

# 2007年・2011年房総半島沖スロースリップイベント：群発地震活動の駆動プロセス

## The 2007 and 2011 Boso slow slip events: a driving process for the accompanying earthquake swarm

廣瀬 仁<sup>1)</sup>

Hitoshi Hirose

松澤 孝紀<sup>2)</sup>

Takanori Matsuzawa

木村 武志<sup>3)</sup>

Takeshi Kimura

木村 尚紀<sup>4)</sup>

Hisanori Kimura

概要：房総半島東方沖では、2-7年間隔で、群発地震活動を伴ったスロースリップイベント (SSE) が発生している。2007年と2011年に発生した房総半島 SSE のすべりの時空間発展を得るため、SSE による地殻変動をとらえた傾斜変化および GNSS 変位の時系列記録に対し、Network Inversion Filter を適用した。得られたすべり過程は、群発地震活動の移動と時間的・空間的により相関があることが分かった。このことは、スロースリップが、併発する群発地震の主要な駆動プロセスであることを強く示唆する。

キーワード：地殻変動、スロースリップイベント、群発地震活動、フィリピン海プレート、関東地震

### 1 はじめに

関東地方の房総半島周辺では、フィリピン海プレートが相模トラフに沿って沈み込んでいる。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、1923年関東地震などのプレート境界型巨大地震が繰り返し発生していることが知られている (例えば, Kanamori, 1971; Wald and Somerville, 1995)。その巨大地震震源域に隣接した領域でスロースリップイベント (SSE) が2-7年間隔で繰り返し発生していることが観測されている (Sagiya, 2004; Ozawa et al., 2003, 2007; Hirose et al., 2012)。最も新しいイベントは2014年1月に発生した (Ozawa, 2014; Fukuda et al., 2014)。この房総半島 SSE の際立った特徴は、その発生期間中、すべり領域とほぼ同じ場所に群発地震活動をともなう点である (例えば, Sagiya, 2004)。SSE は世界中の様々な地域で見出されてきているが (例えば, Peng and Gomberg, 2010)、房総 SSE のように群発地震をともなうものは、ハワイ島・キラウエア山南方 (例えば, Segall et al., 2006)、サンアンドレアス断層南部の Salton Trough (Lohman and McGuire, 2007)、ニュージーランド (Delahaye et al., 2009)、エクアドル (Vallée et al., 2013) などでは報告されていない。それらの地域の中で、房総半島周辺は、国土地理院の GNSS (Global Navigation Satellite System) 観測網 GEONET や、防災科学技術研究所 (NIED) Hi-net (高感度地震観測網) 観測点に併設された高感度加速度計 (傾斜計) (Obara et al., 2005) の地殻変動観測点、および、NIED や気象庁、大学等による地震観測点が稠密に展開されており、SSE による地殻変動および地震活動を詳細に議論することができる。本研究では、これらの観測データに基づいて、2007年8月および2011年10月に発生した房総 SSE のすべりの時空間的な発展を推定し、それと群発地震活動との関係を比較することを目的とした。

## 2 データ

SSE による地殻変動のデータとして、図 1 に示した、GEONET 26 観測点の位置座標データおよび Hi-net 4 観測点の傾斜変化データを用いた。傾斜データは、BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を用いて、潮汐成分・気圧応答成分を除去した。その際、気象庁・千葉特別地域気象観測所の気圧データを用いた。変位データとして、国土地理院から公開されている GEONET の「日々の座標値 (F3)」(中川・他, 2009) を用いた。観測点 93005 (江南) を基準点とした。以上の処理を施した時系列データから、直線トレンドを差し引き、SSE によって生じた変位・傾斜変化データとした。また、SSE に伴う地震活動は、Hi-net のルーチン処理に基づく地震カタログを使用している。(Obara et al., 2005)

