

微動アレイ観測に基づく 1968年えびの地震の被災地周辺のS波速度構造の推定に関する研究

原 輝

1. はじめに

えびの地震は、昭和43年(1968年)2月21日10時45分に、宮崎、鹿児島、熊本の県境付近(震源深さ0 km、震央 32°02.0'N 130°45.3'E¹⁾)で発生したMj6.1の地震である。震央位置を図1に示す。この地震では、同日8時51分にMj5.6の前震、翌日22日19時19分にMj5.5の余震を伴っており、この三度にわたる強い地震により多数の被害が生じた。特に宮崎県えびの町(現・えびの市)と鹿児島県吉松町(現・始良郡湧水町)で大きな被害が生じた。えびの地震災害調査報告²⁾によると、えびの町内でも、地域によって被害が大きく異なる。地域ごとの住家全壊率の一部抜粋を表1、その各地域の位置を図2に示す。京町は全壊率30%以上の被害が生じたのに対し、京町から北へおよそ700 mの水流、東へ4 kmの中島、栗下では全壊率が0%であった。また、地震による道路被害分布も京町周辺に集中しており、水流、中島、栗下では被害がみられていない。これらの地域は、加久藤カルデラに位置しており、火山噴出物からなるシラス地帯となっているため、全体として比較的軟弱な地盤であることが推察されるが、その中でも地下構造による地震動の地盤増幅特性の違いが地震被害の違いに影響を及ぼしたことが考えられる。

本研究では、栗下に位置する防災科学技術研究所の強震観測点K-NETえびの(MYZ009)周辺と、えびの地震による被害が大きかった京町周辺の2地点で微動アレイ観測を行い、S波速度構造の推定を行うとともに、地盤震動特性の検討を行う。観測位置を図1に示す。また、京町周辺に設置したアレイの各観測データと、水流に設置した単点微動観測データから水平動と上下動のスペクトル比(H/Vスペクトル)を求め、その卓越周波数の分布から、地盤増幅特性の空間的な変化についても検討する。

2. 微動アレイ観測

本研究では、京町(以降MSK)、MYZ009周辺(以降EBN)で微動アレイ観測を行った。今回の微動アレイ観測では、半径 r の円周上に3点とその円の中心の1点の計4点に地震計を設置することで1つのアレイとした。円周上の地震計は均等に配置した。MSKの観測は2021年10月5日、EBNの観測は2021年10月6

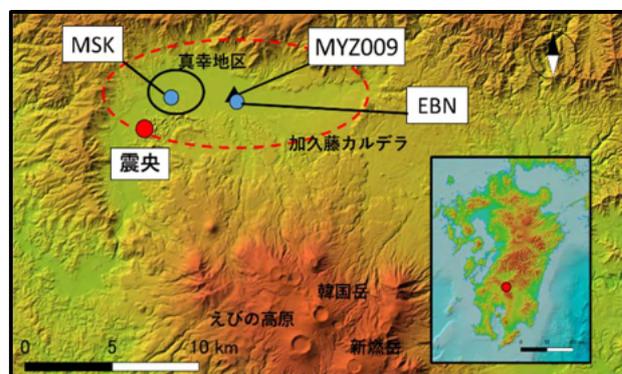


図1 1968年えびの地震の震央と微動アレイ観測位置(背景は電子国土基本図³⁾)



図2 被害の大きかった京町周辺とMYZ009(三角)

表1 えびの地震による各地点の住家全壊率²⁾

地点	住家総戸数	全壊率(%)
京町	587	31.2
中浦	193	37.8
上向江下浦	116	38.8
柳水流	88	34.1
水流	146	0
栗下	336	0
中島	554	0

表2 微動アレイ観測の諸元

地点	アレイ	r(m)	t(分)	地点	アレイ	r(m)	t(分)
EBN	A	750	180	MSK	A	750	180
	B	350	94		B	350	90
	C	200	107		C	200	45
	D	100	84		D	100	60
	E	56	30		E	56	30
	F	25	25		F	30	25
	G	10	20		G	10	20
	H	3	15		H	3	15

日に行った。アレイ半径および観測時間を表2に示す。また、2地点共に半径3~200 mのアレイでは、センサーとして可搬式加速度計JEP-6A3-10(感度10 V/g、ミツトヨ社製)、半径350 m、750 mでは、速度計LE-3D/5s(Lennartz Electronic社製)を用いた。収録器はど

