

上海平野で観測された微動記録からレイリー波を分離する試み

斉藤 秀雄・盛川 仁・赤松 純平

SEPARATION OF RAYLEIGH WAVES FROM MICROTREMORS OBSERVED IN THE SHANGHAI PLAIN

By Hideo SAITO, Hitoshi MORIKAWA and Junpei AKAMATSU

Synopsis

In order to examine the applicability of microtremors to studying ground vibrational characteristics and understanding of subsurface structures, we separate Rayleigh waves from observed microtremors. For this study, we use the array data of microtremors observed in the Shanghai plain in 1993; this observation was carried out as a part of joint research project with State Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, China. In order to ensure the accuracy of the following analysis, at first, the directions of wave propagation are carefully determined using the two-dimensional slowness analysis. On the basis of this result, the phase velocities are calculated with cross-correlation. And then wave groups whose phase velocities were determined accurately are identified with Rayleigh waves using particle motion diagrams.

1. は じ め に

近畿都市圏や首都圏などの厚い土質堆積地盤に立地する都市の地震防災を考えるうえで、基盤岩の深度やその形状、土質地盤の物理的性質と地震動災害との関係が種々議論されている。特に、阪神・淡路大震災では、阪神間における顕著な被害域は帯状に集中しており、六甲山麓から大阪湾にかけて深度の急変する基盤岩の形状が被害の集中に大きく寄与したことが示唆され、改めて基盤岩構造の正確な把握の重要性が指摘されている¹⁾。

地盤サイトの地下構造とこれによる地盤震動特性を推定する簡便な方法として微動の利用があげられる。微動のレイリー波成分に着目し、上下動成分のアレー観測から位相速度を推定し、その分散性から構造を推定する方法²⁾(例えば、Horike, 1985)、地盤上と基準の岩盤上との同時観測によるスペクトル比から地盤による増幅率を求める方法³⁾が一般的であるが、近年、地盤上で観測される微動の上下動成分に対する水平動成分のスペクトル比(H/V)が地下構造を反映するとして、地震工学的な利用が検討されている⁴⁾。 H/V を利用することの利点は、地盤上の1地点3成分のみの記録から必要な情報が得られるという観測の簡便性にあるものと考えられるが、その波動論的解釈や利用可能な条件、その限界についてはまだよくは判っていない。野越は微動の H/V とモデル計算から求められたレイリー波のスペクトル比とを比較し、低周波部分はレイリー波($M11$)の振幅特性から説明できるが高周波部分では説明できず、レイリー波以外の波動の混入を示唆している⁵⁾。

一方、アレーデータによるレイリー波の位相速度の推定については、上下動成分にはレイリー波以外の波動は少ないことなどを仮定してCaponの $f-k$ スペクトル法⁶⁾が多く用いられている。しかしながら、

記録から微動に含まれるレイリー波の割合が吟味されることはあまりない。この点、岡田等の3成分のアレーによりレイリー波とラブ波の位相速度を推定する方法⁷⁾は注目される。

京都大学防災研究所と中国同济大学(上海)土木工程防災国家実験室とは、上海市とその周辺地域の都市施設の地震危険度を総合的に評価する共同研究を実施し、その一環として1992年と1993年に上海平野の広域で微動を観測した。観測された長周期の微動(脈動)の上下動成分に対する水平動成分のスペクトル比、 H/V 、のピーク周期と基盤岩深度とに良好な線形関係が見出され、これが平野のマイクロゾーニングの資料として利用できることを報告した⁴⁾。この観測では、微動に含まれるレイリー波成分を抽出するための試みとして、上下動成分からなるアレーと3成分1点とを組み合わせたアレー観測をおこなっている。本論では、このような比較的手軽に得られる微動の観測記録から、レイリー波成分の分離を試み、分離されたレイリー波の振幅特性を用いて地下構造を推定し地盤による地震波増幅特性を議論することの可能性を検討する。

2. 観測と解析

上海平野のマイクロゾーニングを目的として、1992年と1993年のいずれも11月から12月にかけて上海市街・郊外の広域にわたって微動観測をおこなった。その内、郊外の4地点において3成分1点に上下動成分によるアレーを組み合わせた観測を行った。上下動成分は1992年の観測では3点、1993年は5点である。

本論での解析に使用するアレーデータは1993年11月に金山(Jin-Shan)で収録したものである。Fig. 1に観測点の位置を示す。金山は上海市の南西約50 kmに位置する田園地帯である。金山で展開したアレーの形状をFig. 2に示す。アレーの中心点(Fig. 2に▲

