

地震波スペクトルと地表層構造

信州大学工学部 ○島 坦, 泉谷 恭男, 廣 志

1. まえがき

地震波形については観測に用いる地震計の特性を除くと、震源における地震波の発生機構、媒質中の伝播特性、さらに地表付近の層構造による周期特性等に左右される。地震学における波動の研究では比較的よい地盤で観測を行なうのが普通であるが、工学的応用の立場では地表層構造の特性を知るために種々の地盤において観測を行なっている。従って地盤によってどの程度地震波形が変化するかについて十分調べることは基盤の深さおよび入力地震波の波形の推定と共に興味あることと思われる。

波形解析においてP波あるいはS波といった位相につづいてあらわれる振動波形は、地表付近の地下構造に強く支配されていることはこれまで常時微動との比較からも確かめられている。ここではいくつかの近地地震の記録についてスペクトルを調べているが、波形をS波の到達時で分け、S波以後の波形のスペクトルとP波からS波に到る波形のスペクトルの振幅比で議論してみた。その結果から表層構造による伝達関数を求め、多層構造における重複理論から得られた伝達関数と対比させた。用いた観測資料は震央距離約30km~400kmにわたる地震で、距離と震源の深さの異なる地震のスペクトルから表層構造との関係を調べた。なお観測点は長野市南部を流れる犀川の付近で粘土及び砂レキ層より成る地盤である。

2. 近地地震波形のスペクトル

2-1 観測 解析を行なった地震については Table 1 に示すとおりで、発震時、震源位置、マグニチュードは気象庁で決定されたものが主であるが、松代群発地震については東大北信微小地震観測所で決定された値である。No.1, No.2 の地震は震央距離約30~40kmの極近地地震、あとは約140~400kmの範囲にあるが、No.3, No.6 は深い地震で No.4, No.5 は浅い地震である。

観測は地表では周期1秒の地震計で速度記録、地中では3c/sの加速度計で地下17mの点で記録を得ている。ここに用いた資料はほとんど地表観測によるものである。

2-2 地震波のスペクトル

地震波形の解析にあたって工学的応用の面では、ランダム波形という考えから位相を問わず記録全体について行なうことが多いが、波の性質の相異を考慮してS波の到達時で分けて考える。P波からS波に至る相(以後P~S相という)の波形とS波以後の相(以後S~L相という)の波形についてスペクトルを比較してみよう。図1(a)~(f)に Table 1 に掲げた6個の地震についてスペクトルを両対数目盛で示す。図から分るようにS~L相の方がP~S相に比べて振幅が大きくなっており、そのスペクトルの形は周期と共に増大するが、近い地震では特定の周期で最大値がでてくるという一般的な結果が得られている。このような傾向の中でスペクトル振幅は振動的に変化し、いくつかの卓越した周期成分をもつ。全体についてみたとき、比較的明瞭な卓越周期は0.2~0.3秒, 0.8~1.0秒, 1.5秒あたりにあらわれる。しかし図1をみた範囲では地震によって若干変っており、またP~S相とS~L相によっても相異しているように見え、6つの地震について共通してよくあらわれる周期は分りにくい。

ここで表層構造による振動特性を調べるため、図1に示したP~S相とS~L相のスペクトル振幅の比較から議論してみることにしよう。

3. 地表層構造の振動特性

Table 1. List of earthquakes

No.	Date	Location of Epicenter	Depth (km)	Mag.	Dist. (km)
1.	1975 Apr 23, 030456.2	Sakai-mura*	36°23'N 138°03'E	8	3.4 30
2.	Mar 6, 1937 18.4	Honjo-mura*	36 20 137 55	0	3.8 41
3.	Mar 11, 1757 31.1	Tochigi Pref.	36 31 139 43	130	5.1 137
4.	Apr 18, 0341 08.4	Ibaragi Pref.	36 08 139 51	50	5.0 158
5.	Apr 21, 1245 15.2	Off Ibaragi Pref.	36 30 140 42	60	4.8 225
6.	May 30, 0044 46.1	S off Chubu	33 06 137 19	380	6.2 402

* Epicenter determined by Hokushin Seis. Obs., Tokyo Univ.

