

<平成 29 年 2 月 18 日 京大知球会講演要旨>

## 大地震に先行する地震活動パターン – 発生の特徴とスロースリップ現象との関係 –

京都大学 准教授 (理学研究科 地球物理学教室)

Bogdan ENESCU (平成 16 年 博士卒)

### 1. はじめに

地震活動の時空間変化を引き起こす物理メカニズムを理解することは、地震発生物理の解明や地震ハザードの評価にとって非常に重要な意味を持ちます。本講演では、2011 年東北地方太平洋沖地震 (以下、2011 年東北沖地震と略す) (M9.0) で観測された、大地震の発生に先行する地震活動 (前震活動) の時空間変化に関する最新の研究とその背景にある物理過程について紹介します。

まず初めに、近年発見された「スロースリップ現象」について簡単に紹介します。スロースリップは、地震活動の時空間変化を解釈する上で鍵となる重要な現象です。その後、地震活動の時間変化に注目しながら、大地震発生の前に観測された代表的な地震活動パターンの例を紹介します。ただし、普通の地震と前震活動とを見分けるためには、地震活動の時間変化だけでなく、時間・空間両方の変化を視野に入れる必要があるため、講演の後半では 2011 年東北沖地震を例に、地震活動の時空間変化パターンを紹介します。地震活動の時空間変化パターンに関する知見は、前震活動とスロースリップとの関係、あるいは大地震発生の準備過程の理解に対して、新しい視点をもたらすと期待されています。

### 2. スロースリップ現象

最近 15-20 年における地震学的・測地学的観測技術の目覚ましい発展によって、地震現象の隠された姿が次々と明らかになってきました。GNSS データの解析によって、通常の地震よりも破壊継続時間の長いスロースリップイベント (SSE) と呼ばれる現象が、プレート間における巨大地震発生領域の深部で発生していることがわかってきました。何十日にもわたって文字通り「ゆっくり」と発生する現象のため、通常の地震計ではなく測地学的観測によって初めて捕捉することのできる現象です。もう一つの新しい発見は南海トラフにおける深部非火山性微動 (NVT) です。NVT は非常に微弱な地震のことで、SSE に伴って発生することが知られており、これらをまとめて Episodic Tremor and Slip (ETS) と呼んでいます。ETS は南海トラフだけでなく、世界中のいくつかの沈み込み帯でも観測されています。

前述した SSE の継続時間よりもさらに長く、年オーダーで発生する長期的 SSE も報告されています。南海トラフの西端、豊後水道ではおよそ 1 年にわたって長期的 SSE が発生していることがわかりました。その他にも、大きな地震の直後にはしばしば余効変動と呼ばれる非地震性すべりが何週間あるいは何ヶ月か続くことも知られています。

こうした一連のスロースリップ現象は、通常の地震と同じくプレート間におけるせん断破

壊によるものであり、両者の違いはその破壊継続時間と放射するエネルギーにあること、またこれらの多様な地震現象が一つのスケーリング則に従うということが提案されています。

### 3. 大地震に先行する地震活動パターン - 前震とスロースリップ

これまでの多くの研究によって、沈み込み帯や内陸で発生する大地震に先行する様々な地震発生パターンが報告されています。例えば 1995 年兵庫県南部地震 (M7.2) の発生約 2 年前に地震活動のパターンが変化し始め、また  $b$  値と呼ばれる地震発生率 (地震の発生頻度とマグニチュードの関係を表す指標) も変化していると報告されています。これまでに様々な地震現象が大地震の前兆現象として報告されてきましたが、もっとも確からしい前兆現象は、本震に先立つ (日~週オーダーの) 前震活動といえます。以下の章ではこうした前震活動について紹介します。

#### 3.1. 通常の地震活動と群発地震活動。

典型的な地震活動というのは一つの大きな地震 (本震) が軸になってそれよりも小さな地震を伴いながら形成されるのに対して、しばしば大きな本震を伴わずに中程度の地震活動が群れになって発生することがあります。こうした現象は群発地震活動と呼ばれ、その発生要因に関しては地下での流体・マグマの移動や最近では非地震性滑りとの関係が議論されてきましたが、未だに群発地震活動を支配する要因は明らかではありません。

