

微動アレイ観測に基づく KiK-net 阿蘇の S 波速度構造の推定に関する研究

富崎 脩

1. はじめに

平成 28 年熊本地震 ($M_j7.3$) は、九州地方の広域に甚大な被害を及ぼした。阿蘇カルデラ北東部では K-NET 一の宮 (KMM004) において本震時の強震記録が得られ、これに基づく周辺地域の強震動評価や被害の分析が行われている。一方、阿蘇カルデラ北西部には、内牧に県の震度計が設置されており、その周辺で地盤変状などの被害が見られたほか、KiK-net 阿蘇 (KMMH04) の周辺でも地震断層及び地表変状の出現が数多く確認された¹⁾。しかし、KMMH04 は 2012 年から現在に至るまで休止しており、熊本地震における強震記録は観測されていない。周辺地域の地震被害の分析を行うためには別途、本震時の地震動を推定しなければならない。

適切な地震動評価には、地震動の増幅特性に影響を与える地盤構造を精度よくモデル化する必要がある。しかし KMMH04 では、PS 検層結果が公開されているが地震基盤に達しておらず、地下構造に関する情報は十分ではない。

そこで本研究では、KMMH04 周辺において微動アレイ観測を行い、地震基盤までの S 波速度構造の推定を行うとともに、阿蘇カルデラ北部における地盤震動特性の検討を行う。

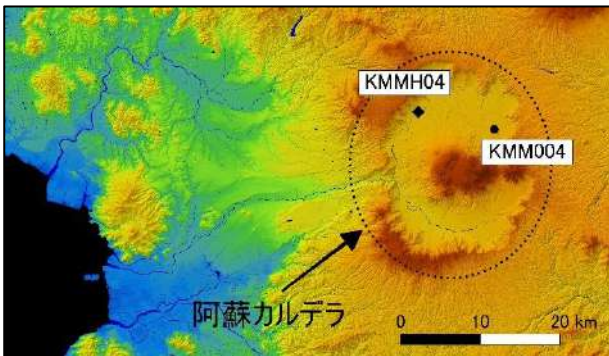


図1 阿蘇カルデラと観測対象地域 (背景は地理院地図²⁾)

2. 微動アレイ観測

微動アレイ観測では、1 つの地震計を中心として、半径 r の円周上に 3 点以上の地震計を均等に設置することで 1 つのアレイを構成し、同時に微動を観測する。本研究では、KMMH04 周辺において、8 つのアレイ半径で、4 点アレイによる微動観測を行った。観測は、2021 年 11 月 3 日～11 月 4 日の日中に行った。半径の小さなアレイ ($r=3\text{m}, 11\text{m}, 33\text{m}, 100\text{m}, 200\text{m}, 400\text{m}$) では、センサーに可搬型加速度計 JEP-6A3-10 (感度 10V/g 、ミツトヨ社製)、半径の大きなアレイ (アレイ半径 $800\text{m}, 1500\text{m}$) では、速度計 LE-3D/5s (Lennartz Electronic 社製) を用いた。ロガーはどちらも DATAMARK

LS-8800 (AD 分解能: 24 bit、白山工業株式会社製) を用い、サンプリング周波数は 100Hz とした。アレイ配置を図 2、アレイ半径と観測時間等を表 1 に示す。

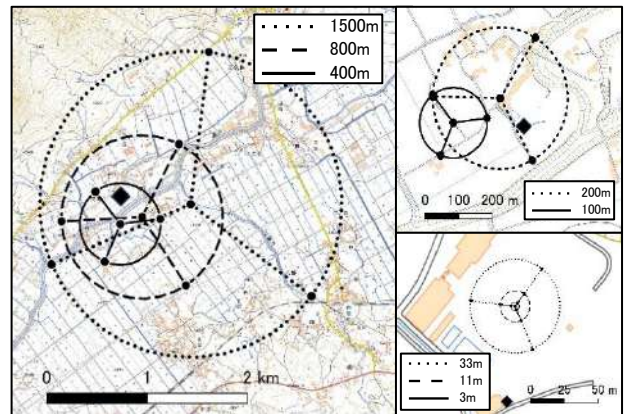


図2 研究対象地域とアレイ配置 (◆は KMMH04、背景は地理院地図²⁾)

