

島根県出雲平野の常時微動から推定される 地盤構造

足立 正夫1・野口 竜也2・西田 良平2・元木 健太郎3・瀬尾 和大3

¹鳥取県立米子工業高等学校 (〒683-0052 鳥取県米子市博労町4-220)
E-mail:masa-a@geosd.jp
²鳥取大学工学部土木工学科 (〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)
³東京工業大学総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田 4259)

本研究では、常時微動観測に基づいて、島根県出雲平野の地盤構造を推定し既存の地形・地質・ボーリ ングデータなどの情報と比較、検討を行った.出雲平野全域に500m間隔のメッシュの交点上もしくはそ の付近において、3成分常時微動観測を行った.これらの記録からH/Vスペクトルを求め、ピーク周期の コンターマップを作成した.また、平野内の4地点において半径3~30m アレイ観測を行いSPAC法により 第三紀層までのS波速度構造を明らかにした.H/Vスペクトルのピーク周期とアレイ観測より求めたS波 速度を用い、1/4波長則から第四紀層の厚さを推定し、その整合性について検討を行った.

Key Words : microtermor, Izumo plain, H/V-spectra, microtremor array, quaternary

1. はじめに

島根県第2の人口を有する出雲市と斐川町は出雲平野 に位置し軟弱地盤上に発達した地方都市で,島根県の観 光や産業の中枢として重要な場所でもある.このような 軟弱地盤の条件下では,地震動特性は大きな影響を受け ることは容易に推測できる.とりわけ,軟弱地盤の速度 構造に関する情報は地震防災上必要不可欠である.

この地域の既存の地盤構造データとしては、堆積層の N値や地質の情報を示したボーリングデータ^Dが存在す る.しかし、平野全域については網羅されておらず、特 に軟弱地盤層の速度構造については防災科学技術研究所 の強震観測点のPS 検層データのみである.

速度構造推定には、人工震源を用いた弾性波探査や PS 検層などが多く行われているが、経済的な制約があ る.一方で、常時微動観測による地盤特性の推定方法と して、一点での常時微動3成分記録から水平上下スペク トル比(以下、H/Vスペクトルと称す)²³を用いて地盤 の周期特性や増幅特性を推定する方法があり、多くの活 用事例が報告されている^(例えば4).また、アレイ観測も 各地で実施されS波速度構造の推定に有効であることが 確認されている^(例えば5).

そこで本研究では、1種類の観測方法のみを用いて推

定される地盤構造に比べ2種類の観測を組み合わせて構 造を推定するするほうが合理的な構造の推定が期待でき ると考え,常時微動の3成分観測およびアレイ観測を行 い,出雲平野における地盤構造を推定した.

2. 出雲平野の地形・地質概要

出雲平野は島根県中東部に位置し(図-1),島根半島と 中国山地北端の間の宍道湖西岸に発達した東西約 20km, 南北約 8km の沖積平野で,中心部を南北方向に斐伊川が 横断し,東部地域は旧平田市(現出雲市)と斐川町,西 部地域は出雲市と旧大社町(現出雲市)に2分される. 斐伊川は島根半島に沿って東の宍道湖に流れ込むような 地形になっているが(図-2),かつては斐伊川と神戸川 ともに西の日本海に流出しており,平野の西部地域はそ の沖積作用によって形成された堆積低地である.平野の 東部地域は近世初頭の東流固定化などの人為的な河道変 更が影響し斐伊川の堆積や氾濫によって形成された低湿 地帯が多くを占め,また,江戸時代から大正時代初期に 行われていた,鉄穴流や農地確保のための埋立・干拓に よって平野が拡大してきたものである¹¹.



図-1 出雲平野の位置図



図-2 観測点

平野全体のボーリングデータによる地質概要について は、堆積層(第四紀層)の厚さが5~60m 程度で、砂・ シルトや粘土からなりN値も平野東部では0~10 程度、 平野西部では1~15 程度と軟弱な地盤の場所が多い.た だし、平野西部の海岸沿いや大社付近は締まった砂の堆 積層で、N値も5m 以深では30 以上になる¹⁾.第四紀層の 下の基盤岩類は第三紀の砂岩や泥岩などから成っている.

