

ポスター会場（1日目） | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

■ 2019年9月16日(月) 17:15 ~ 18:45 | 会場 P会場 時計台国際交流ホールII・III
S09P

17:15 ~ 18:45

[S09P-01] 相互相関解析による南海トラフ沿いで発生する浅部超低周波地震の検出と相対震央決定

*武村 俊介¹、浅野 陽一²、松澤 孝紀²、野田 朱美²、久保田 達矢²、汐見 勝彦² (1. 東京大学地震研究所、2. 防災科学技術研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-02] 西南日本における超低周波地震の網羅的検出

*馬場 慧¹、武村 俊介¹、小原 一成¹ (1. 東京大学地震研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-03] 駿河湾におけるOBS観測記録への低周波微動検出手法適用の試み

*西宮 隆仁¹、小林 昭夫¹、溜淵 功史¹、馬場 久紀² (1. 気象庁気象研究所、2. 東海大学)

17:15 ~ 18:45

[S09P-04] 南海トラフ東部に沈み込む海嶺と浅部超低周波地震の震源分布

*藤 亜希子¹、Chen Wan-Jou²、Chi Wu-Cheng²、Dreger Doug³、井出 哲¹ (1. 東京大学、2. 台湾中央研究院、3. UC バークレー)

17:15 ~ 18:45

[S09P-05] 関東東海地震観測網のアナログ波形記録による1980年代の愛知県東部の低周波微動活動検出の試み

*松澤 孝紀¹、武田 哲也¹ (1. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-06] 琉球海溝で超低周波地震活動に続いて起こる地震活動

*中村 衛¹ (1. 琉球大学理学部)

17:15 ~ 18:45

[S09P-07] 長期的スロースリップに伴う深部低周波微動の特徴的振幅の変化の空間分布

*中本 敬大¹、平松 良浩¹、松澤 孝紀² (1. 金沢大学、2. 防災科学技術研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-08] 蔵王山における深部低周波地震活動の時空間的特徴

*池谷 拓馬¹、山本 希¹ (1. 東北大学)

17:15 ~ 18:45

[S09P-09] 火山性深部低周波地震に見られる特徴的地震波形の数値モデリング: 共鳴効果の検討

*春山 太一¹、小菅 正裕¹、前田 拓人¹ (1. 弘前大学大学院理工学研究科)

17:15 ~ 18:45

[S09P-10] ETASモデルを用いた日本列島周辺の地震活動異常性モニタリング

*西川 友章¹、西村 卓也¹ (1. 京都大学防災研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-11] 日本列島内陸域の相似地震活動

*五十嵐 俊博¹ (1. 東京大学地震研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-12] 南西諸島北部域における海底地震観測と検出された相似地震の特徴

*仲谷 幸浩¹、八木原 寛¹、平野 舟一郎¹、小林 励司¹、宮町 宏樹¹、中尾 茂¹、内田 和也²、松島 健²、清水 洋²、山下 裕亮³、中東 和夫⁴、山田 知朗⁵、阿部 英二⁶、篠原 雅尚⁶ (1. 鹿児島大、2. 九州大、3. 京大防災研、4. 東京海洋大、5. 東大地震研 (現所属：気象庁)、6. 東大地震研)

17:15 ~ 18:45

[S09P-13] 南西諸島北部の海域及び島嶼域における地震観測によるプレート境界面形状の推定 (6)

*八木原 寛¹、仲谷 幸浩¹、平野 舟一郎¹、小林 励司¹、宮町 宏樹¹、中尾 茂¹、山下 裕亮²、内田 和也⁴、松島 健⁴、清水 洋⁴、中東 和夫⁵、馬越 孝道³、阿部 英二⁶、池澤 賢志⁶、諏訪 祥士⁷、山田 知朗⁷、篠原 雅尚⁶ (1. 鹿児島大学、2. 京大防災研、3. 長崎大学、4. 九州大学、5. 東京海洋大学、6. 東大地震研、7. 東大地震研 (現：気象庁))

17:15 ~ 18:45

[S09P-14] 2016年熊本地震の余震発生における間隙流体圧の役割

*中込 広大¹、寺川 寿子¹、松本 聡²、大倉 敬宏³、今西 和俊⁴、吉見 雅行⁴、内出 崇彦⁴、2016年熊本地震合同地震観測グループ⁵ (1. 名古屋大学大学院環境学研究所、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター、4. 産業技術総合研究所、5. 2016年熊本地震合同地震観測グループ)

17:15 ~ 18:45

[S09P-15] 2016年熊本地震震源域に見られる深部地震の特徴

*光岡 郁穂¹、松本 聡²、志藤 あずさ²、2016年熊本地震 合同観測グループ (1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター)

17:15 ~ 18:45

[S09P-16] コーダスペクトル比法に基づく2016年熊本地震の余震の震源パラメータ推定とその特徴

*前迫 直人¹、松本 聡²、光岡 郁穂¹、2016年熊本地震 合同地震観測グループ (1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター)

17:15 ~ 18:45

[S09P-17] 九州の下部地殻における非弾性変形と地震活動について

*湯浅 雄平¹、松本 聡²、中尾 茂³、松島 健²、大倉 敬宏⁴ (1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター、3. 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、4. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター)

17:15 ~ 18:45

[S09P-18] 地動ノイズに含まれる等時間差の相似波形

*勝俣 啓¹、一柳 昌義¹ (1. 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター)

17:15 ~ 18:45

[S09P-19] 海底地震観測網を活用した自動震源決定 (PF法) の評価

*溜淵 功史¹、岩崎 友理子²、岩切 一宏²、上野 寛² (1. 気象研究所、2. 気象庁)

17:15 ~ 18:45

[S09P-20] 2011年東北沖地震後の流体圧変化に伴う内陸の群発地震震源域近傍の速度構造の時間変化

*吉田 圭佑¹、長谷川 昭¹、行竹 洋平²、松澤 暢¹ (1. 東北大学 理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター、2. 神奈川県 温泉地学研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-21] 森吉山地域の群発地震に見られる特徴的な散乱波群の波形形状の時間変化とその要因

*雨澤 勇太¹、小菅 正裕¹、前田 拓人¹ (1. 弘前大学大学院理工学研究科)

17:15 ~ 18:45

[S09P-22] 徳山ダムにおける微小地震観測 (第3報)

*佐野 貴之¹、塚本 守¹、曾田 英揮²、三塚 隆³、神藤 史明³、片尾 浩⁴ (1. 独立行政法人 水資源機構、2. 一般財団法人 国土技術研究センター、3. 地質計測株式会社、4. 京都大学 防災研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-23] 大規模4次元変分法データ同化に基づくスロースリップ断層面における摩擦特性不均一性の不確実性評価

*伊藤 伸一^{1,2}、加納 将行³、長尾 大道^{1,2} (1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学大学院情報理工学系研究科、3. 東北大学大学院理学研究科)

17:15 ~ 18:45

[S09P-24] 鳥取県西部地震震源領域における高精度メカニズム解と非ダブルカップル成分検出

*林田 祐人¹、松本 聡²、飯尾 能久³、酒井 慎一⁴、加藤 愛太郎⁴、0.1満点地震 観測グループ (1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学防災研究所、4. 東京大学地震研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-25] 2016年ニュージーランド・カイコウラ地震の震源域における応力場(2)

*松野 弥愛¹、岡田 知己¹、松本 聡²、河村 優太²、飯尾 能久³、佐藤 将¹、Bannister Stephen⁴、Ristau John⁴、Savage Martha⁵、Pettinga Jarg⁶、Sibson Richard⁷ (1. 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学防災研究所、4. GNS Science, New Zealand、5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand、6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand、7. University of Otago, Dunedin, New Zealand)

17:15 ~ 18:45

[S09P-26] 東日本太平洋地震後地震活動の時間空間特徴

*段 美佟¹、山田 卓司¹ (1. 茨城大学)

17:15 ~ 18:45

[S09P-27] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes in Japan: analyses of JMA catalogue**

*Thystere Matondo Bantidi¹、Takeshi Nishimura¹ (1. Tohoku University)

17:15 ~ 18:45

[S09P-28] 内陸地震におけるM3以上の地震モーメントの推定

*上野 友岳¹、齊藤 竜彦¹、野田 朱美¹ (1. 防災科学技術研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-29] 日本列島下における内陸地震の余震域の広がり

*田中 佐千子¹、齊藤 竜彦¹、野田 朱美¹ (1. 防災科学技術研究所)

17:15 ~ 18:45

[S09P-30] 津波地震の前震および余震活動の時空間的特徴と波形的特徴

*劉 弋鋒¹、伊藤 喜宏²、太田 和晃²、片上 智史¹ (1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所)

相互相関解析による南海トラフ沿いで発生する浅部超低周波地震の検出と 相対震央決定

Detection and relocation of shallow very low-frequency earthquakes along the Nankai Trough based on cross-correlation analysis

*武村 俊介¹、浅野 陽一²、松澤 孝紀²、野田 朱美²、久保田 達矢²、汐見 勝彦²

*Shunsuke Takemura¹, Youichi Asano², Takanori Matsuzawa², Akemi Noda², Tatsuya Kubota²,
Katsuhiko Shiomi²

1. 東京大学地震研究所、2. 防災科学技術研究所

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and
Disaster Resilience

1. はじめに 南海トラフの巨大地震の発生領域の浅部で発生する浅部超低周波地震のメカニズム解や発生位置の空間的な広がり、プレート境界浅部の応力蓄積および摩擦特性を知る上で重要な手がかりとなる（例えば、Saffer and Wallace, 2015; Obara and Kato, 2016）。Takemura et al. (2019)により、室戸岬沖から紀伊半島南東沖にかけての領域の浅部超低周波地震のCMTカタログ（以下、単にCMTカタログ）が整備されたが、CMT解析は水平方向に0.1°毎のグリッドサーチ法を基にしているため、詳細な活動パターンの議論は難しい。そこで、CMTカタログに含まれている浅部超低周波地震をテンプレートとして利用し、Asano et al. (2015)による相互相関解析を用いて浅部超低周波地震の検出と相対震央位置の推定を行い、詳細な活動パターンの解明を試みた。

2. 手法 Takemura et al. (2019)によるCMTカタログから、各震源グリッドで観測波形とのVariance Reductionが最大かつ65%以上のCMT解の計算波形をテンプレートとして用いた。周期20-50秒のF-net速度波形とテンプレート波形との相互相関関数を計算後、Asano et al. (2015)に従って3.8 km/sで相互相関関数のback projectionを行った。0.025°毎に設定した震源グリッドに対して1秒ごとにback projectionを実施し、相関係数が0.45以上の時に浅部超低周波地震として検出した。相関係数のしきい値については試行錯誤的に決めた。重複検出を避けるため、震央距離差100 km以内で検出時刻の差が60秒に満たないものは同一のイベントと見なした。

3. 結果 試験的な解析として、2015年9月に紀伊水道沖、2016年4月に紀伊半島南東沖で発生した浅部超低周波地震について、相互相関解析を行った。CMTカタログには2015年と2016年でそれぞれ9個と14個の浅部超低周波地震が含まれていたが、相互相関解析によって23個および50個とおおよそ倍以上の数の浅部超低周波地震を検出できた。Nakano et al. (2018)によりDONETで推定された浅部超低周波地震カタログと比較をすると、Mw 3.4以上の浅部超低周波地震の震央位置および積算個数の時間変化と良い一致を示している。

手法とCMTカタログに関する参考文献

Asano et al. (2015), <https://doi.org/10.1002/2014GL062165>

Takemura et al. (2019), <https://doi.org/10.1029/2019GL082448>

謝辞 防災科学技術研究所F-netの観測波形記録 (<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>) を利用しました。

Nakano et al. (2018)のカタログは、スロー地震データベース (Kano et al., 2018;

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>) よりダウンロードしました。テンプレート波形の計算には

海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用しました。この研究は、JSPS科研費17K14382および19H04626による助成を受けました。

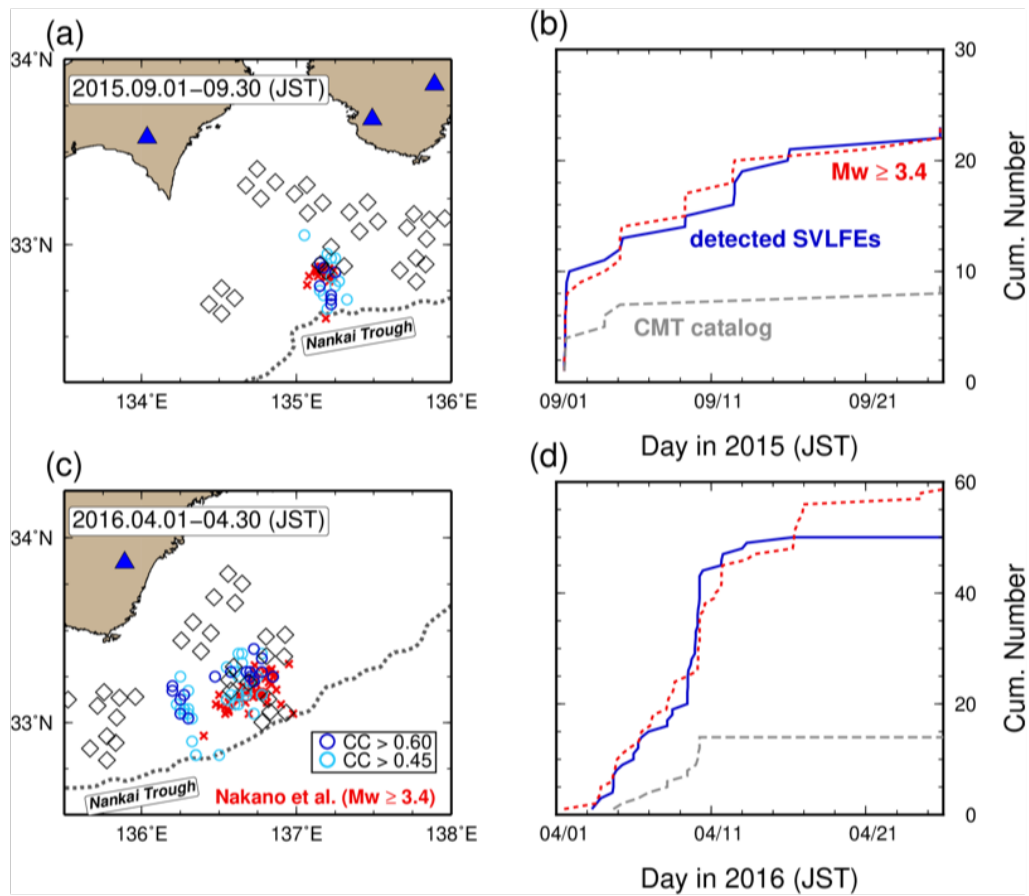


図1. 2015年9月に紀伊水道沖，2016年4月に紀伊半島南東沖で発生した浅部超低周波地震へ相互相関解析を適応した結果．相互相関解析で検知された浅部超低周波地震を青色の○と青線で示す．Nakano et al. (2018)のカタログから，2016年4月に発生した浅部超低周波地震のうちMw 3.4以上のものを赤色のXと線で示す．CMTカタログにより得られた積算個数は灰色線で示す．青色の三角形はF-netの観測点位置，ひし形はDONETの観測点位置を示す．

西南日本における超低周波地震の網羅的検出

Comprehensive detection of very low frequency earthquakes in southwest Japan

*馬場 慧¹、武村 俊介¹、小原 一成¹

*Satoru Baba¹, Shunsuke Takemura¹, Kazushige Obara¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

超低周波地震 (VLFE) は、沈み込み帯の巨大地震発生域の周辺で発生するスロー地震の一種であり、0.02–0.05 Hzの周波数帯で特に強く観測される。西南日本のVLFEには、フィリピン海プレートの巨大地震発生域よりも深部延長で発生する深部VLFEと、巨大地震発生域よりも浅部延長で発生する浅部VLFEが存在する。深部VLFEは、微動や短期的スローリップイベントと同じ領域で発生し、かつ類似のメカニズム解を示すことがわかっている (e. g., Ito et al., 2007)。浅部VLFEは、Asano et al. (2008)によるセンブランス解析によって全国的に検出が行われている。それらの中の室戸岬・紀伊半島沖で発生する浅部VLFEは、詳細な震央位置とメカニズム解の推定が行われており、沈み込むフィリピン海プレートのプレート境界におけるすべり欠損速度や間隙流体の分布と、浅部VLFEの空間分布との関連性が指摘されている (Takemura et al., 2019)。しかし研究の進展の一方で、西南日本の深部VLFEと浅部VLFEを統一的な手法によって網羅的に検出した研究例はない。本研究では、西南日本におけるプレート間のすべり分布を明らかにするために、マッチドフィルター法を用いて、南海トラフ沿いの西南日本の沈み込み帯全域におけるVLFEの網羅的検出を行なった。

本研究では、2003年1月から2018年7月までのF-netの連続波形データに、0.02–0.05 Hzのバンドパスフィルターを適用したものをを用いた。Koketsu et al. (2012) のフィリピン海プレートのプレート境界に196点の仮想震源グリッドを設定し、プレート境界面の形状およびNuvel-1Aによるフィリピン海プレートの沈み込み方向から計算されたメカニズム解を使って、各仮想震源から近い10点のF-net観測点で理論波形を計算し、テンプレートとした。理論波形はKoketsu et al. (2012) の3次元不均質構造を用いて、3次元差分法 (OpenSWPC; Maeda et al., 2017) により計算した。テンプレートと波形データとの相関係数を1秒おきに計算し、相関係数の全成分の平均の解析期間における中央絶対偏差の8倍をしきい値と定め、しきい値を超えた時間にイベントが発生したと判定した。

深部VLFEは、プレート境界面の深さ30–40 kmの範囲に分布し、暫定的な結果として、四国西部で966個、四国東部で294個、紀伊半島で562個、東海地方で253個が検出された。浅部VLFEは、プレート境界面の深さ10 km以浅の範囲に分布し、暫定的な結果として、日向灘で33559個、室戸岬沖で2604個、紀伊半島沖で3311個が検出された。VLFEが検出された領域は、先行研究の結果と整合的であった。四国沖の、プレート境界面の深さ10–25 kmには、VLFEの検出数が極めて少ない領域が存在し、そこはプレート同士が強く固着していると考えられる。

駿河湾におけるOBS観測記録への低周波微動検出手法適用の試み

Application of a tremor detection method to the OBS data in Suruga bay

*西宮 隆仁¹、小林 昭夫¹、溜淵 功史¹、馬場 久紀²

*Takahito Nishimiya¹, Akio Kobayashi¹, Koji Tamaribuchi¹, Hisatoshi Baba²

1. 気象庁気象研究所、2. 東海大学

1. Meteorological Research Institute, 2. Tokai University

2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震 ($M_j7.4$) のあと、気象研究所は、正確な余震分布の調査のため自己浮上式海底地震計 (短周期型) (OBS) による観測を実施した。観測結果の解析によれば、余震に加え、多くの低周波微動が発生していた (溜淵 他, 2019, JpGU)。多数の地震と低周波微動が混在している波形から低周波微動を適切に検出することは重要である。

