

Thu. Nov 2, 2023

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

9:15 AM - 10:30 AM JST | 12:15 AM - 1:30 AM UTC | Room A F205+206

[S09] AM-1

chairperson: Takao Kumazawa, Ritsuko Matsuura

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S09-09] Space-time changes of the Noto Peninsula Earthquake by the Point Process Models

*Takao KUMAZAWA¹, Ogata Yosihiko¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-10] A hypocentral version of the spherical space-time ETAS model

*Yongbo Li¹, Jiancang Zhuang², Shi Chen¹ (1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2. The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems)

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

[S09-11] Estimation of actual activity rate changes based on seismic catalogs with systematic missing measurements

*Yosihiko OGATA¹, Takao Kumazawa¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-12] The present status of the seismicity off the southeast coast of Hokkaido, where the relative quiescence started more than a decade ago

*S. Ritsuko MATSU'URA¹, Takeo Ishibe¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

[S09-13] A preliminary attempt to develop an earthquake swarm detection method using the ETAS model and AIC

*Ryo Yoshimura¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura² (1. Kyoto Univ., 2. DPRI)

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | Room A F205+206

[S09] AM-2

chairperson: Kei Katsumata, Kazuyoshi Nanjo Nanjo

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S09-14] Long-term seismic quiescence in South America and cases of prediction failure

*Kei KATSUMATA¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

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

[S09-15] Shear strain energy change estimated by the current crustal deformation in Japan and spatial correlation with the crustal seismicity

*Taku Ueda¹, Takuya Nishimura¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-16] Static stress change associated with the 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence and seismic response

*Shinji TODA¹, Ross S Stein² (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

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

[S09-17] Analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka

*Kazuyoshi NANJO^{1,2,3,4}, Yohei Yukutake⁵, Takao Kumazawa³ (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. The Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. The University of Tokyo)

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

1:15 PM - 2:45 PM JST | 4:15 AM - 5:45 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-1

chairperson: Takashi Iidaka, Satoshi Matsumoto (Kyushu University)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[S09-19] Lower limit of seismogenic zone accompanied with active faults beneath the Kinki region

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato² (1. NIED, 2. ERI, U-Tokyo)

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

[S09-20] Applying Frequency-Magnitude relation and efficiency of seismic moment release for evaluating stress state in seismogenic layer

*Satoshi MATSUMOTO¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-21] Evaluation of the foreshock in 2016 Kumamoto earthquake based on radiated energy: the effect of pore-pressure and loading-rate changes

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions)

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

[S09-22] Aseismic slip during the swarm earthquakes in the Hakone volcano

*Tetsuro Kawai¹, Yohei Yukutake¹, Ryosuke Doke², Ryou Honda² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Hot Springs Research Institute Kanagawa Prefecture)

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

[S09-23] Time sequence of the seismicity and its relationship with the mid-crustal reflector in Iwaki area

*Takashi IIDAKA¹, Yuta Usuda², Hikaru Iwamori³ (1. IRI, University of Tokyo, 2. Unisys Corporation, 3. ERI, University of Tokyo)

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

[S09-24] Searching for Very Low Frequency Earthquake (VLFE) around Western Kuril Trench

*Novia Anggraini¹, Hiroaki Takahashi¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

3:00 PM - 4:30 PM JST | 6:00 AM - 7:30 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-2

chairperson:Tomoaki Nishikawa, Takanori Matsuzawa

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

[S09-25] Analysis of tremor in the Tokai region, during a short-term slow slip event in April 1988, using analog seismograms

*Takanori MATSUZAWA¹, Tetsuya Takeda¹ (1. Network Center for Earthquake, Tsunami and Volcano, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09-26] Association of regular earthquakes and shallow tremors in the northern Japan Trench before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Kazuma Matsumoto¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Shukei Ohyanagi³, Masanao Shinohara⁴, Yoshihiro Ito⁵ (1. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Graduate School of Science, Kyoto Univ., 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 5. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.)

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

[S09-27] Structure most correlated with the distribution of shallow tremors at the Kuril Trench off Hokkaido

*Hiroto Yamaguchi¹, Shuichi Kodaira², Gou Fujie², No Tetsuo², Yasuyuki Nakamura², Kazuya Shiraishi², Nobukazu Seama¹ (1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S09-28] Tectonic tremor distribution along the northern Japan Trench by relative hypocenter location using polarization-based phase picking

*Kosuke Minamoto¹, Ryota Hino¹, Kazuma Matsumoto¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S09-29] Comparison of statistical seismicity models of low-frequency earthquakes (LFEs): Its implications for the mechanisms of the LFE activity

*Tomoaki NISHIKAWA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S09-30] Mapping the spatiotemporal evolution of shallow tremor/VLFE episode commonly using Source-Scanning Algorithm

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹ (1. ERI, Tokyo Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.)

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

📅 Thu. Nov 2, 2023 9:15 AM - 10:30 AM JST | Thu. Nov 2, 2023 12:15 AM - 1:30 AM UTC | 🏢 Room A F205+206

[S09] AM-1

chairperson: Takao Kumazawa, Ritsuko Matsuura

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S09-09] Space-time changes of the Noto Peninsula Earthquake by the Point Process Models

*Takao KUMAZAWA¹, Ogata Yoshihiko¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-10] A hypocentral version of the spherical space-time ETAS model

*Yongbo Li¹, Jiancang Zhuang², Shi Chen¹ (1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2. The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems)

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

[S09-11] Estimation of actual activity rate changes based on seismic catalogs with systematic missing measurements

*Yoshihiko OGATA¹, Takao Kumazawa¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-12] The present status of the seismicity off the southeast coast of Hokkaido, where the relative quiescence started more than a decade ago

*S. Ritsuko MATSU'URA¹, Takeo Ishibe¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

[S09-13] A preliminary attempt to develop an earthquake swarm detection method using the ETAS model and AIC

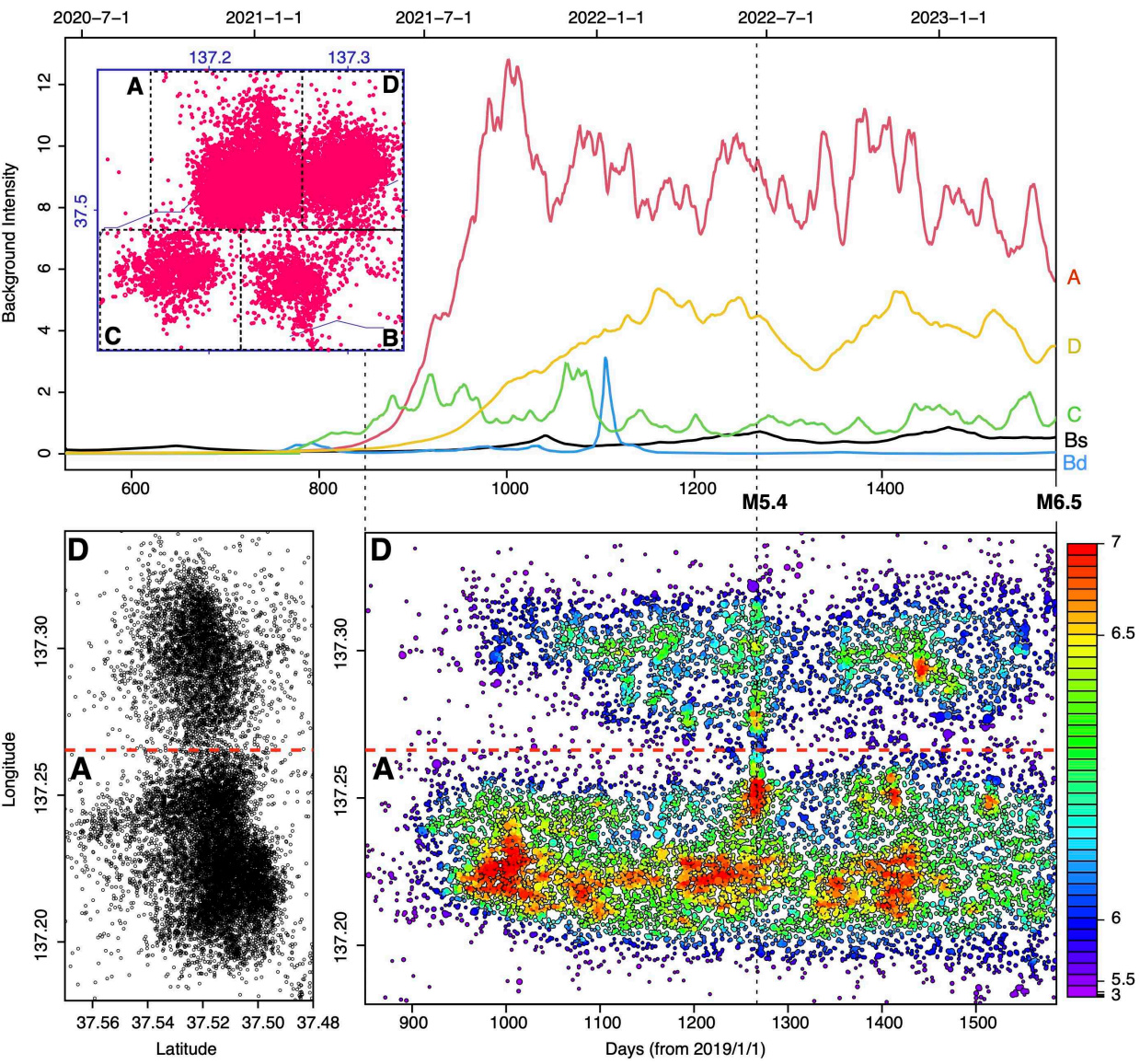
*Ryo Yoshimura¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura² (1. Kyoto Univ., 2. DPRI)

Space-time changes of the Noto Peninsula Earthquake by the Point Process Models

*Takao KUMAZAWA¹, Ogata Yosihiko¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

能登半島では2018年ごろから地震回数が増加傾向にあり、2020年11月末から流体貫入による地震活動が活発化して現在に至っている。これらの活動は大きく4つの震央クラスターに分かれ、従来から活動していた南東部領域では2020年11月末に14km以深へ移動した。以降、他3領域で順次活発化し、2023年5月5日に活動領域の北辺においてM6.5が発生した。我々の研究では各領域の群発地震活動に非定常ETASモデル (Kumazawa and Ogata, 2014) 及び2次元デロネ型関数を用いたABICによる最適なベイズ的平滑化 HIST-PPMを当て嵌め、群発地震の発生からM6.5に至る地震発生パターンの時空間的特徴を調査した。流体の供給源と考えられる南東部領域では、浅部の活動は初め領域の中央付近に分布していたが、2020年11月30日に活動が深部へ移動した際に静穏化した。この時の深部活動は浅部の地震群をとり囲むようにドーナツ状に活発化した。南東部領域深部の活発化以降、流体の拡散に伴って2ヵ月から3ヵ月遅れて先ず西部領域の活動度が上がり、次いで北部および北東部領域の地震活動度が順次上昇した。これらの領域の背景地震活動は、各領域の地殻変化を良く反映していると思われるGNSS 観測時系列の変動パターンと比較的対応が付く。これらの領域におけるb値分布は複雑な形状をしており、M6.5とその最大余震M5.9は共にb値が高く、それ以前の活動が比較的疎な領域で発生した。M6.5発生前後で南東部領域の地震が活動領域を北東方向へ拡大する現象が見られた。



A hypocentral version of the spherical space-time ETAS model

*Yongbo Li¹, Jiancang Zhuang², Shi Chen¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2. The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems

Abstract: Earthquake events are often characterized by certain statistical patterns in both time and space, particularly concerning major earthquakes and their subsequent aftershocks. Omori (1894) was the first to introduce an empirical formula for describing the number of aftershocks that occur over a period following the main shock. Ogata (1988; 1998) further advanced this field by proposing the Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) model, which treats earthquake events as point processes. Subsequent refinements of the ETAS model were carried out by Zhuang et al. (2002; 2004); Zhuang (2005); Ogata and Zhuang (2006). Guo et al. (2015) introduced a beta distribution to simulate the depth characteristics of triggered events and proposed the 3D ETAS model. Through stochastic reconstruction, Guo, Zhuang et al. (2015) illustrated that the 3D-ETAS model exhibits superior performance compared to the 2D ETAS model. However, both the 2D-ETAS and 3D-ETAS models utilize Euclidean distance based on spherical coordinates to model the spatial probability density function of triggered events. This modeling approach might not be suitable for high-latitude areas or extensive regional studies. To tackle this issue, Xiong and Zhuang (2023) have advanced the spatial probability function by incorporating the great circle distance. In this study, we merge the 3D ETAS model with the SETAS model, giving rise to the 3D-SETAS model. Based on the new model, we evaluated the global background seismic occurrence rates at different depths. We also validated our model using stochastic reconstruction techniques. The outcomes of stochastic depth reconstruction are presented in Figure (1). When compared to the SETAS model, the new model exhibits a stronger alignment between calculated outcomes and theoretical values.

