

(一財) 日本建設情報総合センター

研究助成事業実績報告書

助成番号：第 2021-2 号

常時微動探査による地層区分を援用した城郭三次元地盤図の構築

2023 年 4 月

香川大学創造工学部

山中 稔

## 研究者紹介

山中 稔 (やまなか みのる)

現職：香川大学創造工学部 環境デザイン工学領域 教授 (博士(工学))

## 目次

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1. はじめに                    | 1  |
| 2. 研究対象地である金沢城跡について        |    |
| 1) 地形概要                    | 2  |
| 2) 石垣変状箇所                  | 3  |
| 3. 三次元地盤図作成手法              |    |
| 1) 三次元地質解析システム             | 4  |
| 2) 既存ボーリングデータの入力           | 4  |
| 3) 地質区分と地質対比               | 4  |
| 4) 地質境界面モデルの作成             | 5  |
| 5) グリッドデータから NURBS サーフェス作成 | 5  |
| 6) 三次元地盤図の構築手法             | 6  |
| 4. 地層区分への常時微動探査の適用について     |    |
| 1) 常時微動探査について              | 6  |
| 2) 微動計測器について               | 6  |
| 3) 測定方法                    | 7  |
| 4) 常時微動解析について              | 7  |
| 5. 金沢城跡における常時微動探査          |    |
| 1) 常時微動探査実施地点              | 8  |
| 2) H/V スペクトルの特徴            | 9  |
| 6. 常時微動による地層区分の方法          |    |
| 1) 金沢城跡における解析手順            | 11 |
| 2) 解析に使用する $V_s$ について      | 11 |
| 3) ニノ丸における $V_s$ について      | 15 |
| 4) 金沢城跡における微動解析結果          | 18 |
| 7. 金沢城三次元地盤図の構築            |    |
| 1) 地質区分について                | 22 |
| 2) 既存の三次元地盤図と新規ボーリングデータ    | 22 |
| 3) 常時微動解析結果の入力と三次元地盤図の構築   | 24 |
| 4) 常時微動解析結果の導入による地盤図の変化    | 26 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 8. 石垣被害に及ぼす地盤要因解析              |    |
| 1) 検討方法                        | 30 |
| 2) 検討に用いる二次元断面図                | 30 |
| 3) 石垣変状部と健全部における石垣背後盛土の比較と考察   | 32 |
| 4) 石垣変状部と健全部における石垣背後盛土の体積比較と考察 | 33 |
| 9. おわりに                        |    |
| 1) 本研究の主な成果                    | 35 |
| 2) 今後の課題と展望                    | 35 |
| 参考文献                           | 36 |



## 1. はじめに

安土桃山時代から江戸時代初期に築造された近世城郭石垣の被災事例が近年多発している。2011年東日本大震災で被災した小峰白川城の石垣箇所は谷地形を埋め立てた盛土箇所であったことや、2016年熊本地震による熊本城の石垣箇所の多くは過去に修復履歴がある箇所と重なっており弱い地盤が関与したものと考えられている。また、2018年豪雨により大規模に崩落した丸亀城石垣箇所は、集水地形上の盛土がすべり破壊を生じて石垣の崩落を助長した。このように城郭石垣の被害には地盤が大きく関与していると言える。

近世城郭の多くは、自然地形を生かしつつも、一方でそれを大きく改変する造成により成立している。縄張りと呼ばれる城郭の建物・石垣・堀・門等は、攻撃と防御を考慮した上で威厳を持たせた城郭となるよう、自然地形を巧みに利用した配置となっている。近世城郭に見られる天守閣は、一般には小高い山や丘陵地形の先端部の高くそびえる位置に配置されることが多く、天守閣が位置する本丸や、一段下がった二の丸、三の丸は、自然地形の凹凸のある起伏を平坦にするために、すなわち大規模な切土や盛土工事により土地が造成される。このことから、旧地形で谷部では軟弱な盛土が厚くなっている。

本研究で対象とする金沢城は、我が国の代表的な近世城郭である。金沢城は小立野台地先端に立地する平山城であり面積約30万 $\text{m}^2$ の広域に及ぶ。金沢城では石垣変形の大きい箇所は石垣背面が傾斜地であることや、旧地形が谷地形であった箇所に埋土や盛土をした箇所であることが経験的に分かっている。石垣高さが高い箇所では石垣下部が大きく孕んでおり、背面地盤が軟弱性による過度な土圧の発生が考えられる。すなわち、地盤の悪さが石垣の変形を増大させていることが容易に推定できる。

文化財指定地内での地盤調査は、地盤を破壊するボーリング調査や発掘調査によるものがほとんどである。地盤であったとしても、歴史情報を包含する文化財であり、破壊をとまなう地盤調査は極力避ける必要がある。貴重な文化財ともいえる地盤を破壊することなく調査する方法として物理探査手法がある。文化財調査においては、物理探査手法のなかでも、地中に埋設された遺構を検出する地中レーダーの研究は多くなされているものの、本研究で用いる地盤振動特性から地層区分を解析する常時微動計測を、文化財地盤に適用した事例は仙台城や彦根城に若干あるのみである。一方、本研究で実施する三次元地盤図の作成事例は、城郭においては皆無である。わずかに、大坂城敷地内でのボーリング調査結果をもとに試みられているが、敷地面積に対してボーリング密度が荒く、旧地形の詳細把握には至っていないのが現状である。本研究のように、城郭地盤の旧地形の詳細把握を目的とした高精度な三次元地盤図作成のために、高密度に物理探査を実施する研究は初めてと言える。

本研究は、文化財地盤を非破壊で調査可能な常時微動により三次元地盤図の構築を目的とする。発掘調査が蓄積される金沢城を調査対象とし、常時微動測定を高密度かつ高精度に実施し、得られる振動特性を解析することで地層区分を得て、金沢城の三次元地盤図を構築する。構築した金沢城三次元地盤図には旧地形が詳細に解明できていることから、軟弱な盛土地盤が起因とされることが多い城郭石垣の経年的変形進行の維持管理や、地震や豪雨等の自然災害に弱い地盤箇所の事前把握が可能となる。





## 2) 石垣変状箇所

図-2 に、金沢城跡における石垣箇所と石垣変状箇所を示す。金沢城内における石垣の総面積は約 30,000m<sup>2</sup> で、確認されている石垣で 471 面に及ぶ。現在では、約 9 割以上の石垣で 測量調査が完了している。調査により判明している石垣変状箇所は、計 26 箇所となっており、表-1 に石垣変状箇所の名称を示す。なお、表-1 内の石垣変形番号は図-2 中の番号と対応している。

表-1 金沢城跡石垣変状箇所一覧

| 変形箇所<br>番号 | 石垣<br>面数 | 名称             | 位置    |
|------------|----------|----------------|-------|
| 1          | 1        | 数寄屋屋敷西堀縁       | 二ノ丸   |
| 2          | 2        | 数寄屋屋敷西堀縁       |       |
| 3          | 4        | 数寄屋屋敷西         |       |
| 4          | 3        | 数寄屋門台          | 玉泉院丸  |
|            | 3        | 数寄屋門下泉水縁石垣北櫓台  |       |
| 5          | 1        | 玉泉院丸北(庭籠下)     |       |
|            | 1        | 玉泉院丸北(御居間先下)   |       |
| 6          | 4        | いもり坂脇          |       |
| 7          | 2        | いもり坂東          |       |
| 8          | 3        | 稲荷屋敷           | 新ノ丸   |
| 9          | 1        | 本丸南(近代階段)      | 本丸    |
| 10         | 1        | 蓮池堀縁西岸         | 蓮池堀   |
| 11         | 1        | 東ノ丸東(上段)       | 東ノ丸   |
|            | 1        | 東ノ丸東(下段)       |       |
|            | 1        | 東ノ丸東           |       |
| 12         | 1        | 東ノ丸北(丑寅櫓下～唐門前) |       |
|            | 2        | 東ノ丸北(丑寅櫓下)     |       |
| 13         | 1        | 水ノ手門続(北)       |       |
| 14         | 1        | 水ノ手門下(北)       |       |
| 15         | 1        | 東ノ丸附段北面        | 東ノ丸附段 |
| 16         | 1        | 東ノ丸附段東面        |       |
| 17         | 1        | 東ノ丸唐門前         | 東ノ丸   |
| 18         | 1        | 本丸北(弾薬庫跡)      | 本丸    |
| 19         | 2        | 三ノ丸北東(隅櫓台)     | 三ノ丸   |
| 20         | 1        | 三ノ丸北(九十間長屋下)   |       |
| 21         | 1        |                |       |
| 22         | 1        | 新丸東            | 新丸    |
| 23         | 1        | 新丸北東           |       |
| 24         | 3        | 尾板門北東          |       |
| 25         | 1        | 御宮東            | 御宮    |
| 26         | 5        | 御宮南東           |       |



### 3. 三次元地盤図作成手法

#### 1) 三次元地質解析システム

本研究で作成する熊本城三次元地盤図および金沢城三次元地盤図は、三次元地質解析システム(GEO-CRE)を用いて行う。GEO-CREの主な機能としては、地質モデリング、構造物モデリング、モデル分析機能、基本地質データ解析、CG・可視化、管理、データ入出力である。本研究において、三次元地質解析システムを用いて金沢城三次元地盤図を作成する際に用いたデータは、主に金沢城の平面図(CADデータ)やボーリングデータ、常時微動解析により得られる地質データである。

#### 2) 既存ボーリングデータの入力

ボーリングデータをGEO-CRE内で可視化するためには、ボーリング柱状図の内容をXMLファイル形式にして保存しておく必要がある。そのためにXML Chartsを用いる。XML Chartsは「地質・土質調査成果電子納品要領 平成28年10月」に記載されている「ボーリング柱状図作成およびボーリングコア取扱い・保管要領(案)・同解説 平成27年6月」にて定められた、通称JACICの土質様式である。

入力事項は、「標題」、「土質区分」、「色調」、「観察記事」、「標準貫入試験」の5項目である。

図-3に、ボーリングデータを可視化した様子を示す。XMLファイル形式で保存されているボーリングデータをDFX変換した後、GEO-CRE内にインポートすることで、画面上にボーリングデータを可視化することができる。

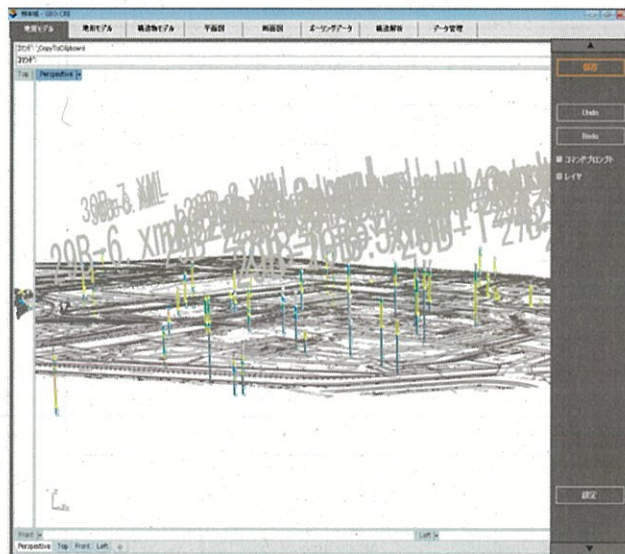


図-3 ボーリングデータを可視化した様子

#### 3) 地質区分と地質対比

三次元地盤図を作成するにあたり、どのように層の区分を行うか決める必要がある。金沢城においては、比較的浅い位置までのボーリングデータが大半であるため、盛土と地山の2層構造の区分で三次元地盤図の構築を行うこととした。

三次元地盤図を作成していく第1段階として、地質対比を行っていく。地質対比の進め方



としては、初めに既存の資料で作成されている地盤想定断面図を参考にして、断面図作成に使用されたボーリングデータ間で対比線を引いていく。断面図上のボーリングデータ同士をつなぎ終えたら、平面図等を参考にして標高や地形などを確認しながら、その他のボーリングデータとも対比線を結んでいく。

#### 4) 地質境界面モデルの作成

三次元モデルを作成する第二段階として、地質対比の結果を基に地質境界面モデルの作成をしていく。まず、様々な地質境界面を三次元的に表す際に、1つのアルゴリズムのみでカバーするのは非常に困難である。そのため、GEO-CREにおける地質境界面計算アルゴリズムはBS-Horizon, NURBS, Tinの3種が備わっている。それぞれの適用範囲に応じて地質境界面サーフェスの計算を行っていく。本研究において、熊本城および金沢城三次元地盤図作成に伴う地質境界面モデルの作成に使用した主なアルゴリズムは、BS-Horizon, NURBS, の2つである。TinはNURBSでサーフェスを作成する前段階として、暫定的な境界面の形状を確認するために使用した。

#### 5) グリッドデータよりNURBSサーフェスの作成

BS-Horizonにより、サーフェスモデルの計算を行うと、GEO-CREのフォルダ内にグリッドデータとして保存される。そのため「グリッドよりNURBS作成」のツールを開いてtxtファイル形式で保存されているグリッドデータを選択することで、サーフェスモデルの推定の際に指定した出力範囲に、NURBSサーフェスが作成される。

NURBSサーフェスの作成にあたり、金沢城跡においては「地山層」の境界面作成には、ボーリングデータより地質対比を行って作成した点群を用いて計算を行ったが、「表層・盛土」の部分については、地質対比から作成した点群では、表層部分を詳細に表現するのは困難であったため、国土地理院より熊本城周辺の10mメッシュの点群データをダウンロードして、NURBSサーフェスを作成した。

図-4に、金沢城跡における地表面のNURBSサーフェスを示す。

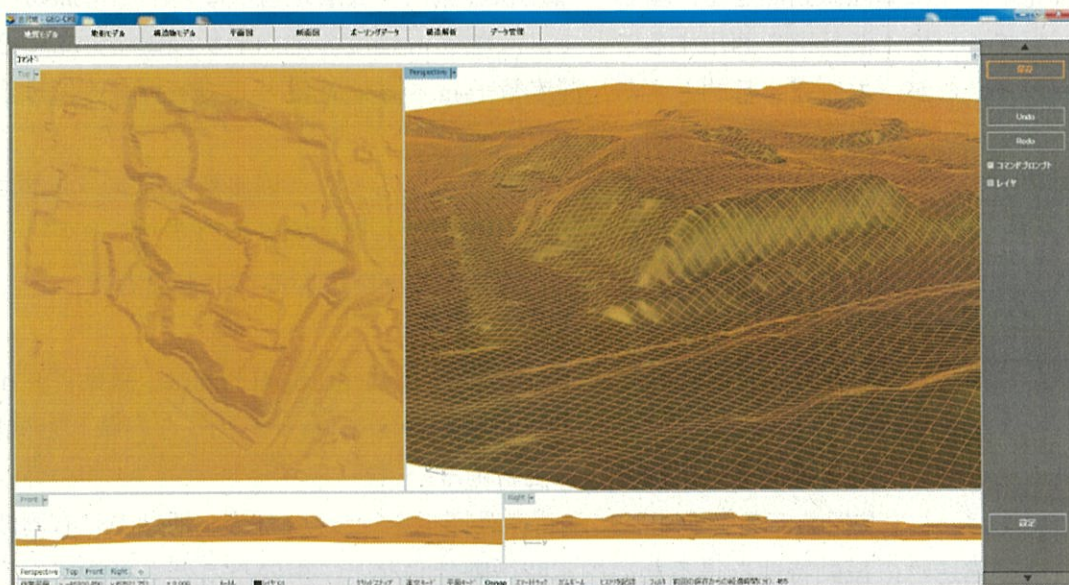


図-4 金沢城跡における地表面サーフェス



## 6) 三次元地盤図の構築手法

作成した各層の地質境界面モデルを用いて、三次元地盤図の構築を行っていく。まず GEO-CRE 内で三次元モデルの基盤となる地層ソリッドを作成するためのレイヤをつくり、三次元モデルの作成予定の範囲に合わせて直方体ソリッドを作成する。この直方体ソリッドを地質境界面モデルで分割することで、各層ごとに三次元モデルを作成する。作成した地層モデルは各層ごとの色調に合わせて色を設定しておく。各層の地層モデルの作成順序としては、原則下層側から順に作成していく。また、地質境界面が交差している場合や、間の層に関しては、複数の地質境界面モデルを使ってソリッドの分割を行う必要がある。このソリッドを分割する作業では、分割する箇所が微小な場合や分割部分が複雑になっている場合には、エラーになって上手く分割ができない場合がある。そのような際には、鉛直方向の縮尺を大きくするなどして、地形の凹凸をはっきりさせることで、分割が可能となる。

## 4. 地層区分への常時微動探査の適用について

### 1) 常時微動探査について

地震被害と地盤の S 波速度  $V_s$  は相関性が高いことが広く知られている。地盤を破壊しない物理探査による地盤の  $V_s$  を得る手法の一つに常時微動探査がある。常時微動探査は、調査地の地質構造が水平成層状態であると仮定できる場合に用いられることが多く、表層地盤構造と基盤との物性値のコントラストがはっきりしている地盤で有効とされている<sup>1)</sup>。そのため、主に火砕流堆積物で構成されている熊本城跡には適用可能であると考えた。

常時微動探査により得られる H/V スペクトルから地盤構造を推定しようとする研究はこれまでに多くなされており<sup>2),3)</sup>、基盤層と表層地盤のインピーダンス比が大きく、基盤と表層の 2 層化でモデルが可能であるような地盤である場合、微動の H/V の卓越振動数から簡易的な式より、基盤深さの推定が可能であることが示されている。

