

城郭石垣形状の計測と変状の評価に関する考察^{*1}

Consideration on Evaluation of Deformation for Castle Masonry Walls Shape

森本浩行^{*2}, 西田一彦^{*3}, 西形達明^{*4}, 玉野富雄^{*5}

By Hiroyuki MORIMOTO, Kazuhiko NISHIDA, Tatuaki NISHIGATA and Tomio TAMANO

要旨：現存する城郭石垣の多くは構築から 400 年前後経過しており、石垣の孕み出しなどにより崩壊の危機にさらされている箇所が数多く存在している。貴重な建設文化の遺産である城郭石垣の保存のために現在の形状を計測するとともに、石垣構築技術書である「後藤家文書」、「石垣秘伝之書」および「石塙書」の三つの構築手法を明らかにすることで、現存する石垣の形状と三つの構築手法による石垣の形状との比較により、構築当時の変形状況を把握した。このことにより、石垣の崩壊の危険性の判断や修復の必要性および修復形状などへの活用が可能となる。

1. はじめに

日本に現存する城郭石垣の多くは構築から 400 年前後経過しており、老朽化の進行や石垣の孕み出しなどにより、崩壊の危機にさらされている箇所が数多く存在している¹⁾。我が国の城郭石垣は個々の石垣石の間に接着剤を使わない空積であり、また曲線を有しているなど世界に類を見ない独自の構造を持ち、建設文化として価値の高い歴史的遺産である²⁾。

このような貴重な文化遺産である城郭石垣の崩落を未然に防ぎ、修復・保存するためには、現在の石垣の形状を正確に把握し、構築当時の形状と比較することで、その変形状態を把握する必要がある³⁾。

そこで本研究においては、現状の石垣形状を把握するために、ノンプリズムレーザー測距儀を用いて城郭石垣の測量を行った。これは目標となる地点に反射板の設置が不要であり、石垣を傷つけることなく安全かつ簡便に計測できるものである。

石垣構築の設計について技術的に説明した書物は極めて少ないが、ここでは既に筆者ら⁴⁾が「後藤家文書」⁵⁾に記述されている「新積地形准繩極秘抄」(1615)や「唯子一人伝」(1824 年)などから明らかにした構築手法（以下、「後藤家文書」と総称する。）と、本研究において「石垣秘伝之書」(1743 年書写)および「石塙書」(1755 年書写)より明らかにした構築手法の合計三つの構築手法について比較検討した。さら

に、これらと現状との比較により構築当時の変形状況を把握でき、石垣の崩壊の危険性の判断や修復の必要性および修復形状などへの活用が可能となる。

2. 城郭石垣断面形状の構築手法

(1) 「後藤家文書」による設計

「後藤家文書」による勾配のつけ方は、図 1 のように以下のような手順で定められていると考えられる。

- ① 高さ h_0 (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。
- ② 下から $h_0/3$ ($=h_1$) の部分は、初期勾配 G で直線 DE を引く。
- ③ 上から $2h_0/3$ ($=h_2$) の部分、すなわち AB 間は高さに応じて n 個に分割する。分割点に下から上へ g, h, i と記号をつける（「後藤家文書」では高さに応じて 1~5 尺で分割している。なお、図では 4 分割している。）。
- ④ 上底 a を $1 \sim n$ までの自然数の和で除した値 a_0 を次式のように算出する。

$$a_0 = \frac{a}{\frac{n(n+1)}{2}} \quad (1)$$

- ⑤ 点 g の水平線と DE の延長線 DA との交点より a_0 だけ石垣前面の張り出した点を g' とする。
- ⑥ 点 h の水平線と E g' の延長線 E g' との交点よ

*1 keywords: 石垣, 設計, 変形

*2 正会員 工修 京都市立伏見工業高等学校建設工学科 (〒612-0011 京都市伏見区深草鈴塚町 13)

