

石造文化財の保存科学的研究

浦 奈穂美

石材は、古代から現代に至るまで、宗教・芸術活動および日常生活に利用されてきた。中には、優れた芸術性や文化的価値を備えるものもある。石材が紙や布などの有機材料にくらべて破損しにくく、温度・湿度の変化に長期間耐え得ることは、材料としての利点である。このため、露出環境下で何百年間も形をとどめたものも多いが、現在それらに劣化が進行しているのは否めない。

石材の劣化要因は多様である。それらは、主に3つに大別されるが、単独ではなく複合して石材に作用する。そして、時と共に加速するのが通常である。以下に石材の劣化要因を示す。

第1に、物理的劣化である。これは、石材の外部・内部で発生した結晶圧が石材に亀裂や剥落を生じさせ、最終的に碎片へと崩壊させることである。この結晶圧は、水が氷となる時、そして塩類が発生する時に生じる圧力のことである。石材の引張強さよりも結晶圧のほうが大きくなるのが原因であり、結晶の成長に伴い劣化程度および範囲が拡大する。

第2に、化学的劣化である。岩石は、地中に埋まっている時が安定状態で、地表に露出している時が不安定状態である。不安定状態とは、生成された環境とは異なる環境下に置かれた岩石が、その環境下で安定するように変化することをいう。これにより、膠結力の低下や塩類の発生が起こる。

第3に、生物的劣化である。植物では、樹木、地衣類、藻類が要因となる。樹根は間隙に入り込む性質があるので、そのような場合、樹根は楔のような働きをして亀裂を生じさせ、成長と共に亀裂を大きくする。また、地衣類の仮根からは地衣酸が供給され石材に有機的に作用して土壌化が進行す

る。何れも植物の生長に伴って劣化が促進されるが、樹根が巨大化した場合には枯死した時の影響も大きく、建物の崩壊の恐れが生じる。その他、動物も要因となる。

以上が石材の主な劣化機構である。このような劣化機構を参考に、十輪院石仏龕において進行している劣化の要因を追求した。

奈良市・十輪院石仏龕は、各一材の花崗岩に刻まれた彫刻と切石から成り、地藏菩薩をはじめとする彩色の残る尊像や種字によって立体的に構成されている。しかし現在、白色の析出物の発生やそれによる石材表面と顔料の剥落が石仏龕表面に認められている。それらの析出物は、石仏龕の石体表面および目地漆喰に白色の粉状の塊となって発生しており、石仏龕の全体に点在している。保存の対策を講じるには劣化の要因を調査して、その状態を詳しく正確に知ることが必要である。したがって、本研究は、劣化の要因や大気汚染の影響を把握して今後の保存活動の資料とすることを目的としている。

石造文化財の保存対策には、諸々の項目を事前に調査する必要があるが、個人的な調査でもあるので、本研究では以下の項目の基礎的調査を行った。

- ①十輪院本堂内部の大気環境
- ②析出物の科学組成
- ③石材表面におけるpH値の測定

大気環境に関しては、奈良大学保存料科学研究室が測定している数値を基に、温度・湿度および大気汚染物質について考察を行った。析出物は、エネルギー分散型蛍光エックス線分析装置により分析し、石材表面のpH値の測定は、pHメータにて行った。なお、本石仏龕は重要文化財に指定されているため、析出物の採取およびpH測定はその前方に建つ経塔周辺に止めた。

経塔のpH測定値からは、床面（0cm）に近いほどpH値が高く、上方ほどpH値が低くなる傾向があり、相対的にみて、経塔の上方ほど表面物質の水溶液の酸性度が高い。pH測定値からは、石材表面の組成成分や付着した物

質の化学組成は不明であるが、測定箇所によってpH測定値が違ふことは、附着物質の化学組成もしくは量に違いがあることを示すと考えられる。そして、石仏龕でも同じように、測定箇所によってpH測定値が違ふことが推測される。

石仏龕表面には、白色析出物が発生している。このような塩類の析出には、水と可溶性塩類の供給が不可欠である。そこで、水と可溶性塩類がどのようにして供給されるのかを検討した。

十輪院本堂内部の環境は外部より安定している一方で、高湿度状況になる日があることが認められる。特に、梅雨期には、石仏龕の表面が濡れたような状態になることもあるという。このことから、大気中の湿度が水分の供給源になることが推測される。石材は、液体としての水分の供給が全く無くても、高湿度環境下で大気中から多量の水分を吸収し、低湿度下で放出する。したがって、比較的高い湿度が塩類の析出しやすい環境をつくる要因になっている。また、大気から供給されるほかに、地下水が土壌を通して供給されている可能性もある。

可溶性塩類の供給源を検討したところ、地下水に含まれる成分と石材を構成する鉱物からの遊離イオンであると推測される。

地下水は、地表面を流れる河川にくらべると含有成分の濃度が高い。したがって、豊富に可溶性塩類を含んだ地下水が土壌を通して石材に吸収され、水分の蒸発とともにそれらが石体表面に析出したということが考えられる。

一方、可溶性塩類が鉱物から供給されることには、鉱物の劣化が関係している。花崗岩の主要構成鉱物は、雲母・石英・長石類であり、長石類からは、水と炭酸ガスの作用によってカオリナイト ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) が生成され、溶解された金属イオンが遊離する。析出物の蛍光エックス線分析の結果から、可溶性塩類としてカルシウムが多く検出された。この結果から、地下水成分のカルシウムや主に灰長石の含有成分のカルシウムが塩類の生

成要因になったと考えられる。したがって、カルシウムが大気汚染物質の硫酸と反応して塩類を析出したことが推測されよう。

析出物の蛍光エックス線分析の結果から、硫黄が検出された。一般的な石材には多少硫黄分が含まれているが、サンプルからは、おおよそ20～40%の硫黄が検出されている。この結果から、可溶性塩類と反応して塩類を析出させるのは、大気中の硫黄と考えられる。硫黄は、酸素などとの化学反応を繰り返すと最終的に硫酸になる。その硫酸ミストが石材に付着して塩類析出の要因になっている。本堂建物によって緩和されているが、1年を通して外部から二酸化硫黄が本堂内へ流入しており、外部の影響を受け続けているといえる。

以上から、地面に接した石材においては、毛細管現象によってほかの成分とともに吸い上げられたカルシウムや鋳物の粘土化作用によって遊離したカルシウムが、大気中の硫酸ミストと反応して塩類を析出させたと考えられる。石材に含有されるカルシウム量を考慮すると、特に、毛細管現象によって吸い上げられたカルシウムの影響が大きいと考えられる。



地面に接していない石材においても、カルシウムと硫酸ミストの反応が起きている可能性がある。

このほか、今回サンプルからは確認されなかった可溶性塩類が、大気中の酸性物質と反応して石体表面に析出していることもあり得る。可能性としては、ナトリウムと硫酸ミストが反応して生成した硫酸ナトリウムである。



本研究においては、様々なデータを参考として劣化要因を探った。そこからは、一般的な劣化要因を探ることができた。しかし、石造文化財に与える影響が大きいのは、現代においては自然環境はもちろんのこと人工的な劣化要因も見逃ごせない。中でも、大気汚染物質が酸性雨となって屋内

外の石造文化財を劣化させた例が多数報告されている。したがって、現在では、大気環境の改善が石造文化財の保存の前提であるといっても過言ではなく、石造文化財自体の保存処理もさることながら、その保存環境の整備も必要なのである。