

水管傾斜計によって観測された地殻変動

地震研究所 山田重平

(昭和48年1月20日受理)

目 次

	頁
まえがき.....	2
第1章 水管傾斜計の計器論.....	5
1. 水管傾斜計の原理と構造.....	5
2. 水管傾斜計の特殊型式.....	6
3. 読取精度ならびに計器の長期安定性.....	8
4. 観測横坑.....	12
5. 計器台石とその施工.....	12
6. 観測誤差の諸要因.....	14
第2章 水管傾斜計の遠隔記録.....	25
1. 序 言.....	25
2. 超音波式水管傾斜計の原理.....	25
3. 計器の構成.....	26
4. 計器の誤差.....	27
5. 計器の要目.....	28
6. 計器の設計, 試作の経緯.....	28
7. 富士川型の設計, 試作.....	33
8. 電気回路.....	39
9. 記録実例.....	46
第3章 水管傾斜計の経年変化.....	48
1. 序 言.....	48
2. 水管傾斜計の観測結果.....	50
3. 三浦半島の水準測量.....	53
4. 水管傾斜計と水準測量の比較.....	56
5. 観測結果に対する考察.....	57
6. 油壺の土地上下変動と傾斜変動.....	58
7. 鋸山観測所と房総半島の水準測量.....	59
8. 油壺と鋸山の水管傾斜計の比較.....	62
9. 観測結果に対する考察.....	63
10. 松山市における水管傾斜計の観測.....	70
第4章 地震活動と水管傾斜計の観測(松代群発地震の場合).....	79
1. 水管傾斜計観測からみた諸現象.....	79
2. 水管傾斜計の観測結果.....	82
3. Tilt-step およびその規則性.....	83
4. 地震の規模Mと断層の長さLの関係.....	89
5. 断層面積の推定.....	90
6. 左横ずれ断層による傾斜の場.....	93
7. 標準転位への震央位置補正と断層変位.....	99
8. 地震の規模Mとモーメント M_0 との関係.....	100
9. 補 遺.....	101
第5章 諸分野への応用.....	102
1. 佐久間ダムの場合.....	102

2.	黒四ダムの場合.....	105
3.	火山学における応用.....	106
	参考文献.....	108
付録	1.1 水管傾斜計の針先を鮮明に見る光学系.....	112
	1.2 読取容器の製作工程.....	113
	1.3 視測横坑の施工.....	114
	1.4 台石の加工.....	114
	1.5 視測坑の平面図.....	114
	2.1 圧電素子の絶縁低下.....	116
	4.1 松代地震の主要地震の前後2日間における異常変動.....	117
	4.2 松代地震視測所における水管傾斜計の読取值.....	129
	4.3 地震の規模と断層面積の関係.....	145
	英文抄録.....	146

まえがき

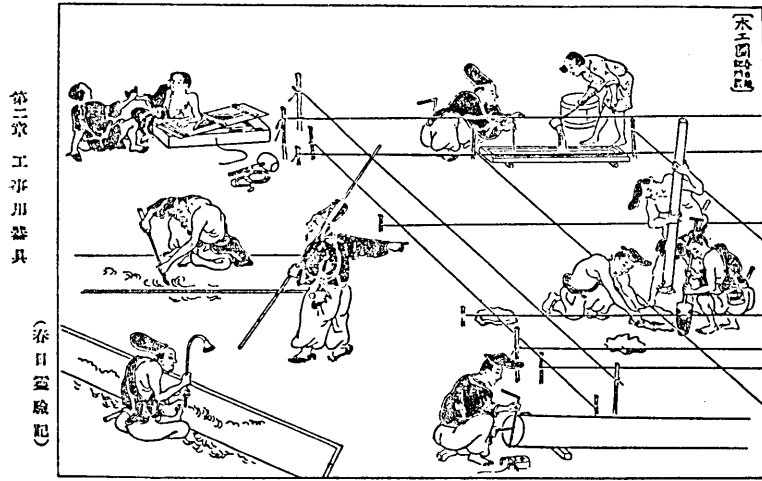
水管傾斜計のはじまり

地震と地殻変動の関係が密接不離であることは、大地震に際して断層や海岸隆起などの現象がみられることから明らかである。今村^{001),002)}は大地震の起る数時間前に著るしい地殻変動のあった例として、鯨ヶ沢(寛政4, 1793),佐渡(享和2, 1802),浜田(明治5, 1872),丹後(昭和2, 1927)の四つの地震を挙げているが、それらの現象はいずれも住民の目撃によって捉えられたものである。^{003),004)}濃尾地震(1891)以降、測地学的方法が地震の調査研究に導入されるに至って、地震と地殻変動の関係は逐次明らかになってくる。藤井⁰⁰⁵⁾が指摘している如く、地震研究所の発足より20年間は所の内外においてこの種の研究が盛んに行なわれた時期で、その成果の蓄積は日本の地震学独自の業績として評価されるに至った。現在の地震予知研究計画もその基底において、これらの研究成果に負うところが極めて多いのである。例えば、関原地震(1927)は今村⁰⁰⁶⁾によって最初から地震研究の目的で計画的に行なわれた測量によって地震前後の土地変動の様相が明らかにされたもので、その時代の代表的業績の一つに挙げられるべきものであろう。

地殻変動観測の重要性は一方において土地の傾斜変動の連続観測計器の開発を促して行った。最初に使用されたものは Rebeur-Paschwitz の水平振子傾斜計である。その構造については志田⁰⁰⁷⁾,萩原⁰⁰⁸⁾の著書に僅かな記述があるのみで、後に述べる Michelson に関する記事も同様原著⁰⁰⁹⁾の閲覧は恐らく個人所持のものに頼るほかあるまい。ついで石本⁰¹⁰⁾は Zöllner 吊の全シリカ傾斜計を製作した。この計器を使った研究としては井上⁰¹¹⁾,高橋^{012,013,014)},西村⁰¹⁵⁾,萩原⁰¹⁶⁾,Rebeur 型と比較した佐々⁰¹⁷⁾らのものが挙げられる。

一方これらとは別の原理に基づくものとして、水の自由表面を利用した傾斜観測がある。検潮儀は海水面を基準として陸地の昇降変動を連続的に検知できる。関東地震(1923)に際し油壺の検潮儀が三浦半島の隆起を記録したことは多くの人の知るところである。湖沼面を利用して土地の傾斜変動を測ることも行なわれた。琵琶湖における坪井⁰¹⁸⁾,富士五湖の萩原・表⁰¹⁹⁾の研究がある。

このような自然の水面を利用することは気象条件に左右されることが大きい欠点がある。常時精密な傾斜観測を行なうためには人工の長い静水面を使用するのが最良である。



鎌倉時代木工図

Fig. 0.1. A water level used as a builder's tool during the Kamakura-era (12th century). upper right.

わが国では鎌倉時代 (1180—1333) すでに建築に使われる「水盛」のあったことが春日靈驗記にのっている。⁰²⁰⁾ (第 0.1 図)

Michelson⁰²¹⁾ はシカゴ市付近において直径 6 吋長さ 502 呎の鉄管を土中に埋設し、その中に水を半分程入れ、彼の作った干渉計によって水面の微小な昇降変動を測り、地殻潮汐の観測を行なった。地震研究所は創立当初この干渉計を輸入して水管傾斜計の研究を始めた。旧地震研究所の構内の地下室に東西・南北の 2 成分が据えられた。その水管傾斜計は直径 6 吋で長さは 18m のものであった。高橋⁰²²⁾ は後に検出部をねじマイクロメータの方式に改造した。鉄管の内面はエナメルを塗って錆を防ぎ、水には 1 gr の HgCl_2 を溶解し

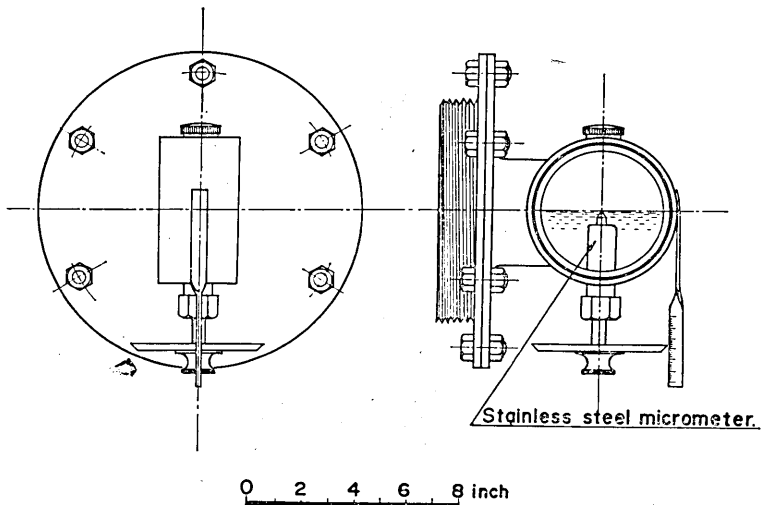


Fig. 0.2. Takahasi's reading microscrew modification of Michelson's proto-type.

て腐敗を防止した。マイクロメータねじのピッチは0.5mmで目盛盤は円周を250等分してあるから1目盛は2 μ に相等する。この装置では読取顕微鏡を用いずに2目盛の誤差で読取が可能であると述べている。第0.2図に読取装置を示す。

萩原⁰²³⁾はねじマイクロメータを取付けた二つの壺を細いガラス管で結んだ簡単で取扱容易な水管傾斜計を考案し、筑波観測所に横坑を掘って、これとシリカ傾斜計との比較観測を長期間に亘り行なった。その結果、坑道内の観測が従来の建物や半地下式の場所に比べて著るしく安定であることが判明し、また水管傾斜計はシリカ斜傾計より一層安定で実用性の高いことが実証された。このようにして地震観測所に比すべき地殻変動観測所の構想が次第に実っていった。当時太平洋戦争が終って間もない頃で、萩原らは軍が残した防空壕を利用して観測所を作った。油壺地殻変動観測所はその最初のものである。

萩原ら^{024,025)}は油壺において簡便な水晶管土地伸縮計を開発した。これと水管傾斜計、シリカ傾斜計の三種をもって観測計器の基本構成とし、潮汐荷重を利用して土地変形の弾性論的研究を行なった。この計器構成は現在も変わらない。観測所においては水管型と水平振子型の原理を異にする二種の傾斜計で観測を行なってきたが、それには理由がある。前者は長期安定性が期待される反面、手動読取のため連続記録が容易でない。この点後者は自記記録式という長所があるからである。20—25mの水管傾斜計と周期30秒程度の水平振子型傾斜計は感度や分解能に関してほぼ同格と考えられるが、両者の観測結果は一致しないことが多い。このことは萩原⁰²⁶⁾が指摘しているように水平振子の方が基線長が短かく、土地の局部的擾乱に左右され易いためである。従って大局的な地殻変動を対象とする場合は水管傾斜計の方が優れていることになる。

各観測所においては、絶え間ない水管傾斜計の読取観測が続けられ、観測事実の発見と計器の性能向上のための努力が払われてきた。その間、南海、福井、今市、新潟などの歴史的地震に遭遇し出張観測の機会にも恵まれたが、大きな成果を挙げることが出来なかった。水管傾斜計の価値が広く認められたのは1965年に始まる松代地震の時であって、その間実に20年余の歳月を閲した。このように水管傾斜計は手動読取に関する限りほぼ完成された感があるが、一方変動の進行状況を時間的に密に観測するためには自動化がますます要望されるようになってきた。

油壺観測所開設の当初既にその試みはあったが成功しなかった。20年後の今日、エレクトロニクス技術の進歩によりようやく成功の見通しがついた。

本論文の要旨

筆者は観測所の建設、それに伴う計器の設計、製作、据付の作業に従事し、観測業務を担当するなど長年水管傾斜計と共に歩んできた。本論文においてはこの間に得られた資料に基づいて水管傾斜計による地殻変動観測を総合的に展望してみたいと思う。地殻変動を論ずるに当っては傾斜量とともに伸縮量も併わせて考察すべきことは言うまでもないが、とり敢えずここでは目的を現用の水管傾斜計に限定し、その地殻変動に対する能力について考究することにしたい。本論文の構成は概ね次の通りである。

本文は5章よりなる。第1章は水管傾斜計の計器論である。観測精度ならびに計器の安定性の向上をはかるための水管傾斜計の改良に関する種々な試みについて述べる。計器自

体の改良，設置場所や施工上の問題点，そして観測誤差の諸要因に及ぶ。

第2章は地殻変動の連続観測にたずさわる者の長年の課題であり，特に最近問題となってきた計器の高感度化に伴う観測坑の安定化，そして省力化の要望，松代地震の苦しい体験からもその必要を渴望されていた水管傾斜計の遠隔記録装置のうち著者らの開発になる超音波方式について述べる。

第3章は水管傾斜計観測の経年変化を油壺，鋸山，松山の三観測所の場合について述べる。油壺と鋸山は東京湾を隔てて20kmの距離に相對している。松山は南海地震後の瀬戸内海沿岸の地盤沈下の監視が目的で，北東30kmにある高繩半島の水準測量と對比して観測が行なわれた。そこで，油壺・鋸山両者間でどの程度調和が得られるか，一般に観測所での観測が水準測量の結果を代表し得るか，検潮記録との関係の三点について考察を試みた。その結論として，水管傾斜計の記録するものは一体何かという問題になるが，広域変動と局地変動の和として考えることによって解決できるように思う。

第4章は水管傾斜計が地震活動の場においてどのような応答を示すかを松代群発地震の場合について述べる。気象庁地震観測所の観測坑内に40m水管傾斜計2成分を設置し地震活動の最盛期に約1年間観測を行なった。先ず規模IV，Vの主要地震のうち62個について筆者らが観測した地震の前後2日間の変動を紹介する。震源近傍における水管傾斜計の高密度観測は未だ類例がなく，その成果は地震予知の将来にひとつの希望の実例を提供したものである。次にそれらの地震に際してあらわれた急激な段違いの傾斜変動，テルトステップの規則性を論ずる。すなわちプレス・チネリーらが弾性転位理論より求めた横ずれ断層変位と比較対照してみた。先ず方向について比較し，大きさについては逆に観測値を得るためには震源においてどのくらいの変位が期待されるかを求めた。さらに地震観測の結果と相俟って断層の大きさを推定し，地震のモーメントを求めた。その結果を地震波動より求めた多くの人達の結果に照して矛盾しなかった。

第5章は水管傾斜計の諸分野への応用を述べる。土木工学方面では，ダムサイトにおいて着岩面付近の岩盤が巨大な湛水荷重を受けた際の挙動をダムの安全管理の上から監視した佐久間，黒部の筆者が関係した二例について簡単に述べる。火山学における応用例として，ハワイのキラウエア・カルデラにおける観測がある。

なお本論文は，本文と付録の二部からなっている。付録には本文と分離して差支えない技術的事項，観測値の数表やそれに関連した図表などをまとめたものである。参考文献は本文の巻末に一括して掲げた。

第1章 水管傾斜計の計器論

1. 水管傾斜計の原理と構造

水管傾斜計の原理は極めて簡単である。第1.1図に示すように，水を満した距離の長い連通管で，土地の傾斜によって起るA，B両容器の水位の増減の差 $\{(A \sim A') - (B \sim B')\}$ と距離 L との比をもって傾斜があらわされる。水位を測るマイクロメータのねじはピッチ500マイクロで，それに取付けたダイヤルは円周を50等分してあるので，1目盛は10マイクロン，目測で1マイクロンまで読取ることができる。計器の要目は次の通りである。

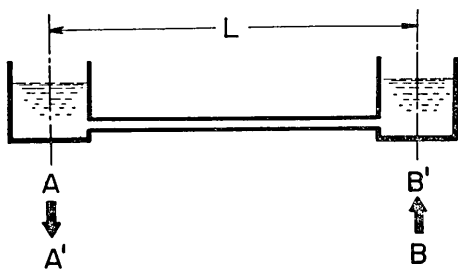


Fig. 1.1. Principle of a water-tube tiltmeter.

測定範囲	±5,000 ミクロン	
感 度		
距 離	$L=10\text{m}$ で	1 ミクロン=0.02秒角
	20	=0.01 "
	40	=0.005 "
精 度	1 ミクロン	

第1.2図はその構造を示すもので、(a)は筑波観測所に据えられた最初の型、(b)はF型と称する最新のものである。

萩原式の水筒傾斜計が計器として優れている点は構造が簡単で取扱容易なことであるが、さらに 1). 水面が全反射面となるよう斜め下から覗き針先と水面に映るその虚像との合致点を求めるので検出が正確に行なわれる。2). 空気管により気圧や風の影響を防止できる。3). 読取ダイヤルの自重によりマイクロメータねじのバックラッシュを除去できることなど極めて合理的によくできている計器である。

2. 水筒傾斜計の特殊型式

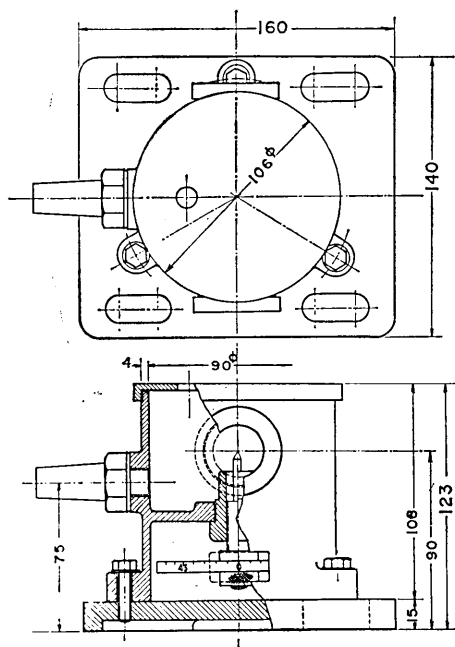


Fig. 1.2. Various models of the water vessel. (a). Proto-type (Tsukuba type).

第1.2図(a)から(b)に移り変わる約20年間に数回のモデル・チェンジが行なわれた。大部分は形態の単純化によって製作費の節減をはかろうとする終戦後の時勢即応のあらわれであった。そのうち特に印象深い試みが二三あった。それらについて簡単に述べる。

a. 簡易型

第1.2図(c)は原型を簡単化し出張観測に適するようにしたものである。1946年の南海地震に際し、筆者ら¹⁰⁾はこれを室戸国民学校の校庭の電柱に取付け約半年間観測を行なった。電柱の方向はほぼ南北で間隔は27.6mであった。この簡易型でも1秒角の読取精度を確保できその観測結果が室戸岬の水準測量の成果とよく対応できた。また南下りの傾動が南上りに逆転すると付近の余震活動が活発になるという興味ある事例を示した。ただ無風の日でないといよい結果が得られなかった。

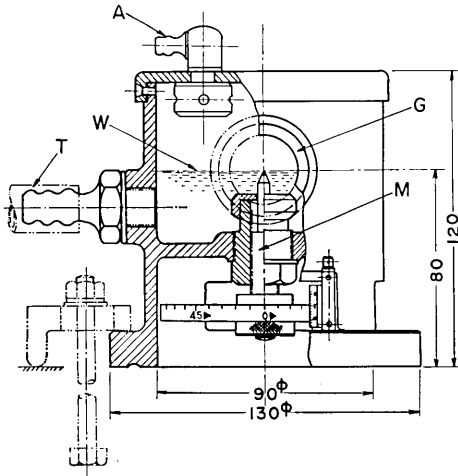


Fig. 1.2. (b). Improved type (model F).

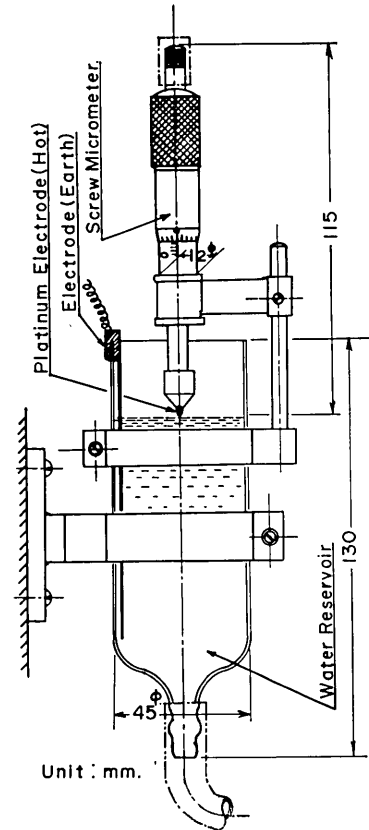


Fig. 1.2. (c). Handy-type, equipped with an electro contact point.

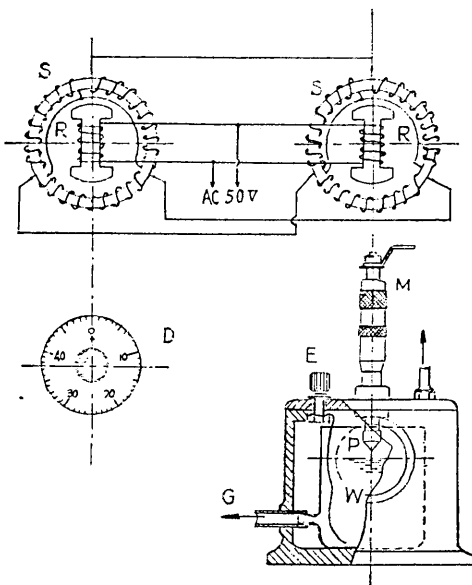


Fig. 1.3. The schematic view of the main part of the water-tube tiltmeter and the circuit for Selsyn motors.

P: platinum
E: electrode
M: micrometer.

マイクロメータの水面接触の検知はグローランプの明滅による。

b. 遠隔操作型

室戸における経験を一步進めて1947年油壺観測所の開設に際し、セルシン電動機による遠隔読取を試みた。¹⁰²⁾ 予備実験の結果に反し、約2年間の使用で針先の白金電極が電蝕で損耗していることが認められたため、廃止してしまった。このほか水の表面張力のために読取にばらつきの起る問題があった。それで再び筑波型に戻り改良を重ねて現用(F型)に至っている。

第1.3図はその概要図である。

c. 携帯型

小型の容器、読取顕微鏡、照明装置など一式を砲金製の台架に取付け移動観測に便利なように考案したものである。水管は鉛管やビニール管のような可撓性のものを使う。

測定場所にはコンクリート台を設け、その中心部にベンチマークを埋めておく。これに対して読取容器の真下、台架の底部には半球形の基準点が下向きに取付けてある。観測の際には3本のねじで台架の水平をとりつつ基準点をベンチマークに押当てる。次に右側の計器を左側に、左右位置を交換して同様の操作を行えば左右のベンチマークの高さの差を求めることができる。¹⁰³⁾ このようにして一組の計器を用意すれば多数個所のベンチマークの測定ができるという便利さはある。しかし固定式に比べて若干不安定であるのは止むを得ないが、ベンチマークと基準点との間の保護機構を考えなかったために、これを損



Fig. 1.4. A portable water-tube tiltmeter (test observation at Aburatsubo).

傷すると以後の観測が無効になる欠点があった。油壺において固定型と比較観測を行なった結果よい一致が得られた。第1.4図はその時の計器の写真である。

3. 読取精度ならびに計器の長期安定性

a. 光学系の問題

水管傾斜計の読取を容易にかつ正確に行なうためには読取顕微鏡の倍率を大きくしなけ

ればならない。しかし実用上の問題として対物レンズを読取容器の外側に置く限り普通の方式の顕微鏡では大きな拡大率を望むことは出来ない。せいぜい10倍が限度であろう。一般に倍率を増せば収差もそれに従って増加するから収差の対策を充分に行わないと、いわゆる「見え味」(definition)の悪い眼鏡となり却って使用に堪えないものとなる。第1.5図は筆者がそれらの点を考慮して改良した光学系で、球面の覗き窓と、球面収差と色収差

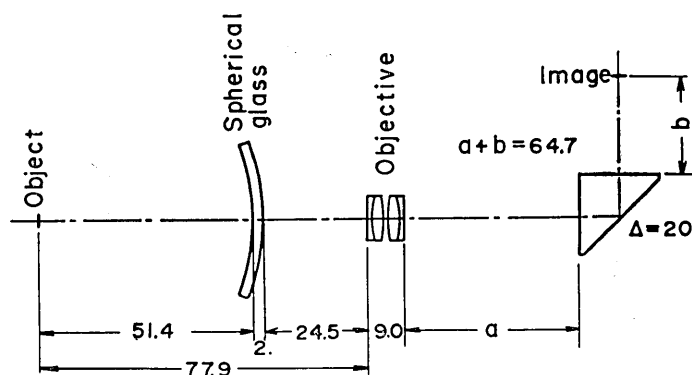


Fig. 1.5. An optical system of a water-tube tiltmeter.

を補正した対物レンズからなる。

その原理は付録1.1に述べてある。

一方針先の形状については鋭く研磨する方がよいとされていたが、むしろ小さい丸味をもたせた方が読み易いことがわかった。実際にやってみて尖った方が眼の疲労が大きく心理的にも不安で位置の判定が困難である。(第1.6図)

b. 容器の大きさと水管の太さ

読取を行なう場合、針先を水面から2~3目盛下げた位置にセットしておく、観測時間の5分前に入坑して針先をほぼ水面にもってゆく。これを「前セット」という。この5分間にマイクロメータねじから排除された水は左右平衡し、入坑による擾乱も静まってくる。容器の水位に差異を生じた場合、平衡に要する時間は水管の直径に最も大きく左右される。細い場合は過制動となり水の流出入が困難で、太い場合には水面が振動していずれも平衡状態に達するのに時間がかかる。長さ25~40mの水管傾斜計に対し経験的に公称 $1/8$ 吋(内径12.5mm)の硝子管が使われてきたが、これがもっとも適当のようである。いまこの硝子管を使った70mの水管傾斜計について試験した結果を述べてみたい。第1.7図において容器Aの水は水管を通して容器Bに移動する。そのときAの水位は平衡水位よりhだけ高いとする。ここで i) A, B両容器の断面形状は一樣で、大きさは相等しい。 ii) 水管中の流れは定常流であるとする。然るときは

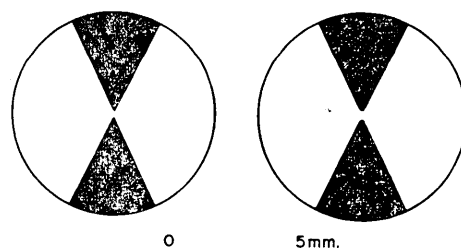


Fig. 1.6. Sharp and blunt points of micrometer heads, approaching the water surface from below (image in the microscope's field).

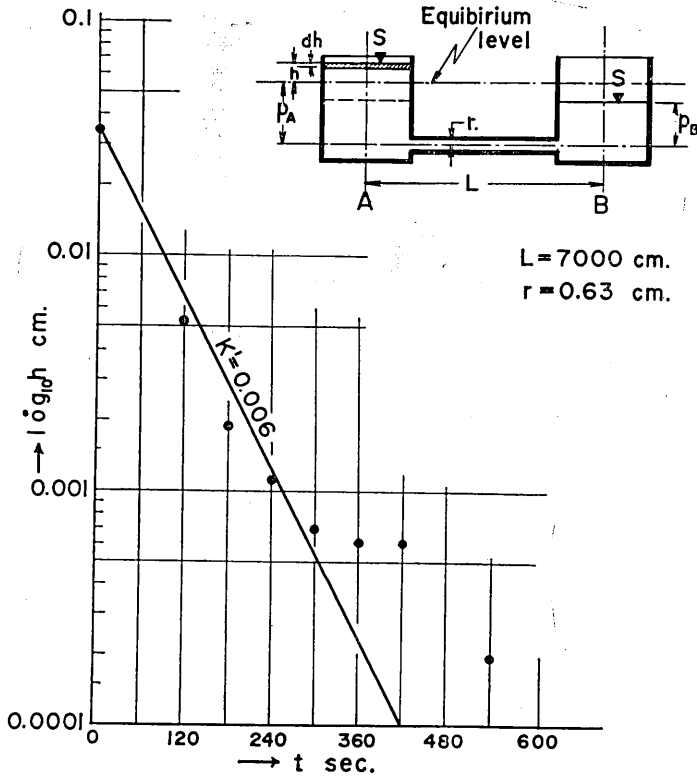


Fig. 1.7. Surge response of a water-tube tiltmeter. K' is an instrumental constant when the values of L , r and S are given, in the upper right figure.

$$-S dh = q dt \tag{1.1}$$

ここで q : 単位時間に水管を流れる流量

S : 容器の水の表面積

両容器の水頭 p_A , p_B の差を Δp とすると

$$\Delta p = p_A - p_B = 2\rho gh \tag{1.2}$$

ここで ρ : 水の密度 g : 重力の加速度 h : 水位差の半分

水理学によれば細管中を流れる流量は

$$q = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot r^4 \tag{1.3}$$

である。ここで

π : 円周率 η : 水の粘性係数

L : 水管の長さ r : 水管の半径

(1.2) を (1.3) に、さらにこれを (1.1) に代入すると

$$-S dh = \frac{\pi}{4\eta} \cdot \frac{\rho gh}{L} \cdot r^4 dt$$

$$\therefore \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = -K \quad (1.4)$$

但し
$$K = \frac{\pi \rho g r^4}{4\eta LS}$$

これを解くと水位変化は

$$h = h_0 \exp. (-Kt)$$

又は
$$\log_{10} h = \log_{10} h_0 - \log_{10} e \cdot Kt \quad (1.5)$$

となる。(1.5)における

$$\log_{10} e \cdot K \equiv K' \quad (1.6)$$

とおき、実際の数値を代入してみる。

$$\begin{aligned} \pi &= 3.14 & \rho &= 1.00 \text{ gr/cm}^3 \\ g &= 980 \text{ cm/sec}^2 & \eta &= 0.0114 \text{ poise (15}^\circ\text{C)} \\ r &= 0.63 \text{ cm} & r^4 &= 0.16 \text{ cm}^4 \\ L &= 7000 \text{ cm} \\ S &= \frac{\pi}{4} \cdot 12^2 = 113 \text{ cm} \end{aligned}$$

とすると

$$\begin{aligned} K' &= 0.4343 \times 0.0135 \\ &= 0.006 \text{ (C.G.S)} \end{aligned}$$

第1.7図のグラフの黒丸印は前述の水管傾斜計の一方の容器の水位を急激に340ミクロン上昇させてから徐々に減少してゆく様子を読取ったものである。(1.5)式はそのグラフでは勾配 K' の直線であらわされる。図は $K'=0.006$ のときの直線であるが、水位変化が急速に進行中はややばらつきが大きいけれども直線とよく一致している。5~6ミクロン以下の読取は1目盛以下の目分量のため誤差の大きいのは致し方ない。この図表は作業などで水位の擾乱があったとき、安定する待時間を求めるのに有効である。すなわち水位が1桁低下するに要する時間は約160秒、あるいは時定数 $1/e$, 37%になる時間は約70秒である。

江頭¹⁰⁴⁾ は桜島火山観測所において火山性の地殻変動観測のため光学記録式の自記水管傾斜計を製作したが、製作に当りその液面運動について詳細な理論的解析を行なった。それによると臨界制動状態を得るための水管の直径 dc は次の式で与えられる。

$$dc = 2 \left(\frac{\eta}{\rho} \right)^{1/3} \left\{ \frac{4LD_1^2 \cdot D_2^2}{g(D_1^2 + D_2^2)} \right\}^{1/6} \quad (1.7)$$

但し、 D_1 , D_2 は左右の容器の直径、その他の記号については(1.2), (1.3)式の場合と同じである。本式によってわれわれの観測している水管傾斜計の場合を当てはめてみると、

$L=70\text{m}$	Ogdensburg	における臨時観測	$dc=14.9\text{mm}$
40m	松代・北信・富士川		=13.7 "
30m	弥彦		=13.0 "
25m	鋸山・油壺		=12.7 "

である。すなわち $1/2$ 吋径の規格品の使用は適切である。(最近はミリ規格で各種揃う)

マイクロメータねじの直径は12mmで、容器の内径はそれの7～10倍である。(第1.2図参照、ほかに明石製作所製の120mmφのものを使っている)従って急激な水位変動の起らない平常の読取の場合には上述の事柄はあまり気にする必要はない。

c. 計器の長期安定性

水管傾斜計を地震学の目的に使用する場合、大い環境の悪い坑道内に長期間据え置かれることになる。そのため台石から測定機構に至るまで全般に亘り耐久性が要求される。容器は上質の青銅铸件で製作し、入念な加工が施される。組立を終ったものは10日間以上の漏水試験と器差検定を行ない、それに合格したものを出荷する。製作工程については付録1.2で述べる。

これまでの経験によれば、純水の汚濁や容器内面に水垢の付着する原因は低品質のガラス管やこれを連結するゴム管より析出する炭酸塩や有機物によるものであることが判明している。従って水管はパイレックス管をなるべく長くガス溶接によって接続することが望ましい。また配管はなるべく高低差を少なくすることが大切である。このほか臨時観測や観測員以外の人の立入る場所ではガラス管より鉄管、塩化ビニール管又は透明ビニールホースなどが適当の場合もある。不透明管を使用する場合、管内の汚れや気泡の排除に注意すべきは勿論である。読取容器の浮遊塵埃、管接続部の漏水、水管内の気泡は観測の三大害敵であるから平素の管理に際し排除に努力しなければならない。

4. 観測横坑

地震学の目的で水管傾斜計の観測を行なう場合、観測横坑を掘ってその中に計器を据える。その理由は外部の擾乱を遮断し安定で新鮮な岩盤を得るためである。観測坑の立地条件は観測の品質を左右する重大な問題である。地質や観測の条件を満足するとき、一方において土地所有権問題、建設資材運搬、電線路などの経済面、また観測員の労働、環境などの条件と相容れない場合がしばしば生ずる。観測坑の掘削と計器台石の据付は観測所建設の最重要作業とも云うべきもので綿密な地質調査と注意深い施工が必要である。観測横坑の形状は地震予知計画研究グループ¹⁰⁵⁾が今までの経験に基づいて作った規格がある。それによると坑道の断面は巾2m、高さ1.8m、準備坑道の長さ30m以上、そこには入口を含めて4個所の隔壁扉を設け、観測坑道を外気の擾乱から守る。観測坑は直角二等辺三角形で均質同一岩質内に掘られる。長さの方向には勾配はないが湧水のある場合は巾の方に勾配をもたせ側溝を設けて排水処理を充分にする。施工法は付録1.3、観測坑平面図は同1.5参照のこと。

5. 計器台石とその施工

観測坑の掘削が終ると次は計器台石の埋設に取かかる。これは将来観測の品質を左右する重要な作業である。台石の材料は花崗岩が最良であるが安山岩や応急の場合にはコンクリートでもよい。素材は均質無疵なものを選び研磨の上計器を取付けるための埋込ボルト用の孔をあけておく。据付の位置は観測員の通行は最小限に考えてなるべく坑道の中央にくるようにすべきである。坑道の長さは計器の長さに対してかなり余裕をみてあっても、たまたま台石を置く場所が岩質の悪い場合には全体をどちらかに寄せなければならない。そ

のときも新しい坑道の突当りの壁際は不安定であるから、できるだけ遠ざけた方がよい。台石はコンクリートをもって岩盤に十分に接着させなければならないが、如何にすれば最もよく接着ができるかを考慮の上、岩質に適した施工を行わなければならない。岩盤が堅硬で均質であればコンクリートは単に台石と岩盤を糊付する役目だけで十分である。従って埋設坑も小さくコンクリートも少量で足りる。岩盤が脆い場合にはコンクリートで周囲の岩盤を安定させながら台石を据えなければならない。埋設坑はその分だけ大きなものとなる。また岩盤が軟弱な場合には台石の荷重を「ならし」（通称捨コンクリート）によって分散させる施工を行わなければならない。その場合台石の底面積の数倍の面積の「ならし」を打設しなければならない。第1.8図A、BおよびCはそれぞれの岩質に応じた台石

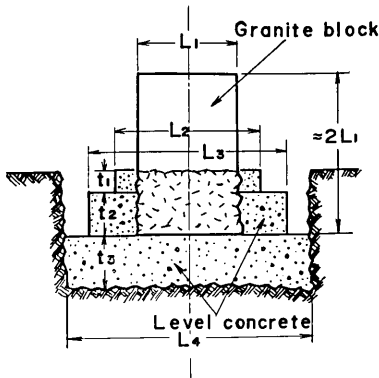


A. Nokogiriyama; homogeneous indurated
...Tertiary tuff.



B. Matsuyama; brittle...Cretaceous shale.

Fig. 1.8. Laying of the terminal pedestals.



L	L ²	L ² -L _i ²	t	V
L ₁ =1	1.	0	-	0
L ₂ =1.5	2.25	1.25	t ₁ =0.25L	0.3
L ₃ =2	4.	3	t ₂ =0.5L	1.5
L ₄ =2.5	6.25	(6.25)	t ₃ =0.5L	3.2
Total				5.0L ³

C. Hokushin; soft.....Tertiary tuff.
Fig. 1.8.

の向上のために努力してきた。雑音要素の主要なものは、海洋潮汐、気温、降水量、気圧、地下水などであるが、これらの挙動は地質や地形によって左右される。念入りに作られた読取式水管傾斜計に関する限りドリフトの問題は考えられない。(前項 3. C, 付録 1.2 参照) 1 日 1 回の読取值を扱う場合解析に若干注意が必要である。SN 比の向上は、ある要素は観測設備によって達せられるが、雑音要素の観測結果との相関または解析法によって除去の目的が達せられるものもある。以下誤差の諸要素について若干の説明を加えたいと思う。筆者の研究の場は油壺、鋸山、松山などの主として地震予知研究計画以前の旧式観測所であるが、それらの観測所から得られたデータを引用する必要がしばしば生ずる。そこ

の埋設例である。Aは鋸山観測所の均質で堅硬な凝灰岩の場合で、きれいな桁型に穴が掘れる。コンクリートは単に接着剤の役目をするだけである。Bは松山観測所の脆弱な頁岩の場合で風化部分を除去しても岩盤はサイコロ状に際限なく割れてくるので遂にこのような大きな穴になってしまった。Cは北信観測所の水を吸収すると急速に粘土化する軟弱な凝灰岩の例である。台石の底面積の6倍の穴を掘り、台石の体積の2.5~3倍のコンクリートをもって埋設すれば、岩盤にかかる台石の荷重を半減することができる。台石の寸法や加工に関しては付録 1.4 に記述しておいた。

6. 観測誤差の諸要因

地殻変動の観測は本来信号対雑音比の極めて低い観測である。求めようとする傾斜変動に数種類の雑音要素が加わるために観測誤差を生ずる。多くの人達が雑音の除去、SN比

Table 1.1. Constants of the water-tube tiltmeters at the four stations.

Name of observation station	Location	Component	Length	Sensitivity	Position of observation from entrance	Commencement of observation	Geological formation
Aburatsubo	$\phi = 35^{\circ} 09' N$ $\lambda = 139^{\circ} 37' E$ H= 3m	N81° W N22° E	10m 25	0.02 "/ μ 0.008"/ μ	10 m	Mar. 2, 1948	Sandston
Nokogiriyama	$\phi = 35^{\circ} 10' E$ $\lambda = 139^{\circ} 50' E$ H= 23m	N 3° E S87° E	25 "	0.008"/ μ "	20	Jan. 1, 1959	Tuff
Matsuyama	$\phi = 33^{\circ} 50' N$ $\lambda = 132^{\circ} 43' E$ H= 5m	N48° W N42° E	23.35 24.35	0.0086"/ μ 0.0082"/ μ	10	Sept. 1, 1949 (Mar. 1, 1959)	Shale
Matsushiro	$\phi = 36^{\circ} 32' N$ $\lambda = 138^{\circ} 12' E$ H= 440m	NS EW	40 "	0.005"/ μ "	200	Oct. 7, 1965	Shale and Porphyrite

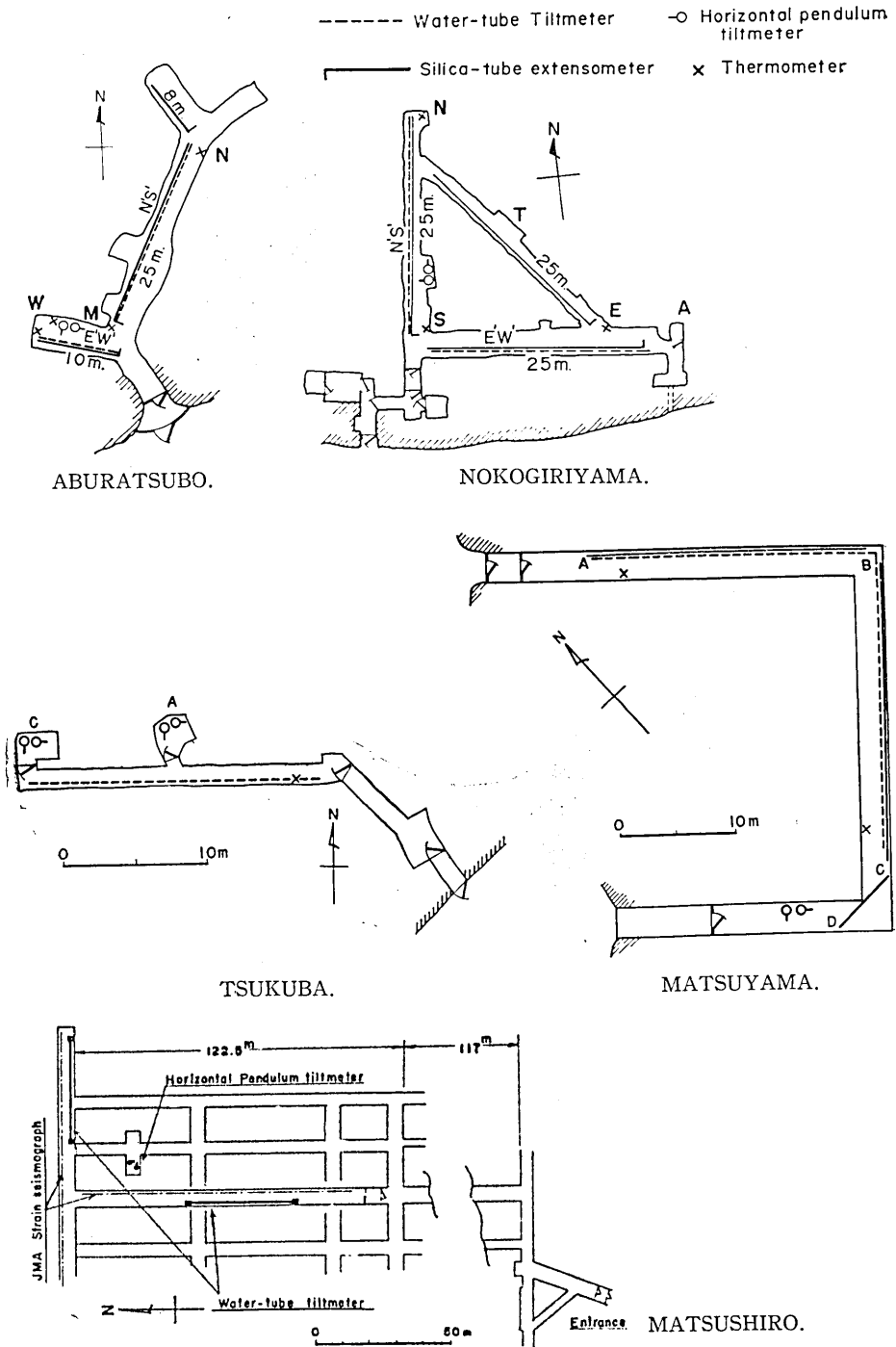


Fig. 1.9. Schematic plan of the vaults and their instrumentation.

で第 1.1 表に各観測所の水管傾斜計に関する計器の諸常数と、第 1.9 図には油壺、鋸山をはじめ本論文に引用される筑波、松山、松代などの各観測所の観測坑の平面図を示しておいた。

a. 海洋潮汐

海岸近くにある観測所においては潮汐の影響は極めて大きく、特に海岸線に直交する方向の成分は大きい。油壺の場合は観測坑の東僅か 50~60m のところに油壺湾があり、鋸山観測所は海岸から約 1 km 東に入ったところにある。第 3 章で述べるが、両観測所の長周期変動（第 3.3 図、第 3.5 図参照）をみるといずれも東西方向に近い成分（E'W' と呼んでいる）に潮汐の影響が顕著にあらわれているのがわかる。20年前の筆者ら¹⁰⁶⁾の研究によれば、油壺における潮位 1 m の上昇に対する傾斜変化は

N'S' (N22° E) 成分では S'下りに 0.04"

E'W' (N81° W) 成分では E'下りに 0.54"

これの合成成分では S64° E下りに 0.56"

となる。これは長周期変動（毎日午前 8 時の読取値の月平均値）とそれに対応する油壺験潮場の記録との相関から得たもので、傾斜変動記録を一定潮位の場合に補正する常数として現在も使われている値である。また 2 日間の短周期変動から求めたものは

N'S'成分 S'下り 0.04"

E'W'成分 E'下り 0.51"

合成すると S64° E下り 0.53"

となる。一方同じ坑内で同時観測を行なった石本式水平振子傾斜計では

S51° E下り 0.54"

高橋¹⁰⁷⁾ が以前に観測坑のすぐ近くで同じ計器で行なった結果では

S59° E下り 0.67"

以上いずれの場合も非常に近い値が得られている。油壺付近の朔望における潮位変化は 1.4m に及び、それに伴う東西成分の傾斜の日変化は 0.7" 以上に達することになる。これらの値は油壺における年平均の変動量を遙かに凌駕する量であり、従って日々の傾斜変動の記録はそのまま潮汐の記録であると云っても過言ではない。しかし、潮汐は天文学的の周期現象であるのでその影響の除去の操作は容易である。水管傾斜計は朝 1 回また朝夕

Table 1.2. Tidal constants at Aburatsubo.

