

Wed. Nov 1, 2023

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room D F204

[S15] AM-1

chairperson: Keishi NOGUCHI, Masumi Yamada

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

[S15-01] Integration of multiple hypocenter determination methods for Earthquake Early Warning into the IPF method*Keishi NOGUCHI¹, Koji TAMARIBUCHI², Naoki HAYASHIMOTO¹, Yuki KODERA² (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S15-02] Real Time Forecast of Long Period Ground Motions Using Strong Motion Records: A Numerical Experiment*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S15-03] Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan*Hong Peng¹, Stephen Wu^{1,2}, Masumi Yamada^{3,4} (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. The Graduate University for Advanced Studies, 3. Kyoto University, 4. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S15-04] To what extent are multiple earthquakes separable?*Masumi YAMADA¹ (1. DPRI Kyoto University)

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

[S15-05] Effect of station density on the maximum observed seismic motion*Shin AOI¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Hiroyuki Fujiwara¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room D F204

[S15] AM-2

chairperson: Susumu Kurahashi (Aichi Institute of Technology), Hiroyuki Goto

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

[S15-06] Estimation of the EGTD for prediction

*Masanori HORIKE¹ (1. Hanshin consultants co., LTD.)

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

[S15-07] Scaling of Fault Rupture Process Simulated from Hierarchy Patch Source Model

*Hiroyuki GOTO¹ (1. Kyoto University)

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

[S15-08] Comparative study of temporal variation of coseismic velocity in Korea and Japan

*Tae Woong Chung¹, Faisal Umer¹, Kazuo Yoshimoto² (1. Sejong University, 2. Yokohama City University)

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

[S15-09] Relationship between strong ground motion and dynamic parameters inferred from dynamic source inversion of the 2016 Kumamoto earthquake

*Takeshi MIYAMOTO¹, Kimiyuki ASANO², Tomotaka IWATA² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University)

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

[S15-10] Extraction of effective source areas based on comparison between calculated waveforms before and after trimming of slip distribution

*Susumu KURAHASHI¹, Ken Miyakoshi¹ (1. Aichi Institute of Technology)

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

1:30 PM - 3:00 PM JST | 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room D F204

[S15] PM-1

chairperson:Atsuko OANA, Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute)

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

[S15-11] Strong motion characteristics of the 2023 southeastern Turkey earthquakes with surface faults*Takao KAGAWA¹ (1. Tottori University, Faculty of Engineering)

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

[S15-12] Source process characteristics of the 2023 Turkey earthquake (M_w 7.7) inferred from pulse-like near-fault ground motions*Yosuke NAGASAKA¹, Atsushi Nozu¹ (1. Port and Airport Research Institute)

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

[S15-13] SIMULATION OF THE NEAR-FAULT RECORDS OF THE 2023 KAHRAMANMARAS, TURKEY EARTHQUAKE (M_w 7.7) BASED ON A CHARACTERIZED FAULT MODEL*Toshimichi Kidoh¹, Masayuki Nagano², Ken Miyakoshi¹, Kensuke Arai¹, Toshiaki Satoh¹ (1. Ohsaki Research Institute, 2. Tokyo Univ. of Science)

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

[S15-14] Strong Motion Simulation Focused on Rupture Velocity of the 2023 Turkey Subsequent Earthquake (M_w 7.6) Based on Characterized Fault Model*Sei Kanayama¹, Toshimichi kido², Hong Liu¹, Masayuki Nagano¹ (1. Tokyo University of Science, 2. OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC.)

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

[S15-15] Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Using the Empirical Green's Function Method.*Hidetoshi Kasugai¹, Yoshiaki Hisada¹, Shinya Tanaka² (1. Kogakuin University, 2. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S15-16] Study on the Shallow Fault Slip of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake (M_w 6.9) Based on Characterized Fault Models*Atsuko OANA¹, Ken Miyakoshi², Shohei Yoshida², Toshiaki Sato² (1. Shimizu Corporation, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

3:15 PM - 4:00 PM JST | 6:15 AM - 7:00 AM UTC | Room D F204

[S15] PM-2

chairperson:Takashi Hirai(University of Hyogo)

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

[S15-17] A Study on Behavior of Japanese Swords on Display during Earthquake Based on Vibration Experiment*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO³, Jun TOBITA³ (1. University of Hyogo, 2. Token Corporation, 3. Nagoya University)

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

[S15-18] Improvement of ground motion prediction equation by non-ergodic approach considering regional characteristics*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-19] Differences in site amplification for each plain based on the ground motion prediction equation*Hiroto Tanaka¹, Ritsuko S. Matsu'ura², Mitsuko Furumura², Tsutomu Takahama¹ (1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction)

Room D | Regular session : S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

4:00 PM - 4:45 PM JST | 7:00 AM - 7:45 AM UTC | Room D F204

[S16] PM-2

chairperson: Ikuo Cho (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S16-01] Peak-frequency map of horizontal-to-vertical spectral ratios in the Kanto region: Addition of content to the Urban Geological Map

*Ikuo CHO¹, Shigeki Senna², Susumu Nonogaki¹, Tsutomu Nakazawa¹, Junko Komatsubara¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S16-02] Estimation of Shallow Structure Along the Hinagu Fault Using Seismic Wave Interferometry in DAS Observations of National Route 3

*Satoru Hamanaka¹, Kentaro Emoto² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Faculty of Science, Kyushu University)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S16-03] Comparative Analysis of Ground Motion Monitoring Performance through DAS Test Observations Using Multiple Instruments

*Hiroyuki FUJIWARA¹, Hiromitsu Nakamura¹, Takashi Kunugi¹, Shohei Naito¹, Shigeki Senna¹, Masato Sato¹, Ken Sakurai², Chisato Konishi², Haruhiko Suzuki², Masaki Takebe³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corporation, 3. Mitsubishi Electric Software Corporation)

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

📅 Wed. Nov 1, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Nov 1, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 Room D F204

[S15] AM-1

chairperson: Keishi NOGUCHI, Masumi Yamada

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

[S15-01] Integration of multiple hypocenter determination methods for Earthquake Early Warning into the IPF method

*Keishi NOGUCHI¹, Koji TAMARIBUCHI², Naoki HAYASHIMOTO¹, Yuki KODERA² (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S15-02] Real Time Forecast of Long Period Ground Motions Using Strong Motion Records: A Numerical Experiment

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S15-03] Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan

*Hong Peng¹, Stephen Wu^{1,2}, Masumi Yamada^{3,4} (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. The Graduate University for Advanced Studies, 3. Kyoto University, 4. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S15-04] To what extent are multiple earthquakes separable?

*Masumi YAMADA¹ (1. DPRI Kyoto University)

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

[S15-05] Effect of station density on the maximum observed seismic motion

*Shin AOI¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Hiroyuki Fujiwara¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Integration of multiple hypocenter determination methods for Earthquake Early Warning into the IPF method

*Keishi NOGUCHI¹, Koji TAMARIBUCHI², Naoki HAYASHIMOTO¹, Yuki KODERA²

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute

1. はじめに

緊急地震速報の震源推定では観測網に応じた複数の震源推定手法を併用しており、最初に精度良く推定できた震源を使って第1報を発表し、より精度の良い震源が推定できた場合には震源を更新して続報を発表するという方法を用いてきた。そのため、複数の手法が推定した震源について、緊急地震速報として発表する際にそれらが同じ地震かどうかを判定する必要があった（同一地震判定）。しかし、この同一地震判定の際に、同時多発地震やノイズを誤って1つの地震と判定した結果、過大な警報を発表する事例があった。この問題を解決するため、震源推定手法の1つであるIPF法[溜淵・他(2014)]に、複数の観測網を統合して解析できるように改良を加えた上で、緊急地震速報の震源推定手法のIPF法への一本化を行った。本発表では、その改良内容と検証結果について紹介する。

2. IPF法の改良

IPF法への一本化を行う前の緊急地震速報では、それぞれ異なる入力データを用いた複数の震源推定手法を併用していた（左図）。震源推定手法をIPF法へ一本化するためには、すべての入力データをIPF法で処理する必要があり（右図）、Hi-netの高感度速度波形を加速度波形へ変換すること、処理観測点数の増加に対応するため観測点選別による負荷軽減を行うこと、及び同一判定ロジックの見直しなどを検討してきた[野口・他(2020)]。一方で、すべてのデータをIPF法に入力しただけでは、過去に発表した緊急地震速報と比較して深発地震など一部の地震で震源推定精度が悪くなることがあり、これに対応するためIPF法の尤度関数の改良を行った。

IPF法は以下の4つの残差について、残差が0のとき最大となるような尤度関数を設定している。

- ・主成分分析[横田(1985)]と震央方位の残差（以下、震央方位残差）
- ・B-Δ法[Odaka et al.(2003)、東田・他(2004)]と震央距離の残差（以下、震央距離残差）
- ・振幅から計算したMと震源Mの残差（以下、M残差）
- ・検出時刻とP波理論走時の残差（以下、走時残差）

これらそれぞれの残差について、実データを用いてその傾向を分析したところ以下の特徴が得られた。

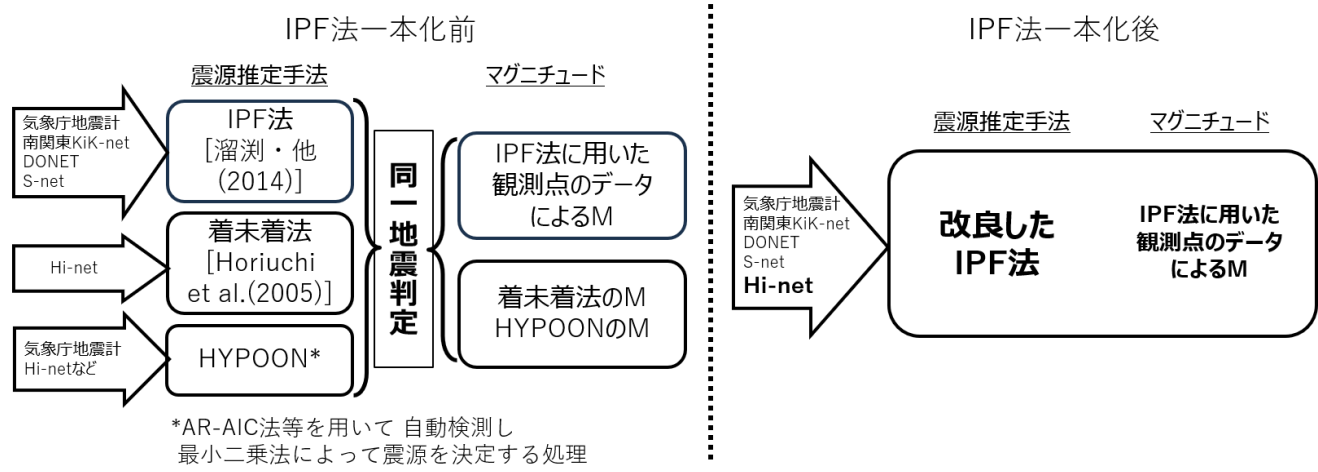
- ・震央距離残差は対数正規分布でバイアスがある
- ・震央方位残差、震央距離残差、及びM残差の標準偏差は震源距離によらずほぼ一定
- ・走時残差の標準偏差は震源距離依存がある

これらの特徴をもとに尤度関数の再設計を行った。

3. 検証結果

2011年3月11日から4月30日、および2016年1月1日から2022年12月31日における、観測震度3以上の地震または当時緊急地震速報を発表した事例について検証を行った。その結果、改良したIPF法は、当時の緊急地震速報が誤った同一地震判定により過大な警報を発表した事例に対して、同時多発地震やノイズを適切に分離し正しく処理できることを確認した。また、当時の緊急地震速報と比較して同等以上の震源推定精度と迅速性を担保できることを確認した。課題となっていた深発地震の震源推定精度についても、走時残差の尤度関数に震源距離による観測点の重みを導入したことにより改善することを確認した。

〔謝辞〕 本発表では気象庁観測点のデータのほかに、MOWLAS（Hi-net、S-net、DONET、KiK-net）のデータを利用しました。記して感謝いたします。



Real Time Forecast of Long Period Ground Motions Using Strong Motion Records: A Numerical Experiment

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1. はじめに

大地震において遠地の平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けて、震源域近傍一予測地点間の伝達関数に基づく予測の可能性を数値実験により検討した。本研究ではこれまで、微動の連続観測データを用いた地震波干渉法により伝達関数を求めたが、今回の発表では、自然地震から得られる伝達関数の活用を検討した。

これまでHoshiba (2013) や倉橋ほか (2013) は、伝達関数を用いて計算した観測点一評価地点の地震動を、Kirchhoff-Fresnel (以下K-F) 積分により多数の観測点分を足し合わせることで予測が可能であることを説明している。しかし、これらの研究の事例では地震波の平面波近似による1観測点での入力波形からの予測結果が示され、実際にK-F積分は用いられていない。本研究では、平面波近似を用いずに、震源から予測地点に至る様々な波線経路のうち第1 Fresnel Zone内に位置する多観測点の波形データをK-F積分した長周期地震動予測の効果を検証した。

2. データと手法

本研究では、東北地方の浅い大地震により発生する関東平野の長周期地震動（周期4～10秒）を予測の対象とした。まず、実データに適用する前に、3次元地下構造モデル (JIVSM ; Koketsu et al., 2012) と3次元差分法 (OpenSWPC ; Maeda et al., 2017) を用いた数値シミュレーション波形を用いて予測手法の妥当性を検討した。神奈川県横浜市のHi-net YFTH観測点を予測地点とし、そこから150 km程度離れた茨城県・栃木県に位置する5つのHi-net観測点を地震動の入力地点とした (Figure 1)。

5つの入力地点と予測地点のペアについて、2点を結ぶ直線の延長上で発生した中規模地震 (M5-6程度) の地震波形を用いて2点間の地震波伝播の伝達関数を算出した。伝達関数は、それぞれの波形から表面波の部分を200秒間抜き出し、予測地点の波形から入力地点の波形をデコンボリューションして求めた。

次に、得られた伝達関数に大地震における入力地点の波形をコンボリューションし、これをK-F積分により足し合せて予測地点の地震波形を求めた。ここでK-F積分による予測は、予測地点を取り囲む閉曲面上の入力地点に到達した波に、入力地点から予測地点の伝達関数をコンボリューションし、閉曲面に対する入射角・出射角に応じて重み付けしながら表面積分することで行われる。長周期地震動を生成する表面波は地表付近でエネルギーが大きいので、表面積分は地表に沿ってのみ (すなわち線積分により) 実施した。

3. 結果

数値シミュレーションから求めた2008年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) の地震波形データを用いて、伝達関数とK-F積分による長周期地震動の予測を行った。シミュレーションは、防災科学技術研究所F-netによる震源のメカニズム解とライズタイム4.0秒のTriangle型の震源時間関数を用いて行った。

Figure 2に、遠地 (YFTH観測点) での長周期地震動の予測結果 (黒実線) と、期待される波形 (赤実線) を比較する。予測結果は、表面波の振幅において良い一致を示し、継続時間は若干短いものの、震動特性をよく説明することが確認できた。Figure 3には、擬似速度応答スペクトル (減衰定数5%) の比較を示す。予測結果のピークは3.5 - 4 s程度であり、期待されるスペクトルよりも短周期側に寄った結果となった。これは、シミュレーションで用いた中規模地震 (ライズタイム1 - 1.5 s) の地震波形から求めた伝達関数が長周期成分の卓越した大地震の伝達関数を適切に評価できていない可能性もあり、検討が必要である。

4. 今後の課題

これまで本研究で用いた微動の地震波干渉法による伝達関数の推定に対して、自然地震による伝達関数の推定には、連続記録ではなくイベントトリガー記録の強震波形を利用する必要がある。また、中小地震の強震観測記録の長周期側のS/N比が低い可能性があり、今後はこれらの課題と微動利用との長所・短所を比較した上で、二つを組み合わせた新たな手法の可能性を検討したい。また、数値シミュレーション実験で確認された事

項に基づいて、実際の観測波形を用いた長周期地震動予測に進む予定である。実際の即時予測では、震源の位置が未知である状態での入力観測点の選定やK-F積分の実施法などについての検討が課題として残される。

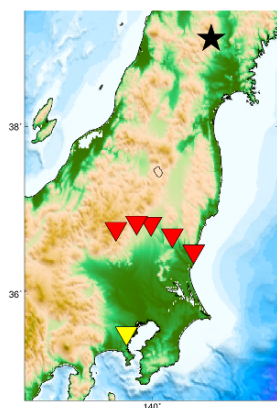


Figure 1. Locations of hypocenter of 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake(★), input stations (▼) and target station (▼).

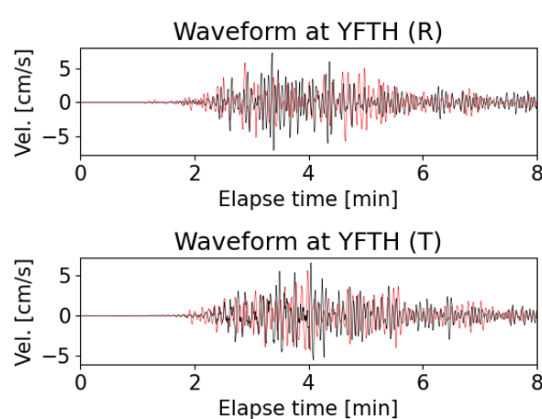


Figure 2. Velocity records of radial (R) and tangential (T) motions at the target station (YFTH; yellow triangle). Black traces are derived from Kirchhoff-Fresnel integration of waveforms at five input stations (red triangles), and red traces are expected waveforms.

