

スロー地震の巨大地震との関連性

1. 発表者： 小原 一成（東京大学地震研究所 所長 附属観測開発基盤センター 教授）
加藤 愛太郎（東京大学地震研究所 附属地震予知研究センター 准教授）

2. 発表のポイント：

◆近年発見されてきたスロー地震の特徴から、スロー地震とプレート境界に発生する巨大地震との関連性を、3つの観点で新たに整理し直した。

◆モニタリングに基づくスロー地震の解明は、巨大地震発生予測の高度化の観点においても意義があり重要である。

3. 発表概要：

スロー地震は、断層破壊がゆっくりと進行する地震現象であり、強い揺れを伴わない。しかし、スロー地震の多くは沈み込むプレート境界面上で巨大地震発生域に隣接し、巨大地震と共通の低角逆断層型のメカニズムを有することから、巨大地震との関連性が示唆されてきた。スロー地震は、発見されてから20年に満たないが、巨大地震に対して次の3つの役割を担う可能性があることが、これまでの観測研究により明らかになってきた。

①Analog（類似現象）：スロー地震の活動様式が巨大地震と類似し、さらに高頻度で発生することから、巨大地震の発生様式を理解するためのヒントを与える可能性。

②Stress meter（応力状態を反映するインジケーター）：スロー地震は周囲の応力変化に敏感であるため、巨大地震震源域における応力蓄積の状況に応じて、スロー地震の活動様式が変化する可能性。

③Stress transfer（周囲への応力転荷）：スロー地震の発生によってその周囲に応力を転荷することがあるため、隣接した巨大地震震源域における断層破壊を促進する可能性。

今後もスロー地震の活動を継続的にモニタリングし、その活動様式や発生原因の解明を進めることにより、巨大地震の発生過程に関する理解の進展にも繋がることが期待される。

4. 発表内容：

【背景】

スロー地震は、普通の地震に比べ断層破壊が低速で起きるために、生じる地震波の揺れの周期が長い、あるいは揺れを伴わない断層すべり現象である。その時定数は数 Hz から数年まで非常に幅広く、同規模の普通の地震に比べ高い周波数成分の振幅は非常に微弱である。このようなスロー地震が、2000年前後に整備された稠密な地震・測地観測網（防災科学技術研究所 Hi-net、注1や国土地理院 GEONET、注2など）によって、西南日本の南海トラフ巨大地震想定震源域を取り囲むように、次々と発見されてきた（図1、2）。特に、2002年にサイエンス誌で発表された、東京大学地震研究所の小原一成教授（当時、防災科学技術研究所に在職）による深部低周波微動（注3）の発見は世界中に大きなインパクトを与え、その後、環太平洋各地でスロー地震が相次いで検出され（図3）、スロー地震研究が世界的に大きく発展した。

そのモチベーションのひとつが、スロー地震と巨大地震との関連性を明らかにすることである。そこで、これまでに明らかにされたスロー地震の活動様式の特徴を整理したうえで(図4)、巨大地震との関連性に焦点を絞りスロー地震が担う役割を3つのポイントに分けて議論を行った。

【内容】

スロー地震は、巨大地震との関連性において、以下の3つの役割を担う可能性がある。

① 類似現象 (Analog)

南海トラフの巨大地震は、これまで100~200年間隔で発生してきたが、その繰り返し間隔には大きな揺らぎが存在し、また、破壊域は一定ではなく、いくつかの領域に分かれた震源域が同時に破壊したり、連動したりすることもあり、地震のマグニチュードにも揺らぎが見られる。これまで検出されてきた数種類のスロー地震のなかでも、ETS (Episodic Tremor and Slip、注4) は、その発生様式が巨大地震と類似している。ETSとは、継続期間が数日程度の短期的スロースリップイベント(注5)と深部低周波微動などが同時に発生する現象で、巨大地震震源域の下端側に沿って帯状に分布する。西南日本ではその帯状領域が数10~100kmの長さを有する複数のセグメントに分かれ、各セグメントでETSは3~6ヶ月のそれぞれ固有の周期で発生する。その発生様式は、巨大地震に比べはるかに規則的であるが、ある程度の揺らぎも存在する。また、各セグメントのETSは多くの場合独立して発生するが、稀に破壊が隣接するセグメントに伝播し、規模のより大きな連動破壊を起こす場合もある。ETSは頻繁に発生しており、多くの観測事例から発生様式の揺らぎ等における法則性を見出すことができれば、巨大地震の発生間隔や破壊域にみられる規則性やその揺らぎ、連動性を含めた発生様式を理解する上で、十分に役立つ可能性がある。

