

第 3 章 この 10 年のスロー地震

小原 一成（東京大学地震研究所）

1. はじめに

スロー地震は、2000 年前後の西南日本におけるスロースリップイベント（SSE）や深部低周波微動の発見^{1,2)}を端緒として、環太平洋の各沈み込み帯などで次々と発見されてきた。10 年前の「地震予知連絡会 40 年のあゆみ」³⁾では、陸域に展開された地震・地殻変動観測網による様々なスロー地震の検出とこれらの主な特徴が紹介され

2. スロー地震の概観

スロー地震とは、通常の地震を引き起こす断層すべりに対してすべり速度や破壊伝播速度が遅く、観測される卓越周期や時定数が通常の地震に比べて長い地震現象の総称であり、これまでに数種類のスロー地震の存在が明らかになっている。図 1 は、沈み込み帯で発生するスロー地震を巨大地震震源域（固着域）に対する発生深度と特徴的時間で分類したものである。世界各地域で検出されるスロー地震は様々であるが、南海トラフ周辺では最も多くの種類のスロー地震が検出されているため、ここではそれについて示している。特徴的時間スケールでは、地震波を放射せず地殻変動のみが観測される測地学的イベントと地震波が観測される地震学的イベントに分類される。測地学的イベントはさらに数か月から数年の継続時間を有する「長期的 SSE」と数日程度の継続時間を有する「短期的 SSE」に、地震学的イベントは周期数 10 秒に卓越する「超低周波地震（VLF）」と数 Hz に卓越する「低周波微動」に分類される。

1. 深部スロー地震

南海トラフの固着域のすぐ深部側には長期的 SSE が、さらにその深部側には深部低周波微動、深部 VLF、短期的 SSE が同時発生する ETS（Episodic Tremor and Slip）が分布する。また、これらの現象に比べると深度は浅いものの、房総 SSE も固着域の深部側に発生する現象である。

1.1 深部低周波微動

1995 年阪神・淡路大震災を契機として防災科学技術研究所（以下、防災科研）が全国に展開した高感度地震観測網（Hi-net）⁴⁾により、陸域における微小振動に対する検知能力が格段に向上したことが背景となり、深部低周波微動が世界に先駆けて発見された²⁾。微動は長野県南部から豊後水道に至る長さ約 600 km の範囲にわたり、沈み込むフィリピン海プレートの等深線に沿って帯状に分布するが、いくつかのセグメントに分かれ、それぞれのセグメントではおおむね一定の周期で活発な微

動エピソードが繰返し発生する⁵⁾。微動エピソードは通常 1 日約 10 km の速度でセグメント内をプレート走向方向に移動するが、時には隣接するセグメントに連動することもある⁶⁾。微動エピソードは ETS として短期的 SSE や深部 VLF とともに発生する。つまり、微動は短期的 SSE すべり面内の小規模なパッチ破壊であり、微動の移動は短期的 SSE のすべりフロントの伝播と解釈される。なお、ETS を構成するなかでは、現象と観測網の特性から微動が最も検出されやすく、微動を ETS の代表、つまり短期的 SSE のプロキシとして取り扱うことが多い。

微動活動を詳細に観察すると、幅の狭い活動域の中でも深さ依存性を示し、最も深部側では小規模の微動がより頻繁に発生する⁷⁾。また、1 日約 10 km の速度で移動する中でもそれとは逆方向に高速度で移動する現象（Rapid Tremor Reversal: RTR）やプレート傾斜方向にさらに高速度で移動する現象も検出されている^{8),9)}。

一方、微動は他の現象によって誘発されるという非常に敏感な性質を有する。例えば、遠地地震による表面波が伝播する際、10~100 秒の長周期表面波の各位相に対応して微動が活発化したり¹⁰⁾、12 時間あるいは 24 時間周期で活発化する地球潮汐応答¹¹⁾が知られている。また、しばしばスラブ内地震によってもトリガーされることがあるが、実体波の到達から数分後に一時的に微動が発生することが多く、その遅延も含めて誘発微動のメカニズムはまだ明らかではない。

微動は低周波地震の群発であり¹²⁾、初動の立ち上がりを検出することが困難であるため、エンベロープを用いた震源決定がなされてきている^{2),13)}が、気象庁では通常の震源決定と同様の手法で低周波地震の震源を決定し、一元化カタログに掲載している¹⁴⁾。近年では、過去に発生した低周波地震をテンプレートとして連続波形記録から相関解析によりイベントを抽出するマッチドフィルター法¹²⁾が盛んに用いられているが、気象庁でも 2018 年 3 月 22 日よりこの手法を導入し、大量の低周波地震を自動的に処理できるようになった¹⁵⁾。一方、微動

