



2011年東北地方太平洋沖地震が房総半島スロースリップイベントを促進した可能性

廣瀬, 仁
木村, 尚紀
エネスク ボグダン
青井, 真

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 17:13-21

(Issue Date)

2013-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCDOI)

<https://doi.org/10.24546/81011404>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011404>



2011年東北地方太平洋沖地震が房総半島 スロースリップイベントを促進した可能性

Recurrent Boso slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake

廣瀬 仁¹⁾

Hitoshi Hirose

木村 尚紀²⁾

Hisanori Kimura

エネスク ボグダン³⁾

Bogdan Enescu

青井 真⁴⁾

Shin Aoi

概要: 房総半島沖では、スロースリップイベント (SSE) が群発地震活動を伴って繰り返し発生している。この群発地震活動を SSE の proxy とし、地殻変動データの乏しい過去に遡って SSE の繰り返しを調べた。その結果、約 30 年間に 6 回の SSE が同定され、その繰り返し間隔は平均 68 か月、標準偏差 16 か月と大きく変動していることが分かった。最短の間隔である 2007–2011 年の間には 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M 9.0) が発生しており、この地震による応力変化によって房総半島 SSE の発生が早められた可能性がある。一方、最長の繰り返し間隔である 1983–1990 年の間には 1987 年千葉県東方沖地震 (M 6.7) が発生しており、その影響で SSE の発生が遅らされた可能性がある。

キーワード: 群発地震活動、フィリピン海プレート、クーロン応力変化、GPS、傾斜変動

1 はじめに

房総半島沖ではフィリピン海プレートの沈み込みに伴い、スロースリップイベント (SSE) が繰り返し発生している。この房総半島 SSE は、その継続期間中に群発地震活動を伴うという、日本の他地域の SSE では見られない特徴を持つ (Sagiya, 2004; 防災科研, 2003; Ozawa et al., 2003, 2007)。SSE の繰り返しサイクルを知ることは、プレート境界でのすべり挙動を理解する上で非常に重要である。房総半島 SSE は過去約 30 年間にわたり 6 回の繰り返しが観測されており (図 1)、SSE の繰り返しに関する有用な情報を与えてくれる。

その房総半島 SSE が前回から 4 年 2 か月後の 2011 年 10 月に再来した。この繰り返し間隔はこれまでで最短である。この間には 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生しており、その影響で房総半島 SSE の発生が早まった可能性がある。そこで本研究では、房総半島 SSE の発生サイクルが東北地方太平洋沖地震のような外的要因によって影響を受けている可能性について検討した。

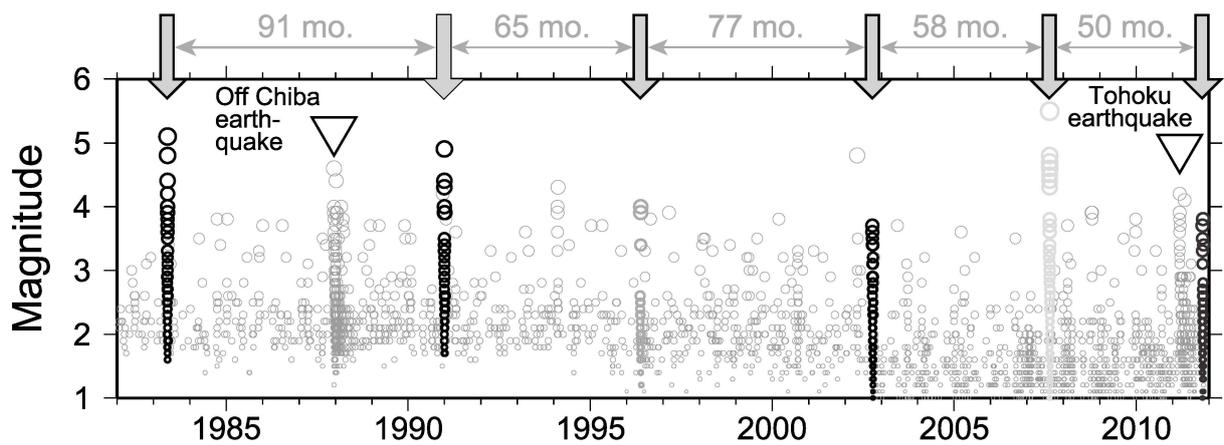


図 1: 過去 30 年間の房総半島沖の地震活動. 図 2B の破線で囲った領域に発生した地震のマグニチュードを示す. 同定された SSE 発生時期を矢印で示す.