ちらも DATAMARK LS-8800 (AD 分解能 : 24 bit、白山工業社製) である。サンプリングは 100 Hz とした。

3. 解析の概要と結果

3.1 空間自己相関法による位相速度の算出

微動アレイ観測による記録の解析には、空間自己相関法 (SPAC 法) ⁴⁾ を用いた。SPAC 法は、微動を定常確率過程に基づく現象と仮定し、円形アレイを用いて観測された微動から、表面波を分散の形で検出し、Rayleigh 波の位相速度を推定する方法である。

まず、観測で得られた記録が加速度記録の場合、解析対象の周波数帯の応じたバンドパスフィルターをかけて速度記録に積分する。次に、速度記録をアレイサイズに応じて定めた解析区間長によって分割し、アレイを構成するすべての観測点の記録が時間的、空間的に安定している区間を解析対象として採用した。その後、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、それらの連続性を考慮しながら統合して 1 本の分散曲線を抽出した。しかし、2 地点ともに考えられる分散曲線が 2 通りあり、どちらを採用するか判断の決め手がない。よって、それぞれ 2 通りの分散曲線を抽出し、検討した。以降、それぞれの分散曲線を EBN-1、EBN-2、MSK-1、MSK-2 とする (図 3)。MSK-2 においては、750 m アレイは採用せず、350 m アレイまでを採用した。EBN は最も速い位相速度が 1.6 km/s 程度であることから、深部地盤に対応した位相速度を求めるために、より半径の大きなアレイで再観測する必要がある。

図 3 より、EBN は MSK に比べ、高周波数帯の S 波速度 (V_s) が遅い。これは最表層の V_s との相関があり、EBN は MSK よりも浅部が軟弱であると推察できる。また、EBN は 2.5 Hz、MSK は 1.3 Hz より低周波数側で V_s が速くなり始めている。この周波数の違いは基盤深さとの相関があり、より低周波側で V_s が速くなるほど基盤が深くなる。よって、MSK の方が基盤面が深いと推察できる。

3.2 S 波速度構造の推定

求められた Rayleigh 波の分散曲線から、遺伝的アルゴリズム (以降、GA) ⁵⁾ を用いた逆解析によって、 V_s 構造を推定した。まず、表層の V_s の探索範囲の初期値は、EBN は防災科学技術研究所における J-SHIS V3.2⁶⁾ および PS 検層結果、MSK は J-SHIS V3.2 を含む範囲を設定し、浅い層から V_s と層厚の探索範囲を変えながら数回試行し、誤差が小さくなり、推定される地下構造が収束したところで次の層の探索範囲を変化させていく。これを最下層まで繰り返し、精度を高め、分散曲線を

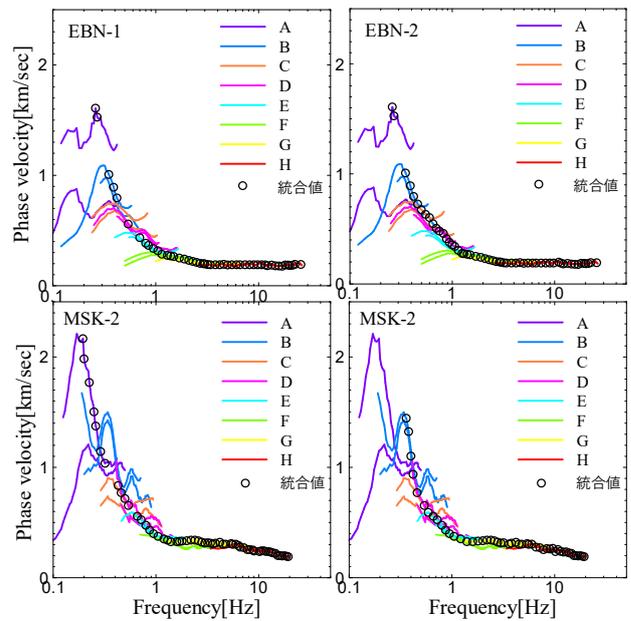


図 3 各地点における各アレイ半径の位相速度とそれらを統合した分散曲線

満たす V_s 構造を推定した。EBN-1、EBN-2、MSK-2 は 1.5 ~ 1.6 km/s の位相速度までしか求まっていないため、最下層の V_s を 2.5 km/s と仮定し、MSK-1 は J-SHIS の地震基盤層の V_s に基づき 3.2 km/s

