

**Wed. Oct 26, 2022**

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

9:45 AM - 10:45 AM JST | 12:45 AM - 1:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-1**

chairperson:Yutaro Okada(Kyoto University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-08] Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

\*Yuto NAKAMURA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

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

[S03-09] Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

\*Koya Nagae<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Yuto Nakamura<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

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

[S03-10] Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

\*Yusuke YOKOTA<sup>1</sup>, Koya Nagae<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>2</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Yuto Nakamura<sup>2</sup> (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

\*Ryosuke Nakahata<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Akihiro Nagaya<sup>2</sup>, Keiichi Tadokoro<sup>3</sup>, Mamoru Nakamura<sup>4</sup>, Rumi Sohrin<sup>1</sup>, Yasushi Harada<sup>5</sup>, Masataka Ando<sup>1</sup> (1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University)

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

11:00 AM - 12:00 PM JST | 2:00 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-2**

chairperson:Yutaro Okada(Kyoto University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-12] Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

\*Yutaro OKADA<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S03-13] Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

\*Tadashi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

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

[S03-14] Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

\*Sota Murakami<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Kohei Fujita<sup>1</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S03-15] Study on viscus flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

\*Hisashi SUIITO<sup>1</sup> (1. GSI of Japan)

**Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system****1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)****[S02] PM-1**

chairperson: Masayuki Yoshimi (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masayuki Obayashi (JAMSTEC)

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

[S02-01] The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

\*Masayuki OBAYASHI<sup>1</sup>, Junko Yoshimitsu<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Joel D Simon<sup>3</sup>, Yu Yong<sup>4</sup> (1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech)

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

[S02-02] Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

\*Ryoichi IWASE<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

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

[S02-03] Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

\*Katsuhiro YABU<sup>1</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Kentaro EMOTO<sup>2</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>1</sup> (1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.)

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

[S02-04] Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

\*Masanao SHINOHARA<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Takano<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Rie Nakata<sup>1</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S02-05] Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

\*Masayuki YOSHIMI<sup>1</sup>, Satoshi IDE<sup>2</sup>, Teppei ENARI<sup>3</sup>, Daiki TAYA<sup>3</sup>, Shuji IWATA<sup>4</sup> (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company)

**Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system****3:00 PM - 4:15 PM JST | 6:00 AM - 7:15 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)****[S02] PM-2**

chairperson:Hajime Shiobara(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Toshinori Sato(Chiba University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

**[S02-06] Classification for Earthquakes with Linked Data**

\*Hiroki UEMATSU<sup>1,2,3</sup>, Ahyi Kim<sup>3</sup>, Hideaki Takeda<sup>1,2</sup> (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

**[S02-07] Development of multi-platform next-generation WIN system (2)**

\*Shigeki NAKAGAWA<sup>1</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>2</sup>, Hiroaki TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takuto MAEDA<sup>3</sup>, Naoki UCHIDA<sup>1</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>4</sup>, Kazuo OHTAKE<sup>5</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>, Yosuke AOKI<sup>1</sup>, Yuta MAEDA<sup>6</sup>, Shiro OHMI<sup>7</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>7</sup>, Makoto OKUBO<sup>8</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>9</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>10</sup>, Katsuhiko SHIOMI<sup>11</sup>, Kenji UEHIRA<sup>11</sup>, Hideki UEDA<sup>11</sup>, Kazuki MIYAOKA<sup>12</sup>, Koji TAMARIBUCHI<sup>13</sup>, Ryo HONDA<sup>14</sup>, Shutaro SEKINE<sup>15</sup> (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)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

**[S02-08] Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method**

\*Shigeki Horiuchi<sup>1</sup>, Yuko Satou<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Aitarou Kato<sup>3</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup> (1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

**[S02-09] Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments**

\*Ryuhei YAMADA<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>2</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>3</sup> (1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

**[S02-10] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient**

\*Hajime SHIOBARA<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Toshinori Sato<sup>2</sup>, Aki Ito<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe University)

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:45 AM - 10:45 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:45 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-1**

chairperson: Yutaro Okada (Kyoto University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-08] Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

\*Yuto NAKAMURA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

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

[S03-09] Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

\*Koya Nagae<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Yuto Nakamura<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

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

[S03-10] Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

\*Yusuke YOKOTA<sup>1</sup>, Koya Nagae<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>2</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Yuto Nakamura<sup>2</sup> (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

\*Ryosuke Nakahata<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Akihiro Nagaya<sup>2</sup>, Keiichi Tadokoro<sup>3</sup>, Mamoru Nakamura<sup>4</sup>, Rumi Sohrin<sup>1</sup>, Yasushi Harada<sup>5</sup>, Masataka Ando<sup>1</sup> (1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University)

## Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

\*Yuto NAKAMURA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>

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

GNSS観測と海中音響測距を結合することにより海底の動きをセンチメートル単位で検出するGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）の測位精度は、海中音速場の擾乱の影響を大きく受ける。そのため、海底測位の分野では海中音速場と海底局位置を観測データから適切に推定するための様々な解析手法が開発されてきた。海中音速場と海底局位置を経験ベイズにより同時推定するGNSS-Aデータ解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では海中音速場を水平成層の基準場と、海上局及び海底局位置に依存する水平傾斜パラメータに分解し推定している。中村ほか（2021, 地震学会）では数値シミュレーションを用いてGARPOSの水平傾斜パラメータの解釈について議論したが、水平傾斜場が測位解の精度にどの程度影響を及ぼすかについてより詳しく検証する必要がある。

本研究では、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いた数値シミュレータで作成したGNSS-A疑似データにより、「GARPOS」の測位精度の評価を行った。数値シミュレータでは、直交座標系のグリッドに海中音速場を与え、最上部のグリッド（海面）からグリッド底面（海底）に設定した海底局位置の間の三次元的な音響伝播を計算する。PyKonalは離散化されたEikonal方程式を低い計算コストで解くFast Marching Method（Sethian 1999, SIAM Rev）を実装しており、Snellの法則を用いたレイトラッキングよりも厳密な理論音響走時を計算できる。計算した理論音響走時と送受信グリッドの座標を結合することにより作成したGNSS-A疑似データをGARPOSで解析し、解析結果をシミュレーションの設定条件と比較することで、GARPOSの測位精度を検証した。

数値実験では、様々な強度・厚さ・深度の水平音速傾斜場を与えてシミュレーションを行った。各パラメータがGARPOSの測位解にどのような影響を与えるか調べ、水平傾斜場が存在する海中音速場における測位解の系統的な誤差について議論する。

## Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

\*Koya Nagae<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Yuto Nakamura<sup>1</sup>

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

GNSSと音響測距を組み合わせることで海底地殻変動をセンチメートルレベルでとらえる手法を、GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）と呼ぶ。海上保安庁では、この手法を用いた海底地殻変動観測網SGO-Aを展開しており、これまで、2011年の東北地方太平洋沖地震による地殻変動やその後の粘弾性緩和、プレート間固着や浅部スロースリップ(SSE)などの固体地球科学における重要な結果を示した。現在は、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析ソフトウェアによりSGO-Aの測位解が公表されている。SGO-Aでの測距には、海上局と海底局の間を10kHzの正弦波を搬送波とする音響信号が用いられる。海上局が受信した波形と送信波形との相関処理を行い、信号の送受時刻を精密に決定することで、往復走時を算出している（富山, 2003, 海洋情報部技報）。ここで、往復走時の分解能は、搬送波の1波長である0.1 msec（往復距離に換算すると約7.5 cm）である。しかし、GARPOSによるこれまでの測位解析では、往復走時残差の標準偏差  $\sigma$  が0.1 msec以上である結果が多く、観測エポックで得られている。さらに、多くの観測エポックで水平方向の測位解のばらつきよりも上下方向のばらつきの方が明らかに大きく、GNSS-A観測での上下方向の位置の不確実性が指摘されてきている。このような上下方向の解のばらつきは、SGO-A観測網が整備され始めて20年以上が経過し、海上局や海底局を更新する機会が増えたことによる機器の変化が原因の一つとして挙げられる（横田ほか, 2022, 地震学会）。このような機器依存により受信信号に変化（図1）が生じ、読み取り位置に誤りが生じたと考えられる。なお、この図1に示した2エポック間では使用した海底局が異なっている。従来の受信波形の読み取りは、まず、図1の中段に示した相関波形の最大値を見つけ、その値の0.4倍を初めて超す極大値を読み取り値として採用している。図より、2012年と2021年では、中段の相関波形の形状が大きく異なり、特に2021年の波形は後ろへ伸びて波形の最大値が不明瞭であり、結果的に読み取りの精度が悪化したと考えられる。そこで本発表では、SGO-Aにおける全期間にわたって統一的利用可能な新しい受信信号の読み取り方法を検討する。新しい手法では、まず下段の相関波形に対して立ち上がり位置を決定する。なおこの立ち上がり位置は、エポックごとに決定される閾値  $s$  を初めて上回った極大値と定義する。次に、立ち上がり位置から  $N$  個目の極大値を読み取り位置とする。ここで、閾値  $s$  や  $N$  は、GARPOSにより得られる走時残差が小さくなるように決定する。この手法を用いることで波形の重畳の影響を抑えることができ、往復走時残差の  $\sigma$  を2 - 2.5 cm程度の精度が可能となる見通しであるが、将来的には、さらに高度で正しい読み取りが実現することが期待される。

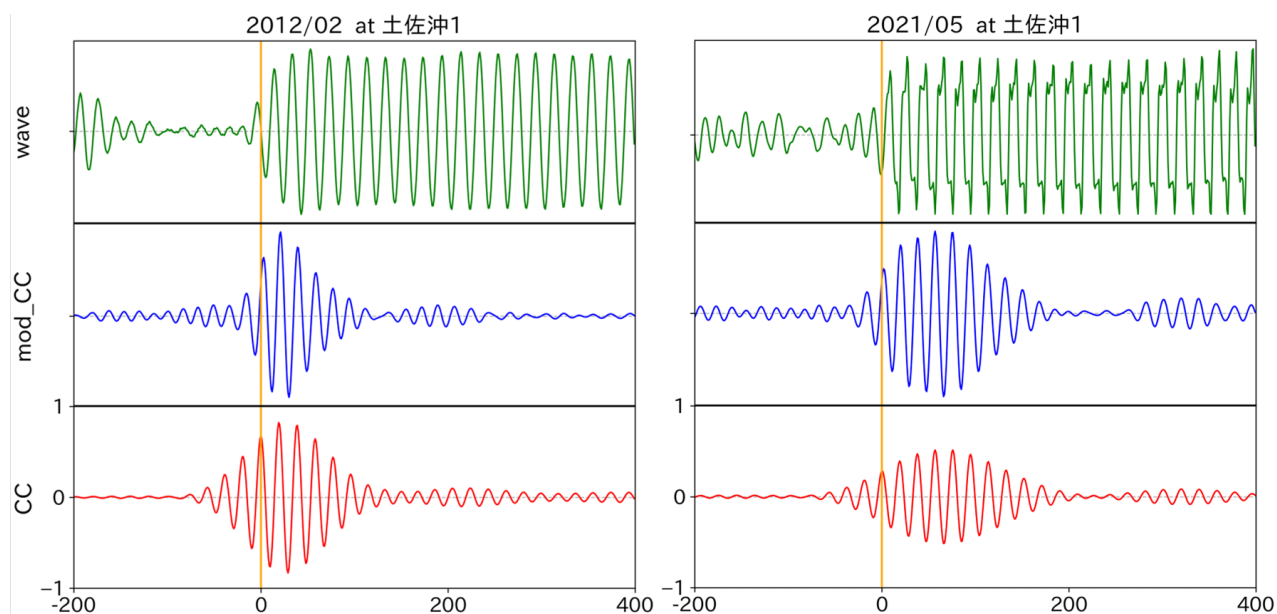


図 1 : 2012年 (左) と 2021年 (右) における受信波形や相関関数の変化.  
 上段 : 受信波形. 中段 : 受信波形と変形参照波形 (富山, 2003, 海洋情報部技報) の相関関数.  
 下段 : 受信波形と参照波形の相関関数.

## Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

\*Yusuke YOKOTA<sup>1</sup>, Koya Nagae<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>2</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Yuto Nakamura<sup>2</sup>

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

海上保安庁はGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測を継続的に実施している。この観測網をSGO-Aと呼ぶ。現在、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析手法による結果が公表されている。船舶側の海上局と海底局の間は10kHzの正弦波で構成される音響信号によって測距される(富山, 2003, 海洋情報部技報)。送信信号と受信信号に対してそれぞれ理論波形との相関処理を行うことで信号の送受時刻を精密に決定して往復走時を計測する。

これまでのデータから水平動よりも大きい上下動のばらつきは、(i)音響信号の読み取り誤り(永江ほか, 2022, 地震学会)にくわえて、次の2つの要因による音響往復時間の計測誤りに依存していることがわかってきた。

(ii)ソナーの有限の大きさに依存した信号の位相反転、重畳などによる角度依存性

(iii)海上局、海底局や観測時期などの機器に依存した位相、タイミングの崩れ具合の違い

これら(ii)と(iii)の影響は見かけの受信波形・相関波形からは容易に識別することができない場合が多いが、GARPOSの最終残差に0.1msec (信号1波長分) ほどのばらつきが見られることで認識される。

音響信号の角度依存性はHonsho et al. (2021, FES)で東北大の観測で用いられる7次2波のM系列信号に対して指摘されており、SGO-Aで用いられている9次4波のM系列信号でも生じていることが確認されたものである。(ii)の角度依存性には(iii)で指摘される機器依存性も関係している。海上局と海底局の機器の組み合わせが変更された場合に角度依存性の表出の仕方が変化する。これらの複合的な影響による信号相関波形の違いに応じた読み取り閾値を考慮しなければ1波長（0.1msec）以上の読み取り誤りを生み、とくに上下動の推定に悪影響がある。

既に広く研究されているGNSS観測における誤差は、①大気圏・電離圏遅延量などの自然由来誤差(Davis et al., 1985, RS; Boehm et al., 2006, JGR)と②サイクルスリップなどの非自然由来誤差(Lau & Cross, 2007, JG), ③アンテナ補正量・マルチパスなどの衛星角度に依存した誤差(Kunysz, 2010, IEEE; Banville & Langley, 2013, JG)に分けられる。GNSS-A観測における海中音速度場による誤差(Yokota et al., 2019, MGR)は①のアナロジーであり、(i)信号の読み取り誤差は②、(ii)角度依存誤差と(iii)機器依存誤差は③（②を含む場合もある）のアナロジーであると考えることができる。

本発表では、GARPOSによる推定結果を利用することで、全期間に統一的に利用できる信号トラベルタイムの補正法を考察し、SGO-A観測網のより正しい上下動を導出する方法を議論する。この中で、(iii)を適切に補正することで最も懸念される海底局置き換えなどによる10cm近いバイアス的なずれはほぼ補正可能であることがわかった。ただし、(iii)の物理的な原因は不明であり、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

(ii)はGARPOSの最終残差に対する移動平均などによるスムージング結果を用いることで補正することは可能であり、残差のばらつきを抑えるだけでなく、一部の観測エポックの上下動誤差の低減に効果を示すことがわかった。こちらも詳細な原因は不明であるが、以前から実験的に指摘されており(望月ほか, 2007, 海洋情報部研究報告)、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

これまでの考察から、 $\sigma \sim 2\text{--}2.5\text{cm}$ 程度の精度は実現できる見通しであるが、将来的にはさらに高度で尤もらしいトラベルタイム補正が実現することで精度を上げることができると考えられる。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所の公募研究ERI JURP 2022-Y-KOBO25により実施されています。

## Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

\*Ryosuke Nakahata<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Akihiro Nagaya<sup>2</sup>, Keiichi Tadokoro<sup>3</sup>, Mamoru Nakamura<sup>4</sup>, Rumi Sohrin<sup>1</sup>, Yasushi Harada<sup>5</sup>, Masataka Ando<sup>1</sup>

1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University

琉球海溝の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」と呼ばれる巨大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。八重山津波の発生源は未だ議論が続いているが、Nakamura (2009)は、琉球海溝南西端のプレート境界浅部で発生したMw8.0の津波地震が発生源であることを示唆している。そこで我々は、琉球海溝南西端のプレート境界の固着の有無を明らかにするために、2014年10月に波照間島南方沖約40km、水深約3300mの前弧海盆に海底基準局OHTM (図)を設置した。海底基準局は3台のトランスポンダをおおむね水深の1/√2程度の外接円直径をもつ正三角形に配置した。2014年10月から2022年6月まで、2021年を除いて年一回のGNSS/音響測距結合方式による観測を実施し、海底局の座標の変動から固着の有無を推定した。本発表では、すでに解析が済んでいる2014年10月～2020年9月の結果に、現在解析中の2022年の結果を併せて報告する予定である。

海底局の座標は、解析プログラム群OCDASAN (Ocean-bottom Crustal Deformation Analysis tool for Study in Ando labo. Nagoya university) を用いてIkuta et al. (2008)によって提案された方法で推定した。本研究では、3台のトランスポンダの重心を海底局の座標と定義している。OCDASANは、(1) 海中の音速構造は水平成層をなしており、一定の滑らかさで時間変化する、(2) 3台のトランスポンダの構成は不変、という2つの仮定のもと罰則付き最小二乗法を解くことにより海底局の座標を推定している。

解析の結果、2014年10月～2020年9月のOHTM海底局の移動方向及び移動速度は、揚子江プレートに対して南向きに $66.3 \pm 10.3$ mm/yr、東向きに $19.0 \pm 9.4$ mm/yrと推定された。また、上下方向は $0.0 \pm 9.7$ mm/yrと推定され、上下変動を伴っていないといえる。さらに、この海底局の移動速度は、西表島及び波照間島に設置されている国土地理院の陸上GNSS局で観測された移動速度よりも速い。この結果は、この地域のプレート境界には固着が存在せず、それどころか前弧海盆が上下変動を伴わずに伸長していることを示唆している。

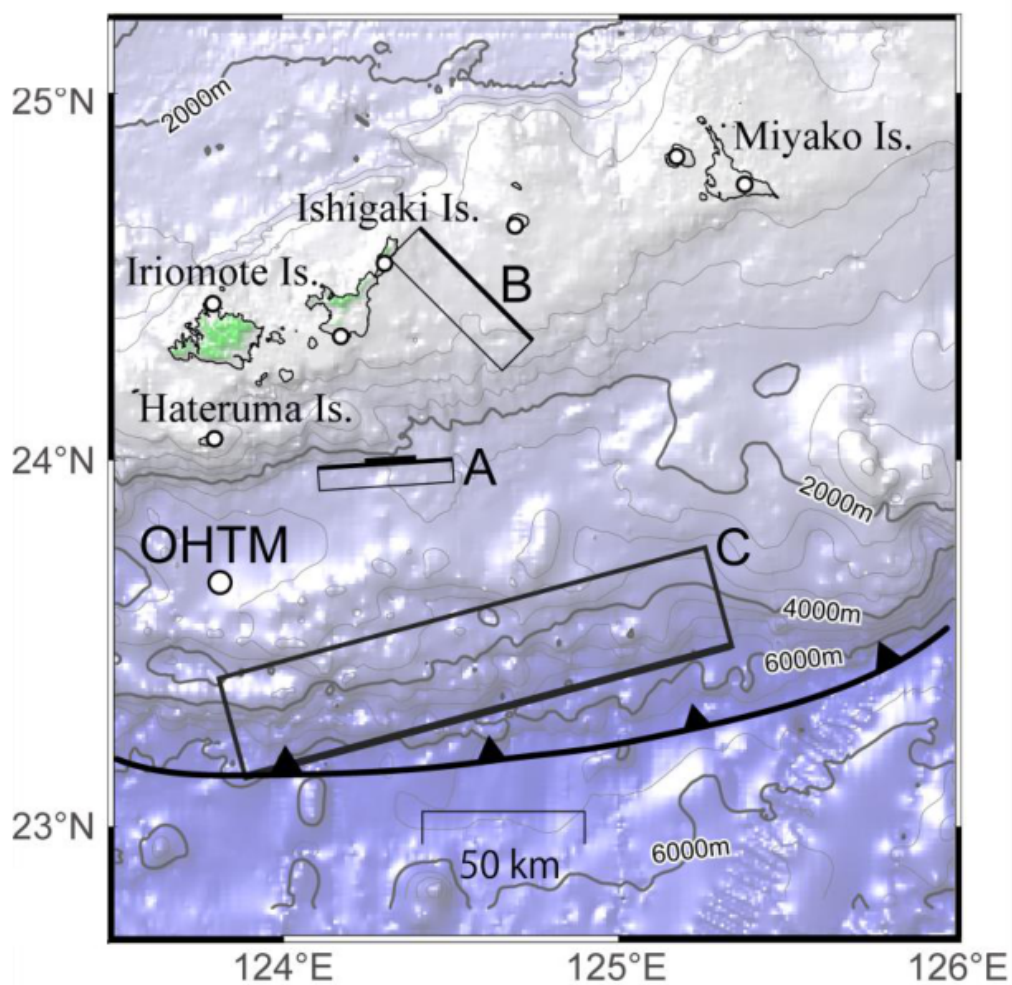
上下変動を伴わずに前弧海盆を伸長させるメカニズムとして、Nagaya et al. (2016)で提案された、琉球海溝のマントルウェッジの先端におけるアンチゴライトの弱い対流が考えられる。アンチゴライトはマントル中のかんらん岩が水和してできる蛇紋岩の一種であり、かんらん岩よりも粘性率が低いのが特徴である。海底局を設置した前弧海盆の地下の比較的浅部にまで、水和してアンチゴライト化したマントルウェッジかんらん岩が侵入し、対流によって前弧ウェッジを海溝側に引き伸ばしていると考えられる。さらに我々は、FreeCAD 0.19 (<https://www.freecadweb.org/?lang=ja>)を用いて、有限要素法を用いて我々の観測結果を再現するモデルを検討した。OHTM直下のプレート境界に固着が無いだけでは不足、マントルウェッジの先端にウェッジを伸長させる対流が必要であることが示唆された。

本研究の結果は琉球海溝南西端の前弧下に固着が無いことを示しているが、固着の欠損がどの程度広範囲にわたるかを知るには更に海溝に沿って広範囲で海底地殻変動を観測する必要がある。OHTM観測点直下に固着が無い事実は、八重山津波の発生源としてOkamura et al. (2018)のような海溝斜面における海底地すべりが有力な候補であることを支持する。1771年の八重山津波では八重山諸島で強震動があったことが示唆されている (例えばAndo et al. 2018) が、直下型の地震に伴う海底地すべりであったと考えても矛盾はない。将来、海底地すべりにより八重山津波の規模の津波が強震動を伴わずに生じる可能性も考えられる。減災のためには海盆上に海底津波計などを設置し、発生した津波を直接監視するシステムが有効である。

今後の計画として、波照間島沖の海底地殻変動観測を続けるほか、宮古島南方沖の宮古深海平坦面に新たな海底局を設置し、この地域のMw8.0クラスのプレート境界地震を発生させうる固着の有無を明らかにしていく予定である。

#### 引用文献

- Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y., Ohashi, Y., Imai, T., Nakamura, M., Ikuta, R., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., and Shishikura, M., 2018, Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics*, **722**, 265 -276. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.007>
- Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K., Yada, K., and Besana G.M. 2008, A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **113**, B02401. <https://doi.org/10.1029/2006JB004875>
- Imamura, F., Yoshida, Y., & Moore, A., 2001, Numerical study of the 1771 Meiwa tsunami at Ishigaki Island, Okinawa and the movement of the tsunami stones. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, **48**, 346-350 (in Japanese). <https://doi.org/10.2208/proce1989.48.346>
- Nakamura, M., 2006, Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation. *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0007-9>
- Nakamura, M., 2009, Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19307. <https://doi.org/10.1029/2009GL039730>
- Nagaya, T., Walker, A.M., Wookey, J., Wallis, S.R., Ishii, K., and Kendall, J.M., 2016, Seismic evidence for flow in the hydrated mantle wedge of the Ryukyu subduction zone. *Scientific Reports*, **6**, 29981. <https://doi.org/10.1038/srep29981>
- Okamura, Y., Nishizawa, A., Fujii, Y., and Yanagisawa, H., 2018, Accretionary prism collapse: a new hypothesis on the source of the 1771 giant tsunami in the Ryukyu Arc, SW Japan. *Scientific Reports*, **8** :13620. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31956-8>



図：海底基準局 OHTM の位置と八重山津波の波源モデル。

A=Imamura et al. (2001); B=Nakamura (2006); C=Nakamura (2009)

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:00 AM - 12:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:00 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-2**

chairperson: Yutaro Okada (Kyoto University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-12] Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

\*Yutaro OKADA<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

---

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

[S03-13] Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

\*Tadashi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

---

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

[S03-14] Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

\*Sota Murakami<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Kohei Fujita<sup>1</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

---

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

[S03-15] Study on viscous flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

\*Hisashi SUIITO<sup>1</sup> (1. GSI of Japan)

# Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

\*Yutaro OKADA<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup>

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

スロースリップイベント（SSE）は低速の断層すべりが数日間から数年間継続する現象であり、通常の地震と比べ時間スケールが長いスロー地震の一種である。オホーツクプレートの下に太平洋プレートが沈み込む日本海溝及び千島海溝では、活発なスロー地震活動が報告されている（e.g., Baba et al., 2020; Nishikawa et al., 2019）。一方で日本海溝ではいくつかの先行研究によってSSEの観測事例が報告されているものの（e.g., Ito et al., 2013; Nishimura, 2021）、千島海溝を含む領域全域におけるSSEの規模・継続期間や時空間分布といった活動様式は依然として不明である。本研究では継続期間が数日間から数週間である短期的SSE（S-SSE）に着目し、陸域のGNSSデータを用いた系統的検出を行うことで、この地域のS-SSEの活動様式の解明を試みる。本研究では国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業により東北日本に設置された529のGNSS連続観測局の1996年12月1日から2021年11月30日までの期間の日座標値を検出に用いた。ノイズを低減するための事前処理として、保守作業等に起因する人為的なオフセット、通常の地震に起因する地表変位、季節変動成分、及び共通誤差成分を取り除いた（Cleveland et al., 1990; Tobita, 2016; Wdowinski et al., 1997）。本研究ではS-SSE系統的検出手法（Okada & Nishimura, in prep.; Okada et al., 2022）を用いてイベントの検出を行った。この手法では、初めに測地マッチドフィルター（Rousset et al., 2017）をGNSSデータの水平成分に適用することでS-SSEの候補となる非定常変位イベントを検出する。続いて、非定常変位イベントの矩形断層モデルと継続期間を推定し（Matsu'ura & Hasegawa, 1987; 宮岡・横田, 2012; Rousset et al., 2017）、これらの推定結果に基づき非定常変位イベントをS-SSEへと分類する。本研究ではS-SSEの可能性の高いイベントをclass 1 SSE、S-SSEの可能性のあるイベントをclass 2 SSEとそれぞれ分類した。また本研究では上記の分類条件に加えて、M6.5以上の通常地震と時空間的に近接する変位イベントを地震に関連するイベントとして取り除いた。

予備解析の結果、25年間で114個のS-SSEの検出に成功した。検出したイベントの多くは関東地方東部の直下及び沖合に分布している（図1）。この地域では先行研究（e.g., Nishimura, 2021）で活発なS-SSEの活動が報告されており、浅部側と深部側に分かれてS-SSEが分布するといった特徴もNishimura (2021)と共通している（図1b）。2017年5月に関東沖合で検出されたイベントは、テクトニック微動（Nishikawa et al., 2019）との間の時空間的同期が確認された。また関東地方ほど活発ではないものの、小規模なS-SSEクラスターが宮城県沖と十勝沖に分布している。このうち、十勝沖で検出されたS-SSEの中には、超低周波地震（Baba et al., 2020）やテクトニック微動（Nishikawa et al., 2019）と時空間的に同期するイベントが確認された。本解析では十勝沖におけるS-SSEは必ず超低周波地震と時空間的に同期するという仮定の下、14件の超低周波地震のバーストを基準にGNSS座標時系列をスタックし矩形断層を推定した。その結果、平均的な断層モデルは2003年十勝沖地震の震源域（Yamanaka & Kikuchi, 2003）の浅部延長に推定された。

一方で予備的な検出結果の中には、明らかに誤検出と考えられる断層すべりで変位パターンを説明し難いイベントや、M6以上の通常地震の地震時変位またはその余効変動をSSEとして検出したと考えられるイベントが多数含まれている。地震に関連する地殻変動の補正とSSEとその他の非定常イベントの分類を解析の中で行ってはいるものの、S-SSEとそれ以外の非定常変位イベントの正確な分類は今後の課題である。

## 謝辞

本研究では国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業より提供されたGNSS RINEXファイルを使用した。本研究で用いたプレート境界モデル(Iwasaki et al., 2015)は、国土地理院の数値地図250mメッシュ（標高）、日本海洋データセンターによる500mメッシュ海底地形データ(J-EGG500, [http://www.jodc.go.jp/data\\_set/jodc/jegg\\_intro\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html))及びアラスカ大学アラスカ地理情報ネットワークの地形・水深データ(Lindquist et al., 2004)から作成したものである。

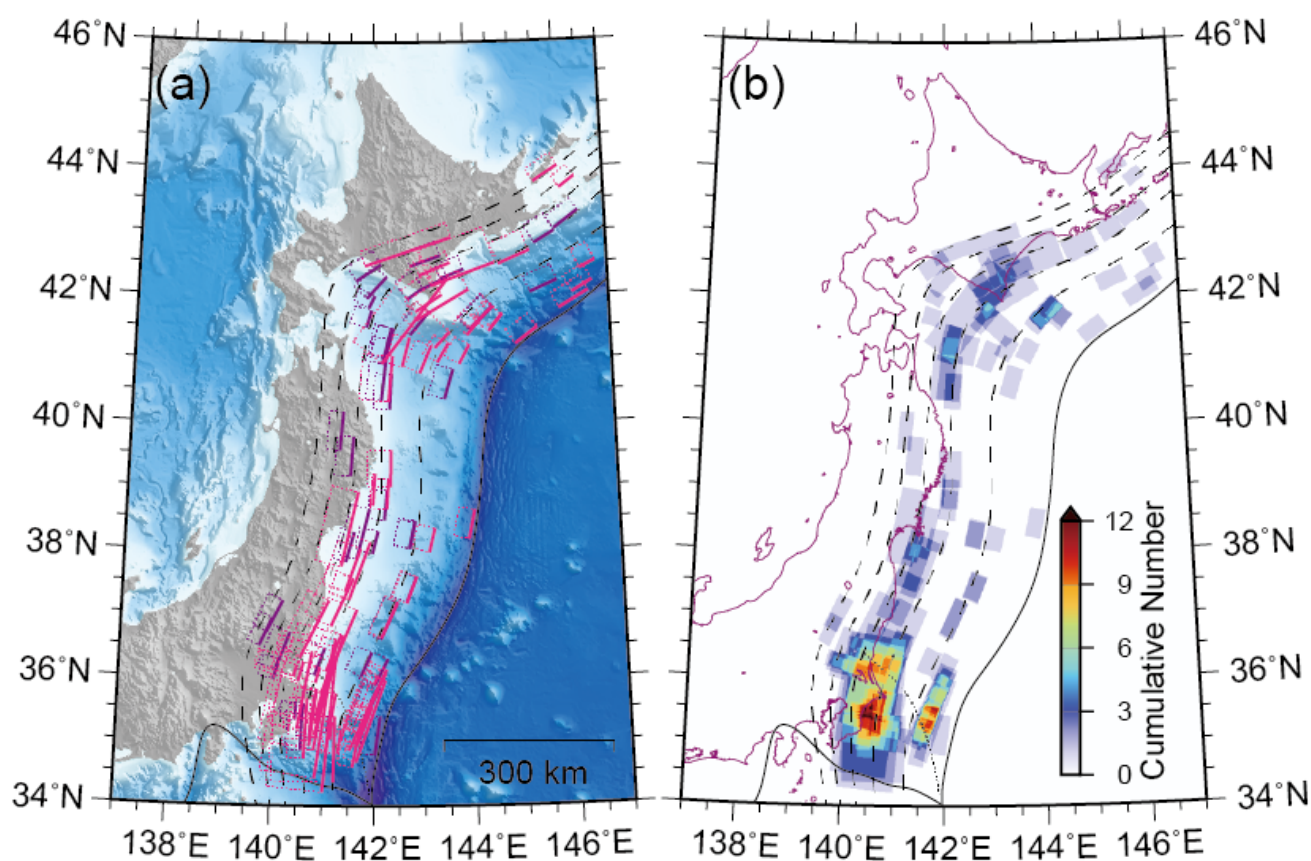


図 1. 予備解析により検出された S-SSE の分布。黒い実線と破線は海溝および 20 km ごとのプレート等深線を示す (Iwasaki et al., 2015)。(a) 検出された S-SSE の断層分布。ピンク色と紫色の長方形はそれぞれ class 1 SSE と class 2 SSE を示す。(b) 検出された S-SSE の累積個数分布。

## Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

\*Tadashi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>

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

地殻変動観測は、地震の発生サイクルにおける断層すべりや固着状態の把握のために重要な情報を提供する。ひとくちに地殻変動観測といっても、対象とする時間スケールを異にする様々な手法がある。その中でも宇宙測地技術を用いた陸上のGNSS観測や海底のGNSS-A観測は、プレートの沈み込みやブロック運動などによる長期的な変動や地震時の永久変位、地震後の余効変動の把握に有効ほか、近年はスロースリップイベントのような短期の変動も重要なターゲットになってきている。現在、国土地理院GEONETによるGNSS観測網や海上保安庁SGO-AによるGNSS-A観測網などの定常観測によって、南海トラフ及び日本海溝の地殻変動場の詳細が把握され、政府の地震調査委員会等の関連会議における地震・地殻活動の現状評価に役立てられている。

地震の発生サイクルを詳細に把握するためには、各サイクルにおいて地下の断層でどのようなすべりが発生しているかを正確に推定する必要がある。そのため、現状の観測技術・観測網でどこまで微小なシグナルが検出可能かその検出能力を評価することは、得られた観測データの妥当性やそれに基づく政府機関における地殻活動の現状評価、さらには今後の観測網の展開を検討するにあたっての重要な指針となる。水藤

(2016) は、GEONETによる日本周辺の海溝におけるプレート境界すべりの検出能力を調査した結果について報告している。震源域となるプレート境界の大部分は海底下にあるため、陸上のGNSS観測のみでは、検出能力が低下する。海上保安庁はその欠点を補うため、日本海溝及び南海トラフ周辺の海底にGNSS-A観測網

(SGO-A) を展開しており、Yokota et al. (2021) は、同様の調査をSGO-Aに適用し、海域における検出能力の向上を定量的に示した。

こうした、地表の地殻変動と地下の断層すべりを結びつける解析の際には、Okada (1992) のような地球を均質な半無限弾性体と仮定したモデルによるグリーン関数がよく使われている。こうしたモデルは簡易でありながら、多くの場合に有用な結果を得ることが可能である。一方で、プレート境界型の巨大地震の震源域を対象とする場合、領域が陸上から海底までの広範囲にわたるため、地下構造の不均質性、観測点の標高差、地球の曲率などの効果が無視できなくなると考えられ、半無限均質弾性体モデルが妥当な近似とならないおそれがある。しかしながら、こうした効果を取り入れようとすると、非常に高い計算コストや複雑な計算が要求され、容易には計算できない。Hori et al. (2021) は、日本海溝及び南海トラフにおいて、これらの効果を考慮したより現実的なモデルによるグリーン関数をあらかじめ計算しライブラリ化した。

このライブラリを用いることで、ユーザーはスーパーコンピュータ等が必要になる複雑な計算と同じ結果を通常のPCで容易に再現可能となる。このグリーン関数ライブラリを用い、Yokota et al. (2021) と同様の検出能力の調査を行った結果、(本原稿執筆時では暫定的な結果ではあるが) 陸域からの検出能力が低下する傾向があるなど、半無限均質媒質モデルとの違いが見えてきている。こうした違いは今後の地殻活動の評価にとっても重要であり、詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究では、JAMSTECから提供いただいたHori et al. (2021) のグリーン関数ライブラリを使用しています。記して感謝いたします。

参考文献：

Hori et al. (2021), EPS, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01370-y>

Okada (1992), BSSA, <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>

水藤 (2016), 測地学会誌, <https://doi.org/10.11366/sokuchi.62.109>

Yokota et al. (2021), PEPS, <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00453-4>

## Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

\*Sota Murakami<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Kohei Fujita<sup>1</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup>

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

プレート沈み込み帯における巨大地震後の地殻変動については、アセノスフェアにおける粘弾性応力緩和と余効すべりの影響が考えられる。2011年に発生した東北沖地震に際しては、海底測地観測点において、地震直後から陸向きの大きな地殻変動が主破壊域直上で観測されており、陸側プレート下のマントルウェッジや海洋プレート下のマントルの粘性を考慮するだけでは説明ができない。この海底観測データの説明として lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) と呼ばれるプレート沈み込み帯下の低粘性領域をモデル化することが提案されている。過去、2004年スマトラアンダマン地震や2010年チリ地震といったプレート沈み込み帯の巨大地震においてはLABの検出に足る海底測地観測はなされていない。しかし、将来の海底観測網の充実によりプレート沈み込み帯におけるLABの普遍的な存在が認められる可能性がある。プレート沈み込み帯の一つであり、今後数十年以内に巨大地震の発生が危惧されている南海トラフにおいては、日本海溝と同様な海底測地観測網が備わっている。しかしながら、過去の地震においては、LABに対する感度が高い海底測地観測はなされていない。そこで、本研究では、想定される南海トラフにおける巨大地震に対し、LABの低粘性が地震後の地殻変動にどのような影響を与えるかを定量的な評価を行った。本研究では、南海トラフの現実的な地下構造モデルを考慮した粘弾性応力緩和による地殻変動解析を実施した。現実的な地下構造を考慮するために、対象領域を2500km x 2500km x 1100kmとし、最小要素サイズを500mとした $4.2 \times 10^9$ 自由度の大規模な有限要素モデルを作成した。このような大規模なモデルによる解析においては、多大な計算コストを要するため、計算コストを著しく削減可能な地殻変動解析手法 (Ichimura et al., 2016) を導入することで、粘弾性解析を実現している。マントルウェッジと海洋マントルにおいて粘性率が異なる場合やLABの粘性率の異なるケースにおける、地震時すべりに対する4年間の地表面応答を計算した。計算の結果、LABの粘性率が $2.5 \times 10^{17}$  Pasと低粘性が著しい場合、2011年東北沖地震の場合と同様に、海域で陸向きの非常に大きい水平変位が生じた。また、鉛直変位については、ケースによって隆起と沈降の分布が変わる複雑な挙動が見られた。これらの変形は、時間経過とともに急速に減衰していくことから地震後初期での観測が有効であることが分かった。具体的には、地震後1年間に於いて、GNSS音響結合方式(GNSS-A)の海底観測点の観測精度を上回る非常に大きな値を持つことから、検知できる可能性が高いことがわかった。一方で、LABの粘性率が $2.5 \times 10^{18}$  Pas程度である場合、LABが存在せず海洋マントルの粘性率を $1.0 \times 10^{19}$  Pasで一様とした場合と似た変形パターンが見られた。この場合、現状の観測精度を上回る差が生じないことから、検知が難しいことがわかった。ただし、GNSS-Aにおける高頻度観測や、DONETにおける観測精度向上など、海底観測技術の進展により検知できる可能性がある。なお、今回は南海トラフのいわゆる全割れ破壊を想定した場合の地表面応答を計算したが、半割れでの地震が発生する可能性があることや、実際のより複雑なレオロジー構造によって応答が異なる可能性がある。こうした複数の地震シナリオやレオロジーによる応答の違いを調べることで、LABの検出可能性を検討することが今後の課題である。

