

微小地震と地震予知

岸本 兆方

1. 序

最近わが国においては、南関東や東海沖の地震発生の可能性に関連して、地震予知は大きな社会的関心事となっている。一方、アメリカ・ソ連・中国の各国においても、地震予知研究はこの数年間に目覚ましい発展を示し、特に中国において、1975年2月遼寧省の地震の予知に成功したことは⁽¹⁾、世界の地震予知研究者に一大衝撃を与えたといつてよいであろう。

わが国で、1965年「地震予知研究計画」がNational Project として発足して以来12年を経過し、1974年に始まった「地震予知研究第3次5ヵ年計画」が終りに近づこうとしている今、それぞれの研究分野において、地震予知研究のこれまでの結果をふりかえり、将来のあり方について考えを整理してみることは、決して不要のことではあるまい。本稿においては、微小地震研究者の立場で、地震予知研究のこれまでの総括、若干の将来の展望および当研究所における微小地震観測態勢について述べてみたい。

まず微小地震研究が、地震予知に関してどのような意義を持つかについて簡単に述べる。それにはいろいろの考え方があつてあろうが、ここでは次のように分類してみる。すなわち、

(1)微小地震を大地震発生についてのIndicator であるとする立場である。これを更に分けて、

(a)直接的なIndicator と考える立場、および

(b)間接的なIndicator と考える立場、

があつてあろう。直接的なIndicatorとは、例えば前震現象、 V_p/V_s あるいは V_p の変化、Gutenberg-Richterの関係における b 値の変化などを指すもので、大きな地震の発生に直接関係して現われる前兆現象の意味である。間接的なIndicatorとは、微小地震を1つの統計量と考へて、大地震発生場の性質を研究しようとするものである。いい換えれば、ある地域の地殻活動の研究であるが、大地震は最も顕著な地殻活動であるから、この立場は、大地震発生を広域の地殻活動の中に位置付け、そこから大地震発生に関する統計的法則性を見つけようとするものといえる。

(2)微小地震をModelと考へて、その1つ1つを地震予知研究の対象とする立場である。すなわち、微小地震といえども立派に地震としての属性を備えていると考へ、試行錯誤の方法によって地震予知研究の効率化を図ろうとするものである。この場合、大地震と小地震の性質の異同性あるいは相似則の有無が問題となる。

現在全国的に行われている微小地震の研究は、恐らく、これらのうちのいずれかに相当するものであろう。以下には、防災研究所の微小地震グループの研究を主体として、微小地震と地震予知の問題を少しく述べてみよう。まず第2節において間接的Indicatorとしての微小地震と地殻活動との関連を、第3節において直接的Indicatorの1つとして前震現象を考察する。第4節においては、地震予知のモデル研究としての微小地震研究を、主として山崎断層における観測を例にとつて説明する。最後に第5節において、このような微小地震研究の基礎である観測態勢について、新しい進展状態を紹介する。

2. 微小地震と地殻活動

2.1 微小地震の空間分布の特性

大地震が最も顕著な地殻活動であることは既に述べた。地殻活動の様相は、造構応力(tectonic stress)、地殻構造(構成岩石の物性も含む)、地質構造(活断層や活褶曲などの活構造を含む)などによって、種々の現われ方をするであろう。従つて、種々の地域で地殻活動の様式を把握しておくことは、地震予知の重要な基礎とな

る。

微小地震は、極めて多い発生数と極めて小さな震源域とによって、それぞれ、時間的および空間的に高い分解能を有しており、地殻活動の詳細を知るのに都合がよい。この方面の研究は、京大防災研究所および阿武山地震観測所の観測網が存在する近畿地方で最も進んでいるもので、多数の研究結果²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾が発表されているから、ここでは空間分布特性について簡単に復習するに止める。

Fig. 1 は、鳥取微小地震観測所によって決められた近畿から中国地方にかけての震央分布に活断層を重ねて示したものである。この図は造構応力に対する地殻のレスポンスが震央分布という形で現われているもので、地殻活動の種々の性質を読取ることができる。特に、

(1)微小地震のサイスマシティは顕著な地域性を有すること、

(2)活断層と地震活動とは極めて密接な関係を有すること、

は重要な結果である。例えば、丹波山地・淀川流域・和歌山市周辺地域などでは、あたかも雲の如き分布を示し、この地域の地殻の破砕度が極めて高いことを推定させる。一方、主として兵庫県では、断層に沿う震央の線状配列が卓越し、かなり大きな低活動地域が存在する。この低活動地域は、地震予知の立場からは、高活動域と同様の重要性を持つものである。更に西方に移って中国地方では、震央分布はかなり一様になり、やや大きな地震が目立ってくる。

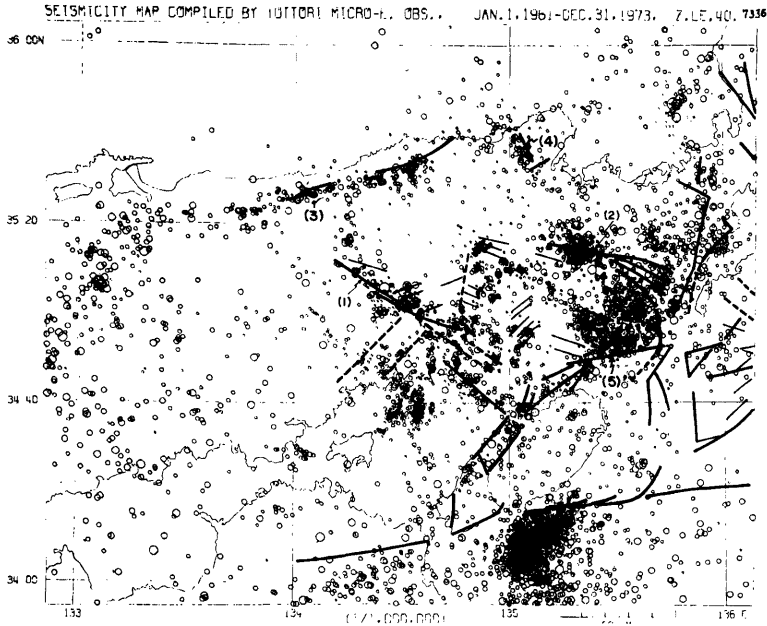


Fig. 1. Epicenter distribution of microearthquakes in northern Kinki and eastern Chugoku areas.

Fig. 2 は $M \geq 3$ の地震の分布である。Fig. 1 と比べて、ずっと一様な分布をしていることがわかる。このことは上述の空間分布様式の違いと対応しており、近畿から中国にかけて、西へ行く程破砕度が小さく、比較的大きな地震の発生する、いわば「大陸的」様相を加えて行くことを示すものである。Fig. 3 は、東から西へ、ある幅で区切った地域における Gutenberg-Richter の b 値の変化であるが、東から西へ b 値がだんだん小さくなる(大

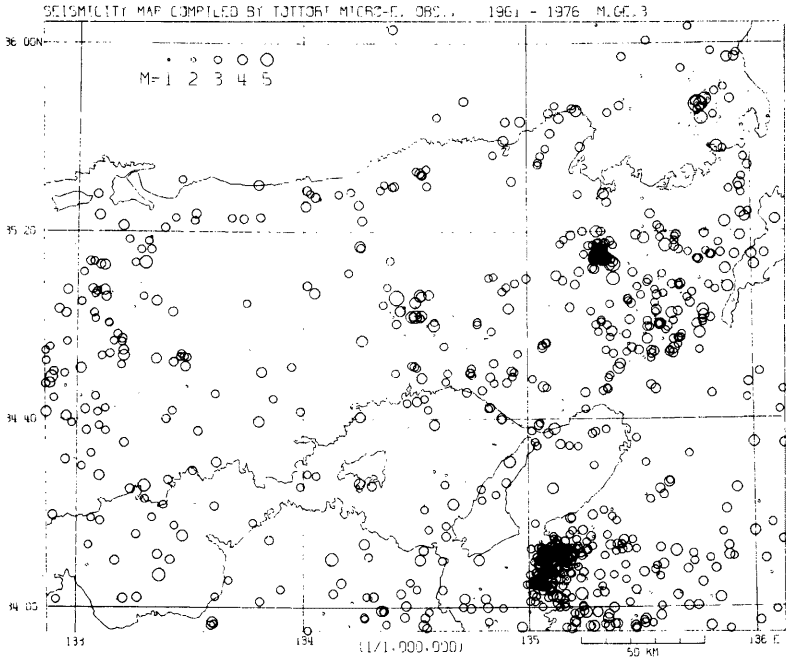


Fig. 2. Epicenter distribution of small earthquakes of $M \geq 3$. (after Oike)

