

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H00766

研究課題名(和文) 広域DEM画像判読による「アジアの詳細デジタル活断層図」作成と地震予測精度の改善

研究課題名(英文) Creation of "Detailed Digital Active Fault Maps of Asia" by Interpreting Wide-area DEM Images and Improvement of Earthquake Prediction Accuracy

研究代表者

中田 高 (Nakata, Takashi)

広島大学・人間社会科学研究科(文)・名誉教授

研究者番号：60089779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：ALOS World 3D DEMやCORONA衛星画像のアナグリフを画像処理ソフトMap Tiler Proを用いてkmlファイルに変換しGoogle Earthに重ねて判読する効率的な活断層認定作業によって、アジア全域の活断層図を作成した。この結果を、研究分担者によるクロスチェックを行い、活断層の線分情報を確定した。活断層判読時に断層位置・走向・断層変位様式・断層変位基準など活断層の属性データを作成した。詳細な活断層の位置・形状の情報によって、活断層起源の大地震の発生場所・地震規模・地震断層の出現位置などの地震発生の予測精度向上に資するデータを整備することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのアジア地域の広域的な活断層図の多くは、異なる研究者の研究成果をコンパイルしたものであった。本研究によって作成されたデジタル活断層図は、統一した認定基準をもとに活断層の位置・形状を広域的に認定したものであり、日本国内の活断層図と同等の精度と詳細さを持つ。このため、地震発場所と地震規模の予測のためにこれまでの活断層分布図にとってかわる信頼性の高い極めて重要な基礎資料であり、活断層と大地震との関連を検討する貴重な資料となり、地震災害軽減に資する社会的意義の大きい研究といえる。今後、アジアの活断層研究の展開や地震防災・軽減のために活用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The investigator mapped active faults of Asia based on interpretation of Anaglyphs from ALOS World 3D DEM and CORONA satellite images which were converted to kml files using the image processing software Map Tiler Pro and superimposed on Google Earth. The result of mapping was cross-checked by the co-investigator, and the line segment information of the active fault was determined. Attribute data of active faults, such as fault position, strike, fault displacement mode, and fault displacement criteria, were created when interpreting active faults. By using detailed information on the position and shape of active faults, we were able to organize data that contributes to improving the accuracy of earthquake prediction, such as the location, scale, and location of occurrence of large earthquakes originating from active faults.

研究分野：自然地理学 変動地形学

キーワード：活断層 アジア ALOS World 3D アナグリフ デジタル活断層図 変動地形学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、アジア諸国では活断層起源の大地震が多発し大きな被害を発生させてきた。しかし、一部の国を除き多くの発展途上国では詳細な活断層の分布図が未整備である。このような地震被害を防止・軽減するためには、発生源となる活断層の詳細な位置・形状に関する詳細かつ信頼できる情報を整備する必要があり、アジア全域で日本の活断層図と同等の詳細な活断層図を作成することにした。

(2) 広域の活断層図マッピングには、数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を用いたアナグリフ画像の活用が費用対効果の面で有利であることを認識し、数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) の活用を目指した。世界の広い範囲をカバーする水平解像度 30m 相当の数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) として、NASA/USGS が配布するスペースシャトルのレーダーで測量された SRTM1 (Shuttle Radar Topography Mission) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ・地球観測研究センターの ALOS World 3D 30m grid DEM (以後 ALOS 30) の標高データの無償提供が 2014 年と 2015 年から始まり、「アジアのデジタル活断層図」の作成を目指す環境が整った。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、アジアの全域を対象に、フリーで提供されている解像度 30m の ALOS 30 や SRTM1 などの広域的な数値標高モデルをもとに立体視可能な地形画像 (アナグリフ画像) を作成し、これを判読することで変動地形学的手法によって活断層の位置・形状を解明し、「アジアのデジタル活断層図」を作成する。

(2) また、地震発生源となる活断層の位置と規模をより統一された判読基準に基づいて詳細に把握し、それらの属性データを整備することで地震予測性を向上し、地震災害の軽減に貢献する。