低周波微動の検出については、低周波微動用・通常の地震用・バックグラウンドノイズ用の3種類の周波数帯域のフィルタを観測記録に適用した後それぞれエンベロープを算出し、それらの比の大きさに基づいて微動検出を行う frequency scanning method (FSM) (Sit et al., 2012, EPSL) や、FSMを短周期型OBS向けに改良した mFSM (Katakami et al., 2017, GRL) がある。これらは単独観測点で検出が行えるという特徴を有する。そこでまず、通常の地震及び低周波微動の検出結果がある前述のOBS観測の記録に対して、これを以下に示す手順で適用を試みた。

(1) OBSの上下動成分の記録を用いる。

(2) Katakami et al.(2017) のmFSMと同様に、ローカルな地震についてはコーダ波が指数関数的に減少するものとして、指数関数と相関のよいエンベロープの範囲を前もって比の値がゼロになるように設定する。

(3) Katakami et al.(2017)と同様に、低周波微動用(2-4Hz)・通常の地震用(10-20Hz)・バックグラウンドノイズ用(0.5-1Hz)のフィルタを観測記録に適用し、エンベロープを求める。

(4) Sit et al.(2012)と同様にエンベロープを5秒窓で平均し、その比を連続値として算出する。算出にあたり、Katakami et al.(2017)を参考に、バックグラウンドノイズ用の周波数帯のエンベロープについては、平均的な値 (中央値) よりも小さい場合は平均的な値に置き換えた。

(5) その5秒間ごとの比について観測の全期間に渡って観測点ごとに算出し、その中央値を観測点におけるノイズレベルの代表的な比の値と考え、代表的な値に対する倍率に基づき低周波微動であるかの評価基準とする。具体的には、倍率と地震及び低周波微動の検出結果とを比較して頻度分布を整理(Fig.1a)し、ROC曲線を作成(Fig.1b)して最適と思われる閾値を算出した。

その結果、閾値は、観測点ごとには30~100程度の範囲でばらつきはあるが、全点では60程度となり、通常の地震が一部混じるものの8~9割程度の割合で低周波微動を検出できることがわかった。

一方、気象研究所では、駿河湾中部において東海大学と共同で7年以上に渡り1~4地点程度OBSを設置して観測を行ってきた。そこで上記を参考に閾値を設定し、駿河湾中部直下で M_j 4.6の地震が発生した2015年9月8日以降の4地点のOBS観測記録に上記方法を適用した。その結果、1週間程度の間でも閾値を超えるケースが複数みられ、波形や地震の発生状況を確認したところ、いずれも低周波微動ではなく、震央距離が200km程度以上離れた遠方の地震もしくはローカルな地震による震動であった(例をFig.2)。

現在、手法の改善や、駿河湾のOBS観測記録へのさらなる適用と閾値を超えた場合の波形の確認を行っており、大会当日は、それら結果について報告する。

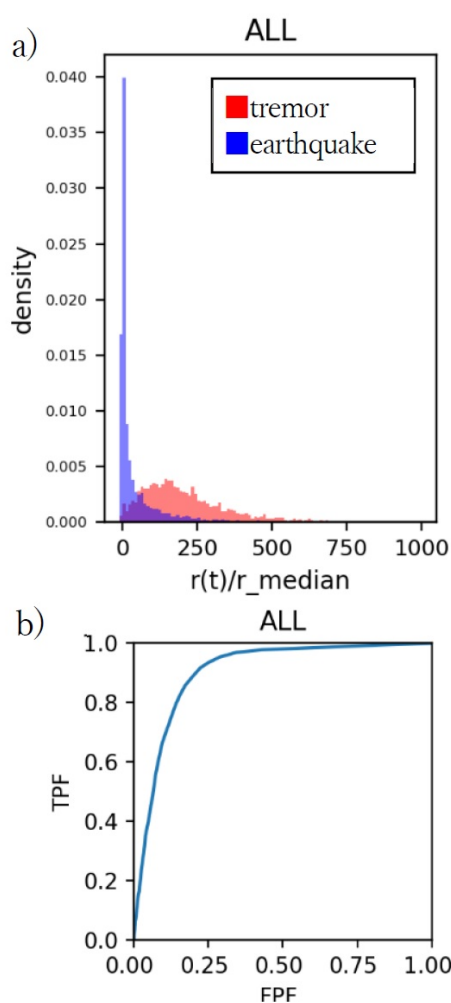


Fig.1 2004年9~11月の紀伊半島南東沖OBS解析

- a) OBS観測点全点の観測記録に基づくエンベロップ比の倍率の規格化度数分布
b) a)のROC曲線

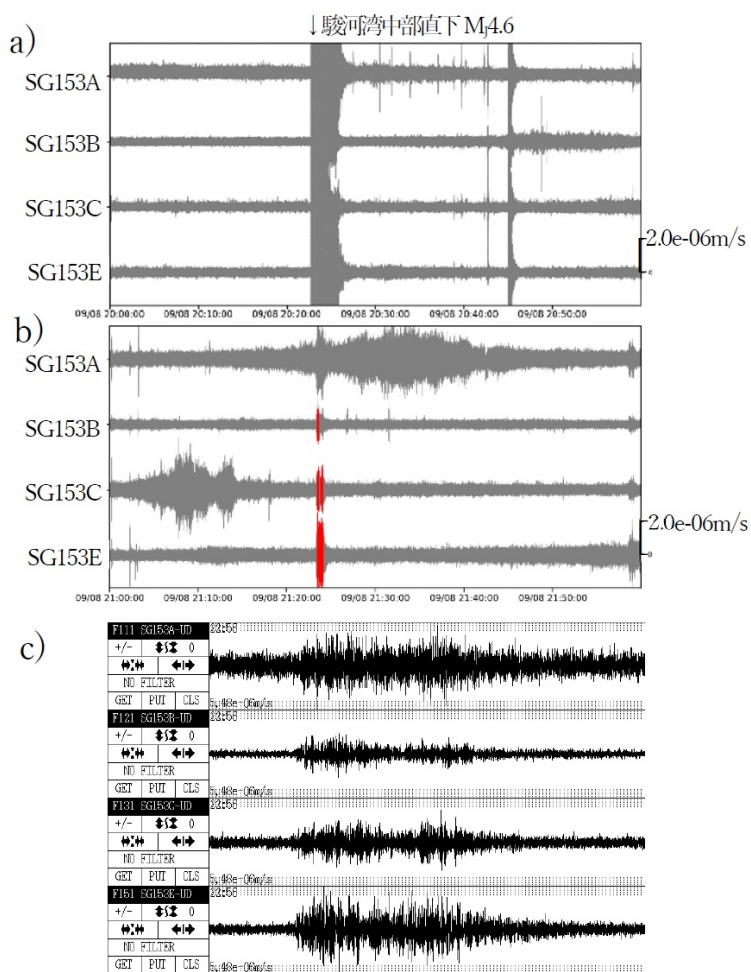


Fig.2 2015年9月8日20~22時の駿河湾OBS(SG153A,B,C,E4地点)の観測記録(閾値を超えたと評価された部分を赤で示す)

- a) 20~21時
b) 21~22時
c) b)のうち赤で示した区間付近の拡大(銚子付近 M_j 3.7の地震による波形)

南海トラフ東部に沈み込む海嶺と浅部超低周波地震の震源分布 Distribution of shallow very low frequency earthquakes influenced by a subducting-ridge

*藤 亜希子¹、Chen Wan-Jou²、Chi Wu-Cheng²、Dreger Doug³、井出 哲¹

*Akiko Toh¹、Wan-Jou Chen²、Wu-Cheng Chi²、Doug Dreger³、Satoshi Ide¹

1. 東京大学、2. 台湾中央研究院、3. UC バークレー

1. Univ. of Tokyo, 2. Academia Sinica, 3. UC Berkeley

はじめに 南海トラフの沈み込み帯で発生する浅部低周波地震(VLFE)は、直上に展開される広帯域海底地震計観測網の近地波形記録の解析結果に基づき、プレート境界断層における低角逆断層型地震として説明されてきた(Sugioka et al., 2012; Nakano et al., 2018)。他方、同海域においてプレート境界より浅い分岐断層におけるVLFE発生の可能性や(To et al., 2015)、南海トラフ東部に沈み込む海嶺のVLFE分布への影響も指摘されている(Toh et al., 2018)。本研究では、これらの指摘を踏まえて、南海トラフ東部における浅部VLFEの震源メカニズム分布の詳細を推定することを目的とした。

データ 南海トラフ東部で2015、2016及び2017年にそれぞれ1-3週間発生したVLFE群発活動のDONET1広帯域地震計記録の三成分を利用した。複数の周波数帯域においてシグナルの有無を確認する明確な基準(To et al., 2015)を適用し、まず947個のVLFEを検出した。6観測点以上でシグナルが観測されたVLFEは355個あった。

手法 観測波形と理論波形のVariance Reduction(VR)を最大化するセントロイドの震源位置と時刻、及びモーメントテンソル5成分を、震源の位置(水平方向0.01°、深さ方向1km)と時間(1s)に対してグリッドサーチし、モーメントテンソル解については各グリッドで時間領域における波形インバージョン(Dreger, 2003)を実施して求めた。構造モデルは、同海域の2次元構造探査モデル(Nakanishi et al., 2008)を水平方向に平滑化して利用した。Green関数は波数積分法(Herrmann, 2003)により求めた。本研究では時間と空間の両方で点震源を仮定している。VLFEの長い震源時間を考慮するために、それぞれのVLFEに対し三種類のバンドパスフィルタ(16-32s、20-50s、25-80s)を試した。長周期フィルタほどS/N比が低下する。利用可能な観測波形数が一定数以上となるような長周期のフィルタをイベント毎に選択した。

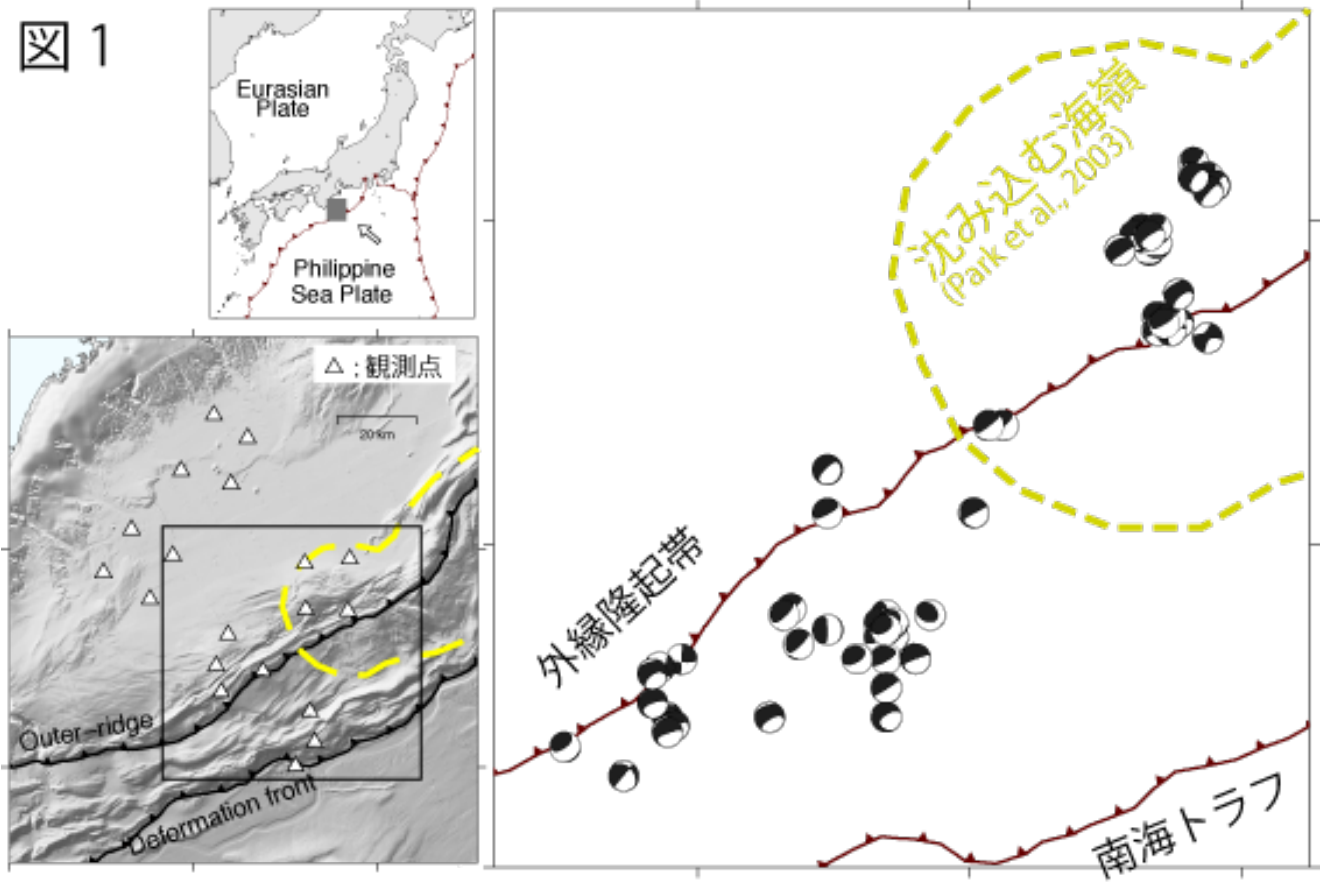
結果と議論 65%以上のVRが得られた50個のVLFEの分布を図1に示す。

1. 海嶺の沈み込みが無い(プレート境界面が滑らかな)南西側では、VLFEは外縁隆起帯の直下からトラフ軸側に分布する。VLFEがプレート境界断層における低角逆断層のメカニズムを持つ地震であるとする既存研究結果(Sugioka et al., 2012; Nakano et al., 2018)と、概ね調和的な結果を得た。但し、最も陸側に位置するものの中にプレート境界よりも~2km浅く震源が推定されるVLFEが紛れている。これらのVLFEと分岐断層の関係については、震源位置の深さ方向の解像度を精査し、今後明らかにしていきたい。

2. 海嶺が沈み込む北東側では、構造探査で示される海嶺(Park et al., 2003)の高まりの直上、及びその陸側にVLFEが分布する。この領域は外縁隆起帯直下とその陸側に相当し、外縁隆起帯のトラフ軸側にVLFEが分布する南西側と対比的である。また、南西側の外縁隆起帯下のVLFEと比較して、北東側では震源の深さが~2km程浅く、To et al., (2015)の報告と調和的である。但しこれは、分岐断層における発生というよりも、寧ろ北東側において海嶺の沈み込みによりプレート境界そのものが持ち上げられていることに起因するとも考えられる。

3. 沈み込む海嶺のようなプレート境界面の凸構造は、上盤のプレートにfractured networkを形成することが指摘されている(Wang and Bilek, 2011)。また、海嶺の陸側の裾において、剪断応力及び間隙圧は増加する筈である。従って、本研究で得られたDONET1の北東側と南西側におけるVLFE分布の違いは、海嶺の沈み込みによって生じると考えられる応力場の変化により整合的に説明可能である。本研究結果は、過去に津波を発生させてきたこの領域の歪み蓄積解放様式を推定する上でも重要である。

図 1



関東東海地震観測網のアナログ波形記録による1980年代の愛知県東部の低周波微動活動検出の試み

Trial detection of tremor in eastern Aichi in 1980s using analog seismograms of the Kanto-Tokai observation network

*松澤 孝紀¹、武田 哲也¹

*Takanori Matsuzawa¹, Tetsuya Takeda¹

1. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震の発生域への応力集中過程を反映して、スロー地震活動の繰り返し挙動が変化する可能性が数値シミュレーション研究から指摘されているが（例えば、Matsuzawa et al., 2010）、こうした議論を行うためには、長期にわたるスロー地震カタログが必要となる。南海トラフ沿いでは、深部低周波微動が繰り返し活発化しており、デジタルの連続記録の解析から、その活動状況が現在モニタリングされている。しかし1990年代以前については、デジタル記録として連続波形を保存することが容易でなかったため、アナログ波形記録を活用することが活動状況の把握において重要となる。防災科研は1979年から関東・東海地殻活動観測網の定常処理を開始しており、その後も順次観測点が増加している（Okada et al., 2000）。本観測網はすでに終了しているが、上下動成分の連続地震波形は、ペンレコーダーによるアナログ波形記録として、防災科研内に保管されている。これまで我々は過去記録の利用について予察的な検討を行ってきたが（松澤・武田, 2016; Matsuzawa and Takeda, 2017）、以下では同観測網の下山観測点の記録を利用し、1980年4月から1987年までの愛知県東部における微動活動検出を試みた結果を紹介する。

活動の検出については、アナログ波形記録の目視により実施した。まず目視による活動把握能力の確認を行うため、既存の微動カタログとの比較を行った。Maeda and Obara (2009)のHi-net地震計記録の波形相関・振幅ハイブリッド法によって推定された微動源位置を、Obara et al. (2010)の方法により1時間毎にクラスタリングした結果について、24時間以内に3つ以上のクラスタリング処理結果が得られている微動活動エピソードを対象として選び出した。この期間のHi-net下山観測点のデジタル波形記録について、ペンレコーダーによる波形記録を模した画像を作成し、検出可能性を確認した。振幅の情報もペンレコーダーと同一とし、一秒および一分のティックマークも出力し、画像解像度を100dpi相当とした画像を用いた。活動が小規模なものについては、遠地の地震波形等との判断が難しいものの、活発な活動については、数Hzに卓越する微動シグナルが数分間以上継続する特徴的な波形が、数日にわたって消長を繰り返すことから、認識することが可能であった。特に夜間についてはノイズレベルも低く、十分明瞭なシグナルとして視認できた。

1984年以降の愛知県東部の短期的スロースリップイベント(SSE)の活動については、歪計記録を用いて検出が行なわれ、結果が報告されている（小林他, 2006）。小林他により短期的SSEが検出された期間（1984年8月, 1986年12月, 1987年5月）についてはこれまでの発表において活動を確証したことを報告しているが、それ以外の期間についても、例えば1980年10~11月, 1981年6月, 1983年5月, 1986年4月などに微動活動とみられる波形が確認された。現在に比べ1980年代の振幅値自体に顕著な差異は認められないが、距離減衰の効果等が考慮されていないため、より詳細な議論のためには、活動域の推定が必要となる。活動の発生間隔の議論についても同様に活動域の情報が重要であり、他観測点の記録も活用し、波形のデジタイズ等を通じた精査を行う必要がある。ただし、波形のデジタイズにおいては、通常地震と異なり継続時間の長い現象であるため効率的なデジタイズ手法の確立が大きな課題である。ここに示したようにアナログ波形記録は深部低周波微動活動の把握において有用であるが、カタログとしての一様性の観点からは、目視でなく機械的処理等による客観化された方法が必要であり、今後の検討課題である。