陸的になる)ことが判る⁶⁾。

活断層が地震と密接な関係を有することは現在定説といってよい。地震の観測波形や地震に伴う地殻変動は、適当な断層面での shear dislocation モデルによってよく説明される。しかしながら、それぞれの活断層の性質は、Fig. 1 に示すような微小地震活動との対応によって、格段に明らかになったことである。一口に活断層といっても、断層に沿う線上的地震活動を示す山崎断層 (Fig. 1 の(1)) や、最近の大地震に伴って活動した吉岡・鹿野 (Fig. 1 の(3)) と郷村 (Fig. 1 の(4)) 両断層などがある一方、高活動域と低活動域を区切っている有馬-高槻構造線 (Fig. 1 の(5)) のような活断層もある。これらは、活断層の活動様式の違いを表わすもので、起りうべき地震についての基礎的情報を与えるものである⁷⁾。

このような微小地震の空間分布、特に活断層との密接な結びつきは、地震現象が、数万年あるいは数10万年にわたる地質学的造構運動の現時点における発現であることを示唆しているが²⁾³⁾、この考えは、これらの地震の発震機構⁸⁾⁹⁾、深さ分布²⁾¹⁰⁾、地形と地震との相関¹¹⁾などの研究結果からも支持される。すなわち、基本的な stress state として、西南日本内帯は、ほぼ東西且水平方向の圧縮応力を受けていること、その力の源として太平洋プレートのもぐり込みが考えられることが作業仮説として導かれるのである²⁾³⁾⁴⁾。以下の各節においても、この考え方が背景として存在することを注意しておきたい。

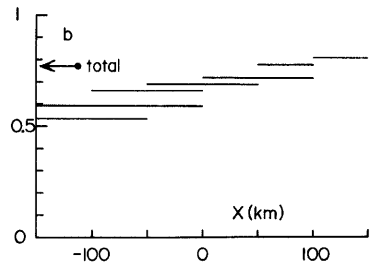


Fig. 3. Regional variation of the b-value in Gutenberg-Richter's relation. (after Oike)
 $x = 0$ corresponds to $134^{\circ} 30' E$.

2.2 地震活動の時空間分布

以上に述べた地震の空間分布、あるいは static な stress 分布は、現在までにほぼ判明したといつてよい。しかし地震予知のためには、時間分布を落すことはできない。次に Fig. 1 に示した地震活動の時空間分布について述べようと思うが、その前に西南日本内帯における地震活動を概観しよう。

Fig. 4 に、内帯および近畿・中国地方における、種々のマグニチュードレベルの地震の発散エネルギー積算グラフを示す。M > 5 の大きな地震について内帯全体を見れば、1961年北美濃地震 (M=7.0) や1963年越前岬沖地震 (M=6.9) などの大地震で代表されてしまい、1969年岐阜中部地震 (M=6.6) が僅かに目立つに過ぎない。これらの大地震は、恐らくもっと広い全国的スケールの地域を考えて収支を合わせるべきものであろう。下から2番目は近畿・中国のみに限った M > 5 のものである。この地域では、1961年の西近畿 (山崎断層) の地震と、1968年京都和知の地震 (M=5.6) が著明なもので、この2つを除けば、エネルギー放出はほぼ一定である。従って、微小地震観測の始まった1965年~現在の間では、和知地震が特別な event であったと考えられる。このことは、Fig. 4 の上の3本の積算グラフを見れば肯定されるであろう。3本とも、和知地震の前後にまたがって活動状態の変化が認められる。変化の始まった時期や細かい点については3本の間に少し違いがあるが、これはそれぞれのマグニチュードレベル、従って関係する領域の広さの違いを表わすものであろう。いずれにしても、近畿・中国における最近15年間の main event である和知地震に関連する活動の変化が、近畿・中国一帯に現われているのは重要である。特に地震のかなり前 (年あるいは月単位の) に活動度の変化が見られることは、もし一般性を持つものであるならば、地震予知に極めて有用な現象というべきであろう。

このような広域的現象はどのように起っているのだろうか。それを見るには、時空間表示をとるのがよい。

Fig. 1 の地震活動に戻って説明しよう。

Fig. 5. a~c は、1966年1月から1974年12月までの9年間にわたる、半年毎の地震発生数の contour 図である。直接震央をプロットしたものは、重なりによって正確な数を表わせないおそれがあるが、contour 図によればこの点が改善される上に、全体的パターンを理解し易くなる利点がある。ただし目の子で contour を引くと、個人差やあいまいさの残る恐れがあるが、Fig. 5 は適当な規則を設けて電子計算機とXYプロッターに引かせたもので、それらが除去されたものといつてよい⁶⁾。これらの図から、地震活動の時空間分布はかなり明瞭に読取れるが、主な点を挙げれば次の通りである。

- (1) 共役2方向 (北西-南東, 北東-南西) の地震配列の活動は、活動期と静穏期をくり返す。
 - (2) 特に顕著な地震に関係すると思われる広域的地震活動の変化がある。
- これらの点について、前述の和知地震前後の活動変化を少しくわしく説明しよう。
- (1) まず山崎断層に沿う活動がある (Fig. 5 a (1))
 - (2) 静穏期となる (Fig. 5 (2), (3))

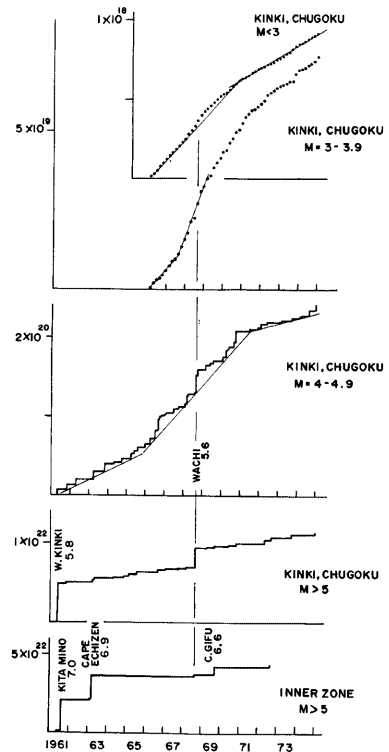


Fig. 4. Cumulative graphs of seismic energy released in several magnitude levels. Upper two graphs are due to observations by the Tottori Microearthquake Observatory, and the others by the Japan Meteorological Agency.

