

甲楽城断層周辺での地震活動と地震波伝播特性

岡本 拓夫・渡辺 邦彦・西上 欽也
平野 憲雄・前澤 廣道・義江 修二

On the Seismicity and the Characteristics of the
Seismic Wave Propagation in and around the
Kaburaki Fault System

By Takuo OKAMOTO, Kunihiro WATANABE, Kin'ya NISHIGAMI
Norio HIRANO, Hiromichi MAEZAWA, Shuji YOSHIE

Synopsis

Kaburaki Fault System is one of the biggest active faults in Fukui Prefecture. It shows clear vertical displacement along the Echizen coastal line. We set a temporary station for earthquake observation just on the Kaburaki fault. More than one hundred and fifty earthquakes were observed for about one and half years.

Some microearthquakes which could not be detected by the Hokuriku Microearthquake Observatory, Kyoto University, were considered to occur near SUJ station. But, the seismic activity there is not so high.

The dominant frequencies of the observed wave-forms differ azimuthally. The wave-forms of earthquakes which occur in southern area from our observation station are relatively lower than those of northern ones. The difference of dominant frequencies is supposed to be caused by the existence of the low Q mass just south of SUJ.

1. はじめに

北陸地方は、大地震の発生が活発な地方である。特にここ100年に限っても、福井地震 (1948.M7.1), 大聖寺沖地震 (1952.M6.5), 北美濃地震 (1961.M7.0), 越前岬沖地震 (1963.M6.9), 近隣では濃尾地震 (1891.M8.0), 姉川地震 (1909.M6.8) などが発生している。また、微小地震の発生状況をみても¹⁾活断層にそって活発であり、防災の面でも重要視されなければならない地方である。

甲楽城断層は、福井地震断層より南西に約 30 km 離れた所にほぼ平行して走り、越前海岸の断層崖を形成している。日本の活断層 (1980)²⁾によれば、その走向はほぼ北西—南東で、活動度は B, 確実度は II, 規模はおおよそ 16 km, 東上がりの活断層である。海面上の垂直変位だけでも 300 m にも達している。甲楽城断層の地質学的規模が 20 km に近く、この全体が活動すれば大きな地震が発生すると考えられるが、有史以来大地震の記述はない。しかし、過去に大地震が発生したとすれば、その発生時に短周期地震波を発生する震源核が形成され、そのあたりでは余震があまり発生しない³⁾現象が現在まで影響している可能性もある。また、大地震の準備期間に見られる空白域を形成しているかもしれない。このような活動の履歴が、活断層直上に

おける地震の観測によって捉えることが可能ではないかと考えられる。また、活断層の直上での地震観測により、観測された地震波形は、その到来方向が断層に沿う場合とそうでない場合が考えられ、観測波形が方位によってどのように変化するか興味もたれる。これらの面を考慮し、甲斐断層の直上に1987年7月より微小地震観測点を設置し、断層に関する地震活動の観測を行った⁴⁾。本稿では、観測された地震の空間分布及び観測波形の方位による変化を中心に議論する。

2. 観測データ及び解析方法

杉山観測点 (SUJ) は、福井県南条郡河野村杉山 (136°1'21.3"E, 35°52'8.4"N 海拔 320 m) にあり、1987年7月11日より観測が始められた (Fig. 1)。観測点の地形学的特徴は、観測点を境にしてその西側が海面まで急角度の崖になっており、その高度は300 m以上になる。この崖は、断層崖だと考えられ、甲斐断層の規模の大きさを物語っている。地震計は、甲斐断層の断層崖と解釈できる斜面の直上にある石切り場跡に

設置され、固有周期1秒で1.5 V/kine の速度型換震器3成分である。増幅器の倍率は、60 dBである⁴⁾。データの収録装置として、OM-4型イベントレコーダを用いた⁵⁾。このレコーダの特徴は、4成分の地震記象と時刻コードがカセットテープ (120分) の片面に約600個入り、保守が簡便な点である。また再生は、近年開発されたパーソナルコンピュータによる方法⁶⁾を用いた。

SUJ における地震の観測を開始してほぼ1年半になり、その期間中に150個程度の地震を観測した。しかし、1988年8月より雷による電気系の不調によりノイズが多くなった。現在、修理を行っている最中なので、解析に用いた地震は、1987年7月より1988年6月までのものとした。また、甲斐断層を含めた福井県地方の構造を明らかにする目的から、S-P タイムが20秒以内のものに限った。解析に用いた地震の数は、S-P タイム20秒以上のものを除いているので69個になる。その一覧表を Table. 1 に示す。本研究に用いた震源情報は、全て北陸観測所のルーチン観測網による結果である。これらの地震の中には、観測所の観測網では震源が決定できなかった地震もあり、それらの地震は、震源情報が示されていない。SUJ の概略については、以前に示されている⁷⁾が、本稿では、まず第一に SUJ でトリガーされた地震の震央分布図 (Fig. 2) と観測所で決定された同期間のすべての地震の震央分布図 (Fig. 3) を比較し、SUJ で観測される地震の空間分布の特異性について議論する。次に、マグニチュードと SUJ での S-P タイムが同程度であり、SUJ への到来方向のみ異なる地震を選び、それぞれの波形をスペクトルの形状の比較によって調べ、断層域を通過することによってと思われる地震波形の特徴を議論する。周波数領域に変換するさい次の2点を考慮した。すなわち、OM-4の周波数特性が30 Hz までしか平坦でないことと、P波初動直後の波動 (P コード波) は、直達波と波線がそれほど異ならないP波とみなせることである。すなわち、スペク

