

# 常時微動アレー観測に基づく表層地盤の 平均S波速度推定精度に関する研究

長尾 毅<sup>1</sup>・紺野克昭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 芝浦工業大学助教授 土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

本研究は、常時微動アレー観測より得られる基本モードレイリー波の観測位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の適用性を検討したものである。全国の港湾および空港地域 22 地点を対象に実施した常時微動アレー観測結果をもとに空間自己相関法を適用して基本モードレイリー波位相速度を求めた。得られた観測位相速度と波長の関係から表層地盤の平均S波速度を直接推定したうえで、推定値をPS 検層結果と比較することによりその精度について検討するとともに、常時微動アレー観測の表層地盤構造推定への適用性を検討した。

**Key Words:** microtremor, phase velocity, Rayleigh wave, S-wave velocity

## 1. はじめに

地盤のS波速度構造は、地盤の振動特性、地震動の増幅特性などに支配的な影響を及ぼす非常に重要な要素であるが、その実測値を得るには速度検層を実施する必要があることから、経済的な理由によりごく限られた箇所においてのみ実施されているのが現状である。このため一般的にはS波速度はN値より推定されることが多いが、S波速度に対するN値のばらつきの大きさを考慮すると、N値を用いた推定には限界があると判断される。

地盤のS波速度構造を経済的かつ精度良く算出する方法として、常時微動アレー観測をあげることができる。常時微動アレー観測を用いた既往の研究は、工学的基盤以深の地震基盤までのS波速度構造の解明に重点が置かれてきたもの<sup>1)</sup>と工学的基盤以浅の表層地盤のS波構造に関するもの<sup>2)</sup>に大別されるが、研究事例としては前者に関する例が多い。本研究においては、周期1秒以下の短周期微動に焦点を当て、工学的基盤以浅の表層地盤の平均S波速度を直接推定する手法の精度を明らかにすることを目的とする。

深さx(m)の地盤の平均S波速度 $V_{sx}$ は、走時により重み付ける方法(以下、走時 $V_{sx}$ )と、層厚により重み付ける方法(以下、層厚 $V_{sx}$ )の2通りの求め方が考えられ、それぞれ式(1)、式(2)により求められる。

$$\text{走時 } V_{sx} = \frac{\sum_i H_i}{\sum_i \frac{H_i}{V_{s_i}}} \quad (1)$$

$$\text{層厚 } V_{sx} = \frac{\sum_i H_i V_{s_i}}{\sum_i H_i} \quad (2)$$

ただし、

$$\sum_i H_i = x \quad (3)$$

ここに、 $H_i$  : i番目の土層の層厚(m)

$V_{s_i}$  : i番目の土層のS波速度(m/s)

地盤の平均S波速度のうち、走時 $V_{s30}$ はアメリカ合衆国において耐震設計における地盤種別分類に用いられる動きがある<sup>3)</sup>。また、走時 $V_{s30}$ などの平均S波速度は、地震動の増幅特性との相関が比較的よいことが指摘されている<sup>4),5)</sup>。このため、今後我が国においても地盤種別分類や地震動増幅特性分類に関して走時 $V_{s30}$ などの表層地盤の平均S波速度を指標とする動きが強まることが予想され、表層地盤のS波速度構造を正確に把握する必要性はますます高まると考えられる。したがって、常時微動アレー観測をもとにした表層地盤の平均S波速度の

推定精度を確認することは非常に重要である。

常時微動アレー観測より得られる基本モードレイリー波の位相速度を用いた地下構造の推定方法としては、逆解析<sup>9)</sup>の適用が一般的である。逆解析による地下構造推定は非線形最適化問題となるため、推定結果は初期解の与え方や最適解の探索方法に依存する。しかしながら、現時点ではこれらに統一的方法が提案されているわけではない。一方、紺野・片岡<sup>7)</sup>および大橋・紺野ら<sup>8)</sup>は、東京都および神奈川県内でPS検層の実施されている85地点を対象に、基本モードレイリー波の理論位相速度と地盤の平均S波速度の関係を検討した結果、走時 $V_s30$ は概ね波長35~40mの基本モードレイリー波位相速度と一致することなどを明らかにした。この方法によれば、基本モードレイリー波の位相速度を用いて走時 $V_s30$ などの地盤の平均S波速度を直接求めることが可能である。ただしこれらの研究は理論位相速度を対象としたもので、観測位相速度との関係については対象外となっている。このため、本研究においては全国の港湾および空港地域においてPS検層の実施されている22地点を対象に、常時微動アレー観測を実施し、空間自己相関法<sup>9)</sup>を適用することにより基本モードレイリー波位相速度を求めた。得られた観測位相速度と波長の関係から表層地盤の平均S波速度を直接推定し、推定値をPS検層結果より求められる平均S波速度と比較することにより推定精度を検討するとともに、常時微動観測の表層地盤構造推定への適用性を検討した。なお、本研究においては港湾・空港地盤を対象としたため、いわゆるI種地盤については対象外となっている。このため、本研究で扱う手法のI種地盤への適用性は別途検討する必要がある。

## 2. 常時微動観測

### (1) 観測対象地点

常時微動観測は、表-1に示すPS検層の実施されている全国の港湾および空港地域22箇所を対象に実施した。表-1には各地点における走時 $V_s30$ の値を併せて示しているが、このうち走時 $V_s30$ が150m/s以下(久里浜, 辰巳), 150-200m/s(千葉港, 名古屋港(築地)), 200m/s以上(釧路空港, 鹿島港)の計6地点について地下構造を図-1に示す。なお、羽田空港については4地点において観測を行っているが、埋立工法の不均一性やSCP改良の有無などにより、地下構造は互いに異なっている。

検討対象22地点の $V_s$ と $V_p$ の相関は図-2に示すとおりである。図中にはポアソン比をあわせて示してあり、ポアソン比は概ね0.33~0.495にあり、特に表層30mまでについては0.48程度以上となることが多い。なお、ポアソン比 $\nu$ のレイリー波位相速度 $C(\lambda)$ に及ぼす影響は

