

## 写真測量技術を応用した文化財形状情報のアーカイブと劣化評価 -CADによるデータ化から4D-GISへのパースペクティブ-

津村 宏臣  
同志社大学 文化情報学部

文化財は、それが同時代的に機能していた時の姿をそのまま残している場合は少ない。文化財に起こる劣化という物理現象は、ある価値観においてはそれを抑制しようとする発想もあるが、一方では、劣化そのものが、文化財という“モノ”の計り知れない(Un-measurable)な価値の外的形成因子であることも否めない。本研究では、タイのアユタヤに所在するマハタート寺院(Wat Mahathat)の煉瓦建造物を対象に、その3次元形状の劣化に関して、写真測量技術を応用した形状データアーカイブと、1次元の時間情報を属性情報とした時系列変化による劣化評価を実施した。また、その中で、文化財を1つの「本質的モデル」として概念化し、評価とモデリングを実施する。

### DCM archiving of the Cultural Properties for assessment of the collapsing - Perspective from Digitizing with CAD to Archiving with 4D-GIS -

Hiro'omi TSUMURA  
Faculty of Culture and Information Science  
Doshisha University

The purpose of this study is to apply the 3D photogrammetry for the collapsing cultural properties, to indicate some perspectives about its application on the practical scene, and to assess the concrete data of the Wat Mahathat. Through this process, our digital modeling concepts of cultural properties which are one of the most important consensuses on JSAI and CAAJapan will be presented.

#### 1. はじめに

文化財は、それが同時代的に機能していた時の姿をそのまま残している場合は少ない。「形あるモノは全てこわれる」という物理学の保存的自己組織化法則を思い出すまでもなく、われわれは経験的にそのことを知っている。文化財に起こるこの劣化という物理現象は、ある価値観においてはそれを抑制しようとする発想もあるが(e.g. 高松塚古墳壁画の劣化とその保存や修復 etc...)、一方では、劣化そのものが、文化財という“モノ”の計り知れない(Un-measurable)な価値の外的形成因子であることも否めない。だが、これまでの文化財データアーカイブに関しては、その属性情報のテキストベース化すら脆弱であり、さらにその劣化情報を体系的にアーカイブする発想は皆無に近い。そこで本研究では、この劣化という物理現象を計量的に扱い、その情報をアーカイブしてモニタリングに役立つアプローチを検討したい。

筆者と東京文化財研究所文化遺産国際協力センターは、2000年からタイ・マハタート寺院煉瓦建造物の劣化評価に関し、デジタル写真測量計測を応用しながら実践的に3次元形状劣化のモニタリングを実施している。本研究では、これまでの劣化評価を継続すると同時に、遺跡

(遺構)の3次元構造情報に関する情報モデル化に関する研究を進めており、ここでは、従来型の3次元形状情報取得から、4次元的なGISをもちいたアーカイブシステムへの移行と劣化解析に関する現状を報告する。

#### 2. 対象と背景

本研究で対象としたのは、タイのアユタヤに所在するマハタート寺院(Wat Mahathat)の煉瓦建造物である(Fig. 1)。1992年以来、東京文化財研究所はタイ国文化省芸術総局とタイの文化財の保存修復に関する共同研究を実施しており、マハタート寺院は共同研究のサイトのひとつである。Fig. 2に示すように壁状遺構で、主として塩類の析出による風化が観察される。遺構の劣化やそのメカニズムに関しては、朽津ほか(1998)や石崎ほか(1999)などの論文に詳述されており、2004年3月にはこれらの研究成果に基づいて遺構上部の樹脂処理が行われた。さて、筆者らは年に2~3回現場を訪れているが、訪れるごとに煉瓦片が壁の周囲に落ちているのが観察され、また、新たな亀裂が生じているようにも見受けられ、数ヶ月の間にも劣化が進行していることが予想された。しかし、煉瓦の亀裂の発生や成長、煉瓦片の剥落の量について定量的に評価を行ったことはなかった。

