

Wed. Nov 1, 2023

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

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room B F201

[S02] AM-1

chairperson: Masanao Shinohara, Shigeki Nakagawa (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S02-01] Development of anchored buoy seafloor seismic observation system for shallow water and evaluation of real data

*Masanao SHINOHARA¹, Shin'ichi SAKAI^{2,1} (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S02-02] Time Adjustment for Short-Period Ocean Bottom Seismometers Using Ambient Noise Cross-Correlation Functions

*Hiroaki Yamahana¹, Yoshio Murai², Masanao Shinohara³ (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S02-03] Traceable calibration of a broadband seismometer using a laser interferometer

*Tomofumi Shimoda¹, Wataru Kokuyama¹, Hideaki Nozato¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (3)

*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Mare YAMAMOTO⁴, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Naoki UCHIDA¹, Yuta MAEDA⁵, Shiro OHMI⁶, Haruhisa NAKAMICHI⁶, Makoto OKUBO⁷, Takeshi MATSUSHIMA⁸, Hiroshi YAKIWARA⁹, Katsuhiko SHIOMI¹⁰, Kenji UEHIRA¹⁰, Hideki UEDA¹⁰, Toshihiro SHIMOYAMA¹¹, Koji TAMARIBUCHI¹², Kazuo OHTAKE¹³, Ryo HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kochi University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 11. Japan Meteorological Agency, 12. Meteorological Research Institute, JMA, 13. Kakioka Magnetic Observatory, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

[S02-05] Detection of submarine volcanic activity at Kaitoku Seamount using S-net

*Ryoichi IWASE¹ (1. JAMSTEC)

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

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room B F201

[S02] AM-2

chairperson:Masayuki Tanaka(MRI, JMA), Shuhei Tsuji

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

[S02-06] Vibration Monitoring in the Off-Tonankai Cable by Distributed Acoustic Sensing*Masayuki TANAKA¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA)

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

[S02-07] Passive seismic data in surface-deployed DAS measurement with helically wound fibers and straight fibers*Shogo Masaya¹, Ryohei Naruse¹, Yuki Kobayashi¹ (1. INPEX CORPORATION)

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

[S02-08] A comparative study of seismic data measured by surface-deployed DAS with two interrogators and different cable deployment conditions*Ryohei Naruse¹, Shogo Masaya¹, Yuki Kobayashi¹ (1. INPEX Corporation)

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

[S02-09] Development of the Earthquake Early Warning Algorithm Utilizing DAS with Optical Fiber Cables along the Shinkansen Railway*Satoshi KATAKAMI¹, Eiichiro Araki², Narumi Takahashi³, Shunta Noda¹, Masahiro Korenaga¹, Naoyasu Iwata¹ (1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S02-10] Automatic arrival time picking of coda waves recorded by DAS seismic observation*Shigeki Horiuchi¹, Yuko Sato¹, Yoshiharu Hirayama², Tsutomu Yamate², Satoshi Ikui², Minoru Yoshida², Yasuhiro Asai³, Yoshio Nakajima³, Yoichiro Naito³, Hiroyuki Fujiwara⁴ (1. Home Seismometer Corporation, 2. Hakusan Corporation, 3. Tokyo Power Tecnology, 4. NIED)

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

1:30 PM - 2:30 PM JST | 4:30 AM - 5:30 AM UTC | Room B F201

[S02] PM-1

chairperson:Satoshi Katakami

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

[S02-11] Development of seafloor deep borehole long-term observation system and the deployment plan in the Nankai Trough.*Eiichiro ARAKI¹, Yuya Machida¹, Takashi Yokobiki¹, Shuhei Tsuji¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuhei Nishida¹, Satoru Baba¹, Kan Aoike², Yasuyuki Nakamura¹, Keisuke Ariyoshi¹, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC IMG, 2. JAMSTEC Mare3)

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

[S02-12] Development of seafloor borehole fiber optical strainmeter*Yuya MACHIDA¹, Eiichiro Araki¹, Yokobiki Takashi¹, Tomokazu Saruhashi¹, Shuhei Tsuji¹, Hiroyuki Matsumoto¹ (1. JAMSTEC)

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

[S02-13] Initial test of borehole fiber optic strainmeter at Kamioka Mine*Shuhei TSUJI¹, Eiichiro Araki¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Yuya Machida¹, Takashi Yokobiki¹ (1. JAMSTEC)

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

[S02-14] Analysis of long-term pore pressure data acquired at a 20 m borehole in the Kamioka Mine*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Yuya Machida¹, Shuhei Tsuji¹, Takashi Yokobiki¹, Keisuke Ariyoshi¹, Eiichiro Araki¹ (1. JAMSTEC)

Room B | Regular session : S14. Earthquake prediction and forecast

3:15 PM - 4:15 PM JST | 6:15 AM - 7:15 AM UTC | Room B F201

[S14] PM-2

chairperson: Masajiro Imoto (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] Comments on the Brownian Passage Time distribution model for recurrent paleoearthquakes

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

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

[S14-02] Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the southwest Japan

*Taro Hara¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S14-03] Application of an Earthquake Early Warning with the PLUM Method to the 2023 Türkiye-Syria Earthquake

*Masaru Morinaga¹, Masumi Yamada² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S14-04] No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹ (1. Institute of Statistical Mathematics (ISM))

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

📅 Wed. Nov 1, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Nov 1, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏠 Room B F201

[S02] AM-1

chairperson: Masanao Shinohara, Shigeki Nakagawa (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S02-01] Development of anchored buoy seafloor seismic observation system for shallow water and evaluation of real data

*Masanao SHINOHARA¹, Shin'ichi SAKAI^{2,1} (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S02-02] Time Adjustment for Short-Period Ocean Bottom Seismometers Using Ambient Noise Cross-Correlation Functions

*Hiroaki Yamahana¹, Yoshio Murai², Masanao Shinohara³ (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S02-03] Traceable calibration of a broadband seismometer using a laser interferometer

*Tomofumi Shimoda¹, Wataru Kokuyama¹, Hideaki Nozato¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (3)

*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Mare YAMAMOTO⁴, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Naoki UCHIDA¹, Yuta MAEDA⁵, Shiro OHMI⁶, Haruhisa NAKAMICHI⁶, Makoto OKUBO⁷, Takeshi MATSUSHIMA⁸, Hiroshi YAKIWARA⁹, Katsuhiko SHIOMI¹⁰, Kenji UEHIRA¹⁰, Hideki UEDA¹⁰, Toshihiro SHIMOYAMA¹¹, Koji TAMARIBUCHI¹², Kazuo OHTAKE¹³, Ryo HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kochi University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 11. Japan Meteorological Agency, 12. Meteorological Research Institute, JMA, 13. Kakioka Magnetic Observatory, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

[S02-05] Detection of submarine volcanic activity at Kaitoku Seamount using S-net

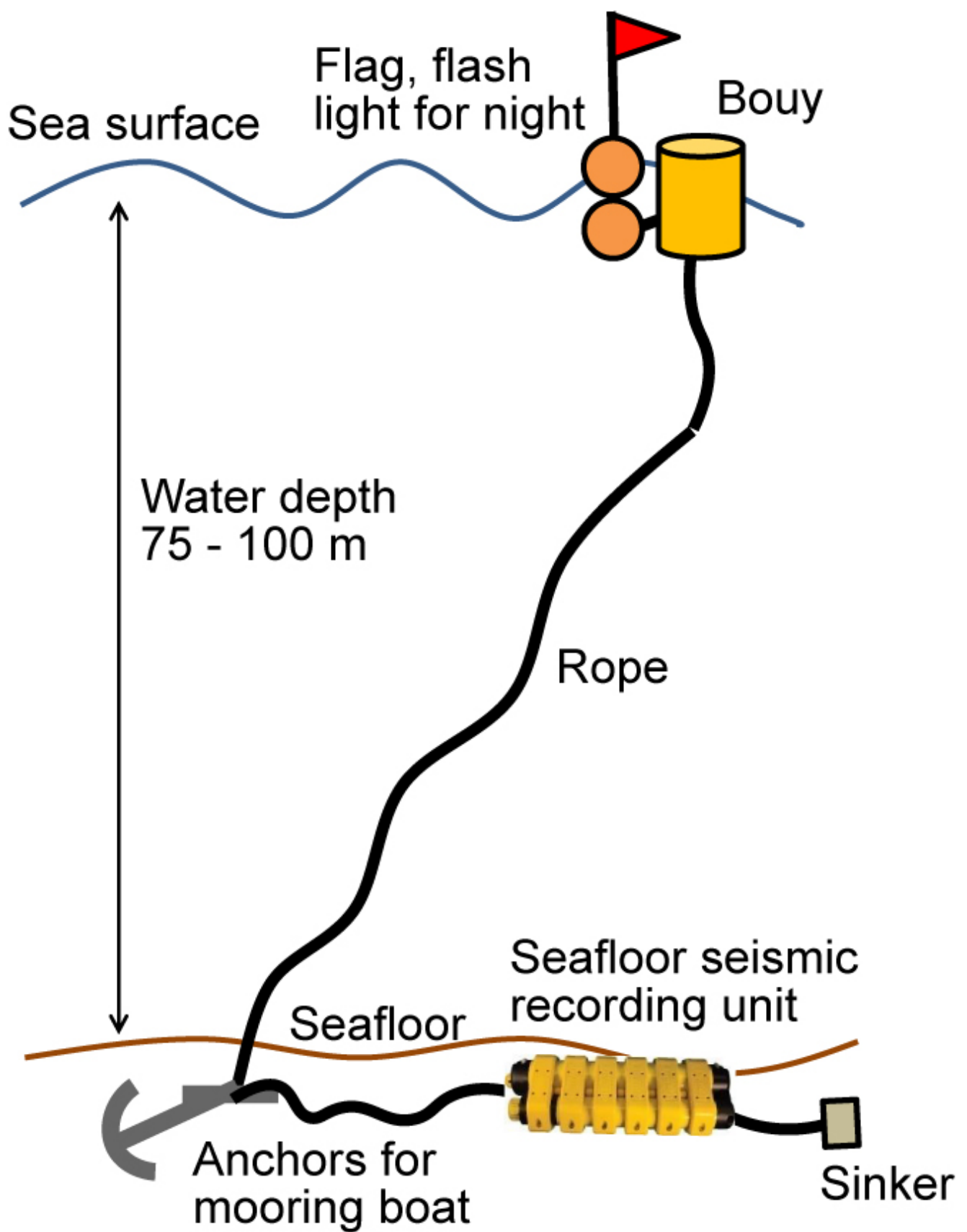
*Ryoichi IWASE¹ (1. JAMSTEC)

Development of anchored buoy seafloor seismic observation system for shallow water and evaluation of real data

*Masanao SHINOHARA¹, Shin'ichi SAKAI^{2,1}

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

日本海東縁沿岸海域では大地震が度々発生している。近年では、2019年6月18日に山形県酒田市沖の深さ約14 kmを震源とする気象庁マグニチュード(Mj) 6.7の地震が発生した。また、2023年5月5日には能登半島沿岸沖の深さ約12 kmにおいて、Mj6.5の地震が発生した。この2つの地震の発震機構は、いずれも逆断層型であり、いわゆる内陸型地震と考えられている。日本海東縁部には、ひずみ集中帯と呼ばれる活構造が存在しており、これらの地震はこの構造の一部が関係していることが推定されている。このような沿岸海域を震央とした浅い地震とその地震発生場の特徴を正確に把握するためには、陸域の高密度地震観測網の近くであるが、震源域直上における海底臨時地震観測が必要である。しかしながら、震源域直上の海底は水深100 m程度と浅く、水産活動等が活発な海域である。そのため、通常海底観測に用いられる自由落下自己浮上式海底地震計による海底観測は難しい。また、海底からの高さがある自己浮上式海底地震計では、雑微動が大きい。そこで、沿岸域は水深が浅いことを利用し、簡便な係留ブイ方式によるS/N比のよい海底地震観測システムを新たに開発した。開発した係留ブイ方式海底地震計は、2019年6月の山形県沖の地震および2023年5月の能登半島沖の地震の余震観測に利用した。ここでは、新たに開発した係留ブイ方式海底観測システムの概要と、得られたデータの評価について、述べる。浅海用係留ブイ方式海底地震計システムに採用した海底地震観測装置は、米国Geospace社のOcean Bottom Recorder (OBX-750) である。この観測装置は、固有周波数15Hz 3成分速度型地震計(GS-ONE OMNI)とハイドロフォンを搭載して、750mまでの水深で自立した観測が可能である。搭載している地震計は置かれている姿勢に関係なく計測可能であるために、レベリング装置を搭載していない。地震計の姿勢を知るために、2軸の傾斜計と方位計が付加されている。ハイドロフォンは10Hz以上の周波数について、平坦な特性となっている。地震計およびハイドロフォンからの信号は24bit-A/Dされ、メモリーに連続収録される。内蔵電池により約30日間の連続観測が可能である。大きさは、52 x 21 x 11cmであり、重量は空中約11kg、水中約4kgの小型な装置である。特徴としては、全体として板の形状をしているため、海底における海水流の影響を受けにくく、S/N比がよい記録が可能である。刻時については、OVCXO（恒温電圧制御水晶発振子）を用いており、設置直前および回収直後に内部時計とGNSSによる標準時計との差を計測する。観測中の時刻差は、これらのデータの直線補間により決定する。設置方法については係留ブイ式を採用した。ブイが海上にあることにより、海底に設置物があることを周知する。係留システムは、まず、ロープ先端に安定のための錘(数kg程度)をつけ、約1.5 m離して、OBXを取り付ける。その先に、船止め用のアンカー（重さ8kg程度）を2 m離して2個、または重量20kgの大型アンカーを1つ取り付け、海底部とする。船止め用アンカーを用いることにより、風や波浪による位置の移動を防止する。船止め用アンカーは、底質などの環境を考慮して選択する。全長約200mのロープ末端にブイとアンカーを繋いだ。2019年6月の山形県沖の地震の余震観測では、この浅海用係留ブイ方式海底地震計3台を、5kmおよび8.5km程度の間隔で震源域直上に設置した。水深は70mから80mである。余震観測であること、設置水深が100m以下と浅いことを考慮し、OBXのアナログ部の増幅度は下げ、500Hzのサンプリング周波数にて収録を行った。7月5日に設置を実施し、回収は7月13日に行った。このうち2台から良好なデータが回収された(Shinohara *et al.*, 2022)。2023年5月の能登半島沖の観測では、4台を約5 km間隔で半島北方沖に、1台を東方沖に設置した。水深は75 mから100mである。収録パラメータは、2019年7月の観測と同一とした。2023年6月26日から観測を開始し、7月5日に全台回収し、良好なデータが得られた。2019年の観測では、傾斜計と方位計のデータから観測中の姿勢はほぼ安定していることがわかった。沿岸の気象データとの比較では、強風時には姿勢がやや変化していた。傾斜計と方位計のデータを用いて、3成分記録を上下動、東西動、南北動に変換し、雑微動のスペクトルを計算した。その結果、沿岸の臨時地震観測点とほぼ同じ雑微動レベルであり、時間変化が小さいことがわかった。