とした。パラメーターは 6 bit で離散化、1 世帯あたりの個体数は 40、世代数は 500、交差率は 70 % とした。理論計算の際に用いた密度 ρ (g/cm³) と V_p (m/s) は、(1) 式の太田ほか ⁷⁾ と (2) 式の狐崎ほか ⁸⁾ の V_s (m/s) からの換算式を用いて算出した。

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

$$V_p = 1290 + 1.1V_s \quad (2)$$

観測値の分散曲線と GA で求められた理論分散曲線の比較を図 4、推定された S 波速度構造を図 5 に示す。最表層の V_s は EBN で 0.190 km/s、MSK で 0.212 km/s であった。工学的基盤 ($V_s > 0.45$ km/s) の出現深さは EBN で 0.171 km、MSK-1 で 0.238 km、MSK-2 で 0.259 km と、MSK の方が深いことが分かる。MSK-1 においては、地震基盤 ($V_s = 3.1$ km/s) の出現深さは 2.209 km となった。MSK-2 の地下構造を見ると、EBN に比べ速度コントラストが大きく、堆積層が厚い軟弱地盤であると判断できる。

4. H/V スペクトルとの比較

推定された地下構造に基づく理論 H/V スペクトルと全アレイの各観測点での記録から求めた微動 H/V スペクトルと全アレイの各観測点での記録から求めた微動 H/V スペクトルの比較を行う。観測スペクトルを求めるため、まず、40.96 秒を 1 ブロックとし 20.48 秒ずらしながら、観測記録を複数のブロックに分割した。分

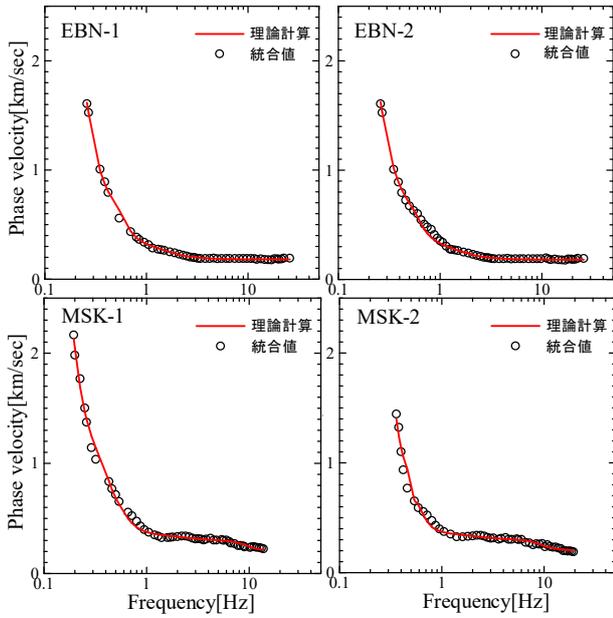


図4 推定した地下構造の理論分散曲線と観測値の分散曲線の比較

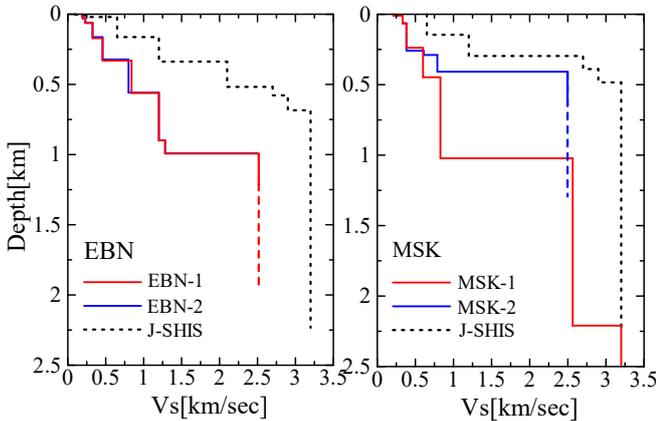


図5 推定したS波速度構造と既存構造の比較

割したそれぞれの記録に対してバンド幅 0.12 Hz の Parzen window で平滑化しながら、フーリエ変換し、水平2成分のベクトル合成した水平動成分と上下動成分の比を算出した。次に、0.2~10.0 Hz の周波数範囲における全データのH/Vスペクトルの相乗平均との誤差が最も大きいものを全データから除外し、再び相乗平均をとり、それとの誤差が大きいものを除外するという操作を繰り返し、最終的に10組のデータを選出し、それらの相乗平均をとることによって最終的な微動H/Vスペクトルを求めた。推定した地下構造の理論H/Vスペクトルと観測H/Vスペクトルの比較を図6に示す。観測H/Vスペクトルの第一ピークがEBN、MSKともに0.5 Hz周辺であるのに対し、EBN-1、EBN-2は0.22 Hz、MSK-1は0.17 Hz、MSK-2は0.29 Hzと、0.2~0.3 Hzのずれが生じる結果となった。図3より、2地点ともに半径100 m以下のアレイでは、求めた位相速度にはアレイ間で連続性が見られ、また、それぞれ

