

12 - 2 スロー地震の発生様式に関する新たな描像～普遍性と多様性の観点から～ Current understanding on slow earthquake activity from viewpoints of systematics and diversity

小原 一成 (東京大学地震研究所)

Kazushige OBARA (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1. はじめに

長期的スロースリップイベント (Hirose et al., 1999)¹⁾ や深部低周波微動 (Obara, 2002)²⁾ の発見から約 20 年が経過し, 現在までに様々な場所で様々なスロー地震が検出され続けている. 次々と新たなスロー地震が検出されることで, 多様性が印象付けられてきたが, 現時点で振り返ってみると, 普遍的な特徴が存在していることが明らかとなり, それを踏まえたうえで多様性を改めて考え直すことができるようになってきた. そのような観点で, スロー地震の発生様式の理解の現状を整理する.

2. スロー地震の普遍性

南海トラフに発生するスロー地震は, 固着域に対する深さの違いと時定数の違いによりいくつかの種類に分類される. 地震計で観測されるスロー地震としては, 数 Hz に卓越する低周波微動と数 10 秒に卓越する超低周波地震 (VLFE), 地殻変動として観測されるスロー地震としては, 数日間の継続時間を有する短期的スロースリップイベント (SSE) と数か月～数年の継続時間を有する長期的 SSE が存在する (第 1 図). このうち, 低周波微動と VLFE との間の帯域は脈動が卓越しているが, 最近, スタッキング等の解析によってその帯域にもスロー地震のシグナルが存在することが明らかとなり, 微動から VLFE 帯域まで連続する現象 (広帯域スロー地震) であることが確認された (Kaneko et al., 2018, Masuda et al., 2020)^{3), 4)}.

巨大地震震源域の深部延長部に発生する深部スロー地震はさらに 2 つに分かれ, その深部側に深部低周波微動, 深部 VLFE, 短期的 SSE の同時発生現象である Episodic Tremor and Slip (ETS) が, 浅部側に長期的 SSE が分布する. ETS を代表する深部低周波微動は, その発見当初からプレート形状の走向方向に細長く分布することが知られていた. 一方, 長期的 SSE は当初, 豊後水道と東海地域のみで検出されていたが, 近年になって固着域と ETS 域のギャップを埋めるように次々と長期的 SSE が検出され (Ozawa, 2016, Kobayashi, 2014, Takagi et al., 2019)^{5), 6), 7)}, ETS 同様に走向方向にある程度一様に分布することが分かった.

一方, 南海トラフ近傍では陸域の観測網により浅部 VLFE が以前から知られていたが (Obara and Ito, 2005)⁸⁾, 近年の海域観測技術の高度化により, 浅部 VLFE に同期した浅部低周波微動 (Yamashita et al., 2015)⁹⁾ や浅部 SSE (Araki et al., 2017)¹⁰⁾ の検出が可能となった. 特に, 紀伊半島南東沖において SSE による間隙水圧変化と VLFE 積算モーメント変化の時系列が非常によく一致したこと (Nakano et al., 2018)¹¹⁾ は, 深部と同様に浅部でも ETS として起きていることを示すものである. また, 海上保安庁の音響 GNSS 海底地殻変動観測システムの展開により年オーダーの継続時間を有する SSE が検出され (Yokota and Ishikawa, 2020)¹²⁾, ETS と長期的 SSE の共存が浅部と深部とで共通することが示された.

3. スロー地震の多様性（空間的不均質性）

浅部と深部におけるスロー地震の共通性が示されたが、分布の特徴はそれぞれ異なる。つまり、深部では多少の活動特性の揺らぎを含みながら走向方向に同じ現象が分布するのに対して、浅部では走向方向に異なるタイプのスロー地震や固着域が存在する(第2図)。VLFEの規模で比較すると、深部では一様に小さいのに対して、浅部では規模のコントラストが大きく固着度の強さに反比例する(Baba et al., 2020a)¹³⁾。従って、不均質の程度は浅部では強く深部では弱いと言える。では、これらの不均質性の要因は何であろうか。深部では、上盤への透水性の違いによるプレート境界での流体圧が要因の一つと考えられる(Nakajima and Hasegawa, 2016)¹⁴⁾。また、四国西部における深部低周波微動のエネルギー空間分布からパッチ強度の違いに原因があり、それにも上盤への透水性が影響すると考えられる(Kano et al., 2018)¹⁵⁾。

