

NantroSEIZE 物語

木下正高

1997年、新たな深海科学掘削計画 (IODP) を立案する国際会議「CONCORD」が東京で開かれ、ライザー管による大深度掘削が可能な掘削船で行うべきテーマとして「海溝型巨大地震のダイナミクス」が掲げられた。しかし、地球深部探査船「ちきゅう」による最初の掘削、南海トラフ地震発生帯掘削 (NantroSEIZE) が、紀伊半島沖で開始されるまでには10年を要した。

M8級の海溝型巨大地震・津波の準備・発生・終了という一連の過程を理解するため、プレート境界上の地震発生帯に到達、断層岩を採取してその強度や変形履歴を分析するとともに、現場の状態 (温度・圧力・歪・地震活動など) を計測することが目標である。それに適する地点のうち、「ちきゅう」で到達しうる場所 (水深が2500mよりも浅く、海面から断層までの深度が10,000m以内) を、世界の地震発生帯中から探し出した。JAMSTECで精力的に取得していた地震探査記録が重要な役割を果たし、東南海地震の震源域である紀伊半島沖南海トラフが掘削地点として決定した (図1)。

米国ウイスコンシン大のハロルド・トビン、東京大学の木村学、ミズーリ大のマイク・アンダーウッド、JAMSTECの末廣潔や木下らが中心となって掘削提案を作成し、2004年までにIODP科学計画委員会 (SPC) で上位にランクされた。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、固着域の断層や浅部断層群などが明瞭に描き出された (図2)。

2007年9月、「ちきゅう」による最初のIODP掘削が開始された。最終目標は海底下7kmの断層固着域であるが、それに先立って、断層のより浅い部分や海底に抜ける出口周辺、沈み込む前の断層物質、またM8固着域の真上の堆積層から掘削を行った。米国掘削船「JOIDES Resolution」号での経験から、圧縮破碎された断層を貫通するのはきわめて困難という教訓を生かし、最初の航海ではコアを全く取らず、高速で回転するドリルパイプ先端部にセンサーを付けて掘削と同時にデータを取るという、LWD (掘削時同時検層) のみを実施し、そのデータから、続く掘削で重要なコア試料を得た。この方法はのちの掘削でも踏襲された。

断層固着域へのライザー掘削には、破碎された地層に加えて4ノットを超える黒潮という大きな課題があった。直径1mを超えるライザー管は、掘削中もろに黒潮にさらされるため、そのままでは破断する。おりしも大蛇行が終了して掘削地点の真上を黒潮が通っていた。2009年には、その北側の黒潮の影響が少ない地点で初のライザー掘削を行い、1600mの掘削に成功、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。その間、CDEX技術者による黒潮対策は着々と進んだ。2010年には、固着域に向けたライザーサイトC0002の掘削を開始し、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。

2011年3月11日、東北地方で巨大地震・津波が発生した。「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した。このためC0002地点での掘削は2012年に持ち越された。2012年には、掘削途中に急激な海況変化に遭遇してライザー管を損傷しながらも、海底下2000mまで到達、続く2013年には3000mまで掘削、ケーシングで孔を確保した (図3)。2枚ある断層固着域のうち、浅い方まではあと2km。前途は有望だが遼遠だ。

現時点では、最終目標である固着域には到達していないものの、その周囲での掘削により、これまでの常識を覆す発見がなされている。

浅部応力場：孔内検層や孔内実験，コア試料計測により，掘削時点での地下の応力場が求められた。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（正断層的）である一方，1000mを超えると横ずれ的になる。また水平最大圧縮応力の向きは，現在活動的な南海トラフ付加体内部の断層付近では，プレート収束の方向と水平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（図4）。プレート運動による圧縮応力変化に加えて，分岐断層の滑りによる隆起なども影響しているのだろう。

断層強度：断層面にかかるせん断応力が，断層破壊強度を超えたときに地震が発生する。従って地震発生を理解するための基本は，断層にかかる応力と，断層強度を計測することに尽きる。強度を決めるのは摩擦係数と間隙水圧，そして断層面にかかる垂直荷重である。間隙水圧の効果も考慮した有効摩擦係数が実験室で求められた。

摩擦係数は滑り速度とともに大きく変化する。これまで掘削した断層浅部自体は，自ら破壊を開始する能力はないので，問題は，深部からやってきた高速破壊がそのまま浅部でも伝搬するのか，停止するのか，である。実験室で試料どうしを密着させ，停止状態から急激に滑らせると，一旦は摩擦抵抗が増加するが，その後の定常状態では低い値になる。その様子から，断層が破壊を助長するのか抑制するかが判断できる。これまでは，浅部断層はすべりが抑制されると考えられていたが，秒速1mという地震滑りに相当する破壊実験が可能となった今では，そのような高速破壊下では摩擦係数が非常に低い，特に粘土鉱物を含む地層を湿潤状態に置くとときわめて滑りやすいことが分かってきた。つまり，断層浅部でも条件によっては地震滑りがそのまま海底まで突き抜けるのである。3.11東北地震でもこれが起こり，大津波の原因となったと考えられている。

