

69. 岐阜県中部地震—1969年9月9日— による地殻歪の場

地殻変動連続観測ネットワーク*

(昭和45年7月21日発表—昭和45年7月25日受理)

要 旨

1969年9月9日の岐阜県地震に際しては各地の地殻変動観測所において strain step が記録された。それらを総合してみると、step の向きや大きさに関してかなりの規則性が見られ、上記地震による地殻歪の場の全国的パターンがかなりの程度に反映されているように思われる。strain step の可能性については、従来も単一の観測所の記録に基づいて論じられた事はあったが、全国的観測網を活用すればさらに確実に取り扱うことができる。また、このような経験を積み重ねていけば、現行の地殻変動観測方式が地震予知研究などにどの程度役立つかについてめやすも得られよう。

は し が き

地殻変動の連続観測をしていると、大地震の際、伸縮計や傾斜計にずれの記録される場合がしばしばある。これは計器にゆらみがあったり、地盤それ自体あるいは地盤と計器との結合に「がた」があるためと解釈されるのが普通であった。しかし、それにはもっと本質的な意味があるのではないかと主張が Press (1965) や Wideman and Major (1967) によって唱えられたのをきっかけとして、この種の研究がここ数年来にわかに活ぱつになった (Smith, 1968; Rikitake and Yamazaki, 1969; 高田・竹本, 1969 など)。

ところで、これら研究の取り扱う対象や方法はいろいろであるが、いずれも単一観測所の資料に基づいて結論を出している。このために若干の疑問が結論につきまとうのは避けられない。というのは、観測された strain step が理論と矛盾しないとは言っても、他の可能性、すなわち偶然の一致を否定しざることには困難であるからである。このため、上記

*) 本報の場合、下記の各観測所からなる:

- | | |
|-------------|--|
| [東北大学理学部] | 秋田地殻変動観測所(男鹿・仁別)・青葉山地震観測所・三陸地殻変動観測所(宮古・今出山) |
| [東京大学地震研究所] | 油壺地殻変動観測所・鋸山地殻変動観測所・北信微小地震・地殻変動観測所・松山地殻変動観測所・弥彦地殻変動観測所 |
| [名古屋大学理学部] | 犬山地殻変動観測所 |
| [京大大学理学部] | 逢坂山地殻変動観測所 |
| [京大大学防災研究所] | 上宝地殻変動観測所・屯鶴峯地殻変動観測所 |
| [気象庁] | 松代地震観測所 |

研究のあるものは多数の地震に対する観測結果を重ね合わせて議論している。これは結論の客観性を増す配慮として有効であるが、その反面マグニチュードも発震機構も異なりさらに観測所に対する相対的位置もいろいろである地震を正規化するため多くの仮定が前提となる。もしも、単一の地震による strain step の空間的分布が捕えられ、それがたとえば断層模型から期待されるものと調和することが確認されたとすれば、上記の疑問に対する最も直接的かつ確定的な結論となるであろう。

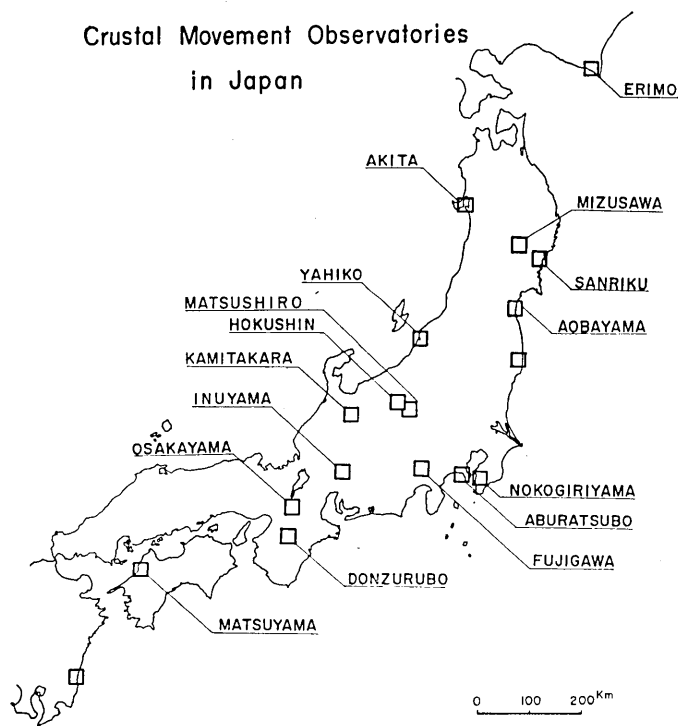


Fig. 1. Crustal movement observatories in Japan. Squares with no names represent the planned observatories.

1969年9月9日岐阜県北部に起きた地震は、この見地から注目すべきものであった。この地震のマグニチュードは気象庁によれば7とも、6.6とも言われるが、この際日本各地の地殻変動観測所において strain step が観測されたのである。周知のとおり、数年前に発足した地震予知研究計画の一環として地殻変動観測所の新設・整備が組織的に進められた結果、ほぼ同等の機能を持つ相当数の観測所が全国各地に開設されて来たのである(第1図)。今回の地震はいわばそのネットワークのほぼ中央部に位置し、それに起因する地殻歪の分布を方位的にも距離的にも追跡するにはまさに好適なものであった。

このようにして、上記の懸案にひとつの決定的な解決が得られるのではないかと期待された次第である。

Table 1. Summary of Observations

Station	Distance	Strain Step		Remarks
		Component	Step Amplitude	
Inuyama	50	N-S	-0.13×10^{-6}	
		NW-S E	-0.05	
		E-W	0	
Kamitakara	60	N-S	-(0.1)	Over-range
		N45° E-	-(")	
		N45° W-	-(")	
Hokushin	140	N33° E-	-0.04	
		N12° W-	+0.05	
		N57° W-	-0.02	
Matsushiro	140	N-S	-0.004	
		E-W	-0.004	
Osakayama	145	N-S	-0.05	
		E-W	-0.02	
		S38° W-	-0.02	
Donzurubo	190	N4.5° E-	0	
		N40.5° W-	0	
		E4.5° S-	-0.03	
Aburatsubo	250	N22° E-	-0.05	
		N25° W-	0	
		N81° W-	0	
Nokogiriyama	270	N-S	0	
		E-W	-0.003	
		N45° W-	+0.002	
Yahiko	280	N73° E-	+0.001	
		N28° E-	+0.001	
		N62° W-	0	
Aobayama	455	N42.9° E-	0	
Matsuyama	460	N47.7° W-	0	
		N42.3° E-	0	
		N86.3° E-	-	
Akita [Oga]	540	N32° W-	0	
		N57° E-	0	
		N15° E-	-	
Akita [Nibetsu]	540	N23° E-	0	
		N69° W-	0	
		N68° E-	0	
Sanriku	590	N2.6° W-	0	
		N35.5° W-	0	
Sanriku [Miyako]	630	N22.5° W-	0	
		N78.5° E-	0	
		N11.4° W-	0	

