

2016 年鳥取県中部の地震の被害地域における 地盤震動特性とその影響

西村 武¹・野口 竜也²・香川 敬生³

¹正会員 鳥取大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: D20T4002H@edu.tottori-u.ac.jp

²正会員 鳥取大学助教 学術研究院工学系部門 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: noguchit@tottori-u.ac.jp

³正会員 鳥取大学教授 学術研究院工学系部門 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: kagawa@tottori-u.ac.jp

2016 年 10 月 21 日、鳥取県中部を震源とする M_{JMA}6.6 の地震が発生し、倉吉市、北栄町、湯梨浜町で最大震度 6 弱を記録した。この地震による建物被害は、限られた地域に集中していた。本研究では被害地域周辺の微動探査を行い、過去に実施された研究成果と統合して地盤構造の推定および地盤震動特性を把握をおこない、被害との関連性を検討した。微動解析より $V_s=200\text{m/s}$ 以下の低速度層が全観測点で推定され、日本海沿岸の平野部から内陸部へ向かって薄くなる傾向がみられ、地震動解析から $V_s=700\text{m/s}$ 以上の深部の地盤構造について、隣接する北栄町と湯梨浜町で大きく異なることがわかった。被害と比較した結果、層厚が急激に変化する領域で被害が生じていることがわかり、建物被害は 2 次元あるいは 3 次元的地盤構造の変化によって生じた可能性がある。

Key Words: Microtremor observation, Seismic observation, Surface structure, the 2016 central Tottori prefecture Earthquake

1. はじめに

2016 年 10 月 21 日に鳥取県中部を震源とする M_{JMA}6.6 の地震が発生し、鳥取県倉吉市葵町、北栄町土下、湯梨浜町龍島で最大震度が 6 弱であった¹⁾。この地震による建物被害は屋根瓦落下等が特徴的であり、北栄町の平野部や、湯梨浜町の山麓部など、限られた地域に集中してみられた^{2,3)}。これらの局所的な被害は、地盤構造の違いによるサイト増幅特性で生じた可能性がある。

この地震の強震記録は防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net、鳥取県内自治体の強震観測点、鳥取大学が設置した臨時観測点等で得られている。強震記録の分析結果より、地盤構造の違いによるサイト増幅の差異が確認された³⁾。また、震源近傍の北栄町土下(HJA)および湯梨浜町龍島(TGAR)、久留(YRAR)では地震記録とそのスペクトル解析から強い非線形効果による地盤応答が疑われている⁴⁾。

地震動評価や非線形地盤応答、地盤震動と被害との関連性について検討するためには、より詳細な地盤構造や地盤震動特性を把握する必要がある。本研究では、強震

観測点や被害地点において微動観測を実施し、過去に実施された研究成果^{5,6)}も加えて地盤構造の推定および地盤構造を把握した。さらに、余震記録から深部地盤構造の推定を行った。

2. 観測

(1) 建物被害と対象地点の先行研究について

2016 年鳥取県中部の地震の本震による建物被害は、北栄町の平野部、湯梨浜町の山麓部に局所的にみられた。図 1, 2 は衛星画像からブルーシートの被覆状況を判別したもの⁷⁾と現地視察および聞き取りから作成した被害分布である。本研究では、被害がみられた住宅から半径 50m の範囲を建物被害エリアとした。全域の建物被害エリアの特徴として、山際に近い地域や平野部の限られた地域に被害が集中していることがわかる。由良川の左岸側の由良宿地域と右岸側の西園地域で特に被害がみられたことが報告されている²⁾。

