



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

南海トラフ地震発生帯 掘削の成果と今後

木下正高

**Nankai Trough Seismogenic Zone
Experiments -Achievements and Future**

Masataka Kinoshita

きのした まさたか：海洋研究開発機構高知コア研究所

南海トラフ地震発生帯掘削 (NanTroSEIZE) は 2007 年 9 月に開始されてから、6 年が経過した。13 地点で掘削、これまで延べ 170 名超の研究者が「ちきゅう」に乗船した。4 ノットを超える黒潮下でのライザー掘削、東北地震による破損など、様々な困難を乗り越え海底下 7km の断層固着域に向けて掘削を進めている。

1. はじめに

M8 級の巨大地震が 100 – 200 年間隔で発生している南海トラフは、フィリピン海プレートが西南日本弧の下に沈み込むプレート境界である。プレート境界をはさんで、両プレートが押し合っている状態であるが、境界をなす断層面の一部が固着しているため、その周囲には特に歪が集中する。固着した部分が「破壊」して歪が解消され、マグニチュード 8 を超える巨大地震が発生する。人間とその財産に甚大な被害を及ぼす海溝型巨大地震・津波がいかに準備され、いかに開始して伝搬し、いかに停止するかを理解するため、これまで様々な観測や分析、あるいは計算機シミュレーションが行われてきた。

しかし、地震断層とその近傍での歪エネルギーの蓄積と、その結果としての破壊は、きわめて非線形な現象である。その動的描像を得るためには断層、とくに固着域に到達して、その構造を知り、破壊条件 (摩擦係数や間隙水圧・上載圧) を求めるとともに、その場に働く歪 (応力) を正確に知ることが必要である。

そのような認識の下、2003 年に開始された IODP (統合国際深海掘削計画) の枠組みの下、NanTroSEIZE (ナントロサイズ; 南海トラフ地震発生帯掘削研究) プロジェクトが開始された。掘削による地震断層からのサンプルリターンと、断層近傍の物性 (密度・間隙率・地震波速度など) の現場計測を行う一方、断層付近での地殻変動・地震活動・間隙水圧など、固着や地震発生機構に重要な影響を与える物理量の長期モニタリングを行うことが目的である。最終目標地点は、紀伊半島沖合 100km、水深 2000m、海底から 7000m 下の、

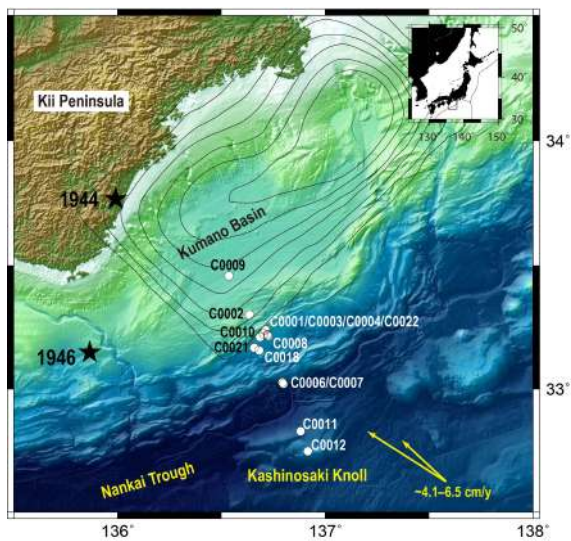


図1 南海トラフ地震発生帯掘削地点。コンターは1944年東南海地震時の断層滑り域。

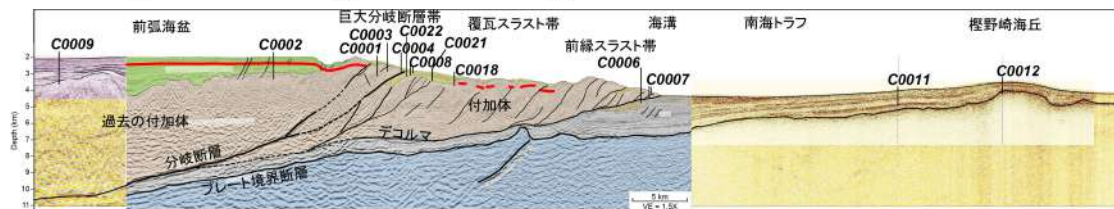


図2 南海トラフ地震発生帯掘削地点 (C0001 ~ C0022)。地震探査断面はMoore *et al.* (2009) や航海報告書から合成した。

東南海地震の震源断層固着域である(図1, 図2)。

海洋研究開発機構が所有する地球深部探査船「ちきゅう」により、2007年以來15か国から延べ170名を超える研究者が乗船して、2012年までに13サイトで掘削が行われた。うち2サイトはライザーを用いた掘削孔であり、これまでの最大掘削深度は海底下2005mである。特に、浅部断層2か所を貫通してコア採取や計測が行われていることは、これまでの大きな達成である。

一方、2013年10月からは、IODPの枠組みが大きく変更される。その中でNanTroSEIZEをどのように継続させるのか、改めて検討することも必要である。

2. 夜明け前—IODP-ISPでの地震発生研究の位置づけと提案作成

1987年にストラスプールで開催された、深海

掘削計画(ODP)の科学計画を議論する会議「COSOD II」では、米国の掘削船JR号を使って推進すべき科学テーマとして「地震・断層」はまだ存在せず、付加体先端部の発達様式を構造地質学的・水理学的に議論している段階であった。その後1996年に発行された「ODP Long Range Plan」では、地球内部ダイナミクス研究の一環として地震過程がテーマとして挙げられた。「デコルマ等浅部活断層の地震探査イメージが明瞭に得られてきたことを踏まえ、沈み込み帯の掘削により地震発生断層の性質や、地震活動の性質を明らかにする」と記述されている。

