Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-06-04

豊後水道周辺域での「スロー地震」連動現象とその意義

廣瀬，仁
浅野，陽一
小原，一成
松澤，孝紀

(Citation)
神戸大学都市安全研究センター研究報告,18:16-22

(Issue Date)
2014-03

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(JaLCDOI)
https://doi.org/10.24546/81011438

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011438

神戸大学都市安全研究センター
研究報告，第18号，平成26年３月

豊後水道周辺域での「スロー地震」連動現象とその意義

A coherent occurrence of slow earthquakes around the Bungo Channel area and its implication for seismic hazard assessment

廣瀬 仁 [1)]
Hitoshi Hirose
浅野 陽一 [2)]
Youichi Asano
小原 一成 [3)]
Kazushige Obara
松澤 孝紀 [4)]
Takanori Matsuzawa

概要： 西南日本の豊後水道周辺域において、約6–7年間隔で発生する長期的スロースリップイベント (SSE) 継続期間中に、深部低周波微動および浅部超低周波地震 (VLF) が活発化することが観測されている。このうち、活発化がみられた浅部 VLF は、陸上の GNSS・傾斜観測に基づいて推定されている長期的 SSE のすべり域から南に 100 km 以上離れた場所に位置している。このような同期現象を説明するための一つの仮説として、陸上の観測網ではとらえられない「見えない」すべりが浅部 VLF の発生領域まで広がっている、という考えが提案されている。その領域のすべり挙動を明らかにすることは、南海トラフ沿いで発生する巨大地震時の破壊伝播、ひいては地震や津波の規模を評価する上で非常に重要である。

キーワード：スロースリップイベント、深部低周波微動、浅部超低周波地震、フィリピン海プレート、地殻変動、非地震性すべり

1　はじめに

西南日本では、フィリピン海プレートが陸のプレートに対して年間約6 cmの速度で北西方向に運動し、南海トラフから陸の下に沈み込んでいる。その沈み込んだプレートと陸側プレートとの境界面を震源域として、百数十年間隔でプレート境界型巨大地震が発生している (例えば, 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013)。その同じプレート境界面付近で、「スロー地震」と総称される多様な現象が発生していることが、国土地理院 GEONET (GNSS 連続観測システム) や防災科学技術研究所 (NIED) Hi-net (高感度地震観測網) などの基盤的観測網によって、世界に先駆けて次々と見出されてきた。

沈み込んだフィリピン海プレートの上面が 30-40 km 程度の深さに達する、四国・紀伊半島・東海地域では、深部低周波微動 (非火山性微動) とよばれる、約 2 Hz の周波数帯に卓越した地震波を放射する現象が発生している (Obara, 2002)。この微動はプレート境界面を震源とし、そこでの逆断層すべりで発生していると考えられている (Ide et al., 2007)。この微動と同期して、地表に検出可能な地殻変動を生じさせるほど規模が大きく、数日から数週間プレート境界面でゆっくりしたすべりが継続する、短期的スロースリップイベント (SSE) が発生しており、この SSE が微動を引き起こしていると考えられている (例えば, Rogers and Dragert, 2003; Obara et al.,

2004)。この深部のスロー地震連動現象は Episodic Tremor and Slip (ETS) と呼ばれることがある (Rogers and Dragert, 2003)。

また、豊後水道や東海地方において、20-40 km 程度の深さで、数か月から年のタイムスケールでプレート間すべりが継続する、長期的 SSE が発生している (例えば, Hirose et al., 1999; Ozawa et al., 2002; 水藤・小沢, 2009)。この長期的 SSE は、本稿で取り上げる「スロー地震」の中では最も規模が大きく、モーメントマグニチュード (M_{w}) で 6 の後半から 7 に相当する。