図 2 に、2007 年および 2011 年の SSE によると考えられる、観測された傾斜変化および地表変位の時系列データを示す。一般的に、SSE のようにゆっくりと進行する地殻変動の始まりと終わりの時刻を定義するのは難しいが、特に KT2H (勝浦東) および CBAH (千葉) における傾斜記録から、2007 年の SSE (以下 2007 SSE) は 8 月 12-13 日から約 10 日間、2011 年 SSE (以下 2011 SSE) は 10 月 25 日頃から約 10 日間の期間、それぞれ発生したとみられる。2007 SSE および 2011 SSE による地殻変動の継続時間は上記のようにほぼ同様であるが、その大きさは異なる。例えば、2007 SSE では、最大傾斜変化  $0.66 \mu\text{rad}$  が KT2H で、最大変位 25 mm が 950226 (千葉大原) で、それぞれ観測されている。それに対して 2011 SSE では、最大傾斜変化  $0.91 \mu\text{rad}$  (KT2H) および最大変位 40 mm (950226) と 2007 SSE よりも大きい地殻変動が観測されている。

SSE に伴う群発地震も、2007 年と 2011 年のエピソードで対照的な活動を示す。2007 SSE に伴う群発地震はより活発で、最大の地震はマグニチュード (M) 5.5 であり、一日あたりの地震数は 100 に達しているのに対し、2011 SSE に伴う地震活動では、M 3.7 のものが最大で、また 1 日あたりの地震数も 14 が最多であった。

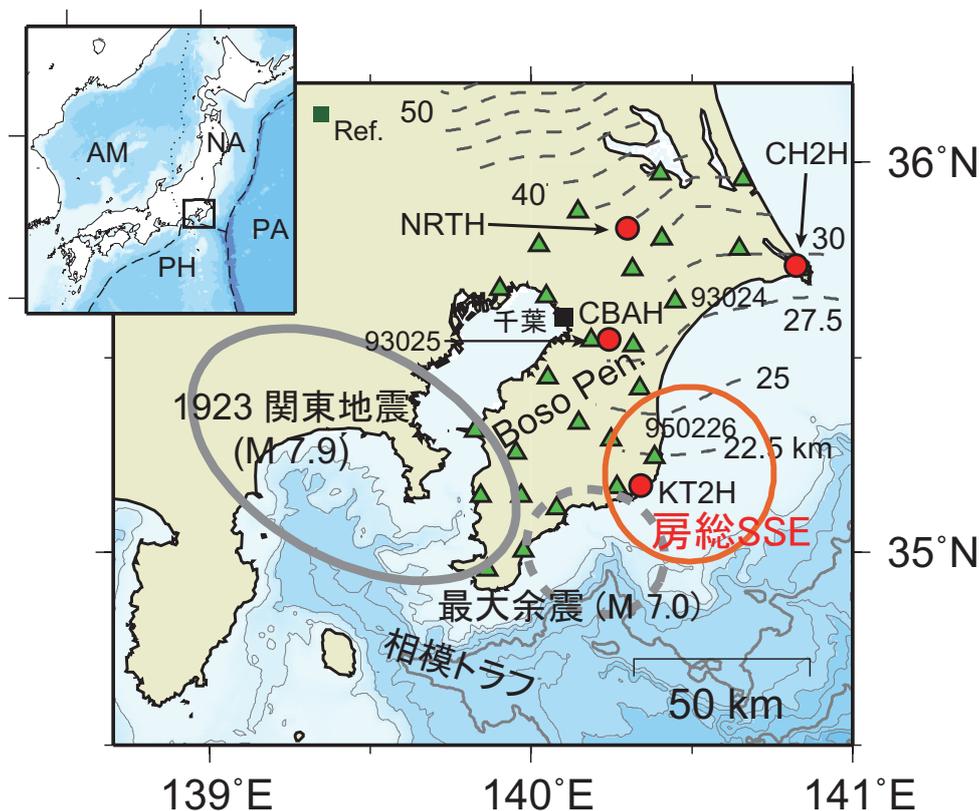


図 1: 関東地方周辺の地震テクトニクスと観測点配置. 房総半島 SSE の発生位置をオレンジの楕円で示す. 1923 年大正関東地震とその最大余震の震源域をそれぞれ灰色実線・灰色点線で示す (武村, 1994; Kimura et al., 2009). 赤円・緑三角はそれぞれ傾斜観測点および GNSS 観測点を示す. 緑四角は GNSS データの基準点位置 (GEONET 93005 江南). 黒四角は千葉特別地域気象観測所の位置. 破線は沈み込むフィリピン海プレート上面の深さ (Kimura et al., 2006). NA: 北アメリカプレート, AM: アムールプレート, PA: 太平洋プレート, PH: フィリピン海プレート.

