width (locking depths) for three sections along the megathrust. Compared with previous studies, we attempt to test a new plate boundary geometry and a different modeling strategy. We use published GNSS data from more than 19 stations in Iran, Pakistan, and Oman, as well as hypocentral positions and seismic data, to build the geometry of the megathrust and a preliminary fault-coupling model for the MSZ. The precise GNSS velocity data show that the entire MSZ is broadly coupled from near the trench to a downdip depth range of 25-35km, although with small information in strike parallel and strike normal directions due to the sparse GNSS network. By modeling the GNSS data, we confirmed the interseismic deformation due to megathrust coupling in the forearc region and its seismogenic potential. We are also working on high resolution Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) data sets (SAR sensors of Envisat (2003-2010) and Sentinel-1 (2015-2023) satellites) to update results, which is expected to complement the sparse GNSS stations and produce more detailed locking distribution.

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

📅 Tue. Oct 31, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏠 Room C F202

[S03] AM-2

chairperson:Fumiaki Tomita(Tohoku University), Hideto Otsuka(Tohoku University)

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

[S03-04] Temporal Changes of Seismic Attenuation after the Tohoku-oki Earthquake

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

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

[S03-05] GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations and their results along the Japan-Kuril trench

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Ryota Hino³, Mako Ohzono⁴, Hiroaki Takahashi⁴, Raymondo Plata-Martínez², Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁵, Kyosuke Nakamura² (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S03-06] Estimate the interplate coupling around the Southern Kuril Trench

*Shunsuke Imai¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

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

[S03-07] Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake

*Kyosuke Hirata¹, Ryota Hino¹, Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Norihisa Usui² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S03-08] SSE detectability of OBP data using principal component analysis: Application to data from Hikurangi and Alaska

*Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Ryota Hino¹ (1. Graduate school of science, Tohoku university)

Temporal Changes of Seismic Attenuation after the Tohoku-oki Earthquake

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

東北地方太平洋沖地震では、東北地方の太平洋沿岸で最大で5 m、震源近くの海底では50 m程度の東向き水平移動が観測され、その後陸上は年間数cm～数十cmずつ東へ移動している。しかし、海底の水平変位は陸上とは逆の西向きを示しており、両者を説明するためにはアフタースリップと粘弾性緩和の両方が必要である。一方、アフタースリップと粘弾性緩和の地表変位に対する寄与はトレードオフの関係にある。従って、地表変位観測のみでは粘弾性緩和とアフタースリップの大きさを同定できないという問題を抱えている。本研究はそのようなトレードオフに対し、地震波減衰の時間変化の解析から観測的制約を与えることを目的とした。

主に宮城県沖で2011-2019年に発生したM3.0-6.5の東北沖地震の余震約2600個を解析対象とした。その約2600個の内、古いものから1200個を選び1つ目のデータセットとした。まず、データセットの中で震源が5 km以内にある地震ペアを選択し、同一観測点におけるP波初動のスペクトル比を計算した。次にそのスペクトル比を理論的な震源スペクトルで補正した後、2つの地震の観測走時の平均で割り算して震源距離の影響を取り除いた。最後に、スペクトル比の分母の地震が分子よりも必ず古くなるような全ての地震ペアをスタックすることで観測スペクトル比を計算し、それに理論スペクトル比をフィッティングした。もし2つの地震間で減衰が変化していなければスペクトル比の傾きはゼロになるのに対し、時間変化があると正（減衰が徐々に小さくなる場合）または負（減衰が徐々に大きくなる場合）の傾きを持つ。本研究ではスペクトル比の傾きから減衰の時間変化を推定した。以上の操作を、データセットの1200個の地震を古い順に10個ずつ入れ替えながら計140回行った。

得られた結果は、本震直後は減衰の減少量が大きく、時間の経過に伴い変化量が小さくなることを示している。この減衰の変化が東北沖地震後の粘弾性緩和を反映していると仮定すると、本震直後に減衰が急上昇した後、指数関数的に減少したことになる。この現象の緩和時間を求めるためにフィッティングをしたところ、単一の緩和時間では説明できず、少なくとも2つの緩和時間（約3ヶ月、約3年）が必要であることが判明した。この結果は2つ、もしくはそれ以上の時定数を持つ緩和現象が進行していたことを示唆している。

GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations and their results along the Japan-Kuril trench

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Ryota Hino³, Mako Ohzono⁴, Hiroaki Takahashi⁴, Raymondo Plata-Martínez², Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁵, Kyosuke Nakamura²

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Tokyo University of Marine Science and Technology

東北大学では、2012年に20点のGNSS-A観測点を東北沖に設置し、観測を実施しており、2016年9月までは各観測点で年に1〜2回程度の船舶を海上プラットフォーム（海上局）として活用したキャンペーン観測を実施しており、その観測成果はHonsho et al. (2019)にまとめられている。それ以降は、船舶の運用コストの問題で高頻度の観測は実施できない状態となっていた。しかし、2019年より波の力により無人で航行可能なウェーブグライダーを海上局として運用する試みを開始し（Iinuma et al., 2021）、2020年以降は多観測点を巡る運用を年に2回実施している。ただし、ウェーブグライダーは海流の強い海域での運用が困難であるため、基本的に黒潮続流の影響の無い宮城県沖以北の観測点でしか運用できていない。福島沖以南の観測点では、従来通りの船舶を海上局とした観測を、JAMSTEC・東京海洋大学と協力して行う体制を整えてきている。また、千島海溝沿い根室沖では、2019年に3点のGNSS-A観測点を設置し、船舶による観測を年に1回程度実施してきている。本発表では、2023年7月までに実施したウェーブグライダーおよび船舶を用いたGNSS-A観測の成果について紹介する。

上記の観測データを東北大学で開発したGNSS-A解析ソフト「SeaGap」（Tomita & Kido, 2022; Tomita & Kido, under review）を用いて解析を行った。解析では、海中音速の単層水平勾配構造を仮定した。勾配深度・浅部勾配について事前分布（勾配深度：平均 0.65 km・標準偏差 0.15 kmの正規分布、浅部勾配：平均 0 sec/km・標準偏差 5.0×10^{-5} sec/kmの正規分布）を課すことで、定点観測データのみでも安定した測位解を得られるようにした。東北沖の観測結果については、2011年東北沖地震の主破壊域に位置する宮城県沖の観測点は、粘弾性緩和によると考えられる10 cm/yr程度の継続的な西向きの変動が得られた。また、宮城県沖では海溝近傍まで沈降傾向が見られている。ただし、Wave Gliderで取得した近年のデータについては、GNSS測位の系統誤差、あるいは音速の初期構造による系統誤差と考えられる推定誤差が生じており、その評価が必要であると考えられる。岩手県沖・青森県沖の観測点は、宮城県沖に比べ変動量が小さいが、近年では西向きの傾向が強くなっている様子が見られ、余効すべりの減衰等によりプレート間固着や粘弾性緩和の影響が現れていると考えられる。福島・茨城県沖の観測点は、2016年9月の観測までで見られていた余効すべりの影響と考えられる東向きの挙動が概ね収束している様子が見られた。根室沖の観測成果については、プレート間固着と考えられる7 cm/yr程度の西北西方向の変動が見られた。