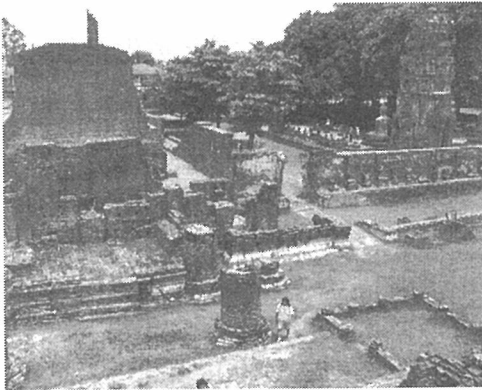


Fig 1 マハタート寺院の煉瓦建造物



Fig 2 マハタート寺院の煉瓦建造物

そこで、今回、2000年に6×6の写真測量用アナログカメラで撮影していた写真と、2004年3月の遺構の樹脂処理と同時にデジタルカメラで撮影した写真とを比較し、保存処理前の4年間の劣化の進行状況について、定量的な評価を試みた。

### 3. 煉瓦建造物の計測と評価

#### 3-1 目視と画像解析による評価

煉瓦建造物の劣化には、塩類析出の様に、機構として連続的で対象に係る物理応力がある閾値に達した時点で起こる変化（亀裂や剥落）と、連続的ないし規則的な機構によらない突発的な変化（事故による破砕）がある。最初目視による対象の観察を通じて、いくつかの視認できる劣化のパターンを整理しておく。Fig. 3の各画像は、いずれも左が2000年、右が2004年撮影写真で、幾何的な補正はおこなっていない。

Fig. 3の①は、壁状遺構の基底に近い部位の煉瓦の脱落とその周辺の状況である。a部にあった煉瓦が脱落し、その際壁体部側で生じた上向き応力によりb部煉瓦の縁部が加圧され剥落を起こしたと考えられる。塩類の析出とその

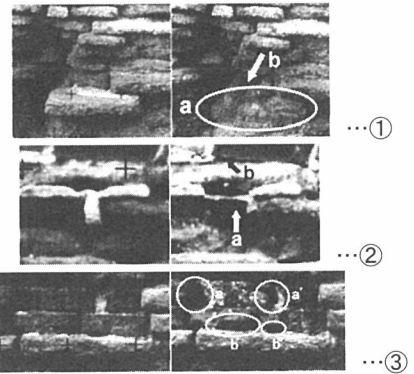
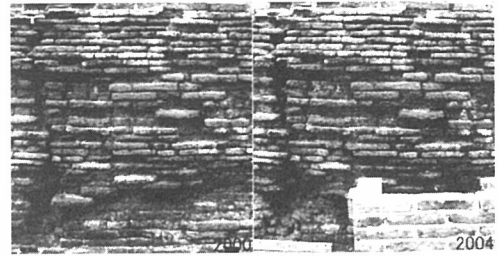


Fig 3 煉瓦の劣化状況

蓄積した応力による変化の可能性もあるが、Fig. 3の①右で分かるように、機器保護のために新たに設置した煉瓦構造物に近く、この設置工事の際の事故によるものとも見うけられる。

Fig. 3の②は、煉瓦の間隙にあるモルタルの剥落と溶出である。a部は、2000年にすでに脱落していた煉瓦の上面を覆っていた薄いモルタルが、その後の亀裂の成長と溶解によって剥落した状況を示す。また、化学性劣化のため、b部でモルタルの溶出がおり、上部の煉瓦との間に新たな空隙が生成されている。ただこの空隙については、他のモルタル部位ではこうした空隙が顕著でないことから、モルタルの溶出だけでなく、壁体全体に係る物理的応力の歪みがb部に現れている可能性も示唆できる。

Fig. 3の③は、煉瓦と煉瓦の継目に見られる特徴的な表面剥落の例である。aおよびa'部は小口面を接する煉瓦の継ぎ目部位での縦位の剥落、bおよびb'部は上下端面を接する煉瓦の継目部位での横位の剥落状況である。aおよびa'部は2000年ですでに亀裂が発生しており、これが剥落の原因と考えられる。また、bおよびb'部では、2000年では顕著な亀裂は観察できないが、一部に同様の萌芽的亀裂も観察でき、同じような機構で剥落したと考えられる。