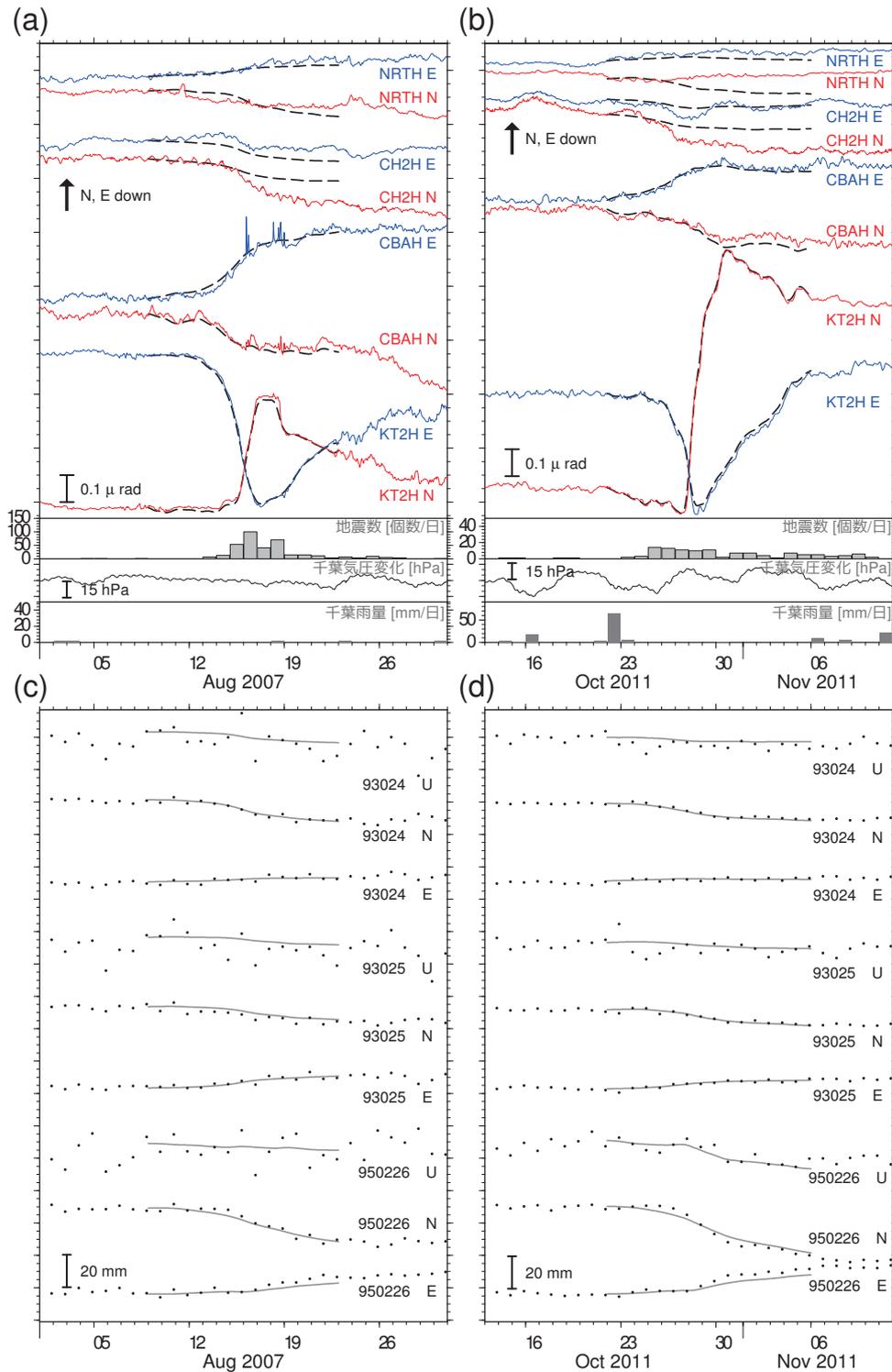


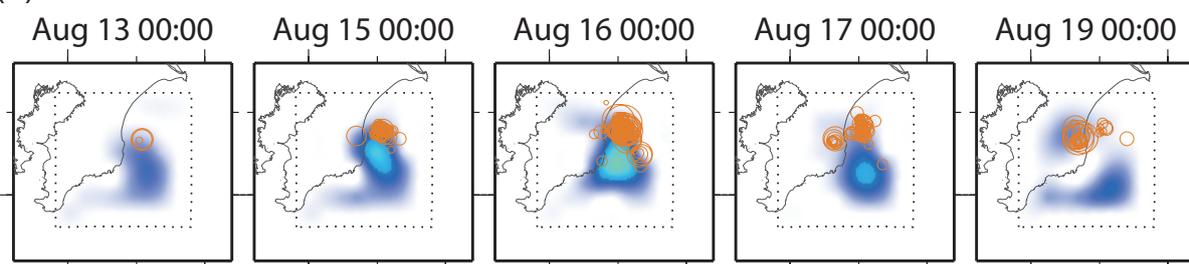
図 2: 2007 年 (a, c) および 2011 年 (b, d) の房総 SSE による傾斜変化データ (a, b) および GNSS 変位データ (c, d) の時系列記録. それぞれ直線トレンドは取り除いている. また傾斜データに関しては、潮汐成分および気圧応答成分も取り除いている. (a, b) 中の破線および (c, d) 中の灰色線は、推定されたすべり過程から計算された理論的な傾斜変化および変位を示す. (a, b) には、SSE 領域で発生した地震 (30 km 以浅) の一日あたりの個数、千葉の気圧変化、千葉での雨量を表示している.

### 3 解析方法

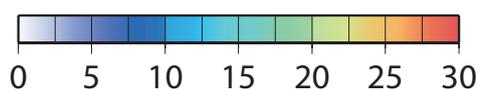
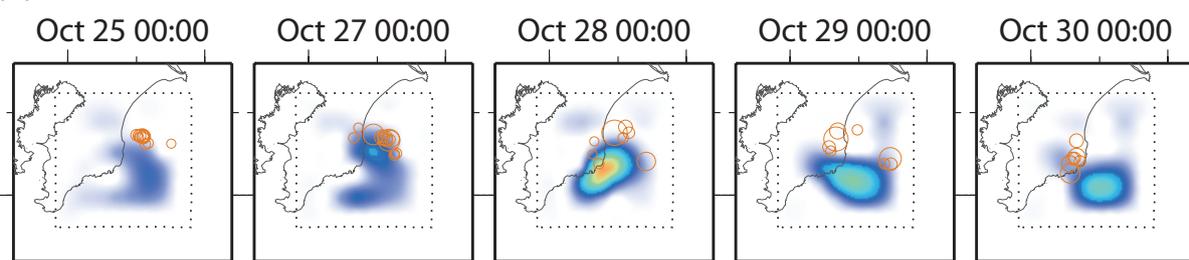
上述の前処理を施した傾斜変化および変位の時系列データに同時に、Network Inversion Filter (Segall and Matthews, 1997; Hirose and Obara, 2010) を適用した。房総 SSE が、沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートとの境界面上で発生していると仮定し、その断層面を  $10 \times 10 \text{ km}^2$  の面積の平面小断層  $8 \times 8$  個で表現した。ここでプレート境界面の形状は、多くの反射法地震探査結果をまとめた研究 (武田・他, 2007) およびこのプレート境界で発生していると考えられる繰り返し地震の研究 (Kimura et al., 2006) に基づいた。各小断層でのすべり方向は、すべりベクトルの地表投影した方向を  $N165^\circ E$  に固定した。理論的な地殻変動の計算は Okada (1992) の半無限均質等方弾性体に対する式によった。

