

平成28年（2016年）熊本地震 石積構造物を中心とした調査・分析結果 その1：熊本城の石垣の被害

菊本統（横浜国立大学 准教授）

小山倫史（関西大学 准教授）

橋本涼太（京都大学 JSPS特別研究員）



調査の概要

当グループは、平成28年（2016年）熊本地震による地盤構造物の被災状況の調査・分析を進めています。主な対象は石積みと地盤の複合構造物（城郭石垣・石橋）とトンネルです。

調査にあたっては、崩壊した構造物の観察だけでなく、残存する構造物の現地計測や既往文献の調査を積極的に行い、同地震による変状や構造物の健全性を慎重に議論するよう留意しました。上空からの観察が難しいトンネルについては現地で内空断面の計測を実施し、その意義を感じています。

今後も調査・分析が進み次第、継続的に結果を公表していく予定です。

調査同行者

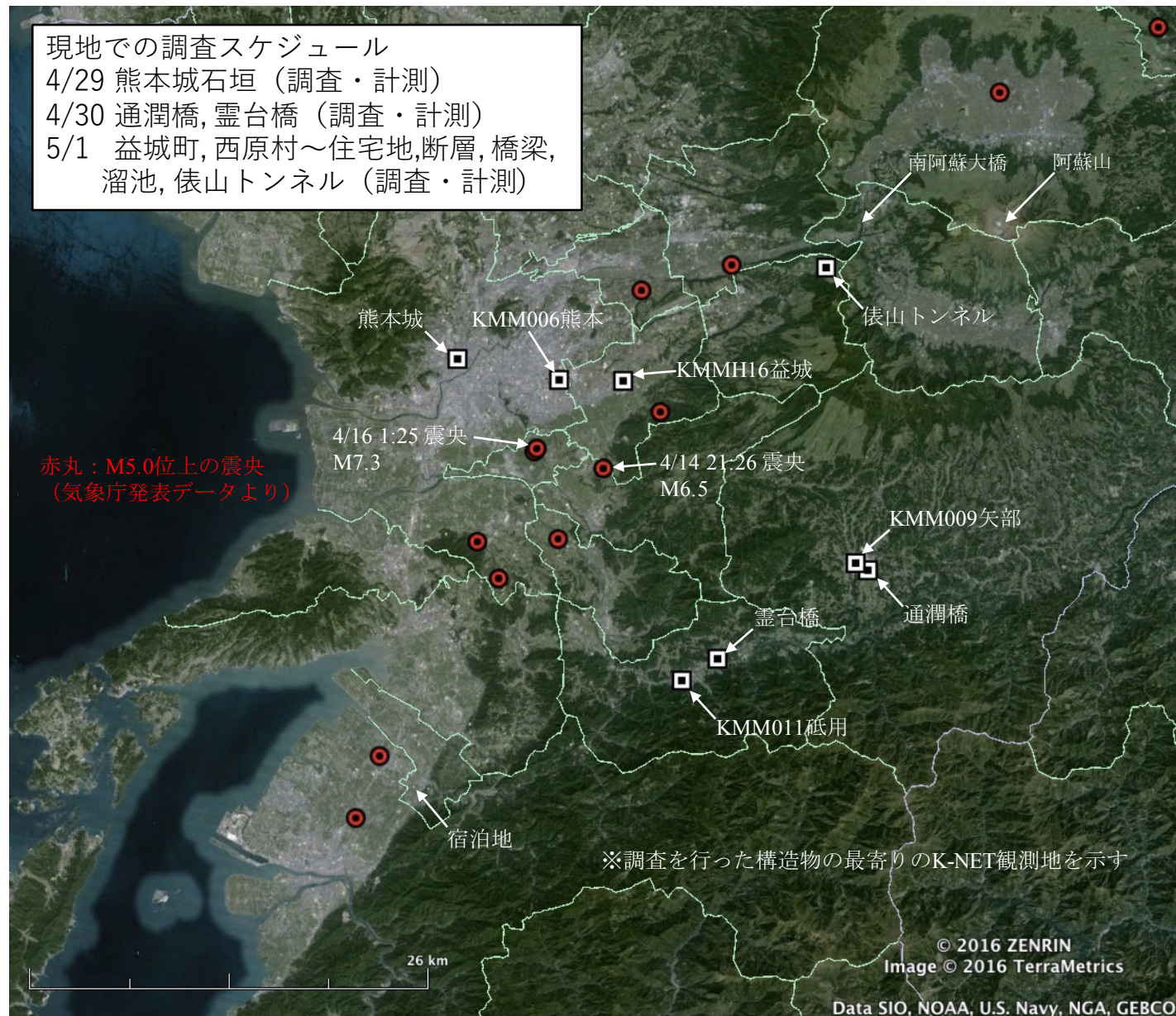
菊本統（横浜国立大学・准教授）

小山倫史（関西大学・准教授）

橋本涼太（京都大学・JSPS特別研究員）

桑島流音（関西大学・学部4年生）

中川康一（大阪市立大学・名誉教授）

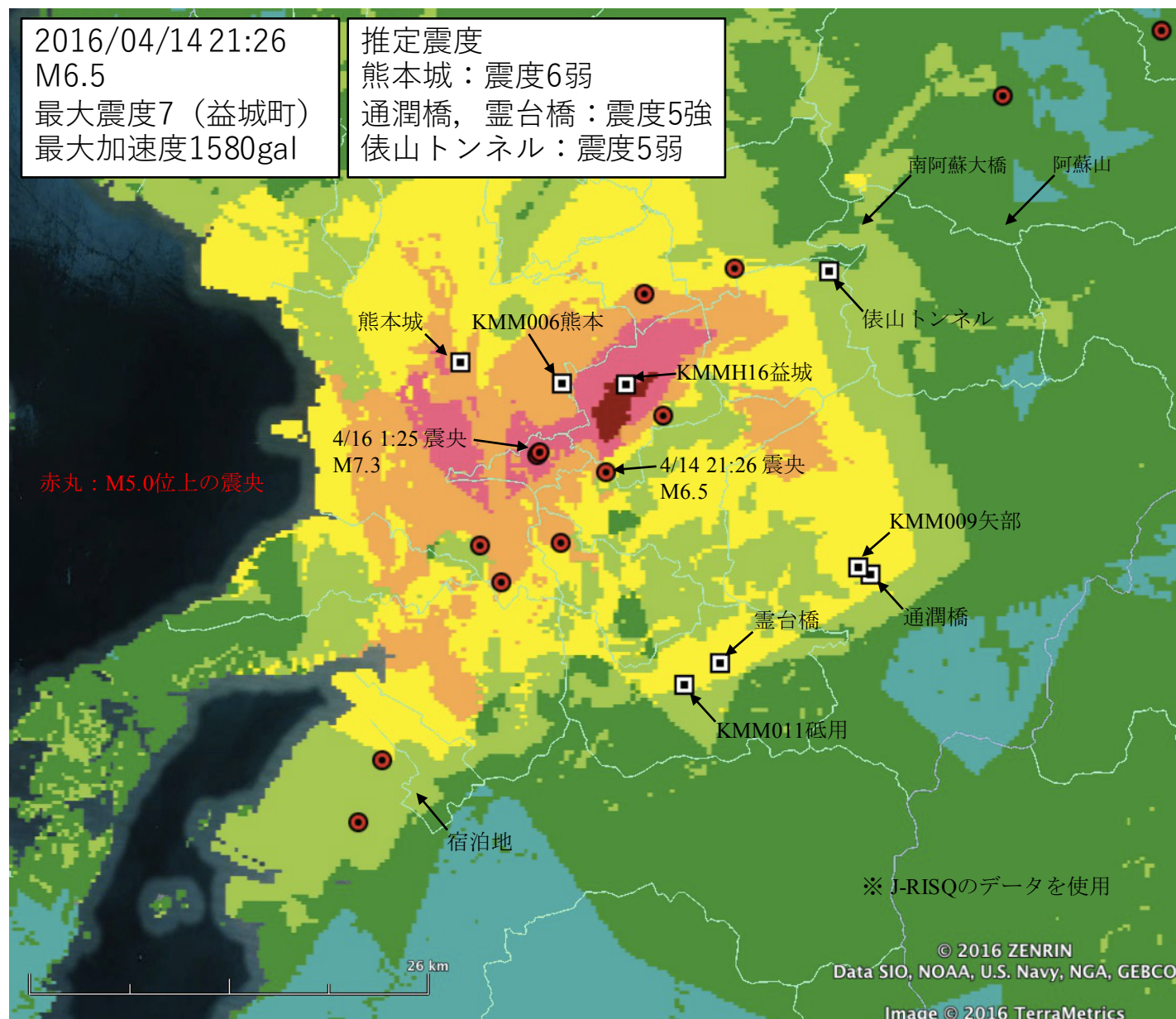


4/14前震の推定震度分布 と調査対象

気象庁から公表された前震のメカニズム(CMT)解は、南北に伸長軸，東西に圧縮軸をもつ横ずれ断層であることが示されています。

右図は調査対象とJ-RISQで公開された4/14前震時の推定地震動の分布です。前震の震度6以上のエリアは本震（次ページ）に比べて限定的で、調査対象構造物の推定震度はいずれも1～2段階、低くなっていました。

