

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(B)（海外学術調査）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04577

研究課題名（和文）プレート沈み込みと内陸長大横ずれ断層の相互作用：巨大地震発生後のスマトラ断層

研究課題名（英文）Interaction between plate subduction and long inland strike-slip fault: Sumatran fault after the occurrence of a giant earthquake

研究代表者

田部井 隆雄（TABEL, Takao）

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授

研究者番号：40207220

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：2004年スマトラ島沖巨大地震の発生により、内陸横ずれ断層であるスマトラ断層への荷重が増加し、近い将来の断層運動の活発化が懸念される。本研究では、スマトラ島アチェ州内の都市部に隣接した2つの断層セグメントを対象に稠密GNSS観測、微動探査、変動地形調査を実施した。過去の長期間の活動履歴の解明に加え、断層面の現在の固着/すべり分布と断層構造を推定し、近い将来の地震発生ポテンシャル評価の基礎となる資料を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレート沈み込み境界で発生する巨大地震は広範囲の応力変化を引き起こし、内陸活断層の活動にも影響を及ぼす。プレート沈み込みと内陸直下型の地震活動の相互作用は、世界共通の問題である。日本では南海トラフ-中央構造線の関係が代表例である。本研究はインドネシア・スマトラ地方の中核都市周辺の地震発生ポテンシャル評価を目的としているが、ここで得られた知見は、他のプレート沈み込み境界域の内陸部における活動評価にも資する。

研究成果の概要（英文）：Sumatran fault in Sumatra island, Indonesia is the long inland strike-slip fault running parallel to the plate subduction boundary at the Sunda Trench. Reactivation of fault movement has been expected along the Sumatran fault because the 2004 Sumatra-Andaman giant earthquake caused regional stress increase on its fault plane. In this study we conducted dense GNSS observation, microtremor exploration and geomorphic field survey along two branch segments of the Sumatran fault near urban areas in Aceh Province, Sumatra. We estimate current locking/slip distribution on the fault plane and subsurface structure of the fault together with long-term fault slip history. These results will provide fundamental data for estimating earthquake generation potential in the near future.

研究分野：測地学

キーワード：スマトラ断層 プレート境界 地震 地殻変動 GNSS 変動地形 微動探査

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々は2004年スマトラ島沖巨大地震発生直後からスマトラ島北西端のAceh州内にGNSS観測網の整備を開始し、地震後の余効変動のメカニズムを研究してきた。同時に、巨大地震の発生によって地域的な応力場が変化し、内陸のスマトラ断層における活動活発化が予想されたため、断層挙動の変化にも注目してきた。その間2度にわたり科研費を獲得する機会を得て(基盤A, 19253003, H19-22; 基盤B, 24403005, H24-27), 現地調査を毎年実施した。2012年4月インド洋で発生した史上最大のプレート内地震(M8.6)に関連し、海洋下アセノスフェアの粘弾性構造を解明するうえで我々の観測結果が重要な役目を果たした。また、2013年にはGNSS観測網内で連続して2つのM6.1内陸地震が発生し、震源域近傍の明瞭な地震時変動を検出した。これ以後、断層活動評価には長期の活動履歴の解明が必須と認識するに至り、高解像度衛星画像の解析と詳細な現地調査を開始し、断層トレースのマッピングと活動時期の同定を行った。さらに、断層形状や浅層地盤構造を推定するための微動観測も開始した。

Aceh州では政治の安定化とともに経済発展と社会インフラの整備が急速に進み、現地大学では若手の地震研究者の育成も進んだ。しかし同時に、建設工事等に伴いGNSS観測環境は急速に悪化し、従来のスタイルの研究の継続が困難になってきた。一方、地方の中核都市であるBanda Aceh市に隣接したスマトラ断層の分岐セグメントの地震危険度は依然として未解明のまま残っていた。そこで、研究対象をこうした分岐セグメントに特化し、新たなGNSS観測網の整備、地形調査、微動観測を実施する計画を立案した。プレート間巨大地震の発生と、それが引き起こした応力変化に伴う内陸活断層の活動変化という関係は、世界の他の沈み込み境界域の地殻活動にも共通する問題である。スマトラで得られる知見は、例えば日本の南海トラフ-中央構造線の相互作用の議論にも資するところ大である。

