

12-13 南海トラフ沿いの巨大地震発生前のスローイベント挙動の変化

Change in the recurrence of slow slip events before a large earthquake in the Nankai trough

松澤 孝紀 (防災科学技術研究所)

Takanori Matsuzawa

(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)

共同研究者：廣瀬 仁 (防災科学技術研究所)，

芝崎 文一郎 (建築研究所)，

小原 一成 (東京大学地震研究所)

1. はじめに

南海トラフ沿いの沈み込み帯では、100-200年の間隔で繰り返しプレート間大地震が発生してきた。Obara (2002)¹⁾ による深部低周波微動の発見以降、この大地震発生領域の深部延長上において、すべりの継続時間が数日から1週間程度の短期的スロースリップイベント (以下、短期的SSE)^{2), 3)} や20秒程度の卓越周期をもつ深部超低周波地震⁴⁾ といった、さまざまなゆっくり地震の存在が明らかにされた。深部低周波微動はそれぞれの地域において数カ月間隔で活発化し、これに伴って短期的SSEや深部超低周波地震も検出されている。地震・地殻変動データの解析から、これらのゆっくり地震はプレート間のすべりによるものと考えられるようになった⁴⁾。また、豊後水道と東海地域においては、微動や短期的SSEの発生領域よりもやや浅い側のプレート境界で、長期的SSEと呼ばれる、数カ月から1年程度継続するゆっくりしたすべり現象が、数年から十年の間隔で発生することも知られている。

これらのゆっくり地震は大地震発生領域の周囲のプレート境界上で起きていることから、将来の大地震発生域に応力が集中していく過程の一現象として捉えられる。大地震発生サイクル間には、ゆっくり地震の発生領域を取り巻く応力場も変化していくため、その挙動に何らかの変化が現れる可能性がある。これを数値モデルの面から検証するため、Shibazaki and Shimamoto (2007)⁵⁾ が短期的SSEの発生を数値的に再現したのと同様に、微動発生領域において高い間隙水圧を仮定するとともに、すべり速度が増加するにつれてすべり速度弱体化から強化に遷移する摩擦挙動を採用して、大地震とSSEの発生を再現し、地震サイクルにおける挙動の変化を調べる。

2. 数値モデル・計算手法

西南日本の微動発生領域においては V_p/V_s が高くなっていることが示されている^{6), 7)}。さらに、長期的SSEが発生する東海地方や豊後水道においては、 V_p/V_s が高い領域が浅い部分まで広がっていることが指摘されている^{8), 9)}。この結果は微動やSSEが発生する領域において水が存在する可能性を示唆するものであり、南海トラフにとどまらずCascadiaやメキシコの微動やSSEの発生領域でも水の存在が示唆されている^{10), 11)}。さらにSSE発生域における水の存在は、間隙水圧が高くなり有効法線応力 (σ_e) が低くなっている可能性を示唆する。

岩石によるすべり実験を良く説明する摩擦則としては、すべり速度・状態依存則が代表的である。Shimamoto (1986)¹²⁾ は脆性—塑性遷移領域の摩擦として、すべり速度 (v) が速くなるにつれて、

あるカットオフ速度 (v_2) 付近で、すべり速度弱体化から強化に転じるような挙動を含む摩擦則を提案した。Shibazaki and Shimamoto (2007)⁵⁾ はこのような挙動を取り入れるため、すべり速度・状態依存摩擦則にカットオフ速度 (v_2) を導入し、SSE の発生を再現した。本研究でも同様にカットオフ速度を含むすべり速度・状態依存摩擦則を仮定している。

数値シミュレーションに用いる沈み込むプレートのモデルとしては、平板の断層面を仮定し、微動発生領域において有効法線応力が小さくなり、カットオフ速度の効果が SSE のすべり速度付近で表れるようなパラメータの分布を仮定した (第 1 図 (a), (b))。以下、特に断りがない場合には、すべり速度・状態依存摩擦則における摩擦パラメータ b については、第 1 図 (b) に赤破線 (モデル 1) で示した値を用いる。また、長期的 SSE の発生を再現するため、やや浅い部分から有効法線応力が小さくなるような領域 (長期的 SSE 領域) を $X=0\text{km}$ 付近に設定し、長期的 SSE の応力降下量は短期的 SSE よりも大きいことから³⁾、短期的 SSE 領域よりやや高い有効法線応力を仮定した (第 1 図 (a))。断層面の水平方向については周期的境界条件を仮定している。数値計算においては、断層要素を矩形の小断層として与え、要素間の相互作用は半無限弾性体における応答として与えた。また地震波放出の効果も近似的に取り込んでいる¹³⁾。これらに基づき、各要素上でのすべり速度と状態量の時間発展に関する常微分方程式を連立させ、SSE と大地震の発生を数値的にシミュレーションした。