3-1 S~L相と P~S相のスペクトル振幅の比

S~L相の波形と P~S相の波形のスペクトルの

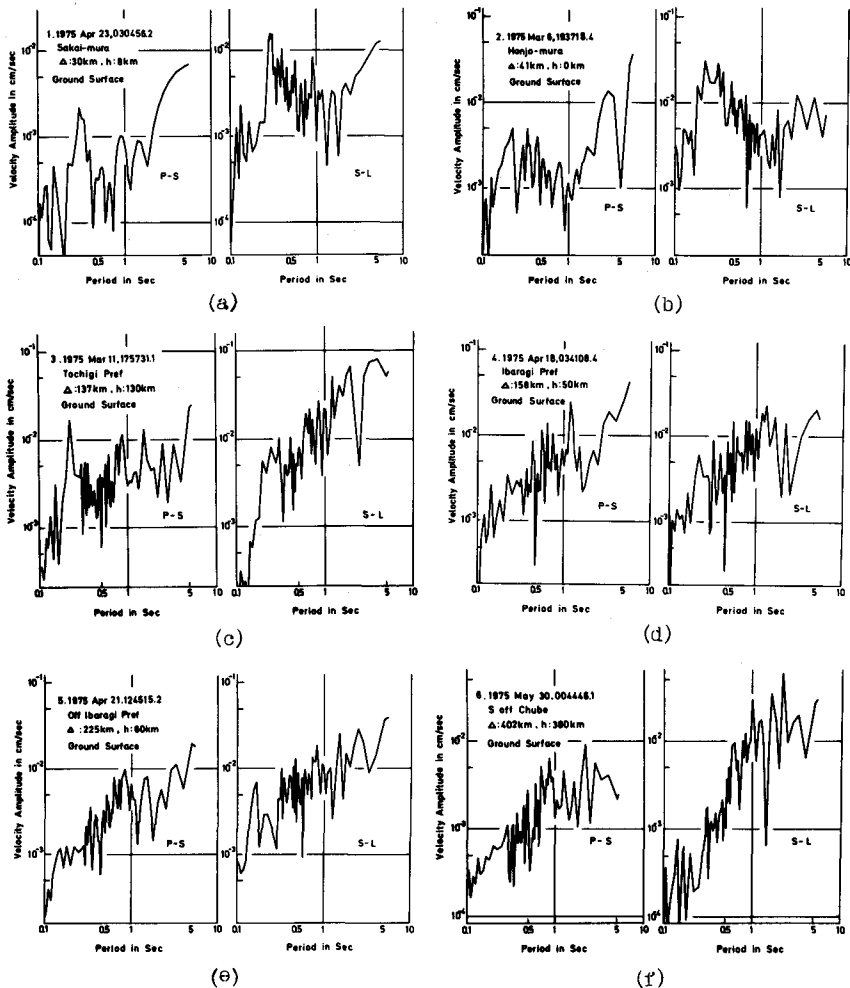


Fig.1 P~S相とS~L相のスペクトル

振幅比を周期について示したのが Fig.2 である。Fig.2, a)にはNo.1とNo.2の極近地地震, Fig.2, b)にはNo.3とNo.6の深い地震, Fig.2, c)にはNo.4とNo.5の浅い地震の場合である。図a), b), c)の間には明瞭な相違がみられ, a)では二つの地震とも周期約0.6秒付近を最大値として周期の短い方と長い方のいずれも振幅比が減衰している。b)では振幅比と周期の関係は約0.6秒付近で短周期成分は減少し, 長周期成分はほぼ一定値をとっているとみることができ。最後にc)ではNo.4の地震では長周期成分でやや右下りとなっている

が, 2つの地震についての全体の傾向はb)の場合と異って周期によらず一定のレベルで振幅比が変化していると思われる。

ここでFig.2, a), b), c)にみられる傾向に対してどのように解釈すべきであるかについて一つの考察を行ない, 表層構造の振動特性を求めてみよう。

3-2 スペクトル振幅比に対する入力地震波の影響

地震記録の中で地表構造の特性を知るため

には, 地盤の基礎に到達する入力波形の影響がどの程度残っているかが問題である。入力地震波はマグニチュードや震源より地盤基礎までの媒質中のエネルギーの吸収によって周期特性が変化することはよく知られている。

地震波のスペクトルにおいて地震発生の機構を考慮した研究が多くなされているが, それらの結果スペクトルの長周期側では周期に関係せず一様な部分と短周期側では周期の n 乗に比例して増大する部分があり, その交点として折れ曲りの周期が存在する。一方地震波スペクトルの変位振幅が一様である周期範囲においてS波とP波の振幅レベルの比はHanks and Wyss (1972)等の研究によって述べられている。その一例として地震発生時における有効応力が地震発生のため全部消費されたとき, P波とS波

のスペクトルのレベル比は速度比 V_p/V_s の3乗となる。

ここでは Fig. 2, a), b), c) に示されたスペクトル振幅比において入力地震波の影響が残っていると考え、これを補正することにより振動特性を見やすくする。その意味合いにおいて前述の発生機構によるスペクトルの形を考えてみよう。層構造の基礎に到達する波のスペクトルとして図式的にモデルを想定しておく。それは Fig. 3, a), b) の上図