② 応力状態を反映するインジケータ (Stress meter)

スロー地震は、地球潮汐応答や遠地地震表面波による誘発現象などに見られるように、その発生域の断層強度が弱く、周囲の応力変化の影響を受けやすい。したがって、スロー地震域に隣接する巨大地震震源域における応力蓄積状態を反映して、スロー地震活動の発生パターンが変化することが期待される。例えば、北米大陸西部のサンアンドレアス断層沿いの一部(パークフィールド地域)で、マグニチュード6の地震が2004年に発生した。この地域でも西南日本と同様の低周波微動が検出されているが、この地震の発生前後に、微動の発生数・移動方向・発生間隔が通常の状態から変化し、地震後しばらくして元の状態に回復した。これは、大地震発生に伴う応力蓄積の影響によるものと考えられる。また、沈み込むプレート境界面上で巨大地震とスロー地震の両方をモデル化した数値シミュレーションによると、巨大地震発生前にスロー地震の発生間隔が短くなるなど、スロー地震活動に変化が生じる。この結果は、非常に単純な仮説に基づくものであるため、現実に観測される現象がシミュレーションどおりに進むとは限らないが、巨大地震の発生が近づくにつれてスロー地震活動に何らかの変化が生じることが期待される。

③ 周囲への応力転荷 (Stress transfer)

スロー地震に限らず、地震現象の発生は応力を再配分し、その周囲に影響を及ぼす。隣接するスロー地震間では相互作用がしばしば観測される。例えば、豊後水道の長期的スロースリップイベント(注6)に伴って、深部側の微動だけでなく、浅部の南海トラフ沿いのスロー地震も同時に活発化するなど、スロー地震発生域周辺の広い範囲にわたって影響を及ぼす。したが

って、巨大地震震源域に対しても同様のことが期待されるが、当然ながら、最終的に破壊に至るかどうかは、受け手側、つまり、巨大地震震源域の応力蓄積状況に依存する。しかし、最近になって、スロー地震と巨大地震との関連性を示す観測結果が次々と報告された。東北地方太平洋沖では、余効すべり以外のスロー地震の存在は知られていなかったが、海底地震・圧力観測により、2011年東北沖地震の大すべり域周辺で微動やスロースリップイベントが東北沖地震以前に起きていたことが分かった。また、東北沖地震の本震発生約1ヶ月前と2日前に起きた前震活動に伴ってスロースリップイベントが2回発生し、いずれも本震破壊開始点に向かって移動しており、断層破壊を促進させた可能性がある。これと同様の現象は、2013年メキシコのパパノア地震や、2014年チリ北部のイクケ地震でも観測された。一方、GPSや小繰り返し地震などの解析から、東北沖地震前に東北沖のプレート境界深部においてスロースリップが加速していたこと、また、東北沖の広い範囲でスロースリップが周期的に発生し、東北沖地震を含む大地震の発生と関連していたことなども、スロースリップによる震源域への応力载荷により破壊が促進された可能性を示すものと考えられる。

【意義】

スロー地震は、発見当初は特異な地球科学現象だと思われていたが、この20年弱の間に世界各地で次々と検出され、その共通性や多様性が明らかになるにつれて、むしろ普遍的な現象であることがわかってきた。しかも、このゆっくりとした変形プロセスが、巨大地震という瞬間的な現象の準備過程に関わっている可能性がある。したがって、高い分解能のもとでスロー地震のモニタリングを継続し、その活動様式の詳細を明らかにするとともに、これらのメカニズムを解明することは、巨大地震発生予測の高度化の点からも重要である。

5. 発表雑誌：

発表日：2016年7月15日（日本時間）

雑誌名：Science

論文タイトル：Connecting slow earthquakes to huge earthquakes

著者：Kazushige Obara*, Aitaro Kato

巻・頁：353(6296), 253-257. doi:10.1126/science.aaf1512

6. 用語解説：

（注1）防災科学技術研究所 Hi-net（High-sensitivity Seismograph Network）

国立研究開発法人防災科学技術研究所が整備・運用している高感度地震観測網で、全国約800箇所に観測点が展開されている。各観測点では人間活動などによるノイズを避けるため、地中に掘削した観測孔の底に高感度地震計を設置して微小な地震動を計測し、観測データは24時間連続的に、防災科学技術研究所のみならず気象庁や全国の大学等にリアルタイムで配信され、地震活動の監視や研究・教育活動に活用されている。