3. 数値計算結果

長期的 SSE を仮定した領域では、大地震間では 7 年前後の間隔で SSE が発生し、これらの SSE について、仮定したプレートの沈み込み速度 ($1.9 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) を越えるようなすべりの継続時間は数ヶ月程度となった (第 2 図, 第 3 図 (a))。また、それ以外の微動発生領域に相当する深さ (30km) では、数カ月間隔で SSE が発生し (第 2 図, 第 3 図 (b))、継続時間は数日程度となった。これらは、実際に南海トラフの沈み込み帯で観測される、長期的および短期的 SSE の特徴的なすべりの継続時間や発生間隔とそれぞれよく一致する。また、地震サイクルを通じて、長期的・短期的 SSE とともにその発生間隔が徐々に短くなっていく傾向が見られた (第 3 図)。

地震サイクルの後半になるに従い固着域の下端は浅い部分へと移動し、大地震後には再び深い部分へと移った (第 4 図)。大地震の前にはすべり速度の加速が短期的 SSE 領域と固着域の間の領域で発生し、大地震につながっていった。また、それに同期するように短期的 SSE の発生間隔も短くなっている。

4. 摩擦パラメータの変化に伴うすべり挙動の変化

次に、前節で得られた結果が、摩擦パラメータの変化によってどのような影響を受けるか検証する。前節では、不安定—安定すべりの遷移が深さ 32.5 km に位置するモデルを用いたが (第 1 図 (b) のモデル 1)、1946 年南海地震の破壊はより浅い部分から始まっており¹⁴⁾、SSE 発生域と固着域の間には安定すべりを起こす領域が存在する可能性も考えられる。これを踏まえて、深さ 24km 付近においていったん安定すべりを起こすような摩擦則 (第 1 図 (b) のモデル 2) を導入し、SSE 発生の変化を調べた。

長期的 SSE、短期的 SSE 領域におけるスローイベントの再来間隔を、それぞれ第 5 図に示す。前節 (モデル 1) で示した変化にくらべて、長期的および短期的 SSE の再来間隔の変化は小さいものの、大地震のサイクル間に再来間隔が短くなる傾向はこのモデルでも見られた。

5. 議論・まとめ

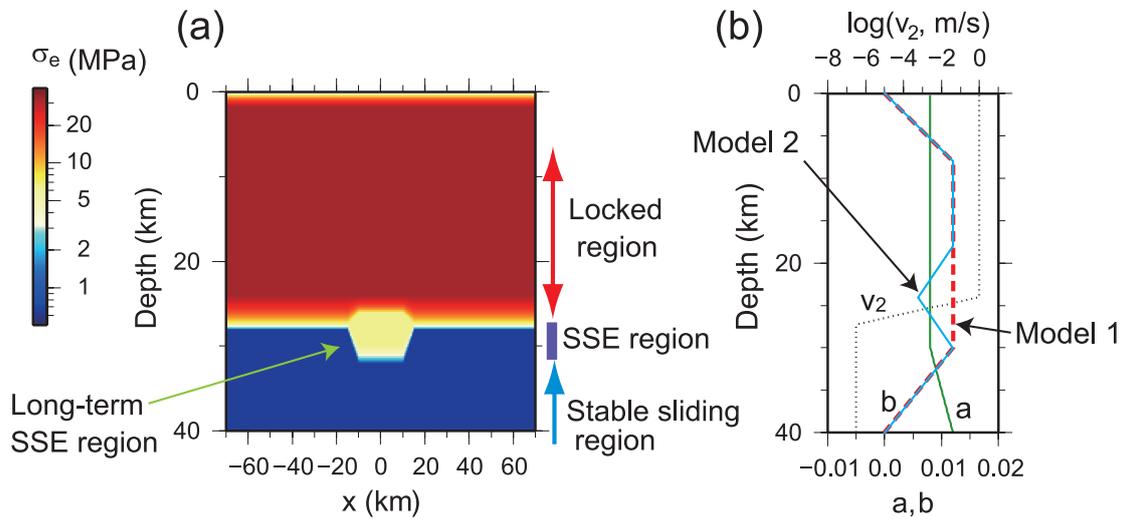
微動発生領域において、低有効法線応力となり、すべり速度弱化から強化に遷移するような摩擦挙動を取り込んだ数値モデル上で、大地震発生サイクルにおける長期的および短期的 SSE の発生を再現することができた。仮定する摩擦パラメータの分布に関する依存性はあるものの、大地震の発生サイクル間には長期的・短期的 SSE の発生間隔が短くなる傾向がみられた。また、数値計算結果では大地震発生の前に、固着域と SSE 発生領域の間ですべりの加速がおこり、それに同期して短期的 SSE の発生間隔も短くなった。

