Mon. Oct 24, 2022

ROOM B

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

[S09] AM-1

chairperson:Takao Kumazawa(Institute of Statistical Mathematics), Kazuyoshi Nanjo(University of Shizuoka)
9:30 AM - 10:30 AM ROOM B (4th floor (Large Conference Room))

[S09-01] The research and application of the spherical space-time ETAS model

*ZIYAO XIONG[1], Jiancang Zhuang[1] (1. The Institute of Statistical Mathematics)
9:30 AM - 9:45 AM

[S09-02] Retrieving successive occurrence of earthquakes using ETAS -Largest and second largest earthquakes in series of earthquakes-

*Tetsuo HASHIMOTO[1], Takashi Yokota[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Aichi Institute of Technology)
9:45 AM - 10:00 AM

[S09-03] Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA[1] (1. Institute of Statistical Mathematics)
10:00 AM - 10:15 AM

[S09-04] Analysis of the non-stationarity of the earthquake swarm activities in the Noto Peninsula

*Kumazawa Takao[1], Ogata Yosihiko[1] (1. The Institute of Statistical Mathematics)
10:15 AM - 10:30 AM

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

[S09] AM-2

chairperson:Yuta Amezawa(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Yukihiro Nakatani(Kagoshima University)
10:45 AM - 12:00 PM ROOM B (4th floor (Large Conference Room))

[S09-05] Long-living earthquake swarm at the NE of Noto peninsula – Hypocenter migration and driving mechanism–

*Yuta Amezawa[1], Yoshihiro Hiramatsu[2], Ayumu Miyakawa[1], Kazutoshi Imanishi[1], Makoto Otsubo[1] (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University)
10:45 AM - 11:00 AM

[S09-06] Mechanisms that cause swarm and crustal activity occurrences since the end of 2020 in the NE Noto Peninsula from perspectives of previous studies

*Masatoshi MIYAZAWA[1] (1. Kyoto Univ.)
11:00 AM - 11:15 AM

[S09-07] Regular Earthquake Activities Accompanied by VLFE Activities along Ryukyu Trench, Southwestern Japan

*Youichi ASANO[1] (1. NIED)
11:15 AM - 11:30 AM

[S09-08] Spatio-temporal relationship between regular earthquakes and shallow tremors in the east to northeast off Kikaijima Island observed by ocean bottom seismic network

*Yukihiro Nakatani[1], Hirotsugu Yanagida[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[3], Kazuo Nakahigashi[4], Masanao Shinohara[5] (1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 3. SEVO, Kyushu Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Science and Technology, 5. ERI, UTokyo)
11:30 AM - 11:45 AM

[S09-09] Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
11:45 AM - 12:00 PM

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

[S09] PM-2

chairperson:Kazuaki Ohta(NIED), Satoru Baba(University of Tokyo)
4:00 PM - 5:45 PM ROOM B (4th floor (Large Conference Room))

[S09-10] **Temperature control of episodic tremors with slip in the Nankai subduction zone**

*Ryoya IKUTA[1], Yui Kobayashi[2], Tatsuhiko Kawamoto[1] (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Shizuoka Higashi High School)

©Seismological Society of Japan

4:00 PM - 4:15 PM

[S09-11] Spatial variation of shallow tectonic tremor energy radiation in the Nankai trough

*Kazuaki OHTA[1], Katsuhiko SHIOMI[1], Takanori MATSUZAWA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:15 PM - 4:30 PM

[S09-12] Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE[1], Shunichi Nomura[2] (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University)

4:30 PM - 4:45 PM

[S09-13] Detection of Low-Frequency Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)

*Aitaro KATO[1], Hiroshi Tsuruoka[1], Masanao Shinohara[1], Kentaro Emoto[2], Tsunehisa Kimura[3], Kenji Okamura[4], Yutaka Kikuchi[5] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyushu University, 3. DAS Consultant (agent of Sintela), 4. Kochi University, 5. Kochi University of Technology)

4:45 PM - 5:00 PM

[S09-14] Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

*Satoru BABA[1], Eiichiro Araki[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Takane Hori[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Shuhei Nishida[1], Takashi Yokobiki[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

5:00 PM - 5:15 PM

[S09-15] Swarms of microearthquakes associated with tectonic tremor bursts in the northern Japan Trench

*Kazuma Matsumoto[1], Ryota Hino[1], Hidenobu Takahashi[2], Masanao Shinohara[3] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

5:15 PM - 5:30 PM

©Seismological Society of Japan

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

[S09] AM-1

chairperson:Takao Kumazawa(Institute of Statistical Mathematics), Kazuyoshi Nanjo(University of Shizuoka)

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 10:30 AM ROOM B (4th floor (Large Conference Room))

[S09-01] The research and application of the spherical space-time ETAS model

*ZIYAO XIONG[1], Jiancang Zhuang[1] （1. The Institute of Statistical Mathematics）

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-02] Retrieving successive occurrence of earthquakes using ETAS -Largest and second largest earthquakes in series of earthquakes-

*Tetsuo HASHIMOTO[1], Takashi Yokota[2] （1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Aichi Institute of Technology）

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-03] Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA[1] （1. Institute of Statistical Mathematics）

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-04] Analysis of the non-stationarity of the earthquake swarm activities in the Noto Peninsula

*Kumazawa Takao[1], Ogata Yosihiko[1] （1. The Institute of Statistical Mathematics）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

The research and application of the spherical space-time ETAS model

*ZIYAO XIONG[1], Jiancang Zhuang[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

The spherical space-time ETAS model is modified from the widely used planar space-time ETAS model (Zhuang et al., 2002; Zhuang, 2012). Different from the traditional space-time ETAS model is only suitable for studying within a small space range; the new version is applicable to analyze and forecast seismicity in high latitude regions or on a global scale. Apply the global CMT catalog to the new model, showing that the model can reasonably simulate the global seismicity variation. And the model supports better modeling of seismic activities and interactions in global regions. Moreover, we calculate the seismicity rates of the seismicity belt in the global area to further analyze the characteristics of earthquake sequences.

© The Seismological Society of Japan

Retrieving successive occurrence of earthquakes using ETAS -Largest and second largest earthquakes in series of earthquakes-

*Tetsuo HASHIMOTO[1], Takashi Yokota[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Aichi Institute of Technology

【はじめに】地震が連動して発生しているという場合、時間的・空間的に近接している地震を指していると考えられるが、この近接しているというはあいまいで、Fuzzyという概念に通ずるものがある。そこで、Fuzzyのメンバーシップ関数として、2地震の発生時間間隔と震央距離をパラメータとするETASの強度関数（Ogata, 2011）を利用することにした。**【連動の検索】**ETASの強度関数としては$\lambda = \mu + K/(t-tj+c)^{p}$ ・$[(x-xj,y-yj)Sj(x-xj,y-yj)^{t}/e^{\alpha(Mj-Mc)}+d]^{-q}$(Ogata(2011))で、Mc＝５の等方的なモデルの数値（μ＝7.97e-06, K=8.79e-05,c=4.48e-03,p=0.891,α=1.257,d=4.88e-03,q=1.763)を利用した。 今回、連動の条件として、λがバックグラウンドの地震活動のμの3倍以上である場合としてみた。地震のデータは、ISCGEMv8の41711個を用いた。その結果、上記の条件を満たす地震の組み合わせは465794個のペアが見いだされた。**【グループ化】**これらの地震ペアのデータを用いて、地震のグループ化を試みた。第1段階では1つの地震ペアごとを1つのグループとし、その1つのグループを種として、種と同じ地震を含むグループがあれば、それらを一つのグループとしてまとめ、地震ペアの全グループにそのような検索を行った。順次、グループ化されていない別のペアのグループを種として、グループ化し、すべての種を一巡してグループ化を行う。第2段階として、新たに出来たグループで、同様の処理を行った。6段階程度、この処理を繰り返すことで、グループが定常化していった。その結果、4866個のグループが得られた。上記のETASのパラメータでは、1900年初頭に発生した地震において、2000年代の地震まで連動しているという結果となってしまい、例えば1904年のアリューシャン列島の地震のペアを種として、日本の東北地方にまで及ぶ広範囲の地震を1つのグループとしてしまった。**【検索条件の追加】**ETASのパラメータ値を適宜変更していくことで、より連動のグループ化するのに適切なパラメータ値を検索する方法もあるが、ここでは、上記のモデルを用いながら、宇津の余震発生の活動レベルを推定する式$(n=10^{0.85(M1-Ms)-1.83}/(t+0.3)^{1.3}$, Usu,1971)を用いて、Ms=M4の発生が0.01個/日になる時間のまでで足切りをすることにした。その結果、74618個のペアが見出され、 4593グループとなった。**【グループ化の結果】**これらのグループにおいて、１グループに3個以上の地震があるグループは2022個あった。1グループの地震数で色分けした震央分布を図1上に示す(例えば1グループ地震数150地震以上が赤で示され、６グループが抽出されている)。多数の地震で構成されるものは概ねMw8.55以上の地震活動に対応しているように見える。フィリピンからニューギニアを経てニュージーランドに続く地震活動域では、超巨大地震がないものの、まとまった地震数のある地震のグループが見られる。北米西海岸や西アジアから地中海にかけた領域では大規模な地震が少なく、少ない地震数のグループとなっている。**【最大地震と2番目の規模の地震】**グループ内で、２番目の規模の地震が最大地震の前に発生した場合（マイナス）が最大の前震（590個、M差の平均0.33）、後に発生した場合（プラス）が最大余震（1432個、0.63）となる。M差が0.3以下のものは、前震的なもので357個、余震的なもので458個、M差が1.2以下のものは、それぞれ、574個と1238個となった。双子地震的なもの(M差0.3以下)を考えると、全体で見てみると、812個/2022個(=0.4)が双子地震になる頻度となった。2番目の規模の地震が前震的に発生すると、357個/590個(=0.6)と、より双子地震になりやすいことになる。また、余震的なものでM差が1.2以下であるものは1238個/1432個(=0.9)で、その範囲に収まってしまうようである。**【大規模地震の連動との比較】**それらの最大地震と2番目の規模の地震の発生時間間隔(単位:日)をみた。発生時間間隔とその地震数をプロットしたものを図の左下に示す。最大地震の前後に2番目の規模の地震が多く発生していることが分かる。図の右下には、大規模地震の連動についての調査（橋本・横田、論文準備中）を同様にプロットしてみた。今回の手法で抽出した最大地震と2番目の規模の地震の発生時間間隔のものより、大規模地震の連動は、地震発生間隔がだらだらと長く続く傾向が見える。**【おわりに】**今回グループ化された地震については、まだ、広めの連動を抽出している場合も見受けられ、より精査していく必要がある。

