

10. 香川県に分布する豊島石製石造物・採掘跡の風化程度の評価 Evaluation of weathering intensity of Teshima stone, Kagawa Prefecture

○西山賢一（徳島大学）・宮本和季（多度津町役場）・長谷川修一（香川大学）
Ken-ichi NISHIYAMA, Kazuki MIYAMOTO and Shuichi HASEGAWA

1. はじめに

豊島石は、香川県に分布する火山礫凝灰岩（中新世）の石材であり、中世以降、灯籠や五輪塔などに広く利用されてきた。これらの石材には、風化による剥離などが進行しているものがあるため、豊島石の風化程度を把握することが必要である。対象が石材であるため、用いる方法は非破壊法でなければならない。一方、豊島石の掘削跡地は、豊島のみに限らず、小豆島や屋島などにも点在している。採掘は主に斜面の急崖露岩を掘削して行われたため、掘削跡は穴丁場と呼ばれる洞窟状の形状を呈するものが多い。掘削跡地の斜面安定上の問題として、内壁を構成する岩盤には、掘削後に生じたゆるみが進行していることが予測され、その評価と対策が必要となる。

本研究では、以上のような観点から、豊島石製の石造物、ならびに掘削跡地の風化程度を評価した。対象とした豊島石製石造物は、建立年代が分かっている複数の五輪塔であり、建立後、現在までの時間を風化継続時間と見なすことができる。豊島石の掘削跡は屋島洞窟の露岩を対象とした。加えて、豊島石の標準的な風化帯構造を把握するため、豊島で掘削されたボーリングコアも対象とした。測定は、(1) 色彩計を用いた色彩値の測定、(2) コンクリート水分計を用いた現場での水分含有量の推定、(3) 帯磁率計を用いた帯磁率の測定であり、屋島洞窟では、(4) シュミットハンマーを用いた強度の測定、ボーリングコアでは (5) みかけ比重・有効間隙率測定も行った。

2. 対象とした豊島石製石造物ならびに掘削跡地

対象とした豊島石製石造物は、五輪塔が6箇所、鳥居が1箇所であり、それらの所在地・建立年代などを表1にまとめて示す。これらの所在地・建立年代は、松田¹⁾によった。測定は2010年9月と11月に実施したので、風化継続時間は、建立～2010年までの経過年数である。

表1 対象とした豊島石製石造物の所在・種類・建立年代

所在地	寺・神社名	種類	建立年代（西暦）	風化継続時間（年）
東かがわ市	東照寺	五輪塔	1750	260
さぬき市	光蓮寺	五輪塔	1655	355
さぬき市	極楽寺	五輪塔	1628	382
高松市	神内家墓地	五輪塔	1466	544
土庄町豊島	十輪寺	五輪塔	1768	242
土庄町豊島	眼明寺	五輪塔	1797	216
土庄町豊島	家浦八幡神社	鳥居	1474	536

五輪塔は、基部から最上部まで6つの石材を積み上げた構造をなすため、それぞれの部分を対象とし、色彩・水分・帯磁率測定を行った。用いた色彩計はコニカミノルタ製土色計 SPAD-503、水分計はケツト科学研究所のコンクリート・モルタル水分計 HI-520、帯磁率計は ZH instruments 製の帯磁率計 SM-30

である。なお、水分計の値を含水比 (%) に換算するため、豊島で採取した豊島石の岩片を用い、実験室で豊島石を飽和状態から乾燥させながら水分測定を繰り返し、含水比と水分計の読み取り値との相関を求め、水分計の値をすべて含水比に換算した。

対象とした五輪塔 (図 1) は、いずれも、特に上から 3 段目の「火輪」の劣化が著しく、開口亀裂が認められるものや、角の部分が大きく脱落したものもある。また、林内に安置されている神内家墓地の五輪塔を除くと、いずれも墓地の隅に移設されており、一部は仮設パイプで倒れないように補強されている。

屋島洞窟は、屋島北嶺の北斜面の標高 140m 付近に位置し、火山礫凝灰岩からなる急崖露岩に複数の洞窟が形成されている。そのうち、対象とした洞窟は、奥行きが約 5m あり、内壁の表面には、掘削時のノミの跡が残存しているほか、一部には表面にコケが付着した場所もある (図 2)。しばしばデューン構造や斜交層理が認められる。表面に白色の析出物が付着した箇所もある。測定は、洞窟入口から 350cm までの区間の側壁を対象とし、シュミットハンマー反発値 (連打法)、色彩・帯磁率測定を実施した。

豊島で掘削されたボーリングコアは掘進長 54m であり、豊島石に相当する火山礫凝灰岩は、下位の土庄層群の泥岩・礫岩を覆い、上位を讃岐層群の溶岩に覆われる。ボーリングコアは肉眼観察による風化分帯を行うとともに、色彩測定、ならびにみかけ比重・有効間隙率測定を行った。