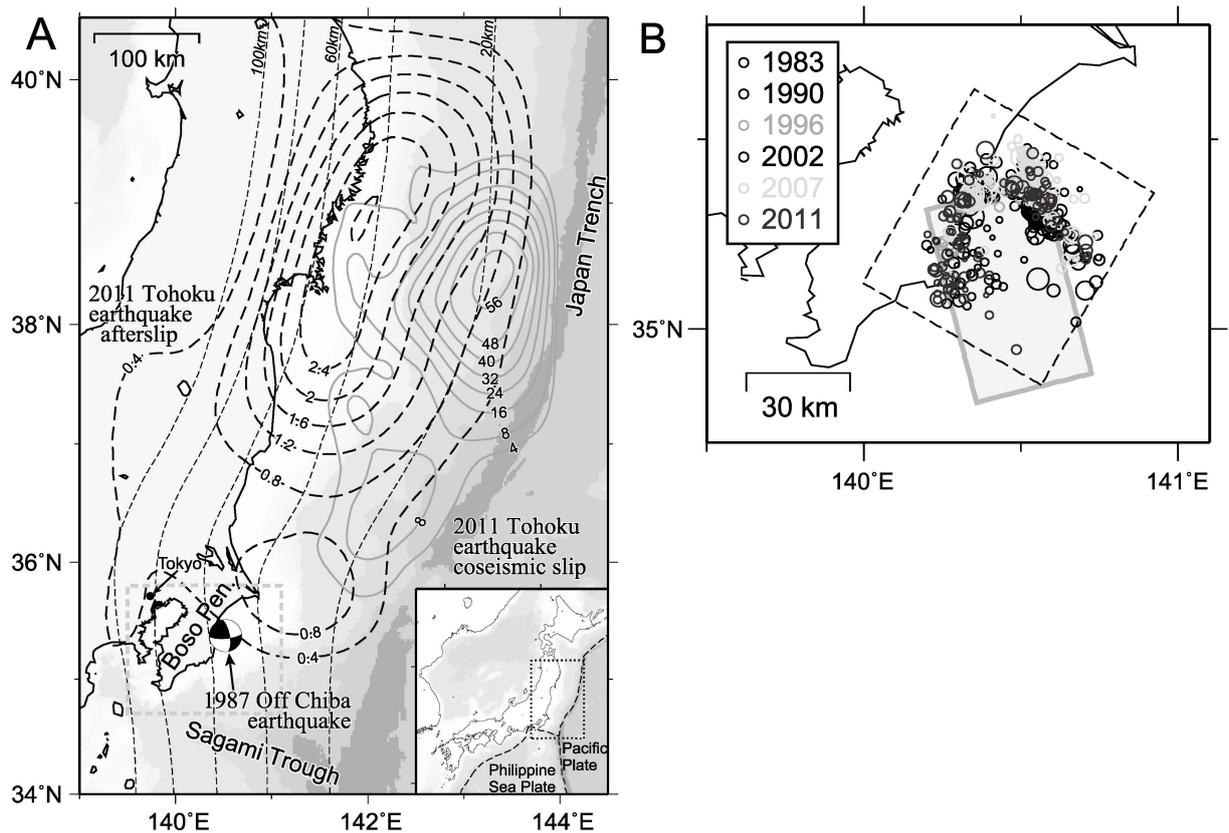


図 2: (A) 2011 年東北地方太平洋沖地震本震時 (灰色実線コンター) (国土地理院, 2011a) および余効すべり (破線コンター, 2011 年 10 月 31 日まで) (国土地理院, 2011b) のすべり分布 (単位 m)、1987 年千葉県東方沖地震の震源メカニズム (Okada and Kasahara, 1990)、太平洋プレート上面の等深度線 (黒点線) (Nakajima and Hasegawa, 2006). (B) 房総半島 SSE に伴う群発地震の震央分布. A の太線矩形の領域を表示している. 破線四角の領域の地震活動を図 1 に示した. 太線矩形は 2011 年 SSE の断層モデル.

