

## 第3章 石垣詳細調査

### 第1節 調査の方法

#### 1. 調査の対象

金沢城調査研究所では、平成 27 年度までに石垣保存管理技術等の総合研究の一環として城内の石垣保存実態調査を行い、『金沢城跡石垣保存実態調査報告書 I』を刊行し、翌 28 年度より新たに詳細調査を開始している。実態調査では城内の変形が顕著な石垣 26 箇所を対象に現地の石垣観察や三次元データをもとに立面コンター図や孕み出し量図などを作成（データを提供し、作成は外部委託）した。また、並行して土木部公園緑地課が実施している石垣動態解析業務（外部委託）の観測データの整理を行った（第 61 図）。

詳細調査では、その 26 箇所の中から 5 箇所について作業を行った。対象とした石垣は、城内の変形箇所 No.1 の No.1 ～ 3 の数寄屋屋敷西石垣、No.4 の玉泉院丸北石垣、No.6 いもり坂脇石垣、No.18 本丸北石垣、No.20、21 三ノ丸北石垣である。

平成 30 年に策定した『金沢城の石垣の保存管理及び保全対策に係る計画書』において、現状評価中でも進行性や現存石垣の中での希少性、崩落時の人的・物的影響度を評価しているが、実施箇所については、それらの中でも特に変異の累積が進んでいるものを調査対象とした。

#### 2. 変形動態の把握

これまで蓄積してきた三次元計測データを用いて変形箇所の可視化作業を行ってきたが、変形箇所の位置や規模、形状、変形程度など、断面図からでは読み取りにくい変形形状をわかり易く表現することができたと考えている。

今調査では、進行性のある変形箇所を中心に行っていることから、変形形状の把握に加えて、変形動態（変形量）を把握するための試みを行うこととした。

変形量については、土木部が平成 9 年から動態観測を、計測箇所の見直し等を行いながら 20 年以上にわたって継続してきており、石垣の保存管理上、非常に重要なデータとなっている。

石垣の動態観測データをみると、極端に変形が進行している石垣で、年間約 1mm、10 年で 10 cm弱の変位量を観測しているものもあった。定点観測で三次元計測でも使用する機器には誤差が含まれており、わずかな変位量であれば変位と誤差の判断は難しい。しかし、誤差以上の変位でそれが累積しているような場合には、一定の年数を経て再計測した三次元点群データとの比較が可能ではないかと想定して、城内で最大の変位量を観測している数寄屋屋敷西石垣の 6500W で試行してみることにした。

6500W は平成 18 年に三次元計測を行っており、平

成 28 年に再計測を行った。10 年の期間を経た 2 時のデータについて比較を行い、その変化量について色彩で表現した。結果として、最も変形が顕著は 10 年間でやはり定点観測と同程度の変位量を確認した。また、定点観測等を未実施の範囲で、一見して変形が顕著でない範囲でも変位が進んでいることが判明するなど、変形動態を把握するには有効であった。

データの検証

各時期の点群データは、10 年前のレーザー計測の精度と最新の精度とでは差が生じていること（第 59 図①）、2 時期の点は厳密にいうと全く同じ位置（座標）を持っているわけではないことなど、問題点もあった。絶対値を比較することは困難であったが、石材単位や変形箇所において変形が進行していることは十分に読み取ることが可能であったことから、石材の特徴点などを重ね合わせながら作業を進めていった。

#### ・前後方向の差分比較（差分図 A）

点群データから 10cm グリッドデータを作成し、二時期データの前後の動きについて差分解析を行った。全体的に表面の色が緑色（-10 mm～+10 mm）の場合は、前後への変動（孕み出し）が微小であることを示している。黄色から赤い色にかけては前方への変位を表す。

築石以外の箇所で見られる特に大きな変位は、石の隙間などで、どちらかのデータが計測時に十分に取れていなかったか、詰石などが脱落したようなことを示していると考えられる。

#### ・全方向の差分比較（差分図 B）

ノイズを除去した点群から TIN メッシュを作成し、旧データを基準とし、新データとのメッシュ間の距離を演算し画像を作成した上、凡例を変えて各場所での動きの傾向を調査した。

1 cm 毎および 5 mm、さらに 2 mm の数値幅による段彩着色凡例パターンで画像を作成した。凡例を狭めることにより、細かな変動の確認を試みた。

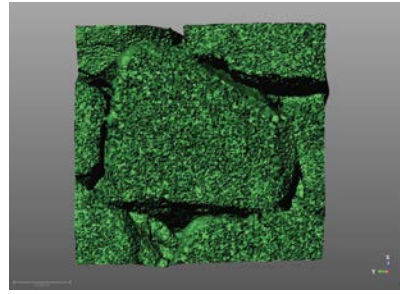
一方向（前後）のみの 10 cm グリッド差分比較とは異なり、全方向について解析することが可能である（第 59 図②）。

TIN メッシュ化したデータはこれ以外にも変動量の可視化作業を行っており、垂直・水平断面図の比較や石垣面のコンターの比較を行った（第 59 図③）。

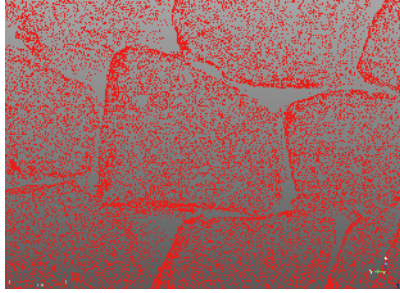
定点観測などの動態観測は、継続的に実施することで、石垣の変動のスピードやタイミングといった詳細なデータを取得できる反面、観測点の設置場所の選択によっては変位を把握できない可能性もある。今回のような一定期間を経たデータの比較は、定点観測の位置を選択する際や、再検討を行う際に有効となろう。



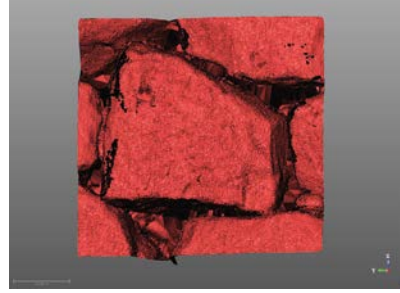
サンプル点群データ画像 (2006データ)



メッシュデータ画像 (2006データ)

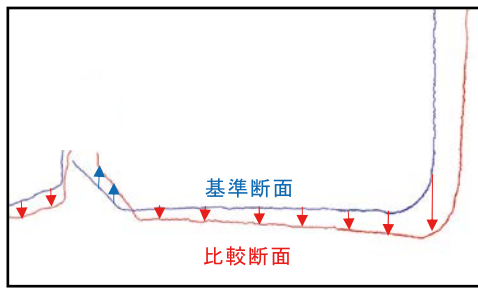


サンプル点群データ画像 (2016データ)

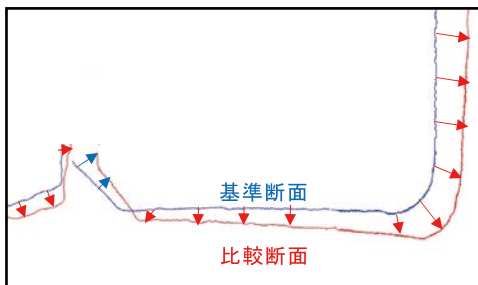


メッシュデータ画像 (2016データ)

①点群データの検証

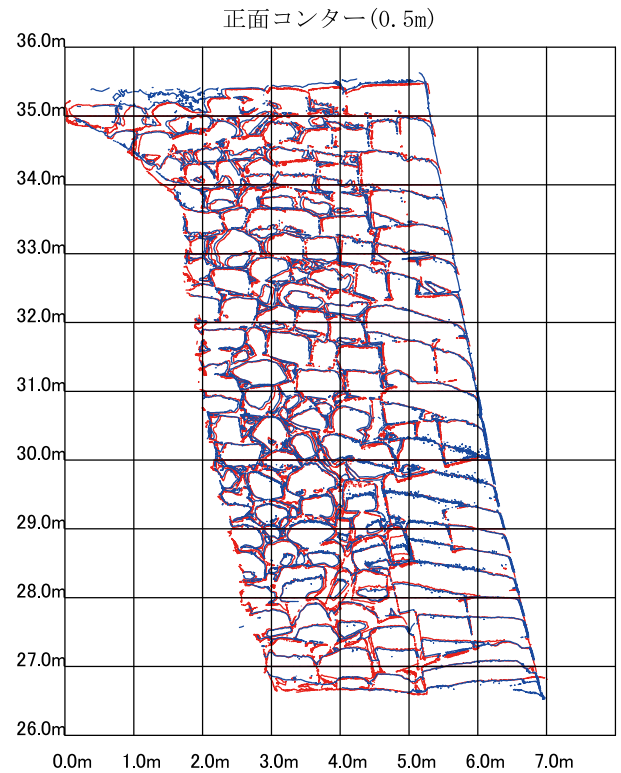


一方向のみ比較



全方向比較

②偏差解析イメージ



6500N 赤：2016計測データ  
青：2006計測データ

③石垣変動量の調査

使用したソフトウェア

1. 差分図A：QGIS ver3.10 64bit
  2. 差分図B：CloudCompare 2.11 64bit
  3. 変動量調査図(断面・標高コンター・正面コンター)：Rhinocerase 6.0 64bit
  4. 孕み出し変動量解析図：点群前処理：RealWorks10.4, 解析計算：Excel 2016, 図化处理：MicroStation10
- \*三次元計測データは研究所が提供、作図作業は㈱サンコーコンサルタントに委託

第 59 図 変形動態の把握



### 3. 変形要因の調査

変形要因の調査については、石垣背後の地盤条件を探るため、ボーリング調査を計画・一部実施したが、当初予定していた箇所が未だ終了しておらず、検討作業も不十分なことから、本報告では省略し、保全対策の進捗状況とあわせて作業を進めていき、改めて別途とりまとめと報告を行いたい。

もう一つ変形要因の調査として、変形箇所を中心に築石間の隙間から小型カメラを挿入して内部の様子を観察し、記録として同時に動画撮影を行った。

この作業は当初、モニター付きのファイバースコープを使用していたが、見える範囲が狭いことや記録画像が不鮮明であったことから、やや規格が大きい、広角で映像がより鮮明な小型カメラを使用することとした。

本報告では3箇所 159 地点について報告を行うが、作業途中で、変形箇所だけでなく、健全な石垣や構築年代が異なる石垣での違いなども、比較資料として観察を行った上での評価が必要ではないかとの指摘をうけ、追加で 110 箇所の観察を行った。

主な観察項目は、土砂の有無、介石の破断、築石の胴割れなどの有無であった。当初は裏込めの土砂の有無を注視していたが、石垣の技術的な特性が内部状況に反映している可能性も考慮して観察を行った。

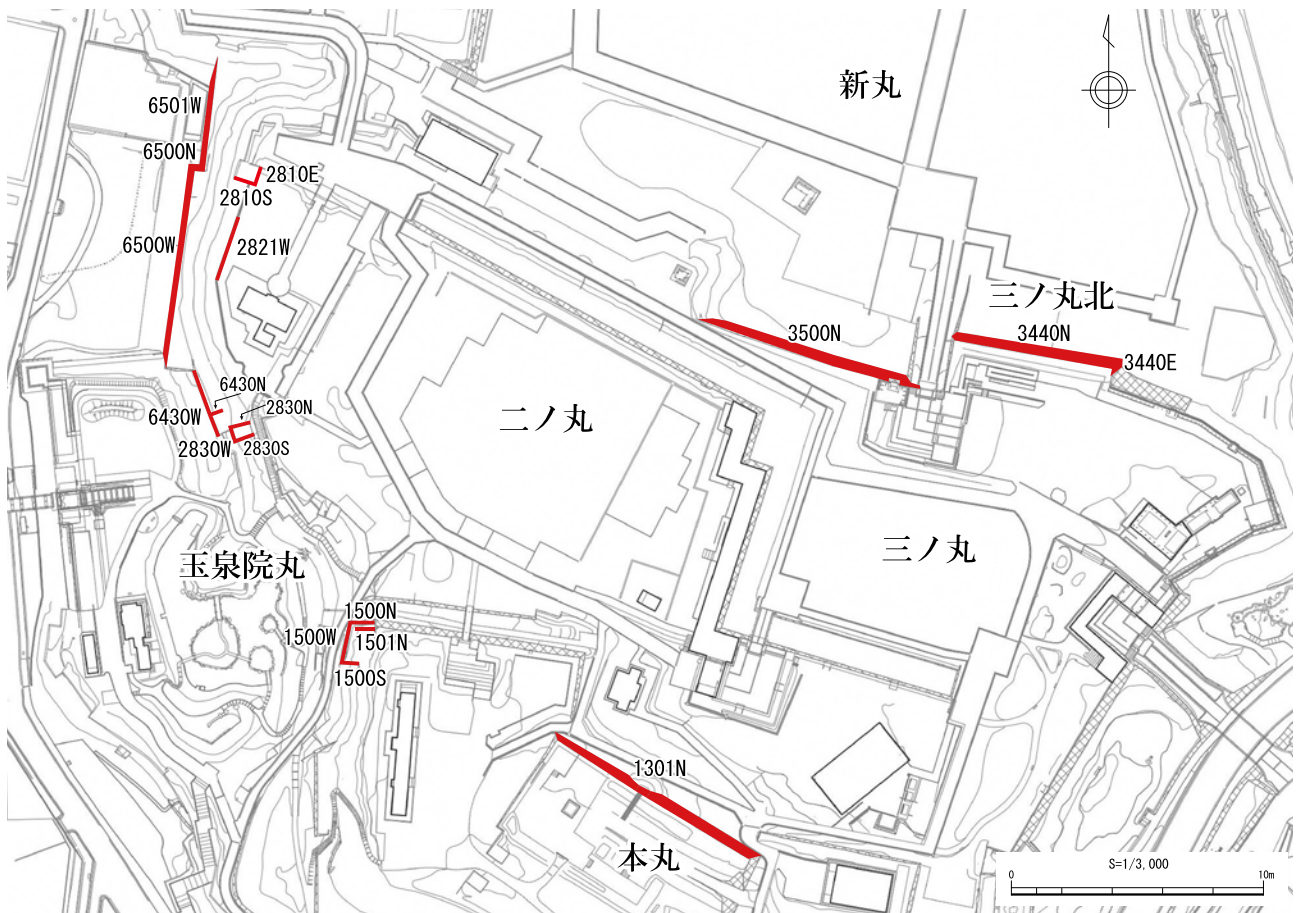


Panasonic ウェアラブルカメラ HX-A1H



作業風景

第 60 図 石垣の内部観察



第 61 図 詳細調査実施箇所

第7表 動態観測結果（一部）

石垣ID	名称	定点観測			孔内傾斜計			クラックゲージ	
		期間	変位量	観測点位置	期間	変位量	期間	変位量	
6501W	数寄屋屋敷西堀縁	H24.1～H24.8 (2012) (H24～H27中止) H27 (2015) ～	13mm H24.1～H24.8 : 7mm H28.3～R3.3 : 6mm 沈下-5mm	H30.7m L40.6m					
6500W	数寄屋屋敷西堀縁	H10 (1998) .5～	193mm H10.5～H19.3 : 43mm (4.7mm/年) H19.4～H28.10 : 60mm (6mm/年) H28.11～R2.3 : 80mm (20mm/年)	H31.6m L29.7m	F2 H10～ 110mm (GL-0.5m) 70mm (GL-2.0m) H10～H19.3 : 20mm (2.2mm/年) H19.4～H28.10 : 30mm (3mm/年) H29～R3 : 20mm (5mm/年)				
6430W	玉泉院丸北泉水縁	H23 (2011) .8～	16mm H23～R2.3 : 11mm (1.2mm/年) R2.4～R3.3 : 5mm (5mm/年) 沈下-3mm R2.4～R3.3 : -3mm	H35.2m L22.8m	F4 H19～ 88mm (GL-0.5m) H19～H22.3 : 25mm (8.3mm/年) H22.4～R3.3 : 6.3mm (0.6mm/年)				
6430N		H31 (2019) .3～	9mm 沈下-5mm	H36.6m L19.5m					
2830W	数寄屋門台	H23 (2011) .8～	7mm 沈下-4mm	H37.0m L2.9m		H17～	18.9mm H17.6～H19.3 : 0.6mm (0.3mm/年) H19.4～H27.3 : 7.3mm (0.9mm/年) H27.4～R3.3 : 11mm (1.8mm/年)		
1500N		H9 (1997) .10～	14mm H9.10～H21.3 : 10mm (0.8mm/年) H21.4～R2.8 : 4mm (0.4mm/年)	H48.0m L5.1m					
1501N	いもり坂脇	H9 (1997) .10～	21mm H9.10～H21.3 : 16mm (1.3mm/年) H21.4～R2.8 : 5mm (0.4mm/年)	H49.4m L7.8m	D-2 H19～ 11mm (GL-3.5m) H19.8～H23.3 : 7mm (1.8mm/年) H23.4～R3.3 : 4mm (0.4mm/年)				
1500W		H9 (1997) .10～	25mm H9.10～H21.3 : 25mm (2mm/年) H21.4～R2.9 : 0mm	H44.1m L17.0m		H18～	5.5mm H18.6～H19.3 : 0.1mm、 ～H19.4 : 5.2mm (能登半島地震後) H19.4～H24.3 : 0.2mm H24.4～R3.2 : 0mm		
1301N	本丸北	H28 (2016) ～	10mm H28.8～H29.8 : 8mm H29.9～R2.8 : 2mm	H59.8m L54.6m					
3440E		H28 (2016) ～	10mm 上方10mm	H41.4m L4.0m					
3440N	三ノ丸北	H9 (1997) ～	21mm 沈下-9mm H9.10～H23.3 : -9mm (-0.6mm/年) H23.4～R3.3 : 0mm 4mm 沈下-22mm H9.10～H23.3 : -22mm (-1.6mm/年) H23.4～R3.3 : 0mm	H41.5m L49.1m H41.5m L46.2m					

## 第2節 数寄屋屋敷西石垣 (No.1、2、3 6500W・N、6501W、2021W)

### 基本事項 (第62～63図)

**位置** 二ノ丸数寄屋屋敷とよばれる曲輪の西縁辺から、下の曲輪(松原屋敷)の間にある石垣を数寄屋屋敷西石垣と呼称している。数寄屋屋敷とその下の松原屋敷の間には比高差約12m、45度の傾斜をもつ斜面地が広がっており、6500W・6500N・6501Wはこの斜面地裾を巡る堀縁(いもり堀)石垣である。いもり堀は城地の南面から西面を巡っており、本石垣前面はその北端にあたる。現在、堀は埋め立てられており(現地表より堀底-5m)、松原屋敷のエリアの一部とあわせて、「丸の内園地」と呼ばれる広場となっている。

石垣は南北方向に長軸をもち、6501Wが最も北に位置し、6500Nとはほぼ直交する入角部で接する。6500Nは東西方向に長軸をもち、6500Wとは出隅部で接する。6501Wや6500Wは二ノ丸側からの斜面地を背にしているが、6501Wの背後は、北半分が二ノ丸・三ノ丸と北ノ丸を画する空堀となる。現状で堀底面は石垣の天端と同一レベルであるが、石垣の創建時にこの状態になったと考えられる。それ以前は更に深い堀であったとみられ、石垣背後で行ったボーリング調査では、現状よりも約7m下で地山(卯辰山層)を確認した。地山直上は旧地表土面ではなく粘性土と礫が混在する土が堆積しており、それより上には厚い盛土層が確認されていた。

2021Wは、斜面上部の数寄屋屋敷の西縁の斜面地上方に巡る鉢巻石垣である。実態調査報告書Iでは、堀縁石垣と別地点として報告しているが、変形の様態が連動していることや、令和2年度から始まった数寄屋屋敷の曲輪西斜面の対策工等を考えていく上でも、2821Wについては一体のものとして捉える必要があると考えた。