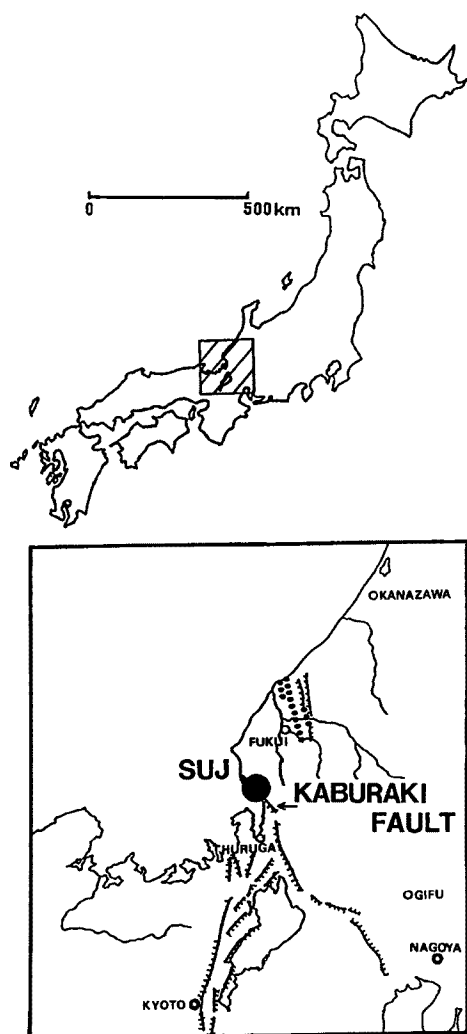


Fig. 1 Site of SUJ and the Kaburaki fault. Solid circle shows the location of SUJ.

Table 1. Analyzed earthquakes and those focal parameters. The origine of the coordinates is (136° E, 36° N)

EQ.NO.	DATE	X	Y	M	Remarks
1	'87. 7.12	—	—	—	S-P time 1 sec
2	7.13	13.530	-25.140	1.5	
3	7.15	—	—	—	S-P time 4 sec
5	7.17	-48.144	-68.348	3.7	
6	7.17	-42.018	-65.749	3.7	
7	7.18	-62.815	0.119	3.8	
8	7.19	27.628	-9.465	2.2	
9	7.21	-60.326	-0.718	4.6	
10	7.21	-60.402	-0.974	3.2	
11	7.23	30.298	0.122	2.3	
12	7.27	34.555	-9.588	2.9	
14	8.10	99.866	-6.804	3.9	
15	8.13	-101.479	-39.242	3.9	
16	8.17	-35.104	-51.442	3.2	
19	8.23	-42.853	-82.713	3.8	
20	8.23	47.355	-88.684	3.4	
21	8.24	24.617	9.143	2.5	
22	8.26	-54.632	-108.022	3.3	
23	8.29	36.282	-12.144	3.0	
24	8.30	—	—	—	S-P time 0.8 sec
25	8.30	-29.682	-61.131	3.0	
26	9.10	20.980	-47.997	4.1	
27	9.15	27.550	-50.381	2.1	
28	9.18	20.088	-50.323	3.3	
29	9.19	45.550	-20.215	3.3	
30	9.21	-22.573	-100.828	3.7	
32	9.25	2.001	-13.582	2.1	
35	10.15	82.730	-12.247	3.5	
36	11.27	—	—	—	S-P time 2.7 sec
39	12. 8	27.228	7.070	2.7	
40	12. 8	27.761	7.318	2.4	
42	12.13	11.767	-18.658	4.0	南条 有感
43	12.16	117.649	-67.675	3.8	
46	12.18	106.187	1.483	3.6	
48	12.20	103.563	1.353	3.1	
49	12.26	25.181	-40.243	3.2	
50	12.27	21.644	-28.935	3.1	
51	'88. 1. 5	-54.571	-80.226	3.3	
52	1. 7	67.544	-58.667	3.1	
54	1.17	-16.203	-11.598	3.0	
55	1.18	33.450	-18.353	2.3	

56	1.23	20.871	-47.505	3.1	
60	2.4	24.561	17.507	3.3	
61	2.5	-34.515	-63.847	3.5	
62	2.8	-13.700	-10.200	2.7	
64	2.20	1.795	16.538	2.9	
65	2.20	35.784	21.445	2.9	
66	2.21	-32.748	-65.251	3.3	
67	3.6	-34.96	-65.112	3.3	
68	3.8	9.508	-31.504	2.6	
71	3.20	36.086	-6.421	2.4	
72	3.22	-18.898	-97.458	3.4	
73	4.2	34.152	-8.757	2.7	
74	4.3	31.835	-5.905	3.8	池田 有感
75	4.4	28.150	19.370	3.2	
77	4.15	26.432	-41.585	2.8	
78	4.16	128.301	-9.325	3.6	
79	4.17	15.265	-27.379	2.5	
80	4.20	68.756	41.322	4.0	
81	4.24	65.314	-109.063	3.7	
82	4.28	33.382	-11.950	4.5	池田 有感
83	4.28	33.953	-11.717	3.7	
84	4.28	34.062	-11.778	3.4	
85	4.30	34.149	-10.858	3.1	
91	5.23	—	—	—	S-P time 0.4 sec
94	6.14	-36.296	-118.826	3.5	
95	6.15	8.727	-3.902	2.6	
96	6.16	26.127	4.166	1.5	
97	6.22	—	—	—	S-P time 0.5 sec

