

城郭石垣の記録・管理における技術革新：石垣 BIM の開発と実践的応用

高田 祐一⁽¹⁾、大村 陸、林 瑞樹⁽²⁾

キーワード

石垣 データ分析 BIM 3DCAD AI 石垣
カルテ 石積み技術 公儀普請 石垣修理

はじめに

文化財の記録と保存において、我々は重要な転換点に立っている。従来、文化財の記録は主に定性的データに依存してきた。これは文化財の多様性と複雑性に起因するものであり、専門家の判断と経験に基づく記録方法が長年にわたり標準とされてきた。特に、何をどのように記録し表現するかという判断自体が高度な専門性を必要とする課題であった。

しかしながら、文化財の科学的な比較研究や客観的な評価を進める上で、定量的データの重要性がますます高まっている。従来の定性的データに基づく比較では再現性の確保が困難であり、また定性的データの定量化には多大な労力とコストを要する上、その妥当性にも課題がある。そのため、これまでは定性的データを中心とした調査研究と管理が主流となっており、それは技術的・環境的制約の中では最適解であったと言える。

近年、社会全体のデジタルトランスフォーメーション（DX）の波は、文化財の分野にも及んでいる。計測機器の低廉化と高性能化、さらには AI 技術の一般化により、これまでは困難であった定量的データの取得と解析が現実的なものとなった。限られたリソースを効率的に活用し、将来に向けて持続可能な文化財保護の取り組みを展開していくためには、適切なデジタル化を推進していくことが不可欠となっている。

本研究では、城郭石垣を対象として、この課題に取り組む。現在、LiDAR などのデジタル計測機器の活用は進んでいるものの、取得された 3D データから石材一つ一つを判別し線画化

する図化作業は依然として人手に頼っている。一面に数千個におよぶ石材の処理には膨大な時間と労力を要し、さらに作業による個人差も避けられない問題となっている。3次元の計測データに対し、人間が手間と時間をかけて標準化されていない2次元の線画データを作成すること自体が経済合理性・科学的なデータのあり方に疑問がある。そこで本研究では、AI 技術を活用した石垣の自動線画化、定量分析と調査管理への応用を提案する。一連のプロセスおよびその効果を「石垣 BIM」と定義する。BIM (Building Information Modeling) とは、建築物のデジタル3次元モデルに様々な属性情報を付与し、設計から施工、維持管理までのライフサイクル全体で活用する建設プロセスの統合管理手法である。部材を1つずつ管理することも特徴である。この手法を石垣管理に応用する。石垣 BIM のプロセスとしては、石垣の3D計測、AIによる石垣石の自動セグメンテーション、3DCADデータの出力、3DCADソフトを用いた定量分析、結果の評価、業務運用である。自

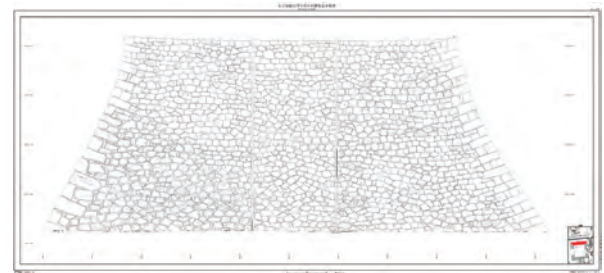


図1 石垣立面図の例（天守台北面）

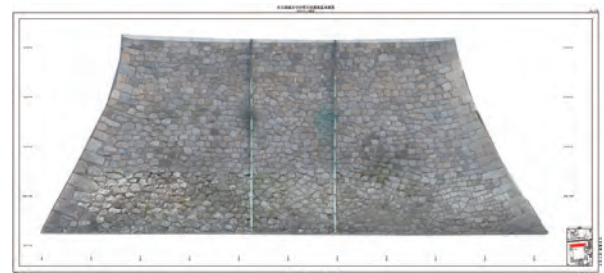


図2 石垣オルソ図の例（天守台北面）

動セグメンテーションと 3DCAD データ出力は ImVisionLabs の板倉健太が開発した。

これにより、データの標準化と定量化を実現すると同時に、作業効率の劇的な向上を図る。さらに、開発した AI ソフトウェアを無償で公開することで、導入コストの低減も実現する。石垣の学術研究においても今までにない資料をもたらした新たな研究視点につながるだろう。石垣 BIM は石垣の記録、管理、調査研究においてブレイクスルーを意図するものである。