以上は一般的な劣化状況の代表例である。①の煉瓦の脱落は事故的背景の可能性があるが、②や③の亀裂や剥落は塩類の析出と関連した変化と評価できる。だが、丹念に画像を観察すると、劣化は壁面全域で均密に発生しておらず、

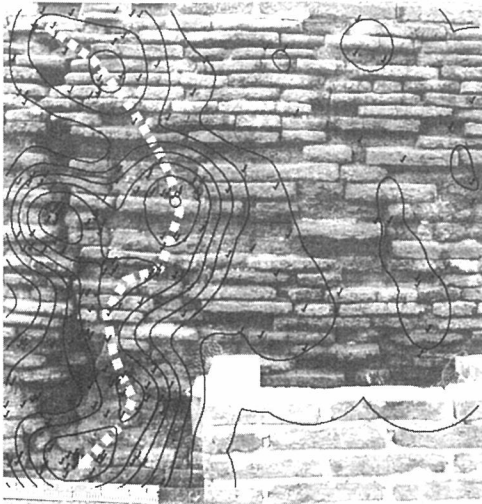


Fig 4 劣化ポイントの等密度分布曲線と接峰線

視認できる劣化ポイントが、画像左辺寄りの大規模亀裂の周辺に集中する傾向が看取できる。この亀裂周辺の煉瓦が特に塩類の析出に対して脆弱な材料的性質を持つ可能性だけでなく、その他の因子も想定する必要がある。

そこで、2004年撮影の画像の各ピクセルから一定距離でバッファを発生させ、その範囲内の劣化ポイントを算出してその等密度分布曲線を作成した (Fig. 4)。すると、劣化ポイントの高密度分布域と大規模亀裂とのオーバーラップが確認でき、さらに大規模亀裂が発生していない部位での集中も新たに評価された。亀裂や剥落が複合的原因で発生することは自明であり、壁体全体に係る物理応力が、この大規模亀裂を軸に歪み、周辺部位が他よりも強い応力下にある蓋然性が示唆される。また、物理応力が煉瓦表面の亀裂や剥落と直接的な相関をもつと仮定すると、密度分布曲線の接峰線は、今後派生する亀裂の成長予測を示唆する可能性もある (Fig. 4の白鎖線)。ただ、この評価には、壁体全体の空間的変動データと壁体に係る応力の測定が不可欠なため、今後の課題としたい。

### 3-2 写真測量による計測

目視による観察と記載は定性評価であり、亀裂の成長や剥落を標準化ないし定量化することは難しい。塩類の析出による劣化を時系列で評価するには、煉瓦表面で発生する微細な変化を計測して数値的記録することが有効で、こうした定量評価をふまえた劣化状況の検討が必要である。亀裂や剥落は原理的に三次元的な物理現象であり、三次元的に計測・記録される必然性もある。これに対し、写真測量による計測は、他の方法に比して現地での作業効率や機動性が格段によく、機材も安価に準備できる。こうした背景から、ここでは写真計測技術を適用した

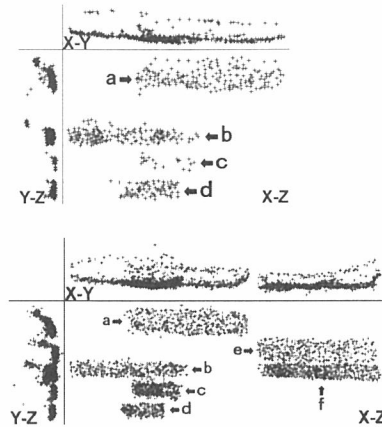
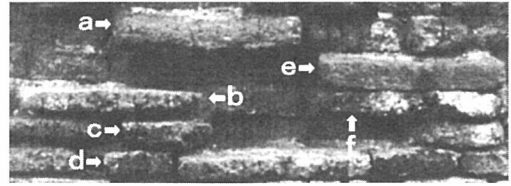


