

Sat. Oct 31, 2020

ROOM B

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

[S02]AM-1

chairperson:Ryoichi Iwase(JAMSTEC)

9:00 AM - 9:45 AM ROOM B

[S02-01] Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

○Yusuke Mukuhira¹, Oleg V. Poliannikov², Michael C. Fehler², Hirokazu Moriya³ (1.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2.Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3.School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan)

9:00 AM - 9:15 AM

[S02-02] Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

○Ryoichi Iwase¹ (1.JAMSTEC)

9:15 AM - 9:30 AM

[S02-03] Channel ID number expansion in WIN format

○Kenji Uehira¹, Shigeki Nakagawa², Hiroshi Tsuruoka², Taku Urabe³ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Telemetra)

9:30 AM - 9:45 AM

Room B | Regular session | S19. Seismology, general contribution

[S19]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

9:45 AM - 10:00 AM ROOM B

[S19-01] A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

○Satoko Murotani¹, Kenji Satake², Hiroshi Tsuruoka², Hiroe Miyake², Toshiaki Sato³, Tetsuo Hashimoto⁴, Hiroo Kanamori⁵ (1.National Museum of Nature and Science, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Ohsaki Research Institute, Inc., 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Seismological Laboratory, California Institute of Technology)

9:45 AM - 10:00 AM

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

[S18]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

10:00 AM - 10:15 AM ROOM B

[S18-01] Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

○Shota Takeichi¹, Toshitaka Baba¹, Naoyuki Nakayama² (1.Tokushima University, 2.Tsuda Junior High School)

10:00 AM - 10:15 AM

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

[S03]AM-2

chairperson:Kosuke Heki(Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University), chairperson:Yuta Mitsui(Faculty of Science, Shizuoka University)

10:30 AM - 12:00 PM ROOM B

[S03-01] Interseismic plate coupling on the Main

Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

○Takao Tabei¹, Mako Ohzono², Bishow R. Silwal³, Rajendra Bhandari³, Janak B. Chand³, Soma N. Sapkota³, Hiroe Miyake⁴, Kazuki Koketsu⁴ (1.Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2.Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.Department of Mines and Geology, Nepal, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM

[S03-02] Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

○Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, Shin'ichi Miyazaki² (1.Tohoku University, 2.Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM

[S03-03] Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

○Fumiaki Tomita¹, Takeshi Iinuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

11:00 AM - 11:15 AM

[S03-04] Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

○Yuta Mitsui¹, Hinako Muramatsu², Yusaku Tanaka³

(1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
11:15 AM - 11:30 AM

- [S03-05] Crustal deformation by a heavy rain episode
○Kosuke Heki¹, Syachrul Arief¹, Wei Zhan² (1.Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2.The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration)
11:30 AM - 11:45 AM
- [S03-06] Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010
○Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Paul Segall³, Takeshi Sagiya^{2,4} (1.Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3.Stanford University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)
11:45 AM - 12:00 PM

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

[S03]PM-1

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)), chairperson: Ryoya Ikuta(Shizuoka Univ.)
1:00 PM - 2:15 PM ROOM B

- [S03-07] Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites
○Hiroki Aota¹, Mako Ohzono^{1,2}, Hiroaki Takahashi¹, Yusaku Ohta³ (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)
1:00 PM - 1:15 PM
- [S03-08] A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough
○Ryoya Ikuta¹, Horng-Yue Chen², Kiyomichi Takemoto³, Takeru Kohmi¹, Masataka Ando¹ (1.Shizuoka Univ., 2.Academia Sinica, 3.Nagoya Univ.)
1:15 PM - 1:30 PM
- [S03-09] GNSS-Acoustic Observation Using the Wave

Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

○Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta^{3,2}, Fumiaki Tomita¹, Ryota Hino^{3,2}
(1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)
1:30 PM - 1:45 PM

- [S03-10] Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS
○Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura² (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
1:45 PM - 2:00 PM
- [S03-11] A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network
○Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Toshinori Kimura¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)
2:00 PM - 2:15 PM

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

[S02]AM-1

chairperson:Ryoichi Iwase(JAMSTEC)

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 9:45 AM ROOM B

[S02-01] Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

○Yusuke Mukuhira¹, Oleg V. Poliannikov², Michael C. Fehler², Hirokazu Moriya³ (1.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2.Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3.School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan)

9:00 AM - 9:15 AM

[S02-02] Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

○Ryoichi Iwase¹ (1.JAMSTEC)

9:15 AM - 9:30 AM

[S02-03] Channel ID number expansion in WIN format

○Kenji Uehira¹, Shigeki Nakagawa², Hiroshi Tsuruoka², Taku Urabe³ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Telemetry)

9:30 AM - 9:45 AM

Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

*Yusuke Mukuhira¹, Oleg V. Poliannikov², Michael C. Fehler², Hirokazu Moriya³

1. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2. Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3. School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan

Detection and analysis of small magnitude events are valuable for better characterization and understanding of reservoirs in addition to developing strategies for mitigating induced seismicity. Three-component (3C) receivers, which are now widely used, are commonly deployed in boreholes to provide continuous seismic data amenable to novel and powerful analysis. Using multicomponent continuous records of ground motion, we utilize two principal features of the direct P-wave arrival: (1) linearity and (2) polarization in the direction along the ray path to the source region to detect small magnitude events undetectable by conventional methods. We evaluate the linearity of polarization and direction of arrival in the time and frequency domains by introducing the spectral matrix analysis method and combine them into a scalar characteristic function that is thresholded for event detection purposes. We boost the signal-to-noise ratio by stacking characteristic functions obtained at different 3C receivers along an empirical moveout of a master event known to have occurred in an area of interest. This allows us to detect smaller events and spatially tie them to a relatively small area around the large event. We apply our method to field data recorded at the Groningen gas field in the Netherlands. Our method detects all catalog events as well as several previously undetected events.

Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

*Ryoichi Iwase¹

1. JAMSTEC

海洋研究開発機構(JAMSTEC)が1993年に相模湾初島南東沖水深1175mの海底に設置した海底ケーブル型観測システム「深海底総合観測ステーション」(初島沖ステーション)は、深海環境の多面的な観測を目的としており、地震計のほか、ハイドロフォン、ビデオカメラ、CTD(海水の電気伝導度・水温・深度)センサや電磁流向流速計等の多種類のセンサを搭載していた。初島沖ステーションは、1999年7月に海底ケーブルの地絡障害により一度観測を停止し、その後2000年に更新されている。

海底に設置されたハイドロフォンの信号は、海底ケーブルを通じ初島陸上局においてアナログ信号として出力され、設置当初から1999年7月の停止までの期間は、ペンレコーダに記録されるとともにアナログデータレコーダに連続記録されていた。しかしながら、これまで当該データは本格的に再生・解析されていなかった。ハイドロフォンは、地震に伴うT波をはじめ、水中を伝搬する音響信号を検出することが可能である。岩瀬(2017)では、ビデオカメラによる海底観察の際、ビデオテープの音声トラックに録音されたハイドロフォン信号から、伊豆半島東方沖地震時の泥流に伴う礫の衝突音と推定される信号やホワイトノイズ的な信号を検出している。ビデオカメラによる観察は間欠的に実施されているため、ビデオカメラによる泥流の観測は、複数回発生したうちの一部に限られている。このため、未再生のハイドロフォンデータの解析は泥流や混濁流の解明等にも資する可能性がある。

ハイドロフォン信号の収録には、TEAC製カセットデータレコーダXR-5000WBが使用された。当該レコーダは、14チャンネルのアナログ信号入力インタフェースを有し、VHSビデオテープを記録媒体として周波数変調方式で記録する。通常無人の初島陸上局にて1週間毎にテープを回収するため、全チャンネルに同一信号を入力し、テープ(VHS 160分テープ)の走行速度を0.6 cm/sとし、テープの順方向走行時は奇数チャンネルに、逆方向走行時は偶数チャンネルの信号を順次記録する設定により、1週間の連続記録を可能としていた。収録テープは約300本に及ぶ。時刻はJJYで校正されており、ボタンの手動押下によりBCD(Binary-coded decimal)表現の日付・時刻情報が重畳されることに加え、毎正時と毎時30分にはそれぞれ2個と1個の短時間パルスが観測信号に自動的に重畳されていた。再生手段は当該レコーダに限られるが、はるか以前に生産終了となっており、今回は収録に使用していたレコーダを用いてテープを再生し、出力信号をリニアPCMレコーダ(OLYMPUS LS-100)に収録した。再生時、テープ走行速度を収録時と同じ0.6 cm/sとすると、テープ走行の揺らぎが原因と推定されるノイズが大きい。再生効率も考慮して、テープ走行速度を収録時の8倍の4.76 cm/sとしたところ、同ノイズの低減が見られた。なお、当該レコーダの仕様では、テープ走行速度0.6 cm/s時の収録可能周波数帯域は0.977 kHz以下となっている。図1は、1997年3月3日23:09に発生した伊豆半島東方沖地震(M5.5)を観測した波形例である。

今後、順次再生を進めていく予定であるが、当該レコーダの劣化が著しく、走行が不安定であることに加え、電解コンデンサやその周辺の基板の焼損等の故障も発生し、困難に直面している。使用可能なTEAC製データレコーダXR-5000WBについての情報があればお知らせ頂けると幸いである。

参考文献

岩瀬, 2017年地震学会秋季大会講演予稿集, S11-01, 2017.