Time Adjustment for Short-Period Ocean Bottom Seismometers Using Ambient Noise Cross-Correlation Functions

*Hiroaki Yamahana¹, Yoshio Murai², Masanao Shinohara³

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

自由落下自己浮上式海底地震計（OBS）による地震観測データを解析するためには、自立した地震計の時計を標準時刻に補正する必要がある。多くの場合はOBSによる観測期間の直前・直後に、標準時刻であるGPSの時計とOBSの内部時計との時刻差を計測し、OBS内部時計の線形変動を仮定して時刻補正を行う。一方で雑微動の相互相関関数(CCF)による手法では、2観測点間の内部時計の相対時刻差を推定する。この手法を使用すればGPSによる時刻補正ができなかった状況でも、時刻補正済みの他の観測点との相対時刻差を推定することで、標準時刻からの時刻差の変化率（ドリフトレート）を求めることができる。それゆえCCFの利用はGPSによる時刻補正法を補うための手法として重要である。CCFにおいて2観測点間の内部時計の相対時刻差は、CCFにより抽出される脈動帯域の波動の走時として現れるため、これまで本手法は主に広帯域OBSに対して使用されていた。例としてTian *et al.* (2021) は、GPSによる時刻補正に失敗した広帯域OBSに対して本手法を使用し、複数の時刻補正済みの広帯域OBSデータとの間でCCFを求めた。その際には複数の成分・周波数帯域を用いてCCFの数を増やすことによって、1台のOBSに対して多数の走時変化を得ており、それらの平均をとることで最終的なドリフトレートの推定精度を向上させている。

本研究では脈動帯域における感度が低い、固有周期4.5Hzの短周期OBSに対して、Tian *et al.* (2021) の手法を用いて時刻補正を試みた。OBSの設置海域は北海道南東の釧路沖である。観測データは24時間ごとに分割し、1日単位で走時を計算することとした。まず前処理として計算量減少のため観測データを100 Hzへダウンサンプリングしたのち、大振幅である地震の影響を除去するためにバンドパスフィルターの適用、振幅等値化、スペクトル白色化を行った。ここで走時変化を多数求めるため、バンドパスフィルターの周波数帯域は脈動帯域を中心に少しずつずらして複数用意した。その後、全観測期間の約10分の1にあたる5日分のCCFをスタックした。ここでのCCFのピーク位置の変化が走時の変化である。ただしSN比が低いCCFを除外するために、全期間スタックしたCCFにおけるピーク値が設定した値より大きいもののみを採用した。選択された複数のCCFから得られた走時変化を用いて重み付き平均をとり、得られた平均的な走時変化の回帰直線の傾きをとることで、時刻補正対象のOBSのドリフトレートを求めた（図1）。

CCFから推定される主な波動の伝播方向は、陸側から離れる東・南向きである傾向が見られた。その波動の伝播速度は0.2 Hzにおいておよそ0.26 km/sであった（図2）。またドリフトレート推定結果を検証するため、GPS時計との時刻差計測により標準時刻に補正済みの複数のOBSに上記の手法を適用した。ここでは時刻補正済みのデータを使用しているので、求まるドリフトレートは0になることが期待される。結果としてどのOBSにおいてもドリフトレートはその95 %信頼区間が0を含み、期待通りほぼ0と一致する値を得ることができた。この結果から、短周期センサーを使用したOBSにおいても低周波帯域でのCCFを利用できる可能性が示された。

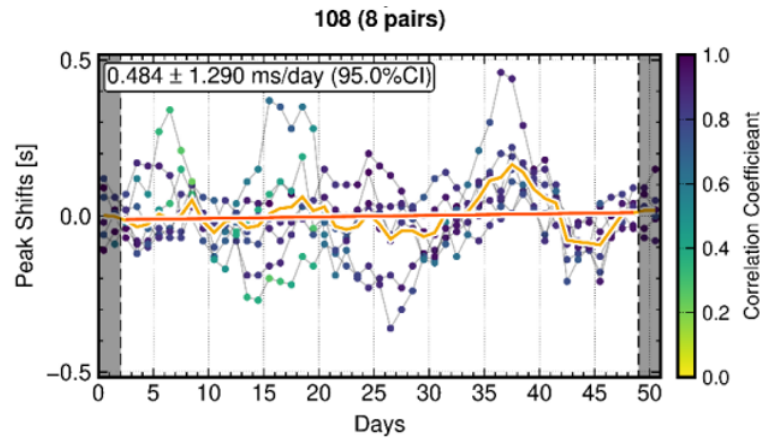


図1. ドリフトレート推定の例。線で結んだ点が各 CCF の走時変化，橙線が重み付き平均の結果，赤線が平均結果の回帰直線。回帰直線の傾きがドリフトレートとなる。

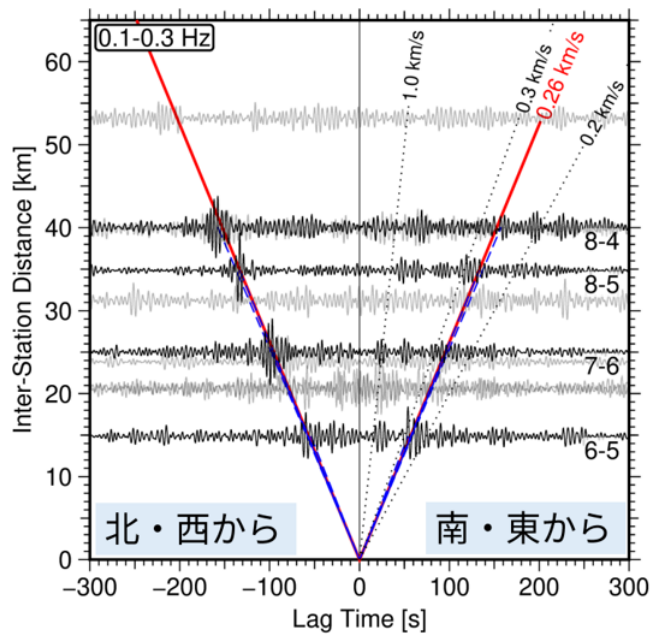


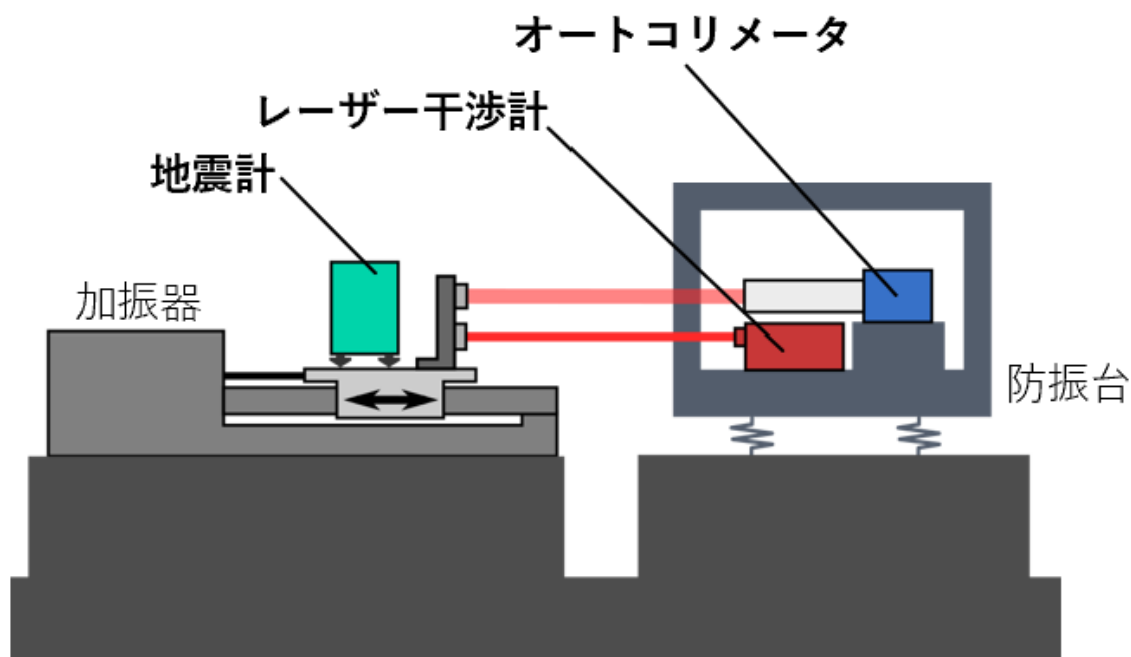
図2. OBS の距離ごとに並べた全期間スタック CCF. CCF のピーク値が小さいものは色を薄くしている。

Traceable calibration of a broadband seismometer using a laser interferometer

*Tomofumi Shimoda¹, Wataru Kokuyama¹, Hideaki Nozato¹

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

広帯域地震計は地震観測に広く用いられているが、計測対象の振動に対する出力電圧信号の感度については、必ずしも正確に校正されていない。ほとんどの場合メーカーの校正値が用いられるため、センサ特性に経時変化等があった場合にデータの正確性が落ちてしまう。センサに組み込まれたコイルを用いて電気的な評価を行うことができる地震計も多いが、電磁力を基準とするものであり、実振動に対する正確な応答は分からない。観測データの信頼性を維持するためには、地震計の特性を評価するための正確な振動標準が必要である。産総研計量標準総合センターでは、振動加振器とレーザー干渉計を用いた振動校正システムを保有しており、これまで加速度センサ等の校正を行ってきた。同システムでは振動加振器でセンサに振動を加え、レーザー干渉計でモニタした基準振動とセンサ出力信号を比較することで、センサの感度・位相遅れの特性を評価する。実際に振動を加えて評価するため、センサの使用時とほぼ同じ条件での特性を測ることができる。数年前から地震計を対象とした低周波域（数mHzから数10 Hz）の校正技術を開発しており、現在までに5 mHzまでの技術が整備されている。校正の不確かさは5 mHz帯で数%、0.1 Hzで0.15 %程度と見積もられている。レーザー波長等を基準にした信頼性の高い標準となるため、地震観測の精度向上や、観測網のメンテナンス、新規開発地震計の特性評価等に貢献できると期待される。本発表では、振動校正システムを用いた地震計の校正技術について紹介するとともに、今後の展望について述べる。



Development of multi-platform next-generation WIN system (3)

*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Mare YAMAMOTO⁴, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Naoki UCHIDA¹, Yuta MAEDA⁵, Shiro OHMI⁶, Haruhisa NAKAMICHI⁶, Makoto OKUBO⁷, Takeshi MATSUSHIMA⁸, Hiroshi YAKIWARA⁹, Katsuhiko SHIOMI¹⁰, Kenji UEHIRA¹⁰, Hideki UEDA¹⁰, Toshihiro SHIMOYAMA¹¹, Koji TAMARIBUCHI¹², Kazuo OHTAKE¹³, Ryo HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kochi University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 11. Japan Meteorological Agency, 12. Meteorological Research Institute, JMA, 13. Kakioka Magnetic Observatory, 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30年近く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，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．

これまで対話検測ソフトウェアとして必要な機能を実装した新たなソフトウェアを試作してきた（中川・他，地震学会，2021，中川・他，地震学会，2022）．WINフォーマット波形データの読み込みと表示，帯域制限フィルターの適用，手動検測，震源計算プログラムの実行，震源計算結果や震源データを地図上にカラー表示する機能を持ち，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特徴を有する．任意の震源計算プログラムを利用できるようにするために，外部コマンド実行機能を実装した．これにより，他の外部コマンドを用いた機能拡張が可能となった．