3. 常時微動観測の概要

(1) 3成分観測

観測に用いたセンサーには、固有周期5秒の3成分一体型速度計UP-255Sおよび3成分一体型加速度計GPL-6A3Pを使用した.平野全体に500 mのメッシュを設定し、その交点付近の400点、サンプリング周波数100Hzで5分間観測した.観測点を図-2に示す.なお、図中の●および●は観測点で使用した観測装置UP-255SおよびGPL-6A3Pを示す.観測記録から20.48秒の区間を3~5 区間選定し、これらの平均スペクトルからH/Vスペクトルを求めた.スペクトルの平滑化にはバンド幅0.3 HzのParzenウィンド



図-3 フーリエスペクトル



図-4 H/V スペクトル

を用いた. なお,水平成分については相乗平均で合成している. アレイ観測IRS 点の平均フーリエスペクトルおよびH/Vスペクトルを図-3 および図-4 に示す.

(2) アレイ観測

アレイ観測は、K-NET SMN005(出雲): IZK, 大社町: TAS, 斐伊川河川敷:HRS, 出東小学校:HKSの4箇所にお いて, 固有周期1秒の上下地震計(速度計)PK-110を4 台使用し, 半径 R=3, 10, 30 mの3セットをサンプリング 周波数1000Hzで15分間ずつ行った. 観測点を**図-2** に示す. なお, 図中の★はアレイ観測点を示す. 観測記録は, 8.192秒の区間をアレイ半径ごとに20区間選定し,空間 自己相関法(SPAC法)⁶⁾を用いて位相速度の分散曲線を 求めた. なお, スペクトルの平滑化はバンド幅0.3 Hzの Parzenウインドを用いた.

4. H/Vスペクトルによる地盤卓越周期分布

本論では、H/Vスペクトルのピーク周期を地盤固有周期 として考え、そのコンターマップを作成した. これを

-221-



図-5 ピーク周期のコンターマップ (コンター間隔: 0.25 sec)

Г

図-5 に示す. 出雲平野のピーク周期分布の特徴について は以下のようになる.

・平野東部地域(平野中央の斐伊川より東側)

平野東部地域全体を見ると、周期1.0 秒以上の場所 が平野中央よりやや北寄りに分布し、旧平田市付近と 直江町・上庄原・宍道町寄りは周期1.0 秒以下で分布 している.

島根半島寄り(平野北側)の斐伊川に沿って周期 1.2 秒以上の場所が帯状に蛇行しながら河口(宍道 湖)まで続いている.

平野中央の宍道湖側に周期1.5 秒以上の場所が集中 している.

・平野西部地域(平野中央の斐伊川より西側)

平野西部地域全体を見ると、周期1.0 秒以上の場所 が平野中央よりやや北寄りに分布している.

遥堪付近から南の下古市町に向け周期1.0 秒以上の 帯がある.

杵築南・神戸川河口・浜町付近で囲まれる地域に 周期1.5 秒以上が分布している.

大島町・大津町付近から北方向に周期1.0 秒以下の 突き出し部分が見られる.

5. アレイ観測記録によるS波速度構造の推定

4箇所のアレイ観測点で得られた位相速度の分散曲線

表-1 地盤構造モデル

p(g/cm ²)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	地質年 代	地質
1.7	1420~ 1510	120~ 200	第四紀	完新統
2.0	1620	300		更新統
2.1	1900	600	新第三	砂岩・泥岩
2.2	2900	1500	紀	(布志名層)



図-6 K-NET SMN005(出雲)地盤情報図

表-2 K-NETSMN005付近のボーリングデータ¹⁾

Depth	N-value	Soil column	
(m)	(Average)		
0-7	12	sand	
7-9	5	clay	
9-18	30	sand	
18-37	20	clay	
3 7-46	33	clay	
46 - 54	45	sand	
54-62	53	clay	
	360	Rock	



図-7 位相速度分散曲線 (IZK)



図-9 位相速度分散曲線 (HRS)

表-3 IZK(K-NET SMN005) における層厚と速度構造

Thickness	Density	Vs	Vp
(m)	(t/m ³)	(m/s)	(m/s)
12	1.7	150	630
25	1.9	190	1460
26	2.0	300	1620
40	2.2	600	1900
x	2.3	1500	2900

表-5 HRS における層厚と速度構造

Thickness	Density	Vs	Vp
(m)	(t/m ³)	(m/s)	(m/s)
13	1.7	120	1420
30	1.9	200	1510
26	2.0	300	1620
40	2.2	600	1900
œ	2.3	1500	2900

を説明するように,試行錯誤で地盤モデルを推定した. 推定方法としては,各層ごとにP波速度,S波速度およ び密度を決めた後それらを拘束し,層厚を変化させて試 行錯誤するという手順に従った.堆積層のパラメータ設 定は,第一層目は最小位相速度とし,第四紀層について はボーリングデータ¹⁰およびK-NET SMN005⁸⁰のPS検層を, 基盤岩部分については既往の研究^{7,99}および文献¹³⁰を参 考にし,P波速度は,K-NET SMN005⁸⁰のPS検層および 次に示す関係式¹⁰⁰を参考にした.