+: Extension, -: Contraction

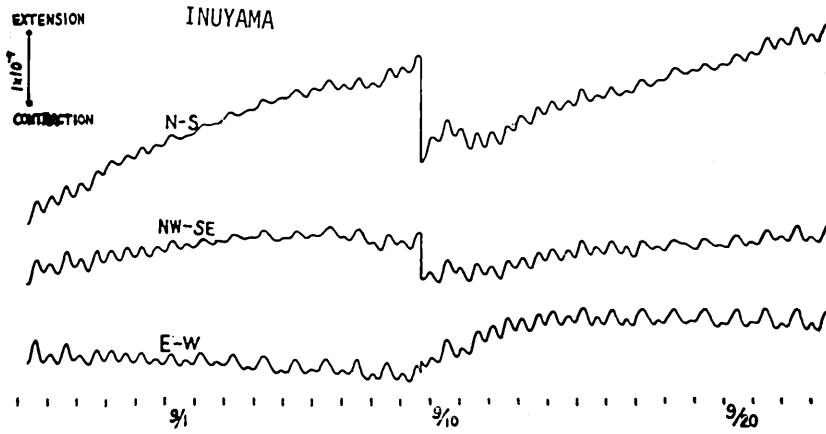


Fig. 2. Examples of strainmeter records. (a) Inuyama

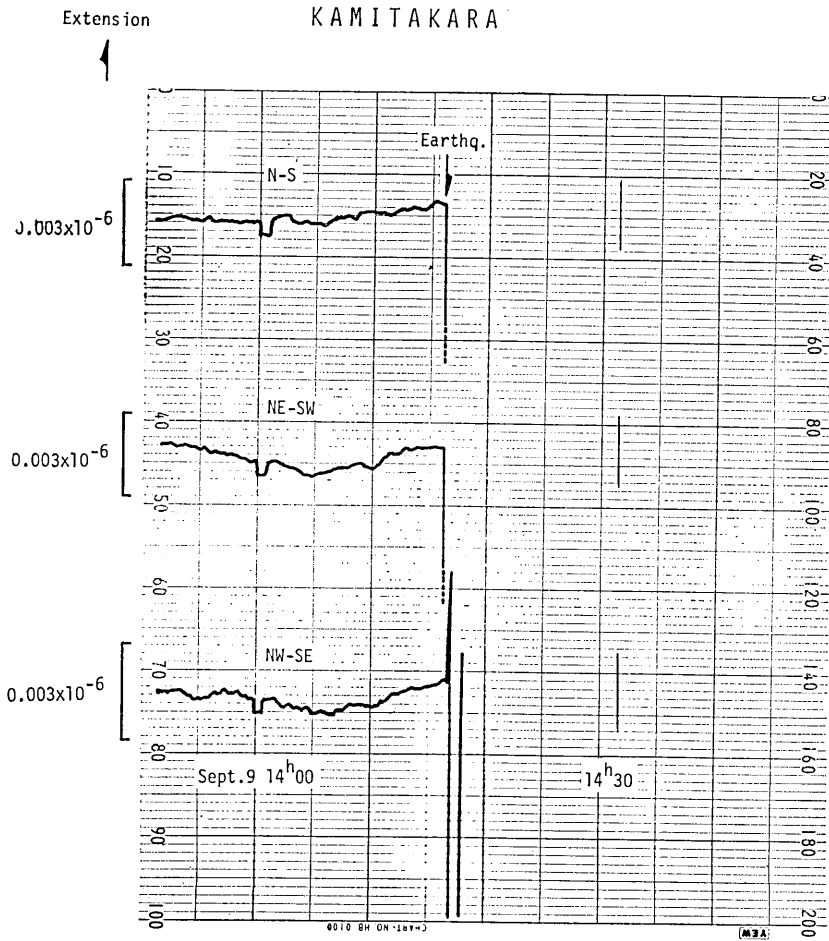


Fig. 2. (b) Kamitakara

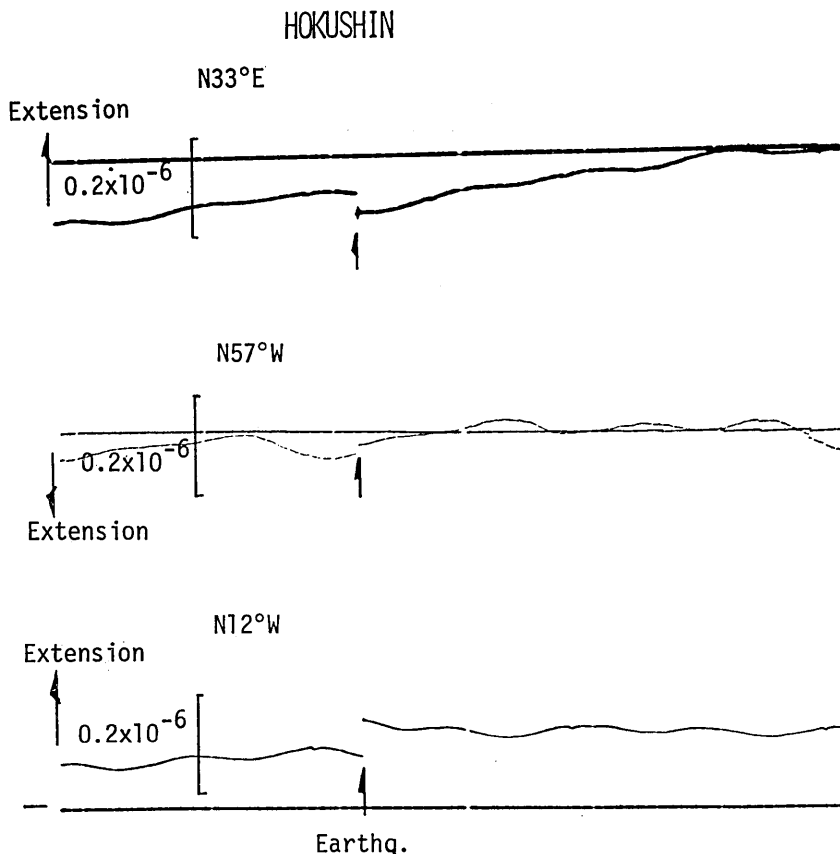


Fig. 2. (c) Hokushin

各地における観測結果

岐阜県地震の時全国各地において地殻変動観測所が稼動中であった。第2図 a~n はこれら観測所の伸縮計記録の実例である。このうち震央に最も近い犬山においては(第2図 a), N-S, NW-SE, E-W のそれぞれの成分において -0.13×10^{-6} , -0.05×10^{-6} , および 0 に相当する零線のずれが読み取られる。もっともその後の記録の動きからわかるように発震当時のずれの相当量はその後徐々に回復の傾向が認められる[志知・飯田(1969)]。このような点から真の strain step をどう見積るのかについては若干の問題が残されてはいるが、ここでは単純に発震当時の零線のずれをもって strain step と解釈することにする。その他の観測所においてもすでに担当者により strain step の読み取り・報告がなされているものもある。そのような観測所に対しては報告済みの数値を採用することとし、未発表のものについてはほぼ上記の要領で strain step を読み取ることにする。第1表はこのようにして得られた strain step の値を示すもので、震央距離順に観測所を並べ、それぞ

