

〔報文〕 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

朽津 信明

1. はじめに

文化財に用いられている石材を科学的に調べる試みは、これまでは主として化学的性質に着目して行われていた。例えば文化財石材の化学的・岩石学的特徴を、想定される原産地のものと比較照合することにより、石材がどこからどこに運ばれたかという流通を議論した研究などがよく知られている¹⁾。これに対して、文化財石材の力学的性質を議論した研究はこれまであまり多くなかった。これには、化学分析法の中には非破壊で行える方法が多く提唱されているのに対し、岩石の力学的性質を測定するためには、試料の破壊が必要となる場合が多かったことが理由として考えられる。言うまでもなく、文化財試料を破壊することは通常の場合には許されず、従って文化財石材を分析する場合には非破壊で行える方法を用いることが原則となる。

岩石の強度評価を非破壊で行う方法として、エコーチップ硬度試験²⁾が近年注目されている。これは殴打した際の反撥値から岩石の硬さを評価する方法で、既に多くの岩石で試みられている³⁾。過去の研究によれば、エコーチップ試験は与える打撃エネルギーが極めて小さいため測定対象への影響は殆ど考えられず、またその反撥値は一軸圧縮強度などの強度値に換算して理解することが可能とされる。つまり、実質上非破壊で石材の強度試験を行うことができる方法ということになり、文化財の石材評価にも極めて有効な方法となることが期待される。そこで本研究では、文化財石材についてエコーチップ試験を行うことから、その石材の力学的性質について議論することを試みる。

2. 日本の文化財石材の硬さに関して

文化財に用いられているという前提でなければ、日本に産出する石材の力学的性質に関しては、既に様々なデータが蓄積されている⁴⁾。従って、ある文化財に用いられている石材の種類を厳密に特定できれば、それと類似した性質を持つ石材の物性値から、その文化財石材の力学的性質に関してもある程度までは推定可能ということになる。例えば、一般に花崗岩や安山岩は硬質の石（硬岩）と認識され、凝灰岩は軟質の石（軟岩）とされることが多い。

こうした一般的な情報に基づいて、日本の石造文化財の硬さについてもこれまでに議論がなされている。例えば河上⁵⁾は、終末期古墳の中でも時代が下ると見られる石槨の石材としては、花崗岩が極端に少なくなり凝灰岩製が目立つようになる事実について、硬さの違いに着目した解釈を発表している。それによれば、「硬い」花崗岩を利用するよりも「軟らかい」凝灰岩を利用する方が労力が少なくてすむことから、古墳規模や石室規模の縮小化と類似した概念の薄葬化の一種と指摘されている。また、古墳石室のような石材利用とは異なり、石塔や石仏のように繊細な加工が施される美術品については、利用石材の力学的性質に関する考察も少ない。例えば川勝⁶⁾は、日本における石造美術品を集大成し、時代ごとに卓越して用いられる石材について言及している。それに基づけば、日本の大型石造美術品加工に用いられる石材は、大まかな傾向としては鎌倉時代頃を境にして大きな変化が見られ、それ以前には凝灰岩などの「軟岩」が利用される場合が多いのに対し、それ以降には花崗岩のような「硬岩」の方が多く用いられるようになる傾向が指摘されている。これは主として、1181年に始まる東大寺再

建に伴って、大勧進・重源が伊行末らの石工を宋から招いたことによるところが大きいとされる。すなわち、高い技術を持った宋人石工が日本に帰化することで、花崗岩を中心とする硬岩に対しても美術品加工が可能となり、以降その技術を引き継いだ者たち（伊派⁶⁾と呼ばれる）によって脈々と石造美術品が造られ続けたことが様々な形で影響し、奈良周辺では硬岩を用いた石材加工が広がっていったのではないかと考察されている。また、その後西大寺の僧・忍性が東国に下向する（1252年）ことに伴って技術者（大工・大蔵安氏など）も関東に流入し、南都の石工技術が東国にも広がったのではないかと考察されており、以降「硬岩」である安山岩の加工例が東国で飛躍的に増えている点も指摘されている⁷⁾。

これらの指摘は、細かい例外もあるとは言え全体的傾向としては極めて妥当なものと思われるが、「硬岩」「軟岩」という用語はあくまでも定性的であって、それが具体的にどの程度の硬さに相当するかは議論されていない。このため、南都で宋人石工によって加工されるようになったとされる「花崗岩」と、東国でそれに遅れて加工されるようになったとされる「安山岩」とが、硬さの面からは具体的にどのような関係にあり、またそれが、それ以前に主に加工されていた「軟岩」とされる石材とはどのように異なるのかという点について、定量的な比較検討はなされていない。また、「南都の石工により加工された花崗岩」と漠然と考えられていた石材でも、それらは決して一連の分布を示す同一の岩石が利用されていたわけではなく、例えば「竜門岳石英閃緑岩」や「加茂の黒雲母花崗岩」など、産地も性質も異なる数種類の石材に分類されることが近年になって指摘されはじめている⁸⁾。従って、「花崗岩」など、かつては同様な岩石名として表現されていた石材同士でも、本当に同一の硬さを持つのかどうかについて、新たな検証が必要となろう。さらには、同じ岩石名で呼ばれている、一連の範囲に分布する岩石ですら、部位によって硬さが異なることは頻りに経験され、例えば熔結凝灰岩の強熔結部と弱熔結部とでは、硬さの値は全く異なることが知られている⁹⁾。実際、阿蘇熔結凝灰岩と呼ばれる、一連の噴火でできた岩石の未風化部分に限定しても、場所によって花崗岩より硬い値を示す部分もあれば、大谷石よりも軟らかい値を示す部分もあることが報告されている。