琉球海溝で超低周波地震活動に続いて起こる地震活動

Earthquake activity following very low-frequency earthquakes in the central Ryukyu Trench

*中村 衛¹

*Mamoru Nakamura¹

1. 琉球大学理学部

1. Faculty of Science, University of the Ryukyus

奄美大島と沖縄島にかけての琉球海溝（南西諸島海溝）の海溝軸付近では、2016年以降、M5以上の地震が頻繁に発生するようになった。最大地震のマグニチュードが5.0以上であった主な地震活動は、2016年5月（最大M5.6）、2018年9月（最大M6.2）、2019年4月（最大M5.6）である。いっぽう、周囲の超低周波地震活動も2016年付近から活動が増加している。この超低周波地震活動の発生時期に海溝軸付近でM5クラスの地震が発生する傾向がある。そこで超低周波地震の活動と海溝軸付近の地震活動の関連を調べた。

超低周波地震カタログとしてNakamura and Sunagawa (2015)のカタログを2019年4月まで延長したものを使用した。地震のカタログは気象庁のものを使用した。期間は2004年1月から2019年4月までである。地震の検知能力を考慮して、気象庁マグニチュード2.5以上の地震を用いた。

解析の結果、地震活動が海溝軸付近で起こり始める約1か月前に周辺域で超低周波地震活動が発生する傾向が2016年以降見られた。2004～2015年にも超低周波地震活動に対応するよう見える群発地震活動がみられる（2005年、2009年、および2010年）。しかし、1か月毎の個数を用いて求めた2004～2015年の超低周波地震活動とM2.5以上の地震活動の相関係数は0.2と低く、あまり関係があるとは言えない。一方、2015～2019年の期間では、群発超低周波地震活動から約1ヶ月後に海溝軸で地震活動が発生し始めた。さらに、この期間の1か月毎の個数を用いて求めた超低周波地震と地震活動の相関は中程度（0.4）であった。2016年の地震活動では、5月上旬に超低周波地震の群発活動が奄美大島付近で始まり、断続的に沖縄島側に向かって移動した。その約30日後、群発地震が海溝軸近くで始まった。2018年9月の群発地震では、超低周波地震の群発活動が8月中旬に沖永良部島付近で始まり、その約1か月後に海溝軸付近の群発地震活動が発生した。

海溝軸付近で発生する群発地震は、いずれも沈み込むフィリピン海プレート内で発生する正断層型地震であった。そこで超低周波地震発生時にスロースリップイベント（SSE）がプレート面で発生していると仮定して、SSEによるCoulomb failure stress (Δ -CFS)を計算した。その結果、SSEの滑り（100 mmを仮定）が海溝軸近くまで到達した場合、プレート内の正断層運動を加速させる Δ -CFSが正（20～40 kPa）となることがわかった。これらのことは、SSEによる Δ -CFSの変化が沈み込んだプレート内の正断層型地震活動を誘発した可能性があることを示している。

長期的スロースリップに伴う深部低周波微動の特徴的振幅の変化の空間分布

Spatial distribution of the variation in characteristic amplitudes of deep low frequency tremors accompanied by L-SSEs.

*中本 敬大¹、平松 良浩¹、松澤 孝紀²

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takanori Matsuzawa²

1. 金沢大学、2. 防災科学技術研究所

1. Univ. of Kanazawa, 2. NIED

はじめに

西南日本の沈み込み帯の遷移領域では短期的スロースリップ(S-SSE)や長期的スロースリップ(L-SSE)、さらには深部低周波微動(微動)といった様々なスロー地震が観測されている[Obara, 2002]. さらにL-SSEの滑り域はS-SSEや微動と比較より浅部に位置しており、豊後水道及び東海にて発生するL-SSEは微動やS-SSEを誘発している[e.g., Hirose and Obara, 2005].

中本他[地震学会, 2018]ではL-SSEが発生している四国西部と東海領域においてL-SSEの発生している期間の微動の特徴的な振幅の変化について調査した. その結果、豊後水道L-SSEの滑り域近隣においてはL-SSE期間に特徴的振幅が大きい微動が発生する割合が増加、東海領域と豊後水道L-SSEの滑り域から少し離れた領域ではL-SSE期間に特徴的振幅の小さいイベントが増加するという結果を得た. 本発表では上記の内容に加えて、クラスタリング処理による微動イベントの分類及び、矩形断層の一樣すべりを仮定したL-SSEのすべりによる周囲の応力変化と微動誘発との関係性についても報告する.

データ・解析手法

解析には防災科研Hi-netの連続地震波形記録を使用した. 特徴的振幅は、幾何減衰を補正したRMS振幅の振幅と継続時間の関係が指数関数となる[Watanabe et al., 2007]ことを利用したフィッティングを行い、指数 λ を算出した後、 λ の逆数から計算した. クラスタリング処理については、任意の二つのハイブリッドクラスタリング法により決定された震源(HBC震源)が24時間以内かつ震央距離が10km以内のペアを同じクラスタに入れるという作業を繰り返し行った. 本研究では、最終的なクラスタに10個以上のHBC震源を含む場合を"Major-episode", 10個より少ない場合を"Minor-episode"とした. 本研究で使用している微動イベントをMajor-episodeに属するかMinor-episodeに属するかを分類することで4つのパターン(L-SSE期間+Major-episode), (L-SSE期間+Minor-episode), (inter-L-SSE期間+Major-episode), (inter-L-SSE期間+Minor-episode)の特徴的振幅の中央値の空間分布を作成した.

結果と考察

四国西部の特徴的振幅の変化のプレート境界の走向方向のコントラストを図1(左)に示す. A領域は ΔCA (L-SSE期間の特徴的振幅の中央値 - inter-L-SSE期間の特徴的振幅の中央値)が正を示しているため、L-SSE期間に特徴的振幅の大きいイベントの割合が増加していることを示し、B領域では ΔCA が負を示しているため、L-SSE期間に特徴的振幅の小さいイベントの割合が増加していることを示す. さらに領域は ΔCA が0付近でばらついていることから、L-SSEはC領域の微動活動にほとんど影響を与えていないと考えられる.

L-SSE期間のHBC震源の時空間分布から、孤立したイベント(Minor-episodeに属しているイベント)の発生状況が微動活動の空間変化の成因である可能性が考えられるため、Minor-episodeに属しているイベントに注目し、それらの特徴的振幅の空間分布のL-SSEに伴う変化を調べた. その結果、四国西部のA領域では、inter-L-SSE期間のMinor-episodeでは特徴的振幅の中央値が小さくなっており(図1中央)、L-SSE期間では高くなっていることを確認した(図1右). 一方Major-episodeの特徴的振幅の中央値ではMinor-episodeほどの明瞭な変化は確認されなかった.

Inter-L-SSE期間に孤立的に発生するイベントの特徴的振幅の中央値が小さいことを考えると、A領域では大きい振幅のイベントはMajor-episodeのような大規模なETSの際にしか発生していないと考えられる. しかし、

L-SSE期間には孤立的に振幅の大きなイベントが発生している. この振幅の大きなイベントはL-SSEのすべり自体によって誘発され発生している可能性が示唆される. 実際に, Ozawa et al. [2013]ではL-SSEのすべり分布と誘発される微動の震源分布の対比において, L-SSEが微動活動域周辺で大きくすべった時に微動活動が活発化していると報告している. さらにNakata et al. [2017]において, 本研究におけるA領域はL-SSE期間に10-20cm程度のすべりが発生していることを報告している.

L-SSEがおおよそ一定のすべり速度で発生していると仮定すると, L-SSEの滑り速度はcm/monthのオーダーであり, 非常にゆっくりとしたすべり速度である. つまり, 振幅の大きな微動活動は非常に遅い応力変化速度においても誘発されうると考えられ, 振幅の大きな微動イベントの発生を支配しているパラメーターは応力変化速度ではなく応力変化の絶対値量である可能性が考えられる.

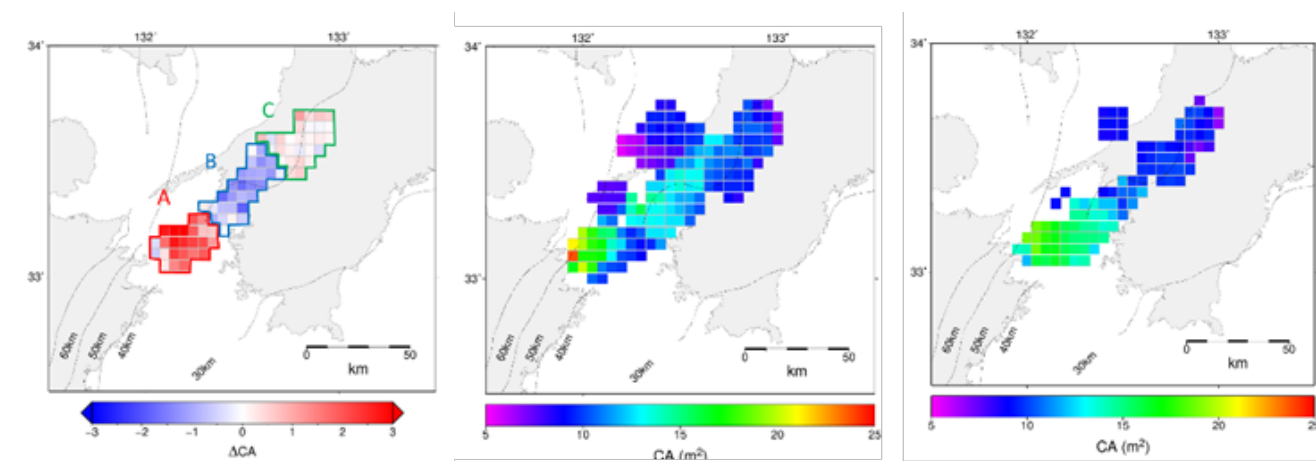


図 1

(左) : ΔCA の空間分布

(中央) : Minor-episodeに含まれるイベントの特征的振幅(CA)の中央値の空間分布(inter-L-SSE期間)

(右) : Minor-episodeに含まれるイベントの特征的振幅(CA)の中央値の空間分布(L-SSE期間)

蔵王山における深部低周波地震活動の時空間的特徴

Spatio-temporal characteristics of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano

*池谷 拓馬¹、山本 希¹

*Takuma Ikegaya¹, Mare Yamamoto¹

1. 東北大学

1. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の発生により、東北地方では広域にわたり歪・応力の変化が生じ、地殻内部の火山性流体も影響を受けたと考えられる。深部火山性流体の挙動を表すと考えられている深部低周波地震の活動を調べることは、巨大地震後の中長期的な火山活動を考える上で重要である。そこで、本発表では、東北地方太平洋沖地震後に火山活動の活発化が見られる蔵王山について、深部低周波地震活動の時空間的特徴を解析した結果を報告する。

東北地方太平洋沖地震後、蔵王山直下では2012年初頭から深部低周波地震が増加し、2013年には浅部 (深さ約2 km以浅) における火山性地震や長周期地震が発生し始めた。さらに、2015年には浅部の火山性地震活動の活発化により蔵王山で初めて火口周辺警報 (噴火警戒レベル2と同等) が発表された。その後、地震活動は数か月間隔で消長を繰り返し、2018年1月に火口周辺警報が再度発表されたものの、全般的には火山活動は静穏になりつつある。このような一連の火山活動活発化の期間における深部低周波地震の活動様式を明らかにするために、Ikegaya and Yamamoto (2019, JpGU) では、相関を用いたイベント検出法であるMatched Filter法を連続波形に対して適用し、気象庁一元化震源カタログの約7倍にあたる数の深部低周波地震の検出に成功した。さらに、2012年と2015年に活動度が活発化した地震と2016年に活発化した地震の波形特性が異なることを明らかにした。そこで本研究では、先行研究で検出した深部低周波地震の分類を行い、蔵王山における深部低周波地震の時空間的な特徴を明らかにすることを目的とする。

解析には、2012年1月~2016年9月における気象庁一元化震源カタログ記載の深部低周波地震146個 (テンプレート) とIkegaya and Yamamoto (2019, JpGU) で検出・震源決定された2012年1月~2018年5月に発生した深部低周波地震1056個の計1202イベントを使用した。震源位置や波形の特性が類似したイベントを抽出し、タイプ別のグループを作るためにイベント間の波形相関を用いた分類を行った。分類には、東北大学七ヶ宿、釜房、防災科学技術研究所Hi-net 上山の3観測点3成分における1-8 Hz帯の波形データを使用した。テンプレートについて3観測点3成分の相関の平均値が0.4以上のイベント群でグループを作り、Ikegaya and Yamamoto (2019, JpGU) による検出イベントについては相関が最大となるテンプレートと同じグループに分類した。

相関によるイベント分類の結果、1202イベントのうち939個を7つのグループに分類できた。主要なグループは浅部クラスターで発生するグループA (241個)、グループB (222個) と深部クラスターで発生するグループC (295個) である (図1a)。グループA, BはOkada et al. (2015) による地震波トモグラフィーの高Vp/Vs領域の側面及び内部に位置する一方、グループCは高Vp/Vs領域の下部に位置する。これらのグループは、Ikegaya and Yamamoto (2019, JpGU) で波形の特徴をもとにイベント分類を行ったもののうち、低周波成分のみが卓越する波形タイプ (グループA, B) と高周波成分が重畳する波形タイプ (グループC) に概ね一致する。

これらの各グループの活動の推移に着目すると、図1bに示すように、深部低周波地震活動の活発化が始まった2012年には深部におけるグループCの活発化が見られ、震源領域が相対的に浅いグループA, Bの活動がやや遅

れて増加し始めたことが分かる。その後、火山浅部（深さ約2 km）における地震活動の活発化や深さ約5 kmを変動源とする山体膨張 (Miura et al., 2019, JpGU) が2015年前半に観測された時期にグループCの活動が再活発化し、翌2016年には、グループA,Bの活動が活発化した。このように深部低周波地震の発生領域や活動に火山活動の推移と対応した時空間的変動が認められ、深部マグマの活動と浅部火山活動の相互作用が示唆される。また、グループCとグループA, BそれぞれのP波・S波のスペクトル比を推定したところ、前者はダブルカップル成分に富む一方、後者は体積変化成分を含む震源メカニズムであることも明らかとなった。

今後、各グループの深部低周波地震の震源メカニズムをさらに精査することで、蔵王山における深部火山性流体の挙動の時空間変化について明らかにできることが期待される。

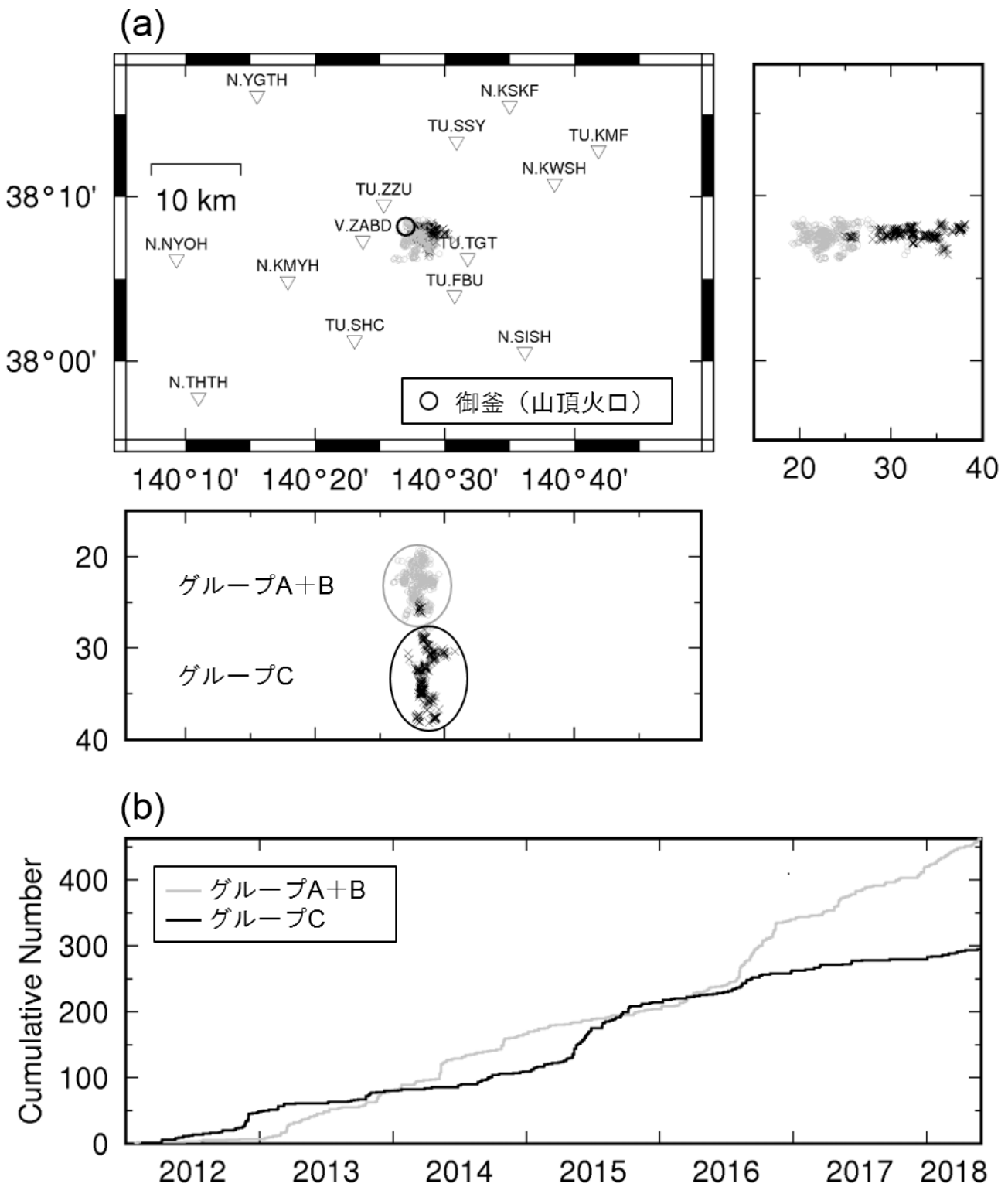


図1. 蔵王山深部低周波地震グループA+BとグループCの (a) 震源と (b) 累積数時間変化

火山性深部低周波地震に見られる特徴的地震波形の数値モデリング: 共鳴効果の検討

Numerical modeling of characteristic waveforms of deep low-frequency earthquakes in volcanic areas: effect of wave resonance

