

論文 Original Paper

熊本城の微動アレイ探査の解析

橋本隆雄*¹, 斉藤 猛*²

Analysis of microtremor arrays in Kumamoto castle

Takao Hashimoto*¹, Takeru Saito*²

Abstract: Kumamoto castle of stone walls, received a total of 30% of the damage by the 2016 earthquake Kumamoto. On the other hand, although castle of stone walls has the same height and structure, there are collapsed parts and parts that do not collapse. But, the mechanism of the collapse of the stone wall has not been clarified. The ground at the place where the castle building is present inside Kumamoto castle is now clear to a certain extent by the boring survey etc. However, the ground in places without this other building has not been clarified because no boring survey has been conducted. Therefore, we conducted ground survey using microtremor array survey in the castle where the boring survey was not conducted.

In this paper, we will discuss the results of examining microtremor array survey of the Kumamoto castle of stone walls and the influence of the ground.

Key words: earthquake, stone wall, collapse, castle, microtremor array survey

1. はじめに

2016年熊本地震の一連の地震活動による強震動の作用によって、4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震（以後、前震と呼ぶ）、その約28時間後の4月16日1時25分に熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震（以後、本震と呼ぶ）が発生した。熊本城では、強震動の作用により、写真-1及び写真-2に示すように石垣の崩壊・孕み出し、櫓・長塀の損壊などの甚大な被害が熊本城内のほぼ全域で広範囲にわたって発生した。

熊本城調査研究センターの速報（熊本市役所内掲示：2016年6月10日時点）による被害概要では、前震で重要文化財建物10棟、復元建造物7棟、石垣の崩落箇所6ヶ所であるが、本震で全ての重要文化財建物13棟、復元建造物20棟、石垣の崩落・孕み・緩み517面、23,600 m²（うち崩落は50ヶ所、229面、約8,200m²）、地盤の陥没・地割れ70ヶ所（約12,345 m²）と報告されている。本震を経た石垣の被害は実に全体の30%にも及び、崩落は全体の10%で、その被害は余震でも進行している。城壁の石垣は、近世における石垣築造（普請）の技術的頂点に位置し、わが国が誇るべき建設文化的遺産であるが、石垣の修復には明確な基準がなく、経験的に行われ



写真-1 百間石垣の崩壊



写真-2 重要文化財「北十八間櫓」の崩壊

*¹ 国士舘大学教授 理工学部まちづくり学系*² 株式会社ジオフィール 会長

ている場合が多い。

一方、百間石垣や熊本城本丸付近等においては、同じ高さ、構造であるにもかかわらず、崩壊部分と崩壊していない部分が隣接しており、そのメカニズムが明らかとなっていない。橋本・齋藤が行った百間石垣脇の駐車場から二の丸広場方向に高さ12mの斜面を挟んだ比抵抗2次元（電気）探査¹⁾では、測線の中央法面付近を境に急にずれているため断層構造である可能性があることが明らかとなった。石垣の崩壊が顕著だった百間石垣と本丸周辺地区について表面波探査を行い、崩壊地点は他に比べ地盤が軟らかいことが分かった。

これから石垣の復旧を行う際に、崩壊した箇所や変状を生じている箇所について、その健全度を検証する必要があるが、この評価する調査法がない。現在、熊本城内で北部の天守・本丸や西部の数寄屋丸、南西部の飯田丸等の城の建物がある場所の地盤は、ボーリング調査等によりある程度明らかになっている。しかし、この他の建物がない場所の地盤は、一切ボーリング調査が行われていないために明らかとなっていない。そこで、本論文では、城内でボーリング調査が行われていない場所について微動アレイ探査を用いた地盤調査を行い、熊本城石垣の変状程度と地盤の影響についての検討を行った。

2. 熊本城石垣の変遷

近世熊本城の築城は1590年頃には開始されていたが、豊臣秀吉の没後、加藤清正は1599年から城地を移して新城の築城に取り掛かり、1607年に本丸までが成就したとされている²⁾。最終的に完成した城域は、城内掲示板より周囲約5.3 km、総面積は980,000 m²で、櫓門49、櫓門18、城門29の規模であったとされている。

熊本城の石材は主に「祇園山」（現在の熊本市西区にある標高132.2メートルの山）である。阿蘇火山灰層の軟弱な地盤上の石垣で、石垣を構築することは極めて困難であった。一般に地盤が軟弱であると萩城のように弓状に描く勾配で、上方からの荷重圧力が石積み下方に分散する構造となる。二様の石垣（写真-3）には、加藤家時代の緩勾配の石垣と細川家時代とされる急勾配の石垣が重なる。

前者は穴太（あのを）積みと呼ばれ、安土城（写真-4：1576年着工 - 1582年焼失）築城で実績を積んだ近江国の石工集団の穴太衆が駆使した技法で、隅石（角の部分の石）に同じ大きさの石を積み上げ、清正が近江から穴太衆を連れて帰って重用したことから、清正流と呼ばれている。

後者の算木（さんぎ）積みは、加藤家後期と細川家初期に採用され、長方形の石の長辺と短辺を交互に積み上げる工法で、これによって、最下部急勾配を持つ急勾配の石垣が構築³⁾することが可能となっている。算木積みの例を写真-5に示す。

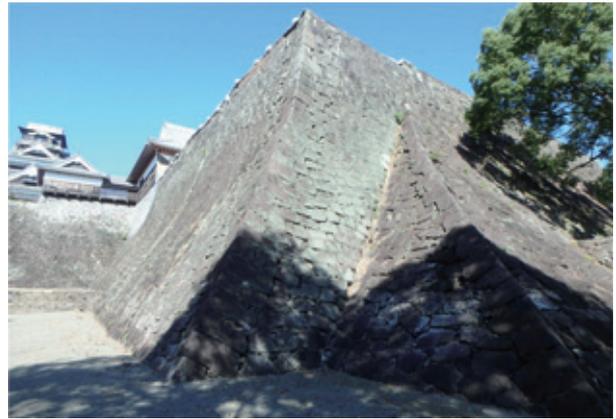


写真-3 熊本城二様の石垣
注1) 加藤家時代（緩勾配：手前）
注2) 細川家時代（急勾配：奥）



写真-4 穴太積み例（安土城）³⁾



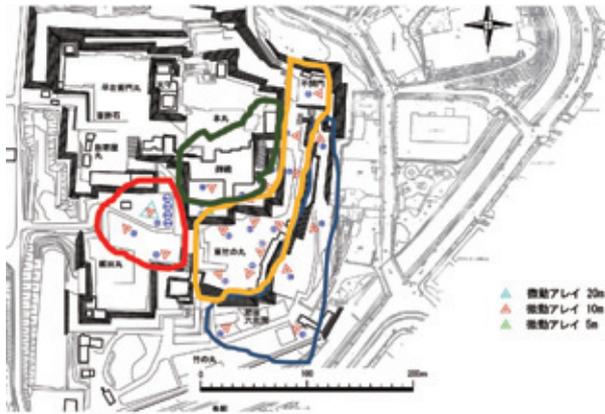
写真-5 算木積み例（名古屋城）³⁾

3. 微動アレイ探査

(1) 探査の内容

微動アレイ探査は、図-1に示すように以下の23地点で行った。

- ①竹之丸地区 5地点（4.5Hz a=10m）
- ②東竹之丸地区 9地点（4.5Hz a=10m）
- ③本丸御殿地区 3地点（4.5Hz a=10m）



記号	地区
	竹之丸地区
	東竹之丸地区
	本丸御殿地区
	飯田丸地区

図-1 調査地点位置

- 3地点 (4.5Hz a=5m)
- ④飯田丸地区 2地点 (4.5Hz a=10m)
- 1地点 (4.5Hz a=10m・20m)
- 合計 23地点

(2) 微動アレイの概要

微動には、人工的なものと自然的なものがある。前者は一般に周期1秒以下の微動で、車両振動等を発生源とし、振幅に明瞭な日変化が認められる特徴がある。一方、後者は周期1秒以上の波で、主として気圧変化に伴う風や波浪等の自然現象が発生源であり、それらの現象の規模によって振幅は変化する。

微動は時間的に変化する、また、空間的にも変化するという特徴を持った波動である。弾性論的には、実体波(P波、S波)や表面波(レイリー波、ラブ波)の集まりである。

通常観測される微動は、複雑な微動の発生源、伝播経路、観測場所の地下構造などに関する様々な情報を実体波や表面波の形で含んでいる。表面波には波の周期(周波数)によって伝播速度が変わる、いわゆる「分散性」の性質がある。この分散性は地下構造に密接に関係するものである。したがって、表面波の分散、すなわち表面波の周期(周波数)と伝播速度の関係がわかれば、それから地下構造が推定できることになる。

微動の発生源は多くの場合、地表面や海底面にあると考えられているので、実体波より表面波が優勢である。そこで、この優勢である表面波を利用し、次の手順で地下構造を推定する手法が開発^{4), 5)}された。