2. 発震機構解計算機能の追加

外部コマンド実行機能を用いて，発震機構解計算プログラムを外部コマンドとして実行し，その結果を表示する機能を追加した．今回は，初動極性から発震機構を求めることもできるHASH (Hardebeck and Shearer, 2002)を計算プログラムとして利用できるように，WINの検測値ファイル（pickファイル）にあるHYPOMHの出力を読み込んでHASHのサブルーチンに引き渡すラッパープログラムを新たに作成した．計算結果は，従来WINシステムで予約されていた#m行を用いてpickファイルに書き込むことにした．

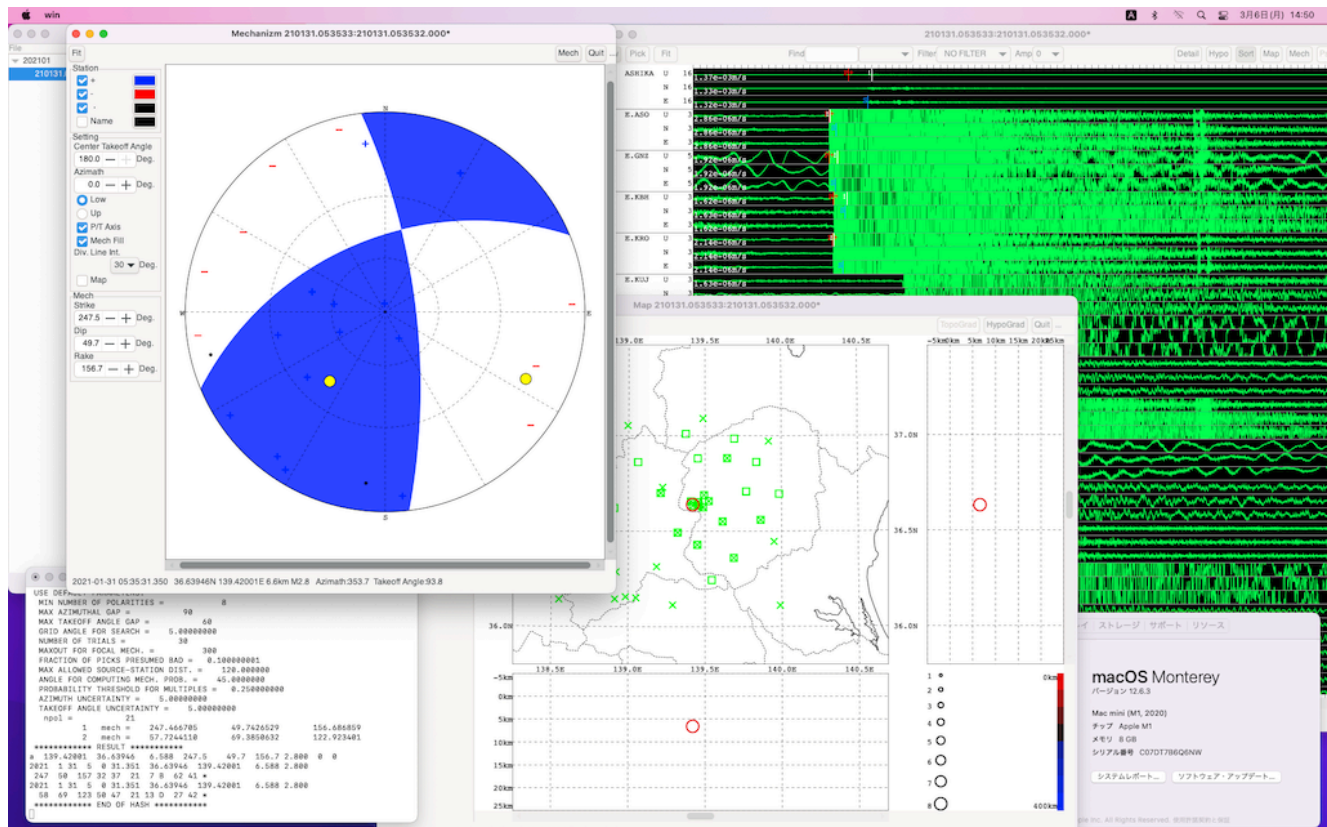
求めた発震機構解は，別ウインドウを開いて表示させた（図）．初動極性や観測点名，地図を重ねて表示させることもできる．また，図上で発震機構解を修正することも可能とした．

3. まとめ

従来のWINシステムでは，初動極性の分布を表示できたものの，断層の走向や傾斜角等を求めて図示する機能はなかった．今回，HASHはユーザが別途用意する必要があるものの，波形読み込み，検測，震源決定，発震機構解推定まで一貫して行うことができるようになった．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．

本研究で作成した対話検測ソフトウェアは，今年度中には地震研究所のWEBサイト等を通じて一般への公開を予定している．また，伝送系システムについても検討を進めていきたい．これらの運用試験や機能拡張，システム製作等に協力いただける方は著者までご連絡ください．

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．



Detection of submarine volcanic activity at Kaitoku Seamount using S-net

*Ryoichi IWASE¹

1. JAMSTEC

海徳海山では、2022年8月以降、航空機による海面の変色水の確認などの海底火山活動が報告されている(海上保安庁, 2022)。一方、同じ8月以降、防災科学技術研究所が構築した「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)の海底地震計の観測波形には、S-netの南側から深海サウンドチャンネル(SOFAR)を伝搬してきたと考えられる波形が断続的に記録されている。岩瀬(2023)では、この波形が海徳海山の海底火山活動に起因するものではないことを示し、S-net各観測点への信号の到達時間差から、信号源(音源)の位置を小笠原諸島南端付近の海溝斜面上と推定した。他方、Tanaka et al. (2023)では、Wake島沖に設置されているハイドロフォンアレーの観測から、この信号が、北マリアナのAhyi海底火山の活動に伴う信号であると指摘するとともに、これとは別に、海徳海山の火山活動に伴うと推定される海中伝搬波を検出したことも報告されている。そこで今回、Tanaka et al. (2023)を参照し、S-net海底地震計の観測波形を用いて、海徳海山の火山活動に伴う海中伝搬波の検出を試みた。

使用したデータは岩瀬(2023)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る。解析対象期間は、Tanaka et al. (2023)を参照し、海徳海山からの海中伝搬波が検出される可能性の高い2022年9月1日とした。速度計の鉛直成分算出のための重力成分は、9月1日00:00 JSTから3時間の加速度計データを時間平均して求めた。

まず、海徳海山の位置に海中伝搬波の音源があると仮定し、岩瀬(2022a)と同様、観測点毎に伝搬時間分時間軸をずらした地震波形のスペクトログラムの対比を実施したが、海徳海山の火山活動に対応する信号は検出できなかった。次に岩瀬(2022b)の結果に基づき5-10 Hzのバンドパス・フィルタを原波形に適用した後、伝搬距離順に並べた図を作成した。なお、伝搬時間は伝搬距離(大円距離)を、岩瀬(2022b)において海中伝搬波の音速として推定した1472 m/sで割って求めた。

作成した図の例をFig. 1に示す。微弱ながら12:20頃を中心にほぼ直線状に縦に並ぶ信号が確認でき、海徳海山の火山活動に対応する信号と判断される。海徳海山では福岡ノ場のような顕著な噴火活動は確認されていないが、同程度の火山活動でもS-netで検出可能なことを示している。

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

海上保安庁(2022), <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r4/k220823/k220823.pdf>

岩瀬(2023), JpGU2023, SVC34-05

Tanaka et al. (2023), JpGU2023, SVC34-P01.

岩瀬(2022a), JpGU2022, SVC31-21

岩瀬(2022b), 日本地震学会2022年度秋季大会, S02-02

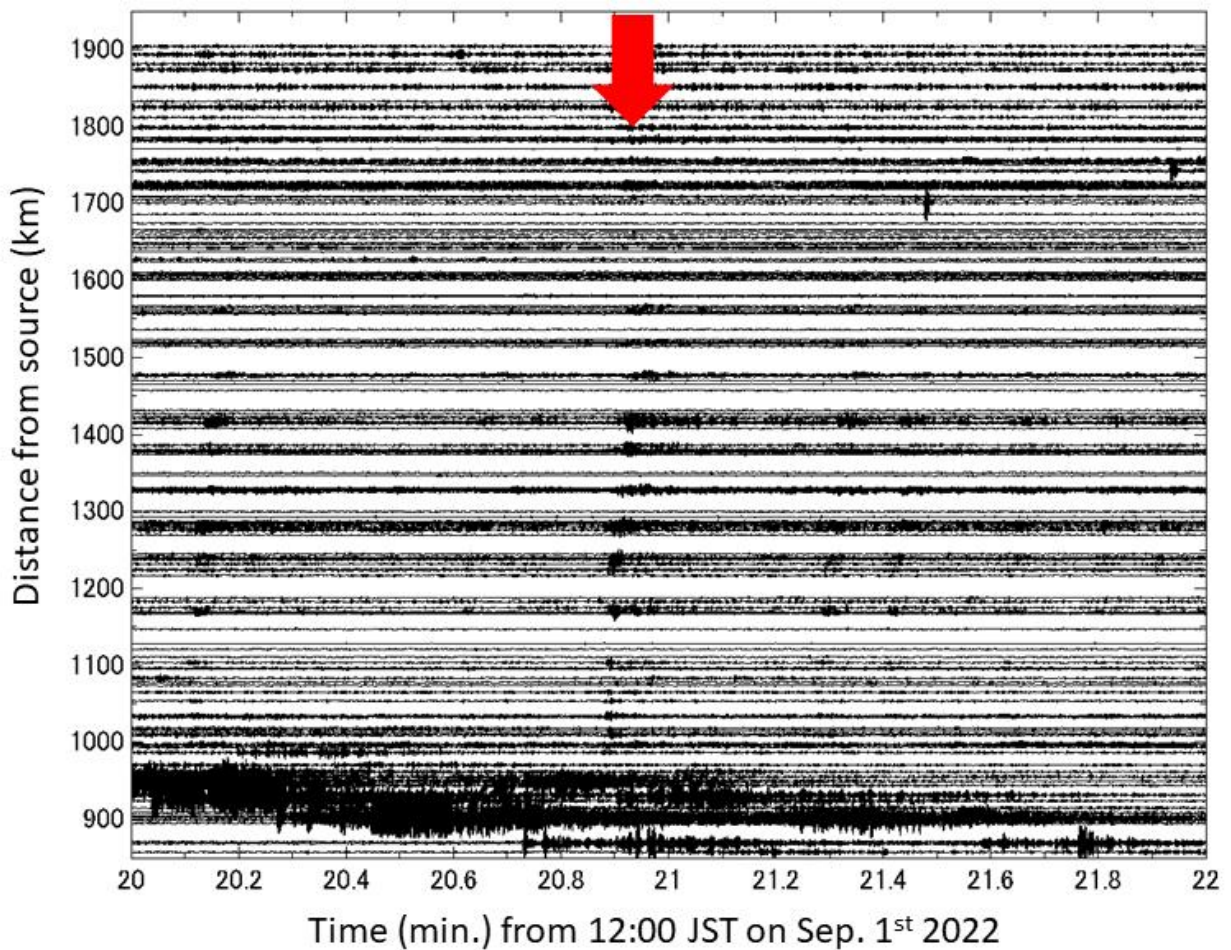


Fig. 1 Profiles of waveform of S-net stations aligned by distance. Time in horizontal axis is projected in the source time.

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

📅 Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏠 Room B F201

[S02] AM-2

chairperson: Masayuki Tanaka (MRI, JMA), Shuhei Tsuji

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

[S02-06] Vibration Monitoring in the Off-Tonankai Cable by Distributed Acoustic Sensing

*Masayuki TANAKA¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA)

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

[S02-07] Passive seismic data in surface-deployed DAS measurement with helically wound fibers and straight fibers

*Shogo Masaya¹, Ryohei Naruse¹, Yuki Kobayashi¹ (1. INPEX CORPORATION)

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

[S02-08] A comparative study of seismic data measured by surface-deployed DAS with two interrogators and different cable deployment conditions

*Ryohei Naruse¹, Shogo Masaya¹, Yuki Kobayashi¹ (1. INPEX Corporation)

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

[S02-09] Development of the Earthquake Early Warning Algorithm Utilizing DAS with Optical Fiber Cables along the Shinkansen Railway

*Satoshi KATAKAMI¹, Eiichiro Araki², Narumi Takahashi³, Shunta Noda¹, Masahiro Korenaga¹, Naoyasu Iwata¹ (1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S02-10] Automatic arrival time picking of coda waves recorded by DAS seismic observation

*Shigeki Horiuchi¹, Yuko Sato¹, Yoshiharu Hirayama², Tsutomu Yamate², Satoshi Ikui², Minoru Yoshida², Yasuhiro Asai³, Yoshio Nakajima³, Yoichiro Naito³, Hiroyuki Fujiwara⁴ (1. Home Seismometer Corporation, 2. Hakusan Corporation, 3. Tokyo Power Technology, 4. NIED)

Vibration Monitoring in the Off-Tonankai Cable by Distributed Acoustic Sensing

*Masayuki TANAKA¹

1. Meteorological Research Institute, JMA

分布型音響センシング（DAS; Distributed Acoustic Sensing）の技術を用いた地震観測事例は国内でも最近数多く見られるようになった。DASの特徴としては、①一度の測定でファイバ全域にわたる稠密な一次元のひずみ速度計測が可能である。②光ファイバに入射する光パルス幅により決まる空間分解能があり、光パルス幅より狭い範囲の変化は平均化された値で観測されるため、点の計測は困難である。③ファイバ内の不純物や欠陥により発生する散乱光は微弱な光であり、ノイズ低減のために加算平均等の処理が行われている。④サンプリング周波数により決まる距離限界がある。⑤ファイバの伝送損失により、より遠方の散乱光の信号強度は装置の近傍よりも弱く、最大測定可能距離は存在し、かつより遠方ほど測定精度が劣る。等があり、DASで観測されるデータの物理量は、地震計で得られる物理量とは異なるひずみ速度で、かつある区間の平均化された値である。

