

日本地球掘削科学コンソーシアム会員提案型活動経費報告書

- 活動名 : 断層掘削合同ワークショップ
- 申請者 : 斎藤実篤 (海洋研究開発機構)
- 共同申請者 : 小林励司 (鹿児島大学)・小平秀一・木下正高・林 為人・山本由弦 (海洋研究開発機構)・木村 学 (東京大学)・Jim Mori (京都大学)
- 助成額 : 200,000 円
- 活動概要 : 地震発生帯に関する3つの掘削計画 (NanTroSEIZE、関東アスペリティー、東北 Rapid response 掘削) に共通の問題と固有の問題を整理し、Rapid response 掘削提案へ向けて知識と経験を結集させるとともに、既存の計画や提案の次なる展開を再構築した。
- 活動報告 : 別紙

断層掘削合同ワークショップ開催報告書

目次

- I. ワークショップの開催趣旨・開催概要
- II. 断層掘削計画の概要と課題
 - II-1. 東北緊急掘削（小平秀一）
 - II-2. 関東アスペリティ（小林励司）
 - II-3. NanTroSEIZE（木下正高）
- III. キーノート講演
 - III-1. 低速から高速における摩擦挙動を考慮した東北地方太平洋沖地震発生サイクルのモデル化（芝崎文一郎）
 - III-2. 地震断層の実体に迫る—岩石力学実験の最前線—（廣瀬丈洋）
 - III-3. Large Slip and Fault Friction（Jim Mori）
 - III-4. 海溝型超巨大地震と比較沈み込み学（木村 学）
- IV. 分科会報告
 - IV-1. 断層帯掘削の物質科学（氏家恒太郎）
 - IV-2. 地震発生帯における海底・孔内観測研究（日野亮太）
- V. 各掘削プロジェクトの研究目標・戦略の強化
 - V-1. 東北緊急掘削（林 為人）
 - V-2. 関東アスペリティ（小林励司）
 - V-3. NanTroSEIZE（木下正高）
 - V-4. Key questions across the projects（Jim Mori）
- VI. 引用文献
- VII. 謝辞

Appendix

- ・ワークショッププログラム
- ・ワークショップ参加者名簿

I. ワークショップの開催趣旨・開催概要

地震発生帯の理解は統合国際深海掘削計画(IODP)における最重要科学課題の一つであり、現在「南海トラフ地震発生帯掘削計画(NanTroSEIZE)」が進行中である。一方、相模トラフ沿いの巨大地震とそれに隣接するスロー・スリップ・イベント領域を狙った「関東アスペリティ・プロジェクト(KAP)」の掘削提案が提出されている。こうした中、2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、緊急掘削(Rapid Response Drilling, RRD)の計画が立ち上がった。東北地震の断層すべり量は従来知られているよりもはるかに大きく、破壊域は海溝軸まで達したと考えられている。RRDはこの断層すべりで発生した摩擦熱が冷めないうちに海溝付近で断層を掘り抜くことを目的としたものである。RRDの必要性を諮問するためにDetailed Planning Group(DPG)会議が2011年5月18~20日に開催され、実現性の評価と計画概要の立案がなされた。DPCの直後、日本科学掘削コンソーシアム(J-DESC)と海洋研究開発機構主催のワークショップ「深海掘削による生命・地球科学の新しいパラダイムを求めて」が開催された。この中の課題別検討会(固体地球科学分野)では、東北RRDの必要性とともに、東北地方太平洋沖地震を契機とした既存の断層掘削プログラムの強化・先鋭化についても議論された。これらの背景により「断層掘削合同ワークショップ」の開催の機運が高まり、世話人グループによって緊急にアレンジされ、6月22-23日に海洋研究開発機構東京事務所(1日目)・横浜研究所(2日目)で開催された。

本ワークショップでは3プロジェクトを横断する議論により、(1)各断層掘削の共通の問題と固有の問題の抽出・整理、(2)NanTroSEIZE 深部掘削へ向けての研究目標・戦略の強化、(3)関東アスペリティを実現へ導くための研究内容・戦略の再検討、そして(4)東北沖地震断層緊急掘削の掘削提案の作成へ向けた、科学目標・作業仮説の構築を目的とした。

1日目は3つのプロジェクトの現状と課題に関する情報共有が図られ、東北地方太平洋沖地震のトピック、断層掘削や摩擦実験、地震発生モデリングなどのキーノート講演をいただいた。2日目午前は2つの分科会に分かれて具体的な議論を行った。分科会の1つは断層帯掘削の物質科学、もう1つは地震発生帯における海底・孔内観測研究である。世話人から各分科会の座長に検討課題が提示され、またそれぞれにおいて話題提供のための発表があり、それらを受けて課題の検討を進めていった。最後に分科会の報告と、各プロジェクトの今後の方針について話し合わせ、閉会となった。本報告書はワークショップの進行に沿って、報告、講演、議論の内容をまとめたものである。

なお、本報告書提出時点では、東北緊急掘削の掘削提案は受理され、Expedition 343: Japan Trench Fast Drilling Project (J-FAST)として計画され、乗船研究者を募集中である。

II. 断層掘削計画の概要と課題

II-1. 東北緊急掘削：DPG レポート概要

JAMSTEC 小平秀一

1. はじめに

東北緊急掘削 Detailed Planning Group (DPG)は未曾有の災害である 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域における、緊急掘削の必要性、科学的メリットと掘削計画の実現性を評価するとともに、事前調査データ、掘削位置や深度、掘削計画を含んで研究と掘削の計画概要を立案するために、組織された。以下に、5月18日から20日に東京で開催された DPG 会議の結果をまとめたレポート概要をしめす。なお、このレポートは6月の SASEC で審議され、8月1日締め切りでフルプロポーザルの提出が承認されている。

2. 緊急掘削の科学的意義

緊急掘削によって解決されることが期待される課題として、以下の5点を掲げた。

1) 海溝軸までの滑りを生じさせた、地震発生帯の応力状態・摩擦特性の把握、2) 掘削により採取された断層試料から超巨大地震の履歴解明、3) 地震発生時の断層におけるせん断応力と、地震発生時における解放過程の解明、4) 地震後の応力・ひずみの再蓄積過程の解明、5) 余震や誘発地震による応力・ひずみ変化の解明。

これらの課題解のためには緊急掘削によって推進すべき計測・観測・実験としては、断層温度の時間変化測定、コア試料の分析・実験、水圧変化、流体の化学分析、ロギング・応力測定、余震観測、などが必須である。特に、これらのデータの中でも、断層での温度の時間変化測定とコア試料の分析は、大変動を起こした断層の摩擦特性など基礎的特性を知る上で最も優先順位の高い観測項目となる。

3. 掘削候補点

緊急掘削の候補点としても条件は、1) 大きな滑りがあった領域であること、2) 掘削可能深度にあるターゲット断層が地震学的に明瞭にイメージングされていること、3) その他、高分解の地形データや湧水の分析結果から断層を規定するデータがあること、などがあげられる。現在のところ、それらの条件を満たす領域として、1) 海溝軸ごく近傍の沈み込んだ海洋地殻上面、2) Tsuru et al. (2002)等で示された Back-stop interface、3) 白亜紀の不整合面を切る陸側斜面の正断層、があげられるが、現状では各々長所、短所がある。今後予定されている事前調査データを見て、最適な掘削点を選定することになる。

4. 結論

以上の、議論を踏まえて、DPGの結論として、1) 大変動が確認された断層に到達可能で、そこでの試料採取、ロギングによる物性・化学計測等が可能であり、かつ、2) 掘削孔

へのケーシング設置が可能で、長期温度計測が可能な場合は、緊急掘削を推進すべき、とした。一方、1)は可能であるが、2)が不可能である場合は、DPGメンバーでも意見は分かれた。

II-2. 関東アスペリティ・プロジェクトの概要

鹿児島大学 小林励司

南関東では、1703年元禄地震、1923年(大正)関東地震とM8クラスの巨大地震が繰り返し発生し、首都圏に甚大な被害を及ぼしている。その東隣でM6.5前後のスロー・スリップ・イベント(SSE)が5-6年おきに発生している。同じ深さで元禄型地震、大正型地震、スロー・スリップ・イベントといった3つの異なるタイプの滑りイベントが起きている。まとめると相模トラフ沿いには次の3つの異なる滑りの領域がある。

- ・大正型地震のアスペリティ：繰り返し間隔 200-400年、カップリング率 80-100%
- ・元禄型地震のアスペリティ：繰り返し間隔 ~2000年、カップリング率 10-30%
- ・SSE発生領域：繰り返し間隔 5-6年、カップリング率 70-100%

特に SSE 発生領域が巨大地震のアスペリティと同じ深さで起きていることには注目される。南海やカスカディアの沈み込み帯の場合は、SSEs はアスペリティよりも深い場所で起きており、これは温度圧力条件が異なることが大きな要因と考えられている。しかし、南関東では温度圧力条件が同じであることから他の要因が考えられる。

そこで、関東アスペリティ・プロジェクトでは次の2つの科学目標を掲げた。

- (1)なぜ同じ深さで異なる滑りが起きるのかを解明すること
- (2)地震発生サイクルのすべての段階を記録したデータを使って現実的な発生サイクル・モデルを確立すること

これらの科学目標を達成するために、次のプロポーザルを提出した。

Umbrella (707-CDP3)

プロジェクト全体の研究背景、科学目標、作業仮説をまとめている。昨年10月にプレプロポーザルを提出し、科学立案評価パネル(SSEP)から改訂版を出すように勧告された。

Program A (782-Pre)

アスペリティおよび SSE 領域内でのプレート境界を掘り抜く超深度掘削を提案している。これは科学目標(1)と(2)両方に関連する。昨年10月にプレプロポーザルを提出し、SSEPからフルプロポーザル提出を勧告された。

Program B (770-Full12)

SSEs の発生サイクルを長期孔内計測システムでモニタリングすることを提案している。これは科学目標(2)に関連する。昨年10月にフルプロポーザルを提出し、SSEPにより external review に出されている。

これらに加えて、科学目標(1)に関して、input sites や海溝寄りの浅部断層(toe)の掘削といった物質科学的な調査のためのプロポーザルの提出を検討している。現状では、Program A のフルプロポーザルと新たなプロポーザルの内容を詰めることが課題である。また東北地方太平洋沖地震を受けた戦略なども検討事項としてある。まとめると以下のようになる。