Partial tide	H (cm)	K (deg)	period (hr)
K 1	22.9	180.1	23.9345
O 1	17.9	152.6	25.8193
M 2	35.2	160.9	12.4206
S 2	16.7	181.8	12.0000

(中野猿人: 潮汐学による)

2回の定時観測を続けてきた。つまり24時間周期の読取に対し潮周期は第1.2表に見る如くこれと僅かな時間の差異がある。そのため解析に際して、たとえば、 K_1 に対し37日、 M_2 には15日の如く見掛上の長周期変動のあらわれる恐れのあることに注意しなければならない。

b. 温度変化

温度変化は観測誤差のうち最も普遍的なものであるが、観測施設の設備次第で完全とまではゆかなくとも支障のない程度まで除去が可能である。

1935年、当時萩原¹⁰⁸⁾は筑波観測所において水平振子傾斜計が石造の建物の中に設置してあったのを観測横坑を掘ってその中に据えた。その結果、傾斜の日変化は坑口付近では建物の時の1/20、坑道の奥20mで岩盤の風化のないところでは入口の1/5、その後さらに10m奥に据えたが、坑道の奥深く進むほど外部擾乱が少なく安定な記録が得られた。奥の記録は入口のものを単に1/5に縮小したものでなく様相も異にしていると述べている。このことは単に温度の日変化の小さな場所に置いたことのみでなく、安定な岩盤に据えたことも大いに関係しているが、温度変化が如何に観測結果を大きく左右しているかを如実に示した一例であろう。

水管傾斜計に関して、温度誤差の原因は二つ考えられる。そのひとつは計器台石の高さの差である。油壺観測所の場合、観測坑は防空壕を利用したためN'S'成分の坑道はN'下りに勾配がついている。そのためN'の計器のコンクリート台はS'のそれより35cm高い。そのため温度の変化分に対するコンクリート台の膨脹の差が見掛の傾斜となってあらわれる。さきに潮位の補正常数を定めたときと同様、坑内温度変化との相関により定めた常数は、坑内温度の1°C上昇に対し傾斜変化は

$$N'S'(N22^\circ E) \text{ 成分では } S' \text{ 下りに } 0.06''$$

である。この値を観測値を一定温度の場合になおす補正值として使ってきたが、1955年10月入口を二重扉に改装したため、常数は0.098''に変わり現在に至っている。

もうひとつの原因は坑内の温度分布の季節的变化に伴う傾斜計の水の密度の変化である。坑道内は一般に入口から遠い程安定であるから、入口寄と奥とでは季節的に温度の反転が考えられる。その際に水管の水柱がある高さ以上の場合には密度差に原因する誤差があらわれる。それ故に水管の水頭は数cm程度に止まるよう配管に注意しているから今のところ問題はないように思う。

鋸山観測所も一部は軍の防空壕を利用したものであるが、油壺の経験に鑑み台石の高さが同一になるよう床面を水平にし、温度変化を一層少なくするために扉を入口共四重にした。そのうち一番奥には船舶用気密扉を使用し伸縮計換振器の気圧の影響を防いだ。

さて、油壺・鋸山両観測所の温度変化を小さくするための対策は以上の通りであるが、こうした設備に対してどの程度一定温度が期待できるであろうか。その観測結果の概要は次の通りである。なお、扉、温度計および諸計器の配置は第1.9図に示しておいた。

油壺における毎日午前8時の坑内温度の月平均値の20年間の大勢は第3章第3.3図(51頁)に示してある。1955年までの一重扉のときには年間の温度変化は約6°Cで、2月に最低、8月に最高温度になっている。この変化の型は外気温の場合と同様である。

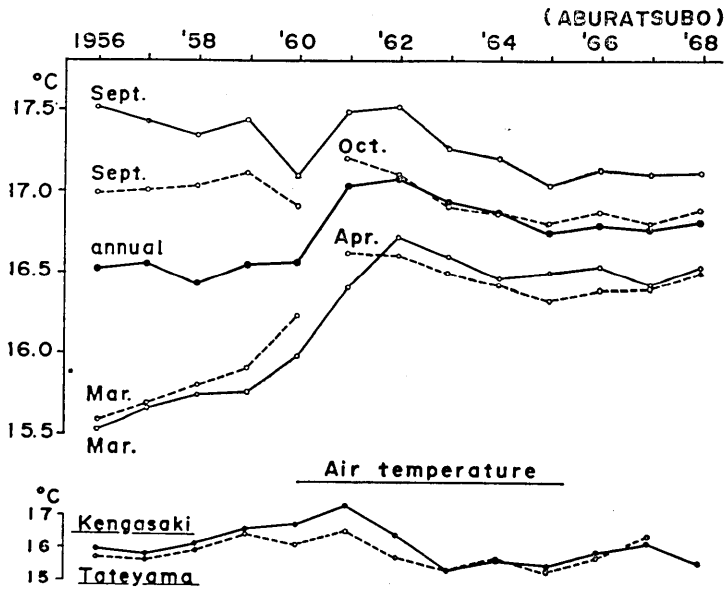


Fig. 1.10. Secular changes of temperature (Aburatsubo). Upper: the room (solid lines) and the rock surface (broken lines) temperature in the vault. Lower: atmospheric temperature at the adjacent weather stations (solid line: Kengasaki, broken line: Tateyama), after Annual Report of Climatological Stations Meteorological Observations for 1956, 1957,.....etc.

二重扉になってからの変化は第 1. 10図を見ることにする, 実線は坑内温度 S (N'S' 坑道の S' ところの温度計), 破線は地中温度 W (水平振子傾斜計の傍の地中温度計, 深さ20cm)をあらわす. 図では月平均の高極である 9月と低極の3月の年変化および年平均値の変化が描いてある. 地中温度計では温度変化の巾が小さくなった1961年以降は極が1カ月遅れ10月と4月になった. 二重扉にすることにより温度の変化巾は翌年には $\frac{1}{3}$ の 2°C となったが, 以後の効果は徐徐にしかあらわれない. ほぼ一定値である 0.6°C に落ち着くまで数年を要している. 地中温度の変化の傾向は坑内温度と全く同様であり, ただ振巾が約 $\frac{2}{3}$ である.

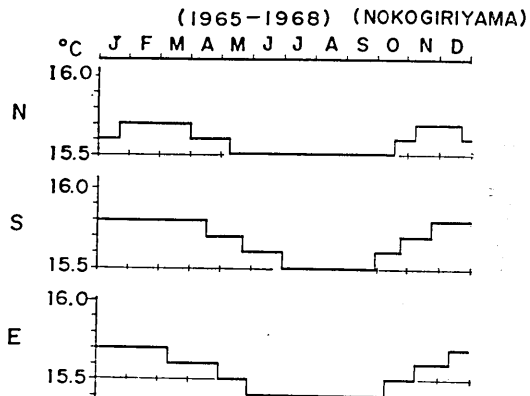


Fig. 1.11. Monthly mean values of temperature in the observational vault averaged for the period 1965-1968. (Nokogiriyama).

1960・1962年の区間の温度変化は, やや異常のように思う. 実は傾斜や験潮結果にも1960年を境に異常が見られるのであるが, それらについては第3章で述べることにする.

図の下欄には剣ヶ崎と館山の年平均気温が掲げている。前者は三浦半島、後者は房総半島の南端部に位置している。平常は三浦、房総地域一帯は一樣な温度の状態にあるが、海洋の異常によって両者間に温度差が生じたのであろう。

鋸山観測所の温度計は N, S, E の 3カ所に設置してある。(第 1.9 図) それらによって観測された年間の温度変化は $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ であるが、 0.1°C の読取精度の温度計では充分な観測結果は期待し難い。1965~1968 年の 4 年間の変動を平均してみると第 1.11 図のようになる。すなわち、夏季低温、冬季高温となり、外気温度とは逆位相になっている。鋸山の入口寄(S)に比べて奥の方(N)が温度変化が少なく低温の期間が長い。それ故に計器の両端において少なくとも 0.1°C の温度差の生ずる時期がある。坑内の年平均温度は外気温度の年平均値(第1.10図館山)に一致している。

最近観測計器の高感度化に伴ない、 0.1°C の温度変化もゆるがせに出来ない場合も生じている。さらに細かな坑内温度の状況を知る必要がある。地震研究所の坪川研究室において試作傾斜計 2 台の試験観測を坑内で行なっている。1 台は斜辺坑道(通称 NE)の中央の地震計台上(T)、他は EW 道坑の東端、非常脱出口に近い小室(A、いずれも第 1.9 図参照)に設置してある。各々の傾斜計の筐内にはサーミスタ温度計が取付けてあり、自記記録計に結んである。温度計の感度は記録紙上で 1 目盛 (=1.8mm) が 0.006°C 、全巾が

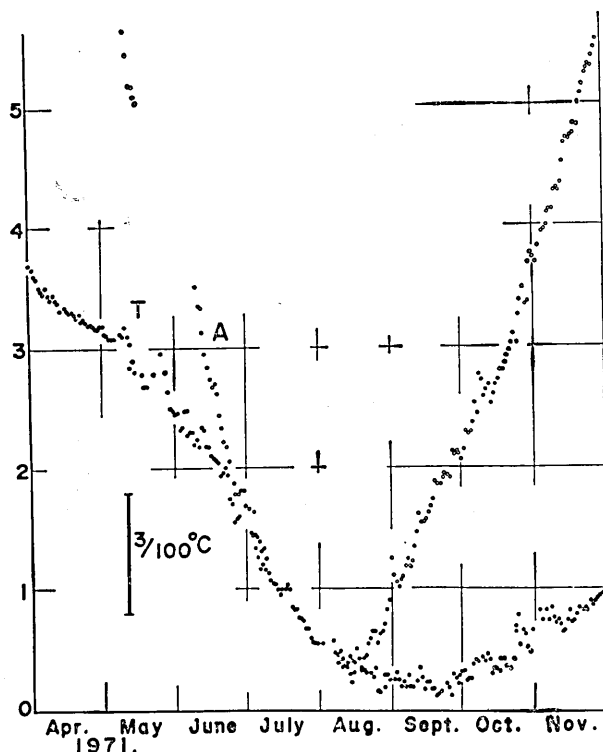


Fig. 1.12. Annual temperature changes in the vault at Nokogiriyama (Sites A and T are shown in Fig. 1.9). (data by Tsubokawa et al.)

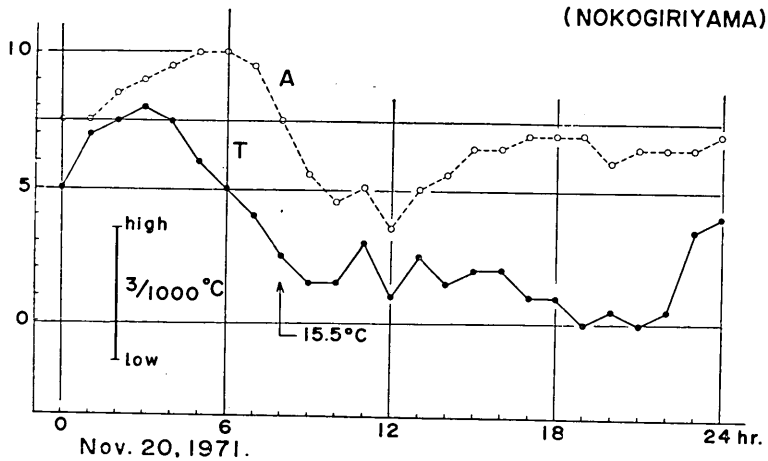


Fig. 1.13. Daily temperature changes in the vault (Sites A and T are shown in Fig.1.9). (data by Tsubokawa et al.)

100目盛のものである。それ自体坑内温度測定が目的ではなく、未だ充分な期間測定がなされていないが観測結果から坑内温度の挙動を推定することができる。第1.12図は1971年4月より11月までの毎日午前0時の温度を記録紙より読取ったものである。第1.11図を参照して年周変化を推定してみるとT地点では3月に高極、9月に低極、温度変化の振巾は 0.12°C 程度であろう。

また、A室では2月に高極、8月に低極、その振巾は 0.25°C を越ゆるものと推定される。第1.13図は日変化の一例として11月20日の変化を示した。その温度の日変化はT地点では 0.0048°C 、A室では 0.0039°C で、A室の変化はT地点の変化の $4/5$ である。T地点では昼夜共3時に山、9時に谷がみられるが、A室ではそれより3時間の遅れがある。なお、第1.12、1.13図とも縦目盛は絶対値が定まらないので、任意の数値である。以上の温度に関する結論として、年周期の温度変化の振巾は坑道の奥程小さい。特にA室のように非常脱出口に近く、山の「かぶり」も浅いところでは変化は大きいように思われる。しかし、日変化に対してはA室は扉があるためにT地点より小さい。つまり扉の温度遮蔽効果は短周期変動には有効であるが、長周期になるほど効果は減少する。坑内温度の年平均値は外気温のそれにほぼ一致する。

最後に「かぶり」の厚さの外気温の遮蔽効果を試算してみる。地表面が $A \sin \frac{2\pi}{T}t$ であらわされるような温度変化をなすとき地下 z の深さにおける温度 Θ は次式であらわされる。¹⁰⁹⁾

$$\Theta = Ae^{-hz} \sin \left(\frac{2\pi}{T}t - hz \right) \div az \quad (1.8)$$

但し、 $h = \sqrt{\frac{\pi}{\kappa T}}$

茲で、 Θ : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 z : 地表からの深さ (cm)
 t : 時間 (sec.)

κ : 熱拡散率 ($5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$)

A : 温度変化の振幅 ($^{\circ}\text{C}$)

T : 周期 (1年 = $3.15 \times 10^7 \text{ sec.}$)

a : 地温勾配

理科年表によれば、気温の月平均値の年変化は日本全土で大体 $20-25^{\circ}\text{C}$ である。許し得る坑内の温度変化を 0.1°C とすれば $\Theta/A \approx 1/200$ となる。いま熱を滲透だけとして、上記の数値を (1.8) 式に代入すと、

$$h = 1 / (2.2 \times 10^2)$$

$$\Theta/A = e^{-hz} \text{ より}$$

$$z = \frac{\log_{10} (A/\Theta)}{\log_{10} eh} \doteq \frac{\log_{10} (A/\Theta) \times 10^3}{2} \quad (1.9)$$

(1.9) 式において、 $\Theta/A = 1/200$ の場合 $z = 11.5\text{m}$ を得る。

c. 気圧変化

佐々¹¹⁰⁾ は気象変化が傾斜に及ぼす影響について実験を行なった1939年の論文の中で気圧についても論及している。同一型の水平振子傾斜計を別府市内の3カ所に据付けて低気圧変化の同時観測を行なった。その結果僅か数100mしか離れていないのに、気圧変化による傾斜変化量も方向も皆異なっている。傾斜に影響を及ぼすものは気圧傾度の変化である。影響の大小は地殻構造に支配されると述べている。

気圧傾度を知るには天気図の等圧線間隔より求めるのが一番簡単である。天気図を描く際に風速から気圧傾度を求めて等圧線を引く方法がしばしば用いられる。岡田武松¹¹¹⁾ はそのための簡単な実験式を作った。風速を V (m/sec.)、気圧傾度を G (mmHg/111km) とすると $G = 0.46 + 0.109V$ であらわされる。

ここで111kmは経線の 1° である。

われわれが日常体験するところでは、気圧は平地において940~1040mbの範囲で変動し、これを超えることは滅多にない。また観測誤差の原因となるほどの大きな気圧傾度を生ずる場合は低気圧である。年に数回来襲する大型旋風や台風の気圧変化は30~40mbで、影響を受け始めてから終るまで大体2日間である。第1.14図は鋸山における傾斜と気圧の相関を示したものであるが、1mb当りの傾斜変化は $0.002''$ である。長谷川ら¹¹²⁾ は台風が通過するとき地殻は負の荷重を受けて変形するが、地殻を半無限弾性体とし、台風のモデルとして円筒、円錐、正規型の三つの軸対称の場合について、垂直および水平方向の変位の計算を行なった。その結果、垂直成分については第1.15図の曲線であらわされる。①は円筒型、②は円錐型、③は正規型の台風モデルの場合である。縦軸は地表における変位で、台風の中心において1であるとし、横軸は台風の半径を1とした場合の中心からの距離を示している。第1.16図は台風の形の一例として1966年の4号台風が紀伊半島南方洋上にあるときの天気図の等圧線を東西に切ったときの断面形状と正規分布曲線とを比較したものである。円筒型や円錐型に比べて正規型が台風モデルとして、より適当であることが理解できよう。この場合の台風の半径は中心から気圧低下量 $p = P_0 e^{-1}$ (P_0 は中心における気

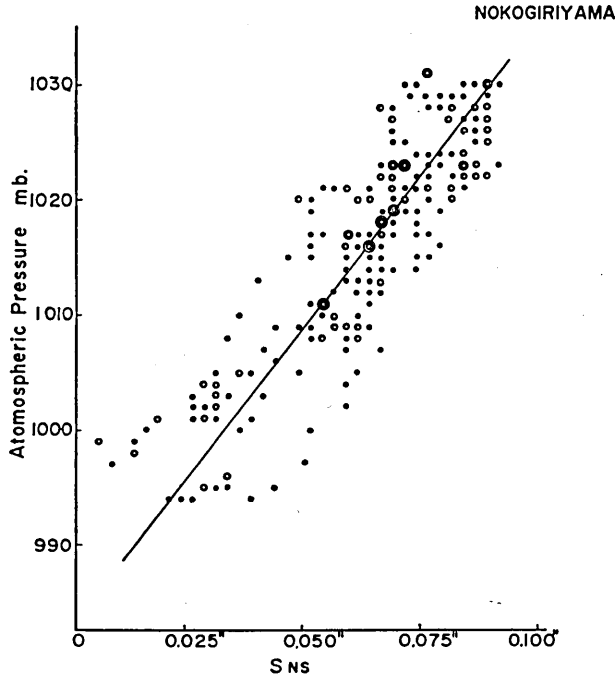


Fig. 1.14. Relation between atmospheric pressure and tilting of NS-component at Nokogiriyama.

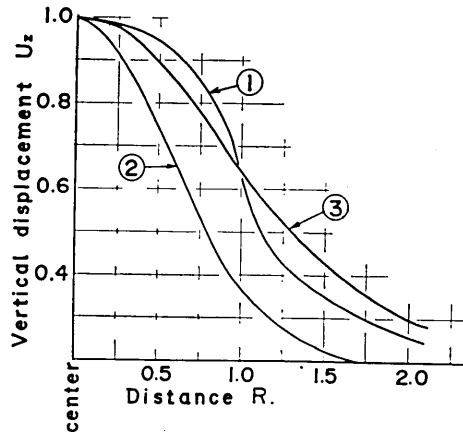


Fig. 1.15. Ground uplift versus radial distance in theoretical typhoon models. ①: cylinder model. ②: cone model. ③: normal distribution model. (after Y. Hasegawa et al.)

圧低下量) の地点までをとっている。

さて、台風の中における変位は各モデルの曲線と軸とで囲まれた部分の面積に等しいと述べている。大凡の見積として台風の半径 $R=200\text{km}$ 、中心気圧変化 $P_0=40\text{mb}$ として円筒モデルの中心での変位は、 $U_z=P_0R/G \cong 8\text{cm}$ (G は剛性率) が得られる。次に第 1.15

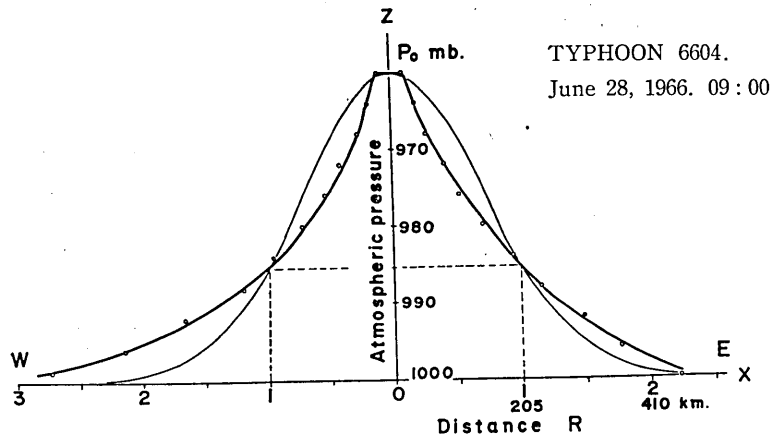


Fig. 1.16. Observed pressure distribution in a typhoon (thick line) which is approximated by an error function curve (thin line).

図の正規型について半径 ($R=1$) 付近の傾斜を求めると、 $U_z/R \approx 4 \times 10^{-7} \text{ rad.} = 0.08''$ を得る。この値は十分に観測可能である。図でわかるように正規型はかなり広範囲に傾斜が一様である特色があるが、第 1.14 図の鋸山における気圧と傾斜の関係に中心気圧変化 40 mb を乗ずると $0.002''/\text{mb} \times 40 \text{ mb} = 0.08''$ を得る。この値は理論的に求めた $0.08''$ とよく一致している。鋸山においては気圧の影響は南北成分に顕著に見られる。東西成分が顕著でないのは西半分が海であるためと思われる。

d. 降雨による影響

低気圧は降雨を伴うことが多く、その発生は散発的で、規模も不定である。低気圧は去っても降雨の影響は長く尾を引き、観測記録上の補正操作は甚だ困難である。降雨そのものが傾斜観測に及ぼす影響は問題にならないであろうが、降水が地下に滲透し地下水圧に変動を及ぼすと甚だ厄介なノイズとなる。萩原¹¹³⁾ はさきに述べた筑波における傾斜計の観測において、坑道の奥深く進むほど安定なよい結果が得られたが、降雨の影響は入口・奥共に大きく避けられなかったと述べている。そして連続 100 mm 以上の降雨に対して 2 週間以上もその影響が記録される。

幸にして筆者と関係の深い油壺、鋸山の観測所では降雨の影響は認められない。その理由は岩盤が均質で割目がなく、地山が低く、降水の流域面積も狭小であることによるものと思われる。

犬山地殻変動観測所において飯田¹¹⁴⁾ は、観測坑からの湧水量降雨量を高精度で日記録する装置を備え傾斜や伸縮との関係を綿密に調べた。その結果湧水量 Q は破碎帯からの流量 q と坑口付近の風化層からの流量 q' との和、 $Q=q+q'$ でらわされる。 q は $q_0 = 80 \text{ cc/sec.}$ までが平常量で、それを超え 120 cc/sec. までの $q-q_0$ が歪変化のパラメータとなる。 $q > 120 \text{ cc/sec.}$ においては歪変化は飽和し一定となる。第 1.17 図は湧水のモデルと $Q=q+q'$ の関係を図示したものある。志知ら¹¹⁵⁾ は一歩進めて、降雨量 P は地表に

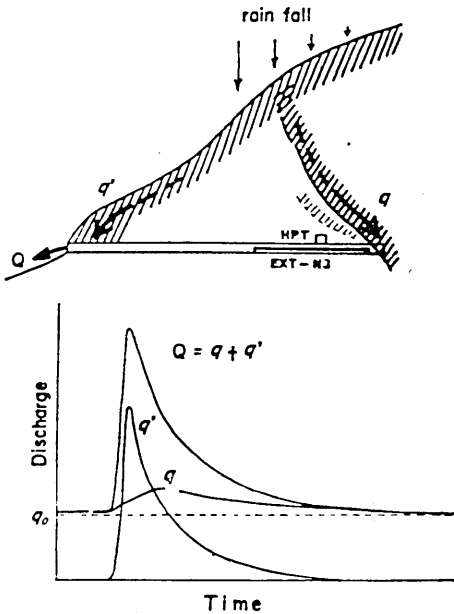


Fig. 1.17. Model to explain rain fall effect on strain and tilting. (after K. Iida et al.)

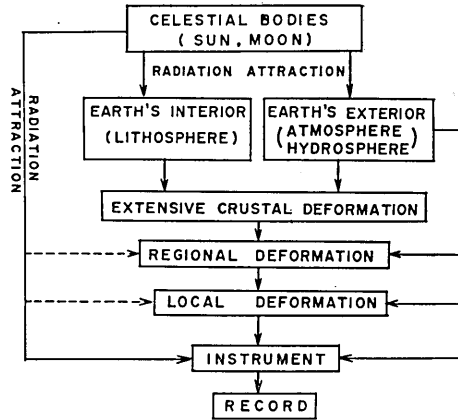


Fig.1.18. A schematic representation about ground deformations and their observations. (after T. Tanaka)

一旦吸収される分 W があるので、 $R=P-W$ がパルス型ノイズ源となる。従って、降雨のパターンだけでは歪のパターンはきまらないことを説明している。地盤内の流量は間隙水圧の圧力勾配 S に比例するというD'Arcyの法則に従う。故に q が定常に近いときには $q \propto \epsilon$ (ϵ は歪)であるから $\epsilon \propto S$ となり、変化は直線的である。降雨による急激な変化、すなわち S の変化より R の変化が急なときにはパルス型ノイズがあらわれる。そのとき $q = a/\sqrt{t} \cdot \exp.(-b/t)$ 、(a, b は定数、 t は時間)の形で定常に近づいてゆくから実測に一致するよう a, b を定めることができる。山内¹¹⁶⁾は以上の結果に基づいて湧水による歪 ϵ_q は $\epsilon_q = (2.60 \pm 0.01)q + (5.72 \pm 0.01) \log q'$ をもって犬山の補正式とし、降雨によるノイズを80%以上除去することができた。こように犬山における短周期変化は地下水の間隙水圧が主要原因で、 q の変化1cc/sec.は ϵ の 2.5×10^{-8} に相当すると述べている。

以上観測誤差の諸要因について述べたが、地殻変動の記録の中にはこれらの諸要因が複雑にかかり合っている。田中(寅)¹¹⁷⁾の地殻変動における潮汐および気象の影響に関する研究は、傾斜・伸縮、潮汐・気象要素のスペクトル構成を明らかにし、諸要素の単位当りの地殻変動“disturbing factor”を求めて外的要因の地殻変動を詳細に論じたものである。第1.18図は観測記録の成り立を示した図である。一般に地殻変動と言えば地球内部に起源をもつものを指すが、地殻変動の連続観測の日常記録の内容はむしろ、地球外部に起因する変動の占める割合の方が大きい。広域的な潮汐、気圧、地域的な地下水、局所的な温度などの人工的擾乱や計器誤差に至るまで種々な原因による変動が含まれている。故

に外部要因を明らかにすることによって内部起源の変動を知ることができる。

安定な岩盤に達するまでの長い準備坑道と四重扉の地震予知計画の標準坑道は、外的要因を遮断する最小限のものというべきであろう。

第2章 水管傾斜計の遠隔記録

1. 序 言

松代群発地震の際には、おもな地震の前後の傾斜変動を詳しく追跡するために水管傾斜計の読取観測を昼夜をわかつぎ行う必要があった。(付録4.1, 4.2参照) この作業自体非常な努力を要することであるが、その苦心にも拘わらず貴重な瞬間を逃がすことがしばしばあった。さらにまた強い地震動のもとに坑道内で観測することは気味の悪いものであるし、観測者にとっても相当の危険を覚悟しなければならない。

水管傾斜計の遠隔記録あるいは自動化の必要性はこれらの諸点から明らかであるが、さらにこれが実現すれば観測所全般の精度向上に大きな効果が期待される。それは最近観測計器の感度が高められた結果として、坑内の状態の僅かなかく乱でも記録が乱されるようになり、観測員の入坑が傾斜計にも伸縮計にも無視できない影響を与えつつあるからである。このようなわけで水管傾斜計の遠隔記録化は地殻変動の連続観測に従事する者が皆渴望するところであり、また観測所の自動化や省力化につながるこの装置の開発は地殻変動観測上最重要課題のひとつといっても過言でない。自記方式について種種な試みがこれまで行なわれてきたが、ここでは筆者らの開発になる超音波方式について述べる。

この研究に着手したのは松代地震の最中で、第1回の試作品が完成したのは1967年10月であった。以降4年間に3回試作と改良を重ねた。最初の試作品は鋸山観測所に、2回目のものは北信観測所に据えて読取式と比較観測を行なったので、それぞれ鋸山型、北信型と呼ぶことにする。3回目のものは目下製作中であるが、いずれ富士川観測所に据える予定であるので、これを富士川型と呼ぶことにする。以下各型について体験した問題点と改良の経緯について概略を述べる。問題の大部分は受感部と称する水位・周波数変換部で起ったのであるが、他は若干の電気回路の改善に過ぎない。問題のひとつは圧電素子の絶縁低下で、他は容器内の音波の残響に原因する電気信号のSN比改善の問題である。

2. 超音波式水管傾斜計の原理

本計器の原理は超音波信号を容器の底部より水面に向けて発射し、その反射波を捕え、反射波による受信電圧を引金にして再び超音波信号を発射することを多数回繰返す、いわゆるシング・アラウンド方式であって、水位の微小変化を繰返し周波数の変化として読取する方法である。Sing-around 回路²⁰⁾ はアメリカのベル電話研究所の特許で、当初航空航法の目的で考案されたものであるが、後に固体の微小な音速の変化の測定や、音速変化から温度の微小変化を検出することなどに利用されるようになった。

さて第2.1図において

h_a , h_b を水管傾斜計の容器A, Bの換振器から水面までの距離, c を水中における音波の伝播速度とすると, h_a , h_b の距離を音波信号が1秒間に往復する回数 f_a , f_b は

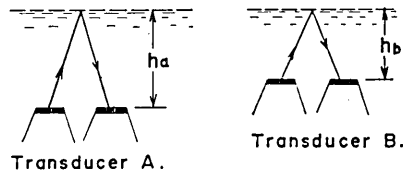


Fig.2.1. Principle of an ultrasonic water-tube tiltmeter.

$$f_a = \frac{c}{2h_a}, \quad f_b = \frac{c}{2h_b} \quad (2.1)$$

水位差 Δh は $h_a \geq h_b$ によって

$$\Delta h = h_a - h_b = \frac{c}{2} \left(\frac{1}{f_a} - \frac{1}{f_b} \right) \quad (2.2)$$

$$= \frac{c}{2f_a f_b} (f_b - f_a) \quad (2.3)$$

または、信号が1往復する時間 t_a, t_b をとれば (2.2) は

$$\Delta h = \frac{c}{2} (t_a - t_b) \quad (2.4)$$

すなわち、水位差は両容器の超音波信号が一定時間に繰返される回数の差、または1往復の時間差をもってあらわされる。鋸山型、北信型は前者、富士川型は後者の方式をとっている。いま

$f_a \doteq f_b \doteq f$ とおくと (2.3) は

$$\Delta h \doteq -\frac{c}{2f^2} (f_b - f_a) \quad (2.5)$$

本計器の設計を行なうに当り、たとえば

$$\left. \begin{aligned} f_a \sim f_b &= 1 \text{ カウント/秒} \\ \Delta h &= 0.1 \text{ ミクロン} \\ c &= 1500 \text{ m/秒} \end{aligned} \right\} \text{とすると}$$

(2.5) より $f = 86.6 \text{ kHz}$ (キロカウント/秒) となり、従って (2.1) より $h = 8.7 \text{ mm}$ となる。

同様にして $\Delta h = 1 \text{ ミクロン}$ とすれば

$$f = 27.4 \text{ kHz}$$

$$h = 28 \text{ mm}$$

となる。

3. 計器の構成

第 2.2 図は計器の構成図である。互いに独立なシング・アラウンド回路により A, B 両

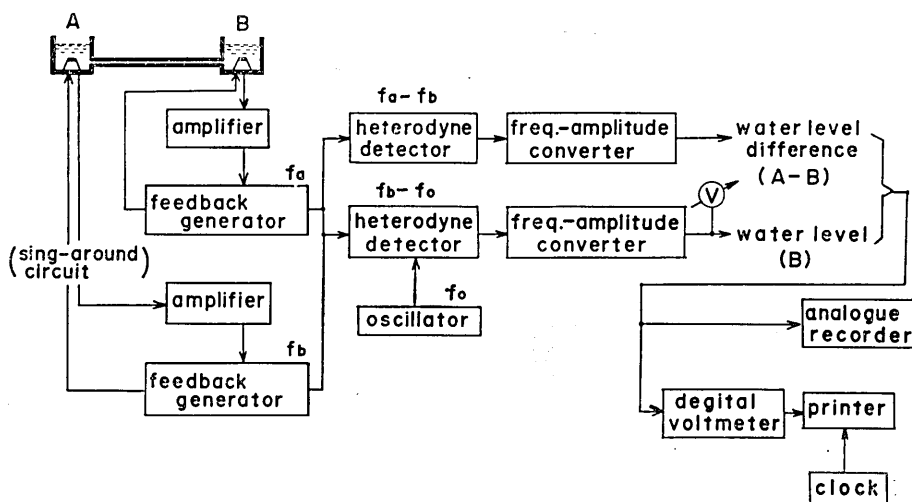


Fig. 2.2. Block diagram of an ultrasonic water-tube tiltmeter. (Nokogirigama type)

容器から得られた繰返し信号 f_a , f_b は唸り周波数検出器により $f_a \sim f_b$ を作る. 同様にして固定周波数発振器 f_0 と f_b との唸り周波数 $f_0 \sim f_b$ を作る. すなわち, 前者はAとBとの水位差であり, 後者はB容器の水位に比例したものをあらわす. いま読取感度を1カウント=0.1 ミクロンに相当するように選んだ場合, $\Delta h = h_a \sim h_b = 500$ ミクロンに対する繰返し周波数の変化は $\Delta f = f_a \sim f_b = 5\text{kHz}$ (キロカウント/秒) となる. この出力は直ちにデジタル測定器にかけられるが, 特にアナログ記録にする必要があれば, 周波数振巾変換を行なう. この装置は一定振巾の交流電圧を加えた場合, 周波数に比例した出力電圧 (本計器の場合 6dB/octave) が得られる一種の増巾器である. これを直流電圧になおしてアナログ記録計に描かせる. 本計器ではこのアナログ電圧をデジタル電圧計に表示 (ゲート1秒, 10秒) させ刻々の変化をアナログ・デジタル両面より知ることができるが, さらに30分毎にこの数値をラインプリンタに印刷する. 印字形式は時刻 (時分), 水位 (NS, EW) それぞれ4桁の数字をもって表示する.

4. 計器の誤差

本計器は測定範囲として基準水位に対して ± 250 ミクロンの水位変動が許される. 水位変化が微小なうちは問題ないが, ある程度大きな変化になると, 変換の非線性による誤差が記録に含まれてくる. すなわち, 水位が上記の許容範囲いっぱいに変化した場合を考えると, 基準水位28mmに対して

$$\frac{0.25}{28 \pm 0.25} = 0.0088 \text{ または } 0.0090$$

基準水位 8.7mm のときには

$$\frac{0.25}{8.7 \pm 0.25} = 0.028 \text{ または } 0.030$$

となり前者は約 0.9%，後者は約 3% の誤差を生ずる，すなわち後者では 1 カウントが 0.103 または 0.097 ミクロンに相当することになる。

別の誤差の原因として温度効果があげられる。いま A, B 両端に温度差があるとすれば (2.1) より

$$\Delta f = f_a \sim f_b = \frac{C_a}{2h_a} \sim \frac{C_b}{2h_b} \quad (2.4)$$

ここで C_a, C_b は A, B の換振器における音速, h_a, h_b には変化がない状態とする。第 2.3 図は音速対温度の曲線であるが, 15°C 前後においては

$$\Delta C = C_a \sim C_b = 4 \text{ m/sec/}^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

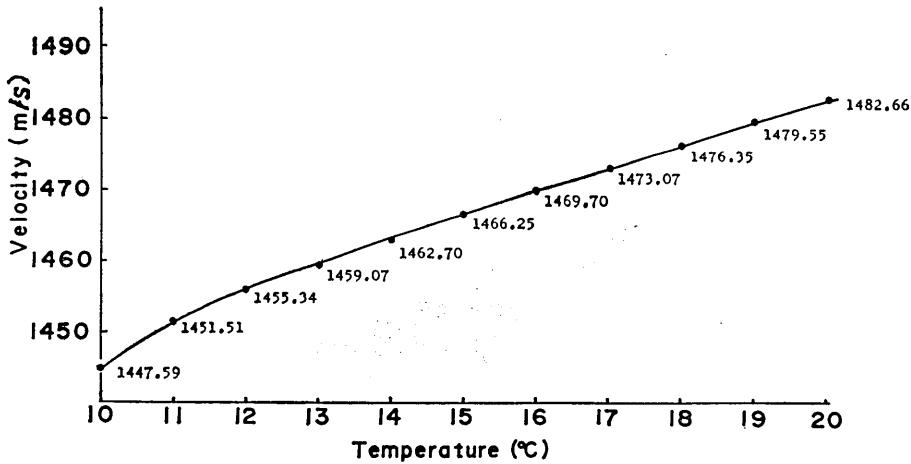


Fig. 2.3. Sound velocity versus water temperature.

である。仮に A, B 両地点の温度差が 0.1°C あったとすると, 感度 1 カウント = 0.1 ミクロンの場合 $40 \text{ cm/sec.} / 0.87 \text{ cm} \times 2 = 23 \text{ カウント/秒}$, 1 カウント = 1 ミクロンの場合 $40 \text{ cm/sec.} / 2.7 \text{ cm} \times 2 = 7.5 \text{ カウント/秒}$ の差異を生ずる。これは前者では 2.3 ミクロン, 後者では 7.5 ミクロンの見掛けの傾斜変化となる。このことは季節変化などの影響で観測坑内の温度分布が一様にならず, しかもそれが季節によって変化するような場合に起り得ることで, 計器設置に当り注意すべきことである。(第 1 章 6 b. 温度変化の項参照, 17 頁)

5. 計器の要目

本章のはじめに鋸山, 北信, 富士川の三形式の試作を行なったことを述べた。以下三者の要目を比較のため掲げる。(次頁)

6. 計器の設計試作の経緯

各形式について製作の経緯と問題点を指摘し, 発展の過程をたどってみる。

項目	型	鋸山	北信	富士川
送受波器		送受兼用	送受独立	送受兼用
測定範囲		約0.5mm	"	"
測定精度		約0.1 μ	0.25 μ	1 μ
温度に対する安定度		約0.5%/0.1 $^{\circ}$ C	約1.5%/0.1 $^{\circ}$ C	"
発振子周波数		10MHz	10MHz	1MHz
繰返し周波数		86.6KHz	15 "	15 "
測定サンプリング		1, 10秒	1, 10秒	0.1秒
記録方式		チャート* プリンタ(30分, 60分・手働)		チャート*のみ
記録要素		水位差, 水位, 時間		水位差のみ
測定レンジ		10 μ , 100 μ , 500 μ	フルスケール	500 μ
受感部耐水圧		2kg/cm 2		(必要なし)
電源		A.C. 100V, 50~60Hz		

* YEW ERB. 12-30-123. (12打点 ± 5 mV) 使用

a. 鋸山型

鋸山型は第2・2図の構成をそのまま実現したようなものである。まず読取容器の形態

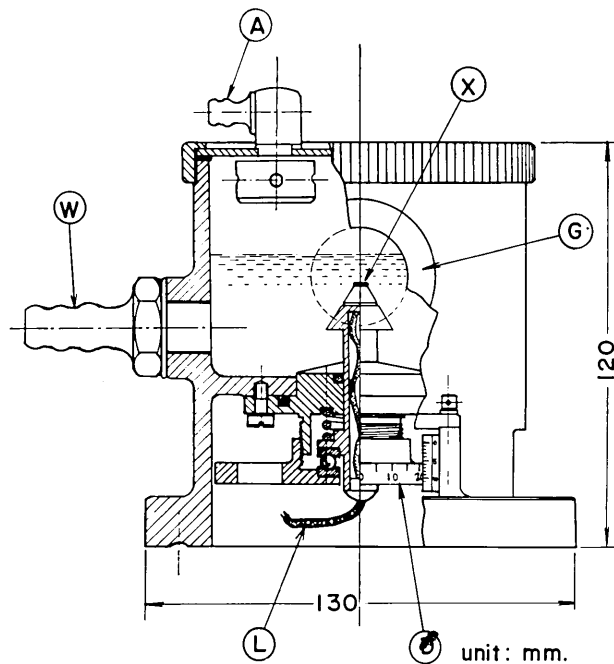


Fig.2.4. Cross-sectional view of a sensor. (Nokogiriyama type) X: piezo-electric element, L: lead wire, D: dial for vertical adjustment, G: glass window, W: water-tube, A: air shunt.

であるが、これは従来の水管傾斜計 F 型の容器 (第 1.2 図 (b)) を利用したため圧電素子はねじマイクロメータの先端に取付けられた形になっている。ただし、読取ダイヤルは圧電素子を回転させないで上下位置調整ができるようになっている。圧電素子の周辺や容器の底面は円錐形にして無用な反射波を散乱させるように配慮がしてある。出来上った計器はやや SN 比の低いものであったがよく動作したので、この方式に確信を持つことができた。しかしシングアラウンドの動作を安定させるためには、さらに SN 比の向上をはかることが必要であった。ここで使用した圧電素子はチタン酸バリウム磁器マイクロホン (BaTiO_3) と呼ばれるものであるが、出力および形状は最小のもので充分であるから孤立波型急峻なパルスを発射できるよう考慮し、直径 4 mm、10MHz という高い固有振動数のものを選んだ。

オシロスコープの観察によると、圧電素子を叩く励振パルスは波高 20 ボルト、巾 57×10^{-9} 秒の極めて急峻な波形であるのに対し、圧電素子の振動継続時間は 10^{-5} 秒である。これに対しシング・アラウンドの繰返しの周期は 1.15×10^{-5} 秒 (86.6kHz) で圧電素子の振動継続時間に近接している。実用上差支えないにしても、なるべく離れた方がよからう。それにはシング・アラウンド周期の方を長く選ぶほかない。圧電素子の周波数の高いことは計器の感度を高めることと相容れる一面、電子回路の調整が困難となる。

鋸山観測所における試験観測の結果は大體良好であったが、記録線が時々飛ぶ事故が起った。その量はほぼ一定で補正すれば差支えないものであったが、その原因が水面に浮遊する塵埃のためか電気回路かが問題になった。この点を明らかにするため固定反射板を水中に置いて調べてみた結果、塵埃も原因のひとつであるが、むしろ水面一底面間の多重反射波のために受信パルスが乱されトリガ時間に遅速を生ずることが原因であろうと結論された。ともあれこの計器の分解能は極めて優秀であり、読取式的水管傾斜計が 2~3 ミクロンの読取精度であるのに比べてはるかに高い精度で連続記録の得られることが実証され



Fig. 2.5. Comparison of an ultrasonic water-tube tiltmeter (right) with a manual reading water-tube tiltmeter (left).

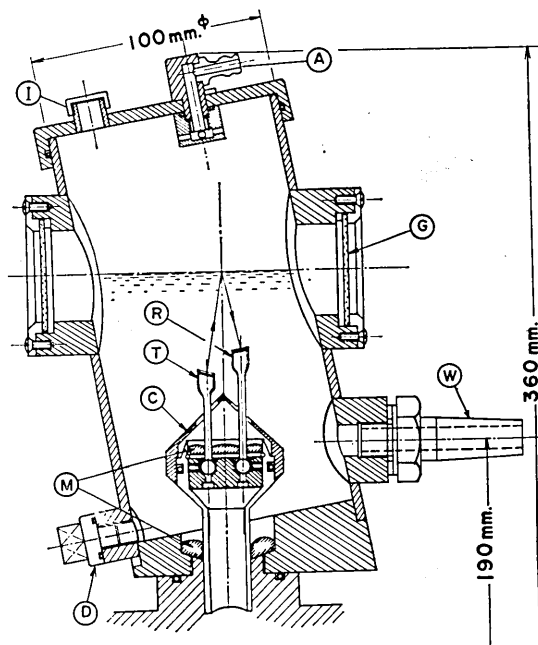


Fig. 2.6. Cross-sectional view of a senser. (Hokushin-type)
 T: transmitter, R: receiver, C: sealing, M: mercury,
 I: hole for pipette, D: drainage cock, G: glass window,
 A: air shunt, W: water-tube.