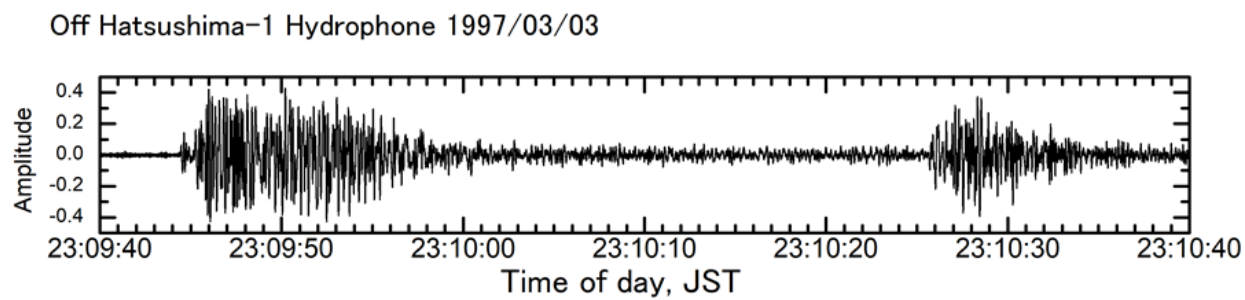


図1 ハイドロフォンで観測した伊豆半島東方沖地震の波形例

Channel ID number expansion in WIN format

*Kenji Uehira¹, Shigeki Nakagawa², Hiroshi Tsuruoka², Taku Urabe³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Telemetry

WINシステム（ト部・東田，1992など）は地震のフェーズの検測や震源決定等の解析，大学・気象庁・防災科学技術研究所などの機関間のデータ流通に広く使われている多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで，UNIX上で動作するプログラム群である．WINシステムではWINフォーマットと呼ばれるデータフォーマットを定義している．WINフォーマットにおいてデータの区別を16ビット長のチャンネル番号（channel ID）によって行っており，最大65536チャンネルまで扱うことが出来る．

ト部（データ流通ワークショップ，2013）で言及があった通り，JDXnetで流通しているのは10000チャンネル弱であり，85%程度は空いているが，多くが虫食い状態であり大きなブロックは残っていない．一方で，陸上や海底でのオフライン観測で得られた観測データをJDXnetの流通データと統合して解析を行ったり，複数機関でのデータ共有，高感度地震計以外の地殻変動・火山・強震等の多項目観測データを同一システムで取り扱う機会が増えており，チャンネル空間の枯渇が課題となっていた．そこで，チャンネル番号の桁数を現行の16ビット長から32ビット長へ増加することにした．

WINフォーマットは観測点での収録から，伝送流通網，収録系にまで幅広く使用されている．チャンネル空間の拡張にあたっては新しいフォーマットが必要となる．運用中の機器との互換性や，これまで収録されてきた既存データとの相互運用性を考えると，ネットワーク上やファイルシステム上で新旧両フォーマットが混在可能であることが望ましい．またソフトウェアについても両フォーマットを混在した状態を扱えることが望ましい．そこで，現行のWINフォーマットを拡張することとした．

WINフォーマットは1秒のブロックが基本単位になっている（図上段）．先頭に6バイト長の時刻情報があり，その後に複数のチャンネルブロックが連なっている．各チャンネルブロックの先頭には4バイト長のチャンネルヘッダがついており（図中段の黄色ハッチ部），その後ろにデータの本体が続く．チャンネルヘッダには2バイト長のチャンネル番号（channel ID）が含まれる（図中段赤枠）．現行フォーマットでは，チャンネル番号（channel ID）として0x0000から0xFFFFまでの値を取ることが出来る．0xFFXXのチャンネル番号は32ビット拡張用として予約されていたが，それを利用することとした．即ち，先頭バイトが0xFFであったら拡張フォーマットであることを表し，更に続く2バイト目が0x00の時（図下段青枠）は，引き続き32ビット（図下段赤枠）が新たなチャンネル番号（channel ID）を示すと定義した．なお，チャンネルヘッダの先頭2バイトが0xFF01～0xFFFFの場合は現在未定義であり，将来の拡張用とすることにした．

以上，今回拡張したチャンネル番号の割り振り方をまとめると，

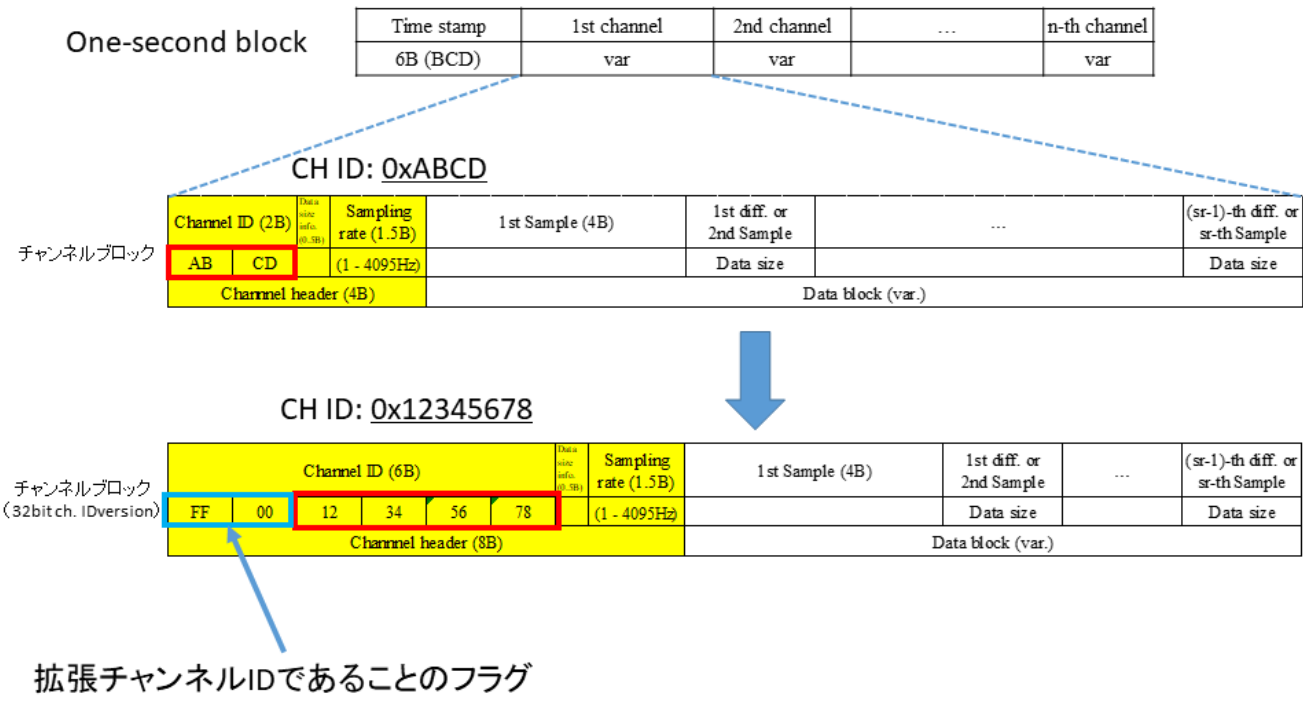
1. 0x0000～0xFEFF (0x0000 0000～0x0000 FEFF)は新旧どちらのフォーマットでも表現出来るチャンネル．ただし，基本は16ビット長で作成．
2. 0xFF00以降 (0x0000 FF00～0xFFFF FFFF)は拡張フォーマットでのみ表現できるチャンネル．

となる．なお，チャンネルヘッダには，4096Hz以上のデータを扱える高サンプリングレート等のバージョンもあるが，チャンネル番号の拡張については上で述べた方法で対応可能である．

現在，チャンネル番号32ビット拡張化については，WINシステムの基本ライブラリの対応が完了し，順

次，個々のソフトウェアの対応を進めている．今後，伝送流通網や収録系のテスト環境の下で検証を行う．

拡張チャンネルIDのWINフォーマット（raw形式）



Room B | Regular session | S19. Seismology, general contribution

[S19]AM-1

chairperson: Satoko Murotani (National Museum of Nature and Science)

Sat. Oct 31, 2020 9:45 AM - 10:00 AM ROOM B

[S19-01] A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

○Satoko Murotani¹, Kenji Satake², Hiroshi Tsuruoka², Hiroe Miyake², Toshiaki Sato³, Tetsuo Hashimoto⁴, Hiroo Kanamori⁵ (1. National Museum of Nature and Science, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Ohsaki Research Institute, Inc., 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Seismological Laboratory, California Institute of Technology)

9:45 AM - 10:00 AM

A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

*Satoko Murotani¹, Kenji Satake², Hiroshi Tsuruoka², Hiroe Miyake², Toshiaki Sato³, Tetsuo Hashimoto⁴, Hiroo Kanamori⁵