本稿の執筆分担については各章末に記した通りである。(高田)

1 石垣 BIM の概要

(1) 背景

石垣調査の成果として石垣立面図(図1)、

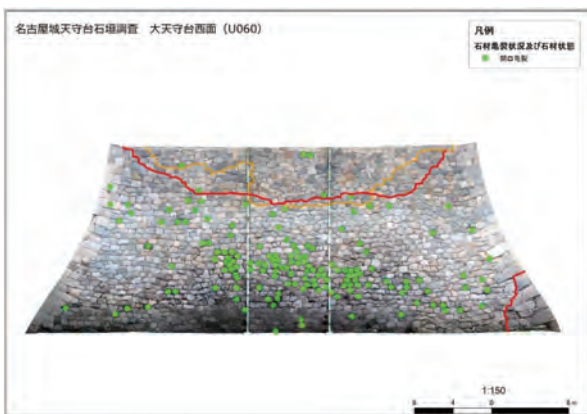


図3 築石中央付近のシンボルを色分けした事例

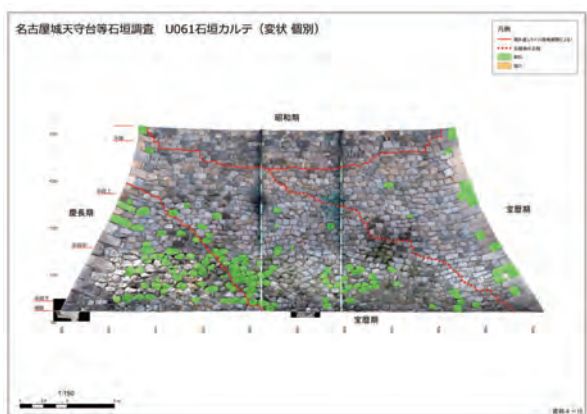


図4 築石の外形を手作業で描画し色分けした例

符番図、石垣オルソ図(図2)、3D スキャンによる3次元点群データなどが作成されている。さらに石垣に関する情報を管理するための仕組みとしてGISによるデータベースを作成して石垣カルテの情報との紐づけを行ったシステムが構築されており、図3のように築石の中央付近に円形のシンボルを配置し、そのシンボルを色分けするなどの方法で活用がされている。

その一方で図4のような築石の形状に沿って色分けするような資料を作成する際にはCADソフトやPowerPoint上での手作業を行う必要があり様々な色分け図を作るためには多大な手間が発生していた。

(2) 面積算出のための築石外形線の作成

石垣の調査および被熱して傷んだ石の補修計画を行うために2DCADで作成した調査図から築石の表面積を求めたいというニーズが発生した。

一般的にCADソフトには図形の面積を算出する機能があるが、その機能を使うためには一石一石の外形線が一筆書きで閉じている必要がある。しかし従来の作図方法で描かれた調査図はそのような描き方になっておらず面積を算定できなかったため、補修面積を算出するために一筆書きで閉じた図形として外形線を作図する作業を行った。また外形線にはメタデータとして符番の情報を持たせることでデータベースとの紐づけができるようにした。

(3) 外形線による築石形状の特徴値評価

築石の閉じた外形線により面積を容易に求められるようになったが、さらに一石一石の幅と高さを求めたいという追加ニーズが発生したことが本取組のきっかけとなった。CADには任意の図形を取り囲む矩形を作成するバウンディングボックスという機能がある。この矩形の辺の長さを石の幅と高さとして考えた。