2 2011年10月房総半島 SSE

2011年10月下旬から11月上旬にかけて、房総半島周辺の国土地理院 GEONET GPS 観測点の変位記録および防災科研 Hi-net 観測点の高感度加速度計による傾斜記録に、SSE による地殻変動が捉えられている (図 3, 4)。継続時間は約 10 日間で、GEONET 950226 (千葉県いすみ市) で最大水平変位 37 mm を観測した。また最大の傾斜変化を記録した Hi-net KT2H (千葉県勝浦市) では、最初の 2 日間半 (図 3 の期間 (1)) にほぼ西向きに約 $0.3 \mu\text{rad}$ 傾き下がった後、北向きに傾斜方向が変化した (3 日間で約 $1 \mu\text{rad}$: 図 3 の期間 (2))。その後変化速度が鈍化し、その後の 5 日間でほぼ東向きに約 $0.4 \mu\text{rad}$ 傾斜した (図 3 の期間 (3))。

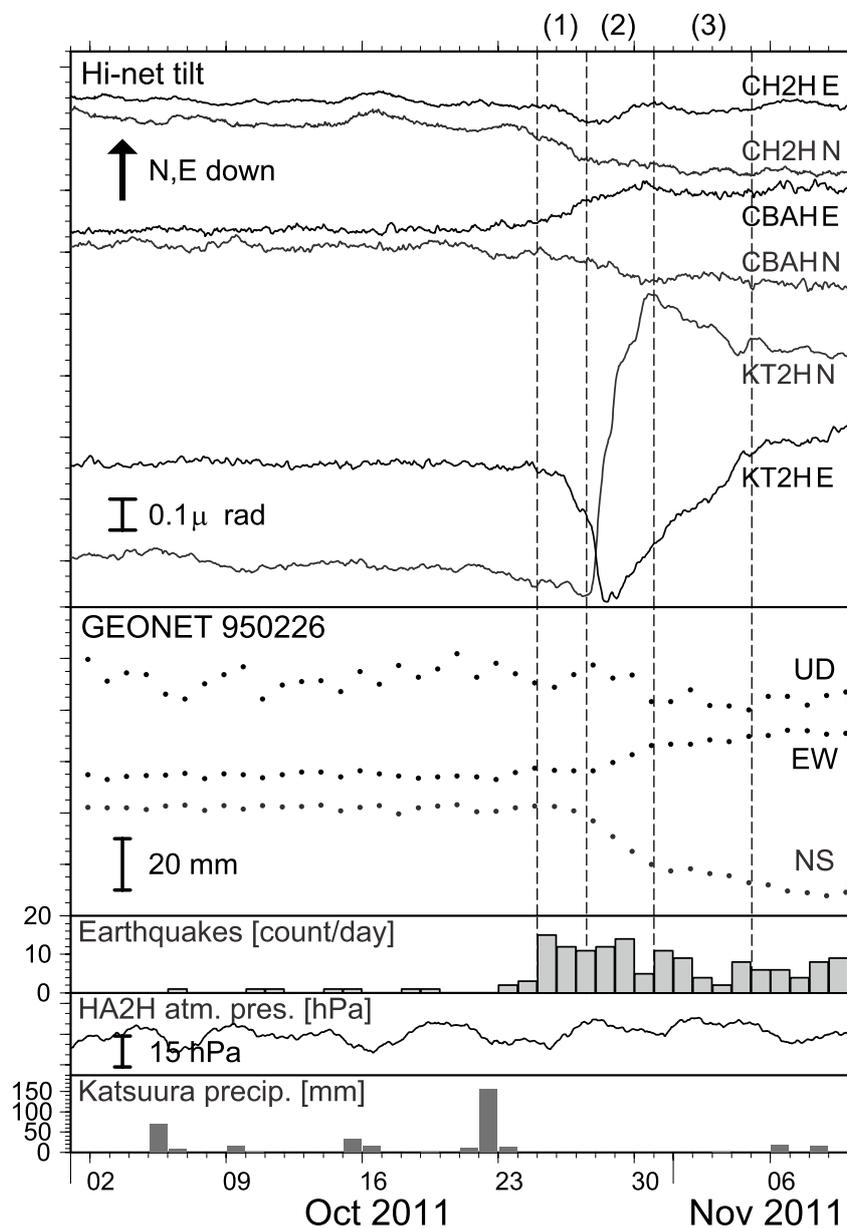


図 3: 2011 年房総半島 SSE の地殻変動データ. 潮汐成分除去後の傾斜変動、GEONET 950226 の変位、日毎の地震数、HA2H の気圧、勝浦の雨量. これらの観測点位置は図 4 に示した. 傾斜記録は BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) により潮汐成分を除去している.