熊本城の石垣の調査では、前震後と本震後での崩壊状況の違いの考察にも留意しました。

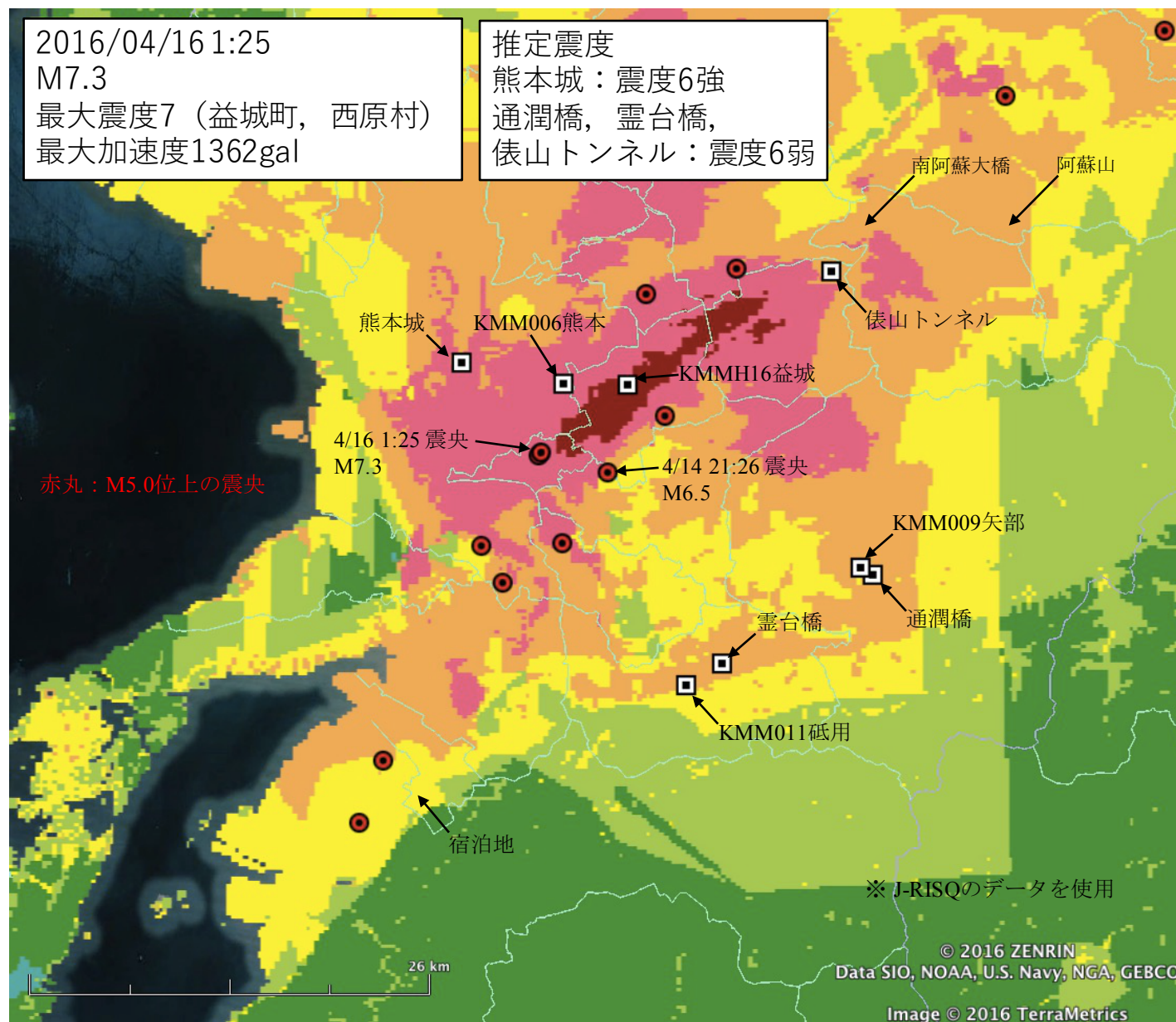


4/16本震の推定震度分布 と調査対象

本震のメカニズム(CMT)解も南北に伸長軸，東西に圧縮軸をもつ横ずれ断層でした。本震での推定震度6以上のエリア（J-RISQ公開のデータを使用）は広範囲におよび、調査対象の熊本城，石橋，トンネルはいずれもこのエリア内でした。

現地では右横ずれの地表地震断層が多数、報告されており、それを参考に当グループも益城町や西原村にて地表地震断層を視察しました。

本調査では，対象構造物の地震時応答について、最寄りのK-netでの地表の観測加速度も利用して地盤工学の観点から考察を試みていますが、断層や地震動そのものの特徴については議論していません。



調査項目



範囲誤差：±2mm
レーザークラス：クラス1
測定範囲：0.6m～130m
波長：1550nm
測定対象の3次元座標を取得
※関大・小山研の機器

調査の主目的は地盤構造物の崩壊要因の解明や変状の把握であり、目視や対象構造物の管理者・関係者への聞き取りと併せて、3Dレーザースキャナによる計測を行いました。

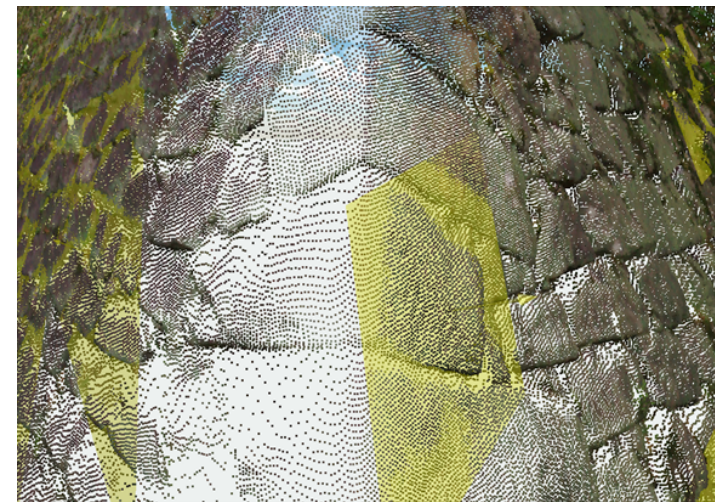
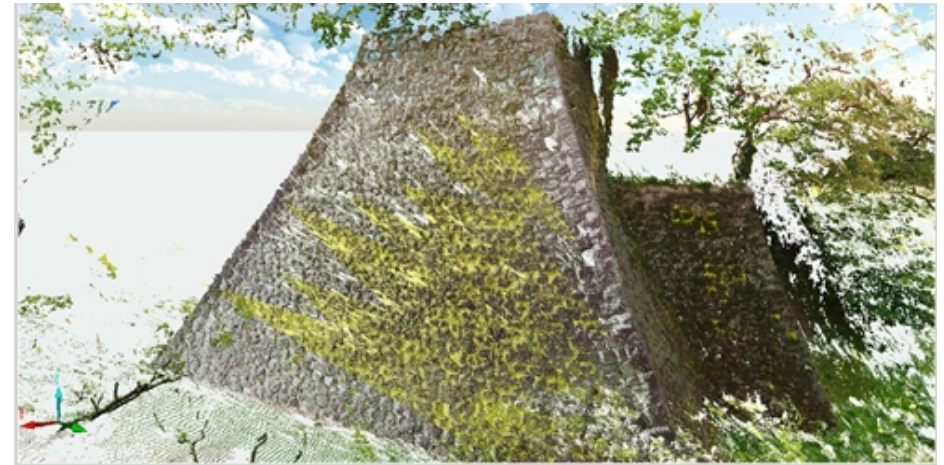
調査に用いた3Dレーザースキャナは、方位と仰角を高速に変化させながら対象物までの距離をレーザー距離計により計測する機器で、計測器を原点として360度全方向の対象物の3次元座標を20分程度で数値化できます。また、複数位置から計測してデータ処理することで、調査対象の地盤構造物の3次元形状を得ることができます。