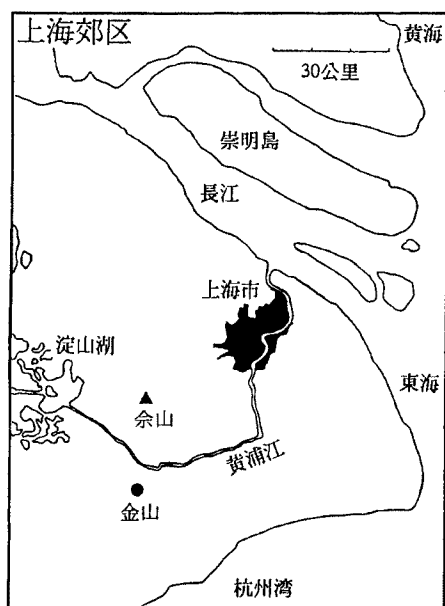


Fig. 1. Location of observation sites in the Shanghai plain.

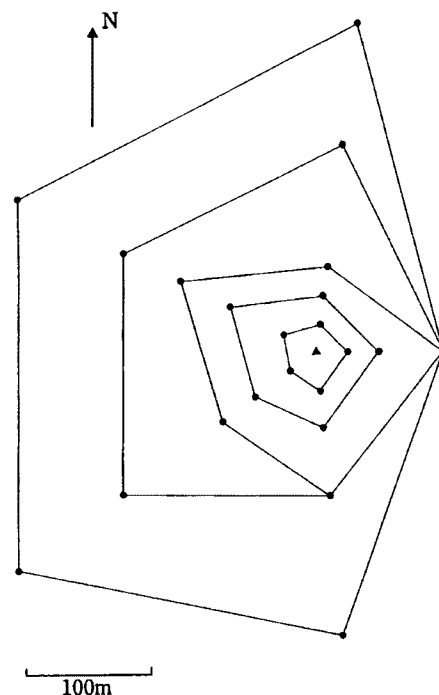


Fig. 2. Distribution of seismometers for array observation at Jinshan, Shanghai. UD components are observed at ● and a set of three components (NS, EW, and UD) at ▲. In this measurement, five UD components on each pentagon and a set of three components are simultaneously observed.

で示した)に3成分を設置し、その周囲に上下動成分のみを5点配置した。解析対象とする周波数帯に対し最適な位相の分解能を得るために大きさの異なる5つのアレーを順次展開した。

観測システムは計8台の換振器の信号を1台のデジタルレコーダで収録する方式とした。Table 1に各アレーごとのサンプリング周波数、ローパスフィルタの遮断周波数、アレーの大きさ(最も離れた地震計間の距離)を示す。使用した換振器は固有周期10秒の速度計(PELS-73)である。得られたアレー観測記録の例をFig. 3に示す。CH. 1, 2, 3はそれぞれ中心点でのNS, EW, UD成分である。

計器ごとの振幅および位相特性の補正は、余山(She-Shan)の上海市地震観測所で計測した個々の計器の特性と、アレー観測現場で毎回計測した各地震計の周期を用いて、レコーダに収録された記録を地動速度波形に変換する際に、おこなった。これにより、以下の解析を行うのに十分な振幅および位相特性の補正がなされている。

本論で行うアレーデータの解析内容は、上下動成分の位相速度および入射方位の推定と、推定された入射方位をもとにした中心点での振動軌跡の分析である。解析の概略を以下に示す。

まず、バンドパスフィルタを通した波形の中から上下動成分について各CH間の位相の対応が良好な波群を選び出す。解析対象はこれらの選び出された波群に限定し、それぞれの波群が一方向から入射した平面波であると仮定して波動相関法により、各波群毎に位相速度および入射方位の推定をおこなう。バンドパスフィルタの中心周期の3倍の長さのウィンドウを半周期づつ移動させながら位相速度および入射方位を計算し、それらの平均値をその波群についての推定値とする。なお、上下動成分の地震計

Table 1. Array size and sampling frequency

Array size*	Sampling freq.	Cut off freq. of low pass filter
m	Hz	Hz
480	100	1
270	100	3
210	200	3
120	200	10
50	500	10

