# I 石造文化財の透水係数を現地で測定するための基礎的研究

荒木 徳人 ARAKI, Naruto / 芸術工学専攻文化財科学領域 博士 2 年

米村 祥央 YONEMURA, Sachio /文化財保存修復研究センター研究員・准教授

石﨑 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

石造文化財の劣化および保存を検討する上で重要になってくるのが診断調査である。診断調査とはあらゆる分析を通じて対象物の損傷状態の記録および損傷原因の究明を行い、これらのデータを用いて保存管理方法を検討していくことである。例えば、石材表面に析出した物質を同定するため、可搬型蛍光X線機器を用いて構成元素を把握することにより、析出原因の究明および除去方法の検討にも役立てることができる1)2)。

これら以外にも損傷状態の変化をモニタリングするための3次元分析や対象物周辺の環境を把握するための環境調査など様々な診断技術が発達してきた一方で、現在、石造文化財を診断する上で大きな課題となるのが透水性の把握である。非破壊分析を原則としている文化財を対象に透水試験を行うには、推定産地から試料を採取して室内実験を行うしか方法はない。しかし、産地推定を行うには石造物から剥落した試料を採取して、様々な分析を行わなければならず、分析に必要な剥落片もそれなりの量を必要とする。

また、石造物と産地から採取した岩石では劣化 状態が異なる。そのため、石造物に用いられてい る岩石の透水性を把握することは可能であるが、 石造物の現状の透水性を把握することは難しく、 これらに着目した研究が少ないことから現場で透 水性を測定できる方法を検討する必要性がある。

現在、屋外で岩石の透水係数を測定する方法として、ボーリング孔を利用した方法が一般的であるが、文化財には適していない方法である。そこで、本研究では現場で土壌の透水係数を測定する際に用いられるミニディスクインフィルトロメーター(METER社)に着目した(図1)。この方法はZhang(1997)によって提案された方法でどのような土壌でも現場で簡易的に透水係数を測定することができる $^{3)}$   $^{4)}$   $^{5)}$  。

特に、凝灰岩製の石造文化財が多い日本では凝 灰岩は多孔質であるため、土壌と透水係数が類似 していることからミニディスクインフィルトロ メーターを岩石の透水係数の測定に適用できると 仮定した。したがって、本研究では現場で透水係 数を測定するための基礎的研究として凝灰岩を対象に室内実験とミニディスクインフィルトロメーターで測定した透水係数ではどのくらい誤差が生じるのか把握した。



図1. ミニディスクインフィルトロメーター

# 2. ミニディスクインフィルトロメーター の原理

# 2-1. ミニディスクインフィルトロメーターとは

ミニディスクインフィルトロメーターは上下の チャンバーに水を入れて上部の可動式チューブで 負圧を調節し、ステンレスを焼結させた透水ディ スクを通じて水分が土壌に浸透していく仕組みに なっている。この装置は時間に対する累積浸透を 測定して次式の関数で示すことができる。

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t} \tag{1}$$

I: 累積浸透 (cm) t: 時間 (s)

 $C_1$ : 透水係数に関連するパラメーター (cm/s)  $C_2$ : 土壌の吸水性に関するパラメーター $(cm/s^{-0.5})$ 

また、透水係数は次式で求めることができる。

$$K = \frac{C_1}{A} \tag{2}$$

*K*: 透水係数 (cm/s)

C1:時間に対する累積浸透の平方根の曲線の傾き

A: 土壌タイプのvan Genuchtenパラメータ,吸引 速度,ディスクの半径に関連付ける値

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp\left[2.92(n - 1.9)a\,h\right]}{(ar_0)^{0.91}} \qquad n \le 1.9$$
 (3)

