

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月17日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22403007

研究課題名（和文）巨大津波の発生原因を探る～スマトラ北西沖巨大津波発生メカニズムに関する仮説の検証

研究課題名（英文）

Investigation of a working hypothesis for the huge tsunami generation off northwest Sumatra, Indonesia in December 2004.

研究代表者

平田 賢治（HIRATA KENJI）

独立行政法人防災科学技術研究所・社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット・総括主任研究員

研究者番号：20359128

研究成果の概要（和文）：

2004年12月16日スマトラ沖地震の際に発生した大津波の発生メカニズムを検討するために、スマトラ北西沖の前弧域で高分解能のマルチチャンネル反射法探査を実施した。その結果、我々が提唱している仮説「沈み込んだプレート境界の運動とともに、スマトラ北西沖の外縁隆起帯に存在する中央スラスト（分岐断層）でも同時に運動した」を裏付けるように、音響地質学的に「最近」活動したと考えられる多数の変形構造が中央スラスト近傍に認められた。

研究成果の概要（英文）：

A huge ocean-wide tsunami, with average heights of more than 20 meters along the west coast of the northern tip of Sumatra followed the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw9.2). Several working hypotheses have been proposed, but the generation mechanism for this tsunami remains unresolved. Most of these hypotheses suggest a possible coseismic slip on splay faults in the outer-arc-high off northwest Sumatra [e.g., Sibuet et al., 2007]. Among these splay faults, the Middle Thrust (or possibly the Lower Thrust), can best account for features of the Indian Ocean tsunamis observed at regional and ocean-wide distances [Hirata et al., 2008]. In 2010, we have conducted KH-10-5 high-resolution MCS survey of the likely source region for the tsunami with JAMSTEC R/V Hakuho-Maru. In the region where the Middle thrust is postulated, we found abundant evidences of faulting and folding of the sediment within small basins, indicating that the Middle thrust might be displaced coseismically

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	12,500,000	3,750,000	16,250,000

研究分野：地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：津波、スマトラ沖地震、津波発生、分岐断層、外縁隆起帯、反射法探査

1. 研究開始当初の背景

遠隔データの解析に基づき、2004年12月26日スマトラ沖地震に関して多数の断層モデルが提出されているが、スマトラ北西沖に「非常に大きな断層運動」があったという点が共通しており、この「非常に大きな断層運動」がスマトラ島北西のアチェ州沿岸に押し寄せた高さ20m以上の巨大津波の原因であろうと推測されている。しかし、遠隔データにはそれ以上の解像度がなく、幅300kmもあるスマトラ北西沖前弧域のどこが／どのように変動したかについて未だ解明が進んでいない。この問題に関して、現場海域の海底調査の結果に基づき、現在、以下の5つの仮説が提案され、国際的な議論が続いている。

第1仮説：プレート境界に沿って断層運動が起き、変形フロントまで地震破壊が到達した [e.g., Henstock et al., 2006].

第2仮説：外縁隆起帯（海溝と前弧海盆の間の地形的高まり）の最も海側の分岐断層、主スラストが地震時に変位した [Soh, et al., 2005; Seeber, et al., 2007].

第3仮説：最も陸側の分岐断層、上部スラストが地震時に変位した [Sibuet, et al., 2007].

第4仮説：外縁隆起帯とアチェ海盆を境する西アンダマン断層がプレート境界とともに地震時に変位した [Plafker, et al., 2006].

第5仮説：外縁隆起帯の中間にある分岐断層、中央スラストがプレート境界や主スラストとともに地震時に変位した [平田・他, 2008; Hirata, et al., 2008] (図2e)。これは第2仮説に中央スラストの運動を加えたものに相当する。

なお日本、英国がそれぞれ実施した水中無人ロボットによる複数箇所での海底観察調査では、第4仮説を支持するような、西アンダマン断層が変位した痕跡は見つかっていない [Henstock et al., 2006, Soh, et al., 2005].

本研究課題の研究代表者（平田）は、これまで平成16-17年度科学技術振興調整費等による研究に参画し、(1)人工衛星海面高度データを解析し、スマトラ北西沖で大きな断層運動が起きたことを明らかにした [Hirata, et al., 2006]；(2)津波解析と地震波解析の結果の比較から、プレート境界に沿う単純な断層運動以外に、なんらかの二次的メカニズムによっても津波が発生した可能性があることを指摘した [Seno and Hirata, 2007].

(3)スマトラ北西沖緊急調査航海に参加し、主スラスト付近で新鮮かつ激しい海底破壊痕を発見、他の海域調査データも考慮して、上述の第2仮説を提案した；(4)インド洋で観測された、短周期津波分散波 [Hanson, et al., 2007]、津波第1波の到達時間 [Fine, et al., 2005.]、および津波数値モデリングの解

析結果 [Geist, et al., 2007] に基づき新たに第5仮説を提案した [平田・他, 2008; Hirata, et al., 2008]。最近、第5仮説を支持する研究成果も出始めている [Lin, et al., 2009].