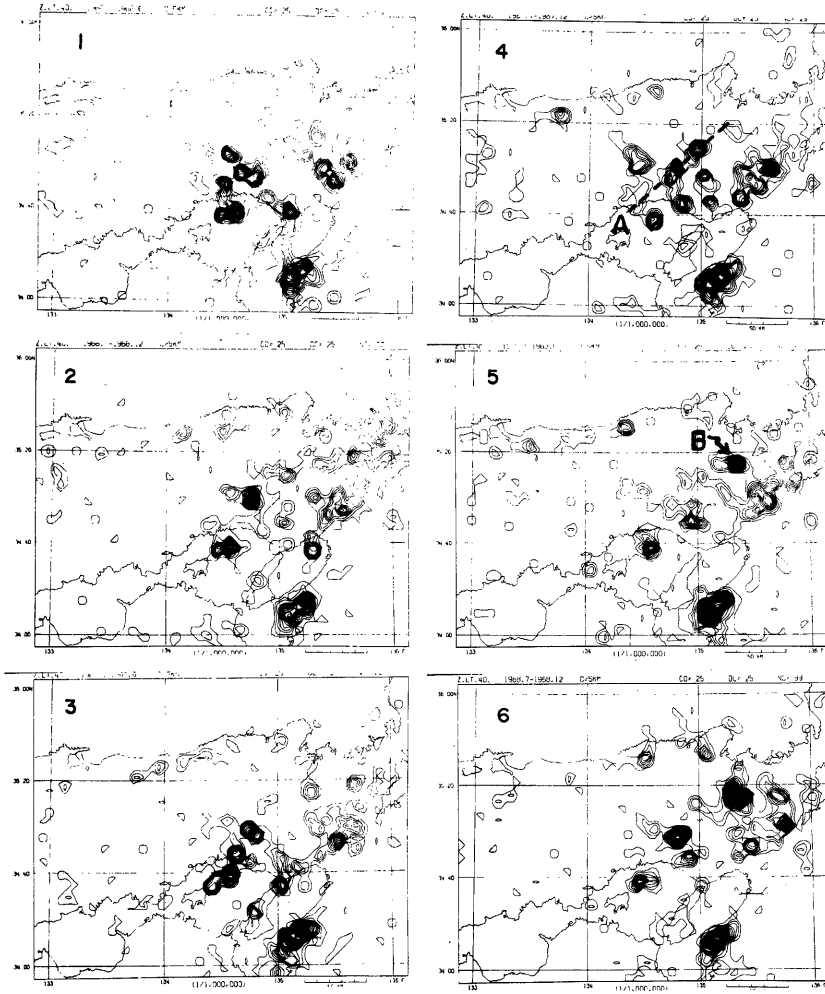


Fig. 5a. Spatial-temporal distribution of numbers of microearthquakes generated in unit area.

Values of respective contours denote $1000 \times N/\text{km}^2/\text{year} = 10, 20, 30, \dots$, where N means numbers in a circle of radius 10 km.

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1: 1966 Jan.-1966 Jun. | 2: 1966 Jul.-1966 Dec. |
| 3: 1967 Jan.-1967 Jun. | 4: 1967 Jul.-1967 Dec. |
| 5: 1968 Jan.-1968 Jun. | 6: 1968 Jul.-1968 Dec. |

- (3)山崎断層と共役の方向にあるFig.5a(4)の点線A (以下加古川線と呼ぶ) に沿う活動の開始 (Fig. 5 a(3))
 (4)この活動の和知震源域 (Fig. 5 a (5)のB) へ向っての移動 (Fig. 5 a(4))
 (5)和知地震の前震活動の開始 (1968年2月) (Fig. 5 a(5))
 (6)和知地震の本震活動 (1968年8月) の発生と、北丹後地震余震域の活動励起 (Fig. 5 a(6))
 (7)再び山崎断層に沿う活動 (Fig. 5 b(7), (8))
 (8)智頭地震 (1970年4月7日, $M=4.3$) (Fig. 5 b(9)のC) の発生 (Fig.5b(9))
 以上の一連の活動のうち、特に重要であると思われる和知地震前の加古川線に沿う地震活動の移動については次

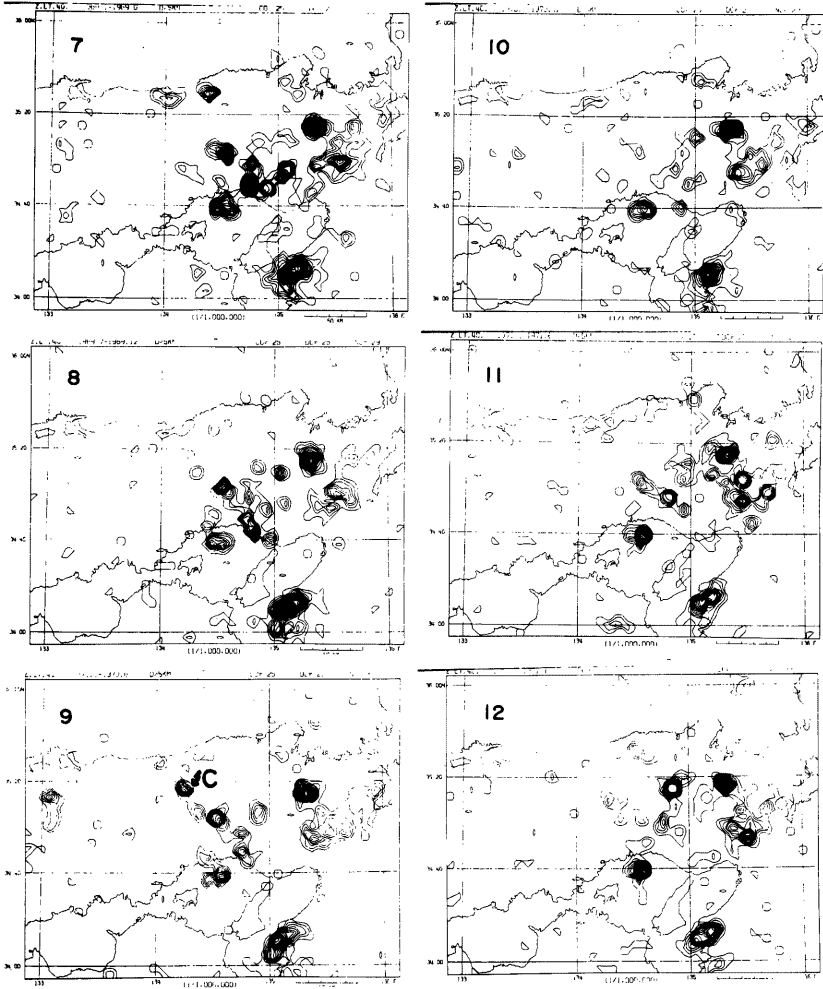


Fig. 5b, 7: 1969 Jan.—1969 Jun. 8: 1969 Jul.—1969 Dec.
 9: 1970 Jan.—1970 Jun. 10: 1970 Jul.—1970 Dec.
 11: 1971 Jan.—1971 Jun. 12: 1971 Jul.—1971 Dec.

節に述べるが、第2節を終るに当たって、地殻活動と地震予知に関する次の諸点を強調しておこう。

(1)先に述べたように、近畿・中国の地殻はほぼ東西方向の圧縮応力を受け、共役な横ずれ断層系が発達しており、それらに沿う微小地震活動がある。地震発生が断層運動と密接な関係を有することは、発震機構その他からも推察される。更にこれらの地震活動は時空間的に全くat randomなものでなく、共役断層系の連鎖的活動変化に応じて消長をくり返していると思われる。

(2)特に大きな地震活動については、通常の意味における前震活動よりずっと広い範囲に及ぶ前駆的活動が存在する可能性がある。また大きな活動は、関係する部分の活動を惹起することもある。