- ① 微動観測：地表に面的に展開した群列地震観測網(seismic array network；以下、アレイと略記)により微動を観測する。

- ② 位相速度の推定：アレイ直下の地下構造の情報を含む表面波を分散の形(位相速度-周期の関係)で検出する。
- ③ S波速度の推定：その分散を逆解析して、そのような分散をもたらす地下構造を推定する。

なお、微動アレイ調査で得られる地下構造は従来の地震探査とは違い、アレイの中心点下の地下構造を平行層で近似したものであり、各層の区分はS波速度による速度帯構造として認識される。

微動アレイ探査法は、表面波の分散性から地下構造を推定する探査法であり、以下、微動探査法と呼ぶ。

(3) 微動アレイ探査における最近の適用例

微動探査法は、従来は地下深部構造の研究などの学術目的が主で、応用地質調査分野において適用されることは少なかった。しかし、平成7年に発生した阪神淡路大震災を期に都市部における地震防災が叫ばれるようになり、地震防災に直結する地震応答解析のパラメータとなる地下数千mまでのS波速度が求められる微動アレイ調査が注目され適用されてきた。さらに、微動アレイ調査は、観測機材がコンパクトで機能性が良いことから観測作業に制約を受けやすい市街地でも容易に実施できる点、震源は自然発生した波動を利用していることから環境に全く影響を与えずに実施できる点が評価され、地質調査手法の1つとして適用される機会が増えてきた。最近の適用分野としては、活断層調査、堆積盆地の地下構造調査、構造物の支持基盤調査、トンネル調査等が挙げられる。

(4) 測定方法

(a) アレイの形状

微動観測は、地震計を面的に展開した観測網(以下「アレイ」)を用いて行う。

アレイの形状は正三角形であり、中心点および頂点に観測機材(地震計およびデータレコーダ)を配置する。通常の微動観測では、中心点を共有した大小の正三角形を組み合わせた多重正三角形アレイを使う。図-2は、2重正三角形アレイの概念図である。

(b) 観測手順

微動観測は、以下の示すとおりの手順で実施する。

- ① キャリブレーション

本番の観測に先立ち、地震計の動作チェックを行う。具体的には、地震計を同一地点に集結させて所定時間の微動を計測し、各地震計の観測波形が互いに同じであることを確認する。
- ② データレコーダの設定

観測前に、データレコーダの設定を行う。設定内容は、観測開始・終了時刻、観測時間、サンプリング間隔等である。

③ 微動観測

事前測量により選定しておいた場所に観測機材を安置して、所定時間の微動を計測する。

④ データ回収・点検

観測終了後、データレコーダに収録したデータをパソコンで回収し、観測データの質を点検する。データ不良の場合には同一場所で再度観測を行う。データが良好な場合には観測機器を撤収して次のアレイに移動し、上記と同様の要領で観測を実施する。

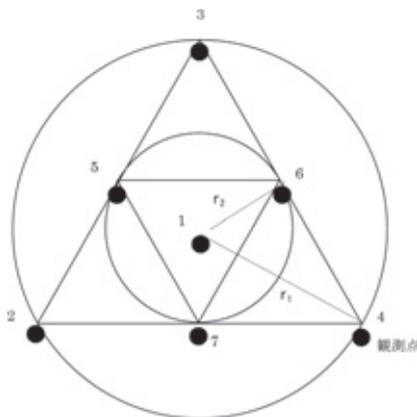


図-2 2重正三角形アレイの概念図

r_1, r_2 : アレイ半径 ($r_1 = 2r_2$)
●: 地震計設置点を表す (計7点)。

(5) 使用機器

微動アレイ探査に用いた使用機器を写真-6に示す。その使用機器の仕様 (主要部分) は、以下のようになる。

- ① 型名: McSEIS-SX 48
- ② 入力チャンネル数: 1,2,3,12,24,48
- ③ サンプル数: 512,1024,2048,4096,8192
- ④ サンプル間隔: $25 \mu s \sim 2ms$ (7段階)
- ⑤ 増幅方式: 瞬時浮動小数点増幅 (ダイナミックレンジ120dB)
- ⑥ A/D変換・信号増幅: 18ビット/10ビット
- ⑦ アナログフィルターハイパスフィルター (タイプ1, タイプ2), ローパスフィルター: なし
- ⑧ 周波数帯域: 4Hz~4000Hz
- ⑨ CPU: i486
- ⑩ ハードディスク: 1.2GB 最大256ファイル収録
- ⑪ プリトリガ: 0 (OFF) 128ワード (ON)
- ⑫ トリガレベル: 100~1000mV, OFF
- ⑬ モニター: TFTカラー液晶 (640×480ドット) 10.4インチ
- ⑭ インターフェース: パラレルポート×1, 外部キーボード接続用ポート×1
- ⑮ 電源・重量・寸法: 直流12V (消費電力35W) / 約9kg / 約330mm×280mm×260mm

⑯ ⑲⑳動作環境: $-5^{\circ}C \sim 45^{\circ}C$ 気温 $40^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$

⑰ 受振器: HGS SM-11 固有周波数4.5Hz, 10器

⑱ 解析ソフト: SeisImagerSW, GFSEIS



(a) 記録器



(b) 測定状況

写真-6 微動アレイ測定状況

4. 微動アレイ探査の解析方法

観測データからS波速度構造を求めるまでの手順を、図-3に示す。

具体的な解析手順は、次のとおりである。

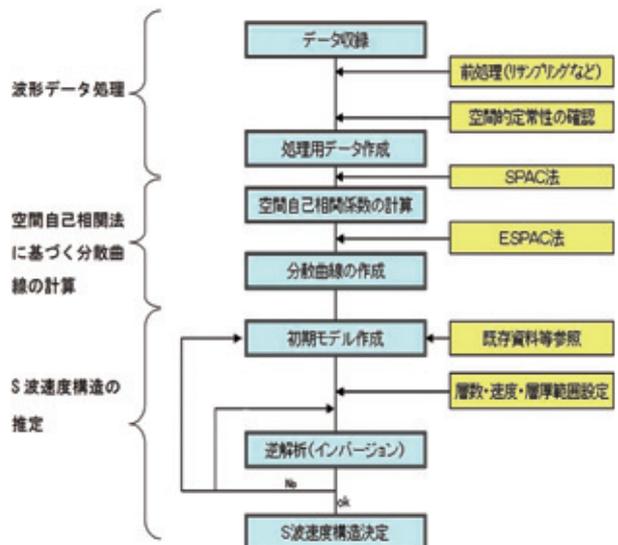


図-3 微動探査法のデータ処理・解析手順

(1) 波形データ処理

微動探査法では、アレイを構成する複数の観測点を「一体の観測システム」と見なして、どの観測点でも均質なデータが取得されたかどうかの確認を行う。これを、「微動の空間的定常性」の評価という。

具体的には、取得した微動波形データから微動パワースペクトルを計算し、各地震計のスペクトル曲線が同じ形状であるような周波数範囲を調べる。スペクトル強度に多少の違いはあっても、曲線形状が相似していれば（パワー軸方向に曲線を上下に移動させると互いに一致する場合）、微動の空間的定常性が保たれていると判断する。以後の処理は、スペクトル曲線の形状が一致するような周波数の範囲内で実施する。

(2) 空間自己相関法に基づく分散曲線の計算

微動に含まれる表面波成分の分散データの計算には、空間自己相関法（Spatial AutoCorrelation Method：略称SPAC法^{4), 5)} および拡張空間自己相関法（略称ESPAC法⁶⁾）を用いる。

ここで実際に用いている空間自己相関係数の計算方法は、Aki (1957) が定義したものではなく、半径rのアレイの中心点(0,0)、円周上の点(r, θ)として、地震計の設置条件（例えば、地震計と地面のカップリング）などが異なる場合を考慮し、式(1)のように求めている^{1), 2)}。

$$\rho(f, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\phi_{0i}(f, r, \theta)}{\sqrt{\phi_{00}(f, 0, 0)\phi_{ii}(f, r, \theta)}} d\theta = J_0\left(\frac{2\pi fr}{c}\right) \quad (1)$$

ただし、

$$\phi_{0i}(f, r, \theta) = \overline{u(f, 0, 0, t)u(f, r, \theta, t)}$$

$$\phi_{00}(f, 0, 0) = \overline{|u(f, 0, 0, t)|^2}$$

$$\phi_{ii}(f, r, \theta) = \overline{|u(f, r, \theta, t)|^2}$$

J₀：第一種0次のBessel関数

式(1)は、半径rのアレイで微動を観測したとき、そこに分散性の波が含まれていると仮定すると、空間自己相関係数ρは周波数f、アレイ半径r、分散性の波の位相速度cを変数とする第一種0次のBessel関数で表されることを意味する。