* maximum distance between geophones

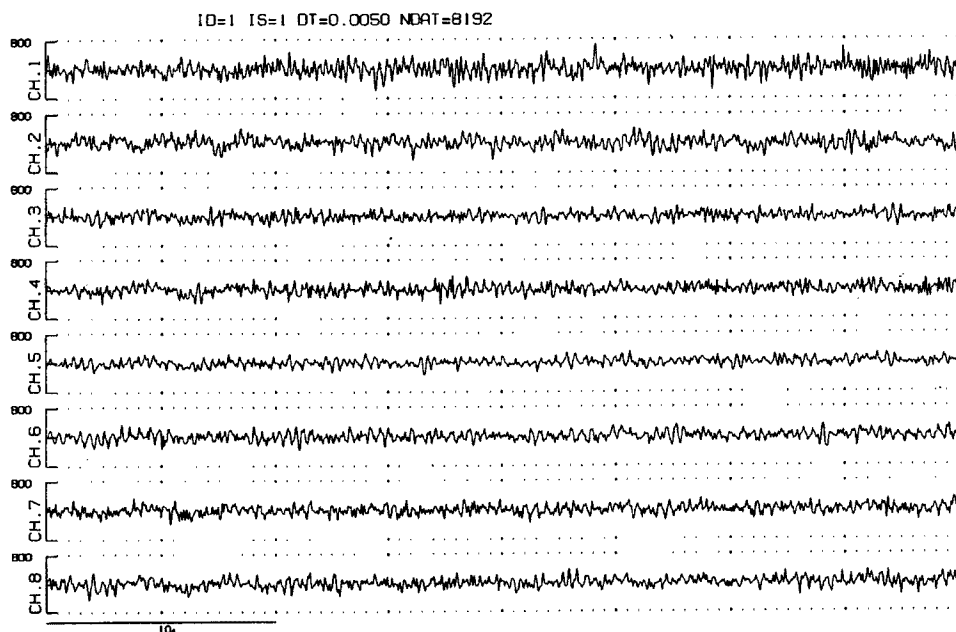


Fig. 3. An example of microtremors observed at Jinshan array. CH. 1 : NS, CH. 2 : EW, CH. 3 : UD at center (Fig. 2 ▲).

の内、CH. 6は動作不良のため解析には使用しなかった。したがって、位相速度および入射方位の推定に用いたのは中心点での上下動成分を含めて計5点での上下動記録である。

次に、位相速度および入射方位の推定値が得られた波群について、中心点での3成分記録から振動軌跡を描き、入射方位との関係を調べる。具体的には、水平面内における振動の卓越方向と入射方位の関係、ならびに入射方位を含む鉛直面内における振動軌跡の形状を検討する。

なお、今回の解析には直接使用していないが、余山の上海市地震観測所において岩盤上の3成分記録を1時間毎に15分間収録することにより波動場の監視をおこなっている。

3. 解析結果

3.1 位相速度および入射方位の推定値の吟味

今回の解析では位相速度および入射方位の推定に波動相関法を用いている。これは「一方向から平面波が入射している」というモデルを仮定した最小2乗法による推定である。推定を行う際の観測値は計5点の上下動成分の各2点間の位相差であり、これらと計算値との残差の2乗和を最小にする位相速度および入射方位が推定値となる。実際の計算では位相差に相当する時間差を用いる。

しかし、選り出した波群が一方向から入射する平面波であるという保証はなく、また微動において一方向から入射する平面波が卓越する区間が存在するか否かも実際は不明である。仮に一方向からの平面波入射でない区間に対して波動相関法を用いて位相速度および入射方位を計算すると、それは不適切なモデルを押しつけることになり、計算される値は無意味である。これに加えて、観測量として扱う位相差は場合によっては $\pm 2\pi$ 取り違えること、すなわち空間的エイリアシングが生じる恐れがある。この場合も、計算される値は無意味である。

そこでこれらの問題を解決するために以下に述べる方法によって推定値の吟味を行った。

ある平面波のx軸方向およびy軸方向のスローネスを (s_x, s_y) とすると、観測点A (x_i, y_i) に対する観測点B (x_j, y_j) の同一波面の到着時間差 t_{ij} は、

$$t_{ij} = (x_j - x_i)s_x + (y_j - y_i)s_y$$

である。

したがって、観測された時間差を τ_{ij} とすれば、観測点が n 点の場合、2つの未知数 (s_x, s_y) に関する方程式、

$$(x_j - x_i)s_x + (y_j - y_i)s_y = \tau_{ij} \quad \dots\dots\dots (1)$$

が nC_2 個得られる。

これらの方程式を s_x-s_y 平面上の直線と見れば、理想的な平面波の入射に対して、それらは1点で交わる。そこで、位相速度および入射方位の推定を行ったすべてのウィンドウについて直線(1)を描き、実際に意味のある推定が行われたかどうかを調べた。

