物理探査　第55巻第5号（2002）363-373頁　　BUTSURI-TANSA, Vol. 55 No. 5 (2002) pp. 363-373

微動アレー探査における周波数-波数スペクトル法と空間自己相関法から推定したRayleigh波の有効波長範囲の上限の検討

小渕卓也*・山本英和**・斎藤徳美**

An experimental study on the upper limits of wavelength of Rayliegh wave estimated by the Frequency-Wavenumber spectrum method or the Spatial Autocorrelation method using a microtremor array technique

Takuya Obuchi*, Hidekazu Yamamoto and Tokumi Saito****

ABSTRACT

In a microtremor array technique phase velocities must be obtained in a wide-range of wavelength in order to estimate underground structures precisely. Frequency-wavenumber spectrum (F-K) method and Spatial auto-correlation (SPAC) method are used to estimate phase velocities of surface waves in microtremors. Recent studies using techniques of numerical simulation or field experiment show that SPAC method can observe longer wavelength possible to estimate phase velocities in microtremors than F-K method. We also examine and discuss the upper limits of wavelength calculated using microtremor array data by the two kinds of methods.

For the above purpose, microtremor array observations were carried out in four sites of Morioka city, Iwate Prefecture. The array configuration is a triangle with seven vertical seismometers. The array size defined by the distance between a center and an apex of the triangle ranges from 10 m to 100 m. Three or four arrays with different sizes were used at one observation site. Phase velocities of Rayleigh wave in microtremors were observed by F-K method and SPAC method. We defined a standard phase velocity which was calculated from all the array records at one site. To estimate the upper limits of wavelength, a residual between standard phase velocity and observed phase velocity for each array was defined within 0.1. The range of the estimated upper limits of wavelengths by F-K method were from 2.3 to 6.8 times for a distance between a center and an apex of the triangle array, and those by SPAC method were ranging from 3.2 to 17.2 times. These results show that SPAC method can observe longer wavelength possible to estimate phase velocities in microtremors than F-K method.

Key words: upper limits of Rayleigh wavelength, Frequency-Wavenumber spectrum method, Spatial Autocorrelation method, microtremor array technique

1. はじめに

微動アレー探査は，常時微動を群列地震計配置（アレー）で観測を行い，微動に含まれる表面波の位相速度を推定し，その分散関係から地下速度構造を推定する手法である。本探査法は，都市部における地下弾性波速度構

2000年10月24日原稿受付；2002年9月2日受理
物理探査学会第102回（平成12年度春季）学術講演会にて一部を発表
* 岩手大学大学院工学研究科
〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5
** 岩手大学工学部建設環境工学科
〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5

©2002 SEGJ

Manuscript received October 24, 2000; Accepted September 2, 2002
A part of this paper was presented at the 102th SEGJ conference, 2000.
* Graduate School of Engineering, Iwate University.
4-3-5, Ueda, Morioka, 020-8551, Japan.
** Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University.
4-3-5, Ueda, Morioka, 020-8551, Japan.

造の推定に有効であるとされ，研究が行われている (Horike, 1985; Matsushima and Okada, 1990；山本ほか, 1997；松岡ほか, 2000)。

微動アレー探査に用いる表面波の位相速度は，波の長波長成分が深部の，短波長成分が浅部の地下構造を反映している。そのため，短波長から長波長までの広い波長範囲の位相速度を得ることにより，地下構造を精度良く推定することができる。また，微動アレー探査では，必要とする波長に見合った大きさのアレーで観測を行う。そのため，推定可能な位相速度の波長範囲が解析手法によって異なるならば，長波長成分の位相速度が推定できる解析法が，微動アレー探査にとってより有効となる。

通常，位相速度の推定には，周波数-波数スペクトル法（F-K 法：LaCoss et al, 1969; Capon, 1969）と空間自己相関法（SPAC 法：Aki, 1957）が用いられる。宮腰（1995）では，数値シミュレーションにおいて地下構造モデルを仮定して F-K 法と SPAC 法から得られる位相速度の波長範囲を議論した。求められた最大波長は，実際の観測として考えられる波が多方向および多数入射するという条件のもとでは，F-K 法でアレー半径の3倍から7倍，SPAC 法で10倍から14倍という結果を示している。一方，実際の微動アレー探査に適用した例として，2箇所の微動観測結果から求められた最大波長は，F-K 法でアレー半径の5倍，SPAC 法で10倍という結果を得ている。しかし，推定可能な位相速度の波長範囲の上限が，数値シミュレーションでは幅をもつ結果を示しているのに対し，より有効と考えられる実際の微動観測から得られた結果は，幅を持たずに示されている。この理由として，実験を行った場所の地下構造に大きな違いがないことが考えられる。

微動アレー探査において，推定可能な波長範囲の上限を検討するためには，微動アレー観測から得られる位相速度の性質を考慮する必要がある。その性質とは，得られた位相速度は，アレーを展開した直下の平均的な地下構造の影響を受けることである。大きさが大きく異なるアレーで観測を行った場合には，直下の平均的な地下構造が変化する場合が考えられる。そのためには，大きなアレーの中に小さなアレーが中心点共通という条件のもとで観測を行う必要があるとともに，大きさが大きく異ならない複数のアレーを密に展開する必要がある。また，Rayleigh 波の分散曲線は，地下構造の違いにより異なる形状を示すために，地質的に異なる場所における検討が必要となる。

そこで，上記の問題を詳細に検討するために，本研究は，大きさの異なる複数のアレーを密に展開した。しかも，地下構造が異なると考えられる複数の場所で観測した微動データを使用し，F-K 法と SPAC 法により求められる位相速度の長波長側における推定可能な波長範囲の上限の違いを定量的に明らかにすることを目的に行った。そのために以下のような実験を行った。すなわち，岩手県盛岡市周辺の4箇所において3種類あるいは4種類の大きさの異なるアレーを展開した。この4箇所は，異なる地質条件を示し，地下構造も多様である（山本ほか, 1997)。各観測場所ごとの観測は，先に述べた中心点共通の条件のもとで，サイズの違いを比べた時に約2倍となる密なアレー展開をした。このアレー微動データを用いて，F-K 法と SPAC 法により位相速度の解析を行い，波長範囲の上限に関して検討を行った。そして，F-K 法と SPAC 法の推定可能な波長の上限を詳細な観測データから定量的に示した。

2. 観測場所および観測方法

微動のアレー観測を行った場所の位置図を Fig. 1 に示す。観測を行ったのは，盛岡北高等学校（本文中では MKH と呼ぶ，以下同様），盛岡南高等学校（MMH），盛岡工業高等学校（MTH）および岩手大学工学部（IUE）の4箇所のグランドである。

MKH と MMH では3種類，MTH と IUE では4種類の中心点を共有した大きさの異なるアレーを展開した。アレーは Fig. 2 に示すように固有周期1秒の地震計7台を展開した。サンプリング周波数は 50 Hz で観測時間は20分から40分である。アレーの大きさを三角形の中心点の地震計と頂点の地震計の距離を Table 1 に