1. National Museum of Nature and Science, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Ohsaki Research Institute, Inc., 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Seismological Laboratory, California Institute of Technology

我が国には明治以来130年以上に渡る地震計・検潮儀による地震・津波観測の歴史があり、膨大な記録が残されている。気象庁や大学機関などの甚大なる努力によって蓄積されてきた地震・津波波形に関するアナログ記録は、所蔵リストや画像のデータベースとして公開され、誰もが利用しやすいよう整備されてきている

(Furumura et al., 2020, SRL; Matsu'ura et al., 2020, SRL; Satake et al., 2020, SRL)。しかしその一方で、観測機器で得られたアナログ記録を数値化し、科学的な解析に耐えうるデジタルデータとするためにはかなりの精査時間と労力が必要であるため、波形記録が数値化されたデータベースは極めて少ない(例えば、消防庁消防大学校消防研究センターによる「気象庁1倍強震計記録の数値化データ公開システム」がある)。近年、地震の解析手法の高度化や計算機の高性能化が進み、速度構造等の新しい知見も得られており、貴重な歴史観測データを用いて過去の被害地震について再解析することにより、地震や津波の発生メカニズムや防災に対する新たな研究成果が生み出されることが期待される。そこで、1920年代～1940年代の歴史的に重要な被害地震・津波(例えば、1923年関東地震や1944年東南海、1946年南海地震)に関する記録の画像化・数値化を行い、将来発生が懸念される大地震に対する防災・減災対策への一助となるよう学術データベースの構築を進めているところである。

このデータベースは地震名や観測点名などで検索できるようにしており、可能な限り大振幅の波形の円弧補正を施し、地震計の特性も併せて提供する。大地震の場合、中央気象台や各地測候所の記録紙には地震計の特性が一緒に書かれていることが多い。しかし、東京大学地震研究所に残る帝国大学時代からの記録紙には特性は書かれておらず、別途観測帳などを参照する必要がある。時期によっては値にばらつきも見られる。いつの情報なのかということも、できるだけ付記する必要がある。公開は数年後を目指しており、国立科学博物館と東京大学地震研究所で公開することを計画している。科博での公開は広く一般の方々に、東大地震研での公開は研究者にとって有用であろう。地震学分野においては、過去の地震の震源パラメータ等の解明や、各地での震度や長周期地震動の検証等への利用、地震工学、社会防災学などの分野では、公開された地震波形や津波波形の数値が、建物構造物等に関連する耐震設計や沿岸域での津波防災対策等に利用されることが期待される。学校教育や博物館分野においては、数値化されたデータを提供することにより、専門的な知識や計算機等を必要とせず容易に波形データを利用することができ、地震に関する展示や教育の普及への利用価値はかなり高いと思われる。さらには、歴史分野や防災教育の分野でも利用できるであろう。

日本は歴史的な観測記録が充実している数少ない地震大国であり、国際的にも重要な研究対象である。歴史観測データ保存と活用の重要性は国際的にも認識されており、本データベースは貴重な歴史観測データを数値的に提供するとともに、元画像を保存公開することで研究の再現性担保やデータのバックアップとなる意義もある。海外の研究者から東大地震研に問い合わせが多いのは、海外で発生した大地震を本郷の地震計で記録した波形の利用についてである。英語でのページも作成予定であるので、日本で観測した海外の大地震などの記録も数値化できれば、より多くの海外の研究者にとっての利便性も高まるだろう。当面は1920年代～1940年代に日本周辺で発生した主要な歴史地震記録の数値化を行うが、将来的には、1950年以降の記録や海外で記録された波形記録についても蓄積できればと考えている。本データベースに関しては、Murotani et al., (2020), *Seismol. Res. Lett.*, doi: 10.1785/0220190287においても紹介している。

謝辞：本データベースの作成は，国立科学博物館における2017年度館長支援経費，JSPS科研費JP18HP8037，JP18H01289，東京大学地震研究所共同利用（2020-G-16）によって実施されています．記して感謝いたします．

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

[S18]AM-1

chairperson: Satoko Murotani (National Museum of Nature and Science)

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

[S18-01] Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

○Shota Takeichi¹, Toshitaka Baba¹, Naoyuki Nakayama² (1. Tokushima University, 2. Tsuda Junior High School)

10:00 AM - 10:15 AM

Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

*Shota Takeichi¹, Toshitaka Baba¹, Naoyuki Nakayama²

1. Tokushima University, 2. Tsuda Junior High School

初等中等教育における防災教育は将来の災害軽減に必要不可欠であり、いくつかの学校では地域住民と連携も含めて意欲的に行われている。例えば、徳島県徳島市津田中学校では防災クラブを結成し、中学校周辺地域の事前復興計画の作成をしている。一方、AIに代表される情報通信技術の進展は著しく、今後、防災分野においても主要な役割は果たすであろうと考えられる。本研究では、このような観点からコンピュータ上で津波避難シミュレーションを中学生に実施してもらい、それによる彼らの考察をもって、有効な防災意識向上効果について調査したので報告する。

はじめに、津波避難シミュレーションの概要を説明する。津波避難シミュレーションにマルチエージェントモデルのCrowdWalkを用いた。CrowdWalkは一次元空間モデルを用いた大規模群衆流動にも対応したマルチエージェント歩行者シミュレータであり、実際の花火大会や劇場での避難訓練で群衆移動の検証が行われている。防災クラブの生徒らは、学校周辺地区内の住民に対して、津波避難先として利用する避難場所とそこまでの経路の調査を実施した。（ちなみに、住民は必ずしも最短経路を使って最寄りの避難場所に避難するとは限らない。）調査をもとに、学生らが自ら作成した避難シミュレーションモデルで、エージェントの避難経路を設定し、シミュレーションを行った。その結果、主要な道路で避難やの混雑（渋滞）が発生する可能性が示唆された。避難完了時間は2112秒であった。また、単に最寄りの避難場所に最短経路で避難する場合のシミュレーションも実施し、この場合は、避難完了時間は852秒であった。避難シミュレーションモデルの作成開始から、シミュレーション実施完了まで、およそ2か月かかった。その期間においては、メール等で利用法を説明するだけでなく、防災クラブの活動に数回訪問して、作業を手助けた。

生徒らに、今回の活動についてヒアリング調査を行った。シミュレーションを用いたことで、避難時に混雑が起こる場所がわかったことや避難のイメージをつかめやすくなったなどの回答があった。これらから、生徒たちにとって、避難シミュレーションの実施は防災活動や事前復興計画を考える上で有効なツールとなる可能性があることが分かった。一方、今回利用したCrowdWalkは専門的なツールで、説明書も中学生向けに書かれているわけではないため、シミュレーションの実施には相当のサポートが必要だった。しかし、要点をつかむと入力作業の速度は一気に上がった。これは、情報ツールを使うことに幼いころから慣れ、興味関心が高いからだと考える。

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

[S03]AM-2

chairperson: Kosuke Heki (Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University), chairperson: Yuta Mitsui (Faculty of Science, Shizuoka University)

Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 12:00 PM ROOM B

[S03-01] Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

○Takao Tabei¹, Mako Ohzono², Bishow R. Silwal³, Rajendra Bhandari³, Janak B. Chand³, Soma N. Sapkota³, Hiroe Miyake⁴, Kazuki Koketsu⁴ (1. Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2. Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Department of Mines and Geology, Nepal, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM

[S03-02] Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

○Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, Shin'ichi Miyazaki² (1. Tohoku University, 2. Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM

[S03-03] Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

○Fumiaki Tomita¹, Takeshi Iinuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

11:00 AM - 11:15 AM

[S03-04] Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

○Yuta Mitsui¹, Hinako Muramatsu², Yusaku Tanaka³ (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S03-05] Crustal deformation by a heavy rain episode

○Kosuke Heki¹, Syachrul Arief¹, Wei Zhan² (1. Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration)

11:30 AM - 11:45 AM

[S03-06] Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

○Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Paul Segall³, Takeshi Sagiya^{2,4} (1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Stanford University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

11:45 AM - 12:00 PM

Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

*Takao Tabei¹, Mako Ohzono², Bishow R. Silwal³, Rajendra Bhandari³, Janak B. Chand³, Soma N. Sapkota³, Hiroe Miyake⁴, Kazuki Koketsu⁴

1. Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2. Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Department of Mines and Geology, Nepal, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

ネパールの国土の大部分はインドプレートとユーラシアプレートの収束境界域の上盤側に位置し、直下で発生する逆断層型地震は直接的な脅威である。最近では2015年Gorkha地震 (Mw 7.8) が記憶に新しいが、この地震の震源域の西方には、過去数百年間にわたって顕著な地震が発生していない広大な地震空白域が広がっている。2016年に開始された地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム「ネパールヒマラヤ巨大地震とその災害軽減の総合研究」(通称NERDiM)の一環として、我々はネパール中部・中西部に計10点のGNSS連続観測点を設営した。我々の観測網は、ネパール国内に既設のGNSS観測網を補間しながら、地震空白域における観測強化を目指している。最終的には、既設観測網のデータも含めてネパール全土の詳細な変位速度場とひずみ速度場を算出し、測地学的側面からヒマラヤ主要断層帯の地震ポテンシャル評価を行うことを目標としている。