© The Seismological Society of Japan

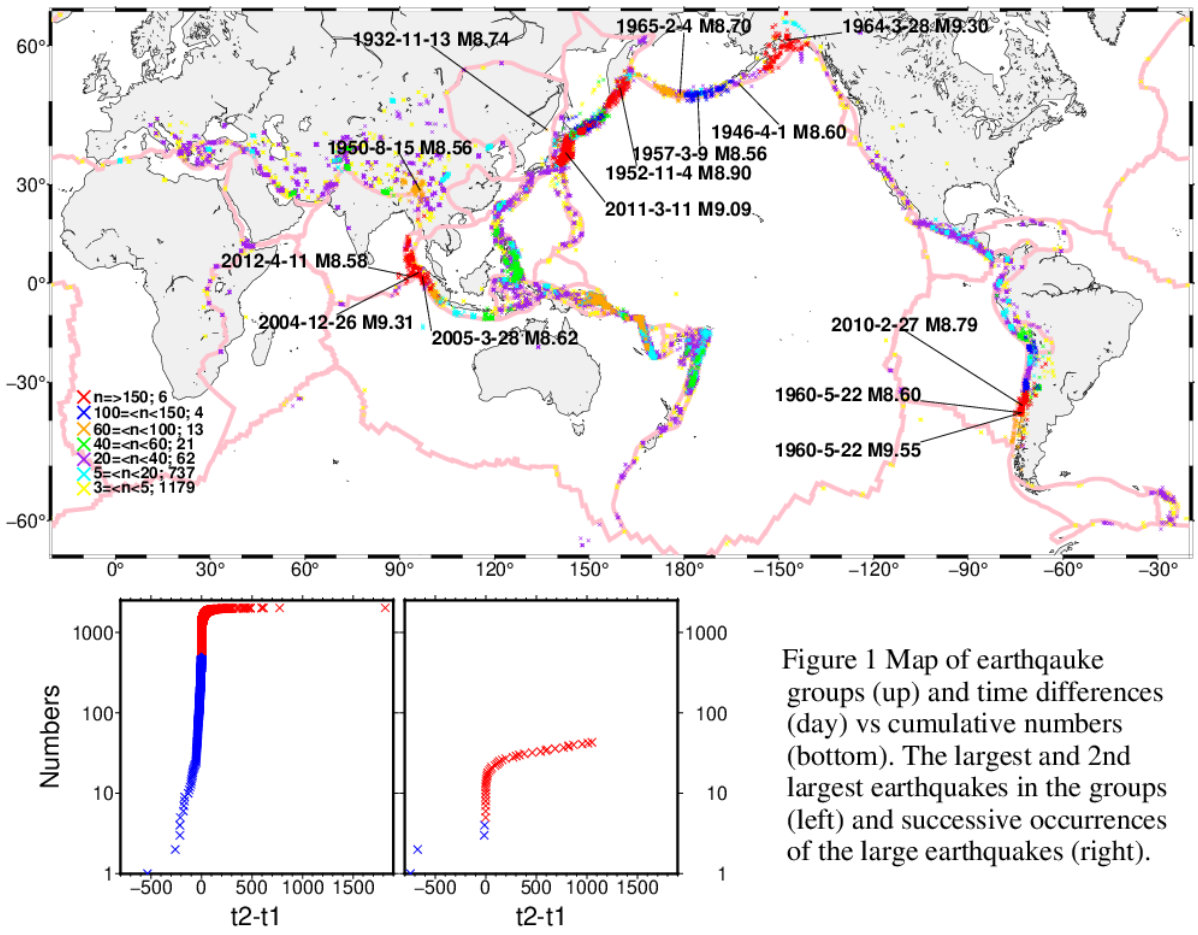


Figure 1 Map of earthqauke groups (up) and time differences (day) vs cumulative numbers (bottom). The largest and 2nd largest earthquakes in the groups (left) and successive occurrences of the large earthquakes (right).

© The Seismological Society of Japan

Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA[1]