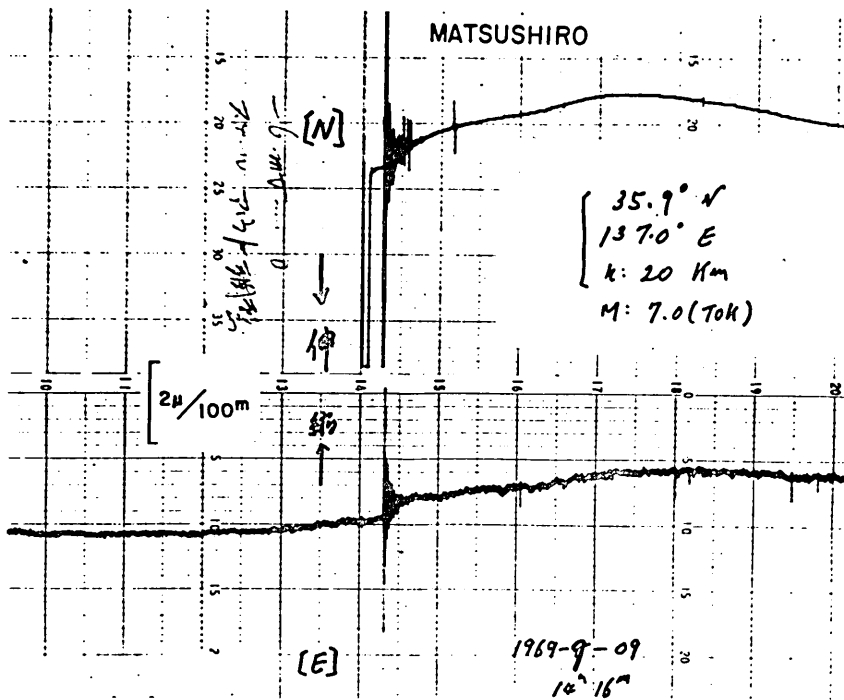


Fig. 2. (d) Matsushiro

れについて伸縮計の成分および step の数値を示したものである。このうち二番目に震央に近い上宝では計器がスケールアウトしたため、正確な数値は求められない。しかし記録巾からみてそれが三成分とも 0.1×10^{-6} またはそれ以上の縮みであったものと推定される。このようにして同表に記載された観測所は 15 にのぼるが、そのうちごく少数のものについては欠測となっている(表中に—で示したもの)。step の振巾を一覧して分かる通り、その数値は必ずしも震央距離に正確には比例していない。しかし大局として震央近傍のものは $0.1 \sim 0.01 \times 10^{-6}$ (伸縮とも)の量であるのに対し、 $200 \sim 300$ km では $0.01 \sim 0.001 \times 10^{-6}$ 程度になり、さらに遠方ではほとんど step が観測されていない。このような傾向をさらに見やすくしたものが第3図である。すなわち縦軸には step の振巾(絶対値)、横軸には震央距離をそれぞれ対数目盛で図示してある。当然のことながら、数値にばらつきは多い。しかし両者の間にいちおうの逆比例関係があるように見られる。強いてこの関係を求めれば、およそ距離の三乗に逆比例するよう見られなくもない[振巾 0 の場合は、便宜上 0.001 の位置に記入してある]。容易に想像出来るようにこの種の strain step は単純に震央距離に依存するものではなく、方位に大きくよるものと思われる。同図中ばらつきの大きな原因の一部はこの事情によるものとも思われる。しかし第一近似として、距離の三乗に逆比例する傾向はそれ程不自然なものではない。

