

地震記録と微動記録に基づく K-NET 一の宮の地下構造の再検討

柚木 拓海

1. はじめに

熊本地震では、4月14日21時26分M6.5の前震と4月16日1時25分M7.3の本震において最大震度7を観測し、大きな被害が生じた。

阿蘇カルデラ北東部に位置する防災科学技術研究所の強震観測点 K-NET 一の宮 (KMM004) において周辺地域では顕著な建物被害はなかったが、北へ 1.8 km 離れた場所に位置する阿蘇神社において、固有周期が長いと考えられる楼門や拝殿が倒壊し、本震では周期約 3 秒で加速度応答値が大きく卓越した長周期地震動が観測され、これらの関連性が指摘されている (田中、2016¹⁾)。

地震動は、表層から深部に至るまでの地盤の構造に強く依存するといわれており、地震動を検討するためにはその地盤の構造を把握することが必要不可欠である。そのため、上菌 (2017)²⁾、五通 (2018)³⁾、五通 (2020)⁴⁾ において長周期地震動の成因とも考えられる、地盤震動特性の影響について検討を行うため、KMM004 において微動アレイ観測を行い、地下構造モデルの推定を行ってきた。しかし、既往の研究で推定した地下構造において 2 種類の解釈が生じたため KMM004 の地下構造モデルの再検討を行うこととした。

2. 既往の研究による KMM004 の地下構造モデルとその問題点

既往研究における微動アレイ観測による位相速度を図 1 左そこから推定した解釈の異なる 2 種類の S 波速度構造を図 1 中央、右、それに基づく理論分散曲線を図 2 Rayleigh 波基本モードの理論楕円率の結果を示す。また、地震動の S 波コーダ波部分の Radial 成分と Vertical 成分のスペクトル比 (コーダ波 R/V スペクトル) および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) を図 3 に併せて示す。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⁵⁾。

図 1 左に緑線で示した地下構造 (以降、地下構造 A とする) で示した地下構造は、推定した地下構造から算出した理論楕円率と微動観測の H/V スペクトル、コーダ波 R/V スペクトルが第 1 ピークから対応せず一致していない。一

方、図 1 右に赤線で示す地下構造 (以降、地下構造 B とする) で示した地下構造は、理論楕円率においては、ピーク値が一致しているが、周辺の地下構造モデルと整合性がとれない点や地下構造の推定に用いた理論分散曲線が高次モードであった可能性がある

