

# 微動探査による鳥取平野南部地域における 地盤震動特性の把握および地盤構造推定

野口 竜也<sup>1</sup>・石田 勇介<sup>2</sup>・香川 敬生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鳥取大学大学院工学研究科助教 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

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

<sup>2</sup>学生会員 鳥取大学大学院工学研究科大学院生 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: d12t4001a@cv.tottori-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 鳥取大学大学院工学研究科教授 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

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

鳥取県中東部に位置する鳥取平野では、これまでに微動や重力探査など物理探査法の実施により、地震予測のための地盤震動特性の把握および地盤構造の推定が行われている。本研究では、鳥取平野の南部地域で微動探査として新たに102地点の単点3成分観測、10地点のアレイ観測を実施し、既往の研究によるデータを含めて地盤構造の推定を行った。その結果、微動探査では単点3成分観測データより微動H/Vの卓越周期分布、アレイ観測データより7地点のS波速度構造が得られた。また、同地域の地質構造や磁気探査と重力探査データを用いた解析により得られた深部基盤構造との比較した。

**Key Words :** *microtremor, subsurface structure, Tottori plain in Tottori Prefecture*

## 1. はじめに

鳥取県東部に位置する鳥取平野は、県庁所在地の鳥取市に属しており、地方都市として重要な拠点となっている。過去の地震による被害としては、1943年鳥取地震で甚大な被害が発生したことが報告されている<sup>1)</sup>。この地域では既往の研究<sup>2), 3), 4)</sup>より、地盤震動特性の評価と深部基盤からごく表層までの地盤構造の推定がなされており、さらに詳細な探査を行うことで地盤構造の推定精度を高めることは、地震動予測を行う上で重要である。

これまで、鳥取平野の北部域では各種物理探査が実施されており、これらのデータをもとに3次元地盤構造モデルが推定されている<sup>3), 4)</sup>が、南部域では探査されていなかった。そこで本研究では、この地域のデータを補強するために微動探査を追加で実施し、既往の研究によるデータを含めて地盤構造の推定を行った。

## 2. 観測

### (1) 対象地域の概要

地形および地質としては以下の通りである。図-1に鳥取平野とその周辺の表層地質<sup>5)</sup>を示す。鳥取平野の基盤をなす周囲の山地では、新第三紀の礫・砂・泥岩の堆積岩、古第三紀の流紋岩、花崗岩、古生代の変成岩が露頭し、軟弱地盤が広がる平野部は一級河川の千代川・八東川による堆積作用により形成されている。平野南部域では、西側は堆積岩、東側の一部は変成岩の山地に囲まれた谷底平野となっており、西側・東側が南北方向、それらを繋ぐように中央部を東西方向に谷が形成されている。

既往の探査結果<sup>3), 4)</sup>によれば、微動の卓越周期は鳥取平野北部域で0.2~1.5秒である。この卓越周期は堆積層の層厚に対応していることがわかっている。今回の対象地域は、その北部域の探査地域の南側鳥取市河原町、船岡町、郡家町の平野部を対象とした。