（注2）国土地理院 GEONET（GNSS Earth Observation Network System）

国土交通省国土地理院が整備・運用しているGNSS（Global Navigation Satellite System）連続観測システムで、日本全国の約1300箇所に設置された電子基準点において米国のGPS等の測位衛星からの信号を受信し、広域の地殻変動の監視を行っている。この観測データをもとに、地震・火山活動に起因する地殻変動を把握するだけでなく、日常的な日本列島周辺のプレート運動のモニタリングやさまざまなスロースリップの検出にも貢献している。

(注3) 深部低周波微動

同規模の地震に比べて低周波 (2~8 Hz) に卓越する微弱振動が長時間継続する現象で、防災科学技術研究所 Hi-net の観測によって世界で初めて西南日本で発見された(Obara, 2002, Science)。発生場所は沈み込むフィリピン海プレートの境界面付近で、南海トラフ巨大地震震源域の深部側に沿って、東海から四国西部まで約 600 km の領域に帯状に分布する。深部低周波微動の顕著な活動に伴って、プレート境界が数日かけてゆっくりすべる現象 (短期的スロースリップイベント、注5) が検出されており、これらの現象を合わせて ETS (注4) と呼ぶ。

(注4) ETS(Episodic Tremor and Slip)

深部低周波微動と短期的スロースリップイベント (注5) の同時発生現象。北米大陸太平洋沿岸部の Cascadia 地方でこれらの現象が同時に発生していることが、カナダ地質調査所の研究者によって 2003 年に発見された。

(注5) 短期的スロースリップイベント

プレート境界が数日かけてゆっくりすべる現象。2001 年に北米大陸太平洋沿岸部の Cascadia 地方で、カナダ地質調査所の研究者によって発見され、後に、深部低周波微動に伴って発生することが明らかとなった。すべりの継続期間は、長期的スロースリップイベント (注6) に比べて圧倒的に短いことから、「短期的」な現象として定義される。

(注6) 豊後水道長期的スロースリップイベント

豊後水道付近においてプレート境界が数ヶ月間かけてゆっくりすべる現象。廣瀬仁 (現在神戸大学) らによって 1999 年に世界で初めてこのようなタイプのスロースリップイベントが発見された。深部低周波微動に伴って発生する短期的スロースリップイベントに比べると継続期間が圧倒的に長いことから、「長期的」な現象として定義される。また、各地で発生する長期的スロースリップイベントはそれぞれ概ね規則的に発生するが、豊後水道の場合は発生間隔が約 6~7 年である。