*3 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科

*4 正会員 工博 関西大学工学部土木工学科

*5 正会員 工博 大阪産業大学工学部土木工学科

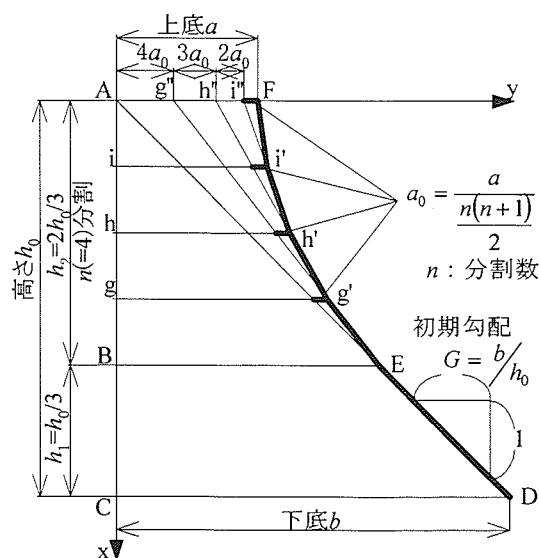


図1 「後藤家文書」による設計

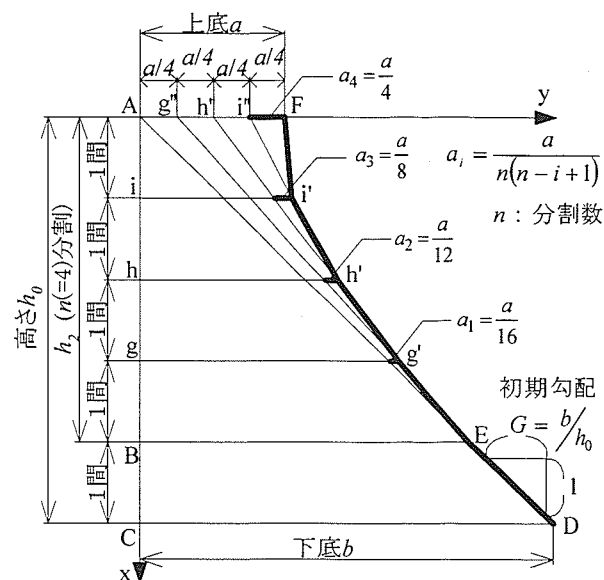


図2 「石垣秘伝之書」による設計

表1 「石垣書」による勾配のつけ方

高さ [間]	仰(ノリ)	1間目	2間目	3間目	4間目	5間目	6間目	7間目	8間目	9間目	10間目
2	1.8.0	1.1.0	7.0								
3	3.5.0	1.4.5	1.2.5	8.0							
4	4.5.0	1.5.0	1.3.5	1.0.5	6.0						
5	6.5.0	1.8.0	1.6.5	1.4.0	1.0.5	6.0					
6	9.0.0	2.0.0	1.9.5	1.7.0	1.4.5	1.1.5	7.5				
7	1.2.0.0	2.3.0	2.2.0	2.0.5	1.8.5	1.6.0	1.2.0	8.0			
8	1.3.5.0	2.5.0	2.4.0	2.2.5	2.0.5	1.7.0	1.3.0	9.0	4.0		
9	1.5.0.0	2.6.0	2.5.0	2.3.0	2.1.0	1.8.0	1.5.0	1.1.0	7.5	3.5	
10	1.8.0.0	2.6.0	2.5.5	2.4.5	2.3.0	2.1.0	1.8.5	1.6.0	1.3.0	8.5	4.0

り a_0 だけ石垣前面に張り出した点を h' とする。

- ⑦ 点 i の水平線と $g'h'$ の延長線 $g'h''$ との交点より a_0 だけ石垣前面に張り出した点を i' とする。

- ⑧ 点 E , g' , h' , i' , F を結ぶ。

ここで AB 間を無限に分割すると考えた場合、図1のように座標軸を取ると、勾配の変化する部分 EF 間は次式で表すことができる。

$$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^2 + \frac{b}{h_0} x \quad (2)$$

(2) 「石垣秘伝之書」による設計

「石垣秘伝之書」による勾配のつけ方は、図2のように以下のような手順で定められていると考えられる。

- ① 高さ h_0 (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。
- ② 下から1間の部分は、初期勾配 G で直線 DE を引く。
- ③ 上へ1間上がるごとにその前の勾配より次式で算出される a_i だけ石垣前面に張り出す。

$$a_i = \frac{a}{n(n-i+1)} \quad (3)$$

ただし、 n : 分割数

[4分割の場合]

- 下から2間目では g の水平線と DE の延長線 DA との交点より $a_1 = a/16$ だけ石垣前面に張り出した点を g' とする。
- 下から3間目では h の水平線と Eg' の延長線 Eg'' との交点より $a_2 = a/12$ だけ石垣前面に張り出した点を h' とする。
- 下から4間目では i の水平線と $g'h'$ の延長線 $g'h''$ との交点より $a_3 = a/8$ だけ石垣前面に張り出した点を i' とする。

- ④ 点 E , g' , h' , i' , F を結ぶ。

ここで、 AB 間の部分を無限に分割すると考えた場合、図2のように座標軸をとると勾配の変化する EF 間は次式であらわすことができる。

$$y = \left\{ \frac{a}{h_2} \left(\log_e \frac{x}{h_2} - 1 \right) + \frac{b}{h_0} \right\} x + a \quad (4)$$

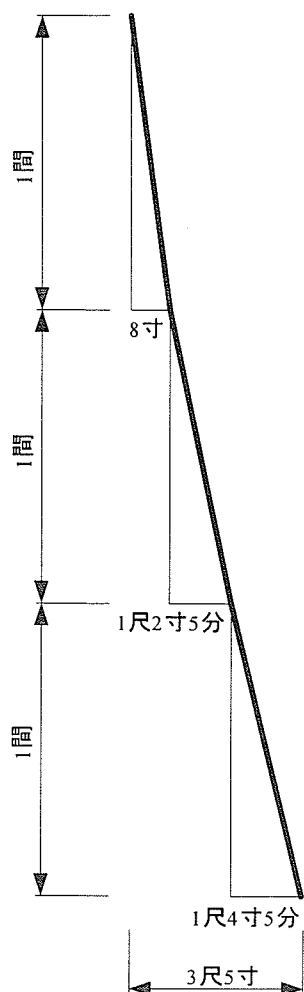


図3 「石塙書」による高さ3間の石塙形状

(3) 「石塙書」による設計

北垣⁶⁾によって紹介されている「石塙書」には設計方法についての具体的な記述はなく、高さに応じて下から1間ごとの勾配が例として示されているだけである。それをまとめたものが表1である。例えば、高さ3間の石塙は図3に示しているような形状となる。

