

66. 岐阜県中部地震 — 1969年9月9日 — の余震観測*

名古屋大学理学部地球科学教室

青	木	治	三
伊	藤		潔
多	田		堯
藤	井		巖
山	内	常	生
伊	神		輝

(昭和45年9月22日発表—昭和45年9月22日受理)

要 旨

9月9日の岐阜地震は犬山地震観測所の北方約50 kmに発生し、数多くの余震が観測された。

震源の精度をあげるため予備観測および郡上郡奥明方村奥住小学校における10日間の余震観測を追加した。犬山観測網のDataにより9月20日より11月30日までの余震の分布を調査した。

余震は主震の南東約3 kmの地点を中心としNW—SE方向にのびる二次元の正規分布で近似できる。標準偏差は推定断層に垂直および平行な方向にそれぞれ2 kmおよび4 kmであった。この余震の中心は古生層、濃飛流紋岩の境界をなす構造線と一致し、観測された余震は主震に伴った断層がこの構造線により大きな残留歪を生じたことを示していると考えられる。

1. 緒 言

9月9日の岐阜地震(1969年9月9日14時15分33.5秒, 137°04'E, 35°47'N, H=0 km, M=6.6)は犬山地震観測所より北方へ約50 km, 衛星点高沢山より約30 kmという近距離にあって本震前後の地震活動の調査には極めて有利な状況であった。本震直後の資料はその整理が完了していないので、ここでは9月20日より11月30日までの余震活動について報告する。

観測網に近いとはいえ、大部分の余震の震源は観測網の外部にあるため、震源精度には十分注意する必要がある。特に深さに関しては地下構造が精度よく知られていないので、かなりの誤差を生ずることを前提としなければならない。マグニチュード6.6はそれ程大きなものではない、いいかえれば小さな余震域であるだけに可能な限り精度をあげなければならない。特に本震直後には主震の近くには犬山観測網しかないので、この観測網だけで最良の震源分布を求める必要がある。このため本震直後予備調査を行ない、その後震源地付近に3成分記録計を1点追加して震源精度の向上をはかった。

* 森本良平所員紹介

2. 予 備 調 査

地震被害、道路事情の調査を兼ねて短時間の地震観測、大森係数の推定のため、本震の翌日9月10日、11日の両日、3成分7c/s地震計とペンレコーダーの直結により移動観測を実施した。結果は Table 1 に示されたとおり、初期微動継続時間の最低値は0.9秒程度である。特に金山町藤后野および弓掛は余震域の中に入る点であるが、1秒以下の S-P 時がほとんどないので地表では地震が発生していないと推定される。

これを裏づける事実としては断層が地表にあらわれていないことがあげられる。各所で植林初期の地域での土砂くずれ、石垣、道路の破損等人工的な地形における被害は見られるが断層の一端あるいは破壊が深部より進行したと思われる地変は見当らなかった。本震付近は道路破損のため通行不能であったが、その後の被害調査でも断層を想像させるような地変は報告されていない。後述するように余震域の形は明らかに断層を示し、気象庁発表の震源の深さは0kmという事から考えるとやや特殊な地震といえるのではないだろうか。

大森係数の推定には高山における観測と犬山、真福寺の data が使用された。3点共3成分記録であるので S-P の明確な記録は少なくない。また震源の深さは高山、犬山および真福寺までの距離を考えると大部分の地震は深さ0とみなしても誤差は少ないであろう。この3点で決定される震源が0kmであるためには12個の明瞭な記録を用いると大森係数は7.9~8.8 km/sec となり、平均は8.3 km/sec 程度である。この値は浅い地震としてはかなり大きな部類¹⁾に属するが北美濃地震余震観測²⁾においても、8.9 km/sec という大きな値が得られている。したがって、この地域では大森係数はかなり大きなことになるが表層の状態あるいは station correction を考えないとこの値が必ずしも正しい震源を与えるわけではない。この点については震源決定の項で述べる。

Table 1. Aftershocks observed in the preliminary observation

Location	Date and observation time, in hours		Number of felt earth quakes	Number of insensible earthquakes	P-S duration time, in sec.
	Sep.				
Kanayama-cho town office	10	0.5	2	0	1.0-2.0
Kanayama-cho Fujigono	10	0.5	1	5	0.9-2.0
Kanayama-cho Yumigake	10	1	5	11	0.9-1.7
Takayama city	10, 11	6	0	17	4.0-5.5
Makido	11	0.5	0	4	3.2-4.8
Shirotori-cho Rokunori	11	1	2	9	2.0-2.8

1) 茅野一郎 地震 20 卷特集号 (1967), 115.

2) 表俊一郎・唐鎌郁夫・中島直吉・斉藤貞夫・茅野一郎 地震研究所彙報 39 (1961), 881.

3. 観測点の追加

犬山観測網を用いて震源の決定を行なう際に誤差を最小にするため約10日間震源付近に追加観測点をおき地震計測の精度を調査することになった。予備調査の結果を利用して余震域の中央において観測する予定は道路事情、地震計設置点等の条件により変更され Table 2 および Fig. 1 に示されている奥住小学校において Data recorder による3成分観測を10日間実施した。

この観測では Data recorder は単に遅延装置として使用され感度は犬山観測所網で P, S 両 phase が読みとれるときに奥住で scale out しない程度におさえている (Full