短周期津波分散波などの津波観測データや既存の海底調査結果すべてを説明可能なのは第5仮説のみであるが、肝心の中央スラスト周辺の調査があまりなされていない。また、そもそもスマトラ北西沖外縁隆起帯の分岐断層の分布も部分的にしか明らかになっていない。

2. 研究の目的

(1) 研究期間内に何をどこまで明らかにするか

①マルチナロービームを用いた海底地形調査および海上マルチチャンネル反射法探査によって、スマトラ北西沖外縁隆起帯中に推定されている中央スラストなどの分岐断層の分布を明らかにする。また、②2004年スマトラ沖地震直後の海底地震計を用いた観測によって取得された膨大な数の余震データに対して、スマトラ島陸上地震観測データを統合し余震の再震源決定を行うとともに、地震主応力軸解析（応力テンソル解析）を実施し外縁隆起帯中の分岐断層およびその周辺の応力分布を推定することにより、本震時にどのような断層運動が発生したのか推測することを試みる。最後に、③本震直後の海域調査および余震データの再解析によって構築された分岐断層モデルに基づき津波数値計算を行い、その計算波形を観測記録と比較することで、第5仮説の妥当性を評価する。

(2) 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点

2004年12月の巨大津波の発生原因について国際的な議論が続いている中、本研究チームは、第5番目の仮説を提案し国内外にインパクトを与えている。2008年12月の米国地球物理学連合秋期大会特別セッションでは招待講演として招かれ、世界各国における研究成果のレビューと、第5仮説に関する講演を行った。中央スラスト周辺は、その重要性にもかかわらず、海底地形マッピング以外の調査がほとんどなされておらず、また海底地形マッピングさえも部分的にしか行われていない。今回の調査が文字通り中央スラスト周辺の「世界初の本格的調査」となる。

(3) 予想される結果と意義

スマトラ北西沖の巨大津波の発生メカニズムに関して、5つの仮説が提案されているが、その検証が進んでいない。本研究では第5仮説の検証を進め、国際的な議論が続いている問題の決着を目指す。スマトラ沖巨大地

震が起きてからまだ5年しか経過しておらず、また発達した前弧海盆が陸上から供給される堆積物の受け皿となるため、スマトラ北西沖の外縁隆起帯は陸上起源の堆積活動の影響を受けない。2004年の海底変動の直接的あるいは間接的証拠が現場海底に残されている可能性が高いと考えた。

本震時の断層運動が、分岐断層にトラップされるか否かによって、沿岸に押し寄せる津波の波高や到達時刻は大きく異なってくる。ところが、津波警報先進国の日本（気象庁）や米国（太平洋津波監視センター）が運用している津波警報システムですら分岐断層の運動を考慮していない。スマトラ北西沖の海底でどのようなメカニズムで巨大津波が発生したのか、あるいは、どの分岐断層が運動したのか、を明らかにすることは、日本やその他の国々の津波警報システムに分岐断層の運動を含める機運を生じさせ、最終的に津波の予測精度を向上させるうえで役立つ。

3. 研究の方法

研究方法の概略は以下のとおりである。すなわち、(a)インドネシア排他的経済水域（IEEZ）内のスマトラ北西沖の海底で、日本・インドネシアを中心とした国際共同研究として、海底地形マッピング、反射法地震探査を実施。次に、(b)2004年スマトラ沖巨大地震直後の余震データ（取得済み）を解析。(a)と(b)の結果に基づき、外縁隆起帯中に分岐断層モデルを構築。最後に、(c)津波数値モデリングを用いて第5仮説の検証を進める。

以下、研究のサブテーマ毎で用いた方法について述べる。

(1)スマトラ北西沖海底調査と地質学的な海底下堆積層内部の変形領域・変形様式の解釈

①インドネシア側共同研究者との打合せ

日本の調査船を用いてIEEZ内で調査を行う場合、インドネシア国内法上の煩雑な許認可申請をクリアする必要があるが、本申請手続きの申請者はインドネシア共同研究機関に属する研究者でなくてはならない。このため、調査の約1年前のH21年度からインドネシア共同研究機関のインドネシア評価応用技術庁（BPPT）あるいはインドネシア科学院（LIPI）の研究者とメールおよび電話で連絡、協議を行うとともに、調査4ヶ月前には日本側研究代表者（平田）がインドネシアを訪問し、インドネシア側研究者との打合せをおこない、申請手続きの状況の確認、および初年度調査準備の具体的スケジュール、調査計画について打ち合わせた。