7. 添付資料：

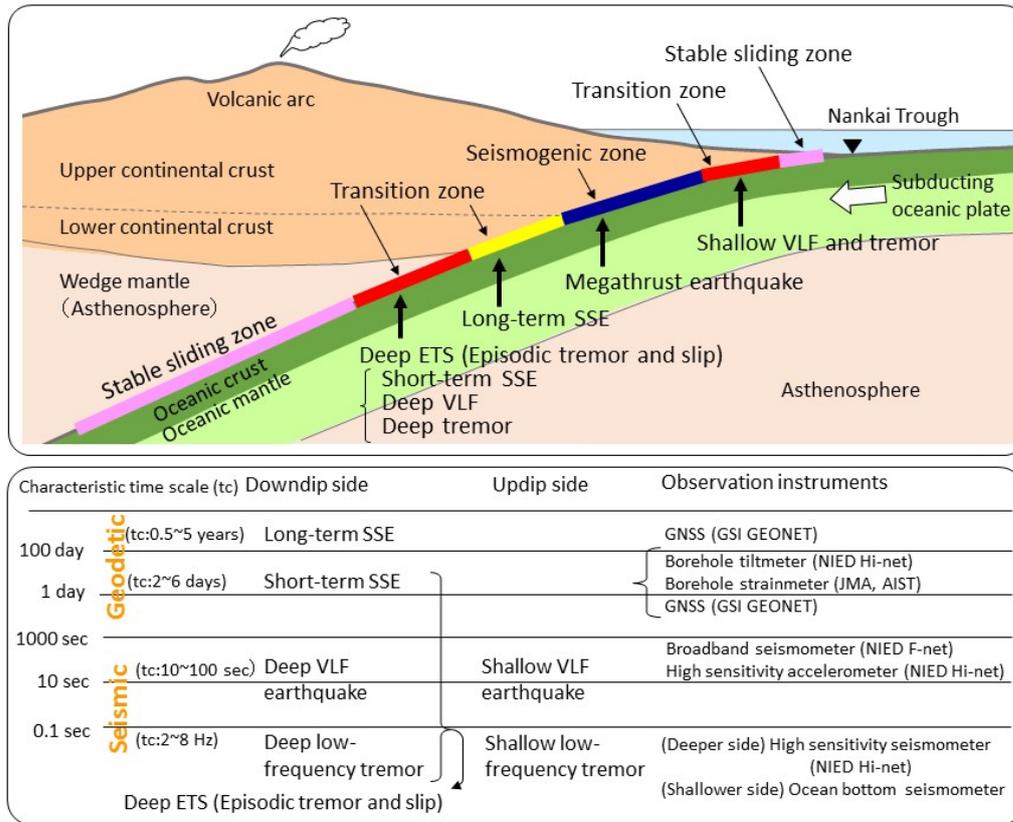


図1. 南海トラフでの観測例に基づいた沈み込み帯に発生する多様なスロー地震を示す断面図。SSE：スロースリップイベント、VLF地震：超低周波地震、GSI：国土地理院、NIED：防災科学技術研究所、Hi-net：高感度地震観測網、F-net：広帯域地震観測網、JMA：気象庁、AIST：産業技術総合研究所

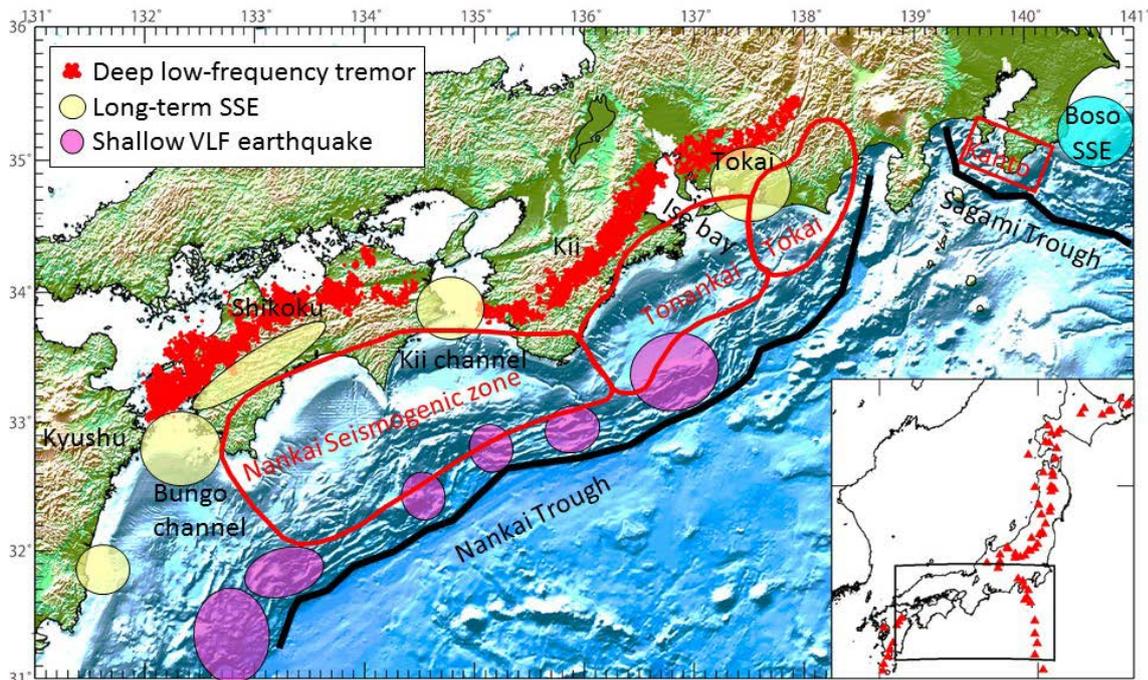


図2. 西南日本におけるスロー地震の分布。赤点は深部低周波微動、黄色い丸・楕円領域は長期的スロースリップイベント、桃色の領域は浅部超低周波地震、赤線領域は南海トラフ巨大地震想定震源域。