表-1 検討対象地点

地点名/所在地	走時 $V_s30$ (m/s)
釧路空港/北海道釧路市鶴丘	220
釧路港/北海道釧路市西港	279
八戸港/青森県八戸市大字川原木字北沼	287
鹿島港/茨城県鹿嶋市泉川字浜屋敷地先	263
千葉港/千葉県千葉市中央区中央港	182
船橋/千葉県船橋市浜町	228
辰巳/東京都江東区辰巳	150
川崎港/神奈川県川崎市千鳥町	141
横浜港(山下)/神奈川県横浜市中区山下町	200
横浜港(大黒)/神奈川県横浜市鶴見区大黒埠頭	152
久里浜/神奈川県横須賀市久里浜	88
名古屋港(築地)/愛知県名古屋港区築地町	185
名古屋港(金城)/愛知県名古屋港区空見町	195
四日市港/三重県四日市市千歳町	156
大阪港(海岸通)/大阪府大阪市港区海岸通	146
大阪港(南港北)/大阪府大阪市住之江区南港北	153
神戸港/兵庫県神戸市中央区小野浜町	196
六甲アイランド/兵庫県神戸市東灘区向洋町	244
羽田空港 No. 7/東京都大田区羽田空港	119
羽田空港 No. 11/東京都大田区羽田空港	184
羽田空港 No. 12/東京都大田区羽田空港	217
羽田空港 新B横/東京都大田区羽田空港	167

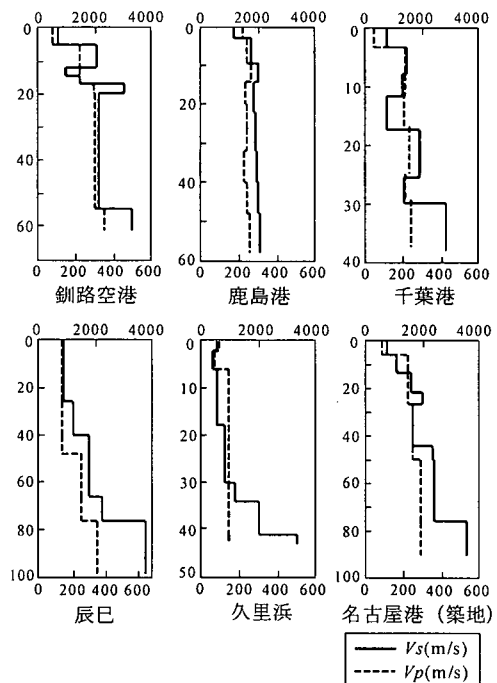


図-1 検討対象地点における地下構造

小さく、半無限の均質な地盤においては、 $\nu=0.33$ の時 $C(\lambda)=0.93 V_s$ 、 $\nu=0.49$ の時 $C(\lambda)=0.95 V_s$ である。

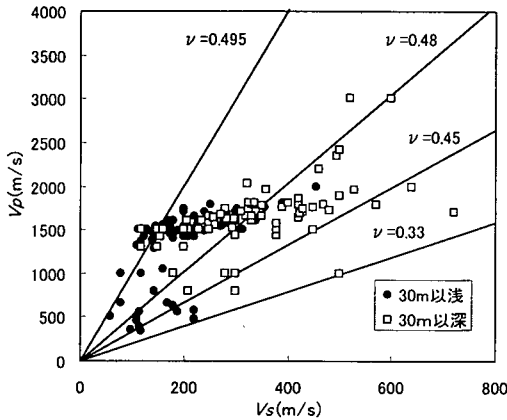


図-2 VsとVpとの相関

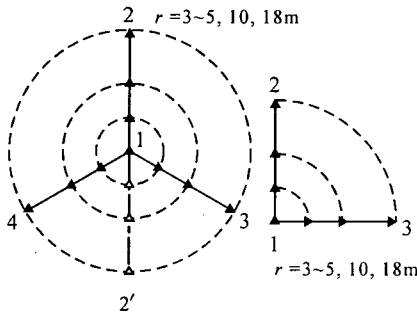


図-3 アレー観測における計測器の配置

## (2) 観測方法

本研究においては、まずアレー半径としては基本的に3～5、10、18mの3種類の半径を採用している。次に観測点数であるが、可能な限り図-3に示すように円中心1点に加えて円周上に3点のセンサーを配置した正三角形(2-3-4)のアレーを採用している。正三角形のアレーを組むことが不可能な場合は正三角形の頂点を底辺側に折り返した菱形(2'-3-4)の配置としている<sup>10)</sup>。また、菱形状のアレーを組むことも不可能なため図-3に示すようにL型のアレー配置とした地点が1地点ある。この方法は道路の歩道部分などでも採用できるため、展開しやすいアレー配置であるが、センサー数が少ないことから観測誤差の影響が大きい場合があることが想定される。観測時間は、ひとつのアレー半径について、可能な範囲で長い時間となるよう最大30分としたが、観測の制約上、3～5分程度の観測時間しか確保できなかった地点も幾つか存在する。

## 3. H/V スペクトル

対象地点における地下構造設定精度の確認を行う観点から、微動 H/V スペクトル、基本モードレイリー波 H/V 振幅スペクトルおよび伝達関数の相互比較を行った。

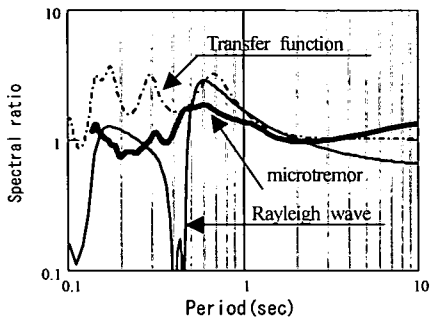
微動 H/V スペクトルは微動波形をもとに、乱れの少ない部分から40.96秒の区間を10分間以内の観測では3区間、それ以上の観測では6または9区間抽出した。水平成分については直角2方向の2乗平均の平方根とした。各区間についてバンド幅0.5HzのParzen ウィンドウで平滑化を行い、H/V スペクトルを求めたうえで、抽出した区間について平均化を行った。次に、地下構造をもとにHaskell<sup>11)</sup>の方法を用いて基本モードレイリー波のH/V振幅スペクトル(以下、レイリー波 H/V スペクトル)を算出した。微動の水平成分および鉛直成分にはレイリー波が卓越していることが期待できる<sup>12)</sup>が、そのような場合、微動 H/V スペクトルとレイリー波 H/V 振幅スペクトルはよい一致を示すことが期待される。さらに、地下構造をもとにして、SH 波重複反射理論を用いて伝達関数を算出した。減衰定数は便宜的に式(4)を用いたが、減衰定数が多少変動しても固有周期は大きく変動することはないと考えられる。