Fig. 4にそれらの例と対応する波形を示す。波形の長方形で囲まれた部分が計算に用いたウィンドウである。(a)に見られるように、本来交わるべき点が確認できる場合は推定値として採用し、(b)のように、交わるべき点が確認できないものは一方向から入射した平面波ではないと判断して解析から除外する。

この吟味を経て、一方向から入射する平面波が卓越していることが確認された波群のみについて、以降の検討を行う。

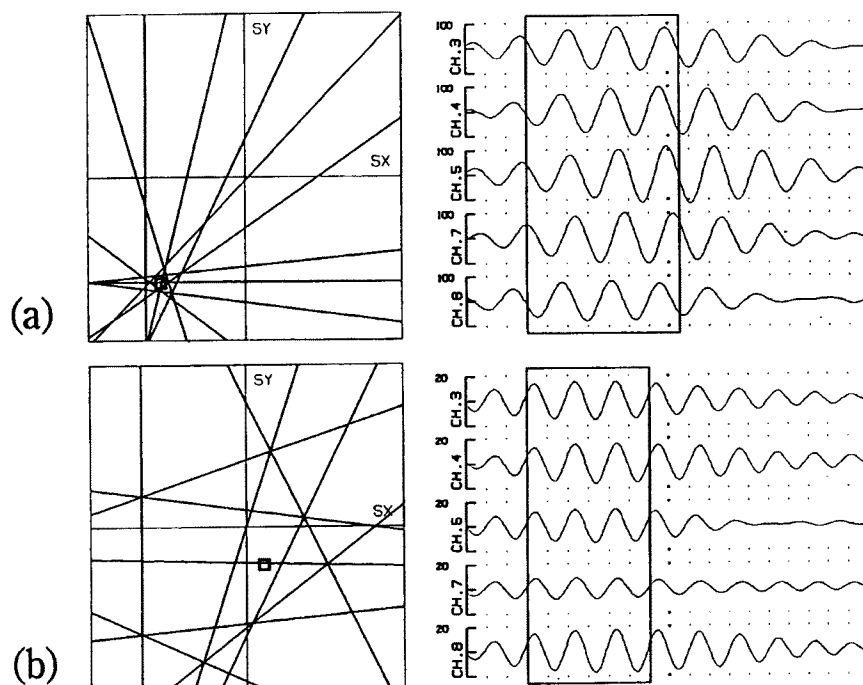


Fig. 4. Slowness diagrams for examination of accuracy of phase velocities and propagation directions. Figure (a) shows agreeable example and figure (b) is a case where the evaluation is unsuccessful. The left panel shows the equations (1) on slowness (S_x , S_y). $\square$ represents the optimal solution of equations (1). The right panel shows corresponding band-pass filtered microtremors and time window.

3.2 解析可能な周波数範囲

位相速度の推定が可能な周波数はアレーの大きさに依存する。つまりアレーの大きさに対して波長が長すぎると位相差の分解能が悪化して、正しい推定が行えなくなる。 $f-k$ 法を用いる場合は波長がアレーの大きさの例えば4倍以内⁸⁾、とされている。今回使用したアレーデータでは、前節の吟味の結果、一番大きなアレーにおいて十分な分解能が得られたのは0.5 Hz以上であった。0.5 Hz帯では、次節で述べる位相速度の推定値から求める波長は、アレーの大きさの約10倍となる。これは $f-k$ 法の場合限界とされている4倍を超えているが、前節の吟味により十分な精度を有すると考えられる。

一方、高周波側は一番小さなアレーにおいて波形の相関が2 Hzまでは良好であったので、2 Hzまでを解析対象とした。

次節以降では、中心周波数が0.5, 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0 Hzの各周波数帯についての結果を述べる。

3.3 位相速度

Fig. 5に3.1の吟味を経たすべての波群の位相速度および入射方位の推定値を周波数帯別に示した。各図中の黒丸1つが1つの波群に対応する。エラーバーは速度の絶対値と進行方向（入射方位）についてそれぞれ独立とみなして計算した標準偏差である。0.63 Hz帯については推定値が得られなかったため、図は示されていない。

Fig. 5において、まず波群の進行方向に注目する。0.5 Hz帯ではあらゆる方向に進行している。0.8 Hzおよび1.0 Hz帯では主に南南東から北北西へ、1.6 Hzおよび2.0 Hz帯ではすべての波群が北東から南西