大水深・大深度での掘削による科学の発展のため、日本でライザー掘削船を建造すべしという機運が1990年代以降徐々に高まってきた。1997年には日米共催で海洋ライザー掘削に関する国際会議(CONCORD)が開催されたが、その中では、

ライザー掘削で推進すべきテーマとして「沈み込み帯地震のダイナミクス」が明示され、海面下約10 kmにある地震断層固着域への到達が目標として掲げられた。そして1999年、科学技術庁(当時)はようやく「ちきゅう」建造の許諾を行った(ちきゅう史編集委員会「ちきゅう」, 2009)。

CONCORD 会議の提言を受けて、海溝型地震や付加体に関する地震学・地質学・岩石力学の専門家が世界から集結し、東京・コロラド・スノーバードでのワークショップを通じて、掘削提案の作成を開始した。複数の掘削孔を何年もかけて掘削することが必要との認識から、単独の掘削提案でなく、全体の概要提案と、複数の個別掘削提案からなる、複合掘削プロジェクト(CDP = Complex Drilling Project)を構築することとなった。その途中、2001年には、IODPの初期科学計画(Initial Science Plan = ISP)が提示され、その中に「地震発生帯」が重点推進項目として掲げられた。

NanTroSEIZEの目的は、M8級の巨大地震が起る断層の固着の実態を解明するために、南海トラフ域プレート境界深部の巨大地震発生帯及びその周辺を掘削して、岩石を採取し、現場の状態(温度・圧力・含水率・歪・地震活動など)を計測することである(図1)。CDP提案(掘削提案603-CDP)の主提案者は東京大学の木村学、および米ニューメキシコ工科大学(当時;現在はウイスコンシン大)のHarold Tobinである。CDP提案では以下の作業仮説を構築した(括弧内はそれぞれを検証するための主な手法を示す)：

- (1) 断層が固着という性質を持つかどうかは、温度圧力条件や物質の変化が支配する(様々な深度での掘削で試料を採取して分析する)
- (2) 沈み込み帯の巨大断層は弱く、周囲に比べて小さいせん断応力ですべりが生じる(試料の物性を調べるための摩擦実験等、現場圧力を調べるための歪計測)
- (3) 巨大地震発生帯では、プレート運動によるずれは主に地震活動による摩擦滑りによって解消される(固着が100%に近い)(歪観

測、層序学的考察)

- (4) 断層面上の物理化学特性や状態は、地震サイクルの中で時間とともに変化している(掘削孔内の長期モニタリング、地質的考察)
- (5) プレート境界から分岐する巨大逆断層は、主断層とともに巨大地震活動で滑りを生じ、津波を発生する原因をなす(試料採取・計測)

掘削サイトとしては、「ちきゅう」によるライザー掘削で、断層固着域に到達しうる場所、すなわち水深が2500 mよりも浅く、ドリルパイプ長さが10,000 m以内という地点を、世界の地震発生帯から探索した結果、南海トラフ上の東南海地震の震源域(熊野灘沖)が選ばれた。図2に示すように、以下の場所で掘削を実施することを提案した：

掘削提案603A：地震発生断層物質の比較研究のため、沈み込む前の堆積物を採取する。このため南海トラフ海溝軸よりも海側の四国海盆堆積層、および、海溝軸の陸側を掘削する(主提案者：米ミズーリ大のMike Underwood・東大海洋研の芦寿一郎)。

掘削提案603B：分岐断層の掘削のため、海底下1,000 m級から3,500 m級までの数箇所連続的に掘削する。また分岐断層の活動度解明のため、その上部である熊野海盆で掘削を行う(主提案者：木下正高・米スクリップス海洋研究所のKevin Brown・米ワイオミング大(当時)のDemian Saffer・フランスCNRS(当時)のPierre Henry)。

掘削提案603C：断層固着域(海底下約6 km)まで掘削し、固着断層試料を採取するとともに現場長期観測所を設置する(主提案者：JAMSTEC(当時)末広潔・Harold Tobin)。

掘削提案603D：沈み込む前の物質や物性に関する情報を得るために、四国海盆とデコルマ先端部に孔内観測所を設置する(提案者：米フロリダ大のElizabeth Screaton 他8名)。

これらの掘削提案書は、2004年までにIODP科学計画委員会(SPC)で上位にランクされた。これを受けて、同年に研究者とCDEX, IODP-MIメンバーがPMT(Project Management Team)を構築

し、ライザーを用いた大深度掘削と、ライザーレスによる浅部掘削を有効に組み合わせ、掘削を4段階に分けて実施する掘削計画が立案・計画された。

掘削提案の前提には、JAMSTEC (IFREE・CDEX) でそれまでに精力的に取得していた、2次元地震探査 (反射法および屈折法) 記録が重要な役割を果たした。加えて2006年には、日米共同で、掘削予定海域で3次元反射法地震探査が実施され、固着域の断層 (プレート境界断層、および地下深部の地震発生断層から分岐して、より高角で海底に達する巨大分岐断層) や、浅部断層群、BSR などが明瞭に描き出された (Moore *et al.*, 2007)。

3. 進捗状況

3-1. 第1ステージ (2007-2008)

地球深部探査船「ちきゅう」による最初のIODP ミッションとして、NanTroSEIZE の第一ステージの3航海 (第314, 315, 316航海) が、2007年9月から2008年2月までの約5か月間実施された。南海トラフ付加体先端部のプレート境界断層 (サイト C0006・C0007) から、地震断層から浅部に分岐して海底に達する断層面とその上盤 (C0001, C0003-C0005, C0008), そして固着域上盤の熊野海盆 (C0002) まで、地震発生帯上部を横断して8サイトで掘削を行った (図1・図2)。掘削最大深度はC0002で海底下1402m, 最大水深はC0007で4081mであった (Kinoshita *et al.*, 2009)。