本発表では、上記の観測成果について変動要因の解釈も踏まえて報告を行う。また、上下変動の系統誤差についてもその評価・議論を行う。

参考文献

Honsho et al. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135

Iinuma et al. (2021), Frontiers in Earth Science, 9:600946, doi:10.3389/feart.2021.600946

Tomita & Kido (2022), Earth, Planets and Space, 74, 176, doi:10.1186/s40623-022-01740-0

Estimate the interplate coupling around the Southern Kuril Trench

*Shunsuke Imai¹, Hiroaki Takahashi²

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

千島海溝南部は太平洋プレートがオホーツクプレートの下に沈み込む沈み込み帯で、1952年十勝沖地震や1969年北海道東方沖地震などのM8クラスのプレート境界地震が発生している。地震本部の長期評価による30年以内発生確率は、M8.8以上の超巨大地震で7-40%、根室沖のM8クラスでは80%程度と高い状態となっている。沈み込み帯においては、プレート収束速度とすべり遅れの比をとることでプレート間の固着率を推定する考え方 (Savage, 1983) が知られている。しかし、千島海溝南部における地殻変動データは地上観測が主であり、海溝付近のプレート境界から比較的浅い部分に関しては、地上観測点から距離があるため、解像度の低さや値の不確実性の高さが課題となっている。

よって、本研究では応力拘束を伴うインバージョン手法 (Lindsey et al. (2021)) を用い、千島海溝付近における、プレート境界浅部まで高い解像度を維持したプレート間固着度の推定に取り組んだ。これは、地震間期を通してプレート間に蓄積する応力は非負であるという拘束を指し、設定期間に短期的なSSE等の応力を解放するイベントを含んでいても、時系列をある程度長くとれば、応力の解放が蓄積を上回ることはないという仮定に基づいている。当該研究においては、海岸から離れたプレート境界浅部におけるプレート間固着度の不確実性が大幅に低減された。今井・他 (2022, 地震学会) では、同手法によって、2003年十勝沖地震の前後で十勝沖付近の海溝付近において固着度の低下がみられたことなど、海溝付近での固着の度合について先行研究と比較した。本発表では、計算範囲をより東側に拡張することによって、得られる結果の違いや海底局のデータ有無によるデータ不確実性の違いなどについて報告する。

今井・他 (2022, 地震学会) において示した結果は、Lindsey et al. (2020) が公開しているMatlabプログラムに内包されたプレート境界モデルをそのまま流用したものであったが、東端が根室沖をカバーしていなかったため、Lindsey (2020) が公開したslabmeshを用いて、新たにslab2モデルより千島海溝南部を広くカバーした三角メッシュの構築を試みた。インバージョン計算においては、南から境界面の一番浅い点を海溝軸からの深さが0kmと定義し、モデル中の最深部はプレート境界の地表からの深さ100kmとした。0kmと100kmの定義が異なることには注意が必要である。緯度の違いによる平面距離の違いや、実際のプレート境界面形状は頂点の決定の際には考慮していないため、メッシュの面積は均一ではない。

入力する変位速度データとして、国土地理院電子基準点日々座標値のF5解を時系列の東西、南北、上下変位に変換した上で期間を①2003年十勝沖地震前(1996~2003)、②2011年東北沖地震前(2006~2011)、③2011年東北沖地震後(2014~2019)、④直近4年間 (2019~2023) の4つの期間に分けた。期間設定については、各地震の余効変動の影響を考慮して、地震後3年の時間を空けている。年周・半年周運動の影響を除外した直線近似の傾きを変位速度(mm/yr)とした。F5解はITRF14に準拠しており、北米プレート準拠の基準系に変換するため、plate motion calculator(UNAVCO web site)を用いて各観測点の北米プレートによる理論変位を計算して速度ベクトルを平行移動させて入力に用いる変位速度を導出した。

推定された固着分布は、プレート境界モデルの変更前と比較し、根室沖で顕著な違いがみられた。2003年十勝沖地震の前後では、根室沖深部の固着度は低い状態を維持した一方、浅部では高い状態を維持した。また、2011年東北沖地震以降では根室沖の固着度の高い領域は拡大している結果となった。プレート境界モデルの変更前後でモデルの適合性について調べるため、予測された地表の変位速度と実測の速度の残差を比較したところ、変更後のモデルは根室地方で有意に小さい値を取った。また、平滑性制約のパラメータを変更し、ABICが最小となるパラメータから10%以内の数値で計算を行った際、メッシュ1区画ごとに固着度の取りうる最大・最小の差を不確実性として算出したところ、変更後のモデルでは、GEONETの観測点東端 (根室) から離れた東経147度以東で顕著に上昇し、以西では低い値を取った。これらの結果から、変更後のモデルは観測結果をよりよく説明し、根室沖までの計算結果は、より南部の十勝沖等と同様に評価できることが示された。

