

〔報文〕 紫外線照射装置を用いた磨崖仏着生生物の除去

森井 順之・川野邊 渉・山路 康弘*・柏谷 博之*²

1. はじめに

蘚苔類や地衣類など着生生物の繁茂は、塩類風化・凍結破碎と共に磨崖仏の主な劣化要因となる。また、着生生物の色彩が目立つことで鑑賞を阻害する要因にもなりうる。そのため、通常の磨崖仏保存修復工事ではクリーニングの一環として着生生物の除去が行われる。

従来の着生生物除去は、竹串やブラシなどを用い物理的に行っていた。しかし、物理的手法には彫刻面を傷つけるリスクが伴い慎重な作業が求められることから、かかる時間も膨大となる。そこで筆者らは、波長約254nmの紫外線照射による着生生物の生長抑制、もしくは枯死させてからの物理的な除去方法を考え、後補材である基壇部にて行った実験より効果を確認した¹⁾。

今回は現地試験の結果を受け、弱熔結部分における蘚苔類繁茂が目立つ臼杵磨崖仏・古園石仏群(図1(A))大日如来坐像周辺および、濃黄色地衣類が繁茂し鑑賞阻害が問題となっている熊野磨崖仏(図1(B))大日如来像右肩部を対象に紫外線照射を実施した(臼杵磨崖仏では照射後、蘚苔類の除去を実施した)。本報では、処置の概要および処置後の経過観察の結果を報告する。

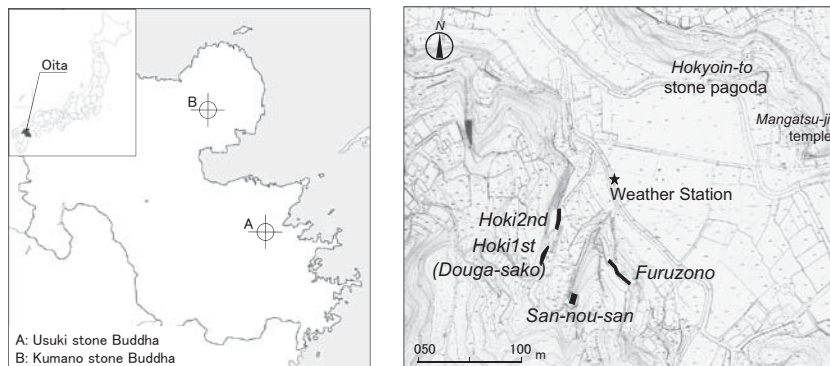


図1 臼杵磨崖仏・熊野磨崖仏の位置(左)および臼杵磨崖仏の各群配置(右)

2. 着生生物除去前の磨崖仏の保存状態

2-1. 臼杵磨崖仏

臼杵磨崖仏は過去2度の保存修理工事により、以前に比べて保存状態は良くなった。しかし現在でも、図2右側・古園石仏群の基壇上部(暗色化した部分)において、着生生物の繁茂が確認される。保存修理工事時に実施した調査²⁾から、基壇上部の地層は褐色凝灰岩層であり、粘土を含み比較的高い含水率であることが明らかとなった。従って、着生生物は湿潤した褐色凝灰岩層に多く繁茂すると考えられる。

また、大日如来坐像周辺部分に着生する生物のうち蘚苔類を対象に、目視及び実体顕微鏡観

* 別府大学文化財研究所

*² 国立科学博物館名誉研究員

察による同定を行った（標本同定者：樋口正信氏（国立科学博物館植物研究部陸上植物研究グループ））。同定結果は表1・図3の通りである。また、サンプルの採取時、苔類をはがした裏側にも蘚類とみられる着生生物の繁茂が確認された。