本研究と同様に単独微動測定を、李ら<sup>4)</sup>は彦根城城山の表層地盤層厚の抽出に簡易な 2 層構造として 4 分の 1 波長則を適用することで、深さ数 m 程度の地山形状の概略分布の把握を可能としているが、本研究で目的とする、深度数十 m を多層地盤として解析するには至っていないのが現状である。

なお、H/V スペクトルを用いた地層区分では、着目するピーク周波数の選定が非常に重要となる<sup>5),6)</sup>。着目するピーク周波数の選定には、対象とする地層境界面の深度を参考にする必要があり、その際にはボーリング柱状図などの既存データを用いることとなる。

### 2) 微動計測器について

本研究で用いた微動計測器は、McSIES-AT 3ch である。McSIES-AT 3ch は、微動アレイ探査および常時微動探査用データロガーである。これは、GNSS、バッテリーを内蔵した機器で、速度計の 3 成分ジオフォンを外部に接続して使用する。

本研究では、この装置を複数台使用して常時微動探査を行った。また、地盤の固有周波数、振動特性や構造物の振動特性を得るための常時微動計測などに用いることも可能である。電源を入れるだけで測定を行うことができ、測定データの回収も無線 LAN 経由で可能となって



いるため、取り扱いが容易である。また、AD変換の際の量子化ビット数が24bitとダイナミックレンジが十分広いため、強さの異なる様々な振動の計測が可能である。

本研究では計7台を用いて測定を実施した。

### 3) 測定方法

常時微動探査は、微動計 McSEIS-AT に3成分ジオフォンを接続して行った。測定を行う際、微動計は方位を合わせて地盤面に水平に設置する。地盤面が軟弱な場合には、長さ5cm程度のスパイクを取り付け、スパイクを地盤面にしっかりと差し込むことで微動計を地盤に密着させた。一方、舗装面のように硬質な地点での設置においては、周辺の小石などを取り除いた後、微動計に高さ調節の可能なレベリングプレートを取り付けて測定を行った。1箇所あたりの測定時間は約20~30分で、走行車両や歩行者による振動の発生が多発すると想定される地点及び時間帯においては、30分で測定を行った。また、効率的に振動を捉えられるように、可能な限りスパイクを使用して測定を行った。また、データ測定の際のサンプリング間隔は、4msecに設定して行った。

### 4) 常時微動解析について

図-5に単純な2層構造の場合の理論的なH/Vスペクトル(基本モード)を示す。H/Vスペクトルは2.4Hz付近に明瞭なピークを持つが、これはSH波の重複反射により計算した地盤の増幅率のピーク、あるいは(式1)に示す1/4波長則により計算される卓越周期(2.5Hz)とほぼ一致していることがわかる。

$$f = \sum V_s / \sum 4H \quad (\text{式1})$$

したがって、同一の地層区分と考えることができ、表層の地盤物性(S波速度)が大きく変わらないと考えられる特定の調査地においては、H/Vスペクトルの形状やピーク周波数から基盤深度や地層区分の水平方向への変化を推定できると考えられる。

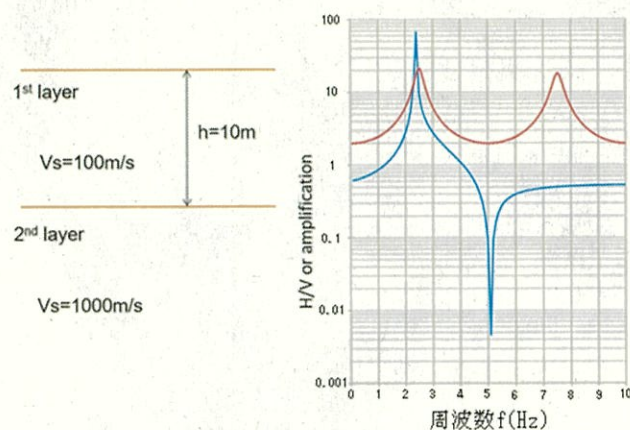


図-5 2層構造モデルにおけるH/Vスペクトル(青線)とSH波の増幅率(赤線)の例



## 5. 金沢城跡における常時微動探査

### 1) 常時微動探査実施地点

図-6に、金沢城跡における常時微動探査の実施地点を示す。金沢城においては、現在石垣の修復を行っている箇所はほとんど無く、石垣天端部付近でも測定が可能な箇所が多かったため、三次元地盤図の精度をより向上させるために測定可能なすべての石垣上に沿って、石垣天端部から約5mの範囲内において10mピッチで測定を行っている。

常時微動探査の実施地点は2020年度のデータが117箇所、2022年度に438箇所の計555箇所となっている。



図-6 金沢城跡における常時微動探査実施地点



## 2) H/V スペクトルの特徴

金沢城内における H/V スペクトルの特徴を調べるために、標高の異なる代表的な 6 地点において H/V スペクトルをまとめた。代表地点はいもり堀(標高約 28.8m), 新丸(標高約 34.1m), 御宮(標高約 42.2m), 三ノ丸(標高約 43.3m), 二ノ丸(標高約 49.7m), 本丸(標高約 58.2m) の 6 地点を選定した。

図-7 に、代表的な 6 地点と比較に使用した微動データの位置図を示す。

代表地点は主に標高が大きく異なり、微動計測データが複数存在している地点を選んでいる。また、三ノ丸と御宮は標高に大きな差はないが、場所が 400m 程度離れているため両方採用している。金沢城内は比較的広く、標高が同じような地点においてもスペクトルの特徴が異なる地点が多く存在するので、細かく特徴を見ていく。

図-8 に、御宮における H/V スペクトルを示す。御宮では、1Hz 付近と 7~8Hz 付近に大きなピークが見られる。また、御宮 1 および御宮 2 は、御宮 3 および御宮 4 に比べて高周波数側のピーク周波数がやや大きくなっており、H/V は小さくなっている。このことから、御宮では東側から西側にかけて盛土厚が大きくなっていることが考えられる。もしくは、東側と西側で盛土部分における  $V_s$  に大きな差が生じており、西側の方が  $V_s$  が小さく、東側に比べて軟弱である可能性が考えられる。

図-9 に、新丸における H/V スペクトルを示す。新丸平均 1~5 では、大きく明瞭なピークが 1 つだけ存在しているのに対して、新丸平均 6~8 では小さなピークが 3 つ、新丸平均 9~10 では小さなピークが 2 つ確認できる。これらの H/V スペクトルの傾向から、新丸の西側から中央部付近にかけては盛土が厚く堆積しており、中央部から東側にかけて盛土が薄くなっていることが考えられる。また、新丸平均 1~5 では、ピークにおける H/V の値が約 2.5 と、他と比べて大きくなっていることから、新丸内において東側よりも西側のほうが軟弱である可能性がある。

図-10 に、二ノ丸における H/V スペクトルと傾向の異なる H/V スペクトルを示す。二ノ丸

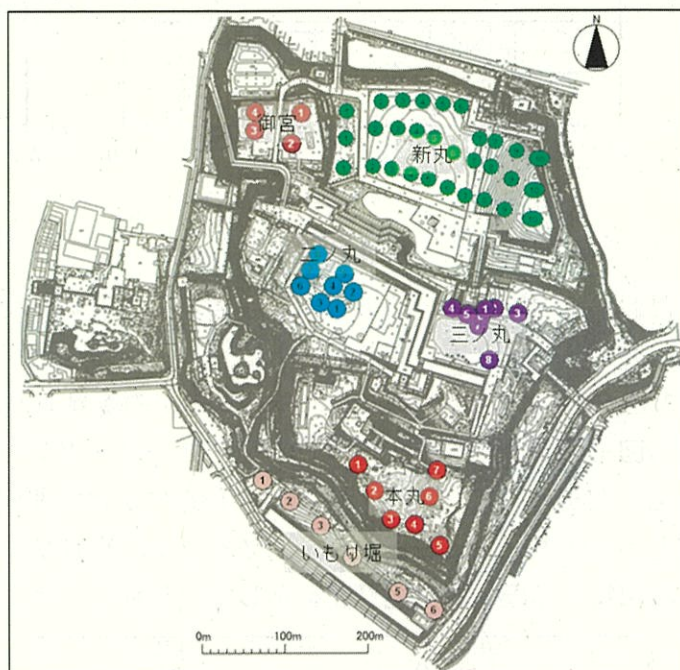


図-7 代表地点の微動データ位置図

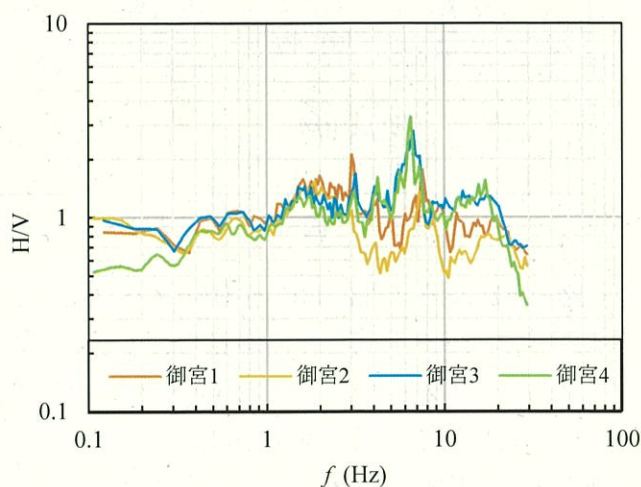


図-8 御宮の H/V スペクトル



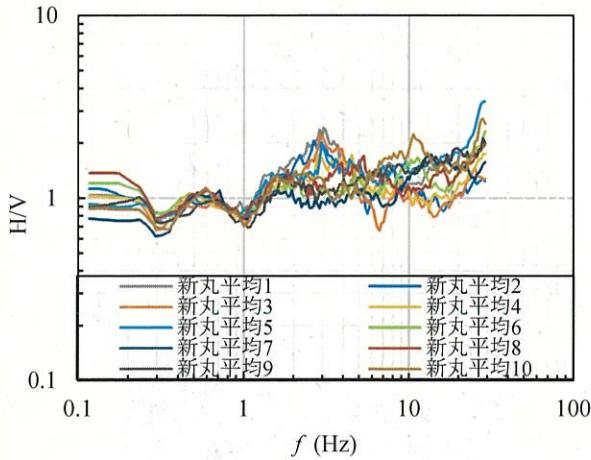


図-9 新丸の H/V スペクトル

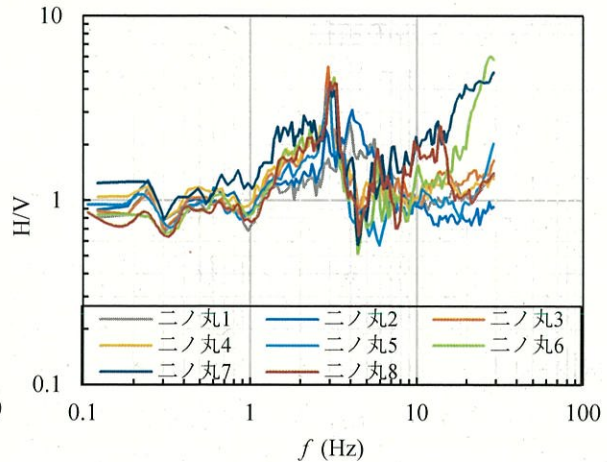


図-10 二ノ丸での H/V スペクトル

における H/V スペクトルでは、どのデータも明瞭なピークは一つだけであった。二ノ丸 1～2 におけるピーク周波数が約 4Hz であるのに対して、二ノ丸 3～8 におけるピーク周波数は約 3Hz であった。この周波数の差は、地山の境界面の深度の違いによるものだと考えられる。

図-11 に、既存報告書<sup>6-2)</sup>におけるボーリングデータを基にした二次元断面図を示す。二ノ丸 1 付近から二ノ丸 3、二ノ丸 6 付近にかけて卯辰山層の境界面の深度が深くなっていることがわかる。このことから、二ノ丸における H/V スペクトルに見られる明瞭なピークは段丘堆積物と卯辰山層の境界面を示しているものと考えられる。

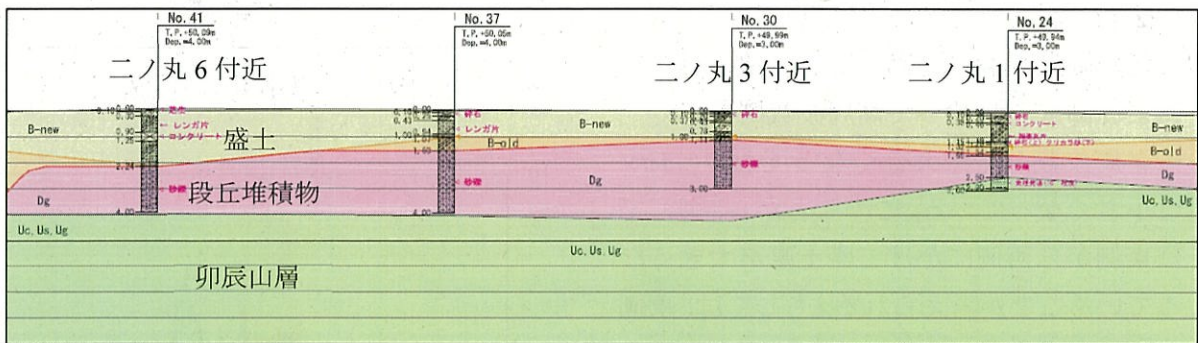


図-11 二ノ丸 1・3・6 付近における二次元断面図<sup>6-2)</sup>

図-12 に、三ノ丸における H/V スペクトルを示す。低周波数側のピーク周波数については、どのデータも同じ傾向が見られる。高周波数側のピークについては、三ノ丸 1～6 については約 5～7Hz 付近にピークがあるのに対して、三ノ丸 7～8 については、約 12Hz 付近にピークが見られる。三ノ丸 1～6 は河北門付近に位置しており、三ノ丸 7～8 は、河北門より南側の鶴ノ丸広場に位置している。これらのことから河北門付近を境に南北で表層地盤構造に大きな変化が生じている事が考えられる。

図-13 に、いもり堀における H/V スペクトルを示す。いもり堀における H/V スペクトルでは、約 5Hz 付近における明瞭なピークが見られるものがほとんどであった。このことから、いもり堀における地層構造は、概ね一定であることが考えられる。また、いもり堀 4 のみピークの山は見受けられるものの、他のデータと比べて H/V の値が小さくなっていて、ピークが



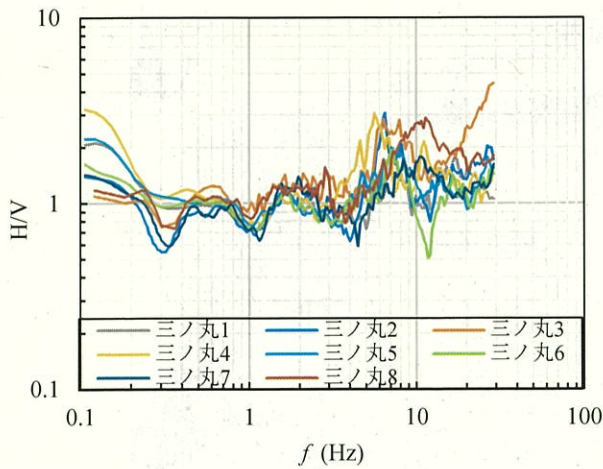


図-12 三ノ丸の H/V スペクトル

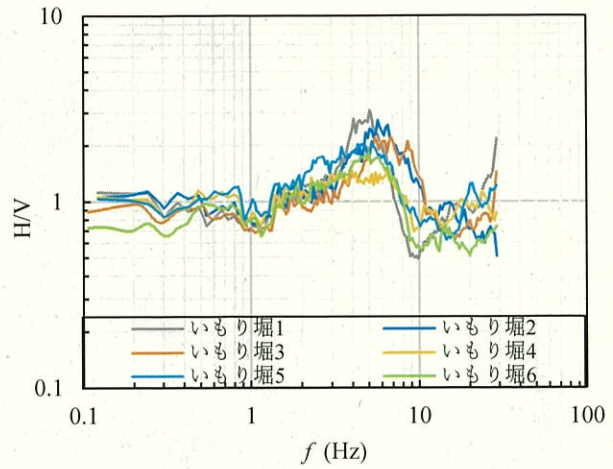


図-13 いもり堀の H/V スペクトル

明瞭ではなかった。この地点のみ、局所的に他とは盛土厚や盛土の硬さに変化があることが考えられる。

図-14 に、本丸における H/V スペクトルと傾向の異なる H/V スペクトルを示す。本丸 1, 2, 4 については、20Hz 付近の高周波帯にピークが一つ存在するのみである。また本丸 3, 5 では、3Hz 付近と 12Hz 付近に明瞭なピークが 2 つ存在している。本丸 6, 7 については、0.6Hz 付近、1~3Hz 付近、8Hz 付近に複数のピークが確認できる。本丸における H/V スペクトルでは、比較的高周波数帯にピークが確認できるデータが多い。本丸は金沢城内において最も標高の高い地点であることや、既存ボーリングデータより盛土厚が 1~2m 程度の地点が多いことなどから、高周波数帯にピークが現れているのだと考えられる。

