

〔報文〕 飯田市・文永寺石室五輪塔における 蘚苔類の繁茂について

朽津 信明・二神 葉子

1. はじめに

石造文化財の保存対策として、それを構成する石材の撥水処理が行われることがある¹⁾が、処理後の経年変化が追跡調査されるケースは非常に少ない。当然のことながら一度撥水処理がなされたからといって、それで未来永劫保存が図られるわけではなく、再処理の要否および時期を検討する上でも、処理後の経過観察は必要不可欠である。飯田市にある重要文化財・文永寺石室五輪塔では、1986年の解体修理が行われた際に石材のクリーニングと撥水処理が施されたが、その後約20年が経過して、特に石室北側屋根石上面には著しく蘚苔類が繁茂するに至っている。本研究では、この蘚苔類が繁茂するに至った原因について考察し、このことから撥水処理を行う際の問題点や注意点について検討し、今後の適切な保存対策について言及する。

2. 調査対象

2-1. 文永寺石室五輪塔とその歴史

文永寺石室五輪塔は、長野県飯田市下久堅に位置する重要文化財石造建造物である。この文化財は、花崗岩切石で組まれた石室の内部に、同材質の五輪塔が安置されており（図1）、石室内部に刻まれた銘文から弘安六（1283）年に神敦幸によって造立されたものであることが確認される。また同銘文から、石室は南都石工・菅原行長の手による製作であることもわかり、形式手法から恐らくは五輪塔も石室と同時代に一連の作業として納められたものと理解されている²⁾。

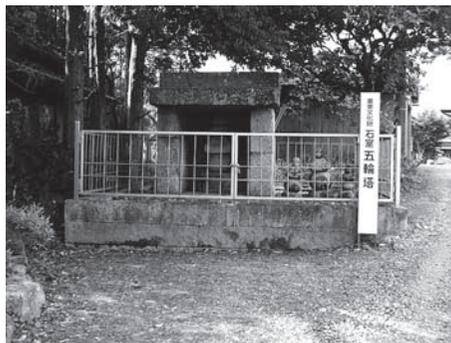


図1 2008年現在の文永寺石室五輪塔
南側より撮影

文永寺石室五輪塔は、昭和五（1930）年に当時の国宝保存法で国宝指定を受け、その後現在の文化財保護法で重要文化財となって保存されている。昭和六十一（1986）年には石室・五輪塔両方の解体修理が行われ、それに伴って基礎の発掘調査やそれぞれの石材の保存処理も施されて今日に至っている²⁾。発掘調査の結果、土台については後世に移動された痕跡は全く認め

られておらず、建立以後、修理時点まで石室は基本的に原位置を保っていたものと解釈されている。ただし、五輪塔のみは、(オリジナルのものが) 後世に据え直された可能性が指摘されている。解体修理時には、石室及び五輪塔を構成する全ての石材(いずれも花崗岩)について、表面を物理的にクリーニングした後、コルコート社の合成樹脂SS-101を全面に塗布する形で撥水処理が行われてから再び組み立てられた。

解体修理時の写真を参照すると、修理前の時点では石室屋根石上面には地衣類または藻類または蘚苔類かと見られる微生物の付着が目立つ(図2)が、竣工時にはそれらが肉眼では殆ど見られない状態にまで除去されていたことがわかる(図3)。



図2 1986年の解体修理前の文永寺石室五輪塔
(文化財建造物保存技術協会²⁾による)
北東側より撮影



図3 1986年の解体修理直後の文永寺石室五輪塔
(文化財建造物保存技術協会²⁾による)

2-2. 現在の保存状態

2008年の調査時点では、石室屋根石上面には、蘚苔類や地衣類を中心とする微生物が観察された。特に石室北側屋根石上面は、ほぼ全面が厚さ1 cm以上にわたる蘚苔類によって覆われていた(図4:口絵参照右側)。これらは国立科学博物館の鑑定により、ヒジキゴケ科のヒジキゴケ(*Hedwigia ciliata* (Hedw.) P.Beauv.), ギボウシゴケ科のケギボウシゴケ(*Grimmia pilifera* P.Beauv.), ハリガネゴケ科のハリガネゴケ(*Bryum capillare* Hedw.) から主として構成されていることが判明した。その一方で、同時期に同処理が行われた南側屋根石上面では、地衣類は認められる部分があったものの蘚苔類繁茂は殆ど見受けられなかった(図4左側)。この他の石室側壁面や石室内部面、さらに内部に安置された五輪塔各面にも蘚苔類の繁茂は殆ど見受けられなかった。このうち、各屋根石側面には蘚苔類の繁茂は認められないものの地衣類の繁茂は認められたのに対し、石室側面や内部面、さらに五輪塔各面には地衣類の繁茂も乏しく観察された。

