

Ⅲ 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 —石材の樹脂処理法を中心に—

石澤夏帆 ISHIZAWA, Kaho／芸術文化専攻保存修復領域 修士2年

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

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. 緒言

岩手県平泉の毛越寺庭園遣水の景石は石の割れや表面の剥離が激しいため、保存処理が検討されている（図1）。石の劣化には様々な要因があるが、特に、気温の変動が0℃を上下し、岩石内の水分の凍結で引き起こされる石の凍結破壊は、岩手県という寒冷地にある景石の劣化の主な要因と考えられる。樹脂含浸強化法は、石材に樹脂を浸透させ石材を強化する方法で行われる。樹脂処理による凍結破壊防止の研究や事例は、日本において岩石材料として占める割合の多い凝灰岩を中心に行われており、粘板岩についての検証は行われていないのが現状である。凝灰岩と粘板岩は石の性質が異なるため、本研究では粘板岩の凍結破壊防止のための有効な樹脂処理の方法の検証を目的とする。



図1. 毛越寺庭園遣水の景石の劣化

2. 毛越寺庭園について

毛越寺境内は名称「毛越寺境内附鎮守社跡」として大正11（1922）年に国指定史跡、昭和27（1952）年に国指定特別史跡に指定され、「毛越寺庭園」も昭和32（1957）年に国指定名勝、昭和34年（1959）に国指定特別名勝に指定された。さらに平成23（2011）年に名称「平泉－仏国土（浄土）を表す建築・庭園及び考古学的遺跡群－」の構成資産の一つとしてユネスコの世界遺産に登録された。毛越寺庭園は浄土庭園の風景を保っていくことで、文化遺産の活用のための役割を担っていると言える。

3. 毛越寺庭園遣水景石と凍結破壊

岩石の凍結破壊の要因として岩質・水分供給・寒冷度の3条件があるとされ、このうち1つを取り除くことで石造文化財の凍結破壊を防止することが可能とされている。この3条件を踏まえ、毛越寺庭園遣水の景石の調査を行った。

寒冷度について、毛越寺庭園遣水付近の気温は±4℃以上を行き来する回数が1、2月に特に多く見られる（図2）。景石の表面（図3）および地表面（図4）の温度データからは、景石や地表が、気温に伴って温度変化を繰り返していることがわかる。図3、図4で1月中旬から下旬にかけて温度変化が小さくなっているのは、この時期に積雪があり、この積雪層が断熱層となっていたためであると考えられる。

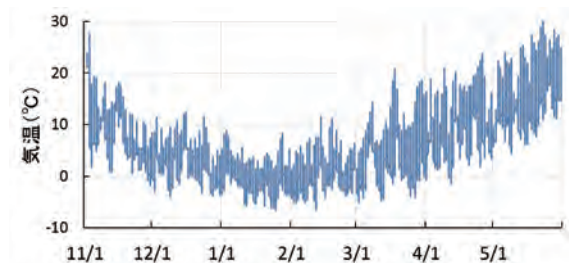


図2. 毛越寺庭園遣水付近の気温

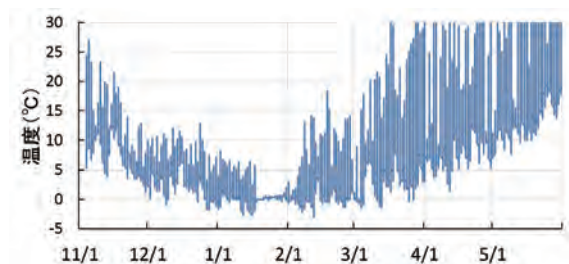


図3. 景石表面の温度

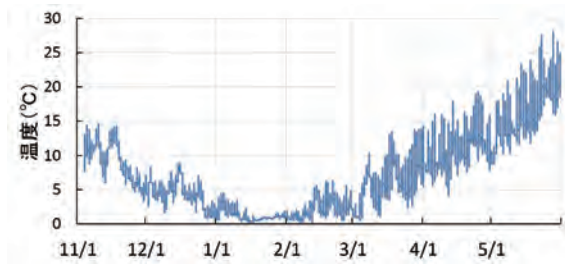


図4. 遺水付近の地表温度

水分供給については、景石が置かれている遺水には常時水が流れており石は水と接している状態である（図5）。また、景石は土壌と接しているため、景石全面が外部から継続的に水分供給される環境にあると言える。