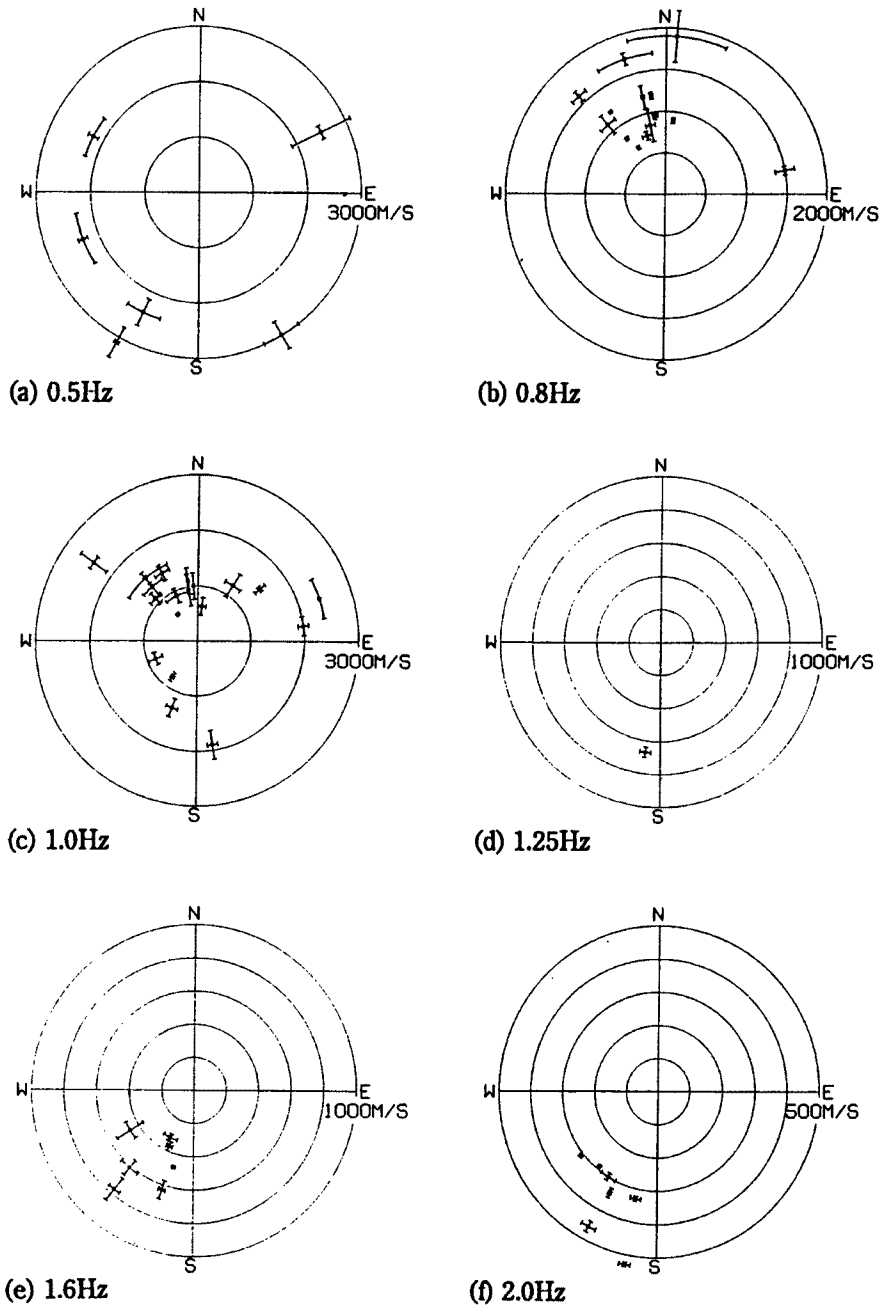


Fig. 5. Distribution of phase velocities and propagation direction. Phase velocities and propagation directions evaluated for each wave groups are shown.

