

Mon. Oct 21, 2024

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

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-1

chairperson: Tomotake UENO(NIED), Shinako Noguchi(Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP))

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S09-01] Evaluation of seismic activity including shallow low-frequency and deep high-frequency events near Hakodate by means of frequency indices

*Shinako NOGUCHI¹, Keiji Kasahara¹, Kosuga Masahiro², Maeda Takuto² (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. Hirosaki University)

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

[S09-02] Categorization of inland earthquakes in Japan by differential Frequency Index (dFI) and their spatial distribution

*Masahiro KOSUGA¹, Takuto MAEDA¹, Shinako NOGUCHI² (1. Grad. School Sci. Tech., Hirosaki Univ., 2. ADEP)

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

[S09-03] Stress field near the fault edges of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO^{1,2}, Shinya Kato⁴, Kazuhide Tomisaka³, Masayo Sawada³, Issei Doi³, Shunta Noda⁵ (1. NPO Abuyama, 2. Tohoku Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. ERI, Univ. Tokyo, 5. RTRI)

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

[S09-04] Evaluating earthquake criticality from frequency-magnitude distribution and seismic moment efficiency (2)

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

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

[S09-05] Shear strain energy changes during the seismic activity after the foreshock and the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹ (1. NIED)

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

10:30 AM - 11:45 AM JST | 1:30 AM - 2:45 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Tatsuhiko Saito(NIED)

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

[S09-06] Mechanically coupled areas in the Nankai Trough: Historical earthquakes, long-term slow slip events, and possible future earthquakes

*Tatsuhiko SAITO¹, Akemi Noda² (1. NIED, 2. JMA)

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

[S09-07] Seismic activity in the transition zone between the ordinary earthquake and shallow slow earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan

*Issei Hirata¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima¹, Yukihiro Nakatani³, Shuichiro Hirano³, Hiroshi Yakiwara³, Kazuo Nakahigashi⁴, Kentaro Emoto¹, Satoshi Matsumoto¹, Shukei Oyanagi², Yoshihiro Ito², ChingYu Hu⁵, Tomoaki Yamada⁵, Masanao Shinohara⁵ (1. Kyushu University, 2. Kyoto University, 3. Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. The University of Tokyo)

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

[S09-08] Spatio-temporal variation of the aftershock activity following the 2021 and 2022 intraslab earthquakes in off-Fukushima prefecture

*Ryo Osawa¹, Ryota Hino¹, Keisuke Yoshida¹ (1. Tohoku university)

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

[S09-09] Hypocenter Distribution and Migration preceding the 2021 M6.0 Ibaraki-Oki Earthquake Based on S-net Data

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹ (1. Tohoku University)

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

[S09-10] Trial of hypocenter relocation using a new 3-D seismic velocity model around the Nankai Trough

*Katsuhiko SHIOMI¹, Makoto MATSUBARA¹, Ayako NAKANISHI², Gou FUJIE², Shoji SEKIGUCHI¹ (1. NIED, 2. JAMSTEC)

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

📅 Mon. Oct 21, 2024 9:00 AM - 10:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 12:00 AM - 1:15 AM UTC | 🏢 Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-1

chairperson: Tomotake UENO(NIED), Shinako Noguchi(Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP))

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S09-01] Evaluation of seismic activity including shallow low-frequency and deep high-frequency events near Hakodate by means of frequency indices

*Shinako NOGUCHI¹, Keiji Kasahara¹, Kosuga Masahiro², Maeda Takuto² (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. Hirosaki University)

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

[S09-02] Categorization of inland earthquakes in Japan by differential Frequency Index (dFI) and their spatial distribution

*Masahiro KOSUGA¹, Takuto MAEDA¹, Shinako NOGUCHI² (1. Grad. School Sci. Tech., Hirosaki Univ., 2. ADEP)

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

[S09-03] Stress field near the fault edges of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO^{1,2}, Shinya Kato⁴, Kazuhide Tomisaka³, Masayo Sawada³, Issei Doi³, Shunta Noda⁵ (1. NPO Abuyama, 2. Tohoku Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. ERI, Univ. Tokyo, 5. RTRI)

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

[S09-04] Evaluating earthquake criticality from frequency-magnitude distribution and seismic moment efficiency (2)

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

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

[S09-05] Shear strain energy changes during the seismic activity after the foreshock and the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹ (1. NIED)

Evaluation of seismic activity including shallow low-frequency and deep high-frequency events near Hakodate by means of frequency indices

*Shinako NOGUCHI¹, Keiji Kasahara¹, Kosuga Masahiro², Maeda Takuto²

1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. Hirosaki University

地震予知総合研究振興会が設置・運用する地域地震観測網AS-netによって、北海道函館市付近において地殻内の深さ10 kmより浅部で低周波地震と通常地震が混在する地震活動が確認された。この付近には深部低周波地震の活動領域も存在する。この特異な地震活動について詳細な調査を行うことは、低周波地震一般の発生メカニズムの解明や、地殻内地震との関係の解明のためにも非常に重要である。そこで地震予知総合研究振興会と弘前大学は2018年10月から当該地域で臨時地震観測を開始した。本研究では、臨時観測記録による震源再決定を行い、各イベントの周波数特性を定量的指標により評価した結果と合わせて、地震活動のメカニズムを探る。

