

I 石鳥居を構成する石材の材質分析による風化特性の基礎的研究

荒木徳人 ARAKI, Naruto/ 芸術工学専攻文化財科学領域 博士1年
米村祥央 YONEMURA, Sachio/ 文化財保存修復センター准教授
石崎武志 ISHIZAKI, Takeshi/ 文化財保存修復研究センター研究員・教授

1. 序論

当大学の文化財保存修復研究センターでは山形県山形市鳥居ヶ丘にある重要文化財「鳥居」を対象に部材の産地推定や保存に向けての様々な診断調査が行われてきた^{1) 2) 3) 4)}。しかし、鳥居を対象とした様々な研究が行われてきた一方で、部材の風化特性を明らかにした研究は行われていない。これらを明らかにすることにより、どのような風化が起りやすいのか予測することができ、保存方法の検討にも活用できる。本研究では重要文化財「鳥居」を構成する石材に使われている成沢累層凝灰岩を対象に材料分析を行い、風化特性を明らかにした。

2. 周辺地質環境

国土交通省が公開している『5万分の1 都道府県土地分類基本調査(山形)』を用いて、鳥居周辺の地質環境を把握した(図1)。石鳥居周辺の岩石は白亜紀の火成岩、中新世の泥岩と多様な凝灰岩、そして第四紀の砂や礫などの未固結堆積物および火山泥流で構成されている。

この石鳥居は凝灰岩製の部材で構成されており、周辺にもこれと類似した凝灰岩質の岩石が分布して

いる。その中でも石鳥居から南に約3km離れた所に石鳥居に使われていると推定されている成沢累層がある。

1982年に山形県が主体となり調査した国土調査の報告書によると、成沢累層の凝灰岩は軽石を多く含み、これらの軽石がモンモリロナイト化作用を受け、青緑色が帯びていると報告している⁵⁾。

3. 岩石および鉱物学的特徴

石鳥居に使われている成沢産凝灰岩の記載的特徴および微細組織を把握するために、肉眼観察および剥落した試料を採取してデジタルマイクロスコープ(HIROX社製 KH7700)での観察を行った。その結果、石鳥居に使われている凝灰岩は全体的に火山砕屑物の一種である軽石が多く含んでおり、細粒質の珪長質鉱物や微量であるが苦鉄質鉱物も観察され、所々に粘土質の鉱物も確認された(図2 A, B)。

次に、鉱物学的造成および組織的特徴を把握するために偏光顕微鏡観察を行った。基質はガラス質であることから軽石および火山灰などの火山砕屑物で構成されており、主要構成鉱物は細粒質の石英と斜長石が観察された(図2 C, D)。