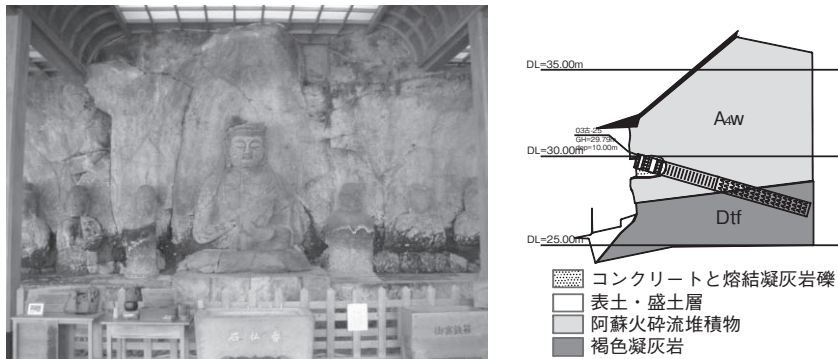


図2 白杵磨崖仏・古園石仏群大日如来坐像（左）および地質断面図（右）

表1 蘚苔類サンプル取得箇所および同定結果

サンプル取得箇所	同定結果
	A) ジャゴケ <i>Conovephalum conicum</i> (L.) Dumort. (苔類, ジャゴケ科)
	B) オオハナシゴケ <i>Gymnostomum aeruginosum</i> Sm. (蘚類, センボンゴケ科)
	C) ナガハゴケ <i>Weissia longidens</i> Card. (蘚類, センボンゴケ科)

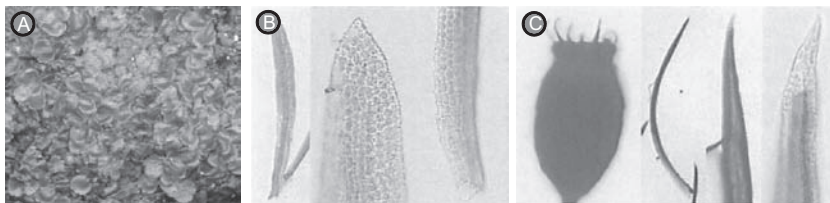


図3 同定された蘚苔類の拡大画像 (A) ジャゴケ, B) オオハナシゴケ, C) ナガハゴケ

2-2. 熊野磨崖仏

熊野磨崖仏では1976～79年にかけて、合成樹脂を用いた材質強化が行われた³⁾。周辺環境条件が良好なこともあり、30年近く経過した現在でも磨崖仏自体の保存状態は良いと考えられる。しかし、大日如来像の頭部から胸部の広範にわたり濃黄色の着生生物が繁茂し、拝観者から苦情が出るなど観覧上の問題が生じている（写真1：口絵参照）。

大日如来像に見られる濃黄色の着生生物は地衣類であると考え、今回は右肩部周辺において着生生物の採取および同定を行った。地衣成分の同定には、顕微化学的検出法・薄層クロマトグラフ法・高速液体クロマトグラフ法を併用した。また、地衣類の内部構造、外部形態などの観察には、生物顕微鏡および実体顕微鏡を用いた。

同定結果は表2の通りである。同定の結果、大日如来像を黄色く被う地衣類はワタゴケ科のコガネゴケ (*Chrysothrix candelaris* (L.) J.R.Laudon) であることが分かった。また、調査領域においてコガネゴケ単独で生育している部分は少なく、レプラゴケの一種 (*Lepraria* sp.), *Physciella melanchra*, *Ramalina kurokawae*, *R. yasudae* などと混生している例が多いことが確認された。



写真1 熊野磨崖仏大日如来像 (撮影日：2007/7/18)

表2 地衣類調査箇所および同定結果

サンプル取得箇所	同定結果 (調査地内に生育が認められた地衣類)	
大日如来像右肩部 (熊野磨崖仏)   (調査風景)	<i>Agonimia tristicula</i> (Nyl.) Zahlbr. <i>Bacidia hakonensis</i> (Müll.Arg.) Yasuda <i>Chrysothrix candelaris</i> (L.) J.R.Laudon <i>Cladonia caespiticia</i> (Pers.) Flörke <i>Cladonia humilis</i> (With.) J.R.Laudon <i>Cladonia ochrochlora</i> Flörke <i>Cladonia ramulosa</i> (With.) J.R.Laudon <i>Cladonia scabriuscula</i> (Delise) Light. <i>Cladonia subcariosa</i> Nyl. <i>Endocarpon petrolepideum</i> (Nyl.) Hue <i>Lepraria</i> sp. <i>Myelochroa irrugas</i> (Nyl.) Elix&Hale <i>Myelochroa leucotyliza</i> (Nyl.) Elix&Hale <i>Pertusaria commutata</i> Mull.Arg. <i>Phaeophyscia hispidula</i> (Ach.) Essl. <i>Physciella melanchra</i> (Hue.) Essl. <i>Porpidia albicaerulescens</i> (Wulfen) Hertel&knoph <i>Pyxine endochrysin</i> Nyl. <i>Ramalina kurokawae</i> kashiw. <i>Ramalina yasudae</i> Räsänen	ツブゴケ ハコネイボゴケ コガネゴケ ドテハナゴケ ヒメジョウウゴケ キツネゴケ ヒメレンゲゴケ ササクレマタゴケ マキバハナゴケ イワウロコゴケ レプラゴケの一種 ウチキウメノキゴケ ヒカゲウチキ ウメノキゴケ ヒメトリハダゴケ ハリトリゴケ ウチキクロボシゴケ イワカラタチゴケ