2重三角形アレイ（図-2）で観測を行ったとき等距離(R)の観測点間の組み合わせは図-4に示すような5通りができる。すなわち、アレイ半径をr、2rとすると大きい順に、r、√3r、2r、3r、2√3rの5通りである。以下、アレイ半径rの値をRで代用する。

S波速度構造の図は、上記の5通りの等距離(R)の観測点間の組み合わせに基づいた計算結果であり、式(1)の被積分関数はこれらの図の上の3つ（あるいは9つ）の図に対応する。

式(1)で周波数を固定した、つまりf=f₀ (=一定)

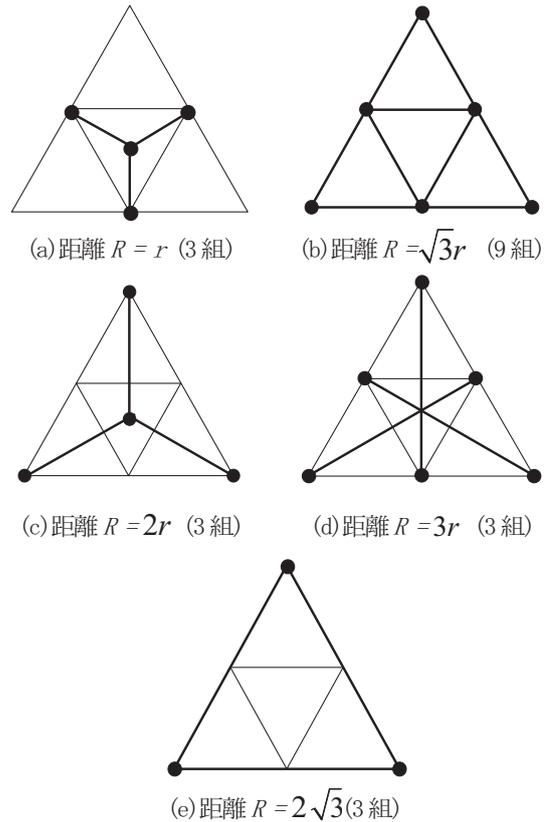


図-4 2重正三角形アレイにおける等距離観測点(R)の組み合わせ
最小アレイ半径をrとする。●は地震計の位置を表す。

とすれば、

$$\rho(f_0, R) = J_0\left(\frac{2\pi f_0 R}{c_0}\right) \quad (2)$$

となる。ここで、B=2πf₀/c₀ (=一定) とおくと、式(2)は、

$$\rho(f_0, R) = J_0(B \cdot R) \quad (3)$$

となる。いろいろなアレイ半径r（2重三角形アレイでは5通り）についてρ(f₀, r)が求められていると、それに最適なBessel関数J₀を最小2乗的に見つけることができる。これはBを求めることに他ならない。Bが求められれば、

$$c = 2\pi f_0 / B \quad (4)$$

により、位相速度c(f)が求められる。周波数を一定にした空間自己相関係数（プロット）および最小2乗的に見つけたBessel関数（実線）に示した。

以上の手続きで、微動波形から分散データが抽出される。分散データは、グラフ化すると滑らかな曲線イメージになることから、通常は「分散曲線」と呼ばれる。

(3) S波速度構造の推定

得られた分散曲線を「レイリー波基本モード」の分散曲線と仮定し、アレイ直下の地下構造を多層半無限水平成層構造として推定する。

レイリー波位相速度は、層数、層厚、各層のP波速度、S波速度および密度をパラメータとする関数である。層数を n とすると、未知パラメータの総数は -1 個である（最下部の層は半無限層である）。数値計算の安定化や処理時間の短縮を図るため、未知パラメータの個数を減らすことを考える。

数値実験によれば、レイリー波分散曲線の変化に強く寄与するパラメータはS波速度と層厚、特にS波速度であり、P波速度や密度の寄与はS波速度よりも1~2桁以上小さいことがわかっている。そこで、P波速度および密度は既存の統計資料^{7), 8), 9)}からS波速度の関数として換算することとし、層数 n は前もって設定する。

すなわち、レイリー波分散曲線から精度良く推定できる実質的な地下構造は、S波速度構造である。このとき、未知パラメータ（S波速度および層厚）の個数は、当初の約半分の個にまで減少する。

通常、地下構造モデリング作業においては、初期モデルを試行錯誤的に決定し、それを反復的に修正する逆解析（インバージョン）プログラムを用いていた。この種のインバージョンでは初期モデルへの依存性が問題となり、標準的な地下構造が未知の場合に初期モデルをどう設定するかが大きな課題であった。

そこで、本報告の構造解析では、初期モデルへの依存性を解決する手段として、個体群探索分岐型遺伝的アルゴリズム（Forking Genetic Algorithm, 略称 fGA）による地下構造推定法を利用する。fGAでは初期モデルとして層の数、各層の層厚の最大値・最小値、S波速度の最大値・最小値を与え、これらの範囲内で残差最小解を求める。fGAは順問題という性格上、計算が不安定になる可能性がないなどの特徴を有する。

最終的には、fGAで求めたパラメータを必要に応じて手動調整し（フォワードモデリング）、最適解を絞り込む。なお、S波速度の調整のみではフィッティングが向上しない場合、層数や層厚を適宜増減する。既存資料との整合性も十分に良好な解を、S波速度構造の最終推定解とする。

5. 微動アレイ探査の解析結果

(1) 竹之丸地区の解析結果

竹之丸地区の微動アレイ位置を図-5に示す測点番号16~20の5地点で測定した。アレイは10mで振動計の固有周波数は4.5Hzである。解析された速度構造を図-6、図-7に示す。この図のグレーのハッチは逆解析によるS波速度構造で、緑のプロットは観測データの分散曲線である。

(2) 東竹之丸地区の解析結果

中段の東竹之丸地区の微動アレイ位置を図-8に示す測点番号1~6, 13~15の9地点で測定した。アレイは10mで振動計の固有周波数は4.5Hzである。解析された速度構造を図-9~図-11に示す。

(3) 本丸御殿地区の解析結果

上段の本丸御殿地区の微動アレイ位置を図-12に示す測点番号7~12の6地点で測定した。アレイは5・10mで振動計の固有周波数は4.5Hzである。解析された速度構造を図-13, 図-14に示す。

(4) 飯田丸地区の解析結果

飯田丸地区の微動アレイ位置を図-15に示す測点番号21~23の3地点で測定した。アレイは10m・20mで振動計の固有周波数は4.5Hzである。解析された速度構造を図-16, 図-17に示す。

6. 微動アレイ探査結果による地表面からのS波速度

図-18はS波速度を推定する場合に、石垣上段でのS波速度に影響を及ぼすためにあらかじめ各地区の標高を測量したものである。図-19は微動アレイ探査結果による地表面からのS波速度150m/sを2m毎のコンターで示したものである。S波速度150m/secはN値2~5相当で、高精度表面波探査結果ではS波速度で約150m/sec以下の速度が、表土に相当する。

図-20は地表面からのS波速度150m/sと石垣の崩壊および孕み箇所を重ねたものである。この図面から、S波速度約150m/sec以下の層下辺まで（それ以上の速度層の上面深度）の深度分布図と被害の状況が概ね合い、深度が大きいほど被害が大きくなっていることが分かる。すなわち、石垣の崩壊および孕み箇所が地盤の緩い箇所に変化する箇所での被害が多いことから地盤による地震動の増幅が発生したことが想定される。

7. ま と め

今回の測定・解析結果をまとめると以下のような。

- (1) 調査地周辺では復興工事が始まっておりノイズや障害物等を考慮しながらの測定作業であったが、1日10地点前後の測定が可能であった。
- (2) 各地点とも解析結果、振動計固有周波数4.5Hzの場合、10mアレイで深度30m, 5mアレイで20m付近までのS波速度構造を得ることが出来た。また現地テストでは振動計固有周波数2.0Hzの場合、20mアレイで深度40mまで解析出来た。
- (3) 深度30~40mまでのS波速度構造が求めれば、重複反射理論により、調査地点での短周期地盤固有周

波数及び増幅率を推定することが出来る。

- (4) 本丸御殿地区・飯田丸地区・東竹之丸地区・竹之丸地区の4地区で測定を行ったが、それぞれ地区によりS波速度構造の違いが見られた。
- (5) 今回は本丸周辺地域の1/3の範囲の測定であったが、残りの測定とボーリング調査および表面波探査結果を合わせて城全体の地質構造・速度構造を把握することが可能と考えられる。