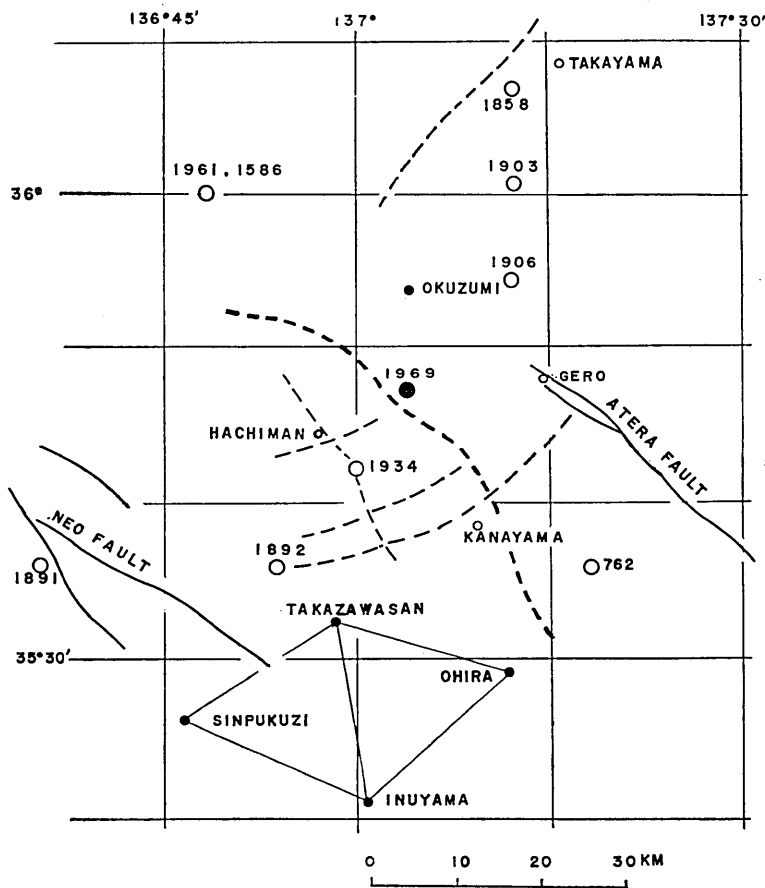


Fig. 1. Map showing the locations of recording stations, epicenters of big earthquakes and major faults.

- Circle with number: earthquake epicenter occurred in the indicated year.
- Small closed circle: recording stations. Those connected by lines belong to the Inuyama recording station net.
- Full line: active fault.
- Broken line: other big fault.

Table 2. Observation stations

Station	Abbr.	Latitude (N)	Longitude (E)	Height (km)	Seismograph
Inuyama	I NU	35 20 58.8	137 01 42.8	0.14	V, H, H, (1 cps) Smoke writing recorder
Takazawasan	T K Z	35 32 34.8	136 58 31.4	0.22	V (1 cps) Smoke writing recorder
Sinpukuzi	S P J	35 27 13.5	136 47 34.7	0.07	V, H, H, (1 cps) Smoke writing recorder
Ohira	O H R	35 29 23.0	137 11 41.6	0.33	V (1 cps) Smoke writing recorder
Okuzumi	O K Z	35 52 49.9	137 04 15.4	0.60	V, H, H, (7 cps) Data recorder

scale で有感になる)。地震計は物採用 7.5 c/s 3 成分一組のもので、Recorder は直線書きペンレコーダー (DC~80 c/s)、紙送り速度 25 mm/sec としたが、高調波が卓越して (時に音を伴なう)、周波数の上限 80 c/s は低すぎたようである。初動、S 波の立ちあがりは一概して明瞭であるが初動振巾が小さく、初動の 3 成分から地震波の方向を知るには困難なものが多かった。準備の都合で観測が始まったのは 9 月 20 日である。

Fig. 2 は犬山において観測された余震回数の日変化であって 9 月 11 日より 11 月 20 日までの結果である。9 月 9 日、10 日は余震が継続して発生するため回数のおえ方に疑問があり、ここにはのせてない。

さらに 9 月 20 日までは 3.3 万倍の低感度に切りかえてあるので余震回数の推移は感度の違いによる補正を加えなければならない。主震直後の振巾分布は小さな地震が読みにくいので困難を極めたが、石本飯田の係数 m は、1.8 より大きく 2.0 を越えることはない。 m に巾があるのは記録の読み取りが困難なためで数が不足している訳ではない。

いま振巾が A から $A+dA$ に入る地震数を dn とすれば

$$dn = cA^{-m}dA \quad (c \text{ は定数})$$

振巾 A_0 より大きな地震の数は $cA_0^{-m+1}/(-m+1)$ であるから倍率を β 倍にしたとき地震の数は β^{m-1} 倍となる。ただし、ある一定値より小さな振巾は記録紙上で読みとれないものとする。10 万倍に換算すると $\beta=3$ であるから余震数は $3^{0.8} \sim 3$ 倍になるものと推定される。Fig. 2 の最初の 10 日間はこのようにして得られた値である。それ以後は 10 万倍の記録であるので補正は必要ないが、数が少なくなって変動が大きいし、主震から時間も経っているので 5 日間の移動平均をとり図に実線で示した。主震後、一週間で余震数が急激に減少しはじめ、9 月 20 日以降は余震の第 2 期には入ったような印象を与える。その後の余震回数の減少はむしろ大森公式によく従っているといえよう。

Fig. 3 は奥庄観測点で得られた初期微動継続時間の頻度分布であって、S-P=0.2 秒程度の極めて近い地震もあるが平均して約 1.4 秒に最大頻度を示した。その日変化を見ても、特に余震発生の中心が移動したような徴候は見当らない。ただ頻度曲線が山形になる

