

# 熊本市における表層地盤震動の時空間変動評価

津野 靖士\* 是永 将宏\* 小林 怜央\*\* 山中 浩明\*\*

## Evaluation of Spatial and Temporal Variation of Site Effects on Superficial Subsurface Structure

Seiji TSUNO Masahiro KORENAGA Reo KOBAYASHI Hiroaki YAMANAKA

We investigated the spatial and temporal variation of site amplification characteristics based on observation data from high-sampling continuous borehole seismic observations and geophysical surveys, as well as using wave propagation theory, to improve the accuracy of earthquake ground motion evaluation. Furthermore, in the vicinity of the observation site at the foot of Mt. Mannichi, where bedrock is exposed, we extracted the relationship between the spatial variation in the epicenter azimuth of site amplification and the irregularly shaped underground structure.

キーワード：表層地盤，地震波速度，地震動増幅，時空間変動，地下水位，不整形，熊本

### 1. はじめに

2016年熊本地震発生直後より熊本平野における地震動特性を評価することを目的として、臨時地震観測が実施されている<sup>1)~4)</sup>。そのうち、熊本駅近傍のボアホール連続地震観測<sup>3) 4)</sup>は1000Hzの高サンプリングでデータ収録を行った特徴を有し、表層地盤の地震波速度や地震動増幅の時空間変動を理解するために非常に効果的な観測点である。本研究では、表層地盤の地盤震動特性の推定精度向上を目的に、高サンプリングのボアホール地震観測・物理探査による実測データおよび波動伝播理論から、地震動増幅の時空間変動特性を明らかにすることを試みた。さらに、熊本駅近傍の観測点周辺は岩盤が露出した万日山の裾野に位置しており、地震動増幅の空間変動と不整形地盤との関係性を抽出することを試みた。

### 2. 観測

地表と地中において連続地震観測データが収録されている熊本駅近傍の臨時地震観測点を対象として、地盤震動特性の時空間変動やその不整形地盤との関係性を検討した。臨時地震観測点 KM04 の位置を図 1 に、周辺の地表地質図を図 2 に示す<sup>5)</sup>。観測点 KM04 は、熊本平野北西端部に位置し、図 2 より第四紀完新世の沖積層堆積物の分布域内にあることがわかる。西側には新生代第四紀更新世の金峰山火山の活動により形成された万日山があり、その火成岩が基盤層を成すものと推測される。ボーリング調査<sup>3)</sup>や微動アレイ調査<sup>6)</sup>の既存結果から、表層地盤の厚さは約 30m と推定されている。図 3 に、

観測点 KM04 に設置された地震計の外観を示す。また、その地点における土質柱状図や N 値、PS 検層結果を図 4 に示す。図中の Vs 700m/s を超える熔結凝灰岩をここでは基盤とする。地表および地中に設置された地震計は、日本航空電子工業社製のデジタル出力サーボ加速度計 (JA-40GA-02) である。センサーの最大計測範囲は ±2G (G: 重力加速度)、感度は 0.510 ± 5%V/(m/s<sup>2</sup>) である。データは地震計本体でデジタル化されており、サンプリング周波数は 1000Hz である。AD 分解能は 32bit である。データは地上部の観測筐体内に設置したコントローラ (白山工業社製: LF-1100R) とデータ収録装置を通じて外付け SSD に送信し、連続的に収録を行った。電源として商用 AC 100V を利用し、停電対策の UPS を介して電源供給を行った。地中地震計設置用のボアホールの掘削深は 43m であり、地表から深さ 42m の位置に地震計を設置した。また、地中地震計のボアホール孔口から約 1.7m 離れた地点に地表地震計を設置した。観測の実施期間は 2017 年 8 月 24 日から 2019 年 2 月 21 日の約 18 か月間である。この間に、主に九州周辺で発生した Mj 3.0 以上の 53 地震のデータが記録された。図 5 に、記録された地震の震央地図を示す。