図-5 竹之丸地区の微動アレイ位置

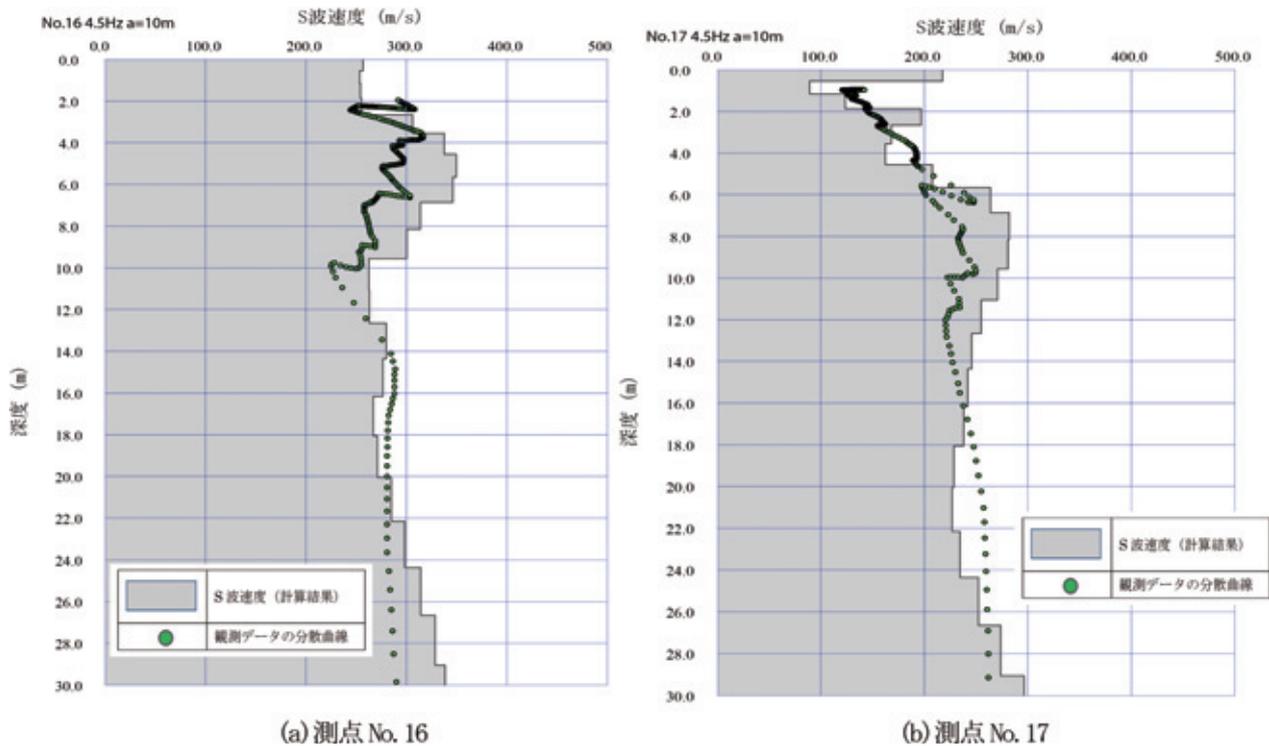


図-6 竹之丸地区のS波速度構造 (1)

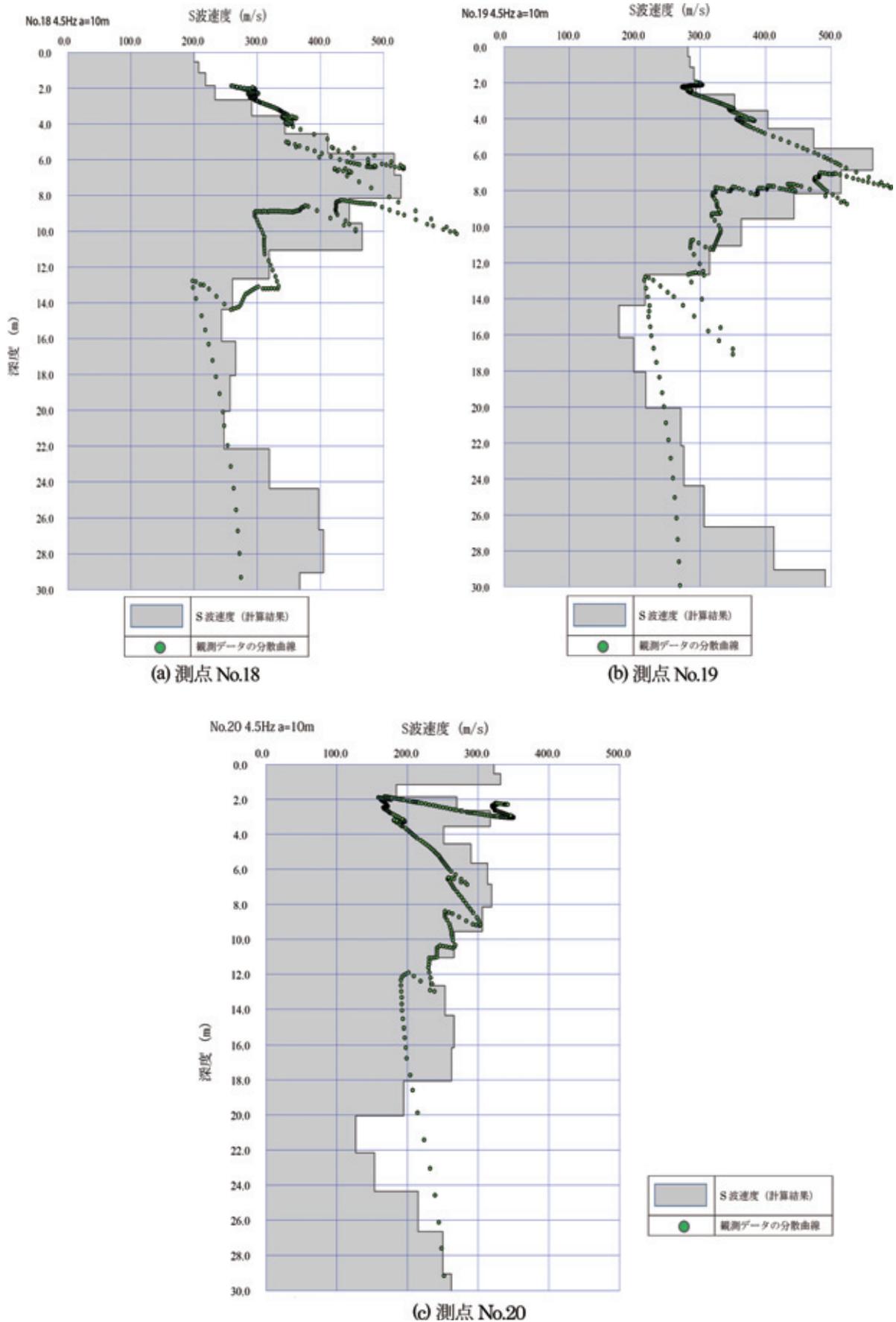


図-7 竹之丸地区のS波速度構造 (2)