### (2) 観測概要

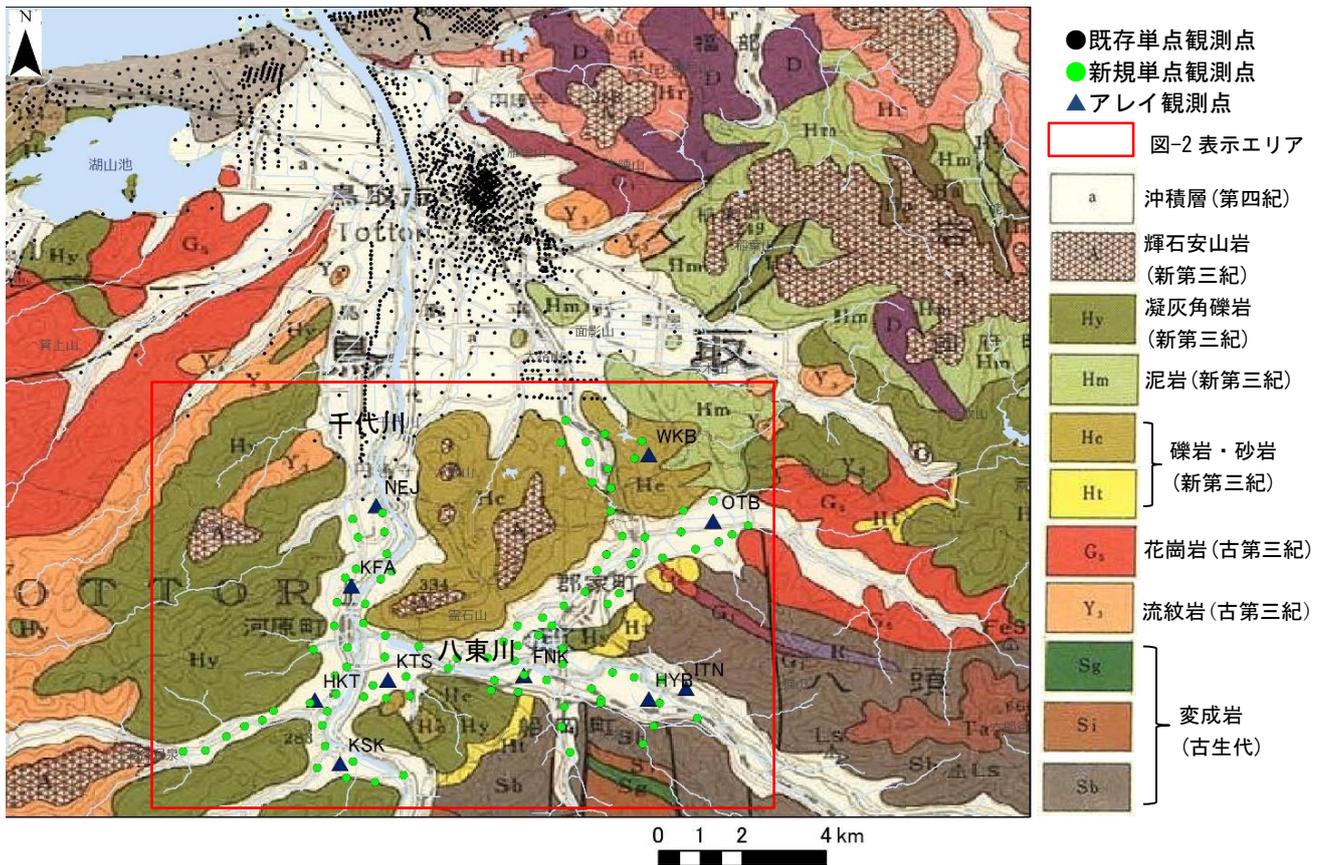


図-1 鳥取平野とその周辺の表層地質図<sup>5)</sup>



図-2 微動探査の観測点位置

微動の単点 3 成分観測は、千代川および八東川、私都川沿い中心に約 500m 間隔で計 102 点で実施した。計測機器には加速度型微動計 (JU210) を用いた。この機器は加速度センサー部が JA-40GA04 (感

度 2V/G, 航空電子製), データ収録部が DATAMARK LS7000XT (分解能 24bit, 白山工業製) で構成されており, 長周期側で周期 10 秒程度までの微動が収録可能な機器とされる<sup>6)</sup>。観測ではサン

