

中国陝西省渭河盆地におけるやや長周期の微動観測

竹内 文朗・渋谷 拓郎・尾池 和夫・大倉 敬宏・
松村 一男・李 徳利

OBSERVATION OF 1-TO 10-SECOND MICROTREMORS IN THE WEIHE BASIN, SHAANXI PROVINCE, CHINA

By *Fumiaki TAKEUCHI, Takuo SHIBUTANI, Kazuo OIKE,*
Takahiro OHKURA, Kazuo MATSUMURA and De-Li Li

Synopsis

Microtremors with periods of 1 to 10 seconds were observed at 8 points in and around Weihe Basin, Shaanxi Province and in Shanghai City, China, from March 20 to March 26, 1990. A middle-period seismograph with a digital recorder was employed as a mobile observation system. Spectral analysis was made on the observed microtremors.

The predominant peoriod was found to be about 5 seconds at almost all stations. Amplitudes of the micro-tremors were 10 or more times larger at points where sediments are supposed to be thick than those observed on basement rocks.

The amplitude of the microtremors with a period of about 5 seconds at Quanling, that is located around 1000 km apart from the sea, showed almost the same value as that obtained at Sheshan located about 60 km from the sea. These facts are important to study the origin of the microtremors and their propagation mechanism.

1. 緒言と目的

やや長周期微動は波浪起源の脈動¹⁾と考えられる。普通、数秒程度の卓越周期を示し、軟弱な地盤では大きく増幅される。軟弱層の厚さによって、岩盤上とは異なる卓越周期が見られたり²⁾、微動の振幅が場所的变化を示す事もある³⁾。これを用いて軟弱層厚を推定する事も行なわれている。

我々は中国との共同研究として、陝西省渭河盆地において微小地震観測を行なっている⁴⁾。共同研究の一環として、著者らの3人が1990年3月に約10日間訪中し、同盆地内に位置する西安市を中心に滞在し、研究交流を行なった。この機会に同地域でやや長周期の微動測定を行なった。観測の目的は、1) 海岸から約千km内陸に位置する同地域で、やや長周期の微動が存在するなら、どのような周期と振幅を示すか、3) 堆積層の最大厚さが数kmに及び、しかも場所によって層厚が大きく変化する渭河盆地内で、周期や振幅の場所的变化があるか、の3点が主である。また、この周期の微動観測は当地域で初めての試みであるので、交通や電源の便や計器の動作を確かめるなど、観測が遂行出来るかどうかの予備的調査も1つのテーマであった。

2. 観測及び解析

2.1 観 測

用いた地震計は固有周期約15秒の水平動ベルス型1成分（速度出力使用）である。3成分観測が望ましいことは言うまでもないが、機材運搬と人員の都合から、最低限の観測にとどめた。また、微動の周期や振幅について、場所的变化を論じるためには、少なくとも1点を固有点観測とし、観測期間中の時間的な変化を補正する必要がある。しかし、同じく機材等の制約から、今回は1点の移動観測だけを行なった。

センサーからの平衡出力は、30 m程度の長さの2芯シールドケーブルを介して、手製のアンプに入力した。アンプの増幅率は500～100,000倍の範囲で、ノイズレベルに合わせて切り替えて使用した。アンプはアンチエイリアスフィルターを兼ねていて、5～6 Hzから6次で落ちるHi-Cut特性を持つ。長周期側は、ゼロ点調整の意味でコンデンサーによるカットを行なった。時定数を十分大きくしたので、倍率は0.05 Hzにおいても最大値の90%以上である。

収録は、デジタル方式で行なった。サンプリング周波数は50 Hz、分解能は±13 bitのデータを1点あたり約10分間観測した。

どの測点でも、南北動だけを測定したが、西安ではチェックのため東西動と南北動を時間をずらして測定した。

堆積層が厚いので、10秒あるいはそれ以上の周期の微動まで観測できることが期待された。それにあわせて、センサーの固有周期はできるだけ長くしたかったが、現場での状況や時間の制約から、10秒を得ることが難しい場合もあった。8観測点での固有周期は9.7～17.0秒の範囲でまちまちであった。なお、アンプには乾電池を、その他の機器には12 Vのカーバッテリーを電源として使用した。

2.2 測定点

Fig. 1に測定点を示す。測線とは少しずれるが、西安市の西隣の咸阳市を通り盆地部を南北に切った地質断面 Fig. 2に示す⁵⁾。渭河盆地の南端は秦嶺山脈が限り、その北側には大規模な正断層である秦嶺北