図-8 東竹之丸地区の微動アレイ位置

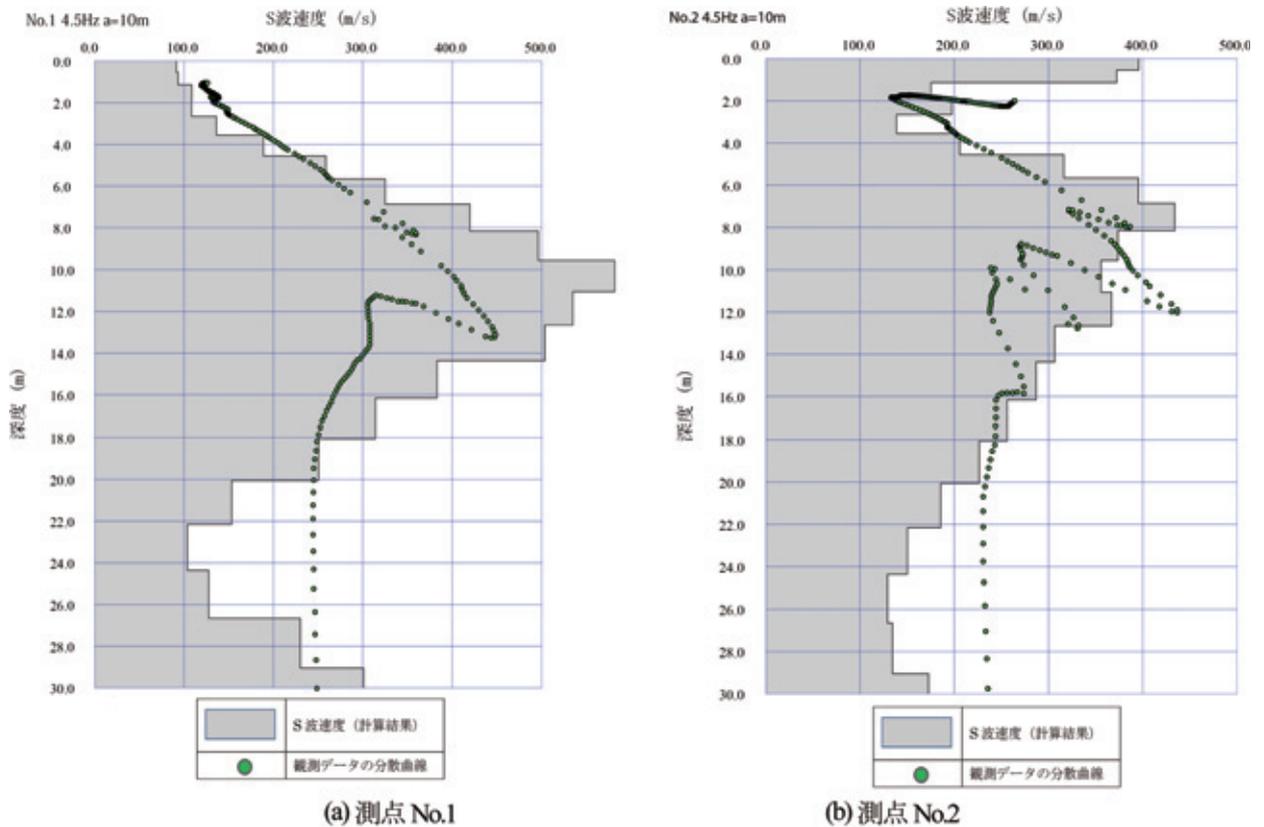


図-9 東竹之丸地区のS波速度構造

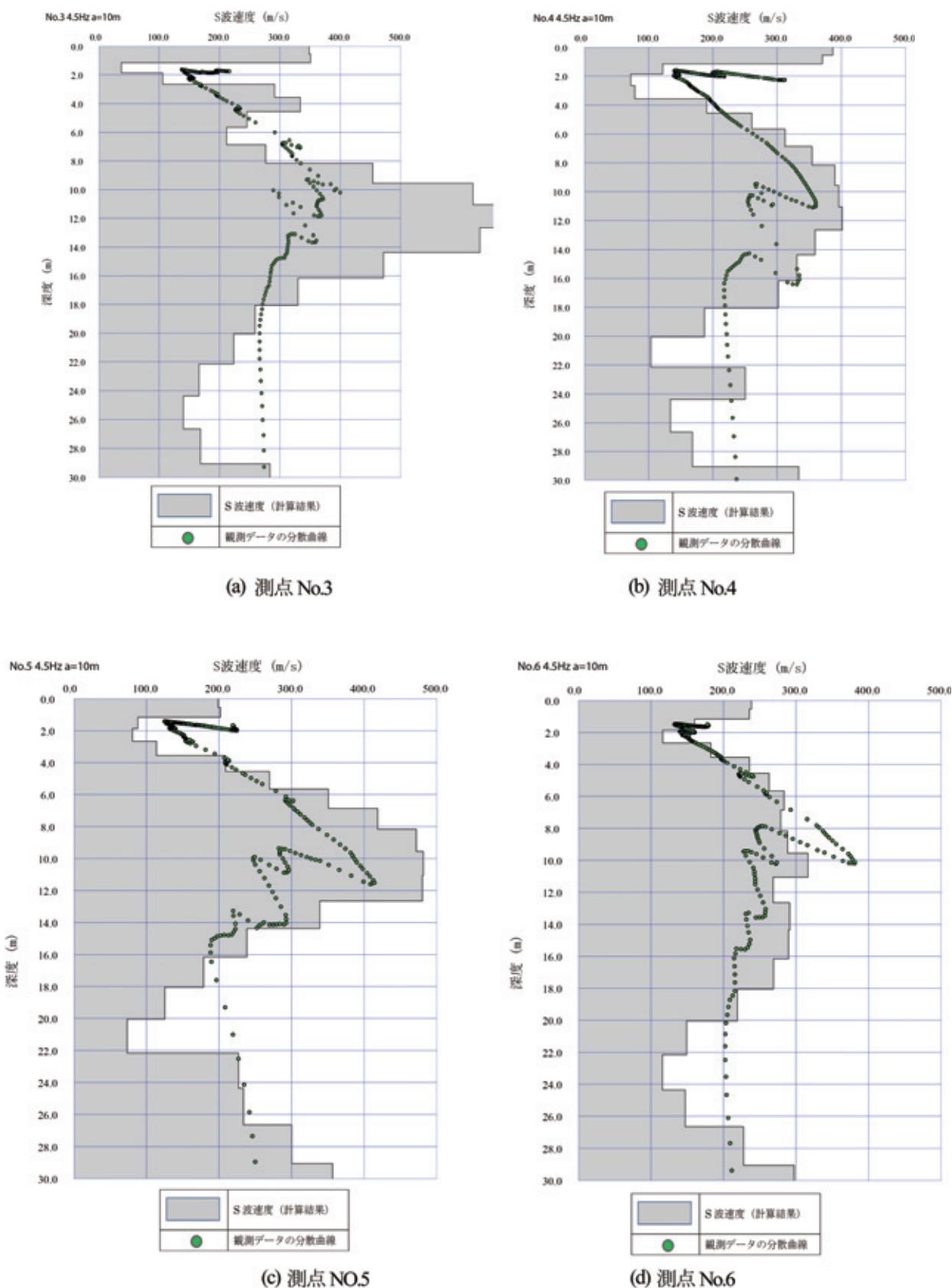
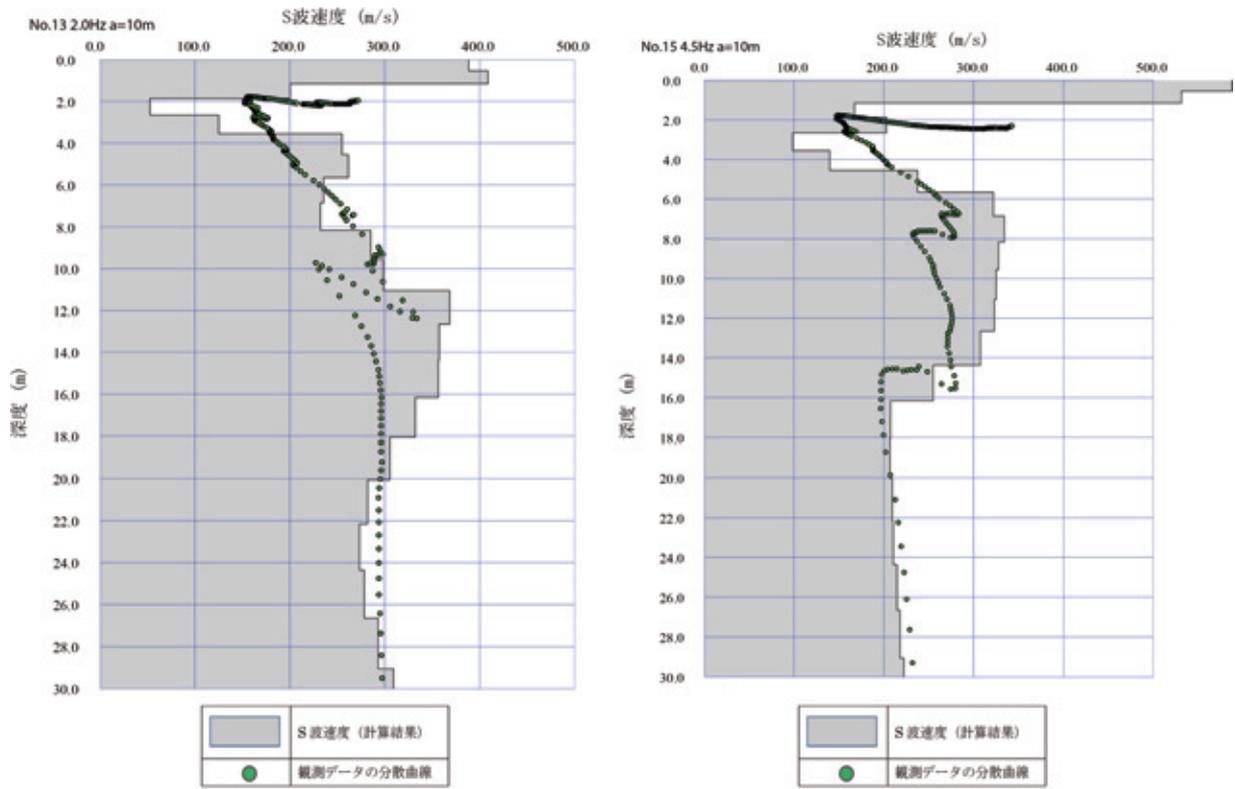
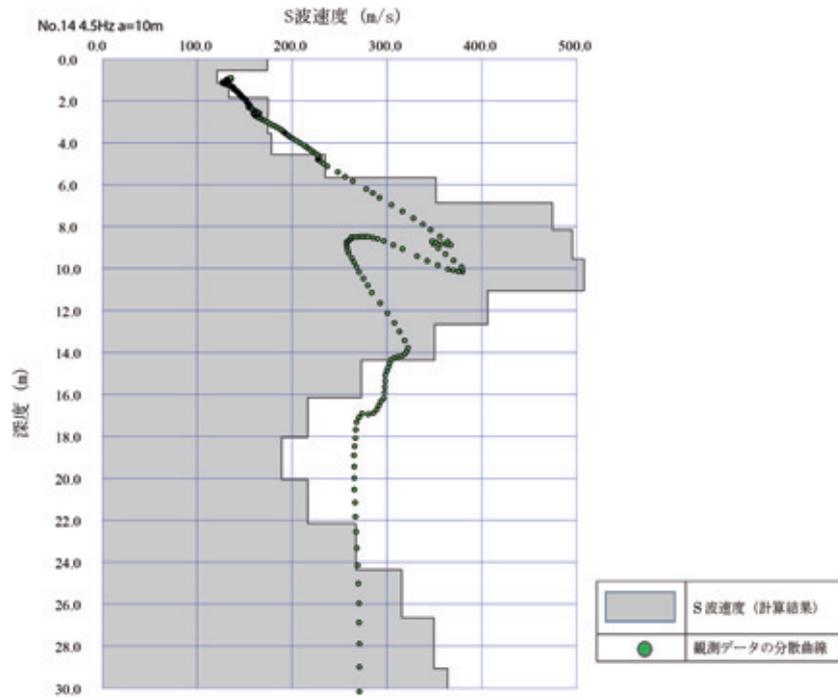