第314航海 (共同首席: Tobin・木下) では、地震発生帯浅部の全体像把握のため、コア採取を全く行わずにC0001-C0006のうちC0005を除く5サイトで掘削同時検層 (LWD) のみを行った。続く第315航海 (共同首席: 芦・Lallemant (仏)) では、C0001・C0002でコア採取を行った。第316航海 (共同首席: 木村・Screaton (米)) では、C0006・C0007とC0004・C0008で、南海トラフのプレート境界断層、岩石の変形破壊過程とその広がり、断層帯の物性を包括的に調査することを目的としてコア採取などを行った。

本海域の付加体堆積物は、もともと砂泥互層で

あるため崩れやすいことに加えて、プレートの沈み込みにより歪が蓄積され、地層が破碎されていた。このため多くの地点で孔の一部が崩落し、ドリルパイプと孔壁の間に詰まって掘削がしばしば中断された。さらに4ノットを超える黒潮の潮流下という、厳しい環境下での掘削であった。

付加体先端部 (C0006・C0007)

南海トラフの付加体先端で886mまでの検層データと603mまでのコア試料を得た。C0007ではプレート境界断層を海底下400-438mで貫通し、角礫岩や断層ガウジが回収された。採取されたコアの一部は、断層のすべりによって100万年以上の地質年代の逆転を示したほか、断層の活動などによって生じた岩石の変形破壊作用を確認した。

分岐断層出口とその上盤 (C0001・C0003・C0004・C0008)

C0004では、巨大分岐断層の活動履歴や、津波を引き起こした過去の斜面崩壊についての情報を記録している地層を掘削し、表層の斜面堆積物を貫いて、巨大分岐断層の浅部で断層とその上下の地層の検層・コア採取に成功した (260-300m)。変形破壊の痕跡やプランクトン化石分析による地質年代の逆転が観察されたことから、このコアは、断層の複雑な変形破壊作用の履歴を記録していると考えられる。

C0001では1000mまでの検層データと458mまでのコアを採取した。上部220mは第四紀の斜面堆積物で正断層が卓越する一方、その下の付加体堆積物中には横ずれ・逆断層も多くみられる。また Moore *et al.* (2012) は、検層で得られた圧力値から、500m付近の破碎帯中の間隙水圧が静岩圧に達するような異常高圧になることを示した。

固着域上部の熊野海盆 (C0002)

C0002では、過去の付加体と考えられる変形堆積層の上に熊野前弧海盆の砂岩泥岩互層が堆積している。第314航海で1402mまでの検層データを得、第315航海では1057mまでのスポットコア

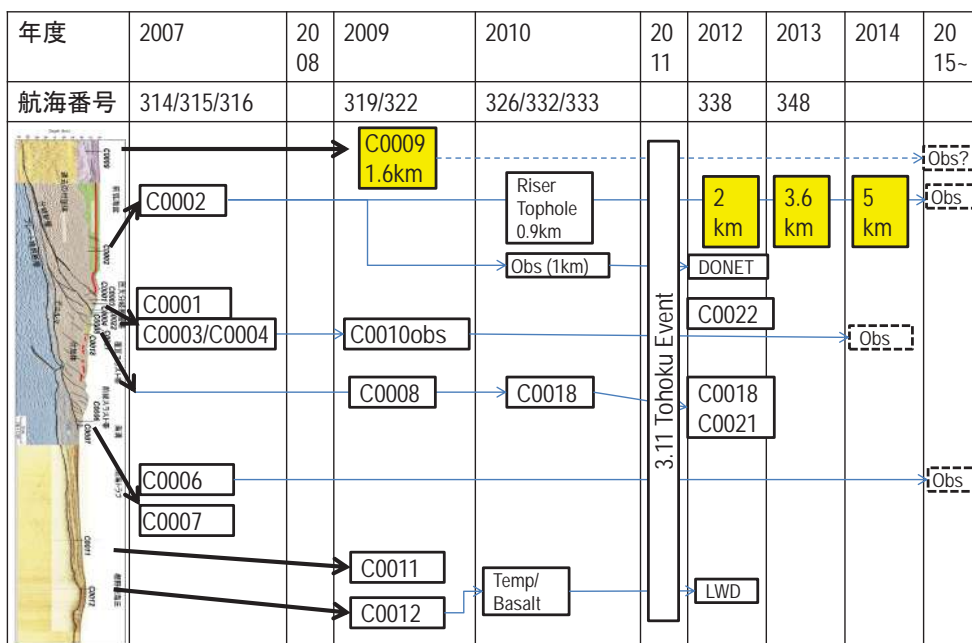


図3 南海トラフ地震発生帯掘削地点を年代順に並べたもの。黄色はライザー掘削，2014年以降は今後の予定。obs：孔内長期計測，LWD：掘削同時検層，DONET：熊野沖海底ケーブルネットワーク。

採取に成功した。微化石および古地磁気層序学的手法により地層年代が精度良く決定され、地震発生帯周辺の地質史が明らかにされつつある。また孔壁イメージにより、海底下220mから400mの区間にメタンハイドレートに富む地層群が、泥質堆積物に挟まれた砂層を充填するように濃集して存在していることが確認された。

3-2. 第2ステージ（2009）

第2ステージでは、プレート固着域中心部付近の上盤（C0009）へのライザー掘削が行われた（第319航海；2009年5月～8月，共同首席：JAMSTECの荒木英一郎，米コネチカット大Tim Byrne，英サザンプトン大Lisa McNeill，米ペンシルベニア州立大Demian Saffer）。コアのみでなく，カッティングスによる年代決定や層序学，泥水検層，孔内での間隙圧・応力計測や2船によるオフセット・ウオークアウェイ式垂直地震探査（VSP），分岐断層浅部（C0010）での自己記録式孔内長期温度・圧力計測（SmartPlug）の開始など，地震発生帯理

