

### 3. 南海トラフ地域のスロー地震

#### (1) 国土地理院による観測

国土地理院

##### 1. はじめに

国土地理院では、GNSS連続観測点網(GEONET)の観測結果を用い、全国の地殻変動のモニタリングを行っている。南海トラフ沿いについては、プレート境界の固着・すべりのモニタリングを行い、その結果を地震予知連絡会や南海トラフ評価検討会等に報告している。

南海トラフ地域では、フィリピン海プレートと陸側プレートの境界面において長期的スロー地震(SSE)が複数の地域で繰り返し発生している(図1)ことが、GNSS観測により検出されてきた。また、長期的SSEの深部延長で、低周波地震(微動)に伴い、短期的SSEが発生している<sup>1)-2)</sup>。これまでGNSS観測では検出困難とされてきたが、最近、いくつかの手法が試みられている。

ここでは、この10年間で観測された南海トラフ沿いでの長期的SSEについて紹介するとともに、GNSS観測結果に基づく短期的SSE検出技術の進展について紹介する。

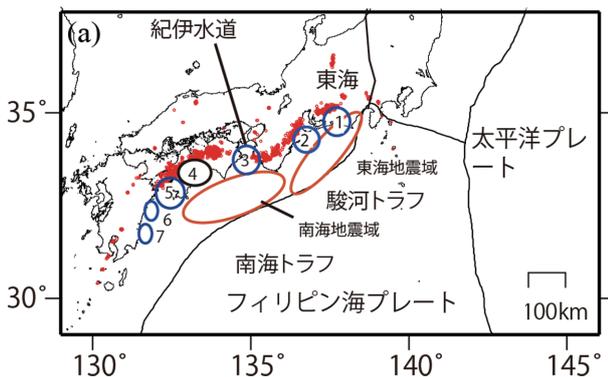


図1 日本地域のテクトニクス図。赤点は、気象庁一元化震源による低周波地震(微動)。1: 東海 SSE, 2: 志摩半島 SSE, 3: 紀伊水道 SSE, 4: 四国西部 SSE, 5: 豊後水道 SSE, 6: 日向灘北部 SSE, 7: 日向灘南部 SSE。赤線で囲まれた領域は、想定される東海及び南海地震の震源域を示す。

##### 2. GNSSデータによる長期的SSE解析

地殻変動のモニタリングにおいて非定常的な地殻変動が検出された際には、その地殻変動がプレート境界面上でのすべりに起因すると考えられる場合に、非定常地殻変動成分からプレート境界面上のすべりの推定を行っている。すべりの推定にあたっては、定常成分及び年周等の周期成分を除去して得られた非定常地殻変動成分の時系列データに対し時間依存インバージョンを適用し、プレート間のすべり分布及びその時間変化の推定を行っている。

南海トラフ沿いにおいては、2009年からの10年間に、東海、紀伊水道、豊後水道、日向灘の各地域で長期的SSEを検出している。本節では、これらの事例について紹介する。

##### 2.1 東海SSE

東海地方では、2000年秋から2005年夏頃にかけて長期的SSEが発生したことが知られている<sup>3)-5)</sup>。その際に観測された非定常的な地殻変動を図2に示す。この長期的SSEの終息以降は、非定常的な地殻変動は観測されていなかったが、2011年3月の東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、この地域にも地震後の余効変動の影響が及び、モニタリングに影響を与えている。そのような中、2013年頃から、東北地方太平洋沖地震の余効変動とは異なる非定常的な地殻変動が観測され、東海SSEが再び発生した可能性が指摘された<sup>6)</sup>。図3に2011年以降の地殻変動時系列をいくつかの観測点に対して示している。

フィリピン海プレート境界面上のすべりを把握するためには、非定常的な地殻変動に重畳している余効変動を考慮する必要がある。ここでは便宜的に余効変動を太平洋プレート境界面でのすべりに起因すると仮定し、フィリピン海プレート境界面に加え、東北地方を含む広域で太平洋プレート境界面でのすべりも同時に推定することで、余効変動の影響の軽減を図ることとした。図3の上段は定常変動と周期成分を差し引いた地殻変動時系列を、下段は余効変動をプレート境界のすべりによるものとしてモデル化し、地殻変動データから差し引いた時系列図を示している。図3の下段に示されるように、南東方向の遷移的な変動が見える。東北地方太平洋沖地震の余効変動を除去した地殻変動の空間分布を図4に示す。浜名湖の西側で南東方向、東側で東南東方向の変動が見られる。この変動は、2000-2005年の地殻変動(図2)と非常によく似ており、東海地域での長期的SSEの発生を示唆する。図5に、図4の非定常地殻変動から推定したプレート境界面上のすべりの推定結果を示す。

すべりの中心は浜名湖付近に推定された。推定されたモーメントマグニチュード( $M_w$ )は、6.6程度となっている。前回のSSEのすべり分布(灰色のコンター)と比較すると、すべりの中心がやや南側に位置している。2013年頃に始まった東海SSEは2017年頃には収束したと考えられる。

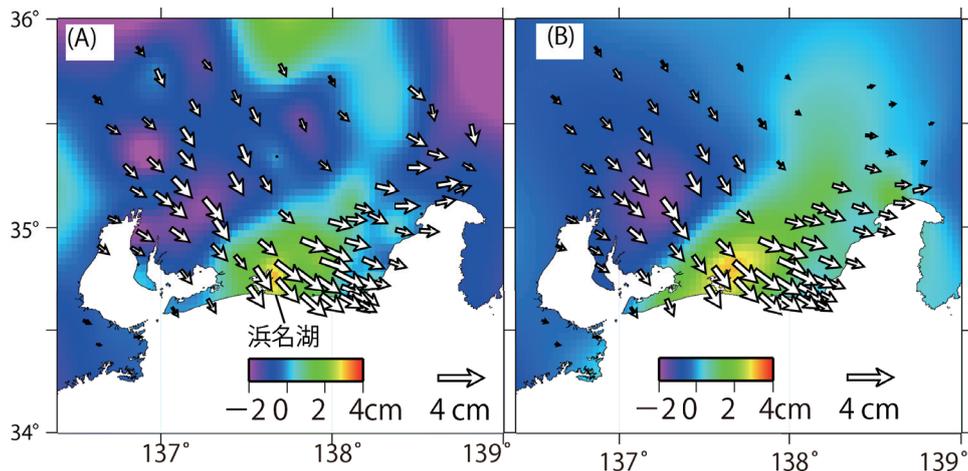


図 2 2000～2008 年の非定常地殻変動。定常期間は、2008 年 1 月から 2011 年 1 月で推定している。白矢印が水平変動，カラーが上下変動を示す。(A) 観測値。(B) 時間依存インバージョンによる計算値。