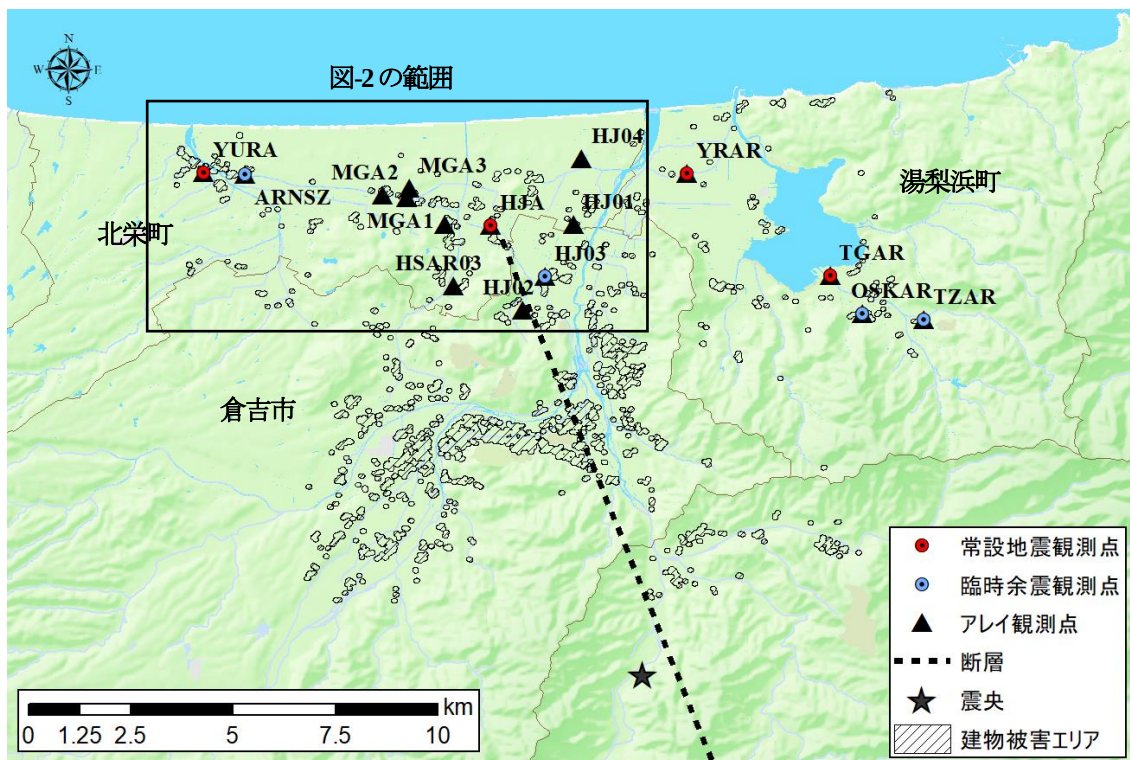


図-1 2016 年鳥取県中部の地震の断層・震央¹⁾，建物被害エリア，各観測点の分布

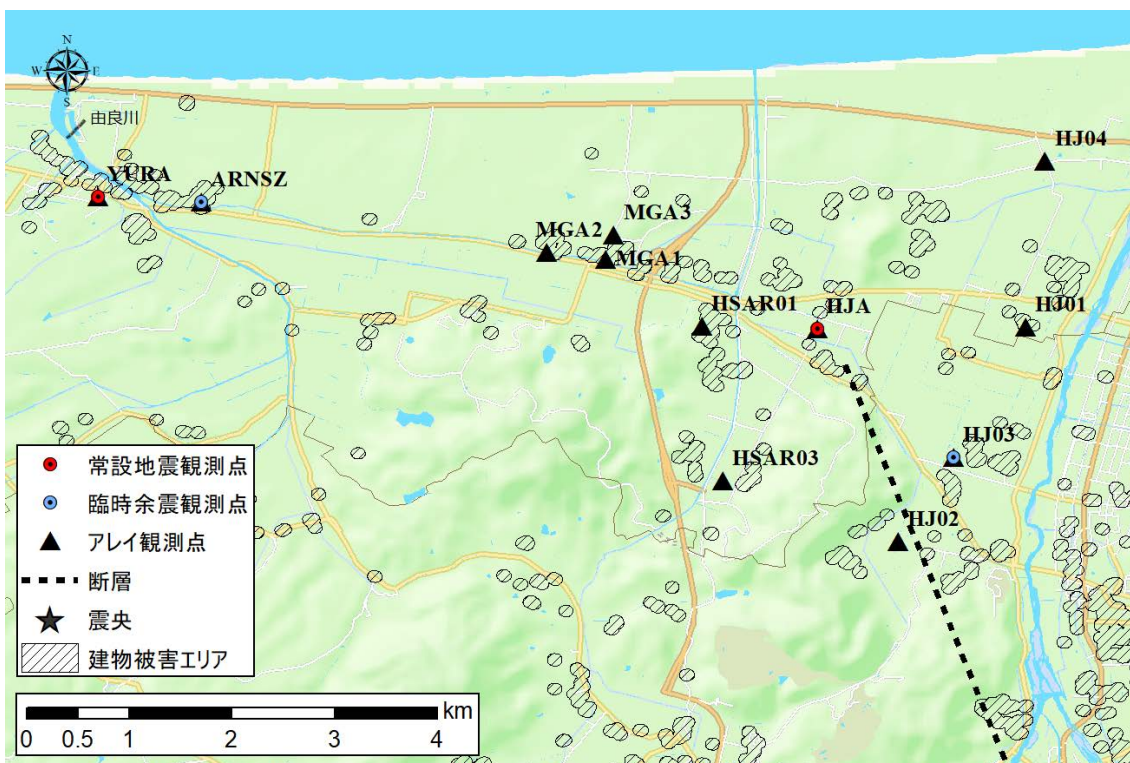


図-2 北栄町における建物被害エリアと各観測点の分布

既往の研究³⁾⁵⁾では北栄町の卓越周期は 0.8-1.5 秒，湯梨浜町は 0.5-2.0 秒である。これは $V_s=400\text{m/s}$ 以下の軟らかい堆積層の厚さに対応していると考えられる。また，両地域とも山際に近い地域から平野部へ向かって卓越周期が長くなる傾向がみられている。

(2) 観測概要

3 成分単点観測は既往の研究⁵⁾で北栄町で 456 点，湯梨浜町で 296 点行われている。本研究では住宅地を中心に北栄町で 114 点実施した。屋根瓦落下の被害がみられた地域では観測点の間隔を 50m おきに設定した。計測機

器には3成分の加速度型地震動計JU410を使用した。増幅倍率を100倍、サンプリング周波数は100Hzもしくは200Hz、観測時間は10-15分間程度とした。

アレイ観測は既往の研究⁵⁶⁾で常設強震観測点で4点(HJA, YURA, YRAR, TGAR)、臨時余震観測点で3点(OSKAR, TZAR, ARNSZ)、被害地域で3点(MGA1-3)の計10点で実施されている(図1, 2)。本研究では臨時余震観測点HJ03で1点、被害地点で5点の計6点で観測を行った。計測機器には3成分単点観測と同じJU410を4台用いてGPSクロックにより同期させる仕様とした。地震計は円の中心に1台、正三角形を作るように円周上に3台を配置させた。サンプリング周波数はHSAR03のみ1000Hz、そのほかは200Hzとし、増幅倍率は3成分単点観測と同様に設定し、観測時間は15分程度とした。

臨時余震観測は、建物被害がみられた小鹿谷および高辻地域の中心地に各1地点(OSKAR, TZAR)設置し、小鹿谷地域は2017年7月24日から2018年7月2日まで、高辻地域は2015年10月20日から2020年9月現在まで観測を実施している。観測機器はセンサー一体型記録計CV-374Aを使用し、サンプリング周波数は100Hzに設定した。観測システムはいずれもNS, EW, UDの3成分を同時に測定する3成分一体型である。設置状況としては、外部電源が確保できる屋内の建物の出入り口など硬質な基礎の上に設置し、GPSクロックによる同期、常時連続観測をおこなう仕様としている。

3. 解析

(1) 微動記録の解析

3成分単点観測の解析は、既往の研究⁵⁶⁾の観測点も含めて以下の手順で再解析を行った。3成分単点観測の波形記録について、交通振動などの非定常な波群が含まれない安定した20.48秒間の区間を目視により10区間以上選定してから3成分のフーリエスペクトルを求め、係数20のLogウィンドウ⁸⁾で平滑化し、それぞれ平均スペクトルを求めた。得られた3成分のフーリエスペクトルから水平動(南北成分; NS, 東西成分; EW, NSとEW方向を相乗平均で合成した成分; COMP)と上下動(UD)のスペクトル比(微動H/V)を求め、目視により卓越周期およびその時のピーク値(振幅比)を読み取った。多くは明瞭なピークが1つだけみられる単峰型のスペクトルであったが、山際などの一部の地域では複数みられる場合があり、その場合は隣り合う単峰型の地点との連続性を考慮し、卓越周期として読み取った。図3に鳥取県中部域の卓越周期分布図を示す。分布図のコンター間隔は0.2秒である。

アレイ観測の解析では、近傍の観測点で最下層の速度構造を統一するために、既往の研究データ⁵⁶⁾を含めて以下の手順で再解析を行った。解析ツールBIDO Ver. 2.0⁹⁾を用いて、CCA法¹⁰⁾に基づき位相速度分散曲線を推定した。解析の設定条件として、セグメント長を10.24秒とし、微動記録のRMS値を用いた自動抽出により少なくとも10区間以上を選択した。次にそれらの区間のパワースペクトルをバンド幅0.3Hzのパーゼンウィンドウで平滑化したのち平均化し、位相速度分散曲線を求めた。各半径で得られた位相速度分散曲線については、連続性を考慮して各観測点でまとめた。

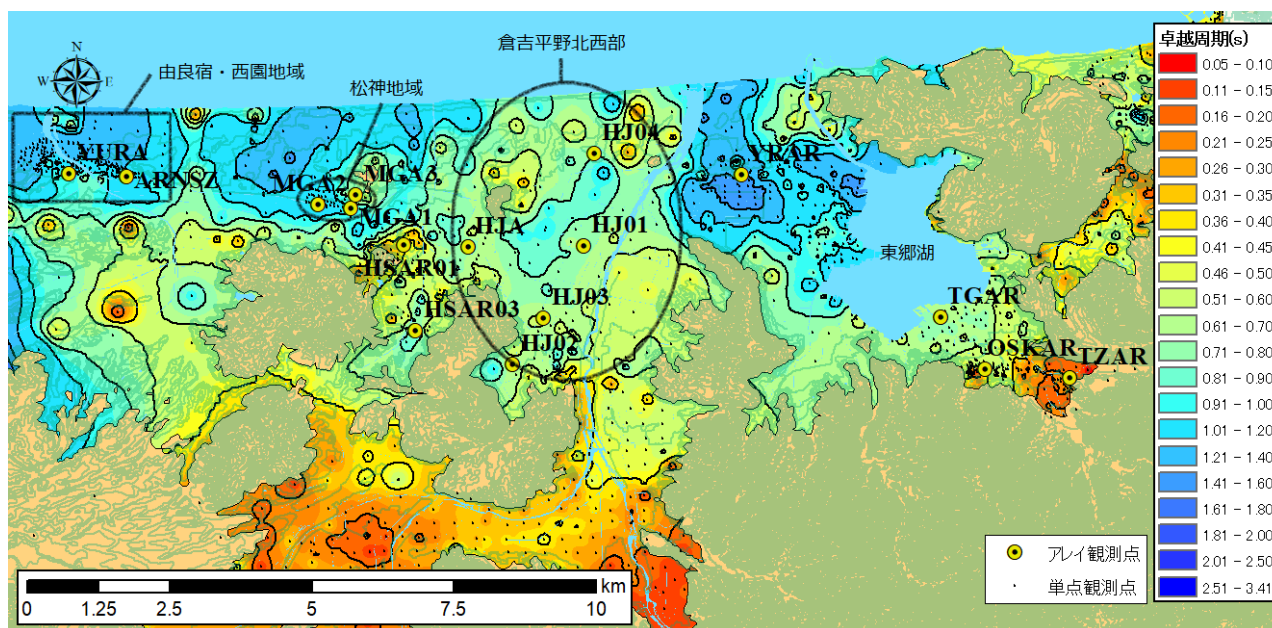


図-3 鳥取県中部域における卓越周期分布図(コンター線は0.2秒間隔)