**規模** 6500W : H7.0m (檜台部分9.0m)、L81.5m、  
A507.1㎡、角度78°

6500N : H9.0m、L5.0m、A34.1㎡、角度78°

6501W : H7.5m、L45.0m、A232.0㎡、角度73°

2821W : H2.5m、L24.3m、A36.2㎡、角度73°

**履歴** 6500W及び6500Nについては、金沢城石垣編年3期(17世紀前半元和期)に創建したと考えられる。江戸期の修理に関する文献や絵図は未確認だが、現状の石垣を観察すると、複数回の修理を経ていると考えられる。檜台の一部は角石の加工痕から石垣編年7期(文化期)の修理を推定している。石積様相の差異から最も新しい修理痕跡は、中央部付近にみられるが、これについては修理範囲の両端に『昭和53年修築』という花崗岩製の標柱が建てられており、修理年代が特定できる。

6501Wは、6500W・Nと同じく元和期と考えている。現況観察から少なくとも3回程の修理を経ているとみられるが、石垣の中央部で緩やかなV字状を呈する修理範囲には目地をコンクリート詰めし、水抜き用とみられる

土管が設置されている。土管については、奥行1m前後で、奥には裏込めの栗石が見える。降雨時に土管から水が流れるようなことはなく、土管内部にも裏込め側からの流水痕やそれに伴う砂礫の堆積などはみられない。

6501W前方は、平成29年まで私有地で、建物や駐車場であったが、現在は県が土地を取得し、建物等も撤去され、石垣の全容が見える状態となっている。

**観測** 6500Wでは、定点観測・孔内傾斜計・多点変位計・伸縮計による動態観測が行われている。定点観測は平成10年より行われており、当初は孕み出しが顕著な中央部分のみであったが、その他にも変形の兆候が見られる部分にも観測点を増設するなどして、令和2年度で計66点について、年に2回計測を行っている。最も孕み出しが大きい観測点で、H10～R2までの22年で193mmであったが、H10～H28までは年間5.4mmで推移していたのが、H28秋以降、年20mmと急激に変位量が増加した。この孕み出し周辺の観測点は、変位量の多少はあるものの概ね同様の变化傾向を示した。平成15年から実施している多点式変位計や傾斜計についても同様であった。孔内傾斜計においては石垣の裏込め部分に設置した3地点(F1～F3)のうち、孕み出し箇所の裏込め層に設置したF2については、変位スピードの変化がみられたが、その他の裏込め層に設置したF1・F3や、斜面地に設置したF4については、変位はあるものの同調した動きではなかった。斜面の滑りを観測するため、変形箇所背後の斜面に設置した伸縮計も同様であった。

以上のことから、急激な変位速度の変化は背後の斜面の動きが速まったのではなく、石積そのもののバランスが崩れ始めたと考えられる。

2821Wについては、6500W背後の斜面に設置した伸縮計が二ノ丸の曲輪面から2821Wを経由しており、前後方向の変位については、これで計測が可能である。6500Wの背後の斜面について、保全対策工が令和3年度に行われるのに伴い、斜面部分の伸縮計は撤去されたが、曲輪面から2821W間の伸縮計については、残置して観測を続けることとなった。

### 差分比較 (第64～67図)

6500Wの定点観測での変位量をみると、10年間に最大で約10cmになる。3次元計測の精度から考えると10年後に再度計測したデータとの差が面的に表現可能ではないかと考え、2時期のデータの差分比較による経年変化量の可視化作業を行った。6500Wでは平成18年(2006)と平成28年(2016)に計測したデータの比較を行った(第67図)。孕みだし量を比較した際に最も大きかった中央部付近については(高さ標高32m、隅角部からの距離30m付近)、前方への変化量が10年間で9～10cmであった。その他の箇所では、石垣の上半部が全体的に黄色～橙色

となっており前方への変位があったことを示している。同じ期間の定点観測の結果と比較すると、中央部に関してはH18からH28年は約80mm、変位が計測されている。計測の誤差や、面的な動きと石材単体の動きという違いも考えれば、概ね一致しているとみてよいだろう。石垣の上半部に関しては、部分的に変位の累積がみられるが、差分比較図のような全体的な変位はない点がどのような理由なのか課題である。

H28年計測のデータでも孕み出し量図や傾斜角度分布図を作成し、H16年データで作成したものと比較した。孕み出し量図では、基準断面よりも前方への孕み出しを示す黄色の範囲が広がっている（第65図）。傾斜角度分布図は最も変化の差が大きな場所を角度で示すが、こちらの比較では広がりの変化はほとんどみられないが、H18年データ差が大きいとしていた箇所が更に急角度となるような変化がみられた（第66図）。ただし、定点観測で変位の累積を確認している箇所と現地で見ると石垣を目視した際に変形していると判断した箇所については概ね一致する。

6500Wは、変状が前後方向を基本としているため、石垣の変化について3次元データを2次元で表現しても、変形様態を把握することが可能であった。ただ、6500Wの側面にあたる6500Nについては、前後方向ではなく、横方向への変形が予想され、6500Wで作成してきた差分比較の手法では可視化することが難しい。石垣は単体の面だけが動くわけではないので、6500Wと6500Nのように隅角部を介して連続する石垣は一面が前方向に動けば、側面にあたる面は、石口の開きが想定される。従って必ずしも全面について可視化作業を行う必要はないともいえるが、こういった前後方向ではない変形にこそ3次元データを利用して、表現できないかと試みた。差分図Bと呼んでいる図であるが、前後の動きだけでなく左右・上下への変化も色で表現している（第67図）。

この場合、石材の右側辺が赤く、左側辺が青くなっている。これは旧新データを重ねたときに、データが追加されている場合に赤、抜けた場合に青となることから、石材が左から右へやや右下に動いたことを示している。

6501Wは、石垣面の両端にそれぞれ孕み出しがみられる。中央部分の土管が埋設された近代以降の修理箇所については逆に窪んだような状態となっている。この石垣についても、H18年とH28年に3次元計測を実施しており、そのデータの比較を行った。

差分比較では、右側にみられる天端付近からの孕み出しがこの10年間で変位量が増加しており、左側の長楕円形の変形はほとんど進行していない。孕み出し量の比較では、右側は広がっているが、左側は変化がみられなかった。差分比較、孕み出し量図ともに変形の傾向に矛盾はなかった。

2821Wについても同様に差分比較と孕み出し量等の可視化を行った。この石垣では、変形箇所において多少の

差はあるが変位量の増加が認められた。この石垣では、点群の差分比較のほかに、メッシュデータに変換した2時期のデータの比較を行った（第3章第1節参照）。

その結果から、石垣面全体がではあるが変位していることが判明した。

#### 内部観察（第68～70図）

当初は、孕み出し部分は土砂による目詰まりがあると想定しており、実際に土砂が栗石層に見られたのは観察した85箇所の4割ほどを占めていた。土砂が多く見られたのは孕み出し部分のやや下、昭和53年の修築範囲と考える段を中心としていた。第68図の赤のドットがそれにあたるが、土砂が横へと広がっているようにみえる。この段はちょうど変形が始まる付近の高さで、栗石層が目詰まりして、排水機能が落ち、上部の石積に悪影響を及ぼしたとも考えられるが、昭和53年の修築時の解体停止面と推定するラインとも合致することから、作業的に背後からの土砂が堆積するような状況があった可能性もある。6500Wについては令和4年度から解体修理を行うことから、その差に小型カメラで覗いた内部の情報と現地の状況を比較・検証を行いたい。

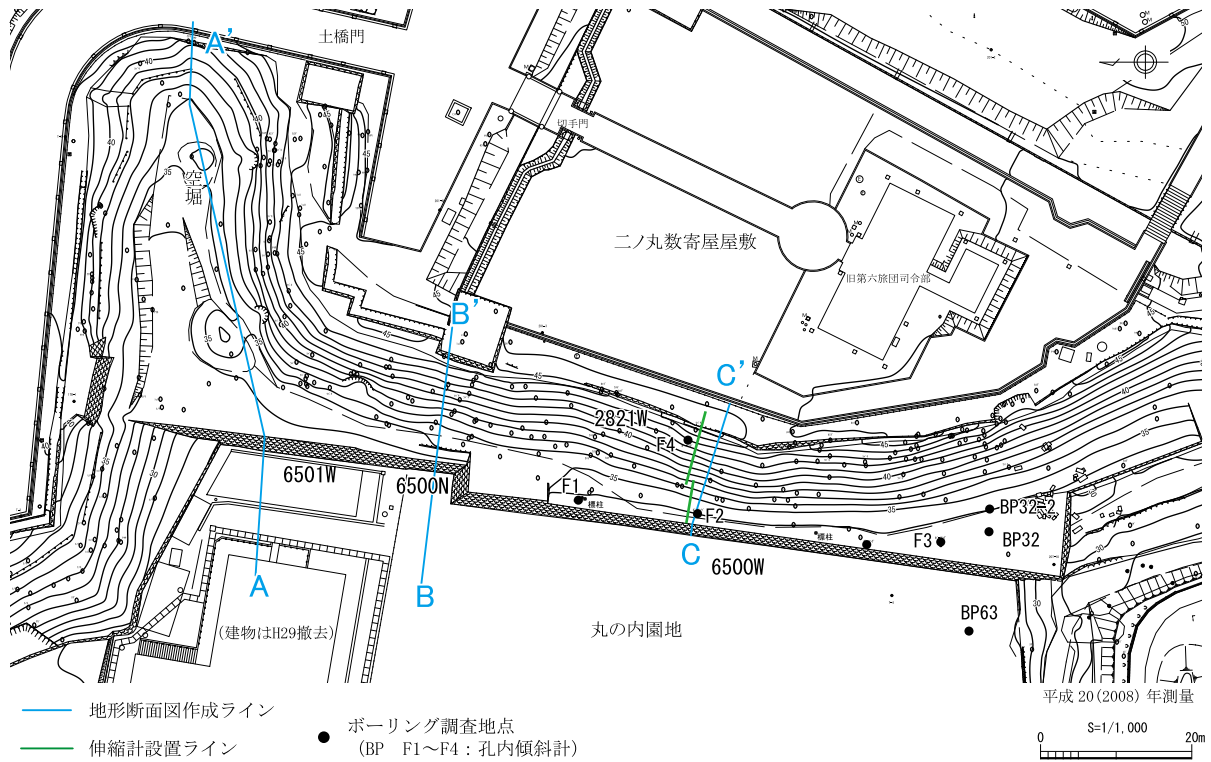
次に介石の破損状況だが、88箇所のうち19箇所で確認した。割れて欠落したものが多いが、介石として築石に挟まれた状態で、築石の圧力により割れたまま築石の間に残ったものもある。介石の破損は変形箇所に集中はせず、点々と分布する。そのことから、変形の誘因として関連付けるよりも、石積みに無理な力がかかったことによる破損であろうと考えており、一時的とはいえ、介石が割れることで無理な力を逃がして、一旦石積みがこの状態で安定化したともいえよう。

#### 小結

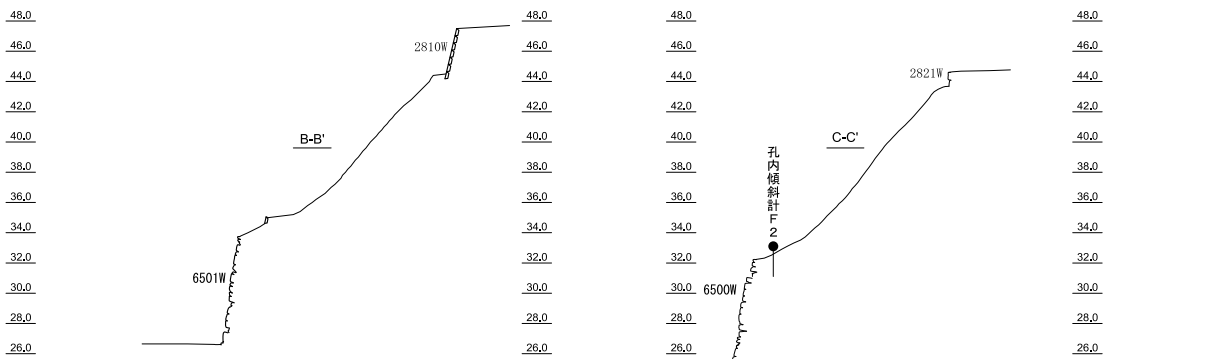
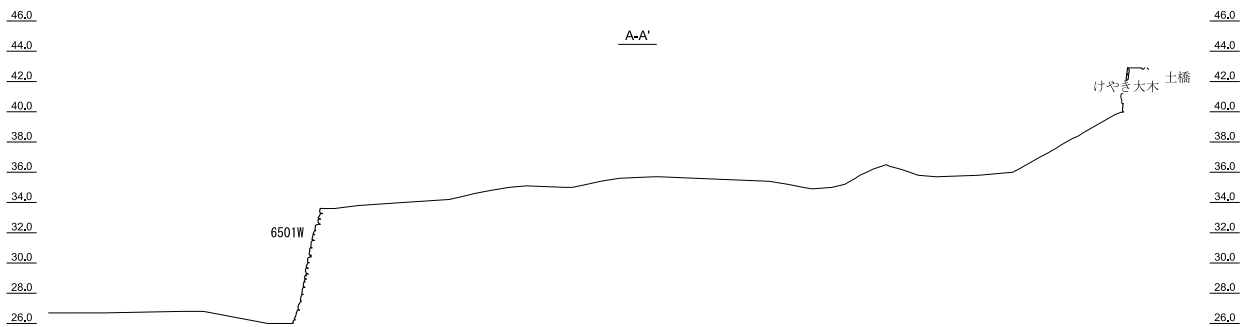
定点観測のデータは平成10年から観測が実施されている箇所では本石垣の変位の累積に伴い、徐々に計測地点や観測手法を増やしており、変形が進んでいることの把握から、次に変形のスピードやその特徴等の把握が可能となり、これらのデータは解体修理のタイミングや必要な対策を考えるうえで有効なものとなった。

新旧の3次元データの比較を行ったことにより、石垣の変形には、進行性のものと何らかの理由で動いたが、それで一旦変形がストップしたものがあることを、改めて確認した。6501Wの変形が進んでいない部分は、石垣背後は旧空堀で、天端から約7m前後は石垣構築時の埋土と考えられ、軟弱な地盤のため変形した可能性がある。現在は埋土が自重で圧密をうけ締まった状態となったことと、石垣の圧力が均衡状態にあると、とらえることもできるだろう。一方で、6500W、6501Wともに、変形が進行している箇所は、背後に二ノ丸への急斜面があるという共通点がある。最も孕み出し量や変位量が顕著な箇所も背後の斜面の滑りが変形要因とみられることから、他の箇所についても観測を継続し、注視していく必要がある。

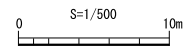




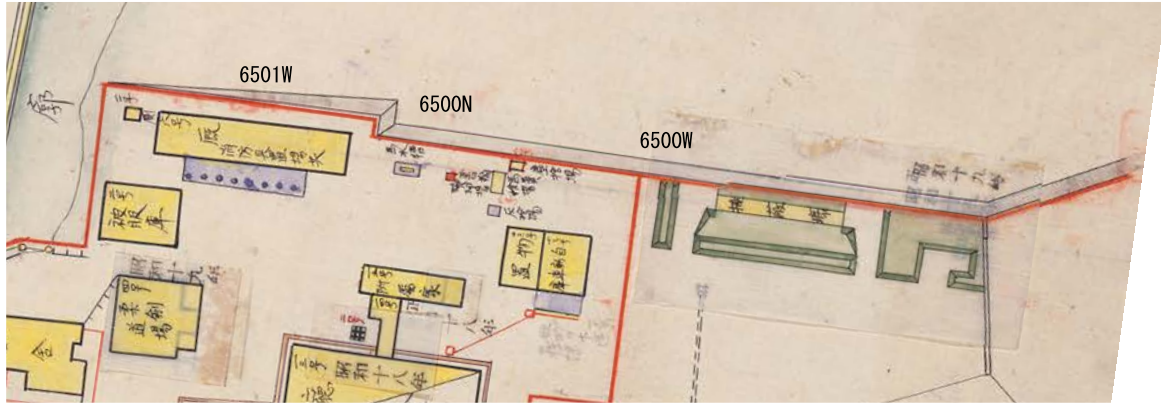
現況平面図



現況地形断面図



第 62 図 No. 2 数寄屋屋敷西現況平面図・地形断面図

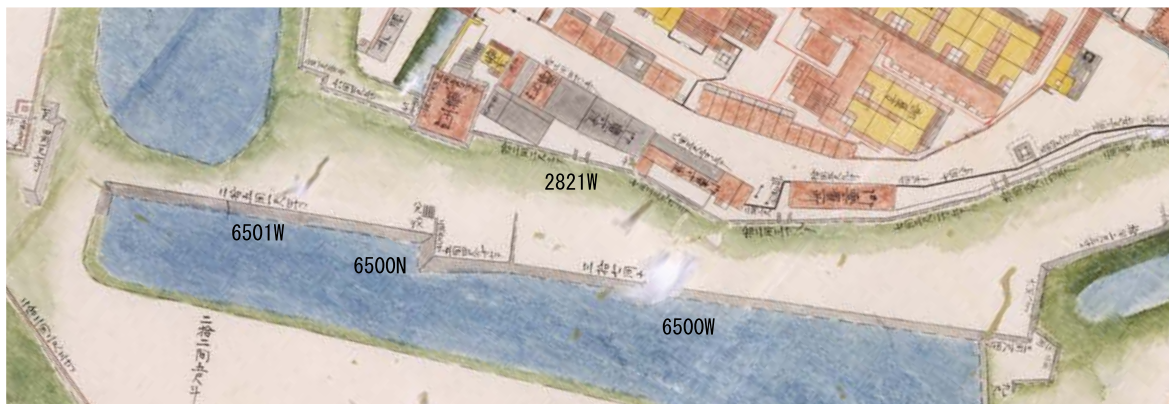


近代

昭和20 (1945) 年「金沢憲兵隊本部、金沢憲兵分隊及同官舎図」  
石川県立歴史博物館蔵

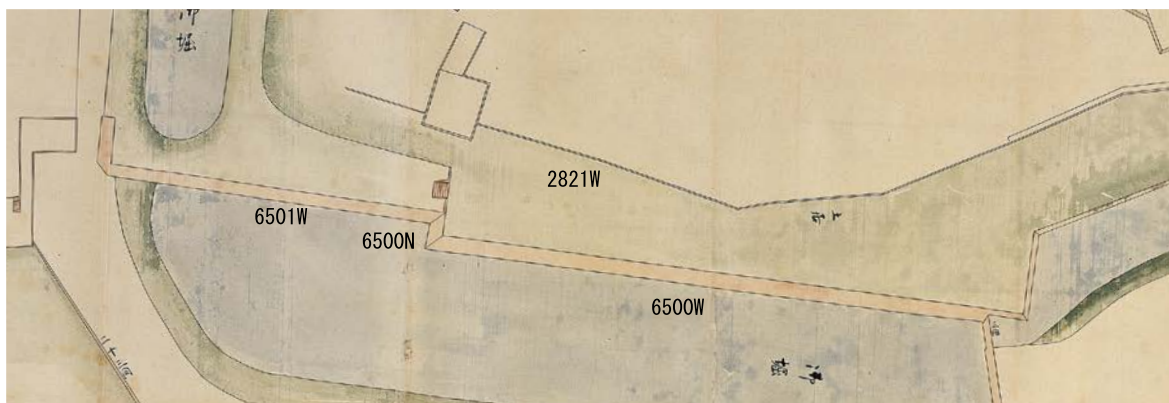


天保4～9 (1833～1838) 年頃「金沢御城内外御建物絵図 七拾間御門辺」  
(公財) 前田育徳会蔵



江戸後期

文政13 (1830) 年「御城中老分基絵図」横山隆昭氏蔵



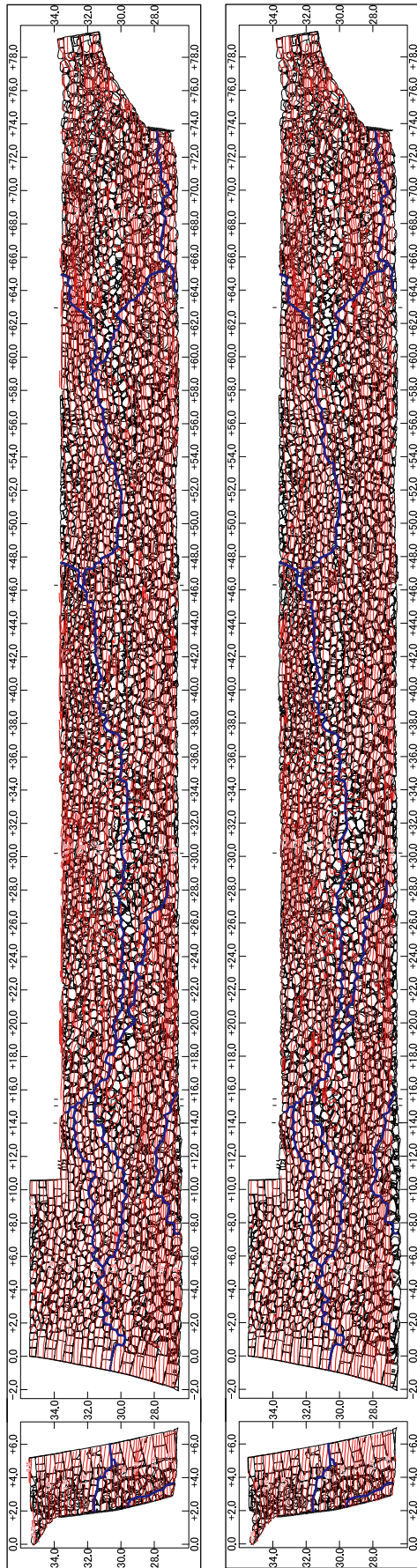
江戸前期

宝暦大火 (1759) 前「金沢城中地割絵図 甲号 (縮尺約百五十分一) 玉泉院様御丸・薪丸・稻荷屋敷・御数寄屋屋敷・金谷屋敷・丹後屋敷・松原屋敷」  
金沢市立玉川図書館蔵

