

# スロースリップイベントによる応力時間変化の計算: 房総半島スロースリップイベントへの適用と地震活動との対比

## Calculation of time-dependent stress change due to a slow slip event: an application to a Boso slow slip event and the comparison with its accompanying earthquake swarm

廣瀬 仁<sup>1)</sup>

Hitoshi Hirose

松澤 孝紀<sup>2)</sup>

Takanori Matsuzawa

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。この群発地震の活動は、SSE のすべり過程が大きく影響していることが指摘されている。しかしながら両者の定量的な関係はよく分かっていない。その理解への一歩として、地殻変動観測データから推定された SSE のすべり過程を基に、媒質中の任意の点における応力の時間変化を評価できるツールを作成し、それを 2007 年房総半島 SSE と同時期に発生した群発地震活動に対して適用し、発生した地震数の時間変化と比較できるようになった。このような対比によって、群発地震発生の要因が定量的に議論できるようになると期待される。

キーワード: 地殻変動、すべり過程、応力計算、群発地震活動

### 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。その沈み込みに関連して、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、その発生期間中に、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)。この群発地震活動の発生場所や活動度などは、地殻変動データのインバージョン解析により推定された、SSE のすべりの時間発展と密接に関連していることが見出され、そのことから、すべりが地震発生に直接的に影響していることが示唆されている (Hirose et al., 2014)。しかしながら、SSE のすべり過程と地震活動との定量的な関係については、まだよく分かっていない。本研究では、この両者の定量的な関係性の理解に向けた一歩として、地殻変動データから推定されているすべり量の時間空間変化を入力とし、媒質中の任意の点における応力の時間変化を計算できるツールを開発した。これを 2007 年房総半島 SSE と同時期に発生した群発地震活動に対して適用し、発生した地震数の時間変化と比較した例を示す。