の振幅はこれまであまり評価されてこなかったが、放射エネルギーの推定を適切に行いつつ微動源を再評価した結果、微動エネルギーの空間分布がフィリピン海プレート収束速度に比例することが明らかになった¹⁶⁾。さらに、微動パッチ密度の不均質分布に関する研究などにも活用されている¹⁷⁾。

1.2 深部 VLF

深部 ETS に同期し、周期数 10 秒に卓越する超低周波地震 (VLF) が 2007 年に発見された⁶⁾。この現象は、モーメントテンソル解析によりフィリピン海プレートの沈み込みに伴う逆断層の発震機構解を有することが推定され、このことは ETS そのものがプレート境界での逆断層すべり現象である重要な証拠となった。深部 VLF の規模は Mw4 以下であり、その分布は深部低周波微動の分布に比べると空間的不均質性が強い¹⁸⁾。しかし、微動 (低周波地震) の発生をリファランスに広帯域波形をスタックすることで、深部低周波微動の活動領域全体に深部 VLF が起きていることが確認された¹⁹⁾。また、そこで得られた発震機構解をテンプレートとしたマッチドフィルター法によって深部 VLF の網羅的検出がなされ、その時空間的特徴が明らかにされた²⁰⁾。

1.3 短期的 SSE (ETS)

北米大陸西海岸の Cascadia では 2001 年に短期的 SSE が発見され²¹⁾、西南日本での微動発見を契機として短期的 SSE と微動の同時発生現象である ETS が 2003 年に世界で初めて報告された²²⁾。この観測事実に基づいて、西南日本でも微動に同期した SSE が予想され、防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net に併設された傾斜計 (高感度加速度計水平動成分 DC 出力)²³⁾によって実際に短期的 SSE が 2004 年に確認された²⁴⁾。

当初は防災科研の傾斜計で把握されるのみであったが、2005 年の東海地域で発生した短期的 SSE が気象庁ひずみ計で初めて認識されて以降、気象庁及び産業技術総合研究所のひずみ計でも頻繁に検出されるようになった。また、地表変位パターンのフィッティングにより国土地理院の GNSS でも短期的 SSE の検出が可能となり²⁵⁾、さらに観測事例が増加している。

短期的 SSE と微動との関係について時空間発展インバージョンに基づくすべりと微動の分布を比較すると、微動はすべりのピークにほぼ一致する²⁶⁾。このことは、微動が SSE 断層 (非地震性すべり) 面に分布する地震性パッチの遅れ破壊であることを示すとともに、すべりのインディケーターとして微動が利用できることを意味している。一方、微動と短期的 SSE が必ずしも一致しない場合がある。例えば、東海と紀伊半島のセグメント

では通常それぞれ独立に ETS が発生するが、たまに 2 つのセグメントが連動し、両セグメントにおける微動の時間発展が一つの線形回帰直線で近似できるような挙動を示すことがある。その際に、中間の伊勢湾では常に微動は検知されないが、傾斜計等によってすべりの発生が推定される²⁷⁾。つまり、ETS が伊勢湾を超えてセグメントを超える際にセグメント境界では微動を起こさずにすべりだけが連続的に進行することを示している。このように、ギャップを挟んで微動が連続的に移動する例は四国中部・東部でも見られ²⁸⁾、ここではギャップでのすべりそのものは観測されないが、伊勢湾と同様のことが起きていると推測される。このような微動とすべりの不一致はおそらく断層面上の微動パッチの不均質分布を反映するものと考えられる。

ETS はその浅部側で発生する長期的 SSE にトリガーされる場合がある (次節)。一方、微動エピソードの発生タイミングで GNSS データをスタックした結果、深部の微動域から少し浅部側に離れた固着域下端部でもわずかな滑りが検出されたとの報告が最近なされた²⁹⁾。このような現象は、プレート境界のレオロジーや流体移動に関係する可能性がある。

1.4 深部長期的 SSE

固着域より深部で発生する長期的 SSE は、国土地理院 GNSS 連続観測システム GEONET が全国展開されたことにより、1997 年に豊後水道で¹⁾、2000 年後半に東海地域で³⁰⁾発見された。最近の約 10 年間では紀伊水道³¹⁾、四国中部^{32),33)}、宮崎県沿岸北部^{34), 35)}、宮崎県沿岸南部³⁶⁾、などでも検出が相次ぎ、ETS 域と巨大地震震源域との間のギャップを徐々に埋めてきた。