*春山 太一¹、小菅 正裕¹、前田 拓人¹

*Taichi Haruyama¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹

1. 弘前大学大学院理工学研究科

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

1. はじめに

深部低周波地震は、波形の卓越周波数が地震の規模に比して顕著に低く、脆性-塑性境界よりも深部で発生することから、断層運動とは異なるメカニズムで発生すると考えられている。そのメカニズムの解明を目指す研究が数多く行われてきた。モーメントルテンソル解析は主に初動部分の波形を説明しようとするものであるが、深部低周波地震の振動継続時間が長いことも説明する必要がある。そのような波形の典型的な例である、特定の周波数が卓越して振幅が徐々に大きくなる現象は、共鳴による振動の可能性がある。そこで本研究では、共鳴効果による波動を数値シミュレーションによって検討した。

2. 方法

本研究では、共鳴体として円柱型の地震波低速度領域を置き、その中または外に力源があるモデルを設定した。低速度領域は深さ30km付近に置き、 $V_p=1.5\text{km/s}$ 、 $V_s=1.0\text{km/s}$ とした。低速度域以外の速度構造モデルはJMA2001を用いた。力源はシングルフォースとし、震源時間関数はKüpper waveletとした。シミュレーションでは、低速度領域の大きさ、震源位置、シングルフォースの向き、震源時間関数を変えて、地表観測点での波形を計算した。計算には3次元波動伝播シミュレーションコードOpenSWPC (Maeda et al., 2017)を用いた。

3. 単独の震源パルスによる波形

シミュレーションでは、震源位置が低速度領域の中にあると継続時間の長い波形が出現した。特に、震源が低速度領域の中心軸の近くに位置し、震源から低速度領域の側面・底面までの距離がS波の波長より短いときに、継続時間がより長く、特定の周波数が卓越する減衰振動が現れた。一方、距離がS波の波長より長いときには、複数の周波数が卓越する減衰振動が現れた。前者は低速度領域内で基本モードが卓越し、後者は高次モードが卓越するためと考えられる。高次モードの卓越周波数は震源時間関数に応じて変化した。また水平方向のシングルフォースを与えた場合、与えた方向と平行および鉛直方向に振動し、鉛直方向のシングルフォースを与えた場合は3成分の振動が現れた。

4. 複数の震源パルスによる波形

単独の震源パルスでは単純な減衰振動となり、紡錘型の波形となる場合があることが説明できない。そこで、それが複数の震源パルスによって説明できるかを検討した。単独の震源パルスで基本モードが卓越する条件で、同じ震源位置に複数の震源パルスを与えた。この場合、前のパルスによる波動が震源位置に戻ってくるタイミングで次の震源パルスが作用したとき、振幅が増幅し、紡錘型の波形を再現することができた。最大振幅の出現時刻は与える震源パルスの個数により変化した。また、振幅が小さく継続時間が短いパルスを最初に与えるとP波部分に高周波の波が現れ、より現実的な観測波形を再現することができた。

したがって、特定の周波数が卓越し継続時間の長い紡錘型波形は、低速度領域内で複数の震源パルスが作用し、基本モードの共鳴が重なり合う特別な場合に出現することが示唆される。多くの場合にはこのような条件が満たされないため、多様な波形が出現すると考えられる。今後は、スペクトルや振動極性についても定量的

に観測波形と比較し、発生メカニズムを検討していく必要がある。

謝辞

本研究では東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用しました。

ETASモデルを用いた日本列島周辺の地震活動異常性モニタリング

Realtime monitoring of seismicity anomaly around Japan using the ETAS model

*西川 友章¹、西村 卓也¹

*Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

異常な地震活動を検出し、モニタリングすることは地震活動を支配する物理を理解する上で重要である。2011年東北地方太平洋沖地震や2014年チリ・イキケ地震の数週間前には、通常の本震-余震系列とは異なる群発的な地震活動が観測された(Kato et al., 2012; Kato et al., 2016)。このことから、異常地震活動のモニタリングは大地震の予測精度の向上にも役立つことが期待される。そこで、本研究はEpidemic-type aftershock-sequence (ETAS)モデル (Ogata, 1988) を用い、地震活動の異常性をモニタリングするシステムを構築した。また、このシステムを2019年4月から現在(2019年7月)まで継続的に運用することで、地震活動の異常性をリアルタイムでモニタリングした。

ETASモデルは、地震発生レートを定常背景レートと余震の大森・宇津公式の重ね合わせで表現するモデルである。本研究は、ETASモデルから予測される地震発生数と実際に観測された地震発生数を比較することで地震活動の異常性を評価する。本研究では、日本周辺の5つの海溝（日本海溝、千島海溝、南海トラフ、琉球海溝、伊豆海溝）における地震活動を解析の対象とし、これらの海溝を全11個の解析領域に分割した。例えば、日本海溝は茨城沖、宮城沖、三陸沖の3領域に、南海トラフは東海・東南海、南海の2領域に分割した。これらの11領域に加え、2016年熊本地震震源域周辺、2019年山形県沖の地震震源域周辺の2領域も解析した。

まず、各解析領域内で過去（日本海溝では過去1年間、日本海溝以外の海溝では過去3年間、熊本、山形県沖では過去20年間に発生したM_j3以上の地震を気象庁一元化カタログと最近の地震活動（速報値）から抽出し、ETASモデルの5つのパラメータを推定する。次に各領域内でETASモデルから予測される地震発生数（変換時間）を計算する。最後に実際に観測された地震発生数と予測される地震発生数を比較し、ETASモデルに従わない地震系列を異常な活発化として検出する。具体的な手順は以下の通りである。

1. 活発化か否かの判定の対象となる地震（判定対象地震）を1つ決める。
2. 判定対象地震から20個前までの地震に対して、その地震から判定対象地震発生時刻までの期間内にETASモデルによって実現される地震発生数の確率分布を計算する。
3. その期間内に実際に観測された地震発生数以上の地震発生数がETASモデルによって実現される確率を2の確率分布から計算する。
4. 2と3の計算を判定対象地震から20個前までの地震全てに繰り返す。
5. 計算された20個の確率のうち最も小さいものを判定対象地震に割りあてる。この確率が0.1%未満であったとき対象地震は異常な活発化であると判定する。1-5の手順を領域内の全ての地震に繰り返す。

以上の解析の結果、2018年6月の房総沖スロースリップに伴う群発地震活動や、2018年9月、10月の沖縄本島沖の群発地震活動、2019年3月の日向灘のM_j5.4のダブルットなどを顕著な活発化として検出した。また、本システムを2019年4月から現在(2019年7月)まで継続的に運用し、2019年6月に熊本県芦北町でM_j3クラスの群発地震活動をリアルタイムで検出した。これらの結果はWebページ上で公開され、毎日更新されている(<https://sites.google.com/site/tomoakinishikawahomepage/home/今日の地震活動>)。

また、上記の解析を過去のいくつかの大地震の前震活動に適用し、本システムが前震活動を異常な活発化として検出できるか調べた。その結果、1982年M_j7.0茨城県沖地震、2008年M_j7.0茨城県沖地震、1996年10月M_j6.9日向灘の地震、2016年M_j7.3熊本地震の前震活動を活発化として検出した。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の3月6日以前の前震活動は活発化の基準（0.1%未満）を満たしはしなかったものの、ETASモデルで実現できる確率が0.15%であり比較的異常な活動であった。今後、本システムを継続的に運用することで、同様の前震活動をリアルタイムで検出できるかもしれない。

日本列島内陸域の相似地震活動

Small repeating earthquake activities in the inland areas of the Japanese Islands

*五十嵐 俊博¹

*Toshihiro Igarashi¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

近年、ほぼ同じ場所で繰り返し発生する相似地震が日本列島やアリューシャン列島、スマトラ島沖など、世界中のプレート境界型地震発生域で多数検出されている。それらの活動は、大地震発生前の前駆的滑り、発生後の余効滑りやプレート沈み込みの揺らぎに応じた時間間隔で発生しており、プレート間固着状態が世界各地で推定できる可能性を示唆している。その一方で、相似地震活動は、内陸の活断層域でも発生していることがいくつか報告されている。そこで本研究では、日本列島の上盤側プレートで発生する相似地震活動の特徴を調べた。また、これらの活動を基に各地域における断層滑り推定の可能性について検討した。

2. 相似地震データ

本研究では、気象庁の震源カタログを基に、日本列島全域に展開されているテレメータ地震観測点で観測されたM1.5以上の地震波形記録を用いて継続的に行っている小規模相似地震の検出結果を使用した。滑り量の推定には、プレート境界で使用しているNadeau and Johnson(1998)による関係式と、応力降下量一定を仮定したSomerville et al. (1999)による関係式を使用し、比較検討を行った。

3. 結果

日本列島域では、地殻内で発生した大地震の余震活動や群発地震活動の中に相似地震活動を見つけることができた。そのほとんどは、大きめの地震が発生した後に出現し、その余震活動の減衰とともに急激に活動度が減少する、パースト的な活動を示す。本解析では主にM2からM4クラスの小規模相似地震が抽出されている。これらの地震を用いた滑り量の値は、プレート境界で使用している関係式を使用した場合には、応力降下量を一定と仮定した関係式の約10倍の大きさをもつ。そのため、大規模な余効滑りが確認されていない多くの地域では、プレート境界で使用している関係式を使用すると滑り量を過大評価してしまう傾向にあった。

一方で、プレート境界で使用している関係式の使用の是非を更に検討すべきと思われる地域もいくつか存在する。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震発生後に地震活動が活発化した茨城県北部地域では、6年弱の間にM6クラスの地震がほぼ同じ場所で発生した。この地域の余震活動中には多数の相似地震が発生しており、その活動は2019年現在も継続している。これらの相似地震から計算される積算滑り量は、プレート境界で使用している関係式を使用した場合、M6クラスの地震の滑り量と同程度と見積もられる。このような地震活動は千葉県銚子市付近でも見られており、相似地震群から推定される滑りの時間変化は、各断層面において大規模な余効滑りが生じていることを示唆している。仮に、応力降下量を一定と仮定した関係式を用いた場合でも、これらの地域における地震発生後1年間の滑り量は3 cmとなる。いずれにしても、これらの地域の地殻活動を把握する際には、上盤側プレート内の変動が無視できないことを示している。地震発生域の非地震性滑りが上部地殻にのみ偏在する場合は、比較的短期間のみ小さく滑る一方、下部地殻の粘弾性変形を伴う場合は、深部の大きな変動に合わせて滑りが長期間継続するのかもしれない。

長期間継続する相似地震活動は、1995年兵庫県南部地震後や2016年熊本地震の前後などでも見られる。今後、これらの活動をより詳細に調べることにより、内陸域で発生する相似地震活動の原因が明らかになることが期待される。

南西諸島北部域における海底地震観測と検出された相似地震の特徴 Characteristics of similar earthquakes in the northern part of the Nansei Islands determined by ocean bottom seismometer data

*仲谷 幸浩¹、八木原 寛¹、平野 舟一郎¹、小林 励司¹、宮町 宏樹¹、中尾 茂¹、内田 和也²、松島 健²、清水 洋²、山下 裕亮³、中東 和夫⁴、山田 知朗⁵、阿部 英二⁶、篠原 雅尚⁶

*Yukihiko Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Kazunari Uchida², Takeshi Matsushima², Hiroshi Shimizu², Yusuke Yamashita³, Kazuo Nakahigashi⁴, Tomoaki Yamada⁵, Hideji Abe⁶, Masanao Shinohara⁶

1. 鹿児島大、2. 九州大、3. 京大防災研、4. 東京海洋大、5. 東大地震研（現所属：気象庁）、6. 東大地震研

1. Kagoshima Univ., 2. Kyushu Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 5. ERI, UTokyo (now at JMA), 6. ERI, UTokyo

南西諸島海溝域では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う定常的な地震活動に加え、低周波微動や短期的スロースリップイベントといったスロー地震活動も確認されている。主に島嶼部で構成される陸上観測網によってそれらの震源を求めると、南西諸島北部域では、地震がクラスター状に発生している場所があるほか、活動空白域となっているような場所も見て取れる。スロー地震に目を向けると、短期的スロースリップイベントや低周波微動は、沈み込むフィリピン海プレートの浅部境界で広く活動していることが、地震・地殻変動観測によってわかってきた。しかしながら、南西諸島北部域におけるすべり現象は、100 km以上離れた、かつ南北に点在する島嶼部からの観測によってのみ拘束されている。そのため、地震およびスロー地震の活動がともに確認されている日本周辺海域の中でもとりわけ、両者の時空間的な対応関係やプレート境界におけるすべり特性の議論が進展していない。

そこで著者らは、トカラ列島東方海域において長期収録型海底地震計を用いた繰り返し海底地震観測を実施してきた。2014年に開始した本観測は、2015年以降、観測点間隔が約40–60 kmの6台の自己浮上型海底地震計によって、約1年周期で回収・設置を繰り返しながら観測を継続している。尚、2019年8月の回収航海をもって、当該配置による第一次の観測体制は終了する。

本研究では、普通の地震、特に相似地震に着目することで、クラスター状に分布していると見られる活動を、その特徴に応じて分類し、それぞれの活動様式を議論する。微小な相似地震も分類するために、Matched-Filter法を採用し、波形相関により地震を検出した。上述の海底地震計および島嶼観測点の3成分連続波形データを使用した。テンプレート波形は、鹿児島大学南西島弧地震火山観測所が作成した地震カタログを参照し、マグニチュード3以上の地震を選択した。Matched-Filter法の適用に先立ち、テンプレート地震の震源精度を向上させるため、海底地震計データからP波・S波の到達時刻を手動検出し、島嶼観測点の既存読取値と統合して震源再決定した。相似地震解析の結果、大別して3つの活動様式に分類された。1つ目のパターンは、ある期間に集中的に発生する地震群、2つ目は繰り返し地震のように、ある程度定期的に発生する地震群、3つ目はランダムなタイミングで発生していると見られる相似地震群である。本発表では、各地震群の空間分布についても示す。

2019年4月からは、喜界島東方海域において観測点間隔20 km（計8台）のより稠密な第二次の海底地震観測を開始した。本発表では当該観測についても報告する。

謝辞：

観測航海は、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されました。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」および「同計画（第2次）」の支援を受けました。また、東京大学地震研究所共同利用の援助を受けました。加えて、公益財団法人東京海上各務記念財団の地震研究助成を受けました。記して感謝いたします。

南西諸島北部の海域及び島嶼域における地震観測によるプレート境界面形状の推定 (6)

Estimation of a plate boundary derived from seismic observations on sea bottom and land in and around northern part of Nansei Syoto islands (6)

*八木原 寛¹、仲谷 幸浩¹、平野 舟一郎¹、小林 励司¹、宮町 宏樹¹、中尾 茂¹、山下 裕亮²、内田 和也⁴、松島 健⁴、清水 洋⁴、中東 和夫⁵、馬越 孝道³、阿部 英二⁶、池澤 賢志⁶、諏訪 祥士⁷、山田 知朗⁷、篠原 雅尚⁶

*Hiroshi Yakiwara¹, Yukihiro Nakatani¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Yusuke Yamashita², Kazunari Uchida⁴, Takeshi Matsushima⁴, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Kodo Umakoshi³, Hideji Abe⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Yoshihito Suwa⁷, Tomoaki Yamada⁷, Masanao Shinohara⁶

1. 鹿児島大学、2. 京大防災研、3. 長崎大学、4. 九州大学、5. 東京海洋大学、6. 東大地震研、7. 東大地震研（現：気象庁）

1. Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Nagasaki Univ., 4. Kyushu Univ., 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 6. ERI, Univ. of Tokyo, 7. ERI, Univ. of Tokyo (now at JMA)

南西諸島北部の種子島・屋久島と奄美大島との間は、海溝軸から200 km以上背弧側に離れた小規模孤立型離島が直線状に位置する。日向灘に隣接するこの領域のプレート境界域テクトニクスに関する理解を進展させるためには、海域及び島嶼域での地震観測により推定したプレート境界面の形状を、島嶼域のGNSS観測データを用いた地殻変動モデリングに取り込み、プレートの固着域・固着率、及びそれらの時間変化の推定する必要がある。著者らは、南西諸島北部域の3観測点において、OBSを繰り返し投入することによる準定常海底地震観測を2014年4月に開始した。LOBSを順次投入し、2015年7月には現行の6観測点による観測網を構築した。この海域地震観測は2019年8月初旬で完了する。

八木原・他（2018, 地震学会）は、この時点で取得済であった2015年7月～2018年4月中旬の約2年9か月に得られた海域・島嶼域データの解析結果を報告した。深さ40 km以浅については、プレート境界域から背弧側にかけて上盤側で広範囲に発生したと推測された深さ10～20 kmの地震が多いため、M4.0以上の地震を対象に震源メカニズム解析を行い、低角逆断層型の地震の分布からプレート境界の深さ分布を推定した。結果として、1枚のnodal planeの走向が海溝軸とほぼ平行な低角逆断層型の解が得られた地震として17個のみが得られた。これらの地震の深さ分布は深さ13～37 kmで、Arai et al. (2017)の測線付近に発生した3個の地震の震源は、いずれも構造断面のプレート境界付近に推定され、深さの誤差の範囲で整合する。

一方、陸域観測網の中長期の微小地震観測データを用いた解析で相似地震活動が検出され、準静的すべり速度が推定された領域（後藤、私信）の背弧側の端は、八木原・他（2018, 地震学会）のプレート境界面の深さ40 km等深線と概ね一致する。さらに海溝軸から背弧側に50 km（プレート境界の20 km等深線よりは前弧側）の範囲では相似地震活動が検出されていない。八木原（2018, 地震学会）で得られた低角逆断層型の地震の深さ範囲を併せて考慮すると、固着域の深さ範囲は概ね15～40 kmと推測される。すなわち、島嶼域GNSSの地殻変動データモデリングの際には、この深さ範囲のプレート境界面形状が重要であることが示唆される。

本発表では、2018年4月16日～2019年8月1日の期間のデータを加えて、最終的にデータが揃った段階での再解析結果を示す。M4.0以上の地震を対象とした場合、低角逆断層型の地震の数や空間分布が限られる。対象とするマグニチュードのしきいを下げ、さらに初動の押し引き分布が低角逆断層型のメカニズム解と矛盾しない地震も抽出して参考とすることで推定したプレート境界の形状について報告する。

謝辞 OBSの回収と再投入のための航海は、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されました。また本研究を実施するにあたり、気象庁のデータを使用しました。さらに、東京大学地震研

研究所共同研究プログラムの援助を受けました。以上の各機関の皆様に謝意を表します。

2016年熊本地震の余震発生における間隙流体圧の役割

Role of pore fluid pressure in aftershock occurrence of the 2016 Kumamoto earthquake

*中込 広大¹、寺川 寿子¹、松本 聡²、大倉 敬宏³、今西 和俊⁴、吉見 雅行⁴、内出 崇彦⁴、2016年 熊本地震合同地震観測グループ⁵

*Kodai Nakagomi¹, Toshiko Terakawa¹, Satoshi Matsumoto², Takahiro Ohkura³, Kazutoshi Imanishi⁴, Masayuki Yoshimi⁴, Takahiko Uchide⁴, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake⁵