図-10 東竹之丸地区のS波速度構造 (2)



(a) 測点 No.13

(b) 測点 No.14

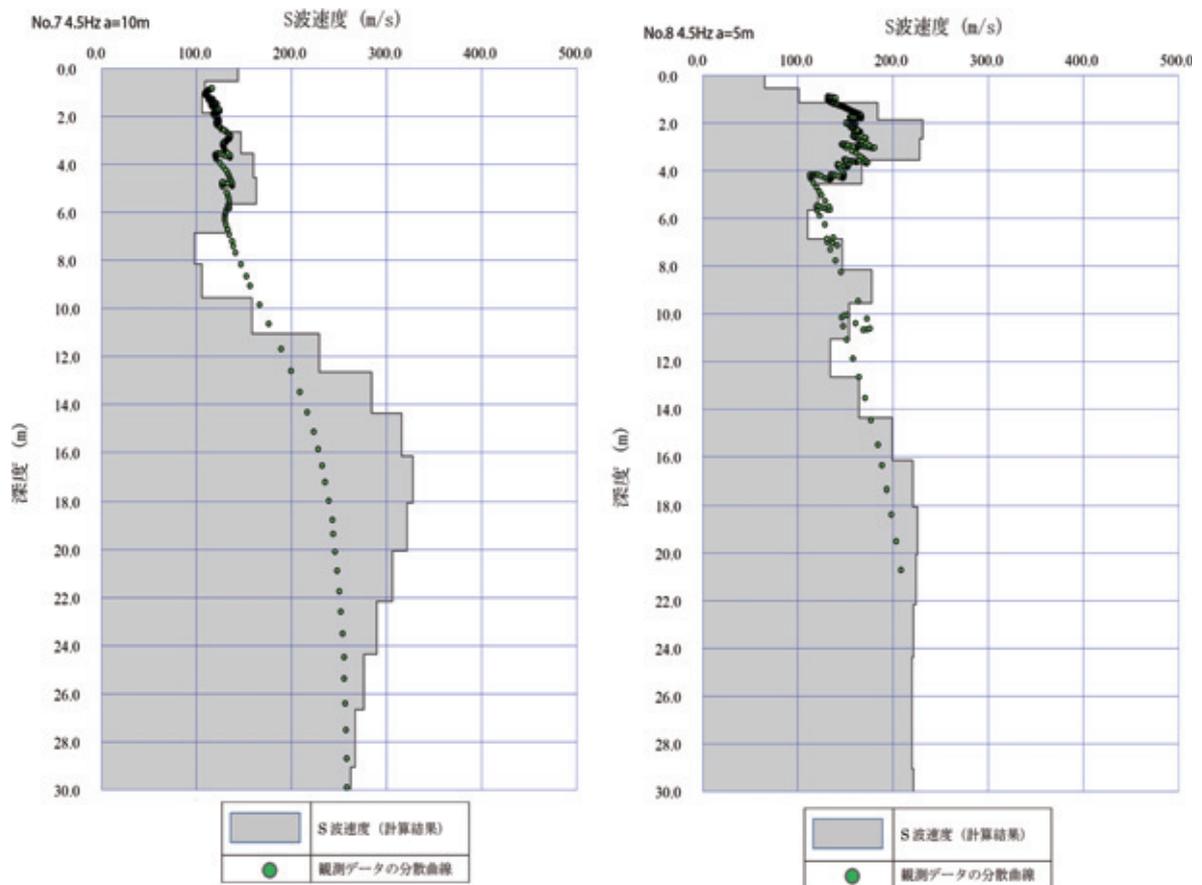


(c) 測点 No.15

図-11 東竹之丸地区のS波速度構造 (3)



図-12 本丸御殿地区の微動アレイ位置



(a) 測点 No.7

(b) 測点 No.8

図-13 本丸御殿地区のS波速度構造 (1)

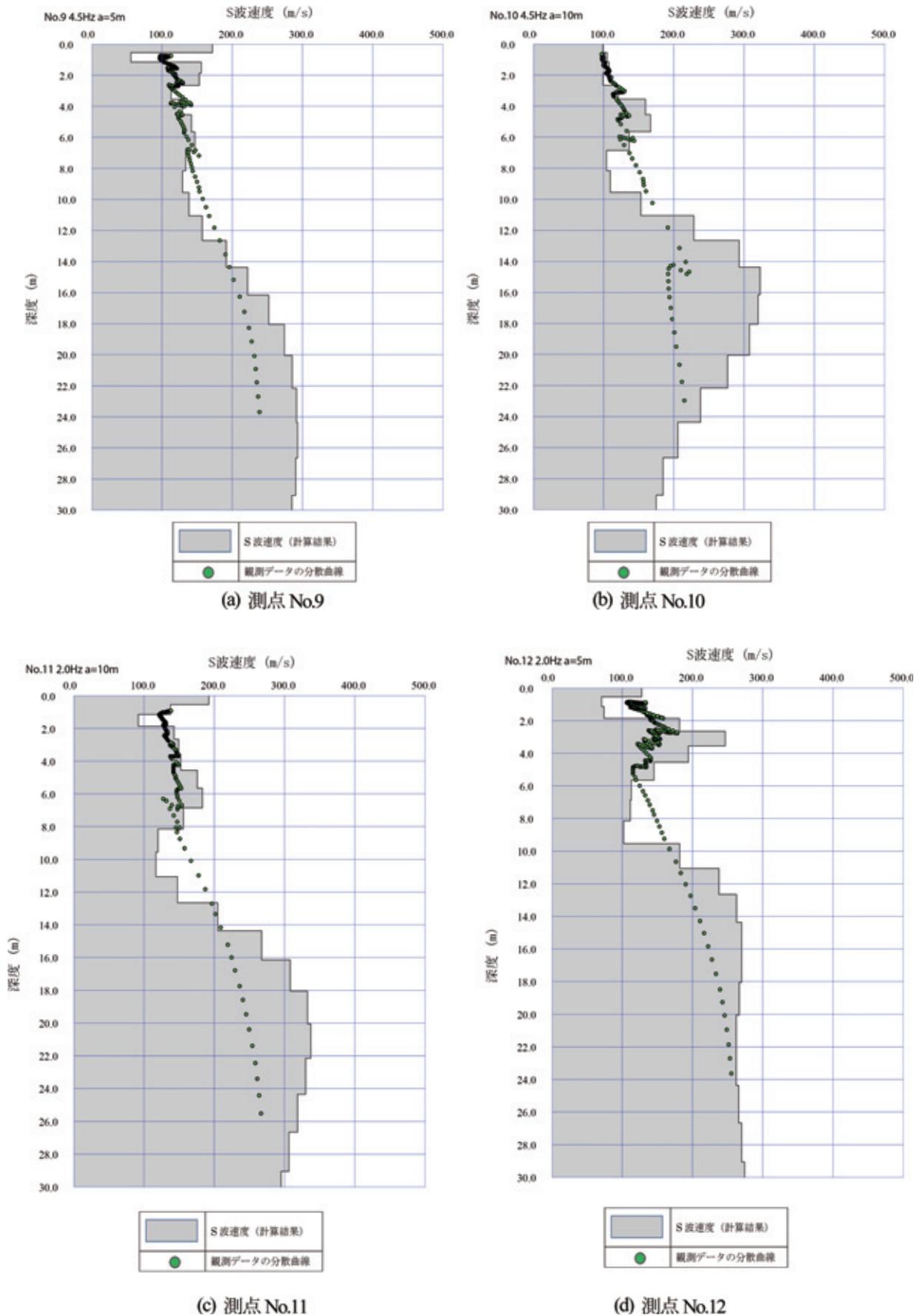


図-14 本丸御殿地区のS波速度構造 (2)

