

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02973

研究課題名(和文) アジアの造山帯の地形発達と深層崩壊発生場に関する研究

研究課題名(英文) A study for the slope development and site characteristics of deep-seated landslides in Asian orogenic belts

研究代表者

千木良 雅弘 (Chigira, Masahiro)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：00293960

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)：岩盤までも崩壊して甚大な災害を引き起こす深層崩壊について、それらの発生場を、山地斜面の河川侵食に対する応答として理解し、領域および特定の斜面として予測する考え方を構築することを目的とした。アジアの代表的な造山帯として、ネパールヒマラヤ、中国眠山山地、台湾中央山脈、日本の西南日本外帯を対象として、地形・地質的特徴を、詳細地形データ分析と現地調査によって検討した。その結果、深層崩壊が重力によって変形した斜面(重力変形斜面)に発生していること、そして、重力斜面変形は古い地形面が新たな河川侵食によって形成された遷急点の上流への遡及によって生じていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネパールヒマラヤ、中国眠山山地、台湾中央山脈、日本の西南日本外帯、いずれの地域においても、隆起する山地を侵食する河川によって遷急点が形成され、その上流への遡及によって谷中谷が形成されて、不安定となった斜面が重力によって変形し、場合によっては崩壊することがわかった。この知見は、これらの造山帯における巨大地震による将来的な斜面崩壊発生危険場所をゾーンとして特定できることを示しており、今後の災害軽減に資するところが大きい。さらに、詳細地形データが得られる場合、深層崩壊に先立って重力斜面変形が生じていることが明確に認められ、不安定斜面を事前に特定することができる可能性が強く示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to interpret the site characteristics of deep-seated catastrophic landslides in terms of the response of mountain slopes to fluvial erosion and to establish the methodology for the prediction of their potential sites. We chose Nepal Himalaya, Minshan Mountains, Taiwan Central Mountains, and Outer Belt of the Southwest Japan for this study and examined their geomorphological and geological characteristics, and found that deep-seated catastrophic landslides occurred on slopes that had been gravitationally deformed and that those deformations were induced by the upstream migration of knickpoints, which were made by fluvial incision into paleo surfaces.

研究分野：応用地質学

キーワード：深層崩壊 造山帯 侵食 重力斜面変形

1. 研究開始当初の背景

2008年中国汶川地震、2009年台湾台風モラコット豪雨、2011年紀伊山地台風12号豪雨、2016年熊本地震によって多数の深層崩壊が発生し、甚大な災害を引き起こしていた。深層崩壊は、規模が大きく、移動速度も大きいため、災害軽減のためには、その発生場所を予測して備えることが必須であるが、日本で進められている土砂災害警戒区域・特別警戒区域の指定は、地すべり、土石流、小規模ながけ崩れを対象としており、深層崩壊は対象に含まれていない。また、その発生場所の予測方法も確立されていなかった。

申請者は、九州山地や紀伊山地の豪雨による深層崩壊の調査を行い、深層崩壊が何の前兆もない所に突然発生するのではなく、前もって重力でずり下がった斜面(重力変形斜面)に発生するものであることを、世界で初めて明確に示し、2013年の米国地球物理学連合秋季大会で招待講演した。また、その研究過程で、重力変形斜面は、地質時代の古地形面が河川侵食によって裾を払われて不安定化した領域に多いことに注目していた。その後、申請者は、台湾中央山脈、中国四川省の眠山山脈、ネパールヒマラヤの調査をする機会に恵まれ、これらの造山帯でも、同様の現象があることに気づいたが、当時は外国の山岳地の地質と地形を調査するための解像度の高い空中写真と地形図は容易には手に入らず、そのような研究を進められる環境になかった。その後、JAXA他によって国外の高解像度衛星画像と5mメッシュの地形データが広い範囲で整備され、また、国内では、あまり一般的ではなかった航空レーザー計測が広い範囲で取得されるようになり、これらが入手可能になったため、申請者が築いてきた研究ネットワークを使って研究を推進する準備が整った。

2. 研究の目的

岩盤までも崩壊して甚大な災害を引き起こす深層崩壊について、アジアの代表的な造山帯を対象として調査し、深層崩壊が重力によって変形した斜面(重力変形斜面)に発生していること、そして、重力斜面変形は古い地形面が新たな河川侵食によって不安定化した斜面に多く発生していること、という申請者の仮説を検証し、古地形面、河川侵食、重力斜面変形をカギとして、深層崩壊の発生危険度の大きなゾーン、さらには斜面を特定する手法を確立すること。