UNAVCO経由でデータ入手可能なネパール国内のGNSS観測点の総数は50に近いが、安定して観測が継続されているものは半数に満たない。今回は、GIPSY/OASIS II ver.6.4のPPP-AR法を用い、NERDiM観測点を加えた2004-2019年の期間のすべてのデータより日々の座標解を算出し、観測期間の長短に関わらず観測点の平均変位速度を求めた。さらに、変位速度場を空間補間し、ひずみ速度場を導いた。結果を要約すると、ユーラシアに対するインドプレートの北進を反映して、ネパール国内では南北方向の10-15 mm/yrの短縮変形が卓越する。ひずみ速度に換算して約0.1 ppm/yrとなる。すなわち、インド-ユーラシアの相対運動速度 (36-37 mm/yr, DeMets et al., 2010) の約30-40%がヒマラヤ前縁域の短縮変形に費やされている。NERDiM観測網は、とくにインド国境に近いプレート境界周辺の空間分解能の向上に大きく貢献している。

GNSS平均変位速度場を用い、インド・ユーラシアプレート境界面における地震間の固着分布を推定した。従来の推定では、ほぼ平坦な断層面が北へ向かって10°程度の緩やかな角度で傾き下がるモデルが用いられてきた (例えばStevens and Avouac, 2015)。それによると、地表から深さ20 km程度までほぼ一様な強い固着が求められている。一方、2015年Gorkha地震発生の構造地質学的考察から、深さごとに急傾斜の断層セグメントと緩傾斜のセグメントが交互につながってプレート境界面を構成するモデルが提唱されている (Hubbard et al., 2016)。今回は、この後者のモデルを採用した。固着するプレート境界面の下限を深さ35 kmと仮定し、深さ5 kmごとの等深線に沿って30-40 km間隔にノードを設定した。TDEFNODE (McCaffrey, 2009) を用い、各ノードにおけるすべり欠損速度を推定した。プレート相対運動速度で規格化した固着率は、プレート境界面の形状と強い相関を持つ。すなわち、緩傾斜のセグメント上では非常に強い固着を、急傾斜のセグメント上ではほぼゼロに近い弱い固着を示す。今回の結果は予備的な解析によるものであるが、単純なプレート境界面形状を用いた従来の結果とは大きく異なる。プレート間固着が境界面形状のみに規定されるものかどうか、今回採用したモデルが実際の広域の構造を正しく反映したものかどうか、さらなる検証が必要である。

Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

*Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, Shin'ichi Miyazaki²

1. Tohoku University, 2. Kyoto University

地震発生サイクルの一連の過程に伴う断層すべり現象は幅広い時間スケールで発生するため、その統一的な理解のためには広帯域な観測手段が必要不可欠である。しかしながら現在のGNSS測位解析は、1時間から半日程度の時間帯域で精度が大きく低下する。これは主に地表変位と、大気遅延等の他の未知パラメータとの分離の困難性による。そこで我々は新たな手段として、GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法(以降PTS (Phase To Slip))を用いた広帯域断層すべりモニタリング技術の開発に取り組んでいる。PTSでは座標推定を行わず、搬送波位相変化をグリーン関数と視線方向への幾何学的変換を介して直接断層すべりに結びつける。そして、断層すべりと大気遅延等の各種パラメータの、初期時刻からの相対変化を一括で推定する。このため、未知パラメータの分離精度の評価と改善に有利であると考えられる。

本研究では広帯域な断層すべり推定手段としてのPTSの性能評価を目的として、同手法による2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続的な推定を試みた。推定では東日本の69のGEONET点の搬送波1秒データを使用し、3月11日の14時から16時(JST、本震発生は14時46分)の2時間について解析した。その結果、本震と茨城沖で発生した最大余震について、通常の測位解析を用いた推定とよく一致するすべり分布やマグニチュードが推定された。得られたすべり分布から計算される地表変位場についても、測位による推定と良好に一致する値となった。さらに岩手沖で発生した余震のすべりも検出された。これらの結果から、短時間に連続して発生する地震時すべりをPTSで安定して推定できることが示された。

一方で本震後の時間帯に注目すると、推定された断層すべり時系列には上記の3つの地震時すべりとは別に、ゆっくりした逆断層すべりの増加が見られた。増加を示すのは主に本震で大きくすべった領域に隣接する陸寄りの深い側の小断層であり、岩手から茨城までの沿岸付近に複数のすべり域が推定された。これらのすべり域はそれぞれ異なる時間発展を示し、本震後の39分間で最大0.8mのすべりが推定された。また全領域の合計では M_w 7.60相当となった。これらはMitsui and Heki (2013)等の先行研究と比べて明らかに大きな値であるが、初期の余効すべりを捉えたものであると考えられる。

以上の結果から、PTSを用いた地震時から地震後のすべりの連続的な推定の可能性が示された。発表ではPTSの原理や推定結果の詳細を解説し、それらの妥当性についても議論する。

Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

*Fumiaki Tomita¹, Takeshi Iinuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

地殻変動観測データを用いた断層すべり分布の推定には、一般的にすべりの平滑化条件を課した最小二乗法が行われ、その度合いを調整するハイパーパラメータをABICやLカーブ等の基準により決定する。しかし、解の直接的な拘束条件（非負拘束等）を課した最小二乗法を行う場合、ABICが解析的に正しく計算できないことや、解の事後確率分布の非ガウス性に対応できないなどの問題点に対応するため、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法の活用が望まれる [Fukuda & Johnson, 2008]。更に、従来の手法ではすべりの平滑化条件として、解析空間で一様な拘束条件を課す場合がほとんどであり、断層すべりの広がりや非一様性に対応できていない。また、観測点分布の空間的な粗密の違い等により、断層すべりのモデル誤差が空間的に大きく異なり、インバージョン結果の確からしさ・解釈が難しい [Kimura et al., 2019] といった問題点が挙げられる。

上記の問題の解決のため、我々は、Reversible-jump MCMC法 [Green, 1995] によるTrans-dimensional inversion（TDI）手法の開発に取り組んでいる [e.g., Tomita et al., 2020, JpGU-AGU]。本手法では、Bodin & Sambridge [2009]と同様にVoronoi cell 空間分割により断層面を区切り、cell毎の未知パラメータ（すべり量）とcell自体の数（未知パラメータ数）を同時に探索する。これにより、観測データから求め得る空間解像度とすべり分布自体の空間スケールに合わせた空間分割がなされ、最小限の未知パラメータ数で断層すべり分布が求められるとともに、非一様な断層すべりの広がりの表現も可能となる。また、本手法はMCMC法の一種であるため、解の直接的な拘束条件を課すことや解の事後確率分布の非ガウス性を表現することも可能である。Tomita et al. [2020, JpGU-AGU] では、このTDI法を測地データを用いた沈み込み帯での巨大地震時すべりの推定に適用し、非一様な断層すべりの広がりや解の事後確率分布の非ガウス性の表現が可能であることを確かめた。

本研究では、上記のTDI法を沈み込み帯での固着分布の推定に適用した。固着分布の推定では巨大地震時すべりと比較して観測データのSN比が小さくなりがちであるため、そうした悪条件下でのTDI法の挙動を確認するとともに、従来のABICによりすべりの平滑化拘束を最適化した最小二乗法（ABIC-LSM）に基づく推定結果との比較から、固着分布の推定にTDI法が適しているかどうかを検証した。このような手法の有用性を確認するため、Syntheticデータを用いて仮定した固着分布の再現度合いの検証を行った。Syntheticデータは、均質半無限弾性媒質 [Okada, 1992] を仮定したバックスリップに対する応答として求めた。沈み込み帯プレート境界断層を模した傾斜角15度・幅300 km・長さ500 kmの矩形断層を仮定し、20 km × 20 kmの小断層を配置した。なお、TDI法では、この小断層をVoronoi cellにより空間的にグループ分けすることで未知パラメータ数を調整することになる。観測点配置は、海溝から200 kmの距離を海岸線として、①150陸上観測点+25海底観測点。②150陸上観測点のみ、の2パターンを用意し、固着分布の推定をそれぞれ行った。Syntheticデータは、円形の滑らかな固着パッチを海溝に沿って3つ並べた複雑な固着分布から計算された地表面変位に対して、実観測成果に沿った観測誤差を与えることで作成した。TDI法の実行にあたっては、初期状態として20個のVoronoi cellを配置し、すべり量の初期値は従来の最小二乗法による推定結果を元に設定することで、初期収束を早める方策をとった。また、初期値の影響を軽減し計算時間を短縮するため、複数鎖の並列計算を行い（今回は2000並列鎖で実施）、合計で 1×10^6 サンプルのアンサンブルにより推定を行った。