(3) 海外におけるグランド・トゥールズにおいて、地形の詳細かつ効率的なマッピングを可能とする簡易モバイル LiDAR を製作し、現地において活断層の 3D 計測を実施することを新たな目的に加えた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 変動地形学的手法による活断層の認定

本研究における活断層の認定は、新しい地形面 (扇状地や段丘地形など) を変位させる (低) 断層崖や撓曲、谷屈曲を伴う顕著なリニアメント (線状構造) など確実な地形的な根拠に基づいて行った。

本研究では活断層の確実度を以下の 3 つに区分した。active fault (断層変位地形が明瞭で連続性の良いもの)、presumed active fault (断層変位地形が認められるがその位置が不鮮明で連続性が乏しいことなどで活断層と断定出来ないもの)、suspected active fault (明瞭な断層変位地形を伴わない直線的な急崖を伴う明瞭な地形境界や、連続するリニアメントなど活断層である可能性を否定できない断層) である。

#### (2) 水平解像度 30m の数値標高モデルをもとにした 3D 画像 (アナグリフ画像) の作成

世界の広い範囲をカバーする水平解像度 30m 相当の数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) として、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ・地球観測研究センターの ALOS 30 と NASA/USGS の SRTM1 (Shuttle

Radar Topography Mission) はいずれも無償で配布されている。これらの DEM をネットでダウンロードし、3D 画像ソフト Simple DEM Viewer を用いてアナグリフ画像を作成して比較したところ、ALOS 30 DSM の地形表現がより詳細であると判断し、主としてこれを使用した。

地形判読にあたっては、2 種類のアナグリフ画像を準備した。その一つは、起伏の大きい山地地域を判読するために高さの強調を 2 倍に抑えた画像スケールを 200%とした画像と、起伏の小さい平地の判読のために高さの強調を 5 倍・画像スケールを 100%とした画像を準備した。判読作業にあたっては前者を主として用い、後者を補助的に使用して活断層の見落としが無いように努めた。

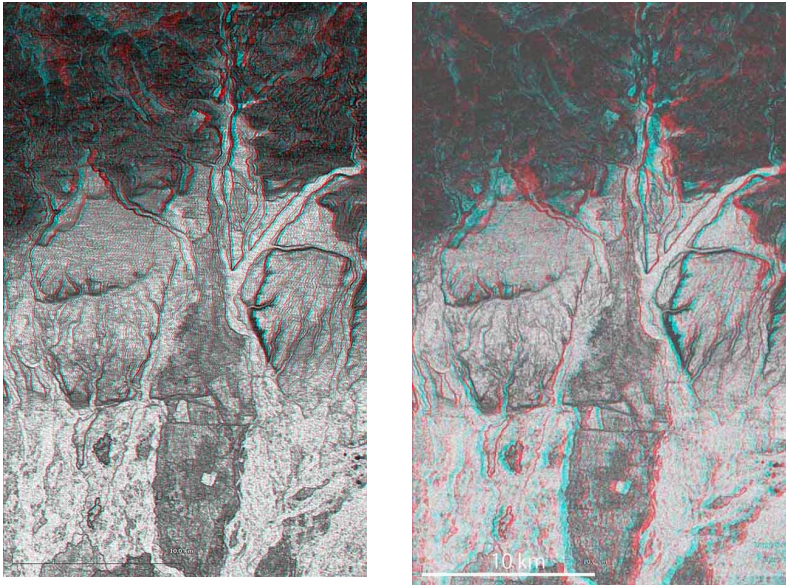


図1 地形判読に用いた2種類のアナグリフ画像(ヒマラヤ山麓・インド北ベンガルの例)

左: 画像スケール 200%・高さの強調 2 倍 右: 画像スケール 100%・高さの強調 5 倍

また、画像を保存する際にワールドファイルを作成し、GIS 等にインポートできるようにした。これらにより、活断層の地形をアジア全域にわたって同一基準・同一精度で判読することが可能となった。

