

## カッパドキア岩窟教会の凍結環境の調査

### Field Research of Frozen Environment of Rock-hewn Church in Cappadocia

渡辺晋生<sup>1</sup>・小泉圭吾<sup>2</sup>・伊庭千恵美<sup>3</sup>・谷口陽子<sup>4</sup>・朴春澤<sup>5</sup>・佐野勝彦<sup>6</sup>

<sup>1</sup>三重大学・<sup>2</sup>大阪大学・<sup>3</sup>京都大学・<sup>4</sup>筑波大学・<sup>5</sup>ハイテック・<sup>6</sup>ディ・アンド・ディ

#### 要旨

カッパドキア岩窟教会の凍結環境を明らかにすべく現場観測を行った。地表（教会表面）が氷点下に晒される機会が各年 10 数回あった。教会の日向側と日陰側の基部では、日向側の方が地温の日振幅が大きく平均地温が数度高かったが、地表凍結期においてはこれらに大きな違いは見られなかった。気温が氷点下に達しても凍結深は数 mm から 1 cm 程度と浅かった。地表への水分供給は結露や融雪水に依存しており、凍上を伴うような凍結の頻度は少ないと考えられた。

キーワード： 岩石風化, 地盤凍結, 環境調査, 土壌水分動態

Key words: Rock weathering, Ground freezing, Environmental monitoring, Soil water migration

#### 1. はじめに

世界遺産カッパドキアの岩窟遺跡は風化の危機に晒されている。風化の原因の一つに岩体の凍結融解が示唆されている。遺跡の保全にはその凍結環境の詳細を明らかにする必要がある。そこで、岩体の凍結頻度や凍結深、凍結に影響を与える水分・温度環境を調査した。

#### 2. 観測地点と方法

トルコ、カッパドキアの Red Valley にある岩窟教会(ウズムル教会:凝灰岩)を対象とした。2014 年 9 月に教会の南方に気象ステーションを設置し、風向風速、放射、気温、湿度、降水のモニタを開始した。教会の南西外壁と北外壁の基部にピットを掘削し（日向区、日陰区）、5, 10, 30 cm 深に 5TE 水分・温度センサを、5, 30 cm 深に MPS2 圧力センサを埋設した。教会内外と壁面各所で透水係数と熱伝導率を測定した。また、実験室で教会周辺の岩塊の含水率  $\theta$ -圧力水頭  $h$  関係(SWC)を測定した。

#### 3. 結果

Fig. 1a に現地で観測した日平均の  $\theta$  と  $h$  の関係を示す。●印は実験室で求めた SWC である。SWC には異なる 2 種類の形状が観測された。 $h \approx -10^3$  cm の  $\theta$  が高い日向区 5 cm 深と日陰区

30 cm 深の岩は 5TE を直接挿入できるほど脆く、こうした風化が進んだ岩は 1  $\mu\text{m}$  程度の細孔を多く含むと考えられる。Fig. 1b に教会各所の不飽和透水係数関数を示す。透水係数関数にも異なる 2 種類の形状が見られた。SWC 同様に風化の違いを反映していると考えられる。

Fig. 2 に日平均気温を示す。2014-15 年と 2015-16 年の 9~6 月の平均気温は 9.6 と 10.7  $^{\circ}\text{C}$ 、最低気温は -15.5 と -16.4  $^{\circ}\text{C}$ 、氷点下を記録した日は 51 と 64 日だった。気温の年変化は概ね同傾向だったが、凍結破碎の目安と言われる 4~-4  $^{\circ}\text{C}$  の気温変化は 6, 11 回、積算寒度は -94, -174  $^{\circ}\text{C d}$  と 2015-16 年の方が凍結環境は厳しかった。日向区の地温は日陰区に比べ日振幅が大きかった。Fig. 2 に地温分布から推定した地表面温度を示す。日向区の地表面温度は日陰区より、冬期以外は数  $^{\circ}\text{C}$ 、冬期は 0.5~2  $^{\circ}\text{C}$  高かった。気温が氷点下になると、両区の地表面温度は 0  $^{\circ}\text{C}$  近くを推移した。放射冷却や積雪の効果は不明だが、日平均気温が -5  $^{\circ}\text{C}$  以下でも地表面温度は 0~数  $^{\circ}\text{C}$  に留まるようにみえる。

Fig. 3 に日降水量と相対湿度を、日向区および日陰区の日平均  $\theta$  とともに示す。2014-15 年と 2015-16 年の 6~9 月の降水量は 347 と 315

mm であり、降雪が 3~4 割を占めた。降水は 1~6 月に多く、小雨が多勢を占めたが、2 mm/10 min 以上の降水も年数回みられた。相対湿度は夜間に 0.9 以上となる日が多かった。土壤水分は、 $h \approx -10^3$  cm の  $\theta$  が高い層 (Fig. 1a) で相対的に高かった。何れの深さの  $\theta$  も、降水にตอบสนองした微少な増減が見られたが、1~6 月の多雨期にはほぼ一定値 ( $h \approx -200$  cm) を推移し、6~12 月の少雨期には緩やかに減少した。ここで、各区の 5~30 cm 深の圧力勾配を求めた (Fig. 4: 正が上向きの水分移動)。1~6 月の  $\theta$  がほぼ一定の期間は、圧力勾配は概ね 0 だった。6~12 月の  $\theta$  が徐々に減少する期間は、上方への水分移動が卓越した。圧力勾配は、2014-15 年は 11 月 31 日に、2015-16 年は 11 月 24 日に最大に達した後それぞれ 12 月 2 日と 3 日に負に転じたが、日平均気温が氷点下に達したのは 12 月 2 日と 22 日であり、地表の凍結に伴う上方への水分移動はほとんど見られなかった。

