

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287134

研究課題名(和文) 東北巨大地震断層近傍の応力状態：「ちきゅう」による日本海溝掘削からのアプローチ

研究課題名(英文) Stress state in the vicinity of the plate boundary fault ruptures during the 2011 Tohoku earthquake

研究代表者

林 為人(リンウェイレン) (Lin, Weiren)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80371714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：地震断層の滑り挙動と断層近傍並びに周囲母岩の応力状態との関連性を解明するために、東北地震の震源断層掘削プロジェクトJFASTなどにおいて、応力状態の解明研究、応力計測技術の高度化研究、断層滑りに密接に関係する熱物性の研究などを行った。その結果、1)東北地震の震源域である日本海溝の近くで行った科学掘削JFAST孔内の応力分布を得ることができ、2)日本海溝と東南海・南海地震の震源域である南海トラフとの応力状態を比較検討し、また、3)JFASTコア試料の熱物性を決定することができた。これらの成果はプレート境界型巨大地震の断層滑り挙動の解明に寄与した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the relationship between behavior of seismic fault slipping and stress state in the vicinity of the fault and in the wall rocks, we conducted stress measurements in the ocean scientific drilling project JFAST penetrated into the plate boundary fault which ruptured during the 2011 Tohoku earthquake, and also developed the relative stress measurement techniques. As their results, we obtained the stress profile in the JFAST borehole, and the results enabled us to compare with the stress state spatial distribution in the Nankai Trough subduction zone where is the source region of the Tonankai and Nankai earthquakes. In addition, we determined the three heat transfer properties using the JFAST core samples, and contributed the interpretation on the temperature anomaly detected at depth around the plate boundary in the JFAST borehole.

研究分野：岩石力学、構造地質、地質工学

キーワード：応力 断層掘削 非弾性ひずみ回復 ブレークアウト 熱物性

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生したマグニチュード9 (M9) 東北地方太平洋沖巨大地震は、比類の無い大きな津波を起こした。この津波が巨大化した最大の原因は、日本海溝付近のプレート境界断層の地震時滑りが50mにも及んだことである (Fujiwara et al., 2011)。この滑り量は、人類有史以来経験したことのない大きさである。なぜ海溝付近のプレート境界本体がこんなに大きく滑ったかを解明することが、巨大津波の発生メカニズムを理解するためのキーとなる。また、それだけ甚大な被害を出した津波の解明は、学術研究のコミュニティだけではなく社会一般の要請でもあった。

2. 研究の目的

断層の滑りを決定する主要な要素は、断層物質の滑りやすさ以外、断層近傍の応力状態と上盤を構成している堆積物 (フロントルプリズム) の物理性質がある。その応力状態を決定するために、研究代表者は地球深部探査船「ちきゅう」による「東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST)」研究航海に参加して、船上で概略解析を行うとともに航海後詳細解析用の貴重な掘削コア試料と検層データの配分を受けた。本研究は、この研究航海で得られた掘削コア試料や物理検層データを駆使し、特にM9の巨大地震時に滑った断層近傍の応力を正確に決定するとともに、海溝付近のプレート境界断層の上盤の熱物性を決定することを目的として行われた。その成果は、地震性滑りを起こさないとされてきた海溝付近がなぜ大きく滑ったかの解明に大きく寄与する。

3. 研究の方法

本研究では、1) 東北地震の震源域である日本海溝、東南海・南海地震の震源域である南海トラフ地震発生帯などの地震断層周囲の応力状態の解明、2) JFASTで得られた断層の摩擦熱による温度異常の解釈に不可欠な上盤のコア試料の熱物性を決定するための実験を行った。

(1) 応力状態の解明研究

掘削に伴って掘削孔壁に生じる局所的な破壊現象であるボアホールブレイクアウトなどの解析、ならびに掘削コア試料を用いて応力解放後の非弾性ひずみ回復 (ASR) の測定から三次元応力を決定する2つの手法を用いた。これらの手法の高度化研究とともに、これらの手法を用いて、地震発生帯などの科学掘削における応力状態の解明研究を行った。