この機能を一石一石の図形に適用すると図5

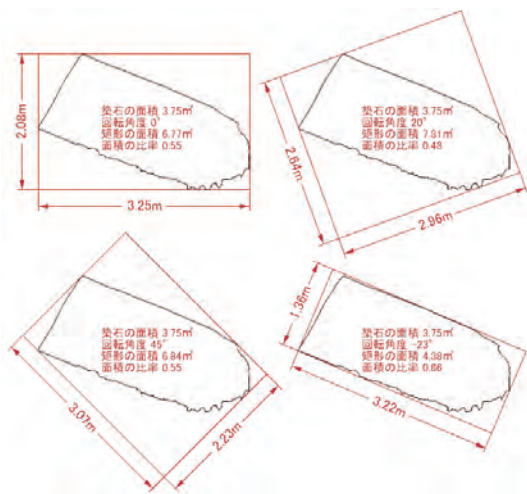


図5 形状分析の手法

の左上のような結果になるがこの寸法は築石の幅、高さとして望む結果ではない。築石はXY座標軸に対して水平直角ではなく傾いているため、その場合は矩形を回転させて図5の右下のように矩形の面積が最も小さくなる場合の矩形の寸法を築石の幅と高さとして考えることとした。同時に矩形の回転角度と矩形充填率（築石の面積を矩形の面積で除した値）を算出した。

現存する名古屋城天守台石垣は慶長期、宝暦期、昭和期と大きく分けて3つの時期に構築・修理されたものであり、それぞれの様相が異なっている。算出した値による様相の違いの定量的な評価を試みた。(林)

2 石垣 BIM の手法

大量な築石に対する上記の処理を行うために3DCAD ソフトである Rhinoceros とそのプラグインである Grasshopper を利用した。ビジュ

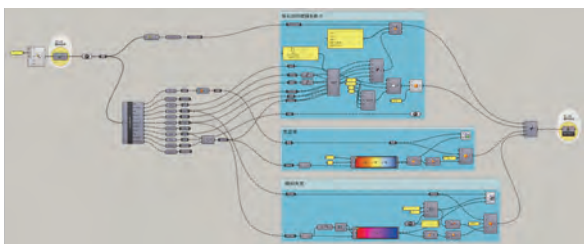


図6 Grasshopper で作成した分析プログラム

アルプログラミングツールである Grasshopper は図6のように様々な機能を持つ部品（コンポーネント）をつなげてプログラムを組むことができ、テキストベースのプログラミングと比較して簡便に扱うことができるため建築業界などで急速に普及している。

Grasshopper で作成したプログラムで築石の回転角度、目地の方向性などの幾何学的特徴を数値化し、さらに得られた結果を視覚化することで、専門家以外にも理解しやすい形での石垣の特徴表現を試みた。(林)