ABIC-LSMによる固着分布の推定結果は、どちらの観測点分布でも仮定した固着分布よりも滑らかな分布を示した。これは、観測点分布の粗さや観測データのSN比の低さから、十分な空間解像度が得られず、強い平滑化拘束が課された結果であると考えられる。一方で、TDI法による推定結果は、ABIC-LSMの結果に比べて、全体的により仮定した固着分布に近い滑らかさの分布が得られた。特に、観測点分布が密でモデル解像度が高いと

考えられる領域の滑らかさがよく再現され、逆にモデル解像度が低いと考えられる領域でやや仮定した固着分布よりも滑らかな分布が推定された。これは観測点分布の粗密による空間解像度に合わせて、Voronoi cellの広がり（平滑化度合い）が調整されたためと考えられる。こうした特徴は、空間的に一様な平滑化条件を置かないTDI法による利点であると考えられる。また、観測点分布が疎な領域では、解の事後確率分布が非ガウス性になる傾向が得られるなど、MCMC法による推定の利点も確認することができた。こういった特徴により、TDI法では観測データの持つモデルパラメータへの感度をより生かした解析が可能であると考えられる。

発表では、より詳細なSyntheticデータの解析結果の報告を行う。また、今後南海トラフでの実データを用いた解析を実施し、その結果も踏まえて報告する見込みである。

Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

*Yuta Mitsui¹, Hinako Muramatsu², Yusaku Tanaka³

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

本研究では、世界で最も深発地震が活動的なトンガ海溝沈み込み帯における、地殻変動と地震活動に注目する。データとしては、GNSS変位時系列(Blewitt et al., 2018)とANSS地震カタログを用いる。トンガのGNSSデータには、2006年5月3日に海溝近傍で発生したM8.0のスラブ内地震による地震時変位と余効変動が明確に記録されている。そのため、それ以前のデータを定常変動と仮定してデトレンドを行い、非定常変動の推定を行った。これと比較するため、地震カタログから沈み込み帯の浅部～深部にかけての背景地震活動率(ETAS model; Ogata, 1988)を1年ごとに推定し、その時間変化を追った。

我々は、トンガのトンガタブ島・ヴァヴァウ島のGNSS観測点において、2009年9月29日に数百km北方のサモア諸島沖で発生したM8.1のスラブ内地震直後から非定常変動(～数cm)が発生していることを発見した。この非定常変動は海溝方向を向いており、2009年サモア地震の余効変動(Han et al., 2019)そのものというよりは、別種の独立したスローイベントが2009年サモア地震によって誘発されたと考えられる。このイベントは、プレート境界の逆断層すべり(スロースリッピイベント)としても解釈できるが、2006年スラブ内地震の余効変動が再加速したという見方も可能である。この非定常変動は数年継続し、2013年5月23日のスラブ内地震(M7.4)の発生時期には収束していた。一方、地震活動の解析からは、2009年サモア地震から2013年のスラブ内地震の時期にかけて、前後の時期よりも深さ400km以深の背景地震活動率が数十%低下していたことがわかった。

以上のことから我々は、2009年サモア地震(M8.1)から2013年スラブ内地震(M7.4)にかけて、トンガ海溝沈み込み帯の少なくとも一部で、浅部から深部にまで影響を与える"スローイベント"が発生していたと考える。その実態は、プレート境界でのスロースリッピイベントやプレート沈み込みの一時的加速など、他の場所で報告されてきた現象と同種のものであるかもしれないが、沈み込み帯における浅い地震と深い地震の関連性についても新たな知見を与えるものである。

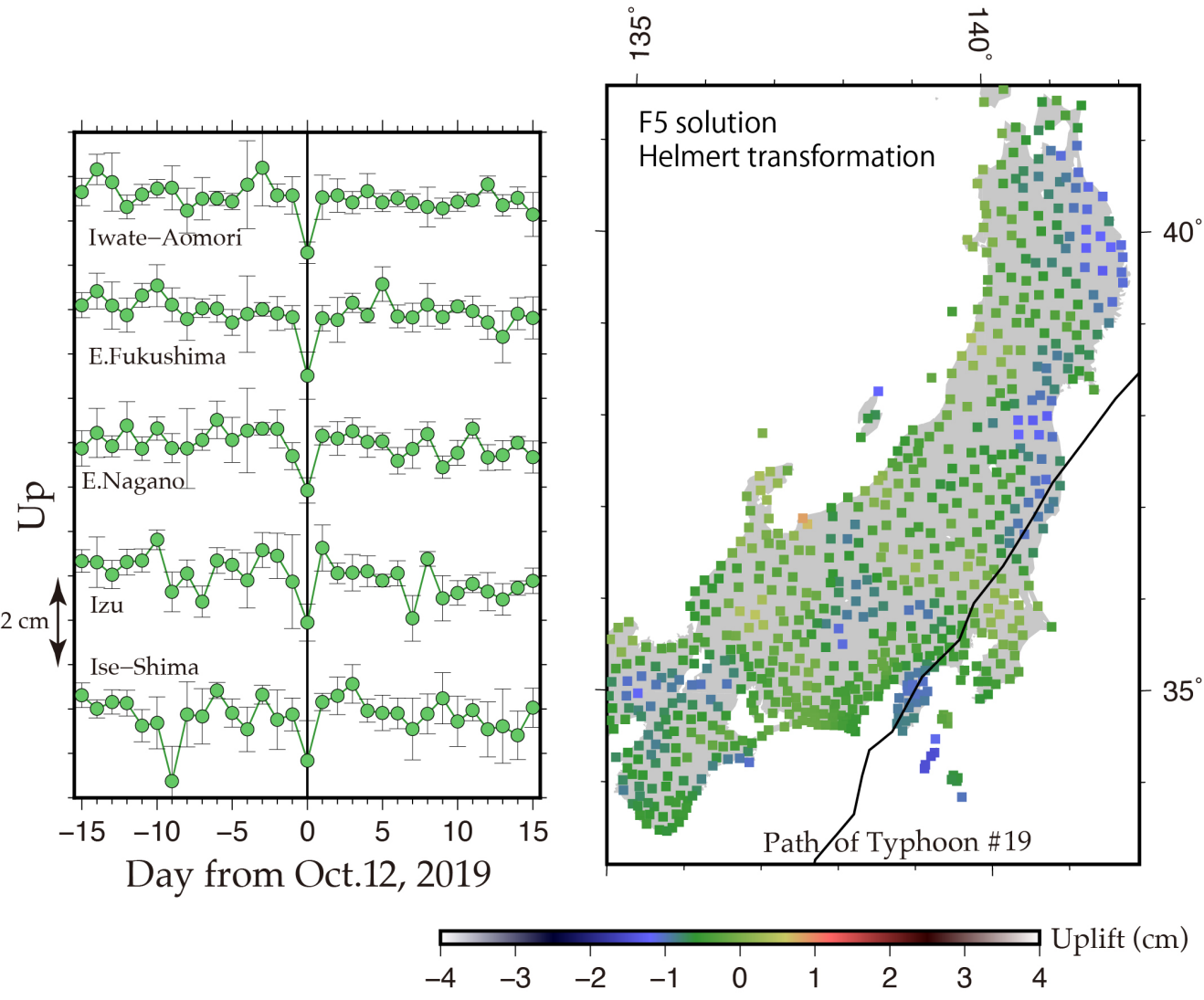
Crustal deformation by a heavy rain episode

*Kosuke Heki¹, Syachrul Arief¹, Wei Zhan²

1. Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration

地表に置かれた荷重は固体地球の弾性変形をもたらす。古くから知られる海洋潮汐荷重変形に加え、大気荷重、積雪荷重、非潮汐性海洋荷重、ダムの湛水等が、全球衛星航法システム(GNSS)でしばしばみられる季節的地殻変動の要因として考慮され、GRACE衛星による重力季節変化とも定量的に対応づけられている。本研究では2019年10/12に日本列島を襲った令和元年台風19号(Hagibis, Category 5)を主に取り上げ、台風がもたらした多大な降水荷重による固体地球の変形を議論する。雨量はアメダス降雨計に加え、レーダーを用いた高空間分解能の解析雨量を併用した。GEONET測位データは国土地理院のF5解を用いた。全国から選んだ約百点の座標を用いて台風前後±15日間の中央値からの偏差を最小にするようなHelmert変換パラメータ（平行移動、回転、膨張）を日々推定した。それらの変換をGEONET全体に施し、測位解全体に共通な系統誤差を取り除いた。その結果台風の進路に沿った伊豆、福島浜通り、岩手沿岸部などで1-2 cmの沈降が台風上陸日に確認された。また沈降は翌日にはほぼ回復し、雨水が海洋に流出する時定数が1-2日であることがわかる。次にFarrell (1972)の荷重グリーン関数（剛性率は30 GPaとした）を用いてGNSS局の沈降を入力データとして、降水荷重分布を最小二乗法で推定した。台風の低気圧に起因する負の荷重は地殻の隆起をもたらすが、それらはアメダス気圧計のデータから計算した日平均気圧を用いて補正した。台風Hagibisがもたらした本州東部の総降雨量は、解析雨量を時空間的に積分すると約33 Gtとなる。一方、地殻上下変動から推定された荷重はそれをはるかに超える40 Gt程度となる。実際の荷重は、降雨量から一日の流出分を差し引いたものになるはずであり、雨量を超える荷重が実在することは考えられない。この矛盾の原因には、(1) GNSS局が立地する地域の地殻岩石の剛性率が局地的に低い、(2) GNSS局が凹地に選択的に配置されているため雨水が局地的に集中し、地域的な平均より大きな沈降がもたらされた、の二つが考えられる。GNSS局の標高を、GNSS局を中心とする一辺20 kmの正方形の中の平均地形高度(ETOPO1モデルから計算)と比べると、GNSS局の方が平均して数百m低いことがわかった。従って本研究では(2)が主要原因と考えている。発表ではさらに台風15号(Faxai, Category 4)や、梅雨前線が例年のようにもたらす西日本の豪雨についても、同様な地殻上下変動と解析雨量を比較する。