昨年までは静岡県浜松市天竜区船明地区にあるトンネル内に敷設したシングルモード4芯1kmの光ファイバを使い、自然地震の観測及び加振器を用いた人工振動で振幅の線形性や安定性を調べた。今年からは静岡県御前崎市から沖合に南海トラフに沿って敷設されている東南海沖ケーブルのダークファイバを使って観測を行っている。東南海沖ケーブルは昨年12月に御前崎沖約4 km付近でケーブルが損傷するトラブルがあり、現在、観測可能なDAS装置から約5kmの区間で観測を行っている。陸上局から約1kmの区間のケーブルは陸上で概ね道路下に敷設されており、約1kmから先は海底に敷設されている。陸上では車の往来、海域では天候対応する風浪などに起因する様々な振動を捉えている。当日は東南海沖ケーブルでのDAS観測の現状を紹介する。

Passive seismic data in surface-deployed DAS measurement with helically wound fibers and straight fibers

*Shogo Masaya¹, Ryohei Naruse¹, Yuki Kobayashi¹

1. INPEX CORPORATION

近年、distributed acoustic sensing（以下DAS）は、従来の地震計等のセンサーに基づく観測システムと比して高密度な観測システムを実現し得る、新たなセンシング技術の1つとして注目されており、地震、火山、地下探査を含めた様々な分野に応用が検討されている（例えば[1-3]）。DAS計測に用いる光ファイバケーブルの利用・設置方式も複数検討されており、地震や火山の分野では、陸海問わず、通信用光ファイバケーブルなどの既設のファイバ（いわゆるdark fiber）の利用に関する研究が多く報告されており（例えば[4-5]）、資源開発の分野では、地下モニタリングの目的で、掘削した坑井内に新たに敷設する光ファイバケーブルを用いたDAS計測が普及し始めている（例えば[3]）。

Dark fiber含め、地表付近に設置された光ファイバケーブルを利用するDAS計測における課題の1つとして、DASで計測されるエネルギーは、ファイバの軸方向の成分が、その垂直方向の成分と比べて支配的となるため、地表に対して鉛直方向に伝搬する波を計測することが制約となる。この課題を克服し、鉛直成分のエネルギーも十分に計測することが可能となれば、計測方向の依存性が低減し、例えば、地震探査の反射波の記録の改善が期待できる。

この課題の解決を目指すアプローチの1つとして、ファイバを直線ではなく螺旋状の形状とすることにより、軸方向に対して垂直方向の感度を向上させる、螺旋型光ファイバケーブルが提案されている[6]。しかし、このアプローチにも課題があり、新たに専用の光ファイバケーブルを敷設する必要があり、新たな敷設が必要ないdark fiberと比べるとコストが増大することが挙げられる。従って、目的に依って利用が限定される可能性があり、地表に螺旋型光ファイバケーブルを敷設して実施したDAS計測に関する先行報告は、世界的にもまだ数少ないため[7-8]、その有効性は十分に議論されていないと言える。

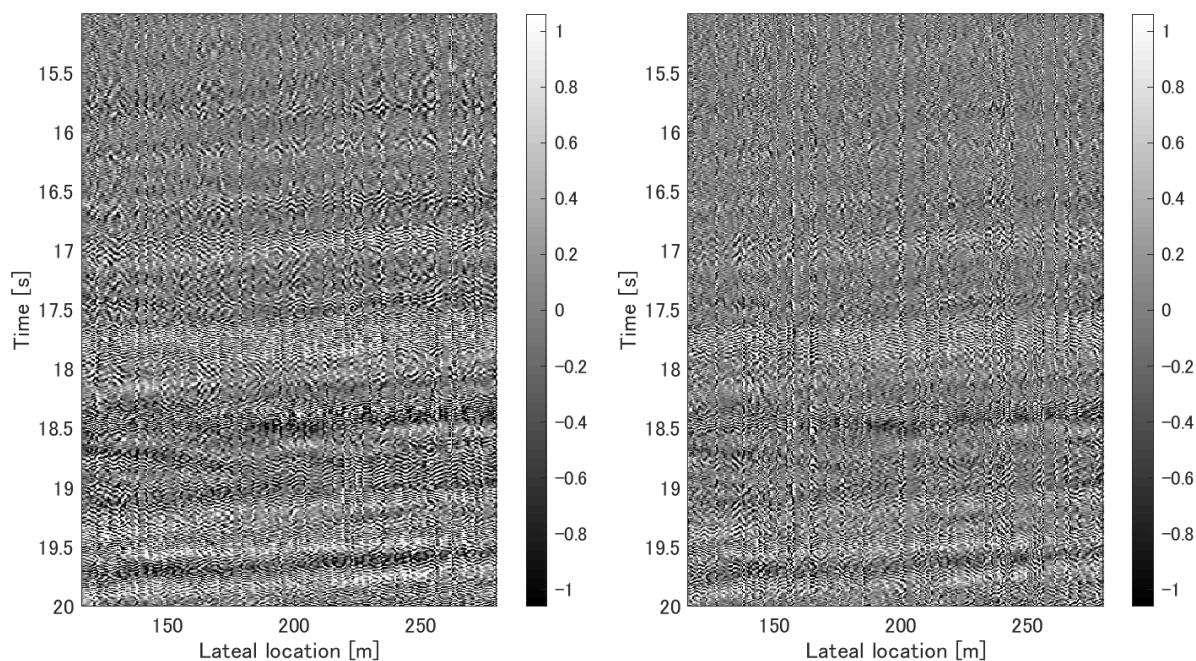
その有効性の検証を目的として、本研究では、新潟県で螺旋型および直線型の光ファイバケーブルを敷設して、地下探査に併せてDAS計測を実施した。本発表では、当DAS計測における、地震および微動（表面波）の計測結果に焦点をあてて、双方のファイバで取得された記録の比較について報告する。

図：新潟県に敷設した直線型（左図）および螺旋型（右図）の光ファイバケーブルを用いたDASにより計測された、千葉県東方沖地震（2023年5月26日19時3分）の一部記録の比較例。図中の17秒付近がP波に相当する。尚、直線型と螺旋型のケーブルは全長に差異があるため、横軸はリサンプリングによりサンプル数を同一としている。

参考文献

- [1] N. J. Lindsey et al., “Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields,” *Geophysical Research Letters*, 44, 11792-11799 (2017).
- [2] T. Nishimura et al., “Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system,” *Scientific Reports*, 11, 6319 (2021).
- [3] T. M. Daley et al., “Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring,” *The Leading Edge*, 32, 699-706 (2013).
- [4] J. B. Ajo-Franklin et al., “Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broad-band Seismic Event Detection,” *Scientific Reports*, 9, 1328 (2019).
- [5] Z. Zhan et al., “Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables,” *Science*, 371, 931-936 (2021).
- [6] B. N. Kuvshinov, “Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves,” *Geophysical Prospecting*, 64, 671-688 (2016).

[7] A. Bakulin et al., “Evaluating HD weathering surveys and surface seismic with DAS in a sand dune environment,” in Proceedings of 2nd International Meeting for Applied Geoscience & Energy, 621–625 (2022).



A comparative study of seismic data measured by surface-deployed DAS with two interrogators and different cable deployment conditions

*Ryohei Naruse¹, Shogo Masaya¹, Yuki Kobayashi¹

1. INPEX Corporation

光ファイバーケーブルをセンサーとして用いるDistributed Acoustic Sensing（以下DAS）計測は、高密度なデータ取得が可能である利点により、地震計等に基づく観測システムと比して空間分解能を向上できるセンシング技術として注目され、地下探査、地震や火山による振動のモニタリングの分野でも広く活用され始めている（例えば[1-3]）。また、DAS計測に用いる光ファイバーケーブルの敷設方法は複数検討されており、近年、地震・火山の分野では、いわゆるdark fiberと呼ばれる通信用光ファイバーケーブルなどの既設のファイバーを利用したDASに関する研究が多数報告されている（例えば[4, 5]）。しかし、dark fiberは計測場所を自由に選択できない等の制約もあり、新たに地表に光ファイバーケーブルを敷設してDAS計測を行う事例も報告され始めている（例えば[6]）。

他方で、DAS計測においては、光ファイバーケーブルに対して光波出力および後方散乱光解析を担う機器、いわゆるインテロゲーターが重要な要素の1つとして考えられ、例えば、パイプレータを用いたvertical seismic profileのテストにより、使用するインテロゲーターの差異がDAS記録の影響を与えることが示唆されている[7]。また、新たに敷設する場合の光ファイバーケーブルの敷設条件についても複数の方法による記録の違いについて言及されているが[6]、地震波の実データを用いた先行研究は限られる。

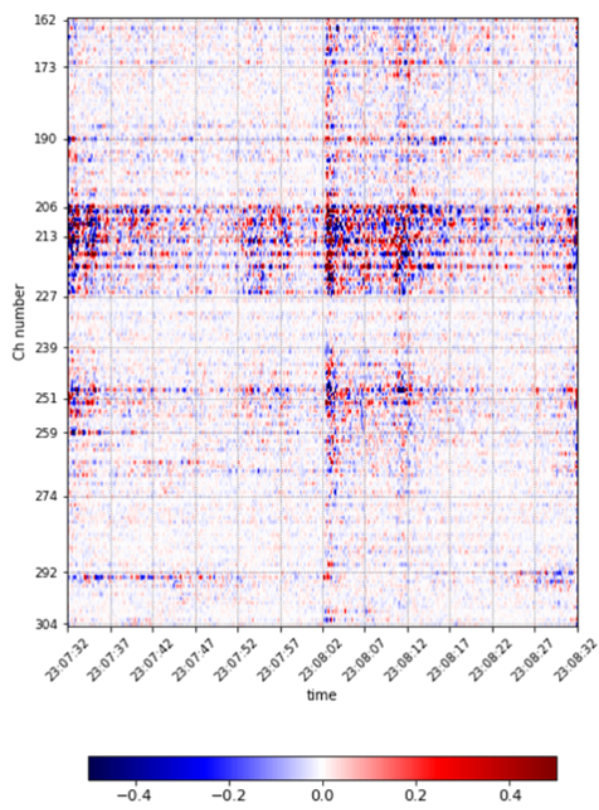
本研究では、地表でのDAS計測における、2台のインテロゲーターおよび異なるケーブルの敷設条件によるDAS計測記録の違いを検証するため、2芯のファイバーが挿入された光ファイバーケーブルを約70mの区間で地表に敷設し、それぞれの芯に異なるインテロゲーターを接続して同時・同地点の連続DAS計測を行った。光ファイバーの敷設条件としては、10cm程度の深さで埋設、地表に敷設してペグにより一定間隔で固定、ペグに加えて上にプロテクターを設置、の3パターンの区間を用意した。本発表では、当DAS計測において取得した地震の計測結果を用い、インテロゲーターの差異、および光ファイバーケーブルの敷設条件の差異から生じる記録の違いについて報告する。

図：INPEX技術研究所敷地内にて約70m区間に光ファイバーケーブルを1往復（全長約160m）させDAS計測した結果

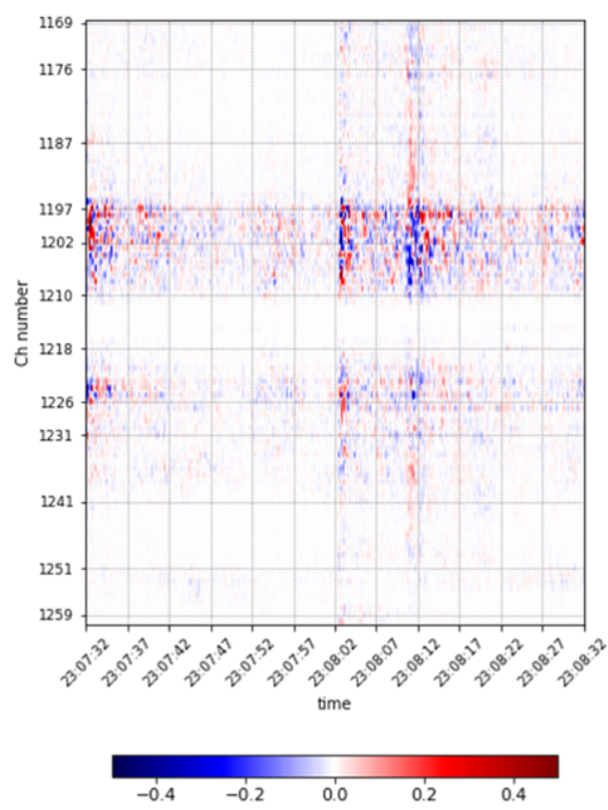
2023年4月25日23時7分に東京湾で発生したM2.9の地震記録

参考文献

- [1] T. M. Daley et al., “Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring,” *The Leading Edge*, 32, 699-706 (2013).
- [2] N. J. Lindsey et al., “Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields,” *Geophysical Research Letters*, 44, 11792-11799 (2017).
- [3] T. Nishimura et al., “Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system,” *Scientific Reports*, 11, 6319 (2021).
- [4] J. B. Ajo-Franklin et al., “Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broad-band Seismic Event Detection,” *Scientific Reports*, 9, 1328 (2019).
- [5] Z. Zhan et al., “Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables,” *Science*, 371, 931-936 (2021).
- [6] J. E. Monsegny et al., “A comparative study of data from different DAS interrogators,” *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 483-487 (2021).
- [7] N. Harmon et al., “Surface deployment of DAS systems: Coupling strategies and comparisons to geophone data,” *Near Surface Geophysics*, 4, 465-477 (2022).