### 4 すべり過程と地震活動

#### (a) 2007 SSE



#### (b) 2011 SSE



すべり速度 (m/yr)

地震のマグニチュード

図 3: 推定されたすべり速度分布の時間変化. (a) 2007 SSE, (b) 2011 SSE. オレンジ色の円は、表示した時刻の前後 24 時間に発生した地震の震央とそのマグニチュードを示す. 各スナップショット間の時間間隔は一定ではないことに注意が必要.

図 3 に、推定された 2007 SSE と 2011 SSE のすべり過程を示す。2007 SSE のすべりは、研究領域の東部海域で開始し、北にすべり域が拡大した。そのすべり伝播に伴い、北部の最も活発な地震活動を示した領域 (図 4 の領域 A) での地震が発生し始めた。その後、すべりは西側の陸側領域へ伝播するとともに、同領域での地震活動が引き続いて起こった。一方、2011 SSE では、エピソード初期は、2007 SSE と同様、すべりが東部海域で開始し、北に拡大した。その後、南部のすべりが西方向 (房総半島南東海岸付近) へ伝播するとともに、そこでの活発な地震活動が引き続いて起こった。

2 つの SSE の最終的なすべり分布を図 4 に示した。2007 SSE の主たるすべりは、東部海域で南北方向に広がっている。この期間の群発地震の震源は、すべり領域の端、特に北端の近くに集中している (図 4 の領域 A)。一方、2011 SSE のすべりは、研究領域の南部において東西に広がっている。またこの期間の地震活動は、房総半島の南海岸付近 (図 4 の領域 B) で活発であったが、2007 SSE では、この場所での地震活動はほとんど見られ