トルを比較するさいは 1 Hz—30 Hz とする。SUJ については、初動が飽和しているので、P コード波を用いる。これらに留意して周波数領域への変換を行った。SUJ においては飽和していない P コード部分 0.5 秒間、常時観測網の波形の変換においては初動より 0.5 秒間おこなった。変換には FFT を用いた。

3. 解析結果と議論

3.1 甲楽城断層近傍の地震活動

観測所の観測網で震源が決められなかった極微小地震について議論する。**Table. 1** において、震源情報が示されていないものがそれらである。備考の S-P タイムによれば、それらの大半が S-P タイム 1 秒以内である。着震時を調べると、明け方など人為的ノイズが発生しにくい時刻のものもあり、波形の検討などからも自然地震の可能性が高い (**Fig. 4**)。これらの地震は、SUJ が甲楽城断層系のほぼ中心付近にあることを考慮すると、甲楽城断層系あるいはその近傍で発生したものであると考えられる。すなわち、甲楽城断層系は、地震活動を伴った活断層であると推察できる。

SUJ でトリガーされた地震の震央分布 (**Fig. 2**) について議論する。この分布の特徴は、SUJ の南方～南西方向で震央距離約 50 km 以内の地震は、北陸観測所観測網で震康が求まっても SUJ ではほとんどトリガーされていないことである。ただし、南方でも震央距離が長く、規模の大きいものは、記録されている。

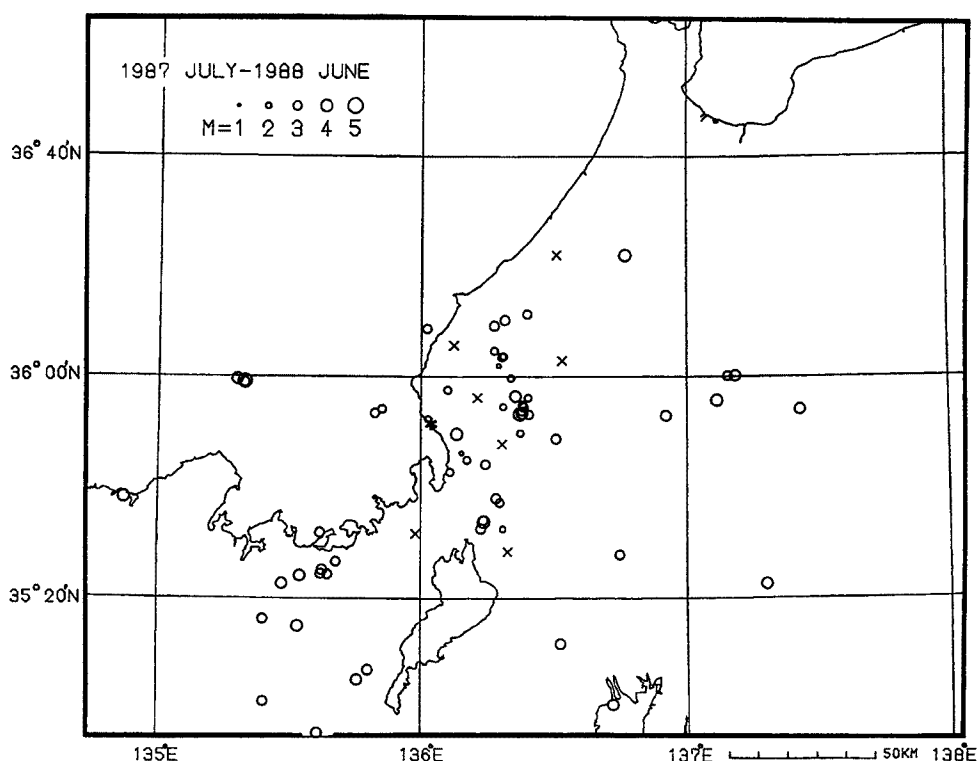


Fig. 2 The spatial distribution of the epicenters which were recorded at SUJ. Cross marks denote the observation stations of the Hokuriku Microearthquake Observatory.

SUJ が観測所の観測網の内部にあると考えられ、SUJ の周辺では観測網の検知能力が M1~M2 である⁸⁾ことを考慮して観測所で決定された同期間のすべての地震の震央分布図 (Fig. 3) と比較した。その結果、SUJ で観測された地震の数そのものがかなり少なかったこと、また、SUJ の南側でも観測所の常時観測網によれば、微小地震の発生がかなり認められるにもかかわらず SUJ ではあまりトリガーされていないことがわかった。前者については、SUJ のトリガーレベルが関係している。実際には、SUJ が海岸線に近いところにあり、ノイズを考慮してトリガーレベルを高めに設定してあるので、このことが影響しているであろう。ほかに、前者の場合観測点が設置されたのが断層崖であり、その影響も考えられる。後者については、SUJ で記録された地震が観測網で震源が決められた地震に対して、どれ位の割合で欠落しているのか調べてみなければならない。SUJ より震央距離 50 km の地震に関して個数の比を方位別に計算した (Fig. 5)。その結果、SUJ より南方の地震について比の値が低下していることがわかった。これらの結果は、SUJ 付近が地震波の伝播に関して特徴ある観測点であることを示唆する。

