

## オーバル修道院で用いられている人工石材の風化に関する研究 Study in salt weathering of reconstituted stones used in the Orval Abbey, Belgium

グエン ティ ハイ デュン<sup>1\*</sup>, 藤巻 俊昭<sup>2</sup>, 小口 千明<sup>3</sup>  
NGUYEN, Thi Hai Duong<sup>1\*</sup>, FUJIMAKI, Toshiaki<sup>2</sup>, OGUCHI, Chiaki T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 埼大・工・建設, <sup>2</sup> 埼大・院, <sup>3</sup> 埼大・地圏セ

<sup>1</sup>Dept. Civil & Env. Eng., Saitama Univ., <sup>2</sup>Graduate School of Sci. & Eng., Saitama Univ., <sup>3</sup>GRIS, Saitama Univ.

人間は住環境をより良くするため、古来から様々な材料を試み、工夫を凝らしてきた。そのような材料の1つとして各種の岩石が使用され、多くの素晴らしい石造建造物が造られてきた。しかし、建設当初は美しい外観を呈す建造物も、時間と共に風化により、岩石表面が剥離したり変色したりしてしまう。このような風化を考慮する際には、岩石のもつ空隙構造や化学組成と、温度や水分状態などの周辺環境について調査されなければならない。近年、宗教施設の一般人への部分的開放で注目されているベルギー南部・ワロン地方のオーバル修道院においても、使用石材の塩類風化が深刻な問題となっている。既往の研究(大澤、2011; 藤巻、2011)により、析出塩類は主としてテナルダイト(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)であることが判明しているが、その起源について断言できるほどの証拠は持ち合わせていなかった。本研究では、同じ建造物を調査対象とし、使用されている石材が風化する原因について、フィールド調査と材料科学的調査の双方から明らかにすることを目的とする。

キーワード: 風化, 硫酸ナトリウム, テナルダイト, オーバル修道院, 人工石

Keywords: weathering, sodium sulphate, thenardite, Oval Abbey, reconstituted stone

## 建造物を構成する岩石の塩類風化に関する室内実験

## Influence of environmental conditions and test method on sodium sulfate weathering of four Japanese building stones

Swe Yu<sup>1\*</sup>, 小口 千明<sup>1</sup>

SWE, Yu<sup>1\*</sup>, OGUCHI, Chiaki T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学地圏科学研究センター, <sup>2</sup> 埼玉大学地圏科学研究センター

<sup>1</sup>Geosphere Research Institute of Saitama University, <sup>2</sup>Geosphere Research Institute of Saitama University