それらより設計方法を導くと、勾配のつけ方は図4のように以下のような手順で定めていると推定される。

- ① 高さ h_0 (AC) に応じて、下底 b (CD) と上底 a (AF) を定める。
- ② 下から1間の部分は、初期勾配 G で直線 DE を引く。
- ③ 上へ1間上がるごとにその前の勾配より次式で算出される a_i だけ石塙前面に張り出す。

$$a_i = \frac{6i}{n(n+1)(n+2)} a \quad (5)$$

ただし、 n : 分割数

[4分割の場合]

- 下から2間目では g の水平線と DE の延長線 DA との交点より $a_1 = a/20$ だけ石塙前面に張り出した点を g' とする。
- 下から3間目では h の水平線と Eg' の延長線

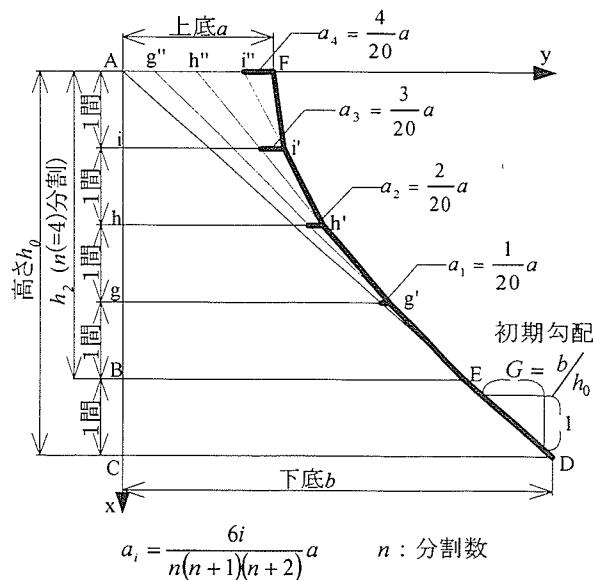


図4 「石塙書」による設計

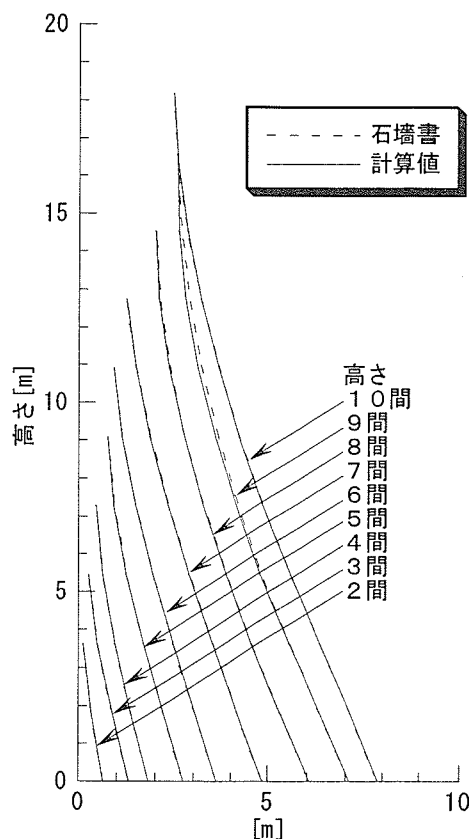


図5 「石塙書」と計算値の比較

Eg'' との交点より $a_2 = 2a/20$ だけ石塙前面に張り出した点を h' とする。

- 下から4間目では i の水平線と $g'h'$ の延長線 $g'h''$ との交点より $a_3 = 3a/20$ だけ石塙前面に張り出した点を i' とする。