3 分析結果の可視化

(1) 築石の幅・高さ寸法の可視化

図7、図10は高さ寸法で色を赤く黄く緑く青く紫とし、幅寸法で色の濃淡を変更（幅が小さいほど色が濃く）することで築石のサイズを可視化した。

図11は高さ寸法の分布を示すヒストグラムである。平均値、中央値、標準偏差を比較する

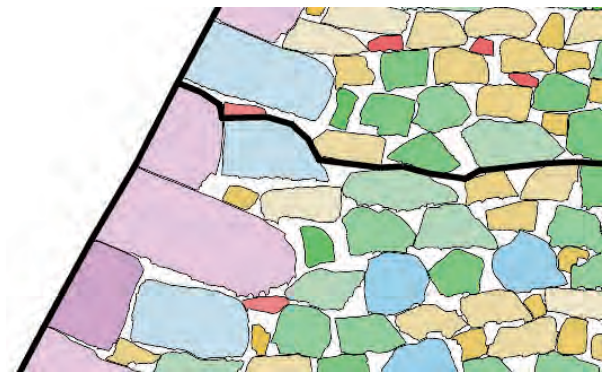


図7 幅・高さ寸法による色分け

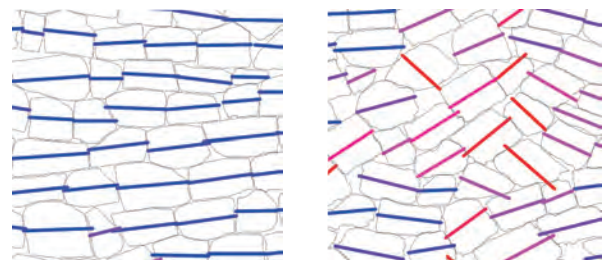


図8 築石の傾斜・目地の可視化

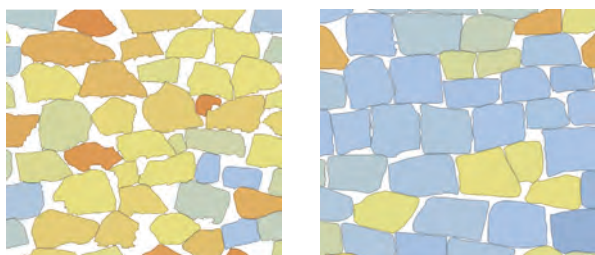


図9 築石の矩形充填率の可視化

と慶長よりも宝暦、宝暦よりも昭和のエリアでサイズが相対的に小さく寸法が比較的揃った築石が利用されていると考えられる。

(2) 築石の回転角度・連続性の可視化

図8、図12では各築石の幅方向の軸線を水平に近い場合は青、45度に近い場合には赤となるようにグラデーション表示している。布積みの場合には青い線が連続的につながる図となり、落とし積みの場合には赤い線が不連続な状態となる。

図13は築石の回転角度の分布を示すヒストグラムである。慶長よりも宝暦、宝暦よりも昭和のエリアで標準偏差が小さくなっており、落とし積みの積み方よりも布積みの積み方の部分が多いことが読み取れる。

(3) 築石の矩形充填率の可視化

図9、図14では築石の面積と築石を囲む矩形の面積との比率（矩形充填率）を計算し、0.5の場合は赤、1.0の場合は青、中間の場合は黄色となるグラデーション表示を行った。築石の外形が長方形に近い整った形か、不整形な形かの評価を狙っている。慶長のエリアでは黄色が多く水色・青がほとんどないことがわかる。

図15は築石の矩形充填率の分布を示すヒストグラムである。慶長は宝暦・昭和と比較して平均値、中央値とも小さく不整形な築石が多いことがわかる。（林）

4 石垣の調査と管理への活用

(1) 現状と課題

名古屋城における石垣の調査と管理はこれまで石垣カルテを中心に進められてきた。名古屋城の石垣カルテ事業は平成29年度（2017）に着手し、全面の石垣カルテ作成完了まであと少しのところまで来ている。