たのである。

b. 北信型

鋸山型で得た経験として、送波器と受波器が同一のものでは音波を水面に向けて垂直に発射しなければならないので、受信波は水面一底面間で多重反射し、その影響でSN比が低下してトリガ位置が不安定になりがちである。その対策として、(1) 送受波器を別々にし反射波の1回目に比べて2回目の振巾ができるだけ抑えられるような配置にする。(2) 容器内で反射波を散乱させ残響が小さくなるよう形状を非対称にする。(3) 圧電素子の振動継続時間に対しシング・アラウンドの周期を十分に離す。この三つの方法により解決を試みた。もつととも送受波器を別々にすると圧電素子のポリウレタン絶縁被膜に経年変化の差異を生じた場合、(厚みで数ミクロン変化するという)それが見掛の傾斜変化となって誤差を生ずる可能性がなくもないが、とりあえず今回はそれを無視して製作にかかることになった。第2.5図は台石に据え付けた状態で、第2.6図は容器および送受波器の部分の構造を示す。なお、上下の調節機構などは鋸山型と同様である。

容器の中心線は鉛直線に対し、約 10° 傾けてある。そのため超音波の発射方向に対しても非対称形になっているから、反射波は同じ個所を往復することなく乱反射し減衰する仕組になっている。また、送波器と受波器は図のように受波が強く受かるよう段違いになっている。基準水位に対して最良の受信状態を得るために、圧電素子の支持軸の基部を球軸承にして任意の方向に調節が可能にしてある。そのため基部は読取式の容器同様水銀溜りを設けて水漏を防いだ。従って容器は不銹鋼で製作することになり熔接加工部に対して不

銹鋼性能を回復させる不活性熱処理を施したのであるが、試験期間が長くなるにつれて若干の発銹は免れなかった。送受波の繰返し周波数については、圧電素子の振動持続時間との間隔を置いて動作の安定を期するため 61 kHz とした。この値は 1 カウントが 0.2 ミクロンの場合に当り、検出感度は鋸山型の半分である。その後さらに安定をはかるために繰返し周波数を約 15 kHz に改め、電氣的に 4 通倍し検出感度を 1 カウント 0.25 ミクロンとする方法をとった。

1968 年 10 月、この計器を北信観測所に据え観測を開始した。当初極めて順調であったが、約 2 カ月を経過した頃から記録紙上で雑音振巾が大きくなりだし遂には全く乱れてしまふ故障が起った。1 個を修理するとすぐまた次のものが故障するという状態を繰返した。故障の大部分は圧電素子の絶縁不良によるものであった。そこで送受波器の部分全部持帰り再検討することになった。製作者（沖電気工業(株)）の調査報告は次の如く述べている。（詳細は付録 2.1 参照）

故障の原因は圧電素子の絶縁が低下し、電気—音響相互の変換能率の低下による。絶縁不良の原因は圧電素子の金属軸とウレタン絶縁被膜の間から毛管現象により水が浸入した。湿気の充満している圧電素子の電極間に励振電圧が印加され火花放電を生じ送波側は劣化を早めた。対策としては、接着の強化、パラフィンの注入により防湿を完全にし、送波器の印加電圧を 10dB 下げ、受波器の増巾利得を 10dB 増加した。

以上の対策を行なったにも拘わらず、その効果は殆んど認められなかった。製作者が言うように、絶縁低下の原因を水の浸入、電極間の火花放電とすることに否定の余地はない。防湿には充分な配慮をしてお北信型がこのように早く絶縁低下をきたすのは何故であろうか。経験によれば静的状態においては、水銀もパラフィンもポリウレタン被膜も、これらの材料と金属との接触面も水の通過を阻止するには充分であった。実際には水はいずれかの部分を通過し圧電素子に到達している。筆者はこれを揺変性 (Thixotropy)²⁰²⁾ の現象と説明するほかないと考えている。

北信型の改良の要点は以上の如くで、電氣的性能では一応成功としながらも絶縁低下すなわち耐久性不良の問題が決定的な短所であるため再考せざるを得なくなった。このほか観測坑と庁舎との間約 650m をケーブル伝送回路によって信号の伝達を行なったが、方式等については富士川型の項で述べる。

c. 富士川型

鋸山、北信の両方式は音源が水中にあるために残響が大きく SN 比も充分に得られないのはある程度止むを得ない。また圧電素子が水の浸入を受けて使用不可能になることも体験済である。これを抜本的に解決するには圧電素子を容器の底板下面に取付ければよい。これにより常時乾燥状態で使用でき、水底を傾斜面にすれば多重反射を散乱出来るので、問題は一挙に解決できることになる。さらにまた圧電素子の背面が自由空間になるので良質な波形を媒質に伝達することが出来、容器は単に水を収納するだけであるから構造が簡単になるなどの長所も挙げることができる。しかし一方では圧電素子を金属の底面に取付けるには絶縁板を介さなければならないので、多層媒質中での地震波伝播の場合にも似た波動現象すなわち、波動の減衰や波形の複雑化の起きることも考慮しなければならない。

以上の如く、富士川型において音波の授受すなわち音響的設計に関しては根本的な考察が必要となり、その実験結果でも成功し充分実用化の見通しがついたので、その経緯については項を改めて述べることにする。

7. 富士川型の設計, 試作

a. 材料の選定

本器の設計に当り使用を考慮した材料およびその音響的性質を第2.2表に示す。但しここに掲げた縦波の音速は、固体の場合波長に比べて十分な大きさを有し、音速 c_1 は $c_1 = \sqrt{(K + \frac{4}{3}G)/\rho}$ (m/s) で規定されるものである。ここで K は体積弾性率、 G はずれ弾性率(剛性率)、 ρ は密度をあらわす。

Table 2.2. Densities, velocities and characteristic impedances of various materials. (after Rikantenpyo)

Materials	Density	Velocities		Characteristic impedance	
		Longitudinal	Shear	Long.	Shear
	kg/m ³	m/s	m/s	kg/m ² s	
Brass(70-30)	8.6	4,700	2,100	40.6	18.3
Iron	7.86	5,950	3,240	46.4	25.3
Ebonite	1.2	2,500	—	3.0	—
Plexiglas	1.2	2,680	1,320	3.2	1.58
Water(15°C)	1.0	1,466	—	1.46	—

理科年表では ρc を音響インピーダンスとしているが広義の音響インピーダンスは、 $Z_{ac} = \text{sound pressure}/\text{volume velocity}$ で定義される。²⁰³⁾ volume velocity は媒質粒子の速度に音圧域の断面積を乗じたものである。音響インピーダンスはまた種種に表現されるがそのひとつは

$$\left. \begin{aligned} Z_{ac} &= R + jx \\ R &= \rho c \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

のような複素量であらわされる。ここで R はエネルギーの分散に関与する成分、 jx は媒質の慣性や硬さに関係しエネルギー消費にあずからない無効成分である。 ρc を特性インピーダンス(特性音響インピーダンスと呼ぶべきであろう)と呼ぶ理由は、平面進行波の音場において任意点で、音圧/粒子速度が一定で ρc に等しいことから、音圧を電圧、粒子速度を電流に対応させると、 ρc は無歪電送線路の特性インピーダンスと呼ばれるものに対応するからである。

b. 境界面への音波の垂直入射^{204), 205)}.

ρc の異なる二つの媒質が無限に広い平面で接しているとき、第1の媒質 ($Z_1 = \rho_1 c_1$) から第2の媒質 ($Z_2 = \rho_2 c_2$) に垂直に入射する場合の音圧の反射率と透過率は次式であらわ

される。

$$\text{音圧の反射率} \quad r_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.7)$$

$$\text{音圧の透過率} \quad t_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.8)$$

ここで P_i , P_r および P_t はそれぞれ入射, 反射および透過の音圧である。同様に音波の強さに対して

$$\text{強さの反射率} \quad r_i = r_p^2 \quad (2.9)$$

$$\text{強さの透過率} \quad t_i = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.10)$$

である。以上の関係式は特性インピーダンスが Z_1 , Z_2 である半無限長の伝送線路の接合点における電圧・電力の反射率と透過率の式と同形である。ここで音波の強さとは音の伝播方向における単位面積を流れるエネルギーの平均的な割合を言い、強さ I は

$$I = c\bar{\epsilon} \quad (2.11)$$

の基本式であらわされる。ここで c は音速 $\bar{\epsilon}$ は空間または時間的平均エネルギー密度である。エネルギー密度を音圧の最大値 P であらわすと

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} \quad (2.12)$$

となり音の強さと圧力の関係が得られる。音波の反射率・透過率を言う場合、強さを指すのが一般であるが、実際の測定では音圧に比例した電圧を測ることが多いので、強さ・

Table 2.3 Reflection (r) and transmission (t) coefficients at an inner boundary. Suffixes p and i denotes the pressure amplitude and intensity of sound, respectively.

Medium	r_p	t_p	r_i	t_i
Water — iron	0.94	1.94	0.88	0.12
Iron — water	-0.94	0.061		
Water — plexiglas	0.36	1.37	0.13	0.87
Plexiglas — water	-0.36	0.64		

音圧両方について知っておく方が便利である。一例として、水と鉄、水とプレキシガラスの場合の反射率および透過率について第2.2表の数値を(2.7)~(2.10)式に当ててみると第2.3表の如くなる。すなわち、水から鉄への場合には透過音圧は94%増大するが逆の場合には6.1%に減衰してしまう。強さについては12%が透過し残りは反射する。その場合常に $r_i + t_i = 1$ である。第2.7図は音圧について同じ事柄を図によって説明したも

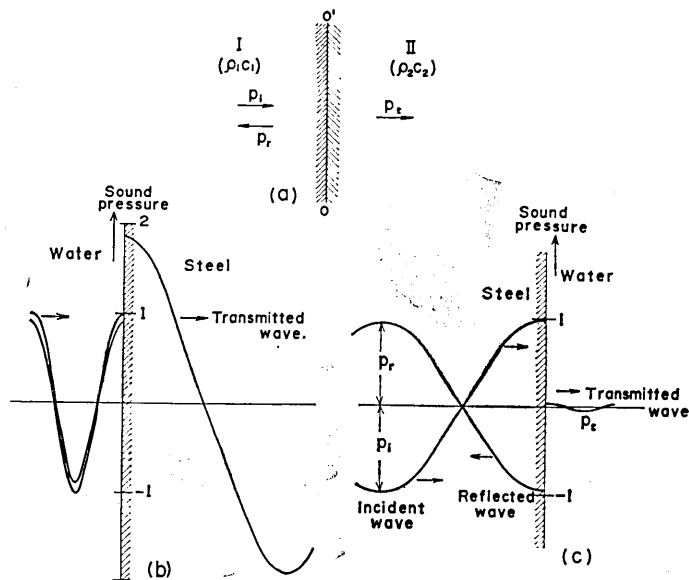


Fig. 2.7. Normal incidence of sound waves to a water-steel boundary (a). Pressure amplitude increases as the wave goes from water into steel as shown in (b). Wave that is transmitted from steel into water is considerably reduced (c). (after J.R. Frederick)

のである。(a) 図は第1媒質 $\rho_1 c_1$ と第2媒質 $\rho_2 c_2$ の境界面において音圧の一部は透過し、一部は反射する。(b) 図では $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$ のときには入射波と反射波は同位相で透過波の音圧は増大し、(c) 図では $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$ の場合にはすべてその反対になることを示している。

以上のことから水管傾斜計の容器を作る際に、鉄や真鍮の底板に圧電素子を取付ける方法で、仮に音波を媒質の境界面に垂直に入射する方法をとったのでは能率よく音波を往復させることが出来ない。

c. 境界面への音波の斜め入射^{206), 207)}

地震学において周知の如く、波動が媒質の境界に斜めに入射すると反射および屈折が行なわれるが、その際に縦波が横波に、横波が縦波に変換するいわゆる Mode Conversion の現象が起る。入射波に対してその反射や屈折は Snell の法則に従う。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin \theta_i}{c_1} &= \frac{\sin \theta_t}{c_2} \\ \theta_r &= \theta_i \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

ここで θ_i, c_1 は入射側の媒質における入射角と音速 (反射も含む), θ_t, c_2 は透過側のものである。 $c_2 > c_1$ なる場合には臨界角 θ_c が存在し、入射角が θ_c を越えると全反射する。 θ_c は (2.13) 式で $\theta_t = 90^\circ$ とすれば決められる。

$$\theta_c = \sin^{-1}(c_1/c_2) \tag{2.14}$$

斜め入射の場合の音波の強さの反射率および透過率は次式であらわされる。

$$r_i = \left(\frac{z_2 \cos \theta_i - z_1 \cos \theta_t}{z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t} \right)^2 \tag{2.15}$$

$$t_i = \frac{4 z_1 z_2 \cos^2 \theta_t}{(z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t)^2} \tag{2.16}$$

$$r_i + t_i \cos \theta_i / \cos \theta_t = 1 \tag{2.17}$$

第 2.8 図は第 1 媒質 (左上) の圧電素子から出た音波のビームが第 2 媒質 (右下) との境界に斜めに入射し、第 2 媒質で 100% 反射 (エネルギー損失なく) して再び第 1 媒質

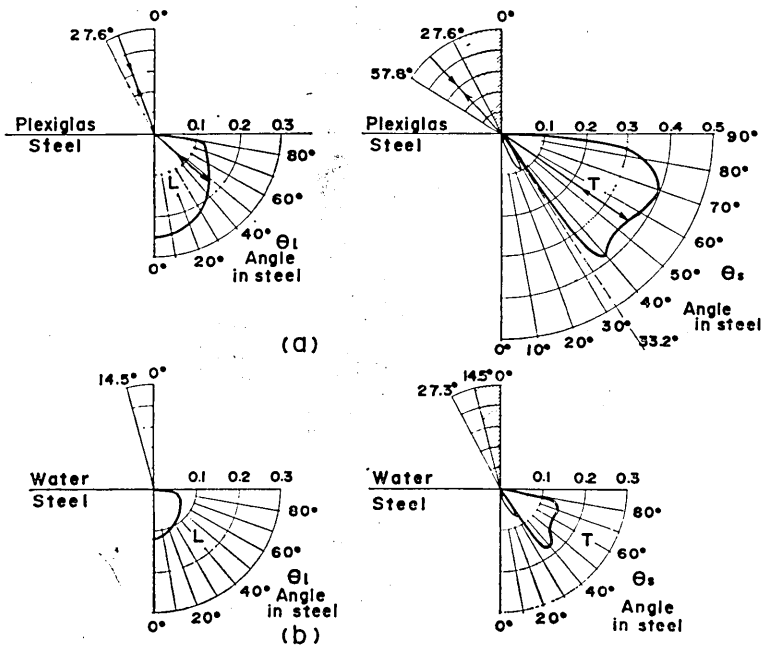


Fig. 2.8. Amplitude of the reflected sound signal at (a) plexiglas-steel and (b) water-steel interfaces. L longitudinal wave, T transverse wave. (after Krautkrämer)

の圧電素子に戻ったときの振幅減衰の様子を示した図である。(a) 図はプレキシガラスと鋼、(b) 図は水と鋼の場合である。(a) 図における 27.6°、57.8° はそれぞれ縦波、横波に対する臨界角である。従って 27.6° と 57.8° の間に入射した縦波は横波に変換される。帰りの途でも横波が縦波に変換されて元に戻る。(b) 図も同様に水と鋼の境界において 14.5° から 27.3° の間に入射した縦波は横波に変換され、帰りの途でも同様である。図でわかるように、縦波—縦波の場合よりも縦波—横波の方が安定で大きな利得が得られる。このことは縦波と横波の媒質の特性インピーダンス ρc を考えても明らかである。

われわれは第 2.8 図を参考にし、プレキシガラスをエボナイトにかえて実験用容器の試作をすすめた。

d. 容器の試作

(2.14) 式に第 2.2 表の数値を代入して臨界面角を求めると次のようになる。

$$\begin{array}{l} \text{エボナイト} \rightarrow \text{鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{縦波 } \theta_{11} = 24^\circ 50' \\ \text{横波 } \theta_{s1} = 50^\circ 20' \end{array} \right. \\ \text{鋼} \leftarrow \text{水} \left\{ \begin{array}{l} \text{縦波 } \theta_{12} = 14^\circ 20' \\ \text{横波 } \theta_{s2} = 27^\circ 00' \end{array} \right. \end{array}$$

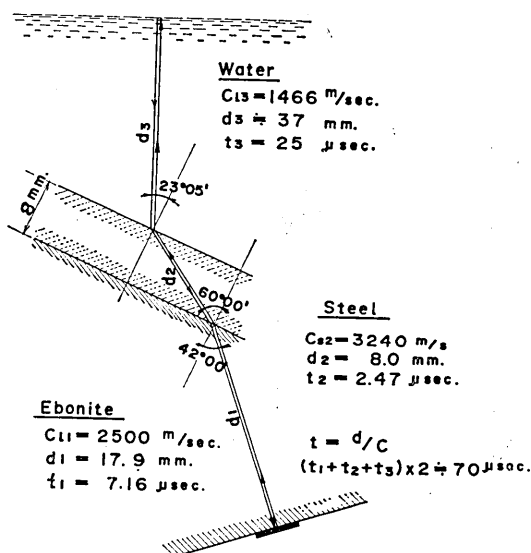


Fig. 2.9. Path of the sound signal that is designed for the Fujigawa-type sensor.

上の数値について、入射角を θ_{11} と θ_{s1} の中間にとれば、水面への屈折角は θ_{12} と θ_{s2} のほぼ中間に得られるであろう。そこで、入射角を 42° 、エボナイトの厚さ 17.9 mm 、鋼の厚さを 8 mm として (2.13) 式によって音波通路を求めると第 2.9 図の結果が得られる。

図には各媒質を通過する時間が求めているが、その総和は $34.6 \text{ } \mu\text{sec.}$ である。往復に要する時間すなわち、シングア라운드周期は約 $70 \text{ } \mu\text{sec.}$ 、 15 kHz に近い。

次に通路における音波の強さを検討してみる。第 2.9 図に従って各媒質の ρc を第 2.2 表より求め、これを (2.15)、(2.16) に代入すると次の値を得る。

$$\begin{array}{l} \text{エボナイト} - \text{鋼} \left[\begin{array}{l} \rho c \left\{ \begin{array}{l} \text{エボナイト} = 3.0 \\ \text{鋼} = 25.3 \end{array} \right. \\ \theta_i = 42^\circ \\ \theta_t = 60^\circ \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} r_i = 0.722 \\ t_i = 0.190 \end{array} \right. \\ \\ \text{鋼} - \text{水} \left[\begin{array}{l} \rho c \left\{ \begin{array}{l} \text{鋼} = 25.3 \\ \text{水} = 1.47 \end{array} \right. \\ \theta_i = 60^\circ \\ \theta_t = 23^\circ 05' \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} r_i = 0.665 \\ t_i = 0.640 \end{array} \right. \end{array}$$

両方の場合共に、大きく強さの低下を生じ損失となってしまうことは止むを得ない。従って反射波のエネルギーは充分に吸収あるいは散逸させる処置を施さなければならぬ。

い。

第 2.10 図は容器の構造を示したものである。本器は容器単体として試験するためのものであるから、導水管は付けていない。容器の材質は肉厚 3.5 mm、外径 120 mm の黄銅管で底板は不銹鋼板である。外側には 3 本のねじが脚となって取付いていて、傾斜の調節によって入、反射の最良の状態を見出すことができる。圧電素子は外径 30 mm でエポナイトの台に取付いている。容器の底面に貼ってあるシリコン・スポンジは独立気泡をもったゴム板で、銅を伝わる多重反射波と水とのカップリングを防止するためのものである。圧電素子の音圧・電圧変換能率、音波通路の損失を加えると、トリガ電圧 1 ボルトを得るための受波は 60 dB の増巾が必要である。このようにして組立てられた装置の受波と雑音との比は 25 dB (18 倍) であった。

従来の 2 型式では SN 比は 15 dB を目標とし、種種苦勞を重ねてきたが、上記の構造をとることにより一挙に大きな SN 比を獲得し、連続試験においても安定であった。これによって長期間安定に動作する計器を作る確信を得た。なお、この経験によって全部黄銅で製作するように設計し、このほど製作を完了した。

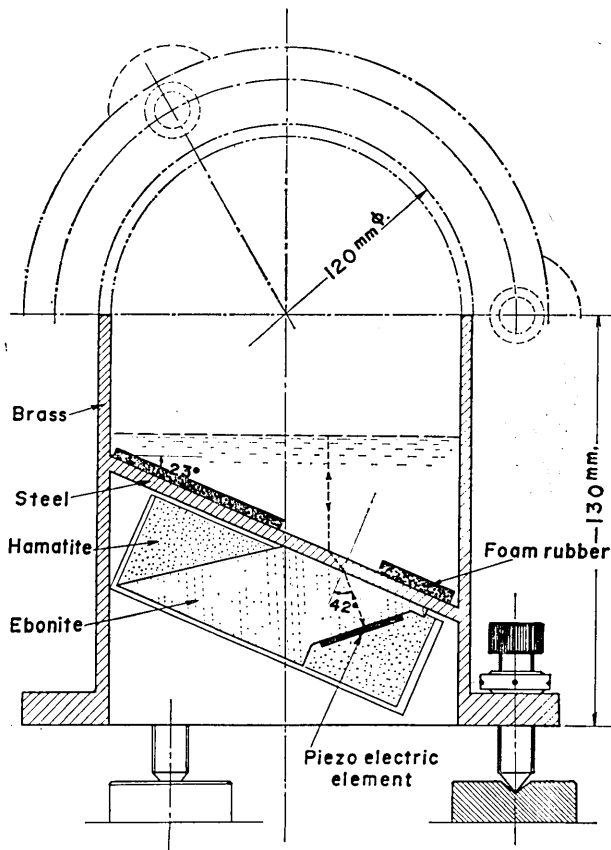


Fig. 2.10. Cross-sectional view of the Fujigawa-type sensor (for basic experiment).

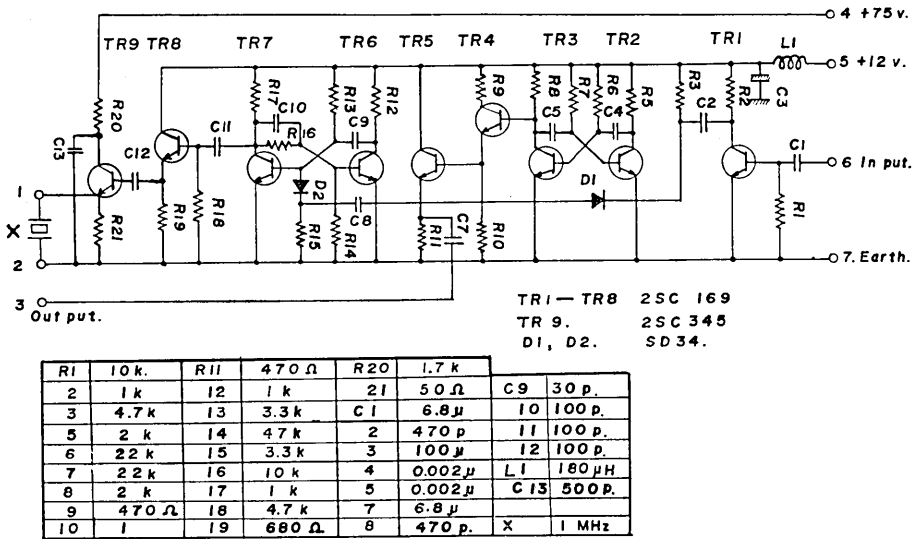


Fig. 2.11. Circuit diagram of the sing-around circuit. (a) feedback generator, transistor: TR3, TR4, astable multivibrator, TR6, TR7, monostable multivibrator, TR8, differentiator, TR9, pulse generator, TR1, inverter, TR4, TR5, buffer.

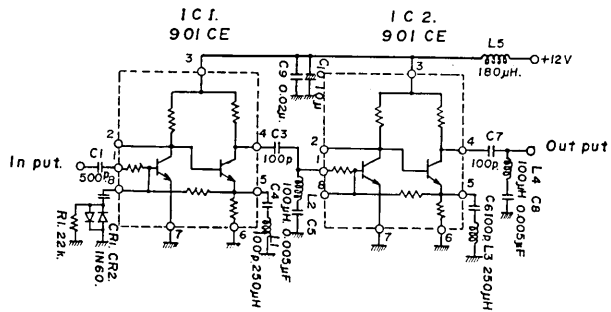


Fig. 2.12. Circuit diagram of the sing-around circuit. (b) narrow band amplifier. CR1, CR2, compressor, L1, C4, L3, C6, trap (1 MHz), L2, C5, L4, C8, filter (200 kHz).

8. 電気回路

本計器を構成する電気回路は次の三部分に大別される。a: 情報入力部, b: 伝送回路, c: 情報処理部である。以下富士川型を中心に回路動作の要点を述べるが、詳細な電子技術的説明は省略する。

a. 情報入力部

水位の変化を電気信号の繰返し周波数の変化に変換する部分で、帰還発振器と増巾器か

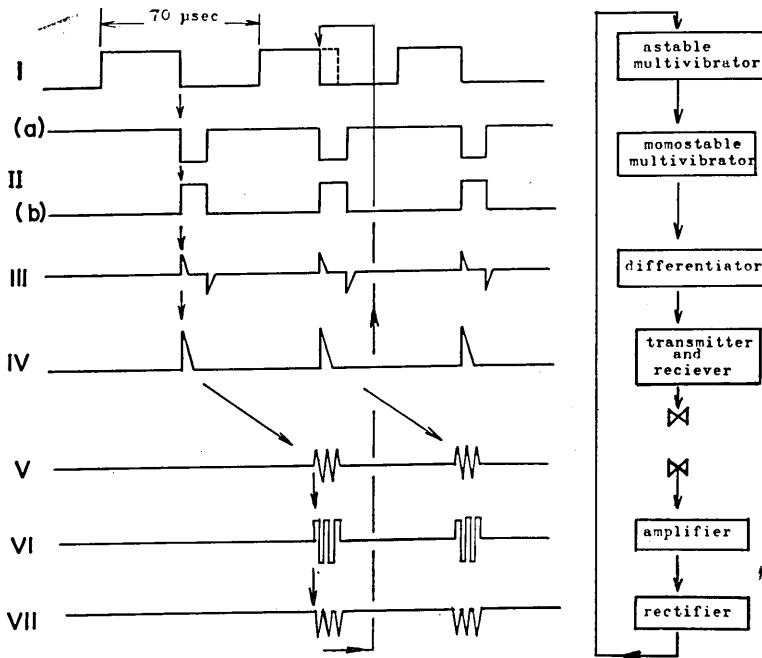


Fig. 2.13. Time chart of the sing-around circuit.

ら成る。sing-around 回路の作用についてはさきに述べたが、これを具体的に電子回路とその動作のタイムチャートによって説明する。第 2.11 図は帰還発振器第 2.12 図は増巾器の回路図、そして第 2.13 図はタイムチャートである。(説明は次頁)

第 2.14 図は送波および受波のオシログラムである。送波の $52 \mu\text{-sec}$ 後に受波が見られる。送波の振巾は不明であるが、受波は $3 \sim 4 \text{ Vp-p}$ である。

増巾器は 2 個の集積回路から成り、 1 MHz で 60 dB の利得を有する狭帯域増巾器である。圧電素子は送受波共用であるから、入力端子に瞬間圧縮器 (compressor) を置いて送波時の過大電圧を阻止している。また L_1C_4 , L_3C_6 は 1 MHz のトラップ、 L_2C_5 , L_4C_8 は圧電素子の半径方向の振動 (200 KHz) 除去用のフィルタで、いずれも主回路の波形を整形するためのものである。増巾器の出力端子は帰還発振器の入力端子 6 に結ばれている。

以上帰還発振器—水—増巾器—帰還発振器の 1 循の超音波振動も、同期のかかった自走マルチの 1 サイクルの矩形波に要約される。

b. 伝送回路

坑道内に置かれた情報入力部で得た矩形波を情報処理部の置いてある観測室まで伝送しなければならない。われわれの場合その距離は数百メートル程度のものであるが、送電端で正弦波になおし受電端で再び矩形波になおす方法をとった。この方法は送受両端に波形整形回路を必要とするが通常の通信ケーブル電線を使用できるので費用が安価になる。第

帰還発振器 (シング・アラウンド回路)			
回路	構成	タイムチャート	
自走マルチ パイプリータ 単安定マルチ パイプリータ (復 帰) 徴 分 送 信	TR2, TR3 C ₄ R ₆ , C ₅ R ₇	I	シング・アラウンド周期より少し長い 約 70 μ -sec で自由振動している。
	TR6, TR7 C ₉ R ₁₃	IIa	自走マルチの波形が下向きするときだけ動作する。
		IIb	IIa が下向きなら IIb はその反対になる。(TR6 が下向きなら TR7 は上向きになる)
	C ₉ , R ₁₂		復帰時間は C ₉ ・R ₁₂ できまる。
	C ₁₁ , R ₁₈	III	IIb の波形を微分波形にする
	TR8, TR9 C ₁₃ , R ₂₁	VI	TR9 が遮断状態のとき C ₁₃ は 75 ボルトの電源 で充電される。 TR8 を通じて微分波形IIIが到来すると, TR9 は 導通状態となり, C ₁₃ の電荷は R ₂₁ を通って放電 する. このとき 40 ボルトの電圧で 20 μ -sec. 間 圧電素子を叩く. 圧電素子は 1 MHz で自由振動する,
超音波が水中を伝播し水面に反射し戻る.			
受 信		V	圧電素子の自由振動が終息して間もなく反射波が 到着する。
増 巾	IC1, IC2	VI	受信波は微弱なので 60 dB 増巾される. 増巾器の 説明は後述.
位 相 反 転	TR1		増巾器の出力端子は帰還発振器の入力端子 6 に結 ばれているので TR1 によって位相が反転し,
整 流	D ₁	VII	ダイオード D ₁ により整流され, 下向きの第 1 波 が自走マルチに強制同期をかけ, シング・アラウ ンドの 1 まわりが終り第 2 ラウンドが始まる.
緩 衝 増 巾 び お 出 よ 力	TR4, TR5		強制同期のかかった自走マルチのパルス波形を低 インピーダンス化して出力端子 3 から伝送回路ま たは計数回路へ送り出される.

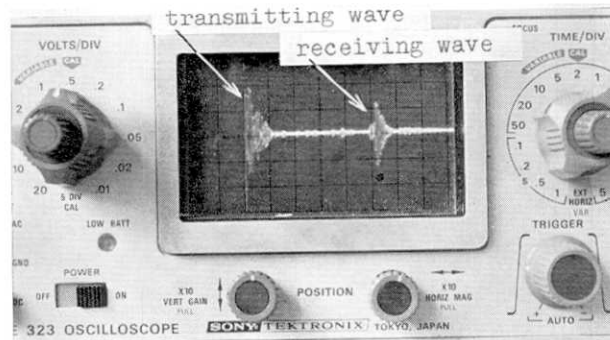


Fig. 2.14. Oscillogram display of the sing-around signal. Scale of the abscissae is 10 μ -sec/div. and ordinates is 0.5 volt/div.

2.15 図(a)は矩形波を正弦波になおす低域通過濾波器, (b)図はその緩衝増巾器である。電線路の送受両端は変圧器によってインピーダンス整合の状態授受する。変圧器は600/75オームである。この方式は電線路のエネルギー損失を最小にして忠実な波形の伝送が可能であり、その上電磁誘導障害に対して良好な SN 比が保証される。

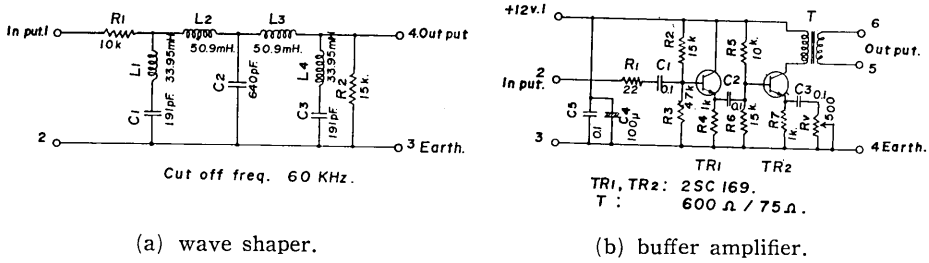


Fig. 2.15. Transmitting circuit.

c. 情報処理部

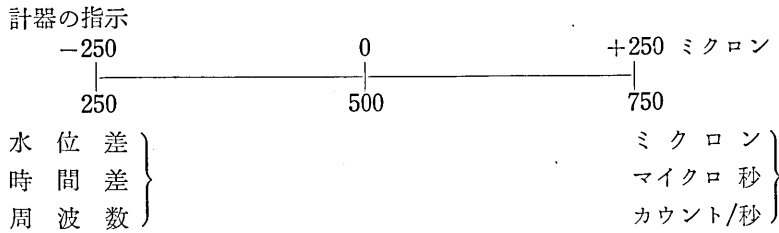
A, B 両容器の水位差を記録器に描かせるために、超音波信号の取扱いに二通りの方法が考えられる。そのひとつは (2.3) 式を原理とする周波数差 ($f_a \sim f_b$) 方式による鋸山型で、他は富士川型に採用した (2.4) 式による時間差 ($t_a \sim t_b$) 方式でこれから述べようとするものである。鋸山型は $f_a f_b \cong f^2$ の近似のために 1 カウント何マイクロンという設定が零水位差付近ではよいが、高水位差では誤差を生じてくる欠点がある。さきに述べたように 1 回のシング・アラウンドの所要時間、すなわち強制同期のかかった自走マルチの 1 周期は約 $70 \mu\text{-sec.}$ である。一方水位差の限界は 500 ミクロンと定めてあるので、その時間差は (2.4) 式より

$$t_a \sim t_b = 2\Delta h / C = 2 \times 500 / 1460 \times 10^6 = 0.66 \mu\text{-sec.}$$

A の 1 パルスと B の 1 パルスの差は $0.66 \mu\text{-sec.}$ より大きくなることはない。このような短い時間を十分な精度で計測するには、鋸山型が 1 秒間のパルス数で比較したのに対し、パルス数が一定数に達する時間をもって比較する。この計測処理は論理回路によるのが便利である。この方式は量産化された規格の論理回路部品を極力種類少なく使って構成することにより部品個数の増加は多少あっても組立のみで無調整で使用できる経済的な商品が出来上がるからである。近年集積回路技術の進歩はこのような趨勢に進みつつある。

次に、本方式によって記録器の指示の中央を零、左右をそれぞれ ± 250 ミクロンの水位差を指示させようとする場合、実際に零やマイナスの水位差を作ることは適当でない。始めからある時間差を与えておかなければならない。いま、A, B どちらかを 500 ミクロンだけ水深を深くしておく、 $0.66 \mu\text{-sec.}$ の時間差が与えられたことになる。この点を零水位差と考えると水位差の両極は $500 \pm 250 = 750$ ミクロンまたは 250 ミクロンとなり、時間差は $0.66 \pm 0.33 = 0.99 \mu\text{-sec.}$ または $0.33 \mu\text{-sec.}$ となる。ところで、記録器の中央を 500 カウント (指示値は 0) にするためには $500 / 0.66 = 758$ 、すなわち 758 倍したものを 1 MHz ($1 \mu\text{-sec.}$) のクロック・パルスで計数すればよいことになる。A, B 両者が 758 パルスに達する時間を比較することになる。この方法を実行するものを時間拡大回路 (Pulse-rate Converter) と呼んでいる。

以上を要約すれば、計器指示の関係は下記の如くなる。



何故ならば時間差は

$$0.99 \mu\text{-sec.} \times 758 = 750 \text{ (}\mu\text{-sec.} = \text{カウント/秒)}$$

$$0.66 \text{ " } \times 758 = 500 \text{ (")}$$

$$0.33 \text{ " } \times 758 = 250 \text{ (")}$$

を得る。故に 1 カウント = 1 ミクロンとなる。

なお、1 回の計測を行なうためのスタートとリセットのパルスの時間間隔は 100 m-sec. にとってある。従って拡大される時間は $70 \mu\text{-sec.} \times 758 = 53 \text{ m-sec.}$ であるから十分に余裕をもつて計測を完了することができる。

第 2.16 図は富士川型計測装置の説明図である。動作の概略は次の如くである。伝送されてきた正弦波形の信号は波形整形回路で再び矩形波に戻される。情報処理部は二つに大別される。前段は時間拡大回路 (Pulse-rate Converter) で後段は時間差制御回路 (Pulse-width Comparator) である。時間拡大回路は $1/758$ の分周回路で多数の双安定マルチを組合わせたものである。758 個のパルス群毎に 1 個のパルスを発生するが、そのパルス中は 758 個のパルス全体に匹敵するものである。図の T_a 、 T_b がそれである。

時間差制御回路は $T_a - T_b$ を作る回路である。 T_a 、 T_b は独立であるから、図のように仮に $T_a > T_b$ であっても両方のパルスの始まりの部分は相前後するから、差の部分は前後 2 個所に生ずる、しかもその 2 個所は和によって $T_a - T_b$ の得られる場合と差の関係にな

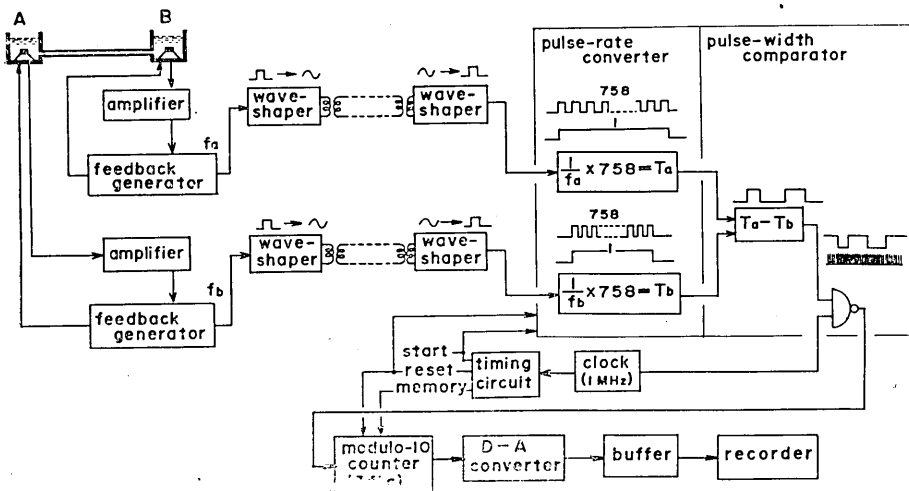


Fig. 2.16. Block diagram of an ultrasonic water-tube tiltmeter (Fujigawa-type).

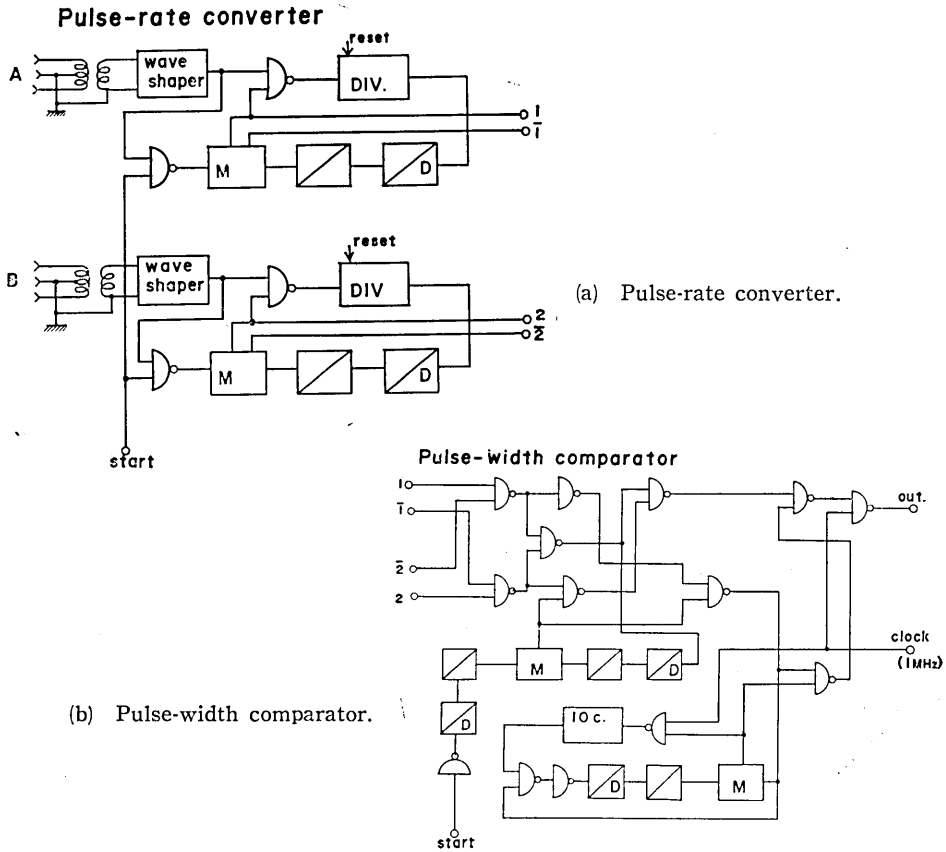


Fig. 2.17. Data processing circuit.

Symbol	Description	Operation															
	NAND circuit	<table border="1"> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table> <p>(TRUTH VALUE TABLE)</p>	A	B	C	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
A	B	C															
1	1	0															
1	0	1															
0	1	1															
0	0	1															
	Frequency divider																
	Memory																
	Phase inverter																
	Differentiation-inversion circuit																

Fig. 2.18. Symbol, description and operation of the logic elements used for the present circuits.

