

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82706

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21107006

研究課題名(和文) 孔内実験・計測による地震準備過程の状態・物性の現場把握

研究課題名(英文) Downhole experiments for in situ state and property assessment of seismogenic processes

研究代表者

木下 正高(KINOSHITA, Masataka)

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・所長

研究者番号：50225009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 166,300,000円、(間接経費) 49,890,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生断層上での応力場・力学・水理特性等の把握のため、孔内検層・実験・解析を行った。

南海掘削では、コア法(弾性・非弾性)、速度検層、水圧破碎実験、VSP、3D地震探査記録という、スケールの異なる様々な手法で推定された浅部応力場が互いに整合的で、水平最大圧縮方向がプレート運動方向に一致した。また、孔内長期観測所の温度データから、分岐断層(~5000m)の温度が130-150℃と推定された。

東北掘削では、地震時に浅部で応力降下が起こったこと、また、プレート境界周辺での温度異常が予測より少ないことから定常摩擦係数が0.1以下と極めて小さいことが判明し、3.11地震時の大規模すべりを支持した。

研究成果の概要(英文)：Various experiments were conducted in order to assess in situ state and property of the seismogenic processes of subduction zone earthquakes. At Nankai Trough, in situ stresses were estimated through core measurements, resistivity-image logging, hydro-fracturing, vertical seismic profiling, etc., all of which show maximum horizontal compression parallel to the plate convergence. Borehole observatory data suggest that the temperature at the mega-splay fault at 5000 m below sea floor is 130-150 degC.

At Japan Trench, stress drop in the shallow portion was detected after the 3.11 Tohoku event. In situ temperature monitoring at the fault zone revealed only +0.3degC increase, suggesting a very low friction (<0.1) during the fault slip. These are consistent with a large slip inferred along the shallow fault zone.

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：統合国際深海掘削系下記 南海トラフ地震発生帯掘削 応力場 間隙水圧 孔内計測 東北地方太平洋沖地震 熱・水理構造 CT亀裂検出

1. 研究開始当初の背景

海溝付近の沈み込みプレート境界で起こる巨大地震と津波の発生から終息、さらに準備過程までの仕組みを解明することは、防災という観点からも最も重要な課題の一つである。地震国日本では、これまで世界最稠密な地震・測地観測網を配置して地震の観測研究に力を注いでおり、その研究水準は世界最先端である。一方、地震の準備・発生過程は、断層の固着域付近にその歪や物性の不均質が集中するため、断層原位置での観測が不可欠である。そのような認識に立ち、統合国際深海掘削計画(IODP)による「南海トラフ地震発生帯掘削研究(NanTroSEIZE)」では、紀伊半島沖の東南海地震発生帯への掘削により、地震断層岩を採取するとともに、応力場や力学・水理学特性の現場計測等を行うことが盛り込まれた。ただし、これらの計測には標準的な手法が確立されていないという課題があった。

2. 研究の目的

応力場・力学特性(弾性波速度・物性)、水理特性(浸透率)、間隙水圧、温度等、断層および周辺の変動に寄与するパラメータを現位置で計測し、南海トラフ巨大地震断層やその上盤の物性・状態を把握する。そのために必要なセンサーや測定方式を開発する。間震期の状態変化・物性モデルを構築し、もって本領域全体の目的である海溝型巨大地震の準備・発生過程の解明に貢献する。また東北地震震源域掘削JFASTに参加し、応力場・物性データを得るとともに温度モニタリングから地震時の摩擦発熱量を推定する。

3. 研究の方法

- (1) 応力場: 既存ツールによる水圧破碎法等を実施してその評価を行う。その際最大主応力の測定を困難とするコンプライアンス問題を解決する。結果をコア法による応力測定結果と比較、互いの手法の妥当性を検証し、地震発生帯上部の応力場を求める。
- (2) 力学特性: 孔内検層により連続的に原位置での V_p, V_s から剛性率・ポアソン比などを求める。これをコアでの値と比較し、原位置での流体の状態・分布を推定する。また断層付近の構造と時間変化を求めるため、掘削孔内制御震源を開発するとともに、孔内地震計を利用した能動探査を実施する。
- (3) 熱・水理特性: 原位置での浸透率・間隙水圧の推定・評価を行う。断層帯の構造の空間スケールと複雑さに対応して、コアによる測定と相補的に統合する。また孔内観測所の温度データから分岐断層の温度を推定する。

