

平成22年6月30日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540453

研究課題名（和文） 海洋底深層掘削のコア試料を用いた応力計測に関する基礎研究

研究課題名（英文） A fundamental study on in-situ stress determination by using core samples in ocean deep drillings

研究代表者

林 為人 (LIN WEIREN)

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・サブリーダー

研究者番号：80371714

研究成果の概要（和文）：

海洋底深層掘削をはじめ、地震断層をターゲットとする科学深層掘削プロジェクトにおける地殻応力の状態を決定するとともに、深層掘削における応力測定手法に関する基礎研究を行った。その結果、東南海地震の発生源である紀伊半島沖の南海トラフ海域の主応力方向分布を明らかにしたほか、台湾集々地震の震源断層付近で地震発生によって生じた応力分布の異常をとらえた。一方、非弾性ひずみ回復法という深層掘削コア試料を用いた応力計測を初めて、海洋科学掘削領域での適用に成功した。

研究成果の概要（英文）：

To determine in-situ stress states in scientific active-fault deep drilling projects and to develop stress measurement techniques in deep ocean drillings, we determined the stress orientation distribution in the southwest Japan subduction zone in an ocean drilling project “Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE)” and found a stress anomaly caused by fault rupturing during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake in “Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP)”. At the same time, we successfully applied a core-based method called anelastic strain recovery (ASR) method to deep ocean drillings.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：応力計測，科学掘削，断層掘削，コア試料，非弾性ひずみ回復，孔内検層，ブレイクアウト

1. 研究開始当初の背景

統合国際深海掘削計画（IODP）の一環として、地球深部探査船「ちきゅう」等を用いた巨大な科学掘削プロジェクト「南海トラフ地

震発生帯掘削計画，Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE)，以下南海トラフ掘削と略す」の実施は2007年秋から始まる予定であった。地震発生帯なら

びにメガスプレー断層の近傍の応力状態を知ることが勿論最重要であるが、それだけでなく、トラフ軸と直行する断面を含め、南海トラフ海域での応力空間分布を把握することも、この計画の目標である南海～東南海地震解明のキーファクターの1つである。しかし、そのような海底深部地層ならびに断層近傍の応力計測手法はまだ整備されていない現状であった。

本研究の前の研究フェーズとして、科学研究費補助金による研究「掘削コアを用いた地震断層および沈み込み帯の地殻応力計測（基盤(C), 16540392, H16-18年度）」を実施してきた。当研究では、非弾性ひずみ回復（Anelastic Strain Recovery, ASR, 以下ASR法と称する）の計測により、応力状態を決定する主法を用いて、地震断層を貫く台湾チェルンブ断層掘削プロジェクト（Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, TCDP）などの陸上深層掘削に適用し、その有効性を初歩的に確認した。このASR法は、ほかのコア法と比べて、三次元測定法としていくつかの優位性を有するとの結論を得た。しかし、これまではASR法を海洋底深部掘削に適用されたことがなく、機能拡張が必要であるなどの問題点も判明した。南海トラフ掘削などの海底深部の深部地殻応力計測に本格的に適用するために、この方法の実用化研究は重要であり、かつ、南海トラフ掘削の実実施スケジュールから考えると急務である。

ASR法による応力測定は最初、米国で二次元的な手法として約20年前に提案されたもので、1990年代に本研究の研究協力者松木浩二により三次元的な手法に拡張された。これまで、研究代表者は、陸上の資源探査深層掘削や本研究の前フェーズの研究等において、三次元的な手法としてASR手法を活用し、良い成果を得ており（例えば、Lin *et al.*, 2006, Tectonophysics）、世界的に見てもこの分野をリードするほど、この応力計測手法のノウハウを蓄積してきた。

2. 研究の目的

地震発生と地震断層近傍の応力状態は密接な関係にある。地殻変動に伴う応力の蓄積がある限界に達すると地震が発生する一方、蓄積された応力は地震の発生により解放される(Stein, 1999, Science)。したがって、地震発生帯の応力状態ならびにその経時変化を知ることが、地震発生・断層すべり（破壊）の進展を理解するために重要であり、地震の予測研究に不可欠である。しかし、地下深部の応力の計測は困難で、これまで様々な手法は提案されたにもかかわらず、完全な手法が存在しない。研究代表者は、地下深部の場合に対して掘削コアを用いた方法、孔内計測・検層などの手段を総合的に活用して、そ