石室五輪塔は現在柵に囲われており、柵内には



図4 石室屋根石上面の現状 東側より撮影
北側(写真右側)で蘚苔類の繁茂が目立つが、南側(左側)にはほぼ認められない

小石が敷きつめられていて植物の繁茂は殆ど見受けられないが、柵外南西側には比較的高い樹木が存在し、その枝によって日照時にも石室北側には陰が与えられることが容易に予想される状況である（図1）。

3. 調査項目

蘚苔類に覆われている状態の石室北側屋根石上面と、そうでない状態の石室南側屋根石上面とで、現状にどのような違いがあるかを調査した。

3-1. 硬度試験

まず、現在蘚苔類に覆われている状態の石材と、そうでない状態の石材とで、表面硬度がどのように異なるかを調査した。石室北側屋根石上面（以下単に「北側」とする）と同南側上面（以下「南側」とする）において、エコーチップ硬度試験を行った（図5）。「北側」では蘚苔類を指で除去して花崗岩石材表面を曝した状態にし、「南側」では地衣類は剥がせなかったため地衣類の上から計測した（以後の計測も、いずれも同様の条件で行った）。また、近年の破損により、新鮮な花崗岩表面が曝されていると判断される部分（以下「新鮮花崗岩」とする）も、比較対象として計測した。それぞれの計測ポイントごとに連打法³⁾により、同一箇所を20回連打した際の最大値3つの平均値をその箇所の測定値とした上で、それぞれの対象ごとになるべく平らな箇所を選んで10箇所計測して得られた各測定値を平均した。



図5 硬度試験風景

3-2. 粗さ計測

本来は同程度に平らに仕上げられていたであろう表面に、現状でどのくらいの凹凸が形成されているかを、表面粗さ曲線⁴⁾を描くことから計測した。計測は、まず「北側」「南側」それぞれの面において、解体修理時の補修剤が認められない部分として、それぞれ北側縁と南側縁から10cm離れた部分においてそれぞれで縁のラインに平行になるように長さ25cmの真弧を設置し、それぞれの断面曲線を写し取った。その状態で、粗さ曲線における「最大高さ」⁵⁾の定義に従って中心直線を定義し、それぞれの曲線で最も出っ張った部分と最も凹んだ部分との垂直方向の距離を最大高さとして算出した。

3-3. 撥水性調査

1986年の解体修理時には同様に撥水処理が施された各面で、現時点では撥水性がそれぞれの程度保たれているかを、接触角⁷⁾を計測することから推測した（図6）。マツボー社製の接触角計 PG-X⁷⁾をそれぞれの上面のできるだけ水平かつ平らな部分に設置し、3 μ lの水滴を「北

側」「南側」それぞれ対象となる部分に滴下し、石材上面に形成された水滴の接線と、石材上面との間に形成される角度を測定した。なお、水滴が安定に形成されない場合には測定値なしとし、安定に形成された場合のみ測定値を採用して、測定値がそれぞれで3個得られた段階で平均した。

3-4. 開空度調査

周辺樹木による陰の出来方を推測する目的で、南北それぞれの上面で、魚眼レンズを用いて全天空写真⁸⁾を撮影した(図7)。撮影場所はそれぞれの面で安定してカメラを固定できる箇所として、「南側」では中央南より、「北側」では西より中央部とした。カメラはNikon Coolpix5700を用い、魚眼レンズはNikon Fish-eye Converter FC-E8を用いて、それぞれの地点で得られた上半球の写真(図8, 9)上で、空が樹木や山の斜面などに隠されずに確認される比率を開空度として計算した。



図6 接触角測定風景



図7 全天空写真撮影風景



図8 「北側」全天空写真



図9 「南側」全天空写真

3-5. 蒸発量調査

南北それぞれの面で、水分の蒸発の仕方がどのように異なるかを調べる目的で、蒸発量(ポテンシャル蒸発量⁹⁾)計測を行った。これは、水で満たした同種の容器の重さをそれぞれ測定してから「北側」「南側」各面上に同時に設置し、日中時に南側から直射日光が当たる条件で一時間放置した後のそれぞれにおける重量変化を比較した。設置箇所は、「南側」では測定期