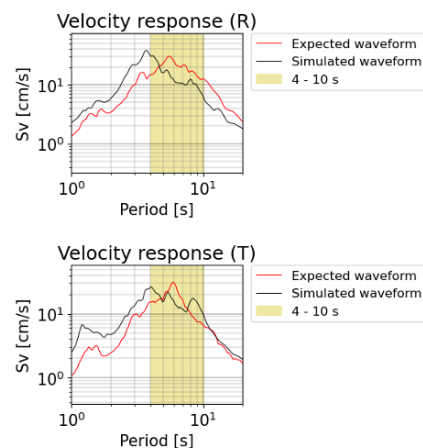


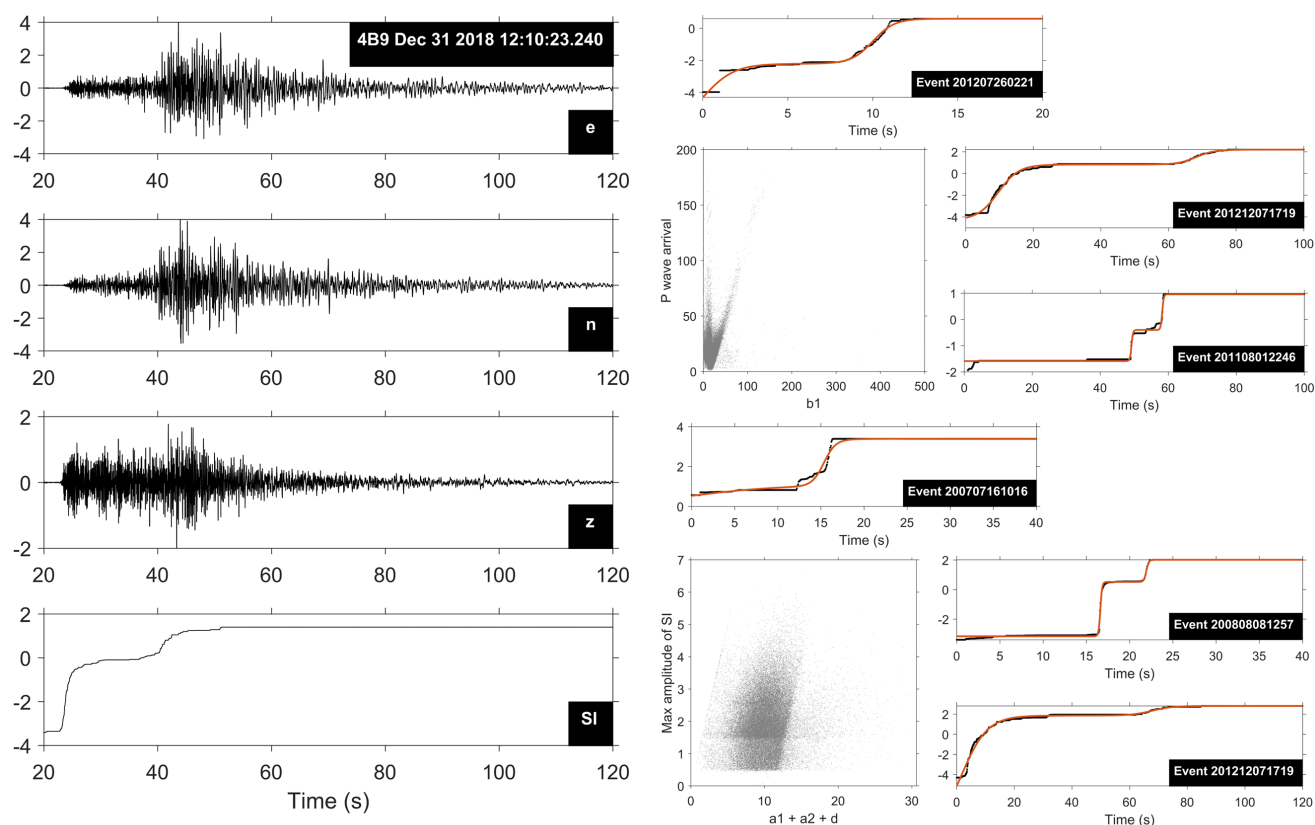
Figure 3. Velocity response spectra retrieved from each waveform in Fig 2.

Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan

*Hong Peng¹, Stephen Wu^{1,2}, Masumi Yamada^{3,4}

1. Institute of Statistical Mathematics, 2. The Graduate University for Advanced Studies, 3. Kyoto University, 4. Disaster Prevention Research Institute

In Japan, earthquake early warning (EEW) system analyzes the data from seismic networks and predicts the seismic intensity (SI) at locations where the strong ground motions are expected to arrive within seconds or minutes. Integrated particle filter (IPF) and propagation of local undamped motion (PLUM) are the two operating EEW systems providing public warnings. IPF predicts the SI through seismic source inversion, while PLUM directly predicts the SI using waveform propagation theory on real-time seismic waveform data. As a result, warnings from IPF are generally faster but less accurate than PLUM. Regarding the hazard assessment, Japan Meteorological Agency (JMA) select the largest SI among the two systems and broadcasts a single warning to the public. In this study, we aim at improving the selection of the final warning by evaluating the performance of the two systems in real-time based on a new empirical envelope function. We fit a double sigmoid function to SI curves extracted from seismic event data, which obtains about 500,000 waveform records from JMA, K-net and KiK-net in the past 20 years. Our preliminary results demonstrated high potential to use such a simple approach as a reliable performance metric for comparing different EEW systems in real-time.



To what extent are multiple earthquakes separable?

*Masumi YAMADA¹

1. DPRI Kyoto University

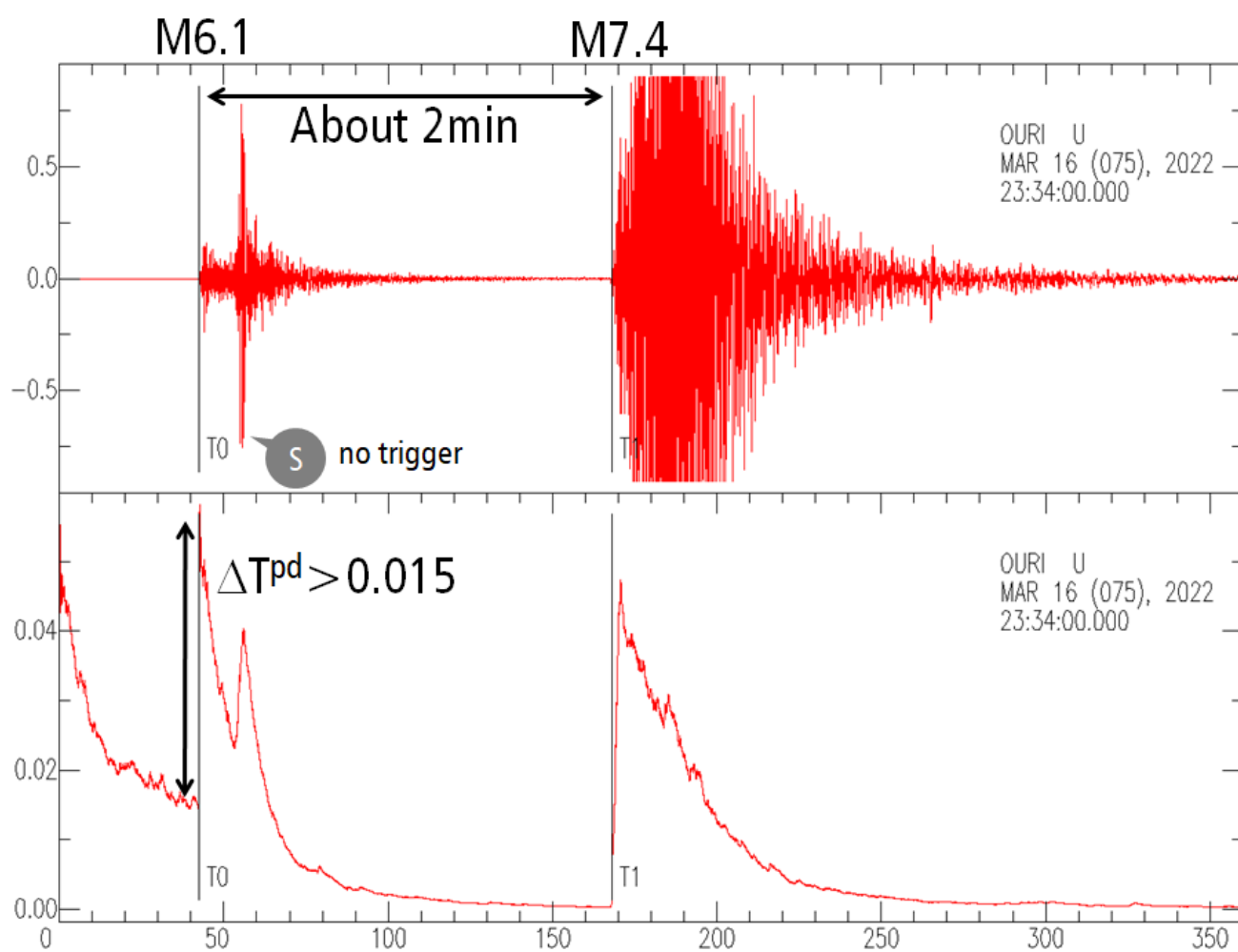
2022年3月16日に発生した福島県沖地震では、2つの大きな地震（M6.1とM7.4）が約2分間隔で発生した。この2つの地震はほぼ同じ場所で発生し、最初の地震に対しては緊急地震速報が適切に発表された。2つ目の地震では緊急地震速報そのものは発表されたが、震源決定が適切に行われなかった。このため、震源推定（IPF法）に基づく警報は発表されず、波動伝播に基づくPLUM法のみが緊急地震速報に用いられた。もし震源が適切に推定されていれば、もっと広い範囲でより早く緊急地震速報を出すことができたはずである。この地震では、福島県内で運行中の新幹線が脱線する事故が発生した。事故の被害を防ぐためにも、緊急地震速報システムの改善が必要である。

本発表では、IPF法のようにP波検知情報（トリガー）に基づいて地震を検知する手法について検討する。複数の地震が時間的・空間的に近い場所で発生した場合、地震の検出分解能は低下する。特に、最初の地震の揺れが続いている間（3分程度）は、新たなトリガー情報が最初の地震に起因するものなのか、別の新たな地震に起因するものなのかを判断する必要がある。また、最初の地震の揺れが続いている時に、新たなトリガーを検出する閾値も重要である。ここでは、(1)最初の地震の揺れが続いているときにP波を検出する閾値、(2)新しいトリガーを最初の地震と新しい地震のどちらに分類するか、について議論する。

我々は、P波検出をよりロバストに行うためにTpd法（Hildyard et al., 2008）を用いた（Yamada and Mori, 2021）。Tpd法はSTA/LTAと同様に異なる周波数成分の比を使用する。図1に速度とTpd波形の例を示す。本アプローチのポイントは、Tpdの絶対値ではなく、3秒間のTpdの最大変化量を閾値とすることである。一般に、P波到達時はTpdの変化が最も大きく現れるため、P波到達の判定が容易となる。また、P波検出直後は、閾値を大きく設定し、より大きくTpdが変化したときのみトリガーとする。このようにすることで、S波によるトリガーを回避しつつ、後続する地震のP波を見逃さないようにする。ただし、2つ目の地震が1つ目の地震より小さい場合、すなわち1つ目の地震のコーダ波によって信号が埋もれてしまう場合は、2つ目の地震のP波を見逃す可能性がある。

P波のトリガーが検出されると、既存の地震と別の新しい地震に分類される。溜瀝ら (2013) で示されたように、IPF法のトリガーのグルーピングは(1)P波の到達時間と(2)P波到達後5秒間の振幅によって行われる。これらの値が既存の地震から推定される理論値から 3σ 以内であれば、トリガーは既存の地震として扱われる。これらの値が 3σ 以上の場合、すなわちP波到達時刻の誤差が 3σ 以上の場合は、別の地震として扱われる。したがって、2つ目の地震のトリガーが、ちょうど1つ目の地震のP波の走時と重なってしまうと、1つ目の地震に吸収されてしまう危険性がある。このリスクを回避するため、溜瀝ら (2013) の判別条件に加えて、1つ目の地震から十分遠方で、予測される振幅がノイズレベルの1/10以下である場合は、別の地震とする条件を追加した。

福島県沖地震の1時間連続波形を拡張IPF法で検証した。拡張IPF法では、現在気象庁が採用している従来のSTA/LTA法の代わりに、Tpd法を利用してP波検出を行っている。図1に示すように、1つ目と2つ目の地震のP波が適切に検出された。IPF法で開発されたトリガーのグルーピング法は、この2つの地震のトリガーを適切に分離することができる。時間的・空間的に近い複数の地震を分離するためには、P波検出の閾値を適切に設定すること、適切なグルーピングを行うことが重要である。



Effect of station density on the maximum observed seismic motion

*Shin AOI¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

近年、これまで知られていなかった様な極めて大きな地震動、いわゆる極大地震動が頻繁に取得されている。1995年兵庫県南部地震以降の25年余りに、K-NET及びKiK-netだけでも、最大加速度PGA（3成分合成、以下同様）が1000galを越える記録が50記録、最大速度PGVが50cm/sを越える記録が110記録、観測されている。また、様々な機関により、相当値を含め震度7は少なくとも14回（正式な震度としては6回）観測されている。

大きな地震動が記録されるようになった要因として、地震活動（特にマグニチュードの大きな地震の発生状況）や観測機器の高性能化（以前に比べ高周波まで観測可能となった）などが考えられるが、なかでも、阪神・淡路大震災を契機に強震観測点の数が増え、震源近傍においてお強震動が観測される機会が劇的に増加したことが大きく貢献していると考えられる。強震動の分布は、震源から放射された地震波エネルギー量だけでなく、放射特性、指向性、伝播特性、増幅特性など様々な要因が重なり合い、複雑な様相を示す。強震動の上限を知ることは強震動地震学の究極の課題の一つであるが、強震動の上限を捉えるためにどの程度の空間的密度の観測が必要であるかを定量的に把握することは、十分な観測密度で観測を行わない限り、極めて困難である。

本講演では、自治体震度情報ネットワークにより取得された計測震度値のデータベースをもとに、観測点密度が観測される地震動の最大値に与える影響を評価する。自治体震度情報ネットワークは、気象庁（約670地点）、防災科研K-NETのうち約800地点、都道府県等の自治体（約2900地点）の合計約4370地点からなる、世界で最も高密度な全国規模の震度観測網である。ある地震で観測された全地点の計測震度を対象に、乱数により観測地点を選択された際の計測震度の最大値を評価することで、任意の数の観測網により観測されることが期待される計測震度の最大値のシミュレーションをモンテカルロ法により行う。例えば、1500点近くの地点で計測震度が計測された2004年新潟県中越地震では、新潟県の自治体震度計で震度7（計測震度6.5）が観測されたが、1990年代前半の震度観測点数である150点を仮定した試行回数10,000回のモンテカルロシミュレーションでは中央値が計測震度5.3となった。つまり、震度7の地震が、1990年代前半の震度観測密度は震度5強程度と評価された可能性があるということを示している。本講演では様々な地震を対象に、モンテカルロシミュレーションにより観測点密度が観測される最大計測震度に与える影響を評価する。

謝辞：気象庁、防災科研、都道府県等の自治体により観測された計測震度をもとに気象庁によりとりまとめられた震度データベースを使用しました。記して感謝いたします。

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

📅 Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 Room D F204

[S15] AM-2

chairperson: Susumu Kurahashi (Aichi Institute of Technology), Hiroyuki Goto

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

[S15-06] Estimation of the EGTD for prediction

*Masanori HORIKE¹ (1. Hanshin consultants co., LTD.)