3Dレーザースキャンと分析の概要

右図は3次元レーザースキャンにより取得した熊本城石垣の点群データです。下段の拡大図では、石垣の角石や平石が無数の座標点の集まりであることを確認できます。点群の密度はスキャナと対象物の距離により変わりますが、どの計測でも十分な密度で点群を取得しています。

点群は膨大な数値データからなりますが、石垣法面の下端ラインや石橋の橋軸を座標軸として座標変換し、断面形状や表面形状を抽出しています。

ただし、「地震による変状」を特定するには被災前の形状データとの差分が必要になります。本調査では、文献調査等を積極的に進めて可能な限り変状の特定を試みています。

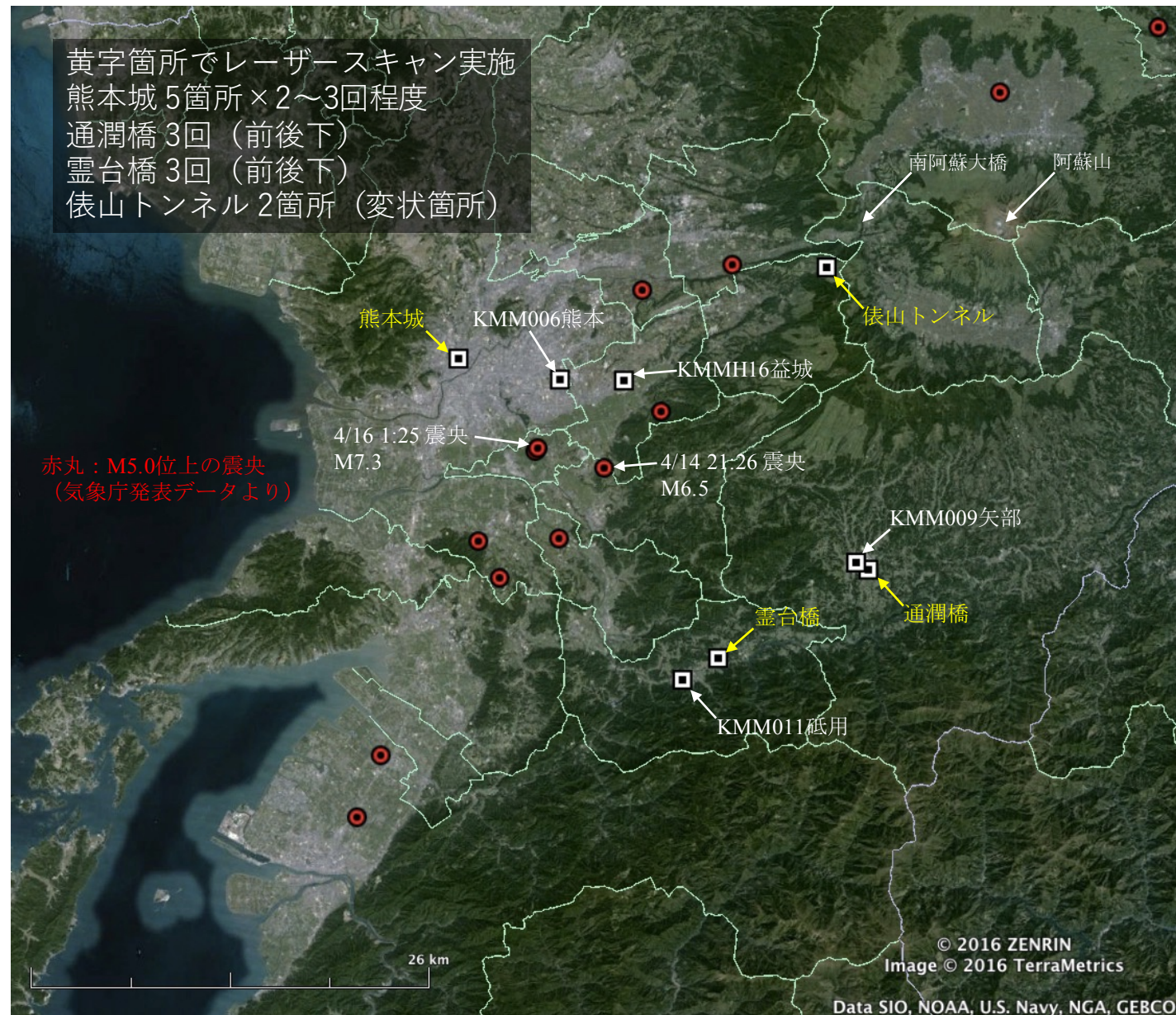


熊本城・櫓方三階櫓東石垣での計測例

3Dレーザースキャンの 実施箇所

本調査では熊本城の石垣（5箇所）、通潤橋、霊台橋、俵山トンネルで3Dレーザースキャンを実施しており、今後も必要に応じて実施する予定です。

俵山トンネルの計測は、県道28号線の橋梁や道路の被害、斜面崩壊により現地へのアクセスが悪く、調査は計測装置類を抱えて往復12kmの行程になりました。



3Dレーザースキャンの実施箇所（熊本城）

熊本城石垣の3Dレーザースキャンは主に北側の石垣を対象として実施しました。

調査は熊本市内在住の福田光治博士の協力も得ており、地震前の石垣勾配の計測実施箇所¹⁾において重点的に実施しました。なお、いずれの石垣も外向き法線方向はほぼ東西南北の方向を向いています。

1) 桑原文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学研究報告，第14巻，第2号，pp.59-74.

