

財団法人国土地理協会 平成 25 年度学術研究助成

アナトリア高原中部における後期完新世の考古環境マッピング  
—大規模災害リスク評価に向けて—

研究成果報告書

2015年3月

早川裕弐  
(東京大学空間情報科学研究センター)

## 目次

1. はじめに .....	3
2. 方法 .....	5
2.1. 調査対象地 .....	7
2.2. 既存データ収集 .....	7
2.3. 現地調査 .....	8
2.4. データ解析・考古環境マッピング.....	9
3. 結果と考察	
3.1. 遺跡地図 .....	9
3.2. 岩屑なだれ堆積物 .....	12
3.3. 活断層 .....	16
3.4. 氷河 .....	18
3.5. 古環境地図 .....	20
4. まとめと展望 .....	21
謝辞・文献 .....	21

## 1. はじめに

気候変動など自然環境の変化が人類の文化活動に与えた影響は、古くからその関係性が報告されている（小泉，2007）。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は、北半球における気候の乾燥化・寒冷化に依存すると指摘されている（安田，1993；藤井，2012）。単成火山の噴火がその周辺域の都市に多大な影響を及ぼしたことなども、イタリアのヴェスヴィオ火山とポンペイ，ヘルクラネウムの著名な事例をはじめ広く知られている（前野ほか，2009）。しかしながら，地域レベルの空間スケールにおいて，人類活動に対する気候以外の古環境変動，とくに地震・断層変位など突発的な変化の直接的な影響や，それに伴う間接的で比較的緩やかな環境変化が及ぼす影響については，それが時空間的に明示された事例はこれまでに少ない。

アナトリア半島はプレート境界に位置し，地震や火山に代表される突発的な自然現象が多発する地域であるにもかかわらず，前述のような古代における自然現象と人間活動との相関関係が論じられたことはこれまでに僅かであった。その中心部とも言える場所に，古代都市キュルテペ（古代名カネシュ）は位置する（図1）。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巨大都市であるこのキュルテペ遺跡においては，60年以上も続く長年の発掘調査の成果から，その詳細な歴史記録が明らかにされてきている。とくに多数発見された粘土板文書はアナトリアで最古の文書記録であり，前3000年紀から数千年間に生じた様々な文化的事象が明らかにされている。ところが，中近東地方においても最大級のひとつとなるキュルテペ遺跡は，当地域の中心都市として機能していたものの，後期青銅器時代に相当するBC1700年頃以降の800年という長い期間，この土地が放棄されたことが考古学調査から明らかになっている。同時期には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，放棄された期間が長過ぎることから，戦争など文化の衝突からもたらされた空白期間ではないことが考古学的知見からは想定されている。すなわち，この文化層の空白の原因が何らかの突発的な自然環境変化によるものである可能性が高い。そこで，地震を含めたあらゆる可能性について，自然地理学的視点から総合的に調査することが望まれている。そこで，活断層・古地震，およびそれともなう河川地形と堆積環境の変化を主軸に，火山災害，気候変化の可能性も含めて，総合的・多角的な視点でのアプローチを行い，考古学調査チームとの協働から考古・歴史記録との整合性を検証すること，換言すれば，カイセリ盆地における後期青

銅器時代前後の古地震，古環境変化と歴史記録の整合性の検証のため，考古学調査から明らかになっている文化層の変容に対応する自然現象を解明するための古環境マップを作成することが，本研究における目標である。

さらに，当該地域における後期完新世の災害履歴を明らかにすることで，現代の都市計画における防災・減災策に提言を行うこと，すなわち，開発途上地域における古代の災害復元と現代の都市計画への提言を，本研究の発展的な目標とする。キュルテペ遺跡が立地するカイセリ市に限らず，トルコの多くの地方都市においては，近年の人口増加により，都市中心部から郊外へと急速に高層建築物の建設が広がりつつあるが，耐震性の低さ等から都市全体の災害に対するレジリエンス低下が懸念されている。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，および開発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，本研究の結果が学術的に重要であることに加え，現代社会の構築に高く貢献すると考えられる。

なお，断層や火山が多数分布し地震も多発する当地域において，高速道路の新設に伴い，断層露頭が2011年に発見された（図2）。これはプリアパートベースンであるカイセリ盆地を区切る正断層群のものとみられ，この活動により断層を横切る河川が影響を受け，上流の盆地内の堆積環境が大きく変化（湖沼化または湿地化）した可能性が示唆される。2010年の発掘調査中には，周辺のトレンチ調査により，地表から4～5 mの厚い泥質堆積物の下に河川堆積物と遺構が発見され，この可能性を支持している。断層変位は何十年もかけて上流に影響し得るため（Hayakawa et al., 2009; 早川ほか, 2013），断層変位に伴う古環境変化を明らかにすることが必要である。

一方，古環境変化を引き起こした原因は地震以外にも可能性がある。対象地域には標高3916 mのエルジエス火山があり，歴史時代における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）。また山頂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（Sarikaya et al., 2009）。したがって，エルジエス火山に関する自然環境調査と考古資料との対応も，重要な課題の一つである。



図1. キュルテペ遺跡.

## 2. 方法

本研究は、カイセリ盆地における青銅器時代からローマ時代にかけて生じた自然環境変化を明らかにするため、以下の3ステップで研究を実施する。

1. [GIS/RS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を作成し、現地調査および古環境マッピングの基図とする。
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簡易ボーリング掘削調査、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. [古環境マッピング] 調査結果と考古学資料とを突き合せ、カイセリ盆地の青銅器時代からローマ時代における都市および古環境変遷を時空間データとして整備し、公開する。



図2. カイセリ盆地北部におけるキュルテペ遺跡の立地と断層分布。

まず、第一段階として、現地調査の準備およびその後の古環境マッピングの基図として、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。第二段階としての現地調査は、研究代表者を含めた自然地理学研究者（とくに地形学、表層地質および古環境学専門）で夏期（8-9月）のキュルテペ遺跡発掘隊（アンカラ大学）に帯同することで宿泊施設、自動車幹旋など支援を受けつつ実施する。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、地形分類それぞれの調査を実施する。得られたサンプル等は可能なものは現地で、一部許可を得られたものに関しては日本に持ち帰り、分析を実施する。第三段階として、得られた現地

