

石造文化遺産の非破壊診断調査

～実忠和尚御歯塔の適切な保存方法の検討～

● 荒木徳人

華嚴宗新薬師寺に所在する実忠和尚御歯塔は、数少ない古代石塔の一例である。この石塔は、江戸時代と明治時代に修復されており、当時の修復理念も見られる貴重な石造文化遺産である。しかし、現在は剥離や剥落、真砂土化などの損傷に加え、黒色や茶色の析出物も確認され、構造的不安が懸念されている。本研究では、実忠和尚御歯塔の適切な保存方法を検討するため、非破壊診断調査を行った。

1. はじめに

岩石の風化は、岩石が持つ材質特性と環境要因が重なり進行する。これを、石造文化遺産という観点から見た場合、過去の誤った修復や破壊行為などの人為的要因、構造上の問題によって部材の損傷拡大を招く構造的要因も加わることから、非常に複雑な劣化メカニズムとなる。そのため、石造文化遺産を適切に保存するには、これらの劣化メカニズムを診断調査によって明らかにしなければならない。

国宝の本堂や十二神将立像をはじめ、多くの文化財を守り伝えている華嚴宗新薬師寺（奈良市）では、現在、石塔の保存問題に直面している。新薬師寺は、奈良時代に光明皇后が聖武天皇の病氣平癒を願い、官立寺院として建てられた。新薬師寺の境内には、実忠和尚御歯塔という石塔がある（図1）。

実忠和尚は東大寺初代別当良弁僧正の弟子で、東大寺二月堂の修二会を創めた僧侶である。『東大寺要録』巻第七雑事章第十には、実忠和尚の二十九ヵ条の功績が記されており、奈良時代の造営面でも幅広く活躍したことが明らかとなっている（小岩 2014）。

荒木（2024）は、実忠和尚御歯塔の造立時期から今日に至るまでの沿革について明らかにした。この石塔は、凝灰岩と花崗岩の部材で構成されている。凝灰岩の部材は、石材の利用時期や石塔内部に安置されている舍利容器の出現時期、笠が木造建築を模していることから、平安時代のもので推定されており、造立時の部材で

あると考えられている。残存する奈良時代から平安時代の石塔は少ない。そのため、実忠和尚御歯塔は文化財に指定されていないが、貴重な古代石塔の一例である。

一方、花崗岩の部材は石塔に刻まれている銘文から文化13年（1816）と明治31年（1898）の修復の際に交換されたものであることが明らかとなっている。軸と笠の間には、部材の傾きを調整する役割を持つ鉄板が敷かれていたり、モルタルで接着および充填していたりと、石塔の至るところに修復痕がみられる（図2）。特に、四層笠では、凝灰岩の部材と花崗岩の部材がモルタルと鋳で接着されており、造立時の部材を残すという当時の修復理念が見られる貴重な石造文化遺産である（図3、4）。

しかし、現在この石塔は、剥離、剥落などの損傷に加え、鉱物が粒子単位で剥落する真砂土化の進行、黒色および茶色の析出物が確認されており、構造的不安が懸念されている（図5、6）。

したがって、本研究では実忠和尚御歯塔の適切な保存方法を検討するため、非破壊診断調査を行い、劣化メカニズムを明らかにした。本研究成果は、近年日本全国で抱えている未指定文化遺産の保護、その中でも、石造物に関する重要な一例となるであろう。

2. 研究方法

本研究目的を達成するため、損傷度評価、析出物の同定、表面温度の分布調査を実施した。



図1 実忠和尚御歯塔(東から撮影)



図2 北側四層軸と笠の間に敷かれている鉄板
(赤く囲っている箇所はモルタルの隙間から確認できる鉄板)



図3 凝灰岩と花崗岩の部材を接着している四層笠(北から撮影)



図4 石材の年代を分類(南から撮影)



図5 二層軸の劣化の様子(西から撮影)



図6 真砂土化によって剥落した鈷物(北から撮影)

(1) 損傷度評価

実忠和尚御歯塔の損傷状態を把握するため、損傷図を作成し、損傷度評価を行なった。

まず、Auto CAD(オートデスク株式会社)を用いて、現地調査で得た各損傷の位置情報をオルソデータにマッピングした(図7)。その後、Auto CADで作成した図面をIllustrator(Adobe株式会社)で整理し、損傷図を完成させた(図8)。オルソデータは、過去の調査で計測したものを使用した。

損傷は、亀裂(部材の表面がひび割れている状態)、断裂(部材が完全に分断された状態)、剥離(石材内部に亀裂が入り、浮きが生じた状態)、剥落(剥離が発達して、剥がれ落ちた状態)、脱落(部材が大きく崩落した状態)に分類した。