3. 着生生物の除去

白杵磨崖仏の各群では、主に褐色凝灰岩層において蘚苔類や地衣類の繁茂が確認される。また、各群とも覆屋内環境は比較的安定しており⁴⁾、着生生物が繁茂しやすい条件である。熊野磨崖仏では、磨崖仏下部に蘚苔類・草本類が見られるものの、濃黄色のコガネゴケなど地衣類の繁茂が主である。これら磨崖仏を被うように繁茂する着生生物は、観覧を阻害する要因となり得るだけでなく、多数の種が磨崖仏表面を損傷させる可能性が高いため定期的に除去を行うことが望ましい⁵⁾。しかし、生きた状態の着生生物は根が抜けにくい状態となっており、竹串やブラシ、ピンセットなどで物理的に除去するとき磨崖仏表面を損傷させるリスクが高い。

そこで著者らは、生物に大きなダメージを与えることができる波長約254nmの紫外線を着生生物に照射し枯死させ、乾燥した状態にて容易に除去を行うことを考え、紫外線照射装置(写真2)を開発した。また、拝観者が紫外線灯を直視しないよう、照射時間の制限や装置周辺のカバーなどの安全対策も行った。

今回は、白杵磨崖仏・古園石仏群大日如来坐像周辺および熊野磨崖仏・大日如来像右肩部にてそれぞれ紫外線照射装置を設置し着生生物の除去を行った。白杵磨崖仏と熊野磨崖仏では、対象となる着生生物が異なり除去方法が違うため、分けて説明する。

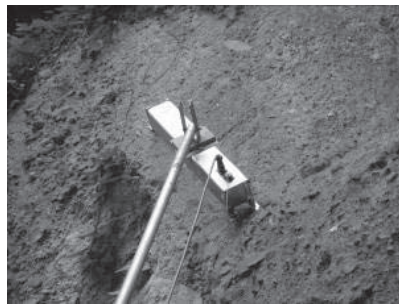


写真2 紫外線照射装置

3-1. 白杵磨崖仏

白杵磨崖仏では古園石仏群・大日如来坐像周辺、主に褐色凝灰岩層表面に着生する蘚苔類・藍藻類を対象に、紫外線照射及び枯死した生物の除去を2回に分けて実施した(表3)。紫外線照射の実施には顔料残存部に装置を直接被せないようにするとともに、拝観客の安全を考慮し拝観時間外である17:00~翌7:00の間照射を行った。また表面着生の蘚苔類は、苔類の裏側に蘚類が繁茂する多層構造となっているため、数日間の照射を行った後、枯死した表層蘚苔類の中間除去を行い、再度照射を行った。

枯死した生物の除去には、筆・ブラシ・ピンセットなどを使用した(写真3)。蘚類や地衣類・藍藻類に関しては筆やブラシで容易に払い落とすことが可能であった。しかし、ジャゴケのような苔類は壁面に強く粘着しており、磨崖仏表面を傷つけないよう葉状体をピンセットで摘みながら仮根をデザインカッターもしくはハサミで切り取った⁶⁾。

紫外線照射期間が終了し着生生物を除去・清掃した後は、シリコン系撥水剤(シンエツバ イオウォーターガードM)を塗布し、その後の生育抑制をねらった⁷⁾。

表3 古園石仏群大日如来坐像周辺の着生生物除去の概要



	期間	照射区域	概要
1回目	2008.1.8-16	坐像左右 	紫外線照射装置2台 (40W 殺菌灯@47本) 2008.1.15 中間除去
2回目	2008.5.26-6.4	腕部・腰部・両脇 	紫外線照射装置 (40W 殺菌灯@13本) 2008.5.28,30 中間除去



写真3 着生生物除去に用いる道具類

3-2. 熊野磨崖仏

熊野磨崖仏の着生生物は臼杵磨崖仏と違い濃黄色の地衣類が主である。また、頭部から胸部にかけて広範囲に繁茂しており、足場の無い状態で修復技術者による物理的除去は困難である。その場合紫外線照射装置を用いると、比較的簡単な足場もしくは治具により高所での広範囲な処置が可能となる。