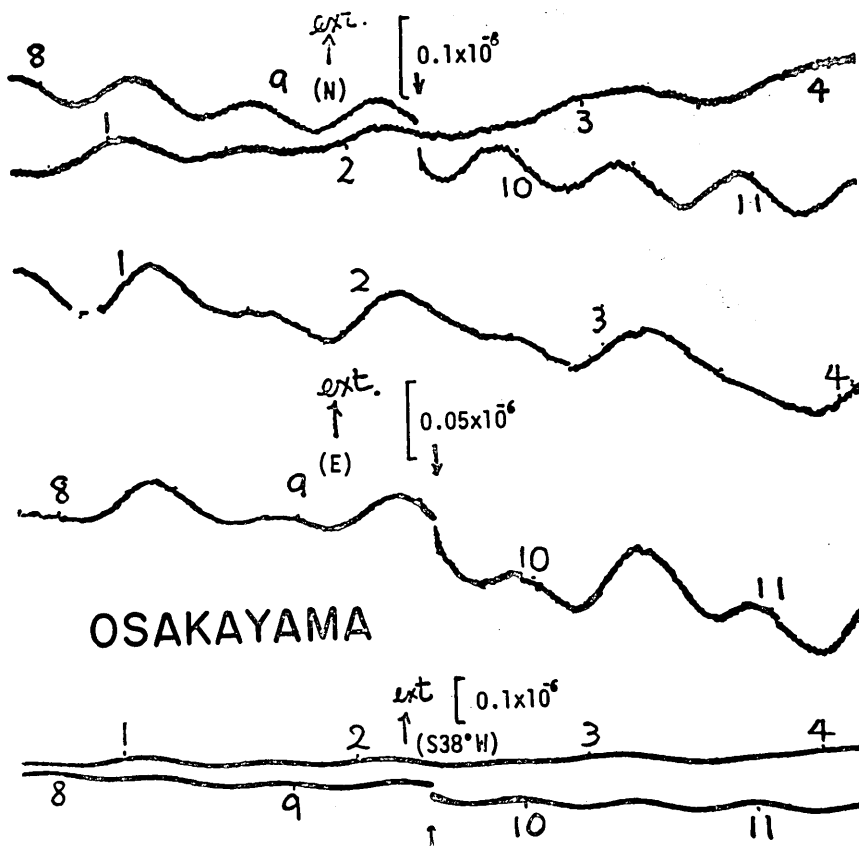


Fig. 2. (e) Osakayama

理論模型との比較

Dislocation theory の導入により地震の震源を断層とみなした場合の地殻変形の分布がかなり具体的に議論できるようになった。今の場合も、もし断層としての震源模型を設定することができれば、理論と観測との比較から当初の目的を達することが可能なはずである。今回の場合、地表では地震断層は確認されなかった。しかし発震機構、余震分布、構造地質学的特徴などの資料により震源の性状をかなりの程度に推測することは可能である。たとえば、気象庁（非公式資料）によれば発震機構は象限型であり節線の方向は $N25^{\circ}W$, $N65^{\circ}E$ であつて、震源が垂直の横ずれ断層的なものであることを暗示している。考えられる strike は上記の節線の方向のいずれかであるが、構造地質学的に知られている当地方の断層方向から推測して、 $N25^{\circ}W$ のほうを採用することにする。これは、余震分布 [地震研究所余震観測班 (1970)] の傾向とも矛盾しない。断層模型を取り扱うためには、さらに断層の長さを指定する必要がある。今の場合これを 50 km とすることにしよう。これは本震のマグニチュードや余震域の広さなどからみると、やや大きすぎるかも知れな