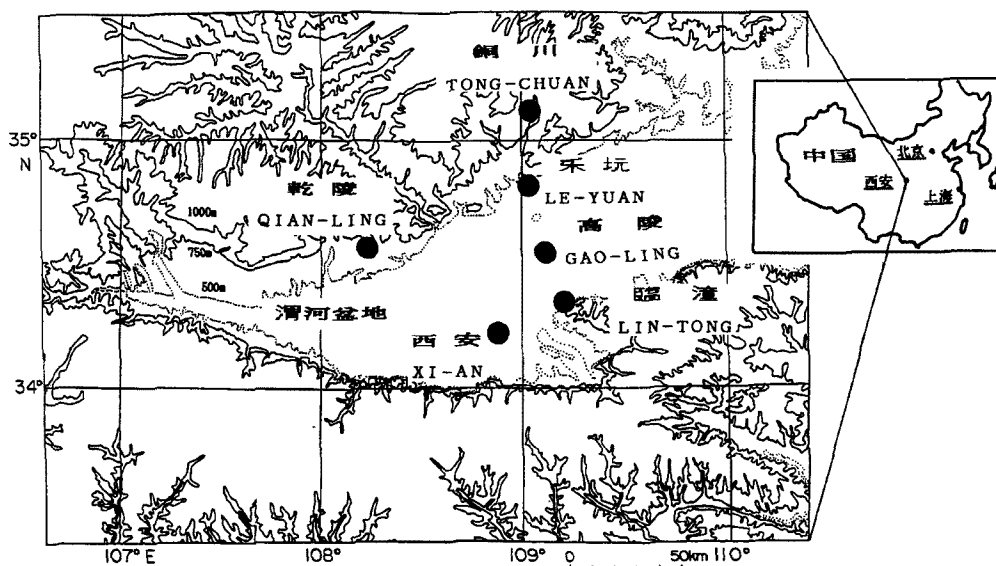


Fig. 1. Distribution of observation points in and around Weihe Basin. Thick and broken lines are height contours.

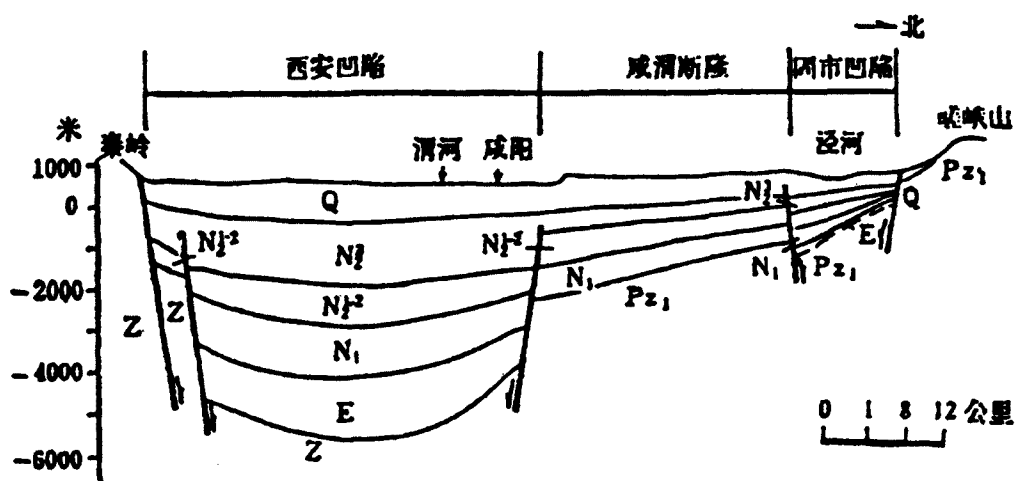


Fig. 2. A north-south geological cross section of the Weihe Basin⁵⁾. Xian City lies about 10 km east to this cross section.

麓大断裂が存在する。そこから北側は堆積層が厚く、新生代層は最大で6 kmにも達する⁵⁾。西安市は、この堆積層の厚い所に位置する。さらに北へ向かって、堆積層は大局的には浅くなる。第四紀層だけに限れば、その厚さは盆地の中央部では1 km程度であり変化がないようである。観測点は全部で6点で、そのうち堆積層上での観測は西安(XI-AN)、高陵(GAO-LING)、乐玩(LE-YUAN)の3点である。銅川(TONG-CHUAN)と乾陵(QIAN-LING)は岩盤上の良好な観測点である。特に乾陵は、広大な墳墓のそばの地震観測点であり、人工ノイズが殆どない静かな場所である。しかも観測用坑道内が使用できたので、高倍率での観測が実施できた。臨潼(LIN-TONG)は、盆地内に突き出した小高い山地の、ふもと付近である。岩盤上と堆積層上の中間的な性格の地点と思われる。堆積層上の高陵と乐玩では、幹線道路から1 km程度逸れて人家のまばらな田園を選んで測定した。ここでは、舗装道路が見つからず、柔らかい土の上で観測せざるを得なかった。また、人や自転車の通行もあり、10分間連続で良好な観測をする事は難しかった。

