

新学術領域研究 超深度掘削が拓く海溝型巨大地震の新しい描像



## ■ CONTENTS

領域代表者巻頭言	1	コスタリカ！	3	研究成果報告	5-10
南海掘削の今後	1	南海をより良く知るためにも		トピックス	11-13
南海掘削の現状	2	JFASTの現状	4	活動報告	14

## 巻頭言

領域代表者 木村 学

### 「要」プロジェクト・最終年度の実施に当たって

本学術領域は本年をもって5年間の研究期間を終え、成果をまとめる年となりました。

本領域が掲げた科学目的は、「海溝型巨大地震の新しい描像を得る」ということです。この目的達成のために、3つの研究項目、すなわち、研究項目A: 大局的構造と海底面変動の理解、研究項目B: 断層の物質と力学的水理学的性質の理解、そして研究項目C: 地震準備・発生過程のモデル構築と検証を設け、それぞれの研究項目の中に相補的な2つの計画研究を配置して進めてきました。

更に本領域では、国際統合深海掘削計画 (IODP)で実施される南海トラフ地震発生帯への直接掘削・観測 (NanTroSEIZE)とリンクさせながら研究を進めてきました。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災を受けて、急遽、計画を充実させ、緊急掘削計画 (JFAST)にも分担研究者を派遣し取り組みました。加えて、IODPにて実施されたコスタリカ沖中米海溝掘削計画 (CRISP)にも首席研究者をはじめ多くの本領域分担研究者が取り組みました。これらはいずれも海溝型プレート境界における地震・津波発生メカニズム解明という科学目的を共有しています。

これらの研究の結果、海溝型巨大地震、超巨大地震と津波発生に関わる科学的解明が大いに前進しました。従来、地震発生時に高速ですべり抜けることはないと思われていた海溝近傍のプレート境界から、高速すべりの痕跡が発見され、そのメカニズムも解明されたことは、日本海溝での地震・津波発生とあわせてこれまでの海溝型地震の常識を覆しました。

最終年度、これらに加えてより深部の巨大地震発生メカニズムとの関連を含めてまとめたいと思います。いよいよ領域の目的を達成するための最大の山場となりました。

私たちは、本領域の目的達成に向けて全力を尽くす所存です。引き続き、皆様からのご協力とご支援をお願いする次第です。

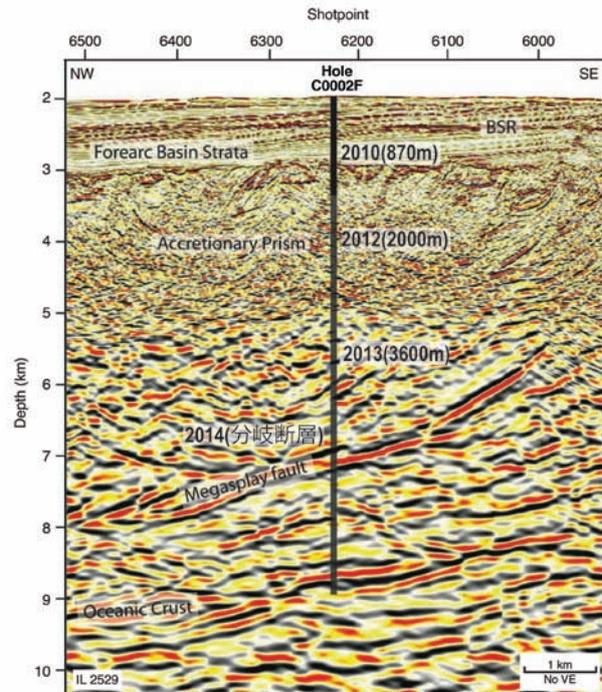


### 南海掘削の今後 (2013年4月現在)

2007年(平成19年)に開始された、地球深部探査船「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削は、2012年のライザー掘削などを含めて、これまでに紀伊半島沖の東南海地震震源域付近で8航海を行い、16地点で掘削が行われました。一方2013年1月には、2010年にC0002地点に設置されたライザーレス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)に接続、リアルタイム観測が開始されました。

2013年度の掘削は、8月中旬から1月中旬に予定されています。ライザー掘削には不適当な台風シーズンを避けるため、最初に浅部分岐断層(C0010孔)へのライザーレス長期孔内観測装置の設置を行います(1カ月)。

続いて行うライザー掘削の目的は、基本的には第338航海と同じです。C0002F孔のライザー掘削を継続して海底下3600mまで行き、翌年度の巨大分岐断層への到達を目指します。現在2000mまで掘削したとはいっても、ケーシングで孔を確保しているわけではないので、孔が崩落している可能性があります。そのため、現在CDEXおよびNanTroSEIZE PMTにおいて、海底下860mにセットされている20"ケーシングの下部より「サイドトラック」(脇を掘ること)する事を検討しています。この場合、C0002F孔のオペレーションの前半で掘削される部分は前回の繰り返しとなり、この部分をエンジニア・レグとしてサイエンスパーティーの乗船は後半に集中させることが検討されています。前回同様、連続したカットिंगスおよびガスモニタリング、そして海底下2300m近傍での100m程度のコアリングを予定しています。日本側のコチーフはJAMSTEC高知コア研の廣瀬丈洋さんです。



NanTroSEIZEのゴール、地震発生断層固着域への掘削実績および計画 (C0002F孔)。

(文責: KANAME総括班 木下 正高  
CDEX運用室 江口 暢久)

## 南海掘削の現状 (2013年4月現在)

千葉大学 金川 久一

掘削船「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削は2007年に開始され、2010年までに熊野海盆から四国海盆にかけてのC0001~C0012およびC0018の13地点で掘削が行われてきました(下図)。2011年は東北地方太平洋沖地震による「ちきゅう」損傷のため実施されませんでした。2012年10月1日~2013年1月13日の間、約2年ぶりに実施されました(第338次研究航海)。当初の計画では、2010年の第326次研究航海で海底下872.5 mまで掘削・ケーシングされたC0002F孔において、海底下約3,600 mまでライザー掘削を行うと同時に物理検層データおよびカッティングス試料を連続取得し、海底下2,300~2,400 m区間でコア試料を採取する予定でしたが、海底下約2,000 mまで掘削した時点で強風と速い黒潮の影響でライザー機器の一部に損傷が生じたため、残念ながら以後のライザー掘削は中止されました。その後はC0002、C0012、C0018、C0021およびC0022の5地点(下図の赤い掘削地点)において、ライザーレス掘削による物理検層およびコア試料採取が行われました。以上の掘削結果の概要は3月末にPreliminary Reportとして出版されています([http://publications.iodp.org/preliminary\\_report/338/index.html](http://publications.iodp.org/preliminary_report/338/index.html))が、以下に簡単に紹介します。

・C0002F孔の物理検層データとカッティングス試料の解析から、付加体中に砂岩層を比較的多く挟在するユニットIV(海底下918.5~1,638 m)とほぼ均質な泥岩から成るユニットV(海底下1,638~2,005.5 m)の2つの岩相ユニットが識別され、両ユニット境界に断層の存在が推定されました。

・C0002J孔で海底下926.7 mに熊野海盆と付加体の間の不整合境界が見出されました。

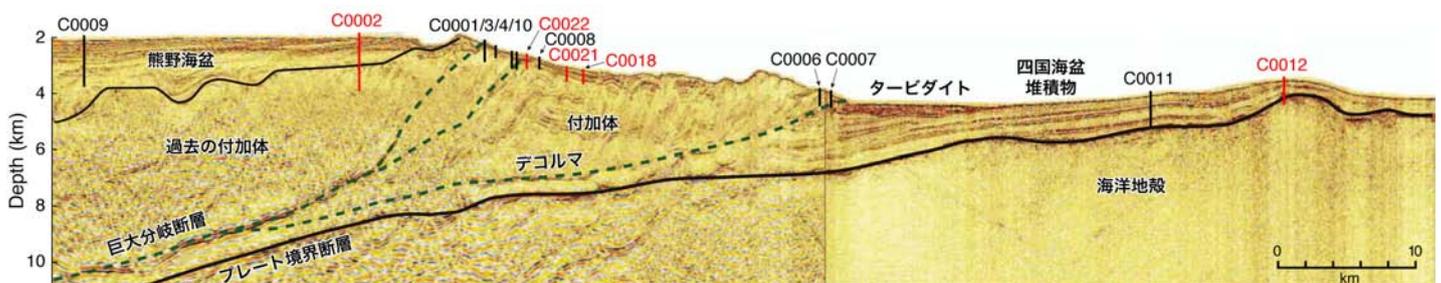
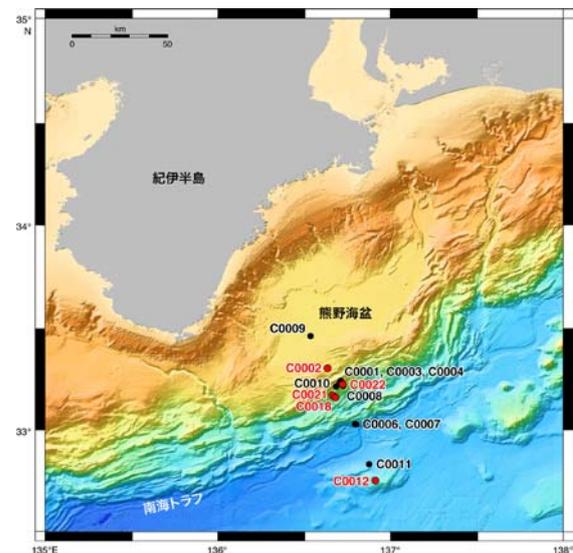
・第314次研究航海の物理検層によってガスハイドレート帯と推定されていたC0002地点海底下200~400 m区間で、砂層中の孔隙に散在する、微生物起源のメタンやプロパンに富むハイドレートの存在が明らかとなりました。

・第322次および第333次研究航海でコア試料が採取された四国海盆のC0012地点で、海底下709 mまで物理検層を行いました。

・第333次研究航海で厚い海底地滑り堆積物が確認されていたC0018地点で物理検層を行い、また近接するC0021地点でも物理検層とコア試料採取を行い、両地点の海底地滑り堆積物層を対比しました。C0021地点のコア試料採取が研究航海終了間際まで行われていたため、コア試料の半裁や記載・物性測定は4月末に高知コア研究所で行われました。

・第316次研究航海で巨大分岐断層を掘削したC0004地点の南方約350 mに位置するC0022地点において物理検層とコア試料採取を行い、海底下約100 mの位置に分岐断層先端部の断層が推定されました。

C0002地点ではライザー掘削中止後にライザーレスによる付加体の掘削も試みられましたが、付加体中では孔壁が不安定で掘削パイプが抜けなくなるなど掘削が非常に困難で、結局コア試料はわずかししか採取できませんでした。今後の南海掘削の予定については前頁を参照して下さい。



既存の南海トラフ地震発生帯掘削地点(黒)と第338次研究航海の掘削地点(赤)の平面図(上)および断面図(下)。(Moore et al., 2013, IODP Exp. 338 Preliminary Report)