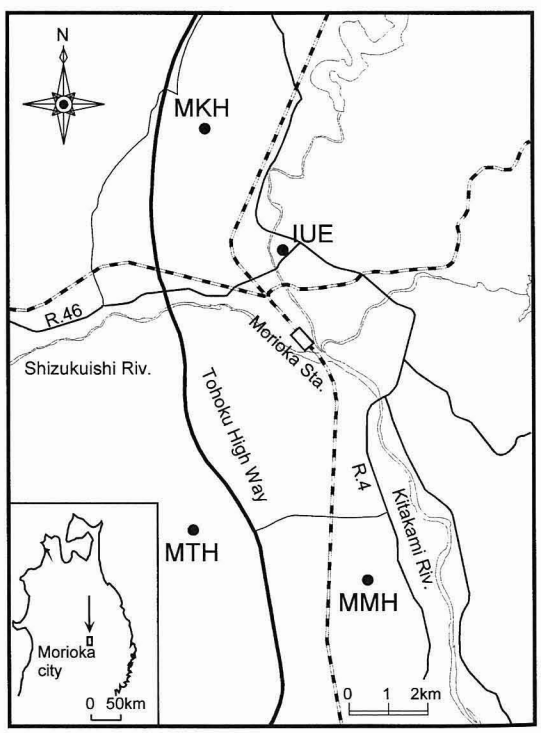


Fig. 1 Location map for array observation sites. Solid circles denote observation sites. MKH denotes Morioka Kita high school, MMH denotes Morioka Minami high school, MTH denotes Morioka technical high school and IUE denotes Faculty of Engineering, Iwate University.

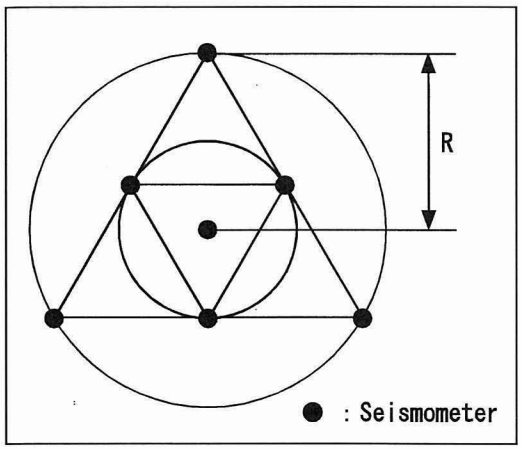


Fig. 2　The schematic configuration of the array used at all observation sites. Solid circles denote seismometer locations. R is defined by a distance between a center and an apex of the array.

Table 1　List of radius (R) for the array in each observation site. The unit is meter.

unit : m

Site	array A	array B	array C	array D
MKH	48.0	24.0	12.0	-
MMH	80.0	40.0	20.0	-
MTH	80.0	40.0	20.0	10.0
IUE	100.0	50.0	24.0	12.0

示す。この距離はFig. 2のR（以後，アレー半径と呼ぶ。）に相当する。アレーは大きいアレーから小さいアレーに向かってアレーA，アレーB，アレーC，アレーDと呼ぶ。アレーの大きさの相互関係は，最も小さなアレーDを基準とするとアレーCで約2倍，アレーBで約4倍，アレーAで約8倍となる。

3.　解析方法

F-K法とSPAC法は，微動に含まれるRayleigh波の位相速度の推定法である。それぞれの推定方法を以下に説明する。

(1)　F-K法

F-K法での位相速度の推定は，最尤法（MLM, Capon, 1969）による解析方法を用いた。MLMによるF-Kスペクトルの推定量$P(f,\boldsymbol{k})$は

$$P(f,\boldsymbol{k})=\left\{\sum_{m=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}q_{lm}(f)\exp\left[-i\boldsymbol{k}(\boldsymbol{r}_m-\boldsymbol{r}_l)\right]\right\}^{-1} \tag{1}$$

である。ここで，fは周波数，$\boldsymbol{k}$は波数ベクトル，Nは観測点個数，$\boldsymbol{r}_l$はl番目の観測点の座標を示す。q_{lm}はN行N列のマトリックスでl番目とm番目とのクロススペクトルの逆行列である。周波数fにおける位相速度cは，$P(f,\boldsymbol{k})$の値が最大となる波数の絶対値$|\boldsymbol{k}|$と周波数fから計算される（(2)式）。

$$c=\frac{f}{|\boldsymbol{k}|} \tag{2}$$

観測により得られた微動アレーデータから，1区間40.96 secを基準に比較的安定していると思われる区間を20区間程度選定した。そして，各区間ごとにFFTによりクロススペクトルを計算し平均化を行い，F-Kスペクトルを求め，各アレーごとの位相速度を推定した。位相速度の解析は0.1 Hz間隔で行った。

(2)　SPAC法

SPAC法における位相速度推定の解析には，空間自己相関係数を算出する際のクロススペクトルの計算にARmodelを適用した山本ほか（1998）の方法を用いた。空間自己相関係数の観測値$\rho(\omega,r)$は(3)式で計算される。

$$\rho(\omega,r)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\mathrm{Real}\,(S_{ij}(\omega,r,\theta))}{\sqrt{S_{ii}(\omega,r,\theta)S_{jj}(\omega,r,\theta)}}d\theta \tag{3}$$

S_{ii}　基準点の微動のパワースペクトル
S_{jj}　円周上にある一点の微動のパワースペクトル
S_{ij}　二点の微動のクロススペクトル
r　相関距離
ω　角周波数

また，空間自己相関係数$\rho(\omega,r)$は，理論的に(4)式で表現される（Aki, 1957）。

$$\rho(\omega,r)=J_0(rk) \tag{4}$$

J_0　第1種0次のBessel関数
k　Rayleigh波波数

上記の(3)式を用いて微動データから空間自己相関係数の観測値を求め，(4)式の理論値を適合することにより，位相速度を求める。本研究では，位相速度を求める際に，複数の相関距離の空間自己相関係数から最小2乗法的に位相速度を求める「拡張空間自己相関法」（凌, 1994）を用いた。本研究で用いた7台の地震計による正三角形アレーは，Fig. 3に示すように5種類の相関距離を得ることができる。この5種類の相関距離の空間自己相関係数を同時に用いて位相速度を推定した。位相速度の解析は0.1 Hz間隔で行った。

(3)　有効波長範囲の上限の推定

上記の解析により得られた位相速度から推定可能とみなされる波長の上限を以下の方法で推定した。

本研究では，正確に求めることができる位相速度の波長の範囲を「有効波長範囲」と呼称する。そして，有効

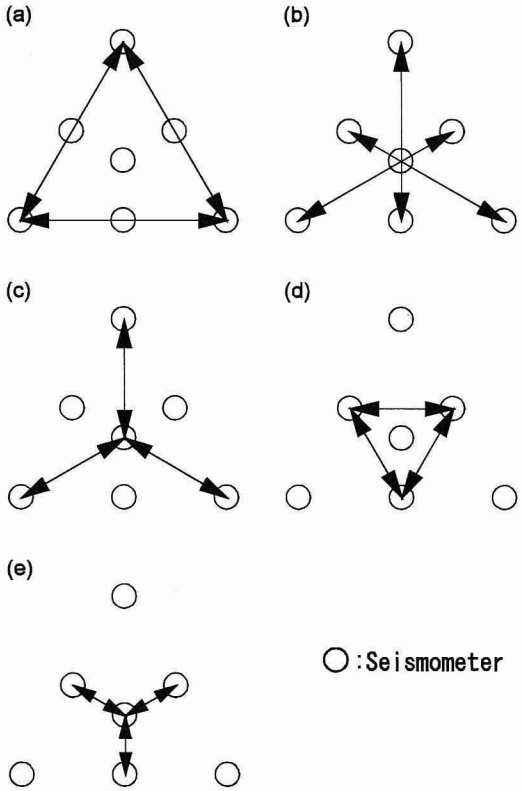


Fig. 3 Five kinds of correlation distance for SPAC method using the configuration of Fig. 2. Open circles denote seismometer locations.