Reference:

- Brummelen, G. V., (2013). *Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry*, Princeton University Press.
- Guo, Y., Zhuang, J. & Zhou, S., 2015. A hypocentral version of the space-time ETAS model, *Geophysical Journal International*, 203(1), 366-372.doi: 10.1093/gji/ggv319.
- Ogata, Y., 1988. Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes, *Journal of the American Statistical Association*, 83(401).doi: 10.1080/01621459.1988.10478560.
- Ogata, Y., 1998. Space-Time Point-Process Models for Earthquake Occurrences, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 50(2), 379-402.doi: 10.1023/a:1003403601725.
- Ogata, Y. & Zhuang, J., 2006. Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophysics*, 413(1-2), 13-23.doi: 10.1016/j.tecto.2005.10.016.
- Omori, F., 1894. On the Aftershocks of Earthquakes, *Journal of the College of Science*, 7, 111-120.
- Xiong, Z. & Zhuang, J., 2023. SETAS: A Spherical Version of the Space-Time ETAS Model, *Seismological Research Letters*.doi: 10.1785/0220220198.
- Zhuang, J., 2005. A study on the background and clustering seismicity in the Taiwan region by using point process models, *Journal of Geophysical Research*, 110(B5).doi: 10.1029/2004jb003157.
- Zhuang, J., Ogata, Y. & Vere-Jones, D., 2002. Stochastic Declustering of Space-Time Earthquake Occurrences, *Journal of the American Statistical Association*, 97(458), 369-380.doi: 10.1198/016214502760046925.
- Zhuang, J., Ogata, Y. & Vere-Jones, D., 2004. Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B5).doi: 10.1029/2003jb002879.

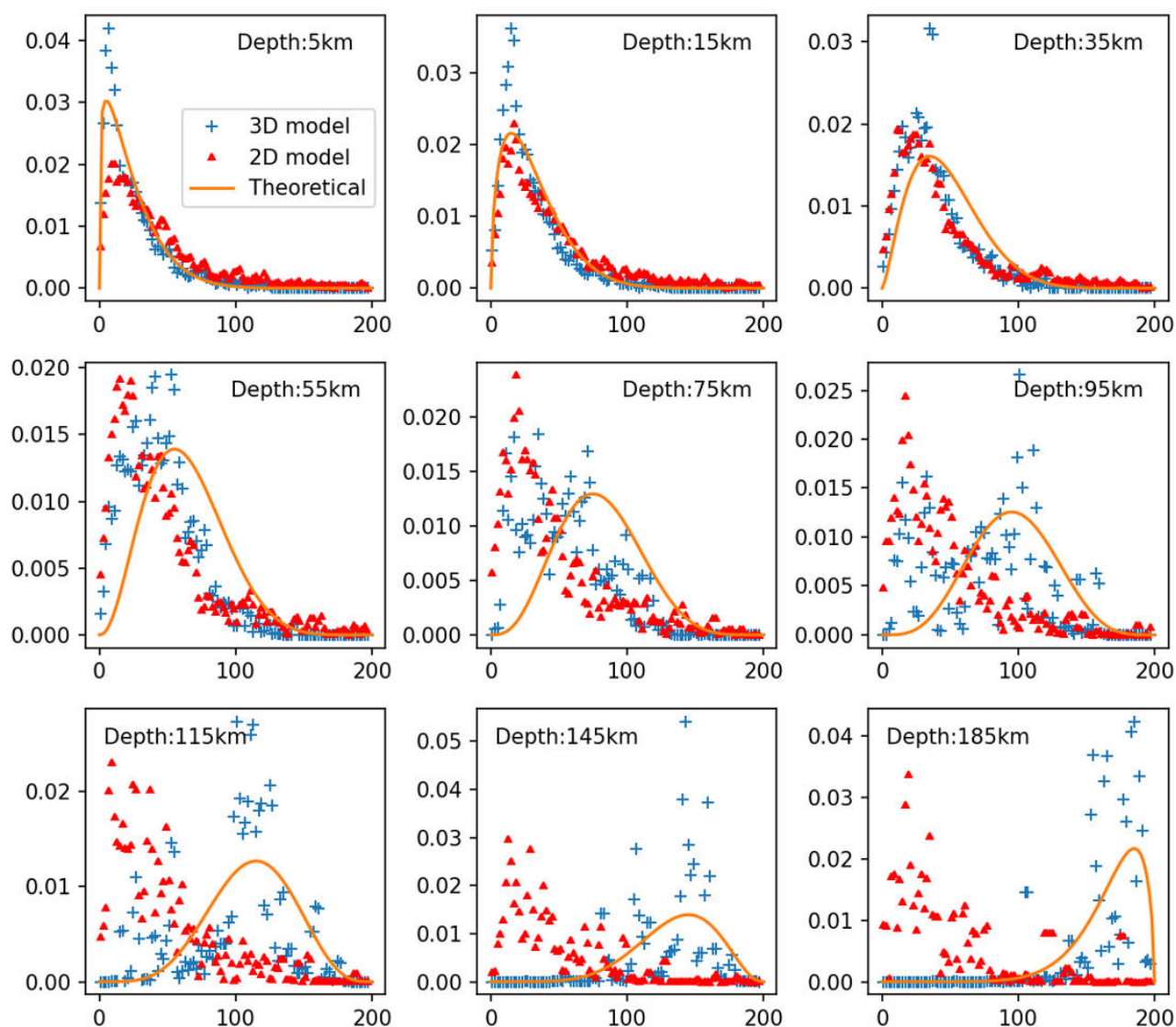


Figure 1. Stochastic reconstruction result of depth distribution of triggered events. Solid lines denote the theoretical curves of $h(z)$.

Estimation of actual activity rate changes based on seismic catalogs with systematic missing measurements

*Yosihiko OGATA¹, Takao Kumazawa¹

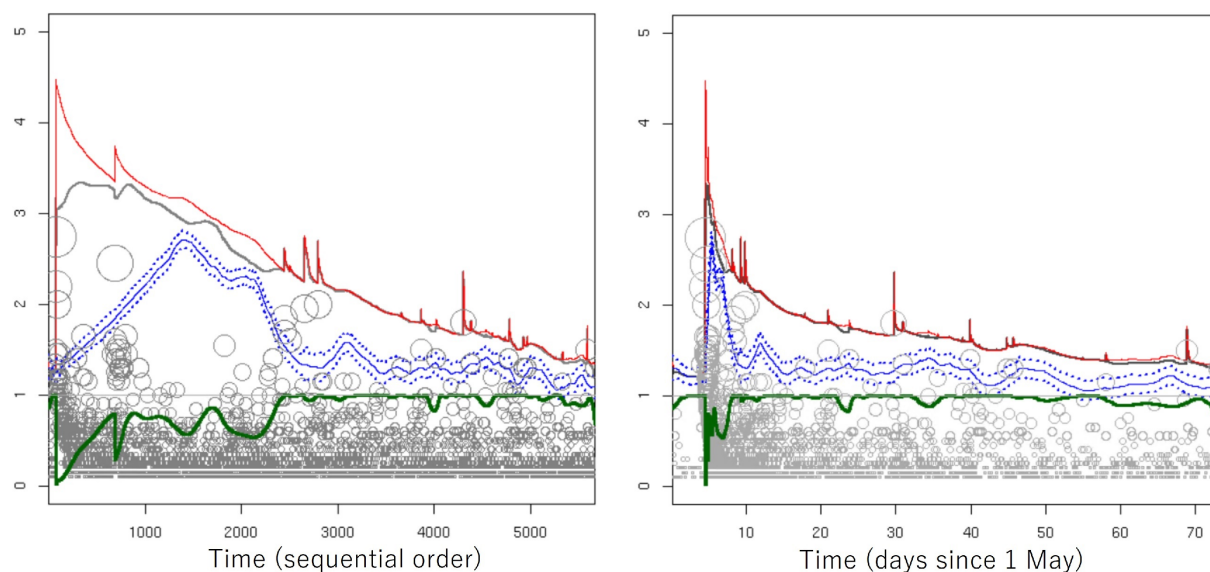
1. The Institute of Statistical Mathematics

大規模な地震（本震）の後に付近で多くの余震が発生する。これらの余震のうち最大のものは、本震と同等かそれ以上に破壊的または致命的なものになる可能性がある。それらの半数前後は本震の数日以内に発生する。したがって、本震の直後には、予期される余震の頻度と規模を正確に予測することが、被災地域での緊急決定とリスク軽減を計画する上で非常に重要である。

ETASモデルは、短期的な地震の群れの短期余震予測に推奨されるモデルであるが、地震活動によって大きなばらつきがあるため、正確な予測を行うためには、モデルパラメータをリアルタイムの地震活動に合わせて調整する必要がある。しかし、大地震の余震に関する調整は、直後の余震カタログの不完全さによって妨げられる。この期間には、マグニチュードの比較的大きな余震でさえも多くが検出できていないためである。本報告では、オンライン早期予測を目的とするために、あえて検出された余震データの全てを考慮する。そのためには、カタログの各地震の検出確率を推定し、ETASモデルと併せてモデル化する必要がある。

早期の余震予測は、リスクの軽減と対応の取り組みにおいて重要な役割を果たす。地震の核生成と伝播には確率論的な性質があるため、これまでのところ、地震発生確率と期待値を提供する統計的予測が最善である。初期余震や群発地震の不完全検出データから定常ETASモデルや非定常ETASモデルを推定する方法を示した。本手法のポイントは、(1)欠測データの統計的特徴を考慮すること、(2)定常または非定常ETASモデルの基礎となる余震活動を推定すること、(3)非定常ETASモデルで余震活動変化で流体効果の変化などの有無の推定をする。

2023 May M6.5 Noto Pen. event's aftershocks



Log10(intensity): **Red curve** ← basic activity rates; **gray curve** ← observed rates; **blue curve** ← background rates;
 Linear scale: **Green curve** ← detection rates of $M \geq 1$ aftershocks; **gray circles** ← $M \geq 1$ aftershocks

The present status of the seismicity off the southeast coast of Hokkaido, where the relative quiescence started more than a decade ago

*S. Ritsuko MATSU'URA¹, Takeo Ishibe¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction

松浦(2014)は、2011年東北地方太平洋沖地震の前の東北太平洋側沖合と同様に、北海道のえりも岬から択捉島南半分の沖合にかけて、2008年末辺りからETASモデルからの相対的静穏化が見られることを報告した。松浦・岩佐(2018)・松浦(2019)では、その静穏化が2015年後半辺りで完了している可能性を報告した。2011年以降の東北地方太平洋沖地震の影響が、東北地方に於いては一応の収束を見せつつある現時点で、北海道南東沖での地震活動度がどうなっているか、今回5年ぶりの定期的チェックとして定量的な検討を行ったので、ここに報告する。北海道南東沖の当該領域では、相変わらず地震活動度は高くない。特にM6.5以上の地震は2016年以降2023年7月末までに僅か4個しか発生しておらず、地震活動度が回復していても、ETAS効果による地震数の上昇が望めない。そのため、Kumazawa et al. (2010)の厳しいチェンジポイント導入に伴うペナルティを含めると、数理的に有意な回復という判断ができない状態である。その半分である理論的ペナルティであれば、2016年頃から地震活動度は有意に回復している、と判断できる。データは以前と同様1965年7月以降2023年7月末までの気象庁震源カタログを用いたが、2021年7月末までのISCカタログでも震源分布は多少異なるが、同様の結果となる。約7年間継続した相対的静穏化の、全てが次の北海道南東沖の超巨大地震の準備過程を反映しているのだろうか。静穏化の定量解析だけでは限界がある。隣接域で2011年に発生した超巨大地震は、当該地域のプレート境界型地震の発生に対してどのような変化を与えたのか、試みに弾性変形による影響も検討する必要がある。このような多様な方向からの検討によって、2009年から2015年までと、2016年以降とで、当該地域で異なる指標がないかを、多種類の検討で実施する契機になればと考える。

本研究は、文部科学省による「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一環として実施された。

参考文献

Kumazawa, T., Ogata, Y., Toda, S. (2010) Precursory seismic anomalies and transient crustal deformation prior to the 2008 Mw = 6.9 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, B10312, doi:10.1029/2010JB007567.