またこの地殻変動が現れたほぼ同じ期間に、房総半島東岸沖合の領域を中心とするおよそ 50 km 四方の範囲で群発地震活動が発生した。この地震活動は、領域の東側で始まり、傾斜記録に傾向の変化が見られた期間 (2) では、震央が西方向の房総半島東岸沿岸部に拡大した。その後徐々に活動度が下がっていった (東西方向の震央の時間変化は図 5F)。これらの震源は、期間全体の SSE を 1 枚の矩形断層で表したすべり領域の深部端周辺に位

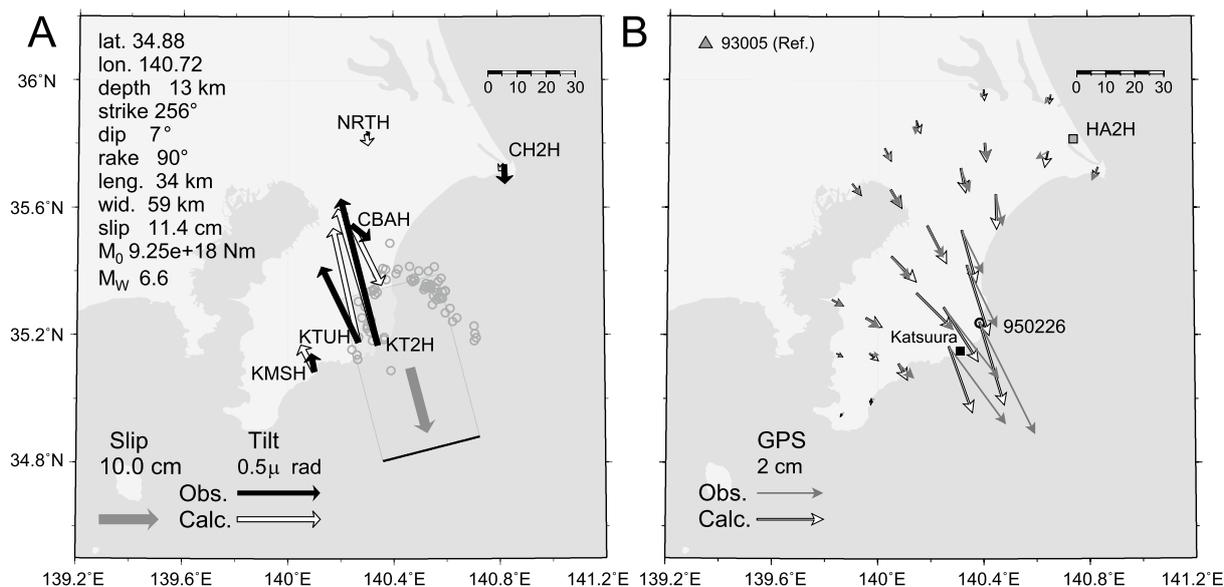


図 4: (A) 2011 年房総半島 SSE の断層モデルおよび傾斜変化の分布. 傾斜変化ベクトル (黒矢印)、傾斜および GPS データから推定された SSE の断層モデル (矩形・矢印)、モデルから計算される傾斜変化ベクトル (白抜き矢印). 期間中発生した地震の震央分布を円で示した. (B) GPS で観測された水平変位 (灰色矢印) および、推定された断層モデルから計算される水平変位 (白抜き矢印). GPS の基準点 (93005)、気圧観測点 HA2H、および気象庁勝浦観測点 (雨量) の位置を示した.

置している (図 4A).

以上の観測結果は、房総半島 SSE のすべりが、東側で始まり、徐々に西方にすべり領域を移していったこと、またそれぞれの場所のすべりによって、その近辺の地震活動を誘発したこと、を示していると考えられる。なおこのような震央の東から西への移動は、過去の 6 回の活動全てで見られる (図 5)。

3 房総半島 SSE の繰り返しの同定

房総半島 SSE の繰り返しの履歴をできるだけ長く過去に遡って調べるため、以下のように SSE 発生の同定を行なった。まず 1996 年 5 月、2002 年 10 月、2007 年 8 月、2011 年 10 月の SSE は GEONET の多くの観測点によって明瞭な地殻変動が捉えられているので (Sagiya, 2004; Ozawa et al., 2003, 2007) (図 3, 4)、これらを典型的な SSE とする。その上で、過去に遡って同様な SSE の有無を知るために、典型的な SSE に伴う群発地震活動の時空間的広がりを基準として、それと同様な群発地震活動を抽出した。地震活動の検討は、約 30 年間にわたりほぼ均質で精度の高い、防災科研高感度地震観測網 (関東東海観測網および Hi-net) 地震カタログに基づいた。さらに抽出された群発地震活動に関して、SSE を示唆する地殻変動記録 (具体的には防災科研傾斜計による記録 (防災科研, 2003)) があるものを「房総半島 SSE」と同定した。