1. 超深度掘削の内容の熟成：アスペリティでも SSE 領域でも、一番浅い部分を1か所掘削して、どのような情報を得るか。どのように全体を理解するか。モデリングにどのように結びつけるか。
2. Toe の掘削をどうするか。どのような情報を得るか。
3. 東北地方太平洋沖地震をきっかけにして、勢いに乗せるには、どのようにしたらよいか。戦略面と資金面（特にモニタリング機器）。

これらの課題についての議論は「総合討論：関東アスペリティ・プロジェクト」で記述する。

II-3. 「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削の概要と成果

木下正高（海洋研究開発機構）・木村学（東京大学大学院）

遠州灘沖から四国沖の南海トラフは、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。プレート境界上の固着した部分が100-200年に一度滑りを起こして、マグニチュード8クラスの海溝型巨大地震が発生する。地震の発生-伝播-停止の過程は、地震波や津波データの解析、岩石破壊実験、陸上での地震断層露頭調査や掘削孔内での観測などから明らかにされつつある。

しかしながら、海溝型巨大地震発生仕組みを理解するためには、固着域そのものの精査が必須であるとの認識に立ち、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、2007年から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、東南海地震の震源断層固着域である(図1、図2)。これまでに8航海が実施され、紀伊半島沖の東南海地震震源域浅部から四国海盆まで、13地点で最大1600mの掘削を行っている。

第一ステージの3航海が、熊野沖にて2007年9月から2008年2月までの約5ヶ月間実施された。付加体先端部デコルマ、地震断層から上方に分岐して海底に達する断層浅部、そして熊野海盆上において、南海トラフ付加体を横断して地点で掘削を行った。付加体で

は砂泥互層が激しく変形・破砕しており、掘削や試料回収が困難であった。

2009年5月から10月までの5ヶ月間、第2ステージ掘削が実施され、プレート固着域上部（図1のC0009）へのライザー掘削が行われた（第319次航海）。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鉛直地震探査（VSP）、分岐断層浅部（C0010）での孔内長期圧力計測の開始など、地震発生帯理解のための新たな試みに挑戦した（図3）。さらに9月に実施された掘削航海（第322次航海）では、引き続き、沈み込む前の物質と状態把握のために、四国海盆上で掘削（C0011, C0012）が実施された。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。

2010年度には3航海が実施された（図）。第326次航海は、NanTroSEIZEの最終目標である、巨大地震断層の固着域（海底下7km）に到達するためのライザー掘削の基礎部分として、872.5mまでの掘削と整備を完了した。引き続き第332航海では、同じC0002地点浅部の間隙圧や地殻変動・地震活動を監視するための孔内観測所を設置した。今後設置される予定の2地点と合わせ、鍵となる3地点での高感度・高精度な長期孔内観測装置による観測ネットワークの構築により、地震断層近傍での地殻変動の監視を実現する。また海底ケーブル（DONET）への接続により、地震発生メカニズムの解明、およびリアルタイム情報発信に活用（緊急地震速報等）が可能になると期待される。第333航海では、分岐断層下盤の大規模地滑り堆積物の採取と、四国海盆堆積層のコア採取・熱流量計測等を実施した。沈み込む前から固着域に至る表層・付加体堆積層・基盤岩からの情報が、約6Maから現在に至るまで得られた。

主な成果

断層浅部の特徴と活動度

プレート境界から分岐して海底に達する断層を海底下260-300mで貫通し、断層物質を採取した。またプレート境界断層の先端部を貫通し、断層試料を海底下438mから採取した。断層をはさんで年代が逆転していること、また斜面堆積物の年代分布から、この断層の活動度を推定する重要な証拠が得られた。

分岐断層試料および海底での試料観察から、この分岐断層が、1944年の東南海地震時の震動により表層堆積層の著しい変形をもたらしたことが明らかとなった。掘削で得られた浅部断層の分析から、分岐断層およびプレート境界断層先端部での高速すべりによる発熱の痕跡が世界の沈み込み帯ではじめて検出され、津波発生や低周波地震との関係が強く示唆された。この浅部断層は、高速すべり時に弱化することも世界ではじめて実験的にも検証され、これまでのプレート境界浅部域の断層挙動に対する常識的知見を一新した。

現在の応力蓄積状況

広域応力場を推定するため、孔内検層による孔壁画像（自然破壊亀裂の検出）やコア試

料解析（非弾性変形解析）、また孔内水圧破碎実験や、鉛直地震探査を行った。その結果、現在活動的な南海トラフ付加体内部の断層付近、および最も陸側（C0009 地点）の熊野海盆中央部では、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ことが分かった。現在のプレート境界の上盤が、プレート収束運動による圧縮歪エネルギーを蓄積し、地震発生の準備過程にあることを示唆する。一方、熊野海盆南部の外縁隆起帯近くの C0002 地点では、プレート収束の方向に伸張が起こっていることが分かった。プレート運動による圧縮はここにも働いているはずなので、それを上回る伸張応力が作用していることを示す。

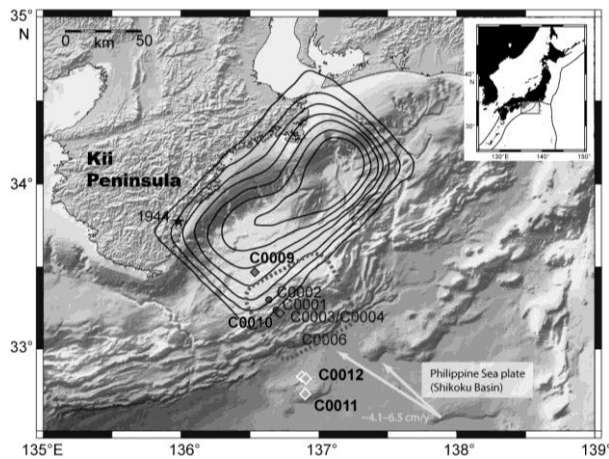


図1 NanTroSEIZEによるこれまでの掘削地点。C0001～C0008 までがステージ1（2007年実施）、C0009以降がステージ2（2009年実施）。実線コンターは1944年東南海地震の震源域（アスペリティ）。点線コンターは超低周波地震が起こると考えられている地域（Ito and Obaraによる）。矢印はフィリピン海プレートの本州に対する相対運動ベクトル。

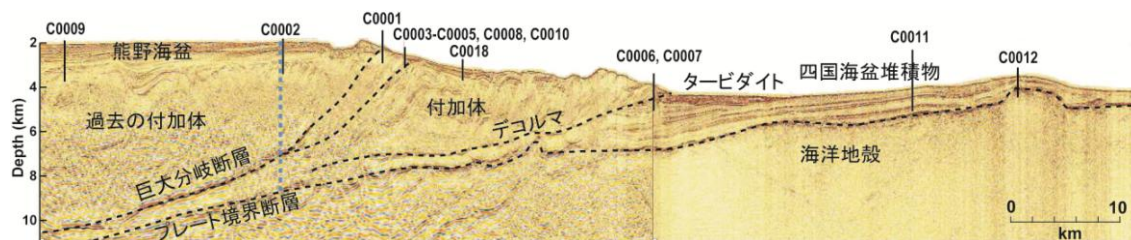


図2 熊野沖南海トラフ付加体・地震発生帯の2010年までの掘削地点。

III. キーノート講演

III-1. 低速から高速における摩擦挙動を考慮した東北地方太平洋沖地震発生サイクルのモデル化

芝崎文一郎（建築研究所国際地震工学センター）

2011年東北地方太平洋沖地震について、最近実験的に明らかにされた低速から高速に至る摩擦の挙動を参考にして、その発生メカニズムについて考察を行う。津波波源のインバージョン解析(Fujii et al., 2011)では、破壊開始点より上部の海溝に近い場所で48m程度のすべりが生じたことが示されている。このことから、この領域で、非常に大きな応力を解放したことが理解される。最近の摩擦実験によれば、高速で断層潤滑により著しく摩擦係数が低下することが明らかにされている(Di Toro et al., 2011)。さらに、付加体物質を用いた摩擦実験でも、低速から中速ですべり速度強化もしくは速度弱化を示すが、高速になると大きなすべり速度弱化を起こすことが明らかにされている(Tsutsumi et al., 2011, submitted)。本講演では、これまでの実験結果を参考にして低速から高速における挙動を考慮した摩擦則を提案する。さらに、それを用いた東北地方太平洋沖地震発生サイクルのシミュレーション結果を紹介し、今後の課題を議論する。

摩擦構成則としては、2つの状態変数をもつすべり速度・状態依存則を考える。低速から中速では速度弱化もしくは速度強化を示すが、状態変数は小さな臨界相対変位量で遷移し、高速では速度弱化を示し、状態変数は大きな臨界相対変位量で遷移するような構成則を考える。このような摩擦則を用いて、2次元の地震発生サイクルシミュレーションを行った。モデルでは、宮城県沖の陸よりのアスペリティさらには浅部の二つのアスペリティを設定した。アスペリティでは低速から中速ですべり速度弱化の性質を示すが、その周辺では低速から中速ですべり速度強化の性質をもつ。高速になると全ての領域ですべり速度弱化を示す。シミュレーションでは、アスペリティを破壊するイベントが30-40年間隔で発生するが、600—700年間隔で全領域を破壊するイベントが発生することが再現された。このイベントでは、低速から中速ですべり速度強化の領域でも、すべり速度が高速になり弱化するため、全領域で破壊が生じる。次に3次元の地震発生サイクルのモデル化を行った。宮城県沖、福島県沖、茨城県沖における幾つかのアスペリティと宮城県沖海溝付近の大きなアスペリティを考慮してモデル化を行った。宮城県沖、福島県沖、茨城県沖のアスペリティでは、単独もしくは複数のアスペリティで破壊が生じるが、いずれも大規模なイベントに成長しない。それに対して、宮城県沖海溝よりの大きなアスペリティが破壊すると、宮城県沖さらには福島県沖におけるアスペリティまで破壊する。このイベントの大きさはM9クラスで、発生間隔も非常に長い。以上のシミュレーションの結果から、2011年東北地方太平洋沖地震においては、宮城県沖海溝よりの大きなアスペリティで破壊が生じ、高速における摩擦強度の低下により大きなすべりが生じ、低速から中速ですべり速度強化

