

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20403001

研究課題名（和文）フィリピン断層帯の大地震発生パターンの地形学的・地震学的研究

研究課題名（英文）Spatial and temporal pattern of surface-rupturing earthquakes along the Philippine fault based on geomorphological and seismological investigations

研究代表者

堤 浩之（TSUTSUMI HIROYUKI）

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：60284428

研究成果の概要（和文）：フィリピン断層の地形・歴史地震・古地震調査に基づき、この断層から発生する地震の規模や頻度が走向方向に大きく変化することを明らかにした。フィリピン断層のほぼ全域の縮尺 5 万分の 1 の活断層分布図を作成し、フィリピン火山地震研究所のホームページで公開した。完新世隆起サンゴ礁段丘の調査により、海岸部を数 m 隆起させるような巨大地震がフィリピン海溝やマニラ海溝で繰り返し発生してきたことをはじめて実証的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We identified an along-strike variation of seismic behavior of the Philippine fault from large surface-rupturing earthquakes to aseismic creeping based on geomorphic, historical earthquake, and paleoseismic data. We mapped the surface trace of the Philippine fault on 1:50,000-scale topographic maps and made them available to the public on the homepage of the Philippine Institute of Volcanology and Seismology. Holocene raised coral reefs along the coast facing to the Philippine and Manila trenches suggest that the mega-thrust and related faults have generated large subduction zone earthquakes around the Philippines that caused uplift of the coastal areas on the order of several meters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	8,600,000	2,580,000	11,180,000

研究分野：地形学

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：活断層、フィリピン断層、変動地形、歴史地震、古地震、海成段丘、海溝型巨大地震、地震発生シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

長さ数 100km 以上におよぶ長大な断層帯が、個々の地震でどのように破壊するのかわかる「断層セグメンテーション」の問題は、

活断層研究および地震学における重要な研究課題のひとつである。この問題を解明するためには、断層の動的破壊過程に関する研究（地球物理学的アプローチ）と断層の幾何学

的形状や活動履歴に関する研究（地形・地質学的アプローチ）が必要である。前者に関しては、断層トレースのステップ・屈曲・分岐などの幾何学的不連続が、断層破壊の伝播や終息にどのような影響を与えるのかを数値シミュレーションで解析する研究が近年著しく進展した。後者に関しては、大地震に伴う長大な断層帯の破壊領域に関する実証的な研究が、地震断層の調査を中心に進められている。また断層の破壊領域や地震の発生間隔が複数の地震サイクルを通して一定なのか否かについては、地形・古地震学的手法に基づいて過去の地震像を詳細に明らかにすることによってのみ検討可能である。しかしながら、これらの問題を検討するのに十分なデータを取得できるような活動度の高い断層帯は国内には存在しない。

我々は、断層セグメンテーション研究の調査適地としてフィリピン断層帯に着目し、地形・古地震調査を進めてきた。フィリピン断層帯は、(1) 1800年代以降、地震断層を伴うM7クラスの地震が複数発生している、(2) 1990年ルソン島地震に関する詳しい地形学的・地震学的データが存在する、(3) 変位速度が大きく、個々の断層の活動間隔が短い、(4) ^{14}C 年代測定により地形面や堆積物の編年が比較的容易である、(5) 空中写真や地形図を外国の研究者でも自由に購入・利用できる、など世界的に見ても優れた条件を備えている。

本研究は、平成15～17年度科学研究費補助金基盤研究(B)「フィリピン断層系を例とした横ずれ断層系のセグメンテーションに関する研究」(研究代表者：堤 浩之)を発展させるものである。前回の科研費では、ルソン島中部の活断層の活動履歴を明らかにするために、断層変位地形調査・トレンチ掘削調査を行った。その結果、ルソン島中部のフィリピン断層帯を構成する4条の活断層の活動履歴が初めて明らかとなり、地表トレースの幾何学的不連続で分割される個々の断層が、複数の地震サイクルにわたって別々に活動し、それぞれが単独の地震セグメントをなしていることが明らかとなった。空中写真の詳細判読に基づく断層の分岐形状の解析からも同様なセグメンテーションモデルが得られた。これらの研究成果については、数編の学術論文として公表した。

このように、平成15～17年度の科研費では、横ずれ断層のセグメンテーション手法の確立に寄与する質の高いデータが得られ、当初の目的を十分に達成することができた。また、フィリピン断層帯の地震災害軽減の観点からは、断層トレースの詳細位置や次の活動時期が迫っている要注意断層が明らかとなるなど大きな成果が得られ、共同研究機関のフィリピン火山地震研究所でも高く評価さ