一方、日向灘から四国中部における長期的SSEについては、発生間隔や積算すべり量に走向方向の変化がみられ、すべり量の小さな領域の浅部側には大地震の震源域が分布するという対応関係があることから、浅部側の固着の程度が長期的SSEの発生様式の空間不均質を形成する要因である可能性がある(Takagi et al., 2019)⁷⁾。

4. スロー地震の多様性：時空間的不均質性

スロー地震活動の時空間変化は、プレート間固着や大地震発生による影響を受け、プレート境界でのすべりを忠実に反映すると考えられる。2011年の東北地方太平洋沖地震の前後における東北沖浅部VLFEの時間変化は、地震発生時の大すべり域との位置関係によって変化する(Baba et al., 2020b)¹⁶⁾。つまり、大すべり域外の岩手沖では、東北沖地震直後に浅部VLFEが急増し、その後徐々に緩和した。これは余効すべりによる影響と考えられる。また、大すべり域内の宮城沖では東北沖地震後に浅部VLFEが静穏化した。これはプレート境界における応力が完全に解放されたことを示している。ところで、宮城沖では東北沖地震前に小規模のバースト的VLFE活動が約1年間隔で繰り返し発生していたが、これは、わずかな固着の剥がれが生じていたのかもしれない。

ところで、約20年に及ぶ四国の短期的SSEの推定結果によると、2012年ごろからSSE断層長が増加する傾向にあるように見える(Hirose and Kimura, 2020)¹⁷⁾。この地域では、深部低周波微動活動域の長さも2011年ごろを境に長くなったという報告もあり、これは浅部側の長期的SSEの存在が影響していると解釈された(Takagi et al., 2016)¹⁸⁾が、経年的変化の原因については今後の課題である。

5. 近年の新たな発見

四国西部では、ETS発生時のGNSSデータを12回分スタックしてすべり分布を推定したところ、微動域だけでなく、それから少し離れた固着域底部でもわずかなすべりが検出された(Kano et al., 2019)¹⁹⁾。ちょうどすべり分布のギャップが長期的SSE域に対応することから、マントルウェッジの底部でETSが起きると同時に、流動的下部地殻との接触域を越えて固着域での有効圧が下がり、わずかな固着の剥がれが生じた可能性がある。このようなギャップを挟むSSE二列分布は最近関東地方でも検出されており(Nishimura, 2021)²⁰⁾、ある程度普遍的な現象かもしれない。

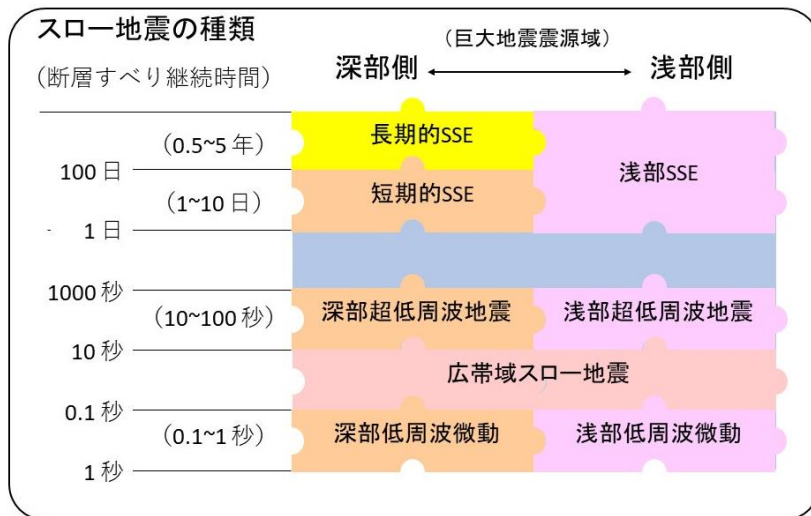
日向灘を含む南海トラフ西部域では、浅部VLFEや微動の深部延長部に相似地震、さらに深部側に長期的SSEが配列しているが、浅部側のVLFE・微動と深部の長期的SSEはそれぞれ相似地震と相互作用しながら、異なる速度で北東方向に数100kmも移動する(Uchida et al., 2020)²¹⁾。もし

