

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

野口 竜也¹・香川 敬生²・奥田 峻³・伊藤 佳洋³

¹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

²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

³非会員 前 鳥取大学工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

鳥取県中部に位置する倉吉平野では、地震動予測のための地盤構造モデルを構築するために、これまでに微動および重力探査が実施されている。本研究では、探査データを補強するために臨海部を中心に、微動探査として新たに65地点の単点3成分観測、5地点のアレイ観測、重力探査として80地点の重力測定を実施し、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5地点のS波速度構造、重力探査では新規データを加えた新たな重力異常分布が得られた。またこれらの推定結果より地盤構造を総合的に把握することができた。

Key Words : microtremor, gravity, subsurface structure, Kurayoshi plain in Tottori Prefecture

1. はじめに

鳥取県中部に位置する倉吉平野は、倉吉市、北栄町、湯梨浜町をまたいでおり、臨海部には温泉地や住宅街が点在している。この地域や近隣地域における過去の地震による被害としては、1989年鳥取県中部の地震、2000年鳥取県西部地震、2002年鳥取中西部の地震により、住宅やライフラインの被害が発生したことが報告されている^{1), 2)}。既往の探査結果より、地震被害に大きく影響を与えるような軟弱地盤が広がっていることがわかっている^{3), 4), 5)}。さらに詳細な探査を実施し、地盤構造の推定精度を高めることは、この地域の地震動予測を行う上で重要である。

これまでこの地域では、内陸部の倉吉市街地³⁾、臨海部の北栄町付近⁴⁾で微動探査、倉吉平野とその周辺の山地で重力探査³⁾が実施されている。そこで本研究では、倉吉平野臨海部でデータを補強するために両探査を追加実施し、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、以下に述べる通りである。倉吉平野の基盤をなす周囲の山地には、古第三紀の流紋岩、花崗岩、新第三紀の安山岩、玄武岩が露頭し、軟弱地盤が広がる平野部は一級河川の天神川による堆積作用により形成されている。平野部の詳細としては、天神川東側が海岸砂丘の北条砂丘、潟湖の東郷池周辺および西側が沖積低地となっている。また、北条砂丘では新第三紀の玄武岩が露頭する場所が点在する。図-1に倉吉平野とその周辺の表層地質図⁵⁾を示す。

既往の探査結果^{3), 4)}によれば、微動の卓越周期が臨海部で最大1.5秒、倉吉市街地で最大0.6秒程度で堆積層の層厚に対応しており、特に東郷池の北西部から海岸にかけて堆積層の厚い地域が広がっている。今回の探査対象地域について、微動探査は東郷池周辺と天神川東側の平野部、重力探査は平野部は微動探査と同じ地域とその周辺の山地とした。