れぞれの長所を發揮し、短所を補い、応力を測定することを提唱している。非弾性ひずみ回復法と呼ばれるコア法は有望であるが、海洋底深部掘削への適用はまだされていない。本研究は、人類史上の初となる海洋底における地震発生帯掘削である南海トラフ掘削の実施に備えるために、海洋底深層掘削のコア試料を用いた応力計測の信頼性を高め、海洋底堆積地層や付加体までその適用範囲を拡張させることを本研究の第一の目的としている。さらに、この手法と掘削孔内検層のイメージデータ等によるブレイクアウト解析との併用により、南海トラフ海域の応力分布や台湾チェルンブ断層掘削プロジェクトにおいて地震断層近傍の応力状態を把握することを目指す。

3. 研究の方法

研究代表者は、南海トラフ掘削計画において、複数の掘削サイトでコア法、孔内検層及び孔内計測を総合的に活用して信頼性の高い三次元地殻応力の空間分布を決定するための計画・実施を推進している。IODPの掘削計画として、南海トラフ掘削は実施されると同時に、孔内検層・孔内計測などはその一環として行われる。本研究は、主として①ASR法による掘削コアを用いた計測、②南海トラフ掘削で得られる孔内検層・孔内計測のデータの解析、③全フェーズ研究で開始した台湾チェルンブ断層掘削研究の詳細解析を継続する。

まず、南海トラフ掘削計画の実施に先だって、想定される海洋底堆積地層のコア試料に適用するために、実用的な測定技術を確立し、測定精度などの確たる信頼性を確保するための各種予備的な室内実験を行う。次に、南海トラフ掘削の研究航海に乗船して、掘削船「ちきゅう」において、その海洋底深層掘削試料を用いて、ASR法による応力の計測を行い、下船後に孔内検層等のデータを併用して、応力の解析を総合的に行う。

4. 研究成果

(1) 南海トラフ海域での応力方向分布

南海トラフ掘削の第314と第319次研究航海の孔内検層から得られた孔壁イメージやキャリパーデータから、ボアホールブレイクアウト（Borehole Breakout）とテンサイルフラクチャー（Drilling Induced Tensile Fracture）を解析した結果と、同じく第315次と第316次研究航海におけるASRの測定結果とを総合して、南海トラフ海域の水平面内の主応力分布を得た（図-1）。

掘削サイトC0009, C0001, C0004とC0006では、水平面内の最大主応力方向は概ねトラフ軸に直交、すなわち、フィリピン海プレートがユーラシアプレートに沈み込む方向に

概ね平行する方向になっていることが判明した。この応力の分布は、テクトニック応力による効果が反映されていると解釈される。しかし、C0002 サイトでは、その最大水平主応力がトラフ軸とほぼ平行していることが判明した。この結果は ASR による主応力方向とよく一致し、サイスミック断面やコア試料の観察から確認された正断層の存在と整合的であった。

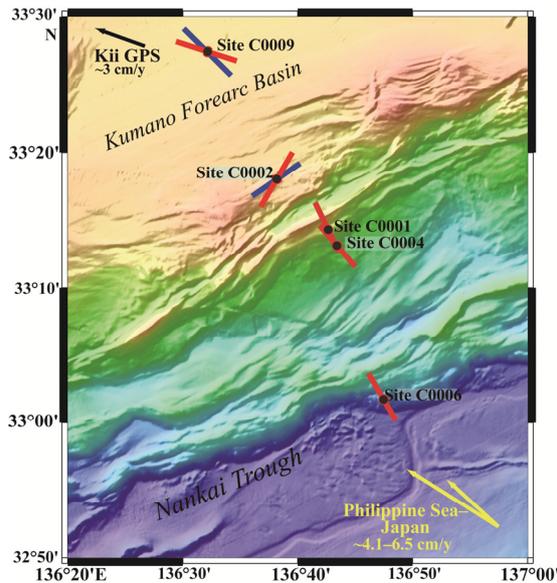


図-1 南海海域での主応力方向の分布 (Lin et al., 2010, GRL)