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)\exp\left[7.5(n - 1.9)ah_o\right]}{(ar_o)^{0.91}} \qquad n < 1.9$$
 (4)

n,a: van Genuchtenパラメータ $h_o$ : ディスク表面の吸引力 $r_o$ : ディスクの半径

測定方法は非常に簡単で先述した算出式が組み込まれたExcelプログラムを用いて、設定した負圧と土壌タイプをプロットして、時間とその時間までに浸透した水分量を入力することで不飽和透水係数を算出することができる。

しかし、設定できる負圧は0.5cmから7cmであ

るため、飽和に近い近傍飽和の範囲を測定していると考えられ、岩石に適用する前にミニディスクインフィルトロメーターの測定範囲を把握する必要がある。したがって、本項ではシルト質の土壌サンプルを対象にミニディスクインフィルトロメーターで測定した透水係数と別の方法で測定した飽和透水係数の結果を比較した。

## 2-2. 実験方法

ミニディスクインフィルトロメーターによる測定方法は上下のチャンバーに水を入れて上部の可動式チューブで負圧を2cmに設定して測定を行った(図2A)。また、飽和透水係数を測定するために用いた装置はMETER社のKSAT(図2B)で、この装置は飽和透水係数を完全自動で測定ができ、今回の測定方法は変水位法で行った。

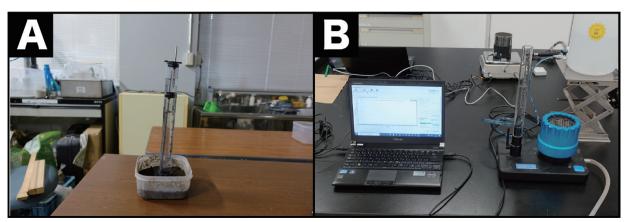


図2.透水係数の測定 (A)ミニディスクインフィルトロメーターによる測定 (B)KSATによる測定

#### 2-3. 実験結果

測定結果からミニディスクインフィルトロメーターで測定した透水係数とKSATで測定した透水係数が近いことから飽和に近い近傍飽和の状態の透水係数を測定しているといえる。

#### 表1. 透水係数の測定結果

測定機器	測定領域	透水係数(cm/s)
ミニディスクインフィルトロメーター	近傍飽和	$7 \times 10^{-6}$
KSAT	飽和	1×10 <sup>-5</sup>

## 3. 実験試料の岩石および鉱物学的特徴

序論でも述べたように、石造物と産地から採取した岩石では物性値が異なるため、本実験を行うにあたって経年的に劣化した試料が重要となる。そこで、本研究では2019年度に解体修復された国

宝当麻寺西塔の基壇外装の解体した石材を奈良県 文化財保存事務所の検討を経て當麻寺よりご提供 いただいた。まず、実験試料の岩石学的特徴を把 握するため、肉眼観察およびデジタルマイクロス コープによる観察を実施した。その結果、岩石の 色は全体的に灰色で部分的に珪長質鉱物と1mm 未満の白色の岩片が確認された(図3A,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火山灰などの火山砕屑物で構成されており、凝灰岩であると判断できる。主要構成鉱物は所々で微晶質の石英が観察され、約1mm未満の岩片も多く見られた(図3C,D)。礫などの大きい岩片が含まれていると水分を浸透する速度にばらつきが発生するが、この試料は組織的特徴がなく、石英および岩片の大きさも細粒