(2) 観測概要

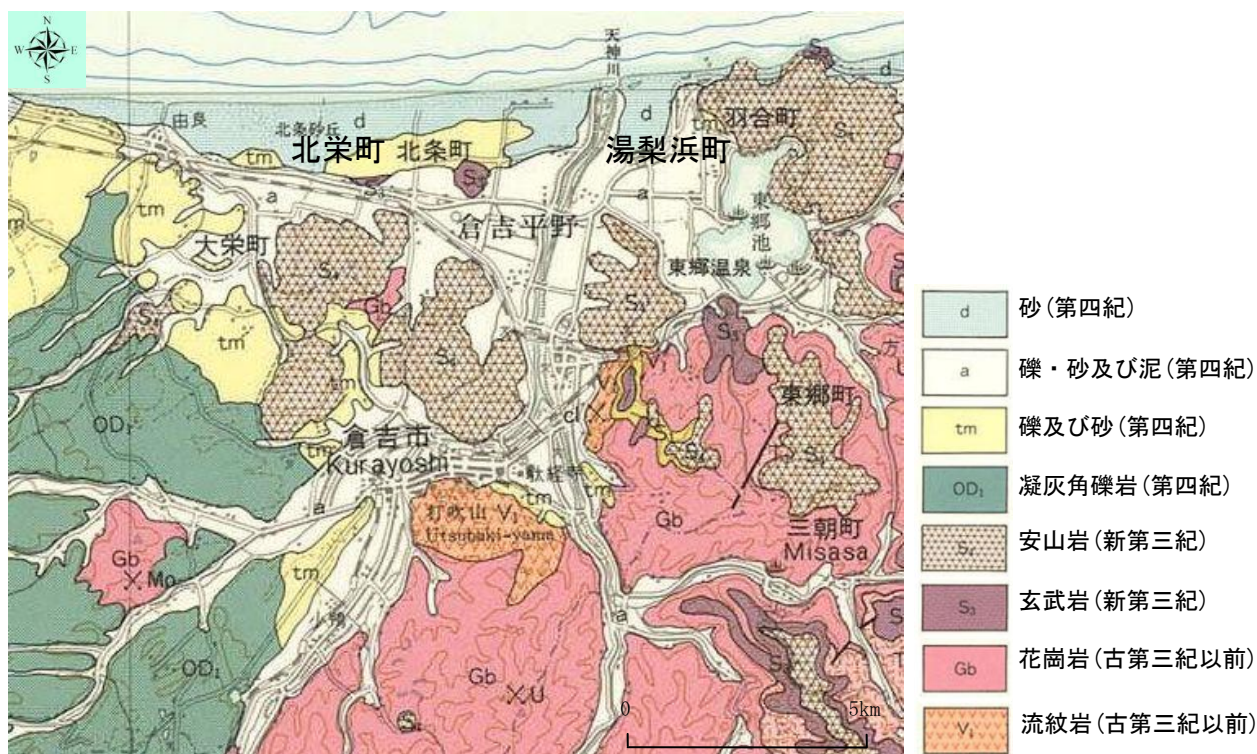


図-1 倉吉平野とその周辺の表層地質図

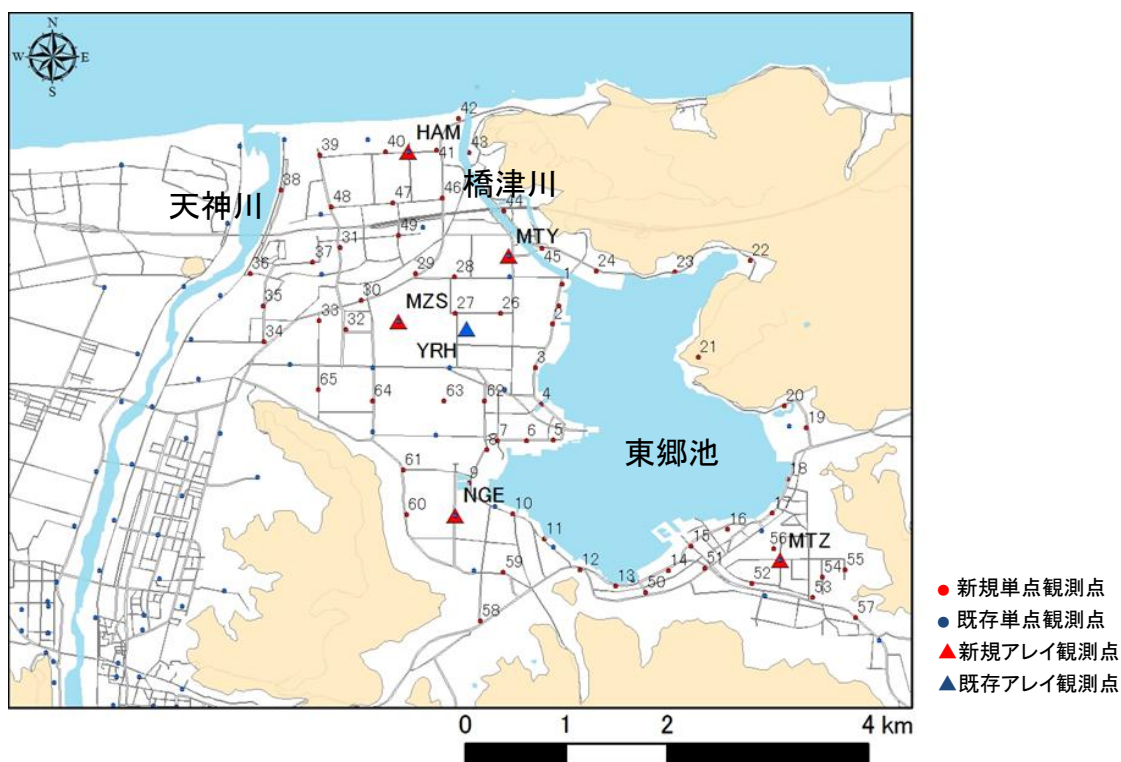


図-2 微動探査の観測点位置

微動の単点 3 成分観測は、東郷池の湖岸沿いを約 200m 間隔、その他の地域を既往の実施地点⁴⁾のほぼ中間地点において約 500m 間隔で計 65 点で実施した。計測機器は JU210 を用い、サンプリング周波数 100Hz、増幅倍率 10 倍に設定、観測時間は 1 地点 10～30 分間程度とした。アレイ観測は 5 地点 (HAM, MTY, MZS, NGE, MTZ) で実施した。