この結果、図 1, 2B に示した 6 つのエピソードが同定された。この SSE サイクルの平均の繰り返し間隔は 68 か月、標準偏差は 16 か月と大きく変化している。これらの繰り返し間隔の中で、平均値からの差が標準偏差を超えているものが 2 回ある: (i) 1983–1990 の間 (91 か月); および (ii) 2007–2011 の間 (50 か月) である。この両者の期間にはそれぞれ (i) 1987 年千葉県東方沖地震 (M 6.7); および (ii) 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M 9.0) が発生している。繰り返し間隔の平均値からの差は統計的には有意とは言えないが、これらの大きい地震は SSE 領域近傍で発生しており、その影響で SSE の繰り返し間隔が変化した可能性がある。その影響を検討するため、正の ΔCFS (静的クーロン応力変化) が SSE 発生間隔を短縮する (負の ΔCFS が間隔を延ばす) と仮定し、これらの地震による SSE 発生領域での ΔCFS を評価した。

4 地震の応力変化による SSE 発生の促進・抑制

ΔCFS は $\Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n$ と定義される (例えば King et al., 1994)。ここで $\Delta\tau$ はせん断応力の変化、 μ' は実効摩擦係数、 $\Delta\sigma_n$ は法線応力の変化である。これらの応力変化の計算は半無限等方均質弾性体を仮定し Okada

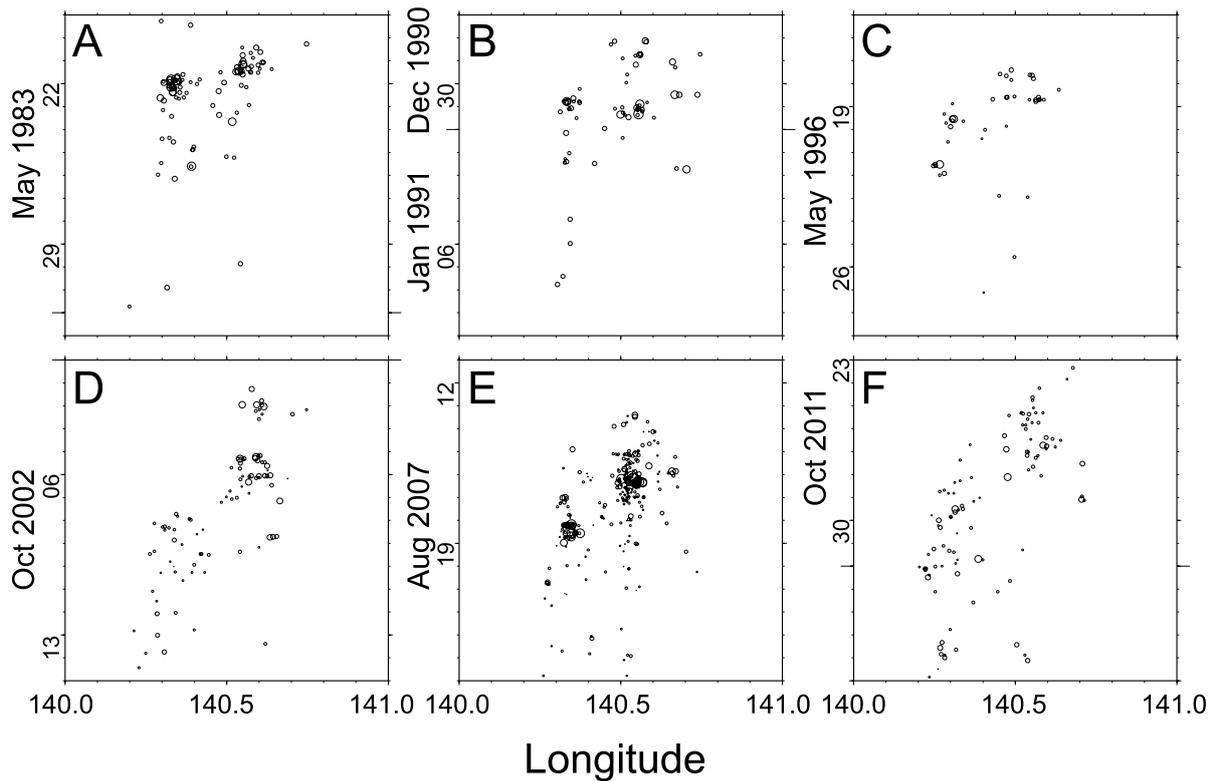


図 5: 各エピソードでの震央の時空間変化. 横軸に経度、縦軸に時間を示す.