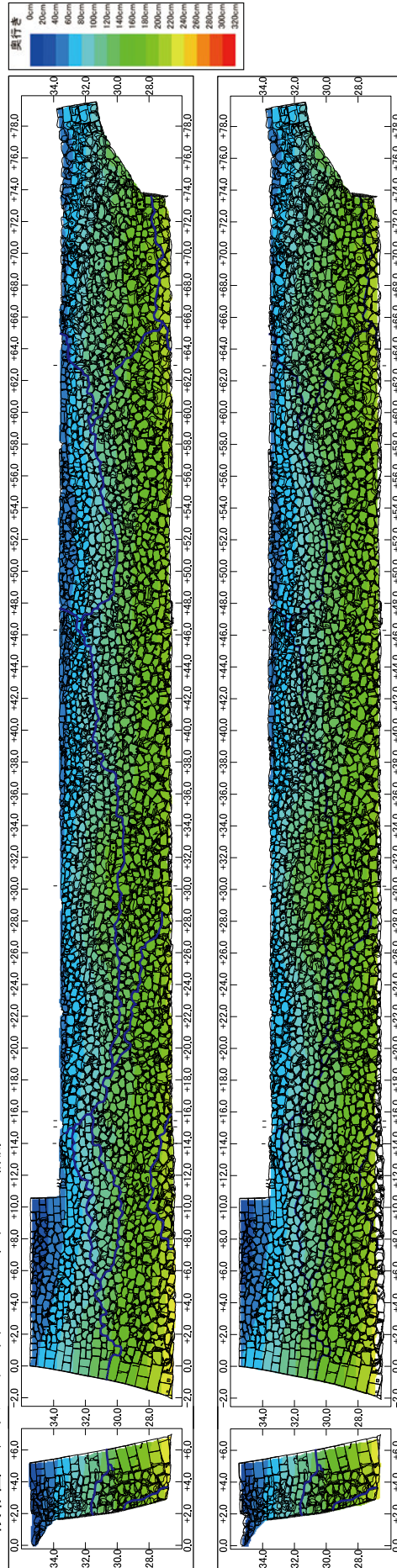
第 63 図 No. 2 数寄屋屋敷西絵図



1. 立面コンターマップ図 (測量基準軸からの単点値を10cm格子で抽出し、コンターマップ化したもの) 上: 2006、下: 2016 計測



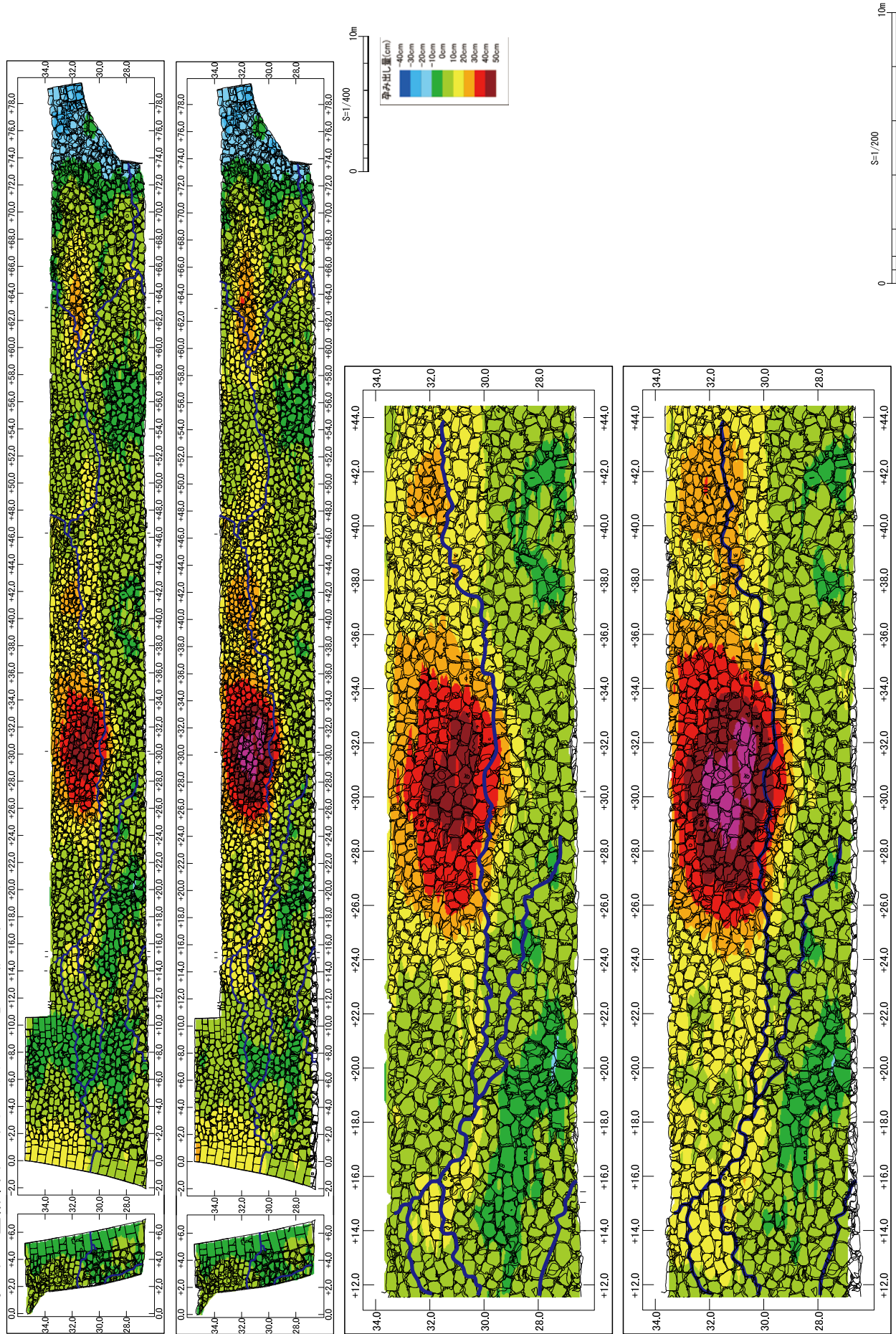
2. 段彩図 (メッシュデータ) 上: 2006、下: 2016 計測



第 64 図 No.2 数寄屋敷西堀縁【6500N、6500W】 1



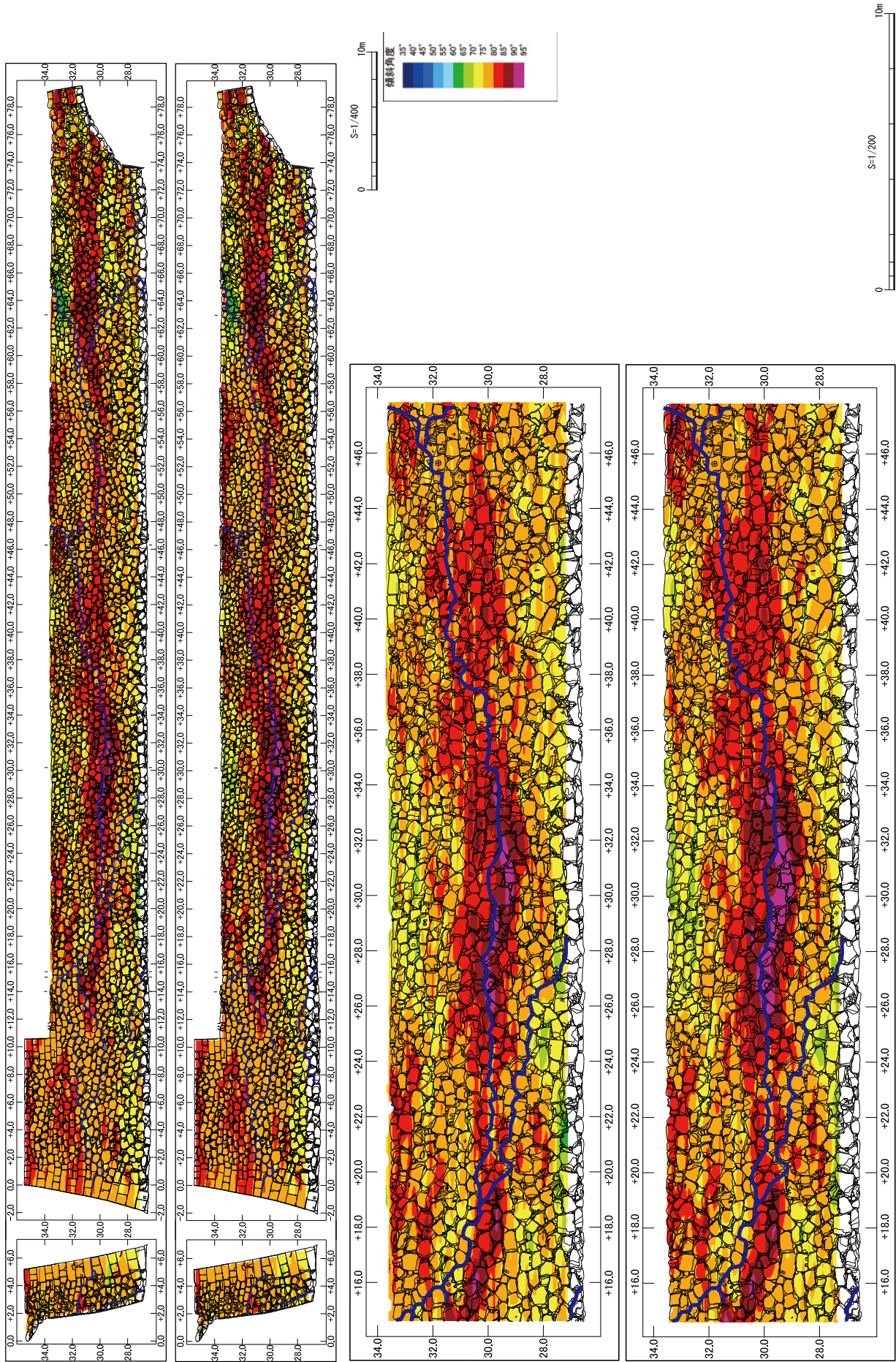
3. 孕み出し量結果図 (基準勾配と現状との差を 10cm 格子で抽出し、10cm ごとにマッピングしたもの) 上：2006、下：2016 計測



第 65 図 No.2 数寄屋敷西堀縁【6500N、6500W】 2

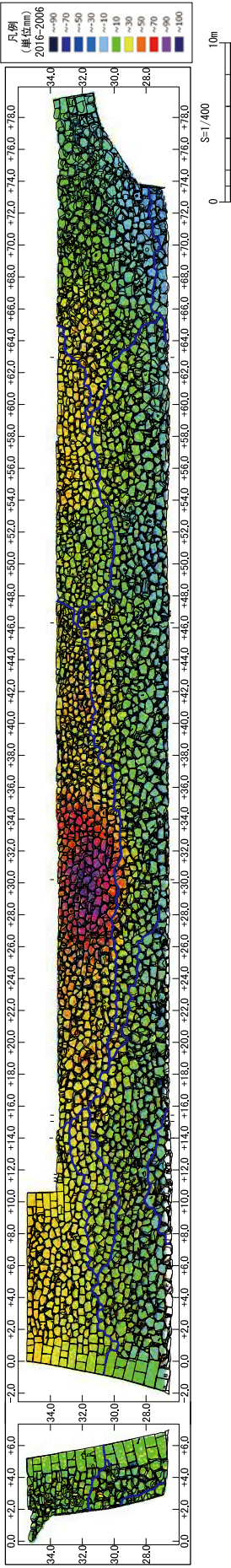


4. 傾斜角度分布結果図 (石垣面の傾斜角度を50cm格子で抽出し、5°ごとにマッピングしたもの) 上:2006、下2016 計測

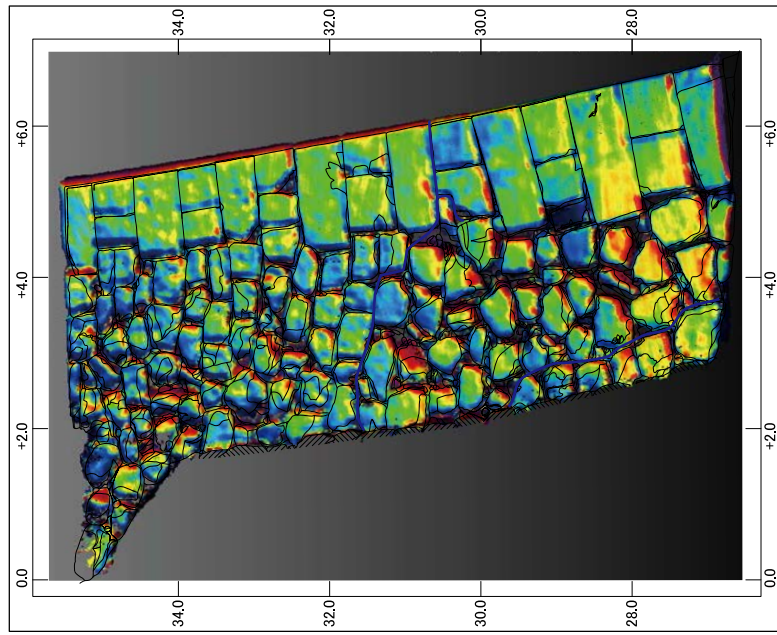


第66図 No.2 数寄屋屋敷西堀縁【6500N、6500W】3

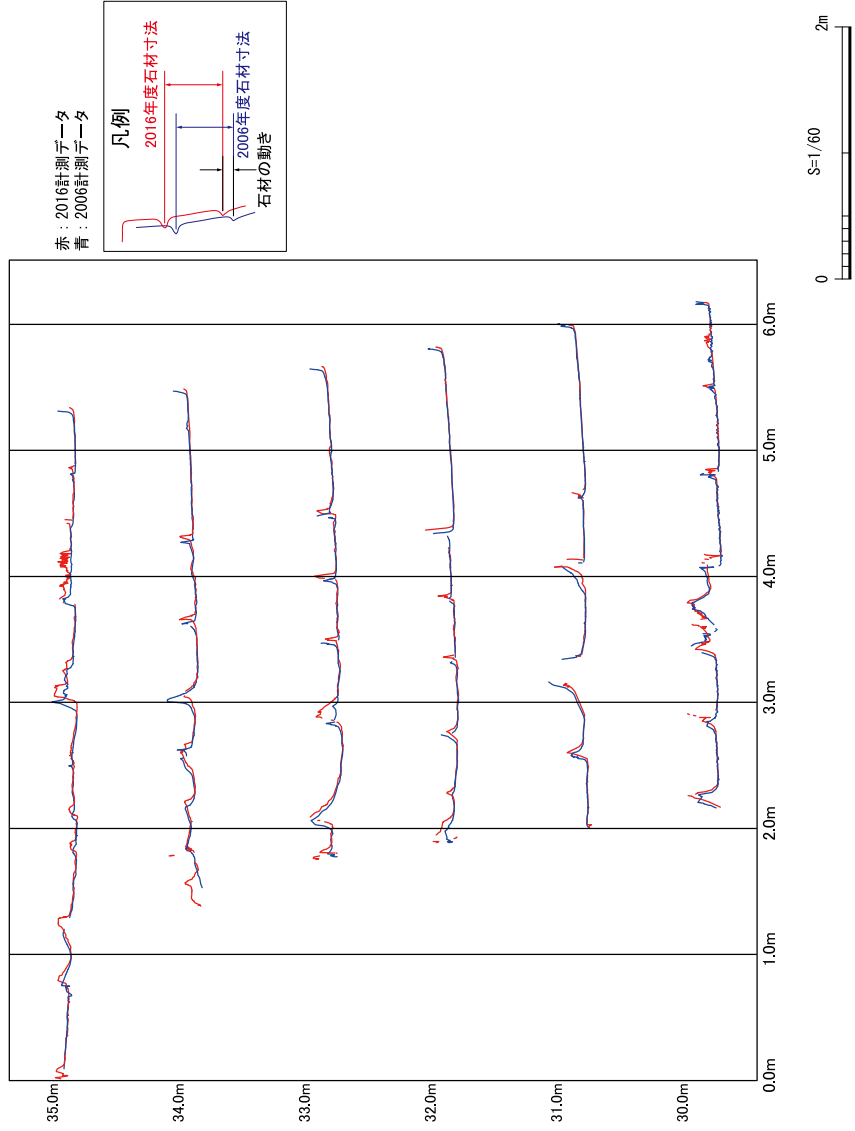
5. 差分図A



6. 差分図B (±50mm)