以上のことから、文化財石材の硬さを厳密に議論するためには、実際に文化財に用いられている石材そのものについて、それぞれの硬さを定量的に計測する必要があると考えられる。もちろんその場合には、非破壊で行うことが大前提となることから、本研究では、上記のエコーチップ試験器を用いることにより、実質上非破壊で石造美術品の硬さを評価しようとするものである。なお、本稿で扱う石造美術品は、大規模かつ繊細な加工を要するものとの前提で、原則として高さ1.2m以上の層塔、宝塔、五輪塔、宝篋印塔、石仏、石幢に限定し、いわゆる板碑の類は硬さよりも板状に割れる性質の方が優先されると判断されるため対象から除外した。

3. 調査対象

3-1. 奈良周辺

奈良周辺地域は、先述のとおり伊行末らの宋人石工が中世に活躍した舞台であり、膨大な石造美術品が存在する。このため、各時代を通じて比較検討が可能な対象として、まずは十三重石塔に絞って検討することとした。対象名を表1に示し、以下に記載する。

(1) 鹿谷寺十三重石塔⁶⁾ (図1)

太子町大字山田に位置し、奈良時代後半頃に地山の石を塔の形に彫り残して造られたと考えられている。このあたりの地山の石材は、流紋岩質火山礫凝灰岩とされており¹⁰⁾、石塔になるべく近接した地山の露頭を測定対象とした。

表1 測定対象と結果一覧

	遺跡等名称	所在地	種類	年代	岩質	Lmax	備考
1	鹿谷寺	太子町	十三重塔	奈良後半	流紋岩質火山礫凝灰岩	711	
2	塔の森	奈良市	十三重塔	奈良後半	流紋岩質凝灰角礫岩質熔結凝灰岩	706	
3	於美阿志神社	明日香村	十三重塔	平安後半	流紋岩質火山礫凝灰岩	738	一部強化処理
4	円成寺	奈良市	十三重塔	平安後半	凝灰岩類	630	
5	大蔵寺	宇陀市	十三重塔	1240年	角閃石黒雲母石英閃緑岩	919	伊行末作
6	法泉寺	京田辺市	十三重塔	1278年	花崗岩類	848	猪末行作
7	談山神社	桜井市	十三重塔	1298年	角閃石黒雲母石英閃緑岩	846	井行元作
8	當麻墓地南	葛城市	十三重塔	鎌倉後半	黒雲母花崗岩	842	
9	覚恩寺	宇陀市	十三重塔	室町初期	流紋岩質熔結凝灰岩	780	
10	新殿神社	精華町	十三重塔	1491年	花崗岩類	850	
11	竜福寺	明日香村	多層塔	751年	流紋岩質凝灰角礫岩質熔結凝灰岩	628	
12	岩屋寺	太子町	多層塔	奈良後半	流紋岩質火山礫凝灰岩	678	
13	春日山石窟	奈良市	磨崖仏	1155年	流紋岩質凝灰角礫岩質熔結凝灰岩	525	
14	當麻墓地北	葛城市	多層塔	平安後半	流紋岩質凝灰角礫岩	675	
15	當麻北墓	葛城市	五輪塔	平安後半	流紋岩質火山礫凝灰岩	654	一部強化処理
16	當麻蹴速	葛城市	五輪塔	鎌倉末期	黒雲母花崗岩	888	
17	十輪院	奈良市	石仏龕	鎌倉時代	花崗岩類	857	
18	大野寺	宇陀市	磨崖仏	1209年	流紋岩質熔結凝灰岩	764	宋人作
19	大蔵寺墓地	宇陀市	五輪塔	1351年	流紋岩質熔結凝灰岩	763	
20	俗称・六孫王	宇陀市	五輪塔	室町初期	黒雲母花崗岩	830	
21	清雲寺	横須賀市	五輪塔	鎌倉前半	凝灰岩類	565	
22	お塔の窟やぐら	鎌倉市	五輪塔	鎌倉前半	凝灰質砂岩	519	
23	多宝寺跡やぐら	鎌倉市	五輪塔	鎌倉後半	凝灰質礫岩	646	
24	元箱根	箱根町	磨崖仏等	1293年	安山岩	766	大蔵安氏作等
25	浄光明寺裏山	鎌倉市	五輪塔	1306年	安山岩	778	
26	安養院	鎌倉市	宝篋印塔	1308年	安山岩	794	
27	別願寺	鎌倉市	宝塔	鎌倉後半	安山岩	764	
28	浄光明寺やぐら	鎌倉市	石仏	1313年	安山岩	767	
29	長楽寺	太田市	宝塔	1276年	天神山凝灰岩	603	
30	円福寺	太田市	五輪塔	1324年	天神山凝灰岩	699	
31	浄光寺	太田市	五輪塔	1333年	天神山凝灰岩	718	
32	上西根	伊勢崎市	五輪塔	鎌倉末期	凝灰岩類	651	
33	天増寺	伊勢崎市	宝塔	1346年	安山岩	906	
34	赤城神社	伊勢崎市	宝塔	1351年	安山岩	812	
35	赤城神社	伊勢崎市	宝塔	1366年	安山岩	772	
36	赤城神社	伊勢崎市	石幢	1490年	安山岩	797	
37	薬師堂	南相馬市	磨崖仏	平安前半	凝灰質砂岩	493	
38	同強化処理後	同	同	同	同	672	強化処理あり

(2) 塔の森石塔⁶⁾

奈良市長谷町に位置し、もとは奈良時代後半頃に建てられた六角十三重塔だったと推定されているが、現在は六層目まで残存している。残存する限りは全て同質の流紋岩質凝灰角礫岩質熔結凝灰岩とされ¹⁰⁾、いわゆる春日石と呼ばれる春日山付近の石材が用いられているのではな



図1 鹿谷寺十三重石塔（奈良時代後半）



図2 大蔵寺十三重石塔（1240年）

いかと推定されている。その初重屋蓋の破断面を測定対象とした。

(3) 於美阿志神社十三重石塔¹¹⁾

明日香村檜隈に位置し、様式から平安時代後半頃の製作と推定されている。岩質は流紋岩質火山礫凝灰岩とされ¹⁰⁾、二上山製の石材ではないかと推定されている。後世の保存処置¹¹⁾の影響がないと推測される、基礎石の破断面を測定対象とした。