Fig 5 3D計測ポイントの比較

煉瓦建造物の構造・形状情報の取得と、その三次元的なデータを用いた劣化評価を実践した。

計測に用いた写真は、2000年に写真測量用アナログカメラ (Rolleiflex6008 metric) で撮影した34枚と、2004年に民生用デジタルカメラ (DiMAGE 7 Hi 5.0 MEGA PIXELS) で撮影した28枚である。前者は、煉瓦建造物全体の二次元測量図作成が目的で撮影されており、複数の単写真をバンドル調整して三次元座標値を計測するよう、対象に対して多方向から収斂撮影された写真である。後者は、写真計測での点群データ作成を目的として、立体写真計測用に対象に対して平行撮影された写真である。また、2000年の撮影では測量基準が準備されておらず、2004年の写真には水平面と距離がわかるモデル座標系構築用の基準点が撮影されている。基準点の条件から、はじめに2004年の写真から被写体空間のモデル座標系を構築し、写真を比較しながら劣化していない共通点を2000年撮影写真の基準点として転用、2004年のモデル座標系に準拠した座標系を構築して、共通した絶対座標系に移行する方法を採った。

写真測量による計測の手順を示す。まず、2時期の写真は異なるカメラで撮影されており、各カメラの幾何光学補正やフィルム、コンパレータの幾何補正 (2000年分のみ) をおこない内部標定を実施した。この際、2004年分については撮影された基準点を、2000年分については2004年分で構築されたモデル座標系上での共通点を利用した。次に、2004年分については複数のステレオペアを選別して相互標定し、そのペ

Table.1 撮影年別基本統計量

	Mean	Standard deviation	Kurtosis	Skewness
2000	0.031	1.3543cm	6.149357	0.198128
2004	-1.041	1.6769cm	2.234389	-1.643672

(cm)

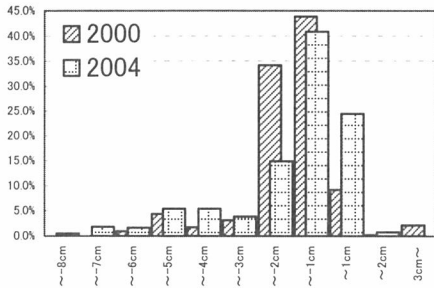


Fig 6 計測点値の度数分布

アを接続評定して外部標定解析をおこない、撮影のカメラ位置と対象までの被写体距離、カメラの傾きなど、共線条件の外部標定要素を計算した。同じように、2000年撮影分についても、外部標定解析をおこなって被写体空間の座標系を構築した。最後に、標定解析結果を参照し、2時期それぞれのステレオペア写真について偏位修正画像を作成した。以上により、2000年および2004年撮影の写真セットに、2004年撮影のモデル座標系に準拠した共通の絶対座標系を設定され、被写体の三次元座標値の直接比較が可能となった。

Fig. 5は、上段のアルファベットで示したa～f(2000年撮影分はa～d)の煉瓦の計測点を絶対座標空間に展開した図である。ある計測点が2000年から2004年にどれだけの方向に変化したかを、計測点を同定しつつ計量評価することができる。具体的に計測点での経時変化を評価するため、Y軸方向の変位を抽出して統計量を求めるとTable.1の様になる。平均では約1cmの減少が評価できるが、尖度が減少し、歪度がマイナスに振れることから、相対的に緩突で左に裾が長い出現頻度分布へ推移したことが分かる(Fig. 6)。4年間で一様に1cmずつ表面が剥落したのではなく、煉瓦縁部の剥落によって大きく欠落した個所が多数あると評価するのが妥当だろう。このような計測と評価を壁面の部位毎に実施すれば、目視による評価では標準化できなかった劣化の場所別の特性と時系列での劣化様相を把握できるようになる。

### 3-3 計測点の面的内挿と評価

写真測量による計測では、計測点そのものの変位の定量化は可能だが、面としての傾向はバルクで把握せざるをえない。Table. 1は計測値全体の傾向で、それは面的あるいは構造的な劣化様相を具体的に示唆してはいない。このバ



Fig 7 DCM・TINと3次元モデリング

ルク傾向の中には、煉瓦の脱落によって生じた変化も、塩類の析出による表面の微細剥落も、物理的応力による亀裂もすべて含まれており、不連続三次元曲面構造体の形状評価手法としては不十分である。