(a) Interrogator A



(a) Interrogator B

2023/4/27 23:07:51.7 M2.9 @Tokyo Bay

Development of the Earthquake Early Warning Algorithm Utilizing DAS with Optical Fiber Cables along the Shinkansen Railway

*Satoshi KATAKAMI¹, Eiichiro Araki², Narumi Takahashi³, Shunta Noda¹, Masahiro Korenaga¹, Naoyasu Iwata¹

1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

序章

新幹線の地震計で使われている早期地震警報（EEW）の地震諸元推定アルゴリズムは、単独観測点データから震源距離（ Δ ）やマグニチュード（ M ）などを推定している。この方式は、推定精度は落ちるが、複数点のデータを使うよりも早く警報を出すことができる。新幹線のEEWアルゴリズムは、沿線（20km毎）や海岸に設置された地震計で取得されるP波初動直後の短いデータ（通常1～2秒）を用いて地震諸元を推定する。しかしながら、震央距離は倍半分、震央方位は $\pm 30^\circ$ 、マグニチュードは ± 0.6 程度の推定誤差があり、出力される警報は単独観測点の推定結果に依存する。Distributed Acoustic Sensing（DAS）は、光ファイバーケーブル内を進む後方散乱レーザーパルスの位相の変化を利用して、光ファイバーケーブルに沿った歪み変化を計測する。本技術は数m毎にデータを計測できるため、ほぼ同時刻（例えば0.5秒以内）に地震波を複数点で検知することが可能である。したがって、各点のデータを用いて推定された地震諸元の結果を統計的（例えば、平均や中央値など）に評価することができ、警報の高精度化に繋がる可能性がある。本研究では、新幹線沿線の既設光ファイバーケーブルに適用したDASを用いて取得された地震データを使用し、地震波検知後、迅速に地震諸元を推定する手法を紹介する。

観測

九州新幹線沿線の既設光ファイバーケーブルにDASを適用し自然地震観測を実施した。観測期間は、2022年1月から2月および2023年2月から3月であり、2022年は新八代駅から新大牟田駅の約75km、2023年は新八代駅から久留米駅の約100kmの既設ケーブルを使用した。観測範囲には、橋梁・高架橋・トンネルなど様々な鉄道構造物があり、橋梁や高架橋は線路横のトラフ内に、トンネル内では壁面に光ファイバーケーブルが設置されている。DASはAPセンシング社のものを使用し、interrogatorを最南端の新八代駅に設置した。

手法

本発表では、リアルタイムで震源距離とマグニチュードを推定し、鉄道沿線から何km離れた地点でどの程度のマグニチュードの地震が生じたか算出する手法の開発を実施した。また、早期警報に使用するために、計算コストをできるだけ抑えることにも注意した。Yin et al. (2023) において、DASで計測されたひずみ速度と、マグニチュードおよび震源距離の回帰式が示されている。九州新幹線沿線のDAS観測で取得した地震データの最大ひずみ速度と、震源距離、気象庁マグニチュードの値を用いて、上記回帰式のパラメータを設定し、九州新幹線沿線のDASデータにおけるマグニチュードスケリング式を取得した。次に、震源距離をリアルタイムで推定するために、STA/LTAを基本としたP波到来時刻およびS波到来時刻をロバストにリアルタイムで決定する手法を開発した。読み取ったS波とP波の到来時刻差から震源距離を推定する。また最初にP波を検知したチャンネルから両側数キロのデータのみを用いることで即時性を維持した。

結果・考察

観測期間中に発生したMj2.5以上、震源距離150km以下で発生した地震データ（地震数は10）に対し開発した手法を適用した。DASで推定したマグニチュード（ M_{das} ）と気象庁マグニチュードを比較すると、今回対象とした地震では、2022年1月22日に日向灘で発生したMj6.6の地震を除き、 ± 0.5 程度の誤差で M_{das} を推定していることがわかった。Mj6.6の地震の M_{das} の推定結果は、S波の到来時刻が正確に決定できていないことで震源距離が小さく求まり、 M_{das} を大きく過小評価していた。これは、cycle skippingの影響でP波とS波のひずみ速度値の差が小さかったことが原因である。今後は、追加観測を実施することでDASによる地震データを増やすことや、P波のみの情報で地震諸元を推定する手法の開発等に注力する。

Automatic arrival time picking of coda waves recorded by DAS seismic observation

*Shigeki Horiuchi¹, Yuko Sato¹, Yoshiharu Hirayama², Tsutomu Yamate², Satoshi Ikui², Minoru Yoshida², Yasuhiro Asai³, Yoshio Nakajima³, Yoichiro Naito³, Hiroyuki Fujiwara⁴

1. Home Seismometer Corporation, 2. Hakusan Corporation, 3. Tokyo Power Tecnology, 4. NIED

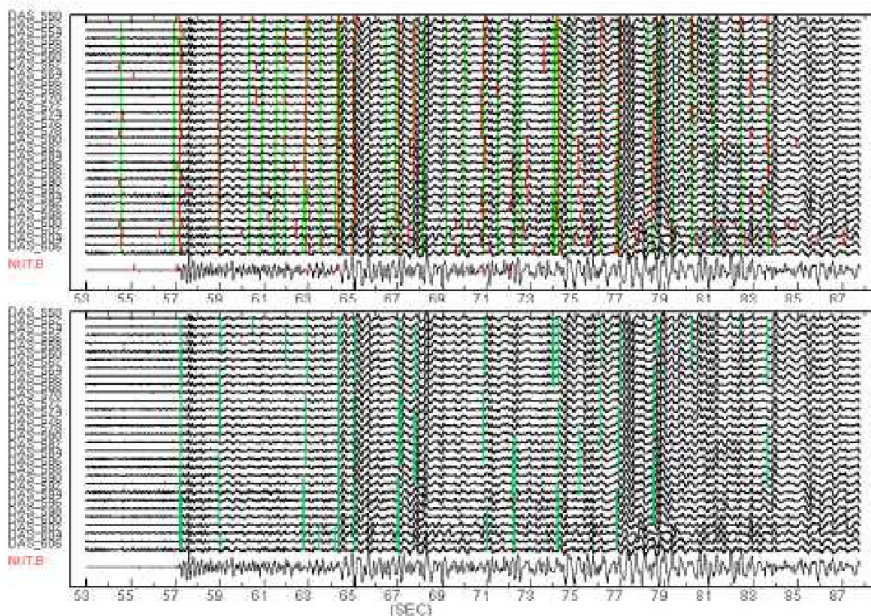
1. はじめに 光ファイバーケーブル全体をセンサーとするDAS（分散型音響計測）は、ケーブルに沿って、数m間隔の地震観測を行うことができ、この数年で観測事例が急速に増えており、従来の地震観測がDASに置き換わる可能性もあると指摘されている。DASによる観測は、高密度、多チャンネルであることから、相関の高い後続波が観測され、初動のみならず、後続波を用いることにより、詳細な地下構造の推定が可能であると期待されている。本報告では、DASにより観測されるP波、S波の他に、後続波の到着時刻を自動で読み取るための手法開発を行ったので報告する。

2. データ 東京パワーテクノロジーと白山工業は、新潟工科大学の深井戸に、光干渉法を利用した光センサーを設置し、地震観測を行っており（藤原他、2023）、2022年7月27日ー8月4日の期間には、DASを用いた観測も行った。本解析では、DASによる観測データを用いた。DASによる観測の、観測点間隔、ゲージ長、チャンネル数、サンプリング間隔は、それぞれ、3.19m、6.38m、637点、1kHzで、最深点の深さは1977mである。本解析では、気象庁一元化震源による予測震度が、-1.0以上の地震の波形を切り出して用いた。このデータセットには、マグニチュード3.4の能登半島の地震や、マグニチュード5.6の、福島県沖の地震等が含まれている。

3. コーダ波到着時刻の読み取り 堀内他(2019)は、数mから数10m離れた2地点の、観測波形のconvolutionを連続的に計算（以下convolution波形と呼ぶ）すると、到着時刻の読み取りや、地下構造推定に適した記録が得られると指摘している。コーダ波の到着時刻読み取りでは、convolution波形に、AGC(Auto Gain Control) フィルターを通したものをを用いた。AGCフィルターの振幅が閾値(Cagc)を超えた場合に、その時刻を到着時刻の初期値とし、堀内他(2009)による到着時刻自動読み取り手法を用いて、読み取りを行うようにした。そして、到着時刻前後の、convolution波形のS/N (SNc) と、生波形のそれ (SNr) を計算し、両者が閾値を超えた場合に、解として採用するようにした。採用した閾値は、Cagc=5.0, SNc=3.0, SNr=1.3 である。

4. 見かけ速度と到来時刻の推定 図1. に示すように、上述の方法を用いることにより、多数の後続波の到着時刻が読み取られるようになった。地下構造の推定では、これらの、読み取りデータを用いて、顕著で、空間的に連続性のあるコーダ波の見かけ速度と、オフセット時刻を求める必要がある。図1. に示されているように、空間的に連続性のあるコーダ波は、多数存在することから、個々の波群について、それに対応する到着時刻を自動的に選び、見かけ速度と、オフセット時間を計算する必要がある。そこで、以下の方法で、これらを求めるようにした。k番目のコーダ波群のi観測点の到着時刻 P_{ki} と、理論走時 T_{ki} との差 E_{ki} を、 $E_{ki}=P_{ki}-(T_{ki}+H_i/V_k)$ (1) と置く。 H_i はi観測点の深さである。 $Sc=\sum \exp(-E_{ki}^2/c^2)$ (2) として、 Sc が最大となるオフセット時刻 T_k と、見掛け速度 V_k を数値的に求めるようにした。(2)式の E_{ki} がcに比べ大きい場合は、expの値が小さくなり、(2)式の最大値は、特定の見掛け速度と、オフセット時間に一致する読み取りデータを用いて、解を求めることに対応している。コーダ波群は多数存在することから、解が求められたら、その解を満足する P_{ki} を削除し、再度、(2)式を最大とする解を求め、これを繰り返すことにより、全ての波群についての、解を求めるようにした。図1に示す直線は、求められた解をプロットしたものである。(2)式のCの値は、経験的に0.1秒を与えた。

3. で示した方法で、コーダ波の読み取りは行えるが、波形相関を用いると、更に、高精度の読み取りが可能である。そこで、(2)式で求められた、複数の見掛け速度と、オフセット時間を満足する時刻の波形を切り出し、数10m間隔毎に、センブルスを計算し、自動読み取りデータの修正を行うようにした（図1）。5.結論 堀内他(2019)によるconvolution 波形を用いて、DASで観測されるコーダ波の到着時刻を自動で読み取るための手法開発を行い、精度の高い読み取りが行えることが示された。波形相関を用いて、読み取りデータを修正することにより、コーダ波の到着時刻データが、詳細な地下構造推定に利用可能になると期待される。謝辞：本研究での地震観測は、新潟工科大学の深井戸を使わせて頂きました。



55

図1. 福島県沖地震（2022年8月4日M5.6）の自動読み取り結果の一例。
 上 赤線：自動読み取り到着時刻、緑線：理論、
 下 緑線：相関による到着時刻

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

📅 Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 2:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 5:30 AM UTC | 🏠 Room B F201

[S02] PM-1

chairperson:Satoshi Katakami

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

[S02-11] Development of seafloor deep borehole long-term observation system and the deployment plan in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI¹, Yuya Machida¹, Takashi Yokobiki¹, Shuhei Tsuji¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuhei Nishida¹, Satoru Baba¹, Kan Aoike², Yasuyuki Nakamura¹, Keisuke Ariyoshi¹, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC IMG, 2. JAMSTEC Mare3)

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

[S02-12] Development of seafloor borehole fiber optical strainmeter

*Yuya MACHIDA¹, Eiichiro Araki¹, Yokobiki Takashi¹, Tomokazu Saruhashi¹, Shuhei Tsuji¹, Hiroyuki Matsumoto¹ (1. JAMSTEC)

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

[S02-13] Initial test of borehole fiber optic strainmeter at Kamioka Mine

*Shuhei TSUJI¹, Eiichiro Araki¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Yuya Machida¹, Takashi Yokobiki¹ (1. JAMSTEC)

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

[S02-14] Analysis of long-term pore pressure data acquired at a 20 m borehole in the Kamioka Mine

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Yuya Machida¹, Shuhei Tsuji¹, Takashi Yokobiki¹, Keisuke Ariyoshi¹, Eiichiro Araki¹ (1. JAMSTEC)

Development of seafloor deep borehole long-term observation system and the deployment plan in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI¹, Yuya Machida¹, Takashi Yokobiki¹, Shuhei Tsuji¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuhei Nishida¹, Satoru Baba¹, Kan Aoike², Yasuyuki Nakamura¹, Keisuke Ariyoshi¹, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC IMG, 2. JAMSTEC Mare3