地震の周波数特性として、低周波地震の検出に用いられる2指標を用いる。いずれも地震記録S波部分のフーリエ振幅スペクトルを用いる。指標のひとつはピーク周波数 f_p で、振幅スペクトルが最大となる周波数である。もうひとつは周波数指標FI (Frequency Index) で、スペクトル振幅のうち高周波数帯域の平均値を低周波数帯域のそれで割って対数をとったものである。対象イベントは、函館付近の浅部・深部の活動領域を含む領域で2018年10月から2022年8月に発生したすべての地震とする。

得られた f_p とFIを比較したところ、 f_p が小さい（低周波数側である）イベントではFIも小さくなった。これは、同指標を用いて日本全国の地殻内で低周波地震の検出を行ったNakajima and Hasegawa (2021)の結果と同様である。Nakajimaらは $f_p < 4$ Hzかつ $FI < -0.75$ を低周波地震としているが、本研究で地震波形の特徴から目視により低周波地震と判断された浅部イベントのうち約半分、深部イベントの一部はこの基準から外れる結果となり、低周波地震としての特徴が必ずしも顕著ではないことを示している。

臨時観測による震源分布を用いて f_p およびFIの分布をみると、浅部の活動域では、 f_p およびFIの大きなイベント（通常地震）が、そうでないイベント（低周波地震）と極めて近いものの、棲み分けた分布となった。この通常地震は、観測波形が酷似する繰り返し地震を含み、それらはほぼ同じ場所で発生したとみられる。この領域の通常地震の繰り返しは2015-16年にも発生し、こちらはYoshida et al. (2020)により地殻流体の関与が示唆されている。

一方、深部低周波地震活動では、 f_p やFIが大きく通常地震に近いイベントがいくつか検出された。これらの多くは深部の活動領域の最上部で発生したとみられるが、深部イベントは連続発生することもあり震源位置の不確実性が高い。深部高周波イベントは波形も通常地震に近く、震動継続時間も低周波イベントより短かった。また、初動付近は高周波数成分が強く、その後はより大振幅の低周波数成分が卓越するイベントもみられた。そのようなイベントは浅部活動域には存在しなかった。

深部でも低周波イベントと高周波イベントが発生するということは、深部の活動でも流体の関与が考えられる。ただし深部イベントの観測記録は浅部イベントと異なる伝播経路の影響を受けており、従来のFI等を用いて両者の単純な比較はできない。とはいえ深部にもかかわらず明らかに高周波の地震波が出ているのは間違いなく、その発生メカニズムについて、今後、発生深度の精度向上や伝播経路の影響の検討などを通して追求していく方針である。

謝辞

本研究では、気象庁、防災科学技術研究所、北海道大学、東北大学および青森県による地震観測データを使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

Nakajima, J. and A. Hasegawa, (2021), Prevalence of shallow low-frequency earthquakes in the continental crust. *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JB021391.

Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi and K. Kasahara (2020), Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1724-1740.

Categorization of inland earthquakes in Japan by differential Frequency Index (dFI) and their spatial distribution

*Masahiro KOSUGA¹, Takuto MAEDA¹, Shinako NOGUCHI²

1. Grad. School Sci. Tech., Hiroasaki Univ., 2. ADEP

1. はじめに

最近、地震波の周波数特性を表すFrequency Index (FI) を用いて低周波地震の識別が行われるようになったことで、日本列島内陸での浅部低周波地震の発生状況が明らかになり、地殻深部も含めた低周波地震全般の発生メカニズムについての研究が進んだ。FIは地震波のスペクトル振幅から求められるので、震源スペクトルの特性や伝播経路の減衰構造の影響を受け、地震のマグニチュード (M) や震源距離に依存する。そのため、FIの空間分布についてはほとんど議論されてこなかった。

一方、震源スペクトルのモデルや応力降下量とコーナー周波数の関係式等を用いると、Mと震源距離に対応する理論的なFIを求めることが可能である。片山・他 (2024) は日本海東縁部を対象に、観測FIと理論FIの差 (本論ではdifferential FI, dFIと述べる) の空間分布を求めた。ここでは日本列島内陸下の地震を対象に、dFIの深さ分布を基に地震をカテゴリーに分け、各カテゴリーの地震の空間分布について議論する。

2. データと方法

観測FIは、気象庁によって低周波地震のフラグ付けがなされた全国の地震、およびその周辺で発生したM1-4の浅発地震 (通常地震) に対して求めた。スペクトルを求める時間ウィンドウはS波到達の0.26 s前からの2.56 s間とし、低周波側は2-4 Hz、高周波側は10-20 Hzの周波数帯域を用いた。波形はHi-net観測点でのデータを用い、S波振幅とP波到達前の波動の振幅比で定義したS/N比が2以上の場合に、水平2成分の平均FI値を求めた。次に、それぞれの観測点で理論FIを計算し、観測値との差をdFIとした。最後に、観測点平均したdFIを地震のdFIとした。

理論FIを求めるには、震源および観測点周辺における均質無限媒質の仮定の下での平均S波速度、応力降下量、Q値を仮定する必要がある。これらの値を、通常地震に対する観測FIと理論FIの残差二乗和が最小になることを条件に、グリッド・サーチにより領域ごとに推定することを試みた。対象領域は、北海道、東北、関東・中部、近畿・中国、九州とした。推定すべきパラメータ間にはトレードオフがあることがわかったので、S波速度の範囲を狭めてパラメータを推定した。推定された応力降下量は東北地方で大きく、関東・中部および九州で小さく、Q値は近畿・中国と九州で大きいといった特徴が見られた。推定されたパラメータを用いて求めたdFIは、震源距離と地震のマグニチュードには依存しないことが確認できた。