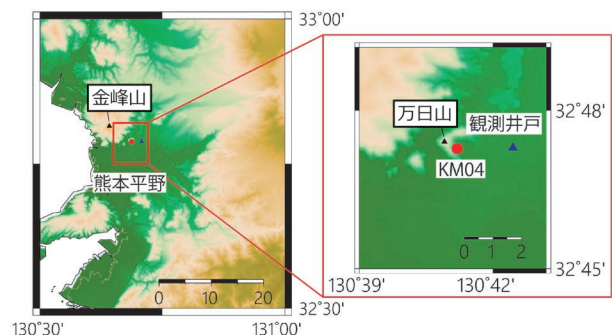


図 1 観測点 KM04 と観測井戸の位置

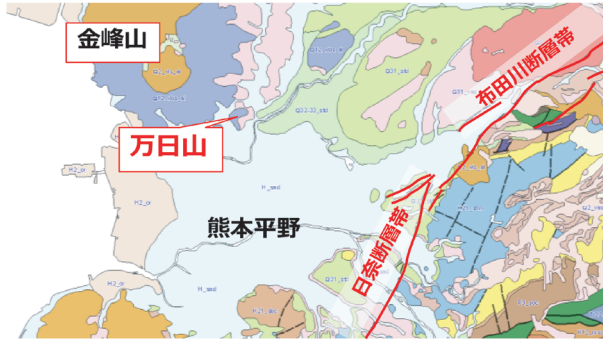
\* 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

\*\* 東京工業大学

### 3. 地震波速度の時間変動特性

#### 3.1 重錘落下を利用したP波速度の時間変動

表層地盤速度の時間変動を検討するため、重錘落下測定と地震観測データから地震波速度を検出し、一般的に



	形成時代	岩石
新第三紀	第四紀 後期完新世	盛り土・埋立地・干拓地
	第四紀 完新世	谷底平野・山間盆地・河川・海岸平野堆積物
	第四紀 後期更新世	デイサイト・流紋岩 溶岩・火砕岩
	第四紀 後期更新世中期～後期更新世後期	段丘堆積物
	第四紀 後期更新世前期	デイサイト・流紋岩 大規模火砕流
	第四紀 後期更新世前期	安山岩・玄武岩質安山岩 大規模火砕流
	第四紀 後期更新世前期	段丘堆積物
	第四紀 後期チバニアン期	非海成層
	第四紀 チバニアン期	安山岩・玄武岩質安山岩 大規模火砕流
	第四紀 チバニアン期	安山岩・玄武岩質安山岩 溶岩・火砕岩
第四紀	更新世 カラブリアン期	玄武岩 溶岩・火砕岩
	中新世 メッシアン期～鮮新世	アルカリ玄武岩・粗面玄武岩 溶岩・火砕岩
	後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期	汽水成層ないし海成・非海成混合層 礫岩
	後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期	汽水成層ないし海成・非海成混合層 砂岩
	後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期	非海成層 泥岩
	後期デボン紀～ペルム紀 シスワラリアン世	珪鉄質片岩 高P/T型広域変成岩 ざくろ石帯
	後期デボン紀～ペルム紀 シスワラリアン世	泥質片岩 高P/T型広域変成岩 ざくろ石帯
	オルドビス紀～シルル紀	超珪鉄質岩類 黒矽・大陸

熊本平野：沖積低地・阿蘇外輪山の洪積台地  
 熊本平野北部：阿蘇山由来の大規模火砕流堆積物  
 熊本平野北西部：金峰山火山の火山岩類、火砕流堆積物

図2 熊本平野周辺の地表地質図(20万分の1日本シームレス地質図<sup>5)</sup>から抜粋・一部加筆

表層地盤速度を把握するために利用されているPS検層結果と比較した。重錘落下測定は2018年7月30日～2019年2月25日までの約7ヶ月間、ほぼ一定の時刻(朝8時頃)に実施され、合計120回の記録が観測された。測定は、重さ15kgの重錘を1.3mのガイドの高さ(図3右)から自由落下させるものである。図6に、重錘落下測定による地表および地中での上下方向の振動に対する加速度波形を示す。重錘落下測定は上下加振であり、主にP波速度が卓越している。図6(a)は加振してから0.4秒の記録を抜き出した加速度波形である。矢印の位置は初動箇所を示している。黒丸の後続位相は、P波の重複反射波の到来を示し、重複反射波の位相が反転していることがわかる。ここでの重複反射波は、地表と深さ30mの工学的基盤面(図4)を往復している。また、地中で3度目に観測された重複反射波は減衰によって幾つかのピークが確認できなくなっている。図6(b)は、さらに最初の0.11秒を拡大した波形である。