石垣の外向き法線方向

宇土櫓

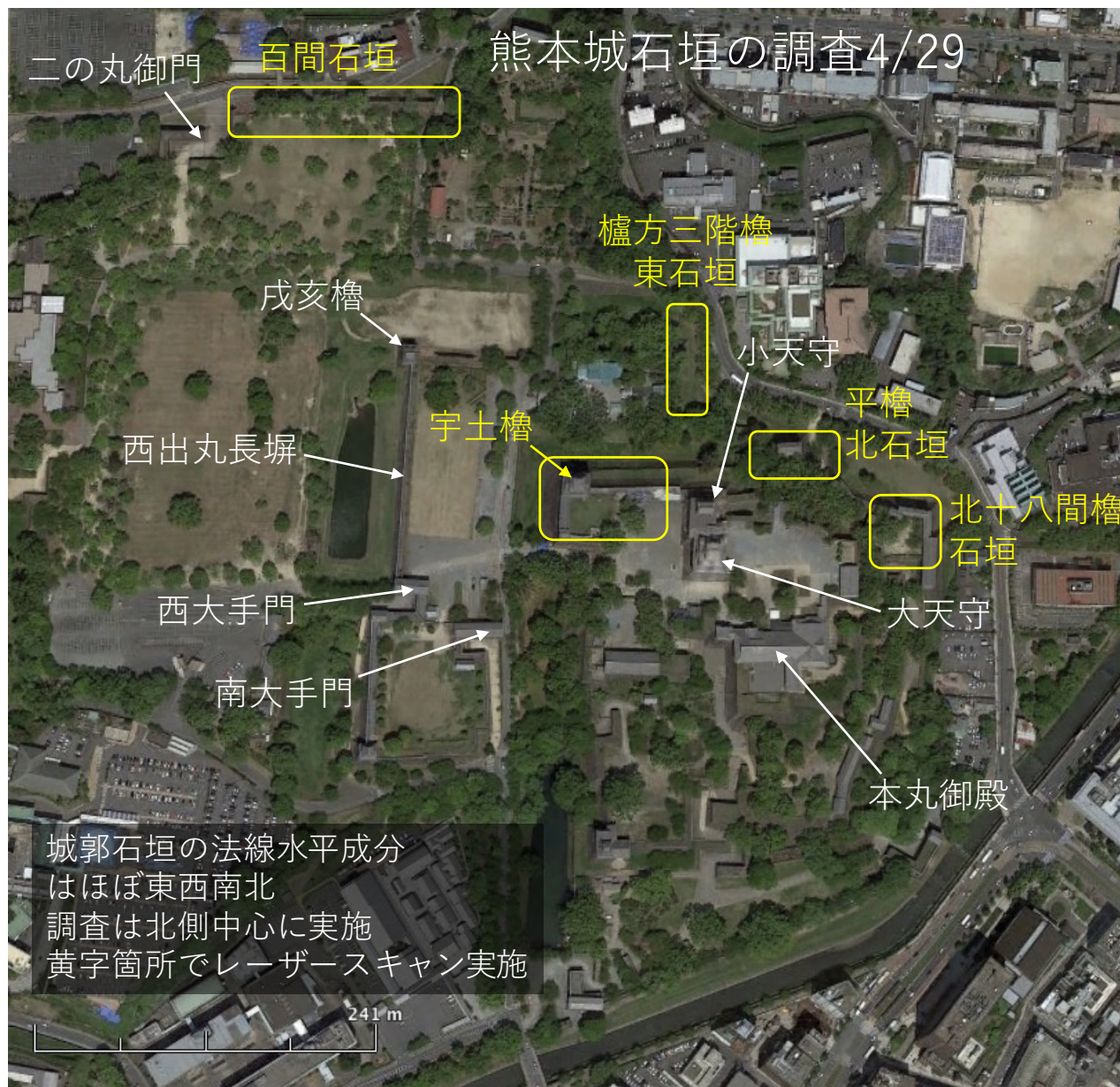
東側：90°，北側：9°

櫓方三階櫓石垣

東側：87°

百間石垣

北側：0°

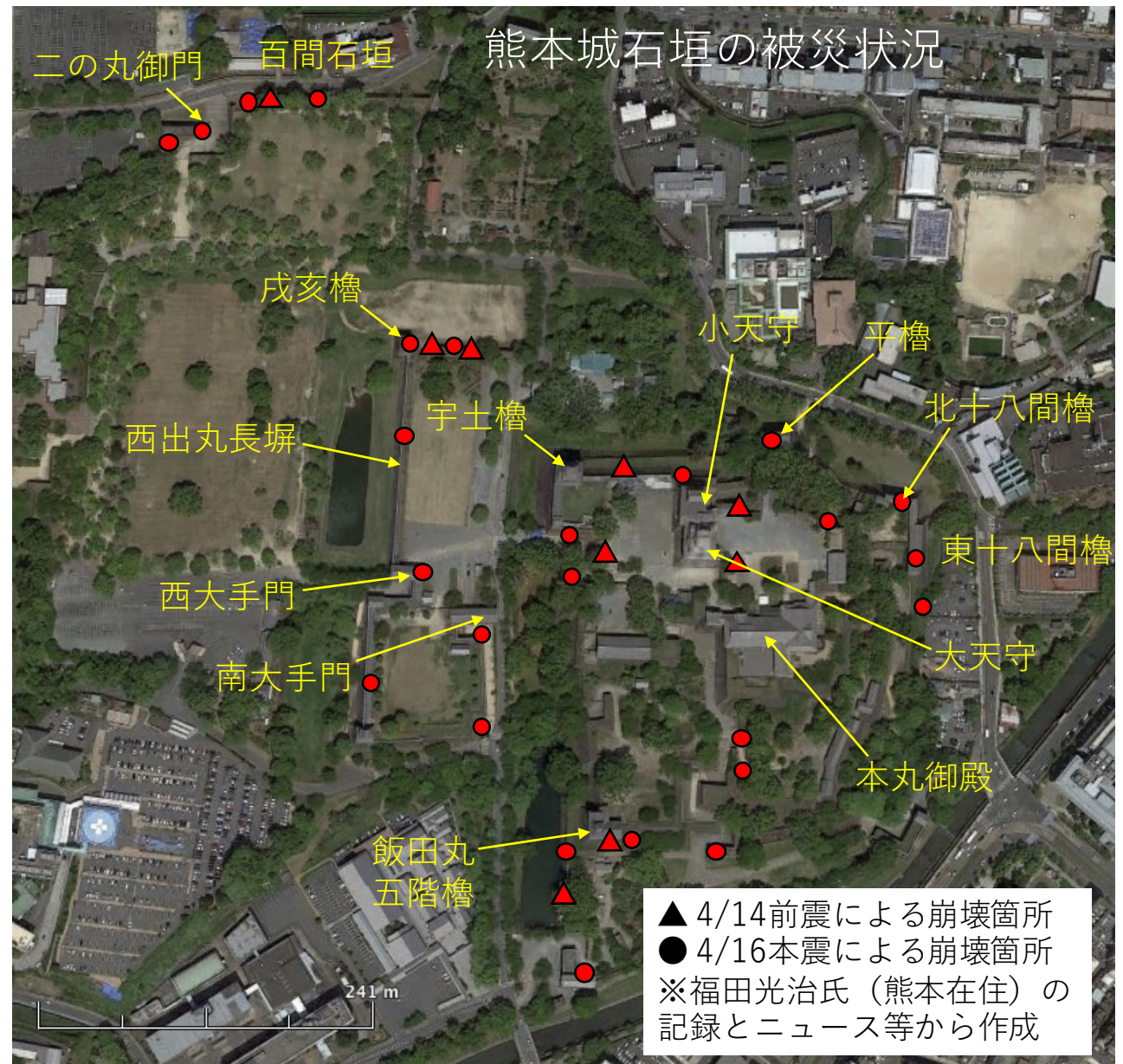


熊本城石垣の被災状況

熊本城石垣の被災状況

熊本城石垣の崩壊箇所は右図に示す通りです。4/14前震で発生した崩壊は6箇所程度で、崩壊の程度も比較的軽かったようですが、4/16本震では崩壊箇所が顕著に増加し、崩壊の程度も壊滅的でした。

残存する石垣についても目視調査で明確な孕み出しが確認された石垣が多数あります。これらについては現状把握を進めるとともに、地震前の調査・点検データや石垣の伝統的な形状曲線との比較、地盤力学的な考察により力学的安定性の把握を試み、補修の必要性を明らかにすることが重要と考えます。



戌亥櫓北石垣と長堀の崩壊状況



戌亥櫓（写真中央）はかろうじて角石に支持されています。飯田丸五階櫓や西大手門、南大手門も同様の形式で残存しています。出隅は直方体の角石の短辺と長辺を交互に積む算木積みと呼ばれる形式で、櫓の自重は出隅の反った曲線に沿う方向に角石が力を伝達して支えられていると考えます。逆に、この力の伝達機構により角石間の摩擦強度が増して、出隅が崩壊を免れた可能性もあります。東側の石垣（写真左）は4/14前震で一部崩壊と報じられましたが、4/16本震では完全に崩壊しました。