図-8 位相速度分散曲線 (TAS)



図-10 位相速度分散曲線 (HKS)

表-4 TAS における層厚と速度構造

Thickness	Density	Vs	Vp
(m)	(t/m^3)	(m/s)	(m/s)
15	1.9	200	1510
50	2.0	300	1620
80	2.2	600	1900
∞	2.3	1500	2900

表-6 HKS における層厚と速度構造

Thickness	Density	Vs	Vp
(m)	(t/m ³)	(m/s)	(m/s)
21	1.7	120	1420
17	2.0	300	1620
180	2.2	600	1900
∞	2.3	1500	2900

Vp = 1.11Vs + 1290 (m/s) (1)

使用した地盤構造モデルを表-1 に示す.

各観測点で推定された位相速度を図-7,8,9,10 に,試行 錯誤で得られた地盤構造モデルを表-3,4,5,6 に示す.な お,図中の実線は理論曲線で○が観測値を示す.

(1) IZK (K-NET SMN005)

第四紀層のS波速度構造は、表-3よりVs=150m/s~ 300m/s で,層厚は 63m となった.また,第三紀の砂 岩・泥岩層 (Vs=600m/s) の層厚はおよそ 40m となった.

図-6 に示す K-NET SMN005 の PS 検層結果と観測結果と の比較においては、表層の S 波速度および深度との対応 がよいことがわかる.また、K-NET 付近のボーリングデ ータ (表-2) との比較においても基盤岩までの深さが 概ね一致している.第四紀層の平均 S 波速度はおよそ Vs=230m/s 程度となった.

(2) TAS(大社)

第四紀層の S 波速度構造は, 表-4 より Vs=200m/s~ 300m/s で, 層厚は 65m となった.また, 第三紀の砂 岩・泥岩層 (Vs=600m/s) の層厚はおよそ 80m となった. この観測場所は, 砂丘地帯であり締まった砂の堆積層が 30~40m と非常に厚いため, 最上部の S 波速度が速くな り,よって第四紀層は全体的に S 波速度が速くなってい るものと考えられる.第四紀層の平均 S 波速度はおよそ Vs=280m/s 程度となった.

(3) HRS(斐伊川河川敷)

第四紀層のS波速度構造は,表-5よりVs=120m/s~ 300m/sで,層厚は69mとなった.また,第三紀の砂岩・ 泥岩層(Vs=600m/s)の層厚はおよそ40mとなった.この 場所は,深度が深くなるにつれ徐々に速度が速くなって いるものと考えられる.第四紀層の平均S波速度はおよ そVs=220m/s 程度となった.

(4) HKS(出東小学校)

第四紀層のS波速度構造は,表-6よりVs=120m/s~ 300m/sで,層厚は38mとなった.他の場所と比較した場 合,地表層のVs=120m/sの低速度層が厚く,より軟弱な 地盤であるものと考えられる.第三紀の砂岩・泥岩層 (Vs=600m/s)の層厚はおよそ180mとなった.第四紀層 の平均S波速度はおよそVs=200m/s 程度となった.

5. 第四紀層の層厚推定

前章で得られた S 波速度構造から, H/V のピーク周期 は概ね第四紀層の層厚に対応するものと考えられる. そ こで,図-11 に示す A-B 断面および C-D 断面において, H/V スペクトルのピーク周期と 4 箇所のアレイ観測結果 より得られる平均 S 波速度を用いて,1/4 波長則に従い 第四紀層の層厚を計算した.前章の4箇所のアレイ観測 結果のみで出雲平野の第四紀層における平均 S 波速度を 推定するのであれば,およそ Vs=230m/s 程度となる.