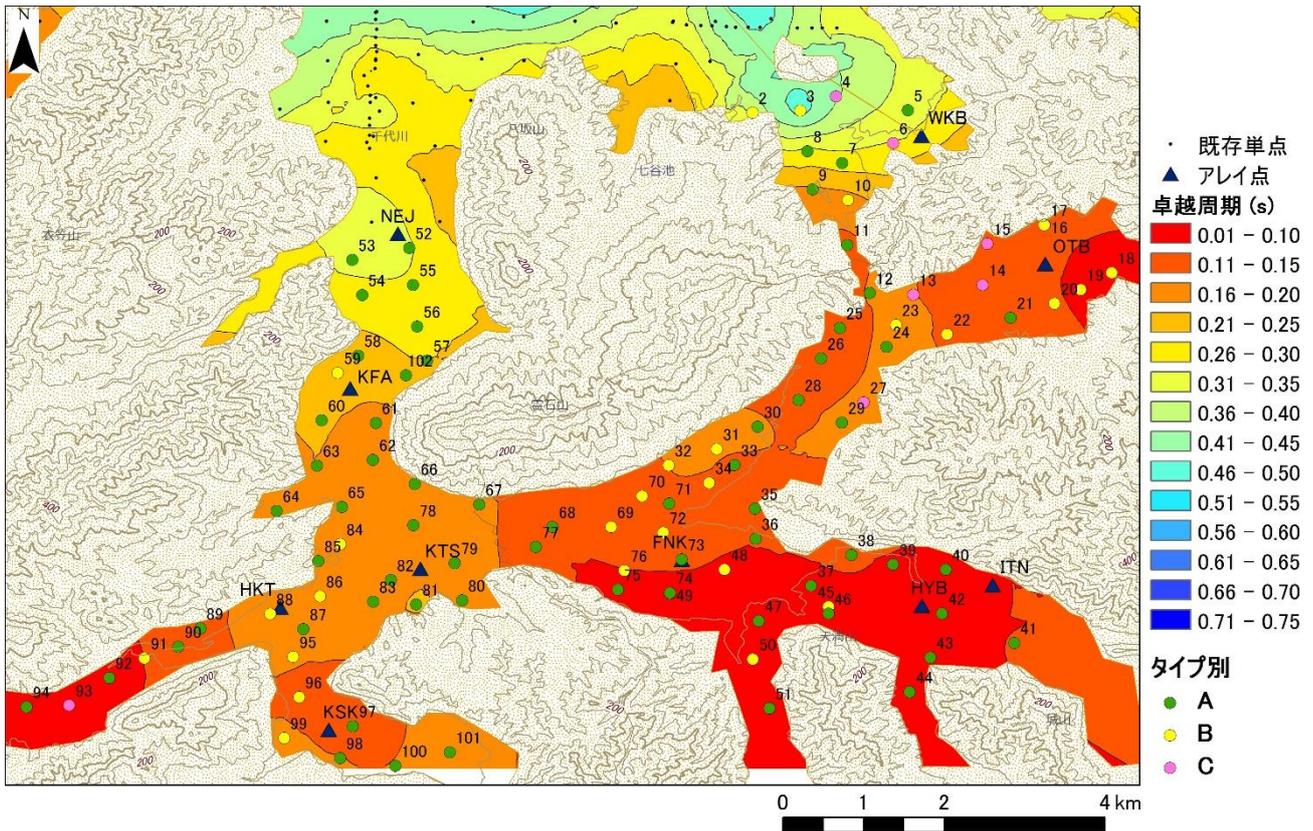


図-3 H/Vの卓越周期とタイプ別分布図

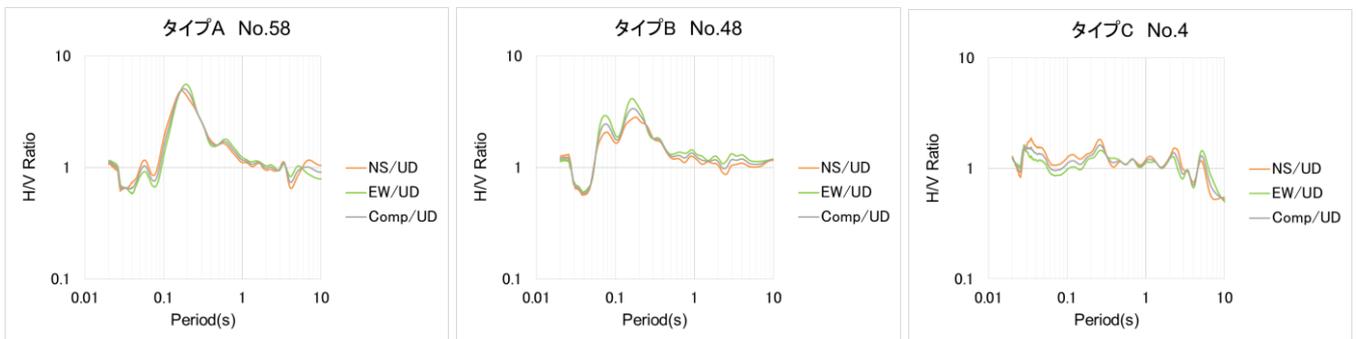


図-4 H/Vの例(タイプ別) (凡例:NS:南北方向, EW:東西方向, COMP:水平動合成, UD:上下方向)

プリング周波数 100Hz, 増幅倍率 10 倍に設定, 観測時間は 1 地点 10~15 分間程度とした. アレイ観測は 10 地点 (NEJ, KFA, KTS, HKT, KSK, FNK, HYB, ITN, OTB, WKB) で実施した. 図-2 に観測点位置を示す.

アレイ観測の計測機器は単点 3 成分観測と同じ JU210 を 4 台用いて GPS クロックにより同期させ, 円の中心には 1 台, 円周上に 3 台を正三角形の各頂点に配置させた. サンプル周波数, 増幅倍率は単点観測と同様の設定にした. 観測日時は, 単点 3 成分観測が 2013 年 9 月 18 日, 19 日, アレイ観測が 2013 年 9 月 20 日, 11 月 20 日, 22 日の日中である. なお微動記録としては, 全観測点において周期約 0.1 秒~5 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. 計測機器はアスファルト舗装された道路上のできるだけ水平な場所で, 路肩に 1m 以上の段差や用水路の埋設管がないなど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プラスチック容器で微動計を覆う措置を施した. 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前提として, 全地点で 0.6m, 10m, 30m を基本とし, NEJ, KTS, FNK, OTB については, 半径 60~400m の観測を追加した.