波長範囲の上限の推定を行うために，基準となる位相速度(基準位相速度)を以下のように規定した。すなわち，基準位相速度は，アレーごとに求めた位相速度をアレーの最小地震計間隔から決まる波長範囲の下限（宮腰，1995）および位相速度の連続性を考慮してつなぎあわせたもので，各観測場所でのそれぞれの解析法における仮の真の値とする。また，各観測場所における最大アレーであるアレーAの最大波長に関しては，求めた位相速度の分散関係が連続する周波数までとした。

有効波長範囲の上限は，観測場所毎に，アレーB，アレーC，アレーDからアレー毎に求めた位相速度と基準位相速度とを比較し推定した。このことは，アレー毎に求めた位相速度を，そのアレーサイズのおよそ2倍，4倍あるいは8倍のサイズのアレーから求めた位相速度と比較することになる。本研究では，その位相速度の違いを規格化した速度差として$\Delta V'$と定義した（(5)式）。

$$\Delta V'=\frac{V-V_0}{V_0} \tag{5}$$

Vは個々のアレーから推定した位相速度，V_0は基準位相速度である。各アレーから求められた位相速度と基準位相速度を用いて(5)式により$\Delta V'$を計算する。そして，$\Delta V'$の絶対値がある基準値以下の波長の範囲を有効波長範囲とした。本研究では，その判断の基準値として0.1を採用した。$\Delta V'$の絶対値が0.1以下の場合，アレーの位相速度が正確に求められており，0.1以上は位相速度が正確に求められていないと仮定した。よって，有効波長範囲の上限は，基準値（0.1）以下となる波長範囲内での最大波長となる。

この推定法をそれぞれの観測場所におけるアレーB，アレーCおよびアレーDについてF-K法とSPAC法による位相速度に適用し，有効波長範囲の上限を推定した。

4. 結　果

ここでは，主に観測点MKHにおける解析結果を例として詳細に示す。

4.1 基準位相速度の作成

Fig. 4にF-K法より求められた位相速度を示す。○印はアレーA，△印はアレーB，□印はアレーCそれぞれの微動データから求められた位相速度である。F-K法による位相速度は，低周波側になるに従いアレーサイズの違いによって分散関係に明らかな違いがある。また，Fig. 5にSPAC法による位相速度を示すが，2.5 Hz程度から各アレーでの位相速度の最小周波数までがほぼ一致している。これらのアレーごとに求めた位相速度をつなぎあわせ，F-K法とSPAC法それぞれの基準位相速度を作成する。

F-K法の基準位相速度は，Fig. 6に示すように，アレーAの1.5から3.5 Hz，アレーBの3.6から7.9 Hz，アレーCの8.0から9.8 Hzまでつなぎあわせて作成した。同様にSPAC法は，Fig. 7に示すようにアレーAの1.5から3.0 Hz，アレーBの3.1から5.6 Hz，アレーCの5.7から9.8 Hzまでをつなぎあわせ作成した。

それぞれの基準位相速度には低周波側に顕著な違いがある。MKHにおける両基準位相速度の周波数範囲は，1.5 Hzから9.8 Hzである。分散関係の違いが見受けられるのは周波数2.5 Hzから1.5 Hzと小さくなるに従い位相速度の差が顕著になり，最小周波数の1.5 HzではF-K法の位相速度が速く721 m/secであるのに対し，SPAC法の位相速度は遅く482 m/secとなっている。アレーAにおけるF-K法での長波長の波長の推定限界を，宮腰（1995）における最小値であるアレー半径の3倍で考えた場合，周波数2.5 Hzとなる。このことから，2.5 Hz以下のアレーAにおける位相速度に誤差が含まれている可能性がある。

4.2 F-K法における有効波長範囲の上限の推定

F-K法における有効波長範囲の上限の検討結果は以下の通りである。Fig. 8にアレーBにおける位相速度（△印）を基準位相速度（実線）と比較して示す。矢印は有効波長範囲の上限に対応する周波数を示す。有効波長範囲の上限に対応する周波数は2.8 Hz，位相速度は

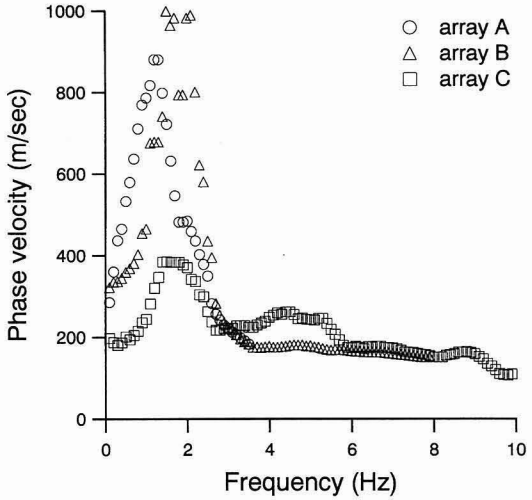


Fig. 4　Observed phase velocities of Rayleigh wave obtained by F-K method as a function of frequency at the site of MKH. Open circles denote observed phase velocities at array A. Open triangles denote observed phase velocities at array B. Open squares denote observed phase velocities at array C.

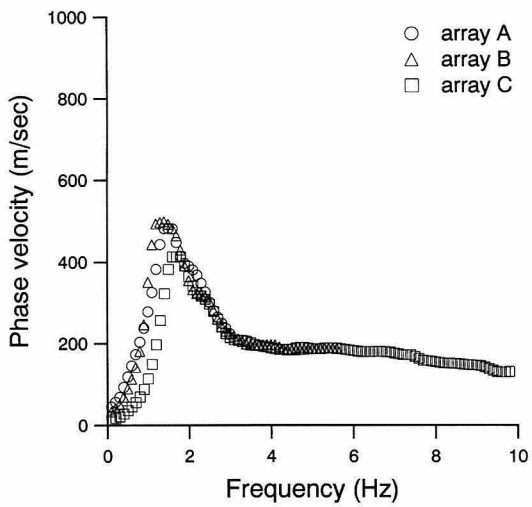


Fig. 5　Observed phase velocity of Rayleigh wave obtained by F-K method. See also the text of Fig. 4.