(4) 円成寺十三重石塔⁶⁾

奈良市忍辱山町に位置し、様式から平安時代後半頃の製作と推定されている。岩質は凝灰岩と報告されており、川勝⁶⁾によれば於美阿志神社十三重石塔(3)と同質同型とされるが、二上山系の石であるかどうかまでは検証されていない。初重屋蓋の破断面を測定対象とした。

(5) 大蔵寺十三重石塔⁶⁾（図2）

宇陀市大宇陀区栗野にあり、宋人・伊行末が延応二（1240）年に製作したことが銘に刻まれており、在銘のものとしては彼の最古の作品とされる。歴史的に花崗岩製とされていたが、屋蓋の三段目より下の石材はいずれも竜門岳の石英閃緑岩製¹⁰⁾であり、在地の石材が用いられている可能性が指摘されている。銘が確認されるという、基礎石を測定対象とした。

(6) 法泉寺十三重石塔⁶⁾

京田辺市草内南垣内にあり、伊派の猪末行が弘安元（1278）年に製作したことが銘に刻まれている。花崗岩製とされており、銘の確認される、基礎石を測定対象とした。

(7) 談山神社十三重石塔⁶⁾

桜井市多武峰にあり、伊派の井行元が永仁六（1298）年に製作したことが銘に刻まれている。

歴史的に花崗岩製とされていたが、全体がほぼ同質の石英閃緑岩製¹⁰⁾であり、多武峰近くの石材が用いられている可能性が指摘されている。初重屋蓋の破断面を測定対象とした。

(8) 當麻墓地南側の俗称中将姫の十三重石塔¹²⁾

葛城市當麻の當麻墓地内には、二つの石造層塔が現在南北に並んで建っている。そのうちの南側の層塔は、様式から鎌倉時代後半に製作された十三重石塔と考えられている。部位により僅かな岩質の差異は指摘されているものの、基本的に當麻から竹内にかけての在地の黒雲母花崗岩が使用されているのではないかと推定されている¹⁰⁾。その中で、片麻状中粒黒雲母花崗岩とされる、初重屋蓋の破断面を測定対象とした。

(9) 覚恩寺十三重石塔⁶⁾

宇陀市大宇陀町牧に位置し、様式から室町時代初期に造られたと考えられている。歴史的に花崗岩製とされていたが、確認される限りの石材はいずれも流紋岩質熔結凝灰岩¹⁰⁾であり、室生火山岩が用いられているのではないかと推定されている。基礎石を測定対象とした。

(10) 新殿神社十三重石塔⁶⁾

精華町大字山田にあり、延徳三（1491）年に製作されたことが銘に刻まれている。花崗岩製とされており、銘の確認されるという、基礎石を測定対象とした。

また、その他に、上記各測定対象と近接した場所に位置する大型の石造美術品の中で、なるべく製作年代や石材のバリエーションが広がるように、以下のものも調査対象とした。

(11) 竜福寺・竹野王の石塔⁶⁾

明日香村稲淵に位置する、天平勝宝三（751）年の銘を持つ石造多層塔である。いずれも流紋岩質凝灰角礫岩質熔結凝灰岩とされ、いわゆる春日石と呼ばれる春日山付近の石材が用いられているのではないかと推定されている¹⁰⁾。その二重目屋蓋の破断面を測定対象とした。

(12) 岩屋寺層塔⁶⁾

太子町大字山田に位置し、鹿谷寺十三重石塔と同様に、奈良時代後半頃に地山の石を塔の形に彫り残して造られたとされ、現在は三重であるがもともとは五重塔だったと考えられている。このあたりの地山の石材は、上記の鹿谷寺付近と同様とされており¹⁰⁾、石塔になるべく近接した地山の露頭を測定対象とした。

(13) 春日山石窟仏⁶⁾（図3）

奈良市春日野町に位置する、久寿二（1155）年と保元二（1157）年の銘を持つ磨崖仏群で、このあたり地山の石材は春日石と呼ばれる流紋岩質凝灰角礫岩質熔結凝灰岩¹⁰⁾とされる。石仏になるべく近接した地山の露頭を測定対象とした。

(14) 當麻墓地北側の多層石塔¹²⁾

先述の葛城市當麻の當麻墓地(5)内の層塔のうち、北側石塔は、様式から平安時代後半頃に製作されたのではないかとされている。流紋岩質凝灰角礫岩製とされ、二上山の鹿谷寺付近の石材が用いられたのではないかと推定されている¹⁰⁾。初重屋蓋の破断面を測定対象とした。



図3 春日山石窟仏（1155年）



図4 十輪院石仏龕（鎌倉時代頃）

(15) 當麻北墓五輪塔¹³⁾

葛城市當麻の當麻墓地(5)内にある五輪塔で、様式から平安時代末頃に造られたのではないかとされている。流紋岩質火山礫凝灰岩製とされ、二上山の鹿谷寺付近の石材が用いられたのではないかと推定されている¹⁴⁾。その水輪で、後世の処理¹³⁾の影響が認められない、オリジナル面が破損して内部の新鮮な部分が露出している箇所を測定対象とした。

(16) 當麻蹴速五輪塔¹²⁾

葛城市當麻にあり、その様式から鎌倉時代末頃に製作されたのではないかと考えられている。部位により僅かな岩質の差異は指摘されているものの、火輪から下は、太田西方の石橋山山麓または當麻から竹内にかけての、在地の黒雲母花崗岩が使用されているのではないかと推定されている¹⁴⁾。その中で、片麻状斑状黒雲母花崗岩とされる、地輪を測定対象とした。

(17) 十輪院石仏龕⁶⁾ (図4)

奈良市十輪院町にある花崗岩製の石仏龕で、正面の地藏菩薩立像とその他の部位との間には時代差を指摘する意見もあるものの、おおよそ鎌倉時代前後の製作と捉えることに大きな異論はない。その中で、鎌倉時代の製作との見解に異論の見られない¹⁵⁾、向かって右側の五輪塔群が刻まれている石材裏面で、後世の破損によってオリジナル面の損なわれている破断面を測定対象とした。

