

地震性地殻変動とくに地震断層の 変位測定のおよぶ例

衣笠善博 (地質部)

〔まえがき〕

地震の予知は地震の先駆現象をとらえることによつてなされる。適確にある種々の先駆現象さえとらえることが出来るなら、事物の変化は地震に向つて進行しているという仮定のもとにさらに種々の測定・観測がなされるであろう。そして事物の変化の空間的な広がりには来るべき地震の規模を与え、与えられた地震規模と先駆現象の時間的な広がりには相関関係がある事が知られているので、先駆現象が観測された場所を含めて、地震規模・地震の時期という三要素が予知されることになる。

それでは一体どのような現象が先駆現象としてとらえられるであろうか？ SHOLTZ, et al. (1973) はそれまでになされた多くの研究をまとめ、地殻変動(水準・三角)・大地の電気抵抗・地下水中のラドンの含有量・地震波速度比(V_p/V_s)・ b 値(地震の頻度と規模の関係式の勾配)に先駆的な変化があらわれるとし、それらの変化を互に関係づけ Dilatancy model (いわゆるシヨルツ理論)を組み立てた。日本の地震予知関係者の間ではさらに地磁気・重力・地下水位などにも先駆的な変化があらわれるとし、それらをとらえる事にも力を入れてきた。

地震は降伏強度を超える応力が岩石に作用し、破壊する現象であるので、地殻応力の連続観測が最も直接的であり、より有効な手段ではあるが、この観測には多くの困難がともない、まだ実用化には至っていない。

地殻に働く応力は地殻を歪ませる。そしてこの歪は水準点の昇降や三角点の変動となってあらわれる。ここではこれらの現象についていくつかの例を紹介したい。

〔地殻変動のおよぶフェイズ〕

地震に起因する地殻変動は“地震性地殻変動”と呼ばれており、上にのべた水準点や三角点の改測によって明らかにされる。さらにより直接的には地震断層の出現や地盤の隆起(たとえば1804年の象瀉地震では秋田県南部にあり、芭蕉の句で有名な象瀉湖が隆起し、乾陸となつてしまった)・沈降(たとえば1946年南海地震では高知市は1.2m沈降し海水に浸つた)によつて知られる。

MESHERIKOV (1968) は地震性地殻変動をその前後の

定常状態を含めて α (steady state) β (pre-earthquake shift) γ (earthquake shift) の3つに区別した。 α は地震と地震の間のおだやかな定常的な状態であり、 β ははじめにのべた先駆現象としてあらわれる地殻変動であり、 γ が上にのべた地震断層の出現や地震時の地盤の昇降である。MESHERIKOV はこれらの事について新瀉地震・松代地震・ニッ井地震などの例をあげて考察をした。

その後 LENSEN (1971) は γ フェイズの後に α とは異なる変動があるとし、これを δ フェイズ (post-earthquake shift) と名づけた。このもとになったのは1968年のInangahua地震のときに出現した地震断層(右ずれ)が地震後しばらくの間右ずれの変位をつづけ、やがてわずかに左ずれを示したという現象である。NASON (1969) は地震断層が地震後も変位をつづける現象(LENSENのpost-earthquake shift)をafter-slipと呼んだ。FUJITA and FUJII (1973) はこれらのフェイズをさらに細分しているがこれについては後でべる。

〔地震性地殻変動の測定〕

地震性地殻変動の典型である地震断層のおもなものを第1表にかかげる。1948年の福井地震による福井断層は地震の前後の水準と三角点の改測によって明らかにされたものであり、1923年関東地震ではこの表にはもられていないが、水準・三角点の改測とdislocation modelから相模湾内を横切る断層が求められた。

現在では比較的大きい地震の後に地殻変動の有無やその広がりを調べるために、水準測量や三角測量の改測が行なわれるようになって来たが、地震に関連して水準点の改測が行なわれたのは1891年の濃尾地震が最初であり、三角点の改測は1923年の関東大地震の後に行なわれたのが最初である。

1927年の丹後地震では有名な郷村・山田の二つの地震断層が生じたが、これについてはTsuboi (1931)の努力によつてはじめて水準点のくりかえし改測が行なわれた。そしてはじめてafter-slipにあたる現象を見出ししている(第1図)。このafter-slipは地震時の断層の動きと同じセンスの動きであり、その速度は時とともに減少