$$h = \frac{2}{\omega} + 0.02 \quad (4)$$

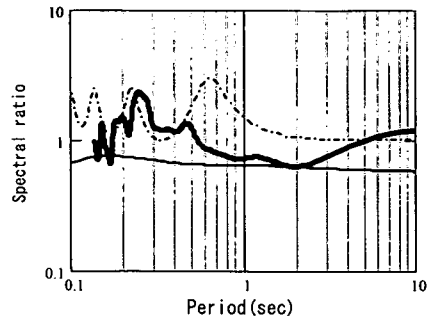
ここに、 $h$  : 減衰定数

$\omega$  : 角周波数(Hz)

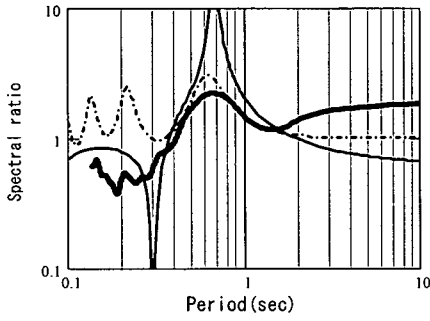
地下構造を示した6地点について、微動 H/V スペクトル、レイリー波 H/V スペクトルおよび伝達関数を図-4に示す。検討対象とした22地点について、3種類のスペクトルの適合度合いを検討すると、概ね良好な一致を示した。特に、微動 H/V スペクトルとレイリー波 H/V スペクトルのピーク周期及び谷周期が調和的な結果を示す地点が多く、そのような地点においては微動にレイリー波が卓越するとともに、地下構造の設定は妥当と判断される。ただし、図-4に示した鹿島港においては、深い構造が明確でなく、かつS波速度のコントラストが低いことから、レイリー波 H/V スペクトルはほぼフラットな形状を示し、ピーク周期が認められない。また、微動 H/V スペクトルには伝達関数に見られる0.6秒付近のピークが認められず、微動 H/V スペクトルから地盤固有周期を判定することは困難である。このような問題は、過去に例えば大町<sup>13)</sup>などによっても報告されている。



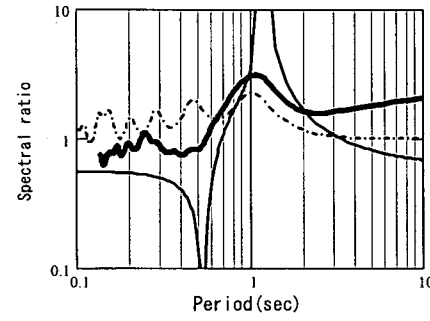
(a) 釧路空港



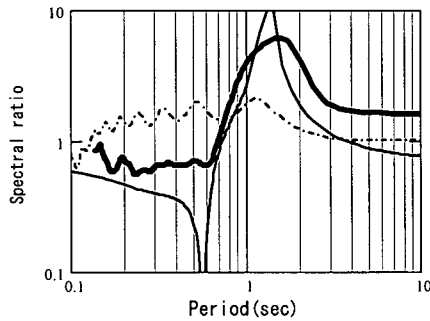
(b) 鹿島港



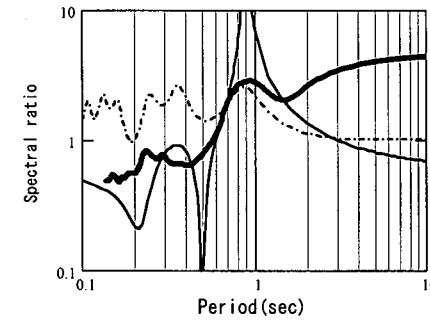
(c) 千葉港



(d) 辰巳



(e) 久里浜



(f) 名古屋港 (築地)