4. 研究成果

(1) 東北地方太平洋沖地震調査掘削 JFAST
海溝付近のプレート境界断層に到達した。孔内検層とコアから地震後の応力場を求めたところ、地震に伴い応力降下したことが分かった(図1; Lin et al., 2013)。地震すべりの指標として摩

擦発熱による温度上昇の検出が有効であるため、JFAST 掘削孔でのプレート境界周辺での温度観測の結果、2011 年東北地震時の断層すべりにより発生した摩擦熱の痕跡を、地震発生から 21 か月後に +0.3 の温度異常として検出した。掘削コア試料の熱物性を測定して温度解析したところ、地震すべり時の摩擦係数が 0.1 以下と小さいことが分かった(Fulton et al., 2013)。これらを総括し、巨大津波を起こすような海底まで到達する断層破壊は極めて薄く、また弱いことを示した(Wang and Kinoshita, 2013)。

地震前後の応力変化模式図
(上盤の下部: プレート境界断層付近)

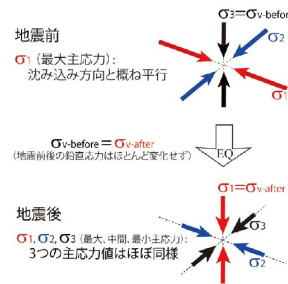


図 1. 東北地震に伴う応力変化(Lin et al, 2013 より)。

(2) 応力場

南海トラフ地震発生帯掘削各サイトで、孔壁比抵抗イメージ検層・速度検層・水圧破碎試験・コア計測(弾性・非弾性回復)により、応力場を推定するための様々な実験が行われた。熊野海盆中央でレーザー掘削された C0009 孔では、水圧破碎試験が実施され、876.9 mbsf (m below seafloor) では水平面内の応力は等方的で 35 MPa と評価された。1533.9 mbsf については、計測条件が悪いため、水圧破碎実験結果とコア弾性変形法を併用し、水平最大・最小応力が 42MPa、55MPa 程度と評価された(Ito et al., 2013)(図 2)。また孔壁比抵抗イメージや孔径から推定された水平最大圧縮応力の方位最大応力方位が N155E と、プレート収束の方向に一致した(Lin et al, 2010)。

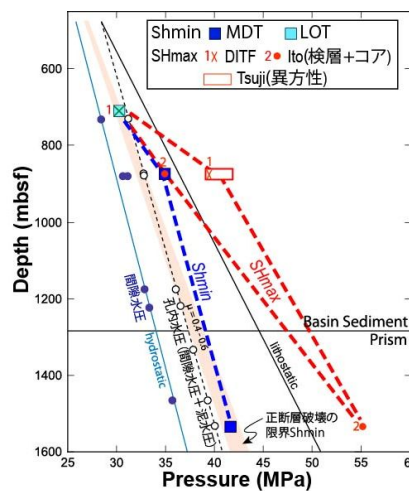


図 2. C0009 孔の主応力および間隙水圧分布(Saffer et al, 2013 改変)。

熊野海盆南縁 C0002 サイトの浅部では、コアの非弾性変形回復(ASR)を用いた応力推定法により、鉛直方向の応力が最大で正断層形成の場であること、プレート収束方向に水平「最小」

圧縮であることを検証した (Byrne et al., 2009)。同孔はその後ライザー掘削により 3000m まで掘削されている。比抵抗イメージ検層から応力場推定を試みたが、ライザー掘削のためブレイクアウトが非常に少なかった。掘削孔の応力場の概要を図3に示す (図3)