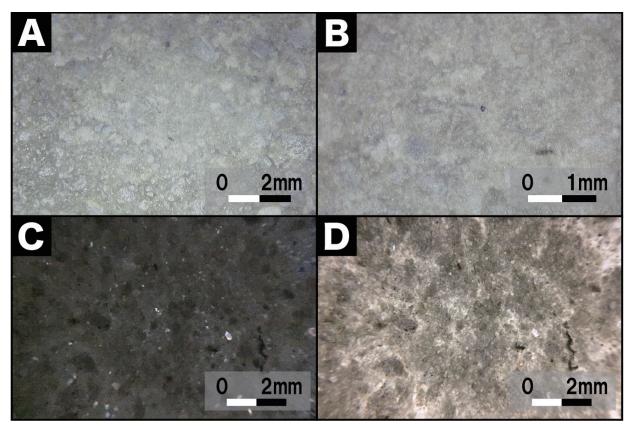


図3. 国宝当麻寺西塔の基壇外装の石材の岩石および鉱物学的特徴 (A)(B)マイクロスコーブ写真 (C)直交ニコル薄片写真 (D)開放ニコル薄片写真

# 4. 変水位試験による基準値の設定

#### 4-1. 実験方法

本研究では試料の基準値を設定するために、国 宝当麻寺西塔の解体した石材を対象に変水位法に よる飽和透水試験を行った。また、今回、データ の信頼度を上げるため変水位試験とミニディスク インフィルトロメーターによる実験に用いる試料 は同一の石材を使用した(図4)。



図4. 各実験に用いた石材

一般的な透水試験は石材のXYZ軸から円柱形の供試体を作成するが、これはあくまで岩石自体の新鮮な状態の透水係数を算出する際に行う方法である。しかし、本研究では石材表面から浸透する現状の透水性を把握することを目的としている。そのため、石材の一方向からボーリングを行い、半径2.5cm、高さ3.5cmの円柱形の供試体を2個(サンプル名:T-T1、T-T2)作成した(図5A)。

まず、変水位試験を行う前に基礎的な物性値となる吸水率および空隙率を算出するため、各試料の飽和重量と乾燥重量の測定を行った。飽和重量を測定する際に、試料が完全に浸漬するまで蒸留水を注ぎ、減圧状態で24時間浸漬させてから重量の測定を行った(図5B)。乾燥過程では24時間110℃で炉乾燥させて乾燥重量を測定した。これらの重量をもとに次式の算出方法で吸水率および空隙率を算出した。

$$Vv = \frac{1}{\rho_w} (Ww - W_d) \tag{5}$$

 $V_V$ : 空隙体積  $\rho_w$ : 水の密度

Ww:飽和重量 Wd:乾燥重量

$$w = \frac{Ww - W_d}{W_d} \times 100 \tag{6}$$

w: 吸水率

$$\phi = \frac{Vv}{Vt} \times 100 \tag{7}$$

 $\phi$ :空隙率 Vt:試料体積

変水位試験方法は飽和させた試料をステンレス 製の筒状の容器に入れた際、試料の外側に微細な 隙間が生じた。この状態では隙間から水が流れ、 正確な飽和透水係数を測定することができない。 そのため、隙間に透水性の低い粘土を詰めて粘土 部分にワセリンを塗布した(図5C)。また、隙 間を充填する作業を行う際に水分が蒸発した可能 性があるため、試料を蒸留水に24時間浸漬させた。この際に、減圧含浸しなかった理由としては、減圧過程で充填した粘土に隙間が発生する可能性があるからだ。変水位試験による飽和透水係数の算出方法は供試体に水が浸透することによってスタンドパイプ内の水位が低下していき、設定したラインまで低下する時間を記録して次式の算出方法で透水係数を算出した(図5D)<sup>6)</sup>。

$$K = 2.3 \frac{aL}{At} log \frac{h_1}{h_2}$$
 (8)

K:透水係数 (cm/s)

a:水位計の断面積 (cm) A:供試体の断面積 (cm)

L:供試体の長さ (cm) t:通水時間 (sec)

 $h_1$ :最初の水位計の水頭 (cm)  $h_2$ : t 秒後における水頭 (cm)

