

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244090

研究課題名(和文) 系統的データ解析による微動・ゆっくり地震と巨大地震発生プロセスの関係解明

研究課題名(英文) Study on the relationship between slow earthquakes and very large earthquakes, based on systematic data analysis

研究代表者

井出 哲 (Ide, Satoshi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90292713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,900,000円

研究成果の概要(和文)：国内海外の様々な地域において深部微動および関連現象を分析し、その統計的性質を調べた。これらのカタログはインターネットで公開している。微動とその元となるゆっくりすべりはプレート運動起源であることを確認し、様々な微動の性質と地域ごとの違いを議論した。特に微動の潮汐応答性から摩擦法則が推定可能であることを示した。東北沖地震の分析から、その階層的破壊伝播の様相を明らかにし、同時に過去の地震活動に基づいた階層不均質数値モデルを構築した。世界中の沈み込み帯の地震活動の比較研究を進め、地震発生数、頻度統計とテクトニクス要素の関連があることを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：We detected deep tectonic tremors and related phenomena in many regions worldwide, and analyzed their statistical characteristics. The resultant catalog is distributed through the Internet. We confirmed that tremor and background slow slip are consistent with tectonic plate motion and discussed regional difference of statistical characteristics. Especially, the tidal response of tremors is strong and found to be useful to constrain frictional properties on the plate interface. The 2011 Tohoku-Oki earthquake was another important study target. We revealed its hierarchical rupture process and numerically modeled it based on regional historical seismicity. We also analyzed seismicity in world subduction zones and found some important relationship between seismicity parameters and regional tectonic properties.

研究分野：地震学

キーワード：ゆっくり地震 東北沖地震 地震活動 破壊すべり 沈み込み帯 摩擦法則 潮汐応力 階層性不均質

1. 研究開始当初の背景

研究開始時点の10年ほど前に、西日本の南海沈み込み帯で発生する巨大地震の震源領域の深部延長で、「深部微動」が発見されていた。日本での発見以来、微動と関連する様々な現象が世界各地でも発見され、これらの現象は巨大地震準備発生過程に関連するものとして世界中の地震研究者の注目を集めてきた。研究開始当初から現在まで、微動と巨大地震の関連解明は地震学・固体地球科学の第一級の研究課題となっている。

微動は極めて微弱な振動だが、数分～数時間と普通の地震よりはるかに長く続く。また多くの場合、ゆっくりしたすべり運動(スロースリップ)を伴う。また低周波地震、超低周波地震と呼ばれる、孤立的な地震波を伴うこともある。しかし、これら異なる呼称で呼ばれる現象の源はすべてプレート境界で発生するせん断すべり現象であり、現象の地震モーメント(地震の大きさの尺度:断層すべり量の空間積分量に比例する)と継続時間が比例するというスケール法則も明らかになっていた。なお普通の地震では地震モーメントは継続時間の3乗に比例する。微動やスロースリップが満たすスケール法則は、単純かつ非常にロバストな関係であり、何らかの普遍的メカニズムの存在を示唆する。このような考え方から、研究代表者たちは、この普遍的メカニズムによって発生する一連の現象を「ゆっくり地震(slow earthquake)」と呼び、その性質を調べてきた。しかし、すべてを一連の現象とみなす考え方に関しては、まだ国際的に異論もある段階であった。

異論の源は世界各地で観測される微動の多様性である。世界の様々な沈み込み帯で発見された微動やスロースリップに対して、それぞれの地域の研究者が独立に研究を行っており、その発生過程の解釈は各地域の現象の個別的特徴に依存しがちであった。明らかに系統的研究によって、微動の性質を定量化する必要があった。当時に研究代表者たちは、その基礎研究を世界に先駆けて進めており、確率微分方程式に基づく、ブラウン運動ゆっくり地震モデルやパッチ型の微動発生モデルなどを提案していた。これらの準備の上に、大量データの系統的研究によって、微動から巨大地震まで、地震発生帯を統一的に理解することを目標に本研究計画に着手した。