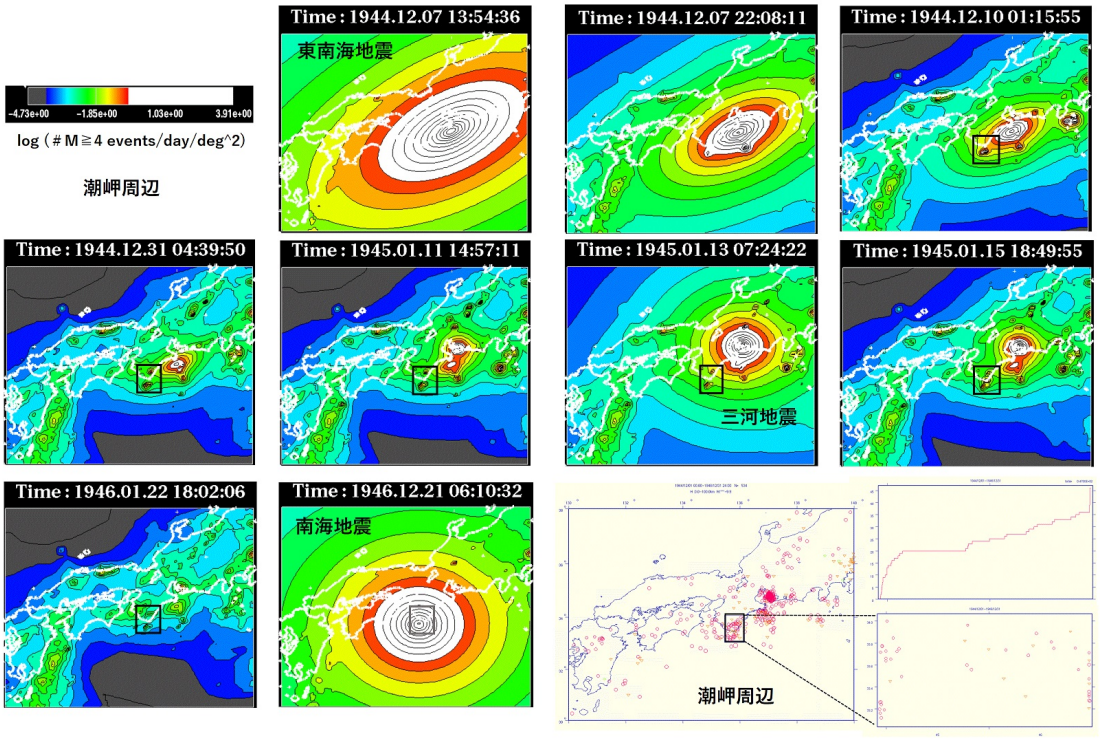
1. Institute of Statistical Mathematics

1944年前から1946年にかけて西日本のいくつかの地域で、地震活動の特徴的な変化（静穏化や活発化）が認められる。南海トラフの巨大地震前後の地震活動を解析するために、階層的時空間Epidemic Type Aftershock Sequence（HIST-ETAS）モデルを当てはめ、背景地震発生強度（M≧4.5）に併せて連鎖的誘発活動の強度変化を示す。それらを動画として視覚化することで、地震活動の移動や、一過性の群発地震活動などを認知できる。たとえば1944東南海地震（M7.9）余震活動から内陸直下型の1945三河地震に至るマイグレーションが見られる。また紀伊半島南端付近で、東南海地震から1946南海地震（M8.0）に至るまで、群発地震活動が減衰せず継続している様相がある。因みに中央気象台の潮岬測候所の地震原簿には、東南海地震の余震減衰途中から継続する300近い群発地震が記録されている。この間の持続的な活動は、地震活動が低下した他の地域には見られない特徴である．これは、東南海断層と近傍の南海断層面付近のプレート境界面における一部で非地震性すべり（slow-slip）を起こしていた可能性が考えられる。そこで、下記文献を再訪議論する。
1926年から 1950 年までの震源データを使って更に詳しく説明する。まず太平洋戦争末期および戦後にもかかわらず、地震検知率は一様であることを確認した。 その結果、西日本地域では南海地震前に地震活動が減少していた。特に和歌山地方の活動低下は顕著である。この静穏化は和歌山測候所の有感・無感地震回数の時系列にも表れている。さらに、東南海地震と南海地震の断層モデルによると, それぞれの時期の西日本の各地域での地震活動変化はクーロン破壊応力変化CFFの値に良く対応する。すなわち, 正のCFFの地域では巨大地震を契機に活動が活発化し, 負のCFFの地域では静穏化している。そのうえで、東南海地震以前から和歌山市周辺地域, 兵庫県南部地域、四国東部地域での静穏化、また東南海地震以後から南海地震までの紀伊半島南端地域の活発化（群発性）が目立つ。これらはそれぞれ東南海地震や南海地震の断層モデル近傍の深部領域でのslow-slipに起因した周辺部でのCFFの地域性パタンで説明が可能である。 もし時間が許せば、西日本の各地域での余震の静穏化とその後の他の場所での地震の時空間的な確率的因果関係を示したい。

参考文献

尾形良彦 (2004) 1944東南海地震および1946南海地震前後の西南日本における地震活動変化について、地震予知連絡会会報 第70巻(7-3), pp. 378-383. http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou70/07-03.pdf
Ogata, Y. (2004) Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes, J. Geophys. Res., 109 (B3), B03308, doi:10.1029/2003JB002621.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Analysis of the non-stationarity of the earthquake swarm activities in the Noto Peninsula

*Kumazawa Takao[1], Ogata Yosihiko[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

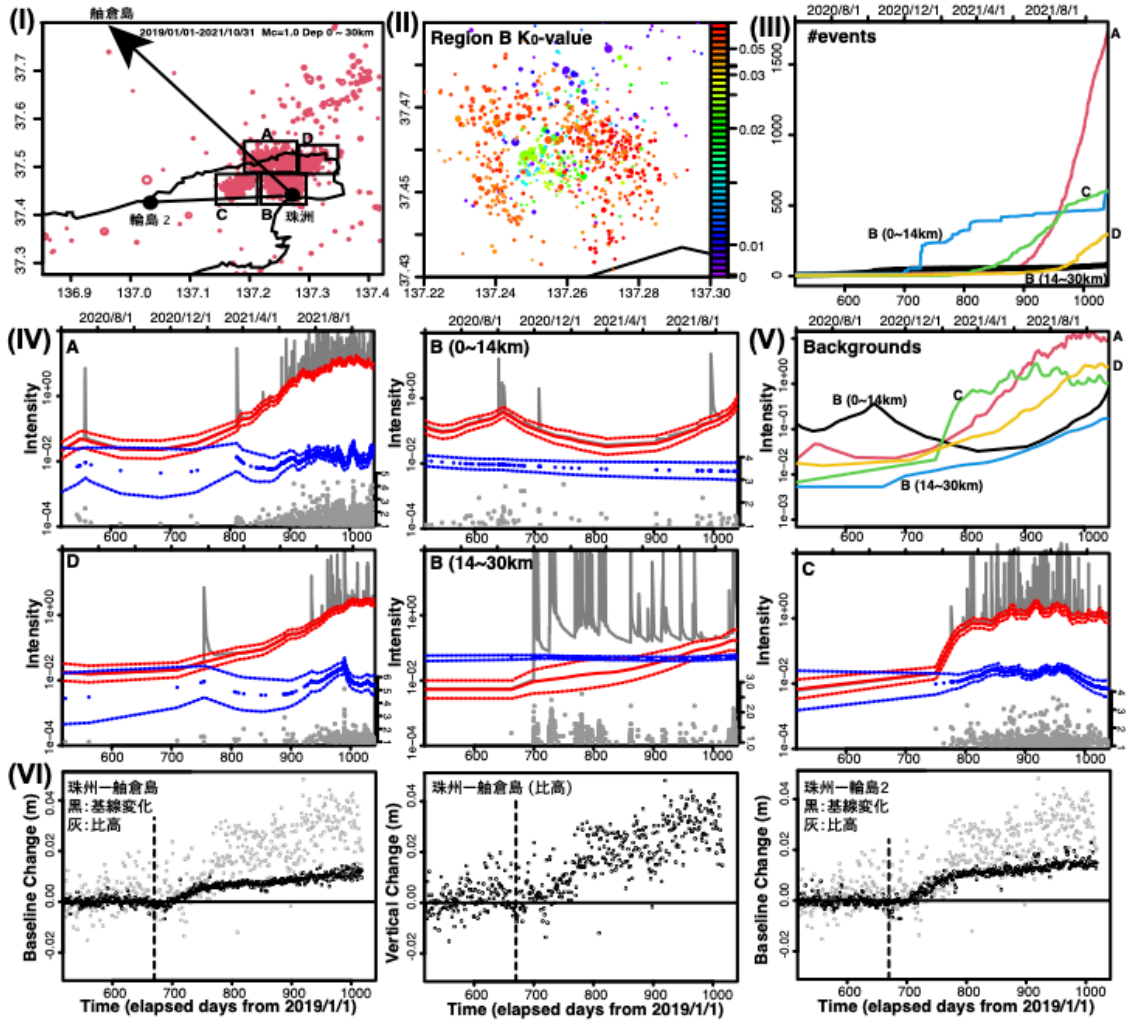
地震時系列データからは様々な統計量を抽出できるが、中でも背景地震活動強度は地震活動の予測の観点からも重要な意味を持つ。我々の研究ではETASモデルの背景地震活動度の時間変動をベイズ法で推定する点過程モデルを用い、2020年末から発生した石川県能登半島の群発地震活動に適用して、その地震活動の特徴を調べた。

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ている．2022年8月15日時点での最大地震は2022年6月19日に北部領域で発生したM_J 5.4である． GNSS観測では2020年11月末頃から非定常な変化が見られ，輪島２－珠州観測点および珠洲－舳倉島観測点の基線距離で約１cm程度の増加，及び珠州観測点の舳倉島との比高ではバラツキ誤差が大きいが３cm程度の隆起が観測されている．

各領域の群発地震活動に非定常ETASモデル (Kumazawa and Ogata, 2014) を当てはめた．このモデルは従来のETASモデルの背景強度と余震的誘発率のパラメータが，時間に依存する関数と仮定し，これらをベイズ法で推定する．背景強度は対象領域全般のゆっくりした応力変化や流体貫入による断層弱化などに起因すると考えられる. 余震的誘発率は主に領域内の先行地震による連鎖効果の変化 (余震的誘発率) を示す.