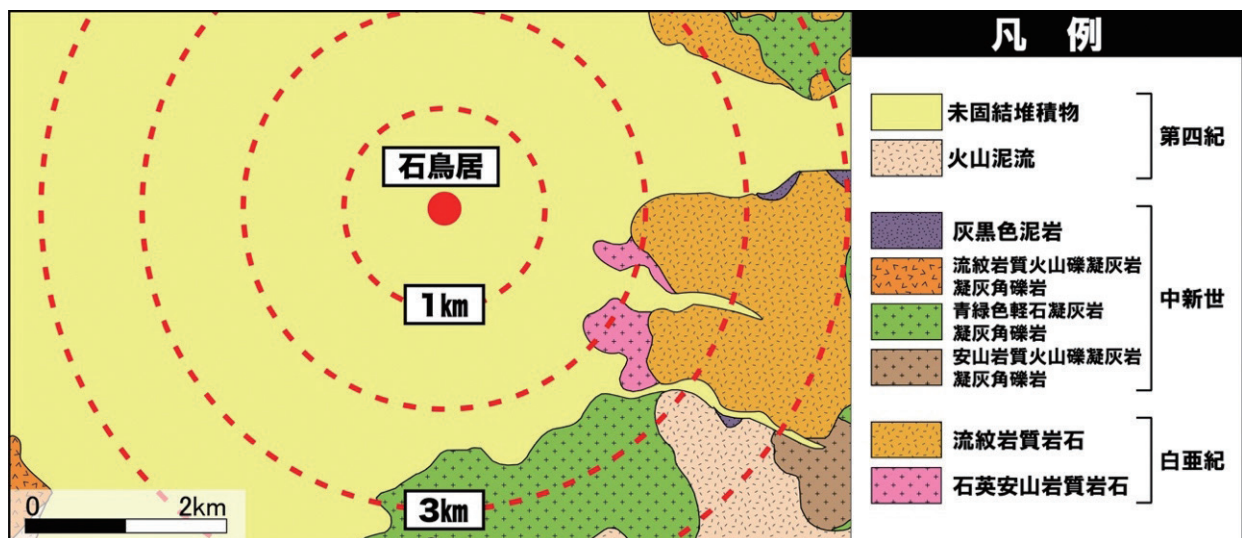


図1. 山形周辺の地質図
出典：5万分の1：土地分類基本調査(表層地質図)「山形」山形県(1982)(一部修正)

また、造岩鉱物の精密な同定を行うため、試料を粉末化してX線回折分析（ブルカー ジャパン D8Discover with GADDS）を通じて行った。ターゲット金属はCoで電圧および電流はそれぞれ35kVと40mAに設定した。分析の結果、石英、スメクタイト、ゼオライトが検出された（図3）。

スメクタイトは膨潤性粘土鉱物の一種で水分を含むと膨張する特徴があり、ゼオライトは多孔質構造であるため、吸水性が非常に高い。今後、石鳥居を保存する上でゼオライトとスメクタイトが含まれた凝灰岩が乾湿を繰り返すことにより、どのような影響を受けるのか明らかにする必要がある。

4. スレーキング試験

凝灰岩の乾湿の繰り返しによる影響性を明らかにするため、スレーキング試験を実施した。スレーキングとは水分を吸収し、乾燥する際に粒子間が狭くなり変形がくり返し起こるため、鉱物間の結合力を低下させ岩石が崩壊する現象のことである。また、膨潤性粘土鉱物の含有なども要因として挙げられている^{6) 7) 8)}。現在までこれらに関する多くの研究が行われているが、そのメカニズムには未だ不明瞭な点が多い。

本実験ではこのようなメカニズムの究明ではなく、その前段階として成沢累層凝灰岩を対象に強制劣化試験を行い、スレーキング現象がどのように起こるのかを把握した。

4-1. 実験方法

成沢累層から採取した凝灰岩を対象に実験を行った。体積が異なる二種類の試料を各5個ずつ作成した。試料の概要は以下に示す（図4 A）。

形状：円柱形

半径：1.7cm（A～E）、2.2cm（F～J）

高さ：3.0cm（A～E）、4.0cm（F～J）

本実験では日本道路公団の基準（KODAN111）⁹⁾を参考に、乾湿試験を行った。湿潤過程では試料が完全に水浸するまで蒸留水を注ぎ、減圧状態にして24時間放置し、乾燥過程では24時間110℃で炉乾燥させた（図4 B）。このように湿潤、乾燥過程を1サイクルとし、湿潤重量、水中重量、乾燥重量を測定し、試料体積と空隙率を算出した。試料体積および空隙率の算出方法は以下に示す。