へ進行している。金山の南東方向には杭州湾の海岸線があることから (Fig. 1), 0.8 Hz と 1.0 Hz のやや低周波数帯域では、主として杭州湾の波浪により励起される脈動が入射していると考えられる。一方金山の北東方向には上海市街があることから、1.6 Hz と 2.0 Hz のやや高周波数帯域では上海市街域で発生した人工的ノイズを主な波源としていると考えられる。したがって、金山においては 1.0 Hz から 1.6 Hz の間で、優勢な波源が海の波浪から人工的ノイズへと移ることが推測される。このように、到来方向の変化

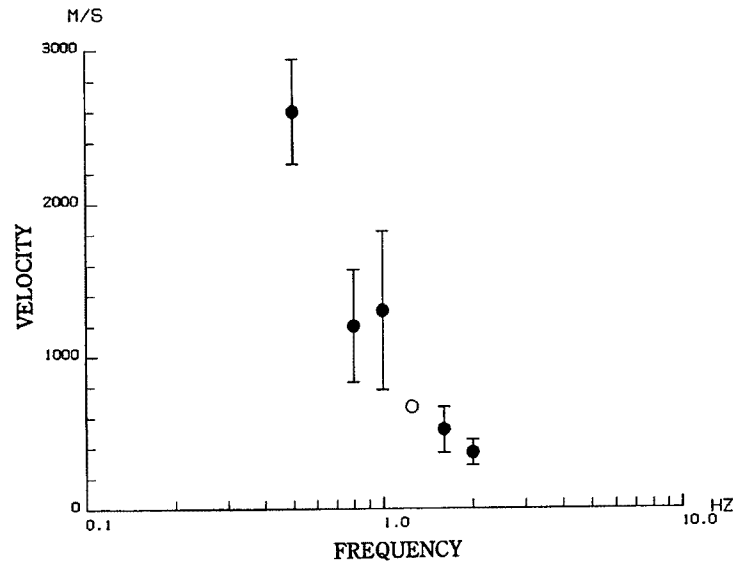


Fig. 6. Dispersion of phase velocities. ● is mean values and error bars represent the ranges of mean $\pm$ standard deviation. ○ is the result calculated from one sample.

から、微動の主たる波源は周波数に応じて異なることが解る。またこのことから、異なる波源の優劣が拮抗する周波数帯では、位相速度および入射方位の推定が困難になることが推測される。例えば、1.25 Hz 帯では位相速度および入射方位の推定値が一つしか得られていないが、この原因は上海市街の人工的ノイズを波源とする波と杭州湾を波源とする波がかち合っているために、一方向から入射する波が卓越しにくかったためと考えることができる。

次に、Fig. 5 の位相速度の絶対値に注目すると、各周波数帯ごとに位相速度が異なっていることがわかる。周波数に対する位相速度の分布を Fig. 6 に示す。図中の黒丸は各波群の推定値の平均を表す。1.25 Hz はサンプルが一つなので白丸で表し区別している。値のばらつきはあるものの、明らかに正分散を示している。

3.4 振動軌跡

位相速度および入射方位が推定されたすべての波群について、中心点での 3 成分記録から振動軌跡を描いた。Fig. 7 に、0.8 Hz 帯についての例を示す。左の図が水平面内の、右の図が入射方位を含む鉛直面内の軌跡である。図中の矢印は波の進行方向を表す。(a) に描かれる波群は水平面内において振動の卓越方向と入射方位が一致し、かつ鉛直面内においてはほぼ楕円運動を示す。このことからこの波群ではレイリー波が卓越していることがわかる。一方 (b) の図では、水平面内において振動の卓越方向と入射方位との間に一致は見られず、レイリー波の挙動としては説明できない。図には示さないが、他の周波数帯でも同様に、レイリー波が卓越する波群と卓越が認められない波群とが存在した。

