

歴史の証拠を次世代につなぐ城郭石垣の新たな安定性評価手法の開発

Development of new stability evaluation technique of castle stone wall for connecting evidence of history with next generation

香川大学創造工学部 教授 山中 稔

（研究計画ないし研究手法の概略）

近世城郭石垣の多くで、経年劣化による石材石の割れやはらみ出し等の変形が進行している。石垣の維持管理では石垣カルテが用いられているが、カルテの情報が石垣の形状や積み方の構造的特徴や、割れの有無や変状の度合い等の目視観察結果にとどまっておき、石垣変状に大きな影響を及ぼすと容易に考えられる地形や地盤の情報はほとんど入っていないのが現状である。石垣カルテに石垣背後の地盤情報を記載し、その地盤情報を石垣変状要因の分析に用いることで、石垣変状箇所の抽出が可能になると考えられる。

本研究では、金沢城石垣を対象に、背後地盤の情報を得るために物理探査である常時微動計測を行い、得られた振動特性を要因分析項目に新たに導入した自己組織化マップ解析によって、石垣変状要因の検出を試みるものである。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 石工職人へのヒアリング

城郭石垣の安定した築造においては石工職人の有する伝統技術に負うことが多く、現代の土木工学的知見においても未だ力学的に定量化できていないのが現状である。そこで、白河小峰城（福島県白河市）の石垣修復工事に携わった石工職人にヒアリング調査を実施した。ヒアリングの結果、石垣石を積む際には下側の石と3点で固定するようにし、左右の間には介石を、石垣石の後ろ側には大きめの臚石をそれぞれ置くことや、石垣背後の栗石層は手詰めで積める工夫をしていること等の、安定メカニズムの解明につながる有益な知見を得た。

2. 常時微動計測

1) 計測方法と測定地点

金沢城跡の石垣部において常時微動計測を実施した（写真-1参照）。常時微動計の設置地点は、石垣上端の前面から2m離れた栗石上と考えられる地点と、同じく4m離れた盛土と考えられる地点を一組とし、石垣水平方向には10m間隔で計測した。1箇所あたりの測定時間は、歩行者や風によるノイズの影響を考慮しつつ15分~20分程度とした。計測地点数は、過去の計測分を含めて416地点であり、実際に変状の生じている石垣の背後だけでなく、変状の生じていない石垣も対象として選定した。



写真-1 常時微動測定状況

2) 常時微動解析方法

常時微動計測で得た計測データから解析ソフトSPACplusを用いてH/Vスペクトルを得た。また、常時微動計測地点の近傍に既存のボーリングデータの地層構造基に、H/Vスペクトルを用いて逆解析的に地層区分を実施した。この地層区分には、近傍のボーリングデータから各層のN値を読み取り、S波速度Vsに換算して適用する。

3. 自己組織化マップ SOM による検討方法

1) SOM とは

SOM (Self-Organizing Maps) は 1982 年に Teuvo Kohonen によって提案され、ニューラルネットワークの一種として位置づけられた人工知能技術である。SOM は、入力データの類似度を SOM の基本的な形の中で描画し、高次元データ間に存在する非線形な統計学的関係を簡単な幾何学的関係を持つ像に変換する。SOM は位相および距離といった最も重要な関係を生成することができる。

SOM の全体マップを解釈するために重要なのが、要素マップである。SOM は入力する学習データの次元数と同じ次元数を持った次元要素を持つため、各変数成分だけを抽出して可視化してマップを作成することができる。全体マップと要素マップを比較することで、各要素が全体マップに対する寄与の度合いおよび、要素間の相関関係を分析することができる。

2) SOM による変状要因の入力

表-1 に、自己組織化マップに使用した要素表を示す。(a)表の地盤情報以外に示すように石垣カルテからは、石垣の種別、高さ、長さ、面積、形式を使用した。また今回、石川県金沢城調査研究所から提供していただいた、石垣の位置、立ち入り状況、隣接地、裾部の長さ、天部の長さ、勾配、石積分類を要素マップに追加し、地盤情報以外の要素は計 12 個とした。一方、(b)表の地盤情報は、近傍の既存のボーリングデータの地層構造と H/V スペクトルを用いて逆解析的に地層区分を実施し、得られた地層区分より盛土表層部と栗石表層部それぞれの盛土厚、増幅率を最小値・平均値・最大値の 3 つの値を算出し地盤情報の要素は計 12 個をとした。これら各要素の影響度を均一化させるために、各要素の最大値を統一させる正規化を行った。