長期的 SSE の規模や継続時間、発生間隔はそれぞれの場所で概ね定まった特性を有する。豊後水道では Mw6.8 前後の SSE が半年程度継続し、1997 年以降は 2003 年、2010 年と約 6～7 年の間隔で繰り返し発生してきた。その後、同規模の SSE は 2019 年に発生したが、その間の 2014 年と 2016 年に Mw6.3 前後の小規模な SSE が発生しており、これらの小規模な SSE によって部分的に応力が解放され、大規模 SSE の発生を遅らせた可能性がある。また、豊後水道を含む宮崎県沿岸南部から四国中部にかけての地域では SSE がいくつかのセグメントに分かれ、それぞれ周期的に発生するとともに南西から北東に向かって繰り返し連動している³⁵⁾。したがってそれぞれの SSE は隣接する SSE に影響を受けるとともに、これらの SSE のすべり分布は浅部側における大地震時のすべり分布と相補的な関係にあることから、その領域のプレート間カップリングに支配されている可能性がある。東海では Mw7 級の SSE が 2000 年後半か

ら 5 年程度継続したが、その前後では 1989 年から 2 年程度³⁷⁾、及び 2013 年から 2 年程度、小規模な SSE が発生しており³⁸⁾、周期性は必ずしも規則的とは言えない。

豊後水道で発生する長期的 SSE については、その下端側に分布する深部低周波微動が SSE 活動期間中に活発化するという相互作用が度々観測される³⁹⁾。微動の活発化は微動域の中でも浅部、つまり長期的 SSE の断層面に接する部分のみに限られ、深部の微動活動は長期的 SSE の発生の有無にかかわらずほぼ一定レートで発生していることから、相互作用は主たるイベントからの距離に大きく依存する。例えば、2014 年と 2016 年の小規模な長期的 SSE が発生したとき、前者は活発な微動活動を伴う一方、後者は微動活動を伴わなかったが、SSE の発生位置が前者は北側、つまり微動域に隣接する領域であったのに対して、後者はやや南方に離れていたためと考えられる。

1.5 房総 SSE

房総半島の東岸部及び沖合では SSE が約 6 年周期で発生し、それぞれの規模は Mw6.5 前後、継続期間は 1 週間程度である。この SSE は深さ約 10 ~ 20 km と前節までの西南日本の深部スロー地震よりは浅い。また、通常の地震の群発活動や小繰返し地震が房総 SSE に伴ってそのすべり域の下端側で発生する⁴⁰⁾。2018 年 6 月に発生した房総 SSE の際には地震調査研究推進本部地震調査委員会が中規模程度の地震との関連性について言及し⁴¹⁾、実際に震度 4 の地震が発生した。平均間隔は 2010 年までは約 6 年であったが、2011 年の東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）でリセットされて短くなり、その後は間隔が長くなる傾向にある。東北沖地震の発生時は余震や余効すべりの影響で GNSS や傾斜計に SSE の有意な変化をとらえることはできないが、小繰返し地震が検出されたことから、小規模な SSE が発生していたと推定される⁴²⁾。また、房総 SSE の時空間発展解析から、群発地震の移動がすべりの移動によって引き起こされていること、2014 年の SSE ではすべりの急速な発展の 1 か月前から徐々に加速していく様子が明らかにされた⁴³⁾。

2. 浅部スロー地震

沈み込みプレート境界の固着域と南海トラフとの間の領域でも多様なスロー地震の検出が報告されている。ここでは南海トラフだけでなく日本・千島海溝および南西諸島付近に発生するスロー地震を概観する。

2.1 浅部 VLF

浅部におけるスロー地震活動としては、防災科研

F-net の連続波形データに基づいて浅部 VLF の存在が 2003 年に明らかになり⁴⁴⁾、その後防災科研 Hi-net の高感度加速度計データを用いて浅部 VLF が南海トラフ陸側の数か所で時空間的に集中して発生していることが明らかになった⁴⁵⁾。この浅部 VLF の発見はその後の深部 VLF の発見⁶⁾につながった。一方、浅部 VLF は南海トラフだけでなく南西諸島海溝付近⁴⁶⁾、十勝沖⁴⁷⁾や日本海溝付近⁴⁸⁾でも検出された。浅部 VLF の発震機構解についてはプレート境界面よりはやや高角に傾斜した逆断層のメカニズムが推定され、付加体内の分歧断層との関連が指摘された⁴⁹⁾。