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

[S15-07] Scaling of Fault Rupture Process Simulated from Hierarchy Patch Source Model

*Hiroyuki GOTO¹ (1. Kyoto University)

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

[S15-08] Comparative study of temporal variation of coseismic velocity in Korea and Japan

*Tae Woong Chung¹, Faisal Umer¹, Kazuo Yoshimoto² (1. Sejong University, 2. Yokohama City University)

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

[S15-09] Relationship between strong ground motion and dynamic parameters inferred from dynamic source inversion of the 2016 Kumamoto earthquake

*Takeshi MIYAMOTO¹, Kimiyuki ASANO², Tomotaka IWATA² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University)

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

[S15-10] Extraction of effective source areas based on comparison between calculated waveforms before and after trimming of slip distribution

*Susumu KURAHASHI¹, Ken Miyakoshi¹ (1. Aichi Institute of Technology)

Estimation of the EGTD for prediction

*Masanori HORIKE¹

1. Hanshin consultants co., LTD.

1. 初めに

前回の発表では、観測記録の再現を目的とするEGTDの推定について主に述べた。再現のEGTDは、伝播経路の性質を求めるために用いる。一方、地震動予測や力学的震源インバージョンでは、予測に用いるEGTDが必要となる。この発表では予測のEGTDの推定について述べる。予測のEGTDの推定の前に、余震群中の一余震を仮想未来地震に指定し、残りの余震からサブ余震群を作り、この余震群から予測のEGTDを抽出する。抽出したEGTDを検証は、それを用いて合成した波形が仮想未来地震の観測記録を精度よく予測することで行う。この研究の一つの目的は、予測の高周波数EGTDが推定可能性調べることにある。もう一つの目的は、最も精度よく予測できる震源時間間を、現在提案されている震源時間関数の中から選択できるかを調べることである。EGTDの推定は因果律を満たす任意の震源時間関数に対して可能である。これは、推定したEGTDの震源時間関数依存性を意味し、伝播経路の性質のみを反映すること矛盾する。このようなEGTDは、受け入れられない。震源時間関数として、断層破壊の物理に基づくものを採用すべきであるが、残念ながらそのようなものは存在していないように思われる。ここでは現実的な方法として、地震動観測記録と仮定した震源時間関数を用いて推定したEGTDにより合成した地震動間の誤差が最も小さくなる震源時間関数を既存の時間関数から選択する。この研究では、予測の高周波数EGTD推定と予測誤差が最小となる震源時間関数の選択の2課題を検討する。用いる余震群は、直径1 km内に8余震と7余震が分布するグループA1とA2である。EGTDの周波数帯は、遮断周波数を4 Hz, 8Hz, 16Hzとする3つとした。

2. 予測のための高周波数EGTDの推定

震源時間関数を平滑化ステップ関数(SSF)とした場合のグループA1の結果について述べる。8余震のうち一つを仮想未来地震に指定して、サブ余震群から予測のEGTDを抽出した。次に、抽出したEGTDを検証するため、仮想未来地震の「観測記録」をEGTDを用いて合成した波形により予測した。予測の精度は観測記録と予測波形の相互相関係数(CCC)により評価した。このEGTD推定のプロセスを仮想未来地震として8余震各々を指定して8回繰り返した。遮断周波数が4Hzの場合のみほとんどすべての余震とすべての観測点でCCCは0.7以上となった。これは、遮断周波数が4Hz或いはそれ以下の場合のみ余震域と各観測点間の予測のEGTDが精度よく得られたことを示している。前回の学会では再現のEGTDは、遮断周波数が16HzでもEGTD精度よく推定できることを述べたが、予測のEGTDは再現のEGTDに比較して、遮断周波数がかなり低い。これは、予測のEGTDでは予測する余震（仮想未来地震）はEGTDを推定するサブ余震群に含まれていないためである。グループA2の結果について述べる。グループA2では、CCCはグループA1よりさらに悪い。但し、それを見ると二つの理由があることがわかる。一つは、特定の1余震がどの観測点でもCCCが低い。これは、この低CCCの原因がこの余震の震源にあることを示している。もう一つは、特定の1観測点のすべての余震に関する相関係数が低い。これは、この観測点の観測システムまたは観測点近傍の観測条件が変化したことを意味する。これら2つの原因が除去されれば、CCCはグループA1と同程度になることが期待できる。従って、低CCCの余震のグループからの除去や他の余震で置き換えることはEGTDの精度向上に重要である。また、低CCCの観測点の除去も重要である。

3. 震源時間関数の選択 高周波数EGTDの推定における最も重要な課題は、震源時間関数の採用である。震源時間関数としては断層破壊の物理に基づいたものを採用すべきであるがそのようなものはないと思われる。ここでは次善の策として、現在利用されている震源時間関数のうち最も精度よく仮想未来地震の地震動を予測するものを震源時間関数として選択する。ここでは、予備的研究として二つの震源時間関数を用いて、予測精度の比較を行う。具体的には、平滑化ステップ関数(SSF)と三角形関数(TAF)である。震源時間関数SSFの予測精度はすでにCCCを用いて評価済みなので、以下では震源時間関数TAFの予測精度の評価をCCCを用いて行う。震源時間関数TAFとした場合の二つの余震グループのCCCは、震源時間関数SSFと同じ特徴を示した。目視による二つの震源時間関数のCCCの差異を確認するのはむづかしい。そこで、対応する二つのCCCの比を求

め、定量的に予測精度の差を調べた。比は3つのどの遮断周波数でも1付近に集中していた。各観測点において余震に関する平均値はほぼ1であった。この結果は、二つの震源時間関数の予測精度は同じであること示しており、予測精度の違いにより震源時間関数を選択することはむづかしいことを意味する。4. まとめ この研究では以下の二つの結論が得られた

1. 予測のための高周波EGTDは推定可能である。但し、予測精度の悪い余震の置き換えや削除により精度向上が可能である。
2. 予測精度の比較により既存震源時間関数から予測精度の高い震源関数を選択することはむづかしい。

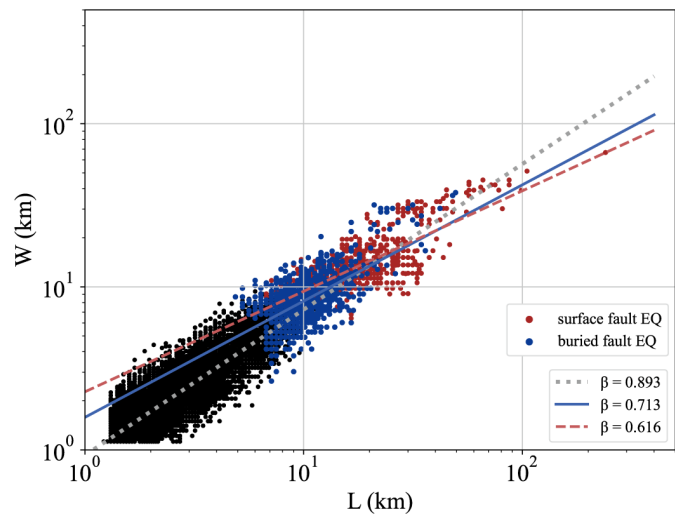
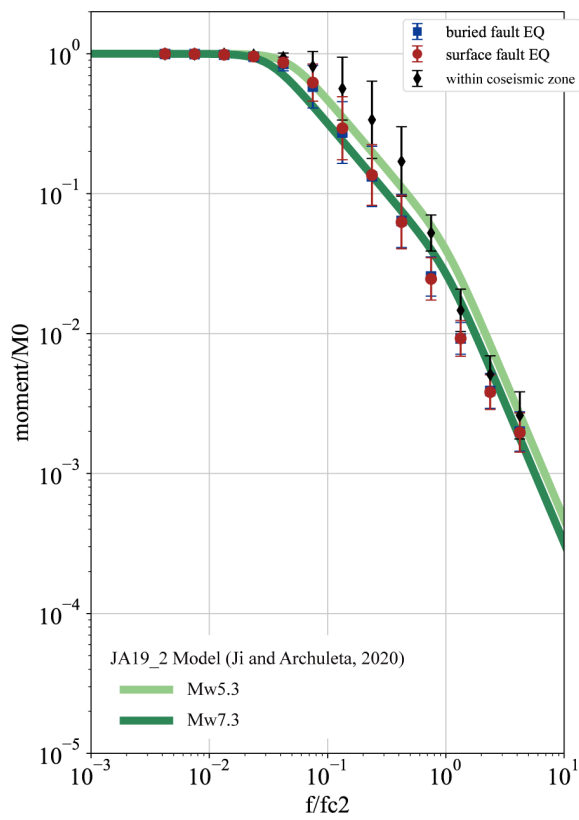
Scaling of Fault Rupture Process Simulated from Hierarchy Patch Source Model

*Hiroyuki GOTO¹

1. Kyoto University

地震ハザード評価や耐震設計において、破壊開始点やすべり分布等の地震シナリオを具体的に設定した断層破壊プロセスのモデル化が行われている。近年、断層破壊プロセスのモデル化に動力学モデルを採用する研究も進められているが、本研究ではIde and Aochi(2005)による滑り弱化距離の階層構造を持つパッチが断層にランダムに配置されるモデルによる方法に着目する。階層パッチモデルはGR則を自然に表現できることから、自然地震の物理と矛盾しないシンプルなモデルとして興味深い。一方で、階層パッチモデルがどのような断層破壊プロセスを生成するかは、十分に調べられていなかった。本研究では、滑り弱化距離の階層パッチモデルを用いた動力学モデルにおいて生成される破壊プロセスについて、特にスケーリングの観点から議論した。

地震発生層を考慮した半無限媒質中の垂直横ずれ断層を対象として数値解析シミュレーションを行い、多数の断層破壊プロセスを生成する。生成された断層破壊プロセスの震源スペクトルは概ね ω^{-2} モデルに従う。しかし、自由表面と地震発生層を考慮すると、震源スペクトルはコーナー周波数付近で過小評価される傾向にある。この形状は、二重コーナー周波数の震源スペクトルモデル (JA19_2モデル) によく一致する。また、生成された破壊プロセスの断層長さとマグニチュードの関係は、Leonard(2010)のモデルに整合する。このモデルは、M5程度を超える地震において断層幅が断層長さの $2/3$ 乗に比例することを主張するものであるが、本研究で生成された断層破壊プロセスも同様の傾向を示した。等方ランダムに円形のパッチを配置した異方性のないモデルであるため、地震発生層内部に破壊が留まるような規模の地震では断層幅は断層長さにほぼ比例する。このため、本研究で示される断層長さとマグニチュードの関係は、地震発生層の存在により実現したものと解釈できる。



Comparative study of temporal variation of coseismic velocity in Korea and Japan

*Tae Woong Chung¹, Faisal Umer¹, Kazuo Yoshimoto²

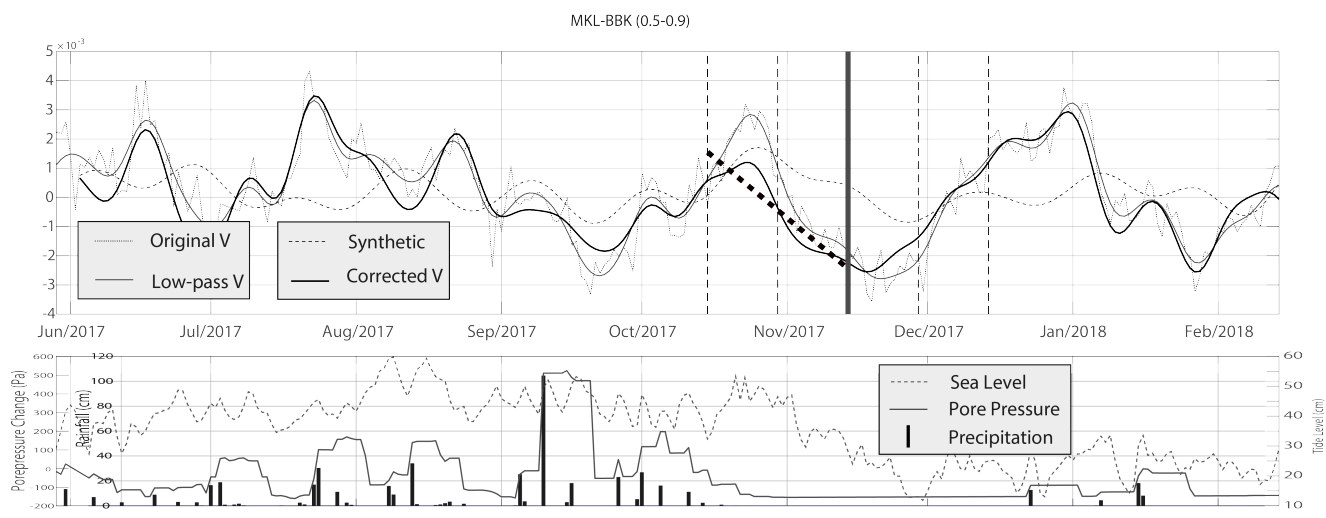
1. Sejong University, 2. Yokohama City University

<Abstract>

Post-earthquake temporal variations can provide insightful information about dynamic processes and the state of crust around seismic area. Larger variations of earthquakes were naturally observed in large magnitude, and moderate Korean earthquake after long seismically quiet period showed larger variation in strong Japanese earthquake (Iqbal et al., 2021). For the quantitative study of variation, the technique of Ambient Noise Interferometry (ANI), which consists of cross-correlating continuous noise records from a stations pair acting as doublets, has been widely applied to numerous earthquakes. As done by Iqbal et al (2021), this study using ANI selected earthquakes with three kind magnitude –major, strong, and moderate. Major and strong earthquakes are Kumamoto (M_L 7.3) and Tottori earthquake (M_L 6.6) occurred in Japan at 2016, respectively, and moderate is Gyeongju (M_L 5.8) and Pohang earthquake (M_L 5.4) occurred in Korea at 2016 and 2017, respectively. Our study corrected synthetic seasonal velocity changes (Wang et al., 2017), which was not incorporated in the previous studies. The analyzed data ranged continuously from approximately 2 to 9.5 months before and 2 to 4 months after the earthquake. The velocity reduction was observed within the classes of 15 and 30 days before and after the earthquake day, respectively. Additionally, two further classes of 30 and 60 days, i.e., the sum of 15 and 30 days before and after the earthquake, respectively, were included in the analyses. The linear fitting applied to these classes with a regression value of R^2 0.5 showed the values of velocity drops for the targeted frequencies of 0.1-0.6 Hz, 0.5-0.9 Hz, and 0.1-0.9 Hz, respectively. The largest interstation velocity drop values obtained from the six classes showed that their distribution correlates well within the epicentral proximity of the Tottori and Gyeongju earthquakes. For Kumamoto earthquakes, the highest velocity variations were concentrated near the Aso volcano, while for the Pohang earthquake, these variations were significant near the Gyeongju earthquake epicentre that preceded it a year ago. For the seasonal corrections, two environmental factors: pore pressure change and sea level changes, were considered based on the observations in Korean data. The pore pressure was obtained from precipitation records (Talwani et al., 2007), and along with sea level changes, two factors were filtered with band-pass between 0.0073 and 0.05 cycles. The velocity time series, on the other hand, was smoothened by a low-pass filter at 0.05 cycles/day and correlated with two factors for correlation coefficients. The pore pressure was, additionally, shifted within ten days to obtain the best minima correlation and was combined with sea level changes to produce a synthetic curve. The smoothened velocity drop was considered only for interstation pairs with significant drop values for six classes, and the velocity drop was corrected by subtracting the synthetic curve from the observed drop values. The corrected results naturally showed reduced values of velocity changes compared to the uncorrected values. For the Gyeongju earthquake, high-velocity variations were prominent near the epicentre. On the other hand, noticeable distribution of high values around the hypocentre of the Gyeongju earthquake was observed after the Pohang earthquake. This significant velocity variation around preceded earthquakes may be explained by the fact that cracked crust due to the previous earthquakes was easily influenced by the later earthquakes. A similar phenomenon was observed at repeated seismic regions as greater variations induced by the smaller magnitude earthquakes than those by larger magnitude ones preceded earlier (Brenugier et al., 2008; Yu et al., 2020)

<Acknowledgement>

This work was funded by Research Project in 2021 Sejong University



Relationship between strong ground motion and dynamic parameters inferred from dynamic source inversion of the 2016 Kumamoto earthquake

*Takeshi MIYAMOTO¹, Kimiyuki ASANO², Tomotaka IWATA²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University

これまで、比較的規模の大きな地震が発生すると、観測波形をデータとした運動学的震源インバージョンなどにより震源の破壊過程が推定されてきた。K-NETやKiK-netをはじめとする強震観測網の下で発生した大規模な内陸地震として、平成28年熊本地震が挙げられる。熊本地震では、 M_{JMA} 6.5の地震（以下、最大前震）の約28時間後に M_{JMA} 7.3（以下、本震）の地震が発生し、益城町では震度7を2度観測するなど大きな被害が生じた。一方、強震記録を用いた震源過程の解析も多く実施され、断層近傍での観測記録との関係が議論されてきた。

本震を対象とした動的破壊シミュレーションによる研究として、Tsuda (2021) は既往の特性化震源モデルを参考に3つの強震動生成域 (SMGA) を配置した布田川断層の動力学的震源モデルを提案し、深さ約2–8 kmに位置する2つのSMGAのいずれかを除いたモデルや一方の長さを半分にしたモデルで波形を合成した結果、西原村における速度波形の断層平行成分の振幅が大きく変化した。このことから、これら2つのSMGAの有無やサイズが観測された強震動の生成に影響していることを指摘した。Kaneko and Goto (2022) は、布田川断層に比較的単純な動的パラメータ分布を与え、その近傍に位置する4地点での観測記録を再現するモデルをパラメータスタディにより求めた。結果、西原村で観測されたような断層近傍における大振幅かつ周期数秒程度の速度波形は、震源からの破壊フロントと地表で反射した破壊フロントとの相互作用により、速度波形の断層平行成分が強まることで説明できることを示した。

強震動生成メカニズムの根本的な理解には、運動学的観点に加えて断層の破壊過程を支配する動的パラメータといった動力学的観点からの考察を通じたその背景物理の解明が必要である。また、Tsuda (2021) と Kaneko and Goto (2022) は、断層近傍の観測記録のみに着目して、動力学的震源モデルを推定している。

そこで本研究では、断層近傍のみならず、より広範囲の観測記録を再現できる動力学的震源モデルを求めるために、観測波形から動的パラメータを推定するdynamic source inversionを熊本地震の最大前震に適用することを試みる。現在は手法の開発段階であり、将来的な本震への適用を視野に入れ、単純な震源モデル (Asano and Iwata, 2016) が提案されている最大前震を最初の適用例とする。

本研究で用いる手法は、主にGallovič *et al.* (2019) に倣った。具体的には、(1) モデルパラメータ（ピーク摩擦係数と動的摩擦係数の差、初期せん断応力、臨界すべり変位量）をランダムに更新し（提案モデル）、(2) 各モデルパラメータの値とstrength excessに関する条件の判定を行い、適合する場合にのみ、(3) その震源モデルを用いて動的破壊シミュレーションを行う。続けて、(4) 得られた震源時間関数とグリーン関数との畳み込みにより波形を合成し、(5) 観測波形と合成波形から事後分布を求め、Metropolis-Hastings algorithmにより、提案モデルを採用または却下する。(6) 手順(1)～(5)を繰り返し、観測波形と合成波形から計算されるVariance Reductionも参考にしながら事後分布の収束を判断し、計算を終える。本手法において、動的破壊シミュレーションには、Gallovič *et al.* (2019) と同様に、三次元スタッガードグリッドに基づく差分法コード (fd3d_TSN; Premus *et al.*, 2020) を用いた。グリーン関数は離散化波数法 (Bouchon, 1981) と反射・透過係数行列 (Kennett and Kerry, 1979) により計算した。地下構造モデルは、「平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」により作成された三次元速度構造モデル (浅野・他, 2019) と全国一次地下構造モデル (JIVSM; Koketsu *et al.*, 2009, 2012) をもとに、各観測点直下の一次元地下構造モデルを与えた。

