

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20382

研究課題名（和文）スロー地震活動を組み込んだ新たな地震活動統計モデルの構築

研究課題名（英文）Development of a new statistical seismicity model incorporating slow-earthquake activity

研究代表者

西川 友章（Nishikawa, Tomoaki）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：10909443

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：沈み込みプレート境界で発生する低速な断層滑り現象（スロー地震）は、地震活動を誘発することが知られている。しかし、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には、スロー地震の地震活動誘発効果が全く考慮されていない。そのため、プレート境界でスロー地震が発生した際、地震活動統計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った。本研究は、主にニュージーランド・ヒクランギ海溝における地震学的・測地学的観測データの解析にもとづいて、スロー地震の地震活動誘発効果を定量化し、それを地震活動統計モデルに初めて組み込むことで、この問題を解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、世界で初めて、スロー地震（特にスロースリップ）の地震活動誘発効果を明示的に組み込んだ地震活動統計モデルを開発した。本研究の新たなモデルにより、スロー地震に伴う地震活動の確率的な予測が初めて可能となった。また、本研究は、「過去の地震活動に基づいて未来の地震活動を予測する」という地震活動予測研究の従来の枠組みから脱却し、「過去の地震活動とスロー地震活動に基づいて未来の地震活動を予測する」という新たな枠組みを提示したという点でも大きな学術的意義がある。今後、本研究のモデルをさらに改良してゆくことで、スロー地震に伴う地震活動の確率予測の精度向上が期待される。

研究成果の概要（英文）：Slow earthquakes (i.e., slow fault-slip events) at subduction plate boundaries are known to trigger seismicity. However, the statistical models of seismicity currently in standard use around the world do not take into account the seismicity-triggering effects of slow earthquakes. Therefore, when a slow earthquake occurs at a plate boundary, there is a large discrepancy between observed seismicity and the results of earthquake forecasts based on the statistical seismicity models. In this study, we solved this problem by quantifying the seismicity-triggering effect of slow earthquakes based on the analysis of seismological and geodetic observation data mainly in the Hikurangi Trench, New Zealand, and by incorporating it into a statistical model of seismicity for the first time.

研究分野：地震学

キーワード：スロー地震 地震活動統計モデル 地震発生確率予測 沈み込み帯 スロースリップイベント

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯プレート境界で発生する低速な断層滑り現象(スロー地震)は、沈み込み帯における地震発生メカニズムに深く関係しており、世界各地の沈み込み帯では、スロー地震と地震活動の因果関係の解明が進められている。その一方、研究開始当初、世界で標準的に使用されている地震活動統計モデル(Ogata, 1988)には、スロー地震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かった。そのため、プレート境界でスロー地震が発生した際、地震活動統計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った。この問題の解決は、地震活動統計モデルに基づく地震発生確率予測の精度向上のために不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究は、各地の沈み込み帯における地震学的・測地学的観測データの解析にもとづいて、スロー地震と地震活動の因果関係を調査し、それを定量化した上で地震活動統計モデルに新たに組み込むことで、この問題を解決することを目指した。

本研究では、特に、スロー地震による地震活動の誘発現象が頻繁に報告されているニュージーランドのヒクラング海溝(Nishikawa et al., 2021)に着目し、重点的に研究を実施した。本研究は、当該地域のスロー地震(特にスロースリップイベント)の有する地震活動誘発効果を定量化し、その効果を世界標準の地震活動統計「ETASモデル」(Ogata, 1988)に組み込むことで、新たな地震活動統計モデルの開発を目指した。また、ヒクラング海溝に加えて、東日本太平洋沖の日本海溝においてもスロー地震と地震活動の因果関係の調査に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 新しい地震活動統計モデルの定式化

本研究を開始するにあたり、まず、新しい地震活動統計モデルの定式化を行った。従来のETASモデルには、スロー活動の地震活動誘発効果を表す項が存在しない。そこで、スロー地震が背景地震活動(ランダムに発生する地震活動)を誘発する効果を表した項と、スロー地震が余震活動の特徴を変化させる効果を表した項を、ETASモデルに新たに導入した。