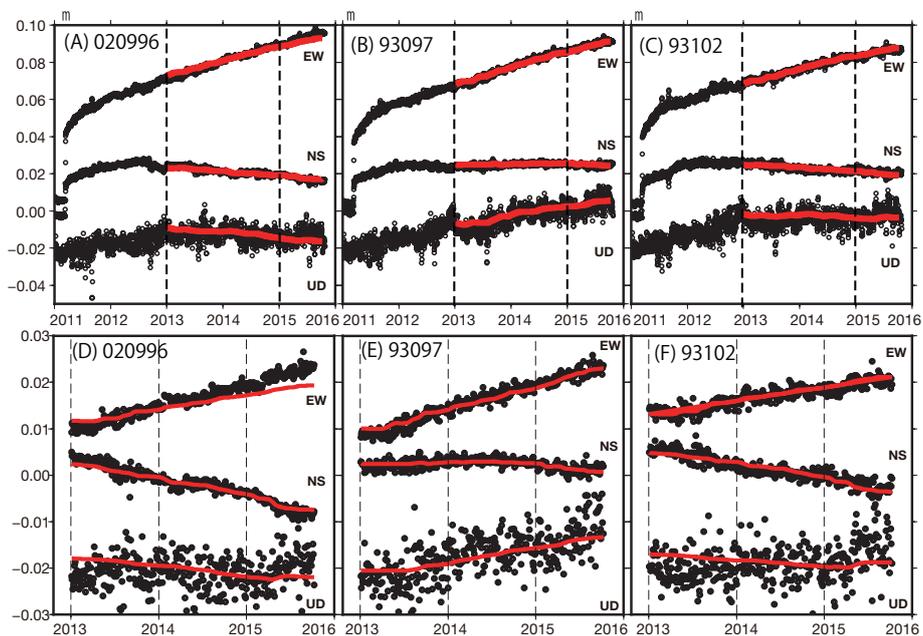


図 3 (A)-(C) 定常変動と周期成分を差し引いた地殻変動。定常変動は 2008 年 1 月から 2011 年 1 月，周期成分は 2012 年 1 月から 2015 年 10 月の観測結果から推定している。黒が観測値，赤は推定されたフィリピン海プレート上面のすべりから計算された値。観測点の位置は図 4 に示されている。  
(D)-(F) 東北地方太平洋沖地震の余効変動を太平洋プレート上面のすべりによるものとしてモデル化し上段の図から差し引いたもの。

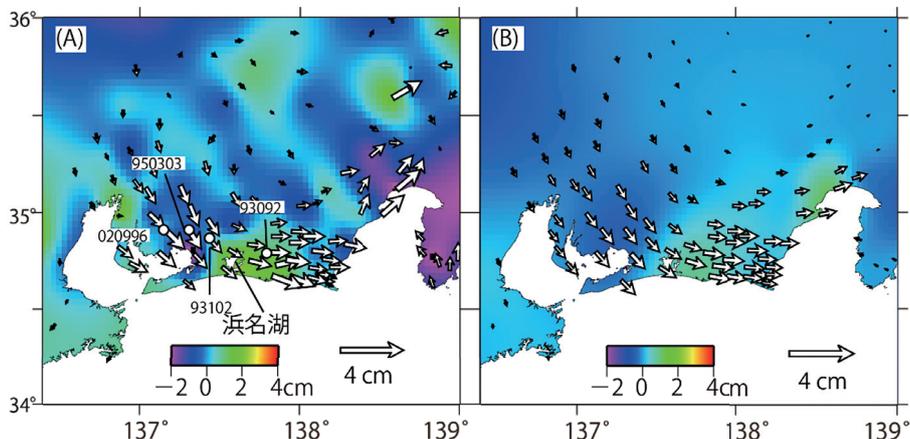


図 4 東北地方太平洋沖地震の影響を取り除いた地殻変動。白矢印が水平変動，カラーが上下変動。(A) 観測値。(B) 計算値。

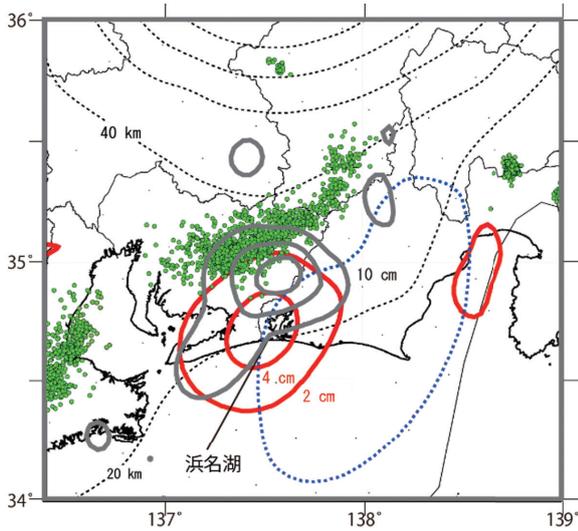


図5 推定されたプレート間すべり. 赤は2013年1月-2015年10月の推定すべり. 浜名湖付近にすべりが見られる. 灰色は2000-2005年のSSE. 青破線は東海地震の想定震源域. 緑丸は, 気象庁一元化震源による低周波地震(微動)の震央. 黒破線はプレート境界の等深線.

## 2.2 紀伊水道 SSE

2014年頃から2016年8月頃にかけて, 四国東部と紀伊半島で南東〜東南東方向の非定常地殻変動が観測された(7). この非定常的な地殻変動に基づき, 時間依存インバージョンによりプレート境界面上のすべりを推定したところ, 紀伊水道を中心としたすべりが推定された(図7). イベント全体での Mw は 6.5 程度と推定された.

紀伊水道では, 1996-1997年, 2000-2002年にも長期的 SSE が発生していたことが報告されている<sup>8-9)</sup>. 今回のイベントでもほぼ同じ領域ですべりが生じており, 紀伊水道は, 東海地域や豊後水道などと同様に長期的 SSE が繰り返し発生する領域と考えられる.