253 m/sec である。この場合，波長は 90.4 m であり，アレーBのアレー半径の 24.0 m に対し3.8倍である。Fig. 9 にアレーCにおける位相速度（□印）を基準位相速度（実線）と比較して示す。有効波長範囲の上限に対応する周波数は 5.8 Hz，位相速度は 180 m/sec である。この周波数と位相速度での波長は 31.0 m であり，アレーCのアレー半径の 12.0 m に対し2.6倍である。Fig. 10に $\Delta V'$ の周波数変化を示す。△印がアレーBの $\Delta V'$，□印がアレーCの $\Delta V'$ である。有効波長範囲の上限を超えた $\Delta V'$ は，どちらのアレーにおいても基準位相速度に対しそれぞれのアレーにおける位相速度が速くなる方向に変化している。

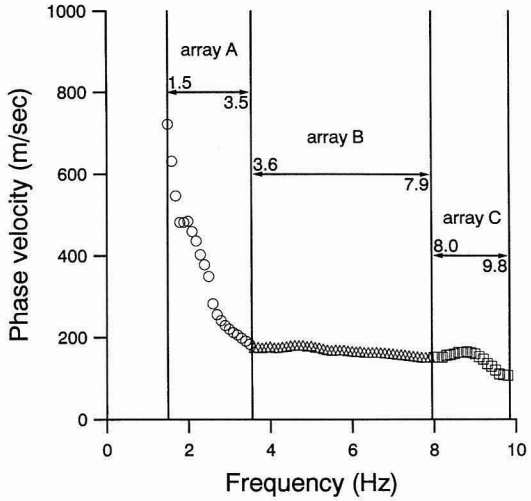


Fig. 6　Standard phase velocities from F-K method at MKH. Standard Phase velocities are made from observed phase velocities at each array. Open circles denote observed phase velocities at array A. Open triangles denote observed phase velocities at array B. Open squares denote observed phase velocities at array C. Both arrows show the frequency range of phase velocity of each array used at standard phase velocity.

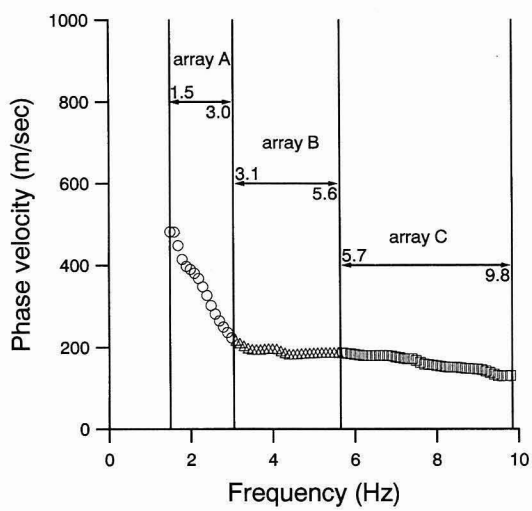


Fig. 7　Standard phase velocities from SPAC method at MKH. See also the text of Fig. 6.

同様の解析を行った他の観測点における $\Delta V'$ を，Fig. 11に示す。F-K法では，MTHのアレーB, IUEのアレーCを除くアレーで有効波長範囲の上限付近から位相速度が見掛け上大きくなる傾向が明確に示された。

Fig. 12に，F-K法の全観測点におけるF-K法の有効波長範囲の上限を示す。有効波長範囲の上限は，アレーごとに求めた有効波長範囲における最大波長をアレー半径で規格化したものである。F-K法の有効波長範囲の上限はアレー半径に対して2.3から6.8倍であった。また，

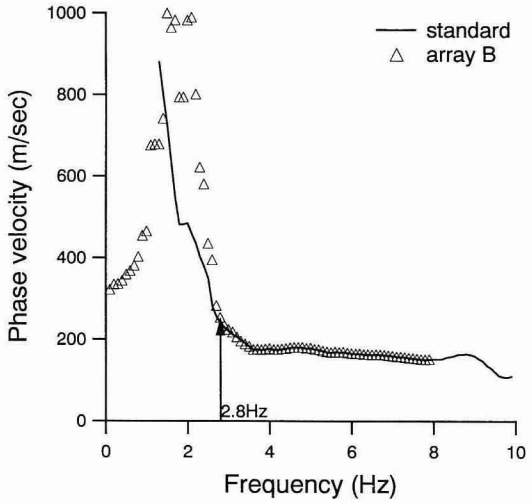


Fig. 8 Standard phase velocities (solid line) and observed phase velocities (open triangles) by F-K method of array B at the site of MKH. Arrow shows the frequency corresponded the upper limit of wavelength.

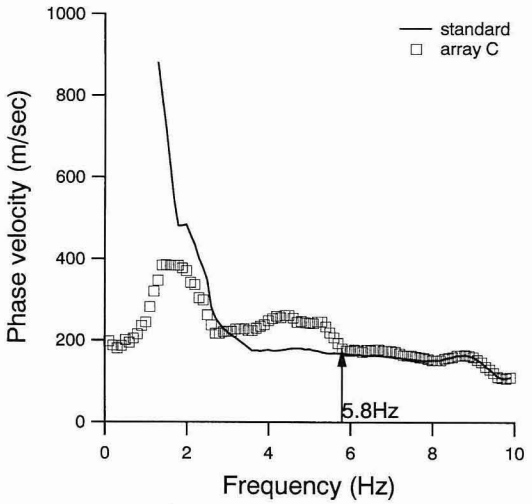


Fig. 9 Standard phase velocities (solid line) and observed phase velocities (open squares) by F-K method of array C at the site of MKH. See also the text of Fig. 8.

MKH, MMH, MTH では，アレー半径が大きくなるに従い有効波長範囲の上限が大きくなる傾向を示した。逆に，IUE では有効波長範囲の上限が小さくなった。

4.3 SPAC 法の有効波長範囲の上限の推定

次に SPAC 法の有効波長範囲の上限についての検討結果を示す。Fig. 13にアレー B における位相速度（△印）を基準位相速度（実線）と比較して示す。矢印で示した有効波長範囲の上限の周波数は 2.3 Hz，位相速度は 320 m/sec である。この周波数と位相速度での波長は 139.1 m であり，アレー B のアレー半径の 24.0 m を

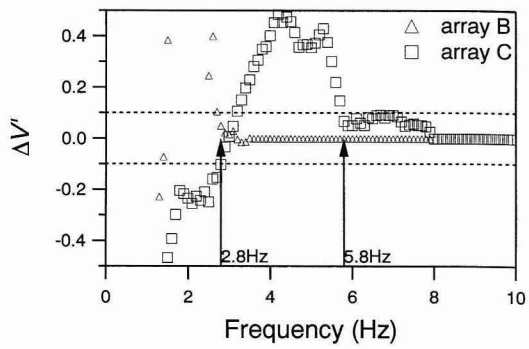


Fig. 10 Residual between standard phase velocities and observed phase velocities at each array by F-K method is shown in this figure. Open triangles denote residual between standard phase velocities and observed phase velocities at array B. Open squares denote residual between standard phase velocities and observed phase velocities at array C. Arrow shows the frequency corresponded the upper limit of wavelength.