南海トラフ沈み込み地震発生帯の熊野灘にIODPで設置された海底深部長期孔内観測システムによって、浅部沈み込みプレート境界域で発生するゆっくり滑りの発生が明らかとなった。海底ケーブルに接続した3点の長期孔内観測システムにより、浅部ゆっくり滑りのモニタリングがなされるようになった。一方、南海トラフの広域では、GNSS/Aなどにより、ゆっくり滑りの発生が示唆される地域もあり、VLFE等からゆっくり滑りの発生も示唆される一方、高感度かつリアルタイムな海底地殻変動観測点がないため、浅部ゆっくり滑りの発生時系列は広い領域で今なお不明である。そこで、私たちは、広域での浅部ゆっくり滑りの発生を捉えることを目指し、熊野灘でのIODP長期孔内観測システムでの観測の経験を踏まえ、広域で浅部ゆっくり滑りを捉えることが期待できる新たな長期孔内観測システムを開発した。現在、紀伊水道沖、四国沖、日向灘のゆっくり滑りの発生が期待できる地域計3か所への設置展開を年次的に計画しており、紀伊水道沖への最初の設置とDONETへの接続・連続観測開始を2023年11月「ちきゅう」航海～2023年12月新青丸航海での実施を予定している。最初の設置にあたり、ゆっくり地震の発生状況、地殻構造探査データや、海底調査データを検討し、掘削点をDONET-2Fノードの南方およびDONET-2Gノードの近傍に選定し、「ちきゅう」航海の実施へ向けて現在準備を進めている。開発した長期孔内観測システムは、海域で高感度にゆっくり滑り、VLFE, 低周波微動～地震を捉えるため、海底下の堆積層500m程度まで掘削した孔内で間隙水圧と歪を広帯域で計測するものである。間隙水圧はこれまで熊野灘に設置したものと同様の仕組みであるが、歪は、孔内にセメント固定したコイル状の200m長の光ファイバーケーブルの伸縮を基準長光ファイバーと光干渉法により比較計測する方式の「孔内光ファイバー歪計」を新たに開発・採用した。この新開発の孔内光ファイバー歪計によって、微小地震～ゆっくり滑りに伴うゆっくりとした歪変動を高感度に観測できると同時に、巨大地震のような大きな歪変動に対しても振り切れず忠実に観測が可能となる。光ファイバー歪計は、孔内には光ファイバー部品のみを配置することによって、耐故障性を高めた。孔内の同一測定区間には温度応答の異なる同等の歪計用光ファイバーが2式孔内設置され、冗長構成とするとともに、計測歪への孔内温度変化の影響を取り除くことができるようにした。孔内間隙水圧および孔内光ファイバー歪計は、DONET孔内インターフェースを通じDONETに接続することで、長期・リアルタイム観測を行う。今回の開発では、孔内光ファイバー歪計の計測区間に並行した、光ファイバーセンシングを行える光ファイバーも巻線した。この光ファイバーは200mの外界歪と温度変動に応答する部分と400mの温度変動のみに応答する部分から構成されており、海底から孔内へ接続する光ファイバーと合わせ、DAS（地震）やTW-COTDR（歪・温度）、DTS（温度）等の様々な方式で孔内光ファイバー計測が行えるものである。今後、「ちきゅう」や「新青丸」航海中、船上の光ファイバー観測装置を孔内ファイバーに接続し観測を試みる予定である。また、将来的には、海底で動作する光ファイバー観測装置を開発・設置し、連続的な光ファイバー観測を実施する計画である。海底孔内への設置に先立ち、岐阜県神岡鉱山内に新たな海底長期孔内観測システムと同等の模擬観測システムの設置を2023年3月に実施し、現在試験検証観測を行っている。間隙水圧・孔内光ファイバー歪計による観測と並行して、DAS及びTW-COTDR技術による光ファイバーセンシングを実施し、光ファイバーの外壁歪に応答する部分で光ファイバー歪計と同等の地震・歪変動の観測が行えるほか、温度のみに応答する部分により、周囲温度変動の高分解能な計測が行えることが確認できた。また、TW-COTDRでの10cm分解能の稠密な観測データからは、光ファイバーセンシングによって孔内多成分歪の観測が実施しうることを示す結果が得られた。

Development of seafloor borehole fiber optical strainmeter

*Yuya MACHIDA¹, Eiichiro Araki¹, Yokobiki Takashi¹, Tomokazu Saruhashi¹, Shuhei Tsuji¹, Hiroyuki Matsumoto¹

1. JAMSTEC

2023年11月に南海トラフにおけるゆっくり滑りの広域把握、および高精度化を目的として紀伊半島沖に長期孔内観測システムを設置する予定である。この観測システムは新規で開発を行った孔内光ファイバ歪センサと、熊野灘の長期孔内観測システムで設置実績のある間隙水圧計で主に構成される。孔内光ファイバひずみセンサは、センシング部の200mファイバと基準長200mファイバ間の光路長の変化を光干渉方式により比較計測することで、200mの光ファイバの長さの変化を1nmの分解能で観測することを実現する。センシング部は円筒形のステンレス管に光ファイバケーブルを螺旋状に巻き付けたものである。このセンシング部は孔内に設置後にはセメンチングされ、周囲の地殻変動を計測することができる。孔内光ファイバ歪センサでは、光干渉計測を行う光ファイバについて2種類の温度係数の異なるシングルモード光ファイバを用いている。これは地殻変動による変化と温度変化による変化を切り分けることを目的としており、仮に水の流れなどによる変化が計測された場合は光ファイバの温度係数に応じた変化量を示すことを利用したものである。ゆっくり滑りによる歪変化は非常に微小なものであるため、温度による変化と予め切り分けできる機構は重要となる。また設置時にはセメンチングを行うが、セメントによる影響は数か月から数年にわたり影響があることが考えられる。2023年3月からは神岡鉱山内20m孔において、孔内光ファイバの評価を実施するために孔内光ファイバ歪センサの実証試験装置を設置し、データ評価を行っている。実証試験装置の記録では、設置直後より指数関数と線形成分による長期的な変化を示しており、海底孔内掘削孔に設置時においてもこの影響が予想される。このため現場で使用するセメントを利用して2023年9月から10月にかけて評価試験を実施する予定である。本発表では光ファイバケーブルの温度応答評価、およびセメント試験に関して議論を行う。

Initial test of borehole fiber optic strainmeter at Kamioka Mine

*Shuhei TSUJI¹, Eiichiro Araki¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Yuya Machida¹, Takashi Yokobiki¹

1. JAMSTEC

地殻変動観測のための新たな海底深部長期孔内観測システムが2023年秋に、地球深部探査船「ちきゅう」によって紀伊水道沖の南海トラフに設置される予定である。この長期孔内観測システムは、孔内計測用に新たに開発した光ファイバー歪計と従来の海底深部長期孔内計測システムでも採用され、実績のある間隙水圧計(例えば、Araki et al., 2017)により構成されている。本研究では、光ファイバー歪計について、その特性を把握するために神岡鉱山で行っている陸上試験の結果を報告する。

孔内計測用の光ファイバー歪計は、周辺地殻と接するセンシングファイバーと耐圧容器内に格納される基準ファイバーから構成され、両ファイバーの長さの差をマイケルソン干渉を用いて精密に計測することにより歪を測る。センシングファイバーは円筒形のフレーム上の約2mの区間に巻き付けられており、掘削孔の孔壁とはセメントで固着させる。そのため、センシングファイバーは鉛直方向に中心軸を持つらせん形状に敷設される。この光ファイバー歪計は機械的な駆動部がないため、長期的な運用に関して信頼性が高いことが期待される。さらに、センサーがらせん形状であるため、直線状の同様の歪計と比較して様々な方向の歪みを計測することができる期待される。一方、従来の地震・地殻変動計測機器とは特性が異なるため、観測される物理量を理解する必要がある。

特性を把握するため、岐阜県の神岡鉱山にあるテストサイトで、長期孔内観測システムで利用する測器と同等の模擬観測システムを用いた試験観測を行っている。模擬観測システムは、2023年3月9日にテストサイト内の深さ約20mの掘削孔内に設置された。テストサイトでは、広帯域地震計(CMG3TC, 固有周期360s)や、南北方向に直線状に展張された光ファイバー歪計も同時に観測している。

試験観測では、模擬観測システムによって脈動や遠地地震、近地地震を観測し、広帯域地震計や直線状の歪計による観測と比較することができた。ノイズのパワースペクトルを計算したところ、脈動のピークが確認でき、その周波数帯域は、直線状の光ファイバー歪計と一致していた。一方、振幅は直線状の光ファイバー歪計より大きかった。これは、直線状の歪計が展張方向の歪成分を計測するのに対し、模擬観測システムのらせん状の光ファイバー歪計は様々な方位の歪が合成されたものを計測しているためと考えられる。遠地地震について、観測期間内に起きた最大の地震(2023年5月19日にLoyalty Islandsの南東で発生した地震, $M_w=7.7$)の直達S波を、200秒から100秒の長周期に注目し、波形を比較した。その結果、模擬観測システムの歪波形の振幅は直線状の光ファイバー歪計の歪波形の振幅より約1.2倍大きく、その形状は広帯域地震計の東西・南北成分の速度波形の特徴が混ざって見られた。近地地震について、2023年3月12日から2023年6月23日までの期間について、気象庁の日々の震源リストから、テストサイト周辺100km四方に震源を持つ地震の震源時刻を取得し、観測波形でP波の立ち上がりを読み取ることができるか調べた。その結果、実証試験装置は333個、広帯域地震計は303個の地震についてP波初動を読み取ることができ、広帯域地震計では確認できない微小な地動もとらえることができることが分かった。一方、広帯域地震計では読み取れたが模擬観測システムでは読み取ることができなかった地震も存在していた。

今後はこれらの観測記録をより定量的に比較し、模擬観測システムのらせん形状の光ファイバーの観測する物理量の推定を試みる予定である。

Analysis of long-term pore pressure data acquired at a 20 m borehole in the Kamioka Mine

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Yuya Machida¹, Shuhei Tsuji¹, Takashi Yokobiki¹, Keisuke Ariyoshi¹, Eiichiro Araki¹

1. JAMSTEC

2023年秋に地球深部探査船「ちきゅう」により南海トラフに設置が計画されている長期孔内観測システムは、光ファイバひずみ計と間隙水圧計などの観測機器から構成される。「ちきゅう」で設置する観測機器の性能検証のために、実証試験装置（プロトタイプ）を神岡鉱山の20 mボアホール内に設置して連続観測を行っている。神岡鉱山の位置は図1に示す。2023年3月に20 mボアホールの下部に光ファイバひずみ計を設置し、2023年4月にボアホール底部からの間隙水圧計測用の圧力ポートに圧力計（Paroscientific, Inc., 8B7000-I-005）を接続して連続観測を開始した。長期孔内観測システムの光ファイバひずみ計はゆっくり地震や低周波微動などの広帯域の地動検出を目指しており、並行観測する間隙水圧計との比較は重要である。そこで、本研究では神岡鉱山の20 mボアホール内の間隙水圧計のデータを解析し、地震時の光ファイバひずみ計の観測と比較して両者の関係を考察した。

20 mボアホールの間隙水圧の計測は、ボアホール底部に存在する貯水セクションに圧力配管の片端を差し込んでもう一方の片端に圧力計を接続して、ボアホール底部から圧力計までの閉そく系内の圧力変化を計測する。観測開始から8月中旬までの間隙水圧計の観測データを図2に示す。約4ヶ月の連続観測データから、間隙水圧は概ね1ヶ月周期で変動していることが判明した。7月上旬から観測された圧力変動が最大で150 hPaあった。間隙水圧の観測と神岡鉱山で計測している湧水側溝水量の水位のデータを重ねてプロットした（図2）。両観測は1週間程度の位相差はあるがよく相関していることから、間隙水圧のバックグラウンド（静水圧成分）の主要な変動は20 mボアホール付近の地下水位の変化に起因すると推察される。

次に、間隙水圧計と光ファイバひずみ計で遠地地震と近地地震の発生時に観測されたデータを解析する。観測期間中に発生した遠地地震のうち最大規模のものは2023年5月19日02時57分（UTC、以下も同様）にRoyalty諸島で発生したM7.7の地震であった（図1(a)）。20 mボアホール内の光ファイバひずみ計と間隙水圧計で観測された1時間分の波形を図3に示す。間隙水圧計では、両振幅で1.5 hPaの圧力変動を観測した。観測波形には、P波、S波、Rayleigh波の各フェーズの到達がそれぞれ03時08分、03時16分、03時28分に明瞭に観測されている。光ファイバの位相とひずみの関係式から、図3のひずみが大きくなることは光ファイバが縮むことを意味する。間隙水圧が上昇すると光ファイバが縮むことになるので、光ファイバひずみ計は適切に間隙水圧を観測していることがわかった。

近地で発生した地震のうち、2023年5月5日05時42分に能登半島沖で発生したM6.5の地震が最大であった。地震時の20分間の観測波形を図4に示す。地震時に間隙水圧計で25 hPaの短周期の圧力変動を観測している。地震時に光ファイバひずみ計は、光ファイバが伸びる方向に約30 nanoひずみに相当するオフセットを観測した。一方、間隙水圧計のデータは間隙水圧が上昇する方向に約2 hPaオフセットしている。光ファイバひずみ計は、地震発生1時間前にセメント固結に関連するステップ状のオフセットを観測しており、地震時のオフセットの解釈にはさらに考察が必要である。