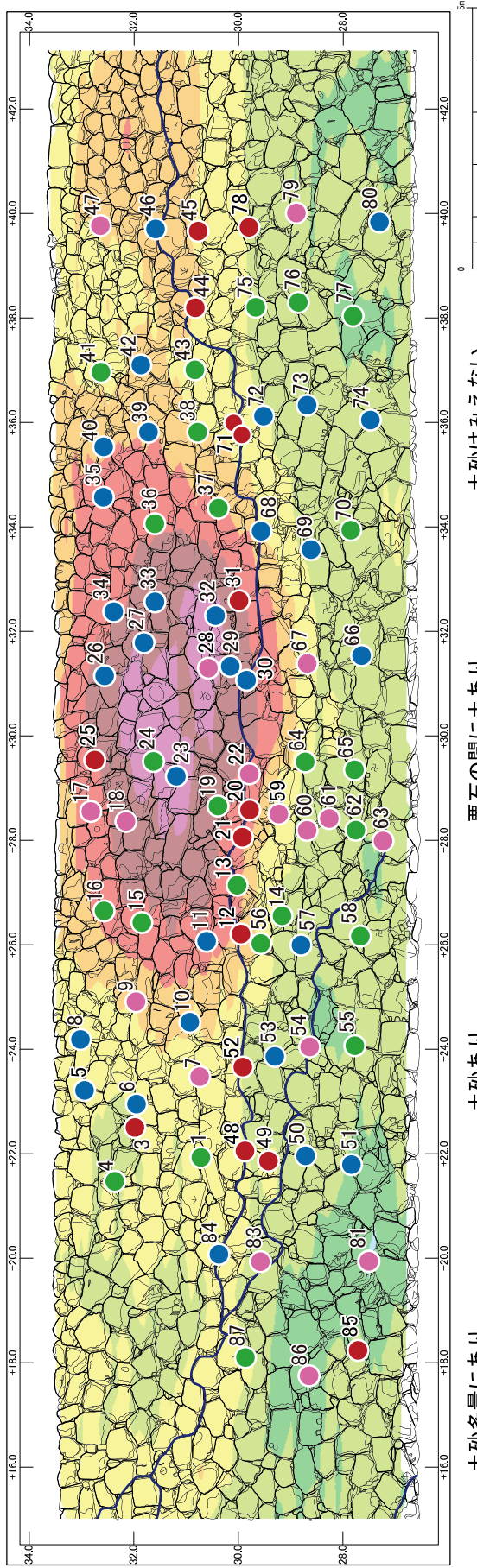


7. 断面比較





内部観察土砂堆積状況



土砂多量にあり

土砂あり

栗石の間に土あり

土砂はみえない



20



9



4



23



25



22



13



51



31



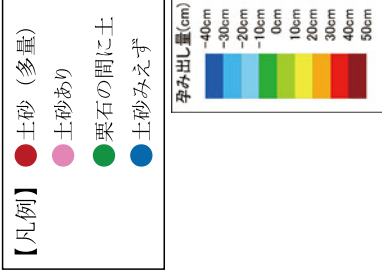
61



38



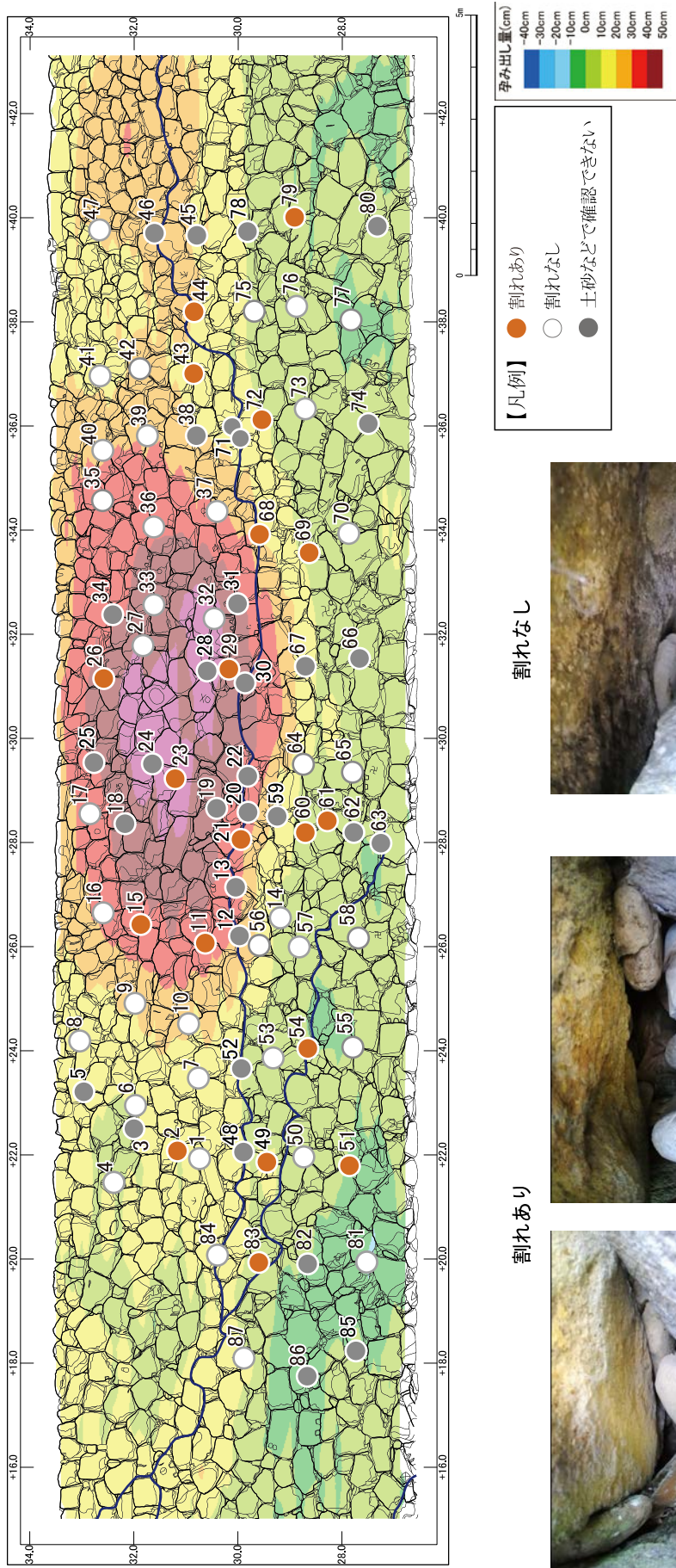
69



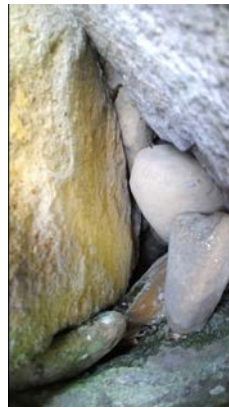
第 68 図 No.2 数奇屋敷敷西掘縁【6500N、6500W】 5



内部観察石の破損状況



割れあり



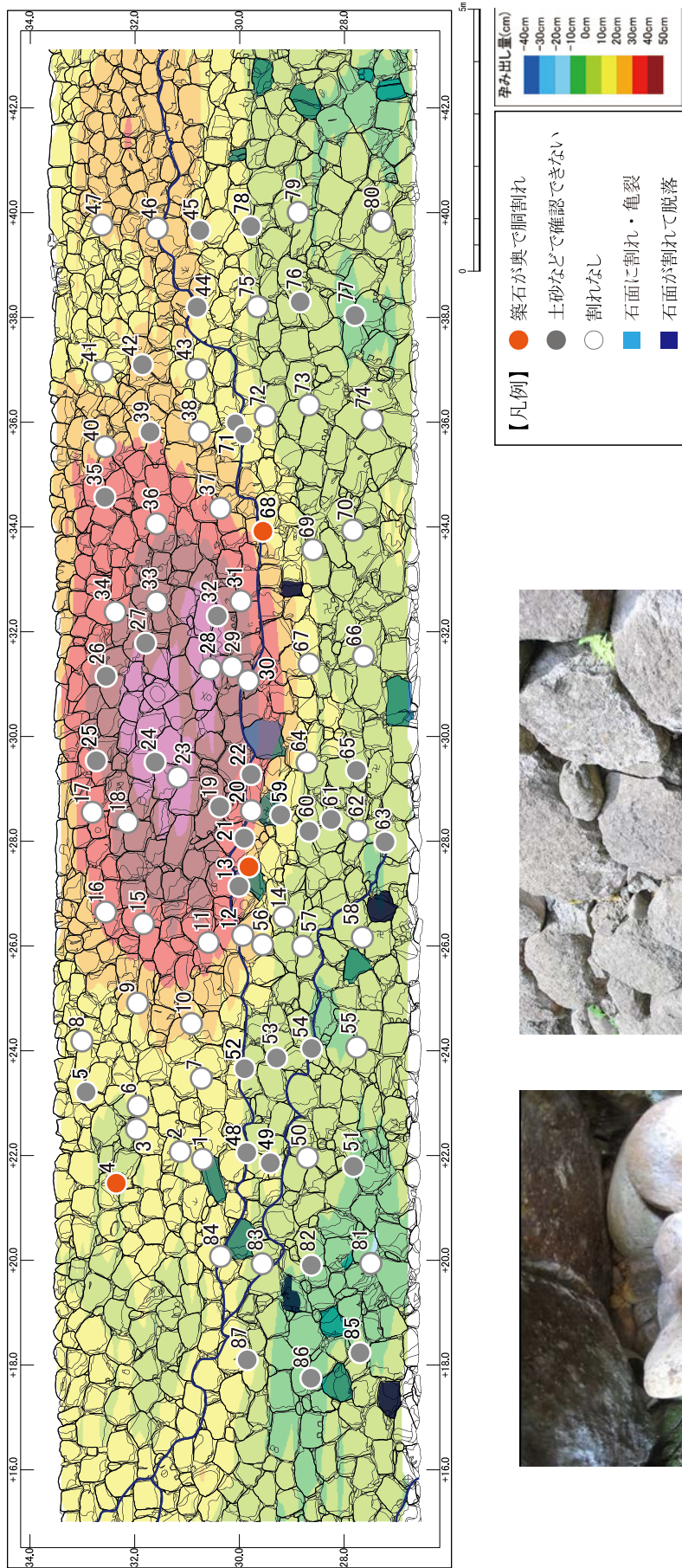
割れなし



第 69 図 No.2 数寄屋敷西堀縁【6500N、6500W】 6



内部観察築石の破損状況



4



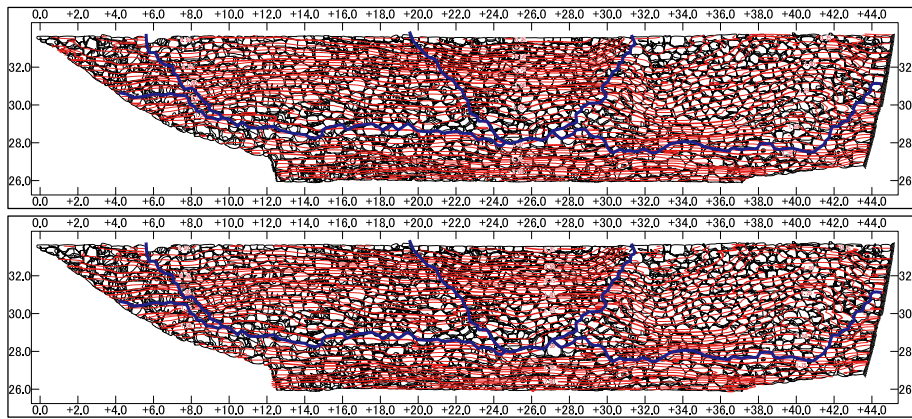
83右上の石面の割れ



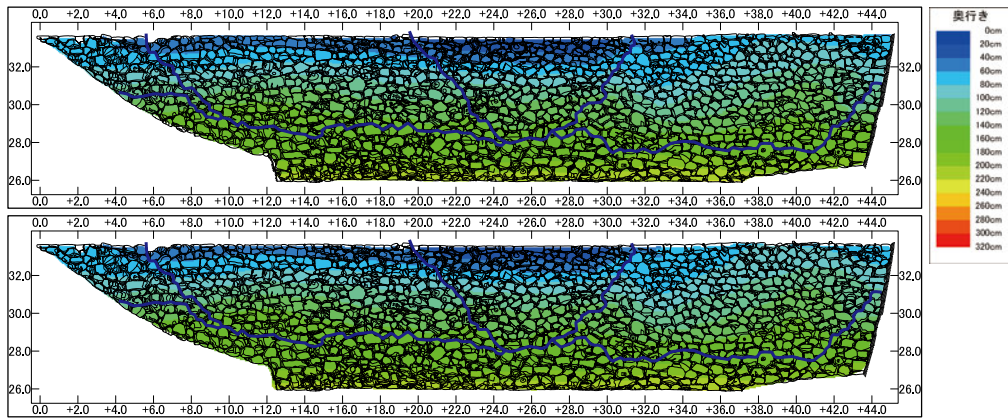
13-1

第70図 No.2 数寄屋屋敷西堀縁【6500N、6500W】7

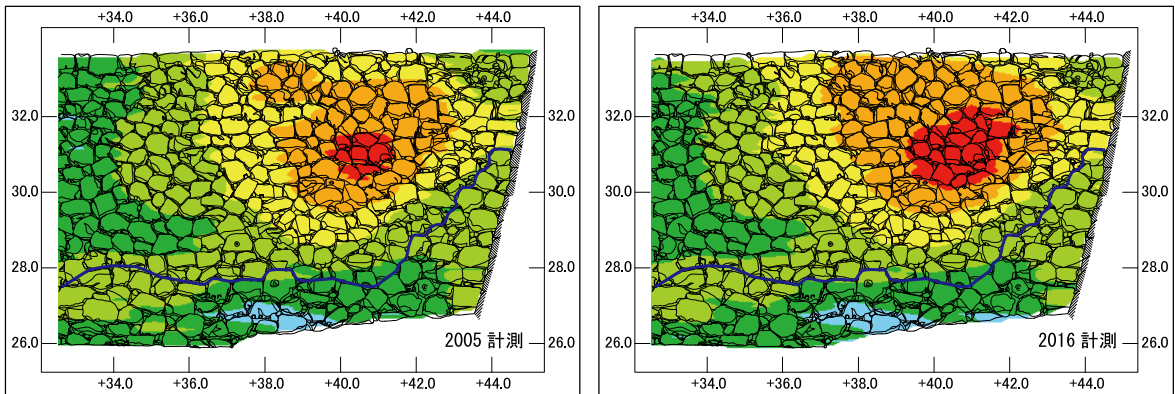
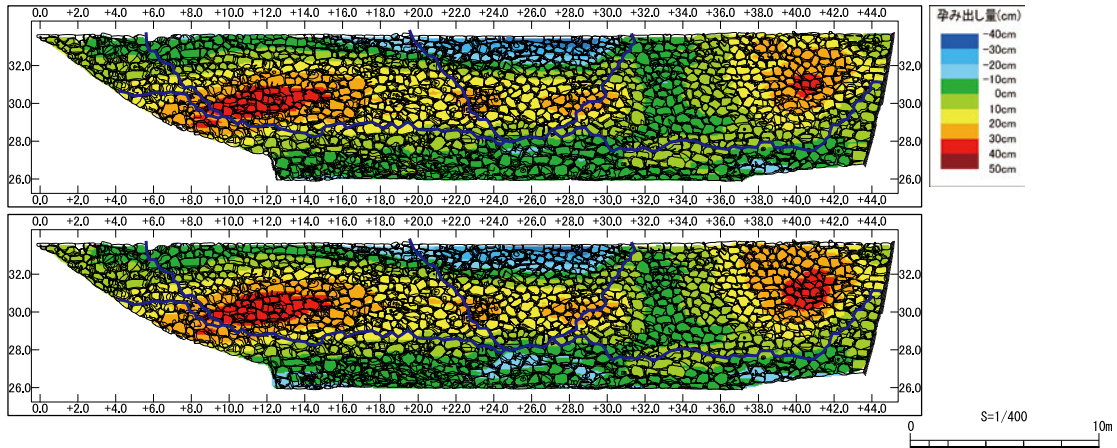
1. 立面コンターマップ図 (測量基準軸からの単点値を10cm格子で抽出し、コンターマップ化したもの) 上: 2005、下: 2016



2. 段彩図 (メッシュデータ) 上: 2005、下: 2016



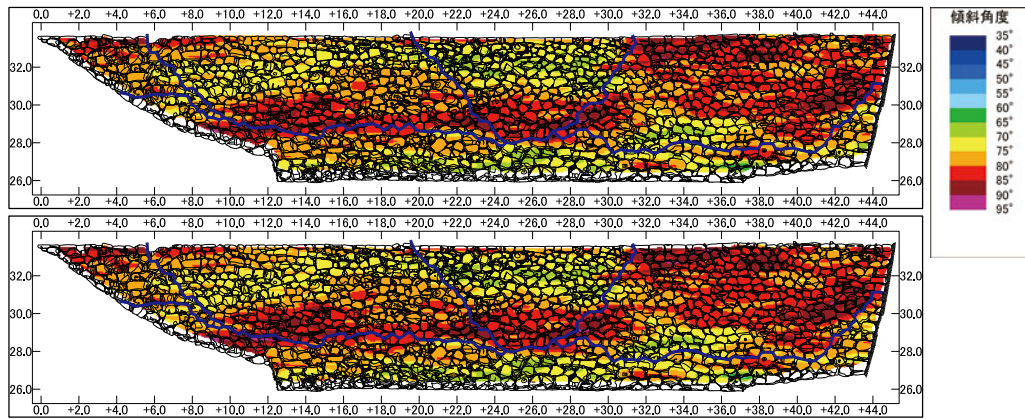
3. 孕み出し量結果図 (基準勾配と現状との差を10cm格子で抽出し、10cmごとにマッピングしたもの) 上: 2005、下: 2016