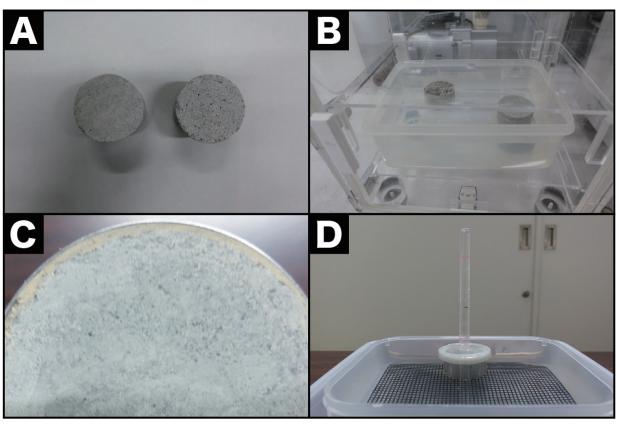


図5. 変水位試験 (A) 供試体の作成 (B) 滅圧含浸(C) ステンレス製の筒状の隙間を充填 (D) 変水位試験の様子

#### 4-2. 実験結果

試料ごとで各物性値の大きなばらつきはみられず、吸水率および空隙率が高く、透水性も岩石の中では比較的高いことがわかる(表 2)。したがって、本研究では変水位試験による結果から $2\times10^5$   $\sim1\times10^5$  を基準値として定めた。

表2. 変水位試験による物性値の算出結果

サンプル名	吸水率(%)	空隙率(%)	透水係数(cm/s)
T-T 1	17.3	28.4	$2 \times 10^{-5}$
T-T 2	16.8	27.7	$1 \times 10^{-5}$

# <u>5. ミニディスクインフィルトロメーター</u> による透水試験

## 5-1. 実験方法

本実験ではミニディスクインフィルトロメーターを用いて石材の透水係数を測定し、基準値と どのくらい誤差が生じるのか明らかにすることを 目的としている。測定地点は現場で測定することを想定して、石材表面の状態が異なる4箇所の測定地点を設定した(図6)。測定地点Aは表面状態が良好で、測定地点Bは一部鉱物によって表面に凹凸がある。測定地点Cは微細な亀裂があり、測定地点Dは欠損のため窪みが生じている。

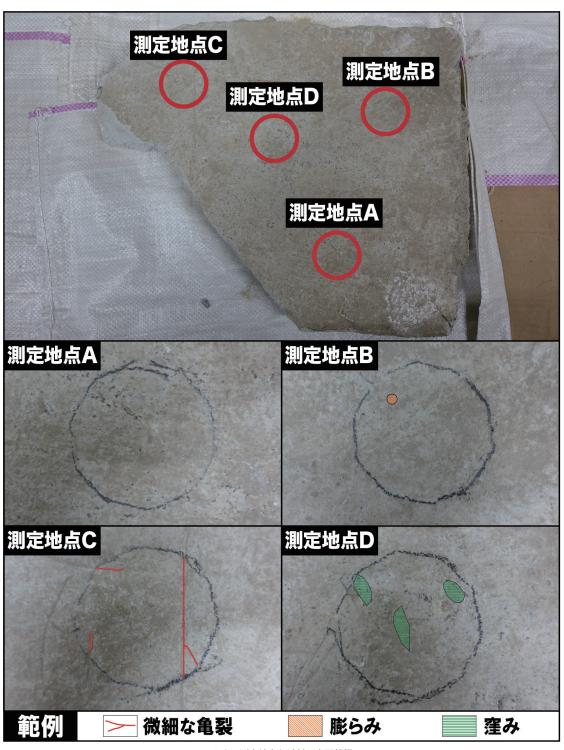


図6. 測定地点と試料の表面状態

測定時の負圧は2cmに設定し、透水係数を算出する際に設定した土壌タイプは変水位試験で算出した透水係数がシルト質の土壌と類似していることからシルトと設定し、各測定地点100分を基準に10分ごとに何ml浸透するのか記録して透水係数を算出した(図7)。



図7. ミニディスクインフィルトロメーターを用いた測定の様子

### 5-2. 実験結果

測定地点AとBの結果をみてみると、変水位試験から得た測定結果の $2\times10^5\sim1\times10^5$ 内であることがわかる。しかし、測定地点BとCの2回目の測定をみてみると、BよりCの浸透量が多いのに

