

科学掘削による地震断層の 応力状態・物性・すべりパラメーターの評価

林 為 人^{*,**} 廣 瀬 丈 洋^{**}
谷 川 亘^{**} 濱 田 洋 平^{**}

Evaluating Stress State, Physical Properties, and Rupturing Behavior of Seismogenic Faults through Scientific Drillings

Weiren LIN^{*,**}, Takehiro HIROSE^{**}, Wataru TANIKAWA^{**} and Yohei HAMADA^{**}

[Received 5 June, 2016; Accepted 14 November, 2016]

Abstract

To better understand seismic fault rupturing mechanisms, recent research results from scientific ocean drilling projects in seismogenic subduction zones such as Japan Trench and Nankai Trough carried out under the International Ocean Discovery Program (IODP) are reviewed and summarized. Stress states in the vicinity of faults and in wall rocks penetrated by drillings are determined or constrained using borehole wall resistivity images and drill core samples. The stress measurement methods are summarized and the stress results are interpreted. Fluid transportation properties and thermal properties within and around the faults are determined from retrieved core samples. The results are both useful and necessary for examining fault rupturing lubrication mechanisms, e.g., coseismic thermal pressurization. Dynamic frictional behavior of fault gouges is elucidated through rotary frictional experiments over a wide range from intermediate to high velocities covering the real coseismic fault slip velocity at around 1 m/s; the results indicate that frictional coefficients of plate boundary fault gouges in subduction zones are very low. In addition, high-temperature history examined with vitrinite reflectance measurements and minor element movements from isotopic analyses using the fault core samples give important evidence of the frictional heat of faults. Such historic high-temperature signals also enable inversion estimations to reveal past fault-rupturing parameters. It is hoped this review paper will be valuable and helpful for planning and implementing future scientific fault drilling programs.

Key words : seismogenic fault, stress state, permeability, frictional coefficient, temperature, thermal property

キーワード : 地震断層, 応力, 浸透率, 摩擦係数, 温度, 熱物性

* 京都大学大学院工学研究科

** 海洋研究開発機構高知コア研究所

* Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 615-8540, Japan

** Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Nankoku, 783-8502, Japan

I. はじめに

日本列島の下に太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込むことによって、東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震と略する）や東南海地震・南海地震のような海溝型巨大地震は繰り返し発生している。これらの地震の震源断層であるプレート境界は海底下にあるため、近年、国際深海科学掘削計画（International Ocean Discovery Program, 略称 IODP）により、東北日本と西南日本の沈み込み帯である日本海溝と南海トラフでの深海科学掘削プロジェクトが行われてきた。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地震では、 M （マグニチュード）9 という地震の規模もさることながら、とくに巨大津波によって甚大な被害が発生した。その津波発生の直接の原因に関する共通認識は、プレート境界断層が海溝軸付近では 50 m 以上もすべった（例えば, Fujiwara *et al.*, 2011）結果、海底が大きく隆起して大量の海水を一気に押し上げたというものである。なぜ東北地震の震源断層がそれほど大きくすべったかを解明するために、IODP 第 343 次研究航海「東北地方太平洋沖地震調査掘削（Japan Trench Fast Drilling Project, 略称 JFAST）」は宮城県牡鹿半島東方沖で地球深部探査船「ちきゅう」によりプレート境界断層の掘削を行った（Mori *et al.*, 2012; Chester *et al.*, 2012）。

西南日本沖合にある南海トラフでは M 8 クラス以上の大地震がこれまで 100-200 年の間隔で繰り返して発生してきた。次の南海トラフを震源とする大地震は、今世紀中に発生する可能性が高く、場合によって 2011 年の東北地震よりも大きな被害をだすと懸念されている。南海トラフの地震発生帯の状態を解明して、プレート境界型の巨大地震発生のメカニズムに対する理解を飛躍的に向上させるために、IODP による南海トラフ地震発生帯掘削計画（Nankai Trough Seismogenic Zone Experiments, 略称 NanTroSEIZE）は 2007 年から実施され、現在まで断続的に行われている。これまでに、NanTroSEIZE は紀伊半島沖において、すでに 10 数本の掘削を行ってきている

（Kinoshita *et al.*, 2014; Tobin *et al.*, 2014）。今後は、これまで海底下深度約 3 km まで掘り進んだサイト C0002 において、海底下深度 5 km よりも深い巨大分岐断層を掘り抜くことを目指している。

日本海溝では 2011 年の東北地震のみならず過去の歴史地震の知見も得る必要があると考えられ、JFAST で掘削した 1 点に限らず、より広範囲にわたって地震断層の物質・流体・応力に関する知見を得たい。したがって、今後の新しい深海地震断層掘削として、Tracking Tsunamigenic Slips in the Japan Trench（略称 JTRACK）は JFAST の後継 IODP 掘削プロジェクトとして提案され、近い将来実現される可能性が高い。また、日本海溝の海側の太平洋プレート内に正断層タイプのアウターライズ地震も多発しており、そのような地震断層も研究対象の 1 つとしている「アウターライズ海洋掘削」の科学提案がなされている。

これまでに巨大地震発生場である沈み込み帯の地震発生帯掘削をはじめ、陸上における地震断層の掘削や地表調査などにおいて、地震断層およびその周囲の応力状態、各種物理と化学的性質、実際の地震時の断層すべり速度領域における断層物質のすべり摩擦挙動、断層すべりの痕跡からその挙動の解明に関する研究は大きく進展してきた。詳細は後述するが、その一例として JFAST ではそれぞれ独立に測定された断層と周囲の応力状態・物性・すべりパラメーターは、東北地震時に 50 m にも及ぶ断層の巨大なすべり挙動の包括的な解明に大きく寄与した。本稿では、科学掘削による地震断層の応力状態・物性・すべりパラメーターの評価に関するこれまでの取り組みと成果をとりまとめ、今後の地震断層掘削等の研究立案およびその実施の参考として役立つことを期待したい。

II. 地震断層周囲の応力状態

一般的に、断層面上にせん断応力と垂直応力が作用している。せん断応力は断層をすべらせようとする原動力であり、有効垂直応力（垂直応力と間隙水圧の差）と摩擦係数の積は断層の摩擦抵抗

となる。間震期（Interseismic, すなわち非地震時または地震の準備期間）に、このせん断の力と摩擦抵抗の力（応力と面積の積）は力学的な平衡状態にある。また、地震時（Coseismic）には断層面上のせん断応力と断層周囲地層中の応力が断層のすべりとともに急激に降下するが、間震期にはその応力が徐々に蓄積する。このように断層面上の応力は、間隙水圧、摩擦係数とともに断層のすべり挙動を大きく左右するパラメーターである。したがって、断層とその周囲の応力状態の空間分布と時間変化を知ることは、地震断層の挙動を解明するために重要である。

1) 検層データおよび掘削コアによる応力の測定方法

地下深部の現在応力状態は、基本的に遠隔測定ができないため、その深度まで掘削してアクセスする必要がある。現在応力の測定は、リークオフテスト（Leak-off test）や水圧破碎法のような孔内実験による方法（例えば、Lin *et al.*, 2008; Ito *et al.*, 2013）と、検層データの解析および掘削コア試料の測定による方法がある。上記の孔内実験は、人為的に掘削孔の一部区間または全部を密封して、水圧を加えることにより孔壁に引張り裂を生成させて、最小水平主応力値や主応力の方向を測定するものである。これらの測定は、掘削オペレーションを止める必要があるため、通常の海洋科学掘削では実施例が稀である。本稿では、検層データ解析とコア試料による応力測定の方法を以下に概説する。

掘削する場合、掘削孔壁の周りに応力の集中が発生する。この応力集中で大きくなった圧縮応力の大きさが孔壁岩石の強度を越した場合、ボアホールブレイクアウト（Borehole Breakout）もしくはブレイクアウトと呼ばれる局所的な圧縮破壊と崩落が発生する。また、孔壁の周りに生じた引張応力が岩石の引張強度を越した場合、引張性のき裂である Drilling Induced Tensile Fracture (DITF) が発生する。検層のキャリパーデータ（孔径）や孔壁のイメージ（例えば、図 1）を用いて、ブレイクアウトや DITF を解析することにより、原位置応力を得ることが可能である（例え

ば、Zoback, 2007; Chang *et al.*, 2010）。

近年、コア試料を用いた原位置応力の測定方法として、非弾性ひずみ回復（Anelastic Strain Recovery, 略称 ASR）法による応力測定が、沈み込み帯等の国際深海科学掘削計画において実施されるようになった（例えば、Byrne *et al.*, 2009; Yamamoto *et al.*, 2013）。岩石コア試料は掘削により原位置応力から解放されると、瞬時に回復する弾性ひずみと、数日～数週間の時間をかけてゆっくり回復する非弾性ひずみが発生する。コアの回収後に、弾性ひずみの回復はすでに終了しており、その回復のプロセスは測定不可能であるが、非弾性ひずみ回復の一部は測定可能である。この非弾性ひずみ回復を測定して、原位置応力を得るのが ASR 法による応力測定である。

ASR 法は当初、コア試料の軸方向を 1 つの主応力の方向と仮定して、軸に直交する平面内で測定を行う二次元的な手法として、提案された（Voight, 1968; Teufel, 1983）。その後、松木（1992）と Matsuki and Takeuchi（1993）は、6 方向の非弾性ひずみ回復を測定して、三次元の非弾性ひずみのテンソルを決定することにより、完全な応力テンソルを得る三次元手法として理論的に拡張した。それ以来、主要な ASR 法の応力測定研究はこの手法によって行われた（例えば、Lin *et al.*, 2006, 2007; Cui *et al.*, 2014; Nagano *et al.*, 2015）。ASR 法は、岩石コア試料の応力解放後の小さな非弾性ひずみ回復を測定して応力を評価するので、精度よくそのひずみを測定することが重要である。一般的に、非弾性ひずみ回復の量は弾性ひずみ回復の量より遥かに小さい。したがって、ASR 法は応力レベルの高い大深度の場合や、非弾性ひずみコンプライアンス（単位応力あたりの非弾性ひずみ回復量）が大きい岩種に適用しやすい。深海科学掘削では、ひずみゲージという測定センサーをコア表面に貼り付けられるほどの固結した堆積物であれば測定が可能である以外、海洋地殻の玄武岩も成功例がある（Yamamoto *et al.*, 2013）。

コア試料の非弾性ひずみ回復は、掘削に伴う応力解放の瞬間からはじまるため、その測定はコア

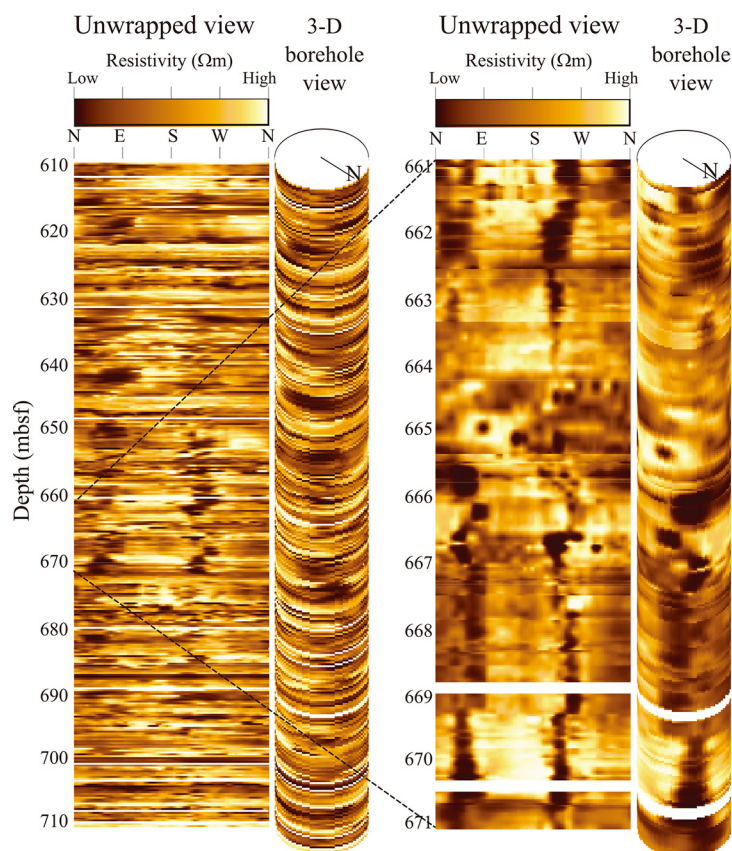


図 1 掘削同時検層 (Logging While Drilling, 略称 LWD) による孔壁の電気比抵抗イメージの一例。比抵抗値が低い領域の黒色帯状の模様 (向きがほぼ 180° 異なる 2 本) がブレイクアウトである (Expedition 343/343T Scientists, 2013). mbsf は海底下深度 (meters below seafloor) を示す。

Fig. 1 Unwrapped and three-dimensional borehole wall resistivity images obtained using Logging While Drilling (LWD) show the presence of borehole breakouts, which occur on the borehole wall and appear on the resistivity image as a pair of vertical black bands (conductive bands) approximately 180° apart (Expedition 343/343T Scientists, 2013). “mbsf” denotes meters below seafloor.

