

福井地震断層周辺でのやや長周期微動観測

古川 信雄・竹内 文朗・春日 茂
平野 憲雄・天池 文男

OBSERVATIONAL STUDY ON 1-TO 5-SEC MICROTREMORS AROUND THE FUKUI EARTHQUAKE FAULT IN THE FUKUI PLAIN

By *Nobuo HURUKAWA, Fumiaki TAKEUCHI, Shigeru KASUGA,*
Norio HIRANO and Fumio AMAIKE

Synopsis

Fukui earthquake fault, which is masked by the thick sedimentary layer, has been investigated by means of 1-5 sec microtremors. The vertical component of microtremors have been measured around the zone of fissures and cracks in the Fukui plain accompanying the Fukui earthquake in 1948. Following results were derived.

1. There are no significant spatial variation in spectral amplitudes of microtremors in the period range of 2-5 sec, so that the position of the Fukui earthquake fault can not be found.
2. Amplitude of microtremors at the period of 3-5 sec at the deposit changed rapidly with time, whereas that at the basement was nearly constant. Therefore, amplitude ratio at the deposit with respect to the basement is not constant.

1. はじめに

1948年6月28日、福井平野においてマグニチュード (M) 7.3の福井地震が発生した。この地震による死者は3895人、全壊家屋35420戸である¹⁾。このような大きな被害をだしたにもかかわらず、この地震の断層は地表にはあらわれず、わずかに地割れが生じたのみである。しかし水準測量からこの地割れ帯を境に東側が西側に比べて60~70cm隆起していることが明らかになったので、この地割れ帯の地下に福井地震を発生させた断層が存在していると推定されている (Fig. 1)²⁾。このような M7 級の地震にもかかわらず地表に地震断層があらわれなかった地震は珍しく、たとえば過去100年間に100名以上の死者をだした内陸の大被害地震9例 (濃尾 (1891年, M8.0), 庄内 (1894年, M7.0), 陸羽 (1896年, M7.2), 但馬 (1925年, M6.8), 北丹後 (1927年, M7.5), 北伊豆 (1930年, M7.0), 鳥取 (1943年, M7.4), 三河 (1945年, M7.1), 福井 (1948年, M7.3)) のうち福井地震を除く8例までがその震央付近に土地のくいちがいを伴っていたとされる³⁾。これに対し福井地震の場合、単に地割れしか生じなかったのは、この地震が厚い堆積層におおわれた福井平野の中央部で発生したためであると思われる。

一般に、地表にあらわれた地震断層の多くは地形・地質から決められた活断層と一致し、地形・地質学的方法からその活断層の活動度が求められている。それに反し福井地震断層は地形・地質学的方法では調査しにくい被覆断層であるので、この断層の規模・活動度等はわかっていない。そこで我々は物理探査により福井地震断層の位置とその規模を調べることにした。福井地震の震央に近い福井県丸岡町周辺では、すでに重力と全磁力、 γ 線、微動、エアガンによる人工地震の探査が実施されている⁴⁾。本論文ではこれらの探査のうちやや長周期 (1~5秒) 微動の上下動成分観測の結果を報告する。