の領域も高速で不安定化し、他のアスペリティにも破壊が伝播したと考えられる。

今後より現実的な地震発生サイクルモデルを構築するためには、東北日本沈み込み帯における断層物質の摩擦特性を理解する必要がある。大きなすべりが生じるためには、摩擦係数の著しい低下や大きな臨界相対変位量が必要となる。沈み込み帯浅部に関しては、断層掘削により採取された物質の摩擦実験により、摩擦特性が理解できると期待される。この他、弱化過程だけでなく強度回復過程も調べる必要がある。さらには、断層の水理学的特性も調べ、thermal pressurization により強度弱화가起きたのかどうかも検証する必要がある。掘削ができない領域の断層の摩擦特性に関しては、可能性のある断層物質を用いた実験により推定する必要がある。さらに、摩擦特性の水平方向の変化に関しては、地震波探査等により断層周辺の構造を調べて推定する必要がある。

III-2. 地震断層の実体に迫る—岩石力学実験の最前線—

廣瀬丈洋 (JAMSTEC 高知コア研究所)

現在提案中の東北沖地震断層緊急掘削および関東アスペリティ掘削に関して、最新の岩石の変形実験研究に基づいて、今後の断層掘削物質を用いた研究戦略を簡単にまとめてみた。

1. 東北沖地震断層緊急掘削

東北地方太平洋沖地震の大きな特徴は、これまで地震波を出すようなすべりが起こらないと考えられていたプレート境界浅部で大きなすべりが確認されたことである (e. g., Ide et al., 2011, Science). 近年の高速摩擦実験の結果から、粘土質堆積物が水に飽和しているプレート境界浅部では、すべりの進展にほとんど剪断エネルギーを必要としないことが明らかになってきており (e. g., Faulkner et al., 2009, AGU), 実験で確認された高速域 ($\sim 1\text{m/s}$) での速度弱化現象が東北沖地震の際にも起こっていたと考えられる。では、なぜ地震時に常にプレート境界浅部まで破壊すべりが広がらないのであろうか? 過去 10 年間におこなわれてきた岩石の低～高速摩擦実験の結果をコンパイルすると (Di Toro et al., 2011, Nature), 中速域 ($0.1\sim 10\text{mm/s}$) で摩擦係数が $0.05\sim 0.1$ ほど上昇していることがわかる (Shimamoto & Hirose, 2005, AGU). また、この中速域で現れる摩擦のバリアは、岩石の種類や垂直応力、速度履歴によって、その大きさと現れる速度領域が変化することが明らかになってきている (廣瀬ほか, 2011, JPGU). プレート境界浅部まで破壊すべりが進展するかどうかは、まさにこの中速域での摩擦のバリアを乗り越えることができるかどうかによって決まってくる可能性がある。緊急掘削では、大きくすべった断層近傍の物質の低～高速域における摩擦変遷を様々な条件下 (温度・含水率・垂直応力等) で調べることによって、プレート境界浅部まですべりが伝播する物理過程が解明されるであろう。

う.

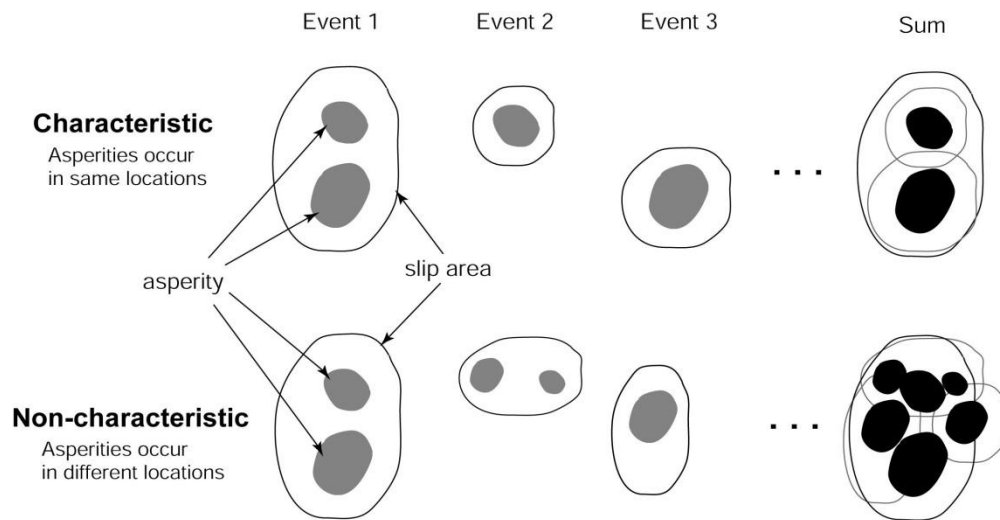
2. 関東アスペリティ掘削

房総半島沖には、周期5～6年のSlow slipが確認されている。斎藤ほか（2011, JPGU）は、房総沖に沈み込む伊豆小笠原弧の物質に着目し、ボニナイトを含むEoceneの火山岩もしくは蛇紋岩海山列とSlow slipとの関連性を指摘している。岩石の高温高压摩擦実験（高橋ほか, 2011, JPGU）によると、房総沖でSlow slipが起こっている温度条件下（～200度前後）では蛇紋岩の速度急変時における摩擦挙動がクリープ的であり（摩擦の速度依存性が正）、地震を起こすようなポテンシャルを持っていないことが示されている。高温・高压・含水条件下における岩石の摩擦挙動は、非常に限られた岩種（花崗岩・斑レイ岩）でしかおこなわれていない。房総沖Slow slip域のコア試料もしくは沈み込む前のコア試料を用いた摩擦実験によって、物質の摩擦特性から房総沖のSlow slip現象を検証することができるであろう。

III-3. Large Slip and Fault Friction

Jim Mori (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

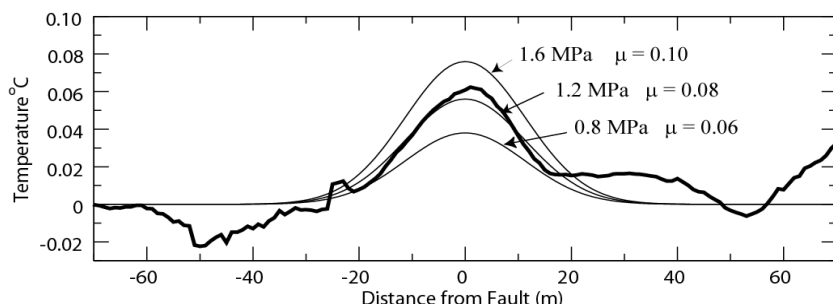
The areas of localized high slip within the rupture areas of large earthquakes are important features in understanding the occurrence and reoccurrence of earthquakes. Also these regions control the levels of strong ground shaking. Some models indicate that the patterns of these localized areas are the same in repeated earthquakes. However, results from some recent earthquakes (e.g. Park and Mori, 2007) and the 2011 Tohoku earthquake, show that the same portion of the fault can rupture with varying values of slip. These observations indicate that the areas of large slip are not constant features in repeated earthquakes and can change from event to event.



The characteristic model (above) shows areas of large slip that are the same in repeated earthquakes. For this model, if the slip over many earthquakes is added together, localized areas have very large slip and other regions need to have slip that occurs aseismically. For a non-characteristic model, different earthquakes have different areas of large slip. When the slip distributions of many earthquakes are added together, the whole fault plane can have the same amount of slip. Aseismic slip is not necessary for this model. (Park and Mori, 2007).

An important characteristic of the 2011 Tohoku earthquake, is the very large slip of tens of meters on the shallow portion of the megathrust. This large slip is largely responsible of the devastating tsunami that hit the coast of northeast Honshu. The shallow area of very large slip is likely indicative of low friction mechanisms during the rupture. One of best ways to estimate frictional stress during large earthquakes is to measure the heat generated on the fault. Past temperature measurements, on the Chelungpu fault following the 1999 Chi-Chi, Taiwan and 2008 Wenchuan earthquakes have been used to determine the level of fault friction. Results from the Taiwan earthquake show a very low coefficient of friction, near or less than than 0.1 (Kano et al., 2006). For the Tohoku earthquake, there are plans being prepared for a possible rapid response drilling project to reach the fault in the area of very large displacement. In addition to temperature measurements, direct stress measurements, identification of geochemical markers, along with analyses and lab experiments on

fault zone samples, should be able to estimate the frictional level and contribute to an understanding of this important area of large slip.



Observed temperature anomaly across the Chelungpu fault after the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. These results indicate a coefficient of friction of less than 0.1 (Kano et al., 2006).

III-4. 海溝型超巨大地震と比較沈み込み学

木村 学 (東京大学)

2011年、3月11日に日本海溝で発生した東北地方太平洋沖地震と津波は、大災害をもたらすとともに、それまでの海溝型地震を考える際の基本的フレームであった比較沈み込み学パラダイム (Uyeda and Kanamori, 1979) が崩壊した瞬間でもあった。古く冷たいプレートが沈み込む海溝域では巨大地震は起こらないとの思い込みが崩れたのである。また、浸食型縁辺では巨大地震が起こらないとのパラダイム(たとえば von Huene and Scholl, 1991; Bileck, 2010) も崩れた。

この旧パラダイムの崩壊は、同時に新しいパラダイムの建設を求めることとなる。その際に、時代をリードした比較沈み込み学 (Comparative subductology) を総括しなければならないが、今回の日本海溝で起こった地震と津波の特徴をきちんと見ておかなければならない。また南海トラフとの共通点と違いも整理しておくのが重要である。なぜなら日本海溝は浸食型縁辺の典型であり、南海トラフは付加型縁辺で最も研究が蓄積されているとみなされているからである。

3.11の地震発生後、相次いで破壊域、すべり分布、陸上海底地殻変動、海底地形変動などのデータが報告されているが、その共通した特徴は、海溝から陸側50キロ程度の前弧部分が数十メートル程度大きく水平移動・隆起し、大津波を励起したことである。その部分を除けばアスペリティーは連動してすべったが、従来の地震とさほど変わらないというものであった。この変形フロントから50キロ程度のプレート境界の上盤はウェッジ状の反射透明地質体からなり、それは第四紀の付加体と解釈されていたものである。その構成物はコスタリカ沖でも確認されたように、海溝充填堆積物が付加したのではなく、泥質