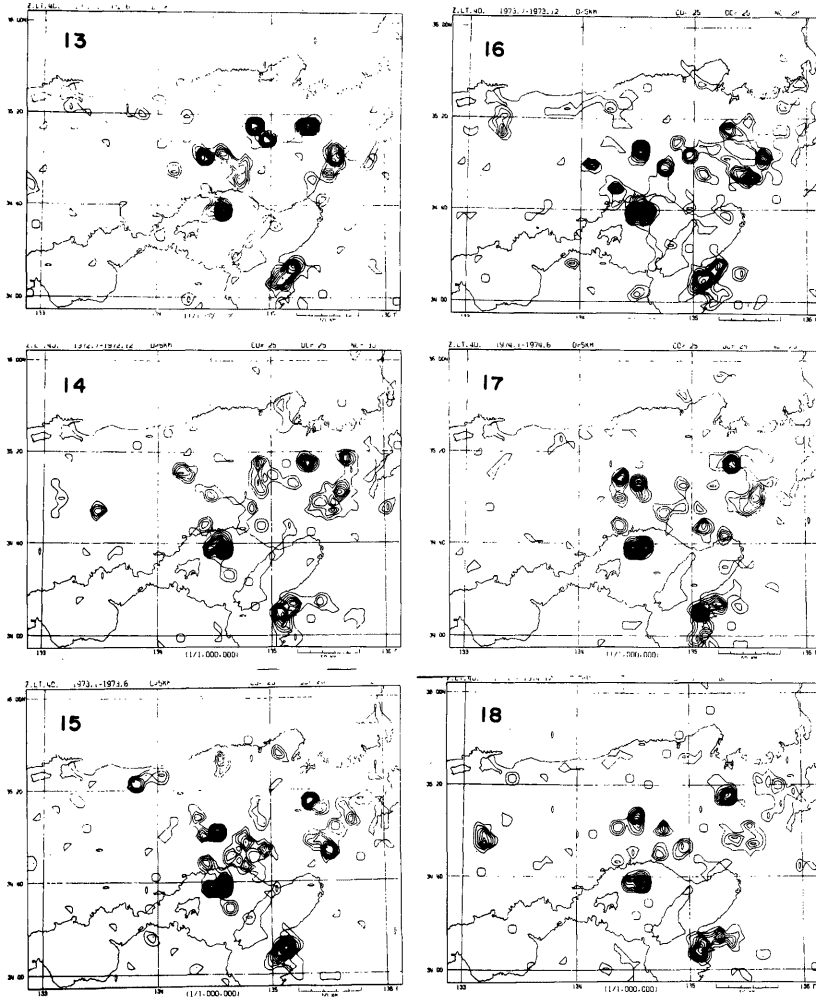


Fig. 5c. 13: 1972 Jan. — 1972 Jun. 14: 1972 Jul. — 1972 Dec.
 15: 1973 Jan. — 1973 Jun. 16: 1973 Jul. — 1973 Dec.
 17: 1974 Jan. — 1974 Jun. 18: 1974 Jul. — 1974 Dec.

(3)上記の前駆的活動は、地震のマグニチュードレベルによって現われ方が異なるかも知れない。従って大地震の予測のためには、各レベルの小・微小地震の活動状態を常に把握しておく必要がある。

3. 前震現象

Scholz ら²⁾は、地震発生前の種々の前駆現象(以下precursorと呼ぶ)の発現から地震発生までの時間 T (通常,日単位)とマグニチュードMとの間に, precursorの種類によらない一定の関係が成立つこと,そしてそれは地殻のダイラタンシーと水の作用で説明できると述べた。ここでは,このモデルの当否には触れず, T~M 関係そのものだけに注目する。

RIKITAKE¹³⁾はこの現象を多くの資料を用いて詳しく研究し,同じような関係が成立つことを示した。力武によればこの関係は, Fig. 6 に示してあるが,

$$\log T = 0.76M - 1.83 \quad (T: \text{日})$$

で表わされる。

力武の結果で注目されることは, precursorには上記の1次関係で表わされるものと, Mによらずほぼ一定の T (約1/10日)を示すものがあるという事実である。力武は前者を第1種,後者を第2種と呼んでいる。第1種には広域の地殻変動(Land deformation), V_p/V_s , V_p および V_s ,震源機構,岩石比抵抗, b値などがある。第2種にはLand deformationが目立つが,これは地震直前の予備的破壊であると述べられている¹⁴⁾。なお,前震と,連続観測による伸縮・傾斜はこの図には含まれない。

前震の起り方については,今までのところはっきりした規則性は見出されていないようである。予知に成功した中国遼寧省の地震では,前震は1日程度前に急激に発生を始めた¹⁵⁾。しかし,前震は最も直接的な precursor であり,その性質をくわしく調べておくことは重要である。

既に1963年, Mogi¹⁶⁾は日本の地震の発生様式を調べ,大別して,主震・余震型,前震・主震・余震型,および群発地震型があること,更にそれらの型の出現には,明瞭な地域性があると述べている。Fig. 7は,宇佐美による日本の被害地震の表¹⁷⁾から,明治以来の被害地震329例について,前震を伴ったものと群発型のものとの表わしたもので, Mogiの論文におけるFig. 30と同じ結果を与える。しかしこの結果は,有感や気象庁の観測網で記録されるような大きな前震についてであって,上述した和知地震の前震のように微小地震クラスのものには含まれない。従って,微小地震クラスまで観測できれば,前震はもっと増える可能性がある。

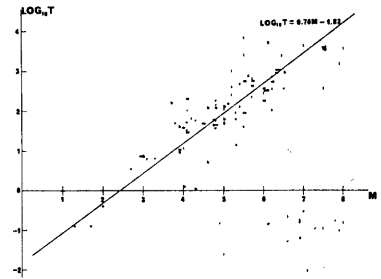


Fig. 6. Logarithmic precursor time in days versus magnitude. (after Rikitake)

一方,本来の意味における前震ではないが,前節に述べた和知地震前の広域の地震活動の変化のような,ある種の前駆的活動のあることも確かであろう。また,山陰地方の地震は「双子地震」であるといわれるのも,これに当るかも知れない。事実,1943年9月10日の鳥取地震(M=7.4)の際にも,約6ヵ月前3月4~5日, M=6.1およびM=6.4の2地震が起っている。従って,このようなものも含めて,広い意味での前震現象はより詳しく研究する必要があるであろう。

以下に「広義の前震」の1例として和知地震前の活動を見直すことにしよう。この前駆的活動は加古川線の地震活動の活発化という形で起ったが,詳しくいうと,この加古川線の活動は,南西端から始めて北東方向へ移動し,遂にその突き当りにある和知で地震が起ったのである。更にいえば,和知は加古川線が三峠断層(Fig. 1(2))と交叉する地点でもある。この活動の移動を見易く示したのがFig. 8である。同図の左の図は,図の短冊形の地域(加古川線)内の震央のX(東西)およびY(南北)座標を縦軸に,時間(単位:日)を横軸にとつて,活動の時間変化を表わしたグラフである。特に,震央のX座標と時間に関する下図に,直線で示した震央の移動

が認められる。グラフ上方の横に長く続く活動が和知地震である。

Fig. 8によっても、加古川線の活動が和知地震と関連を持つことが推察されよう。このような地震前の前駆的な活動の移動は、既に述べた中国遼寧省の地震についても報告されている¹⁵⁾。また直接地震には結びつかないが、地殻変動連続観測において、ひずみの永年変化のパターンが地理的に移動したという事実が東北大学のグループによつて報告された¹⁶⁾。

このような結果から見ても、加古川線の活動の活発化と移動は、何らかの意味で和知地震発生に関連があると考えられるので、それを precursor と考えて T を求めてみる。

Fig. 8 から移動開始と思われる日を決めると、 $T \approx 430$ 日となる。また、Fig. 8 の右図に示されている各観測室における地震の月別観測数において、加古川線の南端附近にある泉観測室 (IZ) では、丁度1年前に観測数が急に増大しているの、これを活動の開始とすれば、 $T \approx 360$ 日となる。更に、先に述べた2月14日の前震発生日をとれば、 $T \approx 180$ 日である。これらを T-M グラフにプロットすれば Fig. 9 のようになる。力武の結果によると、T と M の関係はかなりバラツキがあり、180日~430日の T は、いずれもバラツキの範囲内にある。