## ■ コスタリカ！ 南海をより良く知るためにも

山口大学 坂口 有人

### マグニチュードとテクトニクス

なぜ世界の各沈み込み帯は、それぞれ特徴的なマグニチュードの巨大地震を繰り返すのであろうか？ 例えば付加型の南海トラフではMw8クラスの地震が100-150年の比較的長いインターバルで繰り返され、それとは反対に削剥型の日本海溝やコスタリカマージンでは数十年の短いインターバルでMw7クラスの地震が頻発しており、マグニチュードとテクトニクスとは深い関係がありそうである（例えばBilek, 2010）。ただし2011年東北地方太平洋沖地震（Mw9）は、他のMw9クラスの地震と比較して断層長が短く、かつ海溝軸付近が最大変位を持つという特殊なものであり（Ide et al., 2011; Fujiwara et al., 2011）、例外というべきであろう。付加と削剥型の2つのタイプの沈み込み帯を掘削することは、何がマグニチュードを決定しているのかを理解するうえで鍵となるだろう。しかし一般に両沈み込み帯は、その構成物、年代、構造等が大きく異なる。また削剥型の地震発生帯は掘削可能深度よりも深いケースが多く、両タイプの比較は容易ではなかった。

### アクセス可能な削剥型地震発生帯

コスタリカ沖の中米海溝は、典型的な削剥型沈み込み帯のひとつであり、約40年おきにMw7以下の地震を繰り返している。その地震発生帯はオサ半島沖を除いて掘削可能深度よりも深い。オサ半島沖には、ガラパゴスホットスポットを起源とするココスリッジという比高約2.5 kmの地形的高まりが沈み込んでおり、それによって地震発生帯全体が隆起浅化している。オサ沖の地震発生帯は海底下約5-6 kmの深度であり、これを掘削・観測するためにCosta Rica Seismogenesis Program (CRISP) が計画された。



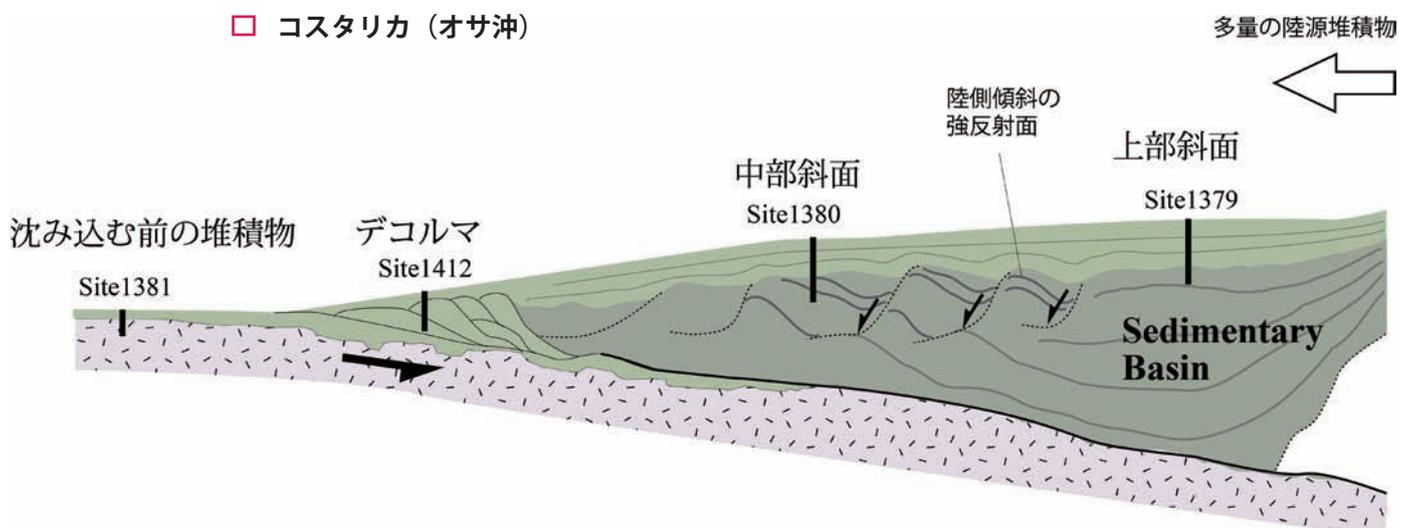
□ コスタリカ（オサ沖）

### コスタリカがわかると南海がわかる

CRISPはライザーによる超深度掘削を含む複数航海からなり、そのうち浅部掘削（IODP Exp334,344）が、2011年と2012年に実施された（Vannucchi et al., 2011; Harris et al., 2013）。そして沈み込む前の堆積物、プレート境界断層の浅部（デコルマ帯）、斜面堆積物と基盤（斜面中部と上部）、においてコア採取とロギングを試みられた。ただしデコルマ帯サイトは、底質の状態がたいへん悪く4回挑戦したにもかかわらず到達できなかった。沈み込み帯の比較という観点においては、中部斜面の Site 1380 の成果を挙げることができる。ここでは地震発生帯の上盤プレートの実態解明が目指された。サイズミックイメージによると、上盤プレートは深部からつながる陸側傾斜の強反射面がいくつも発達することで特徴づけられる。この強反射面を貫いて 800 mbsf までコア採取した結果、表層から連続した斜面堆積物で構成されていることがわかった。これは上盤プレートが大規模な前弧海盆堆積体であることを示唆している。おそらくココス海嶺の衝突に伴う後背地タラマンカン山地の急激な隆起と多量の陸源堆積物流入により、陸源性堆積物のウェッジを構成したのかもしれない。もしそうならばコスタリカの中でもオサ沖は、南海トラフとテクトニック環境がたいへん似ていることになる。たとえば、上盤プレートが若い陸源堆積物で構成され、ココス海嶺や四国海盆という若くて熱流量の大きなスラブが低角で沈み込み、そして流体移動が活発に起きている。しかしオサ沖ではMw7以下の地震が、南海ではMw8以上の地震が発生している。一般的な付加型と削剥型の沈み込み帯と比べて、両者は共通点が多く、比較するのに最適である。南海とコスタリカを比較することによって、何が地震のマグニチュードを規定しているのかを知る手がかりが得られると期待される。南海トラフを深く理解するためにもコスタリカは格好の調査対象である。

### 引用文献

- Bilek, *Geology*, 38, 479-480, 2010.  
 Fujiwara et al., *Science*, 334, 1240, 2011  
 Harris et al., *Exp344 IODP Preliminary Report*, 2013  
 Ide et al., *Science*, 332, 1426, 2011  
 Vannucchi et al., *Exp334 IODP Preliminary Report*, 20132011



## JFAST の現状

筑波大学 氏家 恒太郎

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、プレート間の固着がなく歪みを蓄えていないと考えられていたプレート境界断層浅部で大きな滑りが生じ、その結果海底が大きく変動して巨大津波を引き起こしたことが地震後の観測により明らかとなっている。東北地方太平洋沖地震調査掘削 (Japan Trench Fast Drilling Project: JFAST) は、震源域であるプレート境界断層浅部において摩擦熱を直接計測して地震時の摩擦強度を求めるとともに、プレート境界断層物質を採取して地震性すべりメカニズム・摩擦特性を明らかにすることを目的とした研究プロジェクトである。このプロジェクトは地球深部探査船「ちきゅう」により、2012年4月1日～5月24日、7月5日～19日にかけて統合国際深海掘削計画第343次研究航海として実施された (図1)。世界最深 (水深約7000 mの海底から更に850 m掘削) となる掘削に伴う幾多の困難を乗り越え、掘削同時検層、プレート境界断層物質の採取、孔内温度計の設置に成功した。

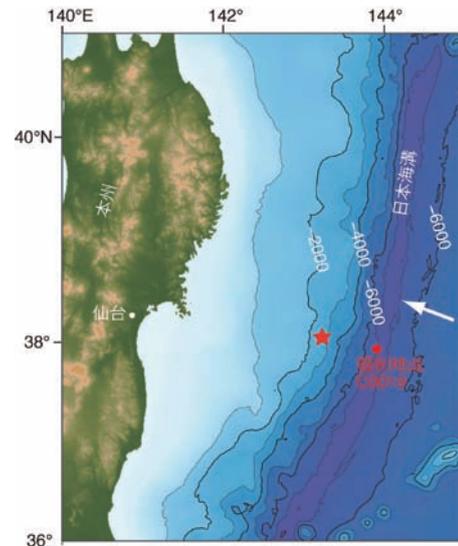


図1 JFAST掘削地点 (赤丸)。赤星印は2011年東北地方太平洋沖地震の震源、白矢印は太平洋プレートの収斂方向を示す。

### 2. プレート境界断層の特徴

掘削の結果、プレート境界断層は海底面下820 m付近の赤茶～黒茶色を呈した遠洋性粘土岩中に発達していることが明らかとなった (図2A)。X線回折分析に基づく、粘土鉱物のほとんどはスメクタイトである (図2B)。遠洋性粘土岩は著しく剪断されており、鱗片状面構造が密に発達する。特徴的なこととして、プレート境界を特徴づける剪断帯の厚さが5 mに満たないことがあげられる。これにより震源域においてプレート境界断層は遠洋性粘土岩中に局所化して発達していることが明らかとなった。今後試料観察・分析を進め、2011年巨大地震を含む地震性すべりの痕跡を探していく予定である。

### 3. プレート境界断層物質の摩擦特性

掘削により得られた日本海溝プレート境界断層物質を用いて含水条件下で高速 (1.3 m/s) 摩擦実験を実施したところ、急速なすべり弱化和極端に低いピーク摩擦、定常摩擦 (0.1以下) が得られた (図3)。その成因として、摩擦発熱による流体圧上昇が効果的に起こったことに加え、低摩擦物質であるスメクタイトを大量に含むことがあげられる。日本海溝プレート境界断層物質の高速滑り時の摩擦挙動は、スメクタイトに富む遠洋性粘土岩に特徴的なものであると考えられ、摩擦強度が非常に低いことにより2011年巨大地震時にプレート境界断層浅部で大きな滑りが引き起こされた可能性がある。

### 4. 孔内温度計による計測

掘削同時検層及び掘削コア回収により、プレート境界断層に加え、海底面下720 mの上盤プレート中に逆断層が発達することが明らかとなった。JFASTではこれら2つの断層をターゲットに孔内温度計を密に設置し、現在も計測中である。今後無人探査機「かいこう7000 II」が潜航し、孔内温度計から計測データを回収し、摩擦熱の検出を試みる予定である。

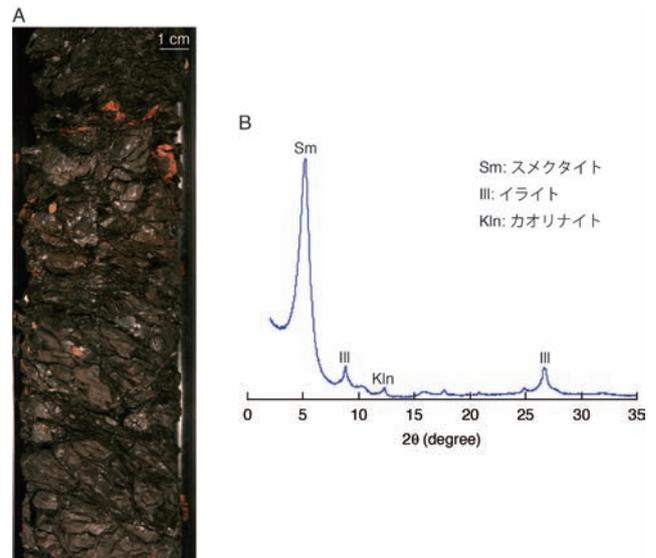


図2 (A)プレート境界断層から採取された掘削コア試料写真。(B)プレート境界断層物質のX線回折分析結果。

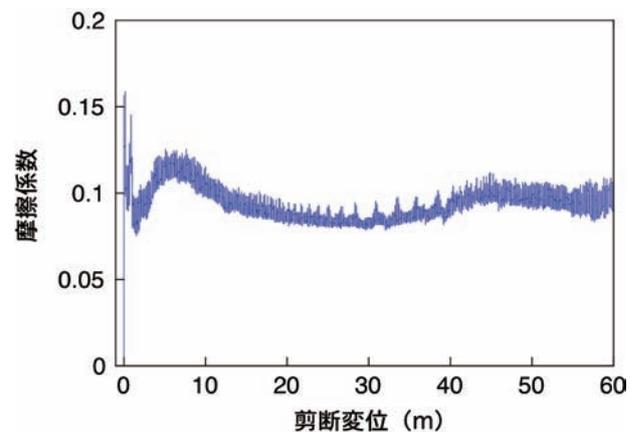


図3 剪断変位に伴うプレート境界断層物質の摩擦変化。

## 研究項目 A：大局的構造と海底面変動の理解

### A01：巨大地震断層の3次元高精度構造と物性の解明

#### 1. 東北地方太平洋沖震源域の高分解能反射法地震探査

宮城沖の日本海溝軸近傍における高分解能反射法地震探査データには、海洋性地殻上のチャート層は保存されたまま少なくとも約 10 km は沈み込んでいる様子が追跡できる。また、海溝軸付近では太平洋プレート上の遠洋性/半遠洋性泥岩層が水平圧縮による変形を受けている(図1)。この構造は今回のような海溝軸まで滑りが達するような巨大地震や、プレート沈み込みに伴って発達してきたと考えられる。デコルマ面と考えられる反射面も発見された。

