(3) 防災科学技術研究所による観測

1. はじめに

防災科学技術研究所(以下,防災科研という)では, 南海トラフにおいて発生するスロー地震として、深部低 周波微動(以下,微動という),深部・浅部超低周波地 震,短期的スロースリップイベント(以下,短期的 SSE という)のモニタリングを実施し、地震予知連絡会に報 告してきた. 2008年までの10年はスロー地震の発見の 時代といえ、小原(2009)¹⁾に詳しく紹介されているよ うに活動の地域特性など、その基本的な特徴が明らかに なった、その後、防災科研が各種スロー地震のモニタリ ングに使用している解析手法の論文が2010年までにそ れぞれ出版され、同一手法での解析が現在も継続されて いる. 2018年までの10年は、このようにスロー地震モ ニタリング手法が確立され、安定運用の段階に入った時 代であり、得られた長期の活動状況から、長期的スロー スリップイベント(以下,長期的 SSE という)発生との 関係などの議論が可能となった.以下では、南海トラフ 周辺における、防災科研のスロー地震モニタリングにつ いて述べる.

2. 深部低周波微動

2.1 観測データとイベント検出方法

微動の検出においては、南海トラフ付近に位置する 防災科研 Hi-net の速度型地震計の記録を使用している. 従来はエンベロープ相関法²⁾により走時差情報のみを使 用して震源が推定されてきたが、現在はこれらの観測記 録について、Maeda and Obara (2009)³⁾で提案された エンベロープ相関による走時差情報と振幅情報を利用し たハイブリッド方式の解析法(以下、ハイブリッド法と いう)により、微動源を推定している.なお震源の深さ は、Shiomi et al. (2008)⁴⁾のレシーバー関数解析によっ て得られた海洋性モホ面から5km 浅部に固定している. ハイブリッド法の微動源は1分毎に推定されるが、まと まった活動のみを抽出するために、Obara et al., (2010) ⁵⁾の方法により、1時間毎にクラスタリング処理を行っ た結果を定常の資料に掲載している.この処理は完全に 自動化されており、後述の深部・浅部超低周波地震の解 析とともに SPA システム (Slow-events Parallel Analysis system)⁶⁾と呼ばれるサーバ群上で常時稼働している.

2.2 長期的な活動状況

継続的なモニタリングにより,南海トラフ周辺の長期 のスロー地震活動履歴が得られている(図1). 微動活動 のセグメントや繰り返し間隔などの地域的な特徴につい て,長期にわたる系統的な変化は特段みられない.2011 年東北地方太平洋沖地震の前後についても,南海トラフ 周辺の活動状況に顕著な変化はみられなかった⁷⁾.

ただし、年程度の時間スケールでの変動はみられてお り, 例えば豊後水道における数か月から1年程度の活発 化は顕著である.こうした活動状況の変化は、微動発生 領域に近接したプレート境界の浅い側で発生する長期的 SSE に起因すると考えられる. Hirose et al. (2010)⁸⁾は, 2003 年および 2010 年の長期的 SSE 時に,豊後水道の深 部低周波微動域のうち,浅い側(南東側)でのみ活動度 が高くなることを示した(図2).また、足摺沖のトラフ 軸付近で発生する浅部超低周波地震も同時に活発化し ていることを指摘した.その後,豊後水道における活動 においては、やや規模の小さな長期的 SSE の存在も報 告され⁹⁾, 2014 年の長期的 SSE 時には対応する微動活 動の活発化がみられるが、2016年前半に発生した長期 的 SSE に際しては、その変化は顕著でない、こうした 活動の相違は、長期的 SSE のすべり分布がそれぞれ異 なる⁹⁾ことによる可能性が考えられる. さらに最近では, 2018 年後半から 2019 年初めにかけて、長期的 SSE¹⁰⁾に 同期した微動活動の活発化がみられる (図 2).



図1 西南日本で発生した深部低周波微動(赤丸)及び深部超低周波地震(青菱形)の2003年から約17年間の 時空間分布. 黄緑色太線は,傾斜変動から検出された短期的スロースリップイベントを示す.