表1 微動アレイの観測の諸元

アレイ	半径 (m)	時間 (分)	解析対象周波数(Hz)
A	1500	300	0.05-5.0
B	800	143	
C	400	90	
D	200	60	0.5-10.0
E	100	70	
F	33	30	0.5-20.0
G	11	20	
H	3	15	

3. 解析の概要と結果

3.1 SPAC 法による位相速度の算出

微動アレイ観測記録の解析には、空間自己相関法 (SPAC 法)³⁾を用い、Rayleigh 波の位相速度を推定した。

解析では、微動記録をアレイサイズに応じて定めた解析長によって分割し、分割した各区間から 4 つの観測点のスペクトル形状が安定したものを解析に用いるデータとして選択した。その後、表 1 に示した解析対象区間に対して SPAC 法を適用し、アレイ毎に Rayleigh 波の位相速度を求め、それらを統合して一本の分散曲線を抽出した (図 3)。ただし、アレイ半径 100m の解析結果に関しては、他のアレイ半径から求められた位相速度との連続性が認められなかったため採用しなかった。解析に用いるデータや解析長の違いにより、3 通りの分散曲線が抽出され、低周波数帯域での位相速度が大きいものから ASO_R、ASO_C、ASO_L とした。アレイ半径

400mの観測記録の解析において、解析長をASO_R、ASO_C、ASO_Lでそれぞれ20.48秒、81.92秒、40.96秒とし、その他のアレイ半径での解析長は統一した。3通りの分散曲線において、アレイ半径3~200mの観測記録から得た位相速度は統一しており、抽出した分散曲線の0.54 Hz以降の位相速度は等しい。またASO_Lでは、アレイ半径1500mと800mの解析結果に連続性が見られず、1.4 km/s程度の位相速度までしか求められていない。

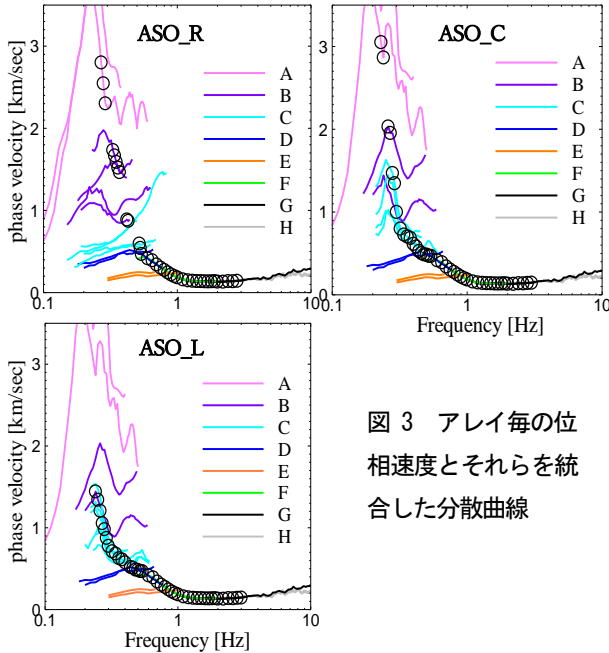


図3 アレイ毎の位相速度とそれらを統合した分散曲線

3.2 S波速度構造の推定およびH/Vスペクトルの比較による妥当性の検討

観測を行った地盤のS波速度構造を求めるため、前述した3通りの分散曲線に対して、遺伝的アルゴリズム (GA) ⁴⁾による逆解析を行った。まず、探索範囲の初期値は、防災科学技術研究所のPS検層結果に基づくS波速度構造 (V_s) の最下層 (G.L.-124m, $V_s=330$ m/s) にJ-SHIS⁵⁾およびJIVSM⁶⁾の地下構造モデルが続く地下構造を仮定し、それを含むように設定した。このときそれぞれの分散曲線に応じて、探索範囲設定の基準にJ-SHISの地下構造を用いるものをそれぞれR1、C1、L1、JIVSMの地下構造を用いるものをR2、C2、L2とした。次に浅い層からS波速度、層厚の探索範囲を変えて誤差を小さくしていき、これを最下層まで繰り返し、最終的な探索範囲は各層の推定された地下構造がなるべく下限値、上限値に近接しないように設定した。最下層については、その探索範囲の上限をJ-SHISおよびJIVSMの地震基盤のS波速度に基づき、それぞれ3.1 km/s、3.2 km/sとした。ただし、L1、L2に関してはそれぞれ2.1 km/s、2.0 km/sとした。GAのパラメータは6bitで離散化、1世代あたりの個体数は40、世代数は500、交叉率は70%とした。GAによる理論計算に用いるP波速度 V_p (m/s) と密度 ρ (g/cm³) は以下の換算式 ⁷⁾⁸⁾によりS波速度 V_s (m/s) から算出した。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (1)$$