回収後になるべく早くはじめなければならない。したがって、ASR 法は掘削船上で採取直後のコア試料にひずみゲージを貼付して、応力解放後の非弾性ひずみ回復 (基本的に自由膨張) を 1-2 週間連続測定する (図 2)。測定するコア試料は、均質等方線形粘弾性体としてとり扱うため、試料をサンプリングする際は、なるべくき裂等を含まない均質なコアを選ぶ。

2) JFAST 断層掘削サイトの応力状態

東北地震の震源断層を掘り抜く掘削プロジェクト JFAST (図 3) において、孔壁のブレイクア

ウト (図 1) の解析から震源断層近傍の掘削時 (地震発生後) の応力状態を測定した (Lin *et al.*, 2013)。その結果、水平最大主応力方向は、太平洋プレートの沈み込む方向とほぼ平行で、かつ、地震前 (1999 年) に行われた ODP (Ocean Drilling Program) 掘削サイト 1150, 1151 での応力方向 (Lin *et al.*, 2011a) ともおおむね平行であった (図 3a)。

ブレイクアウトの方位から水平主応力の方位が推定できるが、それに加えてブレイクアウトの幅とコア試料を用いて測定された岩石の圧縮強度か

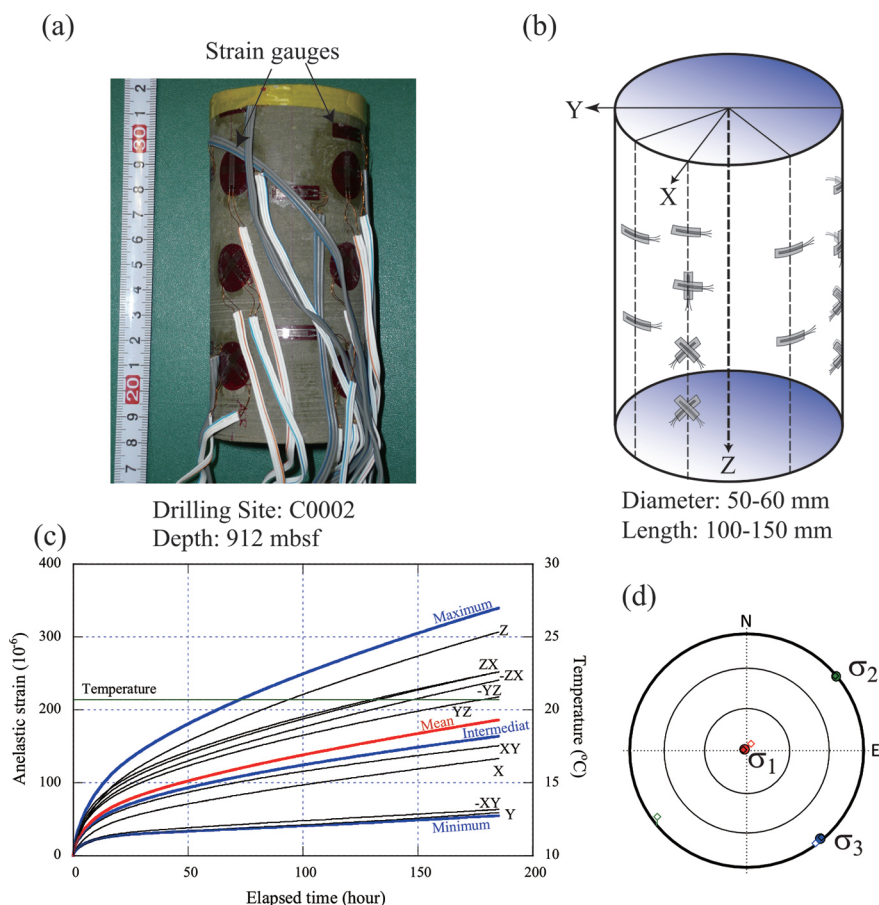


図 2 (a) ASR コアサンプルの一例 (NanTroSEIZE のサイト C0002 の海底下深度 912 mbsf), (b) 円柱コア表面に貼り付けるひずみゲージのレイアウト模式図, (c) コア ((a) の試料) 回収後 8 日間にわたる非弾性ひずみ回復曲線, ラベル X, Y, Z などとは測定方向を示しており, Maximum, Intermediate, Minimum および Mean はそれぞれ, 最大, 中間, 最小主ひずみと平均ひずみ, (d) 非弾性回復主ひずみから決定された主応力方向の下半球シュミット投影図 (Byrne *et al.*, 2009).

Fig. 2 (a) A photograph of ASR core sample taken from 912 mbsf at NanTroSEIZE drilling site C0002, and (b) its schematic illustrations of X, Y, Z axes of a local coordinate system and layout of strain gauges glued to the surface of a cylindrical core sample, (c) As an example of anelastic normal strain recovery raw data, strain curves (thin curves labeled X, Y, Z etc. showing measurement direction) measured in nine directions over approximately eight days of the same core sample with (a). Four thick curves (three principal strains, i.e. Maximum, Intermediate, and Minimum strains, and Mean principal strain) are calculated from anelastic strain raw data in nine directions, (d) Stereo projections (lower hemisphere) of orientations of three-dimensional principal stresses, which are the same as those of the principal anelastic strains from ASR measurements with respect to the true north coordinate system (Byrne *et al.*, 2009).

ら, 応力値がとり得る範囲を推定することも可能である (例えば, Chang *et al.*, 2010)。JFAST では, ブレークアウトの認定と岩石の圧縮強度の測定が共にできたのは, 2 深度だけであった。

図 4 は海底下深度 720 mbsf (meters below seafloor) の例であり, 原位置応力の絶対値は, 図 4b 中の斜線の範囲内と推定され, NF で示されている正断層の応力状態 (Normal Faulting Stress

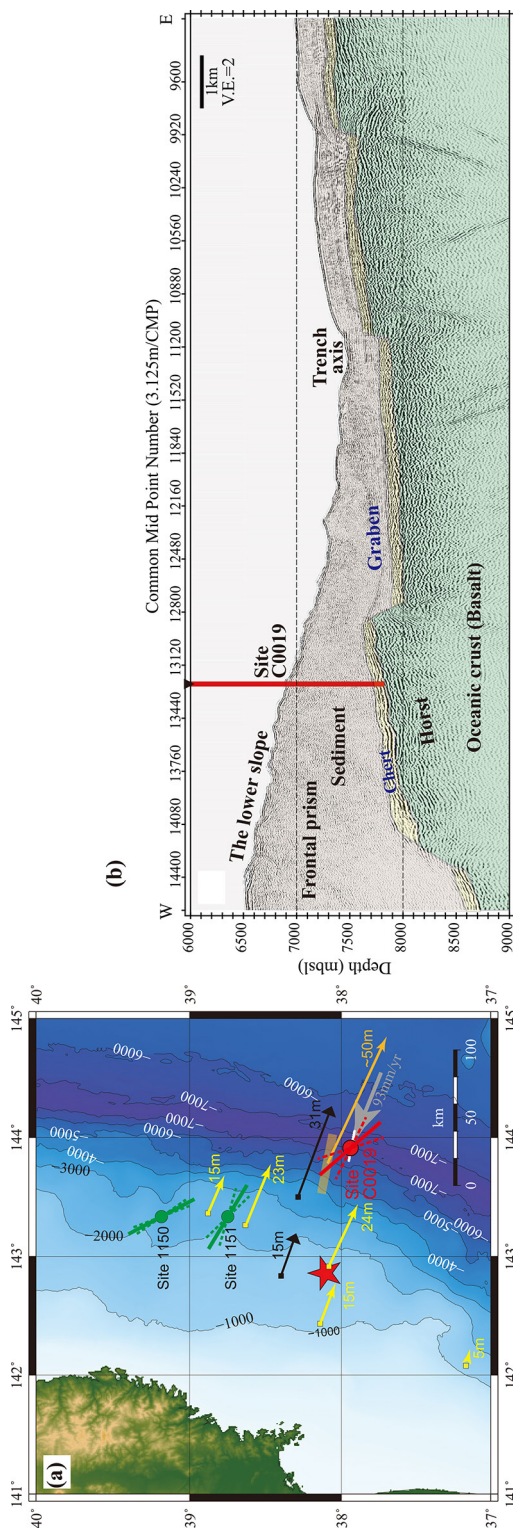


図 3 (a) JFAST 掘削サイト C0019 の位置と最大水平主応力の方向 (赤の実線はその主応力方向の平均, 2 本の破線は $\pm$ 標準偏差), 緑の丸とそれの上にある実線と破線は ODP 掘削サイト 1150 と 1151 での最大水平主応力の方向, 赤い星は東北地震本震の震央, 黄・黒・オレンジの矢印は海底の地震時変位, 灰色矢印と数字は太平洋プレートの運動方向と年間速度 (Argus *et al.*, 2011), (b) 解釈入りのサイスミック断面図, Site C0019 の赤線は掘削位置とおおよその掘削深度を示し, 海洋プレートの上面が約 5° の緩傾斜, 陸側斜面が約 7° の傾斜である (Lin *et al.*, 2013).

Fig. 3 (a) Location of JFAST Site C0019 and maximum horizontal stress S_{Hmax} orientation at a deep part of the borehole. Red solid and dashed lines show mean S_{Hmax} orientation and one standard deviation, respectively. Green circles and lines show ODP sites 1150 and 1151 drilled in 1999 and their S_{Hmax} orientations prior to the 2011 earthquake. Red star shows the epicenter of the 2011 earthquake mainshock; yellow, black, and orange arrows are co-seismic horizontal displacements of the seafloor, and the orange rectangle is the bathymetric survey area. The gray arrow shows relative plate motion (Argus *et al.*, 2011). The white line around Site C0019 shows the location of (b). (b) Interpreted seismic line crossing Site C0019. The red vertical line shows the location and approximate drilled depth range. Subducting Pacific plate dips gently $\sim 5^\circ$; landward lower trench slope dips $\sim 7^\circ$ (Lin *et al.*, 2013).

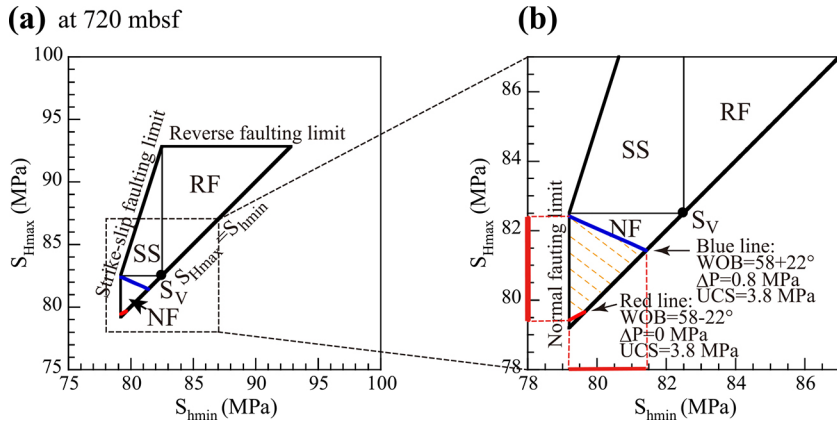


図 4 深度 720 mbsf において、ブレイクアウトの幅 (WOB)、孔内の水圧と間隙圧との差 (ΔP)、岩石試料の一軸圧縮強度 (UCS) および摩擦係数 0.6 から求められた応力値のとり得る範囲 (a とその拡大図 b)；地層中の応力は、岩石の耐えられる限界があり、すなわち、応力値は必ず、鉛直応力 (S_v) と摩擦係数で決定される応力の多角形 (Polygon) の範囲にある。この Polygon は、正断層型エリア NF、横ずれ断層型エリア SS と逆断層型エリア RF からなる。図 b 中の青線と赤線は、それぞれ $WOB \pm SD$ 、最大と最小 ΔP から求められた応力値の上限と下限であり、いずれは正断層型応力状態 NF のエリア内にあることがわかった。縦軸と横軸の赤線はそれぞれ、 S_{Hmax} と S_{Hmin} の範囲を規定する (Lin *et al.*, 2013)。

Fig. 4 Constraints on horizontal stress magnitudes at 720 mbsf (a and b). Stress polygons are based on the Anderson theory of faulting with coefficients of sliding friction of 0.6. Because the stress regime must lie inside the polygon defined by vertical stresses (S_v) and assumed sliding friction, only a restricted range of values of S_{Hmax} and S_{Hmin} is possible. Three triangular areas labeled NF, SS, and RF in the polygon (a) show normal faulting (NF), strike-slip faulting (SS), and reverse faulting (RF) stress regimes, respectively. Red and blue curves in (b) at 720 mbsf show lower and upper stress conditions for WOB (Width of Breakout) of $58 \pm 22^\circ$ (mean $\pm$ SD) and ΔP of 0 and 0.8 MPa, respectively, are located within the NF regime. Hatched area is the constrained horizontal stress magnitude range. Red bars on the axes (b) give the possible ranges of S_{Hmax} and S_{Hmin} magnitudes, respectively (Lin *et al.*, 2013).