DONZURUBO

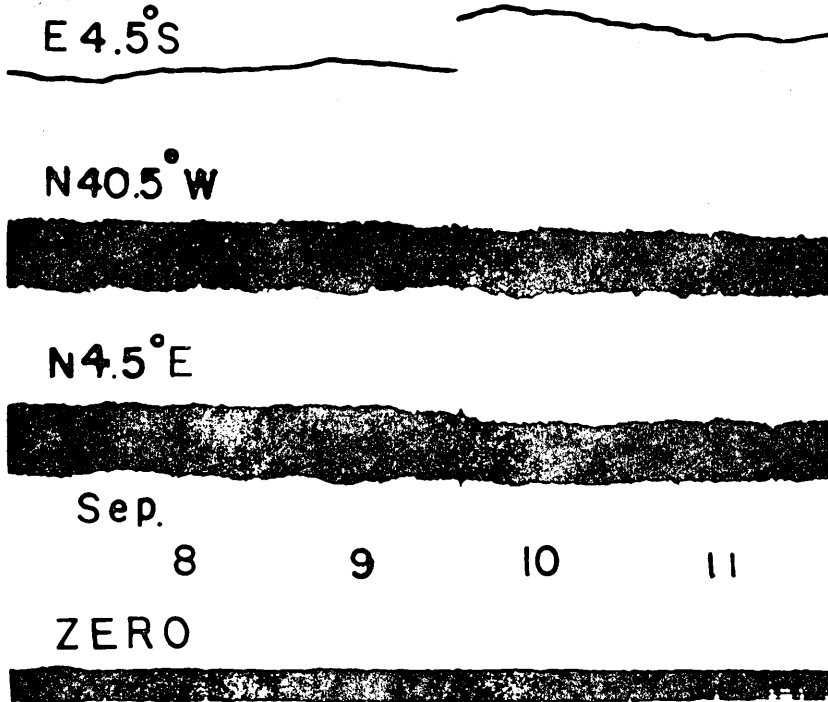


Fig. 2. (f) Donzurubo

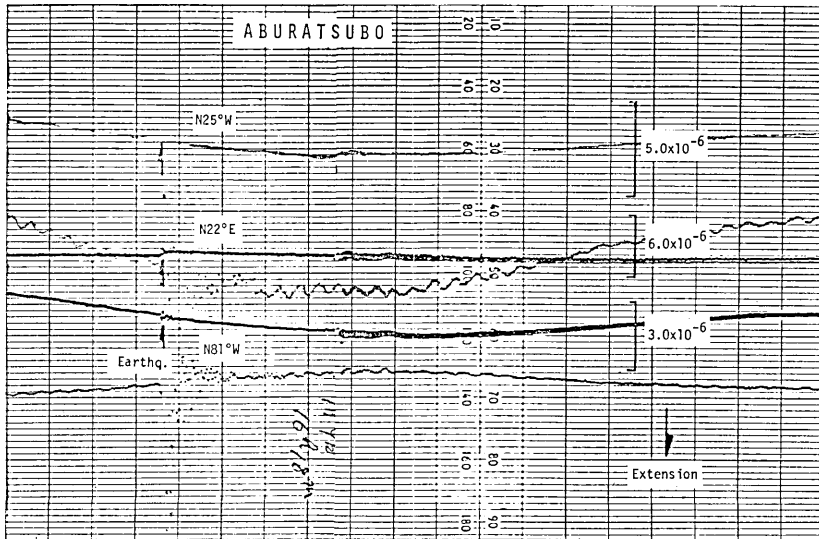


Fig. 2. (g) Aburatsubo

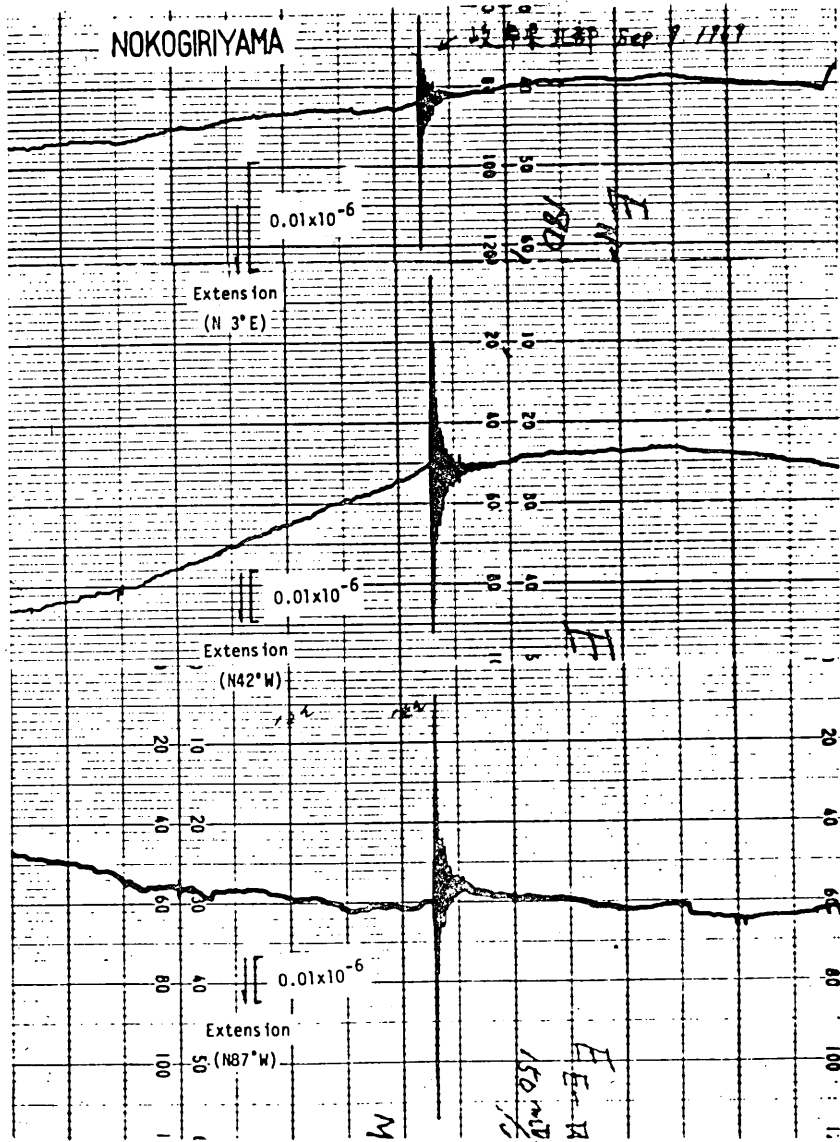


Fig. 2. (h) Nokogiriyama

い。しかしここではオーダーとしていちおうこの値を採用することにする。

このような形式の断層による地殻歪の分布は、すでに Press (1965) が数値計算をして、図表にまとめてある。たとえば、地殻の伸縮に対応するものとして $\partial u_1 / \partial x_1$, $\partial u_2 / \partial x_2$ の図表が利用できる。しかし、われわれの伸縮計は必ずしも今回の地震断層の向きに合致していないから、理論との比較に先きだつて、歪成分を変換しなければならない。幸いわが国

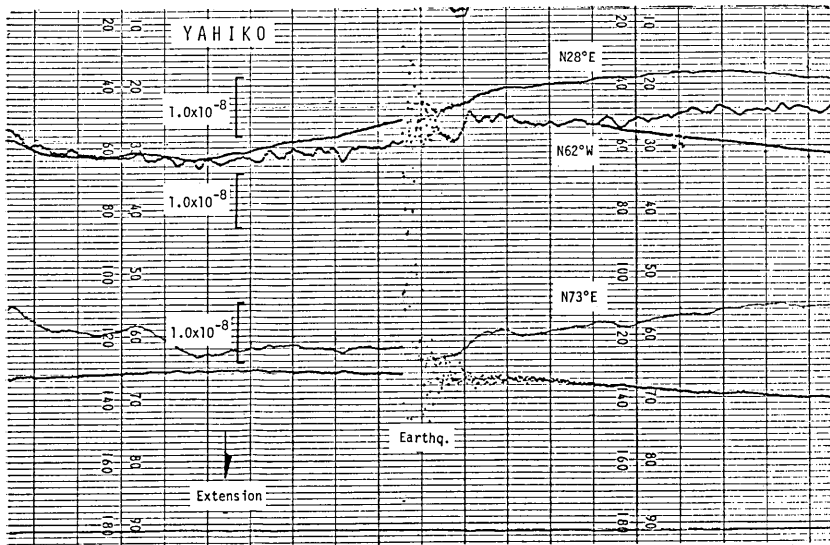


Fig. 2. (i) Yahiko

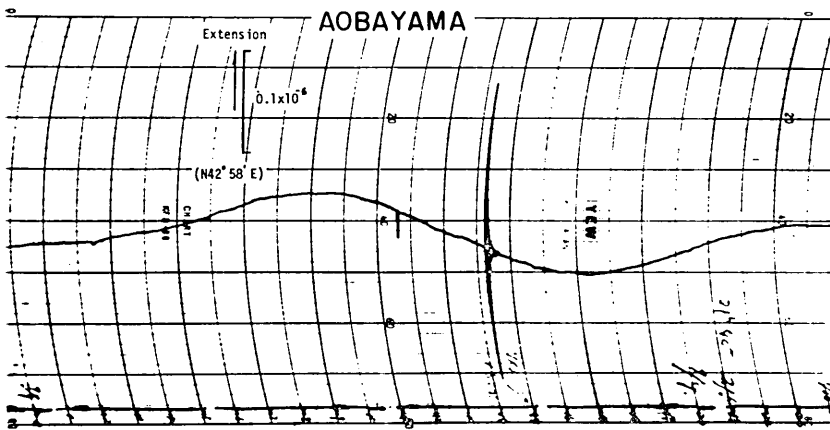


Fig. 2. (j) Aobayama

の地殻変動観測所では、土地伸縮計3成分が標準となっているから、平面歪として解析をすることが可能である。第4図はさきの観測結果(第1表)に基づいて計算した歪主軸の様相である。ここで実線・破線はそれぞれ伸張主軸および短縮主軸を表わしている。ひとたびこれら主軸が求められれば、よく知られている関係式によって任意方向の伸縮量を計算することができる。

第5図はこのようにして各地点の観測結果を断層に平行および直交の歪成分に換算した

AKITA (OGA)