名古屋城では石垣管理のベースとしてオルソ画像を利用しており、石垣カルテに先行して作

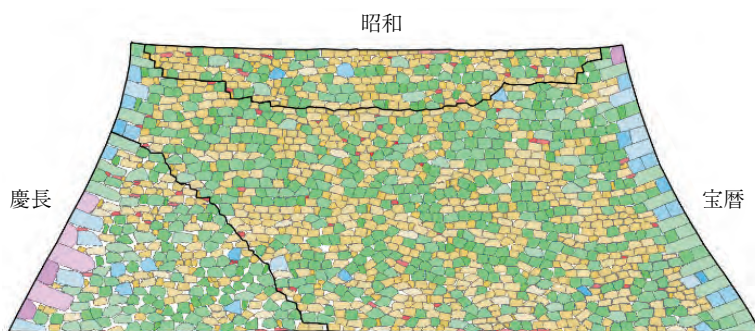


図10 築石の幅・高さの可視化（天守台北面）



図11 築石の高さのばらつき

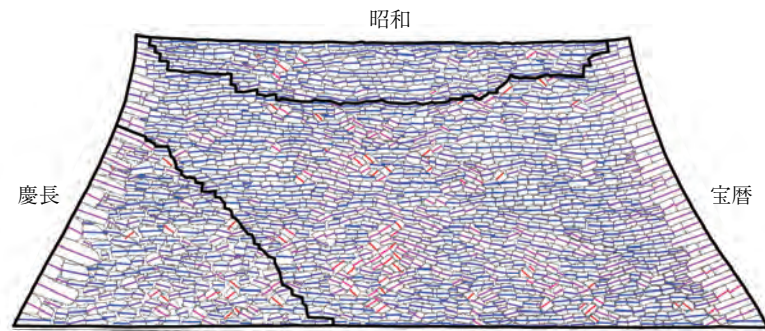


図 12 築石の傾斜・目地の可視化（天守台北面）



図 13 築石の傾斜のばらつき

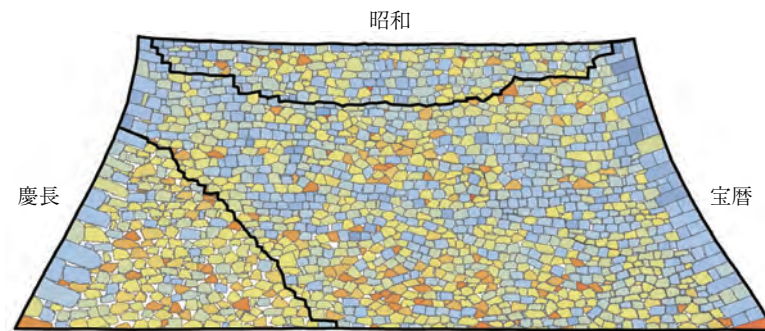


図 14 築石の矩形充填率の可視化（天守台北面）

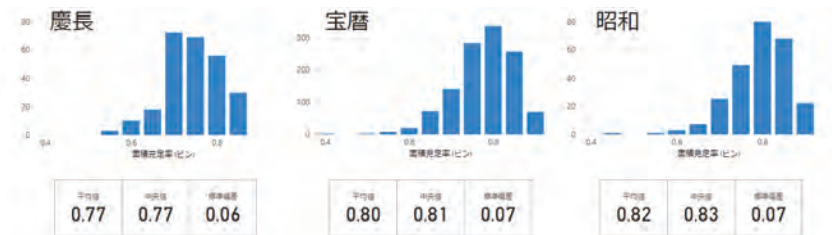


図 15 築石の矩形充填率のばらつき

成してきた。その際にフォトグラメトリ（一部レーザー測量を併用）によって石垣 3D モデルを作成し、そこからオルソ画像を生成しているため、全ての石垣面のオルソ画像と 3D モデルを管理用データとして有している。これを石垣カルテでも利用し、オルソ画像の上に加筆して石垣の現況を記録している。

名古屋城の石垣カルテでは、石垣延長や高さ、面積、勾配といった基本情報から、隅角部・築石部それぞれの石材寸法や石材加工、石質の比率、刻印、矢穴など記載項目が多岐にわたる。

加えて、図 16 のように石材の割れや欠け、間詰石の抜けなどの劣化がみられた位置、積み直しの推定ラインをオルソ画像に書き込み、主な劣化箇所の現況写真を添付して一式となっている。こうした資料について、現在はカルテ作成を進めている段階で、カルテの取りまとめや経過観察は始まったばかりである。このため、カルテによる詳細な記録の評価はまとめ中であるが、城内の全面を対象としたことで劣化が著

しい石垣を抽出でき、優先的に対処しなければならない石垣を把握することができている。

一方で、様々な課題もみえてきている。まずは石垣カルテの記録方法による欠点である。オルソ画像では石垣を 2 次元の画像にしているため、例えば石垣面での膨らみなどはおおよその範囲のみしか記録できず、3 次元的な劣化状況を記録することができない。また、石垣カルテは PDF データで管理されており、新たに築石の割れや間詰石の落下が確認された際には紙出力したものに書き込み、スキャンして別途データ格納するなど、情報がうまく蓄積できていない。

次に調査方法による課題がある。石垣カルテでは石垣を面として捉えており、現況の劣化状況を中心に調査しているため、築石ごとの細かい記録や調査は対象としていない。石垣自体の評価や研究に繋がりにくいデータとなってしまう。劣化状況の調査にあたっても肉眼観察が基本となっており、明確な基準が設けに