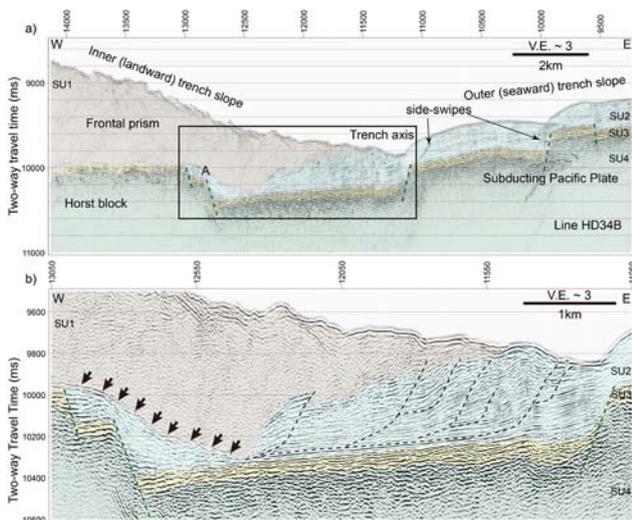


図1 宮城沖日本海溝軸近傍における高分解能反射断面。

#### 2. 熊野海盆の大構造解析

熊野海盆の大構造解析を引き続き行った結果、現在の海盆全域にわたる広域不整合が 1 Ma 以前に形成されて以降、顕著な構造運動とともに海側からのドミノ式褶曲帯が形成されたことを確認した(図2)。これは下位の古期付加体のブロック運動を示している。顕著な変形運動が停止した様子から、現在の熊野海盆は静穏期と考えられる。

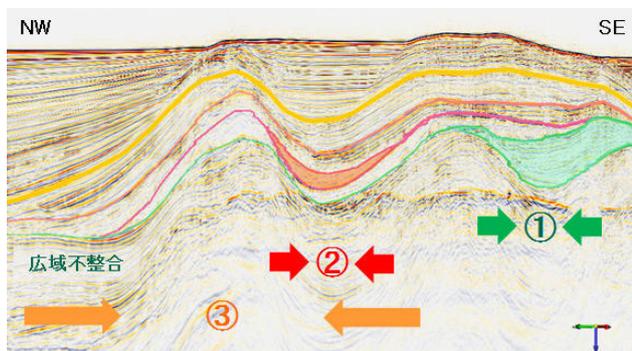


図2 ドミノ式陸側褶曲伝播を示す地質構造。

#### 3. 弾性物性と間隙率の測定

NanTroSEIZEで得られた熊野沖南海トラフのインプットサイトおよび付加体堆積物、白亜系四万十帯メランジュゾーンおよびコヒーレントゾーン、さらに延岡衝上断層掘削コアの上盤・下盤の弾性物性と間隙率の測定を行った。この結果と現世の反射法断面から得られた物性との対比か

ら、浅部デコルマ沿いの有効圧が約 10 MPa であること、巨大分岐断層の上盤で有効圧が約 50 MPa とやや下がっていることを明らかにした。

#### 4. 巨大分岐断層の三次元形状解析

南海トラフ巨大分岐断層の詳細な三次元形状を反射法地震探査データと坑井データを組み合わせて解析した結果、解析範囲内での巨大分岐断層は3つのゾーンに区分できることが分かった。周辺地域で掘削された表層斜面堆積物中に記録された地震性堆積物の分布から、これらのゾーン毎に断層の活動性が異なることが推定されている。このことは、断層面の詳細形状を解析することで、断層活動性を評価できる可能性を示している。

#### 5. 日本海溝・コスタリカ・南海トラフ掘削試料の分析

東北地震緊急掘削で導入した掘削同時検層のデータ解析を行い、自然ガンマ線、比抵抗、掘削パラメータ等の測定値から海底下820 m付近の遠洋性粘土層中に存在するプレート境界断層を特定した(図3)。中南米コスタリカ沖掘削で取得した孔壁画像データの解析により、沈み込み帯浅部における現在の最大水平主応力の方向を決定し、プレート上盤の地殻変動の方向に平行な圧縮場を推定した。南海掘削試料のジルコン粒子の年代測定により、古期大陸(25億年前)と伊豆小笠原弧(8百万年前)から南海トラフへの物質供給を推定した。

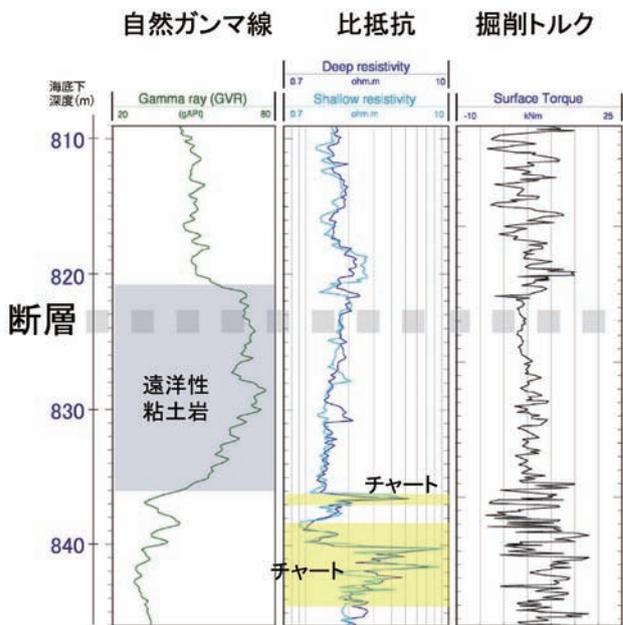


図3 海底下深度820 m付近で特定されたプレート境界断層。

#### 6. 掘削データと反射法探査データとの統合解析

東南海地震の震源域へ沈み込む堆積層の物性変化を解明するため、南海トラフのインプットサイトで取得したIODP掘削データと三次元反射法地震探査データとの統合解析を実施した。その結果、沈み込む火山砕屑物層とタービダイト層において、音響インピーダンスと空隙率の有意義な変化が見出された。

研究成果報告

A02：高精度変動地形・地質調査による巨大地震断層の活動履歴の解明

1. 三陸沖海域の2011年東北沖地震/津波イベント堆積物の経年変化

2011年の東北沖地震/津波に伴って三陸沖の広い範囲でイベント堆積物が形成された。これらの堆積物によるイベント発生履歴の解析では、イベント層がどのように地層中に保存されるかを知っておく必要がある。三陸沖の外側陸棚（水深約120 m）では、2012年の試料には直径数mm~1 cm程度の穴が開いており、イベント層が底生物の活動によって壊れてきているのがわかる。一方、下部斜面（水深約5500 m）では2012年の試料も2011年のものと同じ構造をもち、生物擾乱は認められない。生物活動の大きさの違いはイベント層の保存に大きく関係している。

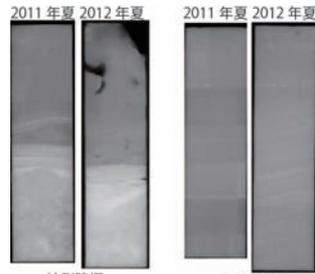


図1 表層コアのソフトX線写真。

2. 津波発生域での繰り返し温度測定から明らかとなったプレート境界上盤の伸張

東北地方太平洋沖地震の津波発生域の断層に対して、潜水調査船による繰り返し温度測定を実施した。その結果、水深3500 m付近の正断層では、地震直後に非常に高かった熱流量が、1年後には通常の値に下がった (Tsuiji et al. 2013, EPSL)。これは本震時の正断層の何らかの活動を示唆している。反射断面図や海底地形図の解析では、巨大津波発生場所でプレート境界上盤が海側へ迫り出したことを示しており、熱流量異常のあった正断層はプレート境界断層の滑りに伴って、その上盤の地殻が引き伸ばされたことにより生じたと解釈できる。

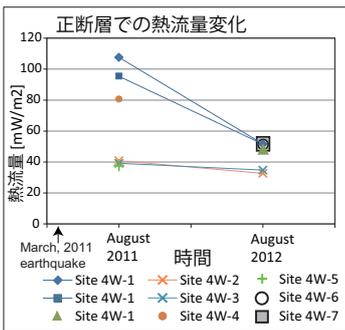
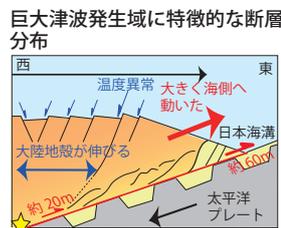
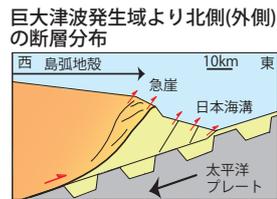


図2 (左) 宮城沖の津波発生域に発達する正断層の温度変化。



(右上) 巨大津波発生域より北側の断層分布。  
(右下) 巨大津波発生域に特徴的な断層分布。

3. 長期温度計測による湧水活動のモニタリング

熊野沖では分岐断層が海底面に達する付近に冷水水が存在する。この湧水活動の時間変動を捉えることを目指し、長さ60 cmの温度プローブ（センサ5個）2台を用いて堆積層中の温度分布の長期計測を行っている。これまでに2年4か月間のデータが得られ、さらに測定を継続中である (図3)。堆積層中の温度は海底水温変動の影響を受けているが、この水温変動の伝播過程を解析することで、鉛