1. 名古屋大学大学院環境学研究科、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター、4. 産業技術総合研究所、5. 2016年熊本地震合同地震観測グループ
1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 5. Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1. はじめに

余震は古くから知られている現象であるが、その発生メカニズムはよくわかっていない。クーロン破壊関数の変化 (ΔCFF) は、ある断層面での剪断応力の変化と面に働く有効法線応力の変化を介した断層強度の変化を評価したもので、余震の発生を理解するために広く用いられてきた (e.g., King et al., 1994)。多くの場合、 ΔCFF は本震によって引き起こされた応力場の変化から見積もられる。しかし、本震による間隙流体圧の上昇は、断層強度を著しく低下させ、余震の発生を引き起こす可能性がある (e.g., Nur & Booker, 1972, Sibson, 2007, Terakawa et al., 2013)。本研究では、2016年4月16日に発生した熊本地震を対象とし、地震メカニズムトモグラフィ法 (FMT法, Terakawa et al., 2010) による本震前の間隙流体圧分布の推定と、本震前後の地震活動度の変化の分析を通して、余震の発生における間隙流体圧の役割の理解を目指す。

2. 熊本地震発生前の間隙流体圧分布の推定

FMT法は、応力場と地震時の断層運動の関係から、地殻内の間隙流体圧場を三次元的に推定する手法である。本研究では、熊本地震の震源域を含む九州中央部 (緯度: 130.2°N~131.6°N, 経度: 32.0°E~33.4°E, 深さ: 0km~15km) を対象とし、FMT法により本震前の間隙流体圧分布を推定誤差と共に求めた。解析には、Matsumoto et al. (2018) による2236個のメカニズム解 (1996年1月24日~2016年4月7日) と、防災科研のF-netカタログに掲載されている90個のメカニズム解 (1997年1月1日~2016年4月13日) を使用し、重複を防ぐようにデータセット (2248個) を作成した。

これらのデータから、まず、CMTデータインバージョン法により九州地方の広域応力場を推定した

(Terakawa & Matsu'ura, 2008; Terakawa et al., in prep.)。次に、この応力場の下でメカニズム解の各節面に働くトラクションの方向から理論的なモーメントテンソル (MT) を計算し、実際のMT (メカニズム解から変換したもの) との内積を計算した。こうして、内積の値が大きい方の節面を真の断層面として選択し、FMT法に適用した。得られた結果から、Asano & Iwata (2016) による震源断層面に相当する場所での間隙流体圧分布を調べた。この結果と本震のすべり分布を比較すると、本震すべりの大きかったところで間隙流体圧が小さくなった。これは、本震断層の強度とすべり量の間係を示しているかもしれない。

3. 熊本地震前後での地震活動度の変化の分析

気象庁の震源カタログを用いて、九州中央部における本震前の3年間 (期間1: 2013年4月13日~2016年4月13日) と本震後の3年間 (期間2: 2016年4月16日~2019年4月16日) の地震数と、本震前後の地震活動度の変化を調べた。まず、深さ 5, 10, 15kmの平面内に5km間隔で地震活動の評価点2463個を設定した。次

に、各期間で、各評価点を中心とした半径5kmの球の中に含まれる地震数を求め、期間1の地震数に対する期間2の地震数の比を算出した。この結果、本震後に地震活動度が減少する領域が、震源域を挟んだ南北方向に分布することがわかった。これは、先行研究による ΔCFF (Nishimura, 2018) の結果とも調和的である。しかし、 ΔCFF が負であるにも関わらず地震活動度が増加した地域が約240地点あり、これらの地域の余震の発生には間隙流体圧の上昇が重要な役割を果たした可能性がある。

4. 余震の発生における間隙流体圧の役割の分析

ΔCFF からの予想に反して地震活動度が増加した地域（3節）に対して、本震前後での応力場に対するメカニズム解のタイプの変化を調べた。分析には、2節で使用した本震前のメカニズム解に加え、今西他による熊本地震合同余震観測で得られたメカニズム解495個（2016年4月16日～2019年2月10日）とF-netカタログ（2016年4月16日～2019年2月18日）のメカニズム解208個を使用した。分析の対象となった地域のうち、本震前後の両期間で十分なデータがあったのは、震源域西部の南方の3地点だけであった。これらの地域のメカニズム解と応力場の関係から各地震を駆動した間隙流体圧係数 C （間隙流体圧の静水圧からのずれを規格化したもの）を計算し、その値を本震前後で比較した。このうち2地点で、 C の値は0.59から0.93、0.42から1.1へと大きく増加した。この結果は、間隙流体圧の上昇がこの地域の余震の発生を促した可能性を支持する。

2016年熊本地震震源域に見られる深部地震の特徴

The seismic activity at 13 km or more depth range around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*光岡 郁穂¹、松本 聡²、志藤 あずさ²、2016年熊本地震 合同観測グループ

*Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Azusa Shito², Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

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

2016年熊本地震は、布田川・日奈久断層帯で右横ずれ、正断層型の応力場において発生した。最大前震(Mj 6.5)、本震(Mj 7.3)発生後も広範囲で非常に活発な地震活動が観測された。Shito et al. [2017]の3次元速度構造をもとに、震源再決定を行うと、最大前震・本震発生後の余震は何枚か面状の分布を示しており、これらの震源分布から断層面形状を決定した[Mitsuoka et al., 2019]。

この余震活動の中でも布田川・日奈久断層の接合部付近、13 km以深で発生した地震活動は非常に特徴的である(図1)。これらは日奈久断層の走向に沿うように帯状に分布しており、2016年熊本地震以前に観測された震源分布では見られない活動である。この深部で発生する地震活動は2019年現在まで、局所的ではあるが継続している。またこの活動が継続している領域の震源分布を詳細に見ると、震源は3つの南から北にかけて深くなる帯状の分布をしていると考えられる。これらの地震の発震機構解を決定すると、横ずれ断層型あるいは正断層型地震の地震であることがわかった。正断層地震は、15 km以浅に多く、15 km以深だと布田川断層側で起こっている。日奈久断層側は右横ずれ地震が多く発生している。

この特徴的な震源分布は、13 km以浅の震源分布には見られず、また、地震前にも見られないことから、最大前震・本震発生による影響があることが予想される。13 km以深で発生したそれぞれの地震の震源位置で岡田モデル[Okada, 1992]を用いて最大前震と本震による応力変化を計算すると、差応力が数10MPa~100MPa程度の非常に大きい応力変化が働いたことがわかった。しかし、応力変化テンソルと地震断層面との関係を調べると、応力変化のみによって地震断層面に働く剪断応力方向とは逆向きに地震すべりが生じている地震が多くあることがわかった。2016年熊本地震以前の絶対偏差応力場は、Mitsuoka et al. [2019]によると、正断層応力場と右横ずれ応力場が不安定に混在する領域であり、それらの差応力は数10 MPa~100 MPa程度であることが推定されている。この地震前の応力場と応力変化の和である応力状態が各地震断層に働いていると考えることができるので、その和の応力テンソルが各地震断層に及ぼす剪断応力の計算を行った。各地震のすべり方向は、約75%が剪断応力方向にすべっており、全地震の90%程度が数MPa~数10 MPaの大きさの剪断応力が働いて地震が発生したことがわかった。断層モデルは、再決定された震源分布から得られた断層面にAsano and Iwata [2016]のすべり分布モデルを投影したモデルを採用した。

また、発震機構解からは観測極性が理論極性と一致しない非ダブルカップル成分を含むメカニズムがいくつかあることがわかった。Hayashida et al. [2019]によるとこれらの地震はダブルカップル成分に加え、断層クラックの開口によって非ダブルカップル成分を持つことが示されており、本研究の対象領域内の地震活動もこのような発生機構を持つ可能性がある。また、この帯状の分布は低比抵抗帯[Aizawa et al., 2019]に沿うように分布しており、低比抵抗帯の存在との関係があることが考えられる。

これらの結果より流体の関与の可能性もあることから、地震断層に働く応力状態を含め、この深部地震活動の発生について議論を行う。

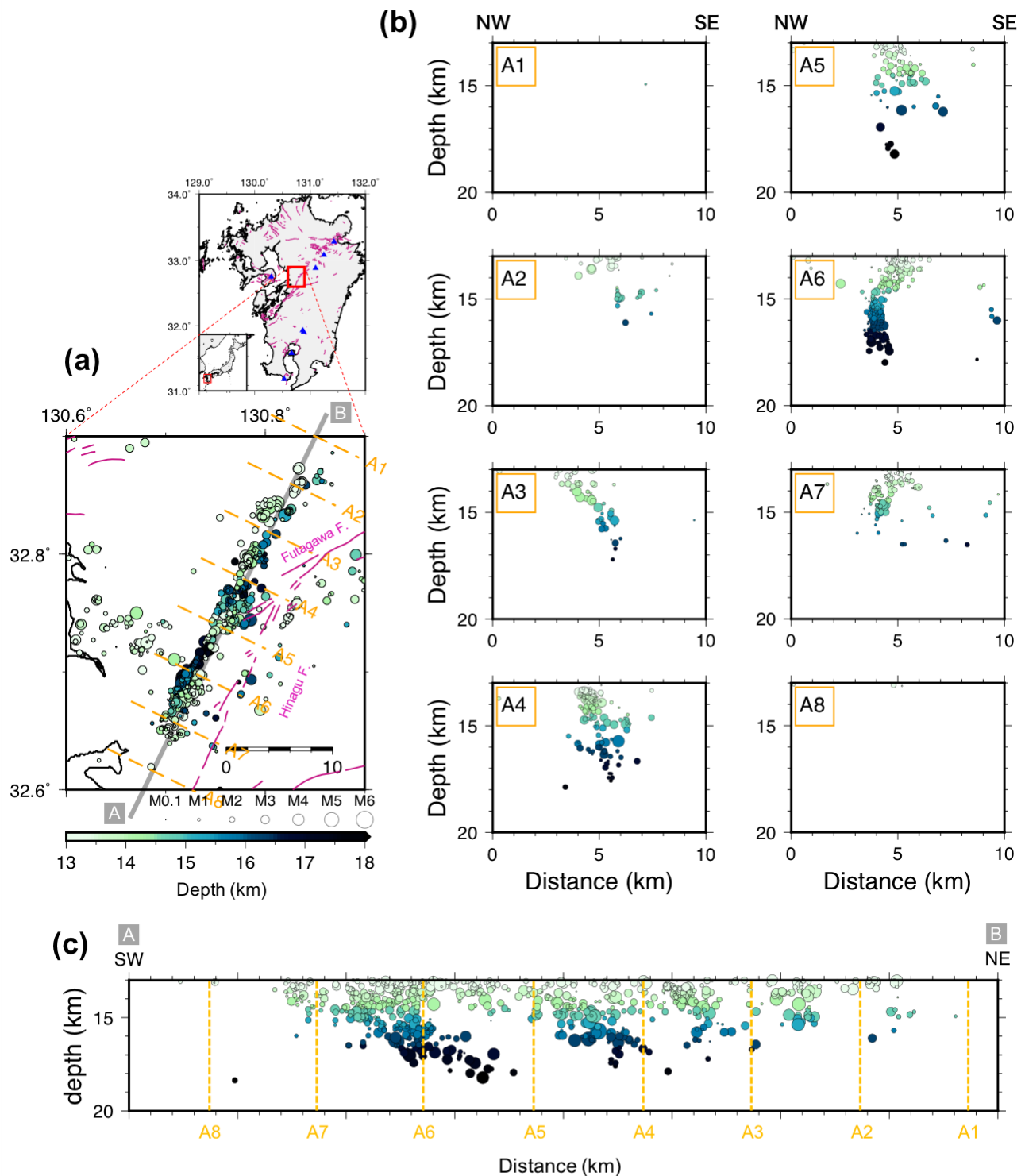


Figure 1. (a) Map showing relocated hypocenter distribution at the target area in this study. (b),(c) Vertical cross sections plotting the relocated hypocenters. Circles indicate the location of the hypocenters with the colors indicating the depth of that. Blue rectangles and pink lines indicate the active volcanos and the active faults, respectively.

コーダスペクトル比法に基づく2016年熊本地震の余震の震源パラメータ推定とその特徴

Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*前迫 直人¹、松本 聡²、光岡 郁穂¹、2016年熊本地震 合同地震観測グループ

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake

1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

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

2016年の熊本地震発生後、およそ深さ13km以深において、日奈久断層の走向に沿うような形で直線的な震源分布が見られるようになった[Mitsuoka et al., 2019]。これは地震発生前には無かった震源分布の特徴である。熊本の地下18kmにおける比抵抗の水平分布を見ると、前述の震源分布と近い形で低比抵抗領域が存在することが分かっており[Aizawa et al., 2019]、震源分布と比抵抗構造との間には何らかの関連性があるものと考えられる。

地震が発生した際、その地震の震源の特徴を理解するには、震源パラメータ(地震モーメント、コーナー周波数、応力降下量など)の推定が重要な鍵となる。また、震源スケージングや応力降下量を調べることは、震源物理の理解や将来発生するであろう地震の強震動予測の向上に必要である。

そこで本研究では、2016年熊本地震系列における前述の震源分布に焦点を当て、そのうちの22地震を対象として、それらを3つのグループに分けて、S波コーダスペクトル比法を用いて震源パラメータの推定を行い、応力降下量のばらつきやその要因について調べた。解析は、基本的にSomei et al.[2014]の手順に倣って、観測記録から震源スペクトル比を求めた。得られた観測震源スペクトル比は概ね ω^{-2} モデル[Aki, 1967]に基づく理論曲線によって説明することができた。SN比が2以上の周波数帯のデータを用いて、地震モーメント比・大地震と小地震のコーナー周波数をグリッドサーチで推定した。大地震の地震モーメントは気象庁が決定したマグニチュード M_{JMA} を地震モーメント M_0 に換算した値で固定し、地震モーメント比から小地震の地震モーメントを推定した。

解析の結果、大地震のコーナー周波数 f_{cL} はグループ1で4.9[Hz](68%信頼区間はそれぞれ -1σ で4.1/ $+1\sigma$ で5.7[Hz])、グループ2で2.6[Hz](-1σ で2.3/ $+1\sigma$ で2.9[Hz])、グループ3で2.9[Hz](-1σ で2.2/ $+1\sigma$ で3.6[Hz])となり、小地震のコーナー周波数 f_{cS} は3.0~16[Hz]の間に、地震モーメント比は6~328の間に推定された。なお、地震モーメントはコーナー周波数に対して $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係に従う様子が見られた。

推定されたコーナー周波数と地震モーメントを用いて、地震断層を円形クラックと仮定して応力降下量を推定した[Eshelby, 1957; Brune, 1970,1971]。対象とした22地震の応力降下量は0.495~59.4MPaの間でばらついており、過去の日本における内陸地震のばらつき[Somei et al., 2014]の範囲内であった。応力降下量の深さ依存性を調べたが、全体として震源が深くなるにつれて応力降下量の値が大きくなる傾向が見られた。

これらの結果の妥当性を検証するために、観測点毎の推定値のばらつきや、グリッドサーチによる理論曲線のフィッティングの精度などについても議論する。

謝辞：解析において、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net、気象庁のデータも用

いました。記して感謝申し上げます。

九州の下部地殻における非弾性変形と地震活動について Inelastic deformation in the lower crust and seismic activity of the Kyushu, Japan

*湯浅 雄平¹、松本 聡²、中尾 茂³、松島 健²、大倉 敬宏⁴

*Yuhei Yuasa¹, Satoshi Matsumoto², Shigeru Nakao³, Takeshi Matsushima², Takahiro Ohkura⁴

1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター、3. 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、4. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

地震は地殻に蓄積された応力（弾性歪み）を解放する現象であり、地震を含む非弾性変形は周囲に応力変化（弾性歪み変化）を引き起こす。したがって、地震の発生と地殻変動のプロセスを理解するためには、応力集中と緩和の過程を理解する必要がある。また測地学的観測によって得られる地表面での歪み変化はプレート沈み込みによる弾性応答や地殻内部で進行する非弾性変形、もしくはそれによって生じた歪み変化である。しかしながら、両者によって生じる歪み変化には時空間的に差異があるため、地殻中の応力集中・解放過程をより詳細に議論するためには両者の影響を分けて考える必要がある。従って、本研究ではGNSS観測によって得られたデータを用いて下部地殻の非弾性変形とプレートのすべり欠損の推定を試みた。

プレート境界に対してはOkada (1992)の矩形断層、下部地殻とマグマだまりでの非弾性変形はBarbot et al. (2017)のグリーン関数を用いることでモデル化を行った。九州における2004年から2014年の11年間のGNSS観測によって得られた変位速度から推定された歪み速度場をデータとして、観測方程式をたて最小二乗法によってプレート境界での滑り欠損速度、下部地殻、マグマだまりの非弾性変形速度を推定した。プレート境界上での滑り欠損速度は豊後水道から足摺岬周辺にかけて50 - 60 mm/yrであり、先行研究によって報告されている値と同程度である。また、高い非弾性歪み速度が推定された領域はMoore et al.(2017)によって推定された低粘性領域とおおむね一致した。プレート境界での滑り欠損と下部地殻の非弾性変形によって内陸の上部地殻に生じる応力変化を計算すると、前者による応力変化は後者よりも低く、九州ではプレートの沈み込みは内陸地震にあまり影響を与えていないと考えられる。次に下部地殻の非弾性変形によって上部地殻に生じる応力変化テンソルと背景応力場を比較すると下部地殻の非弾性変形によって九州の大部分の上部地殻では応力集中が進行している一方で応力緩和傾向の領域もみられることが分かった。この緩和傾向の領域においては地震活動が低調であることが震源分布との比較から分かった。また主要活断層に対してこの応力変化による Δ CFFを計算すると、その多くが正の値である一方で応力集中領域であっても Δ CFFの値が負になる断層帯が得られた。こうした断層帯周辺での地震活動も比較的低調である。以上から九州においては下部地殻の非弾性変形が上部地殻への応力集中過程や地震活動に対して重要な役割を果たしていることが考えられる。

研究の一部は、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」「H28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」および東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けた。ここに記して感謝する。

地動ノイズに含まれる等時間差の相似波形

Waveform twins of equal time difference in seismic ambient noise

*勝俣 啓¹、一柳 昌義¹

*Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichiyanagi¹

1. 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

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

1. はじめに

前震には相似波形が多いという報告が複数ある（例えば、Pechmann and Kanamori, 1982, JGR ; Motoya and Abe, 1985, Earthquake Prediction Research）。高周波数まで波形の相関が良いことから、震源が非常に近接していると解釈された。そこで本研究では、地動ノイズの中から相似波形を探索し、前震の検出を試みた。