る場合とあって演算回路は複雑となる。両者のパルス巾の差に相当する時間巾は 1 MHz のクロックパルスで計測する。10 進カウンタは 3 桁の 2 進化 10 進カウンタである。D-A 変換器は $1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 8$ のコードを 1 位には 1 mA, 2 mA, 4 mA, 8 mA, 10 位には 10 mA, 20 mA, \dots , 100 位には 100 mA, 200 mA, \dots , の如く重みをかけた電流回路で構成させ入力の数値に応じた電流出力が得られる。

第 2.17 図 (a) は時間拡大回路, (b) は時間差制御回路である。そして第 2.18 図は回路に使われている記号の説明図である。本装置の如く論理演算回路によると僅かの種類の部品によって組立が可能である。論理演算とは周知の如く 2 値論理 (数値的表現で 0, 1) に基づく演算 (Boolean Algebra) を実行する回路要素で, 基本的には論理積 (AND), 論理和 (OR) および否定 (NOT) の三種の概念の組合わせによって構成される。詳細は専門書にゆずるが, AND と OR 回路は実質は同じもので, 供給電源の極性を反対にすれば AND と OR は入替わる。このことは NOT 回路を通すことと結果は同じである。NOT 回路はトランジスタ 1 個の位相反転回路である。従って AND と OR は表裏の関係にあり, NOT-AND-NOT=OR , NOT-OR-NOT=AND の如く NOT によって互に変換ができる。そこで, AND と NOT (NAND) または OR と NOT (NOR) の複合回路素子が生産されているので, 演算回路はどちらか一種のみで組立が可能である。本器は NAND (論理積否定) を使っている。

以上の事柄を数式であらわすと,

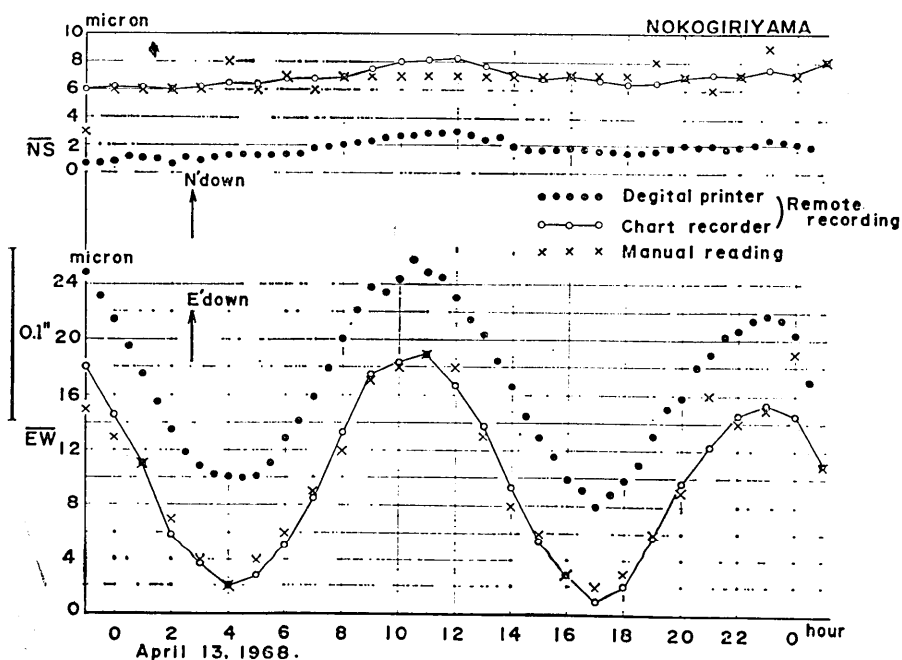


Fig. 2.19. Records of the ultrasonic water-tube tiltmeters as compared with the data from the manual reading water-tube tiltmeters (test at Nokogiriyama).

$$\begin{aligned} \text{NANDの出力} & f_1 = \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B} \\ \text{NOTを通すと} & f_2 = \overline{f_1} = \overline{\overline{A \cdot B}} = A \cdot B \\ \text{再びNOTを通すと} & f_2 = \overline{f_2} = \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B} \end{aligned}$$

の如く元に戻る。ここで A, B は入力変数, f は出力関数, $\overline{\quad}$ は否定をあらわす。この証明は真理値表によっても容易である。

論理演算回路は論理の組立のみによるもので、従来のデジタル回路の如く組立調整の巧拙により性能が左右されないことなど幾多の長所がある。

9. 記録の実例

最後に記録の実例について一言する。第 2.19 図は 1968年 4月13日の大潮を鋸山観測所において読取式水管傾斜計と比較観測を行なった結果である。読取式と遠隔記録式とは振巾、波形共によく一致している。前者が目分量で 1 ミクロンを読取っているのに対し、後者は 1 ミクロンの分数を表示している。1人の観測員が 1成分を 2分間で読取るとは容易なことではない。遠隔式では印字記録は 30分おき(手動操作も可能)、チャート記録は連続的であり、その計測間隔は 0.1秒であるから、人力にくらべ遙かにきめ細かな観測を行なっている。この図においても熟練観測者と言えども時に 3~4 ミクロンの誤読をおかしている。その時の精神的肉体的疲労に左右されるためであろう。そこで人の能力と器械力をと比べてみる。われわれは観測員の読取値がデジタル・プリンタの読出す値と一致することを期待するものであるが、期待値からの外れにどの程度のばらつきがあるかを調べてみた。

ここで取扱ったデータは第 2.4 表に示してある。表の M は読取式の観測値, D はデジタル・プリンタの読出した数値である。いま, $M - D = x_i$, $\sum_{i=1}^n x_i/n = \bar{x}$ とおく。 n は観測数, すなわち標本数である。このとき標準偏差 σ は次式であらわされる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.18)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n-1} - \frac{n}{n-1} \bar{x}^2} \quad (2.19)$$

\overline{NS} , \overline{EW} 両成分の 24時間観測の前半, 後半, 全体の各々について表の数値を (2.19) 式に代入してみると次の値を得る。

\overline{NS} の前半	$\sigma_{N1}=1.01$	\overline{EW} の前半	$\sigma_{E1}=1.11$
" 後半	$\sigma_{N2}=0.76$	" 後半	$\sigma_{E2}=1.92$
" 全体	$\sigma_{N3}=0.89$	" 全体	$\sigma_{E3}=1.62$

第 2.19 図に見る如く \overline{NS} がほぼ一定であるのに比べて \overline{EW} 成分の変化は大きい。前半における両成分の σ の値はほぼ等しい。後半に至って習熟と同時に疲労が加わってくる。

観測の度に変化の大きい方が心労も大きいことから考えてこの結果は体験的に首肯でき

Table 2.4. Comparison of two types of water-tube tiltmeters at Nokogiriyama. M and D denotes manual reading and digital recording, respectively.

1968	Time	NS				EW			
		M	D	$M-D$	$(M-D)^2$	M	D	$M-D$	$(M-D)^2$
	Apr. 12 23h	0μ	0μ	0μ	0	0μ	0μ	0μ	0
	13 0	3	0.2	2.8	7.84	-2	-3.4	1.4	1.96
	1	3	0.4	2.6	6.76	-4	-7.3	3.3	10.89
	2	3	-0.1	3.1	9.61	-8	-11.3	3.3	10.89
	3	3	0.2	2.8	7.84	-11	-13.9	2.9	8.41
	4	5	0.6	4.4	19.36	-13	-14.7	1.7	2.89
	5	3	0.6	2.4	5.76	-11	-14.6	3.6	12.96
	6	4	0.7	3.3	10.89	-9	-12.0	3.0	9.00
	7	3	1.1	1.9	3.61	-6	-8.9	2.9	8.41
	8	4	1.3	2.7	7.29	-3	-4.7	1.7	2.89
	9	4	1.6	2.4	5.76	2	-1.0	3.0	9.00
	10	4	2.0	2.0	4.00	3	-0.4	3.4	11.56
	11	4	2.2	1.8	3.24	4	-0.0	4.0	16.00
	Σ			32.2	91.96			34.2	104.86
	Av.			$\bar{x}=2.477$				$\bar{x}=2.631$	
	12	4	2.3	1.7	2.89	3	-0.7	3.7	13.69
	13	4	1.7	2.3	5.29	-2	-4.4	2.4	5.76
	14	4	1.2	2.8	7.84	-7	-8.1	1.1	1.21
	15	4	1.0	3.0	9.00	-9	-11.8	2.8	7.84
	16	4	1.1	2.9	8.41	-12	-14.9	2.9	8.41
	17	4	0.9	3.1	9.61	-13	-16.8	3.8	14.44
	18	4	0.8	3.2	10.24	-12	-14.9	2.9	8.41
	19	5	0.9	4.1	16.81	-9	-11.7	2.7	7.29
	20	4	1.3	2.7	7.29	-6	-8.9	2.9	8.41
	21	3	1.3	1.7	2.89	1	-5.8	6.8	46.24
	22	4	1.2	2.8	7.84	-1	-4.1	3.1	9.61
	23	6	1.7	4.3	18.49	0	-3.0	3.0	9.00
	0	4	1.4	2.6	6.76	4	-4.4	8.4	70.56
	Σ			37.2	113.36			46.5	210.87
	Av.			$\bar{x}=2.862$				$\bar{x}=3.577$	
	Total			69.4	205.32			80.7	315.73
	Av.			$\bar{x}=2.669$				$\bar{x}=3.104$	

る。日常観測での誤差は7割が $\pm 1\mu$ 以内にあることは心強いことである。松代群発地震における連続読取観測（第4章参照）の例の如く変化も疲労も大きかった場合には、平常 $\pm 2\mu$ 、希に $3\sigma \approx 6\mu$ の誤読のあることも以上の結果から考慮すべきである。

第3章 水管傾斜計の経年変化

1. 序 言

本章では水管傾斜計の経年変化を主として水準測量や観測所相互の調和の問題に関し、油壺・鋸山・松山の三観測所の場合について述べる。

油壺は三浦半島の南端部に、鋸山はその東方 20km、東京湾を隔てて房総半島の中央部に位置している。両観測所より半径 100km の円を描いてみると東京・神奈川・千葉・埼玉の主要都市、いわゆる首都圏はこの中に含まれる。南関東地区はまた地震の多発地帯と

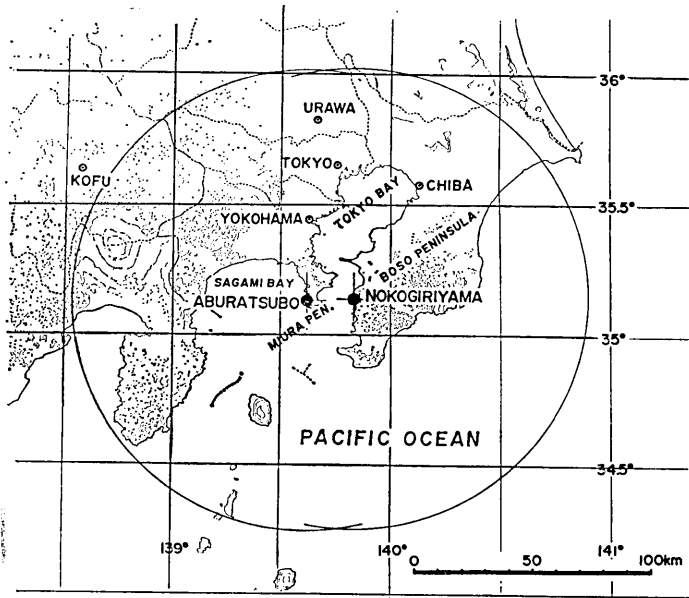


Fig. 3.1. Location of the Aburatsubo and Nokogiriyama stations.

して著名である。鎌倉幕府以来、幾多の大地震の発生は史実の示すところである。一方房総・三浦地区は水準、検潮、地質など地球物理学の研究資料に恵まれている。以上の諸条件から推しても両観測所の存在意義は大きい。

油壺は戦後最初の地殻変動観測所として、松山と同じく1949年より、鋸山は1959年よりそれぞれ観測記録を蓄えてきた。水管傾斜計に関する各観測所の要目、観測坑内の見取図は第1章第1.1表、第1.9図に示してある。三観測所共旧陸海軍の防空壕を利用し、またはその一部を増掘して作られたもので不満足な点も多々ある。これらはもはや旧式観測所に属するが、地震予知計画による新式観測所の基礎はこれらの観測所の研究や経験に基づくところが甚だ多い。

筆者ら³⁰¹⁾は20年前に油壺における観測結果の潮位、温度などの影響に関する考察を試みたなかには水準測量との関係についても若干触れた。水管傾斜計を小区間あるいは三浦半

島全体の測量結果と比べてみたが、変化も小さく期間も不十分のため有意の結果を得るに至らなかった。ここで改めて考察を試みたいと思う。

南関東地区で一等水準測量の行なわれたのは1883年(明治16年)以降のことである。

測量結果に基づいて論じられた主なる事柄は、関東地震(1923年)を挟んでその前後の消長および地質学的挙動に関することのように思う。前者は地震エネルギーの蓄積・解放の尺度、後者は地質学的タイム・スケールの地殻変動の尺度として共に地震学研究上重要な役割を果している。原田³⁰²⁾、檀原・広部³⁰³⁾、檀原³⁰⁴⁾、藤井³⁰⁵⁾は水準測量の結果から三浦・房総地区の地殻変動を以上の観点で論じている。それによると、短期間、小区域についてみればその様相は種種であるが、広地域、長期間、たとえば関東地震を挟んでその前後に大別すれば三浦・房総地区は一つの地塊として運動をしている。

一方この地域では地質学的調査もよく行届いている。松田³⁰⁶⁾は活断層についてこれらの調査をまとめた。第3.2図は南関東の地質構造図である。地質構造の一般走向は北西—南東である。三浦半島中部には活発な活断層が発達し、その走向は大体 $N60^{\circ}W$ 、右ずれである。従って、最大圧縮主応力軸は $NNW-SSE$ であると推定される。房総半島では鴨川—保田地溝帯に多くの縦ずれ断層がみられる。村井³⁰⁷⁾は地震学あるいは測地学的方法によって現時点の応力場を知り、地質学的方法によって過去より現在に至る期間の造構運動の応力場を知り、両者の関係を明らかにすることは、現在の地殻変動および地震現象を解釈してゆく上に重要な意味をもつと述べている。そして三浦・房総地域のわれめ系の調査から応力条件を推定した。それによると房総半島の三浦層群、上総層群の主応力は、鉛直方向に最小、東西方向に中等、南北方向に最大の主応力が作用していた。つまり南北方向の強い圧縮力によって褶曲および上下変位の活断層系が発達したと考えられる。この造構運動は嶺岡・葉山隆起帯が常にその中核をなしている。成瀬³⁰⁸⁾によれば、嶺岡・葉山

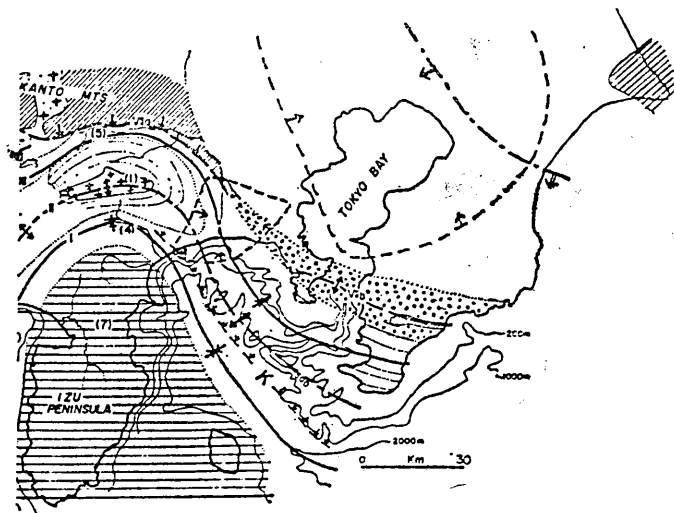


Fig. 3.2 Geological structures of southern Kanto district. Dotted area represents Mineoka-Hayama uplift belt. (after T. Matsuda³⁰⁶⁾)

隆起帯は中新世末—鮮新世初に関東全域に亘る地殻変動(黒滝変動)に際して著しく隆起した部分である。その南側は南縁沈下、北側は構造盆地でその境界線をなすという第四紀地殻変動のパターンを作り上げた。従って、上総層群の南の限界でもある。これらの地殻変動は現在もなお比較的等速度で進行しているものと考えられている。各層群の変動速度は $0.1\sim 3\text{m}/10^3$ 年とかなりの巾をもっている。造盆地運動の速さとしては大凡 $0.9\sim 1.3\text{m}/10^3$ 年、傾斜角で $3^\circ/10^6$ 年 ≈ 0.01 秒/年であるが、藤井³⁰⁵⁾はこれを関東地震の前および後の二つの期間に分けた水準測量の結果との比較を試みた。

関東地震前の26年間では 0.03秒/年
 " 後の35年間では 0.01秒/年

となり大略前者と一致する、但し、重力異常と上下変動の相関の高い場所を選んで比較している。

地質学的に注目すべきもうひとつの場所は国府津—松田断層系に含まれる相模海溝であろう。河角³⁰⁹⁾の調査によれば818年(弘仁9年)以降の鎌倉における10余個の強震、烈震の震央はこの海溝線上に並んでいる。

われわれが三浦・房総地区の地殻変動の連続観測を行なうに当り、測地学的、地質学的背景の概観は以上の通りである。油壺は嶺岡葉山隆起帯より南にあるが、鋸山観測所は鋸山の北麓、隆起帯の北側に含まれている。従って、両者間の経年変化に差異のあらわれることは予期されるところであるが、それがどのような形であられるか、また、地殻変動の連続観測は測地測量の時間的空間的空白を埋め得るものとの期待があるが、それがどの程度可能であるかについては準備段階であり、さらに記録の蓄積と研究を待たなければならぬ。本章では主題を水管傾斜計と水準測量との比較におき、両者が必ずしもよい一致が得られない理由、副題として油壺・鋸山両観測所相互の比較について若干地殻のレオロジー的な考察を含めて、水管傾斜計の記録するものは何かという問題について考察したいと思う。

2. 水管傾斜計の観測結果

第3.3図は油壺における1949年10月から最近までの水管傾斜計の観測結果である。図の各点は毎日午前8時の読取値の月平均値である。上の2行は読取値そのまま、いわゆる「なま」の値である。次の2行はN'S'成分については温度、E'W'成分については潮位の補正を行なったものである。その補正係数は温度は $0.06''/^\circ\text{C}$ (温度上昇でS'下り)、潮位は $0.54''/\text{m}$ 。(潮位上昇でE'下り)である。(補正については第1項a, b参照のこと。)なお、温度は観測坑内の温度計の8時の読取値、潮位は国土地理院の驗潮儀の8時の値を使用させていただいた。その温度と潮位の変動が最後の2行に示してある。5, 6行目はなまの月平均値を12ヶ月の移動平均したものである。これをみると移動平均値がよく平滑されているので、以下の考察にはこの値を主に使用することにする。なおここでN'S', E'W'は計器成分の方位別名称であるが、地理学上のNS, EW方位からは若干ずれているので(')により区別している。諸計器の設置方位については第1.9図と第1.1表を参照されたい。

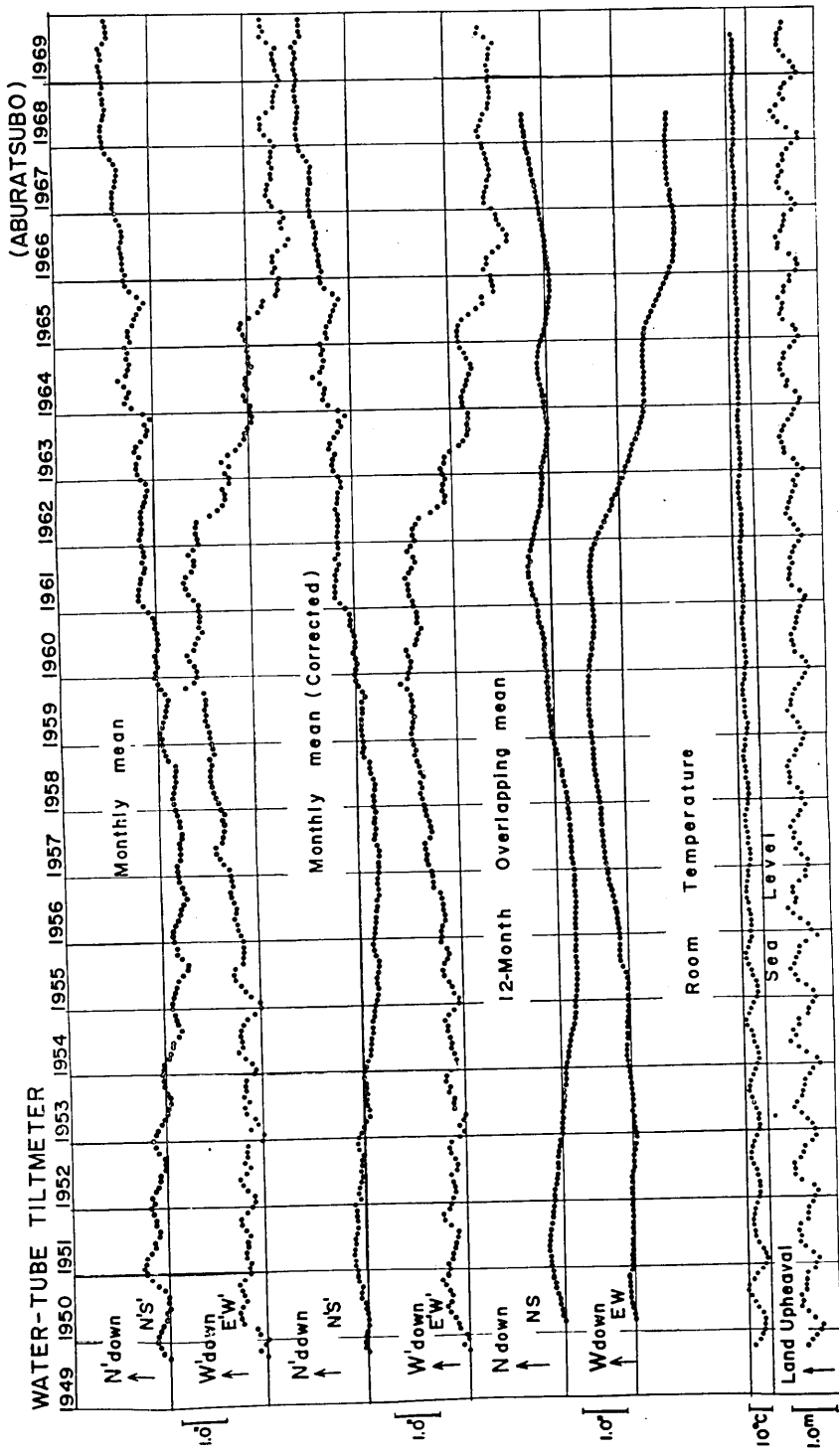


Fig. 3.3. Secular ground tilting at Aburatsubo.

さて第 3.3 図をみると 1951 年から 1962 年頃にかけて両成分間に位相のずれをもった長期変動のあることに気付く。従って、両成分を合成すると円軌道が予想されるが、このような変動を与える原動力となるものが何であるかは、今後解明すべき課題のひとつと考える。第 3.4 図は両成分を合成しベクトル表示したものである。観測当初の 10 年間は年平均 0.2 秒角程度（傾斜方向はともかくとして）をこの観測所における変動レートと思っていたが、1962 年より変動レートは 3~4 倍に急増し、その様相を一変するにいたった。図において白丸はその傍にある年号の 1 月の値を示す。二重丸と傍のローマ数字は次に述べる精密水

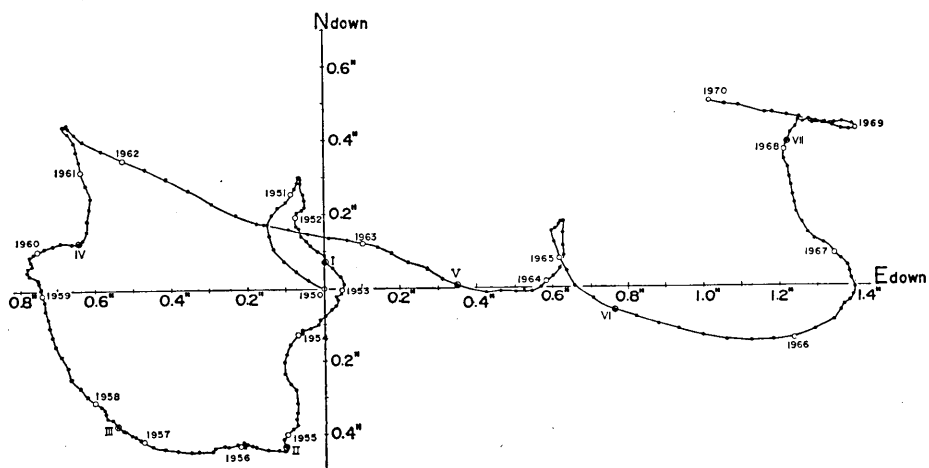


Fig. 3.4. Vectorial illustration of secular ground tilting at Aburatsubo.

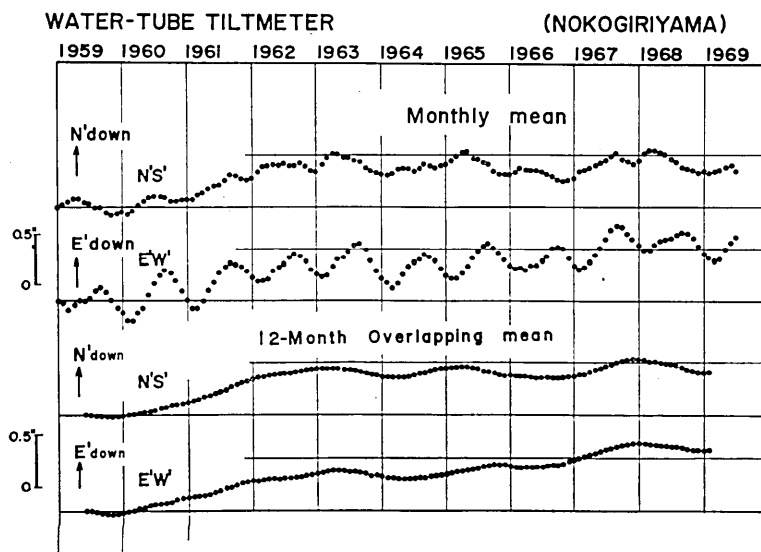


Fig. 3.5. Secular ground tilting at Nokogiriyama.

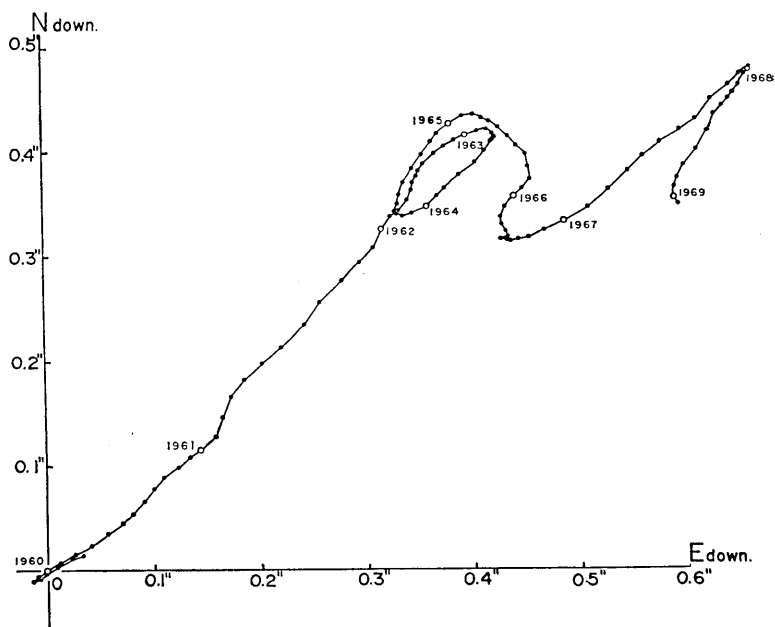


Fig. 3.6. Vectorial illustration of secular ground tilting at Nokogiriyama.

準測量の行なわれた月とその回次の番号である。

第 3.5 図は鋸山観測所の水管傾斜計の観測結果で、1, 2 行目は「なま」の値、3, 4 行目はその12ヶ月移動平均値である。それをベクトルであらわしたものが第 3.4 図でそれぞれ油壺の第 3.3 図、第 3.4 図に対応するものである。

3. 三浦半島の水準測量

三浦半島の一等水準測量は油壺験潮場と東京の水準原点とを結ぶ目的で頻繁に行なわれてきた。1952年以降は三浦半島循環路線が完成し、変動の様相を一層明らかにすることができるようになり、測量回数もすでに7回に及んでいる。そのくわしい解析については檀原³⁰⁴⁾の報告があり、その後を補足するものとして国土地理院の地殻活動調査室³¹⁰⁾発表の資料がある。

水準測量の結果を水管傾斜計と比較するにあたり、いつも問題になるのはよい調和を得るためにはどの範囲の水準測量に基づいて土地傾斜を算出したらよいかという点である。

観測時期についても両者をなるべく細かく一致させるべきであることは言うまでもないが、区域の選定は特にむつかしい。

1952—1963年の三浦半島の垂直変動図(第 3.7 図(b))をみると、BM. 5365—BM. 10842(秋谷・横須賀間)を軸とする大きな変動の谷がみられる。(第 3.7 図(a)) 従って今回の目的には BM. 5365.1 (佐島) と BM. 10844 (浦賀) を結ぶ線の南側、13の水準点を含む半島南端地区を選んだ。測量実施の回次とその期間を第 3.1 表に掲げた。この表で見ると、各回の実施期間にかなりの巾があるので、そのうち観測所に最も近い区間 BM. 5367.2:

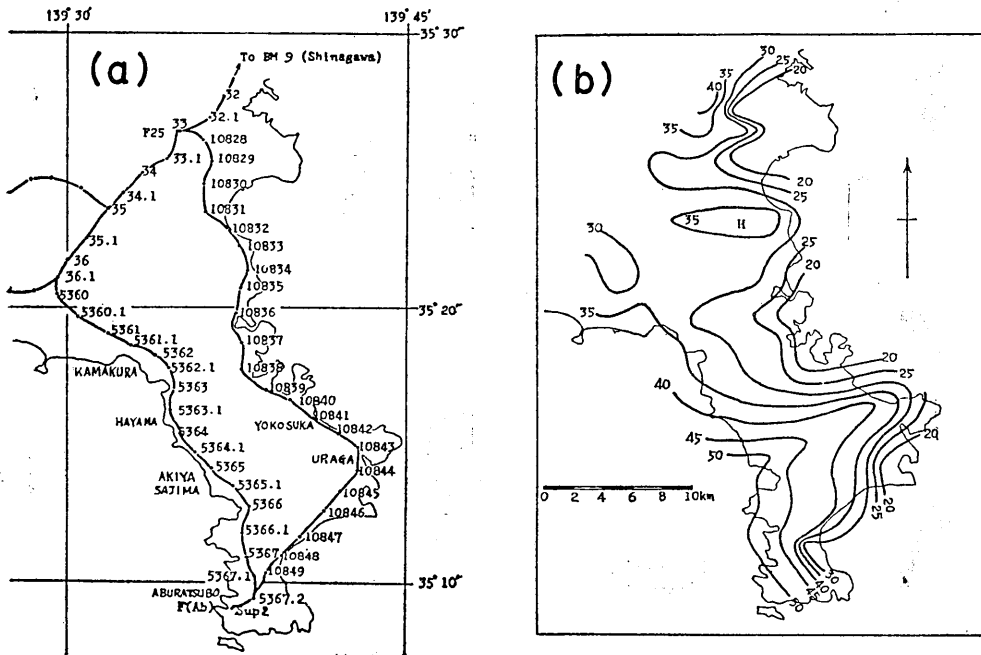
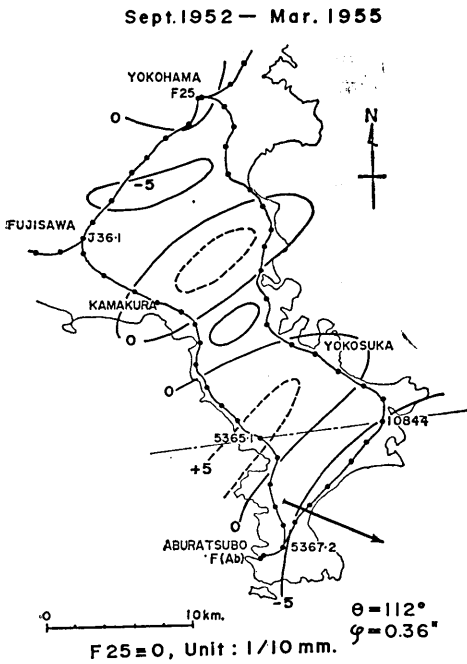


Fig. 3.7. Levelling route (a) and crustal movements during 1952.8—1962.6 in Miura Peninsula. Unit mm. (b) (after T. Dambara, 304).

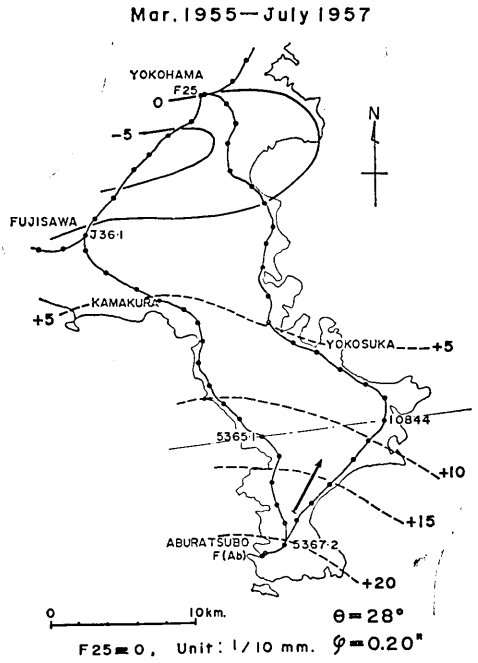
Table 3.1. Precise levelling surveys along the Miura Peninsula since 1952.

R O U T E			
Obs. No.	West coast (Via Kamakura)	East coast (Via Yokosuka)	BM5367.2- F(Ab)
I	Sept. 1952	Sept. 1952	Sept. 1952
II	Feb.- Mar. 1955	Feb.- Mar. 1955	Mar. 1955
III	June-July 1957	June-July 1957	July 1957
IV	June 1960	June 1960	June 1960
V	June-July 1963	June-July 1963	July 1963
VI	May -Sept. 1965	May - Aug. 1965	May 1965
VII	J.-Feb.-M. 1968	Jan.- May. 1968	Feb. 1968

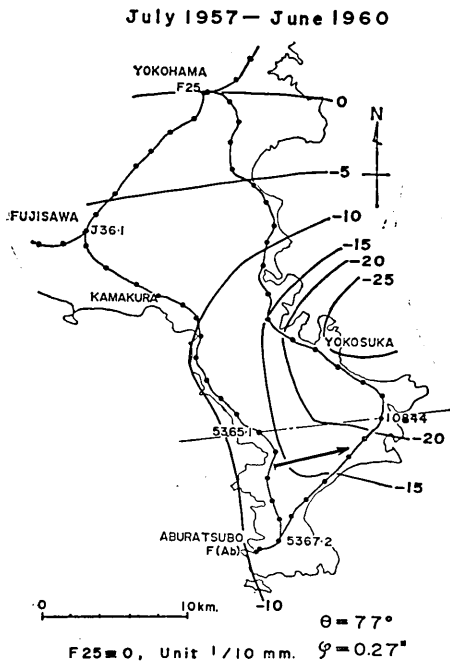
—F(Ab) を測量していた時期で代表させ、水準傾斜計と比較することにした。(表の右端参照) 時期毎に各水準点の垂直変動量を求め、いわゆる正弦法によって最大傾斜の方位とその大きさを算出した。計算は地震研究所の IBM 360/40 計算機によった。第 3.8 図 (a)~(f) は以上の結果を示した図である。半島全体の垂直変動とあわせて南端地区につい



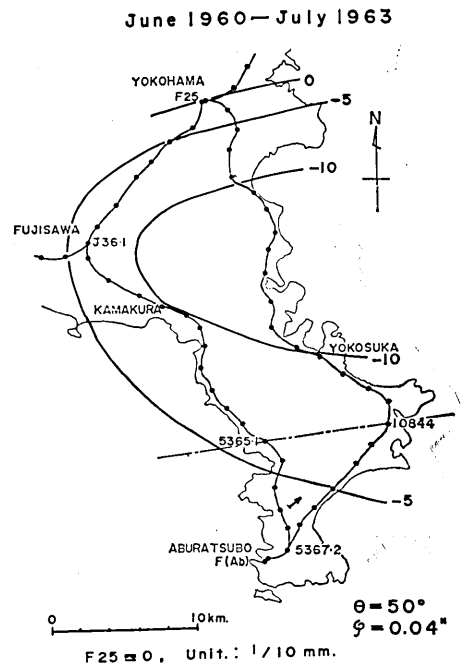
(a). I (Sept. 1952—Mar. 1955)



(b). II₂ (Mar. 1955—July 1957)



(c). III (July 1957—June 1960)



(d). IV₁ (June 1960—July 1963)

Fig. 3.8 (a)-(f). Vertical movements in Miura Peninsula during 1952-1963.

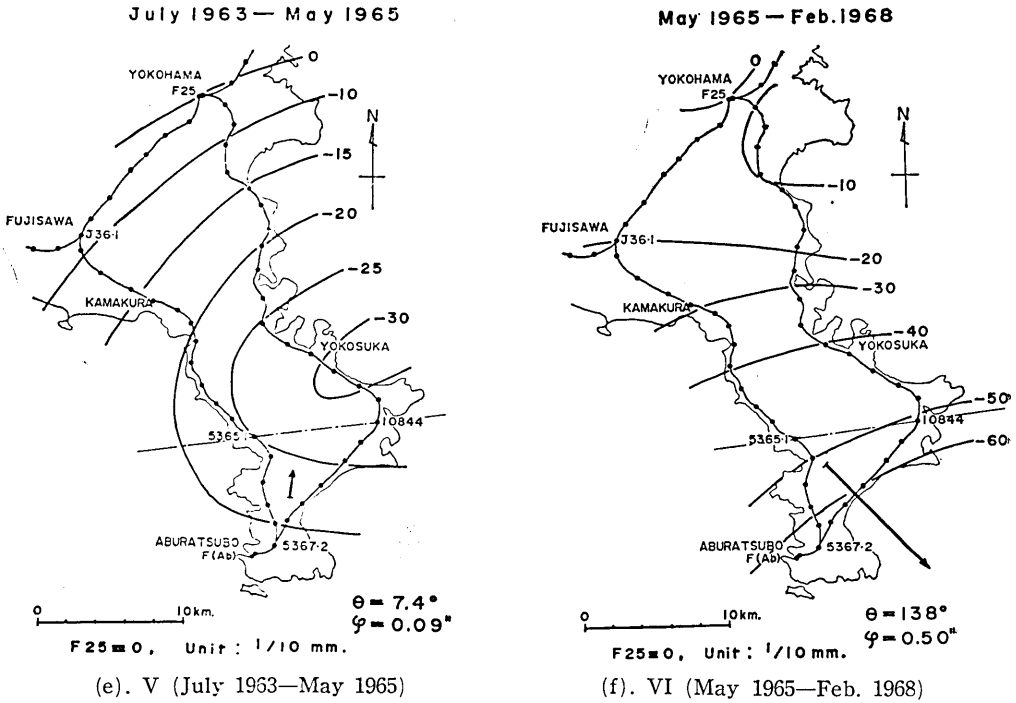


Fig. 3.8.

ては上記の方法によって求めた数値と傾斜量をベクトル表示してある。

4. 水管傾斜計と水準測量の比較

第 3.9 図は水準測量と水管傾斜計の結果を土地傾斜のベクトルに表示して比較したものである。実線は水準測量をあらわし、第 3.8 図 (a)~(f) の各ベクトルを逐次継ぎ合わせたものである。破線は水管傾斜計で第 3.4 図の測量回次番号の順、すなわち観測所至近の

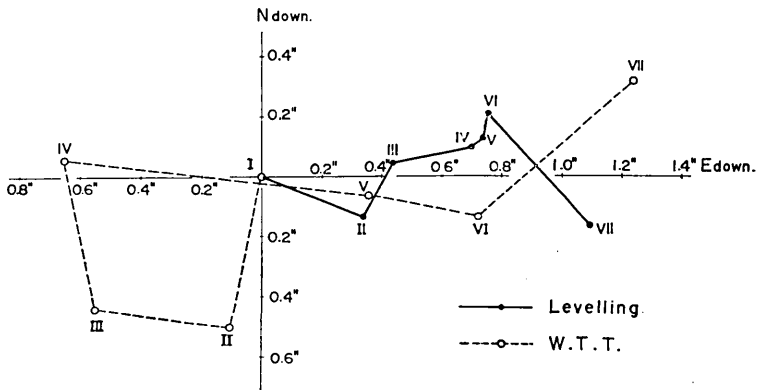


Fig. 3.9. Comparison of levellings with tiltmeter observations at Aburatsubo.

測量の行なわれた月を結び合わせたものである。図を見てわかる通り I—IV (Sept. 1952—June 1960) を結ぶと水管、水準両者は大きさが相等しく方向反対で、III—V (July 1957—July 1963) をとると方向は一致するが大きさが3倍もちがう。しかしI—VI (1952—1965) I—VII (1952—1968) のように長い目でみるとかなりよい一致を示している。

5. 観測結果に対する考察

檀原³¹⁰⁾ は既に1965年に三浦半島における水準測量と水管傾斜計の観測結果の比較を論じている。その資料は全く同じもので、筆者はその後数年分を加えたに過ぎない。その方

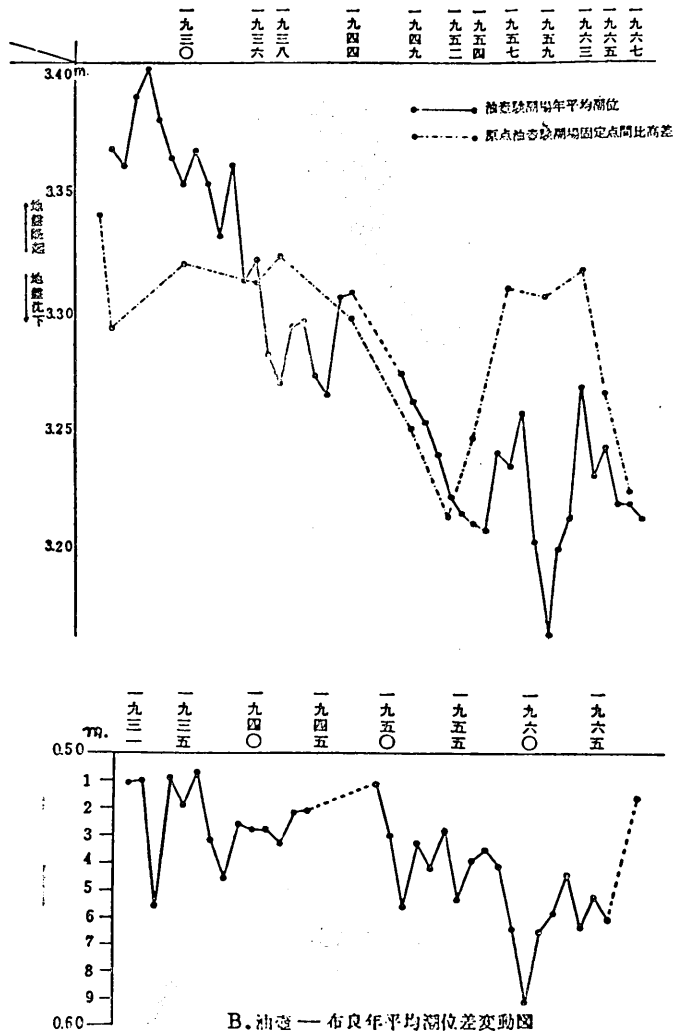


Fig. 3.10(a). Comparison of the annual mean sea level at Aburatsubo (solid line) with the vertical displacement of Aburatsubo relative to Tokyo (broken line).
 (b). Differential annual mean sea level of Aburatsubo to Mera. (after G.S.I.)

法は水準測量の結果を水管傾斜計の2成分の方位に分解し比較したものであった。

今回は12ヵ月移動平均による傾斜観測値を使用し、期間を月単位で比較するなど、よりきめ細かな配慮を行なったにも拘わらず結果において前者と矛盾するところがなかった。

なお、鋸山観測所の結果とも比較してみる。鋸山の観測は1959年に始まる。1968年までの変動を同期間の油壺とくらべると約半分の量であるが、最も基本的な傾向が東下りである点において両者とも一致している。1970年以降の東下りの変動は三浦・房総地区の一般の変動と考えられる。油壺・鋸山両観測所相互の関係については項を改めて述べる。

次に驗潮結果と比較してみる。第3.10図(a)、(b)は前記地殻活動調査室³¹⁰⁾の資料であるが、(a)図は油壺驗潮場の年平均潮位と水準原点・油壺驗潮場固定点間の比高差を示す。両者は1960年を中心に前後4～5年間は平行性がよくない。その原因は不明であるが、ダイナミックな海洋現象による平均潮位の擾乱、あるいは月の昇降点周期の18.6年の潮位が何らかの機構で増巾されたものでなかろうかなどの推測がなされている。この期間はまた水管傾斜計が円軌道を描いている時期に含まれる。檀原³¹¹⁾は水準・水管両者が不一致の理由のひとつに、海岸に近接して設置した水管傾斜計は海の影響を強く受けるから、水準測量の広域傾斜と異なった特殊な傾斜運動を示す可能性もあることを挙げている。以上のことから推して水管傾斜計の円軌道変動の原因もあるいは海の影響ではなかろうかと考えられる。(b)図は油壺と房総半島の南端布良の年平均潮位差の変動図である。その説明によれば、1931年以降30数年間に油壺は布良に比べて直線的に5cm程沈下しているように思われること、(a)図のような10数年周期の変動が現われていないことから、油壺と布良はこのような周期変動に対して平行運動をしていたとみられるとの趣旨が述べられている。しかし、最近の20年間についてみれば、1960年を境にこの西下りの運動が若干東下りに転じているように見える。このことは油壺付近の水準測量、水管傾斜計および鋸山の水管傾斜計の結果と矛盾しない。

6. 油壺の土地上下変動と傾斜変動

藤田³¹²⁾は水準原点—油壺(BM. 5367. 2)間の水準測量の結果(第3.10図(a)鎖線にほぼ同じ)を原点とF. 25(横浜市保土谷区狩場町)、F. 25と油壺の二つの区間に分けた。そして水管傾斜計のE'W'成分の変動パターンが、後者の区間の変動に類似していることを萩原*によって指摘された。第3.11図にその比較を示す。F. 25は油壺のほぼ真北に位置している。(第3.7図(a)参照)N'S'成分ならばともかく、E'W'成分の方がよく一致することの理由のひとつは、F. 25の地点が安定で不動点の役目を果たしていると考えられる。そうであるならば、不動点はどこにあって同じ結果が得られる筈である。油壺の土地が隆起するときは西下りの傾斜変動を伴なうことをこの図は意味することになる。

一方、横浜に対して油壺が沈下しつつある事実も図の示すところである。すなわち長期間の観測結果から、三浦半島の傾斜変動は油壺の水管傾斜計のE'W'成分によって監視できる可能性が生じた。

以上述べたところをまとめると次の如くである。

(1). 水管・水準・検潮の三者は互に密接な関係にありながら、必ずしも常に一致する

* 地震予知連絡会会長

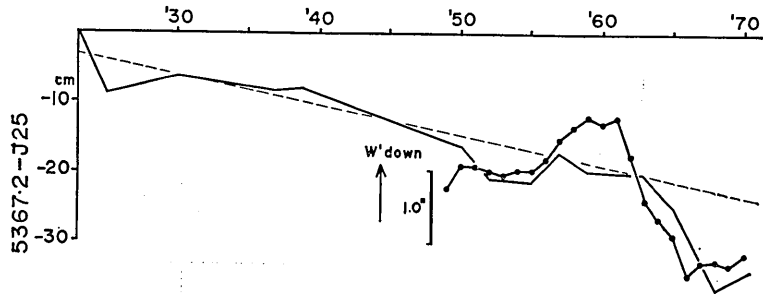


Fig. 3.11 Observed ground tilt (E'W'-component, Aburatsubo) as compared with the levelling data (vertical movement of Aburatsubo referred to Yokohama, after N. Fujita).