この計測点の点群から被写体の面的形状を再構築する手法に空間内挿がある。ここでは情報の次元を還元して2.5次元として空間内挿し、相互に面情報化された形状データの差分により、劣化様相の評価を試みる。空間内挿とは、位置情報を持つ既知のデータを使って、未知の位置のデータを予測する方法で、様々な内挿法が研究されている。この3次元点群を空間内挿する際に利用される最も一般的な手法が、近隣の点を接続しその間隙を三角形でパッチ状に埋めていく、TINである。例えば、Fig. 7のaは、X-Y平面に規則的に配列された高さ値(Z値)をグリッド法で内挿したモデルで、規則的な測点とグリッドの大きさが形状表現の確度に反映する。bはTINで、不規則的な測点間を三角形で内挿する。各三角形は面積と傾きをもつため、計測点以外の未知点でも関数計算により高さ値を求めることができる。このTIN表面を三次元的に俯瞰するとcになる。写真測量による計測のように、計測点の不規則な場合に有効な内挿法の1つである。ただ、TINによる空間内挿は、計測点を同定しつつ劣化特徴点を設定すれば、微細な形状のモデリングが可能な反面、計測点が少ない、あるいは計測点間距離が大きい場合には、その間隙の形状が反映できない。

計測点間をなめらかに曲面内挿する代表的な手法に、数学的なスプライン関数による傾向面と、統計学的な空間自己共分散をもちいたクリギングがある。一般的に、スプライン関数による傾向面は計測点間を緩やかな三次元曲面で内挿するため、先のTINと同様、測点間の微細な形状変化を反映できない可能性がある。これに対し、クリギングは空間自己共分散をもちいており、最適内挿法とも言われる。煉瓦構造物の形状評価には、形状特徴点を写真で同定しつつ計測したTINを一義的に、計測点間の内挿が困難な場合にクリギングを二義的に利用した。

Fig. 5の煉瓦bを例に、空間内挿の手順を示す(Fig. 8)。aはX-Z平面を固定し、Y値が高さ値となるよう座標変換したときの、計測点の平面分布である。各計測点には、X-Z次元での位置情報と、属性情報としてのY値が付与されている。次に、この不規則な計測点に

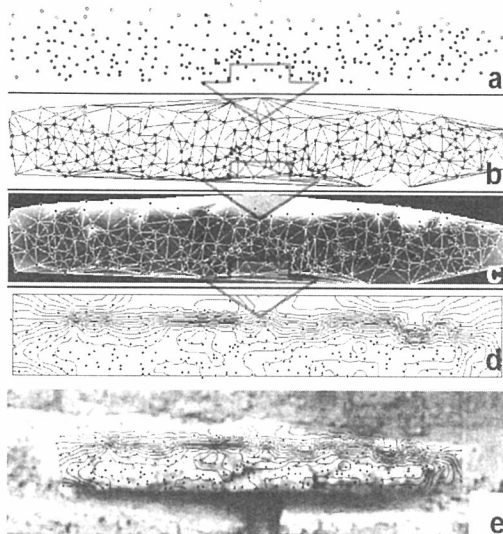


Fig 8 内挿法と3D面データ構築

TIN を適用したのが b である。これにより未計測域が三角形で内挿される。次に、写真測量による計測値との相互検証を行うため、写真画素数に併せて TIN からグリッド法で空間を再内挿し、規則的な Y 値の行列データを作成して C を作成した。ただ、b や c に見られるように、形状表現が不明瞭な部位が見られたため、同じ計測点を使ってクリギングをおこない、TIN から生成した Y 値の行列データに合わせたグリッド情報に変換、それらを併せて平滑化し等差曲線表現したのが d である。以上が、写真測量による計測点の点群から、煉瓦表面の不連続三次元曲面を行列データとして再構築する手順で、幾何補正した写真画像と重ねると e のようになる。