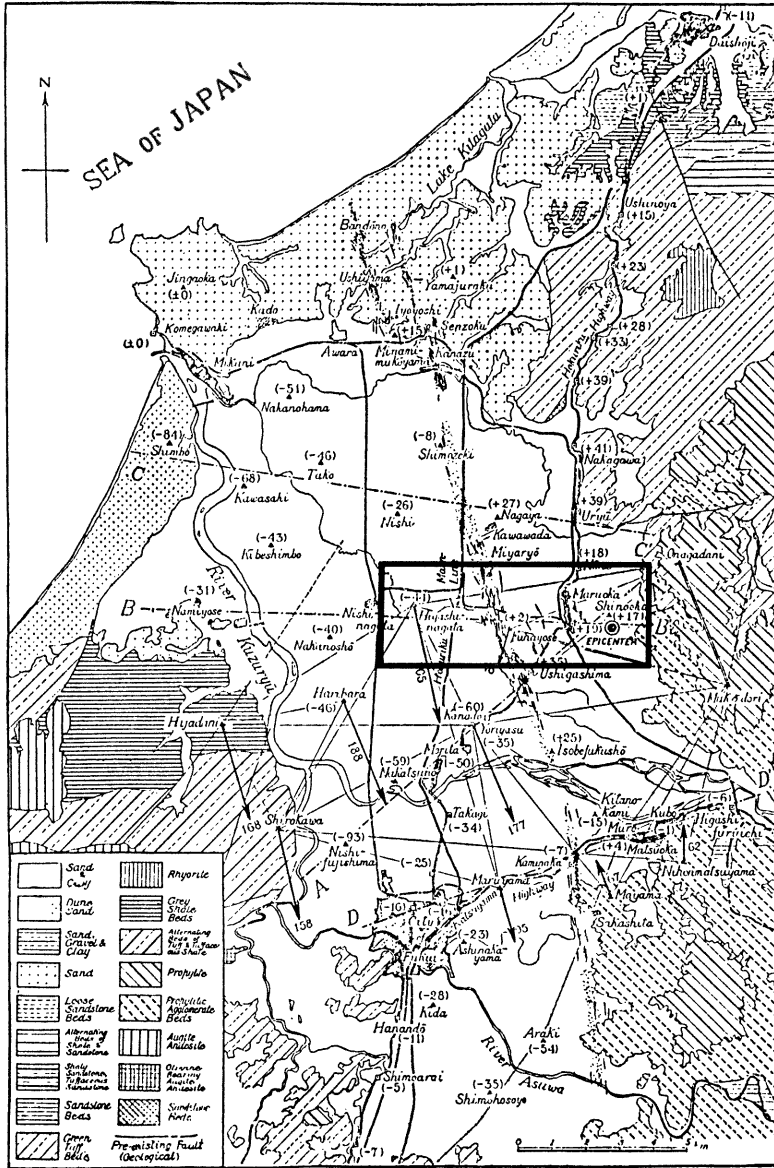


Fig. 1 Crustal deformation in the Fukui plain accompanying the Fukui earthquake (after Tsuya, 1950²¹). Numerals and arrows indicate horizontal and vertical displacement in cm. Dotted zone at the center of the plain shows a zone of fissures and cracks. Studied area in this paper is shown by a rectangle.

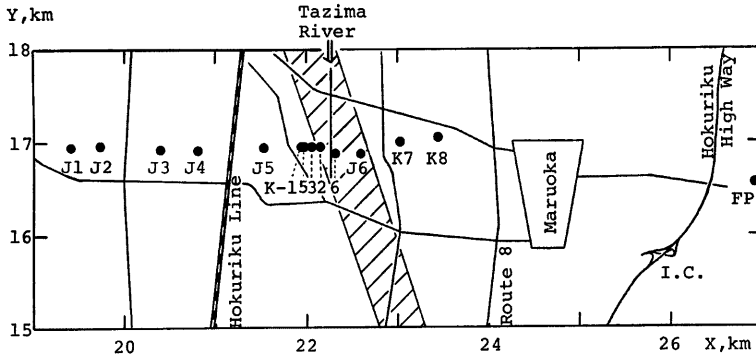


Fig. 2 Observation points of microtremors. FP is a fixed point at the basement. Shaded area indicates an approximate position of a zone of fissures and cracks from Fig. 1.

周期1～5秒のやや長周期微動は主に地下数百mまでの構造を反映しているといわれている⁵⁾。例えば坂尻他(1974)⁶⁾と成瀬他(1976)⁷⁾は青森県八戸市における観測の結果、基盤が深くなるにつれて卓越周期が長くなることをみだし、卓越周期 T と堆積層のS波速度 V 、基盤の深さ H との関係式 $H = VT/4$ から求めた基盤の深さが地震波探査から求められたものとよく一致することを示した。更に卓越周期だけでなく振巾もまた地下構造を反映しており、堆積層が厚いほど振巾が大きいたことが知られている⁵⁾、⁸⁾。それゆえ本論文ではやや長周期微動の卓越周期もしくは振巾の空間分布を調べることにより、基盤の深さが急変するところ、すなわち断層の位置を明らかにすることをめざした。

2. 観 測

Fig. 1 は福井地震のさいの地殻変動をまとめた図である²⁾。福井平野の中央をほぼ南北に縦断する地割れ帯が生じたことがわかる。この地割れ帯は地殻変動のパターンの変わり目でもあり、東側に対し西側が南方向に最大2m移動し、60～70cm沈下した。それゆえこの地割れ帯の地下に地震断層が存在すると思われるので、我々はこの地割れ帯を東西に横切る測線を設定した。場所は Fig. 1 に四角で示す位置で丸岡町の西側にあたる。またこの測線の西端は重力異常の負の目玉の中心になる⁹⁾。Fig. 2 に観測点の位置を示す。全長4kmの測線上に約500m間隔で換振器を配置した。また地割れ帯近くの配置は密にしてある。観測は1982年7月8日と9日の2日間にわたり順次移動して行なった。観測日により測線名をかえ、8日、9日の観測をそれぞれJ、K測線での観測とよび、観測点番号を区別した。また移動観測実施中に、測線の4km東方の丸岡町田屋に固定観測点(FP)を設置して連続観測を行なった。この固定点は山際の基盤上であり、やや長周期微動の時間変化を監視した。

観測には移動点・固定点とも固有周期1秒の速度型上下動地震計を用い、235 μ Fのコンデンサーと

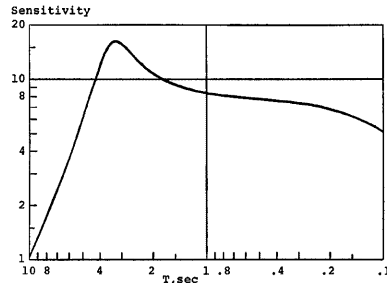


Fig. 3 Relative velocity sensitivity of seismometer calculated by the method of Suzuki and Hasegawa (1970)¹⁰⁾

Table 1 List of observation points.