調査データと分析結果を取りまとめ、古環境地図を作成する。さらに現代の都市開発に関する情報収集も行い、過去の歴史的事実から将来の都市計画に対する提言を行うための基礎情報とする。

## 2.1. 調査対象地

本研究の対象地はトルコ共和国中部、カイセリを中心とするカイセリ盆地とその周辺域である（図2）。この盆地は、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プルアパートベースンであり、南部には標高3916 m のエルジエス火山が位置する。山地を挟んで西にカッパドキア、北にクズルウルマック（赤い川）があり、またエルジエス火山を超えた先の南側にはラムサール条約にも登録されたスルタンサズルの湿地が位置している（Erol, 1999）。

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（古代名カネシュ）は、カイセリ盆地北部の扇状地末端に位置している。ここは、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であった。貴重な歴史記録としての粘土板が多数発掘されており、2014年には世界文化遺産暫定リストに登録された。

## 2.2. 既存データ収集

本研究の準備段階として、既存データの収集と整備をまず実施した。既存データに含まれるものとしては、主に以下のものが挙げられる。

- ・高解像度衛星画像
- ・オルソ補正済み空中写真
- ・1:100,000地形図

高解像度衛星画像については、光学衛星画像としてALOS AVNIR-2、3次元地形情報を抽出可能なALOS PRISMを入手した。PRISM画像からは、10 m 解像度のDEM（digital elevation model, デジタル標高モデル）を生成し、地形解析の基盤図とした。加えて、対象地域において利用可能なその他の高解像度衛星画像の情報収集を行い、一覧表にまとめた（表1）。いずれも高価であり限られた予算では入手困難なものも多いが、これらの一覧にある衛星画像データについては、今後の継続調査において必要となった段階で、本研究の関連課題においても利用していく可能性がある。

現地調査範囲の空中写真と地形図については、トルコ側研究者の協力のもと、

研究目的に限り特別にアクセス可能な情報提供を受けた。

なお、これらの地図データを整備、解析するための環境として、GIS・リモートセンシングソフトウェア（ESRI ArcGIS, Quantum GIS (QGIS), ERDAS Imagine等）を使用した。QGISなどオープンソース・フリーソフトウェアを除いて、有償のソフトウェアに関しては、大学設備として既に導入されたライセンスを利用した。

表1. 当該地域で利用可能な高解像度衛星画像の一覧。

衛星	対象地域	分解能	撮影日時	価格			運営企業	備考
				面積(km <sup>2</sup> )	単価(円/km <sup>2</sup> )	合計(円)		
WorldView-1	全域	パンクロ 0.61	2010/12/9	838	5,600	4,692,800	DigitalGlobe	ステレオペア
	1			334	5,600	1,870,400		
WorldView-2	1	パンクロ 0.48 マルチ 1.94	2010/9/5		5,600		DigitalGlobe	ステレオペア
	2							
	3							
SPOT5	1	2.5	2012/7/23	最小で 20km×20km	380,000	380,000	AIRBUS	
	2							
	3							
	1	5.0			201,000	201,000	AIRBUS	
	2							
	3							
QuickBird	1	パンクロ 0.64 マルチ 2.55	2009/8/30	334	2,800	935,200	DigitalGlobe	
GeoEye-1	1	(パンクロ 0.41 マルチ 1.64)	2005/7/4	334	6,000	2,004,000	DigitalGlobe	
RapidEye	1	6.5	2014/4/24	334	220	73,480	BlackBridge	
	2			237	220	52,140		
	1		2014/4/24	501	220	110,220	BlackBridge	
	3							
Pleiades	1	0.5	-	-	-	AIRBUS	価格不明	
	2		2014/4/24					
	3		2013/8/9					
IKONOS	1	0.82	2011/11/1	334	3,000	1,002,000	DigitalGlobe	

### 2.3. 現地調査

本研究における現地調査は、トルコ国内における調査許可の関係から、現地の考古発掘隊に帯同して行うことが必要である。そのため、現地共同研究者の協力を得て、両国の研究者間でスケジュール調整を行った結果、2014年8月下旬～9月上旬に現地調査を実施することとなった。調査体制は、トルコ側がアンカラ大学言語地理歴史学部・Fikri Kulakoglu 教授，日本側がノートルダム清心女子大学文学部・紺谷亮一教授をはじめとした考古学調査隊に，自然地理学調査隊として広島大学文学部・奥村晃史教授，明治大学文学部吉田英嗣講師，千葉大学環境リモートセンシング研究センター・小花和宏之特任助教，東京大学地震研究所・鳴橋竜太郎特任研究員および早川が参加した。自然地理学調査隊では，遺跡および周辺域の古環境調査として，後述のように，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簡易ボーリング掘削調査，



表層地形計測，年代測定試料収集，また火山災害，気候変動の履歴の調査を実施した。

## 2.4. データ解析・考古環境マッピング

現地調査の結果に基づき，自然環境情報と考古学資料とを照合し，カイセリ盆地の青銅器時代からローマ時代における都市および古環境変遷を時空間データとして整備することを目的に，遺跡分布図，地形分類図といった地図をベースとして，考古環境マッピングを行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 遺跡地図

主要な遺跡の立地環境を明らかにするため，キュルテペをはじめとするいくつかの遺跡において地形計測を行い，詳細な地形図を生成した。地形計測手法としては，レーザ距離計（LRF: laser range finder）やGNSS（global navigation satellite system），地上写真によるSfM多視点ステレオ写真測量

（structure-from-motion multi-view stereo photogrammetry），小型UAV（unmanned aerial vehicle）を用いたSfM多視点ステレオ写真測量といった手法を用いた（早川・津村，2008；Hayakawa and Tsumura，2009；早川ほか，2012；小花和ほか，2014a,b；早川，2015）。なおここでは，小型UAVを用いたSfM多視点ステレオ写真測量のことをUAS（unmanned aerial system）-SfM，地上写真によるSfM多視点ステレオ写真測量のことを地上SfMとする。UAS-SfMに使用した機材およびその特徴は以下の通りである。