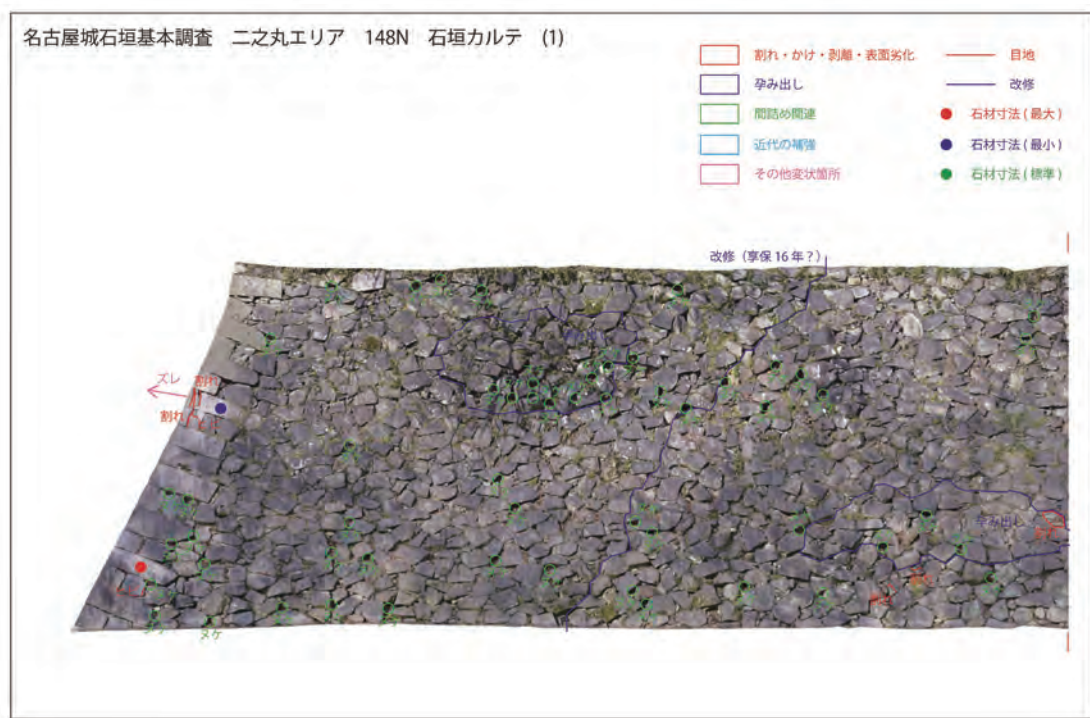


図 16 石垣カルテによる現況記録の例 (148N)



図 17 築石への ID 番号の付与

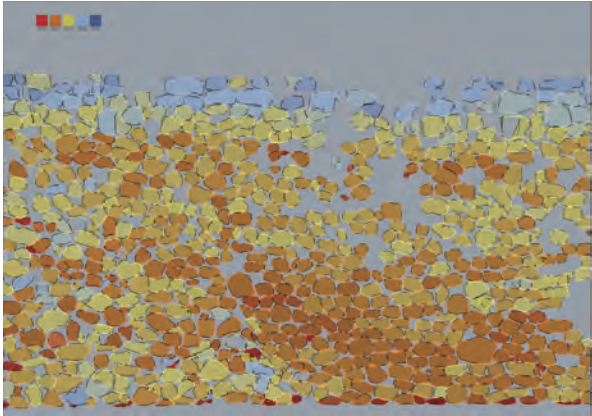


図 19 築石の傾きによる色分け

くいたために調査者によって記録の密度にばらつきが生じている。これらの点で石垣カルテは石垣の総合的な評価を行うには不十分な記録といえる。

石垣 BIM は 3DCAD 上でのデータ蓄積を基本とし、築石ごとの 3 次元情報をもとに客観的なデータ分析ができるため、これらの調査・管理上の課題を解消できる手法として有効である。

(2) 石垣の調査と管理への石垣 BIM 試行

石垣の調査と管理における現状の記録方法と石垣 BIM の手法を比較するため、二之丸外堀南東部の石垣 [148N]⁽³⁾ を例として検証を行った。

はじめに管理上の利点として、外形線が閉じた CAD データがベースとなっているため、築石 1 個ずつに自動で番号を付与することができる (図 17)。付番条件は検討する必要があるが、今回は XYZ 座標が小さいものから機械的に番号を振るよう設定している。隣り合う築石を

連番にできていないが、近い位置で番号が続くようになっている。この築石の付番により、築石単位の詳細な記録が可能となる。

次に前章までみてきたような石垣のデータ分析ができる。築石の幅・高さ寸法による色分けと築石の傾斜・目地を可視化したものが図 18 である。これに加えて築石ごとの傾きを算出することができ、傾きの角度で色分けしたのが図 19 である。築石の傾きを可視化することによって、経年劣化による石垣の膨らみなどの変状を数値によって把握することができる。3 次元による記録がベースにあることで石垣の現状をより詳細に把握できる。

また、築石 1 個がひとつのオブジェクトデータとなっていることで、固有の築石に結び付けて情報を付与していくことができる。様々な調査で確認できた石材や矢穴、刻印などの個別情報を追加していけば (図 20)、その情報を分類して全体で色分け表示することもできる。築石