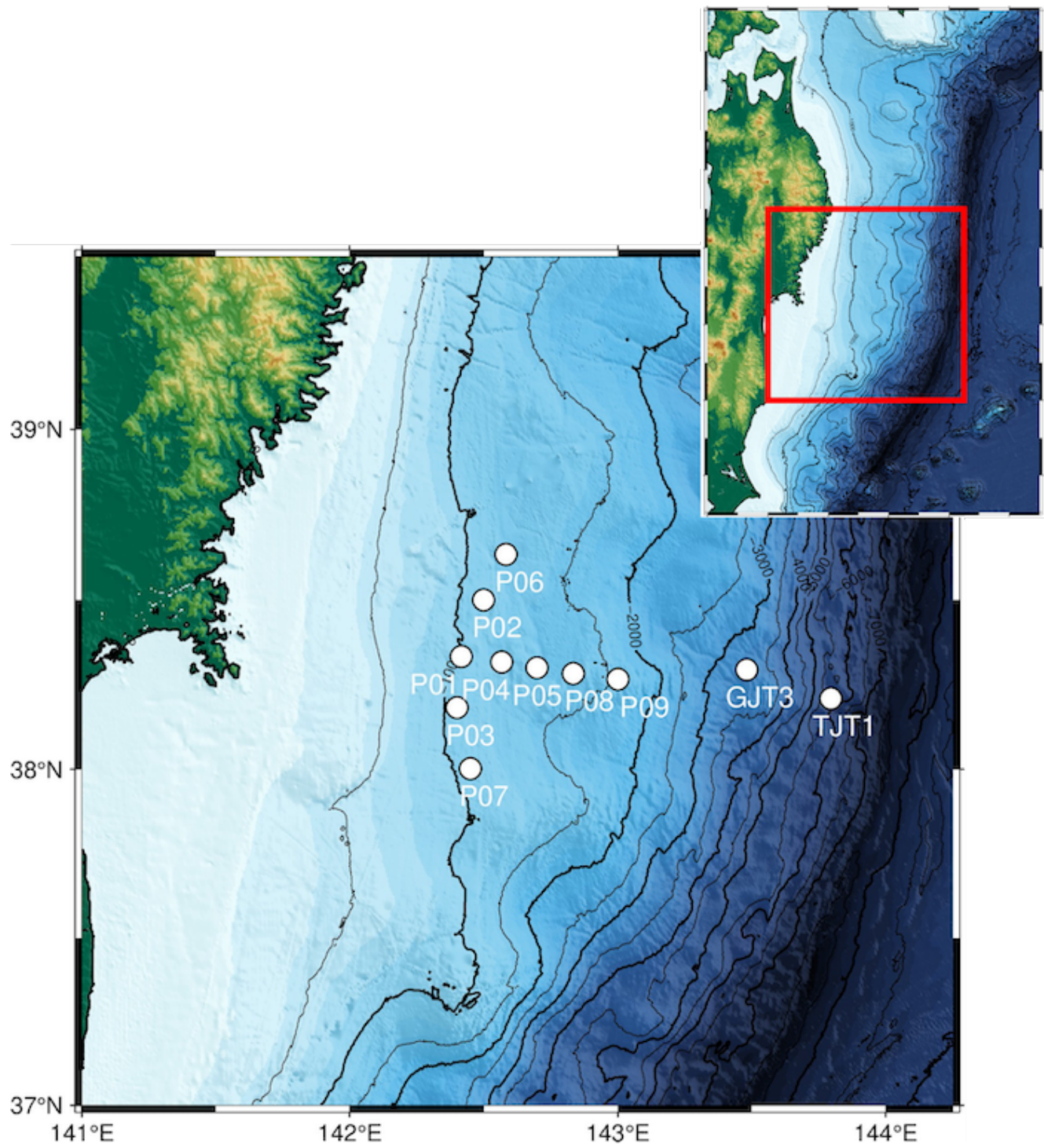
期間設定によって2003年および2011年の各地震の余効変動の影響を回避しようと試みたが、考慮が十分ではない可能性がある。今後は余効変動の影響を除去し、時間分布の推定精度向上を図る予定である。

Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake

*Kyosuke Hirata¹, Ryota Hino¹, Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Norihisa Usui²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute

2011年東北沖地震以前の海底水圧計（OBP）データの解析では、地震発生前に様々なスロースリップ現象が確認されている。3月9日の最大前震後には、明らかな余効すべりがOhta et al. (2012)によって確認されている。Ito et al. (2016) は3月9日の前震の破壊域のアップディップ側で2月中旬からSSEが発生していることを報告している。一方、Hino et al. (2014) は本震の震源域付近でも明瞭な本震発生直前の非地震性すべりの加速に対応する地殻上下変動は確認できなかったと結論づけている。OBPデータから地殻変動シグナルを抽出するには非潮汐海洋変動成分を取り除くことが重要である。海洋変動ノイズを低減するために、海洋モデルを用いて海底圧力変動を推定する手法がとられており（たとえば、Hino et al., 2014; He et al., 2023）、こうした海洋モデルによる実際の海底水圧変動の再現性能の評価は、海底測地学の分野においても重要な課題である。Otsuka et al. (2023) は気象研究所が開発したMRI.COM-JPNモデル (Sakamoto et al., 2019) の性能評価を、DONETのOBPを用いて南海トラフ沿いの海域を対象に実施した。MRIモデルは、これまでのOBPデータ解析でしばしば用いられてきた稲津モデル (Inazu et al., 2012) が海水層を単層として扱っているのに対して、海水を多層構造として扱っていて水平方向の解像度も2倍以上である。彼らは、10年以上にわたるDONETのOBP記録との比較から、MRIモデルは広い周波数帯域で観測データに類似した海底水圧変動を予測することができることを示した。この新しい海洋モデルを用いた非潮汐海洋変動ノイズの除去を東北沖地震前のOBP観測データに対して適用することで、地震発生に先行した海底上下変動に関して、従来の研究よりも詳細な特徴抽出ができることが期待される。本研究では、東北沖地震の震源域におけるOBPデータのうち、先行研究で顕著な地殻変動現象が観測されるようになった2011年2月以前の記録に注目して、MRIモデルと稲津モデルの2種類のモデルによる非潮汐成分除去性能を比較した。観測データからモデル出力を差し引いて得られる残差時系列のRMS振幅の低減率を求めたところ、稲津モデルが全観測点の平均で26%であったのに対して、MRIモデルでは17%であった。Otsuka et al. (2023)がDONETのデータで同様の評価をした結果では、RMS振幅の低減率は対象とする水圧変動の周波数帯域に依存しており、100日程度より短い周期では稲津モデルを使った残差時系列の方がRMS振幅が小さくなることが示されており、今回の評価結果は日本海溝においても同様の傾向がみられることを示す。一方で、長周期帯域ではMRIモデルの方の再現性が高くなる向上があり、特に大きな長周期変動が観測されている最も海溝軸に近い観測点TJT1では、稲津モデルよりもMRIモデルの出力を差し引くことでこうした長周期変動をより低減することができることが確認された。海溝軸に近いOBPの方が長周期の非潮汐海洋変動成分が卓越していることを、MRIモデルがよく再現できていることを示している。測地学への応用では、長周期帯での再現性が重要である上に、東北沖地震に先行した一連の活動では海溝軸近傍での非地震性すべりが主要な役割を果たしたと考えられることから、新しいMRIモデルを用いた再解析により、東北沖地震に先行した海底地殻変動の特徴について新たな知見を提供できることが期待できる。



SSE detectability of OBP data using principal component analysis: Application to data from Hikurangi and Alaska

*Hideto Otsuka¹, Yusaku Ohta¹, Ryota Hino¹

1. Graduate school of science, Tohoku university

海底水圧計 (Ocean Bottom Pressure gauge; 以下, OBP) は海底の地殻変動場を連続的に観測できるセンサである。その一方, 特にスロースリップイベント (Slow Slip Event; SSE) 等の非定常地殻変動の抽出には, その時定数の近さから非潮汐海洋変動の適切な評価, 除去が重要となる。Otsuka et al. (*EPS*, 2023) は, DONET OBPデータに主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA) を適用した。その結果, 水深方向に反相関する海洋変動成分が第2主成分 (PC2) に現れ, OBPデータに含まれる海洋変動成分の水深依存性を反映することを示した。また, SSEに起因する地殻変動成分を模した信号をOBP時系列に重畳させ, その時系列にPCAを適用することで, 地殻変動成分を含む主成分がその振幅に応じて変化することを見出した。さらに, 基準の主成分からの変化を規格化内積値 (Normalized Inner Product; NIP) を用いて評価することで, 定常的な海洋変動と異なる現象を検出する手法を提案した。また, 海洋変動の空間的特徴が時間的に安定していれば, 時系列を任意の時間幅毎に切り出し, それを用いることで実データからNIPによる非定常イベントが検出可能なことを示した。一方で, 実際のDONET OBPデータからSSEを検出した例は示すことができていない。また, 海洋変動の空間的特徴は海域毎に異なる (e.g., Dobashi and Inazu, 2021) ことから, NIPを用いた非定常イベントの検出手法が適用可能かまでは明らかになっていない。そこで本研究では, 同手法によるデータから実際の非定常イベントの検出可能性を評価し, 同手法の他海域での性能評価をNIP変化を用いることで実施した。