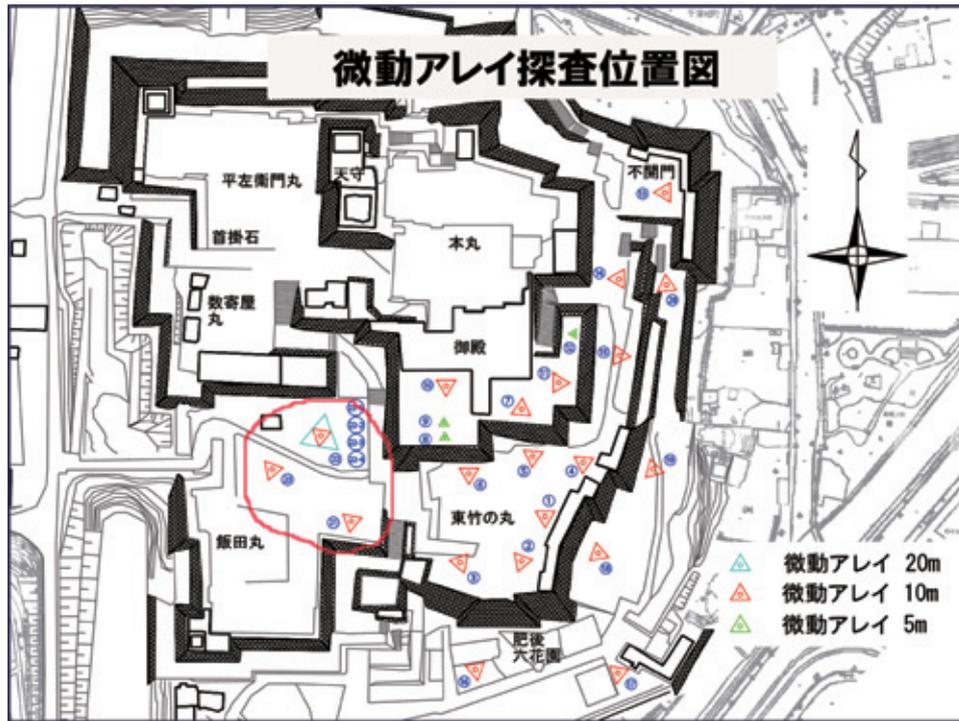


図-15 飯田丸地区の微動アレイ位置

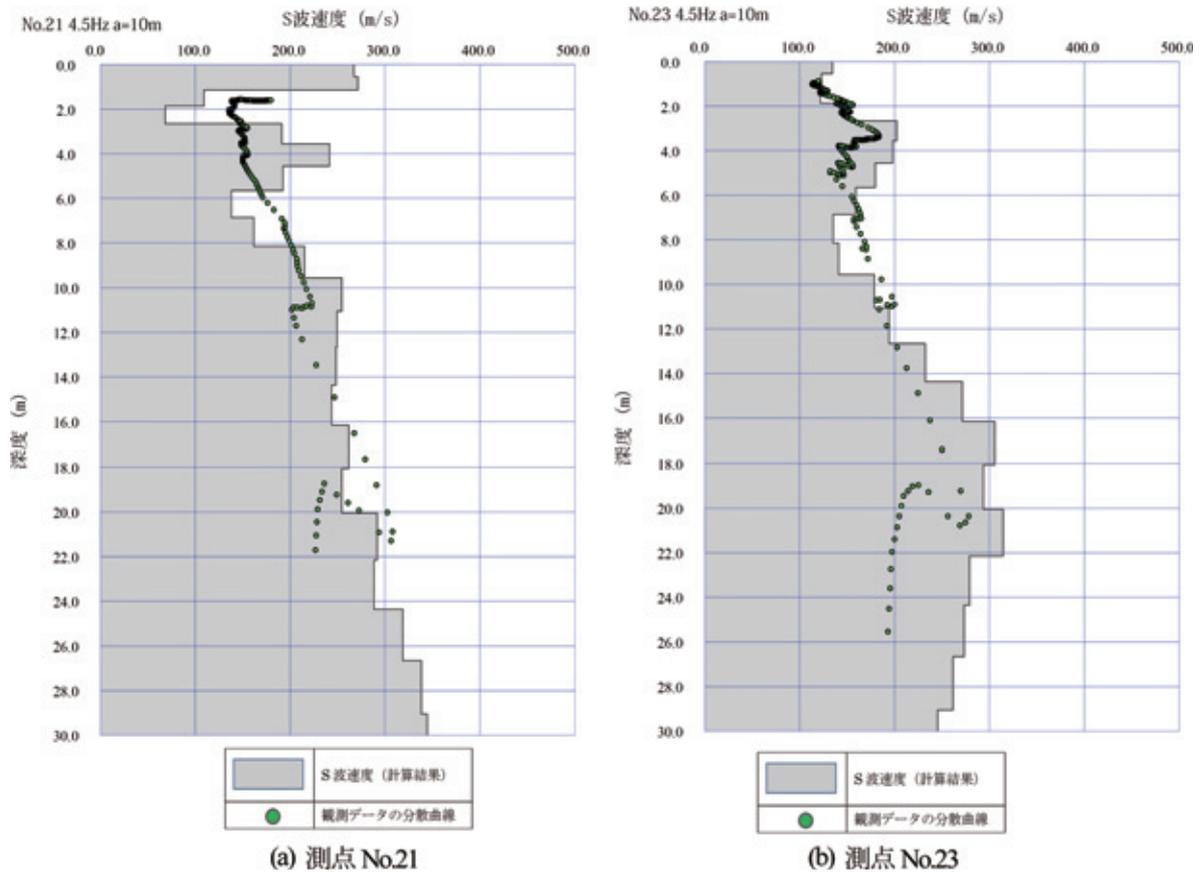


図-16 飯田丸地区のS波速度構造 (1)

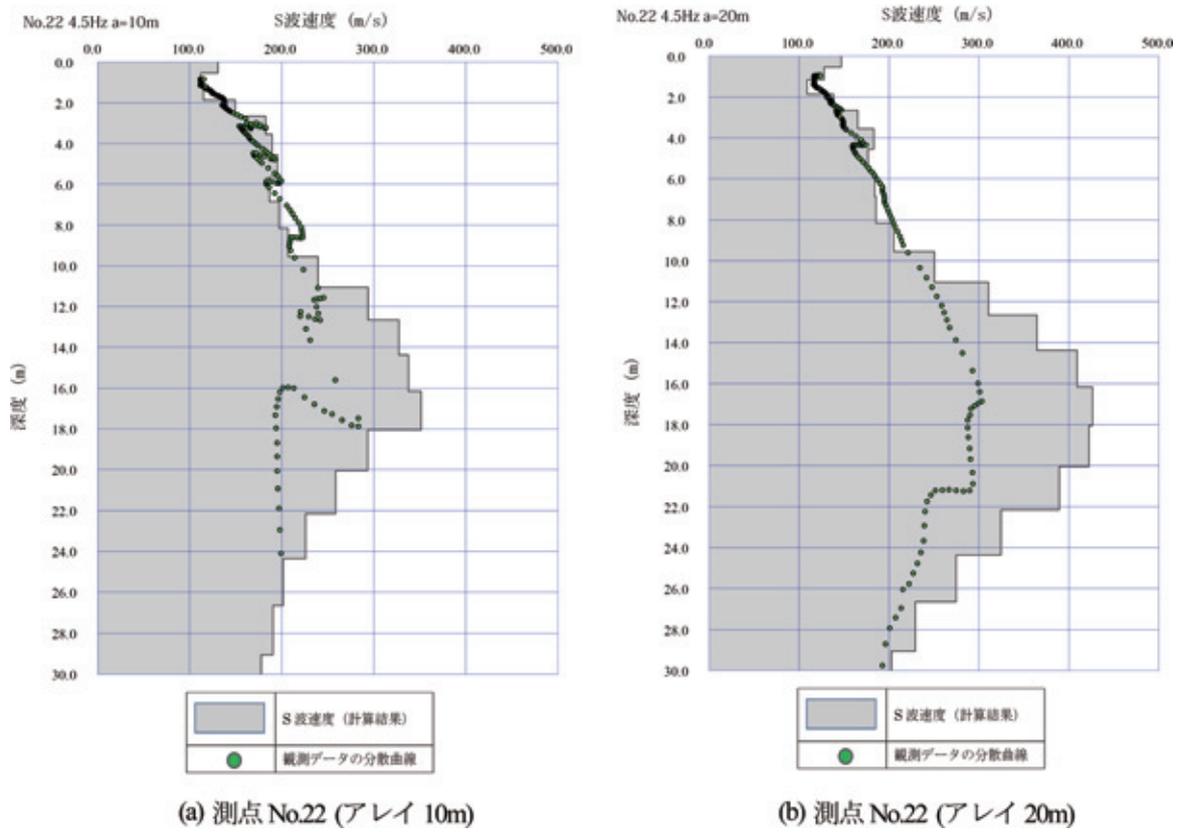


図-17 飯田丸地区のS波速度構造 (2)