太線：微動H/V スペクトル  
 細線：レイリー波H/V スペクトル  
 鎖線：伝達関数

図-4 スペクトルの対比

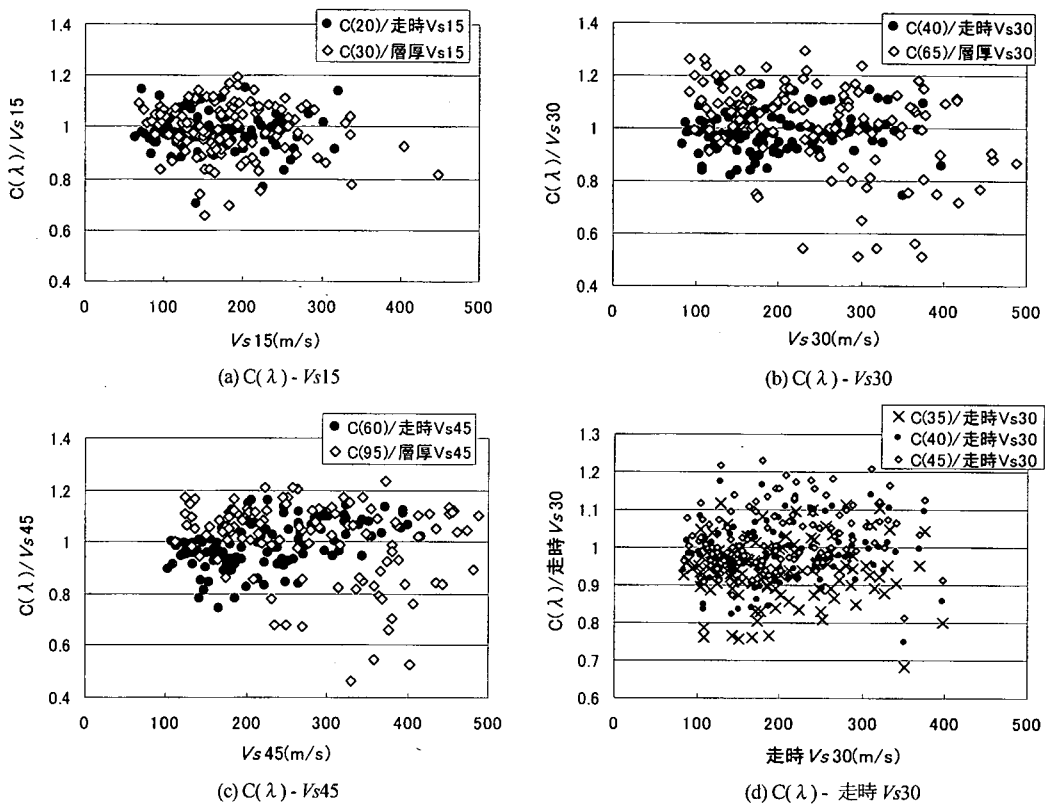


図-5 理論位相速度と平均S波速度の関係

#### 4. 位相速度と平均S波速度の推定

##### (1) 理論位相速度と平均S波速度の関係

大橋・紺野ら<sup>8)</sup>は、東京都、神奈川県内で得られた85地点のPS検層に基づく地盤モデル<sup>7)</sup>を用いて地盤の平均S波速度(走時)と基本モードレイリー波の理論位相速度の関係を調べ、表層厚5~30mの平均S波速度は表層厚+5~10mの波長における基本モードレイリー波の理論位相速度とほぼ一致することを示した。このうち、表層厚5~20mまでは表層厚+5mの波長における理論位相速度、表層厚25~30mでは表層厚+10mの波長における理論位相速度との相関が高いとしている。

本研究においては、大橋・紺野らの85地点のデータに加えて、全国の港湾・空港強震観測網においてPS検層の実施されている40地点を加え、合計125地点について地盤の平均S波速度と基本モードレイリー波の理論位相速度の関係を調べた。また、地盤の平均S波速度については、走時で重み付けした値に加えて、層厚で重み付けした値も検討対象とした。地盤の平均S波速度 $V_{sx}$ は表層厚 $x$ を10mから5m刻みで60mまで求めた。一方基本モードレイリー波の理論位相速度 $C(\lambda)$ は波長 $\lambda$ を10mから5m刻みで100mまで求めた。ある波長における基

本モードレイリー波の理論位相速度と平均S波速度の比を算出し、平均的に比の値が1.0に最も近くなる波長を抽出した。結果を図-5に示す。図-5には、走時 $V_{s30}$ について、対応の良い $C(40)$ に加えて、 $40 \pm 5m$ の波長における基本モードレイリー波理論位相速度との関係をあわせて示した。また、 $C(\lambda)$ と $V_{sx}$ の比の平均値および標準偏差を表-2に示す。

ここでの結果より以下の点が指摘できる。

- ①走時による平均S波速度と対応の良い理論位相速度の波長は、表層10~15mまでは表層+5m、表層20~30mまでは表層+10m、表層35~45mまでは表層+15m、表層50~60mでは表層+20mである。対応の良い理論位相速度と平均S波速度の比の標準偏差は、表層25mまでは0.07、30~35mでは0.08、40m以深では0.09~0.10程度であり、考慮する層厚が厚くなるほど標準偏差は大きくなるが、表層60m程度までは0.10を超えることはない。
- ②層厚による平均S波速度と対応の良い理論位相速度の波長は、表層10mでは波長20m、表層15mでは波長30m、表層20mでは波長45mと深くなるに従って対応する波長が非常に長くなり、表層60mでは波長130mとなる。また、理論位相速度と平均S波速度の比の標準偏差は0.11~0.18と層厚が厚くなるほど大きくなり、同じ層厚

表-2 理論位相速度と平均S波速度の関係

(a) C(λ)/ 走時 V <sub>ss</sub>			(b) C(λ)/ 層厚 V <sub>ss</sub>		
	平均	標準偏差		平均	標準偏差
C(15)/走時 V <sub>s10</sub>	0.973	0.070	C(20)/層厚 V <sub>s10</sub>	0.970	0.112
C(20)/走時 V <sub>s15</sub>	0.974	0.066	C(30)/層厚 V <sub>s15</sub>	0.980	0.119
C(30)/走時 V <sub>s20</sub>	1.017	0.073	C(45)/層厚 V <sub>s20</sub>	1.014	0.150
C(35)/走時 V <sub>s25</sub>	1.000	0.071	C(55)/層厚 V <sub>s25</sub>	1.009	0.160
C(40)/走時 V <sub>s30</sub>	0.984	0.075	C(65)/層厚 V <sub>s30</sub>	1.008	0.170
C(50)/走時 V <sub>s35</sub>	1.011	0.083	C(75)/層厚 V <sub>s35</sub>	1.006	0.170
C(55)/走時 V <sub>s40</sub>	0.997	0.086	C(85)/層厚 V <sub>s40</sub>	1.003	0.166
C(60)/走時 V <sub>s45</sub>	0.987	0.088	C(95)/層厚 V <sub>s45</sub>	1.006	0.153
C(70)/走時 V <sub>s50</sub>	1.010	0.091	C(105)/層厚 V <sub>s50</sub>	0.997	0.159
C(75)/走時 V <sub>s55</sub>	0.995	0.092	C(115)/層厚 V <sub>s55</sub>	0.987	0.166
C(80)/走時 V <sub>s60</sub>	0.986	0.095	C(130)/層厚 V <sub>s60</sub>	1.008	0.173