(18) 大野寺磨崖仏⁶⁾

宇陀市室生区大野にある、承元二(1208)年から同三(1209)年にかけて宋人石工によって刻まれたことが文献から確認される磨崖仏である。このあたりの地山の岩質は室生火山の流紋岩質熔結凝灰岩とされ⁸⁾、石仏になるべく近接した地山の露頭を測定対象とした。

(19) 大蔵寺墓地の五輪塔¹⁴⁾

宇陀市大宇陀区栗野の大蔵寺墓地にある、正平六(1351)年(南朝年号)の銘を持つ五輪塔である。全て同質の流紋岩質熔結凝灰岩とされており、室生火山岩が用いられているのではないかと推定されている¹⁴⁾。銘の確認されるという、地輪を測定対象とした。

(20) 俗称・六孫王の五輪塔¹⁴⁾

宇陀市大宇陀区石清水に位置し、様式から室町時代初頭頃のものとして推測される巨大五輪塔の残欠が散乱している。部位により僅かな岩質の差異は指摘されているものの、いずれも付近の黒雲母花崗岩が用いられていると推定されている¹⁴⁾。そのうち、細粒黒雲母花崗岩とされている、水輪部分の破断面を測定対象とした。

3-2. 鎌倉周辺

鎌倉周辺地域で観察される文化財石材には、鎌倉石と呼ばれる凝灰岩類でできているものと、安山岩でできているものとの、大きく分けて二種類が主に知られている。もちろん、両者とも近年に至るまで脈々と使われ続けているが、安山岩を利用した石造文化財の登場は、凝灰岩製のものに比べて若干遅れるのではないかと指摘されている⁷⁾。同地域では、奈良周辺とは異なり、各時代を通じて系統的に比較可能な文化財が存在しないため、年代の確定または推定可能な大型石造美術品ということで、以下のものを調査対象とした。

(21) 清雲寺五輪塔⁷⁾ (図5)

横須賀市大矢部に位置する、俗に三浦為継の墓と伝えられる五輪塔で、様式から鎌倉時代中期を遡る時期のものではないかと考えられている⁷⁾。凝灰岩製とされ、地輪の破断面を測定対象とした。

(22) お塔の窪やぐら¹⁶⁾

鎌倉市二階堂に位置するやぐらで、内部には凝灰質砂岩製の宝篋印塔群と五輪塔が認められる。宝篋印塔の様式から鎌倉時代前半頃のものとして推定されており、銘はないものの、在銘の京都高山寺宝篋印塔(1239年)よりも様式的には遡る可能性も指摘されている¹⁶⁾。中央にある五輪塔地輪の、後世の破損によってオリジナル面の損なわれている破断面を測定対象とした。

(23) 多宝寺跡10号やぐら¹⁷⁾

鎌倉市扇ガ谷に位置するやぐらで、内部には凝灰質礫岩製の五輪塔が複数認められる。同やぐらは、多宝寺が建てられた弘長二(1262)年以降のそれ程下らない時期に造られたものと推定され、内部の五輪塔もこれに伴うものと考えられている¹⁷⁾。このうち中央の、表面に漆喰が塗布されている五輪塔において、火輪で漆喰が剥落して石材が露出した部分を測定対象とした。

(24) 元箱根磨崖仏群¹⁸⁾

箱根町元箱根に位置する磨崖仏及び石塔群で、永仁元(1293)年の銘を持つものを含んだ俗称二十五菩薩磨崖仏群、永仁三(1295)年の銘を持つものを含んだ五輪塔群、永仁四(1296)年の銘を持ち大工・大蔵安氏の手によるものであることが確認されるものを含んだ宝篋印塔群、さらには正安二(1300)年の銘を持つ俗称六道地藏磨崖仏などの石造文化財を主体として構成されている。磨崖仏は二子山側と駒ヶ岳側の二種類の安山岩に跨るが、岩質はいずれも類似した輝石安山岩であり、測定は二子山側の磨崖仏になるべく近接した地山露頭で、樹脂処理¹⁸⁾などの影響を受けていないと判断される箇所で行った。

(25) 浄光明寺裏山覚賢五輪塔¹⁹⁾ (図6)

現在、鎌倉市扇ガ谷の浄光明寺裏山で、かつては多宝寺の裏山だったと推定される場所にあ



図5 清雲寺五輪塔（鎌倉時代中頃以前）



図6 浄光明寺覚賢五輪塔（1306年）

る、納骨器の銘から嘉元四（1306）年に製作されたことが確認される多宝寺長老覚賢の五輪塔である¹⁹⁾。安山岩製とされ、地輪を測定対象とした。

(26) 安養院宝篋印塔²⁰⁾

鎌倉市大町に位置し、徳治三（1308）年の銘を持つ宝篋印塔で、安山岩製とされる。銘の確認される、基礎石を測定対象とした。

(27) 別願寺宝塔¹³⁾

鎌倉市大町に位置する、様式から鎌倉時代後半頃のものと思われる宝塔で、安山岩製とされる。基礎石を測定対象とした。

(28) 浄光明寺やぐら¹³⁾

鎌倉市扇ガ谷の浄光明寺境内にあるやぐらで、内部には、正和二（1313）年の銘を持つ丸彫りの石仏（俗称・綱引地藏）が安置されている。石仏は安山岩製とされ、その裏面台座部分を測定対象とした。

3-3. その他の地域

上記二地域は、これまでの研究で、具体的に石材使用傾向の転換が指摘されており、その理由も考察されていた地域であるが、それ以外の地域の状況を考えるために、一例として群馬県伊勢崎市周辺の状況について検討した。同地域には、鎌倉時代以降の石造文化財が多数存在することが知られているが、鎌倉時代には凝灰岩製のものが主体であったものが、遅くとも戦国時代頃までには安山岩製が主体に変化することが指摘されていた²¹⁾。それらのうちで、年代の確定または推定可能な石造美術品で、一連の尺度で比較可能なものとして、大型の宝塔と五輪塔を調査対象とした。さらに、別の地域で軟岩に刻まれている磨崖仏の代表的な例として、福