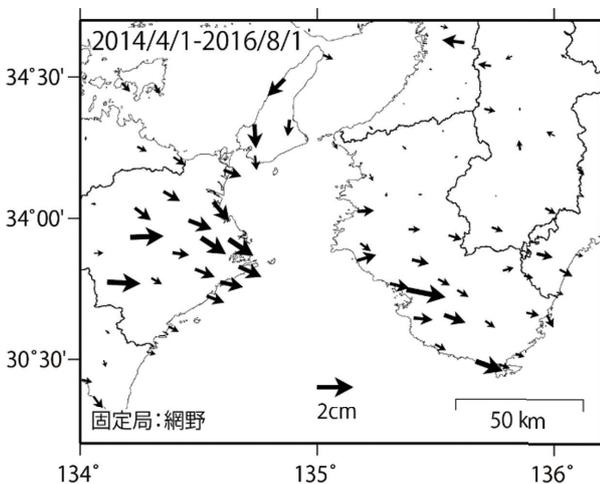


図6 紀伊水道周辺の非定常地殻変動. 定常期間は2017年〜2018年で推定している.

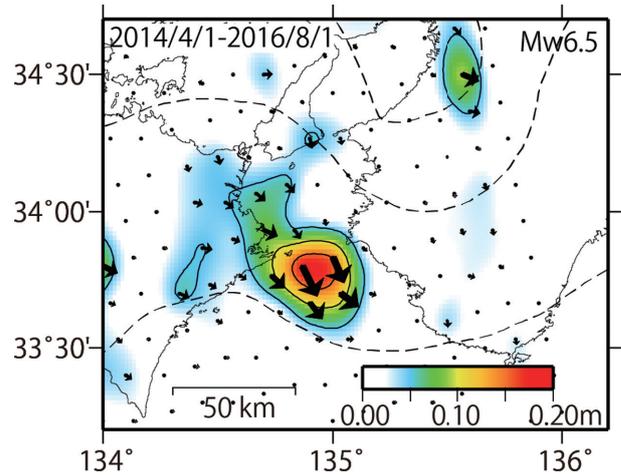


図7 推定すべり分布. カラーと矢印が推定されたプレート間すべりを示す.

## 2.3 豊後水道 SSE

豊後水道では, 1996-1998年, 2003-2005年, 2009-2011年, 2018-2019年の4回, 長期的 SSE が発生している<sup>10-14)</sup>. これら4回の SSE の際の水平及び上下の非定常地殻変動を, それぞれ図8及び図9に示す. 定常期間の設定は, 2018-19年のイベントについては2017年1月〜2018年1月を, それ以外については2006年3月〜2009年4月の変動を定常期間としている. 豊後水道周辺で南東向きの3cmに達する地殻変動が4回の SSE で観測されている.

また, 四国西南部の豊後水道周辺では隆起となっている. この地殻変動に基づき推定された豊後水道域のプレート境界すべりを図10に示す. 豊後水道でのプレート間すべりが推定されている.

図11は, 2018-2019年に発生したプレート境界すべりの時空間変化を示す. この図に示されるように, 日向灘北部で2018年6月頃に長期的 SSE が発生し, 10月頃に減衰し, その後豊後水道及びその周辺でプレート間すべりが発生している. このすべり過程は, 最大すべり速度時に四国側から九州側へとすべり域が移動していた過去の豊後水道 SSE<sup>13)</sup> と異なっており, 熊本地震による応力変化の擾乱が影響している可能性がある.

なお, 豊後水道では, 上記の規模の大きな長期的 SSE 以外にも, 2014年及び2015年に小規模な長期的 SSE が発生している<sup>15,16)</sup>. 過去には2006年に小規模な長期的 SSE が発生しており<sup>17)</sup>, 6〜7年周期の大規模な長期的 SSE の間に小規模な長期的 SSE も発生する領域といえる.