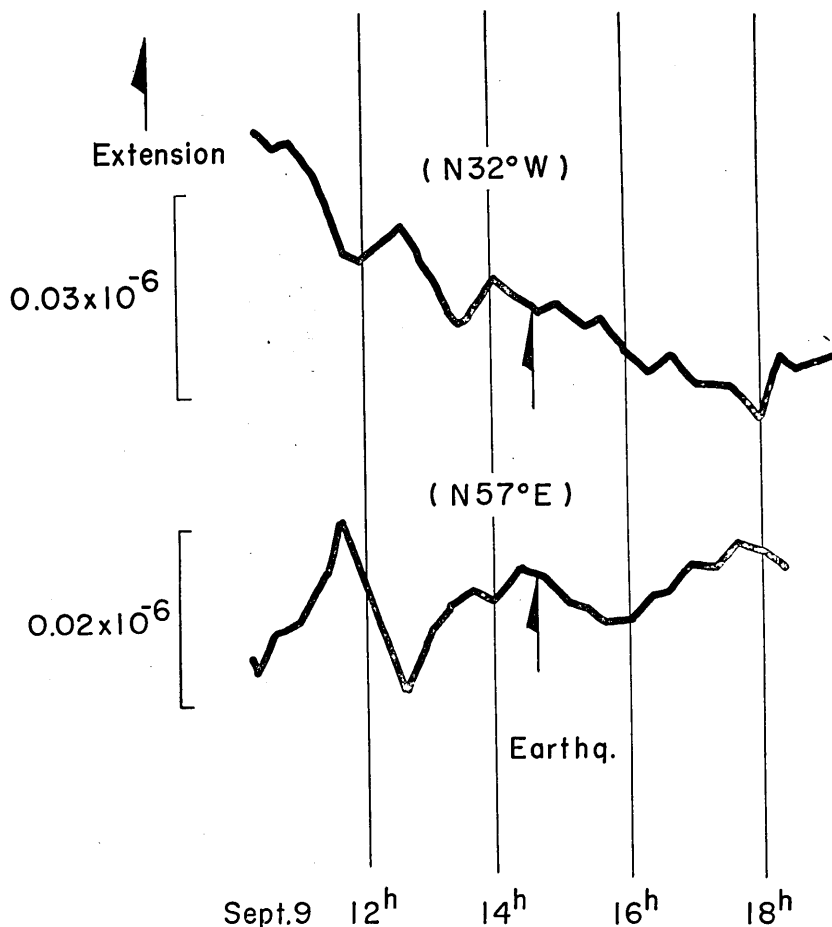


Fig. 2. (k) Akita (Oga Station)

ものをそれぞれに対応する理論値 [Press による $\partial u_1/\partial x_1$, $\partial u_2/\partial x_2$] と比較したものである。このうち ● 印は両者の符号が一致するもの、また × 印は符号が相反するものを示している。一見して分かる通り、符号の矛盾する場合はごく少数である。言いかえれば、伸縮の向きに関する限り観測された strain step は理論的に期待されるものと調和しているといえよう。さらに詳しくみれば、両者の一致は必ずしも良好ではない。仮に観測と理論とが完全に一致するものならば、これらの点は観測・理論の同数値の交点を連ねる 45° 傾斜の直線上に乗るはずである。Press が計算に用いた諸仮定を今の場合に翻訳すれば、この直線は U (横ずれの量) = 0.8 m 強に相当する。実際には、多くの点はこれより上方に散在しているから、試みに $U=0.3, 0.1$ m を表わす直線を引いてみると図のとおりにな

NIBETSU

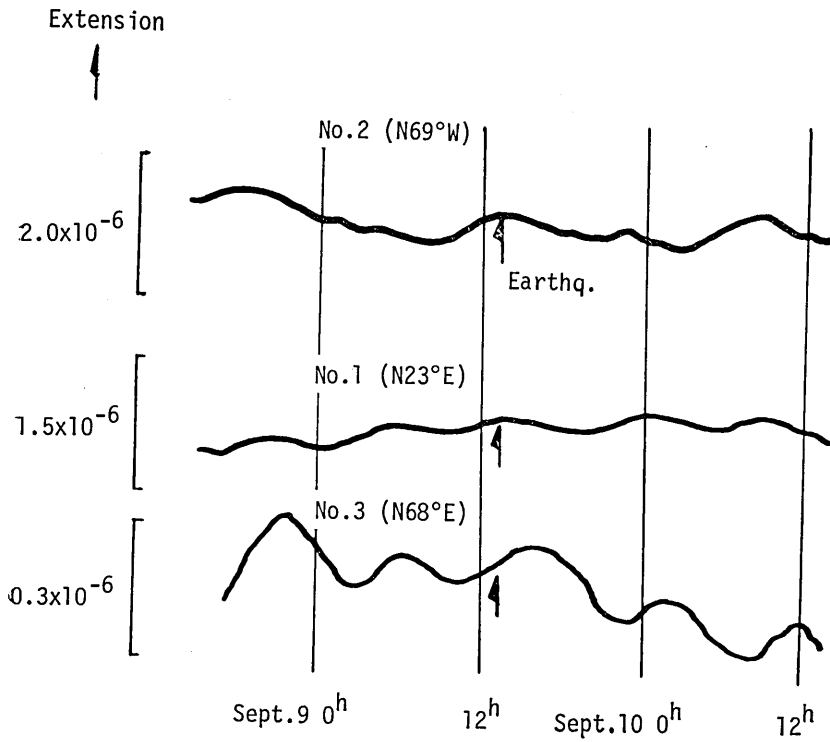


Fig. 2. (l) Akita (Nibetsu Station)

SANRIKU (IMADEYAMA)