直方向の間隙水流動速度が推定できる。予備的な解析結果は、バクテリアマット中に上向きの流れがあること、その速度が時間変動している可能性があることを示している。

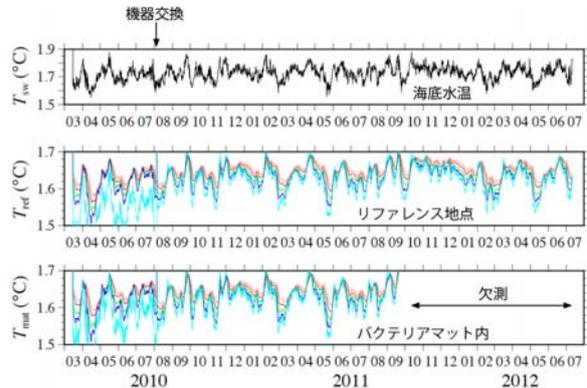


図3 冷水水域の温度長期記録。リファレンス地点はバクテリアマット内の観測点から約20m離れている。2010年8月に機器交換。

4. 日本海溝の巨大海底地すべり

2011年6月に実施された日本海溝での緊急調査では、東北地方太平洋沖地震によって形成された海底の亀裂が深海カメラによって多数見つかった。海底地すべり域でも亀裂が見つかり、日本海溝の巨大海底地すべりが提唱された (Kawamura et al., 2012, GRL)。このような巨大海底地すべりは、幅数十km規模であり、明治三陸地震や今回の震災でも運動している可能性がある。

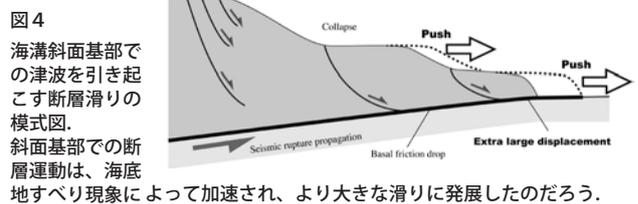


図4

海溝斜面基部での津波を引き起こす断層滑りの模式図。斜面基部での断層運動は、海底地すべり現象によって加速され、より大きな滑りに発展したのだろう。

5. 高解像度浅部構造探査で捉えられた断層による変形構造

海底の急斜面以外では一般に堆積作用が卓越するため、堆積層のごく表層の断層変形は最近の活動を示す。このような表層の微細変形を捉えるには高周波音源を用いる必要があるが、船舶からの発震では音波の減衰により深海底下の構造を捉えることは困難である。我々は海中ロボットに音源・受振器を搭載し、熊野沖海域の表層地下構造調査を行っており、これまでに巨大分岐断層が海底に達する複数の地点において表層堆積層の変形を明瞭に示す断面を得ることができた (図5)。

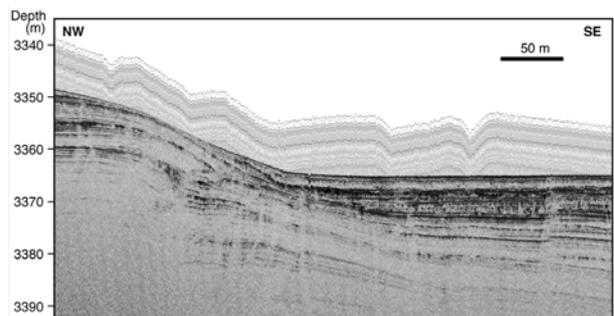


図5 熊野沖の高解像度地下断面。

研究項目 B：断層の物質と力学的・水理学的性質の理解

B01：巨大地震断層の力学的・水理学的特性の解明

1. 南海トラフ付加体浅部堆積岩試料の低速摩擦特性

IODP Exp. 315およびExp. 319において南海トラフ付加体浅部（海底下約1,000~1,580 m）から採取された砂岩、凝灰岩およびシルト質泥岩3試料について、試料原位置に近い条件（室温、封圧37~57 MPa、間隙水圧29~43 MPa）で、軸方向の変位速度を0.1、1、10 μm/sでステップ状に変化させて三軸摩擦実験を行った。昨年度行ったシルト質および粘土質泥岩2試料の実験結果と総合すると、付加体浅部堆積岩類の摩擦特性は粘土鉱物含有量によって系統的に変化することが明らかとなった。摩擦強度と粘土鉱物含有量には負の相関が認められ、粘土鉱物含有量の増加に伴い、定常摩擦係数 $\mu_{SS}$ は低下する（図1a）。また、全試料とも速度強化の挙動を示すが、粘土鉱物含有量の増加に伴って（a - b）値は低下する傾向があるのに対し、流動の効果を含めた $\mu_{SS}$ の変位速度依存性（ $\Delta\mu_{SS}/\Delta\ln V$ ）は逆に増大する傾向が認められた（図1b）。すなわち、粘土鉱物含有量の増加に伴って摩擦に対する流動の影響が大きくなる。

2. 日本海溝プレート境界断層浅部およびその上盤・下盤堆積物の摩擦・透水特性

昨年4~5月に実施された日本海溝掘削（IODP Exp. 343）により得られた、海底下約820 mのプレート境界断層浅部、およびその上盤・下盤の泥質堆積物試料の摩擦実験と透水実験を行った。摩擦実験は室温、原位置深度相当の有効垂直応力10 MPa（垂直応力20 MPa、間隙水圧10 MPa）、変位速度2.5 μm/s ~ 1.25 m/sの条件で行った。250 μm/s以下の変位速度では、プレート境界断層上盤・下盤泥質堆積物試料の摩擦係数が0.3~0.5程度であるのに対し、プレート境界断層試料の摩擦係数は約0.15程度と著しく小さいことが明らかとなった（図2a）。強度が非常に小さい原因については、今後詳細に検討する予定である。

透水実験は有効圧0~20 MPaの下で、定差圧（0.2~1 MPa）流量法により行った。原位置深度相当の有効圧に換算した浸透率は $10^{-18}$  m<sup>2</sup>のオーダーで、プレート境界断層の上盤と下盤で系統的な差は認められなかった（図2b）。プレート境界断層試料の浸透率は測定できていない。

3. コスタリカ沖海洋プレート表層堆積物の摩擦特性

コスタリカ沖の掘削（IODP Exp. 334）により採取された、沈み込む海洋プレート表層約100 mの泥質堆積物11試料について、垂直応力 5 MPa、含水条件、0.03~3 mm/sの変位速度で摩擦実験を行った結果、上位（Unit I）の粘土質試料と下位（Unit II）の珪質または石灰質軟泥試料には、摩擦特性に著しい相違があることが明らかとなった（p. 12トピックス参照）。変位速度0.3 mm/sの場合、Unit Iの粘土質試料はいずれも定常摩擦係数 $\mu_{SS}$ が0.2以下と非常に小さいのに対し、Unit IIの軟泥試料は $\mu_{SS}$ が0.6~0.8と非常に大きい（図3a）。また定常摩擦係数の変位速度依存性（ $\Delta\mu_{SS}/\Delta\ln V$ ）は、Unit Iの粘土質試料が実験した速度範囲において常に正の依存性を示すのに対して、Unit IIの軟泥試料は変位速度0.3 mm/s以下では明瞭な負の依存性を示す（図3b）。粘土鉱物含有量がこのような顕著な摩擦特性の相違を生じた原因のひとつと考えられるが、今後詳細に検討する予定である。

4. 石英ガウジの圧密・固化に伴う強度変化

石英ガウジ試料を 500° C、封圧 200 MPa、間隙水圧 100 MPaの熱水条件で8時間圧密させ、その後同一条件で歪速度 $10^{-4}$ /sで三軸圧縮試験を行った。比較のため、同じ試料を圧密させずに、室温、封圧200 MPa、間隙水圧100 MPa、歪速度 $10^{-4}$ /sで三軸圧縮試験を行った。その結果、圧密させた試料は歪量1%程度で差応力が300 MPa程度に達し、その後多孔質スパーサーが変形したために応力低下が起こった（図4）。従って、試料の強度はもっと大きかったと想定される。圧密させなかった試料は同じ歪量で差応力が40 MPa程度とかなり小さい（図4）ので、熱水条件で圧密した試料は固化して強度が大きくなったと考えられる。

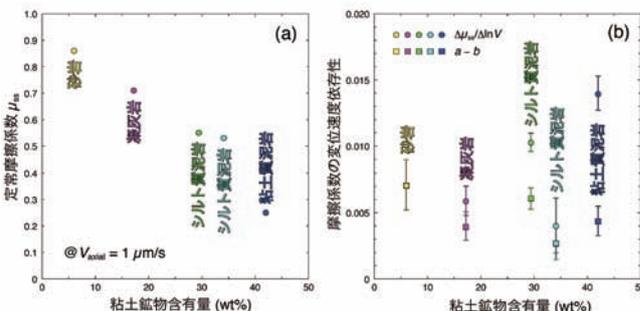


図1 南海トラフ付加体浅部堆積岩類の定常摩擦係数(a)と摩擦強度の変位速度依存性(b)の粘土鉱物含有量による変化。

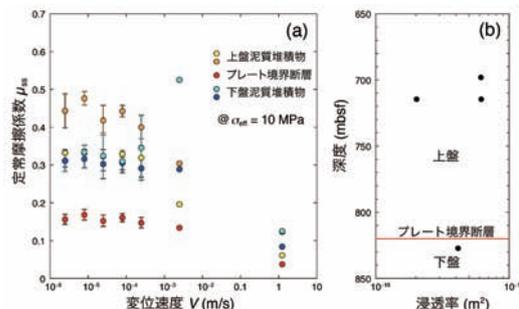


図2 日本海溝プレート境界断層試料およびその上盤・下盤泥質堆積物試料の、定常摩擦係数の変位速度依存性(a)と浸透率(b)。

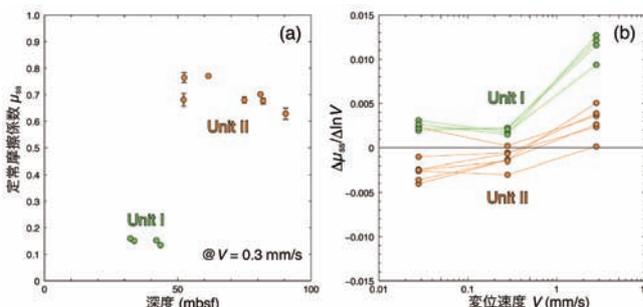


図3 コスタリカ沖海洋プレート表層堆積物の定常摩擦係数の深度変化(a)と $\Delta\mu_{SS}/\Delta\ln V$ 値の変位速度による変化(b)。

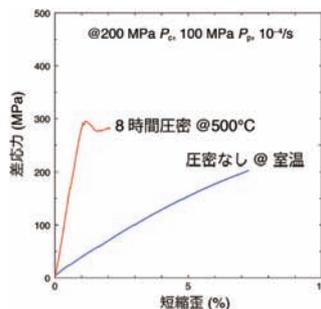


図4 石英ガウジの差応力-歪曲線。

**B02：巨大地震断層の物質科学的研究によるすべりメカニズムの解明**

本計画研究は断層の変形組織の解析、鉱物学的、化学的分析を通して、すべりに伴う諸反応を明らかにし、地震性、津波発生性、非地震性すべりについて、すべりのメカニズムと破壊伝搬過程、エネルギー散逸過程を解明することを目的として研究をすすめている。

また、深海掘削による断層試料の解析・分析に加えて、陸上に露出した断層の上盤と下盤を構成する岩石の変形機

構—流体相互作用を明らかにし、ひずみエネルギー蓄積・解放の物質科学的過程の解明を目指している。

加えて、急遽実行された日本海溝の掘削計画に参加し、プレート境界断層を掘削し、巨大津波を引き起こしたすべりメカニズムについての知見が得られつつある。

以下は2012年度の主要な成果である。

**掘削断層試料などの研究**

1. 日本海溝のプレート境界断層の掘削 (JFAST)・回収に成功、加えて南海トラフで回収されている試料を基に日本海溝と南海トラフプレート境界断層物質の含水透水・不透水条件下高速摩擦実験を実施した。その結果、日本海溝ではスメクタイト+thermal pressurization (TP)効果で浅部地震性すべりを促進。実験後のガウジにはfluidizationの証拠が認められた。南海トラフでは不透水条件下でTPが効果的に起こらないと低速時より摩擦強度は低下しないことが明らかとなった