Many standard and laboratory salt weathering tests have been elaborated to investigate the mechanisms of salt damage, which have threatened our priceless cultural heritage made of porous stones. The tests are also used to investigate the relative destructiveness of salts, and durability of different rocks for selecting proper ones for restoration works. Some results of these studies, however, have become debatable due to employing different test methods and environmental conditions. So far, comparative studies about test conditions are scarce. In addition, there are arguments about sodium sulfate, which is the most widely used salt in laboratory tests, as to which phase of the salt, i.e. thenardite or mirabilite, is responsible for the sodium sulfate damage. To solve these arguments, a series of laboratory experiments was performed by using two types of salt supply techniques: continuous partial immersion (CPI) and cyclic total immersion (CTI). Both tests were conducted under three different environmental conditions: (i) 20°C and 60% RH for 24 h (CPI 1); (ii) 45°C and 40% RH for 24 h (CPI 2); (iii) 45°C and 30% RH for 12 h and 10°C and 70% RH for 12 h (CPI 3); (iv) 3 h immersion at 20°C, 19 h drying at 45°C, and 2 h cooling at 20°C (CTI 1); (v) 3 h immersion and 21 h drying at 45°C (CTI 2); and (vi) 3 h immersion at 20°C, 17 h drying at 105°C, and 4 h cooling at 20°C. CPI 2 and CTI 2 tests were designed to investigate the destructiveness of sheer thenardite. All tests were run for fifty 24-h cycles. Prismatic specimens (5 x 5 x 15 cm<sup>3</sup>) of four types of Japanese building stones, namely Oya Tuff, Ashino Tuff, Indian Sandstone, and Tago Sandstone were used. A range of hydromechanical properties were investigated. For salt supply, saturated sodium sulfate solution (at 20°C) was used in all tests. It is observed that durability ranking of the rocks did not perfectly reflect their hydromechanical properties. Oya Tuff was consistently the least salt resistance in all of the tests, mirroring its properties. However, in contrary to their hydromechanical properties, Tago Sandstone, Ashino Tuff, and Indian Sandstone showed different durability against sodium sulfate in different tests, indicating the unreliability of rock properties in predicting salt susceptibility. Differing to what have been perceived, at the same upper-limit temperature, CPI tests were found generally more destructive than CTI tests, except for the extraordinarily aggressive CTI 3 test driven by a very high drying temperature. The results of CPI 2 and CTI 2 tests revealed that thenardite alone could cause significant damage, although the induced damage was smaller than that of mirabilite-involved tests such as CTI 1, CTI 3, and CPI 3. This suggests that in addition to the immense power of mirabilite attack, the contribution of thenardite in rock decay during drying cannot be discounted in CTI tests. In fact, it was the cyclic conversion of thenardite-mirabilite mechanism, which causes severe damage, no matter what salt supply technique is employed. Moreover, the two salt supply techniques produced markedly different damage patterns: CTI tests induced granular disintegration, spalling, fragmentation, or crumbling, whereas CPI tests mainly produced scaling, cracking, or efflorescing depending on environmental conditions and rock properties. The reason behind this is the continuous accumulation of salts deep inside the CPI-specimens, which produced severe internal cracking and thick scaling, in contrast to the cyclic disintegration of outermost surfaces of CTI-specimens, which did not favor the salt accumulation.

キーワード: 塩類風化, 継続的部分浸漬, 全体浸漬サイクル, 硝石, 含水硫酸ナトリウム

Keywords: salt weathering, continuous partial immersion, cyclic total immersion, thenardite, mirabilite

## 石材の鉱物学的特性と色彩評価に関する研究 Mineralogical characterization of a stone by using colorimetry

中山 泰志<sup>1\*</sup>, 小口 千明<sup>2</sup>

NAKAYAMA, Taishi<sup>1\*</sup>, OGUCHI, Chiaki T.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大・工・建設, <sup>2</sup> 埼玉大・地圏セ

<sup>1</sup>GRIS, <sup>2</sup>GRIS, Saitama Univ.

“色”は風化を認識する際の手掛かりとして、破壊などと並び基本的な情報の一つである。岩石の色は、主として各構成鉱物の色と量比で決定されると考えられる。例えば、Nagano and Nakashima,(1989)は、花崗岩の風化の研究において、酸化鉄鉱物の量比と色の関係の検量線を作成し、分光測色から酸化鉄鉱物の種類や量比を識別できることを示した。このような手法は、化学分析では識別が難しい鉱物、特に粉末 X 線回析や顕微鏡下でのポイントカウンティングが困難な少量の鉱物の種類や量比を知るうえで極めて重要であると考えられる。

風化認識の際に鉱物種の特定制定というのはとても重要な情報である。一般的に鉱物種を特定する際に取られる手法は X 線粉末回析 (XRD) であるが、この手法は実験室に試料を持ち帰り分析する必要があるため、試料を持ち帰ることが困難な重要文化材や石碑などの測定には向いていない。そこで本研究では、近年フィールドワークにおいて色の定量的な記載や風化認定などに用いられている分光測色計を利用し、そこで得られる分光反射スペクトルから鉱物種を特定する手法の可能性について検討する。