斜面堆積物の崩壊・再付加したものであると解釈される。海溝外側からは、ホルストグラベン構造を作りながら、珪藻質シリカ軟泥の卓越する遠洋性堆積物が付加体と接しながら沈み込んでいる。すなわち、この泥質付加体とシリカ軟泥がプレート境界として接しているのが、震源での地震発生から60秒後に大津波発生すべりをしたプレート物質境界である。その境界は従来、安定すべり領域であり、地震はおろか津波を引き起こすような高速すべりも起こさないと見なされていた。

そのようなプレート境界は、南海トラフでいえば、分岐断層より海側の付加体（最近では外側ウエッジという；Wang and Hu, 2006, Kimura et al., 2007）下デコルマである。南海トラフでの1605年の慶長大地震では、この部分がすべり、津波を励起したのではないかと見なされている。そこでは上盤は付加体の泥質卓越部、下盤は沈み込む半遠洋性泥質堆積物が物質プレート境界で接する。そのような泥質岩同士のプレート境界も安定すべりを特徴とし、地震は起こさないと見なされていた。外側ウエッジは南海トラフの変形フロントから50キロ程度陸側まで発達するのでスケールとしては日本海溝とほぼ同じである。それより陸側（内側ウエッジ）は、日本海溝では白亜紀付加体、南海トラフは中新世付加体と見なされる。いずれも完全に岩石化し、弾性歪エネルギーを蓄積でき、地震発生帯ホスト岩として機能しているので物性的な違いはないと考えられる。

この推定される日本海溝と南海トラフのプレート境界構成物質の熱的熟成予想を両者の津波発生域と従来の地震発生域の境界付近に適用すると、10数パーセント以上の含水鉱物からの最大脱水域がほぼ境界付近に一致する。その熱的熟成を決める温度構造は一次的には沈み込むプレートの年齢であり、相対収束速度である。古くて冷たいプレートの早い収束の場合、若干その境界域の深度は深くなるが、その境界を突破し、破壊が海溝まで及んだ時に、付加型、浸食型に関係なくMw9クラスの超巨大+津波地震となる。新しいパラダイムの構築のためには、この境界をいかなる場合に突破し、いかなる場合に突破しないのかの理由を明らかにすることがポイントの1つである。浸食vs付加はプレート境界における地震、非地震性すべりの数100万年以上にわたる時間空間積分現象である。

IV. 分科会報告

IV-1. 分科会「断層帯掘削の物質科学」報告

氏家恒太郎（筑波大学）

本分科会では、専門分野の異なる研究者7名に話題提供と断層帯掘削を成功に導くための提言をして頂き、それらをベースに分科会参加者全員で議論し、提言を練り上げていった。以下、本分科会からのアウトプットを報告する。

掘削同時検層（LWD）と応力測定

深海掘削において、断層帯からの完全なコア回収は極めて困難である。コアリングの前にLWD計測を行い、断層帯の特徴と物性変化をあらかじめ把握しておくことは、全ての断層帯掘削において不可欠である。特に比抵抗孔壁画像は、断層帯構造、フラクチャーの性質・方位、ボアホールブレイクアウトに基づく応力方位の決定に有効である。

また、ボアホールブレイクアウトとASR（Anelastic Strain Recovery）を組み合わせることで、最大、中間、最小主応力の方位を明らかにすることができ、東北緊急掘削では地震破壊面の認定、地震時の応力降下に伴う応力場変化を、南海トラフ地震発生帯掘削や関東アスペリティ掘削では固着域やスロースリップ域での応力場を明らかにすることが期待できる。更に各断層帯掘削プロジェクト間で最大主応力と断層面のなす角度を求め、岩石強度やブレイクアウトの幅などを基に応力の絶対値を決めておくことは、地震サイクル内での応力規模変化と断層にかかる剪断応力変化を定量的に評価するうえで重要である。

掘削コアの観察・分析

断層帯から採取された掘削コアの観察は、地震時のスリップゾーンの特定と地震時の変形メカニズムを明らかにするうえで不可欠である。深海掘削船「ちきゅう」にはX線CTスキャンが搭載されており、すべりの局所化やスリップゾーンを挟んだ密度変化を認定するのに有効である。また、掘削コアから絞り出された流体の分析や断層試料の微量元素・同位体は、断層に沿った流体移動や地震時の岩石流体相互作用を明らかにするうえで鍵となる。

これまで地震すべりの地質学的証拠といえば、摩擦熔融物が固化して形成されたシュードタキライトが唯一とされてきた。地震発生深度で形成された四万十付加体シュードタキライトの分析・解析結果は、固着域とされているものの少なくとも一部は、摩擦の速度強化域に地震破壊が伝播したのを見ている可能性があることを示唆しており、南海トラフや関東アスペリティプロジェクトでの固着域掘削でも考慮しておく必要がある。

一方、台湾チェルンプ断層掘削や陸上付加体に露出する地震発生深度で形成されたウルトラカクレーサイトの観察・分析により、摩擦熔融以外の地震時の変形メカニズムとス

リップゾーンに沿った温度異常を示すプロキシが、ここ4, 5年の間に続々と提示されてきた。温度異常検出に用いられる各プロキシには一長一短があることを考慮すると、同一試料について、変形組織解析とできるだけ多くのプロキシを用いた多角的分析を行うことが重要である。特に東北緊急掘削は、検層・応力測定によって認定された温度異常・地震破壊面が、掘削コアにおいてどのような熱異常・変形として記録されているのかを検討する絶好の機会であるといえる。

掘削コア試料を用いた実験と熱物性測定

断層帯から採取したコア試料を用いて透水実験や摩擦実験を行い、断層帯の浸透率構造や摩擦特性を決めることが重要であるのは、今更議論の余地がないほど明白である。本分科会の発表・議論を通じて新たに浮き彫りになった課題と提言は、以下の7つに集約できよう。

(1) 沈み込み帯物質を用いた摩擦実験は数が限られており、その限られた実験結果だけみても、沈み込み帯物質の摩擦特性は、これまでよく検討されている結晶質岩石のそれと大きく異なっている（特に摩擦熔融時）。沈み込み帯物質を用いた更なる実験が必要である。

(2) 低速から中速域での摩擦の速度強化と速度弱化作動を分ける要因を調べる必要がある。

(3) 沈み込み帯における同一深度での多様なすべり（スロースリップから高速すべり）をインプット物質の摩擦特性のバリエーションで説明可能か検討する必要がある（関東アスペリティ掘削）。

(4) 高速すべりに伴う断層の応答性を調べることで、破壊伝播による巨大地震の発生と津波の励起を考えるうえで重要である。特に東北緊急掘削では wet 条件下での断層ガウジの摩擦特性が鍵となりそうである。

(5) 実際の断層物質を用いた熱物性測定を行うことが、地震すべり時の温度上昇量、剪断抵抗、エネルギー収支をより正確に見積もるうえで重要である。

(6) 摩擦実験で形成された微細構造と掘削コア試料の微細構造の双方を検討することで、地震時の摩擦特性とその根底にある物理プロセス・断層変形の素過程を理解することが可能となる。

(7) 高速すべりまでを含めた沈み込み帯物質の摩擦構成則を記述し、その性質に基づいて断層すべり挙動を予測するために、実験研究とモデリング研究の連携が不可欠である。

分科会話題提供者

1. 斎藤実篤 (JAMSTEC/IFREE) : LWD による断層帯構造と characterization
2. 林 為人 (JAMSTEC/Kochi) : 応力測定
3. 石川 剛志 (JAMSTEC/Kochi) : 微量元素・同位体からみた地震時の断層における流体岩

石相互作用・摩擦融解

4. 亀田 純(東京大学)：沈み込みに伴う玄武岩中の粘土鉱物変化
5. 堤 昭人(京都大学)：沈み込み帯物質の摩擦特性
6. 氏家恒太郎(筑波大学)：天然と実験における沈み込み帯物質の高速すべりの特徴
7. 廣野哲朗 (大阪大学)：断層掘削コア研究の意義-TCDP Hole B を例として-

IV-2. 分科会「地震発生帯における海底・孔内観測研究」報告

日野亮太 (東北大学)・篠原雅尚 (東大震研)

分科会2は「地震発生帯における海底・孔内観測研究」をテーマとして議論を行った。議論は、WS 世話人から提示された「Key Questions」を参加者に提示し、それに対する答えを用意する方向で進めた。「Key Questions」は以下の通りであった：

- ・ プレート境界浅部が大規模に破壊した東北地震を踏まえ、今後の地震発生 of 理論的研究、地殻変動・水理観測研究をどのように再構築していけば良いか？
- ・ 東北、関東、南海の共通の問題、個別の問題は何か？
- ・ 3つのプロジェクトの現状・課題を踏まえ、それぞれ海底観測と組み合わせた掘削孔観測研究はどのように展開すべきか？
- ・ 特に、東北緊急掘削ではどのような海底観測、孔内観測が必要か？(DPG での議論を踏まえ)
- ・ 日向～琉球弧、さらには環日本列島規模でプレート境界を見直す必要性は？

というものであった。

そこで、現在進行中の地震発生帯掘削計画である 1) 南海掘削計画 (NanTro SEIZE), 2) 関東アスペリティ掘削計画 (KAP), 3) 東北緊急掘削計画 (Tohoku Rapid Response Drilling) の3課題のそれぞれについて、長期モニタリング観測の観点から目標や課題に関する話題を提供してもらうとともに、地震発生サイクルの数値モデリング開発の立場から長期モニタリングに求められるものについての提言を受け、これらを踏まえて、地震発生帯掘削計画全体を共通するテーマと3つの掘削計画のそれぞれで力を入れるべきテーマについての具体的な検討を行った。以下に、このように進めた議論における論点と結論について報告する。

NanTro SEIZE における長期モニタリングに関する話題提供を、荒木英一郎氏 (海洋研究開発機構) から受けた。NanTro SEIZE による掘削が進められている南海トラフ・熊野灘海域においては、海底地震観測網 (DONET) の正式稼働開始がまもなくであって、これ