解のための様々な挑戦を行った（図3）。さらに9月に実施された掘削航海では，沈み込む前の物質と状態把握のために，四国海盆上での掘削（C0011,C0012）が実施された（第322航海；2009年9～10月，共同首席：Underwood・JAMSTEC斎藤実篤）（Saito *et al.*, 2009）。C0012では，四国海盆の堆積層だけでなく，その下の海洋地殻玄武岩の採取に成功した（海底下576m）。

3-3. 第3ステージ（2010～2012）

第2ステージでのライザー掘削の経験を踏まえて，黒潮下でのライザー掘削を可能にする技術開発が完了した。2010年には，断層固着域に到達するサイトをC0002に確定し，地震探査データの再解釈により分岐断層までの深度を海底下約5km，プレート境界断層までを約7kmと定めた。第326航海（2010年7～8月；共同首席：Tobin・木下）では，C0002でのライザー孔の基礎部分873mを掘削し，ケーシングパイプの設置および海底面に孔口装置（wellhead）を装着した。

そのほか、第332航海（2010年10–12月、共同首席：ブレーメン大学 Achim Kopf・JAMSTEC 荒木英一郎）では、C0002F ライザー予定孔から約100m離れた地点に、長期孔内観測装置が設置された（Kopf *et al.*, 2011）。熊野海盆底部から付加体最上部（海底下750–940m）にかけて、地震・地殻変動・温度・間隙水圧を観測するセンサーを設置した。また、2009年に分岐断層出口付近のC0010に設置したSmartPlugを回収し、採水機能を加えたGeniusPlugと交換した。回収されたSmartPlugには断層付近の圧力が記録されており、潮汐変動や津波などが検出された。

第333航海（2010年11月–2011年1月、共同首席：仏 Henry・JAMSTEC 金松敏也）では、四国海盆のC0011・C0012を再訪し、第322航海で得られたかった区間のコアを採取し、また両地点での現場温度・熱流量計測を実施した。さらに、NanTroSEIZEへの付随的な提案（738APL）として採択されたNanTroSLIDE（主提案者：ブレーメン大学 Michael Strasser）に基づく掘削が、分岐断層出口の海側斜面（C0018）にて行われ、地震等に起因する海底地すべり堆積物を300m強採取した。

南海掘削で浅部断層の挙動や状態が若干見えてきた矢先に、東北地方で巨大地震・津波が発生した。2011年3月11日に「ちきゅう」は八戸港で津波の被害を受け、左舷後方のスラストが脱落するダメージを受けた。このため同年に予定されていたライザー掘削航海は2012年に延期された（図3）。第338航海（2012年10月–2013年1月、共同首席米国ライス大学 Brandon Dugan, 千葉大学金川久一, 米国ハワイ大学 Greg Moore, Michael Strasser）では、2010年に基礎構築済の固着域掘削孔C0002Fでライザー掘削を開始し、3600mまで到達して最深部付近でコア採取予定であったが、掘削途中に急激な海況変化（爆弾低気圧）に遭遇してライザー管をの損傷したことにより、海底下2000mでC0002F孔のライザー掘削を中断した。

その後、ライザーレス掘削による調査（四国海盆C0012で海洋地殻内の検層、C0002ハイドレート層付近のコア採取、分岐断層出口付近C0022の

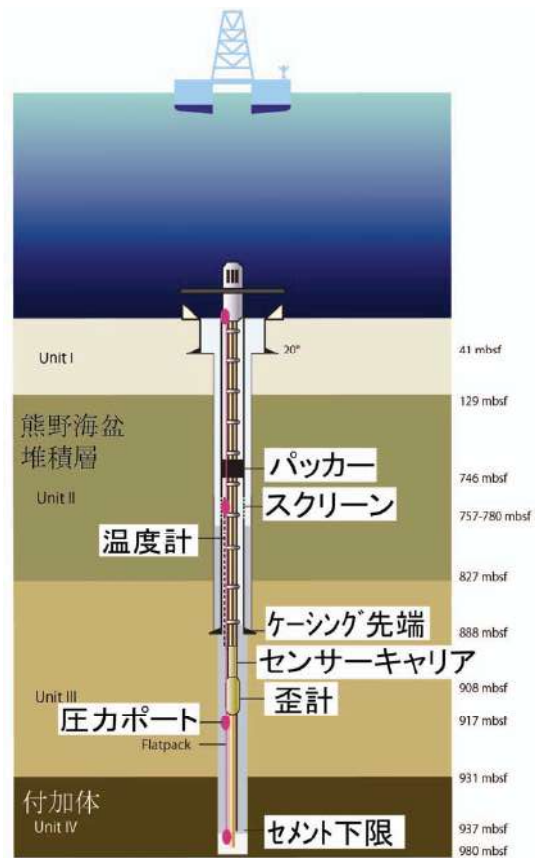


図4 C00002に設置された孔内長期観測装置の概念図。

コア採取等）を行った。一方2013年1月には、2010年にC0002（750m–900m）に設置された長期孔内観測装置が、同地点に展開された地震・津波観測監視システム（DONET；2011年より稼働）に接続し、リアルタイム観測が開始された。

2013年度はC0002F孔のライザー掘削を海底下3600mまで行い、翌年度の巨大分岐断層（約5km）への到達を目指す。またその合間に、浅部分岐断層（C0010孔）からのGeniusPlug回収と、ライザーレス長期孔内観測装置の設置を行う予定である。