# Study on viscous flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

\*Hisashi SUIO<sup>1</sup>

## 1. GSI of Japan

### ・はじめに

南海トラフ沿いでは、100～200年の間隔でプレート境界での大規模地震が繰り返し発生している。「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会（内閣府）」（平成29年8月）では、防災対応を検討するケースとして4つの典型的ケースに整理している。このうち、想定震源域の東側（片側）だけで大規模地震が発生しば場合（ケース1）、想定震源域で一回り小さいM7クラスの地震が発生した場合（ケース2）では、大規模地震の発生につながる可能性を検討するために、プレート境界の固着状態（＝余効すべり）の正確な把握が必要となる。従来、初期の余効変動の主要因は余効すべりに起因すると考えられてきた。しかし、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の余効変動に関する解析では、地震後の粘性緩和の影響を考慮した場合としなかった場合とで、推定される余効すべりの場所と大きさが大きく異なることが分かってきた。従って、余効すべりを正確に推定するためには粘性緩和の見積もりが重要であり、その見積もりには適切な地下の粘弾性構造と粘性率が必要である。最終的には粘弾性構造と粘性率の見積もりが重要であるが、本稿ではその前段階として、1944年東南海地震と1946年南海地震の断層モデルを参考に南海トラフ沿いで発生する大規模地震の地震時の変動を計算し、粘性緩和による変動が、粘性構造のどの領域が地表のどの場所の変動に、どのように影響するのかについて報告する。

### ・各粘弾性領域における変動の特徴

南海トラフ沿いの粘弾性構造は大きく2つの領域に分けられる。一つは陸域の大陸プレート下に位置するウェッジマントル、もう一つはフィリピン海プレート下の海洋アセノスフェアである。これら2つの粘弾性領域における粘性緩和は、ほぼ真逆の変動を引き起こす。1946年南海地震を想定した場合、ウェッジマントルの粘性緩和は、日本海側を中心として海溝軸に向かう南東方向の水平変動と日本海側を中心として陸域でわずかな隆起を引き起こす。一方、海洋アセノスフェアの粘性緩和は、ウェッジマントルの粘性緩和とはほぼ真逆で、太平洋側の海域から陸域の一部では海溝軸から離れる北西方向の水平変動、太平洋側の海域で隆起、陸域でわずかな沈降を引き起こす。ただし、日本海側の陸域ではウェッジマントルの粘性緩和と同じく、海溝軸に向かう南東方向の水平変動が生じる。太平洋側の陸域における水平変動の方向や隆起、沈降の境界は、地震時のすべり分布に強く依存し、太平洋側の陸域でも海溝軸に向かう南東方向の水平変動が引き起こされる場合もある。

次に1944年東南海地震を想定した場合、1946年南海地震の場合と概ね同じ傾向である。ウェッジマントルの粘性緩和は陸域を中心として海溝軸に向かう南東方向の水平変動が卓越する。一方、海洋アセノスフェアの粘性緩和はほぼ海溝軸から離れる北西方向の水平変動が卓越し、太平洋側の海域で隆起、陸域でわずかな沈降を引き起こす。1946年南海地震の場合に見られた日本海側の陸域での南東方向の水平変動はほとんど見られない。

フィリピン海プレートは低角で沈み込んでいるために粘性緩和を引き起こすウェッジマントルの領域が狭い。そのため、海洋アセノスフェアの粘性緩和の影響の方が顕著であると考えられる。また、フィリピン海プレートの厚さが30～40kmと太平洋プレートに比べると薄いことも、海洋アセノスフェアの粘性緩和の影響が顕著になる一因であると考えられる。従って、南海トラフで発生する大規模地震の粘性緩和の影響を評価する上では、ウェッジマントルよりも海洋アセノスフェアの粘性率の方が重要と考えられる。今後、1944年東南海地震および1946年南海地震後の地殻変動の観測データを精査し、適切な粘弾性構造と粘性率を推定していく。また、2004年紀伊半島南東沖の地震の余効変動データも粘性率を制約するには有効だと考えている。

**Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system**

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 2:45 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S02] PM-1**

chairperson: Masayuki Yoshimi (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masayuki Obayashi (JAMSTEC)

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

[S02-01] The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

\*Masayuki OBAYASHI<sup>1</sup>, Junko Yoshimitsu<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Joel D Simon<sup>3</sup>, Yu Yong<sup>4</sup> (1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech)

---

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

[S02-02] Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

\*Ryoichi IWASE<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

---

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

[S02-03] Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

\*Katsuhiro YABU<sup>1</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Kentaro EMOTO<sup>2</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>1</sup> (1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.)

---

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

[S02-04] Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

\*Masanao SHINOHARA<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Takano<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Rie Nakata<sup>1</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

---

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

[S02-05] Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

\*Masayuki YOSHIMI<sup>1</sup>, Satoshi IDE<sup>2</sup>, Teppei ENARI<sup>3</sup>, Daiki TAYA<sup>3</sup>, Shuji IWATA<sup>4</sup> (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company)

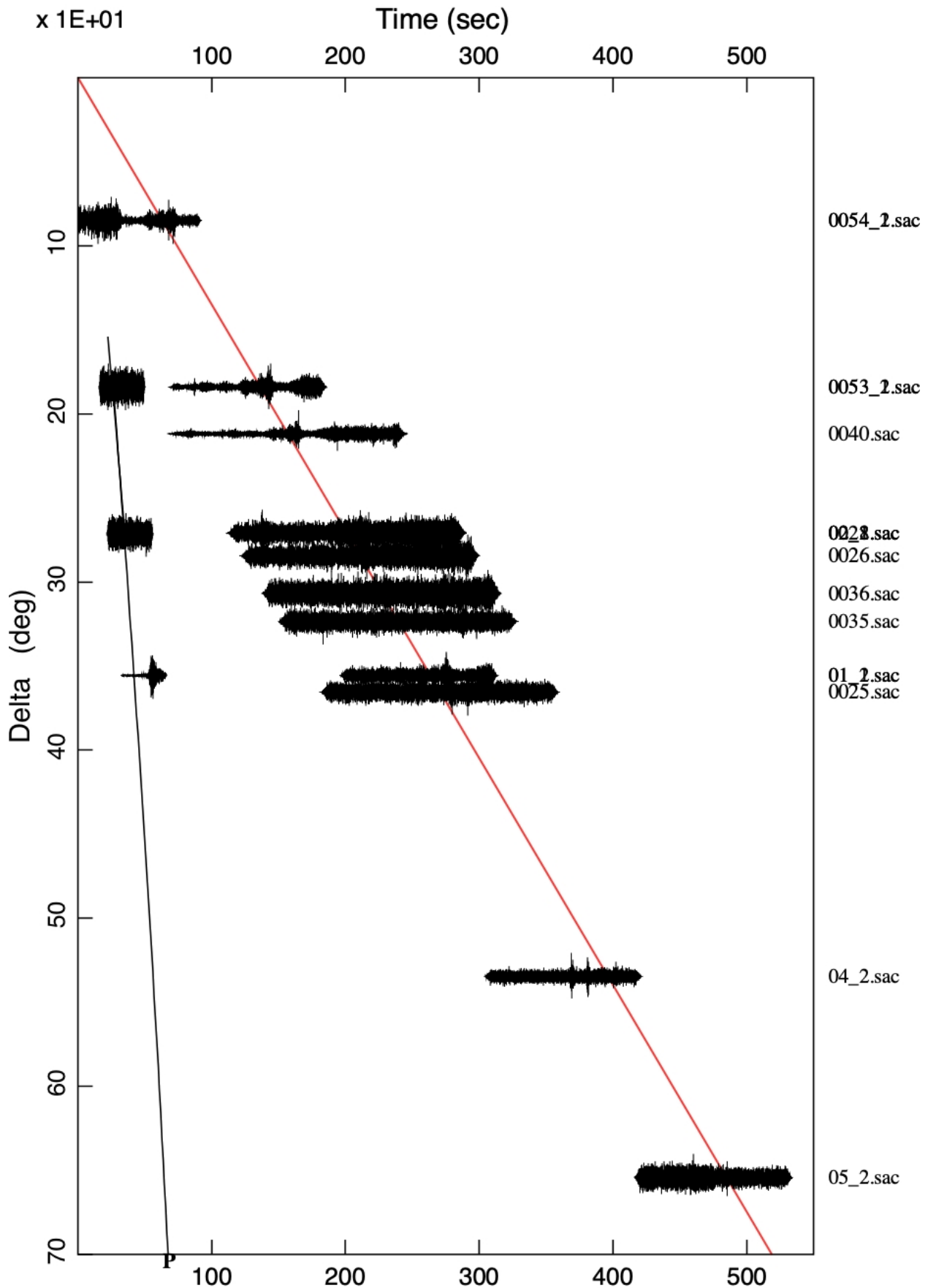
## The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

\*Masayuki OBAYASHI<sup>1</sup>, Junko Yoshimitsu<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Joel D Simon<sup>3</sup>, Yu Yong<sup>4</sup>

1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech

現在約50 台のMERMAID (Mobile Earthquake Recording in Marine Areas by Independent Divers) フロートが南太平洋の海中を漂流しており、地球深部内部構造を求めることを目的に高周波 (~1 Hz) P 波から海底で変換された水中音波をハイドロフォンで観測し、その波形データを衛星通信を利用して準リアルタイムで送信している。このMERMAIDフロートアレイは国際プロジェクトSPPIM (South Pacific Plume Imaging and Modeling) の下2018 年の展開以来、ホットスポットとプルームに富む南太平洋下マントルを通る新しい波線経路のグローバルな地震の高品質P波波形データを何千も記録してきた。MERMAIDフロートはP波から変換された水中音波を観測する自律型フロートであるが、漂流深度 (通常1500 m) で周囲の音響場から地震特有の信号を検出するアルゴリズムを備え、地震が検出されると海面に浮上しその波形を送信する。さらに、MERMAIDフロートには双方向イリジウム通信を介して1年間取得可能なデータバッファが装備されている。従って、MERMAID フロートは、地震P波を準リアルタイムに自動的に送信するシステムを有する一方で、自動的に送信されなかった期間でも陸上からのリクエストにより関心のある期間のデータを切り出すための連続データも保存している。MERMAIDフロートは海洋島の地震計、海底地震計、係留型ハイドロフォンのいずれでもなく、MERMAIDフロート特有のデータであり、発表では、2022 年 1 月の爆発的な Hunga Tonga噴火に焦点を当てたリクエストにより得られたSPPIM MERMAIDフロートアレイのデータを紹介する。

# 2022 01 15 04:14:45 [-20.5453 -175.394] Hunga Tonga



MERMAIDで捉えたフンガ・トンガ噴火によるT-phase。横軸、縦軸はそれぞれ噴火時刻からの時間、火山からの距離。赤線は水中音波速度1.5 km/sを仮定した時の走時を表す。

## Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

\*Ryoichi IWASE<sup>1</sup>

### 1. JAMSTEC

岩瀬(2022)では、2021年8月13日に福徳岡ノ場において発生した海底火山噴火、及び2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ（フンガ火山）で発生した海底火山噴火について、防災科学技術研究所の「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)を構成する海底地震計の観測波形を用い、深海サウンドチャンネル（Sound Fixing and Ranging, SOFARチャンネル）を伝搬した噴火に伴う水中音響信号を検出した。具体的には、噴火地点からS-net各観測点までの音波の伝搬時間を考慮して、時間軸を観測点毎にずらして描画したスペクトログラムを比較することにより、視覚的に噴火に伴う水中音響信号を識別した。今回、この識別結果をもとにして、福徳岡ノ場噴火に伴う水中音響信号について考察を加えた。使用したデータは岩瀬(2022)と同じく、S-netの各観測点を構成する2種類の地震計のうち速度計を使用し、もう一方の地震計である加速度計で計測される重力の方向をもとに鉛直成分を算出した波形データであり、サンプリング周波数は100 Hzである。元の波形データには地震に伴う信号や船舶ノイズ等が多数含まれているが、スペクトログラムを参照すると、噴火に伴う信号が有する周波数成分の検出下限は、観測点によって相違があるものの、およそ5 Hz程度と判断される。一方、ノイズ状況も観測点によって相違があるものの、10Hz以下ではノイズレベルが比較的低い状況となっている。そこで今回5Hzから10 Hzまでの周波数帯域を透過するバンドパス・フィルタの適用を試みた。当該フィルタ適用後の波形に対して観測点毎に時間軸を伝搬時間分ずらし、更にそれを伝搬距離順に並べた結果をFig.1に示す。なお伝搬時間は伝搬距離(大円距離)を音速(1500 m/s)で割って求めた。横軸は各観測点で検出した信号の音源での発出時刻に相当する。縦軸は伝搬距離(km)である。なお波形を表示した観測点は噴火に伴う信号を検出した44観測点のみを選択している。SOFARチャンネルを音速で伝搬した噴火に伴う信号は横軸の同じ位置に出現するので、噴火イベントとして識別可能となる。Fig. 1は2021年8月13日05:00 JSTから1時間の記録である。下向き三角印で示した05:57頃にパルス形状の波形が存在するが、それに先立つ05:55頃からのイベント発生が確認できる。Fig. 2は、05:56 JSTからの2分間の波形を拡大したものであるが、イベント波形の出現位置がやや傾いていることがわかる。そこで、音速を1472 m/sとして描画したものをFig. 3に示す。Fig. 2に比べ、イベント波形の出現位置が揃っていることがわかる。そこで音速を同じく1472 m/sとして、05:54 JSTからの5分間の波形をFig. 4に示す。05:55 JSTの少し前からの噴火活動の開始が推定される。今後フンガ火山の噴火に伴う信号についても同様な解析を行う予定である。

### 謝辞

本研究の実施に際し防災科学技術研究所の公開データ(<https://doi.org/10.17598/NIED.0007>)を利用しました。伝搬距離の計算には国土地理院のサイト(<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>)を利用しました。

### 参考文献

岩瀬(2022), JpGU2022, SVC31-21.

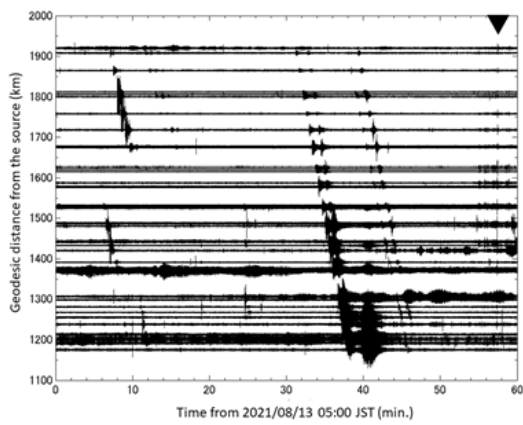


Fig. 1

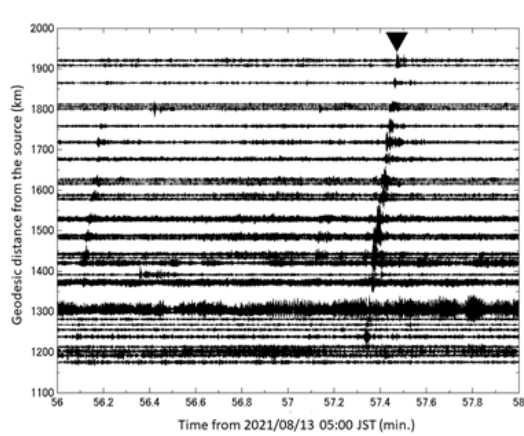


Fig. 2

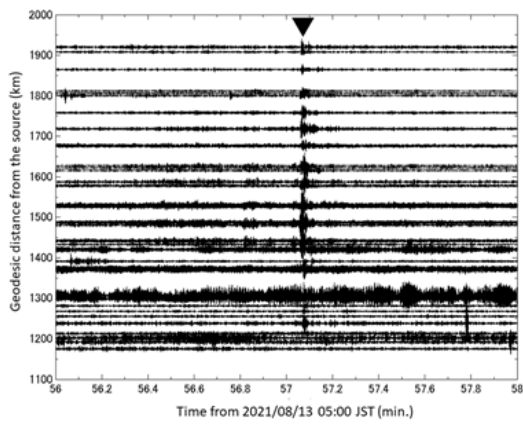


Fig. 3

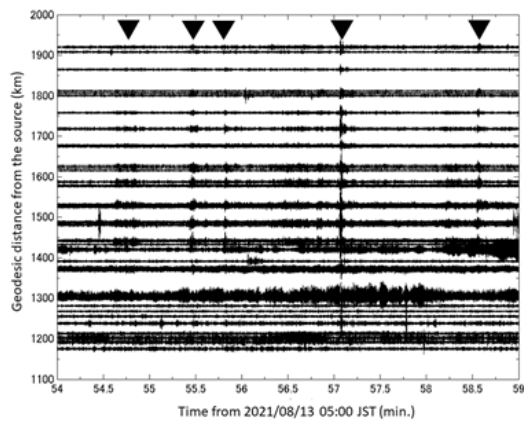


Fig. 4

## Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

\*Katsuhiro YABU<sup>1</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Kentaro EMOTO<sup>2</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>1</sup>

1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.

DAS (Distributed Acoustic Sensing) は既存の光ファイバーケーブルに計測装置を接続するだけで、数m間隔で数十kmにわたるケーブル軸方向の歪みまたは歪み速度を計測できることから、近年地震学において導入が進んでいる。我々のグループは、2020年に宮城県内を通る国道4号線沿いに埋設されている通信用の光ファイバーケーブルを利用してDAS観測を行った(江本・他, 2020, 地震学会)。矢武・他(2021, 地震学会)では車両が励起する表面波の分散曲線を用いて浅部S波速度構造を推定した。しかし、位相だけではなく振幅も含めたDASの歪み波形を解釈するためには、車両が振動を励起する過程を詳しく理解する必要性を痛感した。そこで今回、DASの観測を再び行うにあたり、測線の間地点近くの大衡村の1か所において、ビデオカメラ、広帯域地震計を用いた観測も並行して実施した。本発表では、その観測の概要と、映像から得られる通過する車両の特徴とDAS歪み波形記録、広帯域地震計記録との関係についてこれまでに分かったことを紹介する。

Sintela社のDASの計測装置(ONYX)を国土交通省古川国道維持出張所内に2022年3月から4月の約1ヶ月間設置し、そこから南の仙台方向に国道4号線に沿って伸びている約50kmの光ファイバーケーブルに接続した。ゲージ長は9.57m、チャンネル間隔は6.38m、サンプリング周波数は200Hzとした。本観測機器の出力信号は歪みである。ビデオカメラと広帯域地震計は、大衡村の国道4号線沿道の民家の敷地内に設置した。近傍の車道は片側1車線ずつの計2車線であり、観測場所と車道中央までの距離は約9m、光ファイバーケーブルは観測場所から遠い方の車線の深さ約2.3mに埋設されている。広帯域地震計はナノメトリクス社の広帯域3成分速度計 Trillium Compact を使用し、計測技研のHKS-9700でデータを連続収録した。ビデオカメラはパナソニック社 HC-VZX990M-W を使用し、観測期間中の数日間において断続的に車道方向の映像を記録した。

映像において車両を確認できた際には、広帯域地震計やDASに車両の通過に伴う地面の振動が記録されている。図は、大型トラックが通過した際の各記録の例である。DASの波形記録と映像とを比較すると、車両が最も光ケーブルに近づいたと考えられる時刻に歪み記録は伸びのピークを示し、その前後では縮みを示した。また、表面波の伝播によると考えられるより高周波の振動も捉えられた。コーナー周波数5Hzのローパスフィルタをかけた地震計記録には、同時刻の上下動成分にランプ状の波形が見られることが多かった。一方、水平成分は常に脈動と思われる周期状の波形が見られることが多かった。

映像記録から、軽自動車、普通自動車、普通貨物自動車・マイクロバス、大型貨物自動車・バス、超大型貨物、の5つに分類することができる。そこで、それぞれの車両通過に伴う最大ひずみ量を車両種別ごとに算出した。

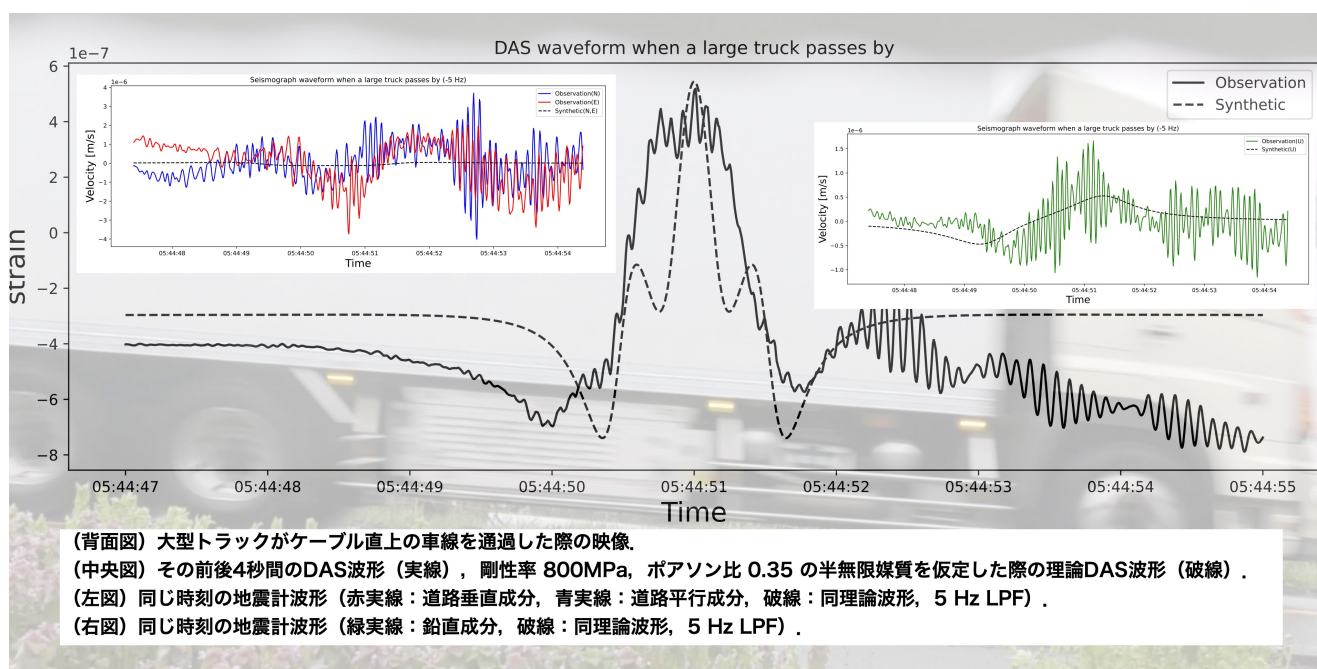
その結果、最大ひずみ量の平均値は、各車種カテゴリーの代表的な荷重の大きさにほぼ比例し、また、光ケーブルの直上の車線を走行する場合の方が、より大きいことがわかった。パルス幅については、大型の車両ほど長くなる傾向にあるが、同じ車両種別でもそのばらつきは大きいことがわかった。

これらの結果を定量的に解釈するため、半無限媒質表面の鉛直荷重に対する変位応答を計算する Boussinesq 問題の解を利用した。車両が一定速度で観測点を通過すると仮定すると、理論DAS波形を水平方向にゲージ長分離れた観測点間の Boussinesq 解による変位の水平成分の差と走行速度を用いて表すことがで

きる (Jousset et al., 2018) . この時、荷重は映像を基に求めたタイヤの位置に等しく分配されているとした。観測波形は、理論波形の形状に類似していることから、各車種カテゴリーの代表的な荷重と最大ひずみ量の平均値を基に、観測地点付近の地盤の弾性パラメータは、剛性率 800 MPa 程度、ポアソン比 0.35 程度と推定された。また、パルス幅が同じ車両種別でもばらつくのは、走行速度が異なるためであると解釈できる。さらに、このパラメータを用いて地震計の理論波形を同様に求めた。水平動成分は他のノイズが乗っていることが多かったものの、上下動成分の速度は複数の車両に対して観測値をよく説明することができた。

