



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

ニュージーランド・ スロースリップ域掘削計画 — スロースリップのなぞを解く! —

伊藤 喜宏
望月 公廣
Laura Wallace

Slow Slip drilling Project at the northern
Hikurangi subduction Margin, New Zealand
— Unlocking the secrets of slow slip —

Yoshihiro Ito • Kimihiro Mochizuki •
Laura M. Wallace

いとう よしひろ : 京都大学防災研究所
もちづき きみひろ : 東京大学地震研究所
Laura Wallace : テキサス大学オースティン校

世界の沈み込み帯で、近年相次いで発見されているスロースリップの発生メカニズム解明に向けた掘削計画を、日本・アメリカ・ニュージーランドなどの国際研究チームが進めている。ニュージーランド北島東方沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯のスロースリップ域における掘削から何を明らかにしようとしているのか、その概要を述べる。

1. はじめに

スロースリップとは、プレートの相対速度（～数 cm/年）よりはやく、地震波を放出するすべり速度（～1m/sec）よりおそい速度で、通常数週間から数ヶ月程度かけて断層が一時的にゆっくりとずれ動く現象である。これらの現象は、近年世界中で整備された GNSS (Global Navigation Satellite System) などによる地殻変動観測網により、特に南海トラフ、カスケーディア、ニュージーランドや日本海溝など巨大地震発生域において相次いで発見された (Dragert *et al.*, 2001 ; Obara *et al.*, 2004; Wallace and Beavan, 2010 ; Ito *et al.*, 2013) 。スロースリップは、巨大地震を含む通常の地震の断層運動と断層が一定レートで動くクリープ現象の「あいだ」の現象であり、両者をつなぐ重要な現象であるにもかかわらず、その発生メカニズムや巨大地震との関係は未だ明らかではない。

巨大地震発生域における沈み込み帯のスロースリップに関する研究は、その発生メカニズムの理解のみならず、東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震との関連性も含めて注目されている。しかしながら、スロースリップ発生域およびその周辺の摩擦特性やレオロジーに関する理解が不足しているため、スロースリップの発生メカニズムの根本的な理解に未だ至らない。この問題の解決に向けて、日本・アメリカ・ニュージーランドの国際研究チームによるスロースリップ域の掘削計画が現在提案されている。

ニュージーランド北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯北部は、スロースリップの掘削に最適な地域である。これは、ニュージーランド国内の陸上地殻変動観測網により、スロースリップの活動履歴が約