計測機器は JU210 を 4 台用いて GPS クロックにより同期させ、円の中心に 1 は台、円周上に 3 台を正三角形の各頂点に配置させた。サンプリング周波数、増幅倍率は単点観測と同様の設定にした。アレイ半径は全地点で 0.6m, 10m, 30m とし、HAM については 60m, 100m を追加した。図-2 に観測点位置を示す。

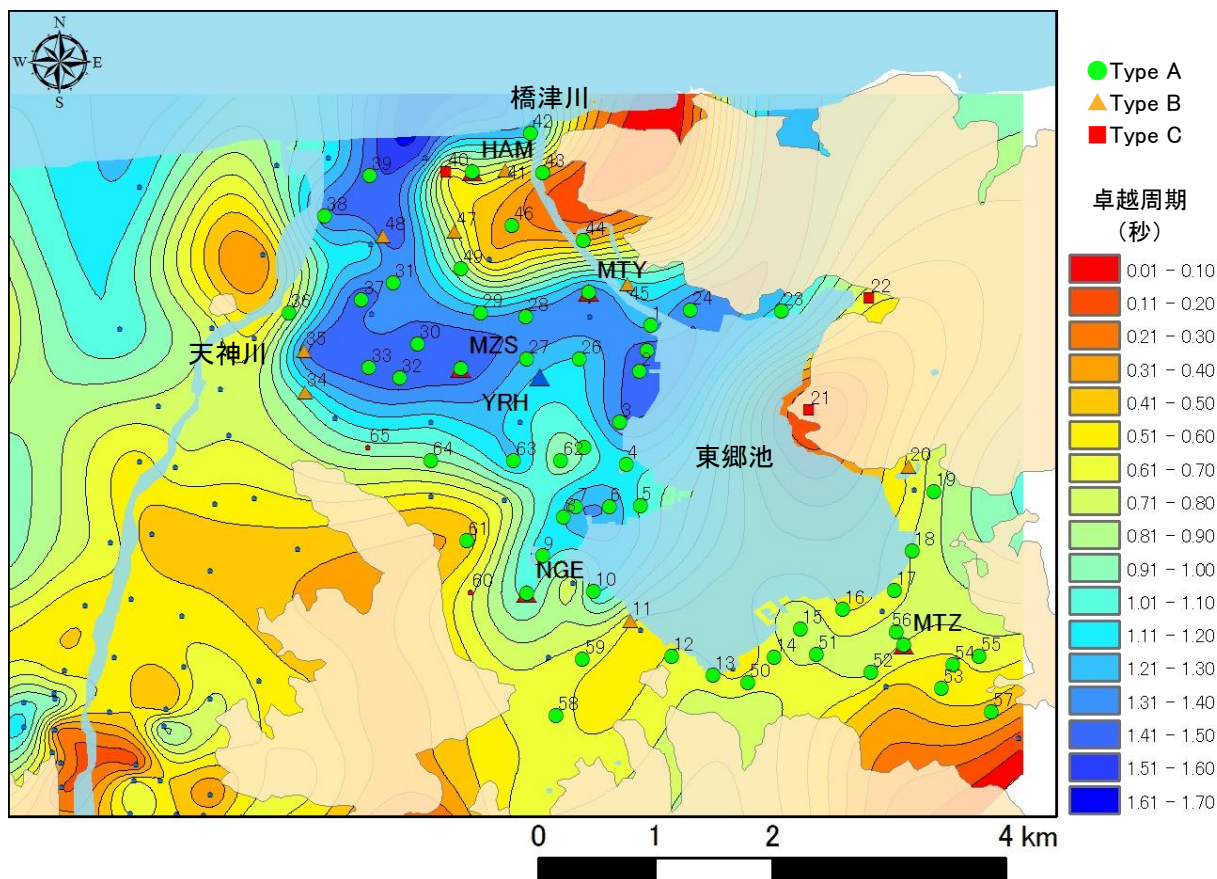


図-3 H/Vの卓越周期分布図

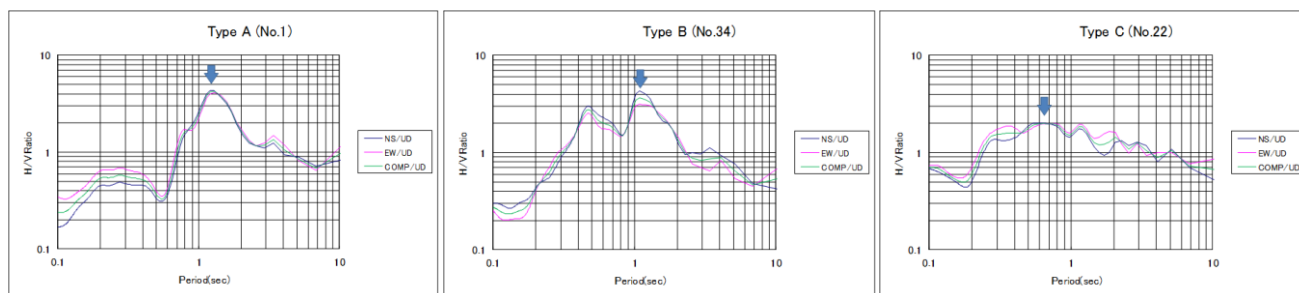


図-4 H/Vの例 (タイプ別)

重力観測は既往の実施地点³⁾や重力データベースの測定地点^{6), 7)}のほぼ中間地点となるように約 1km 間隔で平野部とその周辺の山地を 80 地点で実施した。計測機器はラコスト・ロンバーク重力計を用いた。また、測量にはディファレンシャル GPS (Mobile Mapper CX : Magellan) を用いており、1m 以内の精度で決定されている。

3. 解析

(1) 微動探査データ

3成分の波形記録については、水平動と上下動のスペクトル比 (H/V) を求め、H/Vの卓越周期を読み取った。解析の設定条件については、交通振動などの非定常な波形が含まれない安定した20秒間の区

間を目測により5区間以上選定し、平滑化には係数 20のLogウィンドウ⁸⁾を用いた。H/Vから卓越周期を目測で読み取った。なお、Bタイプのようにピークが複数みられる場合は、長周期側のピークを卓越周期とした。読み取った卓越周期から、スプライン法に基づく補間によりコンターマップを作成した。

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. 2.0⁹⁾を用いることにより、CCA 法¹⁰⁾、SPAC 法¹¹⁾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 20.48 秒、平滑化にはバンド幅 0.3Hz のパーゼンウィンドウを用いた。各半径で得られた位相速度を重ね合わせ、連続性を考慮して後述する S 波速度構造の推定に用いた。