上対馬を基準点とした高知大月の東方向の変位. 2013 年一年間のデータを用いてトレンドを除去した.(b)豊 後水道南東側(赤線)及び北西側の領域(青線)にお ける 2001 年からの微動活動積算個数.図中の地図に 南東側,北西側に位置する微動の分布をそれぞれ赤丸, 青丸で示す.灰丸は上記以外の領域の微動分布を示す.

他の領域においても、長期的 SSE のすべりに近接し た領域での微動活動の活発化がみられている. 紀伊水道 では、2014 ~ 2016 年前半に長期的 SSE が発生しており ¹¹⁾,近傍での微動活動の活発化がみられた¹²⁾.一方、東 海地方の長期的 SSE に対し、2003 ~ 2004 年頃には活発 化がみられていたが、2013 ~ 2016 年前半に発生した長 期的 SSE¹³⁾に際しては、微動の顕著な活発化はみられな い.

3. 深部超低周波地震

南海トラフの微動発生域においては、微動活動ととも に周期10秒から100秒程度に卓越する深部超低周波地 震が発生している.深部超低周波地震の検出・解析にお いては、Ito et al. (2010)¹⁴⁾によるGrid MTとCMT解析 を組み合わせた手法を採用している.この手法ではまず、 F-net 広帯域地震計記録を用いて、グリッド状に配置し た仮想震央上のMT解を常時計算する.さらにこの結 果から候補イベントを一定基準で選出し、F-net 広帯域 地震計およびHi-net 高感度加速度計記録を用いて CMT 解を推定する.最終的には、Variance Reductionと使用 観測点数の基準を満たすイベントについて遠地地震やノ イズ等の状況を目視で確認した後、深部超低周波地震と して決定している.

図3に、この10年間の深部超低周波地震の分布を微動とともに示す.微動発生域が帯状に分布する一方、決定された深部超低周波地震はそのうちの限られた場所に分布する.ただし Ide and Yabe (2014)¹⁵⁾は、波形記録



図3 2009~2018年に発生した深部超低周波地震(青菱形) および深部低周波微動(赤丸)の分布.

をスタックした解析から、南海トラフの微動発生域のほ ぼ全域で超低周波地震の卓越する帯域にシグナルをも つイベントが、マグニチュードの差はあるものの発生し ていることを示した.さらに、図3のような微動と深部 超低周波地震の分布の差異が生じる原因として、深部超 低周波地震のマグニチュードが大きな地域のみで、同地 震が個別のイベントとして検出されることによる可能性 を指摘している.

4. 浅部超低周波地震

南海トラフのトラフ軸付近では,超低周波地震が発生 しており,浅部超低周波地震と呼ばれる.防災科研では, Hi-net 高感度加速度計によるマルチアレイ解析¹⁶⁾による モニタリングを実施している.また定常的なモニタリン グ結果は,十勝沖から日向灘までを含む日本全国を対象 地域として地震予知連絡会に資料を提出している.この 詳細については,本誌の第2部第3章4.(2)¹⁷⁾を参照さ れたい.

紀伊半島南東沖から室戸沖においては,浅部超低周 波地震がたびたび活発化している.2009年3~7月の 活動では,室戸沖で活動が開始した後,6月頃にその東 側のクラスターに活動域が移動した.その際,東側のク ラスターの近傍において M_w4.4 の通常の地震が発生し た¹⁸⁾.この地震はその後の解析により,プレート境界で 発生した地震であることが示された¹⁹⁾.また,2016年4 月1日に三重県南東沖で発生した M6.5 の地震の後,震 源より浅い側において浅部超低周波地震が活発化してい る^{20),21)}.微動や超低周波地震は背後に存在する SSE に よるゆっくりすべりを反映していると解釈されるため, こうした地震とスロー地震の関係の解明は,大地震発生 に関する知見を得るうえで有用と考えられる²²⁾.