さらに、南海トラフ近傍のごく浅部では、観測される地震波が 10-20 秒程度の長周期成分に卓越する浅部超低周波地震 (VLF) が発生している (Obara and Ito, 2005)。浅部 VLF は、陸域の観測網のデータに基づき、震源が浅いこと、プレート境界面の傾斜角よりもやや高角の傾斜角を持つ逆断層型の震源メカニズムを示すものが多いこと、などの特徴から、南海トラフの陸側に発達する付加体内部で発生していると解釈されている (Obara and Ito, 2005; Ito and Obara, 2006a,b)。一方、紀伊半島沖の海底広帯域地震計による観測に基づき、震源深さはプレート境界面に相当し、震源メカニズムも境界面の傾斜角と調和的な水平に近い傾斜角を持つ逆断層型であるという結果から、浅部 VLF はプレート境界面のすべりで発生しているとする解釈も出されている (Sugioka et al., 2012)。

これらの多くは、1946 年南海地震のような南海トラフ沿いで発生するプレート境界型巨大地震震源域の周辺に位置し、「スロー地震」と巨大地震との間で何らかの関連性が示唆される。本稿では、豊後水道での長期的 SSE の発生と同期して、深部低周波微動および浅部 VLF がともに活発化した現象を紹介し、その地震ハザード評価における意義について述べる。

2　豊後水道周辺域におけるスロー地震の連動現象

図 1 に、四国および九州周辺におけるスロー地震群の発生場所と、1946 年南海地震の震源域 (Sagiya and Thatcher, 1999) を示す。ここで、豊後水道 SSE の断層モデルは 2010 年に発生したものを GNSS データおよび防災科学技術研究所 (NIED) Hi-net 併設の高感度加速度計 (傾斜計) データに基づき推定したものである (Hirose et al., 2010)。深部低周波微動の震央は NIED Hi-net 高感度地震計の連続波形データからエンベロープ相関・振幅ハイブリッド法 (Maeda and Obara, 2009) およびクラスタ処理によって求められたものである (Obara et al., 2010)。さらに浅部 VLF の震央は、NIED Hi-net 高感度加速度計データのアレー解析に基づくものである (Asano et al., 2008)。

これらの活動の、約 10 年間の時間的な推移を比較したものが図 2 である。長期的 SSE による地表変位は、GEONET 高知大月 (位置は図 1 の緑四角) の上対馬 (同赤四角) に対する東西成分 (定常速度成分を取り除いたもの) を示す。この期間では 2003 年頃と 2010 年頃に約 1 年間にわたって非常にゆっくりと、約 2 cm 東に変位する変動が捉えられている。この SSE による地表変位の時間変化は、始めの非常にゆっくりとした立ち上がりと、その後に続く加速する変化が特徴的である。

一方、この SSE のすべり領域の深い側 (北側) に位置する微動活動のうち、北西側 (より深部, 図 1 の青点) の微動はこの約 10 年間でほぼ一定の発生レートが続いているが (図 2 青線)、南東側 (より浅部, 図 1 の赤点) の微動は 2003 年と 2010 年の SSE 発生時期に活発化が見られている。その時間的な推移は、GNSS 変位記録に見られるように、活発な時期が数か月間続き、その後徐々に低調になっていく様子が特徴的である。

さらに、足摺岬南方沖の浅部 VLF 活動 (図 1 のピンク円) にも特徴的な活動が見られる。この領域の浅部 VLF は普段はほとんど活動が見られないが、上記の豊後水道南東側の微動と同様、長期的 SSE 期間中の 2003 年および 2010 年にのみ活発な活動が見られた。ただし、その微動活動と比較すると、浅部 VLF の方が活発化した活動期間が短く、長期的 SSE 継続中の 1〜2 か月間にのみ活動が現れるという特徴が 2 回の双方に見られる。

3　スロー地震連動のメカニズム

上記のように、 2003 年と 2010 年に再来した豊後水道の長期的 SSE に同期して、深部低周波微動と浅部 VLF の双方の活動に活発化が検出された (Hirose et al., 2010)。これらのスロー地震のうち長期的 SSE が最も規模が大きく、この連動現象の主たる駆動プロセスと考えられる。長期的 SSE のすべり域の深部と、活発化がみられた微動発生域は、空間的にほぼ重なっており (図 1)、また、より深部の微動活動には特段の活動度変化が現れていない (図 1 青点および図 2 青線) ことから、長期的 SSE のすべりによって微動が直接トリガーされたと考えられる。

