



## 微動アレイ観測から推定した益城町中心部の地盤 S 波速度構造

新井 洋<sup>1)</sup>、柏 尚稔<sup>2)</sup>

- 1) 正会員 国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ、主任研究員 博士 (工学)  
e-mail : arai@kenken.go.jp
- 2) 正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部、主任研究員 博士 (工学)  
e-mail : kashiwa-h92ta@mlit.go.jp

### 要 約

2016年熊本地震で甚大な建物被害の生じた益城町中心部の5地点において、微動のアレイ観測とボーリング調査を行い、深さ80m程度までの地盤のS波速度構造を推定した。微動から推定されたS波速度構造は、各地点とも、本研究および既往のPS検層結果等と概ね対応した。なお、本研究のボーリング調査では、粘性土と砂質土の試料採取および室内試験（圧密・三軸圧縮・動的変形）も行っている。これらの結果と非線形性状を考慮した熊本地震の地盤応答解析は、別の機会に報告したい。

キーワード： 2016年熊本地震、S波速度構造、微動アレイ観測、ボーリング調査

### 1. はじめに

2016年熊本地震による益城町中心部の甚大な建物被害のメカニズムを解明する上で、この地域の地盤特性の正確な把握が不可欠である。しかし、この地域の地盤特性に関する信頼性の高い情報は極めて限られている。そこで、地盤特性のうち地震動増幅に大きな影響を与えるS波速度構造を把握するため、微動のアレイ観測とボーリング調査を5地点で行った。本稿では、その結果を報告する。

### 2. 微動のアレイ観測とボーリング調査

微動のアレイ観測は、図1に●印で示すSite K、Z、O、M、Aの5地点で、2017年1月20-23日、2月11日、6月13日の日中に行った。この図は、日本建築学会九州支部が行った悉皆調査のうち倉庫や神社等を除く2340棟の建築物の大破率の分布<sup>1)</sup>に、アレイ観測を行った5地点の位置を加筆したものである。アレイ観測を行った5地点は、建築物の大破率が0%から75%以上の地域まで、全体的にカバーするよう選ばれている。ここで、Site Kは防災科学技術研究所の強震観測網KiK-net益城観測点<sup>2)</sup>の近傍（辻の城公園）、Site Oは益城町役場<sup>3)</sup>の敷地内、Site M、Aは吉見ら<sup>4)</sup>がボーリング調査を行った地点の近傍である。

各地点における微動観測アレイの形状と等価半径を表1に示す。このうち、Site K、O、M、Aにおける最大アレイのセンサ配置を図2に○印で示す。各アレイとも、センサには見かけ固有周期1sの鉛直動速度計を用い、アレイごとに微動を同時観測した。また、各地点とも、周期0.1s程度以下の短周期領域では微動のパワーが不足するため、地表面の人力加振により生じる鉛直動をセンサ間隔0.5m×6台の直線アレイにより同時観測した。観測波形は増幅後、ローパスフィルタ（遮断周波数25Hzまたは100Hz、-12dB/Oct.）

を通し、サンプリング周波数100-500HzでA/D変換（24bit）した。記録波形が定常性を保っている区間を選び、1024ポイントのデータを20-60セット程度作成して、以後の解析に用いた。

ボーリング調査は、2017年1月26-28日、1月30日-2月8日、11-12日、16-17日に行った。Site Kでは深さ60mまでのボーリングと標準貫入試験、PS検層（深さ14m以深はサスペンション法、それ以浅はダウンホール法）、乱さない試料採取（粘性土×2、砂質土×1）を、Site Zでは深さ15mまでのボーリングと乱さない試料採取（粘性土×1、砂質土×1）を、Site Oでは深さ19mまでのボーリングと乱さない試料採取（粘性土×2、砂質土×1）を、Site Mでは深さ13mまでのボーリングと乱さない試料採取（粘性土×1、砂質土×1）を、Site Aでは深さ15mまでのボーリングと乱さない試料採取（粘性土×1、砂質土×1）を、それぞれ行った。図2に、Site K、O、M、Aのボーリング調査位置を■印で示す。なお、Site K、Z、M、Aでは無水掘りボーリングの孔内水位を計測しており、その深さは14、3.0、1.6、0.0（m）であった。

表1 微動観測アレイの形状と等価半径

Site	アレイの形状	アレイの等価半径（m）
K	5角形+中心1点	2、5、10、20、40
Z	5角形+中心1点	2、5、10
O	5角形+中心1点	2、5、10、20、40、65
M	5角形+中心1点	2、5、10、20
	4角形+中心1点	35、65
A	5角形+中心1点	2、5、10、20
	3角形+中心1点	85、160