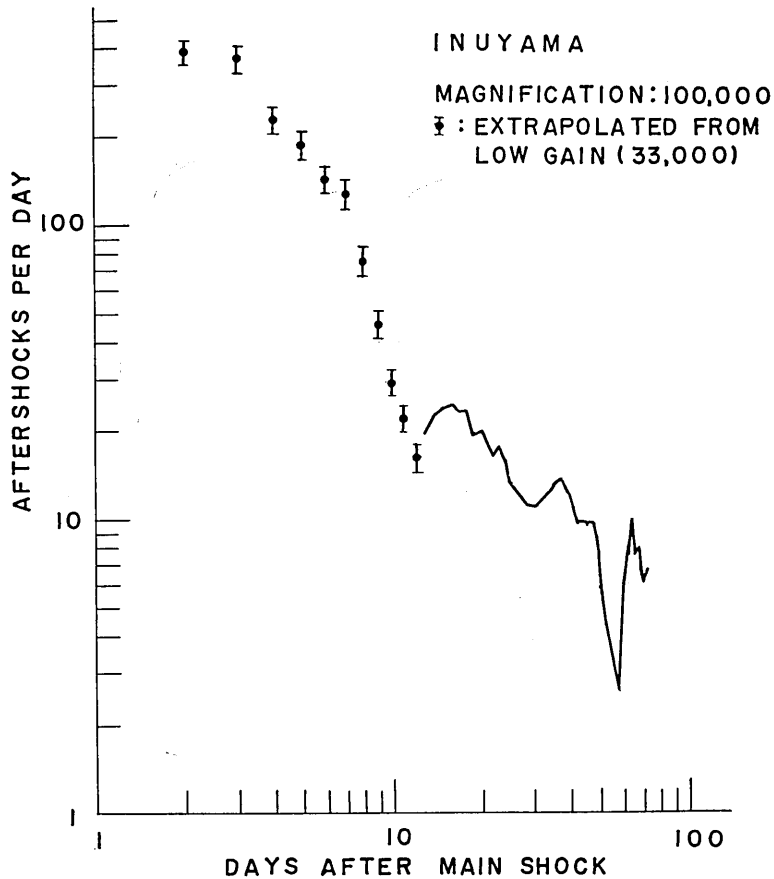


Fig. 2. Daily frequency of aftershocks recorded at Inuyama Observatory.

Full line: plotting of running mean of five days.

Closed circle with line segment: estimated daily frequency. The range indicated by line segment is obtained from two cases of $m=1.8$ and 2.0 , where m is the exponent in the Ishimoto-Iida's formula.

ものと中央が低くなるものがあられ、余震発生に続発性があるものと推定される。これを震源移動とみるかみないかは主観の問題であって、10日間程度の巾とか、後述するように70日間程度の期間でみると、むしろ余震の発生域は変化していないと考えた方がよい。余震の続発性のため短期間でみると震源のかたよりが強調されているとみるべきではなかろうか。しかし後述するように主震直後とは事情が異なるようである。