島県南相馬市の薬師堂石仏についても調査した。

(29)長楽寺宝塔²¹⁾ (図7)

太田市尾島町世良田に位置する、建治二(1276)年の銘を持つ宝塔で、みどり市の天神山凝灰岩製であることが報告されている²²⁾。その塔身部分のうち、後世の破損によってオリジナル面の損なわれている破断面を測定対象とした。

(30)円福寺五輪塔²¹⁾

太田市別所に位置し、正中元(1324)年の銘を持つ天神山凝灰岩製の五輪塔である。銘の確認される、地輪を測定対象とした。

(31)浄光寺五輪塔²¹⁾

太田市龍舞に位置し、元弘三(1333)年(大覚寺統(後の南朝)年号)の銘を持つ天神山凝灰岩製の五輪塔である。銘の確認されるという、地輪を測定対象とした。

(32)上西根五輪塔²²⁾

伊勢崎市上西根に位置する、様式から鎌倉末期のものと見られている凝灰岩製の五輪塔である。その火輪部分のうち、後世の破損によってオリジナル面の損なわれている破断面を測定対象とした。

(33)天増寺宝塔²²⁾ (図8)

伊勢崎市下植木に位置する、貞和二(1346)年(北朝年号)の銘を持つ安山岩製の宝塔である。銘の確認される、基礎石を測定対象とした。



図7 長楽寺宝塔(1276年)



図8 天増寺宝塔(1346年)

(34, 35) 下植木赤城神社宝塔²²⁾

伊勢崎市宮前町に位置し、観応二（1351）年と、貞治五（1366）年の北朝年号銘をそれぞれ持つ、安山岩製の宝塔二基である。それぞれで、銘の確認される基礎石を測定対象とした。

(36) 下植木赤城神社石幢²²⁾

同じく赤城神社内には、延徳二（1490）年の銘を持つ安山岩製の石幢がある。参考のため、これについても基礎石を測定対象とした。

(37) 薬師堂石仏²³⁾

南相馬市小高区泉沢に位置する磨崖仏群で、様式から平安時代前半頃に造られたのではないかと考えられている。このあたりの地山の石材は凝灰質砂岩とされ、石仏になるべく近接した地山の露頭を測定対象とした。また、石仏は過去に修復作業で樹脂含浸強化処理が行われている²⁴⁾が、その強化処理が行われた部分(38)も参考のために調査対象とした。

4. 調査方法

エコーチップ試験器は、シュミットハンマー試験と類似した原理であるが、打撃エネルギーが11N/mmと、極めて弱い打撃（シュミットハンマーの200分の1程度）で計測が可能な装置である。測定値は径約3mmの先端部分がバネの力で材料の表面を打撃する速度と、その反撥した後の速度との比を千分率で表した値として表示され、打撃方向による補正は自動的に行える。計測値Lは1000に近いほど硬く0に近いほど軟らかいことを意味し、単位を持たない。

エコーチップ試験器による岩石の硬さの測定には、単打法と呼ばれる一回の打撃による試験方法と、連打法と呼ばれる一箇所を連打して行う試験方法とが提唱されている³⁾。これは、一箇所連続測定を続けると、連打するうちに反撥値が高くなっていく傾向があるために、その対象の物性を初期値で評価するか、最終的な収束値で評価するかの判断が求められることを意味している。このように連打するうちに測定値が変化する理由として、通常の岩石表面には風化層が存在するために、その岩石本来の硬さを計測できるまでは表面の風化状態を計測してしまっている可能性が指摘されている。つまり、単打法は現状の硬さを評価する際に有効な方法であり、連打法は現状ではなく、その石材本来の硬さを計測する際に有効な方法と考えられる。本研究では、経年変化などに伴う風化の影響をなるべく避け、石材として使用された当時の情報で議論を行うことが目的のため、連打法を採用した。そのため、各対象石材においては、後天的に破損するなどして現れた、風化の進行していない平らな部分をなるべく選び、一箇所を二十回連打して値の推移を計測した。そのような連打法による計測を、一つの測定対象あたり五箇所ずつで行った（図9）。

5. 結果

5-1. 測定結果の傾向

一例として大野寺磨崖仏(18)近傍の露頭において行った調査結果を図10に示す。まず二十回の連打による値の変化は、従来からの指摘通り、打撃回数に伴って上昇する傾向が見られたが、十回目以降の値には収束傾向が認められた。そこで、既存の研究に則り、最大値三つの平均値をもって収束値と見なしてLmax値と定義し、それを計測値として採用した。さらに、同じく大野寺の同対象において場所をずらしながら五箇所で行ったLmax値は、それぞれ761, 723, 734, 743, 764であった。これらのバラツキは、同一岩質の同一露頭においても石の硬さにバラツキ



図9 調査風景（下植木赤城神社
宝塔(34)にて）

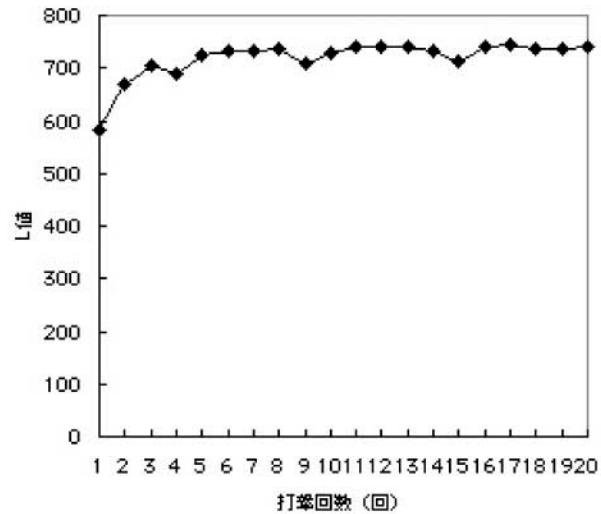


図10 連打に伴う測定値Lの推移
（大野寺(18)付近の露頭の例）

があることを物語るが、石材加工の際に問題となるのはその最も硬い部分であるとの判断から、平均値ではなく五つの測定値のうちの最大値、すなわち764を大野寺における石材の硬さと認識し、他の測定対象についても同様の扱いとして五回の計測における最大値を計測値とした。