図5. 遺水の景石の様子

岩質について景石と凝灰岩（小樽軟石）を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し空隙を比較したところ、小樽軟石（図6）と比較して、景石（図7）の空隙が少ないことが分かった。

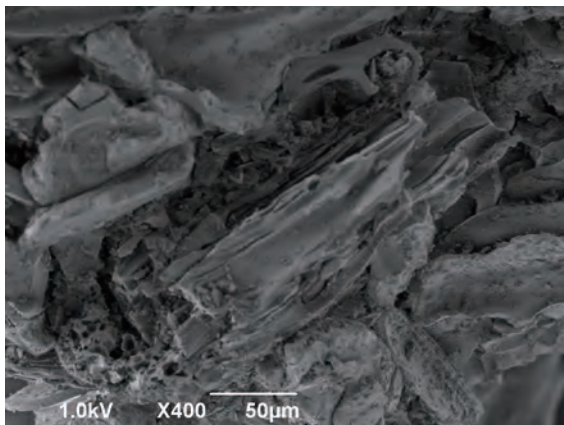


図6. 小樽軟石のSEM画像

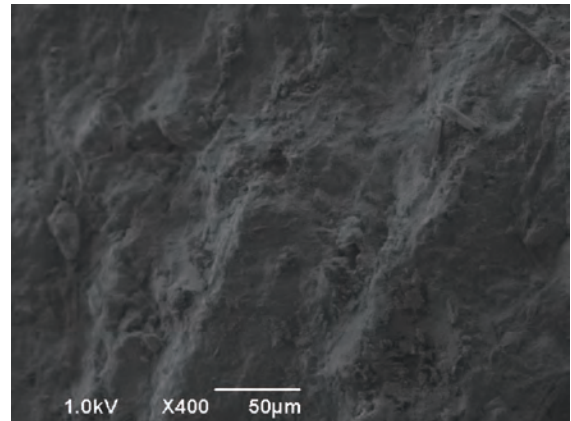


図7. 景石のSEM画像

毛越寺庭園遺水では、気温が $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以上を行き来する期間があるため、凍結融解が起こりやすい環境であると言える。岩石についても、毛越寺庭園遺水で劣化している景石には粘板岩以外もあるが、凝灰岩のように全体的に消耗していくのではなく層状に割れ風化していく特性の粘板岩が特徴的なものとして見られる。遺水には水流があることや景石の割れた断面に大量の土が付着していたことから、土や枯れ草も一因であると思われるが、石の崩壊には大きな力が必要となるため、凍結融解が主な要因と考えられる。

4. 凍結融解防止の実験

樹脂強化法は主に塗布法、浸漬法、減圧含浸法の3つの方法がある。塗布法は、岩石の表面に合成樹脂を塗布し染み込ませる方法、漬浸法は、岩石を合成樹脂の入った槽に一定時間漬浸する方法、減圧含浸法は、岩石を合成樹脂に浸した状態で真空ポンプ等で減圧する方法である。本実験は、これらの樹脂強化法と岩石の凍結融解耐性の関係を明らかにすることを目的とした。この実験において、岩石の空隙率による差異についても観察するため、それぞれに空隙率の異なる岩石サンプルを用意し比較した。