図1 JFASTにより掘削されたプレート境界断層コア。

(氏家ほか)。

2. 日本海溝掘削(JFAST)で得られた掘削コアの鉱物分析を実施した。その結果、プレート境界はスメクタイトに富むことが明らかとなった。また、コスタリカ沖中米海溝・地震発生帯掘削計画 (CRISP) 航海 (Exp334) で得られたコアの鉱物分析を実施、沈み込み帯における続成作用、脱水作用について議論した (亀田ほか)。(図2)

3. JFASTで採集された間隙水のホウ素、ストロンチウム同位体分析を実施、プレート境界断層付近で比較的低温かつ流体岩石比の変化を伴う特徴的な流体岩石相互作用が生じていることが明らかとなった (石川ほか、p12参照)。

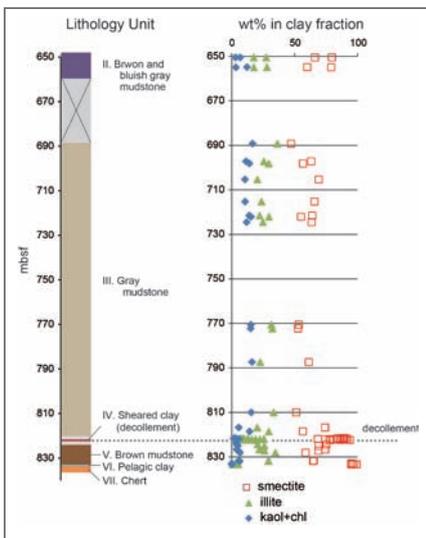


図2 JFAST掘削地点の岩相区分と粘土粒子中の鉱物相対量比。プレート境界断層においてスメクタイトの濃集が見られる。

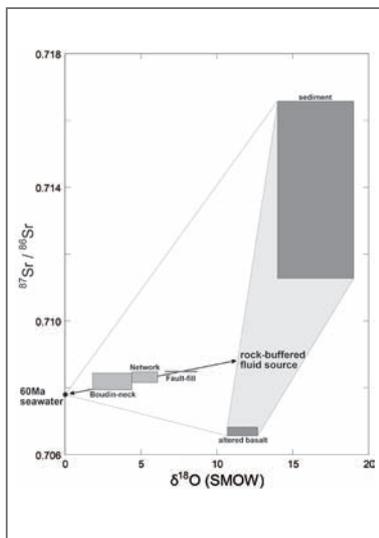


図3 Yamaguchi et al : 2012/産状の違いに対応する鉱物脈のSr同位体、酸素同位体組成。3つの異なる起源流体の混合が推定される。

4. 南海トラフ、スプレー断層の黒色部の再分析 (XRD rockjock、ビトリナイト反射率、ラマン、赤外) 台湾チェルンブ断層の炭質物分析および加熱実験 (ラマン、赤外、ビトリナイト反射率)、台湾チェルンブ断層の鉱物組成の再分析 (XRD rockjock、粉碎実験、高速摩擦実験)、粉碎した石英粒子の溶解実験 (溶解速度定数、活性化エネルギー、溶解度)、MTLと房総江見の断層の微量元素・同位体分析を実施、それらを基にメカノケミカル効果が滑り挙動に与える影響の解明をすすめている (廣野ほか)。

**陸上アナログ断層などの研究**

5. 四万十帯牟岐メランジュの方解石脈の酸素・ストロンチウム同位体測定の結果、堆積物だけでなく玄武岩からの脱水が必要ことが明らかとなり、この間、明らかとなった地震発生帯領域での脱水源の発見 (Kameda et al. 2011) を支持するデータとなった (山口飛鳥ほか、G-cubed, 2012)。(図3)

**延岡衝上断層掘削 (Nobell) プロジェクト**

6. 延岡衝上断層は沈み込み帯10kmにあった化石分岐断層で2011年度に掘削を実施したが、その物性、ボアホールイメージの解析を進めた。その結果、断層中核部 (コア) を挟んで上盤と下盤で顕著なコントラストのあることが判明した。それらは化石化していても地下深部に置かれた時の物性を保持しており、地震性断層滑り時、間震期の物性状態変化を探る重要な手がかりを与えることとなった。今後現在の分岐断層掘削へ向けての科学的・技術的指針も与えている (木村、藤本ほか)。(図4)

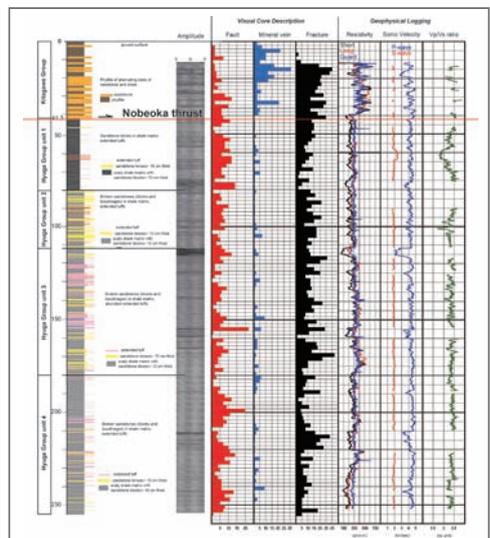


図4 Hamahashi et al., in prep. 延岡衝上断層の一部掘削結果。(岩相、孔壁画像、裂隙分布、弾性波速度)

## 研究項目 C：地震準備・発生過程のモデル構築と検証

### C01：孔内実験・計測による地震準備過程の状態・物性の現場把握

#### 1. 東北地方太平洋沖地震調査掘削

2012年4月1日から5月24日、および7月5-19日の2回にわたるJFAST掘削航海により、海溝付近のプレート境界断層層に到達した。林らは、孔内検層とコア計測により掘削時の応力場を求め、これを地震前の応力場と比較することで、浅部でも地震に伴う応力降下があったことを示した（トピック参照）。一方地震破壊時の応力場を知るための手段として、摩擦発熱による温度上昇の検出が有効であるため、本航海で孔内に温度計アレイを設置した（加納ほか；図1）。回収は2013年5月を予定している。

地震に伴う地中の亀裂等の変化が水理特性の変化として観測される。神岡鉱山での間隙水圧潮汐応答振幅が地震後に減少したが、これは地震による亀裂拡大に伴う水理拡散率の増加（数倍）として解釈できることが、加納らにより示された。



図1 JFAST掘削航海で設置した温度計アレイの様子。

#### 2. 南海トラフ地震発生帯掘削研究

「ちきゅう」による第338次航海には、Wuらが乗船して比抵抗イメージ検層から応力場推定を試みた。ライザー掘削のためブレークアウトが非常に少ないものの、いくつかの区間で最大水平主応力の方位が推定された。

一方、北村はこれまでの全掘削孔で得られた帯磁率異方性解析の歪データと応力に関するデータをコンパイルし、付加体断面の歪・応力分布を概観した（図2）。表層数百mでは場所に依らず圧密による上下短縮が卓越すること、一方で付加体先端部(C0006、C0007)では下部に側方圧縮がみられ、推定現在応力(ASRによる)と推定累積歪(AMSによる)が一見異なることなどが判明しつつある。

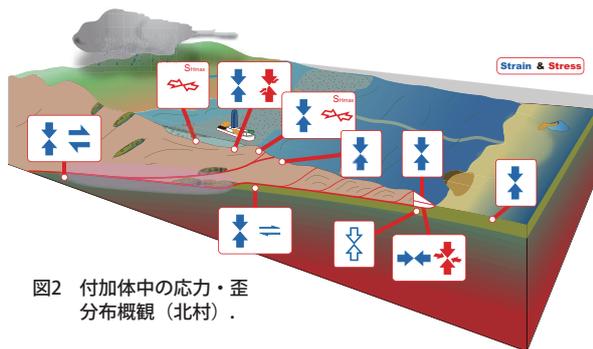


図2 付加体中の応力・歪分布概観（北村）。

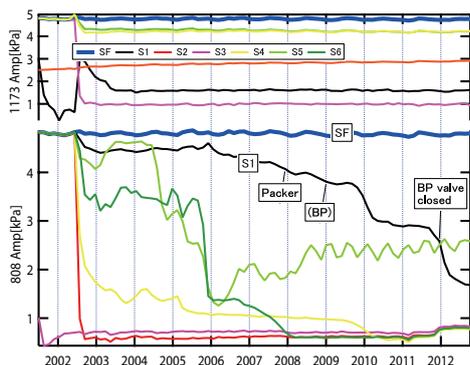


図3 室戸沖ACORKで観測したM2潮汐応答振幅の時間変化。S1が最深部、SFが海底での振幅を表す。

なお木下らは、室戸沖付加体先端部付近の2点に設置したACORKによる、長期孔内間隙圧計測データを11年にわたり継続して取得した。潮汐応答振幅が時間とともに減衰することを発見し、おそらくは孔壁の崩落による水理拡散率の減少がおこったと推測した（図3）。

#### 3. 広域応力場と亀裂

地震準備過程の理解のためには、現在の地中の応力場テンソルを決めることが重要であるが、実際には水平最大主応力を決めるのが非常に困難である。水平最小応力は水圧破砕法等により比較的求めやすいので、水平差応力が決定できればよい。コアスケールでは、P波・S波速度の異方性を計測してインバージョンにより差応力を推定する試みが継続中である（伊藤久男ほか）。一方コアの弾性変形を用いて差応力を推定することが有用であるが、ヤング率が異方性を持つ場合には最大主応力の方位がずれることを合わせて示した（伊藤高敏ほか）。

一方、断層中の流体挙動解明に向けたフローモデル構築に向けて、200 MPaまでの封圧下でX線CTイメージが取得できるコアホルダーの開発を継続した（伊藤久男ほか）。非金属のコアホルダーを用いることで、亀裂開口幅が正確に計測できる見込みが立った（図4）。

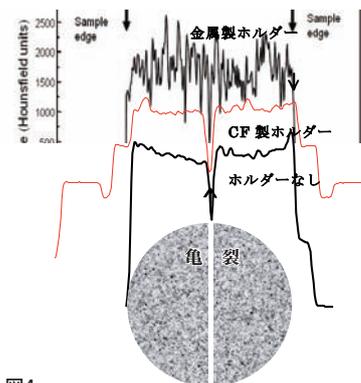


図4 (左)封圧下でCT計測可能な非金属性コアホルダー。(上) そのホルダーにより亀裂がほぼ忠実に再現された様子(赤線)。

#### 4. 孔内モニタリング（受動から能動へ）

断層特性等の微小変動検出に有効な、地震波伝搬特性（速度・減衰）の時間変動推定に向けて、孔内設置型能動震源による制御震源探査の概念設計を行った（山岡ほか）。電源に制約があることから、シングルフォース・高効率であることが要求され、おもりの吊り上げ機構や下部でのバネ係数等の評価のために試作品を製作した。一方、C0002孔に設置した孔内長期観測所（海底下800 - 1000 m）がDONETに接続され、リアルタイムで地震・地殻変動・間隙水圧・温度データを得られるようになった（荒木ほか；図5）。