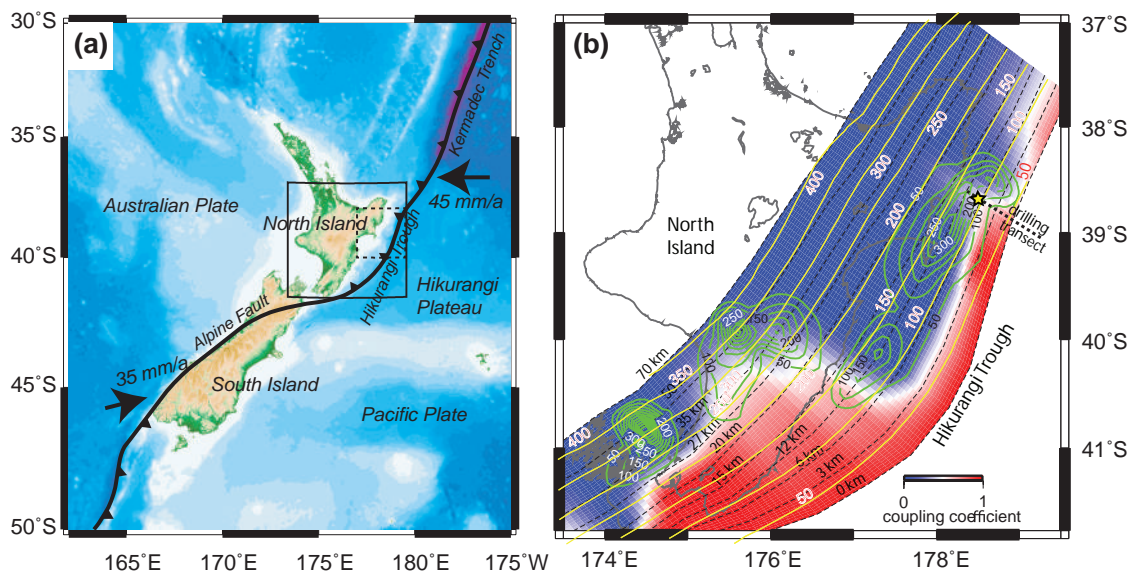


図1 ニュージーランド周辺のテクトニクス (a) とヒクラング沈み込み帯のスロースリップ (b). (a) 実線の矩形領域は図1 (b) の領域を、破線の矩形領域は、図2および図3の領域を示す. (b) 地震間のカップリング率 (Wallace and Beavan, 2010) をカラースケールで示す. 2002年から2010年までに発生したスロースリップの積算すべり量を緑色のコンターで示す (単位はmm). 破線と黄色のコンターはそれぞれ、沈み込むプレート上面の深度とプレート上面での等温線 (MacCaffery *et al.*, 2008, 単位は°C) を示す. 星印はライザー掘削予定地点, 点線は掘削トランセクトを示す.

10年間に渡って十分に調べられていること (Wallace and Beavan, 2010; Wallace *et al.*, 2012), またプレート境界付近の震源断層が掘削可能な深度にあることによる. 大深度掘削によるスロースリップ域の断層物質の取得と掘削孔を用いたスロースリップの長期孔内観測は, スロースリップの「なぞ解き」のみならず, スロースリップにより誘発される超巨大地震 (Ito *et al.*, 2013) との関係解明においても重要な役割を果たすであろう.

2. ヒクラング沈み込み帯のスロースリップ

ニュージーランド北島の東方沖, ヒクラングトラフでは, ヒクラング海台がオーストラリアプレートの下に4.5–5.5 cm/年の速度で沈み込む (図1). 特に, 北部では1–2年間隔で, 2–3週間継続するスロースリップが深さ10 km以浅で発生している. スロースリップの発生に伴う海岸線の動き (南東に1–2 cm程度) は, 陸上のGNSS

観測網で幾度か捉えられている (図2). 1回のスロースリップでプレート境界が約10 cm程度ずれ動き, Mw 6.5–6.8の地震と同等の大きさの歪エネルギーが解放される. 1回のスロースリップで解放される歪みの大きさは, 繰り返し発生するスロースリップ間にプレートの沈み込みにより蓄えられる歪とほぼ一致することが知られている (Wallace and Beavan, 2010). すなわち, ヒクラング沈み込み帯におけるプレート境界上のすべり欠損は, 繰り返し発生するスロースリップでほぼ解消されているといえる.

ヒクラング沈み込み帯の北部のギズボーン沖で発生するスロースリップ域は, その発生域のほとんどが海底下にある (図2). 断層の下端付近は海岸線付近にあるため, 陸上GNSS観測網により高い精度で断層面上のすべり量分布の推定が可能である (Wallace and Beavan 2010). 一方, 上部部は陸域の観測網から離れるため, スロースリップ断