れた。またこの共同研究や現地でのワークショップを通して、フィリピン国内で活断層研究の重要性が認識され、フィリピン火山地震研究所およびフィリピン大学より計3名の国費留学生在が京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程に留学した。このような研究成果と状況を踏まえて、調査地域をフィリピン断層帯全域に広げ、また数値シミュレーションの手法を新たに導入する本研究計画を立案した。

2. 研究の目的

本研究では、平成20～22年度の3年間で、ルソン島南部以南のフィリピン断層帯陸域全域の変位地形調査・トレンチ掘削調査を行う。それにより断層の詳細な分布・変位速度・活動履歴を明らかにし、過去2000～3000年間にこの断層帯から発生した大地震の時空間分布を明らかにする。またそれを断層の幾何学的特性と比較することで、横ずれ断層の地表トレースの形状と破壊の開始・終息の関連性の一般化に努める。具体的には、以下の項目を明らかにすることを目的とする。

①主要活断層の第四紀後期の変位速度を地形学的に算出する。②主要活断層の過去数千年間の活動履歴を明らかにする。③歴史地震の破壊領域を微小変位地形や古地震データを基に特定する。④断層の分岐形状や上下変位パターンに基づくセグメンテーションモデルの妥当性を古地震データに基づき検討する。

本研究では、上記の地形・古地震学的研究に加えて、断層活動の時空間パターンを数値シミュレーションの手法で再現することを試みる。共同研究者の平原は、南海トラフから発生する大地震サイクルを数値シミュレーションで再現し、将来発生する地震の予測に役立てる研究を進めてきた。同様な手法を内陸活断層に適用できれば、内陸直下型地震の長期予測に対して重要なデータを提供できる。本研究では、内陸活断層の活動シミュレーション手法を確立し、ルソン島のフィリピン断層帯の大地震サイクルを再現することを試みる。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、ルソン島南部・マスバテ島・レイテ島・ミンダナオ島のフィリピン断層帯について、詳細活断層分布図の作成・断層変位地形の現地調査・トレンチ掘削調査を行う(図1)。また、内陸活断層の地震発生サイクル数値シミュレーションのモデルや計算コードを開発する。具体的には、以下のような調査・研究を行う。

(1) 空中写真判読-研究対象地域の縮尺2万

分の1の空中写真を判読し、縮尺5万分の1の地形分類図・断層分布図を作成する。今後の解析や研究成果の公開の便も考えて、断層図はGISを使ってデジタルアーカイブ化する。

(2) 断層変位地形の調査と地形面の編年-第四紀後期の河成面・沖積面が変位している地域を中心に現地調査を行う。低断層崖の比高や河谷・段丘崖の横ずれ量を計測すると共に、 ^{14}C 年代測定試料のサンプリングを行う。またトレンチ掘削調査地点の選定を行う。

(3) トレンチ掘削調査-トレンチ壁面に現れた断層構造の記載と解析により、断層変位が生じた層準を特定し変位量を計測する。またトレンチ壁面から ^{14}C 年代測定試料を採取し分析することで、地震の発生時期を明らかにする。

(4) 数値シミュレーション-内陸活断層から発生する地震のシミュレーションを行うためのモデルや計算コードを、プレートの沈み込み帯で使われているものを改良する形で作成する。シミュレーションの対象地域はルソン島中部とし、過去2000年間の地震発生履歴を再現する。

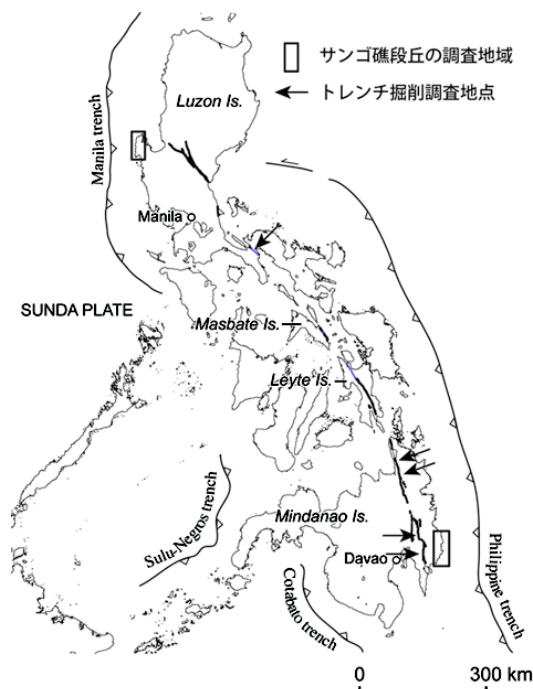


図1 トレンチ掘削調査地点とサンゴ礁段丘調査地域の位置図

4. 研究成果

空中写真判読により、フィリピン断層帯の陸域の約90%の地域について、縮尺5万分の1の詳細活断層図を作成した。残りの約10%の地域については、空中写真が入手できなかったため、衛星画像を判読して断層図を完成した。この活断層図は、GISソフトウェアを