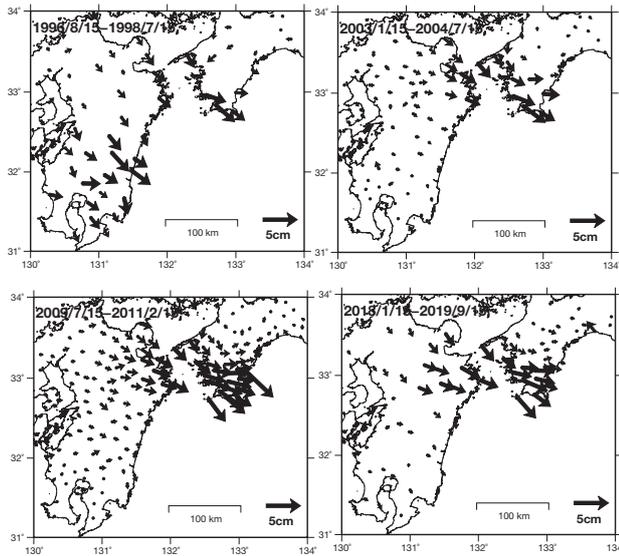


図 8 遷移的な地殻水平変動

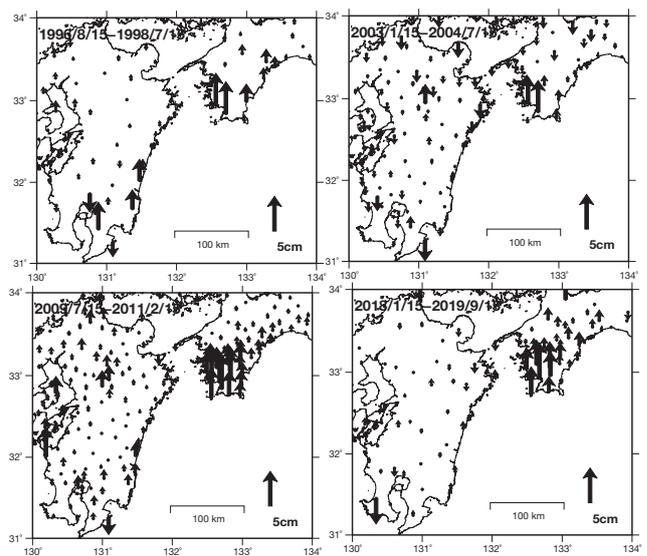


図 9 遷移的な地殻上下変動

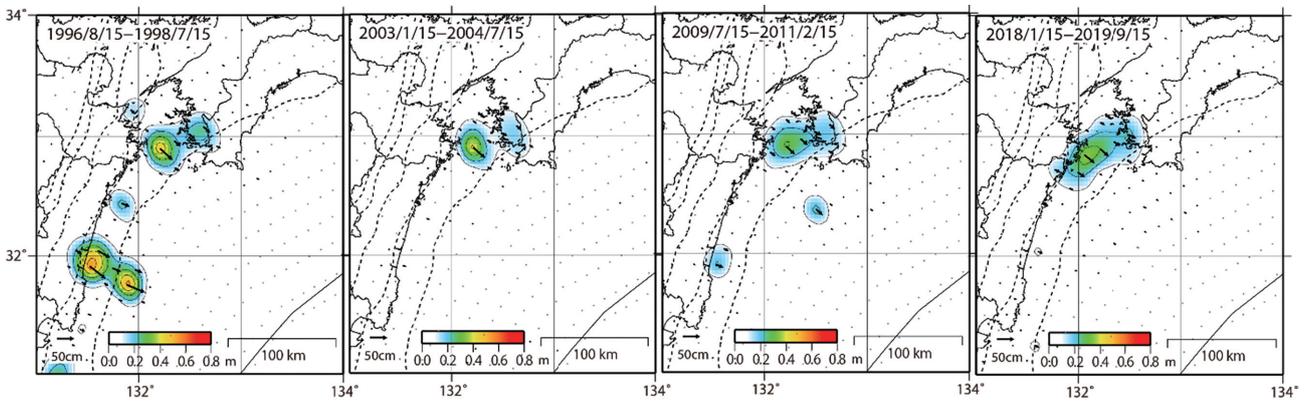


図 10 豊後水道の推定すべり分布. 1996-1998 年の日向灘域のプレート間すべりは、主に 1996 年の日向灘地震のアフタースリップを示している。

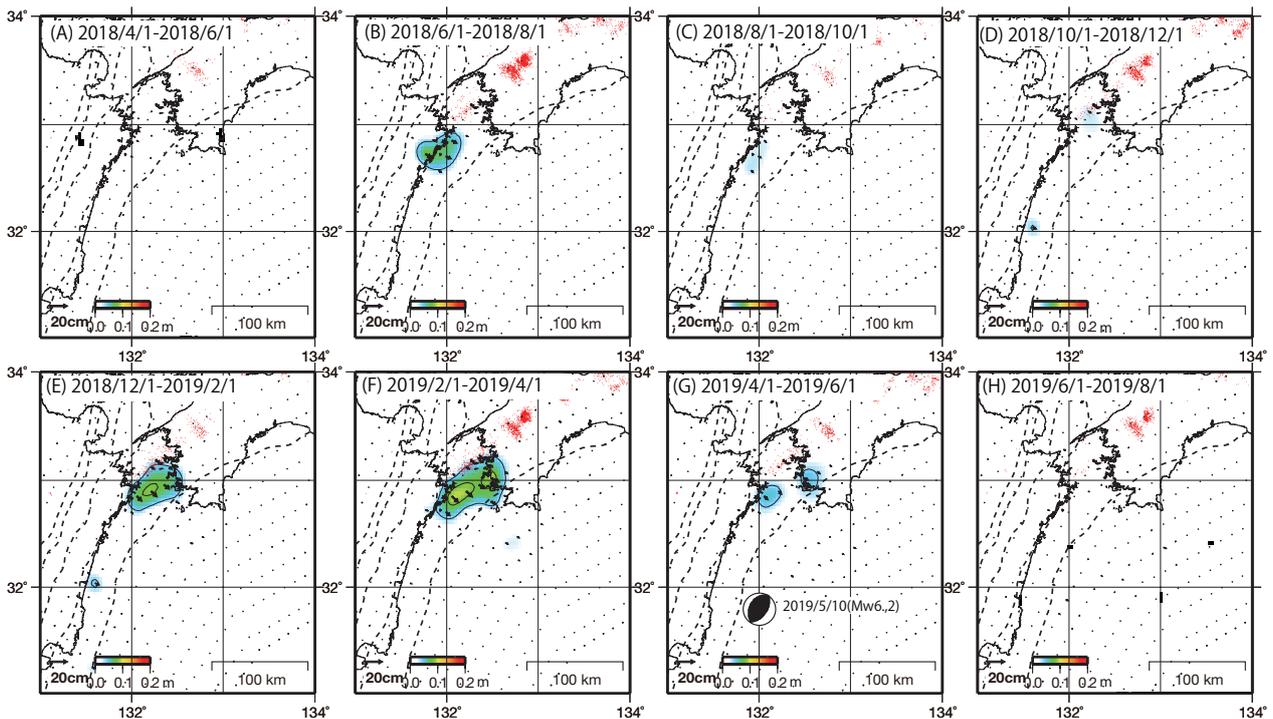


図 11 2018-2019 年の SSE の推定すべり分布. 赤点は、気象庁一元化震源による低周波地震（微動）。

### 2.4 日向灘 SSE

日向灘では、長期的 SSE が繰り返し発生している<sup>18)-19)</sup>。図 13 に、図 12 に示した日向灘周辺の各観測点の非定常地殻変動時系列を示す。図 13 に示されるように、定常成分と周期成分を除いた時系列データに遷移的な変動が見て取れる。特に 021088, 950483 観測点での南北成分には、2004 年頃から 2 年程の間隔で遷移変動が検出されている。

図 14 に日向灘におけるプレート境界すべりを時間依存のインバージョンで推定した結果を示す。1996 年の日向灘地震の余効すべりが推定されており、その減衰の後に 2004 年頃から日向灘南部で 2 年程の間隔をあけて、1 年程の期間をかけて SSE が発生している様子が推定されている。

図 15 に 2013 年以降の九州域での定常成分と周期成分を除いた非定常地殻変動時系列を示す。

図 15 に示されるように遷移的な変動が見て取れる。この非定常変動データを元に推定された 2013 年以降のプレート境界すべりを図 16 に示す。

図 16 に示されるように、2013 年に日向灘南部、北部で SSE が同時に発生し、2014 年に豊後水道で規模の小さな SSE が発生している。2015 年には日向灘南部で

SSE が発生して、2016 年の熊本地震前には、日向灘南部、北部、四国南西端で長期的 SSE が発生していた様子が推定されている<sup>19)</sup>。

また、GNSS データの解析により、日向灘北部の SSE は、平均して 5~6 年程の間隔で繰り返し発生しているとの報告がされている<sup>20)</sup>。