剥離の検出は、目視で観察することができないため、打診調査で剥離している箇所を確認し

ながら、熱画像分析で正確な範囲を把握した。

打診調査とは、石材を打診棒(金属製)で叩き、音の反響の違いによって、剥離箇所を検出する方法である。

一方、熱画像分析とは、空気層と岩石の熱容量の違いを利用して剥離の範囲を検出する方法である。剥離に熱を供給することで、健全な部分との温度差が生じる。その状態で、赤外線サーモグラフィーで撮影することで、剥離を画像として確認することができる。以上の方法で、剥離の検出を行なった(図9,10)。

損傷度評価の方法は、Auto CADでマッピングした損傷面積と部材の面積を求め、次式で損傷率を算出した。

$$\text{損傷率} = \text{部材の損傷面積} / \text{部材の面積} \times 100$$

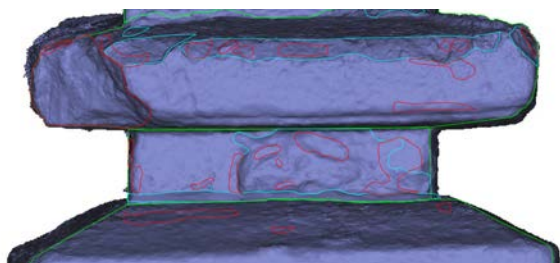


図7 Auto CADで各損傷のマッピング

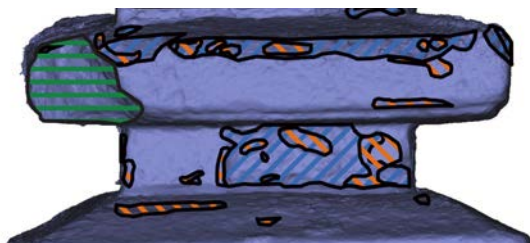


図8 Illustratorで損傷図の整理



図9 熱画像分析の現地調査

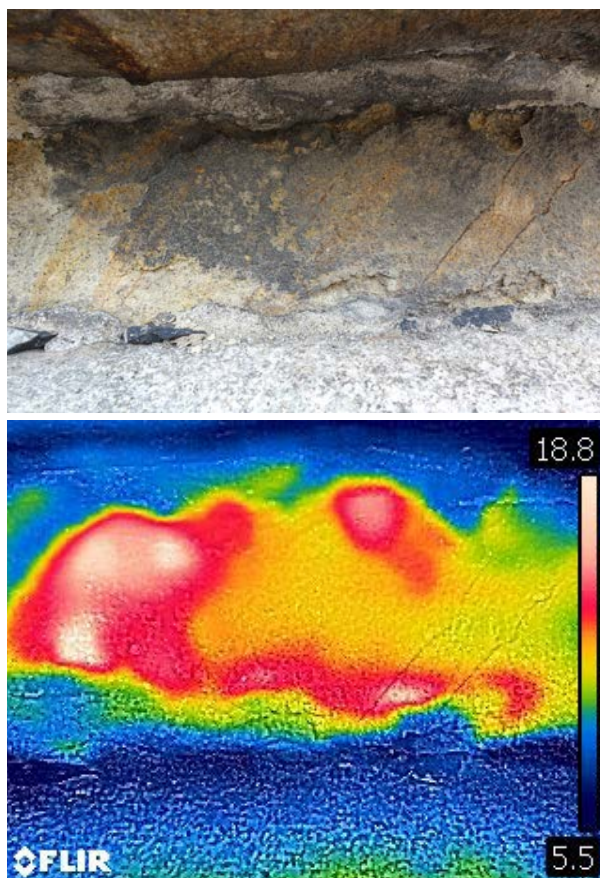


図10 熱画像分析による剥離の検出

(2) 析出物の同定

黒色および茶色の析出物の発生要因を明らかにするため、蛍光エックス線分析による析出物の同定を行なった。

測定箇所は、析出していない新鮮な箇所5点（凝灰岩2点、花崗岩3点）、黒色の析出物4点（凝灰岩3点、花崗岩1点）、茶色の析出物5点（凝灰岩3点、花崗岩2点）、モルタルも黒色に変色していたため1点測定した（図11～13）。

測定機器と条件は、以下の通りである。

測定機器：INNOV-X SYSTEMS 社製 可搬型蛍光エックス線分析装置 α -4000SL

測定条件：ターゲット金属 W（タングステン）、X線照射範囲 ϕ 14mm、管電圧 35kV、管電流 2mA
測定時間 60 秒

(3) 表面温度の分布調査

岩石の風化要因の一つとして、温度が挙げられる。例えば、凍結融解現象は石材中に水分が保持されている状態で、 0°C を中心として $\pm 4^{\circ}\text{C}$ の温度変化を繰り返すことで、石材の損傷を拡大していく。そのため、本研究では赤外線サーモグラフィーによる石材の表面温度の分布調査を行なった。

撮影時間は9時から16時までとし、1時間ごとに4面の撮影を行なった。北面は電灯や木があるため、正面から撮影することができず、斜めから撮影を行った。撮影は、2024年8月と2025年1月それぞれ1日行なった（図14）。