#### 4. 考察

調査地周辺では、例年 12 月下旬までは降水が少なく、気温が低下しても岩体の含水率が低いため、遺跡の凍結破砕の可能性は低いと考えられる。一方、夜間の結露・凝結に伴う乾湿の繰り返しは、遺跡表面数 mm の脆弱化の一因となりうるだろう。1, 2 月には積雪があり、融雪水の浸透は 30 cm 以深まで岩体を  $h \approx -200$  cm まで湿潤化する。こうした水分の凍結は遺跡表面の脆弱化に寄与しうるが、氷晶析出を示す水分移動が見られないことから、亀裂の溜水の凍結を除き、大きな凍結破砕に直接結びつくとは考えにくい。ただし、2017 年 2 月 17~20 日の寒波終盤には氷点下に冷やされた地表面への水分移動が見られ、凍上が生じた可能性が示唆される。機会は少ないが、融雪水で岩体の含水率が高く保持され、地表に氷核形成に必要な水分が生じる 1 月下旬に気温が低下する際には凍結破砕の可能性が高くなると思われる。

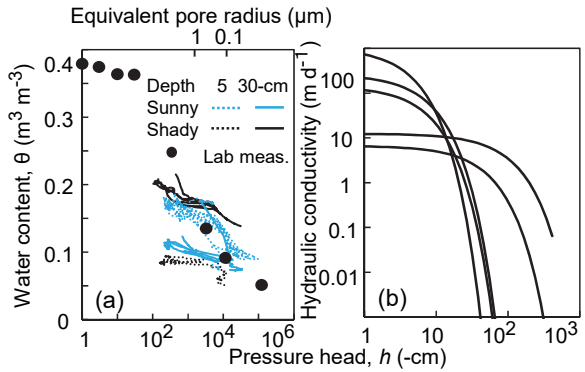


Fig. 1 (a)水分特性曲線 (SWC) と (b)不飽和透水係数

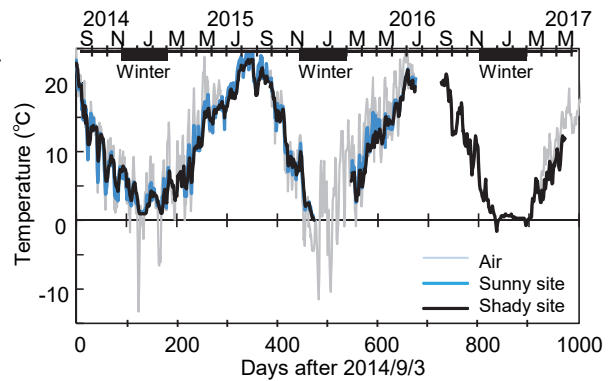


Fig. 2 日平均気温と日向および日陰区の日最低地表面温度

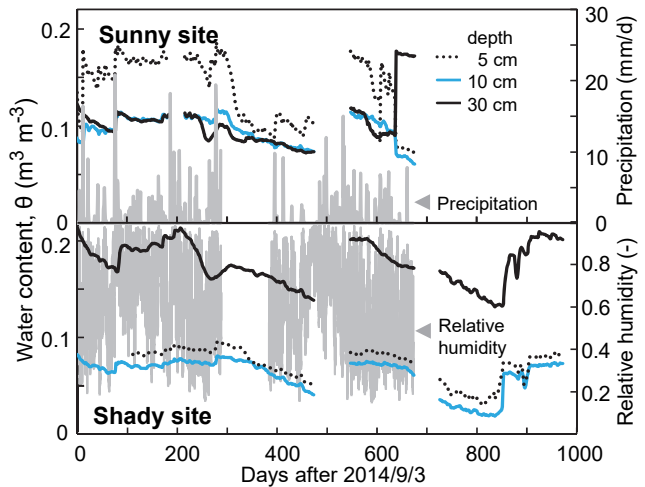


Fig. 3 日降水量、相対湿度および3深度の土壤水分

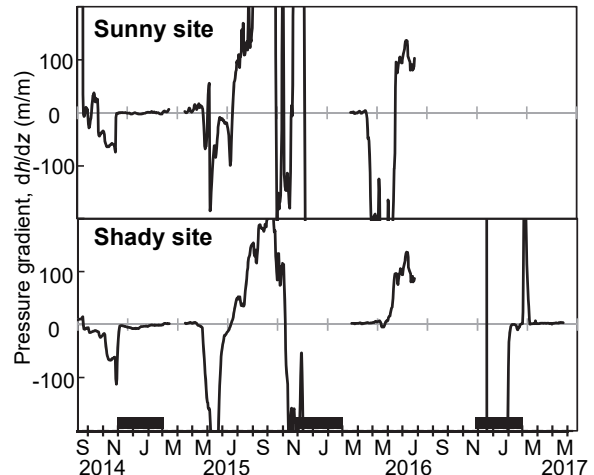


Fig. 4 5~30 cm深さのマトリックポテンシャル勾配