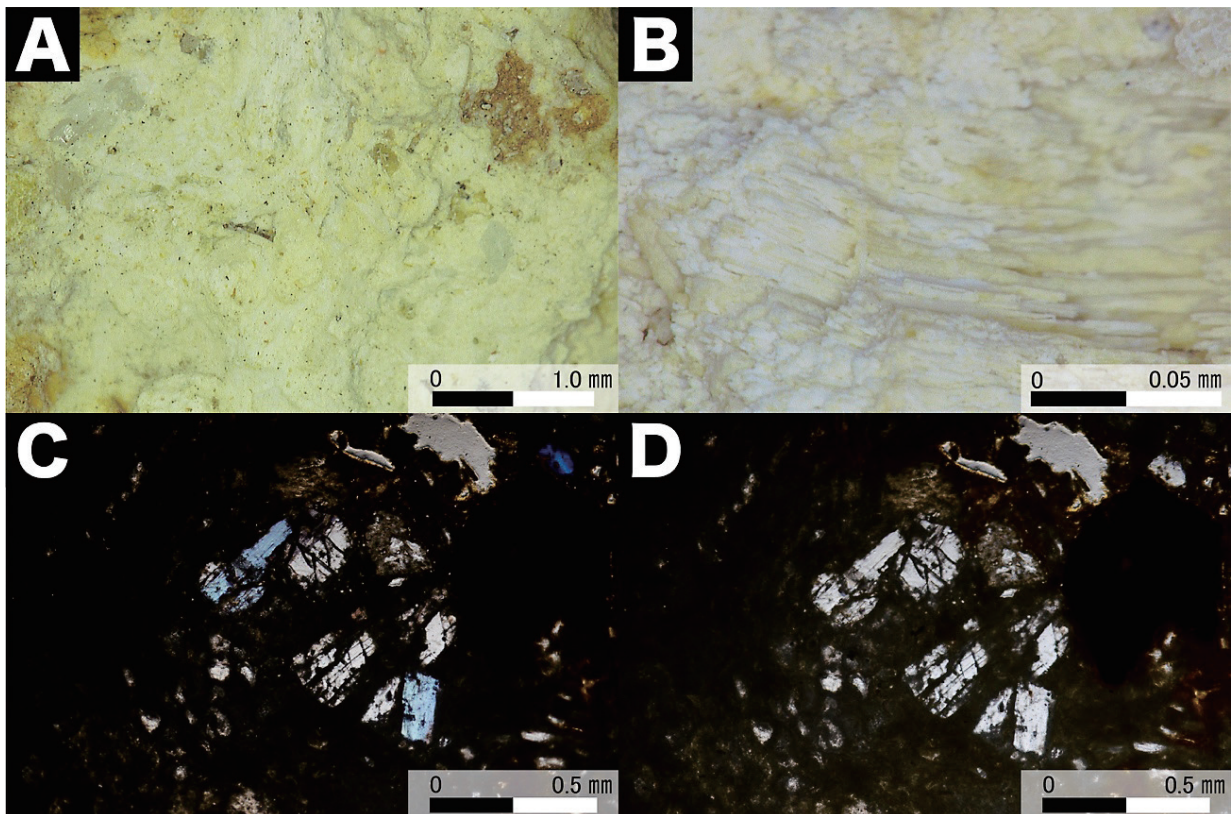


図2. 石鳥居の岩石および鉱物学的特徴 (A)(B) マイクロスコープ写真 (C) 直交ニコル薄片写真 (D) 開放ニコル薄片写真

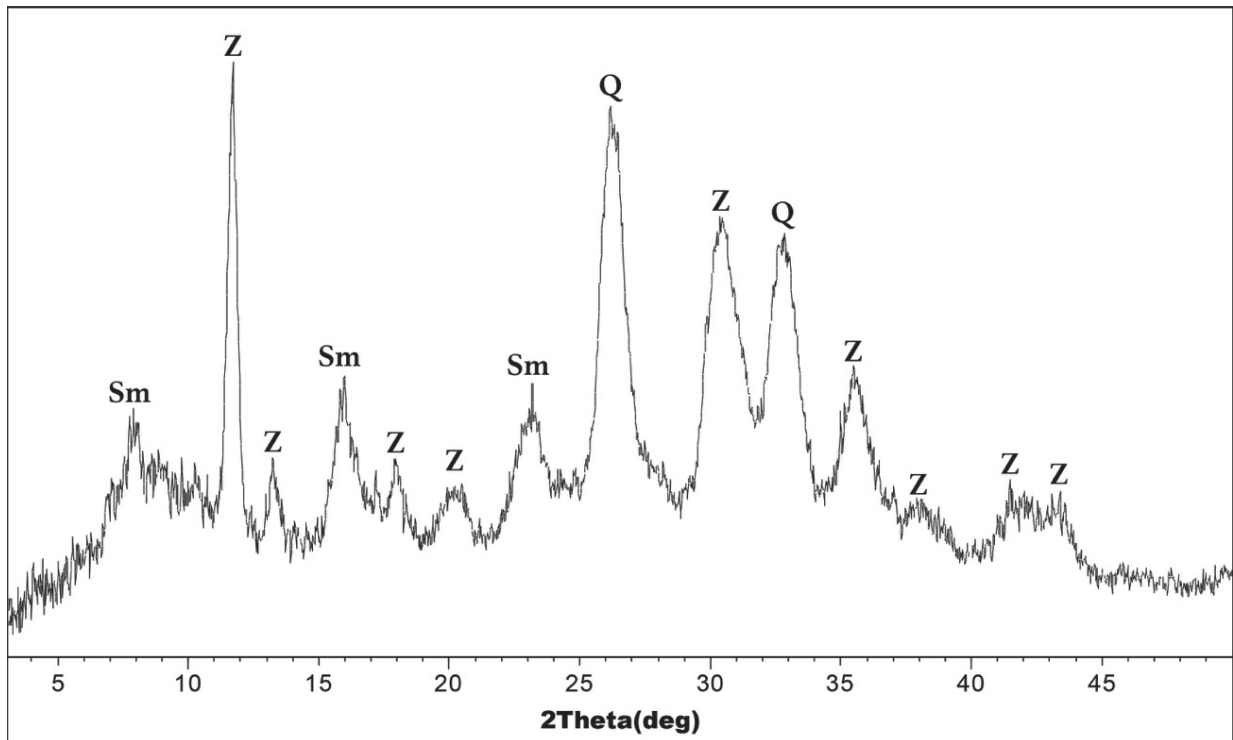


図3. X線回折分析結果 Q：石英，Z：ゼオライト，Sm：スメクタイト

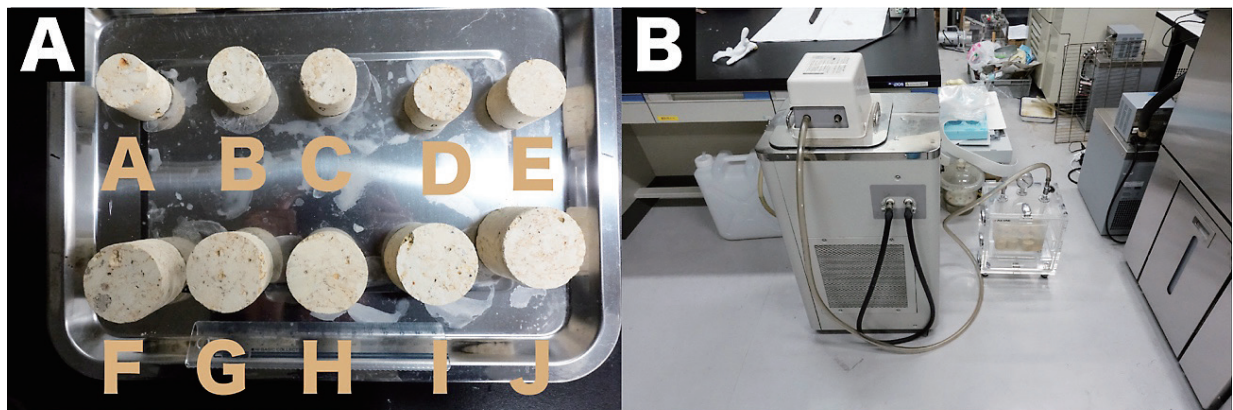


図4. 実験概要 (A) 試料写真 (B) 循環アスピレーターを用いた減圧

$$V_t = \frac{1}{\rho_w} (W_w - W_{aq}) \dots \dots \dots (1)$$

V_t : 試料体積、 ρ_w : 水の密度
 W_w : 湿潤重量、 W_{aq} : 水中重量

$$V_v = \frac{1}{\rho_w} (W_w - W_d) \dots \dots \dots (2)$$

V_v : 空隙体積、 W_d : 乾燥重量

$$\Phi = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

Φ : 空隙率

実験は全13サイクル、重量測定は1、4、7、10、13サイクル目で行い、重量測定時だけ48時間浸漬させた。重量測定時だけ48時間浸漬させる理由として、石澤（2017）の研究で成沢累層の凝灰岩の飽和重量を測定する際に、48時間浸漬させた方が重量が増加することが明らかとなっており、空隙率測定の精度を上げるために行った¹⁰⁾。

