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

西村 武1・野口 竜也2・香川 敬生3

¹正会員 鳥取大学 大学院持続性社会創生科学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101) E-mail: M18J6023B@edu.tottori-u.ac.jp

²正会員 鳥取大学助教 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101) E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

³正会員 鳥取大学教授 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101) E-mail: kagawa@cv.tottori.ac.jp

2016年10月21日に鳥取県中部を震源とする M6.6 の地震が発生し、倉吉市、湯梨浜町、北栄町で最大震 度 6 弱を記録した.その中で湯梨浜町龍頭では地震記録から明瞭な非線形効果による地盤応答がみられた ものの、同町の他の観測点ではみられなかった.また屋根瓦落下等の建物被害は、平野部よりも山際の地 点で確認された.そこで本研究では湯梨浜町の強震観測点付近を中心に微動探査を実施し、地盤構造の推 定および地盤震動特性を把握した.その結果、各地域で卓越周期に違いがみられ、龍頭付近では 0.5-0.8 秒, 被害があった山際の地点では 0.1-0.4 秒であった.また、深部構造に大きな違いはみられなかったが、深さ 60m までの浅部速度構造に違いがみられ、その違いが地盤の非線形応答を引き起こした可能性が示唆され た.

Key Words:microtremor observation, subsurface velocity structure, the 2016 central tottori earthquake

1. はじめに

2016年10月21日,鳥取県中部を震源とするM6.6の地 震が発生し,鳥取県倉吉市葵町,北栄町土下,湯梨浜町 龍頭の3か所の観測点で最大震度6弱であった.上記の 地域を中心に広範囲で建物被害が確認され,全壊が18 棟,半壊・一部損壊が15000棟超であり¹⁾,壁のひび割 れ,道路の変形や破損も報告されている²⁾.北栄町では 倒壊家屋は一部の地域で集中してみられた²⁾.湯梨浜町 では主に山際に隣接する地域で屋根瓦落下の被害が確認 された.これら局所的な被害は,地盤構造の違いによる サイト増幅特性の影響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 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.湯梨浜町内には 3 つの自治体観測点と 2 つの臨時観測点がある.これら の強震記録の分析結果³³から,地盤構造の違い⁴による サイト増幅の差異が確認された.また震源近傍の湯梨浜 町龍頭および北条町土下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みられたもの の⁵,震源断層から同距離程度離れている羽合では明瞭 な非線形応答がみられなかった.

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.そこで本研究では 被害地点や強震観測点において新たに微動観測を実施し、 地盤構造の推定および地盤震動特性の把握した.さらに、 山際の建物被害がみられた地点で臨時地震観測を実施し、 その地震記録を用いて深部までの地盤構造の推定を行った.

2. 観測

(1) 対象地域の概要

地形および地質⁶は以下の通りである.対象地域の平 野部を形成する倉吉平野は、1級河川の天神川による堆 積作用で形成されており、天神川の西側が海岸砂丘(北 条砂丘)、東郷池周辺および西側が沖積低地(倉吉平野 臨海部)で砂および粘土等の軟弱地盤となっている.そ の平野の基盤となる周囲の山地では、古第三紀の流紋岩、



図-1 対象地域の地質図とアレイ観測地点

花崗岩,新第三紀の安山岩,玄武岩が露頭している.また,東郷池西側の一部の地点で北条砂丘による砂丘砂がみられる.

既往の研究 ⁴によると東郷池周辺における微動の卓越 周期は0.5-1.5 秒程度である.南東側の山際に近い地域か ら北西の沿岸部に向かうにつれて卓越周期が長くなり, これは工学的基盤までのS波速度 100-200m/sの堆積層の 層厚に対応していると考えられる.

(2) 観測概要

3 成分単点観測は東郷池周辺の住宅地や強震観測点を 中心に羽合地域で 112 点,東郷地域 80 点で実施した. 屋根瓦落下の被害がみられた小鹿谷および高辻地域では 50m 間隔の観測を 102 点で実施している.計測機器には 3 成分の加速度型地震動計 JU410 を使用した.この機器 は長周期側で周期 10 秒程度までの微動が記録可能な機 器である⁷.観測方法はNS,EW,UDの3成分とし,増幅 倍率を 100 倍,サンプリング周波数 100Hz もしくは 200Hz, 観測時間は 10-15 分間程度とした.