3.2 P 波初動部のスペクトルについて

前述の特徴、すなわち、南方の地震の欠落をさらに明らかにするため、地震波形の解析を行った。方位により観測される地震の空間分布が異なっており、とくに、南北の間で観測された地震の個数がかなり異なっていることにより、南方よりの地震 (No. 77) と北方よりの地震 (No. 21) の波形を比べた。用いた地震の震央を Fig. 6 に示す。それぞれ、福井地震断層系及び柳ヶ瀬断層系に発生したもので、規模は M2.5~M3 である。SUJ における S-P タイムはそれぞれ 4 秒程度である。地震番号は、Table 1 による。それらの波形を観測所の常時観測網については Fig. 7 a), b) に、SUJ に関しては Fig. 8 a), b) に示す。常時観測網の

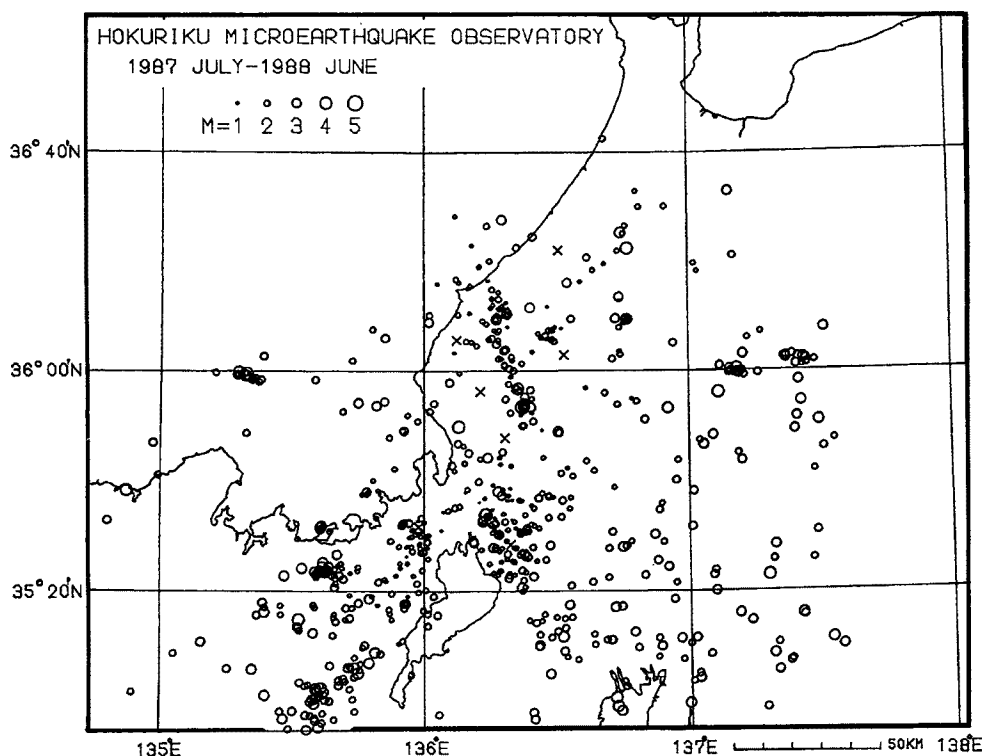


Fig. 3 The spatial distribution of the epicenters which were determined by the observation stations of the Hokuriku Microearthquake Observatory.

波形については、震源距離が大きくなるにつれて振幅及び卓越周波数が小さくなり、特に双方の地震の間で明瞭な震源情報（震源スペクトル）の違いがあるとは考えられない。SUJの観測波形に注目すると、二つの地震の間で明瞭な波形の違いが認められる。特に卓越周波数が大きく異なっている。ただ振幅に関しては、P波初動が飽和しているので詳しく議論することができなかった。Fig. 9 a), b) にSUJでのスペクトルを示す。常時観測網について、No. 21の地震についてはSUJとほぼ同様の震央距離を持つIMJのスペクトル、No. 77の地震についてはSUJより約1.5倍の震央距離を持つFKJのスペクトルを、Fig. 10 a), b) に示す。これらのスペクトルについて、それぞれの地震ごとに議論する。

第一にNo. 21の地震についてであるが、SUJ及びIMJ双方ともほぼ同じ周波数のところにピークを持つ（Fig. 9 a) と Fig. 10 a)）。震央距離がほぼ等しいことを考慮すると、SUJ及びIMJ双方のスペクトルが震源による周波数の変化を示しているのではなく、距離による減衰の効果を示していることがわかる。すなわち、スペクトルのピークの位置が減衰による効果を示し、震源よりSUJ及びIMJへの伝播経路中でほぼ同じであることを意味する。

次にNo. 77の地震についてであるが、震央距離の異なる観測点間（SUJ, FKJ）でスペクトルのピークの位置が一致している（Fig. 9 b) と Fig. 10 b)）。地震波の射出方位がそれほどかわらず、震央距離のみが異なっているにもかかわらずピークが等しいことは、震央距離が短い方のSUJの近傍で地震波の受ける減衰の効果が大きいことを意味している。また、SUJにおいてNo. 77の地震の方がNo. 21の地震よりピークの位置がより低周波にある。SUJに関してNo. 21, No. 77の二つの地震の震央距離がほぼ等しいことを考えれば、SUJの南側でしかもごく近傍で地震波の減衰が大きいことを意味している。