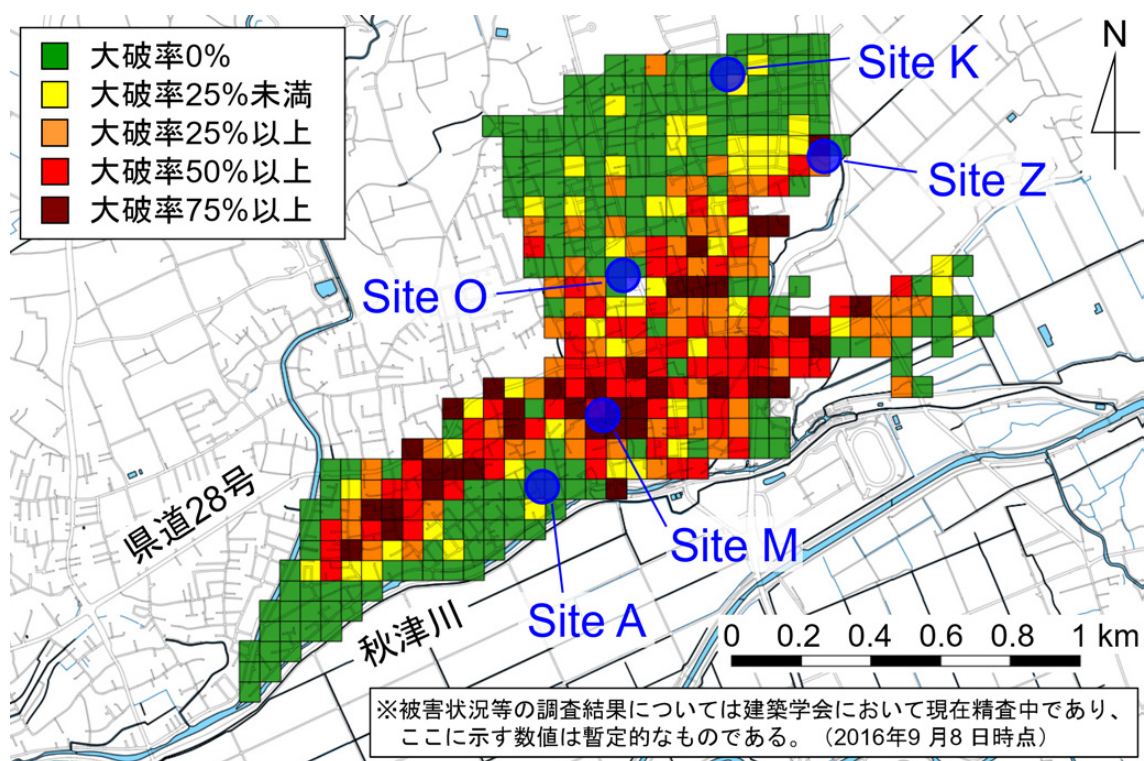


図1 益城町中心部における建築物の大破率<sup>1)</sup>と微動アレイ観測地点 (Site K、Z、O、M、A)

