

西宮市北部におけるやや長周期微動アレー観測 記録に基づく深部地盤構造の推定

盛川 仁¹・澤田純男²・土岐憲三³・中島大輔⁴

¹正会員 工博 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)

³フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

西宮市北部地域における地盤構造を把握することを目的として、市内の75地点で長周期微動観測が実施された。本研究では、その際に得られた記録の上下動成分を用いてF-Kスペクトル解析を実施し、観測された微動の伝播方向及び位相速度を求めた。さらに、求められた位相速度の分散曲線から逆解析により西宮市域の地盤構造を推定した。その結果、市内を東西に横断する甲陽断層の北側では東から西に向かって基盤岩深度が緩やかに深くなっていること、南側では西宮市の北東に位置する伊丹周辺の地盤構造に近いことが明らかになった。さらに、逆解析により甲陽断層を挟む南北の地域における基盤岩深度に約500mの高低差があることが推定された。

Key Words : *microtremors, array observation, frequency-wavenumber spectrum, ground structure, Koyo Fault, baserock*

1. はじめに

西宮市には、南西から北東にかけて市域を横断する甲陽断層が存在する。1995年兵庫県南部地震による被害状況を見ると、この断層に沿って南西より北東に向かって被害の著しい地域が帯状に広がっていることがわかる¹⁾。そこで、筆者等はこの地域における地盤構造、基盤構造を把握することを目的として、1995年の「兵庫県域における合同微動観測²⁾」にあわせて甲陽断層を挟む西宮市北部において長周期地震計(固有周期10秒)を用いたやや長周期微動観測に参加した。本研究では、その際に得られた記録の上下動成分の一部を用いて、レーリー波の伝播を仮定した周波数-波数スペクトル(以下ではF-Kスペクトルという)解析により、微動の波動伝播特性の検討を行う。さらに、F-Kスペクトル解析で得られた位相速度の分散曲線から逆解析により対象地域の地盤構造の推定を行う。

2. 観測場所及び観測方法

1995年兵庫県南部地震における甚大な被害の状況と地盤震動特性との関係についての知見を得ることを目的として、ESG研究委員会微動観測部会、及び1995年度文部省科学研究費(総合研究A)²⁾の強震動予測・地盤震動の研究分担者を中心に、1995年の夏～秋にかけて「兵庫県域における合同微動観測」が行われた。この合同観測では、阪神地域と淡路島を計14個のブロック

に分割し、各ブロック毎に微動の高密度観測が実施された²⁾。筆者等は京都大学防災研究所、同理学部地球物理学教室、千葉県水質保全研究所地質環境研究室、(財)大阪土質試験所の研究者らと共に、図-1に示す甲陽断層を挟む西宮市北部を担当し、8月8日～10日にかけて75点のやや長周期微動の観測を実施した。

観測は、西宮市菅甲山墓地(OHK)と県立西宮高校(NHS)とを定点とし、それに5組の移動観測点を加えた計7観測点において、3成分(N-S, E-W, U-D成分)の同時観測を行った。観測期間中は、深夜10時頃から翌早朝5時頃にかけて約1時間30分毎に観測を行い、合計15回分のデータセットを得た。観測システムは図-2に示すように、一回の記録時間長を20分として、固有周期約10秒の速度型感振器PELS73の速度波形出力を10Hzのローパスフィルターを通して100Hzのサンプリング周波数でデジタルレコーダーに収録した。また、無線親局から時計信号を送信し、各観測点の子局で受信してその信号をレコーダーに記録することにより、1/100秒以下の精度で記録の同時性を確保している。

担当地域内でできるだけ多くの点で観測を実施することが求められている合同観測の一環として、本観測は行なわれたため、通常のアレー観測のように同じ地点でアレー半径を変えて複数回の観測を実施することが困難であった。このような制約条件のもとで、精度は劣るものの、対象地域内のいろいろな場所で、大きさの異なる多数のアレーが構成できるように移動観測