アレイ観測は強震観測点で2地点(YRAR, TGAR),臨 時余震観測点で2点(OSK, TZAR),その他住宅が密集し ている箇所で4点の計8地点で実施した(図-1).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使用とした.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 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.アレイ半径は第四紀の堆積層のS波速度構造を把 握することを目的として、観測地点によって 0.6-30m の 範囲で実施した.

微動計はアスファルト舗装された道路上の可能な限り 水平な場所で,路肩に lm 以上の段差や用水路の埋設管 がないことを確認して設置した.さらに風や日差し等の 外的な影響を防止するためにプラスチックの容器などで 地震計を覆う措置を施した.なお微動記録は全観測点に おいて周期約 0.1-3 秒の周期帯で解析を行う上で十分な 振幅レベルのものが得られていた.

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(OSK, 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2019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で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 行う仕様としている.



図-2 対象地域全域における微動 HV の卓越周期分布図



図-3 建物の被害状況と微動 H/V の卓越周期分布図 (小鹿谷地域)



図-4 建物の被害状況と微動 HV の卓越周期分布図 | (高辻地域)

3. 解析

(1) 微動記録の解析

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 目測により 10 区間以上選定してからフーリエスペクト ルを求め、係数 20 の Log ウィンドウ[®]で平滑化し、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.卓越周期分布 図について、湯梨浜町全域を図-2 に、小鹿谷地区を図-3 に、高辻地区を図-4 示す.なお既往の研究の解析デー タ ⁴も取り込んで分布図を作成している.図中のシンボ ルの色は卓越周期に、大きさはピーク値に対応しており、 ピーク値が5倍以上の点を最大とし、ピーク値が小さい ほどシンボルが小さくなるようにしている.また図-3、 図-4 には建物被害の分布も示しており、これらは衛星 画像からブルーシートの被覆状況より屋根瓦被害の判別 を行ったもの¹³と現地視察および聞き取りによるもので ある.

アレイ観測の記録について、解析ツール BID0 Ver.

2.0⁹を用いることにより、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 秒として微動記録の RMS 値を用いた自動抽出 により少なくとも5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差曲線について は、連続性を考慮して各観測点でまとめた.

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. パラメータの設定は、既往の研究 4やボーリン グデータ¹¹を参考に、S波速度を決定し、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 4を参考に, P波速度はS波速度の換算式¹²を用いて設定している. 表-1 に得られた地盤構造モデルの地盤物性値を、アレ イ観測点の中心の微動H/Vに、表-1のモデルによる理論 値を重ねたものを図-5に示す.

(2) 地震記録の解析

2017 年 7 月 24 日から 2018 年 7 月 2 日の期間内に発生 した 15 地震の記録を対象とし、両観測点で同じ地震を 用いて解析を行った. データ処理として、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 0.2比 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 と EW 成分を相乗平 均して合成)と上下動のスペクトルの比(地震動 H/V)

を求めた.この地震動 H/V を用いて浅部構造は上述した アレイ観測によるモデル,深部構造は既往の研究¹⁴によ る地盤構造モデルをベースに、拡散波動場理論¹⁵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 イック探索 1%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. なお減衰定数hはS波速度100m/s以下 で0.03, 100-400m/sで0.02, 400m/s以上で0.01とした. またインバージョン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=T₀exp(-ck[^]a)の係数 a:0.5, c:1.0, の初期温度 T₀を 100, 温度更新回数を10とした. 探索の対象はS波速度 と層厚とし、P波速度はS波速度の換算式¹²⁾,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±25%の範囲で探索を行う. 図-6 に地震動 H/V と モデル推定で求められた理論H/Vの比較を、表-2に得ら れた地盤物性データを示す.