間を通じて直射日光が観察された中央南より、「北側」では測定期間を通じて木陰となっていた西より中央部とした。

4. 結果

結果を表1に示す。

硬度値は、「北側」で平均457.5, 「南側」で600.6, 新鮮花崗岩では702.2だった。最大高さは、「北側」で15.6mm, 「南側」で5.4mmだった。接触角は、「北側」では水面が安定に形成されることが少なく, 3個の測定値が得られるまでには場所を微妙にずらしながら10回以上の測定を試みる必要があり, 平均値は76.6°だった。一方の「南側」では安定して測定値が得られ, 3回の平均値が93.6°だった。開空度は北側で25.55%, 「南側」で44.05%だった。自由水面からの1時間あたりの重量減は、「北側」で4.75g, 「南側」で10.20gだった。これはポテンシャル蒸発量に換算すると, それぞれ単位面積あたり1時間に0.079mmと0.17mmに相当し, 同一条件の観察で2倍以上の違いが得られたことになる。

表1 測定項目と結果一覧

	「北側」	「南側」	新鮮部
硬度値	457.5	600.6	702.2
最大高さ	15.6mm	5.4mm	-
接触角	76.6°	93.6°	-
開空度	25.55%	44.05%	-
重量減	4.75g	10.20g	-

5. 考察

5-1. 現状

各石材はいずれも同種のもものが同時期に加工されていることから, その当初状態はほぼ同様だったとの推定で以下の議論を進める。

まず硬度に関しては、「北側」の硬度は蘚苔類を除去してから測定されているため, 硬度値が新鮮花崗岩に比べて低く得られたことは, そのまま「北側」で硬度が低下していることを示すと理解される。「南側」硬度値に関しては, 地衣類の上から測定されているため, 新鮮部分に比べて硬度が低下していることを示すかどうかは即断できないが, その計測値が「北側」よりも高いのであるから, 少なくとも現状で「北側」の方が「南側」に比べて硬度低下が進んでいることは指摘可能である。これらの計測面はいずれも1986年の解体修理時に撥水処理が施されていることから, その処理が硬度値にも何らかの影響を与えた可能性も否定はできないが, 同じ処理を施された新鮮花崗岩の硬度値において, 通常の花崗岩石材の硬度値¹⁰⁾に比べて特に異常が認められていないことから, 「北側」に特徴的な硬度低下の主要因を, 処理後の撥水剤の劣化のみに求めるのは困難だろう。従って, 「北側」においては花崗岩石材自身の劣化が進行していると考えられる。

次にマクロな状況を見ても, 表面粗さ曲線の最大高さの値が「北側」と「南側」とでは大きく異なっており, 築造当初に表面が同程度に仕上げられていたと仮定すれば, 現状で「北側」の方が後天的な損傷が著しく大きいことを指摘可能である。

一方、接触角は、計測できた範囲では南北の値にそれ程大きな差異はなく、いずれも無処理の花崗岩の計測値（平均 19.5° ）⁷⁾に比べれば著しく高く、SS-101によって撥水処理された直後の花崗岩表面の計測値（平均 79.1° ）⁷⁾に近い。「北側」においては水滴が安定しない場所が多かったことから、それらのポイントでは既に撥水効果が失われている可能性が考えられるが、少なくとも計測可能だった測定ポイントでは必ずしも撥水効果が既に失われてしまった状況とは言えない。つまり、1986年に施された撥水処理は、20年が経過しても完全に効果が失われているわけではなく、一部には効果が残存する箇所もあるはずで、にもかかわらず蘚苔類は「北側」ほぼ全面に著しく繁茂していることになる。

5-2. 蘚苔類の繁茂

1986年の解体修理完了時点の写真では、石室屋根石上面に肉眼で確認可能な蘚苔類の繁茂は認められず（図3）、従って現在認められる蘚苔類の殆どは、ここ20年あまりの間に形成されたものと判断される。つまり、現在観察される南北上面での生物繁茂状況の違いも、基本的にはここ20年あまりで生じたことになる。そして、先述のとおり撥水効果は「北側」でも完全に失われているわけではないと判断されることから、南北における現在の生物繁茂状況の違いは、撥水剤の劣化状況の違い以外にも要因を求める必要がある。

南北における差異で今回明らかになったポイントとしては、まずは凹凸の違いが挙げられる。その違いの原因はここでは一旦問わないことにして、少なくとも現状として「北側」での凹凸が「南側」よりも大きいことが定量的に示されたことから、仮にそれが解体修理完了時点から継続してそうであったとすれば、凹凸の違いが生物繁茂状況の違いを与えた要因の一つとなっている可能性が考えられる。これは解体修理時の写真（図3）を参照する限り、十分想定され得るストーリーと言える。すなわち、表面の凹凸が激しければ、それだけ水を保持する空間が表面に多く存在することを示し、屋根の傾斜が緩いこともあって降雨時などに上面に溜まった水が蘚苔類の繁茂を促した可能性がある。

