

微動観測と地盤構成

東京都立大学 工学部 正会員 塩 野 計 司

1. はじめに

従来より、地盤構成を明らかにすることを目的として数多くの微動観測が行われてきた。また、微動観測を利用する方法は、地盤構成を推定するための各種の方法の中でとり分け簡便性にすぐれているところから、今後も適用の機会が多い、注目すべき方法であると考えられる。

ところで、微動記録に対してはスペクトル解析を行ない、微動の卓越周期について検討することが常識のようにになっていることは改めて述べるまでもない。そして、微動の卓越周期が地盤の増幅性によってもたらされたものであると考えることによって、卓越周期が地盤構成を推定するための手掛りとして利用されることについても同様である。しかし、微動の中に本来含まれており、また、適当な観測を行なうならば、検出することのできる、地盤構成についての情報が卓越周期以外にはあり得ないのであるだろうか。微動の性質を、その周波数特性(スペクトル、卓越周期)というただ一つの面からのみではなく、より多面的に捉えることができ、しかも、それらを地盤構成の手掛りとして利用することのできたならば、二つ以上の推定結果を同時に得て、それらを相互に比較・含味し、最終的には、より高い信頼性を持った結果を導き出すことも不可能ではない。

では、微動の性質を、卓越周期以外のどのような面に注目して検討すれば、その結果を地盤構成の推定という目的に、有効に利用することのできるであろうか。本研究の目的はこの点について考察することにある。しかし、このような考察を効率良く進めるためには、微動の本性について深い理解を得ておくことが欠くことのできない条件であると考えられる。本研究では、微動の本性をより良く知るための観測および解析を行ない、それを通じて、地盤構成を知るための手段としての微動の利用に、新たな方法を取り入れていくことを考えた。

2. 観 測

本研究では、考察の対象として、周期1〜数秒程度の微動を取り上げた。このような微動は脈動と呼ばれるものであり、古くより、理学的研究の対象になってきたが、近年では、やや長周期の微動とも呼ばれ、厚い地盤の震動性状の把握に利用することを意図した研究を通じて、工学的有用性が明らかにされてきたものである⁽¹⁾。

微動記録は、アレー観測、三成分による多点(移動)観測、基盤・地盤比較観測によるものであり、いずれも、青森県・八戸市において得られたものである。

観測地域の概略と、観測点の配置をFig. 1に示した。観測点は海岸に沿って配列され、一つの測線を形づけている。Fig. 1でB-lineと示されている部分に

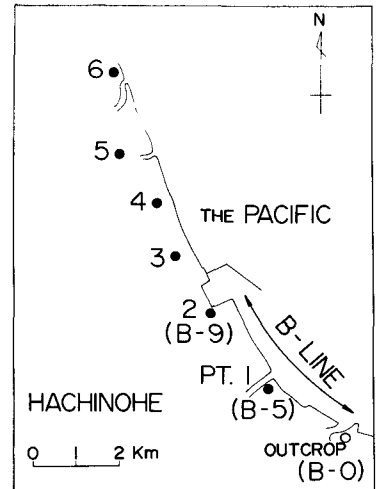


Fig. 1 観測地域

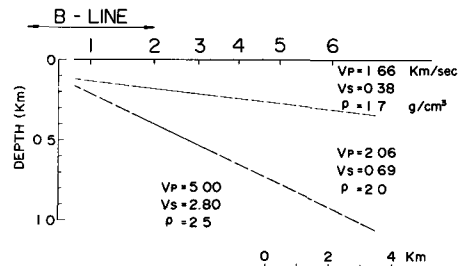


Fig. 2 地下構造モデル

は、10か所の観測点(B-0~9)が設けられている。観測点B-0は基盤岩の露頭に設けられている。

測線に沿っての地下構造モデルをFig. 2に示した。観測地域の一部(Fig. 2の点線部分)では、人工地震および関連の調査研究によって、地下構造が明らかにされており、地下構造モデルはその結果をやや単純化して作成されたものである。地下構造の特徴は、明瞭な基盤面が見られ、かつ、それが南北に傾斜している点にある。

アレー観測の際の地震計配置をFig. 3に示した。各点に設置された上下成分地震計の出力は7チャンネル同時記録となった。その例をFig. 4の上部に示した。

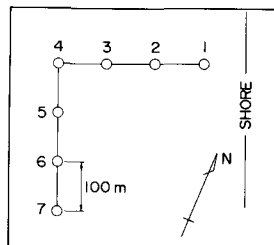


Fig. 3 地震計配置
(アレー観測)