4-1. 予備実験

樹脂含浸処理において広く使用されている合成樹脂Wacker OH100は水と粘度がほぼ同等であるため、岩石への含浸比もほぼ同様の結果になると考えられる。予備実験として、Wacker OH100と蒸留水の岩石への浸透を比較するため、それぞれの重量含水比を測定した。使用した岩石サンプルは以下の通りである。

1. 凝灰岩（小樽軟石）
2. 凝灰岩（成沢地区産）
3. デイサイト質溶結凝灰岩（白河石）
4. 泥岩（毛越寺庭園遣水景石）

測定結果は代表として小樽軟石の結果を載せた（図9、10）。全てのサンプルの結果は、論文末に表として掲載した（表8）。

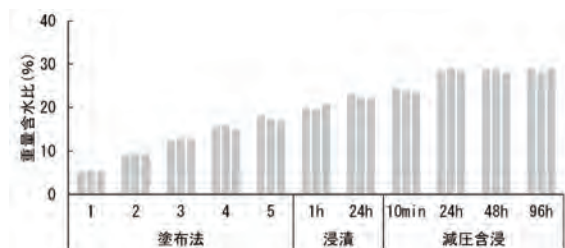


図8. 小樽軟石の重量含浸比（蒸留水）

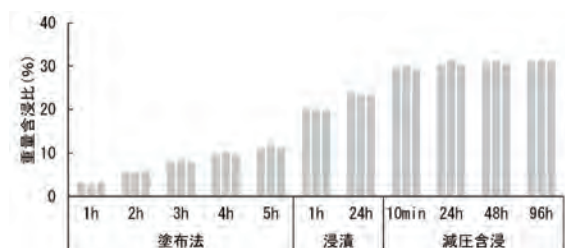


図9. 樽軟石の重量含浸比（Wacker OH100）

蒸留水とWacker OH100の含浸比を比較したところ、どのサンプル、含浸条件においても、ほぼ同様の数値が得られた。従って蒸留水の含水から得られる浸透過程の評価は、Wacker OH100含浸の考察において有用であると言える。以降の実験では蒸留水含水の実験の結果をもとに考察を進めていくこととする。

4-2. 含浸方法による樹脂の浸透

本実験では、樹脂含浸方法による岩石への樹脂の浸透の違いを検証した。“4-1. 予備実験”の結果を受けて、蒸留水の体積含水率を樹脂含浸と同等の結果として取り扱った。使用した岩石サンプルは予備実験と同様で、条件は以下の通りである（表1）。

表1. 含水の条件

●回数と時間

- 塗布法……………全5回
- 浸漬……………1時間、24時間
- 減圧含浸……………10分、24時間、48時間、96時間

●減圧含浸の圧力

- 1気圧、0.7気圧、0.3気圧、0.05気圧

実験の結果はグラフ（図10、11、12、13）と表（表2、3、4、5）の通りになった。含浸方法による樹脂の浸透については、4種の試料全てにおいて、塗布<浸漬<減圧含浸の順に有効であることが再確認されたが、白河石や景石のような空隙率の小さい岩石については、空隙率の大きい凝灰岩と比較し含浸方法による浸透の差が少なかった。減圧含浸の際の減圧度については、景石のような空隙率の低い岩石では、含浸方法による液体の浸透の違いは見られたが、空隙率の大きい凝灰岩と比較し浸漬法や減圧含浸による体積含水率の伸びが小さいことがわかった。