3. 研究の方法

本研究では、付加型造山帯の代表として西南日本外帯、台湾中央山脈を、大陸衝突型造山帯の代表として中国眠山山脈、ネパールヒマラヤをとりあげ研究を実施する。これらの地域では、急激な隆起と侵食の場となっており、地震あるいは降雨によって多数の斜面崩壊が発生し、甚大な災害を引き起こしてきたが、その地質素因や侵食に対する斜面の応答を明らかにした研究は少ない。

中国、台湾、ネパールの造山帯で深層崩壊の発生した場と周辺の地形・地質的特徴を、解像度2.5mの衛星画像と5mメッシュの地形データを用いて調査・分析する。特に高標高部にある古地形面とそれを刻む谷(谷中谷)の分布・形態と地質構造を調べ、谷中谷と重力斜面変形、深層崩壊、そして地質構造との関係を調べる。加えて、無植生の中国とネパールヒマラヤでは、InSARによる変位速度を重力変形斜面の形態的特徴と内部構造と関連付け、また、詳細地形データと精密変位計測データの得られる西南日本外帯では、さらに微地形と地質構造、変位速度との関係を調べる。これらの結果を比較検討して、地域によるデータの過不足を補い、これらの造山帯に共通するような山地地形発達過程を描き出し、深層崩壊発生の可能性の高い領域と特定斜面とを抽出する手法を考案する。

4. 研究成果

(1)ネパールヒマラヤ

ネパールヒマラヤでは、2015年にゴルカ地震が発生し、多数の斜面崩壊が発生した。本研究では、斜面崩壊が多数発生した地域と、ヒマラヤを横断して世界一深い谷を形成するカリガンダキ川流域を対象として調査した。その結果、両地域ともに、新たな河川侵食による谷中谷が広範に形成されていることが明らかとなった。そして、これらの谷中谷は、遷急点の上流への波及によって形成されたことも明らかになった。ゴルカ地震の際には、この谷中谷に集中的に斜面崩壊が発生したことが明らかになった(Tsou et al. 2017)。このことは、谷中谷の壁の斜面が侵食によって不安定化したことを示している。カリガンダキ川流域では、この遷急点よりも下流の谷中谷斜面に多数の重力斜面変形が形成されていることが明らかとなり、その受け盤側斜面では曲

げトップリングが、流れ盤斜面では座屈変形が生じていた(Chigira et al. 2019)。

(2)中国眠山山脈

眠山山脈を横断して流れる眠江流域での詳細な地形と地質の調査から、四川盆地上流では、顕著な遷急点が上流に波及し、谷中谷を形成し、その谷壁斜面で大規模な重力斜面変形と斜面崩壊とが生じていることが明らかになった(Zhao et al. 2019)。さらに、これらの重力斜面変形は、地質構造と河川との交差方向によって特徴的な形態で生じることがあきらかになった。眠江で最大の斜面崩壊である Diexi の崩壊は、層理面と節理面とが谷側に傾斜する楔を構成し、その下部を河川が切断した結果生じたものであった。また、2017年に発生して、村を壊滅し、102名の犠牲者を生じた Xinmo の崩壊は、それに先立って座屈重力変形が生じていたことが明らかになった(Zhao et al. 2018)。Xinmo の崩壊後では、In-SAR の解析によって、さらに変形が進行していることも検出された(Sato and Chigira 2018)。

(3)西南日本外帯

紀伊山地では、白亜紀の付加体である四万十帯において、2011年の台風12号による多数の深層崩壊が、事前に河川侵食によって生じた重力変形斜面に生じたものであったこと、さらに、それらの構造的原因が付加作用時に形成された衝上断層にあることが明らかになった(図1, Arai and Chigira 2018, 2019)。

これと同様のことは、

秩父山地の四万十でも明らかになった(益子将和 and 千木良雅弘 2019)。秩父山地の場合、変形によって生じた堆積物のテフラ分析から、これらの変形が9万年前から開始し、平均変位速度は0.2~0.5 mm/yrであることがわかった。このように長期的な変位速度が明らかになったのは初めてのことである。南アルプスでは、スレートの曲げトップリングによって、高角断層が変形斜面にある場合、断層とスレートとの関係に応じた形態と規模の山向き小崖が形成されることが明らかになった(Yokoyama 2020; Yokoyama and Chigira 2019)。

(4)台湾中央山脈

スレート分布域で、河川侵食によってスレートの曲げトップリングが生じ、さらに、それが大規模な斜面崩壊に至っている場合が明らかになった(Tsou et al. 2018)。