図3 観測点 KM04 の外観(左)と重錘落下装置(右)

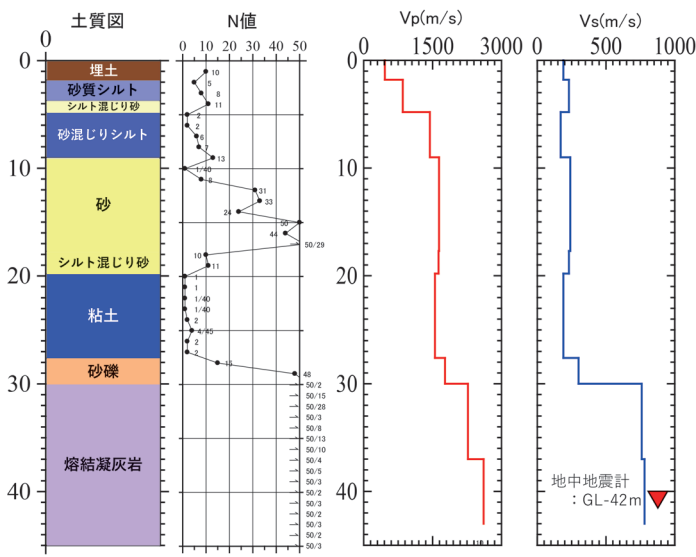


図4 土質柱状図とN値, PS検層結果<sup>3)</sup>

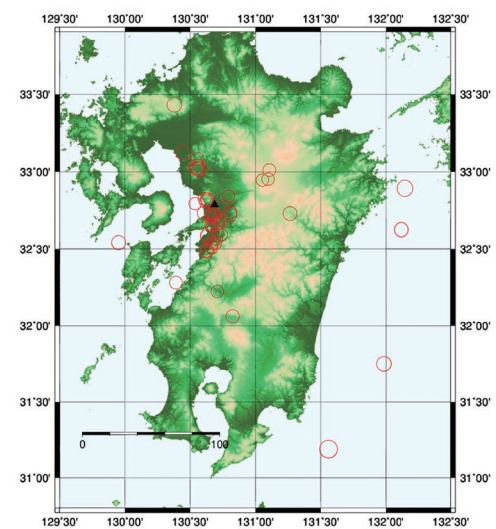


図5 使用した地震の震央位置(図中、○印)

矢印で示した波形の立ち上がりから、重錘落下時のP波の走時差は0.037sであるとわかる。

PS 検層の結果<sup>3)</sup> から求められる地表と地中地震計間におけるP波の平均速度は1482m/sである。図7は重錘落下測定により求められた地表と地中地震計間のP波速度の変動を示している。地表から地中地震計への直達P波の速度は、主に1150m/sから1200m/sの間で推移しており、PS 検層で得られた平均速度1482m/sより2割程度遅くなった。重複反射波同士の時間差から求めた地表と工学的基盤面の間を伝播するP波速度の平均速度においても、PS 検層の結果から求めた速度の理論値より3割程度低下していた。図8は、観測点KM04からやや離れた箇所に設置されている図1で示した観測井戸（アメダス）で観測された地下水位である。地下水位は、2018年9月から10月の間に地表面からやや深くなり、その後は徐々に浅くなっている。地下水位がやや深くなった2018年9月から10月の間においてP波速度に大きな変化はない。10月以降は地下水位が徐々に浅くなるのに対し、P波速度は11月を境にやや遅く

なっている。飽和状態におけるP波速度は乾燥状態より速くなる<sup>7)</sup>が、地下水位が高くなるのに対し、P波速度は遅くなっていた。P波速度が遅くなった理由としては地下水位が浅いシルトなどの不飽和帯の含水比が低下した可能性も考えられるが、今後同様のデータを蓄積するまたは給水実験等により確かめる必要がある。