Regime：伸張場ともいう)の領域にあることが判明した。すなわち、鉛直応力 (S_v) > 水平最大主応力 (S_{Hmax}) > 水平最小主応力 (S_{Hmin}) で表される応力状態である。深度 813 mbsf での応力状態は、正断層型応力状態と横ずれ断層型応力状態 (Strike-Slip Faulting Stress Regime, 図中の略称 SS で示されているエリア；鉛直方向の応力が中間主応力となる)の境界付近であった (Lin *et al.*, 2013)。

地震後の断層近傍は、衝上断層の上盤を押し上げる最大水平主応力と鉛直応力との差応力がほぼ完全に解放された (Lin *et al.*, 2013)。すなわち、プレートの沈み込みに伴って蓄積したテクtonic 応力がほぼなくなり、重力起源の応力場、いわゆる“正断層型”の応力状態になっていたことが明らかになった。一方、地層の層理や小断層の

構造解析に基づき、既存の研究成果をも考慮しながら、地震前の応力状態を推定したところ、その応力状態は断層の上盤を衝上させる水平最大主応力 (S_{Hmax}) が鉛直応力 (S_v) よりも大きい“逆断層型”であったことがわかった。図 5 に示したように、地震前に海洋プレートの沈み込み方向とほぼ平行であった最大主応力 σ_1 が地震時に小さくなり、地震後には中間主応力 σ_2 となった。地震前の中間主応力 σ_2 は地震時に小さくなり、地震後には最小主応力 σ_3 となった。また、地震前の最小主応力 σ_3 であった鉛直方向の応力 σ_v は重力起源のため、その大きさが地震時に変化しないため、地震後には最大主応力 σ_1 となった (Lin *et al.*, 2013)。

3) 南海トラフ掘削サイトの応力状態空間分布
現世沈み込み帯の応力状態を知ることは、地震

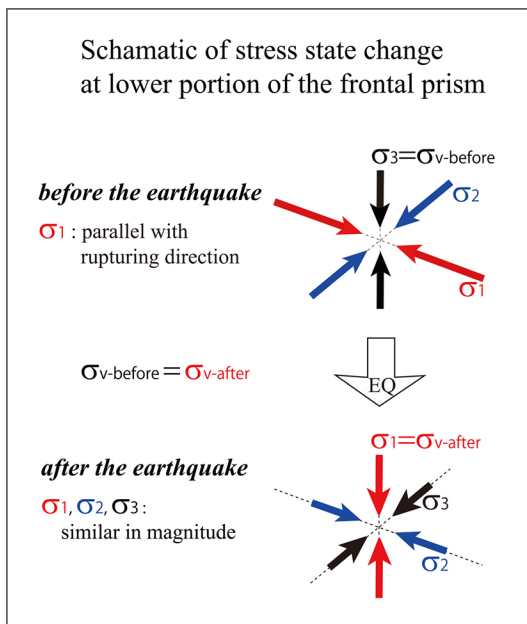


図 5 東北地震に伴う海溝軸付近断層直上の応力状態変化を示す模式図 (Lin *et al.*, 2013). 応力状態が地震発生前の逆断層型から正断層型へ変化を示す。

Fig. 5 Schematic of inferred coseismic three-dimensional stress state change in the lower portion of the frontal prism (Lin *et al.*, 2013).

サイクルに伴う地震発生帯のエネルギーの蓄積と解放を理解するために重要である。また、断層近傍の応力の蓄積を定量評価できれば、地震発生の“切迫度（プレート境界断層に作用するせん断応力と断層の有効摩擦強度の比）”を測り得ると期待されている。したがって、これまでの NanTroSEIZE では、多くの応力測定関連の研究実績があげられてきた (Byrne *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2011; Moore *et al.*, 2011; Tsuji *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2012, 2013, 2015; Lewis *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013; Yamamoto *et al.*, 2013; Kinoshita and Tobin, 2013; Ito *et al.*, 2013; Saffer *et al.*, 2013; Conin *et al.*, 2014; Yamada and Shibamura, 2015)。Lin *et al.* (2016) はこれまでに公表された NanTroSEIZE の応力測定結果（海底下深度 1.6 km まで）をとりまとめた（図 6）。全般的に

みると浅部（例えば、1 km 以浅）では基本的に正断層型の応力場であり、1.5 km 付近では横ずれまたは逆断層型応力場になる兆候が認められた。とくに、応力測定の結果は、熊野海盆の海側辺縁部（C0002 サイト）付近の応力が沈み込み方向の伸張場であることを解明した。このような応力状態は掘削の結果がでるまでに予測されておらず、その意外性から南海掘削ではもっとも注目された結果の一つとなった。

III. 地震断層およびその周囲の物性

沈み込み帯における地震発生の挙動や断層の特性は、間隙流体の高間隙水圧帯（静水圧よりも高い水圧）の有無や温度構造に依存する。また、高間隙水圧の発生は、沈み込む海洋プレートの上載堆積物（スメクタイト・アモルファスシリカなど）や海洋地殻を構成する玄武岩の脱水反応・圧密のほか、地層の流体移動特性によって決まる。さらに、断層および断層近傍の流体移動特性構造は、断層の動的すべり挙動を大きく左右する。一方、温度構造は、深部からのヒートフローに依存するほか、地層の熱物性にも大きく影響される。

1) JFAST 断層掘削試料の水理学的解析

JFAST で得られた掘削コア試料を用い、圧力を上げて現場環境を再現した室内水理実験により流体の移動特性を評価した。その結果、東北地震ですべったプレート境界断層付近では周囲の岩石と比較して非常に透水性が低い（すなわち水が流れにくい）ことが明らかになった（図 7a）。また、透水性が低い原因は、粘土鉱物の含有率が高く、なかでもスメクタイトの含有量が非常に多いためであることがわかった (Kameda *et al.*, 2015)。室内実験で求めた断層帯の流体移動特性をもとに、一次元熱流体移動拡散モデルをベースとした断層のすべり強度の変動（熱圧化：Thermal pressurization）を解析した結果、地震断層のすべりに伴う摩擦発熱により流体の圧力が増加し、すべり摩擦力が大きく低下する（断層のすべり摩擦抵抗の減少：すべりやすくなる）ことがわかった（図 7b）。それが一因でプレート境界断層の浅部で大きなすべりが生じたことを明らかにした

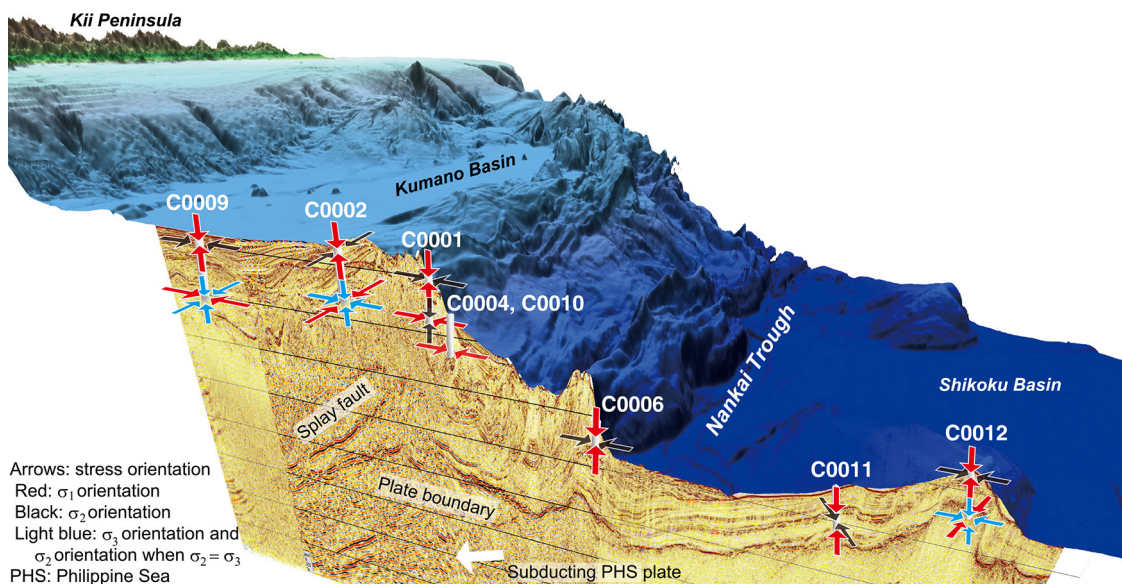


図6 南海トラフ掘削ステージ1-2から得られた浅部の応力場分布 (Lin *et al.*, 2016). 番号 (例えば, C0002) は掘削サイトを示す. 各矢印は三次元主応力の方向を示しており, 赤は最大主応力 σ_1 , 黒は中間主応力 σ_2 , また水色は最小主応力 σ_3 の方向を示している. 中間主応力と最小主応力は, ほぼ等しい場合 ($\sigma_2 = \sigma_3$), 両者とも水色で表されている.

Fig. 6 Distributions of semi-three-dimensional stress state in NanTroSEIZE transect. Codes (e.g. C0002) are the number of drilling sites. Red, black, and light blue arrows are the orientations of maximum, intermediate, and minimum principal stresses, respectively. Two pairs of arrows in the same light blue color in the deeper parts of C0009, C0002, and C0012 mean that intermediate and minimum principal stresses are nearly equal to each other, or intermediate and minimum principal stresses are highly variable (Lin *et al.*, 2016).

(Tanikawa *et al.*, 2013)。

2) 南海トラフ沈み込み帯の断層とその近傍の流体移動特性

IODP 南海掘削計画 NanTroSEIZE により掘削されたコア試料を用いて, 流体移動特性と摩擦特性を測定し, 流体移動特性が摩擦特性へ与える影響および, 分岐断層とデコルマ断層の特徴の相違を考察した (Tanikawa *et al.*, 2012, 2014a)。室内摩擦実験の結果, 低速度域から中速度域 (0.01-10 mm/s) では分岐断層ガウジ (サイト C0004) はデコルマ断層ガウジ (サイト C0007) よりもすべり摩擦が高くなる傾向を示した。また, 高速度領域 (> 100 mm/s) では両方の断層ガウジは低速時に比べ低い摩擦係数を示した (Tanikawa *et al.*, 2012)。一方, 透水係数を比較すると, 分岐断層ガウジとデコルマ断層ガウジはとも

に熱圧化が発生するポテンシャルをもつ程度の低い透水性 (約 10^{-18} m^2) を示すことが明らかとなった (図8)。また, 分岐断層ガウジがデコルマ断層ガウジよりもやや高い透水係数を示した。摩擦実験ではすべりに伴うせん断圧密変形 (断層ガウジの短縮化) は分岐断層がデコルマ断層よりも進行しやすかったことから, 流体移動特性の測定結果により, 分岐断層ガウジは排水効率がより高い (透水性が高い) ために圧密しやすく, その結果低速すべり時においては, 分岐断層のせん断抵抗が高くなったと考えられる。一方高速すべり時には, 両断層ともに透水係数が低いため, 熱圧化が機能し, 摩擦を大きく低下させたものと考えられる。低速時の摩擦挙動を支配したと考えられる圧密変形のしやすさの違いはカルサイトおよび粘土鉱物の含有量の違いが反映しているものと考

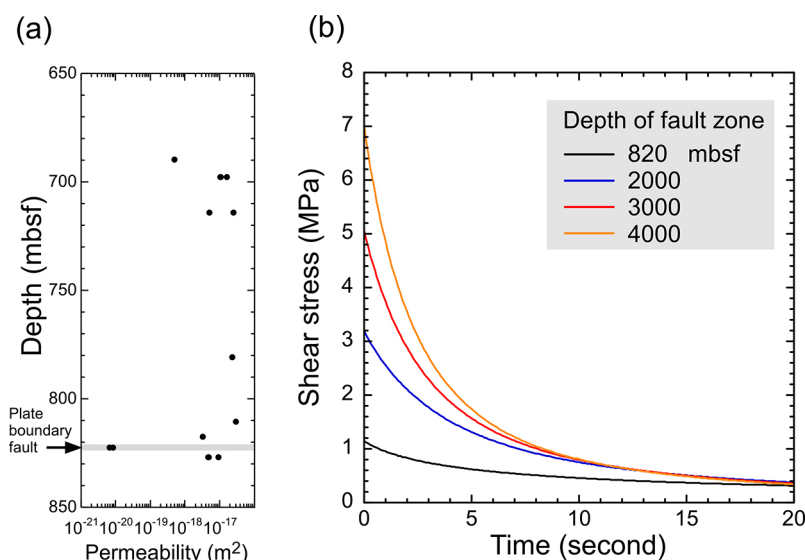


図 7 (a) JFAST 掘削サイト C0019 の深度 680 m から 830 m 区間の透水係数の深度分布. プレート境界断層は 820 m 付近に位置する. (b) 数値解析による断層すべりに伴う断層のせん断応力の変化の推定結果. プレート境界断層の 4 つの深度の違いを考察して, 流体圧の上昇により断層のすべり摩擦の低下を招き, また深部ほどその影響が顕著に現れた (Tanikawa *et al.*, 2013).

Fig. 7 (a) Permeability structure near the plate boundary fault at site C0019 (JFAST). (b) Numerical modeling results for thermal pressurization analysis of the plate boundary fault at depths from 820 m to 4000 m. Average changes of shear stress in the slip zone at various depths for a slip zone 10 mm thick and a friction coefficient of 0.2. The results show that the build-up of fluid pressure induces a reduction of shear stress, and reduction rate increases with depth (Tanikawa *et al.*, 2013).