(2) 台湾チェルンブ断層の地震時滑りによる応力方向に異常分布

1999年に台湾の集々を震央とする Mw7.6の大地震が発生して、約 2500 名の死者をはじめ、甚大な被害をもたらした。その地震の震源断層であるチェルンブ断層を掘削する研究が行われた。本研究は、この断層掘削プロジェクトにおいて、掘削コア試料を用いた ASR 測定とともに、TCDP Hole-B において孔内検層データからブレイクアウト解析を行い、主断層のチェルンブ断層を含む深度区間において孔内の主応力方向の分布を得た (図-2)。

検層が実施された約 400m 区間の深度範囲では、水平面内の最大主応力方向は、概ね北西～南東、つまり、広域応力場と整合している。また、地震断層のコサイスミック変位ベクトルの方向もこの方向と一致する。しかし、主断層 (約 1130 m) 付近の約 20m の比較的狭い深度範囲では、この応力方向は約 90° 回転していることが判明した。地震発生の前には、北西～南東方向の応力が水平最大主応力であったと推定されるが、地震発生時の断層滑

りによって、断層の近傍で蓄積された応力は断層滑りベクトルと同じ方向の成分が、大幅に解放され、その絶対値が大幅に減少したと考えられる。したがって、その結果として、断層滑りベクトルに直交する北東～南西方向の応力成分が最大となったために、断層付近では最大応力方向が 90° 回転したように見える結果となった。

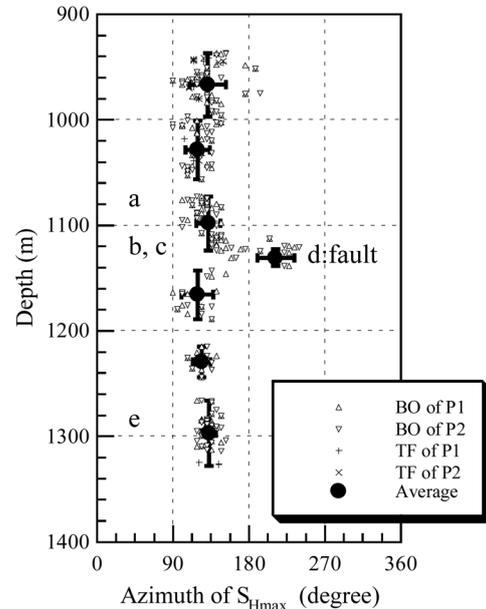


図-2 台湾チェルンブ断層掘削の TCDP Hole-B の最大水平主応力 (S_{Hmax}) 方向の深度分布 (Lin et al., 2007, GRL)

(3) 海洋底深層掘削におけるコア試料による応力計測

図-3は南海トラフ掘削第315次研究航海で得られた有効間隙率約 40%の熊野海盆堆積物コア試料から測定した ASR 経時変化曲線である。理想的な非弾性ひずみ回復カーブであり、高精度な応力解析が可能になる。

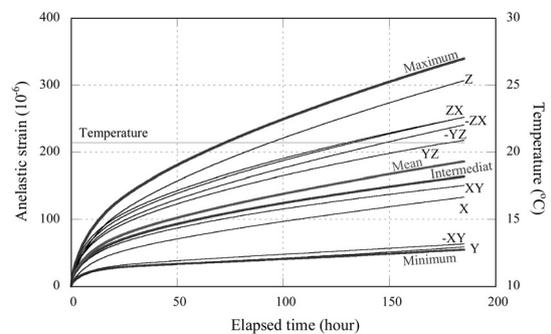


図-3 南海トラフ掘削第315次研究航海の掘削コア試料による非弾性ひずみ回復 (ASR) 経時曲線の一例 (Byrne et al., 2009, GRL)

これらのASR曲線から求めた三次元応力テンソルの主応力方向は図-4の下半球投影に示したように、ブレイクアウトによる水平面内の二次元主応力方向 (SHmax (BO)) と非常に良く一致した。この図からもわかるように、ASR法の長所の1つは、三次元的な手法であり、ブレイクアウトで得られない貴重な鉛直方向の応力情報も得られる。