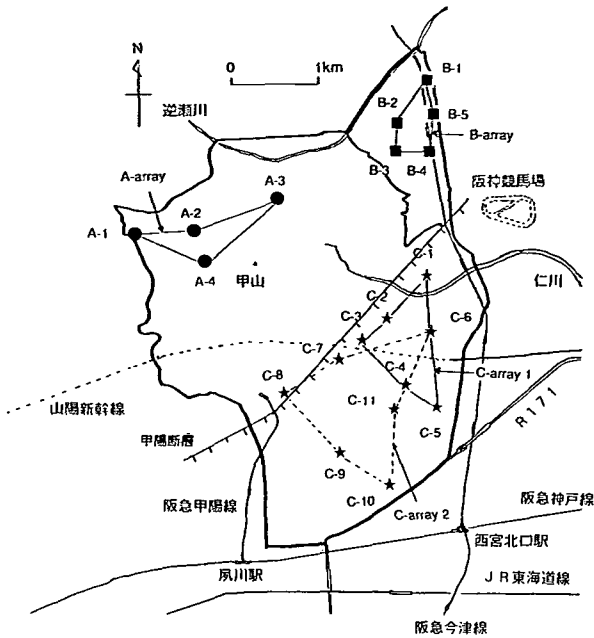


図-1 観測地域とアレーの配置 (断層位置は文献3)による

3. 観測結果

(1) 観測記録

アレーの大きさにあわせて解析対象とする周期帯域を決定し、最も周期の長い成分が少なくとも10波は含まれるように記録の解析区間長を50~80秒とした。記録は計器補正を行い、時計信号による時刻の同期をとった後、全ての観測点において自動車などの人工ノイズの影響が小さいと思われる区間から必要な解析区間長を4~5箇所抽出して解析に用いた。得られた観測波形の例を図-3に示す。ノイズによって乱されてはいるものの、長周期成分については位相の対応をみる事ができる。

(2) 周波数-波数スペクトル解析

アレー観測が行われた7組のデータセットについてF-Kスペクトル解析を行なった。上のようにして抽出された各区間の記録に対して、適当な周期帯域の帯域通過フィルタを通過させた波形について、Capon^{4),5)}による最尤推定法(MLM)に基づくF-Kスペクトル解析を行い、波動の伝播方向と位相速度を計算し、分散曲線を得た。

MLMはF-Kスペクトルを精度よく推定することができ、その各振動数毎に描かれるF-Kスペクトルのコンターには卓越したピークがただ1つ存在する 경우가多く、容易に伝播特性を把握することができる。しかし、記録によってはエイリアジングなどのために同程度の大きさの複数のピークが現れて、明確なピークが存在しない場合もある。このような場合には他の周期帯域におけるF-Kスペクトルのコンターから真のピークと考えられるものを推測した。

まず、観測地域全体をカバーするアレー観測記録を用いて解析を行ったが、信頼性の高い結果を得ることはできなかった。これは、F-Kスペクトル解析のような対象地域が様な地盤構造であると仮定した解析手法を本観測地域全体には適用できないことを示唆している。そこで、観測地域を甲陽断層を境に、南北の区域に分け、さらに北部は東西の小区域に分割して、各区域毎に解析を行なった。

北西、北東、南側の各区域の代表的なアレーとして、それぞれ図-1に示すA-array, B-array, C-arrayについての解析結果を以下に示す。なお、C-arrayについては大きさと位置が少し異なる2つのアレーを対象としている。F-Kスペクトルの例として、北西区域のA-arrayの結果を図-4に示す。図中の星印はコンターの最大ピーク的位置を、▲は比較的大きいピーク(最大値の80%以上)の位置を示しており、破線の円は上記の方法によって選んだピーク位置を通るように描いており、その半