$$V_p = 1.11V_s + 1290 \quad (2)$$

観測値の分散曲線とGAで求められた速度構造に基づく理論Rayleigh波基本モードの分散曲線の比較を図4、推定したS波速度構造を図5に示す。

それぞれの分散曲線において、観測値と理論値が概ね一致している。推定S波速度構造は分散曲線や探索範囲設定に用いた地下構造モデルの違いにより、差異が見られた。特に、地震基盤に達するまでの深度が、C1、C2では0.4km程と比較的浅いことや、R1、R2では0.6 km/s程度の層が深さ0.12 kmと、他の4構造より浅い位置に出現することが挙げられる。

次に、推定した地下構造モデルに基づくRayleigh波基本モードの楕円率と観測した全地点の微動記録から求めた微動の水平動と上下動のスペクトル比 (微動H/Vスペクトル)、さらに過去に同地点で観測された7つの地震記録⁹⁾より求めたコーダ波のRadial成分とVertical成分のスペクトル比 (R/Vスペクトル) の平均との比較を行った。これらの卓越周波数は速度構造に基づくRayleigh波基本モードの理論楕円率の卓越周波数と対応することが知られている。微動記録は解析長20.48秒、バンド幅0.24 HzのParzen windowで平滑化し、安定した20ブロックの記録の平均を用いた。また、地震記録はS波コーダ波の40.96秒間を用い、バンド幅0.3 HzのParzen windowで平滑化した。図6に比較の結果を示す。

微動記録によるH/Vスペクトルおよび地震記録によるR/Vスペクトルの第1ピークはともに0.4 Hz程であるのに対し、推定S波速度構造の理論値の第1ピークは、R1は0.29 Hz、R2は0.28 Hz、C1は0.24 Hz、C2は0.25 Hz、L1は0.22 Hz、L2は0.22 Hzといずれも低周波数側に見られる。本研究におけるアレイ半径が大きな微動アレイ観測では自動車等によるノイズが多く含まれており、比較的半径の小さなアレイに比べて、同一アレイから求められる位相速度の一致度やアレイ間の位相速度の連続性が乏しい。H/VスペクトルやR/Vスペクトルの第1ピークは深部の地下構造の影響を強く受けており、このような深部地下構造は半径の大きなアレイの結果から推定されることから、深部地下構造については、再観測を実施するなど再考の余地がある。