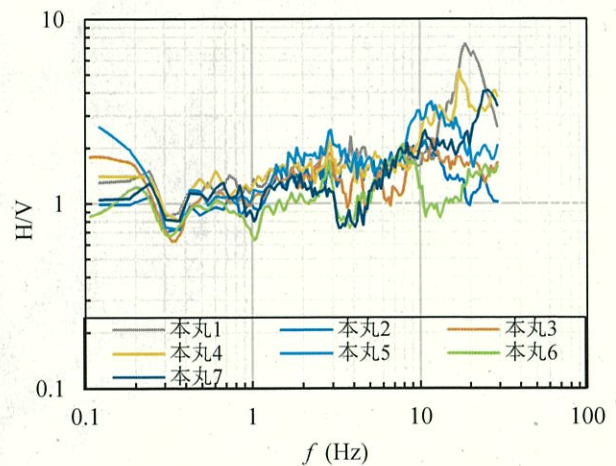


図-14 本丸の H/V スペクトル

## 6. 常時微動による地層区分の方法

### 1) 金沢城跡における解析手順

金沢城跡における常時微動解析は、盛土層と地山層の 2 層構造で行う。そのため、盛土層と地山層の  $V_s$  を決定すれば盛土厚を変化させるのみで解析が行えるため、変数は一つとなる。よって、盛土層に適用する  $V_s$ 、採用するピーク周波数が推定する盛土厚に大きく影響することになるため、これらの値の選定が非常に重要になる。

### 2) 解析に使用する $V_s$ について

解析に用いる  $V_s$  は、今井の式を用いて算出する。また、二ノ丸においては N 値の記載されたボーリングデータは存在しないが、表面波探査を行っているため、表面波探査の結果より  $V_s$  を定める。



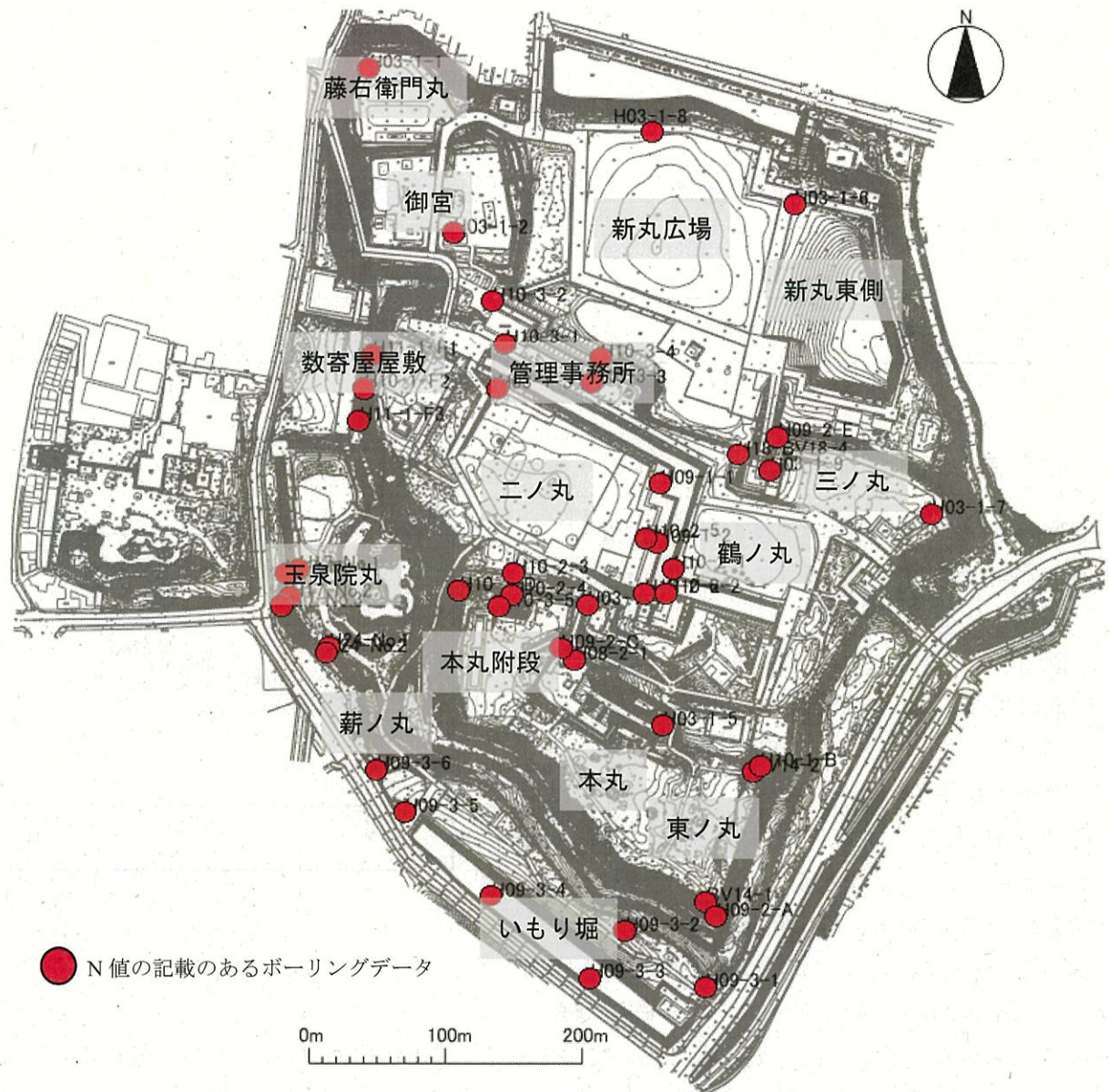


図-15 金沢城跡におけるN値の記載のあるボーリングデータ位置図

図-15に、N値が記載されているボーリングデータの位置図を示す。N値が記載されたボーリングデータを基に、9つのグループに分けて盛土に適用する $V_s$ の計算を行った。

図-16に、盛土に適用する各 $V_s$ の適用範囲を示す。また、表-2に、各 $V_s$ の算出に用いたボーリングデータの組み合わせを示す。図-16に示す平均値1~9は、各ハッチングで示す範囲内の微動データの解析に適用する。また、図中の文字の入っていない赤点はN値が記載されているボーリングデータの位置を示しており、その他の文字の入った点が常時微動探査位置を示している。各平均値の適用範囲は、H/Vスペクトルの傾向の変化や標高の違い、曲輪別に区別して設定している。

表-3に、各地点における盛土層の平均N値と平均 $V_s$ を示す。多くの地点で $V_s$ はおおよそ180(m/s)前後である。一部、御宮で330(m/s)とかなり大きな値となった。これはボーリング柱状図の観察記事より粒径50~100mm程度の礫が多く含まれていたことが原因であると考え



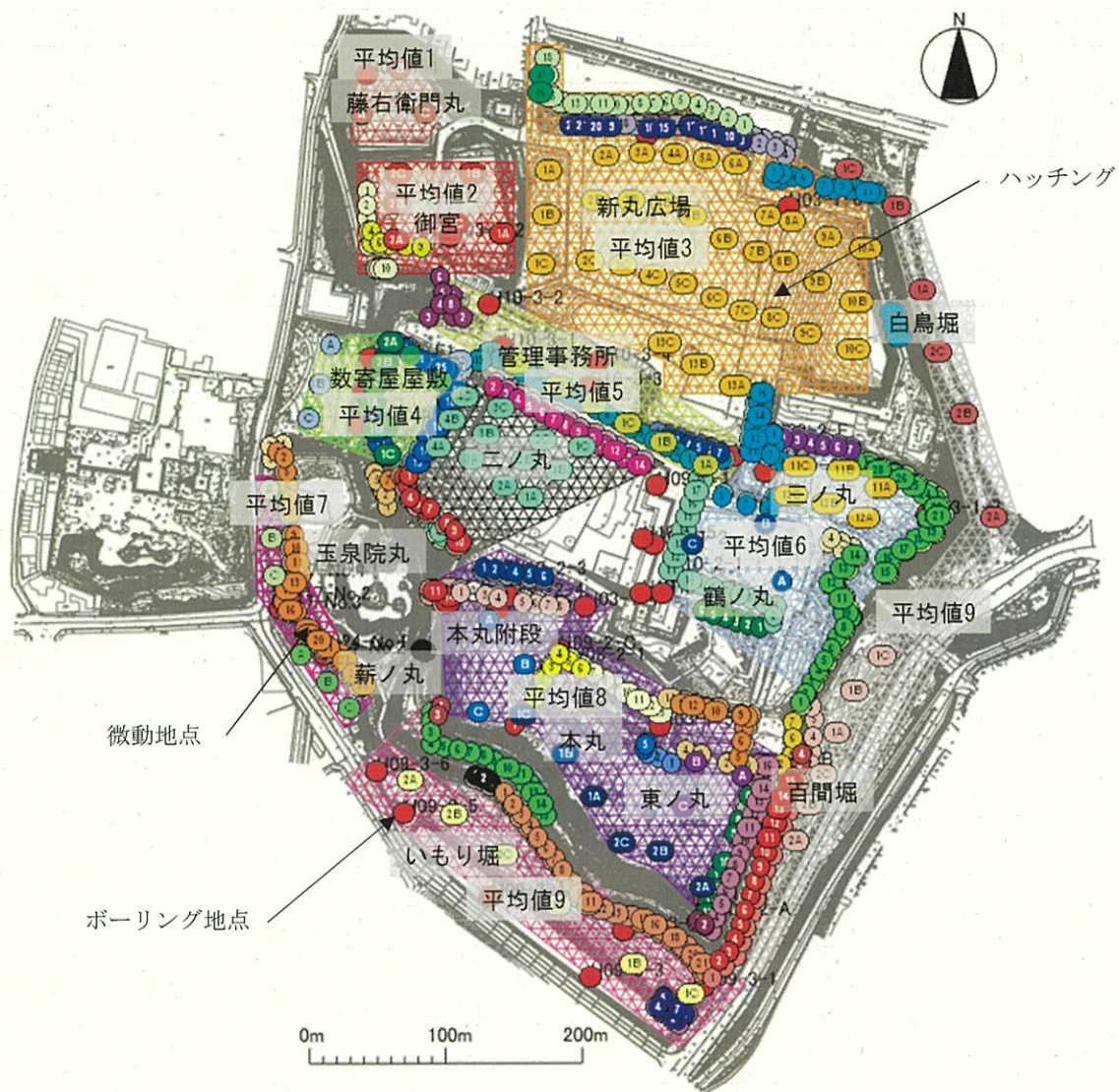


図-16 盛土に適用する平均  $V_s$  の適用範囲

られ、一般的な盛土の  $V_s$  よりもかなり大きな値となっている。また、地山層に適用する  $V_s$  について、深いボーリングデータより算出した値や表面波探査等の結果から、盛土層直下の層では  $V_s$  が約 320~330(m/s) となることが分かっている。この層は黒ボク層や段丘礫層であると考えられるが、本研究では、さらに下層の卯辰山層までを含めて地山層として、2層構造での解析で簡易的に盛土層厚を検出することを目的としている。また、地山層の  $V_s$  を 330(m/s) として解析をしたところ、4分の1波長則を基に計算される理論値波形において、ピークが現れなかった。そのため、もっと  $V_s$  を大きく設定する必要がある。

図-17 に、地山層の  $V_s$  の違いによる理論値波形の変化を示す。盛土の  $V_s$  と層厚については近傍のボーリングデータを参考にした値であり、地山  $V_s$  を 600(m/s) に設定することで、理論値波形と H/V スペクトルのピークが一致した。そのため地山の  $V_s$  についてはすべてのデータにおいて一律 600(m/s) に設定して解析を行うこととした。



表-2 各  $V_s$  の算出に用いるボーリングデータの組み合わせ

| 平均 $V_s$ | 地点名     | ボーリング名   |          |          |         |          |          |         | データ数 |
|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|------|
| 平均値1     | 藤右衛門丸   | H03-1-1  |          |          |         |          |          |         | 1    |
| 平均値2     | 御宮      | H03-1-2  |          |          |         |          |          |         | 1    |
| 平均値3     | 新丸広場    | H03-1-6  | H03-1-9  | H09-2-E  | BV18-4  |          |          |         | 4    |
| 平均値4     | 数寄屋屋敷   | H11-1-F1 | H11-1-F3 | H10-1-F2 |         |          |          |         | 3    |
| 平均値5     | 管理事務所   | H10-3-1  | H10-3-2  |          |         |          |          |         | 2    |
| 平均値6     | 鶴ノ丸     | H03-1-7  | H10-3-3  | H10-3-4  | H10-2-1 | H10-2-2  |          |         | 10   |
|          | 三ノ丸     | H10-2-6  | H03-1-4  | H09-1-1  | H09-1-2 | H10-2-5  |          |         |      |
| 平均値7     | 玉泉院丸    | No.1     | No.2     | No.3     | No.4    | H24-No.1 | H24-No.2 |         | 6    |
| 平均値8     | 本丸附段    | H10-1-D  | H10-2-4  | H10-3-5  | H10-2-3 |          |          |         | 11   |
|          | 東ノ丸・本丸  | BV14-1   | BV14-2   | H03-1-5  | H09-2-A | H10-1-B  | H08-2-1  | H09-2-C |      |
| 平均値9     | いもり堀    |          |          |          |         |          |          |         | 7    |
|          | 白鳥堀・百間堀 | BV-1     | H09-3-1  | H09-3-2  | H09-3-3 | H09-3-4  | H09-3-5  | H09-3-6 |      |

表-3 盛土層に適用する平均  $V_s$

|      | 地点名     | 盛土N値 | 盛土 $V_s$ (m/s) |
|------|---------|------|----------------|
| 平均値1 | 藤右衛門丸   | 7.0  | 177.1          |
| 平均値2 | 御宮      | 50.6 | 330.4          |
| 平均値3 | 新丸広場    | 9.6  | 172.9          |
| 平均値4 | 数寄屋屋敷   | 8.0  | 183.7          |
| 平均値5 | 管理事務所   | 12.0 | 211.0          |
| 平均値6 | 鶴ノ丸     | 10.2 | 189.5          |
|      | 三ノ丸     |      |                |
| 平均値7 | 玉泉院丸    | 9.1  | 187.2          |
| 平均値8 | 本丸附段    | 9.1  | 187.7          |
|      | 東ノ丸・本丸  |      |                |
| 平均値9 | いもり堀    | 6.4  | 164.2          |
|      | 白鳥堀・百間堀 |      |                |

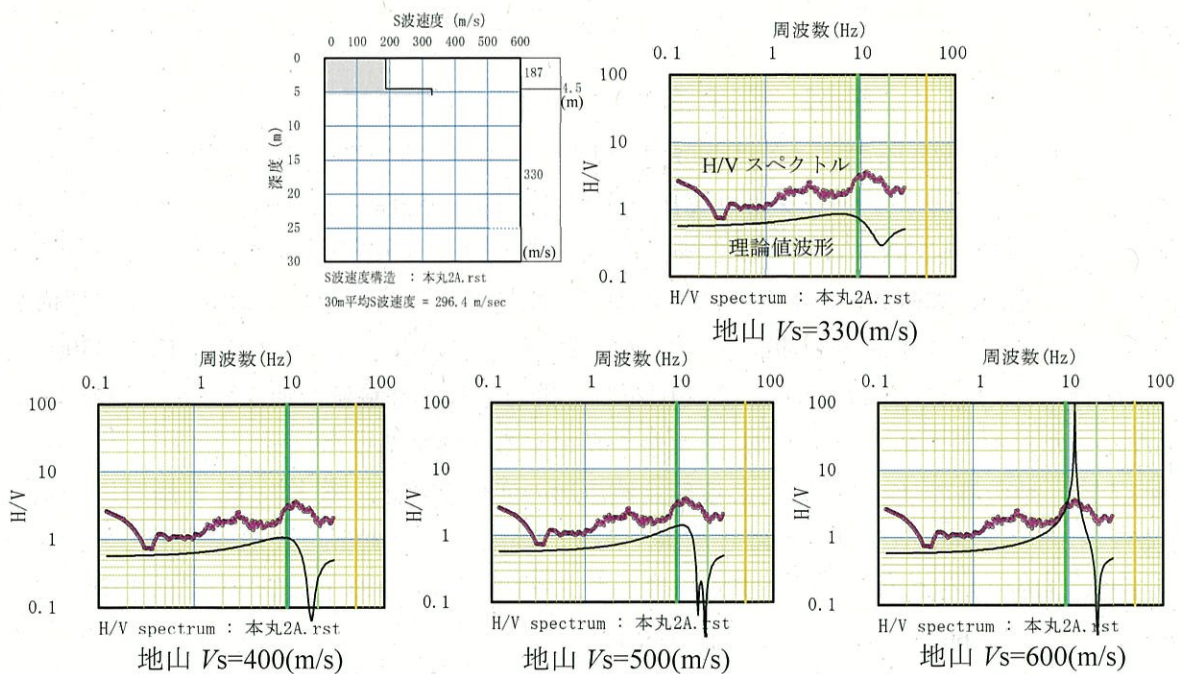


図-17 地山に適用する  $V_s$  の違いによる理論値波形



### 3) ニノ丸における $V_s$ の設定

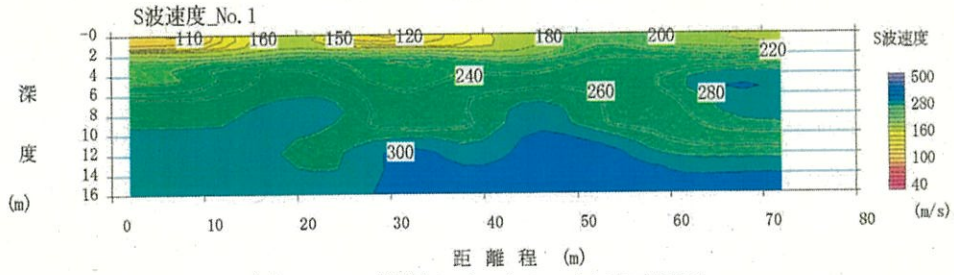
ニノ丸においては、他の地点と異なり参考となる N 値が記載されたボーリングデータがない。そのため、2021 年 11 月に岐阜大学・金沢工業大学と合同で行った表面波探査の結果を参考にして、盛土層の  $V_s$  を決定することにした。図-18 に、ニノ丸における表面波探査の測線の位置図を示す。No.1~No.5 の計 5 測線で実施した。



