

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2018

課題番号：26257206

研究課題名(和文)沈み込み帯浅部のスロースリップはトラフ軸まで到達するか？

研究課題名(英文)Slow slip to the trench ?

研究代表者

伊藤 喜宏 (Ito, Yoshihiro)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：30435581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,200,000円

研究成果の概要(和文)：ニュージーランドの北島の東方沖に位置するヒクランギ沈み込み帯の北部で実施した海底圧力観測記録に基づき、得に2014年のスロースリップがトラフ軸近傍まで到達していることを明らかにした。加えて、ヒクランギ沈み込み帯で発生するスロースリップの動的トリガリングのモデル化も行った。特に2016年に発生したカイコウラ地震により生じた地震波動による動的応力擾乱を考慮することで、浅部のスロースリップの発生をよく再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沈み込み帯浅部の「スロースリップ」が海底近傍の極浅部まで到達していることを観測から示した。2011年東北地方太平洋沖地震時には、地震時すべりが海底まで到達していたことが知られており、結果として海底付近に到達した地震時すべりが巨大津波の一因となった。沈み込み帯浅部のすべり様式の多様性を示した本研究の事例は、沿岸部の地震および津波防災の検討を進める上で有用な新たな知見となった。周囲で発生する巨大地震の地震動による応力擾乱によりスロースリップが誘発されることを数値モデルから示した。これは巨大地震とスロースリップの相互作用を数理的に示した重要な成果となった。

研究成果の概要(英文)：We investigated slow slip events in the Hikurangi Margin, New Zealand with ocean bottom pressure observations and numerical modeling based on the observation data. Our results from the pressure data indicated that the slip area of the slow slip event in 2014 reached the trench in the 2014 slow slip event. Our numerical model simulated the dynamic effect on triggering the slow slip event after the 2016 Kaikoura earthquake captured features of the actual slow slip event observed after the mainshock.

研究分野：地震学

キーワード：スロースリップ 海底圧力観測 ヒクランギ沈み込み帯 巨大地震 ニュージーランド 国際研究者交流 室内実験 路頭調査

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々が普段感じる地震に比べて、ゆっくりとした断層すべりによる地震、すなわちスロー地震は、2000年以降世界の沈み込み帯で相次いで発見された(例えば [1]-[3])。しかしながら、実際の物理プロセスは未知な部分が多い。例えば、通常地震は地震モーメントの1/3乗に比例して大きくなるのに対して、スロー地震は地震モーメントの1乗に比例してすべりの継続時間が大きくなる[4]。このように、通常地震とは異なる物理で支配されているかもしれない「スロー地震そのもの」の理解は不十分である。

2011年東北地方太平洋沖地震では、本震時の地震時すべりが海溝軸(海底)まで到達したことが様々な調査から明らかにされた([5]-[7])。一方で、海溝軸近傍でのすべり量が30m以上(特に海溝軸近傍では80m以上)に達したことも示されている。また、本震発生前には、本震時に30m以上すべった領域内部において、繰り返しスロースリップが発生していたことも海底圧力観測から知られている[8]。これは、本震震源域内で本震発生前に、プレート境界に蓄積される歪み(またはその一部)を解放していた可能性を示す。

スロースリップにより歪みが解放されていたにもかかわらず、なぜプレート境界で30m以上のすべりが生じたのだろうか? 巨大すべりを引き起こす(大きな摩擦力の低下を引き起こす)別な要因として、例えば断層運動に伴う摩擦発熱による間隙圧の急激上昇が指摘されているが[9]、そもそも摩擦発熱に必要な高速破壊に至るまでの物理過程については、十分な説明がなされていない。すなわち、沈み込み帯浅部の「スロースリップそのもの」の理解と巨大な地震時すべりと関連性についての理解は、沈み込み帯の津波生成のメカニズムおよび津波ハザードの評価の観点からも重要である。