一方、活発化がみられた浅部 VLF は、陸上の GNSS・傾斜観測から推定されている長期的 SSE のすべり域から南に 100 km 以上離れた場所に位置している (図 1)。このような離れた場所での同期メカニズムの候補として、

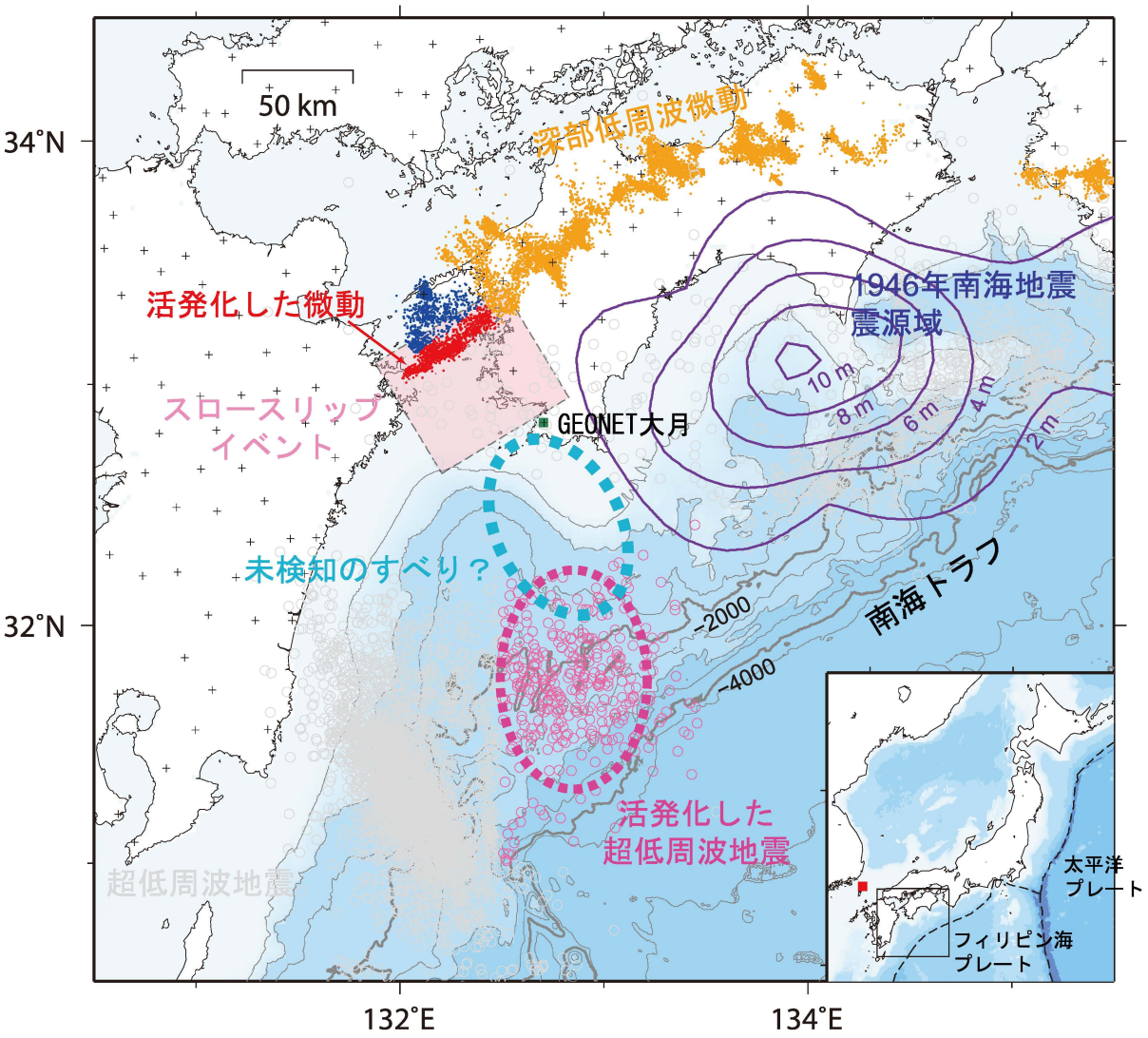

図 1: 南海地震の震源域とスロー地震群の位置図 (Hirose et al. (2010) の図に加筆). 紫のコンターは、1946 年南海地震のすべり量分布 (Sagiya and Thatcher, 1999). オレンジ・赤・青の点が深部低周波微動の震央. 豊後水道付近の活動は南東側 (赤点) と北西側 (青点) に分けられる. ピンクの四角の領域が豊後水道 SSE のすべり領域. 灰色・ピンクの円が南海トラフに沿って発生する浅部 VLF の震央. このうちピンクで示す領域の VLF が、豊後水道 SSE の発生時期に活発化した.

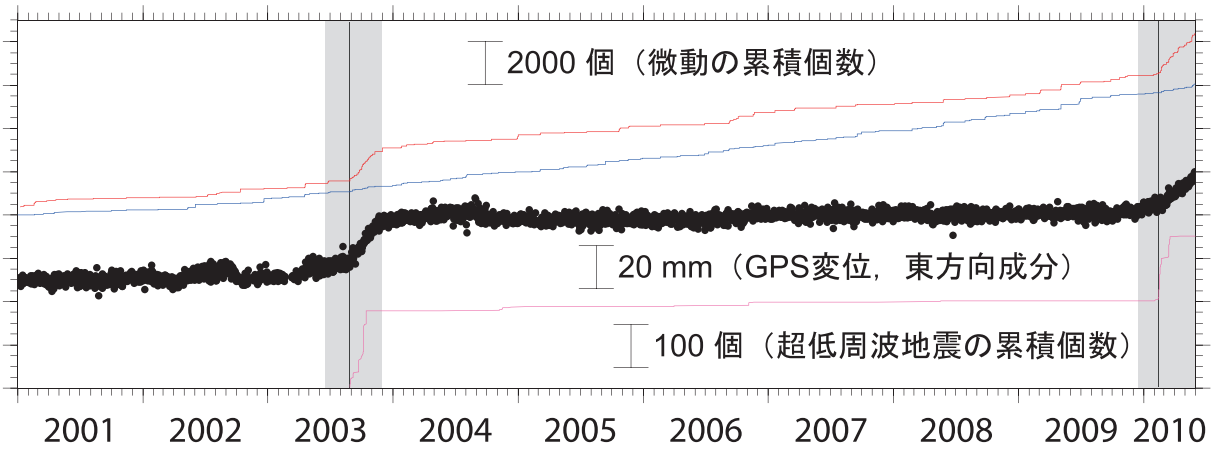