宇土櫓石垣



本丸石垣は天端の一部が崩壊し、その周囲は石垣特有の反りが失われて不自然に孕み出しています。一部でも崩壊箇所の周辺ではこのような変状が多数確認されました。力学的な安定性が損なわれている可能性もあるため注意が必要です。宇土櫓に目立った被害はないようにも見えますが、石垣の法面は幾らか起伏があるように感じられました。本調査では宇土櫓北・西石垣のレーザースキャンを実施し、桑原（1984）の計測結果との比較により、石垣の変状を分析しています。

北十八間櫓石垣

東石垣は残存
石垣の健全性は要確認



北石垣は崩壊



北十八間櫓と東十八間櫓は石垣法面の崩壊により倒壊しました。北十八間櫓は北石垣が完全に崩壊したものの、出隅と東石垣は概ね原型を留めています。東西方向と南北方向で地震外力に違いがあったのか、崩壊は法面のどこからどのような機構で発生したのか、東石垣は健全であるか（再構築の必要はないか）、今後の分析により明らかにしていくことが重要と考えます。

東十八間櫓東石垣（熊本大神宮の背後）



完全に崩壊して社を押しつぶしている
すぐ北側の北十八間櫓は北側が崩壊
加速度応答との関連性は不明

東十八間櫓東石垣は完全に崩壊して熊本城稲荷の社務所を押しつぶしました。本震発生は真夜中であり、石垣の崩壊が人的被害が発生しなかったことは不幸中の幸いと言えるでしょう。

二の丸御門



二ノ丸御門の崩壊法面の側方では、石垣の破壊メカニズムを見て取ることができます。石垣には明瞭に2つの破壊線が形成されており、急な角度の破壊線は地震動を繰返し受けたことによる石垣の剥離、緩い角度（約44度）の破壊線は石垣内部の地盤と連動した主働破壊と推察します。このような崩壊メカニズムは、石積みと地盤の力学的相互作用を評価できる手法により評価することが重要です。

百間石垣



4/14前震で一部が崩壊した百間石垣は4/16本震でさらに多数の箇所が崩壊しました。

角石と平石の目開き（右写真）は、程度の違いこそあれ多数の箇所で見受けられました。隙間なく緻密に角石を積んだ出隅と、間詰め石で隙間を埋めながら平石を積んだ法面の応答特性の違いに起因するものと考えます。

百間石垣の背面地盤



百間石垣の背面地盤では、石積みと地盤の相互作用を見て取れます。崩壊石垣①の背面地盤では、地表に石垣と平行な亀裂が複数生じ、側溝の蓋は軒並み落下していました。石垣の崩壊に伴って地盤内部にすべりを生じている可能性もあります。



崩壊を免れた石垣



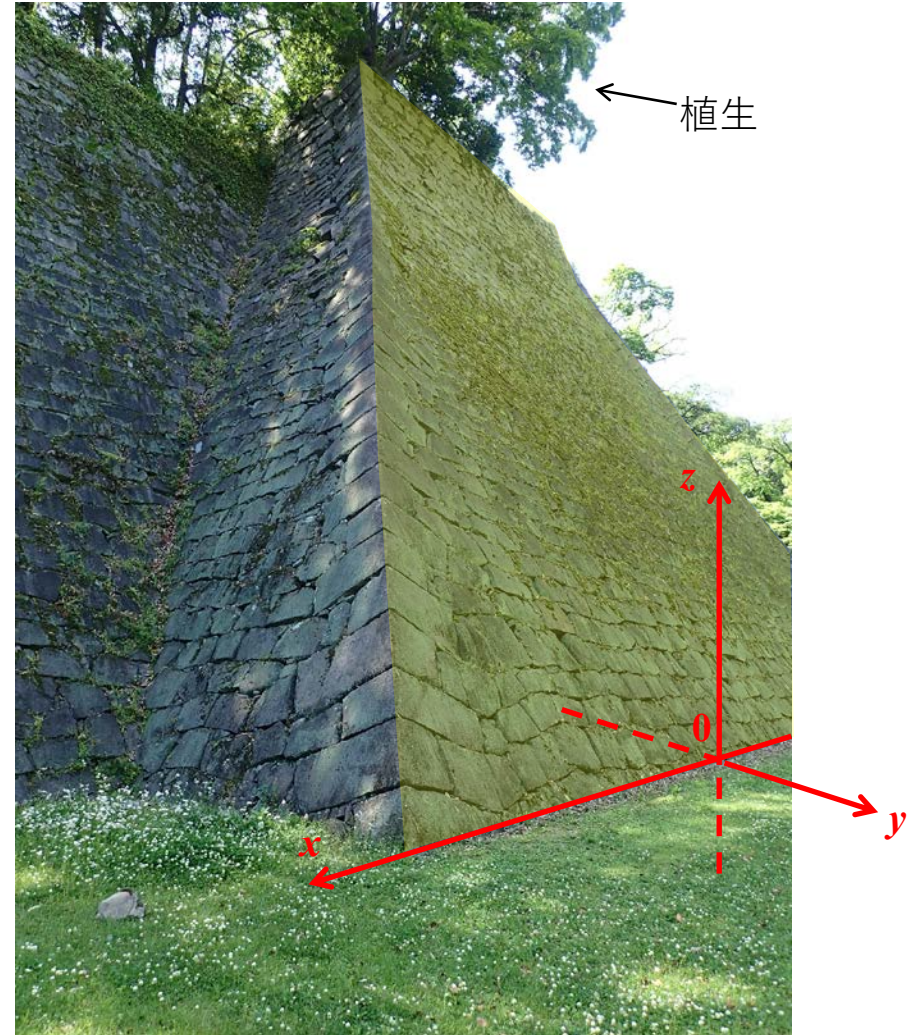
百間石垣

崩壊を免れた石垣でも近くに石材の小片が無数に落下していました（左写真）。新鮮な断面をもつ欠片は地震時の繰返し载荷により平石が欠けて落下したものです。間詰石の欠落により平石間の荷重伝達機構が変化している可能性があります。百間石垣でも崩壊箇所の周辺では天端付近に明確な腹見出しが確認されました（右写真）。

櫓方三階櫓東石垣の3Dレーザースキャン

櫓方三階櫓（加藤神社北東隅）東石垣は、目視では明確な変状はないように感じられました。しかし、桑原（1984）が同石垣の中央の法面形状を計測・報告していることから、本調査で3Dレーザースキャンを行い、その比較により地震による変状を詳しく議論しました。