②海底地形データの取得

スマトラ北西沖の一部の領域では、既に仏

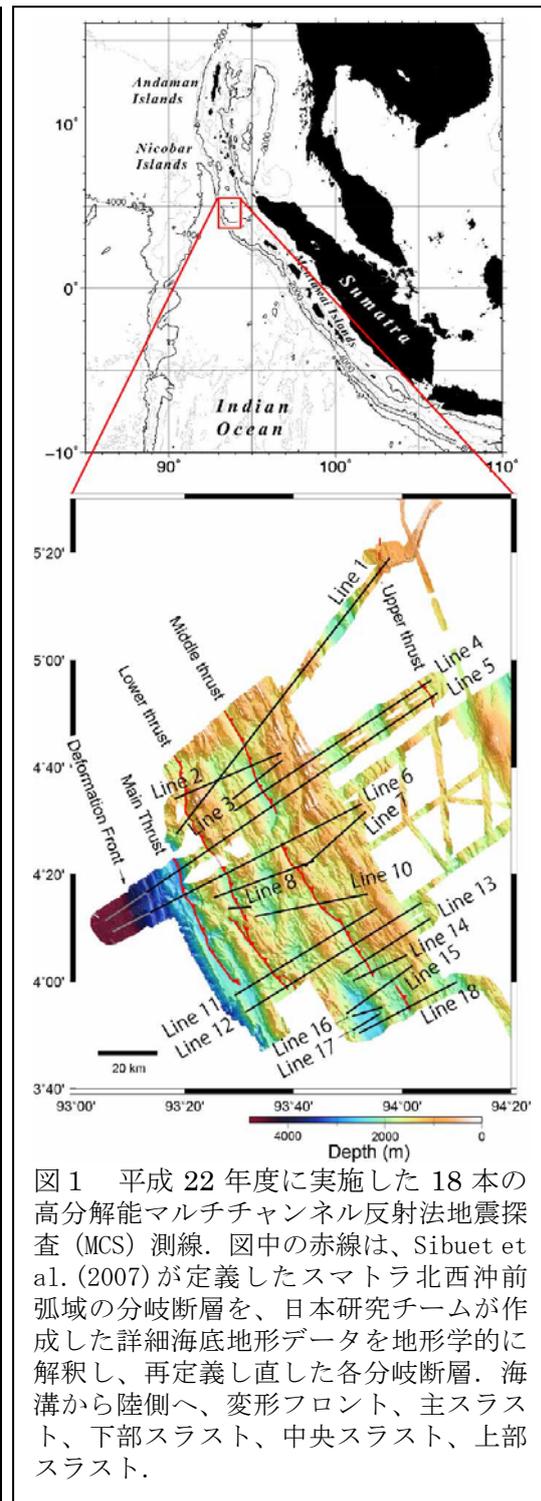


図1 平成22年度に実施した18本の高分解能マルチチャンネル反射法地震探査（MCS）測線。図中の赤線は、Sibuet et al. (2007)が定義したスマトラ北西沖前弧域の分岐断層を、日本研究チームが作成した詳細海底地形データを地形学的に解釈し、再定義し直した各分岐断層。海溝から陸側へ、変形フロント、主スラスト、下部スラスト、中央スラスト、上部スラスト。

国および独国の研究機関の調査船マルチナロービーム海底測深機によって海底地形データが得られている[Graindorge, et al., 2008]。本研究チームが2009年に実施した海底地形調査データと彼らのデータを統合することにより、精度の高いスマトラ北西沖海底の統合海底地形図を作成することを計画した。仏国、独国によって取得されたそれぞれの海底地形データは、仏国、独国それぞれ

の共同研究相手でもあり、かつ今回我々の共同研究相手でもあるインドネシア共同研究機関を経由し入手する運びとなったが、インドネシア側が申請手続きや他事務手続き等で忙殺された等のために、実際には調査船出港日の前日に、初めて日本側にもたらされた。しかも、入手できた海底地形データは、どのような手順で作成されたのかも分からない。「現場海域作業用」と思われる統合済みの海底地形データのみであった。異なる期間に異なる調査船で取得された異種類のデータが、QCされずに機械的に統合されたものである可能性が高く、実際には存在しないはずの、擬似的な大急崖やV字峡谷が至るところに存在していることが容易に視認できた。このため、今回の研究目的のためには使用できないと判断し、日本側研究グループが数年前に自前で取得していた海底地形データを基本的に用いることとした。

③調査航海の実施

10月下旬から11月中旬にかけて海洋研究開発機構の調査船「白鳳丸」を用いて、高分解能マルチチャンネル反射法地震探査(MCS)を行った。また同時にマルチナロービーム海底測深機によって海底地形データも取得した。調査測線を図1に示す。調査した測線は計18本、総延長距離は484マイル(海里)に達した。

MCS探査の音源には高分解能G Iガン(Generator 45立方インチ、Injector 105立方インチ、発振圧力約1750psi(約120気圧)) (写真1)を用い、対地平均約4ノットで水面下約1.5mの深さを曳航し、10秒間隔(約20.6m間隔)で発振した。音源波形をスパイク状に近づけ海底下の反射構造の分解能を向上させるため、G Iガン近傍のハイドロフォンで音源波形の電気信号を船上観測室内に設置したオシロスコープの画面で肉眼で確認しながら調整し、Generatorに対するInjectorの遅れ発振時間を35msecと設定した。受信ケーブルとしては、1200m長、48チャンネル(アクティブセクション1区間で25m)のソリッド・ストリーマーカーケーブルを使用し、水面下約7mを曳航した。1200m長のアクティブセクションには、300m間隔で、5つのケーブル深度調整器を取り付けたが、アクティブセクションの先頭から600m地点に取り付けた深度調整器が通信不良のため遠隔操作できないことが発覚したため、故障した深度調整器の羽の角度を水平に固定したままMCS探査を実施することとした。

ソリッド・ストリーマーカーケーブルで受信した受信記録は、「白鳳丸」の船上記録装置でサンプリング周期1msec、8秒長のSEG-D形式で記録した。なお、第20チャンネル目の受信記録から擬似的なシングルチャンネル

反射断面を作成し、調査中のQCを実施した。

④陸上データ処理と反射断面の解釈

調査航海終了以降、ワークステーションを使用して、反射データ処理を以下のとおり実施した；トレース・エディット、CMPソート、帯域通過フィルタリング、利得回復、デコンボリューション、速度解析、NMO、CMP重合、重合後時間領域マイグレーション、帯域通過フィルタリング、トップミュート、AGC。各測線毎の反射断面を作成し、最終的に計18本の反射断面を得ることができた。

作成した各反射断面の地質学的な解釈・検討は、研究チームの数人のコアメンバーによって約2年間かけておこなった。特に、当初から目的としていた、海底断層に隣接する盆地の海底表層堆積層内部に変形構造が見られるか/否か、もしも変形構造が認められる場合はどのような様式で変形しているか、さらに、変形が認められる場合は、音響地質学的な観点/スケールで最近変形したと考えられるか、あるいはあくまでも過去完了形の变形であったと考えられるか等、については2年間の間に繰り返し解釈・検討を加えた。

(2) 2004年スマトラ沖巨大地震直後の余震データの再解析

①スマトラ島陸上地震観測データ

2005年2~3月に日本側研究チームが取得した海底地震計による余震観測データ[Araki, et al., 2006]と併合処理するために、インドネシア側共同研究機関を通じて、スマトラ島のインドネシア陸上地震観測網の観測データを入手することを試みた。しかしながら、(i) 2005年当時のスマトラ島陸上地震観測網の地震波形データはデジタル化・テレメタ化されておらず、アナログの紙記録が現地観測点の建屋にそのまま貯蔵されており、その紙コピー等を1カ所に収集していないこと、(ii) アナログ記録のコピーを入手するためには現地観測点それぞれを訪問し、一つ一つアナログ紙記録からコピーあるいは写真撮影をする必要があること、(iii) 当時、インドネシアの地震観測支援のためジャカルタに赴任していた日本人専門家から、スマトラ島陸上地震観測網のアナログ地震観測データの質と保管状態が劣悪であるという情報がもたらされ、現地を訪問して地震記録のコピーを入手したとしてもほとんど役に立たないと勧告を受けたこと、からスマトラ島陸上地震観測データの入手を断念することとした。