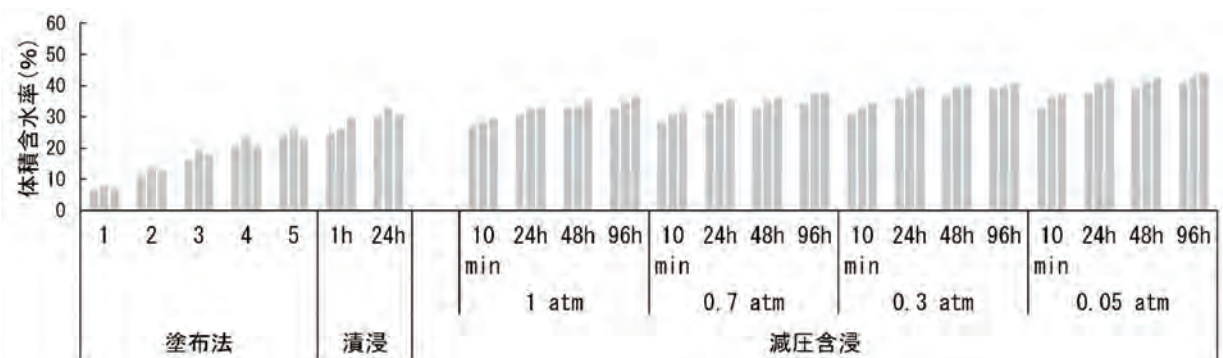


図10. 小樽軟石

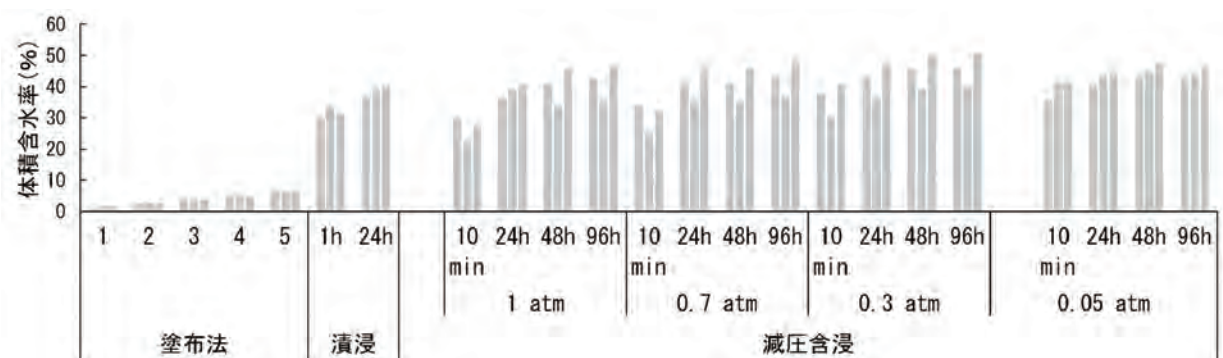


図11. 成沢地区凝灰岩

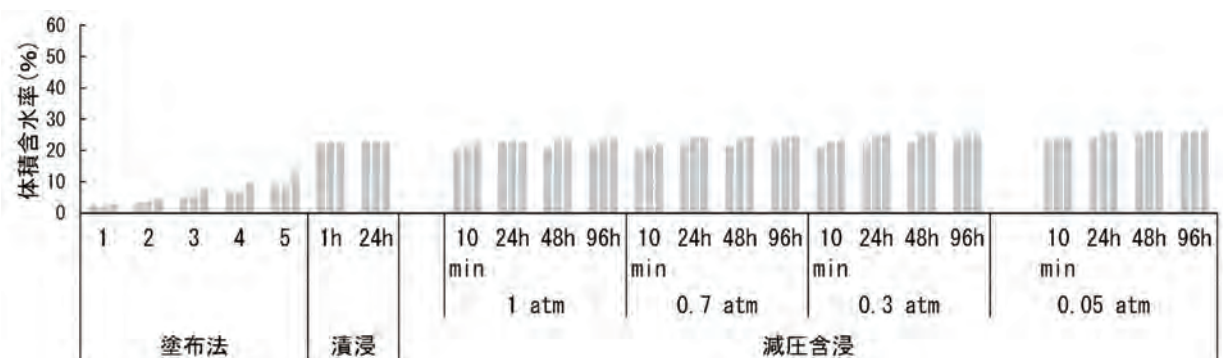


図12. 白河石

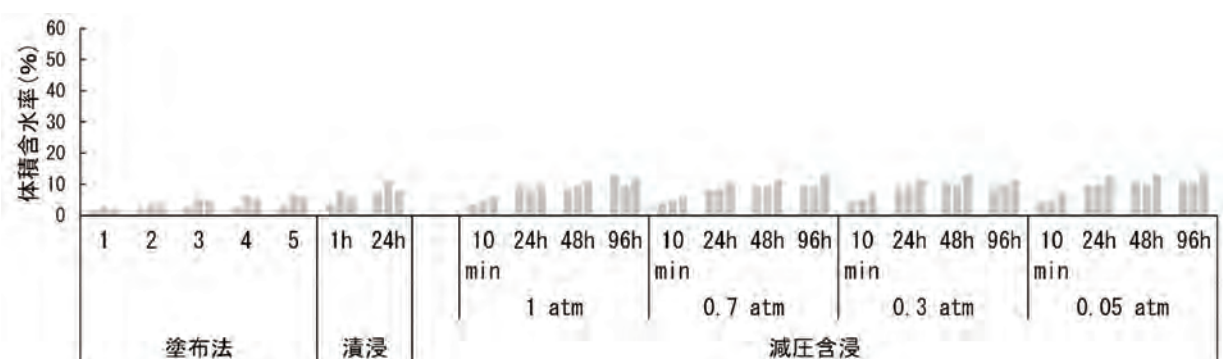


図13. 毛越寺庭園遣水景石

表2. 小樽軟石

	塗布					浸漬		減圧含浸													
	1	2	3	4	5	1h	24h		1気圧				0.7気圧				0.3気圧				
									10min	24h	48h	96h	10min	24h	48h	96h	10min	24h	48h	96h	
OA1	6.7	11.6	16.2	20.5	23.8	24.9	30.4	OA4	27.0	30.6	32.4	32.7	28.3	31.5	32.5	34.5	30.6	35.6	36.9	38.8	
OB2	7.8	14.2	19.3	23.3	25.6	26.4	32.8	OB5	28.4	32.4	33.4	34.9	30.7	34.6	35.1	37.2	33.1	38.1	39.4	39.7	
OC3	7.3	12.9	17.8	20.5	23.0	29.8	30.6	OC6	29.5	33.0	35.2	36.1	31.8	35.2	36.2	37.9	34.7	39.6	40.0	40.8	