松浦律子(2014) 根室沖を含む北海道東部沖広域で継続中の大きな相対的地震活動度の静穏化 について, 日本地震学会講演予稿集, 2014 年度秋季大会, D21-03.

松浦律子・岩佐幸治(2018) 北海道東部沖合の地震活動静穏化の現状, 日本地震学会講演予稿集, 2018 年度秋季大会, S23-02, 77.

松浦律子(2019) 北海道東方沖の相対的地震活動度の静穏化と現状, 予知連会報, 101, 476-483.

Matsu'ura (2014) reported a relative quiescence from the ETAS model around the end of 2008 in the offshore area from Cape Erimo to the southern half of Iturup Island in Hokkaido, which is similar to the quiescence in the offshore area off the Pacific side of Tohoku before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Matsu'ura and Iwasa (2018) and Matsu'ura (2019) reported the possibility that the quiescence was completed around the latter half of 2015. The effects of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake are now appearing to have subsided in the Tohoku region. Here we report a quantitative examination of the seismicity level off the east coast of Hokkaido. The seismicity level remains not high in the studied area. In particular, only four earthquakes of M6.5 or larger have occurred since 2016 until the end of July 2023, and even if the seismicity level has been recovered, the number of

earthquakes cannot be expected to increase due to the ETAS effect. Therefore, including the severe penalty associated with the introduction of change points [Kumazawa et al. (2010)], we are still unable to declare that the recovery is statistically significant. If the theoretical penalty that is a half of theirs', the recovery of seismicity is significant since about 2016. As before, the JMA hypocenter catalog from July 1965 to the end of July 2023 were used for the analysis. The ISC catalog up to the end of July 2021 also yields similar results, although the hypocenter distribution is slightly different. Does the relative quiescence for about seven years solely reflect a preparatory process for the next giant earthquake off the east coast of Hokkaido? Quantitative analysis of the quiescence alone can only detect a dangerous area within a decade. It is necessary to examine how the 2011 giant earthquake that occurred in the adjacent area affected the occurrence of interplate earthquakes in the region. We will examine the effects of elastic deformation as the trial. We believe that studies of various directions on the studied area will provide an opportunity to find some distinguished indicators for the term between 2009 and 2015 from the term after 2016.

This study was supported by the Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP) of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (MEXT) of Japan.

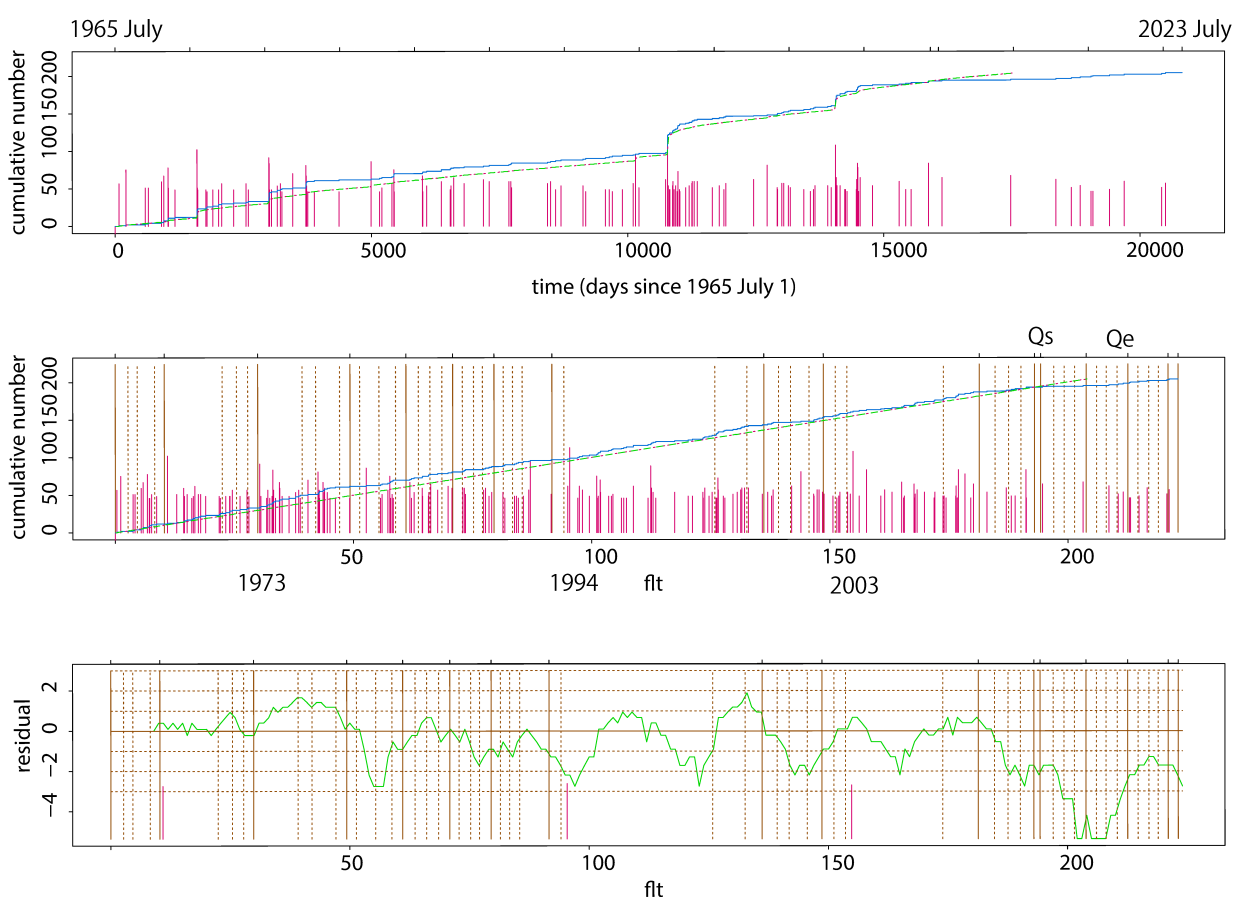


Fig. 1. The revised version of Fig. 5 in Matsu'ura(2019) with the latest data.

A preliminary attempt to develop an earthquake swarm detection method using the ETAS model and AIC

*Ryo Yoshimura¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura²

1. Kyoto Univ., 2. DPRI

1. はじめに

明確な本震を伴わない地震発生レートの増加を群発地震と呼ぶ(e.g., Mogi, 1963)。群発地震は、火山活動が活発な地域や沈み込み帯、トランスフォーム断層など、陸海域問わず様々な場所で発生する。群発地震は、地殻流体の移動やスロースリップイベント (SSE) 等の過渡的な非地震性現象によって引き起こされるとされ (e.g., Nishikawa & Nishimura, 2023), 群発地震の検出は、非地震性現象と地震活動の関係を明らかにする上で重要である。

群発地震の検出手法には、目視による手法や (Holtkamp & Brudzinski, 2011), 観測された地震発生レートと Epidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル (Ogata, 1988) から予測される地震発生レートの大きさの比較に基づく手法などがある (Nishikawa & Ide, 2017; Guo & Zhuang, 2023)。しかし、これらの検出手法には、検出基準の設定が恣意的であるという問題がある。

そこで、本研究は、Okutani & Ide (2011) によって改良された ETAS モデル (Ogata, 1988) と赤池情報量規準 (AIC; Akaike, 1974) に基づく、新たな群発地震検出手法の開発を試みた。本発表では、その暫定的結果を報告する。

2. 手法・データ

ETAS モデルは、ある時刻 t の地震発生レート ($\lambda(t)$) を、定常的な背景地震発生レート (μ) と、大森・宇津の余震則 (e.g., Utsu, 1957) に従う余震発生レート ($\sum_{t_i < t} K \exp(\alpha(M_i - M_c)) / (t - t_i + c)^p$) の和で表す。ここで、 t_i と M_i は、 i 番目の地震の発生時刻とマグニチュードである。また、 α は余震発生レートのマグニチュード依存性、 c は地震発生直後の地震発生レートに関係する時定数、 K は余震発生レートの大きさを決める係数、 p は余震発生レートの減衰のべき指数、 M_c は最小マグニチュードである。モデルパラメータは、 μ, α, c, K, p の5つである。

一方、Okutani & Ide (2011) は、ETAS モデルを改良し、群発地震活動を考慮したモデルを作成した。彼らのモデルでは、5つのETASパラメータに、群発地震発生期間中の背景地震発生レート μ_1 と群発地震の継続時間を表すパラメータ (T_{sw}) を加えた、7つのパラメータが存在する。背景地震発生レートは、群発地震の発生していない期間では μ 、発生している期間では μ_1 としている。また、群発地震活動開始日時 T_{cp1} は、測地観測データに基づきを事前に決定した。

本研究では、Okutani & Ide (2011) による群発地震活動を考慮したモデルにおける群発地震開始日時 T_{cp1} を1日ごとにグリッドサーチを行い、新たなモデルパラメータとした。そして、群発地震を考慮したモデルと、オリジナルのETASモデルのAICの差 (ΔAIC) が-2以下になる日付を抽出し、その日付を群発地震発生日とみなした。パラメータの推定には最尤法を用いた。

次に本研究は、SSEに伴う群発地震活動の発生が知られている、相模トラフ房総半島沖を中心とした深さ0~50kmの領域 (北緯34.8°から35.6°, 東経139.9°から140.9°) において、試験的な群発地震検出を実施した。解析期間は2000年1月1日~2010年12月31日の11年間とした。この期間は、2002年10月と2007年8月のSSEに伴う群発地震活動を含む。震源データには気象庁一元化震源カタログを用い、マグニチュード2.0以上の地震を解析に使用した。

3. 結果

解析の結果、 ΔAIC が-2以下かつ極小値となる日付が19日抽出され、そのうち ΔAIC が特に大きく減少した日付（-10以下）が4日あった。その4日のうち2日は、2002年と2007年のSSEに伴う群発地震活動に対応した。残り2日は、東京湾と房総半島南東部における狭い範囲で発生した群発地震であった。また、 ΔAIC が-8程度で、房総半島沖での群発地震に類似した活動も確認された。これら5つの群発地震活動は、いずれもフィリピン海プレート上面のプレート境界面付近で発生した。

本手法は、既知の群発地震活動に対応する ΔAIC の顕著な減少を検出することができた。これは、本手法の有用性を支持する。また、本手法は、先行研究では報告されていない未知の群発地震活動に対応する ΔAIC の減少も検出した。これらは、より小規模なSSE（Nishimura, 2021）に伴って発生した地震活動である可能性がある。GNSS等の測地観測データを用いた、さらなる検証が必要である。

謝辞

本研究では気象庁一元化震源を使用しました。記して感謝申し上げます。

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

📅 Thu. Nov 2, 2023 10:45 AM - 12:00 PM JST | Thu. Nov 2, 2023 1:45 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 Room A F205+206