そこで、熊野磨崖仏大日如来像、特に地衣類の繁茂が目立つ右肩部を対象に紫外線の照射を実施した(写真4)。1回目は2007年7月18～25日まで、単管で足場を組み立て磨崖仏に接するように紫外線照射装置を設置し照射を行った。なお、装置には40W 殺菌灯を18本取り付けた。照射期間終了後は、紫外線照射装置および単管足場を撤去し、物理的除去作業を行わないまま目視による経過観察を行った。

2回目の照射は2008年7月7～15日の期間で実施した。ここでは1回目の施工で得られたデータを補完することを目的としており、40W 殺菌灯が1本取り付けられた照射装置に簡単な治具を取り付け設置した。



写真4 熊野磨崖仏における紫外線照射（左：1回目、右：2回目）

4. 経過観察

4-1. 臼杵磨崖仏

2008年1月8～16日、古園石仏群大日如来像左右脇部で実施した紫外線照射および着生生物除去について、目視および写真撮影による経過観察を行った（表4左側：口絵参照）。ここでは当初、紫外線照射強度を上げることで効率的に着生生物を枯死させることを目標に、1週間程度照射を継続した。しかし、その後の施工面は、多層に着生していたジャゴケのうち最表層が枯死したのみであり、除去後の層は紫外線の影響をほとんど受けていなかった。そこで、照射により枯死した部分を順次取り除き（中間除去）、再照射を実施した。その結果、背後の褐色凝灰岩層が露出し、除去作業を終了した。

しかし、除去後1か月経過したところから処置箇所での蘚類再繁茂が見られるようになり、3か月後ではさらに繁茂が進んだ。その理由として、除去作業時の天候が悪く褐色凝灰岩層が平常時より湿潤していたため、その影響から除去できない蘚類が残ったこと、また、除去後の撥水剤塗布を見送ったことが考えられる。

2008年5月26日～6月4日では、前回除去後に再繁茂した大日如来坐像両脇部について再照射を行うと共に、坐像本体のうち腕部・腰部の照射を行った。今回は5月28、30日にジャゴケの中間除去を実施するとともに、照射・除去後は褐色凝灰岩露出部分について、撥水剤（シンエツバイオウォーターガードM）の塗布を行った。施工後の目視および写真撮影による観察結果は表4右側である。今回は、2回の中間除去により蘚苔類が効率的に除去できた。また、照射前では左腕部に見られた藍藻類も、照射後は確認されなかった。

2回目の施工における経過観察では、目視・写真撮影に加えて分光測色計（MINOLTA CG-400）の計測も実施した（測定地点：図4、結果：表5および図5）。ジャゴケの繁茂した地点Aでは、除去後から a^* 、 b^* 値ともに大きな変化がなく、蘚類繁茂が抑制されていることが数値からも確認された。また、照射前は藍藻類により黄緑色を呈していた地点Bは、照射により一度淡くなり、時間経過とともに黄緑色が戻りつつあることが確認された。また、クリーム色が残っている⁸⁾地点Cでは、装置の制約上紫外線が照射されたが、その前後で測定値に変化はなく、室内実験¹⁾の結果通り紫外線照射による顔料への影響はほとんどないことが確認された。

表4 着生生物除去後の経過観察（古園石仏群大日如来坐像周辺）










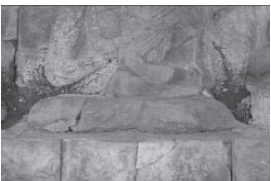


	第一回	第二回
照射前		
中間除去前		
中間除去後		
照射期間終了		
照射後一ヶ月		
照射後三ヶ月		



図4 着生生物除去前後の測色地点

表5 測色結果

		照射前	除去後	1ヶ月後	2ヶ月後
A	L*	21.67	28.8	23.29	21.67
	a*	-6.56	-0.73	-1.23	0.83
	b*	17.44	4.38	5.19	7.45
B	L*	40.77	47.69	42.25	36.28
	a*	-1.88	-0.51	0.04	1.36
	b*	13.23	7.45	8.15	12.8
C	L*	55.97	57.68	56.08	59.89
	a*	0.94	1.88	2.15	1.37
	b*	12.24	15.71	13.03	12.27