も関わらず、Cの透水係数が低いという結果を示した。これに関しては、時間に対する累積浸透の平方根の曲線の傾きを用いて計算するため、浸透速度が不規則な場合このような誤差が発生すると考えられる(表3)。

測定終了後に撮影した写真で、黒い円は測定地点でどのように水が浸透していったのかわかる(図8)。測定地点Aは他の地点と比べて、測定地点を中心に綺麗な円になっていることから、浸透するのに比較的ばらつきが少ないことがわかる。以上の結果から浸透速度のばらつきが少ない測定地点Aに関しては他の地点と比べて正確に透水係数を測定することができたと判断できる。また、A以外の地点で浸透にばらつきがみられる事やAと比べてCとDの透水係数が低い原因として石材表面の損傷状態が関係していると考えられる。

表3. 浸透量および透水係数の算出結果

	1 🗵	1回目		2回目	
測定地点	浸透量	透水係数	浸透量	透水係数	
	(ml)	(cm/s)	(ml)	(cm/s)	
А	19	$1 \times 10^{-5}$	19	$2 \times 10^{-5}$	
В	12	$1 \times 10^{-5}$	11	$1 \times 10^{-5}$	
С	9	$9 \times 10^{-6}$	14	$9 \times 10^{-6}$	
D	12	$8 \times 10^{-6}$	14	$1 \times 10^{-5}$	

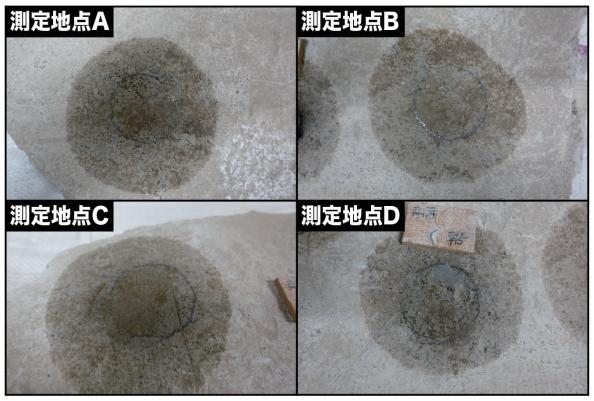


図8.1回目の測定後の浸透度合いの様子

# 6. 石材表面の凹凸による誤差の改善策

## 6-1. 実験方法

ミニディスクインフィルトロメーターの測定条件の一つとして水を浸透させる透水ディスク全体が土壌に接することである。しかし、実際の現場は平ではない土壌環境が多い。そのため、土壌表面の凹凸をなくすために用いられるのが硅砂であ

る。硅砂などの砂は透水性が高いため、ある程度 の量であれば、それほど分析データに影響を与え ることはない。したがって、本実験では石材の表 面状態が良好ではない場合、砂を石材の表面に散 布することによって数値の誤差を解消することが できるのか明らかにするため、測定地点に豊浦硅 砂を散布して測定を行なった(図9)。