南東部領域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．同時に深部では，浅部の地震群をとり囲むようにドーナツ状に活発化し，背景強度は現在に至るまで増加傾向にある．
南東部領域深部の活発化以降、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．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

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

[S09] AM-2

chairperson:Yuta Amezawa(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Yukihiro Nakatani(Kagoshima University)

Mon. Oct 24, 2022 10:45 AM - 12:00 PM ROOM B (4th floor (Large Conference Room))

[S09-05] Long-living earthquake swarm at the NE of Noto peninsula – Hypocenter migration and driving mechanism–

*Yuta Amezawa[1], Yoshihiro Hiramatsu[2], Ayumu Miyakawa[1], Kazutoshi Imanishi[1], Makoto Otsubo[1] （1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University）

10:45 AM - 11:00 AM

[S09-06] Mechanisms that cause swarm and crustal activity occurrences since the end of 2020 in the NE Noto Peninsula from perspectives of previous studies

*Masatoshi MIYAZAWA[1] （1. Kyoto Univ.）

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-07] Regular Earthquake Activities Accompanied by VLFE Activities along Ryukyu Trench, Southwestern Japan

*Youichi ASANO[1] （1. NIED）

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-08] Spatio-temporal relationship between regular earthquakes and shallow tremors in the east to northeast off Kikaijima Island observed by ocean bottom seismic network

*Yukihiro Nakatani[1], Hirotsugu Yanagida[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[3], Kazuo Nakahigashi[4], Masanao Shinohara[5] （1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 3. SEVO, Kyushu Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Science and Technology, 5. ERI, UTokyo）

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-09] Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA[1] （1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

11:45 AM - 12:00 PM

©Seismological Society of Japan

Long-living earthquake swarm at the NE of Noto peninsula –Hypocenter migration and driving mechanism–

*Yuta Amezawa[1], Yoshihiro Hiramatsu[2], Ayumu Miyakawa[1], Kazutoshi Imanishi[1], Makoto Otsubo[1]

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University

はじめに

群発地震とは，群を抜いて規模の大きな地震（本震）を持たず，活動時系列が改良大森公式に従わない地震活動である．群発地震に伴い震源migration（地震活動域の時空間発展）が観測され，それらは流体圧の拡散モデルで説明可能であることが知られている．ゆえに，高圧の流体による間隙流体圧の時空間変化が群発地震の駆動に影響していると考えられている．また，群発地震の継続時間は数時間から数年と非常に多様であり，それが震源migrationの拡散係数に逆相関する可能性が報告されている（Amezawa et al., 2021）．しかし，数年に渡り長期化する群発地震については観測例が少なく，長期化要因の検討は不十分であった．長期化要因の検討は群発地震のメカニズムを理解するために重要である．

2018年に能登半島北東部で発生した群発地震は，2020年12月に活発化し，発生から4年以上継続している．本群発地震の震源分布は，活動域南部のSクラスタと，そこから西・北・北東部に位置するW・N・NEクラスタに大別できる．これまでの種々の解析で，本群発地震には地殻内流体が関連している可能性が判明した（地震調査委員会「石川県能登地方における地震活動の評価」）． 本研究では，高精度に再決定した震源分布に基づき，各クラスタにおける震源migrationの評価と震源分布の時空間発展の解析から，本群発地震の駆動メカニズムと長期化要因を検討した．

データ・手法

2018年–2022年6月に発生したM0.0の20,542地震（気象庁一元化震源）について，Double-Difference法（Waldhauser & Ellsworth, 2000）を適用して震源再決定を行った．入力データであるdifferential-timeは，気象庁検測値から作成したものと，地震波形の相互相関解析に基づいて作成したものを使用した．なお，後者にはP・S波の理論走時±1秒で切り出した上下動成分について5–10 Hzの帯域通過フィルタをかけて地震ペア毎に相互相関係数を計算し，それが6観測点以上で0.8以上のものを用いた．

震源migrationの評価は，Amezawa et al. (2021)の手法に従い，各クラスタの拡散の時空間原点をグリッドサーチしつつShapiro et al. (1997) で提案された間隙流体圧の拡散モデルを当てはめ，拡散係数を推定するという方法で行った．

結果

活動初期の初期震源に使用した地震のうち20,399地震について震源再決定することができた．震源再決定の結果，Sクラスタの震源は深さ10–15 kmにかけて円柱状に分布し，深さ15–20 kmでは円環状に分布していることや，Nクラスタ内部には約30で南東傾斜する長さ1 km程の面的な震源分布が複数存在すること等，これまで以上に震源分布の複雑な特徴を詳細に捉えることができた．

W・N・NEクラスタにおいて震源migrationが観測され，その拡散係数はそれぞれ0.098, 0.094, 0.12 m^2/sであった．一方，Sクラスタの地震活動は複数の間欠的な活動で構成され，全体の時空間発展は一つの拡散モデルで説明できないが，間欠的な各活動について着目すると拡散的な震源migrationが確認された．

議論

地震活動の深さ方向の時間変化に着目すると，群発地震の発端となったSクラスタでは，活動開始から2020年11月頃まで震源の深さが浅くなる傾向を示す．これは，深部からの流体供給を示唆する．また，2020年12月にはSクラスタの深部15–20 kmで地震活動が発生し，拡散係数が~50 m^2/sの非常に高速な震源migrationが観測された．このことは，Sクラスタ底部において高圧になっていた流体が一気に解放され，新

© The Seismological Society of Japan

たな流体供給路が形成されたことを示唆する．その結果，より多量の流体が供給されるようになり，間隙流体圧が本地域の最小主応力を超え，Sクラスタから他クラスタへの流体供給路が開き，他クラスタでの地震活動が発生したと考えられる．

その後，Sクラスタでは深さ15–20 kmで間欠的な地震活動が続いている．これは，クラスタ底部から定常的に流体が供給されているが，一度に他クラスタへ移動できる量が限られていることを示唆する．要因としては，封圧が高く間隙流体圧が少しでも拡散すると有効法線応力の低下が不十分となること等が考えられる．また，W・N・NEクラスタにおける震源migrationの拡散係数は比較的小さく，本群発地震域は低浸透率な環境であることが示唆される．以上から，本群発地震を長期化させている要因として，周辺への間欠的な流体移動および低浸透率な環境が考えられる．

謝辞

本研究では，気象庁一元化震源，気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・京都大学・東京大学の観測点で観測された地震波形，F-netのCMT解を使用しました．感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Mechanisms that cause swarm and crustal activity occurrences since the end of 2020 in the NE Noto Peninsula from perspectives of previous studies

*Masatoshi MIYAZAWA[1]

1. Kyoto Univ.

・はじめに
2020年末頃から始まったと考えられる能登半島の群発地震活動は、2021年9月にM5.1地震と2022年6月にM5.4地震が発生するなど、複数年に及ぶ長期的な活発な活動となっている。GNSS観測によれば、珠洲を中心に地盤の隆起が続いている。定常的な地震・地殻変動観測に加え、2021年からは様々な調査が行われ始めており、それらを統合すれば、地震発生域である深さ10km程度の場所に膨張源があり、その地殻変動に伴い地震が発生していると考えられる（第375回地震調査委員会, 2022）。現在も調査研究が進められている中で、この活動の真相に迫るには限界があるが、これまでの知見を基に、なぜ今この場所でこのような群発地震活動が発生しているのかを考察する。

・能登半島と応力場
能登半島北東部には、古第三紀漸新世から新第三紀中新世前期（約3000万年前から約1500万年前）の日本海形成期から拡大期に形成された火成岩が分布しており（産総研地質調査総合センター, 2022）、この時代の火山活動の存在が示唆されている。また重力異常の分布は火山活動によるカルデラ構造の可能性を示している（山崎・河野, 1973）。ただし現在は火山活動が認められず、火山性の地震活動も観測されていない。このような場所で地殻活動が突然始まるには、なんらかのきっかけがあったと考えられる。1993年能登半島沖地震(M6.6)や2007年能登半島地震(M6.9)の影響もありうるが、2011年東北地震(M9.0)の影響が大きいと思われる。一般的に、プレート間で発生する大地震後には、沈み込んだプレートの上に乗る大陸プレートの陸域で、火山活動が活発化することが知られている（e.g., Hill et al., 2002, PhysToday）。その活動は、地震の直後だけではなく、十年という単位で遅れを伴って活発化している。これは上部マントルの粘弾性構造の影響を受けた準静的応力変化による。2011年東北地震に伴い日本列島では地震時のみならず、地震後も粘弾性の影響を受けた余効変動が観測され続けている。能登半島のみに着目すると、東北地震前はNW-SE圧縮の逆断層型の背景応力場であったのに対し、地震時にはE-W伸張の応力変化が推定されている(e.g., Terakawa & Matsu'ura, 2013, EPSL)。粘弾性を考慮したモデル計算では、E-W伸張の応力変化が時間発展する様子が推定されている(Becker et al., 2018, EPSL)。GNSS記録から推定した歪み速度場からは、NW-SEの背景圧縮場に対し、東北地震後（2017年から2020年）はNNW-SSE圧縮かつENE-WSW伸張場に変わったことが示されている（深畑ほか, 2022, 地学雑誌）。