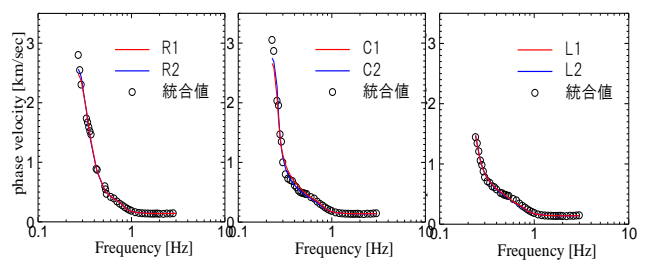


図4 推定した地下構造に基づく理論分散曲線と観測分散線の比較

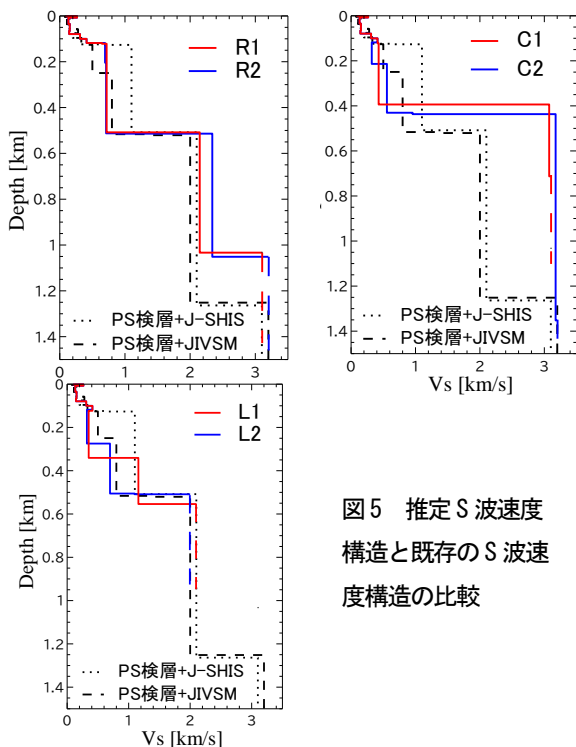


図5 推定 S 波速度構造と既存の S 波速度構造の比較

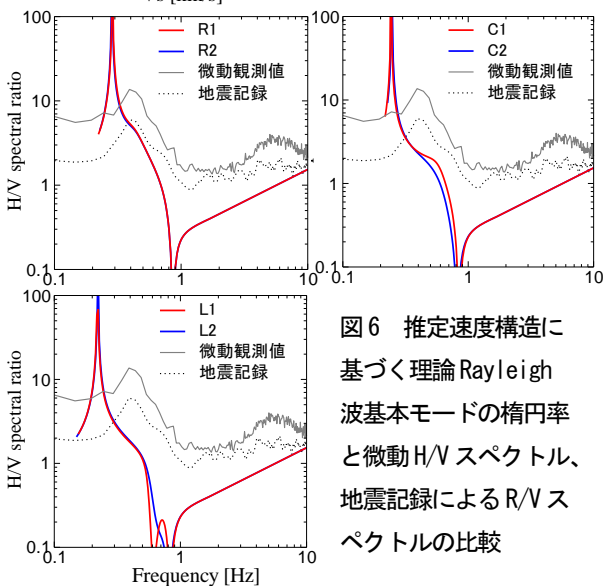


図6 推定速度構造に基づく理論 Rayleigh 波基本モードの楕円率と微動 H/V スペクトル、地震記録による R/V スペクトルの比較

4. 1次元地盤増幅率の検討

地盤増幅率の検討をするため、地震基盤から1次元地盤増幅率をSH波の1次元重複反射理論¹⁰⁾に基づき算出した。密度 ρ (g/cm^3) は (1) 式を用いて算出した。また Q_s 値については、全層でS波速度 (m/s) の1/15とし、周波数依存性については考慮していない。図3で抽出した分散曲線のすべての周波数帯域を用いて推定した地下構造 (R1, R2 等) と、信頼性の高い0.54 Hz以上の周波数帯域のみを用いて推定したに基づく推定地下構造 (推定浅部地盤) より求めた1次元地盤増幅率の比較を図7に示す。低周波数帯域のピークは、推定浅部地盤は0.43 Hzであるのに対して、R1, R2は0.31 Hz、C1, C2は0.26 Hz、L1, L2は0.24 Hzといずれも推定浅部地盤に基づく値よりも低周波数帯域のピークが見られ、探索範囲を変えた場合でも同じ周波数でピークが見られた。

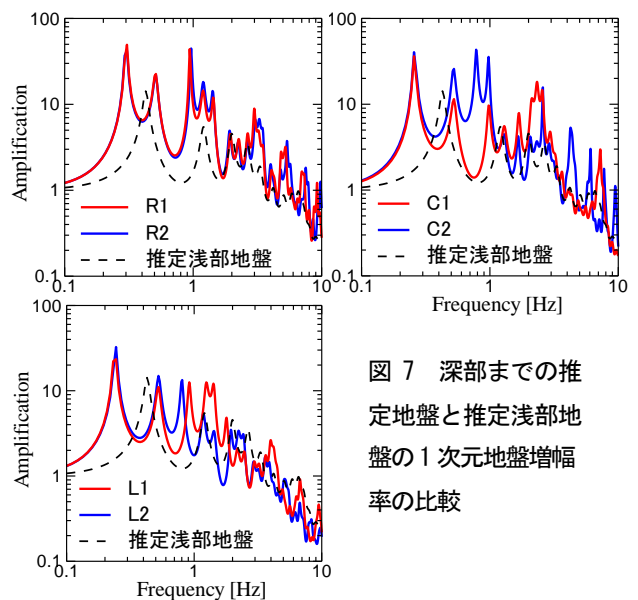


図7 深部までの推定地盤と推定浅部地盤の1次元地盤増幅率の比較

5. K-NET 一の宮周辺との地盤震動特性の比較

重藤・他 (2019)¹¹⁾、五通 (2020)¹²⁾等は、本研究の対象地域より東の阿蘇カルデラ内に設置されているKMM004周辺、ならびに平成28年熊本地震後に設置された臨時地震観測点周辺で微動アレイ観測を実施し、各地点のS波速度構造を推定している。そこでKMM004、さらにKMMH04に比較的距離の近い役犬原 (YIB) と黒川 (KRK) における推定S波速度構造と、本研究における推定S波速度構造との地盤震動特性の比較を行う。KMMH04の推定S波速度構造としては、R1を代表値として比較する。KMM004と各観測地点との位置関係、表層地質の違いを火山地質図¹³⁾にて示す (図8)。