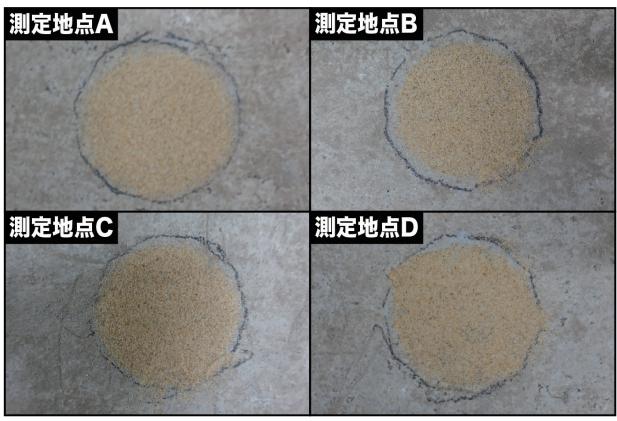


図9. 各測定地点に豊浦珪砂を散布した様子

#### 6-2. 実験結果

1回目の測定はすべての測定地点で透水係数が 基準値と同じ数値を示した(表 4)。また、測定 後の写真を見てみると豊浦硅砂を散布することに よって、ばらつきがなく浸透していることがわか る(図10)。しかし、測定地点Dの2回目の測定 に関しては透水係数が大きく異なった。この原因 として考えられるのが表面の損傷状態と豊浦硅砂 の散布量の違いである。測定地点Dは石材表面に 欠損部があることから、豊浦硅砂を比較的、多く 散布した。散布する際に量を調節するのが難しく、 他の地点より測定する度に豊浦硅砂の量が異なる ことが影響していると考えられる。以上の結果か ら表面の損傷状態がそれほどひどくなければ、砂 を散布することによって浸透速度のばらつきを制 御でき、透水係数を測定できることが明らかと なった。

表4. 豊浦珪砂を散布した際の浸透量および透水係数の算出結果

	1 🗵	可目	2回目		
測定地点	浸透量	透水係数	浸透量	透水係数	
	(ml)	(cm/s)	(ml)	(cm/s)	
А	22	$1 \times 10^{-5}$	19	$1 \times 10^{-5}$	
В	18	1×10 <sup>-5</sup>	19	$1 \times 10^{-5}$	
С	21	$1 \times 10^{-5}$	17	1×10 <sup>-5</sup>	
D	19	$1 \times 10^{-5}$	16	$7 \times 10^{-6}$	

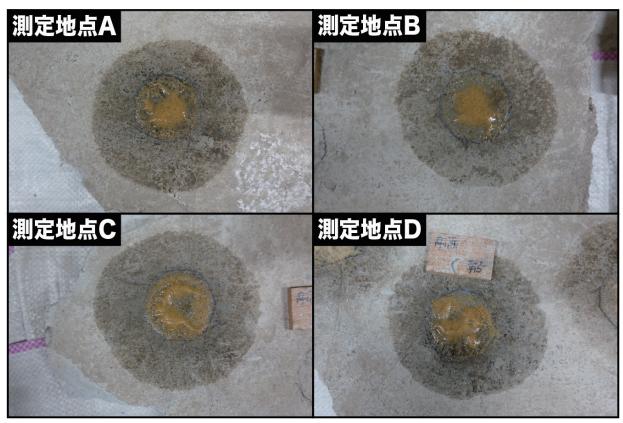


図10. 豊浦珪砂を散布した1回目の測定後の浸透度合いの様子

## 7. 角度による透水係数の違い

#### 7-1. 実験方法

ミニディスクインフィルトロメーターのもう一つの測定条件として測定する際に浸透計が傾かない事である。基本的に傾斜があると一方向に浸透しやすくなるため、浸透速度にばらつきが生じる。しかし、石造文化財を測定する際には基本的に傾斜は存在する。したがって、本実験では角度によって透水係数がどのように変化するのかを把握するために、1°から5°の角度をデジタル角度計で調節して石材を傾け実験を行った。また、測定地点に豊浦硅砂を散布した。

#### 7-2. 実験結果

測定地点Aは1°から3°にかけて基準値と同じ透水係数が、Bに関しては1°から4°にかけて基準値と同じ透水係数が算出された(表5,表6)。測定地点Cは1°と4°で基準値と同じ透水係数が算出されたが、2°と3°では透水係数が異なるため、測定地点Dの結果も踏まえて表面状態に亀裂や欠損部が存在するところでは角度が少し変わるだけでも測定が困難になると判断できる。その一方で、表面状態に少し凹凸がある程度なら1°から3°までは測定が可能であるということが、この実験結果から判断できる。

