

微動による鳥取平野の地盤構造推定

野口竜也¹・西田良平²

¹正会員 工博 鳥取大学研究員 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

²正会員 理博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

1943年の鳥取地震(M7.2, 内陸直下型地震)において, 鳥取平野では甚大な被害が発生し 1000 名以上の死者が出た. この地域の地震災害を軽減するために, 鳥取平野で微動観測を実施し地盤構造の解明を行った. 観測は郡列配列(アレイ)観測(7点)と単点3成分観測(413点)を実施した. アレイ観測記録からはSPAC法を用いて解析することにより, 地下約1kmまでのS波速度構造が推定できた. 単点3成分観測記録からは水平上下スペクトルの比(H/V)より, そのピーク周期分布を得ることができた.

Key Words: Tottori plain, microtremor, SPAC method, H/V, subsurface structure

1. はじめに

地方主要都市である鳥取市は鳥取平野に位置しており, 防災拠点として重要な地域である. 1943年の鳥取地震(M7.2)では甚大な被害が発生し(死者 1000名以上), 特に沖積平野内で被害の集中があったと報告されている¹⁾. この報告の原因調査に必要な既存の地盤構造データとしては, 堆積層の情報を示したボーリングデータが存在する²⁾. しかし, 地震動を考える上で不可欠な地盤震動特性, 深部基盤構造, 弾性波速度(S波速度)構造などの情報は少ない.

地震動に関係する地盤構造の推定法の一つに, 微動のアレイ観測による探査法がある. 微動アレイ観測は各地で実施され, 特に地下数kmまでの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^{3),4),5)}. 一方で微動は, 地盤の周期特性や増幅特性の推定においても利用されている. その推定方法として, 一点での3成分記録から水平上下スペクトル比(以下, H/Vと呼ぶ)を用いる方法が提案されている^{6),7)}. また, H/Vから基盤深度および地盤構造の推定を行った研究例もある⁸⁾. これら微動を利用した地盤構造および地盤震動特性の推定方法は, 地震動に関する地盤情報が少ない地域では, 特に有効であると考えられる.

そこで本研究では, 鳥取平野全域について微動のアレイ観測および単点3成分観測を実施し, 地盤構

造および地盤震動特性の推定を行った.

2. 観測

S波速度構造を推定するために, 鳥取平野の7点でアレイ観測を実施した. また, 3次元的地盤固有周期分布, 基盤構造の推定を行うために, 単点3成分観測を413点で実施した. 観測点の位置を図-1に, 観測システムを図-2に示す.

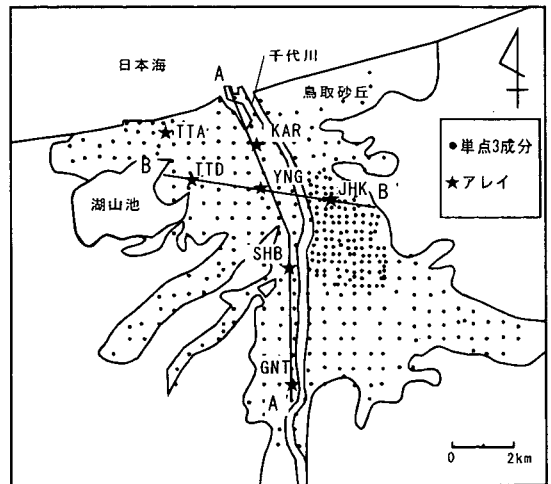


図-1 観測点位置

観測および調査時期は、平成10年10月から平成12年10月にかけての気象条件の良い日で、主に夜間に観測を行っている。

アレイ観測では、4台の上下動地震計を円周上に正三角形となるよう3台、中心点に1台を配置する。アレイ半径3~70m(Sアレイ)ではケーブルによる一局集中方式で、200~500m(Lアレイ)ではGPS時刻補正による独立方式とした。なお、地震計はSアレイで固有周期1秒、Lアレイで8秒のものを用いている。単点観測では、固有周期5秒の3成分一体型地震計を用いた。サンプリング周波数は、Sアレイで100~500Hz、Lアレイ及び単点観測で100Hzとした。