4. 主な成果

掘削コア研究は現在も鋭意行われており、日々論文が出版されている状況である。そのすべてを

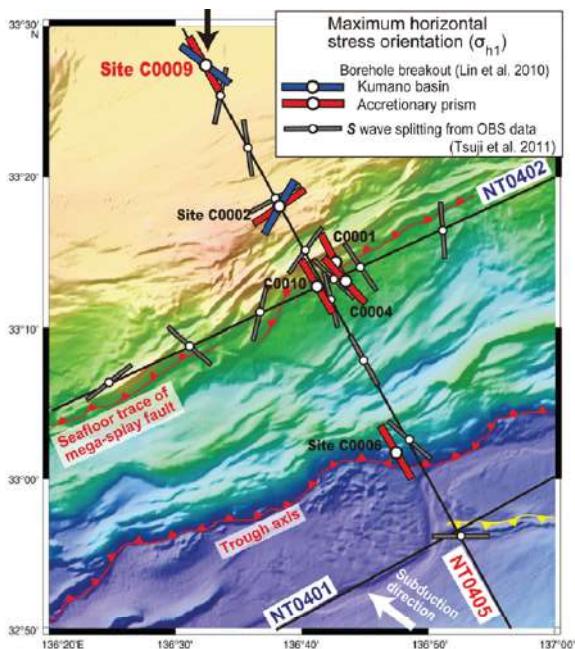


図5 熊野沖南海トラフ付加体浅部の最大圧縮応力の方向 (Tsuiji *et al.*, 2011).

概観することは不可能であり、可能な範囲で、地震断層に関する主な成果を紹介する。

4-1. 浅部応力場

孔内検層から得られる孔壁内部の電気伝導度イメージは現場応力場など重要な情報をもたらす。掘削は、ドリルパイプ先端のビット（切刃）が回転して行われるため、地層中の水平応力場が均質であれば孔の形は円形になる。一方プレート沈み込みなどにより地層が一方方向に圧縮されている場合には、掘削時に最大圧縮方向と直交する円周上2か所（180度離れた）が圧縮破壊を起こして孔径が広がるため、その方向の電気伝導度が相対的に大きくなってイメージ上に垂直の筋ができる。これをブレイクアウトと呼び、水平応力の方向を知る有力な手段である。これまでの航海ではほぼすべての孔でブレイクアウトが観測され、現在の水平最大圧縮応力の方向が明らかになった（図5）。

応力場はまた、コア試料の非弾性リバウンド解析からも推定され（Lin *et al.*, 2010; Byrne *et al.*, 2009）、最大主応力は多くの地点で垂直方向、つまり正断層の応力場であることが判明した。一方、

採取したコアに多数の小断層が認められ、X線CTスキャナーによる非破壊の3次元構造解析により、地層に記録された過去から現在に至る詳細な応力場や歪の履歴を捉えた。例えば Lewis *et al.* (2013) は C0001・C0002 のコアについて小断層解析を行い、海溝軸と直交方向に圧縮軸を持つ古い逆断層と、その後に形成された正断層の存在を明らかにした。また、帯磁率異方性（AMS）からデコルマ付近で水平圧縮の痕跡があることが示された（Kitamura *et al.*, 2010）。

また、エアガンから発射された音波が地中を伝搬する速度に異方性があることを利用して、水平最大応力場を推定することができる（Tsuiji *et al.*, 2011 など）。その結果もまた、ブレイクアウトと整合的なものであった。

深度数百mから1km程度までの浅部応力場は、最大圧縮軸が垂直方向であり、正断層のレジームである。ただし1000mを超えると最大水平応力が上載応力を超えて横ずれる的になることが分かった（Chang *et al.*, 2010; Saffer *et al.*, 2013 など）。