2. 研究の目的

インドネシア・スマトラ島北西端のAceh州においてGNSS観測、変動地形調査、地震観測を実施し、内陸スマトラ断層の過去の活動履歴と現在の固着/すべり分布を解明する。2004年スマトラ島沖巨大地震によりスマトラ断層にはすべりを促進するセンスの応力が載荷され、地質学的な長期のすべり速度と最近百数十年間の静穏期間を考慮すると、内陸地震活動の活発化が危惧される。一方で、Aceh州では未だ計器観測網が不十分のうえ都市部への人口集中が続いており、スマトラ断層の地震発生危険度評価は地域住民にとって喫緊の課題である。我々がこれまで築き上げた現地大学との研究交流をさらに促進し、将来の地震災害軽減につながる基礎資料を提供する。

3. 研究の方法

スマトラ島北西端でスマトラ断層はSeulimeumセグメントおよびAcehセグメントの2本に分岐する(図1)。いずれも中核都市であるBanda Aceh市近郊に位置し、断層活動時には市街地で大きな被害が想定される。本研究ではこれらのセグメントを横断する新たな稠密GNSS観測網を構築し、詳細な地殻変動場から断層面上の現在の固着/すべり状態を推定する。同時に衛星画像とデジタル標高データの解析と現地踏査に基づき、断層変位地形の詳細なマッピングを行う。さらに、断層近傍で微動観測を実施し、浅層地盤地震波速度構造の方位依存性に注目して断層位置を特定する。以上の成果に加え、これまでAceh州内のより広範囲な地域で実施してきたGNSS観測と変動地形調査の成果、およびインドネシア機関による地震活動観測結果を総合的に勘案し、近い将来のSeulimeumセグメントおよびAcehセグメントの地震発生危険度を評価する。Banda Aceh市のSyiah Kuala大学研究者との連携を密にし、地震災害軽減のための基礎資料を提供する。

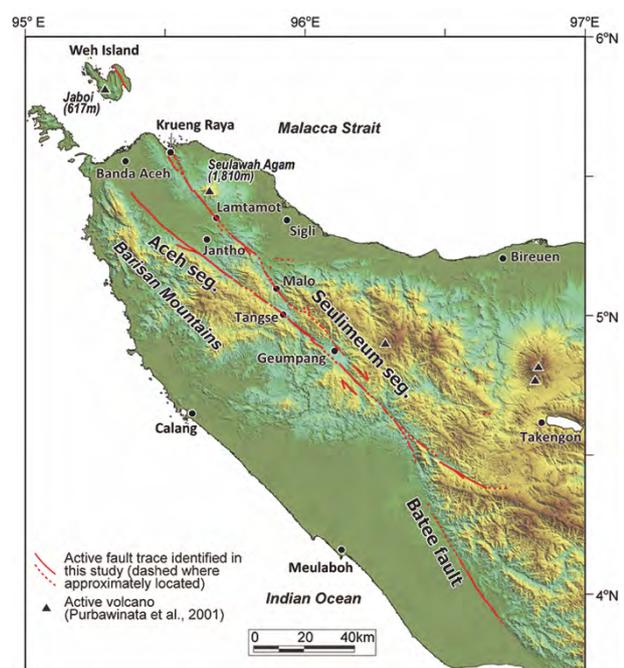


図1. スマトラ島北西端のAceh州におけるスマトラ断層の位置。

4. 研究成果

本科研費は3年計画で2017年4月にスタートした。初年度は8月に約2週間かけてBand Aceh市近郊に計22点から成るGNSS稠密観測網を設営した。また、我々自身の先行研究によって設置したGNSS連続観測点3点の保守を行った。9月には北部のWeh島から南東部のBatee断層にかけて(図1)、変動地形と露頭の調査を行った。

2018年6月Syiah Kuala大学より、インドネシア国内での研究調査には研究活動許可取得が厳密化され、新たな大学間(学部間)交流協定の締結、研究計画の事前審査、研究ビザの取得が必須になったとの連絡を受けた。直ちに高知大学が交流協定締結の準備を進め、9月に1名が渡航し正式に調印した。続けて10月にインドネシア本国へ研究許可を申請した。インドネシア入国後の手続きに約1週間、現地での観測業務にさらに2週間が必要と予想され、今回は日程を融通できる2名のみが申請した。2019年1月、この2名が渡航しJakartaの研究開発・高等教育省より1年間の研究活動許可を、警察本部より野外調査許可を取得した。その後Aceh州へ移動し移民局より現地滞在許可を取得し、本業務であるGNSS稠密観測網22点の再測量を実施できた。