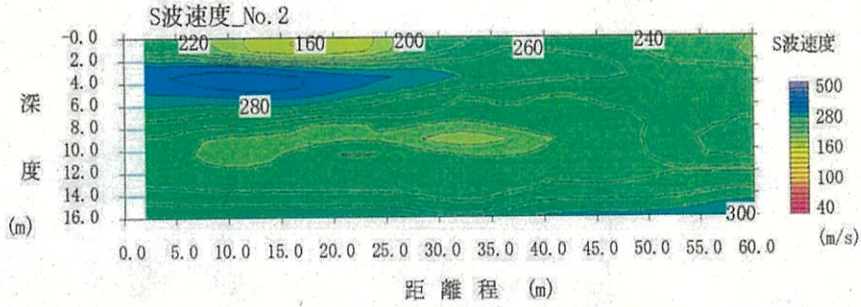
図-18 ニノ丸における表面波探査実施地点

図-19(a)~(e)に、各側線の S 波速度構造結果を示す<sup>8-1)</sup>。表面波探査の結果から、ニノ丸における表層部分の  $V_s$  は、約 110~280(m/s)ということが分かった。一部表層付近でも  $V_s$  が 300(m/s)を超える部分が存在している。また、場所によってかなり  $V_s$  の大きさに差が生じている。そのため解析に使用する  $V_s$  は各微動地点から、最も近い側線の結果を用いることとした。今井の式による  $V_s$  を適用した微動解析の妥当性の検討は、熊本城のデータを用いて既に行っている。そのため表面波探査による  $V_s$  を適用した場合の微動解析の妥当性についても検討を行う必要がある。そこで No.3 測線上において実施した微動データ 3 つと、No.3 測線と概ね同上の位置におけるボーリングデータによる二次元断面図を用いて、精度の確認を行った。

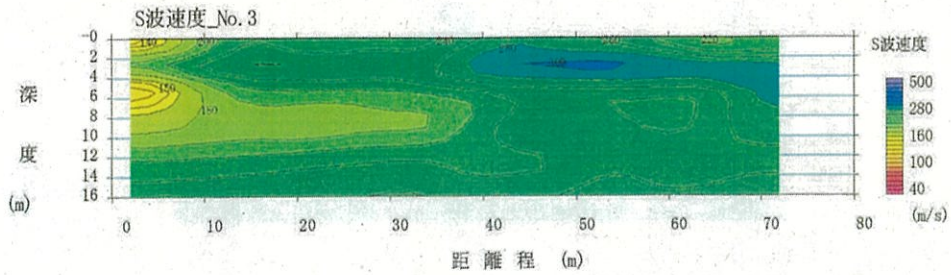




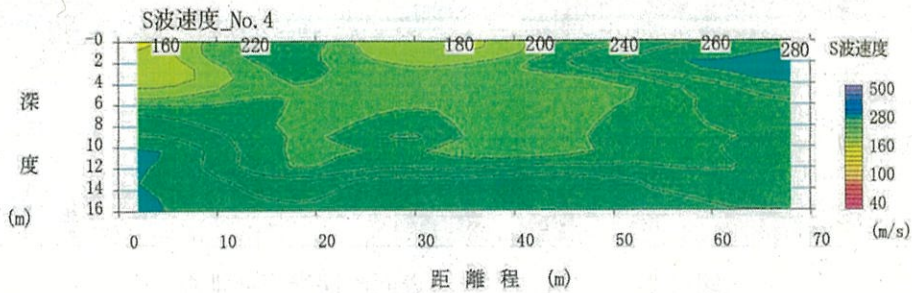
(a) No.1 測線における S 波速度構造



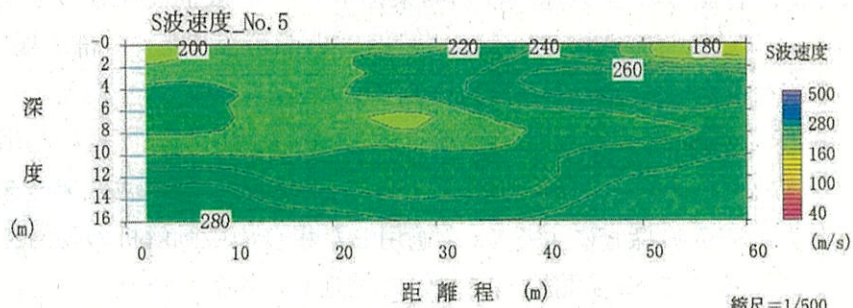
(b) No.2 測線における S 波速度構造



(c) No.3 測線における S 波速度構造



(d) No.4 測線における S 波速度構造



(e) No.5 測線における S 波速度構造

図-19 金沢城二ノ丸内における表面波探査の結果



図-20 に、微動探査データと二次元断面図の位置図を、図-21 (a)～(c)に、微動解析結果を示す。解析に用いた盛土部分の  $V_s$  については、図-19(c)より読み取った値を適用している。二ノ丸 3C のデータについて、採用したピークは最も高周波数帯のものではない。これは近傍に位置するボーリングデータ No.39 の盛土層厚と 4分の1 波長則を参考にした場合に、適当なピークが中央のピークとなったためである。

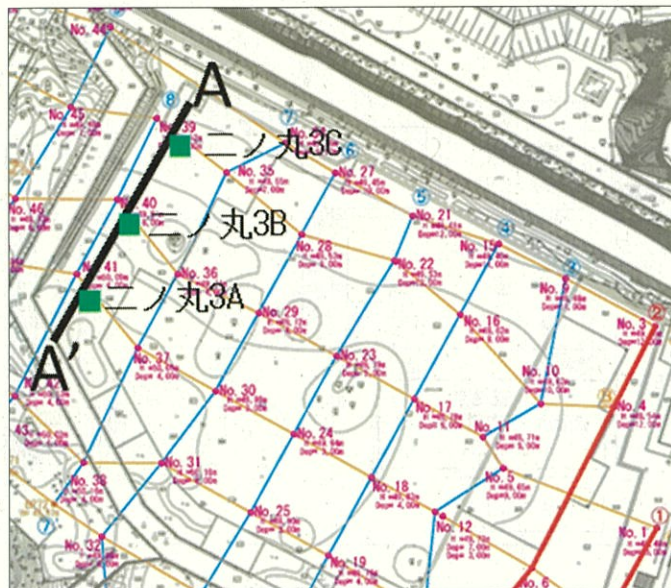


図-20 微動データと断面線位置図

図-22 に、金沢城調査研究所の既存報告書<sup>8)</sup>に記載されている既存ボーリングデータを用いて作成された A-A'断面図に、微動解析により推定された盛土厚を重ねて示す。図中に示す赤線が盛土層と地山層の境界部分であり、黒字で記載した層厚はボーリングによるもの、赤字で記載した層厚は微動解析によるものである。ボーリング盛土層厚と微動解析による盛土層厚の誤差は 0.14～0.52m と、3 地点のみではあるが、かなり正確な値となっていることから、表面波探査による  $V_s$  を適用して解析を行った場合でも、概ね正確な層厚の検出が出来ていると言える。

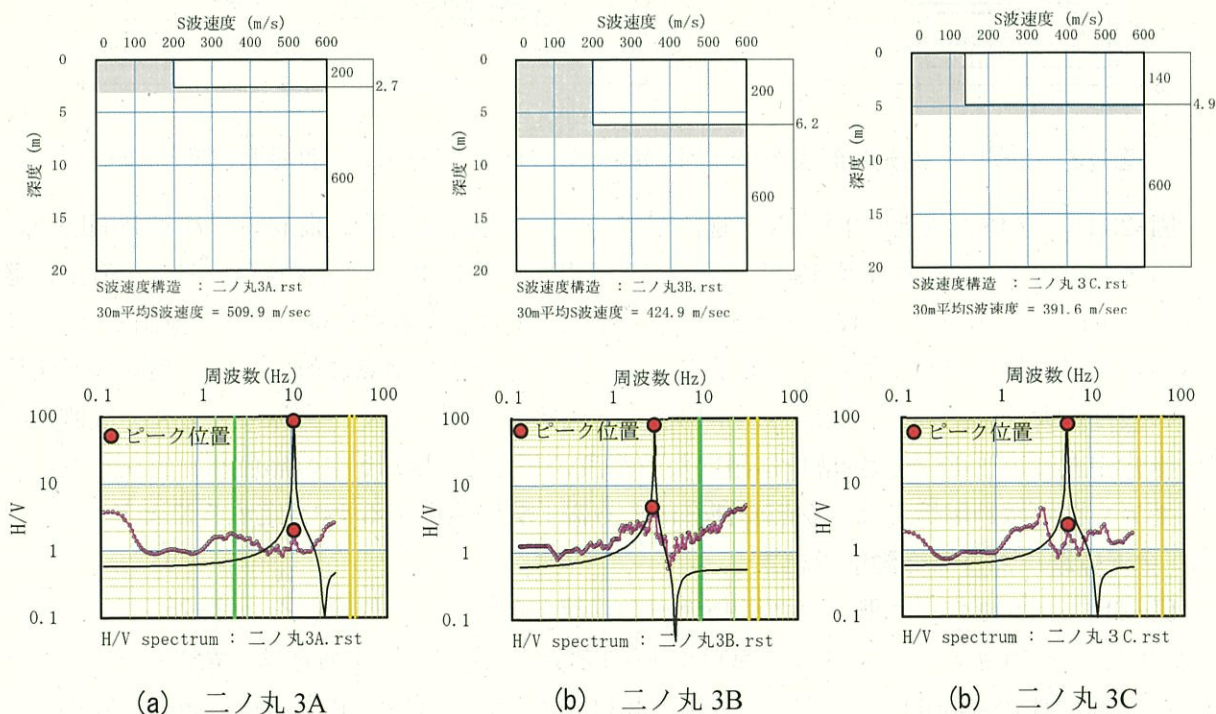


図-21 二ノ丸における微動解析結果 (上図 : S 波速度構造, 下図 : H/V スペクトル図)



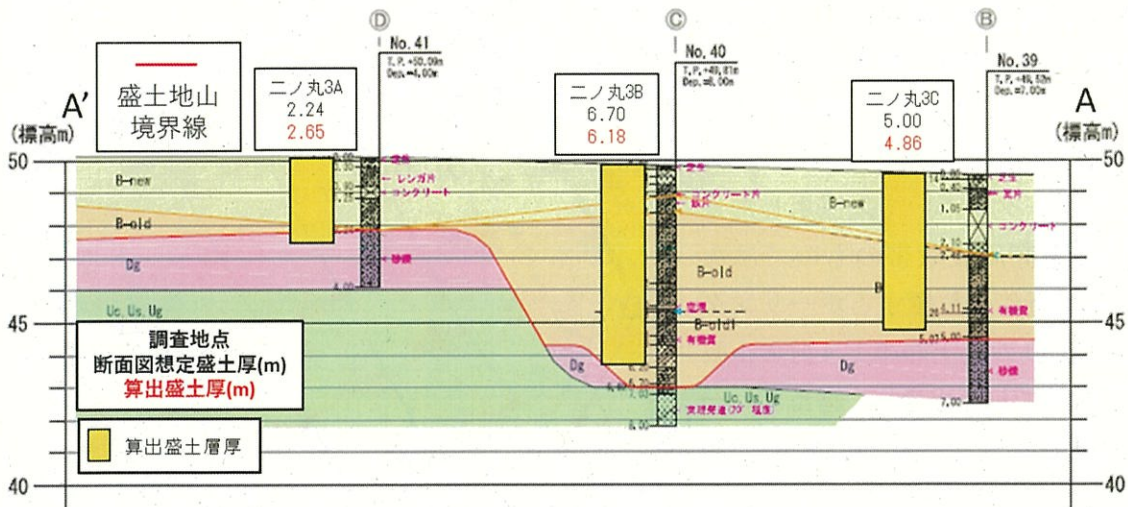


図-22 既存の二次元断面図<sup>8)</sup>と推定盛土厚

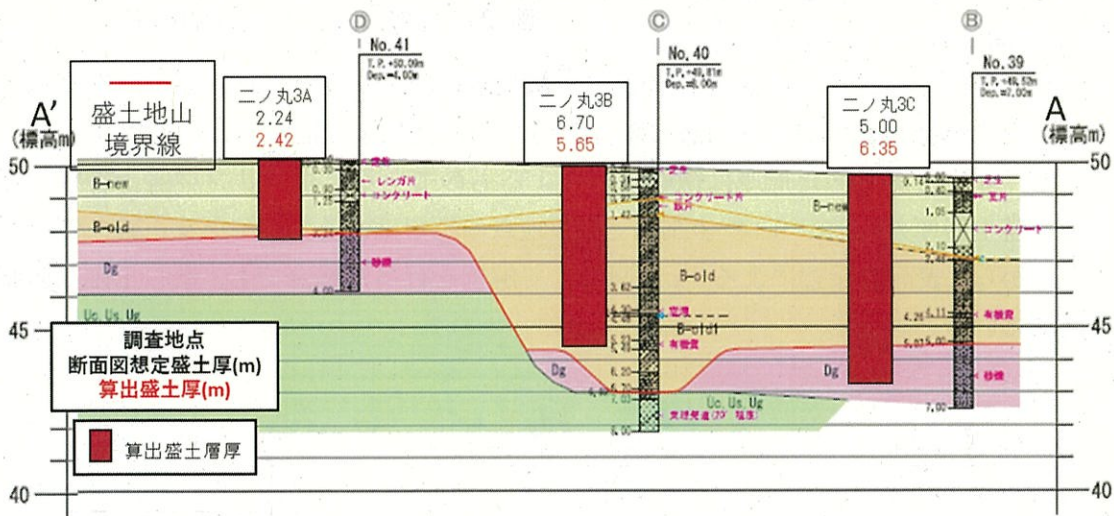


図-23 既存の二次元断面図<sup>8-2)</sup>と全体の盛土Vsの平均値を用いて推定した盛土厚

図-23に、全体の盛土の平均Vsを適用して解析した盛土層厚を、既存の二次元断面図上に重ねた図を示す。盛土の平均Vsは、すべての既存ボーリングデータより算出した、盛土に適用するVsの平均値であり183(m/s)である。三ノ丸3Aの結果のように、Nより算出したVsを用いた方が、精度が高くなっている地点もあるが、その他の地点については、実際の盛土厚との誤差が大きい。このことから、平均値を適用するのではなく、実際に二ノ丸で計測した表面波探査によるVsを微動解析に用いた方が良く、図-16中の黒色ハッチング内の二ノ丸データの微動解析では、表面波探査による盛土層に適用するVsを定めることとした。

#### 4) 金沢城跡における微動解析結果

図-24に、2020年度に測定した微動データ(計117地点)の位置図を、図-25に、2022年度に測定した微動データ(計438地点)の位置図を示す。図中に示す名称は、微動データの名称である(例:HMS-GorR1)。数字の前のGとRはGが背後地盤上、Rが裏込め層上で実施したという意味である。