両地震で観測されたデータのパワースペクトル密度を比較したものを図5に示す。卓越エネルギーの分布は、間隙水圧計と光ファイバひずみ計とで広帯域で調和的である。岩盤が非排水条件で均質等方弾性体と仮定すると、間隙水圧変化と体積ひずみ変化は比例する（加納ほか、2014）。地震時の光ファイバひずみ計と間隙水圧計の観測データから比例係数（伝達関数）を求めると、単位ひずみあたり5 GPa程度となる。既往の研究（竹本ほか、2003）から求まる神岡鉱山の岩盤の体積弾性係数は51.4 GPaなので、光ファイバひずみ計による計測は体積ひずみ変化に対して10倍程度の相違があることを示唆する。

謝辞：神岡鉱山の水位データは、神岡鉱業（株）に提供していただいた。

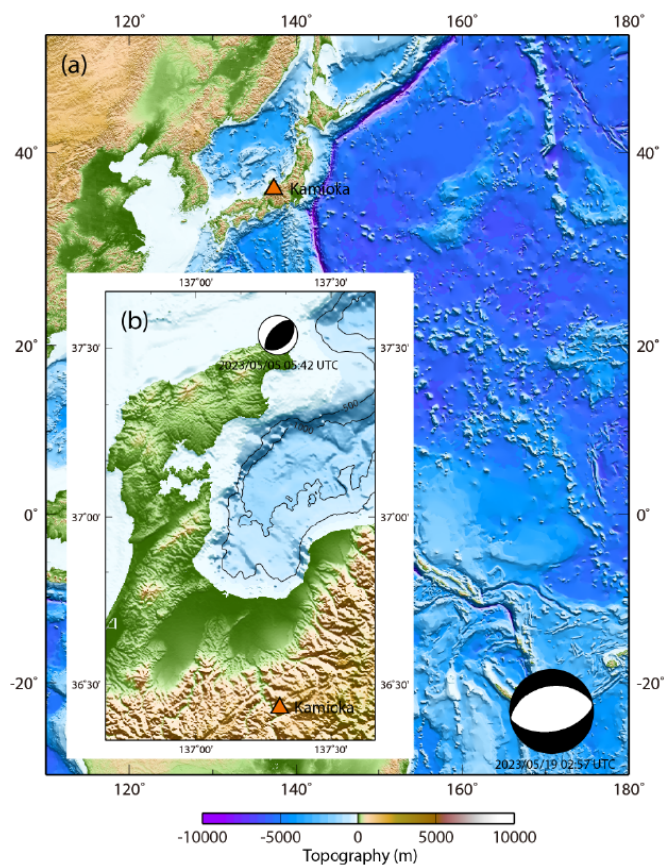


図 1：神岡鉱山と本研究の対象地震の位置。(a) Royalty Islands 地震 (M7.7)、(b) 能登半島沖地震 (M6.5)

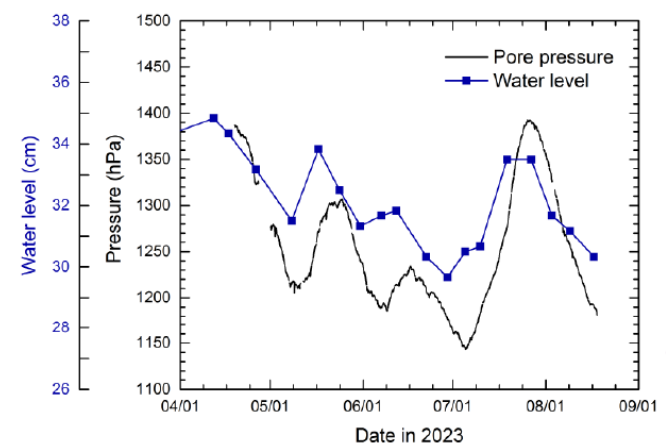


図 2：20 m ボアホールの間隙水圧観測と神岡鉱山での計測水位

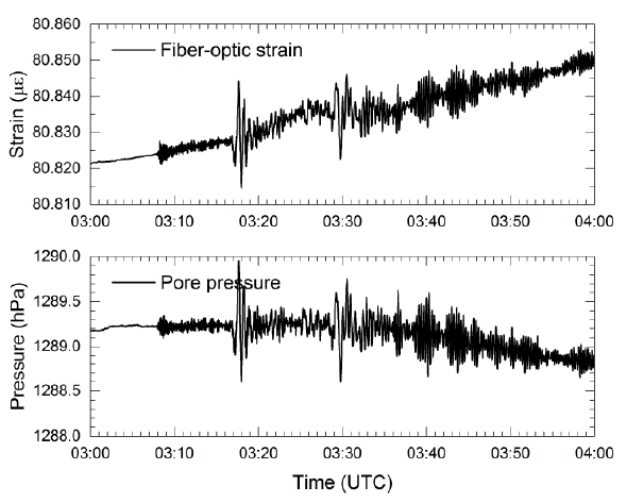


図 3：Royalty Islands 地震のときの光ファイバひずみ計と間隙水圧計の波形

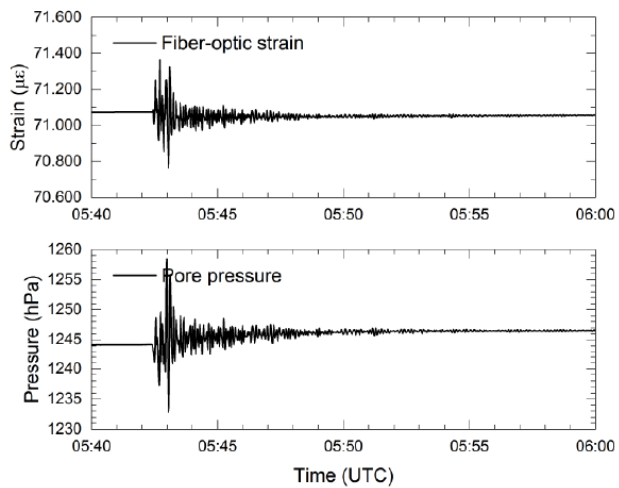


図 4：能登半島沖地震のときの光ファイバひずみ計と間隙水圧計の波形

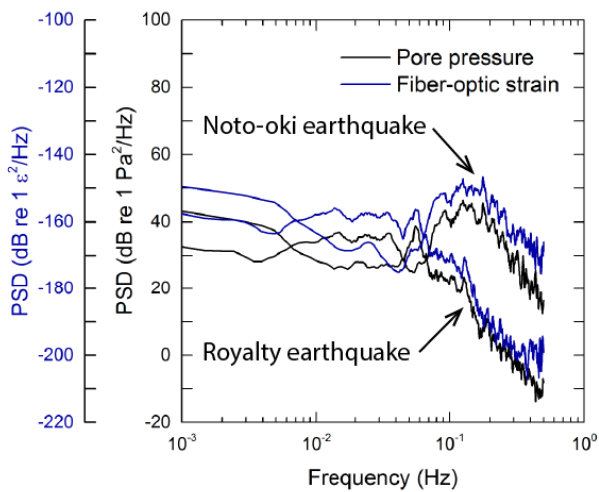


図 5：パワースペクトル密度の比較

Room B | Regular session : S14. Earthquake prediction and forecast

📅 Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 4:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 Room B F201
[S14] PM-2

chairperson: Masajiro Imoto (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] Comments on the Brownian Passage Time distribution model for recurrent paleoearthquakes

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

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

[S14-02] Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the southwest Japan

*Taro Hara¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S14-03] Application of an Earthquake Early Warning with the PLUM Method to the 2023 Türkiye-Syria Earthquake

*Masaru Morinaga¹, Masumi Yamada² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S14-04] No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹ (1. Institute of Statistical Mathematics (ISM))

Comments on the Brownian Passage Time distribution model for recurrent paleoearthquakes

*Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

発生年が不確定となる古地震の時系列は認識論的不確定なデータと捉えることができる。このようなデータに基づく地震発生確率の算出方法はまだ確立されていない。我が国における先行研究のいくつかは、地震間隔の不規則性を過小評価している。認識論的不確定な時系列を更新過程の解析に用いる手法として、不確定な時系列から想定される地震間隔を全て用いたモデルパラメータの推定（尤度幾何平均推定値）を我々は提案している。関東M8クラス地震や太平洋沖型地震の解析において、この推定値に基づく地震発生確率（条件付き30年確率）の推移は、各地震発生期間から無作為抽出された多数の時系列による発生確率の平均値・中央値の推移とよく一致する。ここでは、この一致の根拠について考える。

地震間隔累積分布関数

無作為抽出時系列 k ($k=1,2,\dots,n$) の地震間隔に階段関数の累積分布関数 $S_k(t)$ をあてはめる。同様に、全地震間隔に関する累積分布関数を階段関数 $S_G(t)$ とする。両者には式(1) (表1) の関係がある。これらの累積分布関数に対する相補累積分布関数（信頼度関数）を $R_G(t)$, $R_k(t)$ で表すと、式(2)となる。経過期間 t まで地震が発生していないという条件の下で、 t 以後の期間 dt 以内に地震が発生する確率（条件付き確率） $P_G(t,dt)$ は、信頼度関数 $R_G(t)$ を用いて式(3)で表される。無作為抽出時系列の確率 $P_k(t,dt)$ も同様に表される。式(3)は $P_k(t,dt)$ を用いて式(4)となる。式(4)は信頼度関数を重みとした $P_k(t,dt)$ の加重平均となっている。実際の解析では、Brownian Passage Time分布を適合させているので式(4)は厳密には成立しないが、近似的に成立することが考えられる。また、式(4)の重みがほぼ同じと見なせる場合、式(4)から近似式(5)が得られ、上に述べた一致の根拠を得る。

実例

実例として、有馬高槻断層帯と関谷断層について、式(2)の成立と式(5)の関係をみる。図1において、条件付き確率の推移と地震間隔累積分布関数を比較する。図1aは有馬高槻断層帯について、累積分布関数、式(1)左辺の尤度幾何平均推定値（赤線）と右辺の無作為抽出時系列平均（青線）を比較している（下図）。ここで $n=10000$ である。2つの分布には大きな乖離はない。上図では、条件付き確率の推移（期間120年確率）、式(5)左辺の尤度幾何平均に基づく確率（赤線）と右辺の無作為抽出時系列平均確率（青線）を比較している。さらに、不規則性を表すパラメータ（ばらつき）に拠って無作為抽出時系列を1000個毎の10組に分け、各組の平均確率の推移を黒線で表す。経過年数2000~4000年で2~3%の乖離が認められるが、黒線の広がりには比べると小さい。

図1bに関谷断層の結果を示す。累積分布関数の比較（下図）では、尤度幾何平均推定値と無作為抽出時系列の平均で明確な違いが認められる。条件付き確率の推移比較（上図）では、両者の差は顕著である。10組に分けた各組の平均確率の推移は、経過年数4000年付近で15~90%に渡る。確率の平均値計算では信頼度関数値が 10^{-4} 以下の時系列を除外しているため、平均確率の推移（黒線）が途中で消える場合が生じている。

尤度幾何平均推定値に基づく確率の推移は、原理的には無作為抽出時系列による確率の平均値の近似といえるが、事例によって誤差の程度は異なっている。

(1)	$S_G(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_k(t)$
(2)	$R_G(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_k(t)$
(3)	$P_G(t, dt) = \frac{R_G(t) - R_G(t + dt)}{R_G(t)}$
(4)	$P_G(t, dt) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k(t, dt) R_k(t)}{\sum_{k=1}^n R_k(t)}$
(5)	$P_G(t, dt) \approx \frac{\sum_{k=1}^n P_k(t, dt)}{n}, \text{ for } R_k(t) \approx R_1(t) (k = 2, 3, \dots, n)$

表 1 数式一覧

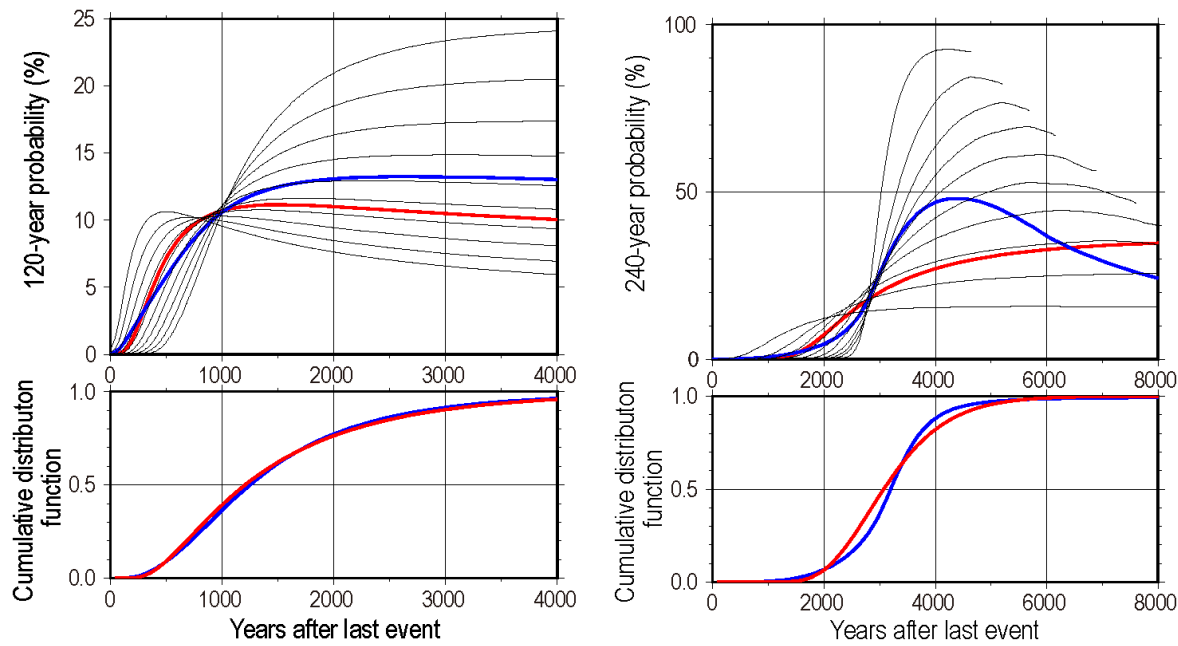


図 1 条件付き確率推移(上図)と地震間隔累積分布関数(下図).
上図: 尤度幾何平均推定値による確率の推移 (赤) と 無作為抽出時系列 (10000 個) による平均確率推移 (青). 無作為抽出時系列 (1000 個) 10 組の平均確率推移 (黒).
下図: 尤度幾何平均推定値による地震間隔累積分布関数 (赤). 無作為抽出時系列 (10000 個) の累積分布平均 (青).
図 1a 有馬高槻断層帯における 120 年条件付き確率.
図 1b 関谷断層における 240 年条件付き確率.

Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the southwest Japan

*Taro Hara¹, Hiroaki Takahashi²

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

はじめに

内陸地震発生の長期的な評価として、主要活断層の確率予測や活断層の地域評価が地震本部によって行われている。これらの長期評価では、地質学的手法による活断層調査に基づくデータが主に用いられていて、地震活動データは参考として示されているが、測地データは用いられていない。地域評価では、地表の長さが短い活断層も評価対象となっているが、伏在活断層や、そもそも活断層が存在しない地域での評価が課題となっている。Nishimura (2021)では、GNSS速度データから得られるひずみ速度の空間分布を用いて西南日本の内陸地震の発生確率の推定が行われているが、南海トラフのプレート間固着の影響をモデルに基づき除去したデータを用いている。日本列島の地殻変動場には、海溝でのプレート間固着や地震時・地震後の余効変動の影響が時間的に複雑に内包されており、定量的な評価が課題である。一方、地震活動度を用いた評価も試みられており (Ogata, 2022)、歴史地震を含む地震活動カタログの利用や、余震の減衰時間と応力速度や地震の繰り返し間隔との関係も検討されている (Toda and Stein, 2018)。本研究では内陸地震発生確率評価に向けて、GNSS速度データから求められるひずみ速度の空間分布と、応力速度との関係が指摘されている余震継続時間の特性の検討を行う。

地殻変動データによるひずみ速度の空間分布の推定と短い空間波長成分の抽出

国土地理院F5座標データから、東北地方太平洋沖地震が発生する直前の2011年3月10日までの西南日本のGNSS観測点の水平成分速度を推定した。南北・東西変位速度ごとに、10kmごとのグリッドでクリギング法を用いて空間補間を行い、ひずみ速度に変換した。クリギング法では、既知のデータから求められた空間相関性をバリオグラムとしてモデル化し、任意の地点での最良線形不偏推定量を求める。今回は通常クリギング法を用いた。小林(2009)によると、クリギング法は長・短波の変動が混在する地殻変動場の空間特性を保ったまま補間することが可能である。一方、GNSSから得られるひずみ速度を直接的に地震発生確率評価に用いるためには、その場所の永年の応力蓄積に寄与しない成分の客観的な評価が必要である。内陸で起こる地震の規模は最大でもM8で一般的には活断層のサイズで規定され、活断層がない場所では最大でもM7程度と考えられる。推定されたひずみ速度分布に移動平均法の適用を行い、短波長成分の抽出を行った。様々な距離で移動平均法を適用し、地震活動の空間分布との比較を行った。

地震カタログによる余震継続時間と定常的な地震活動

Toda and Stein (2018) やStein and Liu (2009)では、余震継続時間と応力速度や活断層での繰り返し間隔の関係が示されている。気象庁地震カタログを用いて過去30年以内に発生したM6.0以上の全国の主要な内陸地震の余震継続時間を、大森公式を利用して推定を行った。余震継続時間は、38年～9300年と地震によって大きく異なる値を示した。

結果と今後の展望

クリギング補間された中国・四国・九州地方のひずみ速度分布は、Okazaki et al.(2020)による結果と同様の空間特性を示し、地震活動が活発な山陰～山口県や徳島県で相対的に大きな地域が見られる。また、大分県～鹿児島県付近にも比較的大きな地域が見られる。移動平均法を適用し短波長成分のみを抽出すると、山口県付近や山陰地方、鹿児島県で局所的にひずみ速度が大きな地域が確認された。2005年福岡県西方沖地震や1997年山口県北部地震の震源付近では余効変動による大きなひずみ速度がみられた。2016年熊本地震や2016年鳥取県中部地震の震源付近では大きなひずみ速度の値は見られなかった。余震の減衰においては、活断層付近で発

生した地震の余震継続時間のほうが、活断層が見つかっていない場所での地震よりも短い傾向を示し、活断層付近で大きな応力速度が示唆される。今後は移動平均法で抽出した短波長成分をNishimura (2021)の手法を適用し、内陸地震の発生確率の推定につなげていきたいと考えている。その際、地震履歴や定常地震活動度、活断層の密度と長さ等の先駆的情報を、当該地域の先天的な地震発生能力を示す指標として、中規模地震の余震減衰時間を応力速度の指標として評価することで、地震発生確率評価手法に組み込むことを検討している。また、地震発生能力を示す指標として、Sharma et al. (2020)のように蓄積されたひずみ速度と大地震によって解放された地震モーメントとの間のモーメント欠損の値についても組み込むことも検討している。

Application of an Earthquake Early Warning with the PLUM Method to the 2023 Türkiye-Syria Earthquake

*Masaru Morinaga¹, Masumi Yamada²

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

PLUM法 (Propagation of Local Undamped Motion method) は、日本の早期地震警報システムにおいて用いられている手法の一つである。この手法は、震源や地震規模の推定を行わずに、周辺の震度観測を参照して震度予測を行うものである。それゆえ、特に、震源域の広い地震が起きた際に役に立っている、しかし、現行のスキームでは、対象地点から30km圏内の観測点を利用するので、少なくとも30km間隔よりも高密度の観測網が必要となる。しかしながら、日本以外の国では、このように高密度な観測網が整備されていない国も多い。そのため、疎な観測網にも適用可能なPLUM法のスキームの設計が、当座の課題となっている。

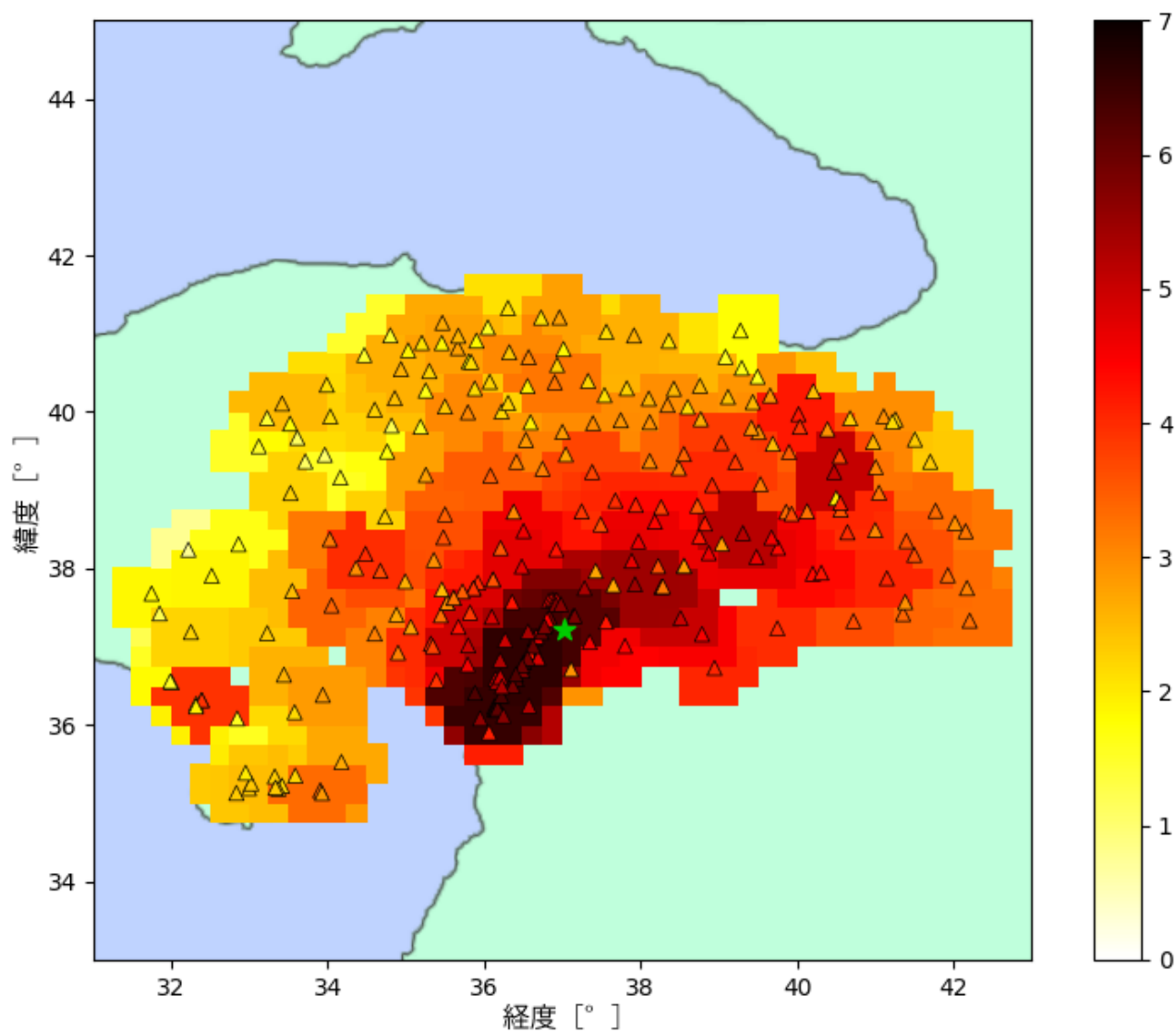
そこで、現在まだPLUM法が運用されていないトルコで起きた地震 (the 2023 Türkiye-Syria Earthquake, Mw 7.8) に対して、試験的にPLUM法を適用した。この地震は2023年2月6日 01:17:34 (UTC)に発生し、震央は37.226°N 37.014°E、震源の深さは10.0 kmであった。用いた地震計のデータの期間は01:17:07 から01:26:19まで、有効な観測点の数は275個であった。

現行のPLUM法のスキームでは、対象地点を囲む半径 $R = 30$ km の円内の観測点の震度と、その地域の地盤特性を用い、各観測点から対象地点に伝播する地震動の震度をそれぞれ計算して、その中の最大値を対象地点の予測震度としている。

しかしながら今回のデータでは、30km圏内に他の観測点が一つもない観測点が74点 (27%)、一つしかない観測点が87点 (32%) あり、カバレッジは十分とは言えない。そこで今回は、従来手法に加えて、予測に使う観測点の距離を 30km 以内から 50 km 以内に広げてシミュレーションを行った。また、当該地域の地盤特性は解明されていないので、地盤増幅を無視して計算を行った。さらに、震度については、日本の気象庁で用いられているリアルタイム震度と同じ手法を、今回のデータにも適用した。

その結果、予測に使う観測点の距離を長く取ると、カバレッジが改善される一方で、各点の最大観測震度と最大予測震度のRMSE (Root-Mean-Square Error) が大きくなることが確認できた。今後はこのような、観測点が疎な地域で活用できる、新たなPLUM法のスキームを模索していきたいと考えている。

〈50km 圏内の観測点を用いた PLUM 法の、最大予測震度と最大観測震度の比較〉



色が表しているのはリアルタイム震度の値で、そのスケールは JMA 震度階級と共通。四角形のグリッドが予測値、三角形のプロットが観測値、緑色の星型が震央。

No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹

1. Institute of Statistical Mathematics (ISM)

The question of whether earthquakes can be predicted is a complex one, and the answer is likely to depend on a variety of factors. One important factor is the presence of correlations between seismic magnitudes. Some researchers have reported evidence of such correlations, while others have argued that they are caused by incomplete data. We study the magnitude correlations for a synthetic seismic catalogue produced with a 2-layer OFC model, which is able to produce a realistic earthquake statistics. We also propose a direct correlation analysis of a machine learning high-resolution catalogue for the Amatrice-Norcia (2016) sequence in Italy. By using stochastic declustering technique, we are able to calculate correlations weighting the results based on the probability of the two events being correlated. After establishing the completeness magnitude of the catalog and performing statistical analysis on correlated pairs, we can check whether the magnitude correlation hypothesis can be rejected with an high level of confidence.

Our results suggest that there is no evidence of magnitude correlation in either the synthetic or real catalogs. This is in contrast to some previous studies, which have reported evidence of such correlations, but they are consistent with the results of other studies that have found no evidence of magnitude correlation.

This study has important implications for the development of seismic forecasting models. If there is no evidence of magnitude correlation, then traditional ETAS models, which do not account for such correlations, may be sufficient for seismic forecasting. However, further research is needed to confirm our results and to understand the reasons for the apparent discrepancy between our results and those of previous studies.

