

## 微動アレー観測による岡崎平野の地盤構造探査

Ground structure inquiry of Okazaki plain by microtremor array observation

日比慎一<sup>†</sup> 正木和明<sup>††</sup>

Shinichi HIBI and Kazuaki MASAKI

**Abstract:** The Okazaki Plain located in the Aichi Prefecture is one of the most industrial areas in Japan. The area was damaged several times due to historical earthquakes( 1707 Houei E., 1854 Ansei E. and 1945 Mikawa Earthquake.), and will be attacked again by the Tokai/Tonankai Earthquake predicted near southern area in subduction zone. Therefore, it is very important to take earthquake disaster prevention measures in this area. In this paper, geological structure in Okazaki Plain was surveyed by using microtremor array measurements at 10 sites. Dispersion curves were calculated by Spatial Auto-Correlation Method (SPAC) and S-wave velocity distribution in soil from surface to rock base were estimated by inversion method. S-wave structures obtained array observations were inspected by H/V spectra of microtremors and earthquake data observed in the same site. Three dimensional structure of soil from surface to seismic basement in Okazaki Plain was obtained comparing with borehole data and structure model studied by the Aichi Prefecture Office. It was clarified that the basement is slanted to north-west direction in the plain and about 800m in depth at Kariya city. The 3-D model obtained in this paper will be useful for estimating strong motions during the future earthquakes.

### 1. 序論

#### 1.1 背景

人口が集中する我が国の都市部は、一般的に大規模な平野や盆地等の堆積平野に位置していることから、都市における地震防災対策を検討する上で、堆積平野における地表から地下の地震基盤までの3次元的な地下構造調査を行い強震動予測のための基礎資料を得ることは重要である。

地震動特性は深さ数 10mの地盤構造に強く支配されているとの考えが一般的であったが、兵庫県南部地震以降、岩盤に至る深い構造も強く関与しているとの指摘が多く報告されている。例えば、釜江・入倉(1997)は断層によって形成された深さ約 1kmの堆積層が地震動の重複を引き起こしたことが震度 7 の帯を形成した事を明

らかにしている。

このような観点から大規模堆積平野の深部構造探査が全国で開始された(科学技術庁、H12)。愛知県では、H11～H13年度に濃尾平野、H14～H16年度に岡崎平野、豊橋平野で地下構造探査が実施された(愛知県、H17)。

地下構造探査の一手法として微動アレー探査法が有力視され、近年多くの平野で実施されるようになった。山中・山田(2002)は関東平野、香川他(1998)は大阪盆地において探査を実施している。

#### 1.2 岡崎平野の地盤構造に関する従来の研究

濃尾平野の深い地盤構造については多くの研究があり、比較的詳細に明らかにされている。一方、岡崎平野については深層ボーリングが少ないこともあり、H14～16年度の愛知県による地下構造調査が唯一の研究である。

この調査では図-1に示すように、反射法探査(3測線)、微動アレー探査(8地点)が実施されたが、詳細な3次元地盤構造を明らかにするには至っていない。

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

<sup>††</sup> 愛知工業大学工学部都市環境学科(豊田市)

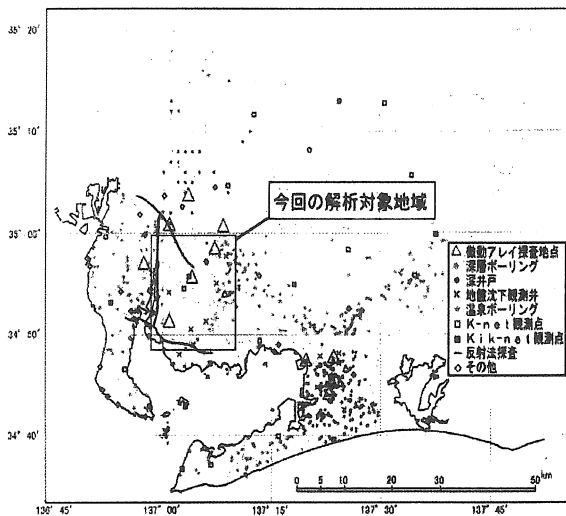


図-1 既存資料の収集地点<sup>2)</sup>

1-3 本研究の目的

本研究では、愛知県内の調査では十分に明らかにされていない岡崎平野を対象地盤とする。調査方法としては、多くの地域で採用されている微動アレー探査法を採用する。観測地点は、地域防災センターによる地震計設置点とこれを補間する計 10 地点とする。10 地点での S 波速度構造を求め、岡崎平野の 3 次元地盤構造モデルを作成する。また、微動および地震データを用いて、モデルの検証を行う。