2. データと解析

2018年9月6日午前3時7分頃、北海道胆振東部地震(Mj6.7)が発生した。この地震の発生前の期間、2018年8月25日00時00分から9月6日03時06分までの7観測点の連続波形データを使用した(図1)。7観測点の内、TKOとSKJが北海道大学の観測点、それ以外の5つは防災科学技術研究所のHi-net観測点である。今回解析したのは上下動成分のみで、サンプリング周波数は7観測点共に100Hzである。なお、9月5日02時00分から16時59分までは欠測観測点があるので解析対象から外した。

解析手順は以下の通りである。

- ① ある1つの観測点において、1分間の上下動成分を用意する。以下②および③の処理はこの1分間のデータに対して行うものとする。
- ② 生データに8-16Hzのバンドパスフィルターをかける。
- ③ 0.5秒間の時間窓を1サンプルずつずらして、全ての組合せについて相関係数を計算する。相関係数の絶対値が0.8以上の組合せの時刻をT1, T2とする
- ④ ①～③の処理を7観測点について行い、以下の3条件が満たされた場合をイベントとして認定する。
 - (a) 7観測点でのT1が±3秒以内で一致している
 - (b) 7観測点での時間差 $\Delta T=T2-T1$ が±0.03秒以内で一致している
 - (c) ΔT が10秒以上である

3. 結果

検出されたイベントの1時間毎の数を図2に示す。イベント数は、昼間に多く、夜間に少ない傾向が見られる。また、日曜日(8月26日と9月2日)に少なく、それ以外の平日に多い傾向も見られる。胆振東部地震直前の9月6日00:00～03:06に検出されたイベントはなかった。また、図2で20個以上のイベントを検出した時間帯は、遠地地震が観測されていて、その波形内にイベントが存在している。

4. 検出されたイベントは前震か？

イベント数の時間変化は、地動ノイズの高低の時間変化とよく一致しているので、地動ノイズが起源のイベントであると推測される。ごく小さい前震がほぼ同じ場所を震源として1分以内に連続発生したとも考えられるが、その場合は、ノイズレベルの低い夜間にイベント数が多く、ノイズレベルが高い昼間はイベント数が少な

くなるはずである。したがって、検知されたイベントが前震である可能性は低い。しかし、上記④の3条件(a)～(c)を満たすイベントは非常に特異な現象であり、7観測点のT1を用いて相似波形の発生位置(震源)を推定する予定である。

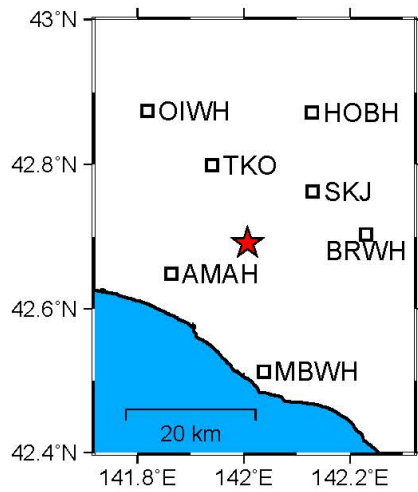


Figure 1. Study area. Squares indicate seismic stations used in this study and a red star indicates the main shock of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake.

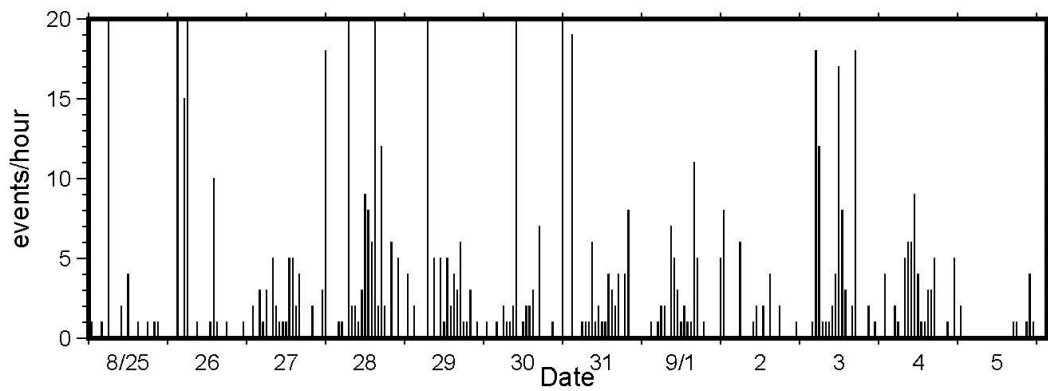


Figure 2. Number of events detected in this study between 25 August 2018 and 6 September 2018.

海底地震観測網を活用した自動震源決定（PF法）の評価

Evaluation of automatic hypocenter determination (PF method) using dense ocean bottom seismographs

*溜瀧 功史¹、岩崎 友理子²、岩切 一宏²、上野 寛²

*Koji Tamaribuchi¹, Yuriko Iwasaki², Kazuhiro Iwakiri², Hiroshi Ueno²

1. 気象研究所、2. 気象庁

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency

気象庁では、気象庁及び関係機関の高感度地震観測データをリアルタイムで一元的に収集し、震源決定等の処理を行い、地震カタログとして公表している（以下、「一元化震源」という）。近年、日本海溝及び南海トラフの海域では、稠密かつ高感度なケーブル式海底地震観測網（S-net, DONET）が展開されている。これらのデータを有効に活用し、海域における詳細な震源分布を得ることは、調査研究はもとより防災上も極めて重要である。本稿では、2016年4月から導入された一元化震源の自動処理（PF法、溜瀧・他（2016, 験震時報）, Tamaribuchi (2018, EPS)）に、日本海溝海底地震観測網S-netを導入した場合の検証を行ったので報告する。

S-netを活用するにあたって、上野・他（2019, JpGU）に合わせて、以下の処理を行った。(1) S-net地震計の3軸は水平と上下からずれて設置されているため、姿勢角情報を基に水平と上下成分にベクトル変換を行う、(2) 走時計算を適切に求めるため、海域ごとに3つ（日本海溝陸寄り、日本海溝アウターライズ、南海トラフ）の異なる速度構造及び未固結堆積層に相当する補正值を用いる、(3) S-net用の速度マグニチュード補正值を用いる。

上記の対応を行って自動震源計算を行った結果、日本海溝周辺では、従来（S-netなし）に比べて、震源決定数は約2倍となった。また、海溝軸付近で発生した地震の深さの精度が大幅に良くなったと考えられる。これにより、海域で発生する地震についても、b値等の詳細な地震活動解析に活用できる可能性がある。さらに、断層面の推定精度が向上するため、震源過程解析や津波予測の初期値として自動震源を活用できる可能性がある。

一方で、エアガンや海中音波など、陸上観測点とは異なるシグナルも多数検出することから、これらを適切に除外することが、自動震源の精度を高めるうえで重要となる。また、変換波が多数検出されるため、S相を適切に検出することも重要である。そのためには、相の判別を適切に行うことが今後の課題である。

2011年東北沖地震後の流体圧変化に伴う内陸の群発地震震源域近傍の速度構造の時間変化

Temporal change in near-source seismic velocity in an earthquake region due to the pore pressure change after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*吉田 圭佑¹、長谷川 昭¹、行竹 洋平²、松澤 暢¹

*Keisuke Yoshida Yoshida¹, Akira Hasegawa¹, Yohei Yukutake², Toru Matsuzawa¹

1. 東北大学 理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター、2. 神奈川県 温泉地学研究所

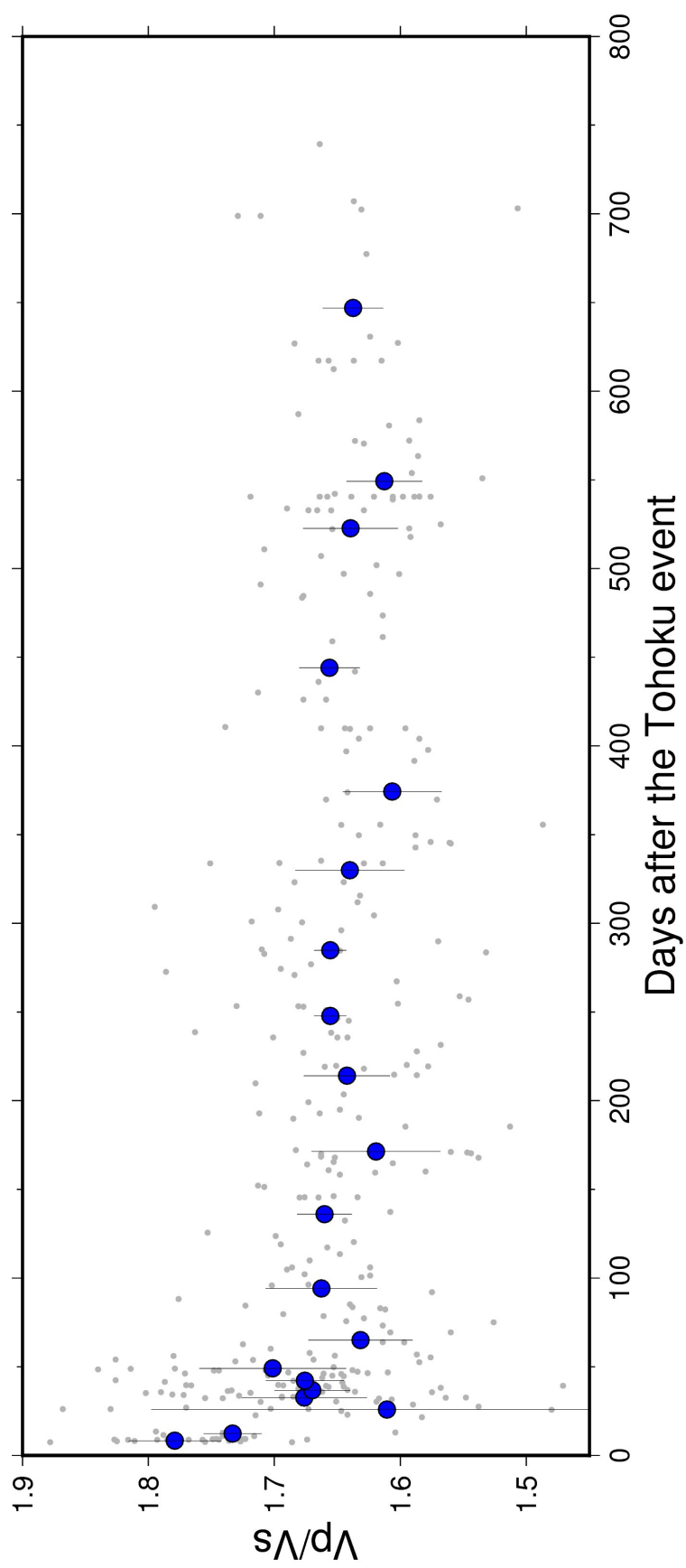
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

地震の発生に、地球内部の流体による断層強度の低下の効果が強く影響している可能性が指摘されてきている (e.g. Hasegawa, 2017; Hasegawa et al., 2005; Hubbert and Rubey, 1959; Nur and Booker, 1972; Sibson, 1992)。その顕著な例として、2011年東北沖地震後に東西圧縮応力の減少した東北日本の内陸部において活発化した群発地震活動が挙げられる。それらの活動は、2011年東北沖地震後の流体圧の増加による断層強度の低下により生じたと推定されており (Terakawa et al., 2013; Okada et al., 2016, Yoshida et al., 2016, 2017, 2018), 震源の深部から浅部へ向かう顕著な migrationが見られる。断層強度, 応力降下量, b値, 地震活動度の顕著な時間変化も検出され、それは震源域における間隙流体圧の時間変化に起因すると推定されたている (Yoshida et al., 2016, 2017; Yoshida & Hasegawa, 2018)。本研究では、2011年東北沖地震後震源域の間隙水圧変化について異なる情報から調べる目的で、震源域の地震波速度の時間変化を推定した。

対象としたのは、2011年東北沖地震後に山形-福島県境で活発化した群発地震活動である。この活動は、東北沖地震後の流体圧変化により引き起こされたと推定されている活動の中で最も規模が大きい。Vp/Vsの推定には、複数地震のP波とS波の到達時刻差データに基づくLin & Shearer (2007)の手法を用いた。ここで、到達時刻差データにはYoshida & Hasegawa (2018)が、波形相関により高精度で求めたものを使用した。対象とした地震は2011年から2018年までの期間において発生した M>2の地震 2,458個である。

結果、610個の地震について信頼性の高いVp/Vsの値が推定された。得られたVp/Vsは、群発地震活動の初期に大きめの値を取り (~1.75), 100日程度まで減少し、その後およそ一定値 (~1.65)を取る (図1)。推定のばらつきが大きいものの、仙台大倉で生じた同種の群発地震活動についても同様のVp/Vsの時間変化の傾向が見られた。その時間変化のパターンは先行研究により独立に推定された断層強度 (Yoshida et al., 2016)・応力降下量・b値 (Yoshida et al., 2017)・定常地震活動度 (Yoshida et al., 2018)と同期するよう見える。このことは、この群発地震活動が間隙流体圧の急激な上昇に起因することを示すもう一つの観測的証拠と考えられる。

図1. 推定したVp/Vsの時間変化。灰色の丸で個々の推定値を、青色の丸で平均値を、縦の線分で標準偏差に基づいて推定した95%信頼範囲を示す。



森吉山地域の群発地震に見られる特徴的な散乱波群の波形形状の時間変化とその要因

Temporal changes in the scattered wave packets associated with earthquake swarm activity beneath the Moriyoshi volcano

*雨澤 勇太¹、小菅 正裕¹、前田 拓人¹

*Yuta Amezawa¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹

1. 弘前大学大学院理工学研究科

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震発生後、東北日本内陸各地で群発地震活動が活発化した (e.g., Okada et al., 2015)。東北地方北部に位置する第四紀火山の森吉山地域は、東北地方太平洋沖地震発生から8年余り経過した今なお群発地震活動が継続している地域の一つである。この群発地震活動の震源は複数のクラスター状に分布し、森吉山北方約5 kmの最も活発なクラスターでは震源のマイグレーションが観測されている (e.g., Kosuga, 2014)。また、本地域で観測される群発地震の地震波形記録のSコーダ中に8 Hz以上の高周波に卓越し1秒程度の振動継続時間を持つ特徴的な後続波が現れる。これは、森吉山周辺に局在する強散乱体へ入射したS波の多重散乱によって生じた波群であると考えられている (Kosuga, 2014)。本研究では、後続波の波形形状の時間変化に着目し、その系統的な解析とこれまで得られた種々の観測事実に基づいて森吉山地域における群発地震の誘発要因を議論する。

2. データと解析方法

本研究では、森吉山北方の震源クラスター内で2011年3月から2016年11までに発生した3609地震についてDouble difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) で再決定した震源を用いた。まず、後続波の波形形状を目視で3種類に分類するとともに、対応する震源位置の空間分布を調査した。次に、直達波部分の波形相互相関に基づいて、震源位置および震源メカニズム解がほぼ同じと考えられる地震を抽出し、その中での後続波部分の波形の時間変化を調べた。

3. 結果

後続波の波形形状を (A) 単一のピーク、(B) 複数のピークおよび、(C) ピークが不明瞭な場合の3パターンに大別すると、それぞれの割合は順に33.8%、63.8%、3.2%であった。各パターンに対応する震源位置は棲み分けせず、(A) および (B) に関してはクラスター内に一様に分布している。(C) のみはクラスターの北東側に偏って分布している。

また、直達波部分の波形形状はよく類似したグループ内の波形であっても、後続波部分の波形の振幅・ピーク数・継続時間は複雑な時間変化を呈した。さらに、後続波の波形形状は十数時間から数日という短期間のうちに変化する可能性があることが判明した。

4. 議論

後続波の波形形状が時間変化する要因として、震源位置および震源メカニズム解の違いと、後続波の発生源の時間変化が考えられる。後続波の波形形状の各パターンに対応する震源がクラスター内で棲み分けしていないことは、震源位置の違いのみでは後続波の波形形状の変化を説明できないことを示している。また、震源位置および震源メカニズム解がほぼ同じ地震を抽出した場合、同一グループ内での直達波部分の相関係数は0.85以上であるが、後続波部分の相関はそれよりも有意に低い。以上から、後続波の波形形状の時間変化は、その発生源の時間変化によるものと考えられる。観測された短期間での急激な波形形状の変化を考慮すると固体的な発生源の時間変化は考え難く、地殻流体の関与が示唆される。一方、後続波のピークが不明瞭な地震は空間的

に局在しており、後続波の発生源に後続波を発生させない要因があるか、あるいは観測点に後続波が到達しない震源・観測点間のジオメトリの影響があると考えられる。

後続波の発生源は、森吉山北方クラスターのほぼ直下約13kmに位置すると推定されている（雨澤・小菅, 2017SSJ）。また、Okada et al. (2015)による地震波トモグラフィーの結果によると、発生源推定位置の直下には地震波低速度領域が存在する。以上の観測事実と後続波の波形形状の時間変化を考慮すると、後続波の発生源には地殻流体が存在している可能性が高く、それは入射波に対し強散乱体として振る舞い特徴的な後続波を励起し、散乱体の時空間変化が後続波の波形形状の時間変化をもたらすと考えられる。

このように、森吉山北方のクラスター下には地殻流体の貯留域が存在しており、東北沖地震による応力場の変化により中間主応力軸が鉛直方向を向いたこと（e.g.,小菅・他, 2012）で鉛直方向のフラクチャーが発達しやすい状態となり（Sibson, 1997）、それを通して地殻流体が上昇し、震源のマイグレーションを伴う群発地震活動を駆動したと考えられる。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所高感度地震観測網Hi-netの地震波形データを使用しました。

徳山ダムにおける微小地震観測（第3報）

Observation of Microearthquake around Tokuyama Dam (3rd Report)

*佐野 貴之¹、塚本 守¹、曾田 英揮²、三塚 隆³、神藤 史明³、片尾 浩⁴

*Takayuki SANO¹, Mamoru TSUKAMOTO¹, Hideki SODA², Takashi MITSUZUKA³, Fumiaki KANTOH³, Hiroshi KATAO⁴

1. 独立行政法人 水資源機構、2. 一般財団法人 国土技術研究センター、3. 地質計測株式会社、4. 京都大学 防災研究所

1. Japan Water Agency, 2. Japan Institute of Country-ology and Engineering, 3. Chishitsu Keisoku Co., Ltd., 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

徳山ダムは、独立行政法人水資源機構（JWA）が2008年に完成した堤高161m、総貯水容量660百万m³の大規模ロックフィルダムである。同ダムは岐阜県揖斐川町の揖斐川上流に位置し、洪水調節、新規利水、発電等を目的としている。ダム周辺には濃尾地震を引き起こした根尾谷断層、及び活断層とされる揖斐川断層が存在するため、JWAでは、湛水による地震活動への影響を監視する目的で、1976年から微小地震観測を行ってきた。本稿は、ダム完成から10年を経過した2018年までの貯水池周辺の地震観測記録に基づき、湛水による地震活動への影響を評価するものである。