表-1 微動解析による地盤構造モデル

観測点	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p(m/s)$	$V_s(m/s)$
YRAR	33	1.6	1430	140
	75	1.8	1730	400
	100	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
TGAR	9	1.6	1390	90
	8	1.7	1510	200
	50	1.8	1730	400
	100	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
OSKAR	8	1.6	1400	100
	3	1.7	1510	200
	30	1.8	1730	400
	100	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
TZAR	4	1.6	1390	100
	4	1.7	1510	200
	100	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
HJA	9	1.6	1380	80
	5	1.7	1460	150
	10	1.8	1510	200
	12	1.9	1730	400
	∞	2.2	2620	1200

観測点	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p(m/s)$	$V_s(m/s)$
HJ01	15	1.7	1400	120
	10	1.8	1600	200
	30	1.9	1700	400
	150	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
HJ02	15	1.7	1400	100
	20	1.8	1500	200
	30	1.9	1700	400
	250	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
HJ03	25	1.7	1400	140
	40	1.9	1700	400
	200	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
HJ04	40	1.7	1500	190
	30	1.9	1700	400
	100	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
HSAR01	9	1.8	1550	230
	80	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
HSAR03	10	1.7	1460	50
	30	1.8	1510	200
	40	1.9	1730	400
	∞	2.2	2620	1200

観測点	層厚(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_p(m/s)$	$V_s(m/s)$
MGA1	4	1.6	1400	100
	30	1.8	1510	200
	100	1.9	1850	500
	∞	2.2	2620	1200
MGA2	5	1.6	1400	150
	23	1.7	1510	200
	20	1.8	1620	300
	50	1.9	1850	500
	60	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
MGA3	35	1.7	1510	200
	10	1.9	1850	500
	∞	2.2	2620	1200
ARNSZ	10	1.7	1430	130
	10	1.7	1510	200
	70	1.8	1730	400
	60	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200
YURA	11	1.7	1490	180
	65	1.8	1730	400
	80	2.1	2070	700
	∞	2.2	2620	1200

青色	建物被害がみられた平野部の観測点
橙色	建物被害がみられた山麓部の観測点

位相速度分散曲線とアレイの中心の3成分微動記録より得られた微動H/Vを用いて、レイリー波基本モードに基づくフォワードモデリングにより地盤構造モデルを推定した。S波速度は既往の研究³⁾⁵⁾⁶⁾やボーリングデータ¹¹⁾¹²⁾を参考に決定し、層厚を変化させてモデリングを行った。密度は既往の研究³⁾⁵⁾⁶⁾を参考に、P波速度はS波速度の換算式¹³⁾を用いて設定した。表1に地盤構造モデルを、付録図1にモデリングした際のレイリー波基本モードの位相速度分散曲線を重ねて示す。表1において、建物被害がみられた山麓部の観測点は青色で、平野部の観測点は橙色で示す。

(2) 地震記録の解析

地震記録の解析では、解析方法を同一にするために、既往の研究³⁾⁵⁾⁶⁾も含めて全ての観測点で以下の手順で再解析を行った。地震記録から各成分のS波部分10.24秒を切り出し、その両端の5%にコサインテーパーを施したあと、零データを付加した20.48秒とし、バンド幅0.2Hzのパーゼンウィンドウの平滑化によりフーリエスペクトルを算出する。各成分のフーリエスペクトルから水平動(NS成分： S_{NS} 、EW成分： S_{EW})と上下動(S_{UD})のスペクトルの比(地震動H/V)を以下の式(1)から求めた。本研究では、各地点で10程度のH/Vスペクトルを求め、その平均を地震動H/Vスペクトルとした。

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{S_{NS}^2 + S_{EW}^2}{S_{UD}^2}} \quad (1)$$

この地震動H/Vスペクトルを用いて $V_s=700m/s$ より遅い浅部構造は上述したアレイ観測によるモデル、深部構造は野口・他⁵⁾によるモデルをベースに、拡散波動場理論¹⁴⁾に基づく理論H/Vを用いてフォワードモデリングで推定した。さらにそのモデルをベースに遺伝的アルゴリズム(GA)と焼きなまし法(SA)によるハイブリッドヒューリスティック探索¹⁵⁾によるインバージョンで最終的に地盤構造モデルを求めた。インバージョンのプログラムコードは安井・他¹⁶⁾が作成したものを使用した。

パラメータの設定は以下の通りである。GAについては試行回数10回、標本数30、世代数300、交叉確率0.7、突然変異確率0.01、動的突然変異およびエリート選択を考慮する。SAについては温度低下関数 $T=T_{\text{exp}}(-ck^d)$ の係数を $a:0.5$ 、 $c:1.0$ 、初期温度 T_0 を100、温度更新回数を10とした。探索の対象はS波速度、P波速度、層厚、減衰定数とし、密度はS波速度との換算式¹⁷⁾から求めた。なお第1層目と最下層のS波速度と層厚は固定し、その他の層に関しては初期値から $\pm 25\%$ の範囲で、減衰は最下層を0.01で固定し、その他の層は0.01から0.1の範囲で探索を行った。表2に得られた地盤物性データを、図4にS波速度構造の柱状図を、付録図2に地震動H/Vとモデル推定で求められた理論H/Vの比較図を示す。

表-2 地震動解析による地盤構造モデル

TGAR 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
9.0	1.60	1240	90	0.057
8.0	1.70	1315	200	0.047
29.7	1.82	1381	400	0.050
63.8	2.01	1859	825	0.069
126.2	2.08	3245	1032	0.027
427.5	2.35	5100	2035	0.059
∞	2.56	5500	3000	0.010

YRAR 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
33.0	1.65	1081	140	0.061
78.0	1.78	1402	324	0.016
89.3	2.01	1828	834	0.022
260.0	2.21	2623	1461	0.019
400.0	2.37	4504	2130	0.060
∞	2.56	5500	3000	0.010

OSKAR 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
5.0	1.60	1246	90	0.091
35.6	1.87	1319	487	0.034
51.5	1.95	1774	674	0.031
106.1	2.07	3502	1006	0.021
355.2	2.31	4879	1859	0.059
∞	2.56	5500	3000	0.010

TZAR 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
6.0	1.60	1441	90	0.092
6.4	1.75	1722	268	0.014
92.6	2.00	1803	801	0.015
190.4	2.16	3567	1293	0.013
330.0	2.36	4594	2051	0.056
∞	2.56	5500	3000	0.010

YURA 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
11.0	1.68	1438	180	0.051
43.5	1.85	1562	458	0.019
66.5	1.90	2518	561	0.079
110.5	2.14	3738	1232	0.022
361.8	2.32	4635	1898	0.050
∞	2.56	5500	3000	0.010

HJA 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
8.0	1.59	1270	80	0.093
36.3	1.82	1338	394	0.063
75.0	1.91	1568	580	0.017
105.6	2.22	2680	1485	0.035
413.6	2.39	5196	2195	0.061
∞	2.56	5500	3000	0.010

HJ03 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
25.0	1.7	1540	140	0.035
47.9	1.8	1576	306	0.013
32.4	2.0	2436	727	0.052
250.5	2.1	3707	1017	0.019
255.0	2.4	4476	2170	0.022
∞	2.6	5500	3000	0.010

ARNSZ 地震動モデル

層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	h
9.0	1.59	1207	80	0.093
8.8	1.83	1300	407	0.057
69.3	1.87	1337	493	0.051
94.2	1.98	1613	757	0.046
164.2	2.05	2896	935	0.046
435.9	2.29	3981	1761	0.058
∞	2.56	5500	3000	0.010