- ④ 点 E, g' , h' , i' , F を結ぶ。

ここで、AB 間の部分を無限に分割すると考えた場合、図4のように座標軸をとると勾配の変化する EF 間は次式であらわすことができる。

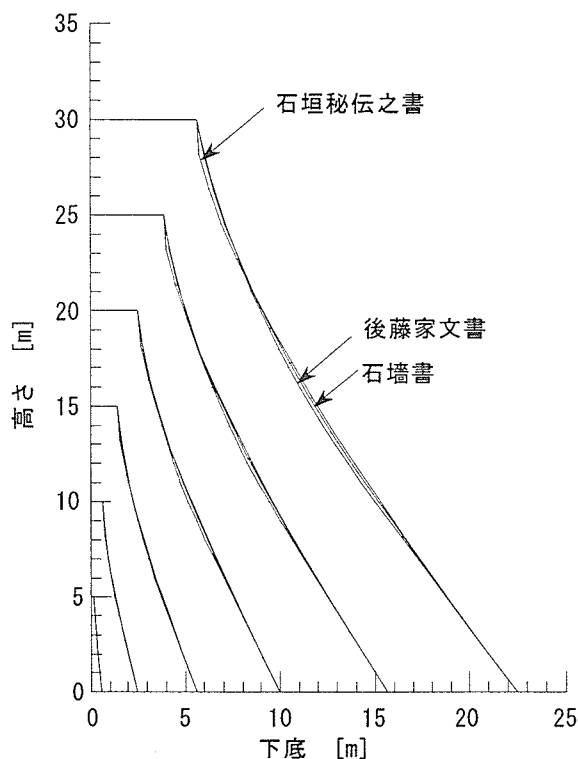
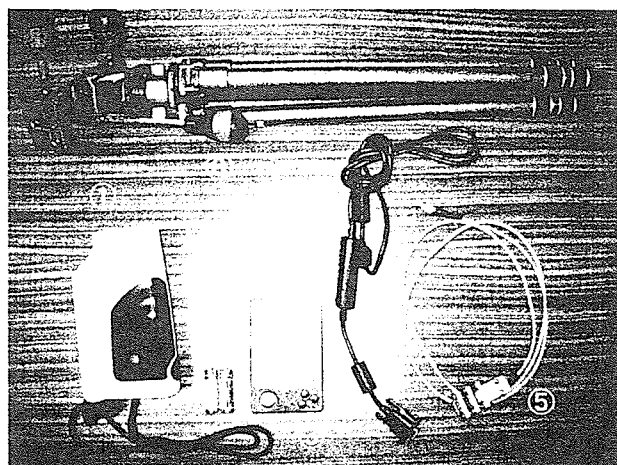
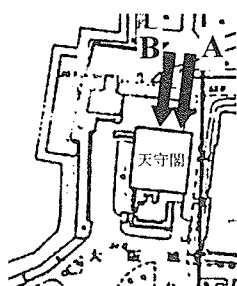


図6 設計方法の比較

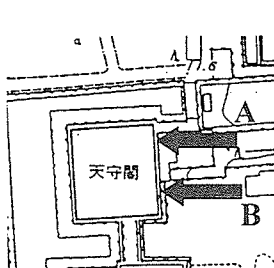


- ①ノンプリズムレーザー (Laser Ace300)
- ②単三電池2個
- ③データコレクタ (カシオペア)
- ④カシオペア専用RS232-Cケーブル
- ⑤Laser Ace専用RS232-Cケーブル
- ⑥三脚

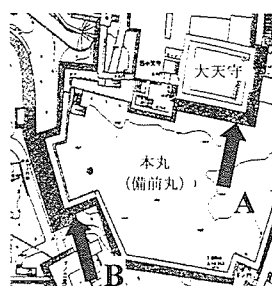
図7 測定装置



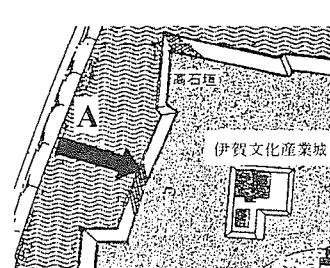
(1) 大坂城



(2) 名古屋城



(3) 姫路城



(4) 伊賀上野城

図8 城郭石垣断面形状の計測地点

$$y = a \left(1 - \frac{x}{h_2} \right)^3 + \frac{b}{h_0} x \quad (6)$$

また、表1に示した「石塙書」に記述された値と、上記で推定した構築手法より得られる値とを比較したものが図5である。両者は非常によく一致していることから、上記の推定は正しいと判断することができる。なお、1尺=0.303mとして計算している。

3. 3種の構築手法の比較

3種の構築手法により石垣形状にはどのような違いがあるのかを高さ30、25、20、15、10、5mについて比較したものが図6である。なお1尺=0.303mとして計算している。

高さ30mの石垣に注目すると、中央部では「後藤家文書」が他者と異なった曲線を描き、上部では「石垣秘伝之書」が他者と異なった曲線を描いていることが読み取れる。また上部付近と中央部付近では「後藤