### 3.2 地震動を利用したP波およびS波速度の時間変動

収録された地震データ（図5）からP波とS波の速度変動について検討する。図9は地震データから求められた地表と地中地震計間までのS波とP波初動の速度を示している。地震波のP波速度は主に750m/sから2000m/sの間で推移し、重錘落下測定で得た結果より速度が大きく、理論値に近いことが確認できる。S波については、PS 検層から求められるS波の平均速度は267m/sであり、P波速度に比べてより理論値に近い値であった。重錘落下データによるP波速度と地震動データによるP波・S波速度の乖離は、P波より波長が短いS波の方が地震動データによる速度にばらつきが見られており、地震動の斜め入射など地震データが空間変動の影響を受けていることが一因であると考えられる。

### 4. 地震動増幅の空間変動

連続地震観測点（KM04）の地中と地表で観測された42個の地震データを利用して、震央方位に対するS波の地表/地中スペクトル比を算出した。図10に、北からの時計回りで算出した震央方位55~85°, 95~125°, 170~200°, 270~300°, 310~340°に対するS波のスペクトル比を示す。なお、NS成分とEW成分のスペクトル比を相加平均したスペクトル比を最終的なスペクトル比とした。図10では、20Hz以上の周波数帯におけるS波のスペクトル比は、他の周波数帯におけるS波のスペクトル比と比較して、ばらつきが大きいことがわかる。図11に、震央方位に対するS波スペクトル比の周波数毎の平均値を示す。この図から、全震央方位において周波数帯20~50Hzのスペクトル比が他の周波数帯のスペ