使ってデジタル化し、図幅ごとに画像ファイルとしてフィリピン火山地震研究所のホームページで公開している。

この断層図を基に、ルソン島中部・マサバテ島・レイテ島・ミンダナオ島の断層変位地形調査を行った。ミンダナオ島では、多くの断層トレースが新たに認定され、その一部は1879年や1893年の歴史地震の地震断層に対応することが明らかとなった。レイテ島の北部では、活断層の地表クリープの確実な証拠を得ることができた。人工構造物の築造年代と変位量から、 $12\sim 22\text{mm/yr}$ のクリープ変位速度(左横ずれ)を算出した。レイテ島では、過去400年間にフィリピン断層上で大地震が発生しておらず、断層変位の大部分が定常的なクリープ変位で解消されている可能性がある。

ルソン島の中部の1地点とミンダナオ島の4地点でトレンチ掘削調査を実施し(図1)、各断層セグメントの活動間隔や歴史地震との対応を検討した。いずれの地域でも、断層の平均活動間隔は数百年のオーダーであることが明らかとなった。

過去400年間の歴史地震記録やトレンチ掘削調査により明らかとなった活動履歴データから、フィリピン断層から発生する地震の規模や間隔は地域ごとに大きく異なることが明らかとなった。すなわち、通常は断層面が完全に固着し数百年間隔でM7以上の大地震を発生させる区間(ルソン島中部やミンダナオ島)から、地震断層を伴うM6~M7の中規模地震が頻発する区間(ルソン島南部やマサバテ島)や断層変位のほとんどがクリープ変位でまかなわれる区間(レイテ島)まで存在する。このような断層の走向方向への地震発生様式の多様性は、脆性破壊する地殻の厚さが関連していることを予察的に指摘することができる。

地震発生サイクルのシミュレーションは、共同研究者の平原の指導のもと、研究協力者のDela Cruzが研究を進めた。海溝型巨大地震のシミュレーション手法を内陸活断層に適用できるようにモデルの改良を行い、ルソン島のフィリピン断層の各セグメントで発生する地震の規模や間隔を再現することに成功した(Dela Cruz, L. S., 2009, Numerical simulations of earthquake cycles along the Philippine fault zone, Luzon Island, Philippines, フィリピン大学大学院理学研究科数学専攻博士論文)。

また当初の研究計画には含まれていなかったが、フィリピン海溝とマニラ海溝で発生する海溝型巨大地震の発生ポテンシャルを評価するために、ルソン島西部とミンダナオ島東部の隆起サンゴ礁段丘の調査を行った(図1)。その結果、両地域で3~4段の完新世離水サンゴ礁段丘を認定し、その分布や高

度から、これらの海溝で M8 クラスの巨大地震が繰り返し発生してきたことが明らかとなった (Ramos and Tsutsumi, 2010 ; Ramos et al., 2011). また、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波被害を受けて、マニラ海溝に面するルソン島西部の 2 地域で、ハンディジオスライサーを用いた予察的な津波堆積物調査を行った。

本研究に参画したフィリピンからの留学生 2 名 (Laarni S. Dela Cruz と Noelynna T. Ramos) が、本科研究費で遂行した調査・研究をもとに博士論文を作成し、学位を取得した。両名は、学位取得後、フィリピン大学の准教授として着任した。また、Jeffrey S. Perez は博士後期課程を修了し、博士論文の作成を進めている。このように、フィリピンからの留学生を研究に参画させることにより、フィリピンの活構造・地震研究の次世代リーダーを教育・育成するという当初の目的は十分に達成された。

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. Ramos, N. T., Tsutsumi, H., Perez, J. S., and Bermas, P. P. Jr., 2011, Uplifted marine terraces in Davao Oriental Province, Mindanao Island, Philippines and their implications for large prehistoric offshore earthquakes along the Philippine trench, *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 114-125. (査読有り)
2. Ramos, N. T. and Tsutsumi, H., 2010, Evidence of large prehistoric offshore earthquakes deduced from uplifted Holocene marine terraces in Pangasinan Province, Luzon Island, Philippines, *Tectonophysics*, 495, 145-158. (査読有り)

[学会発表] (計 11 件)

1. Dela Cruz, L. S., 2012, Numerical simulation of earthquake cycles using depth-dependent frictional parameters, 12th Philippine Computing Science Congress (PCSC 2012), 2012 年 3 月 1 日, フィリピン共和国ビナン市.
2. Tsutsumi, H. and Perez, J. S., 2011, Along strike variation of seismic behavior of the Philippine fault based on historical- and paleo-seismicity, AGU Fall Meeting

2011, 2011 年 12 月 8 日, アメリカ合衆国サンフランシスコ市.