表-1 自己組織化マップ要素表

(a)地盤情報以外の要素

項目	入力ベクトル (石垣カルテより)
種別	1: 近世, 2: 近代, 3: 発掘調査で確認した石垣, 4: 復元, 5: 近世・近代, 6: 近世, 7: 近世・復元, 8: 近代・発掘調査で確認した石垣, 9: 発掘調査で確認した石垣・復元, 10: 近世・近代・発掘調査で確認した石垣
高さ (m)	1: ~5, 2: 5~10, 3: 10~15, 4: 15~20, 5: 20~
長さ (m)	1: ~30, 2: 30~60, 3: 60~90, 4: 90~120, 5: 120~
面積 (m ²)	1: ~200, 2: 200~400, 3: 400~600, 4: 600~800, 5: 800~1000, 6: 1000~
形式	1: 自然石, 2: 粗加工, 3: 切石, 4: 割石, 5: 自然石・粗加工, 6: 自然石・割石, 7: 粗加工・切石, 8: 割石・粗加工, 9: 自然石・割石・粗加工
位置	1: 本丸周辺, 2: 玉泉院, 3: 薪の丸, 4: 二の丸, 5: 三の丸, 6: 新丸, 7: 御宮
立入	1: 多数, 2: 少数, 3: 関係者のみ, 4: なし
隣接地	1: 道路, 2: 園路・広場, 3: 宅地, 4: 建造物, 5: 復元建物等, 6: 自然・土羽・堀
長さ	裾部 (m), 天端部 (m)
勾配	角度 (°)
石積	1: 乱積, 2: 布積, 3: 落とし積

(b)地盤情報の要素

項目	入力ベクトル (常時微動探査で得た解析値)
盛土部	盛土厚 (最小値, 平均値, 最大値), 増幅率 (最小値, 平均値, 最大値)
栗石部	盛土厚 (最小値, 平均値, 最大値), 増幅率 (最小値, 平均値, 最大値)

3) SOMによる石垣変状要因の検討結果

図-1(a)～(h)に、自己組織化マップの結果を示す。図中の赤丸印は変状の見られる石垣である。変状石垣の多いところを対象に4つのグループを作成した。(b)～(d)図の盛土厚の要素マップでは、黄と赤のグループは一貫して同じ色となっているが、青や緑のグループは最小盛土厚から最大盛土厚へと変化する中で徐々に色が濃くなっている。これは、黄・赤グループでは盛土厚がある程度一定なのに対して青・緑グループは石垣背後の盛土厚が変化していることを示している。このことを踏まえて(b)～(d)図の盛土厚の要素マップを見ると、盛土厚が一定のところ(図左側の真っ黒のところと右側の真っ白のところ)には赤丸でマーキングした変状石垣が少ないことが分かる。石垣背後の盛土厚の変化と石垣の変状には何らかの関係があると予想できた。また(a)図の全体マップから、これら盛土厚が一定の石垣は黄や赤といった暖色系のセルに位置しており、それぞれの特徴が非常に似ていることからこれらの石垣の変状が発生する可能性はほかの石垣より低いと考えられ、今後の調査、修繕の優先順位は低いと判断した。

次に、(e)図の勾配の要素マップではマーキングをした変状石垣の位置が真っ黒の所ではなく白いところやその周りに分布をしていることが見て取れた。このことから、変状石垣は角度が比較的小さいところで発生しやすいことが判明した。同じように(f)図の石積分類の要素マップでも色の薄いところに集まっている。石積分類は色が薄いところから布積み・乱積み・落とし積みとなっており、一般的には布積みから順に石垣の強度が弱いとされている。このことを踏まえると、色の濃い落とし積みの石垣の範囲では変状は起きておらず、一般的な傾向と同じ結果を得ることができた。