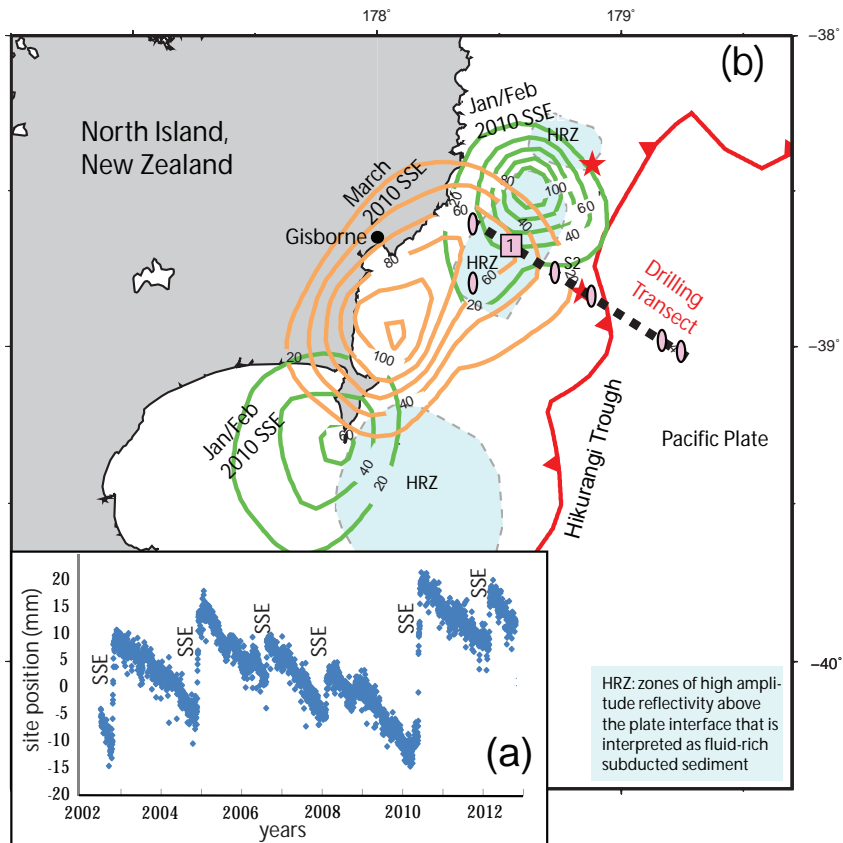


図2 (a) Gisborne観測点のGPS観測から得られた地殻変動記録(東向き成分). スロースリップ(SSE)発生時に1-2 cm程度東向きに移動している. (b) 2010年に発生したスロースリップのすべり域, と掘削サイト(楕円: ノンライザー掘削地点, 四角: ライザー掘削地点). 緑とオレンジのコンターで, 2010年1-2月と3月のスロースリップにおけるすべり量(単位はmm)を示す. 水色で示す領域は, 反射法地震探査で強い反射波が観測された領域(Bell *et al.*, 2010)を示す.

層がトラフ軸まで到達しているのか否かは必ずしも明らかではない.

北部のスロースリップの発生時には, スロースリップ断層周辺の通常の地震活動の活発化が見られること(Delahaye *et al.*, 2008), さらには非火山性微動の活動が伴うこと(Kim *et al.*, 2011)が知られている. スロースリップが周囲の地震活動や巨大地震を誘発する現象は, 房総沖(Ozawa *et al.*, 2004)や日本海溝(kato *et al.*, 2012; Ito *et al.*, 2013)でも観測されている. すなわち, スロースリップそのものの理解に加えて, スロースリップが誘発

する現象の理解も重要である.

3. 掘削計画概要

日本・アメリカ・ニュージーランドなどからなる国際研究チームは, ヒクランギ・スロースリップ発生領域の掘削を計画している. スロースリップ域直上の7箇所のノンライザー掘削に加えて, 海底下5-6 kmのスロースリップ域をターゲットとしたライザー掘削を行い, スロースリップ断層への到達を目指す(図2). これらの掘削では, (1) 沈み込むプレート境界浅部, 上盤側浅部およびス

ロースリップ断層周辺の弾性波速度、密度などの物理パラメータを孔内検層により調べて、(2) コアリングにより断層物質を直接取得しその組成を直接調べ、さらに孔内観測により (3) 水理学的特徴や温度、応力、間隙圧の状態をロースリップ断層の直近でモニタリングする。孔内観測では、機器を長期間設置しロースリップに付随する地殻変動や地震活動、さらには水理学的な変化の観測を目指す。これらの情報を統合的に解析しロースリップの発生メカニズムの「なぜ」を解き明かす。