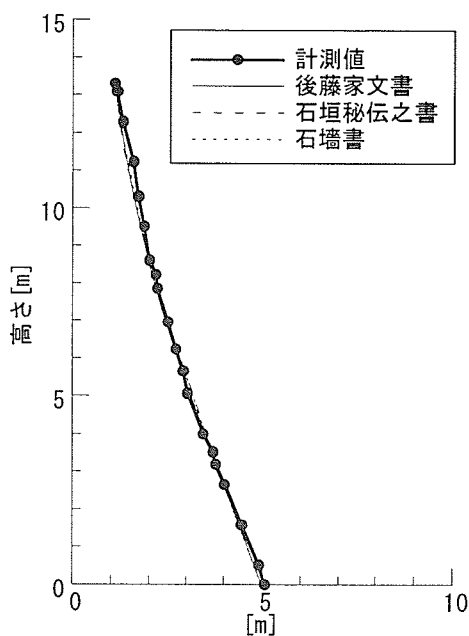
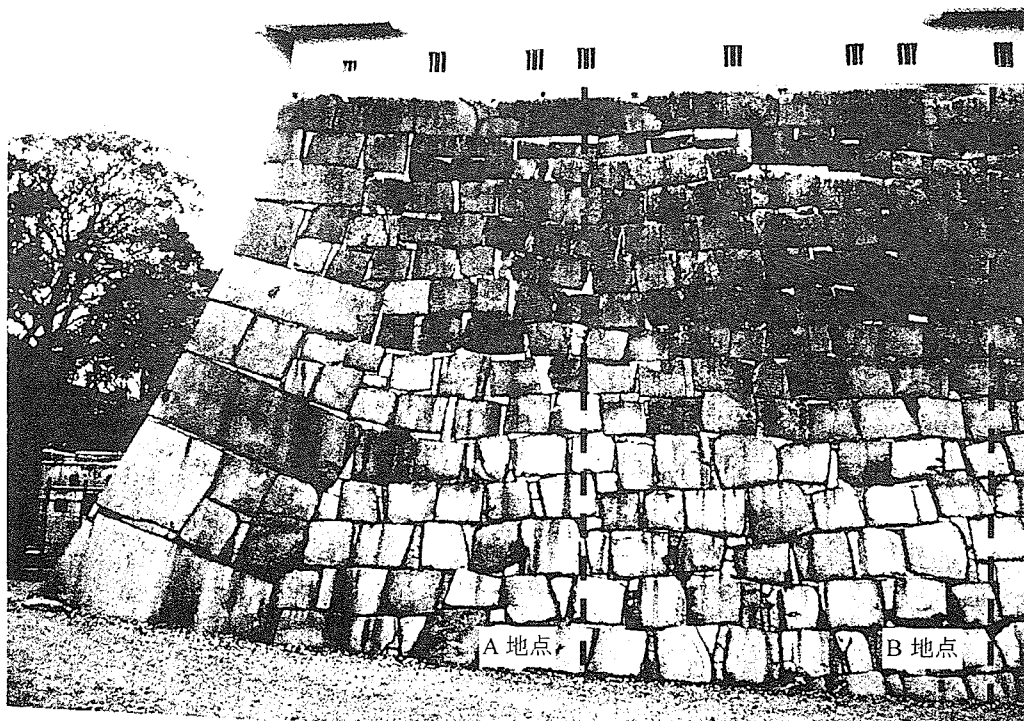
家文書」と「石垣秘伝之書」の水平方向の違いは50cm程度となっている。

4. 現状石垣断面形状の測定

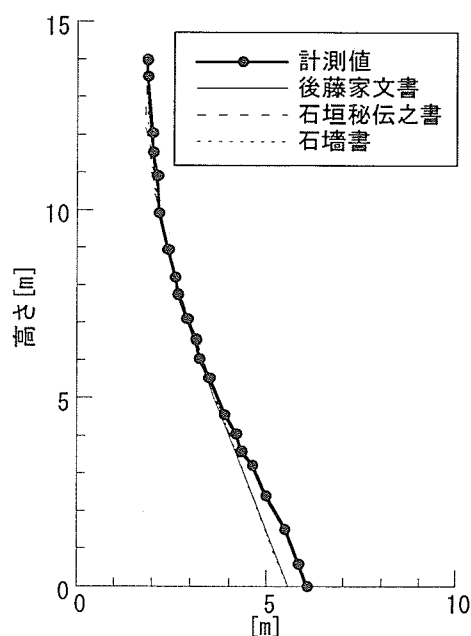
石垣断面形状の計測に用いた測定装置を図7に示している。測定装置は測定ポイントにプリズムなどの反射板を設置しなくても測定が可能なノンプリズムレーザーであり、測定ポイントまでの距離と角度を同時に素早く測定することが可能となっている。測定は石垣面の正面に器械を据え付け、水平方向の軸を固定したまま鉛直方向に角度と距離の測定を行った。

計測は大坂城、名古屋城、姫路城、伊賀上野城の石垣について行った。

大坂城の計測は図8(1)に示しているとおり天守閣北面のA地点とB地点において実施し、名古屋城は図8(2)に示している天守閣東面石垣のA地点とB地点において行った。また姫路城は図8(3)に示しているA地点とB地点において、伊賀上野城は図8(4)に



(1) A 地点



(2) B 地点

図9 大坂城天守北面石垣 (撮影: 森本, 2001)

示している A 地点において、それぞれ石垣の計測を行った。

5. 現存する城郭石垣と3種の構築手法の比較

現状の城郭石垣を計測した値と「後藤家文書」、「石垣秘伝之書」および「石塙書」のそれぞれの構築手法による形状とを比較した。

(1) 大坂城

大坂城天守北面石垣の A, B 両地点で計測した値を図9に示している。A 地点は上部に少し孕み出しが見

られ、B 地点では下部に孕み出しが見られる。また3種の構築手法に大きな違いはみられない。

(2) 名古屋城

名古屋城天守東面石垣の A, B 両地点のそれぞれの計測地点の計測値と構築手法3種を比較したものを図10, 11にそれぞれ示している。

B 地点(図11)は石垣の高さがA 地点(図10)に比べると低く、また初期勾配もきついため、構築手法3種に明確な違いは表れていないが、A 地点の方は計測値が「後藤家文書」による構築手法とよく一致して