における走時による平均S波速度における値と比較するとばらつきが大きい。

③以上により、位相速度より直接推定が可能な平均S波速度は走時により重み付けした値であり、層厚で重み付けした平均S波速度を位相速度から直接推定することは、ごく表層を除いては精度的に問題がありそうである。

(2) 観測位相速度

アレー観測結果に空間自己相関法を適用することにより得られる基本モードレイリー波の位相速度（以下、観測位相速度）を算出した。地下構造を示した6地点における観測位相速度を図-6に示す。解析においては、観測記録を50%重なるの40.96秒の区間に分割して空間自己相関係数を算出した。算出された空間自己相関係数をもとにr=10, 18mの場合は0.6Hz, r=3, 5mの場合1.6Hzのバンド幅のParzenウィンドウを用いてスペクトルの平滑化を行った。短いアレー半径の場合にバンド幅を広げたのは、短周期側において滑らかな観測位相速度を得ることを期待したためである。図中には、地下構造をもとに算出される基本モードレイリー波の理論位相速度を併せて示す。アレー半径によって観測可能な波長範囲が異なり、一般的には式(5)の関係があるとされている<sup>14)</sup>。各アレー半径において、周期が長くなるにつれて観測位相速度が減少し、理論位相速度との差が生じる周期における波長が観測限界波長に相当する。

$$2r \leq \lambda \leq 10r \tag{5}$$

ここに、r : アレー半径(m)  
λ : 波長(m)

図-6に示した結果より、次の点が指摘できる。

①観測位相速度と理論位相速度は概ね調和的である。

②観測位相速度が理論位相速度を上回り、かつ周期の変化に伴って観測位相速度が上下に大きく変動する場合は、高次モードの混入率が高い可能性がある。そのような場合、上下に変動する観測位相速度の下限値は、理論位相速度にほぼ一致することが多い（例：千葉港、辰巳、名古屋港（築地））。

③空間自己相関法を適用する場合、観測可能な波長の最大値はアレー半径の10~15倍程度であることが多い。また、観測可能な波長の最小値は、アレー半径が10m以上の場合には概ねアレー半径の2倍であるが、アレー半径が5m程度以下の場合には、半径の2倍程度の波長の波を検出できない場合が多い。

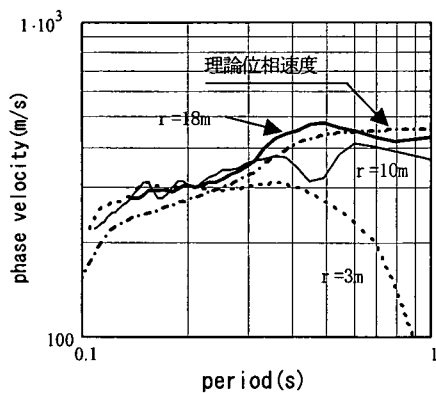
(3) 平均S波速度の推定

観測位相速度を用いて地盤の平均S波速度を直接推定する手法の精度について検討する。まず、前述のように地盤種別分類などで用いられる可能性の高いV<sub>s30</sub>について検討する。

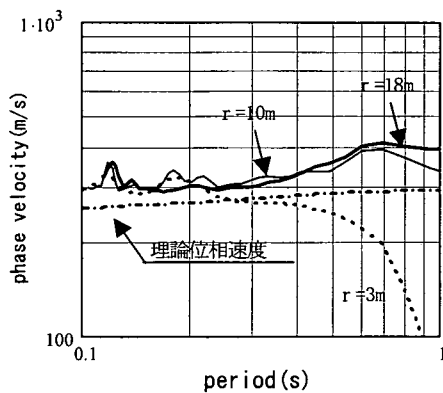
アレー観測によるV<sub>s30</sub>（以下、微動V<sub>s30</sub>）は表-2に示したように、走時V<sub>s30</sub>については波長40m、層厚V<sub>s30</sub>については波長65mの等波長線と観測位相速度の交点により推定することができる。なお、観測位相速度にばらつきがあり、読みとりの際にやや困難を伴うケースとその対処法については以下の通りとした。

①観測位相速度が周期の変化に伴って大きく変動する場合は、変動する観測位相速度のほぼ下限値を結ぶ滑らかな線を観測位相速度とした。

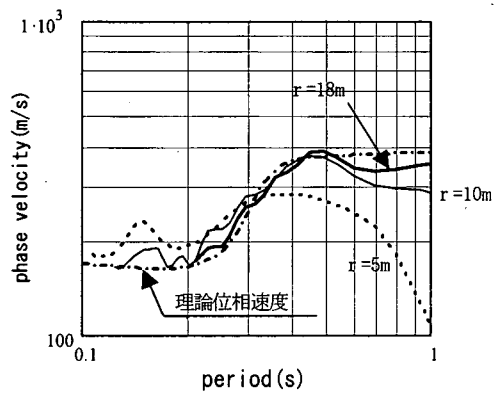
②アレー半径により観測位相速度に違いが大きい場合は、式(5)に示した観測限界波長に注意した上で、有効なアレー半径による観測位相速度の平均的な値を観測位相速度とした。図-7に上記①、②の処理とC(20)、C(40)の読みとり例を示す。