(5)本研究の意義と今後の発展性

ネパールヒマラヤ、中国眠山山地、台湾中央山脈、日本の西南日本外帯、いずれの地域においても、隆起する山地を侵食する河川によって遷急点が形成され、その上流への遡及によって谷中谷が形成されて、この谷中谷と地質構造との関係によって不安定となった斜面が重力によって変形し、強い地震時に崩壊することが明らかになった(図-2, 千木良雅弘 2018)。この知見は、これらの造山帯における巨大地震による将来的な斜面崩壊発生危険場所をゾーンとして特定できることを示しており、今後の災害軽減に資するところが大きい。さらに、詳細地形データが得られる場合、深層崩壊に先立って重力斜面変形が生じていることが明確に認められ、不安定斜面を事前に特定することができる可能性が強く示唆された。

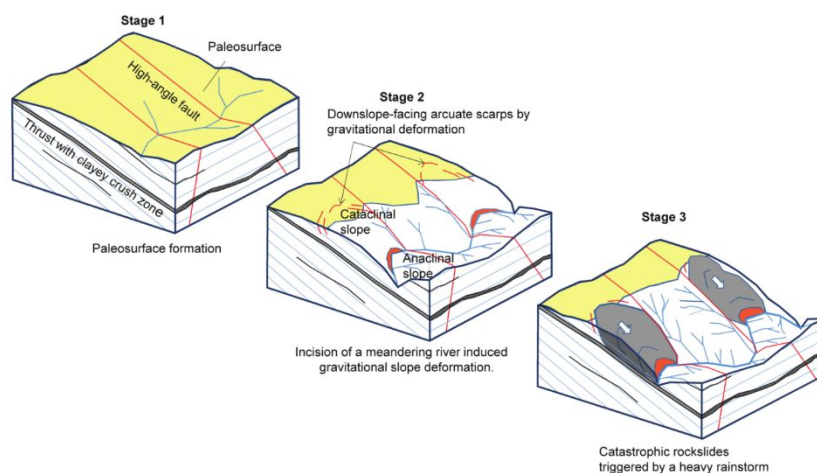


図1 .河川侵食に伴う斜面の不安定化と深層崩壊の発生を示す模式図 (Arai and Chigira, 2011)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhao, S., Chigira, M. & Wu, X.	4. 巻 338
2. 論文標題 Gigantic rockslides induced by fluvial incision in the Diexi area along the eastern margin of the Tibetan Plateau.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geomorphology	6. 最初と最後の頁 27-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geomorph.2019.04.008.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Jaboyedoff, M., Chigira, M., Arai, N., Derron, M.-H., Rudaz, B. & Tsou, C.Y.	4. 巻 7
2. 論文標題 Testing a failure surface prediction and deposit reconstruction method for a landslide cluster that occurred during Typhoon Talas (Japan).	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth Surface Dynamics	6. 最初と最後の頁 439-458
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.5194/esurf-7-439-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Furuki, H. & Chigira, M.	4. 巻 260
2. 論文標題 Structural features and the evolutionary mechanisms of the basal shear zone of a rockslide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enggeo.2019.105214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Arai, N. & Chigira, M.	4. 巻 260
2. 論文標題 Distribution of gravitational slope deformation and deep-seated landslides controlled by thrust faults in the Shimanto accretionary complex.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enggeo.2019.105236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arai, N. & Chigira, M.	4. 巻 27
2. 論文標題 Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.1111/iar.12245	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsou, C.Y., Chigira, M., Higaki, D., Sato, G., Yagi, H., Sato, H.P., Wakai, A., Dangol, V., Amatya, S.C. & Yatagai, A.	4. 巻 15
2. 論文標題 Topographic and geologic controls on landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake and its aftershocks: an example from the Trishuli Valley, central Nepal.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 953-965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10346-017-0913-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsou, C.Y., Chigira, M., Lin, H.H., Huang, W.K.	4. 巻 55
2. 論文標題 Flexural toppling as a causal factor of the rain-induced slope failure in 2016, Hsinchu Prefecture, Taiwan.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Landslide Society	6. 最初と最後の頁 39-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao, S., Chigira, M. & Wu, X.	4. 巻 256
2. 論文標題 Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 187-197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2018.09.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsou, C.Y., Chigira, M., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Arai, N.	4. 巻 14
2. 論文標題 Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1901-1914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10346-017-0838-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsou, C.-Y., Higaki, D., Chigira, M., Yagi, H., Dangol, V., Amatya, S.C., Hayashi, K., Kato, H.	4. 巻 55
2. 論文標題 Topographic characteristics of landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake, Nepal.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Nepal Geological Society	6. 最初と最後の頁 151-157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 益子将和, 千木良雅弘
2. 発表標題 関東山地三峰地域における線状凹地を埋積する堆積物.
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 Yokoyama, O. & Chigira, M.
2. 発表標題 Formative processes of uphill-facing scarps by gravitational flexural toppling.
3. 学会等名 European Geosciences Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chigira, M., Tsou, C.Y. & Higaki, D.
2. 発表標題 Gigantic landslides aligned along the Kaligandaki River, Nepal Himalaya.
3. 学会等名 European Geosciences Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chigira, M.