これにより得られた第四紀層底面の分布と,観測点付 近のボーリングデータ¹⁾の地質断面図(一部改変)を 比較したものを図-12 および図-13 に示す. なお, ボーリ ングデータ No.の下に基盤岩までの深さを記載している が, - については, ボーリングが基盤まで達していな い. また, 平野の南北を横断する断面図は示されていな い.

(1) A - B 断面(図-12)

東側の宍道湖(出雲空港)から平野中央の斐伊川の区 間で,S波速度は平均速度Vs=230m/s として計算した (●).断面中央のHHI012からHRT010を除いて西側の HHI021までの区間は,基盤岩の境界とよく整合している. しかし,東側の HHI004~HHI008 の区間および HHI010・ HRT010 では,ボーリングデータの基盤面に比べ最大で 約40m 深く計算されている.この区間では,基盤岩の上 層にレキ層,あるいは Im 層(粘土でN値がおよそ 14~ 29)がほとんど存在せず,より速度が遅いと思われる粘 土層 (N値が 0 ないし1)が直接堆積している.よって, 第四紀層平均S波速度はより小さい可能性があり, Vs=230m/s とした計算では大きく見積もられてしまう. そこでこの区間では,HKSで得られた最小のS波速度 Vs=120m/s を用いて計算した.この変更した区間は,

(●)の点を結んだ分布となり、ボーリングによる基盤 面と整合性がよいことがわかる.

(2) C - D 断面(図-13)

斐伊川から西の神戸川の区間で、A-B 断面と同様第四 紀層のS波速度は平均速度Vs=230m/s として計算した (●). 斐伊川からIZM051までの区間については、基盤 岩の境界とよく整合している.しかし、それより西側 (左)の区間および HHI033~IZM027 では、ボーリング データの基盤面に比べ最大で約30m 深く計算されている. この区間では、A - B 断面と同じように、基盤岩の上 層にレキ層、あるいは Lm 層(粘土でN値がおよそ 14~ 29)をほとんど存在せず、より速度が遅いと思われる粘 土層(N値が 1 ~4程度)が直接堆積している.そこ で、この区間については、IZKで得られた最小のS波速度 Vs=150m/s を用いて計算した.その結果は(●)の点を 結んだ分布となり、ボーリングデータによる基盤面との 整合性がよいことがわかる.

平野全域の平均S波速度をVs=230m/sとした場合ボーリ ングデータとの適合性が良くない場合もある.よって, 平均S波速度を平野全域に適用するためにはアレイ観測 等を行い速度構造を明らかにする必要がある.また,速 度を変更した地点は観測点周辺のボーリングデータにお いて粘土層あるいはシルト層があるため,アレイ観測で 得られた最小のS波速度をあてはめた.その結果,第四



図-13 C-D 断面

紀層の層厚はボーリングデータとよい整合性が見られた.

6. 考察

強震記録のあるK-NET出雲点において、地震動の卓越 周期とH/Vスペクトルのピーク周期の関係を確認した. 鳥取県西部地震(2000/10/6 Mj=7.3, 深さ11km)およ び芸予地震(2001/3/24 Mj=6.4, 深さ51km)について, SMN005の3成分の加速度記録を速度に変換し,S波の立 ち上がりから40秒の区間のフーリエスペクトルとIZK地 点のH/Vスペクトルを比較したものを図-14に示す.地震 動の水平動スペクトルの卓越周期とH/Vスペクトルの卓 越周期とH/Vスペクトル(1.2秒付近)のピーク周期がほ



図-14 地震動スペクトル(鳥取県西部地震と芸予地震)と H/V ピーク周期との比較図



図-15 古地理¹¹⁾とH/Vピーク周期分布との比較図

ぼ一致していることがわかる.

アレイ観測の解析結果より、出雲平野の沖積層は場所 により速度構造が異なり一様な速度分布ではなく、西側 ほどS波速度が速くなる.よってH/Vのピーク周期のみ で第四紀層の層厚を推定するには注意が必要である. 図-15で示すように、風土記の時代(古地図)¹¹⁾とH/Vピー ク周期分布を比較すると、約1200年前には陸地であった 大社付近、斐伊川の旧河道跡、西の神門水海と東の宍道 湖が繋がっていた地域でH/Vスペクトルのピーク周期が 長くなっている.ボーリングデータから大社付近には厚 い砂の堆積層、斐伊川の旧河道跡には軟弱粘土層堆積が 存在している.この地域では、液状化の発生危険度が高 いと指摘されている¹²¹³. 本論では岩盤層に相当する深部構造については、1秒 未満の短周期領域での解析を対象にしているため、十分 な議論が出来なかった. 今後、より詳細に出雲平野の地 盤構造を議論するには、長周期微動を利用したアレイ観 測および重力データから深部構造を特定していく必要が ある.