	観測点	層厚(m)	密度(t/m^3)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	観測点	層厚(m)	密度(t/m^3)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)
	YRAR	10	1.6	1420	120	TGAR	8	1.6	1390	90
		50	1.7	1510	200		35	1.8	1620	300
		100	2.1	2070	700		40	2.1	2070	700
		∞	2.2	2620	1200		90	2.2	2620	1200
	SDAR	25	1.6	1420	120		∞	2.4	3500	2000
		50	1.7	1510	200	OSK	6	1.6	1400	90
		100	2.1	2070	700		10	1.7	1510	200
		∞	2.2	2620	1200		∞	2.1	2070	700
	KDAR	13	1.6	1400	100	TZAR	8	1.6	1430	130
		40	1.9	1850	500		3	1.7	1490	180
		60	2.1	2070	700		∞	2.1	2070	700
		00	2.2	2620	1200	BSAR	6	1.7	1430	130
	HWAR	15	1.6	1410	110		œ	2.1	2070	700
		20	1.7	1510	200	-				
		50	2.1	2070	700					
		∞	2.2	2620	1200					

表-1 微動の解析による地盤構造モデル



図-5 アレイ観測点の微動 H/V

4. 地盤構造の推定

(1) 微動 H/V の卓越周期

卓越周期分布については以下の通りである. 図-2 よ り広域の特徴として,東郷池北西側の羽合地域(YRAR, SDAR, KDAR, HWAR 付近)で 1.0-1.6 秒,南東側の東郷地 域(TGAR 付近)は 0.4-0.8 秒,さらに山際方向にある小 鹿谷および高辻地域(OSK, TZAR 付近)では 0.1-0.4 秒と なっている.またピーク値については,羽合地域におけ る沿岸部や東郷池の湖畔部,山麓部に位置する地域で低 く,そのほかの平野部では高い傾向がみられる.

小鹿谷および高辻地域は建物被害がみられた地域であり、稠密な観測を実施した場所である.図-3より小鹿谷地域では 08K を境にして東側で 0.4-0.6 秒、西側で 0.1-0.3 秒となっており、山際に向かうにつれて短周期になり、加えてピーク値が小さくなる傾向がみられる.図-4より高辻地域では 0.1-0.4 秒でありピーク値は全体的に小さい傾向がある.図-3、図-4には建物被害の有無が示されているが、建物被害の分布として、小鹿谷地域では広範囲に分布、高辻地域では図-4 中のある道路沿

いに被害がみられる.これらからは、両地域の建物被害 分布と卓越周期分布との明確な関連性はみられない.

(2) 地盤構造の推定

東郷池周辺のボーリングデータ¹¹⁾より,S波速度 100m/s以下は粘土,200-300m/sは砂であり,表-1よりS 波速度90-300m/sの層の層厚は6-75mと各地点で異なる. S波速度200m/s以下の低速度層は東郷池周辺で厚く,内 陸部で薄くなる傾向がみられる.建物被害がみられた小 鹿谷および高辻地域では,S波速度200m/sの層が地表から 15m程度堆積しており,15m以深ではS波速度700m/s の非常に硬い岩盤層が存在している.また,地震観測点 近傍のTGARは非線形地盤応答がみられた地点であり⁵⁰, S波速度90m/sの粘土層が8m堆積しており,この層が非 線形応答した可能性が高い.

山際の2地点では地震観測記録より深部構造モデルが 得られている.表-2よりS波速度90m/sのごく表層の構 造は両地域で似ている一方で,深部構造は高辻地域がい ずれの層も小鹿谷地域より薄く,本震発生時に揺れ方が 異なっていた可能性がある.

観測点	層厚(m)	密度(t/m^3)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	減衰h
	5	1.60	1390	90	0.03
	43	1.82	1717	384	0.02
小鹿谷	52	2.07	2394	995	0.01
OSK	339	2.11	2527	1114	0.01
	317	2.28	3209	1729	0.01
	8	2.56	5500	3000	0.01
	6	1.60	1390	90	0.03
	5	1.71	1535	212	0.02
高辻	83	1.94	2001	627	0.01
TK	162	2.13	2605	1191	0.01
	194	2.31	3323	1867	0.01
	8	2.56	5500	3000	0.01

表-2 地震動 HV の解析による地盤構造モデル



図-6 地震動 HV の比較(青:観測値,橙:理論値)

5. まとめ

鳥取県湯梨浜町において微動探査を実施し,既往の研 究によるデータも合わせて地盤構造の推定を行った.そ の結果以下のことがわかった.