第1表 日本のおもな地震断層

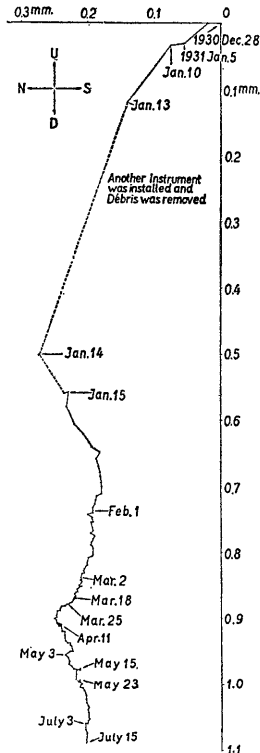
	Date	Name of Earthquake	Magnitude	Name of Fault	Strike	Vertical Displacement		Horizontal Displacement	
						down-side	max. in m	sense	max. in m
1	1891 X	Nōbi	8.4 (8.0)	Neodani etc.	NW	NE	6	Left	7
2	1894 X	Shōnai	7.3	Yadarezawa	NE	NW	a little	—	—
3	1896 X III	Riku-u	7.5	Senya Kawafune	NNE NNE	W E	3 2	— —	— —
4	1923 IX	Kanto	7.9	Shitaura Enmeiji	WNW E-W	S S	1.5 1	— —	— —
5	1925 V	Tajima	7.0	Tai	NE	NW	1	Left ?	0.1
6	1927 III	Tango	7.4	Gōmura Yamada	NNW ENE	E S	0.6 0.7	Left Right	3.3 0.8
7	1930 XI	Kita-Izu	7.0	Tanna Himenoyu	N-S WNW	E&W S	1.8 0.9	Left Right	3.5 1.2
8	1943 IX	Tottori	7.3	Shikano Yoshioka	E-W E-W	N&S N	0.8 0.5	Right Right	1.5 0.9
9	1945 I	Mikawa	6.9	Fukōzu Yokosuka	{E-W {N-S {E-W {N-S	N E N E	2 2 0.5 1.2	Left Light Left Left	1.3 0.5 0.6 0.2
10	1948 VI	Fukui	7.2	Fukui (buried)	NNW	W	0.8	Left	2
11	1964 VI	Niigata	7.5	S _g (Submarine)	NNE	E	6?	?	?
12	1965—1968 (1966 IV VIII)	Matsushiro swarm	Max. 5.0	Matsushiro (buried)	NW	NE	0.15	Left	0.6
13	1974 V	Off Izu Pen.	6.9	Irōzaki	WNW	N	0.3	Right	0.5

(垣見 未公刊)

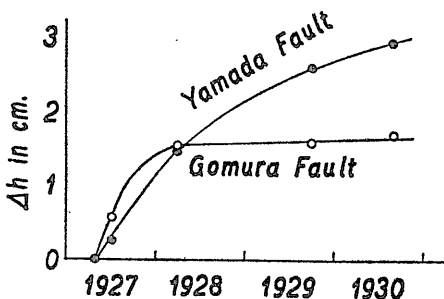
した。

1930年の北伊豆地震では丹那断層が活動をしたが TAKAHASHI (1931) は丹那トンネルの中にあらわれたこの断層の露頭にダイヤルゲージを直接はりつけafter-slipを測定した(第2図)。その結果地震後約7ヵ月間に断層の東側が約1mm上昇したことが明らかになった。

鹿野・吉岡断層を生じた1943年の鳥取地震の後には宮村(1944)が水準測量をくりかえし行ない、両断層ともわずかながら地震時の変位と逆向きの変位をしていることを明らかにした。鹿野断層をまたいでピアノ線をはり、その一端にダイヤルゲージをつけ断層の水平的なafter-slipを計測することを試みたのは萩原(1944)である。



第2図 丹那断層の地震後の動き 縦・横の軸はそれぞれ垂直・水平成分をあらわす TAKAHASHI (1931)



第1図 郷村・山田断層の地震後の動き(垂直) Tsuboi (1931)