本研究では, 事例研究としてOBPに基づくSSE検出の報告例があるニュージーランド ヒ克蘭ギ沖 (HOBITSS) (e.g., Wallace et al., 2016; Muramoto et al., 2019) およびアラスカ半島沖 (AACSE) (e.g., He et al., 2023) のOBPデータを用い, その海洋変動の特徴とNIP手法の性能評価を実施した。本研究で用いたHOBITSSは2014年5月~2015年6月の14観測点, AACSEは2018年5月~2019年8月の21観測点をそれぞれ用いた。HOBITSS, AACSE観測網データはIRISからダウンロードした。OBPデータはオリジナルのデータを平均化処理により1時間値にダウンサンプリングしたのち, 含まれる潮汐成分は潮汐除去フィルタ, 機器ドリフト成分は指数関数と線形近似を用いそれぞれ除去した。これら事前処理後のデータに対し, PCAを適用した。HOBITSS, AACSEともに水深200m以浅の陸棚上観測点と2,000m以深の観測点が含まれる。特に陸棚上の浅部観測点に含まれる海洋変動の振幅は相対的に大きい (e.g., Fredrickson et al., 2023) ことから, 浅部観測点の振幅の影響を低減させるために, 荷重PCA (Weighted-PCA; WPCA) を用いた。さらに, 非定常イベント検出においては, 時系列全体のPCの空間分布を, 20または30日の時定数で切り出した時系列でのPCの空間分布と比較することでNIPの変動を調べた。同時定数は, 先行研究で検出されたSSEの時定数 (20~30日) を考慮し設定した。

HOBITSS, AACSEにW-PCAを適用した結果, DONETと同様に共通成分がPC1, 傾斜成分がPC2に見られた。そのため, DONETでみられた海洋変動の水深依存をもつ特徴はこれら異なる海域でも共通であることが明らかとなった。一方で主成分毎の寄与率はAACSEで大きく異なったが, これは観測網の形状や空間分布に基づく可能性がある。海洋変動の空間分布の時間変化および先行研究でSSEが検出された期間でのNIP変動を調べた。その結果, SSE期間で極端なNIPの低下はどちらの観測網でも見られなかった。これは, 観測点形状および地殻変動の空間分布により, PCAで適切に非定常地殻変動を分離できなかった可能性がある。一方, NIPでは非定常イベントを検出できることから, それらには地殻変動以外が含まれる。そこで, NIPの変化が大きかった時点での各PCの空間分布についても比較する必要がある。発表では, SSE期間を中心にNIP変化に基づき, これら観測網での非定常地殻変動, および海洋変動の特徴について詳細に報告する。

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

📅 Tue. Oct 31, 2023 1:30 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏠 Room C F202

[S03] PM-1

chairperson: Yusuke Yokota, Tadashi Ishikawa

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

[S03-09] Representation of underwater sound speed structure in GNSS-A

*Yusuke YOKOTA¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura², Koya Nagae² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-10] Trial of the detection of seafloor movement by the differential bathymetry method

*Tadashi ISHIKAWA¹, Masanao Sumiyoshi¹, Yuto Nakamura¹, Kei Imuta¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] GNSS/A seafloor geodesy using an ultralight and compact towed buoy system.

*Ryoya IKUTA¹, Yasushi Harada², Keizo Sayanagi², Keiichi Tadokoro³, Ryosuke Nakahata¹, Yusuke Yokota¹ (1. Shizuoka University, 2. Tokai University, 3. Nagoya University)

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

[S03-12] Reanalysis of GNSS-A data obtained in the Hateruma basin at the southwestern end of the Ryukyu trench

*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, keiichi Tadokoro², Yasushi Harada³ (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Tokai University)

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

[S03-13] Numerical experiment on template matching and relative strength index based on noise analysis of high-rate GNSS data

*Riko Arai¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University)

Representation of underwater sound speed structure in GNSS-A

*Yusuke YOKOTA¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura², Koya Nagae²

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

GNSS-Aでは海洋場、とくに海中音速場の傾斜状態を正しく推定することが局位置決定精度に重要である。これは、GNSSにおける大気・電離圏遅延の推定と同様であるが、場全体における影響の度合いや高さ方向の位置のばらつき方に大きな違いがある。

GNSS-Aにおいて代表的な解析手法であるGARPOS version 1.0.0 (Watanabe et al., 2020) では、海面と海底にある海上局の位置と海底局の位置に依存してパラメータ推定を行う。海中の傾斜場を海表面と海底面に投影して g_1 と g_2 （以下ベクトル $\mathbf{G}$ とする）として推定している。これは他のSeaGap (Tomita & Kido, 2023) などで推定されるパラメータとも相互に関連づけることができる。

屈折の影響が小さくほぼ無視できると考えると、 $\mathbf{G}$ は、場の傾斜状態を無数に分解し、その影響の合算として与えられる。この時、 $\mathbf{G}$ を g_2 - g_1 平面にプロットすることを考える。プロットされた点が第1, 第3象限 ($\text{sgn}(g_1)=\text{sgn}(g_2)$) の時は1枚の傾斜場レイヤーに近似して考えることができる。第2, 第4象限 ($\text{sgn}(g_1)\neq\text{sgn}(g_2)$) の時はそのように考えることができないため、複雑な場やバイアス的な誤りを想定しなければならない。

次に3次元の場合を考える。この時、 g_1 と g_2 はそれぞれE方向とN方向のような2方向に分割して推定される。ゆえに g_1 と g_2 が直交2方向に対して得られる。この直交する2つの方向、例えばEとN方向に対して(g_{1E}, g_{1N})ベクトルと(g_{2E}, g_{2N})ベクトルのなす角が $\pi/2$ 以下の時、適切な方向を取る(例えば座標をΦ回転させる)と $\mathbf{G}_{E\Phi}$, $\mathbf{G}_{N\Phi}$ ともに1枚の傾斜場レイヤーに近似して考えることのできる値になる。ところが、 $\pi/2$ より大の時、どのような方向を取っても1枚で近似できない方向が生じる。この時、先ほどの g_2 - g_1 平面に同様にプロットするとその分布や座標回転時の軌道から場の状態やバイアス誤差の考察を容易に行うことができる。

この手法を用いると、実際のデータでも各観測機会の $\mathbf{G}$ を比較することで観測時の場の状態やバイアス誤差の有無を検証することができる。

謝辞：本研究は地震研究所共同利用ERI JURP 2022-Y-KOBO25，SECOM 科学技術財団，科研費学術変革領域 (A) “Science of Slow-to-Fast Earthquakes” のJP21H05200の助成を受けました。

Trial of the detection of seafloor movement by the differential bathymetry method