図 2: 2001 年から 2010 年はじめまでのスロー地震の活動の推移 (Hirose et al. (2010) の図に加筆). 黒点は GEONET 大月観測点（位置は図 1 に表示）の位置の東方向への動き、赤・青線は、それぞれ図 1 の赤・青点で示した位置の微動の積算発生回数、ピンク線は図 1 のピンク円で示した場所の浅部 VLF の積算発生回数を示す. 灰色の影をつけた期間が、長期的 SSE の期間を示す.

長期的 SSE により生じた媒質中の応力変化の影響が可能性として考えられる。推定された長期的 SSE の断層モデル (図 1) と、この領域での浅部 VLF の代表的な震源メカニズムを仮定して、長期的 SSE による静的応力変化を計算したところ、浅部 VLF 発生場所付近では 0.1–1 kPa のオーダーの変化しか生じていないという結果となった。Ito and Obara (2006b) によると、浅部 VLF の応力降下量は通常の地震に比べて 2–3 桁小さい 0.1–10 kPa と推定されており、長期的 SSE により生じた小さい応力変化でも誘発は可能と考えられるが、一方で常時生じている地球潮汐による応力変化も 1 kPa 程度の大きさと考えられるので、このことだけから長期的 SSE の期間だけ活発化するという足摺岬沖の浅部 VLF の活動を説明するのは難しいと思われる。