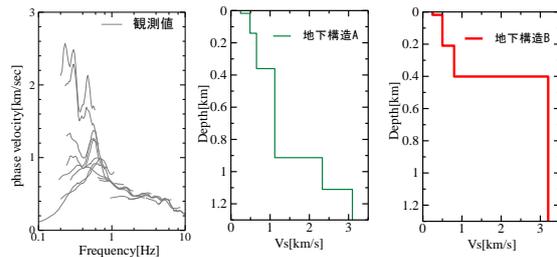


図 1 微動アレイ観測値による位相速度と推定した地下構造

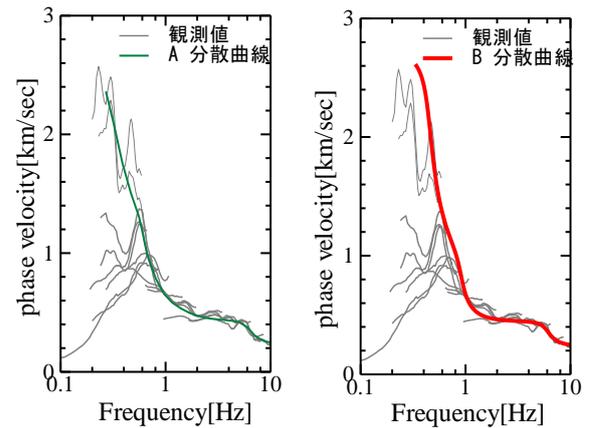


図 2 推定した地下構造の理論分散曲線

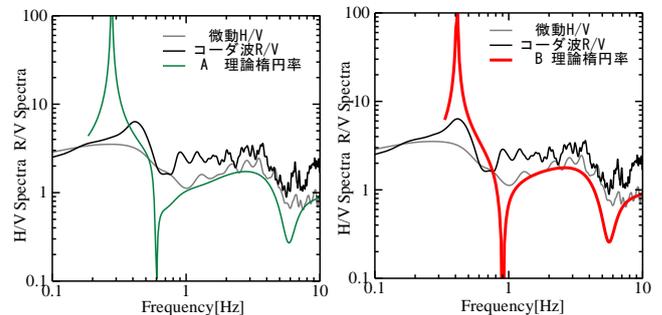


図 3 推定した地下構造の理論計算 H/V スペクトル

五通 2020 による図を一部修正

3. KMM004における微動アレイ観測

本研究の再検討で用いた微動アレイ観測記録は上菌(2017)および五通(2018)によるものである。以下その概要を上菌・他(2017)および五通・他(2018)を参照して記す。過去の微動アレイ観測の内、2016年9月30日~10月1日の観測では、可搬型加速度計 JEP-6A3-10 (感度 10V/g、ミツトヨ社製) と微動波形データを AD 変換して、ノートパソコンにデータを伝送するためのトランスミッター RS-AD24 (AD 分解能: 24 bit、アルニック社製) を組み合わせた機材、2016年12月17~19日、2017年9月8~9日に行った観測では、RS-AD24 の代わりに収録器として GPL-6A3P (AD 分解能: 24 bit、ミツトヨ社製) を用いた。サンプリングは 100 Hz とした。アレイ半径と観測時間を表 1 に示す。

表 1 微動アレイ観測の諸元

アレイ名	半径(m)	観測時間(分)
A	800	87
B	450	59
C	350	60
D	205	60
E	80	20
F	40	15
G	18	15
H	6	15
I	2	15

4. SPAC 法による位相速度の算出

本研究では、位相速度を算出する方法として空間自己相関法 (SPAC 法)⁶ を用いた。今回の解析では解析区間長は、アレイ A~C は 40.96 秒、D~F は 20.48 秒、G~I は 10.24 秒とし、その解析区間長の半分ずつを重ねながら観測された微動記録を分割する。そして、分割されたブロックのうち、4 つの地震計から得られた記録が安定しているブロック、すなわち 4 本のフーリエスペクトルが一致したブロックを解析対象区間とした。そして解析対象区間に対して SPAC 法を適用し、位相速度を算出し、分散曲線を抽出した。(図 4)

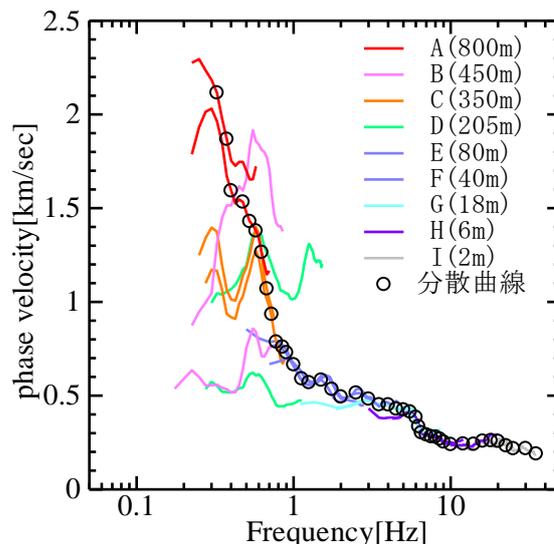


図 4 各アレイ半径位相速度と抽出した分散曲線

5. 地震動 R/V, 微動 H/V スペクトル算出

5.1 コーダ波 R/V スペクトル比

地震動の S 波コーダ波部分の Radial 成分と Vertical 成分のスペクトル比 (コーダ波 R/V スペクトル) を算出する。R/V スペクトルを算出する際は、S 波コーダ波部分の 40.96 秒間を用いて、KMM004 で熊本地震本震前後に観測された $M_{JMA} 4.8$ 以上のものの中から選出した 6 個の R/V スペクトルとその平均を図 5 に示す。

5.2 微動 H/V スペクトル比

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) を算出する。微動 H/V スペクトルを算出する際の解析区間は 81.92 秒とし、読み取り開始時間を 40.96 秒ずつずらしながらブロックに分割した。微動アレイ観測を行ったそれぞれの大きさの半径 (分散曲線の抽出に使用しなかったアレイ半径 205 m と 450 m のデータは除く) の記録に関して円形アレイのそれぞれ 4 点ずつについてスペクトル形状の安定した 10 個のブロック (各アレイ半径それぞれ計 40 個) を H/V スペクトルとして選出した。図 5 に示す。