	X, km	Y, km	Observation Time		
			Date	h m	h m
J 1	19.41	16.95	1982 7 8	1611	— 1627
J 2	19.73	16.96		1647	— 1705
J 3	20.39	16.92		1718	— 1732
J 4	20.80	16.91		1745	— 1800
J 5	21.52	16.93		1815	— 1828
J 6	22.59	16.88		1853	— 1907
K 1	21.94	16.95	1982 7 9	1123	— 1138
				1436	— 1445
K 2	22.15	16.95		1152	— 1204
K 3	22.06	16.95		1215	— 1228
K 5	21.97	16.95		1457	— 1510
K 6	22.31	16.87		1543	— 1557
K 7	23.03	17.00		1619	— 1635
K 8	23.44	17.05		1704	— 1718
F P	26.93	16.56	1982 7 8	1450	— 1927
			1982 7 9	1100	— 1746

Positions of observation points are represented by X(eastward) and Y(northward) in km, taking a geographical point (36.0°N, 136.0°E) as the origin.

20k Ω のシャント抵抗をつけることにより固有周期を延ばした¹⁰⁾。地震計の特性を Fig. 3 に示す。観測時間は1点につき10~20分間で、すべて磁気テープに録音した。記録器は移動点がティアックの R-70A, 固定点はソニーの NFR-3515 である。観測点座標と観測時間を Table 1 に示す。

また微動振中の時間変化を更に詳しく調べるために1983年3月1日に J5, K6, J6, K7 の4点で再度観測を行なった。観測方法は上記のものと同じで、このときは地盤上の J6 を固定点として連続観測し、移動点は14時30分から17時35分の間、J6, K7, J5, K6 の順に23分間ずつ観測した。記録器は両点とも R-70 A である。この観測では固定点・移動点とも3成分観測を行なったが、ここでは上下動成分についてのみ報告する。またこの観測はN測線での観測とよび J, K 測線と区別する。

3. J, K 測線での結果

Fig. 4 に移動観測点における波形の例を示す。いずれも 1Hz のローパス・フィルタを通したもので約 5.5分間の記録である。紙上の感度をあわせてあるのでそのまま振中の大小を比べることができる。卓越周期は観測点によらず一定で約 4 秒である。K7 の振中が小さいこともわかる。

観測点毎の振中の比較は以下のようにフーリエスペクトルを求めて周期毎に行なった。磁気テープに録音された記録を 1Hz のローパス・フィルタに通した後 50Hz サンプリング (固定点は 5Hz サンプリング) で AD 変換した。録音時間の長さに応じて解析区間を約 5.5分間 (固定点は約 13.7分間) ずつに分割して FFT 法によって振中スペクトルを計算した。更にハニング・ウィンドウ

$$\bar{G}_s = 0.25G_{s-1} + 0.50G_s + 0.25G_{s+1}$$

を20回繰り返しかけることによりスペクトルを平滑化した。このようにして得られた移動点の振中スペクトルを Figs. 5, 6 に示す。Fig. 5a は J 測線でのスペクトルである。解析区間をかえて求めたスペクトルを重ねて描いてある。Fig. 5b は移動点での観測時間における固定点でのスペクトルである。移動点でのスペク

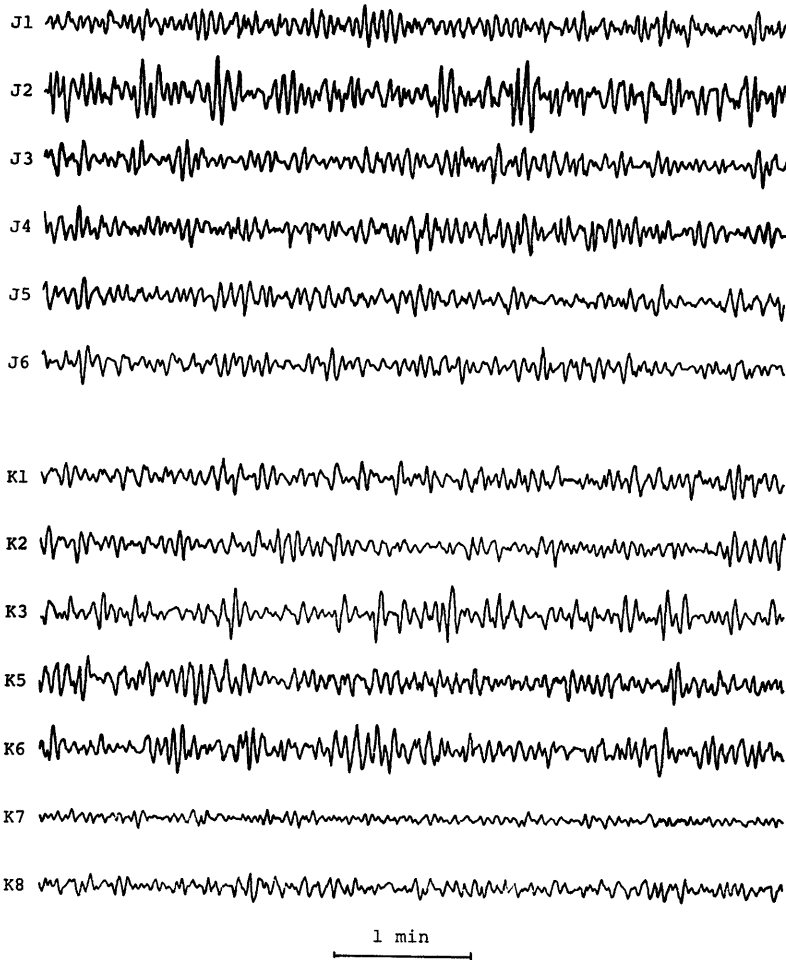


Fig. 4 Examples of waveforms of microtremors at moving points.