3. 解析

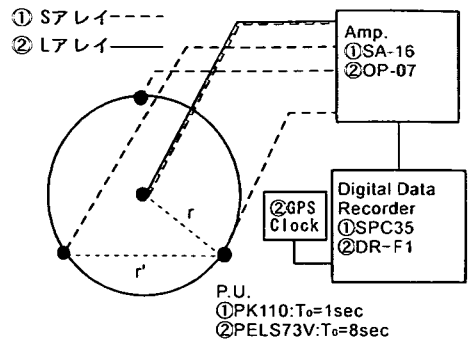
アレイ観測記録は、交通ノイズなどが含まれていない定常的な区間40.96秒もしくは81.92秒を、アレイ半径ごとに10~20区間選定し、空間自己相関法(SPAC法)⁹⁾を用いて位相速度の分散曲線を求めた。なお、スペクトルの平滑化にはParzenウィンドウを用いており、Sアレイではバンド幅0.3Hz、Lアレイでは0.1Hzとした。各アレイ観測点で得られた位相速度を図-3に示す。なお、図中の○は観測値、実線は得られた地盤モデル(表-2)から計算されるレイリー波基本モードの理論曲線である。

単点3成分の観測記録については、ノイズが含まれない20.48秒の区間を3~6区間選定、これらの平均スペクトルからH/Vを求めた。なお、水平動については相乗平均で合成している。スペクトルの平滑化にはバンド幅0.3HzのParzenウィンドウを用いた。

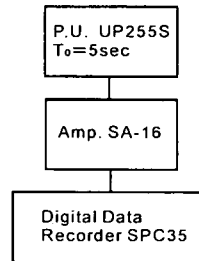
4. 地盤構造の推定

(1) S波速度構造の推定

各アレイ観測点で得られた位相速度の分散曲線を説明するように、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、層厚を変化させてフォワードするという手順に従った。堆積層のパラメータ設定は、ボーリングデータおよびPS検層の結果を参考にしている。基盤岩層については地質的な観点から、層序を(a)新第三系の堆積岩もしくは火砕岩、(b)中生代火山岩もしくは花崗岩として考えた¹⁰⁾。さらに(a)の層は固結の程度により、3層に分けられると仮定した。このような想定のもと、基盤岩各層のS波速度を既往の研究結果^{3),4),5)}を参考に、(a)の層を700m/s(固結・小)、1000m/s(固結・



(1)アレイ観測システム



(2)単点観測システム

図-2 観測システム

表-1 地盤構造モデルのパラメータと地質層序

ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	地質年代	地質
1.6	1400	100	第四紀	完新統 更新統
	1460	150		
1.7	1510	200		
1.8	1730	300		
2.0	1840	500		
2.1	2060	700	新第三紀	固結・小
2.2	2390	1000		固結・中
2.4	2940	1500		固結・大
2.6	5180	3500	古第三紀 中生代	花崗岩 火山岩

中程度)、1500m/s(固結・大)、(b)の層を3500m/sとした。P波速度は次に示す関係式¹¹⁾から、密度は既往の研究^{3),4),5)}を参考にした。

$$V_p = 1.11V_s + 1290 \text{ (m/s)} \quad (1)$$

各パラメータと地質の関係を表-1、推定された地盤構造モデルを表-2に示す。また、S波速度構造の柱状図を、図-1に示したA-A'断面、B-B'断面に投影させて図-4に示す。

表-2 地盤構造の最終モデル

TTD				YNG				JHK			
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)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)
1.6	1455	150	17	1.6	1400	100	10	1.6	1400	100	10
1.8	1620	300	35	1.6	1455	150	22	1.6	1455	150	20
2.0	1840	500	40	2.0	1840	500	20	2.0	1840	500	25
2.1	2060	700	50	2.1	2060	700	120	2.1	2060	700	160
2.2	2390	1000	70	2.2	2390	1000	200	2.2	2390	1000	230
2.4	2940	1500	250	2.4	2940	1500	300	2.4	2940	1500	350
2.6	5180	3500	∞	2.6	5180	3500	∞	2.6	5180	3500	∞