渭河盆地での測点は、海岸線からは約千km内陸にあたる。微動が波浪を起源とするなら、海岸に近い点で観測すれば当然振巾ははるかに大きいと考えられる。この比較のために、上海市の2点でも観測を行った。1点は上海市内の堆積層上(SHANG-HAI)で、もう1点はそこから約30 km南西の佘山(SHE-SHAN)の岩盤上である。観測の諸量をTable 1にまとめて示す。

Table 1. Summary of observations

No.	MMDD	HHMM	OBS. POINT	N. PERIOD	AMP. GAIN	MEMO
1	320	1202	SHANG-HAI	9.8	550	上海地震局
2	321	1130	SHE-SHAN	9.7	20,000	佘山
3	322	1258	LIN-TONG	12.5	2,000	臨潼
4	323	1222	GAO-LING	17.0	5,000	高陵
5	323	1357	LE-YUAN	16.5	5,000	乐玩
6	323	1906	TONG-CHUAN	16.8	20,000	銅川
7	324	1647	QIAN-LING	13.5	100,000	乾陵
8	324	1705	QIAN-NOISE		100,000	NOISE (乾陵)
9	326	2207	XI-AN NS	14.4	10,000	西安 南北
10	326	2245	XI-AN EW	14.0	10,000	西安 東西

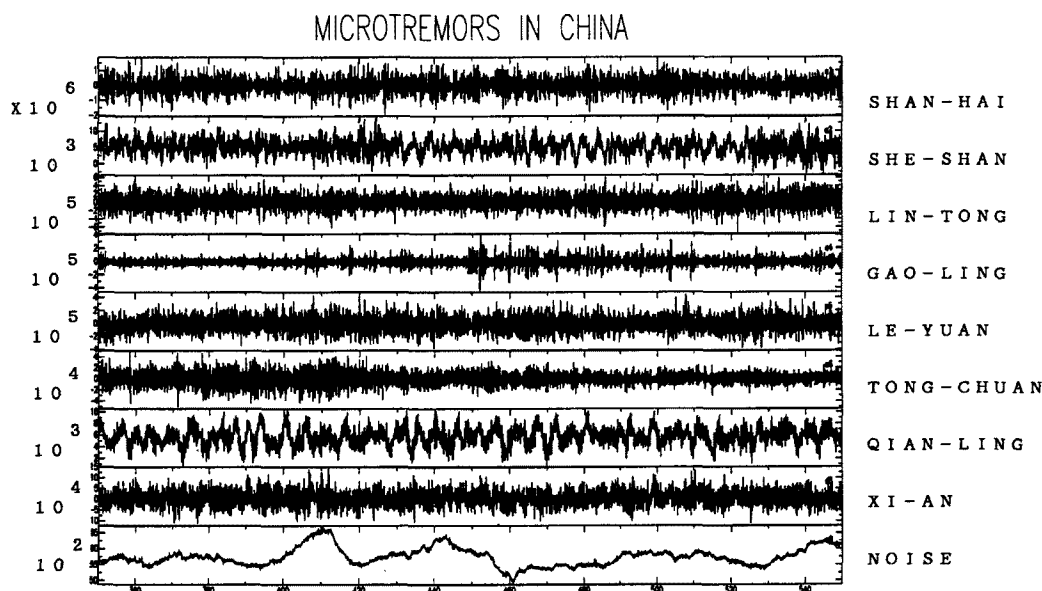


Fig. 3. Example of recorded microtremors (raw data). Each trace corresponds to stations. Upper two traces are obtained in and near Shanghai City. Next 6 traces are for the stations in and around Weihe Basin. The last one is the circuit noise obtained at Qian-ling station. Vertical axis is not common for traces. Multiplication factors are shown at left hand side of each trace.