測定機器は、以下の通りである。

測定機器：Teledyne FLIR LLC 社製 FLIR C5

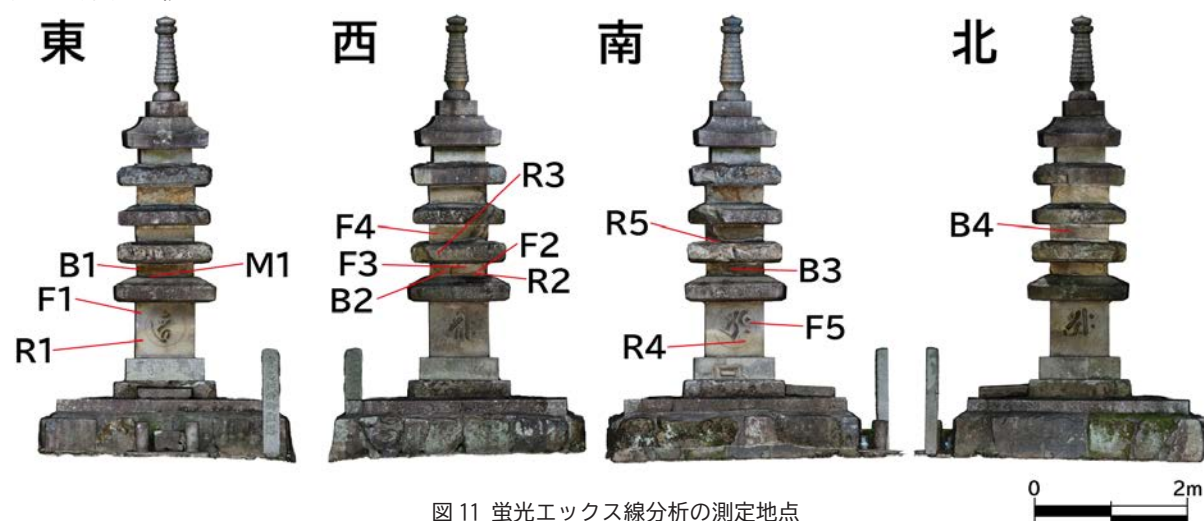


図 11 蛍光エックス線分析の測定地点

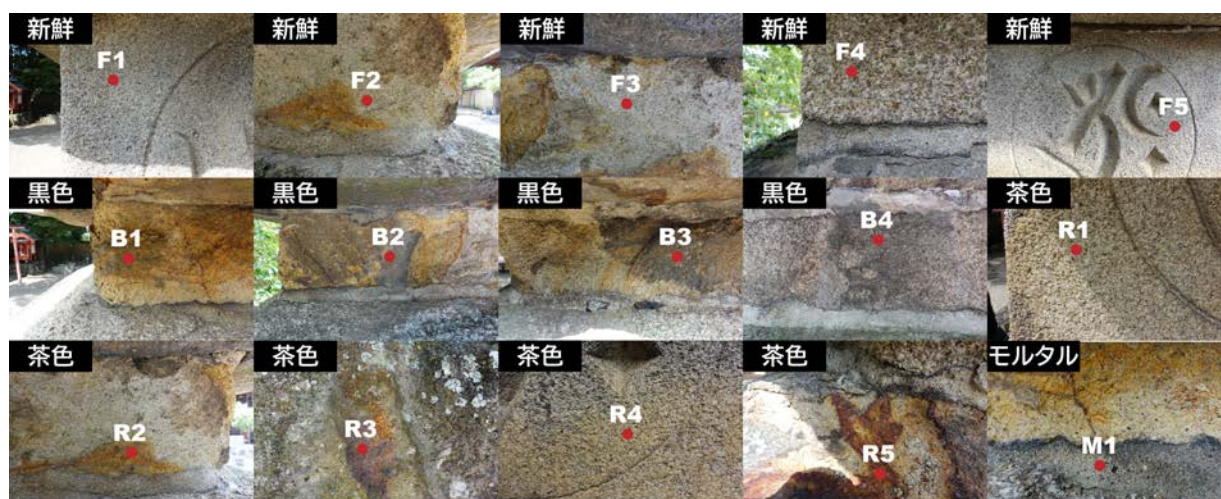


図 12 測定地点の詳細写真



図13 蛍光エックス線分析



図14 表面温度の分布調査

3. 損傷度評価

損傷図および各部材の損傷率のグラフを図15、図16に示す。まず、全体的な傾向を見ると、剥離および剥落は、平安時代の部材で高い数値を示した。一方、江戸時代の部材は、真砂土化の損傷率が高く、明治時代の部材に至っては損傷が全く確認されなかった。

次に、いくつか注意すべき部材について述べる。三層の軸と笠には、大きく脱落している箇所が見られる（図17）。この脱落は、拡大していくと構造的に不安定な状態となる。しかし、脱落した痕跡を観察すると軸と笠の脱落面が繋がっていることから、外から何かしらの衝撃を与えたものであると考えられる。したがって、継続的に脱落する可能性は低いと考えられる。