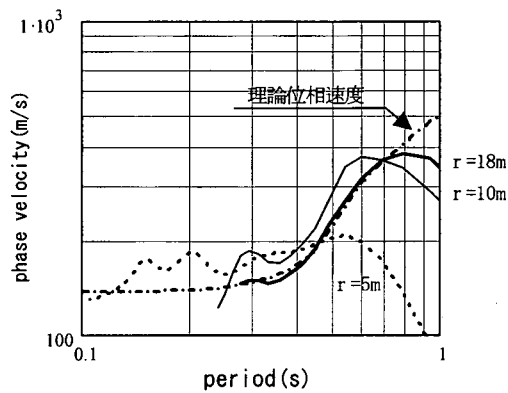
(a) 釧路空港



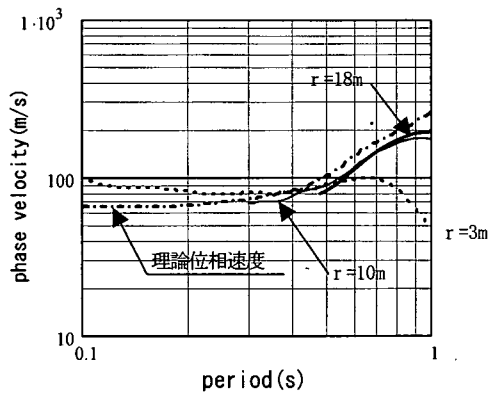
(b) 鹿島港



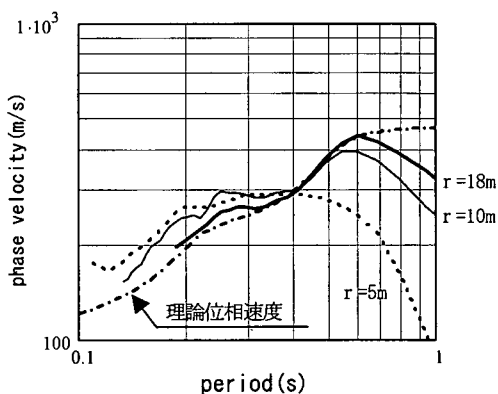
(c) 千葉港



(d) 辰巳



(e) 久里浜



(f) 名古屋港 (築地)

太線：半径 18m；細線：半径 10m

点線：半径 3 または 5m

鎖線：理論位相速度

図-6 観測位相速度

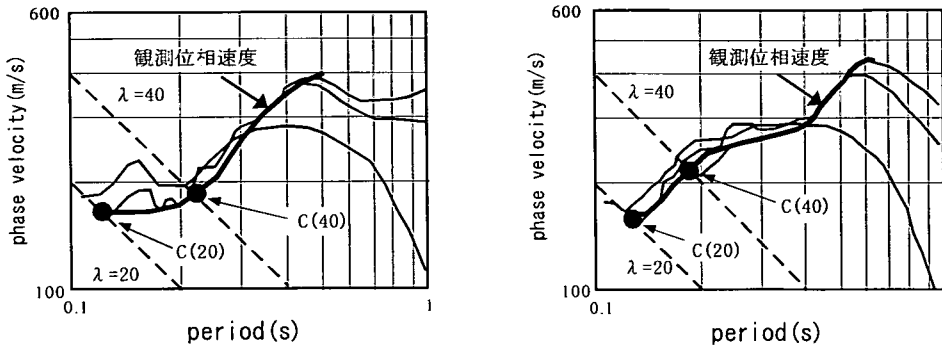


図-7 観測位相速度の設定例

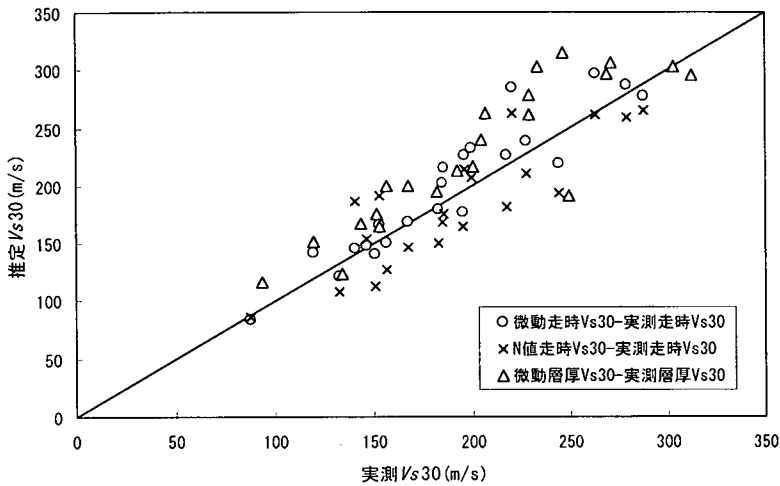


図-8  $V_{s30}$  の実測値と推定値の比較

PS 検層の実施には経済的な負担が大きいことから、 $V_s$  をN値から推定することが多い。このため、N値より換算した  $V_s$  による走時  $V_{s30}$  (以下、N値走時  $V_{s30}$ ) とPS 検層より得られる  $V_s$  による走時  $V_{s30}$  (以下、実測走時  $V_{s30}$ ) の比較をあわせて行った。換算においては、Imai<sup>15)</sup> による式を用いたが、特定の地域におけるN値と  $V_s$  の関係式が示されている場合はその提案式を用いることとし、名古屋港については正木ら<sup>16)</sup>、神戸港では多田ら<sup>17)</sup>の式を用いて換算を行った。観測地点のうち1地点においてはN値の実測データがないため、サンプル数は21である。

$V_{s30}$  の推定精度を図-8に示す。図より、微動による走時  $V_{s30}$  の推定精度が高いことがわかる。ただし、釧路空港や鹿島港などにおいて、微動走時  $V_{s30}$  が実測走時  $V_{s30}$  よりもやや大きい。これらの地点では微動短周期成分に

高次モードが混入し、その結果、基本モード観測位相速度の算出精度が悪い可能性がある。この点については今後の検討課題であるが、固有周期を微動H/Vスペクトルより判別することが困難であった鹿島港のような地盤においても、平均S波速度を微動アレー観測より推定することは可能であるといえる。次にN値走時  $V_{s30}$  については、平均的に実測走時  $V_{s30}$  に近い値を取るものの、ややばらつきが大きい。N値走時  $V_{s30}$  と実測走時  $V_{s30}$  の比の標準偏差は0.15となり、微動による場合の比の標準偏差0.10と比べると精度が低いと判断される。また、微動層厚  $V_{s30}$  は平均的に1.0を上回る傾向にあり、やや精度が低い結果となった。推定精度をまとめると表-3の通りである。



表-3  $V_{s30}$  推定精度

	比の値の範囲	平均値	標準偏差
微動走時 $V_{s30}$ 実測走時 $V_{s30}$	0.90~1.29	1.04	0.10
微動層厚 $V_{s30}$ 実測層厚 $V_{s30}$	0.77~1.30	1.13	0.13
N 値走時 $V_{s30}$ 実測走時 $V_{s30}$	0.74~1.33	0.96	0.15

