

カッパドキア岩窟遺跡の環境解析と岩窟壁の水食耐性の評価

517369 山崎成美 (土壌圏システム学教育研究分野)

1. はじめに

世界遺産カッパドキアの岩窟遺跡は日々風化の危機に晒されており、一刻も早い対策が求められている。風化は様々な自然現象に起因するが、近年の現地調査により遺跡の風化の主要因は降雨だと考えられている。しかし、現地の気象環境や岩壁の水食耐性はこれまであまり調べられておらず、遺跡のどの地点で、あるいはどの壁面で水食を受けやすいのかはわかっていない。そこで、本研究では効果的に遺跡の保護を行うため、現地の降水特性を解析し、降水強度や勾配と侵食量の関係を明らかにした上で水食予測モデルを用いて水食耐性を評価する。

2. 現地環境の解析

カッパドキアにおいて 2014 年から調査を継続している Red Valley の Uzumlu 教会と 2019 年から調査を開始した Pasabaglari 地区の St. Simeon 教会を対象とした(図 1)。それぞれ気温、降水、日射、風向風速、湿度、気圧、および土壌 3 深度の温度と含水率、圧力を計測している。2019 年 9 月～2020 年 8 月の各教会における気温と時間降水量を図 2 に示す。気象環境の解析の結果、どちらも地中海性気候 Cs に区分され、各教会の温湿度にほとんど差はみられなかった。降水強度はどちらも 2 mm/h 以下の割合が高く、最大降水継続時間は 3 h だった。また、時間最大降水量は Uzumlu 教会、St. Simeon 教会でそれぞれ 12.6、10.2 mm/h だった。Uzumlu 教会では降水強度 2 mm/h 以下の雨が長時間降り、St. Simeon 教会では 6～8 mm/h の比較的強い雨が短時間に降る傾向があった。教会付近の土中の水分移動は、降水量に伴い変動するものの、多くの期間で浸透より蒸発が卓越した。また、St. Simeon 教会では地表から 10 cm 深までの水分移動が速い一方、それ以深には浸透しにくく、10 cm 深付近に水分が留まりやすい環境だった。

3. 水食実験

3.1 試料と方法

試料には 2 mm ふるいを通過した黒ボク土、遺跡周辺で採取した 2 種類の未風化岩と風化岩(凝灰岩)を用いた。風化岩は粉状に崩れており、そのままの状態のものを風化岩①、2 mm ふるいを通過したものを風化岩②とした。黒ボク土と風化岩①②は、縦 13.4 cm×横 19.5 cm の底に穴が開いた容器にろ紙を敷設し、その上に充填した。未風化岩は、その形状に合わせ切り取ったポリエチレン板にはめ込み面状とした。試料は前日から水道水で飽和し、黒ボク土と風化岩は水食実験直前に表面を平らに整えた。

試料を振とう機の上に傾斜角 0、20、35、50°になるように載せ、周囲を厚手のビニール袋で囲った後、試料の約 65 cm 上に降水装置を設置した。現地環境の解析に基づき、試料に強度 21.4、11.2、1.24 mm/h の降水を 3 h 与えた。降水中、雨滴が均一に試料に当たるよう振とう機を 14 rpm で回転した。降水終了後、流出した試料を全て回収し、乾燥重量から侵食量を求めた。

3.2 結果と考察

降水強度 21.4、11.2、1.24 mm/h における試料の傾斜角と侵食量の関係を図 3 に示す。降水強度 21.4 mm/h については、黒ボク土、風化岩②、風化岩①の順で侵食量が大きかった。これらに比べ、未風化岩の侵食量はかなり小さかった。また、侵食量と傾斜角の関係は直線で概ね近似できた。降水強度 11.2 mm/h についても、黒ボク土、風化岩②、風化岩①の順で侵食量が大きかったが、試料間の差は小さかった。また、風化岩②の侵食量は傾斜角と比例関係にあったが黒ボク土と風化岩①は傾斜角によらず侵食量がほぼ一定だった。降水強度が小さくなるにつれ試料の侵食量のばらつきが大きくなり、傾斜角による影響が表れにくくなったと考えられる。

また、風化岩①②については、降水強度 21.4 と 11.2 mm/h における侵食量に大きな差が見られなかった。降水強度がある程度以上になると侵食量の増加率が小さくなると思われる。降水強度 1.24 mm/h については、いずれの試料においても侵食量はわずかで、傾斜角にほとんど依存しなかった。岩窟壁面の水食は黒ボク土のような土に比べ傾斜の影響を受けにくく、特に降水強度約 10 mm/h 以下では侵食量が傾斜角より降水強度に依存することが明らかになった。また、Uzumlu 教会に比べ短時間・強雨という降水特性を持つ St. Simeon 教会の方が水食の影響は大きいと予想される。