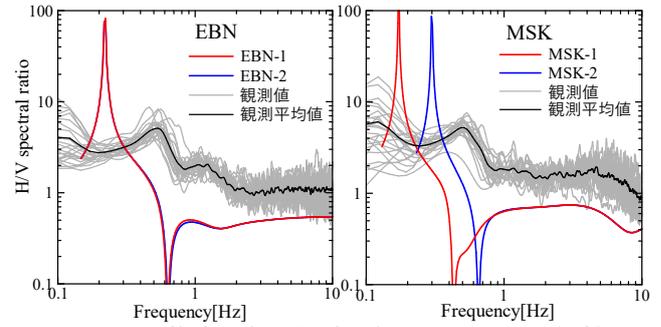


図6 推定地盤の理論H/Vスペクトルの比較

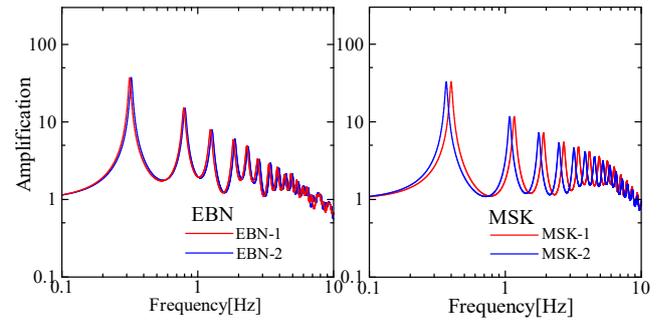


図7 各観測点の各パターンの推定速度構造に基づく1次元地盤増幅率比較

のアレイ観測記録から算出される2つの位相速度の一致度も高いため、それから推定される浅部の地下構造は比較的信頼性が高いといえる。一方、半径200 m以上のアレイから求められた位相速度は、アレイ間の連続性やアレイ内での2つの位相速度の一致度が低く、それから推定された深部の地下構造については暫定的な結果であると言わざるを得ない。比較的大きなアレイにおけるアレイ間の位相速度の連続性やアレイ内での2つの位相速度の一致度の低さについては観測された微動記録の質に依存すると考えられることから、交通量のより少ない夜間に観測を実施するなどの対策が必要である。

5. 1次元地盤増幅率の検討

本研究では、信頼性の高い浅部の地下構造の地盤増幅特性を検討するため、1次元重複反射理論⁹⁾に基づき、1次元地盤増幅率を算出した。解析の際に用いた密度 ρ (g/cm³)は、(1)式を用いた。Qs値については、全層で V_s (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。得られた1次元地盤増幅率を図7に示す。低周波数帯において、それぞれのピークはEBN-1とEBN-2で0.31 Hz、MSK-1で0.40 Hz、MSK-2で0.36 Hzと、低周波数側にピークがみられた。また、各点各パターン低周波数成分が増幅する地下構造となっている。

6. 真幸地区の単点微動観測

6.1 単点微動観測の概要

えびの地震において、被害が大きかった京町と、被害が小さかった水流の地盤震動特性を比較するために、水流で2点の単点微動観測を実施し、MSKの各観測点も併せて解析した。水流の2点の観測では、センサーとして可搬式加速度計 JEP-6A3-10（感度 10 V/g、ミツトヨ社製）を用いた。収録器は LS-8800（AD 分解能：24 bit、白山工業社製）を用いた。サンプリングは 100 Hz、観測時間は2地点ともに 15 分間とした。MSK は京町内にある C（半径 200 m）と D（半径 100 m）の全観測点の微動データを解析対象とした。

6.2 データ処理方法と結果

H/V スペクトルの算出は 4 章で述べた方法と同様である。観測点の配置図と、各観測点の H/V スペクトルから読み取った 1 次卓越周波数を図 8、表 3 に示す。