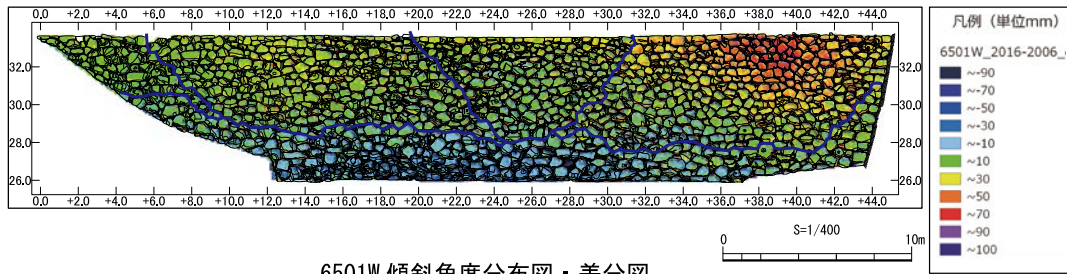
第 71 図 No. 1 数寄屋屋敷西堀縁【6501W】 1



4. 傾斜角度分布結果図 (石垣面の傾斜角度を 50cm 格子で抽出し、5° ごとにマッピングしたもの) 上:2005、下 2016

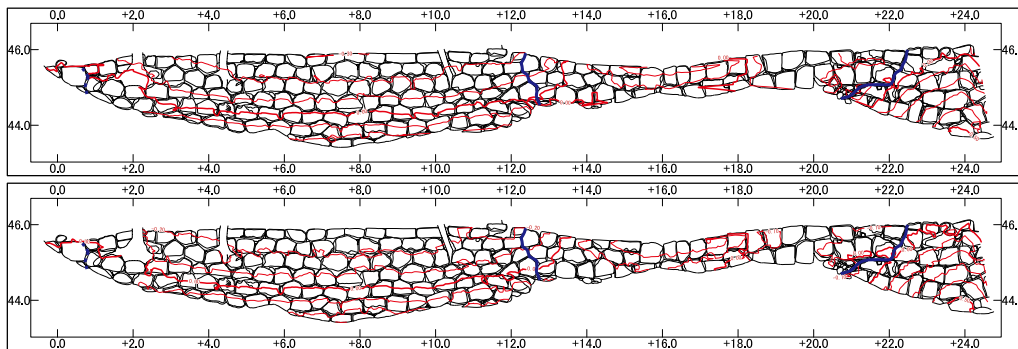


5. 差分図

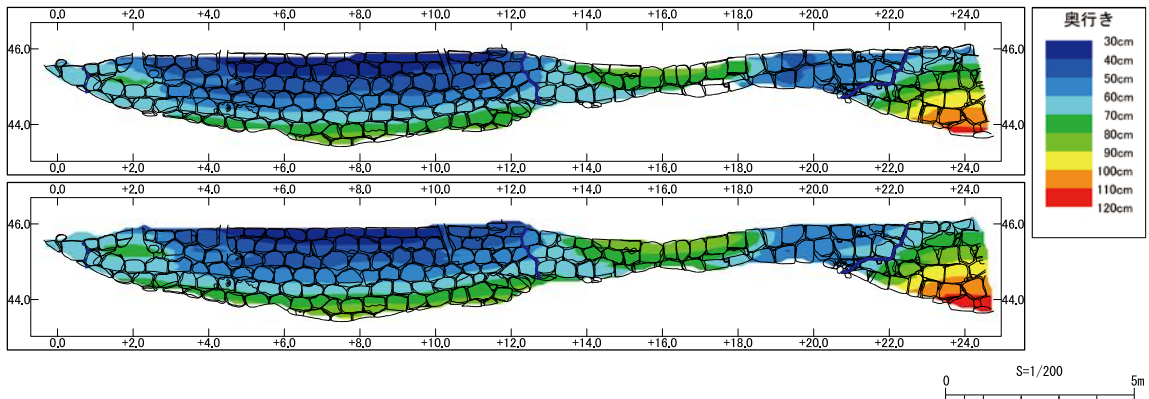


6501W 傾斜角度分布図・差分図

1. 立面コンターマップ図 (測量基準軸からの単点値を 10cm 格子で抽出し、コンターマップ化したもの) 上:2009、下:2020



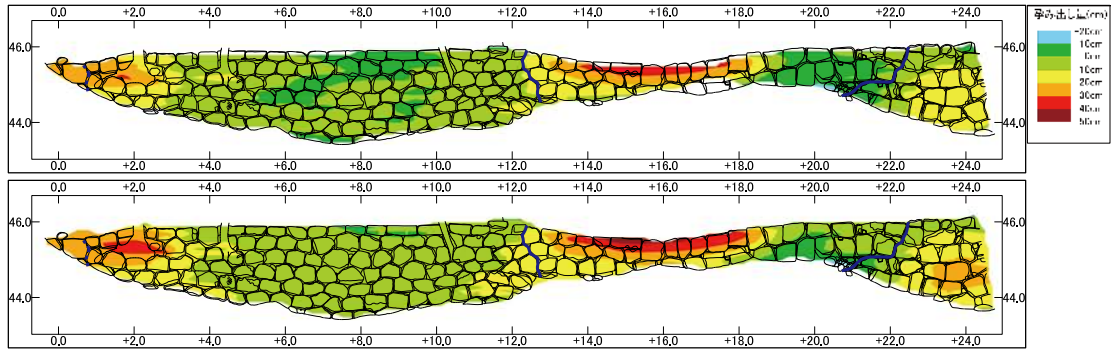
2. 段彩図 (メッシュデータ) 上:2009、下:2020



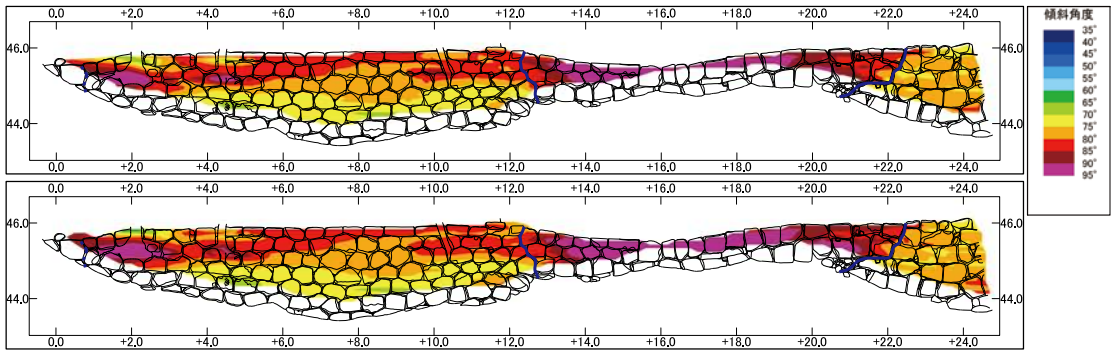
2821W 立面コンター図・段彩図

第 72 図 No. 1 数寄屋屋敷西堀縁【6501W】 2、No. 3 数寄屋屋敷西鉢巻【2821W】 1

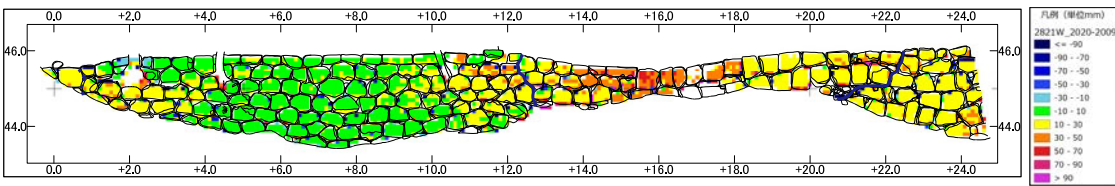
3. 孕み出し量結果図 (基準勾配と現状との差を 10cm 格子で抽出し、10cm ごとにマッピングしたもの) 上: 2009、下: 2020



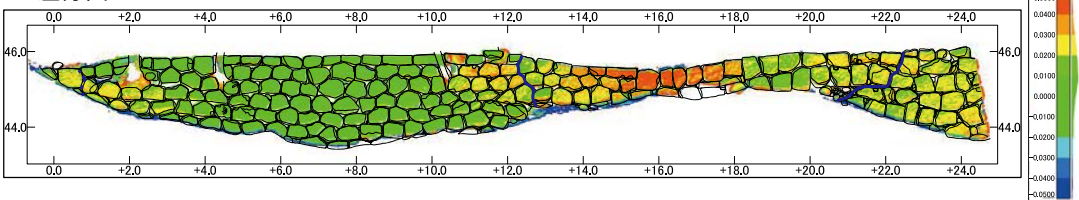
4. 傾斜角度分布結果図 (石垣面の傾斜角度を 50cm 格子で抽出し、5° ごとにマッピングしたもの) 上: 2009、下: 2020



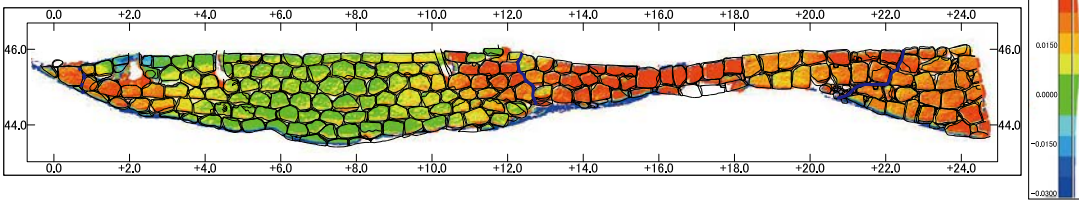
5. 差分図 A



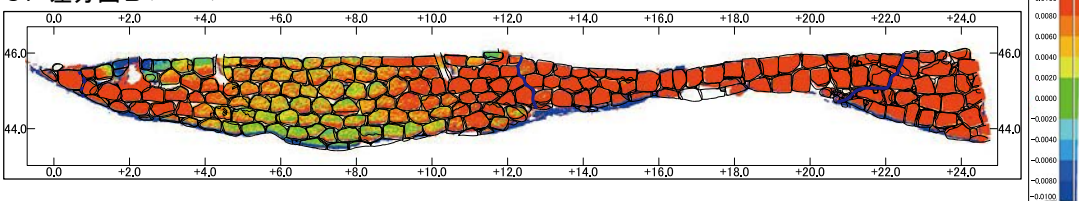
6-1. 差分図 B (±50mm)



6-2. 差分図 B (±30mm)



6-3. 差分図 B (±10mm)



第 73 図 No. 3 数寄屋屋敷西鉢巻【2821W】 2

0 S=1/200 5m





1. 6501W (西から)



2. 6501W (西から)

第 74 図 数寄屋敷西写真 1





3. 6501W (中央部)



4. 6500W (西から)

第 75 図 数寄屋敷西写真 2





5. 6500W 南端隅角部



6. 6500W

上部に孕み出し、天端が沈下

第 76 図 数寄屋屋敷西写真 3





7.6500W



8.6500W

第 77 図 数寄屋敷西写真 4





9. 6500W 大型土嚢設置 (2020年4月)



10. 伸縮計 (6500W背後の斜面のすべりを計測)

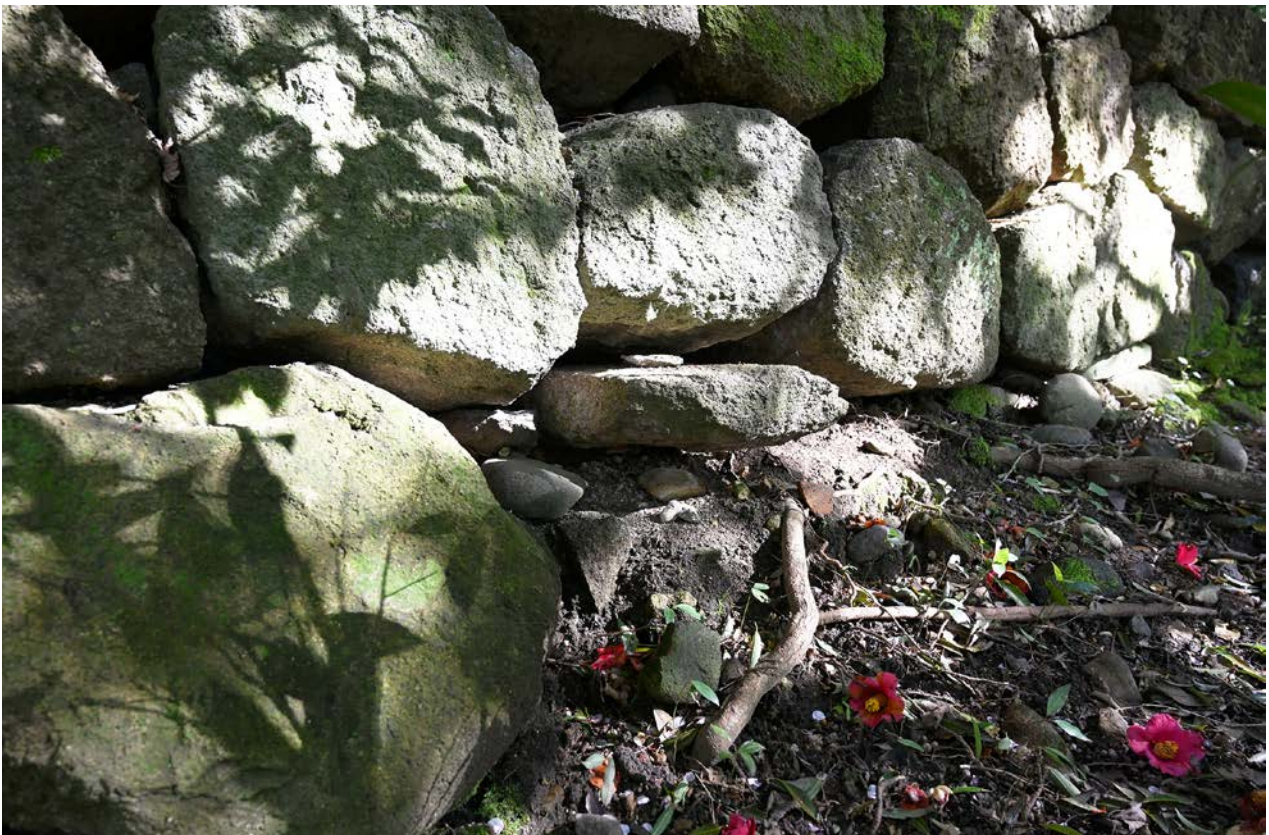
第 78 図 数寄屋敷西写真 5





11. 2821W 北半部

石口から樹木が入り込む



12. 2821W 中央部

根石が一段高くなる

第 79 図 数寄屋屋敷西写真 6





13. 2821W (北西から)

前倒れ



14. 2821W (北西から)

第 80 図 数寄屋敷西写真 7





15. 数寄屋屋敷周辺遠景（西上空から）

石垣奥は二ノ丸



16. 6500W現況

背後の斜面上に2821W

第 81 図 数寄屋屋敷西写真 8



## 金沢城数寄屋敷地区石垣探査について

日本各地に存在する城郭の石垣は構築方法や石材など多種多様であり、その研究や保護には個々の対象に応じた情報収集が必須である。

これらの城郭の中には、地域のシンボルとして文化財や都市公園などとして保全され、多くの人々に親しまれ、活用されているものも多い。しかし、長期間を経過した構造物として、崩落などの危険性が想定され、安全面で憂慮されているものも少なくない。

本稿でとりあげる金沢城数寄屋敷地区の石垣においても、はらみ出しなど石垣の経年的な変化による危険性が指摘されてきており、変位計などによるモニタリングや三次元計測による継続的な変動の確認を通じて対象となる石垣の挙動を評価することに加え、全国の石垣の保全や情報取得に資する研究が継続されてきたことは特筆されるものである。

これらの情報取得に加えて、金沢城調査研究所は奈良文化財研究所と連携して当該石垣の物理的手法による探査をおこない、石垣内部の様相を確認した。本稿ではこれらについて報告をおこないたい。

### 調査の方法と機材

今回は数寄屋敷西堀縁石垣を対象に探査を実施した。この部分は中央部に石垣がはらみ出している状況が確認されており、石垣内部の状況を非破壊的な手法で情報収集することを目的としておこなうこととした。

石垣の経年的な変化の原因としては、裏込石や土砂など石垣内部の物質の流出による空隙の形成と、土圧や地滑りによる変化が指摘されており、これらは石垣の広域な三次元計測や石内部へのカメラ挿入による観察などを通じて確認されている。両者とも有効な手法であるが、前者は変異の傾向からの推定にとどまり、後者は広域な把握が難しいといった問題がある。このため、本報告でおこなった物理探査手法を活用することにより、更にこれらの情報を充実させ、石垣の保全や研究に資する技術試行をおこなった。

以上の目的により、今回は地中レーダー探査（以下 GPR と表記）と電磁探査（EM 法）による探査の2つの手法を用いた。

両者とも、機器を安定して走査させるため、計測方向は石垣の下部より上部へ引き上げる方法でおこなった。開始時の試験計測では、測線毎に上下往復で実施し、効率化することも試みたが、吊り下げでの計測は石垣の目地などに機材がぶつかることによる揺れや直線的な操作が困難であり、引き上げるのみの方法が結果的には良好であった。

両手法とも、石垣に平行に距離の基準線を設定し、それを元に 1m 間隔で石垣を上下して計測をおこなっ

た。走査線方向の距離については機器の回転などを防ぐ目的で用いたザイルに等間隔に目印をつけたものを用いた。GPR は可能な範囲で実施した。

#### 1) GPR 探査

電磁波を用いて地中の情報を取得する手法である（佐藤ほか 2016、水永 2019）。同様の手法が海外や東北大学、富山大学のグループにより実施されており（例えば酒井ほか 2015）、参考となる。

今回は石垣内部の状況の把握を目的とし、基盤までの探査が望ましいが、石垣に沿って引き上げるという作業上、やや探査深度に不安があるものの軽量小型なアンテナを用いた。

GPR 機器は MALA 社 X3M に中心周波数 500MHz のアンテナを用いた。この機器はアンテナ上にデータの送受信部を取り付ける形になっており、そこから通常は LAN ケーブルを通してコンピューターと接続するが、今回は無線化をはかり、更に機器本体に小型のコンピューターを取り付け、無線 LAN でリモートデスクトップソフトウェアを通じて操作することとした。

また、アンテナが石垣上で回転しないように、当初アンテナの左右に塩ビ管を取り付けてそこに補助綱を通して、安定して引き上げが可能な形とした。試験作業を通じて、片側でも十分効果を有することがわかったので、実際の探査においては右側の塩ビ管のみを残して石垣に押し付けながら引き上げて探査をおこなった。巻き上げは当初手動のウインチを準備しておこなったが、手で引き上げるのに比べて労力がかかることから、手で直接引き上げることにした。

#### 2) 電磁（EM 法）探査

地中レーダーと同様に電磁波を用いる手法であるが、機器による 1 次磁場から誘導されて生じる 2 次磁場の応答により導電率と磁化率を求めるものである。導電率は地盤の比抵抗値の逆数であることから、比抵抗電気探査と同様の計測を電極の打設をせずに可能とする。

GPR と比べて解像力や探査深度に限界があるなどの課題はあるが、機器の簡便さや導電率から地中の物性を評価できることから、今回の石垣の探査で有効と考えて導入した。

今回は複数の深度の計測が可能な GFInstruments 社の CMD-MiniExplorer を用いた。この機器は 0.5・1.0・1.8m あるいは 0.25・0.5・0.9m の 3 つの深度の導電率と磁化率を同時に計測できる。

アンテナは棒状を呈しており、これらを測定面より一定の間隔を保持しつつ計測をおこなう。通常は人間が保持して測定をおこなうことが一般的であるが、石垣の計測に対しては困難であるため、専用の治具を作成しておこなうこととした。これは塩ビ管と磁性を有

しないプラスチック製のタイヤを使ったもので、中央部にアンテナを固定し、吊り下げて石垣表面を安定的に走行させる形となっている。GPR に比べて機器が

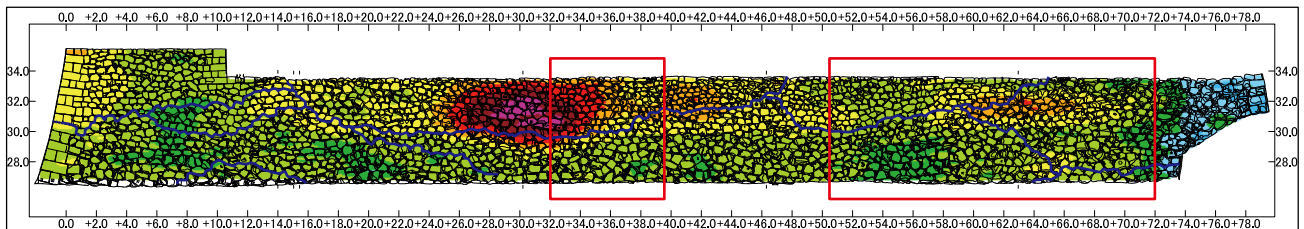
軽量であり、作業は簡便であった。アンテナと計測ロガーとの間は Bluetooth で接続する方法と、有線で接続する方法があるが今回は後者でおこなった。



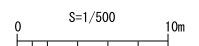
第 82 図 GPR 探査作業風景



第 83 図 電磁探査作業風景



第 84 図 数寄屋屋敷西堀縁石垣 GPR 探査範囲





## 調査成果

調査成果について両手法にわけて述べる。

### 1) GPR 探査

GPR 探査については計測作業の都合上、一部のみしか計測ができていない (X=32-39mおよびX=52-72m) という課題はあるが、興味深い知見が得られている。

Profile については石垣のレーザー計測データがあり、それに基づいて変形して検討するのがより良いと考えるが、今回はその時間がなかったため、石垣面からの相対的な状況を示す。

ここでは、主に Time-Slice 図を中心に検討をおこない、適宜 Profile 図で確認しつつ検討をおこなう。

まず、石垣の石材部分にあたる箇所に対応する f1-f2 については、はらみ出し部の周辺の石垣下部で強い反射がみられる。石垣下部の石の根が深いと考えるか、そこに空隙が存在するかはこれだけではわかりにくいですが、現地での確認が必要であろう。

続く深度においては、上部に強い反射が存在する例がみえる。Profile をみると、20ns-30ns 付近 (約 60-90 cm) に面上に強い反射がみられる部分があり、これが石垣の外側の石材と裏込め部分の境界付近にあたりと考える。この部分では上部に反射が強く、下部は弱いという対照的な状況を示しており、空隙あるいは水分量の多い部分が存在すると考えられる。