2. 研究方法

2-1 フローチャート

図-2 に本研究のフローチャートを示す。

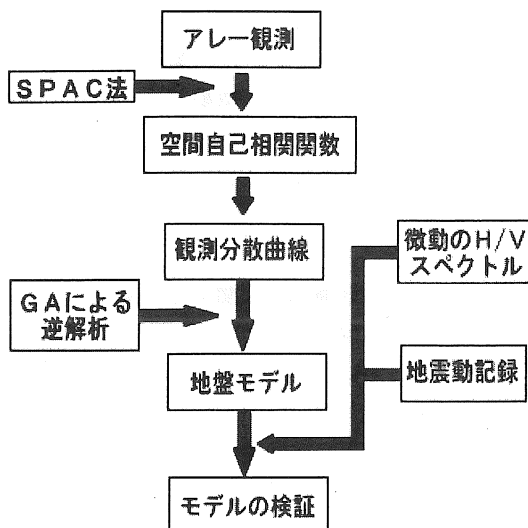


図-2 本研究のフローチャート

2-2 分散現象

微動の上下動成分はレイリー波である可能性が高い。図-3 に示すように、表面波のひとつであるレイリー波は低振動数の波は波長が地下深部にまで至るので伝播速度（位相速度）が速い。逆に高振動数の波は遅い。すなわち、分散性（振動数により位相速度が異なる）を有し、その関係は「分散曲線」と呼ばれる。

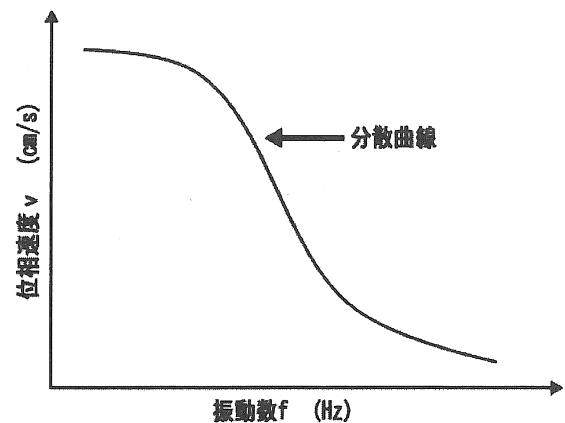


図-3 分散現象の概念

2-3 観測概要

今回の観測に用いた観測機器とアレー形状を図-4 に示す。アレー形状は、半径の異なる 2 つの正三角形の頂点と中心点の計 7 点を基本形として上下動地震計を設置した(2重同心三角形アレー)。アレーサイズを表-1 に示す。

観測に使用した地震計は、振動技研(株)製速度計(固有周期: 7 秒)、記録器は白山工業(株)製 DATA-MARK LS-800SH を 7 台で、各アレーについてサンプリング周波数を 100 Hz で、観測時間を 60 分~90 分とした。観測日時は 2005 年 10 月 1 日~10 日であり、時間は基本的には昼間とした。

表-1 アレーサイズ

観測地点	OH06	OH07	OH08	OH09
Lアレー半径(m)	700	700	---	---
Mアレー半径(m)	---	---	240	250
Sアレー半径(m)	175	175	---	---
観測地点	OH10	OH11	OH12	
Lアレー半径(m)	700	700	700	
Sアレー半径(m)	175	175	175	
観測地点	OH13	OH14	OH15	
Lアレー半径(m)	700	---	700	
Mアレー半径(m)	---	250	---	
Sアレー半径(m)	175	---	175	

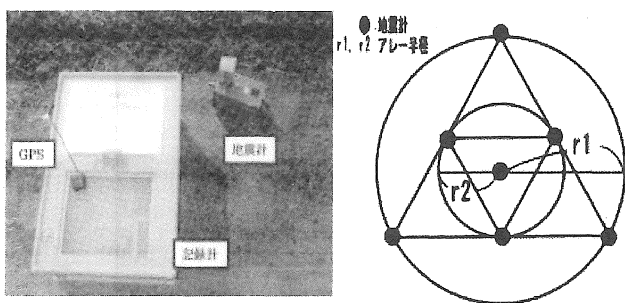


図-4 観測機器 (左) とアレー形状 (右)