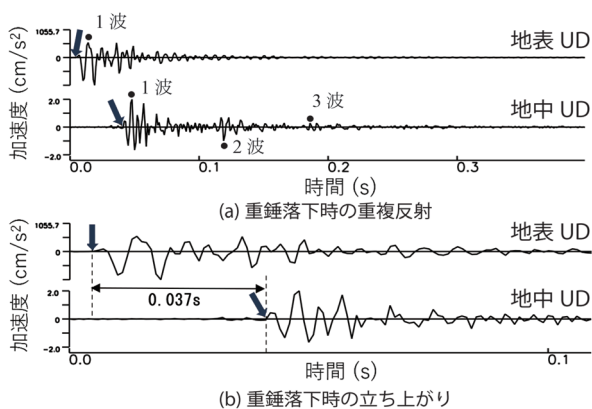


図6 重錘落下試験による上下動成分の加速度波形

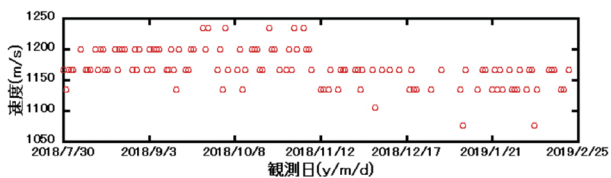


図7 重錘落下試験によるP波速度の時間変動

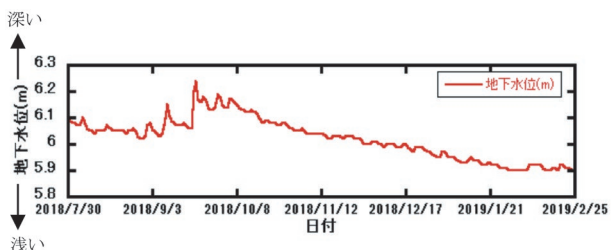


図8 観測点付近（図1の観測井戸）の地下水位

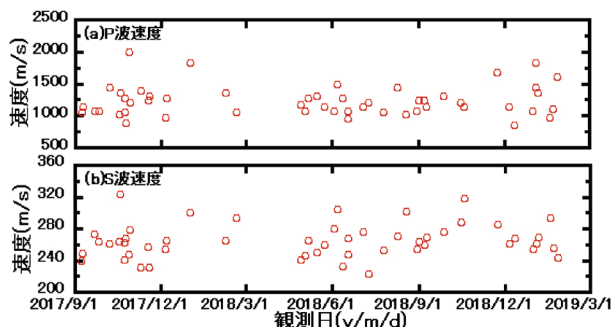


図9 地震波P波速度とS波速度の時間変動

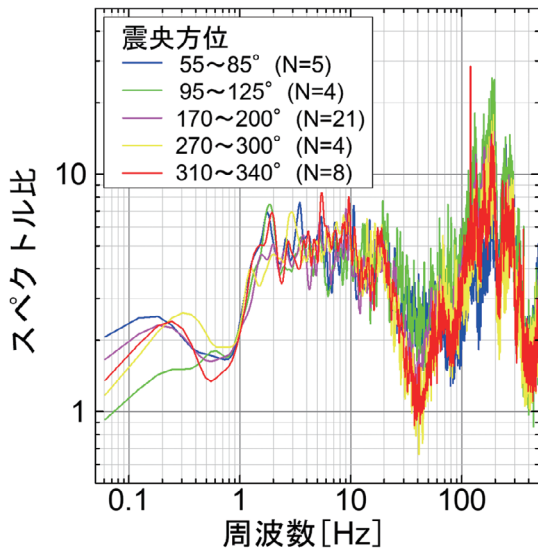


図 10 地震観測点 KM04 の震央方位に対する地表 / 地中 S 波スペクトル比

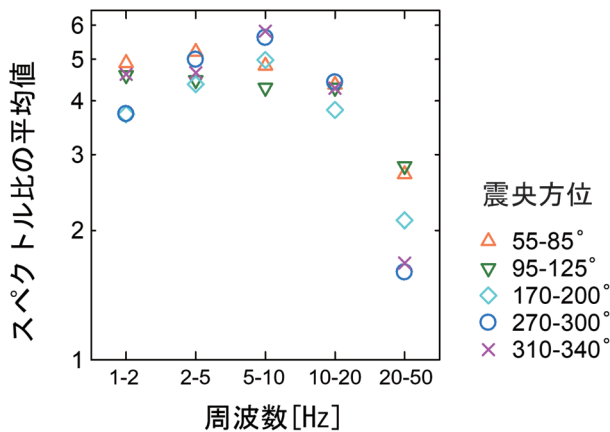


図 11 地震観測点 KM04 の震央方位に対する地表 / 地中 S 波スペクトル比の周波数毎の平均値

クトル比と大きく異なることが明瞭に示されていることがわかる。周波数帯 20~50Hz に対して、南 (170°) ~ 北西 (340°) から入射する地震動は、それ以外の地震動と比較して増幅率が小さいことがわかる。このことは、熊本駅近傍の観測点 KM04 において地震動 S 波を正確に予測するためには、観測点に対する地震動の震央方位を適切に考慮する必要があることを示している。

## 5. 物理探査から推定した S 波速度構造

### 5.1 S 波速度構造

微動アレー探査 (図 12) により得られた上下動成分の観測データに SPAC 法を適用し、レイリーの波位相速度を推定した<sup>6)</sup>。また、表面波探査データには F-K 解析 (MLM 法) を適用して表層のレイリー波位相速度を算

出した。求められた基本モードのレイリー波位相速度を図 13 に示す。山地部 (万日山の A06, A08, A11 および花岡山の A13) では 10Hz 以下の低周波数で位相速度が 500m/s 以上、万日山・花岡山と平地の境界部に位置する A05 では、A06 等と同様に 10Hz 以下の周波数帯域で位相速度が 600m/s 以上となっており、浅部まで高速度層が分布していることが推察できる。一方で、A05 を除く観測点は、A10, A17 では 7~9Hz 以上、それ以外の観測点では 4~5Hz 以上の高周波域で 200m/s 程度の遅い位相速度を示している。さらに平地部の観測点では、4Hz 以上の周波数帯域で境界部の観測点と同様に位相速度が 200m/s 以下となっていることがわかる。