(1992) の式で評価した。実効摩擦係数 μ' は 0.4、ポアソン媒質を仮定し、剛性率は 40 GPa とした。震源断層モデルは (i) 1987 年千葉県東方沖地震の震源メカニズムおよび余震分布から提案された Okada and Kasahara (1990) のモデル; (ii) 2011 年東北地方太平洋沖地震での陸上 GPS (Ozawa et al., 2011) と海底地殻変動 (Sato et al., 2011) のデータに基づく、地震時すべりモデル (図 2A, 国土地理院, 2011a) および、陸上 GPS データに基づく余震すべりモデル (図 2A, 国土地理院, 2011b) をそれぞれ仮定した。SSE のすべり面と考えられるフィリピン海プレート上面の形状は、同じ面で発生している繰り返し地震の震源 (Kimura et al., 2006) および反射法地震探査データの統合解析 (武田・他, 2007) の両者の結果をなめらかにつないだものを使用した。フィリピン海プレートと陸側プレートとの境界面におけるすべり方向は Seno et al. (1993) を参照した。

計算結果を図 6 に示した。なお以下の議論では図 6 に示した 4 か所の丸の位置での ΔCFS 値の平均値を使用する。これは、過去 6 回の群発地震活動がすべて東から西への移動を示すこと (図 5) より、SSE すべり領域の中でも丸で示した北東部分が SSE の開始を規定していると考えられるためである。計算された ΔCFS は、(i) が約 0.2 MPa の減少; (ii) が約 0.1 MPa の増加となった。これらは、房総半島 SSE の矩形断層モデル (図 4A) から見積もられる応力降下量 ($\Delta\sigma$) 0.26 MPa と比較して同じオーダーの値であり、非常に大きい割合に相当する。

図 7 に示したような単純なサイクルモデルを考えた場合、応力変化 ΔCFS の $\Delta\sigma$ に対する割合は、繰り返し間隔の平均値からの差と平均間隔との割合に等しくなる。このモデルは単純すぎであるし、 $\Delta\sigma$ や ΔCFS の推定にもかなりの不確実性が含まれると考えられるが、SSE の繰り返し間隔が平均値に対して大幅に変化することを示している。すなわち、1987 年千葉県東方沖地震の影響により、SSE の発生が平均間隔のかかなりの割合に相当する時間遅らされ、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震および余震すべりの影響により、SSE の発生が平均間隔のかかなりの割合に相当する時間早められ得ることが分かった。本研究の結果は、SSE の発生場が応力変化に対して敏感に応答することを示していると考えられる。また、通常、地震や SSE のサイクルを通じた応力変化は、応力降下量から推測する等が行われているが、これとは独立に ΔCFS によって推定できる可能性が示された。

なお 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震および余震すべりは、そのすべり量やトータルの地震モーメントは大きく異なるが、それぞれによる ΔCFS の内訳は両者とも数 10 kPa と、大差ない結果となった。この結果は、 ΔCFS の評価には、メインの地震時・余震すべり領域はほとんど寄与せず、房総 SSE 領域近傍でのすべり分布が影響しているためと考えられるが、このことは、2011 年 3 月時点で本震の影響だけではまだ SSE が発生する応