・能登半島の地殻活動の源
2020年末から観測されている地殻変動は、地下約10kmの場所に変動源を置くと説明できると考えられている（第375回地震調査委員会, 2022; 西村私信）。モデルとして、断層滑り、球状圧力源、開口クラックのいずれでも説明可能である。限られたGNSS観測点数のため、客観的なモデルの優位性については議論の余地が残されているものの、開口クラックモデルが最も現象を説明しやすいと考える。推定されている開口クラックモデルは、NW-SE走向のSW傾斜の形状である。これは2011年東北地震後の応力場に対して整合的である。さらに開口クラックモデルを用いて静的応力変化を計算すると、現在活発な地震活動を示している西側、北側、東側領域で正値が求まり、地震活動の増加を説明することができる。ここで応力変化の影響を受ける地震活動のメカニズムは、この地域で発生している主な地震のメカニズム（NW-SE圧縮の逆断層型）であるとし、活断層の珠洲沖セグメント延長で発生していると仮定している。

© The Seismological Society of Japan

・群発地震の発生メカニズム
以上をまとめて考えると、能登半島北東部では、2011年東北地震に伴う粘弾性変形により徐々に応力場が変化し、新たに形成されたNNW-SSE圧縮応力場に対応する開口クラックが深さ10 km程度に形成された。日本海拡大期の火山活動の名残として地殻内に残留していたと考えられる流体が、減圧に伴い浮力を得て、このクラックに沿って上昇し、地殻変動をもたらした。同時に、開口クラックと流体は周囲の応力場を変化させ地震活動を誘発し、群発地震活動（西側、北側、東側領域）として観測されている。南側領域の地震活動は深さ分布が他の３領域と異なっているため、流体の上昇と、開口クラックに起因する破壊が原因と考えられる。ここで言う開口クラックモデルとは、複雑な現象を１つのモデルに単純化させたものに過ぎないことに注意が必要である。今後の地殻活動は、地下からの流体の供給やその駆動となる応力場が続く限り、継続する可能性がある。
かつての火山活動の名残として、孤立型の準火山性スロー地震活動（Aso et al., 2013, Tectonophysics）があれば、流体の存在を支持する証左となりうる。気象庁一元化震源カタログによると、これまで能登半島北東部で低周波地震は観測されていない。ヒクランギ沈み込み帯では、遠地地震波によるテクトニク微動の動的誘発の発見(Fry et al., 2010, GRL)によって、背景微動活動が見つかった例があるが、能登半島では2003年十勝沖地震、2011年東北地震の表面波による動的誘発は見つからず、また今の群発地震活動中に起きた2021年アラスカ沖の地震(Mw8.2)でも確認できなかった。一方、2011年東北地震のP波による誘発地震活動の可能性は示唆されている(Miyazawa, 2012, EPS)が、スロー地震の存在を決定づけるほどのものでもない。

謝辞：本議論にあたり、平松氏（金沢大）、飯尾氏、西村氏、深畑氏、吉村氏（京大）からコメントをいただきました。

© The Seismological Society of Japan

Regular Earthquake Activities Accompanied by VLFE Activities along Ryukyu Trench, Southwestern Japan

*Youichi ASANO[1]

1. NIED

南海トラフ沿いの日向灘から南西諸島海溝に沿った領域では，プレート間における地震・超低周波地震活動が比較的活発である．この領域ではトラフや海溝の近傍でエピソディックな超低周波地震活動がしばしば発生しており，その活動域よりも北西側，すなわち深い側で通常の地震が概ね棲み分けるように発生している．著者らは，このエピソディックな超低周波地震活動と通常の地震活動が同期発生するケースの存在を報告するとともに［Asano et al. (2019AGU) ］，超低周波地震と通常の地震の発生レート時系列の相関解析によって，日向灘から種子島・屋久島の東方沖にかけての広い範囲にわたる地震・超低周波地震活動の相関を明らかにした［浅野（2021秋季大会）］．しかしながら，プレート間地震であることが判る規模が比較的大きな地震（概ねMw3.5以上）について調べてきたため，活動の時空間的なふるまいを詳細に把握するには地震数が十分ではなかった．そこで本研究では，発震機構解が不明のものが多いながらも地震数が多い気象庁一元化処理震源カタログと我々による超低周波地震カタログとを比較して，地震・超低周波地震活動の同期が顕著であったいくつかのケースにおける活動の時空間推移を詳しく調べてみた． 超低周波地震カタログの作成には2013年から2022年の防災科研F-netの記録（一部期間，鹿児島大学との合同臨時観測の記録を含む）を使用した．通過帯域0.02～0.05 Hzのバンドパスフィルタを通した広帯域速度計の記録波形にAsano et al. (2015) の手法を適用し，発生時刻と位置が既知の地震（主にセントロイド深さ20 km前後のプレート間地震）17個，超低周波地震6個をテンプレートとして，これらと類似した波形を持つ未知イベントの探索と位置推定を行った．そして，ここで検出されたイベントのリストを気象庁一元化処理震源と照合し，対応する通常の地震が見出されないイベントを超低周波地震と識別した． 解析した期間内で最も同期が顕著であった地震・超低周波地震活動の一つは，2013年9月以降の活動であった．この活動では，Mw4～5クラスの通常の地震5イベントを含む群発的な活動が種子島の南東沖で9月に発生し，約50㎞南西に離れたトカラ列島の沖でも通常の地震活動の活発化が見られた．時期をほぼ同じくして種子島の南東沖で開始した超低周波地震活動は，南西方向には約50㎞のトカラ列島の沖へ，北東方向には約150kmの大隅半島の南東沖へと活動域を広げ，継続期間約1か月間にわたる活動となった． もう一つの顕著な活動は，2019年1月以降の活動であった．1月上旬の種子島近海の地震（Mw6.3）が発生した後，この震源域近傍では余震活動が続くとともに，それよりも東側の海溝近傍では超低周波地震活動が開始した．超低周波地震は1か月程度で終息したが，通常地震の活動は1年間以上にわたり（発生前より）活発な状態が継続した．また，Mw6.3の地震の約2週間後には，約50㎞南西に離れたトカラ列島の沖でも通常の地震活動の活発化して超低周波地震も観測された．このほかにも，規模こそ大きくはないものの，種子島・屋久島からトカラ列島の沖では2016年，2017年，および2018年にも地震・超低周波地震が同期する活動が見いだされた．日向灘や奄美大島沖ではこのような傾向は明瞭ではないことから，地震・超低周波地震の同期発生は種子島・屋久島からトカラ列島の沖を特徴づけるプレート間のふるまいである可能性がある．

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal relationship between regular earthquakes and shallow tremors in the east to northeast off Kikaijima Island observed by ocean bottom seismic network

*Yukihiro Nakatani[1], Hirotsugu Yanagida[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[3], Kazuo Nakahigashi[4], Masanao Shinohara[5]

1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 3. SEVO, Kyushu Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Science and Technology, 5. ERI, UTokyo

南西諸島（琉球）海溝沿いでは，フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震活動およびプレート境界浅部のスロー地震活動が発生しており，他の沈み込み帯同様，両者の時空間的な対応関係が注目される．このうち南西諸島北部域では，近年の中長期的な海底地震観測により，島嶼部の限られた観測網のみでは明らかになっていなかった浅部微動が観測され，通常の地震活動と空間的に棲み分けて発生している可能性が指摘されている．

地震活動と浅部微動活動の詳細な時空間パターンを理解するため，本研究チームでは2019年から喜界島東方沖～トカラ列島東方沖において機動的海底地震観測を実施している．展開した観測網は，主に1 Hz計を搭載した自己浮上式長期観測型海底地震計（OBS）8台で構成され，観測点間隔約20 kmの小スパンアレイとして配置した．観測領域を年次的に移動しながらOBSアレイの設置・回収を繰り返し実施することで，観測領域全体が，南西諸島北部域における観測史上最大の地震である1911年マグニチュード（M）8.0喜界島地震の推定震源域をカバーできるよう計画されている．

本講演では，2019年4月から2022年4月までの計3期および現在進行中の第4期を含めた観測状況について示すとともに，OBSアレイを用いて震源決定した一部期間における地震活動の時空間分布および浅部微動との対応関係について議論する．地震の震源決定手法には，P波／S波到達時刻の手動検測による初期震源決定・PS変換波を利用した未固結堆積層による走時遅れの補正（観測点補正）・Double-Difference法を用いた高精度相対震源決定，の3ステップを実行した．微動の時空間分布は，同OBSアレイデータにエンベロープ相関法を適用したYamashita et al. (in prep.) の結果を参照した．