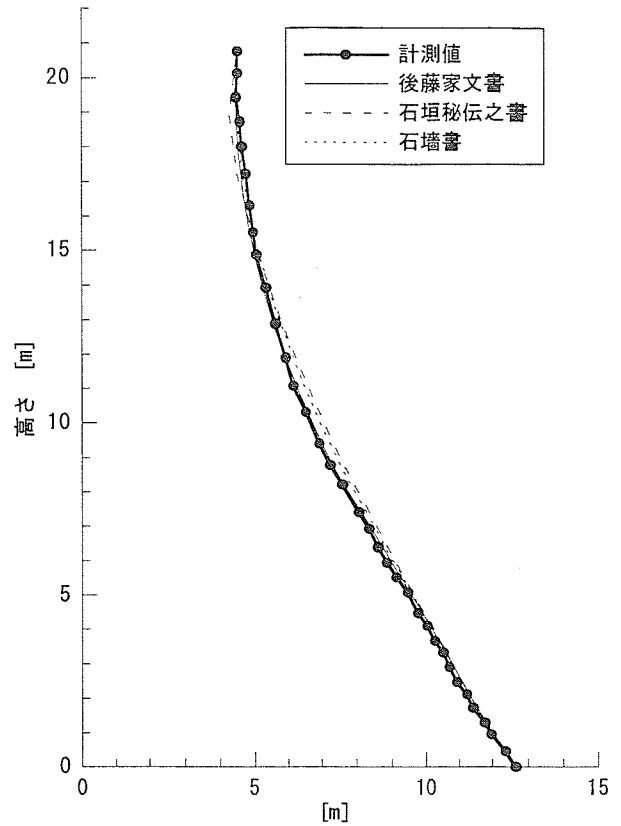


図 10 名古屋城天守東側面石垣 A (撮影：森本，2001)

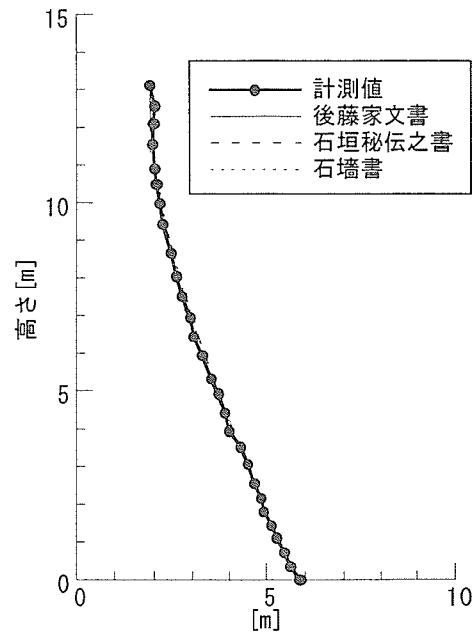
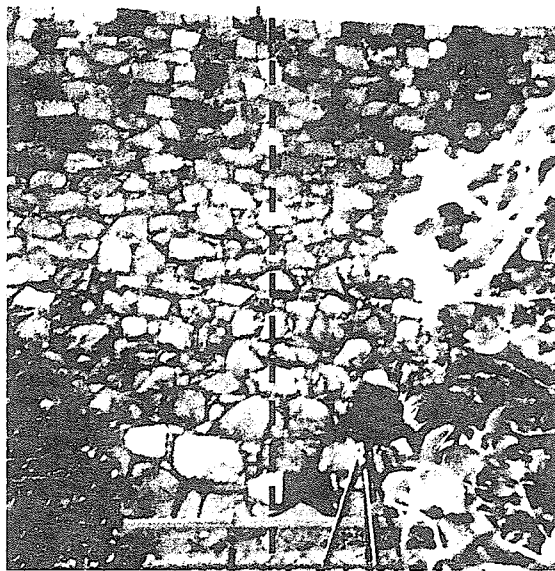


図 11 名古屋城天守東側面石垣 B (撮影：森本，2001)