1 次ピークの分布は、周波数 0.39~0.65 Hz の間で、北から南にかけて周波数が短くなる。一方、地質調査総合センター¹⁰⁾の重力図（図 9）は水流から京町にかけて重力値が低くなる、すなわち基盤が深くなることを示しており、微動 H/V スペクトルの 1 次ピークの推移と整合する。この変化がえびの地震における建物被害の違いに影響しているかについては、浅部地盤の違いなどを含めたより詳細な検討が必要である。

7. まとめ

本研究では、えびの市内の 2 地点（EBN、MSK）で微動アレイ観測を行い、SPAC 法を適用して得られた分散曲線から地下構造を推定した。推定した地下構造の H/V スペクトルや 1 次元地盤増幅率を既存構造と比較した。推定した地下構造の H/V スペクトルや 1 次元地盤増幅率を既存構造と比較した。また、真幸地区京

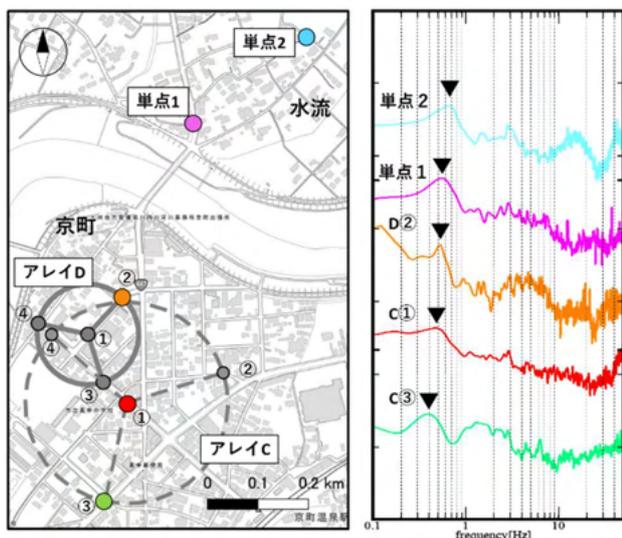


図 8 各観測点の配置図³⁾と観測 H/V スペクトル

表 3 各観測点の一次卓越周波数

観測点	一次卓越周波数	観測点	一次卓越周波数
単点1	0.54	単点2	0.65
C	①	①	0.49
	②	②	0.54
	③	③	0.44
	④	④	0.51

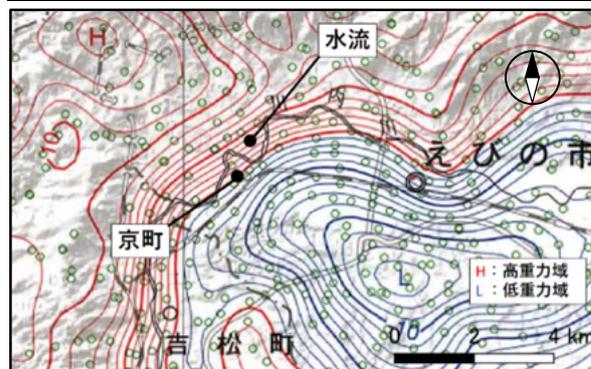


図 9 京町周辺の重力図¹⁰⁾

町周辺と水流の単点微動観測データから H/V スペクトルを算出し、その地盤震動特性を比較した。得られた知見を以下にまとめる。

- EBN、MSK の 2 地点において推定された S 波速度構造を比較すると、MSK-1 は EBN よりも速度コントラストが大きく、堆積層が厚い軟弱地盤であると判断できる。深部においては、より大きなアレイをノイズの少ない夜間などに観測を行った上で再検討をする必要がある。
- 真幸地区における単点微動観測では、1 次卓越周波数の連続的な変化が見られ、地質調査総合センターの重力図に対応した地盤震動特性が見られた。

今後は、深部の地下構造の精度を高めるとともに、えびの地震における地震動と被害の関係について検討していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省気象庁、震度データベース、<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html?ByPref=76#19680221104452>、(参照、2022/01/27)
- 2) 寺島敦：えびの地震災害調査報告、建築研究報告 No53、建設省建築研究所、17 p.,1969
- 3) 国土地理院、電子国土基本図、<https://www.gsi.go.jp/LAW/2930-meizi.html>、(参照、2022/1/30)
- 4) 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、第 43 号、pp.402-417、1990
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 太田外氣晴、江守勝彦、河西良幸：耐震・振動・制御、共立出版、339 p., 2001
- 8) 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、2001
- 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 Center, Report No. EERC 72-12, p. 88, 1972
- 10) 地質調査総合センター、地質図 Navi、鹿児島地域重力図、<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php>、(参照、2022/01/30)