3. dFIの空間分布

dFIの深さ分布には地域差があるが、大まかな特徴は共通することがわかった。その分布の特徴から、ここでは地震を4つのカテゴリーに分類した。

(1) カテゴリー1は浅発地震で、特定のdFIと深さの範囲にデータが集中している。dFIの上限はある深さまで上昇し、ピークに達した後は減少し、その形は地殻内の岩石の強度分布を連想させる。dFIの下限は深さとともに上昇し、Q値の深さ依存性を反映していると考えられる。

(2) カテゴリー2はカテゴリー1よりも深部の、いわゆる深部低周波地震である。

(3) カテゴリー3は浅部低周波地震で、カテゴリー1の下限よりもさらに低いdFIをもつ地震群である。カテゴリー1のdFIの下限が明瞭であることから、カテゴリー1と3の地震の発生メカニズムは異なることが示唆される。

(4) カテゴリー4は深部低周波地震の深さ範囲にあるがそれほど低周波ではなく、深部高周波地震とも呼べるべき地震群である。このカテゴリーの地震は多くないが、全国的に分布することが明らかになった。

地域ごとの違いとしては以下のようなことが挙げられる。カテゴリー1のdFIの上限がピークとなる深さは、北海道では深く、関東・中部では浅い。また、低周波地震が集中する領域が、関東・中部では深さ10-20

km, 近畿・中国では深さ25–35kmにある。一方, 九州では特に低周波が卓越する地震は少ない。

震源分布については, カテゴリー1の低周波の地震は, 2014年長野県神城断層地震, 2016年鳥取県中部地震の震源域や, 定常的に地震活動が活発な和歌山などに多く分布する。また, 規模の大きな地震が発生した地域では高周波の地震も多いことから, 発生する地震の周波数範囲が広いように見える。このように, 地震波の周波数特性が地震活動と対応する例が見つかってきた。

4. おわりに

今回はdFIの深さ分布から地震を4つのカテゴリーに分類し, 各カテゴリーの地震の空間分布を概観した。分類した地震の分布が, 地震波速度構造, 重力, 地質構造等とどのように対応するかは今後の検討が必要であるが, 地震波の周波数を考慮して地震活動が議論できるようになったことから, 地震活動の物理的背景についての研究の進展が期待される。

謝辞: 本研究では気象庁一元化処理の検測値と震源要素, 防災科学技術研究所Hi-net観測点の波形データを使用した。以上の機関に謝意を表す。

Stress field near the fault edges of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO^{1,2}, Shinya Kato⁴, Kazuhide Tomisaka³, Masayo Sawada³, Issei Doi³, Shunta Noda⁵

1. NPO Abuyama, 2. Tohoku Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. ERI, Univ. Tokyo, 5. RTRI

1. はじめに

2017年6月25日7時2分の長野県南部の地震(Mj5.6)は、1984年長野県西部地震(Mj6.8)の余震域の北東端付近、深さ1~5kmで発生した逆断層型の地震である。断層の上端付近では、 V_p/V_s の小さい顕著な低速度異常域が推定されていた(Doi et al., 2013)。

この地域では、1995年より10kHzサンプリングの地震観測が行われており(Iio et al., 1999)、2008年には満点地震計が追加された。満点観測網は、上記の低速度異常域を詳細に調べるために配置されたが、はからずも、Mj5.6を直上で待ち受ける体制となった。昨年秋の学会において、得られた大量の高精度の地震メカニズム解から断層周辺の応力場を推定し、余震域の北側、断層の北端付近で横ずれ型の余震が多い理由として、摩擦係数が小さい可能性を指摘した。今回は、上下の端付近の地震前の応力場について議論する。

2. 結果

最初に、M5.6の断層面を出来るだけ正確に推定した。稠密観測網によるメカニズム解の節面と平行な面の中で、余震の震源との距離の二乗和が最小となる面を求めた。次に、その面上において、矩形を仮定して断層面の大きさ、位置と向きを、下記の3通りの方法で推定した。i) 断層端に余震が集中するように手動で推定、ii) 断層端から余震の震源までの距離の和が最小となるように推定、iii) 断層直交方向も含めて断層面内の余震数と断層端の位置の関係を折れ線でfitした折れ曲がり点から推定。これらの方法で推定した断層面と断層端が、応力逆解析における解析領域の端になるように、各解析領域を設定して、応力場を推定した。M5.6の発生後、いずれの結果においても、断層の上下の端付近において、最大主応力の傾斜角が水平から回転することが見いだされた。一方、断層面内付近においてはそのような回転は見られず、安定した方位分布が見られた。

M5.6のすべり分布と初期応力を仮定して地震後の応力場の再現を試みた。その結果、断層の上下の端付近において地震前に差応力が非常に小さくないと、上記の主応力の回転を再現できないことが分かった。また、地震前には、断層付近において、このような主応力の回転は見られなかった。断層の上端付近においては、上記のように、顕著な低速度異常域が推定されていたが、M5.6の発生前に、断層の上下の端付近において、応力緩和が発生していた可能性が考えられる。あるいは、この断層の上下の延長部が存在した場合には、その部分の断層強度が小さかった可能性も考えられる。