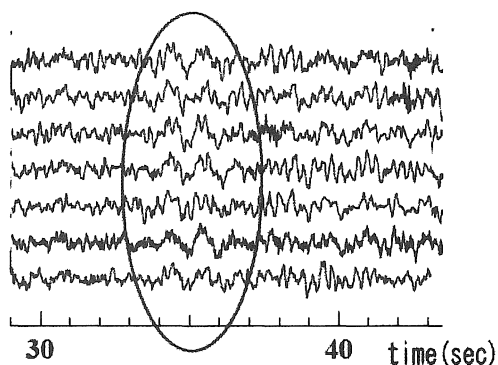


図-6 OH-07 地点における微動記録の一部

### 2-4 観測

図-5 に示す岡崎平野の中心部から南西部にかけての 10 地点において観測を行った。これらの地点には地域防災センターによって ETNA 型地震計が設置されている。

今回、地震計設置点を選定した理由は、これらの地点で得られた地震記録を用いて、地盤モデルの検証ができること、また得られた地盤モデルを用いて地震動特性の解明にも役立つことである。

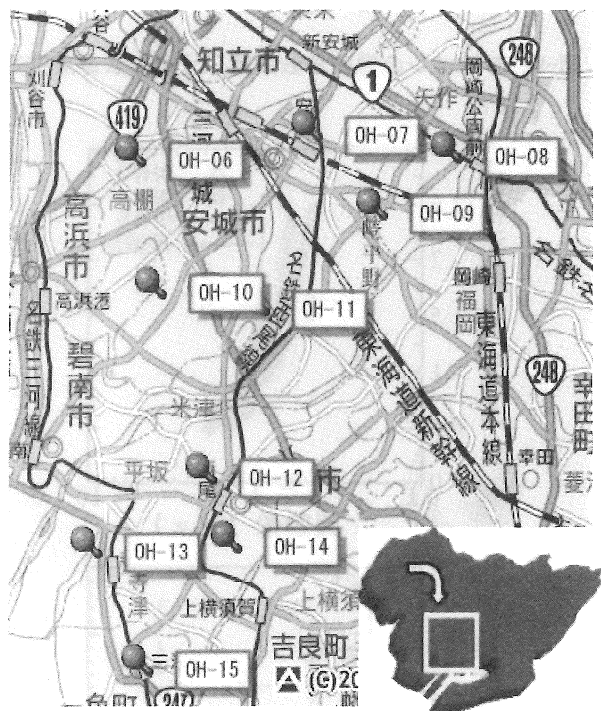


図-5 観測地点 (OH-06~OH-15)

### 2-5 記録波形の例

得られた微動記録の一例として図-6 に OH-07 地点の S アレーの 7 地点における同時観測記録を示す。地震計は数 10m 離れているが、図中の円で囲った部分に示されるように、波形には相関が見られる。

## 3. 解析

### 3-1 解析手法

表面波の位相速度を求める方法として、SPAC 法 (Spatial auto-correlation Method (岡田他、1996))<sup>5)</sup> を用いた。微動は、水平方向に伝わる平面波から構成され、時間的、空間的にもスペクトルが一定であるという仮定と、表面波 (レイリー波) で構成されており、その中の基本モードが卓越しているという仮定から成り立っている。表面波の位相速度は、周波数により異なる分散という性質をもっており、これは、アレーを展開した場所固有の値であり、アレー直下の地下構造を反映している。

### 3-2 遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析

観測で得られた分散曲線から地下構造を求めるための逆解析には、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。これは自然淘汰に基づく生物の進化過程を模擬した数理的なモデルであり、組み合わせ最適化問題の解法としての可能性が検討されている。

反射法の結果やボーリングデータ<sup>1)</sup> から初期モデルを作成し、GAを行った。GAにおける検索範囲は、基本的には初期モデルに対して堆積層では S 波速度 ±30%、基盤では S 波速度 ±7%、層厚 ±70% とした。

## 4. 解析結果

図-7 に観測地点の測線を示す。北から A ライン、B ライン、C ラインとした。図-8、9、10 に得られた分散曲線と S 波速度構造を示す。図中の丸印は観測分散曲線を、実線は GA より求められた S 波速度構造を用いて計算された理論分散曲線を示す。

一般に、分散曲線が低振動数側にある程堆積地盤が厚く、基盤は深いと考えられる。A ラインを見ると、OH8 → 9 → 7 の順に分散曲線が低振動数側にずれている。この事を反映し、得られた基盤深度も OH8 → 9 → 7 の順に