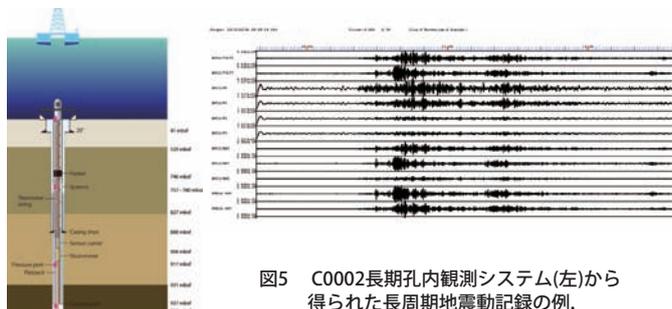


図5 C0002長期孔内観測システム(左)から得られた長周期地震動記録の例。

C02：海溝型巨大地震の準備・発生過程のモデル構築

C02班では下記3つのカテゴリーにおいて各グループが研究を進めた。またH24年度は宮城県松島での研究集会において連携研究を進めるとともに、津波堆積物見学巡検を実施し、地質学的データの解釈法について議論した。

(A) 沈み込み帯浅部の付加体形成と低速変形

沈み込み帯の低速変形について数値実験とアナログ実験を行った。粒子法を用いた数値実験では、沈み込み帯のデコルマが発達する条件を鉛直水平の偏差応力によって整頓することに成功した。アナログ物質（スライム）を用いたすべり実験ではすべり速度によっては、粘弾性効果が無視できず、ゆっくりした変形と地震的なスティックスリップが同時に起きる。この効果が巨大地震の発生リスクを過大評価する可能性があることを明らかにした。

低速変形の結果生じる火山性および非火山性深部微動の様々な精密分析手法を開発し、両者の発生メカニズムの違いを明らかにした。特に非火山性の微動については、統計学的解析手法を開発して特徴的な時定数を測定することに成功した。数年来開発が続いている脆性バッチと背景領域からなる微動モデルを、すべりの自発的進展が可能な形に改良し、観測でみられるような拡散的な微動の時空間的広がりをも説明することに成功した。

(B) 地震の動的破壊伝播とプレート境界面形状

南海トラフにおけるプレート境界面形状のうち、とくに複雑な紀伊水道付近の地殻構造の研究が進み、震源分布と速度構造からこの地域に明瞭なセグメント構造があることや活断層のような構造が存在することが明らかになった（図1）。プレートの構造不均質を推定するためにノイズの自己相関解析による反射散乱イメージング法を開発した。これは、従来活用されている地震波速度トモグラフィやレーザ関数法と独立な異なる情報を与える。

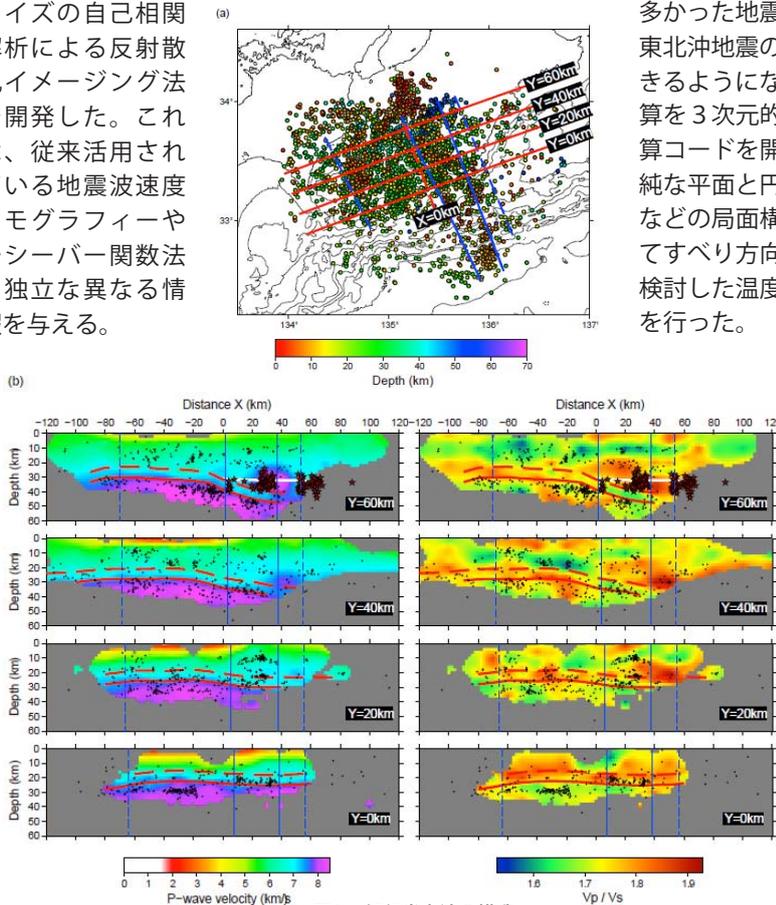


図1 紀伊半島沖の構造。

数値シミュレーションによって断層運動の動的プロセスを再現する各種モデル開発も進行中である。地震の際、断層近傍には様々な変形が生じる。それを微小分岐断層形成、空隙の発展としてとらえる計算法や、生成したガウジの動的挙動としてとらえる計算法を開発し、様々な断層周辺での動的プロセスの再現が可能になりつつある。またそのような微視的なプロセスから生じた巨視的な大分岐断層において破壊が伝播する様子を再現する3次元シミュレーションや、2次元断層における高精度計算法の開発などが行われた。

(C) 地震準備過程を含む地震サイクル

海底地震計のデータ解析より東北沖地震以前に海溝近傍でスロースリップが起きたという証拠を得た。スロースリップは地震の3年前と1か月前に起きたと考えられ、またその領域は地震時には高速ですべったと考えられる（図2）。これは地震モデルの設定に従来取り入れられていない知見である。一方で地震前の断層の振る舞いを最新の摩擦法則を取り入れた地震サイクルシミュレーションで再現した。結果として地震前に断層強度の減少が起きること、その変化を断層を透過する地震波によって検出できる可能性があることを指摘した。

地震サイクルにかかわる数値シミュレーション手法の改良も行っている。これまで準静的なプロセスを扱うことが多かった地震サイクルモデルに動的なプロセスを組み込み東北沖地震のような巨大地震を含む地震サイクルを再現できるようになった。また、沈み込むプレートの温度構造計算を3次元的に行う計算コードを開発し、単純な平面と円錐、円柱などの局面構造についてすべり方向の変化も検討した温度構造計算を行った。

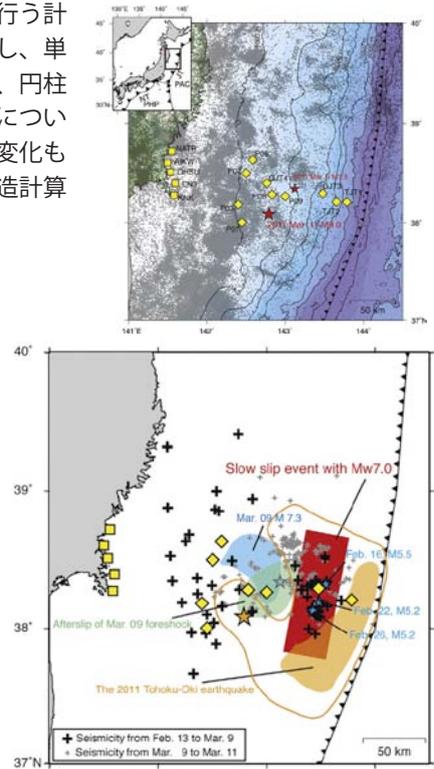


図2 東北地震前のスロースリップ。

## 鉛直地震探査 (VSP) による熊野海盆付加体の地震波減衰構造

日野 亮太 東北大学 理学部

1944年東南海地震 (M8.1) の震源域に位置する熊野海盆においては、プレート間の固着—すべり状態を支配するテクトニックな環境要因の解明を目的として、2009年7月に熊野海盆で実施したIODP Exp.319の際に海底掘削孔を利用した鉛直地震探査 (VSP) を行った (図1)。ここでは、walk-away VSP (WVSP) で得られたデータを用いて付加体深部の地震波減衰構造の推定を試みた結果について紹介する。

熊野海盆のほぼ中央に位置するC0009孔内の907~1135 mbsfの深度範囲の16レベル (15.12 m間隔) に設置した上下動地震計で観測されたP波初動および巨大分岐断層からのPP広角反射波のスペクトルを求め、その高周波域でのfall-off rateから $Q_p$ を推定した。観測点近傍の地盤特性ならびに震源スペクトルの影響を除去するため、下方進行P波のスペクトルとの比 (スペクトル比) を求め解析に用いた。

$Q_p$ の推定では、初動走時解析から推定された $V_p$ 構造 (図2) を仮定した。巨大分岐断層より上位の $V_p$ 構造は、海水層、最上部堆積層、海盆堆積層下部、付加体堆積層の4層構造をなしているの

で、 $Q_p$ を、周波数によらず一定と仮定して、逆解析により推定した。

解析の結果、海底下の $Q_p$ は深さとともに大きくなる傾向を示し、最上部堆積層では $Q_p=80$ 、海盆堆積層下部では $Q_p=140$ 、付加体堆積層内では $Q_p=1,100$ と推定された。最も深い付加体堆積層については、この層を通過するP波のS/Nが低いため、上位の2層と比べて $Q_p$ の推定精度は劣るが、それ

でも層内の $Q_p$ が300を大きく上回ることが、観測スペクトルを説明するためには必要である。海底下堆積物について地震波帯域 (~10Hz) での $Q$ を推定した研究は極めて少ない。中米コスタリカ沖の沈み込み帯においては、海底地震波探査により前弧斜面下の $Q_p$ は25~75と推定されており (Christenson et al., 2000)、熊野灘に比べて小さめである。

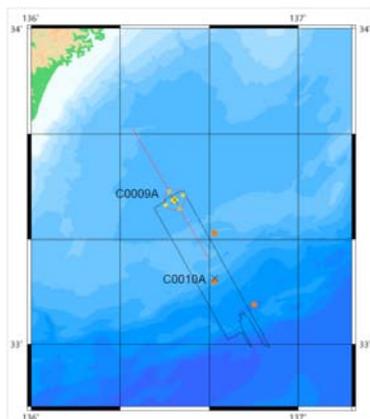


図1 WVSPの受震点となったC0009A孔と測線。

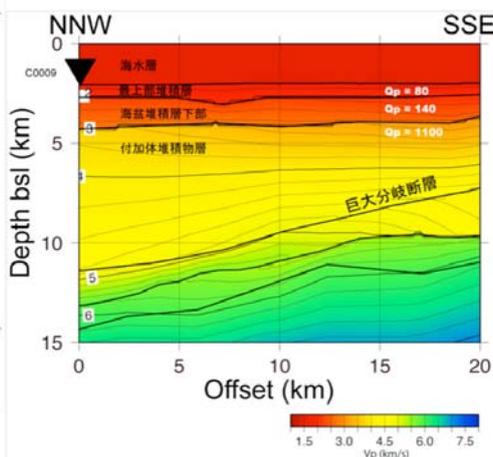


図2 熊野灘における $V_p$ および $Q_p$ 構造。

## 東北地方太平洋沖地震津波により発生した混濁流

成瀬 元 京都大学 理学研究科

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、陸上に大量の津波堆積物をまき散らしただけでなく、深海底にも大きな影響を及ぼしていたことが徐々に明らかになりつつある。海底コア試料・海底地震計・海底圧力計の記録は、巨大津波が海底に大規模な混濁流を発生させた可能性を示唆している。津波が海底に混濁流を引き起こし、深海底にタービダイトを堆積させるとすると、陸上に比べて保存ポテンシャルの高い海底の地質記録は地震・津波災害履歴を復元する上で貴重なデータとなるだろう。