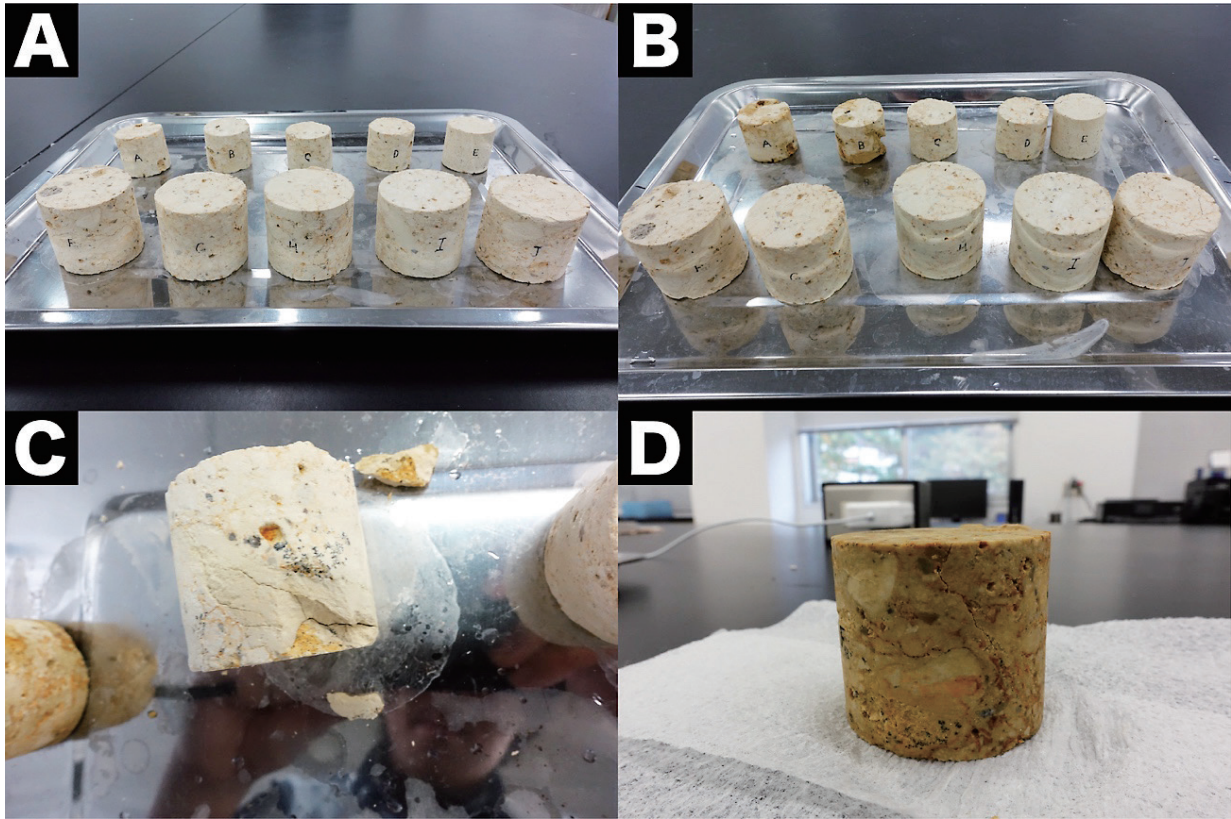


図5. スレーキング試験結果 (A) 1サイクル目の状態 (B) 13サイクル目の状態 (C)(D) 損傷状態の様子

4-2. 実験結果

スレーキング試験の結果、1サイクルから13サイクルにかけて基本的にほとんどの試料に激しい損傷が発生した一方で、一部それほど損傷が起らなかった試料も確認された(図5)。全体的に4サイクル目で微細な亀裂が発生しており、これらの亀裂は基本的に粘土質の部分を中心に発生している。また、粘土質の部分は亀裂だけではなくサイクル数が増えるごとに粒状分解が発生することもわかった。試料Eに関しては他の試料と比べて表面に粘土鉱物が少なく比較的損傷も少なかった。(図6)。