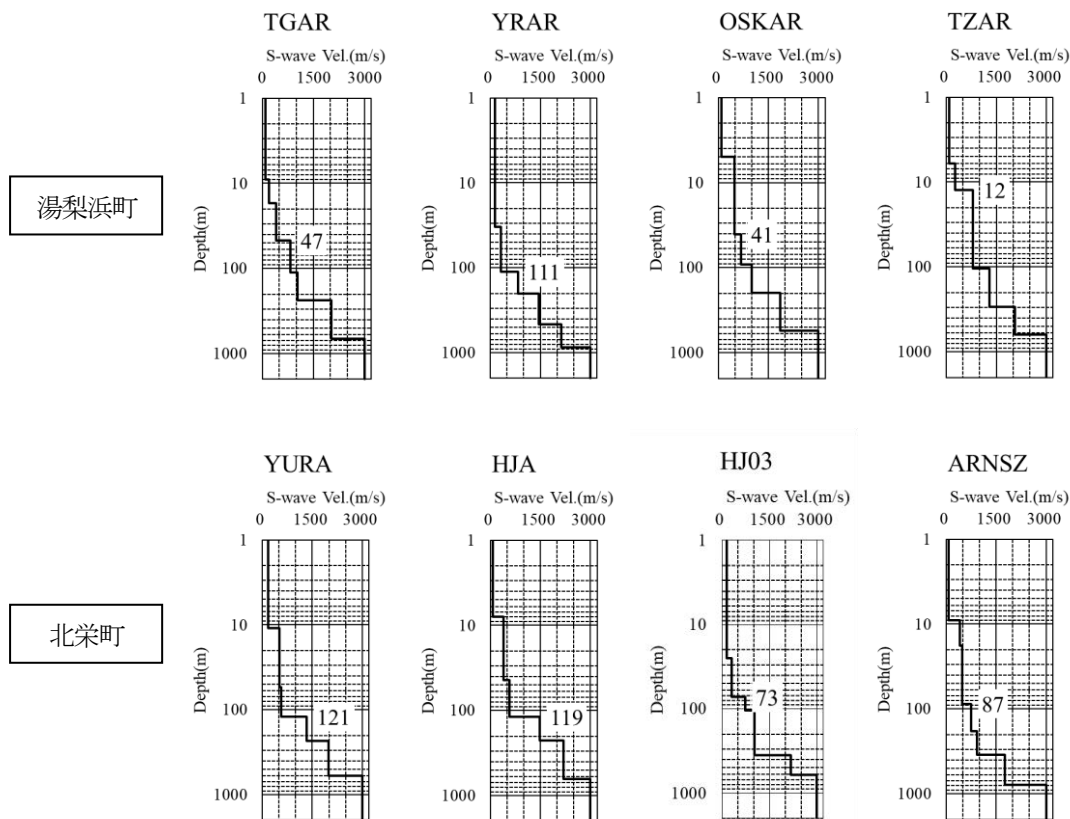


図-4 S波速度構造の柱状図(数字は工学的基盤までの深度を表す)

4. 地盤構造の推定

(1) 微動 H/V の卓越周期

図3より湯梨浜町における卓越周期はYRAR周辺で0.8-1.6秒, TGAR周辺で0.4-0.8秒, 山際に近いOSKARとTZARで0.1-0.6秒の範囲で分布している. 北栄町ではYURAやARNSZの由良宿・西園地域で1.0-1.6秒, MGA1-3の松神

地域で0.3-1.0秒, HJAやHSAR01, 03で0.3-1.0秒, HJ01-04で0.3-1.0秒の範囲で分布している。倉吉平野北西部では, HJAとHJ01周辺で卓越周期が局所的に長周期化する傾向がみられた。微動H/Vの形状に注目すると, 倉吉平野北西部や東郷湖周辺では単峰型の鋭いピークを持つ観測点が多く, 西園・由良宿地域や松神地域では複数のピークを持つ観測点が多いことがわかった(図5)。これは表層の速度構造の違いを反映していると考えられる。

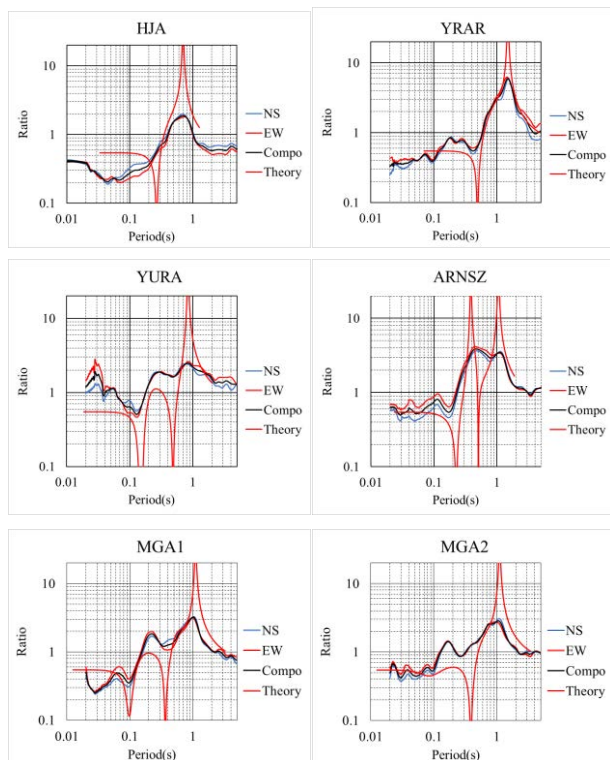


図5 アレイ観測における中心点の微動H/V

(2) 地盤構造の推定

観測点周辺のボーリングデータ¹¹⁾¹²⁾より, 表1の $V_s=100\text{m/s}$ 以下は泥, 粘土あるいはシルト層, $V_s=200\text{m/s}$ 以下は砂層だと考えられる。表1より $V_s=50\text{--}300\text{m/s}$ の低速度層は厚さ8-48mであり, 平野部で厚く, 山際に近い内陸部で薄くなる傾向がみられる。建物被害がみられた山麓部の観測点(OSKAR, TZAR, HJ03, HSAR01)では表層に $V_s=200\text{m/s}$ 以下の低速度層が十数m堆積しており, それで深は $V_s=700\text{m/s}$ 以上の非常に硬い岩盤層が存在することがわかった。一方で建物被害がみられた平野部の観測点(HJ01, MGA1-3, ARNSZ, YURA)ではHJAを除いて $V_s=700\text{m/s}$ 上面までの層厚が45-134mと比較的厚いことがわかった。非線形応答が疑われる土下(HJA), 龍島(TGAR), 久留(YRAR)では表層にS波速度80-140m/sのシルトあるいは砂層がみられ, この層が非線形応答に関与した可能性が高い。

余震記録からさらに深部の地盤構造を推定した。図4

中の数字は工学的基盤までの深度を表している。地盤構造モデルより, 平野部(TGAR, YRAR, HJA, ARNSZ)ほど基盤深度が深くなる傾向がみられ, これは平野部で卓越周期が長周期化する傾向と一致する。山麓部で隣接しているOSKARとTZARは浅部構造が大きく異なっており, 基盤の傾斜や起伏が想定される。 $V_s=700\text{m/s}$ より深部の基盤速度について, 湯梨浜町と北栄町で差があることがわかった。また微動H/Vに複数のピークが確認されたARNSZとYURAでは, 深さ10mと200m付近に大きく速度が変化する境界があることがわかった。

5. 建物被害との関連性について

(1) 各地点の地盤増幅度

地盤増幅度の簡易指標であるAVS30とARVを用いて各地点の地盤増幅度を評価した。ARVは以下の式(2)で算出する¹⁸⁾。表3に各地点のAVS30とARVを示す。AVS30は地下30mまでの平均S波速度を表しており, 本研究では微動観測で推定された地盤モデルから計算した。建物被害がみられなかった観測点におけるARVは2.1-3.2程度, 広域で被害がみられたMGA1-3, ARNSZ, YURAは1.6-2.5程度であり, 値の大小に関係なく被害がみられることから, ARVと今回の建物被害との相関は薄いことがわかった。