謝辞：高精度地震観測は、防災科研の特別研究「直下型地震のダイナミクス」により開始され、地震及び火山噴火予知のための観測研究計画、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画や科研費(課題番号19204043)のプロジェクトで維持されてきた。10kHz観測では産総研のボアホール地震計データを、2008年8月以降には、防災科研、名古屋大学、気象庁による定常地震観測点のデータも使わせていただいている。観測においては、長野県王滝村・木曽町、木曽森林管理署、長野県林務課、名古屋市市民休暇村ほか、地元の方々に大変お世話になった。

Evaluating earthquake criticality from frequency-magnitude distribution and seismic moment efficiency (2)

*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い、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結果が得られている。Matsumoto et al. (2024) は高精度の発震機構解をもとにして、応力状態を示すモーメント円上に多数の地震をプロットし、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（規模の大きい地震が発生する）を示した。すなわち、 b 値は差応力と臨界状態に関係していることが明らかになった。

松本 (2023) で示したように、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、 M_{st}/M_0 ）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。これは、モーメント円で考えると円の頂点に近い場合高く、内側に入ると低下することに対応する。ここから、地震で解放されるモーメントと解放される非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 値とモーメント比の大地震前後における時間変化、さらに地震による非弾性変形レートを見ることで地震発生臨界度の評価を試みる。2016年熊本地震発生前10年間と本震発生後およそ3年間の発震機構解（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。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。震源を含む深さ（10–20km）レンジでみると、最大前震発生前はおおむね誤差範囲で一定の値を持つ。本震発生後、 b 値や M_{st}/M_0 は大きくばらつくが、非弾性ひずみ速度が安定するとある一定値に落ち着く様子が見られる。地震断層付近では、震源領域で地震前に低 b 値、高 M_{st}/M_0 をとり、臨界状態であることが示されている。前後を見ても、 b 値は大きくは変化していないが M_{st}/M_0 は低下している。そのほかの b 所では地震前後で b 値が上昇もしくは変化せず、 M_{st}/M_0 は低下する傾向がある。地震断層外では領域によって異なる。断層南部では地震前から低 b 値であったが地震後も変わらず、 M_{st}/M_0 が上昇する領域がみられた。北部や西部では b 値上昇もしくは変化なし、 M_{st}/M_0 低下もしくはほぼ変化がない。一方ひずみレートは上昇しており、活動の活発化がみられた領域もある。これら多様な様相は地震による応力変化だけではなく、流体圧上昇による強度低下に起因すると考えられる場合もあり、地震活動を分析するうえで重要な情報が得られることが示唆される。

Shear strain energy changes during the seismic activity after the foreshock and the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹

1. NIED

地震活動の活動度は地震発生数や地震発生レート（例えばKnopoff *et al.*, 1996），積算モーメント解放量やその増加率などでも評価され（例えばSavage and Simpson, 1997），断層運動などによる応力変化との関係性が指摘されている（例えばKing *et al.*, 1994）。そこで，我々は応力や歪から推定されるせん断歪エネルギー変化量で地震活動を評価する試みを行う。本研究では2016年熊本地震に着目し，前震発生後から本震発生前までの地震活動（前震の余震）と本震後7年間の地震活動（余震）についてせん断歪エネルギーを求め，その変化量と空間分布の特徴を明らかにする。

地震を引き起こす原動力は弾性リソスフェアのせん断応力であり，地震活動を定量化するためには，地震活動によってリソスフェアから失われるせん断歪みエネルギーを調べるのが重要である。地震発生によるリソスフェアのせん断歪みエネルギーの変化量を見積もるためには，断層運動に加え，背景応力場が必要である。本研究では，背景応力場の応力の主軸方向と応力比，そして，差応力を100MPaと仮定した。また，熊本地震の前震 (M_w 6.1)，本震 (M_w 7.1)の断層として，一様すべりの矩形断層を仮定した。前震の余震（24イベント）や本震の余震（240イベント）は，F-netモーメントテンソル解をもとに断層を設定した。

見積もったせん断歪みエネルギー変化は，前震，前震の余震，余震は $\sim 10^{15}$ J程度，本震は $\sim 10^{16}$ Jであり，本震以外のせん断歪みエネルギー変化量は，本震の1割程度であった。なお，前震の余震によるせん断歪みエネルギーの変化量は前震と同程度であり，これは2016年熊本地震の前震活動の特徴である。また，前震活動のせん断歪みエネルギー変化の空間分布は，前震と似たような分布となった。これは前震の数時間後に発生したMw6.0の地震の影響であると考えられる。一方，本震と余震のせん断歪みエネルギー変化の空間分布は見かけ上似ていない。このように，せん断歪みエネルギー変化の空間分布の特徴は前震の余震と余震で大きく異なる。また，前震，本震のせん断歪みエネルギー変化の空間分布とそれぞれの余震活動の震源分布を比較すると，断層から離れ，せん断歪みエネルギーが増加している領域で地震数が多いことも確認でき，Noda *et al.* (2020)の結果とも調和的であった。ただし，前震の余震活動によって前震のせん断歪みエネルギー変化を解消していない。これらのことを総合的に解釈すると，せん断歪みエネルギー変化に与える影響が小さい地震が，前震のせん断歪みエネルギー変化の増加域で多く発生していることが考えられる。そして，2016年熊本地震の一連の活動が開始する前に蓄えられていた歪みエネルギー量が，前震やその余震活動では解消しきれず，本震が発生したと考えられる。