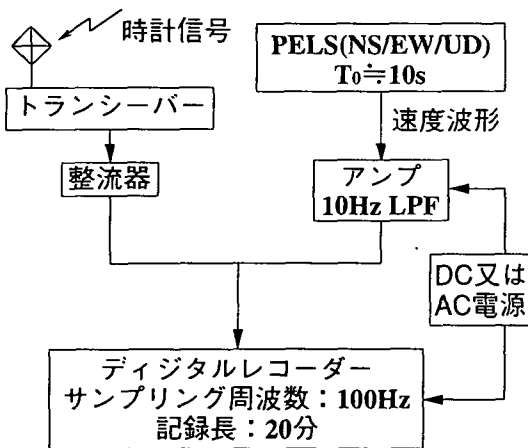


図-2 観測システムのブロック・ダイアグラム

点を配置し、15回の観測のうちアレー観測を7回実施した。定点のOHKとNHSを含めると地域全体に広がる大アレーとなり、それらを除くと範囲が限定された比較的小さなアレーとなるように、また、5点の移動観測点が互いに甲陽断層を跨がないように注意して観測点の配置を行なっている。

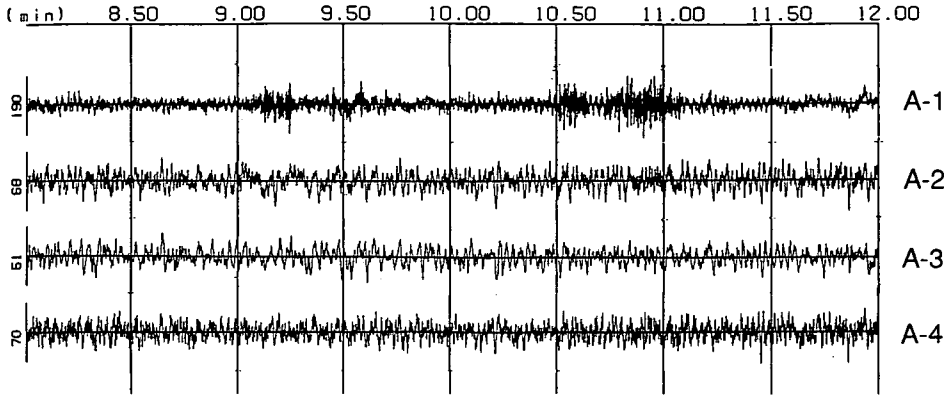


図-3 観測波形の例 (A-array, U-D 成分)

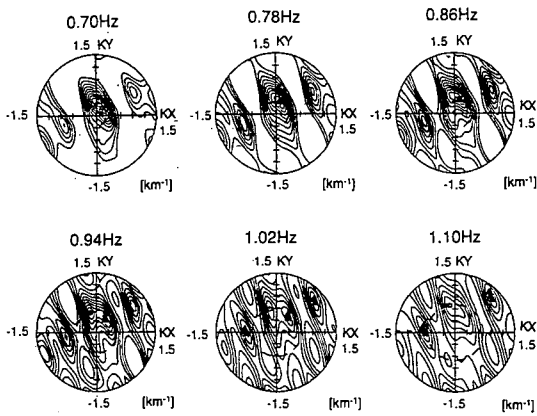
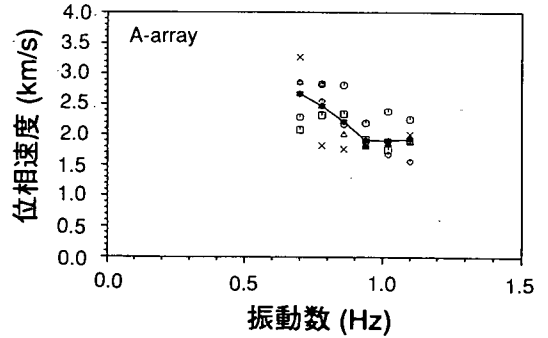