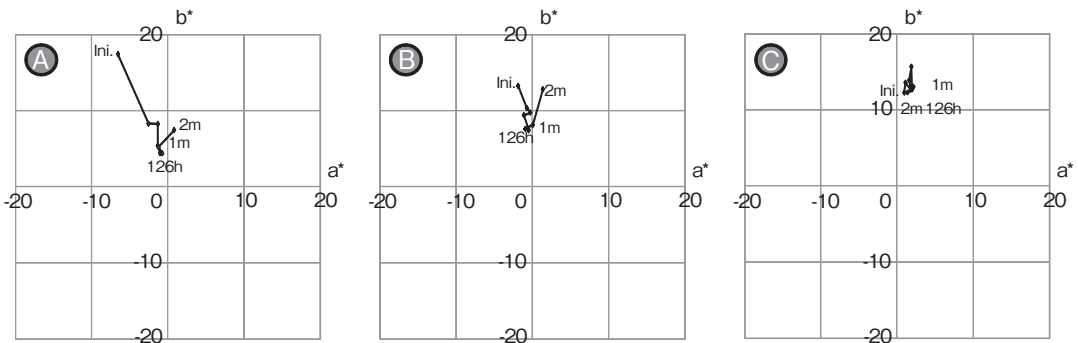


図5 各地点における色変化 (Ini: 照射前、126h: 除去後、1m: 1ヵ月、2m: 2ヵ月)

4-2. 熊野磨崖仏

2007年7月18～25日に大日如来像右肩部を対象に紫外線の照射を実施した。その後、目視および写真撮影による経過観察を実施した。照射終了後装置を外してすぐは濃黄色の地衣類が残っていた(写真5:口絵参照)。その後、照射後2ヵ月経過した2007年9月末の観察では、照射箇所の濃黄色が消え凝灰角礫岩表面が確認された(写真6:口絵参照)。この結果より、濃黄色地衣類への紫外線照射は、照射後すぐに枯死して灰色になる蘚苔類と違い、照射からある程度遅れて効果が発揮されたと推定できる。

2008年7月7～15日に行った照射では、目視や写真撮影に加えて分光測色計(MINOLTA CM-2600d)による測色を行った。照射装置の形状に合わせて5か所の測定地点を決定し、地点2のみは凝灰角礫岩が露出している部分にて測定した(図6)。

図7に測色の結果を示す。グラフ横軸は a^* 値の変化($-5 < a^* < 5$)、縦軸は b^* 値の変化($-50 < b^* < 50$)である。測定地点のうち、最も多く濃黄色地衣類が着生していると考えられる地点1および地点3では、照射後1ヵ月で b^* 値が大幅に減少しており(地点1: $36.12 \rightarrow 11.42$, 地点3: $46.94 \rightarrow 15.2$)、目視観察では黄色がまだ目立つが確実に少なくなったと考えられる。また、他地点でも同様に b^* 値が減少した。経過観察は今後も継続するが、濃黄色地衣類への紫外線照射後1ヵ月の時点で確実に黄色が淡くなっており、紫外線照射によるクリーニングの有効性が明らかとなった。



写真5 紫外線照射後すぐの処置面



写真6 紫外線照射2か月後の処置面

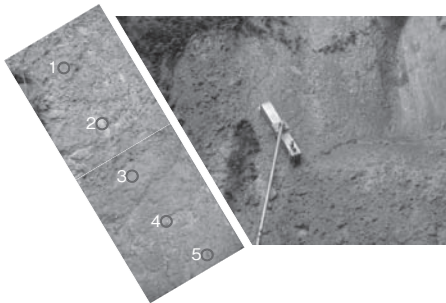


図6 紫外線照射前後の測色地点

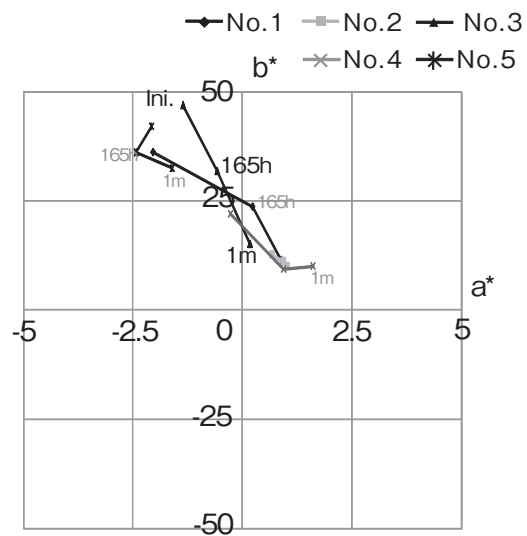


図7 照射による濃黄色地衣類の色変化

5. おわりに

本報では、磨崖仏に着生する生物に対し安全かつ効率的な除去方法として、波長約254nmの紫外線照射による方法を提案し、実際に白杵磨崖仏、熊野磨崖仏の該当箇所で施工を行った。