一方、水平最大主応力の向きはサイトごとにばらつく。現在活動的な南海トラフ付加体内部の断

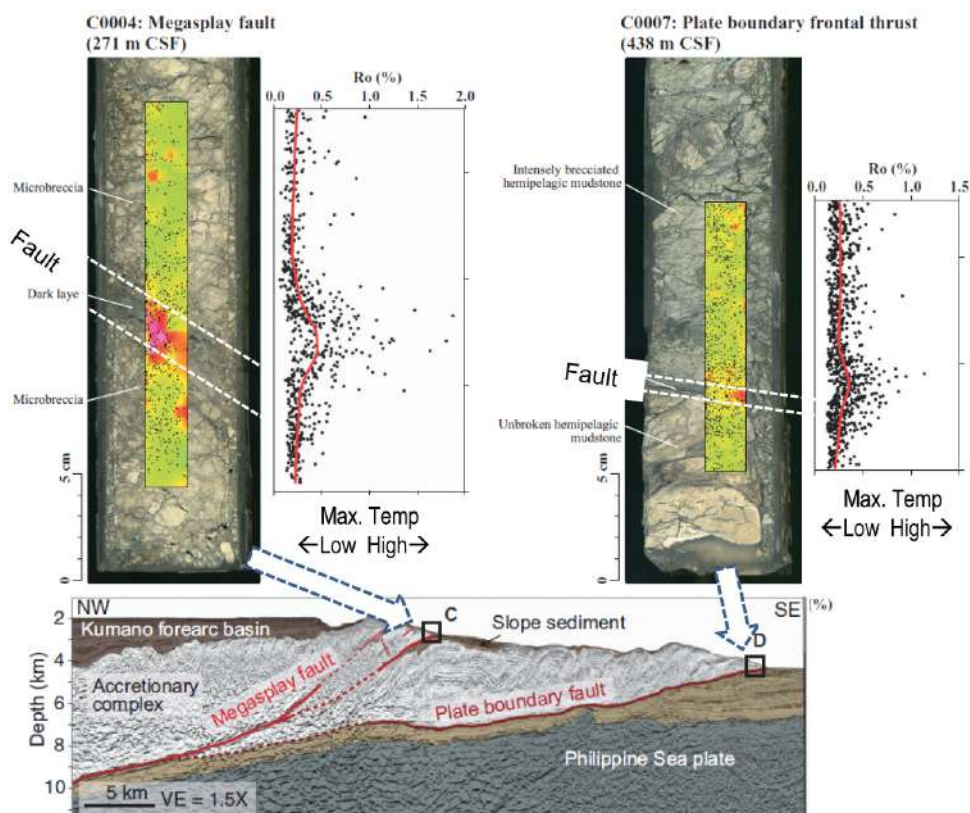


図6 分岐断層およびプレート境界断層先端部の断層写真とビトリナイト反射率分布 (Sakaguchi *et al.*, 2011aより改変)。

層付近 (C0001・C0004・C0006) では、プレート収束の方向と最大圧縮の方向がほぼ一致しているが、その陸側にあり現在は付加が起こっていない熊野前弧海盆 (C0002) では、プレート収束の方向に伸張していることが判明した。さらに陸側のC0009では再び最大圧縮方位がプレート収束の方向にほぼ一致した。一方、トラフ海側の2地点 (C0011・C0012) では、水平最大圧縮方位はプレート収束方向に直交している。浅部での水平差応力は小さい (数 MPa 以内) ので、プレート運動によるテクトニック応力以外に、地すべりなどにも影響されて変動するのであろう。

4-2. 断層先端部の高速滑り

第316航海では、巨大分岐断層先端部 (C0004)

およびプレート境界先端部デコルマ (C0007) から、断層コアが採取された。

ビトリナイト反射率計測により、どちらも断層面上のみが過去 380°C を超える高温になっていた (= 反射率が増加した) ことが示された (Sakaguchi *et al.*, 2011a)。高速破壊実験から、ビトリナイト反射率はわずか 10 秒程度で増加する (Kitamura *et al.*, 2012)。また Fulton and Harris (2012) は、モデル計算により、断層付近の反射率増加は地震時の数十 m に及ぶ滑りが必要と主張した。両断層帯に集中して高速破壊に伴う発熱現象があったことは間違いないようである。

一方、分岐断層上盤表層部には強震動堆積物が何層も見られる。最も浅いものの堆積年代が東南海地震の発生した 1944 年に一致することか

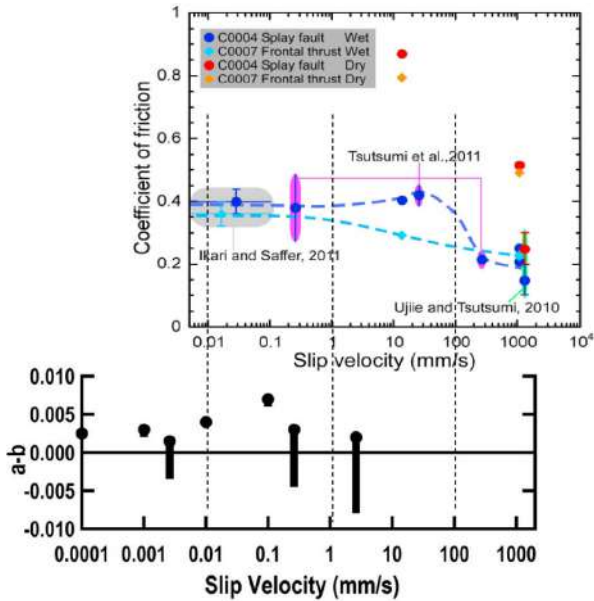


図7 浅部断層 (C0004/C0007) における摩擦特性の滑り速度依存性. (上) 摩擦係数 (Tanikawa *et al.*, 2012 より) ; (下) a-b (Tsutsumi *et al.*, 2011 の図に Ikari *et al.*, 2009 と Ujiiie and Tsutsumi, 2010 を加えた).

ら, Sakaguchi *et al.*, 2011b) は分岐断層破壊が 1944 地震時に海底まで破壊したと主張した. また, Yamaguchi *et al.* (2011) は XRF スキャナー分析から, 分岐断層帯物質は周囲よりもイライトに富んでいることを示した. 摩擦発熱により粘土鉱物の変質 (脱水) が進行した可能性がある.

4-3. 堆積物の摩擦特性

断層岩や粘土鉱物など堆積物の摩擦特性が, 分岐断層試料 (粘土鉱物を 50% 程度含む) などについて, 様々な滑り速度・封圧・間隙水圧下で計測されている.

Ikari *et al.* (2009) および Ikari and Saffer (2011) は, 低速域 (0.03 – 100 $\mu\text{m/s}$) で滑り速度を急変させ, a-b が 0 ~ 0.007 の正の値 (速度強化) を持つことを示した. 断層帯での定常摩擦係数は 0.37 – 0.44 で, 周囲の母岩よりも小さい. Ujiiie and Tsutsumi (2010) は, 高速 (1.27 m/s) で滑らせて摩擦係数を計測した. 初期 (ピーク) 摩擦・定常摩擦ともに, wet 状態では dry よりも小さいが, wet 状態だと, 高速でも低速でもピーク摩擦は同じ程度の大きさ (0.4 程度) であるものの, 定常摩擦は高速滑りの場合のみ 0.1 程度に低くなる. ま

た Tsutsumi *et al.* (2011) は, 滑り速度 2.6 $\mu\text{m/s}$ ~ 260 mm/s の範囲で a-b を求めた. 2.6 mm/s 以下の低速では ± 0.005 以下の正負両方の値を持つが, 26 mm/s を超える領域では +0.002 ~ -0.008 と速度弱化傾向を示す. また定常摩擦係数が低速側で 0.4 から 260 mm/s で 0.2 程度に低下した.

以上から, 海底下 300 m の分岐断層浅部での摩擦特性は, 低速度滑りでは速度強化・高摩擦係数, 高速では速度弱化・低摩擦係数という傾向がある. 巨大地震発生時に分岐断層深部から m/s オーダーの高速滑りが伝搬してきた場合に, 初期摩擦の「壁」を乗り越えて海底まで突き抜けるような破壊が起こりうることを示唆する.