今後、仮想的な動力学的震源モデルを用いて本手法の妥当性を評価し、熊本地震の最大前震に適用する。

Extraction of effective source areas based on comparison between calculated waveforms before and after trimming of slip distribution

*Susumu KURAHASHI¹, Ken Miyakoshi¹

1. Aichi Institute of Technology

1. はじめに 断層面上のすべり量や震源断層の面積と地震モーメントの関係性を示すスケーリング則は、強震動の予測のために非常に重要な関係式である。このスケーリング則はいくつかの関係式が提案され、Miyakoshi et al.(2018, 2020)や長嶋他 (2021) などにより検証がなされている。長嶋他 (2021) による海外内陸地殻内地震のインバージョン結果をデータベースとした検討結果では、震源断層の面積と地震モーメントのスケーリング則のデータへの適合度は、どのスケーリング則も尤もらしさの度合いを比較評価できるほどの有意な差はないことが示されている。震源断層の面積と地震モーメントのスケーリング則に用いられる震源断層の面積は、Somerville et al.(1999)によるトリミング規範、すなわち、波形インバージョン等で得られた不均質震源モデル全体の平均すべり量から、0.3倍未満となる領域を削除し、最終的に残った領域を震源断層領域とするものである。Somerville et al.(1999) のトリミング規範は、断層面上のすべり量のみで実施できるため簡易であるが、波形インバージョンにより推定される不均質震源モデル（すべり量分布）では、グリーン関数の精度不足によりすべり量分布の端に主要な強震動に関係しない見かけ上のすべりが表れる可能性が否めない。そこで本研究では、見かけ上のすべりの部分をトリミングすべく、すべり量分布から計算される波形に着目し、トリミング前の計算波形とトリミング後の計算波形を比較し、主要な波形やパルス波形に影響のない領域をトリミングする手法を試みる。2. 本研究で試みるトリミング手法 本研究のトリミング手法を以下に示す。1) オリジナルの波形インバージョンのすべり量分布による計算波形と、トリミング後のすべり量分布による計算波形の残差を計算する。2) ある閾値 α よりも残差が小さい場合は、トリミングされた領域は計算波形に対して影響度が小さいため、“トリミング可能な領域”と判断する。一方で、ある閾値 α よりも残差が大きい場合は、トリミングされた領域は主要な波群やパルスへの影響度が大きい、すなわち、波形再現に必要な断層すべり運動の領域と考えられるため“トリミング不可な領域”と判断する。対象観測点の残差平均が閾値 α よりも小さい場合、その行または列をトリミングする。本研究では、予備解析等の検討により試行錯誤的に $\alpha=0.1$ とした。トリミングした震源断層の地震モーメントとF-netの地震モーメントは概ね一致している。3) 最終的にトリミングができない領域を主要な波形を生成する震源断層領域とする。図1に2019年山形県沖の地震の震源インバージョンを例に、トリミング前の計算波形とトリミング後の計算波形の比較を示す。図1 (a) から (d) は、トリミング前（オリジナルのすべり量分布）および左端から1列ずつトリミングしたケースのYMT004とNIG006観測点における計算波形を示す。左端から1列ずつトリミングすると、YMT004の計算波形には大きな変化はみられないが、NIG006ではトリミングする列が増えるごとに計算波形が変化することがわかる。これは、その領域がNIG006の計算波形に対して影響が大きく、すなわち“トリミングすべきでない領域”であることを示している。この作業を波形インバージョンで用いられた観測点で実施し、各観測点のトリミング前後の残差の平均が $\alpha=0.1$ よりも小さい場合、波形への影響度の小さい領域としてトリミングする。3. 解析結果 図2にトリミング結果の一例として、2019年山形県沖の地震の結果を示す。図2 (a) は、各観測点におけるオリジナルのすべり量分布による計算波形と、すべり量の上端、右端、下端、左端のそれぞれの行または列をトリミングした領域による計算波形の残差を示しており、最下行がその残差平均である。残差平均が0.1より小さい、上端1行、下端1行、左端1列がトリミングされた。図2 (b) に示すように、すべり量分布の端にみられたすべりの比較的大きな領域もトリミングされていることがわかる。1997年から2019年に日本で発生したMw5.7から7.0の10地震に対して実施した結果、トリミング後の震源断層領域は、Somerville et al.(1999)のスケーリング則と大きくはずれないことを確認した。なお、用いる観測点の震央距離による影響や、観測波形と比較などは今後の検討課題である。

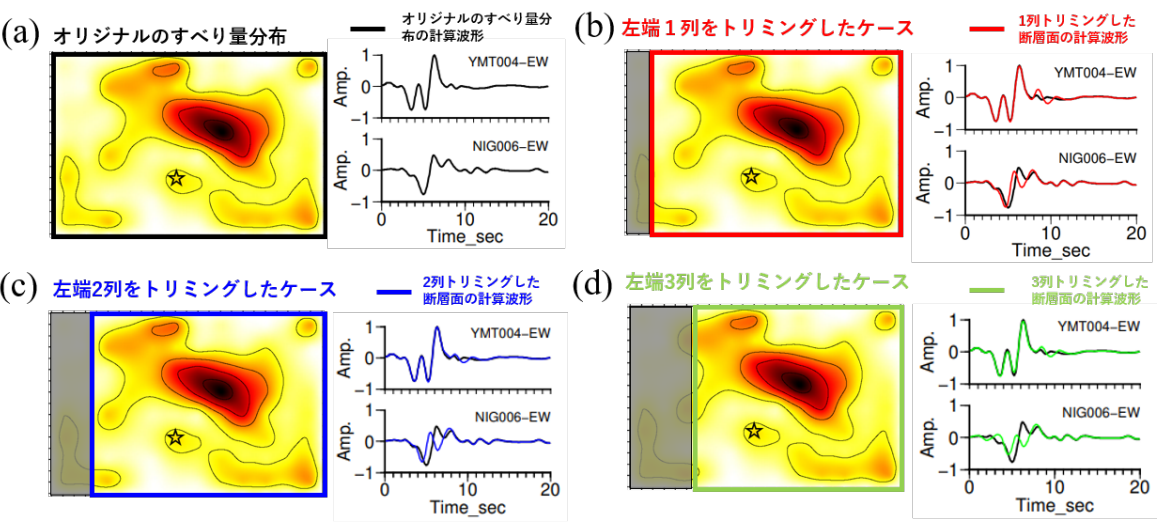


図1 トリミング前（オリジナルのすべり量分布）の計算波形とトリミング後の計算波形を比較。(a)から(d)は、トリミング前（オリジナルのすべり量分布）および左端から1列ずつトリミングしたケースのYMT004とNIG006観測点における計算波形を示す。

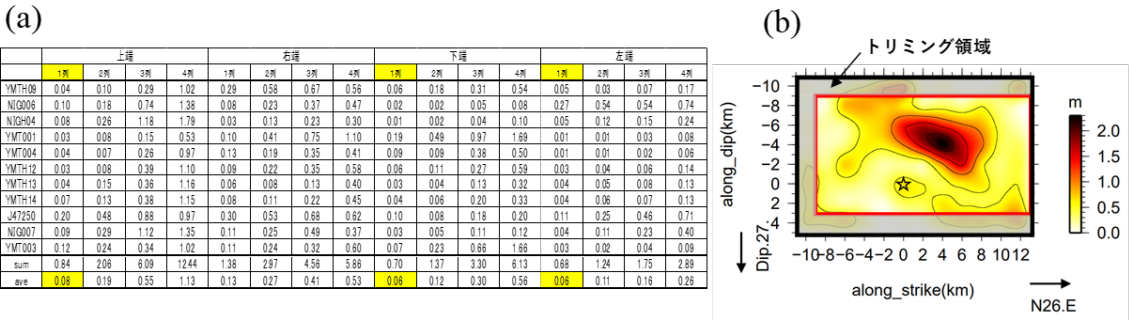


図2 2019年山形県沖の地震におけるトリミング結果。(a)各観測点のトリミング前後の計算波形の残差、(b)すべり量分布におけるトリミング領域

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster**📅** Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 3:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 6:00 AM UTC | **📍** Room D F204**[S15] PM-1**

chairperson: Atsuko OANA, Yosuke Nagasaka (Port and Airport Research Institute)

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

[S15-11] Strong motion characteristics of the 2023 southeastern Turkey earthquakes with surface faults*Takao KAGAWA¹ (1. Tottori University, Faculty of Engineering)

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

[S15-12] Source process characteristics of the 2023 Turkey earthquake (M_w 7.7) inferred from pulse-like near-fault ground motions*Yosuke NAGASAKA¹, Atsushi Nozu¹ (1. Port and Airport Research Institute)

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

[S15-13] SIMULATION OF THE NEAR-FAULT RECORDS OF THE 2023 KAHRAMANMARAS, TURKEY EARTHQUAKE (M_w 7.7) BASED ON A CHARACTERIZED FAULT MODEL*Toshimichi Kidoh¹, Masayuki Nagano², Ken Miyakoshi¹, Kensuke Arai¹, Toshiaki Satoh¹ (1. Ohsaki Research Institute, 2. Tokyo Univ. of Science)

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

[S15-14] Strong Motion Simulation Focused on Rupture Velocity of the 2023 Turkey Subsequent Earthquake (M_w 7.6) Based on Characterized Fault Model*Sei Kanayama¹, Toshimichi kido², Hong Liu¹, Masayuki Nagano¹ (1. Tokyo University of Science, 2. OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC.)

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

[S15-15] Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Using the Empirical Green's Function Method.*Hidetoshi Kasugai¹, Yoshiaki Hisada¹, Shinya Tanaka² (1. Kogakuin University, 2. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S15-16] Study on the Shallow Fault Slip of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake (M_w 6.9) Based on Characterized Fault Models*Atsuko OANA¹, Ken Miyakoshi², Shohei Yoshida², Toshiaki Sato² (1. Shimizu Corporation, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

Strong motion characteristics of the 2023 southeastern Turkey earthquakes with surface faults

*Takao KAGAWA¹

1. Tottori University, Faculty of Engineering

1. はじめに

2023年2月6日にトルコ共和国南東部を震源とするM7.8およびM7.5の地震が続けて発生し、それぞれ東アナトリア断層南西部およびチャルダク断層に沿った地表地震断層が報告されている。トルコ北東部では1999年にKocaeli地震(M7.6)が発生して地表地震断層が確認されたが、その現地調査において断層変位による建物被害のごく近傍で大きな地震動が想定されない建物も観察された。また、Somerville (2003)は既往のスペクトル距離減衰式と周辺の観測記録を比較し、平均よりも地震動が小さかったことを指摘している。今回の地震でも同様の現象が見られるのか、トルコ共和国国内務省災害緊急事態対策庁 (AFAD) が公開している強震観測データを用いて解析を試みたので報告する。

2. 解析の概要

公開地震記録から震源距離で150km以内のものを用い、アメリカ地質調査所 (USGS) のFinite Faultモデルから断層最短距離を求め、Abrahamson and Silva (2008)のスペクトル距離減衰式と比較する。その際、地盤条件としてAVS30が得られていない、あるいは350m/sよりも小さいサイトは用いないこととした。さらに、地震の全体を捉えていない記録や異常が見られる記録は割愛した。その結果、断層最短距離100km以内において、M7.8の最初の地震について41点、M7.5の地震については18点の記録が抽出された。Abrahamson and Silva (2008)の適用にあたっては、横ずれの本震、また上盤効果を考慮しない、などとしてパラメータを設定した。

3. 解析結果

結果を図に示す。左がM7.8、右がM7.5の場合である。細線が各点におけるAbrahamson and Silva (2008)に対するスペクトル比、太線が平均を示す。M7.8は平均が全周期で1を上回っているが、M7.5は周期0.3から2秒の帯域で平均を下回る結果となった。M7.8では断層に沿って多くの記録が得られており、特に破壊進行によって揺れが大きくなった領域での記録が多い。一方で、地表地震断層ごく近傍で建物被害が生じていないと見られる破壊開始点近傍での記録が得られていない影響が懸念される。M7.5は逆に断層線に沿った記録が少ないことが影響していることも考えられる。

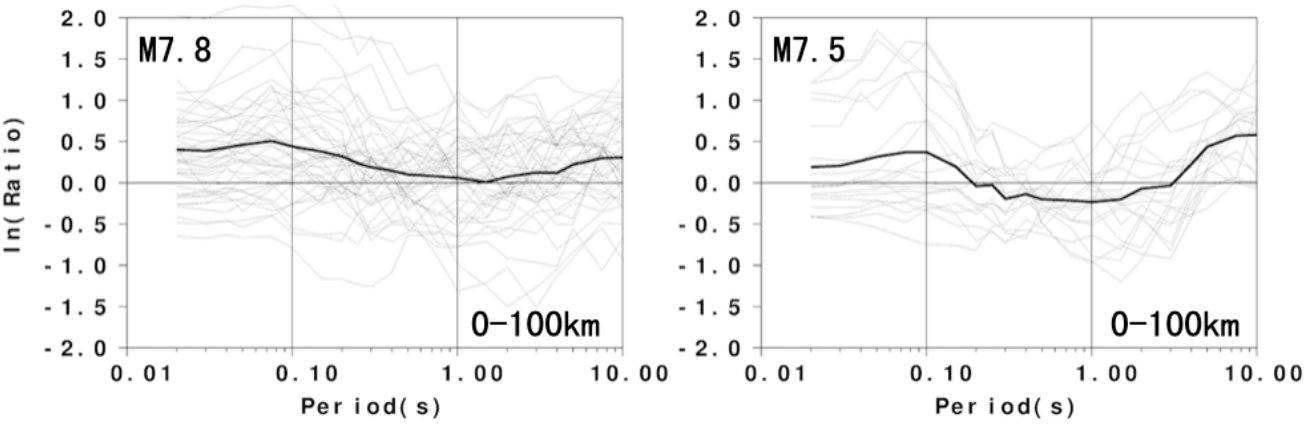
4. おわりに

現時点では暫定結果であるが、建物被害（断層変位によるものと強震動によるもの）との関連、AVS30が得られていない地点の地盤状況など、現地調査の成果を参照することにより、強震動と被害の実態について検討を進めたい。

参考文献

Somerville, P. G., Phys. Earth Planet. Int., 137, 201–212, 2003.

Abrahamson, N. A. and Silva, W. J., Earthquake Spectra, 241, 67-97, 2008.



Source process characteristics of the 2023 Turkey earthquake (M_w 7.7) inferred from pulse-like near-fault ground motions

*Yosuke NAGASAKA¹, Atsushi Nozu¹

1. Port and Airport Research Institute

2023年2月6日に発生したトルコ地震 (M_w 7.7, AFAD) では東アナトリア断層に沿った断層近傍で強震動が多く記録された。これらの強震動を調べることで強震動の特徴だけでなくその発生要因についても知見を得ることができ、被害分析や今後の強震動予測の参考になると考えられる。大地震では複雑な震源過程が強震動に影響を与えることが知られているが、トルコ地震の断層近傍記録を見るとその多くがパルス状の速度波形に代表される比較的シンプルな特徴を示しており、震源過程についても同様にシンプルなモデルで代表的な波形の特徴を捉えられると期待される。一方、波形の振幅や形状は地点や区間によって少しずつ異なり、震源過程を反映しているものと考えられる。そこで、本検討では2023年トルコ地震(M_w 7.7)の断層近傍強震動の生成について調べることを目的として、フォワードモデリングによる震源過程のモデル化を行った。インバージョンによる震源過程解析はある定式化の下で最適な解を得られるという利点があるが、本検討ではフォワードモデリングによるシンプルな震源過程から強震動を理解する試みであり、インバージョンによる震源過程と相補的な役割を果たすことを目指している。本検討では震源近傍で多数の強震記録が得られた震源から南西部のみを対象とした。余震分布と地表地震断層に沿った断層面を仮定し、破壊伝播速度、すべり量、震源時間関数を与えて離散化波数法により波形合成を行った。断層面は走向の変化を考慮して4つのセグメントに分け、断層幅は10kmとした。破壊伝播速度は主に波形の到達時刻から決定し、すべり量と震源時間関数は振幅と波形が合うよう設定した。必要に応じて走向方向に変化するパラメーターの分布を与えた。観測記録の時刻がずれていると思われる地点が見られたため、P波初動の到達時刻を用いて簡易的な時刻補正を行った波形を対象波形として使用した。地盤構造については十分な情報が得られなかったためモデル化は半無限地盤で行い、サイト特性の影響は余震記録を用いて経験的サイト増幅特性を推定することでその影響を考察することとした。その結果、断層近傍で特徴的なパルス状の波形の多くはモデル化した断層に沿って連続的に断層が伝播すると仮定したシンプルなモデルで概ね説明できることが示された。また、これらの観測点における経験的サイト増幅特性はパルス状の波形に対応する周波数には大きな増幅を示さなかった。Narliセグメント近傍の強震動は地表地震断層沿いの断層面によって説明された。Amanosセグメントの一部では4km/sを超える破壊伝播速度が必要となった。また、Amanosセグメントの断層ステップオーバー付近では、表面付近での破壊の停止と再開が示唆された。本検討では多くの断層近傍地点に見られる特徴的なパルスを主なターゲットとしており、2708, 2712, Antakyaの地点等で観測されたより鋭いパルス状の波形の再現には小規模な不均質性を考慮する必要があると考えられる。