(2) コア試料の熱物性測定

岩石試料の熱物性値測定法としては、非定常細線加熱法が最も多用されているが、熱伝導率しか測定できない。岩石の熱移動に

かかわる物性は、熱伝導率のほか、熱拡散率と比熱 (または体積熱容量) がある。本研究では、この3つの熱物性値をすべて決定することができる Transient Plane Heat Source 法 (通称 Hot Disk 法) を用いて行った。

4. 研究成果

(1) 応力状態の解明と測定手法に関する成果

① ボアホールブレイクアウト解析

JFASTの掘削サイトC0019Bにおいて、掘削同時検層によって得られた孔壁の比抵抗イメージから、応力のインジケータであるボアホールブレイクアウトが認められた (図-1)。検層データから応力の絶対値を決定するためのモデル (Morh-Coolumb や modified Wieboles-Cook) を検討し結果、中間主応力の効果を考慮した後者のモデルを用いることが望ましいという結論を得て、学会で発表した他、ジャーナル論文を公表した (Lin, 2014)。

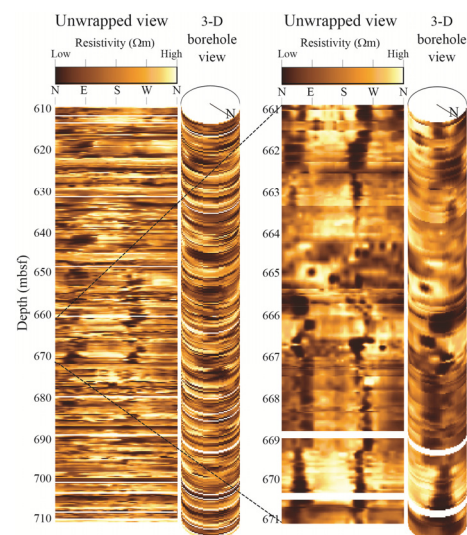


図-1 掘削同時検層による孔壁の電気比抵抗イメージの一例。比抵抗値が低い領域の黒色帯状の模様 (向きがほぼ180°異なる2本) がブレイクアウトである。

また、南海トラフ地震発生帯掘削計画 (NanTroSEIZE) において、掘削サイト C0009 で得られたデータを用いて応力状態の解析を行い、国際学術ジャーナルで共同論文発表をした (Ito et al., 2013 ; Saffer et al., 2013)。

② ASR 測定手法の高度化に関する成果

この ASR による応力測定手法の高度化研究として、代表的な岩石試料の非弾性ひずみ回復の特性について、一軸圧縮先行応力の負荷を行い、キャリブレーション実験を実施した。ASRのせん断モードと体積モードにおけるコンプライアンスの両方を測定した結果、この二つのコンプライアンスの比は、岩石の種類に依存することが判明した。この成果については国際学術ジャーナルで論文発表を行った (Gao et al., 2014)。

また、東海沖海域の渥美半島沖から採取した軟質堆積物の試料に先行三軸圧縮 K0 圧密（1 方向の圧密変形のみ）負荷を行い、除荷後にその試料の ASR を測定して、先行負荷した応力の評価を実施した。その結果、ASR により評価された応力の測定結果は、実際に先行負荷した応力とよく一致した。この成果については国際学術ジャーナルで論文発表を行った (Nagano et al., 2015)。

### ③陸上と海洋の科学掘削における ASR 法による応力測定に関する成果

NanTroSEIZE のインプットサイト C0012 において、沈み込む直前の半遠洋性堆積物と海洋地殻の玄武岩の ASR 測定を行い、応力を評価した。その結果、堆積物の中では重力起源の鉛直応力が最大となる正断層型の応力状態であることに対して、玄武岩中ではフィリピン海プレートの沈み込みによる横方向の圧縮応力が強く、逆断層型～横ずれ断層型の応力状態であることを解明した。この成果については国際学術ジャーナルで論文発表を行った (Yamamoto et al., 2013)。

2008 年に発生した中国四川大地震 (Mw7.9、死者と行方不明者計 9 万人弱) の震源断層である Longmenshan Fault の掘削プロジェクト WFSO において、断層近傍を含む孔内の応力分布を得て、国際学術ジャーナルの論文として発表した (Cui et al., 2014)。