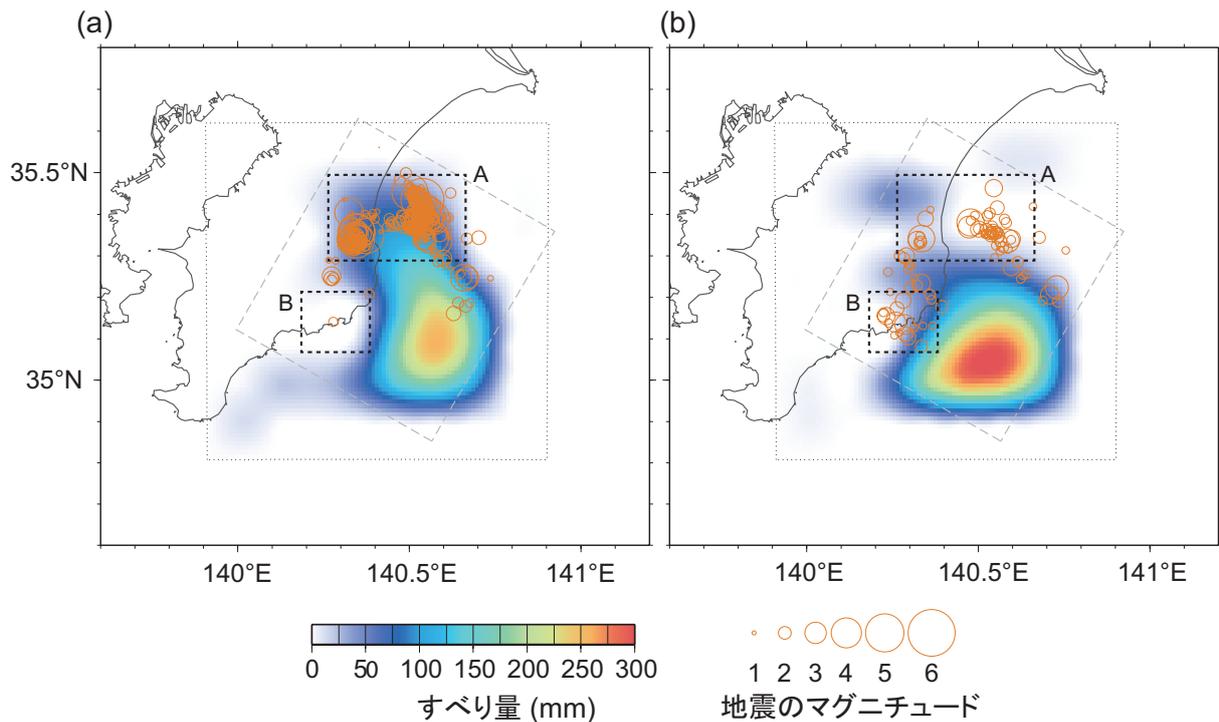


図 4: 2007 SSE と 2011 SSE のすべり分布 (カラースケール). それぞれの SSE 期間中に発生した地震の震央をオレンジ色の円で示す. 灰色破線の四角で示した領域での地震を SSE に関連するものとして考慮した.

なかった。他方で A 領域での地震活動は、2011 SSE では 2007 SSE のときほど活発ではなかった。それぞれの SSE で解放された地震モーメントは、2007 SSE が  $1.0 \times 10^{19}$  Nm (モーメントマグニチュード  $M_w$  6.6)、2011 SSE が  $1.1 \times 10^{19}$  Nm ( $M_w$  6.6) と推定され、両者の規模はほぼ同じであったことが分かった。

2つの SSE の震源時間関数 (モーメントレート) と地震活動度との対比を図 5 に示した。2007 SSE (図 5a) では、SSE のモーメント解放は、群発地震が開始する少なくとも 1 日前にはじまっているように見える。この期間全体を通して、モーメントレートの時間変化は、地震活動レートの変化とよく相関している。モーメントレート関数と地震活動レートに見られる 2 つのピークは、2007 SSE の初期の、東部海域での活動と、それに引き続く西部陸域での活動に対応している。一方、2011 SSE (図 5b) では、モーメントレート関数は、活動の初期にはほぼ一定のレートで増大するが、10 月 28 日頃に急激な上昇がみられる。これに対し、地震活動レートは、活動初期の 10 月 25 日に最大となり、SSE 期間を通じてよく似た活動度が続いた。

## 5 議論と結論

この研究によって、2007 年および 2011 年房総半島 SSE のすべりと地震活動が、時空間的によく相関していることが示された。これは、進行するスロースリップによって地震活動が誘発されていることを強く示唆している。傾斜変化データは、このように地震をトリガーしうる非地震性の過程をとらえるのに優れた能力を有している。これを利用すれば、SSE の進行とともに増大する群発地震のポテンシャル (発生確率) を、準リアルタイムで追跡できる可能性がある。

(本論文は Hirose et al. (2014) 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 のデータを利用させていただきました。また気象庁、東京大学地震研究所の地震観測波形データを利用させていただきました。気象庁の気象観測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。