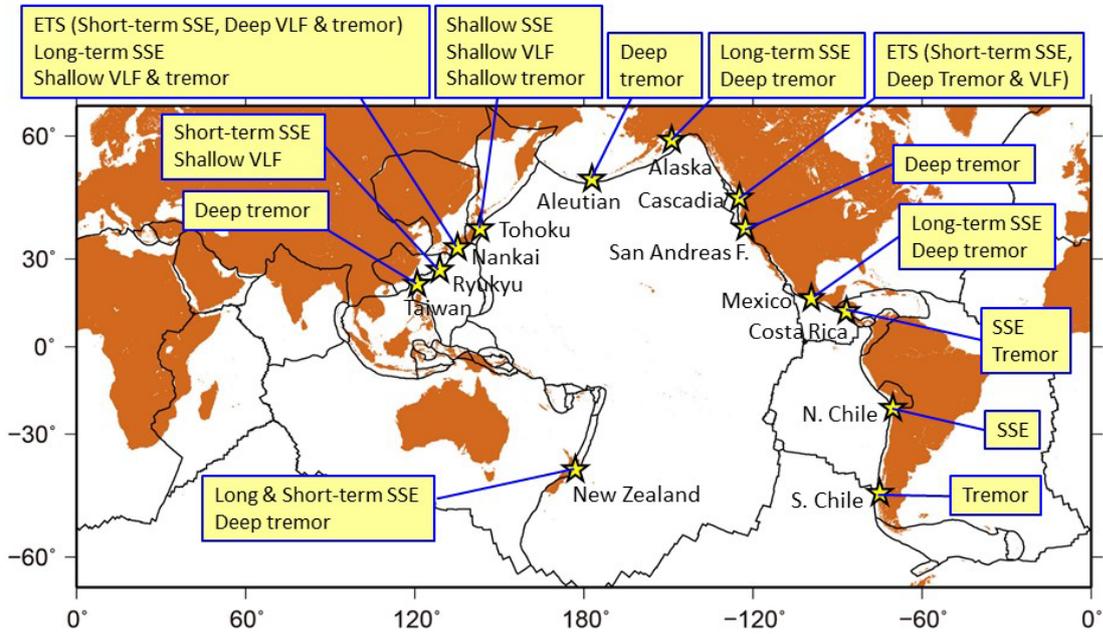


図3. 世界のそれぞれの地域で発生するスロー地震の種類。

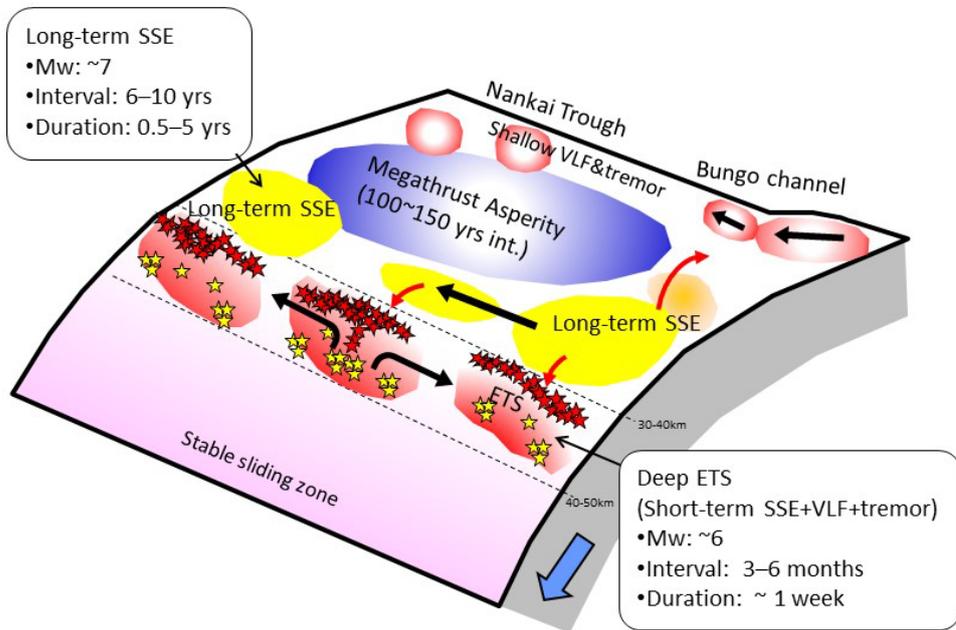


図4. 南海トラフ沈み込み帯で発生するスロー地震の多様性や相互作用を示す概念図。黒の矢印はスロー地震の移動方向を、赤の矢印は長期的スロースリップイベントから他のスロー地震に対する誘発作用を表す。赤と黄の星印はそれぞれ浅部側、及び深部側の深部低周波微動を表し、浅部側の深部低周波微動は長期的スロースリップイベントの影響を受けやすい。また、長期的スロースリップイベントは、浅部のスロー地震の活動にも影響を及ぼす。