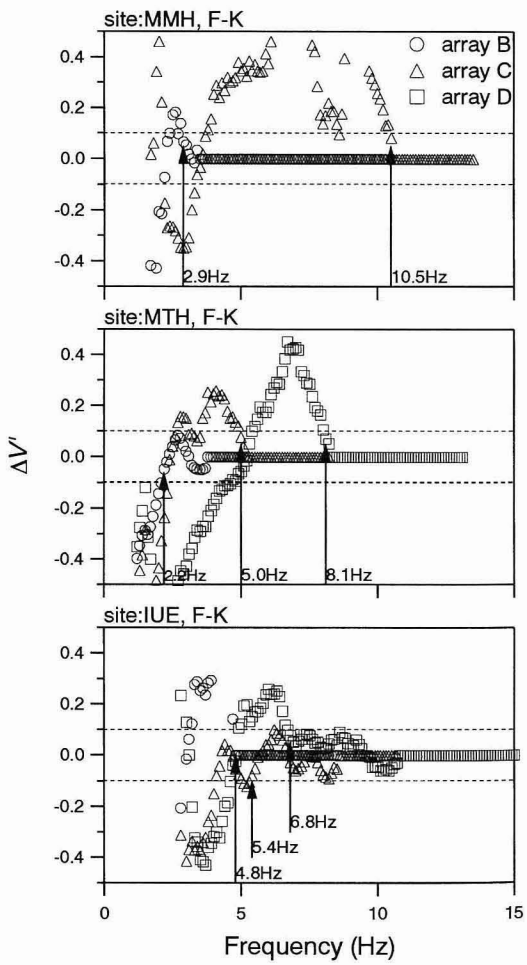


Fig. 11 Residual by F-K method at MMH, MTH and IUE. Open circles denote residual for array B. Open triangles denote residual for array C. Open squares denote residual for array D.

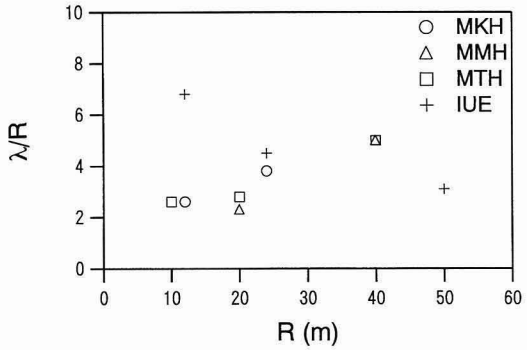


Fig. 12　The normalized upper limits of wavelength (λ/R) estimated from F-K method as a function of R.

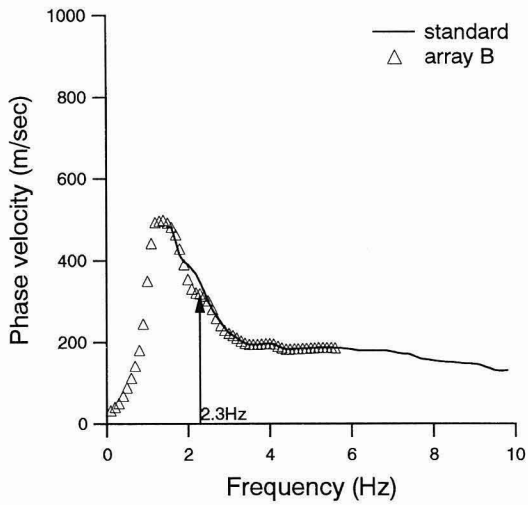


Fig. 13　Standard phase velocities (solid line) and observed phase velocities (open triangles) by SPAC method of array B at the site of MKH. Arrow shows the frequency corresponded the upper limit of wavelength.

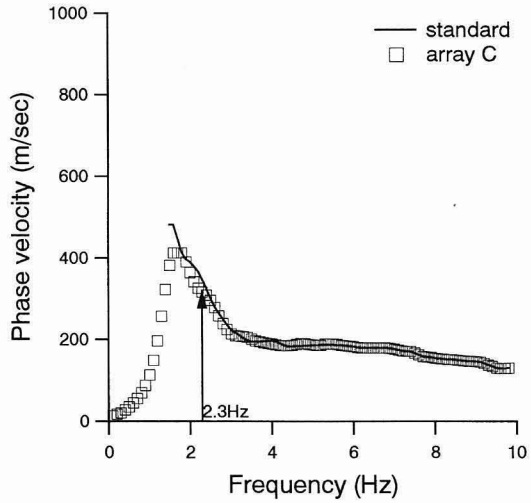


Fig. 14　Standard phase velocities (solid line) and observed phase velocities (open squares) by SPAC method of array C at the site of MKH. See also the text of Fig. 13.

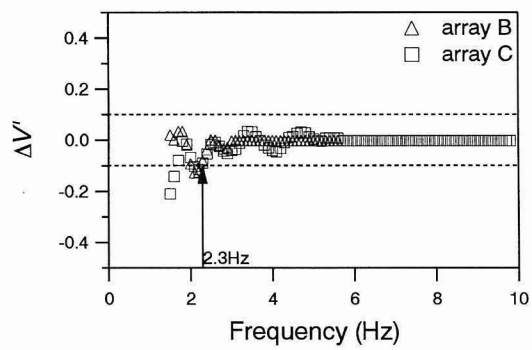


Fig. 15　Residual between standard phase velocities and observed phase velocities at each array by SPAC method are shown in this figure. Open triangles denote residual between standard phase velocities and observed phase velocities at array B. Open squares denote residual between standard phase velocities and observed phase velocities at array C.

基準とすると5.8倍に相当する。Fig. 14にアレーCにおける位相速度（□印）を基準位相速度（実線）と比較して示す。矢印で示した有効波長範囲の上限の周波数は2.3 Hz，位相速度は317 m/secである。この周波数と位相速度での波長は137.8 mであり，アレーCのアレー半径の12.0 mを基準とすると11.5倍に相当する。Fig. 15にSPAC法の$\Delta V'$の周波数変化を示す。SPAC法では，有効波長範囲の上限から外れた低周波側の$\Delta V'$は，基準位相速度に対しそれぞれのアレーにおける位相速度が遅くなる傾向を示した。

SPAC法での他の観測点における$\Delta V'$の周波数変化をFig. 16に示す。SPAC法では，MTHのアレーDおよびIUEの全アレーの位相速度が基準位相速度に対し速くなる傾向を示し，MKHを含むMMHの全アレー，MTHのアレーB，アレーCの位相速度が遅くなる傾向を示した。

SPAC法における有効波長範囲の上限の推定結果をFig. 17に示す。SPAC法での有効波長範囲の上限はアレー半径に対し3.2から17.2倍であった。SPAC法では，MTHのアレーD（R＝10.0 m）を除き，アレー半径が大きくなるに従い有効波長範囲の上限が小さくなる傾向を示した。

5. 考　察

F-K法とSPAC法の有効波長範囲の上限を推定したところ，F-K法の有効波長範囲の上限は，アレー半径に対し2.3から6.8倍であった。SPAC法では，3.2倍から17.2倍であった。このアレー半径に対する有効波長範囲の上限の倍率はそれぞれ異なっているものの，すべて