ave.	7.3	12.9	17.8	21.4	24.1	27.0	31.3	ave.	28.3	32.0	33.7	34.6	30.3	33.8	34.6	36.5	32.8	37.8	38.8	39.8	

表3. 成沢地区凝灰岩

	塗布					浸漬		減圧含浸													
	1	2	3	4	5	1h	24h		1気圧				0.7気圧				0.3気圧				
									10min	24h	48h	96h	10min	24h	48h	96h	10min	24h	48h	96h	
NA1	1.0	2.6	4.0	5.3	6.8	29.7	36.3	NA4	29.7	36.3	41.0	42.3	34.1	41.5	41.4	43.4	38.0	43.3	45.5	45.6	
NB2	1.5	2.8	4.1	5.4	6.6	33.6	39.0	NB5	22.3	39.0	34.2	35.4	25.2	34.9	35.1	37.0	30.7	36.4	39.2	39.6	
NC3	1.5	2.5	3.8	5.0	6.3	31.4	40.6	NC6	27.7	40.6	45.4	46.6	32.0	45.5	45.8	48.2	40.7	47.6	50.2	50.9	
ave.	1.3	2.6	4.0	5.2	6.6	31.5	38.6	ave.	26.6	38.6	40.2	41.5	30.4	40.6	40.7	42.9	36.5	42.4	45.0	45.4	

