

# 周波数-波数解析法による 浅所地下構造の解析に関する基礎的検討

斎藤徳美 (岩手大・工)

神 薫 (岩手大学大学院) ・ 船越千等 (岩手大学学生、現：日重建設㈱)

Fundamental Investigation on Analysis of Underground Structure of Near Surface

by the Frequency-Wavenumber Method.

Tokumi SAITO (Iwate Univ.) ・ Kaoru JIN (Iwate Univ.) ・ Chitoshi FUNAKOSHI (Iwate Univ.)

## 1. はじめに

周波数-波数解析法 (F-K法) は、平面的に多数の地震計を配置したアレイ観測記録から、波の到来方向および見掛け位相速度を解析する手法 (Capon:1969,1973) で、解析された位相速度の分散と地下速度構造モデルに基づき計算された理論分散曲線との対比から地下構造を推定することが可能とされている。

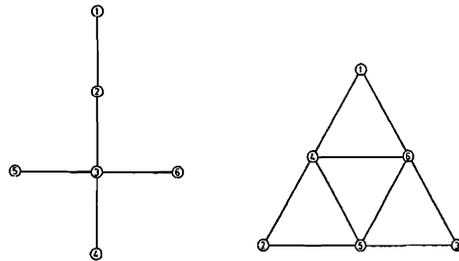
周期2~10秒といった長周期微動から深さ数100~1000mオーダーの地下深部構造を推定しようとする試みは、北大等で研究が進められ成果を挙げている (岡田・松島他:1987他) が、短周期微動を対象とした検討はわずかしか行われていない。

いうまでもなく、地下浅所の速度構造の解析には弾性波探査が確立された技術として有用であり、またボーリングによるより直接的な調査も深部調査に比して安価に行うことができる。しかし、短周期微動を対象としたF-K法による解析も実技的に確立されれば、

## 調査対象区域・目的

によっては、特に100~200mオーダーのやや深部の解析には一定の役割を果たす可能性があるものと考えられる。

筆者らは、盛岡市近郊・秋田市・大湯村等で、図1に示すように、固有周期1秒の上下動地震計6台による観測を試みてきたが、適切な解



$$\text{BFM} \quad \hat{P}(f, k) = \sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^N S_{ln}(f) \cdot \exp[ik \cdot (r_l - r_n)]$$

$$\text{MLM} \quad \bar{P}(f, k) = \sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^N A_l(f, k) A_n^*(f, k) S_{ln}(f) \cdot \exp[ik \cdot (r_l - r_n)]$$

$$A_l(f, k) = \frac{\sum_{n=1}^N q_{ln}(f, k)}{\sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^N q_{ln}(f, k)}$$

$\hat{P}, \bar{P}(f, k)$ : 周波数  $f$ 、波数  $k$  の点における F-K パワースペクトルの推定値  
 $N$ : 地震計の数  
 $r_l, r_n$ :  $l, n$  番目の地震計の位置  
 $S_{ln}(f)$ : 周波数  $f$  における  $l$  番目と  $n$  番目地震計の信号のクロススペクトルの推定値  
 $q_{ln}(f, k)$ : 行列  $[S_{ln}(f) \cdot \exp[ik \cdot (r_l - r_n)]]$  の逆行列の要素  
 $*$ : 共役転置行列を示す

図1、地震計の配置およびF-K法の解析原理 (本報での解析はBFMによった)