② Araki et al. (2006)の海底地震観測データの再解析

NT05-02 航海によって得られた海底地震計

観測データ (OBSデータ) [Araki et al., 2006] (図2) を使った。Araki et al. の地震観測では、15 台の短期型OBSと1 台の長期型OBSの計16 台のOBSが使用された。観測期間の最初の方と最後の方はデータが無いOBSもあり、解析対象期間の2005年2月20日から3月12日の全期間において、16 台分のOBSデータはそろっていない。

OBSで記録された地動速度波形に、3~9 Hzの帯域通過フィルターをかけ、P波初動の押し引きを読み取った。読み取ったP波初動極性毎に、初動の読み取り易さ、すなわち初動読み取りの確からしさ、からその読み取り品質をa、b、cの3段階に分けた(aが最高品質)。aクラスに分類された初動極性データ数は2,253個、bクラスが2,449個、cクラスが4,396個となった。マグニチュード3以上の余震データ、かつ、3段階に分けた極性データのうち最も品質の良いaクラスに分類された極性データを解析に用いることとした。

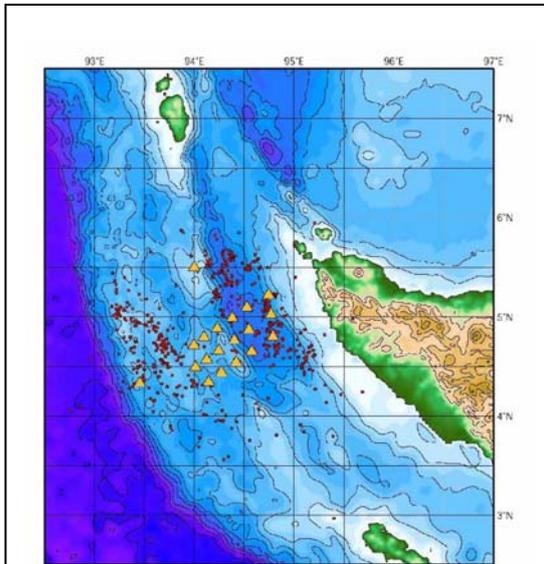


図2 再解析に使用した地震データを観測したOBS(黄色三角)[Araki et al., 2006]. 赤点は、 $M > 3$ で、aクラスの初動極性を読み取ることができた余震。

まず初めに、Araki et al. (2006)によって決定された余震の座標を固定し、彼らが用いた速度構造モデルから射出角と方位角を求めた。次に、それぞれの観測点に対してその初動極性を下半球投影した。地震学では一般的に、観測点で押しを黒塗りの丸、引きを白抜きの丸、として表現するが、本研究では押し引きの分布が良く分かるよう、丸どうしが重ならないように、押しを赤丸、引きを青丸として表現した。

マグニチュード3以上の余震で、かつ、品

質がaクラスと判定された初動極性のみを使用することとしたため、解析対象となった余震の数および、余震1ヶ当たりの初動極性データの数はかなり少なくなった。このため、余震が発生している領域を、スダ海溝からスマトラ島に向かって、水平方向に20 km間隔、深さ方向には10 km間隔で分けし、同じ区域で発生している余震すべてから合成発震機構解を求めることとした。

(3) 分岐断層モデルの構築と、津波数値計算に基づく第5仮説の妥当性の評価

当初の計画では、上記の(1)、(2)の検討結果に基づき最終的に分岐断層モデルを構築、次にそのモデルから計算される初期津波水を初期条件とし津波数値計算を実施、最後に人口衛星で観測されたインド洋の津波水位分布データあるいはインド洋深海底のハイドロフォン・アレイ観測網で観測された高周波の津波分散波データなどの観測データと計算結果を比較することにより、分岐断層モデル、すなわち第5仮説が主張する「中央スラスト運動説」の妥当性を検証する予定であった。

しかしながら、(1)のスマトラ沖海域調査で取得された反射法データの解析と解釈に、結果として約2年の時間を費やすこととなったため、分岐断層モデルを構築するのに十分な時間が確保できず、したがって津波数値計算も実施することができなかった。

その理由として、まず初めに、いくつかの断層の活動時期に関して日本側とインドネシア側に見解の相違が生じ、最終年度(H24年)の夏以降、その部分の再検討と調整に時間をかけざるを得なくなったことが挙げられる。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9)が発生し、その緊急対応研究課題に、本研究の参加者の多くの者が時間を優先して割かねばいけなかったことが2つめの理由として挙げられる。研究代表者(平田)に関して述べると、本震災発生後約1年にわたって複数の大学との緊急共同余震観測に気象庁側の代表者として加わり、気象庁と大学との連絡調整や、気象庁観測船や観測装置の手配と準備作業が震災後約1年間の主業務となった。また研究分担者の富士原も震災後約1年の間、日本海溝域の複数の海域調査に参加しなければならなくなった。他の研究分担者、連携研究者もほぼ同様な状況に陥ったので、結果として

(1)の研究項目を効率的に進めることができなかった。

今回は誠に残念であるが、(3)のサブ研究項目は遂行できなかった。しかし近い将来、適当な研究予算を獲得し、日本/インドネシアの共同研究者と相談のうえ、(3)の研究を再開したいと考えている。