3. 震源決定

余震が終息しつつあるとき、京大、東大、岐阜大等の観測班が余震域近くに出動しているので震源決定の精度はかなり高くなっていると思われる。しかし、主震直後では気象庁

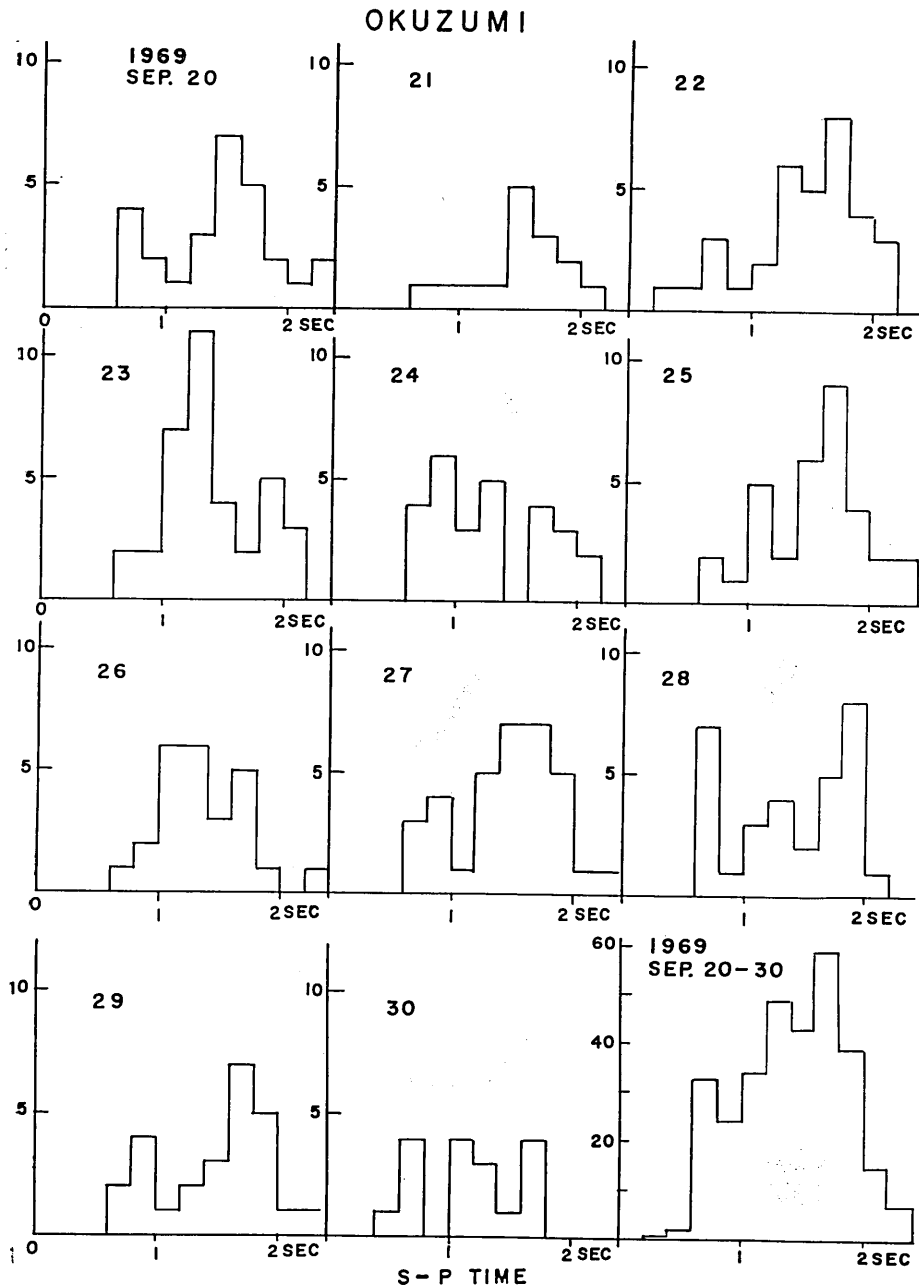


Fig. 3. Frequency diagram of the P-S duration times.

の観測点を除いて観測中であった観測点は犬山ネットの4点だけである。したがってこの4点だけで、できるだけ震源の精度をあげる必要があった。奥住観測点の10日間の記録

はそのために使用された。dynamic range の狭さから奥住観測点を含めて4~5点で共通に観測された97個のうち、P、Sが明瞭に記録された余震は74個である。これは奥住で観測された全地震の約1/4に当る。

まず予備調査で得られた大森係数 $k=8.3 \text{ km/sec}$ を使用して半無限媒質を仮定、犬山、高沢山、真福寺（あるいは大平）、3個のS-Pより、震源分布を求めると、震央はともかく震源の深さが、地表より40kmの範囲にもわたり異常に巾の広いものとなり、震央の分

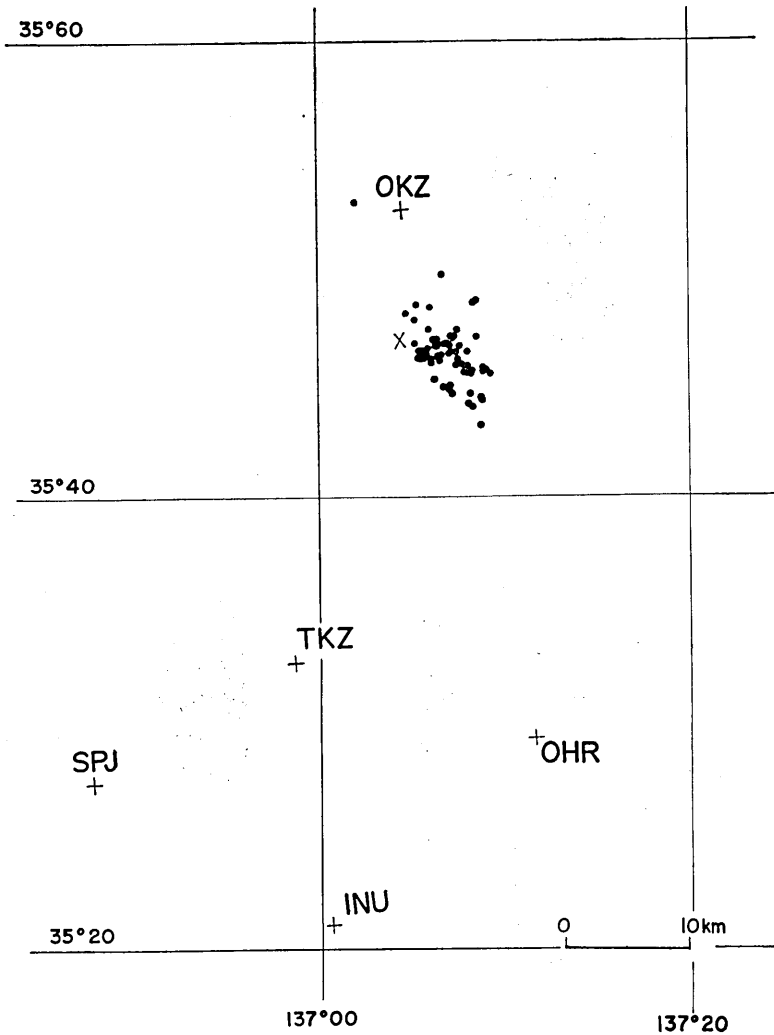


Fig. 4-1. Aftershock epicenters determined from arrival times and S-P times at both of Okuzumi and the Inuyama station net under the assumption of a two horizontal layer model (first layer; 5.5 km/sec, 5 km thick, second layer; 6.0 km/sec).

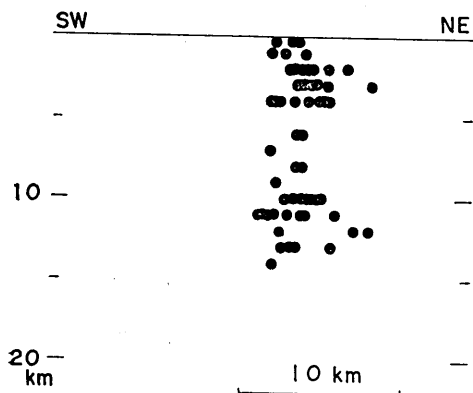


Fig. 4-2. Projection of hypocenters of aftershocks in Fig. 5-1 to the plane perpendicular to the assumed fault.