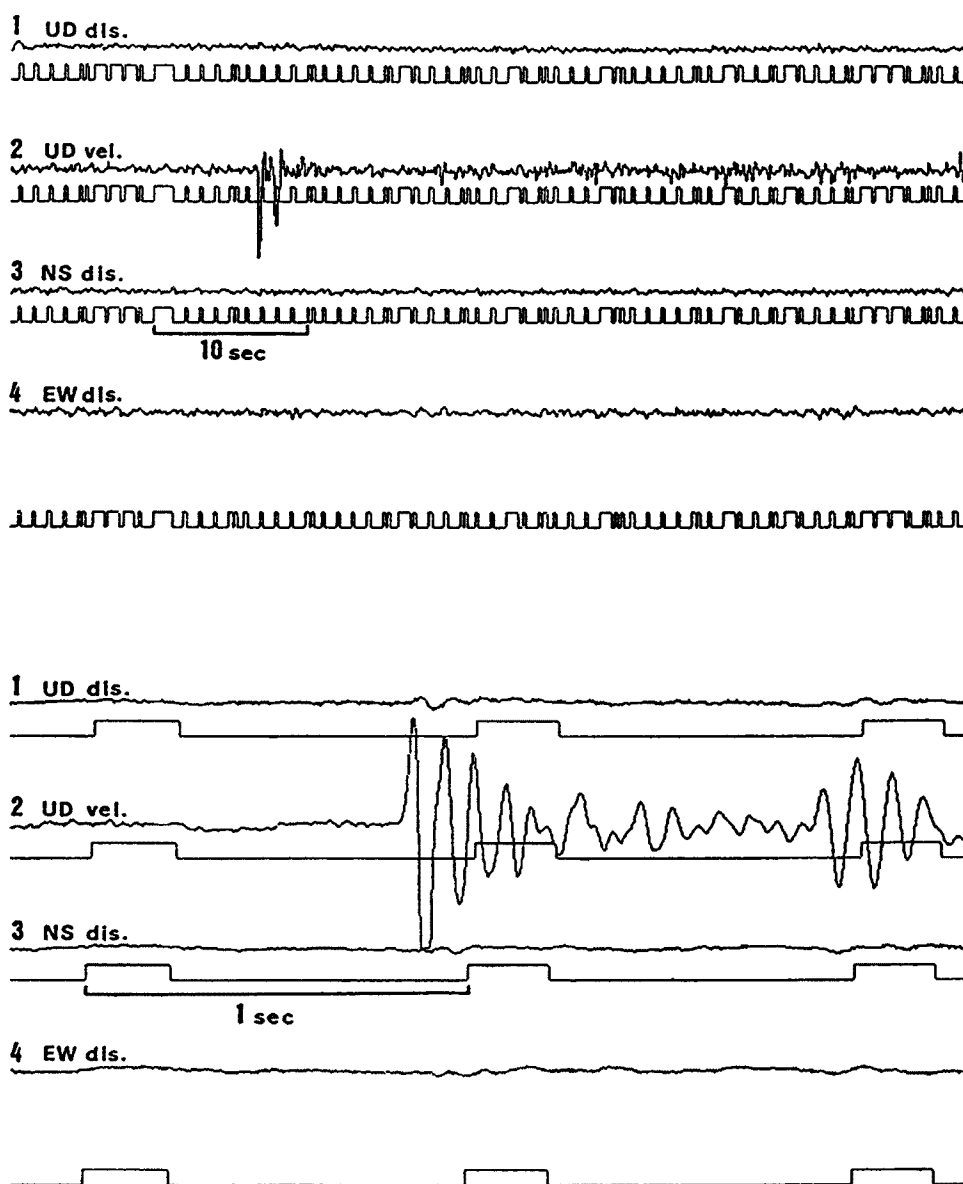


Fig. 4 An example of wave-forms recorded at SUJ⁴⁾. Lower half is the same records extended in horizontal axis. Channel 1, 3 and 4 are displacement seismograms and only channel 2 is velocity one.

3.3 議論

SUJ でトリガーされた地震の震央分布図で得られた特徴と波形で得られた特徴をあわせて議論する。震央分布図においては、SUJ の南～南西側約 50 km 以内に発生している微小地震がトリガーされにくいことが大きな特徴である。波形においては、SUJ の南側の極近傍で減衰が大きいことが特徴的である。これらの特徴はあい矛盾するものではなく、一つの仮説によって説明することが可能である。すなわち、SUJ の南方でトリガーされている地震の震央距離と波線の最深点の関係を考慮すれば、SUJ の南側のごく近傍に、深さがたかだか 10 km 程度の地震波の減衰率の大きい物質があると考えることが可能である。このことは、甲斐城断

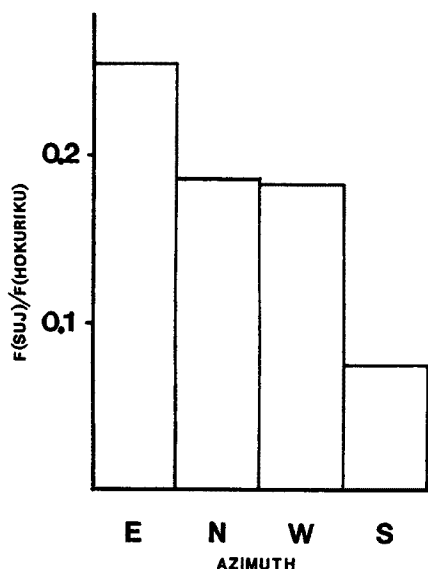


Fig. 5 Concerning the earthquakes whose epicentral distances are less than 50 km from SUJ, The ratios of numbers of shocks observed at SUJ. and those determined by the Hokuriku Microearthquake Observatory were calculated and illustrated every 90° in azimuth.