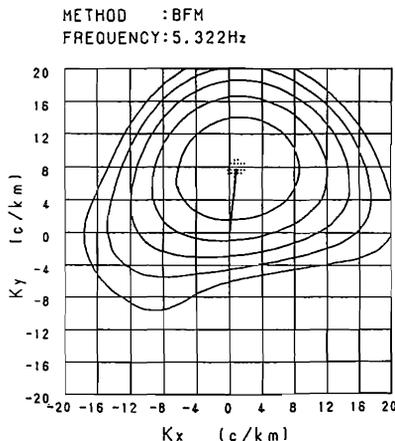


図2 F-Kパワースペクトルの例

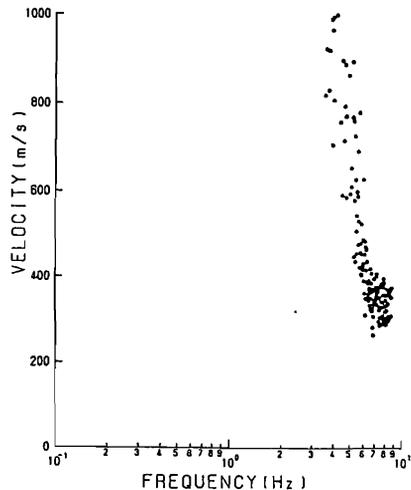


図3 位相速度の分散 (実測分散曲線) の例

折を行う上で考慮すべき事項が指摘された。それらのうち、観測に際しての適切な地震計配置・解析に際しての適切な波数のとりかた・微動特性との関係・人為的特定振動源の影響等、基礎的な検討結果について報告する。

## 2. 検討結果

### 2-1 地震計間隔

F-K法による解析結果は、図2に示すようなF-Kパワーコン

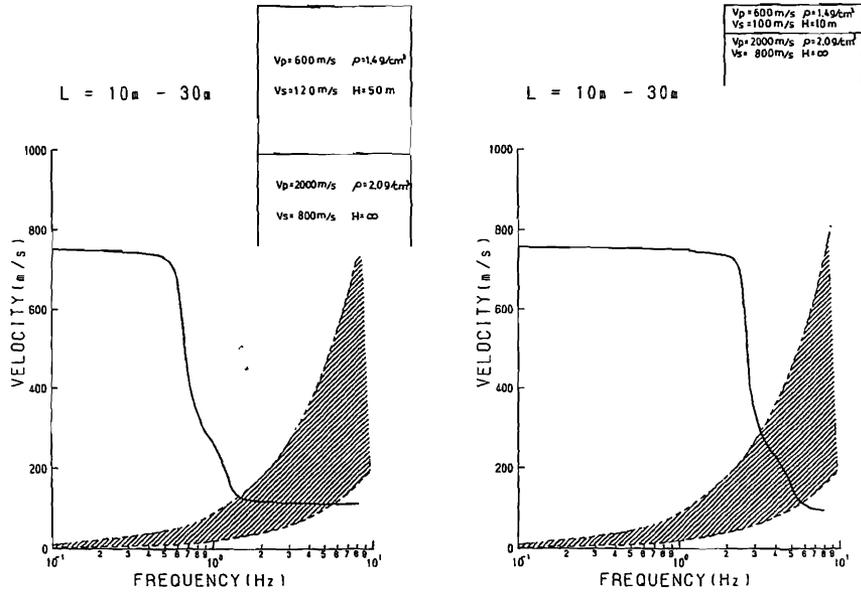


図5 地下速度構造モデルの理論分散曲線と地震計間隔10m十字アレイの適正解析範

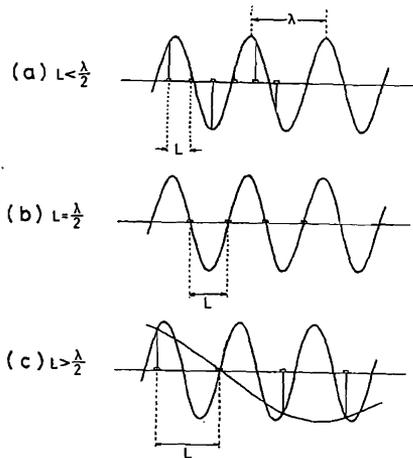
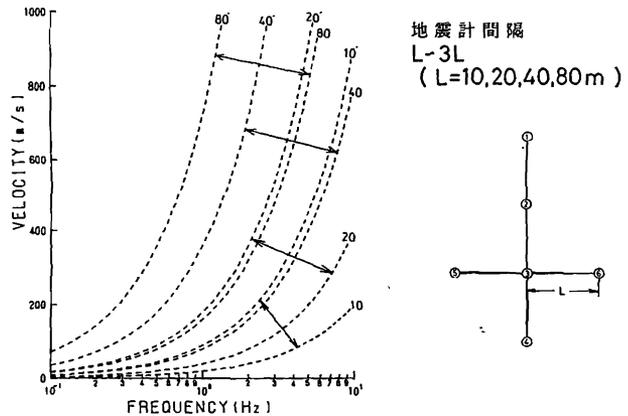