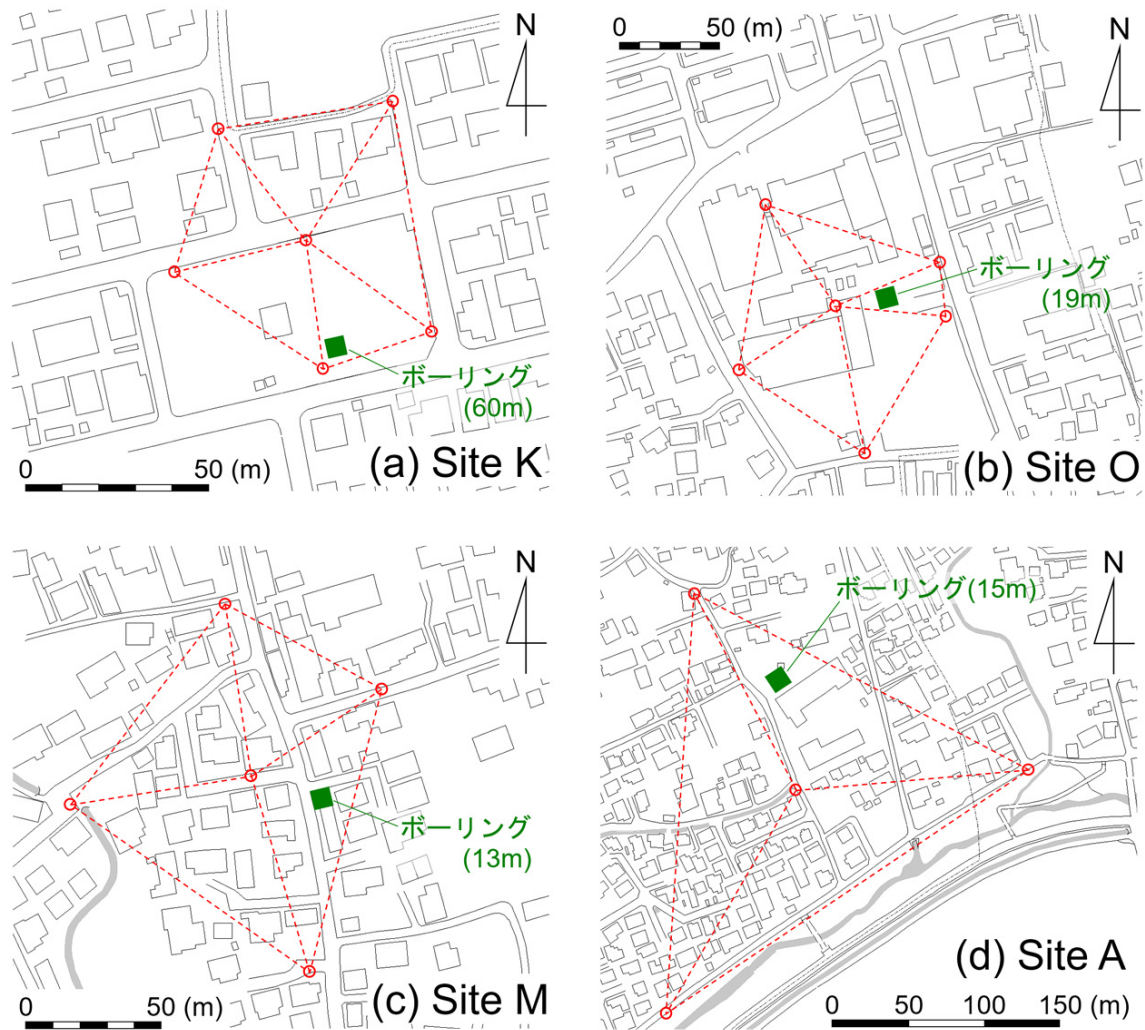


図2 Site K、O、M、Aにおける最大アレイのセンサ配置とボーリング調査位置

### 3. 微動の分散特性とH/Vスペクトル

得られた鉛直動データセットに対して最尤法によるF-kスペクトル解析<sup>9)</sup>を行った。この際、クロススペクトルの算定にはFFT（高速フーリエ変換）およびブロック平均法<sup>9)</sup>を用い、クロススペクトル逆行列の計算はGauss-Jordan法（対角項の人為的減衰1%）によった。Site Kで得られた鉛直動のF-kスペクトルの例を図3に示す。F-kスペクトルには、比較的明瞭な単一ピークが卓越する場合が多く、複数ピークが見られる場合でも、それらの波数ベクトルの大きさ（即ち位相速度）は同程度であった。他の4地点でも同様の傾向が確認された。なお、F-kスペクトルは、その最大ピークに対応する波長（=周期×位相速度）が観測アレイの最小センサ間隔の2倍から最大センサ間隔の3倍までの範囲<sup>9)</sup>にある場合を有効とした。

各地点のF-kスペクトルの最大ピークから求めた鉛直動の周期-位相速度の関係（分散曲線）を図4に○印で示す。いずれの地点でも表面波特有の分散性（周期によって位相速度が変わる性質）が確認される。Site K、Z、O、M、Aで得られた位相速度の最大値は680、470、730、790、920（m/s）、波長の最大値は270、110、250、400、640（m）である。図4の下部には、既報<sup>7)</sup>で得られた各地点の微動のH/Vスペクトル（水平動スペクトルは直交2成分の2乗和平方根）を○印で示す。図では、観測に用いた微動計の性能から有効と判断される周期範囲のデータを示している。いずれの地点でもH/Vスペクトルには比較的明瞭な周期特性が認められ、スペクトルのピークとなる周期は、Site K、Z、Oで0.4-0.5s、Site M、Aで0.8-0.9sとなっており、県道28号線の北側と南側の地点で大きく異なっている。