深く求まった。OH6 については、分散曲線の低振動数部分が得られていないので、検討の余地がある。Bラインの分散曲線はほぼ同じなので、同じような地盤構造が得られた。また、Cラインの分散曲線については、14→15の順に左に移っているの、得られた構造もこの順に深くなった。

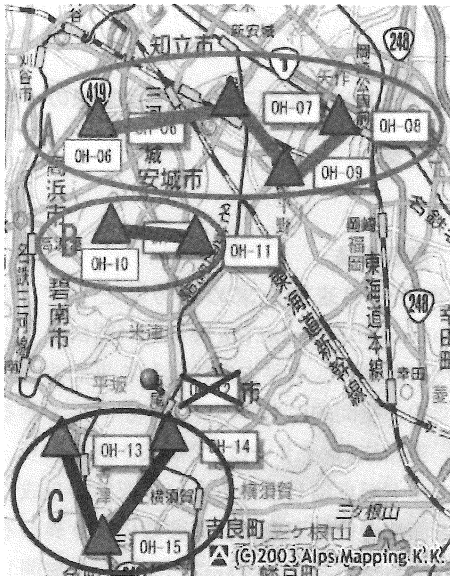


図-7 図 8~図 10 に示す観測地点の測線

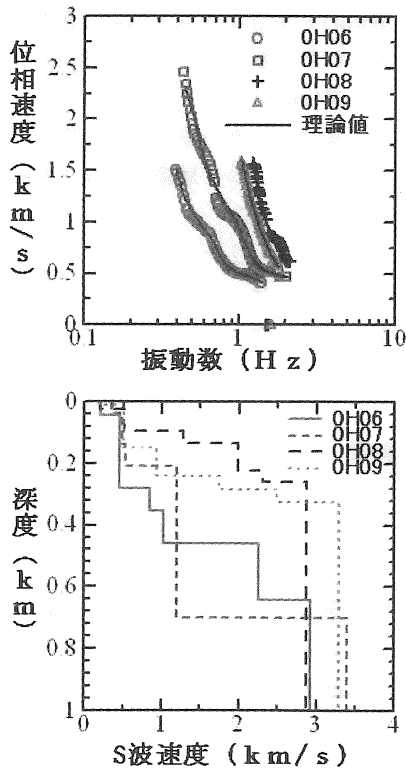


図-8 Aラインの観測分散曲線(上)とS波速度構造(下)

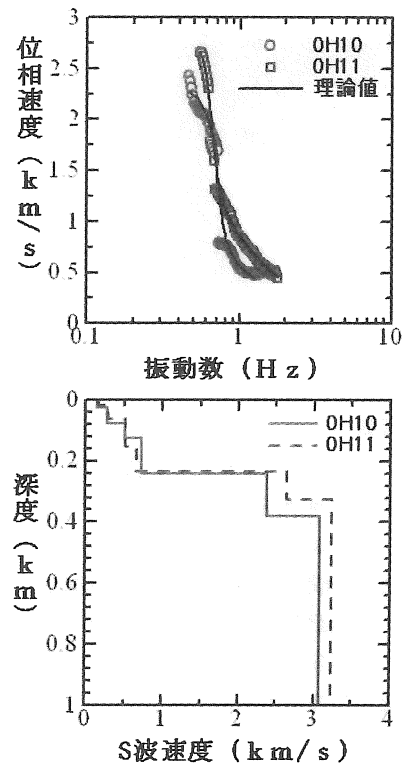


図-9 Bラインの観測分散曲線(上)とS波速度構造(下)

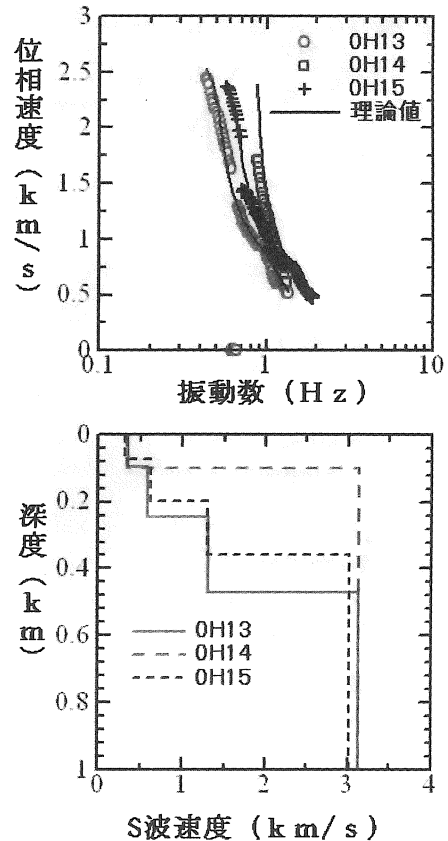


図-10 Cラインの観測分散曲線(上)とS波速度構造(下)