そして9月22日より30日までの間の測定で0.3mm程度しか変化しなかったことから「只断層は成生後短期間には餘り活動を行はぬものであるといふことだけは確かである。」とのべている。

この萩原の用いた方法はその後改良が加えられ また測定場所の条件に応じて工夫がされて松代地震(1965~1967)の地割れ拡大の計測に用いられた(NAKAMURA and TSUNEISHI, 1967). 後にのべるように San Andreas 断層の変位測定を精力的に行なっている NASON はこれを Tsuneishi metar と呼び NASON 自身の計測にも応用しているということである。

地震に先駆する地殻変動が測地的に求められたのは1927年の関原地震が最初であろう。

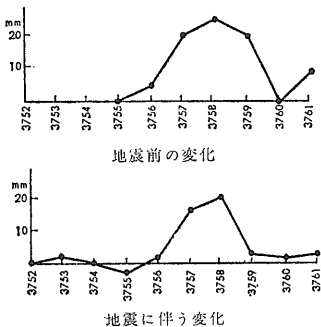
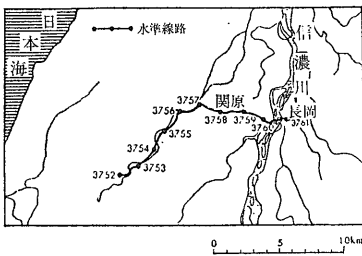
地震の後で震源域に地殻変動を生じている事が次々と明らかにされるにつれて 地震の前にもそのような変動があってもしかるべきだと考えたのは今村明恒である。そして彼は地震の後の調査では後手をとることになるので「この地方には地震がありそうだ」と思われるところに先手をとって水準測量を行なう必要がある事を主張した。今村は1927年(関原地震の年)の4月に陸地測量部に越後長岡地方の水準点の測量を依頼した。この地方の水準点は1894年に設置・測量がなされているが 陸地測量部は同年の7月から8月にかけて早速これを実行した。そして地震が発生したのは10月27日であった。さらに地震による地殻変動を調べるために同年の11月から12月にかけて3回目の水準測量が行なわれ 地震前と

地震ともなう地殻変動が明らかにされた(第3図)。

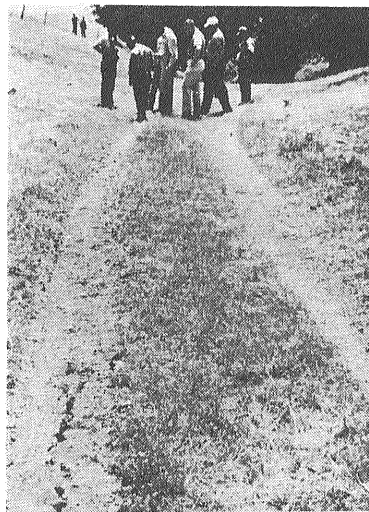
地震予知計画の中で現在のところその主流をなしている先駆的地殻変動の把握はこのようにしてなされた。今から見るとラッキーのようにも思えるが ここに至るまでの今村の努力も見のがせないし 同年の3月には前へのべた丹後地震があり 地震に対する社会的な関心が高まっていたのが幸いし 陸地測量部も彼の要請にすぐさま答えることになったのであろう。

地震性地殻変動の測定にとって最もドラマチックなのは1966年の Parkfield 地震である。1966年6月に第2回日米地震予知研究会議がニューヨークで開かれた。当時日本では松代地震がその最盛期にあっており この会議でも松代地震が大きな話題となった。会議終了後一行はカリフォルニア・ネバダへの巡検を行ない 6月16日カリフォルニア州パークフィールドに立寄った。そこで彼らは 道路を横切る新しいエシェロン状の地割れを発見し しばしの間議論を湧かせた。

BRUNE と ALLEN は18日から19日にかけて現地の近くにポータブル地震計を置き地震観測を行なったが これといった地震は記録されなかった(BRUNE and ALLEN, 1967). しかし この新鮮なエシェロン状の地割れを重視したSMITH と WYSSはこの地割れの進行の計測を計画し 28日に出発する予定で機材の積み込み作業を行っていた。そして今や出発するばかりになっていた27日の午後9時26分(太平洋岸標準時)に地震が起きた。