本研究の定式化では、スロー地震が誘発する背景地震の発生レートは、スロー地震のモーメントレートの冪乗に比例すると仮定した。そして、その比例定数を新しいパラメータとした。また、ヒクラング海溝におけるスロー地震の発生と、スロー地震に伴う地震活動の間に時間ずれが存在すると指摘した先行研究(Nishikawa et al., 2021)を参考に、背景地震発生レートとスロー地震のモーメントレートの間の時間ずれを表すパラメータを新たに導入した。また、スロー地震が余震活動の特徴を変化させる効果に関しては、スロー地震が発生している期間では、発生していない期間と比べて、余震発生レートが定数倍変化するという定式化を行った。

(2) スロースリップイベントの震源パラメータ推定

(1)で定式化したモデルを実際のデータに適用するには、スロースリップイベントの震源パラメータ(特に、モーメントレート)をあらかじめ推定しておく必要がある。そこで本研究では、ニュージーランドのGeoNetが公開しているGlobal Navigation Satellite System(GNSS)時系列データを使用して、スロースリップイベントの時空間滑りインバージョンを実施した。そして、時空間滑り速度分布を空間積分することによって、モーメントレートを得た。

解析の対象は、ヒクラング海溝で2006年、2008年、2011年に発生した3つの大規模(Mw6.7以上)なスロースリップイベントとした。

(3) ヒクラング海溝の地震活動・スロースリップイベント活動に対する新しいモデルの適用

(1)と(2)に基づいて、ヒクラング海溝における地震活動・スロースリップイベント活動に新たな地震活動統計モデルを適用した。その際、地震活動データには、GeoNet地震カタログ掲載されている2006年から2011年までに発生したM2.5以上の地震で、スロースリップイベントの近傍で発生した地震を使用した。具体的には、スロースリップイベントの滑り領域を取り囲む、200km×200kmの領域内で発生した地震を使用した。

(4) 従来のモデルと新しいモデルの比較

最後に、新しいモデルの予測と従来のモデルの予測を比較した。具体的には、赤池情報量規準(AIC)を使用して比較を行なった。新しいモデルのAICと従来のモデルのAICの差が、2以上であった時、AICが小さいモデルが大きいモデルに比べて有意に優れていると判断した。

4. 研究成果

(1) スロースリップイベントの滑り分布およびモーメントレート

図1には、GNSSデータから推定した2006年のスロースリップイベントの滑り分布(図

1a) とモーメントレート (図 1c) を示した。また、このスロースリップ周辺で発生した地震活動も併せて示している (図 1b)。図 1a を見ると、スロースリップと地震の震央は、相補的に分布しており、スロースリップがプレート境界面のアップディップ側に分布していることがわかる。

同様の解析を 2008 年と 2011 年のスロースリップイベントに対しても実施した。

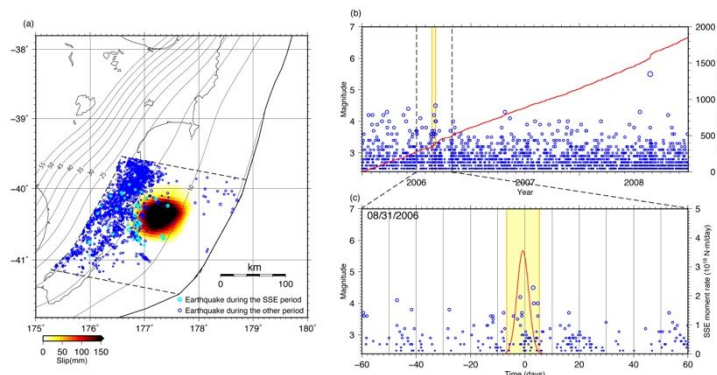


図 1. 2006 年のスロースリップイベントとその周辺の地震活動

(2) ETAS モデルパラメータの推定と AIC に基づくモデル間比較

図 1 に示された、2006 年のスロースリップイベントのモーメントレートと地震活動に対して、新しいモデルを適用した。モデルパラメータの推定には Markov chain Monte Carlo 法を使用し、事後確率を最大化するパラメータを得た (MAP 推定値) (図 2a)。ここで、パラメータの事前確率分布は、一様分布を仮定した。パラメータ推定の結果、2006 年のスロースリップイベントは、約 14 個の地震を誘発しており、1 個の地震を誘発するのに必要なスロースリップイベントのモーメントマグニチュードは Mw 6.0 程度であることがわかった。

次に、新たなモデルと従来のモデルの地震発生数の予測を比較した。その結果、従来のモデル (Original ETAS model) の予測では、SSE 発生期間中の地震発生数を大幅に過小評価していた (図 2b)。それに対して、新たなモデルでは、観測された地震発生数 (Cumulative earthquake count) と予測された地震発生数 (Transformed time) は同程度であった。さらに、従来のモデルの AIC と比べて、新たなモデルの AIC は 6.6 小さく、新たなモデルの予測が有意に優れていることがわかった。