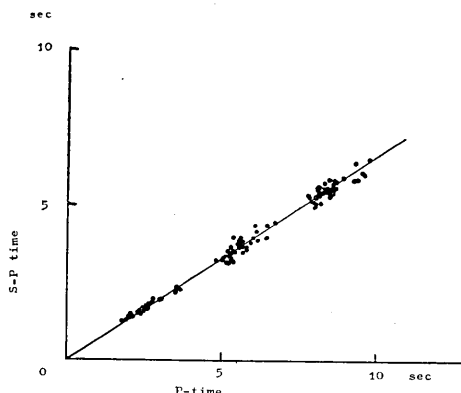


Fig. 5. Superposition of plots of P-S duration times against arrival times.

布も誤差が大きく、NW—SE 方向というよりは N—S 方向に分布してしまう。これは奥住で得られた S—P の data とは明らかに矛盾している。

ここでは半無限一様媒質の仮定が大きな誤差を生ずる原因となっている。

Figs. 4-1, 4-2 は奥住の data と犬山ネットの data を用いて決めた震央および深さの分布を示す。犬山ネットの 4 点が常に正常とはいえないので使用された観測点は奥住を含めて 4~5 点である。震源決定の方法は水平地下構造を仮定し、P と PS の直線関係より origin time を決定し、4—5 点の P の arrival time を用いて震源を求めている。深さは誤差を考慮して 1 km きざみで求めた。

P と PS の関係は、それぞれの地震について直線を引き発震時で重ねあわせると Fig. 5 に示されるように、かなりよい近似で直線関係を示す。図中の直線は $V_p/V_s=1.67$ ($\sigma=0.22$) である。origin time の求め方は、この直線の勾配を用い、 $S-P=0$ になる P の時間を読んでいる。仮定した地下構造は三層構造であるが、大爆破の結果によれば 6 km/sec 層は厚く (約 15 km) 今回の余震は震源が浅く、観測点が近いので表層 5.5 km/sec が 5 km、その下に 6.0 km/sec 層をおいた 2 層構造で十分である。その結果震央は NW—SE の方向にならび、震源の深さは地表から 15 km 位まで分布するが、一様な分布とは言い難い。Fig. 4-2 に見られるように、推定断層に垂直な断面で、深さ 0~5 km, 10~15 km の 2 箇所に分かれる。これは推定された断層が地表で見られず、深さが 15 km とすると、断層によって生じた stress 最大の深さに余震が集中していることになる。刻時精度、発震時の読み取りは 0.1 sec 以上狂う事は考えられない。単なる偶然誤差でこのような震源分布が得られるとは考えられない。

次に他の期間の震源分布を求めるため、奥住の data を除き、犬山ネットの 3~4 点だけで同じ地震の震源を求めた。同じ構造でポアソン比 $\sigma=0.22$ を用いると発震時が 0.5~0.7 秒おそくなり、計算結果では震源が深くなりすぎる、 $\sigma=0.22$ を変更して $\sigma=0.25$ にすると Figs. 6-1, 6-2 に示したように奥住を加えて求めた結果に近づいてくる。 $\sigma=0.25$

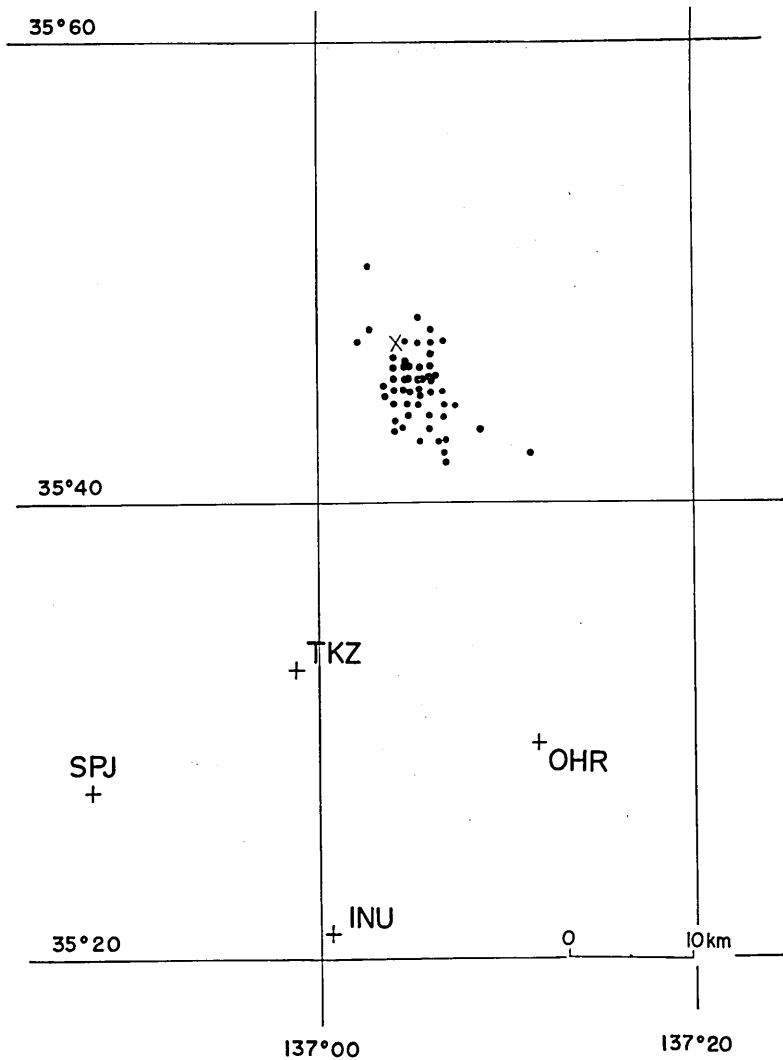


Fig. 6-1. Aftershock epicenters determined from arrival times and P-S times at the Inuyama station net. Aftershocks plotted in this figure are the same as those in Fig. 5.