第3図 関原地震前後の地殻の上下変動 IMAMURA (1928) を引用して藤井 (1967) が描いた図



Parkfield fault - investigation Valley - Choham The tentatively survey areas enation of to man conceit the fault

第4図 Parkfield 地震の 12 日前の地割れの様子を記録した USGS Professional Paper の 1 頁. この写真は第 2 回日米地震予知研究会議に出席した笠原氏によって撮影された

Figure 34.—Fractures along trace of San Andreas fault 1 mile south of Parkfield. Photograph taken June 16, 1966, by Dr. Keichi Kasahara of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo during Second United States-Japan Conference on Research for Earthquake Prediction.

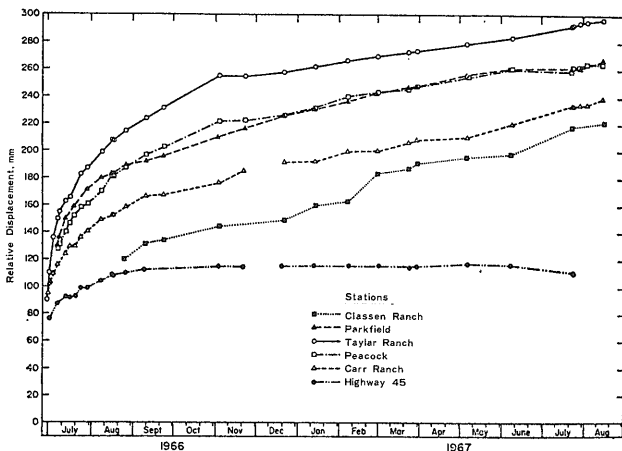
The are the

とるものもとりあえず（といっても準備は上にのべたようにほとんどととのっていた）SMITH と Wyss は現地に出かけ 29日に Taylor 牧場 30日には Carr 牧場 7月1日には高速道路46号線に小規模の測地網を設置し観測をはじめた。そしてその後もParkfield, Peacock, Semetary, Classen 牧場などに次々と観測網を設置し3日に1度の割合で測定をくりかえした。地震後1ヵ月をすぎてからは10日に1回 1967年に入ってからは1ヵ月に1回の割合で測定を継続した(第5図)。そしてその結果1966年中には20cm 以上の変位が測定された。この値は地震時の変位と同等もしくはそれをうわまわる値である。

USGS の WALLACE と ROTH も同様の計測を行なった。彼らは第6図のように二重の菱形基線線を作り小さな菱形(A1・A2・A3・A5)の辺長の変化と大きい菱形(B1・B2・B4・B6)の辺長の変化が同程度であることから これら辺長の変化が断層の変位のみによるものである(断層周辺の引きづりなどを含まない)事を明らかにした。

1968年の Borrego mountain地震では USGS の BURFORD が SMITH らとはほぼ同様の方法で地震後の変位を計測した。

1971年の San Fernando 地震では NASON (1971) がこの地震後の変位測定を試みた。彼は San Fernando断層帯にそって12カ所のクリープメーターを地震の直後に設置したが そのいずれにも確かな変位は記録されなかった。明瞭な変位をとらえることができなかったとはいえ 地震の直後に12カ所ものクリープメーターを設置し得たのは彼が以前から地震後の断層の動きに興味を持っていたからである。1969年にすでに彼は“after-slip”

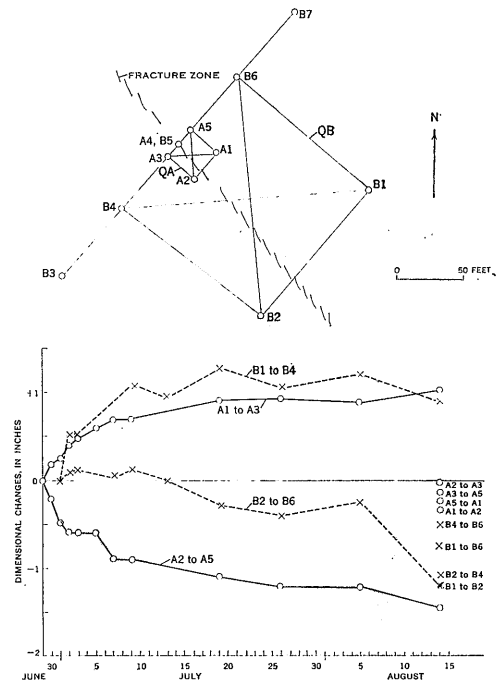


第5図 Parkfield 地震で活動した断層の余効的運動 (SMITH, S. W. and WYSS, M., 1968)