TTA				KAR				SHB			
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)	ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)
1.7	1510	200	9	1.6	1400	100	10	1.6	1400	100	5
1.8	1620	300	25	1.6	1455	150	30	1.6	1455	150	20
2.0	1840	500	20	2.0	1840	500	25	2.0	1840	500	20
2.1	2060	700	30	2.1	2060	700	150	2.1	2060	700	70
2.2	2390	1000	80	2.2	2390	1000	200	2.2	2390	1000	80
2.4	2940	1500	240	2.4	2940	1500	300	2.4	2940	1500	150
2.6	5180	3500	∞	2.6	5180	3500	∞	2.6	5180	3500	∞

GNT			
ρ (t/m ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	層厚(m)
1.7	1510	200	10
2.0	1840	500	15
2.1	2060	700	70
2.2	2390	1000	100
2.4	2940	1500	100
2.6	5180	3500	∞

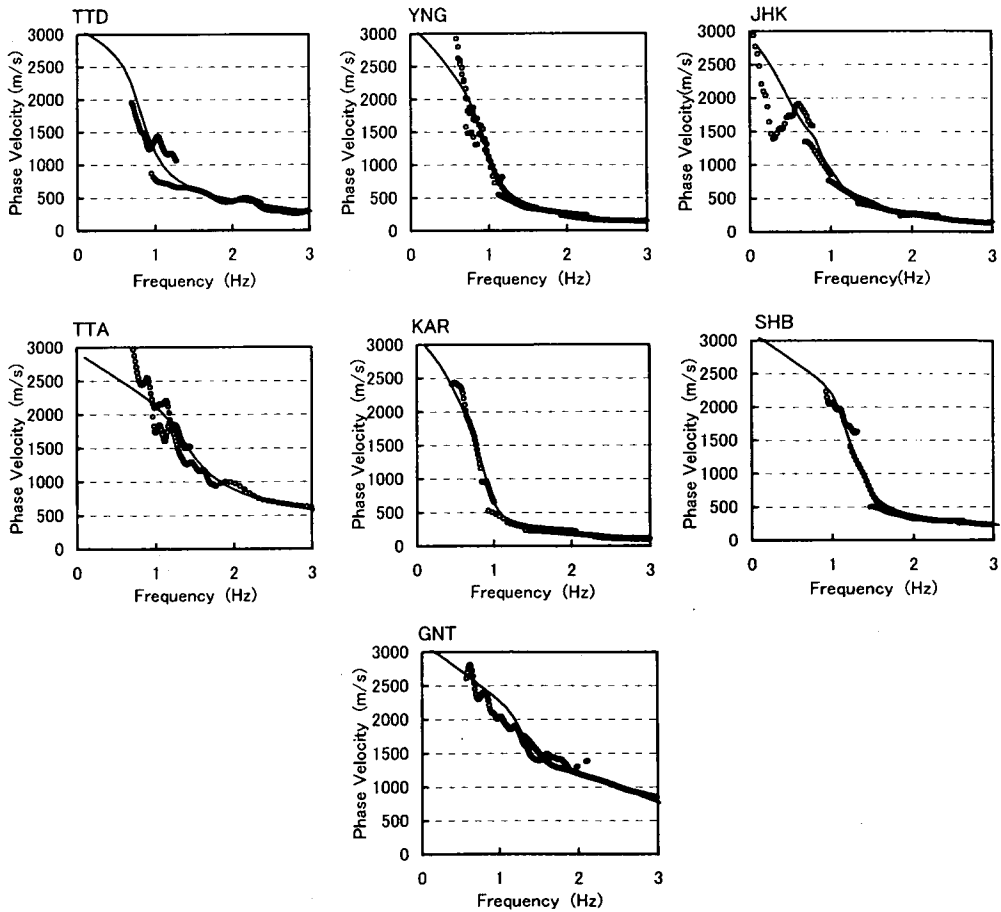


図-3 位相速度の分散曲線

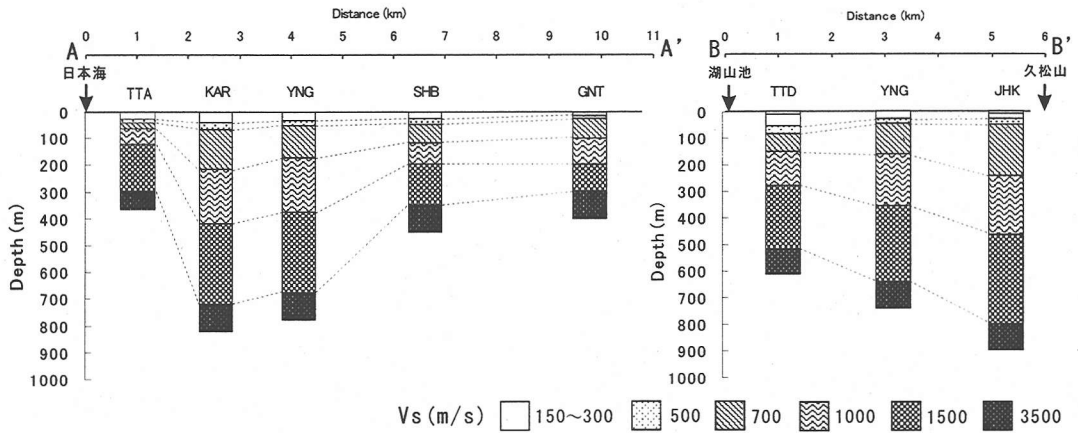


図-4 S波速度構造の柱状図