前年度の経験を踏まえ、2019年度は早々に残りのメンバーの研究活動許可申請手続きを開始し、8月に約2週間にわたってGNSS・地震・変動地形の各調査を実施した。さらに、10月および2020年2月に補完的なGNSS観測を実施した。

(1) GNSSによる地殻変動観測

2017年8月にBanda Aceh近郊のSeulimeumセグメントを横断する2本の測線を設定し、計22点のGNSS観測点を設置した。アンテナ設置誤差を考慮せずに済むよう、ほぼ全ての点でアンテナ固定用ボルトを建物屋上や岩盤に埋め込んだ。1点あたり2-3日間連続してデータを取得した。また、我々自身の先行研究で設置した観測点の数点でも観測を行った。再測量を2019年1月と8月に実施した。データ取得が不十分な点があったため、10月に追加の観測を行った。さらに、Acehセグメントの南側ブロック内で観測点配置が希薄なため、断層からは遠方に位置するものの、同ブロック内に位置する数点の既存観測点で観測を実施した。

図2にGNSS観測結果を示す。ここでは各点の2017-2019年の平均的な水平変位速度を、PIDI観測点(図中赤四角印)に相対的な動きとして表示している。2004年スマトラ島巨大地震発生後の余効変動は現在も進行中で、これにプレート沈み込みによる新たな圧縮と、内陸活断層の固着/すべりに伴う変動が重畳し、変位速度ベクトルの空間変化は複雑である。本研究ではこれらを基に、ブロック運動モデルを構築した。これは、ブロックの剛体運動、ブロック境界の固着に起因する弾性変形およびブロック内の一様ひずみによって観測値を説明するものである。このうち、ブロック境界の固着状態を推定した結果を図3に示す。この図に示す”すべり欠損”とは”すべらざに残った量”すなわち”固着”と同義語である。Seulimeumセグメントではすべり欠損が小さく定常的なひずみ蓄積速度が小さいのに対し、Acehセグメントではその反対で、大きな速度でひずみ蓄積が進行しているという結果が得られた。ただ、Acehセグメントの南側のブロックの動きを拘束する観測点の数が少なく、確証を得るには更なるデータの蓄積を必要とする。