以上は陸域の広帯地震観測網のデータを用いた解析であったが、最近 10 年間で海域の臨時・定常観測に基づく研究成果が次々と発表されてきた。紀伊半島南東沖に展開された機動的広帯域地震観測網によって浅部 VLF が検出され、ほぼ水平の断層面を有する発震機構解が得られた⁵⁰⁾。このことは、浅部 VLF がデコルマ面やプレート境界面でのすべりであることを示唆する。その後、紀伊半島南東沖や紀伊水道沖に展開されたケーブル式海底地震計観測網 DONET-1,2 を用いて浅部 VLF の検出がなされている⁵¹⁾。DONET を用いた重要な成果のひとつは、1~10 秒帯域におけるスロー地震現象の発見である⁵²⁾。この帯域は微動と VLF の間で脈動が卓越しているため現象の検出が困難であったが、2016 年紀伊半島南東沖の地震後に同海域における微動や VLF が活発化し、それらをもとにスタッキングした結果、検出が可能となった。

一方、解析手法の進展により、陸域の広帯域データを用いて VLF 活動の詳細な描像が明らかになってきた。南海トラフ付近では 3 次元グリーン関数を用いた CMT 解析により、海底地震計による結果と同様の低い傾斜角を有する発震機構解が得られ⁵³⁾、さらに CMT 解析を利用した長期間カタログによる VLF 活動度の時空間変化が明らかになった⁵⁴⁾。東北沖ではプレート境界面における逆断層すべりを仮定して計算された理論波形をテンプレートにしたマッチドフィルター法により浅部 VLF が網羅的に検出され、東北沖地震の大すべり域とその周辺の余効すべり域とでは、東北沖地震前後の時系列変化が逆になることが見い出された⁵⁵⁾。

十勝沖で検出された浅部 VLF は、2003 年の十勝沖地震の直後に活発化し、その後次第に活動が低下していった⁴⁷⁾が、その VLF 地震活動積算個数変化は十勝沖地震の余効すべりによって生じた地殻変動パターンと非常によく似ており、浅部 VLF がプレート間すべりを反映していることが示唆される。

浅部 VLF は、深部スロー地震と同様に他の現象によって誘発されることがある。例えば、2003 年十勝沖地震

によって日向灘で、また 2004 年紀伊半島南東沖地震によって同地域の VLF が活発化した⁴⁷⁾。また、南西諸島の VLF は干潮時に活動が最大になるという潮汐応答を示し、その応答の程度は地域依存性や季節依存性を有する⁵⁶⁾。

2.2 浅部微動

紀伊半島南東沖の機動的な海底地震観測により、海底下での低周波微動が 2009 年に初めて観測された⁵⁷⁾。また日向灘の浅部 VLF 活動域でも機動的な海底地震観測によって 1 か月程度継続する活発な低周波微動が捉えられた⁵⁸⁾。この微動活動は陸域観測網で捉えられた浅部 VLF と震央位置及び時系列変化がほぼ一致し、浅部微動と浅部 VLF が一体的に発生することを示す初めての結果である。また、震源直上で精度の良い微動分布が得られ、速度約 20 km/day と約 200 km/hour の 2 種類の微動移動モードが存在することがわかった。後者の高速移動は前者の低速移動に対して逆向きであり、深部微動における RTR とよく似ている。以上の観測事実から、浅部でも深部同様の ETS 活動が発生し、サイスミックなスロー地震現象の背後で浅部 SSE が起きていることが予想された。

一方、東北地方太平洋沖には、2011 年東北沖地震発生前から海底地震計が設置されており、その解析から浅部微動の発生が指摘された⁵⁹⁾。その後防災科研によってケーブル式海底地震・津波観測網 S-net が構築され、日本海溝付近における低周波微動が発見された^{60),61)}。この低周波微動は浅部 VLF とほぼ同期して発生し、また明瞭な移動現象を伴うことから、深部の微動活動と非常によく似た特徴を有している。

2.3 浅部 SSE

南西諸島では、その南西部に位置する西表島付近にて、継続期間約 1 カ月、Mw6.7 程度の SSE が約半年周期で繰り返し発生している⁶²⁾。さらに継続期間が数日程度で Mw6.4 程度の短期 SSE が沖縄島付近などでも検出されている⁶³⁾。これらの SSE の多くは深部スロー地震に分類されると考えられるが、一部は海溝付近に推定されており、また浅部 VLF 等との相互作用も見られるため、海溝軸付近の浅部スロー地震としての活動を含んでいる可能性がある。