このような広義の前震現象の他の1例を挙げよう。

1973年9月21日山崎断層の中央部附近に $M=5.0$ の地震が起こった。これは1965年以来の近畿北部の地震としては和知地震に次ぐ大きさであった。この地震には「直前の前震」はなく典型的な主震・余震型であつたが、広い意味では前駆活動があつたようである。Fig. 10はこの地震の震央を囲む南北35km、東西30kmの地域に起こつた毎月の地震数である。この地震の約4ヵ月前、5月12日に $M=4.2$ を主震とする活動が認められるが、Fig. 10 全体の傾向からいって、両方の活動は関係がありそうである。Fig. 11は、9月21日の地震とその前の2つの地震の震央を示

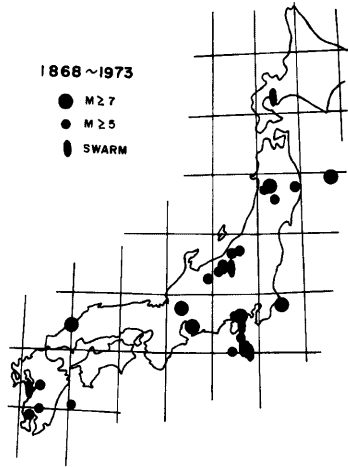


Fig. 7. Distribution of destructive earthquakes with foreshocks in 1868—1973. (after Usami)

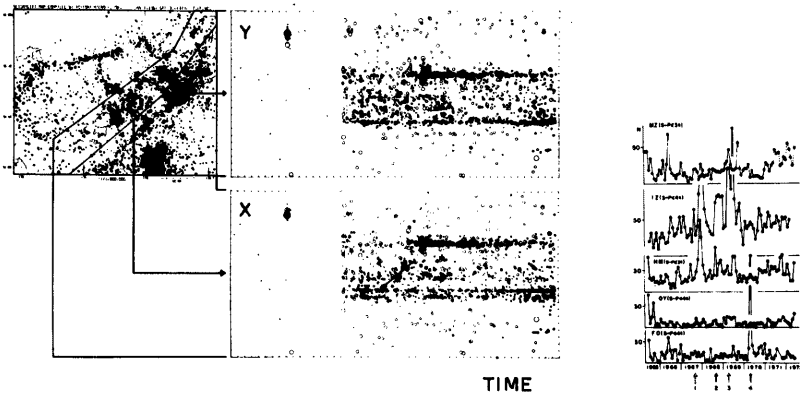


Fig. 8 Migration of seismic activity before the Wachi earthquake in Aug., 1968 (left) and monthly numbers of earthquakes observed at some stations (right).

し、点線のように時間的に動いたことを示している。山崎地震の震央につけてある両矢印は、この地震の fault 面の strikeを表わし、5月12日の地震から山崎の地震への移動方向とはほぼ同方向にある。1月21日の地震 (M=3.8) は、時間的にかなり離れていること、山崎断層の両側は性質が異なっていることなどから、直接の関係はないと見るべきであろう。従って、もし5月12日の地震を precursor と考えれば $T \approx 130$ 日となり、Fig. 9 に白丸で示す通り $T \sim M$ 関係を充している。

もちろん、 $T \sim M$ 関係を成立させる機構についてはまだ決定的なものはなく、且否定的な考え方もある。しかし多くの precursor について $\log T \sim M$ の1次関係が存在することはほぼ確からしいし、この関係に合致する前駆的地震活動の存在することも上に見た通りである。この現象の研究は今後強く推進する必要がある。

以上、地震発生 of 直接的 indicator の1つとして前震について述べた。前震現象は複雑であって、その研究は必ずしも十分に進んでいるとはいえない。しかし、最も直接的な前兆として、本来の意味での前震はもちろん、上に述べた広義の前震あるいは前駆的地震活動も、地震予知のためのみならず破壊の性質の解明の手段として、今後の重要な課題であると考え。また、ここでは触れなかった V_p/V_s や V_p の変化、 b 値のなども、第5節に述べる新しい観測システムを活用して、今後系統的に研究を進めようと考えている。

4. 地震予知のモデル研究のための小・微小地震、テストフィールド。

4.1 地震予知のモデル研究

既に中国においてなされていることであるが、最近わが国やアメリカにおいても、小地震、時には微小地震さえも地震予知研究の練習台として利用しようという試みがなされつつある。これは、あまり大きくなくて度々起り、且被害をもたらさないような地震を用いて、地震予知の試行錯誤的研究をしようということである。この試みは、前震などの地震学的研究だけではなく、地殻変動、電磁気学的変化、地下水や放射能の変化など、いろいろな方法によって総合的に判断しようとするもので、「テストフィールドにおける総合観測」と呼ばれており、今後地震予知研究の重要な一環となるであろう。

防災研究所微小地震グループは、数年前から山崎断層をテストフィールドに選び研究を進めているが、これについては4.2 節で紹介する。

先に述べたように、小地震あるいは微小地震を地震予知のモデルケースとして使うとすれば、同時に、大地震と小地震の間の相似則がいかに成立つかを調べておかねばならない。更に拡張すれば、微小地震は大きな地震と岩石破壊実験との中間に位するものであるから、岩石実験から得られる結果を地震発生に外挿する場合、その橋渡しとしての役割を演ずることもできる。この方面の研究も、多くのなすべきことを残しているというべきであろう。後述するように、微小地震観測がテレメーター化され、観測精度、観測方式が飛躍的に改善されたので、

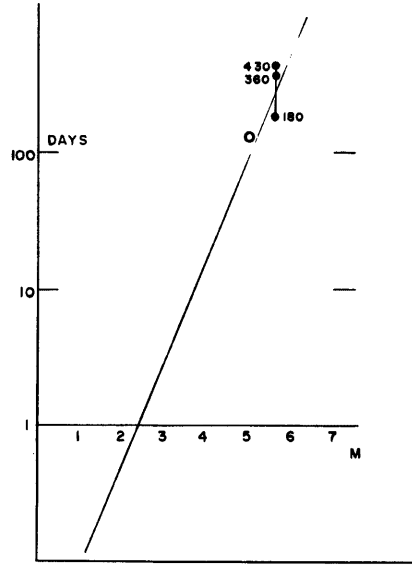


Fig. 9. Plot of some precursors on the Rikitake's graph in Fig. 6. Black circles denote precursors accompanied by the Wachi earthquake, attached numerals being referred to the text. White circle denotes that of the Yamasaki earthquake.

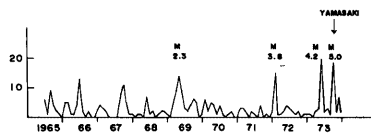


Fig. 10 Monthly numbers of earthquakes in an area of 35 km x 30 km centering around the Yamasaki earthquake in Sept., 1973.

この種の研究も大きな進展を示すことが期待される。以下には、微小地震の性質について2,3の例を挙げるに止めよう。

以前は、前震はもちろん余震でも、ある程度大きい地震でないと伴わないといわれていた。しかし微小地震観測が始まると、微小地震でも前震や余震を伴うものや群発型のものがあることが判った。Table 1 に、被害地震および小・微小地震が前震を伴う比率を示す。被害地震は前述の宇佐美の表¹⁷⁾によるもので、小・微小地震は、鳥取・山崎断層・加古川の諸地域の $M \geq 2$ の地震につき、鳥取微小地震観測所の観測記録から地震前24時間以内の前震の有無を調べたものである。1/3以上の地震が前震を伴うことがわかる。またTable 2 とFig. 12は、Fig. 12に与えたような分類によって、単発、準単発、双子、主震・余震、前震・主震・余震、および群発の各型に分けた結果と分布を示している。地震の型の地域性はかなり著しい。一般的にいて、微小地震は、たとえ断層に沿う線状配列を示す場合でも、主断層のものよりむしろ枝分れした部分に密集するようである。いい換えれば、微小地震は主断層のすべりに伴うよりも、むしろ枝分れ部分の破壊に伴うものかも知れない。