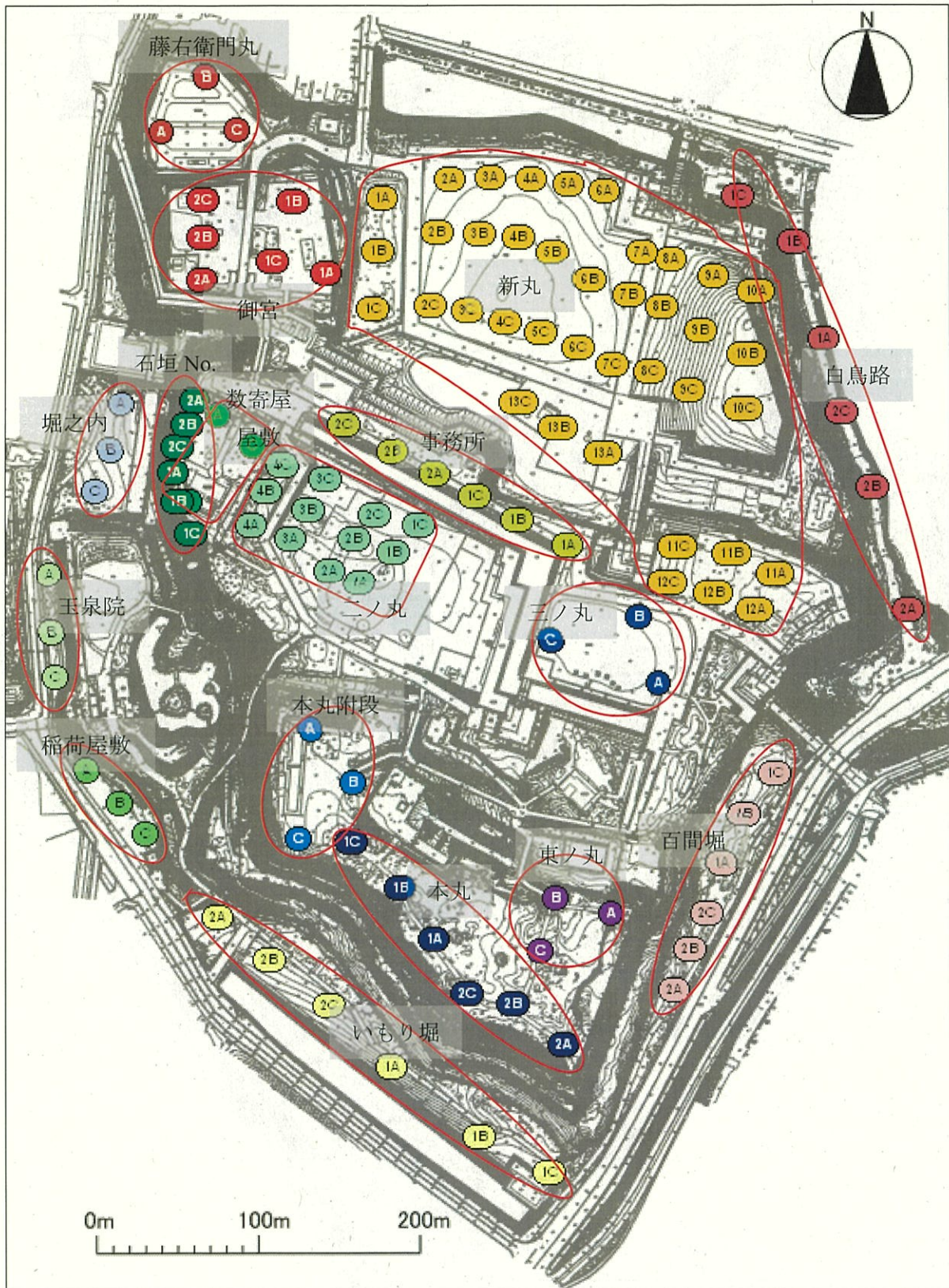


図-24 2020年度の微動探査実施位置



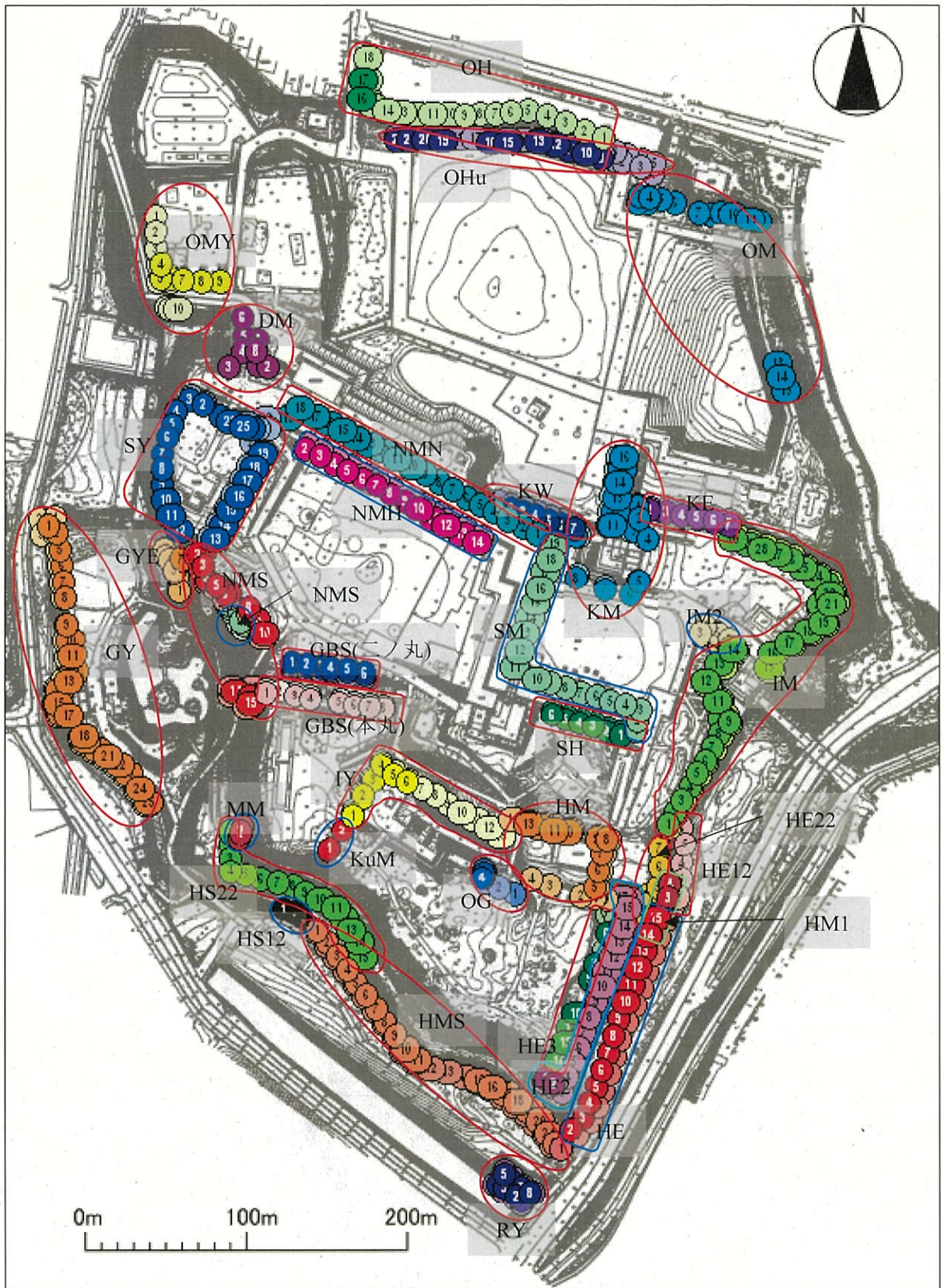


図-25 2022年度の微動探査実施位置



図-26(a)～(f)に、代表地点の御宮、新丸、二ノ丸、三ノ丸、いもり堀、本丸における解析結果の例を示す。解析を行ったデータは計 466 箇所であり、データ数が多いため解析を行った図は主となる代表地点のもののみとする。各 H/V スペクトルについては末尾に付録として記載する。

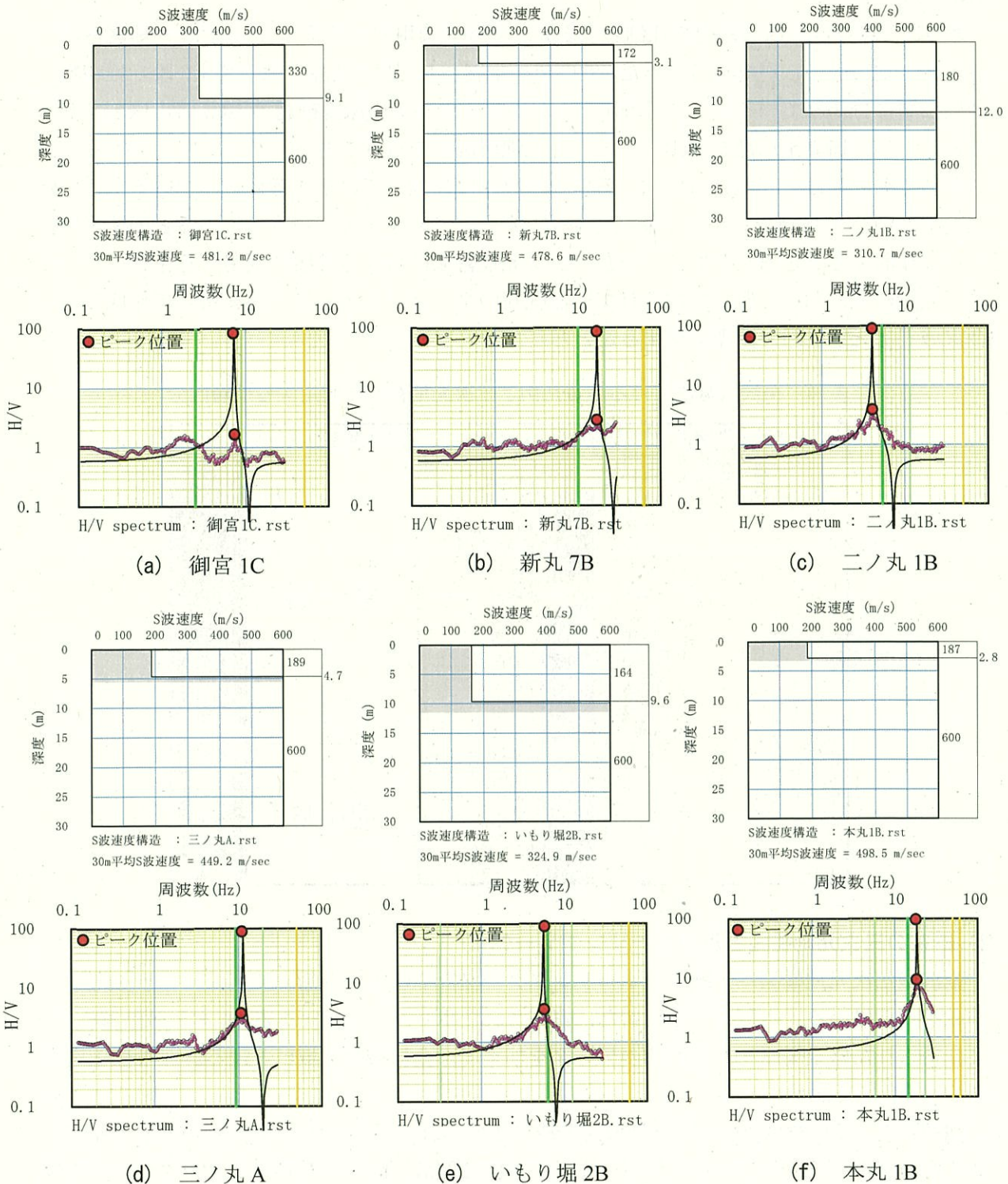


図-26 代表地点における微動解析結果（上図：S波速度構造，下図：H/V スペクトル図）



## 7. 金沢城三次元地盤図の構築

### 1) 地質区分について

微動解析結果による盛土層厚と、既存ボーリングデータを用いて、金沢城三次元地盤図の構築を行った。三次元地盤図の構築に用いるボーリングデータは計 326 本、微動解析結果は 416 箇所分である。

表-4 に、金沢城跡周辺の地質凡例と三次元地盤図に適用する地質区分を示す。地層区分は、盛土層と地山層の 2 層構造で行った。地山層の定義としては、実際には旧表土、段丘堆積物、卯辰山層に分かれているが、多くのボーリングデータが地山深度確認の 10m 前後以下となっているため、旧表土以深を地山と一括にして地層区分を行うこととした。なお、石垣変状の主たる地盤要因は、石垣背後における盛土の厚さに起因していると考えられているため、盛土と地山の 2 層構造で三次元地盤図を構築したとしても、十分石垣変状と地盤との関係性について検討できると考えている。また、三次元地盤図における各層に適用する色調については、先行研究において既に作成されている既存のボーリングデータのみを用いて作成した、金沢城三次元地盤図の色調に準ずることとした。

表-4 金沢城跡における地質凡例と三次元地盤図に適用する地層区分

| 地質年代 | 地質名    | 時代区分     | 地層区分名             | 記号      | 主な構成土質      | 三次元地盤図地質区分 | 色調 |            |     |    |
|------|--------|----------|-------------------|---------|-------------|------------|----|------------|-----|----|
| 第四紀  | 新期盛土   | 現代       | 現代盛土              | bnew-2  | 練まじり粘土・廃棄物等 | 盛土層        | 茶色 |            |     |    |
|      |        | 明治時代     | 近代盛土              | bnew-1  | 練まじり粘土      |            |    |            |     |    |
|      | 旧期盛土   | 江戸時代     | 旧期盛土 3            | 旧期盛土 3  | bold-4      |            |    | 練まじり粘土     |     |    |
|      |        |          | 旧期盛土 3            | 旧期盛土 3  | bold-3      |            |    | 練まじり粘土     |     |    |
|      |        |          | 旧期盛土 2            | 旧期盛土 2  | bold-2      |            |    | 練まじり粘土     |     |    |
|      |        |          | 中島盛土              | bold-ra | 練まじり粘土      |            |    |            |     |    |
|      |        |          | 豊地土               | bold-se | 練まじり粘土・砂質土等 |            |    |            |     |    |
|      |        |          | 池底堆積物             | bold-p2 | 有機質粘土・粘土    |            |    |            |     |    |
|      |        |          | 池底堆積物<br>(池底、石垣等) | bold-p2 | 戸室石、石垣等     |            |    |            |     |    |
|      |        |          | 旧堀堆積物             | bold-p1 | 練まじり粘土      |            |    |            |     |    |
|      |        |          | 旧堀堆積物<br>(堀底、石垣等) | bold-p1 | 戸室石、石垣等     |            |    |            |     |    |
|      |        |          | その他栗石等            | bold-pl | 玉石、転石       |            |    |            |     |    |
|      | 旧期盛土 1 | bold-1   | 練まじり粘土            |         |             |            |    |            |     |    |
|      | 完新世    | 旧表土      | 栗ボク               | 栗ボク     | Ap          |            |    | 有機質粘土(栗ボク) | 地山層 | 緑色 |
|      |        |          | 地山表土層             | 地山表土層   | Ac          |            |    | 粘土・シルト・砂礫  |     |    |
| 更新世  | 段丘礫層   | 砂礫層      | 砂礫層               | As      | 砂礫          |            |    |            |     |    |
|      |        | 卯辰山・礫層   | 卯辰山・礫層            | As      | シルト質砂礫      |            |    |            |     |    |
|      |        | 卯辰山・砂層   | 卯辰山・砂層            | As      | 練まじり砂・砂     |            |    |            |     |    |
|      |        | 卯辰山・粘性土層 | 卯辰山・粘性土層          | As      | 固結粘土・シルト    |            |    |            |     |    |

### 2) 既存の三次元地盤図と新規ボーリングデータ

金沢城三次元地盤図は、既存のボーリングデータ計 267 本分を用いて、佐川<sup>9)</sup>と住友<sup>10)</sup>が作成を行っている。本研究では、新たに実施されたボーリングデータ計 59 本と微動解析により得られた盛土層厚 416 箇所分のデータを加えて、金沢城跡全域における詳細な盛土層厚の分布を明らかにする。

図-27 に、既存の金沢城三次元地盤図作成に用いられた既存のボーリングデータと新たに加えた新規ボーリングデータの位置図を示し、図-28(a), (b) に、既存ボーリングデータのみで作成された三次元地盤図の全体像を示す。既存の三次元地盤図は図 9-9 中の赤点で示すボ



ーリングデータを用いて作成されている。玉泉院丸や本丸付近については、数多くのボーリングデータが存在しているが、二ノ丸、鶴ノ丸より北側は、少くないボーリングデータで作成せざるを得なかったことが分かる。

図-28 に示すように、既存の三次元地盤図における地山形状は玉泉院丸や本丸付近においては詳細に表示出来ているが、新丸や御宮、藤右衛門丸においては一様な平面のような形状になってしまっている。そのため、微動解析による新たな盛土層厚を組みこんでいくことでより詳細な地山形状を表現していく必要がある。