図4 空間的エイリアジング

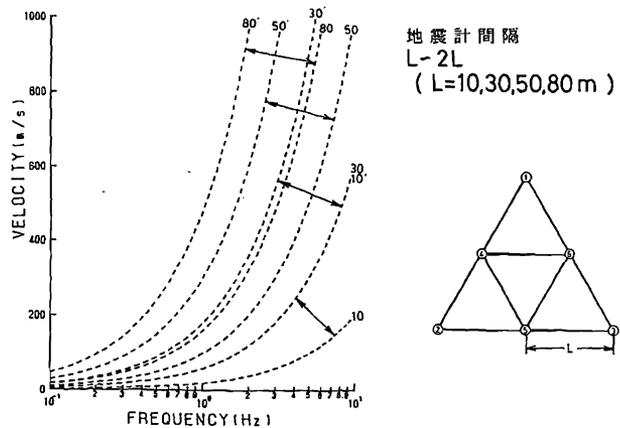
ターで示され、原点とパワーの最大値を示す点を結んだ線が到来方向、長さが見掛け位相速度を表す。通常短周期微動の解析における40.96秒の区間を100分の2秒間隔でデジタル化した場合には、0.0244 Hz間隔で計算がなされ、図3に示すように位相速度の分散(実測分散曲線)が得られる。

F-K法による解析に際しては、

- 1) 分解能上げるため、最大地震計間隔は観測する波の最大波長の1/3以上にする。
- 2) 図4に模式的に示すような空間的エイリアジングを避けるため、最少地震計間隔は観測する波の最少波長の



地震計間隔  
L-3L  
(L=10,20,40,80m)



地震計間隔  
L-2L  
(L=10,30,50,80m)