表4. 白河石

	塗布					浸漬		減圧含浸													
	1	2	3	4	5	1h	24h		1気圧				0.7気圧				0.3気圧				
									10min	24h	48h	96h	10min	24h	48h	96h	10min	24h	48h	96h	
SA1	2.5	3.3	5.3	6.9	8.9	22.2	22.9	SA4	19.7	22.9	20.9	21.6	19.7	21.6	21.6	22.2	20.7	22.3	22.6	23.0	
SB2	2.3	3.6	5.2	6.9	8.8	22.6	23.0	SB5	21.5	23.0	23.2	23.6	21.6	23.9	23.5	24.1	22.9	24.8	25.3	25.0	
SC3	2.7	4.7	7.7	9.7	12.7	22.6	22.7	SC6	22.2	22.7	23.5	23.9	22.2	24.1	24.2	24.7	23.3	25.2	25.4	25.5	
ave.	2.5	3.9	6.0	7.9	10.1	22.5	22.9	ave.	21.1	22.9	22.6	23.0	21.2	23.2	23.1	23.7	22.3	24.1	24.4	24.5	

表5. 毛越寺庭園遺水景石

	塗布					浸漬			減圧含浸											
	1	2	3	4	5	1h	24h		1気圧				0.7気圧				0.3気圧			
									10mi	24h	48h	96h	10mi	24h	48h	96h	10mi	24h	48h	96h
KA1	1.5	2.2	2.5	2.6	3.3	3.5	7.1	KA4	3.5	9.1	8.6	12.8	3.8	8.3	9.1	9.3	4.2	8.5	10.1	8.6
KB2	2.5	3.6	5.2	6.2	6.7	7.6	11.1	KB5	4.2	8.5	9.3	9.3	4.4	8.6	9.1	9.0	5.1	9.1	9.9	9.9
KC3	2.3	3.5	4.8	5.3	5.6	5.6	7.9	KC6	5.7	10.0	10.9	12.2	6.0	10.5	11.4	12.6	7.2	11.5	12.9	11.8
ave.	2.1	3.1	4.2	4.7	5.2	5.6	8.7	ave.	4.4	9.2	9.6	11.4	4.7	9.1	9.9	10.3	5.5	9.7	11.0	10.1

4-3. 凍結融解耐性の実験

“4-2. 含浸方法による樹脂の浸透”の実験結果を踏まえ、岩石への樹脂の浸透と凍結融解への耐性の関係について検証した。実験試料として、大きな劣化した粘板岩試料が得られなかったため、劣化していない粘板岩（雄勝石）を用いた。

- ・ 無処理
- ・ 塗布法……全5回
- ・ 浸漬……94時間以上
- ・ 減圧含浸…0.05気圧で94時間以上

実験試料

1. 凝灰岩（成沢地区産）
2. デイサイト質溶結凝灰岩（白河石）
3. 粘板岩（雄勝石）

実験方法

- 1) それぞれの岩石を直径5cm高さ3cmで裁断し、1種につき12個の試料を用意した。
- 2) 以下のようにサンプルをWacker OH100に含浸し、体積含浸率を測定した（図14、15、16、表6、7、8）。

