

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560153

研究課題名(和文) 過去から未来へ - 古代トルコにおける自然災害の痕跡と現代の都市開発リスクの評価

研究課題名(英文) From past to future: Assessment of palaeodisasters and urban development risks in ancient and modern Turkey

研究代表者

早川 裕弐 (Hayakawa, Yuichi)

東京大学・空間情報科学研究センター・准教授

研究者番号：70549443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：数千年に一度といった大規模低頻度な自然災害は、自然地理学的あるいは地質学的アプローチからその実態を解明する必要がある。本研究では、豊富な考古学資料から数千年前の明確な文化の断絶が立証されているものの、同時期に大規模な環境変化が報告されていない中央アナトリアの一地域において、長期的な災害履歴・古環境変動を調査し、それらが文化変容に与えた影響を検討した。とくに、火山の山体崩壊や活断層に関する古災害の可能性が明らかとなった。これは、同地域で将来的に起こりうる自然災害に関して、今後の都市開発と防災・減災策を検討するための基礎情報として提供される。

研究成果の概要(英文)：Large-scale, low-frequency natural disasters, e.g., once per several thousand years, need to be evaluated from physical geographical and geological approaches. In this study, we investigate the long-term history of natural disasters in one area of Central Anatolia where large-scale environmental change has not reported despite a clear cultural disruption in the history several thousand years ago has been known from archeological evidence. We also examined the influence of such palaeodisasters and palaeoenvironmental changes on the cultural transformation. In particular, the possibility of palaeodisasters triggered by the volcanic sector collapse and fault activities was clarified. This will be provided as basic information for future urban planning and disaster prevention/reduction strategies regarding potential natural disasters in the area.

研究分野：自然地理学

キーワード：災害 古環境 考古遺跡 気候変動 活断層・古地震 岩屑なだれ堆積物 地理情報システム
高精細地形情報

1. 研究開始当初の背景

気候変動など広域的な自然環境の変化が人類の文化活動に与えた影響は、たとえば 8.2 ka 頃の西アジアにおける広域的な移牧から遊牧または定住農耕への変化が北半球における気候の乾燥化・寒冷化に関係するなど、比較的良好に指摘されてきた (安田, 1993; 藤井, 2012)。一方、地域レベルの空間スケールにおいて、気候以外の古環境変動や大規模低頻度な自然災害現象が、人間活動に直接的または間接的に与えた影響が明らかになった事例は少ない。これには、地域的な現象に関しては歴史文献記録が断片的になりやすく、広域的な気候変動の影響のように多地点での検証を行えないといった理由が挙げられる。すなわち、数千年前のある地域で何か大規模な自然災害が生じたとしても、例えばイタリアのポンペイ遺跡のように奇跡的に保存の良い状態で遺物・遺構が残されない限り、それが発生した事実すら確認困難なことが多い。そのため、地域レベルでの過去の大きな環境変化については、多くが未発見あるいは未検証のままと考えられる。

この観点できわめて興味深い地域がある。アナトリア半島中部カイセリ盆地の北部に位置し、前期青銅器時代 (BC3000 年頃) からローマ時代 (AD100 年頃) までアナトリア～メソポタミア間の交易の中心地として栄えた古代都市であるキュルテペ遺跡においては、後期青銅器時代に相当する BC1700 年頃以降の 800 年という長期間、周辺地域でヒッタイト帝国が繁栄しているにもかかわらず、その都市の中心部が周辺の土地ごと放棄されていたことが、考古学調査から明らかになっている。また、この文化層の空白の原因は、戦争など文化の衝突からもたらされたものではないことが考古学的知見から判明しており、翻って、突発的な自然環境変化によるものである可能性もあることが指摘されている。そこで、この地域における当時の古環境変動・古災害の可能性について、自然地理学および地質学的視点から総合的に調査することが強く望まれている。