2. 地震観測の概要

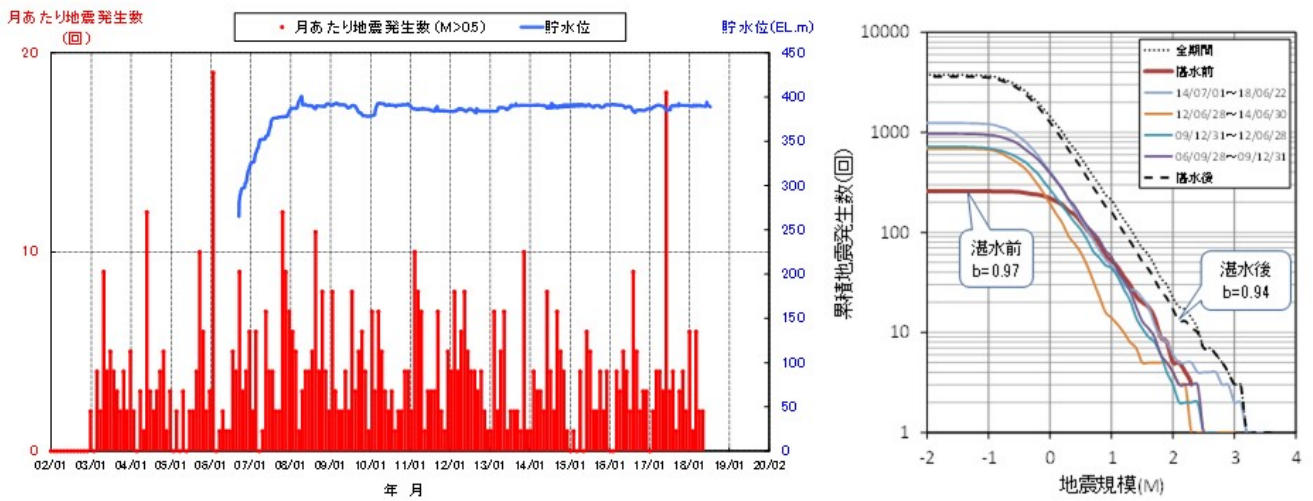
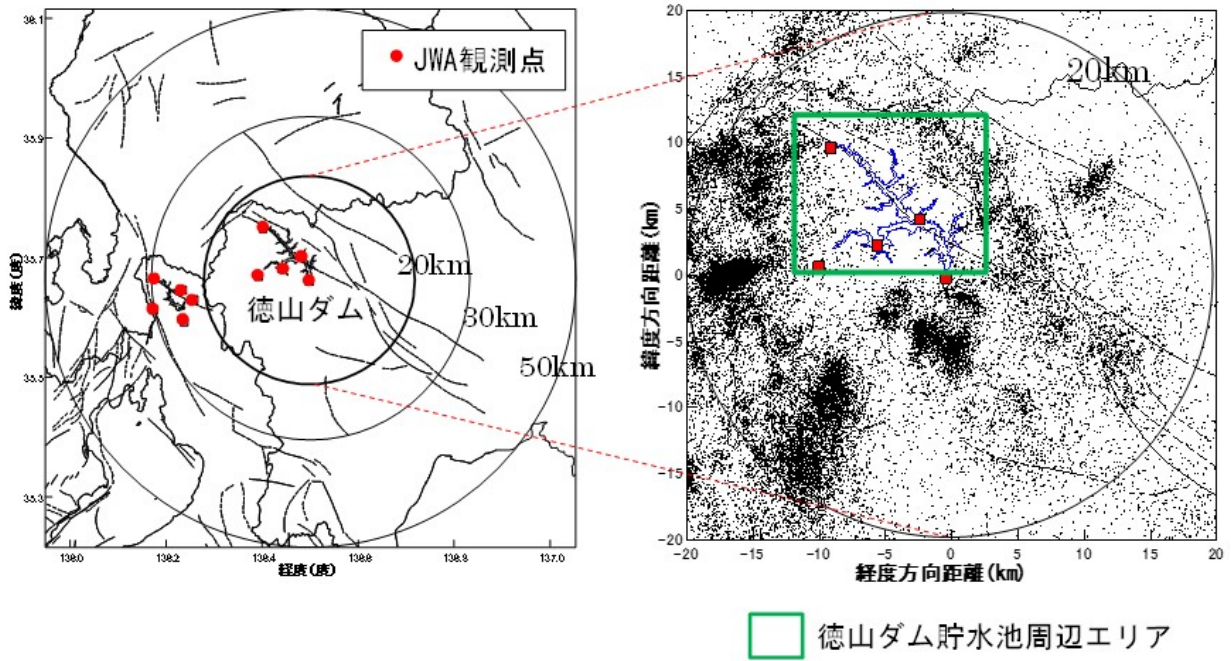
観測は1976年当初3地点で開始し、2002年に8地点、2006年に9地点になり、2016年以降は徳山ダム近傍5地点で実施している。記録形式は当初トリガー起動により磁気テープに記録していたが、2002年末にデジタル連続観測（地震計は固有周波数2Hz地表設置型）に移行し、現在に至る。当該地域は山間部で電源と通信手段の確保が困難なため、各点で独立に収録したwin形式の地震記録を定期的に回収し、目視による験震を実施してきた。図1に、2002年12月から2018年6月までの震央分布を示す。図1右の範囲は、ダムを中心とした±20km、深度20kmまでであり、地震総数は35,028個である。気象庁一元化震源カタログによる同エリア、同期間の地震総数は6,864個で、およそ5倍の地震を検知している。ダムおよび貯水池の近傍には地震が少なく、東側の根尾谷断層沿い、西側の岐阜・滋賀県境沿いおよびダムサイト南側で地震活動が活発である。以降の評価はJWAの観測結果による。

3. 地震活動の評価

図2左に、JWAの観測記録による徳山ダム貯水池周辺エリア内（図1緑色枠内）を震源とするM>0.5地震の月あたり地震発生数とダム貯水位を、図2右に湛水前後のG-R図を示す。地震発生数はランダムに変動しているが時間経過に伴う増減傾向はない。G-R図も、湛水前のb値0.97に対し湛水後は0.94であり、湛水前後で明確な変化はない。湛水後の観測期間を累積地震数が同程度になるよう分割した小期間のb値も、多少の変動はあるものの増減傾向は認められなかった。

4. 今後に向けて

ダム完成から10年以上が経過し、湛水前後の地震活動に明確な変化は認められなかった。これをふまえて2019年からは、JWAの2観測点とHi-netの3観測点の記録を統合処理することで気象庁一元化震源よりも高い験震精度を確保できる体制に移行した。観測継続については、今後の気象庁一元化震源の験震精度や既設観測機器の寿命をふまえて判断する予定である。



大規模4次元変分法データ同化に基づくスロースリップ断層面における摩擦特性不均一性の不確実性評価

Uncertainty quantification via large-scale 4DVar data assimilation for frictional inhomogeneity in a slow-slipping fault

*伊藤 伸一^{1,2}、加納 将行³、長尾 大道^{1,2}

*Shin-ichi Ito^{1,2}, Masayuki Kano³, Hiromichi Nagao^{1,2}

1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学大学院情報理工学系研究科、3. 東北大学大学院理学研究科

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 3. Graduate school of Science, Tohoku University

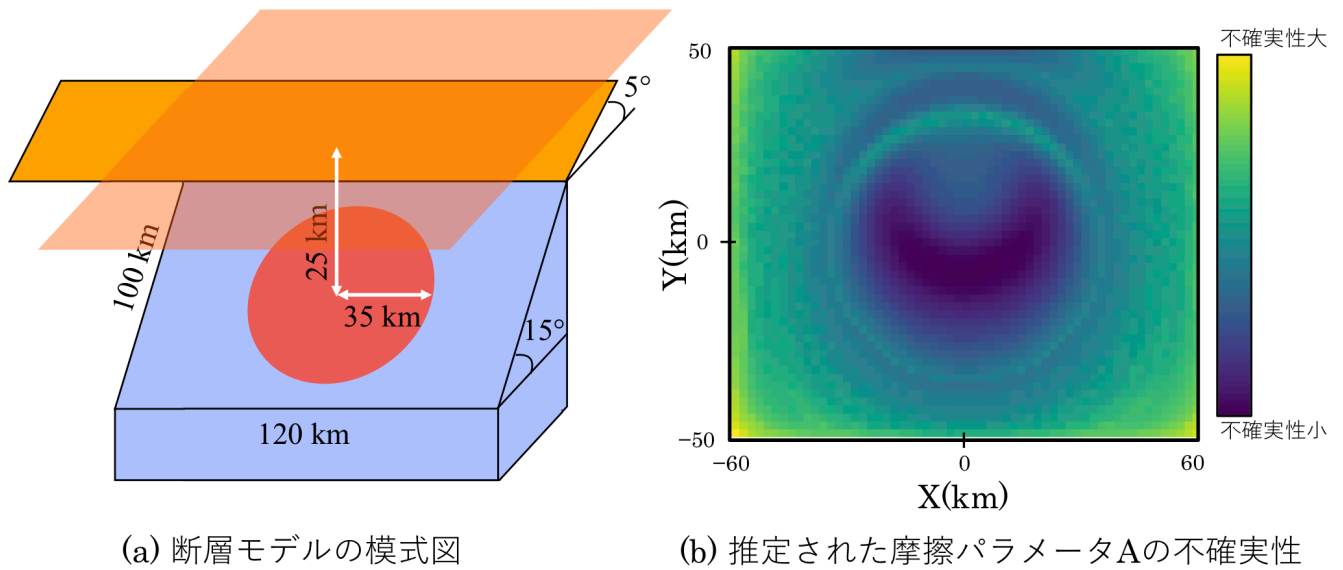
断層の運動は断層面間に発生する摩擦の特性によって支配され、その動力学は、摩擦力の断層面内速度に対する非線形な依存性によって定性的に説明される。しかしながら、現実の断層運動は、摩擦特性の空間的不均一性により、空間一様な摩擦特性を仮定した断層運動とは大きく異なる挙動を示す。そのため、そのような複雑な断層運動を数理的に理解するためには、「観測された断層運動が実現するためには摩擦特性の空間分布はどうあるべきか」を推定し、その推定値のゆらぎ(不確実性)を評価することにより、「空間的に不均一に分布している摩擦特性のどの部分が主要な断層運動に寄与しているか」を定量化することが重要な課題となる。

データ同化は、シミュレーションモデルと観測データをベイズ統計に基づいて融合する計算技術であり、ベイズ事後分布を構成・評価することにより、直接観測できない系の内部状態やパラメータ空間分布などの推定や、その不確実性評価を可能にする。近年、データ同化の元々の土壌であった気象・海洋分野から大きく適用範囲を広げ、固体地球科学現象への応用もかなり浸透してきた。しかしながら、既存のデータ同化手法を固体地球科学で用いられる大規模なシミュレーションモデルに適用する場合、「次元の呪い」により、モデル変数の自由度に対して計算量が組み合わせ爆発的に増大するため、現実的な計算機資源の下で推定値およびその不確実性を正確に評価することが極めて困難になるという問題を抱えている。この問題を解決するため、近年我々は、気象予報における主力のデータ同化手法である4次元変分法(4DVar)を発展させ、次元の呪いに囚われることなく推定値および不確実性を高速かつ高効率に評価する新しいデータ同化法を構築した[1,2]。このデータ同化手法は2nd-order adjoint法と呼ばれるベイズ事後分布の曲率を評価する手法を用いることで、モデル変数の自由度に依存しない計算量での不確実性評価を実現するため、大規模シミュレーションモデルに対しても現実的な計算量でデータ同化を行なうことを可能にする。

本研究では、この新規データ同化法を、豊後水道スロースリップ発生域を模擬した図(a)に示すような断層面内の運動のみに着目したモデル[3] (以下、断層モデル)に適用し、スロースリップの動力学と摩擦特性の空間不均一性の不確実性との関係を調べる。この断層モデルでは、摩擦則として、固着度合いを表す状態変数と呼ばれる時間特微量と断層面内速度に依存した速度状態依存摩擦則を用い、状態変数の発展則としてaging則を用いる。さらに、速度状態依存摩擦則に含まれるパラメータを空間に依存した場の変数として扱うことで摩擦特性の空間依存性を表現する。結果としてこのモデルは、速度場+状態変数場+パラメータ場を変数に持つモデルになり、既存のデータ同化手法では取り扱うことが困難な超大規模なシミュレーションモデルとなる。本研究では、この断層モデルのシミュレーションから生成された速度場の時間発展を擬似的なデータとして用いて、上述の新規データ同化法を用いたデータ同化を行ない、図(b)のように、仮定した断層運動が実現するためのパラメータ空間場およびその不確実性を評価する。これにより、スリップの動力学とパラメータ空間場の不確実性の関係を定量化する。我々のデータ同化手法は一般の大規模シミュレーションモデルへの応用が可能であるため、将来的には断層面間の摩擦特性の不均一性だけでなく、そのまわりの地下構造の不均一性も考慮した大規模有限要素モデルなどへの展開が期待できる。

参考文献

- [1] S. Ito, H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano, and J. Inoue, Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, *Physical Review E*, 94, 043307, doi:10.1103/PhysRevE.94.043307, 2016.
- [2] S. Ito, H. Nagao, T. Kasuya, and J. Inoue, Grain growth prediction based on data assimilation by implementing 4DVar on multi-phase-field model, *Science and Technology of Advanced Materials*, 18, Issue 1, 857-869, doi:10.1080/14686996.2017.1378921, 2017.
- [3] K. Hirahara and K. Nishikiori, EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on a LSSE fault -numerical experiments-, *JpGU2018, SCG53-17*, <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2018/subject/SCG53-17/advanced>, 2018.



鳥取県西部地震震源領域における高精度メカニズム解と非ダブルカップル成分検出

High-accuracy mechanism and non-double couple component detection in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake(M7.3)

*林田 祐人¹、松本 聡²、飯尾 能久³、酒井 慎一⁴、加藤 愛太郎⁴、0.1満点地震 観測グループ

*Yuto Hayashida¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴, Group for "0.1 Mantle" hyper dense seismic observation

1. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学防災研究所、4. 東京大学地震研究所

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

我々は2000年に発生した鳥取県西部地震震源領域に約1000点の地震計を設置し、2017年3月から約1年間観測を行った。発生した地震のイベントのメカニズム解を推定したところ、ダブルカップル型では十分に説明できない極性のミスフィットが節面、ヌル軸付近に確認された。林田他, 2019, JpGUにおいて、tensile crackや複数破壊も仮定することで、非ダブルカップル型のメカニズム解を推定することができている。そこで、本研究では、林田他, 2019, JpGUで解析されているイベントを用いて、Matched filter法（MF法）を用いて、ごく近傍のイベントを検出し、ダブルカップル型と非ダブルカップル型の地震で特徴を探ることを目的とした。

本研究では、0.1満点観測で得られた約1000点の上下動成分の地震計の連続波形記録を使用した。プレート地震として林田 他, 2019, JpGUで解析されているイベントを用い、イベント検出基準は合計した相関係数が全観測点数の20%以上とした。さらに、検出したイベントについて、各観測点で独立に検出時刻から±1秒の幅で波形相関をとり、最も大きい相関係数の値とその時の時間差 Δt を計算した。検出されたイベントの震源を、 Δt とプレート地震の震源位置から、マスターイベント法（ME法）を用いて相対的に決定した。

プレート地震発生日の前後3日間で、MF法、ME法による解析を行った。その結果、マスターイベント付近で発生した地震の震源を決定することができた。また、それぞれのイベントにおいて相関係数を観測点にコンターマップに示すことで、プレート地震とスレーブ地震とのメカニズム解の違いを把握することができた。特に、非ダブルカップル成分の割合の違いによって、ヌル軸付近に相関の値が小さいイベントや、メカニズム解が違うイベントを確認できた。

謝辞 本研究は平成26-30年度文部科学省新学術研究領域「観察・観測による断層帯の発達過程とマイクロからマクロまでの地殻構造の解明」（代表：竹下 徹、課題番号26109004）によって助成されました。

2016年ニュージーランド・カイコウラ地震の震源域における応力場(2) Stress tensor inversion in the focal area of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand (2)

*松野 弥愛¹、岡田 知己¹、松本 聡²、河村 優太²、飯尾 能久³、佐藤 将¹、Bannister Stephen⁴、Ristau John⁴、Savage Martha⁵、Pettinga Jarg⁶、Sibson Richard⁷
*Miu Matsuno¹、Tomomi Okada¹、Satoshi Matsumoto²、Yuta Kawamura²、Yoshihisa Iio³、Tadashi Sato¹、Stephen C Bannister⁴、John Ristau⁴、Martha K Savage⁵、Jarg Pettinga⁶、Richard H Sibson⁷

1. 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、2. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、3. 京都大学防災研究所、4. GNS Science, New Zealand、5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand、6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand、7. University of Otago, Dunedin, New Zealand
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. University of Otago, Dunedin, New Zealand

本研究では、ニュージーランドの南島北部で発生したカイコウラ地震を研究対象とし、地震のメカニズム解を複数決定することによって、本震前後の応力場を求めた。本震断層面上で余震が多く起きている場合、断層面が偏りを持って分布している可能性があるため、本震断層面上で発生した余震メカニズム解の影響を検討する必要がある。そのため、Hamling et al. (2017)で設定された20の断層モデルと余震メカニズム解とのKagan角(Kagan, 1995)を用いて、断層面上で起きていると考えられる余震を取り除いた後、応力テンソルインバージョンを行った。本震前の地震を用いた応力テンソルインバージョンの結果、Townend et al. (2012)で得られていた結果と同様の最大水平応力軸方向を得た。本震後の地震を用いた応力テンソルインバージョンの結果、南島北部のLondon hill断層付近の地域やKekerengu断層付近の地域では、Kagan角の閾値に依らず安定した横ずれ断層型となった。また水平最大圧縮軸方向はおおよそN115Eであり、本震前について得られている方向と概ね変わらなかった。本震の震源付近ではより細かく分割して応力インバージョンを行った結果、南部の一部地域では逆断層型の応力場が推定され、その領域では本震時に逆断層の滑りが生じていたと推定される。今後は、本震の震源付近の地域や本震前の地震についてもメカニズム解を増やして安定した応力場を得られるようにし、更に細かい領域での応力場を推定する必要がある。

We study spatio-temporal changes of stress field surrounding the 2016 Kaikoura earthquake rupture in the northern South Island of New Zealand. Data from 51 temporary stations and 22 GEONET stations were used. Data collection was from March 2011 to December 2017. We derived focal mechanisms using HASH (Hardebeck and Shearer, 2002). By focal mechanism solutions of earthquake, we estimated the stress fields of main shock before and after Kaikoura earthquake. We used SATSI (Hardebeck and Michael, 2006) for stress tensor inversion. By using Kagan angle between main shock fault model and each focal mechanism, we remove aftershocks on the faults, and perform stress tensor inversion. We use the fault model of Hamling et al. (2017). The stress regime after the main shock in the areas near the London Hill Fault and near the Kekerengu fault are strike-slip fault type with S_{Hmax} orientation of \sim N115E, which is almost same as for before the Kaikoura earthquake (e.g., Sibson et al., 2012; Townend et al., 2012), and stress tensors before and after the main shock didn't appear to change after the earthquake beyond the estimation error. In some areas of the south near the hypocenter of the main shock, the obtained stress tensor inversion is of this area. As a future study, we plan to obtain results of a stable stress tensor for before the main shock and in the area near the hypocenter of the main shock by increasing the number of focal mechanisms of earthquakes that we examine.