東北地方太平洋沖地震の発生から3時間後、仙台沖の震源域周辺に設置されていた海底圧力計 (OBP) のうち一台が突然日本海溝方向に1 km 移動し、横倒しになった状態で発見された。このOBPは、約0.2°の温度上昇を記録しており、浅海から海水の流入があった可能性を示唆している。さらに、地震発生直後に海底調査および柱状試料採取を行ったところ、未固結泥質堆積物が陸棚外縁 (水深300 m) から海溝斜

面 (水深5940 m) の広い範囲から発見された。また、宮城沖に設置してあったOBS 14台のハードハット内には多量の未固結堆積物が詰まっていた。一部の海底面ではリップルなどの流痕が観察されている。

新たに発見された泥質堆積物は、大陸棚縁部から海溝に向けて流れた混濁流から堆積した可能性が高い。混濁流の発生メカニズムとしては、津波の引き波により陸棚上で発生した浮遊堆積物雲からの発達と考えられる。試しに、混濁流の1次元水理モデルにより数値計算を行い、津波が大規模な混濁流を発生させる必要条件を予察的に検討した。既存研究に基づくと、東北沖においては、今回の津波により最大で水深450 m程度までの

海底面でシルト質堆積物が水中に巻き上げられた可能性がある。浮遊した堆積物がどの程度の濃度に達したのかは現時点では不明だが、数値実験を繰り返した結果、堆積物濃度が0.05体積%程度を超えれば十分に観測事実と一致する大規模混濁流が発生しうることが明らかになった。この境界となる濃度を超えると、発生した混濁流は流速が最大で5 m/sにも達し、約3時間以内にOBP設置地点に十分到達しう。今後は、海底探査および数値計算により混濁流のダイナミクスをより詳細に解析し、混濁流の発生要因および海底の侵食・堆積作用における津波の重要性を解明していく必要があるだろう。

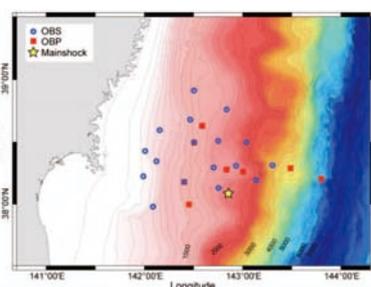


図1 東北沖で津波後にハードハット内に堆積物が侵入したOBSならびにOBPの設置位置。

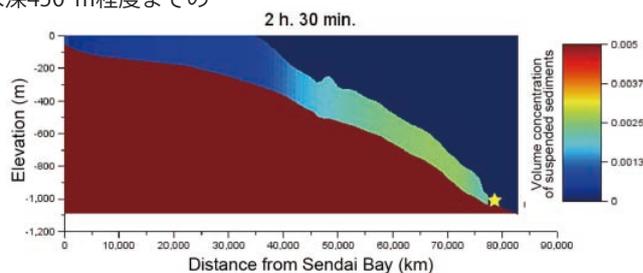


図2 仙台沖において、津波によって発生した浮遊堆積物雲から発達した混濁流の数値実験結果の一例。星印はOBP設置地点をあらわす。初期堆積物濃度を0.1体積%に設定した場合、発生から2時間半後に流速4.8 m/sでOBP設置地点の水深に混濁流が到達した。

## コスタリカ沖沈み込み帯に持ち込まれる海洋プレート上堆積物の摩擦特性

堤 昭人・並木 由香 京都大学大学院理学研究科

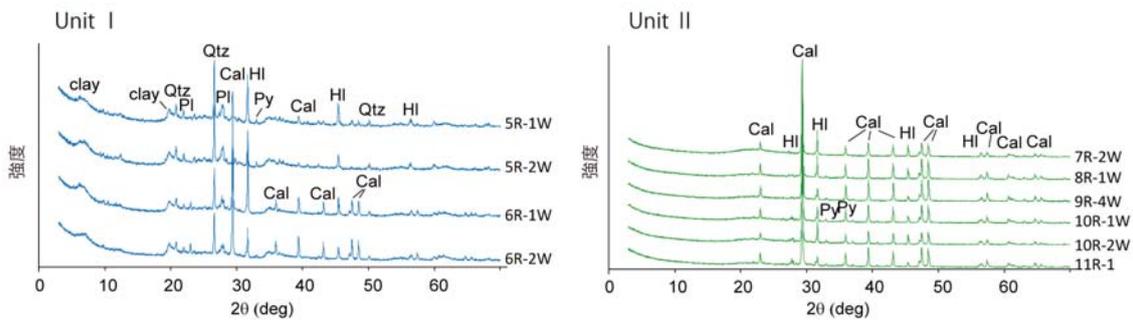
IODPのExp. 334「コスタリカ沖沈み込み浸食縁域における地震発生過程の解明」において、典型的浸食縁域とされるコスタリカ沈み込み帯における地震の発生過程 (seismogenesis) を明らかにすることを目的とした掘削研究がすすめられている。我々は、インプットサイト (Site-U1381A) で採取された粘土鉱物を含む堆積物 (silty clay, Unit I) および、珪質および炭酸塩質の生物起源堆積物からなる軟泥 (siliceous to calcareous ooze, Unit II) について、垂直応力5 MPa、すべり速度約0.003、0.03、0.3、3 mm/s、含水条件における摩擦の性質を調べ、摩擦強度とその速

度依存性を検討した。実験の結果、粘土鉱物を含む堆積物と生物起源堆積物との間で、摩擦特性が大きく異なることが明らかになった。

粘土鉱物を含むUnit Iの堆積物はおおよそ0.2以下の非常に小さい摩擦係数を示すのに対し (すべり速度は0.3 mm/sで一定)、生物起源堆積物からなる軟泥は、同様の条件で0.75程度と高い摩擦係数の値を示す (p7 図3a参照)。摩擦の速度依存性においてもこれら二種類の試料の示す摩擦特性は顕著に異なる。すなわち、粘土鉱物を含む堆積物試料の定常摩擦は、実験した速度範囲において常に正の速度依存性を示すのに対して、生物

起源堆積物の摩擦は顕著な負の速度依存性を示すことで特徴付けられる (p7 図3b参照)。

XRDによる分析結果によると、上記のUnit Iの堆積物とUnit IIの堆積物との間には、含有鉱物種に顕著な違いがみられる (図)。堆積物中に、例えば粘土鉱物 (おそらくスメクタイト) が含まれるかどうかといったことが、コスタリカ沖沈み込み帯の断層摩擦の性質を支配している可能性がある。地震時断層すべりにおいて、このような異なる摩擦特性を示す物質のどの部分に変形が集中するのかといった問題が、地震発生の素過程を明らかにする上で重要である。



粘土鉱物を含む堆積物 (Unit I) および、珪質、炭酸塩質の生物起源堆積物からなる軟泥 (siliceous to calcareous ooze, Unit II) のX線回折図形。

## 東北沖日本海溝地震断層帯における流体岩石相互作用

石川 剛志 海洋研究開発機構 高知コア研究所

2011年東北地方太平洋沖地震では、日本海溝近傍の地震発生帯浅部における大きな断層すべりが巨大津波を発生させる原因となった。この大きな断層すべりの発生に断層帯内部の流体が果たした役割 (例えば熱圧化の可能性等)、断層帯内部の流体の化学的性質とその起源、地震時・地震後の断層帯における流体移動を知ることは、地震発生帯浅部における断層のすべりメカニズムと物質移動を理解するために本質的な意味を持つ。

本研究では、IODP Exp. 343 (JFAST) で地球深部探査船「ちきゅう」により採取された掘削コア試料、間隙水試料の微量元素・同位体比の分析を行うことによ

り、東北沖日本海溝地震断層帯における流体岩石相互作用および流体移動の解明を目指している。このうち間隙水試料についてはストロンチウム同位体比、ホウ素同位体比の測定を現在行っている (図1)。ストロンチウム同位体比は間隙水の起源物質を知るために有効である。また、ホウ素同位体比は低温～高温の流体岩石相互作用を鋭敏に反映することが知られている。JFASTの掘削地点 (C0019) では、掘削時検層 (LWD) と岩相学的・構造地質学的記載により海底下720 mと820 mに主要な断層帯が認められ、後者がプレート境界断層であるとされている (Exp. 343/343T Preliminary Report,

2012)。予察的な分析によりストロンチウム同位体比からは、間隙水が組成的に3成分系であり、2つの断層帯には起源の異なる水が寄与していることが明らかとなった。一方、ホウ素同位体比には海底下820 m付近に明瞭な正のピークが認められた。これはプレート境界断層付近で流体岩石比の減少を伴う比較的低温の流体岩石相互作用が生じていることを示唆している (図2)。これは破壊による単位流体量当たりの固体表面積の増大を反映している可能性がある。今後岩石の微量元素・同位体分析も合わせて行うことでプレート境界断層帯における流体岩石相互作用の実態を解明してゆく予定である。



図1 TIMS法によるストロンチウム同位体比測定。

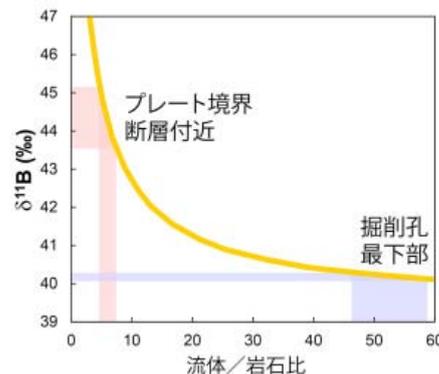


図2 間隙水のホウ素同位体比と流体岩石比の関係の計算例。

## 東北沖 M9 巨大地震に伴う先端部の応力状態変化

林 為人

海洋研究開発機構 高知コア研究所

東北日本太平洋沖巨大地震の発生をうけて、統合国際深海掘削計画 (IODP) は、2012年4-5月と7月に掘削船「ちきゅう」による緊急掘削調査プロジェクト「東北地方太平洋沖地震調査掘削; Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST)」として、地震時断層すべり量の最も大きいプレート境界断層の先端部において、震源断層の掘削を実施した。宮城県牡鹿半島東方沖約 220 km、日本海溝まで約 6 km の掘削地点で、水深が約 6890 m の海底から深度約 820 m のプレート境界断層を貫通して、850 m まで掘削した (図1)。東日本大震災の大津波をもたらした、滑り量が 50 m にも及ぶ震源断層を貫通したと考えられる。掘削孔 C0019B において掘削同時検層 (LWD) を実施し、良質な孔壁の比抵抗イメージから比較的多くのブレイクアウトを抽出することができた。ブレイクアウト等を用いて決定した掘削時 (地震後) の応力状態は、プレート境界断層付近の上盤内では、鉛直応力が最大主応力となる正断層型 (伸張応力場) であることが判明した。一方、孔壁イメージ解析やコア観察から得られる小断層の構造ならびに地震波探査の既往研究から、プレート境界断層上盤内の下部の地震前応力は逆断層型 (圧縮場ともいう) であった

と推定された。したがって、地震前後の応力状態は逆断層型から正断層型に変化したことが実証できた (図2)。この顕著な応力の変化は、地震時の断層すべりが海溝軸へ伝播しながら増幅したことを招いたと考えられる。従来非地震性とされていたプレート境界断層の先端部は、東北沖地震では地震性すべりを起こし、能動的に滑ったことが示唆された。

また、地震後応力状態は、3主応力値が大差を示さない結果となったため、断層面上のせん断応力が小さいと推定されるので、地震時にほぼ完全に解放したと考えられ、断層が“速度弱化”という仮定に整合する。

参考文献

Lin et al., *Science*, 339, 687-690, 2013.