Figure: (left) Average time series of 7 GNSS stations around 2019 Oct. 12 from each of the 5 regions, Ise-Shima, Izu, Eastern Nagano, Eastern Fukushima, and Iwate-Aomori, along the path of the typhoon Hagibis (#19 in 2019). We can see significant subsidence on the day of the landfall and recovery on the next day. (right) Subsidence of GNSS stations on 2019 Oct. 12 relative to their median position of the period shown in the left figure. Spatially smoothed with the averaging radius of 20 km. We used the GSI F5 solutions and removed common mode errors by performing daily Helmert transformation to adjust the daily positions to the median positions.



Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

*Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Paul Segall³, Takeshi Sagiya^{2,4}

1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Stanford University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Crustal deformation has been transformed in the past decades by the availability of continuous GPS data. Time series analysis of GPS data often assumes strain accumulation at a steady rate. In the case of NE Japan, analysis of horizontal GPS data from 1996-2010 revealed a decrease in trench perpendicular strain-rate in the decade prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mavrommatis et al., 2014). However, the limited duration of the observations makes it difficult to assess how these transients relate to the full interseismic period. Importantly, we do not know whether the strain-rate at the beginning of the GPS era (1996-1998) is typical of the preceding decades or not. It could be that strain-rate during this period was anomalously high.

Conventional geodetic data (triangulation and trilateration) are available in Japan since the end of the 19th century. The data consist of two first-order triangulation surveys (1883-1901; 1946-1972) and two trilateration campaigns in the latter half of the 20th century (1973-1985; 1977-1994), including second-order surveys. Examination of historical data in combination with GPS data can provide a way to evaluate the velocity and strain distributions in the last 100 years and elucidate whether the acceleration observed prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake represents a short-term transient deformation or not. Thus, we analyze horizontal deformation in NE Japan utilizing all the geodetic sets available.

We estimate horizontal displacement fields in NE Japan for the conventional geodetic data using the method developed by Yu and Segall (1996). In this, a denuisancing procedure is performed so that the dependency of the data on station coordinates is projected out of the system of equations and the horizontal displacement fields can be estimated directly. We solve for the inner coordinate or minimum norm estimate, representing the essential displacement after removing rigid motion and scale factor (in the case of triangulation) which fall in the null space of the observations. These results are transformed into average velocities by assuming steady deformation over the survey period and average shear strain rates are calculated for the region. The null space inherent in trilateration and triangulation data is constrained by GPS velocities in either the early GPS period or the period prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake.

We found that the maximum shear strain rate in South-Central Tohoku from 1884-1984 was not higher than those observed during the GPS era. Thus, suggesting that the transient deformation described by Mavrommatis et al. (2014) did not begin prior to 1996. Furthermore, the maximum shear strain rates from conventional geodetic data are consistent with those prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake, while the shear strain rate in the early stage of the GPS data may represent an anomalously high strain rate from the average interseismic situation, having geophysical implications related to precursory phenomena of the giant earthquake.

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

[S03]PM-1

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)),

chairperson:Ryoya Ikuta(Shizuoka Univ.)

Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM B

[S03-07] Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

○Hiroki Aota¹, Mako Ohzono^{1,2}, Hiroaki Takahashi¹, Yusaku Ohta³ (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:00 PM - 1:15 PM

[S03-08] A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

○Ryoya Ikuta¹, Horng-Yue Chen², Kiyomichi Takemoto³, Takeru Kohmi¹, Masataka Ando¹ (1.Shizuoka Univ., 2.Academia Sinica, 3.Nagoya Univ.)

1:15 PM - 1:30 PM

[S03-09] GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

○Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta^{3,2}, Fumiaki Tomita¹, Ryota Hino^{3,2} (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S03-10] Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

○Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura² (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

1:45 PM - 2:00 PM

[S03-11] A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

○Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Toshinori Kimura¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

2:00 PM - 2:15 PM

Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

*Hiroki Aota¹, Mako Ohzono^{1,2}, Hiroaki Takahashi¹, Yusaku Ohta³

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

千島海溝沿いにある北海道根室沖は、陸域のGNSSデータ解析から大きなすべり欠損速度分布が推定されており(例えば, Hashimoto et al., 2009), 次のプレート境界型大地震が発生する可能性が高い場所として注目されている地域である。また、この地域の津波の痕跡からは、17世紀に十勝沖から根室沖にわたる広範囲で超巨大地震が発生し、2011年東北地方太平洋沖地震のようにプレート境界浅部の断層がすべった可能性が示唆されている(Ioki and Tanioka, 2016)。そのため、このような海溝近くのプレート境界浅部の固着状態を推定することは、起こりうる地震の規模を予測するためにも重要であるが、距離が離れた陸域の観測のみからの推定には限界がある。このため、2019年7月に北海道大学・東北大学・東大地震研の共同研究により、根室沖の海底に3点のGNSS-A観測点が設置され、1回目の観測点の座標値推定が実施された(太田・他, 2019地震学会)。2020年10月に2回目の航海が予定されており、順調に行けば今年中に最初の地殻変動速度が得られると期待される。

これに先立ち本研究では、陸域のGNSS観測点による固着分布の検出限界を調べるとともに、新設されたGNSS-A観測点が、陸域のGNSS観測点では検出できない地域の固着分布推定にどのように貢献しうのかなかを定量的に検討する。まずは陸域のGNSS観測点が、固着分布の違いによってどの程度変化するかを調べる。本研究では、より現実的なプレート形状を仮定するため、ブロック断層モデルの1つである

TDEFNODE(McCaffrey, 2009)を用いて各点のノードにIwasaki et al. (2015)のプレート形状を与えて、試行錯誤的なフォワード計算から推定を行った。ブロックの相対的な剛体回転はプレート運動モデル

GSRMv2(Kreemer et al., 2014)で定義し、ブロック境界となる断層に様々な滑り欠損分布を与え、半無限均質弾性体を仮定したOkada (1992)によって各点での変位場、速度場を求めた。

先行研究等から固着の下限を60 kmと仮定してそれ以浅の固着率を1としたが、陸域の観測点から遠い深さ0-10 km, 0-20 kmのプレート境界面の固着率を0.5や0.0のように変化させた場合と、深さ0-60 kmにおいてフルカップリングさせた場合の計算値を比較すると、深さ0-10kmの固着率を変化させても陸域のGNSS観測点の速度場に大きな変化は生じないことがわかった。深さ0-20kmについては、固着率を0.5に変化させても深さ0-10kmの場合と同様に大きな変化はなかったが、固着率を0.0とした場合は陸域のGNSS観測点で最大1.5cm/yほどの変化が生じた。海溝近くのプレート境界浅部の固着状態を変化させても陸域の観測網のみからはそのシグナルの検出能力が低下することが報告されているように(Yokota et al., 2016), 本研究においても特に深さ10kmよりも浅いところについては陸域のみの観測網では固着状況を推定することが難しいことを確認した。一方で、同様の変化を与えてプレート境界浅部に近いGNSS-A観測点の予測値を見ると、深さ0-10 kmの領域で、0.5程度の固着率の変化させた場合、それに対応して水平成分では3cm/y以上、上下成分では最大0.8cm/y程度の違いが生じる。海底地殻変動の観測精度は、他の地域の先行研究などから水平成分で2-3cm/y程度と考えられているため、この誤差を考慮しても観測点周辺の固着率を検出可能と考えられる。上下成分については、水平成分よりも誤差が大きくなるため、固着率の細かい違いについては議論が難しいかもしれないが、今後の繰り返し観測による精度向上により、水平成分の結果をサポートする情報が得られる可能性がある。現在、プレート境界に沿って一様な固着分布を与えて簡易的な計算を行っているが、今後、17世紀型の超巨大地震(Ioki and Tanioka, 2016)におけるプレート境界浅部の固着分布を設定して計算するなど、走行方向にも変化する固着分布に対してGNSS-A観測点がどのような感度を持つか検討し、プレート境界浅部の固着の可能性やその状態について検討を行う。