2. 研究の目的

本研究では沈み込み帯の多様性を利用して、系統的数据解析によって、微動・ゆっくり地震と巨大地震発生過程の統一的理解を目指す。

微動・ゆっくり地震の支配メカニズムとして、以下のような作業仮説を考えている。「もともと安定にすべるプレート境界に、沈み込むプレートの運動によって、パッチ上の不安定領域が形成される。パッチ形成過程は過去

のプレート運動の歴史とプレート境界の不均質構造に依存し、場所によって不安定領域の割合が異なる。この非一様性はプレート運動方向に線状に形成され、微動の特徴的な継続時間、潮汐応力に対する感度、微動の伝播様式および速度などの統計的性質をコントロールする。パッチの破壊様式の多様性によって様々な現象が発生する。」というものである。このような作業仮説を元に以下の研究を進める。

(1) 作業仮説の普遍性検証

世界の様々な地域での微動活動を定量化し、統計的性質を比較する。微動発生地域のプレート年齢は数百万年から数千万年までのばらつきがある。また沈み込む速度や沈み込みの継続時間も場所により異なる。それぞれの地域で網羅的な地震波データ解析を行い、その微動カタログから統計的性質を推定する。

(2) 作業仮説の物理モデル化

作業仮説の考えはすでに Ando et al. (2010) のパッチ型微動発生モデルとして、ほぼ実現されている。本研究では連携研究者安藤・中田とともに、このモデルに適切な修正を加え、モデルの予測と現実の観測量との比較を行う。この比較によって微動発生域の摩擦強度や粘性等の物性を推定する。この量がプレート運動の性質と相関するか検証する。

(3) ゆっくり地震と普通の地震の比較

微動・ゆっくり地震と普通の地震、巨大地震を関連づける。作業仮説から微動の空間分布は、浅部の地震の空間分布や海溝型巨大地震のセグメント構造と相関を持つと予測できる。多様な沈み込み帯の地震活動を系統的に研究・比較することで相関の有無を検証する。また、世界の任意の地域で発生する巨大地震のデータ解析を行う。最終的には微動・ゆっくり地震と巨大地震発生を含むプレート沈み込み運動をモデルすることを目指す。

3. 研究の方法

全世界の微動を系統的に解析するためのデータサーバーを購入し、諸機関からデータをダウンロード、解析可能な状態に整頓する。データサーバーは5年間の期間に必要な更新を行うものとし、データサーバーの保守を主に行う特任研究員を雇用する。

様々な微動発生地域において連続データに連続微動震源決定ツールを適用し、微動源の時空間分布を求め、1次カタログとして整頓する。1次カタログはインターネットで公開する。このカタログから微動の継続時間、繰り返し周期、潮汐応力に対する応答を分析する。

1次カタログをもとに2次カタログを作成する。これには相対震源決定等を用いた精密震源、広帯域地震データを用いたメカニズム解、高周波地震データを用いた地震波動エネルギーの推定を行う。

世界の沈み込み帯の特徴を文献等で調査する。プレート運動速度、プレート形状、年齢、温度圧力条件、ゆっくり地震の有無などの情報を整理する。各地域の地震活動の特徴を統計解析によって抽出する。バックグラウンド地震活動度、サイズ頻度統計を調査し、上記の沈み込み帯の特徴との相関を調べる。

東北沖地震の発生を受けて、本地震について破壊すべりインバージョンをはじめとした各種解析を行う。この地域でのゆっくり地震の発生可能性を検討する。震源域周辺でのエネルギーを推定する。

最終的にこれらのゆっくり地震、普通の地震についての解析から、プレート沈み込みプロセスの総合モデル化を行う。微動の潮汐応答や普通の地震のエネルギーから、プレート境界の摩擦法則についての情報を得る手法を開発し、様々な地域に適用する。微動の発生から、巨大地震発生ポテンシャル変化を予測可能かどうか評価する。