OBSアレイが1911年喜界島地震の推定震央直上に展開された第2期観測（2020年8月～2021年4月）においては，気象庁一元化震源カタログに比べて約2倍の震源数が求められたものの（約120イベント／約8か月），得られた地震のほとんどが沈み込む海洋プレート内で発生するM3未満の微小地震であり，プレート間地震は低調であった．一方，プレート境界面上で発生すると想定されている浅部微動は，マイグレーションを伴う顕著なエピソードが複数回発生しており，通常の地震と浅部微動の活動領域の棲み分けが示唆される．また，第1期観測（2019年4月～2020年8月）においては，微動エピソードの直前あるいは微動活動が低調な期間に通常の地震がまとまって発生する時系列の関係性も確認された．

謝辞：海底地震計の設置・回収航海は，長崎大学水産学部附属練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施し，乗組員の皆様に多大なるご協力をいただきました．東京大学地震研究所・技術職員の皆様にはOBS準備等にご尽力いただき，鹿児島大学・九州大学・京都大学・東京海洋大学の学生諸氏には関係航海に乗船いただきました．本研究は，文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」および東京大学地震研究所共同利用の支援を受けました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

南海トラフの大地震の切迫性が高まった可能性があると判断される場合、南海トラフ地震臨時情報が発出される仕組みが構築されている。その臨時情報の契機の一つとして、「通常とは異なるゆっくりすべり」の発生可能性が挙げられるが、その具体的基準はまだ明確ではない。そこで、本講演では「ゆっくりすべり」を「スロー地震」全体に拡張したうえで、「通常とは異なるスロー地震活動」とは何か、その判断に対して今の地震学の知見からどこまで貢献できるのか、さらに、今後我々はスロー地震の何を明らかにしなければならないのかについて考察する。

ここで取り扱うスロー地震は次の現象から構成されるものとする（小原，2009，地震２）。
・長期的および短期的スロースリップイベント（SSE）
・超低周波地震（VLF）
・低周波微動
なお、すべての現象に「スロー」を意味するキーワードが付されているのは、スロー地震ファミリーとしての統一性を示すためである。このうち、短期的SSEとVLF・低周波微動はEpisodic Tremor and Slip（ETS）として時空間的に同時発生すること、ETSは長期的SSEとは棲み分けるがそのすべり面からの距離に応じた影響を受けることなどが知られている。

Obara＆Kato(2016, Science)によって指摘されたスロー地震と大地震との関連性やこれまでのスロー地震に関する研究成果を踏まえると、「通常とは異なるスロー地震活動」を評価するにあたり、次の３つの観点が重要である。
・Stress transfer（応力載荷）：スロー地震によって再配分された応力が固着域に載荷されて大地震を促進する可能性。
・Stress meter（応力指標）：大地震発生域内の応力集中による影響でスロー地震の活動様式が変化する可能性。つまり、スロー地震活動の変化が大地震の切迫度を反映する指標として利用できる可能性。
・Creep meter（すべり指標）：小繰り返し地震（RE）と同様にプレート間すべりを反映する指標としてスロー地震を扱える可能性。

Stress transferの観点では、SSEの規模が評価項目として挙げられる。その物理的根拠はSSEによる応力再配分であるが、具体的な評価対象を個々のSSE規模とするか、あるいは積算規模またはその変化率とするかについては検討が必要である。もちろん、いずれの場合にも適切な基準値の設定が必要不可欠であることは言うまでもない。また、SSEのプロキシとしての低周波微動やVLFの活動度変化も評価項目として利用可能である。特に、SSEの規模が小さく地殻変動としての直接計測が困難な場合は、これらのサイスミックなスロー地震による評価が重要である。これまで、低周波微動やVLFの活動度とSSE規模の関係性については、エピソード内の微動の数や継続時間と短期的SSEのモーメントとの線形性が議論されたが（Aguiar et al., 2009; Obara, 2010）、今後はより物理的量である微動エネルギーやVLFモーメントが適切である。なお、これらのサイスミックなスロー地震の規模とSSEモーメントとの関係は地域依存性を有することが知られており、そのような不均質性の原因の解明はスロー地震の理解においても重要である。
Creep meterの観点では、REと同様に、各スロー地震がその震源域の周囲におけるすべりが進行する中での遅れ破壊との解釈に基づき、スロー地震活動度がプレート境界すべりを反映する評価項目となる。もちろん、各スロー地震の規模の定量的評価が重要であることは言うまでもない。
Stress meterとしては、活動間隔や移動パターンなど、スロー地震におけるあらゆる活動様式が評価項目とな

© The Seismological Society of Japan

りうる。例えば、深部ETSはセグメントごとにある程度固有の活動間隔や移動方向を有しているが、それらの特徴がこれまでの平均的描像からずれることがあれば、通常とは異なる状況を示していると言えるかもしれない。実際に、短期的・長期的SSEと巨大地震を含めた数値シミュレーション研究では、巨大地震発生前にSSEの発生間隔が経年的に減少する結果が得られている（Matsuzawa et al., 2010）。しかし、スロー地震の様々な活動様式に関する観測事実はまだ十分に蓄積されておらず、物理的根拠も明確ではない。したがって、まずは各種スロー地震を確実に検出し、高精度なカタログを構築して、各スロー地震現象の様々な活動様式を明らかにし、通常と非通常を統計的に区別できるようにモニタリング研究を進めることが期待される。

© The Seismological Society of Japan

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

[S09] PM-2

chairperson:Kazuaki Ohta(NIED), Satoru Baba(University of Tokyo)
Mon. Oct 24, 2022 4:00 PM - 5:45 PM ROOM B (4th floor (Large Conference Room))

[S09-10] Temperature control of episodic tremors with slip in the Nankai subduction zone

*Ryoya IKUTA[1], Yui Kobayashi[2], Tatsuhiko Kawamoto[1] （1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Shizuoka Higashi High School）

4:00 PM - 4:15 PM

[S09-11] Spatial variation of shallow tectonic tremor energy radiation in the Nankai trough

*Kazuaki OHTA[1], Katsuhiko SHIOMI[1], Takanori MATSUZAWA[1] （1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

4:15 PM - 4:30 PM

[S09-12] Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE[1], Shunichi Nomura[2] （1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University）

4:30 PM - 4:45 PM

[S09-13] Detection of Low-Frequency Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)

*Aitaro KATO[1], Hiroshi Tsuruoka[1], Masanao Shinohara[1], Kentaro Emoto[2], Tsunehisa Kimura[3], Kenji Okamura[4], Yutaka Kikuchi[5] （1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyushu University, 3. DAS Consultant (agent of Sintela), 4. Kochi University, 5. Kochi University of Technology）

4:45 PM - 5:00 PM

[S09-14] Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

*Satoru BABA[1], Eiichiro Araki[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Takane Hori[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Shuhei Nishida[1], Takashi Yokobiki[1] （1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）

5:00 PM - 5:15 PM

[S09-15] Swarms of microearthquakes associated with tectonic tremor bursts in the northern Japan Trench

*Kazuma Matsumoto[1], Ryota Hino[1], Hidenobu Takahashi[2], Masanao Shinohara[3] （1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

5:15 PM - 5:30 PM

©Seismological Society of Japan

Temperature control of episodic tremors with slip in the Nankai subduction zone

*Ryoya IKUTA[1], Yui Kobayashi[2], Tatsuhiko Kawamoto[1]

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Shizuoka Higashi High School

南海トラフの深部微動の震源の空間分布を沈み込むプレートの運動と形状、温度の視点から検討し、その発生条件を制約した。

南海トラフの深部微動(≒ETS)は、カスケディア(e.g. Rogers & Dragert, 2003)、メキシコ(Husker et al. 2012)のETSと同様、巨大地震を生じる固着域のdown-dip側に帯をなして生じている。我々は南海トラフの深部微動の帯状の分布の二つの特徴に注目した。一つめはプレート境界に沿った深さのバリエーションである。微動がプレート境界で生じていると考えると、その発生帯の深さは一定ではなく、30 kmから50 km程度の範囲で地域性をもって変動することが知られている(例えばShiomi et al. 2008, Hirose et al. 2008)。二つめの特徴は空白域である。微動の帯状の分布の中で、伊勢湾と紀伊水道には微動の空白域が見られる。これらの特徴に注目して微動の発生条件を考える。 まず我々は3-Dの熱伝導、移流モデルを用い、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場の計算を行った。計算には有限差分法を用い、以下の条件を採用した。１．熱は3次元の熱伝導とプレートの移動によってのみ移動し、マントルウェッジ対流は存在しない。２．プレートは一定の厚みを持った板であり、現在の形状に沿って現在のプレート収束速度で沈み込む。３．初期状態は一次元半無限冷却モデルで与える。計算の結果、微動の震央位置は、プレート境界の等深度線より等温度線（450℃から500℃）によく一致した。 プレート形状と運動からは更に、伊勢湾と紀伊水道に見られる微動の空白域について、前者は等温度線がマントルウェッジではなく大陸地殻と接すること、後者はプレートの運動方向を考慮すると空白域は狭く、微動の分布がプレート運動に直交する方向には連続している（空白域ではない）ことが示唆される。多くの先行研究が、微動を生じさせているのはスラブから特定の温度圧力条件で放出される水であることを示唆しているが（例えばYoshioka & Murakami 2007; Shelly et al. 2007; Nakajima & Hasegawa 2016等）、我々の結果は更に、水が出るのは特定の温度条件に達した一度で、水が放出された先にマントルウェッジが存在することが微動の発生条件であることを示唆している。 特定の温度圧力条件で蛇紋岩の脱水分解により放出された水がプレート境界の間隙水圧を上昇させるとすると、微動を生じるためにはマントルウェッジは水で飽和している必要がある。Wada & Wang (2009)は、西南日本の下では60 kmより浅いマントルウェッジは沈み込むプレートとデカップルしていると主張している。60 kmより浅いマントルウェッジは長時間その場に留まることで、過去にスラブから放出された水で飽和していると考えられる。他方で微動の終端である日向灘より西では、プレート境界の等温度線が深くなりマントルウェッジのデカップリングの下限を下回る。スラブから放出された水がフレッシュなマントルウェッジに吸収されれば、間隙水圧を上げることはできない。