四層笠の凝灰岩と花崗岩の接合箇所も注意しなければならない。北側の接合している付近を

見ると、かなり損傷が激しくなっている。接合力の低下により、断裂する恐れがあるため、何らかの対策を講じなければならない。

現状、この石塔で最も重要視しなければならないのが基壇である。基壇は各面で、剥離および剥落を確認している（図18）。特に、東面の中央部は大きな剥落の中に断裂も確認された。基壇は基礎および塔身部を支える土台となる。そのため、このまま剥離が進行し続けると、基礎部材と接触しない面積が増え、倒壊する恐れがある。

次に、石塔全体を各方角で比較した損傷率のグラフを図19に示す。真砂土化に関しては、各損傷の中でも、方角による顕著な違いを示した。恐らく、北面のすぐそばには木があり、風雨の影響を最も受けなため、このような損傷率の違いが生じたと考えられる。

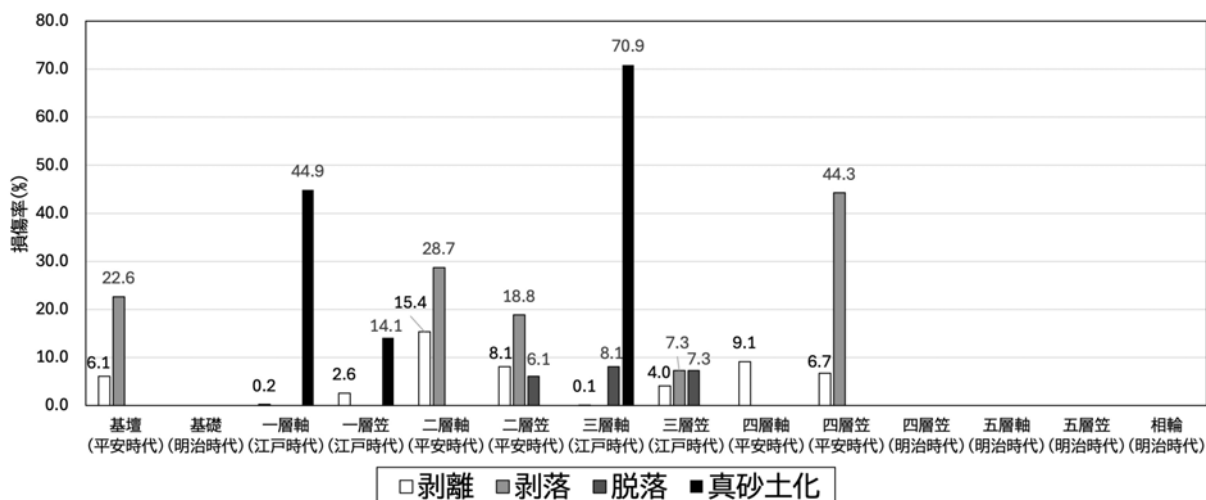