(2) 重力探査データ

観測された重力観測データからドリフト補正、潮

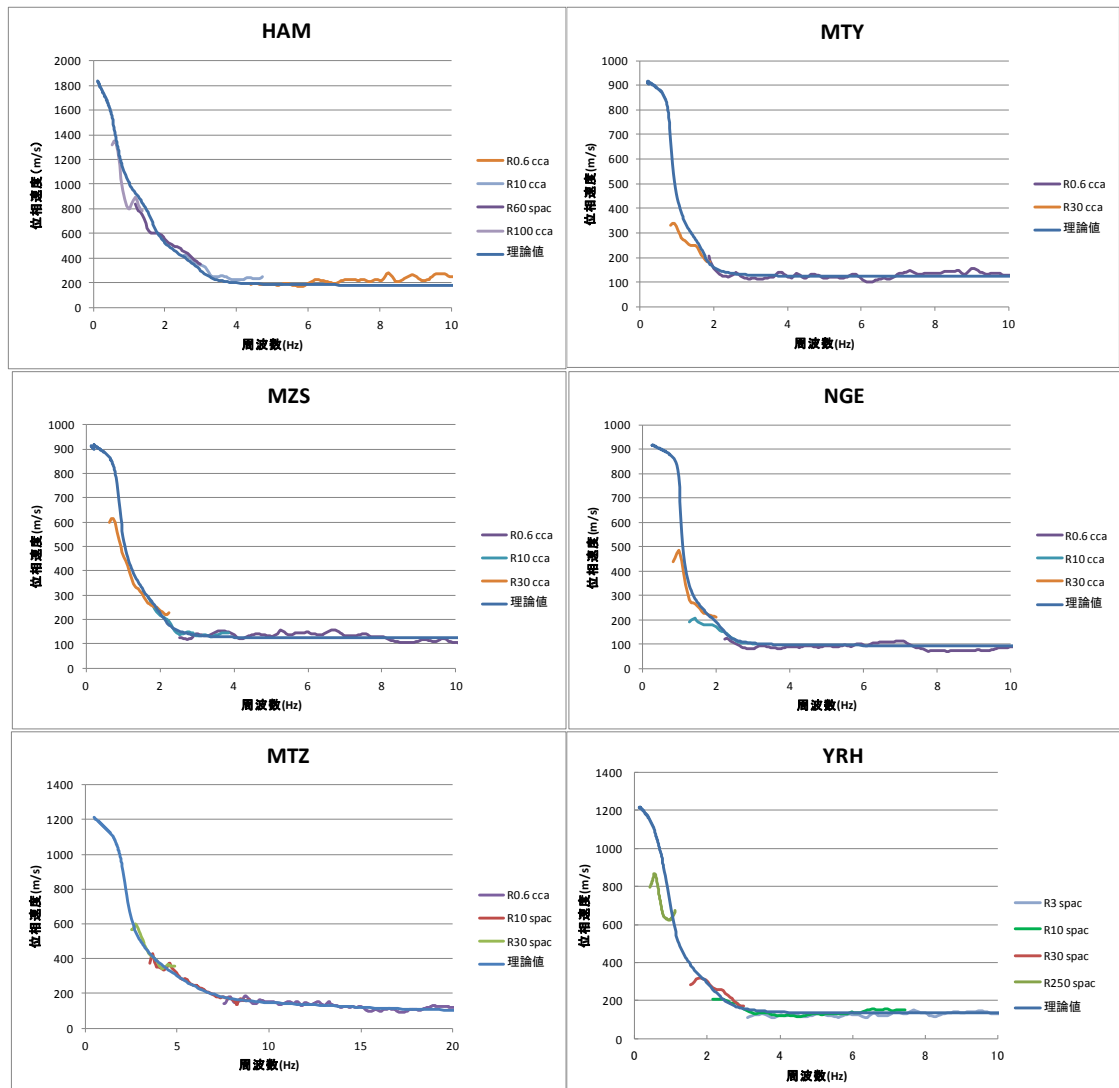


図-5 位相速度の分散曲線

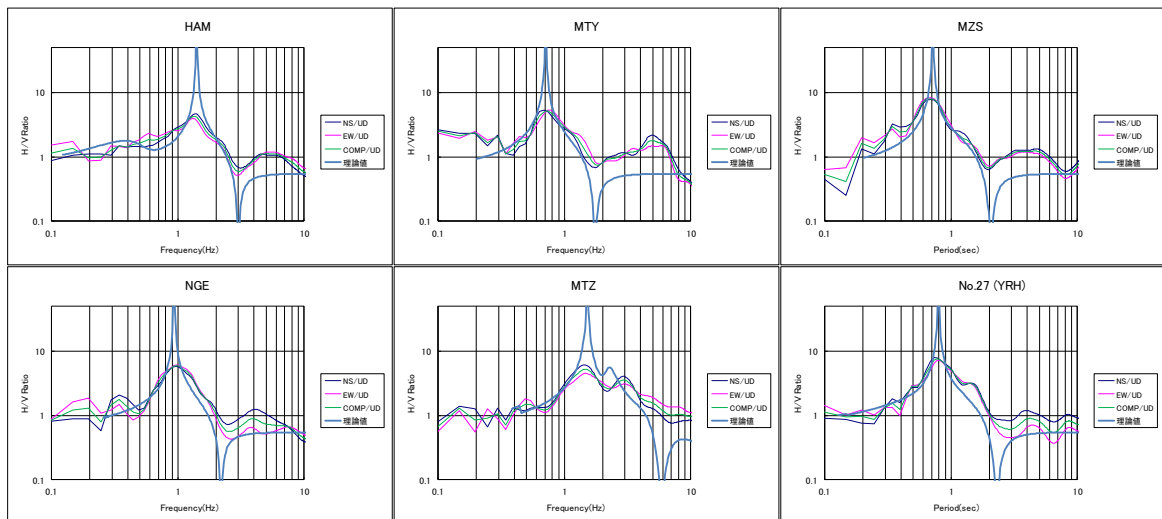


図-6 アレイ観測点の H/V

汐補正，地形補正等の補正を施し，既存の観測データ³⁾および重力データベースのデータ^{6), 7)}を組み合わせデータ処理を行い，仮定密度を 2.5 t/m^3 とした重力異常を求め分布図を作成した。仮定密度については既往の研究³⁾に倣い，倉吉平野の基盤となる

周辺の山地の推定値とした。なお，北西側から南西側にかけて地殻などの深部構造の影響を受けた重力異常が低くなるトレンドがあり，この長波長の変化を取り除くためのフィルタ処理（50m～3000m のバンドパスによる上方接続フィルタ）を施した。