図 1 十輪寺の五輪塔



図 2 屋島北嶺の豊島石採掘跡の内壁

3. 豊島石ボーリングコアの風化帯構造

豊島石の火山礫凝灰岩のボーリングコアの風化程度は、肉眼観察により、新鮮帯・微風化帯・弱風化帯・中風化帯・強風化帯の 5 帯に区分でき、深度が浅い部分ほど風化が進行している (図 3)。特に、上位を讃岐層群の溶岩に覆われる火山礫凝灰岩の最上部 (厚さ 6m 程度) は、著しく褐色化した強風化ゾーン (風化殻) である。新鮮帯から風化帯に変化するにつれ、みかけ比重は低下し、有効間隙率は増加し、色彩値の a^* と b^* は増加する傾向が明瞭である。新鮮帯では、含まれる黒色の玄武岩質の礫の形状が明瞭だが、微風化帯では礫の一部が褐色化し、弱風化帯～強風化帯では礫を含めた試料全体の褐色化が著しい。これを反映して、新鮮帯から弱風化帯にかけては色彩値の L^* が増加している。なお、火山礫凝灰岩 (豊島石) のフィッシュトラック年代は 16.2 Ma、上位の溶岩 (讃岐層群) は 13.6 Ma となった²⁾。したがって、火山礫凝灰岩最上部の風化殻は、その間の約 3Ma に受けた長期的な風化作用の産物とみなされる。

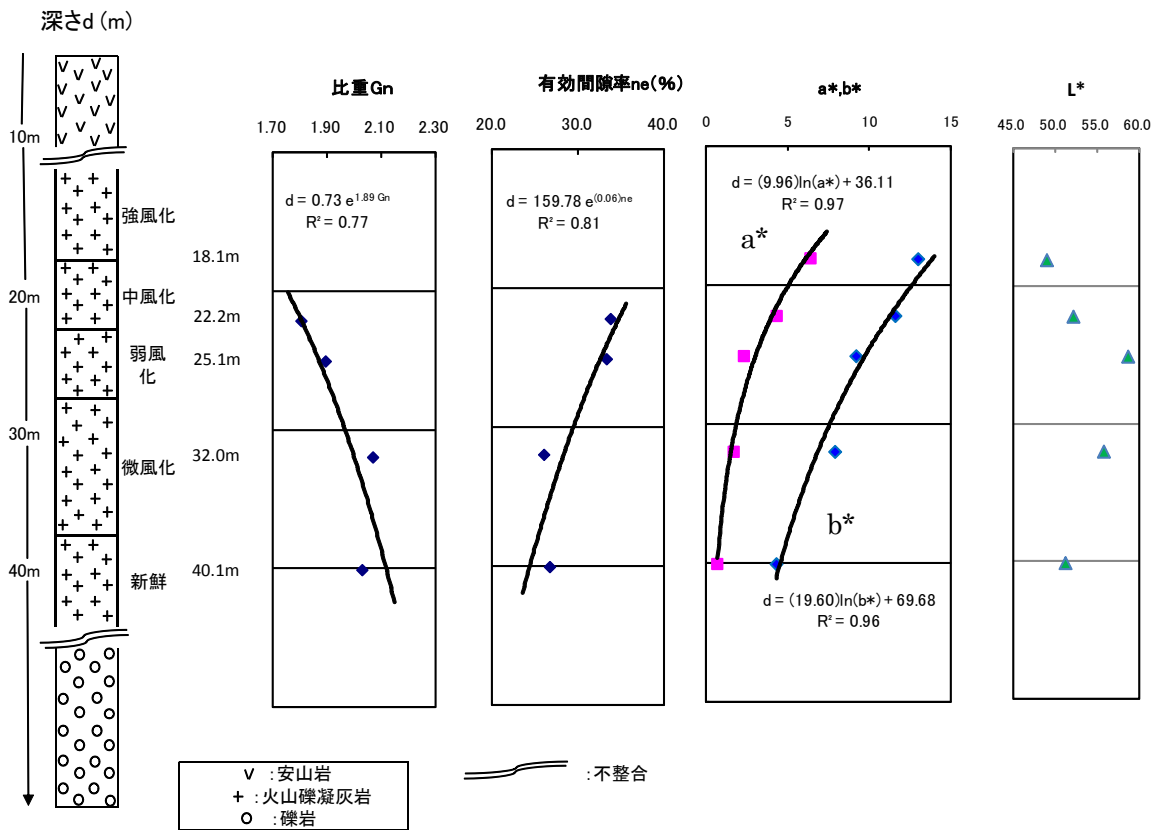


図3 豊島石ボーリングコアの風化帯構造と物性値

4. 五輪塔・鳥居の風化程度

各石造物の色彩 (L*, a*, b*), 含水比 (%), 帯磁率の平均値を表2に示す。

表2 五輪塔・鳥居の色彩・含水比・帯磁率測定結果

寺・神社名	風化継続時間 (年)	L*	a*	b*	含水比 (%)	帯磁率
東照寺	260	39.1	-0.3	4.1	0.5 未満	1.61
光蓮寺	355	41.5	0.8	3.2	0.5 未満	1.45
極楽寺	382	44.0	0.1	3.4	0.5 未満	1.95
神内家墓地	544	44.9	0.6	5.3	0.5 未満	1.61
十輪寺	242	42.0	-0.1	5.3	0.5 未満	1.40
眼明寺	216	39.1	-0.2	2.1	0.5 未満	1.60
家浦八幡神社	536	40.5	1.0	3.4	0.5 未満	1.77