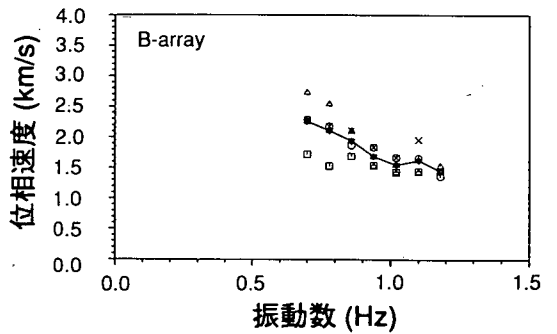
図-4 F-K スペクトルの例 (A-array)

径がスローネスを表している。また、原点から見たコンターのピークの位置は波動の伝播方向を示している。観測された常時微動の伝播方向は、対象とした周期帯においては、いずれの区域においても、おおむね真北～やや北東方向であった。

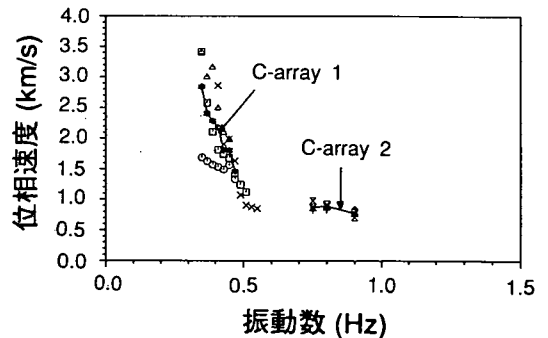
各区域におけるアレーの分散曲線を図-5に示す。C-array については2つのアレーの結果を重ねて示している。図中の○・×・△・□・◇等はそれぞれ一つの解析区間から計算された位相速度を、星印とそれを連ねた実線は各解析区間の平均値を表している。位相速度を見ると、いずれの区域においても正の分散性が見られることがわかる。各区域の分散曲線の平均値を連ねたものをまとめて図-6に示した。この図より、甲陽断層の北側の区域では、西側に比べて東側のアレーの方が位相速度がやや遅くなっていること、また、甲陽断層の南北で位相速度に顕著な違いがあることが直ちにわかる。



(a) A-array



(b) B-array



(c) C-array

図-5 観測記録から求められた分散曲線

表-1 地盤の速度構造の初期モデル

V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (t/m^3)	各層の深度 (km)		
			A-array	B-array	C-array
1.600	0.300*	1.700	0.000	0.000	0.000
1.800	0.700	1.800	0.025	0.045	0.155
2.500	1.200	2.100	0.170	0.135	0.395
5.400	3.200	2.700	0.315	0.325	0.895

*C-arrayは $V_s=0.250\text{km/s}$ とした。

4. 逆解析による基盤構造の推定

上で得られた分散曲線から逆解析により、地盤の速度構造の推定を行なう。表-1に示す初期モデルの層厚のみを変化させて理論的に計算される分散曲線と観測された分散曲線の平均との差の2乗和が最小となる地盤構造を定めた。初期モデルは、香川らによって伊丹市で行われた微動のF-K解析から求められた地盤モデル⁶⁾をもとにして与えている。図-7に、図-5で示した観測から求められた位相速度をエラーバーを用いて示し、最終的に決定された速度構造に基づくレイリー波のファンダメンタルモードの理論分散曲線を実線で示した。C-arrayの推定では二つのアレー(C-array 1, C-array 2)をまとめて説明できる速度構造とした。C-arrayは観測分散曲線のばらつきが大きく、速度構造の決定には大きな自由度が伴うことに注意が必要であるが、地盤の速度構造の推定結果を図-8に示した。この図より、S波速度で 3.2km/s 程度の基盤岩の深度は、甲陽断層の北側で約 $300\sim 400\text{m}$ 、南側では、約 850m であった。

5. 議論

既に述べたように、観測記録から求められたF-Kスペクトルをみると、解析を行なった全てのアレーのほとんどの周期帯域においてはほぼ同じ方向(ほぼ真北~北東方向)へ波動が伝播している。日本で観測される脈動の波源は、夏は太平洋のうねりで、冬は季節風による日本海のうねりである^{7),8),9),10)}とされていることを考慮すると、観測された常時微動の波源は、脈動が卓越する周期帯域では太平洋における波浪、それよりも短周期帯域では都市圏の人口ノイズであることを示唆するものと考えられる。なお、伝播方向は基盤構造と無関係ではないと考えられるが、この問題については今後の課題として、本研究では言及しない。