表-1 地盤構造モデル

HAM				MTY			
ρ (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	層厚(m)
1.7	1501	190	31	1.7	1434	130	34
2.1	2067	700	110	1.9	1623	300	35
2.2	2400	1000	300	2.1	2067	700	150
2.3	2789	1350	500	2.2	2400	1000	∞
2.4	3621	2100	∞				

MZZ				NGE			
ρ (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	層厚(m)
1.7	1434	130	28	1.7	1401	100	22
1.9	1623	300	50	1.9	1623	300	20
2.1	2067	700	150	2.1	2067	700	150
2.2	2400	1000	∞	2.2	2400	1000	∞

MTZ				YRH			
ρ (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	層厚(m)	ρ (t/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	層厚(m)
1.7	1401	100	3	1.7	1445	140	26
1.8	1468	160	8	1.7	1623	300	45
1.9	1623	300	20	2.1	2067	700	150
2.1	2067	700	100	2.2	2400	1000	400
2.3	2789	1350	∞	2.3	2789	1350	∞

4. 地盤構造の推定

(1) H/Vによる地盤構造の把握

図-3 に今回観測を追加した地域における H/V の卓越周期分布図を示す。この卓越周期分布は後述する S 波速度構造との関連で堆積層の層厚分布に対応しており、長周期ほど堆積層が厚いと推定できる。卓越周期分布は以下の通りである。1.3～1.6 秒の長周期の地域が L 字状に東郷池の北西部から西側の天神川東岸までとそこから海岸までの地域にみられる。また 1.0～1.3 秒のやや長周期の地域が L 字状の長周期領域に隣接して東郷池西側にみられる。一方 1.0 秒以下の短周期の地域は、橋津川流域の海岸部や東郷池の南側でみられ、特に橋津側中流域と山地境界部では 0.5 秒以下の地域となっている。

図-4 に特徴的な 3 タイプ (A タイプ；単一の明瞭なピークがある、B タイプ；同じようなピークが複数ある、C タイプ；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。A タイプは海岸部から内陸部までのほぼ全域で、B タイプは卓越周期が長周期から短周期の境界部、C タイプは山地近傍の卓越周期が短い地域にみられる。これら H/V の形状は堆積層と基盤層の速度コントラストに対応し、ピークの明瞭な A・B タイプは大きく、C タイプは小さいと考えられる。また B タイプについては、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。

(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^{3),4)}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^{3),4)}を参考に、P 波速度については S 波速度の換算式¹²⁾を用いて設定し、層厚の変更させてフォワードモデリングを行った。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。さらに、既往の研究⁴⁾による YRH についても同様の手順で再度モデリングを行った。なお、各アレイ観測点の位相速度分散曲線とモデルによる理論値を重ねたものを図-5、アレイ観測点の配置内で得られた H/V にモデルによる理論値を重ねたものを図-6、推定し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。第四紀の堆積層について、工学的基盤相当の S 波速度 700 m/s 層までの深度は HAM で 31m、MTY で 69m、MZZ で 78m、NGE で 42m、MTZ で 31m、再度モデリングした YRH で 71m であり、海岸部の HAM と内陸の山地に近い NGE、MTZ で浅く、内陸部の MZZ、MTY、HAM で深いことがわかる。堆積層の地質について、ボーリングデータ¹³⁾によれば S 波速度 100～190m/s の層は海岸線に近い HAM で砂、内陸部の MTY、MZZ、NGE、MTZ、YRH で粘土、S 波速度 300m/s の層は全地点で砂あるいは砂礫となっている。

さらに深部の構造について、S 波速度 1000m/s 層までの深度は HAM で 141m、MTY で 219m、MZZ で 228m、NGE で 192m、YRH で 221m、S 波速度 1350m/s 層までは HAM で 441m、MTZ で 131m、YRH で 621m である。基盤岩層の地質としては、周辺山地の表層地質図⁵⁾より、新第三紀の安山岩・玄武岩もしくは古第三紀の流紋岩・花崗岩で構成され