図6 地震計6台の十字および三角アレイにおける適正解析範囲

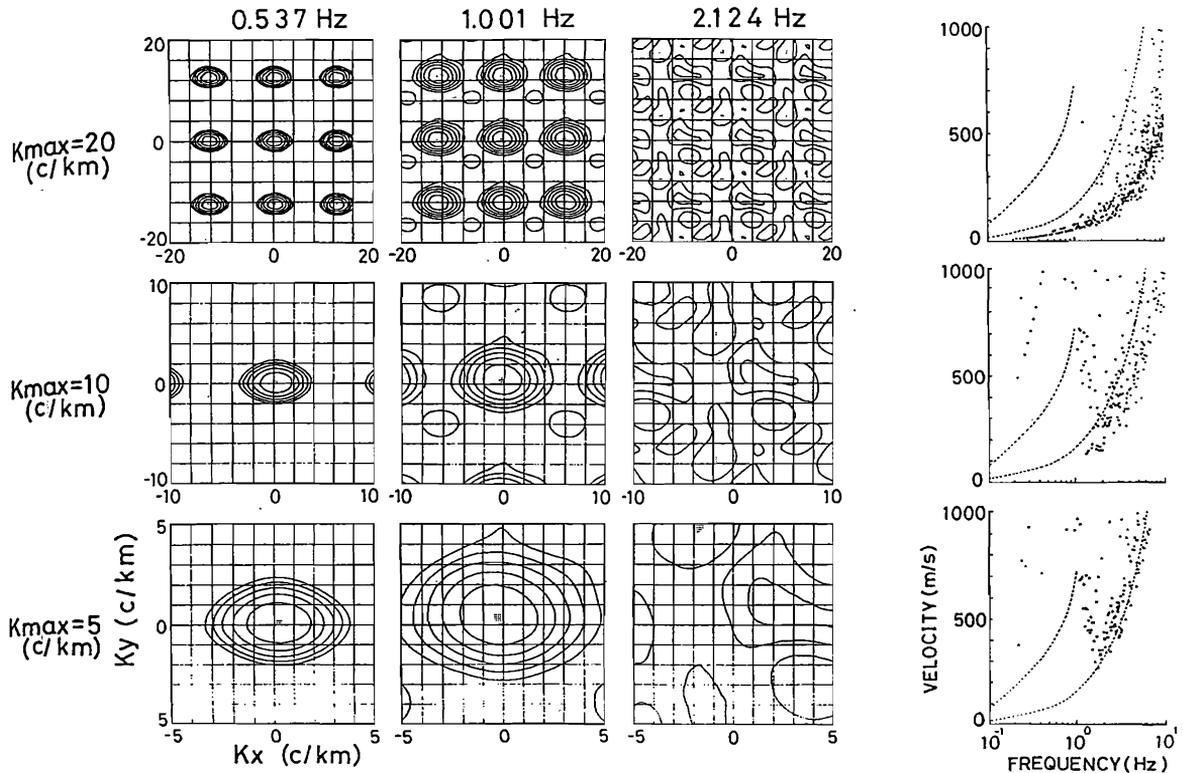


図7 最大波数( $k_{max}$ )を変えたときのF-Kパワースペクトルおよび実測分散曲線(地震計間隔80m十字アレイ)

2分の1以下にする必要がある。最小地震計間隔10m・地震計6台の十字アレイを例にとると、適正解析範囲は図5に示す斜線の範囲となる。図に示すようなモデル速度構造があると仮定した時、Tomson Haskellのマトリックス法(Haskell:1953)で計算された理論分散曲線と対比するには、変曲点間に対応する実測分散曲線が得られていることが望ましいが、図の左では必要区間をほとんど捕らえられず、右でも一部しかカバーされていない。1種類の地震計間隔での解析可能範囲は狭いため、地下速度構造が不明瞭な地域を対象に観測を行う際には、適正解析範囲をオーバーラップさせるため、図6に示すように、十字アレイならば、10・20・40・80m、三角アレイならば10・30・50・80mというように、地震計間隔を変えて測定することが必要となる。

### 2-2 解析に際しての波数のとりかた

F-Kパワースペクトルの計算に際しては、波数 $k$ の最大値 $k_{max}$ を適切にとる必要がある。図7に秋田県大湯村における地震計間隔80mでの観測記録を、 $k_{max} 20 \cdot 10 \cdot 5$ で計算した0.537・1.001・2.124HzのF-Kパワーコンターの例と実測分散曲線を示す。 $k_{max}$ の値を大きくするとエイリアジングを生じ、逆に小さすぎる場合にはF-Kパワーの最大値が解析波数の範囲外となり、適正解析範囲内でも正しい実測分散曲線が得られ

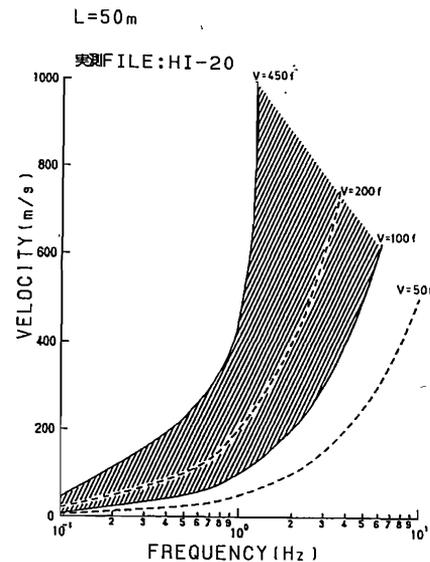


図8 地震計間隔50mの適正解析範囲と $k_{max}$

ない。

図8に地震計間隔50mの十字アレイの場合の例を示す。地震計間隔からの適正間隔を斜線で示すが、 $k_{max} = 20$ とすると $v = 50 f$ と $v = 100 f$ の間はエイリアジングを生じ、一方 $k_{max} = 5$ と小さな値をとると、 $v = 200 f$ と $v = 450 f$ の間のみに解析範囲をせばめることとなる。それ故、最小地震計間隔から規定される $v$