プレート間地震発生域周辺のすべり・固着状態を評価する手法として、相似地震活動のモニタリングは有効な方法となりうるが¹⁵⁾、南海トラフ沿いではプレート間地震の活動が稀であるために、これを適用することは難しい。それに代わって、この数値シミュレーションの結果は、微動や SSE の活動が大地震発生域周辺のすべりの状態をモニタリングするための指標となる可能性を示唆する。ただし、モデル 1 と 2 の比較でもみられるように、数値モデルから得られる結果は仮定する摩擦則によっても大きく変化する。また、たとえそのような性質があったとしても、実際の長期的・短期的 SSE の発生間隔にはゆらぎがあるため、そのゆらぎの中から大地震の切迫性を評価できるほど有意な再来間隔の変化を検出することが可能かという問題もある。今後は、地震・地殻変動データのモニタリングと理論的なモデルの構築を進め、物質科学的な観点を含む様々な側面からゆっくり地震の理解を深めるなかで、微動や SSE による大地震の準備過程の評価について検討していく必要がある。

参 考 文 献

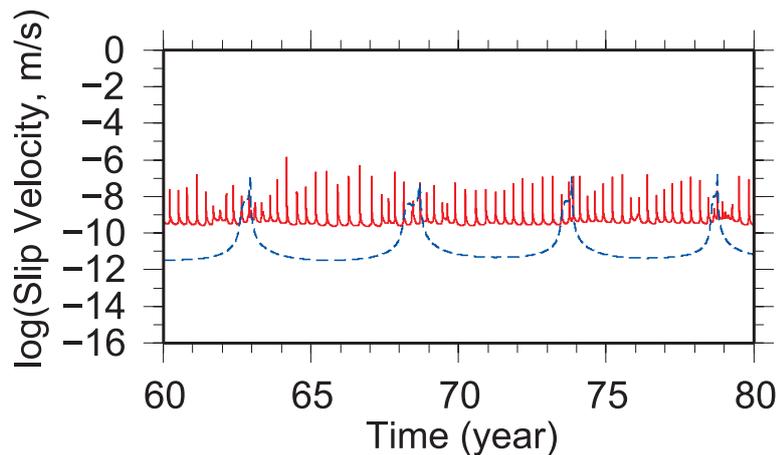
- 1) K. Obara (2002), Non-volcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679–1681.
- 2) K. Obara, H. Hirose, F. Yamamizu, K. Kasahara (2004), Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23602, doi10.1029/2004GL020848.
- 3) H. Hirose, K. Obara (2005), Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, *Earth Planets Space*, 57, 961–972.
- 4) Y. Ito, K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine, H. Hirose (2007), Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events, *Science*, 315, 503–506, doi:10.1126/science.1134454.
- 5) B. Shibazaki, B., T. Shimamoto (2007), Modelling of short-interval silent slip events in deeper subduction interfaces considering the frictional properties at the unstable-stable transition regime, *Geophys. J. Int.*, 171, 191–205, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03434.
- 6) D. R. Shelly, G. C. Beroza, S. Ide, S. Nakamura (2006), Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic slip and tremor, *Nature*, 442, 188–191, doi:10.1038/nature04931.
- 7) M. Matsubara, K. Obara, K. Kasahara (2008), Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86–103, doi:10.1016/j.tecto.2008.04.016.
- 8) S. Kodaira, T. Iidaka, A. Kato, J.-O. Park, T. Iwasaki, Y. Kaneda (2004), High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai trough, *Science*, 304, 1295–1298.
- 9) M. Matsubara, K. Obara, K. Kasahara (2009), High- V_p/V_s zone accompanying nonvolcanic tremors and