#### ・小型UAV：DJI Phantom 2

回転翼が4つ（クアッドコプター）の小型機であり，機体内のGPS受信機，気圧高度計，電子コンパスにより姿勢が自動制御されるため，安定性が高く操縦が容易で安全性が高い。固定翼機に比べて，離着陸の滑走路が不要，空中静止（ホバリング）できるために対象物に接近した高解像度の写真撮影が可能，費用が低い，等の優位性がある。

#### ・デジタルカメラ：NIKON COOLPIX A およびRICOH GR

いずれもコンパクトデジタルカメラの中ではトップクラスのセンササイズ（APS-C）であり，また高性能な単焦点レンズで構成されるため，高品質な

写真撮影が可能である。また空撮に必須の条件である短間隔（1秒）のインターバル撮影機能を有している。さらに、COOLPIX AにはGPS受信機ユニット（NIKON GP-1A）を接続可能であり、写真データに位置情報を直接付与することが可能であるため、後処理の時間短縮および精度向上を図ることができる。

・ SfM多視点ステレオ写真測量ソフトウェア：Agisoft PhotoScan Professional Edition

汎用的なSfM多視点ステレオ写真測量ソフトウェアとして、近年、地球科学分野での利用実績が多く、使用方法や精度検証に関する情報も豊富である。従来の写真測量ソフトウェアに比べて操作が容易であり、計算速度も高く、費用も低い。

UAS-SfMおよび地上SfMのいずれにおいても、撮影する画像の数は数10枚から数100枚（広範囲に及ぶ場合は1000枚を超える）におよび、これらの画像データをPhotoScanに投入して、画像中の特徴点の自動抽出、撮影画像の相対位置の復元（以上SfM）、対象物の3次元形状を示す対応点の形状取得（多視点ステレオ写真測量）、および生成された3次元点群からの3D-TINモデル・DEM・オルソ補正画像の生成を行う。また、SfM多視点写真測量で得られる3Dモデルの座標は相対的なものであるが、カメラ位置の地理座標やGCP（ground control points）の地理座標を入力することにより、生成されるデータのジオリファレンス（地理座標系上への投影）が可能となる。ここではGCPの地理座標の取得に高精度GNSS（VRS-RTKによるリアルタイム補正、もしくはディファレンシャル・PPKによる後処理補正）を用いた。

UAS-SfMおよび地上SfMによる結果の一部を図3に示す。対象としたのはキュルテペ遺跡とテクネカヤ遺跡である。いずれも、旧来の測量図は存在するものの、それらをはるかに凌駕する解像度で遺跡およびその周辺の地形情報がUAS-SfMにより取得できた。さらに、地上SfMにより部分的にさらに高解像度な3Dデータを、発掘される遺構を中心として取得した。これらのマルチスケールな地形情報は、古環境調査の基図となるとともに、GISによる水系解析、地形解析から、たとえば人工改変前の流路の復元といった、ミクروسケールでの古環境の復元と遺跡情報との関連付けのために使用する。

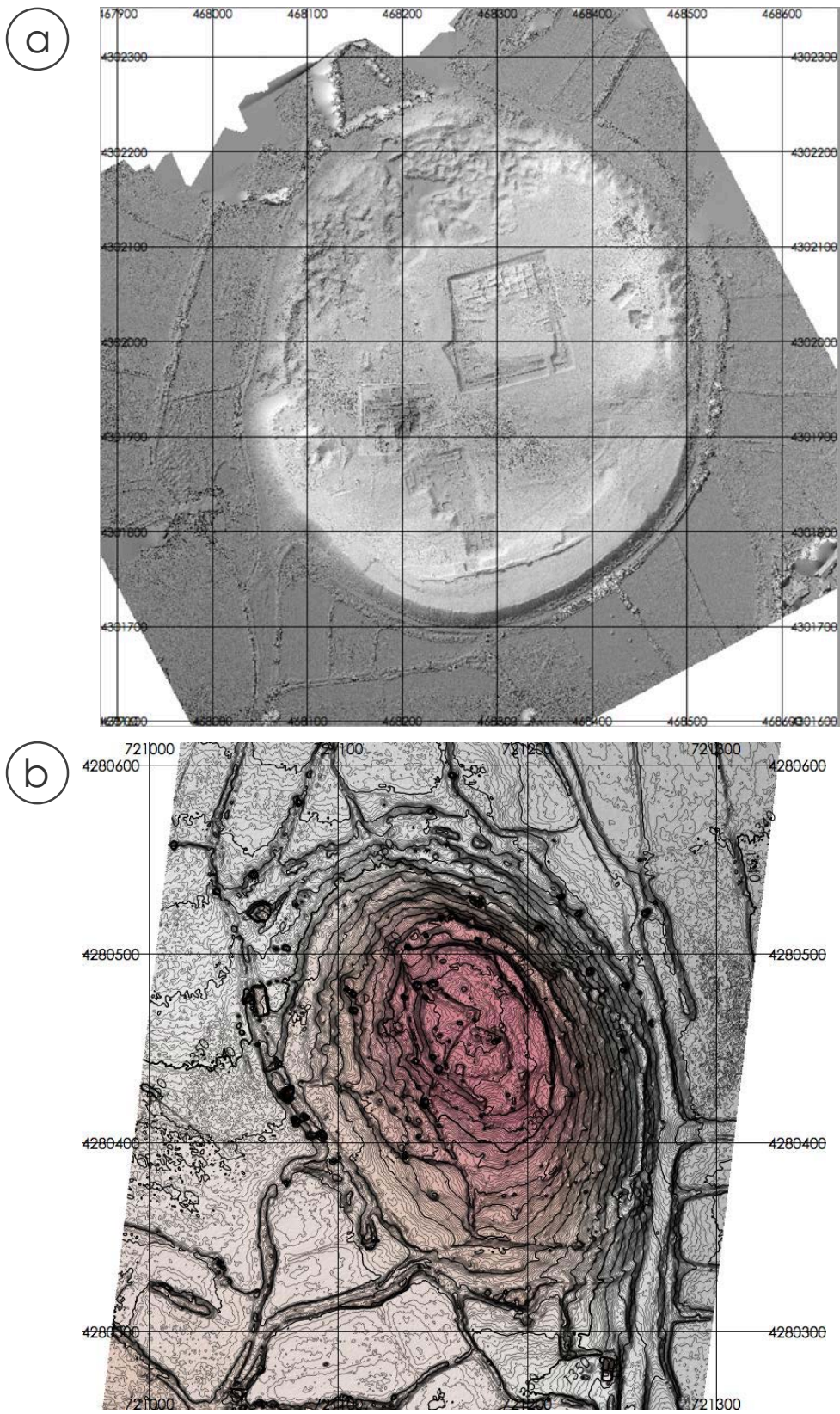


図3. (a) キュルテペ遺跡の測量図（5-cm DEM）． (b) テクネカヤ遺跡の測量図（10-cm DEM）． XY座標はいずれも UTM Zone 36N (WGS-86)．