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \log AVS30 \quad (2)$$

表-3 各地点のAVS30とARV

湯梨浜町	YRAR	TGAR	OSKAR	TZAR
AVS30	140	174	220	328
ARV	2.59	2.25	1.98	1.48

北栄町1	HJ01	HJ02	HJ03	HJ04
AVS30	160	133	157	190
ARV	2.37	2.68	2.40	2.12

北栄町2	HJA	MGA1	MGA2	MGA3
AVS30	142	176	194	200
ARV	2.56	2.22	2.09	2.05

北栄町3	HSAR01	HSAR03	ARNSZ	YURA
AVS30	434	100	197	276
ARV	1.23	3.24	2.07	1.65

青色	建物被害がみられた平野部の観測点
橙色	建物被害がみられた山麓部の観測点

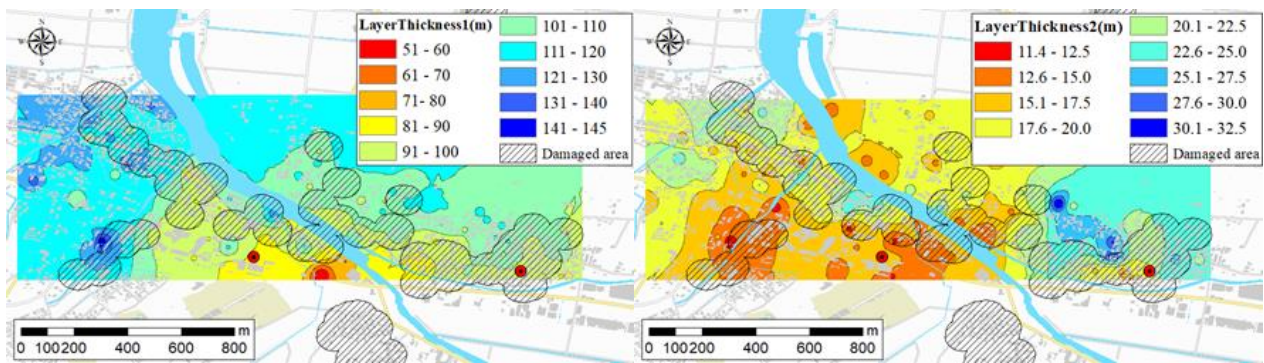


図-6 由良宿・西園地域における層厚分布
(左図：長周期側の卓越周期 T_{pi} , 右図：短周期側の卓越周期 T_{pj})

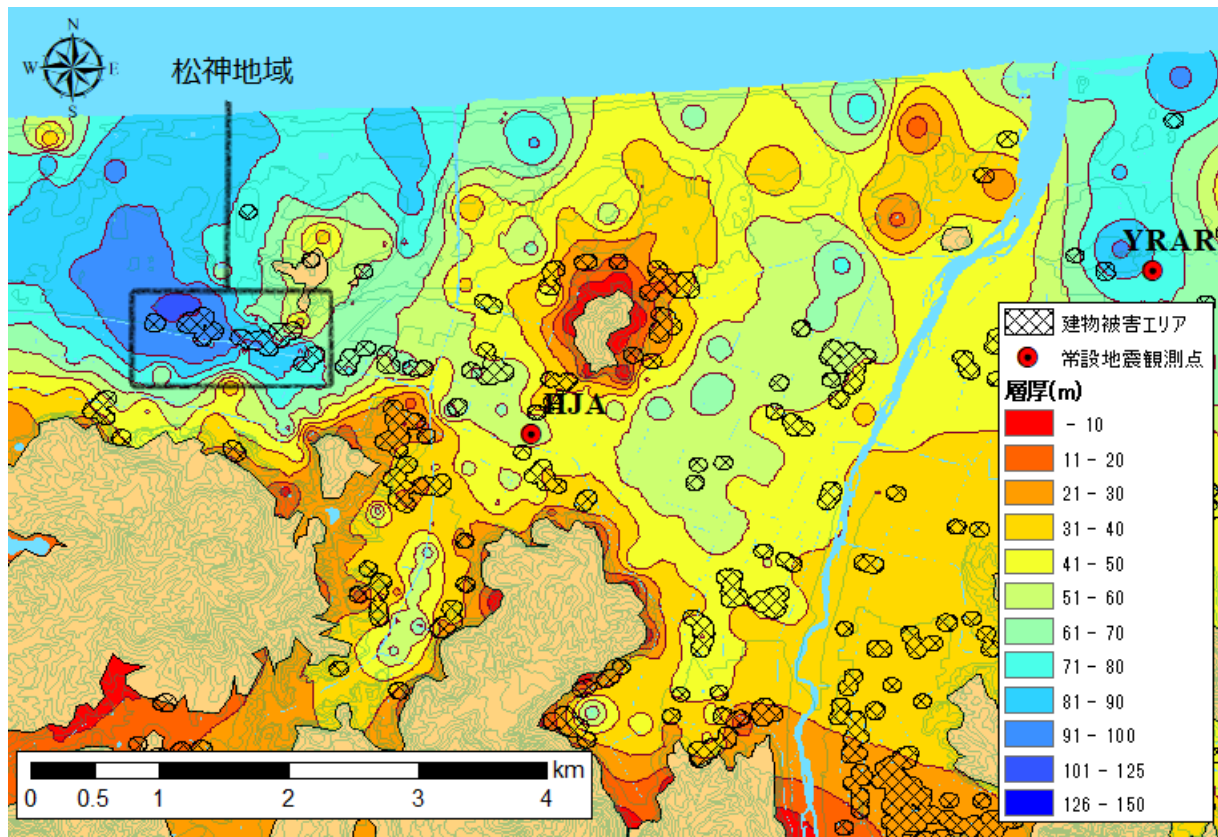


図-7 倉吉平野北西部における層厚分布

(2) 被害地域の層厚分布

建物被害が広範囲で確認された由良宿・西園地域と倉吉平野北西部について、表層地盤の S 波速度 (V_s) と読み取った卓越周期 (T_p) から、式(3)の 4 分の 1 波長則で表層の層厚 (H) を推定した。式(3)の i は複数の卓越周期を読み取った地点ではそれぞれの層厚を算出したことを示している。由良宿・西園地域においては短周期側 (T_{pj}) と長周期側 (T_{pi}) の卓越周期がみられたので、それぞれのピークに対して層厚を推定した。

$$H_i = \frac{V_s \cdot T_{pi}}{4} \quad (3)$$

図 6 の由良宿・西園地域の層厚分布より、 T_{pi} による層

厚は南から北西方向へ向かって深くなり、 T_{pj} による層厚は局所的に深くなる地点がみられる。被害分布と比較すると、 T_{pj} による層厚の急変部と建物被害が重なるエリアがみられた。図 7 より倉吉平野北西部の層厚は HJA 周辺で 40-50m、その西側と東側では 50m よりも厚くなっており、内陸部へ向かって層厚が薄くなる傾向がある。松神地域では局所的に層厚が厚くなり、西側へ向かって深くなることがわかった。層厚が急変する山麓部や局地的に層厚が厚くなる松神地域で被害分布と重なる領域が多くみられた。このように、層厚が急変する領域で被害が集中的にみられることから、建物被害は基盤の 2 次元あるいは 3 次元的变化が影響していると示唆される。