とは限らない。その原因は明らかでない。(2).最近の20年間について云えば、油壺、鋸山の水管傾斜計は1960年を境にして西下りが東下りに転じている。このことは三浦半島南端部の水準測量、油壺、布良の驗潮結果と矛盾しない。(3).三浦半島の傾斜変動を監視する際に、油壺の水管傾斜計は重要な役割をもつ。(4).油壺、鋸山の水管傾斜計の細かな変動については検討の必要がある。

7. 鋸山観測所と房総半島の水準測量

三浦半島の一等水準測量が頻繁に行なわれているのに引換え、房総半島では最近までに5回行なわれているに過ぎない。第1回1898年(明治31)、第2回1924年(大正13)、第3回1931(昭和6)、第4回1965年(昭和40)である³¹³⁾。水準路線は千葉市に始まり房総半島を一周し、千葉市に帰る環状路線が主要なものである。最近(1969年)再測が行なわれたが、取あえず前回分までについて考察を行なうことにする。鋸山において水管傾斜計の観測が始まったのは1959年である。観測所付近を通る水準路線は南北方向であるから、観測所周辺を詳しく知るためにはこれと直交する路線が必要である。観測所設立と同時に保田(BM. 3870)・鴨川間の県道に沿って7 km.の区間に5点の水準点を特設した。岡田ら³¹⁴⁾はすでに4回の測量を実施したが、充分な変動があらわれていない。

宮部³¹⁵⁾は関東地震の前後の房総半島の地殻変動を詳しく論じている。それによると房総半島は、地震の前には南上りの運動を続けていたが、地震後は木更津・勝浦を結ぶ線を軸として南下りに転じた。この軸について矢部長克より大滝断層の存在から姉が崎・大原の線とするも同様であると指摘された。

次に地震後の3回の測量結果について調べてみる。第3.12図は千葉・館山・茂原間の水準点の変動図である。地名は第3.13図により位置を知られたい。1924年基準1931年、1931基準1965年の二つの変動を示す。木更津・勝浦間をみると、前者の形を保ったまま木更津が80mm 勝浦が160mm 隆起し、結果として西下りの傾向がうかがえる。ただ、湊・丸山間が少々隆起に取残されている。第3.13図は宮部が作った房総半島のブロック運動図である。図は水準路線に沿って24ブロックに分かれている。各ブロック毎に地震前後の変動がベクトルによって示されている。その傾向は概して海岸線に対して海に向かって下

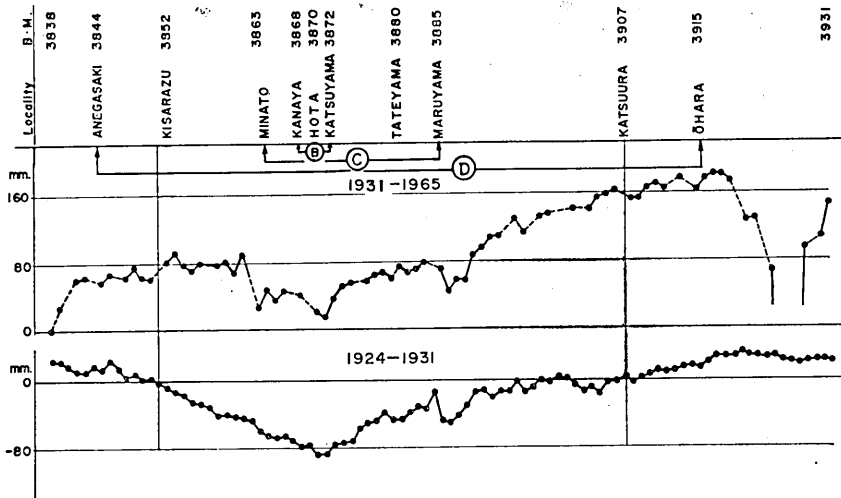


Fig. 3.12. Vertical displacements of the bench-marks in the Bôshô Peninsula during the period 1931-1965 (upper) and 1924-1931 (lower).

ているが、葉山・嶺岡隆起帯においては東下り、木更津・湊間では北下りから西寄に反転している。鋸山観測所は第10番（金谷）のブロックに属している。観測所の位置■印と水準測量の1965年の変動は筆者が加筆したものである。

さて、水管傾斜計との対応を考えるに当り水準測量の領域を三つに分けしめる。すなわち、姉ガ崎一大原の大ブロック、湊一丸山の中ブロック、そして第10番の金谷一勝山の小ブロックである。第3.12図の①、②、③の記号をつけた区間がそれぞれ上の三ブロックに対応する。ここで、大ブロックは中ブロックを含み、中ブロックは小ブロックを含む。故に鋸山観測所はこの三つのブロックのいずれにも属しているわけである。

各ブロックについて宮部の方法によって最大傾斜角とその方位を求めたものが第3.14図である。図で③ブロックの決定には×印、②は×印と○印、そして①ブロックは×○●印によって正弦曲線を決定する。なお、③ブロックの変動は藤井³⁰⁵⁾の図より求めた。第3.15図の①、②、③は得られた結果である。ここで、水準測量は34年間（1931—1965）、水管傾斜計は10年間の値である。そのため便宜上その期間の平均速度をもって両者を比較することにする。図に示す如く、①ブロックは、 $N70^{\circ}W$ の方向に $0.021''/\text{年}$ 、②は $N10^{\circ}W$ で $0.015''/\text{年}$ 、③は $N20^{\circ}W$ で $0.053''/\text{年}$ の速度で傾斜した。一方水管傾斜計は第3.6図より $N55^{\circ}E$ 、 $0.08''/\text{年}$ と求めることができる。そこで、中ブロックの変動③は大ブロック①の影響をうけるから、中ブロックの固有の運動Cと①との和が③として観測されると考える。すなわち $③ = C + ①$ である。同様に $② = B + ③ = B + C + ①$ である。鋸山観測所は小ブロックに含まれるから、水管傾斜計の観測値を④とすると、 $④ = A + ② = A + B + C + ①$ であらわされる。

以上は考え方を述べたものでA、B、Cは知ることの出来ない量である。蛇足ながら、 $A + B + C \rightarrow 0$ または、 $A + B + C \ll ①$ の場合には $④ \approx ③$ を得る。図から察するに現在は $④ \gg ①$ 、従って $④ \approx A + B + C$ の状態であろう。また34年間に対する①、②の値はそれぞ

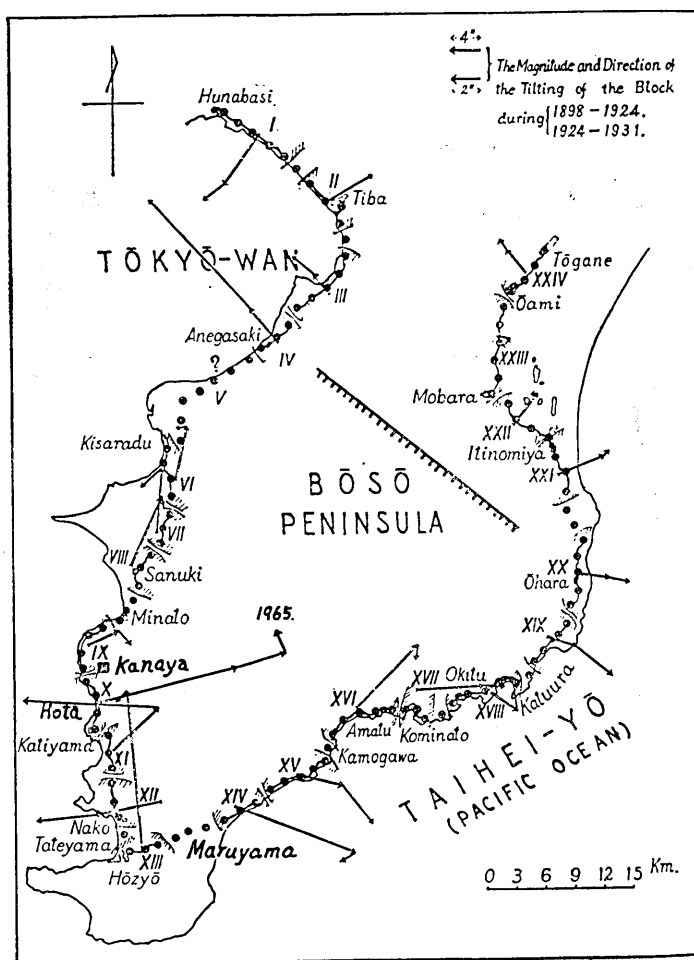


Fig. 3.13. Block movements in the Bōsō Peninsula. (after Miyabe³¹⁵.)

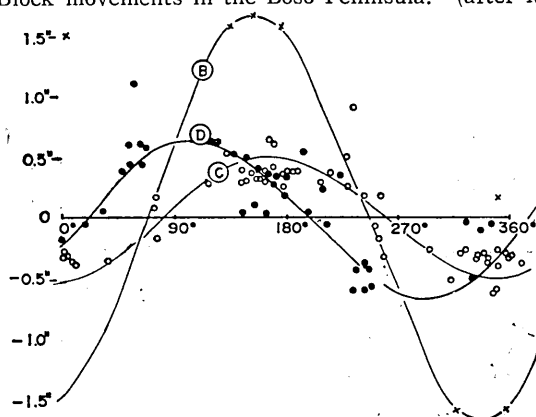


Fig. 3.14. Ground tilt and its azimuth in the three land units interpreted by the Miyabe's method.

註. 第 3.13 図の金谷の水準変動, 姉ヶ崎・大原の断層は筆者の加筆である。

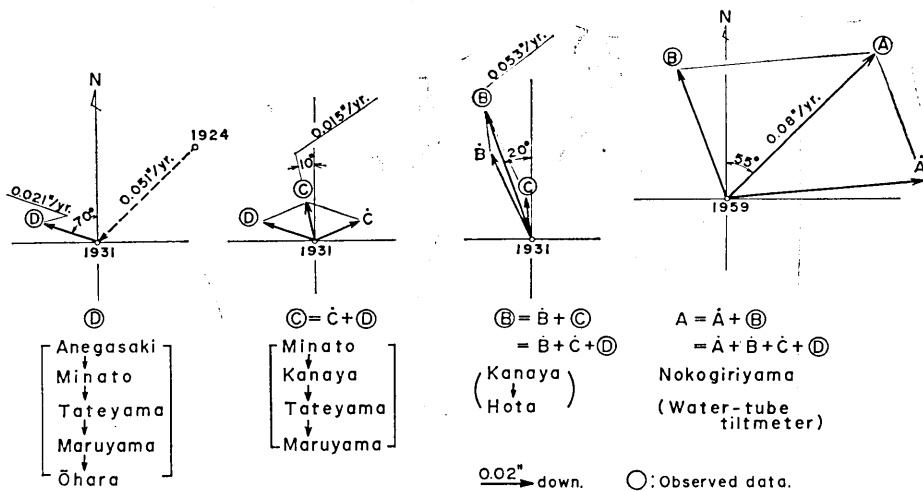


Fig.3.15. Trends of tilting in the three land units as compared with tiltmeter data.

れ 0.021"/年, 0.015"/年である。この値はさきに述べた藤井が造盆地運動の地域で試算した値および地質学的調査結果である 0.01"/年に近い。(50 頁) ③ 地域は活断層を含む不安定な地帯である。水管傾斜計は第 3.6 図の如く緩急さまざまな変動を示す。従って、8 年間で 0.08"/年であるが、最初の 4 年間では 0.14"/年となる。このように長期間の観測により次第に広範囲の水準測量あるいは地質学的調査と調和してゆくことが期待される。

8. 油壺と鋸山の水管傾斜計の比較

第 3.16 図は油壺・鋸山両観測所の水管傾斜計の年平均値のベクトル図である。大きさ

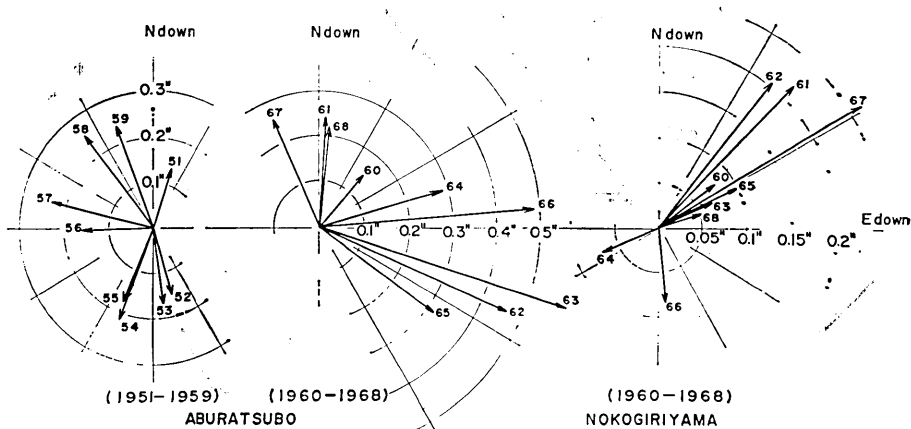


Fig. 3.16. Annual mean values of tilting observed at Aburatsubo and Nokogiriyama.

は鋸山を油壺の2.5倍に拡大してある。1960年以降の両観測所の年ごとの方位を比較してみても、よい一致を見出すことができない。しかし、全体的に見れば、東下りの傾向が基本的なものであることでは一致している。さきに第3.4図、第3.6図に両観測所の月平均の変動をベクトルで示してある。両者を比較するために最もよく一致するように重ね合わせてみたのが第3.17図である。図の太線・黒丸・太字は油壺、細線・白丸・細字は鋸山のものをあらわす。図は次のようにして作られた。(1) 鋸山の尺度を油壺の2.5倍にとる。(2) 油壺の1961年1月と鋸山の1960年1月とを台致させる。(3) 鋸山の座標を 27° 反時計式に廻し、南北を反転する。

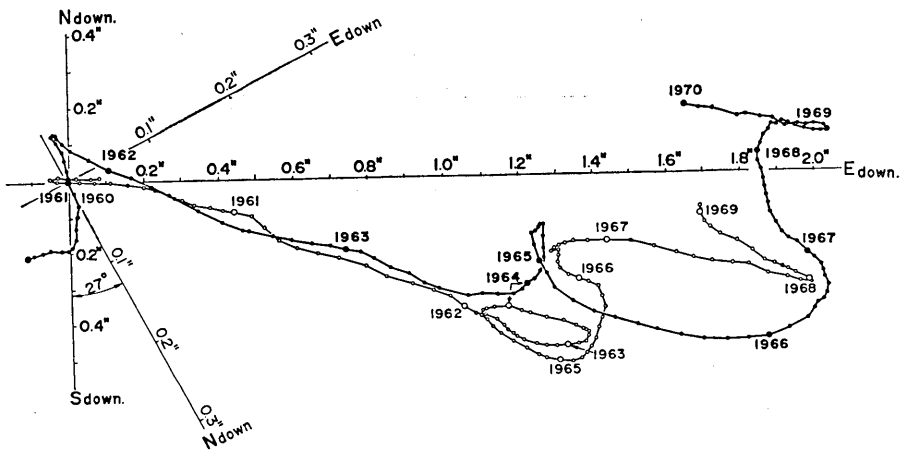


Fig. 3.17. Comparison of secular ground tilting at the two adjacent stations Aburatsubo (thick line, closed circle and thick letters) and Nokogiriyama (thin line, open circle and thin letters).

傾斜変動は次の四つの型に分類できるように思う。A. 急激に方向転換をする。B. 一方向に急激に流れる。C. 大きな円弧を描き、D. 時に環状を形成する。点と点の間隔は歪速度をあらわしていると考えられるが、運動が方向を転換しようとするとき、曲り角付近において変動速度は鈍化する。

さて、上述の四つの型について両者の変動をくらべてみると、非常によく一致していることに気付くであろう。図の大きな丸はその傍の年号の1月を示す。従って、時間的に鋸山が油壺に対して1年間現象が先行している。すなわち、発生源は鋸山の東にあり、地殻歪は西に移動してゆくと考えられる。

9. 観測結果に対する考察

以上油壺・鋸山両観測所の水管傾斜計の観測結果を比較したが、次の三点の問題が考えられる。a. 鋸山の南北反転の理由。b. 時間遅れの理由。c. 油壺の変動が鋸山の2.5倍大きい理由。以下順に考察を試みる。

a. 鋸山の南北反転について

三浦・房総地区の造構運動を論ずる際に嶺岡・葉山隆起帯が常にその中核をなしている

NOKOGIRIYAMA

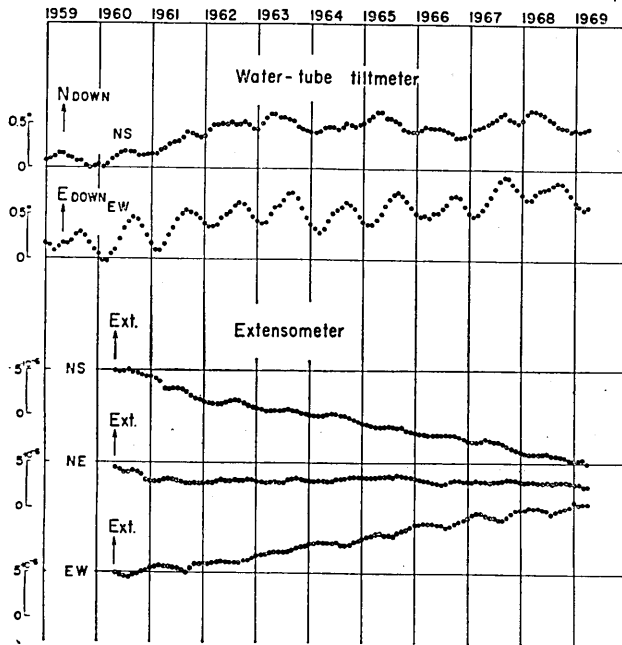


Fig. 3.18. Ground tilts and strains at Nokogiriyama (monthly mean values).

ABURATSUBO

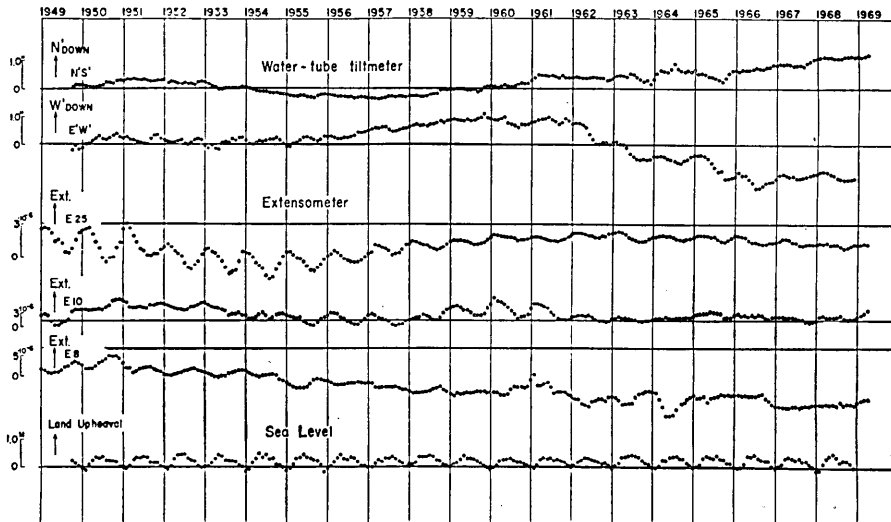


Fig. 3.19. Ground tilts and strains at Aburatsubo (monthly mean values).

ことはすでに述べた。(49~50 頁) その分布は第 3.2 図に示されている。油壺は隆起帯の南側に、鋸山は隆起帯の北縁に位置している。

松田・村井のいう三浦半島で北北西—南南東、房総半島で南北方向の強い圧縮力が働くならば(49 頁)、油壺の南下り、鋸山の北下り傾斜変動は、圧縮力によって隆起帯の背斜地形を一層強める向に働いたことの説明になる。さらに伸縮計について調べてみる。第 3.18, 3.19 図はそれぞれ鋸山、油壺の伸縮計の変動を示した図である。(計器の配置は 15 頁参照) 房総半島における南北方向の強い圧縮力に対して鋸山の伸縮計の NS 成分は一樣な縮み、EW 成分は一樣な伸を示している。一方三浦半島における西偏の圧縮軸は油壺の E8 (N25°W) 成分とほぼ一致するであろう。この成分もまた一樣な縮みを示している。油壺・鋸山の座標軸の 27° の差異は、油壺の最も急速に一方向に流れている 1963 年前後の変動の方位に一致するものであり、同時に三浦半島の右ずれ系活断層の走行とも一致するものである。以上のことから両観測所における水管傾斜計の観測結果は嶺岡・葉山隆起帯の造構運動と矛盾していないと考えられる。

b. 遅れ時間について

第 3.17 図が示すように鋸山の変動は油壺に対してほぼ 1 年先行している。油壺・鋸山間の距離は 20km である。従って変動の伝わってゆく速度 $u=20\text{km/yr}\approx 0.06\text{cm/sec}$ となる。水管傾斜計は傾斜のみを知るものであるが、水準測量が示す如く年間数 mm から 10 数 cm に及ぶ地殻の上下運動の結果として傾斜が観測される。観測区域を三浦・房総地区にとどめる限りわれわれの観測する変動は小区域の地殻表面の凹凸変化に過ぎない。

スカンジナビア半島の隆起運動は有名である。現在も 1cm/年の速度で隆起しているというが、その範囲は広大である。この現象を基にしてマンツルの粘性を多くの人が論じている。同様の手法でわれわれの観測からも地殻の粘性を推論できないであろうか。試みに基本的事項を島津³¹⁶⁾の著書によって述べてみる。粘性流体の基本となるものは Navier-Stokes の運動方程式である。いま座標軸を水平方向に x 、下方向に z をとれば

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\text{grad. } P + \eta \nabla^2 V + \rho g \quad (3.1)$$

ここで ρ は密度、 V は速度ベクトル、 P は圧力、 η は粘性係数、 g は重力加速度である。緩慢な現象に対して加速度項それに圧縮性は無視してよい。 x, z 方向に対して

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \eta \nabla^2 u \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \eta \nabla^2 w + \rho g \quad (3.3)$$

の基本式を得る。ここで u, w はそれぞれ x, z 方向の速度、粘性流体は $z=0\sim\infty$ に存在しているとする。これに非圧縮性の条件 $\text{div. } V=0$ を加え、未知数 u, w, P が

$$\begin{pmatrix} u \\ w \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u'(z) \\ w'(z) \\ P'(z) \end{pmatrix} e^{iiz} e^{-t/\tau} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho g z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

の形で解けると仮定し、実際に解答が得られるのである。ここで求めたいものは、緩和時間 (τ) と粘性係数 (η) の関係である。途中の計算は省略し結果のみを示せば

$$\tau = 2\pi\eta/\rho gL \quad (3.5)$$

L は隆起域の半波長である。スカンジナビアの例では、 $\tau=5280$ 年、 $L=1200$ km、 $\rho=3.27$ として次の値を得ている。

$$\eta = 1.02 \times 10^{22} \text{ Poises} \quad (3.6)$$

ここでは極めて広大な地域を扱っているので地殻の厚さは無視され、上部マントルのほぼ 1000km までの平均値と見做されている。

これよりやや小規模のもので、アメリカの大塩湖について同様の解析を行なったものがある。この場合 $\tau=4000$ 年、 $L=200$ km として

$$\eta = 1 \times 10^{21} \text{ poises} \quad (3.7)$$

を得ている。前例より 1 桁小さいが深さ 100km までのマントルの平均としている。

竹内は剛体上に厚さ H の粘性流体がのっている層構造の場合を考えた。そして $H \ll L$ のとき表層内の運動は主として水平方向の流れであるとして取扱っている。この場合の緩和時間 τ は

$$\tau = 3\eta/\rho gH^3 \cdot (L/2\pi)^2 \quad (3.8)$$

である。(3.5)式にくらべて著るしい差異は $\tau \propto L^2$ 、すなわち長波長の凹凸ほどつぶれにくいことをあらわしている。

南関東地区について金森³¹⁷⁾ は重力異常および 爆破地震動の結果からモホ層の深さをきめた。それによると深さは 31.3km、また密度 ρ は平均して 3.00 の値を得ている。神沼³¹⁸⁾ はレーリー波の位相速度から地殻の厚さを決定している。この場合波動の到来方向によって多少異なるが、27~30km の値を得ている。国土地理院³¹⁹⁾ が房総・三浦地区の水準測量の結果をまとめた上下変動図を見ると、隆起域の半径は 30~35km である。

スカンジナビアや大塩湖の例では地殻は無視できるほど大規模なものであるが、南関東地区における上述の資料は地殻部分の粘性についての情報も十分に含むものと考えることができる。しかし、移動性地殻変動について実際に適用し得る計算式をわれわれは持たない。いま仮に (3.5)、(3.8) 式によって η を求める試みを許されたい。 $L=60$ km、 $\rho=3$ 、 $\tau > 1$ 年 (仮に 1年とする)。

$$\eta = \rho gL/2\pi \cdot \tau = 1/6(3 \cdot 10^3 \cdot 10^6) \cdot 3 \times 10^7 = 9 \times 10^{16} \text{ Poises} \quad (3.9)$$

また、

$$\eta = \rho gH^3/3 \cdot (2\pi/L)^2 \cdot \tau = 8.1 \times 10^{17} \text{ Poises} \quad (3.10)$$

となる。McConnell³²⁰⁾ は種々な層モデルについて波数と緩和時間との関係を理論的に求めた。第 3.20 図はその一例である。

(a) は半無限の剛体上に一層の粘性流体がのっている場合、

(b) は半無限の粘性体の上に粘性係数の異なる層がのっている場合である。ここで、座標軸の

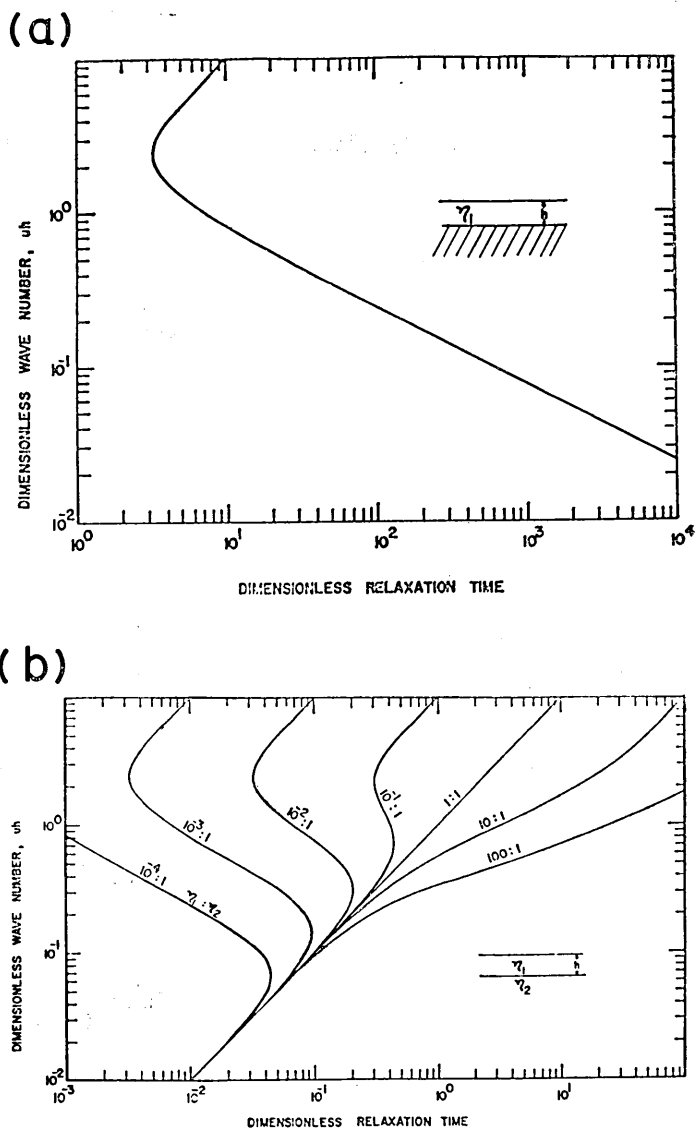


Fig. 3.20. (a) Relaxation time as a function of wave number for a single viscous layer over a rigid half-space.
 (b) Relaxation time as a function of wave number for a viscous layer overlying a viscous half-space. (after R. K. McConnell)

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Dimensionless relaxation time} \quad \bar{\tau} &= \frac{\rho g h}{2\pi} \cdot \tau \\
 \text{Dimensionless wave number} \quad uh &= h/\lambda \quad (\lambda: \text{波長})
 \end{aligned} \right\} (3.11)$$

であらわされるものである。いま、 $h=30\text{km}$ 、 $\lambda=120\text{km}$ とすると、 $uh=30/120=0.25$ 、

これに対する $\bar{\tau}$ の値は、(a) 図では 10^2 である。

$$\eta = \rho gh / 2\bar{\tau} \cdot \tau \tag{3.12}$$

より

$$\eta = 3 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^6 / 2 \times 10^2 \cdot 3 \cdot 10^7 = 1.4 \times 10^{15} \text{ Poises} \tag{3.13}$$

次に (b) 図において $\eta_1/\eta_2 = 10^{-1}$ の場合 $\bar{\tau} = 0.22$ である。(3.12) に代入して

$$\begin{cases} \eta_1 = 6.1 \times 10^{17} \text{ Poises} & (h = 0 \sim 30\text{km}) \\ \eta_2 = 6.1 \times 10^{18} \text{ " } & (h > 30\text{km}) \end{cases} \tag{3.14}$$

同様に $\eta_1/\eta_2 = 10^{-2}$ の場合 $\bar{\tau} = 0.2$

$$\begin{cases} \eta_1 = 6.8 \times 10^{17} \text{ Poises} & (h = 0 \sim 30\text{km}) \\ \eta_2 = 6.8 \times 10^{19} \text{ " } & (h > 30\text{km}) \end{cases} \tag{3.15}$$

以上種々な式によって地殻の粘性の試算を行なったところ $10^{15} \sim 10^{18}$ の値を得た。

第3.22図は地表からの深さに対する種々な粘性モデルを示したものである。たとえば、McConnell 7, 竹内のモデルでは地表に近いところは 10^{20} 程度の値である。試算の結果はこれらのモデルに比べてそれほど不自然ではないように思われる。しかし、 $\eta = 10^{20}$ として逆に τ を求めてみると、McConnell (b) 図によるものを除きいずれも $10^3 \sim 10^4$ 年を超える値となる。

(b) 図において、 $\eta_2 = 10^{20}$ にとると $\tau = 16$ 年 ($\eta_1/\eta_2 = 10^{-1}$)、 $\tau = 1.5$ 年 ($\eta_1/\eta_2 = 10^{-2}$) となる。移動性地殻変動のゆらぎが 10^3 年も保存されることは考え難いところであるが、20年程度なら可能とするならば、たとえば、1953年の房総沖地震の影響が1963年に鋸山にあらわれることも起り得ることである。さきの計算式にはそれぞれの条件 (Haskell (3.5) は $L/H \rightarrow 0$, 竹内 (3.8) は $L \gg H$) が含まれている。またアイソスタテックな均衡作用と波動的挙動の移動性地殻変動の現象とでは自から異なるであろう。しかし、同じ粘性媒質の作用であるならば、われわれの観測からも粘性係数が求められてもよいと考える。なお、移動性の現象として、Savage³²¹⁾ のトランスフォーム断層のデスロケーション・ドリフトの例としてサンアンドレアス断層の 10km/yr 、茂木³²²⁾ による震源の移動系列についてアナトリア断層 (80km/yr) などの例をあげることができるが、こうした事実も移動性地殻変動と関係があるように思われて興味深い。また、房総・三浦地区における隆起域の半径がモホ層の深さに一致することも注意をひく事柄である。

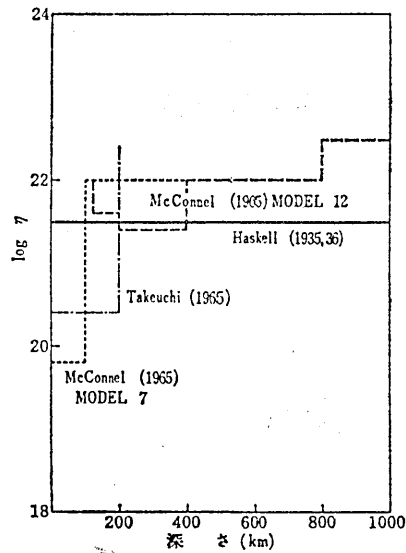


Fig. 3.21. Log_{107} viscosity versus depth in kilometers. (after Y. Shimazu³¹⁶⁾.)

ここではマンツルの粘性流動が地殻の緩慢な傾斜変動に重要な役割をもつこと、今後の地殻変動の研究にレオロジカルな考えが重要であること、鋸山の変動から油壺の変動を予測する可能性を生じたことを指摘しておきたい。

c. 油壺の変動が鋸山の2.5倍大きいこと

鋸山の変動が油壺に対して1年間先行していることは発生源が鋸山の東側にあることである。従って、均質な媒質が一樣に分布しているならば、遠い側の油壺の変動が近い側の鋸山より小さい方が自然である。然るに実際は油壺の変動が鋸山の変動より2.5倍も大きい。この事実を説明することはかなりむづかしいと思う。

安藤³²³⁾は関東地震(1923)の震源パラメータを地殻変動の資料を用いて推定した。それによると断層面の長さ130km、巾65km、dip 45°、その走向N45°W、そして断層面の運動として逆断層成分3m、右ずれ成分6mの値を示している。すなわち、相模トラフを境にして西側の地殻のブロックの斜面の上に上記の東側のブロックがずり上った相対的な運動を起したと考えている。第3.22図は相模湾付近の地図で、破線は安藤による関東地震の断層面と地表との交線である。油壺・鋸山両観測所はこの断層面の直上投影面に含まれるが、断層線までの水平距離の比は、14km:30km \approx 1:2である。このことは両観測所の傾斜変動の大きさの比が2.5:1であることと関係がありそうに思われる。そうであるならば、移動現象はサンアンドレアスやアナトリア断層の例の如く相模トラフ沿に伝播してくるものかも知れない。その場合、伝播速度は $20\text{km/yr} \cdot \cos 45^\circ \approx 15\text{km/yr}$ で、粘性係数も若干増加が期待される。以上問題の解決に至らないが、手がかりになると思われる事項を述べた。

d. 実験室における岩石の粘性係数

岩石の一軸圧縮によるクリープ試験の結果に Maxwell モデルと Voigt モデルを直列

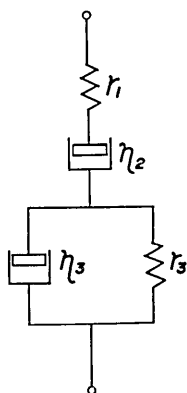


Fig. 3.23. Burgers model.

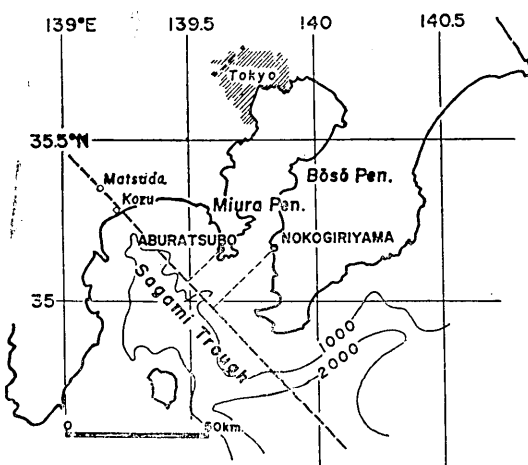


Fig. 3.22. Sketch map of the South Kanto district. Broken line denotes the fault trace of the great Kanto earthquake. (after Ando,³²³⁾).

に連結した Burgers モデルを適用した場合について山口・西松³²⁴⁾の著書を引用する。

岩石のクリープ現象などの変形と力の関係の時間的变化，すなわちレオロジー的性質を説明するのに最近力学的模型による方法が試みられている。第 3.23 図の Burgers モデルに瞬間的に荷重を加え，その荷重を一定に保った場合の歪 ε と時間 t との関係式は

$$\varepsilon = \sigma_0 \left[\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\eta_2} + \frac{1}{\gamma_3} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_3}{\eta_3} t\right) \right\} \right] \quad (3.16)$$

である。ここで， σ_0 は応力， γ_1 ， η_2 はそれぞれ Maxwell モデルの， γ_3 ， η_3 は Voigt のばねの弾性率とダッシュポットの粘性率である。和泉砂岩について上式を適用すると， $\sigma_0 = 510 \text{ kg}$ ， $\gamma_1 = 1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ， $\eta_2 = 7.7 \times 10^{17} \text{ Poises}$ ， $\gamma_3 = 3.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ， $\eta_3 = 7.1 \times 10^{15} \text{ Poises}$ が得られた。

10. 松山市における水管傾斜計の観測

1946年12月21日の南海地震は四国各地に大きな地盤変動をひき起した。地盤沈下による四国四県の被害総額は地震そのものによる被害額をはるかに上まわるものであった。太平洋岸の地盤変動の回復は急速であったのに比べて瀬戸内海沿岸一帯の沈下運動は進行を続ける一方で留まるところを知らぬ状態が13年間も続いた。そのため沿岸地帯は満潮時，特に台風の高潮に際し海水浸入による沿岸住民の生産活動，日常生活の支障は真に同情に堪えないものがあつた。1948年，四国地方経済復興開発委員会の中に地盤変動調査専門委員会が発足し，沈下の調査究明にのり出すことになった。愛媛県土木部は地盤沈下対策として海岸線に沿ってぼう大な護岸工事を行なうことによって災害の解消に当たったが，その必要資料を提供するために松山観測所が設立された。筆者もその一員として観測業務に従事した。観測坑は松山市郊外吉田浜にある旧海軍の防空壕を利用して計器を据付け1949年(昭和24年)9月より観測を開始した。観測坑は海岸の西1kmのところであり潮汐の影響は鋸山とほぼ同じく，水管傾斜計の諸要目に関しても同様である。(14, 15頁参照) 観測開始の当初，付近一帯は畑地と草原であつたのが10年後には松山空港を残して北部一帯は松山工業地帯となり，現在は民家が密集し市街地と化した。

一方松山市の北東約40kmにある今治を起点とし高縄半島の先端に8の字型の閉塞水準路線が高橋教授等によって設けられてあつた。

この路線の精密測量は5回行なわれているが，最後の3回は松山観測所の記録と比較検討のために実施されたものである。専門委員会解散後は地震研究所が観測を続行することになった。1960年(昭和35年)計器基礎台石など観測坑の大改装を行なつた。そして今日まで約20年間観測記録を蓄積してきた。

a. 松山市・高縄半島付近の地盤変動

第 3.24 図は国土地理院³²⁵⁾が行なつた高松・宇和島間の一等水準測量から変動量を求めたものである。南海地震の前(1937—1893年)と後(1947—1937)とを比べてみると，地震によって全体的に約30cmの沈下が見られ，隆起部分と沈下部分の傾向が地震の前後で反対になっている。松山・高縄半島付近について云えば地震前は緩慢な北下りの運動を行な

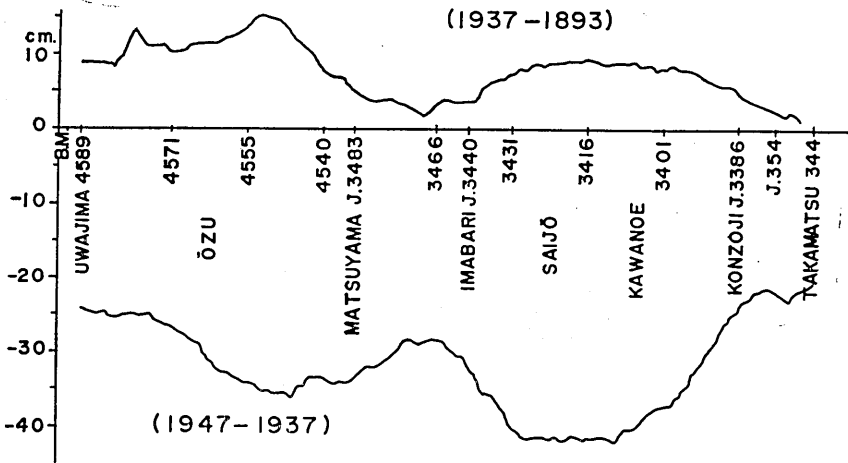


Fig. 3.24. Height changes of bench-marks between Takamatsu and Uwajima during the period 1893-1937 (upper) and 1937-1947 (lower). (after G. S. I.)

なっていたのが地震によって北上りとなり、全般に 30cm の地盤沈下に急速な北下りの復帰運動が加わってこの事態に至ったものと考えられる。

第 3.25 図は高橋ら³²⁶⁾によって作られた高縄半島の 8 の字型水準路線図である。松山の水管傾計斜と比較する目的では今治 J. 3440 の水準点を不動と仮定して1949年12月、1952年12月、1956年2月の3回の精密水準測量が岡田ら³²⁷⁾によって行なわれた。

第 3.26 図は 5 回の測量から変動量を求めたものである。さらに正弦法によって傾斜変

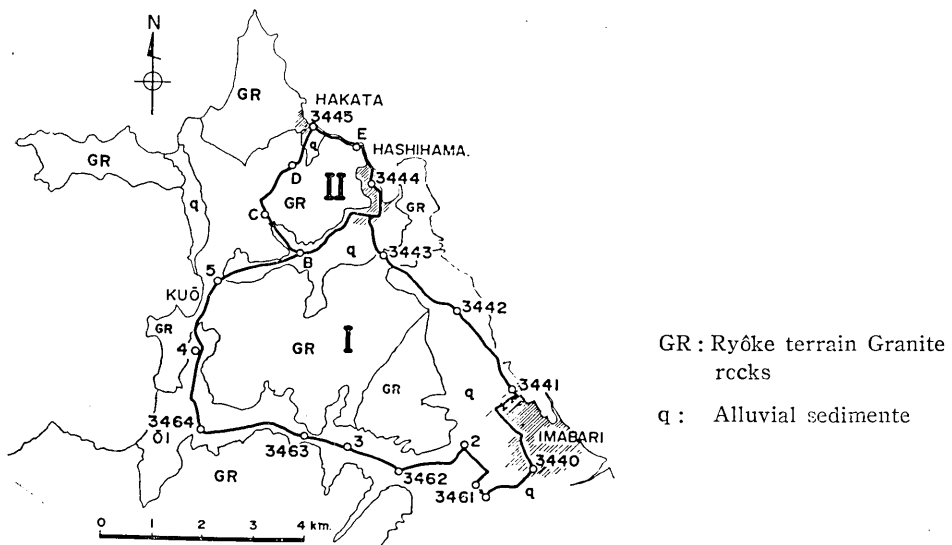


Fig. 3.25. Geological map and levelling route in the Takanawa Peninsula.