[S09] AM-2

chairperson: Kei Katsumata, Kazuyoshi Nanjo Nanjo

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S09-14] Long-term seismic quiescence in South America and cases of prediction failure

*Kei KATSUMATA¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

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

[S09-15] Shear strain energy change estimated by the current crustal deformation in Japan and spatial correlation with the crustal seismicity

*Taku Ueda¹, Takuya Nishimura¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-16] Static stress change associated with the 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence and seismic response

*Shinji TODA¹, Ross S Stein² (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

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

[S09-17] Analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka

*Kazuyoshi NANJO^{1,2,3,4}, Yohei Yukutake⁵, Takao Kumazawa³ (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. The Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. The University of Tokyo)

Long-term seismic quiescence in South America and cases of prediction failure

*Kei KATSUMATA¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

1. はじめに
- 地震活動の長期静穏化に基づく地震発生予測実験（Katsumata and Nakatani, EPS, 2021）によると，長期静穏化が起きても，その後M7.5以上の大規模地震が発生しない場合（空振り）がかなり多いことが分かる．空振りとなってしまう静穏化の原因としては，（１）地震活動の長期的なゆらぎ，（２）大地震の先行現象とは別の現象，などが考えられる．本研究では，南米地域の静穏化とその後発生したイベントを比較し，空振りの事例について報告する．
2. データと解析
- 研究領域は，45°S-10°N，65°W-85°Wの南米太平洋沿岸地域である．1965年1月1日から2020年12月31日までに研究領域で発生した実体波マグニチュード5.0以上，深さ60 km以浅の地震をISC Bulletinから選択した．そして開始年を1年ずつずらして，期間長39年のサブカタログを18個作成した．具体的には，1965～2003年，1966～2004年，・・・，1981～2019年，1982～2020年の18個である．各サブカタログをstochastic declustering 法 (Zhuang et al., 2005)を使用してデクラスタリングした後，PMAP法 (Katsumata and Zhuang, PAGEOPH, 2020)を用いて長期静穏化を探索した．
3. 結果
- PMP法ではP値が小さいほど強い静穏化を表す．P値が 10^{-3} 程度以下の長期静穏化とそれに対応する可能性があるイベントを下の表に示す．表中のNo.1とNo.2に対しては静穏化に対応するイベントは見つからなかった．No.3とNo.5は，長期静穏化の後，M8以上の大規模地震は発生しなかったが，中規模地震を含む顕著な群発地震活動が観測された．静穏化後に大規模地震が発生しなかったという意味では「空振り」事例であろう．講演ではNo.3とNo.5について詳しく説明する．

No.	Location	Period	P-value	Event
1	6.7-7.5N,77.4-76.7W	1997-2016	2.3×10^{-4}	n/a
2	1.9-3.0N,78.8-79.8W	1998-2020	6.0×10^{-5}	n/a
3	6.3-6.6S,80.9-81.3W	1992-2009	1.8×10^{-4}	swarm
4	20.3S,71.4W	1989-2013	9.6×10^{-6}	Iquique Eq
5	26.4-27.5S,70.3-71.8W	1993-2006	3.4×10^{-5}	swarm
6	29.4-32.3S,71.0-72.7W	2004-2015	2.3×10^{-3}	Illapel Eq
7	33.3-34.4S,70.9-71.9W	1994-2009	1.4×10^{-4}	Maule Eq

Shear strain energy change estimated by the current crustal deformation in Japan and spatial correlation with the crustal seismicity

*Taku Ueda¹, Takuya Nishimura¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地震はプレートの相対運動により地球内部に生じた応力を解放するために発生する。そのため、ひずみの増加が地震発生帯での応力蓄積に対応するという仮定から測地データから推定される地球内部のひずみ速度と地震の発生頻度は相関することが考えられ、これまでカリフォルニアなどの領域でその関係性が議論されてきた (e.g., Kreemer and Young, 2022)。

しかしながら、日本では測地的に観測される最大圧縮ひずみと地震学的に観測される最大圧縮応力の方位が異なる領域が存在する (Kosugi and Mitsui, 2022)。そのため、ひずみの増加が必ずしも応力蓄積と対応しない可能性がある。本研究では日本の地殻内の背景地震発生数と、背景応力場と現在の地殻変動を考慮したせん断ひずみエネルギー変化 (Saito et al., 2018) を比較した。

せん断ひずみエネルギー変化の計算における応力変化の推定には、国土地理院 (GEONET)、海上保安庁、京都大学、国際GNSSサービス (IGS)、UNAVCOから公開されているGNSS観測点のデータを使用した。各観測点の日座標値 (2006-2009年) をソフトウェアGipsyX Ver. 1.4 (Bertiger et al., 2020) を用いて算出した。各観測点の各成分 (東西・南北) の時系列データに対して共通誤差を除去し、季節変動成分と顕著なステップ変動と共に平均変位速度を推定した。推定した平均変位速度を用いてOkazaki et al. (2021) の手法を用いて水平歪速度場を推定した。平面応力状態を仮定して歪速度テンソルを応力テンソルに変換し、Uchide et al. (2022) で推定された背景応力場に対するせん断ひずみエネルギー変化 (を差応力と剛性率の比で割ったもの) を評価した。

背景地震発生数の空間分布は上田・西村 (2023, JpGU) で推定したもの ($M > 3.0$ 、1980-2010年、深さ25km以浅) を使用した。対象領域は、新潟神戸ひずみ集中帯、奥羽脊梁地帯、山陰ひずみ集中帯、別府島原地溝帯を含む領域とした。

新潟神戸ひずみ集中帯と奥羽脊梁地帯では背景地震発生数とせん断ひずみエネルギー変化が弱～中程度の相関 (相関係数=0.1~0.5) が見られ、これらの相関は統計的に有意であった ($p < 0.05$)。特に奥羽脊梁地帯では、背景地震発生数とひずみ速度 (せん断ひずみ速度・二次不変量) との相関よりもせん断ひずみエネルギー変化との相関の方が良くなった。山陰ひずみ集中帯と別府島原地溝帯では、統計的に有意な相関は見られなかった。山陰ひずみ集中帯を含む領域では、一部の領域 (山陽地方) で負のせん断ひずみエネルギー変化が推定された。それらの領域でも地震が発生していることが、有意な相関関係が見られなかった要因であると考えられる。別府島原地溝帯を含む領域では、別府島原地溝帯と南九州せん断帯でせん断ひずみエネルギー変化が大きくなる傾向が見られた。微小地震 ($M1 \sim 2$) の震源分布でもこの2つの領域で地震発生数が多い傾向が見られるため、微小地震の背景地震発生数を評価することで、結果が改善されることが期待される。

謝辞：気象庁の一元化処理震源カタログを使用しました。GNSSデータは国土地理院、海上保安庁、京都大学、国際GNSSサービス、UNAVCOから公開されているデータを使用しました。岡崎智久博士からひずみ速度場を推定するコード (Okazaki et al., 2021) をいただきました。本研究はJSPS科研費JP22KJ1770の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

参考文献

- Saito et al. (2018): Shear strain energy change caused by the interplate coupling along the Nankai Trough: An integration analysis using stress tensor inversion and slip-deficit inversion, JGR: Solid Earth, 123, 5975-5986.
- Okazaki et al. (2021): Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC, EPS, 73:153.

Uchide et al. (2022): Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, JGR: Solid Earth, 127.

上田・西村 (2023): 日本のひずみ集中帯とその周辺域での背景地震活動度とひずみ速度の関係性、JpGU2023年大会、SSS10-P15.

Static stress change associated with the 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence and seismic response

*Shinji TODA¹, Ross S Stein²

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor Inc.

2023年2月6日に発生したカフラマンマラシュ地震はトルコ南東部を襲い、死者55,000名以上、建物被害35万棟、家を失った被災者150万人という未曾有の被害をもたらした。この地震はトルコ南東部に北東-南西に延びる東アナトリア断層の南西部（パザルジュック〜アマノス区間）の活動によるものである。最初のM7.8パザルジュック地震に引き続き、9時間後にはM7.8震央から約100km北方のチャルダック断層が活動しM7.7エルピスタン地震が発生した（図1）。既に報告されているように（Jia et al., 2023）、最初のパザルジュック地震によるチャルダック断層の静的応力変化を計算すると、震源付近で剪断応力変化は+0.1MPa程度になるが、法線応力（断層から遠ざかる向きを正）の増加が著しい（+0.3MPa）。一方で、M7.8震源断層に近い北東側では、剪断応力は顕著に低下（-0.5MPa以下）となるため、法線応力変化（unclamping stress）が震源核形成に寄与し、剪断応力低下は動的破壊過程にほとんど影響しなかったと考えられる。静的応力変化と地震活動度変化との対応を調べるため、USGSの震源断層モデルを用いてパザルジュック地震・エルピスタン地震によるクーロン応力変化（dCFF）を計算した。dCFFの計算にあたっては、レシーバ断層（receiver fault、影響を受ける断層）の走向・傾斜・レイク角の設定が重要となる。今回は、トルコ防災危機管理庁（AFAD）のメカニズム解および周辺活断層（Emre et al., 2018）の情報を参考にレシーバ断層を設定した。その結果、2つの震源断層の周辺で負のdCFFが大きく広がり、2つの震源断層の4つの端部延長で顕著なdCFF増加となった。地震応答の検証には、AFAD震源カタログを用いた。AFADカタログは、2014年以降検知能力が向上し、2023年本震直後を除くと検知最小マグニチュード（Mc）が1.5-2.0である。比較に用いたカタログの本震前の期間は2014年〜2020年1月23日、本震後の期間は2023年2月21日〜7月13日とした。東アナトリア断層帯北東部で発生した後述する2020年1月24日M6.8エラズー地震後から2023年2月20日（M6.3余震）の期間を除いている。両者の比較の結果、広域のdCFF低下と2023年本震後の地震発生率低下は概ね対応し、震源断層沿いの余震を除いて、全体的に周辺域で活動の低下がみられた。一方で、断層端でのdCFF増加域にその後の余震活動は集中する傾向がある。特に、M7.8震源断層南端付近とM7.7震源断層西端で著しい。一方で、M7.8断層北東端延長部ではきわめて余震活動が低調な部分がみられる。その地域は、2020年エラズー地震（M6.8）の震源断層上にあたる（図1）。エラズー地震に関しては、地震・測地インバージョンによって複数の震源断層モデルが提示されているが（例えば、Cheloni and Akinci, 2020）、アスペリティ位置に大きな違いはなく、そのアスペリティ周辺で2023年本震後の余震がほとんど認められない（図1）。エラズー地震そのものによる北東走向・左横ずれ断層へのdCFFは-1MPa前後程度で、2023年本震による+0.1〜+0.2MPaを大幅に下回る。単純に応力変化の合計が顕著に負のため、オフフォルト余震が誘発されなかったという見方もできる。一方で、速度および状態依存摩擦則（rate/state friction）を考慮したモンテカルロ法による検討（Toda and Stein, 2022）でも、2023年時にごく短期間（数日〜1ヵ月程度）の地震発生率上昇が再現されるものの、その後は地震活動が無応答の結果となる。このように比較的最近大きな地震が発生したことによって破壊進展や地震応答が回避されているという点では、チャルダック断層の東延長に分布しながら破壊が進展しなかったシュルギュ断層（図1）も興味深い。現状、東アナトリア断層上での歴史地震に関しては様々な解釈がある。M7.8パザルジュック地震を起こしたエルケネック区間、パザルジュック区間、アマノス区間（図1）の最新活動はそれぞれ西暦1893年（Ms7.1）、1513年（Ms7.4）、521年（Mw7.5）にあたると解釈されていた（例えば、Duman & Emre, 2013）。しかし、1893年の地震をシュルギュ断層によるものとする解釈もある（例えば、Çetin et al., 2023）。シュルギュ断層が130年前に活動していたとすると、2023年時点で応力降下が大きくエルピスタン地震時に破壊が進展しなかった可能性もある。