図-6よりわかるように、北西部での位相速度は、短周期域でも $2.5\sim 3.0\text{km/s}$ とかなり大きく、硬い基盤層がかなり浅いところまで分布しているものと推定される。また、北東部では分散曲線の形状は北西部とほぼ同じであるものの、全体に位相速度が 0.5km/s ほど遅

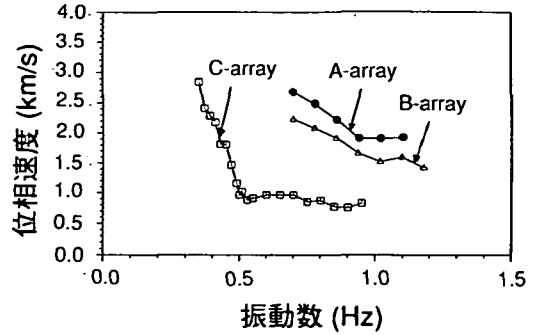
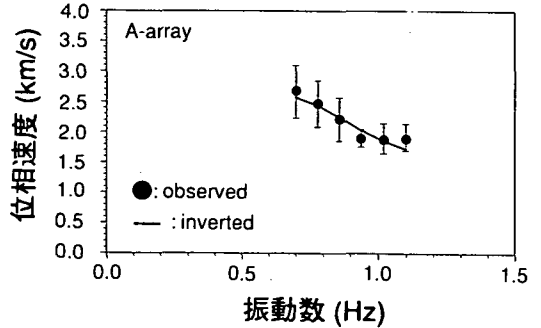
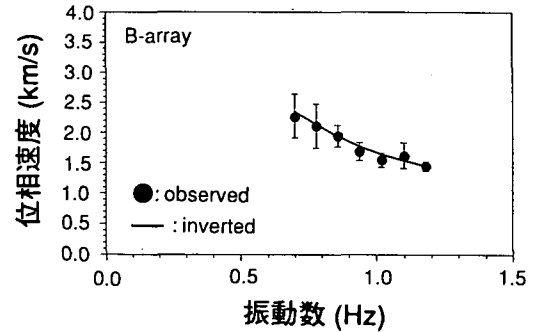