ボーリングコアと石材の色彩値と比較すると、石材の風化程度はほぼ新鮮帯に該当する。したがって、色彩変化の原因となる鉱物組成の変化を伴う化学的風化作用は、石材にはほとんど及んでいないと見なされる。すなわち、色彩変化が生じる風化継続時間は、今回検討した石材の風化継続時間よりはるかに長い時間を要するものと推定される。石材で観察される亀裂や表面の剥離は、鉱物化学的な風化作用によるものではなく、主として物理的風化作用(掘削後の応力開放や粘土鉱物の膨潤など?)、地震動(例

えば、1707年宝永、1854年安政、1946年昭和の南海トラフ巨大地震)による転倒、ならびに、石材の移設時などに生じる人為的な破損によるものと考えられる。

石材の各測定値同士の回帰分析を行った結果、風化継続時間と、色彩値・含水比・帯磁率の関係は、いずれも決定係数が低く、明確な傾向は認められなかった。これは、風化継続時間よりも、それぞれの石造物が置かれた環境の違い(林内や寺院の境内など)による影響がより強いことを示唆する。したがって、石材に達する直達日射の有無、土壌から石材への毛管水の吸い上げといった、個々の地点ごとの風化環境を検討する必要がある。ただし、神内家墓地を除く五輪塔は、墓地の改築に伴って安置場所が移動させられたと考えられることから、過去の安置状況や変遷の詳細は不明であり、上述の風化環境とその変化を推定することは困難である。

5. 屋島洞窟内壁の風化程度

屋島洞窟の側壁で実施したシュミットハンマー測定結果(最大値)を図4に示す。R値は、洞窟の奥ほど大きくなる傾向が認められ、洞窟入口と奥とでは、ほぼ10程度の差がある。洞窟奥の測定値が初生的な岩盤強度を示すものと考えられ、入口付近の低下した測定値は、洞窟掘削後に生じた風化作用の結果と見なされる。同時に実施した色彩値(b^*)の測定結果(図5)では、値が6を超える洞窟入口付近の2点を除くと、入口から奥にかけての値は2~4程度となり、いずれもボーリングコアの新鮮帯に該当する値であることから、強度低下に関与した風化作用は、色彩変化として現れやすい鉱物化学的な変化とは考えにくい。このことから、洞窟入口部に認められる強度低下は、掘削後の応力開放による岩盤のゆるみを反映したものである可能性が高い。屋島洞窟の掘削開始時期は判明していないが、100年程度前と考えられる。それ以降に、洞窟内壁の表面付近で、R値を10程度(初期値より約25%)低下させるゆるみが生じたと考えられる。以上から、近世以降の産業遺産としても貴重な豊島石の掘削跡(穴丁場)の保存のためには、同様の岩盤のゆるみが他の掘削跡でも生じていないかを検討する必要がある。

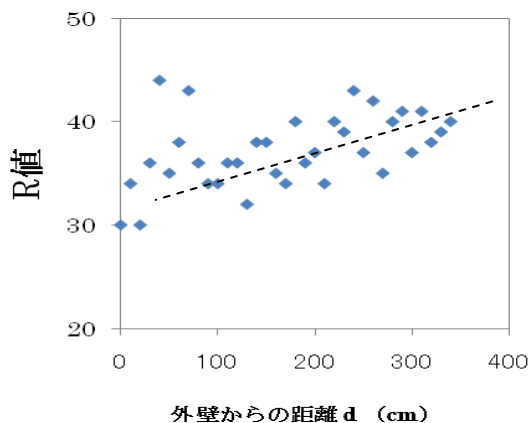


図4 屋島洞窟の側壁におけるシュミットハンマー反発値(最大値)

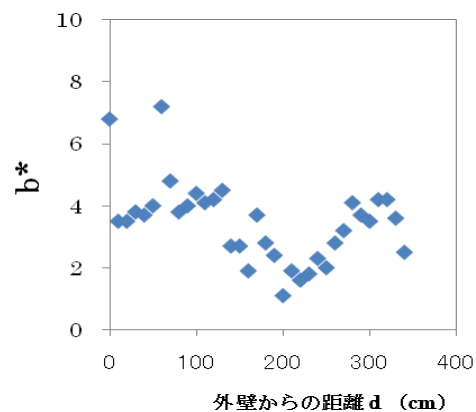


図5 屋島洞窟の側壁における色彩値(b^*)

文献

- 1) 松田朝由(2009) 豊島石石造物の研究I. 財団法人福武学術文化振興財団平成19年度瀬戸内海文化・研究活動支援調査・研究助成報告書, 157p.
- 2) 長谷川修一(2010) 讃州豊島石の特性と豊島石石造物の時空分布に関する調査. 財団法人福武学術文化振興財団平成20年度瀬戸内海文化・研究活動支援調査・研究助成報告書, 142p.