近年、トルコの多くの地方都市においては、急速な人口増加により、中心部から郊外へと高層建築物の建設が広がりつつある。耐震性が充分に伴わない高層住宅が断崖の直上や大規模な盛り土の上に建てられることも多く、都市の災害に対するレジリエンス低下が懸念されている。ここで、同じ土地において過去数千年間に実際に生じた自然災害の実態を明示することで、現代におけるハザードリスクの適切な評価、および発展途上にある都市のレジリエンス向上へ提言を行うことが可能となり、本研究の成果は現代社会の構築に高く貢献すると期待される。

2. 研究の目的

本研究の第一段階における目標は、カイセリ盆地における後期青銅器時代前後の歴史記録と古地震、古環境変化の整合性の検証である。考古学調査から明らかになっている文化層の空白に対応する自然現象の解明のため、断層・火山・河川を含む地形・地質調査、および気候変動記録の調査を実施する。さらに、当該地域の現代の都市計画における防災策への提言を目指し、当地域で過去に発生した環境変動・自然災害のカタログ化を進める。

3. 研究の方法

本研究は、カイセリ盆地における古代の自然環境変化を明らかにし、また現代の都市計画に寄与することを目的に、以下のステップで構成される。

1. GIS/R 分析。高解像度衛星画像や空中写真を用いて、対象地域の地形区分図の作成や地形解析を実施し、またフィールド調査データの集約および研究成果の公開を実装する。
2. 現地フィールド調査。古地震およびそれに伴う断層変位、堆積環境変化を解明するためのボーリング調査、地形調査、年代測定、また火山災害、気候変動の履歴を調査する。
3. 都市開発への提言。古代の災害発生履歴を明示、および現代の都市構造と比較することにより、現カイセリ市の都市開発への提言と、そのレジリエンス向上への寄与をめざす。

本研究の対象地はトルコ共和国中部、カイセリ盆地北部であり、東アナトリア断層系の一部である左横ずれのエジェミシュ断層群に区切られる構造盆地内に位置する。ここには標高 3916 m のエルジェス火山があり、この山頂付近には氷河が現存する。歴史時代におけるエルジェス火山の活動は明らかにはなっていないが、少なくとも 8 万年より新しい時代には地震を誘因とする山体崩壊を起こしている (Sen et al., 2003, J. Volcanol. Geotherm. Res.)。また、氷河の変動から過去数千年間の気候変動が調査され、湿潤であった前期完新世から前 2000 年紀にかけて乾燥化が進んだことが報告されている (Sarıkaya et al., 2004, Quat. Sci. Rev.)。前期青銅器からローマ時代にかけての大都市遺跡であるキュルテペは、盆地北部の扇状地末端に位置し、中央アナトリアとメソポタミアとの文化の交流地点として交易が盛んな巨大都市であった。

まず、現地調査の準備として、GIS (地理情報システム) および RS (リモートセンシング) の手法で衛星画像、空中写真および地形データの解析から、対象地域の地形分類図を作成する。現地調査ではボーリングコア掘削、断層露頭、考古隊からの文献・歴史記録、火山地形、河川地形、それぞれの調査を実施する。現地調査データと分析結果を取りまとめ、GIS データベースに集約し、カタログ化を進める。

これらの調査結果を用いて、考古調査隊から提供される歴史記録についての詳細と、本

調査結果からの古環境変動カタログについて比較検討を行うとともに、現代の都市計画における問題点や改善点についての検討を進める。

4. 研究成果

本研究の成果を、山体崩壊、活断層の2点に焦点を置いて示す。

1) エルジエス火山の山体崩壊と岩屑流堆積物

火山の山体崩壊によって生じる岩屑なだれは、しばしば流れ山を含む特徴的な堆積地形を形成する。堆積学的分析だけでなく、岩屑なだれ堆積物 (DAD) の地形学的分析は、岩屑なだれの規模やメカニズム、流動-堆積プロセスを明らかにする上で重要である。カイセリ盆地の南東、エルジエス火山の東部-北東部に位置する DAD において、流れ山地形が新たに発見され、その形態を調査した。この DAD は、正確な年代は未知であるものの、既存研究の成果から後期更新世に形成された可能性が高いと考えられる。小型の遠隔操作航空機システム (UAV, UAS もしくは RPAS) および SfM 多視点ステレオ写真測量 (SfM) を用いて、高精細デジタル標高モデル (DEM) とオルソ補正画像を対象とする流れ山地形の領域で現地計測により取得した。さらに、UAS-SfM による高精細 DEM を用いて、流れ山の詳細な幾何学的特徴を解析した。DAD の体積は、より低い分解能である人工衛星から取得された DEM (SRTM) を用いて、山体の元の形状を復元することによっても推定された。このためには、山体の地形断面を取得し、崩壊以降保存されているとみなされる周囲の斜面から延長し、直線近似とベジェ曲線の双方に基づく復元方法を用いた。