には S波および P波のスペクトルを速度値で表現し、下図に振幅比を示してある。図 a) は近くて比較的マグニチュードの小さい場合で、もしマグニチュードが大きくなると点線のように思われる。図 b) にはやや遠い地震の場合、あるいは近くてもマグニチュードが大きくなると図 a) の点線表示の場合の拡張としてこのようになると考えられる。この図式表現で S波と P波のレベルについては前述の $(V_p/V_s)^3 = 5.2$ (ポアソン比0.25の場合) とした。この理論値については今後観測からはっきりさせたいが、Fig. 2, a) の極近地地震ではほぼこの値に近い結果となっている。なお Fig. 3, a), b) における短周期側における S波スペクトルの傾斜は 1.7 としてあるが、それは P波のスペクトルと振幅 0.1 のところで合せてあるため今後基礎までの S波、P波の吸収の議論をして決めねばならない。ここではあくまでも第1近似とし Fig. 2 の観測結果に対する補正值として決めたことであり、Fig. 2, a) には Fig. 3, a) の振幅比の曲線、また Fig. 2, b), c) には Fig. 3, b) の曲線が示されている。従って Fig. 2 のスペクトル振幅について、表示された補正曲線により書き直すと Fig. 4 に図示したスペクトルとなる。いまこれを地表層構造の振動特性として次に議論してみる。

3-3 地表層構造の振動特性と理論値

Fig. 4 にあらわれたスペクトルをみると 6つの地震について若干の差はあるが、かなり共通した卓越周期が認められる。すなわち周期0.15秒、0.25~0.30秒、0.5~0.7秒、1秒、1.5秒あたりに対応して振幅比が大きくなっている。

ここで理論計算と比較するために定常的な正弦波が成層構造に入射する場合の応答について調べてみる。多層構造において鉛直下方より SH 波が入射するときの振幅-周期特性について最近 Tsai (1970) が計算している。その方法に準じて観測地点の構造モデルで計算してみた。Fig. 5 にボーリング結果の土質柱状図と N値の分布を示している。40m以上の深さについては近傍のボーリング資料に基づいて構造のモデルを作り、計算を行なった一例が Fig. 6 である。図には基礎までの深さを300mとっており、図中の速度分布の構造では基本周期は4.0秒となっており、Fig. 6 に表われている周期範囲の卓越周期は高次のも

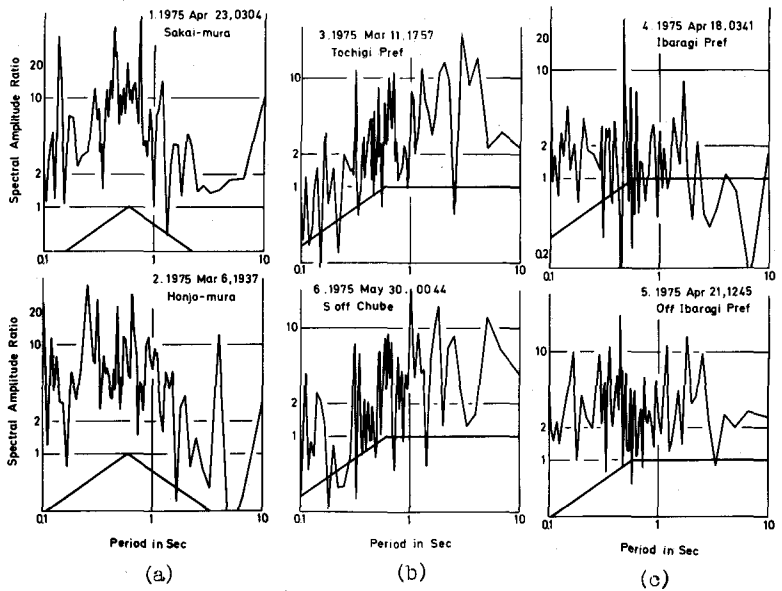


Fig. 2 S~L相とP~S相のスペクトル振幅比

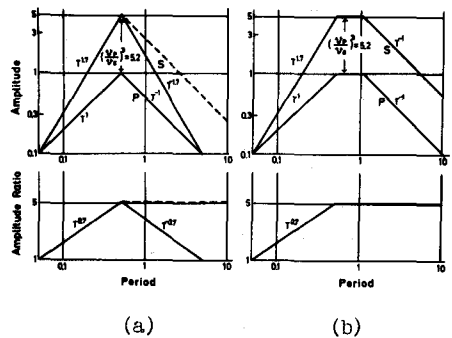


Fig. 3 基礎におけるP波とS波のスペクトル模式図

のである。

Fig. 6とFig. 4, a), b)を比較してみるとスペクトルの傾向はよく一致しているとみることができる。すなわちNo. 1, No. 2のような極近地地震及びNo. 3, No. 6のようなやや遠いが深い地震の場合には、観測点付近の構造内の重複反射の理論でよく説明されることになる。一方Fig. 4(c)におけるNo. 4とNo. 5のやや遠く