2.3 解 析

Fig. 3 に得られた微動波形を観測点毎に示す。上の2つは上海でのもので、その下の6つが渭河盆地でのものである。一番下は、地震計をクランプした状態でのノイズの観測である。

各点とも10分間データを取ったが、人や車などに邪魔されることが多かった。持ち帰ったデータから、それらの人為ノイズが少ない部分を選んで、各地とも約200秒間のデータセットをつくり、解析した。図示したのは、選ばれた200秒間のデータである。縦軸は、観測点毎に異なっていて、最大で約2桁振幅が異なる。一番下のノイズの振幅は、微動の中で最も振幅の小さいものよりさらに1桁小さい。観測された微動のS/N比が大きいことが伺える。スペクトルの計算は、主としてSAC (Seismic Analysis Code) によった。データの両端にはそれぞれ20秒ずつのコサイン型テーパーを掛け、平均値を差し引いた後、FFTによってスペクトルを計算し、スムージングを行なって表示した。

3. 結 果

3.1 微動の周期と振幅

海岸線から千kmの内陸部で微動が存在するかどうかを、ひとつの調査目標にした。Fig. 1に見る通り、どの測点でも微動を観測することができた。観測波形の振幅が大きかったのは、上海及び渭河盆地内の堆積層上の観測点である。これらの点では、短周期の波の振幅が大きいたことが見てとれる。これと対照的に、余山と乾陵では、周期数秒の波が主要で、短周期の波はそれより小さい。これらの波の周波数成分を見るため、例として西安の南北動についてのフーリエスペクトルをFig. 4に示す。この範囲では、0.2 Hz (5秒) 付近と0.35 Hz (約3秒) 付近にピークをもち、さらに長周期部分にも、成分を持つことが分

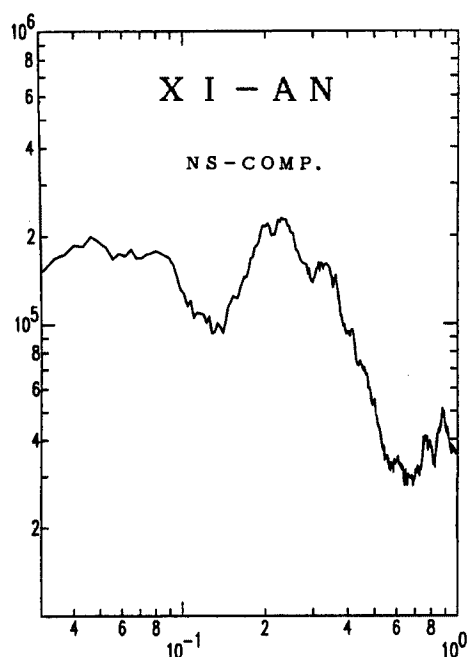


Fig. 4. Example of Fourier Spectrum for microtremors of N-S component observed at Xi-an.

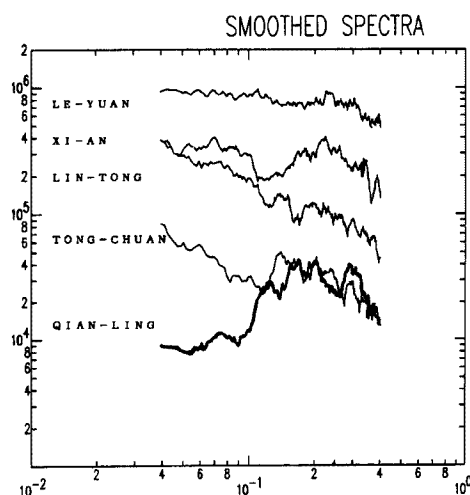


Fig. 5. Fourier Spectra for microtremors observed at stations in and around the Weihe Basin. Thick line is for Qian-ling. Upper two curves are the spectra obtained at sediment sites. The amplitudes are 10 or more times larger than bottom two curves, which are for the stations located on basement rocks.

かる。より長周期の部分は、今回の観測計画の中でも注目していた部分である。しかし、センサーの固有周期がまちまちであったこと、解析に 200 秒間のデータしな使えなかったこと、などの理由で、この長い周期（10 秒程度以上）の波については、参考にとどめたい。

(1) 堆積層上と基盤の微動

Fig. 5 に、渭河盆地での微動のスペクトルをまとめて示す。高陵（GAO-LING）のデータを省いたのは、センサーのコイルがひっかかった時に見られるような波形が記録時間の相当部分を占めたからである。縦軸のスケールは任意であるが、観測点ごとにアンプの増幅率を補正してあるので、相対的な比較が可能である。0.2 Hz（5 秒）付近の振幅について見ると、LE-YUAN が最大で、以下 XI-AN, LIN-TONG, TONG-CHUAN, QIAN-LING の順である。最大と最小では 1 桁半の開きがある。これが場所的な違いか、時間的な違いかは、今回の 1 点移動観測だけでは決論出来ない。しかし、振幅の大きい方の 2 つが盆地内の堆積層上での観測で、小さい方から 2 つが基盤での観測であり、その中間的な場所である TONG-CHUAN での振幅が両者の中間に求まったことの系統性を考えると、この振幅変化は場所的な変化である可能性が強い。