これらは、石垣の修復記録によって実際に指摘されている修復部分における空隙の存在などと連動させて理解することが必要であろう。

続いて、f15 より深い部分については、石垣南側 (87 図右) に三角形の強い反射部分が存在する。これについても空隙および水分量の多い部分が存在すると考えることができる。

探査の成果としてはこのような状況であるが、現地の石垣を観察すると、石組みが同様の形状に積まれており、石垣石材の表面が湿っている様相が確認され、また、この部分だけ他の部分とは異なる苔類が着生しており、周辺の水分量が多いことが予想できた。これは、石垣内部に水が集中しやすい部分が存在し、周辺の水がここに集まりやすいことを示していると考えられる。

### 2) 電磁探査

電磁探査については 1.0m および 1.8m の成果について紹介する。

また、X=30m 付近は石垣のはらみ出しが大きい部分であるが、計測段階において変位計などが設置されていたため、計測が出来ていない部分が存在する (第 88 図)。

第 87 図では、上部に電気抵抗値、下部に帯磁率を表示した。単位はそれぞれ  $\Omega\text{m}$ 、SI である。

電気抵抗についてみていくと石垣面より 1.0m の部分においては石垣各部分において抵抗に粗密がみられ、石垣内部の裏込め石・土の状況による変化がうかがえ

る。また、後世の補修が確実な一段高い部分については抵抗値が高く、空隙が多いあるいは乾燥しているなど、高抵抗を示す状況が存在することが想定できる。

石垣面より 1.8m の部分については、上部と下部で抵抗値が異なっており、この部分で差がみられている。この部分が裏込め石・土の内部であるのか、あるいはその裏の基盤層になるのかはこの成果だけでは断定できないが、後者である場合、地層の変化を反映していると考えられよう。

既に継続的なレーザー計測による変異の把握により、本石垣の変異については背後の基盤層の地滑りに起因する可能性が指摘されており、今後比較が必要であるが、この差を本探査においても把握できているとすれば、石垣内部の非破壊調査について本手法が有効であることを示すものと評価できる。

帯磁率については今回は参考までに示した。

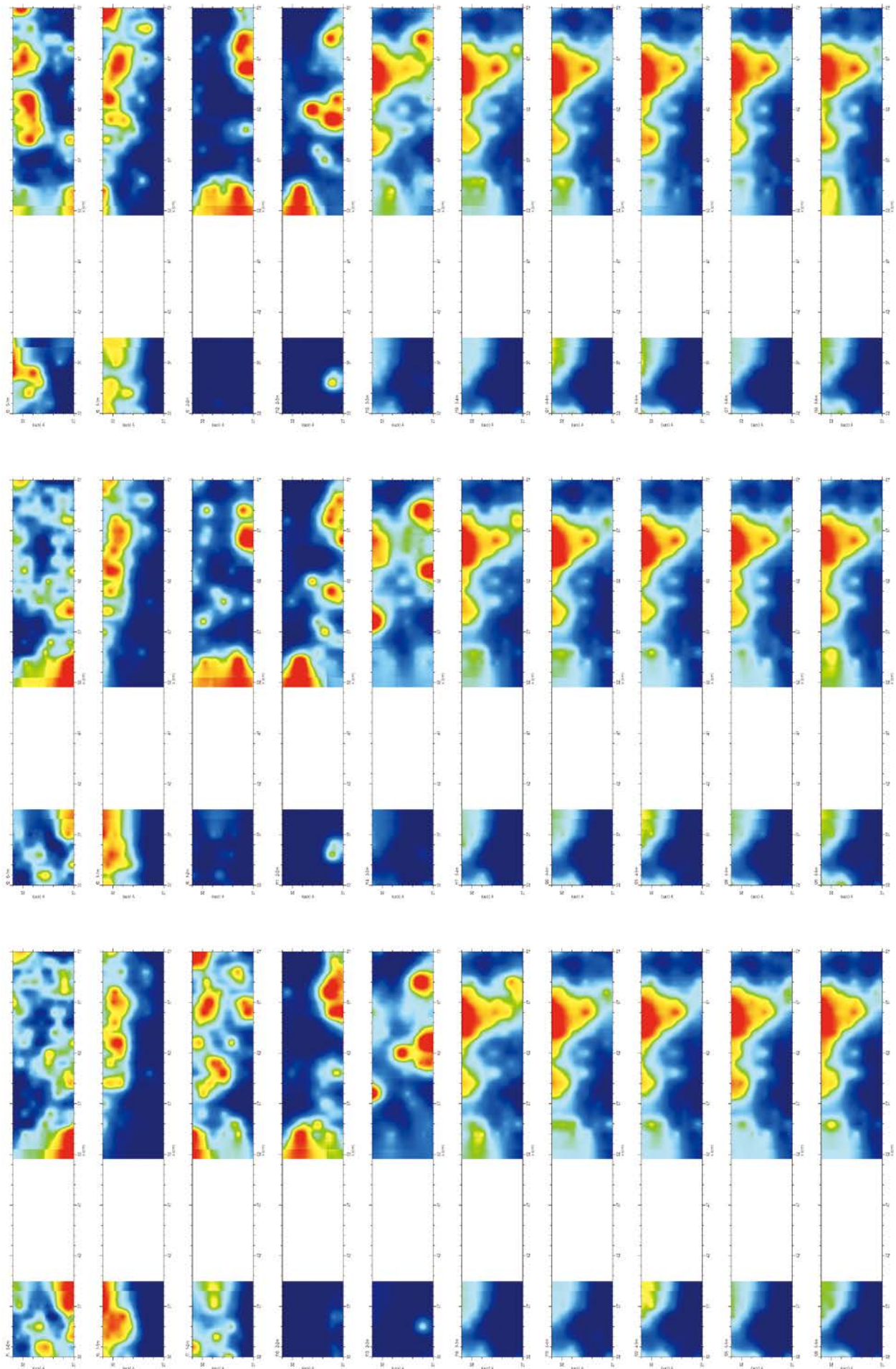
## まとめ

金沢城の石垣については、多様な築造手法の石垣が存在すること、修復記録などが豊富なことから、石垣の保全を検討としたときに参考に資することができる情報に恵まれており、良好な条件で計測が可能である。今回の試行により、石垣の内部構造の広域把握の手段としての物理探査手法の活用を進め、今後とも試験と手法の洗練を通じ、金沢城および全国の石垣の保全や研究に資する手法として確立していきたい。

## 参考文献

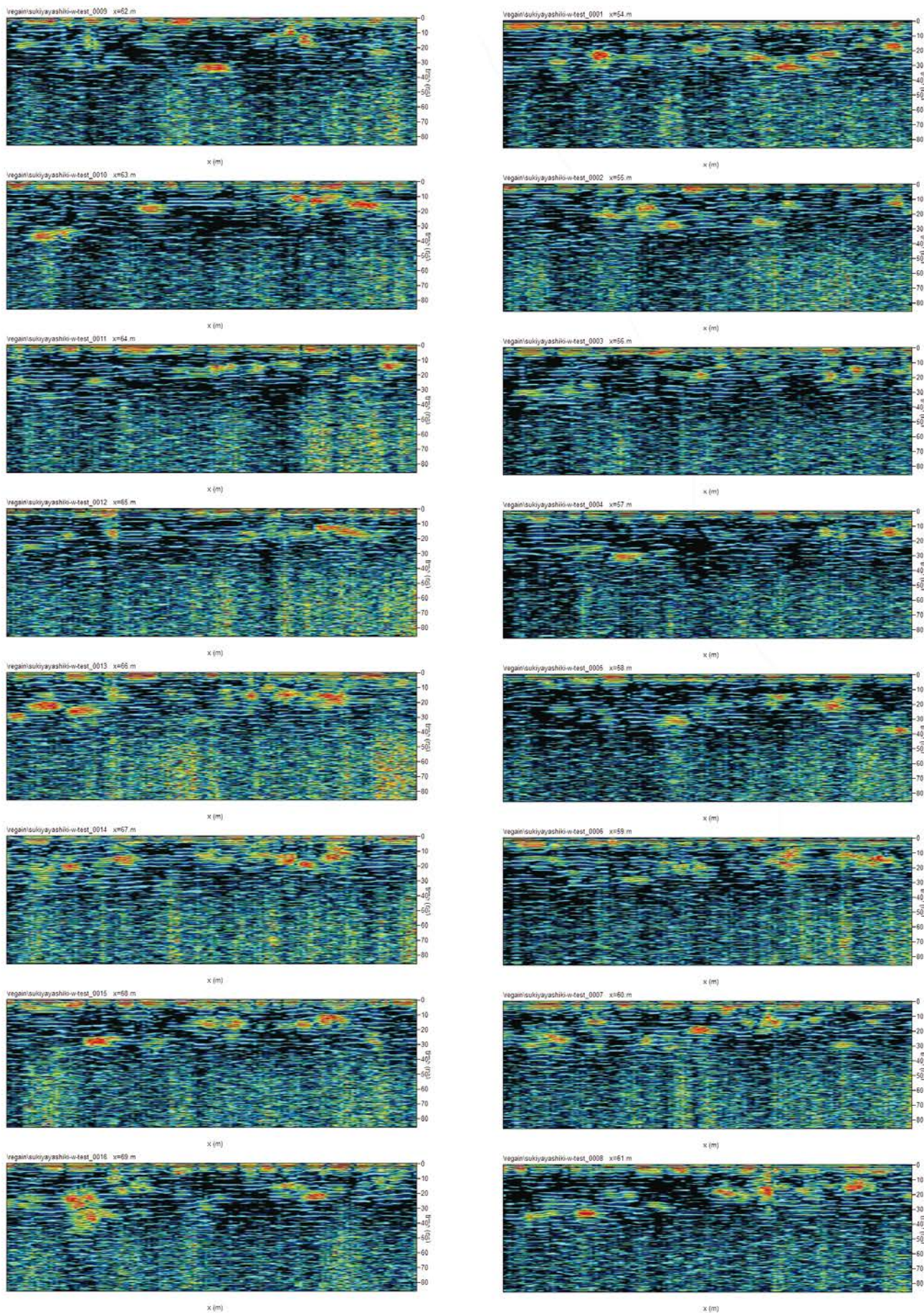
- 酒井英男, 泉吉紀, 川崎一雄, 田上和彦 2015 史跡高岡城跡・本丸虎口の探査と土壌の磁化研究 日本文化財科学会第 32 回大会発表要旨集 日本文化財科学会  
佐藤源之, 金田明大, 高橋一徳 2016 地中レーザーを応用した遺跡探査 GPR の原理と利用 東北大学出版会  
水永秀樹 2019 はじめの一步 物理探査学入門 九州大学出版会





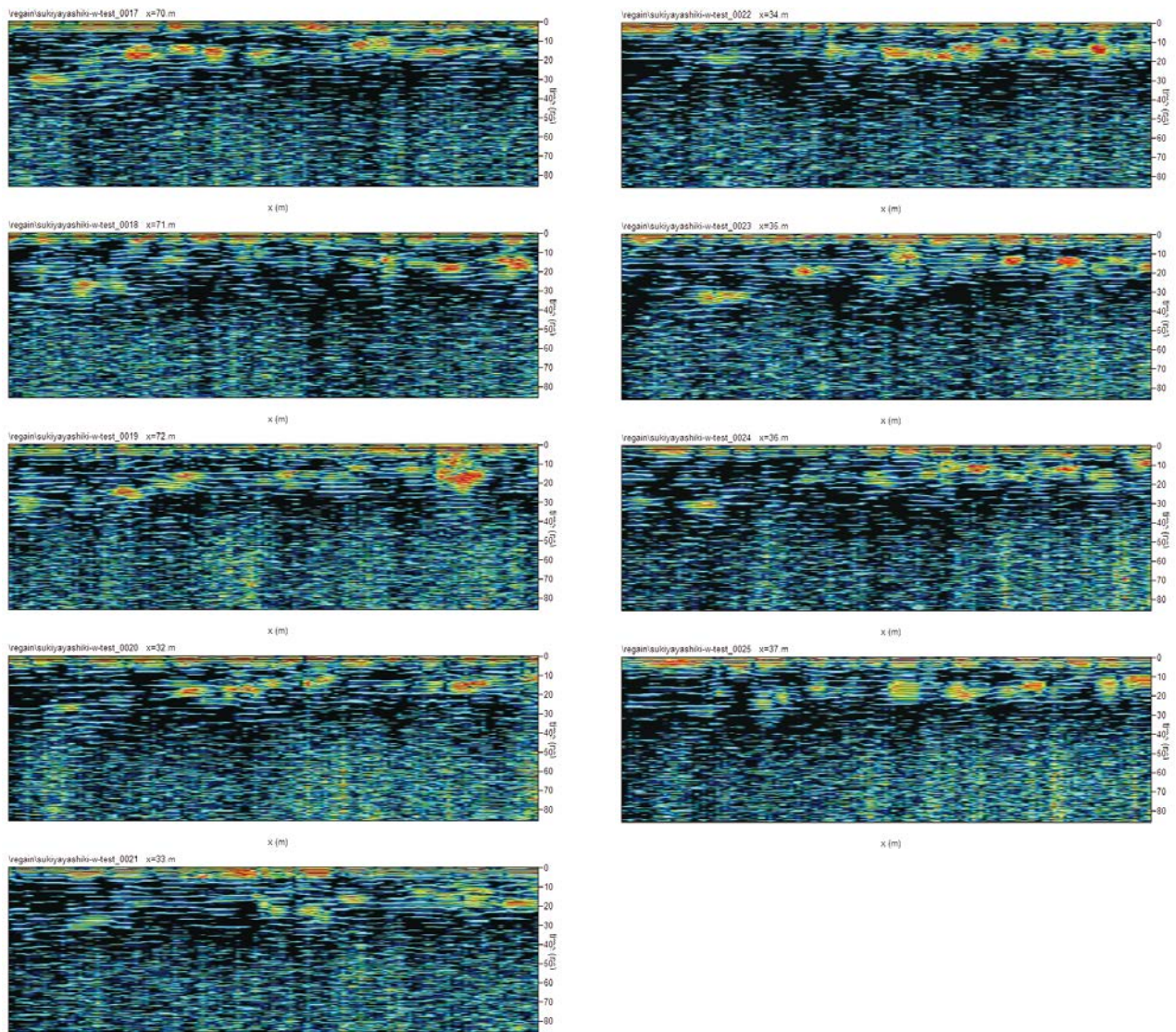
第 85 図 金沢城数寄屋敷西堀縁石垣 GPR 成果 (Time-Slice)



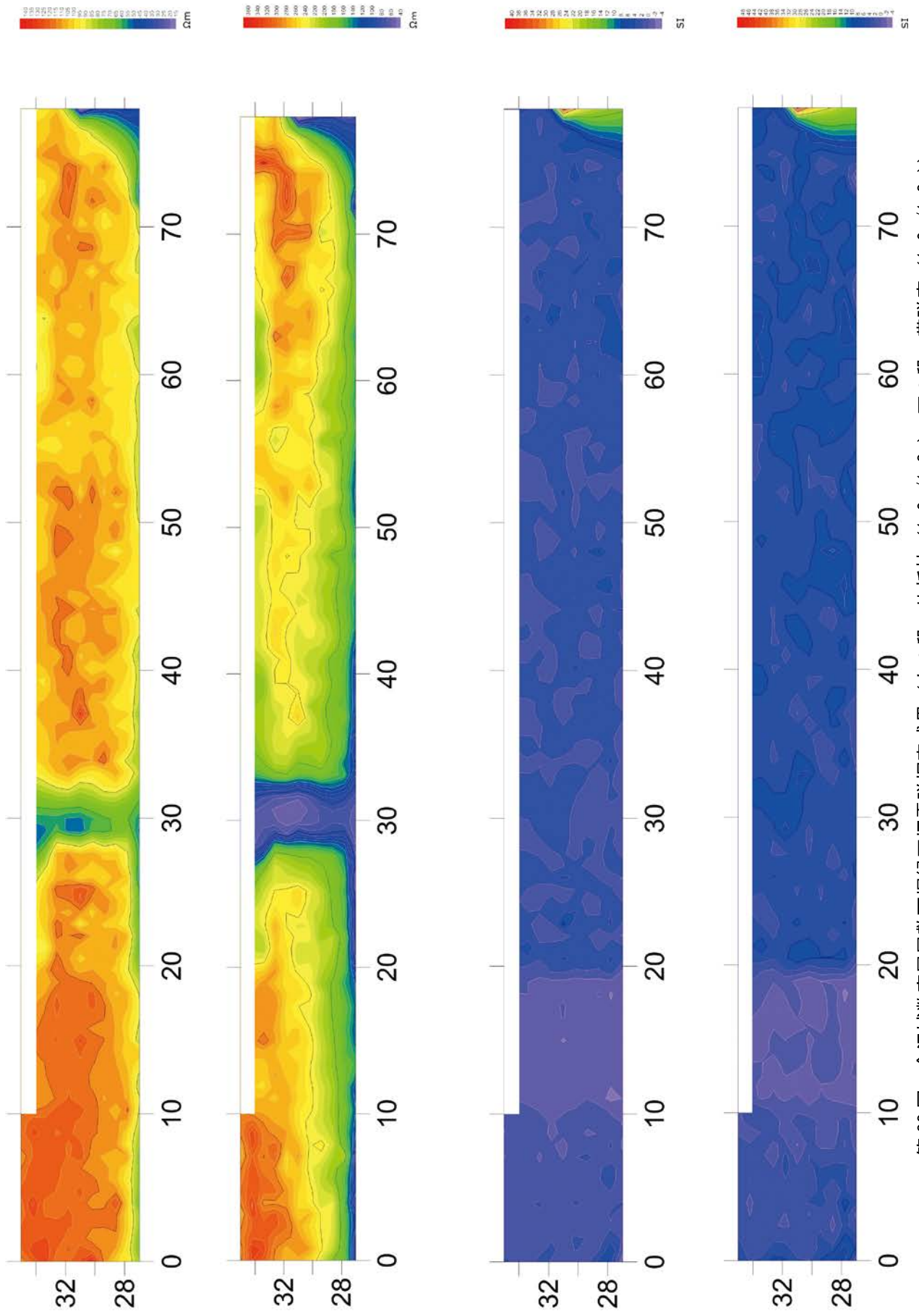


第 86 図 金沢城数寄屋屋敷西堀縁石垣 GPR 探査成果 (Profile-1)





第 87 図 金沢城数寄屋敷西堀縁石垣 GPR 探査成果 (Profile-2)



第 88 図 金沢城数寄屋敷西堀縁石垣電磁探査成果（上 2 段：比抵抗（1.0m/1.8m）・下 2 段：帯磁率（1.0m/1.8m））



### 第3節 玉泉院丸北泉水縁石垣・数寄屋門台石垣 (No.4 6430W・N・S、2830W・N・S)

#### 基本事項 (第89図)

**位置** 玉泉院丸北部にあり、石垣上方には二ノ丸数寄屋屋敷、前面は玉泉院丸庭園の北側の泉水があり、その境に位置する。先述の数寄屋屋敷西石垣の東側にあたり、二つの曲輪の間の斜面も数寄屋屋敷西の斜面と連続している。泉水縁石垣は玉泉院丸庭園の泉水に面し、背後に斜面地があり、数寄屋門台石垣は泉水縁石垣の斜め背後、斜面中腹に築かれている。