### (3) Google Earth を活用した活断層判読の効率化と詳細化

アジアは世界の面積の 3 分 1 に当たる 44,579,000 平方キロメートルの面積を有し、日本の面積の約 118 倍にあたる広大な領域である。本研究では、アナグリフ画像を Map Tiler Pro (Klokant Technologies) を使って、kml ファイルに変換して Google Earth に重ねる手法(後藤, 2015)によって活断層判読を行うことにした。この手法では、ALOS 30 アナグリフ画像で判読した活断層を、Google Earth の透過度調整機能を使って拡大した詳細な画像上で参照し、断層トレースの位置や形状などの属性を詳細に把握することが可能となる。さらに、Google Earth の描画機能を用いて活断層線を詳細な画像に直接記入し、断層の属性を「説明」欄に記載した。アジア全域の活断層図を 5 年間で作成するという試みは容易なことではなかったが、一定の成果をあげることができたのは、本研究が採用した手法によるところが大きい。

## 4. 研究成果

### (1) アジア全域の詳細なデジタル活断層図

本研究の主要成果は詳細なデジタル活断層図(図 2)である。詳細な活断層の位置・形状の情報によって、活断層起源の大地震の発生場所・地震規模・地震断層の出現位置などの地震発生の予測精度向上に資するデ



図2 Google earth 上に示したアジアのデジタル活断層

には記載されていない短い活断層も数多く認定した。

地震国であるトルコも詳細な活断層(<https://www.mta.gov.tr/en/maps/active-fault-250000>)が整備された国の一つである。本研究では、大縮尺空中写真を利用していないので、North Anatolian Fault などの長大な断層では、詳細さにおいてはるかに及ばない。一方、既存の活断層図には、判読結果に地域差が認められ、統一された判読基準に基づいて判読されていない可能性がある。リニアメントや大きな崖地形をもとに積極的に活断層と認定されたものの中には、変位地形を伴わないものも少なくないことが明らかになった。

そのほかの国々についても、新たに詳細な活断層図を作成した。また、幾つかの国では CORONA 衛星画像を用いた詳細な判読作業を実施した。これによって、モンゴル・ウランバートル周辺で新たな活断層を発見し、トレンチ調査によってその存在を確認した。インド西部ヒマラヤおよびその周辺地域では、山地内に新たな複数の右横ずれ断層を発見した。また、ヒマラヤ南麓からベンガル平野に延びる活断層については、既知の断層からさらに数 10km ほど南東に延びることを確認するなど多くの成果を挙げた。

## (2) 本研究の活断層データベースと既存の活断層データベースとの比較

本研究で作成した活断層図と世界の活断層の位置を簡便に確認できるサイトとして、GEM Global Active Faults (<https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/>) の線分情報を中心にイランとキルギスタン事例としてフリーGIS ソフトウェアの QGIS において断層の線分情報を比較した。その結果、GEM と比較して、本研究の方が 15~18 倍程度位置精度良くトレースを認定している。キルギスタンでも GEM のトレースに比べて、実際の地形に沿って断層線を精度の高いトレース引いていること、国による違いが少ないことが明らかとなった。

ータを整備することができた。本研究で作成した活断層図は、変動地形学的手法によって活断層の認定を行った保守的なものである。このため、既存の活断層図で連続的に引かれた断層が断続的な活断層によって構成されている事例が少ない。また、新たな活断層が数多く発見された一方、既存の研究によって活断層とされた断層が活断層として認定されなかったものも少なく認められた。

近年、地震災害の多発するイランでは、活断層の分布を示した全国活断層図も刊行され (Hessami et al., 2003 ほか)、いくつかの活断層では地震断層との関連で、詳細な分布図が提示されているが、本研究では既存の活断層図

### (3) 本研究で認定した活断層と地震との関連

2023年2月6日に発生したトルコ・シリア地震では、東アナトリア断層で最初の地震(MW 7.7-7.8)が発生し長さ約300km,最大変位量7mの地震断層が出現し、第二震(MW 7.5-7.7)ではチャルダク断層で発生し、本研究でマッピングした活断層にほぼ沿って地震断層が出現した。両者の関係を地震直後に公開された衛星画像(<https://turkey.archiving.jp>)から詳細に検討すると、活断層とほぼ一致する区間とそうでない区間があった。一致する区間は断層変位地形が明瞭な場所であり、それが不明瞭な場所や新期堆積物からなる低地のような場所で事前に活断層を認定できなかった場所では一致しない例が少なくなかった。