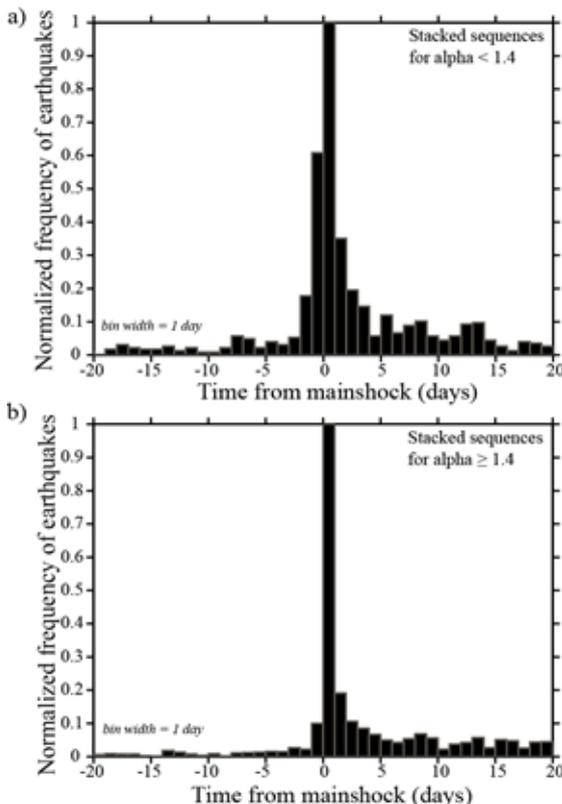


図 1. 南カルフォルニアにおける本震前後 20 日間に発生した地震の正規化したスタック数(Enescu et al., 2009 を改変). 図はそれぞれ (a) 群発地震型, (b) 前震-本震-余震型.

典型的な地震活動と群発地震活動との根本的な違いは、その系列における余震の発生パターン (より正確には、あるマグニチュードの地震に対してそれに伴う地震の発生効率) に現れます。本震に対する余震の発生効率は Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) モデ

ル (Ogata, 1988) における  $\alpha$  というパラメータ (余震の発生効率を示すパラメータ) によって表現されますが, 典型的な地震活動と群発地震活動ではこの  $\alpha$  が大きく異なることが知られています. ETAS モデルとは, ある場所・時間における地震活動の推移を統計的に表現するモデルで, 余震活動の尤度関数を最大化することで求まる  $\alpha$  を含む 5 つのパラメータで表現されるモデルです.

Enescu et al. (2009) は南カルフォルニアにおける地震活動をパラメータ  $\alpha$  に基づいて大まかに群発地震型と前震-本震-余震型の 2 つに分類しました. 前震は「バックグラウンド」の地震活動 (一定速度のテクトニックな荷重を受けることで発生する地震活動) に埋もれてしまい区別するのが難しいため, 余震データのスタッキングで本震発生前の地震活動の時間変化を取り出すこととしました (図 1). スタッキングとは 1 日毎に発生する地震数を足しあわせて正規化し, 地震活動の時間変化をわかりやすく提示する処理のことで, これを群発地震型 (図 1a) および前震-本震-余震型 (図 1b) の両方に対して行います. 本震のあとに地震活動が活発化する (余震が発生する) のは当たり前ですが, 本震の数日前にも地震活動が活発化していることがわかります. とくに前震-本震-余震型のデータではこの傾向が顕著にみられました (図 1b).

前震は大地震に先立つ特徴的な地震活動パターンであるといえますが, 以下の 2 つの理由から大地震の発生前にそれを検出することは困難です: (1) 前震の活動は微弱であり, 普通の地震に比べてその性質を詳細に分析することが難しい. (2) もし異常な活動が検出できたとしても, それが大地震の前兆現象なのか, あるいは大地震とは関係ない独立な地震系列の一種に過ぎないのかを本震の発生前に判断することが難しい. ここで, 前震活動の空間変化にも目を向けることで, こうした困難を乗り越えることができるかもしれません. そこで 2011 年東北沖地震を例に前震活動の時空間変化パターンに関する研究を紹介します.

### 3.2. 前震活動の空間変化の特徴 - 2011 年東北沖地震を例に

図 2a に 2011 年東北沖地震に先行して発生した地震活動の時空間変化を示します. 気象庁が決定した地震カタログを使って, 時間-緯度軸に対して震源をプロットした図になります. 本震発生 30 日前から地震活動がいくらか活発化していることがわかると思いますが, とくに北から南へと推移する地震活動の変化が顕著にみえます (図中矢印). この傾向は本震発生 20 日前に顕著になり, その後 8 日間静穏化します. M7.3 の大地震が本震の 2 日前に発生した後, 余震の震源が M9.0 の本震の震央に向かって再び北から南に推移していることがわかります (図 2b).

2011 年東北沖地震に先行する地震活動のパターンは多くの研究グループによって詳細に解析がなされています. Ando and Imanishi (2011) は M7.3 の前震と M9.0 の本震との間にみられる地震活動パターンをはじめて調査し, 地震活動の移動スピードが時間とともに遅くなることを明らかにしました. より正確にいうと, 震源の移動距離が時間と拡散係数の積の平方根で表現されるということです. こうした時間に対して非線形な移動パターン (拡散現象ともいいます) はスロースリップイベントでも観測されており, 断層のレオロジーと関係があるとされています.