この方法により、Fig. 5 の煉瓦表面を対象とし、2000 年と 2004 年の写真セットから、煉瓦表面部分の行列データを再構築したのが Fig. 9 で、計測点、TIN モデル、クリギングによる等差曲線図を重ねている。それぞれ計測点数が異なるため、重複する計測範囲のみの比較となるが、それらをオーバーレイ処理して差分を抽出することで、2000 年から 2004 年にかけての煉瓦表面の面的な形状変化を評価できる。Fig. 10 では、煉瓦 a・b および d の 2000 年と 2004 年の差分値を 256 階調のグレースケールで表現し、元の煉瓦表面の形状と比較できるように、2000 年の煉瓦表面の等差曲線図を重ねて表示している。a 部は、すでに亀裂が認められた部位やその周囲の応力作用部位での顕著な変化を示している。これは亀裂の拡大に伴う 3 次元劣化である。b 部は、等値線の緩急曲部で見られる変化で、表面の突部や縁部が剥落した状況を示している。Brick a の左下端部の b は、煉瓦の小口端部が大きく剥離した様相を捉えている。c 部は、表

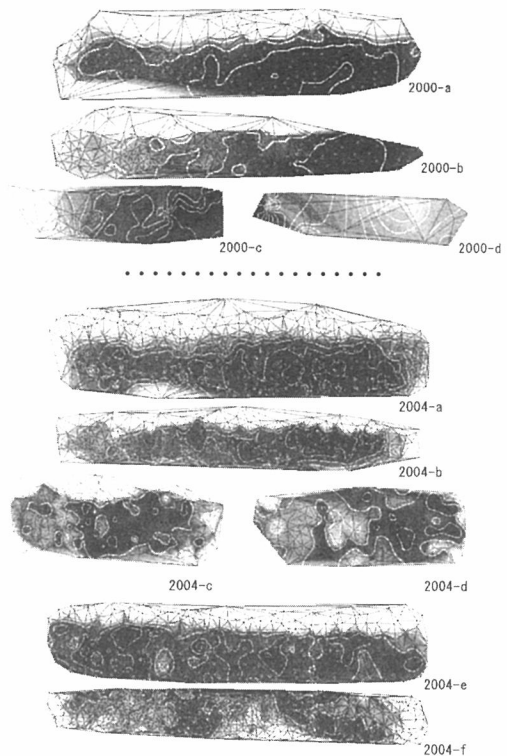


Fig 9 煉瓦表面 DCM の構築と比較

平面で見られる変化で、面的な剥落状況を示している。それぞれの劣化のパターンは、数量的に把握でき、この 3 つの煉瓦では、亀裂の拡大や突部の剥落が相対的に多く、劣化変位量は亀裂の拡大が最も大きいことが評価できる。

a 部や b 部のパターンは、劣化の前段として亀裂や突部部といった煉瓦の形状が問題となっており、大局的には煉瓦の突部が落ち、全体的に丸みを帯びる形態への変化と理解できる。しかし、これを形状変化の機構としてみれば、その前段としての亀裂や突部部がいかに形成されるのかが不明である。そこで、表平面の剥落である c 部のパターンについて少し検討する。

表平面の凹凸を計量評価する手法として、計測点の空間自己共分散を標準化して評価する Moran の I 測度がある。Moran の I は、

$$I = \frac{n}{W} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$n \text{ はピクセル数, } W \text{ は } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$$

で求められ、I は -1 ~ 1 値をとる。たとえば、計測点の周囲の値が計測点の値と大きくかけ離れていれば、I は -1 値に、逆に計測点と周囲の値が近ければ I は 1 値にそれぞれ近い値となる。各煉瓦の行列データから I を計算すると、煉瓦



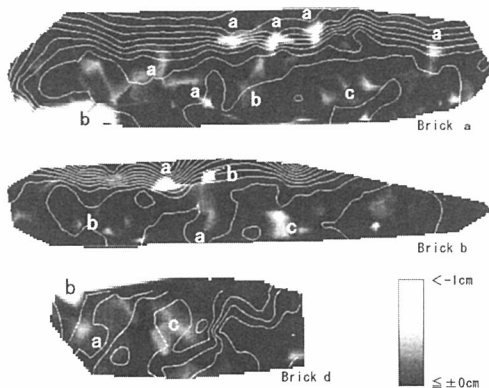


Fig10 4年間の劣化速度(時系列動態)

a では 0.9333 から 0.9084 へ、煉瓦 b では 0.9023 から 0.9012 へ、煉瓦 d では 0.8685 から 0.8118 へ、測度が推移していた。これは、4年間の劣化により煉瓦表面の凹凸が成長していることを示唆しており、煉瓦 d が最も凹凸が多いということがわかる。以上から、先の亀裂の拡大や突曲部の剥落という劣化の前段の面的凹凸は、表平面の微細な剥離の蓄積によって形成される可能性があり、一連の劣化行程を模式的に把握できる。