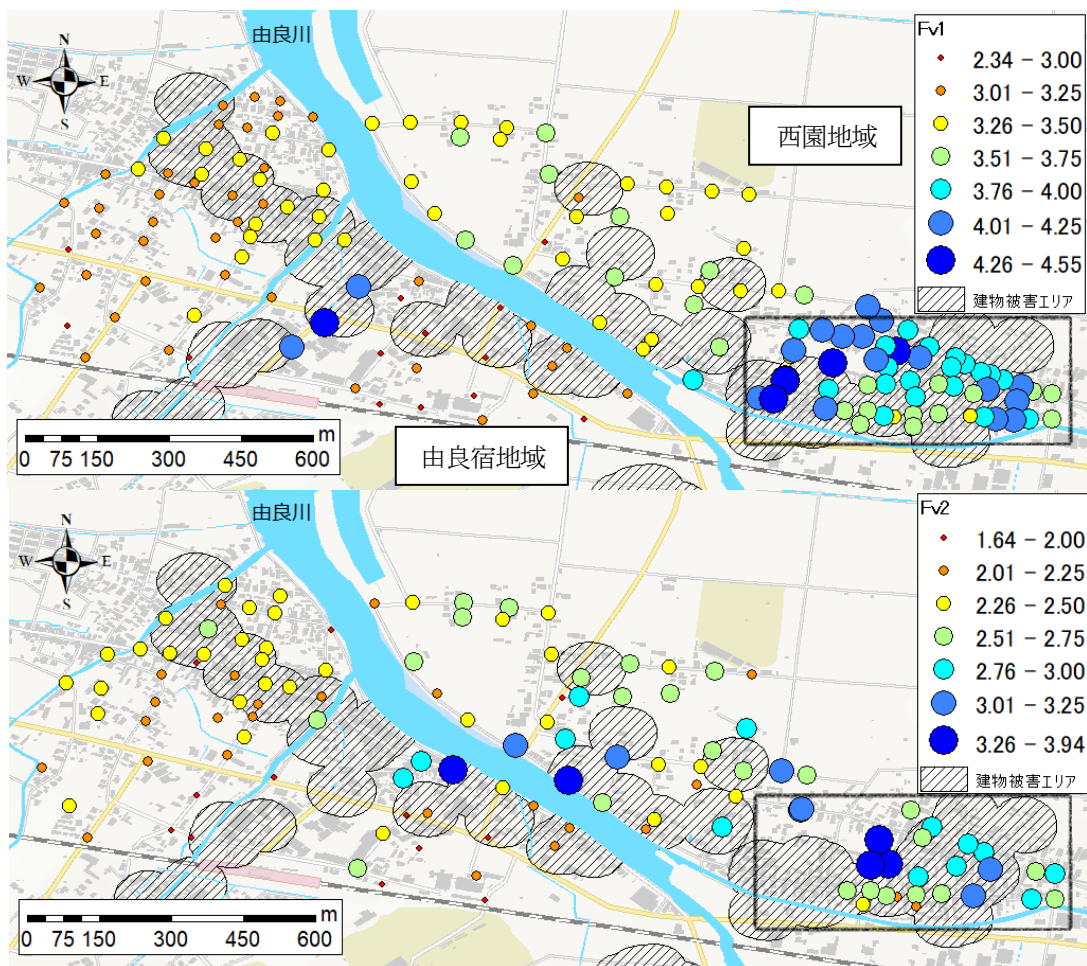


図-8 由良宿・西園地域における地盤増幅度
(上図：長周期側の地盤増幅度 Fv1, 下図：短周期側の地盤増幅度 Fv2)

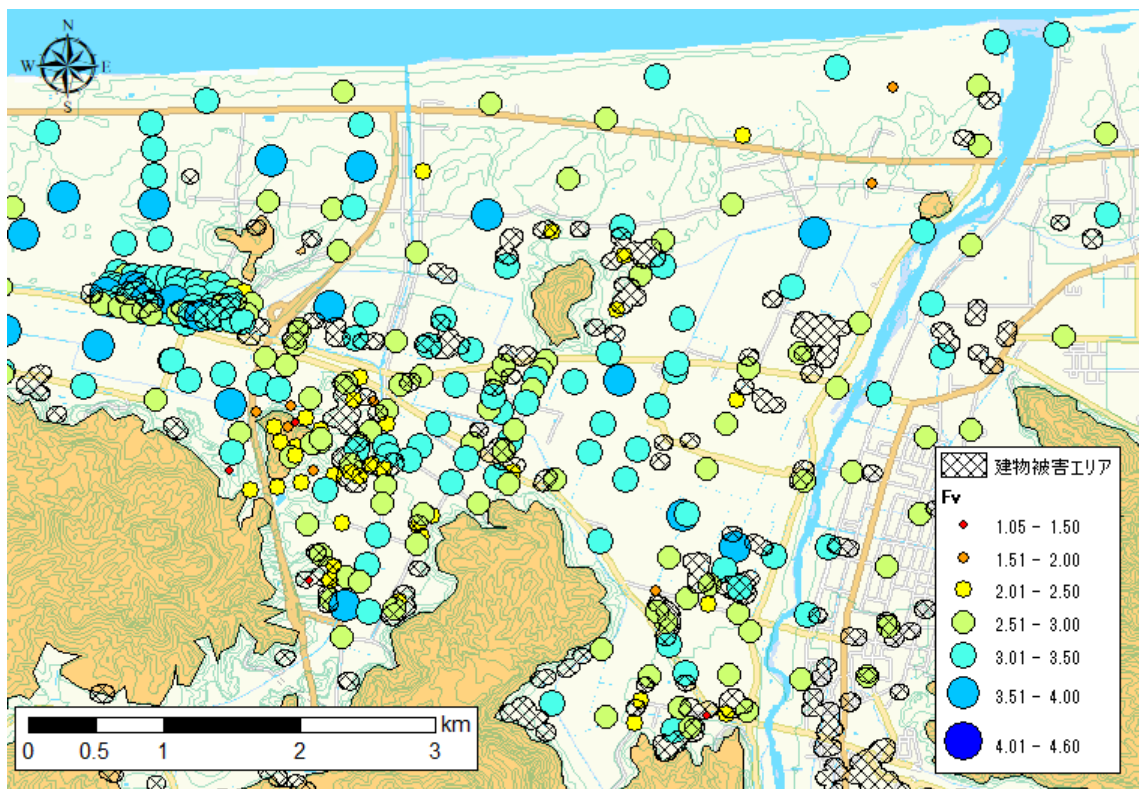


図-9 倉吉平野北西部における地盤増幅度

(3) 微動 H/V を用いた地盤増幅度の評価

西川・他¹⁹⁾は地震観測記録から評価した地盤増幅度を微動 H/V のピーク値と卓越周期を用いて、経験的な地盤増幅度の評価を行う回帰式(4)を提案している。地盤増幅度の観測値と式(4)による予測値の誤差二乗和が最小になるように回帰係数 c_1, c_2, c_3, c_4, d, e を決定している(表 4)。本研究では由良宿・西園地域と倉吉平野北西部を対象に最大地動速度に対する地盤増幅度 F_v を算出し、被害との対応について検討を行った。微動 H/V に複数のピークが確認された地域ではそれぞれの F_v について算出した。図 8 に由良宿・西園地域、図 9 に倉吉平野北西部の地盤増幅度の分布を示す。

$$\log F_v = c_1 + c_2 \log \alpha_m + c_3 \log f_m + c_4 \log(f_m^2 + d f_m + e) \quad (4)$$

α_m : 微動 H/V のピーク値

f_m : 微動 H/V の卓越周波数(卓越周期の逆数)

表-4 式(4)における回帰係数¹⁹⁾

c_1	c_2	c_3	c_4	d	e
0.496	0.291	1.089	-0.817	0	0.468

図 8 より由良宿地域では、どちらの F_v も川沿いに値の高い観測点がみられるが、平面的な違いはみられない。西園地域では、特に被害が集中した黒杵の領域では F_v1 と F_v2 とともに高い傾向がみられる。被害エリアと比較すると、 F_v の大きさに関わらずに被害が生じている。

図 9 より倉吉平野北西部では平野部ほど F_v が高く、山麓部では低い傾向がみられる。被害エリアと比較すると、 F_v が 3.0 前後で被害が生じているように見えるが、同じ値でも被害がみられない地域があり、値に関わらず被害が生じている。これらより、地盤増幅度 F_v と今回の建物被害の対応性は低いと考えられる。

(4) 建物被害の要因について

今回の地震による被害は、屋根瓦の損傷や壁の亀裂など軽微な事例がほとんどであり、鳥取県中部の全域にわたって広範囲で確認された。その上で建物被害と地盤増幅特性の関連性を検討した結果、被害は地盤構造モデルから得られる地盤増幅度や、最大地動速度に対する地盤増幅度とは対応しないことがわかった。卓越周期分布より、建物の固有周期帯(0.2-0.4 秒)に被害が集中していなかったことから、共振によって被害が発生した可能性は低いと思われる。なお、層厚分布より、層厚の急変部で被害がみられることがわかった。