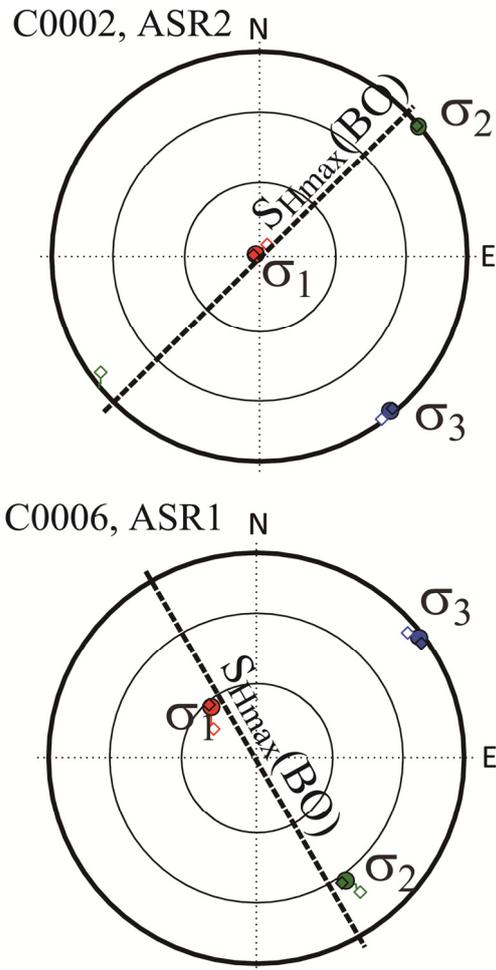


図-4 南海トラフ掘削におけるASR測定による主応力方向 ($\sigma_{1,2,3}$) とブレイクアウト解析による水平最大主応力方向の比較 (SHmax (BO)) の点線)

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 26 件)

- ① Lin, Weiren et al., Present-day principal horizontal stress orientations in the Kumano forearc basin of the southwest Japan subduction zone determined from IODP NanTroSEIZE

drilling Site C0009, *Geophys. Res. Lett.*, 査読あり, Vol.37, in-press, 2010, doi: 10.1029/2010GL043158.

- ② Lin, Weiren, Timothy Byrne, Akito Tsutsumi, Chandong Chang, Yuji Yamamoto, Arito Sakaguchi, A comparison of stress orientations determined by two independent methods in a deep drilling project, Proceedings of the Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2010, 査読なし, In-press.

- ③ Lin, Weiren, Timothy B. Byrne, Akito Tsutsumi, Yuhji Yamamoto, Arito Sakaguchi, Yuzuru Yamamoto, and Chandong Chang, Applications of anelastic strain measurements in scientific ocean deep drillings, Proceedings of the International Symposium on In Situ Rock Stress, 査読なし, 2010, In-press.

- ④ Lin, Weiren, En-Chao Yeh, Jih-Hao Hung, Bezalel Haimson, Tetsuro Hirono, Localized rotation of principal stress around faults and fractures determined from borehole breakouts in hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), *Tectonophysics*, 査読あり, 482, 2010, 82-91, doi: 10.1016/j.tecto.2009.06.020.

- ⑤ Haimson, Bezalel, Weiren Lin, Haruyuki Oku, Jih-Hao Hung, Sheng-Rong Song, Integrating borehole breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan, *Tectonophysics*, 査読あり, 482, 2010, 65-72, doi: 10.1016/j.tecto.2009.05.016.

- ⑥ Byrne, Timothy, Weiren Lin, Akito Tsutsumi, Yuhji Yamamoto, Jonathan Lewis, Kyuichi Kanagawa, Yujin Kitamura, Asuka Yamaguchi, Gaku Kimura, Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 査読あり, Vol.36, 2009, L01305, doi: 10.1029/2009GL040749.

- ⑦ Hung, Jih-Hao, Kuo-Feng Ma, Chien-Ying Wang, Hisao Ito, Weiren Lin, and En-Chao Yeh, Subsurface structure, physical property, fault-zone characteristics and stress state in scientific drill holes of Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project, *Tectonophysics*, 査読あり, 466, 2009, 307-321, doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.014.