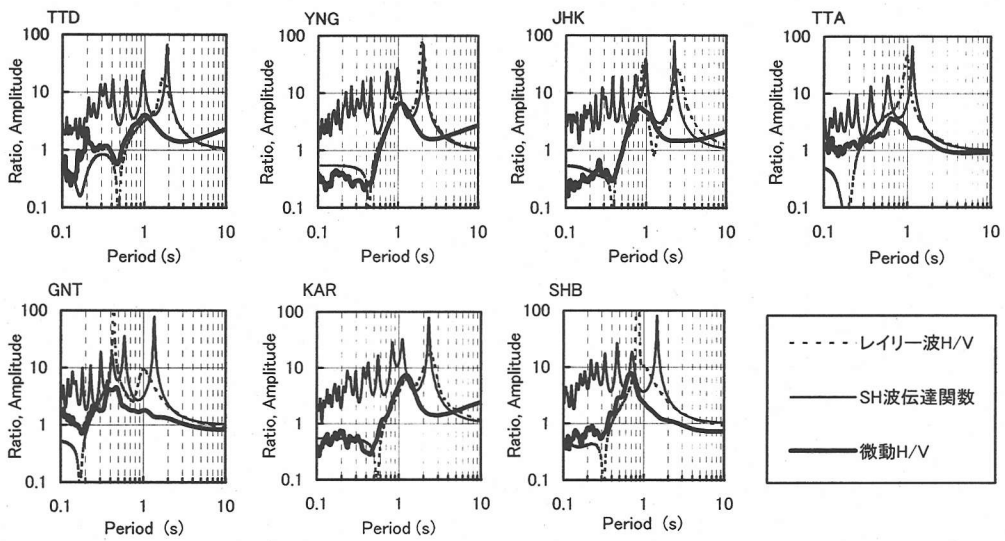


図-5 レイリー波のH/V, SH波の伝達関数, 微動H/Vの比較

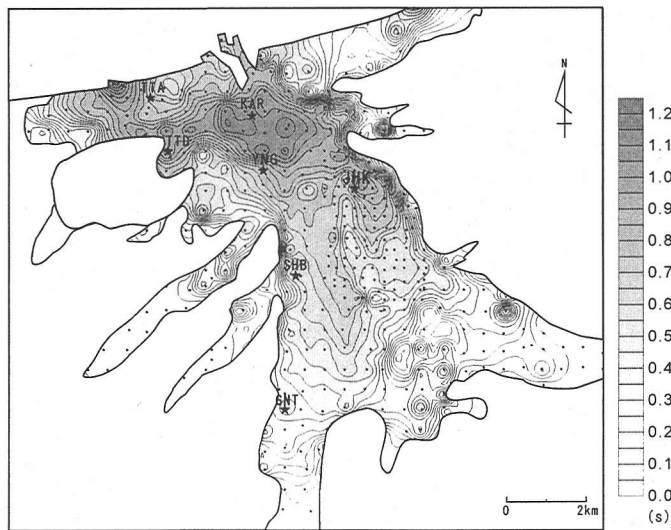


図-6 H/Vのピーク周期分布

$V_s=100\sim 300\text{m/s}$ の低速度層は沖積層・洪積層の粘土層・砂層と考えられる。表-2 及び図-4 から、その層厚は約 10~50m で変化し、海側に近い点ほど厚くなる傾向がある。また、 $V_s=500\text{m/s}$ の層は、洪積層の砂礫層と考えられるが、その層厚は約 15~50m である。最下層の $V_s=3500\text{m/s}$ 層までの基盤深度は、約 300~800m である。

$V_s=700\text{m/s}$ 層以深の基盤岩層は、堆積層とは異なった傾向を示す。図-4 の A-A'断面では、GNT から KAR までは徐々に深くなり、TTA で急激に浅くなる特徴がみられる。B-B'断面では、西側の TTD から JHK にかけて緩やかに深くなるという特徴がみられる。JHK の東側約 1km には花崗岩の露頭する山地があるため、この周辺の基盤形状は、東側から西側にかけて急激に落ち込んでいると推測される。

(2) H/V による地盤特性の推定

微動には実体波と表面波が含まれていると考えられる。大町ら⁷⁾は、2 層の地盤モデルを仮定した数値計算から、表層と基盤の S 波速度のコントラストが大きい場合、ラブ波のエアリー相の周期、レイリー波基本モードのピーク周期、SH 波伝達関数の 1 次固有周期が、ほぼ一致することを示している。よって、表層と基盤のコントラストが十分大きい地盤条件下では、微動を表面波と実体波のいずれであると仮定しても、地盤固有周期の推定が可能と考えられる。そこで本論では、H/V のピーク周期を対象地域の地盤固有周期として考える。