と孔内長期モニタリングとを総合して、地震発生帯における断層すべり過程を包括的に理解することが目標となっている。掘削孔を用いた観測システムとしては、すでに1つの掘削サイトには地震・測地・水理センサーを備えた装置が2010年末に設置されたことが報告された。孔内長期モニタリングの具体的な狙いとしては、固着域前縁におけるゆっくりすべりイベント（SSE）の全貌解明が挙げられる。強く固着して巨大地震の発生準備過程にある領域の周辺ではSSEの発生が予測され、固着域のトラフ側においては長周期の地震波励起を伴う超低周波地震（VLF地震）の活動が知られる。こうしたVLF地震の活動は固着域の深部側の遷移域において見られるが、ここではVLF地震だけでなく、地震波をほとんど励起しないSSEややや短周期の地震波が継続して観測される非火山性微動など複数の種類の特徴的な活動が見られる。掘削が行われている浅部側の遷移域では、これまでこうしたSSEの多様性を示すような観測事例は得られていないため、その検知と活動度の解明はNanTro SEIZEによる長期モニタリングの中では特に重要な目的である。また、巨大地震の発生に関与する断層帯に直接アプローチできる深部掘削が実現できるため、断層帯近傍における間隙水圧の実測は非常に意義深いものと期待される。断層帯における間隙水圧については、断層強度に強い影響を及ぼすために重大な関心が払われている一方で、巨大地震発生の際における実測がないため、まずは絶対値を正確に把握することが、当面の最重要課題であることが説明された。

KAPに関連した話題は、佐藤利典氏（千葉大学）より提供を受けた。KAPは掘削提案が審査を受けている段階であるが、長期モニタリングに関するパートは外部レビューを受けている。KAPにおける長期モニタリングの特徴は、房総半島沖で発生しているSSEの発生サイクルを高感度観測することにより把握することを目標としていることにある。この領域においてはSSEは5～6年程度の間隔で繰り返し発生しており、最近のイベントの発生は2007年であった。房総SSEは、比較的一定の繰り返し間隔を示す一方で、カップリング率は100%近くあると推定されているため、長期モニタリングによってプレート間固着による発生準備—すべりイベント発生—固着の回復という、断層固着—すべりのサイクルを連続して観測することができる可能性が高く、地震発生サイクルのモデル化のための実地検証の対象となりうると期待できる。通常のプレート間大地震は繰り返し間隔が100年程度あるため、その実地検証はほぼ不可能であるが、房総SSEはその短い繰り返し間隔から、複数のサイクルを連続して捉えることができる数少ない繰り返しイベントである。観測の具体的なプランは、測地帯域のアレイ観測を指向したものであり、これはSSE発生域におけるすべりの時空間発展を正確に把握することが目標達成のために不可欠であるためである。SSEにおける傾斜変動のモデル計算から、海底下の比較的浅い掘削孔を用いた観測でSSEによるすべりを十分なS/Nと分解能で検知可能であることが確かめられている。NanTro SEIZEの対象である南海トラフ熊野灘とは逆に、房総沖ではSSEの発生が知られる一方で、VLF地震の発生はこれまで知られておらず、広帯域地震計を用いてVLF発生の有無を検証することも、SSEの多様性を理解する上で大変興味深い。

Tohoku RRD に関する話題提供は、小平秀一氏（海洋研究開発機構）が行った。RRD は、地震発生直後に緊急に実施するという特質から、特に緊急を要するものに焦点を絞る必要があることが説明された。そうした背景の下、Tohoku RRD の検討にあたっては、地震時すべりに伴う発熱量の正確な見積もりが、最重要課題であると認識されている。地震時発熱量は、地震の動的すべり過程における摩擦強度を推定するための数少ない観測量であり、RRD はその計測を実現する貴重な機会である。一方で、RRD とはいえ、地震発生の直後に測定できるのではないため、地震後の熱拡散過程を同時に理解しなくては、RRD での観測から地震時発熱を正確に推定することができない。そこで、断層近傍で温度とその時間変化を測定するだけでなく、その周囲での空間的な変化もあわせて明らかにする必要がある。地震発生後に固有の過程として、余震活動や余効すべりも、モニタリングにおける重要な対象であるが、設置地点が大深度であることなどによる技術的な困難さから、優先順位は高くはない。ただし、RRD を中心とした研究を進める上では、こうした地震・測地観測は重要であって、自己浮上機器を用いた海底観測との連携の必要性が認識された。

地震発生サイクルのモデリング研究の視点から、海底・海底下モニタリングに対する提言を堀高峰氏（海洋研究開発機構）より受けた。プレート境界型地震の発生過程に見られる南海トラフと日本海溝との違いに、上盤側の変形・破壊履歴や応力場の違いが関与している可能性が指摘された。南海トラフでは海溝内側の付加体内部に out-of-sequence thrust などの大規模構造があるのに対して、日本海溝では地震探査イメージを見る限り短波長不均質が卓越して大規模構造は不明瞭である。こうした違いは、プレート間相対運動による変形が、プレート境界面に沿って局在化するか・周囲に拡散するかを反映している可能性がある。こうした変形様式の違いは、今回大きなすべりをもたらした浅部プレート境界のモデル化に重要な意味を持つため、海溝近傍での変形場のモニタリングとコアサンプリングが重要であることが指摘された。また、日本海溝において従来観測されていた小繰り返し地震の活動が、東北地方太平洋沖地震の後どのように変化したのかを詳細に明らかにすることの重要性が指摘された。小繰り返し地震は、プレート境界面上の小固着域の繰り返し破壊と解釈されており、固着域が地震発生のサイクルにわたって不変であることの根拠となっていたが、巨大な断層すべりを伴った今回の地震がそうした「不変性」に影響を及ぼしたか否かの検証は、媒質特性の時間変化をモデル化する必要性を考える上で重要であるためである。さらに、観測とモデリングとの相互検証のために、今回の震源域だけでなく周辺の沈み込み帯でも、広域にプレート間すべり速度の時空間分布を把握することが必要であることが示された。

以上のような話題提供とそれに基づく議論を踏まえて、「Key Questions」のそれぞれに対する回答の検討を進めた。

- ・ プレート境界浅部が大規模に破壊した東北地震を踏まえ、今後の地震発生の理論的研究、地殻変動・水理観測研究をどのように再構築していけば良いか？
- ・ 東北、関東、南海の共通の問題、個別の問題は何か？

東北地方太平洋沖地震では、海溝軸に至る（すくなくとも非常に近いところ）までの範囲で大きな地震時すべりがあったことが示されている。こうした海溝近傍（以下、「tow 領域」）における大きな地震時すべりは、従来想定されていなかったことであり、それだけに超巨大地震発生のメカニズムと深く関連している可能性が高い。実際、M9 の超巨大地震と M7~8 の大地震が共存するような地震サイクルを再現できるモデルにおいては、「toe 領域」の振る舞い（すべり速度の変化）が重要であることが認識されるに至っている。従って、東北地方太平洋沖地震の発生は、「toe 領域」における長期モニタリングを視野に入れた計画立案の必要性を示すものであると考えられる。

これを踏まえ、地震発生サイクルを理解する上での長期モニタリングの役割を改めて議論した。通常地震発生サイクルを完全にモニタリングすることは不可能ではあるが、地震サイクルの中で異なるステージにある領域の比較は地震サイクルの理解に貢献するものである。従来、南海トラフと日本海溝とは、「比較沈み込み学」の文脈からは、異なる地震テクトニクスのある場であると認識されそれらの直接的な比較は困難と思われてきたが、近年の NanTro SEIZE の成果と東北地方太平洋沖地震の発生は、両者で「toe 領域」での大規模破壊が共通なプロセスとして存在することを示しており、「toe 領域」に着目することで、地震準備過程（南海）と地震時・地震後過程（東北）とを総合的に理解し、地震発生のサイクルのモデル化に貢献できるであろう。こうした複数の地震発生帯の比較と、KAP がめざす SSE 繰り返しサイクルの連続モニタリングとは、地震発生サイクル解明のための両輪として並行して推進している必要があって、「地震発生サイクル」の理解が 3 プロジェクトにおける長期モニタリングの共通テーマであると結論できる。

一方、各計画に固有の問題設定とそれをクリアするための要点は次のようにまとめることができる。

東北においては、特に地震後急速に減衰する「地震時変動」の痕跡と「地震後変動」に重点を置いた観測研究の推進が最重要課題となる。RRD における温度計測とそれをバックアップするための海底観測網の実現と維持はもちろんのこと、RRD 掘削孔を利用した繰り返し観測や、新しい掘削孔を用いた長期モニタリングも視野に入れた、post-RRD の研究計画の検討にも早急に着手する必要がある。

NanTro SEIZE では、他の計画に比べてモニタリングシステムの開発・設置が先んじていることもあって、着実なデータ取得が重要課題と考えられる。特に、「toe 領域」よりも深部側の 1944 年東南海地震のような M8 級地震で高速破壊を示す領域におけるモニタリングの重要性は、依然として特筆すべきものである。なぜなら、従来「地震発生帯」と考えられてきた深度での断層の振る舞いと「toe 領域」における断層の振る舞いは異なっ

いることが予測されるが、南海トラフはそれを検証できる数少ない海域であるからである。したがって、NanTroSEIZE では、深部掘削と掘削孔での長期モニタリングを計画通り実現するとともに、「toe 領域」においてもモニタリングが実現できるような努力が必要である。

KAP における長期モニタリングは、断層近傍でのモニタリングではない点で非常にユニークである。掘削が測定対象（断層）に近づくためだけに貢献するのではなく、高感度・高分解能観測網の実現のために貢献するという意味で、深海掘削計画の中では新しいプロジェクト・モデルである。一方で、こうした観測網の実現は、地震発生サイクルのモデル化を介することにより、他プロジェクトや KAP の深部掘削提案との総合が可能であり、単なる地震・地殻変動モニタリング計画ではなく、断層に関する総合地球科学に大きく貢献できるものとして、コミュニティを挙げて推進する必要がある。