そこで、これらの連動を説明する一つの仮説として、陸上の地殻変動観測からは検知することのできない規模で、長期的 SSE のすべり領域がより浅部まで延びていることが考えられる (図 1 中の水色点線円で示したあたりの領域)。この地域では、現在利用できる地殻変動の観測点は陸上にしかないため、陸地から離れるに従い、SSE のようなプレート間すべりの検知能力は急速に下がる (例えば, 国土地理院, 2010)。そのため、すべりの規模に依存するが、仮にそのような場所にまで長期的 SSE のすべり領域が広がっていても、現状の観測網ではそれを検知することができない。そのような「見えない」すべりが豊後水道長期的 SSE の際に浅部 VLF の発生領域付近まで広がることによって、ここで見られているような、浅部から深部にいたるスロー地震の同期現象が起こっている可能性がある。

4 地震ハザード評価における意義

もし上記の仮説が正しければ、この領域は南海トラフ巨大地震の際に破壊の伝播をとめるバリアとして働くかもしれない。それは、この領域では長期的 SSE のたびに歪を解放していることになり、それが十分に解放されていれば、地震時にはすべることができなくなっている可能性があるためである。また、スロー地震の発生する領域は、巨大地震が発生する領域とはすべり特性が異なり、地震性すべり（高速すべり）を起こすことが難しい場所である可能性もあるためである。実際、1946 年昭和南海地震の震源域の西端は、足摺岬付近と考えられており (図 1 の紫コンター; Sagiya and Thatcher, 1999)、そのようなメカニズムで地震時の破壊伝播が止められた結果の可能性がある。また、浅部 VLF の波形相関に基づく高精度の相対震源決定結果によると、バースト的な活動の期間内での水平方向への震源の移動が認められている (浅野・他, 2011)。これは深部で見られる短期的 SSE のすべり伝播とともに微動や深部 VLF の震源が移動する現象 (例えば, Ito et al., 2007) との類似性から、浅部 VLF の領域でも SSE のようなすべり現象が背後に存在し、それによって浅部 VLF の移動が引き起こされている、と解釈されている。このことも、仮説に対する一つの傍証となるだろう。

しかし一方で、1707 年宝永地震の際の津波堆積物の分布を説明するためには、従来の震源モデルよりもさらに西側の領域、すなわち、未検知の非地震性すべりが延伸していると提唱している領域まで震源域を広げる必要があることが、津波の数値シミュレーション結果から指摘されている (Furumura et al., 2012)。大きい津波を引き起こすための断層すべりは、大きい振幅の地震波を放射するような高速すべりである必要は必ずしもないの

で、このことが直ちに上記の仮説に対する反証となるわけではない。とはいえ、巨大地震時にこの領域におけるプレート境界がどのようなすべり挙動を示すかを検討する上で大きな制約条件となる。

以上のように、足摺岬沖・日向灘を始めとする、南海トラフ近傍のプレート境界のすべり特性を知ることは、浅部 VLF 活動やその駆動メカニズムを理解するために必要なだけでなく、巨大地震時にその震源域となりうるかどうか、すなわち、地震や津波の規模を評価する上でも非常に重要である。これを明らかにするためには、陸上の測地学的観測からとらえることが難しい、当該領域 (海域) でのプレート間すべりを観測するため、海底での長期的な地殻変動観測が必要である。それによってすべり挙動を明らかにするとともに、そのような挙動がどのようなメカニズムで発生しているのかを、すべり摩擦の室内実験やそれに基づく数値シミュレーションなどで検討していくことが重要であろう。

(本論文は Hirose et al. (2010) の内容に加えてその地震ハザード評価における意義を紹介したものである。)

謝辞： 国土地理院 GEONET データを利用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

Asano, Y., Obara, K., Ito, Y., 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, 2008.

浅野陽一, 松澤孝紀, 廣瀬仁, 田中佐千子, 汐見勝彦, 伊藤喜宏, 小原一成, 日向灘～足摺岬沖における浅部超低周波地震活動のマイグレーション, JpGU 予稿集 SCG058-14, 2011.

Furumura, T., Imai, K., and Maeda, T., A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2010JB007918, 2011.