堆積層の厚さは、LE-YUAN は 2000 m, XI-AN は 6000 m 程度と Fig. 2 の地質断面から堆定される。同図の中央部に断層が描かれていて、その南側と北側では堆積層の構造が大きく異なる。LE-YUAN と XI-AN のスペクトルの違いは、このような堆積層の構造の違いによるのであろう。

QIAN-LING は上述の通りの良好な基盤上での観測である。非常に人工的なノイズが小さかったので、手製アンプの限界と思われる十万倍までゲインを上げて観測した。結果は、Fig. 5 の通り 0.2 Hz 付近を最大に 0.1 Hz ~ 0.4 Hz にいくつかのピークを持つ形を示す。0.1 Hz より低周波数（長周期）部分では振幅は小さく、参考のために LE-YUAN を見ると百倍程度の値を示している。

同じく基盤上の TONG-CHUAN は、0.1 Hz より高周波数部分では、QIAN-LING とほとんど同レベルのスペクトルである。上にも述べた通り時間変化を含んでいるが、基盤への入力を目安が得られたと考える。

(2) 上海地域での観測との比較

渭河盆地での観測に先立ち、途中立ち寄った上海地域

でも2ヶ所で観測を行なった。一点は市街地 (SHANG-HAI) で堆積層上であった。もう一点は、基盤上 (SHE-SHAN) である。これらでのスペクトルを Fig. 6 に太線で示す。渭河盆地の堆積層と基盤の代表として、それぞれ XI-AN と QIAN-LING のスペクトルを細線で併せて掲げた。上海地域は海岸から高々60～70 kmで、渭河盆地は約千km内陸に入っている。それにも拘らず、どちらの地域でも、基盤どうしのスペクトル振幅は非常に近い値をとっている。また堆積層どうしも、スペクトルの形状は異なるが、振幅はほぼ同じである。

(3) 南北動と東西動の比較

西安 (XI-AN) では、南北動の観測後約30分において東西動も観測した。センサーの固有周期もほぼ同じ値にセット出来、またアンプのゲインも同一であった。同時観測に準ずると考えられるので、スペクトルの比をとって Fig. 7 にプロットした。0.2 Hzを境に、長周期側では南北動が約2倍大きく、短周期側ではほとんど同じ大きさである。0.1 Hz付近のピークは、南北動が東西動の4倍大きいことを示す。したがって、微細にみると、南北動だけでその点の水平動を代表させることは無理である。しかし、上で見た基盤上と堆積層上での10倍程度の振幅の開きは成分の違いよりさらに大きいようである。

4. 微動の振幅についての考察

渭河盆地の周辺の基盤でと、海岸から近距離にある基盤での微動振幅が、ほとんど同じ大きさを示した。大陸における微動については、例えば Tabulevich (1990)⁶⁾ の論文を参照すると、周期数秒の場合 1μ 程度で、日により数倍の変化をする。海に近い所と数百kmでは海寄りの方が数倍程度振幅が大きいようである。我々の測定では、内陸と海の近くの測定は約1週間の時間的隔たりがあるので、Tabulevich の論文と特に違っているとは言えない。QIAN-LING の振幅もちょうど 1μ 程度である。

防災研究所の微小地震ネットワークでも、海の荒れる日などには脈動が大きくなり、地震観測に悪影響を与えることがある。Fig. 8 に、そのような例を示す。同図の右側は、3つの衛星観測点 (観測点の配置は Fig. 9 の上図参照) で得られた、同一時刻の脈動である。観測点によって、振幅に違いがあるが、卓越周期は2秒前後と読み取れる。これらの観測点の計測システムは同一の形式のものである⁷⁾。ただし、固有周期1秒のセンサーを用いているので、2秒周期の波に対する感度には個体差があることが懸念される。Fig. 8 の左には、そのような心配が無いことを確かめるために、同じ観測点で得られた自然地震 (東海はるか沖, M 6.6, 震央距離約350 km) の波形を示した。福井と勝山では、周期1秒以下から数秒の

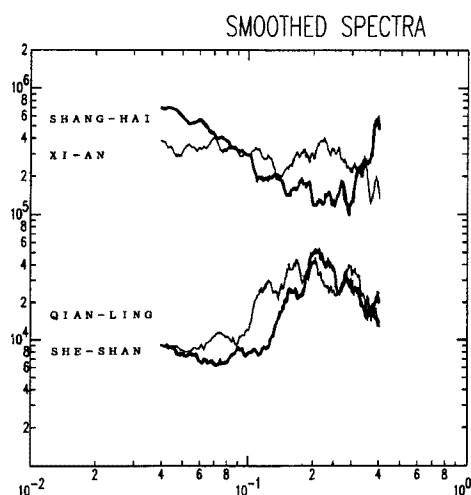


Fig. 6. The same as Fig. 5 observed in and near Shanghai City. Again the spectral amplitude for Shanghai (sediment site) is about 10 times larger than that for She-shan station (basement site). Spectra for Xi-an and Qian-ling are also shown by thin lines for reference.