5-2. 各文化財における結果

測定対象ごとに計測されたLmax値の最大値を、表1に示す。

奈良周辺での凝灰岩類の石材の値は525～738の範囲、花崗岩類の値は830～919の範囲であり、室生熔結凝灰岩類は763～780の範囲であった。一方、鎌倉周辺における凝灰岩類の値は519～646の範囲であり、安山岩は764～794の範囲であった。最後に伊勢崎市周辺における凝灰岩類の値は603～718の範囲であり、安山岩は772～906の範囲であった。また、参考のために行った薬師堂石仏付近の露頭の値は493だったのに対して、樹脂含浸処理が施された部分は672であった。

6. 考察

6-1. エコーチップ試験による硬度評価

岩石はそもそも不均質性を持つ材料であり、径約3mmの範囲で測定するエコーチップ試験が、大型石造文化財全体の強度評価にどこまで適用可能かについては別に検証が必要と思われるものの、本稿の目的は、あくまで先人たちによって指摘されていた、石造美術品加工に困難さを与える「硬さ」を評価することである。従って、五箇所計測したうちの最大値を採用することで、加工の障害となる石材の硬さは比較評価可能と判断する。

その結果、例えば奈良周辺で凝灰岩製とされていたものの中で、二上山系の石と推測されている石材の値はそれぞれ、711、675、654であり、春日石系とされている石材の値は706、628、525であって、産地内でのバラツキの方が、産地間でのバラツキよりも大きい結果となっている。

また、花崗岩類とされていたものにしても、例えば當麻付近の黒雲母花崗岩と見られるものが842, 888, 竜門岳付近の石英閃緑岩と見られるものが919, 846と言った具合に、同様に産地間でのバラツキよりも産地内でのバラツキの方が大きい結果となっている。しかし、これらをまとめて凝灰岩類と花崗岩類として比較すれば、奈良周辺で「軟らかい」とこれまでされていた凝灰岩類のLmax値はいずれも750未満であるのに対して、「硬い」とされていた花崗岩類のLmax値はいずれも800以上と、重複する領域が全くなく完全に区別され得ることが示された(図11)。なお、室生火山系の熔結凝灰岩石材は、石材名としては凝灰岩となっているものの、いずれもLmax値が750-800であることから、もともと強熔結部分が卓越して地表に露出しているか、あるいは意図的に強熔結部分が好んで利用されたかのいずれかと推定される。これは従来硬岩と認識されてきた花崗岩類の値は下回るものの、二上山系や春日石系の凝灰岩類の値よりは有意に高く、どちらかと言えば硬岩の一種と認識する方が理解しやすい。

同様に、鎌倉周辺地域や伊勢崎市周辺地域でも、軟岩と硬岩とは重複する領域を持たずに完全に識別されていることがわかる(図11)。さらに、薬師堂石仏においては、樹脂含浸のない露頭はLmax値493であるのに対して、樹脂含浸強化後の部分は672と、軟岩の範疇ではあるものの値が有意に大きくなっている(表1)ことから、強化状況を評価する際にも、この方法が有効である可能性も示唆される。

6-2. 硬度測定値の示す意味

今回取り上げた各石造美術品の、銘によって確認される年代または様式から推定される年代と、計測されたLmax値との関係を、地域ごとに図12に示す。まず、奈良周辺では、平安時代後半と鎌倉時代前半との間にLmax値の飛躍が認められ、それ以前はいずれも750未満の値であったものが、それ以降は750以上の値となっていることがわかる。この値が、従来指摘されていた「軟岩」の概念と「硬岩」の概念との境目に相当すると思われ、上記に記載した細かな岩質や産地の違いを越えて、13世紀初頭頃に硬度の高い石材を用いた文化財が飛躍的に増える傾向が確認された。むろん石材の選定にあたっては、硬さばかりでなく、色や質感、さらには産地(勢力圏や流通)など、他にも様々な要因が考えられる。それでも奈良周辺の十三重石塔(1)-(10)に限定して見た場合に、宋人石工・伊行末の銘入り最古の作品である大蔵寺十三重石塔(1240年)以降で、平安時代以前のものとは全く異なる高いLmax値が得られた事実(表1)は、東大寺再建に伴う宋人石工の来日が、石材使用傾向の変化に何らかの影響を与えた可能性を指摘する従来の見解⁶⁾を、支持する結果と考えられよう。

また、鎌倉周辺地域についても同様に、Lmax値750が一つの境目となっているようで、13世紀末頃からこの値を超える石材を用いた大型石造美術品が確認された(図12)。これは奈良周辺に比べれば数十年程度遅れて観察され、従来から議論されている⁷⁾とおり、西大寺の忍性が鎌倉に下向(東国に入るのは1252年だが、最終的に鎌倉に入るのは1262年)した事実と関連させて捉えることが可能かも知れない。ただし、鎌倉周辺で文化財石材として認められる安山岩は、同じ「硬岩」とされていても奈良周辺で文化財石材として認められる花崗岩類に比べると、Lmax値が小さい傾向が認められ(図11)、この違いは硬さだけではなく、その他の様々な要因も含めて理解される必要がある。

さらに、伊勢崎市周辺地域でも、鎌倉末期以前にはLmax値750を越える大型石造美術品は確認できなかったのに対し、1346年以降にはこれを越えるものが複数確認された。この時代の伊勢崎市周辺では、1338年に新田義貞が足利尊氏に敗れたことに伴って新田荘周辺の支配関係に混乱が生じ、例えば上野国守護には鎌倉の上杉憲顕が任ぜられている²⁰⁾。それに伴う具体的な