4. 研究成果

世界の様々な地域から連続地震データを取集し、地震データサーバーにおいて整理した。これらの連続データを微動検出プログラムに入力し、微動カタログ（1次カタログ）を作成した。5年間で日本（南海、九州）、台湾、カスケード、メキシコ（ハリスコ・コリマ、ゲレロ）、チリの沈み込み帯および、サンアンドレアス断層帯のパークフィールド地域においてカタログ整備を完了し、2014年からインターネットで公開している（図1）。海外からの評判もよく、最終年度には他の研究地域のカタログとの相互参照も開始した。これ以外に世界の多くの地域の連続データを用いて同様な分析をしたが、それらの地域では検出可能な微動活動が存在しなかった。ある地域では微動が見つからないというのも重要な情報である。

微動の1次カタログに基づいて各種の解析を行った。国内では高品質データを用いて新たに開発した相対震源決定プログラムによって精密震源決定を行い、微動が深さ方向に極めて狭い範囲で発生していることを明らかにした。微動の継続時間、発生間隔、潮汐応力に対する感度、地震波動エネルギーを定量化し、それらの特徴量が微動の空間的な広がりやばらつきと相関を持つことを確認した。これは Ando et al. によるパッチ型微動発生モデルの予測とよく一致し、ゆっくり地震についての我々の作業仮説が正しいことを示している。

微動発生タイミングを基準として広帯域地震波形を重ね合わせることで、信号・ノイズ比を格段に改善できることが明らかになった。これは作業仮説が正しければ予測できることであり、確かに改善が得られることは、作業仮説について独立の証拠ともなる。この原理を利用して、微動カタログと広帯域地震

波形からゆっくり地震の発震メカニズムを推定する手法を開発した。この手法を日本と台湾に適用し、日本では沈み込むフィリピン海プレートの形状と細部まで一致するゆっくり地震のメカニズムを推定することに成功した。台湾ではこれまで微動源が明らかでなかったが、推定したメカニズムから、台湾でも微動が沈み込みプロセスにより発生していることを明らかにした。これらの手法により、高精度でプレート形状やすべり運動の詳細を解明する新たな研究の展望を開いた。

本研究では世界の沈み込み帯での地震活動解析も進めた。まず統計的地震活動解析モデルを用いた普通の地震の時系列解析法を開発し、この手法によって測地的な観測では見えない、小規模なゆっくり地震を検出できることを確認した。実際に過去に東京湾でゆっくりしたすべりが起きていた可能性を示唆した。世界の沈み込み帯に対して網羅的にこの手法を当てはめ、沈み込み帯の定常地震活動が、1次的にはプレートの相対速度によって、2次的には沈み込みの前のプレートへの水の取り込みによって規定されていることを示した。また各地域での大きさ頻度統計には大きな違いがあり、この違いは沈み込むプレートの年齢の違いによる応力場の違いによって生み出されている可能性が高いことを示した。これらの沈み込み環境の違いが、各地域でのゆっくり地震の有無とも関係しているとみられる。