一方、紀伊半島南東沖に設置された間隙水圧計によって、浅部 VLF や微動に同期した圧力変化が観測され、トラフ付近の逆断層面で発生した浅部 SSE であることが明らかにされた⁶⁴⁾。海底の間隙水圧変化と浅部 VLF との関係については室戸沖で既に報告されている⁶⁵⁾が、浅部 SSE と認識されたのはこれが初めてである。しかもその圧力変化パターンが、それに同期して発生した浅部 VLF の積算モーメントの時系列変化と非常に良く一

致し、両者が同一断層面における共通のすべり過程で生成することを示すとともに、浅部でも深部同様の ETS が起きている証拠を示した重要な結果である⁵¹⁾。

近年、海上保安庁の音響 GNSS 観測点が南海トラフに沿って広く多点展開されるようになった結果、海域におけるプレート間カップリングの空間分布が明らかにされた⁶⁶⁾。また、紀伊水道沖では複数の観測点で 2018 年から約 2 年程度ゆっくりと変化する海底変位が捉えられ、南海トラフにほぼ接するような断層面が推定されたとともに、これと同様の長期的な SSE は 2009 年にもほぼ同じ場所で観測されている⁶⁷⁾。これらの長期的 SSE に同期して、浅部 VLF が移動を伴って活発化したという報告もある⁶⁸⁾。

東北地方太平洋沖では、東北沖地震発生前から設置されていた海底圧力計にて、2008 年および 2011 年の東北地震発生前に浅部 SSE が捉えられていた⁶⁹⁾。また、東北沖地震発生の 1 か月前と 2 日前にそれぞれ前震活動が起これ、陸域の高感度地震観測網のデータ解析から、いずれの前震活動も東北沖地震本震破壊開始点に向かって移動していたこと、およびこれらの活動の中には小繰り返し地震が含まれていたことが明らかになった⁷⁰⁾。このことは、東北沖地震発生直前に SSE が 2 回発生し、いずれも本震破壊開始点に向かって移動したことで破壊開始点付近に応力を载荷させ、その結果として東北沖地震が発生した可能性を示唆する。

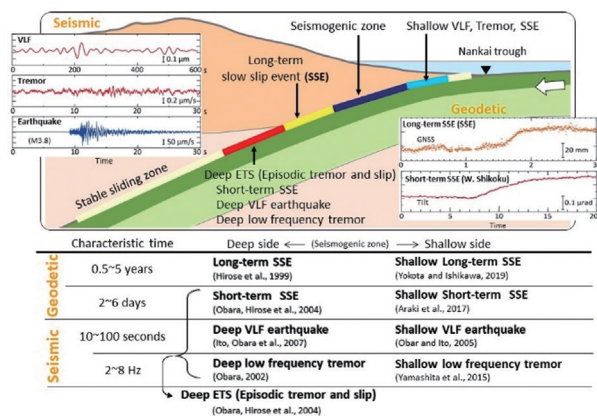


図 1 南海トラフ沈み込み帯におけるスロー地震の模式的断面図と分類表

参考文献

- 1) Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki, 1999. A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, 26, 3237-3240.
- 2) Obata, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296,