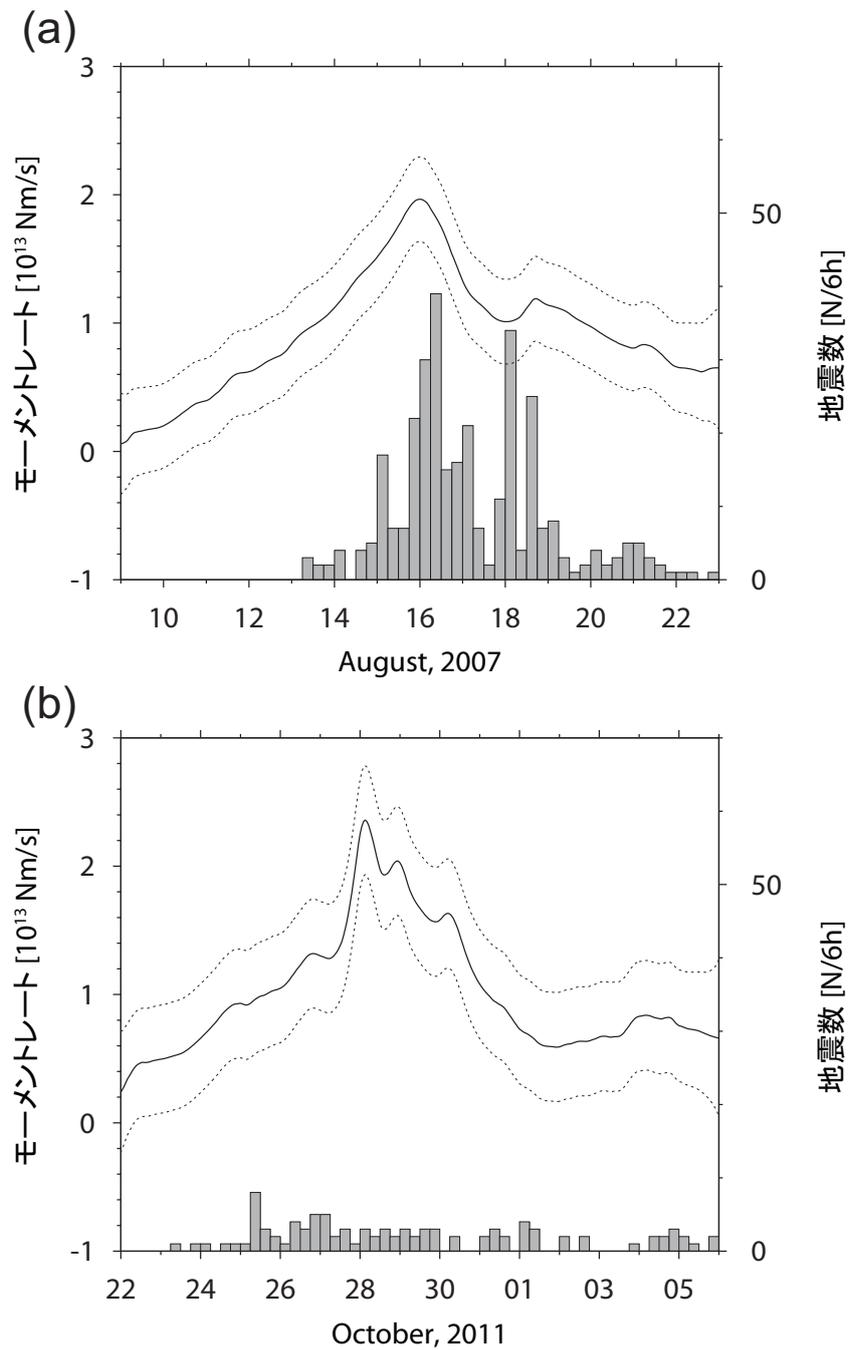


図 5: SSE の震源時間関数 (モーメントレート関数) と地震活動度 (6 時間あたりの地震数). (a) 2007 SSE, (b) 2011 SSE. 太実線がモーメントレート、破線がその 1 標準偏差の範囲 (左側の軸). 棒グラフは 6 時間ごとの地震数 (右側の軸).