**規模** 6430W : H5.8m、L27.7m、A134.6㎡、  
角度86.5°

6430N : H3.9m、L5.3m、A7.0㎡、角度84°

6430S : H7.0m、L4.7m、A11.7㎡、角度84.5°

2830W : H8.6m、L6.6m、A49.3㎡、角度84°

2830N : H6.5m、L6.1m、A31.2㎡、角度83°

2830S : H7.8m、L7.7m、A40.8㎡、角度80.5°

**履歴** 金沢城石垣編年4期(17世紀前半、寛永期)に創建され、現状のような切石積石垣となったのは5期(17世紀後半、寛文期)と考えられる。6430W(泉水縁石垣)は、石垣前面の発掘調査において、堀底の堆積土上に根石が据えられて、粗加工石積み石垣が築かれ(4期、創建時)、その後、金場取残積石垣に改築されたことが確認されている[金沢城調査研究所2011b]。

その他の江戸期の修理に関しては、両石垣ともに6期(18世紀後半、宝暦期)に火災による被災記録があり、現状の石積みをみても、その際の記述と近似した範囲で、修理痕跡を確認することが可能である。

**観測** 6430Wと2830Wにおいて平成23年(2011)より定点観測を実施している。6430Wはその後の動態観測及び実態調査の結果から、令和元年3月に7地点を追加し、計12地点を、2830Wは3地点の観測を行っている。

6430W側面にあたる6430Nでは、石材にピンを固定し、2点間の距離をノギスにより計測している。通常はクラックゲージを2石の築石に跨がせるように設置して使用するが、6430Nについては、石口の開きが大きく、クラックゲージでは尺不足となるためである。2830Sではクラックゲージを使用した。

6430Wの定点観測では、H23からR2年の間で最大16mmの前方への変位がみられた。観測開始からR元年までは年間1mm前後で累積していくような変化であったが、R2年度は年間で5mm前後となる急激な動きがあった。H31年追加の7地点についても同様に5mm前後の動きがみられた。一方、6430Nのノギス計測では、R2年もそれまで同様に約2mmの変化であった。ノギス計測はH17年から開始しているが、H27年を境に、年間1mm程度だった変形のペースが、2mm程になっており、定点観測と異なる動きをみせている。

2830Wの定点観測は、H23～R2の間で最大8mmの変化

量が計測されている。こちらは近年ほとんど変化がなく、2830Sでのクラックゲージによる計測でも変化はみられなかった。ただし、2830W前面で、6430と連続する6420Wの観測値が年間3mmと以前に比べ増加している。

#### 差分比較 (第90～94図)

6430Wは平成23年(2011)と平成30年(2018)の9年間、2830Wは平成23年(2011)と令和元年(2019)の10年間の変形量について比較を行った。

6430Wは、孕み出し量図で檜台状の北西隅角部を中心に変形がみられていた。差分図Aでは、その隅角部だけではなく、北東隅角部周辺以外の石垣全体が前方への変位を示していた。

差分図Bでみると、やはり石垣面全体が前方向に動く傾向はみられるが、その中でもやはり北西隅角部周辺の変位量が多い。

2830Wについては、孕み出し量図では目立った変形箇所は確認できないことから、面的に前倒れもしくは面で滑っていると考えていた。差分比較では、面的に前にでているのではなく、北東隅角部下部(右側)が前方に変位していることを確認した。

差分比較では、±10mmの範囲の変位でみると、北東隅角部下部が前方に、石垣面の対角線上にあたる北西隅角部上部が後方に動いており、6430Wのような前倒れではなく、根元から面的に転倒していることが判明した。

#### 内部観察

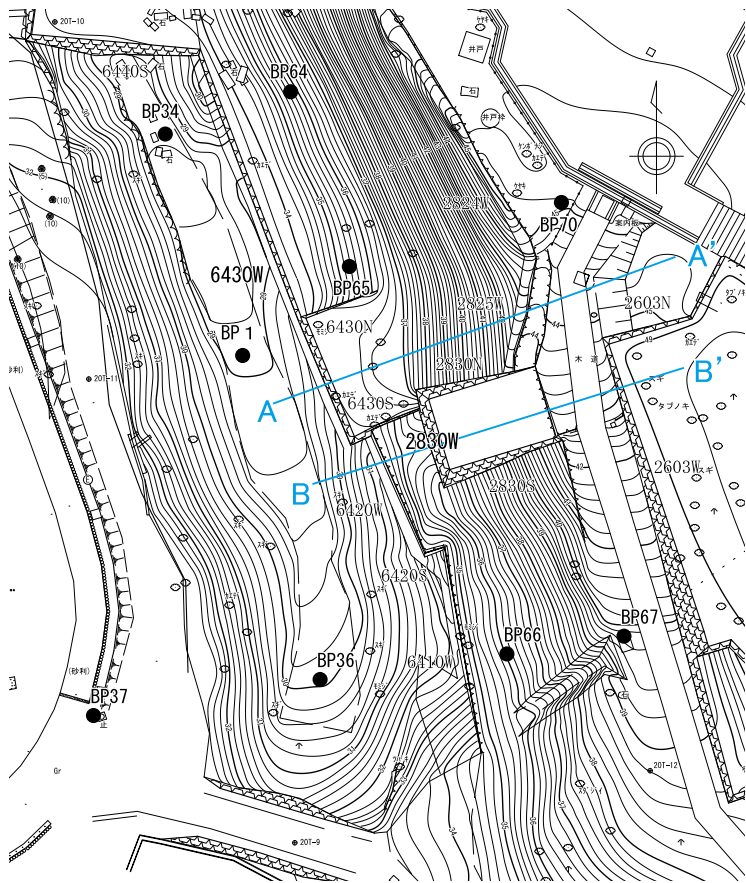
切石積石垣は築石間の隙間が無く内部観察は実施せず。  
**小結**

切石積石垣は報告書Iでも述べたが、石積みの一部が孕み出すよりも、面的に動いた場合、孕み出し量図や傾斜角度分布図では表現されない場合もある。前倒れした面の側面部分の石垣は石口が開くことから変形に気づくが、正面からの目視のみでは把握が難しい。

ID6430は定点観測でR2年に急激な変位量の増加があったが、クラックゲージによる計測は必ずしも同調した動きではなかった。しかし差分比較などの結果からは、前方への変位が認められる。基準点や計測機器が原因の誤差の可能性も否定できないが、斜面の滑りが変形の誘因であれば、側面部分の石垣も滑り始めている可能性も想定して、経過観察が必要であろう。

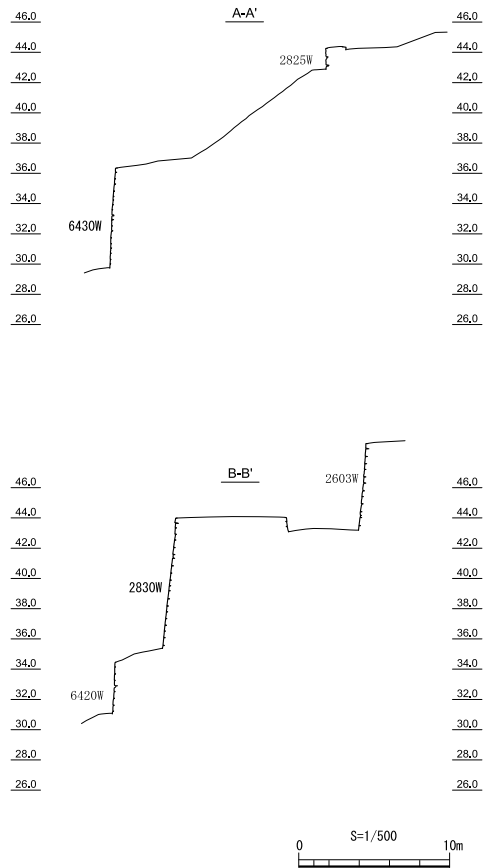
ID2830は、定点観測及びクラックゲージによる計測では急激な変化はみられなかったが、石垣が面的に倒れるような変形が認められる。北東隅角部の下部が特に前方向へ動いているが、北西隅角部の下部は6430Sがあたっていることから、前方への滑りが抑えられているものと考えられる。