- 1679-168.
- 3) 小原一成, 2009. 13. 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, 27-33.
 - 4) Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, & A. Yamamoto, 2004. Recent progress of seismic observation networks in Japan—Hi-net, F-net, K-net and KiK-net. *Earth, Planets and Space*, 56(8), 15-18, <https://doi.org/10.1186/BF03353076>
 - 5) Obara, K., 2010. Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatiotemporal characteristics and segmentation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B00A25, <https://doi.org/10.1029/2008JB006048>.
 - 6) Ito, Y., K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine, & H. Hirose, 2007. Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events, *Science*, 315, 503-506.
 - 7) Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, & T. Matsuzawa, 2010. Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan, *Geophysical Research Letters*, GL43679.
 - 8) Obara, K., T. Matsuzawa, S. Tanaka, & T. Maeda, 2012. Depth-dependent mode of tremor migration beneath Kii Peninsula, Nankai subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 39, L10308, <https://doi.org/10.1029/2012GL051420>
 - 9) Shelly, D.R., G.C. Beroza, & S. Ide, 2007a. Complex evolution of transient slip derived from precise tremor locations in western Shikoku, Japan, *Geochim. Geophys. Geosyst.* 8, Q10014, <https://doi.org/10.1029/2007GC001640>.
 - 10) Miyazawa, M., & J. Mori, 2006. Evidence suggesting fluid flow beneath Japan due to periodic seismic triggering from the 2004 Sumatra - Andaman earthquake, *Geophysical Research Letters*, 33, L05303, <https://doi.org/10.1029/2005GL025087>.
 - 11) Nakata, R., N. Suda, & H. Tsuruoka, 2007. Non-volcanic tremor resulting from the combined effect of Earth tides and slow slip events, *Nature Geoscience*, 1, 676—678.
 - 12) Shelly, D., G. Beroza, & S. Ide, 2007b. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature* 446, 305–307, <https://doi.org/10.1038/nature05666>.
 - 13) Ide, S., 2010. Striations, duration, migration and tidal response in deep tremor, *Nature*, 466, 356–360, <https://doi.org/10.1038/nature09251>.
 - 14) Katsumata, A. & N. Kamaya, 2003. Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, 30, <https://doi.org/10.1029/2002GL015981>.
 - 15) 気象庁, 2018. 南海トラフ周辺の地殻活動 (2017 年 11 月～2018 年 4 月), 地震予知連絡会報, 100, 219-239, https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou100/08_05.pdf.
 - 16) Annoura, S., K. Obara, & T. Maeda, 2016. Total energy of deep low-frequency tremor in Nankai subduction zone, southwest Japan, *Geophysical Research Letters*, 43, 2562–2567, <https://doi.org/10.1002/2016GL067780>.
 - 17) Kano, M., A. Kato, R. Ando, & K. Obara, 2018. Strength of tremor patches along deep transition zone of a megathrust. *Scientific Reports*, 8, 3655, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22048-8>.
 - 18) Ito, Y., K. Obara, T. Matsuzawa, & T. Maeda, 2009. Very low frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B00A13, <https://doi.org/10.1029/2008JB006036>.
 - 19) Ide, S., & S. Yabe, 2014. Universality of slow earthquakes in the very low frequency band, *Geophysical Research Letters*, 41, 8, 2786-2793, <https://doi.org/10.1002/2014GL059712>.
 - 20) Baba, S., A. Takeo, K. Obara, A. Kato, T. Maeda & T. Matsuzawa, 2018. Temporal Activity Modulation of Deep Very Low Frequency Earthquakes in Shikoku, Southwest Japan, *Geophysical Research Letters*, 45, 2, 733-738, <https://doi.org/10.1002/2017GL076122>.
 - 21) Dragert, H., K. Wang, & T. S. James, 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface, *Science*, 292, 1525–1528, <https://doi.org/10.1126/science.1060152>.
 - 22) Rogers, G., & H. Dragert, 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, *Science*, 300, 1942–1943, <https://doi.org/10.1126/science.1084783>.
 - 23) Obara, K., K. Kasahara, S. Hori, & Y. Okada, 2005. A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, *Rev. Sci. Instrum.*, 76, 021301, <https://doi.org/10.1063/1.1854197>.