*Tadashi ISHIKAWA¹, Masanao Sumiyoshi¹, Yuto Nakamura¹, Kei Imuta¹

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

地震時の地殻変動を把握することは発生した地震の物理過程の解明に重要な役割を果たす。特にGNSSやInSAR等の人工衛星を用いた宇宙測地技術による地殻変動観測は高密度・高精度な地殻変動の検出を可能とし、震源断層のすべり推定に大きな貢献を果たしている。さらに、こうした宇宙測地技術が直接使用できない海域においても、地殻変動観測を可能とする技術の研究開発が進み、GNSS-A、海底間音響測距、水圧計などの他、海底に掘削した孔内での間隙水圧やひずみ・傾斜観測が実施されている。特に海底版GNSSともいえるGNSS-A観測は、海上保安庁や大学によって日本海溝・南海トラフを中心とした海域で継続的に観測が実施され、地震間の定常/非定常な変動、地震時変動、地震後の余効変動等の把握に着実に成果を残している。一方で、これらの海底観測は技術的な困難さに加え、海底への機器の設置・維持などにコストがかかるため、現状では陸上の観測網と比べ空間的な拡がりや密度が劣っているという欠点がある。

観測設備の有無とは無関係に地殻変動を検出する技術として、地震発生前後の地形データを比較することで地殻変動を検出する差分地形法がある。2011年東北地方太平洋沖地震発生後、海洋研究開発機構は地震発生前に取得していた地形データと同じ場所で地形調査を行い、その差分から地震時の変動を推定した。その結果、日本海溝の海溝軸付近において約50 mの水平変動があったことが捉えられた(Fujiwara et al., 2011)。このときの検出精度は水平変動について約20 mと見積もられており、2-3 cmの精度を持つGNSS-A観測とは3桁の違いがあるが、観測点が無い空白域においても、予め海底地形データを整備しておくことによって大まかな地殻変動を捕捉できる可能性があることで、差分地形法の有用性は高いと考えられる。また、巨大地震に伴う津波の発生原因として、断層すべりによる海底の地殻変動のほかに、地震動による海底地すべりも考えられる。差分地形法はこのような地すべりによる地形変化の検出にも有効な手法となりうる。

我々は、将来の南海トラフ地震に備え、想定震源域の海底における地形データの整備を試行的に開始した。南海トラフ地震の最大想定は全域を破壊するM9クラスであるが、片側のみの所謂半割れの場合はM8クラスとなり、Fujiwara et al., (2011)で見積られている20 mの精度ではその変動を検出することは難しい。しかしながら、Fujiwara et al. (2011)で用いたデータは元々高精度な海底地形の取得を目的としたものではないため、必ずしも本手法に最適な精度を有したデータではなかった。

そこで、はじめから異なる時期の詳細な地形の比較を目的とし、最新の機器による精度の高いデータを取得すれば、より高い精度で地殻変動を捉えることが可能になると期待される。より高い精度の海底地形データを取得するためには、航海安全のために高い精度が求められる水路測量における水深データ処理手法として使用されているCUBE処理を前提としたマルチビーム測深手法を採用することが現時点では最適である。CUBE処理は、データの不確かさを統計的に処理することによって、測深点データから高密度の水深グリッドデータを算出する処理手法であり、そのためには、十分な冗長性が担保された高密度データを取得する必要がある。

我々は最初の試行として、2021年10月に室戸岬沖の南土佐簗周辺において、マルチビーム測深機による海底地形調査を実施した(図1)。さらに2023年3月にも同一の海域で調査を実施し、比較による精度の検証を行っている。本発表では、差分地形による海底の地殻変動検出に向けて試験的に行った海底地形調査の実施手順と、取得した海底地形データについて報告する。

参考文献：

Fujiwara et al. (2011) The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench axis,

Science, 334, 1240.

石川・他 (2023) 差分地形法による海底の地殻変動検出にむけて, 海洋情報部研究報告, 61, 75.

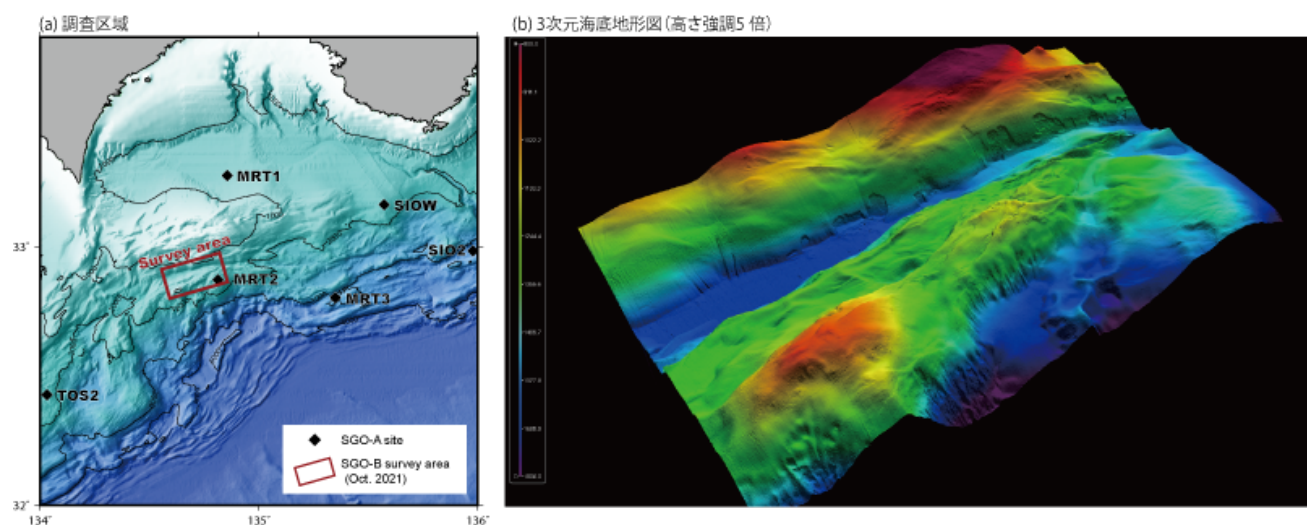


図1 2021年10月に実施した海底地形調査の調査区域(a)と得られた海底地形図(b). 石川・他(2023)より抜粋.

GNSS/A seafloor geodesy using an ultralight and compact towed buoy system.