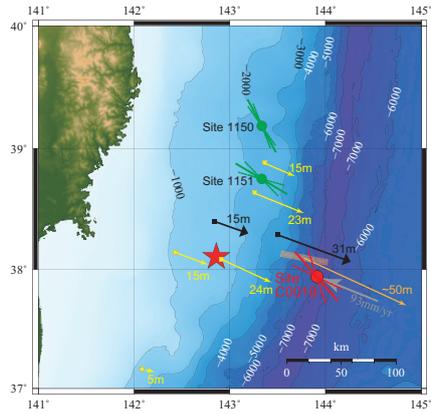


図1 JFASTの掘削位置●、本震震央★、既往研究による地震時の海底変位量: 黄・黒・橙色の矢印、プレート運動方向と年間速度: 灰色矢印と数字、ODP掘削サイト●、最大水平主応力方向の平均値と標準偏差: 赤と緑の実線と破線。

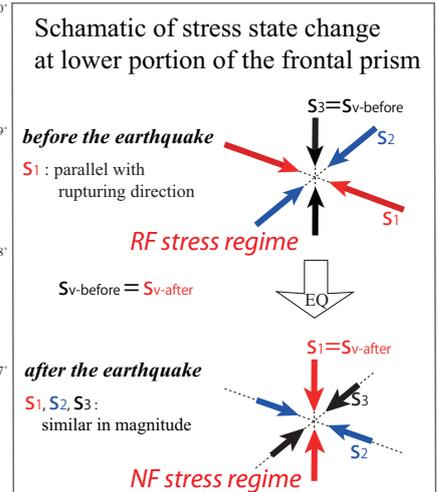


図2 地震前後の応力状態変化模式図。

## 損傷テンソルの固有値比と二次破壊

鈴木 岳人

東京大学 大学院理学系研究科

本研究では、動的地震破壊に伴って生成する断層面外微小亀裂 (損傷) がその破壊過程に与える影響、特に二次破壊

(破碎や分岐) へ与える影響を解析的・数値的に考えた。中でも損傷を損傷テンソル  $\mathbf{D}$  として定量的に扱ったことが重要であるので、その物理的意味について簡単にまとめておく。まず、固有値がその固有ベクトルを法線方向とする損傷の数密度を表すことに注意する。特に最大固有値に対する固有ベクトルは最大多数の損傷の法線方向を表す。また  $\text{tr} \mathbf{D}$  は固有値の和であるから、損傷数の総密度に相当する。

二次破壊の理解のためには、損傷の向きを詳細に調べる必要がある。そこで2次元モードIIの巨視的亀裂を仮定すると、2つの固有値が存在するが、それらの比 (最小/最大) をとるとということ考えた。この比 (固有値比と呼ぶ) が1ならば等方的な損傷分布であり、0ならば全ての損傷が同じ向きを持っていて強い非等方性があることになる。つまり後者では損傷の固有の向きがはっきりと現れることになる。またこの両者の間の場合も固有値比で定量的に記述できる。すなわち、この比により損傷の向き

の分布が等方的なものからどれだけ離れているか、定量的に表現できるようになったのである。

図1では、巨視的亀裂面周辺の損傷の分布形状自体は似ていても、固有値比には違いがあることを示している ( $\eta_2$  は損傷の「量」、 $\eta_4$  は損傷の「向き」に関わるパラメータと思って良い)。Case c では固有値比が大きく、より等方的な分布であるのに対し、case a や d ではそれが小さく、損傷の固有の向きがはっきりと現れることになる。この時、例えば前者では損傷領域で等方的破碎を誘発し、後者では固有の向き (具体的に書けるが、ここでは割愛する) の分岐を誘発することになる。固有値比の考え方により、二次的な破壊をも含めた複雑な地震現象が、単一のモデルで包括的に理解できるようになった。

更に図1によると、固有値比の決定には  $\eta_4/\eta_2$  (これは無次元数である) が重要な役割を果たしていることが示唆される。すなわち  $\eta_4/\eta_2$  が小さいほど固有値比が大きいと考えられる。実際に、より簡単なモードIIIの亀裂を仮定することで、解析的・数値的にその点も確かめることができた。

参考文献

Suzuki, T. (2012), Understanding of dynamic earthquake slip behavior using damage as a tensor variable: Microcrack distribution, orientation, and mode and secondary faulting, *J. Geophys. Res.*, 117, B05309, doi:10.1029/2011JB008908.

Suzuki, T. (2013), Damage-tensor-based Nondimensional Parameters Governing Secondary Faulting Behavior, in press in *Tectonophysics*, doi:10.1026/j.tecto.2013.02.034.

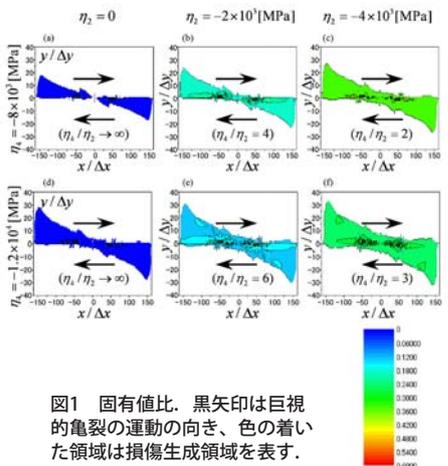


図1 固有値比。黒矢印は巨視的亀裂の運動の向き、色の着いた領域は損傷生成領域を表す。

## KANAME 箱根研究集会 (2/27~3/1) 報告

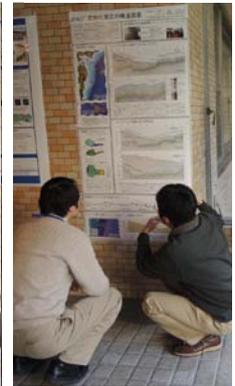
2月27日(水)~3月1日(金)、箱根のホテルラフォーレ強羅に於いて平成24年度KANAME研究集会を開催した。参加者は学生・院生32名を含む延べ89名で、KANAMEの国内研究集会としては過去最大規模となった。

初日午後および2日目午前に研究成果の口頭発表(計31件)が行われ、活発に議論が行われた。今回は研究分担者、連携研究者、公募研究者だけでなく、PDや院生の発表もあった。昨年実施された日本海溝、南海トラフ、コスタリカ沖の掘削などの最新の掘削成果や、東北沖地震前のスロースリップと本震との関連性、地震後の津波起源の堆積物、地震前後の主応力軸配置変化、堆積物の粘土鉱物含有量に応じた摩擦特性の系統的变化など、多くの興味深い研究発表が行われた。

2日目午後の冒頭には班毎の分科会が開かれ、各班の昨年度の研究成果と今年度の研究計画が話し合われた。その後、約50件のポスター発表があり、熱心に議論が行われた。

2日目夜には、懇親会が盛大に行われ、終了後も深夜まで議論が交わされた。

3日目午前には各班代表者から昨年度の研究成果と今年度の研究計画が簡単に紹介され、その後総合討論に移ったがCHIKYU+10 WSに関する議論に時間を消費し、残念ながらPost-KANAMEについて議論をする時間が足りなかった。しかしながら、研究集会を通じて多くの実りある研究発表と議論が行われ、KANAME最終年度に向けてのシナジー効果は十分にあった。(総括班集会担当金川久一)



## 活動報告

### 昨年度の活動

- 2012年4月22日~27日(オーストリア・ウィーン)  
EGU General Assembly 2012
- 2012年5月20日~25日(千葉・幕張)  
日本地球惑星科学連合2012年大会
- 2012年5月20日~25日(千葉・幕張)  
新学術領域研究「超深度海溝掘削(KANAME)」展示ブース
- 2012年5月23日(千葉・幕張)  
新学術領域研究「超深度海溝掘削(KANAME)」夜間集会
- 2012年6月5日~7日(秋田ビューホテル)  
石油技術協会春季講演会
- 2012年7月15日~20日(スイス・ローザンヌ)  
GeoMod 2012
- 2012年8月7日~8日(宮城・松島)  
C02班研究集会
- 2012年8月13日~17日(シンガポール・セントーサ島)  
Asia Oceania Geoscience Society
- 2012年9月15日~17日(大阪)  
日本地質学会第119年学術大会
- 2012年9月24日~25日(宮崎)  
A01,02班研究集会および巡検
- 2012年10月17日~19日(函館)  
日本地震学会2012年度秋季大会
- 2012年12月3日~7日(アメリカ・サンフランシスコ)  
AGU 2012 Fall Meeting
- 2013年2月27日~3月1日(神奈川・強羅)  
KANAME 研究集会

### これからの活動予定

- 2013年4月7日~12日(オーストリア・ウィーン)  
EGU General Assembly 2013
- 2013年4月21日~23日(東京・一橋講堂)  
国際ワークショップ「CHIKYU+10」
- 2013年5月19日~24日(千葉・幕張)  
日本地球惑星科学連合2013年大会
- 2013年5月19日~24日(千葉・幕張)  
新学術領域研究「超深度海溝掘削(KANAME)」展示ブース
- 2013年5月22日(千葉・幕張)  
新学術領域研究「超深度海溝掘削(KANAME)」夜間集会
- 2013年6月24日~28日(オーストラリア・ブリスベン)  
Asia Oceania Geosciences Society
- 2013年9月14日~16日(東北大学川内キャンパス)  
日本地質学会第120年学術大会
- 2013年10月7日~9日(横浜県民ホール、産業貿易センター)  
日本地震学会2013年度秋季大会
- 2013年12月9日~13日(アメリカ・サンフランシスコ)  
AGU 2013 Fall Meeting

## 「市民講座、中高校の特別授業、サイエンスカフェ等へ講師を派遣します」

本KANAMEプロジェクトでは、市民講座、中高校の特別授業、各種講演会、サイエンスカフェ等に研究メンバーを派遣して海溝型巨大地震の解説と最新の研究成果の紹介を行います。対象は、一般の方、中高校生、大学生・大学院生と幅広く対応いたします。講師派遣は無料です。申し込みは以下のサイトからお願いします。

■ URL: <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro~/>



#### 写真説明

表紙：CRISP (Exp. 344) 航海中のJoides Resolution号.

【写真提供：坂口 有人（山口大学）】

裏表紙：A01, 02班の日南市大堂津猪崎鼻（四万十帯日南層群）巡検の様子.

見事な堆積構造が多数観察できた。上段の写真はフルートキャスト.

【写真提供：坂口 有人（山口大学）、芦 寿一郎（東京大学）】

#### ■ 領域代表者

木村 学  
東京大学大学院理学系研究科  
地球惑星科学専攻  
〒113-0033  
東京都文京区本郷7-3-1 理学部1号館  
Tel 03-5841-4510 Fax 03-5841-8378  
E-mail: gaku@eps.s.u-tokyo.ac.jp

#### ■ 新学術領域「KANAME」事務局

斎藤 実篤・山口 美帆  
独立行政法人海洋研究開発機構  
地球内部ダイナミクス領域  
〒237-0061  
神奈川県横須賀市夏島町2-15  
Tel 046-867-9330 Fax 046-867-9315  
E-mail: nantro-kaken-info@jamstec.go.jp

#### ■ 編集

芦 寿一郎・金原 富子  
東京大学 大気海洋研究所  
〒277-8564  
千葉県柏市柏の葉5-1-5  
Tel 04-7136-6121 Fax 04-7136-6148  
E-mail: ashi@aori.u-tokyo.ac.jp