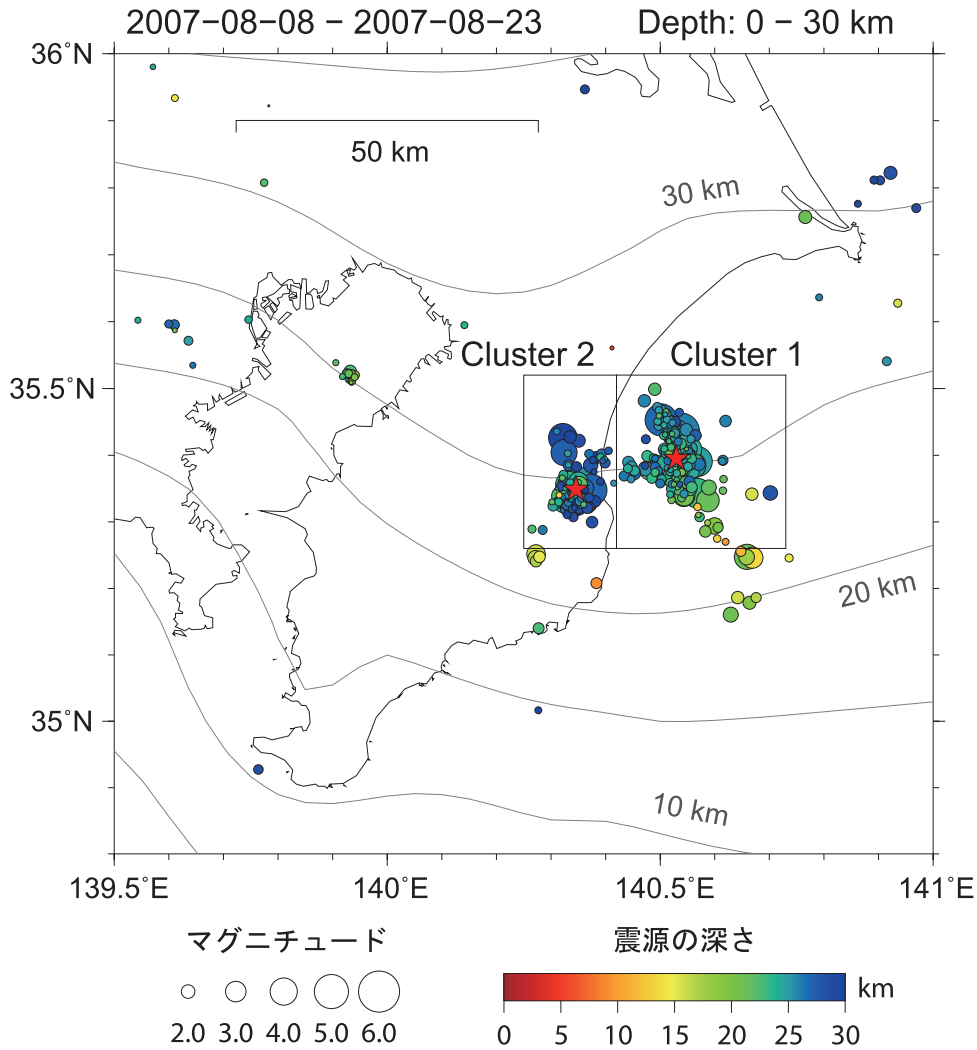


図 1: 2007 年房総半島 SSE 期間中の震源分布図. 円の位置が震央、色が深さ、円の大きさがマグニチュードを表す. 2007 年 8 月 8-23 日の期間の深さ 30 km 以浅のものを表示した. 破線はプレート境界面の等深線を表し、Hirose et al. (2014) で仮定されたのと同様 (武田・他, 2007; Kimura et al., 2006) に基づく. 点線で囲った 2 つの領域を主要な地震活動領域と仮定し、これらに含まれる地震の平均位置を星印で示した.

## 2 方法

今回開発した応力計算ツールは、GNSS 変位データおよび (または) 傾斜データに適応でき、カルマンフィルターに基づく、断層すべりの時間発展を推定するインバージョン手法 (Hirose and Obara, 2010; Hirose et al., 2014) に対応したものである。このインバージョン手法は、Network Inversion Filter (Segall and Matthews, 1997) と呼ばれる。

Hirose and Obara (2010); Hirose et al. (2014) では、すべり領域を複数の矩形小断層に分割し、各小断層ではすべり量は均一で時間依存する、という形ですべりの時空間変化を表現する。これと同じソース表現、すなわち、各小断層でのすべり量の時間関数を入力とする。各々の小断層でのすべりに対する、応力評価点での応力テンソルの値 (グリーン関数) は、半無限均質等方弾性体媒質中の定式を与えた Okada (1992) に基づいて計算している。この仮定媒質は、上記のインバージョンで用いられているものと同じである。より正確には、Okada (1992) では、矩形断層上でのすべりに対する、媒質中の点における変位  $u_i$  およびその空間微分  $\partial u_i / \partial x_j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) の表式が与えられている。これらをもとに、以下の歪テンソルおよび線形等方弾性体の応力・歪の関係式:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \sum_{k=1}^3 \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (2)$$

により、応力テンソルを計算する。ここで  $\epsilon_{ij}$  は歪テンソル、 $\sigma_{ij}$  は応力テンソル、 $\lambda, \mu$  はラメ定数 ( $\mu$  は剛性率)、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。さらに  $\lambda = \mu$  のポアソン固体とし、媒質の剛性率は 40 GPa を仮定している。

このように得られた応力テンソル  $\sigma_{ij}$  を、レシーバーで仮定した震源メカニズムへの方向へ座標変換することにより、ある断層面上でのすべり方向に対するせん断応力および法線応力を求める。

### 3 2007年房総半島 SSE への適用と地震活動との比較

Hirose et al. (2014) により、2007年8月に発生した房総半島 SSE のすべりの時空間発展が求められている。この推定では、国土地理院の GNSS 観測網である GEONET および防災科学技術研究所 Hi-net 併設の高感度加速度計 (傾斜計) による観測データに基づき、房総半島周辺域でのフィリピン海プレート上面の形状に沿うように  $10 \times 10 \text{ km}^2$  の大きさの小断層を  $8 \times 8$  個配置し、それぞれの小断層上でのすべりの時間関数が得られている。