山崎断層の北東側と南西側を比べると、両側の地震の起り方のはっきりした違いがわかる。北東側では、主断層と共役方向の多数の枝分れ断層に密集して、群発型あるいは多くの余震を伴う地震が起こるのに反して、南西側では、殆どが単発地震である。このことは、山崎断層が性質の異なる大きなブロックの境界でもあることを示すのであろう。Fig. 12にAで示してある山崎断層の分岐部は最も顕著な地形のずれを見せている部分であるが、この分岐部では専らその先端部に地震が密集し、且すべてが単発や双子などの単純なもので群発は1例もない。そしてその部分を張り囲んで群発地震が起こっている。

このような結果は、茂木の大地震についての結果を、微小地震と微細構造に引き直すことができるということかも知れない。微小地震を用いて地震予知の実習をする際には、このような微小地震の「個性」を考慮して、キムの細かい取扱いをすることが必要である。

4.2 テストフィールドとしての山崎断層

既に見たように、山崎断層附近の地震発生様式や発震機構はよく調べられている一方、地形学的に見てもこの断層が極めて明らか且活動的な断層であることが判っている。従って、地震発生を断層の急激なすべりと考えるわれわれの立場からいって、断層運動を直接測定すること、それに伴う地震との対応を明確化することは、必然

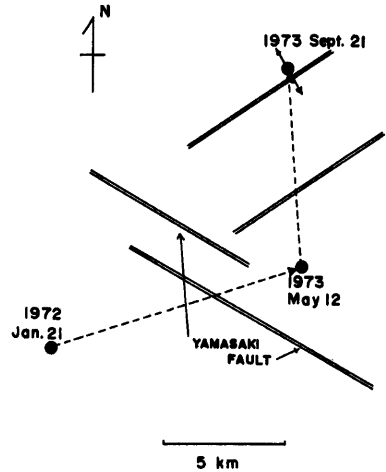


Fig. 11 Epicenters of the Yamasaki earthquake in Sept., 1973 and two preceding earthquakes.

Table 1

	Total number	Number of earthquakes with foreshock	Ratio %
Destructive Earthquake	329	35	11 %
M=2.0 ~ 2.4	111	31	28
2.5 ~ 2.9	57	25	44
3.0 ~ 3.4	24	10	42
3.5 ~ 3.9	13	5	38
4.0 ~ 4.4	2	1	50
4.5 ~ 5.0	1	1	100
Total	208	73	35

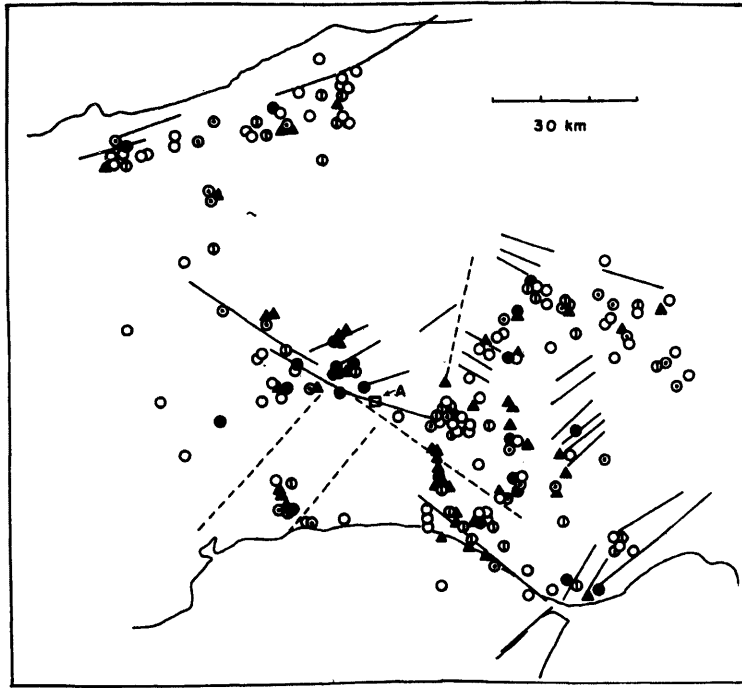


Fig.12 Distribution of various types of microearthquakes and active faults.

- : single shock, $N=1$
- ⊙ : quasi-single shock, $N \leq 3, \Delta M \geq 1.5$
- ⊕ : twin shocks, $N \leq 3, \Delta M < 1.5$
- : complex shocks, $N \geq 4, \Delta M \geq 1.5$
- ▲ : swarm shocks, $N \geq 4, \Delta M < 1.5$

N denotes numbers of earthquakes in each group, and ΔM is difference of magnitudes between the maximum and the second shocks.

Table 2.

Classification is referred to Fig. 12.

M	Single	Quasi-single	Twin	Complex	Swarm
2.0~2.4	46	9	26	6	24
2.5~2.9	20	12	10	8	7
3.0~3.4	6	5	1	6	6
3.5~3.9	2	2	0	4	5
4.0~4.4	1	1	0	4	1
4.5~5.0	0	0	0	1	1

的に生ずる研究上の要請といてよい。

このような考え方のもとに、防災研究所微地震グループは、大阪市立大学地質学グループと協力して、山崎断層におけるすべり運動の測定を計画した。幸にして、われわれの計画は日本道路公団の賛同を得、折柄山崎断層に沿って建設中であつた中国高速道路の直下8mに、断層を横切る鉤形の観測坑が建設されるに到つた。この

観測坑は、将来の道路建設計画に対する基礎資料を得る目的をも含むものである。その位置をFig. 12の中のA部の四角で、観測坑の平面図をFig. 13に示す。Fig. 13で、Aはスーパーインバー管伸縮計、Fは伸縮計の固定端、1～12はそれぞれ差動トランス型トランスデューサー、点線は明瞭なクラックあるいは断層粘土をはさむ破砕帯である。記録は1時間毎に紙テープに印字され、1～12のトランスデューサーによって、断層帯各部分の変位およびひずみを測定することができる。この観測については別に発表されるので^{19,20)}、ここでは簡単に概略を述べることにしよう。

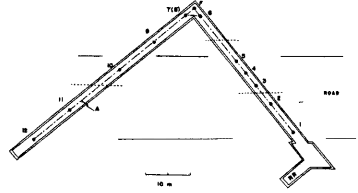


Fig. 13. Yasutomi observation tunnel at the Yamasaki fault. Various notations are referred to the text.

(1)1975年11月の観測開始以来約1年半を経過した現在、この観測

によっていろいろの重要な事実が明らかにされ、この種の研究が極めて有意義であることが立証されたといつてよからう。Fig. 14に示すように、断層帯を横切る各部分には特徴的な挙動をしている。図は代表的な成分を示すもので、2-3、10-11は断層粘土を含む破砕帯をまたぐもの、3-4、9-10はそのような破砕帯のない1つの岩盤内の成分である。後者の2成分の変化は坑内温度変化とよく一致し、岩体の温度変化を示すものであろう。前者の2成分は逆センスの季節変化をするが、これは図から明らかのように、断層が季節によって左ずれ、右ずれを交互に起こすジグザグ形の運動を行っていることに相当する。山崎断層は、地形学的にも験震学的にも左ずれであることが明らかであるから、このジグザグ運動は極めて興味ある事実である。いずれにしても、巨視的に見た断層変位とは、このような小破砕帯の変位の集積と考えるべきであろう。

(2)Fig. 14のA、B、Cは、断層が急激に右ずれの動きを示すところであるが、その時に高い確率で断層附近で地震が発生することが判ってきた。更に尾池の研究¹⁹⁾によって、この時には数日前に急激な降雨があることが確かめられた。これは急激な降雨がトリガーとなって、断層の右ずれ変位と地震発生を起すのであろうと思われるが、地震予知の観点から極めて重要な発見というべきであって、今後の発展が望まれる。