図9に各地点の観測値に基づく分散曲線の比較と推定S波速度構造の比較を示す。KMMH04の分散曲線は、特に高周波数帯域で他の3地点の分散曲線と比較して位相速度が小さく、推定されたKMMH04表層のS波速度は他の3地点より遅い。これは、KMMH04の表層地盤を構成する軟弱なカルデラ埋積層が影響していると考えられる。

図10にKMMH04とKMM004周辺の3地点における強震記録のコード波R/Vスペクトル比の比較と推定地下構造に基づく1次元地盤増幅率の比較を示す。また、図11に各地点におけるブーゲー重力異常図¹⁴⁾を示す。各地の重力値は地下の密度の不均質性により異なり、その実測値と等緯度の標準重力の差を重力異常という。一般に、高重力異常の地点では基盤が浅く、低重力異常の地点では基盤が深い傾向にある。

R/Vスペクトル比の第1ピークは、KMM004は0.42 Hz、KRKは0.24 Hz、YIBは0.28 Hz、KMMH04は0.39 Hzである。KRKとYIBは比較的低周波数側に見られ、KMMH04とKMM004は近い値を示している。これは、重力異常図の傾向と一致する。また1次元地盤増幅率の低周波数側のピークは、KMM004は0.28 Hz、KRKは0.26 Hz、YIBは0.27 Hzとカルデラ北部の中央部に位置する2地点がより低周波数帯域で

大きく増幅する地盤であることが分かる。重力異常図の傾向を考慮すると、KMMH04 の 1 次元地盤増幅率も KRK と YIB より高周波数側でピークが見られると考えられる。本研究の推定地下構造の中では、R1 と R2 がこの傾向に一致する。

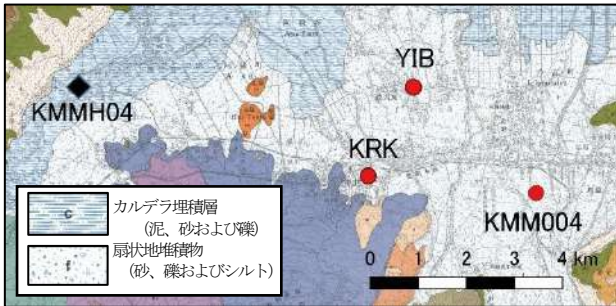


図8 各観測地点の位置関係 (背景は火山地質図¹³⁾)