図15 各部材の損傷率

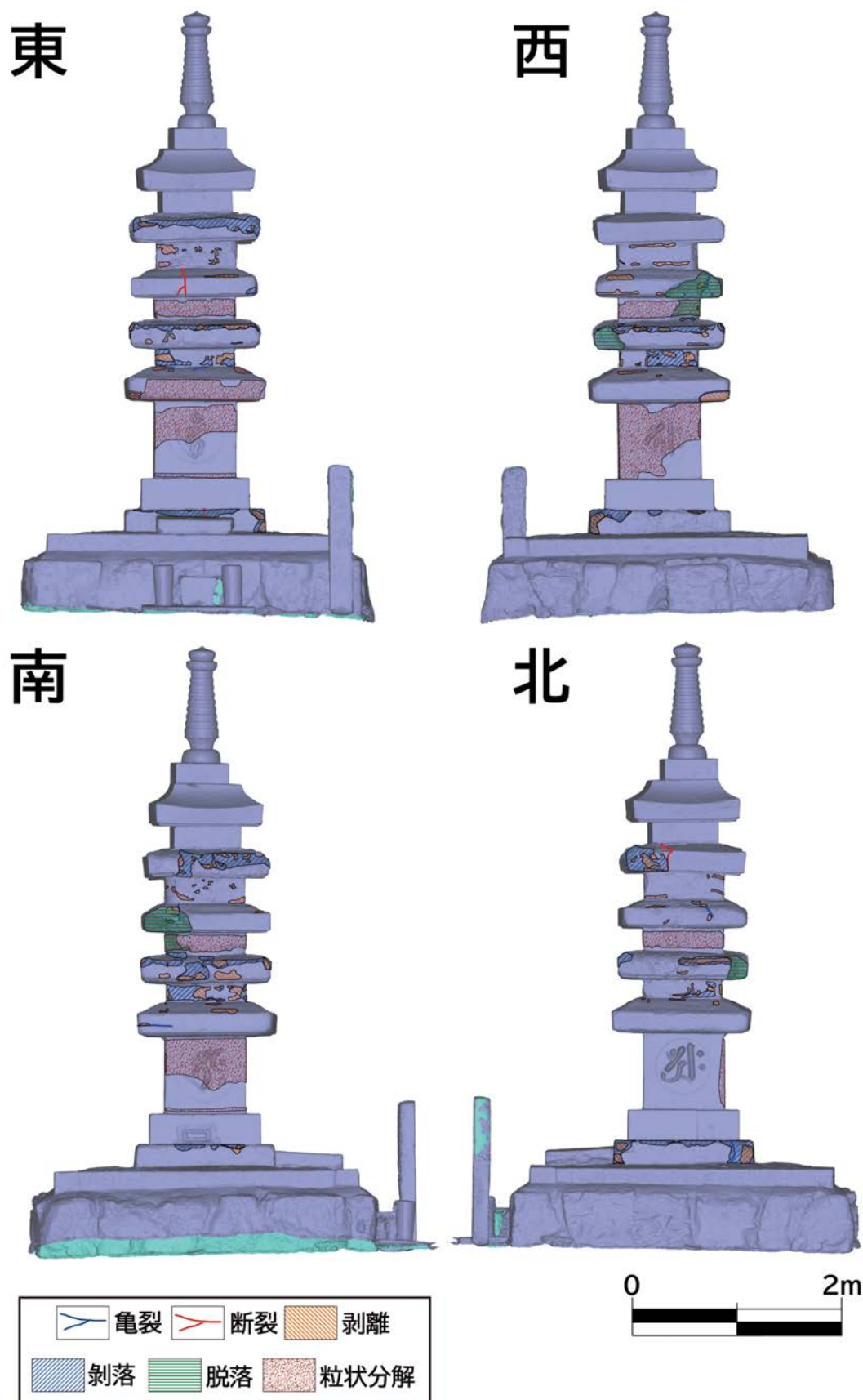


図 16 実忠和尚御歯塔の損傷図



図17 三層軸と笠の劣化の様子(南西から撮影)



図18 基壇の劣化の様子(東から撮影)

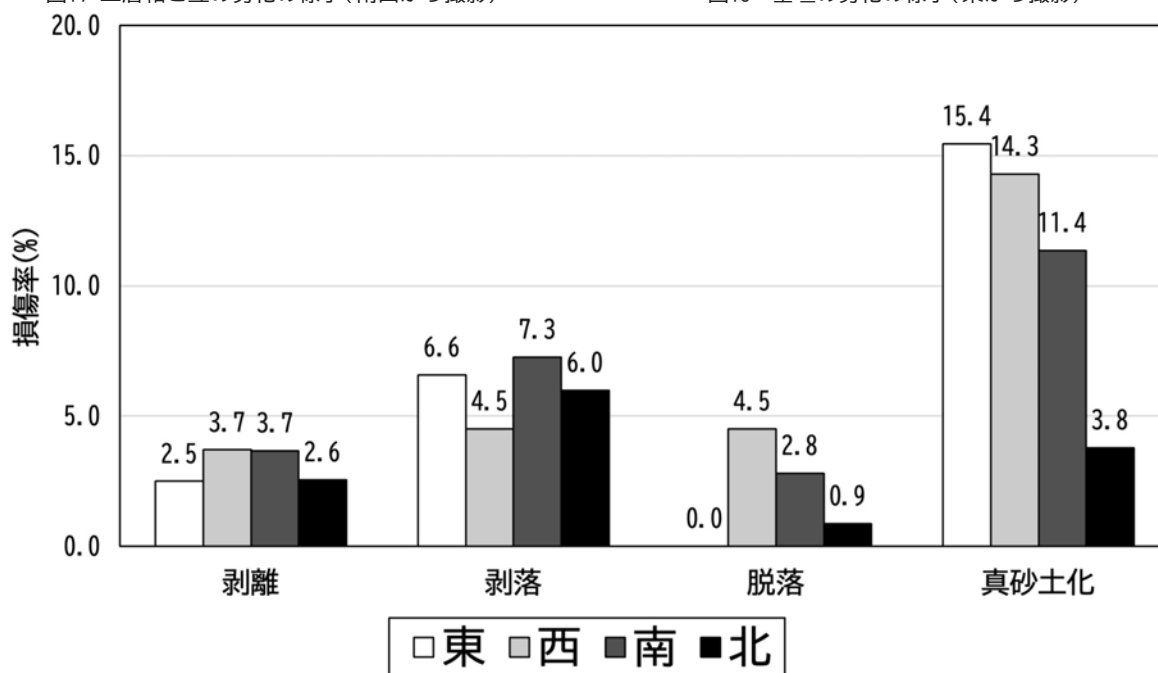


図19 各方角の損傷率

4. 析出物の同定

蛍光エックス線分析の結果から、特徴的な差を示したCa(カルシウム)、S(硫黄)、Fe(鉄)のグラフを図20～図22に示す。

黒色の析出物およびモルタルは、新鮮な箇所よりも、CaとSが多く検出された。恐らく、黒色の析出物は石膏(gypsum)であると考えられる。過去の調査で、凝灰岩の部材の産地推定を目的として、X線回折分析を行なった際にも、石膏が検出された(荒木2024)。