7. まとめ

出雲平野において高密度の単点3 成分観測およびアレイ 観測を行い地盤構造の推定を試みた.その結果をまとめ ると次のようになる.

- (1) アレイ観測から4地点のS波速度構造のモデルを求めることができた.そのモデルから、出雲平野の第四紀層の平均S波速度はVs=120m/s~280m/s程度で分布していることがわかった.また、4地点の第四紀層の平均S波速度はVs=230m/s程度となった.
- (2) 出雲平野全域における高密度単点3 成分観測から、 H/Vスペクトルのピーク周期分布を得ることができた. また、平野の中心より北側の島根半島寄りにピーク 周期が約1~1.5秒の周期の長い地域が分布している ことがわかった.
- (3) ボーリングデータとH/Vのピーク周期の比較から、 ピーク周期が第四紀層の層厚と対応していることが わかった.得られたS波速度構造から第四紀層の平均 S波速度をVs=230m/s程度として層厚を求めると、10 ~100m程であった.但し、第四紀層の速度を一様と 考えると、一部でボーリングデータとの整合が悪く、 速度を小さく見積もることで一致度が良くなること がわかった.

謝辞:本論文作成に当たり,鳥取大学大学院生 小村紘 平・大畑至・山下毅君,学部生(現 未来建設)鳥越俊 一君には観測および解析等協力して頂きました.地盤情 報にはK-NETSMN005を使用させて頂きました.査読者の 方には丁寧な意見を頂きました.記して感謝します.

参考文献

- 1) 米子工業高等専門学校:島根県地盤図,1985.
- 2) 中村豊、上野真:地表面震動の上下成分と水平成分を利用した地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム講演集、pp.265-270,1986.

- 3) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧:常時微動の水平 動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定法の改良 と適用, 土木学会論文集, N0.489, pp.251-260, 1994.
- 小嶋啓介,山中浩明:常時微動観測に基づく福井平野の第 四紀層構造の推定,土木学会論文集,No.752/I-66, pp.217-225, 2004.
- 5) 野口竜也,西田良平:微動による鳥取平野の地盤構造推定, 土木学会論文集, No. 710/I-60, pp. 473-478, 2002.
- Aki, K. :Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 35, pp. 415–456, 1957.
- 7) 吉川大智,盛川仁,赤松純平,野口竜也,西田良平:余震, 微動,重力を用いた弓ヶ浜半島における2次元基盤構造の 推定,地震,第2輯,第55巻, p.70,2002.
- 8) K-NET SMN005 : http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/
- 9) 吉田治雄,小林喜久二,熊谷千代志,河野倫範:島根半島の2地点における観測記録から推定した2000年鳥取県西部地震の基盤地震動の比較,日本建築学会大会学術講演概要集, pp.171-172,2003.
- 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, Vol.9, No.3, pp. 4-10, 1990
- 11) 建設省(現国土交通省)出雲工事事務所:斐伊川誌, pp. 134-147, 1994.
- 12) 鹿野和彦,竹内圭史,松浦浩久:今市地域の地質,地域地 質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,pp.66-67, 1989
- 13) 鹿野和彦,竹内圭史,大島和雄,豊遙秋:大社地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所, pp. 30-31, 1989

(2007.4.6 受付)

ESTIMATION OF QUATERNARY AND S-WAVE VELOCITY STRUCTURE OF IZUMO PLAIN USING MICROTREMORS AND MICROTREMOR ARRAY

Masao ADACHI, Tatsuya NOGUCHI, Ryohei NISHIDA Kentaro MOTOKI and Kazuoh SEO,

We observed microtremors at 400 sites and microtremor arrays at 4 sites, in the Izumo plain. S-wave velocity in quaternary and the distribution of predominant periods were determined by microtremor array observation and H/V (horizontal-to-vertical) spectral ratios, respectively. The average S-wave velocity in

quaternary was found as 230m/s. The predominant periods in H/V spectral ratios will provide individual thickness of quaternary following to the quarter wavelength law. We estimated the thickest value at about 10 to 100m with the predominant period of 0.2 to 1.8s, and it looked quite reasonable as we confirmed similar result in the geotechnical information.