*Ryoya IKUTA¹, Yasushi Harada², Keizo Sayanagi², Keiichi Tadokoro³, Ryosuke Nakahata¹, Yusuke Yokota¹

1. Shizuoka University, 2. Tokai University, 3. Nagoya University

GNSS-音響結合方式（GNSS-A）の海底地殻変動観測のために開発した超軽量-小型のえい航ブイシステムを駿河湾および宮古島沖における計測に使用したので紹介する。GNSS-Aに導入された、船底トランスデューサを用いたハルマウントシステム(Sato et al., 2013)は、よくコントロールされた航跡を高速(～7 knot)で航行しながら信号を送受信できるため、精度の高い海底局位置の測位を短い時間で実現できる。ただしこのシステムは船底のトランスデューサと高価なジャイロコンパスを備えた専用の観測船が必要である。

そこで我々は、低予算、自前の船を持たずにハルマウントシステムと同等の観測を行えることを目指し、軽量-小型えい航ブイシステムの開発を行っている。GNSS-Aの構成要素はGNSSアンテナ（位置測定）、ジャイロコンパス（姿勢測定）、トランスデューサ（音響測距）である。本システムでは、図1のようにGNSS収録器（Net-R8）、トランスデューサのコントローラ部、姿勢データ収録部（ノートPC）を全て船上に集約し、ブイにはセンサーのみを設置することでブイの軽量化を試みている。2023年5月の連合大会では、重量25 kg全長1.5mのブイを作製し、海域試験において5 knotでえい航しながら十分なS-N比の音響測距が行えたことを紹介した（生田ほか, 2023）。その後このブイを用い、2023年4月と7月に三保半島沖の駿河湾（SNW海底局）、2023年6月に琉球海溝沿いの宮古深海平坦面（OMYK海底局を新設）で実観測を行った。

ブイの取り回しは問題なく行えている。駿河湾SNWでは東海大学の実習船「北斗」で、Aフレームとロープで上げ下ろしを行い、4名の人手が必要であった。宮古島沖OMYKの観測では漁船「第二幸徳丸」で、乾舷が低いためロープを使わず2名のみで上げ下ろしできた。SNWでは合計6時間、OHTMでは17時間を5ktでえい航し続け、耐久性も示された。

実観測を重ねる中で、ジャイロコンパスのトラブルが二件あった。一件目は電源部の浸水である。ジャイロコンパスには電源供給の必要があり、バッテリーとUSB-Hubを弁当箱に入れてブイに取り付けている。弁当箱はポリエチレン袋に入れて厳重に防水し、ジャイロと船に向かう2本のケーブルを外に出している（写真）。宮古島沖OMYKの観測でケーブル部分から弁当箱が浸水した。袋を2重3重にすれば浸水を防げるが、防水を厳重にするほどトラブル対応の際に揺れる船上での出し入れが大変になる。簡単で頑強な浸水対策を試行錯誤している。二つ目のトラブルは信号の途絶である。ジャイロコンパスからはNMEAフォーマットに準じた時刻と姿勢情報がシリアル通信で出力されるため、30m伝送するためにUSB Extenderで変換してEthernetケーブルを通して（図1）。観測の途中でしばしば、通信が途絶してシリアル接続が失われることがあった。ほとんどの場合はPCのUSBポートを無水エタノールで掃除して再接続すると復旧した。原因としてEthernetケーブルを経由した信号の電圧に余裕が無かったことが考えられる。ブイ側のUSB-Hubの電源供給をリセットしないと復旧しない場合もあった。市販のUSB Extenderは千円程度から数万円まであり（我々が使用したのは数千円）、より高性能のものを選定することで回避できた可能性がある。

2023年6月宮古島沖OMYKの観測では、水深約900mの海底に3台のトランスポンダーを設置し、17時間の観測で図2の幾何学形状を3往復半描いた。2023年4月と7月の駿河湾SNWの観測では、水深約800mに3台設置したトランスポンダー上を同様の幾何学形状の片道1回のみを行った。8月と9月では1往復を計画している。本発表では、駿河湾SNWで繰り返しの観測で得られる海底局位置の比較から本観測の局位置推定精度を評価し、また宮古島沖OMYKの初回位置を報告する予定である。