基本モードのレイリー波位相速度に遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた逆解析を適用し、表層地盤の S 波速度構造の推定を行った (図 14)。初期構造として、境界部および平地部の観測点については、KM04 でのボーリングデータ<sup>3)</sup> をもとにした 3 層構造のモデルを仮定して逆解析を実施した。山地部において基盤の深度は浅く、表層近くに分布している。また境界部のうち A05 では山地部の A06 とほぼ同一の構造となっており、表層地形の変化が認められるものの万日山南東端の尾根部に位置していると考えられる。さらに万日山南側境界部の A10, A17 においては周囲の平地部観測点と比較して基盤深度がやや浅く、山地部から基盤面が傾斜して深度が変化している地点に位置しているものと考えられる。

一方、上記以外の境界部と平地部の観測点では、第 1 層が深度約 10m まで、基盤層が深度 30m の付近に位置するほぼ同一の構造が推定された。このことから、万日山・花岡山の東側、南東側においては、山地部から境界部にかけては浅部の S 波速度構造が急変するような構造形体であることが示唆される。なお、境界部および平地部での速度構造は図 4 の KM04 における PS 検層による S 波速度構造の結果とほぼ一致しており、本手法により S 波速度構造が精度よく推定されていることがわかる。

### 5.2 地震動増幅の空間変動と不整形地盤との関係性

求められた微動の H/V スペクトルのピーク周波数を図 12 に示す。ただし、ピーク振幅の値が 2.5 以下の場合には明瞭なピークが見られないものとした。万日山・花岡山山地部および山地部に極めて近い境界部ではピークが明瞭ではない、もしくはやや高周波側の 2~3Hz に緩やかなピークが見られている。一方、平地部および山地部からやや離れた境界部の地点では 1~2Hz 付近にピークがあり、明瞭な違いが見られる。H/V スペクトルからも山地部から平地部にかけて S 波速度構造に急激な変化があることが示唆される結果となった。

図 15 に、熊本駅近傍観測点 KM04 に対して半径

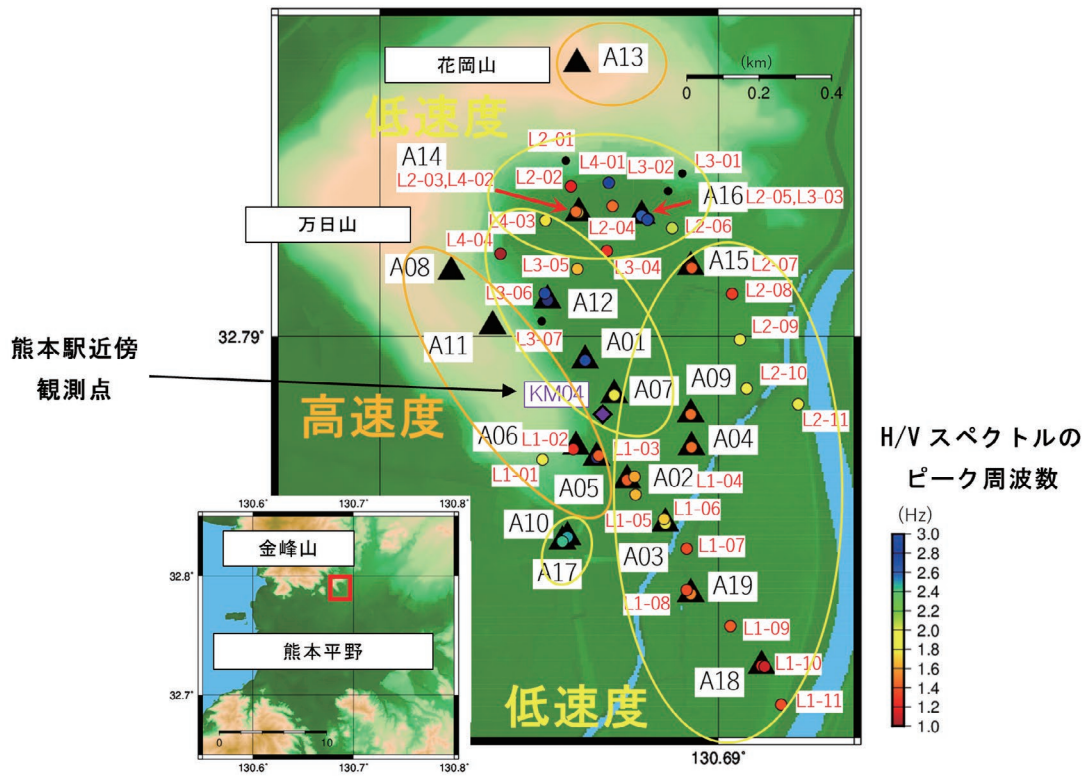


図 12 観測点の位置 (▲: 微動アレー探査の位置, ○: H/V スペクトルの算出位置とピーク周波数)