- 24) Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, & K. Kasahara, 2004. Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 31 (23), L23602, <https://doi.org/10.1029/2004GL020848>.
- 25) Nishimura, T., T. Matsuzawa, & K. Obara, 2013. Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 6, (3112-3125), <https://doi.org/10.1002/jgrb.50222>.
- 26) Hirose, H., & K. Obara, 2010. Recurrence behavior of short-term slow slip and correlated nonvolcanic tremor episodes in western Shikoku, southwest Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B00A21, <https://doi.org/10.1029/2008JB006050>.
- 27) Obara, K., & S. Sekine, 2009. Characteristic activity and migration of episodic tremor and slow-slip events in central Japan, *Earth, Planets and Space* 61, 853-862.
- 28) Obara, K., T. Matsuzawa, S. Tanaka, T. Kimura, and T. Maeda, 2011. Migration properties of non-volcanic tremor in Shikoku, *Geophysical Research Letters*, 38, L09311, <https://doi.org/10.1029/2011GL047110>.
- 29) Kano, M., A. Kato, & K. Obara, 2019. Episodic tremor and slip silently invades strongly locked megathrust in the Nankai Trough, *Scientific Reports*, 9, 9270, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45781-0>.
- 30) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, Y. Hatanaka, H. Yurai, & T. Nishimura, 2002. Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, Central Japan, *Science*, 298, 1009-1012, <https://doi.org/10.1126/science.1076780>.
- 31) Kobayashi, A. 2014. A long-term slow slip event from 1996 to 1997 in the Kii Channel, Japan, *Earth, Planets and Space*, 66, 9, <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-9>.
- 32) Kobayashi, A., 2017. Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough using GNSS data (1996–2016), *Earth, Planets and Space*, 69 (1), 171, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0755-7>.
- 33) Takagi, R., K. Obara, & T. Maeda, 2016. Slow slip event within a gap between tremor and locked zones in the Nankai subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 43, 1066–1074, <https://doi.org/10.1002/2015GL066987>.
- 34) Ozawa, S., 2017. Long - term slow slip events along the Nankai trough subduction zone after the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Earth, Planets and Space*, 69(1), 56, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0640-4>.
- 35) Takagi, R., N. Uchida, & K. Obara, 2019. Along - strike variation and migration of long - term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 3853–3880, <https://doi.org/10.1029/2018JB016738>.
- 36) Yurai, H., & S. Ozawa, 2013. Quasi - periodic slow slip events in the afterslip area of the 1996 Hyuga - nada earthquakes, Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 2512–2527, <https://doi.org/10.1002/jgrb.50161>.
- 37) Yamamoto, E., S. Matsumura, & T. Ohkubo, 2005. A slow slip event in the Tokai area detected by tilt and seismic observation and its possible recurrence, *Earth, Planets and Space*, 57, 917–923, <https://doi.org/10.1186/BF03351871>.
- 38) Ozawa, S., M. Tobita, & H. Yurai, 2016. A possible restart of an interplate slow slip adjacent to the Tokai seismic gap in Japan, *Earth, Planets and Space*, 68, 54, doi:10.1186/s40623-016-0430-4.
- 39) Hirose, H., Y. Asano, K. Obara, T. Kimura, T. Matsuzawa, S. Tanaka, & T. Maeda, 2010. Slow earthquakes linked along dip in the Nankai subduction zone, *Science*, 330, 1502.
- 40) Hirose, H., H. Kimura, B. Enescu, & S. Aoi, 2012. Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc. National Academy Sciences USA*, 109, 38, 15157–15161, <https://doi.org/10.1073/pnas.1202709109>.
- 41) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2018. 2018 年 6 月の地震活動の評価, https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2018/2018_06.pdf.
- 42) Kato A, T. Igarashi, & K. Obara, 2014. Detection of a hidden Boso slow slip event immediately after the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Geophysical Research Letters*, 41, 5868–5874, <https://doi.org/10.1002/2014GL061053>.
- 43) Fukuda, J., 2018. Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 732–760,