は明らかに Fig. 5 の P-PS 関係に矛盾してくるので、この結果は各観測点の station correction を考慮していないこと、観測点付近が水平構造ではないことに原因があると思われる。また震央の分布も系統的に南西にずれている。主震の位置は気象庁発表のものであるので、主震と余震域のずれは議論しても無意味である。ある程度の系統的なずれはあっても余震の分布の形からして相対的な位置のずれはそれ程大きなものではない。σ=0.25 を使用すると震央は系統的に 1 km 程度 NE にずれるが、深さは大巾にくい違いを生ずる。

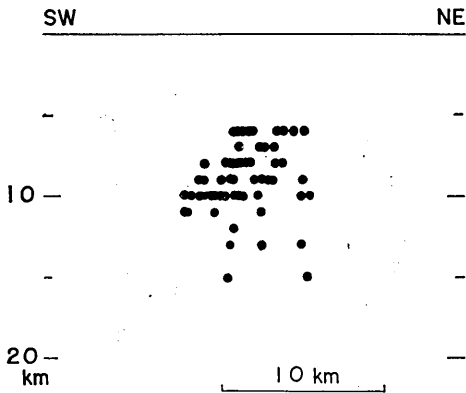


Fig. 6-2. Projection of hypocenters of aftershocks in Fig. 6-1.

tion, 層の傾斜等を考慮しなければならないであろう。

4. 震央分布

3に述べたように、犬山ネットだけで震源を求めるためには station correction を考えない限り $\sigma=0.25$ とする必要がある。ある程度の系統的なずれは仕方ないとして9月20日より11月末日までの震央の分布を10日毎(9, 10月)あるいは15日毎(11月)にわけて示した(Figs. 7-1~7-6)。Fig. 8-1, はこれらをまとめたものである。Fig. 8-2 は同期間の震源の深さの分布を推定断層に垂直な面に投影したものである。

全体を通じて同じ傾向を示すが10月1日~10日および10月21日~31日の2回余震域の南部が南西に延びている。

この地域は Fig. 1 に実線で示した活断層(阿寺, 根尾)に囲まれ, 内部に点線で示した大きな地質断層が活断層に直交している。地質的にみると主震, 金山を結ぶ磯見, 河田による大きな構造線の北東部は中生代末期の飛騨流紋岩類におおわれ, 南西部は古生層になっていて, 小規模の断層が無数に存在する。余震域はこの構造線に斜交する形で分布し, 20 km の長さにあたる。

阿寺断層と余震域がほぼ平行であることとあわせて考えると今回の余震の活動がこの地域の地質構造と密接な関係を示すものと思われる。しかし1961年の北美濃地震の余震域はむしろこれと直交する方向に延びていたらしい³⁾。この地域の大きな断層がやはり直交する事から考えて北美濃地震の活動もやはり今回の地震, また濃尾地震と同じく一連の活動を示すものと思われる。Fig. 1 には過去における被害を伴った地震⁴⁾の震央が示してある。その大部分が NE-SW 方向に並んでいて, この方向への破壊の可能性をも示唆している。

観測網の外部の震源は深さに対する精度が極めて悪くなるので注意しなければならない。したがって震源の深さに関しては信用できる分布とは思われない。観測点の配置から考えて, 犬山ネットだけでこれ以上の精度を望むのは無理である。Fig. 6-2 で N 38° W の推定断層に垂直になった断面図で 5 km 以浅の震源がないのは表層を 5 km の厚さにとった事が原因である。計算では一応臨界屈折の走時も考慮しているが結果は図の如く震源を境界面に押しつけた方が走時にも小さな誤差を与えることになる。これ以上の精度をあげるためには, station correc-

3) 宮村撰三・堀実・松本英照・辻浦賢 地震研究所集報 39 (1961), 895.

4) 飯田波事 中部地区における災害の地域的特性に関する総合的研究 研究報告 (1969), 105.