### 3. 解析

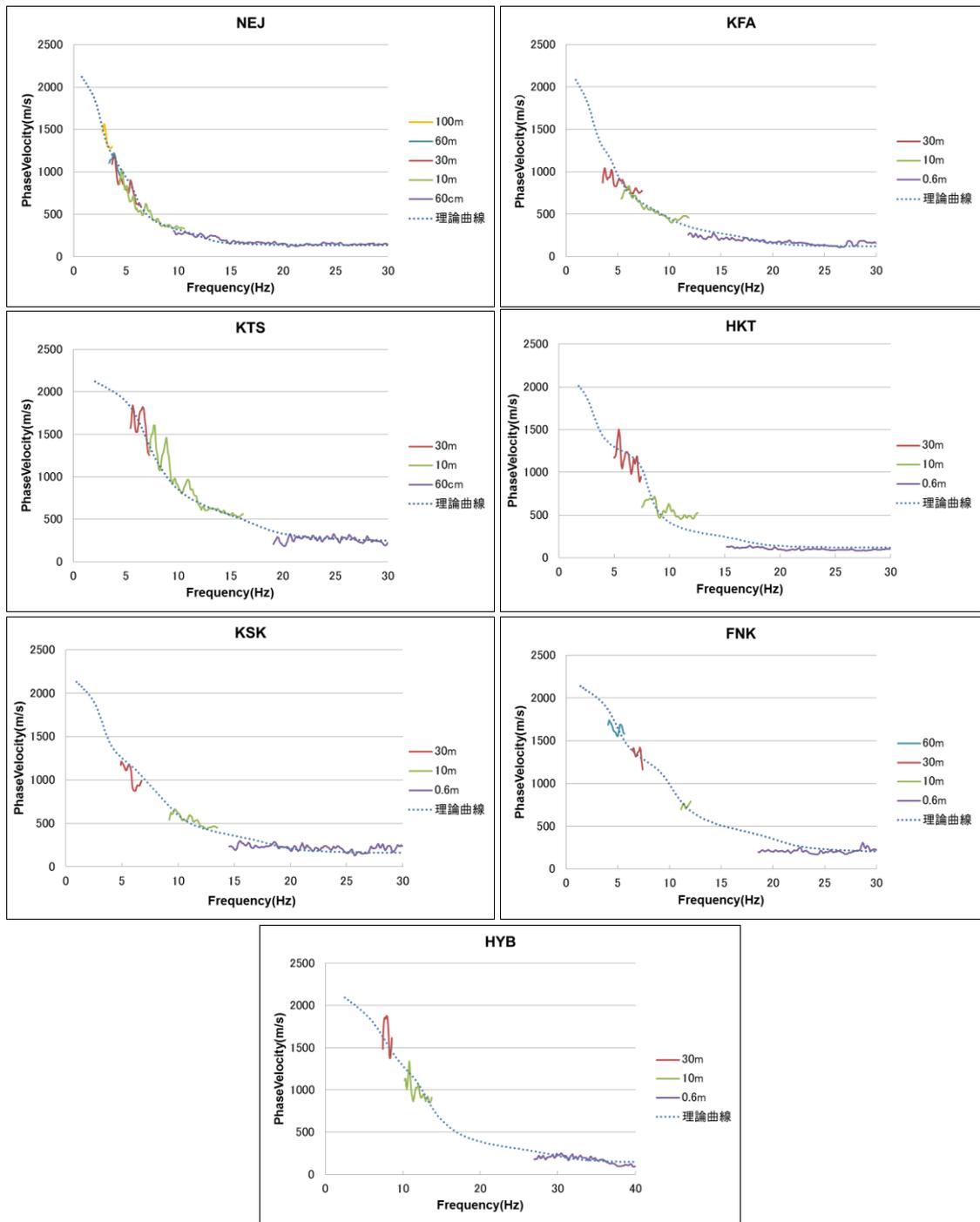


図-5 位相速度の分散曲線

3成分の波形記録については、交通振動などの非定常な波形が含まれない安定した20.48秒間の区間を目測により5区間以上選定しフーリエスペクトルを求め、係数20のLogウィンドウ<sup>7)</sup>で平滑化し、平均スペクトルを求めた。既存の観測データ<sup>3,4)</sup>では、平滑化に0.3Hzのパーゼンウィンドウを用いているが、後述する卓越周期の読み取りに関して平滑化の方法の違いは問題とならないことを確認している。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・EW成分を相乗平均で合成したもの；COMP）と上下動（UD）のスペクトル比（後掲の図-4，図-6ではNS/UD，EW/UD，COMP/UDとして示す）を求め、水平動を

合成したH/Vから目測により卓越周期を読み取った。なお、明瞭なピークが2つみられる場合は長周期側のピークを、さほど明瞭でない複数ピークがみられる場合は最大のピークを基本として近接地点との連続性を考慮して読み取った。読み取った卓越周期に既往の研究によるデータも含めて、クリギング法を用いた補間によりコンターマップを作成した。なお、山地を横断して補間した箇所は図上でマスキングしている。