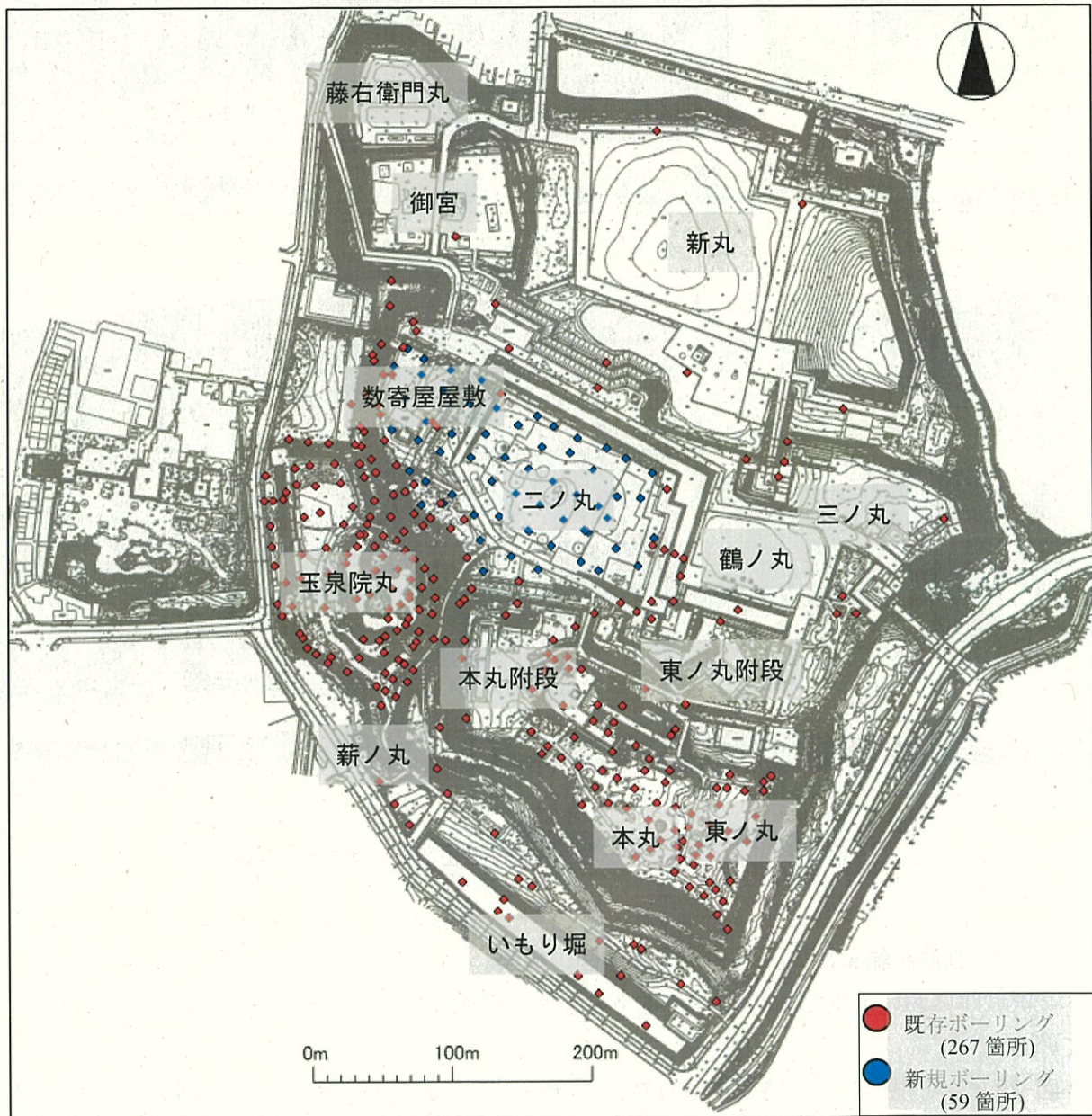
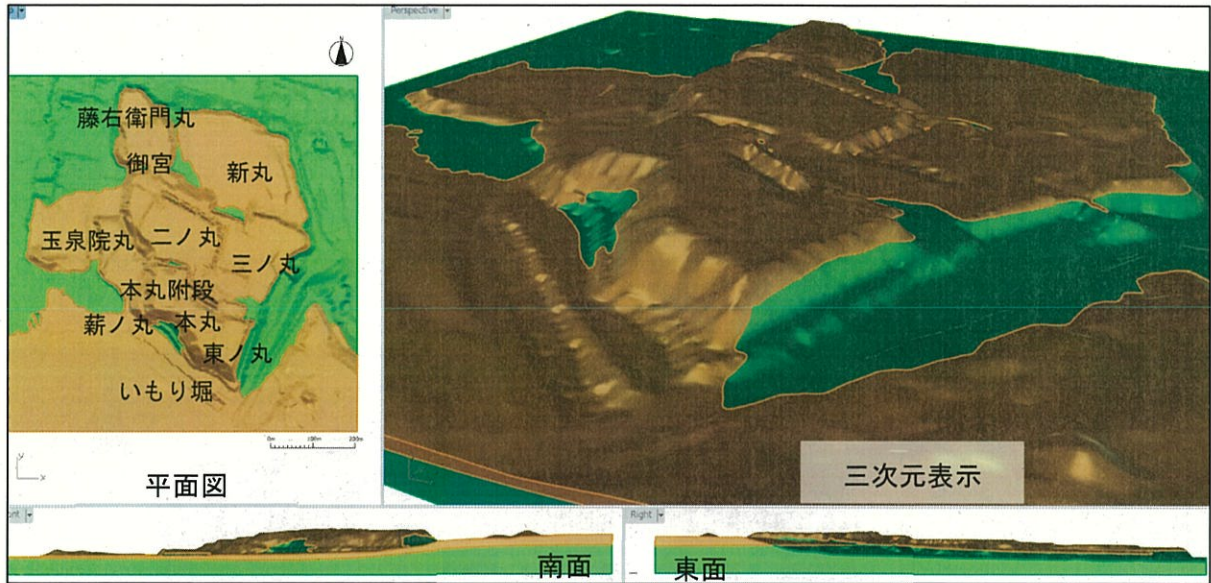
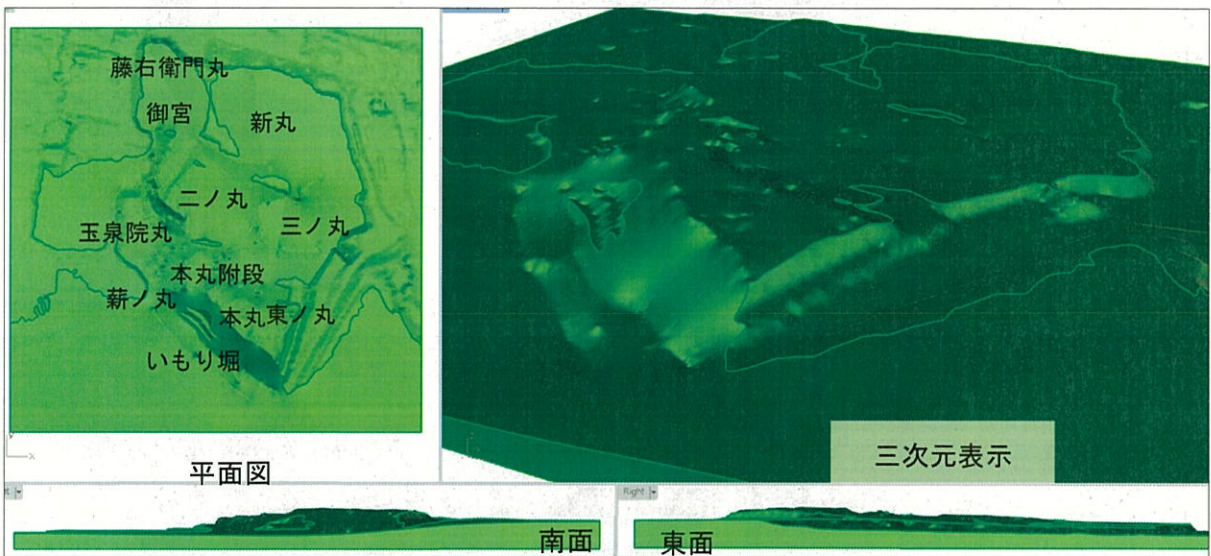


図-27 既存の三次元地盤図に用いているボーリングデータと新規ボーリングデータ





(a) 金沢城三次元地盤図の全体像



(b) 金沢城三次元地盤図における地山形状

図-28 既存ボーリングのみで作成した金沢城三次元地盤図

### 3) 常時微動解析結果の入力と三次元地盤図の構築

金沢城跡において実施した計 416 地点分の常時微動解析結果計を GEO-CRE にて可視化していく。

図-29 に、可視化した常時微動解析結果と既存ボーリングデータを示す。微動データを組み合わせることで、金沢城跡全域において数多くの地層データが存在していることが分かる。416 本の微動解析結果と 326 本のボーリングデータを用いて地質対比を行い、盛土層と地山層の地質境界面モデルの作成を行うことで、金沢城三次元地盤図を構築していく。

図-30 (a)～(c) に、常時微動解析結果を組み込んだ三次元地盤図構築の流れを示す。また、図-31 に、完成した金沢城三次元地盤図の全体像を示す。



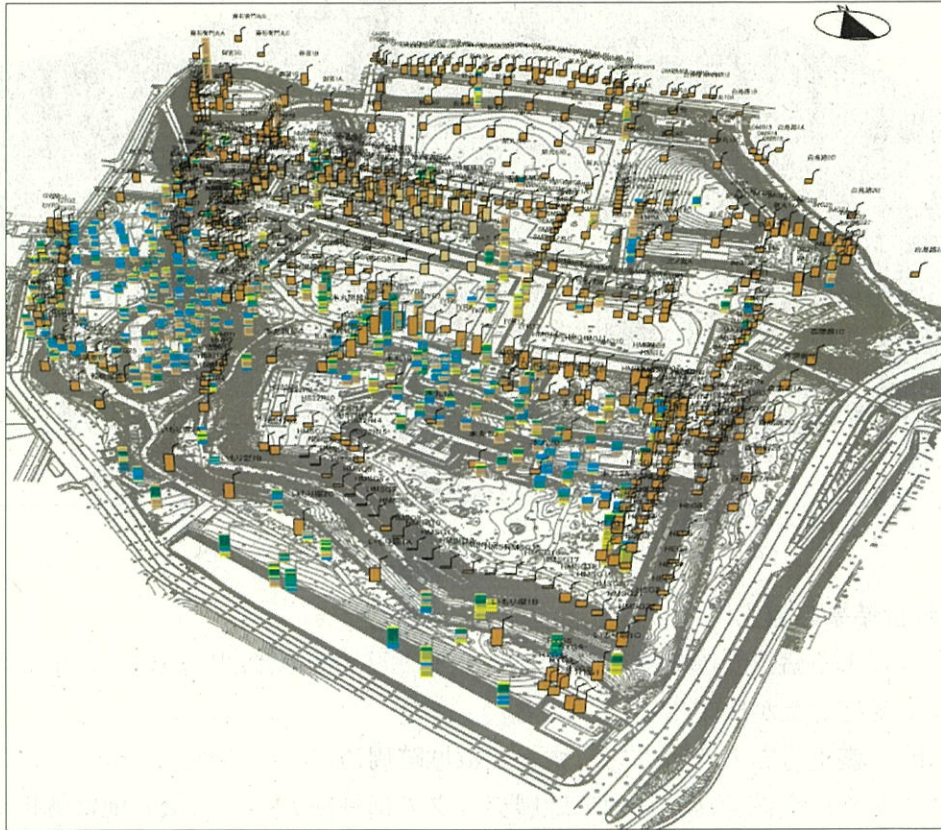
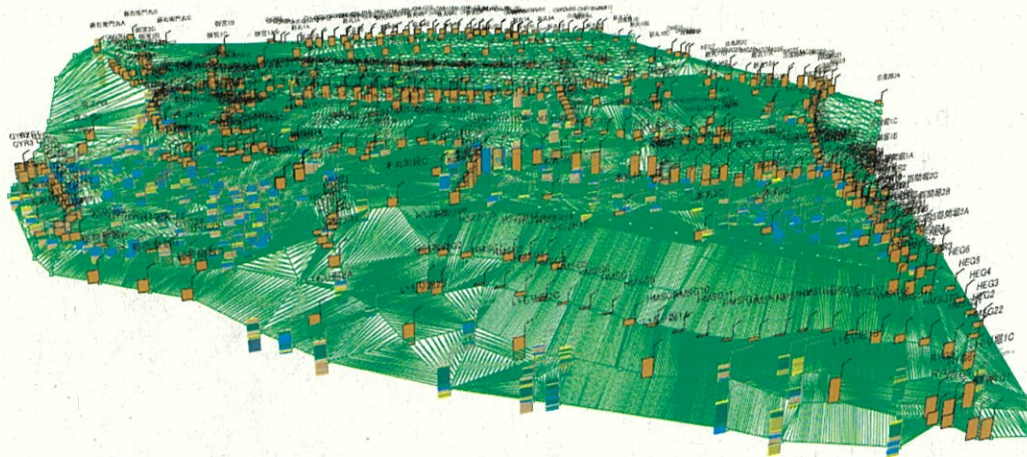


図-29 GEO-CREにて可視化した微動解析結果とボーリングデータ



(a) 盛土層と地山境界における地質対比の様子



(b) 地質対比の結果より作成した地質境界面モデル



(c) 地質境界面モデルより三次元表示区域を切り出して完成した三次元地盤図

図-30 金沢城三次元地盤図の構築過程



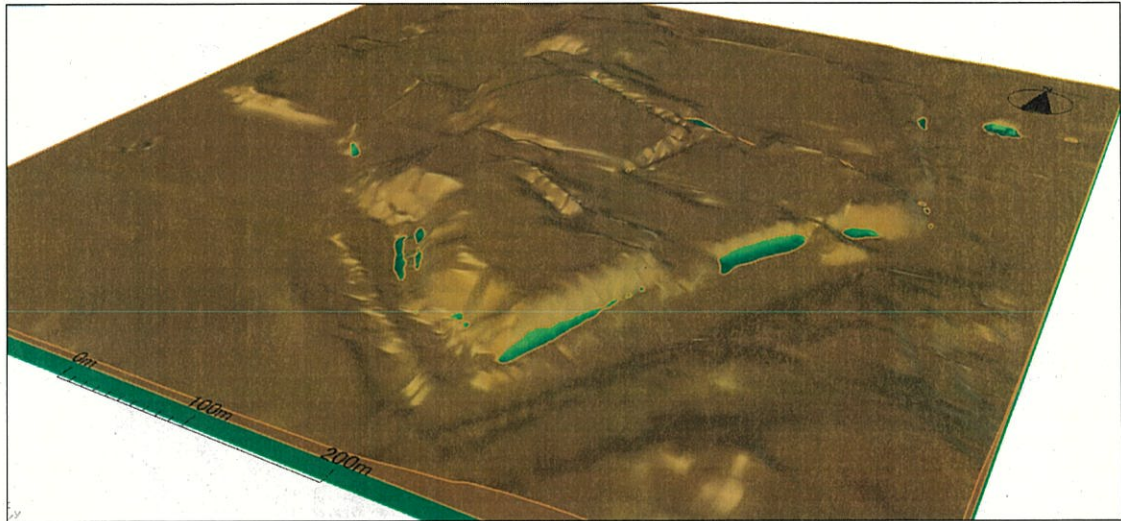


図-31 完成した金沢城三次元地盤図の全体像

#### 4) 常時微動解析結果の導入による地盤図の変化

常時微動解析による盛土層厚を組み込むことで、三次元地盤図における盛土層と地山形状がどのように変化したか確認する。

図-32 (a), (b)に盛土分布の比較図を示す。金沢城跡周辺における地形については地層データのない部分であり、金沢城跡における地層データの延長部分を、三次元地質解析システムで自動生成された部分であるので関係ないが、明らかに盛土の分布範囲が異なっている。これは東ノ丸における石垣部や百間堀、白鳥路等において実施した常時微動探査データの存在によるものである。元々この付近のボーリングデータは少数であったため、盛土層の作成がなされていなかったためだと考えられる。

図-33 (a), (b)に、三次元地盤図における地山形状の比較図を示す。元々ボーリングデータが多く存在していた玉泉院丸や本丸、東の丸における地山形状には大きな変化は見られないが、新たにボーリングが実施された二ノ丸や、常時微動探査を数多く実施した新丸や三ノ丸、藤右衛門丸周辺については、より詳細に地山形状が明らかになっている。既存の三次元地盤図では、盛土層と地山層の境界面において一様な面的な部分が多く見られるが、常時微動解析結果を組み込んだ三次元地盤図ではそれが解消されている。また、より詳細に見るために双方の三次元地盤図を用いて、いくつかの二次元断面図の作成を行い、比較してみることにした。

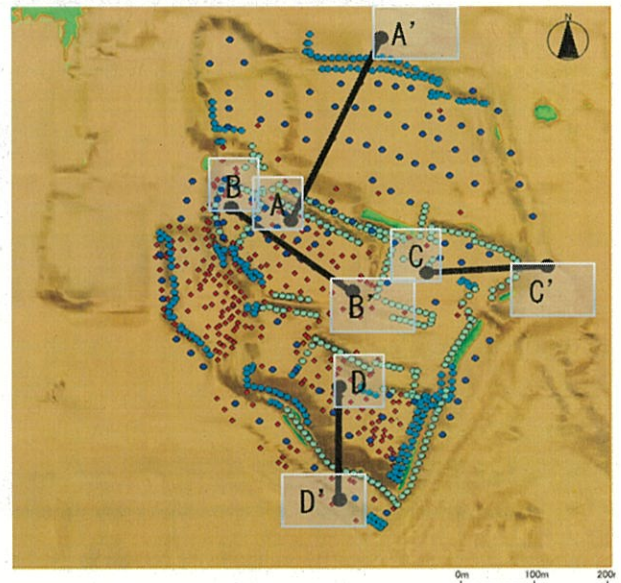
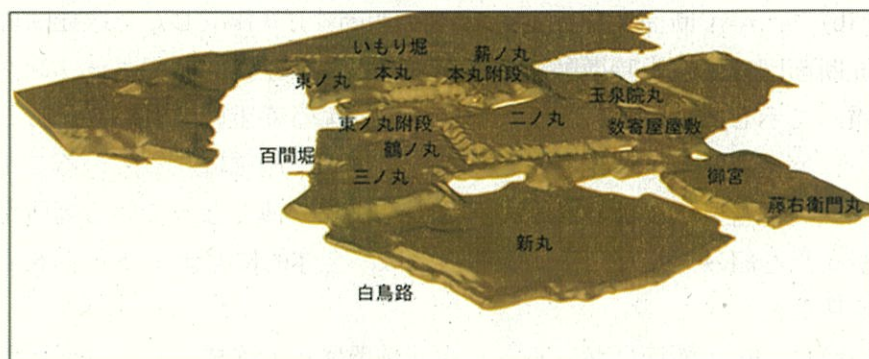