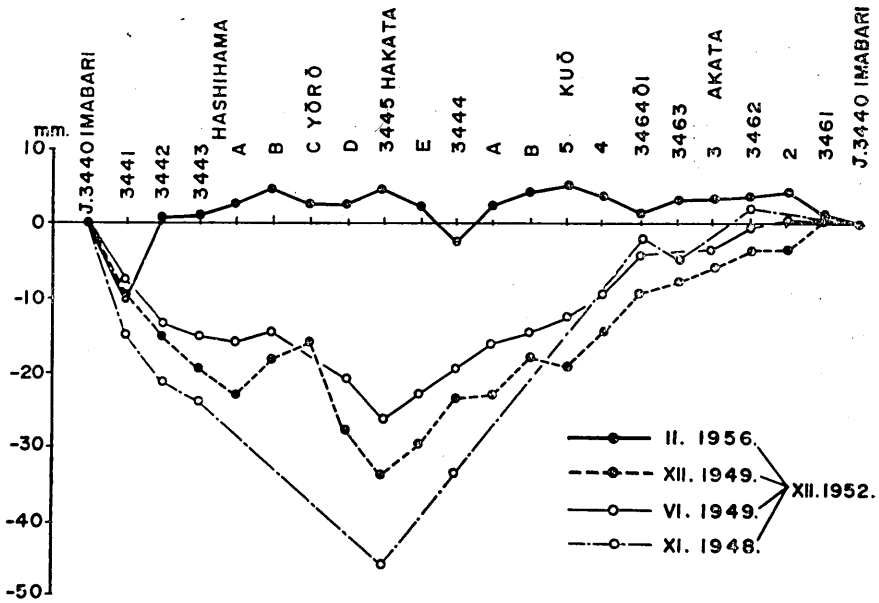


Fig. 2.26. Height changes of bench-marks in the Takanawa Peninsula. (after Okada et al., 327).

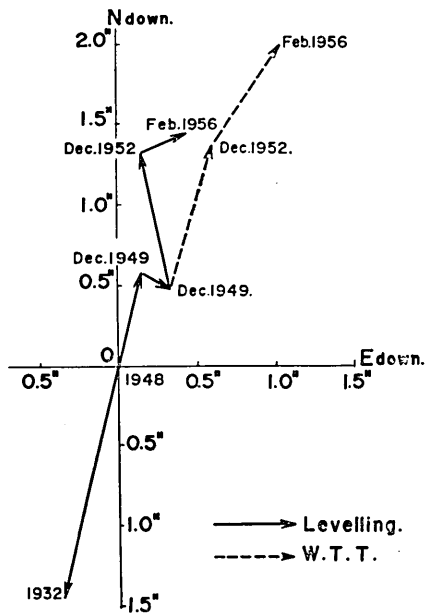


Fig. 3.27. Comparison of levellings with tiltmeter observations at Matsuyama.

動の方位とその大きさを求め、ベクトル表示したものが第 3.27 図の実線で示されたもので、破線は同期間に対する水管傾斜計の結果である。水管傾斜計の結果は先に述べた油壺の場合 (56 頁) と同様、前回と今回の測量期間に対する 12 カ月移動平均値を結んだものである。水管・水準測量両者の 1949 年 12 月～1952 年 12 月の変動は方位、大きさ共 40km も離れた場合としてはよい一致を示している。このことはかなり広範囲に亘って地殻が一樣な運動を行なったことを意味し、そのブロックは面積、厚み共に巨大なものであることが推定される。次回の 1952 年 12 月～1956 年 2 月の方は、第 3.26 図に見られる如く第 I リング (南) と第 II リング (北) とは別個の運動をしている。すなわち、

第 I リング : 0.1" N down, 0.2" ~ 0.3" E down.

第 II リング : 0.2" N up, 0.5" ~ 0.6" E down.

愛媛県地質図³²⁸⁾によれば、高縄半島は領家帯花崗岩類によって占められているが、第 I リングと第 II リングの境の部分には細長く第四系が挟まれている。このような部分は構造的に折れ曲り易い場所であるかも知れない。ともあれ、次項第 3.29, 3.30 図水管傾斜計

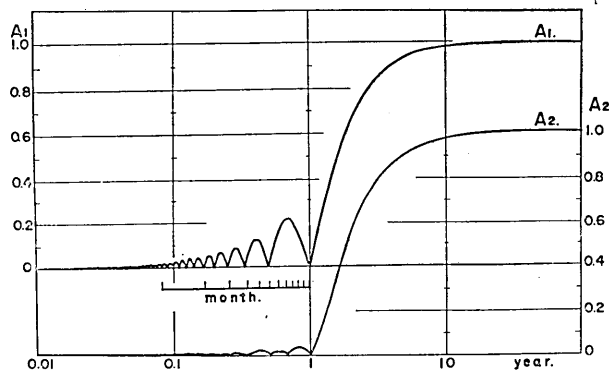


Fig. 3.28. Response of the low-pass filtering by overlapping mean method. A_1 : first filtering (12-month overlapping mean), A_2 : after second filtering (9-month o. m.), data by Shichi.

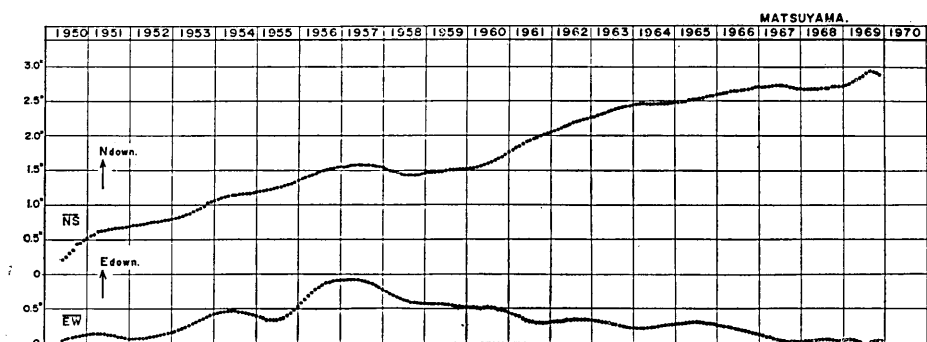


Fig. 3.29. Secular ground tilting at Matsuyama.

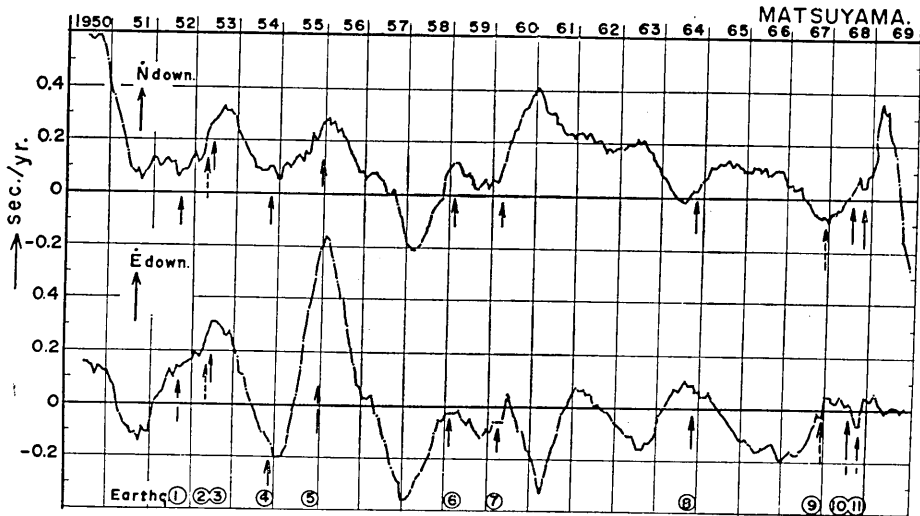


Fig. 3.30. Velocity of ground tilting at Matsuyama.

の経年変化を見れば明らかな如く、この期間は北下り運動が鈍化し、東下り運動が最も活発にならんとする時期に当る。方向については不十分であるが、両者の東西成分の大きさはよい一致を示している。そして翌々1958年(昭和33年)、地盤沈下の終熄が宣せられた。

b. 水管傾斜計の観測結果

地盤沈下問題に関して松山の水管傾斜計と高繩半島の水準測量の比較は以上の通りである。しかるに1960年より地盤沈下問題のときに勝るとも劣らない北下り運動が起っている。その原因探究について若干述べてみたい。その方法は多く志知³²⁹⁾の助言によるものである。油壺、鋸山の場合12カ月の移動平均だけであるが、これに9カ月の移動平均を加えた。その理由は12カ月だけでは9, 5, 3カ月の周期成分が若干残るが、もう一度9カ月の移動平均を行なうことにより、これらを殆んど除去できる。第3.28図はこのような移動平均法によるデジタル・フィルタの沓波特性で、 A_1 は12カ月のみ、 A_2 は12カ月と9カ月の移動平均を行なった場合を示す。次に、志知はこの移動平均値の時間微分、すなわち傾斜速度であらわすことにより変動を拡大して観察する方法を試みるよう助言があった。

さて、松山における計器の配置は第1.1表、第1.9図(14, 15頁)に示してある。観測は朝夕2回行なっているが、第2.29図は朝(08:30)の観測値の月平均値を12カ月と9カ月の移動平均を行なったものである。なお、方位を地理学上の東西・南北の成分になおしてある。実際に松山の観測結果について、移動平均12カ月のみと9カ月を加えた場合とでは、後者の方が幾分滑らかなになった程度で顕著な差異はなかった。第3.30図は第3.29図を傾斜速度であらわしたもので第3.29図で目立たなかった変動が顕著に表現されている。ここで注目すべきことは、1960年を境に東西・南北両成分の変動が逆位相になっていることである。すなわち、地盤沈下問題とは別個の要素の変動が生じたものと推定される。地盤沈下終熄宣言(1958年)以降1968年までの10年間の変動を第3.29図より求めるとN25°W

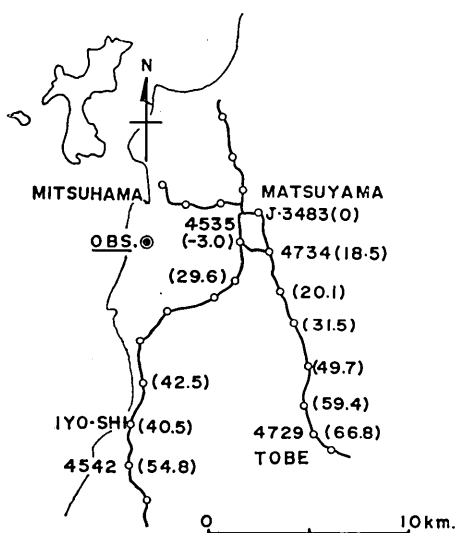


Fig. 3.31. First order levelling route of G. S. I. in Matsuyama area.

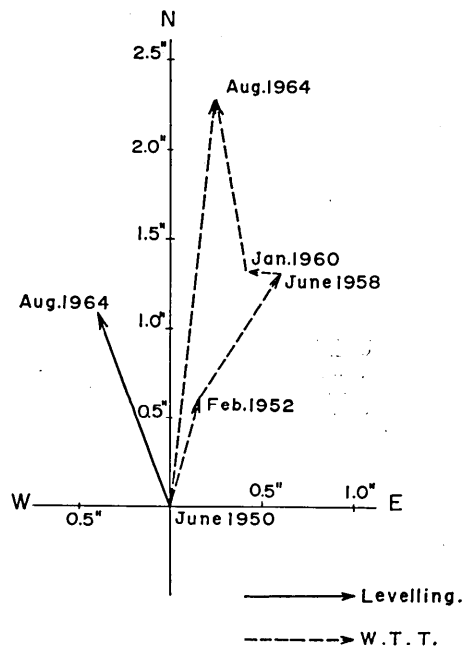


Fig. 3.32. Comparison of levellings with tiltmeter observations at Matsuyama (June 1950—Aug. 1964).

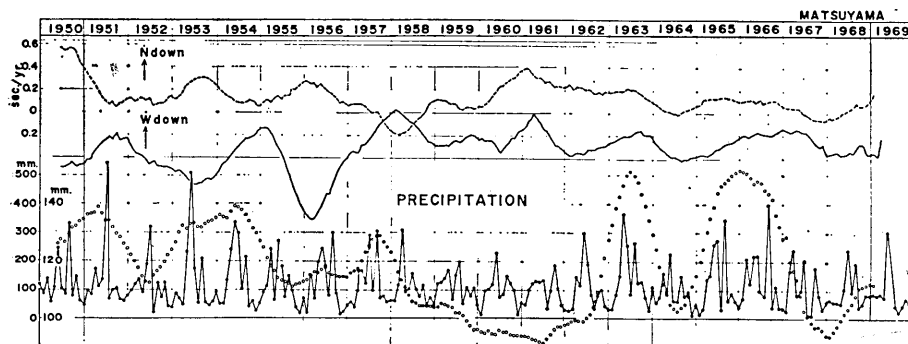


Fig. 3.33. Precipitation and velocity of ground tilting at Matsuyama. closed circle : monthly value, open circle : overlapping mean of the monthly values.

の方向に 1.4 秒角下っている。

c. 観測結果と地下水

先ず最近の地盤変動について調べてみる。

第 3.31 図は松山市付近における国土地理院の一等水準路線図である。これらの区間について 1950 年と 1964 年に測量が行なわれている。図の括弧内の数字は松山市の J. 3483 を

基準としたときの変動量である。この図に基づいて松山平野南部はほぼ 10km 四方の地域から得られる平均的傾動は $N20^{\circ}W$ で 1.18 秒角下りである。これと同期間における水管傾斜計は $N6^{\circ}E$, 2.32 秒角下りである。第 3.32 図は両者の比較を示したもので、大きさは水管傾斜計の方が 2 倍大きく、北下りの大勢においてまずまずの一致とみてよいであろう。

次に地下水の影響を調べてみたいと思ったが、地下水の長期的資料が今のところ入手できないので、その補給源である降水量との関係について調査した。第 3.33 図は松山地方気象台の資料³³⁰⁾による松山市の月別降水量を 12 カ月と 9 カ月の移動平均したものを傾斜速度と比較したものである。降雨量について、平野部の松山市と山間部とでは差異が認められたが、ひとまず永続的資料を有する松山市の資料を用いることにした。図において降雨量の増加と共に西下りの傾斜速度が大きくなる傾向がみられ、時間的に 4~5 カ月の遅れが認められる。また、1960 年以降は南北成分も東西成分に酷似の変動をしている。石手、重信の両河川は松山平野を貫流し松山市に水資源を供給している。両河川の合流する松山市西南部一帯は、観測所付近を含めて、その豊かな伏流水に恵まれている。柱状図によれば深さ 130m 程度まで粘土と粘土交砂利、あるいは交砂の互層で、ほぼこの深さまで取水が行なわれている。県当局に伺ったところによると、1959 年~1966 年頃まで毎日 11.5 万トン ($\approx 1.3m^3/秒$) の水が汲上げられ、その大部分が松山臨海工業地帯に向けられていたが、それ以後は逐次工業用水道に切替られて現在に至っているという。

このような大量の水が長期間に亘り汲上げられた場合に地盤変動の起る可能性について、小牧³³¹⁾が四日市で行なった調査がある。四日市の場合、揚水量は松山をやや上廻る量であるが工業用水法の指定地域内では地下水位および地表沈下共に揚水量の影響は顕著であるが、その及ぶ範囲は 10km 以内であるとしている。また、井底における地層 1m 当りの年間収縮量は沖積層洪積層では 0.3~0.4mm、第三紀層ではその 1/5 程度である。小沢³³²⁾は逢坂山観測所において、近所の養魚場が 1 日 50 トン程度であが 30 分毎に 7 分間ポンプを運転する間歇揚水によって生ずる土地変動を伸縮計による群列観測を行なって影響の程度を調べた。この場合、伸縮計の記録上で、ほぼ 25 分間で揚水の影響が回復するので 250m 離れれば長期変動の観測には差支えないとしているが、変動の検知は 500m に及んでいる。

野間³³³⁾は 1953 年~1957 年の期間に石手川の伏流水の流動状態を 530 点に及ぶ氷露頭の比抵抗測定の結果から論じているが、特にわれわれの観測所の南部付近では著るしく流速が減じていること、相当内陸部まで海水の浸入が認められることを指摘している。

以上述べた諸例より筆者の言わんとするところは、至近距離において相当量の揚水を行なった際にその影響が傾斜観測の結果にあらわれていない筈はないということである。傾斜の観測結果はさきに述べた通りであるが、傾斜の方向は 1952 年頃より活動を開始した松山臨海工業地帯の諸工場の方向に一致している。観測所よりの距離も 0.5~3km である。しかるに、松山平野における水準測量の結果もまた同様の方位を示している。小牧の言うように揚水の影響が 10km 近くに及ぶとしても松山平野全体の傾斜を支配するところまでは考え難いのである。1960 年より数年間の北下りの急変動、1963 年、1966 年の大量の降雨にも拘わらずそれほど大きな西下りの速度変動を示さないことなどは揚水と深い関係がある。

ように思われるのであるが、充分な論拠を得るに至らない。引続き資料の蓄積を待って研究を続けてゆきたいと思う。

d. 観測結果と地震活動

松山観測所が開設された1949年9月から1968年末までの19年間に観測所を中心に半径100kmの距離に入るマグニチュード3.3以上の地震は、気象庁の地震カタログ³³⁴⁾によると60個を数える。第3.34図はそれらの震央分布図である。このうち、地殻変動観測計器に歪を捉え得る有効な距離に達していないものは除かなければならない。その規準として檀原³³⁵⁾の地震の規模 M と地殻変動の範囲 r との関係式がある。

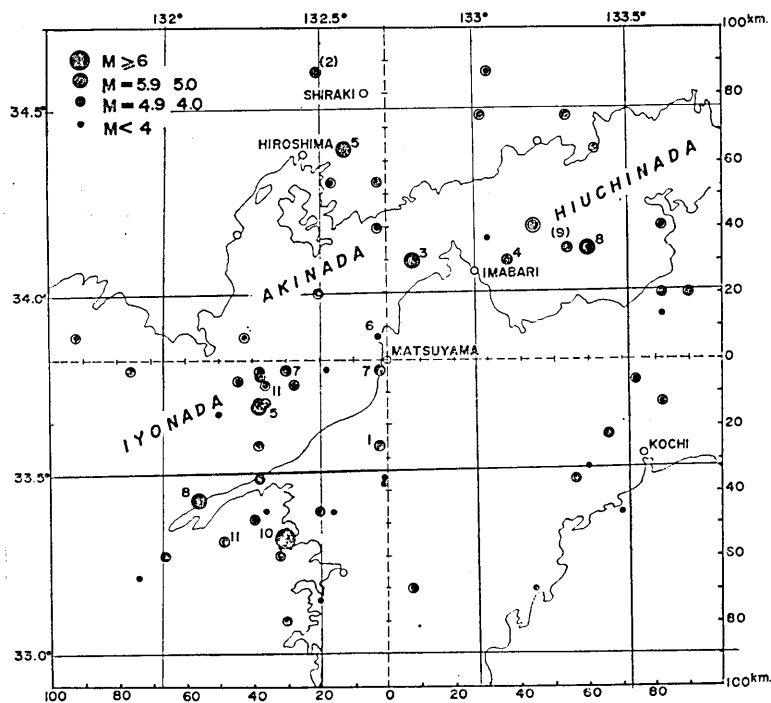


Fig. 3.34. Earthquakes around the Matsuyama Observatory ($r \leq 100\text{km}$). after J. M. A.³³⁰⁾.

$$\log r^3 = 1.53M + 8.18 \pm 0.8 \quad (3.17)$$

比較的大きな標準偏差は M の大きい方に誤差が大きいためであるというが、大きめに見積った概略の値を求めてみる。

$$\log r^3 = 1.53M + 9,$$

すなわち

$$\log r = 0.51M + 3 \quad (3.18)$$

と仮定すると次の値を得る

$M=7.0$: $r=37$ km.

6.5 : 21

6.0 : 7.7

5.5 : 6.4

$M=5.0$: $r=3.6$ km.

4.5 2.0

4.0 0.25

坪川³³⁶⁾は地震のエネルギーが貯えはじまってから地震に至るまでの時間 T と地震の規模 M との関係を

$$\log T = 0.79 M - 4.44 \quad (3.19)$$

の式であらわし、 T を地殻変動の継続時間としている。上式によれば、

$M=7.0$	$T=12$ 年	4.5	1.6月
6.5	5	4.0	19日
6.0	2	3.5	7.6
5.5	10月		
5.0	3.8		

となる。

Mescherikov³³⁷⁾はタシュケント、新潟などの地震における地殻変動の経過の例から、その時間的推移を α , β , γ の三期間にわけている。 α を直線的永久変動の期間、 β を地震に近く様相の変化する期間、 γ を発震時を含む不連続な急激な変動期間としている。その形を三本の折線によって代表させている。

そこで前述の60個の地震のうちから地殻変動の範囲内にあるものを探したが残念ながら

Table 3.2. List of earthquakes on which precursive tilting at the Matsuyama Observatory was examined.

No.	DATE	LAT.	LONG.	DEPTH	MAG.	DELTA
1	5 SEP '52	33.60N	132.70E	35km	4.7	25.7km
(2)	13 APR '53	34.60	132.50	10	4.1	88.0
3	30 JUL '53	34.10	132.80	15	5.2	31.0
4	13 DEC '54	34.10	133.10	5	4.8	46.1
5	5 DEC '55	34.40	132.60	5	5.3	64.3
	30 JAN '56	33.70	132.30	50	5.1	41.3
6	5 FEB '59	33.90	132.70	30	3.5	8.2
7	14 MAR '60	33.80	132.40	5	4.3	29.8
	15 APR '60	33.80	132.70	40	4.4	3.8
8	9 NOV '64	34.12	133.37	20	5.0	68.1
	14 NOV '64	33.43	132.12	60	5.8	71.1
(9)	18 DEC '67	34.12	133.30	60	4.1	62.5
10	6 AUG '68	33.30	132.40	40	6.6	64.0
	23 AUG '68	33.30	132.40	40	4.8	64.0
11	28 SEP '68	33.30	132.20	0	4.6	74.0
	27 OCT '68	33.75	132.30	50	4.4	36.5

該当するものが見当らなかった。そこで比較的近距离で規模の大きなものを選び出したものが第3.2表に示す14個の地震である。(2),(9)は変動の形から逆に地震の存在を調べたものである。次に地殻変動の継続時間 T を考慮に入れながら第3.30図と第3.2表を照合(表の地震番号が図の矢印の番号)してみると、変化の形があると云えばあるようで判然としない。また、地震以外の変化でないという保証もない。しかし、現在の観測を続けてゆけば上述の適当な距離に該当する大きさの地震が起れば検出可能であると信ずる。松山における20年間の観測において、付近で起った最大のは日向灘地震(1968年4月1日 $M=7.5$)である。松山からの震央距離は約180km、地殻変動の範囲には程遠い。その継続時間は31年である。この地震は新潟地震と同規模であり、念珠が関付近の水準点変動から坪川(前出336)が定めた α , β , γ の各期間によると、 β 期だけでも12~13年を要している。

松山の東西成分の経年変化が1957年を境に東下りから西下りに転じたことは(第3.29図参照)日向灘地震が β 期に入ったことと関係ないであろうか、ともあれ水管傾斜計観測で大切なことは、連続観測の長所を生かし α , β , γ の転換の時間を的確に捉えることである。

第4章 地震活動と水管傾斜計の観測

(松代群発地震の場合)

1. 水管傾斜計観測からみた諸現象

1965年に始まる松代群発地震はその規模においても活動期間においても空前のものであった。この間に地震関係の各分野は総力をあげて調査活動を行なった。気象庁の報告⁴⁰¹⁾によれば、地震の回数669,534回、そのうち有感61,319回を数える。地震研究所の地震観測班計測部⁴⁰²⁾では臨時観測網を設けて地震の活動状況を逐次発表しているが、萩原・岩田⁴⁰³⁾はその経過を次の如くにまとめている。地震の活動地域は松代町を中心とし、次第に北東一南西に広がり、その長さは凡そ45km、巾15km、深さは10kmに及ぶ。全期間を5期の活動期に区分できる。

放出エネルギー

第1期(1965年8月—1966年2月)	252.5×10 ¹⁸ ergs	(M=5.7の1個分)
第2期(1966年3月—7月)	841.4×10 ¹⁸ "	(M=6.1 ")
第3期(1966年8月—12月)	392.1×10 ¹⁸ "	(M=5.8 ")
第4期(1967年1月—5月)	124.5×10 ¹⁸ "	(M=5.5 ")
第5期(1967年6月—10月)	51.3×10 ¹⁸ "	(M=5.3 ")

全体として $M=6.3$ 1個分に相当する。

筆者らが気象庁地震観測所の観測坑内に40m水管傾斜計2成分を据えたのは1965年10月である。計器要目、観測坑の平面図は第1.1表、第1.9図(14,15頁)に示しておいた。同時に水平振子傾斜計2成分、後に4成分に増設して比較観測を行なった。

それらの観測結果の一部はすでに報告した⁴⁰⁴⁾経年変化については水管と振子型はよい一致を示したが、マグニチュードの大きい地震の前にあらわれる変化や地震と同時に生ず

る段違い変化には両者に著るしい相違が生ずることが多い。この解釈について萩原⁴⁰⁵⁾は計器を含む岩盤が one-block 運動をするか、小ブロックに分れ将棋倒しのような運動をするかによることをモデルによって示した。また、水管傾斜計からも Strain-step (Tilt step) が計測できることを示した。

水管傾斜計の観測結果は地震活動をはじめ光波測量、断層変位、温泉湧出量などの諸部門の調査に当る人達の関連観測として注目するところとなり、地震活動を予測する手がかりとなるので町民の人達にも親まれるところとなった。

松代地震の最盛期にまたがって行なわれた約1年半に亘る水管傾斜計の観測結果を第4.1図に示す。⁴⁰⁶⁾下の図は同じ場所で観測された地震観測所の毎日の地震回数で、地震活動と傾斜変動がよく一致している様子を示したものである。全期間を通じて経年変化はNS成分7秒角、EW成分24秒角に達している。

笠原⁴⁰⁷⁾は皆神山を中心に光波測量を行なったが、特に北方測線(皆神山一可候)が水管傾斜計(EW成分)および皆神山周辺の水準測量など地殻変動の諸観測と非常によい

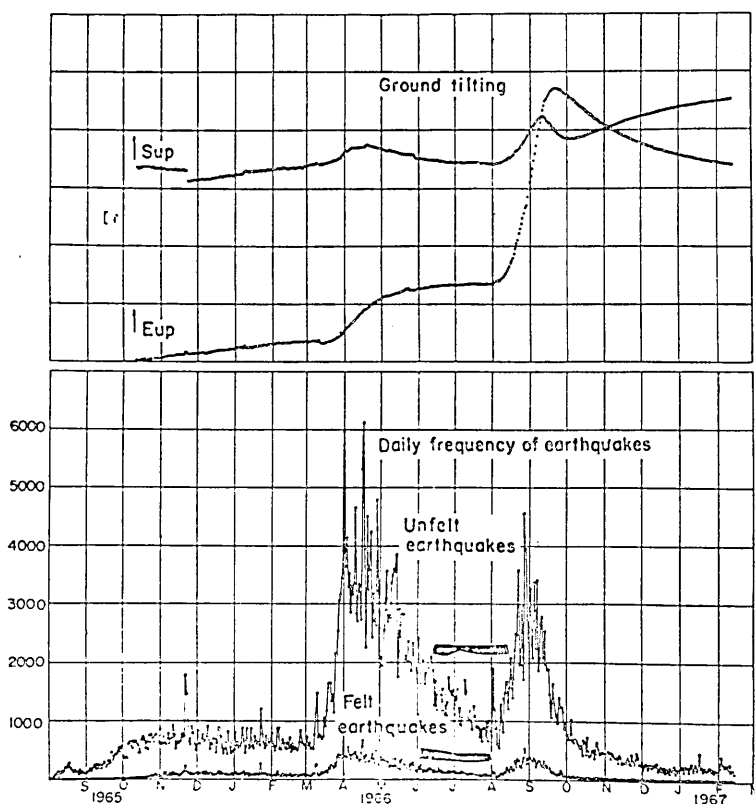


Fig. 4.1. Changes in ground tilting and daily numbers of unfelt and felt earthquakes during the Matsushiro earthquake swarm. (after Hagiwara and Rikitake,⁴⁰⁶⁾).

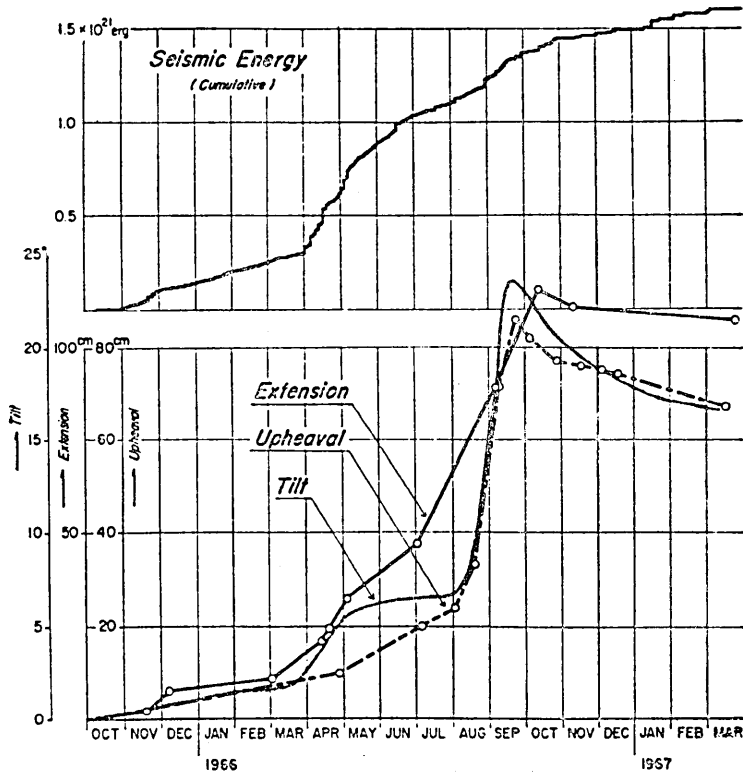


Fig. 4.2. Development of various sorts of crustal deformations compared with seismic energy release. (after Kasahara,⁴⁰⁷⁾)

一致を示すこと、これらが開放された地震エネルギーの総量に従っていることを第4.2図によって説明している。

恒石・中村⁴⁰⁸⁾は断層と地割れの調査を主に行なったが、これを種々な観測資料と対比している。第4.3図はそれらの関係を示したものである。水管傾斜計の観測もまた断層の横ずれの量とよく一致していることを図は示している。ここで特に注目すべきことは、加賀井温泉の湧水量(図の上から3段目)が傾斜の東西成分に酷似していることである。湧水量は8月中旬に一時減少するかに見えたが、忽ち極に達し、減少し始めると間もなく傾斜の向が反転している。また断層付近の地震活動も著るしく減少した。これらの事実から、間隙水圧が岩石の見かけの剪断強度を低下させ、深部における地下水圧の増加が地震および地殻変動の重要な因子の一つであることを著者らは述べている。松代は温泉地帯であり豊富な被圧地下水が存在し、これが断層を通して地表に溢れ出たといわれている。地震観測所の坑内も大量の湧水に悩まされながら観測を続行した。東西成分の変動が極に達した10月17日、牧内地区で大地泣りが起った。10月には地震回数は急速に減少したが、地震の発生地域は南部および南西部に広がっていった。傾斜計もその頃から大きな変動を記録しなくなった。この観測は1967年3月5日まで続けられたが、地震観測所の坑内改装工事の

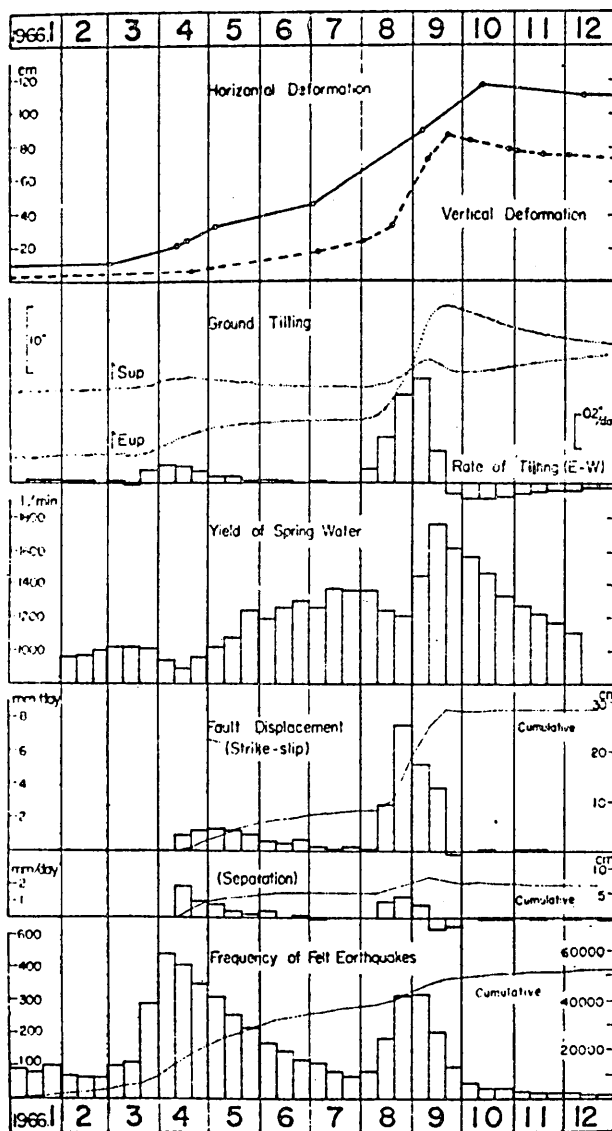


Fig. 4.3. Comparison of various types of observational data. (after Tsuneishi and Nakamura,⁴⁰⁸).

ため一旦中止し、同年9月地震観測所の手によって再開され現在に至っている。

2. 水管傾斜計の観測結果

水管傾斜計観測の経年変化はすでに述べた如く第4.1図に示した通りである。観測開始後の数カ月間は地震観測班に委託して朝夕2回観測を行っていたが第2活動期に入ってからには傾斜観測として十分な成果を挙げるために、筆者と弥彦観測所の若杉の2人が専従

し昼夜を分たず観測を行なった。震源域内で水管傾斜計の高密度観測を行ない、多数の震度 IV, V の地震を至近距離で捉えたのは類例がないことと信じている。その観測値は付録 4.2 に記載してある。また、全期間を通じて萩原・岩田（前出403）による主要地震 ($M \geq 4$) 88個のうち、地震番号19より80までの62個は高密度観測中に起ったものである。それらの地震の前後48時間の異常変動を図示したものを付録 4.1 に掲げた。本章の主題である Tilt-step に関する解析はこの図より出発したものである。

3. Tilt-step およびその規則性

水管傾斜計の観測において地震に伴う変化の記録された例は、福井地震（1948年）における臨時観測で得た唯一例がある。それは7月10日11時13分、丸岡町付近で起った余震（小区域地震）を南東約 17km にある坂東島鉦山の廃坑に計器を据えて得られたものである。第 4.4 図はその記録である⁴⁰⁹。それから松代地震に至る18年間は観測上の進展はあまりなかった、松代の場合も人手による読取観測であるから、その時間間隔が長く、自記記録でない限り正確な Tilt-step は得られない。そこで萩原（前出405）は、地震を挟む前 2 回、後 2 回の読取値を結ぶ直線の発震時刻における段違いをもって松代地震の場合の Tilt-step とした。観測の時間間隔の長い場合には問題はあるが、ひとまずこの方法で求めることにした。第 4.5 図はその実例で、48番の地震（付録 4.1 参照）について試みたものである。

さて、Tilt-step を求めこれを解析してゆく上に基本となるデータを第 1 表に掲げる。

表の左より地震番号、発震時刻、規模 (M)、地震観測所よりの震央距離 (d)、深さ (h)、これらは萩原・岩田（前出403）の震度IV以上の地震の表を引用し、またはその資料より求めたものである。発震機構は市川⁴¹⁰の資料によった。nodal plane はすべて水平面に垂直で、方位は北より反時計式に測られている。これに記載されていない地震は震研の地震観測班・計測部⁴⁰²の初動の押引分布図により、表では括弧で区別してある。

Tilt-step はさきに述べた方法で62個の地震全部について求め、東西・南北両成分の合成ベクトルの方位とその大きさを定めた。

第 4.6 図は各地震番号の地震に伴って生じた Tilt-step の方位とその大きさを示したものである。地震番号を書いた丸印の座標は、それぞれの番号の地震の震央が、原点 EPC. にあったときの観測点の位置である。すなわち、その位置において図のベクトルが示す Tilt-step が観測されたことを意味する。従って、原点に対し対称の位置にそれぞれ

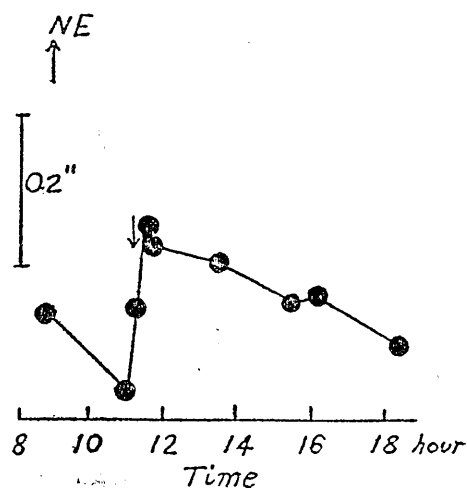


Fig. 4.4. A remarkable tilting anomaly, which occurred with an earthquake on July 10, 1948.

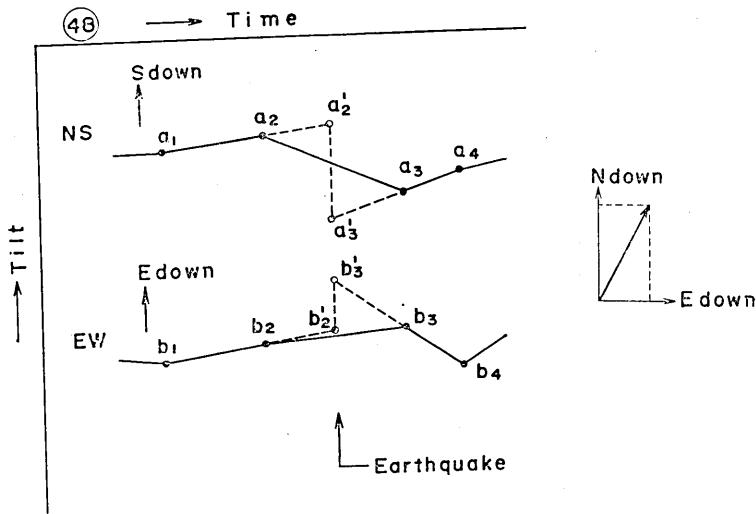


Fig. 4.5. A scheme of obtaining tilt-step amplitude from tiltmeter reading.

Table 4.1. The primary data used for the tilt-step analysis.

Earthq. No.	Date	Time	Magni- tude M	Epicent. distance Δ km	Focal depth h km	Nodal line	Tilt step				Fault dimension			Tilt-step by ΔU ₂ =1cm	Displace- ment ΔU ₂ cm	Moment M ₀ x10 ²²	Consistency	
							NS	EW	IVI	Press. chart	L km	D km	A km ²					
19	1966 Apr. 11	0457	4.5	2.4	3.4	34°			6	1.5	B	6.5	3.9	25.4	5.8	0.26	0.66	A
20		0458	4.5	4.2	1.5	(45)			3	0.8	B	5.4	3.8	20.5	6.3	0.13	0.27	A
21		0606	4.5	2.4	3.0	33			16.8	4.2	B	6.5	3.9	25.4	7.3	0.58	1.45	B
22	14	0909	4.1	2.6	6.2	(45)			5.5	1.4	B	?						
23	16	0907	4.9	2.7	4.8	30			5.5	1.4	C	5.6	5.6	31.4	9.3	0.15	0.45	C
24		1506	4.1	4.2	3.3	45			9	2.2	B	4.1	2.5	10.2	2.8	0.79	0.31	B
25	17	1021	5.0	6.5	5.5	40			5.5	1.4	C	6.3	6.3	40.0	1.8	0.78	3.12	A
26		1022	4.7	4.2	5.6	(45)			5.5	1.4	B	5.8	4.6	26.7	3.2	0.44	1.17	A
27		1546	4.4	2.2	3.0	(45)			22	5.5	B	4.8	3.4	16.3	4.4	1.25	2.04	C
28		2002	4.4	3.5	5.8	(45)			9.5	2.4	A	4.8	3.4	16.3	7.3	0.33	0.54	C
29		2006	4.3	2.6	3.2	(45)			9.5	2.4	C	5.1	3.1	16.6	1.0	0.24	0.40	A
30		2028	4.2	2.9	2.3	(45)			7.5	1.9	C	4.6	2.8	14.0	8.6	0.22	0.31	C
31		1438	4.5	3.2	5.3	(45)			15	3.8	C	6.5	3.9	25.4	0.7	5.4	1.37	B
32	28 May	0044	4.7	7.4	6.9	42			4	1.0	A	6.8	4.8	32.6	1.7	0.59	1.92	B
33		0045	4.5	5.3	3.6	(45)			4	1.0	A	5.4	3.8	20.5	6.8	0.15	0.31	B
34	04	1048	4.5	2.2	3.6	45			8.5	2.1	C	6.5	3.9	25.4	8.6	0.24	0.61	B
35	06	1908	4.6	6.7	2.8	30			19.5	4.9	A	6.0	4.2	25.2	1.9	2.58	6.50	C
36	19	2151	4.4	2.8	1.3	60			9	2.2	B	5.8	3.5	20.3	1.0	2.20	4.50	C
37	20	0930	4.9	5.4	5.5	(45)			8	2.0	C	7.3	5.8	42.3	2.7	0.74	3.12	(A)
38	22	1728	4.5	2.6	4.7	62			6.5	1.6	C	8.3	4.2	34.8	8.6	0.19	0.61	C

To be continued.

Table 4.1. (continued)

39	25	0557	4.4	1.0	2.5	40	┌	┌	29.5	7.4	B	5.8	3.5	20.3	20.0	0.37	0.75	A	
40	27	2203	4.1	4.4	4.4	53	┌	┌	3.8	1.7	A	5.2	2.6	13.5	0.52	3.27	4.42	B	
41	28	1228	4.2	8.1	6.8	44	┌	┌	6	1.5	A	4.6	2.8	13.9	1.35	1.11	1.54	A	
42		1421	4.7	3.6	3.2	55	┌	┌	56.5	14.0	C	8.1	4.9	40.0	5.8	2.41	9.65	C	
43	June	11	1205	4.6	5.7	4.5	44	┌	┌	4	1.0	B	9.4	4.7	44.0	3.4	0.29	1.27	(A)
44	12	0943	4.6	6.4	6.8	59	┌	┌	1.7	0.4	B	9.4	4.7	44.0	9.8	0.04	0.18	B	
45	21	2205	4.6	7.8	3.0	30	┌	┌	6	1.5	B	6.0	4.2	25.2	0.6	2.50	6.30	B	
46	26	1634	4.6	8.5	4.9	62	┌	┌	1.9	0.45	B	7.3	4.4	32.0	0.78	0.58	1.85	B	
47	28	1810	4.6	6.9	5.3	(45)	┌	┌	3	0.8	A	9.4	4.7	44.0	3.3	0.24	1.05	B	
48	July	01	0532	3.7	5.5	4.7	34	┌	┌	7.5	1.9	B	2.1	1.5	3.2	0.21	9.05	2.90	B
49	10	1544	4.4	5.9	4.8	52	┌	┌	26	6.5	C	4.8	3.4	16.3	2.0	3.20	0.52	(A)	
50	Aug	03	0348	5.0	4.1	3.2	52	┌	┌	60.5	15.0	C	8.1	6.5	52.6	7.9	1.90	10.0	C
51	08	0937	4.7	5.8	5.5	61	┌	┌	4.5	1.1	B	4.5	4.5	20.2	1.75	0.63	1.27	(A)	
52	14	0405	4.1	1.1	3.2	(45)	┌	┌	28.5	6.9	B	2.3	2.3	5.3	9.2	0.65	0.34	A	
53	16	1642	4.4	2.4	2.1	(45)	┌	┌	2	0.5	B	3.2	3.2	10.2	4.7	0.10	0.10	(A)	
54	20	1950	4.4	4.5	5.1	54	┌	┌	21	5.3	C	3.5	3.2	11.2	1.7	3.12	3.50	B	
55		1950	4.4	4.1	3.5	54	┌	┌	21	5.3	C	3.5	3.2	11.2	2.0	2.67	2.99	(A)	
56	28	1309	5.0	7.2	7.0	46	┌	┌	20	5.0	B	6.3	6.3	40.0	1.7	2.94	1.17	B	
57	29	0036	4.6	4.9	4.5	46	┌	┌	18	4.5	C	6.0	4.2	25.2	4.8	0.94	2.37	B	
58		1037	4.4	8.2	3.2	(45)	┌	┌	3	0.8	A	4.0	3.2	12.8	0.28	2.86	3.02	C	
59	31	1337	4.8	4.6	5.4	(45)	┌	┌	23.5	6.0	A	7.3	5.3	38.6	8.0	0.75	2.89	A	

To be continued.