地震滑りの証拠：海底下300～400mの浅部断層物質が，2か所（分岐断層およびデコルマ）で採取された。JAMSTEC（当時）の坂口有人らは，特殊な顕微鏡でコアのビトリナイト反射率を測定し，幅2cmの薄い断層帯のみが高い反射率を持つことを発見し，過去にその部分が400℃近くまで上昇していたことを示す証拠を示した（図5）。断層帯の粘土鉱物も一部高温で脱水していることが示されるなど，過去に浅部断層が地震滑りを起こしていたことが明らかになった。

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，NanTroSEIZEの継続も，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，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も重要である。

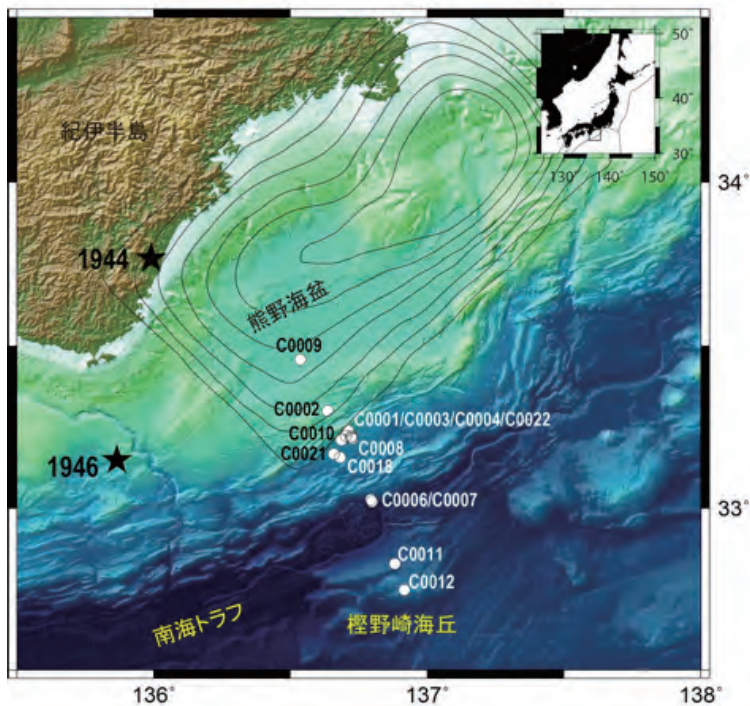


図1 紀伊半島沖海底地形図と南海トラフ地震発生帯掘削地点. コンターは1944年東南海地震時の断層滑り域.

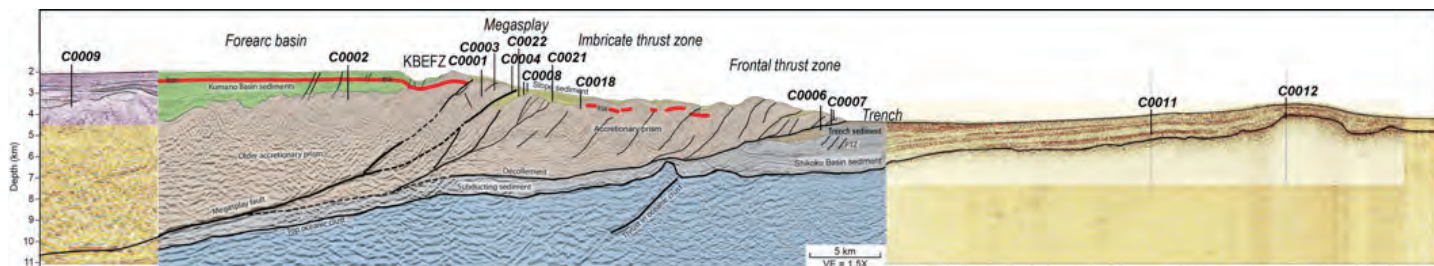


図2 南海トラフ地震発生帯掘削地点(C0001～C0022). 地震探査断面はMoore et al. (2009)や航海報告書から合成した.