3. 堤 浩之, 2010, 東南アジアの活構造と地震テクトニクス, 故藤田和夫追悼シンポジウム, アジアの山地形成論: 日本列島からヒマラヤまで, 日本地質学会第 117 年学術大会, 2010 年 9 月 19 日, 富山市.
4. Tsutsumi, H. and Perez, J. S., 2010, Progress in seismic hazard evaluation of the Philippine fault zone through fault mapping and paleoseismic trenching, 20th Year Commemoration of the 16 July 1990 Luzon earthquake "Harnessing Lessons Towards an Earthquake-Resilient Nation" (招待講演), 2010 年 7 月 15 日, フィリピン共和国ケソン市.
5. Tsutsumi, H. and Perez, J. S., 2010, Large-scale digital mapping of the Philippine fault zone based on aerial photograph interpretation, HOKUDAN International Symposium on Active Faulting, 2010 年 1 月 17 日, 兵庫県淡路市.
6. Tsutsumi, H. and Ramos, N. T., 2010, Evidence for large prehistoric offshore earthquakes along the Manila trench deduced from emergent Holocene coral reefs in Pangasinan Province, Luzon Island, Philippines, HOKUDAN International Symposium on Active Faulting, 2010 年 1 月 17 日, 兵庫県淡路市.
7. Perez, J. S., Tsutsumi, H., Cahulogan, M. T., Ishimura, D., and Cabanlit, D. P., 2010, Paleoseismic evidence along the Surigao segment of the Philippine fault zone, northeastern Mindanao, Philippines, HOKUDAN International Symposium on Active Faulting, 2010 年 1 月 17 日, 兵庫県淡路市.
8. Perez, J. S., Tsutsumi, H., Ishimura, D., Cahulogan, M. T., and Cabanlit, D. P., 2009, Evidence of large earthquakes on the Surigao segment of the Philippine fault zone, northeastern Mindanao, Philippines, 日本活断層学会 2009 年度秋季学術大会, 2009 年 11 月 8 日, 東京都文京区.
9. 堤 浩之・Noelynna T. Ramos・Jeffrey S. Perez, 2009, 隆起サンゴ

礁が示すマニラ海溝・フィリピン海溝の巨大地震発生履歴, 2009年日本地理学会秋季学術大会, 2009年10月24日, 沖縄県中頭郡西原町.

10. 堤 浩之・Noelynna T. Ramos・Jeffrey S. Perez, 2009, マニラ海溝・フィリピン海溝で発生する海溝型巨大地震の地形学的証拠, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 2009年5月21日, 千葉市.
11. Ramos, N. T., Tsutsumi, H., and Perez, J. S., 2009, Seismotectonic implications of uplifted coral reefs in the Philippines: A preliminary report, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 2009年5月20日, 千葉市.

[その他]

フィリピン断層帯の縮尺5万分の1の詳細活断層図 (フィリピン火山地震研究所のホームページにて図幅毎に公開, http://www.phivolcs.dost.gov.ph/index.php?option=com_content&view=article&id=379&Itemid=500023)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堤 浩之 (TSUTSUMI HIROYUKI)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 60284428

(2) 研究分担者

平原 和朗 (HIRAHARA KAZURO)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40165197

(3) 連携研究者

中田 高 (NAKATA TAKASHI)
広島工業大学・環境学部・教授
研究者番号: 60089779

杉戸 信彦 (SUGITO NOBUHIKO)
名古屋大学・大学院環境学研究科・研究員
研究者番号: 50437076

(4) 研究協力者

Laarni, S. Dela Cruz
京都大学・大学院理学研究科・博士後期課程研究生 (現在フィリピン大学理学部数学科准教授)

Noelynna T. Ramos
京都大学・大学院理学研究科・博士後期課程大学院生 (現在フィリピン大学理学部地

質科学科准教授)

Jeffrey S. Perez
京都大学・大学院理学研究科・博士後期課程大学院生 (現在フィリピン火山地震研究所研究員)