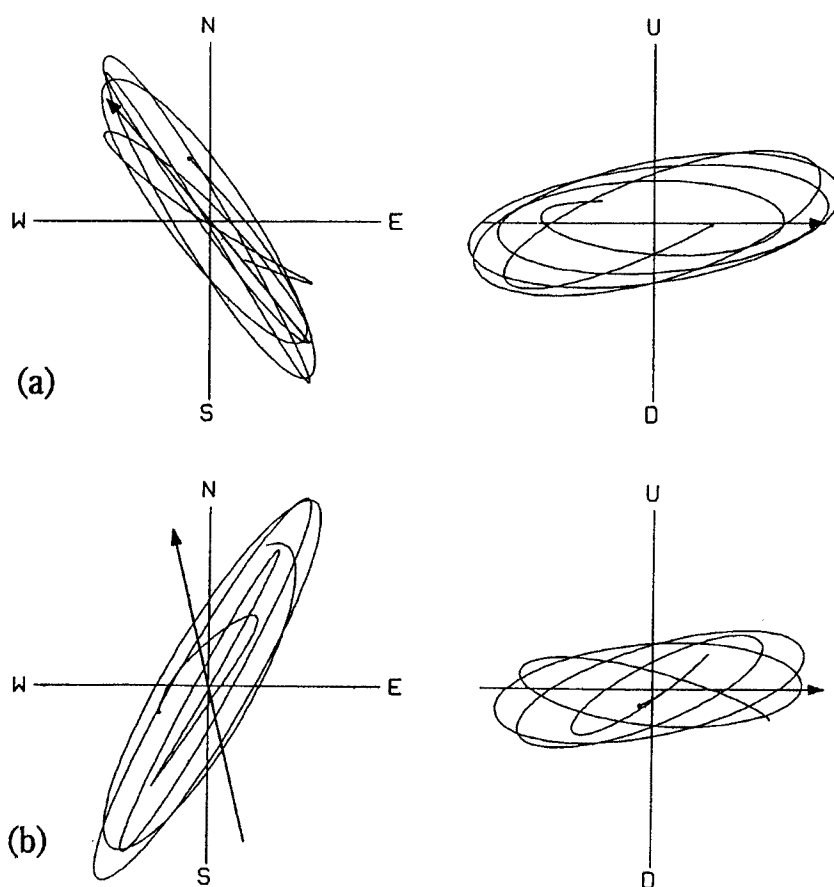


Fig. 7. Examples of particle motions of microtremors. The arrows denote the direction of propagation. Figure (a) has the properties of Rayleigh wave. On the other hand, we cannot observe the characteristics of Rayleigh wave in figure (b).

4. 議 論

Table 2 に位相速度および入射方位の推定値が得られた波群, すなわち一方向から入射する平面波が卓越する波群と, それらの波群の内レイリー波の卓越が認められた波群について, それぞれの波群の数, 波

Table 2. Content of waves extracted from microtremors

Frequency Hz	Duration of record (T) S	portions regarded as plane wave			portions identified with Rayleigh wave		
		Number	Total time (T_P) S	T_P/T %	Number	Total time (T_R) S	T_R/T_P %
0.5	676	6	68	10	3	31	46
0.63	676	0	—	—	—	—	—
0.8	676	14	95	14	6	37	39
1.0	338	19	115	34	8	49	43
1.25	338	1	5	1	0	—	—
1.6	135	7	34	25	1	5	15
2.0	135	7	20	15	1	3	15

群の継続時間の和、およびそれらの全体に対する割合をまとめた。

以下、(1)位相速度および入射方位の推定値が得られた波群の内、レイリー波が卓越するもの、(2)位相速度および入射方位の推定値が得られているが、3成分の振動軌跡からはレイリー波の卓越が認められなかった波群、(3)位相速度および入射方位の推定値が得られなかった区間、に分けて考察を行う。

(1)位相速度および入射方位の推定値が得られ、かつレイリー波が卓越する波群は、1 Hz より高い周波

数帯では少ないが、1 Hz 以下の周波数帯では半分程度存在する。このように、レイリー波のみが卓越する波群が低周波数側で、より多く見られる。この結果は、野越が数値計算により示した、微動の H/V が低周波数部分ではレイリー波の振幅特性として説明できるが高周波数部分では説明できない、という結果⁵⁾に矛盾しない。また、これらレイリー波のみが卓越する波群を抽出することにより微動記録からレイリー波を分離することが、1 Hz 以下の長周期帯では可能であるといえる。本研究の目的の一つはこのようにして分離されたレイリー波の振幅比 (H/V) から地下構造を推定することであったが、今回の解析では得られたサンプル数が少ないので振幅比を定量的に評価するには至っていない。

(2)位相速度および入射方位の推定値が得られている波群の内、レイリー波の卓越が認められない波群がどの周波数帯でも見られる。これらの波群の上下動成分は一方向から入射する平面波ではあるが、これがレイリー波の上下動成分なのか実体波によるものなのかは解らない。そこでレイリー波の卓越が比較的多く見られた、0.5, 0.8, 1.0 Hz の各周波数帯において、レイリー波の卓越が認められた波群と、それ以外の波群とで、位相速度を別々に集計し比較した。この結果を Table 3 に示す。サンプル数は多くないが、2種類の波群の間に明らかな差は認められない。このことから、振動軌跡からはレイリー波の卓越が見られなかった波群についても上下動成分は主にレイリー波で構成されていると考えられる。したがって、振動軌跡がレイリー波の挙動を示さなかった理由は実体波が入射したためではなく、水平動成分にレイリー波と同時にラブ波が混入したためと考えられる。