A. 2011 Tohoku eq.

B. 1987 Off Chiba eq.

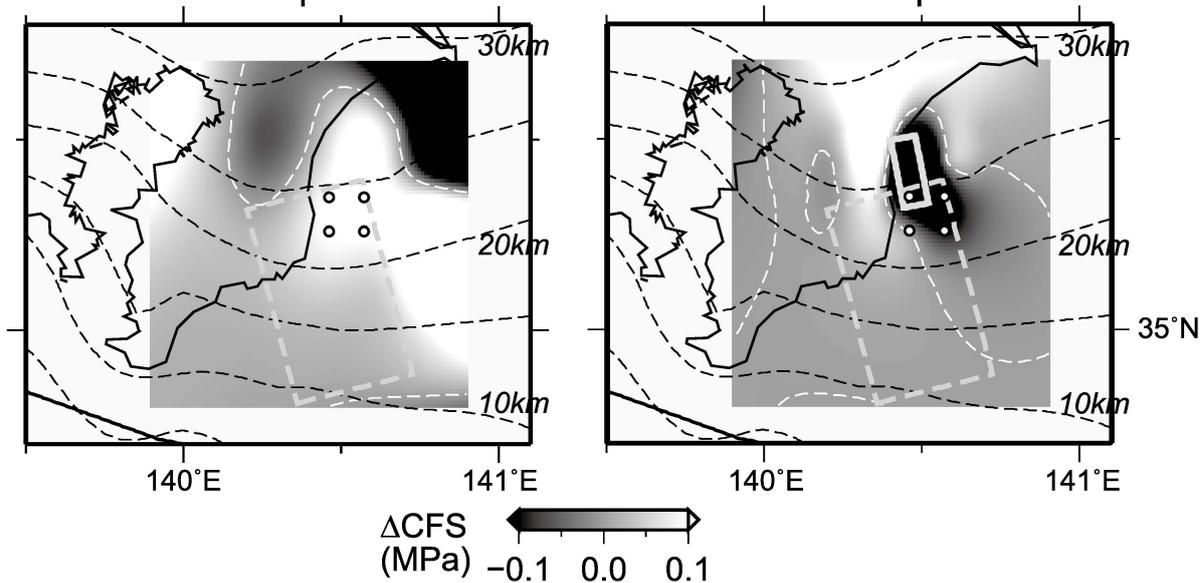


図 6: 房総半島 SSE すべり域周辺の ΔCFS . 4つの丸の位置での応力値の平均値を議論する. (A) 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震および余効すべりによる変化; (B) 1987 年千葉県東方沖地震による変化. グレーの四角がこの地震の震源断層 (Okada and Kasahara, 1990).

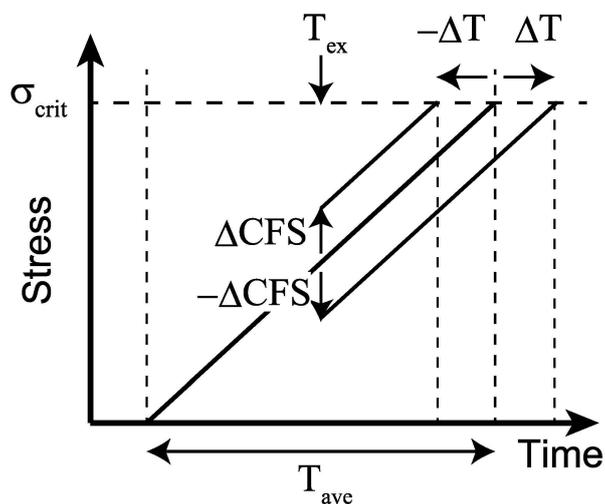


図 7: SSE サイクルにおける応力変化の概念図. 一定の臨界応力 σ_{crit} および一定の応力増加速度をもち、一度のイベントで σ_{crit} を全て解放するとする (応力降下量 $\Delta\sigma = \sigma_{\text{crit}}$). このとき、イベント間で正の (もしくは負の) 応力変化 ΔCFS が生じた場合、次のイベントは繰り返し間隔 T_{ave} より ΔT だけ早く (もしくは遅れて) 発生する. また $\Delta\text{CFS}/\Delta\sigma = -\Delta T/T_{\text{ave}}$ の関係が成り立つ. すなわち、応力降下量に対する応力変化の割合は、繰り返し間隔に対する発生時刻の差に等しい.

力レベルに達しなかったが、SSEの発生時期をある程度早める影響を与え、その後の余効すべりの影響で臨界応力に達してSSEが10月に発生した、と解釈することが可能である。

5 結論

房総半島域の地震活動および地殻変動データから、房総半島SSEが1982年–2011年の30年間に6回繰り返し発生したことを同定した。その間隔の平均値は68か月であるが、標準偏差が16か月と大きく変化することが明らかになった。また、SSEの活動領域の近傍で発生した大地震による ΔCFS の評価から、1987年千葉県東方沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震により、SSEの応力降下量の大きな割合に相当する応力変化がSSEのすべり域に作用し、SSEの発生が平均的な間隔に比べて大幅に早められたり遅らされた可能性が高いことが分かった。このことは、SSEの発生場が応力変化に対して敏感に応答すること、言い換えれば、SSEの繰り返しサイクルでの応力変化が、0.1 MPa程度のオーダーであることを示唆する。