三成分観測は、観測点1~6の6か所において行なわれた。

基盤・地盤比較観測はB-line上で、上下成分地震計を用いて行なわれ、観測時刻はある日の深夜の約6時間が選ばれた。地盤上の9つの観測点

(B-1~9)での観測が順次に進められている間に、基盤岩に設けられた観測点(B-0)では、2時間おきに4回の観測が行なわれ、基盤・地盤上でのほぼ同時記録ともいえるべきものが得られた。

3 解析

3-1 位相速度 アレー記録を用い、微動の位相速度を解析した。位相速度の算出には、あらかじめバンド・パス・フィルタリングした記録を用い、また、パス・バンドを変えながら解析を進めて、分散性の検討を行なった。バンド・パス記録の例をFig. 4の下部に示した。

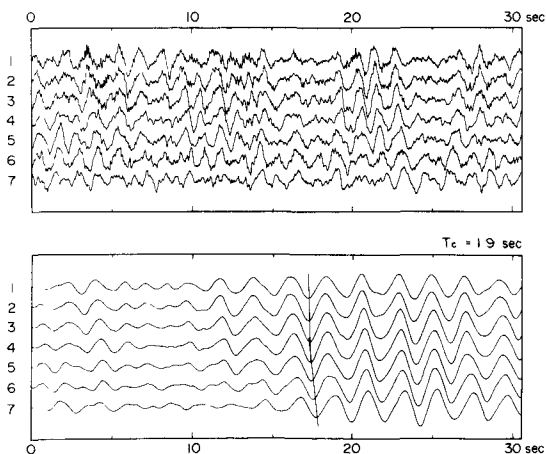


Fig. 4 アレー記録 上・原記録
下・バンド・パス記録

各測線上でそれぞれに見掛け速度を算出し、算出された値の一群によって、位相速度と到来方向を計算した。なお、見掛け速度の算出には相互相関法を用いた。

周期と位相速度の関係をFig. 5に示した。観測値のまともりはあまり良くないが、全体的な分布を捉えれば、分散性表面波の一般的特徴の一つである、長い周期の波ほど大きな位相速度を持つ傾向が認められる。Fig. 5にはまた、分散性Rayleigh波の理論分散曲線を記入した。これと観測値とを比較すると、M₂₁モードのものと考えられる位相速度もわずかに見られるが、大部分の観測値はM₁₁モードの曲線のまわりに集まる傾向が認められる。微動を構成する波の一つとして、基本モードRayleigh波(M₁₁モード)のあることが明らかになった。

3-2 粒子軌跡(上下・水平振幅比) 分散性Rayleigh波の粒子軌跡は媒質の構成と波の周期とに依存して系統的に変化することが知られ、この性質は地下構造の推定や波の種類の識別に際して、しばしば利用されてきた。

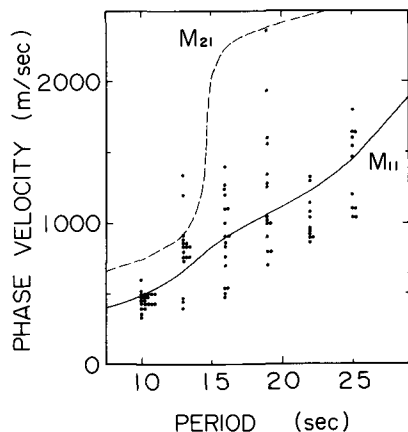


Fig. 5 周期と位相速度の関係

三成分記録によって、周期と振幅比(水平/上下)の関係を解析した。振幅比の算出には、あらかじめバンド・パス・フィルタリングした記録を用い、タイム・ウィンドウ内の振幅読み取り値の分散の比を求め、この値の平方根を計算して求める値とした。なお、できる限り波形に乱れの少ない Rayleigh 波を選んで解析するために、粒子軌跡の包絡体を楕円体で代表させて把え、長軸の向きが上下、水平のいずれかに十分に近い(10° 以内)場合に限って、振幅比を算出した。この条件は次のような考えに従って設けたものである。Rayleigh 波の上下、水平成分の間には $\pi/2$ の位相差があるが、このために、粒子軌跡は楕円を描き、かつ、楕円の軸の向きは一方が上下、他方が水平になる。従って、粒子軌跡を包絡する楕円体の長軸が上下、水平のいずれから大きく離れた場合には、少なくとも、波形に乱れの少ない Rayleigh 波が記録されていることはあり得ないと考えられる。