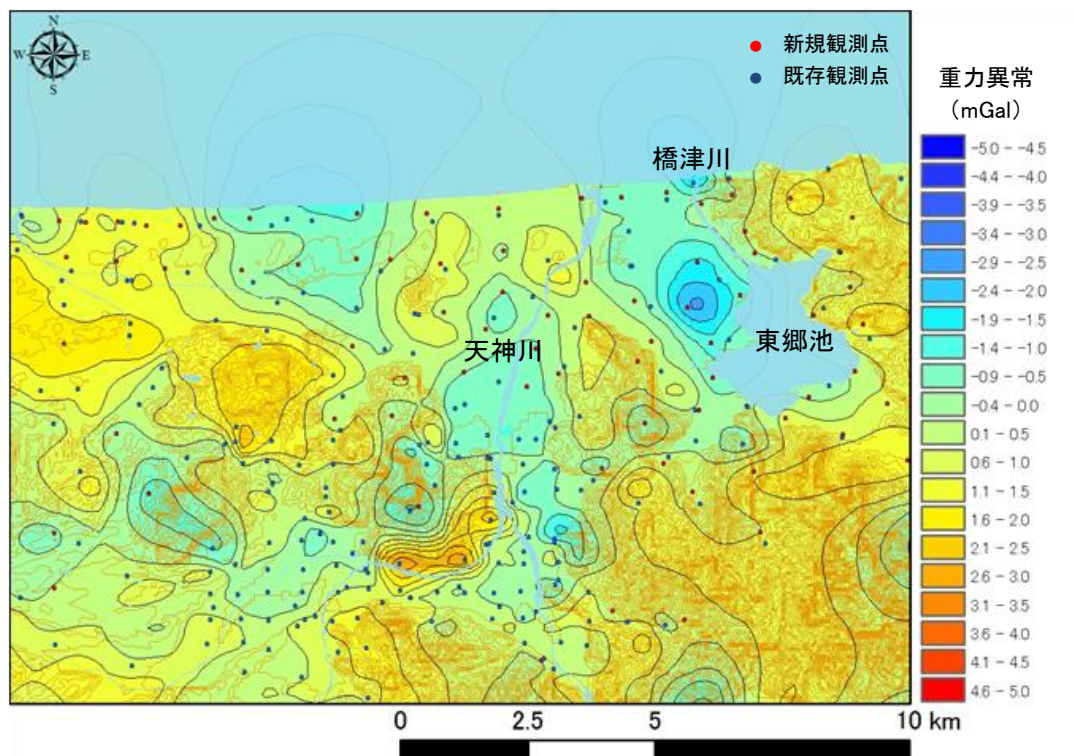


図-7 重力異常分布図

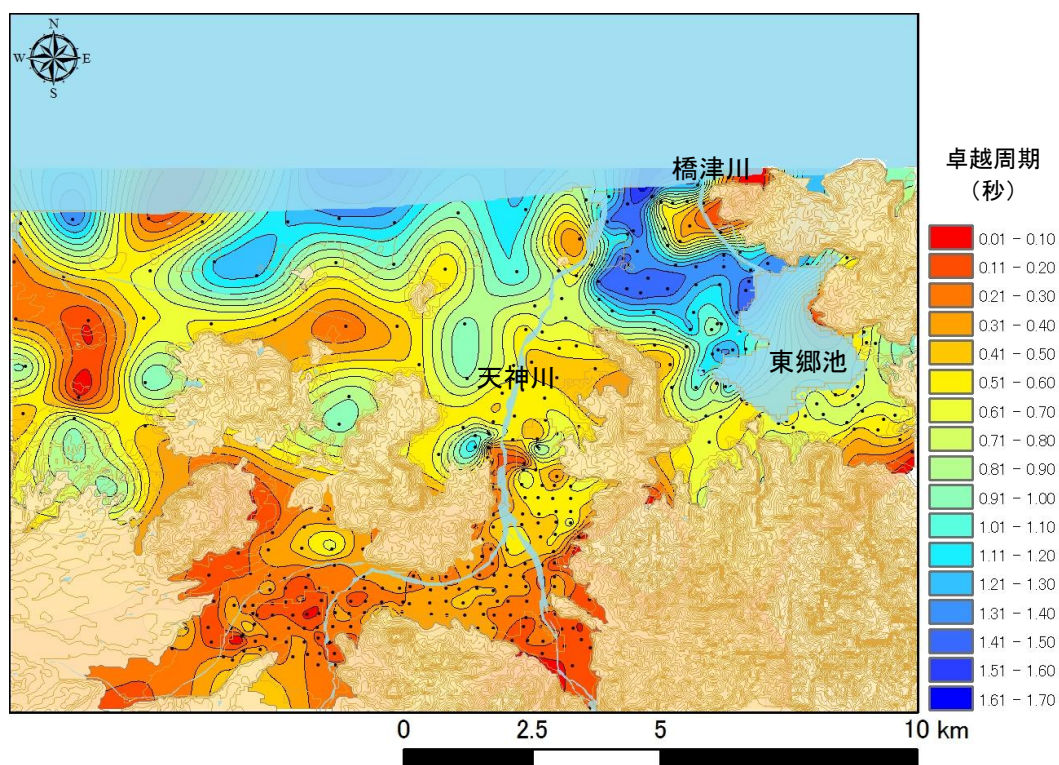


図-8 H/Vの卓越周期分布図（図-7と同じ範囲）

ていると考えられる。ただし、低周波側の位相速度が十分に得られていない地点についてはH/Vを頼りに決定している場合もあるため、このような地点では今後新たにアレイ観測を追加するなどして検討する必要がある。