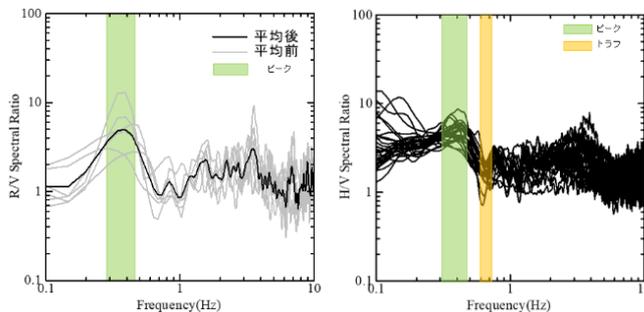


図 5 コーダ波 R/V スペクトルと微動 H/V スペクトル

6. S 波速度構造の推定

地盤の S 波速度構造を求めるため遺伝的アルゴリズム

(GA)⁷⁾による逆解析を行った。

S波速度探索範囲の初期値は、JIVSM⁹⁾の地盤構造を満足するように設定した。浅い層からS波速度・層厚の探索範囲を変えていき数回試行し、逆転層が出ないように探索範囲を変化させていった。最下層のS波速度においては、JIVSMのS波速度構造に基づきその探索範囲の上限を3.2 km/sとした。本研究では、パラメーターを6bitで離散化し、1世代あたりの個体数を40、世代数を1,000、交差率を70%とし、探索を行った。GAによって推定した地下構造を基に理論楕円率を算出し、スペクトル比と比較し、満足するような地下構造を試行錯誤的に求めた。理論楕円率を計算する際、P波速度 V_p (m/s)についてはS波速度 V_s (m/s)の関係式¹⁰⁾ $V_p=1290+1.1V_s$ を、密度 ρ (g/cm³)はS波速度との関係式¹¹⁾ $\rho=1.4+0.67\sqrt{V_s}$ を用いた。

微動H/Vスペクトルは、ピーク値のばらつきの範囲が0.32~0.47 Hz、トラフ値のばらつきの範囲が0.60~0.72 Hzであり、また、地震動R/Vスペクトルは、ピーク値のばらつきは0.29~0.45 Hzで、トラフ値のばらつきはほとんどなく、約0.7 Hzである。そのため、ピークやトラフの対応について検討する際は、そのばらつきの範囲内に理論値のピークやトラフが位置するかという基準で比較し、R/V、およびH/Vスペクトルを満足するようにGAを用いてS波速度構造を推定した。15回試行し、その中で最も観測値の分散曲線を満足するものを最終解とした。図6に推定したS波速度構造を示す。

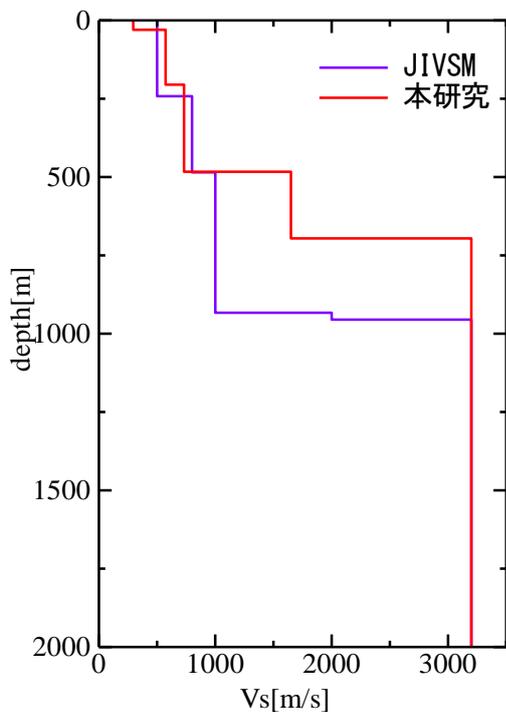


図6 推定したS波速度構造と推定した地下構造

地震動R/Vスペクトルと微動H/Vスペクトルとの推定した理論楕円率の比較したものを図7に示す。今回推定した地下構造の理論楕円率の第1ピーク値、トラフ値はそれぞれ0.33 Hz、0.70 Hzである。

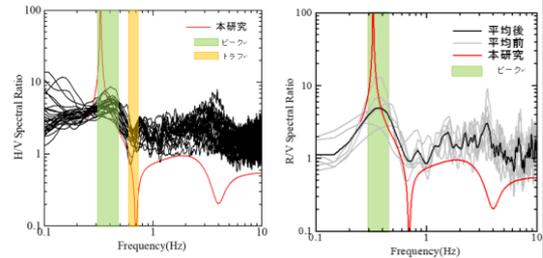


図7 地震動R/Vスペクトル、微動H/Vスペクトルと推定した地下構造に基づく理論楕円率の比較

図8に観測と理論分散曲線の比較を示す。0.4 Hzより低周期領域と10 Hzより高周波領域で両者に多少のずれがあるが、観測値で求めた分散曲線と概ね一致度の高い位相速度の地下構造だと分かる。