このすべり過程を入力とし、上記の手順で応力計算を行った。応力の評価地点は、2007年房総半島 SSE の期間中に発生した群発地震活動のうち、主要な2つの地震活動領域 (クラスター) の位置とした (図1)。具体的には、防災科研 Hi-net のルーチン解析による震源カタログから、2007年房総半島 SSE の期間として Hirose et al. (2014) で同定された2007年8月8日から23日の期間、深さ 30 km 以浅の震源を抽出し、図1に示す2つのクラスターに含まれる震央の平均位置 (図1中の星印) を定義する。そしてこれらの震源はほぼプレート境界付近に位置することから (Hirose et al., 2014)、インバージョン解析で使用したプレート境界面モデルにて、これらの震央の位置におけるプレート面の深さをもとめ、それらの点を応力評価点とした。また、評価する応力の方向として、すべりの方向はインバージョン解析で SSE のすべり方向と仮定したのと同じ方向で、プレート境界面でのすべり方向を地表面に投影した方向が  $N165^\circ E$  となる方向とした。この方向への断層運動が促進されるようなせん断応力変化を正の方向とする。

この結果を図2に示す。図に示されたように、任意の点における任意の方向のせん断・法線応力の時間変化が評価でき、それと地震個数の時間変化とを対比することが可能となった。

2007年の房総半島 SSE によって生じたせん断応力変化の大きさは、Cluster 1、Cluster 2 どちらも数 100 kPa のオーダーであった。しかしながらその符号は反対、すなわち、Cluster 1 では正のせん断応力変化に対し、Cluster 2 ではほぼすべての期間で負のせん断応力変化となった。一方、法線応力変化は、双方のクラスターにおいて -10 kPa のオーダーの変化となり、せん断応力変化と比べると1オーダー小さい変化量となった。時間的な比較では、地震活動のピークに対応するのは、せん断応力変化のピークではなく、せん断応力速度の正のピークと関連がありそうにも見える。

### 4 議論と結論

本研究で開発した手法によって、媒質中の任意の点において、SSE などの準静的なすべりによる任意の方向のせん断・法線応力の時間変化が評価できるようになった。これにより、SSE によって生じた応力の時間変化と、発生した地震数の時間変化とを比較することが可能となり、SSE とそれに伴う地震活動との関係性を定量的に議論していく上での一つのステップが達成された。また2007年房総半島 SSE の際の2か所への適用事例を示した。事例が限られているので確定的なことは言えないが、応力速度が地震活動において重要な役割を果たしていることを示唆している可能性がある。今後、このような対比の事例を増やしていくことによって、群発地震発生の要因が定量的に議論できるようになると期待される。

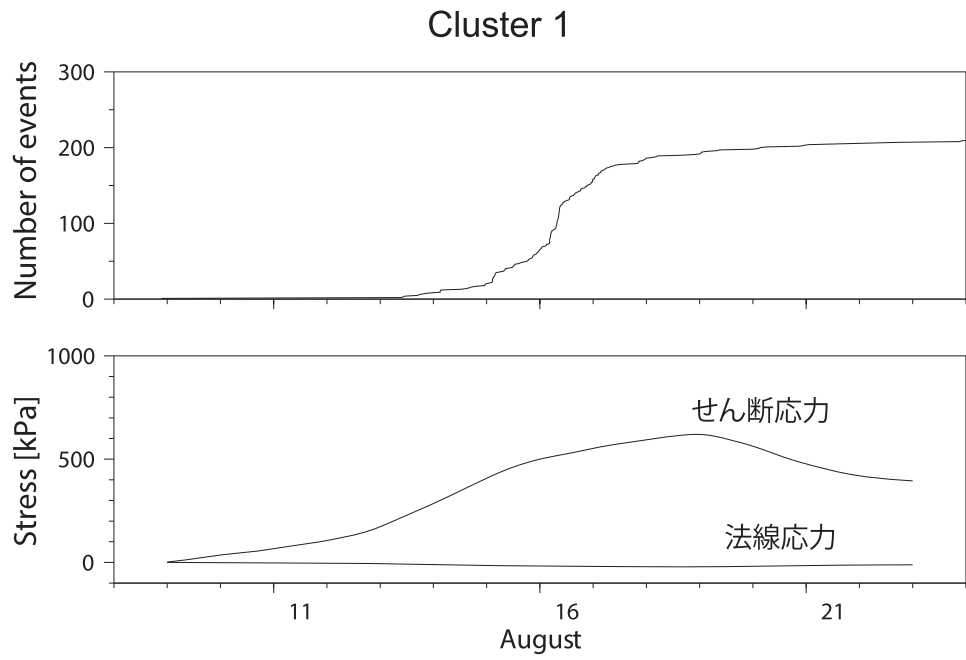
謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP16K05542, JP16H06474 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 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), 74937500, doi:10.1002/2014GL061550.
- 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, *Tectonophys.*, 417, 101–118.
- 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.
- 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.
- 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.
- 著者： 1) 廣瀬仁, 都市安全研究センター, 准教授; 2) 松澤孝紀, (国研) 防災科学技術研究所, 主任研究員