アレイ観測の記録については解析パッケージツール BIDO Ver. 2.0<sup>9)</sup>を用いることにより、CCA法<sup>10)</sup>に基づき位相速度を推定した。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

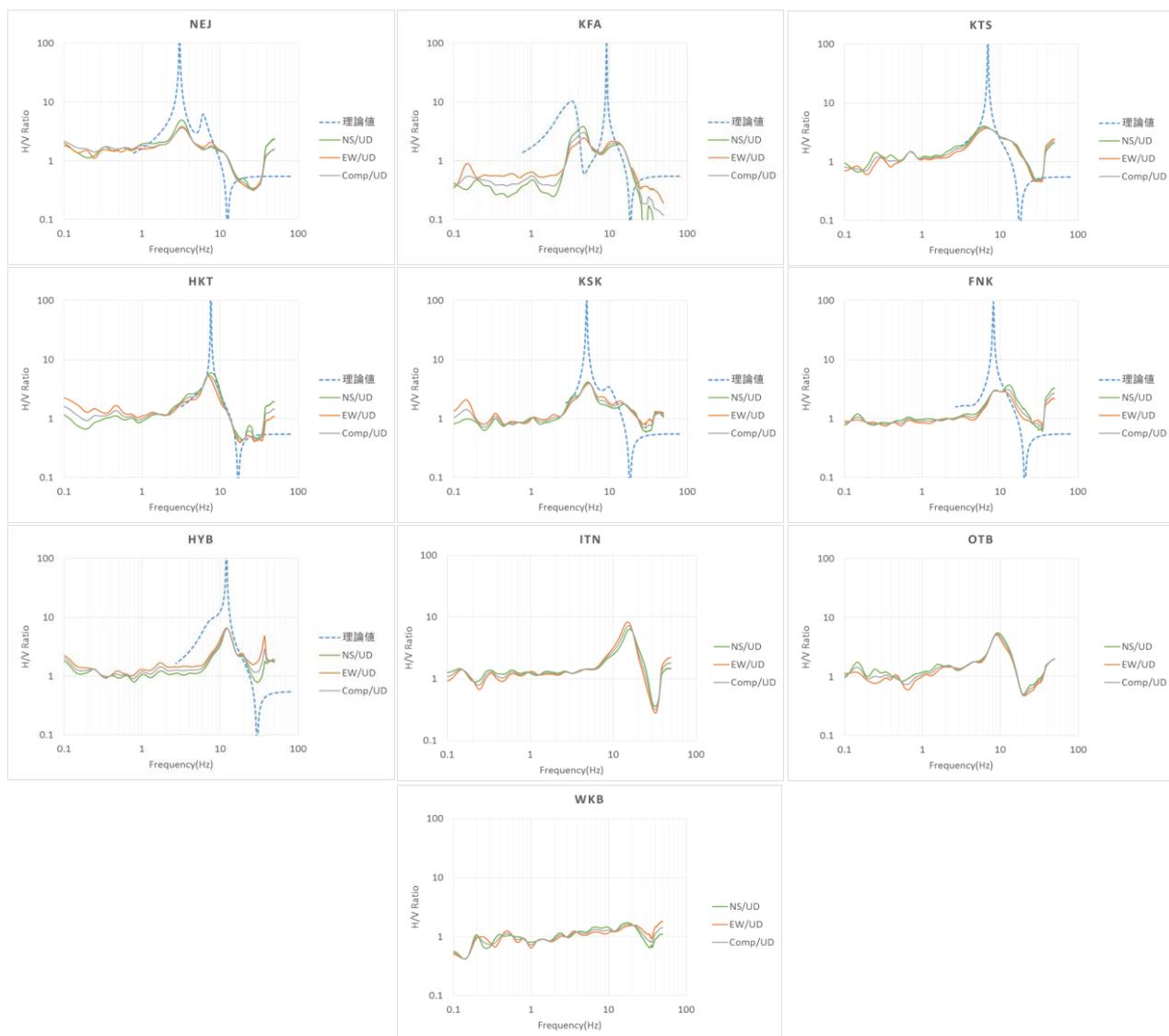


図-6 アレイ観測点の H/V (凡例:NS;南北方向, EW;東西方向, COMP;水平動合成, UD;上下方向)

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、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、位相速度を求めた。各半径で得られた位相速度を連続性を考慮して各観測点でまとめて、後述する S 波速度構造の推定に用いた。ただし、ITN、OTB、WKB については、十分な分散傾向を示す位相速度が得られず、後述する地盤構造モデルの推定の対象からは除いた。