流れ山の空間分布は、距離-サイズ関係に関する特異なパターン、すなわち、給源からある一定の距離にとくに集中していることが示された。流れ山の形状分析からは、それらが岩屑なだれの流れ方向に主に整列していることが判明し、岩屑なだれの伸長的な流動特性を示唆している。これらの事実、この DAD は、他の地域においてみられる典型的な DAD の特徴に従わない。すなわち、旧カルデラ壁による遮蔽と、断層に影響された線状の谷における流下といった、既存地形による地形制約が、このエルジエスのケースでは岩屑なだれの流動パターンに強く影響を及ぼしていた可能性が考えられる。すなわち、既存のカルデラ壁の地形は、岩屑なだれを崩壊初期の東向きから北向きに変え、ここで流動様式は一旦圧縮され、続いて北部の狭く急峻な谷で伸長したと考えられる。また、山体の欠損部から推定される DAD の総体積 $12\text{--}15 \times 10^8 \text{ m}^3$ から見積もられる平均厚は $60\text{--}75 \text{ m}$ であり、これは他の DAD の報告例よりもはるかに深い。これは、現在残存している DAD の範囲は全てでは

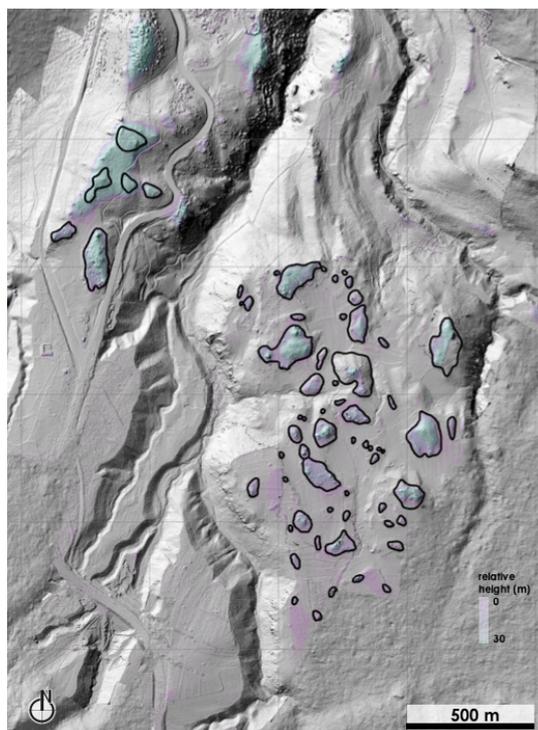


図1. エルジエス火山北東部における岩屑なだれ堆積物上にみられる流れ山の分布。

なく、岩屑なだれがさらに下流の領域に流下した可能性があることを強く示唆している。したがって、この DAD の評価は、対象としたエルジエス火山周辺だけでなく、より下流のカイセリ市域における潜在的な災害リスクとその緩和についてのさらなる洞察に向けて、貴重な情報源として利用される。

2) 第四紀におけるエルジエス断層の活動履歴に関する考察

カイセリ盆地の南東に位置するエルジエス断層は、中央アナトリアで最も活発な第四紀断層の一つである (Emre et al., 2011)。既存研究によると、エルジエス火山を横切るセクションを含め、約 100 km 長の断層として記載されている。この断層運動にともなう M7+ クラス地震は、カイセリ地域の 150 万人に大きな脅威となりうるが、その活動履歴や潜在的な地震リスクについてはほとんど知られていない。