- ⑧ 徐 垣・谷川 亘・廣瀬丈洋・林 為人・

- 谷水雅治・石川剛志・廣野哲朗・中村教博・三島稔明・En-Chao Yeh・Sheng-Rong Song・Kuo-Fong Ma, 1999年台湾集集地震を引き起こしたチェルンプ断層の深部掘削の成果概要—明らかになってきた断層岩の物質科学と今後の課題—, 地質学雑誌, 査読あり, 115, 2009, 488-500.
- ⑨ LIN, Weiren En-Chao YEH and Jih-Hao HUNG, 2009. Determination of orientation of horizontal stress and localized rotations of the orientation around faults and fractures from breakouts in a scientific drilling borehole, Proceedings of the 13th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics in Kyoto (RAEG 2009), 査読なし, 2009, pp. 25-28.
- ⑩ Lin, Weiren, Orientation changes of principal horizontal stresses around faults and fractures, Proceedings of the International Symposium and the 7th Asian Regional Conference of International Associate Engineering Geology, 査読なし, Vol. 1, 2009, 402-407.
- ⑪ Lin, Weiren et al., A Case Study of 3D Stress Orientation Determination in Shikoku Island and Kii Peninsula, Japan, Proceedings of the Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2009, Ed: I. Vrkljan, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-80481-3, Dubrovnik, Croatia, 査読なし, 2009, pp. 277-282.
- ⑫ Lin Weiren, Matsubayashi O., Yeh E-C, Hirono T., Tanikawa, W., Soh, W., C-Y. Wang, S-R. Song and Murayama, M., Profiles of volumetric water content in fault zones retrieved from hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), *Geophys. Res. Lett.*, 査読あり, Vol. 34, L01305, 2008, doi: 10.1029/2007GL032158.
- ⑬ Lin, Weiren, Koji Yamamoto, Hisao Ito, Hideki Masago, Yoshihisa Kawamura, Estimation of Minimum Principal Horizontal Stress from an Extended Leak-off Test onboard the *Chikyu* drilling vessel and Suggestions for Future Test Procedures, *Scientific Drilling*, 査読あり, No. 6, 2008, pp. 43-47, doi:10.2204/iodp.sd.6.06.
- ⑭ LIN, Weiren, A core-based method to determine three-dimensional in situ stress in deep drilling wells: the anelastic strain recovery technique, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 査読あり, Vol. 27, No. 12, 2008, pp. 2387-2394.
- ⑮ LIN, Weiren, TAKAHASHI Manabu, Anisotropy of strength and deformability of Inada granite under uniaxial tension, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 査読あり, Vol. 27, No. 12, 2008, pp. 2463-2472.
- ⑯ TAKAHASHI Manabu, TAKEMURA Takato, LIN Weiren and URUSHIMATSU Yukihiro, Microscopic visualization of rocks by micro focus X-ray CT under confining and pore pressures, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 査読あり, Vol. 27, No. 12, 2008, pp. 2455-2462.
- ⑰ Lin Weiren, Yeh En-Chao, Ito Hisao, Hung Jih-Hao, Tetsuro Hirono, Wonn Soh, Kuo-Fong Ma, Masataka Kinoshita, Chien-Ying Wang and Sheng-Rong Song, Current Stress State and Principal Stress Rotations in the Vicinity of the Chelungpu Fault Induced by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 査読あり, Vol. 34, L16307, 2007, doi: 10.1029/2007GL030515.
- ⑱ Lin, Weiren, E. C. Yeh, H. Ito, T. Hirono, W. Soh, C. Y. Wang, K. F. Ma, J. H. Hung, and S. R. Song, Preliminary results of stress measurement using drill cores of TCDP Hole-A: an application of anelastic strain recovery method to three-dimensional in-situ stress determination. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 査読あり, 18, 2007, 379-393, doi:10.3319/TAO.2007.18.2.379 (TCDP).
- ⑲ Hirono, T., Yokoyama, T., Hamada, Y., Tanikawa, W., Mishima, T., Ikehara, M., Famin, V., Tanimizu, M., Lin, W., Soh, W., and Song, S., A chemical kinetic approach to estimate dynamic shear stress during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 査読あり, Vol. 34, L19308, 2007, doi: 10.1029/2007GL030743.
- ⑳ Lin, Weiren, Hirono T., Yeh E-C., Tanikawa W. and Soh W., Core handling and real-time non-destructive characterization at the Kochi Core Center: An example of core analysis from the Chelungpu fault, *Scientific Drilling*, 査読なし, Special Issue No. 1, 2007, pp. 106-109, doi:10.2204/iodp.sd.s01.35.2007.
- ㉑ Lin, Weiren, W. Soh & H. Ito E.-C. Yeh M. Kwasniewski C.-Y. Wang, Comparison of in-situ stress orientations and magnitudes

determined by anelastic strain recovery measurement and borehole breakout analysis in the vicinity of an active fault, in Proceedings of 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, Ribeiro e Sousa, Olalla & Grossman (eds), 査読なし, 2007, pp.1105-1108.