④NanTroSEIZE のステージ 1 と 2 で実施された掘削研究航海の応力測定結果を統合して、その空間分布を得た (図-2)。また、日本海溝プレート境界断層の先端部の地震後応力状態 (平成 24 年 JFAST 掘削時) と、南海トラフのプレート境界断層先端部の応力状態 (平成 20 年の南海トラフ掘削時) を取りまとめ、比較検討を行った。その成果は国際学術ジャーナル Tectonophysics に掲載された (Lin et al., 2016)。

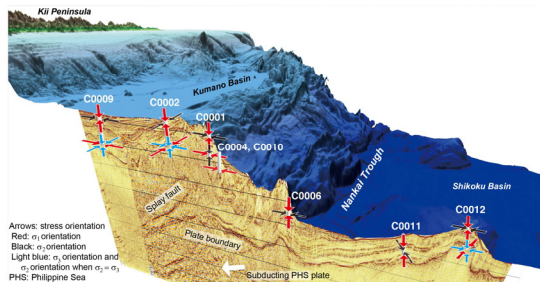


図-2 NanTroSEIZE ステージ 1～2 から得られた浅部の応力場分布。番号 (例えば、C0002) は掘削サイト、各矢印は三次元主応力の方向、赤は最大主応力、黒は中間主応力、水色は最小主応力の方向を示す。なお、中間主応力と最小主応力は、ほぼ等しい場合、両者とも水色で表されている。

### (2)JFAST 掘削サイトの熱物性の決定

東北地震発生後、統合国際深海掘削計画

(IODP) により、地震時の断層摩擦熱のシグナルである断層付近の温度異常を測定することを主目的として、掘削プロジェクト JFAST を迅速的に実施した。掘削孔内の温度プロフィールを測定して、断層付近に存在する正の温度異常 (約 0.3°C) が確認された。この温度異常が地震時の断層摩擦熱によるものかどうかを判定するために、また、この温度異常から断層が滑る際の動的摩擦係数を定量的に決定するために、地層の 3 つの熱移動物性値 (熱伝導率、熱拡散率および体積熱容量) を知る必要がある。

掘削航海中に船上で行われていたコア試料のルーチン物性計測では熱伝導率しか測定されないため、我々は JFAST の掘削コア試料 (Whole-Round-Core、円柱状コア試料) を用いて、Hot Disk 法により熱伝導率と熱拡散率を同時に測定したうえ、体積熱容量を算出した (図-3)。この熱物性の測定結果を国際学術ジャーナルに発表した (Lin et al., 2014)。

地層の熱物性の不均一分布や流体移動は、地層中の不均一温度分布を起こすことがあり得るが、本研究で行った掘削コア試料の熱物性の測定結果や、コア中の間隙流体の同位体分析の結果から、地震時の断層摩擦熱以外の可能性が除外された。したがって、JFAST の掘削サイト C0021 の海底下深度 820 m 付近のプレート境界断層検出した正の温度異常は、近年地震性滑りを起こしたこと、すなわち、東北地震時に滑ったことが確認された。また、この摩擦熱による温度異常から、断層の動的見かけ摩擦係数は 0.08 と見積もられ、東北地震時のプレート境界断層は非常に滑りやすかったことが判明した。この成果は、JFAST の代表的な成果として、主著の P. Fulton らと共同で、学術誌「サイエンス」にて論文発表することができた (Fulton et al., 2013)。

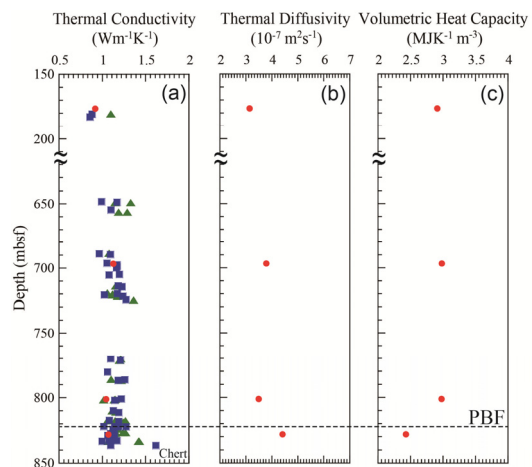


図-3 (a) 熱伝導率 (赤丸: 円柱形コアを用いた Hot Dick 法の測定結果; 青四角: ハーフコアの TK04 による測定結果; 緑三角: 粒試料を用いた測定結果)、(b) 熱拡散率、(c) 体積熱容量の深度プロファイル。熱伝導率と熱拡散率は測定結果であり、体積熱容量はその他の 2 つから算