4. 研究成果

(1) 高分解能マルチチャンネル反射法探査および処理によって取得された反射断面例

図3に、本国際共同研究グループが実施したマルチチャンネル反射法探査・データ処理によって作成したスマトラ北西沖外縁隆起帯の高分解能反射断面の一例を示す。

図3では、小盆地の表層堆積層内の地層が断ち切れ、スマトラ島側ブロックが海溝側ブロックに対して相対的に隆起している様子が明瞭に見てとれる。また表層堆積層内部に生じた断層変位パターンと同様の変形が海底面にも現れている。音響地質学的には、測線3の反射断面でとらえられた中央スラストは「最近」変位したと考えられる。

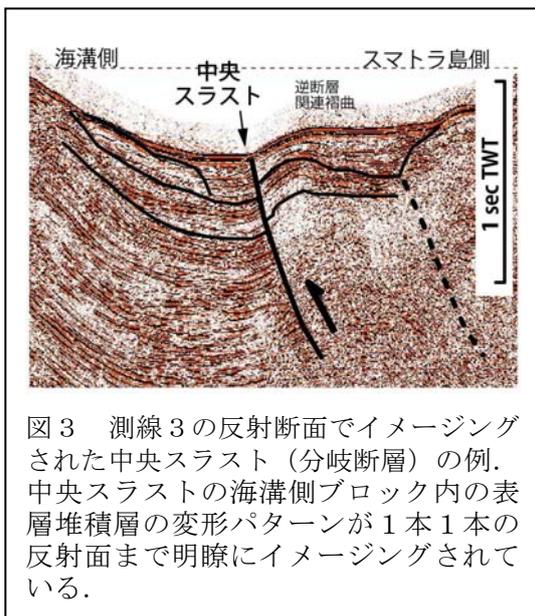


図3 測線3の反射断面でイメージングされた中央スラスト(分岐断層)の例。中央スラストの海溝側ブロック内の表層堆積層の変形パターンが1本1本の反射面まで明瞭にイメージングされている。

(2) スマトラ北西沖前弧域に存在する断層分布

図4に、我々の国際共同研究グループが約2年間かけて検討を繰り返したうえで、推定されたスマトラ北西沖外縁隆起帯中の分岐断層を含む断層群の分布を示す。

以下、スンダ海溝から陸へ向かって順に、スマトラ北西沖前弧域に存在する主要な構造・特徴について述べる。

① スンダ海溝

スンダ海溝の海溝堆積物は広範囲に水平に堆積している。海溝堆積物中に、昔の海溝底の流路と考えられる溝状地形が、より新しい海溝堆積物で埋められた跡が認められる。

② 海溝陸側斜面域

海溝陸側斜面域は、海溝堆積物が陸側にスラストアップ(衝上)して形成されたことを

示している。すなわち、海溝陸側斜面は、海側傾斜、陸側フェルゲンツの小規模の逆断層群の運動によって、海溝と直交する方向に短縮およびスラストアップしている。変動地形学的解析陸側フェルゲンツの小規模逆断層群は明らかに海底面を断ち切っていると同時に、堆積層変形と同様なパターンで海底面を変形させている。それゆえ陸側フェルゲンツの小規模断層群は現在も活動していることが明らかである。海溝堆積物の陸側斜面へのスラストアップがスマトラ北西沖付加体の主要な成長メカニズムであることが推測される。

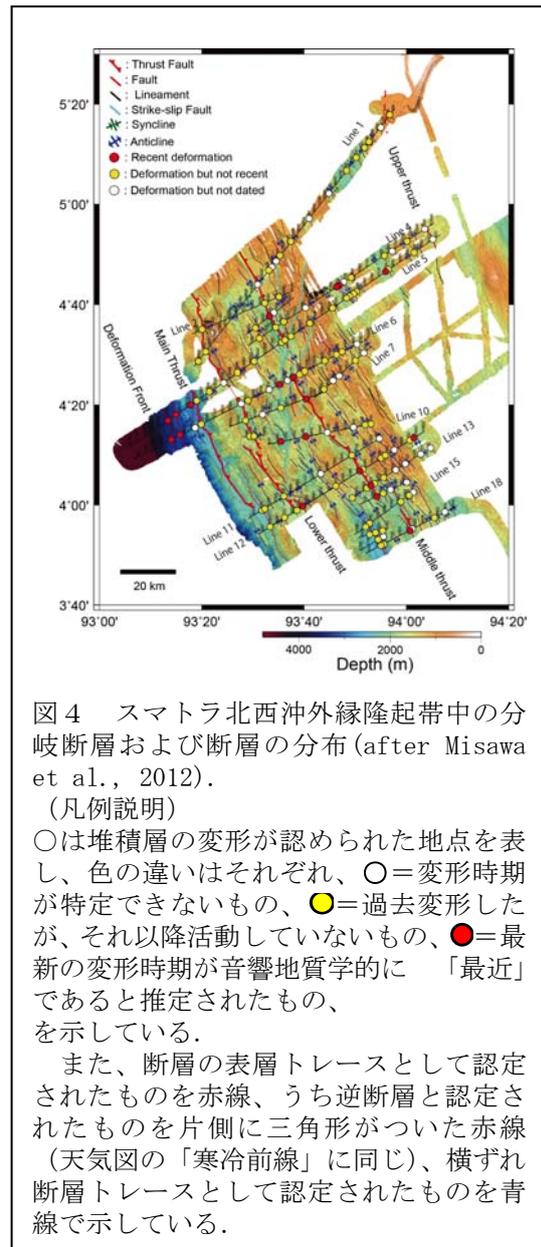


図4 スマトラ北西沖外縁隆起帯中の分岐断層および断層の分布(after Misawa et al., 2012).