### 3.2. 岩屑なだれ堆積物

エルジエス火山北麓には、山体崩壊による岩屑なだれ堆積物（DAD; debris avalanche deposits）が存在する。岩屑なだれ堆積物の表層には、流れ山といった典型的な地形も観察され、一部は既存の空中写真からも判別可能であった。しかしこの詳細な調査はこれまでにほとんど行われておらず、また空中写真のカバー範囲は限られており、すべての流れ山を把握することができなかった。そこで、本研究ではまずその地形の精密な現地計測、および露頭観察・堆積物調査を実施した。

この山体崩壊と岩屑なだれ堆積物の年代については、Sen et al. (2003) がおよそ80 ka より若いものであると報告している。一方、Sarıkaya et al. (2009) は、この山体崩壊により形成されたエルジエス山北東面の谷であるÜçker谷の内部に位置するモレーン堆積物について、LGMの氷河拡大期に形成されたものであると報告している。したがって、この山体崩壊およびそれにとまなう岩屑なだれは、20-80 ka の間に発生した可能性がある。

岩屑なだれ堆積物の露頭が、主用道路沿いの切り通しにおいて観察することができる。このうち典型的な流れ山の露頭において、堆積物の観察と、地上SfMによる立面図の作成を行った（図4）。この露頭では、ジグソークラックや破碎されたマトリックスに包まれた巨礫といった、岩屑なだれ堆積物に特有の構造が発見され、これらの流れ山がエルジエス山の山体崩壊による岩屑なだれ堆積物の一部であることがまず確認された。これらの岩屑なだれ堆積物の正確な厚さは、限られた露頭からは確定が困難であるが、周辺域の地質構造等からも推定して、それほど厚くはない（10～30 m?）と考えられる。しかし分布範囲は広く、またエルジエス山に残る崩壊跡の形状から推察すると、この山体崩壊の規模は北アメリカのセントヘレンズ山、あるいは日本の磐梯山といった大規模なクラスのものに匹敵する可能性がある。山体崩壊直後は岩屑なだれ堆積物がさらに広がっていたと推測されるが、その後には泥石流や土石流として流出し、多くの部分は消失したものと考えられる。その際の堆積物とみられる層の露頭も、調査した流れ山のすぐ横の谷壁斜面上に観察された。開析谷の内部には数段の段丘面も存在し、それぞれの形成時期の推定も今後の課題のひとつである。

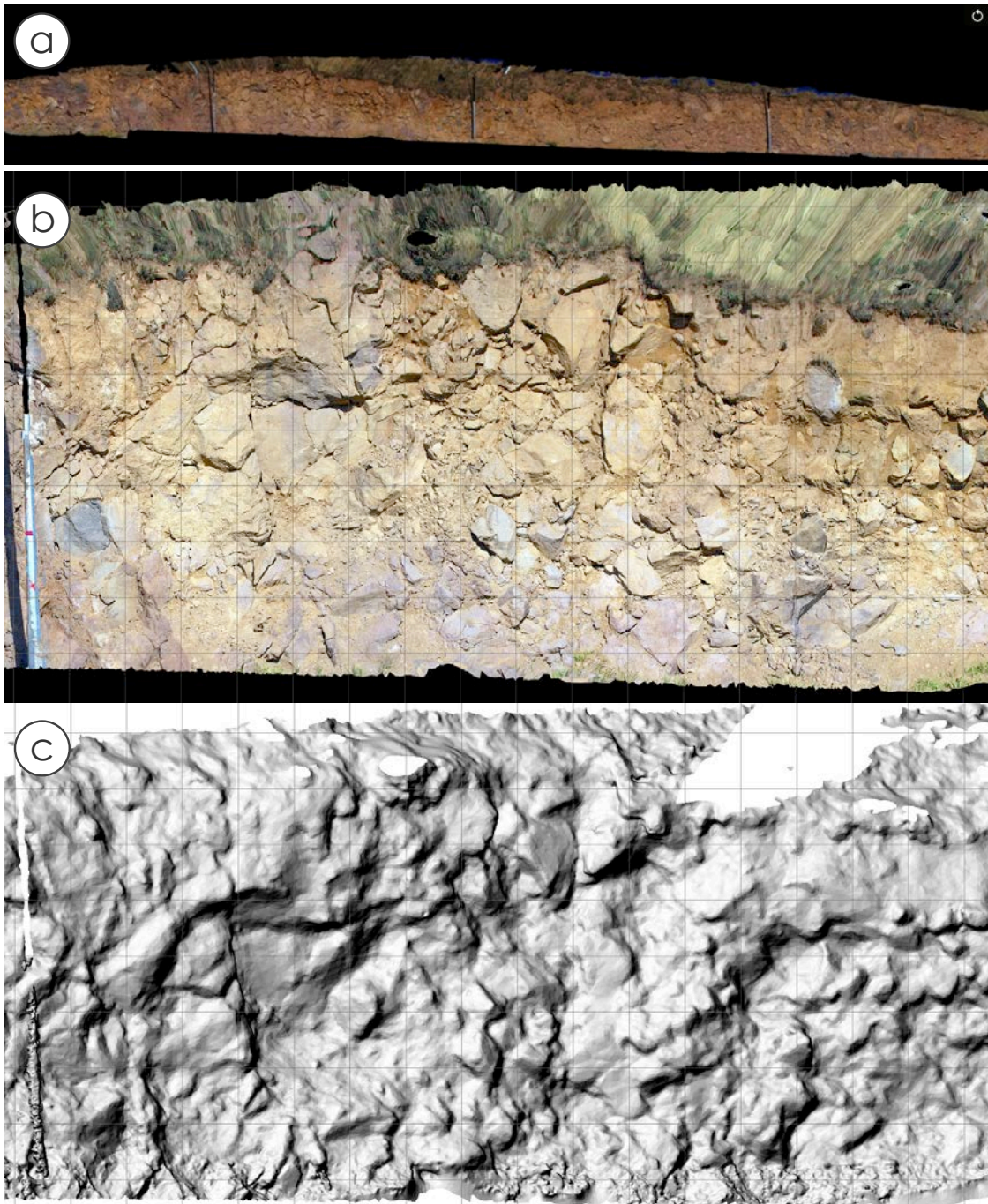


図4. 岩屑なだれ堆積物の露頭. (a) SfM多視点ステレオ写真測量により生成した露頭の立面オルソ画像（高解像度パノラマ画像）の全体図. (b) 同・オルソ画像の部分拡大. 画像解像度は2 mm. (c) 立面DEM. 解像度は1 cm.