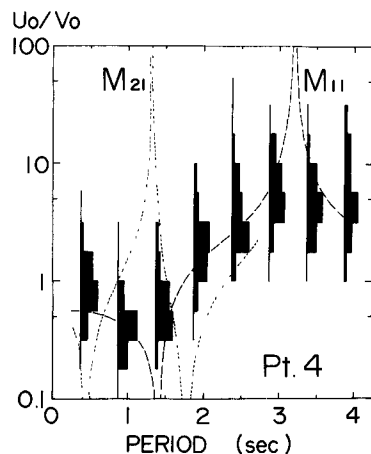


Fig. 6 周期と振幅比の関係

上述の方法によって求められた周期と振幅比の関係の一例を

Fig. 6 に示した。黒く塗りつぶされた部分は振幅比の値の頻度分布を表わしている。観測値は M_{11} モードの理論値のまわりに集まる傾向にあり、微動観測を通して、観測点の地盤構成によって決定される M_{11} モードの特徴が検出できることを示している。これはまた、微動に含まれる M_{11} モードを用いて地盤構成を行なうことのできる可能性を示唆するものでもある。

次に、微動に含まれる M_{11} モードの周期と振幅比との関係が地質の構成の違いを反映しながら変化することを確かめてみた。本研究での観測地域に見られるような地盤構成の場合には、いずれの観測点においても、周期に対する振幅比の変化には、極大値と極小値がそれぞれ一つずつあり (Fig. 6 参照)、また、振幅比の極値は地盤の厚さが増すとともに、より長い周期に現われるようになる。従って、振幅比が各観測点でどのような周期に生じるか、その変化に着目することによって、地盤構成の変化を反映する様子が確かめられるはずである。

振幅比が極小になる周期の付近について、周期と振幅比との関係を調べ、結果を Fig. 7 に示した。各周期での振幅比は平均値によって表わした。なお、振幅比の算出は粒子軌跡を包絡する楕円体の長

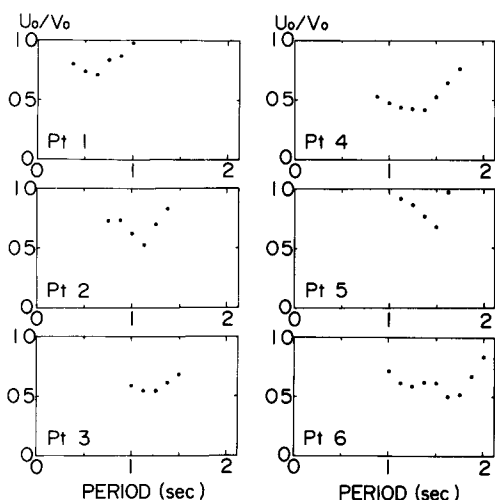
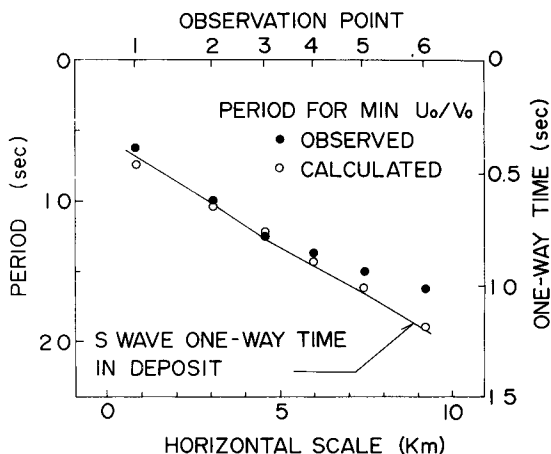


Fig. 7 各観測点における周期と振幅比の関係

Fig. 8 → 振幅比(水平/上下)が極小になる周期の変化



軸の向きが上下方向に近い場合(傾きが 10° 以内)に限って行なった。これは、Love 波や M_{21} モード (M_{21} モードの振幅比は M_{11} モードの振幅比が極小になる周期の付近で大きな値になる)が記録された部分を除くとともに、波形に乱れのない M_{11} モードだけを選んで解析を行なうために設けた条件である。