## 参考文献

- Delahaye, E. J., J. Townend, M. E. Reyners, and G. Rogers (2009), Microseismicity but no tremor accompanying slow slip in the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 277(1–2), 21–28.
- Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato (2014), Imaging of the early acceleration phase of the 2013–2014 Boso slow slip event, *Geophys. Res. Lett.*, 41(21), 7493–7500, doi:10.1002/2014GL061550.
- Kanamori, H. (1971), Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 49, 13–18.
- Hirose, H., and K. Obara (2010), Recurrence behavior of short-term slow slip and correlated nonvolcanic tremor episodes in western Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B00A21, doi:10.1029/2008JB006050.
- Hirose, H., H. Kimura, B. Enescu, and S. Aoi (2012), Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 109(38), 15157–15161.
- Hirose, H., T. Matsuzawa, T. Kimura, and H. Kimura (2014), The Boso slow slip events in 2007 and 2011 as a driving process for the accompanying earthquake swarm, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2014GL059791, doi:10.1002/2014GL059791.
- Kimura, H., K. Kasahara, T. Igarashi, and N. Hirata (2006), 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.
- Kimura, H., K. Kasahara, and T. Takeda (2009), Subduction process of the Philippine Sea Plate off the Kanto district, central Japan, as revealed by plate structure and repeating earthquakes, *Tectonophysics*, 472, 18–27.
- Lohman, R. B., and J. J. McGuire (2007), Earthquake swarms driven by aseismic creep in the Salton Trough, California, *J. Geophys. Res.*, 112(B4), doi:10.1029/2006JB004596.
- 中川弘之・他 (2009), GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, 118, 1–8.
- Obara, K., K. Kasahara, S. Hori, and Y. Okada (2005), A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, *Rev. Sci. Instrum.*, 76, 021301, doi:10.1063/1.1854197.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040.
- Ozawa, S., S. Miyazaki, Y. Hatanaka, T. Imakiire, M. Kaidzu, and M. Murakami (2003), Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso peninsula, Central Japan, *Geophys. Res. Lett.* 30(6), doi:10.1029/2002GL016665.
- Ozawa, S., H. Suito, and M. Tobita (2007), Occurrence of quasi-periodic slow-slip off the east coast of the Boso peninsula, Central Japan, *Earth Planets Space*, 59, 1241–1245.
- Ozawa, S. (2014), Shortening of recurrence interval of Boso slow slip events in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41(8), 2762–2768, doi:10.1002/2014GL060072.
- Peng, Z., and J. Gomberg (2010), An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena, *Nature Geosci*, 3(9), 599–607.
- Sagiya, T. (2004), Interplate coupling in the Kanto district, central Japan, and the Boso peninsula silent earthquake in May 1996, *Pure Appl. Geophys.*, 161, 2327–2342.
- Segall, P., and M. Matthews (1997), Time dependent inversion of geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102(B10), 22391–22409.

Segall, P., E. K. Desmarais, D. Shelly, A. Miklius, and P. Cervelli (2006), Earthquakes triggered by silent slip events on Kilauea volcano, Hawaii, *Nature*, 442, 71–74.

武田哲也, 笠原敬司, 木村尚紀 (2007), 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 No. 57, 115–123.

武村雅之 (1994), 1923 年関東地震の本震直後の余震活動 –岐阜測候所の今村式二倍強震計記録の解析–, 地震 2, 46, 439–455.

Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro (1991), A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104(3), 507–516.

Vallée, M. et al. (2013), Intense interface seismicity triggered by a shallow slow slip event in the Central Ecuador subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 118(6), 2965–2981, doi:10.1002/jgrb.50216.

Wald, D. J., and P. G. Somerville (1995), Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 159–177.

著者： 1) 廣瀬仁, 都市安全研究センター, 准教授; 2) 松澤孝紀, (独) 防災科学技術研究所, 主任研究員; 3) 木村武志, (独) 防災科学技術研究所, 主任研究員; 4) 木村尚紀, (独) 防災科学技術研究所, 主任研究員

# The 2007 and 2011 Boso slow slip events: a driving process for the accompanying earthquake swarm

Hitoshi Hirose  
Takanori Matsuzawa  
Takeshi Kimura  
Hisanori Kimura

## Abstract

Near the Boso Peninsula, central Japan, slow slip events (SSEs) accompanied by earthquake swarms repeatedly occur every 2 to 7 years. We apply a Network Inversion Filter to tilt change and GNSS displacement data simultaneously in order to obtain the spatiotemporal slip evolution of the Boso Peninsula SSEs in 2007 and 2011. The inverted slip propagations correlate well both spatially and temporally with the migration of the accompanying seismicity. This indicates that the Boso slow slip is a major driving process for earthquake swarm activities.

©2015 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.