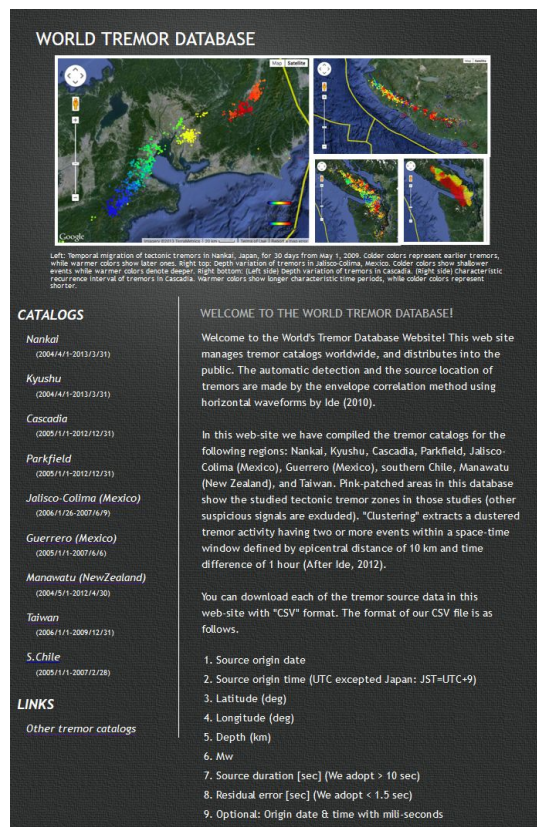


図1：インターネットで公開している世界の微動カタログのウェブページ

東北沖地震に経験的破壊すべりインバージョン手法を適用して、この地震が主に4つのステージからなる複雑な階層的破壊であったことを明らかにした。この研究は地震発生直後より開始し、本研究計画開始直後に結果をまとめて投稿、論文は2011年6月にサイエンス誌において出版され、直後から地球科学分野としては極めて例外的に頻繁に引用されている。この階層的な破壊の連鎖的伝播は、研究代表者が過去に提唱していた階層的パッチモデルでよく表現できる。実際にこの東北沖で過去100年に発生した地震の震源情報から、階層パッチモデルを構成できることを示した。東北沖では多数の繰り返し地震が発生しており、その発生様式は東北沖地震によって大きく変化した。本研究ではこれらの繰り返し地震の地震波エネルギーを推定し、発生間隔によって地震波エネルギーが変化することを示した。この情報はプレート境界の摩擦強度回復過程を推定するのに役立つ。

微動が潮汐応力によってコントロールされていることは、本研究開始以前に知られていたが、本研究によって、その依存性は場所によっては極めて強く、微動の発生タイミングと潮汐変化からプレート境界での摩擦特性がわかる。実際に正確な潮汐応力計算コードを作成し、プレート境界の応力と微動発生のタイミングを比較し、速度の対数が応力と線形関係にある、速度強化型の摩擦則がプレート境界に働いていることを突き止めた。さらに空間的に摩擦パラメータを定量化することが可能であることを示し、西日本、台湾、カスケードで摩擦パラメータの空間分布を求めた。この結果から、ゆっくり地震は従来考えてきたよりより広範に発生し、巨大地震を含む普通の地震活動を支配している可能性があることが明らかになってきた。これが本研究計画の目指していた、ゆっくり地震と巨大地震の関連性の解明についての一歩重要な成果である。この知見に基づくと、地震活動は潮汐応力だけでなく、これまであまり重要でないと考えられてきた気象や海洋の変動とも関連することになる。本研究ではさらに西日本の地震活動が18年という長周期潮汐や、黒潮変動などによる海洋底圧力変化によってコントロールされている可能性が高いことを示した。これは今後の研究につながる重要な発見である。

それ以外にも本研究では、ゆっくり地震に関する様々な研究を行った。内陸の火山周辺で起こる低周波地震については、その微動等との違いを明らかにし、発生メカニズムを推定した。また準火山性地震というものがあることを指摘した。ゆっくり地震発生地域での熱力学的モデリングを行ったり、地質学的データによるゆっくり地震の時間空間的定量化を行ったりした。東北沖地震の破壊プロセスの数値シミュレーションを行うとともに、そのような地震が長期のローディングの下

で発生する場合の粘性効果をアナログモデル実験で検討した。

これらの成果は30編の査読付き論文として、国際学術論文誌において出版された。国内外の学会、研究集会等での発表は研究代表者によって、また研究代表者を共同発表者として毎年度約25回行われた。東北沖地震の解析結果がサイエンス誌において出版されたときには、大学において記者会見を行い、それ以外にも2回プレスリリースを行った。その結果として、本研究の成果はマスコミ等で報道された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計30件)

Yabe, S., S. Ide, Y. Tanaka, and H. Houston, Tidal sensitivity of tectonic tremors in Nankai and Cascadia subduction zones, *J. Geophys. Res.*, 120, 7587-7605, doi:10.1002/2015JB012250, 2015. 査読有.