SIMULATION OF THE NEAR-FAULT RECORDS OF THE 2023 KAHRAMANMARAS, TURKEY EARTHQUAKE (M_W 7.7) BASED ON A CHARACTERIZED FAULT MODEL

*Toshimichi Kidoh¹, Masayuki Nagano², Ken Miyakoshi¹, Kensuke Arai¹, Toshiaki Satoh¹

1. Ohsaki Research Institute, 2. Tokyo Univ. of Science

2023年2月6日4時17分(現地時間)にトルコのナルリ-パザルジユク断層(以下, NPF)を発震断層とし, 東アナトリア断層帯(以下, EAF)に破壊が乗り移り M_W 7.7(トルコ首相府災害緊急事態対策庁, 以下, AFAD)の地震(以下, M_W 7.7地震)が発生し, 地表地震断層近傍で貴重な多数の強震観測記録が得られた。さらに引き続いて, 同日13時24分(現地時間)にチャルダック断層で M_W 7.6(AFAD)の地震(以下, M_W 7.6地震)が発生した。両地震では大規模な地表地震断層が確認されており, 相対変位で M_W 7.7地震では最大約6.6m, M_W 7.6地震では最大約7.5mの地表変位であった(CEDA[2023])。

M_W 7.7地震や M_W 7.6地震については既に強震波形, 遠地地震波形やハイレートGPS記録による永久変位をターゲットとした震源インバージョン解析が多数行われており, 種々の不均質すべり分布を有する断層モデルが多数提案されている(例えば, USGS[2023], Melgar et al.[SEISMICA, 2023], Mai et al.[TSR, 2023], Jia et al.[SCIENCE, 2023]等)。一方で, 地震本部(2020)の強震動予測では, 大きなすべり量や応力降下量を持つSMGA(Strong Motion Generation Area, 強震動生成域)とそれ以外の背景領域からなる特性化震源モデルを用いるが, M_W 7.7地震や M_W 7.6地震について特性化震源モデルに基づく地震動評価は未検討である。

2016年熊本地震(M_W 7.0)では地表地震断層が確認されるとともに, 地表地震断層近傍で強震観測記録が得られたことから, 地震発生層内だけではなく地震発生層以浅をモデル化した特性化震源モデルの検討が行われている(例えば, 貴堂・永野[AIJ, 2019], 田中・他[AIJ, 2018], Irikura et al.[PAG, 2019]等)。 M_W 7.7地震でも主に断層南西部(クルクハン〜ターコル)において, 地表地震断層に沿って約5km以内の近傍で多数の強震記録が得られている。このような断層近傍の強震記録を再現可能な特性化震源のモデル化は, M7~M8クラスの強震動予測を目的とした地震発生層以浅を含む震源の特性化を検討する上で重要と考える。今回EAFで発生した M_W 7.7の地震では, 断層南西部において, 地表断層に沿って多数の強震記録が世界で初めて得られたことから, ここでは, M_W 7.7地震に対して貴堂・永野[AIJ, 2019]の考え方を適用し, SMGA及び背景領域に中村・宮武のすべり速度時間関数[地震2, 2000], LMGA (Long-period Motion Generation Area, 長周期地震動生成域)(Irikura et al.[PAG, 2019])には二等辺三角形のすべり速度時間関数を与えた特性化震源モデルによる地表地震断層近傍の強震観測記録の再現解析を行い, 地震発生層以浅を含めたモデル化の適用性を検討する。

地震動計算は速度波形だけでなく, 永久変位の再現も目的とするため理論的手法を選択する。水平成層地盤構造を対象として断層近傍の永久変位も評価可能な薄層法(貴堂・他[JAEE, 2020])により地震動を計算する。理論地震動計算の有効振動数の上限は1.0Hzまでとした。再現解析の対象とする観測点は発震断層のNPFとEAFの南西側の地表地震断層近傍に位置する計18観測点とした。各観測点における水平成層地盤構造はGuvercin et al.[GJI, 2023]のS波, P波速度構造を使用した。

既往の震源インバージョン解析[例えば, USGS(2023)]ではNPFとEAFの交点付近を中心に北東側と南西側に大きなすべり量が求まっており, その最大すべり量は10m前後となっている。地表地震断層分布や震源インバージョン解析のすべり分布を参考に地震発生層内のSMGAと地震発生層以浅のLMGAを設定する。SMGAやLMGAのすべり量, すべり速度時間関数の形状等は観測記録の再現性をみながら, フォワードモデリングにより推定する。

M_W 7.7地震の特性化震源モデルの巨視的断層面は断層モデルの上端が地表に到達するように設定した。特に断層近傍の観測点が, 断層モデルの地表トレースに対して上盤側か下盤側かが重要であるため, 複数のセグメントを設定する際, 可能な限りUSGSの地表地震断層分布に沿うように留意した。傾斜角はUSGSの震源イン

バージョン解析に基づく不均質震源モデルを参考に設定した。対象観測点及び特性化震源モデルの地表投影図を図1に、特性化震源モデルを図2に示す。SMGAとLMGAのすべり量は3～7mとなっている。強震観測記録を良好に再現するために断層モデルはNPFの初期破壊開始点を含めて計8個の破壊開始点から同心円状に破壊が伝播すると仮定するMulti hypocenter型モデルを採用し、それぞれ破壊遅延時間と破壊伝播速度(3.1km/s～3.2km/s)を試行錯誤的に設定した。

断層モデルのすべり速度時間関数の設定も試行錯誤的ではあるが、断層近傍の強震観測記録を良好に再現することができた。代表例を図3に示す。また、断層モデルに基づいて永久変位の面的分布を試算したが、大局的な傾向はAn et al.[remote sensing, 2023]と整合的な結果となることを確認した。今後は解析結果の理論地震動の分析を通じ、長大断層近傍の強震動についての解釈を進める。

謝辞：AFADの強震記録及びUSGSの地表地震断層分布のデータを利用させていただきました。本研究を進めるにあたり、大崎総合研究所の山崎文雄先生、小川幸雄博士、津田健一博士、ドルジャパラム・サロル博士、吉田昌平博士には多くのご助言をいただきました。理論地震動計算は東京理科大学永野研究室のWSを利用させていただきました。図の作成には一部GMTを利用させていただきました。記して謝意を表します。

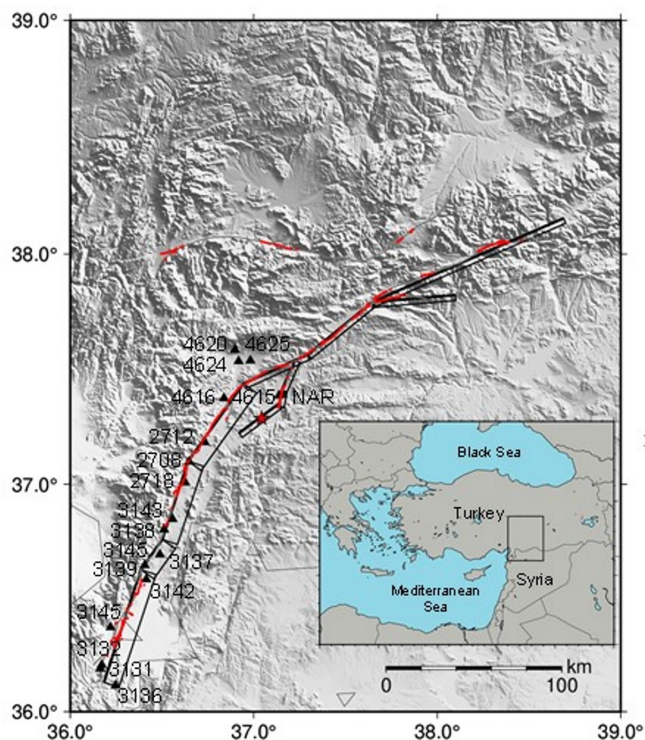


図1 対象観測点と特性化震源モデルの地表投影図

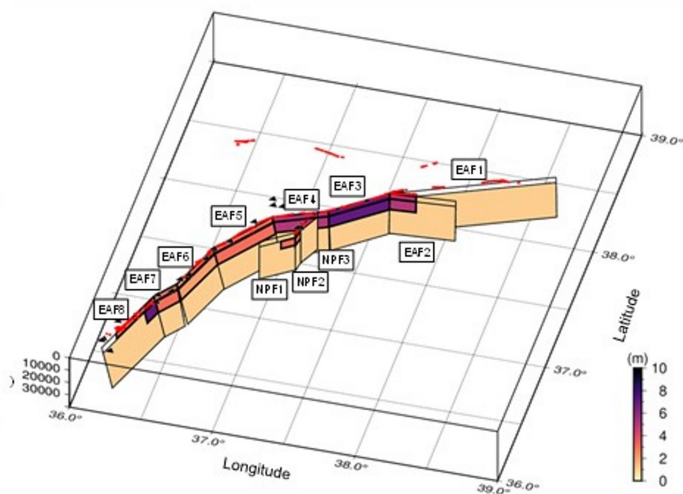
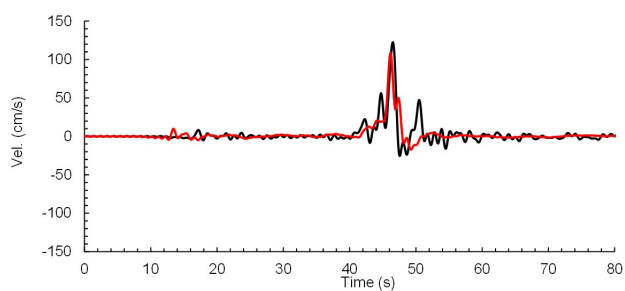
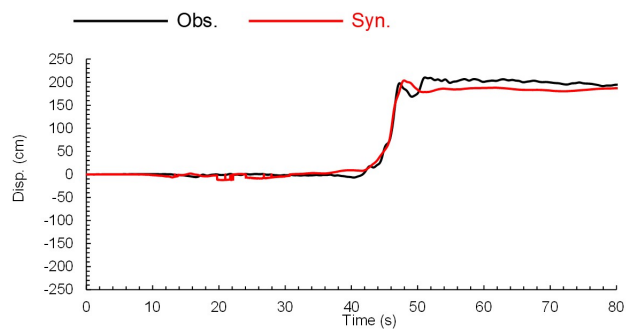


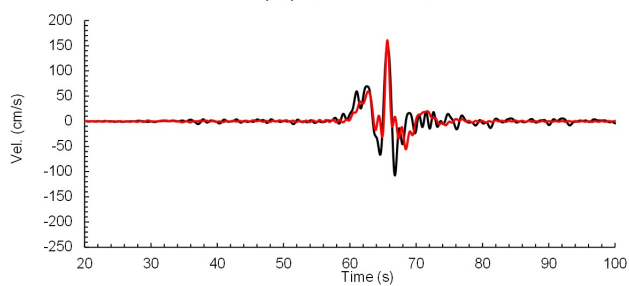
図2 特性化震源モデル



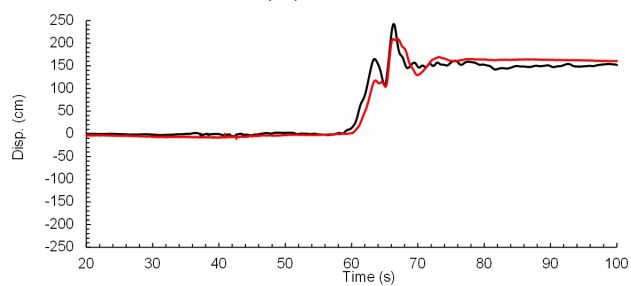
(a1) 2708 NS 速度波形



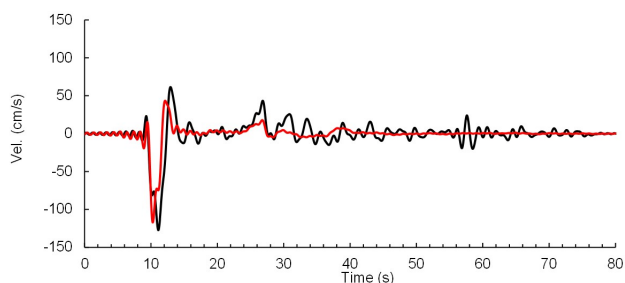
(a2) 2708 NS 変位波形



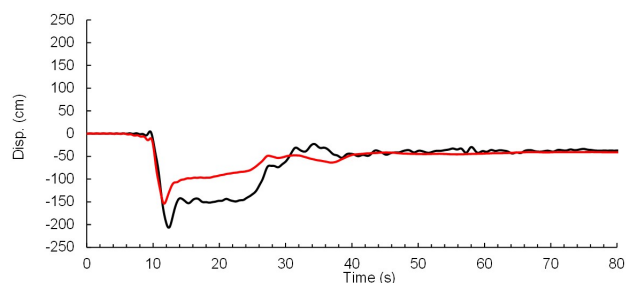
(b1) 3139 NS 速度波形



(b2) 3139 NS 変位波形



(c1) 4615 NS 速度波形



(c2) 4615 NS 変位波形

図3 再現解析の例

Strong Motion Simulation Focused on Rupture Velocity of the 2023 Turkey Subsequent Earthquake (Mw7.6) Based on Characterized Fault Model

*Sei Kanayama¹, Toshimichi kido², Hong Liu¹, Masayuki Nagano¹

1. Tokyo University of Science, 2. OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC.

2023年2月6日10時24分(UTC)頃にトルコ南東部を震源としてMw7.6の地震(エルビスタン地震)が発生した。この地震は2023年2月6日1時17分(UTC)頃に発生した本震(Mw7.7)の後発地震とされている地震であり、本震・後発地震ともに広域で地表地震断層が確認された。本震では東アナトリア断層沿いの南西部で多数の強震記録が得られたものの、後発地震においては断層極近傍での記録は殆ど得られていない。また、Melger et al. (2023)によれば本震では破壊伝播速度が3.2 km/s程度であるが、後発地震においてはチャルダック断層西側で破壊伝播速度がS波速度を大きく上回るスーパーシアとなっていた可能性があるとしている。過去の地震においてもスーパーシアが確認された地震は少なく、そのときの断層近傍等における地震動特性や建物被害との関係を議論することは重要である。本研究では、エルビスタン地震時に得られた断層近傍を含む強震記録を整理するとともに、チャルダック断層の特性化震源断層モデルを構築し、理論地震動計算により断層近傍の観測記録の再現を試みた。この際、震源位置を境にチャルダック断層西側の破壊伝播速度を変化させ、強震記録との対応からチャルダック断層西側で解釈されているスーパーシアと断層近傍地震動との関係について基礎的な検討を行う。

エルビスタン地震の断層活動の特徴としては、震源付近での大きなすべり量や、幅20km、長さ80kmに及ぶ断層のすべりが挙げられる。USGSの震源インバージョン解析によれば、震源付近の最大すべり量は11.5mであり、長大断層のすべりは平均して5, 6m程にもなる。エルビスタン地震で得られた断層極近傍の強震記録は4612のみであるが、比較的断層近傍に位置する0129, 3802, 4406, 4611を加えて速度軌跡の卓越方向について確認した。解析でサブシアとなっている断層東側では断層直交方向に速度パルスが卓越する傾向が見られたが、スーパーシアである断層西側では速度パルスの卓越方向は不明瞭であった。震央からスーパーシア側への走行に沿った速度ペーストアップからは、パルス波が伝播する様子が明瞭に確認できた。また、4612の近傍では地表地震断層が確認されている。該当点については加速度の基線変化補正を行って残留変形を評価し、その値がGNSSの地表変位記録より大きく外れていないことを確認している。

次に特性化震源モデルを用いて、チャルダック断層による理論地震動を評価した。巨視的断層面は、断層モデル上端が極力USGSの地表地震断層に沿うようにして設定した。震源以西の破壊伝播速度の違いによる比較を行うため、チャルダック断層東側に該当するセグメントについては震源を境に2枚のセグメントで構成した。破壊伝播速度 V_r については、Melger et al. (2023)では断層西側では $V_r=4.8$ km/s、東側では $V_r=2.8$ km/sとなっている。今回は、震源より断層西側をスーパーシアとなる $V_r=4.8$ km/sの場合とサブシアとなる $V_r=2.8$ km/sの場合について検討を行い、断層東側は両ケースとも $V_r=2.8$ km/sで統一した。地表地震断層が確認されている地域の浅部はLMGAとして設定し、地表地震断層が確認されていない浅部において断層すべりは発生しないものとした。SMGAについては既往の震源インバージョン解析のすべり分布を参考に設定した。理論地震動計算には断層近傍の地震動評価が可能な三次元薄層要素法を用い、最大振動数は1.0 Hzとした。水平成層地盤構造はGuvercin et al.(2023)を参照し、各断層のすべり速度時間関数は波形の再現性を見ながら設定した。試行錯誤的な特性化震源モデル、すべり速度時間関数の与え方ではあるものの、理論地震動計算に基づく地震動シミュレーション解析によりエルビスタン地震時の強震記録の再現を試みると同時に、破壊伝播速度が断層近傍の地震動特性に与える影響を検討した。

謝 辞

AFAD, ESMによる強震記録、USGSの地表地震断層分布のデータを利用させていただきました。一部図の作成にはGMT4を利用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Using the Empirical Green's Function Method.