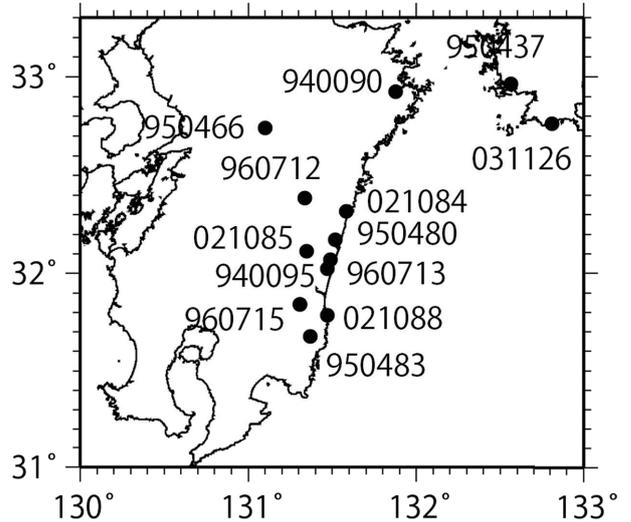


図 12 図 13 に時系列を示す GNSS 観測点の位置図

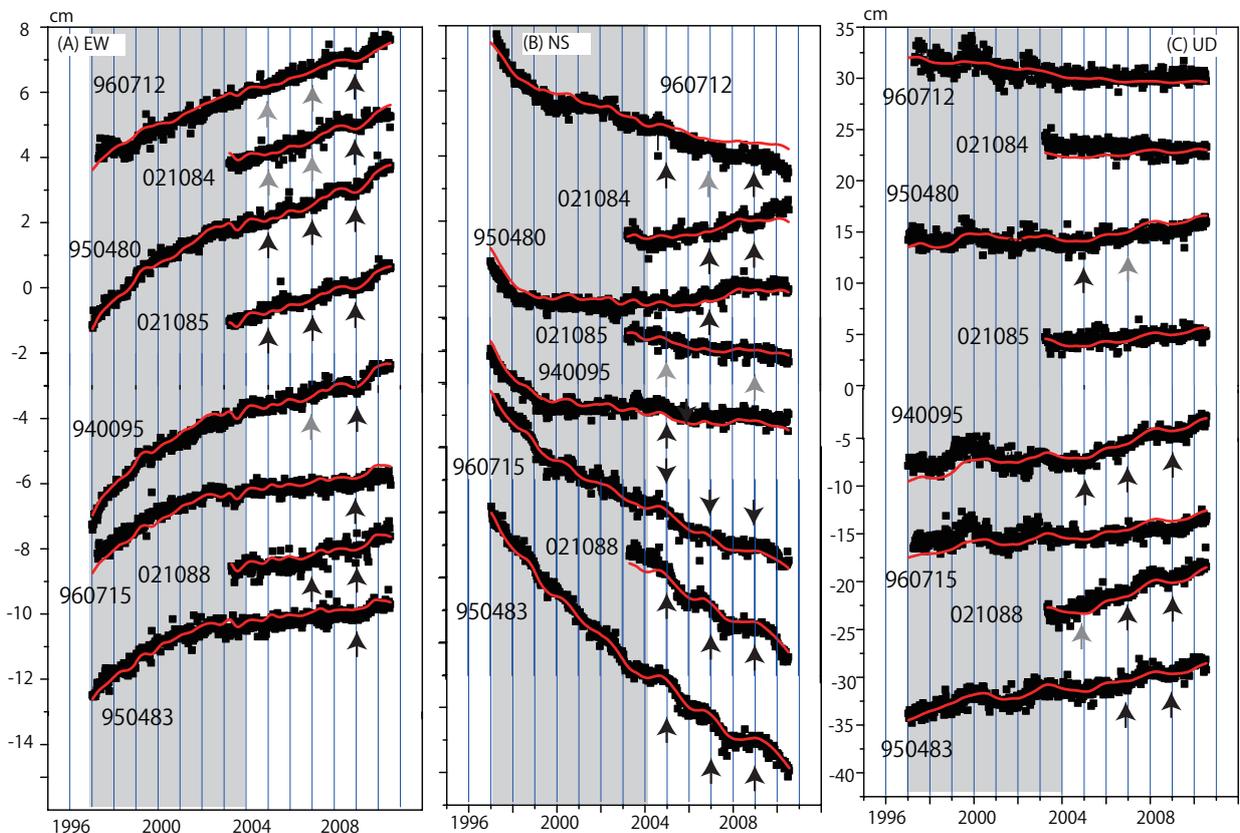


図 13 非定常地殻変動時系列。黒が観測、赤が計算。周期成分は 1997 年 1 月~2010 年 7 月までで推定した。一次トレンドは、2007 年 1 月から 2009 年 3 月までで推定している。