60	Sep.	06	0337	4.9	4.3	5.2	54	┌	┌	45	11.0	B	5.6	5.6	31.4	6.2	1.78	5.60	B
61	07	1518	4.1	0.5	4.8	(45)	┌	┌	4	1.0	C	4.1	2.5	10.2	5.0	0.20	0.20	(A)	
62	09	1614	4.2	5.4	4.8	(45)	┌	┌	6	1.5	A	4.6	2.8	14.0	0.95	1.58	2.21	B	
63	14	0626	4.5	6.8	2.0	60	┌	┌	45.5	11.0	A	4.0	3.6	14.4	0.40	0.27	4.0	(A)	
64		1014	4.9	3.2	6.0	33	┌	┌	19.5	5.0	C	7.3	5.8	42.3	6.3	0.79	3.38	A	
65	24	1929	4.4	6.1	4.1	(45)	┌	┌	3.8	0.95	B	3.5	3.2	11.2	0.28	3.38	3.78	B	
66	27	0403	5.0	3.7	5.1	51	┌	┌	14	3.5	C	6.3	6.3	40.0	9.0	0.35	1.40	B	
67	Oct.	13	0601	4.9	3.4	9.0	34	┌	┌	8.5	2.1	B	7.3	5.8	42.3	7.3	0.29	1.22	B
68	19	0004	4.8	4.5	9.0	19	┌	┌	2	0.5	C	7.6	5.3	40.3	11.0	0.05	0.21	B	
69	23	1114	4.5	4.1	6.0	51	┌	┌	4.5	1.1	C	7.3	5.8	42.3	5.3	0.21	0.89	A	
70	26	0304	5.0	12.0	6.0	(45)	┌	┌	7	1.8	A	?							
71	31	1401	4.0	10.4	8.8	(45)	┌	┌	3.5	0.9	B	?							
72	Dec.	01	1936	4.2	5.1	3.9	(45)	┌	┌	3	0.8	C	5.8	2.9	16.8	0.16	5.00	8.40	B
73	1967.	Jan.03	1232	5.0	12.8	10.2	(45)	┌	┌	1.5	0.4	B	6.3	6.3	40.0	0.19	2.10	8.40	A
74	Feb.	03	1717	4.8	16.1	11.2	23	-	-	0	-	-	9.1	5.5	50.0	0.27		-	-
75	08	1850	4.5	12.7	12.5	55	┌	┌	2.5	0.6	B	8.3	4.2	34.8	0.52	1.15	4.00	C	
76	09	0950	4.2	7.8	5.9	64	┌	┌	4.5	1.1	B	3.8	2.7	10.2	0.30	3.68	3.75	B	
77	12	0922	4.5	10.5	5.0	42	┌	┌	1.65	0.4	A	5.4	3.8	20.5	0.32	1.25	2.56	B	
78	21	1431	4.0	10.9	4.5	(45)	┌	┌	6	1.5	A	2.0	2.0	4.0				A	
79	Mar.	01	0414	4.8	9.4	7.7	42	┌	┌	2.5	0.6	B	?						
80	02	0340	4.8	8.9	5.4	57	┌	┌	15	4	B	?							

の丸印を移せば、観測点を原点とする震央分布図が得られる。

次にこれらの Tilt-step が、地震の規模、震央距離、深さ、あるいは発震機構との間に規則性がみられるか、あるならばどのような関係があるかを調べてみた。

まず、これらの地震がすべて同じ発震機構である左横ずれ系の断層によるものであるこ

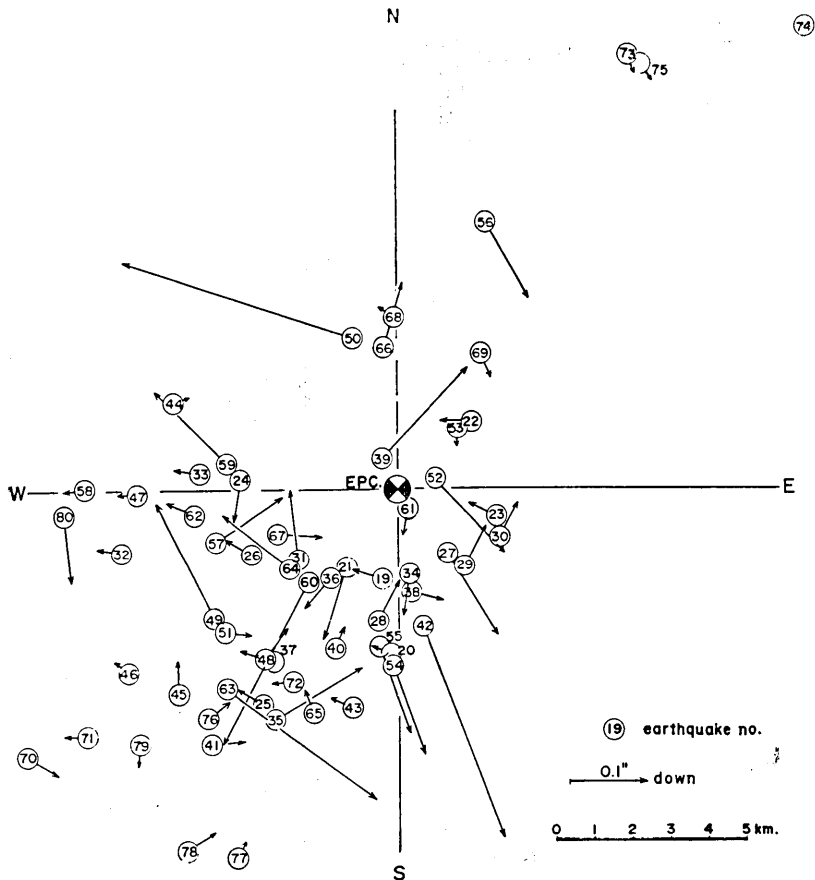


Fig. 4.6. Tilt-steps associated with earthquakes. Vectors are plotted at the station's coordinates relative to the respective epicenters, which is fixed at the coordinate's origin, commonly.

とは、市川、地震観測班計測部および恒石・中村らによる地表にあらわれた断層の調査(前出410, 402, 408)によって明らかである。Press⁽⁴¹¹⁾は断層の長さ比べて充分遠い平面上での strike-slip あるいは dip-slip による strain あるいは tilt field を dislocation の理論に基づいて計算し、いわゆる Press の図表を作成した。そこで62個の Tilt-step の方位がこの図表に一致しているか否かを調べてみた。そのために Press の図表を比較し易く作り直したものが第4.7図である。すなわち、 $\partial u_3/\partial u_1$, $\partial u_3/\partial u_2$ のそれぞれ $D=1.0L$ と、 $D=0.1L$ の4枚の図面から傾斜変化ゼロの線を写しとり、その線上では X_1 または X_2 軸と平行な傾斜方向が得られる。それらの線の中間部分に対しては両側と中間の 45° の向の傾斜方向を描いた。ここで幸なことは $D=1.0L$ の場合も $D=0.1L$ の場合も傾斜方向に関してそれ程差違がないことである。この図の62個の Tilt-step ひとつひとつを比較したものが第4.1表12列の Press の判定である。ここでは $30^\circ \sim 35^\circ$ の巾をもつ

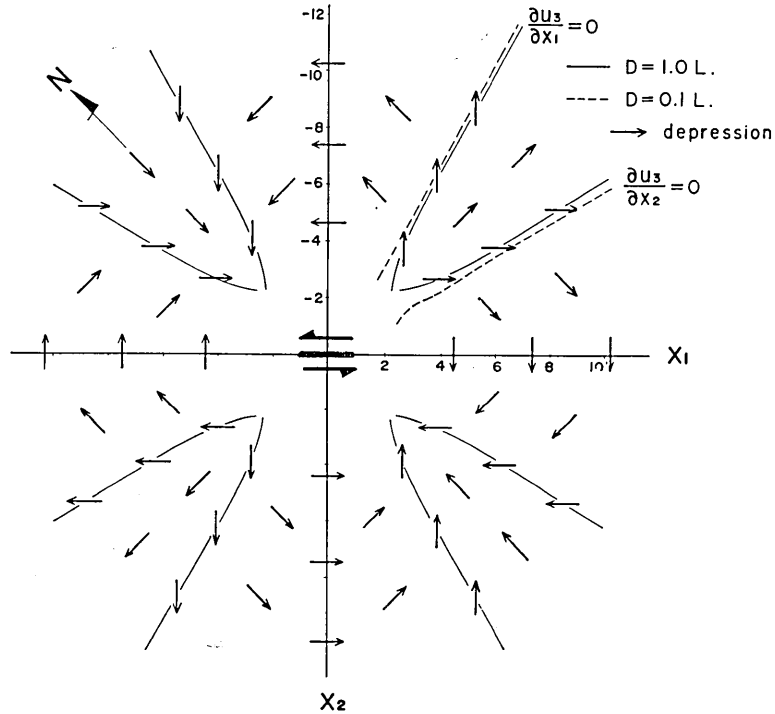


Fig. 4.7 Direction of tilting associated with a left lateral strike-slip fault. (modified from the Press's chart (1965)).

た荒い判定であるが、Aは一致するもの、Cは反対向のもの、Bはどちらにも属さないもので、その数はA14、C20、B28を数えた。なおここで、図の断層と共転な断層が生ずる場合も考えられる。その場合には隣りの象限の図表の矢印を反対にしたものになる。つまり元の図表と同じになる。結局、このような象限型発震機構では断層が $N45^{\circ}W$ でも $N45^{\circ}E$ でも同じことで、その判別はつかない。さて、Aの判定とCの判定のものを第4.1表のデータに従って、マグニチュードと震央距離を第4.8図のような片対数方眼紙の上にプロットしてみると明瞭に区別される。ここで白丸は Press の理論に従うもの、黒丸は反対のものであるが、白丸は震央距離の遠い方に、黒丸は近い側に分布し、マグニチュードが大きくなる程境界が遠い方へ移ってゆく、この境界線をあらわす式は

$$M = -6.92 + 2.0 \log_{10} D \quad (4.1)$$

となる。

Chinnery⁴¹²⁾ は断層の極近傍の媒質表面の変位を理論的に求め、図表を作成した。ここでは凡そ断層の長さの2倍以内の範囲が議論されている。つまり、さきの Press の図表の中央空白部がこれに相等する。ここで注意して欲しいことは、Press も Chinnery も断層の半長をもって L としているが、筆者は全長を L とすることにする。第4.7図については座標軸の値は半長 L を単位としている。

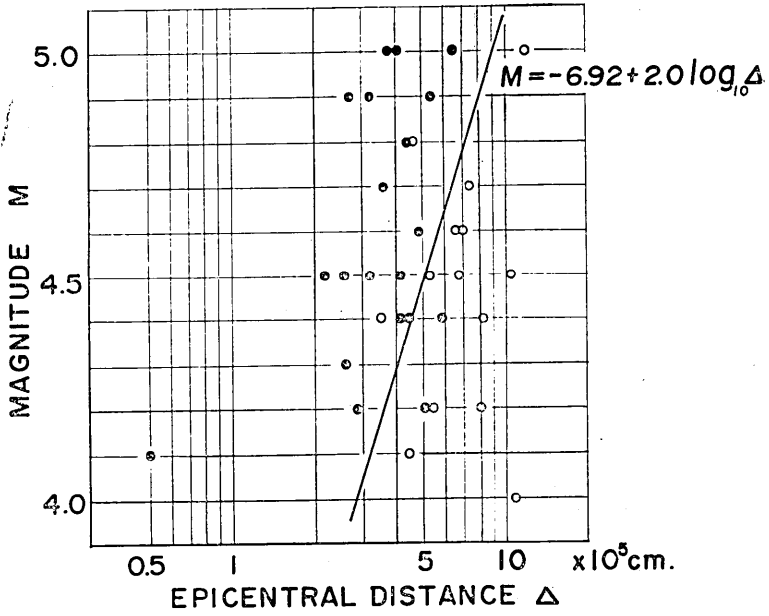


Fig. 4.8. Earthquake magnitude versus epicentral distance.
 Polarity of tilt-step : consistent with theory (○),
 inconsistent " " (●).

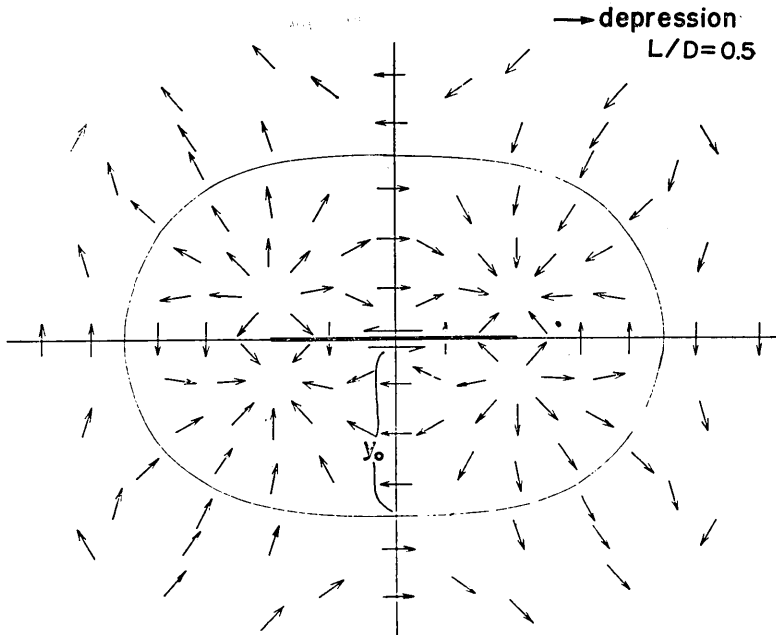


Fig. 4.9. Directions of tilting associated with a left lateral strike-slip fault. ($D/L=0.5$, modified from the Chinnery's chart (1961)).

さて、Press の判定で C, すなわち A と反対向のものは Chinnery の領域内にあってその理論に従っているかをも調べてみる必要がある。

第 4.9 図はその目的で Chinnery の図表から一例として $D/L=0.5$ ($L=$ 全長), 第 4.7 図の実線に続くものとして作ってみた。いま矢印の向を両図について比べてみると、断層に対してはほぼ 45° の方向以外は反対向であるとは云い難い。特に方位は断層の深さ D に大きく左右されるので、先ず D を知り D/L の種々な値に対する傾斜方位の図表が必要となる。

4. 地震の規模 M と断層の長さ L の関係

Chinnery は断層の深さ D を求める方法について、垂直変位ゼロのコンターまでの距離 y_0 , 断層の長さを L (全長) として次式を得た。

$$D=0.6 y_0+0.125 L \quad (4.2)$$

この式は D の種々な値に対する y_0 の値を図式的に求めたと云うが、垂直変位そのものが非常に小さい上にゼロ変位の位置を求めることは精度上、特に浅い地震については困難であるが $D/L>0.5$ の場合には上式は成立つと述べている。第 4.9 図の場合には垂直変位ゼロのコンターは図の如く押しつぶされた円になるが、 D/L が大きくなるに従って y_0 は大きくなり円形に近づく。

いま、(4.1) 式の $A=y_0$, すなわちゼロコンターの距離とすると、

$$M=-K+2.0 \log_{10} L. \quad (4.3)$$

となる。但し K は次の値をとる。

D/L	0.5	0.6	0.7	0.73	0.8	0.9	1.0
K	(7.33)	7.12	6.96	6.92	6.81	6.69	6.59

(4.1) 式の定数がそのまま (4.3) 式となる場合は $D/L=0.73$ に該当する。

竹本・高田⁴¹³⁾ は伸縮計の記録から比較的浅い地震に伴なう strain-step から M と L の関係を求めた。それは 10^{-8} の Strain-step が観測される限界における M と R (震源からの距離) の関係に距離による Strain-step の減衰を考慮して、

$$M=-8.4+2.2 \log_{10} L \text{ (TAKEMOTO-TAKADA)}$$

の関係を得た。両氏はほかに地表にあらわれた断層から求めたものとして飯田、Tocher ら $M \geq 6$ の場合の観測式

$$M=0.75+0.98 \log_{10} L \text{ (TOCHER)}$$

$$M=2.27+0.76 \log_{10} L \text{ (IIDA)}$$

を紹介している。大塚⁴¹⁴⁾ は飯田の資料をもとにして M について地表にあらわれた断層のうちで最長のものを結んで

$$M=-6.4+2.0 \log_{10} L \text{ (OTSUKA)}$$

の関係式を得ているが、それには震源を球体とする取扱がなされている。Wyss and

Brune⁴¹⁵⁾ は地震波動のデータから

$$M = -6.7 + 1.9 \log_{10} \sqrt{A} \quad (\text{WYSS-BRUNE})$$

$$A = L \cdot D$$

の式を得ている。ここで竹本らは $\log_{10} L$ の係数が 2.0 に近いことは、Gutenberg-Richter の M と E (エネルギー) の関係

$$\log_{10} E = 1.5M + 11.8$$

から $E \propto L^3$ である地震体積の考え方との関連から興味深いと述べている。

以上多くの M と L との関係式を掲げたが、これを (4.3) 式と比べてみると、竹本・高田の式は $D/L = 0.5$ の場合と殆んど同じ結果が得られ、大塚、Wyss-Brune の式は $D/L = 1.0$ の場合に一致する。それは竹本・高田が中距離の比較的浅い地震を対象にしていること大塚は球体震源の仮定、Wyss-Brune は $\sqrt{L \cdot D}$ の考慮から至極当然の結果と思われる。M と L の関係に関して、Tilt-step から求めたものは伸縮計、地表観測、地震波動より求めたものと矛盾しない結果が得られた。

5. 断層面積の推定

(4.3) 式の M と L の関係において、M が与えられても L は D との関係によって定まるので一義的には決まらない。たとえば、 $M = 5.0$ の地震で D/L が 0.5 と 1.0 のときでは、L, D が $14.8 \times 7.4 = 110 \text{ km}^2$, $6.3 \times 6.3 = 39.7 \text{ km}^2$ の如く前者は後者の 3 倍も大きい。しかし、後者の断層変位が前者の 3 倍大きければ両者の放出エネルギーは同じ筈である。変位が大きい方が小さい場合より影響範囲は遠方に及ぶ、第 4.10 図はそのことを例証するもので、断層の垂直二等分線 ($y_1 = 0$ の y_2) に沿う u_1 (断層線に平行な水平変位成分) の減衰を種々な D に対して示したものである。従って、Tilt-step も変わるであろうから、L/D によって区別して考えなければならない。

震研の地震観測班・計測部 (前出 402) では地震活動の最盛期には毎月の有感地震の震源分布図を発表している。第 4.11 図の左はその一例で 1966 年 6 月のものである。黒丸はさきに述べた萩原・岩田による番号を有する震度 IV 以上の地震を示す。いま、これらの地震に対して市川 (前出 410) の nodal plane の線を引いてみる。そしてこの線上で地震の集中している部分の巾を測ってみる。これをあらかじめ (4.3) 式で計算してある断層面積の寸法表 (付録 4.3) と照合することにより容易に縦横の長さを推定することができる。

第 4.11 図の右はこのようにして推定した断層の大きさである。第 4.12 図はこのようにして定めた 62 個の地震の断層面積を示した図である。また第 4.1 表にもその数値を掲げておいた。注目すべきことは地震観測から決定した震源はすべて面の周縁に位置していることである。

ここで問題になることは、以上のようにして求めたものが果して余震分布から求めた断層面積に一致するかということ一度は検定をしておくべきことである。地震観測班の観測網は 5~8 km の辺をもった三角形であるが、三点对応のとれる地震の規模は石本式加速度計では $M \geq 2$, HES 1-0.2 地震計 5 万倍では凡そ $M \geq 0$ である。前者は余震として認められる数がそれほど多くなく、後者は充分の数を数えぬうちに次の主震格の地震が到来

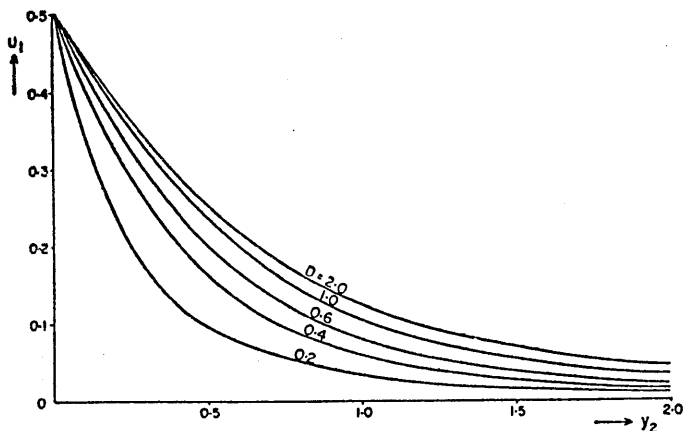


Fig. 4.10. Fall off of u_1 with y_2 along $y_1=0$ (u_1 in units of U , D and y_2 in units of $L/2$). (after Chinnery⁴¹²)

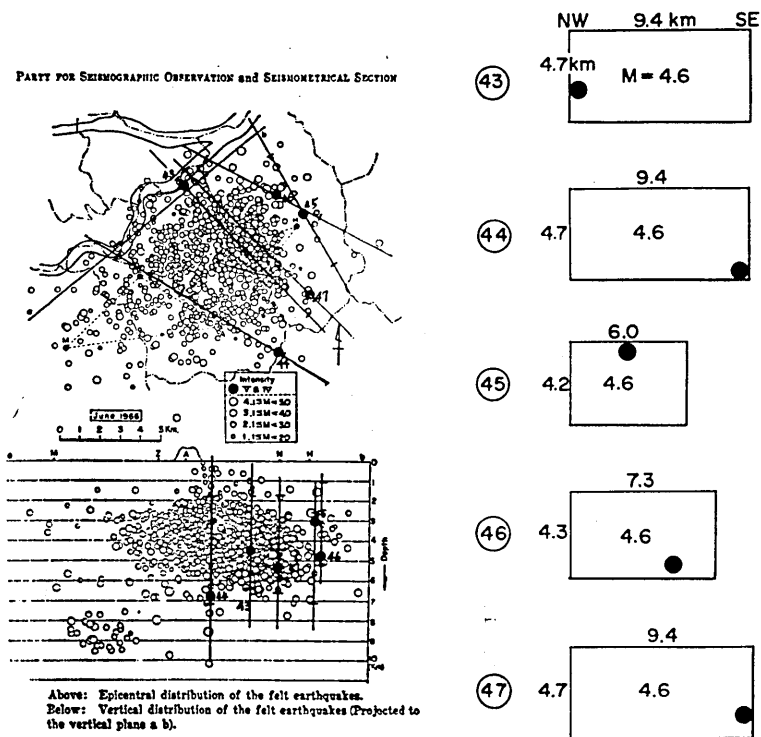


Fig. 4.11. Configuration of the hypothetical dislocation areas (right) and their projection on the swarm area (left).

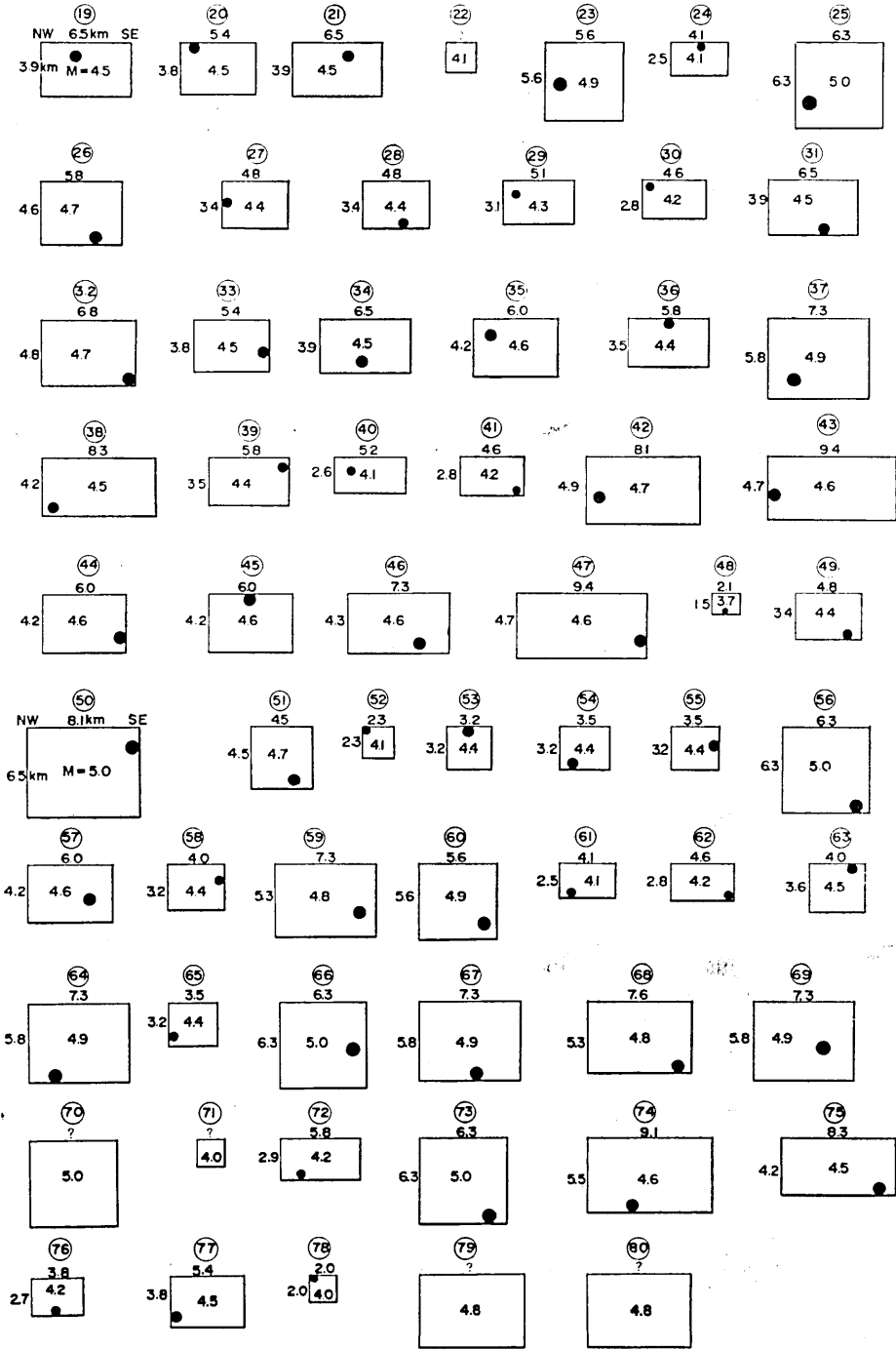


Fig. 4.12. Configuration of the dislocation areas estimated on the bases of seismological data.

し、よほど地震を選ばない限り成功は覚束ない。不本意であるがこの検定は次の機会に譲ることにする。

6. 左横ずれ断層による傾斜の場合

Press および Chinnery らの研究によって、左横ずれ断層による傾斜の場の概要を把握することができた。しかし、その結果は直ちに松代の場合に適用できない。それは、(1) Chinnery は変位を対象にしていること、(2) 断層の深さの区分が荒い、(3) Chinnery と Press の領域が連続的に理解し難い。

以上の点を明らかにし、今後の作業を円滑に進めるために新たに図表を作ることにした。先ず丸山⁴¹⁶⁾ の式から出発することにする。半無限媒質中の変位の不連続によって生ずる変位の m 成分 u_m は次式によって表わされる。

$$u_m(Q) = \iint_{\Sigma} \Delta u_k(P) W_{kl}^m \nu_l(P) d\Sigma, \quad (4.4)$$

ここで $Q(x_1, x_2, x_3)$ は観測点、 $P(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ は断層面上の点をあらわす。

Δu_k : 断層面上の点 P における変位の k 成分。

W_{kl}^m : 半無限媒質中の点 P における歪核 (strain nucleus) による観測点 Q での変位の m 成分。

歪核には二つの型があり k, l で示されている。第 4.13 図参照。

$k=l$ の場合, type A slip (Body force 型)

$k \neq l$ " , type B slip (Double couple 型)

(23), (31) は dip-slip, (12) は strike-slip である。

$\nu_l(P)$: 断層面上の点 P における断層面の法線ベクトルの l 成分。

$\iint d\Sigma$: 断層面上の積分。

$\lambda = \mu$ (λ, μ はラーメの弾性常数) を仮定し、断層が strike-slip 型であるとする。断層面が地表に垂直、長方形であらわされる場合 ($k=2, l=1$) には、地表面における鉛垂変位 ($m=3$ on $x_3=0$) は次式であらわされる。

但し、変位の k 成分は断層面上で一定 ($\Delta u_k = \text{const.}$) であると仮定する。

$$4\pi \frac{u_3}{\Delta u_2} = \frac{X_1(\rho + 2\xi_3)}{\rho(\rho + \xi_3)} \parallel. \quad (4.5)$$

ここで、 $X_1 = x_1 - \xi_1$, $X_2 = x_2 - \xi_2$, $\rho = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + \xi_3^2}$ であらわされる。 \parallel は Chinnery の記号で、長方形の断層面上の四隅の点の関数であることをあらわす。すなわち、

$$f(\xi_2, \xi_3) \parallel = f(b, c) - f(b, C) - f(B, c) + f(B, C).$$

u_3 は下向き変位が正となるように表わされている。(x_3 は下向きにとられている)。第 4.14 図に断層面の座標を示す。

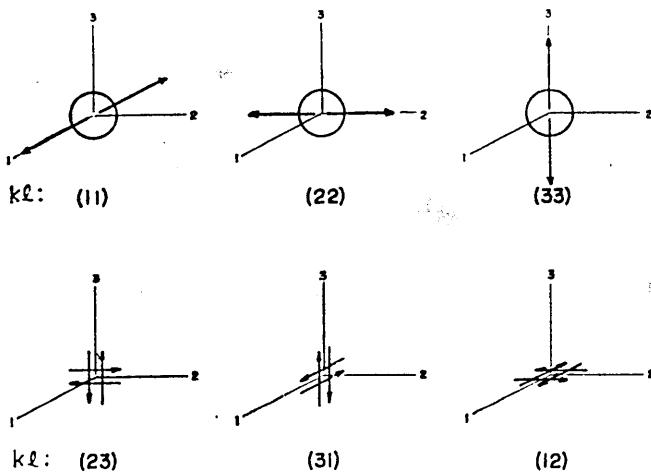


Fig. 4. 13. (kl) is a combination of double force at P which generates the displacement field T_{kl}^m at Q. (11), (22) and (33) are A-nuclei; (23), (31) and (12) are B-nuclei. (after Maruyama⁴¹⁶⁾).

x_1 および x_2 方向の傾斜を求めるには (4.5) 式を微分して次の式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{4\pi}{\Delta u_2} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial x_1} &= \frac{(\rho^2 - X_1^2)(\rho^2 + 3\rho\xi_3 + 2\xi_3^2) - X_1^2\rho\xi_3}{\rho^3(\rho + \xi_3)^2} \Big\|, \\ \frac{4\pi}{\Delta u_2} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial x_2} &= \frac{X_1 X_2 [2\xi_3^2 - (\rho + 2\xi_3)^2]}{\rho^3(\rho + \xi_3)^2} \Big\|. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

(4.6) 式に従って x_1, x_2 方向について求めた傾斜をベクトル合成した傾斜の場の図を第 4.15 図に示す. (a), (b) および (c) はそれぞれ D/L が 0.6, 0.8, 1.0 の場合を示す.

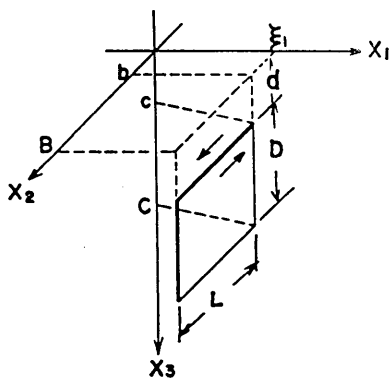


Fig. 4. 14. Rectangular dislocation surface perpendicular to the free surface.

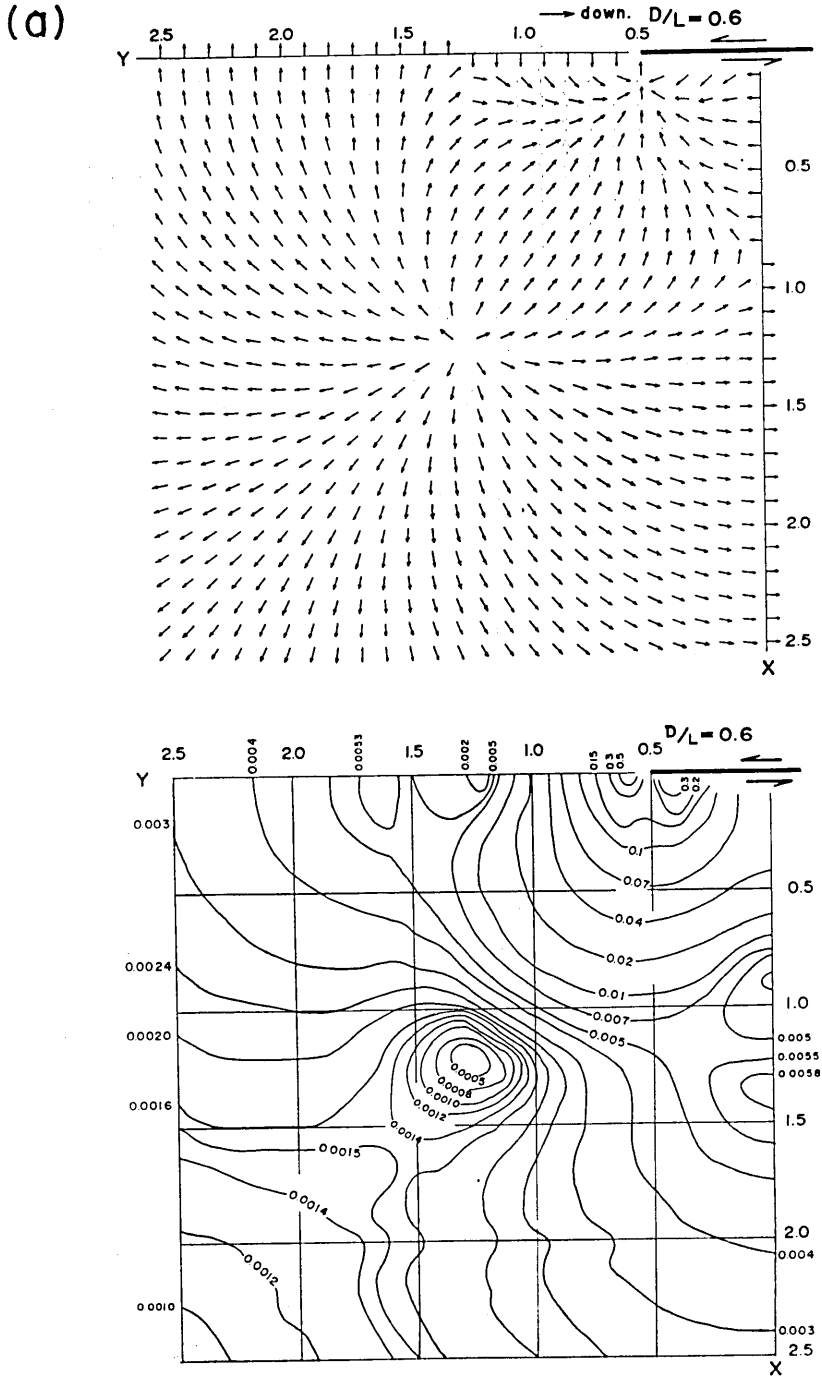


Fig. 4.15. Strain field around a left lateral strike-slip fault.
 (upper): direction of tilting. (lower): amplitude, unit: u_2/L radian.
 (a): $D/L = 0.6$.

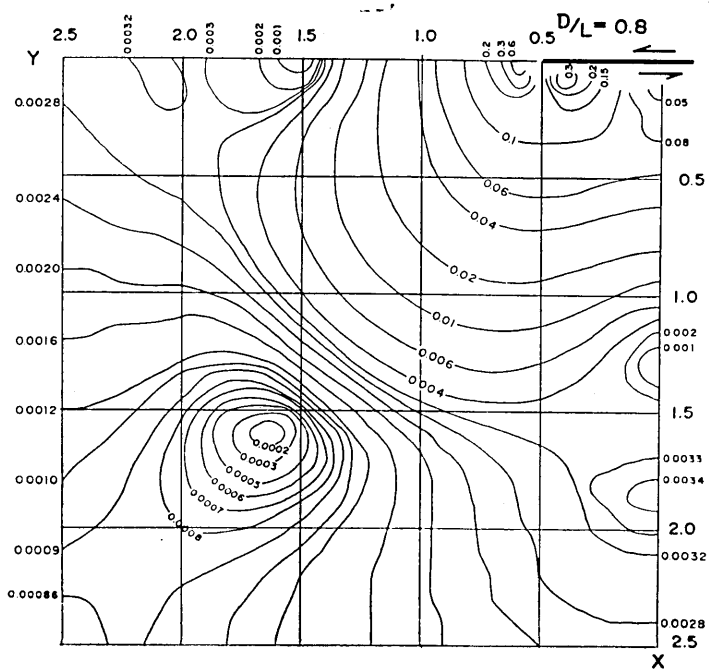
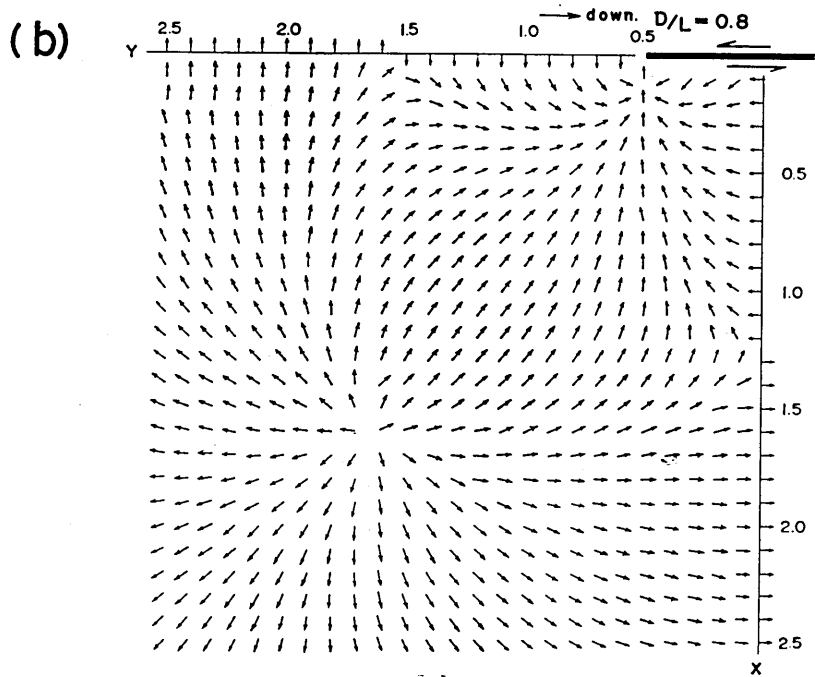


Fig. 4. 15. (b): $D/L=0.8$.

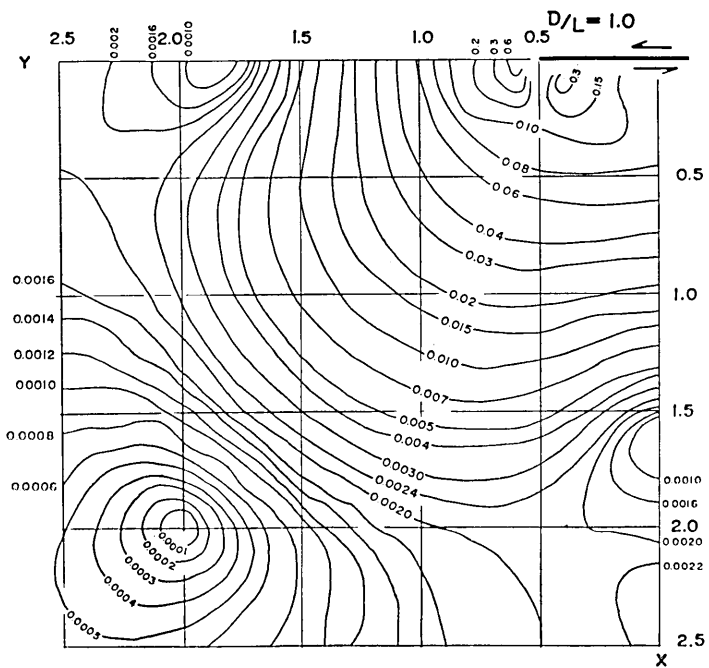
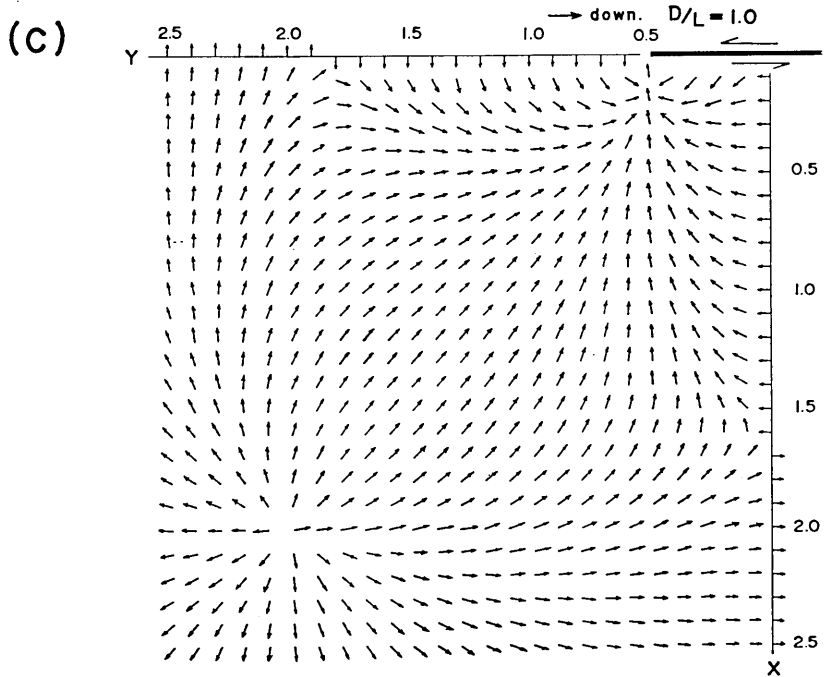


Fig. 4. 15. (c): $D/L=1.0$.

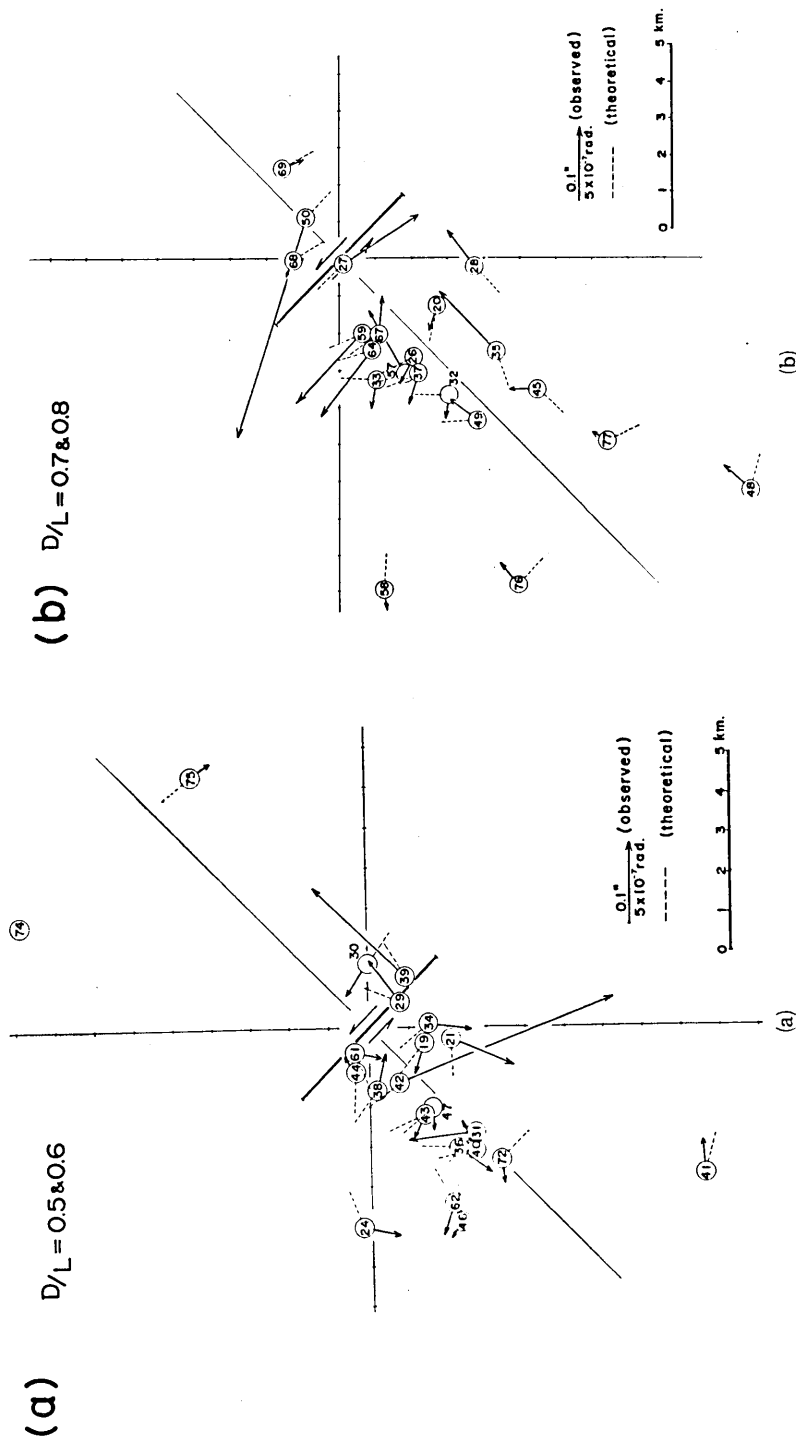


Fig. 4.16. Reproduction of Fig. 4.6. Data reduced to the standard dislocation (length; 5 km, strike; NW-SE, $M=4.5$).
 (a): $D/L=0.5-0.6$, (b): $D/L=0.7-0.8$, (c): $D/L=0.9-1.0$.