表5. 角度の違いによる浸透量および透水係数の算出結果1

	1	0	2°		3°	
測定地点	浸透量	透水係数	浸透量	透水係数	浸透量	透水係数
	(ml)	(cm/s)	(ml)	(cm/s)	(ml)	(cm/s)
A	18	$1 \times 10^{-5}$	22	$1 \times 10^{-5}$	21	$1 \times 10^{-5}$
В	19	$1 \times 10^{-5}$	18	$1 \times 10^{-5}$	23	$1 \times 10^{-5}$
С	20	$1 \times 10^{-5}$	18	$9 \times 10^{-6}$	20	$9 \times 10^{-6}$
D	17	$6 \times 10^{-6}$	18	8×10 <sup>-6</sup>	20	$9 \times 10^{-6}$

表6. 角度の違いによる浸透量および透水係数の算出結果2

	4	0	5°		
測定地点	浸透量	透水係数	浸透量	透水係数	
	(ml)	(cm/s)	(ml)	(cm/s)	
А	20	6×10 <sup>-6</sup>	19	$9 \times 10^{-6}$	
В	18	$1 \times 10^{-5}$	18	$5 \times 10^{-6}$	
С	22	1×10 <sup>-5</sup>	15	5×10 <sup>-6</sup>	
D	16	$5 \times 10^{-6}$	17	$4 \times 10^{-6}$	

# 8. まとめ

本研究では石造文化財の透水係数を現場でミニディスクインフィルトロメーターを用いて測定できる可能性を見出すことができた。表面状態が良好で1°から3°までであれば、現場で透水係数を測定することができ、表面に多少の凹凸があっても水平であれば砂を散布して凹凸をなくすことで測定が可能になるということが明らかとなった。

浸透速度のばらつきによる誤差を解決する方法として最も有効的であると考えられるのが測定時間を長くすることである。本研究では100分を基準に10分ごとに何ml浸透するのか記録していたが、この10分という間隔を伸ばすことによって浸透速度のばらつきによる誤差は少なくなると考えられる。

また、ここで一つ考えなければならないのが データの許容誤差である。岩石の透水係数はもち ろん岩石の種類によって異なるが頁岩の場合、 オーダーの範囲が広い。これを踏まえて今回、す べての実験で算出した透水係数をみると許容誤差 範囲内であるものが多いが、文化財を対象として 測定する場合、どのくらい厳密な数値を求めるの か今後、検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究で用いた石材は當麻寺のご住職である山 下真弘様にご提供いただいた。また、石材の選別 には奈良県文化財保存事務所の当麻寺出張所主任 である山下秀樹様にご協力いただいた。本研究は 皆様のご協力を得て実施できましたことを、ここ に記し感謝申し上げます。

#### 参考文献

 Chan Hee Lee, Naruto Araki,2019
"Evaluation of Nondestructive Diagnosis and Material Characteristics of Stone Lantern at Damyang Gaeseonsaji Temple Site in Korea"

- Journal of Conservation Science. Volume 35(4) 279-293
- 2) Sung Han Kim, Chan Hee Lee and Naruto Araki,2017. "Analysis of Surface Contaminants and Deterioration Degree on the Seated Stone Statue of Buddhist Master Seungga at Seunggasa Temple in Seoul, Korea", Economic and Environmental Geology. Vol.50, No.6, 497-508.
- 3) Dohnal, M., J. Dusek, and T. Vogel, 2010. "Improving hydraulic conductivity estimates from Minidisk Infiltrometer measurements for soils with wide pore-size distributions" *Soil Sci. Soc. Am.* J. 74:804-811.
- 4) Hallet, P.D., Baumgartl, T. Young, I.M. 2001. "Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 184-190.
- 5) Zhang, R. 1997. "Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1024-1030
- 6)高橋学、張銘、江崎哲郎、坂井健太郎『室内 透水試験法について』応用地質第39巻第3号 p315-321(1998)