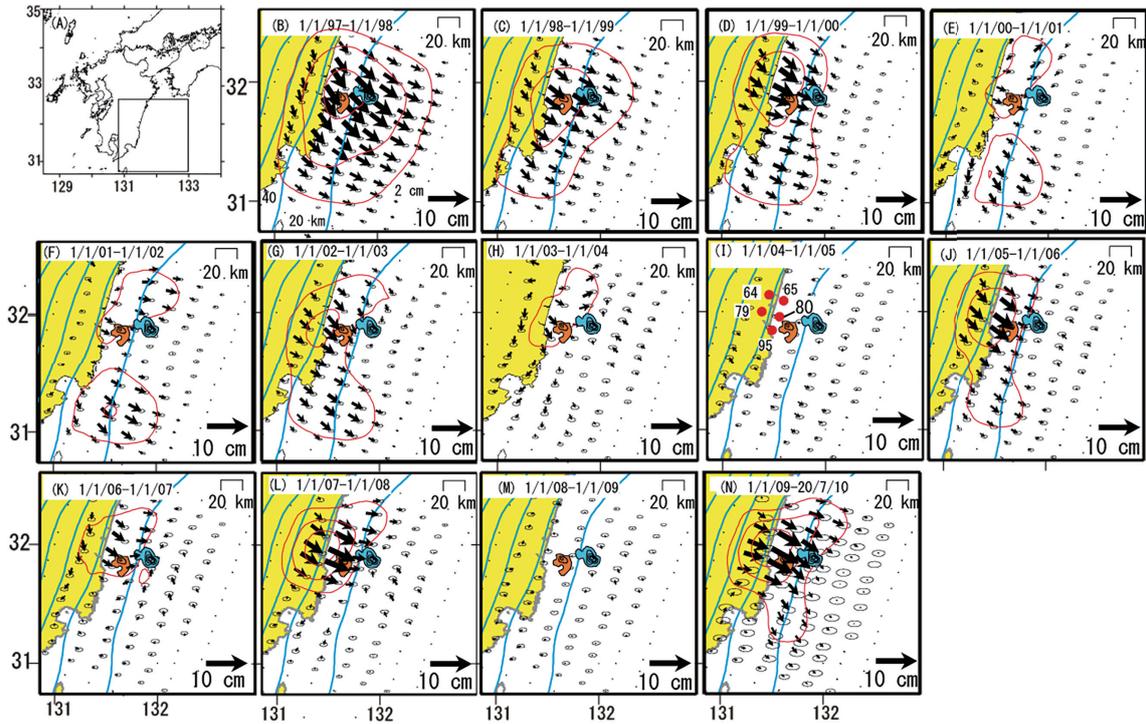


図 14 時間依存のインバージョンによる推定すべり分布. オレンジと青色の領域は、1996 年の日向灘地震のすべり域を示している。

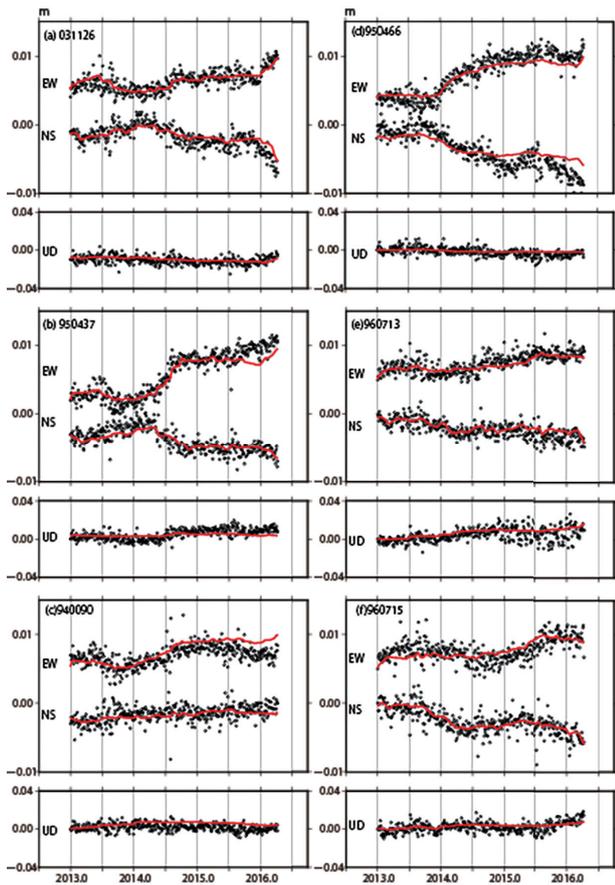


図 15 非常地殻変動時系列. 黒は観測値, 赤は計算値を示す. 周期成分は 2012 年 1 月～2016 年 4 月で推定している. 一次トレンドは 2012 年 1 月～2013 年 1 月で推定した.

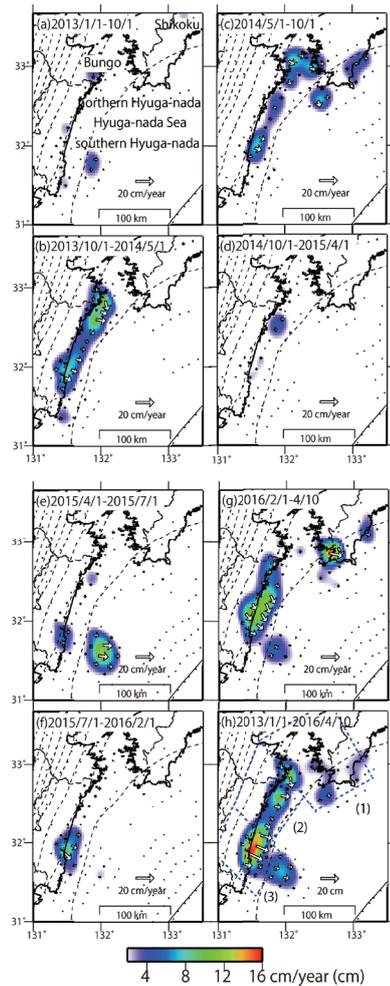


図 16 時間依存インバージョンによる推定すべり分布. 破線はプレート境界の等深線を示す. カラーがすべり速度の大きさを示す.

### 3. 短期的 SSE

数日から 10 日の時定数を持つ短期的 SSE については、傾斜計やひずみ計によって観測されているが、GNSS では地表の変位が数mm程度とノイズレベル以下であるため検出できないと考えられてきた。しかし、近年の GNSS 解析技術の向上や変位の検出手法の改良等により、GNSS による短期的 SSE の検出が可能となりつつある。

例として、GNSS 観測結果の時系列データから、ステップ的な変動の有無を AIC で評価することで短期的 SSE を検出する手法がある<sup>21)・22)</sup>。図 17 に観測点配置と気象庁一元化震源による低周波地震（微動）の震央が示されている。

図 18 に地殻変動にステップがある場合とない場合の AIC の差が示され、有意な AIC の変化が数多く検出されている。図 19、図 20 には、検出された地殻変動の例が示されている。

また、時間依存インバージョン手法を用いた短期的 SSE の検出も試みられている。現時点では、M6 程度以上のやや規模が大きい場合に限られるものの、イベントの検出や、イベントでのすべりの時間変化も捉えられるようになってきている<sup>23)・24)</sup>。例として、2018 年 3 月に発生した四国西部での短期的 SSE について、時間依存インバージョンで推定したプレート間すべり分布及び低周波地震（微動）の発生域を図 21 に示す。このイベントでは低周波地震（微動）の発生域が時間とともに西から東へと移動したが、それと同期してすべり域が東に移動していく様子が推定されている。

図 22 は、短期的 SSE の時期に相当する地殻変動の観測結果と計算結果を示している。図 22 に示されるように GNSS 観測により南東方向への変動が検出されており、計算結果はそれと調和的な結果となっている。