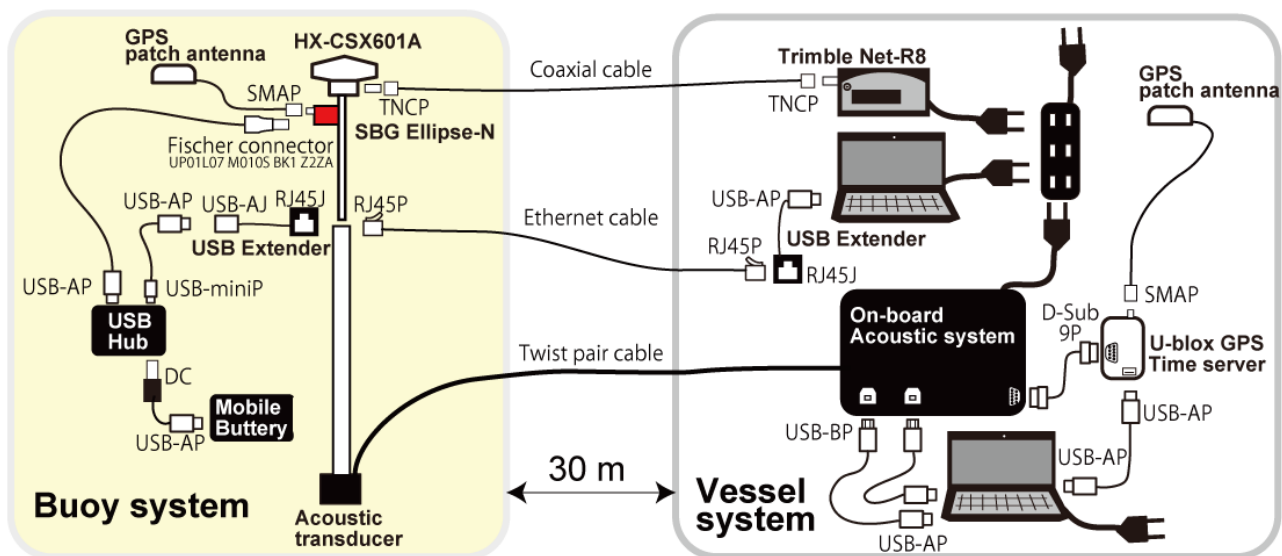


図 1. ブイシステムの結線図。左側囲み内がブイ、右側囲み内が観測船。

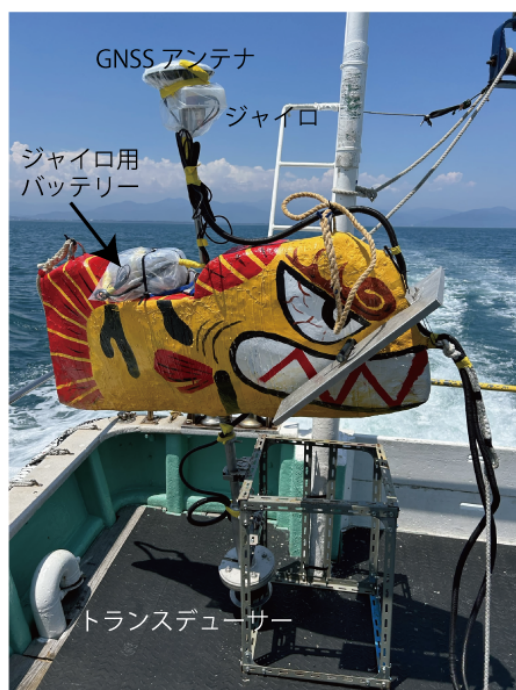


写真. えい航ブイ「零号機」
2023 年 7 月 27 日駿河湾「北斗」船上にて

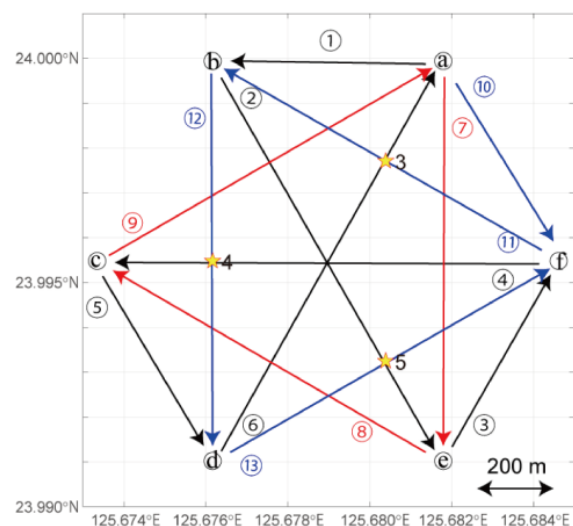


図 2. 2023 年 6 月 24 日 OMYK 観測における測線図。☆が海底トランスポンダーの位置。船は①～⑬の測線を矢印にしたがって順にたどる。黒、赤、青全ての測線で測距を行ったら、次は⑬～①を矢印とは逆にたどって往復 1 セットとする。

Reanalysis of GNSS-A data obtained in the Hateruma basin at the southwestern end of the Ryukyu trench

*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, keiichi Tadokoro², Yasushi Harada³

1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Tokai University

我々は琉球海溝南西端、琉球海溝に面した波照間海盆に海底局OHTMを設置してGNSS-A測地観測を行ってきた。昨年度の本学会で発表した2014年から2022年の海底局位置（中畑ほか, 2022）について、GNSS解析を見直して再解析を行った結果を報告する。

琉球海溝南西端に位置する八重山諸島は、1771年4月24日に発生した「八重山津波」によって壊滅的な被害を受けたことが知られている。Nakamura (2009)は、八重山津波の発生源として、琉球海溝南西端のプレート境界浅部で発生したMw8.0の津波地震である可能性を示唆している。そこで我々は、琉球海溝南西端のプレート境界における固着の有無を明らかにするために、2014年10月に波照間島南沖約40km、前弧海盆である波照間海盆内に海底局OHTMを設置した。OHTMは水深約3300mの海底に、3台のトランスポンダを水深のおおむね $1/\sqrt{2}$ 程度の外接円直径をもつ正三角形に配置することで構成されている。

我々は昨年度の地震学会秋季大会で、2014年10月から2022年6月まで、2021年を除いて年1エポック、合計8エポックのOHTMの測位結果からプレート境界浅部に固着が無いことを推定した。また推定精度の向上のために今後も観測を継続する必要性を述べた。ところがその後、海底局OHTMを構成するトランスポンダのバッテリーが切れ、新たな観測エポックの追加は不可能となった。これを機に改めて過去のデータ、特にGNSS解析について見直しをしたので本発表で紹介し、再解析によって得られた2014年10月から2022年6月までの海底局OHTMの座標変化の結果を報告する。

GNSS解析は、高須知二氏によって開発されたオープンソースの解析ソフトウェアRTKLIB（高須ほか, 2007）を用いて行った。最初に独自に設置した陸上基準局の座標を、ITRF2008（Altamimi et al. 2011）で座標値が与えられているIGS点を基準として30秒サンプリングの位相データでstatic解析した。次に得られた座標値に基づいて、陸上基準局に対する船上アンテナの位置を0.2秒サンプリングでkinematic解析した。

昨年度までの解析では、static解析に用いるIGS点として2014年から2017年及び2022年は観測点TNMLを、2018年から2020年は観測点TWTFを使用してきたが、用いるIGS点の違いにより陸上基準局座標の推定結果に水平成分で3cm程度のオフセットが生じていたことがわかった（図）。そこで再解析においてはIGS点として原則TWTFのみを用い、TWTFのデータの無い2015年のエポックのみTNMLを用いた。2015年のエポックについても、得られた陸上基準局座標から上記のオフセットを差し引くことで異なるIGS点を用いた効果を補正した。陸上基準局は機器の故障や設置場所の制約の都合で、2014年は石垣市立平真小学校屋上のGNSSアンテナ（観測点HESN）、2015年は台湾中央研究院地球科学研究所の観測点SUAB、2016年は同研究所の観測点SUAO、2017年以降は石垣市立崎枝小中学校屋上のGNSSアンテナ（観測点SKED）と変遷している。これらの基準局座標を再決定し、全エポックの船上アンテナのkinematic GNSS再解析を完了した。

得られた船上アンテナ位置に基づき、海底局位置解析プログラムOCDASAN (Ikuta et al. 2008) を用いて海底局位置の再解析を行った結果を報告する。

謝辞：本研究はJSPS科研費26287104、17K05630、22H01335の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

引用文献

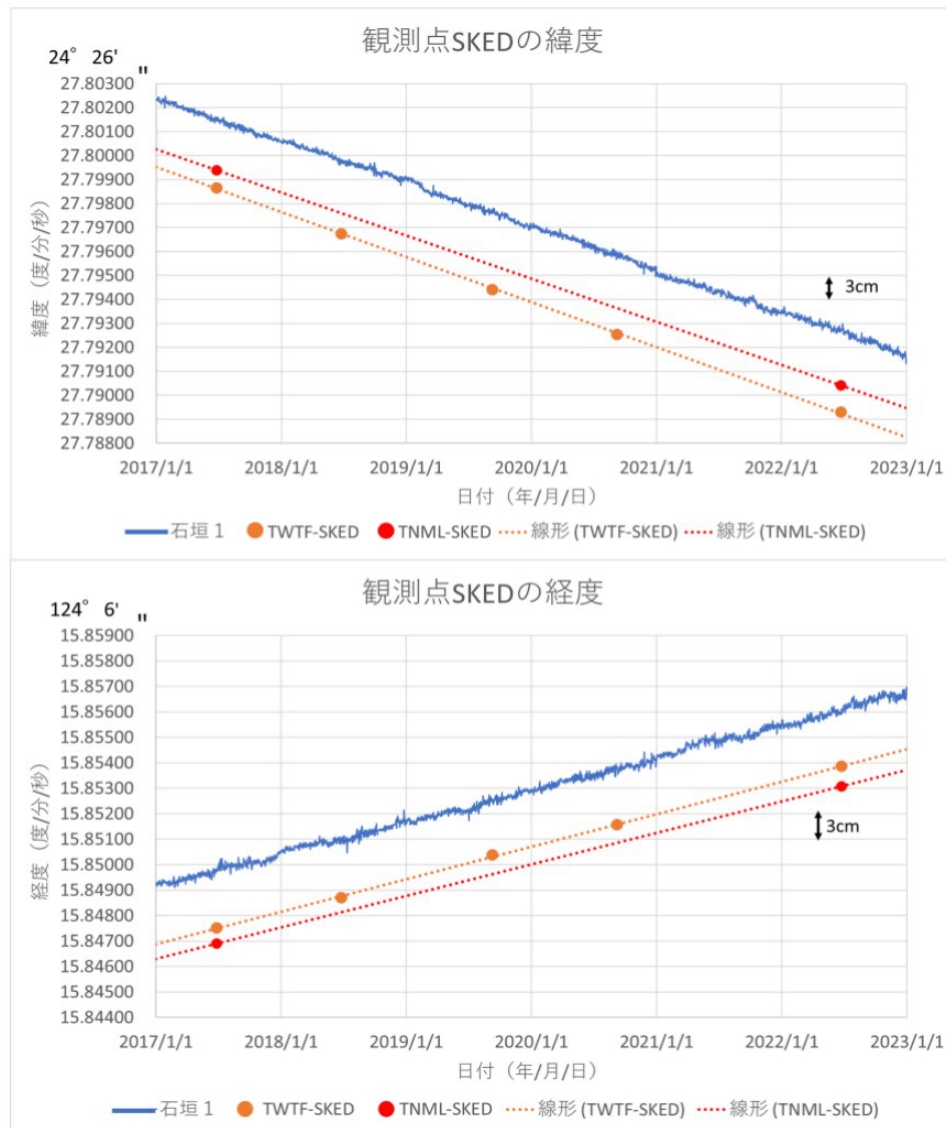
Altamimi et al. (2011). *J. Geod.*, **85**:457–473. DOI 10.1007/s00190-011-0444-4