$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	H (m)
700	100	1.4	15
1000	300	1.6	4.0
1200	500	1.6	20
2000	1000	1.8	$\infty$

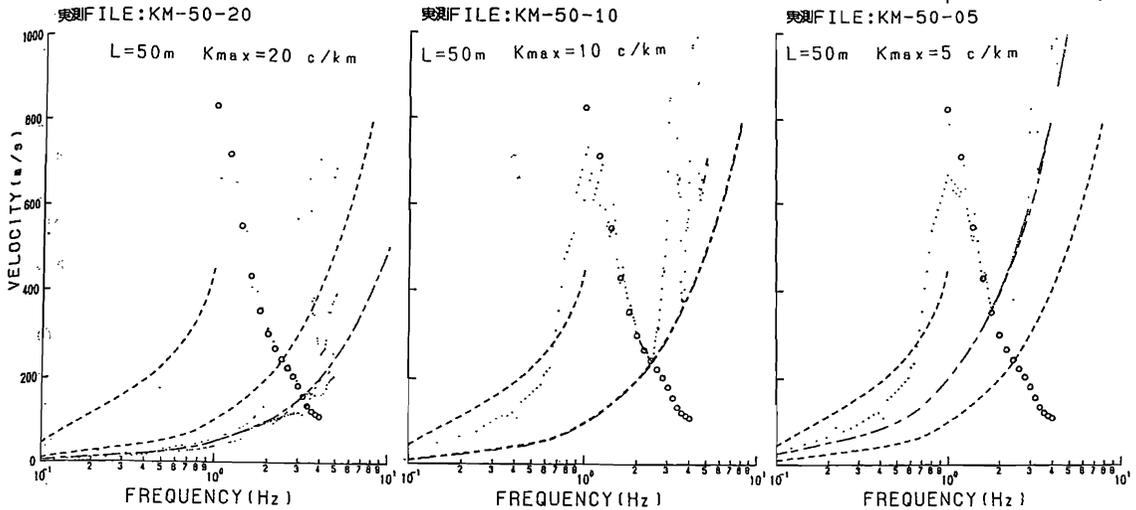


図9  $k_{max}$ を20・10・5と変えたときの解析結果の比較(破線の間は適正解析範囲・地震計間隔50m)