4-4. 水理特性

Ikari *et al.* (2009) は, C0004 断層試料について, 低速滑りの後の浸透率が周囲よりも低い ($< 5 \times 10^{-20} \text{m}^2$) ことを示した. Tanikawa *et al.* (2012) は, C0004/C0007 の断層ガウジの浸透率を計測し, 10 – 18 m^2 という低い値を得た. また断層ガウジに粘土鉱物が多く含まれる場合には, 大きな滑りにより透水率が減少して水理バリアとなることを示した.

4-5. 間隙水圧異常

断層の有効強度を左右する大きな要因が間隙水圧であるが、それを直接モニターした例は少ない。間隙水圧異常を検出した例は、バルバドス CORK (949 デコルマ) で 1MPa という例がある (Becker *et al.*, 1997) が、そのほかは間隙率異常や地震波速度異常からの推定値である。Skarbek and Saffer (2009) は、間隙率分布の inversion から室戸沖デコルマに沿った間隙水圧異常を推定、1174 では 2.7 – 4.5 MPa, 808 では 5 – 6 MPa, また水理モデルから推定した平均間隙水圧異常は海溝で 2 MPa, 40 km 陸側で > 30 MPa と見積もった。摩擦係数が 0.3 とするとせん断強度は 12 MPa 以下と小さいことが推定された。

分岐断層浅部 (C0010) に設置された SmartPlug では、15 か月にわたり断層付近の温度・圧力計測に成功し、間隙水圧異常はほとんど見られないことが明らかになった (Hammerschmidt *et al.*, 2013)。一方 Kitajima and Saffer (2012) は 3 軸圧縮試験と土質力学の critical state 理論から、前弧斜面下の低速度帯 (Park *et al.*, 2010) での間隙水圧異常を 17 – 87 MPa と推定した。

4-6. 水の供給源としての玄武岩

第 322 航海では、沈み込む前の海洋地殻玄武岩が採取され、低温変質作用によりその 30% がサポナイト化している。サポナイトは 100 – 250°C で脱水して緑泥石に相転移するため、地震発生帯で水を放出する水源として着目された (Saito *et al.*, 2009)。玄武岩からの水の供給量は、付加体堆積物の圧密による排水よりも 1 けた以上大きい (Kameda *et al.*, 2011)。

5. 日はまた昇る—今後の展望

2013 年の 9 月をもって、統合国際深海掘削計画は終了し、次期 IODP (International Ocean Discovery Program) に移行する。NanTroSEIZE の最終目標は、海底下 7 km のプレート境界断層であるが、現在計画立案されているのは 5 km の分岐断層までである。それは一つには、ライザー掘削で南海

かり掘削するのではなく、国内外の、地震断層以外のテーマでの科学掘削も並行して推進すべきという意向もあろう。NanTroSEIZE のプロジェクトチーム (PMT) でも、毎年連続して掘削する必要はないとしており、むしろ掘削を行わない年があることで、研究が進んだり、その後の掘削方針を考えることができる。何より、5 km の分岐断層と 7 km のプレート境界断層のどちらが固着しているのか、現時点で判断することはできない。そのような状況では、まず分岐断層のコアや検層データをきちんと検討し、その結果に基づいて新たに 5 – 7 km までの掘削を提案すべきであると考え

る。2013 年 4 月に行われた「Chikyu+10 Workshop」では、今後 10 年間に「ちきゅう」で実施すべき掘削研究が討議された。NanTroSEIZE (7km 到達) も、重要な課題の一つに掲げられた。また、固着域の性質を理解するだけでなく、それよりも海溝側の挙動を理解するためには、JFAST (東北地震震源域掘削) やそれに続く浅部断層掘削、また他の沈み込み帯掘削とも共同して、これまでの固着 – 非固着 (安定滑り – 不安定すべり) というパラダイムを超えた、浅部滑りに関する新たな共通原理の発見を目指すことが、今必要であると信じる。

参考文献

- [1] Becker, K., A. T. Fisher, and E. E. Davis (1997), The CORK experiment in Hole 949C : Long-term observations of pressure and temperature in the Barbados accretionary prism, in Shipley, T. H., Ogawa, Y., Blum, P., and Bahr, J. M. (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 156 : College Station, TX (Ocean Drilling Program), 247-252.
- [2] Byrne, T. B., W. Lin, A. Tsutsumi, Y. Yamamoto, J. C. Lewis, K. Kanagawa, Y. Kitamura, A. Yamaguchi, and G. Kimura (2009), Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone, Geophys. Res. Lett., 36, L23310, doi:10.1029/2009GL040749.
- [3] Chang, C., L. C. McNeill, J. C. Moore, W. Lin, M. Conin, and Y. Yamada (2010), In situ stress state in the Nankai accretionary wedge estimated from borehole wall failures, Geochem. Geophys. Geosyst., 11, Q0AD04, doi:10.1029/2010GC003261.
- [4] Fulton, P. M., and R. N. Harris (2012), Thermal considerations in inferring frictional heating from vitrinite reflectance and implications for shallow coseismic slip within the