キーワード: 鉱物種, 分光反射率スペクトル, 色測定

Keywords: mineral species, visible-reflectance spectrum, color measurement

## 秋吉台における石灰岩の溶解速度：野外風化実験と水文観測に基づく推定 Dissolution rate of limestone at a doline in the Akiyoshidai karst plateau

秋山 沙苗<sup>2</sup>, 八反地 剛<sup>1\*</sup>, 松四 雄騎<sup>3</sup>, 松倉 公憲<sup>4</sup>

Sanae Akiyama<sup>2</sup>, HATTANJI, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>, MATSUSHI, Yuki<sup>3</sup>, Yukinori Matsukura<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境系, <sup>2</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所, <sup>4</sup> 筑波大学

<sup>1</sup> Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, <sup>2</sup> Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, <sup>3</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>4</sup> University of Tsukuba

カルスト地域に見られる凹地(ドリーネ)の形成過程を議論する上で、ドリーネ内における石灰岩溶解速度の空間分布を明らかにすることは重要である。宇宙線生成核種年代測定法に基づき、長期間の平均的な溶解速度を求めた研究もあるが、今後の地形発達を予測する上では現在の環境における溶解速度を明らかにすることも重要である。そこで本研究では、山口県の秋吉台石灰岩台地にある円形ドリーネ(直径150m、深さ20m)を対象とし、現在のドリーネ地下の水文環境を明らかにするとともに、野外風化実験を行い石灰岩の溶解速度の規定要因を明らかにした。さらにこれらの結果を組み合わせ、ドリーネの現在の環境における石灰岩の溶解速度と、今後のドリーネ地形の発達について検討した。

ドリーネの地下構造を調べるため、比抵抗映像法を用いた2次元電気探査と簡易貫入試験を実施した。比抵抗値の空間分布と簡易貫入試験による基盤岩-土壌境界の結果を比較すると、比抵抗値300 m付近に存在する値の急遷部が基盤岩-土壌境界とほぼ一致した。基盤岩-土壌境界面は斜面上方ほど浅く、ドリーネ底部では深い傾向にあった。基盤岩の形状は滑らかではなく、一部が地表面に露岩として現れている場所もあった。また、基盤岩-土壌境界の上部に沿うように、低比抵抗値(~100 m)の層が存在した。この層は、地表面が非常に乾燥する時期にも存在していた。検土杖により採取した土壌の水分量測定によると、比抵抗値が120 mを示す付近では土壌水分飽和度90%(S3, 深さ70cm)、190 mを示す付近では土壌水分飽和度が83~87%(S1, 深さ50~100cm)であった。地下深部まで土壌粒子の構成や密度が同じだと仮定すると、基盤岩-土壌境界面の上部に存在する低比抵抗部は、土壌水分の飽和度がほぼ100%と推定される。

野外風化実験では、ドリーネの斜面上部(S1)、斜面中部(S3)、斜面下部(S5)、底部(S6)の4地点の土壌中(深さ50cm, S1とS5には更に深さ15cm)に合計6個のタブレット(秋吉台石灰岩, 阿武隈石灰岩の2種類: 直径3.5cm, 厚さ約1cm)を設置した。期間は2009年4月~11月(218日間), 2010年3月~2011年1月(307日間), 3月~11月(243日間)である。同時に実験地点において土壌水分と地温を連続観測し、二酸化炭素濃度と土壌水の水質は定期的に測定した。野外風化実験の結果、秋吉台石灰岩についてS1, S3の深さ50cmでは溶解速度が1.6~3.3%/yと大きく、斜面下部で0.11~0.55%/yと小さかった。ドリーネ底部では0.52~0.88%/yと中間の値であった。これら場所や年度による溶解速度の違いについて、水文観測の結果を説明変数とし回帰分析を行った。最も決定係数が大きいのは、土壌水分が飽和状態であった時間の割合との関係であった( $R^2=0.65$ )。さらに、土壌空気中の二酸化炭素濃度の平均値を説明変数に加えた重回帰分析を実施したところ、決定係数が上昇した( $R^2=0.74$ )。これは土壌水分が飽和状態にほとんどならない場所では二酸化炭素濃度の違いが溶解速度に影響するためと考えられる。土壌水の水質については、大部分でカルサイト飽和度が-1.0以下であり、十分な溶解能力をもった土壌水であった。