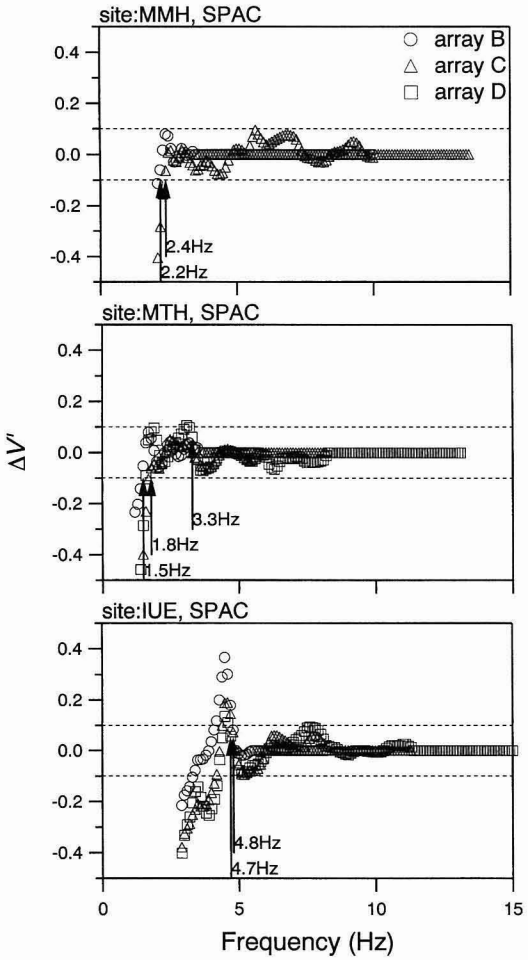


Fig. 16 Residual by SPAC method at MMH, MTH and IUE. Open circles denote residual for array B. Open triangles denote residual for array C. Open squares denote residual for array D.

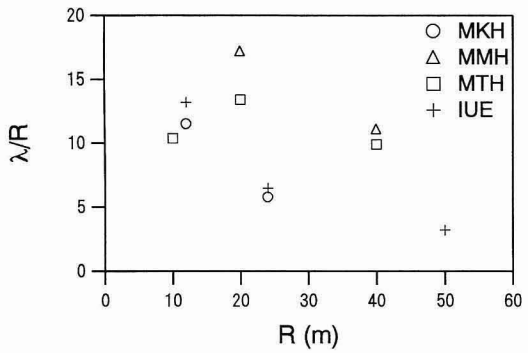


Fig. 17 The normalized upper limits of wavelength estimated from SPAC method as a function of R.

の観測場所のすべてのアレーにおいてSPAC法の有効波長範囲の上限は，F-K法の上限を上回っている。

その有効波長範囲の上限でのそれぞれの位相速度推定法の重要な推定量であるF-K法ではF-Kスペクトル，あるいはSPAC法では空間自己相関係数を示し，有効

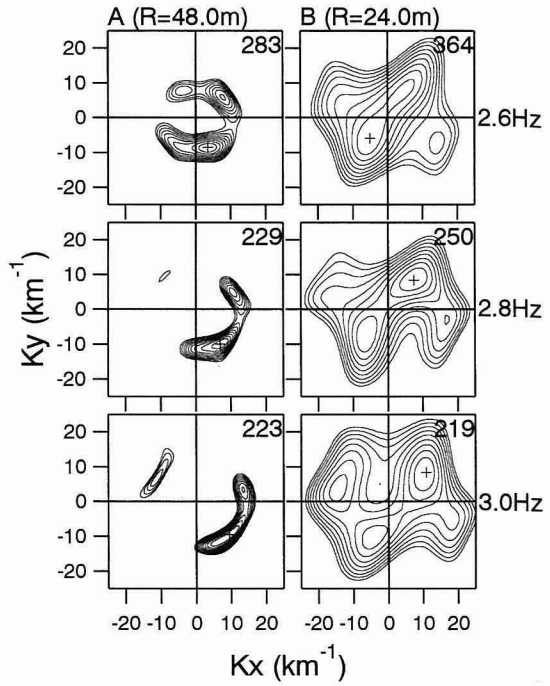


Fig. 18 F-K spectra for each frequency at array A (left) and B (right) in MKH. The value in each graphs denote each phase velocities (unit: m/sec). Cross denote the peak of F-K spectrum.

波長範囲から外れる原因を考察する。

Fig. 18にMKHのアレー半径48.0 mのアレーAと24.0 mのアレーBにおけるF-Kスペクトルを2.6 Hzから3.0 Hzまでを0.2 Hz間隔で示す。アレーBにおける波長の上限に対応する周波数は2.8 Hzである。F-Kスペクトルは，最大パワーの値から−10 dBまでを1 dBのコンター間隔で示している。それぞれのグラフ中の数値は，そのF-Kスペクトルから計算される位相速度である。周波数2.6 Hzから3.0 Hzまでの基準位相速度は，アレーAと同じである。アレーAとアレーBのF-Kスペクトルから，どちらも複数の波の到来を示している。有効波長範囲の上限より長い位相速度を示したアレーBの2.6 HzにおけるF-Kスペクトルは，アレーAのそれと比較すると，縮張現象が起きている。縮張現象とは，同時刻に複数の波動がアレーに入射し，かつ，アレーの大きさに比べその波の波長が大き過ぎるとF-Kスペクトルでそれらの波を分離できないために起こる現象である（石川ほか，1995）。

Fig. 19に，MKHのアレー半径24.0 mのアレーBと12.0 mのアレーCにおけるF-Kスペクトルを5.6 Hzから6.0 Hzまでを0.2 Hz間隔で示す。アレーCにおける波長の上限に対応する周波数は5.8 Hzである。5.6 Hzから6.0 Hzまでの基準位相速度は，アレーBと同じである。有効波長範囲外におけるアレーCの2.6 HzのF-Kスペクトルは，縮張現象が起きていないように見える。しかし，コンター形状が5.8 Hzと6.0 Hzに比

べ縦方向に長くなっている。このことから，縮張現象が起きている可能性が高い。Fig. 18と Fig. 19で示した有効波長範囲外の F-K スペクトルは，どちらにおいても縮張現象により位相速度に誤差がもたらされた，もしくは，その可能性が示された。つまり，F-K 法においては，位相速度に誤差を与える主な原因として縮張現象が考えられた。

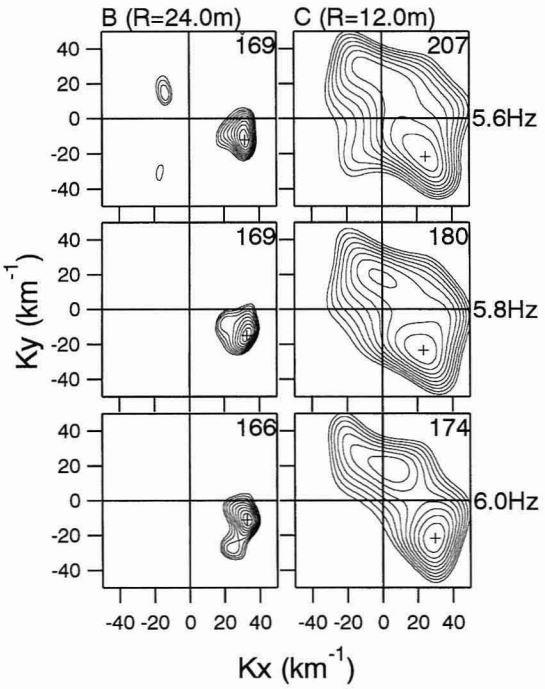


Fig. 19　F-K spectra for each frequency at array B (left) and C (right) in MKH. See also the text of Fig. 18.