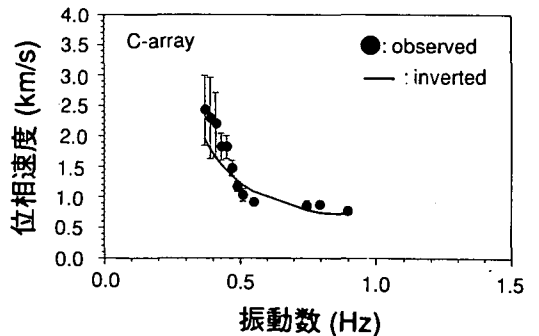
図-6 3つのアレーにおいて得られた分散曲線



(a) A-array



(b) B-array



(c) C-array

図-7 観測記録から求められた位相速度の平均及び標準偏差の幅と逆解析によって求められた速度構造に基づく理論分散曲線

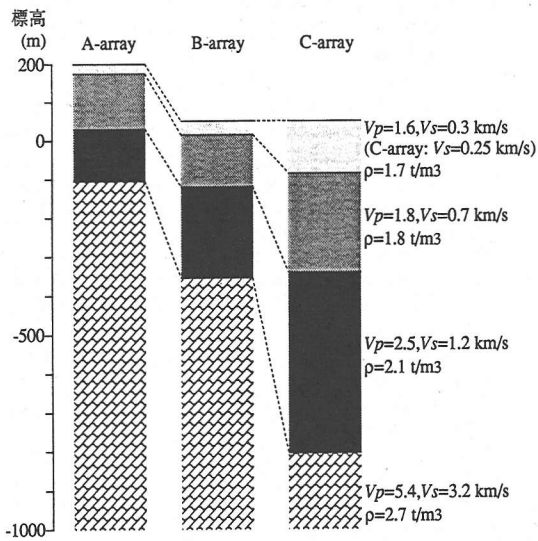


図-8 逆解析によって推定された地盤構造

い。従って、北東部の基盤層は北西部とほぼ同じか、わずかに深い位置に存在しており、甲陽断層に沿って西から東に向かって基盤岩深度は一定、またはわずかに大きくなっているものと推定される。また、甲陽断層の南側では北側に比べて位相速度が非常に小さく、図-8にみられるように、甲陽断層を挟んで、南側の基盤岩が北側に比べて約500m深いところにあるものと考えられる。このことは、断層を跨ぐ測線上の余震観測で得られた余震の走時に基づいて推定された、基盤岩の深さ構造とも調和的である¹¹⁾。なお、図-1にみられるように、C-arrayでは観測点C-8が甲陽断層の北側に位置している可能性があるため、C-8を除く観測点を使って、アレー配置でF-Kスペクトル解析を行なったが、図-5(c)で示したものとほぼ同じ結果が得られている。

次に、過去にこの地域に隣接する地域で行われたやや長周期微動観測結果との比較を行う。香川ら⁶⁾は大阪平野の地盤構造に関する調査の一環として、尼崎港、武庫之荘及び伊丹において位相速度の分散特性を調べている。この結果のうち、伊丹における位相速度とC-arrayの解析結果を比較したのが図-9である。この図より、甲陽断層の南側のC-arrayにおける分散特性が伊丹付近の分散特性と非常によく似ていることがわかる。C-arrayはF-Kスペクトルが不安定で推定精度が必ずしも十分ではない周期帯域も含まれているので、比較に際しては注意が必要であるが、位相速度は0.35Hz~0.6Hzの周波数帯域ではほとんど一致しており、それよりも短周期側で伊丹の方がたかだか0.3km/s程度小さいだけである。従って、甲陽断層の南側の区域の地盤構造が伊

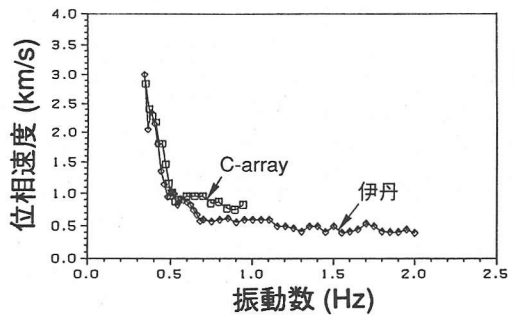


図-9 C-arrayと伊丹における微動のアレー観測から求められた分散曲線

丹付近のそれと比較的類似していると推定できる。西宮市と伊丹市との位置関係を考えると、断層に沿って南西から北東にかけてよく似た構造が続いているという予測も可能である。また、大阪盆地の深部地盤構造のモデル化を行った香川ら¹²⁾によると、西宮市の海岸部での基盤岩深度は、少なくとも1500mであると推定されており、甲陽断層のすぐ南側の基盤岩深度に比べてさらに700m以上の高低差があることになる。このことは、甲陽断層の南側から海岸側に向かって急傾斜で深くなっているか、あるいは甲陽断層の南側に位置する確実度IIIの断層¹³⁾またはそれ以外の断層があってそこで大きな高低差が存在していると考えざるをえない。