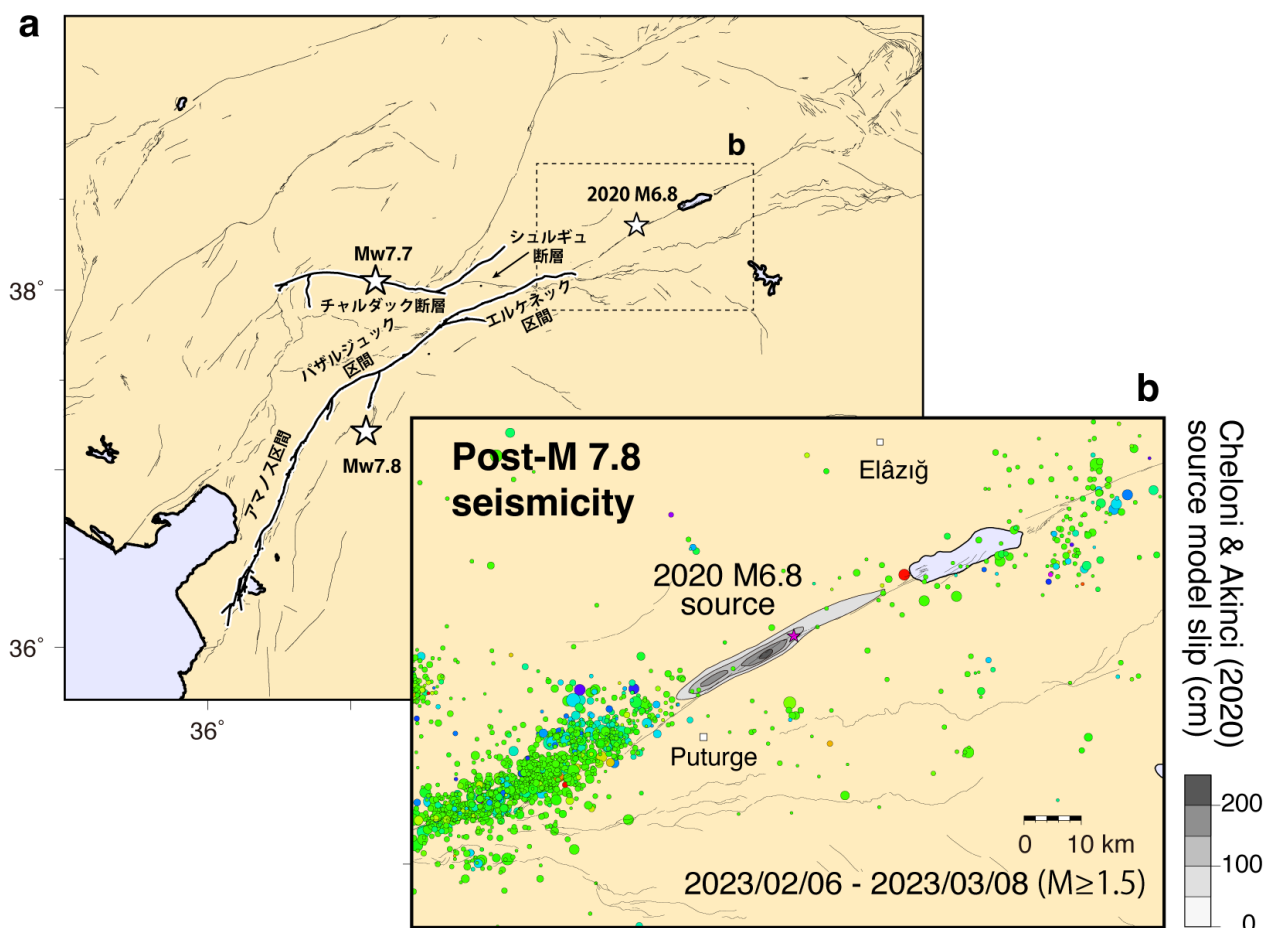


図1 a) 2023年トルコカブラマンマラシュ地震の地表地震断層 (USGS, 2023) と周辺活断層の分布 (Emre et al., 2023),
b) 2020年エラズー地震の震源周辺の2023年本震後の地震活動と2022年地震時すべり分布

Analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka

*Kazuyoshi NANJO^{1,2,3,4}, Yohei Yukutake⁵, Takao Kumazawa³

1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. The Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. The University of Tokyo

Before the 1989 submarine eruption that formed the Teishi Knoll (a volcano belonging to the Izu-Tobu Volcano Group), there was an earthquake swarm off the coast of Ito, located in Shizuoka Prefecture of Japan. This area is referred as the Ito area. It is thought that there is a relationship between earthquakes and magmatic activity. The purpose of this study was to clarify the characteristics of seismic activity in the Ito area to suggest its state of magmatic activity.

The earthquake catalog maintained by the Japan Meteorological Agency (JMA) was used as the source of earthquake data for the Ito area. This catalog includes ordinary earthquakes and low-frequency earthquakes (LFEs). More than 10,000 ordinary earthquakes occurred between 2005 and 2020, and there were swarms in 2006, 2009 and 2011. 48 LFEs occurred during the same period. Given that this number of LFEs is small, it is possible that the characteristics of seismic activity cannot be fully understood. It may be due to difficulty in detecting LFEs that are easily buried in noise due to their low signal-to-noise ratios for conventional event-detection methods employed by the JMA. To resolve this difficulty, we produced a LFE catalog using the matched-filter (MF) method¹. Our resultant catalog included about 900 LFEs during the period from 2005 to 2020. This is about 17.8 times more than the number of earthquakes (48) reported by JMA during the same period. This means that LFEs occurred more frequently than were previously thought.

To capture essential aspects of seismic activity in the Ito area, the two types of earthquakes were analyzed by using the Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) model² and assuming that this model, which was originally developed for ordinary earthquakes, was applicable to LFEs (Nanjo et al., 2023). Our results indicated that seismic quiescence started at 2010-2011 for ordinary earthquakes and at 2011-2014 for LFEs. These timings of start of seismic quiescence are consistent with each other. We compared our results with timeseries of crustal movement conducted by Geospatial Information Authority of Japan⁴. Based on a leveling survey along the eastern coast of Izu peninsula since 1904, crustal movement that showed uplift before 2010 showed stagnant or subsidence after it. The timings of start of seismic quiescence roughly coincided with the timing of start of stagnant or subsidence. This coincidence suggests the changes in magmatic activity in the Ito area. Actually, no seismicity was reportedly activated since the 2011 swarm.

In this presentation, a report on the most recent results will be provided.

References: ¹Yukutake et al., *Geophys. Res. Lett.* 46(20), 11035-11043 (2019); ²Kumazawa et al., *Earth Planets Space* 71, 130 (2019); ³Nanjo et al., *Sci. Rep.* 13, 10562 (2023); ⁴Geospatial Information Authority of Japan, https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou96/05_01.pdf (2016)

Acknowledgments: We used the waveform records obtained from the permanent stations of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, the Earthquake Research Institute at the University of Tokyo, JMA, and the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government. We also used the JMA earthquake catalog. This study was partially supported by JSPS KAKENHI Grant

Numbers JP 22K03752 (Y.Y.), 20K11704 (T.K.), a Research Grant of the Izu Peninsula UNESCO Global Geopark (K.Z.N. and Y.Y.), and Chubu Electric Power's research based on selected proposals (K.Z.N.). The authors thank Y. Noda for help with implementing the MF method.

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

📅 Thu. Nov 2, 2023 1:15 PM - 2:45 PM JST | Thu. Nov 2, 2023 4:15 AM - 5:45 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S09] PM-1

chairperson: Takashi Iidaka, Satoshi Matsumoto (Kyushu University)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[S09-19] Lower limit of seismogenic zone accompanied with active faults beneath the Kinki region

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato² (1. NIED, 2. ERI, U-Tokyo)

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

[S09-20] Applying Frequency-Magnitude relation and efficiency of seismic moment release for evaluating stress state in seismogenic layer

*Satoshi MATSUMOTO¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-21] Evaluation of the foreshock in 2016 Kumamoto earthquake based on radiated energy: the effect of pore-pressure and loading-rate changes

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions)

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

[S09-22] Aseismic slip during the swarm earthquakes in the Hakone volcano

*Tetsuro Kawai¹, Yohei Yukutake¹, Ryosuke Doke², Ryou Honda² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Hot Springs Research Institute Kanagawa Prefecture)

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

[S09-23] Time sequence of the seismicity and its relationship with the mid-crustal reflector in Iwaki area

*Takashi IIDAKA¹, Yuta Usuda², Hikaru Iwamori³ (1. IRI, University of Tokyo, 2. Unic Corporation, 3. ERI, University of Tokyo)

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

[S09-24] Searching for Very Low Frequency Earthquake (VLFE) around Western Kuril Trench

*Novia Anggraini¹, Hiroaki Takahashi¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Lower limit of seismogenic zone accompanied with active faults beneath the Kinki region

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato²

1. NIED, 2. ERI, U-Tokyo

1. はじめに

近畿地方には、中央構造線より北側の地域で、多くの活断層が高い密度で分布している。丹後半島周辺を走る1927年の北丹後地震を引き起こした山田断層と郷村断層、本州から淡路島にかけて東北東-西南西に走る1995年の兵庫県南部地震を引き起こした六甲淡路断層帯の一部の野島断層をはじめ、山崎断層、上町断層、有馬-高槻断層帯など、大都市直下を走る活断層も多い。2018年6月18日には M_{JMA} 6.1の地震が発生し、最大震度6弱を観測した。防災科学技術研究所（防災科研）では陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）を運用し、高感度地震観測網（Hi-net）を含めた観測網により三次元地震波速度構造やそれを用いた震源決定を行っている。本研究では、三次元地震波速度構造を用いて近畿地方の地震活動を再決定し、活断層に起因すると考えられる内陸の地震発生層の下限について考察した。

2. データ・手法

防災科研MOWLASのHi-net等に加え、気象庁、国立大学等のデータも含めて解析した三次元地震波速度構造や観測点補正值（Matsubara et al., 2022）を用いて2000年10月以降の約22年間の地震について震源を再決定した。Gutenberg-Lichter則を満たす $M1.5$ 以上の地震を解析対象とした。ある点を中心に $\pm 0.05^\circ$ （約5km）すなわち1辺 0.1° （約10km）の矩形領域内の深さ30kmまでに地震が10個以上ある場合にD90（その深さよりも浅いところで矩形領域内の地震の90%が起きている深さ）を、20個以上ある場合にD95（その深さよりも浅いところで矩形領域内の地震の95%が起きている深さ）を計算した。同様に、 $\pm 0.1^\circ$ （約10km）すなわち1辺 0.2° （約20km）の矩形領域内の地震、 $\pm 0.2^\circ$ （約20km）すなわち1辺 0.1° （約40km）の矩形領域内の深さ30kmまでに地震についても地震が10個以上ある場合にD90を、20個以上ある場合にD95を計算し、地震発生層の下限とした。

3. 結果と議論

活断層の直下の地震活動に注目するには1辺 0.1° （約10km）の矩形領域内の地震活動の解析が有効である。この結果では、北緯 34° 以北ではD90は16km以浅となっており、沈み込むフィリピン海プレートの影響を受けずにユーラシアプレート内の地震活動の下限を推定できていることがわかる。中央構造線の南側では、和歌山市付近の群発地震活動が活発であり、地震発生層の下限が深さ8km以浅と非常に浅くなっている。この領域ではヘリウム同位体比の高異常や比抵抗構造から、スラブ由来の流体の上昇が認められている(Umeda et al., 2006)。一方で、活断層が多く走る中央構造線以北では、丹後半島付近で深さ12km以浅の場所が見られるが、それ以外の場所では深さ12~16kmとなっている。しかし中国山地東部や琵琶湖の南東から奈良県にかけての地震活動が低調なところでは下限の推定が困難である。一方、1辺 0.4° （約40km）の矩形領域内の地震の解析では、分解能は低くなり個別の活断層との比較は困難であるが、地域の地震活動の下限を考える一助となる。その結果からは、北緯 34° 以北の近畿地方では、中国山地下、和歌山市付近、伊勢湾周辺を除いてほぼ全域で地震発生層の下限が12~16kmであった。D95についてはD90よりも若干深くなるが、やはり12~16kmであった。中国山地の下や伊勢湾周辺では16-18kmであった。北緯 34° 以南では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震活動が含まれるため、D90やD95は深くなっている。