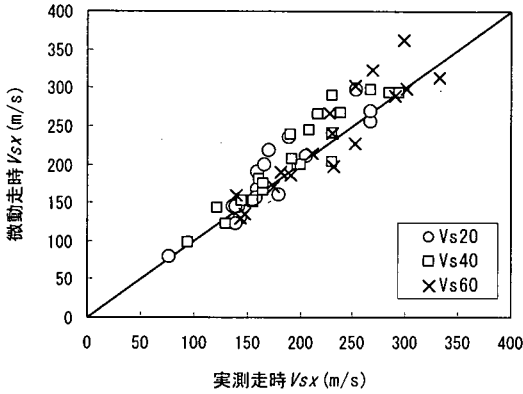


図-9  $V_{s10}$  などの推定精度

次に、走時  $V_{s10}$  などの、その他の表層の走時による平均S波速度の微動による推定精度についても同様の検討を行う。30mに限らず、他の層厚に関する平均S波速度の推定精度も高いことが確認できれば、今後この結果を用いて地下構造の推定を精度良く行うことが可能であることが示唆されるためである。 $V_{s20}$ ,  $V_{s40}$ ,  $V_{s60}$  に関する結果を図-9に、各  $V_{sx}$  に関する結果を表-4に示す。

観測位相速度からの推定においては、それぞれ表-2に示した波長より読みとっている。また、各地点毎に観測限界波長が異なるため、深さ毎の平均S波速度の推定可能地点数は異なる。検討結果より、概ね各深さの平均S波速度の推定精度は良好で、微動走時  $V_{sx}$  推定値と実測走時  $V_{sx}$  の比の標準偏差は0.10~0.13の範囲にあり、精度がかなり高いことが分かる。また、比の平均値は概ね1.05前後であった。

(4) 高次モードの影響

これまでの検討において、特に短周期側で観測位相速度に乱れが生じ、かつ観測位相速度の推定精度が悪くなる例が見られた。この理由として、微動における高次モードレイリー波の混入の影響が考えられる。このため、辰巳における観測結果を例にして、図-10に空間自己相関係数  $\rho$  の観測値を示すとともに、PS 検層より得られる

表-4  $V_{s10}$  などの推定精度

	比の値の範囲	平均値	標準偏差
微動走時 $V_{s10}$ 実測走時 $V_{s10}$	0.79~1.10	0.95	0.13
微動走時 $V_{s15}$ 実測走時 $V_{s15}$	0.82~1.18	1.00	0.12
微動走時 $V_{s20}$ 実測走時 $V_{s20}$	0.88~1.27	1.05	0.12
微動走時 $V_{s25}$ 実測走時 $V_{s25}$	0.89~1.31	1.05	0.11
微動走時 $V_{s30}$ 実測走時 $V_{s30}$	0.90~1.29	1.04	0.10
微動走時 $V_{s35}$ 実測走時 $V_{s35}$	0.88~1.26	1.07	0.10
微動走時 $V_{s40}$ 実測走時 $V_{s40}$	0.90~1.25	1.06	0.10
微動走時 $V_{s45}$ 実測走時 $V_{s45}$	0.90~1.26	1.05	0.10
微動走時 $V_{s50}$ 実測走時 $V_{s50}$	0.87~1.26	1.07	0.11
微動走時 $V_{s55}$ 実測走時 $V_{s55}$	0.86~1.24	1.05	0.11
微動走時 $V_{s60}$ 実測走時 $V_{s60}$	0.85~1.22	1.03	0.12

地下構造をもとにした各アレー半径における基本モードおよび一次高次モードレイリー波に関する空間自己相関係数の理論値をあわせて示す。

18m 半径の記録を見ると、3 Hz 以上の周波数帯で観測空間自己相関係数に乱れが顕著である。この場合、観測空間自己相関係数のうちひとつについては一次高次モード側にシフトし、逆に他の観測空間自己相関係数については3 Hz あたりおよび4~5 Hz において基本モード理論空間自己相関係数を下回る値を示している。このため3つの観測空間自己相関係数を平均すると5 Hz 程度までは観測空間自己相関係数と理論空間自己相関係数がほぼ一致している。しかしながら、アレー半径10mの場合は、3~4 Hz および5 Hz 以上の周波数帯において観測空間自己相関係数が高次モード側にシフトする成分が多く、高次モードの影響を受けている可能性が高いと考えられる。基本モード観測位相速度の算出精度の向上のため、今後高次モードの影響を分離する方法を慎重に検討する必要があるといえる。

5. まとめ

本研究により得られた知見をまとめると以下の通りで

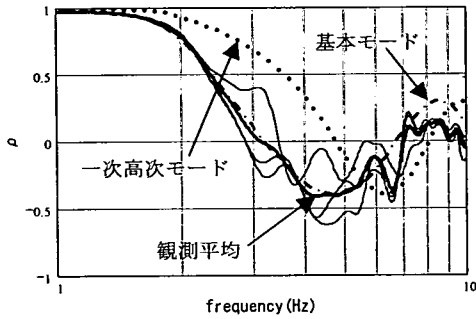
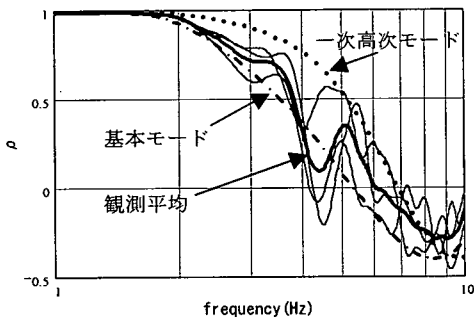


図-10(a) 空間自己相関係数の比較 (辰巳 ( $r=18m$ ))



鎖線：基本モード理論空間自己相関係数  
 点線：一次高次モード理論空間自己相関係数  
 細線：観測空間自己相関係数  
 太線：観測空間自己相関係数の平均

図-10(b) 空間自己相関係数の比較 (辰巳 ( $r=10m$ ))