4. 「ちきゅう」によるライザー掘削による「なぜ解き」

2000年頃から西南日本やカスケード沈み込み帯などの巨大地震発生域深部に相次いで発見されたロースリップは、ともに深さ30–35 km程度で発生 (Dragert *et al.*, 2001; Obara *et al.*, 2004) していたため、ロースリップは、摂氏350度から摂氏450度程度の範囲で固着から安定すべりに遷移する領域で発生する現象と考えられていた。その後、深さ15 km以浅の摂氏100–150度と低温の領域でもロースリップが、ヒクラングや房総沖、コスタリカ、日本海溝などで相次いで検出されたため、ロースリップの発生は温度–圧力条件にのみ支配されるものではないと考えられるようになった。では何がロースリップの発生を支配しているだろうか？

ロースリップの発生を支配する一つの要因として、ロースリップ断層の高間隙圧異常がある。これは、断層面上の有効法線応力が断層帯内の高間隙圧により低下することで見かけの強度が低下し、ロースリップが発生し易くなるという考え方である。その可能性を示す観測データが、ロースリップ域周辺の調査から示されている (e.g. Kodaira *et al.*, 2004; Shelly *et al.*, 2006)。また、摩擦構成則に基づく数値シミュレーションでは、低い有効圧 (間隙圧が静岩圧の99%程度) でロースリップが発生し得ることが示されている (Liu and Rice, 2005, 2007)。さらにギズボン

沖の反射法地震探査では、ロースリップ域からの強い反射波が観測されている (図2) (Bell *et al.*, 2010)。これは、ロースリップ域に高間隙圧下にある領域が存在する可能性を示唆する。ギズボン沖の強反射域はライザー掘削により到達可能な深度にあるため、その生成原因は断層掘削により直接解明可能である。

ロースリップの発生メカニズムを支配する別な要因として、先述した高間隙圧異常の他に、発生域周辺の粘性緩和による歪解放過程が考えられる。主としてロースリップが発生している摂氏400度以下の領域では、圧力溶解クリープ (Gratier *et al.*, 2011) が支配的な変形メカニズムとして働くため (渡辺 2011)、このような粘性過程もロースリップの発生メカニズムとして有効かもしれない。コアや孔内検層による直接計測から、摩擦と粘性のどちらがロースリップにより支配的か明らかにされるであろう。

巨大地震による歪解放が卓越する沈み込み帯と、非地震性すべりが卓越する沈み込み帯では、いったい何が異なるのであろうか？非地震性すべりが卓越する沈み込み帯では、プレート境界部の変形帯が深さ方向に厚みを持って分布する可能性が高い (Fagereng and Sibson, 2010; Wang and Bilek, 2011)。この考え方は、せん断破壊が狭い領域に集中する結果を示す岩石実験の結果 (Marone and Kilgore, 1993) や地震時の高速すべりが薄いせん断帯に集中していることを示す南海トラフの結果 (Sakaguchi *et al.*, 2011) からも支持される。ロースリップ域の変形帯を掘削し、得られた結果と他の沈み込み帯、特に南海トラフの掘削結果との比較により、ロースリップに関する「なぜ」の解明が期待できる。

5. 掘削に向けた日本側の取り組み

将来の掘削計画に向けた日本側の取り組みとして、東京大学と東北大学が、海底地震計・圧力計を用いたロースリップ域近傍での海底地震・地殻変動観測を行っている。ロースリップの下端付近はニュージーランド陸上GNSSおよび地震観