えられる (分岐断層物質のカルサイト量が多い)。当該研究の結果, 摩擦特性の違いは流体移動特性の違いに大きく依存し, 現実的な地震動力学モデルの構築には断層内流体の水理拡散過程を十分に考慮する必要があることを示している。

断層帯が流体の流路となるかシールとなるかは, 石油トラップや深部物質移動をはじめとして昔からさまざまな分野で議論されている問題である (Jones *et al.*, 1998)。南海トラフに限って言えば, 高間隙水圧帯の断層帯近傍での形成 (Tsuji *et al.*, 2014) やデコルマ帯の形成プロセス (Housen *et al.*, 1996) に断層シール問題が大きく関わってくる。地下深部では断層破碎帯中にフラクチャーが卓越することにより断層が流体の流路として機能することが予想される (Faulkner *et al.*, 2010)。一方, 塑性・流動的な性質を示すような比較的浅部 (地表付近から数 km 深度まで) の断層物質で

は, 流体の通路となる十分な開口幅をもつフラクチャーの形成・維持が可能か定かではない。

そこで, 南海掘削計画 NanTroSEIZE の掘削試料を用いて, (比較的浅部の) 断層近傍の透水性構造を評価した。その結果, 分岐断層帯は周囲の岩石 (とくに断層下部の岩石) と比較して断層帯の透水性が低いことが明らかとなった。一方, デコルマ帯は深部ほど透水性が小さくなるが, 断層帯と周囲の岩石とでは大きな違いは認められなかった。以上の結果, 分岐断層は流体シール能力が高く, 断層近傍での脱水反応や下位からの流体流入が期待される環境下であれば, 断層帯近傍で高間隙水圧が形成する可能性が高いことを示唆する。高間隙水圧の発達は断層の強度低下を促進するため, 南海トラフ地震発生時に分岐断層がデコルマと比較して活動しやすいというシナリオにつながるかもしれない (Kimura *et al.*, 2012)。

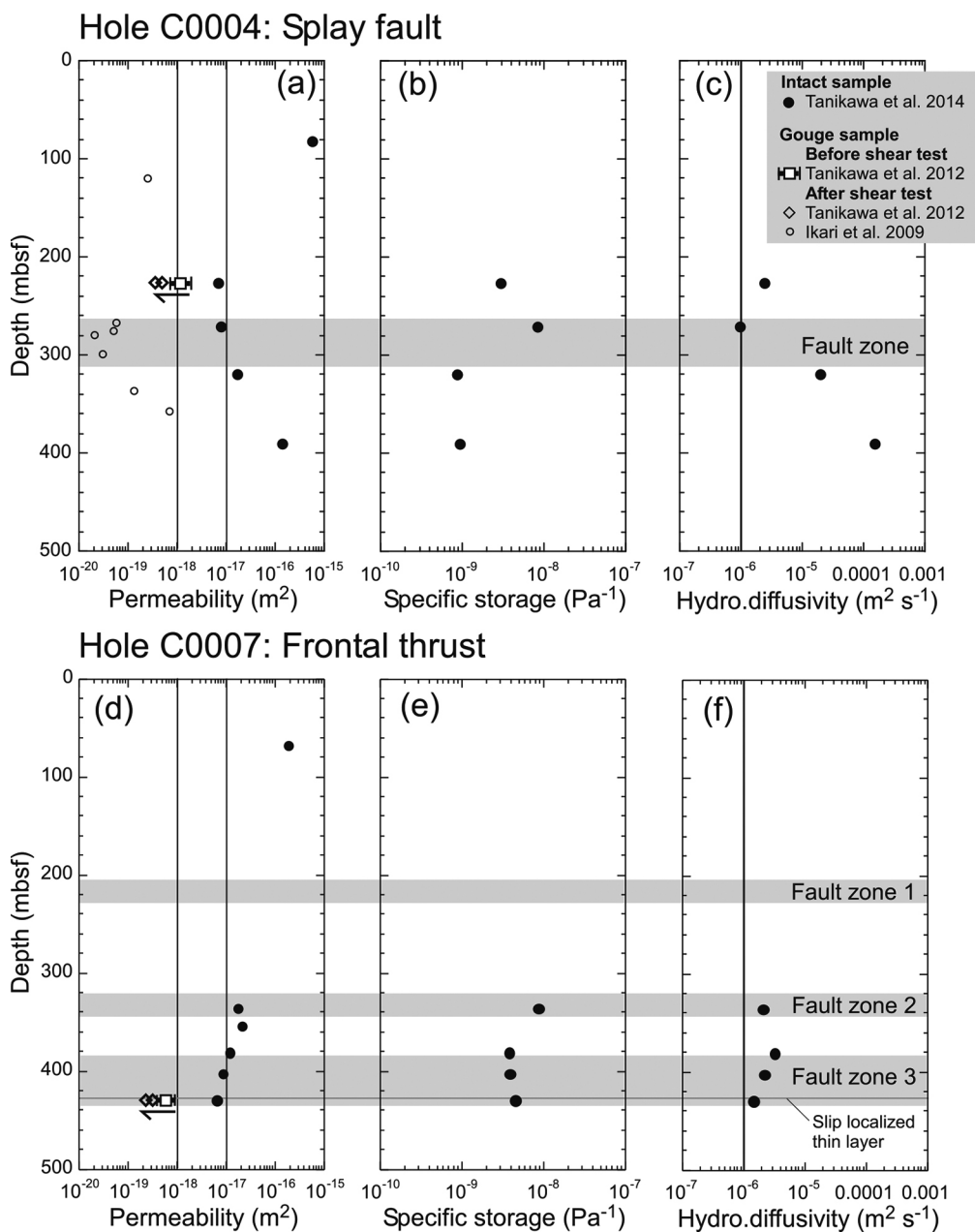


図 8 南海掘削コア試料を用いて推定した南海トラフ浅部の水理構造。断層近傍のガウジ物質（図 a と d 中の正方形とひし形マーク）はガウジ化とせん断変形により透水性が 1 桁以上低下している（a, e）。分岐断層が下部より透水性が 1 桁以上低く、断層下位から上位への流体の流れに対してシール機能の役目をする。デコルマ断層に比べて、分岐断層がわずかに低い水理拡散係数を示す（Tanikawa *et al.*, 2014a）。

Fig. 8 Depth distribution of transport properties at site C0004 (a-c) and site C0007 (e). Permeability of fault gouge materials near faults decreases one order of magnitude from initial values with shear deformation (Square and Rhombus in (a) and (d)). Permeability of spray fault is one order of magnitude smaller than sediments below the fault zone, and the fault may act as a barrier for fluid migration from the depths. Hydraulic diffusivity of the splay fault is slightly smaller than that of the frontal thrust (Tanikawa *et al.*, 2014a).

3) 地震時の動的現象の再現に向けた取り組み

流体が断層すべり挙動および断層帯内物理化学反応へ寄与していることはこれまで地震学的・物質科学的な分析から推定されていた。しかし、それを再現・実証するための実験的考察は一步後れをとっていた。そこで、断層内部の流体を保持および制御した環境で地震時の断層すべり挙動を再現できる装置の開発を行った(図 9a, Tanikawa *et al.*, 2010)。この装置では数 10 MPa までの高い流体圧を保持した状態で最大約 1 m/s のすべり速度で摩擦実験が可能である。

1999 年の台湾集々地震時に活動した台湾チェルンブ断層(Taiwan Chelungpu Fault)では、断層内部の微量元素量と同位体比に異常が認められ、熱圧化に起因する 350℃ 以上の熱水と岩石の相互反応で説明づけられることがわかった(Ishikawa *et al.*, 2008)。そこで、開発した装置を用いて熱圧化現象に起因する「熱水-岩石反応」を検証したところ、摩擦実験中に 300℃ 以上の高温に達した試料のみ微量元素異常が認められ、断層内動的化学反応を再現することに成功した(図

9b; Tanikawa *et al.*, 2015)。

また、断層帯の透水性は地震すべりとともに大きく変動し、そのことが熱圧化プロセスにも影響を及ぼすと考えられる。しかし、実験スケールで検証されていなかった。そこで、摩擦実験装置を改良し、摩擦実験中に透水性の変動を測定する装置の開発を行った(Tanikawa *et al.*, 2012)。異なる透水性をもつ 2 種類の模擬試料を用いた実験から、高速断層運動に伴う透水性の変化は、発熱に伴う流体の粘性率の変化、母岩の浸透率、すべり速度、および生成磨耗物質(ガウジ)の分布に大きく依存することが明らかとなった(Tanikawa *et al.*, 2014b)。さらに、初期透水性が大きい場合すべりとともに透水性が減少し、一方、透水性が低い場合は透水性が増加することが明らかとなった。当該研究結果は南海トラフ震源域が仮に低い透水性をもつ場合、すべりに伴い透水性が増大し熱圧化作用が抑制される可能性を示唆する。

4) 掘削コア試料による熱伝導率と熱拡散率の同時測定

JFAST 掘削プロジェクトでは、2011 年の東北

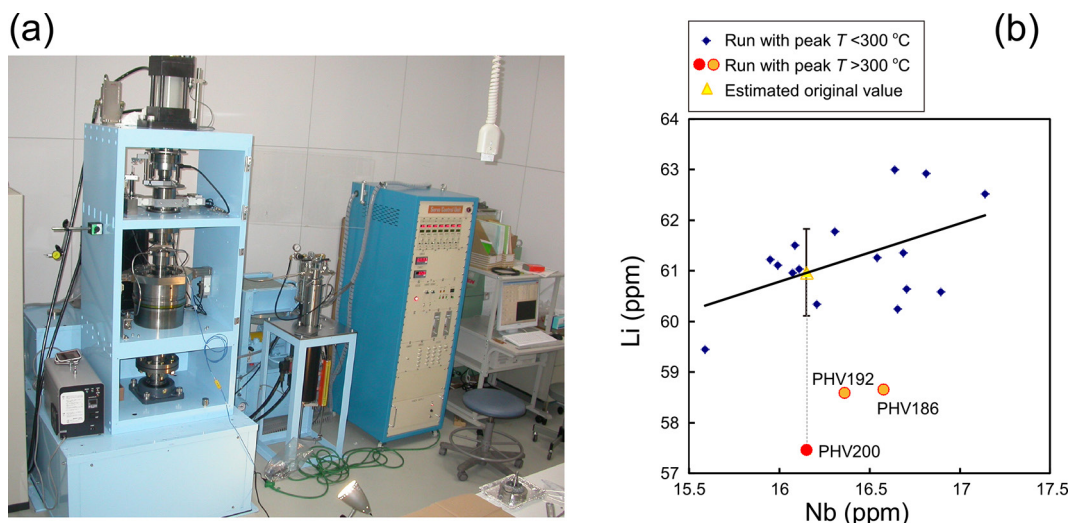


図 9 (a) 断層物質の含水・圧力条件をより地下深部環境下に再現できる流体制御型中高速摩擦試験機。(b) 高流体圧環境下での摩擦実験後の模擬断層物質(台湾チェルンブ断層掘削物質)のリチウム(Li)濃度の変化(Tanikawa *et al.*, 2015)。

Fig. 9 (a) Photo image of fluid-control medium- to high-velocity friction testing system. (b) Li concentration plotted against Nb concentration in gouges before and after friction tests (Tanikawa *et al.*, 2015).

地震時にプレート境界断層のすべりによる摩擦熱の残熱（正の温度異常）を検出することができた（Fulton *et al.*, 2013）。この正の温度異常を解釈するために、また、温度異常から断層の動的摩擦パラメーターを定量的に評価するために、岩石の3熱物性値を決定することが必要である。船上で行われているコア試料のルーチン物性計測では熱伝導率（Thermal Conductivity）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、Transient Plane Heat Source法（通称, Hot Disk法）により熱伝導率と熱拡散率（Thermal Diffusivity）を同時に測定したうえで、体積熱容量（Volumetric Heat Capacity）を算出した（図10；Lin

et al., 2014）。使用した装置（Hot Disk社のTPS 1500）による熱伝導率、熱拡散率と体積熱容量測定の実験性はそれぞれ、2%、5%と7%とされている（Hot Disk, 2007）。これらの熱物性値は、JFASTのプレート境界断層付近の温度異常が地震時の摩擦熱によるものとの結論づけに用いられた（Fulton *et al.*, 2013）。また、IODP第347次研究航海の掘削コア試料による熱伝導率と熱拡散率の同時測定が行われ、下北沖の温度構造の推定に寄与した（Tanikawa *et al.*, 2016）。

5) コア試料の高圧環境下での熱物性測定

「ちきゅう」によるライザー大深度掘削で採取されるコア試料は、原位置の高圧環境下にあったために、その物性測定はその高圧条件を考慮す

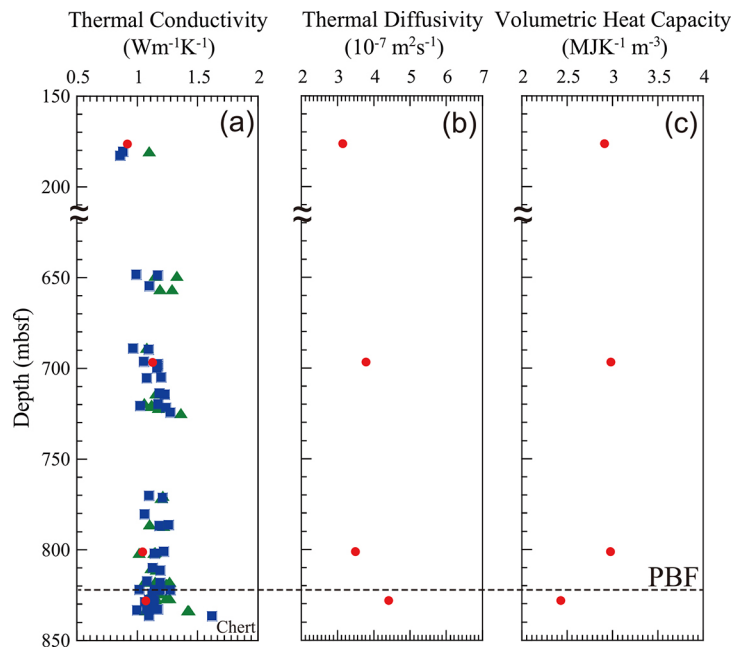


図10 (a) 熱伝導率（赤丸：円柱形コアを用いた Hot Disk 法の測定結果、青四角：ハーフコアの TK04 による測定結果、緑三角：粒試料を用いた測定結果）、(b) 熱拡散率、(c) 体積熱容量の深度プロファイル。熱伝導率と熱拡散率は測定結果であり、体積熱容量はその他の2つから算出されたものである。水平破線 PBF は、JFAST の掘削サイトにおけるプレート境界断層の深度を示す（Lin *et al.*, 2014）。

Fig. 10 Depth profiles of thermal conductivity (a), thermal diffusivity (b), and volumetric heat capacity (c). Thermal conductivity values were measured for all round core samples (red circles), half-core samples (blue squares), and rock-chips samples (green triangles) retrieved from JFAST borehole C0019E. Thermal diffusivity (b) was measured, but volumetric heat capacity (c) was calculated from the two measured values. The broken line shows the depth of the plate boundary fault (PBF) that ruptured during the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Lin *et al.*, 2014).