ある。

①走時および層厚により重み付けした平均S波速度と対応の良い理論位相速度の波長を示した。対応の良い波長における理論位相速度と走時による平均S波速度の比の標準偏差は、考慮する層厚が厚くなるほど大きくなるが、表層60m程度までは0.10を超えることはない。ただし、層厚による平均S波速度については、比の標準偏差は0.11~0.17となり、同じ層厚における走時による平均S波速度における結果と比較してばらつきが大きい。このため、位相速度より直接推定が可能な平均S波速度は走時により重み付けした値であり、層厚で重み付けした平均S波速度を位相速度から直接推定することは、ごく表層を除いては精度的に問題がある。

②全国の港湾・空港22地点を対象とした検討結果より、常時微動アレー観測により得られる観測位相速度から地盤の平均S波速度を精度良く直接推定できることが分か

った。観測位相速度による微動走時  $V_{sx}$  と実測走時  $V_{sx}$  の比の標準偏差は0.10~0.13の範囲にあり、精度がかなり高い。

③N値からの換算によるN値走時  $V_{s30}$  とPS検層による実測走時  $V_{s30}$  の比は平均的には1.0に近いものの、標準偏差は0.15となり、微動アレー観測による場合の比の標準偏差0.10と比較するとばらつきが大きい。このため、平均S波速度を推定するためには微動アレー観測による方が精度がよいことが期待される。

④地盤のS波速度のコントラストが明瞭でない鹿島港のような地盤においては、微動H/Vスペクトルより固有周期を判別することが困難な場合がある。しかしながら、そのような場合においても微動アレー観測により平均S波速度を精度良く推定することができる。

⑤微動アレー観測に空間自己相関法を適用して得られる観測位相速度は、特に短周期側で周期の変化に伴って上下に大きく変動する場合があります、高次モードの混入の影響が考えられる。このため、表層地盤の構造を精度良く推定するにあたり、高次モードの分離の方法について検討する必要がある。

地盤の平均S波速度は、耐震設計上の地盤種別の分類に適用できるほか、サイスマックゾーンネーションの際の重要な指針となりうる。港湾および空港地盤を対象とした検討により、この値を容易かつ経済的に測定できることが明らかになったことで、今後実務面での広範囲な適用が期待されることである。今後は、本研究で対象としなかったI種地盤に対する適用性について検討するとともに、高次モードの影響を分離する方法を確立した上で、観測位相速度から表層地盤のS波速度分布の推定を行う手法を確立するための研究を行う予定である。

謝辞：常時微動観測の実施におきまして、国土交通省港湾技術研究所西守研究員、佐藤研究員、芝浦工業大学学部生大出哲也氏、片野隆史氏、津留崇氏（いずれも観測当時）をはじめとする方々ならびに関係機関の協力を頂きましたことに感謝します。

#### 参考文献

- 1) 例えば、第2回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、文部科学省、2001。
- 2) 例えば、Sato, T., Kawase, H., Matsui, M. and Kataoka, S.: Array measurement of high frequency microtremors for underground estimation, Proc. of the 4<sup>th</sup> international Conference on Seismic Zonation, Vol.2, pp.409-416, 1991.
- 3) Building Seismic Safety Council(BSSC): NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new

- buildings, part I: Provisions, developed for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1994.
- 4) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.442, pp.71-78, 1992.
  - 5) 田村 勇, 山崎文雄, ホスロウTシャベスタリ: K-NET地震記録を用いた地盤増幅度と平均S波速度の関係, 生産研究, 52巻12号, pp.12-15, 2000.
  - 6) 岡田 廣, 松島 健, 森谷武男, 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, Vol.43, No.6, pp.402-417, 1990.
  - 7) 紺野克昭, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集, No.647, 1-51, pp.415-423, 2000.
  - 8) 大橋明如, 紺野克昭, 片岡俊一, 齊藤正樹: 地盤の平均S波速度とレイリー波の位相速度の関係, 土木学会第55回年次学術講演会 I-B347, pp.694-695, 2000.
  - 9) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, *Bulletin, Earthquake Research Institute*, Vol.35, pp.415-456, 1957.
  - 10) 紺野克昭: 地下構造推定に用いる2点間および3点間空間自己相関法に関する理論的検討, 土木学会論文集, No.654, 1-52, pp.367-375, 2000.
  - 11) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull., Seismol. Soc. Am.*, 43, pp.17-34, 1953.
  - 12) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, No.439, pp.81-87, 1992.
  - 13) 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, 1-27, pp.251-260, 1994.
  - 14) 宮腰 研, 岡田 広, 凌 魁群: 微動探査法における推定可能な微動中の表面波位相速度の波長範囲, 科研報告(地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究), pp.73-79, 1997.
  - 15) Imai, T.: P and S wave velocities of the ground in Japan, *Proc. IXth ICSMFE*, 1977.
  - 16) 正木和明, 谷口仁土, 飯田汲事: 地盤内のS波速度, 密度をN値, 地質, 土質から推定する試み, 第17回土質工学研究発表会講演集, 2の2, pp.1541-1544, 1982.
  - 17) 多田公平, 時松孝次, 新井 洋: 神戸市におけるボーリング資料を利用した表層S波速度構造推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp.317-318, 1996.

(2001. 3. 27 受付)

## ESTIMATION OF AVERAGE S-WAVE VELOCITY OF GROUND BY USE OF MICROTREMOR ARRAY OBSERVATION

Takashi NAGAO and Katsuaki KONNO

The present study concerns the application of microtremor array observation to the evaluation of average S-wave velocity of the ground. Twenty-two sites were picked up for the study, at which distributions of S-wave velocity were known. Average S-wave velocities estimated with the microtremor observation have been compared with those obtained by the elastic wave exploration; the result shows very good coincidence. It is concluded that from the viewpoint of easiness and cost-effectiveness, microtremor measurement is highly applicable to the evaluation of S-wave distribution of the ground, which is essential for earthquake resistant design of the structures and seismic zonation.