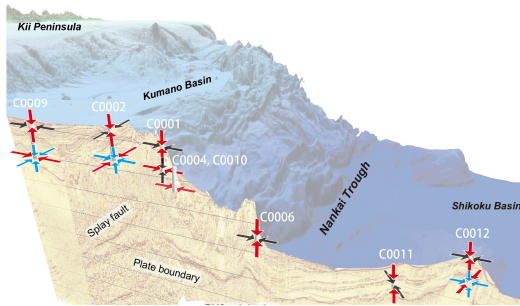


図3. 南海トラフ掘削地点の応力場(Lin et al., submitted より)。赤:最大圧縮、青:最小圧縮、黒:中間。

地震サイクルで断層上に蓄積されるせん断応力量を、2次元弾性モデル上で海洋プレートを5m変位させ、固着域では100%固着として計算し、最大でも3MPaであることを示した(Kinoshita and Tobin, 2013)。

応力場計測法のうち、コア回収後の弾性変形を用いて差応力を推定する方法が有用であることが分かったが、ヤング率が異方性を持つ場合の最大主応力の方位がずれるため、これを理論的に補正した。

海底掘削孔での現日応力場計測の既往ツールでは、応力テンソルを決定することができないため、南海の地層条件を想定し、孔径の制限の下、高压・高条件で十分な破砕圧を発生できるコンプライアンスの小さい現場応力測定装を部分開発した。水圧破砕のためのモーター・ポンプ・バルブ部について室内試験により所定の性能が確認された (図4;伊藤ほか、特許出願済)。

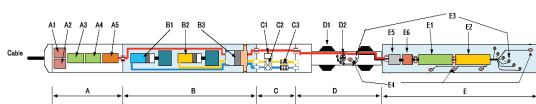


図4. 孔内応力測定装置 (A:伝送部、B:モーター・ポンプ部、C:水圧・流量計測部、D:パッカー部、E:イメージング部)。

(3)力学特性

C0009 ライザー孔で実施した弾性波検層 (SonicScanner) データを解析し、走時解析や測度分散曲線から、S波速度に異方性がある区間とない区間が存在し、異方性のある区間では速度が速い方向が基本的にプレート収束方向に一致することを見出した (Ito, 2010AGU)。

断層特性の微小変動検出に有効な、地震波伝搬特性 (速度・減衰) の時間変動推定に向けて、孔内設置型能動震源による制御震源探査の設計・試作を行った。シングルフォース・高効率を前提とし、直径10cm、最大電力30Wの制約下、おもりを自由落下させる方式で1週間程度の連続運転に成功した。

(4)水理・熱特性原位置測定

C0009 孔内9点で実施されたドロウダウン試験により、浸透率はおおむね低いこと、間隙圧はほぼ静水圧に等しいことが分かった (Saffer et al., 2013)。神岡鉾山の断層実験から、複雑な構造を持つ断層帯の透水構造を得るためには、断層帯に加えて母岩の透水性を調べることも重要であることを明らかにした (Kano and Ito, 2011AGU)。

熊野沖の前弧断層をはさんで BSR (ハイドレート下面) 分布が不連続であることから、断層が最近まで活動したことを示した (図5; Kinoshita et al., 2011)。

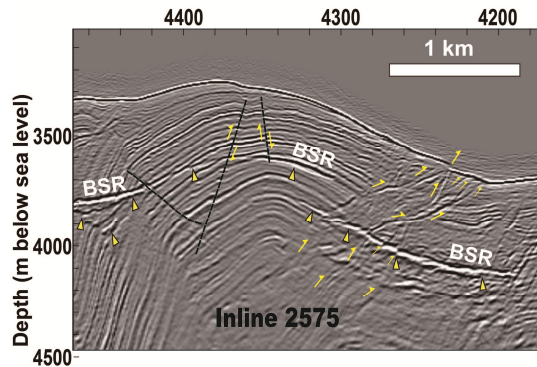


図5. 前弧斜面断層付近のBSR不連続。

室戸沖付加体先端部付近で11年にわたる孔内間隙水圧計測データから、3.11東北地震時等に水圧変化が記録され、地震時の歪変化によるスロー地震に起因する水圧変動と解釈された (Davis et al., 2013)。

断層中の流体挙動解明モデル構築に向けて、100MPa封圧下でX線CTイメージが取得できる耐圧容器を製作した (伊藤ほか、特許出願)。

(5)孔内モニタリング

2010年C0002孔に設置した孔内長期観測所 (海底下800-1000m) が設置され、その後DONETに接続され、リアルタイムで地震・地殻変動・間隙水圧・温度データ取得を開始した。孔内長期観測所の温度データから、海底下900mの地層温度は38℃、熱流量は56mW/m²と決定された (図6; Kinoshita et al., 2013AGU)。これを境界条件として分岐断層 (~5000m) の温度を130-150℃と推定した。