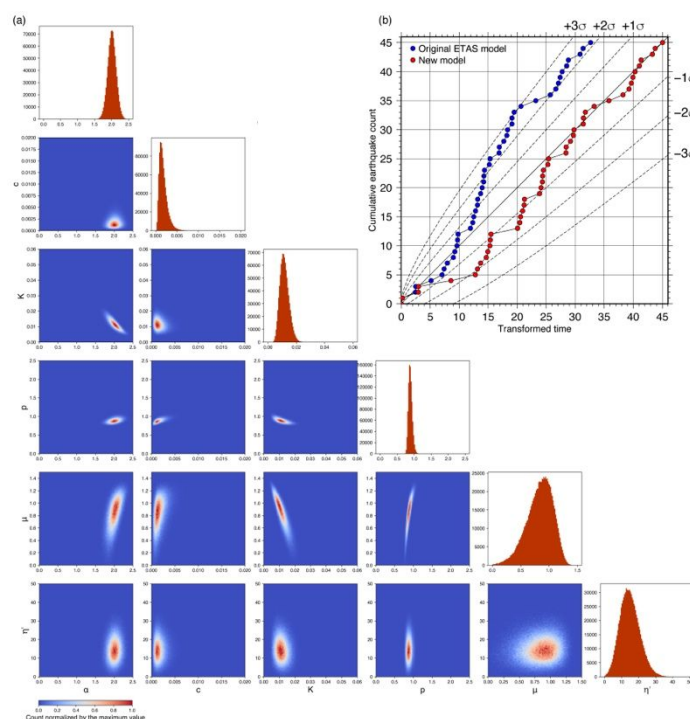


図 2. 2006 年のスロースリップイベントに対する ETAS パラメータ推定と地震発生数の予測

同様の解析を 2008 年と 2011 年のスロースリップイベントに対しても実施した。その結果、2011 年のスロースリップイベントでは、2006 年のスロースリップイベントと同様に、有意な地震活動の誘発が認められ、2011 年のスロースリップイベントは約 62 個の地震を誘発したことがわかった。また、1 個の地震を誘発するのに必要なスロースリップイベントのモーメントマグニチュードは Mw 5.5 程度であった。この値は、2006 年のスロースリップイベントの値 (Mw 6.0) と比較して有意に小さい。つまり、2011 年のスロースリップイベントは、2006 年のスロースリップイベントよりも効率的に地震活動を誘発したことが明らかとなった。

その一方、2008 年のスロースリップイベントでは、従来のモデルの予測と新しいモデルの予測にほとんど違いはなく、有意な地震活動の誘発は認められなかった。これは、先述の 2006 年と 2008 年のスロースリップイベントの解析結果とは対照的である。以上の解析により、ヒクランギ海溝で発生するスロースリップイベントの地震活動誘発効果の大きさには、大きなバリエーションが存在することが明らかとなった。

(3) スロースリップイベントのモーメントレートと地震発生レートの時間ずれ

ヒクランギ海溝では、スロースリップイベントの発生と地震発生レートの上昇の間に、時折、時間ずれがあることが報告されている (Nishikawa et al., 2021)。そこで、新たなモデルを用いて、時間ずれを表すパラメータの推定も行なった。その結果、2006 年のスロースリ

ップイベントでは、スロースリップイベントと同時に地震発生レートが上昇する効果(= 0日)と、スロースリップイベントから約 18 日遅れて地震発生レートが上昇する効果(= 18 日)の二つの地震活動誘発効果が確認された。そして、それら二つの効果を、ともに考慮したモデルの AIC が、他のモデル(従来の ETAS モデルおよびスロースリップイベントと同時に地震発生レートが上昇する効果のみを考慮したモデル)と比べて有意に小さかった。その一方で、2008 年と 2011 年のスロースリップイベントに対しては、スロースリップイベントと地震発生レートの間の時間ずれは認められなかった。上記の結果と(2)の結果を併せて考えると、ヒクランギ海溝で発生するスロースリップイベントの地震活動誘発効果には、その大きさのみならず、時間ずれの有無にもバリエーションが存在するということがわかった。