る必要がある。そのため、最高 100 MPa（深度約 5 km の圧力相当）までの封圧下における熱伝導率の測定装置を開発した（Lin *et al.*, 2011b, 図 11）。予察的な研究として、南海トラフ掘削のコア試料を含めて、各種岩石コア試料の高圧下の測定を行った結果、熱伝導率は圧力の増加に伴い、上昇することが明らかになった（Lin *et al.*, 2011b）。南海トラフ掘削のサイト C0001 の 183 mbsf と 293 mbsf から採取された堆積物の実験結果から、深度約 1 km に相当する圧力は熱伝導率が約 7% の上昇、約 3 km での圧力は約 20% の上昇をもたらすことが判明した。使用した熱伝導率測定装置による結果の不確定さは 5% 未満とされており、上記の圧力効果は有意なものと考えられる。したがって、深度条件ならびに要求される精度によっては、掘削コア試料を用いて原位置の熱物性を評価する場合、この圧力の効果は無視できないといえよう。

一般的に、岩石は高い有効拘束圧下において、

間隙の量が小さくなる。間隙の部分に含まれる水の熱伝導率が鉱物と比較して小さいので、間隙量が少なくなると、熱伝導率の比較的大きい鉱物の割合が多くなるため、全体の熱伝導率は大きくなる。したがって、熱伝導率の正の圧力依存性は、岩石の一般的な性質であるといえる。さらに、岩石の種類によって、組成鉱物の熱伝導率が異なるため、圧力依存性の強弱が認められた（詳細について Lin *et al.* (2011b) を参照されたい）。これは組成鉱物と水の熱伝導率のコントラストが異なるためであり、比較的大きい熱伝導率の鉱物（例えば、石英）を多く含む岩石は圧力の効果が大きい。

IV. 断層物質のすべりパラメーター

2011 年の東北地震では、プレート境界浅部が大きくすべて大津波が発生し、甚大なる被害がでた。地震波を用いた解析によると、この時プレート境界断層は静止していた状態から秒速 1 m

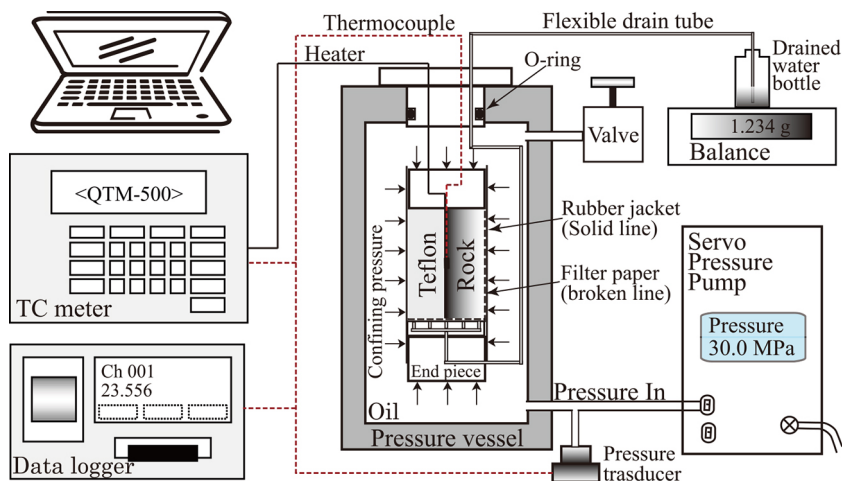


図 11 高圧下における熱伝導率の測定システムの模式図，（Lin *et al.*, 2011b）。このシステムは、200 MPa までの静水圧タイプの高圧容器、サーボコントロール付の封圧負荷装置、圧力容器内に設置される熱線法センサー、熱伝導率計（QTM-500）、試料からの排水量を測定する電子天秤とデータロガーからなる。

Fig. 11 Schematic diagram of apparatus developed for measuring thermal conductivity under high-pressure conditions. The system consists of a hydrostatic pressure vessel with a servo-controlled pump, which provides pressures up to 200 MPa, a wire-type line-source sensor in the pressure vessel, a thermal-conductivity meter (QTM-500) to measure thermal conductivity from the wire sensor, an electrical balance to monitor drained water mass for calculating volumetric deformation of wet samples associated with consolidation, and a data logger (Lin *et al.*, 2011b).

程度まで加速・減速しながら大きくすべり、日本海溝付近の断層浅部のすべり量が 50 m 以上に達したとされている（例えば、Ide *et al.*, 2011; Fujiwara *et al.*, 2011）。しかしながら、このような大地震時に断層が高速で大きくすべる時の断層の摩擦すべり特性は、今世紀になるまでよくわかっていなかった。1990 年代中頃、高速で大変位条件下における岩石の摩擦すべり特性を精度よく測定できる回転式の摩擦試験機が開発され（嶋本・堤, 1994）、それ以来断層の高速摩擦に関する多くの知見が得られるようになってきた。本章では、高速摩擦特性の概要、日本海溝プレート境界および南海沈み込み帯の付加体から採取された断層物質の地震時における摩擦特性、および自然界の断層から地震時の高速すべりを検出する試みについて紹介する。

1) 地震時の断層物質の摩擦力学特性（断層潤滑効果）

地震時の高速・大変位運動を再現した高速摩擦実験によって明らかになってきた重要な点は、(1) 数 cm から数十 cm 以上に達するすべりを伴いながら摩擦強度が著しく低下する現象（すべり軟化）と、(2) すべり速度が数 cm/s に達すると急激に摩擦強度が減少する現象（速度弱化、図 12）が確認されたことである（例えば、Di Toro *et al.*, 2011）。すべり軟化と速度弱化は地震が起こるための必要条件である。このような断層の摩擦すべり挙動を引き起こす物理化学プロセスの理解が地震の仕組みを解き明かす鍵となるとの考えのもと、今世紀になって岩石の高速摩擦研究が大きく進展した。

これまで摩擦実験によって明らかとなってきた断層の動的強度低下プロセス（断層潤滑作用）には、摩擦熔融、ゲル状物質の形成、熱分解による物質変化やナノサイズ物質の形成、断層物質表面水の吸・脱着、摩擦熱による断層間隙水圧の上昇などが提唱されている（例えば、堤, 2009）。それぞれの詳細については参考文献をあたっていただきたい。重要なのは、多くの断層強度低下プロセスが、高速すべり時に発生する摩擦熱に起因することである。例えば、断層帯に普遍的にみられる

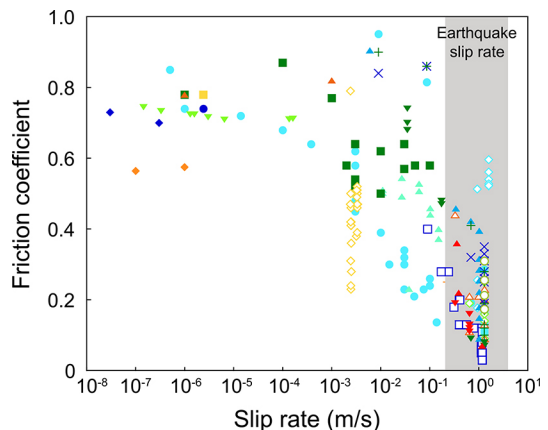


図 12 プレーートの運動速度（約 10^{-9} m/s）から地震時のすべり速度（数 m/s）における、さまざまな岩石の定常摩擦係数のコンパイル。断層を構成する岩種が異なっても、断層潤滑効果によってすべり速度が数 cm/s より速くなると、摩擦係数が 0.6–0.8 から 0.3 以下に著しく減少する。凡例等の詳細は、Di Toro *et al.* (2011) を参照。

Fig. 12 Steady-state friction coefficient of rocks as a function of slip rates ranging from 10^{-9} m/s (nearly plate moving rate) to 10^1 m/s (seismic slip rate). The friction coefficient decreases markedly from 0.6–0.8 to below 0.3 when the slip rate reaches more than 10^{-2} m/s, irrespective of rock type. See Di Toro *et al.* (2011) for more details.

断層粘土はその結晶内に水分子をもつ。典型的な粘土鉱物の 1 つである蛇紋石を秒速数 m の高速ですべらせると、すべり開始直後にアスペリティが 500℃ 以上の高温になって脱水分解反応が起こり、断層面には脱水分解した水やサブミクロンサイズの橄欖石が形成される（Hirose and Bystricky, 2007）。さらに、摩擦熱によって分解反応で生成した水の圧力が上昇する効果と、低摩擦の性質をもつナノ粒子の形成の効果によって、著しく断層の強度が低下するのである。このように、複数の物理・化学的要因が複雑に絡み合って、断層の強度が著しく低下して大地震が発生することが明らかとなってきた。

2) 日本海溝のプレート境界断層物質の摩擦特性

本節では、東北地震時のプレート境界浅部での

大きなすべりの要因を解明する目的で行った、断層物質の摩擦特性に関する研究結果を紹介する。本研究では、東北日本弧に沈み込む直前のプレート境界物質 (Deep Sea Drilling Project (DSDP), Leg 56, Site 436 で採取) を用いて低速から地震時の高速すべり摩擦実験を、Mizoguchi *et al.* (2007) の手法に従って行った。その結果、JFAST で採取されたプレート境界物質に対応すると考えられる粘土質堆積物 (Kameda *et al.*, 2015) は、摩擦係数が幅広い速度領域で 0.2 以下と著しく小さいこと (図 13a), そして地震性高速すべり伝播のしやすさを規定する破壊エネルギーが他の断層物質と比較しても数桁小さいこと (図 13b) をはじめて明らかとなった (図 13b)。このような地震高速すべり時の低摩擦は、JFAST で採取されたプレート境界物質を用いた実験結果 (Ujii *et al.*, 2013), および東北地震時の摩擦発熱の残熱から見積もった地震時の動的摩擦係数 (Fulton *et al.*, 2013) とよく一致する。これらの結果は、

東北沖のプレート境界浅部で、摩擦強度の弱い粘土層沿いに選択的に破壊が伝播することを示唆しており、このような摩擦特性が東北地震時に大きなすべりを引き起こす一要因となったと考えられる (Sawai *et al.*, 2014)。また、Ikari *et al.* (2015) は、プレートの沈み込み速度に相当する、非常にゆっくりとしたすべり速度で JFAST 試料の摩擦実験を行い、プレート境界断層浅部ではスロー地震のゆっくりとしたすべりと巨大地震時の高速すべりが同じ断層で起こり得ることを実証した。

3) 南海トラフ試料の低-高速摩擦特性

南海トラフ地震発生帯掘削第 316 次研究航海 (Site C0007D) で採取された付加体基底部のフロントスラスト直上の堆積物の摩擦係数を間震期 (通常時) のゆっくりとしたすべり速度から、地震時の秒速数 m の高速すべりまでの条件で調べた。実験手法は、Mizoguchi *et al.* (2007) に従った。その結果、含水条件下におけるプレート