Nishikawa, T., and S. Ide, Background seismicity rate at subduction zones linked to slab bending related hydration, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 7081-7089, doi:10.1002/2015GL064578, 2015. 査読有.

Tanaka, Y., S. Yabe, and S. Ide, An estimate of tidal and non-tidal modulations of plate subduction speed in the transition zone in the Tokai district, *Earth Planets Space*, 67, 1-11, doi:10.1186/s40623-015-0311-2, 2015. 査読有.

Ide, S., S. Yabe, H.-Ju. Tai, K. H. Chen, Thrust type-focal mechanisms of tectonic tremors in Taiwan: Evidence of subduction, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3248-3256, doi: 10.1002/2015GL063794, 2015. 査読有.

Nishikawa, T. and S. Ide, Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy, *Nature Geoscience*, 7, 904-908, doi:10.1038/ngeo2279, 2014. 査読有.

Yabe, S., S. Ide, and S. Yoshioka, Along-strike variations in temperature and tectonic tremor activity along the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Earth Planets Space*, 66, 142, doi:10.1186/s40623-014-0142-6, 2014. 査読有.

Yabe, S., and S. Ide, Spatial distribution of seismic energy rate of tectonic tremors in subduction zones,

J. Geophys. Res., 119, 8171-8185, doi: 10.1002/2014JB011383, 2014. 査読有.

Idehara, K., S. Yabe, and S. Ide, Regional and global variations in the temporal clustering of tectonic tremor activity, Earth Planets Space, 66:66, doi:10.1186/1880-5981-66-66, 2014. 査読有.

Yabe, S., A. S. Baltay, S. Ide, and G. C. Beroza, Seismic wave attenuation determined from tectonic tremor in multiple subduction zones, Bulletin of Seismological Society of America, 104, 2043-2059, doi:10.1785/0120140032, 2014. 査読有.

Ide, S., and Y. Tanaka, Controls on plate motion by oscillating tidal stress: Evidence from deep tremors in western Japan, Geophys. Res. Lett., 41, 3842-3850, doi: 10.1002/2014GL060035, 2014. 査読有.

Ide, S., and S. Yabe, Universality of slow earthquakes in the very low frequency band, Geophys. Res. Lett., 41, 2786-2793, doi:10.1002/2014GL059712, 2014. 査読有.

Aso, N., and S. Ide, Focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes in eastern Shimane in western Japan, J. Geophys. Res., 119, 364-377, doi:10.1002/2013JB010681, 2014. 査読有.

Ide, S., The proportionality between relative plate velocity and seismicity in subduction zones, Nature Geoscience, 6, 780-784, doi:10.1038/ngeo1901, 2013. 査読有.

Ide, S., and H. Aochi, Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophysics, 600, 27-40, doi:10.1016/j.tecto.2012.10.018, 2013. 査読有.

Aso, N., K. Ohta, and S. Ide, Tectonic, volcanic, and semi-volcanic deep low-frequency earthquakes in western Japan, Tectonophysics, 600, 1-13, doi:10.1016/j.tecto.2012.12.015, 2013. 査読有.

Yabe, S., and S. Ide, Repeating deep tremors on the plate interface beneath Kyushu, southwest Japan, Earth Planets Space, 65, 17-23, doi:10.5047/eps.2012.06.001, 2013. 査読有.

Ide, S., Variety and spatial heterogeneity of tectonic tremor

worldwide, J. Geophys. Res., 117, B03302, doi:10.1029/2011JB008840, 2012. 査読有.