重力異常では、若狭湾から琵琶湖を通り大阪湾に抜ける領域で負の重力異常となっている一方、紀伊半島の山間部では正の重力異常となっている（地質調査総合センター（編），2013）。それぞれ異常領域は活断層に囲まれているが、地震発生層の下限とはそれほど関係は見られない。

近畿地方の地磁気異常は、ほぼ東北東-西南西の等値線が北から南へ向かって並んでおり、南に向かって徐々に弱くなっている。地震発生層の下限は12~16kmであったものが和歌山市付近で8-12kmと浅くな

り、その南では20km以深と急激に深くなるので、単調に変化する地磁気異常とは調和的ではない。

モホ面は伊勢湾から琵琶湖周辺と中国山地で深い一方、紀伊半島中部では浅い（Matsubara et al., 2017）。伊勢湾周辺や中国山地下では地震発生層の下限は16-18km程度であり、やや深いモホ面と調和的である。

Applying Frequency-Magnitude relation and efficiency of seismic moment release for evaluating stress state in seismogenic layer

*Satoshi MATSUMOTO¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

マグニチュードと地震発生頻度の関係はグーテンベルグ・リヒター則におおむね従うことが知られ、そのべき定数 b 値は時間空間的に変化することが多く報告されている。特に、 b 値は地殻中の差応力に逆比例することなどが求められている。実験的にはそのみならず、破壊に至る臨界状態によっても変化するという報告もある。松本・他（2022）は高精度の発震機構解から応力状態を示すモーメント円上にプロットし、その区分ごとに b 値をもとめて、その場応力臨界状態に近づくとき b 値が小さいことを示した。すなわち、自然地震でも b 値は差応力と臨界状態に関係していることが示された。一方、ある領域内で様々な発震機構の地震が発生する場合を考える。多様な地震モーメントテンソルを足し合わせと個々の地震モーメントの和の比（地震モーメント比）を通してみる。弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放され、比は1になる。既存の亀裂が非最適面でかつ流体圧が高い場合、モーメント比は徐々に低下する。このように地震で解放されるモーメントと解放される弾性ひずみの比は地殻の臨界状態を示していると考えられる。そこで本研究では、差応力と臨界状態に関係する b 値とモーメント比を用いて応力状態の評価を試みる。ここでは、 b 値と地震モーメント比を実際の地震データから求めてその特性について検討する。データは2016年熊本地震発生前後の発震機構解（Mitsuoka et al., 2022）と気象庁一元化カタログから得た震源データを用いた。2016年4月14日に発生したM6.5以前のデータを解析すると、震源域では b 値の小さい領域がみられたことは従来の研究で指摘されている。さらに地震モーメント比から見るとモーメント比が高い（臨界状態に近い）領域は狭まり、震源位置近傍に見られる。このように2つの値を用いることでより詳細な地殻応力状態の評価可能性がみいだされた。

Evaluation of the foreshock in 2016 Kumamoto earthquake based on radiated energy: the effect of pore-pressure and loading-rate changes

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions

大地震の発生に先立つ前駆的地震活動が、本震の震源核形成過程の非地震性すべりや、断層面に浸入した地殻流体による断層強度低下、あるいはそれに伴って発生する非地震性すべりに起因して発生している可能性が指摘されている (e.g., Sibson, 1992; Kato et al., 2012; Matsumoto et al., 2022)。しかしながら、前駆的地震活動発生の物理過程に関して、観測データに基づいて与えられている拘束は十分でない。前駆的地震活動において発生した地震と本震後に発生した地震の特徴を系統的に調べ比較することが有用であると考えられる。

2016年熊本地震の際には、2016年4月14日にM6.5の地震が発生し、その28時間後にM7.3の本震が発生した。M6.5 前震発生からM7.3 本震発生までの期間に多数の地震が発生しており、前駆的地震活動と本震の関係を調べるのに適していると考えられる。M6.5 前震後に発生した小地震の震源スペクトルと規格化エネルギーを推定し、それらの特徴を系統的に調べた。

初めに、観測スペクトルから地震波減衰 Q^{-1} とサイト特性の影響を除去することにより震源スペクトルを決定した。サイト特性と地震波減衰 Q^{-1} については、地震波の後続波を用いたコーダ規格化法 (Aki and Chouet, 1975; Aki, 1980) に基づいて評価した (Takahashi et al., 2005; Yoshida et al., 2017)。次に、決定した震源スペクトルに基づいて放射エネルギーと地震モーメントを計算して規格化エネルギーを推定した。

この結果、10656個の地震について、震源スペクトルと規格化エネルギー e_R を推定することができた。得られた e_R の範囲は 10^{-5} から 10^{-4} ($\log_{10}(e_R)$ の平均値と標準偏差はそれぞれ -4.97, 0.30) であり、先行研究 (e.g., Abercrombie et al., 1995; Kanamori and Brodsky, 2004; Yoshida and Kanamori, 2023) で推定された地殻内地震のそれと同じ範囲であった。

各地震の規格化エネルギーの時空間的な特徴を調べた。その結果、M6.5 前震が発生してから M7.3 本震が発生するまでの期間において、 e_R が M6.5 前震発生からの時間の経過とともに系統的に減少する傾向が得られた。規格化エネルギーは応力降下量や破壊伝播速度に相関する (e.g., Kanamori and Brodsky, 2001)。M6.5前震とM7.3本震の間の期間に地殻流体が断層面に浸入して、断層の有効法線応力を低下させることにより、前駆的地震活動の応力降下量や破壊伝播層度が低下させられていた (e.g., Goertz-Allmann et al., 2011; Kwiatak et al., 2014; Yoshida et al., 2017) ことを反映している可能性がある。

一方、M7.3本震が発生した直後には、 e_R が一時的に増加する傾向が見られた。余効滑り等による loading rateの増加に伴い断層の不安定性が増し、一時的に破壊伝播速度や応力降下量が増加していたことを意味している可能性がある。

謝辞

解析には防災科学技術研究所、気象庁、九州大学が設置された地震計の記録と、気象庁の一元化カタログの震源データを使用した。記して感謝申し上げる。

Aseismic slip during the swarm earthquakes in the Hakone volcano

*Tetsuro Kawai¹, Yohei Yukutake¹, Ryosuke Doke², Ryou Honda²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Hot Springs Research Institute Kanagawa Prefecture

はじめに

群発地震の発生要因について、マグマ移動に伴う応力変化 (Toda et al. 2002)、高圧流体の拡散に伴う断層強度低下 (Shelly et al. 2014)、非地震性滑りの拡大 (Barros et al. 2020) が提案されている。近年の研究では流体の貫入により断層の非地震性滑りが誘発されることが実験的に検証され (Cappa et al. 2019)、また非地震性滑りを示唆する相似地震や地殻変動が観測されるなど (Nakajima and Hasegawa 2023、Nishimura et al. 2023)、群発地震の発生における非地震性滑りの重要性が指摘されている。

河合ほか(2023, JpGU)では、活発な群発地震活動が発生する箱根火山において2015年の群発地震活動の際に、拡散的な震源移動、傾斜変動、相似地震の発生を明らかにし、群発地震に伴う非地震すべりの発生の可能性を指摘した。本研究では、2015年に加えて、2009年及び2019年の群発地震活動に対して震源の時間空間分布、傾斜計記録に基づいた断層モデル及び相似地震を推定し、結果の比較を通して群発地震活動に伴う非地震性滑りの寄与についての考察を行った。

データおよび手法

震源カタログとして河合ほか(2023, JpGU)によりDouble-Difference法(Waldhauser & Ellsworth 2000)を用いて決定されたものを使用し、Shapiro et al., (1997)の理論式を当てはめ震源移動の拡散係数を求めた。地殻変動データとして、神奈川県温泉地学研究所湖尻、裾野、駒ヶ岳及び小塚山観測点のボアホール傾斜計の記録を用いた。降水の影響については過去のデータと照合し、解析期間中の降水については影響を無視できる量であることを確認した。検出された傾斜変動に対して、Okada (1992)の断層モデルを仮定し、断層パラメータを推定した。その際、断層位置と形状は震源分布を参考に決定し、滑り量と滑り角についてグリッドサーチで推定した。相似地震の検出は、上記の震源カタログを基にS波の理論走時の1秒前から5秒後までのタイムウィンドウを用いて波形を切り出して相互相関処理を行い、相互相関係数が0.95以上の観測点が4以上あるものを繰り返し地震の候補として抽出した。さらに、応力降下量3MPaと仮定した際の円形の断層クラックが50%以上重なるものを相似地震と定義した。検出された繰り返し地震に対して、Uchida & Burgmann (2020)の手法に基づきSomerville et al. (1999)による地震モーメントと滑り量とのスケーリングを仮定し、非地震性滑りの時系列を求めた。ただし、2009年及び2019年の震源移動様式、および2019年の傾斜モデルについてはYukuake et al., (2011)、Yukutake et al., (2022)の結果を参照した。

結果及び考察

各期間での群発地震の震源は東西から東南東-西北西方向に走向を持つほぼ鉛直な面上に集中して分布しかつ震源移動が認められた。2009年、2015年及び2019年の拡散係数を比較すると、0.5-1.0、10、3.0m²/sとなり、2009年は拡散係数が最も小さく、2015年群発地震の拡散係数は1オーダー大きいことが分かった。各期間で傾斜変動に基づいて推定した最適な断層モデルは、それぞれ変位量1cm、4cm、0.7cmの右横ずれ変位を伴うことが分かった。最適な断層モデルの横ずれ変位から推定されるモーメントが、同期間中で起こったすべての群発地震の積算地震モーメントと非地震性滑りによるモーメントの和によって表されると仮定すると、10、90、26%のモーメントが非地震性滑りによって解放されたと推定できる。相似地震から非地震性滑りの時系列を求めると、積算でそれぞれ0.15、0.35、0.3cmの滑りが算出された。ただし、2009年には相似地震はほとんど検出されていない。最も速い震源移動が観測された2015年の活動において非地震すべりによるモーメント解放の割合が大きいことから、非地震すべりの寄与の大きさにより震源移動速度などの地震活動様式が支配されている可能性が示唆される。今後の課題として、震源分布とモーメントの和から応力降下量を求めるFischer & Hainzl (2017)のeffective stress dropについて検討を行う。

謝辞

本研究では、神奈川県温泉地学研究所、気象庁、防災科学技術研究所の観測点で記録された連続地震波形記録を使用させていただきました。断層パラメータの推定には気象研究所によるMAGCAP-Vを使用しました。

Time sequence of the seismicity and its relationship with the mid-crustal reflector in Iwaki area

*Takashi IIDAKA¹, Yuta Usuda², Hikaru Iwamori³

1. III, University of Tokyo, 2. Unic Corporation, 3. ERI, University of Tokyo

1) はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震以降、日本列島の地震活動は大きく変化した。これらの地震活動の変化は、東北地方太平洋沖地震に伴い島弧の応力場が変化したことに関係していると考えられる。いわき地域の地震活動においては、東北地方太平洋沖地震以降大きく変化した地震が増加した。この地域で観測された地震記録では、地殻内地震について2種類の後続波が観測され、その原因は臼田・他(2022)によって調べられた。その結果、深さ約15km~23kmと約26km~34kmに2つの反射面が存在し、これら2つの後続波は、それらの反射面でS波が反射したSxS波であることがわかった。これら2つの反射面のうち深さ約26km~34kmの反射面は、モホ面であることがわかった。一方、深さ約15km~23kmの反射面は、地殻内に存在する境界面であることがわかった。この地殻内の反射面は、観測された反射波の振幅が大きいことから、地殻内流体を含む面であることが推定された。また、一連の地震活動の増加は、この地殻内流体と関係する可能性が示唆された。そこで、本研究では、この地域の地震活動の推移と地殻内反射面との関係を調べるとともに、地殻内流体の供給源についても調べるため、この地域の地震活動について詳細に調べた。