次に，SPAC 法の重要な推定量である空間自己相関係数について考察する。

MKH のアレー B とアレー C で有効波長範囲の上限に対応する周波数は，2.3 Hz と推定された。その周波数近傍におけるアレー A，アレー B，およびアレー C の空間自己相関係数を Fig. 20に示す。○印が空間自己相関係数の観測値を示し，実線が観測値に適合する計算された空間自己相関係数である。グラフ中の数値はそれぞれの空間自己相関係数から推定された位相速度を示す。周波数 2.1 Hz から 2.5 Hz までの基準位相速度は，アレー A と同じである。いずれのアレーでも，計算された空間自己相関係数は，観測値に適合している。

SPAC 法は，観測から得られる空間自己相関係数 $\rho(f)$ を第 1 種 0 次のベッセル関数 $J_0(x)$ に適合させ位相速度 $c(f)$ を推定する。この $\rho(f)$ の誤差が $c(f)$ に与える影響は，$\rho(f)$ の値によって異なる。すなわち，$c(f)$ は直接的にアーギュメント x を用いて計算されるが，$\rho(f)$ の誤差に伴う x の誤差は $J_0(x)$ の値によって変化する。

いま，$J_0(x)$ の値を ρ とすれば，x の ρ に対する変化率 $dx/d\rho$ は，

$$dx/d\rho = -1/J_1(x) \qquad (6)$$

となる。ここで $J_1(x)$ は第 1 種 1 次のベッセル関数であ

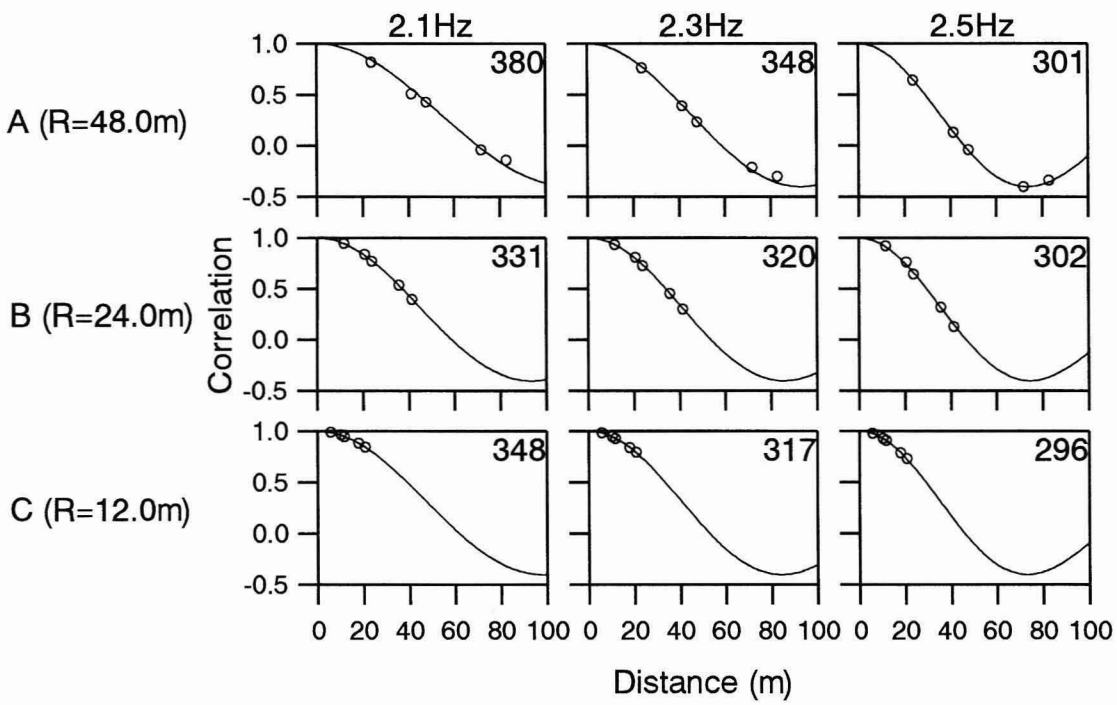


Fig. 20　Observed and calculated spatial auto-correlation coefficients as a function of correlation distance at array A (upper), array B (middle) and array C (lower) in MKH. The value in each graphs denote each phase velocities (unit: m/sec).

る。Fig. 21は，ナイキスト空間自己相関係数$J_0(\pi)$までの$J_0(x)$とともに$|dx/d\rho|$を示したものであるが，最大値近傍で$|dx/d\rho|$が急増する。したがって，$\rho(f)$の誤差が$c(f)$に与える影響は最大値近傍で急速に大きくなる（松岡ほか，1996）。

その考えを，本研究に照らし合わせると，Fig. 20に示した空間自己相関係数で，相関距離が短くなるに従い相関の値が高くなる。それに伴い空間自己相関係数の誤差が位相速度に与える影響は，相関距離が短くなるにつれ大きくなる。つまり，短い相関距離からなるアレーBとアレーCでは，アレーAに比べ，位相速度の誤差が大きくなると考えられる。

有効波長範囲の上限の推定は，宮腰（1995）においても議論されている。宮腰（1995）では，実際の微動観測結果から求められた有効波長範囲の上限は，アレー半径に対し，F-K法で5倍，SPAC法で10倍までの波長であった。だが，本研究で求められた有効波長範囲の上限は，F-K法でアレー半径の2.3倍から6.8倍，SPAC法で3.2倍から17.2倍という幅を持つものであった。宮腰（1995）において観測を行った2箇所は，表層付近において，地質的な違いが存在するものの，微動アレー観測で求めた位相速度およびその位相速度から求められる地下構造に大きな差異が無いことが認められる。一方，本研究で微動の観測を行った4箇所は，地下構造に大きな差異が存在する。ここで，SPAC法で求めた位相速度をFig. 22に示す。Fig. 22の位相速度から分散曲線に違いが見受けられる。Fig. 22の実線は，それぞれの観測位相速度に適合する位相速度の計算値である。こ

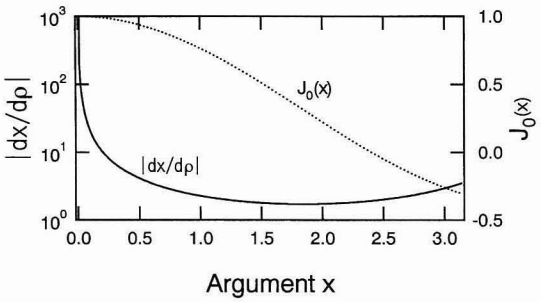


Fig. 21 Curves of J_0 and $|dx/d\rho|$. [After Matsuoka et al., (1996)]