#### 4. まとめ

煉瓦建造物を対象に、形状情報の記録・保存とアーカイブデータを用いた劣化評価の方法について検討した。目視による定性的評価では劣化状況をパターンに大別し、その壁面における出現頻度分布の密度解析により、劣化機構を予測した。写真計測による定量的評価では、計測点を点群データとして統計処理し、劣化の時系列変化を標準化した。また、計測点の空間内挿による煉瓦表面の再構築と差分による劣化状況評価により、劣化行程の模式化を試みた。結果として、すでに指摘されている塩類の析出による劣化も、①煉瓦各面の微細な表平面剥離、②面的凹凸の形成と亀裂、突曲部の形成、③亀裂拡大と突曲部の剥落、という行程が模式的にはあるが評価できたことは重要であろう。

写真測量で文化財建造物の計測・記録を実施するメリットは、これまで行われてきた手実測と同じ形態のアウトプットが可能で、レーザーレンジスキャナを用いた三次元点群のような形状データを生成できること、測量基準を撮影することで計測精度が保証できること、現場での機動性・利便性が極めて高いこと、民生用デジタルカメラのような安価な機材で実践可能なこと、などがあげられる。また、対象の物理量と質情報を同時にアーカイブできること、その情報を任意形態で出力できること、古写真

(ここでは 2000 年撮影の写真)のように既存の写真を利用しても計測が可能などとは、手実測やレーザーレンジスキャナによる計測では不可能な適用領域といえる。質情報が不可欠な CG のような VR への応用や、写真しか残されていない文化財建造物の再計測などで、強力な技術であることは間違いない。最も重要なことは、劣化を“人為的に”止めるのではなく、劣化をもアーカイブするという発想への転換にある。それは、文化財の価値を不用意に減じることなく後世に継承する重要な手段である。

今後は、定期的に撮影を行って本研究で導出した劣化過程モデルの適合性について検証し、また、この技術の目下の最大の課題ともいえる撮影後の作業を短縮するための撮影手順の確立を目指したいと考えている。

最後に、本プロジェクトを共同で進めている、二神葉子・東京文化財研究所文化遺産国際協力センター研究員、2004 年 3 月にマハタート寺院の煉瓦建造物の撮影を行っていただきました西浦忠輝・国士館大学イラク古代文化研究所教授に感謝いたします。

#### 参考文献

- 石崎武志・朽津信明・西浦忠輝・ユッカ シムネック(1999): タイ国アユタヤの歴史的レンガ建造物中の水分移動解析. 保存科学、38号、pp.154-162.
- 朽津信明・石崎武志・西浦忠輝(1998): タイ・アユタヤ遺跡の劣化と保存に関する応用地質学的調査、日本応用地質学会平成 10 年度研究発表会講演論文集、pp.121-124.
- 津村宏臣・寺村裕史(2002): 考古学における“Digital Heritage”の現状と課題. GIS—理論と応用 vol.10-2、pp.1-8.
- 津村宏臣・寺村裕史(2002): 欧米考古学における“Digital Heritage”の実践—「CAA2002」国際会議報告—. 考古学研究、第 49 巻 2 号. pp.13-17.
- Tsumura,H. and Futagami,Y. (2004): Digital Archive for the conservation of cultural properties with the 3D-photogrammetry application - A case research of the MAE-FUTAGO Kofun burial mound at Gunma, Japan. *Beyond the artifact*, p.119.
- 津村宏臣・二神葉子(2004): 写真測量技術の応用による 3 次元 DCM の取得と利用—文化財保存・活用への展開—. 日本文化財科学会第 21 回大会研究発表要旨集、pp.194-195.
- 二神葉子・津村宏臣(2004): 三次元写真測量技術を用いた文化財建造物の劣化状況の評価. 文化財保存修復学会第 26 回大会研究発表要旨集、pp.58-59.