出されたものである。水平の破線 PBF は、JFAST の掘削サイトにおけるプレート境界断層の深度を示す。

#### 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 24 件)

- ① Fulton, P.M., E. E. Brodsky, Y. Kano, J. Mori, F. Chester, T. Ishikawa, R.N. Harris, W. Lin, N. Eguchi, S. Toczko, Low Coseismic Friction on the Tohoku-Oki Fault Determined from Temperature Measurements, *Science*, 査読有, 342 巻, 2013, 1214-1217  
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1243641>
- ② Yamamoto, Y., W. Lin, H. Oda, T. Byrne, Yuhji Yamamoto, Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the basement basalt and overlying sediments, *Tectonophysics*, 査読有, 600 巻, 2013, 91-98  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.028>
- ③ Tanikawa, W., T. Hirose, H. Mukoyoshi, O. Tadai, W. Lin, Fluid transport properties in sediments and their role in large slip near the surface of the plate boundary fault in the Japan Trench, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 382 巻, 2013, 150-160  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.052>
- ④ Saffer, D., P. Flemings, D. Boutt, M.-L. Doan, T. Ito, L. McNeill, T. Byrne, M. Conin, W. Lin, Y. Kano, E. Araki, N. Eguchi, and S. Toczko, In situ stress and pore pressure in the Kumano Forearc Basin, offshore SW Honshu from downhole measurements during riser drilling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 査読有, 14 巻, 2013, 1454-1470,  
<http://dx.doi.org/10.1002/ggge.20051>
- ⑤ Cui, W., W. Lin, Wang, L., Gao L., Huang Y., Wang, W., Sun, D, Li, Z., Zhou, J., Qian H, Peng, H, Xia, K, Li, K., Determination of three-dimensional in situ stresses by anelastic strain recovery in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1), *Tectonophysics*, 査読有, 619-620 巻, 2014, 123-132  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.09.013>
- ⑥ Lin W., P.M. Fulton, R.N. Harris, O. Tadai, O. Matsubayashi, W. Tanikawa and M. Kinoshita, Thermal conductivities, thermal diffusivities, and volumetric heat capacities of core samples obtained from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST), *Earth, Planets and Space*, 査読有, 66 巻, 2014, 論文番号 48  
<http://dx.doi.org/10.1186/1880-5981-66-48>
- ⑦ Lin W., Determination of in-situ stress state in a Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) borehole one year after the Tohoku-Oki great earthquake, *International Journal of the JCMR*, 査読有, 10 巻, 2014, 1-4  
<http://dx.doi.org/10.11187/ijjerm.10.1>
- ⑧ 林 為人, 齊藤 実篤, モリ ジェームズ, 江口 暢久, TOCZKO Sean, 東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST) の概要とこれまでの主な成果、応用地質、 査読有、55 巻第 5 号、2014、241-250  
<http://doi.org/10.5110/jjseg.55.241>
- ⑨ Gao, L., W. Lin, D. Sun & H. Wang, Experimental Anelastic Strain Recovery Compliance of Three Typical Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 査読有, 47 巻, 2014, 1987-1995  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00603-013-0526-0>
- ⑩ Tanikawa W., H. Mukoyoshi, W. Lin, T. Hirose and A. Tsutsumi, Pressure dependence of fluid transport properties of shallow fault systems in the Nankai subduction zone. *Earth, Planets and Space*, 査読有, 66 巻, 2014, 論文番号 90  
<http://dx.doi.org/10.1186/1880-5981-66-90>
- ⑪ Sun DS, Lin W., Cui JW, Wang HC, Chen QC, Ma YS, Wang LJ, Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery and its application at the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1(WFSD-1), *Science China: Earth Sciences*, 査読有, 57 巻 No.6, 2014, 1212-1220  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11430-013-4739-6>
- ⑫ 畠田 健太郎, 林 為人, 後藤 忠徳, 廣瀬 丈洋, 谷川 亘, 濱田 洋平, 多田井 修, 交流インピーダンス法を用いた比抵抗測定 of 精度および地質試料における有効性の検討実験、JAMSTEC-R、 査読有、20 巻、2015、41-50  
<http://doi.org/10.5918/jamstecr.20.41>
- ⑬ Nagano, Y., W. Lin, K. Yamamoto, 2015, In-situ stress analysis using the anelastic strain recovery (ASR) method at the first offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan, *Marine and Petroleum Geology*, 査読有, 66 巻, 2015, 418-424  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.027>