各観測点で得られた、 M_{11} モードの振幅比が極小になる周期を Fig. 8 にまとめて示した。観測値の変化の様子は理論値のそれ、すなわち、地下構造の変化の様子に良く対応したものになっている。また、地下構造の最も正確に知られている観測点 2, 3 の場合、観測値と理論値とはきわめてよく一致している。ここでは、地盤構成と密接な関係を持つ値——分散性 Rayleigh 波の上下・水平振幅比が極大あるいは極小になる周期——が微動観測を通じて検出できるということが示された。このことは、地盤構成を推定するために微動を利用するという立場から見て、きわめて好都合なことである。従来から常に利用されてきた卓越周期と同様に、そして、それと並用して、振幅比が極値をとる周期に着目することが考えられる。ちなみに、振幅比が極小になる周期と地盤の S 波 one-way time との間に良い比例関係のあることが指摘できる (Fig. 8)。

3-3 地盤/基盤スペクトル振幅比 地盤/基盤スペクトル振幅比は、単なる、地盤上の記録のスペクトルに比較して、微動の周波数特性に及ぼす地盤の影響(増幅性)をより直接的に捉えたものであると考えられる。

基盤・地盤比較観測記録(上下成分)を用いて、スペクトル振幅比(地盤/基盤)を計算した (Fig. 9; 実線)。同時に、微動の上下成分を構成する

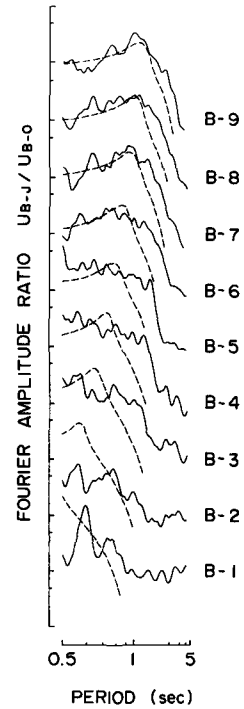


Fig. 9

スペクトル振幅比(地盤/基盤)

波であることが明らかにされた M_{11} モードの振幅応答関数 amplitude response function⁽⁵⁾ を、地下構造モデルに基づいて理論計算し、スペクトル振幅比との比較を行なった。地下構造が正確に知られている、観測点 B-7~9 については、観測値と理論値はよく一致する。ここで行なったような観測と理論の比較が直ちに、地下構造を推定するための方法として利用できる可能性については改めて述べるまでもない。

4. おわりに

微動には、地盤構成についての情報がいろいろの形で含まれていることが推察される。微動という自然現象を有効に利用し、あるいは、微動観測を利用して行なう地盤構成の推定に、従来にも増して高い信頼性が得られるためには、微動の性質を多面的に検討することが効果的な方策の一つであると考えられる。本研究ではアレ観測と位相速度の解析を通じて、微動が基本モード Rayleigh 波を優勢に含むことを明らかにし、(1) 三成分観測と粒子軌跡(上下・水平振幅比)の解析 (2) 基盤・地盤比較観測と地盤の増幅性(地盤/基盤スペクトル振幅比)の解析が新たな着目点(検討すべき微動の性質)になり得ることを具体的に示した。ただし、(2)の方法は、観測地域内に適当な基盤観測点を得られたために実行が可能になったものである。一方、微動を構成する波の種類には地域的な差異のあることも考えられ、微動記録を常に Rayleigh 波として解析することの妥当性については不安がある。この問題に対しては、微動を構成する波の種類についての一般的理解を得て解決を試みることが必要である。この問題の解決を今後の課題としたい。

文献 (1) 坂尾直巳ほか(1978), 地震第2輯, 31, 179-193. (2) 太田 裕(1964), 地震第2輯, 17, 179-186.

(3) 例えば, Boor, D.M. and N. Toksöz (1969), Bull. Seism. Soc. Am., 59, 331-346; 野越三雄・五十嵐亨(1971), 地震第2輯, 24, 26-40.

(4) Montalbetti, J.F. and R. Kanosewich (1970), Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 21, 119-129.

(5) Harkrider, D.G. and D.L. Anderson (1966), J. Geophys. Res., 71, 2967-2980.