- slow slip events beneath southwestern Japan, *Tectonophys.*, 472, 6–17, doi:10.1016/j.tecto.2008.06.013.
- 10) P. Audet, M. G. Bostock, N. I. Christensen, S. M. Peacock (2009), Seismic evidence for overpressured subducted oceanic crust and megathrust fault sealing, *Nature*, 457, 76–78, doi:10.1038/nature07650.
 - 11) T.-R. A. Song, D. V. Helmberger, M. R. Brudzinski, R. W. Clayton, P. Davis, X. Pérez-Campos, S. K. Singh (2009), Subducting slab ultra-slow velocity layer coincident with silent earthquakes in southern Mexico, *Science*, 324, 502–506, doi:10.1126/science.1167595.
 - 12) T. Shimamoto (1986), Transition between frictional slip and ductile flow for halite shear zones at room temperature, *Science*, 231, 711–714.
 - 13) J. R. Rice (1993), Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, 98, 9885–9907.
 - 14) H. Kanamori (1972), Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 5, 129–139.
 - 15) N. Uchida, T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, T. Okada, and A. Hasegawa (2007), Source parameters of a M4.8 and its accompanying repeating earthquakes off Kamaishi, NE Japan: Implications for the hierarchical structure of asperities and earthquake cycle, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20313, doi:10.1029/2007GL031263.



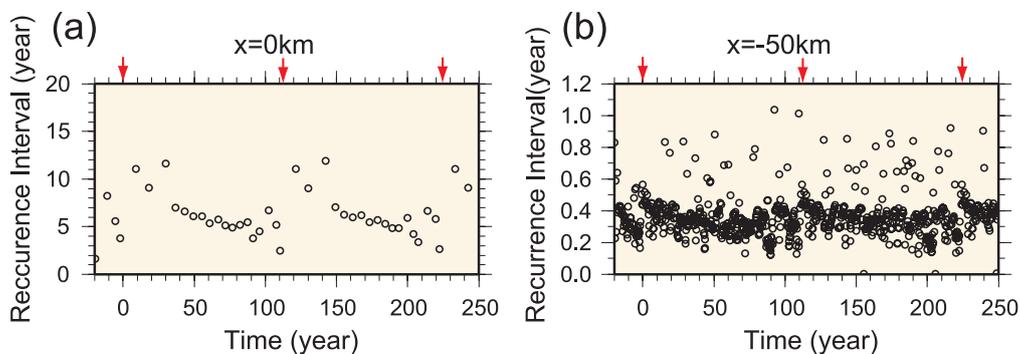
第 1 図 (a) 仮定した有効法線応力の分布. (b) 緑実線はすべり速度・状態依存摩擦則におけるパラメータ a の分布. 赤破線, 青実線は, それぞれモデル 1, 2 で仮定したすべり速度・状態依存則の摩擦パラメータ b の分布. 黒点線はカットオフ速度 v_2 .

Fig. 1 (a) Distribution of effective normal stress assumed in our model. (b) A green solid line shows a distribution of a in a rate-and state-dependent friction law. A red dashed line and a blue solid line show the distribution of b in a rate and state-dependent friction law assumed in the model 1 and 2, respectively. A black dotted line indicates a distribution of cut-off velocity v_2 .