次に試料の体積および空隙率の変化を図7から図10、表1から表4に示す。試料E以外はサイクル数が増えるごとに空隙率が上昇し、体積が小さくなった。また、1サイクル目から4サイクル目にかけて急激に数値の変動がみられるのは岩石に亀裂が発生し始めたからであると考えられる。4サイクル以降、数値変動が安定してきたのはいくつかの要因が考えられ、一つはスメクタイトの膨張率より細孔径が大きくなったためであり、二つ目は細孔径が大きくなることによって鉱物間に存在する毛細管力の影響が小さくなり、損傷が止まったと考えられる。

しかし、試料Eだけは他の試料と反して、体積が小さくなるのと同時に空隙率も低下していた。これに関しては今後もう少し分析を続けていく必要があるが、他の試料と比べて表面に粘土鉱物が確認されなかったことが何らかの影響を与えたと考えられる。

5. 材料学的観点からみた風化特性

本研究では成沢累層の凝灰岩にスレーキング現象が起きることを明らかにすることができた。その原因は前述したとおり膨張性粘土鉱物および毛細管力が影響していると推測される。

また、スレーキング現象が起きた試料は約4サイクル目で損傷が止まる。このことから、石鳥居の場合、表面下でスレーキング現象が発生し、劣化部分が剥落することによって新しい新鮮な岩石の部分が露出し、このようなスレーキング現象が少しずつ繰り返されている可能性が考えられる。実際に石鳥居も多様な物理的損傷が確認されている。