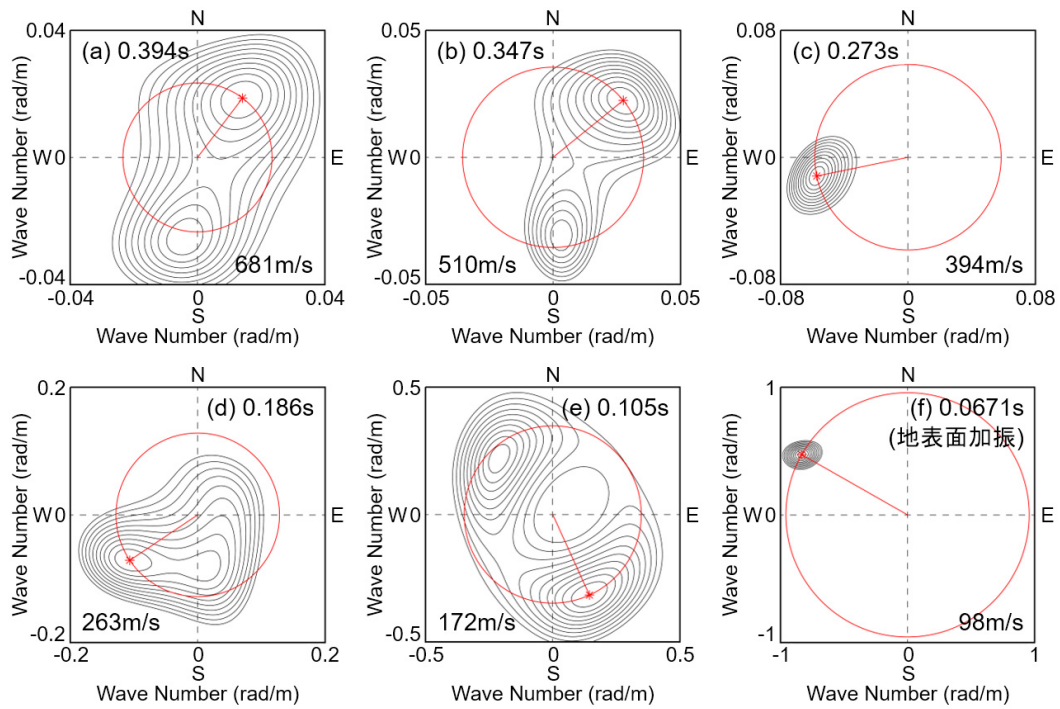


図3 鉛直動のF-kスペクトルの例 (Site K)