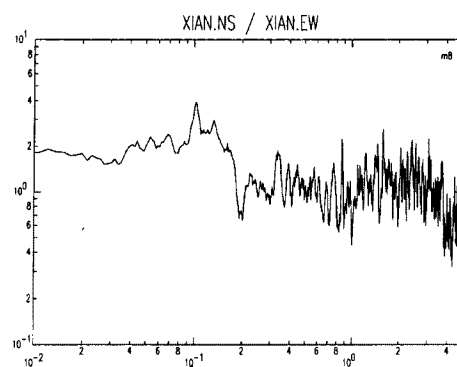


Fig. 7. Spectral ratio for N-S/E-W at Xi-an station.

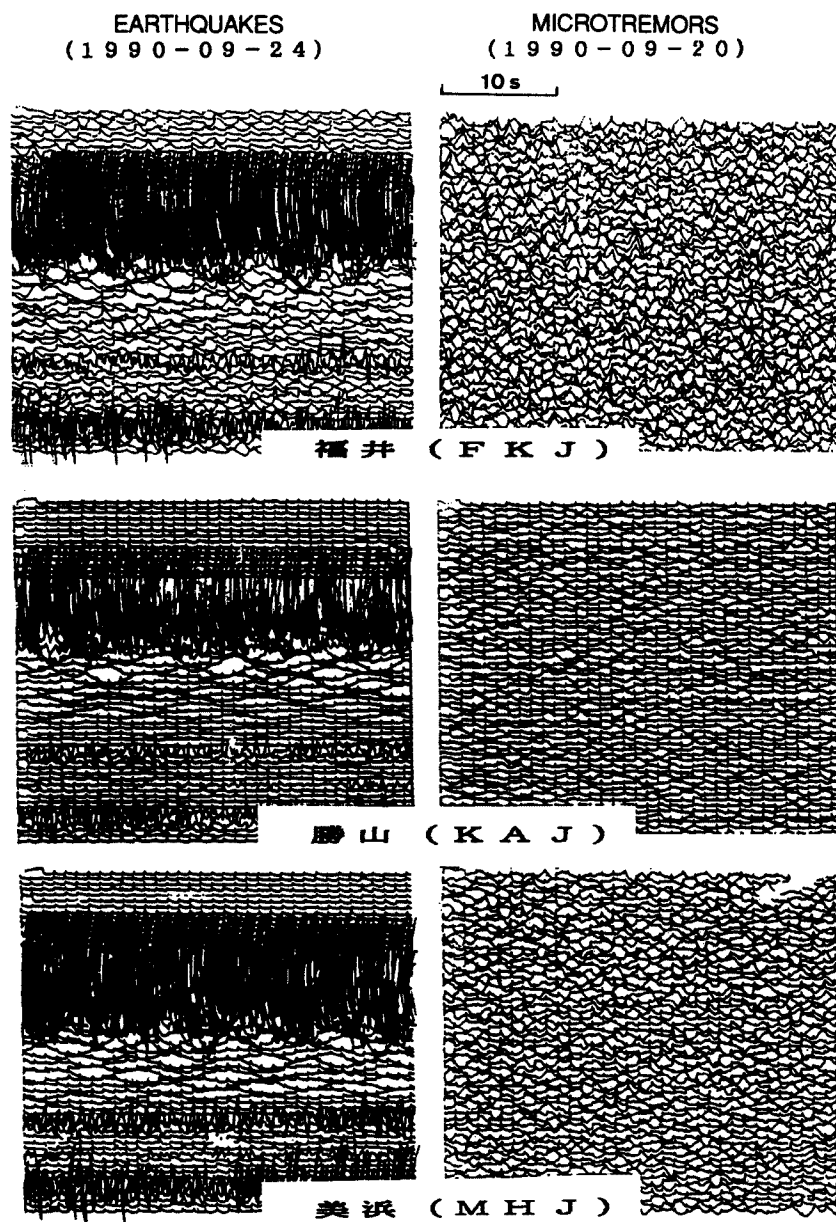


Fig. 8. Right: Microtremors obtained at three stations for the microearthquake observation network of the Hokuriku Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

Left: Earthquakes recorded at the same stations as the right figures. The amplitude of the earthquake records are almost the same for FKJ and KAJ stations, which fact shows that the over-all characteristics of the recording systems at both stations are almost the same.