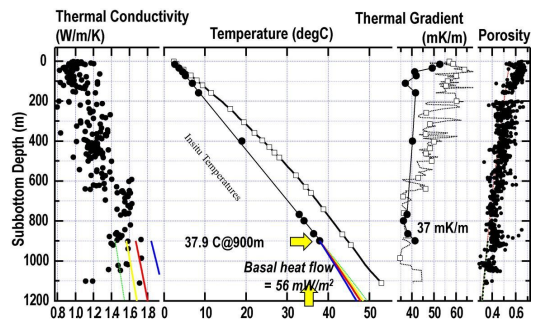


図6. C0002孔内観測所で決定された地下900mの温度。

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100件)全て査読有

加納 靖之・木下 千裕・伊藤 久男 (2014), 地殻応力およびひずみモニタリングにおける間隙水圧計測の意義, 材料, 63, 265-270

Kinoshita, M., Tobin, H.J. (2013), Interseismic stress accumulation at the locked zone of Nankai Trough seismogenic fault off Kii Peninsula, Tectonophysics, 600C, 153-164. doi:10.1016/j.tecto.2013.03.015.

Fulton, P.M., E. E. Brodsky, Y. Kano, J. Mori, F. Chester, T. Ishikawa, R. N. Harris, W. Lin, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343, 343T, and KR13-08 Scientists (2013) Low Coseismic Friction on the Tohoku-Oki Fault Determined from Temperature Measurements, Science 342, 1214 (2013), doi: 10.1126/science.1243641

Wang, K. and M. Kinoshita (2013) Dangers of Being Thin and Weak, Science, 342, 1178-1180, doi: 10.1126/science.1246518.

Ito, T., A. Funato, W. Lin, M-L., Doan, D. Boutt, Y. Kano, H. Ito, D. Saffer, L. McNeill, T. Byrne, K. Moe (2013) Determination of Stress State in Deep Subsea Formation by Combination of Hydraulic Fracturing In-situ Test and Core Analysis - A Case Study in the IODP Expedition 319-, J. Geophys. Res., 118, 1203-1215, doi:10.1029/2012JB009724.

Xue, L., H.-B. Li, E. E. Brodsky, Z.-Q. Xu, Y. Kano, H. Wang, J. J. Mori, J.-L. Si, J.-L. Pei, W. Zhang, G. Yang, Z.-M. Sun, and Y. Huang (2013), Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone, Science, 340, 1555-1559, doi: 10.1126/science.1237237

Lin, W., M. Conin, J.C. Moore, F.M. Chester, Y. Nakamura, J.J. Morim L. Anderson, E.E. Brodsky, H.Eguchi, Expedition 343 Scientists (2013), Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Science, 339, 687-690, doi: 10.1126/science.1229379.

Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara, and Y. Fukao (2012), Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, doi: 10.1038/NCEO1466.

Kimura, G., S. Hina, Y. Hamada, J. Kameda, T. Tsuji, M. Kinoshita, and A. Yamaguchi (2012), Runaway slip to the trench due to rupture of highly pressurized megathrust beneath the middle trench slope: The tsunamigenesis of the 2011 Tohoku earthquake off the east coast

of northern Japan, Earth Planet. Sci. Lett., 339-340, 32-45.

Kinoshita, M., G. F. Moore, and Y. N. Kido (2011), Heat flow estimated from BSR and IODP borehole data: Implication of recent uplift/erosion of the imbricate thrust zone in the Nankai Trough off Kumano, Geochem. Geophys. Geosyst., 12, Q0AD18, doi:10.1029/2011GC003609.

Lin, W., S. Saito, Y. Sanada, Y. Yamamoto, Y. Hashimoto, and T. Kanamatsu (2011), Principal horizontal stress orientations prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area, Geophys. Res. Lett., 38, L20309, doi:10.1029/2011GL049744.