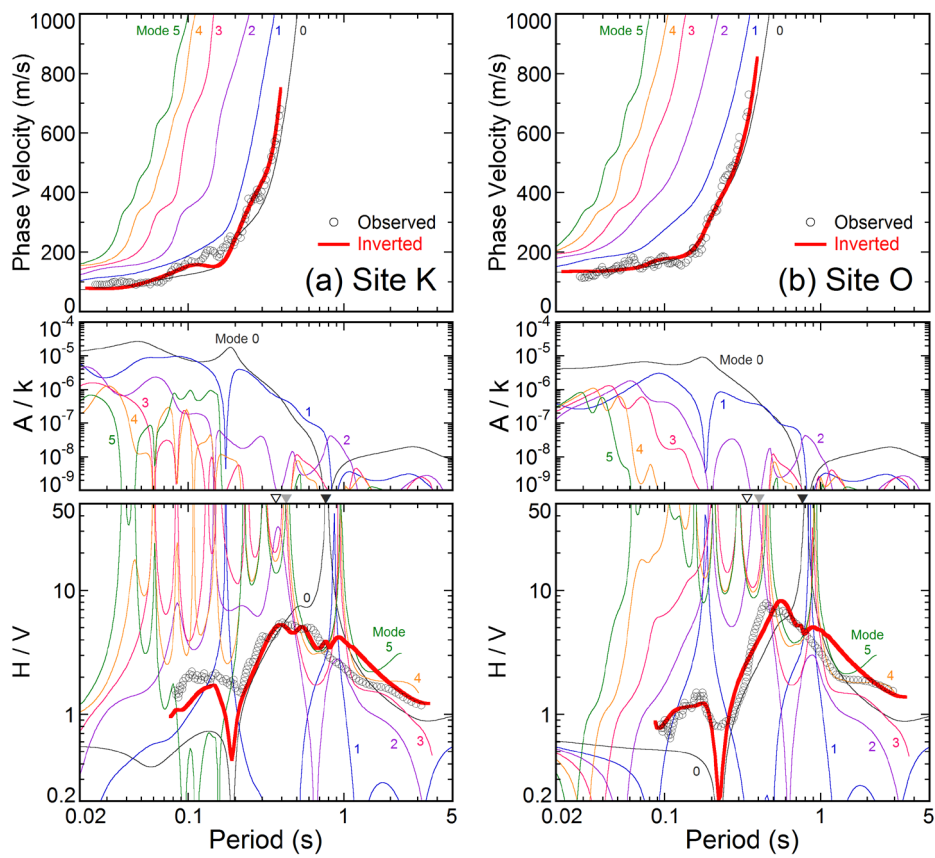


図4 分散曲線とH/Vスペクトルの観測値および逆解析理論値とレイリー波モード (Site K、O)

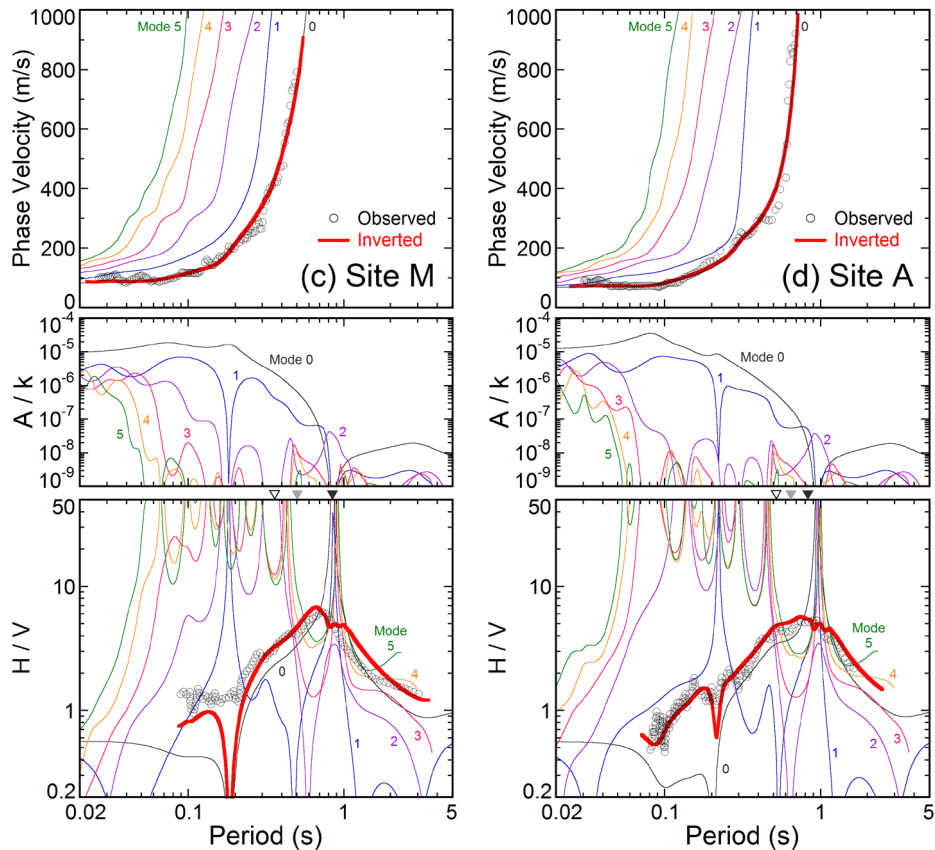


図4(続き) 分散曲線とH/Vスペクトルの観測値および逆解析理論値とレイリー波モード (Site M、A)