いることが分かる。このことから名古屋城石垣は「後藤家文書」による構築手法で築かれたのではないかと推測できる。

(3) 姫路城

姫路城石垣の A, B 両地点における計測値と 3 種の構築手法を比較したものを図 12, 13 にそれぞれ示し

ている。どちらの形状も 3 種の構築手法によるものとよく似た形状を示している。

(4) 伊賀上野城

伊賀上野城の石垣形状は図 14 に示しているように、勾配の変化が少なくほぼ直線に近い形で構築されているため、3 種の構築手法による違いが明瞭には表れて

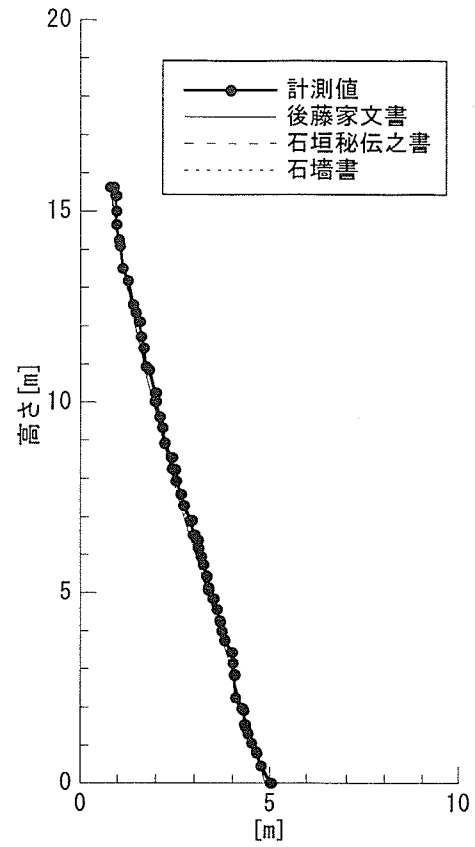
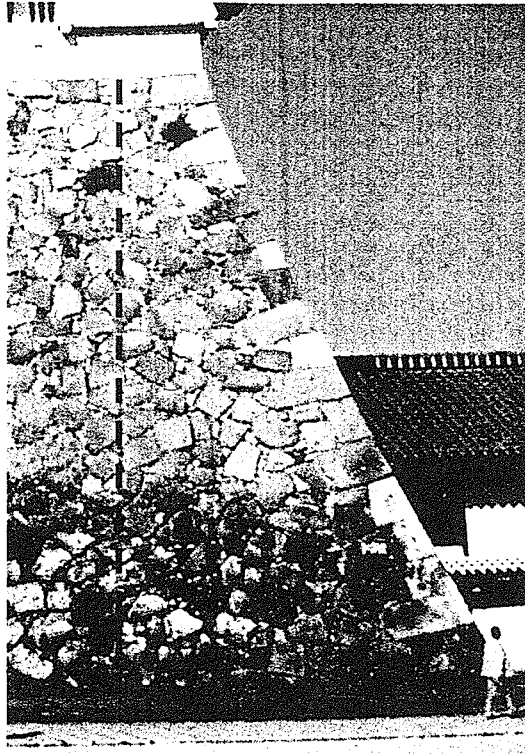


図 12 姫路城大天守南面石垣 A (撮影：森本，2001)

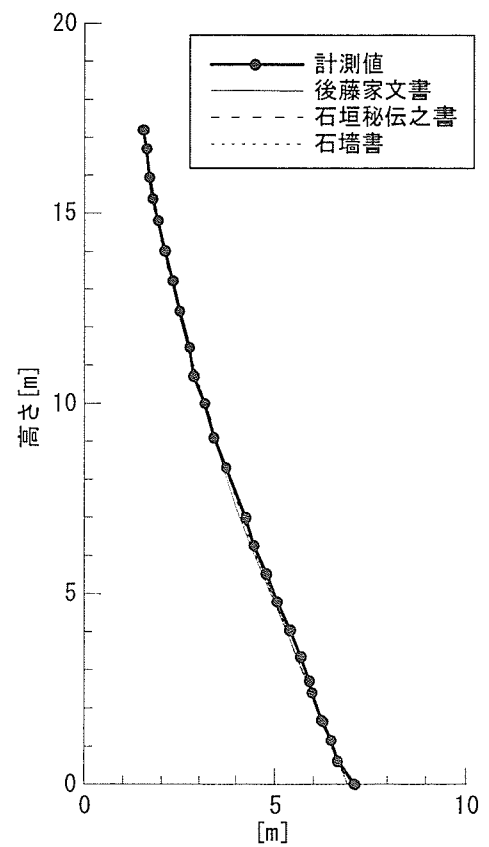
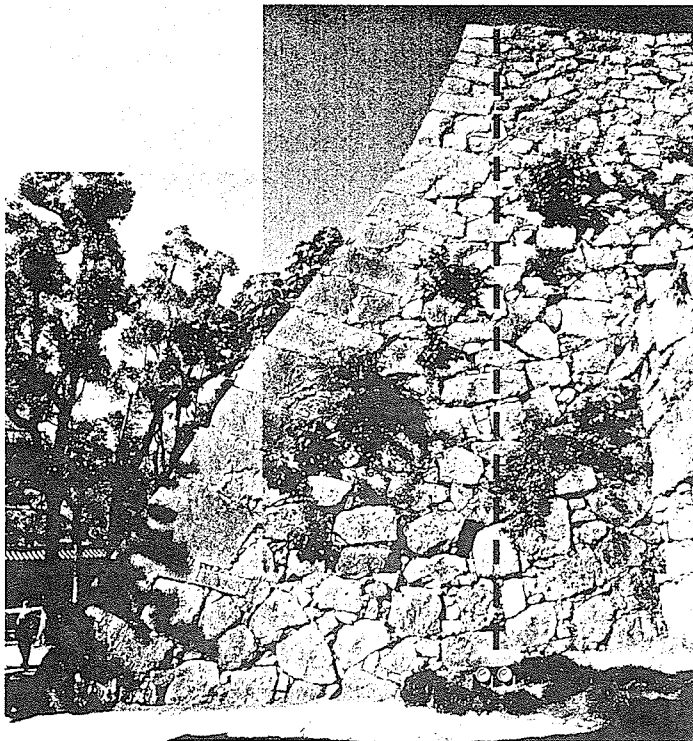


図 13 姫路城石垣 B (撮影：森本，2001)