トルに対応させてその下に示してある。振巾の目盛は共通であるので4秒付近では移動点の振巾は固定点より3割程度大きいことがわかる。同様にK測線の結果を Fig. 6 に示す。この図では観測点の x 座標の順にスペクトルを並べてある。K1 における破線は時間をかえて（約3時間後）行なった2回目の観測の結果を示す。移動点、固定点とも1.1秒のピークを除けば2回の観測結果は良く一致している。1.1秒のピークは2回目の観測で移動点、固定点ともに現れたことから、地盤固有の卓越周期ではなく、微動自体のスペクトルの変化を示していることがわかる。それゆえ、他の点における周期1.1秒のピークも微動の時間変化によるみかけ上のものといえる。

各観測点の卓越周期は3.8~4.6秒の間にあり、同一地点でのスペクトルの時間変化や固定点でのスペクトル

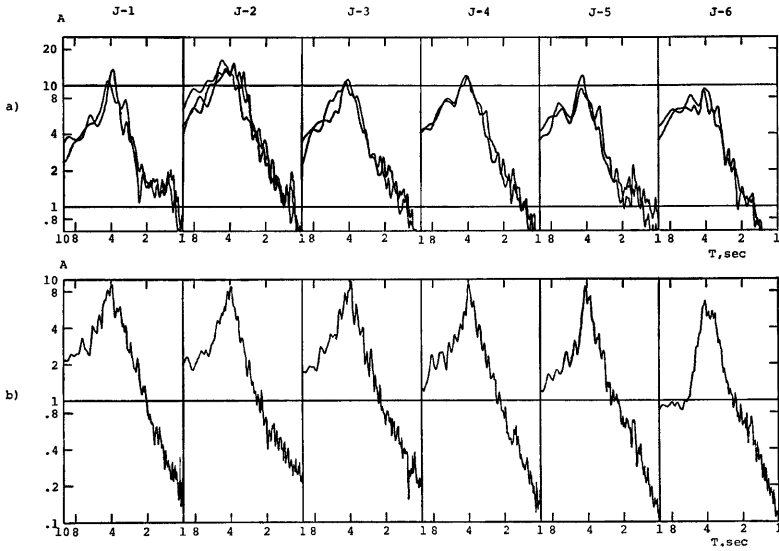


Fig. 5 Fourier spectra of microtremors. a) All the spectra at observation points in J-line. b) Spectra at FP corresponding to each observation point shown above.

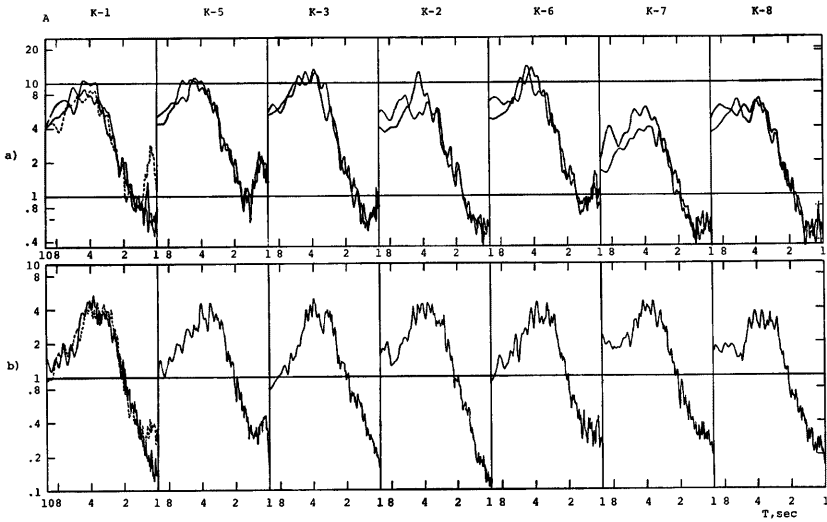


Fig. 6 Fourier spectra of microtremors. a) All the spectra at observation points in K-line. b) Spectra at FP corresponding to above observation points.