という言葉を提唱している。彼は「Continuing fault movement after an earthquake, termed “after-slip” in analogy to “aftershock”, is newly recognized phenomenon following earthquakes.」とのべ 1966年の Parkfield 地震 1968年の Borrego mountain 地震 そして1961年の Hollister の地震にその例が見られることをのべた。

サンフランシスコ南東 150km ばかりの Hollister にある W. A. Taylorブドー酒醸造所は1943年から48年にかけて建設されたが 54年頃から建物に亀裂が入りはじめ したいに口を大きくし 1957年の秋には醸造所から排水用の溝に至る水路がこわれてしまった。1956年から継続的な測定が始められた。その記録によると1959年頃から亀裂の開口スピードが増し 1961年の地震を迎える。地震時には一度に11mm変位した。その後1年半程は逆に目立った変位のない期間がつづき 再び定常的なクリープを続けるようになった(第8図)。

NASON はその後も精力的に研究を続け 1973年までに San Andreas 断層にそって20カ所近くもクリープメーターを設置した。San Andreas 断層にはこの NASON の設置したものを60カ所以上も同様の設備が設けられており 測地測量網も文字通り網の目のようにはりめぐらされている。またアラスカでも PAGE と LAHR (1971) によって断層をはさむ菱形基線が設けられ測定



第6図 Parkfield 地震で活動した断層の余効的変動を測定するための二重の菱形基線(上半)とその測定結果(下半) WALLACE, R. E. and ROTH, E. F. (1967) の図

が続けられているが ベンチマークの凍上や熊にあらされたりで苦労が多い様である。

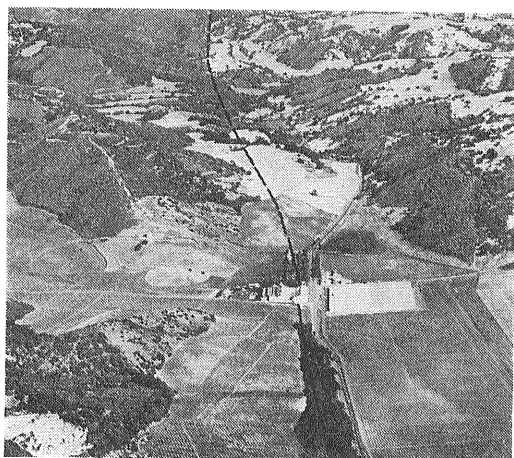
日本では 地震研究所の岡田らによって 既設地殻変動観測所の周辺と活断層・活褶曲に関連する地域に放射基線が設けられ Geodimeter による測定がくりかえされているが 松代地震の震源地の場合を除いて Geodimeter そのものもつ精度すなわち $\pm [10\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times \text{距離}]$ は観測されていない (岡田ら 1969など)。

六甲山の山腹を走る活断層—大月断層—に断層をまたいでスーパーインバー棒の伸縮計 水平振子型傾斜計 水管傾斜計などが設置され連続観測が開始されている (田中・藤田 1973)。また田中・藤田らは京都大学防災研究所と共に兵庫県の山崎断層をまたいで掘られた水平坑にもスーパーインバー棒伸縮計を設置し 昨年10月から測定に入った。この水平坑の上 地上では地質調査所と田中・藤田らが共同で精密三角測量の手法によって断層の変位を測定すべく昨年8月に第1回の測定を行った。この山崎断層ではジオジメーターを使った測量や地磁気 地電流の測定も計画されている。

地質調査所ではこの山崎断層の他 三浦半島の北武断層 房総半島の延命寺断層でもそれぞれ1970年 1971年からくりかえし精密三角測量を行なっている。また 1974年の伊豆半島沖地震で活動した石廊崎断層については2ヵ所のミニ菱形基線場を設け 地震直後からくりかえし測量を行なっている。