#### 4. 分散特性とH/Vスペクトルの同時逆解析に基づく地盤S波速度構造の推定

図4の鉛直動の分散曲線および微動のH/Vスペクトルがレイリー波および表面波（レイリー波とラブ波）によるものと考え<sup>8) 9)</sup>、高次モードの影響を考慮した同時逆解析<sup>10)</sup>を行った。この際、本研究で実施した各地点のボーリング調査結果に加えて、Site K、Zでは防災科研<sup>2)</sup>のボーリング調査結果を、Site Oでは町役場建設時<sup>3)</sup>のボーリング調査結果などを、Site M、Aでは吉見ら<sup>4)</sup>のボーリング調査結果を、それぞれ参考に、深さ60-70m程度までの地盤構造を5-7層にモデル化した。また、各層の厚さ・密度・P波速度は各地点のボーリング調査結果から仮定し、S波速度のみを同定した。各地点とも、深さ60-70m程度以深の地盤構造はSite Kの防災科研のPS検層結果<sup>2)</sup>を用い、表面波のH/Vスペクトル<sup>9)</sup>のピークを有限にするため等に必要な地殻構造は文献11を参考に仮定した（表2）。表面波のH/Vスペクトル<sup>9)</sup>の算定に用いる水平動のレイリー波／ラブ波振幅比の値は、H/Vスペクトルの理論値が長周期側で観測値と同程度になるよう、Site Z、Oでは0.8、Site K、M、Aでは1とした。なお、逆解析で考慮するモード次数は、レイリー波の見かけ分散曲線<sup>8)</sup>については4次高次モードまで、表面波のH/Vスペクトル<sup>9)</sup>については7次高次モードまでとし、分散曲線とH/Vスペクトルの重みは1:0.5とした<sup>10)</sup>。

逆解析から推定された各地点の地盤のS波速度構造を図5に赤実線および橙鎖線で示す。図には比較のため、各地点の既往の地盤情報（Site Kでは本研究および防災科研<sup>2)</sup>のPS検層結果、Site Oでは町役場建設時の標準貫入試験N値<sup>3)</sup>から経験式<sup>12)</sup>により換算したS波速度、Site M、Aでは吉見ら<sup>4)</sup>のPS検層結果）を示している。Site Kでは、推定された各層のS波速度は、深さ14m以深では両PS検層結果の中間的な値であるが、それ以浅では地表から深さ1.7mまでを除いて本研究のPS検層結果に近い値となっている。Site Zの推定S波速度構造は、Site Kのそれと大差ないように見える。Site Oでは、推定された各層のS波速度は、標準貫入試験N値から経験的に換算した値と概ね整合している。Site M、Aでは、推定された各層の

S波速度は、Site Aの深さ10-35mの砂質土層を除いて、吉見ら<sup>4)</sup>のPS検層結果と概ね対応している。ここで、図4の赤太線は、逆解析で得られたSite K、O、M、Aの推定地盤構造に対応するレイリー波の見かけの分散曲線<sup>8)</sup>と表面波のH/Vスペクトル<sup>9)</sup>である。図4から、いずれの理論値も観測値の周期特性・絶対値とも概ね説明できている。以上の結果は、本研究で推定されたS波速度構造の妥当性を示唆している。

表2 逆解析で仮定した地殻構造<sup>11)</sup>

深さ (km)	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	V <sub>P</sub> (km/s)	V <sub>S</sub> (km/s)
-3	2.4	4.5	2.4
-17	2.7	5.9	3.5
-33	3.0	6.6	3.8
∞	3.3	7.6	4.3