個別の計画に関する議論とともに、断層掘削に関連した長期モニタリングに共通した課題として、モニタリング装置の調達の高難易さが認識された。海底孔内モニタリングそのものが確立された観測技術ではなく開発要素が多いこともあって、装置の準備やその設置には長い準備期間と多額の資金が必要である。NanTro SEIZE においては関係者の尽力の結果、モニタリング装置の開発・設置が進められてきたが、KAP においては資金調達の面で困難があり、RRD では装置の準備期間が実現可能な観測項目を制約するという状況になっている。さらに、長期連続してデータを安定供給するためには、さらなる努力・資金が必要であるということも、改めて認識された。

- ・ 3つのプロジェクトの現状・課題を踏まえ、それぞれ海底観測と組み合わせた掘削孔観測研究はどのように展開すべきか？

いずれのプロジェクトにおいても、海底観測と海底孔内モニタリングのそれぞれの特質を活かした総合観測が必要である。海底観測は、孔内モニタリングに比べて機器の設置やデータ取得が容易であることから、多点広域展開が可能であるとともに、多くの異なる物理量の計測が可能であるという利点をもっている。一方で、孔内モニタリングは、対象となる現象とそのソース（断層すべりと断層）に近づくことと、ノイズ源（海洋）から遠ざかることの2つの効果により、S/Nの大幅な向上を図って海底観測では測定しえない現象を捉えることができる。

掘削孔が直接対象に届く NanTro SEIZE では、断層とその直近における物理量の直接測定と準静的な変形の連続モニタリングが、孔内長期モニタリングの最重要課題となる。従って、間隙水圧や水温ならびに傾斜・歪の孔内観測は特に重要である。一方で、掘削孔の数は限られるため、DONETだけでなく、HiNetやGEONETといった海陸の観測網によるデータから広域変動を把握することと同時に進める必要がある。さらに、海底地殻変動を把握する上での有効性が認知されつつある、GPS/音響結合式海底測地観測との連携も視野に入

れた研究計画の展開が求められる。また、孔内地震計は安定した環境で長期観測ができること、断層帯の近傍であること、から断層帯近傍における地震学的構造の時間変化の検知に有効であると期待される。地震波干渉法のような passive な手法とともに、繰り返し人工地震探査などによる、構造モニタリングへの活用も視野に入れたい。

観測網構築を指向する KAP においては、海底観測網との統合は本質的であり、KAP で提案されている孔内計測ネットワークを土台として、海底・海底下観測の統合観測網の具体的なデザインを進めることが求められる。

- ・ 特に、東北緊急掘削ではどのような海底観測、孔内観測が必要か？（DPG での議論を踏まえ）

上の報告と重複するが、東北緊急掘削においては、孔内温度観測が最重要課題である。しかし、水深 6,000 m 以上・掘削深度 1,000m 以上という難しい条件で実現可能な観測方法には限りがあるため、その検討は実効性のある掘削計画を立案する上できわめて重要な位置を占める。一方で、限られたデータから最終目的である、地震時の断層における摩擦特性を理解するために、掘削孔以外の観測データが活用可能か検討を進める必要があるだろう。たとえば、地震後の応力状態・余効すべりは、地震時の断層のすべり特性と関係があると期待されるから、海底地震・測地観測による余震観測・余効すべり観測との協働を前提にして、孔内モニタリングの検討を進める必要がある。

- ・ 日向～琉球弧、さらには環日本列島規模でプレート境界を見直す必要性は？

沿岸における歴史地震による津波に関する地質調査の結果から、南海トラフ沿いで発生する地震の破壊域は、九州パラオ海嶺を越えて日向灘側にまで広がるのが指摘されている。また、琉球弧においても 1771 年の八重山地震が琉球海溝沿いにそった「津波地震」であった可能性が指摘されている。こうした、例外的に大きな地震の発生には、東北地方太平洋沖地震と同様に「toe 領域」の振る舞いが強く関与している可能性があり、モニタリングの観点からすれば、「toe 領域」における海底地殻変動観測の強化が最優先課題としてあげられる。これと同時に、非地震性すべりの状況把握のためには、小繰り返し地震の活動度のモニタリングも有力であり、琉球弧では海底地震観測による長期モニタリングの実現を図るべきであろう。

一方で、NanTro 掘削での成果にあるように、深海掘削は、「toe 領域」での高速破壊の可能性を検証する上で重要な役割を果たすほか、過去の巨大地震発生履歴の解明にも貢献できると考えられる。長期的な地震発生ポテンシャルの見直しを迫られる今、長期モニタリングを含む海底掘削が果たすべき役割は非常に大きいと言える。

IV. 各掘削プロジェクトの研究目標・戦略の強化

IV-1. 東北緊急掘削

林 為人 (JAMSTEC 高知コア研究所)

掘削計画の概要紹介、キーノート講演、分科会でのプレゼンおよび討論に基づいて、東北沖地震断層緊急掘削の掘削提案に向けて、科学目標・作業仮説・成功に導くための実施戦略などについて議論された。科学掘削により捉えられるシグナルと現象は、地震発生後の数年以内に消失してしまうものと、長年にわたってもあまり変化しないものがある。そのため、緊急的な掘削と、中長期的なアプローチに分けて考えるべきであり、今回のワークショップでは主として前者にフォーカスした。検討された主な内容を以下に取りまとめる。

1. 科学目標

2011年3月11日、東北地方太平洋沖で発生したM9の巨大地震は、日本海溝に近いアウターウェッジの部分できわめて大きな断層滑り変位を起こした。この特異な断層挙動を解明することは、地震発生と断層破壊の伝播のみならず、きわめて大きな被害をもたらした巨大津波の発生メカニズムを理解するためにも重要である。そのための最も有力な手段が断層を直接掘削することである。多くの場合、大きな変位が発生した断層の深度が深く、現有の掘削技術では到達できないが、東北沖地震では大水深の困難があるものの、掘削可能であると考えられている。地震時に発生する断層の摩擦熱のような、地震時の断層滑りの本質を理解するために重要なシグナルは地震発生後の比較的短期間にしか捉えることができないため、緊急掘削 (Rapid Response Fault Drilling) の必要性が共通認識として確認された。

緊急掘削の最重要科学目標は、プレート境界のアウターウェッジ部の滑り挙動の解明とし、具体的には断層を掘り抜き、断層の地震滑り時の最大履歴温度、断層の動的強度、断層の構造、応力状態、物理・化学性質の解明 (岩石-流体反応を含む) などである。これらを解明することにより、海溝型巨大地震のサイクルにおけるプレート収束帯の前縁部 (Toe) の役割について重要な知見が得られると期待されると同時に、地震発生後の東北緊急掘削は、地震の準備過程にある南海掘削の断層挙動と比較できる。すなわち異なるステージにおける海溝型地震断層の比較ができる可能性もある。

2. 主な作業仮説 (案)

掘削により検証すべき主な作業仮説は以下のように集約されつつある。

- ✓ 今回の震源断層の破壊はプレート境界にそって、海溝軸付近まで伝播した。
- ✓ 断層の動的摩擦強度が弱く、大きな滑り変位が発生した。また、低摩擦強度の1要

因としては、断層物質の摩擦特性にある可能性が高い。

- ✓ 上盤（場合によって下盤も）の応力状態は、正断層型の余震で示唆されているように、断層の地震性滑りにより正断層型に変化した可能性が高い。また、地震時の応力降下が大きかった。

3. 掘削計画案の骨子

緊急掘削計画（案）の骨子としては、以下のことが検討され、意見の集約がなされた。

- ✓ 緊急掘削は地震時滑った断層を貫くことが重要である。
- ✓ 掘削サイトの水深が 7000m 前後になると予想され、ライザーレス掘削になる。
- ✓ Primary site の掘削深度（海底下深度）は 1000 mbsf 程度が望ましい。断層破碎帯の影響等で困難になることもあるため、300-500 mbsf の Contingency site の計画も重要である。また、両方とも重要で、Primary site とすべきとの意見も強かった。
- ✓ そのほかの Contingency site としては、Back stop and/or Normal fault (Tsuji et al., 2011, EPS, in-press) や、一つの Transect に沿って、南海掘削第 314 次航海 (Tobin et al., 2009) のように、複数の LWD sites を提案すべきとの案もあった。
- ✓ LWD 掘削を行った後に、コアリングの掘削を行う。
- ✓ 繰り返し温度プロファイルの測定のために、Casing と Re-entry が望ましい。

4. 今後の課題など

今後の掘削提案あるいは掘削の実施に向けて、以下の課題もクローズアップされた。今後の課題と関連事項を以下に列記する。

- ✓ 掘削サイトの詳細位置を決めるために、詳細な地震反射断面や海底地形図を得ることが望ましい。IODP に提出予定の Full Proposal の締め切りである 2011 年 8 月 1 日までは、新規に地震反射断面を取得する予定はないが、Proposal の審査期間中に（掘削の実施計画の策定までに）、JAMSTEC のマルチチャンネルや海底付近で行う高精度音響海底地形・地下構造等の調査は追加実施される予定である。
- ✓ 断層帯コア試料を使った解析・分析が重要であるため、断層帯コアの回収率の向上やそのコア試料の効率的利用は重要である。
- ✓ 大水深の海洋掘削におけるボアホール内の温度プロファイルを高精度かつ繰り返し測定する技術の高度化が必要であろう。
- ✓ CORK 等による間隙水圧の現場測定・長期観測、多船式 VSP、歪計等の孔内地殻変動観測なども重要であるが、緊急掘削としては対応が困難と考えられる。また、海底地すべりや Input サイトの掘削も海溝型地震および津波発生の理解に重要であるが、同様に通常の掘削提案として検討されるべきであろう。

IV-2. 関東アスペリティ・プロジェクト

小林励司（鹿児島大学）

当初示した課題は以下の通りであった。

1. 超深度掘削の内容の熟成：アスペリティでもスロー・スリップ・イベント (SSE) 領域でも、一番浅い部分を1か所掘削して、どのような情報を得るか。どのように全体を理解するか。モデリングにどのように結びつけるか。
2. Toe の掘削をどうするか。どのような情報を得るか。
3. 東北地方太平洋沖地震をきっかけにして、勢いに乗せるには、どのようにしたらよいか。戦略面と資金面（特にモニタリング機器）。