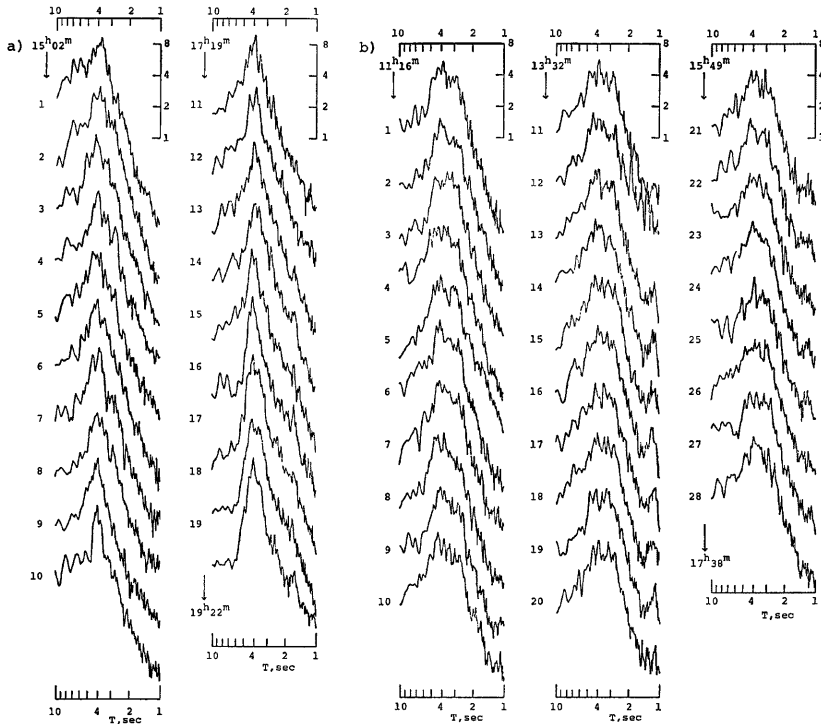


Fig. 7 All the Fourier spectra of microtremors at FP. a) 1982. 7. 8 15h02m-19h22m.
b) 1982. 7. 9 11h16m-17h38m.

ルの変化を考慮すれば、これら測定点の間に卓越周期の有意な差はないと言える。しかし地震計の特性が Fig. 3 に示したように周期3.3秒にピークをもち低周波側へ周波数の2乗に逆比例しておちているので、特性を補正した実際の卓越周期はもっと長周期になると思われる。ここでは地震計の特性は補正せずに生のスペクトルを用いて周期毎に振巾を比較することにする。

次に固定点で連続観測したやや長周期微動のスペクトルを時間順に示す。Fig. 7a は7月8日の15時02分から19時22分まで、Fig. 7b は翌9日11時16分から17時38分までの期間のスペクトルである。いずれも約13.7分間ずつ解析した。これらの図からスペクトルが時間変化していることがわかる。最大の違いは測定日による卓越周期付近の形である。すなわち1日目はスペクトルのピークが尖っているのに対し、2日目は3～5秒の間で平坦になっていることである。次にめだつのは周期1.1秒のピークである。1日目から2日目の午前中にかけてはなかったピークが2日目の午後になって現われ次第に大きくなっていく様子わかる。このピークは15時頃最大となりその後は徐々に小さくなっている。また Fig. 7a からは初日の周期5秒以上の波の振巾が時間とともに小さくなり19時頃には急減していることがわかる。周期2秒と4秒の波については Fig. 8 にその時間変化を示す。ここで周期4秒での振巾としては周期4秒付近の最大振巾、すなわち卓越周期での振巾を読取った。周期4秒付近の平均振巾を読取った場合と変動のパターンに大きな違いはない。振巾の変動量を最大値と最小値の比で表わすと、7月8日が1.7、9日が1.5である。しかし8日と9日

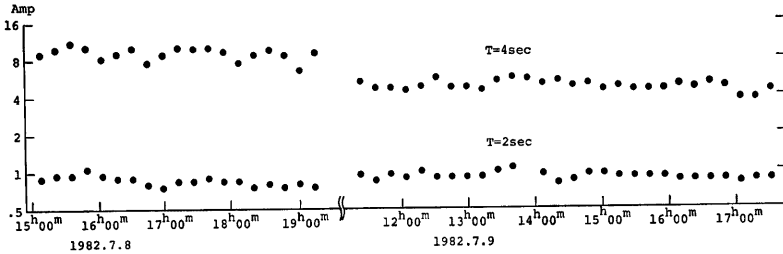


Fig. 8 Temporal variation of microtremors at FP. Spectral amplitudes at periods of 4 sec and 2 sec are plotted.

ではその振巾は大きく異なり9日は8日の約1/2になっている。**Fig.7** のスペクトルの形を比べると、8日は卓越周期のピークが尖っているだけ振巾が大きくなっているように思える。周期2秒の振巾については、2秒付近のスペクトルの形をほぼ1.5秒から3秒の間を直線近似した後で読取った。このようにして求めた周期2秒での振巾は非常に安定していることがわかる。全観測期間を通じての変動量は1.4である。

4. 振幅の空間分布

前節で求めたスペクトルから周期2秒と4秒付近の振巾を読み取り、観測点のx座標に対して図示する。**Fig.9a** は卓越周期である4秒の波の振巾である。ここでは4秒付近の波の最大振巾すなわち卓越周期の振

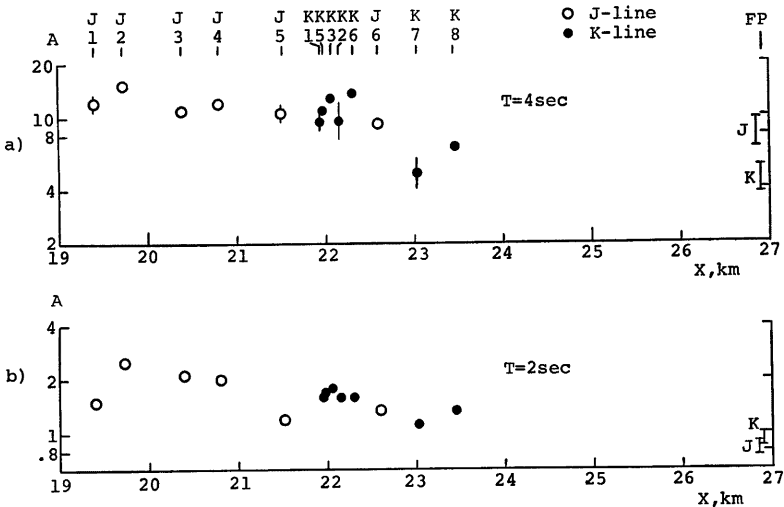


Fig. 9 Spatial variation of spectral amplitudes of microtremors. Open and solid circles represent observation points in J- and K-lines, respectively. Bars at circles show ranges of amplitudes at 2 or 3 measurements at some observation points. Bars at FP show ranges of amplitudes at the fixed point during the period of observation for J- and K-lines, respectively.