次に、茶色の析出物について述べる。茶色の析出物が発生した原因は、二つ考えられる。一部の茶色の析出物を除いて、新鮮な箇所と析出

物のFeの含有量を比較すると類似した数値を示している。実忠和尚御歯塔の凝灰岩は、黒雲母が多く含まれており、それは花崗岩も同様である。そのため、茶色の析出物は岩石中に含まれる鉱物が酸化したものであると考えられる。

もう一つの原因は、修復時に使用した鉄板や鍔などの金属が影響していると考えられる。軸と笠の間に設置されている鉄板は、酸化しており、雨水によって錆汁として石材に供給され変色したと考えられる。そのため、このように外から錆汁が供給され、鉄の含有量が高くなったと考えられる。現状、石材に錆汁が供給されることで劣化したという報告はないが、美観的に良い状態であるとは言えない。

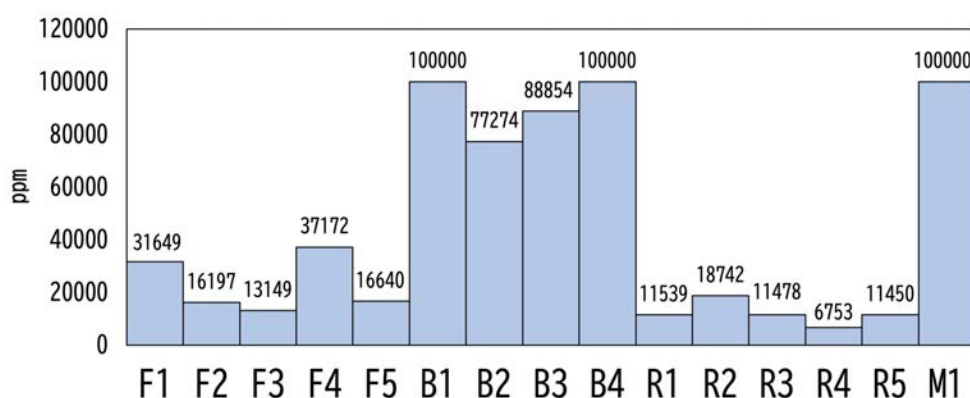


図 20 蛍光エックス線分析の測定結果 (Ca の含有量)

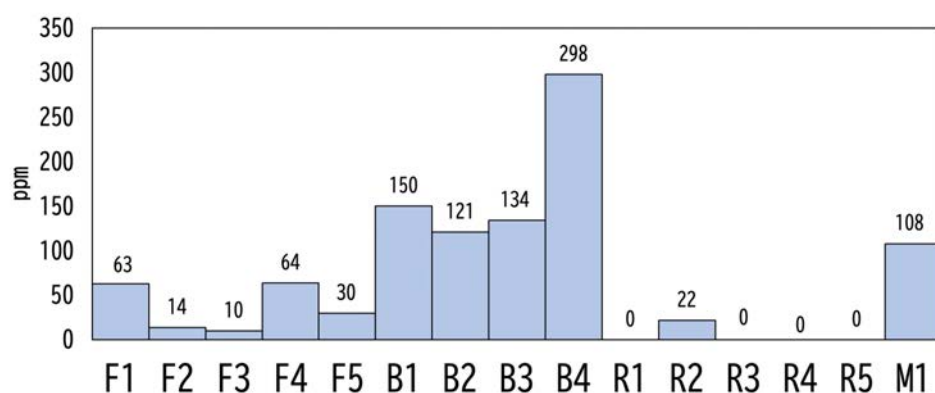


図 21 蛍光エックス線分析の測定結果 (S の含有量)

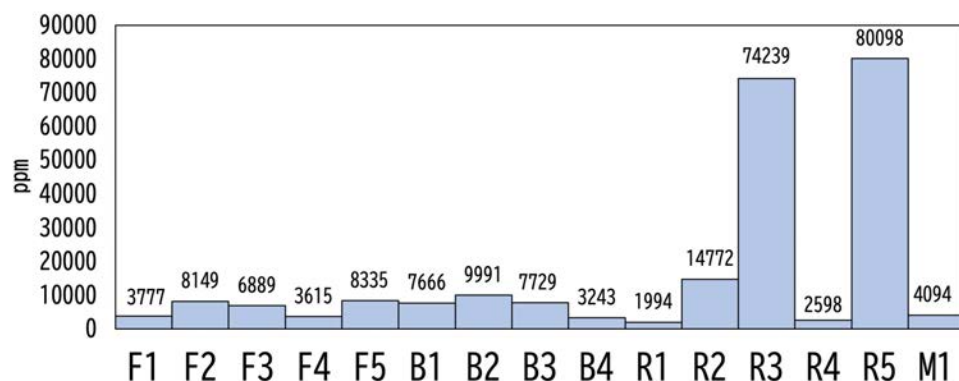


図 22 蛍光エックス線分析の測定結果 (Fe の含有量)