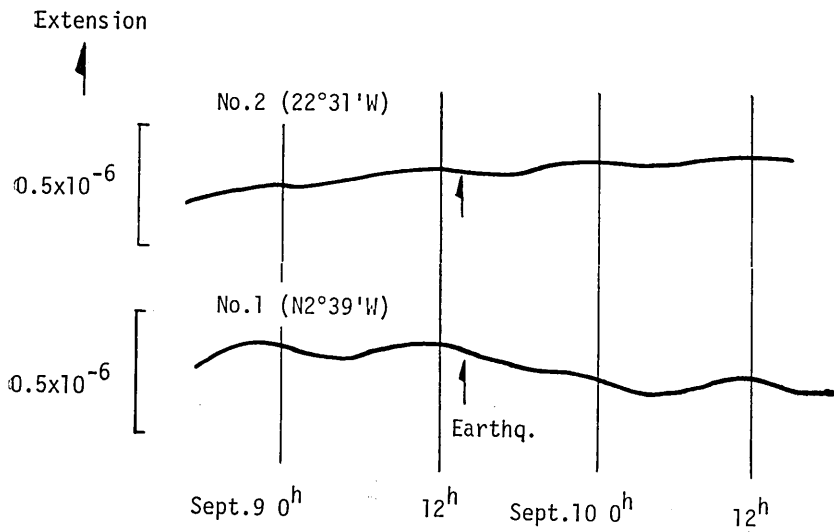


Fig. 2. (m) Sanriku

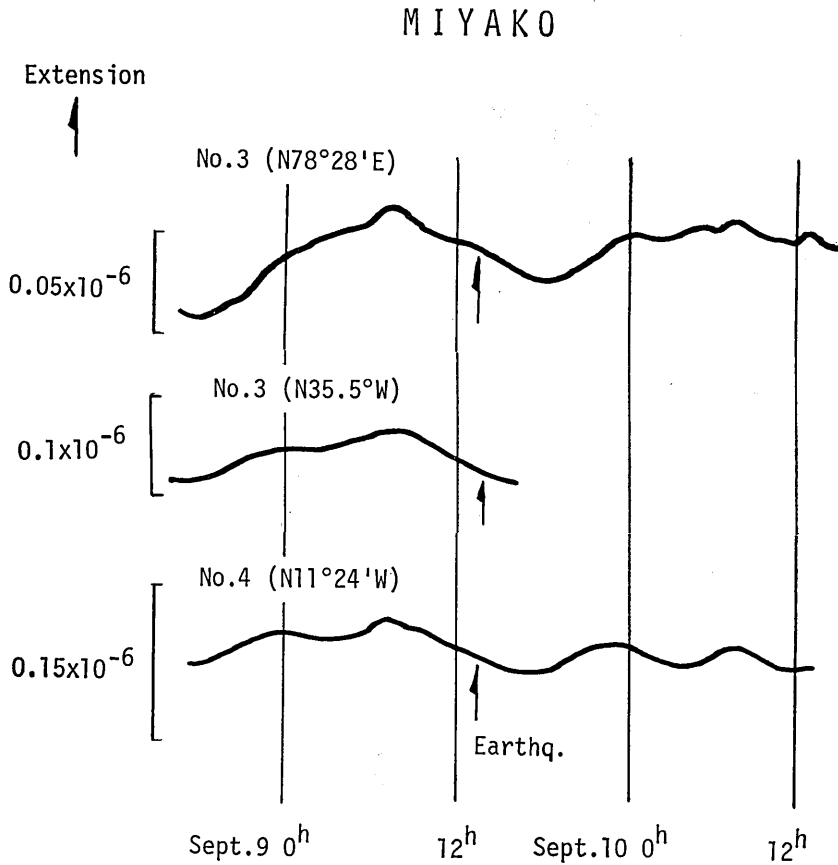


Fig. 2. (n) Sanriku (Miyako Station)

る(ただし、他のパラメーターは全て固定)。ばらつきが著しいので最適の U を指定することはやや困難であるがあえていうならば現在の仮定条件のもとでは $0.3 \sim 0.1 \text{ m}$ と推定される。

考 察

1969年9月9日の岐阜県地震による地殻歪の観測資料を解析した結果、およそ次の諸点を知ることが出来た。

1. strain step に関する観測点ごとのばらつきは予想以上に大きい。従って、単一観測点の資料に頼る従来の調査研究はよほど好適な観測点に恵まれない限りはなほ危険である。
2. これに反して、多点観測網を活用する今回の方式はより客観的に結論を導くこと

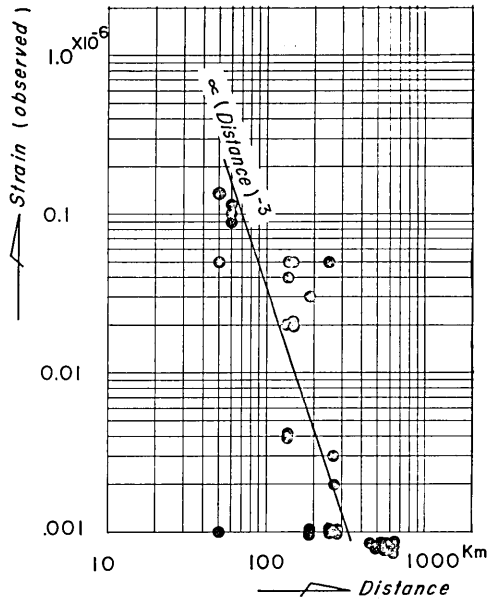


Fig. 3. Amplitude of strain steps versus distance.

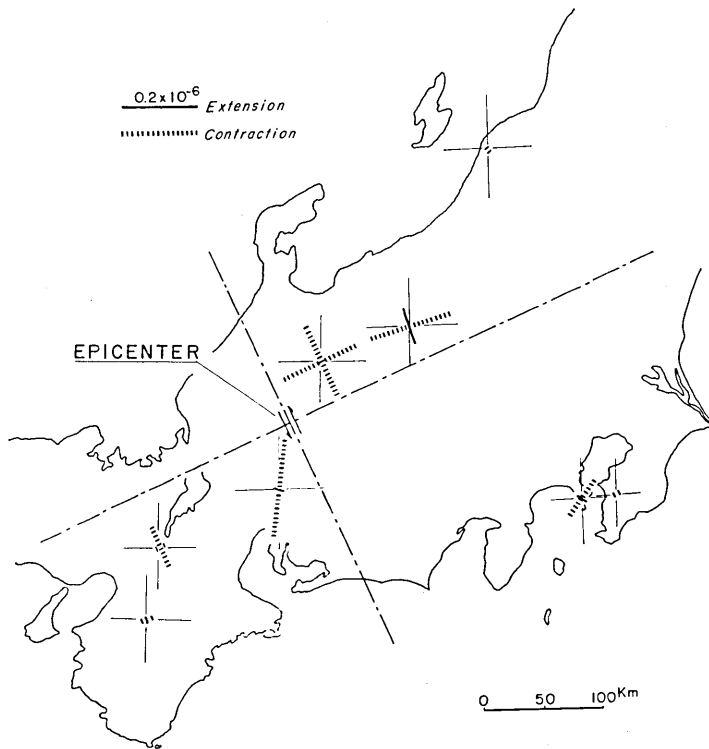


Fig. 4. Principal axes of strain field associated with the Gifu earthquake.

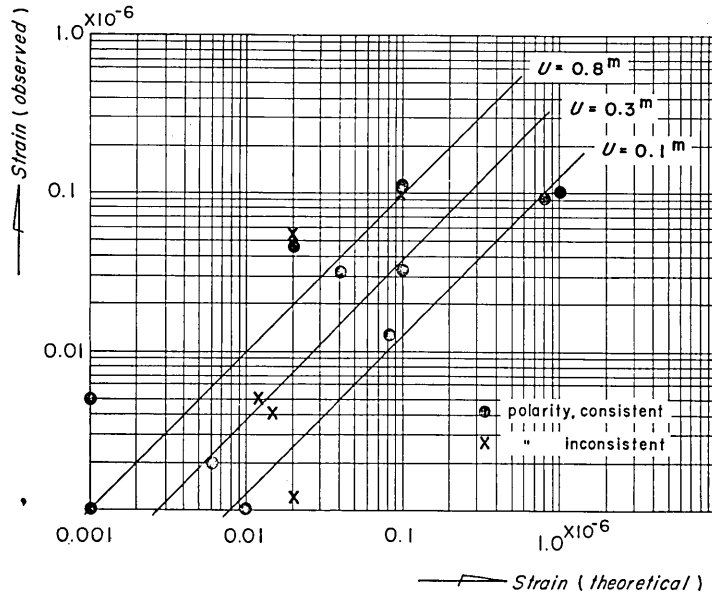


Fig. 5. Observed strain steps as compared with the theoretical ones.