巾を読み取った。スペクトルは1観測点あたり2~3回求めてあるので、それぞれの最大値を読み取り観測点毎の平均値を図示した。この値は4秒付近の平均の振巾を読み取った場合と相対的には大きな差はなく、その違いは±10%程度と思われる。解析区間により最大振巾の値が大きく違うときは、その範囲を縦線で示す。

Fig.9b は周期2秒の波の振巾分布である。これは周期2秒における振巾ではなく、2秒周辺のスペクトルの形を考慮して、すなわちスペクトルを更に平滑化して読み取った周期2秒での振巾である。これについても最大±10%の読み取誤差があると思われる。このように **Fig.9** の振巾は4秒、2秒付近の平均的な振巾を表わしている。また両図の右端のFPは固定点の位置を表わし、J、Kで示す範囲は各測線での移動観測中の固定点における4秒と2秒の波の振巾変化の範囲を表わす。

この図の特徴は次の通りである。まず全体の傾向として、2秒・4秒とも基盤上の固定点 (FP) から遠ざかり、福井平野の中央へ行くほど振巾が大きくなっている。4秒の波ではJ6とK7の間 ($x=22.8\text{km}$) で振巾が急変しており、西側は東側の約2倍になっている。2秒の波はJ1を除いて振巾が東から西へ一定の割合で増加している。以上は各観測点で得た振巾をそのまま用いた場合である。すなわち、2日間の観測期間中、測線上では(つまり平野部では) やや長周期微動の振巾は時間的に変化しなかったと仮定した場合である。

一方、**Fig.9** からわかるように固定点における振巾の変動量は同じ日の中でも最大1.4、日が違えば更に大きくなり平均1.8になる。そこで次に移動点の振巾を固定点の振巾で補正することにする。すなわち基盤に対する地盤の振巾増巾度は観測した2日間を通じて一定であると仮定した場合である。固定点の振巾に対する移動点の振巾を **Fig.10** に示す。**Fig.10a** は周期4秒の波の振巾比である。J測線だけをみると振巾比1.3でJ1からJ6まではほぼ一定である。しかしJ5とJ6の間の観測点K1からK6までの振巾比は平均2.5でJ5・J6の約2倍になっている。これはまさにJ・K測線を観測した日の固定点における振巾の時間変化を補正したために生じた空間変化である。この補正が正しければ、田島川 ($x=22.3\text{km}$) 付近の巾500mの地域では周辺域の2倍に増巾されていると言える。**Fig.10b** は周期2秒の波について同様の補正を行なったものである。この場合は補正量が小さいので空間分布の形は **Fig.9b** とほとんど同じで、西へほぼ一定の割合で振巾が増加している。ただしJ1だけは有意に小さく、J1とJ2の間に地下構造の変化が予想される。

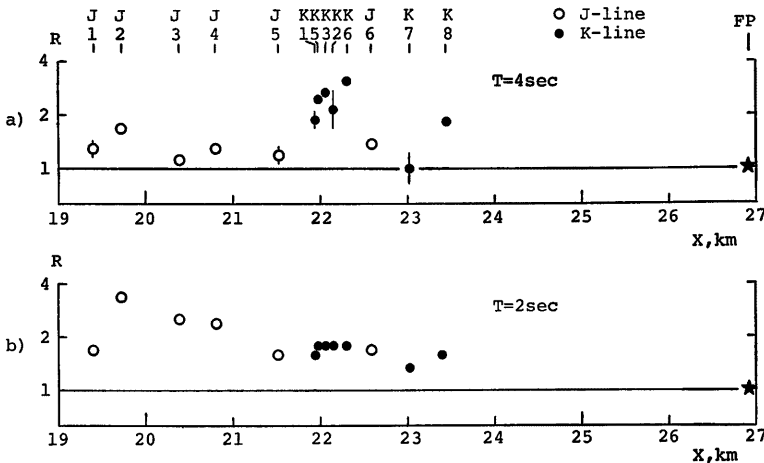


Fig. 10 Spatial variation of amplitude ratios of microtremors with respect to FP.