次に、その水分が蒸発する際にも、南北で状況に違いがあった可能性が考えられる。実際、開空度から判断して南側の方が日射を受けやすく水分蒸発が盛んであることは十分予想され、短時間の計測とはいえ今回の実測値もそれと整合的である。

つまり、クリーニングされて撥水処理がなされた時点から、既に南北両石材の表面凹凸状態には違いがあり、さらにその後の環境の違いもあって、現在はほぼ「北側」のみで蘚苔類の繁茂が観察される状況となったと考えられる（図10）。その際には、撥水剤の存在は、石材内部への水の浸透を妨げたと考えられることから、表面凹部にはかえって水分が長時間留め置かれやすくなるように作用した可能性も考えられ、このことは、凹凸が激しい石材を水分蒸発が起きにくい環境下で撥水処理すると、かえって蘚苔類を繁茂させやすくなる危険性があることを示していると懸念される。ただし、同時期に同処理が行われた「南側」ではそのような現象がほぼ認められていないことから、撥水処理そのものが蘚苔類繁茂を促進したと解釈す

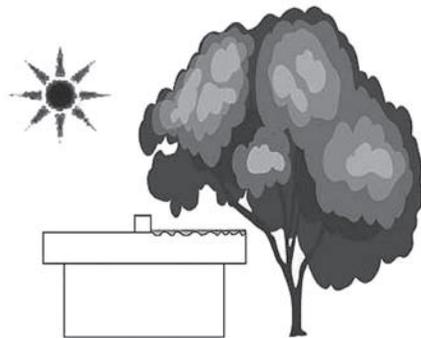


図10 蘚苔類繁茂の模式図

東側から見た概念。北側には陰が
できやすく、そこに蘚苔類が繁茂
している。

るよりは、あくまでも処理対象の状態と環境条件などとの関係の中で理解されるべきであろう。

5-3. 保存対策と撥水处理

「北側」と「南側」とにおける現在の石材風化損傷状況の違いは、1283年の石室築造以後、現在に至るまでに蓄積された風化の結果であり、基本的に解体修理後だけで与えられたものとは考えにくい。現在表面に観察される損傷と、表面における蘚苔類の繁茂との因果関係を現段階で議論することは困難である。むしろ上記で考察したように、解体修理時点での南北の表面風化状態の違いがその後の生物繁茂の違いを生む要因の一つとなった可能性の方が考えられ、「蘚苔類の繁茂で風化が与えられた」というよりは「風化していたから蘚苔類が繁茂した」という表現の方が現状の解釈としては適切かも知れない。従って、今後のこの文化財の保存を純粋に材料劣化の観点から考える際には、現段階で「北側」表面に繁茂する蘚苔類を除去すべきかどうか、拙速に結論を出すことは避けるべきだろう。

ただしこの文化財においては、現状で損傷の激しい範囲が、蘚苔類の繁茂が著しい箇所とよく一致している事実を指摘することは可能である。このことは、現在の表面における蘚苔類の繁茂が、その下の石材が劣化していることを示す指標となっている¹⁾ことを意味しており、またこの文化財が原位置を保っているとみられる²⁾ことを考え合わせれば、蘚苔類の繁茂している部分は石材が風化を受けやすい環境にある(あった)ことを示しているとも解釈される。具体的には、水分蒸発が起きにくい「北側」では水分が保たれやすいため化学風化が促進されやすと考えられることに加え、日照が少ないことが温度低下を生むとすれば凍結劣化を誘引しやすい可能性もあり、さらには蘚苔類が繁茂することそのものが何らかの形で物理的または化学的な風化に寄与している可能性も十分検討される余地がある。

だとすれば、この文化財を今後良好な状態で保存していくためには、現在蘚苔類の繁茂している箇所の環境を、そうでない箇所の環境に近づける対策が必要だろう。具体的には、「北側」の現在の環境を、「南側」の環境に近づける対策ということになる。例えば、南西側に存在する木の枝を切るなどして「北側」の開空度を上げて、「北側」における水分蒸発を促進する等の対処が考えられる。具体的にどの程度の環境になれば風化が軽減できるかは今のところは言及できないものの、例えば日中時の蒸発量の違いは定量的に示されたことから、同様に劣化が乏しいと判断される「南側」の環境をさらに細かく検討していけば、目標とされる保存環境の目安を今後与えることができるようになると期待される。