図5. UASにより撮影した流れ山の画像の一例。

さらに、流れ山の多く分布する岩屑なだれ堆積物上において、UAS-SfMによる地形計測を行った。小型UAVから撮影した649枚の写真画像を用いて(図5)、SfM多視点ステレオ写真測量から解像度10 cm のDEM、および解像度4 cm のオルソ補正画像を生成した(図6)。6点のGCPにはGNSSによる地理座標(UTM Zone 36N / WGS84, 後処理補正による位置精度: 40 cm)を与え、SfM多視点ステレオ写真測量による地形データを入力し、データのジオリファレンスを行った。この詳細な地形データと、PRISMによる10 m DEM、既存空中写真データを統合的に用いて、流れ山の正確な抽出が可能となる。

加えて、岩屑なだれ堆積物の分布する谷の上流側における湖において、その湖底堆積物の簡易ボーリング調査を実施した。ハンドオーガによる掘削のため、得られる情報は表層2 m 程度に限られるが、その間の堆積環境の変化を明らかにすることで、山体崩壊発生後の谷からの土砂流出プロセスの推定を行うことが可能となる。

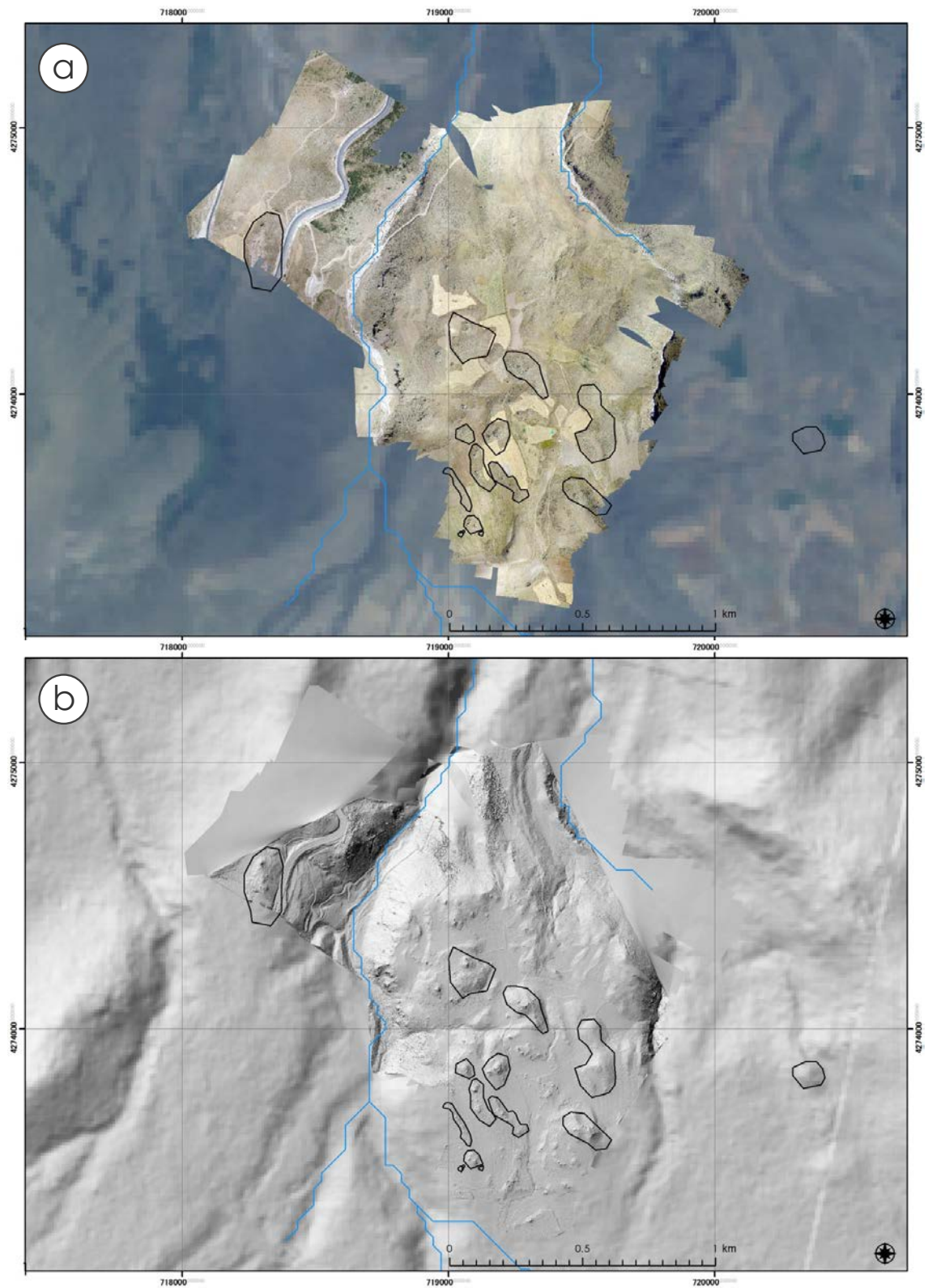


図6. UAS (sUAVベースノSfM多視点ステレオ写真測量) による地形測量結果。  
 (a) オルソ補正画像。背景はALOS AVNIR-2 光学衛星画像。(b) DEMによる陰影図。背景はALOS PRISM 衛星画像から生成した10 m DEM。