本研究では動画を併用したことで車両の特定を行うことが可能となり、多様な荷重源を基に弾性パラメータの推定精度を高めることができた。また、DASの解析結果を地震波形を用いて検証することもできた。さらに今後、この地点で求めた各車両の荷重を基に、車両が移動した先の映像記録がない地点においてもDAS記録を用いて弾性パラメータを求める予定である。

(謝辞) 国土交通省所有の光ファイバーを使用させていただいた。観測に当たって、仙台河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。また、地震計とカメラの設置については、大衡村の石川敏氏様に多大なご協力をいただいた。

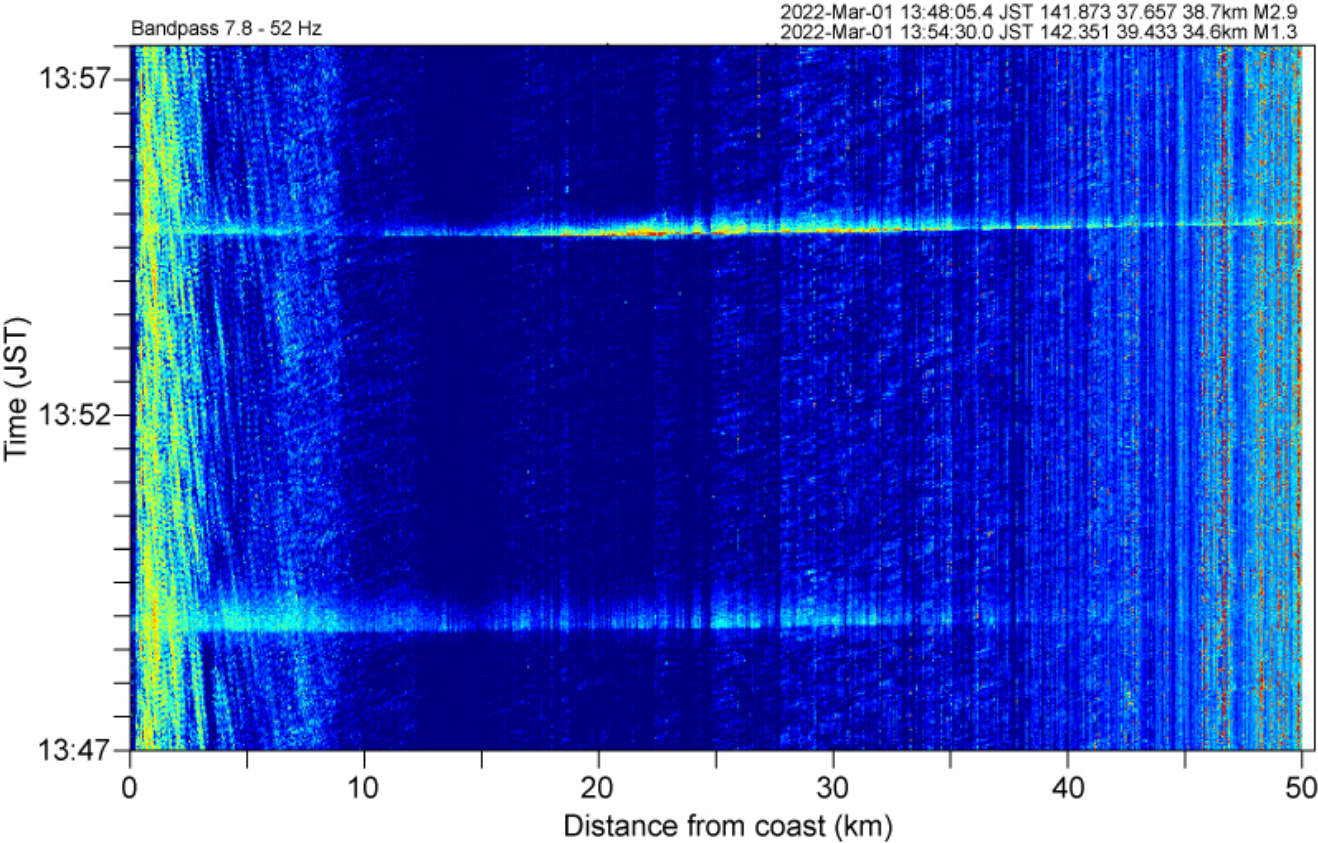


## Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

\*Masanao SHINOHARA<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Takano<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Rie Nakata<sup>1</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

散乱波の干渉計測による分散型音響センシング(DAS)は光ファイバセンシングの一つであり、ファイバに沿って短い計測間隔で、長距離に渡って記録が得られることから、地震観測にも適用されている。干渉計測を用いたDAS計測は徐々に正確さが向上しており、現在は、質の高い記録が得られるようになってきている。現在海域において地震観測を行っている観測点はまだ数が少ないが、海底ケーブルを用いたDAS計測は線状ではあるが、海底観測点数を大幅に増加させることが可能で、今後が期待されている。1996年に東京大学地震研究所により設置された三陸沖海底光ケーブル地震津波観測システムは、拡張用に6本の予備ファイバがあり、この予備ファイバをDAS計測に使うことができる。そこで、2019年2月以降、予備ファイバを用いて、計8回の臨時観測を行っている。それぞれの観測期間は2日から2ヶ月である。収録チャンネル間隔が10m以下で、収録距離は長いときで100kmに達する。計測精度を示すゲージ長は10mから100mである。それぞれの観測において、微小地震を含む多数の地震が記録された。2019年2月の第1回の観測では、気象庁が決定したマグニチュード1.8以上のケーブルシステムから震央距離200km程度までの地震はすべて確認することができた。また、震央距離が約2,300kmであるマグニチュード6.6の遠地地震も記録された。三陸沖海底光ケーブル観測システムには、3地点において3成分加速度計が接続されており、DASデータとの比較が可能である。DASはファイバ方向の歪を計測しているが、単純な仮定の基で加速度に変換できる。その結果、現在の干渉計測によるDAS観測のノイズレベルは、ケーブルシステムに接続されている加速度計とほぼ同程度であることが確かめられた。DAS計測は陸上局から約100km沖合までを空間的に高密度で観測していることから、海岸線から沖合に至るノイズスペクトルの空間変化を求めることもできた。2020年11月に三陸沖海底光ケーブルのDAS計測と制御震源による構造探査実験を行った。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン（1台あたり容量1500cu.in.）4台とSercel社GIガン（1台あたり容量355 cu.in.）2台の2種類である。陸上局舎において、2本のファイバ末端にそれぞれ計測器を接続し、2台による同時DAS観測を行った。DASの収録はサンプリング500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km（一部80km）である。1500LLエアガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートとその延長の全長約200kmである。発震間隔は約100mとした。GIガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートのみ約100kmであり、この測線上を2回発震した。発震間隔は約50mである。エアガン発震中はDAS計測を実施すると共に、発震を行う観測船から、ストリーマケーブルを曳航して、記録を収録した。収録されたデータは、2つの計測器間に大きな差はないことが確認された。また、DAS計測による制御震源の記録とケーブルシステムの加速度計による記録を比較したところ、DAS記録ではP波振幅が小さいことが確認された。構造探査実験では、海底において5mの間隔で全長80km以上の収録が行われており、高分解能な反射断面が得られることが期待される。そのため、得られたDASデータに対して基本的な反射処理を施し評価を行った。まず、DAS計測により記録された制御震源の水中直接波の走時を用いて、ケーブル位置の再決定を行った。その後、CMPソート、bandpass処理、単純なdeconvolution処理を行った後に、定速度重合により反射断面を作成した。DASデータは反射波の連続性が高くないために、定速度重合法による速度解析を行った。震央距離が3km以内のCMP gatherにおいて、1500LLエアガン記録に対しては1.0km/s、GIガン記録に対しては0.8km/sとして、定速度重合により反射断面図を作成した。DAS計測による反射断面図をストリーマケーブルによる反射断面と比較したところ、反射面の走時は異なるが、基本的に同じ反射面を示していると解釈された。DAS計測による反射断面における反射面の海底面からの往復走時は、ストリーマケーブルによる反射断面における同じと思われる反射面の海底面からの往復走時の約2~5倍となっている。反射面まで比較的長い往復走時やCMP重合の遅い重合速度などから、得られたDAS計測による反射断面は変換されたS波による反射波が卓越していると考えられる。



## Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

\*Masayuki YOSHIMI<sup>1</sup>, Satoshi IDE<sup>2</sup>, Teppei ENARI<sup>3</sup>, Daiki TAYA<sup>3</sup>, Shuji IWATA<sup>4</sup>

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company

東海道新幹線の軌道沿いに布設された通信用光ケーブルを用いて、約三ヶ月間（2021年8月30日から11月23日）にわたるDAS観測（AP sensing製 N5226A）を実施した。新幹線や交通車両等による振動に加え、複数の地震記録が取得された。本発表では、計測の概要、光ケーブル設置条件と観測記録の特性、地震計記録との比較、テンプレートマッチングによる火山性低周波地震の検出試行結果を報告する。測定対象は小田原―掛川区間であり、このうち熱海―静岡区間（約75km）で74日間、熱海―小田原区間、静岡―掛川区間でそれぞれ2日間および3日間程度の連続観測を実施した。DAS観測に並行して、新丹那トンネル内の3箇所、富士川橋梁上、および、沿線の3箇所に広帯域地震計もしくは加速度計による観測を行った。DASの計測パラメータは、機器が設定を許す最大のサンプリングレートおよびゲージ長（空間サンプリング5.1m、ゲージ長40.8m、サンプリング周波数は熱海―静岡区間では1000Hz、それ以外では2000Hz）とした。1分間のデータ量は、熱海―静岡区間（約75km：約15000ch）で1.72GB、静岡―掛川区間（約45km：約9000ch）で2.1GB、熱海―小田原間（約19km：約3800ch）で0.87GBであり、観測期間全体で200TBあまりのデータ量となった。測定区間の新幹線軌道は、トンネル、橋梁、高架橋、盛土、掘割、自然地盤など様々な地盤・構造物上に設置されている。光ケーブルは、トンネルでは壁面に架けられ、それ以外の場所では線路脇等の配線箱もしくは配線棚に格納されている。新幹線通過時には位相跳びによる振幅の頭打ちが生じるものの、新幹線による振動が記録され、設置環境による振動特性の違いが明瞭であった。トンネル区間では、新幹線の突入に伴う微気圧波による振動が音速で伝搬する様子も観測された。観測期間中には房総沖、千葉中部、静岡県中部等を震源とする地震（有感）が発生し、これらのDAS計測波形が取得された。P波、S波のオンセットは概ね明瞭であった。後続波群は地震に関わらず場所ごとにほぼ同一の周波数帯域に収斂し、構造物―地盤系の振動特性を反映しているものと推察される。計測区間北方には富士山の火山性低周波地震の震源域がある。低周波地震のシグナルが明瞭に認識できるDAS計測波形のうち10秒区間をテンプレートにして、Matched Filter解析を実施した。約360万個の相互相関値のうち6 $\sigma$ 以上のもの（112個）の中に、富士山の火山性低周波地震は21個（テンプレート地震含む）含まれていた。同じ期間の気象庁カタログに含まれるものの23個のうち12個、含まれないものも9個検出された。M0.5を超える低周波地震は概ね検出でき、また約5分間続く低周波地震活動も検出できていた。構造物設置の光ケーブルを用いたDAS観測は、当該構造物の振動特性把握など工学的に有用であるばかりでなく、地震検知など理学目的の自然地震観測にも有用である。

## Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:00 PM - 4:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S02] PM-2**

chairperson: Hajime Shiobara (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Toshinori Sato (Chiba University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

**[S02-06] Classification for Earthquakes with Linked Data**

\*Hiroki UEMATSU<sup>1,2,3</sup>, Ahyi Kim<sup>3</sup>, Hideaki Takeda<sup>1,2</sup> (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

**[S02-07] Development of multi-platform next-generation WIN system (2)**

\*Shigeki NAKAGAWA<sup>1</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>2</sup>, Hiroaki TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takuto MAEDA<sup>3</sup>, Naoki UCHIDA<sup>1</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>4</sup>, Kazuo OHTAKE<sup>5</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>, Yosuke AOKI<sup>1</sup>, Yuta MAEDA<sup>6</sup>, Shiro OHMI<sup>7</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>7</sup>, Makoto OKUBO<sup>8</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>9</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>10</sup>, Katsuhiko SHIOMI<sup>11</sup>, Kenji UEHIRA<sup>11</sup>, Hideki UEDA<sup>11</sup>, Kazuki MIYAOKA<sup>12</sup>, Koji TAMARIBUCHI<sup>13</sup>, Ryo HONDA<sup>14</sup>, Shutaro SEKINE<sup>15</sup> (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)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

**[S02-08] Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method**

\*Shigeki Horiuchi<sup>1</sup>, Yuko Satou<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Aitarou Kato<sup>3</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup> (1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