なお、撥水处理についていえば、「北側」では約20年間で効果が失われたと判断される箇所が指摘され、また効果が残存すると見られる箇所についても蘚苔類の繁茂が顕著であり、「南側」では効果は基本的に持続していると考えられるにもかかわらず地衣類の繁茂は顕著であった。その一方で、各屋根石の側面では地衣類の繁茂が顕著であったのに対し、垂直面のため撥水性は定量できていないものの、屋根石の陰になって直接には雨が当たらない石室側面(図1)や内部石材では地衣類の繁茂も顕著ではなかった。このことは、撥水处理を行っても、撥水効果の持続性について環境条件の影響が顕著に現れるのはもちろん、撥水効果は保たれていても、微生物繁茂の抑制効果については環境条件との関係で考えていく必要があることを示している。従って、撥水处理の検討に際しては、対象の現状と共に、部位ごとの環境条件まで含めて慎重に議論される必要があるだろう。

6. まとめ

重要文化財・文永寺石室五輪塔の石室屋根石北側で蘚苔類が著しく繁茂するに至ったのは、既に凹凸が激しい状態だった表面が撥水処理され、その後水分蒸発が起きにくい条件下におかれていることに主として起因すると考えられる。蘚苔類の繁茂箇所は、その部分で風化が起きやすいことを示していると判断されることから、それが繁茂している箇所の環境を、そうでない箇所の環境に近づけていくような保存対策が妥当と考えられる。

謝辞

本稿における蘚苔類の記載は、国立科学博物館の樋口正信氏の鑑定に基づく。また、本研究における現地調査に際しては、文永寺および飯田市教育委員会にご許可・ご協力いただいた。また、早稲田大学の田邊雅明氏には、現地調査にご協力いただいた。以上を記して御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 東京国立文化財研究所：石造文化財の保存と修復（1985）
- 2) 文化財建造物保存技術協会：重要文化財文永寺石室・五輪塔修理工事報告書（1987）
- 3) 朽津信明：エコーチップ試験による文化財石材の硬さに関する研究，保存科学，46，145-160（2007）
- 4) 朽津信明，二神葉子：風化に伴う岩石表面の凹凸状態の計測，日本応用地質学会平成19年度研究発表会講演論文集，179-180（2007）
- 5) 実教出版株式会社：製品の幾何特性仕様－(GPS)－表面形状の図示方法 改正のポイント（2005）
- 6) 日本工業規格：JIS R 3257基板ガラス表面のぬれ性試験方法（1999）
- 7) 朽津信明：接触角計を用いた合成樹脂処理による撥水効果の評価，アジア諸国における文化遺産を形作る素材の劣化と保存に関する調査・研究 平成19年度成果報告書，33-40（2008）
- 8) 朽津信明，宇野朋子：石造五輪塔表面の生物繁茂と環境条件との関係について，日本文化財科学会第回第24回大会研究発表要旨集，276-277（2007）
- 9) Kuchitsu, N.: Process of salt weathering observed at a brick building, Shimoren Kiln, Central Japan, Transactions JGU, 21, 261-276 (2000)
- 10) 朽津信明：茨城県つくば市周辺の中世石造美術の硬さについて，考古学と自然科学，56，1-12（2007）
- 11) 朽津信明：カンボジア・タ・ネイ遺跡における蘚苔類の繁茂と砂岩の風化，保存科学，47，111-120（2008）

キーワード：撥水処理 (hydrophobic treatment)；エコーチップ硬度 (Equotip-hardness)；開空度 (open space proportion)；接触角 (contact angle)；蒸発量 (evaporation rate)

Luxuriant Growth of Mosses on the Stone Chamber of Bun'oji Temple, Iida City

Nobuaki KUCHITSU and Yoko FUTAGAMI

The Stone chamber of the Bun'oji Temple was cleaned and treated with hydrophobic resin in 1986. However, the northern side of the upper surface of the chamber is now almost completely covered with mosses. On the contrary, on the southern side, mosses are hardly observed and the surface is covered only with lichens. This difference is thought to have been brought by the following factors: 1. difference in the surface roughness between the northern and southern sides, and 2. difference in the proportion of the open space. The rough surface on the northern side keeps water more than the smooth surface on the southern side. The low proportion of open space on the northern side reduces the evaporation rate. The mosses are considered to have grown due to the fact that water tends to stay longer on the northern side. In this case, hydrophobic treatment may have contributed to make the water stay longer, i.e. the treatment might have accelerated the growth of mosses under the condition that the evaporation rate is low. Though it is not yet ascertained whether or not mosses directly damage the host rocks, the existence of mosses indicates that the host rock under them is damaged. Therefore, it is necessary to accelerate evaporation on the northern side in order to conserve the stone chamber well. Making the proportion of open space higher, e.g. by cutting branches of the tree, may be one possibility for conservation.