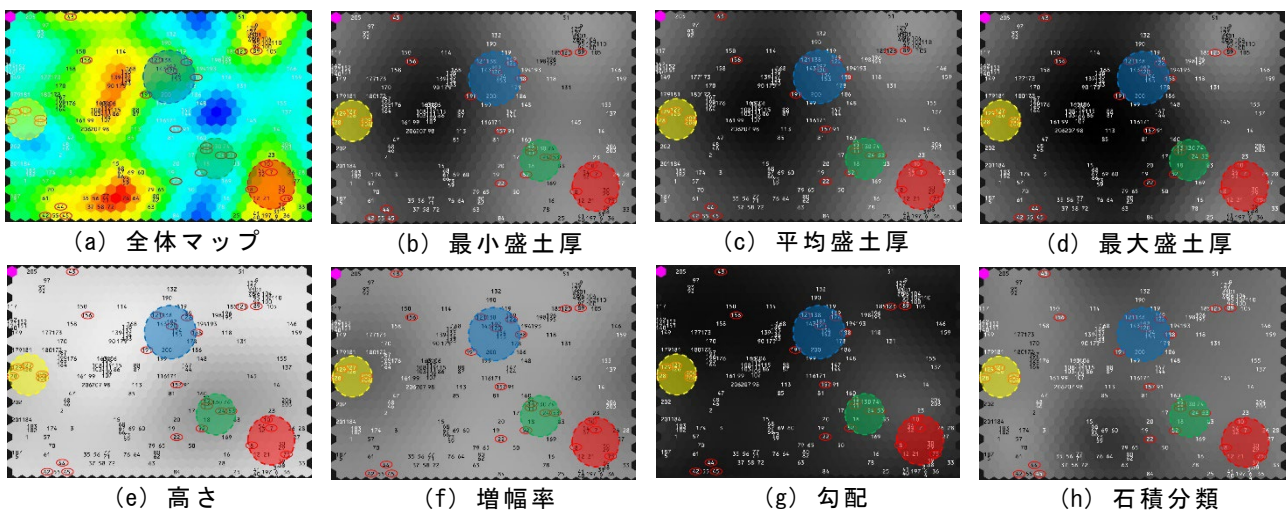


図-1 自己組織化マップ

表-2に、4つのグループについてそれぞれ特徴をまとめる。黄グループは、盛土圧は布積み・高さが低く自重が軽い・盛土が締まっていないこと、青グループは盛土圧が不規則・布積み・高さが低いこと、緑グループは盛土圧が不規則であるということ、赤グループは盛土が締まっていないという点に変状をうながす要素となったと考えられる。また、青グループは背後に洋風(木造)の旧第六旅団司令部の建造であり、緑グループは石垣中央に戦時中に弾薬保管場として利用するための入り口があること、赤グループは金沢城内で最も古い時期の石垣という点も変状を促す要因になったと考えられる。

表-2 各グループの特徴

	盛土厚	石積分類	高さ	盛土の締まり具合
黄グループ	一定	布積み	低い	締まっていない
青グループ	不規則	布積み	低い	締まっている
緑グループ	不規則	乱積み	高い	締まっている
赤グループ	一定	乱積み	やや高い	締まっていない

4. まとめ

本研究の結果，伝統石垣築造技術を有する石工職人にヒアリングを行い，石垣安定性評価につながる力学的な多くの知見を得た。また，自己組織化マップによる石垣変形に及ぼす要素の抽出では，全体マップより変状の見られる石垣が明瞭なグループ化はできなかったが，要素マップの特徴から，変状が見られる石垣は，①栗石表層部の周波数が小さいこと，②布積みであること，③石垣延長上の盛土厚が不均一であること，④盛土が緩いこと，等の特徴があることが明らかとなった。

今後は，これらの研究成果を踏まえ，近世城郭石垣の安定性評価手法の開発をさらに進めていきたい。

(発表論文)

なし