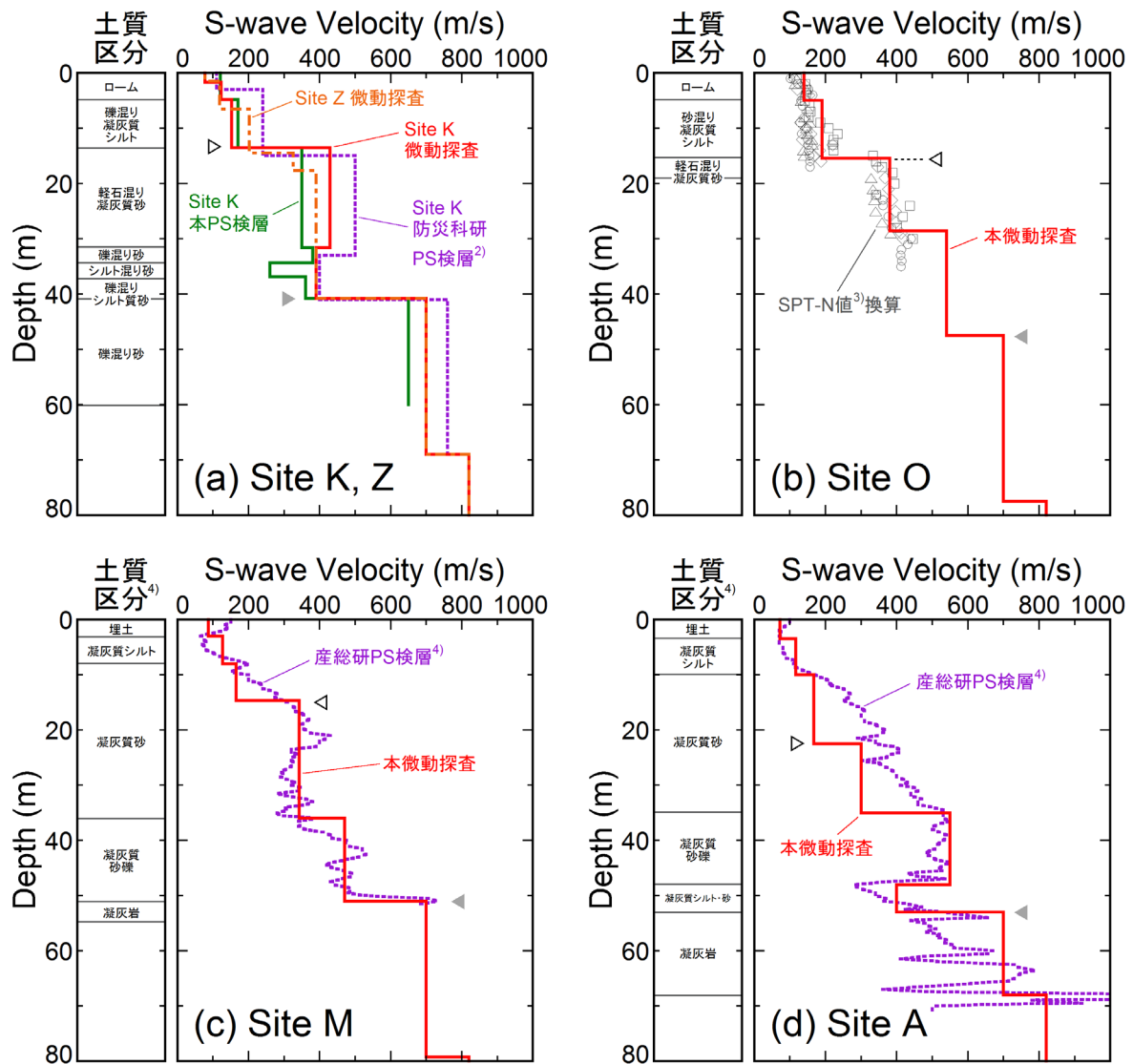


図5 微動から推定された地盤のS波速度構造とボーリング調査結果の比較

なお、Site Kの推定S波速度構造については、文献13において、防災科研KiK-net益城の鉛直アレイ弱震記録<sup>2)</sup>を用いた1次元重複反射理論に基づく弾性波動伝播解析<sup>14)</sup>から、その妥当性がさらに検証されている。また、地震により大ひずみ履歴を受けた地盤の剛性が低下・回復する場合<sup>例えば15)、16)</sup>もあるが、本研究の調査を行った時期の地盤状況は熊本地震前のそれに近い可能性が指摘されている。

考察のため、各地点の推定地盤構造に対応するレイリー波モードの分散曲線<sup>17)</sup>、ミディアムレスポンス<sup>18)</sup>を波数で除した振幅スペクトル<sup>19)</sup>、地表粒子軌跡の楕円率<sup>17)</sup>を図4に細実線で示す。図から、分散曲線に対しては、Site O、M、Aでは、観測データの得られた周期範囲で全体的に、レイリー波の基本モードの寄与が卓越している。一方、Site Kでは、周期0.1s付近および0.2s以上の範囲において、基本モードに加えて1次高次モードの影響が大きい。このことは、Site Kにおいて、レイリー波の分散曲線の逆解析から適切な推定S波速度構造を得るためには、基本モードから高次モードまでの影響を考慮する必要のあることを意味している。また、H/Vスペクトルに対しては、いずれの地点でも、その周期特性はレイリー波の基本モードに概ね支配されている。しかし、H/Vスペクトルの絶対値は、文献9、19の定式化から容易に想像されるように、レイリー波およびラブ波の基本モードから高次モードまでの影響と両者の水平動中の混在比率（または微動源の水平鉛直加振力比）が複雑に関係している様子が伺える。