図-34 断面線位置図

図-34に、二次元断面図作成位置図を示す。



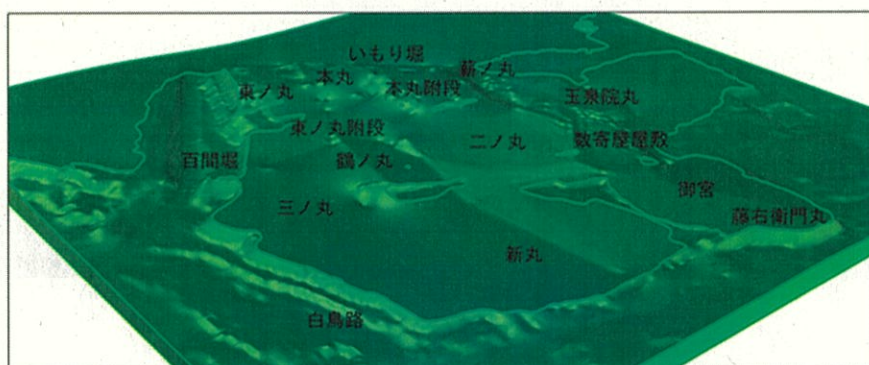


(a) ボーリングデータのみでの盛土分布

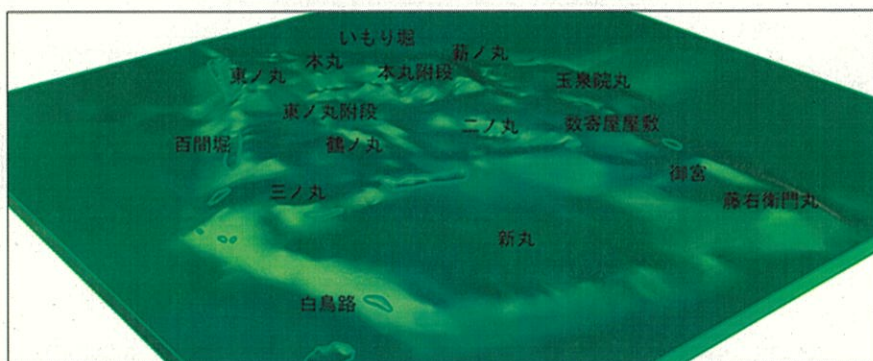


(b) 微動解析による地層区分を導入した盛土分布

図-32 微動解析による地層区分を導入による盛土分布の比較



(a) ボーリングデータのみでの地山形状



(b) 微動解析による地層区分を導入した地山形状

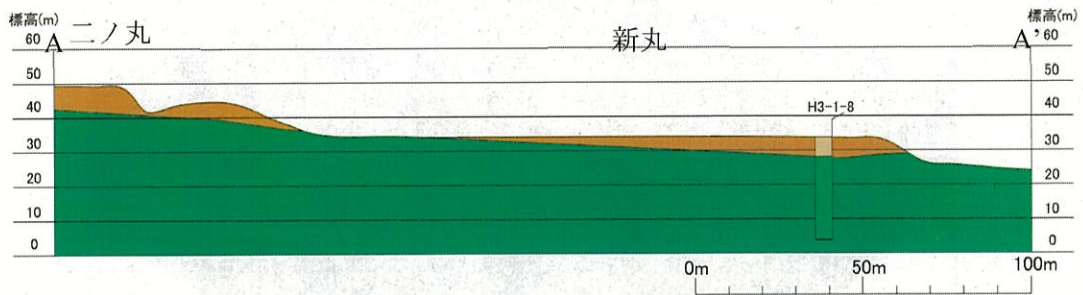
図-33 微動解析による地層区分を導入した地山形状の比較



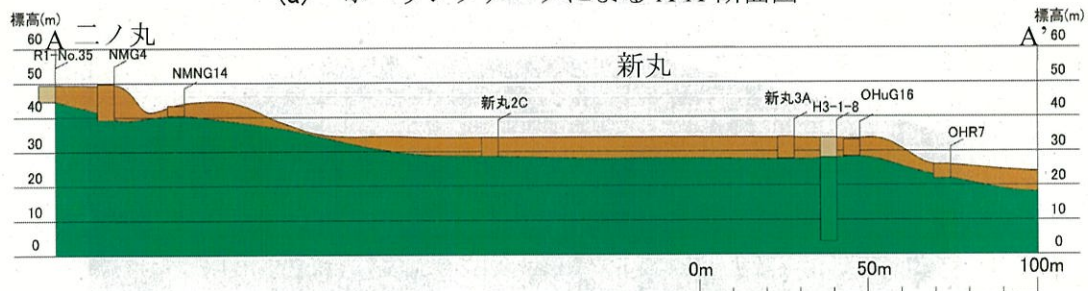
図-35(a), (b)に、A-A'断面における各三次元地盤図より作成した二次元断面図を示す。また、各二次元断面図には、常時微動解析により得られた盛土層厚やボーリングデータによる地層構造を重ねて示している。常時微動解析結果による盛土層厚を組み込むことによって、新丸において、盛土層厚が不明確であった部分について明確になっていることが分かる。また、既存の三次元地盤図における新丸の盛土は、かなり薄くなっている箇所が多かったが、常時微動解析結果を組み込んだ三次元地盤図では、全体的に盛土が5m前後と厚く堆積していることが判明した。

図-36(a), (b)に、B-B'断面における各三次元地盤図より作成した二次元断面図を示す。既存の三次元地盤図では、二ノ丸において一様に盛土が厚く堆積する構造になっていたが、新規のボーリングデータや常時微動解析結果による盛土厚によって、盛土が厚く堆積している部分も確かにあるが、二ノ丸の中央付近では、盛土層が比較的薄くなっていることが分かる。また、数寄屋屋敷と二ノ丸、鶴ノ丸と二ノ丸の境界付近において盛土層厚が厚くなっていることが分かる。これは築城時、曲輪の形成に伴い、二ノ丸を鶴ノ丸や数寄屋屋敷よりも標高を高くするために盛土の造成が行われたためであると考えられる。

図-37(a), (b)に、C-C'断面における各三次元地盤図より作成した二次元断面図を示す。三ノ丸においても既存の三次元地盤図では、一様に盛土が比較的厚く堆積しているような構造になっていたが、常時微動解析結果を組み込むことで、より詳細に地山形状が表されている。特に既存の三次元地盤図では、白鳥路における地質データが不足していたため、地山形状が大きく異なっていることが分かる。わずかな違いであるが、石垣変状との関係性を検討するためには、少しでも詳細に盛土分布を明らかにしておく必要があると言える。



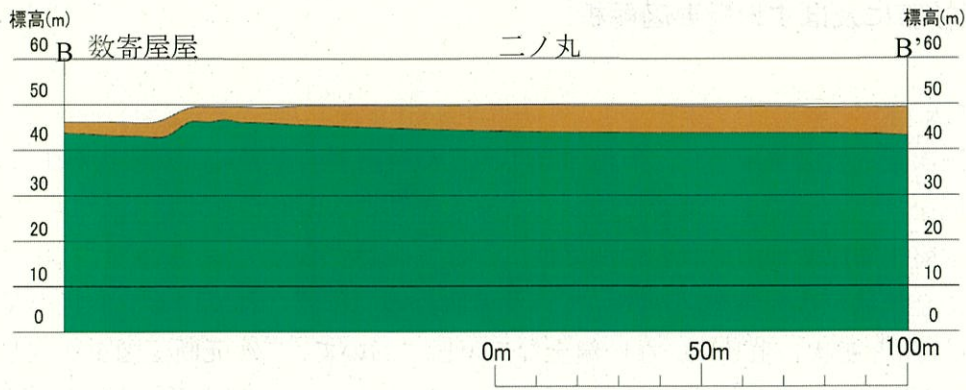
(a) ボーリングデータによる A-A'断面図



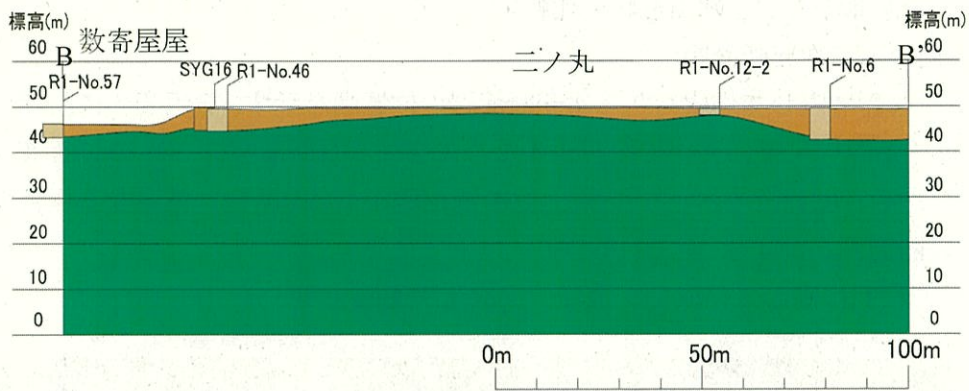
(b) 微動解析による地層区分を導入した A-A'断面図

図-35 三次元地盤図より切り出した二次元断面図 (A-A'断面)



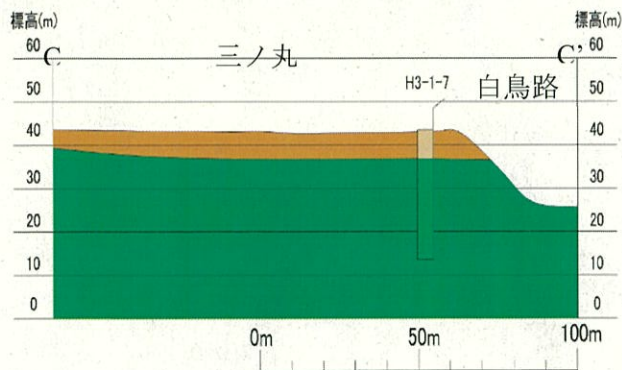


(a) ボーリングデータによる B-B'断面図

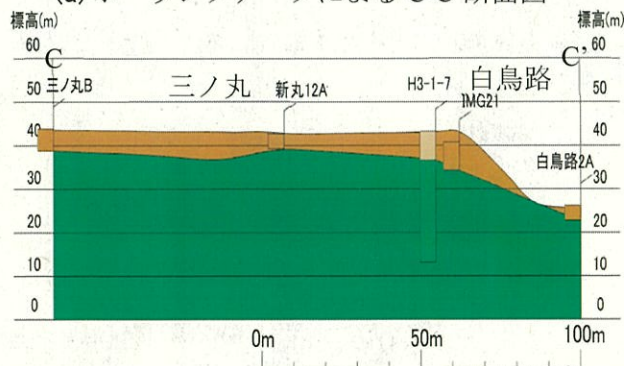


(b) 微動解析による地層区分を導入した B-B'断面図

図-36 三次元地盤図より切り出した二次元断面図 (B-B'断面)



(a) ボーリングデータによる C-C'断面図



(b) 微動解析による地層区分を導入した C-C'断面図

図-37 三次元地盤図より切り出した二次元断面図 (C-C'断面)



## 8. 石垣被害に及ぼす地盤要因解析

### 1) 検討方法

金沢城三次元地盤図を用いて、石垣の経年劣化や豪雨等の影響により変状が生じた石垣と健全な石垣を対象として、石垣背後における盛土層厚や地山形状を比較することで、石垣変状に及ぼす盛土層厚や地山形状との関係性について検討する。

作成した金沢城三次元地盤図を用いて、測量調査等で確認されている、変状が見られる石垣部計 26 箇所と変状の生じていない健全な石垣部において、二次元断面図を作成して検討を行う。二次元断面図は対象とする石垣背後において、石垣に対して水平方向に作成し、10m ピッチでの盛土層厚の計測と地山形状の比較に用いる。

### 2) 検討に用いる二次元断面図

図-38 に、検討に際して作成した二次元断面図の位置図を示す。石垣変状に及ぼす石垣背面における盛土層厚の影響について検討するために作成した断面図は、計 60 断面である。石垣変状のみられる石垣背後において作成した A 断面図が計 15 断面、健全な石垣背後において作成した B 断面図が計 45 断面である。

図-39 に、検討に際して作成した全ての二次元断面図を示す。

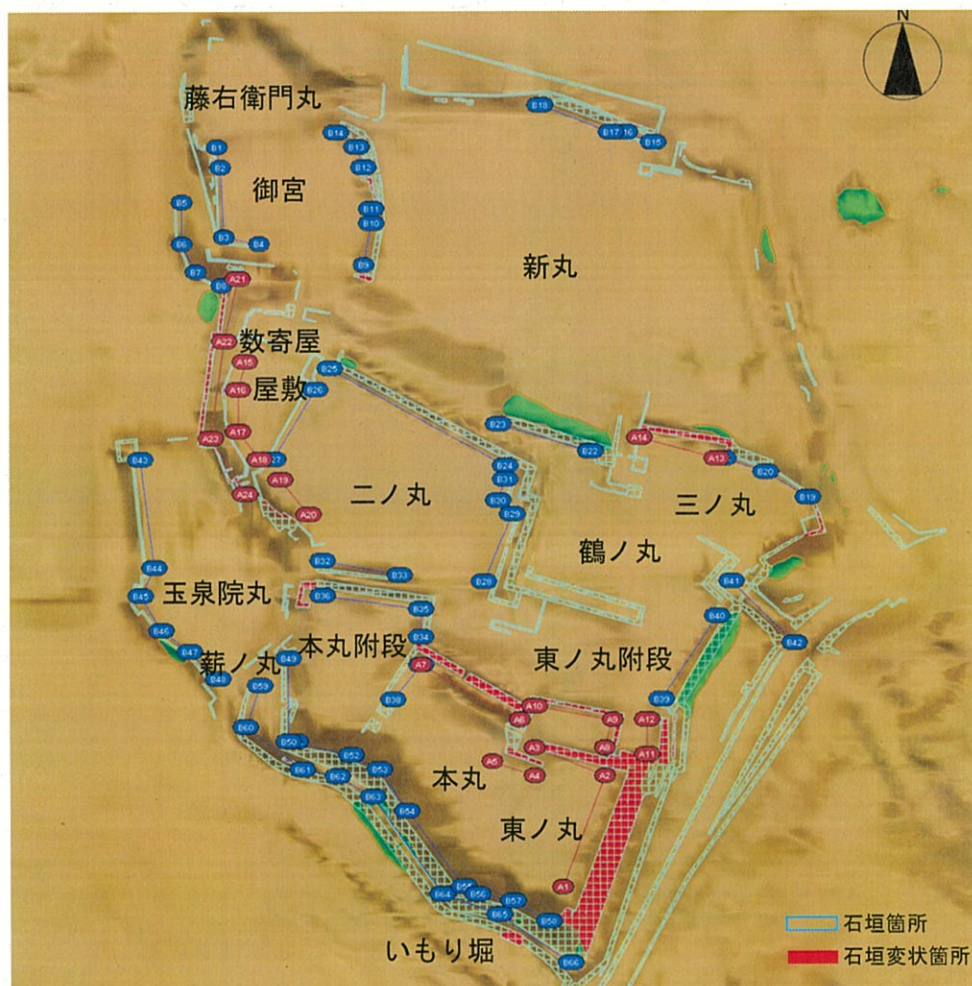


図-38 石垣被害に及ぼす地盤要因の検討に際して作成した二次元断面図位置図



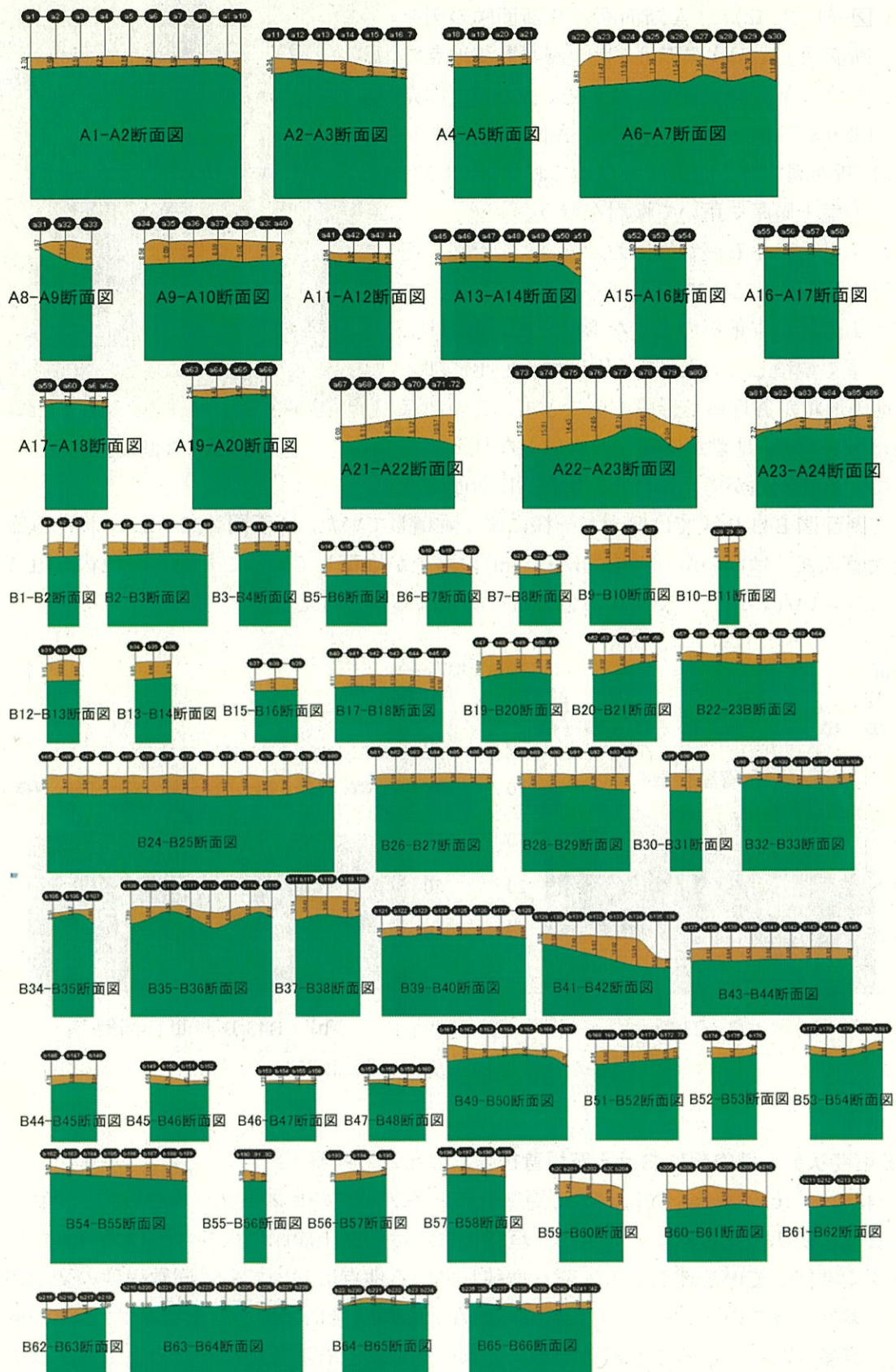


図-39 石垣被害に及ぼす地盤要因の検討に際して作成した二次元断面図



図-40 に、A 断面図および B 断面図例の位置図を示し、図-41 (a), (b) に、A 断面図と B 断面図の例を示す。断面図上に示す黒点は、盛土層厚計測地点であり、概ね 10m 間隔で設定している。また、二次元断面図より読み取った盛土層厚は、A 断面図で計 86 箇所、B 断面図で計 242 箇所となっており、合計 328 地点分の盛土層厚を用いて検討を行う。