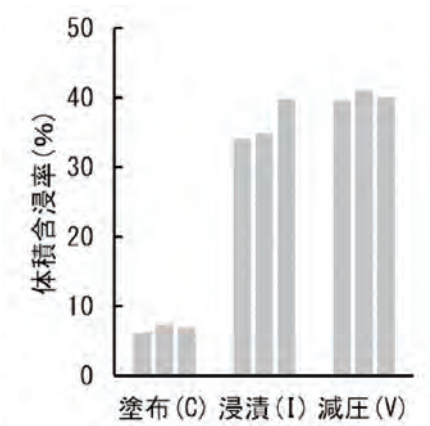


図14. 成沢地区凝灰岩の樹脂含浸率

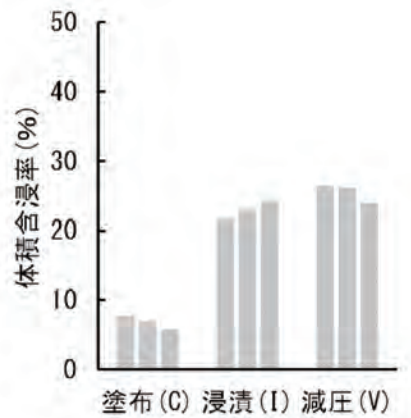


図15. 白河石の樹脂含浸率

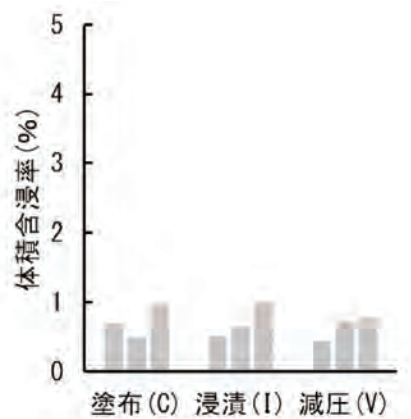


図16. 雄勝石の樹脂含浸率

表6. 成沢地区凝灰岩の樹脂含浸率

	塗布(C)	浸漬(I)	減圧(V)
a	6.2	34.0	39.6
b	7.2	34.8	41.1
c	6.9	39.8	40.0
ave.	6.8	36.2	40.2

表7. 白河石の樹脂含浸率

	塗布(C)	浸漬(I)	減圧(V)
a	7.8	21.6	26.3
b	7.1	22.9	26.1
c	5.8	24.2	23.8
ave.	6.9	22.9	25.4

表8. 雄勝石の樹脂含浸率

	塗布(C)	浸漬(I)	減圧(V)
a	0.7	0.5	0.4
b	0.5	0.7	0.7
c	1.0	1.0	0.8
ave.	0.7	0.7	0.6

4) サンプル周辺の気温が、約 $+5^{\circ}\text{C}$ ～ -5°C の間で変動するように低温恒温恒湿機を設定し各温度2時間ずつ、1サイクル4時間で凍結融解試験を行った。

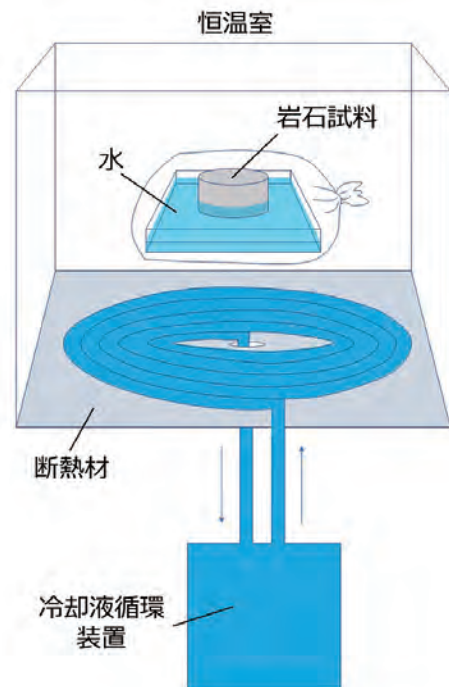


図17. 凍結融解実験模式図



図18. サンプルの様子

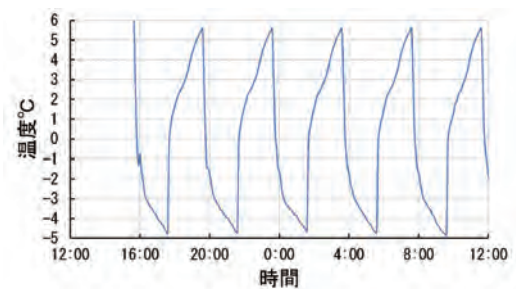


図19. サンプル周辺の温度変化

3) 蒸留水に浸し0.05気圧で94時間減圧し水で飽和状態にしたのち凍結融解試験を開始した。

実験前（図17）、凍結融解59サイクル目（図18）、107サイクル目（図19）の岩石サンプルの様子を比較した。成沢凝灰岩のような空隙率の大きい岩石は、塗布法のような浸透の少ない含浸方法では少ないサイクル数でも容易に崩壊に至ることに対し、白河石や雄勝石のような空隙率の小さい岩石は、同じサイクル数でも凝灰岩と比較し耐久性が大幅に異なるということが分かった。