[再び地殻変動のフェイズと石廊崎断層の After-Slip]

第9図にこの石廊崎断層の地震後の水平変位が地震後の経過日数と共に増加していく様子を示す。この実測



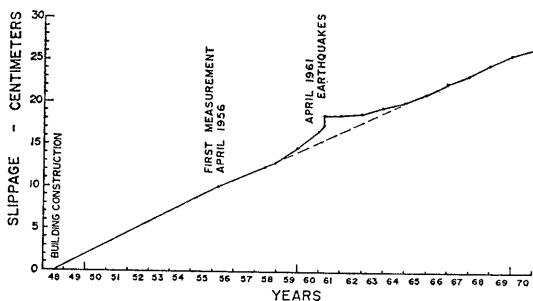
第7図 W. A. Taylor ブードー酒工場を横切る San Andreas 断層 BRABB, E. E. らの作成した San Andreas 断層の巡検案内書より転写

値は $S = a_0 + a_1 \log T + a_2 \frac{1}{T}$ で近似される。ここで S は水平変位量であり T は地震後の経過日数である。

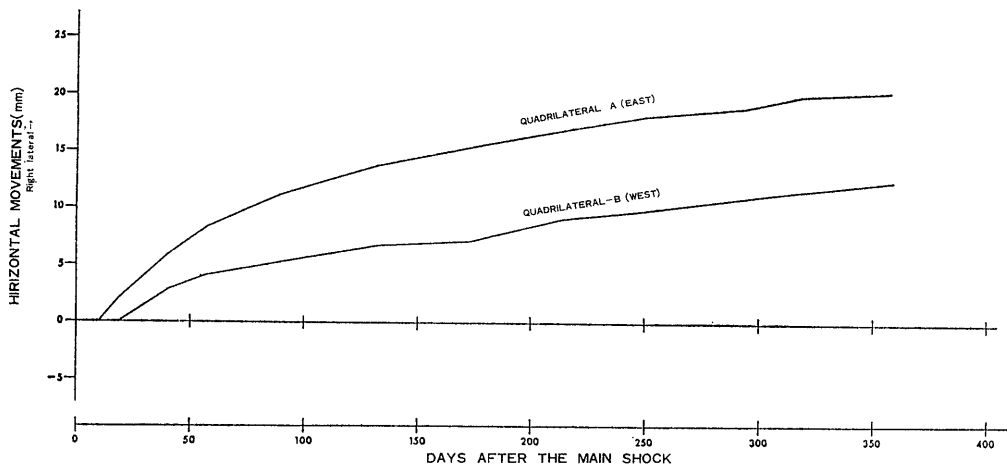
第9図やこの近似式から地震後の水平変位量 S は急激に増加するが やがて第3項は無視し得る程に小さくなりゆるやかなカーブを描く そして経過日数 T が十分に大きくなると第2項も S の増加にほとんど寄与しなくなり T の増加にともない S はほんのわずかに増加するか見かけ上一定の定常状態になる事が期待される。

FUJITA and FUJII (1973) は前へのべた LENSEN (1971) の $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ の4つのフェイズをさらに細分した (第10図)。 α は MESHERIKOV, LENSEN と同じで steady state であり β を β_1 (ダイラタンシー状態) と β_2 (不安定状態) に分け γ を $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ に分けそれぞれを pre-seismic slip, co-sismic slip, post-sismic slip と名づけた。そして地震前後の測量で求めるのは $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$ であるから γ を Geodetic slip と呼び さらに地震波の解析から求められる変位は γ_2 であるから γ_2 と Geodetic slip すなわち γ との間に差があっても不思議ではないことをのべた。

さて石廊崎断層についてであるが 今となつては 地震前の α, β_1, β_2 を知る手だてはない。 $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$ は地震の直後に認められた断層の変位そのものであり 右ずれ約40cm 北下がり約25cmである。 δ は我々が測定を継続している余効的運動であるが 前へのべたようにこの余効運動は見かけ上 変位が急激に増加する時期と ゆるやかに増加する時期 そしてほぼ一定値かごくわずかに増加する時期の3つに区別出来そうである。とすると3番目の見かけ上一定となる定常状態がFUJITAらの α にあたり その前のゆるやかに変位が増加する時期が δ 急激に増加する時期が γ_3 にあたるとも考えられる。もしそうだとすると γ_3 と α までは上に示したような一つの式で近似される一連の運動であり FUJITAらの区別は γ_3 から α に関する限り 見かけの上だけのもの