*Hidetoshi Kasugai¹, Yoshiaki Hisada¹, Shinya Tanaka²

1. Kogakuin University, 2. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

1. はじめに

我が国では強震観測網²⁾などにより観測記録が蓄積され、近年では長周期成分を含む高精度な記録が得られ始めているが、その記録は十分活用されているとは言えない。経験的グリーン関数法（EGF）は予測可能な周期帯域が小地震のS/N比に依存するため、近年の記録を活用して広帯域の予測も可能である。しかし、EGFは表面波を含む長周期地震動に関する実績が多くない。そこで本研究では、余震記録が豊富な2000年鳥取県西部地震を対象とし、EGFによる広帯域の強震動シミュレーションを行なう。

2. 検証に用いる地震

図1に池田ほか¹⁾によるEGFを用いた2000年鳥取県西部地震の震源モデルを示す。以下ではこのモデル、入倉・釜江(1997)によるEGFを用いて再現を試みる。要素地震として用いる余震は、池田ほか¹⁾が用いた10/17(Mj=4.2, 深さ8km)の余震に加え、震源メカニズムが本震と類似しており、震源が比較的浅い10/8(Mj=5.0, 深さ5km)の余震を用いる。

3. 震源近傍における強震動シミュレーション

まず始めに、震源近傍の本震波形の再現を試みる。震央距離30km以内では、10/17ではSMNH01、10/8ではSMNH02で強震記録が得られている。図2に本震波形と合成波形の比較を示す。10/17では、加速度波形の包絡形状、速度波形のパルス波形の性状をよく再現できている。一方、10/8の余震では、加速度波形は過小評価であるが速度波形の位相や振幅は再現できている。

4. 震源遠方における強震動シミュレーション

次に、震源遠方の本震波形の再現を試みる。図3にHRSH06、SMNH10における本震波形と合成波形の比較を示す。HRSH06において、10/17では低周波数域では過小評価であるが高周波数域では比較的再現が出来る。10/8では低周波数域では比較的再現が出来るが高周波数域では過小評価である。この理由は、やや深い10/17では長周期地震動の励起が弱いことに対して、比較的浅い10/8では短周期地震動の発生は弱い、表面波と考えられる長周期地震動は強く励起しているためだと考えられる。一方、SMNH10では、10/17ではTransverse成分に関して低周波数域で過小評価あり、10/8ではどの成分においても過大評価となっている。SMNH10ではより大きな表面波が本震・余震ともに観測されており、10/8では長周期波形のコヒーレントな重ね合わせにより、過大評価となった原因であると考えられる。なお、10/17のRadial、UD成分に関しては低周波数域まで比較的再現できており、深い余震であっても表面波が含まれていれば広帯域の再現が出来ると考えられる。

5. 要素地震の使い分けによる検証結果の比較

震源が深い10/17では実体波による短周期波形の発生、浅い10/8では表面波による長周期波形の励起が強いことを示した。そこで、深いAsperity1を10/17、浅いAsperity2を10/8として要素地震を使い分けた場合の検証を行なう。図4に要素地震を使い分けない場合、使い分けた場合による本震波形と合成波形のフーリエスペクトル比の平均値を示す。全体の観測点を用いた平均値では、10/17では低周波数域まで1に近い値となっているが、要素地震を使い分けた場合と10/8では低周波数域でやや過大評価となっている。また、震央距離60km以上の観測点を用いた平均値も同様である。しかし、10/17では震央距離60km以内の観測点を用いた平均値では、低周波数域で過小評価となっており、要素地震の使い分けによる有効性を示唆していると考えられる。

6. まとめ

2000年鳥取県西部地震、池田ほか¹⁾による震源モデルを用いてEGFによる広帯域地震動の再現を試みた。その結果、10/17では深いAsperity1からの実体波による短周期波形の再現性が高いが、10/8では浅いAsperity2からの表面波の励起が強く、表面波が卓越する観測点では、要素地震のコヒーレントな重ね合わせにより、長周期成分が過大評価となった。また、深いAsperity1を10/17、浅いAsperity2を10/8とし要素地震を使い分けた場合、10/17と比べて低周波数域で平均値の振幅は大きくなることが明らかとなった。今後は、各観測点の詳細な確認、長周期波形の重ね合わせ方の検討を行なっていく予定である。

謝 辞 本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網による観測波形を使用させていただきました。

参考文献

- 1)池田隆明ほか(2002)：日本建築学会構造系論文集, 第561巻, 37-45
- 2)防災科学技術研究所 強震観測網：<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

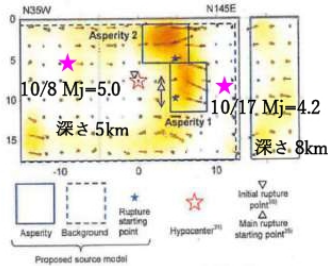
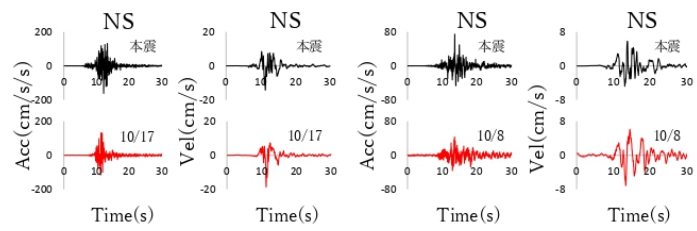
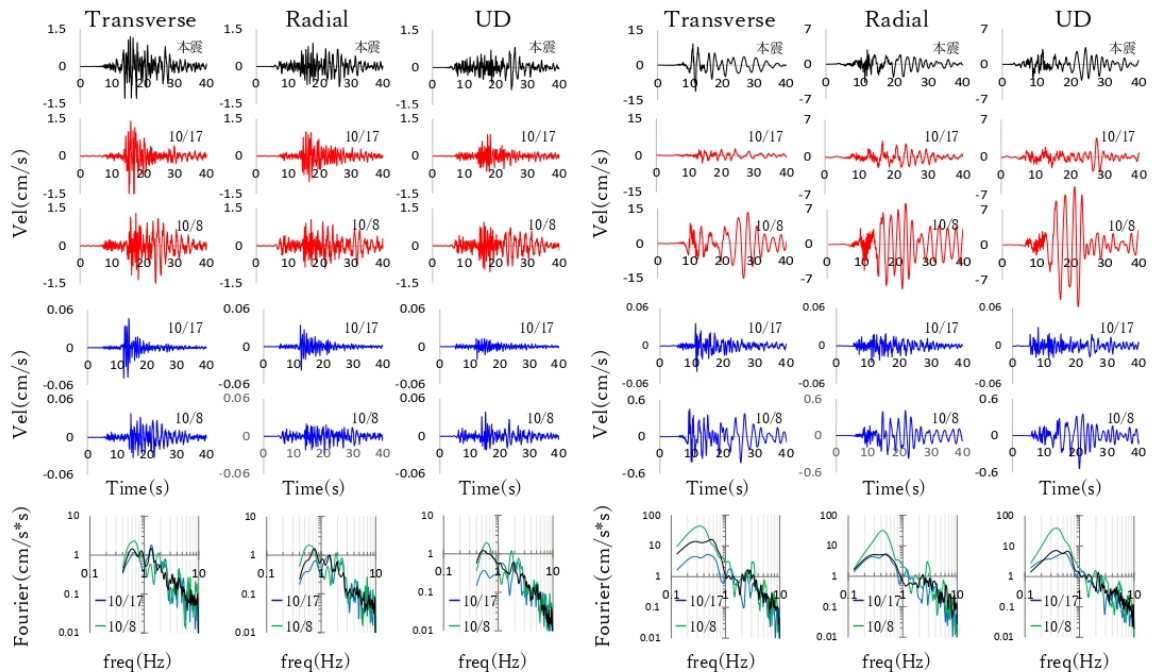


図1 最適震源モデル[池田ほか¹⁾]
より抜粋し一部加筆



(a)SMNH01 (8km) (b)SMNH02 (24km)
図2 震源近傍の検証結果 (—:本震 —:合成)



(a)HRSH06 (56km) (b)SMNH10 (31km)

図3 震源遠方の検証結果 (—:本震 —:合成 —:余震)

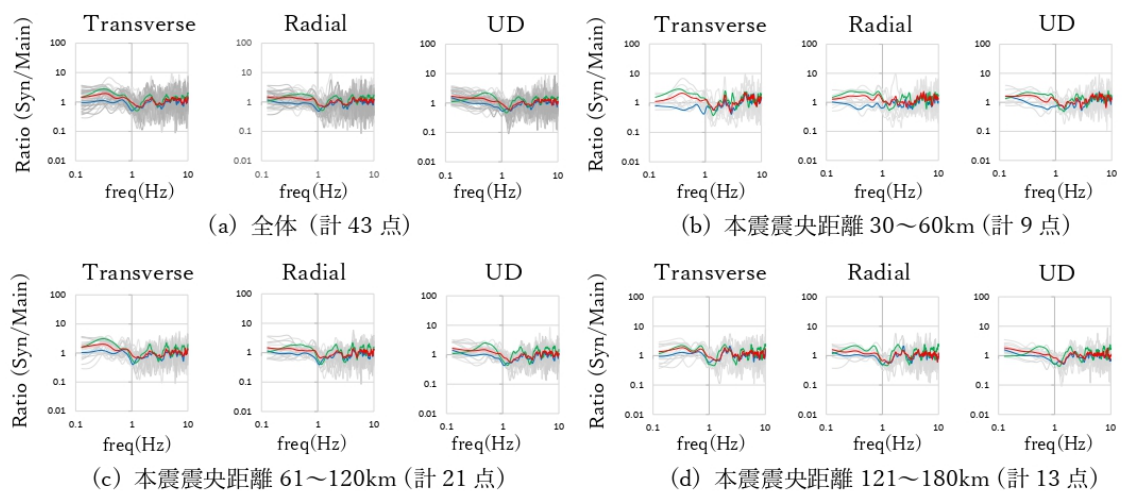


図4 合成波形と本震波形のフーリエスペクトル比 (合成/本震)

(—:使い分けの平均 —:10/17(Mj=4.2)の平均 —:10/8(Mj=5.0)の平均 —:使い分けの算出値)

Study on the Shallow Fault Slip of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake (Mw6.9) Based on Characterized Fault Models

*Atsuko OANA¹, Ken Miyakoshi², Shohei Yoshida², Toshiaki Sato²

1. Shimizu Corporation, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

1. はじめに

2022年9月、台湾南東部においてMw6.9 (USGS[2022]) の地震（以下、2022年台東地震）が発生し、地表に断層が出現するとともに、その断層沿い約2 km程度以内の観測点において、速度波形に長周期パルス（周期約4秒）が、変位波形に永久変位が記録された。

地震調査研究推進本部[2022]は、2016年熊本地震の観測記録に基づき、既往の強震動予測手法の検証を行い、中間報告としてその結果を公開している。その中では、震源断層近傍における長周期パルスや永久変位を再現することを目的として、従来の強震動予測レシピでは考慮されていなかった地震発生層よりも浅い領域に震源断層を拡張したモデルを用いた検討事例が示されるとともに、モデルの改良・高度化のためにはさらなる検討が必要と述べられている。

本稿では、上記の検討の一例と位置づけ、2022年台東地震を対象に、地震発生層以浅を含む特性化震源モデルを用いて震源断層近傍における地震動を計算し、観測記録の再現性への影響について評価する。

2. 特性化震源モデル

台東地域には、南北に並走する西傾斜の中央山脈断層と東傾斜の縦谷断層の二つの主要な活断層が存在する。既往の震源インバージョン結果では、主に中央山脈断層を考慮したもの（USGS[2022], Yagi et al.[2023]）と、中央山脈断層と縦谷断層の両方を考慮したもの（Lee et al.[2023]）が提案されている。後者の場合でも主要なすべりは中央山脈断層に集中していることを踏まえ、ここではUSGS[2022]の震源インバージョン結果を参考にしつつ、断層モデルの上端が地表地震断層（Central Geological Survey[2022]）に概ね沿うように、かつUSGS[2022]の巨視的断層面の範囲を極力尊重するように、2セグメントから成る特性化震源モデルを作成した。

地震発生層以浅の浅部断層すべりが震源断層近傍の地震動に与える影響度合いを評価するため、地震本部[2022]を参考に、3通りの特性化震源モデルを設定した。一つ目はSMGA（Strong Motion Generation Area、強震動生成域）、背景領域、およびLMGA（Long-period Motion Generation Area、長周期地震動生成域）（Irikura et al.[2019]）から成るモデル1（深部+浅部（LMGAあり））、二つ目はモデル1のLMGAを背景領域に置換したモデル2（深部+浅部（背景領域））、そして三つ目は地震発生層以浅の浅部断層を取り除いたモデル3（深部のみ）である。モデル1を図1に示す。特性化震源モデルの各領域のすべり量とすべり角は、USGS[2022]の震源インバージョン結果のすべり分布に基づき平均的な値とした。深部断層のSMGAと背景領域のすべり速度時間関数は中村・宮武[2000]の近似式とし、与条件として必要となる応力降下量は強震動予測レシピ（地震本部[2020]）に従い仮定した。浅部断層のLMGAと背景領域のすべり速度時間関数はSmoothed ramp関数とし、そのライズタイムは震源近傍記録におけるベル型の速度パルス幅から設定した。破壊開始点はマルチハイポセンターとし、破壊伝播様式はそれぞれのセグメントで同心円状を仮定した。破壊伝播速度は2.1 km/sで均質とした。

3. 地震動評価結果

波数積分法（Hisada and Bielak[2003]）を用いて理論地震動を計算した。地下構造モデルには、Huang et al.[2014]の北緯23.3度、東経121.32度における速度構造モデルを用いた。地震動評価結果には0.5 Hzのローパスフィルタをかけた。地表地震断層から約200 mに位置するEYUL（玉里）における観測記録と計算結果の比較を図2に示す。モデル2とモデル3は全体に過小評価であり、観測記録に見られる特徴的な速度パルスや永久変位を再現できていない。一方、モデル1は、周期特性などの再現精度には課題が残るものの、地震動レベルは観測に近づいており、浅部断層のLMGAの寄与が大きいことが窺える。

以上より、2022年台東地震においても、震源断層近傍の観測記録を再現するためには、地震発生層以浅に震源断層を拡張する必要があること、浅部断層のすべり量は背景領域と同等では必ずしも十分ではない場合があることが確認された。

謝辞：台湾中央気象局のTaiwan Geophysical Database Management System GDMS-2020で公開されている強震観測網CWBSN、TSMIPの加速度時刻歴データを利用させて頂きました。工学院大学久田嘉章教授が研究室WEBサイトで公開されている波数積分法のプログラムを使用させて頂きました。

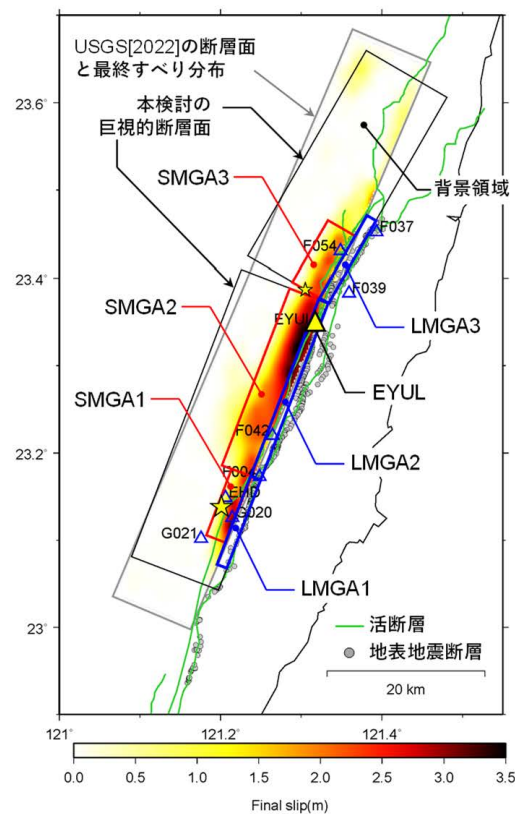


図1 特性化震源モデル（モデル1）

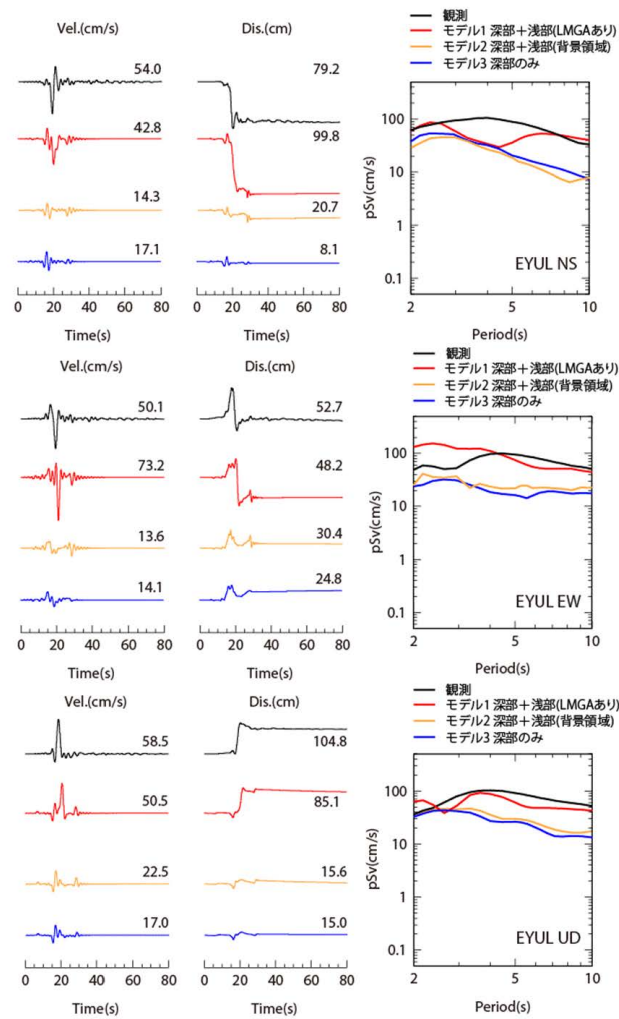


図2 震源断層近傍の観測点EYUL（玉里）における観測記録と計算結果の比較

Room D | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

📅 Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 4:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 Room D F204