5. 解析結果の検証

5-1 検証方法

得られたS波速度構造の検証を試みた。検証材料としては、深層ボーリング等が考えられるが、図-1に示すように本数が少なく、材料とはなり得ない。そこで、本研究では、アレー観測と同一地点でとれた地震動記録と、微動記録を用いることにした。

- 1) 地震動については主要動部分を切り取り、H/V (水平2成分合成/上下成分) スペクトルを求めた。用いた地震は各地点2~3個である。
- 2) 微動記録については、1点3成分観測を行い、そのH/V スペクトルを求めた。
- 3) アレー観測によって得られた地盤モデルからレイリー波のH/V スペクトルを求めた。

地震動については主要動を用いたが、主要動の主成分はS波であり、レイリー波ではない。しかし、主要動部のH/V スペクトルは微動のH/V スペクトルとよく一致すると言われているので、検証材料として用いることにした。

5-2 H/V スペクトル

微動のスペクトルから直接地震動特性を求めようとする研究が行われており、微動の水平動スペクトルの卓越周波数が表層地盤の卓越周波数に対応するという研究がある。その後、微動の水平動と上下動のスペクトル比が、地盤の地震波増幅特性を近似的に表すという方法が提唱された(中村, 1998)。この方法は、表層地盤では水平動は増幅されるが上下動は増幅されにくいことから、地表の微動のH/V スペクトルは地盤の地震波増幅特性に類似するとしており、単点3成分の微動観測から地震動増幅特性の推定が可能になるという、非常に利便性の高い方法である。

5-3 検証結果

比較した結果を図-11に示す。高振動数成分は浅い地盤の局所的影響を受けているので、ここでは除外し、深い構造を反映している約1Hz以下の第1次ピークに注目して比較する。全地点においてピーク振動数はおおむね理論値と観測値(地震動、微動)は一致している。このことは、アレーで求められたモデルがおおむね正しいことを検証していると言えよう。OH10では大きなずれが見られるが、これはもともとアレー観測時の記録が悪く、モデルに問題があると考えられる。