3次元の直交座標軸として、石垣下端にx軸、水平外向きにy軸、鉛直上向きにz軸をとり、x軸に垂直な断面の石垣形状を求めました。



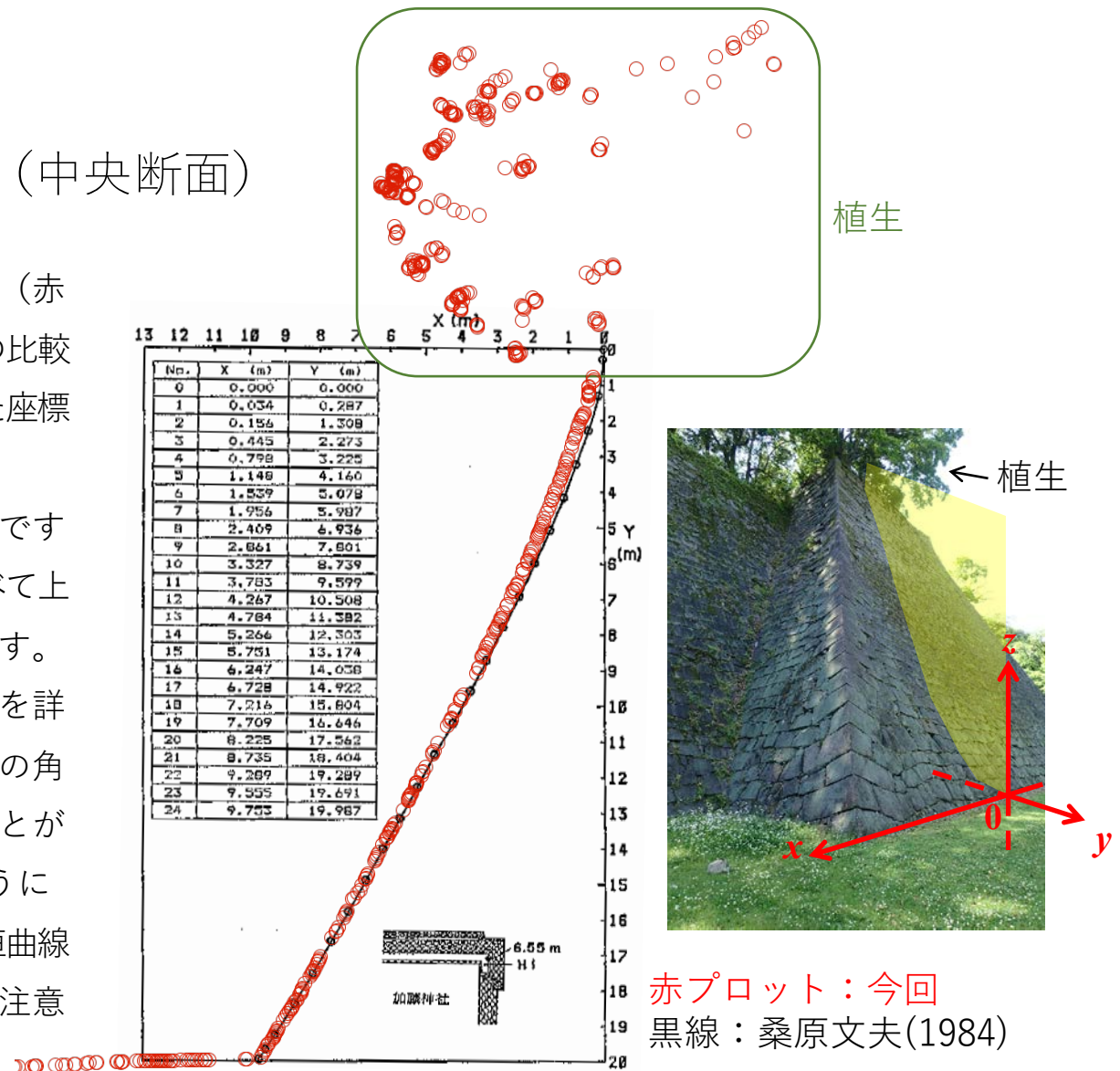
櫓方三階櫓東石垣：

断面ごとの石垣形状 | $x=0.0\text{m}$ (中央断面)

右図は計測により得た石垣中央の法面形状（赤プロット）と桑原（1984）による計測結果の比較です。なお、図中のX、Y軸は桑原が設定した座標軸で単位はmです。

地震後の石垣法面は滑らかなに反った形状ですが、桑原（1984）が計測した石垣形状に比べて上部がやや外側に位置していることがわかります。

この結果を得て、改めて現地での記録写真を詳しく観察すると、石垣の両側方において上部の角石と平石の間に幾らか目開きを生じていることがわかりました（次頁の2枚の写真）。このように2016年熊本地震前の計測値や建設当時の石垣曲線の記録と比較することにより、石垣の変状を注意深く特定していくことが極めて重要です。