以上2つの場合、すなわち1)平野部では振中の時間変化はなかったと仮定した場合、2)基盤に対する平野部の振中増巾度は時間変化しなかったと仮定した場合について考えたが、これらの仮定によらず次の2つのことは言える。1)周期2秒の波は基盤から平野中央部へ行くほど振巾が大きくなる。2)周期4秒の波はK6とK7の間($x=22.3\sim 23.0\text{km}$)で振巾が急変し、西側は東側の約2倍である。

ここまで周期2秒と4秒の波についてのみ議論してきたが、周期3秒と5秒の波の振巾についても同じ方法で調べると、それらの空間分布はそれぞれ周期2秒と4秒の波の空間変化と同じである。固定点の振巾を補正した場合も同様である。

5. N測線での結果と議論

やや長周期微動の振巾は気象状況等により大きく変化することが知られている。たとえば坂尻他(1978)¹¹⁾は青森県八戸市において基盤と地盤上で約1週間同時観測した結果、最大振巾は上下動・水平動成分とも基盤上で3倍程度、地盤上で6~7倍変化したと報告している。それゆえ、振巾の空間変化をみると、測定値を固定点の振巾で補正すべきかどうかは難しい問題である。特に今回の測定では、固定点のスペクトルの形が日によって大きく変化しているのに対し、移動点のスペクトルの形は変化が小さいように見えるため、補正すべきかどうか疑問が残った。

そこで新たな観測により確かめることにした。田島川近くでJ・K測線として2日間にわたって観測した点のうちいくつかを選び1日の短時間うちに観測した。また時間変化を監視する固定点は地盤上のJ6におき、補正しやすいようにした。

観測結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11a に移動点でのスペクトル振巾を、Fig. 11b に各移動点での観測期間中の固定点における微動のスペクトル振巾を対応させて示す。解析方法はJ・K測線のときと全く同じであり、振巾の目盛は前回と共通である。約5.5分ずつのスペクトルを示す。ただしK-7の破線は約2.7分間のスペクトルである。この図から移動点・固定点とも周期2秒・4秒の波の平均振巾はあまり変化していないことがわかる。Fig. 12 にJ・K測線のときと同じ方法で読み取った周期4秒と2秒の波の振巾をx座標に対して図示する。ただし、

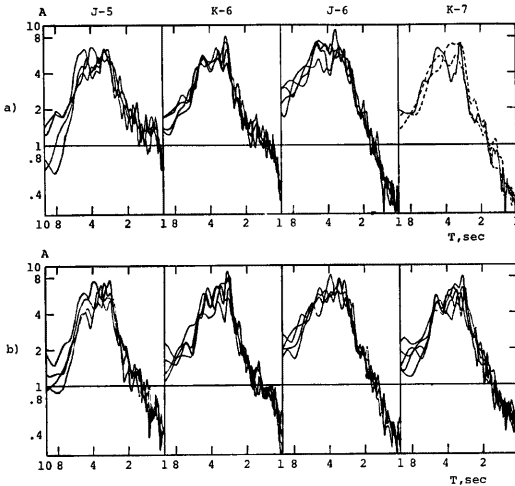


Fig. 11 Fourier spectra of microtremors. a) All the spectra at observation points in N-line. b) Spectra at J6 corresponding to above observation points.

N測線での卓越周期は2.9~5.0秒であり、前回の測線のときの3.8~4.6秒よりも少し短周期になっている。同じ図に各移動点での観測期間中の固定点(J6)における振巾の中を縦線で示す。小さい丸印はその平均値であり、その変動量は20%以下である。この図から次のことがわかる。まず周期4秒の波については、固定点の振巾を補正しても、しなくても、その空間変化は20%以下であり、K測線のときのようにK6とK7の間に2.7倍もの差はなかった。2番目に、周期2秒の波は西の点ほど大きく、J・K測線のときの傾向と一致する。ただし、前回はJ5だけが少し小さかった。

次に絶対振巾を比較するために、J・K・N測線の全データを Fig.13 にまとめる。Fig.13a は周期 4 秒の波であり、N測線での振巾は J・K測線のときの 0.5~1.3倍になっていることがわかる。このように、短時間内に観測したN測線において振巾がほぼ一定であったことから、K測線のK6とK7での振巾の急変は地盤における微動の振巾が短時間のうちに時間変化したためのみかけ上の空間変化であると思われる。K測線のK6とK7における観測時刻はそれぞれ15時43分から15時57分と16時19分から16時35分であり、わずか30分のうちに振巾が1/3に減少している。また、K7で5.5分間おいての2回のスペクトル振巾をみても振巾が大きく変化しており、K2についても同様である。ところが基盤上の固定点ではこの間も振巾はほぼ一定であるので、この振巾変化は地盤上だけで起ったと思われる。Fig.13b は周期 2 秒の波の振巾分布である。この場合は周期 4 秒の波と違って、J・K測線での振巾とN測線での振巾がほぼ一致し、時間的な変動は小さかったといえる。特にこの場合、固定点（J・K測線ではFP、M測線ではJ6）での振巾を補正した振巾比で比べると、2回の測定はさらによく一致する。

以上 2 回の観測を比較したが、周期 4 秒の波については振巾の時間変化が大きく、今回実施したような移

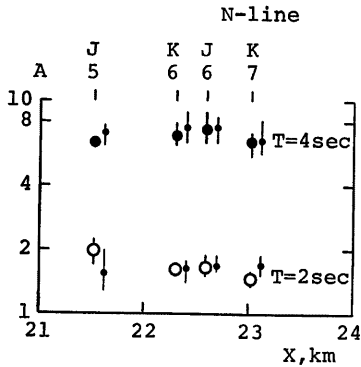


Fig. 12 Spatial variation of spectral amplitudes of microtremors in N-line. Small circles besides large circles indicate amplitudes of microtremors at fixed point J6 corresponding to above observation points. Bars are the same in Fig.9.