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

🗓 Mon. Oct 21, 2024 10:30 AM - 11:45 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 1:30 AM - 2:45 AM UTC | 🏢 Room A
International Conference Hall (4F)

[S09] AM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Tatsuhiko Saito(NIED)

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

[S09-06] Mechanically coupled areas in the Nankai Trough: Historical earthquakes, long-term slow slip events, and possible future earthquakes

*Tatsuhiko SAITO¹, Akemi Noda² (1. NIED, 2. JMA)

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

[S09-07] Seismic activity in the transition zone between the ordinary earthquake and shallow slow earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan

*Issei Hirata¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima¹, Yukihiro Nakatani³, Shuichiro Hirano³, Hiroshi Yakiwara³, Kazuo Nakahigashi⁴, Kentaro Emoto¹, Satoshi Matsumoto¹, Shukei Oyanagi², Yoshihiro Ito², ChingYu Hu⁵, Tomoaki Yamada⁵, Masanao Shinohara⁵ (1. Kyushu University, 2. Kyoto University, 3. Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. The University of Tokyo)

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

[S09-08] Spatio-temporal variation of the aftershock activity following the 2021 and 2022 intraslab earthquakes in off-Fukushima prefecture

*Ryo Osawa¹, Ryota Hino¹, Keisuke Yoshida¹ (1. Tohoku university)

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

[S09-09] Hypocenter Distribution and Migration preceding the 2021 M6.0 Ibaraki-Oki Earthquake Based on S-net Data

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹ (1. Tohoku University)

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

[S09-10] Trial of hypocenter relocation using a new 3-D seismic velocity model around the Nankai Trough

*Katsuhiko SHIOMI¹, Makoto MATSUBARA¹, Ayako NAKANISHI², Gou FUJIE², Shoji SEKIGUCHI¹ (1. NIED, 2. JAMSTEC)

Mechanically coupled areas in the Nankai Trough: Historical earthquakes, long-term slow slip events, and possible future earthquakes

*Tatsuhiko SAITO¹, Akemi Noda²

1. NIED, 2. JMA

力学に基づき多様な大地震を想定する研究開発に取り組んできた。例えば、相模トラフにおける応力蓄積域を力学的固着パッチとしてGNSS解析によって同定し、元禄・大正関東地震とスロースリップのすべり分布モデルを構築した。そして、これらイベントの力学的固着パッチへの影響を考慮したうえで、将来起こりうる大地震の破壊シナリオとして6つのすべり分布モデルを構築した (Saito & Noda 2023 BSSA)。南海トラフにおいては、力学的固着パッチを同定したものの (Noda et al. 2018 JGR, Noda et al. 2021 JGR; Saito & Noda 2022 JGR)、歴史地震活動および長期的スロースリップイベントが力学的固着パッチに与える影響の定量評価は未完であった。そこで本研究では、南海トラフにおける歴史地震、長期的スロースリップイベントのすべり分布モデルを構築、力学的固着パッチに与える影響を評価したうえで、今後起こりうる大地震のすべり分布モデルを構築する。

GNSS解析による力学的固着域推定の解像度は海域で低下する。そのため、本研究では、スロースリップや浅部微動の発生域を考慮することで、力学的固着の位置と空間の広がりを設定した。具体的には歴史地震のセグメント構造から5つのパッチ (室戸沖(Mu), 紀伊半島沖(Ki), 熊野灘(Ku), 遠州灘(En), 東海 (To)) を、豊後水道長期的スロースリップに対応するパッチ(Bu)を設定した。その後、GNSSデータのインバージョン解析によって、それぞれのパッチの応力蓄積速度を推定した。

得られた力学的固着モデルを使って、長期的スロースリップイベント、歴史地震、および、今後起こりうる大地震の破壊シナリオとしてすべり分布モデルを構築する。豊後水道のパッチ(Bu)へ蓄積される6年間ぶんの応力を解放することで、豊後水道スロースリップイベントの規模Mw 7を再現できる。また、パッチ (Mu, Ki, Ku, En, To) への応力蓄積を歴史地震の発生履歴から見積もり、5つの力学的パッチの連動パターンから多様な断層破壊を想定する。特に、パッチMu-Ki-Ku-Enの連動破壊によって1707年宝永地震を、Ku-En-Toにより1854年安政東海地震を、Mu-Kiによって1854年安政南海地震を、Ku-Enによって1944年昭和東海地震 (Mw 8.1)を、Mu-Kiによって1946年昭和南海地震 (Mw 8.4)のすべり分布モデルを作成した。比較的高い信頼度で推定されてきた昭和東南海・南海地震のすべり分布およびモーメントマグニチュードを、本研究で提案する手法によっておおよそ再現することができる。この手法では、すべりが起こる範囲を設定する必要がある。すべりが海溝まで達するとした場合、達しない場合と比べ、モーメントマグニチュードがおおよそ0.1から0.2程度大きくなる。

さらに、2026年時点で蓄積されている応力蓄積量を見積もり、この応力解放によって起こりうる大地震を合成した。5つの力学パッチが全て破壊する場合 (Mu-Ki-Ku-En-To, Mw 8.44), 安政東南海地震型 (Ku-En-To, Mw 8.14), 南海地震型 (Mu-Ki, Mw 8.31) の破壊シナリオを含む大地震の破壊シナリオを提案することができる。

今後、昭和・安政地震の地震記録・津波記録等を利用し、力学的固着モデルの検証を行えるようにすることが重要である。また、将来的に海域GNSS観測点が増えれば、より直接的な検証と改良を期待できる。