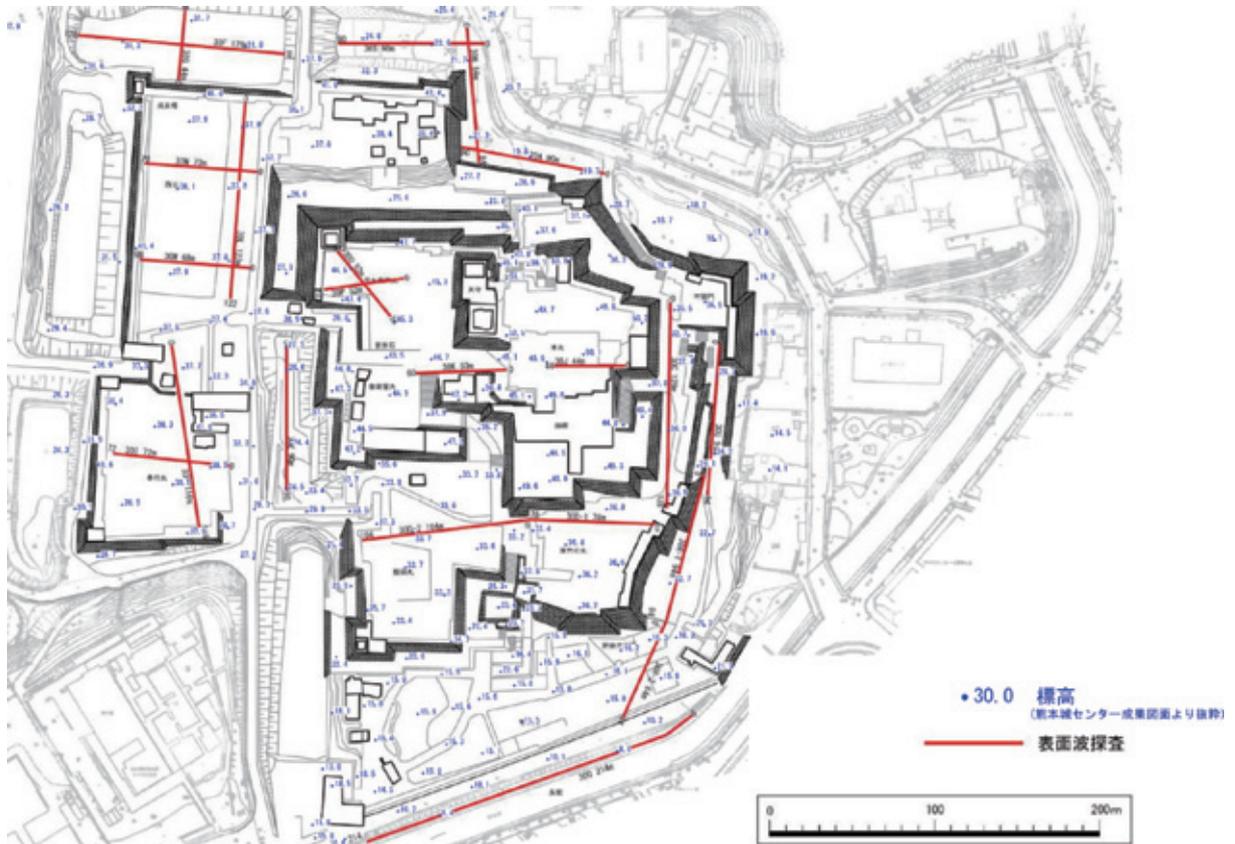


図-18 地盤標高図

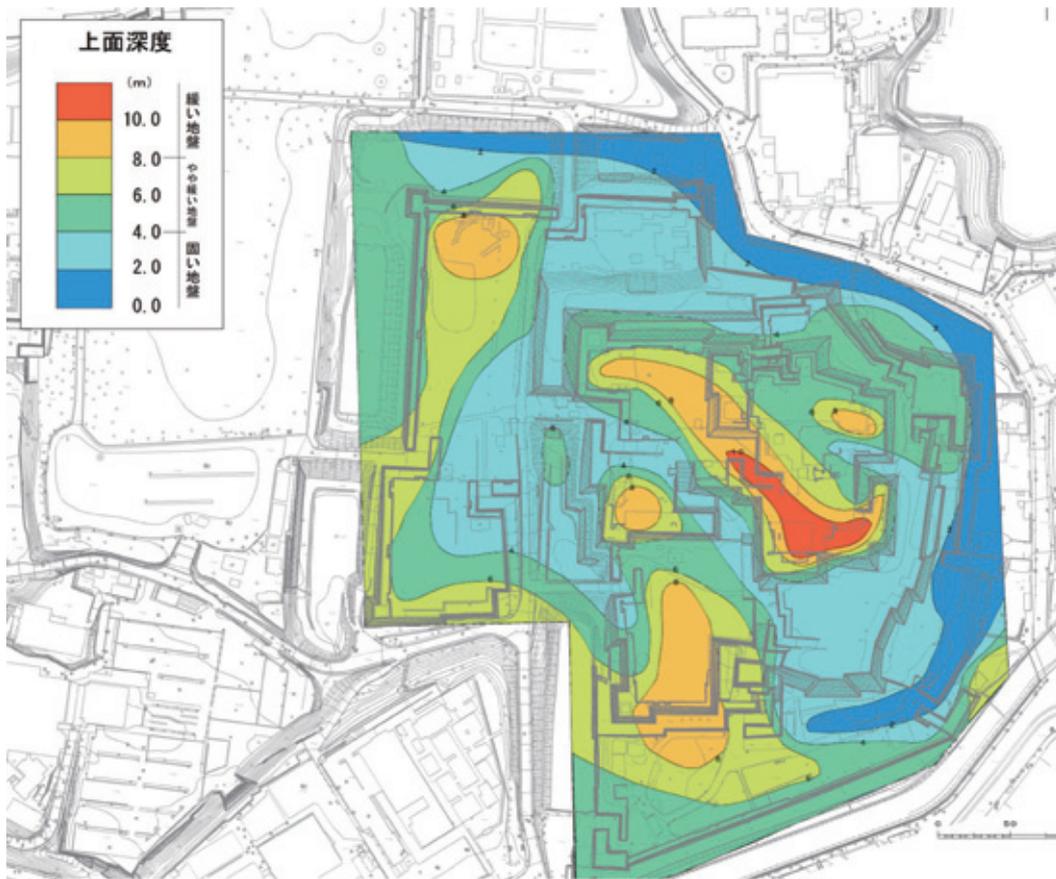


図-19 地表面からのS波速度150m/s

謝辞

本論文は、(社)土木学会地震工学委員会「城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会(委員長:橋本隆雄)の活動の一環であり、公益財団法人鹿島学術振興財団の助成金、土木学会地震工学委員会の助成金及び「平成29年度重点研究課題」の助成金を活用させていただきました。また、熊本城内での石垣等調査にあたっては、熊本城調査研究センターの鶴嶋文化財保護主幹、東園主任技師、嘉村文化財保護主事等の職員の皆様にご同行いただきました。末筆ながら記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本隆雄, 斎藤猛:比抵抗2次元探査及び表面波探査による熊本城石垣等の地盤調査, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.65-74, 2017.
- 2) 鶴嶋俊彦:「熊本城の歴史と地震被害」季刊『永青文庫』No.97号, 18p~20p, 公益財団法人永青文庫 2017.
- 3) 大角 恒雄:加藤家時代の遺構は細川家時代のものより地震に強いのか?, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.31-38, 2017.
- 4) 岡田 廣, 松島 健:長周期微動を用いた地下構造の推定, 第76回学術講演会講演論文集, 物理探査学会, 1987.4.
- 5) 岡田 廣, 松島 健:長周期微動を用いた地下構造の推定,

物理探査第43巻第1号, 1990.

- 6) 凌 魁群・岡田 廣:model適用による微動に含まれる表面波の位相速度の推定法, 第88回学術講演会講演論文集, 物理探査学会, 1993.5.
- 7) Ludwig et.: ポアソン比と密度の関係, 1970 in the Sea, vol.4,Part1
- 8) S波速度とP波速度(未固結層), 物理探査学会, 土木物探研究会, 1970.
- 9) S波速度とP波速度(岩盤)」物理探査学会 土木物探研究会, 1970.