Nakata, R., R. Ando, T. Hori, and S. Ide, Generation mechanism of slow earthquakes: Numerical analysis based on a dynamic model with brittle-ductile mixed fault heterogeneity, J. Geophys. Res., 116, B08308, doi:10.1029/2010JB008188, 2011. 査読有.

Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza, Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, Science, 332, 1426-1429, doi:10.1126/science.1207020, 2011. 査読有.

Aso, N., K. Ohta, and S. Ide, Volcanic-like low-frequency earthquakes beneath Osaka Bay in the absence of a volcano, Geophys. Res. Lett., 38, L08303, doi:10.1029/2011GL046935, 2011. 査読有.

[学会発表](計126件)

Ide, S., The mechanism and variation of slow earthquakes, KIGAM Seminar, Daejeon (Korea), 2016/03/28.

Ide, S., Universality of very low frequency signals behind tremors explained by a stochastic model, AGU Chapman Conference on the Slow Slip Phenomena, Ixtapa (Mexico), 2016/02/22.

Ide, S., Focal mechanisms and tidal modulation for tectonic tremors in Taiwan, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 2015/12/16.

Ide, S., Multiscale heterogeneities in earthquake source process, Best Practices in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations, Vienna (Austria), 2015/11/19.

Ide, S., Deformation mechanism and rheology for slow earthquakes, 26th IUGG General Assembly 2015, Prague (Czech Republic), 2015/06/30.

Ide, S., Universality of slow earthquakes in the very low frequency band, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 2014/12/15.

Ide, S., Controls on plate motion by oscillating tidal stress: Evidence from deep tremors in western Japan, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 2014/12/15.

Ide, S., Universality of slow

earthquakes in the very low frequency band, SEG-AGU Summer Research Workshop, Vancouver (Canada), 2014/07/22.

Ide, S., The proportionality between relative plate velocity and seismicity in subduction zones, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 2013/12/10.

Ide, S., Modeling scale-independent heterogeneities of earthquake dynamic rupture, IAHS-IAPSO-IASPEI 2013, Gothenburg (Sweden), 2013/07/25.

Ide, S., The mechanism and spatial variation of slow earthquakes, Seminar at Oxford University, Oxford (UK), 2013/07/18.

Ide, S., Regional and global variations in statistical features of tectonic tremor, AOGS2013, Brisbane (Australia), 2013/06/28.

Ide, S., Global perspective on controls on megathrust slip behaviour, GeoPRISM Workshop, Wellington (New Zealand), 2013/04/15.

Ide, S., Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 2012/12/06.

Ide, S., Modeling scale-invariant heterogeneity of earthquakes, ECGS Workshop 2012: Earthquake source physics on various scales, Luxembourg (Luxembourg), 2012/10/04.

Ide, S., Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, 9th General Assembly of ASC, Ulanbaataar (Mongoria), 2012/09/18.

Ide, S., Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco (USA), 2011/12/09.

Ide, S., Variety of Tectonic Tremor in the Nankai Subduction Zone, AOGS 2011, Taipei (Taiwan), 2011/08/10.

Ide, S., Geometrical Constraints on World Deep Tremor, IUGG 2011, Melbourne (Australia), 2011/07/04.

Ide, S., The source process of the 2001 Tohoku-Oki earthquake estimated by empirical Green's function analysis, SSA 2011 Annual Meeting, Memphis (USA), 2011/4/15.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

World Tremor Database

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~idehara/wtd0/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井出 哲 (IDE, Satoshi)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 90292713

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

安藤 亮輔 (ANDO, Ryosuke)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号: 10455256

中田 令子 (NAKATA, Ryoko)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・特任技術研究員

研究者番号: 00552499

堀 高峰 (HORI, Takane)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・グループリーダー

研究者番号: 00359176

鈴木 岳人 (SUZUKI, Takehito)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号: 10451874