- a) 微動の3成分単点観測記録から得られたH/Vは、山 際から平野部に向かって卓越周期が長くなる傾向 がみられた.また、ピーク値については羽合地域 の湖畔部と小鹿谷および高辻地域の山際の観測点 で小さくなる傾向がみられた.
- b) 微動アレイ観測記録より位相速度分散曲線が得られ、S波速度構造を推定することができた.S波速度 200m/s以下の低速度層は東郷池周辺で厚く、内陸部で薄くなる傾向がみられた.非線形応答がみられた龍頭では表層8mにS波速度90m/sの層が堆積しており、この層が非線形応答した可能性が高い.
- c) 地震記録から深部までの地盤構造の推定を行った.

その結果,小鹿谷と高辻地域で表層は似ているも のの深部構造が大きく異なり,これを原因として 本震発生時の揺れが異なっていた可能性がある.

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:本研究は、微動観測は鳥取大学工学部地圏環境工 学研究室所属の学生に協力して頂きました. 地震動 HV 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や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.

参考文献

- 鳥取県:鳥取県中部地震(第 100 報)
 (3月 20日 12時 00分), https://www.pref.tot-tori.lg.jp/secure/1114702/100.pdf>[2019/08/23 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.
- 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, Vol69, DOI10.1186/s40623-017-0689-0, 2017.
- 野口竜也,香川敬生:微動および重力探査による倉 吉平野臨海部の地盤構造推定,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, pp.I_888-I_896, 2014.
- 5) 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.
- 地質調査所:20万分の1地質図「松江及び大社」, 1982.
- 先名重樹,安達繁樹,安藤浩,荒木恒彦,飯澤清典, 藤原広行:微動探査観測システムの開発,第115回 物理探査学会学術講演会予稿集,pp.227-229,2006.
- 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.
- 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.
- 中国地方基礎地盤研究会:山陰臨海平野地盤図'95, 1995.
- 12) 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.

- 13)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.
- 14) 野口竜也,西川隼人,吉田昌平,香川敬生:鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価,土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol.72, No.4,[特]地震工学論文集,Vol.35, p.I_646-I_658, 2016.
- 15) Kawase, H., Sanchez-Seama, F.J. and Matsushima, S. : The optimal use of horizontal-to-vertiacal spectral ratios of

earthquake motions for plane waves, Bull. Seism. Soc. Am. Vol.101, No.5, pp.2001-2014, 2011.

- 16) 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.
- 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.

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

SUBSURFACE VELOCITY STRUCTURE DERIVED FROM MICROTOREMOR OBSERVATION IN YURIHAMA TOWN, TOTTORI, JAPAN

Isamu NISHIMURA, Tatsuya NOGUCHI and Takao KAGAWA

An earthquake with M_{JMA} 6.6 occurred in the central part of Tottori prefecture, Japan on October 21, 2016. Recorded JMA seismic intensity were 6 lower at Kurayoshi city, Yurihama town and Hokuei town. Nonlinear soil response due to strong ground motion is suspected at Ryuto observation site in Yurihama town, but not at Hawai in the same area from the observed data. More housing damages were observed mainly found at edge of mountain than at flatland. In this study, microtremor observations were carried out around the strong motion observation sites and damaged area in Yurihama town. It was found that the predominant period at Ryuto is around 0.5-0.8 seconds, at damaged area is around 0.1-0.4 seconds. There were almost no difference in deeper S-wave velocity structure between the two areas, so it is suggested that shallower layer was dominantly affected on the site response. The nonlinear ground response in the area might be also caused by the differences of the rather shallower subsurface velocity structure down to about 60m depth.