2. 研究の目的

ニュージーランドの北島の東方沖に位置するヒ克蘭ギ沈み込み帯の北部では、深さ5-10kmのプレート境界でスロースリップ(マグニチュード6.5相当)が繰り返し発生している[10]。発生するスロースリップの繰り返し周期は1-2年間隔と、世界の他の沈み込み帯のスロースリップに比べ短く、ヒ克蘭ギ沈み込み帯北部は、4-5年間の観測期間に高い確率で複数回のスロースリップが観測できる理想的な調査領域である。また、深さ5-10kmで発生するヒ克蘭ギ沈み込み帯のスロースリップの規模やすべりの継続時間は、我々が日本海溝の海底圧力観測網で既に観測したスロースリップの特徴と似ているため、既に開発済みの機材および解析手法[8]を適用することができる。本研究では、ニュージーランド北島の東方沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯で海底圧力計を用いた海底地殻変動観測を最大5年間継続し、最低3回程度のスロースリップを観測することで、繰り返し発生するスロースリップの空間的広がり、特にトラフ軸近傍でスロースリップによるすべりが浅部まで到達するかを海底観測から明らかにすることを目的とする。さらに、観測結果に基づき沈み込み帯の浅部で発生するスロースリップのモデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

ニュージーランド北島東方沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯で海底圧力観測とそのデータ解析を5ヶ年で実施した。繰り返し発生するスロースリップにともなう海底上下変動を海底圧力計で観測した。海底観測は、本研究の4ヶ年に加えて、既に実施中の予備調査および平成25年度末から実施予定の国際共同観測期間を合わせて、計5年間実施した。予備調査期間中の平成25年7月には、スロースリップが観測領域内で発生した。取得されたデータを用いた地殻変動の解析手法の開発および解析を実施し、スロースリップ域の詳細な時空間分布を推定した。さらに、得られた結果に基づき、ヒ克蘭ギ沈み込み帯で繰り返し発生するスロースリップのモデル化を行なった。

4. 研究成果

(1) 観測実績

平成25年3月から平成26年5月の期間に予備調査として設置された海底圧力計も含めて、5カ年の海底圧力記録をニュージーランドヒ克蘭ギ沖で観測した。観測期間中には、少なくとも3回の比較的規模の大きなスロースリップが発生している。小規模なものまで含めると10回程度のスロースリップが観測期間に発生した。

(2) 海底圧力計の解析とスロースリップの検出

(2) 1 地殻変動の解析

平成26年9月に観測されたスロースリップの地殻変動は、本研究で設置された圧力計に加えて、国際共同研究として設置された他の海底圧力でも観測された。すべての観測記録を統合して、スロースリップのすべり域の推定を行なった。その結果、スロースリップは海溝軸近傍のプレート境界浅部まで到達していることが示された。スロースリップ発生域周辺には、沈み込む海山が存在し、その近傍でやすべり量がやや小さくなっていることが確認された。

地殻変動の検出精度の向上を目的として、海底圧力計記録に含まれる海洋潮汐と非海洋潮汐の特性を評価する手法の開発を行った。特に風ベクトルにより駆動される海洋循環モデルに基づ

く海洋物理モデルを用いて非潮汐成分を推定し、観測値から差し引く手法の高度化を行った。その上で、開発した手法により地殻変動由来の圧力変動が精度よく抽出できることをヒ克蘭ギ沈み込み帯に設置された圧力記録を用いて示すことができた。非潮汐成分の観測値とモデル値の位相はよく一致し高い相関値を示すが、観測される非潮汐成分の振幅は観測値に比べて、系統的に小さいことがわかった。モデル値の振幅を観測値に合うよう補正する新たな手法も提案し、非潮汐成分をさらに効率良く除去する手法の開発にも着手した。

(2) 2 地震動の解析

深部低周波微動の検出手法の開発を行った。通常、低周波微動の活動ではスロースリップの発生を伴う。その発生位置は、およそスロースリップの発生位置に対応する。つまり微動の発生履歴から、スロースリップの活動履歴に関する情報が得られる可能性がある。本課題では特に海底地震計記録から微動活動を検出する手法を開発した。特に単独観測点による微動の検出方法と地震波干渉法を応用した微動の検出手法の開発を行った。