野外風化実験の結果から、土壌水分が一年を通して飽和状態である場所では3.9%/yの石灰岩溶解速度が推定された。すなわち、基盤岩-土壌境界付近の比抵抗値の低い層が一年を通して土壌水分飽和状態であると仮定すると、年間356 g/m<sup>2</sup>yの溶解速度に換算される。この結果は同じドリーネでの既存研究で宇宙線生成核種を用いて測定した長期溶解速度(63~256 g/m<sup>2</sup>y)の最大値と比べてやや大きい。地表付近の野外風化実験による溶解速度の値を換算すると10~298 g/m<sup>2</sup>yと長期溶解速度と同程度であり、現在の溶解速度は過去の値と比べてほぼ等しいかやや増加していることが推定される。また、低比抵抗層はドリーネの底部に限らず、斜面の一部の地下にも存在したことから、ドリーネの形状変化は斜面の一部と底部のいずれにおいても同程度の速度で進行していると予測される。

キーワード: 石灰岩, カルスト地形, ドリーネ, 電気探査, 溶解速度

Keywords: limestone, karst, doline, electric resistivity survey, dissolution rate

## 関東盆地中央部におけるコアサンプルの粒度分析と鉱物分析による液状化層位の検討 Granulomeric and mineralogic investigation of liquefaction induced by the 2011 megaquake at the Watarase flood-retarding

瀬戸 真之<sup>1\*</sup>, 浅井 崇彰<sup>2</sup>, 北沢 俊幸<sup>2</sup>, 小口 千明<sup>1</sup>, 田村 俊和<sup>2</sup>

SETO, Masayuki<sup>1\*</sup>, Takaaki Asai<sup>2</sup>, Toshiyuki Kitazawa<sup>2</sup>, OGUCHI, Chiaki T.<sup>1</sup>, TAMURA, Toshikazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学地圏科学研究センター, <sup>2</sup> 立正大学

<sup>1</sup> Geosphere Research Institute of Saitama University, <sup>2</sup> Rissho University

The 2011 Off Pacific Coast of Tohoku earthquake of Mw9, which recorded a seismic intensity of JMA scale 6 in central Kanto, induced liquefaction at the northwestern part of the Watarase flood-retarding basin in the central part of the Kanto basin. The area is located in a former pond into which floodwater of the Watarase river and a few tributaries flew frequently. We collected boiled sand and carried out boring investigation to loosely-deposited sand and mud alternation at four sites (sites A-D) to identify the layers which caused liquefaction. At site D, we had a 500cm deep core sample. We observed some layers; 0-30cm: artificial ground, 30-70cm: silt, 70-250cm: medium or fine sand, 250-400cm: clay, 400-500cm: medium sand. Ground water level was 200cm deep. Bowling sites A, B and C were almost similar to site D. Grading and mineral analyses carried out by liquefaction deposits and core samples. From the ground water level and grading and mineral analyses, we considered that liquefaction layer was the medium and fine sand of around 200cm deep. In comparison of granulometry and mineral composition of boiled sand with those of borehole-core samples below watertable, we identified the layers which were liquefied as follows: site A- medium and fine sand (134-157cm deep) and medium sand (187-232cm deep), site B-coarse or medium sand (160-195cm deep), site C- fine sand (193-255cm deep), site D-fine sand (210-245cm deep) and fine sand (399-422cm deep). All the liquefied sandy layers are correlated to the uppermost members of the Holocene deposits which were interpreted to have been formed during recent 2000years.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 液状化, 粒度分析, 鉱物分析, 関東盆地中央部, 渡良瀬遊水地

Keywords: The 2011 Off Pacific Coast of Tohoku earthquake, liquefaction, grading analysis, mineral analysis, central part of the Kanto basin, Watarase flood-retarding basin