1. と 2. は共通するところもあるので、まとめて記述したい（以下で a. とする）。また、当初の課題になかったモニタリングに関しては、external review に行っていることもあり、大幅な変更は考えていないが、検討事項のアイデアをいただいたので、触れておきたい (b.)。3. は、結局のところあまりこの WS では馴染まない内容であったが、簡単に触れたい (c.)。

a. 超深度掘削 + Toe

どちらも input sites との連携している。SSE 領域は、フィリピン海プレート上では海溝近くの蛇紋岩海山列が沈み込んでいる領域であると考えられる。廣瀬さんらの提言によると、蛇紋岩の高速での摩擦特性が creep から frictional に変化する。Slow slip 領域の温度を考えると creep となり、slow slip を説明できる可能性がある。また、芝崎さんによると、大正のアスペリティよりも高間隙水圧である可能性があるが、これは超深度掘削で検証する必要がある。一方、大正のアスペリティは火山岩の海山列が沈み込んでおり、それが frictional な摩擦特性を持つと考えられる。

どちらもスラブ上面の凹凸がなんらかの形で slow slip や固着に関与している可能性がある。その可能性として、やはり凹凸に伴う間隙水圧の変化があり、それを超深度掘削で検証できる可能性がある。

SSE 領域とアスペリティでそれぞれ1か所の掘削で、どのように全体を理解するか、という課題に関しては、SSE 領域のみについては、長期モニタリングで全体の摩擦特性パラメーターの分布が推定される。超深度掘削において1か所でそれを検証することで、全体の理解につなげることができる。

アスペリティのほうは、長期モニタリングからは（地震が起きない限り）摩擦特性の推定はできない。堤さんの提言にあった core-log-seismic integration によって、seismic のデータを利用して全体の理解につなげられる可能性がある。現在でも反射強度とアスペリティの位置の関係が指摘されているが、それをコアやロギングデータで使える可能性が

ある。現時点では core-log-seismic integration は開発段階であるため、超深度掘削が実現する頃にさらに進歩していることを期待する。

一連の講演や話題提供で多く言及されたのが、高速での滑りの挙動であった。例えば氏家さんの結果によると、シュードタキライトがイライトの近くで見つかっており、またイライト自身は速度強化を示すことから、速度強化域にも高速の滑りが伝播した可能性が指摘されている。これらの結果は、東北地方太平洋沖地震の toe での大きな滑りに大きく関わっている可能性がある。KAP においても、SSE 領域の南の toe の部分が元禄地震の津波波源域である可能性がある。Toe の掘削により、歪を十分蓄積できるか摩擦特性であるか、低速～高速ではどのような滑り挙動を示す摩擦特性であるか、等といったことを調べることも重要である。また、ビトリナイトを調べることにより toe まで実際に滑りきっているかどうかを調べるができる。

b. モニタリング

以下の提案をいただいたので、今後検討していきたい。

- 海底での GPS 音響観測と海底水圧観測（水圧は孔内よりは良いとのこと）
- 孔内での広帯域地震計観測では、他の地域で見られる、超低周波地震や非火山性微動の検知も
- 応力の空間分布（モニタリング？）
- Toe で固着しているかどうかの（地殻変動の）モニタリング

c. 戦略

特に地震学のコミュニティに情報が伝わっていないことが多く、その風通しを良くすることによって、他プロジェクトとの連携や資金調達等の道が見つかる可能性がある。

IV-3. 南海トラフ地震発生帯掘削：今後の展開と戦略

木下正高（海洋研究開発機構）

IODP に提出された掘削提案では、検証すべき仮説として、以下の 5 項目が挙げられている：

- (1) 系統的・順次的な物質・状態変化が、地震発生断層でのすべりを支配する
- (2) 沈み込み帯の巨大断層は弱い；比較的小さいせん断応力ですべりが生じる
- (3) 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すべりによって解消される
- (4) 断層帯での物性・化学組成・状態は地震発生サイクルを通じて時間的に変動している

(5) 巨大分岐逆断層系 (00ST) は個々の巨大地震活動ですべりを生じ、津波を発生する原因をなす。

これらの仮説を検証するためには、断層を速度強化 (安定滑り) 領域から速度弱化 (固着) 領域にわたって様々な深度で掘削し、試料の記載や分析・物性計測・破壊実験等を実施するとともに、孔内検層・実験や長期孔内計測により、現場状態の把握を行うことが必要であることを述べた。

上記の仮説は基本的には現在でも有効である。特に(5)は掘削により浅部まで高速すべりが伝搬していることが強く示唆されるなど、その正当性が支持されつつある。また 2011 年 3 月 11 日に発生した、東北日本太平洋沖地震では、メインの滑りを生じる固着域での挙動と同様に、その海側の、これまでよく分かっていなかった先端部の挙動を把握することも重要であることが明らかになりつつある。

一方、「ちきゅう」の掘削日程は、予算、黒潮、そして今回の地震など、様々な障害により、NanTroSEIZE の最大の目標である、海底下 7km の断層固着域への到達が道半ばである。今回のワークショップでは、このような事情を鑑みつつも、当初の目標を堅持することで合意された (図 1)。ただし、現状では、当初のゴールである 2013 年までに、プレート境界断層 (7km) には到達することは、日程・予算上から極めて困難であることが、IODP-MI および CDEX から指摘されており、その場合には巨大分岐断層 (5.2km) への到達と試料採取・孔内計測を 2013 年までに完遂することとし、その後に別途提案を行うなどして、2014 年以降にプレート境界断層への到達と長期孔内計測の開始を狙う。

それと同時に、固着域海側の断層浅部の挙動把握は、来る東南海地震での津波発生予測にとって極めて重要な意味を持つことを踏まえ、その正確な把握を目指した掘削・観測も視野に入れることが、新たに提案された。特に長期孔内計測は、南海掘削では DONET に接続することでリアルタイムで地下の状態が把握でき、地震準備過程の長期予測等に極めて大きな役割を果たすことは間違いない。

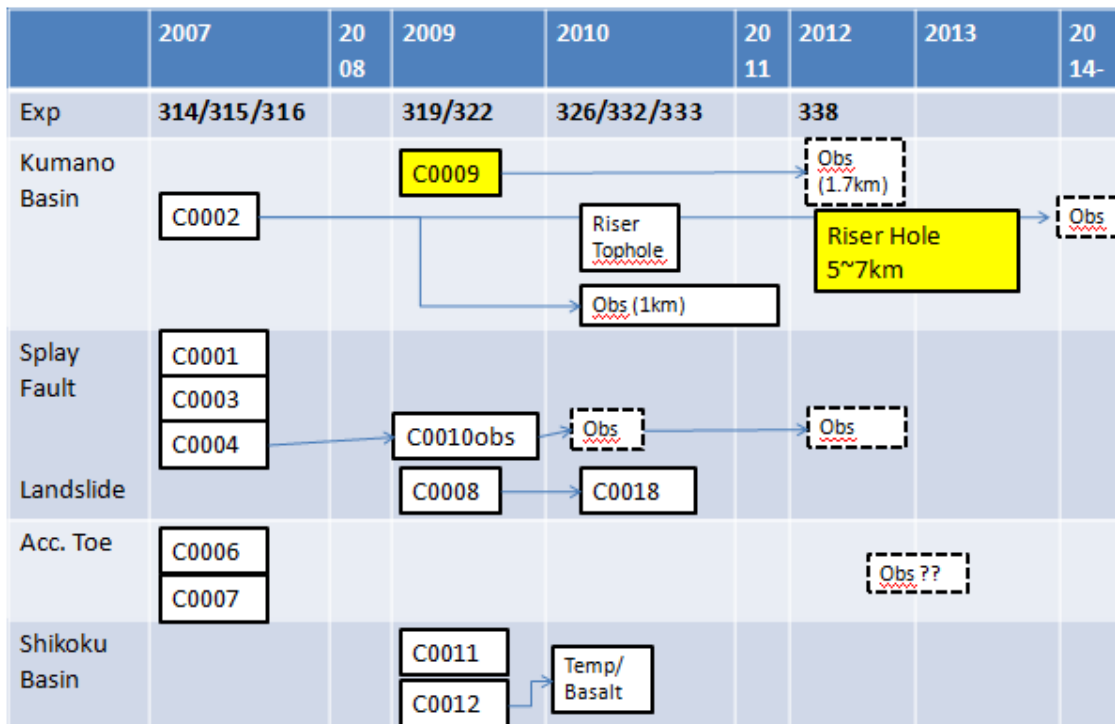


図1 南海掘削の実績と今後の予定 (2011年6月現在)

IV-4. Key questions across the projects

Jim Mori (Kyoto University)

The discussions during the last two days have included many important results from fault drilling projects of onshore faults, such as the Nojima Fault, Chelungpu, Fault in Taiwan, Wenchuan fault in China. In future discussions of fault zone drilling projects, it would be good to consider both onshore and offshore faults together. There are some structural and tectonic differences between faults on land and under the ocean, but most of the basic scientific issues regarding slip during large earthquakes are the same for both types of faults. Usually drilling on land is technically less challenging and can be done for much less cost. When considering specific sites to address scientific issues with fault zone drilling, it would be appropriate to consider options for both onshore and off-shore faults.

The three drilling projects discussed in this meeting, have similar scientific objectives in trying to understand the nature of faulting in large earthquakes. During the last two days, we have heard about many topics related to the properties of faults and slip

during large earthquakes. Repeatedly the same key words have been used, for example, Large Slip, Friction, Stress, Temperature, Water, Mineralization.

Since there are some basic issues that often discussed with fault drilling projects, it might be useful to have a set of questions that point to the common scientific goals. These questions can help focus the objectives when organizing future proposals related to fault zones. For example,

1. How do we explain the large slip of earthquakes ?

It is currently difficult to understand when and where large slip occurs. A small earthquake and large earthquake can occur at the same location on a fault. A single large earthquake has areas of both large and small slip. We would like to identify the factors that control the amount of slip during an earthquake.

2. Can we develop/verify a general friction law ?

Is there a general friction law that is applicable to a wide range of slip velocities that includes slow or aseismic events, as well as normal earthquakes ? We would like to understand the physical mechanisms that are associated with such a law.

3. What is the role of fluids in large earthquake slip ?

Fluids in a fault zone can significantly affect the behavior of an earthquake rupture, by changing the frictional properties and altering chemical composition. We would like to understand how the amount, temperature, and pressure of the fluids affects the fault slip during large earthquakes.