波まで、ほとんど同じ振幅で振動している。Fig. 9には、これら3観測点の配置(上図)と、毎日9時における脈動振幅(下図)を示した。下図から分かるように、振幅の消長は福井(FKJ)と勝山(KAJ)では非常によく似ている。同一の振動源からの波動を記録していると考えられる。振幅は、海に近い福井

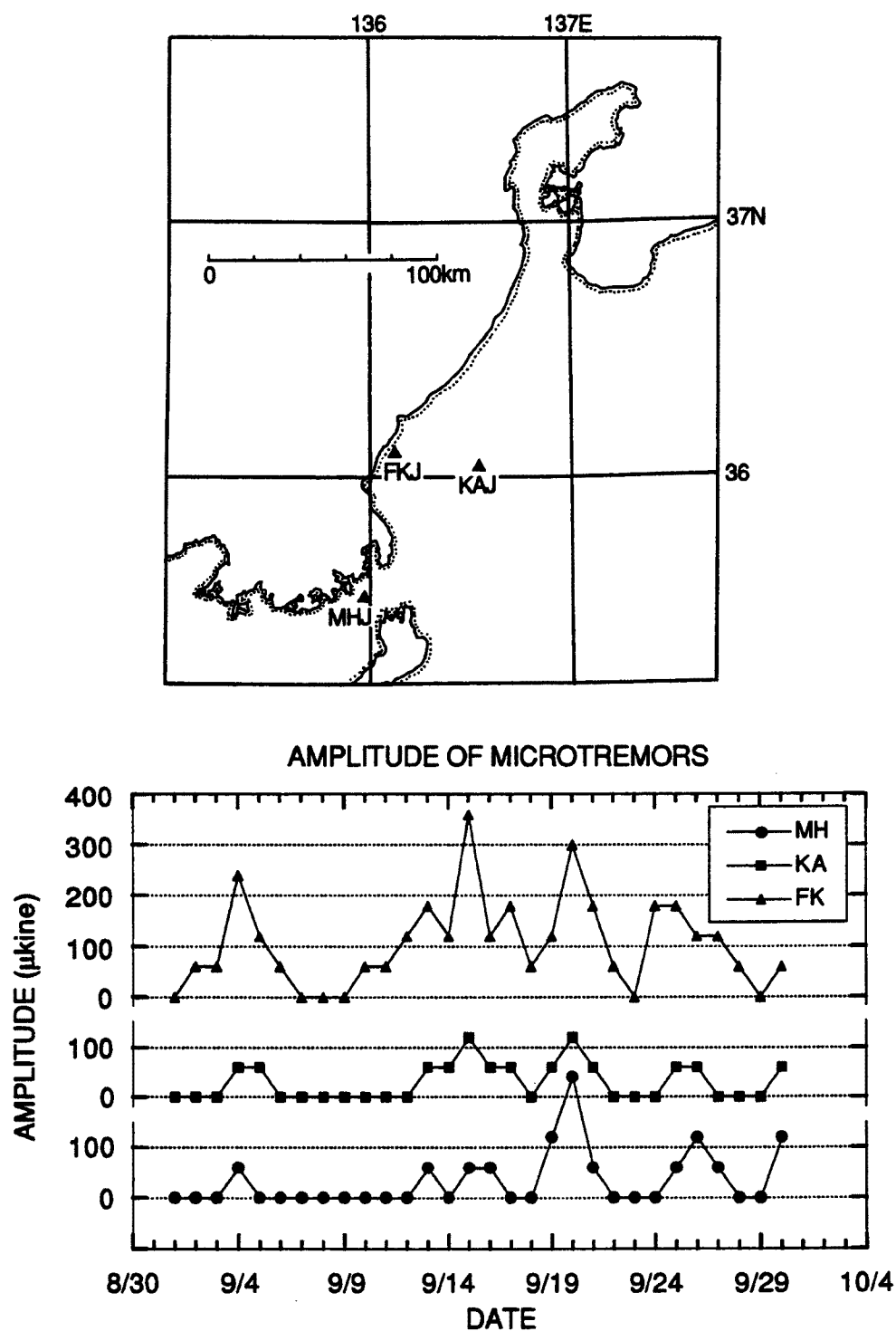


Fig. 9. Upper: Distribution of microearthquake observation stations, at which stations microtremors were recorded and studied.
Lower: Daily changes of the microtremor amplitude at three stations.