(4) ヒクランギ海溝で発生するスロースリップイベントの地震活動誘発効果の多様性の原因

(2)および(3)で明らかとなった、ヒクランギ海溝で発生するスロースリップイベントの地震活動誘発効果の多様性は、従来の地震活動物理モデル(Dieterich, 1994)では説明が困難である。地震活動物理モデルでは、地震発生レートは地殻内応力の変化速度に比例するため、スロースリップイベントと地震発生レートの大きな時間ずれを再現することはできない。そのため、本研究の結果は、従来の地震活動物理モデルで考慮されているもの(地殻内応力の変化)とは異なる地震誘発メカニズムが存在すること強く示唆している。そのメカニズムの一つの候補が、地殻内流体の移動である。ヒクランギ海溝では、スロースリップ発生前に沈み込む海洋地殻内部に高圧な流体が蓄積し、スロースリップイベント発生後に流体がプレート境界または上盤プレート内に移動することが、地震のメカニズム解の研究によって指摘されている(Warren-Smith et al., 2019)。この指摘を踏まえると、スロースリップイベント発生後に移動を開始した地殻内流体が、移動先で断層強度を低下させることで、スロースリップイベントに遅れて地震活動を誘発している可能性が考えられる。また、スロースリップイベントと地震発生レートの間の時間遅れが確認されないケースも存在することを踏まえると、スロースリップイベント発生後の流体移動の規模の大きさに応じて、スロースリップイベント後の地震活動効果が確認できる場合と確認できない場合があると推測される。今後、この仮説を検証する必要がある。

(5) 日本海溝におけるスロー地震と地震活動の因果関係の調査

本研究では、ニュージーランド・ヒクランギ海溝に加えて、東日本太平洋沖の日本海溝においてもスロー地震と地震活動の因果関係の調査に取り組んだ。日本海溝海底地震・津波観測網の地震波形観測データを使用して、日本海溝沿いにおいて網羅的なスロー地震(テクトニック微動)検出を実施し、2016 年 8 月から 2021 年 12 月までのスロー地震の詳細な時空間分布を解明した。さらに、過去の地震活動観測データと、スロー地震観測データを網羅的に比較することで、関東地方東方沖ではスロー地震による地震活動の誘発現象が頻繁に発生していることを明らかにした。

<引用文献>

Ogata, Y., Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Journal of the American Statistical association*, 83(401), 1988, 9-27.

Nishikawa, T., Nishimura, T., & Okada, Y., Earthquake swarm detection along the Hikurangi Trench, New Zealand: insights into the relationship between seismicity and slow slip events, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4), 2021, e2020JB020618.

Dieterich, J., A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B2), 1994, 2601-2618.

Warren-Smith, E., et al., Episodic stress and fluid pressure cycling in subducting oceanic crust during slow slip, *Nature Geoscience*, 12(6), 2019, 475-481.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 西川友章	4. 巻 518
2. 論文標題 日本海溝沿いのスロー地震分布とそれに関する地殻構造論的・地質学的考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊地球	6. 最初と最後の頁 523-537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishikawa Tomoaki, Ide Satoshi, Nishimura Takuya	4. 巻 10
2. 論文標題 A review on slow earthquakes in the Japan Trench	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1:1-1:51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-022-00528-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nishikawa Tomoaki, Nishimura Takuya	4. 巻 128
2. 論文標題 Development of an Epidemic Type Aftershock Sequence Model Explicitly Incorporating the Seismicity Triggering Effects of Slow Slip Events	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2023JB026457
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2023JB026457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, and S. Ide
2. 発表標題 The slow earthquake spectrum of the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川友章, 松澤孝紀, 太田和晃, 内田直希, 西村卓也, 井出哲
2. 発表標題 日本海溝海底地震津波観測網S-netが明らかにした日本海溝のスロー地震分布
3. 学会等名 日本地質学会2021年学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川友章, 西村卓也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nishikawa., T., and T. Nishimura
2. 発表標題 Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川友章, 西村卓也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震活動の統計モデルと物理的意味」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Nishikawa, Satoshi Ide, Takuya Nishimura
2. 発表標題 Slow Earthquakes in the Japan Trench
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Nishikawa
2. 発表標題 Application of the ETAS model to slow earthquake research
3. 学会等名 第85回統計地震学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Nishikawa, Satoshi Ide, Takuya Nishimura
2. 発表標題 Attempts to improve understanding and forecasts of slow and fast earthquakes
3. 学会等名 令和 4 年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------