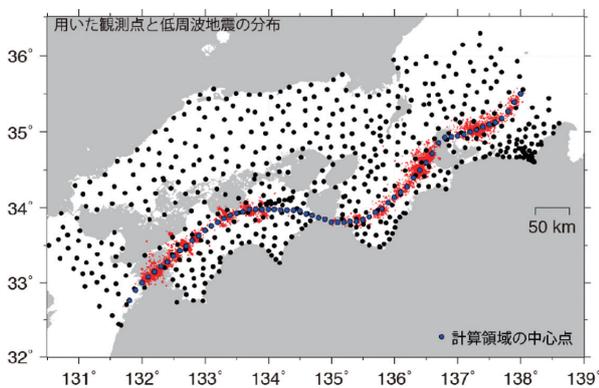


図 17 用いた観測点の分布及び AIC を計算した領域の中心点。赤点は、気象庁一元化震源による低周波地震（微動）の震央。N45° W 方向に長さ 160km、幅 50km の領域をとって AIC の計算を行っている。

以上のようにここ 10 年で、GNSS データから短期的 SSE を検出する手法が発達してきた。今後さらに GNSS 解析技術の向上や変位の検出方法の改良などにより、短期 SSE に関する新たな知見が得られるようになることが期待される。

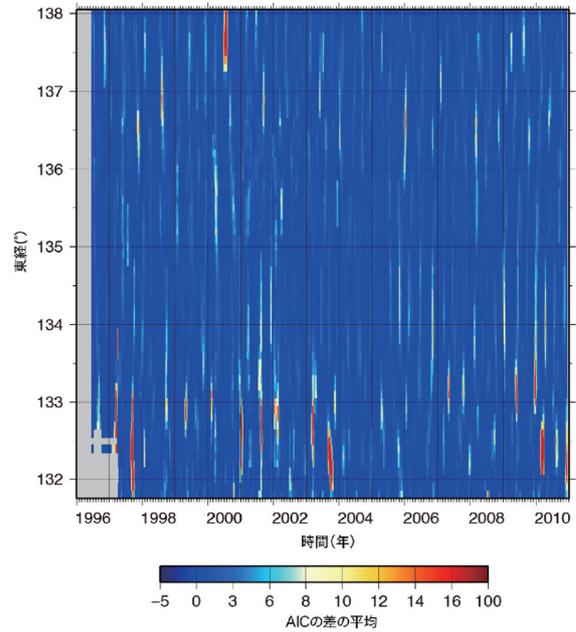


図 18 ステップを仮定した場合と仮定しない場合の一次関数をフィッティングしたときの AIC の差。AIC の差が大きい場合ほど、ステップを仮定したことがよい事を示す。四国西部や紀伊半島北部などに多数のイベントが見られる。

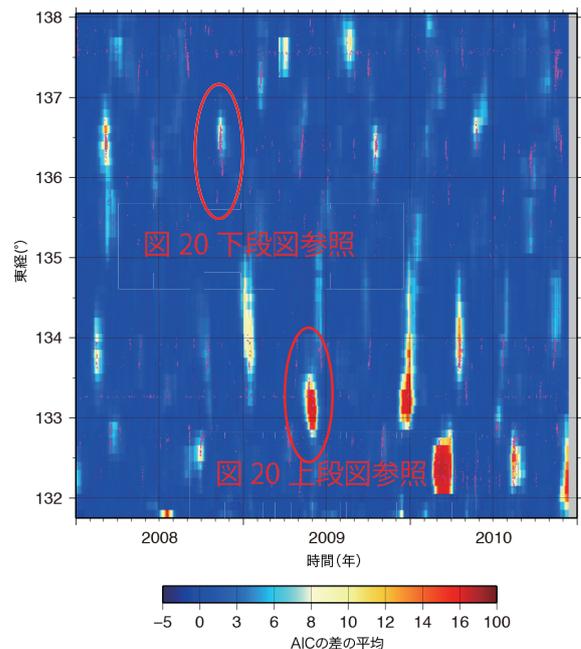


図 19 上図は図 18 の一部を拡大した図。2008-2010 年の AIC の差。ゼロ点は気象庁一元化震源による低周波地震（微動）。

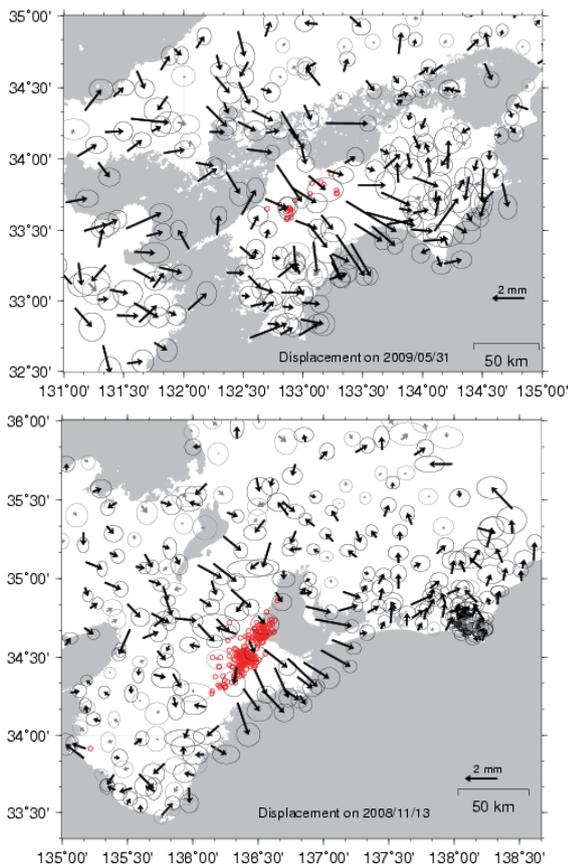


図20 図19で、特徴的な期間における水平変動ベクトル。赤丸は気象庁一元化震源による低周波地震（微動）。下段の低周波地震（微動）は図中に示した変動日の前後5日間分を示している。