白杵磨崖仏では、古園石仏群下部の褐色凝灰岩層に着生するジャゴケ、ナガハゴケなどの蘚苔類を紫外線照射により枯死させ、それらが収縮した状態で除去を行った。照射により安全かつ効率的に除去ができることを再確認するとともに、実際に折り重なって生育する蘚苔類に対しては、数日間の照射後に中間除去を行い再度照射することで確実に除去が可能であることを確認した。

また、除去作業を行っただけでは施工後1ヵ月で新たな蘚類の着生が確認され、その後改めて行った実験では、除去作業後の施工面（特に含水率の高い褐色凝灰岩層）にシリコン系撥水剤の塗布を行った。経過観察の結果、3ヵ月経過しても新たな蘚苔類が見られないことより、作業間隔を広げるためにはシリコン系撥水剤の併用が有効であることを確認した。

熊野磨崖仏では、大日如来像表面を被う濃黄色地衣類（コガネゴケ）の紫外線照射による除去を行った。照射後の目視観察および分光測色計による測色から、照射から暫くして黄色が少しずつ淡くなっており、濃黄色地衣類に対する紫外線照射の有効性を確認した。

謝辞

本研究における現地試験は、三嶋有子氏をはじめとする白杵市教育委員会関係者の方々、岩男信吾氏をはじめとする豊後高田市教育委員会関係者の方々、文化庁文化財部美術学芸課の奥健夫氏、大分県教育委員会関係者の方々、そして東京文化財研究所の朽津信明氏にご協力頂いた。また、白杵磨崖仏における蘚苔類の同定には国立科学博物館の樋口正信氏にご協力頂いた。ここに記して御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 川野邊渉, 朽津信明, 早川典子: 白杵磨崖仏群における紫外線を用いた生物制御の試み, 保存科学, 40, 64-68 (2001)
- 2) 白杵市: 『国宝白杵磨崖仏保存修理工事報告書』(1997)
- 3) 藤本青一: 彫刻作品の保存修理における合成樹脂の応用—美術院国宝修理所における文化財修理を中心に—, 文化財保存修復学会誌, 50, 11-27 (2006)
- 4) 森井順之: 覆屋が磨崖仏保存環境に与える影響と凍結防止策の検討, 『文化財保護閣改善法案国際学術シンポジウム報告書』, 国立文化財研究所 (大韓民国), 37-53 (2006)
- 5) 早川典子, 川野邊渉: 白杵磨崖仏における表面処置について, 『日韓共同研究報告書2007』, 東京文化財研究所/国立文化財研究所 (大韓民国), 60-63 (2008)
- 6) 山路康弘: 白杵磨崖仏における紫外線照射装置を用いた生物除去について, 『日韓共同研究報告書2008』, 国立文化財研究所 (大韓民国) / 東京文化財研究所, 35-42 (2008)
- 7) 早川典子, 川野邊渉: 事例報告: 白杵磨崖仏における表面樹脂処理試験, 保存科学, 40, 69-74 (2001)
- 8) 朽津信明: 白杵磨崖仏で観察される彩色表現について, 保存科学, 40, 52-63 (2001)

キーワード: 磨崖仏 (Buddhist image carved on natural cliff); 着生生物 (epiphytic vegetation); 除去 (cleaning); 紫外線殺菌灯 (ultraviolet germicidal lamp); 色差 (color difference)

Cleaning Epiphytic Vegetation with UV-C Irradiation for Buddhist Images Carved on Natural Cliff

Masayuki MORII, Wataru KAWANOBE,
Yasuhiro YAMAJI * and Hiroyuki KASHIWADANI *²

To clean epiphytic vegetations growing on the surface of Buddhist images carved on natural cliff, a method of UV-C irradiation was tested. Its effect was confirmed from the conservation works of the Usuki Stone Buddha and the Kumano Stone Buddha. This method was especially more effective to irradiate UV-C again after cleaning dried-up vegetation of the top layer by irradiation if some sort of vegetation were growing in folds. Furthermore, it was confirmed that coating with silicone water repellent after irradiation was effective in controlling the growth of new vegetations..

* Beppu University Research Institute for Cultural Properties

*² Researcher Emeritus, National Museum of Nature and Science