(3)山崎断層における地震予知のテスト研究は、微小地震観測および伸縮連続観測の他、多くの研究参加者により、観測坑周辺に設けられた基線網による測地測量、断層附近における地球電磁気の研究および地下水・放射能の研究などが進行中であり、この総合研究の成果は急速に挙げられて行くものと考えられる。

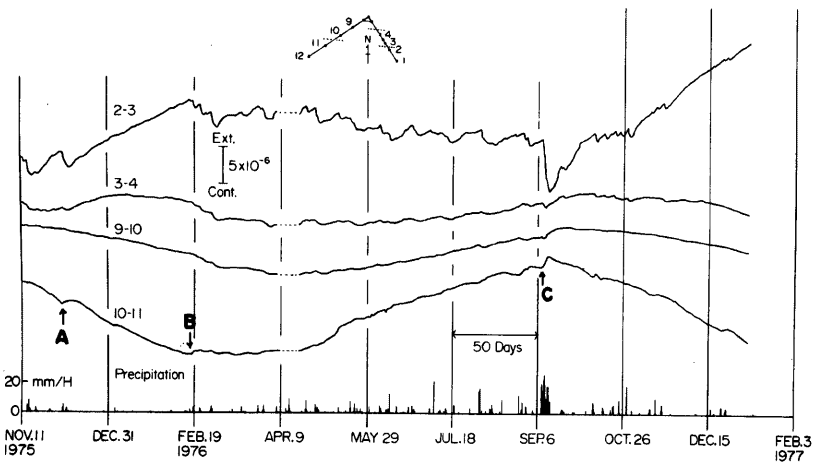


Fig. 14. Strain variations of some representative components and precipitation.

5. 防災研究所における微小地震観測態勢

以上の各節では、微小地震の研究が大地震発生の直接的あるいは間接的indicatorとして重要な役割を持つとともに、地震予知のモデル研究の対象としても有用であることを述べた。

いままでもなく、地震予知研究に微小地震を十分に役立てようとするれば、まず観測態勢そのものを整備することが不可欠となる。微小地震は発生頻度が極めて高いから、活動状態に即応するためには従来の如き委託観測で

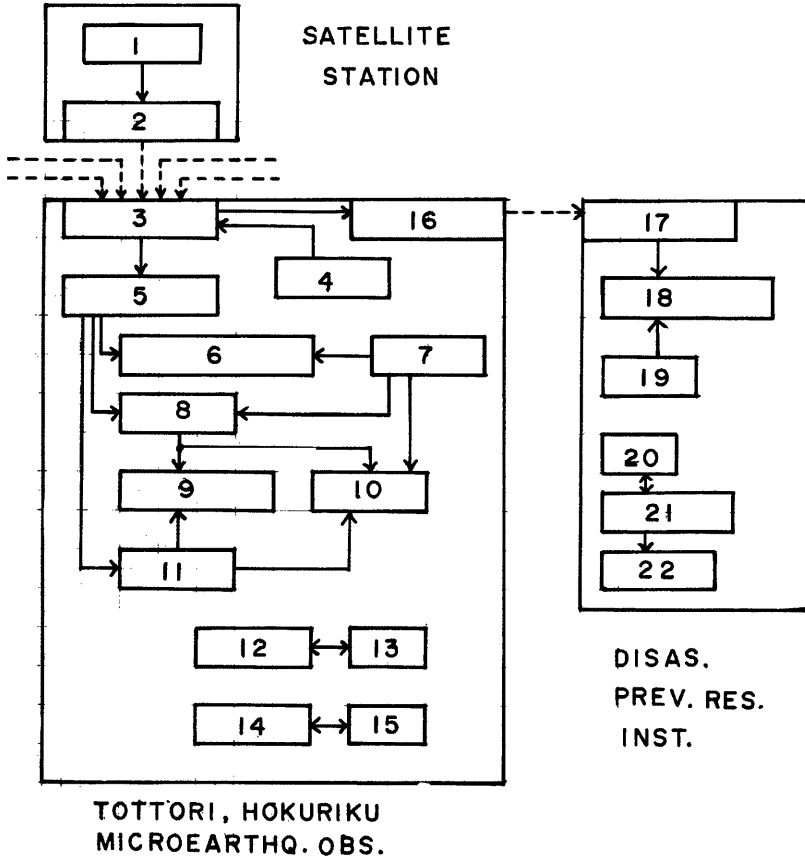


Fig. 15. Block diagram of telemetric system for microearthquake observation at the Disaster Prevention Research Institute.

- 1, 4: seismometer, 2, 16: transmitter, 3, 17: receiver,
 - 5: terminal plate, 6, 18: long-term recorder,
 - 7, 19: clock, 8: memory, 9: data-recorder(observation),
 - 10: monitor pen-recorder, 11: trigger,
 - 12, 21: data-recorder(play-back), 13, 20: tape-searcher,
 - 14: CPU, 15: typewriter, 22: pen-recorder.
- Dotted line denotes the telephone line.

Table 3

Notation in Fig. 16	Name of station	Abbrev.	Longitude E	Latitude N	Height	Observation Period
TTT	Tottori Micro-earthquake Observatory	TTT	134° 14' 16.0"	35° 30' 52.9"	10 ^m	1971 Aug. ~
1	Kurayoshi	KYT	133 50 01.9	35 26 21.2	100	1972 Sept. ~
2	Shikano	SNT	134 01 13.3	35 24 37.8	200	1975 Apr. ~
3	Chizu	CZT	134 17 32.8	35 16 07.0	300	1971 Sept. ~
4	Mikazuki	MZT	134 26 40.5	34 59 12.0	200	1964 Aug. ~
5	Izumi	I Z T	134 53 15.5	34 58 20.0	230	1965 June. ~
6	Hikami	HMT	135 02 36.6	35 13 35.5	250	1964 Aug. ~
7	Oya (1)	OYT	134 39 52.2	35 20 02.3	260	1964 Nov. ~
7	(2)	OYT	134 39 56.8	35 19 18.5	230	1969 Nov. ~
HKJ	Hokuriku Microearthquake Observatory	HKJ	136 12 45.0	35 56 15.0	20	1974 Jul. ~
A	Fukui	FKJ	136 07 24.0	36 05 38.9	90	1974 Jul. ~
B	Komatsu	KMJ	136 30 20.6	36 21 52.3	70	1976 May. ~
C	Katsuyama	KAJ	136 31 41.3	36 02 55.2	300	1975 June. ~
D	Imajo	IMJ	136 18 10.0	35 47 53.4	240	1972 Nov. ~
E	Azai	AZJ	136 19 26.0	35 28 38.0	370	1971 Jul. ~
F	Mihama	MHJ	135 58 44.2	35 31 50.2	260	1976 May. ~

は十分ではない。また微小地震の研究では、微細構造あるいは微細過程を問題にするから、高い刻時精度や進んだ観測設備が要求される。このような要請のもとに、微小地震観測は全国的にテレメーター化されることになった。鳥取・北陸両微小地震観測網のテレメーター化は1975年度に完成、1976年度から観測が開始され大いにその効果を発揮しつつある。以下にその概要を述べよう。

Fig. 15にテレメーターシステムのブロックダイアグラムを、Fig. 16およびTable 3に観測網の配置およびその詳細を示す。Fig. 15に示すように、衛星観測室における電磁地震計の地震波動は電々公社回線によって、鳥取あるいは北陸の観測所に搬送される。搬送された地震波信号は、長時間レコーダー（ペン書、送り速度4mm/秒）によって常時観測されるとともに、比較的大きな地震は、トリガー装置および遅延装置によって、データレコーダーおよび早送りモニターレコーダー（ペン書）に、時刻信号とともに記録される。刻時は一括して観測所本所の刻時装置による。時刻較正は1日1回NHK時報により自動的に行なわれるが、時刻精度は従来に比べて1桁向上し1/100秒となった。また伝送系・記録系を含めての周波数特性およびリニアリティも満足すべきものである。Fig. 17に両観測所の周波数特性を示すが、総合特性としても40Hz位までは速度感度一定と見てよい。Fig. 18は地震計からプリアンプへの入力（横軸）とテレメーター出力（伝送系のみ）（縦軸）の関係を示す。

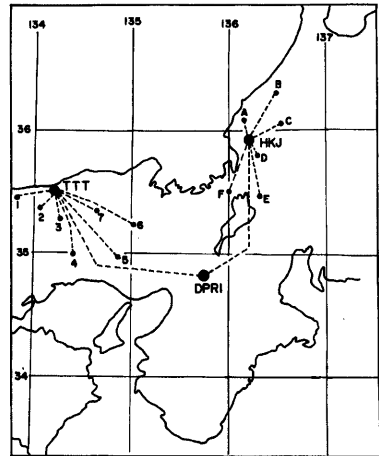


Fig. 16. Telemetric network for microearthquake of the Disaster Prevention Research Institute.

