

スロースリップイベントによる地震活動誘発効果を陽に組み込んだ ETAS モデルの開発  
 Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of  
 slow slip events on seismicity

○西川友章・西村卓也

○Tomoaki NISHIKAWA, Takuya NISHIMURA

Slow slip events (SSEs) at subduction zone plate boundaries sometimes trigger earthquake swarms and great earthquakes. However, the epidemic-type aftershock-sequence (ETAS) model, which is a standard statistical model of seismicity, does not consider the triggering effect of SSEs on seismicity at all. Therefore, when an SSE occurs at a plate boundary, probabilistic earthquake forecasts based on the ETAS model fail to predict the observed seismicity. Here, we developed a new ETAS model by explicitly incorporating the SSE moment rate estimated from Global Navigation Satellite System observation data into the existing ETAS to consider the triggering effect of SSEs. This model assumes a linear- or power-law relation between the SSE moment rate. We applied this new model to three SSEs along the shallow part of the Hikurangi Trench, New Zealand, and nearby seismicity. Our new model enabled us to better estimate the probability of earthquake occurrence by considering the increase in the seismicity rate due to SSEs.

## 1. はじめに

世界各地の沈み込み帯プレート境界では、スロースリップイベント (Slow slip event; SSE) と呼ばれる低速な断層滑り現象が発生する (Obara & Kato, 2016)。スロースリップイベントは、ときに大地震や群発的な地震活動を誘発することが知られており (Ozawa et al., 2003; Radiguet et al., 2016)、各地の沈み込み帯では、SSE と地震活動の因果関係の解明が進められている (Kato et al., 2012; Nishikawa et al., 2021)。

その一方、現在、世界で標準的に使用されている地震活動統計モデルである Epidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル (Ogata, 1988) には、SSE が地震活動に及ぼす影響 (誘発効果等) が全く考慮されていない。そのため、プレート境界で SSE が発生した際、ETAS モデルに基づく地震発生確率予測の結果と、実際に観測される地震活動が大きく乖離するという問題がある (Llenos et al., 2009)。

この問題を回避するため、Okutani & Ide (2011) は、SSE 発生期間と非 SSE 発生期間に、それぞれ異なる ETAS パラメータを割り当てることで、SSE に起因する地震発生レートの上昇を既存の ETAS モデルの枠組みの中で表現した。しかし、このモデルには SSE の震源特性 (モーメントマグニチュ

ードやモーメントレートなど) が組み込まれていないため、SSE のモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSE のマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式は、このモデルからは直接は得られない。つまり、「あるマグニチュードの SSE が発生した際、いくつの地震が誘発されるか？」という基本的な問いに、このモデルは答えることができない。

## 2. 新たなモデルの開発と解析データ

以上の背景を踏まえ、本研究は、既存の ETAS モデル (Ogata, 1988) に Global Navigation Satellite System (GNSS) 観測データから推定した SSE のモーメントレートを陽に組み込むことで、新たな ETAS モデル (SSE-informed ETAS model) を作成した。このモデルは、SSE のモーメントレートと地震発生レートに線形な関係 (或いはべき乗の関係) を仮定し、SSE のモーメントレートと地震発生レートの比例定数 (或いは SSE の地震モーメントと地震発生数の比例定数) を新たな ETAS パラメータとして直接推定する。

我々は、新たな ETAS モデルをニュージーランド・ヒクランギ海溝浅部で発生した 3 つの SSE (2006 年 8 月 Mw 6.8、2008 年 3 月 Mw 6.6、2011 年 6 月 Mw 6.7) と、それらの周辺で発生した M2.5

以上の地震に適用した (図 1)。2006 年と 2011 年の SSE はヒクラング海溝中央部南より (南緯 40.5 度付近) に、2008 年の SSE は中央部北より (南緯 39 度付近) に位置する。各 SSE のモーメントレートは GeoNet が公開している GNSS 座標時系列データと TDEFNODE (McCaffrey, 2009) を用いて事前に推定した (図 1c)。

### 3. 結果

その結果、2006 年と 2011 年の SSE では、赤池情報量規準 (Akaike information criterion; AIC) が従来の ETAS モデルと比べて大きく減少し、新たなモデルがより良いモデルであることが示された。また、新たに導入したパラメータ  $\eta$  (SSE のモーメントレートと地震発生レートの比例定数) から、ちょうど 1 つの地震を誘発するのに必要な SSE のマグニチュードが計算でき、2006 年の SSE では Mw 6.0/event (95% CI: Mw 5.8/event-Mw 6.3/event)、2011 年の SSE では Mw 5.5/event (95% CI: Mw 5.4/event-Mw 5.7/event) と推定された。その一方、2008 年の SSE では、AIC はむしろ増加し、従来の ETAS モデルのほうが良いモデルであった。これは、2008 年の SSE では、有意な地震活動誘発効果が確認できなかったことを意味する。

ヒクラング海溝沿いの群発地震活動に関する先行研究 (Nishikawa et al., 2021) では、SSE とそれに伴う群発地震活動に数日から 1 ヶ月程度の発生時間のずれがあることが報告されている。これをふまえ、SSE のモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れを許容したモデルと許容しないモデルを比較した。その結果、2006 年の SSE では、18 日の時間遅れがあるモデルが、時間遅れのないモデルと比べて AIC が 2.7 減少し、時間遅れを許容したモデルがより良いモデルであることが示唆された。加えて、SSE のモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式のべき指数を 1 (線

形) としたモデルと、べき指数を 1 以外としたモデルの比較も行なったが、べき指数 1 (線形) のモデルに比べ、AIC が顕著に減少 (2 以上の減少) することはなかった。

### 4. 結論

本研究の新たなモデルによって、SSE に起因する地震発生レートの上昇を考慮した地震発生確率予測が可能となった。また、本モデルによって SSE のモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSE のマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式を得ることができた。加えて、本モデルは、SSE のモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れや、SSE のモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式の間数形 (べき指数等) に関する定量的な議論を可能にした。今後、本モデルを各地の沈み込み帯沿いの SSE 及びそれに伴う地震活動に適用することで、各地の地震活動の予測精度向上や、SSE に伴う地震活動の特徴の定量化及びその地域差の解明につながると期待される。

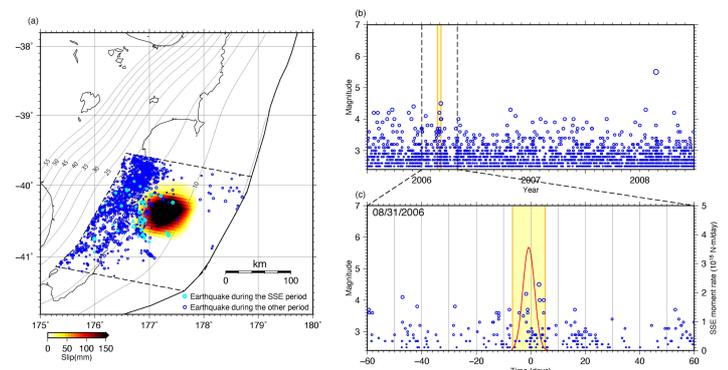


図 1. 2006 年 8 月 Mw 6.8 の SSE とその周辺の地震活動。(a) SSE の滑り分布と周辺の地震活動の震央分布。(b) 周辺の地震活動のマグニチュード-時間ダイアグラム。黄色の期間は、SSE の発生期間を示す。(c) マグニチュード-時間ダイアグラムの拡大図。赤色の線は、SSE のモーメントレートを示す。