[S15] PM-2

chairperson: Takashi Hirai (University of Hyogo)

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

[S15-17] A Study on Behavior of Japanese Swords on Display during Earthquake Based on Vibration Experiment

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO³, Jun TOBITA³ (1. University of Hyogo, 2. Token Corporation, 3. Nagoya University)

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

[S15-18] Improvement of ground motion prediction equation by non-ergodic approach considering regional characteristics

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

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

[S15-19] Differences in site amplification for each plain based on the ground motion prediction equation

*Hiroto Tanaka¹, Ritsuko S. Matsu'ura², Mitsuko Furumura², Tsutomu Takahama¹ (1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction)

A Study on Behavior of Japanese Swords on Display during Earthquake Based on Vibration Experiment

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO³, Jun TOBITA³

1. University of Hyogo, 2. Token Corporation, 3. Nagoya University

地震災害への対策を考えるうえでもっとも優先されるのは人命の保護であるが、人類が長い時間をかけて創造し守り伝えてきた文化財についても、損傷を極力防止しなければならない。これを破損することなく次代へ伝えることが、復興後の地域や国家ひいては人類全体の文化水準の維持と向上に資することになる。

著者らは、文化財の中でも特に日本刀をはじめとする刀剣類について、その展示状態における地震時の挙動と損傷防止のための方策について検討してきた。多くの場合、刀剣類は刀掛けの上に寝かせる形で展示される。地震時に跳躍、落下、あるいは他の展示物と衝突することにより刃こぼれが、また刀掛けの上で滑動することによりひけ疵（ひっかき傷）が生じるおそれがある。刀剣類は一般的な文化財と異なり、刃物であるためテグス等による固定が不可能であることに加え、個人所有のものが多いため建物の免震化や展示用免震台の調達が費用面で難しいことが多い。それゆえ、安価に実施できる工夫や、刀掛けへの免震機構の組み込みなどが望まれる。これまでに、模造刀を用いた振動実験により、刀掛けの種類や白布の有無による挙動の違い、水平方向の正弦波加振による刀身の滑動の様子、刀掛けと刀身との摩擦係数等を明らかにしてきた [1] [2]。

本研究では、これまでの検討を踏まえて、3次元の非定常的な地震動に対する刀身の挙動を把握することを目的として、詳細な振動実験を行った。

図1に実験の様子を示す。試験体となる模造刀の設置条件として、3種類を設定した。写真の左手前側より、(1) 刀掛けの上に白布を介して刀身を載せたもの、(2) 刀掛けの受け部分に簡単なクランプを設置して刀身を固定したもの、および (3) 受け部分にウレタン素材を用いて摩擦係数とクッション性を向上させた展示ケースに刀身を設置したものである。いずれも刀掛けと展示ケースは振動台に固定した。各模造刀の両端に3軸加速度計を設置し、振動台に設置した加速度計との比較から、刀掛けに対する刀身の相対的な動きを測定した。加振内容としては、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での強震記録、2004年新潟県中越地震のK-NET小千谷での強震記録、2016年熊本地震本震のKiK-net益城での地表強震記録、および想定南海トラフ地震による愛知県での地震動を入力した。

実験の結果、試験体2と3については刀掛けと刀身との相対的な動きはほとんど生じなかった。ただし、試験体3においては、刀身が受けの上で前後方向にわずかに揺れる挙動が見られた。試験体1については、刀身が刀掛けの上で長さ方向に大きく滑動し、ほとんどの加振ケースで最終的に刀身が落下した。一方、刀身の刀掛け上での跳躍や、前後方向に振動して落下する現象は見られなかった。これは、入力した地震動の下向きの加速度が1 Gを超えなかったことと、白布やウレタン素材によるクッション性が作用した結果と考えられる。建物内での展示の場合には上下動よりも水平動が卓越するため、損傷要因となりうる現象としてもっとも発生しやすいのは長さ方向の滑動であることが分かる。

今後、刀身の動きを力学モデルによって表現し、シミュレーションを援用して地震時の損傷を効果的に防止する方策について検討する。また、本実験での試験体2と3についてはおおむね刀身は無事であったが、これは地動入力に対しての結果であり、建物応答に対しての安全性は不明である。この点も、今後の課題である。

謝辞

本研究の実施にあたり、名城大学の武藤厚教授の御厚意により振動台設備を使用させていただいた。また、刀箱師の中村圭佑氏より展示ケースの試験体を制作、提供いただいた。それぞれ、謝意を表する。

参考文献

- [1] 平井敬, 手塚朋子, 高野美希: 展示状態の文化財の地震時損傷防止に関する検討 ―日本刀の振動実験―, 日本地震学会2022年秋季大会, C000212 (2022)
- [2] 手塚朋子, 平井敬, 高野美希, 山田銀河: 日本刀を事例とした文化財の地震時損傷防止対策, 日本ミュージア

ム・マネジメント学会研究紀要, 27, pp.49-57 (2023)

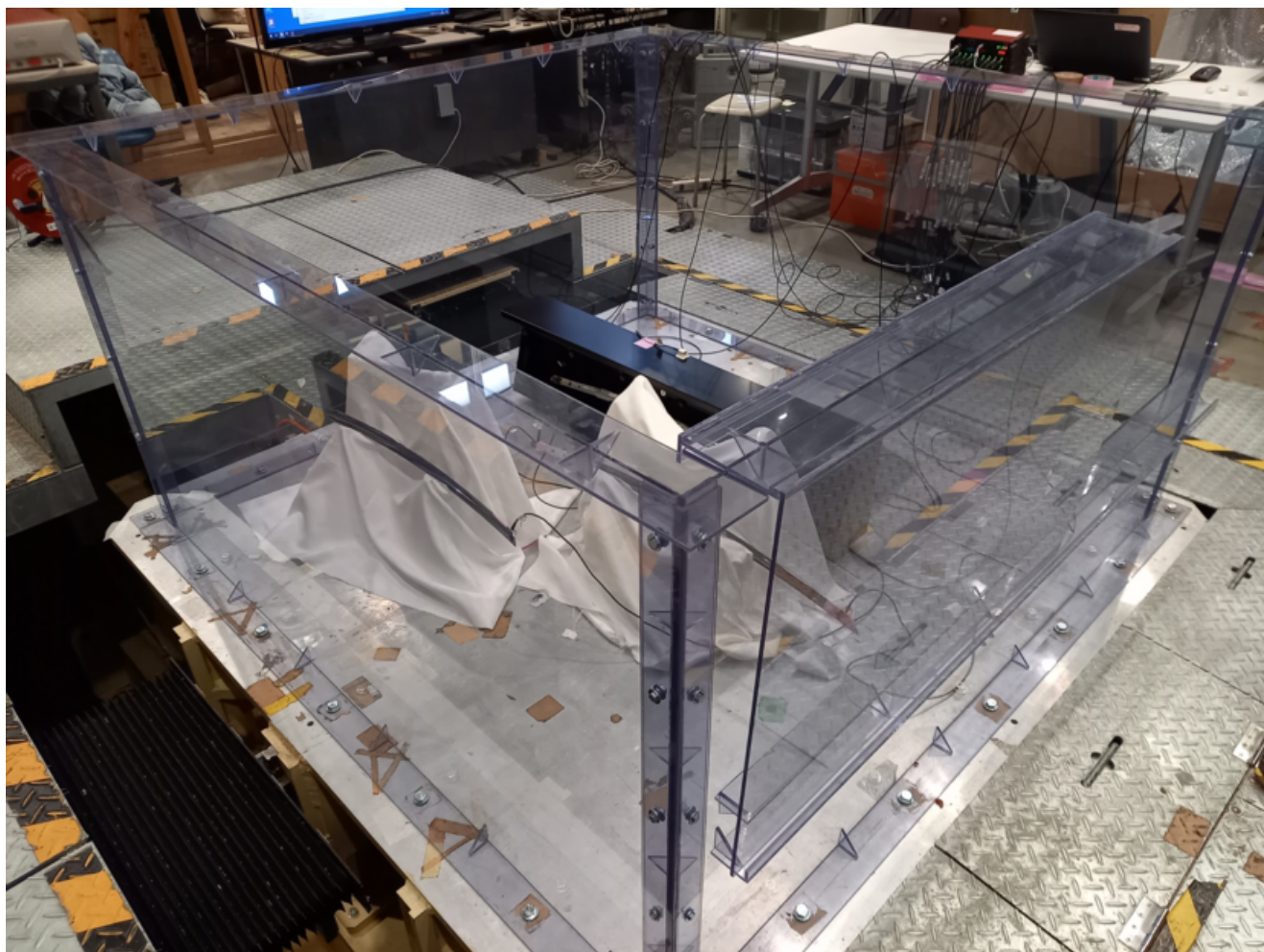


図 1 振動台実験の様子

Improvement of ground motion prediction equation by non-ergodic approach considering regional characteristics

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

日本列島及びその周辺における3次元的な地震波減衰（Q値）構造が複雑であることが明らかとなりつつある。地震動予測においてこのような複雑な伝播経路特性が適切に考慮されることは、ばらつきや不確実さの低減に必要不可欠である。具体的な例として、北海道のえりも岬周辺では短周期（高周波数）地震動の減衰に関してLow-Q構造が比較的狭い範囲で推定されており、森川ほか（2004；防災科学研究資料）でもえりも岬付近の3地点のみ観測された地震動の短周期成分を説明するためには、局所的なLow-Q領域の設定が必要とされている。近年における膨大な数の地震動記録の蓄積により、3次元的なQ値構造の推定における解像度の向上や、非エルゴード的な地震動予測モデル構築の検討などが進められつつあるが、伝播経路特性が十分に分離（抽出）されているとは現状では言い難い。一方で我々は、地震動予測式による予測値と観測値との残差を地震ごとのばらつきと観測点ごとのばらつきに分離し、それらをそれぞれ「補正項」とすることで地震動予測のばらつきを低減できることを示している（Morikawa et al., 2008; Journal of Seismology）。本検討では、特定の震源域で発生した地震による観測値と地震動予測式（Morikawa and Fujiwar, 2013; Journal of Disaster Research）による予測値との残差のばらつきの分離を行い、その結果に基づいて地域性地震動予測モデルに拡張することを試みる。Morikawa et al. (2008)では6つの震源域にのみ適用したが、その後の蓄積されたデータと規模の小さな地震の記録も用いることで、より多くかつ狭い震源域を対象とできることが期待できる。本検討によって地域的な地震動予測式の構築が可能となれば、既存の他の地震動予測式にも適用できる。

Differences in site amplification for each plain based on the ground motion prediction equation

*Hiroto Tanaka¹, Ritsuko S. Matsu'ura², Mitsuko Furumura², Tsutomu Takahama¹

1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction

1. はじめに

地震調査研究推進本部による全国地震動予測地図では、これまで主に最大速度や震度を指標とした地震動ハザード評価が行われてきたが、近年、工学的利活用のために応答スペクトルを指標とした評価に向けた検討が進められている。超高層建築物や免震構造は大都市の平野部に集中しており、これらの構造物の評価に重要となる長周期側の応答スペクトルの推定精度を高めるためには堆積盆地構造による地盤増幅を適切に考慮することが重要である。

地震動ハザード評価に用いられている既往の地震動予測式（例えば、Morikawa and Fujiwara, 2013やNGAプロジェクト）では長周期側の地盤増幅を考慮するために、観測点直下の堆積層の厚さをパラメータとした補正項が提案されている。しかし、堆積盆地における地盤増幅は3次元的な構造の影響を受けるため、堆積層の厚さだけでなく平野の規模や地層構成も地盤増幅に関係すると考えられる。本研究では、地震動予測式と観測値の残差を分析し、平野毎の地盤増幅の違いについて検討した。

2. 回帰分析

観測点毎の地盤増幅特性を抽出するために、震源特性と伝播特性のみに対して地震毎に地震動予測式の回帰分析を行った。Matsu'ura et al.(2020)の地震動予測式の構築に用いられた地震のうち、概ね100観測点以上の観測記録が得られている85地震の27,957記録を対象とし、地震動予測式は次式のモデルを用いた。

$$\log_{10} Sa = A - b \Delta - \beta \log_{10} \Delta - d \min[\delta, 250]$$

ここで、 Sa は水平動の加速度応答スペクトル（ $h=5\%$ ）としてRotD50[cm/s²]（Boore, 2010）を用い、周期0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0秒の5点を対象とした。 Δ は断層最短距離[km]、 δ は観測点直下のプレート上面までの深度[km]である。 A, b, β, d は回帰係数であり、地震タイプや減衰傾向を鑑みて地震毎に回帰する係数の組み合わせを調整した。地震毎の地震動予測式の回帰分析によって得られた観測値との対数残差を観測点毎に平均することで、観測点毎の地盤増幅特性を算出した。

次に、地盤増幅の平野毎の違いや、浅い地盤構造と深い地盤構造の周期による影響度の違いを明らかにすることを目的に、5記録以上得られている1,606地点の観測点毎の地盤増幅特性（観測値との残差の平均）について回帰分析を実施した。具体的には、 V_{s30} と D_{1400} をパラメータとした次式のモデルで、浅部の補正項（第1項）と深部の補正項（第2項）を同時に求めた。

$$\text{Residual} = g_v \log_{10}(\min[V_{s30}, V_{th}]/V_0) + g_D \log_{10}(\max[D_{1400}, D_{th}]/D_0)$$

ここで、 V_{s30} はPS検層結果を基に翠川・野木(2015)の方法で推定した地表から30mの平均S波速度[m/s]、 D_{1400} は防災科学技術研究所J-SHISの深部地盤構造モデル（V3.2）においてS波速度が1400m/s以上となる深度[m]である。データセットの分布を鑑みて $V_{th}=1000\text{m/s}$ 、 $V_0=350\text{m/s}$ に固定した。 g_v, g_D, D_0 は回帰係数であり、 D_{th} はグリッドサーチにより求めた。

3. 結果

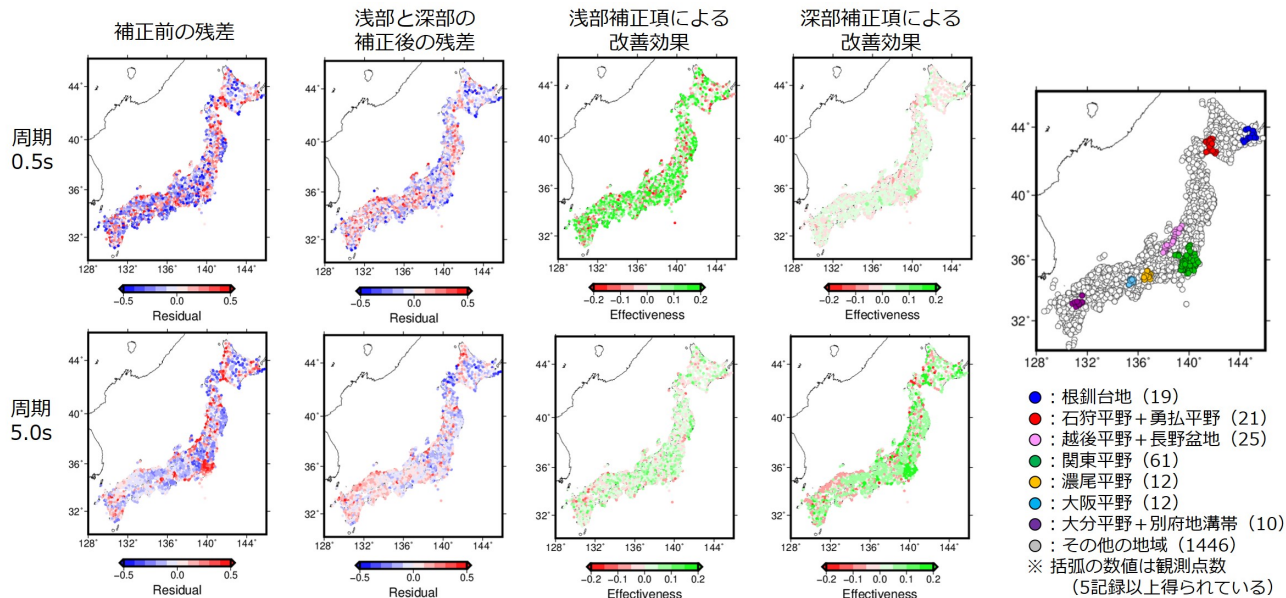
地盤補正項による残差の変化について、図1に周期0.5秒と5.0秒の例を示す。補正項による残差の改善が確認でき、短周期側の周期0.5秒は浅部の補正項による改善効果が、長周期側の周期5.0秒は深部の補正項による

改善効果がそれぞれ大きい傾向が見られている。浅部と深部の改善効果の大小は、周期1～2秒程度で入れ替わることが確認された。なお、中国地方では2秒以上の長周期側において深部の補正項により残差が悪化した。これは、中国地方は堆積層が薄くD1400が小さいため補正は応答を小さくする側に働くが、実際は表面波の卓越により観測の応答が大きいことが要因として考えられる。