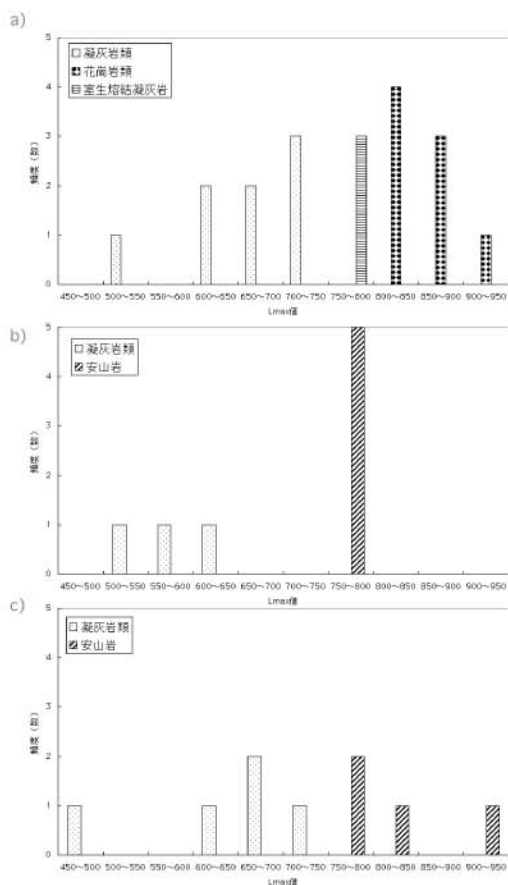


図11 石材ごとのLmax値の比較

a) 奈良周辺, b) 鎌倉周辺, c) その他の地域

凝灰岩類(室生熔結凝灰岩を除く)、花崗岩類、安山岩、室生熔結凝灰岩の、各石材ごとに、該当するLmax値が計測された対象数の頻度を示す。凝灰岩類は低めの値を示すものが多い、花崗岩類は高めの値を示すものが多い。

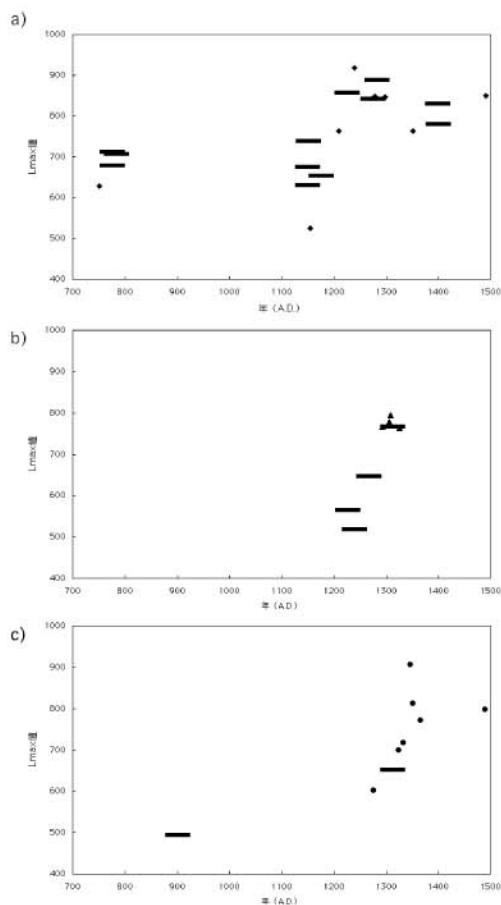


図12 年代ごとのLmax値の比較

a) 奈良周辺, b) 鎌倉周辺, c) その他の地域

各対象の、確認または推定される加工年代(西暦)と、Lmax値との関係。古い時代のものが低く、新しい時代のものが高い傾向があるが、それは連続的な変化ではなく、それぞれ13世紀初頭頃(a)、13世紀末頃(b)、14世紀中頃(c)に、飛躍的な値の上昇が認められる。

石工の移動などに関しては今のところ明らかにはされていないものの、北朝年号銘を持つ硬岩製大型宝塔が登場する背景には、この地域の石工事情に何らかの変化があったのではないかと推察される。このように考えていけば、他の地域に関してもだいたいLmax値750を目安として、それを越える硬度の石材が大型石造美術品の加工に利用されるようになる段階をもって、それぞれの地域に新しい石工技術が浸透したことを示すと捉えることが可能かも知れない。

ただし、以上はあくまでも今回計測した範囲での結果であり、当然のことながら計測していない文化財の中にはこの傾向に当てはまらないものも少なくないと予想される。例えば言うまでもないことではあるが、硬岩が加工できるようになって以降でも、軟岩で製作された石造文化財の例は枚挙に暇がなく、例えば二上山系の凝灰岩類などは大阪周辺の中世以降の石造物にも数多く用いられていることが報告されている¹⁰⁾。これらのLmax値は今回計測していないものの、鹿谷寺(1)や岩屋寺(12)での計測結果を踏まえると、鎌倉時代以降の奈良周辺地域であっ

ても750に満たない値が予想される。また、鎌倉周辺地域でも、14世紀以降にも「鎌倉石」で造られたとされる石造文化財は数多く指摘されており、伊勢崎市周辺でも「天神山凝灰岩」の利用は14世紀後半以降にもごく普通に想定されていて²¹⁾、これらも計測すればLmax値は恐らく750に満たないであろう。従って、Lmax値750以上というのはあくまでも目安に過ぎないものであり、個々の事例を議論する場合にはまた別の考え方が必要となる点を最後に指摘しておく。これは、幕末の開国に伴って貿易が開始されることで、輸入顔料の絵画への使用が飛躍的に広がるものの、開国以降にも伝統的材料だけで絵画表現がなされる場合が少なくない事実²⁵⁾と、類似した概念として捉えられるだろう。