5. 表面温度の分布調査

8月の測定結果を図23～図26に示す。8月は時間が経つにつれて、東・南・西の順に表面温度が上昇していった。全体的に、軸より笠の温度が高い傾向にある。北面に関しては、近くの木が影となり、相輪を除いて、約30℃以下

の状態を保っていた。

次に、1月の測定結果を図27～図30に示す。1月は笠が30℃を少し超えるくらいで、他の部材は10℃以下であった。しかし、0度を下る部材は確認されなかった。そのため、凍結融解現象が起こる可能性は極めて低いと言える。

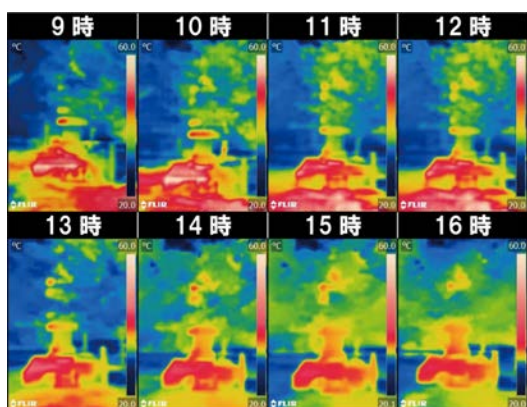


図23 8月の撮影結果(東から)

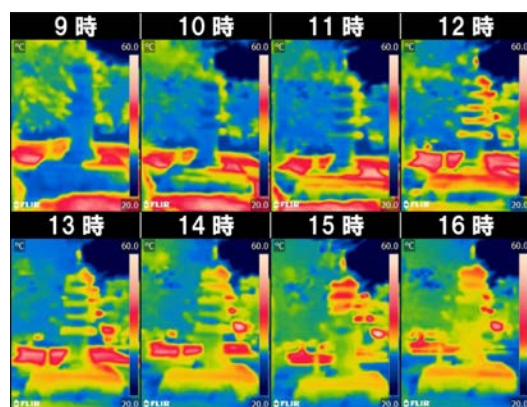


図24 8月の撮影結果(西から)

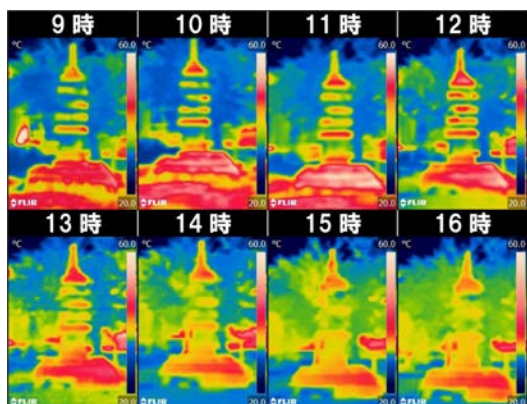


図25 8月の撮影結果(南から)

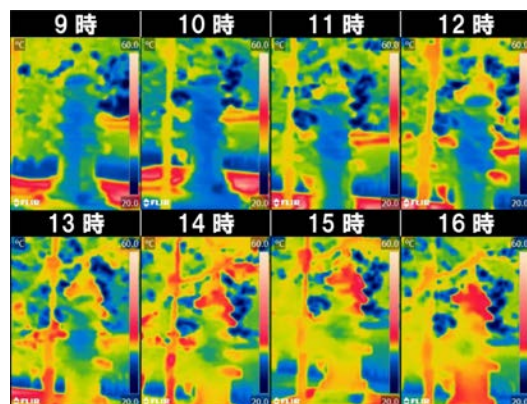


図26 8月の撮影結果(南西から)

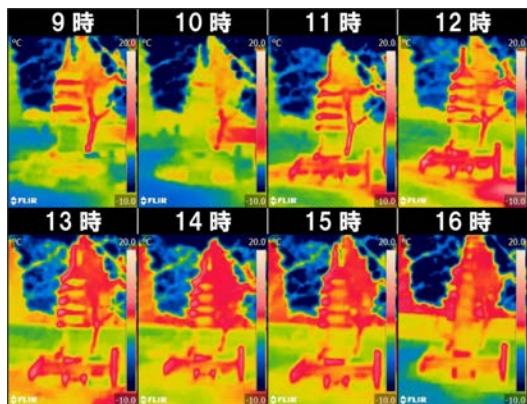


図27 1月の撮影結果(東から)

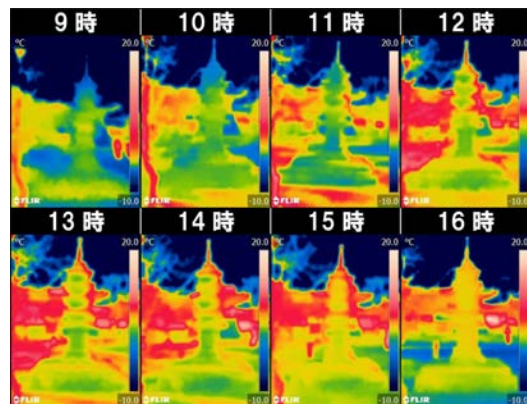


図28 1月の撮影結果(西から)