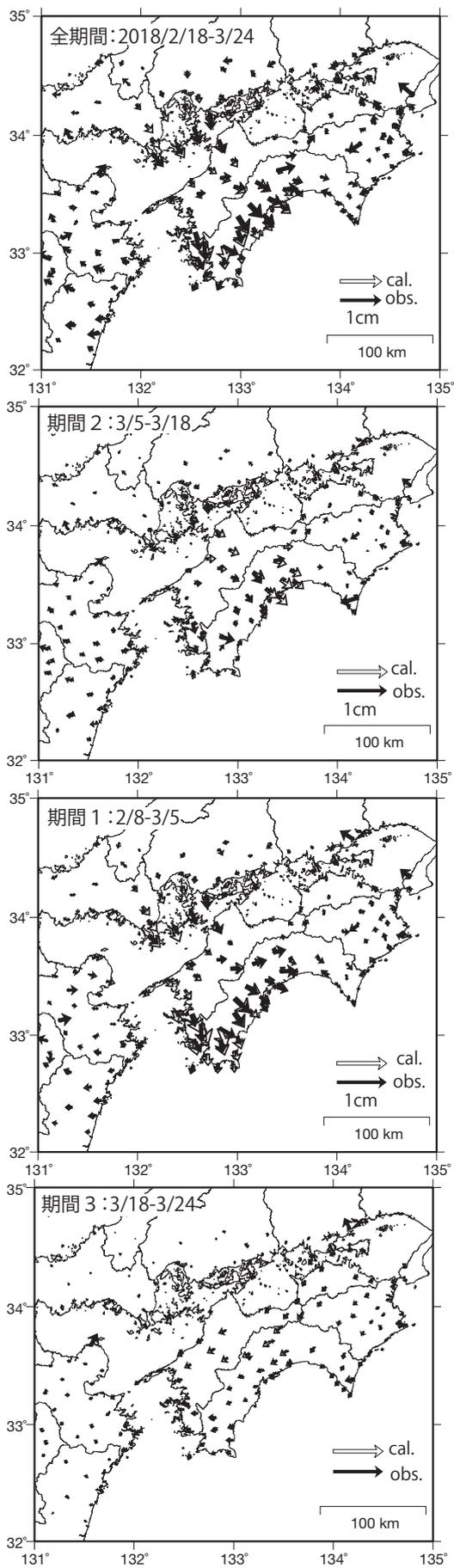


図22 短期的SSEに伴う地殻変動観測（黒矢印）と計算値（白矢印）の比較

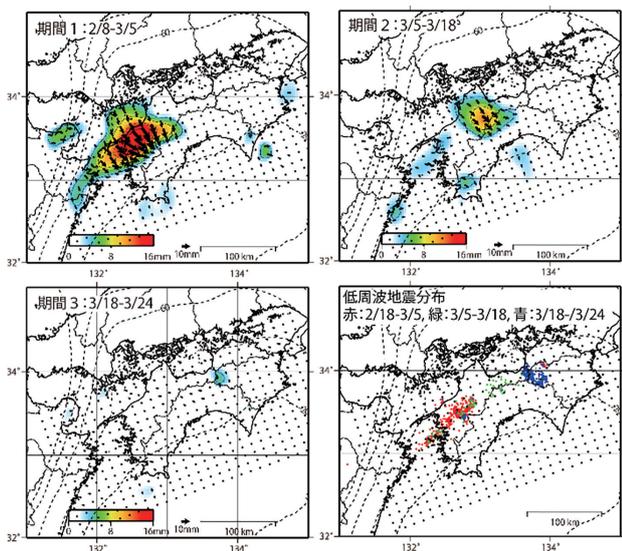


図21 時間依存のインバージョンにより推定された2018年3月の四国西部の短期的SSEの時空間変化。矢印がすべりを示し、カラーがすべりの大きさを表している。気象庁一元化震源の低周波地震（微動）の震央の期間による変化が右上に示されている。低周波微動も時間と共に東側に移動しており、推定されたすべりの時空間変化と調和的である。

## 参考文献

- 1) Obara, K. (2002) Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan *Science* 296: 1679, doi: 10.1126/science.1070378.
- 2) 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 and Space* 57, doi: 10.1186/BF03351875.
- 3) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura (2002) Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan., *Science*, 298, 10009-1012.
- 4) Miyazaki, S., P. Segall, J. McGuire, T. Kato and Y. Hatanaka (2006) Spatial and temporal evolution of stress and slip rate during the 2000 Tokai slow earthquake. *J Geophys Res* 111:B03409. doi:10.1029/2004JB003426.
- 5) Liu, Z., S. Owen, D. Dong, P. Lundgren, F. Webb, E. Hetland and M. Simons (2010) Integration of transient strain events with models of plate coupling and areas of great earthquakes in southwest Japan. *Geophys J Int* 181:1292-1312.
- 6) 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.
- 7) 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, 286-287.
- 8) Kobayashi, A. (2014), A long-term slow slip event from 1996 to 1997 in the Kii Channel, Japan, *Earth Planets Space* 66.
- 9) Kobayashi, A. (2016), Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai trough using GNSS data, *Earth Planets Space* 69, 171.
- 10) Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, S. Miyazaki (1999) A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuga-nada Earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Geophys. Res Lett* 26: 3237-3240.
- 11) Ozawa, S., M. Murakami and T. Tada, (2001) Time-dependent inversion study of the slow thrust event in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan. *J. Geophys. Res.* 106:787-802.
- 12) Ozawa, S., H. Yarai, T. Imakiire, M. Tobita (2013) Spatial and temporal evolution of the long-term slow slip in the Bungo Channel, Japan. *Earth Planets Space* 65:67-73.
- 13) Yoshioka, S., Y. Matsuoka and S. Ide (2015). Spatiotemporal slip distributions of three long-term slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data. *Geophysical Journal International*, 201(3), 1437-1455. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv022>.
- 14) 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, 364-368.
- 15) 国土地理院, 2015, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 94, 330-336.
- 16) 国土地理院, 2016, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 96, 371-378.
- 17) 国土地理院, 2011, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 85, 318-332.
- 18) Yarai, H., S. Ozawa (2013) Quasi-periodic slow slip events in the afterslip area of the 1996 Hyuga-nada earthquakes, Japan. *J Geophys Res Solid Earth* 118:2512-2527, doi: 10.1002/jgrb.50161.
- 19) 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 doi:10.1186/s40623-017-0640-4.
- 20) Takagi, R., N. Uchida and K. Obara (2019) Along - Strike Variation and Migration of Long - Term Slow Slip Events in the Western Nankai Subduction Zone, Japan, *J. Geophys Res.*, <https://doi.org/10.1029/2018JB016738>
- 21) 国土地理院, 2011, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 86, 555-558.
- 22) Nishimura, T., T. Matsuzawa and K. Obara (2013) Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 3112- 3125, doi:10.1002/jgrb.50222.
- 23) Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda and T. Kato (2019) Spatiotemporal evolution of long - and short - term slow slip events in the Tokai region, central Japan, estimated from a very dense GNSS network during 2013-2016. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JB018650>.
- 24) 国土地理院, 2019, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 100, 298-300.