(凡例説明)

○は堆積層の変形が認められた地点を表し、色の違いはそれぞれ、○=変形時期が特定できないもの、●=過去変形したが、それ以降活動していないもの、●=最新の変形時期が音響地質学的に「最近」とであると推定されたもの、を示している。

また、断層の表層トレースとして認定されたものを赤線、うち逆断層と認定されたものを片側に三角形がついた赤線(天気図の「寒冷前線」に同じ)、横ずれ断層トレースとして認定されたものを青線で示している。

③ 前弧隆起帯(外縁隆起帯)

地形的には、海溝と平行方向(NW-SEあるいはNNW-SSE方向)に、リッジ地形とトラフ

地形が幾重にも繰り返している。反射断面の解釈から、リッジ地形は背斜構造を形成していること、またリッジ地形とリッジ地形の間のトラフ地形の多くはピギーバックベーン (piggyback basin) であることが明らかになった。

リッジ地形背斜構造の海溝側の縁のほとんども、海側傾斜あるいは陸側傾斜の断層を認定できるが、前弧隆起域では陸側傾斜の断層が多数を占める。リッジ地形背斜構造の内部には、傾動した断層ブロック構造とキンク褶曲構造を認めることができる。

海溝側から陸側に向かって、順に、主スラスト、下部スラスト、中央スラスト、上部スラストを、反射断面記録から明確に定義することができる。図4に示しているように、反射断面で堆積層に変形が認められた地点のほとんどは、これらの分岐断層近傍に位置している。また、堆積層の変形は分岐断層以外に、断層と認定されたものにも随伴している。

(2) 前弧隆起帯 (外縁隆起帯) の分岐断層の活動時期の推定

分岐断層あるいはそれ以外の断層に隣接する盆地内堆積層の変形構造を読み解き、それらの変形が過去に起きたのか、あるいは音響地質学的に現在も活動的であるのか、を分類することを試みた。

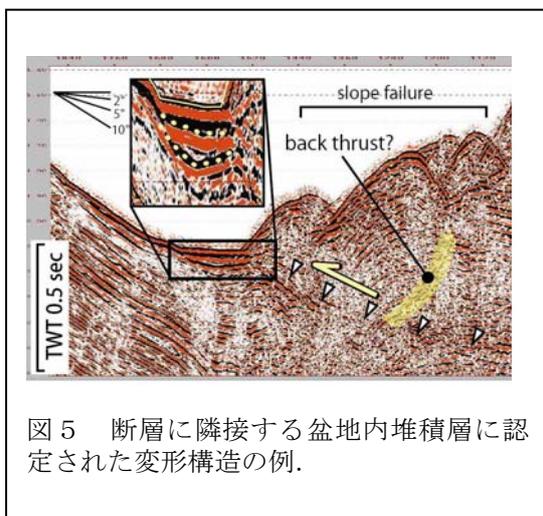


図5 断層に隣接する盆地内堆積層に認定された変形構造の例。

図5に、測線7の中央スラスト付近を拡大した反射断面記録を示す。幅約1.5 kmの盆地の陸側端に、陸側傾斜の分岐断層を往復走時で海底下約0.4秒まで追跡することができる (白抜き逆三角形で図示)。盆地内の堆積層最上部には2枚の地層境界面が認識でき (黄色の点線)、下側の地層境界面は中央部で下に凸状を呈するが、上側の地層境界面は陸側に単調に傾動していることが読み取れる。盆地内海底面の形状は上側の地層境界面とほぼ平行であるのに、海底面自体は陸側に向かって約2度の傾きで傾動している。

すなわち、上側の地層境界面まで堆積した後、これを埋設するように、現在の海底面までいったんはほぼ水平に堆積したが、それ以降、堆積盆地の陸側傾動運動が「最近」生じた、と解釈することができる。しかし、反射断面に認識可能な堆積層の変形パターンだけの情報なので、あくまでも音響地質学的に「最近」傾動運動が生じたことまでしか話分らない。それが百年前なのか数年前なのかまでを明らかにすることはできない。

図5で説明したように、断層に隣接する盆地内部の堆積層の構造を詳しく検討することによって、堆積構造中に変形が認められるか否か、変形が認められる場合は音響地質学的に「最近」か「過去」か、について分類した結果をまとめたものが図4である。

図4が示すように、音響地質学的に「最近」変形したと認定されたポイントは、中央スラスト近傍にもっとも多く集中している。

下部スラスト近傍の堆積層変形は南端部の1カ所を除き、そのほとんどが過去に生じてしまったと認定することができる。

今回の我々の調査では、上部スラストを貫くように設定したのは測線1、測線4、測線5のみと少ないのであるが、Sibuet et al. (2007) が定義した「上部スラスト」近傍には変形構造が認識可能であるがそれほど明瞭ではなかった。Sibuet et al. (2007) の「上部スラスト」と中央スラストの間にも断層が認定でき、その近傍に変形構造が認められたが、そのほとんどが音響地質学的に過去に変形し、それ以降は変形運動は停止したと認定できた。

なお、中央スラストの約40 km陸側を中央スラストとほぼ平行に走る断層の南北の2カ所において、音響地質学的に「最近」変形したと考えられる変形構造が認定できた。もしかしたら、中央スラストと上部スラストの間にも「最近」も変形している分岐断層が隠れているのかもしれない。

以上をまとめると、我々の国際共同研究グループが提唱している第5仮説、すなわち、2004年12月のスマトラ沖地震発生時に、プレート境界の運動とともに、中央スラストでも運動が起きたという仮説を支持するような地質学的な調査結果が得られた。

(3) 2004年スマトラ沖巨大地震直後の余震データの再解析

① 沈み込んだプレート境界付近の余震の合成発震機構解析

スンダ海溝からの距離が180 kmから220 km、深さ30 kmから50 kmの余震の集中している深部プレート境界領域を、海溝軸に平行な方向に20 km間隔で5つの領域に区切り、震源メカニズムを求めた。得られた合成発震機構解は中央部が押し、両側が引きの分布にきれい