Seismic activity in the transition zone between the ordinary earthquake and shallow slow earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan

*Issei Hirata¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima¹, Yukihiro Nakatani³, Shuichiro Hirano³, Hiroshi Yakiwara³, Kazuo Nakahigashi⁴, Kentaro Emoto¹, Satoshi Matsumoto¹, Shukei Oyanagi², Yoshihiro Ito², ChingYu Hu⁵, Tomoaki Yamada⁵, Masanao Shinohara⁵

1. Kyushu University, 2. Kyoto University, 3. Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. The University of Tokyo

日向灘はユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込んでいる領域で、通常の地震とスロー地震の両方が発生している。プレート境界地震が発生する深さ15-30 kmの地震発生層のdown-dip側では長期的スロースリップが、up-dip側では浅部テクトニック微動や浅部超低周波地震が発生していることが測地観測や地震観測研究により、ここ10年の間で明らかとなっている。通常の地震については気象庁一元化震源カタログがあるが、日向灘で発生する地震は陸上観測点のデータのみで解析しているため、震源決定精度は低く、特に深さの詳細な分布は得られていない。そこで、2021年から2022年にかけて、日向灘の浅部スロー地震と通常の地震の発生領域境界部において、それぞれの現象がどの場所で発生しているのかを明らかにするため、海底地震計を用いた直上観測が行われた。

平田・他(2024, JpGU)では、この観測データを用いて、本研究領域で実施された地震波構造探査(Arai et al., 2023)の結果をもとに作成した一次元速度構造を使用し、一次元速度構造と観測点ごとの走時の系統的なずれを補正するために観測点補正も行ったうえで、気象庁一元化カタログに掲載されている通常の地震の震源再決定と発震機構解析を行い、震源分布や発震機構解の特徴について報告を行った。その結果、地震のクラスターが気象庁一元化震源と比較して水平方向で北西(陸の方向)に約10 km異なる位置に決められたこと、それらが深さ15 km付近に集中することを示した。しかし、クラスターを含め、対象としていた地震のほとんどが観測網の外側で発生していることが明らかとなり、観測点配置に依存していると見られる震源分布が得られるなど、得られた結果の解釈および議論には限界があった。

海底観測網の外側に決められた震源の絶対的な位置の精度を少しでも向上させ、発震機構解を精度良く求めるためには、震源に対して観測網のカバレッジを向上させることが重要である。そこで、これまで使用していた海底地震計のデータに加えて宮崎県沿岸の陸上地震観測点も使用し、現時点で使用可能な三次元速度構造を用いたdouble-difference法による震源決定を行うとともに、三次元速度構造を用いて計算された射出角を使って発震機構解析を行うこととした。陸上観測点は宮崎県南部沿岸の気象庁、防災科学技術研究所、九州大学、京都大学、鹿児島大学の10点を使用し、宮崎県沿岸部～海底地震観測網の間の領域で海底観測期間中に発生したM0以上の地震を気象庁一元化震源カタログから抽出して解析に用いる。対象となったイベント数は既に海底地震計のみで解析を行っていたイベント83個を含む408個である。陸上観測点のP波、S波の読み取り値は、気象庁の検測値がある観測点はそのまま使用した。大学独自の観測点においては、京都大学防災研究所宮崎観測所による読み取り値があれば使用し、ない場合は新たに読み取りを行った。海底地震観測点については読み取りが確実にできる観測点でのみ読み取りを実施した。初期震源の計算にはhypoMH(Hirata and Matsu'ura, 1987)を用い、三次元速度構造での震源計算にはtomoDD(Zhang and Thurber, 2003)を用いた。本発表ではこれらの結果を紹介するとともに、地震活動の特徴およびスロー地震と通常の地震の関係性についてについて考察と議論を行う予定である。

謝辞：本研究は文部科学省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」および文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の一環として実施されました。解析には気象庁一元化震源カタログおよび検測値を利用しました。海底地震計の設置・回収は長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」および海洋エンジニアリング株式会社所属「第三開洋丸」によって行われました。両船の船

員の皆様ならびに乗船された京都大学，九州大学，鹿児島大学，東京海洋大学，東京大学の皆様に感謝の意を表します．また，海洋研究開発機構の新井隆太博士には2020年の日向灘の地震波構造探査の測線データを提供していただきました．以上の方々に心より御礼申し上げます．

Spatio-temporal variation of the aftershock activity following the 2021 and 2022 intraslab earthquakes in off-Fukushima prefecture

*Ryo Osawa¹, Ryota Hino¹, Keisuke Yoshida¹

1. Tohoku university

2021年2月13日、福島県沖の太平洋スラブで大地震（M7.3）が発生し、東北地方の広い範囲で強い揺れによる被害が発生した。その2021年の地震から約1年後の2022年3月16日には、2021年の地震の北側で再び大きなスラブ内地震（M7.4）が発生し、福島県と宮城県で再び大きな被害が発生した。これらの地震は、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）の破壊領域の南縁に沿って発生し、東北地方全域に大きな地震後変形をもたらした。

本研究は、これら2つの地震の破壊領域周辺のスラブ内地震活動をより包括的に明らかにすることを目的とする。そのために、東北地方太平洋沖地震以前から最近までの長期にわたる地震の時空間分布を解析し、隣接して連続する2つの巨大なスラブ内地震の相互作用を検討する。また、巨大地震がスラブ内の地震活動に及ぼす影響についても議論する。