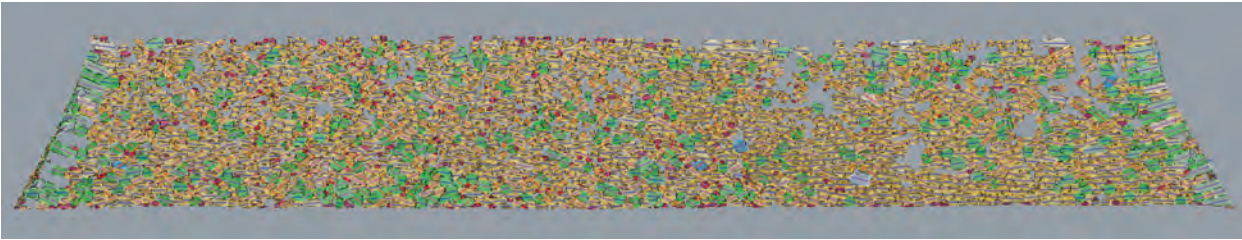


図 18 築石の幅・高さ・傾斜の可視化 (148N)

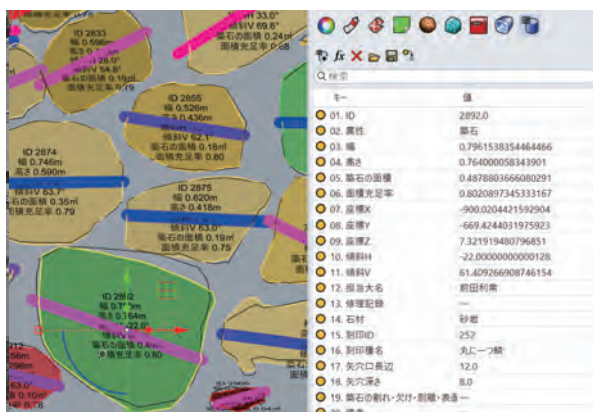


図 20 築石へのデータ追加

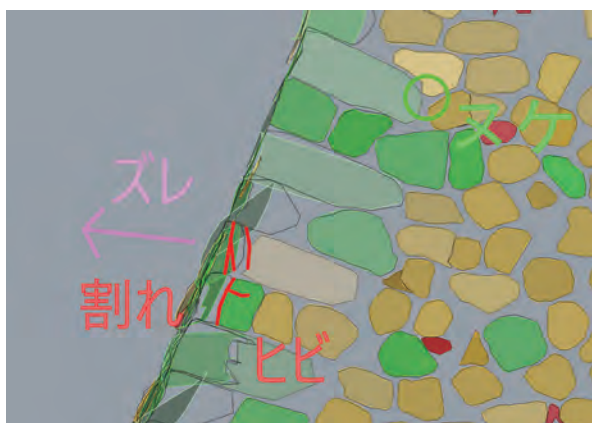


図 21 石垣カルテ成果の追加

ごとにデータを蓄積していくのはこれまでの PDF データによるカルテ管理では対象としていなかったことである。

その他、記録のベースが CAD データであるため、自由に線や図形を加筆することができる。石垣カルテ作成の調査で確認した石垣の劣化状況を石垣 BIM 上にも追加することができる(図 21)。名古屋城では築城時の丁場割も石垣の基礎情報として重要であり、多種多様な情報を集約した図化が可能である。

こうしたひとつのデータに様々な情報を統合する手法は GIS に近いものとなるが、石垣 BIM は 3 次元情報をもったデータである点で石垣の調査・管理の面としても優位性がある。

(3) 石垣の調査と管理における石垣 BIM

全国的にみても 2003 年の日向哲朗らによる

石垣管理データベース構築の重要性の指摘(日向ほか 2003) から 20 年以上が経ち、2015 年には文化庁から『石垣整備のてびき』(文化庁文化財部記念物課 2015) が刊行されたこともあって、現在では多くの城郭で石垣カルテが着手・完了している。このような第 1 段階のカルテ作成から第 2 段階の経過観察や追加調査に移行するなかで、石垣 BIM はカルテ作成の成果を活用して石垣がもつ詳細なデータを新たに得ることができる点で極めて有効である。