5. スロースリップイベント

5.1 観測データとイベント検出

南海トラフの微動発生域においては、微動活動の活発

化と同期して継続時間が数日~10日程度の短期的 SSE が発生している.防災科研では、Hi-net に併設されてい る地中の高感度加速度計により得られる傾斜変動データ を用いて、短期的 SSE の断層モデルの推定を行ってい る^{23),24)}.断層モデルの推定の際には、20Hz サンプリン グで収集されている高感度加速度計記録を1時間サンプ リングにデシメーション後、データに含まれる潮汐応答 成分や気圧応答成分を BAYTAP-G²⁵⁾により補正し、各 データの背景トレンドを直線で近似して除き、解析して いる.

短期的 SSE の検出にあたっては,自動で検出される 微動の活動状況を参考に微動が活発化した期間の傾斜 変動データを目視により確認し,短期的 SSE に伴う変 動を判別している.約0.05 µ rad 以上の変動が2~3観 測点以上で確認できた場合に,断層モデルの推定を行っ ている.また,傾斜変動データのみから短期的 SSE を 自動で検出する手法の開発も行っている²⁶⁾.

断層モデルとしてプレート収束方向と逆向きのすべり 角をもつ矩形断層を仮定し、断層の長さ・幅・深さを含 む位置・走向・傾斜の7つの非線形パラメータについて は遺伝的アルゴリズム、すべり量については線形最小二 乗法によりモデル推定を行う^{23),24)}.通常は1枚の矩形 断層モデルを仮定するが、SSE発生中に傾斜変動パター ンの明瞭な時間変化が確認できた場合には、解析期間を 複数に分割し、それぞれの期間に対して1枚ずつ断層モ デルを推定する.

5.2 長期的な活動状況

2009 年から 2018 年の 10 年間で,防災科研が断層モ デルを推定した短期的 SSE の数は,四国地域で 37,紀 伊半島で 15,愛知県域では 6 である.これに加えて, 2017 年 11 月~12 月には紀伊半島北部から愛知県域に 至る広い領域において,微動活動域の移動と同期した短 期的 SSE のすべり域の移動が確認できた²⁷⁾.この領域 では,2006 年 1 月にも同様の大規模なすべり域の移動



図4 2009 年から 2018 年で傾斜変動データから推定され た断層モデル(ピンク矩形).

が確認されている²⁸⁾.期間中のすべての短期的 SSE の 断層モデルを図4に示す.

期間中で最大の短期的 SSE は、豊後水道から四国東 部に至る広い領域において発生したイベントで、2018 年2月21日から3月25日までの1ヶ月以上の継続時間 をもち、その規模は $M_w6.4$ であった²⁷⁾. このイベント は、傾斜変動データを用いて解析されている2001年以 降のカタログ²⁹⁾の中でも最大のものである. 紀伊半島及 び愛知県域での最大の短期的 SSE は、両領域にまたがっ て2017年11月~12月に発生したイベントで、その規 模は $M_w6.2$ であった²⁷⁾. 一方で、期間中の全領域で最 小の短期的 SSE は、2011年7月に四国西部で発生した $M_w5.6$ のイベントであった³⁰⁾.

(松澤 孝紀·木村 武志·浅野 陽一·田中 佐千子)

謝辞

図の作成にあたり、国土地理院のデータを使用させて いただきました.

参考文献

- 小原一成,2009,短期的スロースリップ・深部低周 波微動,地震予知連絡会40年のあゆみ.219-227.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, 296, 1679–1681.
- Maeda, T., and K. Obara, 2009, Spatiotemporal distribution of seismic energy radiation from lowfrequency tremor in western Shikoku, Japan. J. *Geophys. Res.*, 114, B00A09.
- Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara, 2008, Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan. *Geophys. J. Int.*, 173, 1018–1029.
- Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, and T. Matsuzawa, 2010, Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L13306.
- 6)松澤孝紀・浅野陽一・田中佐千子・木村武志・小原 一成・前田拓人・伊藤喜宏・廣瀬仁・芝崎文一郎, 2015,日本列島周辺におけるスロー地震モニタリン グと数値モデリング.日本地震学会2015年秋季大会.
- 7)防災科学技術研究所,2016,東北地方太平洋沖地震 前後のスロー地震活動の変化,地震予知連絡会会 報,95,447-451.
- Hirose, H., Y. Asano, K. Obara, T. Kimura, T. Matsuzawa, S. Tanaka, and T. Maeda, 2010,