変状の見られる石垣背後における A 断面図の例として、断面図 A22-A23 を挙げると、石垣背後において地山形状が谷地形のような形状となっており、盛土も厚く堆積していた。厚く堆積する盛土に加えて、地山形状が谷地形を形成することで、この地点が集水域となり、地盤が不安定な状態となり変状が生じている可能性が考えられる。また、B 断面の例

として断面図 B43-B44 では盛土が一様に厚く堆積していた。断面図 A22-A23 における盛土厚の最大値ほどではないが、平均的に約 6m の盛土が堆積していることから、現状石垣に変状は見られていないが、今後変状が生じる可能性はあると考える。



図-40 A・B 断面線位置図

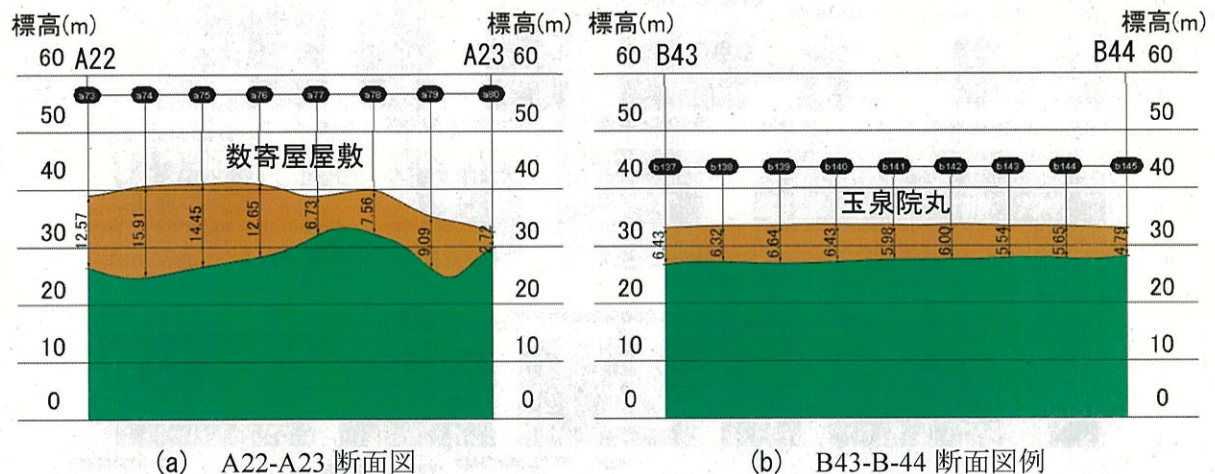


図-41 A 断面図及び B 断面図例

### 3) 石垣変状部と健全部における石垣背後盛土の比較と考察

図-42 (a) ~ (c) に、盛土層における層厚分布と各データのヒストグラムを示す。変状の見られる石垣と変状の見られない健全な石垣背後における盛土層厚に大きな差は見られない。盛土が厚く堆積している地点でも、薄く堆積している地点においても、同数程度の変状が見られる結果となっている。また、変状の見られない石垣背後における盛土層厚は、概ね 7m 未満の地点が多くなっていることが分かる。変状の見られる石垣背後における盛土厚よりも変状の見られない石垣背後における盛土厚の方が、わずかに薄い傾向が見られるものの、盛土厚が 2m 未満の地点においても、石垣変状の見られるデータが 10 個以上存在している。そのた



め一概に盛土厚が薄い方が石垣に変状が生じにくいとは言えない。また、たまたま変状が生じていないだけかもしれないが、現状盛土厚が大きい地点においても、変状の見られない健全な石垣が数多く存在することから、前提条件とは異なり、盛土厚が大きいほど石垣変状が生じやすいとも言えない。以上のことから、盛土厚の程度のみで考えると、石垣変状との関係性は薄いことが考えられる。

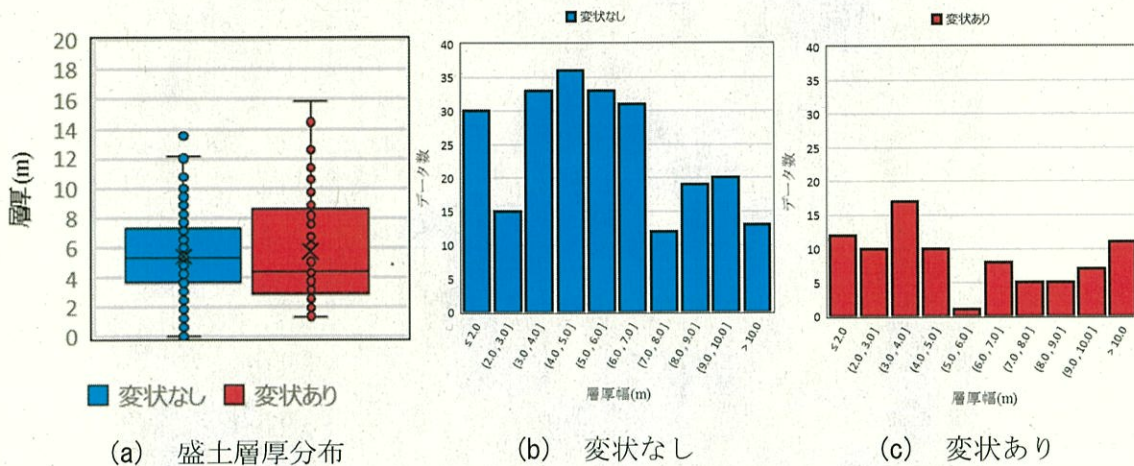


図-42 盛土層における層厚分布と各ヒストグラム

#### 4) 石垣変状部と健全部における石垣背後盛土の体積比較と考察

図-43に、盛土の体積比較に際して区分した金沢城三次元地盤図の盛土部を示す。盛土の体積比較を行うために、金沢城三次元地盤図を30mメッシュ状に区分して、石垣変状部と健全な石垣部における体積を比較した。図10-27中の赤色で示すブロックが石垣変状箇所であり、石垣計29個、水色で示すブロックが健全な石垣箇所であり、計65個となっており、計94個のデータを用いて比較を行った。

図-44(a)～(c)に、盛土層における体積分布と各データのヒストグラムを示す。体積による比較を行うことで、層厚による比較結果よりも、明確に石垣変状部と健全部における盛土の分布量に差が生じるかと考えたが、差は見られなかった。層厚比較の際と同様に、わずかなではあるが変状のない健全な石垣部における盛土の分布量の方が、石垣変状部よりも小さくはなっているものの、誤差の範囲内であると考えられる。盛土の堆積量の程度に関わらず石垣に変状が生じていることから、各変状箇所における変状要因はそれぞれ異なる可能性が高く、地山形状の影響を考慮する必要がある。三次元地盤図において地山層を現状1層として構築しているが、地山形状を考慮した石垣変状に及ぼす地盤要因の検討を行うためには、黒ボク層や段丘堆積物等の区分も行って地盤図を構築することが望ましいと考える。また、地盤要因だけでなく、石垣自体の老朽化の程度や石垣上部の載荷重の違いなど、その他の要因とかけ合わせて検討していくことで、現状まだ見えていない地盤要因について明確になってくるのではないかと考える。



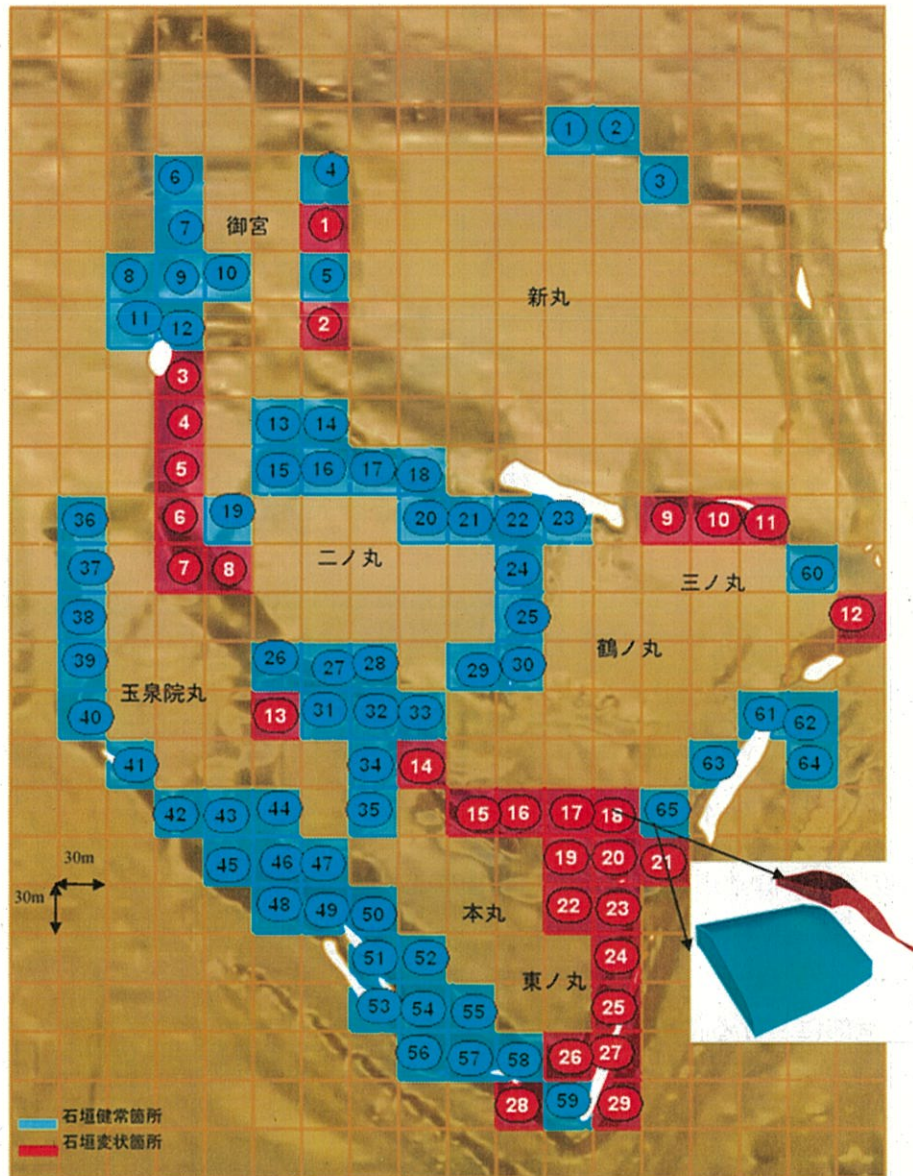


図-43 盛土の体積比較に際して区分した金沢城三次元地盤図盛土部

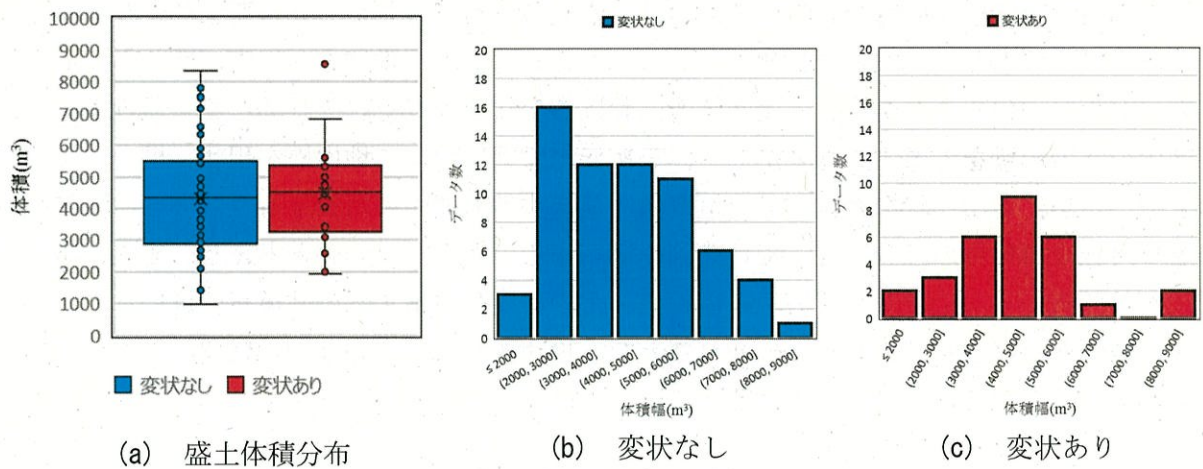


図-44 盛土層における層厚分布と各ヒストグラム



## 9. おわりに

### 1) 本研究の主な成果

- ・金沢城跡におけるボーリングの過疎地点を中心に、常時微動探査を実施し、解析により推定された盛土層厚を三次元地盤図に組み込むことで、ボーリングデータが少なく盛土厚が不明確である区域を少なくすることができ、金沢城跡全域において詳細な盛土厚が反映された三次元地盤図を構築した。
- ・構築した金沢城跡三次元地盤図を用いて、石垣変状に及ぼす石垣背後における盛土層厚の検討を行った結果、石垣変状に対する盛土層厚の程度との関係性は薄く、地山の起伏の程度など、地山形状による影響が大きい可能性が示唆された。
- ・金沢城石垣においても、石垣変状に及ぼす地盤要因について、石垣の造成された年代や、石垣背後の地下水位など、地盤要因以外に考えられる石垣変状要因をかけ合わせて検討していくことで、それぞれの地点における石垣変状に及ぼす地盤要因が明確になっていくと考えられる。

### 2) 今後の課題と展望

- ・今は新たにボーリング調査が実施されれば地盤図との差異を確認する、もしくは三次元地盤図にその都度データを組み込むことで、地盤図の更新を行っていく必要がある。
- ・本研究では石垣被害に及ぼす層や層厚の程度についてある程度は解明することができたが、なぜその層や層厚の程度が影響するのか、どう影響しているのかなどの地盤工学的なメカニズムの検討には至っていない。そのため、三次元地盤図より切り出した二次元断図等を基に FEM 解析等を実施して石垣に加わる応力や生じるせん断ひずみ等の検討を行うなどして、背後地盤の構造がどう石垣変状に影響しているのか、詳細を明らかにしていく必要がある。
- ・本研究の成果は、文化財である城郭の、特に石垣に着目した維持管理やハザードについて基礎データを提供するものであり、従来、城郭石垣を保全管理してきた考古学分野への、工学分野からの貢献が可能となるものである。本研究で用いた手法を他の城郭にも応用展開していきたいと考えている。



## 参考文献

- 1) 物理探査学会編：物理探査適用の手引き(とくに土木分野への適用), pp.47-48, pp.272-273, 2000.
- 2) 萩本由訓, 野畑有秀：単点常時微動観測を用いた基盤深さ推定に関する研究, 大林組技術研究所報, No.79, pp.1-6, 2015.
- 3) 小嶋啓介, 山中浩明：常時微動観測に基づく福井平野の第四紀層構造の推定, 土木学会論文集, No.754/I-66, pp.217-225, 2004.
- 4) 李 想, 大村早紀, 杉野未奈, 林 康裕：彦根城天守および周辺地盤における微動計測に基づく振動特性の分析, 日本地震工学会論文集, Vol.20, No.6, pp.25-40, 2020.
- 5) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄 巧：常時微動の水平動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.486/I-27, pp.251-260, 1994.
- 6) 紺野克昭, 大町達夫：常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.247-259, 1995.
- 7) 佐藤泰夫：弾性波動論, 岩波書店, 1978, pp.59-61.
- 8) 石川県金沢城調査研究所：金沢城跡(二ノ丸)埋蔵文化財調査地質調査業務委託報告書, p.42, 2020.3.
- 9) 佐川 唯：金沢城三次元地盤図の作成による地山形状と石垣変状の関係について, 卒業論文, 91p., 2020.3.
- 10) 住友天音：金沢城跡地盤における常時微動振動特性の違いについて, 卒業論文, 香川大学工学部安全システム建設工学科, 85p., 2021.3.