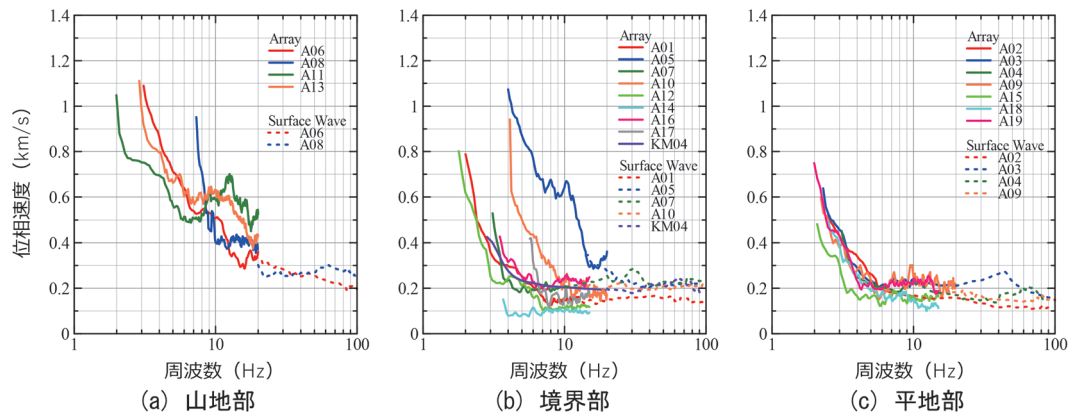


図 13 微動アレー・表面波探査によるレイリー波位相速度<sup>6)</sup>

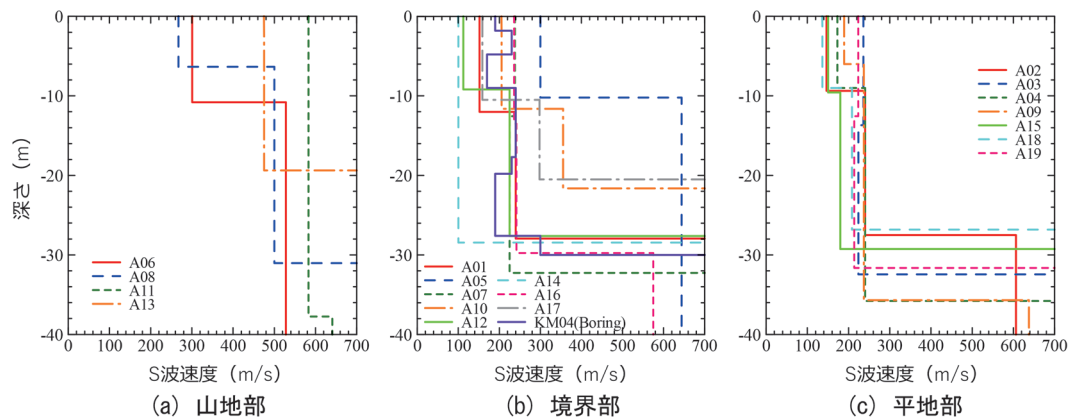


図 14 逆解析により求めた S 波速度構造<sup>6)</sup>

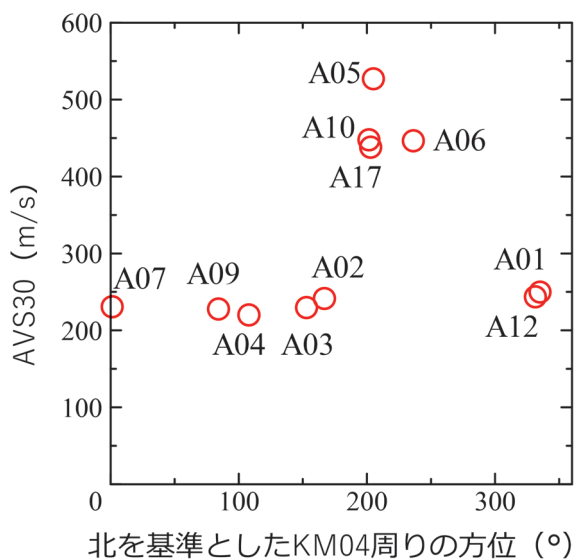


図 15 地震観測点 KM04 回りの方位に対する AVS30 (半径 400m)