Lin, W., O. Tadai, T. Hirose, W. Tanikawa, M. Takahashi, H. Mukoyoshi, and M. Kinoshita (2011), Thermal conductivities under high pressure in core samples from IODP NanTroSEIZE drilling site C0001, Geochem. Geophys. Geosyst., 12., Q0AD14, doi:10.1029/2010GC003449

Lin, W., E.-C. Yeh, J.-H. Hung, B. Haimson, and T. Hirono (2010), 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, 482, 82-91.

Lin, W., et al. (2010), 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., 37(L13303).

[学会発表](計133件)

Kinoshita, M., Sugihara, et al. (2013), Revised temperature at the updip limit of locked portion of Nankai megasplay, inferred from IODP Site C0002 temperature observatory, Abstract T33F-07 presented at 2013 Fall Meeting, AGU, Moscone Center, San Francisco, 9-13 Dec.

加納靖之他(2013), JFAST 掘削孔に設置した温度計アレイによる断層摩擦発熱検出, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 8 日, 神奈川県民ホール, 横浜市 (招待講演)

林 為人 他(2013), 東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST) における応力測定, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013 年 5 月 21 日 (招待講演)

Kano, Y., and H. Ito (2011), Modeling of Permeability Structure Using Pore Pressure and Borehole Strain Monitoring, 2011 Fall Meeting, AGU, Moscone Center, San Francisco, 5-9 Dec.

Ito, H. (2010), S-anisotropy and stress direction-Results from logging at site C0009

of IODP expedition 319, NanTroSEIZE-,
2010 Fall Meeting, AGU, T13A-2166,
Moscone Center, San Francisco, 13-17 Dec.

〔図書〕(計1件)

木村学・木下正高編, 付加体と地震発生帯
南海地震の解明に向けて, 東京大学
出版会, 296p, 2009.

〔産業財産権〕

出願状況(計5件)

名称: 接合構造

発明者: 伊藤久男、加藤和政、越智寛、細
川直史、萩田裕久、河内重和

権利者: (独)海洋研究開発機構/東レ(株)/
サカイ・コンポジット(株)/大和工業(株)

種類: 特許

番号: 特願 2013-105070

出願年月日: 2013年05月17日

国内外の別: 国内

名称: 圧力容器

発明者: 伊藤久男、加藤和政、越智寛、細
川直史、萩田裕久、河内重和

権利者: (独)海洋研究開発機構/東レ(株)/
サカイ・コンポジット(株)/大和工業(株)

種類: 特許

番号: 特願 2012-081782

出願年月日: 2012年03月30日

国内外の別: 国内・外国

名称: バルブ

発明者: 伊藤久男・加藤和政

権利者: (独)海洋研究開発機構

種類: 特許

番号: 特願 2011-252902

出願年月日: 2011年11月18日

国内外の別: 国内

名称: 水中作業装置及び水中用歪計測装置

発明者: 伊藤久男・荒木英一郎・古屋和男

権利者: (独)海洋研究開発機構/サイスマテッ
ク(株)

種類: 特許

番号: 特願 2009-295348

出願年月日: 2009年12月25日

国内外の別: 国内・外国

名称: バルブ機構

発明者: 伊藤久男・荒木英一郎・古屋和男

権利者: (独)海洋研究開発機構/サイスマテッ
ク(株)

種類: 特許

番号: 特願 2009-295352

出願年月日: 2009年12月25日

国内外の別: 国内・外国

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro~/
index.html](http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro~/index.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

木下 正高 (KINOSHITA, Masataka)

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア
研究所・所長

研究者番号: 50225009

(2)研究分担者

伊藤 久男 (ITO, Hisao)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部
探査センター・技術研究統括

研究者番号: 10356470

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・グループリーダー

研究者番号: 80371714

伊藤 高敏 (ITO, Takatoshi)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号: 00184664

加納 靖之 (KANO, Yasuyuki)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号: 30447940

(3)連携研究者

荒木 英一郎 (ARAKI, Eiichiro)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学
センター・サブリーダー

研究者番号: 60359130

山岡 耕春 (YAMAOKA, Koshun)

名古屋大学大学院・環境学研究科・教授

研究者番号: 70183118