また、Kato et al. (2012) は、東北沖地震の更に 1 ヶ月ほど時間を遡って震源域での地震活動を調査しています。彼らは Matched Filter Technique (MFT) という手法を使って、気象庁が検出できなかった地震まで丁寧に探しだすことで、より完全な地震カタログを作成し、詳細な地震活動の時空間変化を調べました。この研究の中で彼らは「繰り返し地震」とよば

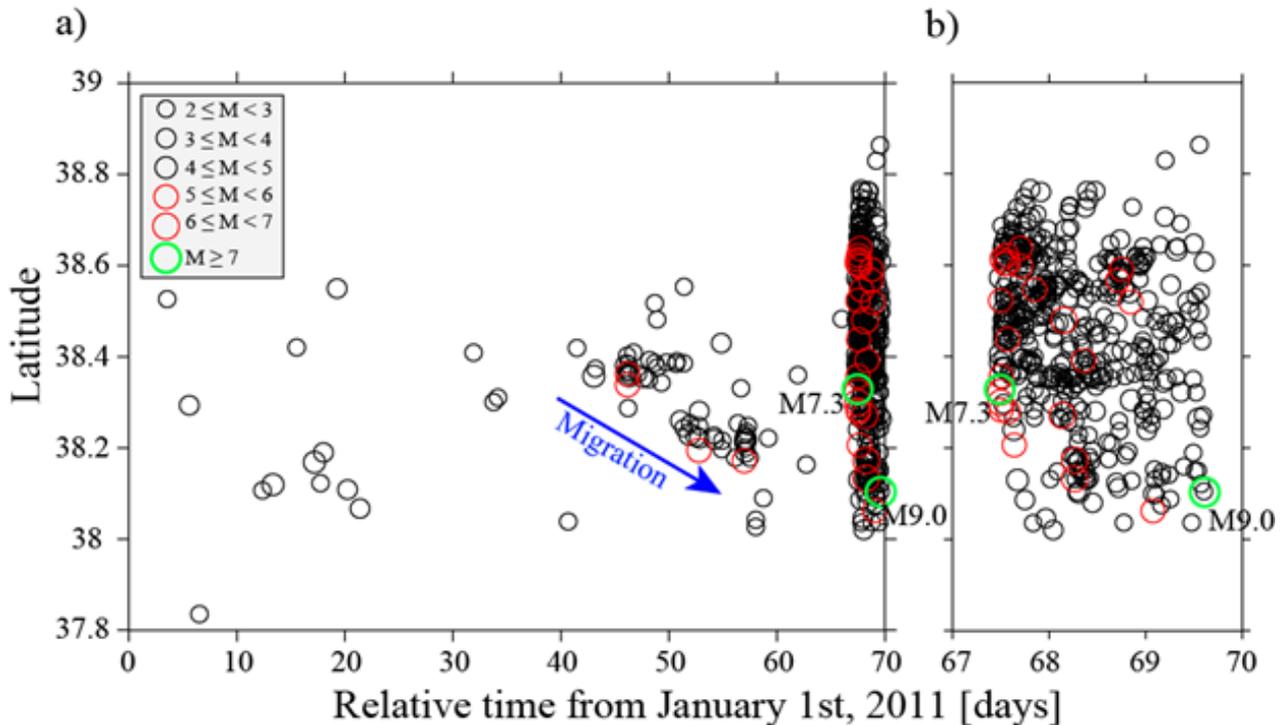


図 2. (a) 2011 年東北沖地震前の地震活動 (Enescu, 2011 を改変). 横軸は時間, 縦軸は緯度. 矢印は地震活動の移動パターンを示す. 丸印の大きさはマグニチュードの大きさに対応する. (b) より短い期間におけるプロット.

れる, プレート境界でゆっくりとすべる領域に囲まれた小さな固着域で発生する特別な地震が発生していることを見出しました. 彼らの研究によって本震に先立つ前震活動の明瞭な移動と, その前震活動を促す繰り返し地震が震源域で発生していることが明らかになりました. 繰り返し地震の発生は, スロースリップを反映した現象と考えられていますので, 彼らの観測結果は東北沖地震の発生前にスロースリップ現象が発生していたことを示唆しています. こうしたスロースリップは, 震源域におけるプレート間の固着率を減少させる, いわば巨大地震発生の準備運動として作用したのではないかとということが議論されています.