A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

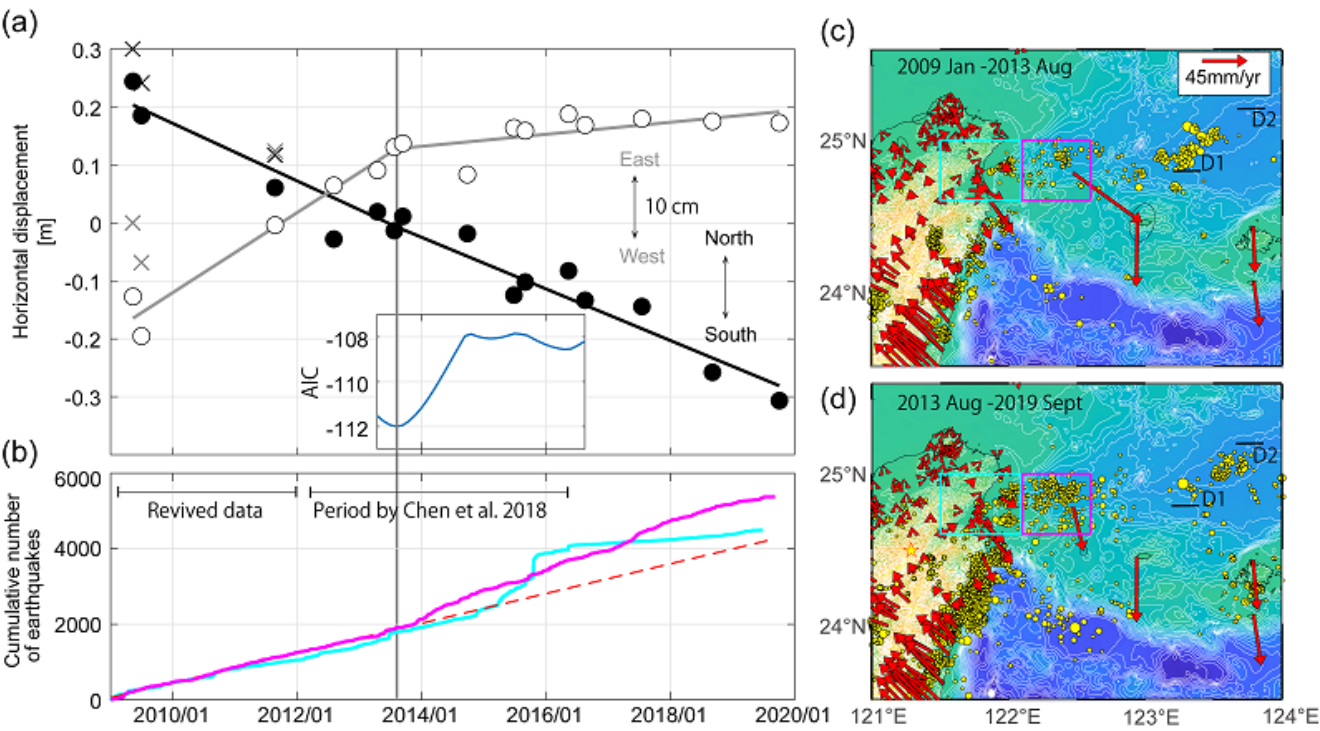
*Ryoya Ikuta¹, Horng-Yue Chen², Kiyomichi Takemoto³, Takeru Kohmi¹, Masataka Ando¹

1. Shizuoka Univ., 2. Academia Sinica, 3. Nagoya Univ.

The sustained seafloor geodetic measurement is crucial, even yet sparse in time and space, to constrain the undersea crustal deformation near the plate boundaries versus time. We present an integrated analysis of a decade of GNSS/Acoustic data collected at the site 60 km to the east of the northeast coast of Taiwan near the opening axis of the Okinawa trough back-arc basin. As a result, we obtained the horizontal and vertical positioning time series of the benchmark by the eighteen measurements from 2009 to 2019. The positioning time series of the benchmark shows a southeastward movement at a rate of 44 ± 3 mm/yr, with respect to the Yangtze plate, following the potential offset in 2012. The horizontal motion can be explained by the clockwise block rotation of the Yonaguni block united with the northern part of the Central Range. In addition, the vertical displacement of the transponder array shows the rapid subsidence of 20 ± 7 mm/yr from 2012 to 2019. The fast subsidence rate and the negative free-air gravity anomaly in this region indicate that the crustal thinning is compensated mainly by the surface deformation instead of the upward migration of the Moho. Considering the offset in 2012 due to the change of transponder array, the horizontal positioning time series of our site is best explained by two linear lines with a slope change in August 2013. The timing of the velocity change roughly coincides with the change of the periphery seismicity rate and the dike intrusion 150 km away from the site. The results show the potential of our seafloor geodesy site in accessing the temporal variation in the deformation rate near the spreading center of the Okinawa Trough, which is not accessible by on-land GNSS stations.

=====Figure caption=====

Time series of the OILN benchmark position relative to the stable part of Yangtze plate. (a) Same with Figures 3a and 3b. North-south (solid circles) and east-west (open circles) components. The coordinates for the revived data before 2012 are shifted assuming an offset at 2012. The original north-south and east-west coordinates are shown by black and gray crosses. Each time series is fitted by linear lines with a break at August 7, 2013 (vertical line) which is determined by AIC which is shown by the imposed diagram. The data for the middle eight campaigns are common with Chen et al. 2018 but solved by our new procedure. (b) Cumulative seismicity larger than M2.0 detected within the corresponding colored rectangular shown in Figures 6c and 6d. The red dashed line fits the seismicity during the period from January 2009 to July 2013. (c) Horizontal velocity vectors and seismicity larger than M3.0 during the period from Jan 1, 2009 to August 7, 2013. D1 and D2 show the location of dike intrusion modeled by Nakamura & Kinjo (2018) which occurred in the end of 2002 and April 2013, respectively. (d) Horizontal velocity vectors and seismicity during the period from August 8, 2013 to September 30, 2019.



GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

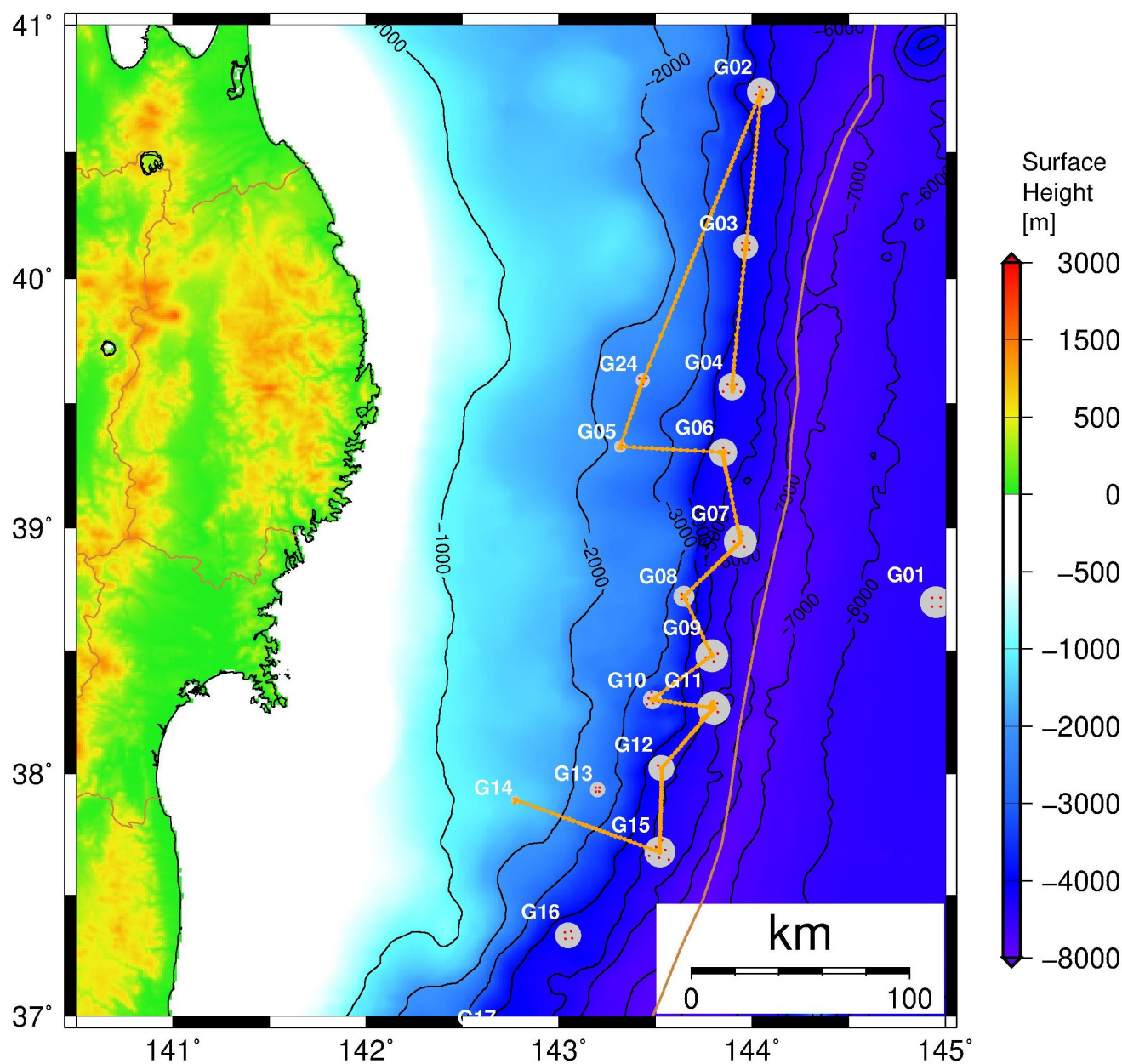
*Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta^{3,2}, Fumiaki Tomita¹, Ryota Hino^{3,2}