かしたら、何らかの大規模なテクトニクスの変動を反映している可能性もあり、今後もスロー地震活動のモニタリングや発生様式の解明が重要であろう。

参考文献

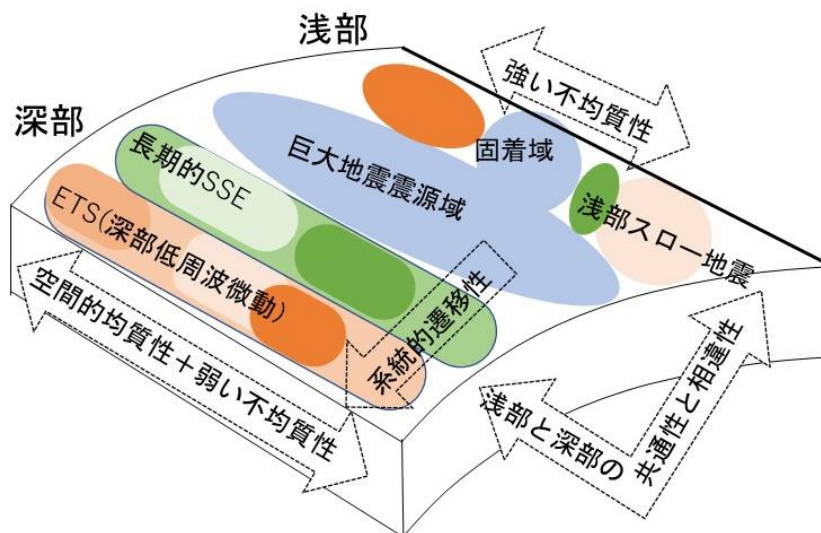
- 1) Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, & S. Miyazaki, 1999. A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, **26**, 3237-3240, <https://doi.org/10.1029/1999GL010999>.
- 2) Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1688, <https://doi.org/10.1126/science.1070378>.
- 3) 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>.
- 4) Masuda, K., S. Ide, K. Ohta and T. Matsuzawa, 2020. Bridging the gap between low-frequency and very-low-frequency earthquakes, *Earth Planets Space*, **72(47)**, 1-9, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01172-8>.
- 5) 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.
- 6) 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>.
- 7) 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>.
- 8) 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, <https://doi.org/10.1186/BF03352570>.
- 9) 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>.
- 10) 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>.
- 11) 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>.
- 12) 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>.
- 13) Baba, S. Takemura, K. Obara, A. Noda, Slow earthquakes illuminating interplate coupling heterogeneities in subduction zones, *Geophysical Research Letters*, **47**, <https://doi.org/10.1029/2020GL088089>, 2020.

- 14) Nakajima, J., & A. Hasegawa, 2016. Tremor activity inhibited by well-drained conditions above a megathrust, *Nature Communications*, **7**, 13863, doi:10.1038/ncomms13863.
- 15) 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>.
- 16) Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, & T. Maeda, 2020b. 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>.
- 17) Hirose, H., and T. Kimura (2020), Slip Distributions of Short-Term Slow Slip Events in Shikoku, Southwest Japan, From 2001 to 2019 Based on Tilt Change Measurements, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2020JB019601, doi:10.1029/2020JB019601.
- 18) 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>.
- 19) 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>.
- 20) Nishimura, T. (2021), Slow Slip Events in the Kanto and Tokai Regions of Central Japan Detected Using Global Navigation Satellite System Data During 1994–2020, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **22**, e2020GC009329, doi:<https://doi.org/10.1029/2020GC009329>.
- 21) Uchida, N., R. Takagi, Y. Asano, & K. Obara, 2020 Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust, *Earth and Planetary Science Letters*, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115986>.



第 1 図 南海トラフ域でこれまでに発見されたスロー地震の種類。断層すべりの継続時間と巨大地震に対する深さ方向の位置関係のマトリクスで分類している。

Fig. 1 Classification of various slow earthquakes along the subducting plate interface in the Nankai subduction zone.



第 2 図 南海トラフにおけるスロー地震発生様式を示した模式図。浅部と深部ではスロー地震を構成する現象は共通している一方、深部では同種の現象が活動度の不均質性を有しながら、走向方向に連続するのに対し、浅部では異種現象が並ぶという強い不均質性を示す。

Fig. 2 Schematic view of slow earthquakes along the subducting plate interface in the Nankai subduction zone.