- ⑭ Hashimoto, Y., K. Tobe, E-Y. Yeh, W. Lin and S-R. Song, Changes in Paleostress and its Magnitude Related to Seismic Cycles in the Chelung-pu Fault, Taiwan, *Tectonics*, 査読有, 34 卷, 2015, 2418-2428  
<http://dx.doi.org/10.1002/2015TC004005>
- ⑮ Lin W., In Situ Stress measurements in a Drilling Hole Penetrated to The Tohoku-oki Earthquake Fault: Indication of Coseismic Stress Change, *Proceedings of The 13<sup>th</sup> International Congress of Rock Mechanics – Innovations in Applied and Theoretical Rock Mechanics –*, 査読無, 1 卷, 2015, Document ID: ISRM-13CONGRESS-2015-065
- ⑯ Lin W., O., Tadai, M. Takahashi, D. Sato, T. Hirose, W. Tanikawa, Y. Hamada, K. Hatakeda, An Experimental Study on Measurement Methods of Bulk Density and Porosity of Rock Samples, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 査読無, 3 卷, 2015, 72-79,  
<http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.35009>
- ⑰ Yamamoto, Y., Torii, M., Natsuhara, N., Archeointensity study on baked clay samples taken from the reconstructed ancient kiln: implication for validity of the Tsunakawa-Shaw paleointensity method, *Earth Planets Space*, 査読有, 67 卷, 2015  
<http://dx.doi.org/10.1186/s40623-015-0229-8>
- ⑱ Lin W., T. Byrne, M. Kinoshita, L. McNeill, C. Chang, J. Lewis, Y. Yamamoto, D. Saffer, J.C. Moore, H.-Y. Wu, T. Tsuji, Y. Yamada, M. Conin, S. Saito, T. Ito, H. Tobin, G. Kimura, K. Kanagawa, J. Ashi, M. Underwood, T. Kanamatsu, Distribution of stress state in the Nankai subduction zone, southwest Japan and a comparison with Japan Trench, *Tectonophysics*, 査読有, 692 卷, 2016, 120-130  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.05.008>
- ⑲ 林 為人・高橋 学・佐東大作・葉 恩肇・橋本善孝・谷川 亘、2016、水銀圧入法による岩石の空隙寸法分布測定、応用地質、査読有、57 卷、2016、201-212  
<http://doi.org/10.5110/jjseg.57.201>
- ⑳ Tanikawa, W., O. Tadai, S. Morita, W. Lin, Y. Yamada, Y. Sanada, K. Moe, Y. Kubo, F. Inagaki, Thermal properties and thermal structure in the deep-water coalbed basin off the Shimokita Peninsula, Japan, *Marine and Petroleum Geology*, 査読有, 73 卷, 2016, 445-461  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.03.00>
- ㉑ Takahashi M., Kato M., Lin W., Sato M., Three-dimensional pore geometry and permeability anisotropy of Berea sandstone under hydrostatic pressure: connecting path and tortuosity data obtained by microfocus X-ray CT, *Developments in Engineering Geology*, Geological Society London, Engineering Geology Special Publication, 査読有, 27 卷, 2016, 207-215  
<http://doi.org/10.1144/EGSP27.18>
- ㉒ 畠田 健太朗, 林 為人, 廣瀬 丈洋, 谷川 亘, 濱田 洋平, 多田井 修, 封圧下における岩石試料の比抵抗測定に関する研究, *JAMSTEC-R*, 査読有、24 卷、2017、1-9  
<http://doi.org/10.5918/jamstecr.24.1>
- ㉓ 林 為人、東日本大震災の地震断層ボーリング調査と原位置応力の測定、第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集、査読無、14 卷、2017、論文番号 077
- ㉔ Lin, W., Kiguchi, T., Satoh, T., Nagano, Y., Kuwahara, Y., A Case Study of Stress Measurement by the Core-based Anelastic Strain Recovery Method in a Scientific Drilling Borehole of Geological Survey of Japan, *Proceedings of the 7th International Symposium on In-situ Rock Stress*, 査読無, 7 卷, 2016, 405-414, Document ID: ISRM-ISRS-2016-037
- [学会発表] (計 23 件)
- ① 林 為人、山本裕二、多田井修、谷川 亘、廣瀬丈洋、IODP 第 343 次研究航海乗船研究者一同、JFAST 掘削のコア試料を用いた非弾性ひずみ回復による応力測定結果の速報、日本地質学会第 120 回学術大会、2013 年 9 月 15 日、宮城県仙台市
- ② Lin W., Kido Y., Sanada Y., Saito S., Mori J.J., Chester F. M., Eguchi N., Toczko S., Maeda L., and Expedition 343 Scientists, Determination of horizontal stress orientations from borehole breakout analyses in an ocean drilling project, The 11th International SEGJ Symposium, 2013 年 11 月 20 日、神奈川県横浜市
- ③ Lin W., Byrne T., Kinoshita M., McNeill L., Chang C., Yamamoto Y., Wu H., Yamada Y., Tsuji T., Saito S., Distribution of stress state in Nankai subduction zone, southwest Japan determined during NanTroSEIZE stage 1 and 2, AOGS 11th Annual Meeting (AOGS2014), August 1, 2014, Sapporo, Hokkaido