図20. 実験前



図21. 凍結融解17サイクル目



図22. 凍結融解23サイクル目



図23. 凍結融解59サイクル目



図24. 凍結融解107サイクル目



図25. 凍結融解160サイクル目

5. まとめ

“2. 毛越寺庭園について”で述べたように、毛越寺庭園は景観に価値の重きが置かれているため、遣水やその周辺の景観を破壊しない方法で石材の強化を行うことが求められる。従って、石材自体を強化する樹脂処理法が最適であると言える。

本研究では、岩石の空隙率により岩石への樹脂の浸透に違いが現れることがわかった。試験期間では、成沢凝灰岩に劣化が見られた。17サイクルでは、無処理の試料が崩壊をはじめた。23サイクルでは、塗布法の試料が崩壊をはじめた。ここでは、塗布法による強化処理も試料の凍結劣化を遅らせる上で有効であることがわかった。また、160サイクルまでは、浸漬法および減圧含浸で処理した成沢凝灰岩は崩壊しなかった。

白河石や雄勝石は、“4-2. 含浸方法による樹脂の浸透”の実験で、減圧度による体積含水率の差が空隙率の大きい凝灰岩と比較し、ごくわずかであったことから、樹脂含浸処理を行う際、空隙率が小さい岩石については樹脂含浸の方法による凍結融解への耐久効果の違いが、今回の凍結融解回数では見られなかった。今後、凍結融解のサイクル数増やした実験を行う予定である。

含浸方法による岩石への含浸率の違いについて、未劣化の粘板岩は違いがほとんど見られないことに対し、景石のような劣化した粘板岩は凝灰岩と

似たようなグラフの動きとなることがわかった。
従って、劣化した粘板岩に対しては、凝灰岩と同様に減圧含浸による樹脂含浸が有効であることが考えられる。

実験室で行う凍結融解は短期間に集中して強制劣化させるが、現場で起こる凍結融解は長期間にわたりゆっくりと進行するといった違いがあるため、実際の現場では含浸した樹脂自体の劣化といった問題もあると考えられる。そのため、現場作業では定期的に樹脂含浸処理をし直すことが前提となることが考えられる。

また、本研究における実験の過程で、樹脂含浸処理において広く使用されている合成樹脂の岩石への含浸率と蒸留水の含水率の結果がほぼ同等のものとなることがわかったため、合成樹脂の含浸方法の評価には、岩石への透水等の先行研究を参考にすることが重要であると考えられる。

参考文献

1) 福田正己, 三浦定俊, 西浦忠輝, 松岡憲知『石造遺跡の凍結破壊と樹脂によるその防止効果の実験』保存科学, No.22, p1-14 (1983)

2) 三浦定俊, 福田正己, 西浦忠輝『合成樹脂による岩石の凍結破壊防止』石造文化財の保存と修復, p23-32 (1985)

3) 平成27年度特別史跡毛越寺境内附鎮守跡保存修理事業第4回保存修理指導委員会資料(抜粋), 宗教法人毛越寺, 株式会社環境事業計画研究所 (2015)

4) 石崎武志『毛越寺庭園遺水の景石周辺環境に関する調査』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, p70-73 (2017)

表9. 予備実験の結果

小樽軟石		
	蒸留水	Wacker OH100
成沢凝灰岩		
	蒸留水	Wacker OH100
白河石		
	蒸留水	Wacker OH100
毛越寺庭園景石		
	蒸留水	Wacker OH100