2016年にニュージーランド南島でカイコウラ地震(M7.8)が発生した。本震の発生に伴い、本研究の対象領域でスロースリップが誘発された。陸上の地震観測記録から本震の地震動による動的応力変化が誘発に効果的であったことが示唆されている。しかしながら、スロースリップ域直上に地震観測点がないため、海底における地震動およびその応力擾乱への寄与について十分な検証が行われていない。ここでは、観測された海底圧力記録から地震動を再現し、動的応力変化に関する地震動の検証を行なった。結果、付加体直上の観測点で200-500秒以上継続する20-200秒の周期の特異な地震動の検出に成功した。これは、本震震源域から放射された地震動のエネルギーが、陸上観測から想定されていた以上に、長時間スロースリップ域直上の付加帯内に停滞していた可能性を示す。

(2)-3 津波の解析

2016年9月にニュージーランド北島北方沖でM7.1の地震が発生した。この地震はニュージーランド国内の陸上観測網から離れた海底下の地震であるため、震源位置を含めた断層パラメータの推定が難しい地震であった。この地震に伴う津波がニュージーランドの沿岸部で観測された。本研究で設置した海底圧力計でも津波波形が観測された。観測された津波の直達波に加えて、ニュージーランド北島の東海岸からの反射波を解析に加えた波源インバージョンを実施し、津波波源および断層パラメータの推定に成功した。

(3) スロースリップの数値モデルの構築

ヒ克蘭ギ沈み込み帯で自発的に発生する、深部長期的及び浅部短期的スロースリップのモデル化を行った。その結果、有効圧は、深部の長期的スロースリップ域で5MPa程度、浅部の短期的スロースリップで1MPa程度と推定された。(2)-1の地殻変動解析により得られたすべり分布を基に浅部の短期的スロースリップのモデル化を行った。浅部まですべりが到達するためには、浅部でも低速で速度弱化的摩擦特性が必要であることが示された。

2016年カイコウラ地震により励起された深部長期的及び浅部短期的スロースリップのモデル化を行った。深部長期的スロースリップは、カイコウラ地震の震源に近いこと、静的応力変動で励起されることを示した。また、浅部短期的スロースリップは、スロースリップ域の有効圧が小さいため、カイコウラ地震により生じた地震波動による動的応力擾乱により励起されることを示した。

(4) すべり依存の摩擦弱化的

スロースリップによる断層のすべり弱化的、特に3月9日の最大前震に伴う余効すべりによる滑り弱化的による2011年東北地方太平洋沖地震の震源断層の摩擦弱化的の可能性を2軸摩擦試験機を用いた岩石摩擦実験から明らかにした。

(5) 新たな交際共同研究への発展

本研究で得られた知見に基づき、トラフ軸近傍の浅部で発生するスロースリップの総合的理解を目的とした共同研究を開始した。ここでは特に地質学的知見と地球物理学的知見の融合した国際共同研究を英国カーディフ大学および筑波大学と勤めた。本研究で得られた沈み込み帯浅部で発生するスロースリップの発生領域の空間的広がりに関する知見を共同研究に提供した。さらに日本海溝の沈み込み帯浅部の断層物質を用いた摩擦実験をドイツ・ブレーメン大学と共同で開始した。

(6) 研究集会の開催

2014年9月8日~10日:本課題に関連した研究集会として、京都大学防災研究所にて国際研究集会「西日本大震災の減災に向けたスロースリップ地震研究の今後の可能性」を開催した。参加者は所内所外合わせて78名であった(13名の海外からの参加者を含む)。研究集会

では、ヒクラング沈み込み帯のスロースリップに加えて、西南日本、東北日本、メキシコ太平洋岸を含む様々な地域の沈み込み帯で発生するスロー地震に関する話題が提供され発表内容に関して議論を行った。