に分かれており、概ねプレート境界における逆断層型 (dip-slip) の震源メカニズムがみられ、テクトニクスに照らして整合的な結果が得られた。

② 陸側プレート内部の余震の合成発震機構解析

陸側プレート (ビルマプレート) である外縁隆起帯内部では、深さ方向を 10km 間隔、海溝軸に平行な方向に 20km 間隔で、海溝軸からスマトラ島の方向に 20km 間隔で領域を区切り、余震の合成発震機構解を作成し、ここの領域の平均的な震源メカニズム推定することを試みた。しかし、OBS 観測網震源球投影図の中で、同じ領域に初動押し引きが混在し、明瞭な震源メカニズムらしきものを認識することはできなかった。

Araki et al. [2006] は、30km 以浅の陸側プレート内部の余震では、dip-extension 型のメカニズムが卓越している可能性を指摘したが、本研究の結果では、対象領域がやや異なるものの、dip-extension 型のメカニズムと調和的な合成発震機構解を得ることはなかった。外縁隆起帯内部の領域に分岐断層が存在するとすれば、高角な断層を示す震源メカニズムが認識されると期待したが、実際にはそのような合成発震機構解を得ることは難しかった。

仮に個々の分岐断層の運動を調和的な発震機構で余震が発生しているのだとしても、OBS 観測網から外れた、これらの余震の震源決定の精度が足りていないために、合成発震機構解が同じ領域で押し引き混在してしまう結果をもたらした可能性も排除できない。また、余震活動にもしかしたら時間変化があり、震源メカニズムが 20 日間より短い時間で変化しており、20 日間のデータを重ね合わせたことで、複数の異なった震源メカニズムが混在してしまい、震源メカニズムがはっきりしなかった可能性も考えられる。結局、分岐断層が存在すると推定される外縁隆起帯内部の領域でシンプルな震源メカニズムが確認されなかったが、この結果は、この領域では分岐断層は存在しないという事ではなく、分岐断層は活動しているが、活動様式が地滑りのような、局所的なレオロジーのために、シンプルな逆断層ではない可能性もある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Hirata K., H. Permana, T. Fujiwara, Udrek, E. Z. Gaffar, M. Kawano, Y. S.

Djajadihardja, Detailed bathymetric features in the outer-arc high off the northwest Sumatra - results from KY09-09 cruise -, JAMSTEC Rep. Res. Dev., 査読有, 2012, 15, 1-11.

② Permana, H., K. Hirata, T. Fujiwara, Udrek, Eddy Z. Gaffar, M. Kawano, and Yusuf S. Djajadihardja, Fault pattern and active deformation of outer-arc ridge of northwest of Simeulue Island Aceh, Indonesia, Bulletin on Marine Geology (English Bulletin), 査読有, 2011, 1-6.

[学会発表] (計 28 件)

① Arai, K., A. Misawa, K. Hirata, et al., High-Resolution MCS reflection survey of the offshore Sumatra forearc region, Indian Ocean and Pacific Conference 2013, June 18, 2013, Bali, Indonesia.

② Hirata, K., A. Misawa, J. Ashi, et al., Distribution of submarine faults off northwest Sumatra and estimation of their subsurface deformation activity, 2013 JAMSTEC Blue Earth symposium, BE13-P13, March 14, 2013, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo.

③ Misawa, A., K. Hirata, L. Seeber, et al., Subsurface deformation along major thrusts in the outer-arc high off northwest Sumatra, 2012 AGU Fall Meeting, T52A-02, December 12, 2012, Moscone International Convention Center, San Francisco.

④ Hirata, K., T. Fujiwara, M. Kinoshita, et al., A Controversy over Source Model for the Huge Tsunami Generation off Northwest Sumatra During the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake, AOGS 2012 meeting, SE57-A012, August 14, 2012, Singapore.

⑤ Permana, H., K. Hirata, Udrek, et al., Middle Thrust of Aceh Fore Arc High: shallow structure style and role during 2004 Aceh-Andaman Earthquake, AOGS2012 SE57-A017, August 14, 2012, Singapore.

⑥ Misawa, A., K. Hirata, L. Seeber, et al., Sub-bottom structures in the region causing the huge tsunami during the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake, JpGU meeting 2012, SSS38-P34, May 24, 2012, Makuhari Messe, Chiba.

⑦ Hirata, K., R. Rahardiawan, A. Misawa, et al., KH-10-5 High-Resolution MCS Survey Off Northwest Sumatra, 2011 AGU Fall Meeting, T21B-2347, December 6, 2011, Moscone International Convention Center,

San Francisco.

⑧ Seeber, L., K. Hirata, R. Rahardiawan, et al., Oblique accretion, slip partitioning, and longitudinal extension on the Aceh Promontory of the Sunda Arc in the 2004-2005 rupture areas, northern Sumatra, 2011 AGU Fall Meeting, T33G-2508, December 7, 2011, Moscone International Convention Center, San Francisco.

⑨ Hirata, K., R. Rahardiawan, A. Misawa, et al., Seismic images of Submarine Active Faults and Active Tectonics in the Outer-Arc High off northwest Sumatra, Indoensia-Japan Workshop on Multi-disciplinary Hazard Reduction from Earthquakes and Volcanoes in Indonesia, October 27, 2011, JAKARTA INTERNATIONAL EXPO / JI EXPO(PRJ), Jakarta, Indonesia.

⑩ 平田賢治、富士原敏也、木下正高・他、スマトラ北西沖海域調査の国際的な取り組みと 2004 年波源域南部の津波発生モデル仮説のレビュー (その 3)、2011 年日本地震学会秋期大会、B11-04, 2011 年 10 月 12 日、静岡、静岡。

⑪ Hirata, K., R. Rahardiawan, A. Misawa, Preliminary Results from High- Resolution MCS Survey During the KH-10-5 Off Northwest Sumatra Cruise, AOGS 2011 meeting, IWG01-05-11-A022, August 12, 2011, Taipei, Taiwan.