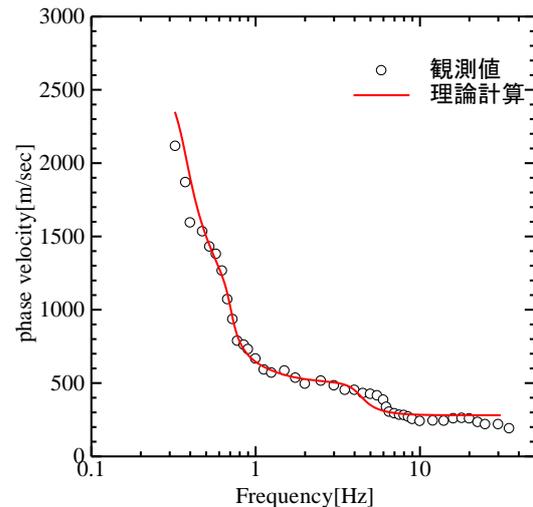


図8 観測と理論分散曲線の比較

7. 考察

本研究で推定した地下構造は、地下構造Aより、理論楕円率のピーク値とトラフ値に対して一致度が向上した構造である。また、位相速度においては、地下構造Aと本研究で一致しており、基本モードであると考えられる観測値と一致しているため、妥当であると考えられる。

それらを考慮すると両構造の良点を取り、妥当性に欠けていた点を改善した地下構造が推定できたとと言える。すなわち、総合的に見て、両構造より妥当性の向上した地下構造の推定を行うことができた。地下構造を見ても、ちょうどS波速度が3200 m/sに到達する深さが本研究で推定した地下構造が中間あたりの値となっており、両構造のバラ

ンスをとった妥当性の向上した地下構造が推定できた。表8に既往の研究と本研究の地下構造の比較を示す。

8. まとめ

本研究では、KMM004 で実施した微動アレイ観測データを用いて、SPAC法を適用し、位相速度を算出し、分散曲線を抽出してGAを用いて、理論楕円率が地震動R/Vスペクトルや微動H/Vスペクトルを満足するように、微動アレイ観測分散曲線との一致度を見ながら、地下構造の推定を行った。推定した地下構造の最終解に関して、スペクトルの比較を示した。地震動と微動のスペクトルのピークとトラフをばらつきのある範囲で捉え、満足すること、位相速度の一致度合いから妥当性のある地下構造の推定を行うことができた。

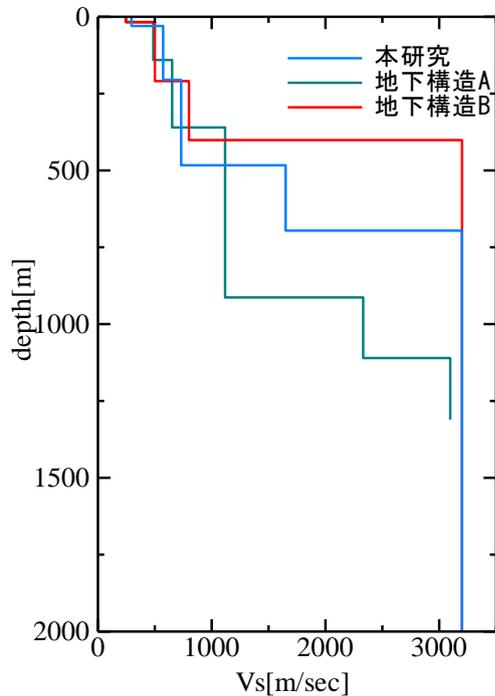


図8 地下構造比較

表8に既往の研究と本研究の地下構造の比較を示す。

表8 地下構造の比較

	位相速度	H/V	R/V
地下構造A	○	×	×
地下構造B	△ (高次モードか)	○	○
本研究	○	○	○

参考文献

1) 田中圭：木造建築の被害の概要、2016年度日本建築

学会大会(九州)災害部門緊急報告会資料、pp.12-18、2016

- 2) 上藪：2016年熊本地震において長周期地震動が観測された地震観測点の地盤震動特性に関する研究、2017
- 3) 五通：カルデラに位置する阿蘇市街地における地盤震動特性に関する研究、2018
- 4) 五通：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、2020
- 5) 塩野計司、太田裕、工藤一嘉：やや長周期の微動観測と地震工学への適用(6)-微動に含まれるRayleigh波成分-、地震第2輯、第32巻、pp.115-124、1979
- 6) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors、Bulletin of the Earthquake Research Institute、Vol.35、pp.415-456、1957
- 7) 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、468、pp.9-17、1995
- 8) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET, KiK-net) (bosai.go.jp)
- 9) 「長周期地震動予測地図」2012年試作版 データダウンロード | 地震本部 (jishin.go.jp)
- 10) 狐崎長琅、後藤典俊、小林芳正、井川猛、堀家正則、斉藤徳美、黒田徹、山根一修、奥田宏一：地震動予測のための深層地盤P、S波速度の推定、自然災害科学、vol.9、No.3、pp.1-17、1990
- 11) 元木健太郎、渡辺哲史、加藤研一、武居幸次郎、山中浩明、飯場正紀、小山信：微動アレイ計測に基づく傾斜基盤構造の推定、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第688号、pp.1081-1088、2013/6