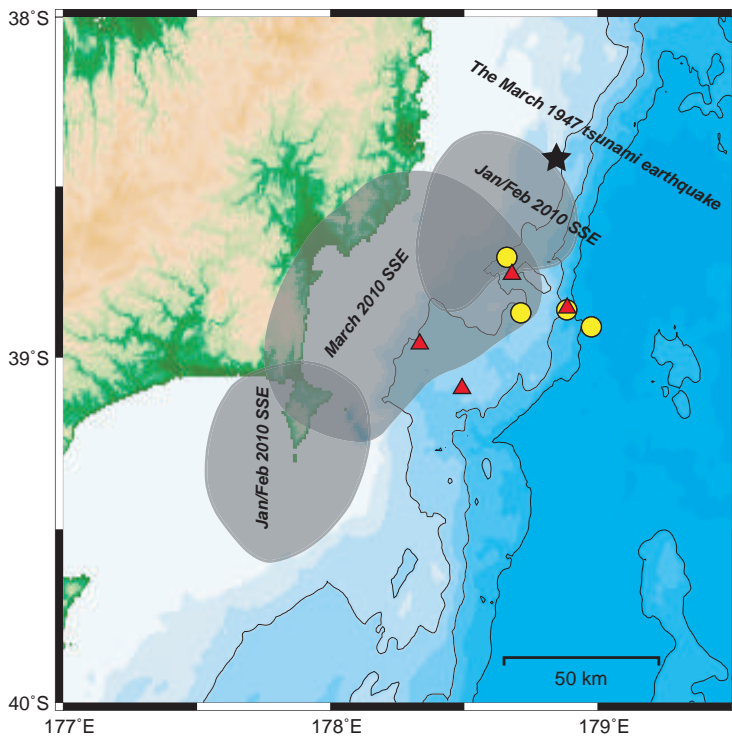


図3 ヒクランギ沈み込み帯北部の海底地震・圧力観測点。赤三角は東京大学地震研究所による海底地震・圧力観測点(2012年4月から2013年3月まで)、黄丸は京都大学、東北大学および東京大学地震研究所による海底圧力観測点(2013年3月から2014年3月回収予定)を示す。灰色の領域は、2010年に発生したスロースリップのすべり域を示す。星印は1947年にギズボーン沖で発生した津波地震の破壊の開始点を示す。

測網が直上に存在するため、その広がりや付随する現象を高い精度で推定できる。一方、その上端は、陸から離れたトラフ付近であるため、スロースリップ域のトラフ近傍での空間分布を精度良く推定することが難しい。そこで、我々はニュージーランド・ヒクランギ沈み込み帯の北部、ヒクランギ沖のスロースリップ域上端付近の活動域を詳細に調べる目的で、海底圧力をスロースリップ上端域付近に設置した(配島・他2013;伊藤・他2013)(図3)。観測は2012年3月より開始され2013年8月現在も観測を継続して行っている。

2013年3月から開始した海底圧力観測では、ニュージーランド・ヒクランギ沈み込み帯の北部、ギズボーン沖に海溝軸にほぼ直交する方向に計画中の掘削トランセクトにほぼ沿って4台の自己浮上式海底圧力計が設置された。そのうち一台は、ヒクランギトラフの変形フロントよりも海側に設置された。設置後、2013年7月初旬にギズボーン

沖でスロースリップが発生した。これらのデータは2014年5月に回収される見込みである。

6. おわりに

本稿では、ニュージーランド・ヒクランギ沈み込み帯北部で繰り返し発生するスロースリップの重要性について述べた。スロースリップの「なぜ」の解明は、純粋な科学的視点からのみ要請されるものではなく、スロースリップ域内で発生する将来の巨大地震とスロースリップとの関係の理解に基づく地震・津波災害科学の上でも重要である。現在、スロースリップ域を掘削できる能力を有する掘削船は世界で「ちきゅう」のみである。その最適地であるニュージーランド・ヒクランギ沈み込み帯において、「ちきゅう」によるスロースリップの「なぜ解き」に近い将来なされることを切望する

謝辞：ニュージーランドの海底圧力観測は、主として IODP 掘削提案フィジビリティ研究「ニュージーランド・ヒクラング沈み込み帯のスロースリップ域掘削計画にむけたスロー地震のモニタリング研究」、東京大学地震研究所国際・学際共同利用(2012-D-03)、同特定共同研究(B)(2013-B-09)、および東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究費によって行われました。