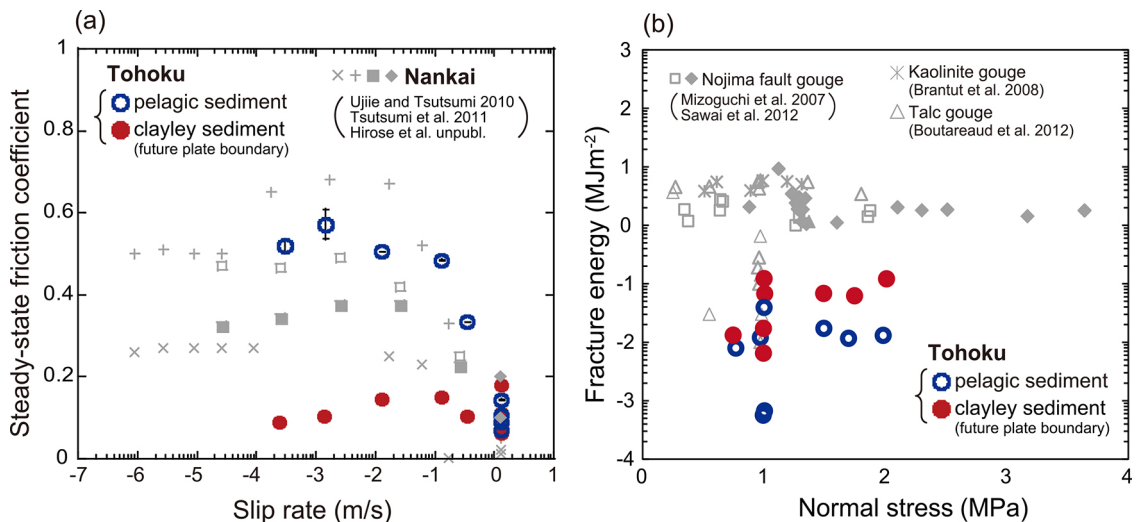


図 13 (a) 定常摩擦係数とすべり速度の関係、粘土質プレート境界物質の摩擦が広い速度範囲で著しく小さい。(b) 破壊伝播のしやすさを規定する破壊エネルギーと垂直応力の相関関係 (Sawai *et al.*, 2014)。東北日本弧に沈み込む堆積物は、破壊エネルギーが非常に小さい。

Fig. 13 (a) Steady-state friction coefficient of pelagic and clayey sediments recovered at Site 436 during DSDP Leg 56. The clayey sediments show a very low friction coefficient over a wide range of slip velocities. Friction coefficients of sediments from the Nankai trough are plotted for comparison. (b) Logarithm of fracture energy plotted against normal stress for sediments from Site 436 (Sawai *et al.*, 2014). Fracture energy determined under similar experimental conditions to those of the present study are also shown as gray-colored symbols.

境界物質は一般的な岩石と比較すると著しく摩擦係数が小さいことが明らかとなった（図 14）（Hirose *et al.*, 2008）。同様の摩擦特性は、Ujii and Tsutsumi（2010）や、より詳細な摩擦の速度依存性を調べた Tsutsumi *et al.*（2011）と調和的である。これらの結果は、東北のプレート境界同様に、地震破壊が深部からプレート境界に沿って伝播してきた場合、プレート境界浅部ではエネルギー的に容易に断層すべりが促進されることを意味している。実際、プレート境界浅部においてビトリナイトの反射率の変化から、過去に地震断層すべりに伴う摩擦発熱の痕跡が報告されている（Sakaguchi *et al.*, 2011）。別途、Ikari *et al.*（2013）は南海トラフ掘削浅部の試料を使い、断層高速すべりによる強度低下だけでなく、一定のすべり変位量以上になると断層の強度が低下することをも確認した。この現象が南海トラフで発生しているスロー地震のすべり挙動に類似す

る可能性があることを指摘した。

4) 日本海溝と南海トラフ試料の摩擦特性比較

日本海溝と南海トラフに沈み込む堆積物の大きな違いは、粘土鉱物であるスメクタイトの量比である（おおむね前者は 60-80%，後者は 10-40% 程度）。そこで、沈み込みプレート境界に多量に存在するスメクタイトの低速（30 $\mu\text{m/s}$ ）から高速（1.3 m/s）すべり時の含水条件における摩擦特性を調べ、日本海溝と南海トラフにおけるプレート境界浅部のすべり挙動の違いを理解することを試みた。実験では、スメクタイトと石英をさまざまな割合で混合した模擬物質を用いて、とくに、各速度ステップにおけるスメクタイトの量比が摩擦挙動に与える影響を調べた。その結果、中速域（約 150 $\mu\text{m/s}$ ）においてスメクタイトの量比を 20% から 50% に増やすと、摩擦係数が 0.6 から 0.1 へと徐々に減少することがわかった（図 15）。一方、高速域（1.3 m/s）では、スメクタイトの量比にかかわらず摩擦は 0.2 以下の小さな値を示した。中速域でスメクタイトの量比が増えるにつれて摩擦が小さくなるのは、せん断圧密に伴う間隙水圧の上昇に起因すると考えられる。この結果は、日本海溝ではスメクタイトが 60-80% 占める遠洋性堆積物が沈み込むため、低速でも摩擦が小さく地震時に大きな応力降下をもたらさないのに対し、スメクタイトが比較的少ない（< 40%）半遠洋性堆積物が沈み込む南海トラフでは、大きな応力降下が発生する可能性を示唆している（Oohashi *et al.*, 2015）。大きな応力降下は多くの地震エネルギーの放出を意味するもので、より大きな断層のすべり量につながるがあると思われる。なお、日本海溝と南海トラフの試料の摩擦特性の違いに関しては、限られた掘削試料による結果であり、今後 JTRACK などの掘削が実施された場合、同様な実験的研究による検証とデータの更なる蓄積が望ましい。

5) 断層試料の摩擦熱の履歴検出

地震時、断層が高速で運動する際には、断層面では多大な摩擦発熱が生じ得る。この発熱によって断層内部や近傍母岩の温度が劇的に上昇すると考えられている（例えば約 1000℃：Cardwell

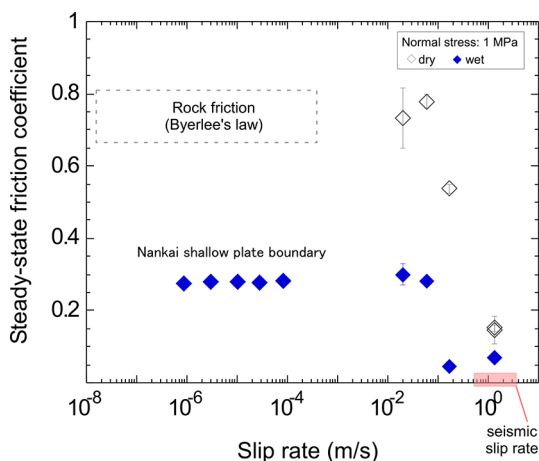


図 14 南海トラフ地震発生帯掘削ステージ 1 で採取されたフロントスラスト直上の堆積物の摩擦係数（縦軸）と断層すべり速度（横軸）の関係。含水条件下におけるプレート境界物質の相対強度は、一般的な岩石の 1/3 程度であり、地震時のすべり速度ではほとんど強度を失う。

Fig. 14 Steady-state friction coefficient of sediments collected from IODP Expedition 316, Site C0007D, 437.4 mbsf: basal part of the accretionary prism above the frontal thrust. Wet specimens exhibit significantly low friction at seismic slip rates compared to dry specimens.

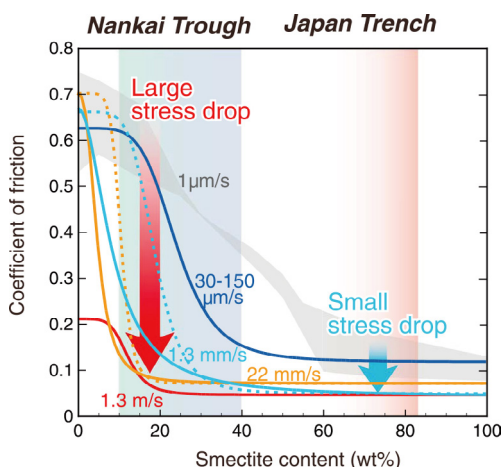


図 15 さまざまなすべり速度における、スメクタイトと石英の量比と摩擦係数の関係。日本海溝にはスメクタイトに富む遠洋性物質が沈み込み、南海トラフにはスメクタイト量比が少ない半遠洋性堆積物が沈み込む。実験データは、地震時の応力降下が日本海溝では比較的小さく、南海トラフでは大きくなることを示唆している (Oohashi *et al.*, 2015)。

Fig. 15 Compilation of steady state coefficient of friction versus smectite content at slip rates ranging from 1 $\mu\text{m/s}$ to 1.3 m/s. Colored areas show smectite content of incoming sediments in the Nankai Trough and the Japan Trench (Oohashi *et al.*, 2015).

et al., 1978)。この急激な温度上昇によって、断層沿いではさまざまな相変化や化学反応が励起され、それらが不可逆反応であれば「摩擦発熱の痕跡」として断層近傍に記録されると考えられている。実際、摩擦熔融した断層岩であるシュードタキライトはその存在が以前より確認されており (McKenzie and Brune, 1972; Sibson, 1975), また天然の断層での詳細な化学分析によって、方解石の熱分解 (Ikehara *et al.*, 2007), 微量元素の移動 (Ishikawa *et al.*, 2008), 粘土鉱物の脱水・構造変化 (Yamaguchi *et al.*, 2011) など、さまざまな地震時の化学反応の痕跡が明らかとなってきた。

断層での発熱量は断層運動時の摩擦強度やすべり距離に依存することから、逆にこの痕跡から摩擦発熱量 (温度) を推定し、地震時の応力等の情

報に変換するという手法が近年試みられてきている (Hirono *et al.*, 2007; Ishikawa *et al.*, 2008; Hamada *et al.*, 2009, 2011; Kameda *et al.*, 2013 など)。同様の手法は現世の沈み込み帯の断層にも導入され、南海トラフ掘削計画によって採取された浅部の巨大分岐断層・プレート境界断層に対して、ビトリナイト反射率測定が実施され、断層近傍での反射率の上昇が確認された (Sakaguchi *et al.*, 2011)。ビトリナイトは石炭の主要構成物のひとつであり、この反射率は熟成度と相関をもつ。このことから低温帯の被熱温度を推定する手法として広く用いられ、幅広い温度レンジでの反応速度論も議論されてきた (Sweeney and Burnham, 1990; Suzuki *et al.*, 1993)。ビトリナイトは堆積物中に広く分布するため、沈み込み帯のような堆積物中に発達する断層の温度指標としても有用であると考えられる。

南海トラフ沈み込み帯の断層浅部が、過去にどのようなすべりを引き起こしたのかを、断層に記録された摩擦熱の痕跡を用いて見積もった。南海トラフ浅部断層での発熱の痕跡として、ビトリナイト反射率の上昇 (Sakaguchi *et al.*, 2011) に注目した。すべり時間とすべり距離を摩擦熱の痕跡から同時に見積もる計算手法を開発し、それを南海トラフ沈み込み浅部の断層に適用した (図 16)。摩擦発熱の痕跡 (ビトリナイト反射率の増加: 下段の点) を、開発した計算手法で再現したところ (下段の線), 数十メートル長時間の摩擦発熱によって断層の外側が加熱されていたことが明らかになった (上段)。この特異な温度上昇から、南海トラフ浅部のこれらの断層は、東北太平洋沖地震と同規模の非常に大きな変位を、長時間かけてすべった可能性が示唆された (Hamada *et al.*, 2015)。

V. 地震断層すべり挙動解明の総合的な取り組み —東北地方太平洋沖地震の震源域掘削研究を例として—

断層は、地震時に大きなすべりが生じたのであれば、摩擦熱のために温度が大きく上昇したのであろうし、地震に伴って応力とひずみが解放さ

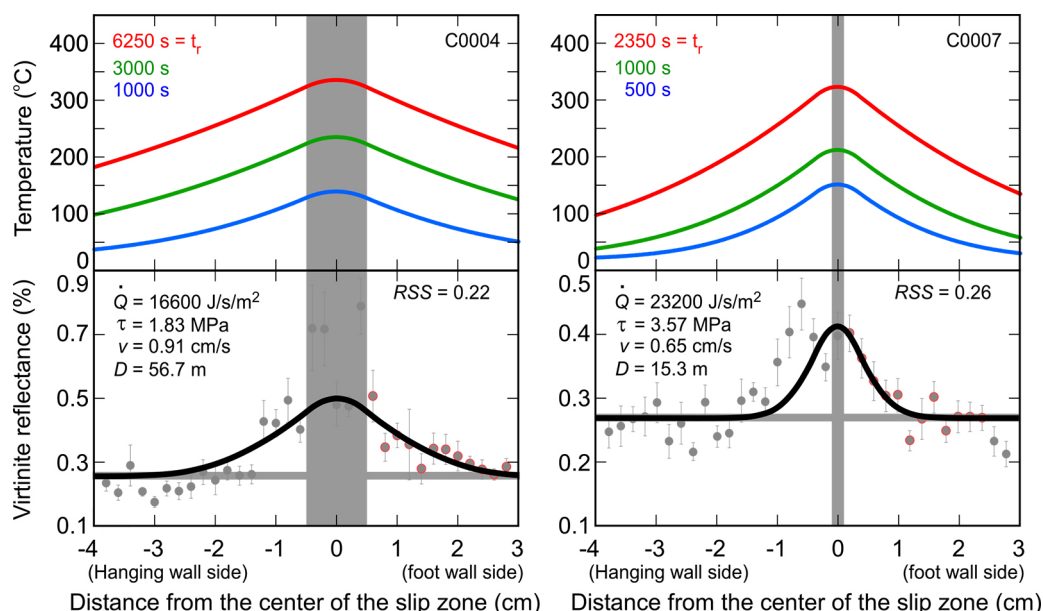


図 16 南海断層掘削コア試料の摩擦熱の痕跡と摩擦発熱，平均すべり速度 (v)，総すべり距離 (D) の推定結果 (Hamada *et al.*, 2015). 陰影の部分はスリップゾーンを示す。

Fig. 16 Estimation results of temperature, slip velocity (v), and slip distance (D) (Hamada *et al.*, 2015). Measured vitrinite reflectance (points in the lower column) are fitted by the method developed with the most appropriate parameters (black line). The shaded area represents the slip zone. Our calculation shows that slow and large slips can cause high values of vitrinite reflectance in the vicinity of the slip zone.