(a)



(b)

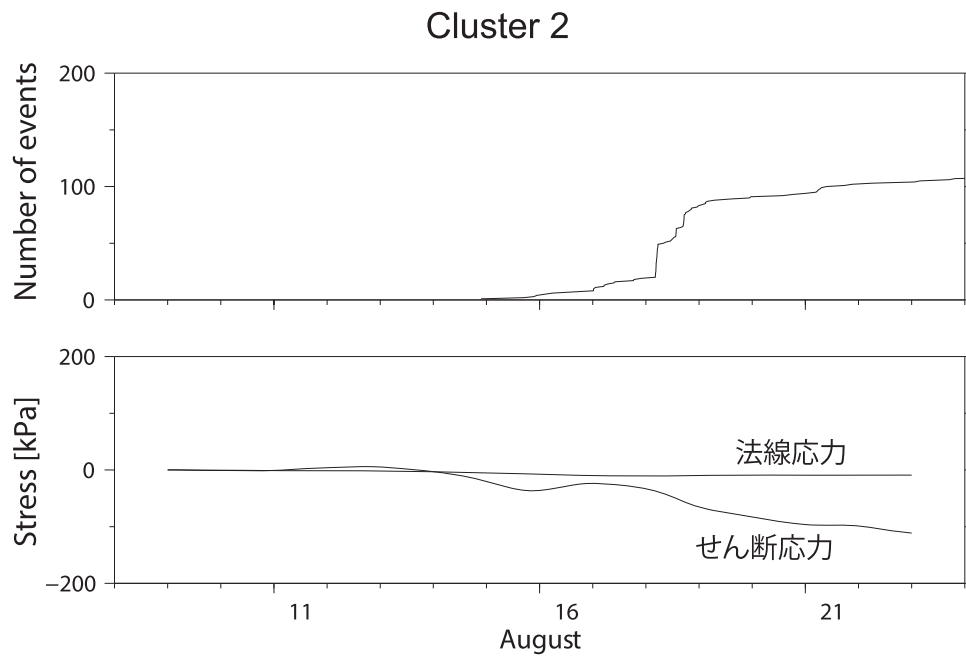


図 2: 各地震活動クラスターの平均位置で計算された応力の時間変化と各クラスターでの累積地震個数. (a) Cluster 1; (b) Cluster 2.

# Calculation of time-dependent stress change due to a slow slip event: an application to a Boso slow slip event and the comparison with its accompanying earthquake swarm

Hitoshi Hirose  
Takanori Matsuzawa

## Abstract

Near the Boso Peninsula, central Japan, slow slip events (SSEs) accompanied by earthquake swarms repeatedly occur every 2 to 7 years. These earthquake swarms are thought to be affected by the spatio-temporal source slip process of the accompanied SSE. However, a quantitative relation between an SSE and an earthquake activity is poorly known. As a first step toward the understanding on this relation, we developed a tool for evaluation of stress change time function at any location in a medium and applied this to the 2007 Boso SSE and its accompanying earthquake swarm. This enables to compare time-dependent shear and normal stresses with temporal development of the number of earthquakes in a cluster. It is expected that this kind of comparison could help us discussing a cause of the accompanying earthquake swarm quantitatively.

©2018 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.