#### 4. 地盤構造の推定

##### (1) H/Vによる地盤構造の把握

図-3 に H/V の卓越周期分布図を示す。卓越周期分布は以下の通りとなっている。卓越周期は 0.05～0.75 秒の範囲で、海に面する平野北部に接する北側ほど周期が長く、山間部の南側ほど短くなっており、特に 0.3 秒以上の領域は北側の一部の地域に集中しており、大半の地域が 0.3 秒以下の短周期となって

いる。また、西側の方が東側に比べ周期が長くなる傾向がある。図-1 の表層地質図<sup>5)</sup>をみると、周囲の山地の地質年代は、西側は新第三紀、東側は古生代となっており、地盤構造と関連性が示唆されるが、後述の地盤構造モデルとの関連で再度検討する。

図-4 に特徴的な 3 タイプ (タイプ A ; 単一の明瞭なピークがある, タイプ B ; ピークが複数ある, タイプ C ; 明瞭なピークがみられない) の H/V の例を示す。また図-3 にタイプ別の分布を重ねて示す。タイプ A はほぼ全域で大半の領域を占めている。タイプ B は散在しているが、HKT から KSK と FNK の北側で群列している。タイプ C は OTB や WKB の周辺で多くみられる。これら H/V の形状が、堆積層と基盤層の速度コントラストに対応していれば、ピークの明瞭なタイプ A・B はコントラストが大きく、タイプ C は小さいと考えられる。またタイプ B については、長周期側および短周期側のピークがそれぞれ深部および浅部の基盤までの深さに対応すると考えられる。

表-1 地盤構造モデル

NEJ				KFA				KTS			
層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)
5.5	1.7	1450	140	3.2	1.6	1420	120	6	1.7	1570	250
25	2	1840	500	24	2	1840	500	6	2	1840	500
30	2.1	2180	800	45	2.1	2180	800	7	2.1	2180	800
160	2.2	2940	1500	150	2.2	2940	1500	70	2.2	2940	1500
$\infty$	2.4	4070	2500	$\infty$	2.4	4070	2500	$\infty$	2.4	4070	2500

HKT				KSK				FNK			
層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)
3.5	1.5	1420	120	4.2	1.7	1470	160	4.5	1.7	1510	200
4	2	1840	500	15	2	1840	500	3	2	1840	500
35	2.1	2180	800	15	2.1	2180	800	15	2.1	2180	800
150	2.2	2940	1500	150	2.2	2940	1500	100	2.2	2940	1500
$\infty$	2.4	4070	2500	$\infty$	2.4	4070	2500	$\infty$	2.4	4070	2500

HYB			
層厚(m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Vs(m/s)
2.3	1.6	1450	140
5	2	1840	500
19	2.1	2180	800
50	2.2	2940	1500
$\infty$	2.4	4070	2500

(2) S波速度構造の推定

アレイ観測で得られた位相速度の分散曲線から、地盤構造モデルを推定した。手順としては、既往の研究<sup>2),3)</sup>によって推定された地盤構造モデルを参考にS波速度を設定、密度については既往の研究<sup>2),3)</sup>を参考に、P波速度についてはS波速度の換算式<sup>1)</sup>を用いて設定し、層厚を変更させてフォワードモデリングを行った。既往研究<sup>2),3)</sup>の初期地盤モデル(S波速度構造)について、第1層目は位相速度分散曲線の最小位相速度に合わせ、下位の第四紀層は既往の研究<sup>2),3)</sup>のままでVs=500m/sで1層、さらに下位の新第三紀以前の岩盤層は対象地域近傍のKiK-net(河原:TTRH06)のPS検層を参考にVs=800m/s、その下位は既往の研究<sup>2),3)</sup>の通りVs=1500m/s、2500m/sの2層を挿入したパターンとした。なお、この地盤モデル推定ではS波速度が最も感度が高いため、P波速度、密度に関しては経験則に基づいた換算式もしくは値を採用している。

このとき、位相速度の分散曲線とアレイ観測点配置内のH/Vの卓越周波数について、レイリー波基本モードによる理論値が、両方の観測値を最もよく説明できるように試行錯誤でモデルを決定した。各アレイ観測点の位相速度の分散曲線を図-5、中心点におけるH/Vを図-6に示す。両図の実践は観測値、点線はフォワードモデリングの際に算出されるレイリー波基本モードの理論値である。得られた地盤構造モデルを表-1に示す。

地盤構造モデルは以下の通りとなっている。第四紀の堆積層の層厚に相当するVs=800 m/s層までの深度はNEJ:30.5m, KFA:27.2m, KTS:12m, HKT:7.5m, KSK:19.2m, FNK:7.5m, HYB:7.3mである。浅部の基盤深度の傾向として、西側谷筋の北側NEJ, KFAで深く、同じ谷筋の南側KTS, KSKでやや浅くなり、東西方向に延びる谷筋の