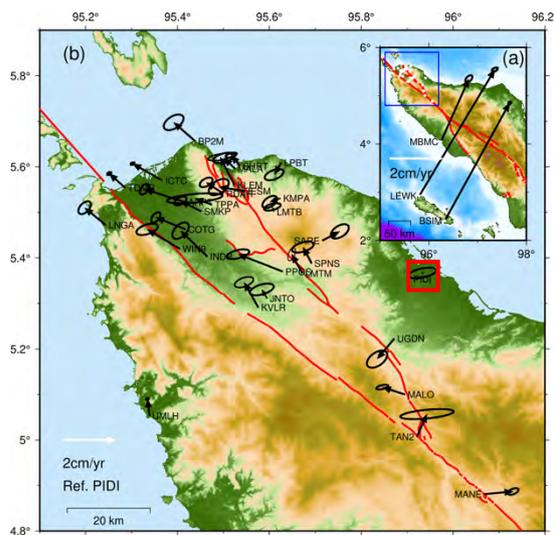


図2. 2017-2019年の期間におけるGNSS観測点の水平変位速度。PIDI観測点(図中赤四角印)に相対的な動きを示す。赤線は断層位置を示す。

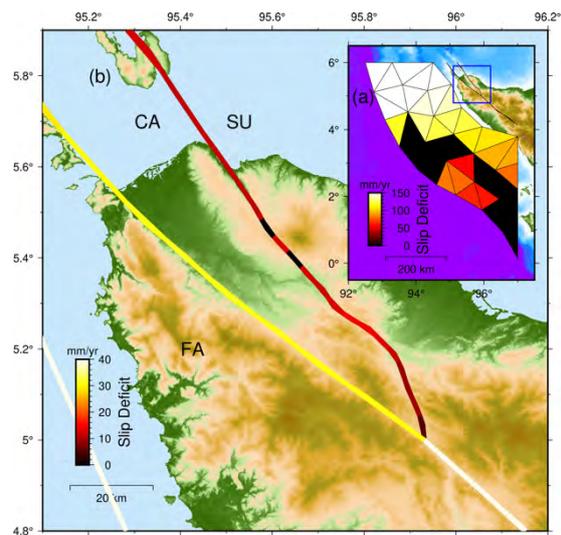


図3. 各断層面上におけるすべり欠損速度の分布。

(2) 地形調査

2017～2019年度は、前回の科研費（基盤 B, 24403005, H24-27）で作成した活断層分布図の作成範囲の拡大と改訂を進めた。従来は、活断層のマッピングには ALOS の PRISM 画像から作成した実体視画像を使用していた。しかし、雲量が多く判読が不十分な地域があった。2018年度にインドネシアのデジタル標高データ (DEMNAS) が公開されたことに伴い、これを使った実体視画像を整備した。DEMNAS は 0.27 秒メッシュの標高データで、分解能は約 8m である。これにより、これまで十分な判読ができていなかった Aceh 盆地南西縁の Aceh セグメントや Batee 断層沿いに明瞭な断層変位地形を認定した (図 1)。2017年度と 2019年度には、これまで未踏査であった Weh 島・アチェ盆地南西縁・Batee 断層の調査を行った。これらの地域で河成段丘や海成段丘を切る低断層崖や断層破砕帯・小断層群を観察し、これらの断層が第四紀後期にも活動的であることを示す実証的なデータを収集した。また明瞭な断層変位地形を対象に、ドローンを使った空撮を行った (図 4)。

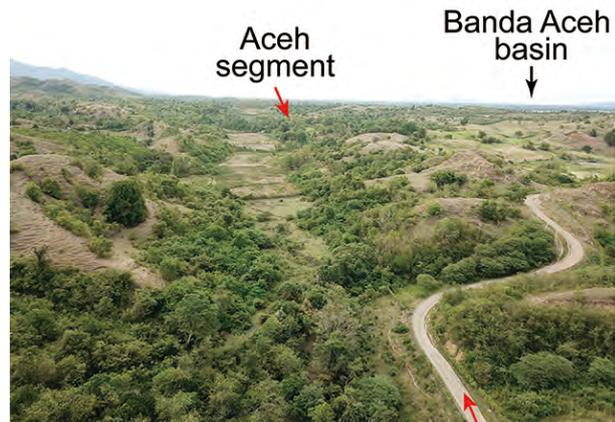


図 4. Banda Aceh 盆地南西縁の断層変位地形。北西に向かって撮影。逆向き低断層崖と線状凹地が連続する。

(3) 微動探査

Seulimeum セグメントの位置を特定するため、常時微動の H/V スペクトル振幅比法を用いた地盤構造調査を 2017 年度に実施した。解析時に水平成分の情報を独立に扱うことで浅層地盤地震波速度構造の方位依存性に注目し、断層位置の特定を行なった。2019 年には、前回の科研費（基盤 B, 24403005, H24-27）で実施した定常地震動観測点の記録に、この手法を拡張した SITES 法を適用することで、断層面からの反射波と考えられる信号を抽出した。信号強度の時空間変化に注目することで、断層の固着度モニタリングとして有効と思われる。

Syiah Kuala 大学への技術 SEEDS と地震動災害に対する大学のアセスメント基礎的資料作成として、大学キャンパス内の地盤構造調査を実施した。この調査では、地下約 20 m までの平均的な S 波速度構造の推定を行い、軟弱地盤の分布を調査した。軟弱層の分布は過去の浜堤跡や旧河川、湿地などの分布と相関が見られる。調査技術や解析手法は Syiah Kuala 大学の大学院修士論文や学生教育に取り入れられた。