### (4) 簡易モバイルLiDARによる活断層の3Dマッピング

国外における活断層のグランド・トゥールースで、詳細な活断層の位置・形状に関する情報を効率的に取得することは調査の成否に関わる問題である。近年、車の自動運転向けにLiDAR装置の需要が高まり、LiDARの低価格化が急速に進んだ。これにより、これまで数千万円から数百万円したLiDAR計測装置を十数万円で自作できるようになり、容易に地形の3Dマッピングが可能になった。岩佐ほか(2022)は、熊本地震の地震断層について簡易LiDAR計測を行い、数十メートル四方の比較的狭い範囲でその精度と有効性を検証している。本研究では、活断層を対象に数100メートル四方の広い範囲で3Dマッピングを実施した。また、取得した点群からフリーの点群処理ソフトCloudCompareを用いて地面のみを抽出しラスタ化することで高度段彩図や等高線図を作成した。このような特徴をもつ簡易LiDARを使って国内の活断層とともにモンゴル・ウランバートル断層の北西部のナラントレンチサイト周辺の地形計測を行った。その結果、およそ150m四方の範囲を約15分で計測し、詳細な地形図を作成することが出来た。ドローンを用いた計測の制約が増す中、これに代わる3Dマッピングの手法として国の内外において活用されることが期待される。

### 引用文献

Hessami, K., Jamali, F., and Tabassi, H., (2003) Major active faults of Iran, scale 1: 2,500,000. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.

岩佐佳哉, 濱 侃, 中田 高, 熊原康博, 後藤秀昭, 山中 蛭, SLAM技術を用いた低価格モバイル3Dスキャナーによる地上地震断層の数値表層モデルの作成とその有効性(2022)活断層研究, 57号, 1-14.

後藤秀昭(2015)海陸を統合した広域ステレオ地形画像を用いた変動地形学的研究: 関東平野南部と南西諸島中部周辺を事例に, 広島大学大学院文学研究科論集. 特輯号75巻1-87.

トルコの活断層:<https://www.mta.gov.tr/en/maps/active-fault-250000>

### 本研究で使用したデータ

1)ALOS World 3D-30m(AW3D30):

<https://portal.opentopography.org/raster?Opentopoid=OTALOS.112016.4326.2>

2)CORONA images: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

3) GEM Global Active Faults (<https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/>)