### 3.3. 活断層

トルコMTA（General Directorate of Mineral Research and Exploration）による活断層分布図に基づき、カイセリ盆地北部における断層の露頭調査を実施した。地図上に示されたエジェミシュ断層群は、カイセリ盆地の東部を南西-北東方向に走り、断層崖を形成している（図7）。この周辺を中心に調査を行った。また、カイセリ盆地西縁に位置する断層についても、未発見の断層がある可能性もあることから、あわせて調査を行った。

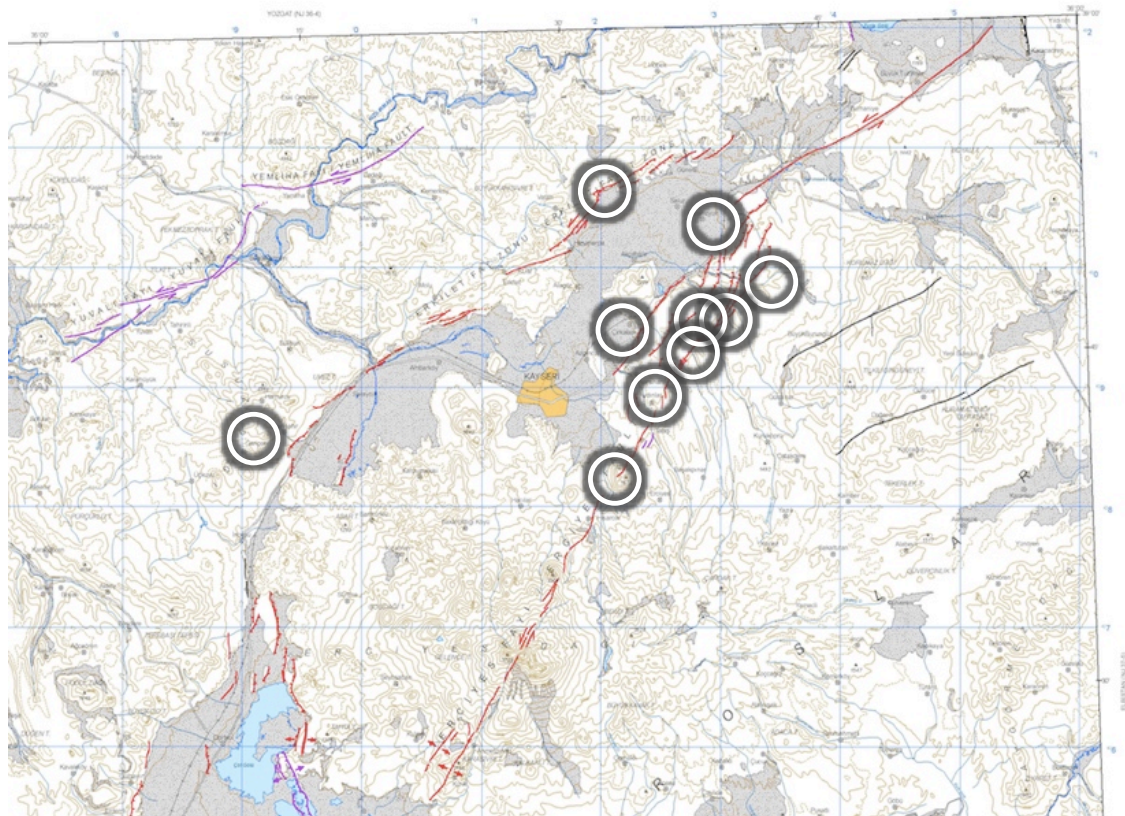


図7. トルコMTA（General Directorate of Mineral Research and Exploration）によるカイセリ盆地周辺の断層分布（赤線）と主な調査地点（白円）。



調査した地点は、主に主要道路沿いの切り通しにみられる、断層部分の露頭である(図8)。断層崖およびその近辺の精密な断面測量を、RTK-GNSS(real-time kinematic global navigation satellite system)を用いて行った。また、断層が含まれる露頭の地質について、既存地質図、文献との対応を調査し、岩石の同定とその大まかな年代の確認を行った。



図8. 調査を行った断層露頭のひとつ。

一例を挙げると、断層と考えられる斜面の両側には、2.7-2.8 Maとされる溶結凝灰岩(Incesu Ignimbrite またはValibaba Tepe Ignimbrite)の層が地表面部にみられ、その下位には風化した土壌の層がある(図8)。Incesu Ignimbriteの厚さは薄く、約2 mであるが、溶結は強固であり、その堆積面が広く平坦面として残存している。Incesu ignimbriteの層厚は断層の両側で不変であり、また断層と考えられる斜面上にはそれを覆うIncesu Ignimbriteが認められないことから、この断層の活動はIncesu Ignimbriteの堆積後であることが推定される。最大変位量は100 mほどであり、下盤側の断層崖へ向かう傾動や、逆向き低断層崖の地形がみられることから、正断層運動が考えられる。加えて、中新世の火砕流堆積物と、Incesu Ignimbriteを覆う断層面に向かい傾斜した崖錐堆積物とが断層で接している部分があり、この部分は中新世の断層面が第四紀(比較的新鮮な崖錐堆積物であるため後期更新世の可能性も考えられる)に再活動した断層運動があったことが示される。

このように調査した断層のいくつかは、層序から判断して数百万年スケールで活動していない可能性が示唆されたが、一方、一部の断層については、後期更新世に活動があった可能性も示された。これらの断層については、最適な模

式露頭の探索を行い、今後もいくつかの地点で追加調査を実施する必要もあると考えられる。一方、カイセリ盆地西縁の断層においては、地図上に示されたものの他にも、横ずれ成分をもつ断層が存在する可能性が、現地研究者（アンカラ大学）との議論から、既存の比較的高解像度なDEMデータの分析に基づき示唆されている。1シーズンの現地調査ではその発見に至るのは困難であったが、今後も継続して調査を進めていく必要がある。

### 3.4. 氷河

エルジェス火山の山頂付近、北西に面する谷壁（Upper Aksu valley）には、氷河が縮小しつつも現存することが報告されている（Sarıkaya et al., 2009）。この氷河とそれに関連する氷河性堆積物は、過去数百年から数千年間の気候変動を記録する貴重なものである（Sarıkaya et al., 2009）。一方、1900年代初頭に初めて報告されてから氷河は後退を続けており、最新の論文も数年前の報告であるため、2014年現在で氷河が残存しているかどうかの情報は得られておらず、本調査において確認を行った。