本研究ではD1400の分布を参考に図2に示す7地域の平野（盆地・台地を含む）に着目し、地域間での残差の違いを確認した。図3に補正項の適用前後の残差を地域毎に平均して周期毎に示す。水色で示す大阪平野では周期2秒以上において、補正前の残差が他の地域に比べて大きい。補正項による改善効果は見られるが、他の地域に比べて効果が十分とは言えない。一方、青色の根釧台地では周期1～3秒において、補正前の残差が他の地域に比べて小さく、補正項により残差が悪化する場合がある。このことは、地域によってVs30やD1400と地盤増幅の関係性（補正項の傾き）が異なる可能性を示唆しており、地域毎の特性を考慮した地震動予測式の構築に向けて今後さらなる検討を進めたい。

4. 謝辞

本研究は「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一部として文部科学省からの委託によって実施しました。防災科学技術研究所の観測記録を利用しました。図の作成にはGMTを用いました。ここに記して感謝いたします。



左図: Residual = 観測値 - 予測値

右図: Effectiveness = 補正前残差の絶対値 - 補正後残差の絶対値

図1 観測点毎の残差と改善効果 (上段: 周期0.5s、下段: 周期5.0s)

図2 着目した平野 (盆地・台地を含む)

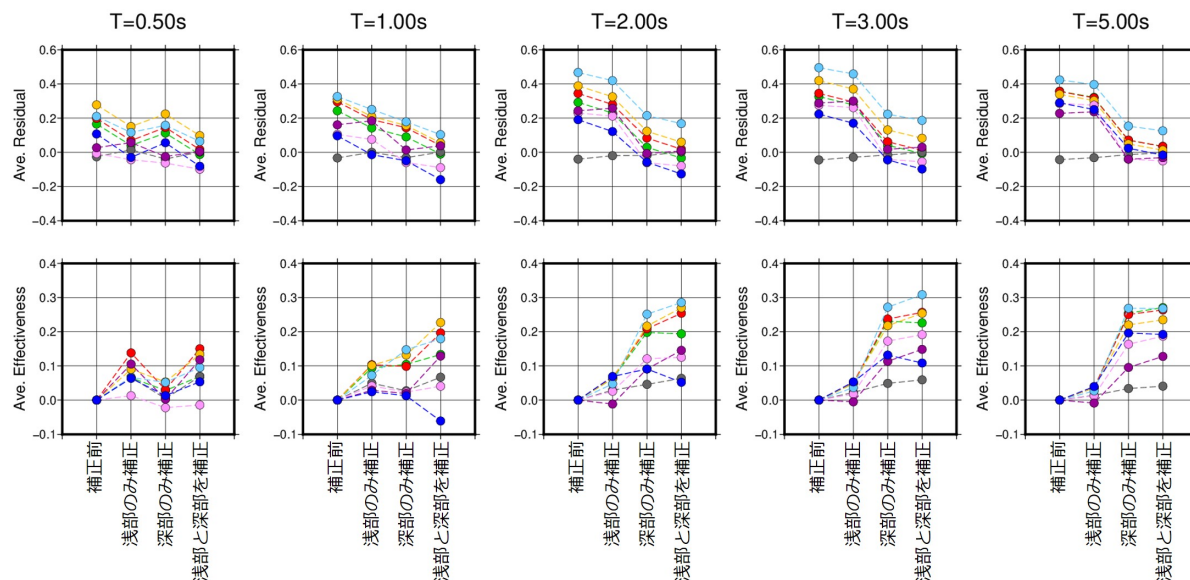


図3 平野毎の平均残差 (上段) と改善効果 (下段)

Room D | Regular session : S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

📅 Wed. Nov 1, 2023 4:00 PM - 4:45 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 7:00 AM - 7:45 AM UTC | 🏢 Room D F204

[S16] PM-2

chairperson: Ikuo Cho (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S16-01] Peak-frequency map of horizontal-to-vertical spectral ratios in the Kanto region:

Addition of content to the Urban Geological Map

*Ikuo CHO¹, Shigeki Senna², Susumu Nonogaki¹, Tsutomu Nakazawa¹, Junko Komatsubara¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S16-02] Estimation of Shallow Structure Along the Hinagu Fault Using Seismic Wave

Interferometry in DAS Observations of National Route 3

*Satoru Hamanaka¹, Kentaro Emoto² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Faculty of Science, Kyushu University)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S16-03] Comparative Analysis of Ground Motion Monitoring Performance through DAS Test Observations Using Multiple Instruments

*Hiroyuki FUJIWARA¹, Hiromitsu Nakamura¹, Takashi Kunugi¹, Shohei Naito¹, Shigeki Senna¹, Masato Sato¹, Ken Sakurai², Chisato Konishi², Haruhiko Suzuki², Masaki Takebe³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corporation, 3. Mitsubishi Electric Software Corporation)

Peak-frequency map of horizontal-to-vertical spectral ratios in the Kanto region: Addition of content to the Urban Geological Map

*Ikuo CHO¹, Shigeki Senna², Susumu Nonogaki¹, Tsutomu Nakazawa¹, Junko Komatsubara¹

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

産業技術総合研究所（産総研）地質調査総合センターは、経済産業省の知的基盤整備計画に基づき、3次元（3D）地質地盤図を整備している。3D地質地盤図は、従来の平面の地質図では表現が難しかった都市部の地下の地質構造を、大量のボーリングデータを利用した3Dモデリングによって立体的に可視化したものである。地下数10 mまでの地質構造を立体図や任意の箇所の地質断面図として表示できる機能を有する。地震防災・減災やインフラ整備、地質汚染対策への利活用を見込み、産総研のウェブサイト「都市域の地質地盤図」<https://gbank.gsj.jp/urbangeol/>で誰もが無償で閲覧可能となっている。

3D地質地盤図構築のプロジェクトは2011年東北地方太平洋沖地震をきっかけとして着手され、2018年に首都圏のモデル地域としてまず千葉県北部地域（柏～成田～船橋～千葉近辺）、2021年に東京都区部が公開された。今後は対象地域を拡大し、最終的には首都圏主要部を覆う予定である。

一方、防災科学技術研究所（防災科研）は、ほぼ同時期に関東地域のリアルタイム地震被害推定用の地盤モデルを構築した（藤原他、2019）。その際、膨大な量の常時微動観測が行われ、その結果は地盤モデルの基礎データの1つとされた。具体的には、関東地域の平野部で面的にほぼ5 km間隔（半径数十～400 mの大アレイ）あるいは首都圏でほぼ1 km郊外で2 km間隔（半径0.6～10 mの極小アレイ）で微動アレイ観測が実施された。

我々は、上述の微動データと産総研独自の微動データを基礎として、H/Vスペクトルのピーク周波数を評価し、3D地質地盤図のコンテンツとすることを計画している。H/Vスペクトルのピーク周波数は地盤の卓越周期として把握され、耐震設計のための地盤種別判定、地震災害軽減のための地震ゾーニングあるいは地震動増幅特性の評価にも用いられている。地質構造と地盤構造として地盤震動特性は互いに密接に関連するので、我々は、H/Vスペクトルのピーク周波数マップを作成して3D地質地盤図と比較できる環境を構築し、誰でも自由に閲覧できる仕組みを提供するという立場で、地震防災・減災意識の啓発や地盤モデルの高度化に寄与することを目指している。

本発表ではまず3D地質地盤図について説明する。次に、微動のH/Vスペクトルのピーク周波数を決めるためのピークの同定手順を説明する。最後に、ピーク周波数の空間分布をシームレスマップ化し、地形・地質との対応を例示する。

例えば、一般的に期待される通り、大河川の河口付近の低地では、ピーク周波数が低い一方、その周辺の台地では周波数が高い傾向があることが分かる。東京都区部を例にとると、3D地質地盤図では沖積層の基底に相当する埋没地形（埋没谷底、埋没平坦面1～4）が詳細に描き出されている。これとH/Vスペクトルのピーク周波数マップを対応させると、沖積層が厚く分布する湾岸域の埋没谷軸部の周辺ではピーク周波数が低く1 Hz以下となることが分かる。

武蔵野台地においては、3D地質地盤図では、従来「東京層」と一括りにされていた地層が堆積サイクルに基づき3層（下位より藪層、上泉層、東京層）に区分された。このうち藪層、上泉層の海成砂層が分布するところではピーク周波数は5 Hz以上となることが多いことが分かる。3D地質地盤図には台地下でも谷状に軟弱泥層（東京層下部）が分布する領域があることが示されているが、この谷埋め泥層の分布域の一部は1 Hz程度の低周波数領域に対応することが分かる。また、台地内の所々にピーク周波数が低いところがあり、それらの一部は谷底低地に対応することなども確認できる。

その他、埼玉県東部の旧利根川の流路沿いの中川低地に1 Hzあるいはそれ以下の明瞭な低周波数領域が南北に連続する一方、江戸時代以降の治水工事で流路変更した現在の利根川沿いには低周波数の卓越が目立たないことなども分かる。むしろ旧鬼怒川の流路である現在の小貝川低地（茨城県つくばみらい市～竜ヶ崎市の河内町付近）で明瞭な低周波数領域が観察される。また、西方では、多摩川の河口付近から上流側に遡るにつれて河川沿いに堅固な地盤となりむしろ周辺の台地よりもピーク周波数が高くなる傾向が現れることが分かる。

以上のように、3D地質地盤図にH/Vスペクトルの情報を追加することで、多くの興味深い事実が一見して明らかとなっている。地形・地質と地盤震動特性との関係が「見える化」され、専門家、研究者の詳細かつ定量的な分析に寄与することはもちろんのこと、一般のユーザーにとっても防災教育・啓発的な意味合いで寄与できるようになると期待する。

藤原他：全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発，防災科学技術研究所研究資料，第432号,65p, 2019.

Estimation of Shallow Structure Along the Hinagu Fault Using Seismic Wave Interferometry in DAS Observations of National Route 3

*Satoru Hamanaka¹, Kentaro Emoto²

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Faculty of Science, Kyushu University

浅部の地下構造をイメージングすることは、建築計画や地下空間の利用といった、都市開発を進める上で非常に重要である。特に断層付近の地域等では、地盤の崩落や地震動の増幅によって大きな被害を受ける可能性があり、浅部構造の情報が地盤特性を評価するために必要である。浅部構造推定のために微動探査が一般に行われているが、広範囲での実施には多大な労力が必要であり、市街地での観測も難しい。近年、光ファイバーケーブル自体をセンサーとしてある場所での歪および歪速度を時系列で測定する、Distributed Acoustic Sensing (DAS) が地球科学分野において観測手法として普及している。DAS観測は低コストかつ超高密度で多点観測を行え、市街地でも既存ケーブルを利用して実施できる利点がある。例えば、火山性地震の震源決定やサイト特性の評価 (Nishimura et al., 2021) や、都市部での浅部イメージングや交通ノイズ検知 (Song et al., 2021)、断層帯のイメージング (Yang et al., 2022) など様々な研究にDASによる観測が利用されている。

本研究では2023年2月から3月までの約1ヶ月間、国土交通省熊本維持出張所にSilixa社のインテロゲーター (iDAS) を設置し、南方向の国道3号線に沿って国土交通省八代維持出張所まで約40kmの光ファイバーケーブルに接続し、DAS観測をおこなった。チャンネル間隔は4 m、ゲージ長は10 m、サンプリング周波数は400 Hzとし、総チャンネル数は9984チャンネルであった。期間中、22個の地震を観測することができた。しかしイベントの規模が小さいこと、そして国道を通る車両のノイズが多く含まれていたため、雑微動を用いて地下構造を推定する。

観測されたデータから日奈久断層沿いにあるチャンネル区間において、昼の時間帯 (13時から15時) の3時間分のノイズ記録を用いた。まずデータはトレンドを除去し、1-30 Hzでバンドパスフィルタをかけ100 Hzにリサンプリングした。次にそれを10分間の時間窓で分割し、波形の1ビット化、スペクトルホワイトニングをした後、相互相関関数を計算し、最後に時間窓毎の相互相関関数を位相重み付けスタッキング (PWS) した。しかし、この通常の地震波干渉法のデータ処理では、非一様・非定常なノイズ源分布により安定した相互相関関数を得ることが難しかったため、さらにTSI法 (Three-Station Interferometry) を採用した。TSI法は3つの観測点を使用し、1点を仮想震源、他2点を観測点とした相互相関関数を用いて、繰り返し地震波干渉法を適用し、抽出される表面波のSN比を向上させる手法である (Curtis and Halliday 2010, Song et al., 2022)。TSI法で計算した相互相関を使用し、表面波マルチチャンネル解析により分散曲線を推定した。推定した分散曲線から波長が36 mの時のレイリー波位相速度を求め、経験式 (Brown et al., 2000) に基づき表層30 mの平均S波速度を示す V_{s30} を導出した。

TSI法を適用した結果、元の相互相関関数よりSN比が向上し、長距離まで表面波を抽出することができた。TSI法は繰り返し適用することが可能であるが、1回だけで十分な結果が得られた。推定した V_{s30} は、およそ360 m/sであり、J-SHISの表層地盤のデータとほぼ整合的であった。区間によって V_{s30} の変動が見られたが、この詳細に関しては誤差評価を含め、さらに解析をする必要があると考えられる。

TSI法を用いても、表面波の抽出が困難な区間もあり、今後はノイズ源の考察や解析手法の向上を行い、測線全体における浅部構造の空間分布を推定する予定である。

(謝辞) 今回の観測にあたりまして、国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所のご協力のもと、国土交通省所有の光ファイバーケーブルを使用させていただきました。

Comparative Analysis of Ground Motion Monitoring Performance through DAS Test Observations Using Multiple Instruments

*Hiroyuki FUJIWARA¹, Hiromitsu Nakamura¹, Takashi Kunugi¹, Shohei Naito¹, Shigeki Senna¹, Masato Sato¹, Ken Sakurai², Chisato Konishi², Haruhiko Suzuki², Masaki Takebe³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corporation, 3. Mitsubishi Electric Software Corporation

光ファイバDASと微動探査の融合による高密度・高精度な広域での詳細地盤モニタリングのための基礎的な基盤技術を開発することを目指し、既存の光ファイバや地震観測施設を利用することにより、光ファイバDASによる地盤モニタリング技術、長期間連続モニタリング技術、及び、微動探査や地震波干渉法と融合した解析手法の開発に着手した。地震災害を低減する上で、大都市が立地する堆積平野の地震動特性を高精度に予測することは極めて重要である。防災科研では地震動予測のための地盤モデル高度化を進めており、開発された全国250mメッシュの地盤モデルは地震ハザードステーション (J-SHIS) を通じて公開されている。しかし、現行モデルでは地盤の不均質構造の細部を再現できているとは言い難く、空間分解能のさらなる向上が期待されている。一方、近年では通信用に敷設されている光ファイバケーブルを活用し高密度な歪計測を行う

DAS (Distributed Acoustic Sensing) が注目されている。この技術を用いて既設の光ファイバケーブルをセンサーとして利用した計測を行うことにより、地盤の振動特性を10m以下の高分解能で把握することができれば、従来の強震観測記録や微動アレイ探査等に基づいて構築された地盤モデルの空間分解能を飛躍的に向上させることが期待される。本研究では、研究の第一段階として、地盤モデルの高度化に資するデータ取得・解析技術開発を目的に、シングルモード、マルチモードを含めた複数種類のケーブルおよび複数のインテロゲータを利用してDASによる試験観測を行い、常時微動観測記録との比較などにより複数の機材を用いたDAS試験観測での地盤振動モニタリング性能の比較を行った。

茨城県つくば市内の試験フィールドにおいて、シングルモードの通信用ケーブルおよびひずみ計測用ケーブル各2種類、およびマルチモードの通信用ケーブルを含め計5種類の光ファイバケーブルによる計測を行った。4種類のシングルモードケーブルは同じ長さのものを融着により連結して1本にした後、縦25m、横105m、深さ30cmに掘られたL字の溝に沿って敷設し、ケーブル連結部で折り返して各種のケーブルがL字状に配置されるようにした。シングルモードケーブルの長さは、計測小屋のインテロゲータに接続するための延長ケーブル20mと合わせ、約620mである。また、マルチモードケーブルはケーブル長約500mのものを使用し、折り返しにより同じ位置を3回通過するようにした。これらのケーブルは保護管無しで敷設後、現地発生土で埋め戻しを行った。DAS計測のためのインテロゲータは計測小屋内に設置し、ケーブル端に接続したコネクタの差し替えによりシングルモード、マルチモードを切り替えて計測を行った。また、インテロゲータは異なる3社の製品X、Y、Zを利用し、同一の観測を行った。なお、X、YとZでは出力形式が異なるが、動的な変化である地震動評価にあたってはひずみ速度を計測する方が適していると考え、ひずみ速度に変換した上で比較した。観測期間は各インテロゲータにおいて24時間以上の連続する期間とし、かけやによる起振や常時微動観測等を行った。比較用として光ファイバのL字測線の長軸方向に沿って20台の微動計を5m間隔で設置し同時測定を行った。DASで出力されるひずみ速度と比較するために、隣同士の微動計速度記録の空間差分を微動計間の距離で除すことによりひずみ速度に変換した。微動計の記録と比較した結果、いずれのケーブル・インテロゲータにおいても約1~2Hz以上の周波数帯域においては、常時微動を利用した位相速度の推定等に活用可能であることが確認された。

さらに、高感度地震観測施設 (Hi-net) 真岡観測点における鉛直ボーリング坑 (深さ約1,648m) における既設のマルチモード光ファイバを3種類のインテロゲータに接続し、それぞれ約24時間ずつ試験観測を行った。また、相模湾地震観測施設の海底ケーブルにおける総延長約120kmの既設光ファイバを利用し、2種類のインテロゲータによる計測をそれぞれ約2日間実施した。

謝辞 本研究は、防衛装備庁「安全保障技術研究推進制度」の支援を受けて実施されました。