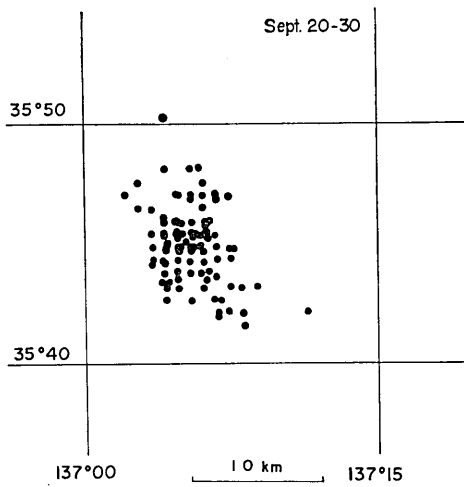


Fig. 7-1

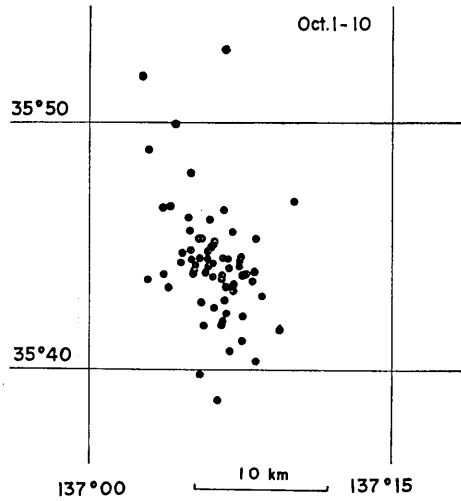


Fig. 7-2

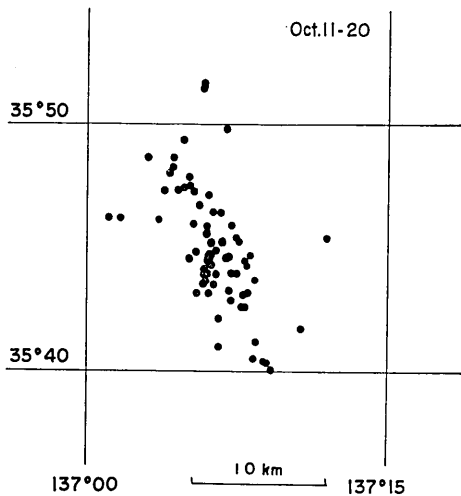


Fig. 7-3

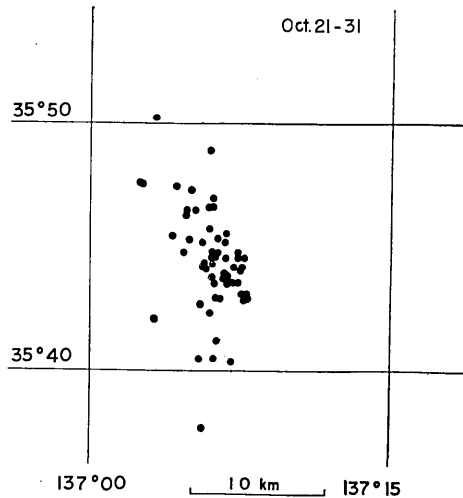


Fig. 7-4

更に9月20日より11月末日まで全期間を通じて余震の分布を調べてみた。推定断層の方向を(N 38° W)とし、Fig. 9に示すようにNW—SE方向で巾1 kmの帯、これと直交する方向で巾2 kmの帯に余震域を分割し、それぞれの中に入る余震の数を求めた。すなわち、推定断層の方向から見た余震のひろがり(点線)および断層に余震がどのように分布するか(実線)を一枚の図にあらわした。図中の矢印の位置は主震の場所を示す。水平軸を1:2にすることにより、頻度分布はほとんど同じ形になり、しかも正規分布で十分

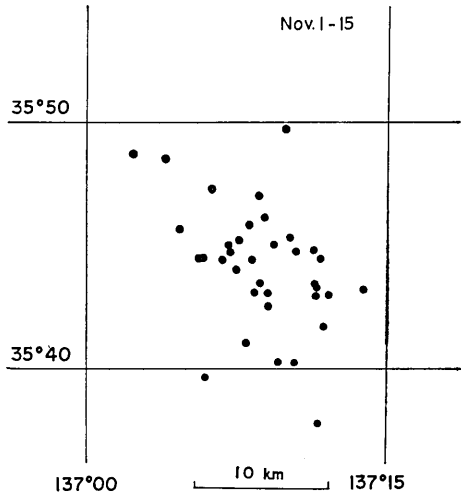


Fig. 7-5

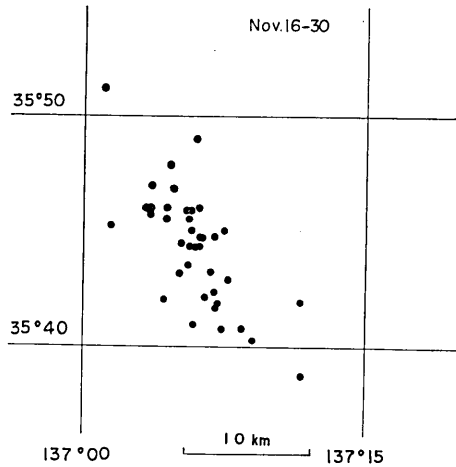


Fig. 7-6

Fig. 7. Diagram of epicenters determined from arrival times and P-S times at the Inuyama station net.

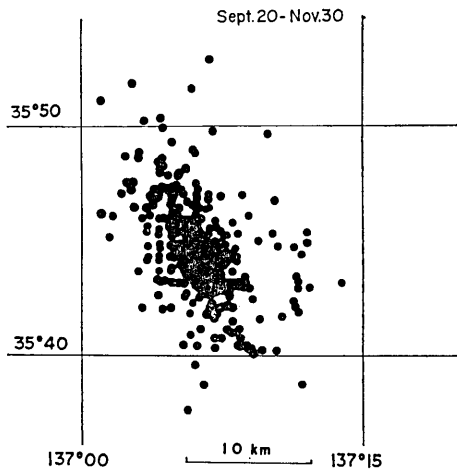


Fig. 8-1. Aftershock epicenters from Sep. 20 to Nov. 31.

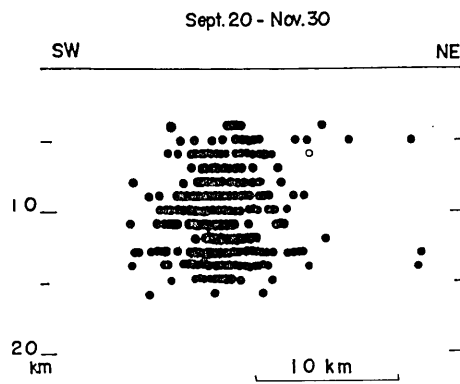


Fig. 8-2. Projection of hypocenters of aftershocks in Fig. 8-1.