対象とする地震は気象庁一元化カタログに掲載されているM2以上の地震で、2003年3月から2023年6月までのものである。震源は波形相関を用いたDouble-difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000) によって再決定した。再決定した震源に対して、DBSCAN (Ester et al. 1996) を用いてクラスター分析を行い、面的な形状を形成する震源の密集したクラスターを同定した。その際に、1回目の本震後から2022年の2回目の本震前の地震を「2021年地震の余震」、2回目の本震後の地震を「2022年地震の余震」と定義し、この2つのデータセットを個別に用いてクラスター分析を行い、それぞれの余震活動から面的なクラスターを抽出した。

「2021年地震の余震」を対象とした分析から4つの面的クラスターが、「2022年地震の余震」から2つの面的クラスターが定義された。これらのクラスターのそれぞれを近似する平面を定義して、これらを複数の断層面とみなすことにより、断層上での地震活動の特徴を調べた。クラスター分析の対象とした期間外の地震も含めて、断層ごとに、それぞれに沿って発生した地震のカタログを作成した。その結果、2022年M7.4の本震震源（破壊の開始点）を含む断層沿いの地震は、2021年M7.3の地震が発生した直後から活動を始めていたことがわかった。2022年の地震発生までの期間での活動は、断層面上でも2021年の本震の破壊域に近い南側領域に限られ、2022年の本震震源近傍の狭い範囲での活動が持続していたことが特徴である。2021年M7.3震源断層上でも、本震発生直前のおよそ1ヶ月前から地震が複数回発生していた。しかし、2022年M7.4地震の発生前に見られたような、破壊の開始点周辺での集中的な前駆的活動を確認することはできなかった。

この領域のスラブ内では、2011年の東北沖地震発生直後から地震活動は活発化したが、本研究で抽出された2021・2022年の地震に伴って活動した断層に沿った震源の集中は、2021年M7.3地震の発生以前には見出されなかった。

Hypocenter Distribution and Migration preceding the 2021 M6.0 Ibaraki-Oki Earthquake Based on S-net Data

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹

1. Tohoku University

茨城県沖プレート境界では、M6-7クラスの地震に先行して、度々前震活動が観測されている (例えば、Nishikawa & Ide, 2018). 2021年8月4日のM 6.0 地震についても、発生の約1日前から前震活動を確認できる. 気象庁一元化震源によると、前震活動は、上盤プレート内とプレート境界付近にわかれて分布している. しかし、震央位置が最寄りの観測点から約20 km離れており、震源決定誤差が大きいために、この分布は実状を表していない可能性がある. 東北日本の沖合では、2016年からS-net観測網による海底地震計のデータが利用可能になり、2020年以降の気象庁一元化震源にも利用されている. しかし、S-netデータによりどの程度震源決定精度が向上したのかを詳細に評価した先行研究は少ない. 本研究では、最初に S-net データによる震源決定の信頼性を検証したのち、相対震源決定により震源分布の信頼度を向上させ、2021年M6.0茨城県沖地震をトリガーしたメカニズムを調べる.

震源決定の不確定性の評価には相似地震を利用した. 相似地震を抽出するために、対象領域に近いHi-net観測点 (N.TYOH) の観測波形の相互相関を計算した. 2003/03/08 - 2024/3/31に発生したイベントを対象に、2-5 Hzバンドパスフィルターを適用した28秒間の上下動成分の波形を用いて、相互相関係数が0.98 以上を満たすペアを相似地震とみなし、グルーピングした. 計算の結果、20個のイベントを含む相似地震グループを特定し、それらについて、S-net データを用いて推定した観測点補正值 (Matsumoto et al., 2024JpGU) を使用した震源決定を行った. その結果、S-netデータが使用できない相似地震の震源は、東西方向に約20 km広がり、深さ方向には10 - 70 km の範囲に散らばった分布を示した. 震源決定時の残差に基づき、観測点分布の違いによる震源の不確定性を調べたところ、S-net データが使用できない期間の地震については、震央の東西の抑えが効かず、深さに関してはほとんど拘束できないことがわかった. 一方、S-net データを用いたイベントについては、震央位置を5 km以下に拘束できた. しかしながら、最寄りのS-net観測点からおおよそ20 km離れるため、この場合にも、震央に比べて深さの不確実性が大きい (約20 km)結果が得られた.

震源の相対位置の精度を向上させる目的で、S-net データが利用可能な期間の地震 (2020/9/1 - 2024/3/31のM $\geq$ 1.5の3021イベント)を対象に DD法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000) による震源決定を行った. この結果、気象庁一元化震源で二つのクラスターに分かれていた震源は、プレート境界に平行な一枚の面上に集中した. これらの地震のF-netのメカニズム解は低角逆断層型を示し、節面と震源の並びから、各地震がプレート境界上で発生したことが示唆される. 震源再決定後、近くに位置するイベントペア間の距離と観測波形の相互相関係数の間の相関もより明瞭になった. このことも、DD法により震源間の相対位置精度が向上したことを支持する.