第8図 San Andreas 断層をまたぐブードー酒工場での1948年から1972年の間の変位。 NASON, R. D. (1973) の図

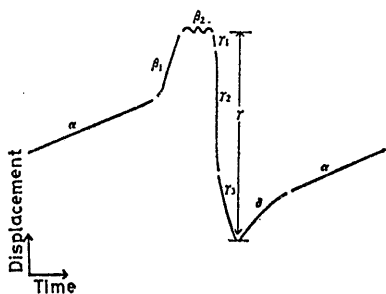


第9図 石廊崎断層の余効的運動 (水平ずれ成分)

のとも言うことができそうである。そして今まで我々が測定し明らかにして来た運動の様式がとらえられたとするとそれは余効的運動すなわち FUJITA らの γ_3 や δ の終りを意味するのではなく 次の地震の先駆現象 β_1 ということになる。我々の測定期間はまだ1年とすこしでしかないし 測定をはじめた時にはすでに地震発生から10日たっており これ以上の論議はできないが 余効的運動の測定は地震前後の定常状態を含めて地震性地殻変動の全体像を得る事に寄与し 地震予知の上でも地震の先駆的現象を適確にとらえる事に役立つと思われる。そして Parkfield 地震のときの SMITH and WYSS のように観測機材の積み込み中に地震発生 of ニュースがもたらされるというような "幸運" にめぐまれる事はそう多く期待できないとするなら あらかじめどのような事態にでも対処し得るように 平静から観測機械の整備を行なう事に心がけなければなるまい。さらに 主要な活断層少なくとも A 級とされているような活発な活断層にはあらかじめ観測網という網をはっておく必要がある。

文 献

BRUNE, R. D. and SMITH, S. W.: Bull. Seism. Soc. Am. **57**, 277 (1967)
 BURFORD, R. O.: USGS Prof. Pap., **787**, 105 (1972)
 藤井陽一郎: 「日本の地震学」 紀伊国屋 (1967)
 FUJITA, N. and FUJII, Y.: Jour Geod. Soc. Japan, **19**, 55 (1973)
 荻原尊礼: 震研彙報 **22** 66 (1964)
 IMAMURA, A.: Proc. Imp. Acad. Japan, **4**, 109 (1928)
 LENSEN, G. J.: Roy. Soc. New Zeal. Bull., **9**, 97 (1971)
 MESHRIKOV, J. A.: Tectonophysics, **6**, 29 (1968)
 宮村撰三: 震研彙報 **22** 49 (1944)
 NAKAMURA, K. and TSUNESHISHI, Y.: Bull. Earthq. Res. Inst., **45**, 417 (1967)
 NASON, R. D.: Am. Geophys. Union Trans., **50**, 252 (1969)
 NASON, R. D.: USGS Prof. Pap., **733**, 89 (1971)
 NASON, R. D.: Stanford Univ. Pub., Geol. Sci, **13**, 275 (1969)
 岡田 惇・柴野睦郎・笠原慶一: 測地学会誌 **14** 72 (1969)
 PAGE, R. and LAHR, J.: Jour. Geophys. Res., **76**, 8534 (1971)
 SHORTZ, C. H., et al.: Science, **181**, 803 (1973)
 SMITH, S. W. and WYSS, M.: Bull. Seism. Soc. Am., **58**, 1955 (1968)
 TAKAHASHI, R.: Bull. Earthq. Res. Inst., **9**, 435 (1931)
 田中 豊・藤田和夫: 科学 **43** 289 (1973)
 TSUBOI, C.: Bull. Earthq. Res. Inst., **9**, 423 (1931)
 WALLACE, R. E. and ROTH, E. F.: USGS Prof. Pap., **579**, (1967)



第10図 FUJITA and FUJI (1973)が示した "A typical pattern of seismic crustal movement"