以上、プレート形状と運動、温度の計算から、微動が生じる条件は、特定の温度圧力条件により、スラブから水が放出されること、その水が既に飽和したマントルウェッジに供給されることであると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

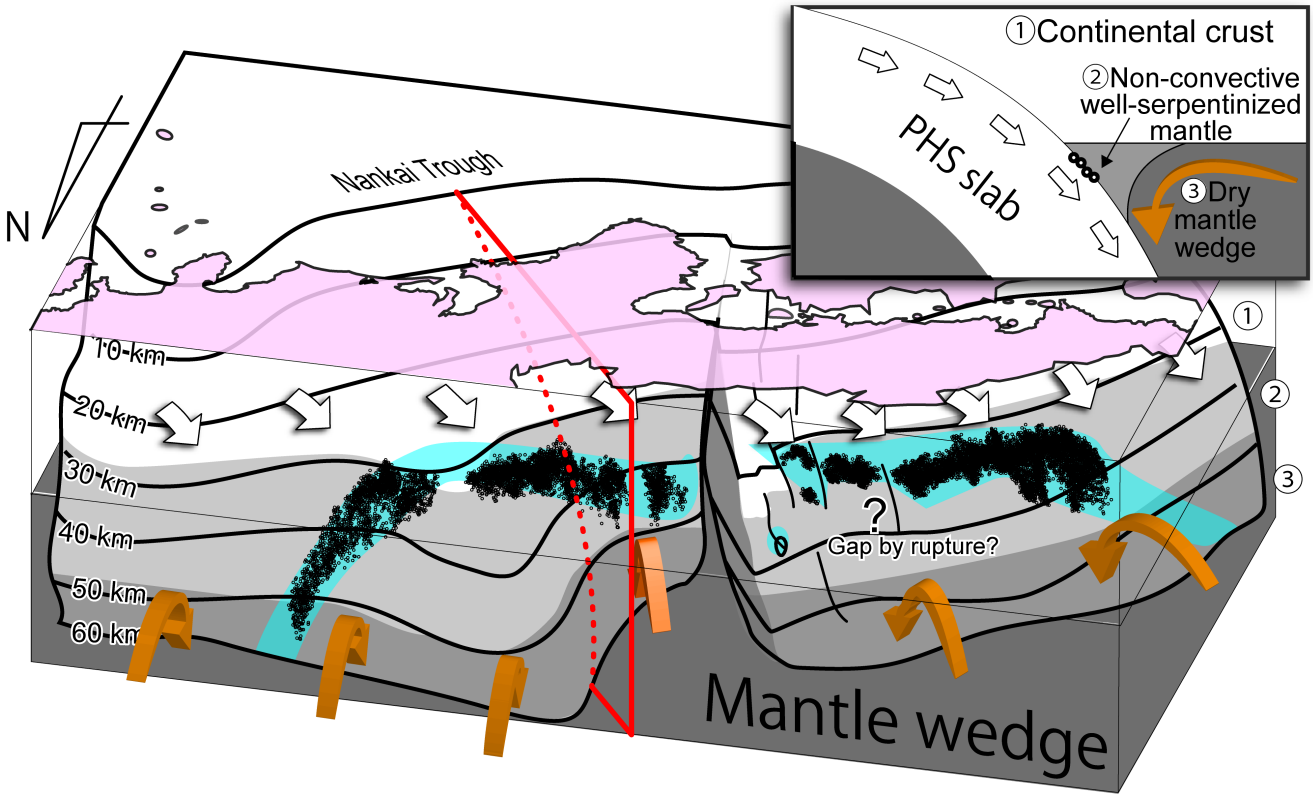


Figure. Schematic illustration showing slab motion (white arrows), torn and ruptured slab with isodepth contours, dehydrated water (blue), tremors (black circles), and deeper convective mantle (orange arrows).

© The Seismological Society of Japan

Spatial variation of shallow tectonic tremor energy radiation in the Nankai trough

*Kazuaki OHTA[1], Katsuhiko SHIOMI[1], Takanori MATSUZAWA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフ沈み込み帯のプレート境界では巨大地震発生域をはさんで深部側と浅部側の双方の領域において，それぞれスロースリップや超低周波地震を伴う微動が発生している．浅部の微動の性質は，海底地震計データを用いた近年の研究により調べられており，地震波エネルギーの不均質な空間分布(Yabe et al., 2019, 2021)や，高エネルギー側で指数関数的に逸脱するグーテンベルクーリヒター則(tapered G–R則)に従う規模別頻度分布(Nakano et al., 2019; Nakano and Yabe, 2021)が知られている．しかし，これらの解析は時間的・空間的に限定された微動活動に基づいている．本研究では，南海トラフ浅部域における長期間の微動カタログを用いて微動の地震波エネルギーの時空間分布および規模別頻度分布を詳細に調べた．
防災科学技術研究所の運用する地震・津波観測監視システムDONET1およびDONET2の広帯域地震計記録を使用し，スペクトル解析によるエアガンノイズ除去とカタログ照合による遠地地震除去を施したエンベロープ相関法を適用して，南海トラフ浅部域の微動活動の網羅的なカタログを構築した．さらに，海底地震計のサイト増幅特性および地震波減衰を補正して，微動の周波数帯域(2-6 Hz)における地震波輻射エネルギーを推定した．補正値はYabe et al. (2019, 2021)で推定されたものを使用した．最後に，微動のエネルギーレートと累積継続時間に基づいて規模別頻度分布を調べた．
室戸沖から紀伊半島南東沖にかけての領域で，2015年10月から2022年6月の期間に6回の大きなバースト活動を含む15,000以上の微動を検出した．微動のエネルギーはプレート沈み込みの走向方向に明瞭な空間不均質を見せ，紀伊半島南東沖の海溝軸近傍に顕著にエネルギーの高い領域(~10^6 J/s)，紀伊水道沖に顕著にエネルギーの低い(~10^3 J/s)領域が確認された．微動の規模別頻度分布にも，走向方向に沿って特徴的な空間変化が見られた．沈み込み帯の東側の紀伊半島南東部の微動は，先行研究で報告されているtapered G–R則に従う一方，西側の紀伊水道沖や室戸沖の微動は典型的なG–R則に近い規模別頻度分布を持つことがわかった．これらの違いは，プレート境界浅部の摩擦特性や応力状態の空間的な違いを反映していると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE[1], Shunichi Nomura[2]

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University

スロー地震は、世界各地で発見されており、巨大地震などとの関連性が示唆されるために、大きな注目を集めている。スロー地震の高周波成分であるテクトニック微動は、地震データによって震源決定可能であり、その情報は時空間的に高分解能なスロー活動のモニタリングに利用できる。さらにはその特徴、空間的セグメンテーション、準周期的活動、マイグレーション、潮汐依存性などを、定量的な標準モデルで表現することで、将来の活動予測も可能となる。本研究では、南海トラフの微動活動を対象として、活動の標準化のための更新過程モデルを作成、そのモデルを用いた予測実験を行う。

南海トラフの微動発生地域を、約20km四方の範囲に分割し、地域ごとにモデル作成を行う。地域ごとの微動発生間隔の分布はほぼ二峰性であり、短い間隔は近接した微動との相互作用、長い間隔は長期の応力蓄積過程の特徴的時間を、それぞれ表している。そこで、短い発生間隔と長い発生間隔に対して、それぞれ対数正規分布とBPT分布を仮定、その混合分布を更新過程の確率分布として採用した。12.5年分の微動カタログを、10年間の推定期間と2.5年間の予測期間に分け、推定期間のカタログを用いて、この更新過程モデルを特徴づける５つのパラメターを最尤法によって推定した。微動発生地域の7割程度で、パラメターを適切に推定することに成功した。