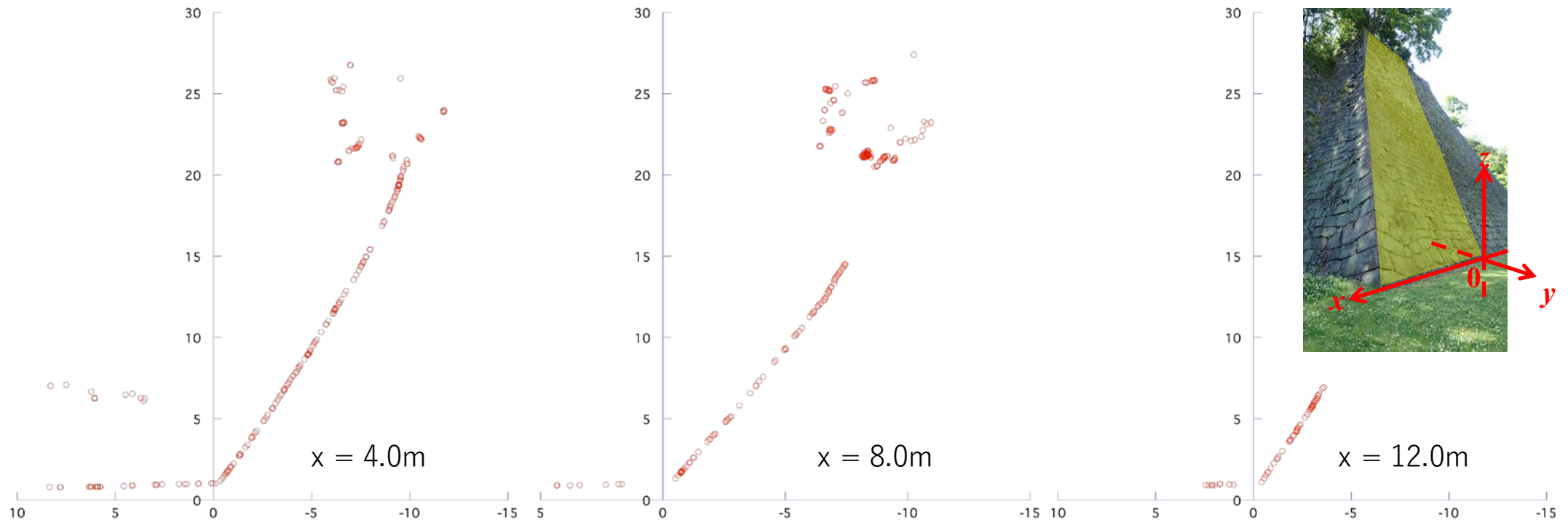
櫓方三階櫓東石垣：側面から見たようす



上部の隅石と平石はやや目開き
している

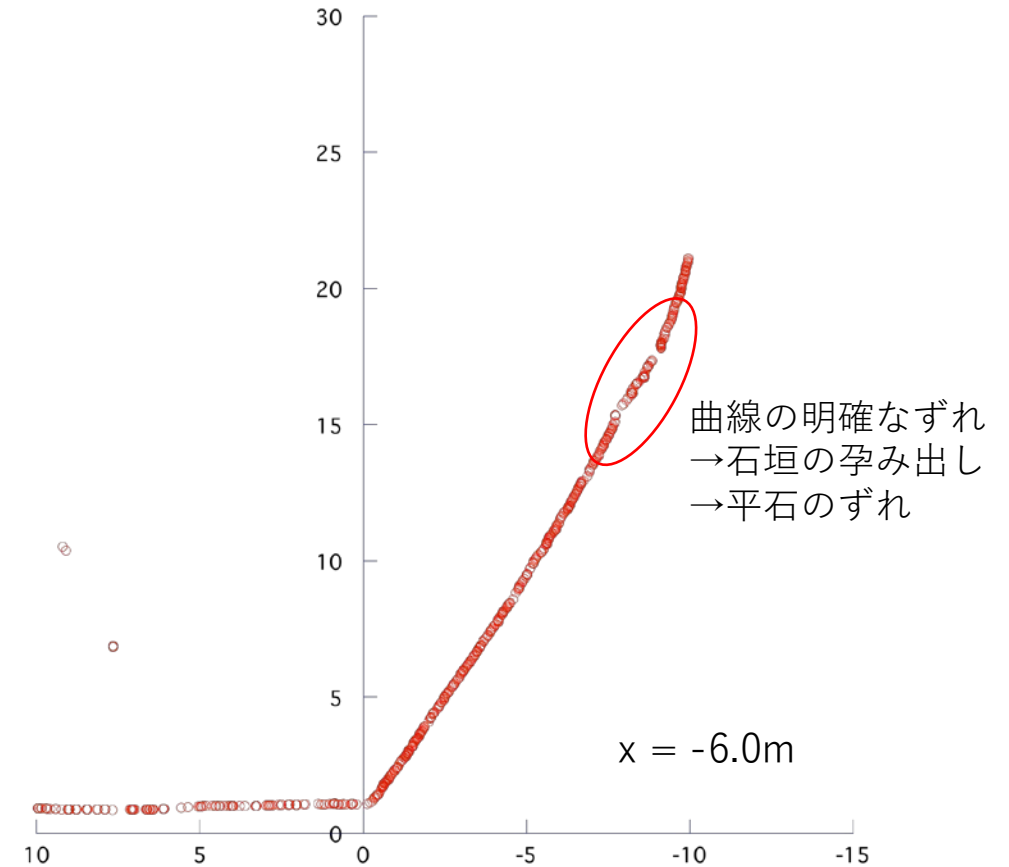
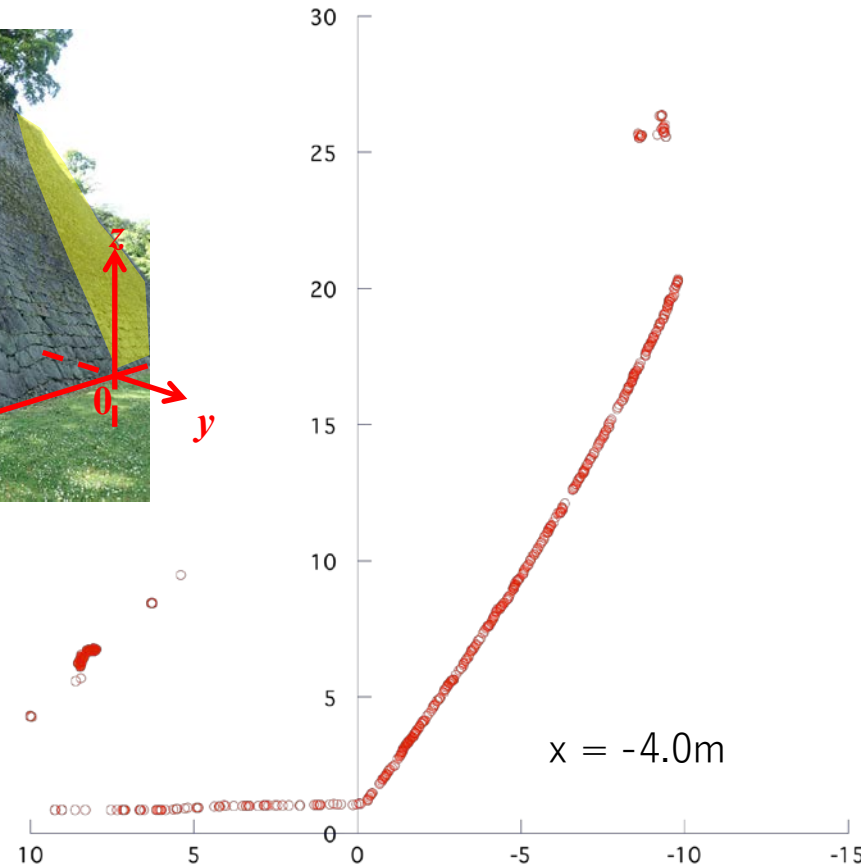
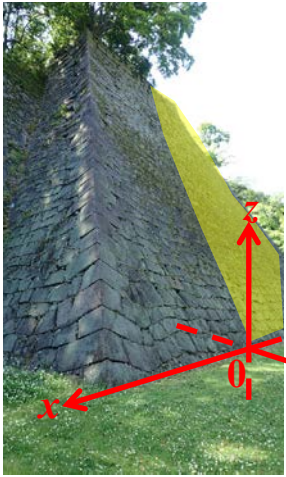


櫓方三階櫓東石垣：
断面ごとの石垣形状 | $x > 0\text{m}$ (向かって左側)



限られた測点を一測線ずつ計測する従前の測量に対して、3Dレーザースキャンは一回の計測で法面全面の座標を取得でき、あらゆる断面の石垣形状を求めることができます。上図は櫓方三階櫓東石垣の左側の法面の形状です。いずれも滑らかな形状が得られましたが、地震前の計測値が無いため変状を特定するには至っていません。今後、伝統的な石垣曲線との比較により変状の有無や程度を分析していく予定です。

櫓方三階櫓東石垣：断面ごとの石垣形状 | $x < 0\text{m}$ (向かって右側)



右側の法面においても地震前の計測値は得ていません。しかし、中央から6mの位置の断面（右図）では石垣勾配が上部で明確に不連続になっていることがわかりました。この歪みが地震による影響であるか慎重に議論する必要がありますが、少なくとも築造当初の形状からは何らかの変状が生じているものと予想されます。

宇土櫓西石垣の3Dレーザースキャン



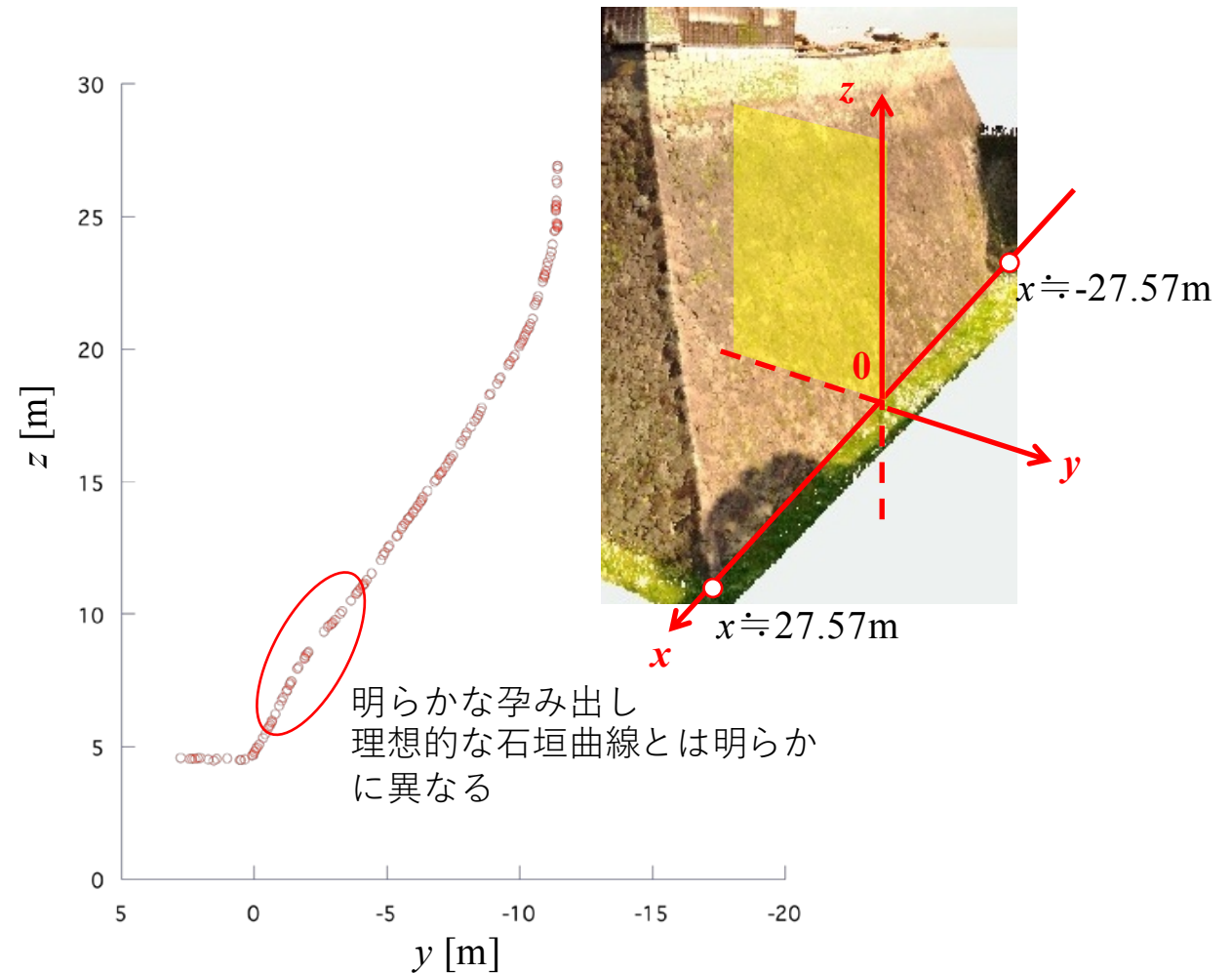
宇土櫓の計測は加藤神社鳥居前から実施しました。境内の植生により計測範囲が限られたため、北石垣は法面左下の座標データは欠落しています。まずは西石垣の分析結果について解説します。