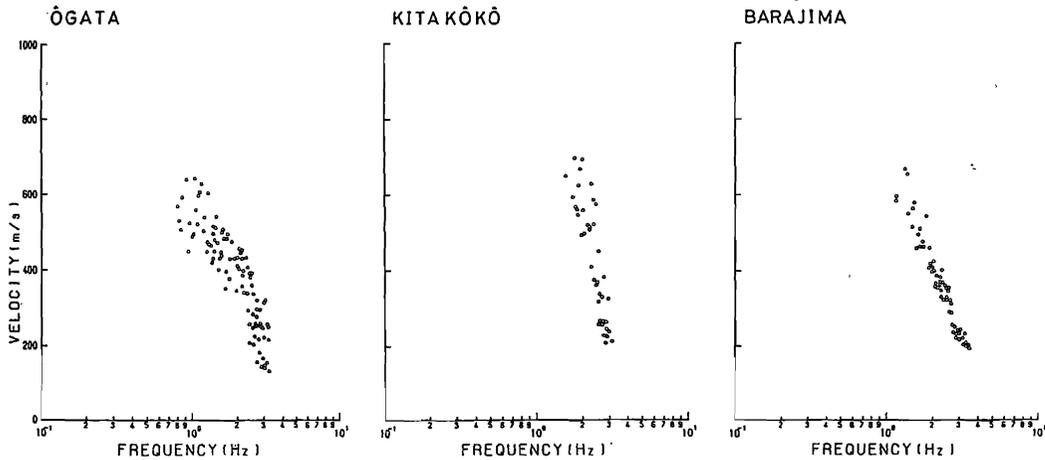


図10 秋田県大湯村・盛岡市北高校・秋田市茨島工業地帯で観測・解析された実測分散曲線の例

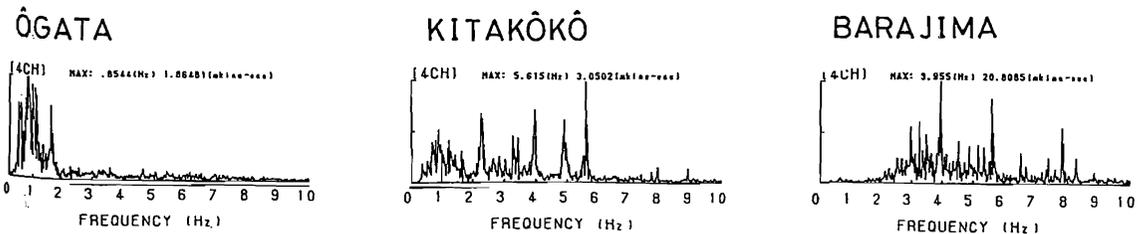
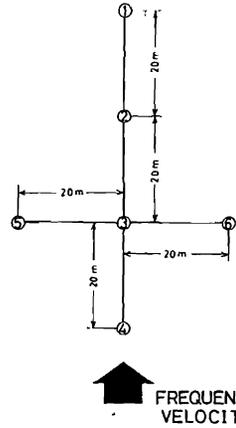


図11 秋田県大湯村・盛岡市北高校・秋田市茨島工業地帯で観測されたスペクトルの例

$\approx 100f$  に対応する  $k_{max} \times 10$  として計算することが適切といえる。

図9は、盛岡市で想定された地下速度構造モデルを例に、理論分散から期待される各周波数ごとの波の速度を0.2 Hz 間隔で求め(Oで示す)、地震計間隔50mの十字アレイにおける位相差を含む合成波を作成して、F-K法で解析した位相速度(・で示す)である。破線の間が地震計間隔から規定される適正解析範囲であるが、



↑ FREQUENCY: 4 Hz  
VELOCITY: 200 m/s

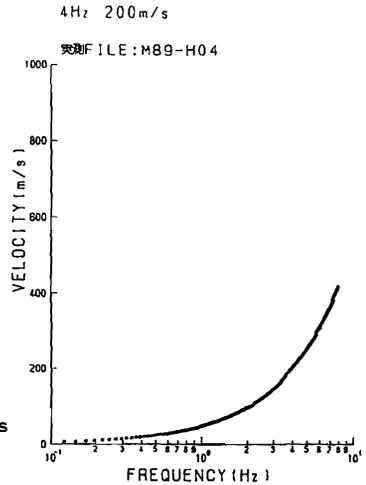


図12 4 Hz・速度200m/sの波が入力したとして解析された分散曲線

最小地震計間隔に対応する  $k_{max}$  を選定するのがより適切であることが、モデル合成波の解析からも示されている。

2-3 微動

特性との関係

これまで測定で得られた実測分散曲線を見ると、図10に例を示すように測点によりそのばらつきに大きな違いがあり、特に大湯村でのばらつきが大きい。各地震計間での波の位相相関