7. まとめ

エコーチップ試験器を用いることで、石材に損傷を与えずに簡単に硬度を計測することが可能となった。これにより、これまで「硬岩」「軟岩」と漠然と捉えられていたものを、数値で定量的に比較可能となり、また樹脂含浸による強化処置の評価を行える可能性も示唆された。この方法を用いて大型石造美術品の硬度を年代ごとに調べていった結果、奈良周辺では13世紀初頭頃に、鎌倉周辺では13世紀末頃に、そして伊勢崎市周辺では14世紀中頃に、それぞれ硬岩製の事例が飛躍的に増えるようになることが確認された。これは、東大寺再建に伴う宋人石工の招聘に影響を受けた石工技術の向上が、各地に広がっていく過程を反映している可能性が考えられる。

謝辞

本研究における現地調査を進めるにあたり、それぞれの所有者または管理者の方々にご協力いただくとともに、奈良県教育委員会の今西良男氏、葛城市歴史博物館の吉岡昌信氏、群馬県立文書館の岡部央氏、鎌倉市教育委員会の玉林美男氏、宇陀市教育委員会の森本陽子氏、十輪院住職の橋本純信氏には、特に便宜をお図りいただいた。また、筑波大学の松倉公憲教授、熊本県立装飾古墳館の池田朋生氏、東京文化財研究所の関博充氏からはエコーチップ試験に関して、そして群馬県立文書館の秋池武氏と元岩宿博物館の国井洋子氏からは石材の流通に関して、それぞれ様々な有益な情報をいただいた。以上を記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 秋池武：『中世の石材流通』高志書院（2005）
- 2) 川崎了・谷本親伯・小泉和広・石川正基：エコーチップ硬さ試験器による岩石の力学特性推定の試み、応用地質、43、244-248（2002）
- 3) 青木久・松倉公憲：エコーチップ硬さ試験器の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察、地形、25、267-276（2004）
- 4) 池田駿介/[ほか]編：『新領域土木工学ハンドブック』（2003）
- 5) 奈良県立橿原考古学研究所編：『古墳が消えるとき』学生社（1997）
- 6) 川勝政太郎：『日本石材工芸史』綜芸舎（1957）
- 7) 前田元重：称名寺開山審海五輪塔について、三浦古文化、10、96-115（1971）
- 8) 奥田尚：『石の考古学』学生社（2002）
- 9) 朽津信明・松倉公憲・池田朋生：エコーチップ硬度試験による文化財石材の評価-熊本県下の装飾古墳の例-、日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集、433-436（2006）

- 10) 奥田尚：石製多層塔の石材とその採取地-大和・河内の古代・中世石造物（1）-, 古代学研究, 147, 43-49 (1999)
- 11) 奈良県教育委員会：『重要文化財於美阿志神社石塔婆修理工事報告書』（1970）
- 12) 川勝政太郎『石造美術の旅』朝日新聞社（1973）
- 13) 奈良県教育委員会：『重要文化財 五輪塔（鎌田家）修理工事報告書』（1986）
- 14) 奥田尚：五輪塔の石材とその採取地-大和・河内の古代・中世石造物（2）-, 古代学研究, 160, 36-43 (2003)
- 15) 太田古朴：鎌倉前期石造美術 十輪院石龕仏・生駒惣持寺・都祁相河石仏の年代（一）, 史迹と美術, 536, 251-255 (1983)
- 16) 野村隆：お塔の窟やぐら宝篋印塔, 史迹と美術, 454, 148-155 (1975)
- 17) 学習院大学輔仁会史学部：『中世墳墓「やぐら」の調査-鎌倉市, 多宝寺址, 東林寺址, 東御門-』（1966）
- 18) 箱根町教育委員会編：『元箱根石仏・石塔関係資料 元箱根石仏・石塔群の調査 二』箱根町文化財研究紀要 23号 (1992)
- 19) 文化財建造物保存技術協会：『重要文化財浄光明寺五輪塔修理工事報告書』（1976）
- 20) 文化財建造物保存技術協会：『重要文化財安養院宝篋印塔保存修理工事報告書』（1980）
- 21) 国井洋子：中世東国における造塔・造仏用石材の産地とその供給圏-上野国新田荘の天神山凝灰岩を中心に-, 歴史学研究, 702, 1-16 (1997)
- 22) 伊勢崎市教育委員会：『伊勢崎市の文化財』（1997）
- 23) 小高町教育委員会：『史跡薬師堂石仏 付阿弥陀堂石仏 史跡観音堂石仏修理工事報告書』（1968）
- 24) 山本隆志：『新田義貞』ミネルヴァ書房（2005）
- 25) 朽津信明：青色顔料から見た日本文化史, 福井県立博物館紀要, 9, 27-35 (2003)

キーワード：石工 (Stonemason) ; 石塔 (Stone pagoda) ; 石仏 (Stone Buddha) ; 中世 (Middle Age) ; 石材加工 (Carving stones)

Investigation of the Hardness of Stones Used for Cultural Properties by Equotip Hardness Tester

Nobuaki KUCHITSU

Non-destructive measurement of the hardness of stone arts has been established by using an Equotip Hardness Tester. The rebound value given by tapping with a small sensor (1 cm) can be regarded to represent the hardness of stones. Thus, the Equotip-hardness of the stones used for 37 historic stone arts in Japan was measured systematically. As a result, it was found that the so-called “hard rock” and the so-called “soft rock” can be divided quantitatively by the Equotip-hardness: the Equotip-hardness of hard rocks, such as granite, is more than 750, whereas that of soft rocks, such as tuff, is less than 750. The measurements show that granitic rocks (hard rocks) became dominantly used for stone arts only after the beginning of the 13th century around Nara prefecture. This fact perhaps reflects the influence of the technique of carving hard rocks practiced by naturalized stonemasons from China, such as Igyomatsu, during that period. The measurements also show that andestic rocks (hard rocks) became dominantly used for stone arts only after the late 13th century around Kamakura city and only after the mid-14th century around Isesaki city. The former may reflect the movement of stonemasons together with Monk Ninsho from Nara to Kamakura in the late 13th century. The latter might be related to the fact that the ruler around Isesaki city, Nitta Yoshisada, was killed in 1338 A.D. and a new ruler came from Kamakura. In this way, the use of hard rocks for stone arts defined by Equotip-hardness may reveal the revolution in techniques of carving stones in Japan.