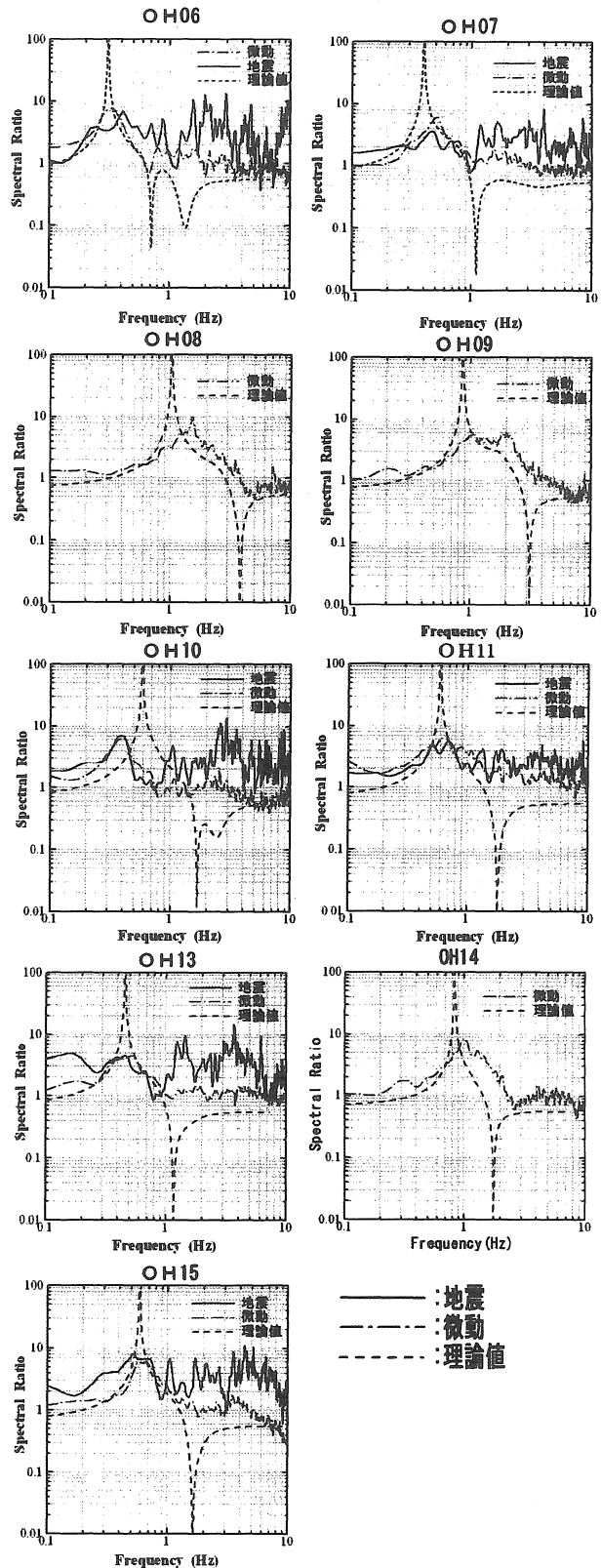


図-11 理論値と観測値(地震、微動)の比較図

5-4 モデルの修正

比較的ずれの大きかったOH7、8、14地点についてモデルの修正を試みた。GAの初期モデルの層厚を変化させ、

検索範囲を狭くして、再解析をした。いくつかのモデルについて最も観測 H/V スペクトルに近いモデルを最終モデルとした。

OH07 は少しの改良しか見られなかったが、OH14 についてはかなりの改良が見られた。しかし、OH08 についてはよい最適モデルを見つけれなかった。これにより、決定した地下構造を表-2 に示す。

6. 3次元モデルの作成

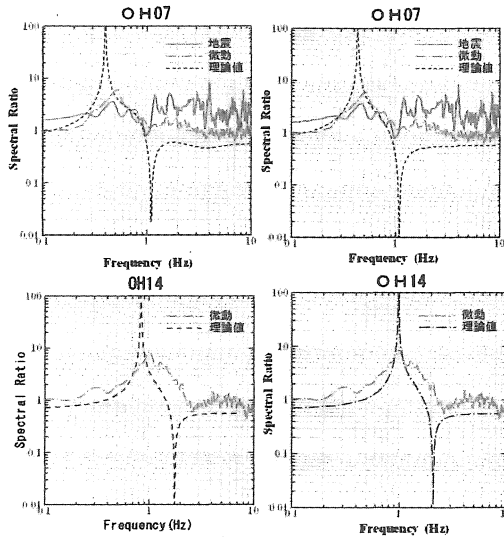


図-12 地盤モデルの変更前(左)と変更後(右)