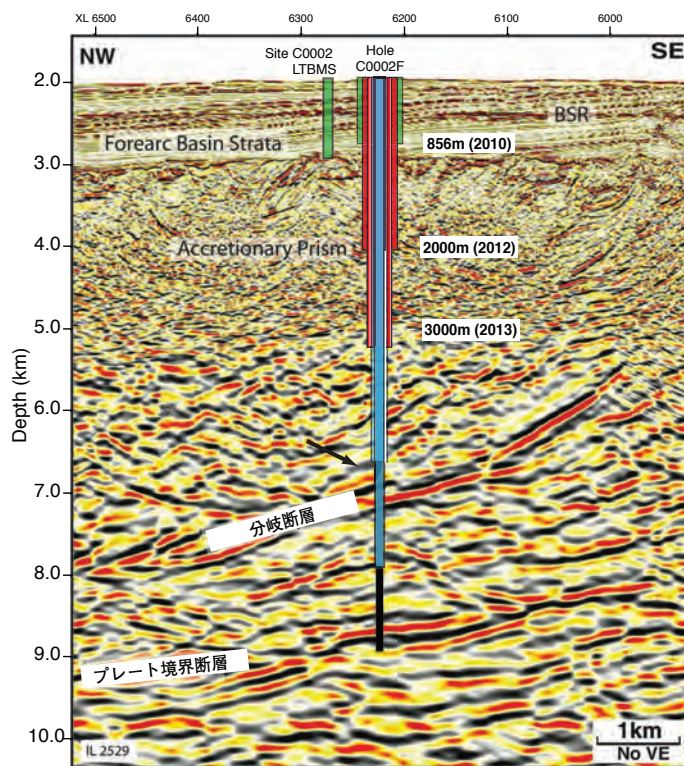


図3 断層固着域までの掘削サイトC0002付近の地層断面図

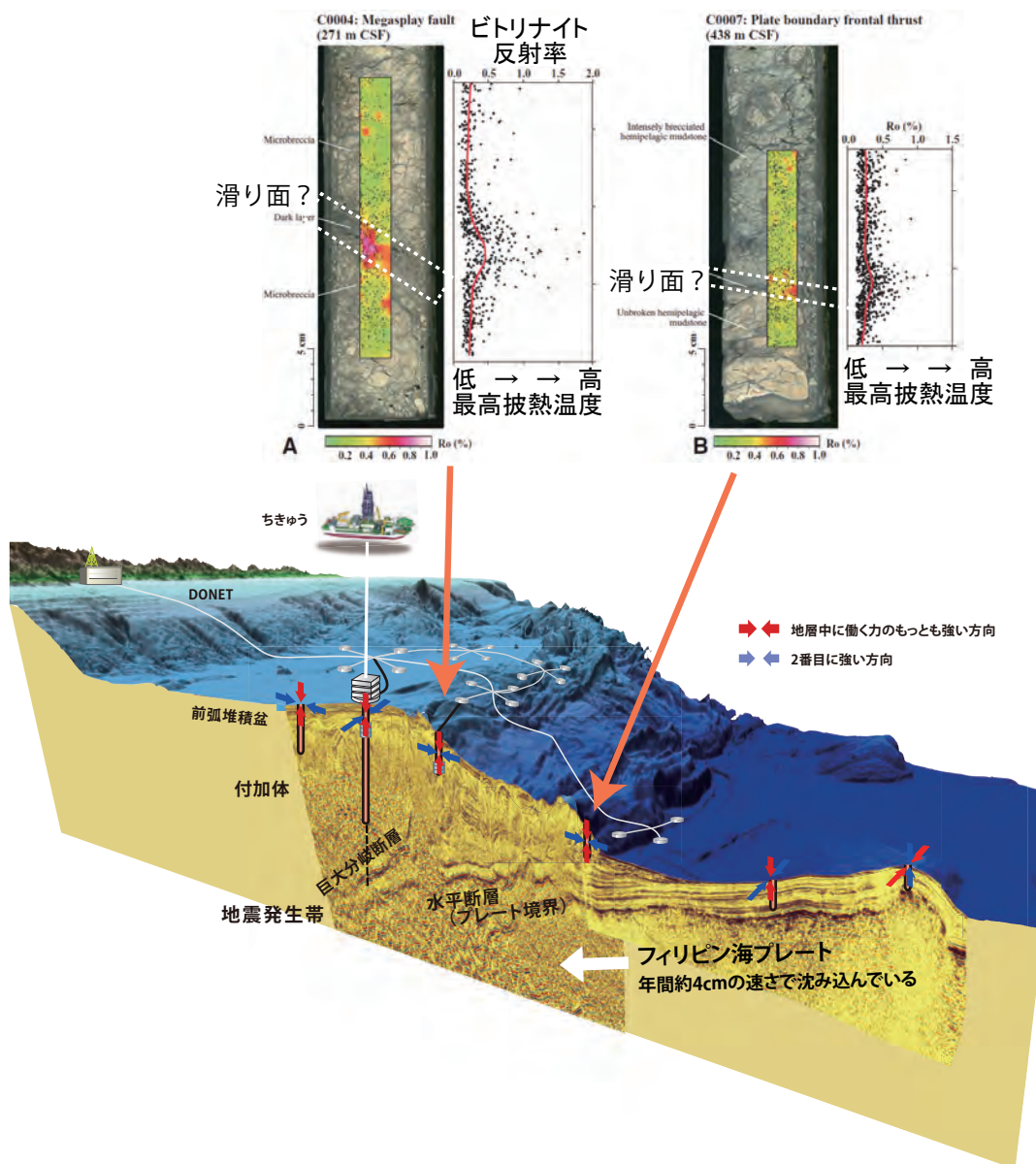


図4 (上)分岐断層およびプレート境界断層先端部の断層写真とビトリナイト反射率から過去の温度上昇が示唆された(Sakaguchi et al., 2011, Geologyに加筆).
 (下)NanTroSEIZE掘削により明らかになった浅部応力場の概要