- ④ 林 為人、多田井 修、Fulton P.、Harris R.、谷川 亘、木下 正高、東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST) における熱物性測定、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 28 日、神奈川県横浜市
- ⑤ 林 為人、木口 努、佐藤隆司、長野優羽、畠田健太郎、多田井修、桑原保人、コア試料の非弾性ひずみ回復法による応力測定：GSJ 新居浜掘削の例、日本地質学会第 122 年学術大会 (2015 長野大会)、2015 年 9 月 13 日、長野県長野市
- ⑥ Lin W., Coseismic stress change in frontal prism during the 2011 Tohoku-oki earthquake examined from the Japan Trench Fast Drilling project, 26th IUGG General Assembly, June 29 2015, Prague, Czech Republic
- ⑦ Lin W., Byrne T., Kinoshita M., Spatial distribution of stress state in the NanTroSEIZE transect and a comparison with JFAST at frontal thrust, Japan Geoscience Union Meeting, May 22, 2016, Chiba
- ⑧ Lin W., Hirose T., Tanikawa W., Hamada Y., Our approaches to understand why the shallow part of the Tohoku-oki earthquake fault coseismically slipped more than 50 m, SEG-AGU Workshop: Upper Crust Physics of Rocks, 2016.7.11, Hawaii, USA
- ⑨ Lin, W., Yang X., Tadai O., Zeng X., Yeh E-C., Yu C., Hatakeda K., Xu H., Xu Z., Experimental results of temperature response to stress change: An indication of the physics of earthquake rupture propagation, 2016 AGU Fall Meeting , 13 December 2016, San Francisco, USA
- (ほか 14 件)

[図書] (計 1 件)

林 為人、共立出版、「海洋底科学の基礎」、(担当)：11 章 トピック 原位置応力計測、ISBN978-4-320-04729-7、2016. 9、310～316

[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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 為人 (LIN, Weiren)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：8 0 3 7 1 7 1 4

### (2) 研究分担者

山本 裕二 (YAMAMOTO, Yuhji)  
高知大学・自然科学系・准教授  
研究者番号：0 0 4 5 2 6 9 9

### (3) 連携研究者

- ① 谷川 亘 (TANIKAWA, Wataru)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知  
コア研究所・主任研究員  
研究者番号：7 0 4 3 5 8 4 0
- ② 木下正高 (KINOSHITA, Masataka)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：5 0 2 2 5 0 0 9

### (4) 研究協力者

高橋 学 (TAKAHASHI, Manabu)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・地  
圏資源環境研究部門・主任研究員  
研究者番号：2 0 3 5 7 3 7 0