しかし、本実験では成沢累層凝灰岩を対象にスレーキング現象が起きるのかというところに着目しており、今

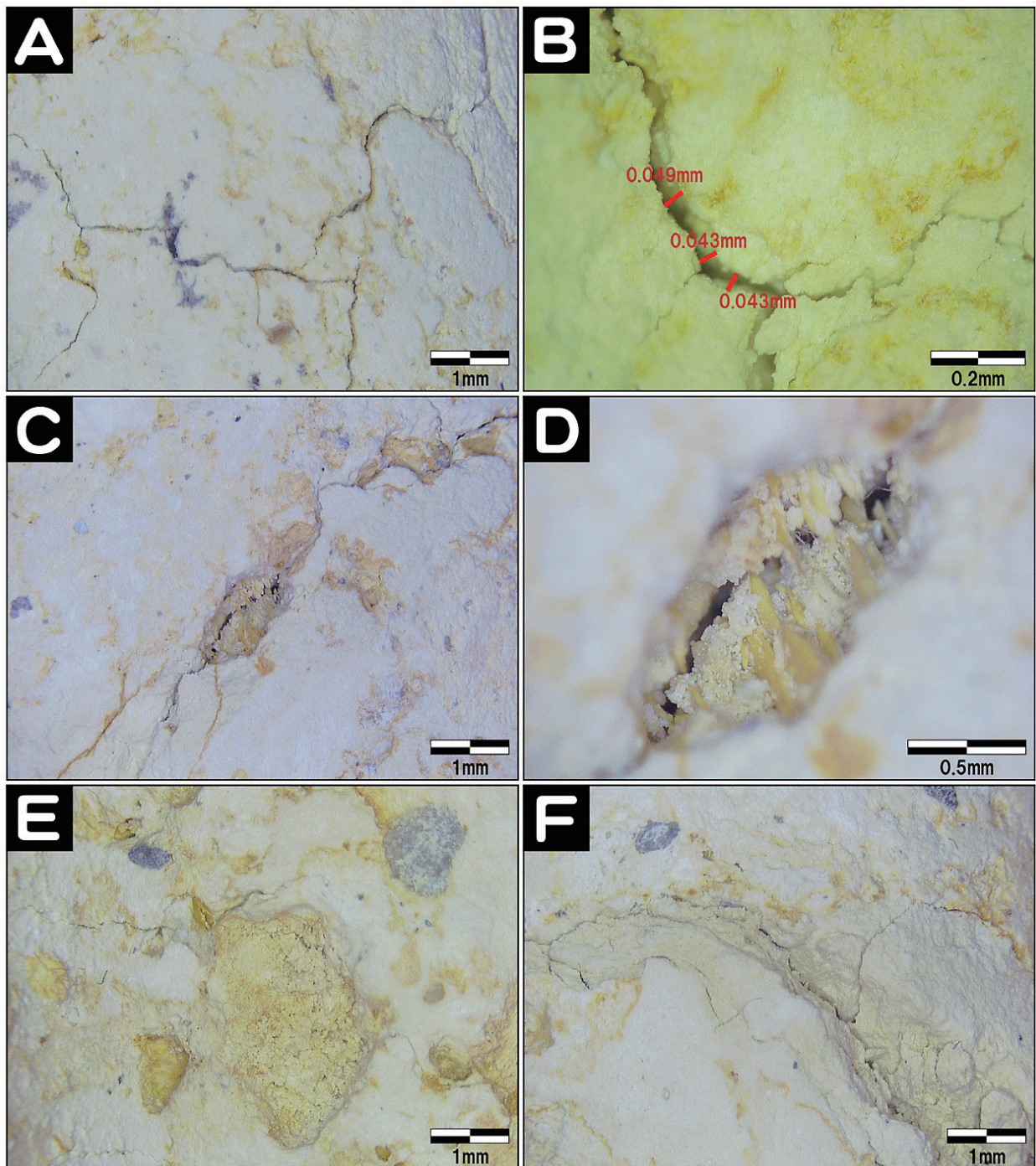


図6. 亀裂の様相

後、分析項目を増やして水分膨張のメカニズムの究明やそれらの風化現象に対する対処方法を検討する必要がある。

以上のことから鳥居は一年間通じて冬季には凍結融解現象が起き、それら以外の時期にはこのように乾湿を繰り返してスレーキング現象が起きていることが明らかとなった。

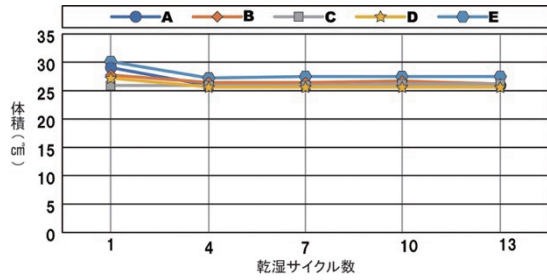


図7. AからEの体積変化グラフ

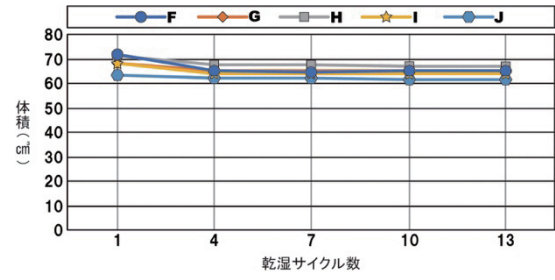


図9. AからEの空隙率変化グラフ

表1. AからEの体積 (cm³) 測定結果

サイクル	1	4	7	10	13
A	29.2	26.1	26.1	26.2	26.0
B	27.9	26.4	26.5	26.8	26.3
C	26.1	26.1	26.1	26.2	26.2
D	27.2	25.7	25.8	25.8	25.7
E	30.2	27.4	27.6	27.6	27.6

表3. AからEの空隙率 (%) 測定結果

サイクル	1	4	7	10	13
A	44.2	47.5	45.9	46.6	46.9
B	47.5	48.7	49.6	48.8	49.8
C	45.9	45.3	46.0	46.4	46.5
D	46.6	47.9	48.6	49.3	48.9
E	46.9	43.7	44.8	45.1	44.7