2) データ

地震の震源と反射面との関係を調べるため、これら2つの要素をデータとして用いた。地震の震源については、気象庁によって決定された震源を用いた。また、反射面については臼田・他(2022)によって求められた境界面を用いた。

3) 結果

この地域の地震活動は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生までは、ひじょうに低調な地域であった。一方、この地域で求められた地殻内反射面の分布は、南北に約20km~30km、東西に20km程度の範囲で検出された[臼田・他(2022)]。また、この地殻内反射面は、北東側に約20度程度で傾いていることが示された。この地域の地震活動の活発化は、東北地方太平洋沖地震の発生直後から始まった。2011年3月11日に発生した地殻内地震は、反射面の南側の直上で発生している。また、2011年3月11日から4月10日までの地震活動を見ると、地震は反射面の南西の縁をなぞるように活動が活発化していった。また、反射面の北東側でも活動が活発化した。それらに挟まれる間の領域は比較的活動が低い状態であったが、2011年4月11日に、福島県浜通り地震 (M_{JMA} , 7.0)が発生し、この領域全体を埋めるような形で活動が活発となった。2011年3月11日から2012年3月10日までの1年間の地震活動と反射面の分布とを比べてみると、反射面を中心としてその周囲に広がるような形で地震が発生していることがわかった。内陸地震の発生と地殻内流体の関係は、これまでに発生した多くの被害地震において示唆されている。この領域においても、検出された反射面は、反射波の振幅が大きいことから、地殻内流体を含んだ層である可能性が示唆されてきた。これらのことから、地殻内流体を含んだ層に存在する流体は、その浮力によって地殻内を上昇し、地殻内に存在する断層面に到達し、それら断層面の強度を低下させ地震活動が活発化したと考え、この領域の地震活動の増加を説明できる。

次に地殻内流体の供給源について考える。沈み込み帯に伴う水の脱水反応は、多くの研究者によって研究がなされてきた。Iwamori (2007) は、日本列島周下に沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートからの脱水について調べた。それによるとプレートの沈み込みの深さが30km程度の領域において、非常に多くの水が脱水する可能性が示された。さらに、この領域での地震活動についてプレートを含み深さ50kmまでの断面図を調べた。断面図では、沈み込む太平洋プレートの30kmから40kmの深さから、いわきの地震活動の活発域に向かって伸びる地震活動の帯がみられた[Imanishi et al. (2012)]。一方、この領域では2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生以前にも観測研究がなされている [Shelly et al., (2006)]。彼らの研究によると、この領域では、プレート上面からいわきの領域に向かって高Vp/Vsの帯が確認されている。これらのことから、Iwamori (2007) に示されたように太平洋プレートの深さ30kmで脱水した水は、プレート上面からいわ

きにつながる地震活動の断層間を上昇し、いわきの領域に地殻内流体を含んだ反射面を形成し、そこから上昇した流体が断層を弱化させ地震活動の活発化に至ったと考ええると全体の活動について説明が可能であることがわかった。

Searching for Very Low Frequency Earthquake (VLFE) around Western Kuril Trench

*Novia Anggraini¹, Hiroaki Takahashi¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

A Very Low-Frequency Earthquake (VLFE) is a type of slow earthquake that occurs with a frequency of 0.02 to 0.05 Hz. In many studies, VLFE is observed to obtain a hint at the occurrence of fast earthquakes by examining their relation through the spatiotemporal distribution of VLFE activity. For instance, as revealed in a study by Baba et al. (2020), growing and decreasing VLFE activity were detected in some areas around the asperity of the 2011 Tohoku earthquake either before or after the rupture. Around Kuril Trench, VLFE was first recognized by Asano et al. (2008), which occurred in the southwesternmost part of the trench, referred to as the Tokachi region. By using F-net broadband and Hi-net tiltmeter data from July 2003 to December 2007, around 8,500 VLFEs were detected. This study also demonstrated the possibility of VLFE activity in the area with an underdeveloped accretionary prism. Another study is from Baba et al. (2020), which aims to detect VLFE activity around Hokkaido and the Tohoku Pacific coast. The Hokkaido area includes the Tokachi and Nemuro regions. Using F-net data from January 2003 to July 2018, more than 20,000 VLFEs were detected around the Tokachi region. Meanwhile, the Nemuro region was dominated by false detections. This led to the exclusion of this area from their analysis. In this work, we attempt to identify the activity of VLFE around the Western Kuril Trench by reviewing a detection catalog from the previous study, as there is a possibility that VLFE occurs in this area. We make use of a catalog from the study of Baba et al. (2020), which was discerned between March 2007 and July 2018. Here, there have been around 886 detections. The waveforms under examination are produced by F-net stations located on the Pacific coast of Japan and five additional distant stations from IRIS. Then, resampled one sample per second, and filtered by a bandpass filter with a frequency of 0.02-0.05 Hz. The waveforms are examined visually, and the event of VLFE is selected based on the arrival time and amplitude. In addition, local and distant events are removed from the list of selected events. The epicenter location is estimated using a plot of particle motion. Initially, there were six candidates for VLFE. However, after rechecking the probability of these events being surface waves of distant events, no VLFE is detected. The difficulty of VLFE detection is indicative of the low activity of VLFE in this area. It might be due to the plate interface being strongly coupled. Comparing this condition to those of the Japan trench region before the Tohoku earthquake 2011, it suggests that the off Nemuro region probably will be part of major rupture area of potential large event. In addition, the absence of this shallow slow slip in this trench could also notify the possibility of another disaster which is a tsunami. Lindsey et al. (2021), in their study on slip rate deficit and earthquake potential, used geodetic data to infer the high slip rate deficit in the up-dip of the asperity of the Tohoku earthquake before the rupture which later excite a large tsunami. The same case also occurred around Hokkaido in the 17th century (Ioki and Tanioka, 2015) in which a large tsunami was triggered by a very large slip (25 m) in the shallow part of Tokachi and Nemuro segments. For further study, we intend to examine another catalog that is from NIED which recorded probable VLFE from June 2003 to June 2023. Acknowledgment: Dr. Baba of JAMSTEC and Dr. Asano of NIED for providing us with the VLFE catalog, Dr. Yamashita of DPRI Kyoto University, and Dr. Yoshida of GRI for discussion and suggestions.

Room A | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

📅 Thu. Nov 2, 2023 3:00 PM - 4:30 PM JST | Thu. Nov 2, 2023 6:00 AM - 7:30 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S09] PM-2

chairperson:Tomoaki Nishikawa, Takanori Matsuzawa

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

[S09-25] Analysis of tremor in the Tokai region, during a short-term slow slip event in April 1988, using analog seismograms

*Takanori MATSUZAWA¹, Tetsuya Takeda¹ (1. Network Center for Earthquake, Tsunami and Volcano, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09-26] Association of regular earthquakes and shallow tremors in the northern Japan Trench before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Kazuma Matsumoto¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Shukei Ohyanagi³, Masanao Shinohara⁴, Yoshihiro Ito⁵ (1. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Graduate School of Science, Kyoto Univ., 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 5. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.)

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

[S09-27] Structure most correlated with the distribution of shallow tremors at the Kuril Trench off Hokkaido

*Hiroto Yamaguchi¹, Shuichi Kodaira², Gou Fujie², No Tetsuo², Yasuyuki Nakamura², Kazuya Shiraishi², Nobukazu Seama¹ (1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S09-28] Tectonic tremor distribution along the northern Japan Trench by relative hypocenter location using polarization-based phase picking

*Kosuke Minamoto¹, Ryota Hino¹, Kazuma Matsumoto¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S09-29] Comparison of statistical seismicity models of low-frequency earthquakes (LFEs): Its implications for the mechanisms of the LFE activity

*Tomoaki NISHIKAWA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S09-30] Mapping the spatiotemporal evolution of shallow tremor/VLFE episode commonly using Source-Scanning Algorithm

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹ (1. ERI,Tokyo Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.)

Analysis of tremor in the Tokai region, during a short-term slow slip event in April 1988, using analog seismograms

*Takanori MATSUZAWA¹, Tetsuya Takeda¹

1. Network Center for Earthquake, Tsunami and Volcano, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

スロー地震のうちスロースリップイベント(SSE)については水準測量や歪計記録など地殻変動観測に基づく解析が行われており、例えば東海地域の短期的SSEについては、1984年以降の活動状況が歪計記録から明らかにされている(小林他, 2006, 地震)。一方、同地域における深部微動活動について、2000年以前の活動状況は明らかでない。これは、デジタルの連続地震計記録が存在していないことに起因している。こうした過去の微動活動状況を解明するためには、まずアナログ地震計データが残されていること、加えてそれを解析する手法の開発が必要となる。近年、Kaneko et al. (2023, JGR)は、紀伊半島地域におけるアナログ地震計記録に対して機械学習を適用し、微動活動の有無を検出しているものの、震源位置の推定には至っていない。また先述の短期的SSEの解析においても、1998年以前については観測点が限られており、やはり詳細な位置の議論はできていない。防災科研は1970年代終わり頃から関東・東海地殻活動観測網を運用しており、その地震計の連続データが紙記録として残されている。我々は、これを用いて微動源推定を目指したデジタルデータ抽出を試みてきた(例えば、松澤・武田, 2023, JpGU)。以下では、1988年4月の短期的SSEの発生が報告されている期間について、この手法で得られた波形データを、微動源の推定に適用した結果を紹介する。

アナログ記録においては、2時間分の上下動成分の地震計データがペンレコーダーによって一枚の紙に記録されており、毎分0秒~35秒台と、35秒~翌5秒台のデータのトレースがそれぞれ左右のブロックに分かれて上から順に記録されている。この記録をスキャンして画像ファイル化したのちトレースを抽出し、傾きの補正を行うとともに、時刻情報を自動で付与し、さらに毎秒および毎分のティックマークの補正(松澤・武田, 2023)を行って時系列データとして地震波形データを得た。しかしながら、自動処理による波形トレース抽出においては、日付のスタンプやインクの染み、用紙の穴など地震波形以外の色の変化をトレースに含めてしまう場合がある。また色が薄い場合等はトレースとして抽出されなかったり、地震等で振幅が大きな波形となる場合には、隣り合ったトレースと交差するため誤ったデータが抽出されたりする。こうしたデータの混入を防ぐため、抽出されたデータを目視で確認した上で、地震以外の情報が混入した場合については手動で除去するとともに、誤ったデータ抽出など手動除去で対応できない箇所については解析に使用しないこととした。こうして得た35秒毎のトレースを連結することで、微動域周辺の4観測点について連続データを得た。

微動源の解析にあたっては、まずデータに2-8Hzの帯域のバンドパスフィルターを適用した。次に、エンベロープ波形を計算してスムージングし、2分間のデータの波形相関からシグナルの到達時間差を1分毎に計算した。この時間差を用いて、震源の深さを30kmに固定し、一様な速度構造を仮定して震源位置を推定した。その結果、ばらつきはやや大きいものの、微動源の震央位置は現在の微動活動域付近に推定された。また、例えば1988年4月28日の震央位置は4月27日に比べて北東方向に移動している傾向がみられた。デジタルデータ抽出の自動化や解析の高精度化において依然課題は残るものの、アナログ記録から過去の微動活動状況を明らかにできる可能性が本研究により示された。

Association of regular earthquakes and shallow tremors in the northern Japan Trench before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Kazuma Matsumoto¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Shukei Ohyanagi³, Masanao Shinohara⁴, Yoshihiro Ito⁵

1. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Graduate School of Science, Kyoto Univ., 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 5. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.