⑫ Hirata, K., R. Rahardiawan, A. Misawa, et al., High-resolution MCS survey during KH-10-5 Leg. 1 off northwest Sumatra cruise, 2011 JpGU meeting, HDS004-P06, May 27, 2011, Makuhari Messe, Chiba.

⑬ Hirata, K., J. A. Hanson, E. L. Geist, et al., Fifth model for the huge tsunami generation off northwest Sumatra during the 2004 Sumatra-Andaman earthquake: Introduction of Japanese offshore surveys during KY09-09 and KH-10-5, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑭ Misawa, A., R. Rahardiawan, Udrek, et al., Preliminary results of KH-10-5 offshore Sumatra MCS survey, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑮ Udrek, R. Rahardiawan, A. Misawa, et al., Geophysical Investigation of Accretionary Prism and Fore Arc High in Western Part of Aceh-Indonesia, International workshop on Subduction processes,

and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑯ Rahardiawan, R., A. Misawa, Udrek, et al., Deformation structures on the toes of Accretionary Prism, at the northern most of Sunda Trench, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑰ Seeber, L., K. Hirata, R. Rahardiawan, et al., Slip partitioning and longitudinal extension on the Aceh Promontory of the Sunda Arc in the 2004-2005 rupture areas offshore northern Sumatra, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑱ Kawano, M., T. Fujiwara, K. Hirata, Focal mechanisms of aftershocks following the 26 December 2004 Sumatra- Andaman earthquake from ocean bottom seismographic observation, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑲ Soh, W., H. Machiyama, K. Hirata, et al., Surface break of a thrust that initiated the Indian Ocean Tsunami in the Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

⑳ Hirata, K. H. Permana, T. Fujiwara, et al., Geological evidences of the fifth model for the tsunami generation in ocean floor off northwest Sumatra during the 2004 Sumatra-Andaman earthquake - results from the KH09-09 cruise -, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

㉑ Hirata, K., R. Rahardiawan, H. Baba, KH-10-5 Leg.1 high-resolution geological survey off northwest Sumatra, International workshop on Subduction processes, tectonics, and related topics along the Sumatra-Java arc, March 10-11, 2011, Tokyo.

㉒ Hirata, K., R. Rahardiawan, A. Misawa, et al., Preliminary results of KH-10-5 Leg.1 high-resolution geological survey off northwest Sumatra, JAMSTEC Blue

Earth'11 symposium, BE11-P09、March, 7, 2011, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo.

②③ Hirata, K., H. Permana, T. Fujiwara, et al., Geological evidences of the fifth model for the tsunami generation in ocean floor off northwest Sumatra during the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, 2010 AGU Fall meeting, T11B-2090, December 14, 2010, Moscone International Convention Center, San Francisco.

②④ Hirata, K., Investigation of submarine active faults off northwest of Sumatra - present and past -, International Workshop on Multi-disciplinary Hazard Reduction from Earthquakes and Volcanoes in Indonesia, Nov. 22, 2010, Kobe, Japan.

②⑤ 川野雅弘、志藤あずさ、富士原敏也、平田賢治、荒木英一郎、海底地震計観測データに基づく2004年12月26日スマトラ-アンダマン地震の余震の震源メカニズムの検討、2010年度日本地震学会秋期大会、P1-64、2010年10月27日、広島。

②⑥ 平田賢治、Haryadi Permana、富士原敏也・他、2004年に発生したスマトラ北西沖巨大津波の発生メカニズムに関する第5仮説に対する地質学的な証拠について、2010年度日本地震学会秋期大会、P2-27、2010年10月28日、広島。

②⑦ Hirata, K., H. Permana, T. Fujiwara, et al., Detailed bathymetric features of the outer-arc high off northwest Sumatra acquired during the KY0909 Leg1 survey, JpGUnion Meeting, MAG022-P04, May 27, 2010, Makuhari Messe, Chiba.

②⑧ Permana, H., K. Hirata, S. Signh, et al., General Structural Pattern inferred from bathymetry data of Aceh Fore Arc and Aceh Outer Arc Ridge, Sumatra, Indonesia, International Workshop on Subduction Margin off Sumatra, April 15, 2010, Nice, France.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 賢治 (HIRATA KENJI)
独立行政法人防災科学技術研究所・社会防災システム研究領域・総括主任研究員
研究者番号：20359128

(2) 研究分担者

荒井 晃作 (ARAI KOHSAKU)
独立行政法人産業総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員
研究者番号：30356381
徳山 英一 (TOKUYAMA HIDEKAZU)
高知大学・高知コア総合研究センター・教授

研究者番号：10107451
木下 正高 (KINOSHITA MASATAKA)
独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・所長
研究者番号：50225009
(H22・H23年度研究分担者)
富士原 敏也 (FUJIWARA TOSHIYA)
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・技術研究主任
研究者番号：30359129
(H24年度研究分担者)
弘瀬 冬樹 (HIROSE FUYUKI)
気象庁気象研究所・地震火山研究部・主任研究官
研究者番号：90414515
(H22・H23年度研究分担者)

(3) 連携研究者

斉藤 実篤 (Saneatsu Saito)・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号：40292859
馬場 久紀 (Hisatoshi Baba)・東海大学・海洋学部・准教授

研究者番号：80256180

荒木 英一郎 (Ei' ichiro Araki) ・ 海洋
工学センター・技術研究主任

研究者番号：60359130

志藤あずさ (Azusa Shito) ・ 地球内部ダイ
ナミクス領域・研究員

研究者番号：90376541

中村 恭介 (Yasunori Nakamura) ・ 東京大学
海洋研究所一・助教

研究者番号：60345056