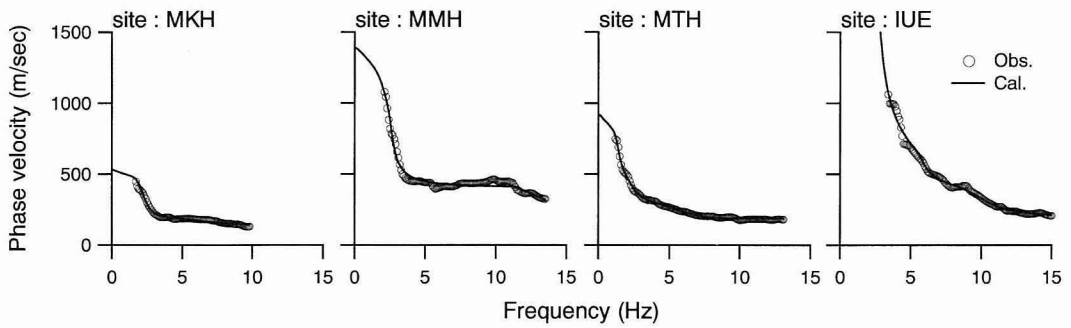


Fig. 22 Dispersion curves of observed phase velocity (open circles) obtained by SPAC method at MKH, MMH, MTH and IUE. Solid lines show calculated phase velocity using the fitting model.

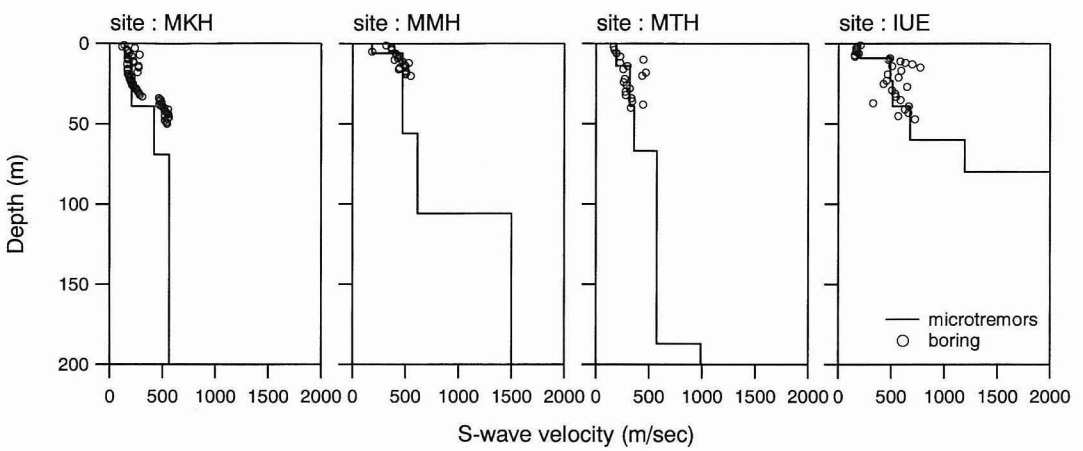


Fig. 23 S-wave velocity structure (solid line) estimated from observed phase velocities by SPAC method at MKH, MMH, MTH and IUE. Open circles show S-wave velocities obtained from borehole data using empirical relation by Yamamoto et al. (1996).

の位相速度の計算値を与える地下構造をFig. 23に実線で示す。同時に示している丸印は，ボーリング資料のN値から山本ほか（1996）の推定式を用いて計算したS波速度である。求められた地下構造は，浅い場所でMKHの深度約70 m以浅，深い場所でMTHの約185 m以浅に対応するものであり，明らかに構造の違いが認められる。それぞれの観測場所の地質としては，MKHでは泥炭，粘土，岩屑なだれ堆積物，MMHは洪積世の砂礫，MTHはローム，IUEは火山泥流堆積物を挟む洪積世の砂礫で構成されている。このように，地下構造および地質の違いが明確である。4箇所の観測場所およびその場所における大きさの異なるアレーごとに有効波長範囲の上限が違う結果を得た。宮腰（1995）が微動観測記録から求めた有効波長範囲の上限は本研究で求められた範囲に含まれる値ではあるが，有効波長範囲の上限は単なる固定値ではなく地下構造の違いおよびアレーの大きさによっても変化することを示していると考えられる。

6. まとめ

本研究では，岩手県盛岡市周辺の4箇所の学校のグランドにおいて大きさの異なる複数のアレーを密に展開し，実際に観測した微動データからF-K法とSPAC法を用いて推定したそれぞれの有効波長範囲の上限の推定を行った。

その結果，F-K法から推定された有効波長範囲の上限は，アレー半径に対し2倍から7倍であった。SPAC法から推定された有効波長範囲の上限は，アレー半径に対し3倍から17倍であった。これらの有効波長範囲の上限は，SPAC法のほうがF-K法よりも全観測場所の上限を解析した10アレーすべてにおいて大きかった。このことから，SPAC法のほうがF-K法よりも長波長の位相速度を推定できることが示された。すなわち，微動アレー探査においてより深部の地下構造を正確に把握するためには，位相速度の推定法としてSPAC法が有効であるといえる。

また，本研究では有効波長範囲の上限が幅を持って求められた。これは，有効波長範囲の上限が地下構造の違いおよびアレーの大きさによっても変化することを示していると考えられる。

参考文献

AKI, K. (1957) : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., **35**, 415–456.

石川　顕，凌　甦群，岡田　広（1995）：F-Kスペクトル法を用いた表面波の位相速度推定のシミュレーション，物理探査学会第93回（平成7年度秋季）学術講演会論文集，100–104.

CAPON, J. (1969) : High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc, IEEE, **57**, 1408–1418.

Horike, M. (1985) : Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to basement in urbanized areas, J. Phys. Earth, **33**, 59–96.

松岡達郎・梅沢夏実・巻島秀男（1996）：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，49, 1, 26–41.

松岡達郎・白石英孝・梅沢夏実（2000）：深部地下構造推定のための微動探査法の適応性に関する検討—深層ボーリング資料を利用した位相速度の逆解析—，物理探査，**53**, 1, 12–28.

Matsushima, T. and Okada, H. (1990) : Determination of geological structures under urban areas, BUTSURI-TANSA, **43**, 21–33.

宮腰　研（1995）：微動探査法による表面波位相速度の推定の基礎的研究，北海道大学大学院理学研究科博士論文.

山本英和，小渕卓也，斎藤徳美（1998）：微動アレイ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，**51**, 1, 70–76.

山本英和，大丸篤志，斎藤徳美（1996）：盛岡市域における地盤のS波速度推定式の作成，物理探査，**49**, 3, 182–196.

山本英和，吉田芳則，小渕卓也，斎藤徳美，岩本鋼司（1997）：短周期微動のアレイ観測による盛岡市域の地下速度構造の推定，物理探査，**50**, 2, 93–106.

LaCoss, R. T., E. J. Kelly and M. T. Toksoz (1969) : Estimation ed seismic noise structure using arrays, Geophysics, **34**, 21–38.

凌　甦群（1994）：微動に含まれる表面波の位相速度の推定に関する研究，北海道大学理学研究科博士論文，pp. 150.