層南東縁にあたる今庄付近で、爆破観測より求められた速度構造において速度のギャップが指摘されていることとそれほど矛盾はない⁹⁾。また、SUJの周辺の地形学的な状況をみると、敦賀湾～琵琶湖という断層を伴った地形が連続して存在している。特に琵琶湖付近では、その直下の地殻が落ち込んでいることが指摘されている¹⁰⁾。すなわち、堆積物等を考慮すると、地震波の減衰率の大きな物質が深くまで存在している可能性もあろう。また、敦賀湾～琵琶湖にかけてが負の重力異常の地域であるといわれており、ごく最近でも日本の重力異常のまとめのなかで指摘されている¹¹⁾。このことも、この地域一帯に地震波の減衰の大きい物質があることと矛盾しない。また、甲楽城断層の断層崖が敦賀湾の北東縁と一致するところから、この物質は甲楽城断層の運動及び敦賀湾の成因と直接関係しているかもしれない。敦賀湾の深さを考慮して、甲楽城断層の断層崖の規模をみると、現在甲楽城断層の地震活動がそれほど活発でないとしても、過去における甲楽城断層の活動の高さを示していると考えてよい。

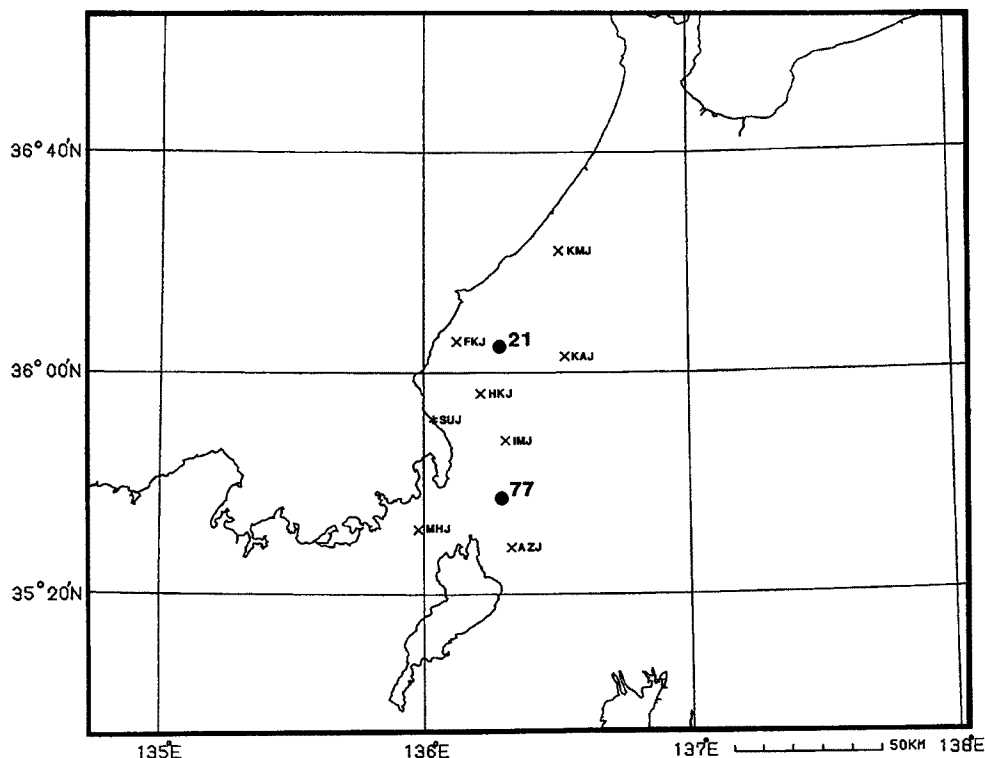


Fig. 6 The epicenters of earthquakes, No. 21 and No. 77, whose spectra were calculated.

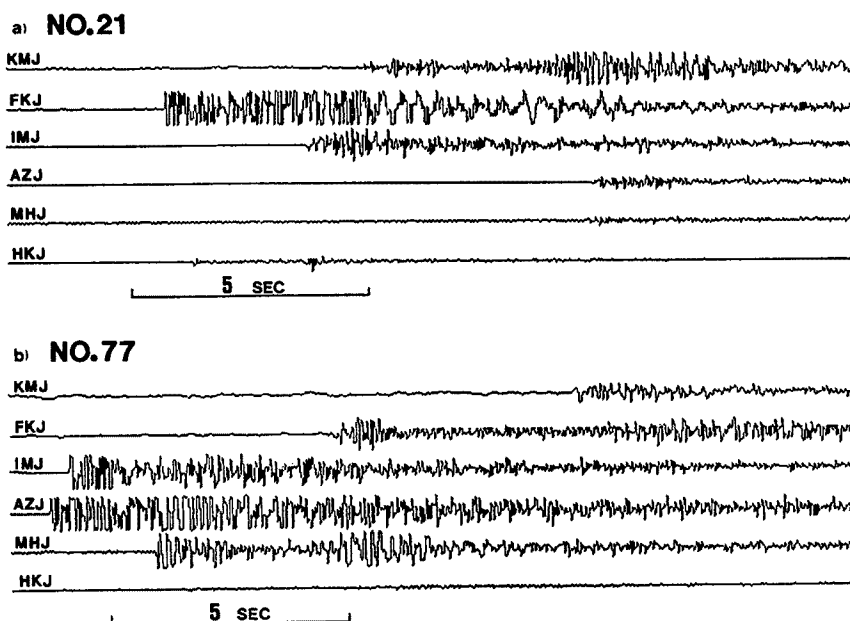


Fig. 7 Seismograms recorded by the network of the Hokuriku Microearthquake Observatory. a) is the wave-forms of No. 21 event and b) is those of No. 77.