石垣 BIM は、肉眼観察によるカルテ作成では見えてこない基礎情報を可視化でき、築石 1 石ずつの情報から石垣面全体での現況を様々な側面から客観的なデータによって把握することができる。石垣 BIM 上に石垣カルテの成果を取り込むことで、肉眼観察とデータ処理による調査情報を統合したデータも作成可能である。また、石垣 BIM によって新たに得られた情報は石垣の評価や研究に繋がり、その城郭全体における石垣の特質をデータ処理によって総括的に検討することもできる。こうしたことから、石垣 BIM によって得られる基礎情報は正に石垣カルテのアップデートに適しているといえる。(大村)

5 石垣研究への適用可能性

デジタル技術の発展により、城郭石垣研究は新たな段階を迎えている。特に BIM 的手法の導入は、従来の定性的な評価から定量的な分析への転換を可能にしつつある。本章では、BIM を活用した石垣研究の可能性と展望について論じる。

BIM の特徴は、石垣を構成する各築石を独立したデジタルオブジェクトとして扱い、その属性情報を統合的に管理できる点にある。これにより、石材の寸法、加工度、石材種、目地の形状など、従来は定性的にしか評価できなかった

た要素を定量的に分析することが可能となる。

この手法は、特に技術史研究において新たな知見をもたらす可能性がある。例えば、室町時代から江戸時代にかけての石垣技術の変遷を、築石の規格性や加工精度の数値的变化として捉えることができる。さらに、公儀普請における割普請の実態解明にも有効である。複数の大名や家中組による分担施工の痕跡を、築石の特徴や刻印の分布パターンとして定量的に把握できるためである。

構造工学的観点からも、BIM は重要な貢献をなす。各築石の正確な形状データと位置関係を 3 次元的に把握することで、石垣全体の構造解析の精度が向上するだろう。これは、耐震性能の評価や、適切な補強方法の検討に直接的に寄与する。また、GPR などの非破壊調査データと BIM モデルを統合することで、石垣内部構造のより詳細な理解が可能となる。

修復履歴の研究においても、BIM は有効なツールとなる。積み直し箇所の特特定は、石材の規格性や目地パターンの数値的な差異として検出できる。これにより、従来は調査者の経験に依存していた判断を、より客観的な基準で行うことが可能となる。

BIM の最大の利点は、データの標準化による比較研究の促進である。異なる時代や地域の石垣を、同一の基準で定量的に比較できるようになる。これは、技術発展の過程や地域の特徴を、より精確に理解することを可能にする。将来的に、全国の城郭石垣の BIM データが蓄積されれば、日本の石垣築造技術を巨視的に分析することも可能となる。石材総数の把握や規格性の時代的変遷など、これまで困難であった研究課題にも取り組めるようになるだろう。

ただし、BIM の導入には技術的・方法的

な課題も残されている。特に、歴史的価値の評価や文化的文脈の理解など、定量化が困難な要素をいかに組み込んでいくかは今後の重要な研究課題となる。(高田)

おわりに

本稿では名古屋城天守台石垣の調査を契機として生み出された石垣 BIM の手法を紹介し、この分析方法が従前の石垣調査や管理、研究に新たな視点をもたらすものとして評価できることを指摘した。

ただし、石垣 BIM によって得られる情報の精度や石垣の評価に有効な分析方法の確立、他の城郭石垣での有効性の検討などの課題が残されている。また、石垣 BIM の導入にあたっては、石垣の CAD データないしは 3D データが必要となり、同様の手法を用いるなら有償の 3DCAD ソフトを購入しなければならない。こうした課題を解決していきながら全国の石垣をもつ城郭への普及に向けて検証を進めていきたい。(大村)

註

- (1) 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所文化財情報研究室所属。註のない執筆者は名古屋城調査研究センター所属。
- (2) 株式会社竹中工務店生産本部所属。
- (3) 名古屋城の石垣カルテで石垣面ごとに付与した番号である。

引用文献

- 日向哲朗・笠博義・黒台昌弘・平井光之「城郭石垣管理におけるデータベース構築に関する検討」『土木学会第 58 回年次学術講演概要集』 2003
- 文化庁文化財部記念物課『石垣整備のてびき』同成社 2015

《Title》

An introduction of innovation in technology towards archive and management for castle stone walls : development and practical application of stone wall BIM methodology

《Keyword》

stone wall, data analysis, BIM, 3D CAD, AI, stone wall documentation, masonry techniques, *Kōgi fushin*; large-scale construction ordered by the shogunate, stone wall restoration