図-6 に H/V のピーク周期分布を示す。その分布には顕著な周期異常がみられる。海岸付近では周期 0.5 秒以下の短周期領域が帯状にみられる。久松山のある東側の山地から JHK にかけては、急激に長周期となる。周期 1 秒以上の長周期領域は、ちょうど KAR, TTD, YNG, JHK に囲まれた盆地状となっている。また JHK の南方では、南北方向に延びた帯状の短周期領域がみられる。

5. 考察

アレイ観測の解析で求めた S 波速度構造モデルを用いて、H/V のピーク周期と地盤構造の関係を検討する。図-5 に、各アレイ観測点の地盤モデルから算出されるレイリー波の基本モード H/V (破線)、SH 波の伝達関数 (細線)、およびアレイ中心点の微動 H/V (太線) を示す。

KAR, YNG, JHK, GNT の 4 地点では、微動 H/V のピーク、レイリー波 H/V の短周期側のピーク、および SH 波伝達関数の 2 次あるいは 3 次ピークが、

周期約 0.5~1 秒でほぼ一致している。なお、レイリー波 H/V の長周期側のピーク周期は約 1~2.5 秒、伝達関数の 1 次のピーク周期は約 1.2~2.5 秒である。

TTD, TTA, SHB におけるレイリー波 H/V は、前述の 4 地点とは異なり、一つだけピークがみられ、微動 H/V のピークとは一致しない。すなわち、微動 H/V のピークは、レイリー波 H/V のピークより短周期側にずれる。このとき、微動 H/V のピークは SH 波伝達関数の 2 次ピークと一致している。