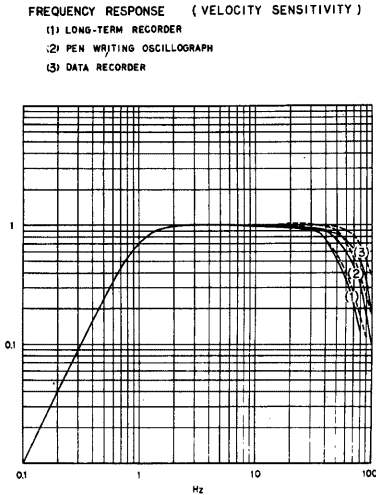


Fig. 17 Frequency characteristics of telemetric system.

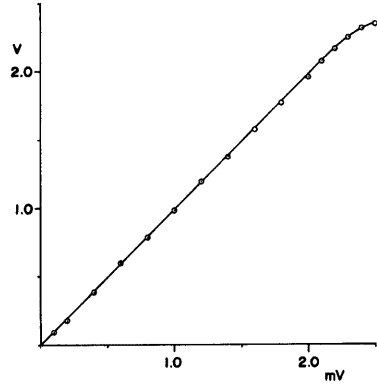


Fig. 18 Linearity of telemetric transmission system. Abscissa and ordinate denote input from seismometer to pre-amplifier and output from transmission system, respectively.

第2節に述べたことから、地震予知のためには、長年月にわたる均質な資料の蓄積が極めて大切であることが知られたと思うが、長期間レコーダーは、この観点から、トリガーの働かない小さい地震も含めて、各観測室での連続記録を得ることを目的とする。第2および第3節で述べた地殻活動の時空間分布や前震の研究などには、このような連続記録は重要な意味を持つであろう。

即時的な地震の読取り、サイスミシティの把握は、早送りモニターレコーダーと、XYリーダー、ミニコンピューターにより、各観測所で極めて能率的に行われるようになった。これと長期間レコーダーを併用することにより、地震活動の異常などには、1日以下のおくれで対応することが可能であろう。

第4節で述べたような微小地震の性質や発生メカニズムの研究は今後の重要課題であろう。このためには、データレコーダーによる記録は、これまで落されてきた多量の情報を与えるであろう。この1両年の間に、急速な研究の進展が期待される。

6. 結 語

防災研究所における地震予知研究の現状と将来の展望について、特に微小地震研究の面から多少の考察を行った。

われわれが、今までに地震予知に関して得た知識は決して少ないとはいえない。微小地震研究も、以上各節に述べたように、地震予知について少なからぬ知見を与え、更に将来への希望を十分に持たせるものであったといえてよいであろう。われわれは今、いくつかのいとぐちを擱んでいる。飛躍的に整備されつつある研究体制に依りて、今後の数年間に、大きな進歩をもたらすのは地震予知研究者の義務であろう。

参 考 文 献

- 1) 中国地震考察団講演論文集—中国の地震事業及び海城地震の予知・予報と防災—, 地震学会, 1976, pp.1-83.
- 2) 藤田和夫・岸本兆方: 近畿のネオテクトニクスと地震活動, 科学, 第42巻, 第8号, 1972, pp.422-430.
- 3) Huzita K., Y. Kishimoto and K. Shiono: Neotectonics and Seismicity in the Kinki Area, Southwest Japan, Journ. Geoscience, Osaka City Univ., Vol. 16, 1973, pp. 93-124.
- 4) 岸本兆方: 関西地域における地震活動と応力場, 京都大学防災研究所年報, 第16号A, 1973, pp. 9-21.

- 5) 尾池和夫：鳥取微小地震観測所の震源表について，地震，第2輯，第28巻，1975，pp.331-346.
- 6) 尾池和夫：微小地震の時空分布と活断層，地質学論集，第12号，1976，pp.59-73.
- 7) 岸本兆方・尾池和夫・松村一男・渡辺邦彦・佃為成：西南日本の地震特性，自然災害科学資料解析研究，第4巻，1977，pp.74-84.
- 8) Nishida, R. : Earthquake Generating Stress in Eastern Chugoku and Northern Kinki Districts, Southwest Japan, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 22, 1973, pp.197-233.
- 9) Kishimoto, Y. and R. Nishida : Mechanisms of Microearthquakes and Their Relation to Geological Structures, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 23, 1973, pp.1-25.
- 10) 塩野清治：微小地震観測網から求めた和歌山地方の地震の発震機構（第2報），地震，第2輯，第23巻，1970，pp.253-263.
- 11) Mino, K. : On the Relations between Topography and Earthquake Distribution Pattern, Part 1. On the Relation between Topography and Microearthquake Distribution Pattern in Northwestern Kinki and Northern Chugoku Districts, Bull. Disas. Prev. Inst., Kyoto Univ., 準備中.
- 12) Scholz, C. H., L. R. Sykes and Y. P. Aggarwal : Earthquake Prediction : A Physical Basis, Science, Vol. 181, 1973, pp.803-810.
- 13) Rikitake, T. : Earthquake Precursors, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, 1975, pp. 1133-1162.
- 14) 力武常次：地震予知論入門，共立社，1976.
- 15) 許紹燮：海城地震の地震活動の特徴，中国地震考察団講演論文集，地震学会，1976，pp. 27-41.
- 16) Mogi, K. : Some Discussions on Aftershocks, Foreshocks and Earthquake Swarms — the Fracture of a Semi-infinite Body Caused by an Inner Stress Origin and Its Relation to the Earthquake Phenomena (Third Paper), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 41, 1963, pp.615-658.
- 17) 宇佐美龍夫：資料日本被害地震総覧，1975，東京大学出版会.
- 18) 東北大理地殻変動研究グループ：東北地方における多点地殻変動連続観測，地震学会昭和51年度秋季大会にて講演，1976.
- 19) 尾池和夫：降雨と地震発生との関係について，京都大学防災研究所年報，第20号B-1, 1977, pp. 35-45.
- 20) 岸本兆方・尾池和夫・中村佳重郎・中堀義郎・藤田和夫・横田修一郎：山崎断層安富観測坑における伸縮計による連続観測について，地震，第2輯，準備中.

MICROEARTHQUAKE AND EARTHQUAKE PREDICTION

Yoshimichi KISHIMOTO

Synopsis

Role of microearthquakes for earthquake prediction is discussed, mainly on the basis of investigations at the Disaster Prevention Research Institute.

Microearthquakes are useful for earthquake prediction not only as an indicator for large earthquakes but also as a tool of trial and error method approaching prediction. Particularly, the spatial-temporal change of the pattern of seismic activity is significant as some kind of precursor.

Observations of fault motion at the Yasutomi Observation Tunnel on the Yamasaki fault are explained as a model work using microearthquakes.

Finally, a new telemetric observation system for microearthquakes at this Institute is introduced.