現地調査は現地自治体（ハジュラル市役所）の協力を得て行った。当地に詳しいレンジャーに案内され、標高2800 m を超える地点まで到達し、エルジェス山頂直下にわずかながらも氷河が現存することを目視で確認した（図9）。氷河より下流にはモレーンやアウトウォッシュプレーンなど氷河性の堆積物が分布しているのが観察できる。しかし、氷河の減少速度からすると、数年後か遅くとも数十年後には、この氷河は消失している可能性が高いと考えられる。今回の調査では氷河に直接接触できる地点まで到達することができなかったが、氷河堆積物による古気候の記録調査は今後も実施する必要があると考えられる。

一方、同じくエルジェス火山の高標高部に位置する旧火口の凹地に形成された湖（Sarı Göl）においても、その堆積物調査から古気候変動の記録を抽出することができる可能性も示唆された。そのため、粗い堆積物の掘削など課題はあるが、今後の調査計画の検討を要するであろう。

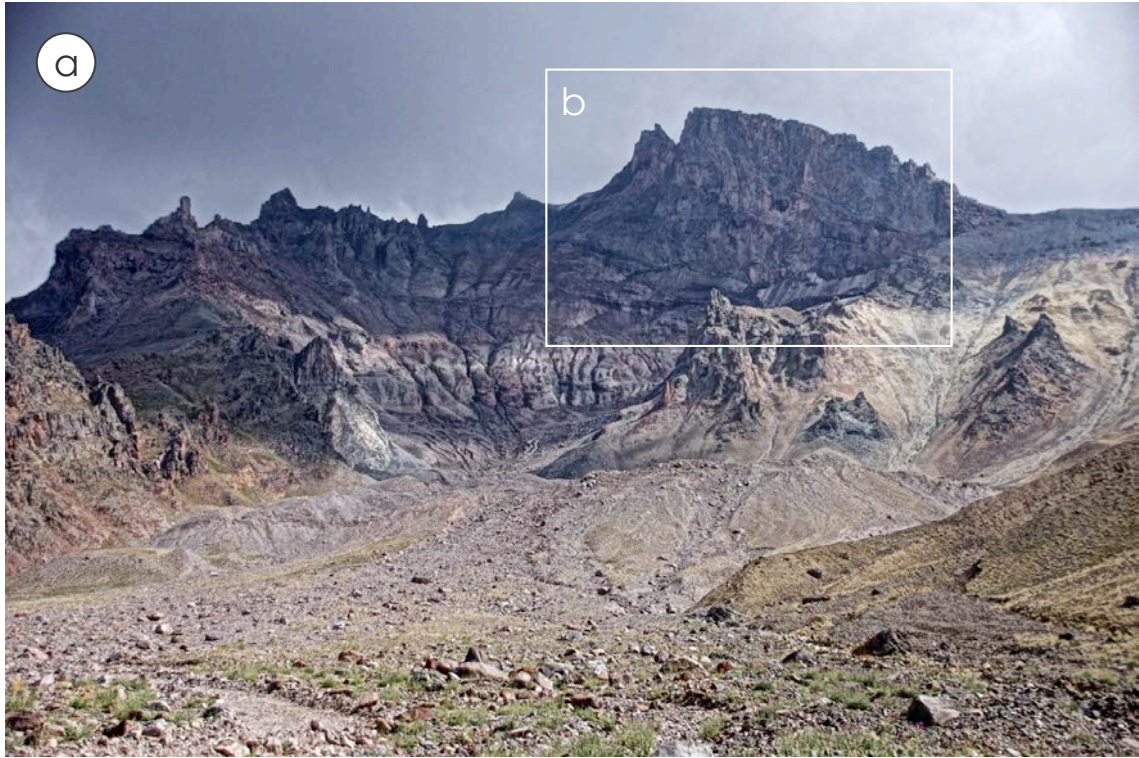


図9. (a) エルジエス火山山頂付近の氷河とアウトウォッシュ（早川，2014）.  
(b) 山頂直下にわずかに現存する氷河.

### 3.5. 古環境地図

現地調査における調査結果のとりまとめを行い、古環境地図の作成を進めた。新たに得られた詳細な地形情報も活用し、地形区分図の作成から、断層に関する情報集約、遺跡の分布図などのGISデータベースへの投入を行った。今後、これらのデータの表現方法の検討を進め、さらに見やすい地図として、現地自治体等の機関にも配布できるかたちに整備する予定である。