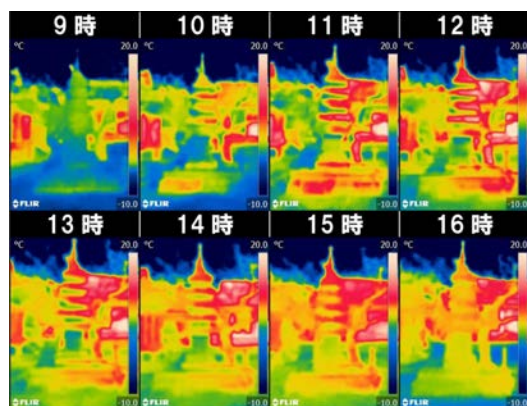


図29 1月の撮影結果(南から)

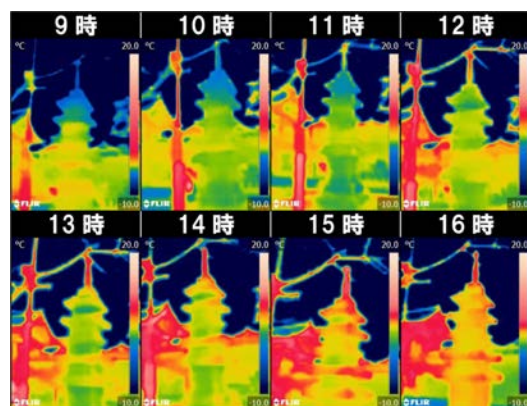


図30 1月の撮影結果(南西から)

6. 劣化メカニズムについて

分析結果から、実忠和尚御歯塔の劣化のメカニズムについて考察する。

まず、凝灰岩で発生した剥離について述べていく。結論から述べると剥離は、明治時代の修復の際に使用されたモルタルが白華現象を引き起こし、大気汚染の影響を受けたことによって発生したと考えられる。

白華現象とは、モルタル等のセメント材料の中に含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (水酸化カルシウム) が雨水などによって溶け出し、水分の蒸発に伴い、石材表面に CaCO_3 (炭酸カルシウム) を主成分とする鉱物が析出する現象である。

CaCO_3 は大気汚染の影響を受け、石膏である CaSO_4 (硫酸カルシウム) に変質する。そして、空気中の浮遊汚染物質を取り込み石材表面で結晶化し、黒色に変色する。これはクラストと呼ばれるもので、石材表面を硬い膜で被うため美観を損ねるだけでなく、変色した表面は膨れ上がり破裂し、内部へと劣化が進行していく。

奈良市内で大気汚染が文化財に与えた影響については、西山(1994)が報告している。以上の点に加えて、モルタルと黒色析出物の Ca と S の含有量が類似している点、クラストを形成している点、過去の調査で石膏を検出している点から、修復に使用されたモルタルが原因であると判断できる。明治の修復から約120年の間で起きたこの劣化現象は、このまま放置し続けると継続的に剥離は進行し続ける。

次に、真砂土化について述べる。真砂土化は、岩石が土に変わる一般的な風化の過程である。真砂土化に至るまでには、いくつかのプロセスがある。岩石は、熱を帯びると鉱物の熱膨張率の違いから歪みが生じ、粒子状に剥落する。また、鉱物に含まれる成分は、酸化・加水分解・溶脱などの化学反応を起こし、真砂土化が起きるとも言われている。しかし、これらの現象は、長い年月を経て起こる。

以上に加えて、損傷度評価のところで述べた、基壇や四層笠の劣化による構造的不安についても対策していかなければならない。

7. 今後の展望

早急に解決すべき点をまとめると、凝灰岩の剥離の進行、基壇や四層笠の劣化による構造的不安の2点が挙げられる。

凝灰岩の剥離の進行を制御するためには、要因となっているモルタルを除去するしか方法がない。現状、軸はモルタルを充填していることで自立している部材もある。そのため、解体修復は必要不可欠となる。解体修復を行うことで、基壇と四層笠の修復あるいは部材交換することができ、構造的にも安定する。

しかし、実忠和尚御歯塔は、文化財に指定されておらず、資金面において保存することが難しい。今回、作成した損傷図は定期的に作成することで、調査時の損傷の進行度合いを把握することができ、モニタリング調査にも繋がる。今後は、文化財指定に向けた活動と同時に継続的なモニタリング調査を行っていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、新薬師寺住職中田定観氏には多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

荒木徳人 2024「新薬師寺に所在する実忠和尚御歯塔の造立年代について」『研究紀要』25号 愛知県埋蔵文化財センター

小岩正樹 2014「東大寺における実忠の造営事績とその活動形態」『日本建築学会計画系論文集』79巻 696号

西山要一 1994「酸性雨による生態系影響などの被害 東大寺など文化財への大気汚染による影響」『環境技術』23巻 12号