日本海溝沈み込み帯の北部では、2011年東北沖地震前後のプレート境界のすべり挙動について詳細に研究が行われている。例として、スロー地震の一種である超低周波地震（以下、VLFE）の活動度の増加が報告されている[Baba et al., 2020]。スロー地震の別のタイプであるテクトニック微動（以下、微動）の東北沖地震以前の活動については、Takahashi et al. [in prep]により解析され、活動度の変化は議論されていないが、東北沖地震後とほぼ同じ空間分布を示すことが明らかとなった。我々は、微動源のごく近傍で通常地震（以下、地震）が発生すること、微動と地震が時空間的に連動する傾向があることを示してきた [Matsumoto et al., 2022; 2023]。本研究では微動-地震の連動性に着目し、連動活動の様式が東北沖地震前後で変化しているかを明らかにすることを目的とする。

解析対象期間は2007年10月～2008年6月（以下、期間Ⅰ）と2016年8月～2022年7月（以下、期間Ⅱ）である。期間Ⅰでは、日本海溝北部に設置された47個の自己浮上式海底地震計のデータを用いてTakahashi et al. [in prep]がエンベロープ相関法によりイベント検知と震源決定を行っている。彼らは、検知したイベントを継続時間の違いにより微動（30秒以上）と地震（20秒以下）に分類している。本研究では、地震と分類されたイベントについて、PおよびS波の到達時刻を検測しDouble-Difference（DD）法を用いて震源再決定した。期間Ⅱでは、Ohyanagi et al. [2022]により得られた微動と地震の震源情報を用いた。彼らは、日本海溝北部に設置されているS-net観測点の2016年8月～2022年7月の連続波形にエンベロープ相関法を適用してイベントの検出を行った後、地震探査由来の震動イベントを除去して、微動および地震の候補となるイベントのカタログを作成した。それとは独立に、連続波形に対して深層学習を応用した地震検出を行なって、上記のイベントカタログから検知された地震を除外した上で時空間クラスタリングを適用することで微動カタログが得られている。本研究では、地震と認定されたイベントについての震源を、検知時に検測されたP・Sの到達時刻をもとにDD法により再決定を行い、期間Ⅰでの微動検出基準と同じ継続時間が30秒以上の微動との連動性を解析した。

期間Ⅰでは、ほとんどの微動バーストが群発地震を伴っていた。また、期間Ⅰで群発地震との関連性が確認された領域では、期間Ⅱでも群発地震との関連性が確認されることが多かった。しかし、期間Ⅱでは微小地震の活発化を伴わない微動バーストも多く見られた。地震が連動する頻度の違いが意味することを議論するためには、この変化が東北沖地震とその余効すべりの影響によるものなのか、それとも沈み込み帯がもつ固有の多様性を反映したものなのかを区別する必要がある。そのためには、群発地震を伴う微動バーストと伴わない微動バーストに分類し、それらの時空間的な分布に注目して、それぞれの特徴を明らかにする必要がある。

Structure most correlated with the distribution of shallow tremors at the Kuril Trench off Hokkaido

*Hiroto Yamaguchi¹, Shuichi Kodaira², Gou Fujie², No Tetsuo², Yasuyuki Nakamura², Kazuya Shiraishi², Nobukazu Seama¹

1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

最近の研究で浅部微動は沈み込む海洋地殻上の海山や海嶺と空間的な関係を持って発生していることが示されている。浅部微動は、沈み込み帯のプレート境界変形プロセスの内最も浅い場所で発生するイベントの一つで、条件付き安定領域で発生する。浅部微動の発生にはプレート境界の摩擦や力学的な条件が関わっていると考えられている。これらの条件がプレート境界の不均質構造、例えば海山の沈み込み、で満たされることで浅部微動が発生する可能性が指摘されている。北海道沖の千島海溝では浅部微動が活発に観測される領域と観測されない領域が存在している。しかしながら、これまで浅部微動が発生する領域の沈み込む海洋地殻では十分な解像度で調査が行われておらず、海山や海嶺を示唆する明らかな構造は得られていない。例えば、先行研究で行われた屈折法地震探査は浅部微動の分布域を海溝平行方向に横断しているが海山などを示唆する速度構造は得られていない。本研究では、海底面から海洋地殻上面まで浅部微動と空間的な関係をもつ構造を調査するために、JAMSTECで取得した海溝垂直方向の7測線に沿った反射法地震探査の結果を利用した。我々の結果は、最大で深度20kmまでの沈み込んだ海洋地殻海洋地殻上面の構造を鮮明に示し、沈み込んだ後の海洋地殻上面にみられる凹凸がTremorの分布と極めて良い相関を持つことを示している。凹凸の大きさは海洋地殻の長周期トレンドを取り除いた曲線と観測された海洋地殻上面の差の二乗和平方根をとることで定量化した。沈み込む海洋地殻の凹凸が大きい領域で浅部微動が活発に観測され、小さな領域ではほとんど観測されないことが明らかになった。本研究ではその他に次の構造を定量化した。それは、堆積盆地の堆積物の厚さ、堆積物基盤の深度、Frontal prismの長さ、厚さ、Reflective zoneの位置と長さ及び厚さである。しかしながらこれらの構造と浅部微動に明確な相関はみられなかった。

Tectonic tremor distribution along the northern Japan Trench by relative hypocenter location using polarization-based phase picking

*Kosuke Minamoto¹, Ryota Hino¹, Kazuma Matsumoto¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

日本海溝における通常地震（fast地震）の発生域付近では、しばしばテクトニック微動を含む浅部slow地震が観測され、これらのslow/fast地震は相互に影響し合っていると考えられている。この相互作用の詳細な特徴を明らかにすることは、2011年東北地方太平洋沖地震のようなプレート間巨大地震の発生過程に関する有益な情報を提供しうる。本研究では、新しい位相検測法と震源決定手法を導入することで、日本海溝北部における微動震源の決定精度を向上させることを目的とする。エンベロープ相関法（ECM; Obara, 2002）は微動の検出と震源決定に広く用いられているが、推定される震源の深さには大きな不確実性があると考えられている。日本海溝北部ではTakahashi et al. (in prep.) がECMを用いて微動の検出と震源決定を行っており、通常地震の周辺でプレート境界に沿って微動検出がなされた。しかし震源深さの決定精度は高くないため、それらの相互作用を詳しく論じることはできていない。ECMは観測点間のエンベロープ波形の相似性を仮定しているが、複雑な地下構造から生じた散乱波が相似性を低下させ、到達時間の検測精度が下がる可能性があるためである。そこで本研究では、Hendriyana & Tsuji (2021) が開発したS波の到達に感度をもつ特性関数（CF）を相互相関させることにより、イベントの検知と到達時刻差の検測を行なった。CFを用いることで直達S波に加えて、海底直下の堆積基盤でP波初動からS波に変換された信号（PS変換波）の検知も自動化できる。PS変換波とP波の到達時刻差を用いると、観測点直下の低速度堆積層による走時遅れを補正する観測点補正值を推定することができ、この補正も震源決定精度の改善につながる。さらなる震源決定精度向上の試みとして、微動の近傍で発生する通常地震のP波とS波の到達時間から正確に決定された震源（Matsumoto et al., 2022）を基準として、複数観測点での到達時刻差の差から微動の震源を相対的に決定した。新手法を用いることで、Takahashi et al. (in prep.) よりも約1.5倍の震源を検出し、到達時刻差のRMS残差も減少した。再決定された震源のうち、残差の比較的小さかったイベントはプレート境界モデル（Iwasaki et al., 2015）に沿って分布している。提案された震源位置決定法は、遅い地震と速い地震の相互作用のより良い理解に貢献すると期待される。

Comparison of statistical seismicity models of low-frequency earthquakes (LFEs): Its implications for the mechanisms of the LFE activity

*Tomoaki NISHIKAWA¹

1. Disaster Prevention Research Institute

Slow earthquakes are a general term for various slow fault-slip events. In subduction zones, the relationship between slow earthquakes and megathrust earthquakes has been actively studied (e.g., Obara & Kato, 2016). Quantifying characteristics of slow earthquake activity and monitoring them are important because they may change before a megathrust earthquake (e.g., Matsuzawa et al., 2010; Luo & Liu, 2019).

Statistical seismicity models are useful for quantifying seismicity characteristics. For the activity of ordinary fast earthquakes, the epidemic-type aftershock-sequence (ETAS) model is widely used (e.g., Ogata, 1988). However, there is still no standard statistical model for slow earthquake activity. Statistical modeling of low-frequency earthquakes (LFEs), a type of slow earthquake, has begun recently. Lengliné et al. (2017) and Tan & Marsan (2020) proposed statistical models similar to the ETAS model (L model), in which the LFE occurrence rate is expressed as the summation of a stationary background rate and the effect of each LFE inducing future LFEs. Ide & Nomura (2022) proposed a statistical model (IN model) for tectonic tremors, a swarm of LFEs. Their model was based on an approach different from the L model; they described the probability distribution of interevent times using log-normal and Brownian passage time distributions. Furthermore, their model does not explicitly include the effect of event-to-event triggering.

Identifying the best statistical model for LFE activity is important for elucidating the mechanisms governing LFE activity. However, the existing statistical models have never been compared. Here, I applied the existing models to M 0.6 or larger LFEs in the Nankai Trough (Kato & Nakagawa, 2020) and examined their performance using Akaike's information criterion (Akaike 1974). As a result, I found the IN model often outperforms the L and ETAS models. This result indicates that the effect of LFE-to-LFE triggering is not significant. In other words, the cascade model (e.g., Ellsworth & Bulut, 2018), in which the rupture of one asperity leads to the rupture of the next asperity, cannot explain LFE activity. This is also evident from the fact that intense LFE bursts do not decay gradually but rather stop abruptly. My result places constraints on future physical modeling of LFE activity.

Mapping the spatiotemporal evolution of shallow tremor/VLFE episode commonly using Source-Scanning Algorithm

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹

1. ERI, Tokyo Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.

スロー地震は、西南日本の深さ30-40 kmのプレート境界付近で発見されて以降(e.g., Obara, 2002)、世界中の沈み込み帯で確認されており、スロー地震発生域は巨大地震の震源域に隣接することが知られている(Obara & Kato, 2016)。紀伊半島沖においては、1944年東南海地震の震源域の浅部延長で、微動や超低周波地震(VLFE)といった浅部スロー地震活動が繰り返し発生していることが報告されている(e.g., Takemura et al., 2022)。同地域で、2020年12月から2021年1月にかけて活発な浅部スロー地震活動が発生し、微動やVLFEがF-netおよびDONETの定常観測網で観測され、その活動パターンや震源パラメータが研究されてきた(e.g., Ogiso & Tamaribuchi, 2022; Takemura et al., 2022; Yamamoto et al., 2022)。このエピソードを含め、一般的に微動とVLFEは時空間的に同期していると考えられているが、それぞれを異なる手法で震源位置等の推定がなされることがほとんどである。そこで本研究では、高密度に展開された機動的海底地震計(OBS)アレイとDONETで観測された波形を用い、Source-Scanning Algorithm (SSA) (Kao and Shan, 2004)を適用することで、微動とVLFEの震源位置を共通の手法で推定し、それぞれの活動の時空間発展を比較した。本研究で用いた高密度OBSアレイは、2019年9月20日から2021年6月1日までDONET1とDONET2の間の領域に設置され、固有周波数1 Hzの3成分地震計15台で構成されている(Akuhara et al., 2023)。OBSアレイとDONETの連続波形データの上下動成分について、微動とVLFEの解析用にそれぞれ2-8 Hzと0.1-0.15 Hzの異なるバンドパスフィルターをかけ、エンベロープに変換した。次に、これらのデータをいずれも4分の時間窓で規格化し、時刻を5秒ずつずらしながらSSAを適用し、微動とVLFEの震源位置と時刻を推定した。対象としたエピソードの初期フェーズ(2020年12月12日から7日間)を解析したところ、微動とVLFEは、ともにDONET1の東側であるBノード付近で活動が開始し、そこから南西へメインフロントが5 km/dayほどで移動するパターンを示し、既往研究のカタログと同様の結果を示した。本研究により、共通の手法を用いて微動とVLFEの震源位置を決定できることが確認された。また、VLFEについては既往のカタログにはないイベントについても多数の震源位置が推定されており、SSAの有用性ととともにこのスロー地震エピソードの全体像を網羅的に明らかにすることが可能になると考えられる。