また、図4のH/Vスペクトルの図の枠の上部に示されている▽、▼、▼印は、本研究で推定されたSite K、O、M、AのS波速度構造（図5の赤実線）において、S波速度が300-400m/s程度に達する地層境界（横向き△印）、700m/sに達する地層境界（横向き▲印）、および表2の地殻構造においてS波速度が2400m/sに達する地層境界（深さ220-240m程度：図表等は省略）を、それぞれ露頭基盤の上面と仮定して1次元重複反射理論に基づく弾性波動伝播解析<sup>14)</sup>から算定した地盤の固有周期である。図から、Site K、Oでは、H/Vスペクトルのピーク周期は、各地点のS波速度が300-400m/s程度または700m/sに達する地層境界（横向き△印または横向き▲印）のいずれかあるいは両方の影響を強く受けられていると考えられる。一方、Site M、Aでは、H/Vスペクトルのピーク周期は、各地点のS波速度が300-400m/s程度に達する地層境界（横向き△印）の影響は小さく、S波速度が700m/sに達する地層境界（横向き▲印）以深の地盤構造の影響を強く受けられていると考えられる。このことは、益城町中心部では、H/Vスペクトルピークの反映する地盤特性の深さが場所により異なっている可能性を示唆している。

## 5. まとめ

2016年熊本地震で甚大な建物被害の生じた益城町中心部の5地点において、微動のアレイ観測とボーリング調査を行い、深さ80m程度までの地盤のS波速度構造を推定した。微動から推定されたS波速度構造は、各地点とも、本研究および既往のPS検層結果等と概ね対応した。なお、本研究のボーリング調査では、粘性土と砂質土の試料採取および室内試験（圧密・三軸圧縮・動的変形）も行っている。これらの結果と非線形性状を考慮した熊本地震の地盤応答解析は、別の機会に報告したい。

## 謝辞

微動のアレイ観測では、国土技術政策総合研究所の中川貴文主任研究官と建築研究所の中川博人主任研究員および荒木康弘主任研究員の協力を得た。記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課、国土技術政策総合研究所、建築研究所：熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書、2016年、p.30
- 2) 防災科学技術研究所 強震観測網（K-NET, KiK-net）<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 3) 益城町庁舎建設地質調査 地質調査報告書、1979年
- 4) 吉見雅行、後藤浩之、秦吉弥、吉田望：益城町市街地の2016年熊本地震被害集中域における非線形地盤応答特性、京都大学防災研究所 研究発表講演会、2017年、A05
- 5) Capon, J. : High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Proc. IEEE, Vol.57, Issue 8, 1969, pp.1408-1418
- 6) Lacoss, R. T., Kelly, E. J., and Toksöz, M. N. : Estimation of Seismic Noise Structure Using Arrays, Geophysics,

Vol.34, No.1, 1969, pp.21-38

- 7) 新井洋、柏尚稔：2016年熊本地震における益城町中心部の建物基礎・地盤被害と微動特性、日本地震工学会大会、2016年、P2-39
- 8) Tokimatsu, K., Shinzawa, K., and Kuwayama, S. : Use of Short-Period Microtremors for  $V_S$  Profiling, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.118, No.10, 1992, pp.1544-1558
- 9) Arai, H., and Tokimatsu, K. : S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.94, No.1, 2004, pp.53-63
- 10) Arai, H., and Tokimatsu, K. : S-Wave Velocity Profiling by Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectrum, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.5, 2005, pp.1766-1778
- 11) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価、平成15年7月31日、p.12
- 12) 加藤巧祐、田守伸一郎：各種土質データに基づくS波速度推定式の提案、日本建築学会技術報告集、Vol.17, No.36, 2011年、pp.467-471
- 13) 新井洋、柏尚稔：KiK-net益城の地盤ボーリング調査と微動アレイ探査、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、2017年、pp.253-254
- 14) Schnabel P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B : SHAKE – A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972
- 15) Tokimatsu, K., and Hosaka, Y. : Effects of Sample Disturbance on Dynamic Properties of Sand, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, 1986, pp.53-64
- 16) 新井洋、関口徹、時松孝次：2004年新潟県中越地震後のK-NET・JMA小千谷における表層S波速度の回復過程、第12回日本地震工学シンポジウム論文集、2006年、pp.1414-1417
- 17) Haskell, N. A. : The Dispersion of Surface Waves on Multi-Layered Media, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.43, No.1, 1953, pp.17-34
- 18) Harkrider, D. G. : Surface Waves in Multilayered Elastic Media, Part I. Raleigh and Love Waves from Buried Sources in a Multilayered Elastic Half-Space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.54, No.2, 1964, pp.627-679
- 19) 時松孝次、新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.511、1998年、pp.69-75