近似できる。犬山ネットから離れているので震源の誤差は系統的なものがあるとするば、それを除いて1 km 程度のものであろう。大部分の地震が断層面極く近傍にあるとすれば求められた余震の頻度が断層面から離れるに従い誤差曲線の形で小さくなるのは当然であるが、標準偏差が2 km となったのは単なる誤差としては大きすぎる。また断層に沿って得られた分布も標準偏差4 km の誤差曲線であらわされるのは震源決定の誤差とは考えら

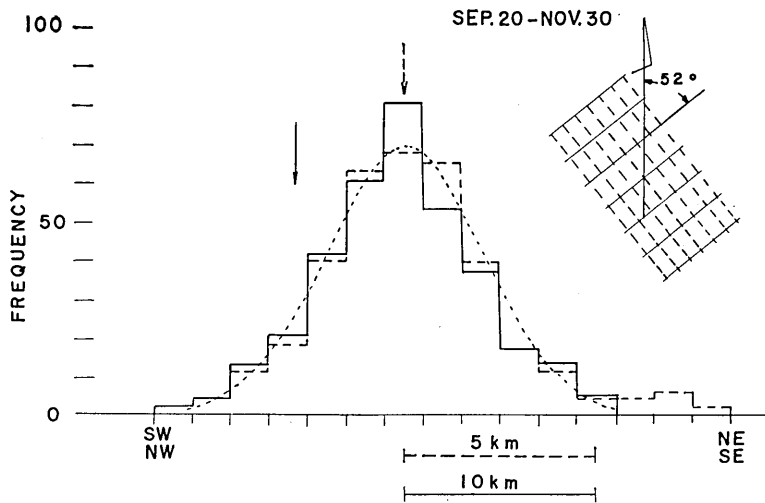


Fig. 9. Distribution of epicenters against distance from the assumed fault plane (thick broken line) and along the fault (full line). The thin broken line is the normal distribution with the standard deviation of 2 km or 4km. The arrow shows the position of the main shock.

れない。特に頻度最大の位置が構造線上に来るのは意味のあることである。本震直後の余震は地震月報によって Fig. 10 に示した。これらの余震はマグニチュードが4近く、あるいはそれ以上で、犬山ネットでは初動から scale out する大きさで、この報告にある余震とは規模が全ったく違う。しかしながら、主震の付近に余震が極めて少ないのが目につく。したがって主震近傍では主震により大部分のエネルギーが放出され、大きな余震は発生していない。むしろその程度の範囲では媒質が一樣で残留歪が少ないと考えられる。余震の中心は南よりで構造線の付近であろう。この構造線付近では媒質を

一樣とみることはできない。余震は主震によって不均質の媒質内に残った stress の状態を示しているものと考えられる。われわれの観測した余震の総エネルギーは主震に比較して無視できる程度のものであるから余震によって歪の場が変化すると考えるのは当たらない。むしろ残留歪の程度をあらわしていると考えられる。Fig. 9 の断層方向の分布が正規分布であらわされるのは、少なくとも9月20日以降11月末日頃までは余震の中心部分があり、それがこの間定常であったと考えられる。これは Fig. 2 の余震の日変化で、この

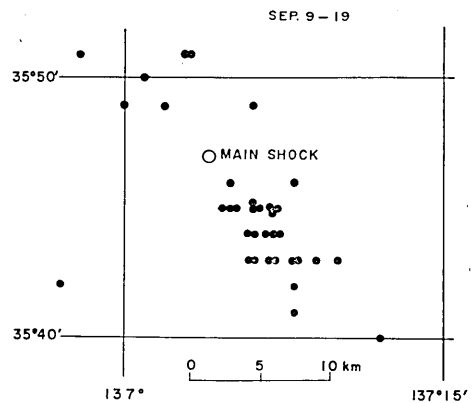


Fig. 10. Epicenters of Aftershocks from Sep. 9 to Sep. 19 determined by J. M. A. open circle: Main shock epicenter.

間大森公式によく従っていることから定常と考えてよいであろう。

今後、主震直後の資料についても同様な調査をしてみたい。

謝 辞

観測の実施について奥住小学校より多くの御援助をうけた。観測点の選定、機器の設営等は犬山地震観測所移動班に依頼した。また過去の大地震の分布図は飯田教授に、犬山観測所における余震回数の日変化の data は大井田助手に戴いた。関係者各位に心から謝意を表したい。なお震源の計算は京大大型計算機を使用し(課題番号 4001 KC 181)、研究費の一部は特定研究: 岐阜県9月9日地震の総合研究によるものである。

66. Observation of Aftershocks of the Earthquake of the Central Part of Gifu Prefecture, September 9, 1969.

By Harumi AOKI, Kiyoshi ITO, Takashi TADA, Iwao FUJII,
Tsuneo YAMAUCHI and Akira IKAMI,
Department of Earth Sciences, Nagoya University.

Since the earthquake of September 9, 1969 occurred at about 50 km north of the Inuyama Seismological Observatory, a number of aftershocks were recorded at four recording stations: Inuyama, Sinpukuzi, Takazawasan and Ohira. It was intended immediately after the main shock to conduct a preliminary observation of damage and aftershocks for the estimation of the aftershock region and to find the best complementary recording site for the determination of hypocenters. During the two-day observation beginning Sep. 10, we could not find on the ground surface any sign of an earthquake fault. The observed P-S duration times however suggested that the depths of the aftershocks were very shallow.

It was found from the following observation at Okuzumi about 10 km north of the epicenter of the main shock that the depths of aftershocks ranged from the surface down to about 15 km with such a distribution as to show two concentrations of hypocenters near the surface and at a depth of about 10 km. The epicenters were distributed along the NW-SE direction and suggested a fault of about 20 km length.

The observation during the 70 days since Sep. 20 revealed that the occurrence of aftershocks was stable and represented by a two dimensional normal distribution with standard deviations of 2 km and 4 km across and along the fault respectively, as shown in Fig. 9.