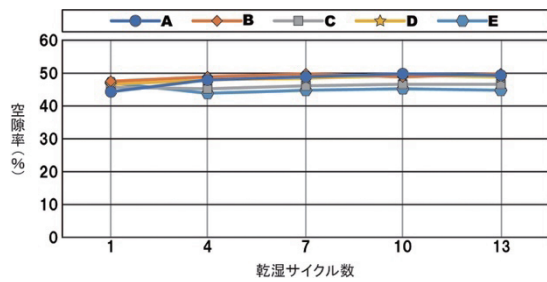


図8. FからJの体積変化グラフ

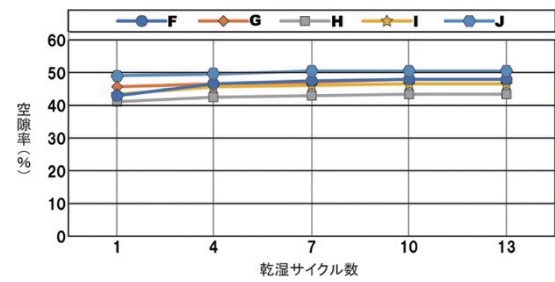


図10. FからJの空隙率変化グラフ

表2. FからJの体積 (cm³) 測定結果

サイクル	1	4	7	10	13
F	77.2	65.4	64.4	65.2	65.3
G	68.2	65.4	65.4	65.4	65.3
H	71.6	67.6	67.6	67.3	67.2
I	68.6	64.0	63.9	64.0	64.1
J	63.3	62.0	62.2	61.9	61.9

表4. FからJの空隙率 (%) 測定結果

サイクル	1	4	7	10	13
F	43.1	46.7	47.3	47.8	47.8
G	45.7	46.7	47.2	47.8	47.8
H	41.1	42.3	43.1	43.3	43.4
I	43.3	45.6	46.2	46.6	46.6
J	48.9	49.4	50.2	50.4	50.4

6. 結論

1. 材質分析の結果、軽石が多く含んでおり、珩長質鉱物以外にもゼオライトおよびスメクタイトが含まれていた。
2. ゼオライトは非常に吸水性が高く、スメクタイトは膨潤性粘土鉱物のため、スレーキング試験を行った結果、短いサイクルで激しい損傷が発生した。
3. 損傷が激しくなると細孔径が大きくなり粘土鉱物および毛細管力の影響が小さくなる。
4. 一年間通じて冬季には凍結融解現象が起き、それら以外の時期には乾湿を繰り返しスレーキング現象が起きていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 石崎武志、小柴まりな、澤田正昭『山形市の重要文化財「鳥居」の劣化に関する総合調査』平成29年度東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要 p15-22 (2017)
- 2) 石崎武志『重要文化財「鳥居」冬季養生の効果検証及び周辺環境調査』平成28年度東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要 p63-65 (2016)
- 3) 張大石『山形に伝わる日本最古の石鳥居群に用いられた凝灰岩の化学組成』平成19年度東北芸術

工科大学文化財保存修復研究センター紀要 p127-135 (2008)

- 4) 張大石『山形に残る日本最古の石鳥居群の現状』平成17年度東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要 p89-93 (2006)
- 5) 吉田三郎、加藤啓、鈴木生男、安彦宏人『表層地質』土地分類基本調査 山形p23-40 (1982)
- 6) 中田英二、小野雅弘、市原義久、飯島幸夫『地下水水質と堆積岩の急速スレーキング特性の関係』資源地質、56(2) p133-144, (2006)
- 7) 中田英二、大山隆弘、馬原保典、市原義久、松本裕之『海底下堆積岩の浸水崩壊特性と水質が強度・透水特性に与える影響』応用地質、第45巻、第2号 p71-82 (2004)
- 8) 吉田幸信、高田修三、横田公忠、矢田部龍一、『和泉層群の頁岩のスレーキング特性とメカニズムに関する一考察』土木学会論文集No.750 III-65 p15-25 (2003)
- 9) 地盤工学会編『岩の調査と試験』地盤工学、p410-418 (1989)
- 10) 石澤夏帆、米村祥央、石崎武志『寒冷地における石造文化財の劣化調査と保存対策に関する研究一石材の樹脂処理法を中心に一』平成29年度東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要 p23-30 (2017)