レイリー波 H/V の長周期側のピークと SH 波伝達関数の 1 次ピークは、地盤モデルの $V_s=3500\text{m/s}$ 層までの基盤深度を示すものと考えられる。微動 H/V のピークは、レイリー波 H/V との比較において、短周期側のピークと一致しているか、あるいは短周期側にずれている。また、SH 波伝達関数との比較においては、2 次・3 次ピークと一致している。よって、微動 H/V のピーク周期は、少なくとも $V_s=3500\text{m/s}$ 層までの基盤深度には対応していないと推測される。

6. まとめ

鳥取平野において微動のアレイ観測および高密度の単点 3 成分観測を行い、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) 微動のアレイ観測から 7 地点について、鳥取平野で 6~8 層、 $V_s=100\sim 3500\text{m/s}$ の S 波速度構造モデルを求めることができた。そのモデルから、 $V_s=100\sim 300\text{m/s}$ 層の層厚は約 15~50m、最下層 $V_s=3500\text{m/s}$ 層までの基盤深度は約 300m~800m であることがわかった。
- 2) 鳥取平野全域における高密度単点 3 成分観測から、H/V のピーク周期分布を得ることができた。東側の山地~平野部、および海岸部~平野部でその分布の急変がみられた。周期 1 秒以上の領域は盆地状の形状を呈している。
- 3) アレイ中心点の微動 H/V と、地盤モデルから計算されるレイリー波 H/V、SH 波伝達関数を比較した結果、微動 H/V のピーク周期は少なくとも $V_s=3500\text{m/s}$ 層までの基盤深度には対応していないことが示唆された。

謝辞：東京工業大学の盛川仁博士、地域地盤環境研究所の宮腰研博士、鳥取大学の塩崎一郎博士、京都大学の赤松純平博士には有益なご助言、ご支援を頂いた。また、地域地盤環境研究所の趙伯明博士には観測及び解析を行う上でご支援頂いた。微動観測実施には、鳥取大学地圏環境工学研究室のメンバーを

はじめ多くの方々にご支援頂いた。ここに厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鳥取県震災調査報告，建築雑誌，2，3月合併号，1944.
- 2) 鳥取県建築士会：鳥取県地盤図，1995.
- 3) 岡田廣，松島健，森本武男，笹谷努：広域，深層地盤調査のための長周期微動探査法，物理探査，第43巻第6号，pp.402-417，1990.
- 4) 宮腰研，岡田廣，笹谷努，森本武男，凌甦群，齋藤誠治：小田原市におけるESG Blind Prediction Test Siteの地下構造－微動探査法による推定－，地震，第2輯第47巻，pp.273-285，1994
- 5) 山中浩明，古屋伸二，野澤貴，佐々木透，高井剛：関東平野におけるやや長周期微動のアレイベクトル観測－東京都江東地区におけるS波速度構造の推定－，日本建築学会構造系論文集，第478号，pp.99-105，1995.
- 6) 中村豊，上野真：地表面振動の上下成分と水平成分を利用した表層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.
- 7) 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方法の改良と適用，土木学会論文集，No.489，pp.251-260，1994.
- 8) 時松孝次，新井洋，浅香美治：微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部S波速度構造と地震動特性，日本建築学会構造系論文報告集，第491号，pp.37-45，1997.
- 9) 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.
- 10) 赤木三郎：鳥取温泉保全調査報告書，Ⅲ-1地質，pp.14-27，1993.
- 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，Vol.9，No.3，pp.4-10，1990.

(2001. 7. 9 受付)

ESTIMATION OF SUBSURFACE STRUCTURE OF TOTTORI PLAIN USING MICROTREMORS

Tatsuya NOGUCHI and Ryohei NISHIDA

To estimate the subsurface structures of Tottori plain, a microtremor observations were carried out. This area was severely damaged by the 1943 Tottori earthquake (M7.2), with damage concentrated in the alluvial plain. Microtremors were observed using seismic arrays (7 sites) and a 3-component single site observation (413 points). The observed data were analyzed using the spatial auto correlation (SPAC) method or the horizontal - to - vertical spectral ratio (H/V). S-wave velocity structures to the depth of about 1km were estimated by the analysis of array observational records. The distribution of the peak period of H/V was derived by the analysis of single site observational records.