400m 以内に位置する探査地点の AVS30 (深さ 30m の平均  $V_s$  値) を示す。KM04 の方位  $200^{\circ} \sim 250^{\circ}$  に位置する A05, A10, A17, A06 地点 (図 12) の AVS30 は、他の地点に比べて 400m/s 以上の AVS30 を示していることがわかる。KM04 の方位  $250^{\circ} \sim 330^{\circ}$  において半径 400m 以内に位置する地点がないため KM04 に対して西～北側に対する AVS30 の変化が分からないものの、図 11 に示されたように地震動の増幅率の変化が大きかった地震の到来方向 (南 ( $170^{\circ}$ )～北西 ( $340^{\circ}$ )) と調和する。本研究の地震データ分析結果と物理探査結果を通じて、熊本駅近傍観測点 KM04 においては、周波数帯  $20 \sim 50\text{Hz}$  の地震動 S 波が入射する方向に対する変化率と KM04 回りの表層地盤の AVS30 の変化率が対応する傾向にあることを示した。

## 6. まとめ

表層地盤の地盤震動特性の推定精度向上を目的に、高サンプリングのボアホール地震観測・物理探査による実測データおよび波動伝播理論から、地震動増幅の時空間変動特性について検討した。

熊本駅近傍観測点の高サンプリングの重錘落下測定データから求めた P 波速度は  $1075 \sim 1250\text{m/s}$  であり、約 1 割程度の時間変化を確認した。また、地震データから求めた P 波速度は  $750 \sim 2000\text{m/s}$  であることを確認し

た。これらの P 波速度の相違を受け、地震動 S 波の地表/地中スペクトル比を用いて震央方向に対する地震動増幅と物理探査から推定した不整形地盤との関係性を検討した。その結果、震央方向が異なる地震動 S 波が表層の不整形地盤に入射することにより周波数帯  $20 \sim 50\text{Hz}$  に対して地震動 S 波の増幅が異なることを示した。

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (C) (一般) (20K05039) を受けて実施した。

## 謝 辞

本研究における重錘落下測定の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文 献

- 1) Tsuno, S., Korenaga, M., Okamoto, K., Yamanaka, H., Chimoto, K., and Matsushima, T., "Local site effects in Kumamoto City revealed by the 2016 Kumamoto earthquake," *Earth, Planets and Space*, 69:37, 10.1186/s40623-017-0622-6, 2017.
- 2) 津野靖士, 是永将宏, 山中浩明, 地元孝輔, 岡本京祐, 山田伸之, 三宅弘恵, 松島健: 熊本平野で展開した臨時地震観測とその地震動特性, 日本建築学会, 第 45 回地盤震動シンポジウム, pp.24-33, 2017
- 3) 是永将宏, 津野靖士: 熊本市万日山近傍でのボアホール地震観測および PS 検層, 日本地震工学会梗概集, B-5-4, 2020
- 4) 小林怜央, 山中浩明, 津野靖士, 是永将宏: 熊本平野北部の鉛直アレイ記録を用いた表層地盤における弾性波速度の時間変動, 日本建築学会, 学術講演梗概集, pp.349-350, 2021
- 5) 産総研地質調査総合センター: 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (参照日: 2023 年 12 月 8 日)
- 6) 是永将宏, 津野靖士, 山中浩明, 小林怜央: 熊本市万日山近傍での高密度微動探査, 日本建築学会, 学術講演梗概集, pp.333-334, 2021
- 7) Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media," *Geophysics*, 21, pp.41-70, 1956.