以上のことから工学的基盤の 2 次元あるいは 3 次元的变化によって地震動が増幅したことが建物被害の要

因として考えられる。ただし、地表に軟らかい堆積層が厚く堆積している久留(YRAR)や土下(HJA)などの地域では、地盤の非線形化によって地震動が減衰し、被害が抑えられた可能性がある。また今回の地震の規模は $M_{JMA}6.6$ であったが、兵庫県南部地震や熊本地震といった $M7.0$ クラスの地震動であればより広範囲で甚大な被害が生じたかもしれない。詳細な地震動評価のためには、2 次元あるいは 3 次元の地盤構造モデルの作成とその応答解析、および非線形を考慮した地盤応答解析が重要だと考える。

本研究ではブルーシート被覆建物を一律に建物被害とみなして考察を行った。しかしながら、断層近傍の倉吉平野北西部の被害と、断層から遠く離れた由良宿・西園地域の被害は同じ屋根瓦落下の被害であっても、その被害が発生したメカニズムは全く別である。断層近傍の建物被害は、短周期での共振により発生し、由良宿・西園地域ではやや長周期の地盤増幅によって発生したと考えられる。今後の課題として、建物被害のメカニズムを考えて、被害の適切な評価手法を用いることが必要だと考える。

6. まとめ

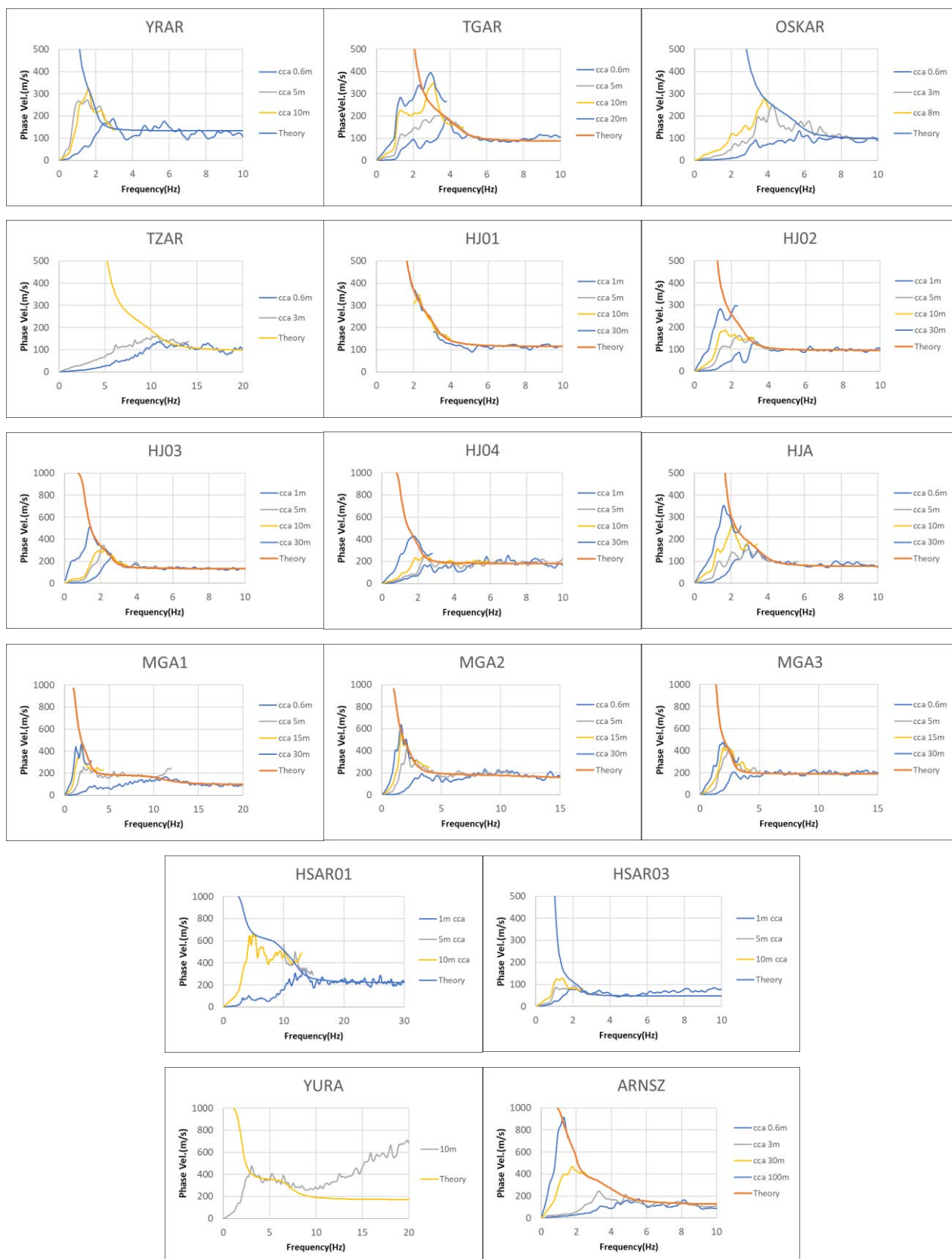
2016年鳥取県中部の地震の被害地域を中心に微動観測を実施し、既往の研究によるデータと統合して地盤構造の推定を行い、地盤震動特性と被害との関連性について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 微動の3成分単点観測から得られた H/V は、内陸部から平野部へ向かって長周期化する傾向がみられた。
- 微動アレイ観測記録より位相速度分散曲線が得られ、S 波速度構造を推定した。非線形地盤応答が観測された土下、龍島、久留では表層に低速度なシルト・砂層が確認され、この層が非線形応答に影響した可能性が高い。
- 余震記録から深部地盤構造を推定した結果、 $V_s = 700\text{m/s}$ より深部の基盤速度について、北栄町と湯梨浜町で異なることを確認した。
- 建物被害と各地盤物性から得られる地盤増幅度を比較した結果、その関連性は低いことがわかった。
- 表層の S 波速度と微動の卓越周期から層厚を推定し、被害との比較を行った。建物被害は層厚が急変する領域で生じていることがわかり、2 次元あるいは 3 次元的地盤構造の変化が影響している可能性がある。