HKT, FNK, HYBで浅くなっている。ボーリングデータ<sup>12)</sup>によればモデル各層の土質状況は、Vs=120~160m/sの層は粘土、Vs=200~500m/sの層が砂礫、800m/s以上の層は基盤岩類となっている。

さらに深部の構造について、Vs=1500m/s層までの深度はNEJ:60.5m, KFA:72.2m, KTS:19m, HKT:42.5m, KSK:34.2m, FNK:22.5m, HYB:26.3mである。Vs=2500m/s層までの深度はNEJ:220.5m, KFA:222.2m, KTS:89m, HKT:192.5m, KSK:184.2m, FNK:122.5m, HYB:76.3mである。深部の基盤深度の傾向としては、西側谷筋の北側NEJ, KFAで深く、同じ谷筋の南側HKT, KSKでやや浅くなり、東西方向谷筋のKTS, FNK, HYBで浅くなっている。図-1の表層地質図<sup>5)</sup>より基盤岩層の地質は、西側谷筋(NEJ, KFA, KTS, HKT, KSK)では、新第三紀・凝灰角礫岩もしくは礫岩・砂岩が厚く存在し、最下層が古第三紀の花崗岩もしくは古生代・変成岩の構成、東西方向の谷筋(FNK, HYB)では、新第三紀層は薄いかほとんど存在せず、最下層が古生代・変成岩の構成になっていると考えられる。

図-3の卓越周期分布より基盤の深いNEJ, KFAの周辺では局所的に周期の長い領域となっており、この領域で基盤が落ち込んでいることが示唆される。また、本研究の対象地域を含む重力と磁気データを用いて推定された密度構造による基盤深度の分布図を図-7に示す。なお、この解析では基準となる拘束条件の影響で深さの値にはオフセットが含まれており、本研究の地盤構造モデルの基盤深さとは直接比較できないため、ここでは深さの傾向のみ比較することとする。図-7をみるとNEJおよびKFAの近傍では基盤が深く、またFNKやHYBの近傍では浅くなっており、本研究による地盤構造モデルによる基盤深度の傾向は調和的であるといえる。今後はこの