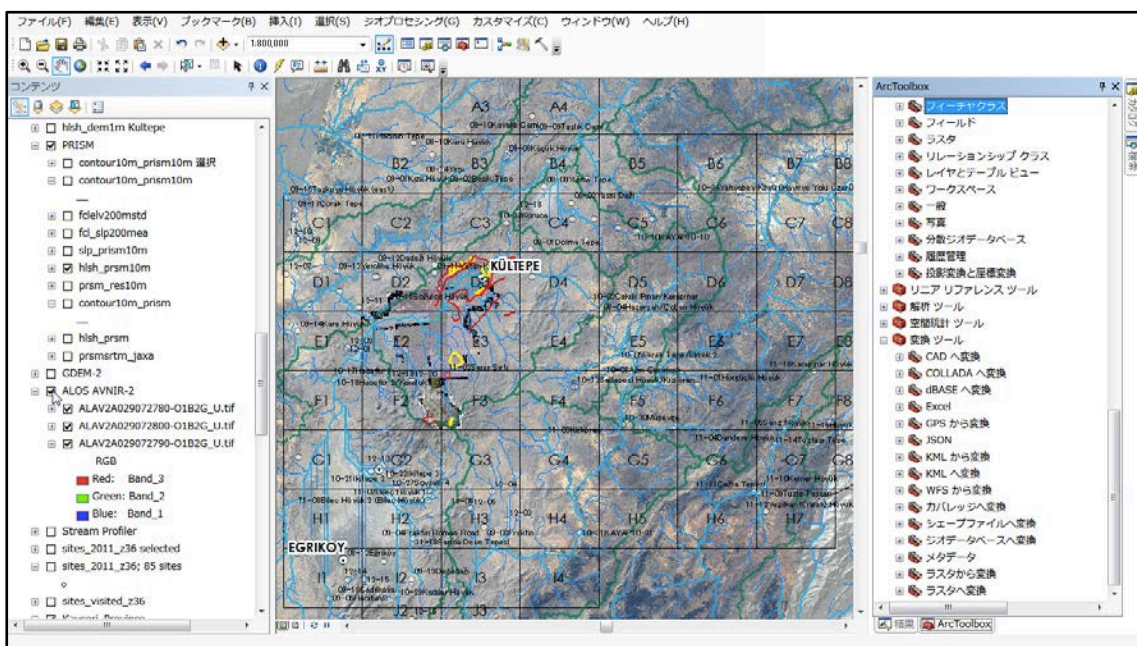


図10. 古環境地図のGISデータベース表示画面。

#### 4. まとめと展望

本研究では、断層・火山に囲まれそれにともなう自然災害が発生し得るカイセリ盆地およびその周辺域において、過去の自然災害や環境変化と人間の文化活動との関係の実態を自然地理学的アプローチで解明することを目的に、各種調査を実施し、古環境地図の作成を進めた。今後、本研究の成果を公表するためのウェブサイトを設置し、収集したGISデータベースから、閲覧者にとってわかりやすいWebGISを構築したうえで、研究内容や成果としての古環境マップを一般に公開する予定である。これにより、現地への防災計画提言を行う基礎情報を提供できることになる。さらに、人と自然との関係の明確化という点で地考古学的に重要な成果となり、同地域における現代社会のハザードリスク評価、都市計画に貢献することができると考えられる。これは、トルコ国内及び周辺の西アジア地域において、古災害の痕跡調査、古環境変動と人間活動（文化変容）とのマッチング、および現代社会への提言を行うといった総合的研究の先駆的なケースとなるであろう。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人国土地理協会助成金「アナトリア高原中部における後期完新世の考古環境マッピング-大規模災害リスク評価に向けて-」（研究代表者：早川裕弼）、および科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究「過去から未来へー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」（研究代表者：早川裕弼、研究課題番号：26560153）を使用した。記して謝意を表します。

#### 文献

Erol, O. (1999): A geomorphological study of the Sultansazlığı lake, central Anatolia.

*Quaternary Science Reviews*, **18**, 647–657, doi:10.1016/S0277-3791(98)00102-4.

藤井純夫 (2012): 新石器時代移牧民のダムとシスターンー西アジア周辺乾燥域の水利史から見た遊牧化の経緯ー。早稲田大学高等研究所フォーラム 文明の形成にみる環境と文化, 4–8.

- 早川裕弉 (2014): トルコ共和国中部、エルジエス火山の山頂とその直下に現存する氷河。地形, **35**, 表紙.
- 早川裕弉 (2015): 鳥の眼から虫の眼へー地形・地物情報の高解像度化革命 (イノベーション) ー. *GIS NEXT*, **50**, 91.
- 早川裕一 and 津村宏臣 (2008): LRF と DGPS を用いた野外調査における地形測量: トルコ, ハジトゥール・テペ遺跡における適用事例. 地形, **29**, 421–434.
- Hayakawa, Y.S. and Tsumura, H. (2009): Utilization of laser range finder and differential GPS for high-resolution topographic measurement at Hacituğrul Tepe, Turkey. *Geoarchaeology*, **24**, 176–190, doi:10.1002/gea.20261.
- Hayakawa, Y.S., Matsuta, N. and Matsukura, Y. (2009): Rapid recession of fault-scarp waterfalls: Six-year changes following the 921 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **30**, 1–13.
- 早川裕弉, 紺谷亮一, クラックオウルフィクリ, エゼルサバハッティン and オズトルクギュゼル (2012): レーザ距離計と自動パノラマ撮影装置を組み合わせた簡易レーザスキャンシステムの構築. *CSIS Discussion Paper*, Vol. 113 available at: <http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/dp/113.pdf>.
- 早川裕弉, 松多信尚, 前門晃 and 松倉公憲 (2013): 集集地震により生じた台湾中西部における滝の地震後 10 年間の後退速度とその変化. 地形, **34**, 21–36.
- 小泉格 (2007): 気候変動と文明の盛衰. 地学雑誌, **116**, 62–78.
- 前野深, 新堀賢志, 金子隆之, 藤井敏嗣, 中田節也, 鎌田桂子, 安田敦 and 青柳正規 (2009): ヴェスヴィオ火山北麓で発見されたローマ時代の遺跡の埋没過程: 2006～2008 年に新たに発見された 472 年噴火による土石流堆積物にもとづく再構築. 地震研究所彙報, **84**, 271–289.
- 小花和宏之, 早川裕弉, 齋藤仁 and ゴメスクリストファー (2014): UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング, **53**, 67–74.

小花和宏之, 早川裕弐 and ゴメスクリストファー (2014): UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング. *地形*, **35**, 283–294.

Sarikaya, M.A., Zreda, M. and Çiner, A. (2009): Glaciations and paleoclimate of Mount Erciyes, central Turkey, since the Last Glacial Maximum, inferred from  $^{36}\text{Cl}$  cosmogenic dating and glacier modeling. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 2326–2341, doi:10.1016/j.quascirev.2009.04.015.

Şen, E., Kürkcüoğlu, B., Aydar, E., Gourgaud, A. and Vincent, P.M. (2003): Volcanological evolution of Mount Erciyes stratovolcano and origin of the Valibaba Tepe ignimbrite (Central Anatolia, Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **125**, 225–246, doi:10.1016/S0377-0273(03)00110-0.

安田喜憲 (1993): 気候が文明を変える. 岩波書店

## 成果発表

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) 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, 日本大学.

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) 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. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ.

Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., Yoshida, H., Naruhashi, R., Okumura, K., Zaiki, M., Kontani, R. (2015) Mapping surface morphology and outcrop structures of hummocks in debris avalanche deposits using structure-from-motion multi-view stereo photogrammetry. INQUA XIX, Nagoya, Japan

Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., Yoshida, H., Naruhashi, R., Okumura, K., Zaiki, M. (2015) Geomorphology and archaeology: mapping landforms around archaeological sites in Kayseri region using high-definition data. IGU Moscow 2015, Moscow, Russia.