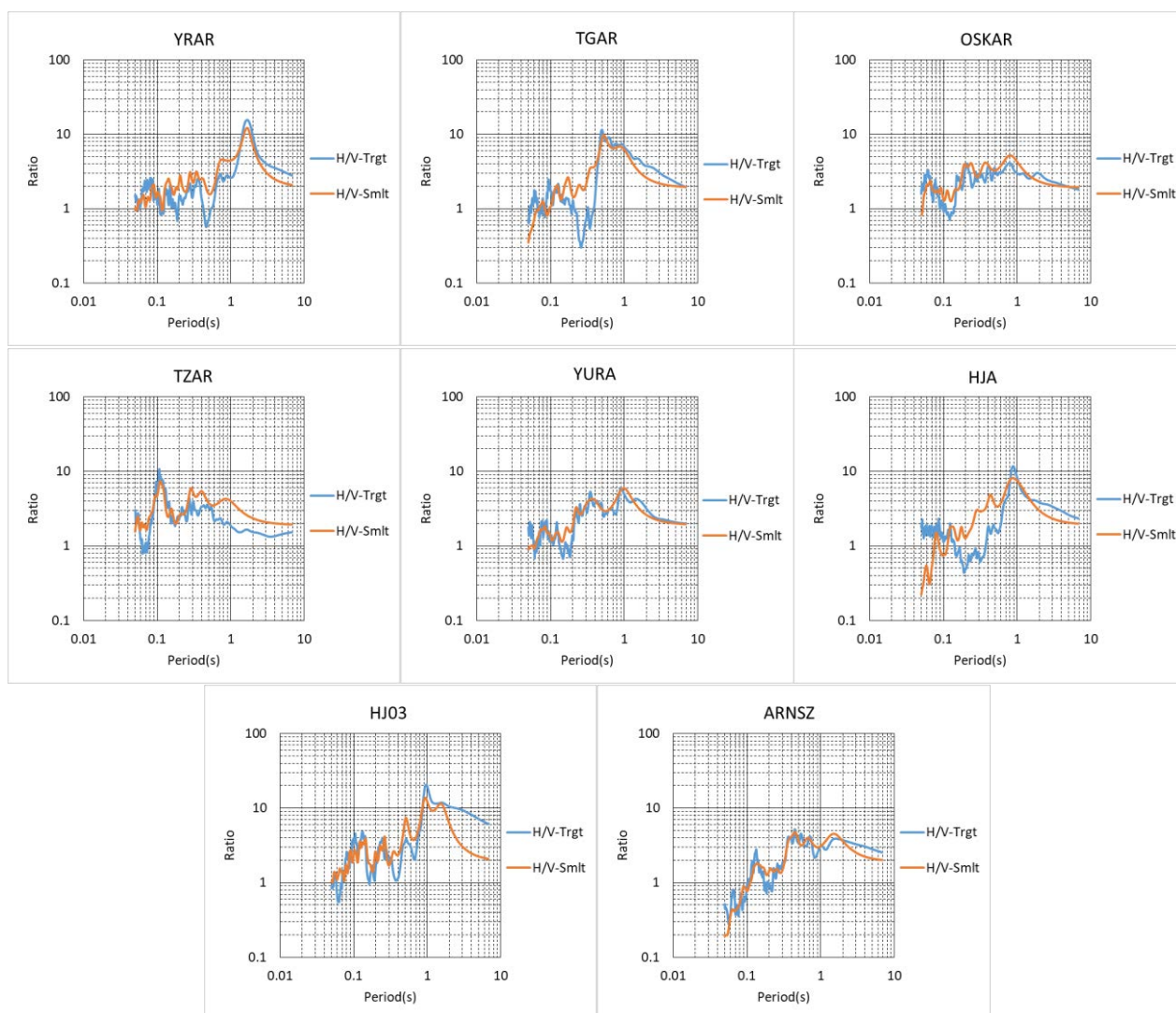
今後はこれらの地盤構造モデルをもとに詳細な地盤応答解析を実施し、地震動評価を継続的に実施する計画である。

謝辞：地震動 H/V を用いたインバージョンの計算には、
安井譲博士のプログラムソースを利用させて頂きました。
小鹿谷・高辻の観測点の設置およびデータ収集、建物被

害状況の報告には自治体消防団員の市橋氏、鳥取大学工
学部技術職員の山本氏にご協力して頂きました。ここに
記して感謝致します。



付録図-1 アレイ観測点の位相速度分散曲線



付録図-2 地震観測点の地震動 H/V(青線)とモデル推定による理論 H/V(橙線)の比較

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の評価（平成 28 年 11 月 10 日），
<https://www.static.jishin.go.jp/re-source/monthly/2016/22016102_tottori.pdf>[2020/09/01 閲覧]
- 2) 香川敬生：2016 年鳥取県中部の地震(M6.6)について，地震ジャーナル，No.63，pp.14-22，2017.
- 3) Kagawa, T., Noguchi, T., Yoshida, S. and Yamamoto, S.: Effect of the surface geology on strong ground motions due to the 2016 Central Tottori Earthquake, Japan, Earth, Planets and Space, 69:106 DOI 10.1186/s40623-017-0689-0., 2017.
- 4) 野口竜也，西川隼人，吉田昌平，香川敬生：2016 年鳥取県中部の地震における非線形地盤応答の基礎的検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）Vol.74, No. 4，[特]地震工学論文集，Vol.37, 2018.
- 5) 野口竜也，中井翔，日高大我，吉見 和，上野 太士，西川 隼人，吉田 昌平，香川 敬生：微動および地震観測に基づく鳥取県中部域の地盤構造推定と地盤震動特性の把握，日本地震工学論文集，19 巻，5 号，特集号「第 15 回日本地震工学シンポジウム」その 2，2019.
- 6) 西村武，野口竜也，香川敬生：微動探査に基づく鳥取県湯梨浜町における地盤構造の推定，第 39 回地震工学研究発表会予稿集，2019.
- 7) 本田禎人，望月貫一郎，下村博之，門馬直一：鳥取県中部地震での衛星画像によるブルーシート被覆建物の自動抽出，日本災害情報学会，第 19 回学会大会予稿集，pp.244-245，2017.
- 8) 紺野克昭，大町達夫：常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例，土木学会論文集，No.525/ I -33，pp.247-259，1995.
- 9) 長郁夫，多田卓，篠崎祐三：一般理論が切り開く微動アレイの可能性：解析ツール BIDO の公開，日本地震学会講演予稿集，2009.
- 10) Cho, I., Tada T. and Shinozaki Y. : Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, J. Geophys. Res. , 111, B09315, 2006.
- 11) 防災科学技術研究所：Geo Station, <<https://www.geo-stn.bosai.go.jp/>>[2020/09/01 閲覧]
- 12) 中国地方基礎地盤研究会：山陰臨海平野地盤図' 95,

- 1995.
- 13) 狐崎長琅, 後藤典俊, 小林芳正, 井川猛, 堀家正則, 齊藤徳美, 黒田徹, 山根修一, 奥住宏一: 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, 9-3, 4-10, 1990.
 - 14) Kawase, H., Sanchez-Seama, F.J. and Matsushima, S.: The optimal use of horizontal-to-vertical spectral ratios of earthquake motions for plane waves, Bull. Seism. Soc. Am. Vol.101, No.5, pp.2001-2014, 2011.
 - 15) 山中浩明: ハイブリッドヒューリスティック探索による位相速度の逆解析, 物理探査, 60, pp.265-275, 2007.
 - 16) 安井譲, 西川隼人, 前田寿郎, 長郁夫, 小嶋啓介, 額嶺一起, 宮島昌克: 地震動 H/V スペクトルによる地盤構造逆解析の適用性—福井地域の記録を用いた研究事例—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.70, No.4, [特]地震工学論文集, Vol.33, pp.628-643, 2014.
 - 17) 太田外氣晴, 江守勝彦, 河西良幸: 耐震・振動・制御, 共立出版, p. 339, 2001.
 - 18) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site Effect of Strong- Motion Records Observed during the 1987-Chiba-kentoho-oki, Japan Earthq. Eng. Sympo, Vol.3, pp.85-90., 1994.
 - 19) 西川隼人, 野口竜也, 宮島昌克, 香川敬生: 微動 H/V の 1 次ピークの振動数と振幅に基づいた地盤増幅度評価式の検討, 日本地震工学会論文集, 第 19 巻, 第 7 号, 2019.

(Received ???, ???)
(Accepted ???, ???)

ESTIMATION OF VELOCITY STRUCTURE AND GROUND MOTION CHARACTERISTICS IN THE DAMAGED AREAS DUE TO THE 2016 CENTRAL TOTTORI PREFECTURE EARTHQUAKE, JAPAN

Isamu NISHIMURA, Tatsuya NOGUCHI and Takao KAGAWA

On October 21, 2016, an earthquake with MJMA 6.6 occurred in the central part of Tottori Prefecture, Japan. Observed JMA seismic intensities were 6 lower at Kurayoshi city, Yurihama and Hokuei towns. Housing damages due to the earthquake were concentrated in limited areas. In this study, we carried out microtremor observations around damaged areas, and estimated velocity structures and ground motion characteristics with previously conducted studies. We confirmed relationship between ground motion characteristics and damages due to the earthquake. Low-velocity layers with S-wave velocity less than 200 m/s were estimated at all observation sites and the layers tend to be thicker to coastal plain and thinner to inland areas. Thicknesses to deeper layers with S-wave velocity more than 700 m/s were different in Yurihama town and Hokuei town from earthquake ground motion data. It was found that the damage areas correspond to the parts where the layer thicknesses change steeply. It suggests that the damages concern to two- or three- dimensional effects of velocity structures. The clarification is our future issue.