いない。しかし現状と構築手法の比較から、下部に孕み出しのあることが分かる。

6. まとめ

石垣の反り曲線勾配部分の構築手法を、筆者らが既

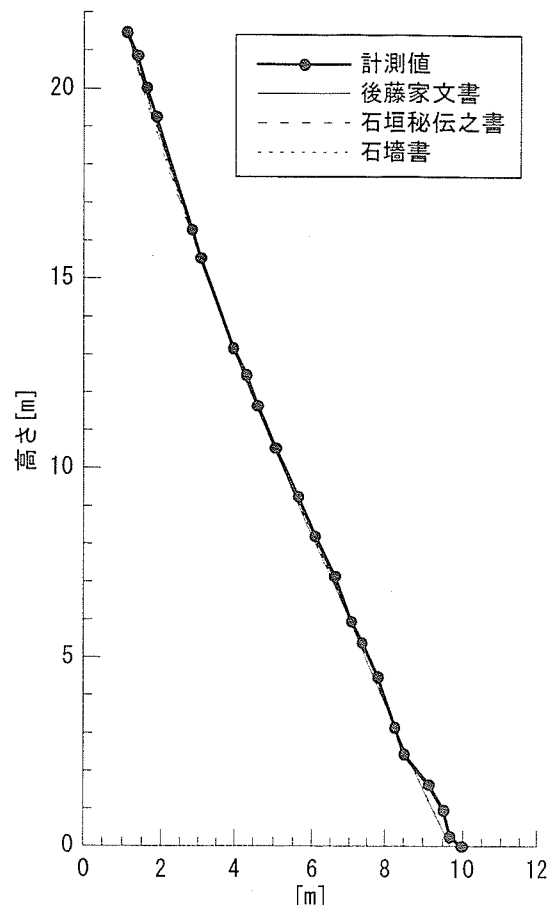
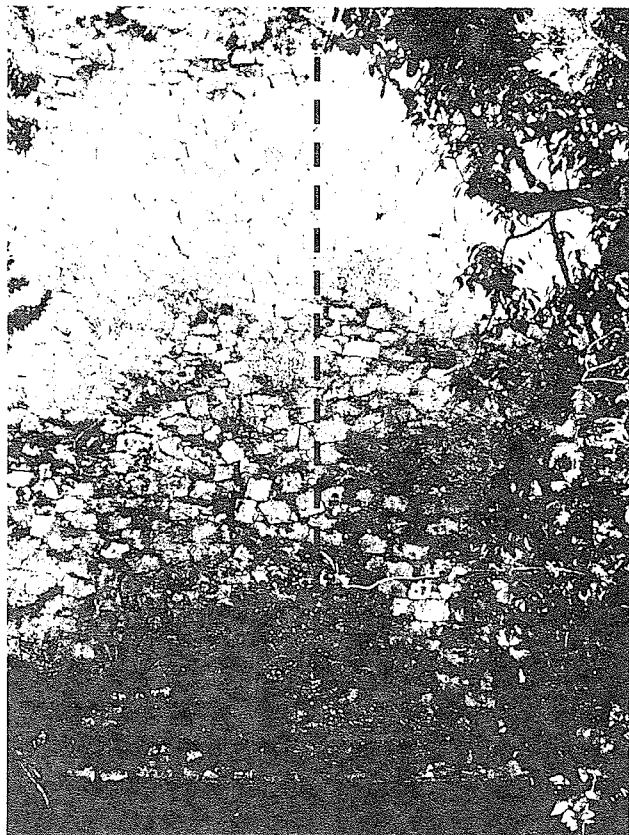


図 14 伊賀上野城石垣 A (撮影：森本，2001)

に明らかにしている「後藤家文書」に加え、「石垣秘伝之書」および「石塙書」についても明らかにし、さらには数式化を試みた。これら 3 種の構築手法による石垣の形状は、名古屋城石垣（図 10）のように反り曲線勾配が大きく変化するものについては違いが表れてくるが、伊賀上野城石垣（図 14）のように反りの変化が少なく直線に近い形状のものには明瞭な差異が表れてこない。

今回測定した、大坂城、名古屋城、姫路城、伊賀上野城のいずれの石垣においても、孕み出しなどの検討には「後藤家文書」の構築手法による形状を基準と考えることで、実質的な対処が可能であることが判明した。このことにより石垣の崩壊の危険性の判断や石垣遺構の保存あるいは修復に向けての活用についても期待できる。また、計測と 3 種の構築手法による石垣形状の比較により石垣の孕み出しは中央部のみでなく、地盤に接している下部においても存在していることが明らかとなった。これは地盤の強さの影響によるものではないかと考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（B）（1）課題番号 12450208，研究代表者：天野光三）による研究である。現地測量においてご協力いただいた

大阪城天守閣、名古屋城管理事務所、姫路城管理事務所、上野市文化課および関係各位に謝意を表す次第である。また、大阪城天守閣館長の中村博司氏には資料の提示ならびに懇切なご教示を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 田中邦熙，新谷洋二：日本城郭石垣の変遷と現状，土木学会論文集，No.576/IV-37，pp.101-110，1997.
- 2) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法，土木学会論文集，No.666/III-53，pp.159-168，2000.
- 3) 西田一彦，西形達明，玉野富雄，森本浩行：城郭石垣断面形状の設計および構築に関する考察，土木史研究，第 21 号，土木学会，pp.317-324，2001.
- 4) 2) に同じ。
- 5) 喜内敏 監修・解説：『金沢城郭史料—加賀藩穴生方後藤家文書』，日本海文学叢書，第 3 巻，石川県図書館協会，1976.
- 6) 北垣聰一郎：伝統技術からみた城郭石垣の勾配について，関西大学考古学研究室開設 50 周年記念考古学論叢，2002.5.刊行予定。