(本論文は Hirose et al. (2012) の概要を日本語で紹介したものである。)

謝辞： 国土地理院 GEONET データ、および気象庁の雨量観測データを利用させていただきました。東北地方太平洋沖地震のすべり分布は国土地理院の西村卓也氏よりご提供いただきました。本研究で使用している地震カタログや高感度加速度計データは、防災科研地震・火山観測データセンターの方々による長年にわたる観測網の維持管理およびデータ解析によるものです。記して感謝いたします。

参考文献

- 防災科学技術研究所, 地殻傾斜の連続観測で捉えた2002年10月に発生した房総半島東方沖のスロースリップ, 地震予知連絡会会報, 69, 198–204, 2003.
- Hirose H., Kimura H., Enescu B., and Aoi S., Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109, 38, 15157–15161, 2012.
- Kimura H., Kasahara K., Igarashi T., and Hirata N., Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips, *Tectonophysics*, 417, 101–118, 2006.
- King G. C. P., Stein R. S., Lin J., Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 935–953, 1994.
- 国土地理院, 東北地方太平洋沖地震の陸域及び海域の地殻変動と滑り分布モデル, 2011, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html>
- 国土地理院, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の地震後の変動と滑り分布モデル (暫定), 2011, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314-index.html>
- Nakajima J., and Hasegawa A., Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, 33(16), doi:10.1029/2006GL026773, 2006.
- Okada Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040, 1992.
- Okada Y., and Kasahara K., Earthquake of 1987, off Chiba, central Japan and possible triggering of eastern Tokyo earthquake of 1988, *Tectonophysics*, 172, 351–364, 1990.
- Ozawa S., Miyazaki S., Hatanaka Y., Imakiire T., Kaidzu M., and Murakami M., Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso peninsula, Central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), 1283, doi:10.1029/2002GL016665, 2003.
- Ozawa S., Suito H., and Tobita M., Occurrence of quasi-periodic slow-slip off the east coast of the Boso peninsula, Central Japan, *Earth Planets Space*, 59, 1241–1245, 2007.

Ozawa S., Nishimura T., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., and Imakiire T., Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, 475:373–376, 2011.

Sagiya T., Interplate Coupling in the Kanto District, Central Japan, and the Boso Peninsula Silent Earthquake in May 1996, *Pure Appl. Geophys.*, 161, 2327–2342, 2004.

Sato M., Ishikawa T., Ujihara N., Yoshida S., Fujita M., Mochizuki M., and Asada A., Displacement Above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1395, 2011.

Seno T., Stein S., and Gripp A. E., A Model for the Motion of the Philippine Sea Plate Consistent With NUVEL-1 and Geological Data, *J. Geophys. Res.*, 98, 17941–17948, 1993.

武田哲也, 笠原敬司, 木村尚紀, 相模トラフ周辺域におけるフィリピン海プレート等深度曲線マップの作成 –紙記録のマルチチャンネル反射法探査データのデジタル化復元–, 月刊地球, 号外 57, 115–123, 2007.

Tamura Y., Sato T., Ooe M., and Ishiguro M., A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507–516, 1991.

著者: 1) 廣瀬仁, 理学研究科地球惑星科学専攻, 准教授; 2) 木村尚紀, (独) 防災科学技術研究所, 主任研究員; 3) エネスク ボグダン, 筑波大学生命環境系, 准教授; 4) 青井真, (独) 防災科学技術研究所, 主任研究員

Recurrent Boso slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake

Hitoshi Hirose
Hisanori Kimura
Bogdan Enescu
Shin Aoi

Abstract

Around the Boso Peninsula, central Japan, slow slip events (SSEs) accompanied by earthquake swarm activity occur repeatedly. We identified the repeating history of the SSEs for 30 years using the earthquake activity as a proxy for the SSEs because of scant crustal deformation data showing the early recurrences of the SSEs. Six episodes are identified, with the average duration of the SSE inter-occurrence interval is of 68 months; however there are significant fluctuations from this mean. Here we show that the latest SSE in the Boso peninsula was likely hastened by the stress transfer from the 11 March 2011 great Tohoku earthquake. Moreover, a similar mechanism accounts for the delay of an SSE in 1990, by a nearby earthquake. The low stress build-ups and drops during the SSE cycle can explain the strong sensitivity of these SSEs to stress transfer from external sources.