4. How does the specific geological setting affect the different behavior of faults ?

There are a variety of tectonic settings that produce different types of earthquakes, both onshore and offshore. In addition, complexities in geological conditions can produce different styles of faulting, even for a single type of regime, such as subduction zones.

5. What changes in physical parameters and fault behavior can see through the earthquake cycle ?

Studying the characteristics of different faults which are at different stages in the earthquake cycle (such as before and after a large event) can help identify

time-dependent properties of a fault.

V. 謝辞

本ワークショップを開催するにあたり、助成金として J-DESC 会員提案型活動経費を配分していただき、参加者の旅費の一部として活用させていただきました。ワークショップの開催準備、当日のロジ等を CDEX/J-DESC 事務局の皆様にご多大なるご協力をいただきました。準備時期から本ワークショップの企画運営を支えて下さった川幡穂高 IODP 部会長をはじめ、J-DESC の関係各位には大変お世話になりました。3週間という短い準備期間にも関わらず、多くの方の積極的な参加により、実りあるワークショップを開催することができました。関係するすべての方々に御礼申し上げます。

V. 引用文献

- Tsuru, T., Park, J., Miura, S., Kodaira, S., Kido, Y. and Hayashi, T. (2002). Along-arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling. *Journal of Geophysical Research* 107(B12): doi: 10.1029/2001JB001664. issn: 0148-0227.
- Ito, Y. and K. Obara (2006), Very low frequency earthquakes within a accretionary prisms are very low stress-drop earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL025883.
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M. and Shimamoto, T., Fault lubrication during earthquakes, *Nature*, 471, 494-498, doi:10.1038/nature09838, 2011
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M., Kanazawa, T., 2011. Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, *Earth Planets Space* 63. doi:10.5047/eps.2011.06.010.
- Ide, S., Baltay, A. S. and Beroza, G. C., Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1426-149, doi:10.1126/Science.1207020, 2011
- Kano, Y., J. Mori, R. Fujio, H. Ito, T. Yanagidani, S. Nakao, K.F. Ma, Heat Signature on the Chelungpu Fault Associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2006GL026733, 2006.
- Park, S. and J. Mori, Are Asperity Patterns Persistent? Implication from Large Earthquakes in Papua New Guinea, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JB004481, 2007.
- Uyeda, S. and Kanamori, H. (1979) *Jour. Geophys. Res.*, 84, 1049-1061.
- Bilek, S.L. 2010, The role of subduction erosion on seismicity, *Geology*, v. 38; no. 5; p. 479-480;

DOI: 10.1130/focus052010.1

von Huene, R., and Scholl, D., 1991. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Rev. Geophys.*, 29:279-316. Wang, K. and Hu, 2006, JGR, 111

Kimura, G. et al., Transition of accretionary wedge structures around the up-dip limit of the seismogenic subduction zone, *Earth and Planetary Science Letters*, 255, 471-484, 2007.

Tobin, H., et al. (2009), Expedition 314 summary, in *NanTroSEIZE Stage 1: Investigations of Seismogenesis, Nankai Trough, Japan, Proc. ICDP, 314/315/316*, doi:10.2204/iodp.proc.314315316.111.2009.

Tsuji, T., et al. (2011), Potential Tsunamigenic Faults of the 2011 Tohoku Earthquake, EPS, in-press.

<関連ウェブページ>

IODP - Initial Science Plan: <http://www.iodp.org/isp/>

IODP - Science Plan for 2013-2023:

<http://www.iodp.org/Science-Plan-for-2013-2023/>

南海トラフ地震発生他掘削計画: <http://nantroseize.com/>

KAP -Kanto Asperity Project-: <http://www.iodp-kap.org/>

東北地方太平洋沖地震断層緊急掘削 DPG レポート (日本語)

<http://www.j-desc.org/modules/tinyd0/rewrite/uploads/docs/reports/110518DPG.pdf>

東北地方太平洋沖地震断層緊急掘削 DPG レポート (英語)

<http://www.iodp.org/weblinks/Featured-Publications-HOME-PAGE/Report-Rapid-Response-Drilling-Following-Tohoku-Earthquake/>

ワークショップ「深海掘削による生命・地球科学の新しいパラダイムを求めて」<特別セッション : 東日本大震災が投げかけた巨大地震科学の新たな課題>:

http://www.j-desc.org/m0/events/110521_newparadigmWS.html

本ワークショップ:

http://www.j-desc.org/modules/tinyd0/rewrite/events/110622_faultWS.html

Integrated Ocean Drilling Program (IODP): <http://www.iodp.org/>

日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC): <http://www.j-desc.org/>

Appendix-1 : ワークショッププログラム

断層掘削合同ワークショップ

【日時】 2011年6月22日(水) 13:30～ 6月23日(木) 9:30～17:00

【場所】 1日目と2日目の会場が異なりますのでご注意ください。

6月22日(水) 海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A/B

6月23日(木) 海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂

【世話人】 Jim Mori・木下正高・小林励司・斎藤実篤

【後援】 日本地球掘削科学コンソーシアム

【開催趣旨】 東北地方太平洋沖地震を契機に、進行中・提案中の断層掘削プログラム(南海掘削、関東アスペリティ等)の科学目的・研究戦略の先鋭化を図るとともに、東北沖断層緊急掘削の実現へ向け、地震学、地殻変動、反射法、検層、断層岩、水理地質、地球化学、地球熱学、応力、物性、岩石磁気など各分野の研究者の知識と経験を結集することが求められている。本ワークショップでは各プロジェクトを横断する議論により、(1)各断層掘削の共通の問題と固有の問題の抽出・整理、(2)NanTroSEIZE 深部掘削へ向けての研究目標・戦略の強化、(3)関東アスペリティを実現へ導くための研究内容・戦略の再検討、そして(4)東北沖地震断層緊急掘削の掘削提案の作成へ向けた、科学目標・作業仮説の構築を目的とする。

【プログラム(案)】

6月22日(水) JAMSTEC 東京事務所

11:00-

・プレミーティング「東北沖緊急調査のデータ検討会」

13:30 開会挨拶(J-DESC IODP部会長 川幡穂高)

13:35 ワークショップ開催趣旨説明(木下正高/斎藤実篤)

13:45 断層掘削計画の概要

・東北緊急掘削(小平秀一)

・Kanto Asperity Project(小林励司)

・NanTroSEIZE(木下正高)

15:00 休憩

15:15 キーノート講演

芝崎文一郎（建築研）「低速から高速における摩擦挙動を考慮した東北地方太平洋沖地震発生サイクルのモデル化」

廣瀬丈洋（JAMSTEC高知）「地震断層の実体に迫る ー岩石力学実験の最前線」

Jim Mori（京大）「Large slip and fault friction」

木村 学（東大）「海溝型超巨大地震と比較沈み込み学」

井出 哲（東大）「Shallow Slip Dynamics」

17:45 分科会の目標設定

6月23日（木）JAMSTEC横浜研究所 三好記念講堂

9:30 キーノート講演

深尾良夫（JAMSTEC IFREE）

「2011年MW9.0東北沖地震：その地震サイクルにおける役割」

10:00 課題別分科会

(1) 断層帯掘削の物質科学

分科会リーダー：氏家恒太郎（筑波大）

固着域掘削とShallow Slip断層掘削で何を明らかにするのか？

(2) 地震発生帯における海底・孔内観測研究：

分科会リーダー：日野亮太（東北大）

地震断層域でどのようなMonitoringの展開が必要か？

13:30 分科会報告と質疑

14:45 休憩

15:00 全体討論：各プロジェクトの今後の展開・戦略 [座長：Jim Mori]

(1) 東北緊急掘削

(2) 関東アスペリティ

(3) NanTroSEIZE

(4) まとめ

17:00：コアメンバーによるレポート作成

Appendix-1：ワークショップ参加者名簿

(順不同：記帳した人のみ)

橋本善孝 (高知大)	堤 昭人 (京大)
中村恭之 (JAMSTEC-IFREE)	辻 健 (京大)
利根川貴志 (JAMSTEC-IFREE)	石田瑞穂 (JAMSTEC)
Hung Yu Wu (JAMSTEC-IFREE)	中村祐貴 (早稲田大)
土岐知弘 (琉球大)	根上裕成 (早稲田大)
林 為人 (JAMSTEC-高知)	亀田 純 (東大)
熊谷英憲 (JAMSTEC-IFREE)	渡辺喜保 (東海大)
坂口有人 (JAMSTEC-IFREE)	篠原雅尚 (東大地震研)
三浦誠一 (JAMSTEC-IFREE)	芝崎文一郎 (建築研)
山本由弦 (JAMSTEC-IFREE)	氏家恒太郎 (筑波大)
小林健太郎 (防災科研)	道林克禎 (静岡大)
阪口 秀 (JAMSTEC-IFREE)	Sean Toczko (JAMSTEC-CDEX)
真田佳典 (JAMSTEC-CDEX)	木村 学 (東大)
石川剛志 (JAMSTEC-高知)	斎藤実篤 (JAMSTEC-IFREE)
高橋成実 (JAMSTEC-IFREE)	木下正高 (JAMSTEC-IFREE)
浅田美穂 (JAMSTEC-IFREE)	井出 哲 (東大)
廣瀬丈洋 (JAMSTEC-高知)	深尾良夫 (JAMSTEC-IFREE)
新井和乃 (千葉大)	小平秀一 (JAMSTEC-IFREE)
小林励司 (鹿児島大)	廣野哲朗 (大阪大学)
平田 直 (東大地震研)	荒木英一郎 (JAMSTEC)
大橋聖和 (千葉大)	堀 高峰 (JAMSTEC-IFREE)
山尾正起 (JAMSTEC-CDEX)	川幡穂高 (東大大気海洋研)
阿部なつ江 (JAMSTEC-IFREE)	江口暢久 (JAMSTEC-CDEX)
山野 誠 (東大地震研)	
喜岡 新 (東大大気海洋研)	
鈴木勝彦 (JAMSTEC-IFREE)	
佐藤利典 (千葉大)	
北田数也 (JAMSTEC-IFREE)	
酒井明男 (JAPEX)	
日野亮太 (東北大)	
安間 恵 (川崎地質)	
木村俊則 (JAMSTEC-IFREE)	
Jim Mori (京都大学)	