宇土櫓西石垣：断面ごとの石垣形状 | $x=0.0\text{m}$ （中央の断面）

右図は宇土櫓西石垣の中央の断面の石垣形状です。城郭石垣は法尻から直線的に打ち出し、天端で鉛直になるよう徐々に反りを持たせて構築されますが、計測では下部が不自然にふくらんだ石垣形状が得られました。

地震前からこのような石垣形状であったか、力学的な観点から見た補修の必要性、上部構造物（宇土櫓）の存在下での石垣補修の可能性といった点について、今後、精査していくことが必要になるでしょう。

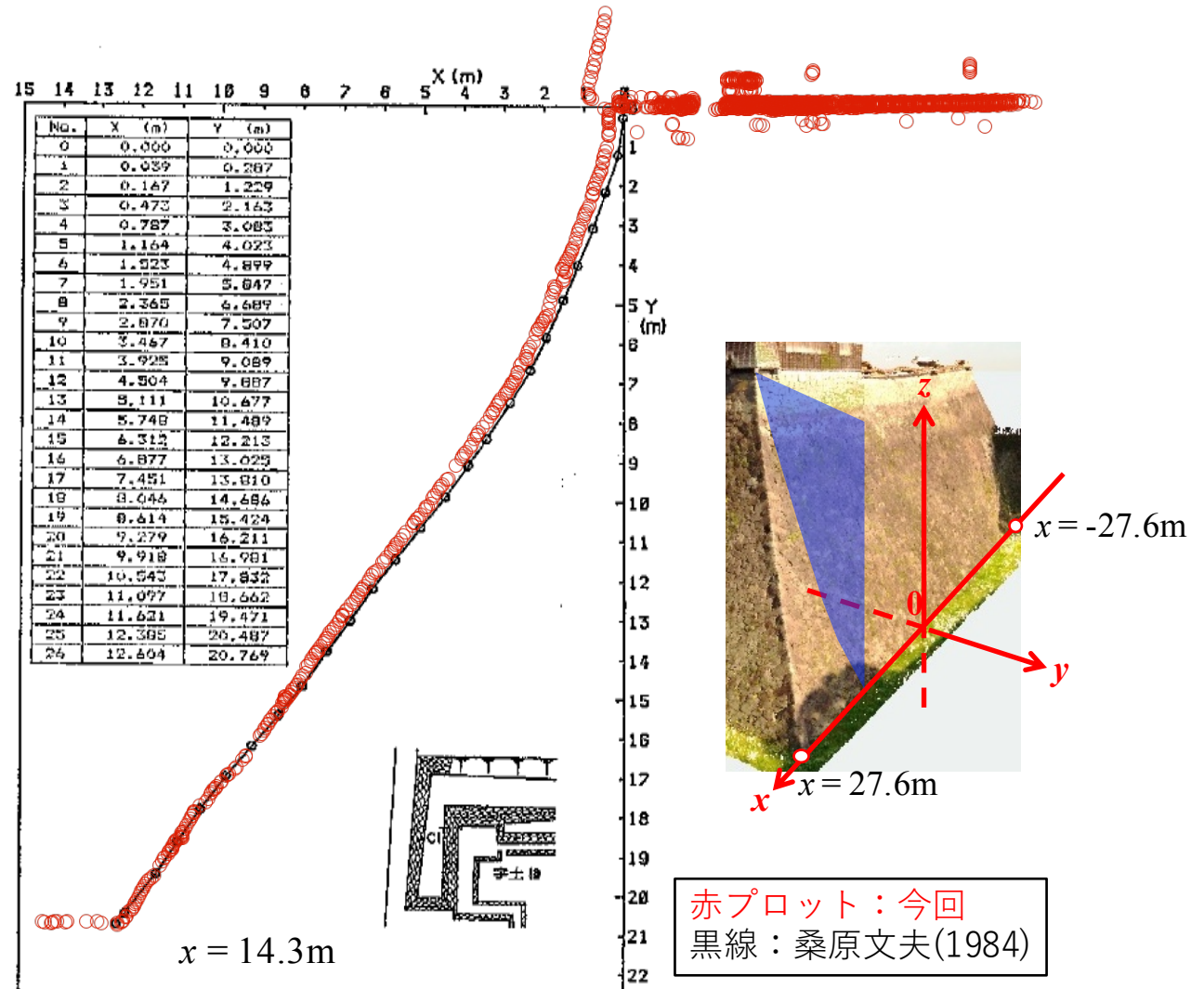


宇土櫓西石垣：断面ごとの石垣形状 | $x > 13.3\text{m}$ (櫓北西角の計測線)

桑原 (1984) は宇土櫓北西角から北向き、西向きの二測線で石垣形状を報告しています。このうち西向きの測線は、本計測において $x = 13.3\text{m}$ の鉛直断面で切り出した石垣断面に相当します。

この断面での地震後の石垣形状と桑原 (1984) の計測値の比較が右図です。地震後の石垣は全体的に外側に変形しており、その勾配は法尻 (下端) から不連続に変化していることがわかります。天端の外向き変位量は約 60cm です。

北向きの測線や計測値が存在する他の石垣についても分析を進めるとともに、力学的安定性や補修の必要性について議論していくつもりです。



熊本城石垣の調査のまとめ

崩壊した石垣について

- ・ 4/16本震により多数の崩壊が発生しています。
- ・ 石積みの剥離だけでなく、内部の地盤も含むすべり破壊のメカニズムが確認されました。このような崩壊機構を解明するには
石積みと地盤の力学的相互作用を考慮した評価手法 が必要です。

崩壊を免れた石垣について

- ・ 複数箇所では石垣の**孕み出し**や**勾配の不自然な変化**が認められました。
- ・ 地震前の石垣（桑原，1984）との比較では、地震後の石垣が前方に押し出されていることを確認しました。

補修の必要性の判断について

- ①**伝統的な石垣曲線や地震前の計測値との更なる比較**
- ②**力学的安定性の検討** が必要になると考えます。

最後に

- ・熊本城石垣とあわせて、通潤橋や霊台橋といった石橋や道路トンネルの分析も進めています。いずれも構造物の変状の有無や変状の理由を特定することが重要だと考えています。調査・分析の結果は随時、公開していく予定です。

- ・地震による変状を特定するには、建設当時の諸元や地震前の計測値との比較が必須になります。平時に熊本城石垣の勾配を計測された桑原文夫先生の先見性に敬意を表するとともに、関係者の皆様には石垣や石橋の点検・計測データをご提供頂きますようお願い申し上げます。