この更新過程モデルは、長期のスロースリップ現象に伴うような、微動活動の異常な活発化など、標準でない活動を定量的かつ客観的に抽出するために用いることができる。また推定されたパラメターの空間的な違いから、長期と短期の発生間隔の特徴的な時間、相対的なプレート運動、微動活動のエピソード性、微動継続時間を結びつけるスケーリング関係が導かれる。そしてこのモデルにより、ある基準時刻における次の微動の発生を確率的に予測できる。実際に予測期間のカタログを用いて実験を行い、その妥当性を確認した。このモデルは、スロー地震の高度な時空間予測のための複雑なモデル構築への第一歩となり得る。

© The Seismological Society of Japan

Detection of Low-Frequency Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)

*Aitaro KATO[1], Hiroshi Tsuruoka[1], Masanao Shinohara[1], Kentaro Emoto[2], Tsunehisa Kimura[3], Kenji Okamura[4], Yutaka Kikuchi[5]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyushu University, 3. DAS Consultant (agent of Sintela), 4. Kochi University, 5. Kochi University of Technology

近年，分散型音響センシング（DAS）技術を用いて，世界の様々なテクトニクス環境で，近地地震や遠地地震等を対象に地震波動場の観測が実施されている（e.g., Lindsey et al., 2017; Jousset et al., 2018; Wang et al., 2018; Zhan et al., 2019; Nishimura et al., 2021; Shinohara et al., 2021）．本研究では，徳島県から愛媛県にかけて発生している深部低周波地震による波動場を観測するために，四国中央部を概ね南北と東西に走る2本の国道沿いの光ファイバを用いて，DAS計測を約3ヵ月間実施した．四国地方整備局からご協力をいただき，上記の2本の光ファイバケーブルのDAS計測への利用が認められた．徳島県三好市内の国道維持出張所にDAS機材（Interrogator）を設置し，2021年12月から連続波形記録の取得を開始した．当初，時刻同期としてNTPを用いていたが，2022年2月上旬からGNSSによる時刻同期へと変更した．DAS計測中に，2本のケーブル沿いでタップテストを計20地点で実施し，良好な記録が取得できた．タップテストをもとに，ケーブル沿いの測定地点の位置決めを行った．

2022年1月上旬に発生した低周波地震活動の波動場を2本の光ファイバケーブルに沿って捉えることができたものの，DASの自己ノイズが高く，波動場の空間的な連続性は芳しくなかった．そこで，2月上旬よりノイズを低減した測定モードに切り替えて計測を実施した．但し，測定スペックの制約が生じ，測線長約12㎞の 1本の光ファイバのみを用いた計測となった．その後，2022年3月上旬に発生した低周波地震活動の波動場を明瞭に捉えることに成功した．測線の西端付近で発生したため，光ファイバに沿って波動場を概ね連続的に確認することに成功した．見かけ速度が速いため，ひずみ速度のSNが低下しやすい悪条件にも関わらず，10分程度継続する低周波地震の活動を観測できた．また，一部の低周波地震について，目視でS波を読み取り震源再決定を行った．

© The Seismological Society of Japan

Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

*Satoru BABA[1], Eiichiro Araki[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Takane Hori[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Shuhei Nishida[1], Takashi Yokobiki[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

光ファイバーケーブルをセンサーとして歪みの変化を計測する分布型音響センシング（DAS）は、空間的に密な観測が可能であることから、近年地震学において広く使われるようになっている。しかし、通常の地震よりも特徴的な時定数が長いスロー地震については、DASによる観測が行われた研究例は少ない。四国の室戸岬沖は、南海トラフの沈み込み帯で発生する巨大地震発生領域の一部となっており、そのupdip側ではスロー地震が観測されている（例えば、Nakano et al., 2018; Takemura et al., 2019）。スロー地震の発生する環境や構造との関係を明らかにするには、高い空間解像度でのスロー地震の観測が必要である。室戸岬沖では、室戸岬から55 kmの範囲で、AP SensingのDASによる観測が2022年1月より行われている。本研究では、室戸岬沖において密な観測が可能なDASと、地震・津波観測システム（DONET）の広帯域地震計データを用いて、スロー地震の一種である微動を観測し、それらの震源決定を行った。本研究は、DASで微動を観測した初めての研究である。

室戸沖のDASの歪みレート波形に2–8 Hzのバンドパスフィルターをかけた波形において、2022年1月30日から2022年2月8日までの期間で、約30個の微動が観測された。これらの微動のシグナルは、DONETでも広い範囲の観測点で広帯域地震計によって観測されている。DASで観測された微動のシグナルの継続時間は約40–60秒であり、これはDONETの広帯域地震計で観測された継続時間（約30秒）よりも長い。DASで観測された微動の歪み波形を詳細に見ると、微動のシグナルは数秒続くいくつかのいろいろな見かけ速度の相から構成されているように見え、これらの層がコヒーレントな範囲は50–100 m程度である。

微動の震源決定においては、DASの各チャンネルの歪み波形を速度波形に直したものと、DONET広帯域地震計の速度波形データに、2–8 Hzのバンドパスフィルターをかけ、2乗して0.3 Hzのローパスフィルターをかけたものを用いた。エンベロープ中の微動のシグナルの立ち上がりをピックし、理論走時と観測走時の残差が最も小さくなる位置をグリッドサーチによって求め、その位置を震源と定めた。多くの微動の震源は、DONETのGノードのやや北東部である、134.7ºE, 32.8ºN付近に決まった。ここは土佐ばえ海盆の南にあたり、Nakamura et al. (2022) によって調べられた構造と比較すると、沈み込んだ海山のupdip側になるため、先行研究（例えば、Sun et al., 2020; Toh et al., 2020）で示唆されたような、スロー地震活動と海山などの海底地形との関連性が示唆される。DASで微動が見えた時間のDONET広帯域地震計の0.02–0.05 Hzの波形では、超低周波地震（VLFE）のシグナルが観測され、室戸岬沖においては微動とVLFEが時間的に同期している。本発表では、微動とVLFEの時空間的関連性についても議論する。

© The Seismological Society of Japan

Swarms of microearthquakes associated with tectonic tremor bursts in the northern Japan Trench

*Kazuma Matsumoto[1], Ryota Hino[1], Hidenobu Takahashi[2], Masanao Shinohara[3]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

スロー地震の一種であるテクトニック微動（以下，微動）と通常地震が同じ深さ範囲で近接して発生している日本海溝沈み込み帯において，微動と通常地震の活動の時空間的な関係を詳細に明らかにすることは，スロー地震と通常地震の発生メカニズムを包括的に理解する手がかりを与えると期待される．本研究では，2007~2008年に日本海溝北部で発生した微動エピソード（Takahashi et al. , in prep.）に伴って活発化した通常地震の時空間分布の詳細を明らかにした．本研究では，Takahashi et al. [in prep.]がエンベロープ相関法で検知したイベントのうち，継続時間が20秒より短いものを通常地震として，それらの震源をPおよびS波の到達時刻により再決定した．再決定することができた地震の数は3909個で，そのうち最小のものはM -0.4であった． ほとんどの微動エピソードに同期して，震源移動を伴う微動と通常地震の連動がみられた．通常地震の規模の時間変化は，これらの地震活動は本震一余震型というよりは群発的な活動であることを示す．空間スケールが最大の微動エピソードでは，微動の活発化が始まった後，小繰り返し地震（いずれもM 0.8 ~ 1.0）を含む通常地震が活発化し，微動と通常地震の震央が海溝の走向方向に移動する様子が顕著であった．震源移動の速さは 約4 km/day程度で，他の小規模なエピソードでの震源移動も同程度の速さを示す．日本海溝南部では，微動活動が示す震源移動の延長上での通常地震の活発化が報告されている[Obana et al. 2021]が，本研究で示した日本海溝北部での観測事例と，微動が通常地震に先行すること，微動と通常地震の震源移動の速さ，といった点で類似性を指摘することができる．微動一通常地震の連動した活動にみられる特徴は，非地震性すべりイベントが隣接して分布する微動パッチと通常地震パッチの破壊を誘発していることを示唆する．また，日本海溝南部と北部で共通の特徴をもつ活動様態を示すことから，非地震性すべりに駆動される微動一通常地震の連動活動は日本海溝沿いの広い領域で発生している可能性がある．

© The Seismological Society of Japan