東日本太平洋地震後地震活動の時間空間特徴

Spatiotemporal characteristics of aftershock activity of the 2011 M9 Tohoku earthquake

*段 美修¹、山田 卓司¹

*MEITONG DUAN¹, Takuji Yamada¹

1. 茨城大学

1. Ibaraki University

1.はじめに

大地震が発生すると、その後震源域周辺に余震が発生する。Omori(1894)は、余震数がおおむね大地震からの経過時間の逆数に比例して減少することを発見した。その後Utsu(1961)により、余震数と経過時間の関係は $n(t)=K[(t+c)^{-p}]$ でよく近似されることが明らかとなった。ここで t は大地震からの経過時間、 $n(t)$ は単位時間あたり地震数、 c は有限の短い時間であり、 K , p 値はそれぞれ余震活動の活発さと時間経過による余震数減少の特徴を表す変数である。大きい p 値は時間とともに余震数が急減することを表し、日本周辺では一般に 0.9~1.5 程度の値をとることが知られている (Omi, 2015)。

本研究では、2011年東北地方太平洋地震後（以下、2011年東北地震と記す）の余震活動を解析し、 p 値の空間分布の特徴を調べるとともに、2011年東北地震の地震時すべり分布・地震前の地震活動度との関連を議論する。

2.データおよびp値解析結果

気象庁によって震源が決定された地震のうち、北緯34.0~42.0度、東経141.0~145.0度、深さ0.1~90.0kmの範囲で起きた2003~2018年のマグニチュード (M) 3.0~9.9の地震を解析に使用した。解析領域を緯度・経度1.0度ごとの小領域に分け、各小領域で2011年東北地震の余震の p 値を解析し、その空間分布を求めた。その結果、 p 値は0.47~0.97の値をとることが明らかとなった。求めた p 値の空間分布および *linuma et al.* (2012)による2011年東北地震の地震時すべり分布をFig. 1に示す。

3.議論および今後の解析

Fig. 1aより、2011年東北地震の大すべり域北部（領域C5）およびすべりの北端部（B7,C7）で小さな p 値を示すことが分かる。これらの理由は不明だが、比較的総余震数が少ないため、時々起こる大きめの余震に付随する「余震の余震」の影響により、見かけ上、小 p 値が得られているのかもしれない。A4領域でもやや小さい p 値が得られているが、この領域では2016年11月22日にM7.4の地震が起きている。このM7.4地震の余震が解析地震に含まれているため、小 p 値が得られたと考えられる。今後は、これらの影響を取り除いた解析も行う予定である。また現段階では、地震の選定の際、深さ方向に大きな制約を与えていない。今後は、Nakajima and Hasegawa (2006)により得られた太平洋プレート上面の深さ分布などを参考に、解析地震を絞り込んだ上で p 値を解析することを考えたい。さらに、 K 値の空間分布も解析し、 p , K 値それぞれについて2011年東北地震のすべり分布や地震前の地震活動度と比較し、余震発生の特徴により深く踏み込んだ議論を行いたいと考えている。

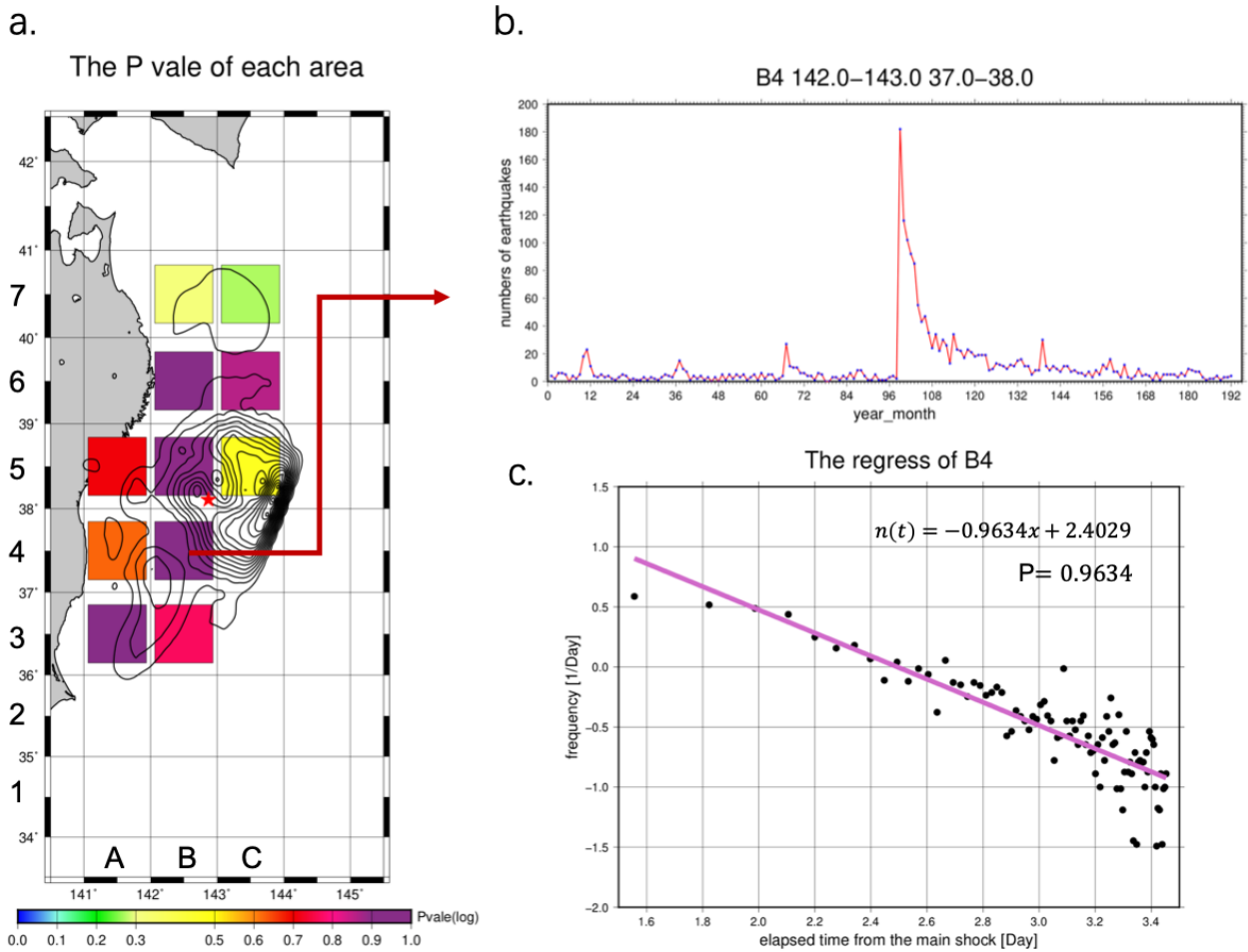


Figure 1. (a) Spatial distribution of p value for aftershocks of the 2011 M9 Tohoku earthquake, whose epicenter is shown as a red star. Black contours indicate coseismic displacement at an interval of 2 m derived by linuma et al. (2012). (b) Temporal characteristic of earthquakes that occurred in the area B4 shown in (a) from 2003 to 2018. (c) Relationship between the elapsed time from the 2011 Tohoku earthquake and the logarithmic number of daily aftershock $\log_{10} n(t) = \log_{10}[K\{t^{-p}\}]$ in the area of B4. Slope of the purple best-fit line shows the p value indicating the temporal decay rate of the aftershock activity

Spatio-temporal clustering of successive earthquakes in Japan: analyses of JMA catalogue

*Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹

1. Tohoku University

This study analyzes earthquakes closely occurring in space and time in Japan in order to clarify their characteristics. We group the earthquakes that occur in a given space-time window from a target earthquake into a cluster (i.e., a group of the earthquakes successively occurring), and count the number of the clusters. To examine whether or not these successive earthquakes occur randomly, we compare the results with simulations in which earthquakes are set to randomly occur in time (but same in locations). We analyze shallow earthquakes with depths of ≤ 70 km from Japanese Meteorological Agency catalogue (JMA) for the period from 1998 to 2017 with magnitudes ($5.0 \leq Mw < 6.0$), and compare the results to those that was previously determined from the global CMT catalogue for the period from 1976 to 2016 (Bantidi and Nishimura, JpGU 2019). The results show an eminent homogeneity of spatial clustering behaviors around Japan for both global and regional catalogues; and the spatio-temporal distribution of cumulative number of clusters exhibit similar features in logarithmic scale. Earthquakes in the magnitude range $5.5 \leq Mw < 6.0$, are found to be triggered at the distance between 60 - 190 km in JMA catalog and 70 - 210 km in the CMT catalog within 365 days. Furthermore, within 365 days, the JMA catalogue shows that successive earthquakes occurring close to the target fault account for about 3% of the total number of earthquakes around Japan. These consistencies suggest that the JMA catalog can be used for the analyses of smaller earthquakes with magnitude of less than 5 which are not easily analyzed by using global data set.

内陸地震におけるM3以上の地震モーメントの推定

Estimating seismic moment of inland earthquakes using the Hi-net and the F-net record

*上野 友岳¹、齊藤 竜彦¹、野田 朱美¹

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹, Akemi NODA¹

1. 防災科学技術研究所

1. NIED

地震の発生は、地殻内に蓄積されてきた弾性歪（応力）が断層運動によって、応力を伴わない非弾性歪みへと変換するプロセスと見なすことが出来る。地震活動による非弾性歪みを推定するためには、地震の発生数だけではなく断層運動の規模を表す地震モーメントとその総和を知ることが重要となる。これまで、日本周辺で発生したM3.5以上の地震の地震モーメントについては、広帯域地震観測網（F-net）の波形データを用いて推定されたモーメントテンソルから評価されている。しかしながら、M4未満の地震になると、F-netの観測点密度やグリーン関数の精度の問題でモーメントテンソルの推定が困難になることもあり、結果として地震モーメントが求められていない地震もある。M4未満の地震活動は活発的であるがそれより大きい地震はあまり発生しない地域もあるため、小規模地震の地震モーメントを推定することも重要になる。そこで、本研究では観測点密度の高いHi-netを用いて、S波の変位スペクトルからM3クラスの地震モーメントの計算をし、日本の内陸地域における地震モーメントとその総量の推定を試みた。

用いたデータは2013年から2017年の5年間に陸域で発生した深さ20km以浅の地震とした。ある地震に対して、震央距離が100km以内の観測点を選び、計器特性を補正したS波記録に対して、到達時の1秒前から10秒間の波形を切り出して、変位スペクトルを計算した。さらに、サイト増幅特性と距離減衰およびS波の減衰を補正し、地震波の平均的な放射特性と媒質のS波速度と密度を仮定して震源スペクトルを推定した。そして、 ω^2 モデルを仮定して、周波数無限小の振幅値である地震モーメントを推定した。 ω^2 モデルの推定には、0.1Hzから20Hzまでのスペクトル振幅に対し、シグナルノイズ比が10倍以上あるデータを用いた。また、初動極性で求められているメカニズム解をもちいて、モーメントテンソルにした。さらに、地震を緯度・経度方向に0.4度毎のグリッドに振り分けて、グリッド毎に求められているモーメントテンソルの総和を求め、地震モーメントを計算した。

2013年から2017年の5年間に於いて検知できたM3クラスの内陸地震の内、約95%近くになる2819個の地震モーメントを推定することができた。これらの結果をF-netのモーメントテンソルインバージョンによって求められている地震モーメントと比較したところ、両者の差はモーメントマグニチュードに換算して 0.1 ± 0.1 程度であった。また、内陸地域で限定すると、Hi-netから求めたM3からM4の地震モーメントの総和が得られた面積は、F-netから推定されている地震モーメントの総和のグリッド数に比べて1.8倍近く多かった。この差分はどこかの地域で顕著というよりはむしろ全国的にまばらに存在する。このことは、Hi-netでのみ地震モーメントを推定できたM4クラス未満の地震活動域が広く分布していることを示唆している。Hi-netデータから推定したM3クラスの地震モーメントとF-netで求められているM4以上の地震の地震モーメントをまとめて総和したところ、期間中に大地震のあった九州中部や中規模地震のあった山陰、信越地方を除くと、例えば北海道胆振地方や秋田県内陸部、福島茨城県境付近から日光周辺、銚子周辺や長野岐阜県境付近、淡路島や徳島県南部などで地震モーメントの総和がグリッドあたりで 10^{16} Nmを越えていることが分かった。

日本列島下における内陸地震の余震域の広がり

Aftershock areas of inland earthquakes in Japan

*田中 佐千子¹、齊藤 竜彦¹、野田 朱美¹

*Sachiko Tanaka¹, Tatsuhiko Saito¹, Akemi Noda¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震が発生すると、震源域やその周辺では、引き続き、多数の余震が発生する。通常、余震の規模は本震と比べると一回り小さいが、追加的な被害を生じさせるような大きい余震が発生する場合もあり、余震域の広がり の想定は、余震規模の特性や発生頻度の高低と併せて、余震活動を評価する上で極めて重要である。余震域の広がり は古くから調査が行われ、本震の規模が大きいほど余震域が広がる傾向が確認されている（例えば、Utsu, 1969）。本研究では、近年の高精度な地震データを用いて、日本列島下の内陸地震について、余震域の広がり を改めて検討した。

用いた地震データは、気象庁一元化処理による震源リスト（1997年10月-2017年12月、深さ30 km以浅、M2.0以上）である。シングルリンク法（Frohlich and Davis, 1990）によるクラスタリング処理（時空間の変換係数1 km/day, 時空間距離10 km以内）を行い、陸域で発生したM5.5以上の地震を含むクラスタについて、最大規模の地震を本震、それ以降の地震を余震として定義した。また、本震後1日間の余震の震央分布について、2次元正規分布を仮定し、95%以上の地震が含まれる等確率楕円を求め、余震域とした。

クラスタリング処理により、26個の本震（M5.5-7.3）が抽出された。そのうち、逆断層型の地震は15個、横ずれ断層型の地震は10個、正断層型の地震は1個である。従来の研究で示されているように、本震の規模が大きいほど余震域が広がる傾向が確認された。回帰分析の結果、余震域の面積（S）と地震規模の間には、 $\log(S) = 0.97M - 4.15$ の関係式が得られた。これは、Utsu（1969）によって陸域の地震（M5.5-7.5）について得られた関係式（ $\log(S) = M - 4.1$ ）と概ね一致する。また、横ずれ断層型の地震（ $\log(S) = 0.83M - 3.46$ ）に比べ、逆断層型の地震（ $\log(S) = 1.12M - 5.01$ ）の余震域が広がる傾向がみられた。ただし、横ずれ断層型の地震のうち、1998年長野県中部の地震（M5.6, $S = 59 \text{ km}^2$ ）および2016年熊本地震（M7.3, $S = 2220 \text{ km}^2$ ）は例外的に広い余震域を伴っている。

津波地震の前震および余震活動の時空間的特徴と波形的特徴

Spatial-temporal and seismogram characteristics of foreshock and aftershock activities for tsunami earthquakes

*劉 弋鋒¹、伊藤 喜宏²、太田 和晃²、片上 智史¹

*Yifeng Liu¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Satoshi Katakami¹

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所

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

津波地震は実体波から推定されるマグニチュードに比して、大きな津波が観測される地震である。それゆえ、沿岸部で観測・計測される震度が小さく、住民の直接の避難行動につながりにくいため甚大な津波被害へと発展する可能性がある。しかしながら、津波地震の観測事例は、通常の地震に比べて少なく、その詳細な発生メカニズムは未だ明らかではない。本研究では、津波地震の発生メカニズムの解明に向けて、津波地震の前震および余震群に津波地震と同様の特徴を示す地震（マグニチュード5以上）の有無を検証することを目的とする。特に、過去に発生した3つの津波地震（ニカラグア(1992/09/02, Mw7.7)・ジャワ島(2006/07/17, Mw7.7)・メンタワイ(2010/10/25, Mw7.8))の前震・余震活動を調べたについて調査を行った。

はじめに、ISCやUSGSなどで公開されている地震カタログから前震並びに余震活動を抽出し、時空間的特徴の評価を行った。その結果、特にニカラグア本震の発生前には、震央から約10km離れた西側でMb5前後の前震(1992/08/10 06:09:20 Mb 5.2, 1992/08/10 06:34:14 Mb4.7, 1992/08/11 05:23:51 Mb 5.1, 1992/08/13 08:41:17 Mb 4.7)が四つ発生していることがわかった。また、20年間(1983-2012)の地震カタログに示される地震活動について、津波地震の震源を中心とした5度*5度の領域を1度刻みで分割し、各領域について地震活動度を調べた。地震活動を累積頻度分布に基づき評価した結果、ニカラグア津波地震の本震域の周辺では静穏期が存在していることが分かった。特に、ニカラグア地震の余震に関しては、前震と同じ領域内で余震活動が前後の期間に比して低調になる時期も検出された。また、ニカラグア地震の本震発生前には、本震の震源域付近の前震活動にマイグレーションが観測された。

静穏期やマイグレーションが観測された領域内に含まれる地震の波形について、本震（津波地震）のの波形と比較し、本震と同様の特徴が含まれるか調査した。震源域付近の地震観測記録はIRISからダウンロードした。ここでは、本震域内(11.245°~12.245°、-86.866°~ -87.866°)で発生したM5以上の地震に対して、本震域周辺の4つの観測点の地震記録に対して、変位波形にバンドパスフィルタを(0.01~0.1Hz)を施したのち、表面波とSV波の最大振幅の比を求め、これらの値を比較した。その結果、特にニカラグア地震の領域内で発生した3つの地震（前震8/11(Mb5.1)と余震9/5(Mb5.3)、9/6(Mb5.3)）が津波地震の本震と同様の特徴（4000km以内の観測点で震央距離の増加に伴い振幅比の値が高くなる）を示すことがわかった。これは、津波地震の発生直前と直後に津波地震と同様の特徴を示すやや小規模な地震が発生していた可能性を示唆する。