**[S02-09] Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments**

\*Ryuhei YAMADA<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>2</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>3</sup> (1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

**[S02-10] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient**

\*Hajime SHIOBARA<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Toshinori Sato<sup>2</sup>, Aki Ito<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe University)

## Classification for Earthquakes with Linked Data

\*Hiroki UEMATSU<sup>1,2,3</sup>, Ahyi Kim<sup>3</sup>, Hideaki Takeda<sup>1,2</sup>

1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University

本研究では、Linked Dataと呼ばれるWeb上のデータを互いにつなげることのできる形式で公開、共有する仕組みを用いて、地震データの整理を行う。また、地震データをLinked Dataで表現するために、地震に関する語彙を作成する。地震動は波形データとして記録され、震源パラメーターの推定、地下構造の推定などさまざまな研究に使われている。またこれらの大量に蓄積された波形データは近年地震学の分野で盛んに用いられる機械学習において、震度予測や、観測波形の分類、P波/S波の検出等の機械学習を用いた研究の教師データとして利用されている。機械学習には大量の良質な教師データが必要であるため、地震観測網で観測されたデータは有用だが、それらの収集には困難が伴う。例えば、防災科学研究所の波形データの取得サイトにはAPI等は用意されておらず、ユーザが日付時刻や震源、観測点等を指定して手動で波形データをダウンロードする必要がある。また、研究者が独自に観測した波形データや、気象庁や地方自治体の観測網を横断して検索するためには、波形データを集約したデータベースの作成等が考えられる。しかし、波形データの再公開はできず、また波形データを一意に指し示すURIを持たないため、研究者独自のデータベースが乱立することとなり、再利用可能なオープンな波形データベースの作成は難しい。そこで、地震動を観測した観測点の情報や震度、観測時刻、また観測された波形から推定された震源の位置やマグニチュードなど、「地震」のメタデータを収集し、Linked Dataの形式で公開する。Linked Dataは事物や概念が一意のURIを持ち、リンク構造を持つことでデータ同士をつなぐことができる。Linked Dataでは、事物や概念のリンク構造をトリプルと呼ばれるモデルで表現し、Webサイトのリンクを辿ることと同様に、プロパティ（リンク）を辿ることで、データを辿ることができる。ここで、Webサイトのリンクは、単なるつながりを示しているが、Linked DataのトリプルではリンクとなるプロパティもURIを持ちリンクの関係性を示している。本研究では、地震データに特化したプロパティとして、震源や震度、観測時刻など地震動に関する語彙や観測点に関する語彙を新たに定義する。例えば、「地震動」は、「震度」「マグニチュード」「発生時刻」等の語彙をプロパティとして持つ。また、「観測した波形」という語彙をプロパティとすることで、ある地震動を観測した波形のトリプルが作成され、「地震」そのものを観測することは難しいが、観測された地震動のリンク構造から「地震」を表現することが可能となる。本研究では、地震語彙の作成、観測波形や震源の情報をもとに地震にURIを付与することでLinked Dataの形式で公開し、地震データおよび学習データとして利用可能な地震カタログの可用性と流通の可能性を検討する。

## Development of multi-platform next-generation WIN system (2)

\*Shigeki NAKAGAWA<sup>1</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>2</sup>, Hiroaki TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takuto MAEDA<sup>3</sup>, Naoki UCHIDA<sup>1</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>4</sup>, Kazuo OHTAKE<sup>5</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>, Yosuke AOKI<sup>1</sup>, Yuta MAEDA<sup>6</sup>, Shiro OHMI<sup>7</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>7</sup>, Makoto OKUBO<sup>8</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>9</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>10</sup>, Katsuhiko SHIOMI<sup>11</sup>, Kenji UEHARA<sup>11</sup>, Hideki UEDA<sup>11</sup>, Kazuki MIYAOKA<sup>12</sup>, Koji TAMARIBUCHI<sup>13</sup>, Ryo HONDA<sup>14</sup>, Shutaro SEKINE<sup>15</sup>

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（ト部・束田, 1991；ト部・束田, 1992；ト部, 1994など）は、大学等の基幹システムとして25年以上にわたって使い続けられている。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）の開発を進めている。

### 2. 対話検測処理系システムと今後の展望

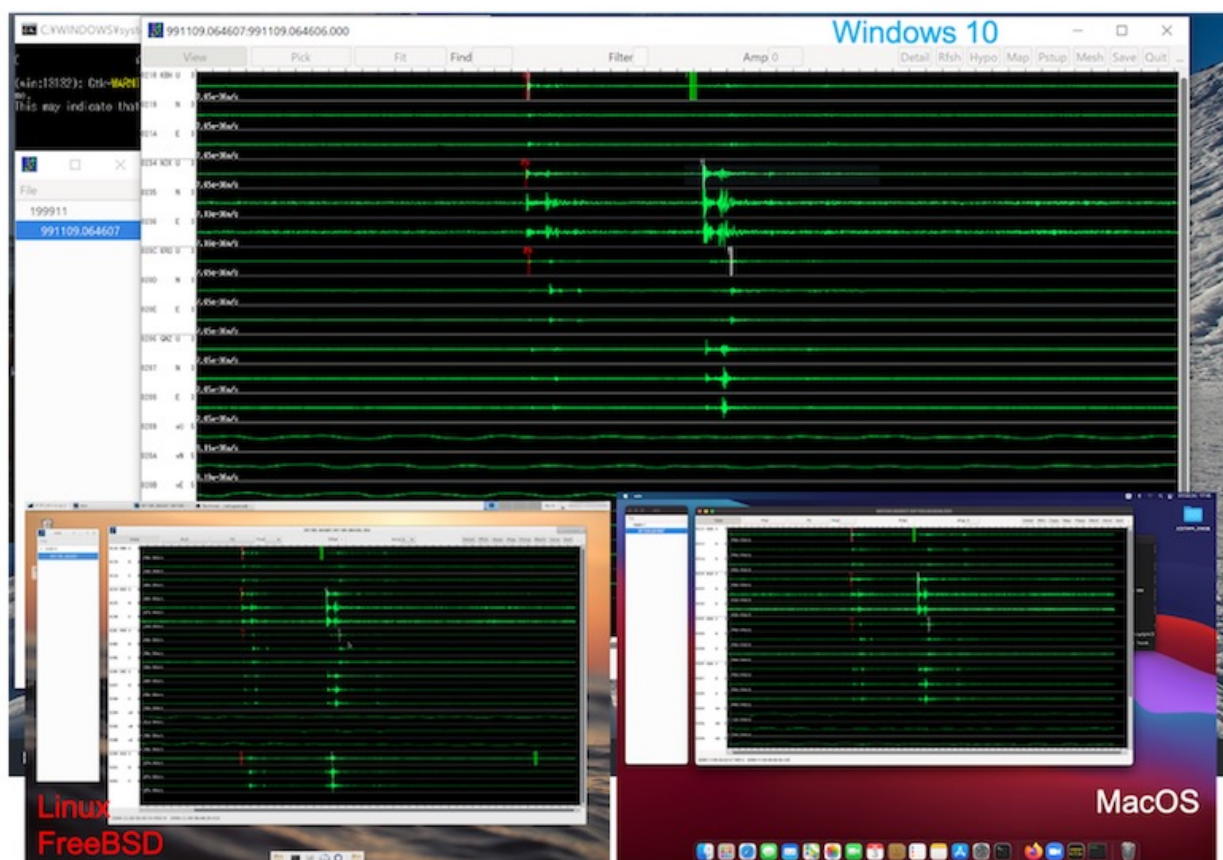
昨年度は波形データの読み込みやマウス操作による検測など対話検測ソフトウェアの基礎となる部分を試作した（中川・他, 地震学会, 2021）。最大の特徴は、1つのソースコードからUnix (Linux, FreeBSD), Windows, macOS の複数プラットフォーム上で動作するネイティブバイナリをそれぞれの環境下でコンパイルできることである。昨年度試作したプログラムは波形表示と手動検測の最小限の機能しか備えていないが、今後の機能拡張が可能な設計となっている。

本研究では、この昨年度試作したソフトウェアに、震源決定プログラムなどの外部コマンド実行機能や地図表示機能を実装した。震源決定プログラムはWINシステムに同梱されているhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）を用いているが、入出力のフォーマットを整えれば他のプログラムでも差し支えない。震源決定プログラムを利用することで、検測後に震源決定するだけでなく、理論走時を波形に重ねて表示したり（図(a)）、震央距離順に観測点を並べ替えて表示したりできるようになった。また、決定した震源を地震活動と重ねて地図上に表示できるようになった（図(b)）。地図表示では、震源の深さによるカラー表示ができるようになった。

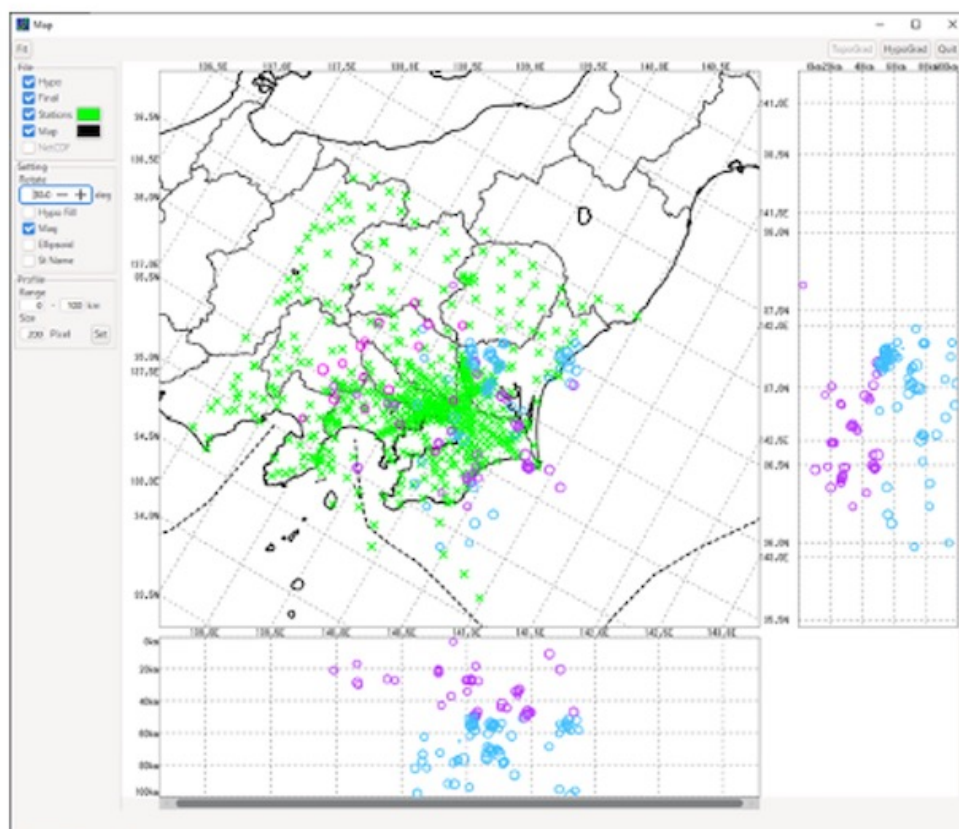
外部コマンド実行機能を実装したことで、他の外部コマンドを用いた機能拡張が可能となった。例えば、発震機構解を求める外部プログラムの利用などが考えられる。対話検測ソフトウェアとして必要最低限の機能は実装できたので、関連する研究者や技術者等で試用しながら、更なる機能拡張を進めていきたい。

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。

(a)



(b)



## Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method

\*Shigeki Horiuchi<sup>1</sup>, Yuko Satou<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Aitarou Kato<sup>3</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup>

1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.