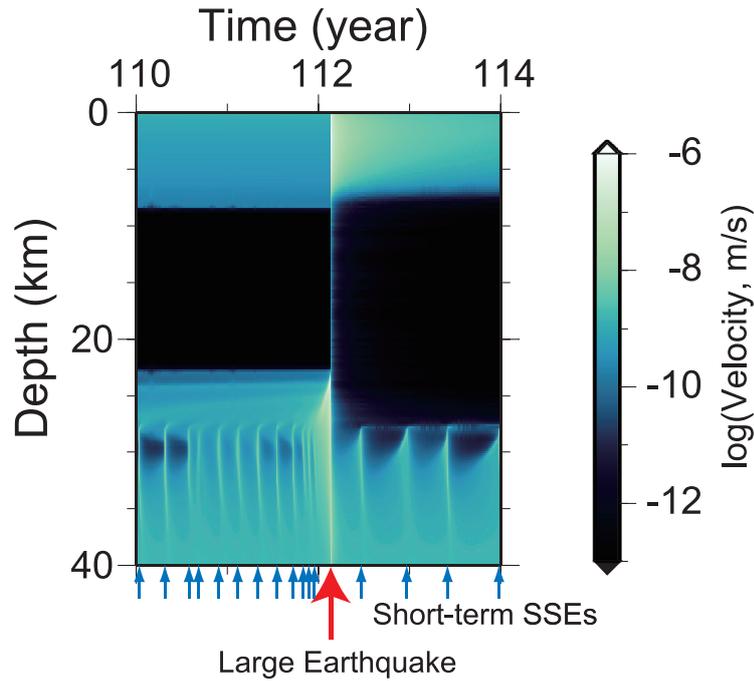
第 2 図 巨大地震サイクル間での, 長期的 SSE 領域 (青破線) および, 短期的 SSE 領域 (赤線) におけるすべり速度の時間変化.

Fig. 2 A blue dashed line and a red solid line are slip velocity during an inter-seismic period at long-term and short-term slow slip event (SSE) region, respectively.



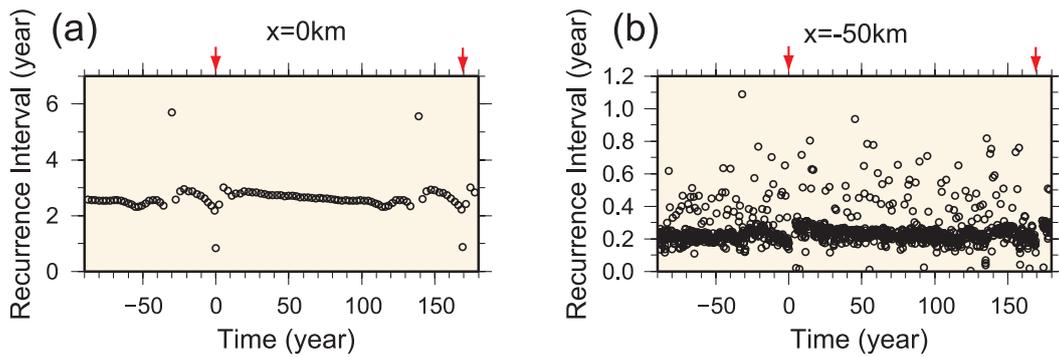
第 3 図 地震サイクルを通した SSE の発生間隔の変化. 赤矢印は, 大地震の発生時を示す. (a) 長期的 SSE 領域における間隔の変化. (b) 短期的 SSE 領域における間隔の変化.

Fig. 3 Recurrence intervals of SSEs in seismic cycles. Red arrows show the occurrence of large earthquakes. (a) Recurrence intervals of SSEs at long-term SSE region. (b) Recurrence intervals of SSEs at short-term SSE region.



第4図 大地震発生（赤矢印）前後におけるすべり速度の分布 ($X=-50\text{km}$)。短期的 SSE の発生時を青矢印で示す。

Fig. 4 Distribution of slip velocity at $X=-50\text{ km}$ around the occurrence of a large earthquake (a red arrow). Blue arrows show the occurrence of short-term SSEs.



第5図 図1(b)のモデル2の場合における SSE の再来間隔。赤矢印は、大地震の発生時を示す。
(a) 長期的 SSE 領域における間隔の変化。(b) 短期的 SSE 領域における間隔の変化。

Fig. 5 Recurrence intervals of SSEs in the case of Model 2 show in Fig.1(b). Red arrows show the occurrence of large earthquakes. (a) Recurrence intervals of SSEs at long-term SSE region. (b) Recurrence intervals of SSEs at short-term SSE region.