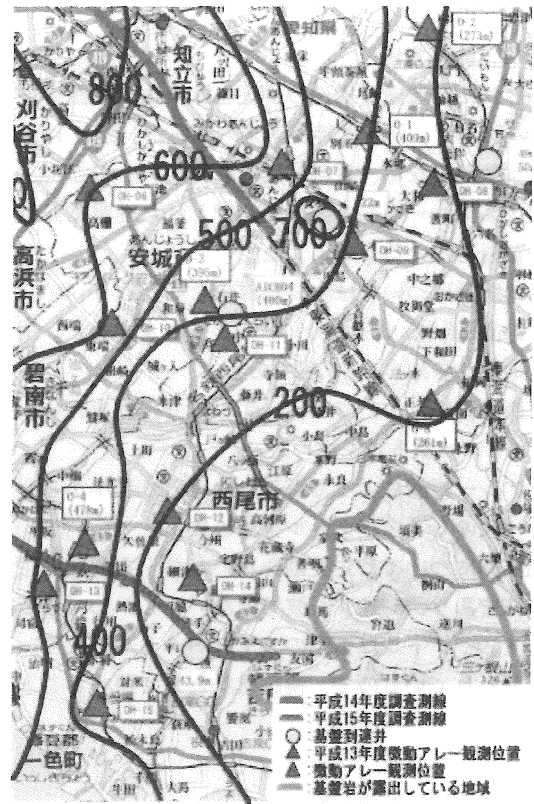


図-13 基盤面の深さ分布図

表 2 アレー観測より求められた地下構造

OH06				OH07				OH08			
H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.076	1.654	0.254	1.759	0.079	1.852	0.461	1.863	0.021	1.602	0.184	1.716
0.161	1.909	0.529	1.894	0.088	1.866	0.477	1.870	0.022	1.785	0.397	1.832
0.120	1.920	0.542	1.899	0.065	2.140	0.751	1.987	0.049	1.888	0.503	1.882
0.214	2.487	1.123	2.108	0.322	2.562	1.190	2.128	0.152	2.961	1.471	2.212
0.000	5.628	3.234	2.637	0.000	5.347	3.076	2.589	0.000	5.443	3.138	2.604
OH09				OH10				OH11			
H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.026	1.595	0.170	1.709	0.046	1.589	0.177	1.713	0.039	1.596	0.172	1.710
0.022	1.840	0.447	1.856	0.052	1.769	0.374	1.821	0.062	1.739	0.347	1.807
0.085	1.978	0.610	1.823	0.061	2.249	0.876	2.030	0.045	2.052	0.674	1.951
0.210	2.813	1.368	2.184	0.450	2.873	1.413	2.195	0.172	2.562	1.190	2.126
0.000	5.101	2.927	2.549	0.000	4.867	2.792	2.522	0.000	4.912	2.818	2.527
OH13				OH14				OH15			
H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.097	1.752	0.358	1.813	0.065	1.664	0.266	1.767	0.074	1.714	0.322	1.795
0.147	1.958	0.587	1.815	0.002	4.864	2.790	2.521	0.125	1.985	0.618	1.927
0.227	2.748	1.319	2.171					0.158	2.729	1.305	2.167
0.000	5.440	3.136	2.604					0.000	5.256	3.020	2.574

アレー観測より求めた基盤面深度を愛知県が求めた基盤面深度および、ボーリングデータを用いて修正した結果を図-13に示す。

図右下の岡崎平野および幡豆郡では基盤面が露頭している。基盤面は北方向に傾斜して深くなり、西尾市 200 m、安城市 500m、知立市 800mとなっている。安城市南西部に 700mの凹みが見られるが、これはこの地点のボーリングデータで岩盤深度が 722mとなっているためである。

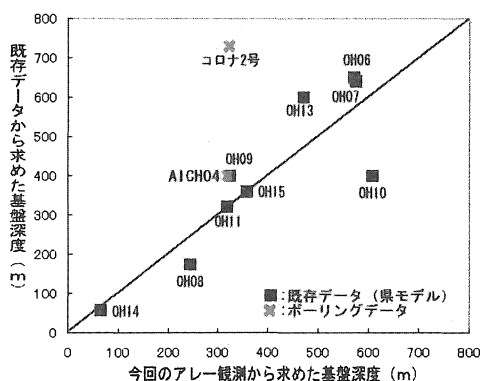


図-14 今回の結果と既存データとの比較

図-14に今回得られた9地点の基盤深度と、既存の資料に記載の基盤面深度との比較を示す。両者はおおむね一致している。OH09地点では今回求めた深度343mに対し、そのすぐ近くのボーリング地点(コロナ2号)では722mとなっている。ボーリングデータに疑いが持たれるが、本研究ではそのまま使用した。この結果が図-13の凹みになっている。

図-13をもとにメッシュデータを作成し、3次元的に基盤面を表現した結果を図-15に示す。図では基盤面が露頭する地域は0mとなっている。図は北方向より見た基盤面であり、南東方向に基盤面が隆起している様子がうまく表現されている。

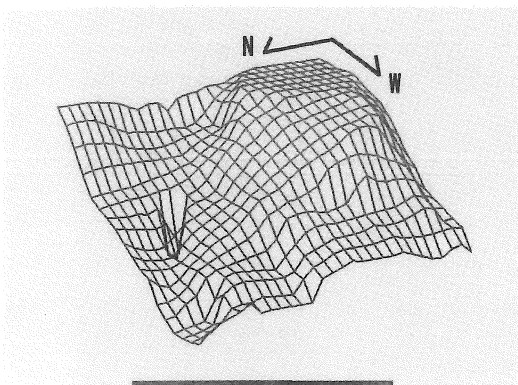


図-15 地震基盤面の3次元モデル図

## 7. 結論

1. 空間自己相関法(SPAC法)によりレイリー波分散曲線を求めた。愛知県による地下構造モデルを初期モデルとし、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて逆解析を行い、地盤構造モデルを求めた。
2. 9地点における、地表から地震基盤に至るS波速度、層厚を得た。
3. 得られた構造モデルを用いて、レイリー波理論H/V(水平成分/上下成分)スペクトルを求めた。一方、地震動主要動および微動3成分波形からH/Vスペクトルを求めた。理論と観測のスペクトルを比較することにより、モデルの検証を行った結果、得られたモデルは妥当なものと判断された。
4. スペクトルの一致が十分でない2地点については、改良を試みより適切なモデルを得た。
5. 愛知県モデル、ボーリングデータと統合することによって、3次元モデルを得た。地震基盤面は北西部で、約800mと最も深く、南東方向に向かって浅くなり、岡崎・幡豆郡で露頭する構造を得た。
6. 今回得られたモデルは愛知県モデルとは概略において一致している。