**1. はじめに** 到着時刻の自動読み取り、震源決定システムの開発が行われ、比較的精度の高い震源が自動決定できるようになった。しかし、各種ノイズの混入のため、全ての観測点の読み取りを正確に行うことは難しい。自動震源決定システムは、走時残差の大きさを利用して、間違った読み取りデータの削除を行っているが、地下構造に大きな不均質性が存在するため、読み取り誤差と、不均質性による走時残差とを区別することが難しい。一方、隣接して発生する2個の地震を相対震源決定すると、不均質性の影響が相殺され、走時残差は小さくなる。相対震源決定の走時残差を用いれば、自動読み取りの誤差が大きい観測点を自動検出できる可能性がある。本報告では、一個の地震について、その近傍で発生するマグニチュードの大きい地震を数10個選び、一個の地震と、数10個の地震との相対震源決定を行うことにより、その地震の各観測点での読み取り誤差を検出し、自動修正を行うシステムを開発した。また、自動震源決定に適した相対震源決定手法を開発したので報告する。

**2. 複数の地震の相対震源決定を用いた読み取り誤差の推定方法** 隣接して発生する地震を、相対震源決定すると、パスの違いによる不均質性の影響が相殺され、走時残差を小さくすることができる。また、大きい地震のS/N比は、小さい地震のそれに比べ高く、読み取り精度は高い傾向にある。そこで、自動震源決定された地震 $A_k$ について、その近傍に震源決定され、かつ、マグニチュードの大きい地震を $N$ 個( $B_{km}$ )選ぶ。地震 $A_k$ と、その $j$ 観測点の読み取り値を $A_{kj}$ 、地震 $B_{km}$ との相対震源決定の、 $j$ 観測点の走時残差を $R_{kmj}$ とする。読み取り誤差の推定は、その理論的到着時刻 $T_{kj}$ を推定することにより行う。読み取りが行われ、 $A_{kj}$ が存在する場合は、 $T_{kj}$ は、走時残差 $R_{kmj}$ の平均値と $A_{kj}$ との和で表される。 $A_{kj}$ の読み取り値が存在しない場合で、地震 $B_{km}$ の $j$ 観測点の到着時刻が存在する場合は、この読み取りデータを満足するように、地震毎に、 $A_k$ の $j$ 観測点の理論走時を求め、その平均値で理論走時を与えるようにした。この方法の最大のメリットは、地震 $A_k$ の到着時刻が、 $N$ 個の地震の読み取りデータから精度よく推定できる点である。ここでは、 $N=50$ とした。また、走時残差 $R_{kmj}$ の平均値は、先ず、平均値と、分散を計算し、誤差が2乗平均誤差を超えるデータを削除して、求めるようにした。到着時刻の再読み取りは、読み取り値が、推定された到着時刻の2乗平均誤差の2倍を超える範囲外だった場合に行うようにし、顕著な位相の立ち上がりがあり、その範囲内に存在する場合に、読み取り値を採用するようにした。

**3. 相対震源決定** Waldhauser & Ellsworth (2000)によるHypoDDは、解析する全領域で発生する全地震の相対震源決定の誤差が最小となるように震源決定する方法である。自動震源決定は、日本列島全域で発生する地震を対象にして行う場合もある。また、地震は、毎日発生することから、地震が発生する度に、過去に遡って、HypoDDを行うと、計算機の負荷は膨大になる。そこで、ここでは、上記 $N$ 個の地震 $B_{km}$ の震源位置をレファレンスとして、全ての $B_{km}$ の地震との相対震源決定の走時残差の2乗和を最小となるように、 $A_k$ の震源位置を求めるようにした。すべての $A_k$ について、この震源決定を行うと、 $B_{km}$ に属する個々の地震も、同様に、周りで発生する $N$ 個の地震で相対震源決定される。本震源決定では、この操作を2回繰り返し、相対震源決定された $B_{km}$ の地震位置をレファレンスとして、 $A_k$ の地震の相対震源決定を行うようにした。

**4. 結果** 解析には、2016年10月21日マグニチュード6.6の鳥取県中部地震の発生の翌日の24時間の、京大・九大・東大地震研合同余震観測班(Iio et al., 2020)による地震観測データ、及び、2017年3月〜4月の福島県いわき周辺で発生した地震のHi-netデータを用いた。堀内・他(2009)による自動震源決定システムで震源決定されて地震のトリガー波形とピックファイルを用いて、上述の方法で、走時残差の大きい観測点の再読み取り、読み取りが行われていない観測点の再読み取りを行ない、相対震源決定を行った。通常の自動震源決定と、本方法による震源決定結果の比較、及び、一元化震源と、本方法によるそれとの比較から、本方法の適用により、詳細な震源分布が得られることが示された。また、鳥取県中部地震のデータを用いた場合の、相対震源決定の走時残差の平均値は、0.11秒であった。東北地方、海域で発生する地震についても、本方法の有効性を調べる予定である。

## Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments

\*Ryuhei YAMADA<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>2</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>3</sup>

1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS

地震の発生メカニズムや天体の内部構造に関する研究は、地震計による観測網拡張に伴い進展してきている。その一方で、一般に、海底、火山地域、極域、月惑星等、いわゆる人が地震計を運搬し、設置するのが困難な極限環境下に、地震観測網を展開するのは決して容易ではない。本研究では、極限環境域への地震観測網展開を目指すため、小型軽量、かつ高性能の広帯域地震計の開発を進めている。

この開発において、我々は宇宙機用として開発された短周期地震計(図1)をベースに周波数応答の広帯域化を実施してきた。この地震計は固有周波数1Hzの電磁コイル式の短周期地震計であり、同タイプの地震計と比較しても小型軽量(直径5cm×高さ5cm, 重量350g)でありながら、より高い感度(1000V/m/sec)を実現しているため、火山噴火地域や月惑星等、無人で観測装置を運ぶ際に有利となる。また、この地震計は航空機等からの投下により無人でのセンサー設置が可能なハードランディングプローブであるペネトレータにも搭載できる。ペネトレータは槍型の貫入装置であり、地震計を搭載しての地上試験実績も有している。開発した地震計は、このペネトレータの貫入衝撃に耐えて微小振動を観測できるだけの頑健性もすでに実現している(Yamada et al., 2009)。この小型軽量で汎用性の高い短周期地震計を広帯域化する事で、地震計の運搬・設置が困難な極限環境域で例え一点設置であっても、より多くの観測成果を得る事が期待できるようになる。

本研究では、この短周期計に容量変位検出器とフィードバック機構を取り付けて広帯域化を図り、1Hzよりも長周期側でも高感度(1000V/m/sec以上)を実現する事を目指した。この広帯域地震計として、我々は図1に示す地震計の振り子とケースの両端面に電極版を取り付けて、検波回路を接続することで、地動変位に伴う容量変化を検出できるようにした。そして、この地震計で固有周期10-30秒を実現するための負帰還回路の設計と製作を行った。この負帰還回路をセンサーに取り付けて、周波数応答の計測を実施したところ、設計通りの応答を示し、少なくとも0.1-20Hzの間で、約2000 V/m/secの感度を実現可能な事を確認する事ができた。そして、広帯域地震計の地動応答の評価のため国立天文台水沢の江刺地球潮汐観測所で、リファレンス用の広帯域地震計(CMG3 ESP)との比較観測を実施した。その結果、現状、0.15~1Hz程度までは、開発した広帯域地震計はリファレンス地震計と同等の応答を示す事を確認できた。一方、長周期側では、リファレンス地震計よりも、ノイズがより多く観測波形に含まれる事も示されたので、現在、負帰還回路の小型化や低ノイズOPアンプの使用などで、地震計の低ノイズ化を図っている。

本発表では、この小型負帰還回路を使用した結果も含めて、広帯域地震計の設計、これまでの開発状況、及び実験室や江刺での試験結果について、報告・議論する予定である。

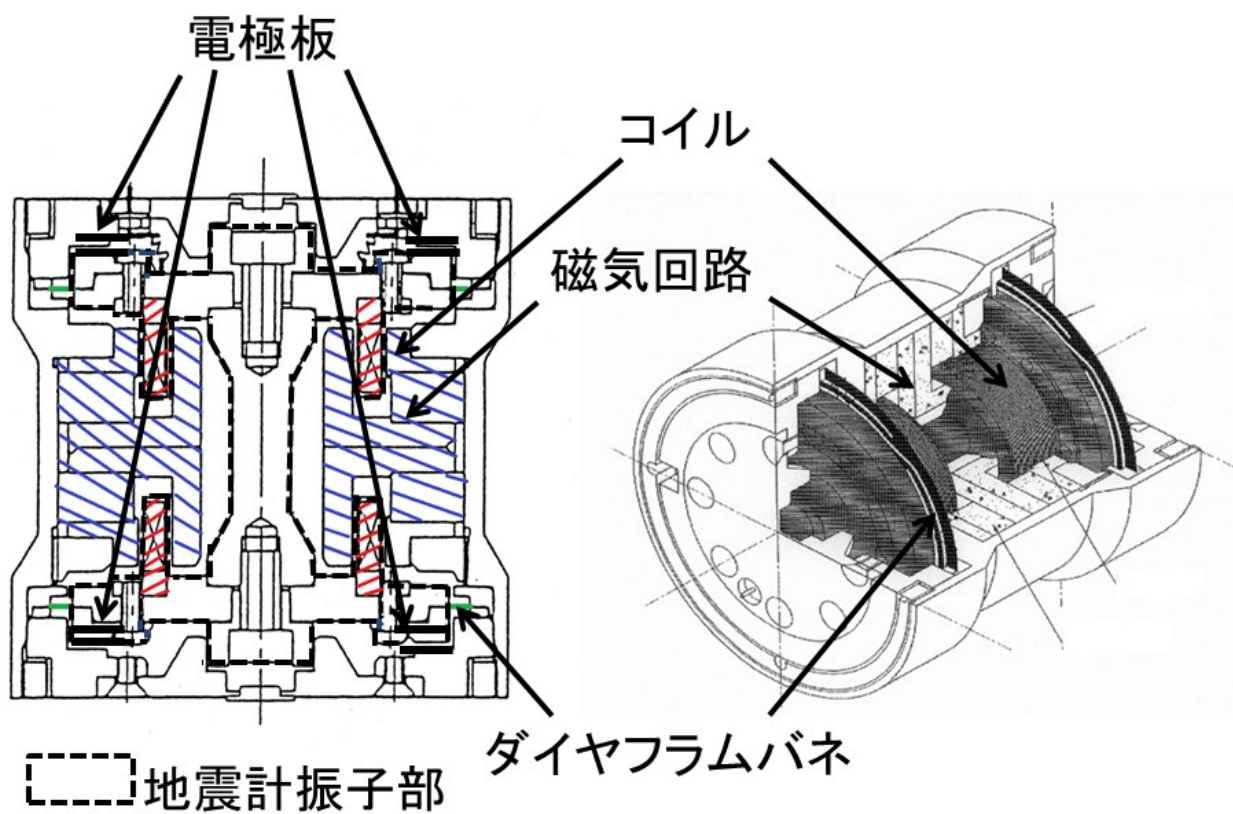


図1.短周期地震計の断面図と鳥瞰図

## Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient

\*Hajime SHIOBARA<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Toshinori Sato<sup>2</sup>, Aki Ito<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup>

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBE, Kobe University

### 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)を基にしたBBOBST-NXによる長期観測について2014年・2017年・2021年の地震学会で報告した[1][2][3]。今回は、2020年に回収したBBOBST-NXの観測データに見られた傾斜値の温度依存性についての続報である。

### 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く、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（図A）。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. 長期試験観測と取得データ

房総半島南東沖で繰り返しSSEが発生している領域で2013-2014年、2015-2017年に長期試験観測を実施した。初回は数m離れた流向流速計で、2回目は自記式精密水温計をBBOBST-NXの外装に取り付け、水温等も記録した。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（約 $-30 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ ）が見えた（図B）。同じ個体の広帯域センサーを用いた、2012-2013年と2013-2014年の過去2回での試験観測での結果[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、2015-2017年の観測結果からは温度依存性が確認できた。これらの傾斜変動と水温変化の関係をみると、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、水塊移動による傾斜変動ではなく、BBOBST-NX自体での温度依存性であると判断できる。この温度依存性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。過去2回の傾斜記録に対しても同様な処理を行ったが温度係数が、同じオーダーではあるがやや異なった。この処理後、2014年のSSE時に見られた傾斜変動は、2成分共にその存在が明確になった。

### 4. 温度依存性の要因

過去3回の海底傾斜観測時には同一個体の広帯域センサーを使用していたが、温度係数には差があるように見られた。これは広帯域センサーと水温測定場所との距離がそれぞれで異なるのが原因とも考えられる。また一方で、BBOBST-NXのセンサー部の構造（図C）から、3成分の各1成分を内蔵する筒型耐圧容器間を固定しているチタン合金製のバーの膨張係数（ $8.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）でも同程度の傾斜変化が起こる可能性もある。そこで、広帯域センサー自体のマスポジション信号の温度依存性を確認するべく、高精度の小型自記温度計を使った室内試験を2022年7-8月に地震研究所内の実験室環境で実施した。安定したマスポジション信号が得られた約3週間分の傾斜変動と広帯域センサーの容器（メーカー出荷用、3成分一体）内での温度変化を比較すると、既知の温度係数より小さい、約 $-10 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ と見られた。但し、この広帯域センサーの個体が上記の海底傾斜観測時（図B）のものとは異なること、温度係数自体が温度に依存する可能性もあることから、まだ完全には結論付けられない。

### 5. まとめ

室内試験の結果からは、やはり広帯域センサー内部での精密温度計測を行い、その温度係数を推定することが重要であるのが明確となった。広帯域センサー自体に高精度の温度測定機能を組み込むことが必要であり、今後、製造会社と協議する予定である。

#### 参考文献

- [1] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, C32-09, 2014.
- [2] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-07, 2017.
- [3] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-02, 2021.
- [4] Tamura, Y., et al., GJI, 104, 507-516, 1991.
- [5] Shiobara, H., et al., Front. Earth Sci., 8:599810, 2021.