れたはずである。これらを実証するため，IODP 第 343 次研究航海は東北地震時の断層すべりがもっとも大きい海域で掘削船「ちきゅう」によるプレート境界断層掘削 JFAST を行った (Mori *et al.*, 2012; Chester *et al.*, 2012)。海溝付近の震源断層浅部がなぜ 50 m も大きくすべったかを解明するため，多方面からの総合的な取り組みがなされた。

前述のように，JFAST において，プレート境界断層に近い上盤内の掘削時（地震後）の原位置応力測定結果と，構造解析から推定された地震前の応力状態を比較すると，東北地震の時に，日本海溝付近のプレート境界断層の浅い部分は，蓄積されていた応力とエネルギーを解放したことで，大きな断層すべりを引き起こす一要因となり，津波の巨大化につながったと考えられる。このような応力の変化は，従来地震性すべりが発生しないとされていた海溝付近の断層が能動的にすべった

ことを示唆し，断層の高速すべり弱化作業仮説と合致した (Lin *et al.*, 2013)。

JFAST では，東北地震が発生してから約 16 か月後に孔内観測の温度計アレーを設置した。その後，約 9 か月間の温度観測を行った結果，海底下深度 820 m 付近のプレート境界断層では，周囲より 0.31℃ の高い温度異常が特定された (Fulton *et al.*, 2013)。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，掘削コア試料を用いた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，海底下深度 820 m 付近のプレート境界断層は近年地震性すべりを起こしたことが，すなわち，東北地震時にすべったことが確認された。この摩擦熱による温度異常から，断層の動の見かけ摩擦係数は 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すべりやすかった

ことが判明した。断層帯のコア試料の分析結果から、プレート境界断層を構成する物質は、太平洋プレート上に堆積した遠洋性粘土であり、約 78 % のスメクタイトを含んでいる (Ujiie *et al.*, 2013; Kameda *et al.*, 2015)。この断層物質の高速摩擦実験を行った結果、不透水条件で実験的に求められた断層物質の摩擦係数は約 0.1 であることがわかった (Ujiie *et al.*, 2013)。前述の DSDP の Site 436 からの試料も同様に非常に低い摩擦係数 (高速摩擦抵抗の速度弱化) を示した (Sawai *et al.*, 2014)。また、断層の高速すべり時の摩擦熱により間隙流体は体積膨張して、スメクタイトを多量に含む断層の透水係数が低いために、排水 (周囲へ移動) できないので、間隙流体の圧力の急激な上昇を招いたと考えられる (Tanikawa *et al.*, 2013)。すなわち、前述の熱圧化 (Thermal Pressurization) という現象が発生して、すべりやすい物質から構成された断層はさらにすべりやすくなったとの結論に至った。よって、多量のスメクタイト物質を含むことと、熱圧化現象によるすべりやすいプレート境界の浅部断層は、深部から伝わってきた断層すべりを止めることができなかったうえ、蓄積されていた応力とエネルギーが放出されることによって、その断層すべりは促進され、海溝付近では 50 m 以上にも及んだと考えられる。

VI. おわりに

本稿では、主として IODP による沈み込み帯等の科学掘削プロジェクトにおいて、地震断層およびその周囲の応力状態・物性・すべりパラメータの評価方法、研究事例をレビューするとともに、代表的な例として 2011 年に発生した東北地震の震源断層掘削調査 JFAST における断層すべり挙動解明を目指した総合的な取り組みを紹介した。今後、地震断層に関連した科学掘削が行われる場合、1 つの現象または側面からの研究だけではなく、地震断層の動的すべり挙動が多くの要素ならびにそれらの総合作用によって決定されるため、総合的な研究が必要不可欠であると考えられる。

謝 辞

本稿で紹介した諸研究の多くは、国際深海科学掘削計画 (IODP) により実施された研究航海のコア試料や検層データを用いて実施されたものである。木下正高氏ともう 1 名の匿名査読者より丁寧な査読と有益で建設的なコメントをいただき、本稿の質の向上に大きく寄与した。また、本研究の一部は日本学術振興会 (JSPS) の科学研究費補助金 25287134, 16H04065 の助成を受けたものである。ここに深く感謝の意を申し上げる。

文 献

- Argus, D.F., Gordon, R.G. and DeMets, C. (2011): Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q11001, doi:10.1029/2011GC003751.
- Byrne, T., Lin, W., Tsutsumi, A., Yamamoto, Y., Lewis, J., Kanagawa, K., Kitamura, Y., Yamaguchi, A. and Kimura, G. (2009): Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone. *Geophysical Research Letters*, **36**, L01305, doi: 10.1029/2009GL040749.
- Cardwell, R., Chinn, D.S., Moore, G.F. and Turcotte, D.L. (1978): Frictional heating on a fault zone with finite thickness. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **52**, 525–530.
- Chang, C., McNeill, L.C., Moore, J.C., Lin, W., Conin, M. and Yamada, Y. (2010): In situ stress state in the Nankai accretionary wedge estimated from borehole wall failures. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q0AD04, doi:10.1029/2010GC003261.
- Chester, F.M., Mori, J.J., Toczko, S., Eguchi, N. and the Expedition 343/343T Scientists (2012): *Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). IODP Preliminary Report. 343/343T*, doi:10.2204/iodp.pr.343343T.2012.
- Conin, M., Bourlange, S., Henry, P., Boiselet, A. and Gaillot, P. (2014): Distribution of resistive and conductive structures in Nankai accretionary wedge reveals contrasting stress paths. *Tectonophysics*, **611**, 181–191.
- Cui, W., Lin, W., Wang, L., Gao, L., Huang, Y., Wang, W., Sun, D., Li, Z., Zhou, J., Qian, H., Peng, H., Xia, K. and Li, K. (2014): Determination of three-dimensional in situ stresses by anelastic strain recovery in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, **619–620**, 123–132, doi:10.1016/j.tecto.2013.09.013.
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi K., Ferri, F., Cocco, M. and T. Shimamoto (2011): Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, **471**, 494–498.
- Expedition 343/343T Scientists (2013): Site C0019.

- in *Proceeding of the IODP* edited by Chester, F., Mori, J., Eguchi, N., Toczko, S. and the Expedition 343 Scientists, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., Tokyo, **343/343T**, doi:10.2204/iodp.proc.343343T.103.2013.
- Faulkner, D.R., Jackson, C., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C. and Withjack, M.O. (2010): A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, **32**, 1557–1575, doi:10.1016/j.jsg.2010.06.009.
- Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N. and Kaneda, Y. (2011): The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement Reaching the trench axis. *Science*, **334**, 1240, doi:10.1126/science.1211554.
- Fulton, P.M., Brodsky, E.E., Kano, Y., Mori, J., Chester, F., Ishikawa, T., Harris, R.N., Lin, W., Eguchi, N., Toczko, S., Expedition 343, 343T and KR13-08 Scientists (2013): Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements. *Science*, **342**, 1214–1217, doi:10.1126/science.1243641.
- Hamada, Y., Hirono, T., Ikehara, M., Soh, W. and Song, S.-R. (2009): Estimated dynamic shear stress and frictional heat during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: A chemical kinetics approach with isothermal heating experiments. *Tectonophysics*, **469**, 73–84, doi:10.1016/j.tecto.2009.01.036.
- Hamada, Y., Hirono, T. and Ishikawa, T. (2011): Coseismic frictional heating and fluid-rock interaction in a slip zone within a shallow accretionary prism and implications for earthquake slip behavior. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B01302, doi:10.1029/2010JB007730.
- Hamada, Y., Sakaguchi, A., Tanikawa, W., Yamaguchi, A., Kameda, J. and Kimura, G. (2015): Estimation of slip rate and fault displacement during shallow earthquake rupture in the Nankai subduction zone. *Earth, Planets and Space*, **67**, 39.
- Hirono, T., Yokoyama, T., Hamada, Y., Tanikawa, W., Mishima, T., Ikehara, M., Famin, V., Tanimizu, M., Lin, W., Soh, W. and Song, S.-R. (2007): A chemical kinetic approach to estimate dynamic shear stress during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake. *Geophysical Research Letters*, **34**, L19308, doi:10.1029/2007GL030743.
- Hirose, T. and Bystricky, M. (2007): Extreme dynamic weakening of faults during dehydration by coseismic shear heating. *Geophysical Research Letters*, **34**, L14311, doi:10.1029/2007GL030049.
- Hirose, T., Tanikawa, W., Sakaguchi, M., Tadai, O., Lin, W. and Scientific Party (2008): High-velocity frictional behavior of clay-rich sediments from IODP Expedition 316, Nankai Trough, offshore Japan. *American Geophysical Union 2008 Fall Meeting*, San Francisco, T31A-1980.
- Hot Disk (2007): *Instruction Manual, Hot Disk Thermal Constants Analyser — Software Version 5.9* —. 42p.
- Housen, B.A., Tobin, H.J., Labaume, P., Leitch, E.C., Maltman, A.J. and Ocean Drilling Program Leg 156 Shipboard Science Party (1996): Strain decoupling across the decollement of the Barbados accretionary prism. *Geology*, **24**, 127–130.
- Ide, S., Baltay, A. and Beroza, G.C. (2011): Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *Science*, **332**, 1426–1429.
- Ikari, M.J., Marone, C., Saffer, D.M. and Kopf, A.J. (2013): Slip weakening as a mechanism for slow earthquakes. *Nature Geoscience*, **6**, 468–472, doi:10.1038/ngeo1818.
- Ikari, M.J., Ito, Y., Ujiie, K. and Kopf, A.J. (2015): Spectrum of slip behaviour in Tohoku fault zone samples at plate tectonic slip rates. *Nature Geoscience*, **8**, 870–874, doi:10.1038/ngeo2547.
- Ikehara, M., Hirono, T., Tadai, O., Sakaguchi, M., Kikuta, H., Fukuchi, T., Mishima, T., Nakamura, N., Aoike, N., Fujimoto, K., Hashimoto, Y., Ishikawa, T., Ito, H., Kinoshita, M., Lin, W., Masuda, K., Matsubara, T., Matsubayashi, O., Mizoguchi, K., Murayama, M., Otsuki, K., Sone, H., Takahashi, M., Tanikawa, W., Tanimizu, M., Soh, W. and Song, S. (2007): Low total and inorganic carbon contents within the Chelungpu fault. *Geochemical Journal*, **41**, 391–396.
- Ishikawa, T., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Matsuoka, J., Tadai, O., Sakaguchi, M., Hirono, T., Mishima, T., Tanikawa, W., Lin, W., Kikuta, H., Soh, W. and Song, S.-R. (2008): Coseismic fluid–rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault. *Nature Geoscience*, **1**, 679–683, doi:10.1038/ngeo308.
- Ito, T., Funato, A., Lin, W., Doan, M.-L., Boutt, D.F., Kano, Y., Ito, H., Saffer, D., McNeill, L.C., Byrne, T. and Moe, K.T. (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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, doi:10.1002/jgrb.50086.
- Jones, G., Fisher, G.J. and Knipe, R.J. eds. (1998): *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs. Special Publication Geological Society London*, **147**.
- Kameda, J., Yamamoto, Y., Hamada, Y., Fujimoto, K. and Kimura, G. (2013): Progress of illitization along an imbricate frontal thrust at shallow depths in an accretionary prism. *Tectonophysics*, **600**, 41–51, doi:10.1016/j.tecto.2013.04.024.
- Kameda, J., Shimizu, M., Ujiie, K., Hirose, T., Ikari, M., Mori, J., Oohashi, K. and Kimura, G. (2015): Pelagic smectite as an important factor in tsunami-