4. WEPP による侵食量の推定

環境解析と水食実験の結果を用いて、USDA が開発した水食予測モデル (WEPP) により岩窟教会壁面の年間侵食量の評価を試みた。なお、現地観測で壁面にリル侵食を認められなかったため、ここでは面状に全体が削られるインターリル侵食のみを考慮した。式 (1) に WEPP の侵食量計算式を示す。

$$D_i = K_{ib} \cdot I \cdot \sigma \cdot S \quad (1)$$

ここで、 D_i はインターリル侵食量 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]、 K_{ib} はインターリル侵食係数 [$\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^4$]、 I は降水強度 [m/s]、 σ は流出高 [m/s]、 S は傾斜の補正係数で、傾斜角 θ を用いて式 $S = 1.05 - 0.85e^{-4\sin\theta}$ で算出した。WEPP により推定した 1 m^2 あたりの平均的な年間侵食量を図 4 に示す。風化の進行度合いによらず短時間・強雨という降水特性を持つ St. Simeon 教会の侵食量の方が多かった。また、各教会の環境では風化岩①の侵食量は未風化岩の約 30 倍となった。同じ地点の岩窟遺跡であっても岩壁のそれまでの風化の履歴や岩質、風向や風速による降水強度の違いにより侵食量は大きく変化すると言える。これらのことから、St. Simeon 教会付近のような短時間に多量の雨が降る地点や 比較的風化が進んでいる壁面を優先的に保護することで、効果的に遺跡の風化を抑制することができると思われる。

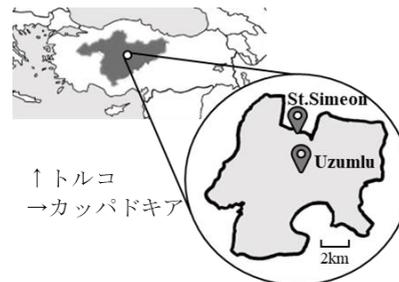


図 1. 対象地 (Uzumlu 教会と St. Simeon 教会)

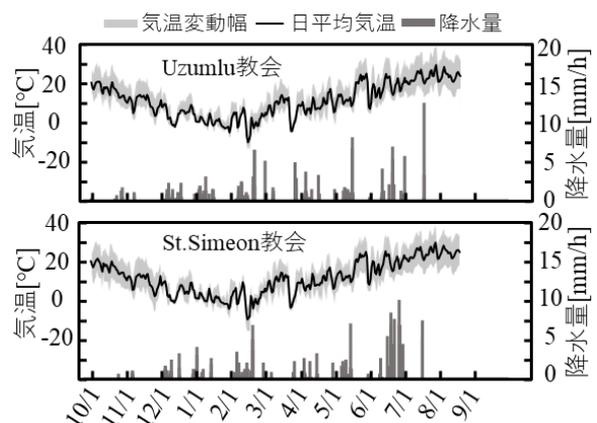


図 2. 2019 年～2020 年の気温と降水量

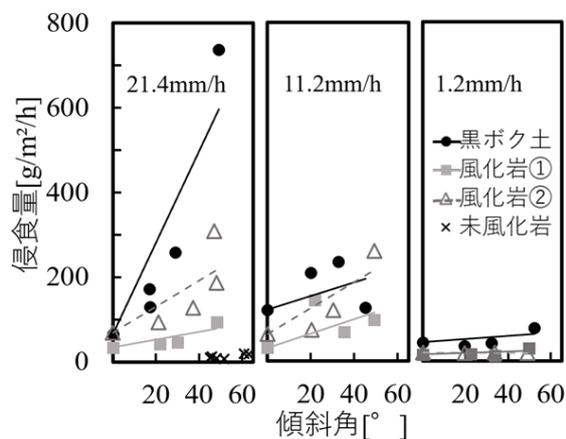


図 3. 降水強度および傾斜角と侵食量の関係

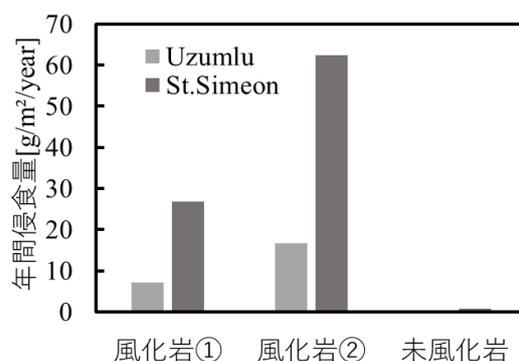


図 4. WEPP により推定した年間侵食量