2021年M6.0茨城県沖地震の約30時間前から発生した前震活動もプレート境界に沿って分布しており、その活動は本震震源から約 7km updip側から始まり、その後本震震源の方に向かって拡大した. この震源 migration は、その活動の背後に存在する非地震的なメカニズム (流体移動、非地震性すべり等) を反映している可能性が高い. 今回の前震の migration のパターンは、内陸地殻内で発生した鹿児島湾の M5.3地震の前震活動 (Matsumoto et al., 2021)のそれと類似しているが、鹿児島湾でのmigration速度が約 0.1 km/day であったのに対して、今回の前震活動の migration速度は約 10 km/day と約 2 桁高い. この傾向は、プレート境界の Permeabilityが地殻内断層のそれより遥かに大きいことを意味するのかもしれない. 一方、今回得られた速度は、沈み込み帯プレート境界型巨大地震の発生前に観測された地震活動 (例えば、Kato et al., 2012)や、非地震性すべりにより誘発されたと考えられている群発地震活動のそれと類似する (例えば、Lohman & McGuire, 2007). Nishikawa et al. (2023) は、2021年茨城県沖地震の前震活動に先行する短期的 SSE や tectonic tremor を検出している. 断層すべりと高圧流体の拡散が相互作用する可能性があり (Yamashita et al., 2017), 非地震性すべりの伝播や流体移動、あるいはその両方が2021年茨城県沖地震の前震震源migrationに関与したことが示唆される.

Trial of hypocenter relocation using a new 3-D seismic velocity model around the Nankai Trough

*Katsuhiko SHIOMI¹, Makoto MATSUBARA¹, Ayako NAKANISHI², Gou FUJIE², Shoji SEKIGUCHI¹

1. NIED, 2. JAMSTEC

はじめに

文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（本PJ）において、我々は、南海トラフ及びその周辺で発生する地震の活動状況を迅速かつ精度良く把握出来るようになることを目指し、海域と陸域をあわせた三次元地下構造モデルの構築並びにそのモデルに基づいて自動的に震源位置を推定するシステムの整備を進めている。これまで、主に海域で実施された構造探査結果と海陸の観測データに基づく地震波走時トモグラフィ解析結果を統合、調整することで南海トラフ全域を対象とした新たなP波速度構造モデルを構築するとともに、様々なデータに基づく関係式を用いてこのP波速度構造を変換することにより、S波速度構造モデルを推定した。これにより、従来のモデルでは解像が十分でなかったトラフ軸周辺から陸域を含む三次元地震波速度構造のプロトタイプが得られた（例えば、Nakanishi et al., 2024; JpGU）。今回、このモデルを用いて、日向灘及び紀伊半島南東沖を対象とした震源再決定を試行したのでその結果を報告する。

解析方法・データ

本PJでは、防災科研が別途運用する一次元速度構造を用いた自動震源決定システム（Hi-netシステム）の出力をトリガーとして、三次元地震波速度構造を用いた震源再計算を自動的に実施するシステム（本システム）を整備した（汐見・他, 2022; SSJ）。今回の試行は、本システムにNakanishi et al. (2024) の構造モデルを適用し、過去震源再計算機能を稼働させることで実施した。震源計算には、Pseudo-bending法（Koketsu & Sekine, 1998）により走時を逐次計算する方法を用い、日向灘及び紀伊半島南東沖で2003年1月～2024年7月にHi-netシステムによって検知されたM2.5以上の地震を解析対象とした。Hi-netシステムによるこれらの地震の震源位置を初期震源位置とするともに、Hi-netシステムに登録されている検測値をそのまま震源再計算に用いた。得られた震源再計算結果は、Hi-netシステムによる震源や気象庁一元化震源等との比較検討を行った。

結果・議論

日向灘は、南海トラフ巨大地震想定震源域の中でもっとも地震活動が活発な地域である。本海域において、再決定震源は全体的に初期震源よりも浅くなる特徴が見られた。日向灘北部では、海岸付近で発生する地震の震央がわずかに陸域に移動する傾向が確認された一方、沖合では震央の移動は顕著では無かった。これは四国側の観測点の存在が影響している可能性がある。日向灘南部で発生する地震活動に対し、Hi-netシステムで求めた震源は深さ20～45 kmの範囲にバラついて分布しており、良く求まっていない。再計算の結果、沖合の地震活動の震央は10～20 km陸側に移動するとともに、30 km以深に決まっていた地震は軒並み10～15 km程度浅くなるなど、大きな移動が確認された。

紀伊半島南東沖では、2004年9月5日にMw7.2及び7.5のプレート内地震が相次いで発生し、顕著な余震活動を伴った。Hi-netシステムでは深さ固定で震源決定されるイベントが多かったが、再決定後は深さ15 km付近と40～50 km付近の2層に分かれる傾向を確認した。この地域のOBSを用いた詳細震源決定結果（Sakai et al., 2005）によると、深さ5～15 kmと15～25 kmに地震活動が分布するとされている。この差異については、観測点補正值の設定等を含めた再検討が必要である。一方、2016年4月1日にはプレート境界においてMw5.8の地震が発生した。Hi-netシステムではこの地震の深さを19 kmとしていたが、新しい構造モデルを用いたところ、深さは13 kmに求まった。この震央のプレート上面の深さは11 km程度とされており（Nakanishi et al., 2024）、プレート境界型の地震であることと矛盾しない結果となった。

今後は、各地震の震源決定状況の傾向の調査から、得られた震源分布の妥当性の検討を進めるとともに、観測

点補正值を含む構造モデルの評価も進める予定である。

謝辞：本研究は，文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。Hi-netシステムでは，気象庁・大学・産業技術総合研究所等の観測データを使用している。また，解析結果の比較検討に気象庁一元化震源カタログを使用した。