現況平面図

平成 20 (2008) 年測量



現況地形断面図



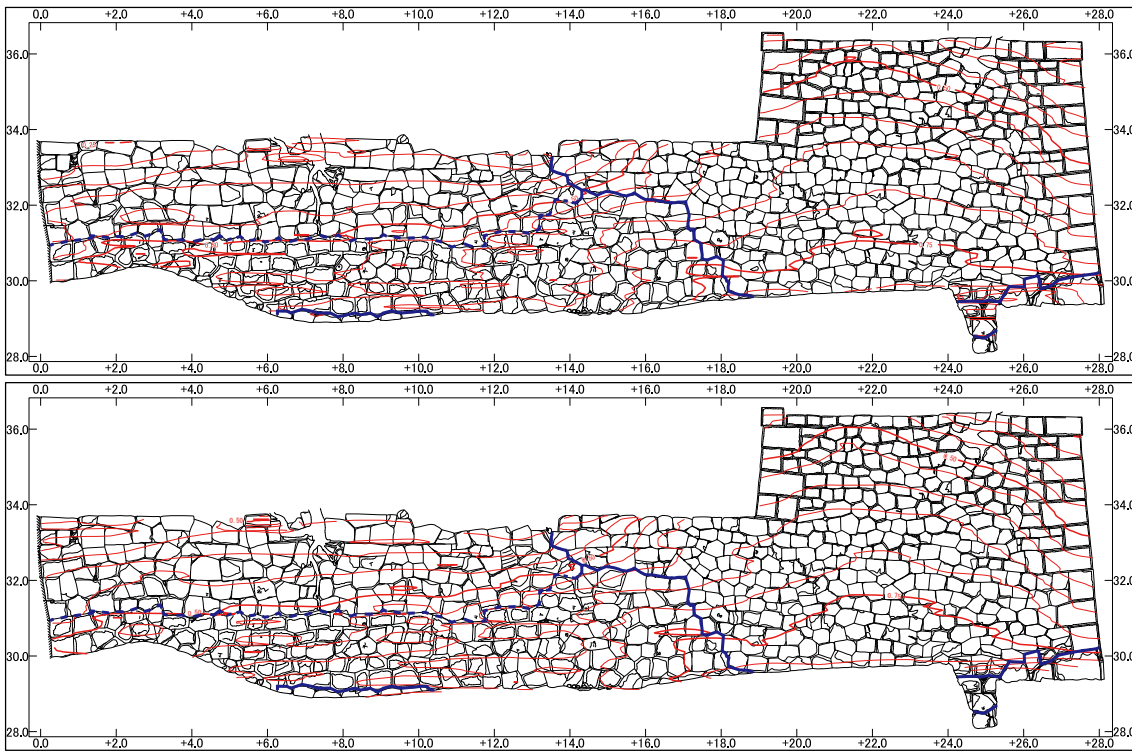
江戸後期

文政13 (1830) 年「御城中老分基絵図」横山隆昭氏蔵

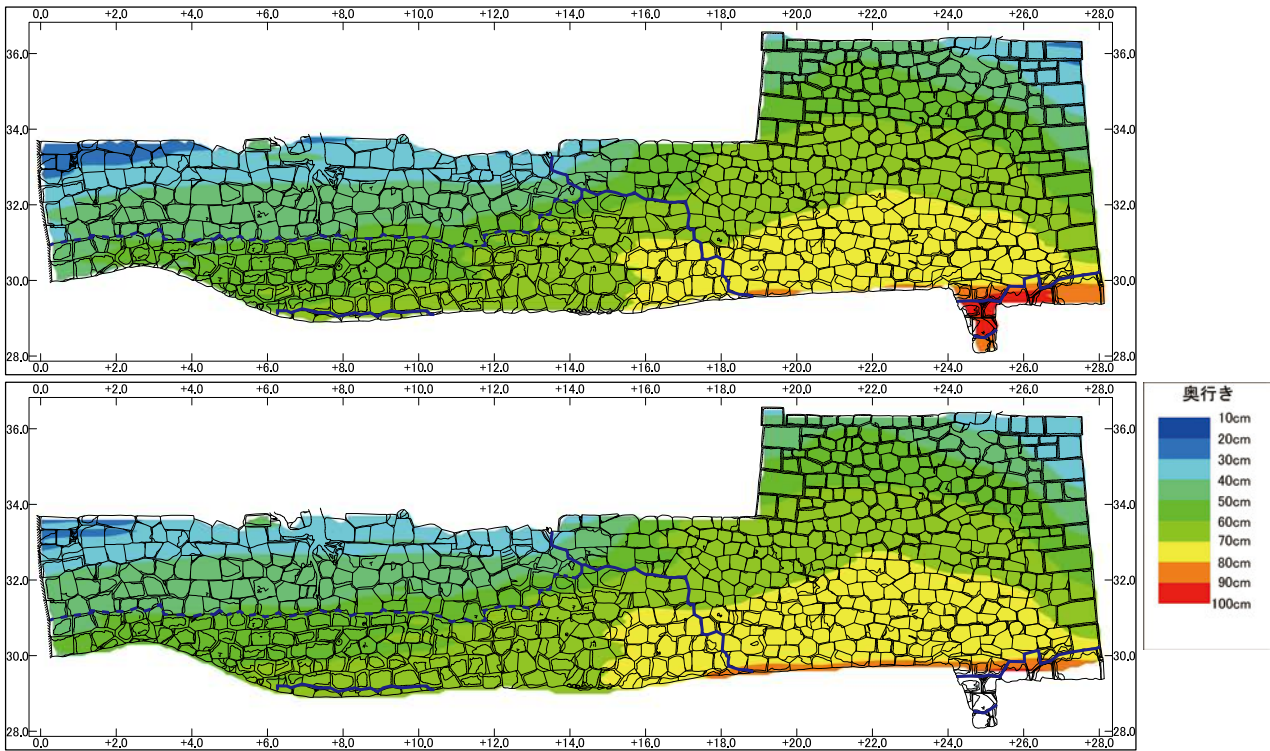
第 89 図 No. 4 玉泉院丸北石垣現況と周辺地形・絵図



1. 立面コンターマップ図 (測量基準軸からの単点値を10cm格子で抽出し、コンターマップ化したもの) 上: 2009、下: 2018



2. 段彩図 (メッシュデータ) 上: 2009、下: 2018

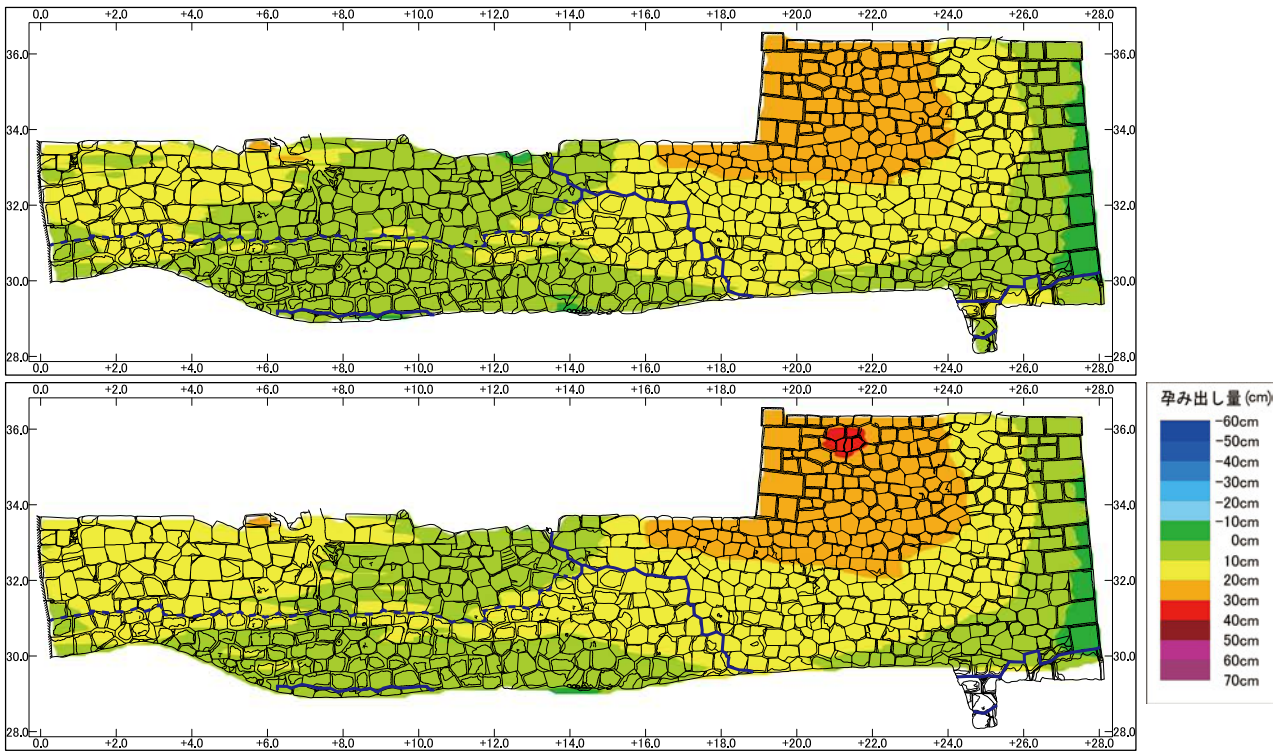


第 90 図 No. 4 玉泉院丸北 (泉水縁) 【6430W】 1

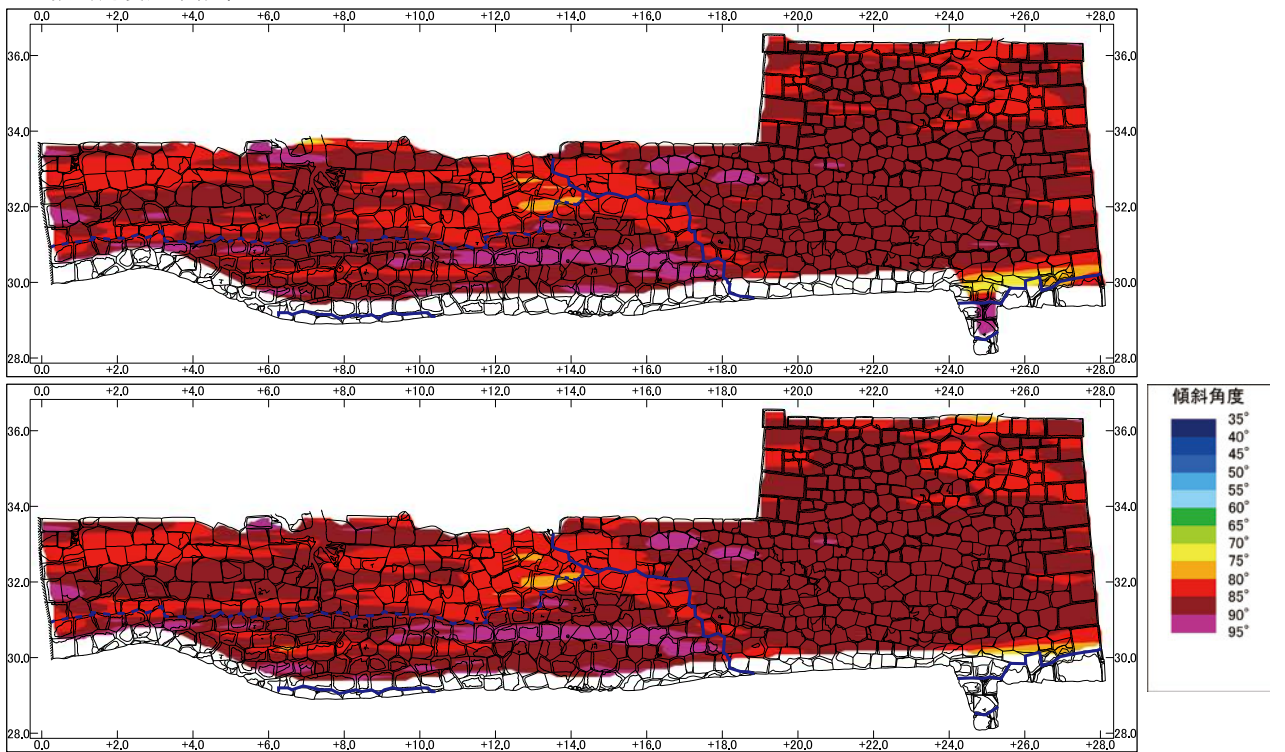
0 S=1/200 5m



3. 孕み出し量結果図 (基準勾配と現状との差を10cm格子で抽出し、10cmごとにマッピングしたもの) 上: 2009、下: 2018



4. 傾斜角度分布結果図 (石垣面の傾斜角度を50cm格子で抽出し、5°ごとにマッピングしたもの) 上: 2009、下: 2018

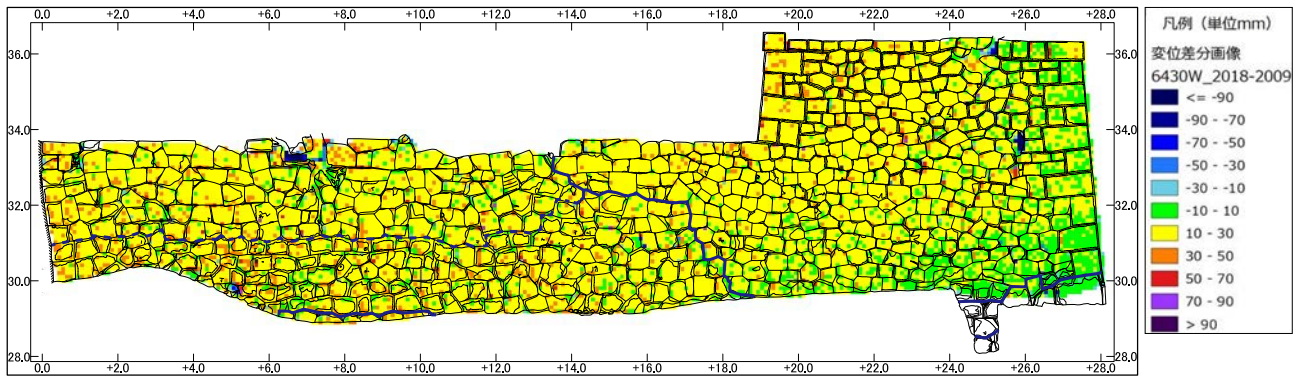


0 S=1/200 5m

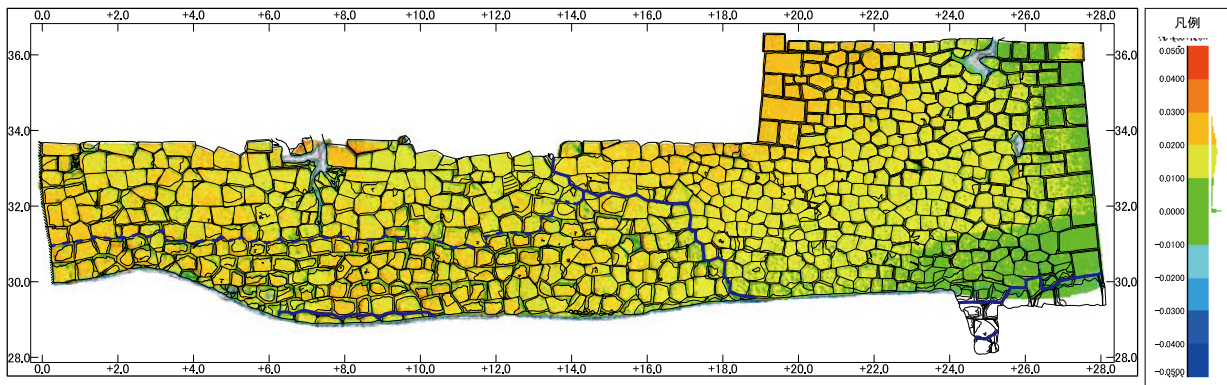
第 91 図 No. 4 玉泉院丸北 (泉水縁) 【6430W】 2



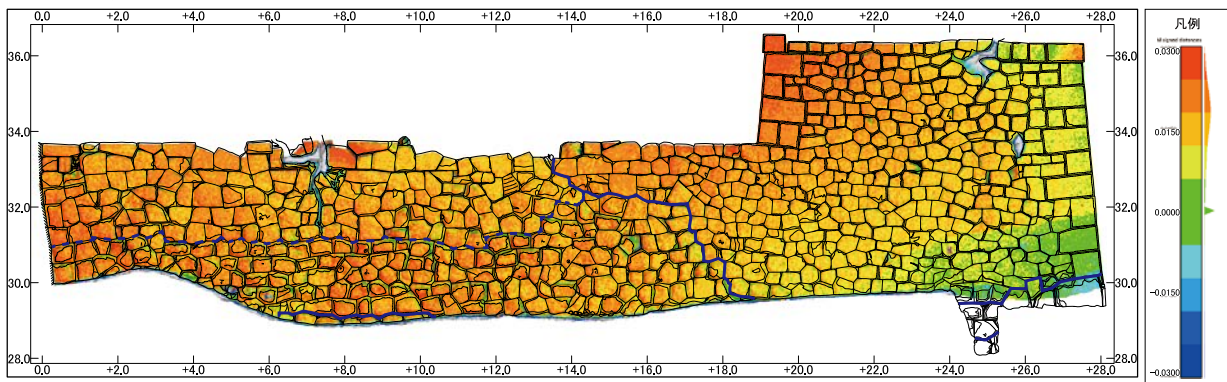
5. 差分図A



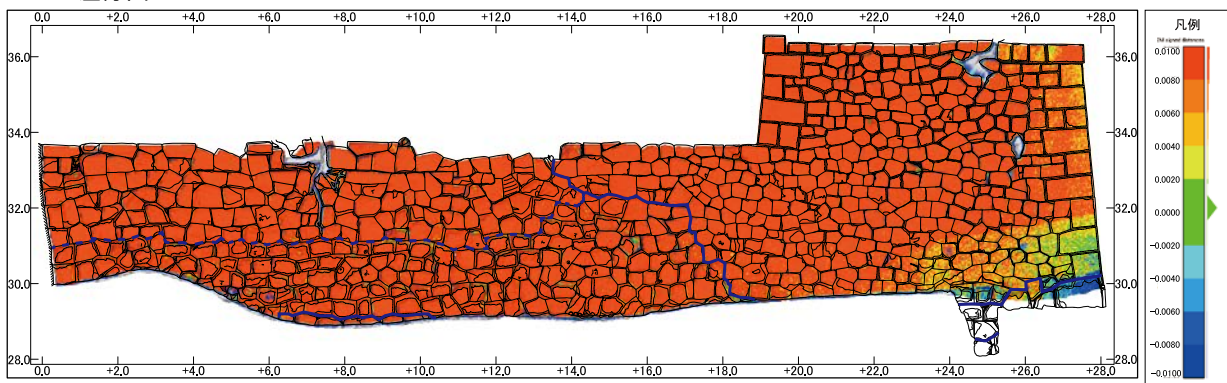
B 6-1. 差分図B ( $\pm 50\text{mm}$ )



6-2. 差分図B ( $\pm 30\text{mm}$ )



6-3. 差分図B ( $\pm 10\text{mm}$ )

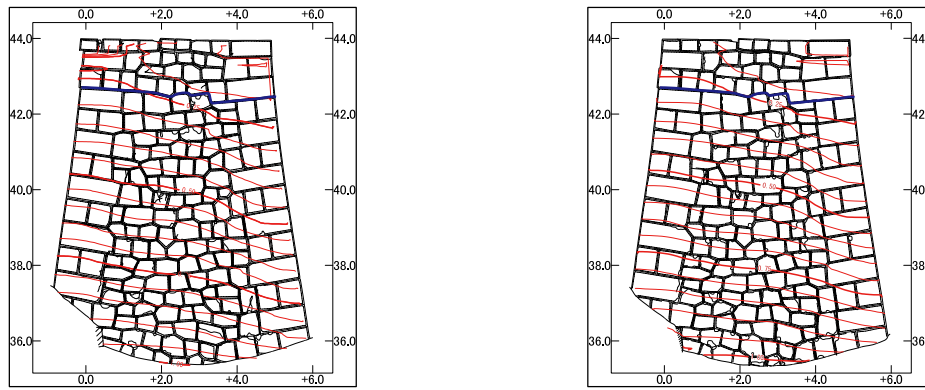


0 S=1/200 5m

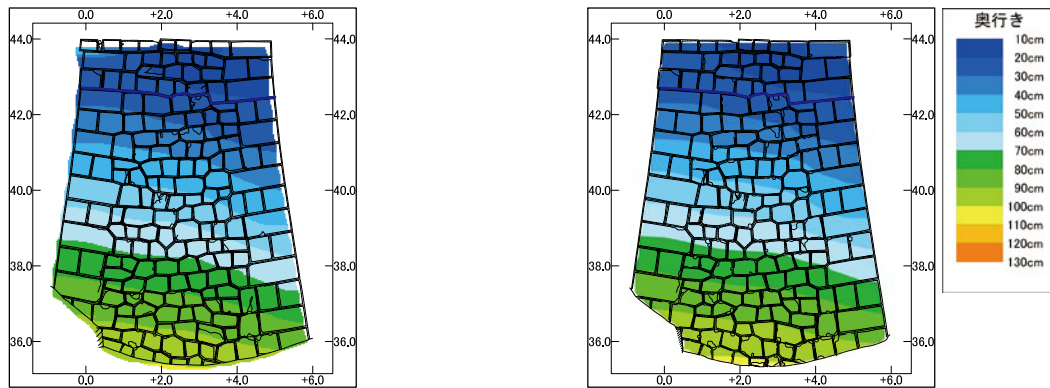
第 92 図 No. 4 玉泉院丸北 (泉水縁) 【6430W】 3



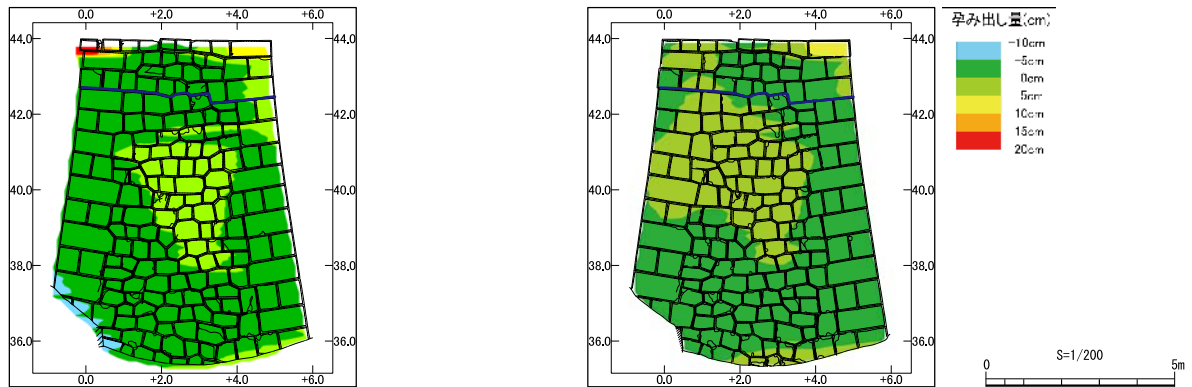
1. 立面コンターマップ図 (測量基準軸からの単点値を10cm格子で抽出し、コンターマップ化したもの) 左: 2009、右: 2019



2. 段彩図 (メッシュデータ) 左: 2009、右: 2019



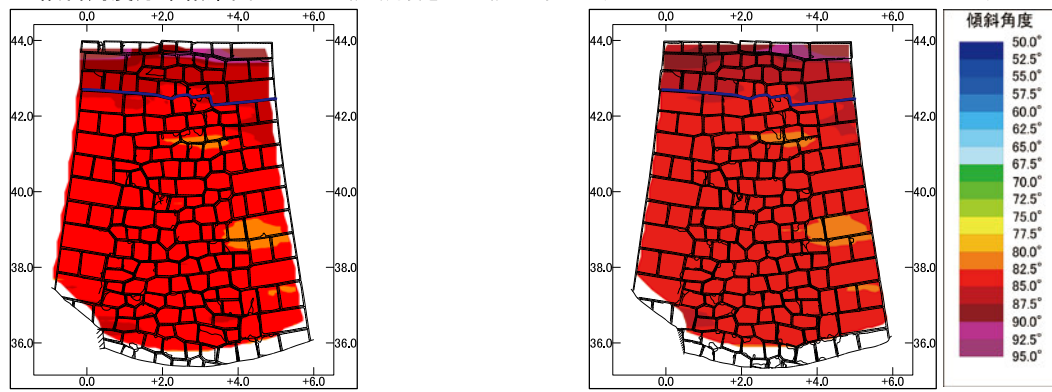
3. 孕み出し量結果図 (基準勾配と現状との差を10cm格子で抽出し、5cmごとにマッピングしたもの) 左: 2009、右: 2019



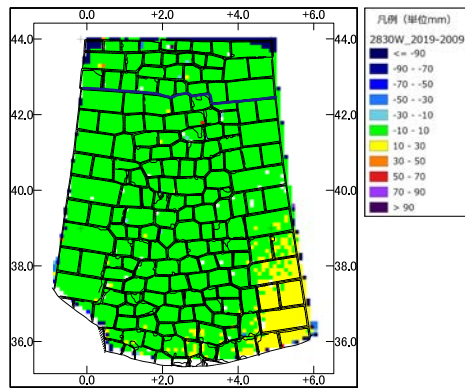
第93図 No.4 数寄屋門台【2830W】1



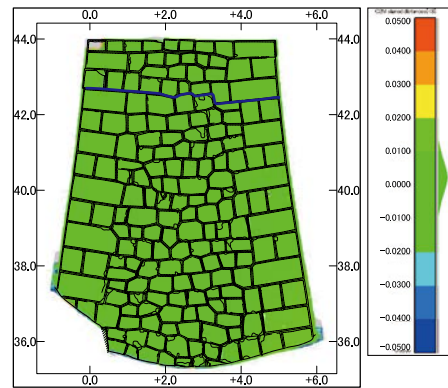
4. 傾斜角度分布結果図 (石垣面の傾斜角度を50cm格子で抽出し、2.5°ごとにマッピングしたもの) 左: 2009、右: 2019



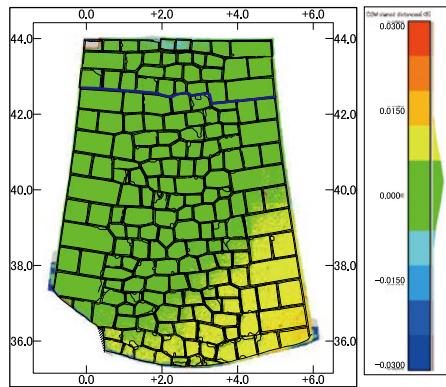
5. 差分図A



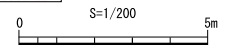
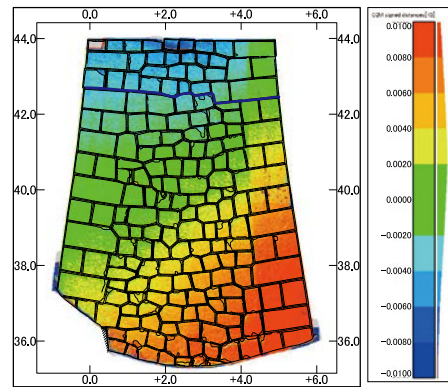
6-1. 差分図B ( $\pm 50\text{mm}$ )



6-2. 差分図B ( $\pm 30\text{mm}$ )



6-3. 差分図B ( $\pm 10\text{mm}$ )



第94図 No.4 数寄屋門台【2830W】2





1. 6430W・2830W (西から)



2. 6430W (北西から)

前面に旧堀を改変した泉水

第 95 図 玉泉院丸北石垣写真 1





3. 6430W・2830W・6420W (西から)



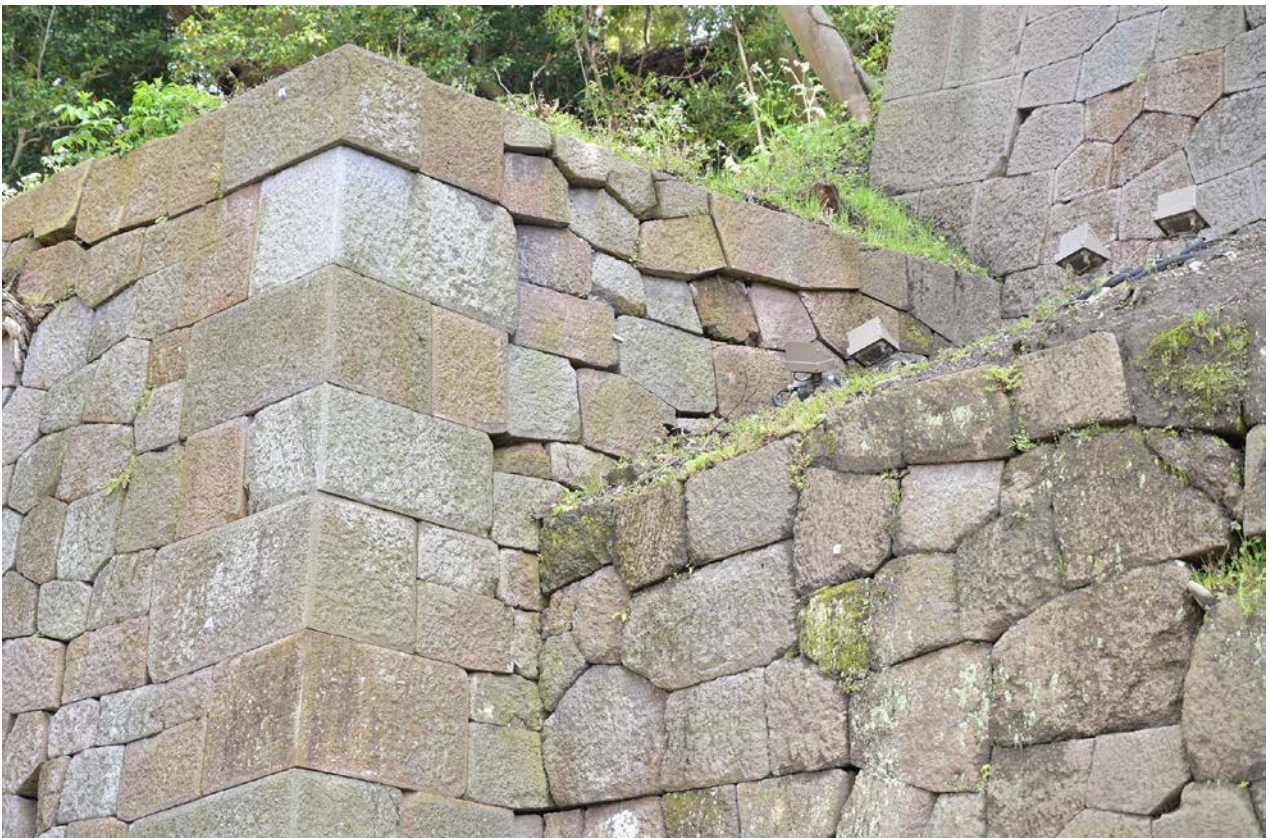
4. 2830N・2830W (北西から)

第96図 玉泉院丸北石垣写真2





5.6420W (西から)



6.6430S (北から)

第 97 図 玉泉院丸北石垣写真 3





7. 2830N (2015年撮影)



8. 2830N (2021年撮影)

第 98 図 玉泉院丸北石垣写真 4





9. 2830S (2015年撮影)



10. 2830S (2019年撮影)

第 99 図 玉泉院丸北石垣写真 5





11. 6430N (2015年撮影)



12. 6430N (2021年撮影)

第 100 図 玉泉院丸北石垣写真 6