4. 結論

甲斐断層の直上で地震の観測を行った結果、甲斐断層周辺で極微小地震が発生していることが認められた。また、甲斐断層のごく近傍に地震波の減衰率が大きな領域（地塊）が存在している可能性が推察された。本稿では、この領域が直接甲斐断層の活動と関連したものかどうか明らかにするまでにはいたらなかった。しかし、甲斐断層周辺における構造が複雑でかつ地殻活動が現在でも続いていることが指摘できた。将来、観測点の増強をはかり、震源決定、三次元構造等の研究を行なう予定である。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり終始ご指導頂いた、京都大学防災研究所、岸本兆方教授、京都大学理学部、尾池和夫教授、京都大学防災研究所、竹内文朗氏に心より感謝致します。観測点設置、解析等を手伝って下さった、福井工業高等専門学校学生、有田健君、蔵本守功君、及び福井工業高等専門学校地球物理研究会の学生諸氏に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 私信：京都大学防災研究所附属北陸微小地震観測所，1989.
- 2) 活断層研究会編：日本の活断層，東京大学出版会，1980.
- 3) UMEDA, Y.: AN EARTHQUAKE SOURCE MODEL WITH A RIPPLE GENERATING CORE, J. Phys. Earth, 29, 1981, pp.341-370.
- 4) OKAMOTO, T., H. MAEZAWA and S. YOSHIE: Introduction of Seismic Observation Systems at Fukui Technical College and Sugiyama, Research Reports of Fukui National College of Technology,

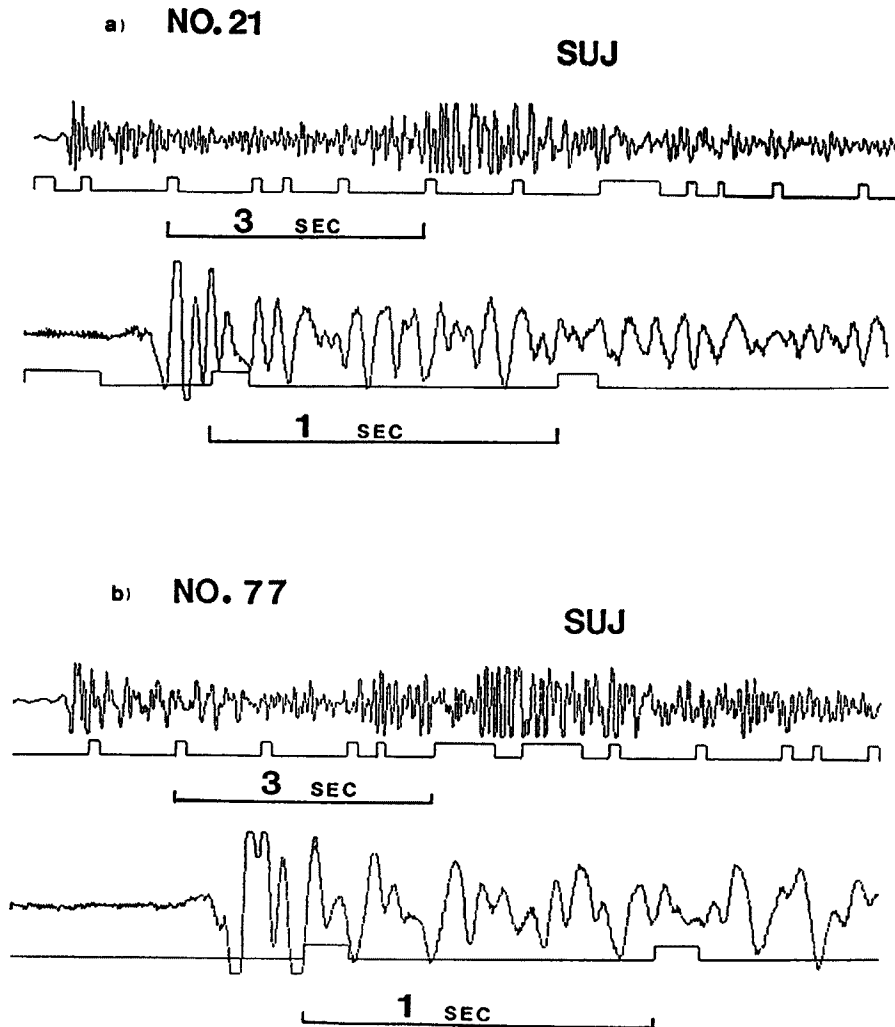


Fig. 8 UD component wave-forms of velocity type recorded at SUJ. a) denotes those of No. 21. and b), No.77.

Natural Science and Engineering, No. 21, 1987, pp.33-40.