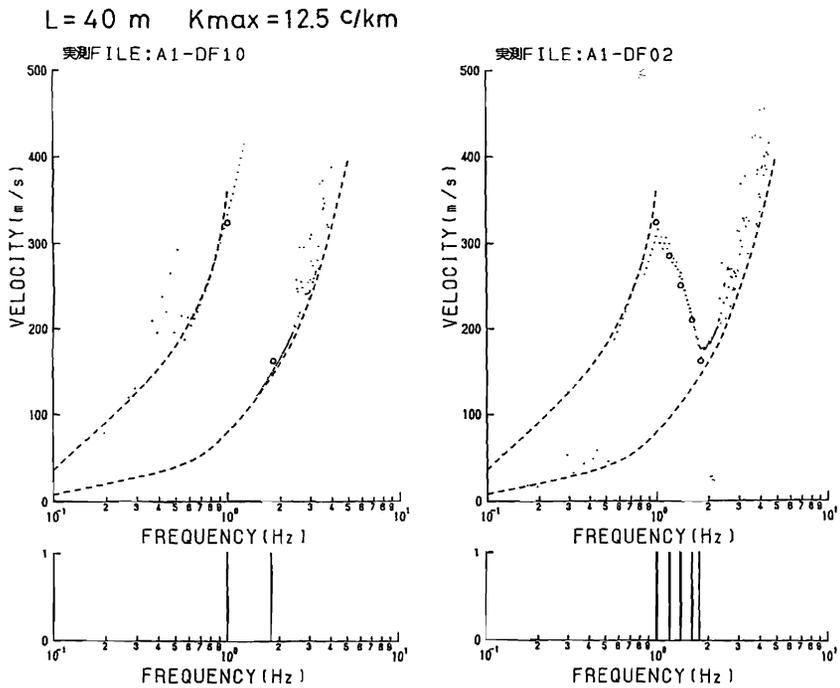


図13 1~1.8Hzに0.8(左)および0.2Hz(右)間隔で波が入力したときの分散曲線のモデル計算解析精度が悪く

なることはいうまでもないが、それ以前に対象とする周波数帯に一定の振幅をもった波が入力しなければ解析はなしえない。図11に3測点でのスペクトルを示すが、大湯村では2 Hz以上の周波数の波はほとんど入力しておらず、そのために見掛け位相速度のばらつきが大きいものと考えられる。ちなみに、位相速度  $200 \text{ m/s} \cdot 4 \text{ Hz}$  の単一周波数の波が到来するとして、F-K法による解析を行うと、図12に示すように4 Hzのみの位相速度は想定した値となるが、その他の周波数では異常な速度を示す。そこで、入力周波数間隔・振幅比を変えて、図9の場合と同様のモデル計算を行った。図13は、大湯村で想定された速度構造モデルで、入力する周波数が1 Hzから1.8 Hzまで、0.8、0.4、0.2、0.1 Hzと入力周波数間隔を変えたときの解析結果を示すが、0.2 Hz間隔以下と狭くなると、理論分散曲線と対比可能な解析がなされる。図14には、入力周波数間隔が0.2 Hzで、2.4から4.2 Hzの間で最大振幅との比が5・10・15・20・25%とし

たときのモデル計算結果の例を示すが、振幅比が20%程度以上でない理論分散曲線と対比可能な解析が成し難い。実際の解析における周波数間隔は0.0244 Hzであり、精度上望ましい振幅比はもっと小さくて良いものと推定されるものの、微動の周波数特性は解析可能深度・精度の点で十分考慮する事が重要である。