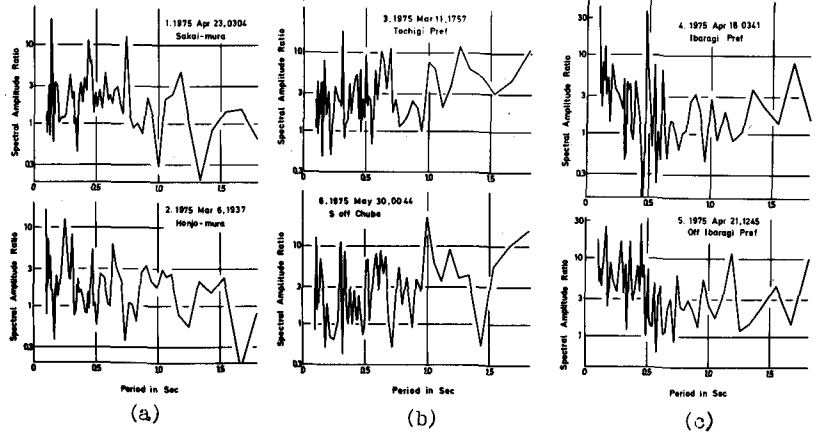


Fig. 4 地表層構造の振幅-周期特性

くて浅い地震の場合には、約0.5秒以上のやや長い周期範囲では理論とはほぼ一致する。しかし周期約0.3秒以下の短周期成分では理論値より大きくなっている。このことはP~S相に比べてS波以後の振幅が大きくなっていることに対応しているから、表面的な伝播機構の方が卓越しているように思われる。

次にFig. 6に点線で画いている地下17mにおける振動特性についてみてみよう。観測値としてNo. 1の地震の地中観測について得られたS~L相とP~S相のスペクトルの振幅比をFig. 7に示す。Fig. 6の理論値と比較すると定性的な傾向はほぼ一致しているとみてよい。すなわち周期約0.8秒以下の成分はごく地表付近の構造に支配されている。

このように地表及び地中の観測についてP~S相とS~L相との波形の比較から表層構造をかなり明らかにすることが出来るように思われる。

4. むすび

1. S~L相とP~S相のスペクトルの振幅比から地下構造との対応を調べると、周期約1.8秒以下の振動特性でも深さ300m程度のかなり深い構造を考える必要があるように思われる。

2. 地下構造について仮定された速度分布で地表の観測を大凡説明でき、また極近地地震の場合について深さ17mにおける観測も同じモデルで説明できた。

3. 極近地地震ややや遠くて深い地震の場合には地震波形のスペクトルでは地表層構造内の鉛直入射による重複反射で説明できる。一方やや遠くて浅い地震では表面波の伝播特性が影響し、したがって入射角を考慮した重複反射を議論すべきであろう。

本研究における計算には東大大型計算機を使わせて戴いた。

Ref.

Hanks, T. C., and M. Wyss (1972) : B. S. S. A., 62, 561~589

Tsai, N. C. (1970) : B. S. S. A., 60; 795~808

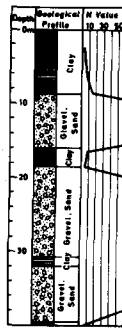


Fig. 5 土質柱状図

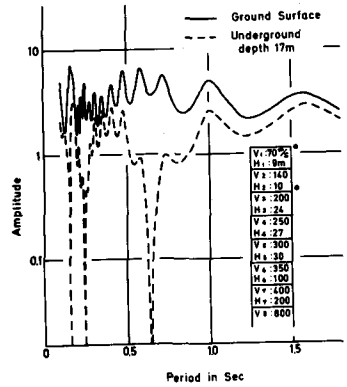


Fig. 6 地表および地中(17m)の振動特性

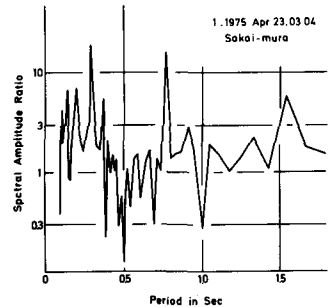


Fig. 7 地中(17m)における振幅-周期特性