- <https://doi.org/10.1002/2017JB014709>.
- 44) Ishihara, Y., 2003. Major existence of very low frequency earthquakes in background seismicity along subduction zone of south-western Japan, *Eos Trans. AGU*, 84(46), Fall Meet. Supl. Abstract, S41C-0107.
 - 45) Obara, K. & Y. Ito, 2005. Very low frequency earthquake excited by the 2004 off the Kii peninsula earthquake: A dynamic deformation process in the large accretionary prism, *Earth, Planets and Space*, 57, 321-326.
 - 46) Ando, M., Y. Tu, H. Kumagai, Y. Yamashita, & C. H. Lin, 2012. Very low-frequency earthquakes along the Ryukyu subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 39, L04303, <https://doi.org/10.1029/2011GL050559>.
 - 47) Asano, Y., K. Obara, & 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 and Space*, 60, 871-875.
 - 48) Matsuzawa, T., Y. Asano, & K. Obara, 2015. Very low frequency earthquakes off the Pacific coast of Tohoku, Japan, *Geophysical Research Letters*, 42, 4318-4325, <https://doi.org/10.1002/2015GL063959>.
 - 49) Ito, Y., K. & Obara, 2006. Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 33, L02311, <https://doi.org/10.1029/2005GL025270>.
 - 50) Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara & Y. Fukao, 2012. Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, *Nature Geoscience*, 5(6), 414-418, <https://doi.org/10.1038/ngeo1466>.
 - 51) Nakano, M., T. Hori, E. Araki, S. Kodaira, & S. Ide, 2018. Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone, *Nature Communications*, 9(1), 984, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03431-5>.
 - 52) Kaneko, L., S. Ide, & M. Nakano, 2018. Slow earthquakes in the microseism frequency band (0.1-1.0 Hz) off Kii Peninsula, Japan, *Geophysical Research Letters*, 45, 2618-2624, <https://doi.org/10.1002/2017GL076773>.
 - 53) Takemura, S., T. Matsuzawa, T. Kimura, T. Tonegawa, & K. Shiomi, 2018. Centroid moment tensor inversion of shallow very low-frequency earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, using a three-dimensional velocity structure model, *Geophysical Research Letters*, 45, 6450-6458, <https://doi.org/10.1029/2018GL078455>.
 - 54) Takemura, S., T. Matsuzawa, A. Noda, T. Tonegawa, Y. Asano, T. Kimura, & K. Shiomi, 2019. Structural characteristics of the Nankai Trough shallow plate boundary inferred from shallow very low frequency earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 46(8), 4192-4201, <https://doi.org/10.1029/2019GL082448>.
 - 55) Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, & T. Maeda, 2019. Comprehensive detection of very low frequency earthquakes off the Hokkaido and Tohoku Pacific coasts, northeastern Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, <https://doi.org/10.1002/2019JB017988>.
 - 56) Nakamura, M., & K. Kakazu, 2017. Tidal sensitivity of shallow very low frequency earthquakes in the Ryukyu trench, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 1221-1238, <https://doi.org/10.1002/2016JB013348>.
 - 57) Obana, K., & S. Kodaira, 2009. Low-frequency tremors associated with reverse faults in a shallow accretionary prism, *Earth and Planetary Science Letters*, 287(1-2), 168-174, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.08.005>.
 - 58) Yamashita, Y., H. Yakiwara, Y. Asano, H. Shimizu, K. Uchida, S. Hirano, K. Umakoshi, H. Miyamachi, M. Nakamoto, M. Fukui, M. Kamizono, H. Kanehara, T. Yamada, M. Shinohara, & K. Obara, 2015. Migrating tremor off southern Kyushu as evidence for slow slip of a shallow subduction interface, *Science*, 348(6235), 676-679, <https://doi.org/10.1126/science.aaa4242>.
 - 59) Ito, Y., R. Hino, S. Suzuki, & Y. Kaneda, 2015. Episodic tremor and slip near the Japan Trench prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, 42, 1725-1731.
 - 60) Tanaka, S., T. Matsuzawa, & Y. Asano, 2019. Shallow low frequency tremor in the Northern Japan Trench subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 46, 5217-5224, <https://doi.org/10.1029/2019GL082817>.
 - 61) Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, & S. Ide, 2019. The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, *Science*, 365, 808-813, <https://doi.org/10.1126/science.aax5618>.

- 62) Heki, K., & T. Kataoka, 2008. On the biannually repeating slow slip events at the Ryukyu trench, southwestern Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113, B11402, <https://doi.org/10.1029/2008JB005739>.
- 63) Nishimura, T., 2014. Short-term slow slip events along the Ryukyu trench, southwestern Japan, observed by continuous GNSS, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1), 22, <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0022-5>.
- 64) Araki, E., D. M. Saffer, A. J. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, & IODP Expedition 365 shipboard scientists, 2017. Recurring and triggered slow - slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust, *Science*, 356(6343), 1157-1160, <https://doi.org/10.1126/science.aan3120>.
- 65) Davis, E.E., K. Becker, K. Wang, K. Obara, Y. Ito, & M. Kinoshita, 2006. A discrete episode of seismic and aseismic deformation of the Nankai subduction zone accretionary prism and incoming Philippine Sea plate, *Earth and Planetary Science Letters*, 242, 73-84.
- 66) Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, & A. Asada, 2016. Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, 534(7607), 374– 377, <https://doi.org/10.1038/nature17632>.
- 67) Yokota, Y., & T. Ishikawa. 2020. Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A, *Science Advances*, 6, eaay5786, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay5786>.
- 68) Takemura, S., A. Noda, T. Kubota, Y. Asano, T. Matsuzawa, & K. Shiomi, 2019b. Migrations and Clusters of Shallow Very Low Frequency Earthquakes in the Regions Surrounding Shear Stress Accumulation Peaks Along the Nankai Trough, *Geophysical Research Letters*, 46, 21, 11830-11840, <https://doi.org/10.1029/2019GL084666>.
- 69) Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, & D. Inazu, 2013. Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, 14-26, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.022>.
- 70) Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, & N. Hirata, 2012. Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 335(6069), 705–708, <https://doi.org/10.1126/science.1215141>.