- 2015年9月24日～26日：本課題に関連した研究集会として、名古屋大学にて国際研究集会「Study on occurrence mechanism of slow earthquakes: Toward resolving the relationship between slow earthquakes and megathrust huge earthquakes based on unification of results from observations, surveys, experiments, theoretical studies, and modeling」を開催した(9月24日～26日)。参加者は国内外合わせて56名であった(11名の海外からの参加者を含む)。研究集会では、ヒクラング沈み込み帯や他地域のスロースリップの観測に関する研究に加えて、数値計算によるモデリングの研究および室内実験結果や地質学的視点からのスロー地震に関する最新の研究内容が紹介された。
- 2016年12月12日：本課題に関連した研究集会として、America Geophysical Union 2016年秋季大会(米国サンフランシスコ)にてセッションを立ち上げ、参加者は国内外合わせて8名の口頭講演および21件のポスター発表が行われた。セッションでは、スロー地震に関する観測、理論から物質科学に関する研究まで多岐に渡る最新の研究が紹介された。
- 2017年7月26-28日：JST-JICAのSATREPS課題と連携した地震・津波防災に向けたワークショップを開催した。国内外合わせて50名が参加した。ここでは、スロー地震の発生メカニズムや関連して発生する巨大地震による災害に関する多岐に渡る最新の研究が紹介された。
- 2018年1月25-26日：海底地震・測地観測に関する国際研究小集会を開催した。国内外から15名が参加し、海底観測における現状と課題について議論した。特に海底地震・圧力・GPS/A観測に関する最新の情報が交換された。

<引用文献>

- [1] Dragert, H., Wang, K., & James, T. S. (2001). A silent slip event on the deeper Cascadia subduction Interface. *Science*, 292, 1525-1528. doi:10.1126/science.1060152
- [2] Obara, K. (2002). Nonvolcanic Deep tremor associated with subduction in Southwest Japan. *Science*, 296, 1679-1680. doi:10.1126/science.1070378
- [3] Ito, Y., Obara, K., Shiomi, K., Sekine, S., & Hirose, H. (2007). Slow Earthquakes Coincident with Episodic Tremors and Slow Slip Events. *Science*, 315, 503-506. doi:10.1126/science.1134454
- [4] Ide, S., Beroza, G. C., Shelly, D. R., & Uchide, T. (2007). A scaling law for slow earthquakes. *Nature*, 447(7140), 76-79. doi:10.1038/nature05780
- [5] Ito, Y., Tsuji, T., Osada, Y., Kido, M., Inazu, D., Hayashi, Y., . . . Fujimoto, H. (2011). Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(7), n/a-n/a. doi:10.1029/2011gl048355
- [6] Kido, M., Osada, Y., Fujimoto, H., Hino, R., & Ito, Y. (2011). Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(24), n/a-n/a. doi:10.1029/2011gl050057
- [7] Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N., & Kaneda, Y. (2011). The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench Axis. *Science*, 334(6060), 1240. doi:10.1126/science.1211554
- [8] Ito, Y., Hino, R., Kido, M., Fujimoto, H., Osada, Y., Inazu, D., . . . Ashi, J. (2013). Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 600, 14-26. doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022
- [9] Noda, H., & Lapusta, N. (2013). Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening. *Nature*, 493(7433), 518-521. doi:10.1038/nature11703
- [10] Wallace, L. M., & Beavan, J. (2010). Diverse slow slip behavior at the Hikurangi

subduction margin, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 115(B12).
doi:10.1029/2010jb007717

5 . 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 14 件)