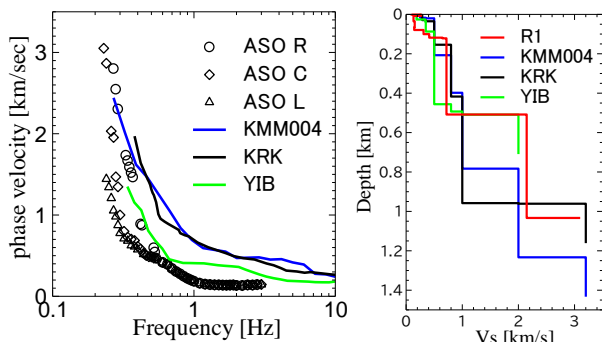


図9 各観測地点の推定地下構造と理論分散曲線の比較

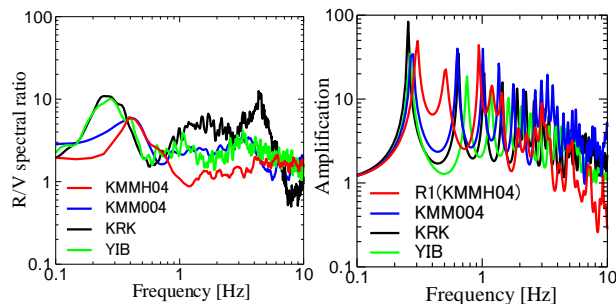


図10 各観測地点の強震記録のコーダ波 R/V スペクトル比と 1 次元地盤増幅率の比較

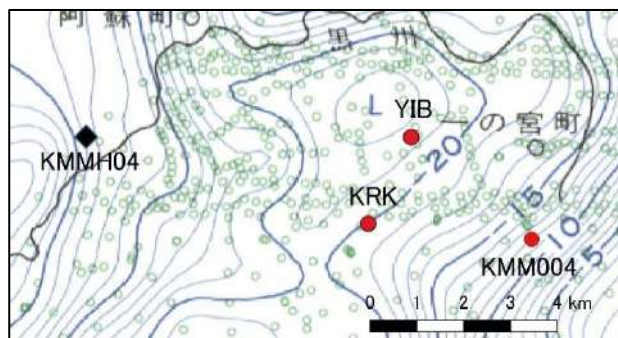


図11 各観測地点のブーゲー重力異常¹⁴⁾

6. まとめ

本研究では、KiK-net 阿蘇で実施した微動アレイ観測の記録に、SPAC 法を適用して得られた分散曲線から GA を用いてそれを満たす S 波速度構造を推定した。推定した地下構造に基づく H/V スペクトルや 1 次元地盤増幅率を、観測値や

既存構造、また同じ阿蘇カルデラ内に設置されている K-NET 一の宮周辺での既往研究のデータと比較検討し、地盤の特徴について考察した。得られた知見を以下に示す。

- SPAC 法での解析により 0.54 Hz 以上の周波数帯域において信頼性の高い分散曲線が得られた。より低周波数側の分散曲線の精度向上には、大きいアレイ半径 (800 m 程度以上) の微動アレイ観測を再度実施する必要がある。
- KMMH04 の表層地盤の Vs は KMM004 よりも遅く、これには軟弱なカルデラ埋積層の堆積が影響している。
- KMMH04 と KMM004 周辺の 3 地点の R/V スペクトルのピーク周波数は、低重力異常値を示す地点ほど低周波数側にあり、重力異常図の傾向と一致する。
- KMMH04 の 1 次元地盤増幅率は、KMM004 周辺の 3 地点と同様、1 Hz よりも低周波数帯域でピークを持つ。

今後は、KMMH04 のより詳細な地盤構造を把握し、地震被害との関連性や他地点との関係性の検討をしていきたい。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査、平成 28~30 年度成果報告書：活断層の活動区間を正確に把握するための詳細位置・形状等の調査及び断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調査観測、pp.36-37、2018 国土地理院：地理院地図 (電子国土 Web) ,
- 2) <https://maps.gsi.jp> (参照 2021-10-03)
- 3) 岡田広、松島健、森谷武男、笹谷努：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法、物理探査、43、pp.402-417、1990
- 4) 山中浩明、石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析、日本建築学会構造系論文集、第 468 号、pp.9-17、1995 防災科学技術研究所、J-SHIS 地震ハザードステーション、doi.org/10.17598/nied.0010、2019
- 5) 地震調査研究推進本部：
https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshn/12_choshuki_dat/ (参照 2021-12-13)
- 6) 太田外氣晴、江守勝彦、河西良幸：耐震、振動、制御、共立出版、339p、2001
- 7) 狐崎長琅、後藤典俊、小林芳正、井川猛、堀家正則、斎藤徳美、黒田徹、山根一修、奥田宏一：地震動予測のための真相地盤 P, S 波速度の推定、自然災害科学、Vol. 9、No. 3、pp. 1-17、2001 防災科学技術研究所：NIED K-NET, KiK-net,
- 8) doi.org/10.171598/NIED.0004、2019
- 9) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Earthquake Engineering Research No. EERC72-12, pp. 88, 2001
- 10) 重藤迪子、迫原尚也、五通康形、神野達夫：微動アレイ観測に基づく阿蘇カルデラ北東部における S 波速度構造の推定、日本建築学会学術講演梗概論文集 (北陸)、pp. 557-558、2019
- 11) 五通康形：阿蘇カルデラ北東部における 3 次元地下構造モデルの構築に関する研究、九州大学修士論文、2020 産業技術総合研究所地質調査総合センター、
- 12) 火山地質図 阿蘇火山地質図 (3 刷) 1:5 万、1985 産業技術総合研究所地質調査総合センター、
- 13) 重力図_大分地域重力図、2001