2. 発表標題 Recent large landslides in Asian countries and their background
3. 学会等名 12th Asian Regional Conference of International Association of Engineering Geology and Environment. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山修、千木良雅弘
2. 発表標題 スレート地帯の重力斜面変形と地震による深層崩壊.
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 Zhao, S., Chigira, M. & Wu, X.
2. 発表標題 Geology and geomorphology of the 2017 Xinmo landslide and its preceding gravitational slope deformation at Maoxian, Sichuan, China.
3. 学会等名 Japan Geosciences Union 2018 Meeting. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 浩、千木良雅弘
2. 発表標題 PALSAR-2干渉画像の2.5次元解析による中国・四川，2017年新磨村地すべり後の斜面変動の把握
3. 学会等名 2018年度日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sato, H., Chigira, M.
2. 発表標題 Detection of landslide surface deformation in Min Jiang watershed, China using PALSAR-2 InSAR image
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Arai, N. and Chigira, M.
2. 発表標題 Rock avalanches controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex of the Shimanto Belt
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荒井紀之，千木良雅弘
2. 発表標題 四万十付加体からなる山地斜面で発生する深層崩壊の地形・地質構造条件について
3. 学会等名 京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Chigira, M., Arai, N.
2. 発表標題 Deep-seated gravitational slope deformations that develop to catastrophic landslides
3. 学会等名 4th Slope Tectonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 千木良雅弘
2. 発表標題 南海トラフおよび相模トラフの大地震による深層崩壊
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤浩
2. 発表標題 四川省新磨村の2017年崩壊斜面のSAR干渉画像の判読
3. 学会等名 日本地理学会2017年秋季学術大会, 三重大学
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sato HP
2. 発表標題 Interpretation of L-band InSAR images to detect landslide surface deformation along Min Jiang River, Western Sichuan, China
3. 学会等名 4th Slope Tectonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sato HP
2. 発表標題 Landslide Precursory deformation using ALOS-2/PALSAR-2 InSAR image along Min River in Maoxien, Sichuan, China
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsou, C.Y., Ling, X. and Chigira, M.
2. 発表標題 A flexural toppling failure in the northern Central Range, Taiwan
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jaboyedoff, M., Chigira, M., Arai, N., D., M.-H., Thierry, O., Ivanna, P., Benjamin, R. and Tsou, C.Y.
2. 発表標題 3D failure surface and volume estimation of large rock slope instabilities: a review of a bottleneck problem.
3. 学会等名 4thSlope Tectonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsou, C.Y., Chigira, M., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Arai, N.
2. 発表標題 Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan
3. 学会等名 4th Slope Tectonics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yokoyama, O. and Chigira, M.
2. 発表標題 Gravitational slope deformation and its transformation into catastrophic landslides during earthquakes in a slate area.
3. 学会等名 4th Slope Tectonics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhao, S. and Chigira, M.
2. 発表標題 Geomorphological and Geological Characteristics of Large Catastrophic Ancient Landslides along Minjiang River in Diexi, Western Sichuan, China
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhao, S. and Chigira, M.
2. 発表標題 The response of catastrophic landslides to fluvial incision in the upstream of Minjiang River, Western Sichuan, China
3. 学会等名 4th Slope Tectonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhao, S. and Chigira, M.
2. 発表標題 Geomorphological and Geological Characteristics of Large Catastrophic Ancient Landslides along Minjiang River in Diexi, Western Sichuan, China
3. 学会等名 京都大学防災研究所年次講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 千木良雅弘	4. 発行年 2018年
2. 出版社 近未来社	5. 総ページ数 246
3. 書名 災害地質学ノート	

〔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	鄒 青穎 (Tsou Ching-Ying) (40750055)	弘前大学・農学生命科学部・助教 (11101)	
研究分担者	佐藤 浩 (Sato Hiroshi) (60360468)	日本大学・文理学部・准教授 (32665)	
研究協力者	リン チンウェイ (Ling Ching-Weei)		
研究協力者	フェイ リュウエン (Fei Li-Yuan)		
研究協力者	ウー シヨン (Wu Xiyong)		

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	ビシュヌ ダンゴル (Vishnu DangoI)		
連携研究者	小嶋 智 (Kojima Satoru) (20170243)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	
連携研究者	松四 雄騎 (Matsushi Yuki) (90596438)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	