今後は、他の地域での観測結果や、微動以外の観測事実との比較検討により、対象地域及び周辺の地盤構造のより詳細な推定を行っていく必要があると考えている。

6. 結論

本研究では、西宮市の北部地域でやや長周期微動のアレー観測を行い、F-Kスペクトル解析と逆解析により地盤構造の推定を行なった。その結果、甲陽断層を挟む南北の地域で基盤岩深度が約500mほど異なること、甲陽断層の北側では西から東に向かって基盤が緩やかに深くなっていることがわかった。また、過去の研究成果との比較により、甲陽断層の南側の地盤構造は伊丹市と非常に類似していること、甲陽断層の位置から西宮市の海岸に向かって基盤岩深度の大きな変化が存在する可能性が明らかになった。

謝辞： 本研究で用いたアレー観測記録は、京都大学防災研究所の赤松純平助教、尾上謙介助手、同理学部の西村敬一講師、千葉県水質保全研究所の地質環境研究室の香村一夫氏、古野邦雄氏、佐藤賢司氏、(財)大阪土質試験所の香川敬生氏、京都大学大学院の斉藤秀

雄氏, 慈道 充氏と共同で行なった観測により得られたものである。また, 解析には大阪工業大学の堀家正則助教授, (財) 大阪土質試験所の香川敬生氏によって作成されたコンピュータ・プログラムを使用させていただいた。なお, 観測に際しては1995年度文部省科学研究費 総合研究 A(研究代表者: 藤原悌三, 課題番号: 07300005)の援助を得た。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Kameda, H., Kakumoto, S., Iwai, S. and Hayashi, H.: DiMSIS: Geographic information system for disaster information management of the Hyogoken-nambu Earthquake, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 16, No. 2, pp.89-94, 1995.
- 2) 平成7年度文部省科学研究費(総合研究 A, 研究代表者: 藤原悌三): 平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 資料編 兵庫県域における合同微動観測, 1996.3.
- 3) 通商産業省工業技術院地質調査所: 1:50000 地質図 大阪西北部, 1992.
- 4) Capon, J.: High-resolution frequency-wave number spectrum analysis, *Proc. IEEE*, Vol. 57, pp.1408-1418, 1969.
- 5) 堀家正則: 微動の位相速度及び伝達関数の推定, 地震, 第2輯, 第33巻, pp.425-442, 1980.
- 6) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘 淳: 常時微動アレー観測から見た大阪平野の地盤構造, 関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集, pp.127-134, 1992.
- 7) Okano, K.: Observational study on microseisms (Part 1), *Disaster Prevention Research Institute Kyoto University Bulletins*, No. 44, pp.2-22, 1961.2.
- 8) Okano, K.: Observational study on microseisms (Part 2), *Disaster Prevention Research Institute Kyoto University Bulletins*, No. 47, pp.2-15, 1961.8.
- 9) Okano, K.: Simultaneous observation of microseismic waves at two stations, *Geophysical Papers Dedicated to Prof. K. Sassa, Geophysics Inst.*, Kyoto University, pp.387-391, 1963.
- 10) Akamatsu, J., Fujita, M. and Nishimura, K.: Vibrational characteristics of microseisms and their applicability to microzoning in a sedimentary basin, *Journal of Physics and Earth*, Vol. 40, pp.137-150, 1992.
- 11) 西村敬一, 川崎慎治, 和賀俊治: 阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み—, 京都大学防災研究所, pp.151-161, 1996.
- 12) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘 淳: 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化, 第22回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会耐震工学委員会, pp.199-202, 1993.
- 13) 活断層研究会: 新編 日本の活断層, 東京大学出版会, pp.272-279, 1991.

(1996. 6. 24 受付)

ESTIMATION OF DEEP GROUND STRUCTURE USING MICROTREMOR ARRAY RECORD IN NORTHERN NISHINOMIYA AREA

Hitoshi MORIKAWA, Sumio SAWADA, Kenzo TOKI and Daisuke NAKAJIMA

The observations of microtremors were carried out at 75 sites in northern area of Nishinomiya, Japan. Using frequency-wave number spectral analysis, the phase velocities and directions of wave propagation were detected from the observed data. Subsurface structures are estimated by means of an inversion analysis of phase velocities. The deep ground structure around the Koyo Fault is surveyed from the results.