ができる。今回の事例についても、いわゆる strain step が震央を含む相当広範囲に広がっていることはほぼ確実である。

3. 第5図で取り扱ったように、資料さえ良ければ現地調査や長周期地震波の解析とは独立に U を推定することが可能である。今回の場合 U は 0.3~0.1 m 程度と思われる。あいにく地表で地震断層が確認されずこの推定の当否を今ただちに議論することは困難であるが、将来三角測量その他の調査が震央を越えて行なわれれば、この推定の当否について明確な判定が得られよう。

4. いずれにせよ今回の経験からすれば、地殻歪の S/N 比は著しく低い。これが 1 を越えるのはおそらく歪が 10^{-7} 程度を越える場合であろう。言いかえれば、わが国の場合、マグニチュード 7.5 程度以上の地震でないと、strain step を全国的な広がりにおいて捕えることは困難であろう。

5. 第3図が示している地殻歪の距離効果も、本質的な strain step ではなくて計器また岩盤のたが地震動の強弱に応じて現われたものという疑いもあり得る。しかし今の場合この疑いは当たらないようである。というのは、松代・鋸山・青葉山などの記録を比べてみると、地震動に伴う動的な地殻歪の最大振幅はいずれも 10^{-6} ~ 10^{-7} 程度で大差がないにもかかわらず、静的 strain step には明らかな距離効果が認められる。

6. 今回の議論は土地伸縮に限られ、傾斜は取り扱わなかった。これは傾斜の連続記録を安定に与えるような傾斜計がまだ実用化されていないためであり、おそらく傾斜量についても strain step 的なものが相伴なうに違いない。これはもし傾斜量も伸縮量と同時に取り扱うことが出来れば、結論はさらに確定的なものとなるであろう。この意味において、自記水管傾斜計などの早急な実用化が望まれる。

7. 地震予知研究計画における地殻変動連続観測の役割りについては、土地変動の単なる indicator 的性格以上は望めないという見方もある。しかし今回の経験から考えれば、適当な観測方式を確立することによって、地震に伴う地殻歪ばかりでなく、その前駆的な変動も的確にとらえる可能性があるように思われる。この見地から地殻変動連続観測の果し得る役割について再評価が望まれる。

8. 前項にも関係するが、地殻変動観測所の緊密な協同観測は極めて有用かつ必要である。当初地震予知研究計画においては、地殻変動観測所の視野は地方的なものにこだわり過ぎたきらいがある。この意味において、全国的ネットワークの編成が早急に望まれる。

あとがき及び謝辞

以上は 1969 年 9 月 9 日の岐阜県地震を対象として、strain step がほぼ理論的に期待されるのと同じ様相で起きたことを地殻変動観測所の全国的なネットワークによって確認した。この種の研究には多点観測は極めて有効であると信じられる。従来、地殻変動観測所はそれぞれ単独で機能を発揮するよう計画され、また期待されてきたが、今回の経験はこれら観測所の相互協力が今後の地震予知研究発展のためにも不可欠であることを示した。今後はこの要請に応えるべく観測所の協力関係を確立していかなければならない。

本報告の主体をなす strain step の観測資料はこれに関係する 15 の地殻変動観測所の協力によって集約出来たものであるが、まとめるに当たっての責任はこれを担当した地震研究所笠原慶一にある。

終りに報告をまとめるに当たっては、地震研究所の平井正代・金谷祝禱子両嬢に資料作成上及び計算処理上の助力をいただいた。感謝の意を表する次第である。

文 献

- 地震研究所余震観測班, 1970, 岐阜県中部地震—1969年9月9日—余震観測, 地震研究所彙報, **48**, 1155-1163.
- 松田時彦・恒石幸正, 1970, 岐阜県中部地震—1969年9月9日—被害地調査報告, 地震研究所彙報, **48**, 1267-1279.
- PRESS, F. 1965, Displacements, Strains, and Tilts at Teleseismic Distances, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2395-2412.
- RIKITAKE, T. and Y. YAMAZAKI, 1969, Electrical Conductivity of Strained Rocks. The Fifth Paper. Residual Strains Associated with Large Earthquakes as Observed by a Resistivity Variometer, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **47**, 99-105.
- 志知竜一, 飯田汲事, 山内常生, 1970, 犬山における地殻変動及び地震発生との関係, 地震学会講演会(1970年5月11日).
- SMITH, S. W. and J. R. MCGINLEY, 1967, Permanent Tilts and Strains Associated with Earthquakes, IASPEI Assembly, Zürich, Oct. 6, 1967.
- 竹本修三・高田理夫, 1969, 地震に伴う Strain step について, 測地学会誌, **15**, 68-74.
- WIDEMAN, C. J. and M. W. MAJOR, 1967, Strain Steps Associated with Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **57**, 1429-1444.

69. *Spatial Distribution of Strain-steps Associated with the Earthquake of the Central Part of Gifu Prefecture, September 9, 1969.*

By the Japanese Network of Crustal Movement Observatories.

(c/o Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.)

Abstract

The writer collected strainmeter records of the Gifu earthquake of September 9, 1969 ($M=6.6$) from the fifteen crustal movement stations, which are distributed widely in Honshu, Japan. The purpose of this work is to investigate the associated changes in the earth's strain field by examining whether the strain-steps decay reasonably with distance, as expected from a dislocational fault model of the earthquake source.

Roughly speaking, the amplitude of the recorded steps is inversely proportional to the cube of the distance from the source, and amounts to 0.1×10^{-6} approximately at Inuyama which is only 70 km away from the epicenter. For further examination, the writer dissolved the three components of strains at each station into the two principal strain components, which are parallel and perpendicular to the supposed fault, respectively, and compared them with the theoretical values from Press's charts. There is a considerable scattering of the observational data about the theoretical ones. However, we still notice an indistinct but systematic correlation of the two, suggesting that the best correlation is obtained by assuming the fault offset, U , as 0.3 m, approximately.