が40 km程度内陸の勝山の約3倍である。美浜（MHJ）は、海に近いが振幅は勝山と同程度である。振幅の消長は福井と似てはいるが、9月20日前後の大振幅は、勝山より大きく、福井のそれに近い値である。このことから、美浜には別の脈動源の影響もあると考えられる。

福井と勝山が同一振動源からの脈動を記録しているとすれば、この2点間の距離約40 kmを伝播する間に1/3に減衰したことになる。中国でも同様の減衰をすると仮定すれば、約1000 kmの伝播であるから、1/3の減衰を25回重ねることになる。これを計算すると、 $\sim 10^{-12}$ で、観測には全くかからない量である。したがって、中国での脈動の伝播と福井-勝山のそれとは、仕組みが違ふと考える。例えば、振動源が、福井-勝山の場合は点震源的で、波面の広がりによる振幅の減衰が大きいのに対し、中国での振動源は、海の広範囲に線形的あるいは面的にわたっていて、波面のひろがりの影響が小さいこと等が考えられる。この仮説の確かめは、今後の研究に待ちたい。

5. ま と め

中国の渭河盆地と上海にて、約1週間に8点で微動の観測をした。水平1成分の移動観測であるので、厳密さを欠くが、次のような事が分かった。

1) 海岸に近い上海と、海岸から約千km内陸に位置する渭河盆地の両方で、やや長周期の微動が観測できた。

2) その周期は1秒から10秒の間では5秒(0.2 Hz)付近にピークを持つ。10秒以上の周期範囲にも大きな振幅を示す観測点もあるが、計測条件が整わなかったので、参考にとどめた。

3) 堆積層の厚さによる卓越周期の違いは、興味深いところであったが、盆地内の観測点が少なくはっきりしなかった。振幅については、基盤で小さく、堆積層上で10倍あるいはそれ以上大きいことが分かった。

4) 上海地域の観測でも、この傾向ははっきり見られた。とくに両地域の岩盤での微動振幅が同じような値を示した事は注目すべきである。これについては、日本の北陸地域の観測も比べてみたが、距離により振幅は急激にへるので、同じ仕組みでは1000 km離れば観測できないと思われる。

5) 観測は概ね順調に遂行できたが、さらに工夫を要する点もあった。幹線道路以外は、ほとんど柔らかな土道であるので、センサーのセットには、然るべき台を用いることが望ましい。また、人家はまばらでも、自転車や人の行き来が多く、連続した良好な記録を取ることは難しかった。約10分間、通行を見合わせるよう依頼したい。

6. 謝 辞

中国での観測には、謝正章氏はじめ西安市地震局の皆さん、馬守信氏はか陝西省地震局の方々、また王明球氏はか上海市地震局の皆さんにお世話になりました。記して感謝します。

解析用ソフトウェア（SAC）の使用を許可して頂いた Joe YULL 氏（Lawrence Livermore National Laboratory）に感謝します。

この研究の一部には文部省科学研究費補助金（国際学術研究）を使用しました。

参 考 文 献

- 1) Higgins, L.: A Theory of the Origin of Microseisms, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 257, 1951, pp. 1-35.
- 2) 成瀬聖慈・出原孝示・竹内文朗・太田裕・鏡味洋史・後藤典俊・塩野計司・工藤一嘉・坂尻直巳:

- やや長周期の微動観測と地震工学への適用⁽²⁾—微動の卓越周期と地下構造の関係—, 地震, 2, 第29巻, 1976, pp.25-32.
- 3) 古川信雄・春日茂・竹内文朗・天池文男: やや長周期微動の郡列観測による福井地震断層探査, 地震, 2, 第37巻, 1984, pp.207-215.
- 4) 尾池和夫・松村一男・大倉敬宏・謝正章・刘景文・羅伯发・李德利・馬守信・丁蘊玉・田小平・王洪体・刘尚孝: 中国陝西省渭河盆地の地震観測 (日中共同研究序法), 京都大学防災研究所年報, 第32号 B-1, 1989, pp.117-124.
- 5) 韓恒悦・易学尧: 渭河新生代断陷盆地与華県大地震, 中国活動断裂, 地震出版社, 1982, pp.133-140.
- 6) Tabulevich, V.N., L.A. Drugova and G.M. Troshina: On observations of storm microseismic vibrations by Seismic stations of the U. S. S. R., P. E. P. I., 63, 1990, pp.209-218.
- 7) 岸本兆方・尾池和夫・渡辺邦彦・佃為成・平野憲雄・中尾節郎: 鳥取および北陸微小地震観測所のテレメータ・システムについて, 地震, 2, 第31巻, 1978, pp.265-274.