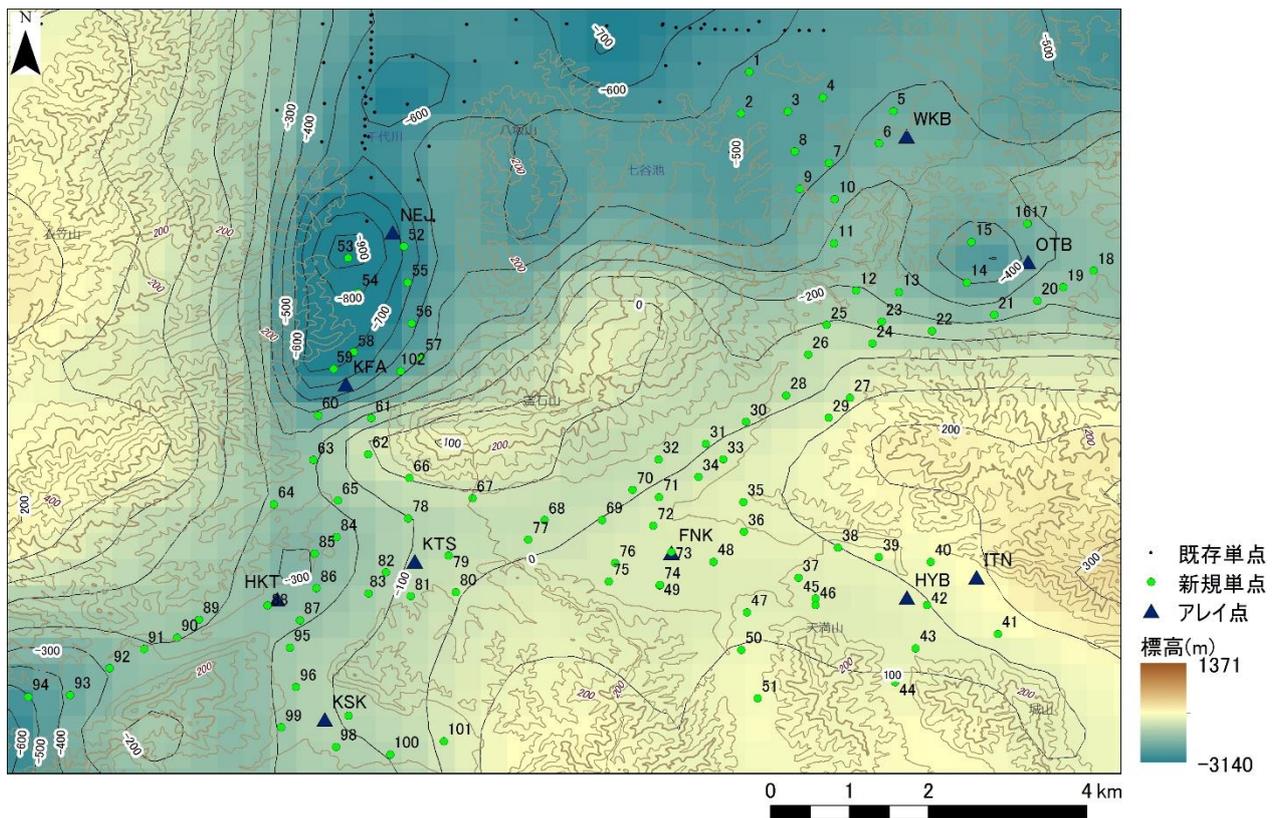


図-7 磁気および重力データによる基盤構造

ような他の探査結果との関連性について、より詳細な検討を加えるとともに、鳥取平野北部を含めた鳥取平野全域の3次元構造モデルの構築を行う必要がある。

## 5. まとめ

鳥取平野南部で微動探査を実施し、既往の研究によるデータを含め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) 微動の単点3成分観測記録よりH/Vが得られ、卓越周期は0.05～0.75秒の範囲で、北側ほど周期が長く、山間部の南側ほど短くなっており、特に0.3秒以上の領域が北側の一部の地域にみられ、大半の地域が0.3秒以下の短周期であった。H/Vの形状は明瞭見られる箇所が大半を占め、局所的に複数になる箇所があった。
- b) 微動のアレイ観測記録より、7地点のS波速度構造を推定することができた。S波速度120～2500m/sの地盤構造モデルが得られ、堆積層のS波速度は120～500m/sでその層厚は7.5～30.5m、さらに深部の最下層までの基盤深度は約76～220mであった。
- c) 重力・磁気解析による基盤深度との比較より、基盤深度の傾向は本研究による地盤構造モデルによる調和的であった。今後は他の探査結果と

比較により詳細な検討を加えるとともに、鳥取平野全域の3次元構造モデルの構築を行う必要がある。

**謝辞：**本研究は主として元鳥取大学工学部土木工学科の岡田祐典氏の卒業研究によって観測および解析がなされた。また、観測では現・元鳥取大学工学部土木工学科地圏環境工学研究室所属の学生諸君にも協力を頂いた。ここに記して感謝する。

## 参考文献

- 1) 鳥取県：鳥取県震災小誌，1944.
- 2) 野口竜也，西田良平，岡本拓夫，平澤孝規；人工地震，微動，重力観測による鳥取平野の地盤構造の推定，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.197，2003.
- 3) 石田勇介，野口竜也，香川敬生；鳥取平野における地震動評価のための3次元地盤構造モデルの構築，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 69，No. 4，地震工学論文集第32巻，p. I\_821-I\_828，2013.
- 4) 石田勇介，野口竜也，香川敬生，盛川仁；中国地方北部域における重力・磁気データを用いた3次元基盤構造モデル推定の試み，物理探査，Vol.67，No.3，pp.157-170，2014.
- 5) 地質調査所：20万分の1地質図，1974.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 野口竜也, 香川敬生; 微動探査による鳥取県内の強震観測地点における地盤震動特性の把握および地盤構造の推定, 第14回地震工学シンポジウム論文集, 2014 (投稿中) .
  - 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., T. Tada and Y. Shinozaki : Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.* , 111, B09315, 2006.
  - 11) 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.
  - 12) 中国地方基礎地盤研究会: 山陰臨海平野地盤図'95, 1995.

**GRASP OF GROUND VIBRATION CHARACTERISTIC AND  
DETERMINATION OF SUBSURFACE STRUCTURE OF  
SOUTH PART OF TOTTORI PLAIN, TOTTORI PREFECTURE  
BY MICROTREMOR EXPLORATION**

Tatsuya NOGUCHI, Yusuke ISHIDA and Takao KAGAWA

Microtremor and surveys have been carried out in the south part of Tottori plain to obtain information of subsurface structures for prediction of earthquake strong ground motion. In this study, to add explorations data, 3-components single site observation and array observation were carried out at 102 sites and 10 sites respectively as microtremor exploration. Subsurface structures were determined by adding new data to exiting data. In the results, S-wave velocity models and distribution of predominant period were obtained in the target area. The analysis result of this study was compared with the bedrock structure based on analysis result of the magnetic and gravity survey data.