参考文献

- [1] Delahaye, E. J., J. Townend, M. E. Reyners, G. Rogers, Microseismicity but no tremor accompanying slow slip in the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 277, 21-28.
- [2] Bell, R., R. Sutherland, D. H. N. Barker, S. Henrys, S. Bannister, L. Wallace, and J. Beavan, 2010, Seismic reflection character of the Hikurangi subduction interface, New Zealand, in the region of repeated Gisborne slow slip events, *Geophys. J. Int.*, 180 (1), 34-48.
- [3] Dragert H., K. Wang, and T. James, 2001, A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface, *Science*, 292, 1525-1528.
- [4] Fagereng, A., and R. Sibson, 2010, Melange rheology and seismic style, *Geology*, 38 (8), 751-754.
- [5] Gratier, J. -P., J. Richard, F. Renard, S. Mittempergher, M. -L. Doan, G. Di Toro, J. Hadizadeh, and A. -M. Boullier, 2011, Aseismic sliding of active faults by pressure solution creep: Evidence from the San Andreas Fault Observatory at Depth, *Geology*, 39, 1131-1134.
- [6] Ito, Y. R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2013, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, 14-26.
- [7] 伊藤喜宏・望月公廣・日野亮太・木戸元之・塩原肇・鈴木秀市・八木健夫・篠原雅尚・小原一成・Laura Wallace・Stuart Henrys・Bill Fry・Stephen Bannister, 2013, ニュージーランド・ヒクラング沈み込み帯における海底圧力計を用いたスロースリップ観測, 日本地震学会講演予稿集, C21-12.
- [8] Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 335, 705-708.
- [9] Kim, M. J., S. Y. Schwartz, and S. Bannister, 2011, Non-volcanic tremor associated with the March 2011 Gisborne slow slip event at the Hikurangi subduction margin, New Zealand, 38, doi:10.1029/2011GL048400.
- [10] Kodaira, S., T. Iidaka, A. Kato, J. O. Park, T. Iwasaki, and Y. Kaneda, 2004, High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai trough, *Science*, 304, 1295-1298.
- [11] Liu, Y., and J. R. Rice, 2005, Aseismic slip transients emerge spontaneously in three dimensional rate and state modeling of subduction earthquake sequences, *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2004JB003424.
- [12] Liu, Y. and J. R. Rice, 2007, Spontaneous and triggered aseismic deformation transients in a subduction fault model, *J. Geophys. Res.*, 112, B09404, doi:10.1029/2007JB004930.
- [13] McCaffrey, R., L. M. Wallace and J. Beavan, 2008, Slow slip and frictional transition at low temperature at the Hikurangi subduction zone, *Nature Geoscience*, 1, doi:10.1038/ngeo178.
- [14] Marron, C., and B. Kilgore, 1993, Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zones, *Nature*, 362, 618-621.
- [15] 靑島大資・望月公廣・塩原肇・山田知朗・篠原雅尚・Stuart Henrys・Bill Fry・Stephen Bannister, 2012, ニュージーランド北島沖合ヒクラング沈み込み帯における海底地震観測, 日本地震学会講演予稿集, P3-35.
- [16] Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara, 2004, Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23602.
- [17] Ozawa, S., S. Miyazaki, Y. Hatanaka, T. Imakiire, M. Kaidzu, and M. Murakami, 2003, Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso peninsula, *Central Japan*, 30, doi:10.1029/2002GL016665.
- [18] Sakaguchi, A., F. Chester, D. Curewitz, O. Fabbri, D. Goldsby, G. Kimura, C. -F. Li, Y. Masaki, E. J. Sreaton, A. Tsutsumi, K. Ujiie, and A. Yamaguchi, 2011, Seismic slip propagation to the updip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTro SEIZE cores, *Geology*, 39, 395-398.
- [19] Shelly, D. R., G. C. Beroza, S. Ide, and S. Nakamura, 2006, Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan and their relationship to episodic tremor and slip, *Nature*, 442, 188-191.
- [20] Wallace, L. M., and J. Beavan, 2010, Diverse slow slip behavior at the Hikurangi subduction margin, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 115(B12402), doi:10.1029/2010JB007717.
- [21] Wallace, L. M., J. Beavan, S. Bannister, and C. Williams, 2012, Simultaneous long-term and short-term slow slip events at the Hikurangi subduction margin, New Zealand: Implications for processes that control slow slip event occurrence, duration and migration, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2012JB009489.
- [22] 渡辺了, 2011, 地殻プロセスにおける流体の役割, *ながれ*, 30, 311-316.
- Wang, K. and S.L. Bilek, 2011, Do subducting seamounts generate or stop earthquakes?, *Geology*, 39, 819-822.