もう一つの独立した手法によって M7.3 の前震から東北沖地震までの前震活動を精査した研究に Marsan and Enescu (2012) があります. 彼らは地震波形に対して統計的な処理を行うことで, 気象庁の地震カタログに載っていないような小さな地震まで検出し, 地震活動の時空間変化を詳細に追っています. 彼らの研究もまた, 前震活動がスロースリップ現象を反映していることを示唆していますが, こうした地震活動が ETAS モデルのようなスロースリップの仮定を必要としないモデルで説明できることも同時に示しています. つまりスロースリップの存在を確かめるために, 地震活動の様子を追うだけでは十分ではないということです. そこで彼らは更に, 防災科学技術研究所が運営する F-net という観測点ネットワー

クの地震波形データを詳細に調査しました。F-net は日本全国に設置された地震計によって幅広い周波数帯域の地震波形を記録する観測網ですが、震源域近くの観測点で観測された波形の中に、本震の発生に先立って低周波のノイズが存在していることを突き止め、スロースリップの仮定を支持するデータとして提示しています。

日本列島の陸域に設置された機器で計測される測地学的データは、残念ながら陸域から離れた沖合で発生しているスロースリップを検出できるほどの解像度を持ち合わせていませんが、東北沖地震の震源域直下に設置された海底水圧計 (OBP) のデータを解析することで、2011 年 2 月に SSE が発生していたことが明らかになり (Ito et al., 2013), これは先ほど紹介したスロースリップの仮説的な議論を支持する発見になりました。ただし、OBP のデータから東北沖地震直前にスロースリップが発生していたかどうかを明らかにすることはできませんでした (Hino et al., 2013)。OBP 観測によって、こうした前兆現象の複雑性が明らかになり、前兆現象やスロースリップ現象を解明するような、観測結果を説明しうる新しいモデルの構築など、更なる研究の必要性が浮き彫りになりました。

#### 4. 議論

3.2 節では日～月オーダーの短いスケールの現象を紹介しましたが、より長い、東北沖地震発生前 10 年スケールのスロースリップ現象も報告されています (例えば Mavrommatis et al., 2014)。こうした観測結果は、東北沖地震発生前の長い時間スケールにわたる地震活動の変化 (例えば Nanjo et al., 2012; Tormann et al., 2015) とも整合的です。長い期間にわたるスロースリップは、プレート間の固着率を減少させる役割をもつと考えられ、繰り返し地震と測地学的データを用いた最近の研究においても周期的なスロースリップが 2011 年東北沖地震をトリガしたのではないかと議論が行われています (Uchida et al., 2016)。

西南日本の南海トラフは、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に位置しており、M8-9 クラスの巨大地震発生が懸念されている地域です (地震調査研究推進本部, 2013)。古地震・古津波記録を調べることによって、過去に発生した複雑な地震サイクルが提案されていますが、こうした地震サイクルを基に南海トラフにおいて近い将来巨大地震発生の可能性が予測されています。また巨大地震の発生前には、内陸における地震活動が十年スケールで活発化するという研究もあります。最近、ケーブル式の海底地震津波観測網が、日本海溝 (S-net) および南海トラフ沿い (DONET) に展開されています。陸域のみならず海域における地震学的・測地学的な観測体制を継続的に行うことで、前震や本震に先立つスロースリップを事前に検出し、将来発生する巨大地震のハザード評価を改善するかもしれません。

#### 5. 引用文献

- Ando, R. and Imanishi, K. (2011): Possibility of Mw 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of afterslip from Mw 7.3 foreshock. *Earth Planets Space*, **63**, 767-771.
- Enescu, B. (2011): Stress changes due to the March 11, 2011, Tohoku Off-shore

megathrust earthquake (Mw9.0) and related seismicity patterns;

A) Seismicity patterns with a possible precursory character.  
<http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~benescu/offTohoku.html>.

Enescu et al. (2009): Correlations of Seismicity Patterns in Southern California with Surface Heat Flow Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**, 3114-3123.

Hino et al. (2013): Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter. *Mar. Geophys. Res.*, **35**, 181-190, 10.1007/s11001-013-9208-2.

Ito et al. (2013): Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, **600**, 14-26.

地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2013): 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版) について. [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/nankai\\_2.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf).

Kato et al. (2012): Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **335**(2), 705-708.

Marsan, D., and Enescu, B. (2012): Modeling the foreshock sequence prior to the 2011, MW9.0 Tohoku, Japan, earthquake. *J. Geophys. Res.*, **117**, B06316, doi: 10.1029/2011JB009039.

Mavrommatis et al. (2014): A decadal-scale deformation transient prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys Res Lett.*, **41**, doi:10.1002/2014GL060139.

Nanjo et al. (2012): Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.

Ogata, Y. (1988): Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *J. Am. Stat. Assoc.*, **83**, 401, Applications, 9-27.

Tormann et al. (2015): Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake. *Nature Geoscience*, **8**, 152-158.

Uchida et al. (2016): Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan. *Science*, **351**, 6272, 488-492.