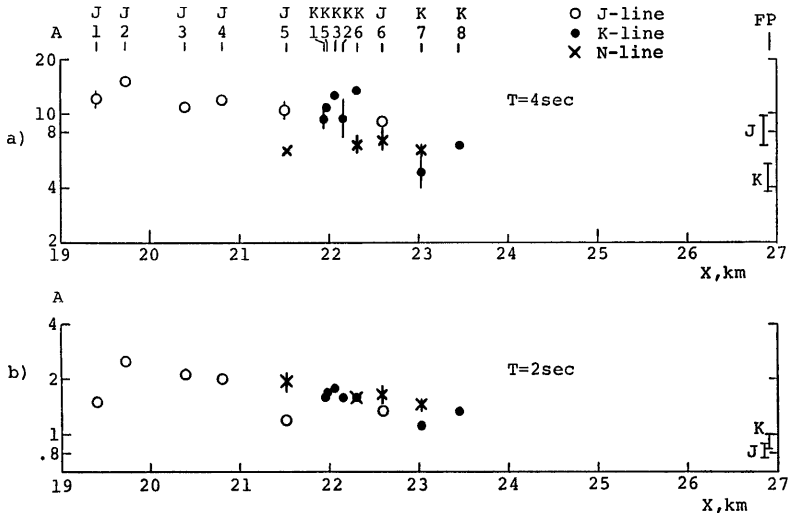


Fig. 13 Spatial variation of spectral amplitudes of microtremors at all line. Symbols are the same in Fig.9.

動観測ではたとえ振巾が変化してもそれが微動自体の時間変化なのか、観測場所による空間変化なのか分離することができない。また基盤上で連続観測してもこれで地盤上の移動点の振巾を補正することができないこともわかった。つまり、基盤と地盤上で振巾比は一定ではない。それゆえ多点同時観測が望ましいが、器材等の都合でできない時は、連続観測する固定点を基盤上だけでなく地盤上にも設置することが望ましい。一点しかおけない時でも、観測地域の中心付近の地盤上に固定点をおくほうが振巾の時間変化を調べるには都合がよいと思われる。

6. ま と め

福井地震断層周辺域でやや長周期微動の上下動成分の観測を行なった結果、以下のことが明らかになった。

1. 周期2～5秒の微動振巾に大きな空間変化はなく、地震断層の位置を推定することはできなかった。
2. 周期2秒の波の振巾は1982年7月と1983年3月の観測値に大きな差はなかった。振巾は山際の基盤から平野の中央部へいくほど大きくなっており、基盤に対する振巾比は基盤から4km西で1.5、7km西で2.5である。
3. 周期4秒付近の波は時間変化が大きく、観測により2倍程度変化する。また短時間の間にも大きく変化する。基盤に対する振巾比は1.0～3.0である。
4. 基盤上で振巾が変化していないときでも、地盤上では振巾が2倍以上変化する。ゆえに基盤に対する地盤の振巾比は一定ではない。

観測の便宜をはかって下さった福井県坂井郡丸岡町田屋の豊原春雄氏と、データ処理のプログラムを使わせて下さった京都大学防災研究所の入倉孝次郎博士と、観測を手伝って頂いた京都大学理学部の川部喜朗氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 東京天文台：理科年表，丸善，1983，pp. 911.
- 2) Tsuya, H: The Fukui Earthquake of June 28, 1948, Report of the Special Committee for the Study of the Fukui Earthquake, 1950, pp. 197.
- 3) 萩原尊禮：古地震——歴史史料と活断層からさぐる，東京大学出版会，1982，pp. 66-69.
- 4) 福井地震断層探査グループ：福井地震断層の探査，地震学会講演予稿集 No. 2, 1982, pp. 51.
- 5) 地震探鉱実験グループ：地震波の生成・伝搬に関する実験，地震探鉱実験グループ，1976，pp. 119-157.
- 6) 坂尻直己・成瀬聖慈・竹内文朗・吉川賢一・後藤典俊・太田裕：やや長周期の微動観測と地震工学への適用(1)——八戸市における予備観測——，地震2，27，1974，pp. 338-351.
- 7) 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・坂尻直己：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2，29，1976，pp. 25-32.
- 8) 正木和明，谷口仁士・飯田汲事：濃尾平野とその周辺地域において測定されたやや長周期微動の卓越周期・平均振幅と地盤構造との関係について，物理探鉱，35，1982，pp. 1-12.
- 9) 河野芳輝・角南亮亮・藤井美智子：福井平野における重力異常と福井地震災害との関係，地震2，34，1981，pp. 377-383.
- 10) 鈴木次郎・長谷川武司：コンデンサーでシャントされた地震計の動きについて(1)，地震2，23，1970，pp. 198-204.
- 11) 坂尻直己・太田裕・後藤典俊・鏡味洋史・塩野計司・岡田成幸・工藤一嘉・成瀬聖慈・久保寺章・竹内文朗・三浪俊夫：やや長周期の微動観測と地震工学への適用(5)——卓越周期の安定性の検討と観測の定式化への提案——，地震2，31，1978，pp. 179-193.