- 5) 尾池和夫・松村一男：音響用テープレコーダを用いた地震波記録装置（OM 型イベントレコーダ），地震，第38巻，第3号，1985，pp.359-364.
- 6) 平野憲雄・岡本拓夫：パソコンによる OM 型レコーダの再生と読み取りシステム，地震学会講演予稿集，No. 1, P14, 1988, p338.
- 7) 岡本拓夫・前澤廣道・義江修二・有田健・蔵本守功：甲斐城断層周辺における地震活動，福井工業高等専門学校研究紀要，自然科学・工学，第22号，1988，pp.15-24.
- 8) 竹内文朗・平野憲雄：北陸地方の微小地震活動の特徴について（その1）—浅井観測室付近の活動—，京都大学防災研究所年報，第22号，B-1，1979，pp.11-18.
- 9) 松村一男・見野和夫・渡辺邦彦・竹内文朗・平野憲雄：北陸地方南部の地殻構造について—手取川ダム砕石発破および琵琶湖発破—，京都大学防災研究所年報，第22号，B-1，1979，pp.1-10.

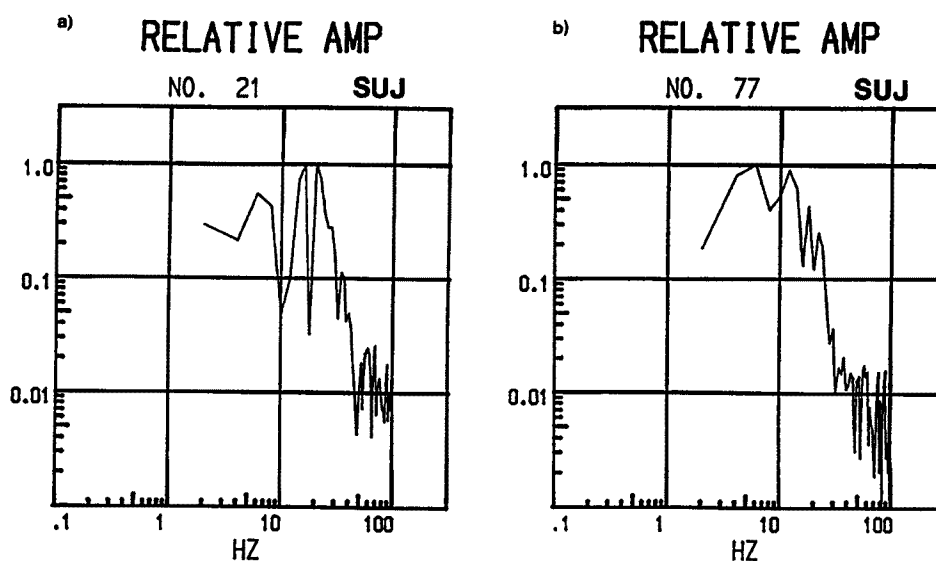


Fig. 9 Relative amplitude spectrum of coda P wave recorded at SUJ. a) shows the spectrum of No. 21 event and b) shows that of No.77

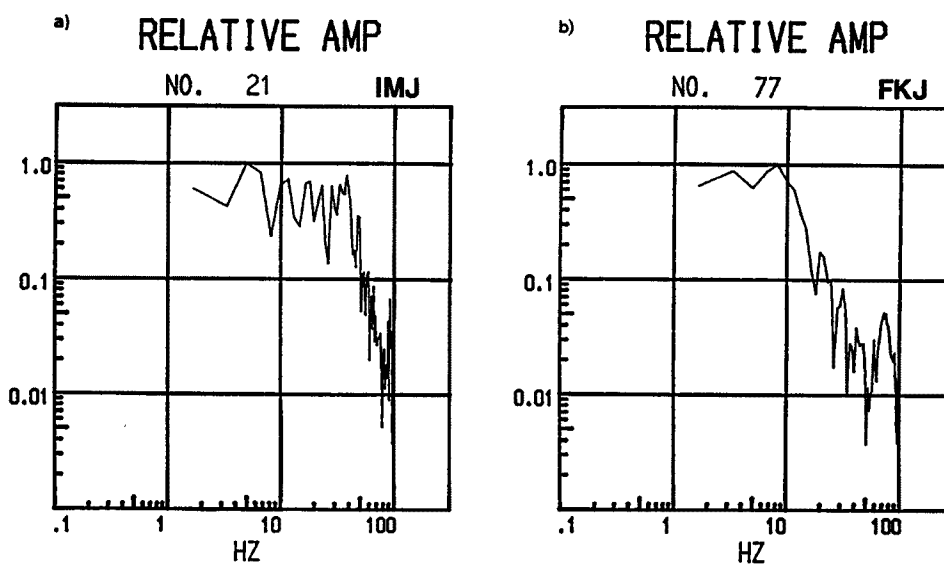


Fig. 10 Relative amplitude spectrum of initial P wave. a) shows the spectrum of No. 21 event recorded at IMJ and b) shows that of No. 77 recorded at FKJ.

- 10) HURUKAWA, N.: Pn VELOCITY AND MOHO-OFFSET AT THE WEST OF LAKE BIWA IN THE KINKI DISTRICT, JAPAN, J. Phys. Earth, 31, 1983, pp.33-46.
- 11) 河野芳輝・古瀬慶博：日本列島の重力異常，科学，岩波書店，July 1988, Vol. 58, No. 7, pp.414-422.