## 8. 考察

1. 国、県による岡崎平野地盤構造探査は現在計画されていない。アレーを用いた観測が唯一の手法と考えられる。今回は9地点でのモデルを求めたが、今後観測地点を拡大し、より多くのデータを得ることが望まれる。
2. モデルの検証方法としては、地震動シミュレーションを行い観測波形を説明できるかどうかをチェックする方法が最も有効である。今後はこの種の研究が必要である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の多大な協力を頂きました。特に、(有)ジオアナリシス研究所 凌甦群氏には、アレー観測を手伝っていただき、大変お世話になりました。そして、愛知工業大学工学部 正木和明教授には多大なるご指導を賜りましたことを、心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 釜江克宏、入倉孝次郎：1995 兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における地震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第500号、pp29-36、1997



- 2) 愛知県:三河地域堆積平野地下構造調査報告書, 2001, 2002, 2003
- 3) 山中浩明、山田伸之: 微動アレー観測による関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築, 物理探査, 第 55 巻, 第 1 号, pp53-65, 2002
- 4) 香川敬生他: 常時微動アレー観測による大阪堆積盆地深部 S 波速度構造のモデル化, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp31-40, 1998
- 5) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック[手法編 1 章-4 章], pp195-204, 1998
- 6) 岡田廣: 新しい地下構造の推定法: 微動探査法について—その原理と応用—, 1996
- 7) 香川敬生、澤田純男、岩崎好規、南荘淳: 常時微動アレー観測による大阪堆積盆地深部 S 波速度構造のモデル化, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp31-40, 1998
- 8) 山中浩明、山田伸之: 微動アレー観測による関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築, 物理探査, 第 55 巻, 第 1 号, pp53-65, 2002
- 9) 山中浩明、栗田勝美、瀬尾和大、小嶋啓介、佐藤浩章、宮腰研、赤澤隆士: 微動アレー観測による福井平野の S 波速度構造の推定, 地震, 第 2 輯, 第 53 巻, pp37-43, 2000
- 10) 三浦弘之、翠川三郎: 3 次元深部地下構造がやや長周期地震動の特性に及ぼす影響 —横浜市とその周辺地域における検討—, 地震, 第 2 輯, 第 54 巻, pp381-395, 2001
- 11) 松岡達郎、白石英孝: 関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性 —埼玉県南部地域の三次元 S 波速度構造の推定—, 物理探査, 第 55 巻, 第 2 号, pp127-143, 2002
- 12) 神野達夫、先名重樹、森川信之、成田章、藤原広行: 金沢平野における 3 次元地下構造モデル, 物理探査, 第 56 巻, 第 5 号, pp313-326, 2003
- 13) 宮腰研、岡田広、笹谷努、森谷武男、凌甦群、齋藤誠治: 小田原市における ESG Blind Prediction Test Sites の地下構造 —微動探査法による推定—, 地震, 第 2 輯, 第 47 巻, pp273-285, 1994
- 14) 片岡俊一、川瀬博: 微動と発破記録の表面波解析から推定される神戸市東灘区における地下構造, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp99-112, 1998
- 15) 山中浩明、佐藤浩章、栗田勝美、瀬尾和大: 関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレー観測 —川崎市および横浜市の S 波速度構造の推定—, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp355-365, 1999
- 16) 松岡達郎、梅沢夏実、巻島秀男: 地下構造推定のための空間自己相関法の適用性に関する検討, 物理探査, 第 49 巻, 第 1 号, pp26-41, 1996
- 17) 山中浩明、石田寛: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 468 号, pp9-17, 1995
- 18) 山本英和、小淵卓也、齋藤徳美: 微動アレー探査における空間自己相関法の自己回帰モデルを用いた改良, 物理探査, 第 51 巻, 第 1 号, pp70-76, 1998
- 19) 澤田義博他: 微動 H/V 法の有効性とその適用限界の解明, 平成 13 年度~平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B (1))) 研究成果報告書, 2004

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)