Hirose, H., Hirahara, K., Kimata, F., Fujii, N., and Miyazaki, S., A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.* 26(21), 3237–3240, 1999.

Hirose, H., Asano, Y., Obara, K., Kimura, T., Matsuzawa, T., Tanaka, S., and Maeda, T., Slow Earthquakes Linked Along Dip in the Nankai Subduction Zone, *Science*, 330(6010), 1502, 2010.

Ide, S., Shelly, D. R., and Beroza, G. C., Mechanism of deep low frequency earthquakes: Further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03308, doi:10.1029/2006GL028890, 2007.

Ito, Y., and Obara, K., Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequencyearthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02311, doi:10.1029/2005GL025270, 2006.

Ito, Y., and Obara, K., Very low frequency earthquakes within accretionary prisms are very low stress-drop earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L09302, doi:10.1029/2006GL025883, 2006.

Ito, Y., Obara, K., Shiomi, K., Sekine, S., and Hirose, H., Slow Earthquakes Coincident with Episodic Tremors and Slow Slip Events, *Science*, 315(5811), 503–506, 2007.

地震調査研究推進本部地震調査委員会, 南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について, 2013.

国土地理院, GPS 連続観測に基づくプレート境界面上のすべりの検知能力, 地震予知連絡会会報, 84, 565–576, 2010.

Maeda, T., Obara, K., Spatiotemporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:200910.1029/2008JB006043, 2009.

Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679—1681, 2002.

Obara, K. and Ito, Y., Very low frequency earthquakes excited by the 2004 off the Kii peninsula earthquakes: A dynamic deformation process in the large accretionary prism, *Earth Planets Space*, 57, 321–326, 2005.

Obara, K., Hirose, H., Yamamizu, F., and Kasahara, K., Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31(23), L23602, doi:10.1029/2004GL020848, 2004.

Obara, K., Tanaka, S., Maeda, T., Matsuzawa, T., Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL043679, 2010.

Ozawa, S., Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yarai, H., and Nishimura, T., Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, *Science*, *298*, 1009–1012, 2002.

Rogers, G., and Dragert, H., Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, *Science*, 300, 1942–1943, 2003.

Sagiya, T., and Thatcher, W., Coseismic slip resolution along a plate boundary megathrust: The Nankai Trough, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 104(B1), 1111–1129, 1999.

Sugioka, H., Okamoto, T., Nakamura, T., Ishihara, Y., Ito, A., Obana, K., Kinoshita, M., Nakahigashi, K., Shinohara, M., Fukao, Y., Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, *Nature Geosci.*, 5, 414–418, 2012.

水藤尚, 小沢慎三郎, 東海地方の非定常地殻変動 –東海スロースリップと 2004 年紀伊半島南東沖の地震の余効変動–, 地震 2, 61(3), 113–135, 2009.

著者： 1) 廣瀬仁, 都市安全研究センター, 准教授; 2) 浅野陽一, （独）防災科学技術研究所, 主任研究員; 3) 小原一成, 東京大学地震研究所, 教授; 4) 松澤孝紀, （独）防災科学技術研究所, 主任研究員

A coherent occurrence of slow earthquakes around the Bungo Channel area and its implication for seismic hazard assessment

Hitoshi Hirose

Youichi Asano

Kazushige Obara

Takanori Matsuzawa

Abstract

Around the Bungo Channel area, southwest Japan, contemporaneous activations of deep low-frequency tremors and shallow very-low frequency earthquakes (VLFs) are observed during the Bungo Channel long-term slow slip events (SSEs) in 2003 and 2010. The shallow VLF activity is located over 100 km south from the source region of the long-term SSEs. A hypothesis is proposed to explain this temporal correlation among the three different slow earthquakes: the slow slip area of the Bungo Channel SSEs extends to the source area of the activated shallow VLFs, which can not be detected by onshore geodetic stations. It is very important to clarify the slip characteristics around the area for the assessment of the seismic and tsunami hazard on an anticipated Nankai megathrust earthquake because the area may control the rupture propagation and extent of the earthquake.

©2014 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.