[学会発表] (計 22 件)

- ① 林 為人ほか, 南海トラフ地震発生帯掘削 C0009 サイトから得られた熊野海盆の応力方向, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS019-P10, 2010. 5. 24, 千葉.
- ② Lin Weiren et al, A preliminary result of stress orientation obtained from drilling induced tensile fractures and borehole breakouts at Site C0009 of Expedition 319, NanTroSEIZE, *Eos. Vol. 90, No. 52, 29 Fall Meet. Suppl., Abstract T21C-1831*, 2009. 12. 14, サンフランシスコ, 米国.
- ③ 林 為人, 中村 敏明, Chandong Chang, 多田井修, 坂口 真澄, 廣瀬 丈洋・谷川 亘, 南海掘削ステージ 1 で採取されたコア試料の三軸圧縮強度, 日本地質学会第 116 年学術大会, 2009. 9. 5. 岡山.
- ④ 林 為人・崔 軍文, 王 連捷, 唐 哲民, 孫 東生, 彭 華, 許 志琴, 池田安隆, 中国 Wenchuan 地震の断層掘削および掘削コアを用いた応力計測の紹介, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, J169-019, 2009. 5. 19, 千葉.
- ⑤ Lin, Weiren, Current stress measurement in scientific drilling, Rapid Response Drilling of Faults: Past, Present and Future ICDP/SCEC Workshop, 2008. 11. 18, Tokyo, Japan.
- ⑥ 林 為人, 多田井 修, ボーリング孔壁のブレイクアウト解析による初期地圧絶対値推定の一例, 日本応用地質学会平成 20 年度研究発表会, 講演論文集 pp. 101-102, 2008. 10. 31, 横浜.
- ⑦ Lin, Weiren, En-Chao Yeh, Jih-Hao Hung, Bezalel Haimson, Tetsuro Hirono, Localized rotations of principal stress around faults and fractures from borehole breakouts in the hole B of Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), 3rd World Stress Map Conference, 2008. 10. 16, Potsdam, Germany
- ⑧ 林 為人, Timothy Byrne, 堤 昭人, 坂口有人, IODP Expedition 315 & 316 乗船研究者一同, 南海掘削ステージ 1 A のコア試料による非弾性ひずみ測定の結果, 日本地質学会第 115 年学術大会, 0069, 2008. 9. 20, 秋田.

- ⑨ Lin, Weiren, En-Chao YEH, Hisao Ito, Jih-Hao HUNG, and Wonn SOH, 2008. Stratagem for current in-situ stress determination in a deep fault zone drilling program: An example from Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, 33rd International Geological Congress, SDD01437P, 2008. 8. 9, オスロ, スウェーデン.
- ⑩ 林 為人, 大深度掘削における応力計測の戦略: 台湾チェルンブ断層掘削を例として, 日本地球惑星科学関連学会 2008 合同大会, J248-006, 2008. 5. 30, 千葉.
- ⑪ Lin, Weiren, Hideki Masago, Koji Yamamoto, Yoshihisa Kawamura, Saneatsu Saito, M. Kinoshita: Prediction of magnitude of minimum horizontal stress from extended leak-off test conducted by the riser vessel CHIKYU, AGU Fall Meeting, Session OS51A-0175, 2007. 12. 14, サンフランシスコ, 米国.
- ⑫ 林 為人・眞砂 英樹・山本 晃司・木下 正高, ライザー掘削船「ちきゅう」による XL0T 実施と最小主応力値推定の一例, 日本地震学会 2007 年度秋季大会, S12-08032049-8165A, 2007. 10. 25, 仙台.
- ⑬ 谷川 亘, 林 為人, YEH En-Chao, 非弾性ひずみ測定とブレイクアウト解析による応力計測の一例, 第 114 回日本地質学会年次発表会, 2007. 9. 11, 札幌.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 為人 (LIN WEIREN)
独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・サブリーダー
研究者番号: 80371714

(2) 研究分担者 (平成 19 年度)

高橋 学 (TAKAHASHI MANABU)
独立行政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: 20357370

(3) 連携研究者 (平成 20-21 年度)

高橋 学 (TAKAHASHI MANABU)
独立行政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: 20357370