(3) 重力異常分布による基盤深度の推定

図-7 に長波長成分を除去したフィルタ処理後の重力異常分布図を示す。平野での低異常域は密度が低い堆積層の影響、つまり堆積層より密度の高い基盤の深度に対応しており、重力異常が低いほど基盤が深いと考えられる。重力異常分布としては、平野

部の東郷池の西側から海岸部にかけて、天神川中流域、北条砂丘の中央部では低異常域、その周囲の山地では高異常域となっている。山地の低異常の地域については、山地を構成する岩の密度が仮定密度 2.5 t/m^3 よりも小さいことが原因と考えられる。

図-8 に図-7 と同じ領域の（既往の結果を含む）微動 H/V の卓越周期分布を示す。これらの図を比較すると、多くの卓越周期の長周期の領域と重力異常の低異常域が一致していることがわかる。ただし、それぞれの結果は扱う物理量が違うこと、微動 H/V の卓越周期は地表近くの低速度層、重力異常はより深部の岩盤層境界の影響を強く受けることが考えられることから、対象とする深さが違っている可能性がある。よって今後、地質や微動探査の結果などを踏まえて密度構造の推定を行っていく必要がある。

5. まとめ

倉吉平野臨海部で微動および重力探査を実施し、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1秒以上の長周期の地域が多く分布しており、形状もピークが明瞭なことから、軟弱な粘土や砂層に対応する堆積層が厚く堆積していることが推定できた。また、卓越周期分布から東郷池北西部から海岸部にかけてL字状に長周期の地域が広がっていることがわかった。
- b) 微動のアレイ観測記録より、新規の5地点と既往の1地点についてS波速度構造を推定することができた。S波速度100～2100m/sの地盤構造モデルが得られ、堆積層のS波速度は100～300m/sでその層厚は31～78m、さらに深部の基盤深度は約130～600mであった。
- c) 重力観測の結果より、既存のデータと含めた解析により新たに重力異常分布を得ることができた。その重力異常分布の特徴として、平野部には堆積層の層厚を反映した局所的な低異常領域

がみられ、またその領域は微動の卓越周期分布の長周期の領域とおおむね一致しすることがわかった。

参考文献

- 1) 新編倉吉史：第四巻 自然文化編，pp.3-122，1995.
- 2) 消防庁：鳥取県中・西部を震源とする地震，2002.
- 3) 野口竜也，西田良平，中野雅巳，作永達也：倉吉市における地盤構造および地盤振動特性，第2回日本地震工学会年次大会2003梗概集，2003.
- 4) 野口竜也，伊藤奨悟，香川敬生：微動探査による鳥取県中部の地盤構造推定，第32回地震工学研究発表会講演論文集，2012.
- 5) 地質調査所：20万分の1地質図，1974.
- 6) The Gravity Research Group in Southwest Japan: Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9, 2001.
- 7) 駒澤正夫：日本重力異常グリッドデータベース，日本重力CD-ROM第2版，数値地質図 P-2，地質調査総合センター，2002.
- 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., 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) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, pp.415-456, 1957.
- 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) 中国地方基礎地盤研究会：山陰臨海平野地盤図'95，1995.

DETERMINATION OF SUBSURFACE STRUCTURE OF THE SEASIDE AREA OF KURAYOSHI PLAIN, TOTTORI PREFECTURE BY MICROTREMOR AND GRAVITY EXPLORATION

Tatsuya NOGUCHI, Takao KAGAWA, Shun OKUDA and Yoshihiro ITO

Microtremor and gravity surveys have been carried out in the Kurayoshi 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 65 sites and 5 sites

respectively as microtremor exploration. And gravity surveys were carried out at 80site. Subsurface structures were determined by adding new data to exiting data. In the results, subsurface structures were obtained newly as follows. S-wave velocity models and distribution of predominant period from microtremor exploration and gravity anomaly distribution and density subsurface structure from gravity exploration were determined.