- genic slip along the Japan Trench. *Geology*, **43**, 155–158.
- Kimura, G., Hina, S., Hamada, Y., Kameda, J., Tsuji, T., Kinoshita, M. and Yamaguchi, A. (2012): Run-away 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 and Planetary Science Letters*, **339–340**, 32–45.
- Kinoshita, M. and Tobin, H. (2013): Interseismic stress accumulation at the locked zone of Nankai Trough seismogenic fault off Kii Peninsula. *Tectonophysics*, **600**, 153–164, doi:10.1016/j.tecto.2013.03.015.
- Kinoshita, M., Kimura, G. and Saito, S. (2014): Chapter 4.4.2 Seismogenic Processes revealed through The Nankai Trough Seismogenic Zone Experiments: Core, log, geophysics and observatory measurements. in *Developments in Marine Geology Vol.7: Earth and Life Processes Discovered from Subseafloor Environment* edited by Stein, R., Blackman, D.K., Inagaki, F. and Larsen, H.-C., Elsevier, 641–670.
- Lee, H., Chang, C., Ong, S.H. and Song, I. (2013): Effect of anisotropic borehole wall failures when estimating in situ stresses: A case study in the Nankai accretionary wedge. *Marine and Petroleum Geology*, **48**, 411–422, doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.09.004.
- Lewis, J., Byrne, T. and Kanagawa, K. (2013): Evidence for mechanical decoupling of the upper plate at the Nankai subduction zone: Constraints from core-scale faults at NantTroSEIZE Sites C0001 and C0002. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **14**, 620–633, doi:10.1029/2012GC004406.
- Lin, W., Kwasniewski, M., Imamura, T. and Matsuki, K. (2006): Determination of three-dimensional in-situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth. *Tectonophysics*, **426**, 221–238, doi:10.1016/j.tecto.2006.02.019.
- Lin, W., Yeh, E.C., Ito, H., Hirono, T., Soh, W., Wang, C.Y., Ma, K.F., Hung, J.H. and Song, S.R. (2007): 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. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, **18**, 379–393, doi:10.3319/TAO.2007.18.2.379 (TCDP).
- Lin, W., Yamamoto, K., Ito, H., Masago, H. and Kawamura, Y. (2008): 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*, **6**, 43–47, doi:10.2204/iodp.sd.6.06.2008.
- Lin, W. and 33 others (2010): Present-day principal horizontal stress orientations in the Kumano fore-arc basin of the southwest Japan subduction zone determined from IODP NanTroSEIZE drilling Site C0009. *Geophysical Research Letters*, **37**, L13303, doi:10.1029/2010GL043158.
- Lin, W., Saito, S., Sanada, Y., Yamamoto, Y., Hashimoto, Y. and Kanamatsu, T. (2011a): Principal horizontal stress orientations prior to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area. *Geophysical Research Letters*, **38**, L00G10, doi:10.1029/2011GL049097.
- Lin, W., Tada, O., Hirose, T., Tanikawa, W., Takahashi, M., Mukoyoshi, H. and Kinoshita, M. (2011b): Thermal conductivities under high pressure in core samples from IODP NanTroSEIZE drilling site C0001. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q0AD14, doi:10.1029/2010GC003449.
- Lin, W., Conin, M., Moore, J.C., Chester, F.M., Nakamura, Y., Mori, J.J., Anderson, L., Brodsky, E.E., Eguchi, H. and 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.
- Lin, W., Fulton, P.M., Harris, R.N., Tada, O., Matsuhashi, O., Tanikawa, W. and Kinoshita, M. (2014): Thermal conductivities, thermal diffusivities, and volumetric heat capacities of core samples obtained from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). *Earth, Planets and Space*, **66**, 48, doi:10.1186/1880-5981-66-48.
- Lin, W., Byrne, T., Kinoshita, M., McNeill, L., Chang, C., Lewis, J., Yamamoto, Y., Saffer, D., Moore, J.C., Wu, H.-Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Conin, M., Saito, S., Ito, T., Tobin, H., Kimura, G., Kanagawa, K., Ashi, J., Underwood, M. and Kanamatsu, T. (2016): Distribution of stress state in the Nankai subduction zone, southwest Japan and a comparison with Japan Trench. *Tectonophysics*, **692**, 120–130, doi:10.1016/j.tecto.2015.05.008.
- 松本浩二 (1992): 岩石の非弾性ひずみ回復を用いた三次元地圧計測法の理論的検討. 資源と素材, **108**, 41–45. [Matsuki, K. (1992): Theoretical examination of the method for measuring three-dimensional in-situ stress with anelastic strain recovery of rock. *Shigen-to-Sozai*, **108**, 41–45. (in Japanese with English abstract)]
- Matsuki, K. and Takeuchi, K. (1993): Three-dimensional in-situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **30**, 1019–1022.
- McKenzie, D. and Brune, J.N. (1972): Melting on fault planes during large earthquakes. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **29**, 65–78, doi:10.1111/j.1365-246X.1972.tb06152.x.
- Mizoguchi, K., Hirose, T., Shimamoto, T. and Fukuyama, E. (2007): Reconstruction of seismic faulting by high-velocity friction experiments: An example

- of the 1995 Kobe earthquake. *Geophysical Research Letters*, **34**, L01308, doi:10.1029/2006GL027931.
- Moore, J.C., Chang, C., McNeill, L.C., Moe, T.K., Yamada, Y. and Huftile, G. (2011): Growth of borehole breakouts with time after drilling: implications for state of stress, NanTroSEIZE transect, SW Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q04D09, doi:10.1029/2010GC003417.
- Mori, J.J., Chester, F.M., Eguchi, N. and Toczko, S. (2012): *Japan Trench Fast Earthquake Drilling Project (JFAST)*. *IODP Scientific Prospectus*, **343**, doi:10.2204/iodp.sp.343.2012.
- Nagano, Y., Lin, W. and Yamamoto, K. (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*, **66**, 418–424, doi:10.1016/j.marpetgeo.2015.02.027.
- Oohashi, K., Hirose, T., Takahashi, M. and Tanikawa, W. (2015): Dynamic weakening of smectite-bearing faults at intermediate velocities: Implications for subduction zone earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **120**, 1572–1586, doi:10.1002/2015JB011881.
- Saffer, D.M., Flemings, P.B., Boutt, D., Doan, M.-L., Ito, T., McNeill, L., Byrne, T., Conin, M., Lin, W., Kano, Y., Araki, E., Eguchi, N. and Toczko, S. (2013): In situ stress and pore pressure in the Kumano Forearc Basin, offshore SW Honshu from downhole measurements during riser drilling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **14**, 1454–1470, doi:10.1002/ggge.20051.
- Sakaguchi, A., Chester, F., Curewitz, D., Fabbri, O., Goldsby, D., Kimura, G., Li, C.F., Masaki, Y., Sreaton, E.J., Tsutsumi, A., Ujiie, K. and Yamaguchi, A. (2011): Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTroSEIZE cores. *Geology*, **39**, 395–399, doi:10.1130/G31642.1.
- Sawai, M., Hirose, T. and Kameda, J. (2014): Frictional properties of incoming pelagic sediments at the Japan Trench: Implications for large slip at a shallow plate boundary during the 2011 Tohoku earthquake. *Earth, Planets and Space*, **66**, 65, doi:10.1186/1880-5981-66-65.
- Sibson, R.H. (1975): Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **43**, 775–794.
- 嶋本利彦・堤 昭人 (1994): 新しい回転式高速せん断摩擦試験機: その基本設計と研究目的. 構造地質, **39**, 65–78. [Shimamoto, T. and Tsutsumi, A. (1994): A new rotary-shear high-speed frictional testing machine: Its basic design and scope of research. *Japanese Journal of Structural Geology*, **39**, 65–78. (in Japanese with English abstract)]
- Song, I., Saffer, D.M. and Flemings, P.B. (2011): Mechanical characterization of slope sediments: Constraints on in situ stress and pore pressure near the tip of the megasplay fault in the Nankai accretionary complex. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q0AD17, doi:10.1029/2011GC003556.
- Suzuki, N., Matsubayashi, H. and Waples, D.W. (1993): A simpler kinetic model of vitrinite reflectance. *AAPG Bulletin*, **77**, 1502–1508.
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.K. (1990): Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **74**, 1559–1570.
- Tanikawa, W., Sakaguchi, M., Tada, O. and Hirose, T. (2010): Influence of fault slip rate on shear-induced permeability. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2009JB007013.
- Tanikawa, W., Mukoyoshi, H., Tada, O., Hirose, T., Tsutsumi, A. and Lin, W. (2012): Velocity dependence of shear-induced permeability associated with frictional behavior in fault zones of the Nankai subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B05405, doi:10.1029/2011JB008956.
- Tanikawa, W., Hirose, T., Mukoyoshi, H., Tada, O. and Lin, W. (2013): 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*, **382**, 150–160, doi:10.1016/j.epsl.2013.08.052.
- Tanikawa, W., Mukoyoshi, H., Lin, W., Hirose, T. and Tsutsumi, A. (2014a): Pressure dependence of fluid transport properties of shallow fault systems in the Nankai subduction zone. *Earth, Planets and Space*, **66**, 90, doi:10.1186/1880-5981-66-90.
- Tanikawa, W., Tada, O. and Mukoyoshi, H. (2014b): Permeability changes in simulated granite faults during and after frictional sliding. *Geofluids*, doi:10.1111/gfl.12091.
- Tanikawa, W., Ishikawa, T., Honda, G., Hirono, T. and Tada, O. (2015): Trace element anomaly in fault rock induced by coseismic hydrothermal reactions reproduced in laboratory friction experiments. *Geophysical Research Letters*, **42**, doi:10.1002/2015GL063195.
- Tanikawa, W., Tada, O., Morita, S., Lin, W., Yamada, Y., Sanada, Y., Moe, K., Kubo, Y. and Inagaki, F. (2016): Thermal properties and thermal structure in the deep-water coalbed basin off the Shimokita Peninsula, Japan. *Marine and Petroleum Geology*, **73**, 445–461, doi:10.1016/j.marpetgeo.2016.03.006.
- Teufel, L.W. (1983): Determination of in-situ stress from anelastic strain recovery measurements of oriented core. *SPE Paper 11649, SPE/DOE Symposium on Low Permeability*, Denver, CO, 421–430.
- Tobin, H.J., Henry, P., Vannucchi, P. and Sreaton, E. (2014): Chapter 4.4.1 Subduction zones: Structure and deformation history. in *Developments in Marine Geology Vol.7: Earth and Life Processes Discovered*

- from *Subseafloor Environment* edited by Stein, R., Blackman, D.K., Inagaki, F. and Larsen, H-C., Elsevier, 599–640.
- Tsuji, T., Hino, R., Sanada, Y., Yamamoto, K., Park, J., No, T., Araki, E., Bangs, N., von Huene, R., Moore, G. and Kinoshita, M. (2011): In situ stress state from walk around VSP anisotropy in the Kumano basin southeast of the Kii Peninsula, Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q0AD19, doi:10.1029/2011GC003583.
- Tsuji, T., Kamei, R. and Pratt, R.G. (2014): Pore pressure distribution of a mega-splay fault system in the Nankai Trough subduction zone: Insight into up-dip extent of the seismogenic zone. *Earth and Planetary Science Letters*, **396**, 165–178, doi:10.1016/j.epsl.2014.04.011.
- 堤 昭人 (2009): 高速すべり時における岩石の摩擦強度弱化的機構: 摩擦熔融を伴わない場合について. 地震, **61**, 527–533. [Tsutsumi, A. (2009): Weakening mechanisms of rocks at fast slip rates: Example from the cases without frictional melting. *Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.*, **61**, 527–533. (in Japanese with English abstract)]
- Tsutsumi, A., Fabbri, O., Karpoff, A.M., Ujiie, K. and Tsujimoto, A. (2011): Friction velocity dependence of clay-rich fault material along a megasplay fault in the Nankai subduction zone at intermediate to high velocities. *Geophysical Research Letters*, **38**, L19301, doi:10.1029/2011GL049314.
- Ujiie, K. and Tsutsumi, A. (2010): High-velocity frictional properties of clay-rich fault gouge in a megasplay fault zone, Nankai subduction zone. *Geophysical Research Letters*, **37**, L24310, doi:10.1029/2010GL046002.
- Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J.J., Kameda, J., Brodsky, E.E., Chester, F.M., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists (2013): Low coseismic shear stress on the Tohoku-oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science*, **342**, 1211–1214, doi:10.1126/science.1243485.
- Voight, B. (1968): Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores. *Felsmechanik und Ingenieurgeologie*, **6**, 201–215.
- Wu, H.-Y., Kinoshita, M. and Sanada, Y. (2012): Stress state estimation by geophysical logs in NanTroSEIZE Expedition 319-Site C0009, Kumano Basin, southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, **39**, L18303, doi:10.1029/2012GL053086.
- Wu H.-Y., Chan, C.-H., Kinoshita, M. and Saito, S. (2013): Stress field observation and modeling from the NanTroSEIZE Scientific Drillings in the Nankai Trough system, SW Japan. *Tectonophysics*, **600**, 99–107, doi:10.1016/j.tecto.2013.04.009.
- Wu, H.-Y., Saito, S. and Kinoshita, M. (2015): Stress state and its anomaly observations in the vicinity of a fault in NanTroSEIZE Expedition 322. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **16**, doi:10.1002/2015GC006072.
- Yamada, Y. and Shibamura, J. (2015): Small-scale stress fluctuations in borehole breakouts and their implication in identifying potential active faults around the seismogenic megasplay fault, Nankai Trough, SW Japan. *Earth, Planets and Space*, **67**, 17, doi:10.1186/s40623-014-0176-9.
- Yamaguchi, A., Sakaguchi, A., Sakamoto, T., Iijima, K., Kameda, J., Kimura, G., Ujiie, K., Chester, F.M., Fabbri, O., Goldsby, D., Tsutsumi, A., Li, C.F. and Curewitz, D. (2011): Progressive illitization in fault gouge caused by seismic slip propagation along a megasplay fault in the Nankai Trough. *Geology*, doi:10.1130/G32038.1.
- Yamamoto, Yuzuru, Lin, W., Oda, H., Byrne, T. and Yamamoto, Y. (2013): Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the basement basalt and overlying sediments. *Tectonophysics*, **600**, 91–98, doi:10.1016/j.tecto.2013.01.028.
- Zoback, M.D. (2007): *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, New York, doi:10.1017/CBO9780511586477.

* Title etc. translated by W.L.