- Nankai Subduction Zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 335-336, 206-215, doi: 10.1016/j.epsl.2012.04.012.
- [5] Hammerschmidt, S., E. E. Davis, and A. Kopf (2013), Fluid pressure and temperature transients detected at the Nankai Trough Megasplay Fault : Results from the Smart-Plug borehole observatory, *Tectonophysics*, 600, 116-133, doi: 10.1016/j.tecto.2013.02.010.
- [6] Ikari, M.J. and D.M. Saffer (2011), Comparison of frictional strength and velocity dependence between fault zones in the Nankai accretionary complex, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q0AD11, doi: 10.1029/2010GC003442.
- [7] Ikari, M. J., D. M. Saffer, and C. Marone (2009), Frictional and hydrologic properties of a major splay fault system, Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20313, doi:10.1029/2009GL040009.
- [8] Kameda, J., A. Yamaguchi, S. Saito, H. Sakuma, K. Kawamura, and G. Kimura (2011), A new source of water in seismogenic subduction zones, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L22306, doi:10.1029/2011GL048883.
- [9] Kinoshita, M., Tobin, H., Ashi, J., Kimura, G., Lallement, S., Scream, E.J., Curewitz, D., Masago, H., Moe, K. T., and the Expedition 314/315/316 Scientists, 2009. Proc. IODP, 314/315/316 : Washington, DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.314315316.2009.
- [10] Kitajima, H., F. M. Chester, and G. Biscontin (2012), Mechanical and hydraulic properties of Nankai accretionary prism sediments : Effect of stress path, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, Q0AD27, doi:10.1029/2012GC004124.
- [11] Kitamura, Y., T. Kanamatsu, and X. Zhao (2010), Structural evolution in accretionary prism toe revealed by magnetic fabric analysis from IODP NanTroSEIZE Expedition 316, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 292, 221-230.
- [12] Kitamura, M., H. Mukoyoshi, P. M. Fulton, and T. Hirose (2012), Coal maturation by frictional heat during rapid fault slip, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L16302, doi:10.1029/2012GL052316.
- [13] Kopf, A., Araki, E., Toczko, S., and the Expedition 332 Scientists (2011), NanTroSEIZE Stage 2 : riserless observatory. IODP Prel. Rept., 332. doi:10.2204/iodp.pr.332.2011
- [14] Lewis, J. C., T. B. Byrne, and K. Kanagawa (2013), Evidence for mechanical decoupling of the upper plate at the Nankai subduction zone : Constraints from core-scale faults at NanTroSEIZE Sites C0001 and C0002, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 620-633, doi:10.1029/2012GC004406.
- [15] 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, doi:10.1029/2010GL043158.
- [16] Moore, G. F., *et al.* (2009), Structural and seismic stratigraphic framework of the NanTroSEIZE Stage 1 transect, Proc. Integrated Ocean Drill. Program, 314/315/316, 1-46, doi:10.2204/iodp.proc.314315316.102.2009.
- [17] Moore, J. C., M. Barrett, and M. K. Thu (2013), Fluid pressures and fluid flows from boreholes spanning the NanTroSEIZE transect through the Nankai Trough, SW Japan, *Tectonophysics*, 600, 108-115, doi: 10.1016/j.tecto.2013.01.026.
- [18] Park, J. - O., G. Fujie, L. Wijerathne, T. Hori, S. Kodaira, Y. Fukao, G. F. Moore, N. L. Bangs, S. Kuramoto, and A. Taira (2010), A low - velocity zone with weak reflectivity along the Nankai subduction zone, *Geology*, 38, 283-286, doi:10.1130/G30205.1.
- [19] Saffer, D. M., P. B. 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 (2013), In situ stress and pore pressure in the Kumano Forearc Basin, offshore SW Honshu from downhole measurements during riser drilling, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, doi:10.1002/ggge.20051.
- [20] Saito, S., Underwood, M. B., Kubo, Y., and the Expedition 322 Scientists, 2010. Proc. IODP, 322 : Tokyo (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.322.2010.
- [21] Sakaguchi, A., F. Chester, D. Curewitz, O. Fabbri, D. Goldsby, G. Kimura, C. -F. Li, Y. Masaki, E. J. Scream, A. Tsutsumi, K. Ujiie, and A. Yamaguchi (2011a), Seismic slip propagation to the updip end of plate boundary subduction interface faults : Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTro SEIZE cores, *Geology*, 39, 395-398, doi: 10.1130/G31642.1.
- [22] Sakaguchi, A., G. Kimura, M. Strasser, E. J. Scream, D. Curewitz, and M. Murayama (2011b), Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology*, 39, 919-922, doi:10.1130/G32043.1.
- [23] Skarbek, R. M., and D. M. Saffer (2009), Pore pressure development beneath the décollement at the Nankai subduction zone : Implications for plate boundary fault strength and sediment dewatering, *J. Geophys. Res.*, 114, B07401, doi:10.1029/2008JB006205.
- [24] Tanikawa, W., H. Mukoyoshi, O. Tadai, T. Hirose, A. Tsutsumi, and W. Lin (2012), Velocity dependence of shear-induced permeability associated with frictional behavior in fault zones of the Nankai subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 117, B05405, doi:10.1029/2011JB008956.
- [25] Tsuji, T., J. Dvorkin, G. Mavko, N. Nakata, T. Matsuoka, A. Nakanishi, S. Kodaira, and O. Nishizawa (2011) Vp/Vs ratio and shear-wave splitting in the Nankai Trough seismogenic zone : Insights into effective stress, pore pressure and sediment consolidation, *Geophysics*, 76, 1-12. Doi: 10.1190/1.3560018.
- [26] Tsutsumi, A., O. Fabbri, A. M. Karpoff, K. Ujiie, and A. Tsujimoto (2011), Friction velocity dependence of clay - rich fault material along a megasplay fault in the Nankai subduction zone at intermediate to high velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L19301, doi:10.1029/2011GL049314.
- [27] Ujiie, K., and A. Tsutsumi (2010), High - velocity frictional properties of clay - rich fault gouge in a megasplay fault zone, Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24310, doi:10.1029/2010GL046002.
- [28] Yamaguchi, A. *et al.* (2011), Progressive illitization in fault gouge caused by seismic slip propagation along a megasplay fault in the Nankai Trough, *Geology*, 39, 995-998, doi:10.1130/G32038.1.