中新世から更新世にかけての火砕流堆積物の広域分布の確認や、第四紀堆積物の分布と性状の記載、および UAV-SfM 写真測量を用いた高精細地表面形状情報取得といった現地調査を、カイセリ南東部において実施した。その結果、第四紀後期における有意な傾斜方向の変位や、横ずれ変位が確認された。一方、 $2.52 \pm 0.49 \text{ Ma}$ のインジェス火砕流堆積物 (Incesu ignimbrite, IC) (Aydar et al., 2012) は、カイセリ盆地周辺において特徴的な、強固な溶結凝灰岩である。また、エルジエス火山からのプリニー式降下軽石堆積物である Gesi Bagpnar (GBP) も、後期更新世の鍵層である (Sen et al. 2003)。

1つの断層群に2つの主要な断層がある。北東-南西方向の前面部の断層はカイセリ盆地の低平部と、北東に続く台地部とを分け、カイセリ市をまたぎ50 km以上の長さに渡って続く。Gesi Guney断層はこれと平行に、3~4km離れて走り、アリ・ダー (Ali Dag) 山から盆地の低平部を通り20 kmほど続く。南北方向の断層群は、ICの下位において、盆地の内部と外部の双方で観察され、これらの南北方向の断層はICの噴出以前、すなわち鮮新統の断層群である。一方、Gesi Guney断層はICを鉛直に約120 mの変位をもたらしている。その活動の開始時期を推測する情報は現時点で見つからないが、扇状地とその上に乗る未固結の新鮮な崖錐堆積物の正断層変位が観察され、第四紀後期の断層活動が強く示唆される。

前面の断層の南西端近くでは、ICは鉛直方向に約40 mの変位が観察される。その南西端から約15 km北東の地点では、GBP (0.11-0.14 Ma) を含む砂礫層が北西方向に30~40 mほど傾いており、これはほぼ垂直な横ずれ断層により切られている。ICとGBPの変位は同様であるため、前面の断層変位は後期更新世に生じたものと考えられる。推定される変位速度は、おおよそ0.3~0.4 mm/yであり、中央アナトリアにおいて無視できない規模となる。

以上の研究成果は国際学会および学術誌において発表済または発表準備中(投稿中)であり、今後、一般に向けた解説も含め公開を進めていく。

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5件)

1. Hayakawa, Y. S., Yoshida, H., Dragut, L., Oguchi, T. (in press) Automated extraction of hummocks in debris avalanche deposits using DEMs: A case study at Mt. Gassan, northwest Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie*. doi:10.1127/zfg_suppl/2017/0361
2. 早川裕式, 小花和宏之 (2016.10) 小型無人航空機を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による地形情報の空中計測. *物理探査*, 69 (4), 297-309.
3. Kondo, Y., Miki, T., Kuronuma, T., Hayakawa, Y. S., Kataoka, K., Oguchi, T. (2016.08) Concurrent and sustainable development of a local-scale digital heritage inventory through action research at Bat, Oman. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 6 (2), 195-212. doi:10.1108/JCHMSD-01-2016-0005
4. 早川裕式・小花和宏之・齋藤 仁・内山

庄一郎 (2016.07) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的应用. *地形*, 37 (3), 321-343.

5. Yener, K.A., Kulakoglu, F., Yazgan, E., Kontani, R., Hayakawa, Y. S., Lehner, J.W., Dardeniz, G., Öztürk, G., Johnson, M., Hacı, A. (2015.06) The discovery of new tin mines and production sites near Kültepe, ancient Kanesh in Turkey: a third Millennium BC highland production model. *Antiquity*, 89 (345), 596-612. doi:10.15184/aqy.2015.30

[学会発表] (計10件)

1. Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., Yoshida, H., Naruhashi, R., Okumura, K., Zaiki, M., Kontani, R. (2016.08) Potential risks of natural hazards in Kayseri region, central Turkey. *International Geographical Congress 2016 Beijing*.
2. Hayakawa, Y.S. (2016.06) Archaeological sites and natural hazards in Kayseri (Turkey). 2016 International Geographical Union Geomorphology and Society Commission, Island Study Commission, and Political Geography Joint Symposium.
3. Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., Yoshida, H., Naruhashi, R., Okumura, K., Zaiki, M. (2016.04) Morphological analysis of hummocks in debris avalanche deposits using UAS-derived high-definition topographic data. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU2016-2755.
4. Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., Yoshida, H., Naruhashi, R., Okumura, K., Zaiki, M. (2015.08) Geomorphology and archaeology: mapping landforms around archaeological sites in Kayseri region using high-definition data. 2015 IGU Regional Conference, C12.41.
5. Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., Yoshida, H., Naruhashi, R., Okumura, K., Zaiki, M., Kontani, R. (2015.08) Mapping surface morphology and outcrop structures of hummocks in debris avalanche deposits using structure-from-motion multi-view stereo photogrammetry. XIX INQUA Congress, T18-P06.
6. Hayakawa, Y.S., Yoshida, H., Dragut, L., Oguchi, T. (2015.06) Comparative analysis of manual and automatic extractions of hummock landforms in Mt. Gassan, northwestern Japan. *Geomorphometry 2015*.

7. 早川裕弐・小花和宏之・吉田英嗣・鳴橋竜太郎・奥村晃史・財城真寿美(2015.05) トルコ・カイセリ県における遺跡周辺の地形情報の取得と解析. Abstracts, Japan Geoscience Union International Meeting 2015, HTT32-03.
8. 早川裕弐, 小花和宏之, 吉田英嗣, 鳴橋竜太郎, 奥村晃史, 財城真寿美(2015.03) 遺跡周辺における高精細地形情報の取得と解析—トルコ中部カイセリ県を対象として—. 日本地理学会 2015年春季学術大会発表要旨集.
9. 早川裕弐 (2014.08) 現地調査における地形情報取得のためのGNSSとTLS. 高解像度地形情報シンポジウム 2014～地形情報のすべて～.
10. Hayakawa, Y. S., Obanawa, H., Naruhashi, R., Yoshida, H., Zaiki, M., Kontani, R., Sudo, H., Odaka, T., Yamaguchi, Y., Kulakoglu, F. (2014.04) Spatial analysis of archaeological sites and landforms in Kayseri, central Turkey using multiscale topographic data. Abstracts, Japan Geoscience Union International Meeting 2014, HTT07-P01.

〔図書〕(計2件)

1. Oguchi, T., Hayakawa, Y., Oguchi, C. T. (in press) Quaternary fluvial environments and paleohydrology in Syria. In: Enzel, Y, Bar-Yosef, O. (eds.) Quaternary of the Levant: Environments, Climate Change, and Humans, Cambridge University Press.
2. Hayakawa, Y. S., Imaizumi, F., Hotta, N., Tsunetaka, H. (2016.07) Towards long-lasting disaster mitigation following a mega-landslide: high-definition topographic measurements of sediment production by debris flows in a steep headwater channel. In: Meadows, M., Lin, J.-C. (eds.) Geomorphology and Society (Advances in Geographical and Environmental Sciences Series) Springer, 125-147. doi:10.1007/978-4-431-56000-5_8

〔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〕

<http://kayap.exblog.jp/>
<http://topography.csis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川裕弐 (HAYAKAWA, Yuichi S.)
 東京大学・空間情報科学研究センター・准教授
 研究者番号：70549443

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

小花和宏之 (OBANAWA, Hiroyuki)
 株式会社ビジョンテック・主席研究員
 研究者番号：1042205

鳴橋龍太郎 (NARUHASHI, Ryutarō)
 東京大学・地震研究所・研究員
 研究者番号：00649155

吉田英嗣 (YOSHIDA, Hidetsugu)
 明治大学・文学部・准教授
 研究者番号：90548116

財城真寿美 (ZAIKI, Masumi)
 成蹊大学・経済学部・准教授
 研究者番号：50534054

奥村晃史 (OKUMURA, Koji)
 広島大学・文学研究科・教授
 研究者番号：10291478

(4) 研究協力者