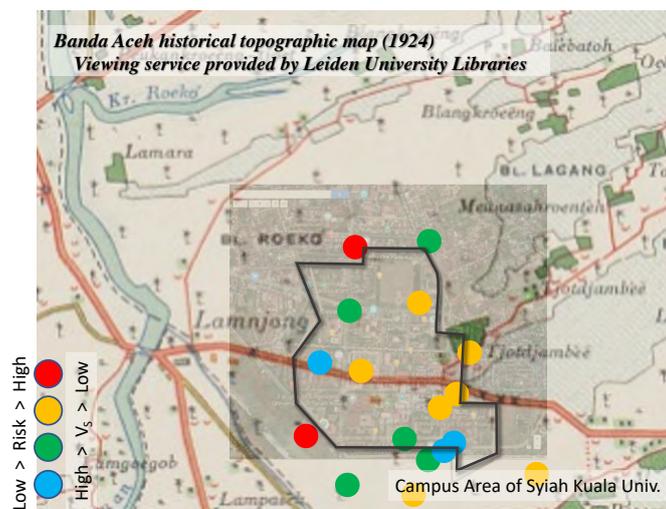


図 5. Syiah Kuala 大学キャンパスにおける地盤構造調査の位置 (丸) と平均 S 波速度、および古地図との比較。暖色の丸は S 波速度が小さく、地震動災害のリスクが高い場所を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Pratama Cecep, Ito Takeo, Sasajima Ryohei, Tabei Takao, Kimata Fumiaki, Gunawan Endra, Ohta Yusaku, Yamashina Tadashi, Ismail Nazli, Nurdin Irwandi, Sugiyanto Didik, Muksin Umar, Meilano Irwan	4. 巻 147
2. 論文標題 Transient rheology of the oceanic asthenosphere following the 2012 Indian Ocean Earthquake inferred from geodetic data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 50 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2017.07.049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Gunawan Endra, Widiyantoro Sri, Rosalia Shindy, Daryono Mudrik Rahmawan, Meilano Irwan, Supendi Pepen, Ito Takeo, Tabei Takao, Kimata Fumiaki, Ohta Yusaku, Ismail Nazli	4. 巻 108
2. 論文標題 Coseismic Slip Distribution of the 2 July 2013 Mw6.1 Aceh, Indonesia, Earthquake and Its Tectonic Implications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 1918 ~ 1928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0120180035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Cecep, P., T. Ito, R. Sasajima, T. Tabei, F. Kimata, E. Gunawan, Y. Ohta, T. Yamashina, N. Ismail, U. Muksin, P. Maulida, I. Meilano, I. Nurdin, D. Sugiyanto, and J. Efendi
2. 発表標題 Effect of 3-D heterogeneous-earth on rheology inference of postseismic model following the 2012 Indian Ocean earthquake
3. 学会等名 American Geophysical Union 2017 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堤浩之, 副田宣男, Nazli Ismail, Bukhari Ali
2. 発表標題 スマトラ断層北端部の断層変位地形と活動履歴
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤武男, 田部井隆雄, 木股文昭, 大久保慎人, 山品匡史, Cecep Pratama, Didik Sugiyanto, Mukusin Umar, Nazli Ismail, Irwandi Nurdin
2. 発表標題 The kinematic model along the Sumatran fault using a new dense GNSS observation (AGNeSS+) in Banda Aceh
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保慎人
2. 発表標題 Microtremor array exploration in the Syiah Kuala University, Banda Aceh, Indonesia
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤武男, 木村洋, 田部井隆雄, 大久保慎人, 山品匡史, 木股文昭, Cecep Pratama, Agustan, Mukusin Umar, Nazli Ismail, Didik Sugiyanto, Irwan Nurdin
2. 発表標題 インドネシアバンダアチェ近郊におけるGNSS 観測に基づくブロック運動モデル
3. 学会等名 日本測地学会第132回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Yamashina, Makoto Okubo, Takao Tabei, Umar Muksin, Nazli Ismail
2. 発表標題 Exploration of the fault extension using SITES method; Aceh and Seulimeum segments of the Sumatran fault, Indonesia
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshio Soeda, Hiroyuki Tsutsumi, Nobuhisa Matta, Nazli Ismail, Bukhari Ali
2. 発表標題 Active fault mapping and late Holocene activity of the northern Sumatran fault, Aceh province, Indonesia
3. 学会等名 HOKUDAN International Symposium on Active Faulting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木股 文昭 (KIMATA Fumiaki) (10089849)	公益財団法人地震予知総合研究振興会・東濃地震科学研究所・副首席主任研究員 (82669)	
研究分担者	伊藤 武男 (ITO Takeo) (40377982)	名古屋大学・環境学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	大久保 慎人 (OKUBO Makoto) (50462940)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・准教授 (16401)	
研究分担者	堤 浩之 (TSUTSUMI Hiroyuki) (60284428)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	
研究分担者	松多 信尚 (MATSUTA Nobuhisa) (40578697)	岡山大学・教育学研究科・教授 (15301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山品 匡史 (YAMASHINA Tadashi)	高知大学・理工学部	
研究協力者	副田 宣男 (SOEDA Yosio)	西日本技術開発株式会社	