(3)観測で得られた全データのうち、位相速度および入射方位の推定値が得られた割合 (Table 2, T_p/T) は 1.0 Hz の 34% が最も大きく、他は 0.63 Hz と 1.25 Hz を除いて 10 ~ 25% である。しかしこの割合は上下動成分において一方向から入射するレイリー波が卓越する割合であるから、残りの全ての区間の上下動成分についてレイリー波が劣勢であることを示すものではない。むしろ、一方向から入射する表面波だけで全体の 10% 以上を構成していることは、微動中にラブ波が混入するもののレイリー波がかなり多く含まれていることを示唆するものともいえる。

このことは、Fig. 5 (a) に見られる 0.5 Hz 帯の入射方位の分布からも推論できる。すなわち、Fig. 5 (a) によると、0.5 Hz 帯ではあらゆる方向からレイリー波が到来している。このことは同時刻に複数方向からレイリー波が入射し得ることを示している。このような場合、今回の解析方法では個々の入射波を分解することはできない。したがって、0.5 Hz 帯においてレイリー波の位相速度および入射方位が推定できた区間は 10% であるが、実際にはより多くのレイリー波が存在していると考えられる。

Table 3. Comparison of phase velocities between waves whose locus show characteristics of Rayleigh wave, and other waves

Frequency Hz	Phase velocity m/s	
	Rayleigh wave	Other
0.5	2400 ± 82	2766 ± 403
0.8	1200 ± 327	1138 ± 406
1.0	1111 ± 428	1449 ± 541

5. お わ り に

微動に含まれるレイリー波成分を分離し、その振幅特性から地下構造を推定する目的で、3成分1点と上下動成分4点の記録から成るアレーデータの解析を行った。本研究では、解析対象を一方向から入射す

る平面波が卓越する波群に限定したために、解析対象として抽出された波群のサンプル数はすくなくかった。しかしこの結果、 $f-k$ 法による位相速度推定のように微動を統計的に処理するのではなく、個々の入射波について個別に検討をおこなうことができた。この解析で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 微動の上下動成分において、伝搬性を示す波群の存在が確認された。それらの位相速度は分散性を示し、進行方向は周波数に依存して異なる傾向を示した。

(2) 振動軌跡を検討した結果、伝搬性を示す波群の上下動成分はレイリー波であることが示された。また同時に、水平動成分にはレイリー波だけでなくラブ波も含まれていることが示された。

(3) レイリー波のみが卓越する波群として、微動記録からレイリー波を分離することができた。しかし、振幅の定量的な評価をおこなうための十分なサンプル数を得ることはできなかった。

以上の結果、当初の目的である地下構造の推定をおこなうには至らなかったが、上海平野における微動の成分に関して有益な情報を得ることができたと考えている。

参 考 文 献

- 1) Akamatsu, J., H., Morikawa, H., Saito and M., Jidou : A relation between distribution of damages caused by the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake and ground vibrational characteristics inferred from microtremors, DPRI News Letter, Special Issue, Preliminary Report on the Great Hanshin Earthquake of January 17, 1995, pp. 24 - 33.
- 2) Horike, M. : Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, J. Phys. Earth, Vol. 33, 1985, pp. 59 - 96
- 3) Akamatsu, J., M. Fujita and K. Nishimura : Vibrational characteristics of microtremors and their applicability to microzoning in sedimentary basin, J. Phys. Earth, Vol. 40, 1992, pp. 137 - 150.
- 4) 赤松純平・李 文芸・盛川 仁・斉藤秀雄・羅 奇峰・陶 能付・亀田弘行・章 在壩・藤原悌三：脈動観測による上海平野の地盤振動特性，京大防災研年報，第 37 号 B-1，1994，pp. 119 - 126.
- 5) 野越三雄・五十嵐亮：微動の振幅特性（その 2），地震（3），第 24 巻，1971，pp. 26 - 40.
- 6) Capon, J. : High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, 1969, pp. 1408 - 1418.
- 7) 岡田 広他：深度 3000 メートル未満地下構造の広域概査のための微動探査法実用化への研究（平成 5 年度科学研究費補助金研究成果報告書（研究課題番号 13554009）），1994.
- 8) 宮腰 研・岡田 広・松島 健・森谷武男・笹谷 努・坂尻直巳：長周期微動からみた地下構造，シンポジウム「足柄平野の微動と地下構造」，文部省化学研究費総合研究（A）「地震動に与える表層地質の影響に関する総合研究」（代表，竹内吉弘），1991，pp. 86 - 91.