Ikuta et al. (2008). *JGR*, **113**, B0240. DOI 10.1029/2006JB004875

Nakamura (2009). *GRL*, **36**, L19307. DOI 10.1029/2009GL039730

高須ほか (2007).

https://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/gpsymp_2007_rtklib.pdf



図：観測点 SKED の座標

縦軸は緯度または経度 (度/分/秒)、横軸は日付を示している。オレンジ丸とオレンジ線は IGS 点に観測点 TWTF を用いて推定した SKED の座標 (2017 年～2022 年) と最小二乗法による回帰直線を、赤丸、赤線は IGS 点に観測点 TNML を用いて推定した SKED の座標 (2017 年、2022 年) と最小二乗法による回帰直線を示している。青線は国土地理院の電子基準点石垣 1 (ID=960749) の日々の座標値 (F5 解) を示している。

Numerical experiment on template matching and relative strength index based on noise analysis of high-rate GNSS data

*Riko Arai¹, Yuta Mitsui²

1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University

様々な時間スケールのスロー地震が報告されている中、継続時間100秒程度から1日程度の帯域のイベントは検出事例が少ない(Ide and Beroza, 2023)。かつ、それらの検出事例の一部は微動・低周波地震のクラスターの活動を1つのイベントとして解釈した間接的なものであるため、測地学的手法でのより直接的なスロースリップイベント検出を行うことがこの帯域のスロー地震を理解する上で不可欠と考えられる。そこで、本研究では実際のハイレートGNSSデータのノイズ特性解析、および、シグナル検出手法の設定の検討(数値実験)を行う。

使用するデータは、Nevada Geodetic Laboratory が提供する、5分サンプリング精密単独測位解(Blewitt *et al.*, 2018)のハイレートGNSSデータセットである。GNSSデータのノイズスペクトルは一般にホワイトノイズ的ではなく、周波数に依存した成分を持つことが知られている(e.g., Genrich and Bock, 2006; Geng *et al.*, 2018)。このことがシグナル検出に影響を与えていると考え、データのノイズスペクトルが具体的にどうなっているかを調べる。そのため、連続した30日間のデータから1日分ずつのパワースペクトル密度を算出し、スタックする。次に、観測データのパワースペクトル密度の形状を単純化したパワースペクトル密度の形状を持つノイズを作成し、Clipped ReLU 関数のシグナル(範囲0~1、変位期間1800秒)を足した人工データ X と、単純なホワイトノイズにシグナルを足した人工データ ω とを作成する。

その上で、1日サンプリングGNSSデータの解析で用いられてきた2つの手法について、シグナル検出の数値実験を行う。1つは、相関分析に基づくテンプレートマッチング(e.g., Rousset *et al.*, 2017; Okada *et al.*, 2022)で、Clipped ReLU 関数をテンプレートとし、テンプレート全体の窓幅は変位期間の10倍とする。変位期間およびノイズレベル(標準偏差 σ)を変えたときに、シグナルの位置で最大の相関係数を取るか否かで結果を評価する。もう1つは、相対力指数(RSI)に基づく検出(e.g., Crowell *et al.*, 2016)である。RSIは、株式市場において短期間での株価の急速な変化を判断する指標として知られ、シグナルの有無を判断する際の一般的な閾値の目安も確立している(e.g., Wong *et al.*, 2003)。こちらも、期間およびノイズレベル(標準偏差 σ)を変え、シグナルの位置でRSIが70を超える最大値を取るか否かで結果を評価する。

まず、観測データのノイズスペクトル(パワースペクトル密度)を調べた結果、周波数が 3×10^{-4} Hz程度以下の低周波数帯では周波数の-1乗におよそ比例するピンクノイズ的傾向が見られるが、それ以上の高周波数帯では周波数依存性が小さいホワイトノイズ的傾向になることがわかった。なお、ハイレートGNSSデータ一般がこのようになっているわけではなく、今回使用した Nevada Geodetic Laboratory の5分解に固有の特性である。

この観測データと同様の特性を持つノイズから作成した人工データ X と、ホワイトノイズから作成した人工データ ω 各々について、数値実験結果をまとめる。テンプレートマッチングでは、人工データ ω (ホワイトノイズ)のとき、シグナルの半分程度(900秒)未満の短い変位期間を設定すると、著しく性能低下することがわかった(図a)。人工データ X (観測データ参照ノイズ)では、この性質が消え、テンプレートの変位期間が短ければ短いほど検出可能性が上がるという結果が得られた(図b)。ただし、ホワイトノイズの場合(人工データ ω)と比べて、観測データ参照ノイズ(人工データ X)の場合、検出可能なノイズレベルの閾値が全般に小さくなり、ノイズに弱くなる傾向が見られた。

RSIに基づく検出では、人工データ ω (ホワイトノイズ)のとき、シグナルの半分程度未満、またはシグナルより

長い期間を設定すると検出性能が低下した(図c)。人工データX(観測データ参照ノイズ)では、長い期間を設定するほど性能が向上した(図d)。さらに、ホワイトノイズの場合(人工データ ω)に比べて、観測データ参照ノイズ(人工データX)の場合、検出可能なノイズレベルの閾値が全般に大きくなり、ノイズに強くなる傾向が見られた。これはテンプレートマッチングとは真逆の傾向である。

人工データX(観測データ参照ノイズ)に対しては、RSIの検出能力が全体として優れていた。株価の分析に用いられてきた指標が、ハイレートGNSSの解析にも応用できそうであることは興味深い。