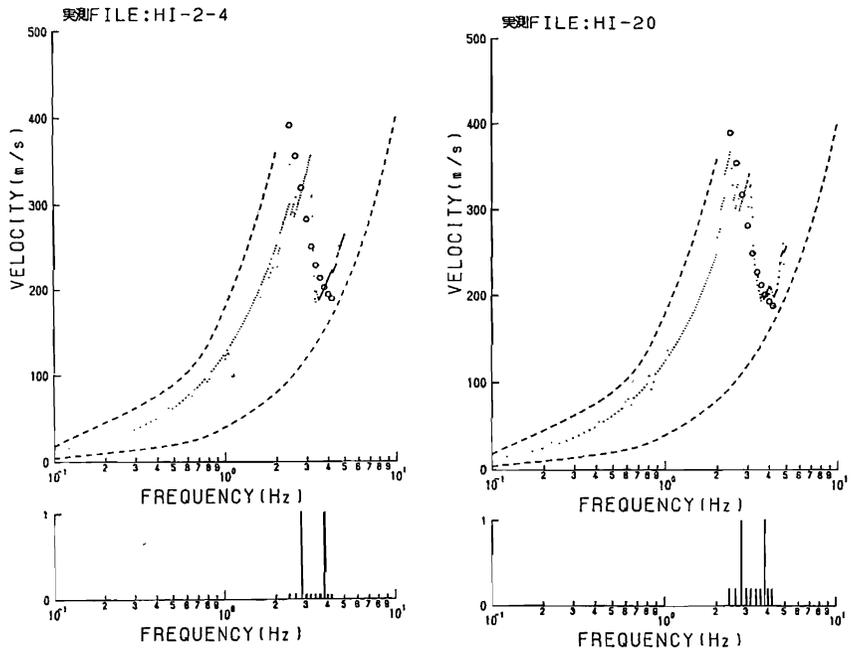


図 1.4 2.4~4.2Hzに0.2Hz間隔で振幅比5%(左)および20%(右)の波が入力したときの分散曲線のモデル解析

2-4 人為的特定振動源の影響

地盤の振動特性の評価に関する測定では、工場等的人為的振動はノイズとして排除すべき場合もあるが、図1.4および1.5に示すように、秋田市茨島工業地帯近傍で得られた実測分散曲線はばらつきが小さく、モデル分散曲線との対比も容易である。工場群周辺では3~5 Hzの周波数帯に相対的に大きな振幅比のピークが多く、2-3で検討した振幅比の条件を満たしている。すなわち、アレイ観測による地下構造の解析には、特定振動源からの振動は定常的で振幅比の大きい多くの周波数を含む場合には、積極的に利用できるものと考えられる。

なお、本報告で検討に用いた茨島工業地帯および大湯村における観測データは、微動研究グループにより測定されたものを使用させて頂いた。記して感謝の意を表する。

参考文献 岡田・松島・日高(1987):北大地物研究報告,49,53-62.

Capon,J.(1969):Proc.IEEE,57,1408-1418. Capon,J.(1973):Method in Computational Physics,13,1-58.

Haskell,N.A.(1953):Bull.Seisms.Soc.Am.,43,17-34.

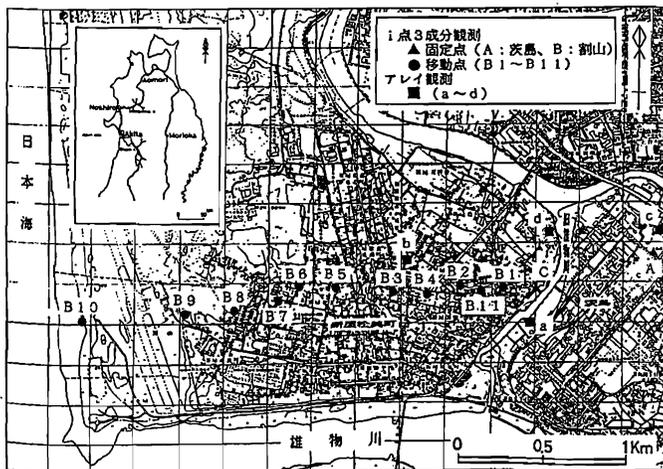


図 1.5 秋田市茨島工業地帯での測点位置図

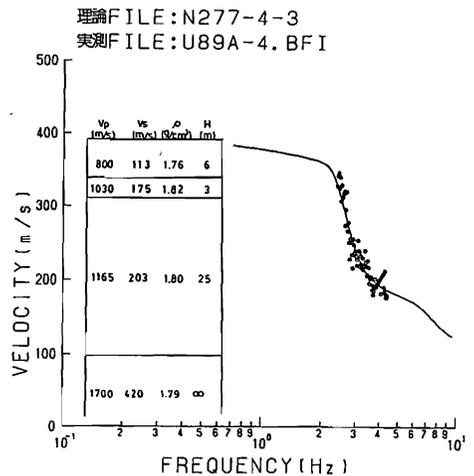


図 1.6 アレイ測点Aでの実測分散曲線と最適理論分散曲線