Slow earthquakes linked along dip in the Nankai subduction zone. *Science*, 330, 1502.

- Ozawa, S., 2017, Long-term slow slip events along the Nankai trough subduction zone after the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Earth Planets Space*, 69:56.
- 国土地理院, 2019, 九州・沖縄地方の地殻変動.地 震予知連絡会会報, 102, 359-370.
- 国土地理院, 2016, 近畿地方の地殻変動. 地震予知 連絡会会報, 95, 285-287.
- 12)防災科学技術研究所,2016,西南日本における深部
 低周波微動活動(2015年11月~2016年4月).地
 震予知連絡会会報,96,363-370.
- 13) Ozawa, S., M. Tobita, and H. Yarai, 2016, A possible restart of an interplate slow slip adjacent to the Tokai seismic gap in Japan. *Earth Planets Space*, 68:54.
- 14) Ito, Y., K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda, 2009, Very low frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition. *J. Geophys. Res.*, 114, B00A13.
- 15) Ide, S., and S. Yabe, 2014, Universality of slow earthquakes in the very low frequency band. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2786-2793.
- 16) Asano, Y., K. Obara, and Y. Ito, 2008, Spatiotemporal distribution of very-low frequency earthquakes in Tokachi-oki near the junction of the Kuril and Japan trenches revealed by using array signal processing. *Earth Planets Space*, 60, 871-875.
- 17)浅野陽一・松澤孝紀・木村尚紀,2019,防災科研によるその他の地域のスロー地震モニタリング.地震予知連絡会50年のあゆみ(本誌).
- 18)防災科学技術研究所,2010,2009年7月四国沖の地震:周辺域における浅部超低周波地震の活動,地震 予知連絡会会報.83,455-457.
- 19) Takemura, S., A. Noda, T. Kubota, Y. Asano, T. Matsuzawa, and K. Shiomi, 2019, Migrations and clusters of shallow very low frequency earthquakes in the regions surrounding shear stress accumulation peaks along the Nankai Trough. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 11830-11840.

- 20)防災科学技術研究所,2016,日本周辺における浅部 超低周波地震活動(2015年11月~2016年4月). 地震予知連絡会会報,96,5-7.
- 21) Nakano, M., T. Hori, E. Araki, S. Kodaira, and S. Ide, 2018, Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone. *Nat. Commun.*, 9:984.
- 22) Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, and S. Ide, 2019, The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories. *Science*, 365, 808-813.
- 23) Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara, 2004, Episodic slow slip events accompanied by nonvolcanic tremors in southwest Japan subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23602.
- 24) Hirose, H., and K. Obara, 2005, Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan. *Earth Planets Space*, 57, 961-972.
- 25) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro, 1991, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516.
- 26) Kimura, T., K. Obara, H. Kimura, and H. Hirose, 2011, Automated detection of slow slip events within Nankai subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01311.
- 27)防災科学技術研究所,2018,西南日本における短期的スロースリップイベント(2017年11月~2018年4月).地震予知連絡会会報,100,301-306.
- 28) Obara, K., and S. Sekine, 2009, Characteristic activity and migration of episodic tremor and slow-slip events in central Japan. *Earth Planets Space*, 61, 853-862.
- Sekine, S., H. Hirose, and K. Obara, 2010, Along strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 115, B00A27.
- 30)防災科学技術研究所,2012,西南日本における短期 的スロースリップイベント(2011年6月~2011年 10月)、地震予知連絡会会報,87,430-437.