4)2023年トルコ地震後の衛星画像:<https://turkey.archiving.jp>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Yasuhiro Suzuki, Takashi Nakata, Mitsuhsa Watanabe, Sukhee Battulga, Dangaa Enkhtaivan, Sodnomsambuu Demberel, Chimed Odonbaatar, Amgalan Bayasgalan, Tuvshin Badral	4. 巻 92
2. 論文標題 Discovery of Ulaanbaatar Fault: A New Earthquake Threat to the Capital of Mongolia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Seismol. Res. Lett.	6. 最初と最後の頁 437-447
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/02202001	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 Wesnousky Steven G., Kumahara Yasuhiro, Chamlagain Deepak, Neupane Prajwal Chandra	4. 巻 174
2. 論文標題 Large Himalayan Frontal Thrust paleoearthquake at Khayarmara in eastern Nepal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 346 ~ 351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jseaes.2019.01.008	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 岩佐佳哉, 濱 侃, 中田 高, 熊原康博, 後藤秀昭, 山中 蛭	4. 巻 57号
2. 論文標題 SLAM技術を用いた低価格モバイル3Dスキャナーによる地表地震断層の数値表層モデルの作成とその有効性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 活断層研究	6. 最初と最後の頁 1-13
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 0件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 中田 高・熊原康博
2. 発表標題 ヒマラヤの横ずれ活断層に関する新知見
3. 学会等名 2021年秋季学術大会・オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 高・後藤秀昭・熊原康博
2. 発表標題 北京周辺の活断層の変動地形学的再検討
3. 学会等名 日本活断層学会2021年度秋季学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 高・後藤秀昭・熊原康博・渡辺満久・田中 圭
2. 発表標題 地形学的手法によって認定された中国の活断層に関する新知見-予察
3. 学会等名 2022年春季学術大会・オンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhiro KUMAHARA・Takushi KOYAMA・Deepak Chamlagain
2. 発表標題 Geomorphologic study of tectonic landforms related to active faults along the Dang Dun valley, south of the Main Boundary Thrust, Western Nepal
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021・オンライン（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 高・近藤久雄・後藤秀昭
2. 発表標題 ALOS 30 DSMアナグリフ画像を用いたトルコの活断層マッピング
3. 学会等名 2020年日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊原康博・Deepak Chamlagain・Prajwal Neupane
2. 発表標題 ネパール中部Hetauda Dunにおける断層地形の特徴
3. 学会等名 2020年度日本活断層学会秋季学術大会 2020年11月22日
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田 高・熊原康博・後藤秀昭
2. 発表標題 ALOS30 DEMアナグリフ画像とGoogle Earth画像判よるチベット高原の活断層詳細マッピング
3. 学会等名 2020年度日本活断層学会秋季学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田 高・後藤秀昭・熊原康博・田中 圭
2. 発表標題 ALOS 30 DSMアナグリフ画像を用いたイランの活断層マッピング(予報)
3. 学会等名 2021年日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nakata, T. and Kumahara, Y.
2. 発表標題 Active faults and uplift of the Higher Himalayas
3. 学会等名 Hokudan International Symposium on Active Faulting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1 . 発表者名 Kumahara, Y., Koyama, T. and Chamlagain, D.
2 . 発表標題 Characteristics and the latest event of the active fault along the Main Boundary Thrust in the Dang Dun, Western Nepal
3 . 学会等名 Hokudan International Symposium on Active Faulting 2020 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Hideaki Goto, Nakata, T., Kumahara, Y. and Yamanaka, T.
2 . 発表標題 Extensive Active Fault Mapping of Asia Based on ALOS World 3D Anaglyph Image
3 . 学会等名 Hokudan International Symposium on Active Faulting 2020 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Drukpa,D., Namgay, K., Kumahara, Y. and Nakata, T.
2 . 発表標題 Active fault survey in southwest Bhutan
3 . 学会等名 Hokudan International Symposium on Active Faulting 2020 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Papiona,K. L., Nakata, T., Abigania, M.I.T., Perez, J.S., Tsutsumi, H., Goto, H. and Solidum,R.U. Jr.
2 . 発表標題 A New Generation of Active Faults Map in the Philippines
3 . 学会等名 Hokudan International Symposium on Active Faulting 2020 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 熊原康博・中田 高・Nangay, K.・Drukpa, D.
2. 発表標題 ブータンヒマラヤ南西山麓の活断層の特徴
3. 学会等名 日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Suzuki, Y., Watanabe, M. and Nakata T.
2. 発表標題 Impact of Active Fault Discovery on Disaster Risk Reduction
3. 学会等名 The International Science Conference on Strengthening Urban Disaster Resilience (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Y., Nakata, T., Watanabe, M., Battulga, S., Enkhtaivan, D., Demberel, S., Odonbaatar, C., Bayasgalan, A. and Badral
2. 発表標題 Discovery of the Ulaanbaatar Fault in Mongolia
3. 学会等名 Fall meeting of American geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田 高・後藤秀昭・熊原康博・山中蚩・田中 圭
2. 発表標題 ALOS 30 DSMアナグリフ画像を用いた活断層の効率的な広域マッピング
3. 学会等名 日本地理学会 2019 年度春季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wesnousky, S. G., Kumahara, Y. and Chamlagain D
2. 発表標題 Paleoseismology along the Himalayan Frontal Thrust (HFT) of Nepal after the Mw 7.8 2015 Gorkha earthquake.
3. 学会等名 Fall meeting of American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2018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	後藤 秀昭 (Goto Hideaki)  (40323183)	広島大学・人間社会科学研究科(文)・准教授  (15401)	
研究分担者	熊原 康博 (Kumahara Yasuhiro)  (60379857)	広島大学・人間社会科学研究科(教)・准教授  (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Hokudan International Symposium on Active Faulting 2020	開催年 2020年～2020年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------