- [1] Yarce, J., A. F. Sheehan, J. S. Nakai, S. Y. Schwartz, K. Mochizuki, M. K. Savage, L. M. Wallace, S. A. Henrys, S. C. Sebb, Y. Ito, R. E. Abererombie, B. Fry, H. Shaddox, E. K. Todd (2019), Seismicity at the northern Hikurangi Margin, New Zealand, and investigation of the potential spatial and temporal relationships with a shallow slow slip event, *J. Geo. Res.*, in press
- [2] Ohta, K., Y. Ito, R. Hino, S. Ohyanagi, T. Matsuzawa, H. Shiobara, M. Shinohara (2019), Tremor and inferred slow slip associated with afterslip of the 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, in press
- [3] Muramoto, T., Y. Ito, D. Inazu, L. M. Wallace, R. Hino, S. Suzuki, S. C. Webb, S. Henrys(2019), Seafloor crustal deformation on ocean bottom pressure records with non-tidal variability corrections: application to Hikurangi margin, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 303-310, doi:10.1029/2018GL080830
- [4] Uemura, M, Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, M. Shinohara(2018), Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using Ocean Bottom Seismometer's records, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(87), doi:10.1186/s40645-018-0240-3
- [5] Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, and M. Shinohara (2018), Spatiotemporal Variation of Tectonic Tremor Activity Before the Tohoku-Oki Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 123, 9676-9688, doi:10.1029/2018JB016651
- [6] Kubota, T, T. Saito, Y. Ito, Y. Kaneko, L. M. Wallace, S. Suzuki, R. Hino, and S. Henrys (2018), Using Tsunami Waves Reflected at the Coast to Improve Offshore Earthquake Source Parameters: Application to the 2016 Mw 7.1 Te Araroa Earthquake, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 123, 8767-8779, doi:0.1029/2018JB015832,
- [7] Todd, E.K., S.Y. Schwartz, K. Mochizuki, L. M. Wallace, A. F. Sheehan, S. C. Webb, C. A. Williams, J. Nakai, J. Yarce, B. Fry. S. Henrys, Y. Ito (2018), Earthquakes and Tremor Linked to Seamount Subduction During Shallow Slow Slip at the Hikurangi Margin, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 123, 6769-6783, doi:10.1029/2018JB016136
- [8] 伊藤喜宏(2018), 南海トラフのスロー地震と断層活動 *地盤工学会誌* , 66, 54-60.
- [9] Katakami, S., Y. Yamashita, H. Yakiyama, H. Shimizu, Y. Ito, and K. Ohta (2017), Tidal Response in Shallow tectonic tremors, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9699-9706, doi:10.1002/2017GL074060.
- [10] Ito, Y., M. J. Ikari, K. Ujiie, and A. J. Kopf (2017), Coseismic slip propagation on the Tohoku plate boundary fault facilitated by slip-dependent weakening during slow fault slip, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8749-8756, doi:10.1002/2017GL074307.
- [11] Wallace, L., S. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, R. Hino, S. Henrys, S. Schwartz, and A. Sheehan (2016), Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Science*, 352, 701-704, doi:10.1126/science.aaf2349.

- [12] Harris, R., L. Wallace, S. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, H. Ichihara, S. Henrys, A. Tréhu, S. Schwartz, A. Sheehan, D. Saffer, and R. Lauer (2016), Investigations of shallow slow slip offshore of New Zealand, *Eos*, 97, doi:10.1029/2016E0048945.
- [13] Ito, Y., and M. J. Ikari (2015), Velocity- and slip-dependent weakening in simulated fault gouge: Implications for multi-mode fault slip, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9247-9254, doi:10.1002/2015GL065829.
- [14] Ikari, M. J., Y. Ito, K. Ujiie, and A. J. Kopf (2015), Spectrum of slip behaviour in Tohoku fault zone samples at plate tectonic slip rates, *Nature Geoscience*, 8, 870-874, doi10.1038/ngeo2547.

〔学会発表〕(計 34 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

該当なし

取得状況 (計 0 件)

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~yito/NewSite_J/projects.html

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：木戸元之

ローマ字氏名：(KIDO, Motoyuki)

所属研究機関名：東北大学

部局名：災害科学国際研究所

職名：教授

研究者番号 (8 桁) : 10400235

研究分担者氏名：芝崎文一郎

ローマ字氏名：(SHIBAZAKI, Bunichiro)

所属研究機関名：国立研究法人建築研究所

部局名：国際地震工学センター

職名：上席研究員

研究者番号 (8 桁) : 20344012

(2)研究協力者

研究協力者氏名：日野亮太

ローマ字氏名：(HINO, Ryota)

研究協力者氏名：小原一成

ローマ字氏名：(OBARA, Kazushige)

研究協力者氏名：篠原雅尚

ローマ字氏名：(SHINOHARA, Masanao)

研究協力者氏名：望月公廣

ローマ字氏名：(MOCHIZUKI, Kimihiro)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。