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 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（以下、GNSS-A観測）によって、プレート間の固着や地震時すべりによる地殻変動を海底で捉えることができ、多くの重要な知見が得られてきた。しかしながら、GNSS-A観測の実施には海上プラットフォームが不可欠であることがコスト面の問題を生んでいる。海上プラットフォームとしての有人船舶や係留ブイは、その運用に多額の費用がかかるため、経時的な地殻変動を検出するための高頻度観測や、多くの観測点を巡回しての観測を実施するのに限界がある。この点を克服して、多数の観測点における高頻度GNSS-A観測を行うため、海洋研究開発機構と東北大学では、無人機を用いた長期自律的GNSS-A観測を実施するための技術開発に共同で取り組んでいる。2019年7月に実施されたKS-19-12航海において、ウェーブグライダーを用いたGNSS-A観測を試験的に行った結果については、昨年の地震学会秋季大会で報告した通り、海底地殻変動観測点G02において、データの収録及び海底局の起動に無事成功した。また、大会後の解析によって、船舶を用いた場合と同程度のばらつきで海底局アレイ位置の推定が可能であることも示された[富田・他, 2019, 日本測地学会第132回講演会; Iinuma et al., 2019, AGU 2019 Fall Meeting].

昨年の試験の結果を踏まえ、今年度上半期においては、1か月程度ウェーブグライダーを実海域で運用して、日本海溝沿いに設置されている海底地殻変動観測点を巡回し、各観測点でのGNSS-A観測を実施する、長期運用試験を行った。昨年度のシステムを一部改良して、スラヤ衛星を利用した通信機能を付加し、ウェーブグライダーに搭載した制御装置に陸上から接続できるようにした。これによって、一部のデータの取得状況を確認したり、音響船上局へ手動でコマンドを送信したりできるようになった。当初は、2020年5月に、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海（KS-20-7）において、ウェーブグライダーを投入し、1か月余り後に傭船航海によって回収する予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大による機構船舶の運航停止によって、KS-20-7航海はキャンセルとなってしまった。このため、6月20日から23日にかけて東北大学が実施した「第三開洋丸」を用いた傭船航海での投入に切り替えて準備作業を行い、6月21日にG04観測点でウェーブグライダーを投入した。38日間の運用を経て、7月28日に「第八開洋丸」を傭船しての航海を実施して同機を回収した。

図にウェーブグライダーの航跡を示す。東北大学が2012年に設置した、G01～G20までの観測点のうちの13点、及び2019年に設置したG24の計14観測点を巡回し、GNSS-A観測を実施した。途中天候に恵まれない時期があり、太陽光パネルによる発電が不足したため、G13観測点での観測を断念した。取得したデータの解析は現在実施中ではあるが、各観測点における海底局アレイの位置を求めるのに十分な質・量のデータは得られており、大会当日は解析結果の詳細についての紹介する見込みである。



Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura²

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

GNSS-A 観測では、海中音速度場が精度に重大な影響を与える。しかし、その影響について、場所・時期による違いの検証や定量的な評価は十分になされてこなかった。渡邊・内田 [2016, 研究報告] では、それぞれの海底局における実際に観測された鉛直音速度プロファイルの比較を行い、局ごとのばらつきの大小を評価した。しかし、GNSS-A 観測では音速度構造の水平傾斜や時空間変化が観測精度に強く影響する。その影響を考慮して、観測値に対して、観測機会、観測点ごとに異なる環境依存の誤差量が与えられるべきである。このことは、GNSS-A 時系列の精度評価のみならず、時系列解析を実施する上でも必要であり、課題となっている。本稿では、観測中に得られる海洋場の状態を新しく定義し、その値を明示的かつ定量的に抽出できる新しいソフトウェア GARPOS を用いて、数値シミュレーション結果等との比較を行う。

海面を海上局が移動する手法を採用した GNSS-A 観測では、海上局の位置の違いから抽出される海中音速度変化 g_1 と海底局の位置の違いによって抽出される音速度変化 g_2 がそれぞれ取り出される [Yokota et al., 2019, MGR; Yokota & Ishikawa, 2019, SNAS]。これら 2 つのパラメータを複素平面上に配置した $g_1 + ig_2$ (G と定義する) を考慮することで観測時の海中音速度傾斜構造の定性的な状態が把握できる。傾斜層が多くて 2 層までと仮定すると、たとえば、 G の偏角 $\arg G \sim 0$ となる場合、傾斜構造は単純かつ浅部側に寄っていると推定できる。 $\arg G \sim \pi/2$ の場合、2 層かつお互いが逆向きの傾斜を持っていると推定される。 $\arg G \sim \pi, 3\pi/2$ の場合は $\arg G \sim 0, \pi/2$ の場合と同様であるが向きが反転している。 G の絶対値 $|G|$ は傾斜場の強度を表している。 G は水平 2 方向に取り出され、立体的な場を反映する。 G は、観測時のあらゆるタイミングで推定されるが、海上局が移動する測線の形状などに拘束され、現状では 1500 m 深度の観測局で 1 時間程度の分解能しか持たないと考えられる [Yokota et al., 2020, Frontiers in ES]。

観測値 G の例をいくつか紹介する。紀伊水道の沖合に位置する MRT2 では、2017 年以降の黒潮大蛇行時とそれ以前では明らかに観測時間中の $\arg G$ の平均値が変化している。また、南海トラフ側では $\arg G$ の平均値が観測機会ごとにばらつかず安定しているのに対して、日本海溝側ではばらつきが大きく、観測機会ごとの海洋場の大きな変動が観測されている。

海底局の場所や観測時期による G の変化は、局ごとの観測時の海洋場の状態を表現しており、各観測時の観測精度を議論する上で重要である。新たに開発された GARPOS [Watanabe et al., submitted] を用いることで、この値が明示的に取り出せるようになり、数値シミュレーション等を利用した比較を簡便かつ高速に行うことができるようになった。本稿では、アイコンアル方程式に基づいた海中音響伝播の数値シミュレーション結果との比較を通して、上記の音速場の状態について定量的に議論する。

A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

*Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Toshinori Kimura¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

南海トラフ地震発生帯では、海洋プレートの沈み込みより年間1cm程度の海底上下地殻変動が予想される。巨大地震発生帯における海底地殻変動を捉えることは、プレート間の固着強度分布、巨大地震の発生過程、およびその推移を理解する上で非常に重要な情報である。このような現象を高精度で捉えるために南海トラフに展開されている地震・津波観測監視システム（DONET: Dence Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis, Kaneda et al., 2015; Kawaguchi et al., 2015）に接続された水圧計により、長期的な変動を捉えることが期待されるが、それぞれの水圧計は年間最大10hPa（=10cm）の固有のドリフトを持っており、地殻変動成分とドリフト成分を切り分けるためには水圧計の校正が必要である。そこで私たちは海底に設置している水圧計を校正し、水圧計に固有なドリフト成分を把握するための移動式水圧校正装置を開発してきた

（Machida et al., 2019）。移動式水圧校正装置は内部の水圧計の計測の不確かさの主要因である圧力ヒステリシス、温度特性、姿勢の影響を最小にするように設計されており、実験室においても海底においても1hPa（1cm相当）以下の精度で圧力を計測することができる。現場における校正時にはDONET水圧計との水準差を計測することができ、その水頭差を把握することでDONET水圧計に対して絶対圧力を値付けすることができる。海洋研究開発機構では移動式水圧校正装置の精度評価を行うため、DONET1, DONET2においてそれぞれ1観測点ずつ（KMB08, MRC10）の校正を繰り返し行ってきた。MRC10観測点においては2018年10月、2019年2月、2019年5月、2020年2月に校正を行った。その結果MRC10観測点の水圧計の機器的なドリフト成分は7.3hPa/yearとなり、2015年以降からの長期的な連続水圧データについて線形的に補正した結果、MRC10観測点では0.48hPa/year（速報値）の沈降を示した。また、2020年以降、観測域の拡大、および稠密化を目的としてDONET水圧計の校正観測点を順次拡大している。本講演ではこれまでのDONET水圧計の校正結果、および今後の展望について紹介を行う。

※DONETは構築終了後の2016年4月1日より海洋研究開発機構から防災科学技術研究所に移管され、陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS: Monitoring of Waves on Land and Seafloor）の一環として両者が連携して運用・保守を行っている。