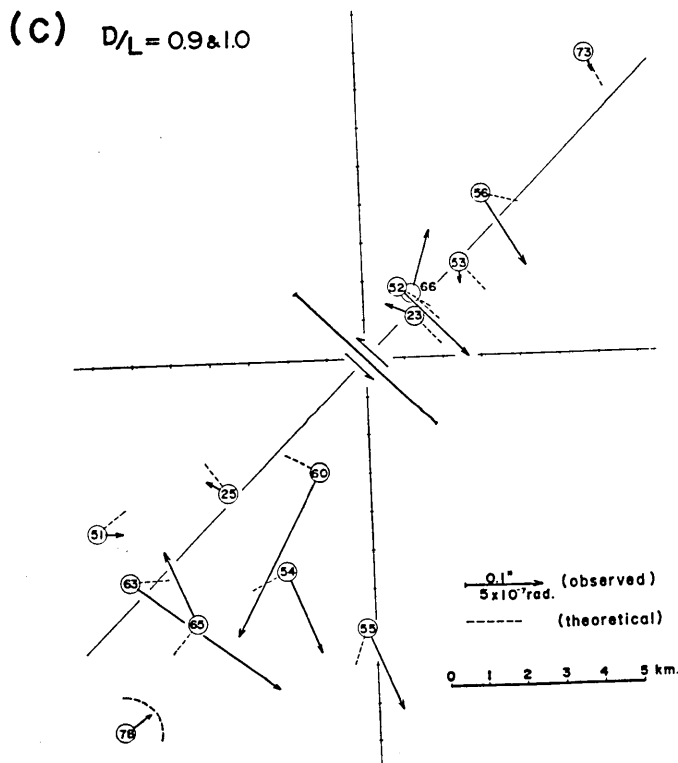


Fig. 4.16. (c)

図は断層が地表にあらわれている場合 ($d=0$) である。傾斜の大きさは断層の全長 L を単位としている。従って、断層変位 u_2 と L とが異なる場合には図の数値に u_2/L を乗じなければならない。例えば、 $u_2=1\text{ cm}$ 、 $L=1\text{ km}$ の場合には $u_2/L=10^{-5}$ を乗じた radian で表わされる。

7. 標準転位への震央位置補正と断層変位

前節の計算によってある標準状態における左横ずれ断層による傾斜の場が得られた。その範囲は断層の長さの 2.5 倍に及び、62 個の地震を充分包含できる。これと観測データとを比較するためには、観測データを標準状態に補正しなければならない。その標準状態とは、(1) 断層面の方位を $N45^\circ W$ とする。(2) マグニチュードを一樣に $M=4.5$ とする。 $M=4.5$ に対する断層の長さを 5 km とし、断層変位は 1 cm を単位とする。なお、 D/L は 0.6, 0.8, 1.0 の三つの場合とする。さて、実際の観測データは第 4.1 表に掲げてある如く市川 (前出 410) による nodal plane の方位は $N45^\circ W$ に対し $\pm 20^\circ$ の範囲でさまざまであるが、これを一樣に $N45^\circ W$ になるように座標軸を回転する。次にマグニチュード $M=4.5$ はここで扱っている地震 $M=4.0\sim 5.0$ の中間の値である。発震機構が同じで、大きさの異なる地震を同じ規模で見ようとするには、マグニチュードの大きな地震は観測点を近ず

け、小さな地震は遠ざければよい。従って、マグニチュードの異なる地震をすべて $M=4.5$ であるように補正するには、震央距離にマグニチュードに対する断層の長さの比 $(L_{4.5}/L_M)^*$ を乗じた距離に震央の位置を補正すればよい。このような相似の操作が許されることは、(4.6) 式がデメンションのない値だからである。

第4.16図は第4.6図を以上のような補正を行なって描き直したものである。但し D/L については0.5と0.6、0.7と0.8、0.9と1.0とを一緒にし三群に分けてある。これらを第4.15図と重ね合わせてみる。図において点線は理論的方位である。断層変位が1cmである場合の観測点での傾斜角は、第4.15図より求めて第4.1表の終りから4列目に掲げておいた。従って、推定される断層の変位量は観測された Tilt-step をこの数値で除せば求まる。但し、傾斜の方位が理論と観測とが一致したものについて行なわなければならない。そこで一致の判定を行なったところ、Press の図表に対して行なったと同様に A, B, C に分けてみるとよく一致している A は13、ややよい一致のもの ((A) とする) 7、計20個を数えた。それらの結果は第4.1表の最後の列に記載しておいた。

8. 地震の規模 M とモーメント M_0 との関係

断層変位 u_2 と断層面積 $L \cdot D$ が推定できたから、剛性率 μ を仮定すると地震のモーメント M_0 が求まる。

$$M_0 = \mu u_2 L \cdot D \quad (4.7)$$

$\mu=10^{11}$ と仮定して M_0 を計算したものを第4.1表の終りから2列目に記載してある。そのうち理論の方位と一致する A および (A) についてマグニチュード M との関係をとってみると第4.17図の如くなる。その関係を直線であらわすと

$$\log_{10} M_0 = 1.38 M + 15.7 \quad (M=4 \sim 5), \quad (4.8)$$

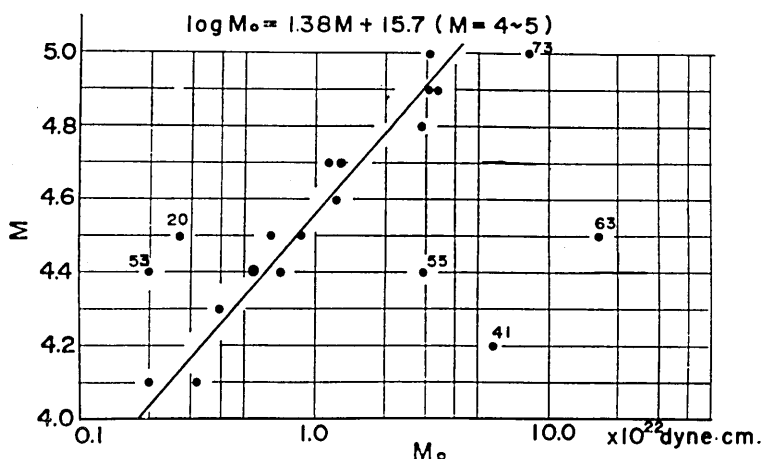


Fig. 4.17. Earthquake magnitude versus earthquake moment derived from tilt-steps.

* L: (4.3) 式又は付録4.3による。

となる (番号のついた丸印は含まない). M と M_0 の関係についてはいろいろと求められている. 笠原 (前出 406) はここで扱った同じ地震を岐阜における Wiechert 地震計の観測から

$$\log_{10}M_0=1.8 M+13.5 \quad (M=4\sim 5),$$

を得ている. また安芸⁴¹⁷⁾は Parkfield の地震から

$$\log_{10}M_0=1.5 M+15.8,$$

Wyss, Brune⁴¹⁸⁾ の両氏も Parkfield 地震から

$$\log_{10}M_0=1.4 M+17.0 \quad (M=3\sim 6),$$

の関係をj得ている. 竹本・高田⁴¹⁹⁾は近畿北部の中規模地震の伸縮計の strain-step の観測から得た M と L の関係を敷衍して

$$\log_{10}M_0=1.4 M+(18.7\sim 17.7) \quad (M=3.6\sim 5.6),$$

を得ている. 竹本・高田以外はすべて地震波動から求めたものである. これらを数値を代入して比較してみると次の如くなる.

$\log_{10}M_0$:

	W.T.T.	KASAHARA	AKI	W. & B.	T. & T.
$M=4$	21.2	20.7	21.8	22.6	24.3~23.3
$M=5$	22.6	22.5	23.3	24.0	25.7~24.7

水管傾斜計と笠原の値とはよい一致を示している. 竹本・高田は $\mu=3\times 10^{11}$ に仮定している.

9. 補 遺

以上 Tilt-step から M と L の関係を M と D/L の関係に発展させ, M と M_0 の関係については, それが他の方法で求めたものと矛盾しない結果が得られた. しかし, M と M_0 の関係にしても 62 個の地震のうち対応のとれたもの 14 個とはやや“歩どまり”が悪いように思う. その原因のひとつは観測が時間的に密なところも疎のところも一様に第 4.5 図の方法によって Tilt-step を決定したことなどで, 自記水管が完成すればよい結果が得られるであろう.

第 4.18 図は第 4.16 図 (a), (b), (c) から理論と一致する方位のものを抽出したものである. そのうち実線の丸印が M と M_0 の関係式を定めたものであるが, 断層の至近あるいは極至近距離のものが以外によく理論に合致している. それは傾斜の変化が大きいので媒質の多少の不均質に打勝ってよい一致が得られたのであろう. また, 傾斜変化の異常に大きなもの, 方位の一致のよくないものは, 観測点が震源域内にあるため, 震動によって計器台付近の岩盤の二次的破壊による影響も考えられる.

最後に断層面積推定の問題であるが, 本震による断層面積の大きさを知るには余震の空間的分布を知る以外確実な手がかりが得られないであろう. 大竹⁴²⁰⁾は 1970 年 4 月 9 日北

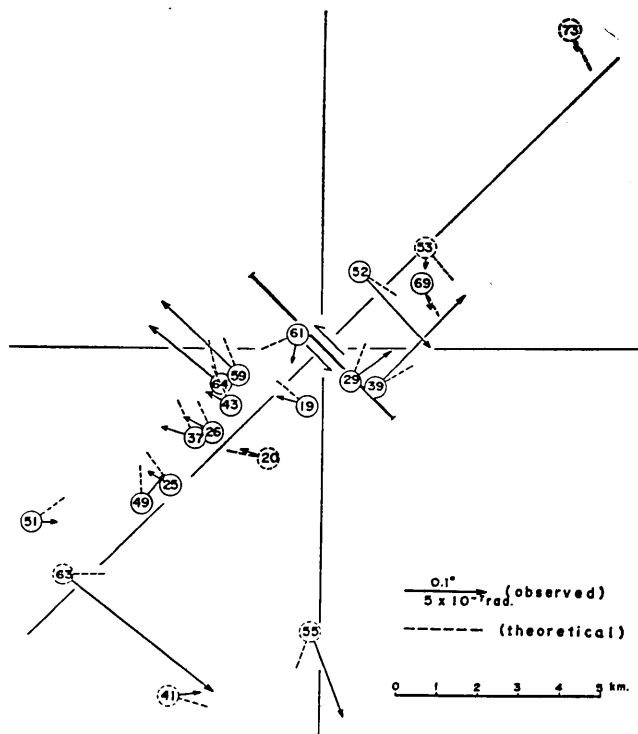


Fig. 4.18. Fourteen selected tilt-steps, which M versus M_0 were derived. (open circle).

信地区で起った $M=5.0$ の地震の前後の地震活動の微細構造を論じている。第 4.19 図は主震以降 30 日間の余震分布図である。図から主震の断層面積を長さ 10 km, 巾 2 km の面が深さ 14 km から 5 km かけて斜め上向に走っていると述べている。第 4.11 図の推定法では、 $5 \text{ km} \times 9 \text{ km} = 45 \text{ km}^2$ より小さくはならない。 M と M_0 の関係についてはよい結果が得られている反面、断層面積については過大見積をしている可能性が大きい。これらの問題については今後さらに検討しなければならない。

ここでは 1 カ所の観測点で多くの地震を観測したが、地殻変動観測所が多数建設された現在、ある大きな地震を多数の観測点で観測する場合の参考になるであろう。

以上多くの問題を残しながらも一応観測結果をまとめた。

第 5 章 諸分野への応用

水管傾斜計の諸分野への応用として、土木工学の分野として佐久間ダム、黒四ダムの場合を、火山学の分野としてキラウエア・カルデラにおける観測の場合について簡単に述べる。

1. 佐久間ダムの場合⁵⁰¹⁾

佐久間ダムは天竜川の中流域に位置し、重力ダムとしてはわが国最大のものである。満水時の湛水容量は $327,000,000 \text{ m}^3$ である。

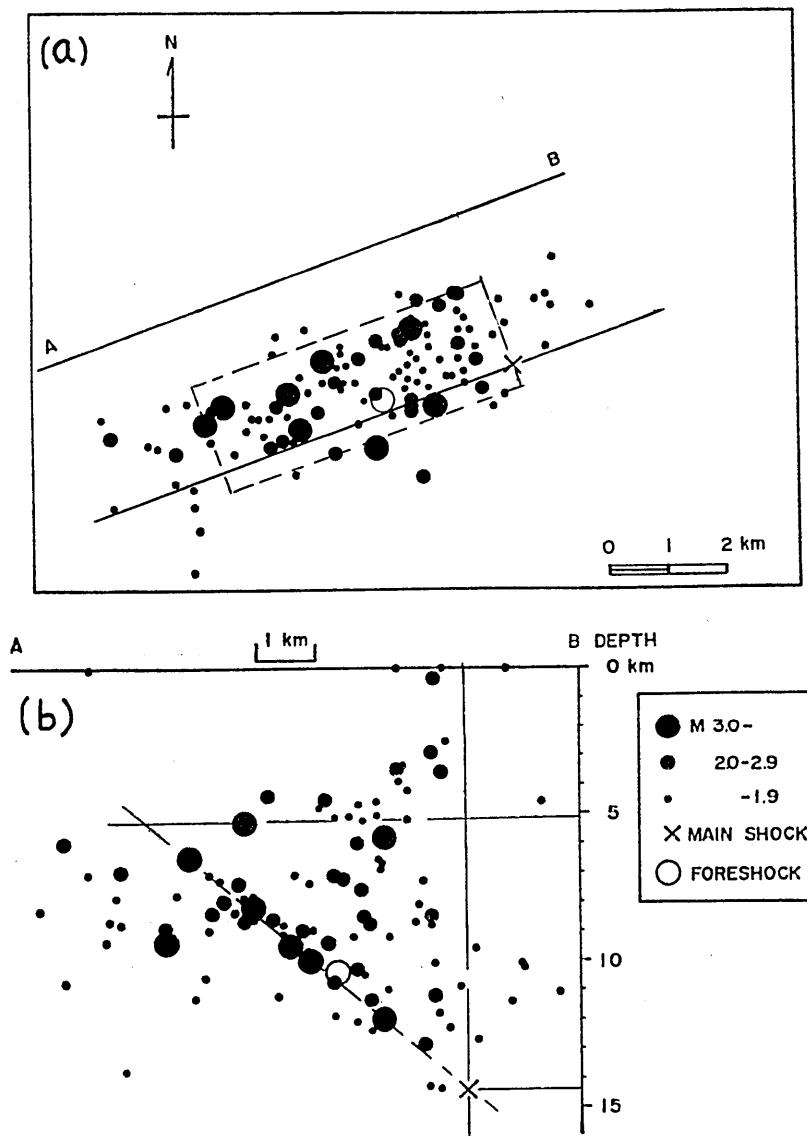


Fig. 4.19. (a) The epicentral distribution of the earthquakes which occurred within thirty days following the main shock. (b) The section map of the hypocentral distribution projected on a vertical plane trending N70°E (A-B). (after Ohtake).

この膨大な湛水荷重により、ダム周辺の岩盤は巨大な応力を受け、相応する歪が観測されるであろう。地殻の構造は複雑であるから、実験室における試験片の岩石とは異なる挙動が期待される。筆者らは電源開発株式会社と協同のもとに2号ダイバージョン・トンネルに水管傾斜計、伸縮計を据え廃棄した国鉄飯田線トンネル内に水管傾斜計1成分を据えて湛水の初期から観測を開始した。第5.1図は計器の位置図である。(●印地震計位置に同

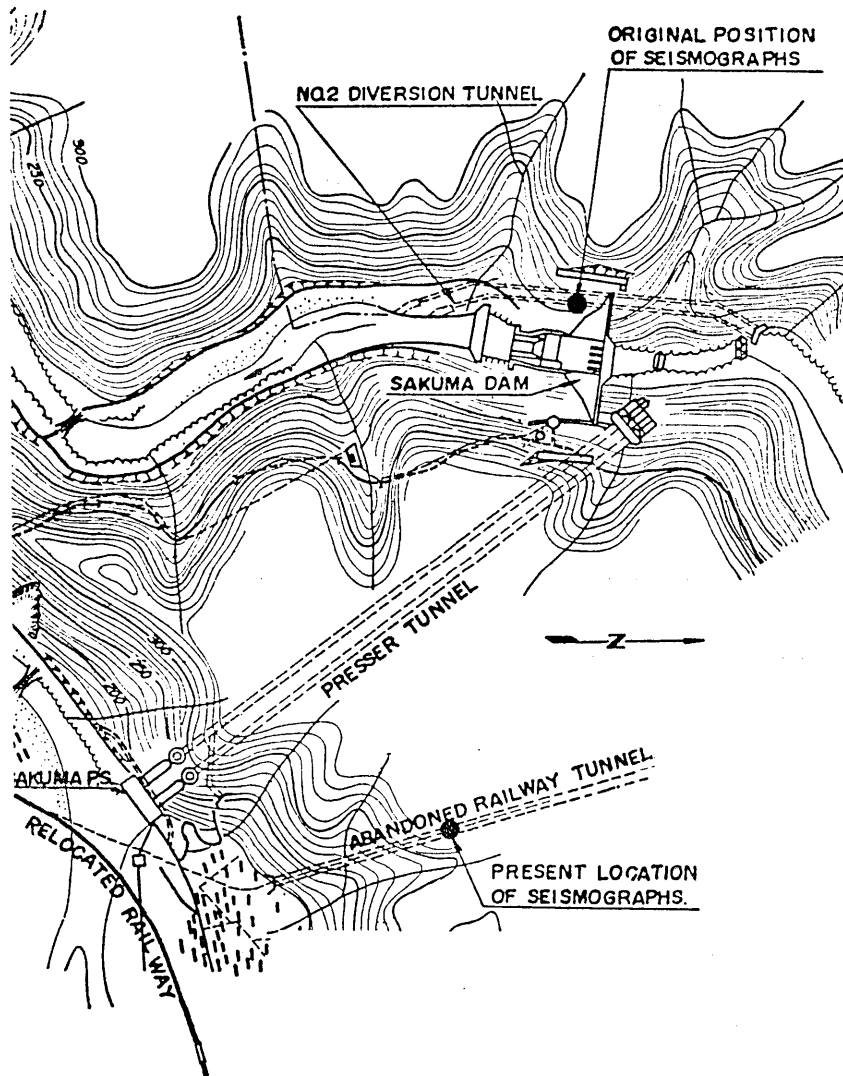


Fig. 5.1. Map of Sakuma Dam area. The observatories are shown by solid circles.

じ). 前者はダムの中央河床面に据えられ、後者は全長約 1500 m のトンネルの入口から 600 m の地点に据えられている。トンネルの北口は閉栓され水面下にある。第 5.2 図はその観測結果で、10日平均値で示してある。AB 成分は上流下流方向 (A down は下流側下り)、BC 成分は左右岸方向 (C down は左岸側下り) である。水位変化は約 50 m であるが、AB 成分より BC 成分の方が水位変動に対してより鋭敏に対応している。水位 1 m 当りの傾斜変化は BC 成分が $0.05''$ であるのに対して AB 成分はその半分である。FG 成分 (廃棄鉄道トンネル) の記録は湛水池より遠いため水位変動との対応は顕著でない。しかし、水位変動と傾斜変化の間に若干の時間差があるように見える。なお、この研究では

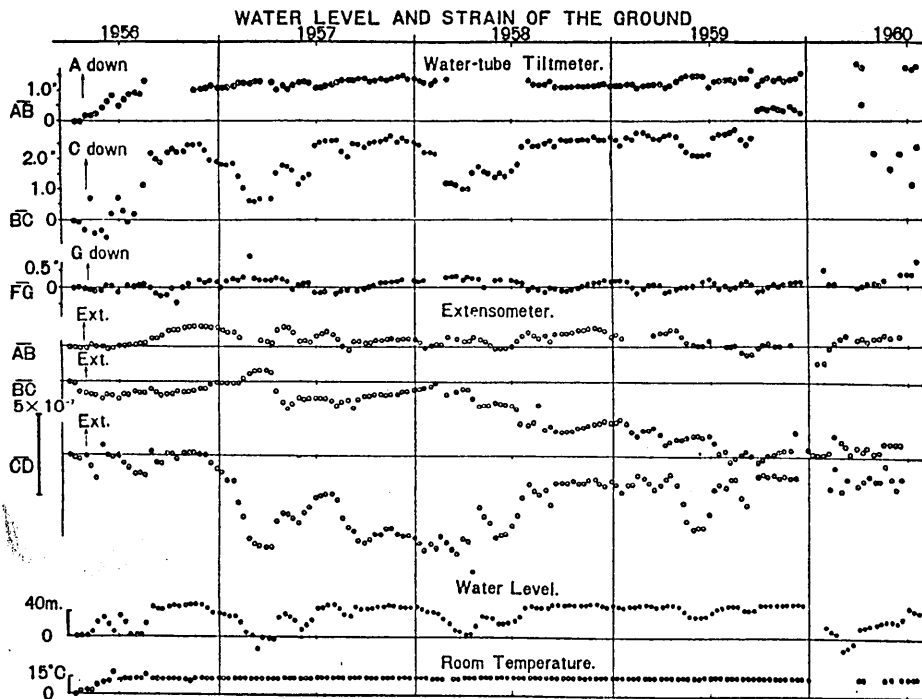


Fig. 5.2. Ground tilts and Strains at Sakuma.

湛水荷重による下流側の沈降域のひろがりを水準測量によって確かめた。その結果 82 m の水位上昇に対しダムサイトの下流 2 km の区間で平均傾斜 1.6 秒角のダム側の沈降が認められた。

2. 黒四ダムの場合⁵⁰²⁾

黒四ダムは、関西電力株式会社の黒部川第四水力発電所のダムである。堤頂長 475 m、高さ 186 m アーチ式ダムとしてわが国最大のものである。このダムは黒部溪谷の脆弱な岩盤に建設されているので、あらゆる種類の測定を行なって安全管理に万全を期している。それはダム本体のみならず基礎岩盤の挙動にも充分に力が注がれている。筆者もこれらの測定の一部に参加した。

水管傾斜計は満水位の 40% (EL. 1340) と 60% (EL. 1370) の標高にある右岸の着岩面付近の河川に直交する監査廊内に据えられた。この場所は工事中から岩盤の変位が注目されていたところである。前者は 98 m、後者は 65.9 m の長さを有し、配管の途中 2 カ所にも読取容器を据えて中間の変化もわかるようにしてある。坑道の奥から容器に 1, 2, 3, 4 の順に番号がつけてある。第 5.3 図は観測結果の一部である。図は最深部の地点 (No. 1) に対する各点の相対垂直変位であらわしてある。ここでは湛水位との相関はみられない。雨期 (7~8 月) には乾期 (3 月) にくらべ地表側が深部より 1.5~2.0 mm 沈下している。

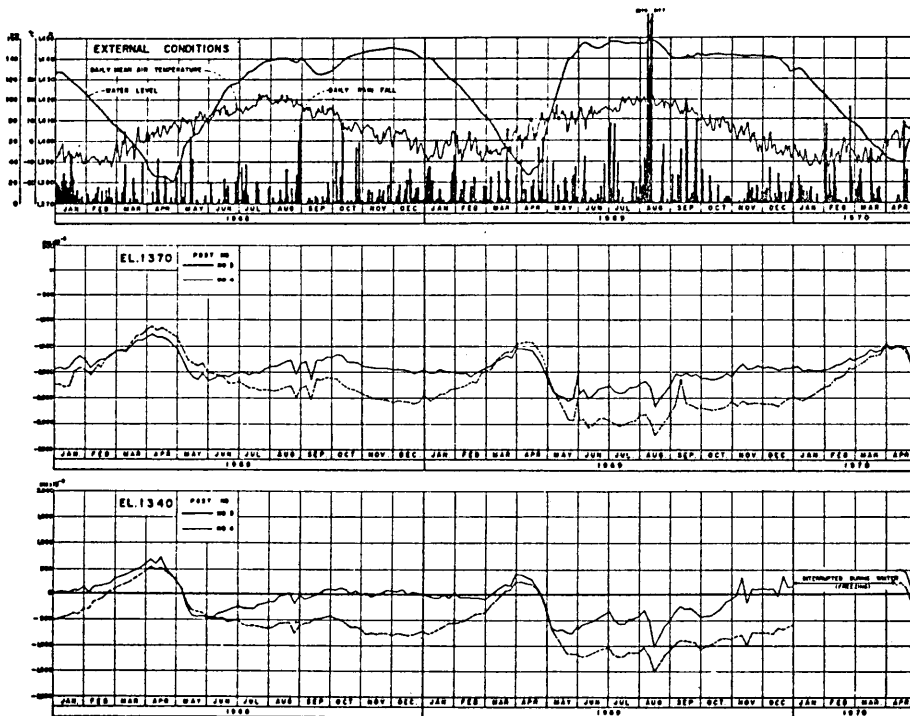


Fig. 5.3. Vertical movement of rock foundation. (after Kansai Electric Power Co.)

この現象は雨期に地山深部の膨脹によるものと解釈された。その理由として、夏季地山の間隙圧の上昇、河川に直角方向のロック・デフォーマータに圧縮があらわれることが挙げられる。そこで、地山の地下水位の変動がダム基礎岩盤に変形を及ぼすことがほぼ確実と推定されるに至り、関電トンネル内の浸透水の測定から地下水位は赤沢岳 (EL. 2670 m) 直下で 430 m から 260 m (関電トンネル測定点標高 EL. 1560 m) まで 170 m 変化することが確められた。それから湛水面までの地下水流の自由水面、等ポテンシャル網の解析を行ない、地下水圧差による地山の変形量を求めた。これらの解析には有限要素法が用いられた。第 5.4 図はその結果を示したものである。図の変位ベクトルの上向成分は水管傾斜計の示す基礎岩盤の角変位をあらわし、水平 (Y 方向) 成分はいわゆる山押現象となるものである。山押は、ダムの着岩面における変位方向が三成分調整計算 (S.A. C.A.) の方向と若干の差違の生ずることにより確認できる。

この現象はアーチ・コードを圧縮する力が働くので、ダム設計に当り考慮すべき事柄である。以上の重要な事実を把握できたことは、水管傾斜計が他種計測との関連において、ダムの安全管理上有効なものであることを証明するものである。

3. 火山学における応用

火山学における傾斜観測の歴史はかなり古い。地震研究所においては 1934 年頃より水上^{503), 505)}、高橋・水上⁵⁰⁴⁾によって浅間火山の傾斜についての報告がある。同じ頃京都大学

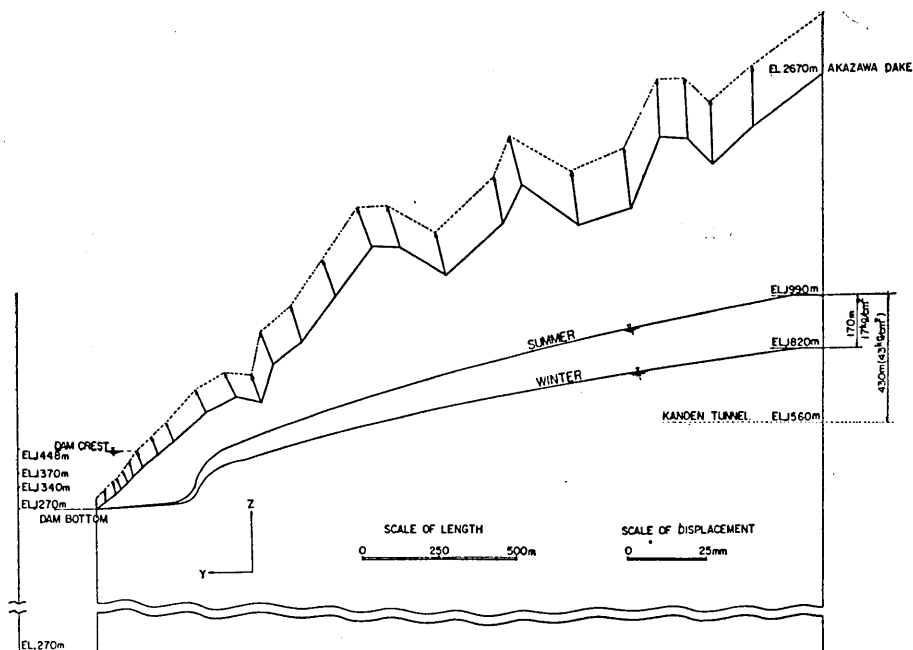


Fig. 5.4. Displacement of mountain to be caused by difference of seasonal ground water table. (after Kansai Electric Power Co.)

では佐々（前出 017）によって阿蘇山の観測が行なわれている。これらの観測はいずれも水平振り型傾斜計によるものである。浅間山の場合、計器は火口より5 kmほど離れた山裾の熔岩の洞窟に据えられている。この観測で明らかにされたことは、火山活動が始まると傾斜変動も速度を増す。1935年の噴火の例では、約2カ月前から異常が現われ始め、変動速度は1日当り1秒角で30秒角にも達した。この振巾は平常の数倍のものである。最初の噴火が始まると以後急速に変動が元に戻る。

この観測室の温度変化は年間を通じて $0^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$ で、このような条件のよい場所は少ない。水平振り型が局部的な擾乱をうけて本質がうまく記録されないのは火山学においても同様であろう。水管傾斜計が火山学に実用されたのは最近である。わが国では秘島火山における江頭（前出 104）の試みがある。

J. P. Eaton⁵⁰⁶⁾ はハワイのキラウエア・カルデラにおいて水管傾斜計による観測を行なった。その方法は1辺2,000呎の三角形の頂点の部分に基礎台を設け、1組の水管傾斜計であたかも水準測量のように順次移動して観測する方法である。その閉塞誤差は屋外で不十分な条件であるが 10μ 以内であるという。

このような三角形をカルデラの外縁に4カ所設けて1958年10月から5カ月間観測を行なった。一方、均質媒質内に球形のマグマ溜りがあり、これに静水圧が加わった場合に地表面でどのような傾斜があらわれるかを理論的に求めたものと観測とを比較した。観測による火山頂上の膨らみの形から、カルデラの南縁の直下4 kmのところにもマグマ溜りがあることが推定された。

なお、ここで使用された水管傾斜計は、筆者らの製作になるものを参考にして作られたときいている。

謝 辞

本論文が茲に完成するに至ったのは、多くの方々のご指導とお力添によるものである。

東京大学地震研究所の萩原尊禮名誉教授、力武常次教授、笠原慶一教授には二十余年に亘り地震学、特に地殻変動についてご指導にあずかった。笠原教授には全篇を通覧の労をとっていただき多くのご教示にあずかった。また、島崎邦彦助手、名古屋大学の志知竜一助手には終始貴重なご意見とご指導を賜わった。諸先生に深く感謝の意を表します。

論文内容の基本である観測資料については、長年に亘り観測に精進してこられた油壺観測所の若生喜市氏、高橋辰利技官、鋸山観測所の島津孝技官、松山観測所の故岩城治義技官、松代地震に際して筆者と観測を共にした弥彦観測所の若杉忠雄技官、以上の方々には貴重な資料を使用させていただいたことに対し厚く御礼を申し上げます。

計器の企画、試作、改良に関し良好な成果を収めることが出来たのは地震研究所の技術部の方々の優れた技術によるものである。ご協力を感謝致します。

各章で述べた研究を進めてゆく上にお世話になった方々は極めて多い。一人一人お名前を挙げるが出来ないが、愛媛県土木部、気象庁地震観測所、国土地理院、沖電気工業株式会社の関係の方々、そして、引用させていただいた文献の著者の方々によって啓発されるどころ絶大なものがあつた。それらの方々に対し厚く御礼を申し上げる次第である。

最後に本論文を執筆するに当り、北海道大学の横山泉教授には終始ご指導とご鞭撻を賜わった。深甚の謝意を表します。

本論文は北海道大学審査学位論文である。

参 考 文 献

まえがき

- 001) 今村明恒, 地震に先駆する地殻変形に就て. 地震 I, 4 (1932), pp. 422-424.
- 002) A. IMAMURA, Topographical Changes accompanying Earthquakes or Volcanic Eruptions. Publ. Earthq. Inv. Comm., 25 (1930) pp. 27-30, pp. 35-38, pp. 112-113.
- 003) 文部省震災予防評議会, 大日本地震史料. 3 (昭 18), pp. 105-106, pp. 148.
- 004) 島根県立浜田測候所, 明治五年旧二月六日浜田地震. (大正 1), pp. 29.
- 005) 藤井陽一郎, 日本の地震学. 紀伊国屋新書 (1967), pp. 147.
- 006) A. IMAMURA, A Note on the Result of Precise Levelling in the Littoral Region of Etigo and Sinano. Proc. Imp. Acad. 4 (1928) pp. 56-59.
- 007) T. SHIDA, On the Elasticity of the Earth and the Earth's Crust. Memoir of College of Science and Engineering, Kyoto Imp. Univ., 4 (1912), pp. 24-26.
- 008) 萩原尊禮, 地震計. 科学文献抄 8, 岩波書店 (昭 11), pp. 48.
- 009) z. B.
O. HECKER, Beobachtungen an Horizontalpendeln über die Deformation des Erdkörpers dem Einfluss von Sonne und Mond. Heft I u. II. Veröff. d. Königl. Preuss. Geodät. Inst. Potsdam N. F. 32 (1907), N. F. 49 (1911).
E. v. REBEUR-PASCHWITZ, Das Horizontalpendel. Nova Acta Ksl. Leop. Carol Acad. Halle, 60 (1892).
E. v. REBEUR-PASCHWITZ, Horizontal Pendel-Beobachtungen auf der Kaiserlichen Universitäts Sternmarte zu Strassburg 1892-1894. Gerl. Beit z. Geophys. 2 (1897). etc.

- 010) M. ISHIMOTO, Observations sur les variations de l'inclination de la surface terrestre (premier rapport). Bull. Earthq. Res. Inst., 2 (1927), pp. 1-12.
- 011) W. INOUE, On Earth-tilting observed at Mt. Tsukuba. Bull. Earthq. Res. Inst., 6 (1932), pp. 130-144.
- 012) R. TAKAHASI, Tilting Motion of the Earth Crust caused by Tidal Loading. Bull. Earthq. Res. Inst., 6 (1929), p.p. 85-108.
- 013) R. TAKAHASI, Tilting Motion of the Earth's Crust observed at Ryozyun (Port Arthur). Bull. Earthq. Res. Inst., 10 (1932), pp. 532-553.
- 014) R. TAKAHASI, Tilting Motion of the Earth's Crust observed at Kawana. Bull. Earthq. Res. Inst., 10 (1932), pp. 145-170.
- 015) 西村栄一, 地殻潮汐について. 地球物理, 5 (昭. 16) pp. 10-170.
- 016) T. HAGIWARA, Observations of Changes in the Inclination of the Earth's Surface at Mt. Tsukuba. Bull. Earthq. Res. Inst., 16 (1938), pp. 366-371. ditto (Second Report). 19 (1941), pp. 218-227.
- 017) 佐々憲三, 気象変化に起因する土地昇降変化に就いて. 天文学及地球物理学邦文輯報, 1 (昭. 15), pp. 16-26.
- 018) C. TSUBOI, The Water Surface of a Lake as an Indicator of Crustal Deformation. Bull. Earthq. Res. Inst., 15 (1937), pp. 935-943.
- 019) 萩原尊禮, 表俊一郎, 富士山麓に於ける地表傾斜変化の研究 (其の 1). 地震研究所彙報, 21 (昭. 18) pp. 243-275.
- 020) 社団法人土木学会, 明治以前日本土木史. (昭. 11) pp. 1669.
- 021) A. A. MICHELSON, The Rigidity of the Earth. Astrophys. J. 50 (1919).
(原著は入手できないので内容は (前出 016) 西村英一, pp. 12 より引用.)
- 022) R. TAKAHASI, Preliminary Report on the Observation of the Tilting of the Earth's Crust with a Pair of Water Pipes. Bull. Earthq. Res. Inst., 8 (1930), pp. 143-152.
- 023) T. HAGIWARA, Observation of Changes in the Inclination of the Earth's Surface at Mt. Tsukuba (Third Report). Bull. Earthq. Res. Inst., 25 (1947), pp. 27-32.
- 024) 萩原尊禮, 力武常次, 山田重平, 笠原慶一, 油壺における地殻変動の研究. 地震研究所速報, 第 6 号 (昭. 24).
- 025) T. HAGIWARA, T. RIKITAKE and J. YAMADA, Observations of the Deformation of the Earth's Surface at Aburatsubo, Miura Peninsula Part I. Bull. Earthq. Res. Inst., 26 (1948), pp. 23-27.
T. HAGIWARA, T. RIKITAKE, K. KASAHARA and J. YAMADA, ditto. Part II, Bull. Earthq. Res. Inst., 27 (1949), pp. 35-38. ditto, Part III, Bull. Earthq. Res. Inst., 27 (1949), pp. 39-44.
T. HAGIWARA, K. KASAHARA, J. YAMADA and S. SAITO, ditto. Part. IV, Bull. Earthq. Res. Inst., 29 (1951), pp. 455-468.
T. HAGIWARA and K. KASAHARA, ditto. Part V, Bull. Earthq. Res. Inst., 29 (1951), pp. 557-561.
- 026) loc. cit., 023), pp. 27-28.
または, 萩原尊禮, 地震の予知, 地学出版社, (昭. 41), pp. 66-72.

第 1 章 水管傾斜計の計器論

- 101) 萩原尊禮, 山田重平, 室戸岬で行った水管傾斜計による土地傾斜変動の観測. 地震研究所速報, 5 (昭. 22), pp. 179-185.
- 102) loc. cit., 024), 025) Part I.
- 103) T. HAGIWARA and T. RIKITAKE, Observation of the Deformation of the Earth's Surface in the Vicinity of the Epicenters of the Imaichi [Earthquake]. Bull. Earthq. Res. Inst., 28 (1950), pp. 438.
- 104) 江頭庸夫, 自記水管傾斜計, 京大防災研究所年報. 8 (昭 40), pp. 59-68.
- 105) Earthquake Prediction Research Group in Japan, Prediction of earthquakes Progress to Date and Plans for Future Development. (1962), pp. 8.

- 106) loc. cit., 025). Part II, Part III.
 107) loc. cit., 012).
 108) loc. cit., 016).
 109) M. YASUI, T. WATANABE. Studies of the Thermal State of the Earth. The 16th Paper: Terrestrial Heat Flow in the Japan Sea (1). Bull. Earthq. Res. Inst., **43** (1965), pp. 549-563.
 110) loc. cit., 017).
 111) 岡田武松, 気象学. 岩波書店, 上 (昭. 15), pp. 173.
 112) 長谷川洋作, 浜野洋三, 坂田正治, 台風通過と地殻の隆起. 昭和46年度地震学会春季大会講演予稿集, pp. 151.
 113) loc. cit., 016), (Second Report).
 114) 飯田汲事, 志知竜一, 松浦宏, 犬山にけおる地殻変動の連続観測. 測地学会誌, **14** (1969), pp. 150-154.
 115) 志知竜一, 松浦宏, 飯田汲事, 犬山における地殻変動の連続観測, (II). 測地学会誌, **16** (1970), pp. 177-189.
 山内常生, 志知竜一, 飯田汲事, 湧水量測定 of 自記装置. 測地学会誌, **16** (1970), pp. 276-227.
 116) 山内常生, 志知竜一, 飯田汲事, 地殻変動の連続記録に現われる降雨によるノイズについて. 測地学会誌, **16** (1970), pp. 202-208.
 117) T. TANAKA, Study on Meteorological and Tidal Influence upon Ground Deformations. Special Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ., **9** (1969), pp. 29-90.

第2章 水管傾斜計の遠隔記録

- 201) R. L. HANSON, Applications of the Acoustic Sing-Around Circuit. J. Acous. Soc. Am. **21** (1949), pp. 60.
 202) 例えば 岩波理化学辞典, 第1刷 (1953), pp. 62. ほかに Rheology の著書多数.
 203) JULIAN R. FREDERIC, Ultrasonic Engineering. John Wily & Sons, Inc., New York (1965), pp. 27-28.
 204) ditto, pp. 31-33.
 205) } 実吉純一, 超音波の応用. エレクトロニクス講座, 応用編 I. 共立出版 (昭. 36), pp. 224-225.
 206) }
 207) loc. cit., 203), pp. 33-41.
 208) 沖電気工業株式会社, 超音波式自記水管傾斜測定装置取扱説明書. (昭. 42)

第3章 水管傾斜計の経年変化

- 301) loc. cit. 025), Part IV, pp. 455-468.
 302) 原田美道, 地殻変動特に三浦半島の変動特性, 第1報. 地震II. **1** (1948), pp. 52-56.
 303) 檀原毅, 広部正信, 日本における過去60年間の上下変動, II 関東地方南部. 測地学会誌, **10** (1964), pp. 61-69.
 304) 檀原毅, 日本における過去60年間の上下変動, III 三浦半島特論. 測地学会誌, **10** (1964), pp. 71-82.
 305) 藤井陽一郎, 房総半島における地殻変動, I. 測地学会誌, **13** (1968), pp. 136-145.
 306) 松田時彦, 南関東の地質と活断層. 東京大学地震研究所地震予知観測センター資料, **1** (1970), pp. 9-16.
 307) 村井勇, 南関東の地質構造的応力場. 東京大学地震研究所地震予知観測センター資料, **1** (1970), pp. 17-24.
 308) 成瀬洋, 関東地方における第四紀地殻変動. 地質学論集, **2** (1968), pp. 29-32.
 309) 河角広, 鎌倉の地震力の期待値について. 災害科学研究会 (1963), 307) より引用.
 310) 国土地理院・地殻活動調査室, 房総・三浦半島における地殻活動状況. 地震予知連絡会会報, **1** (昭. 44), pp. 25-33.
 311) 檀原毅, 油壺における傾斜記録と水準測量との比較. 測地学会誌, **11** (1965), pp. 107-113.
 312) 藤田尚美, 三浦半島の上下変動に関する一考察. 地震予知連絡会会報, **5** (昭. 46), pp. 36-37.
 313) 国土地理院, 一等水準測量検測成果集録, **10** (昭. 44).

- 314) 岡田惇, 井筒屋貞勝, 伊藤裕, 角野行栄, 房総半島鋸山周辺の水準測量. 地震研究所彙報, **47** (1969), pp. 129-135.
- 315) N. MIYABE, Blocks in the Earth's Crust and their Mouements Part II. (Post-Seismic Crustal Movements in Boso Peninsula). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **9** (1931), pp. 407-422.
- 316) 島津康男, 地球内部物理学, 裳華房 (昭. 44), pp. 147-152.
- 317) H. KANAMORI, Study on the Crust-mantle Structure in Japan. Part 2, Interpretation of the Results Obtained by Seismic Refraction Studies in Connection with the Study of Gravity and Laboratory Experiments. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **41** (1963), pp. 761-779.
- 318) K. KAMINUMA, The Crust and Upper Mantle Structure in Japan. Part 2. Crustal Structure in Japan from the Phase velocity of Rayleigh waves. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **44** (1966), pp. 495-510.
- 319) 建設省国土地理院, 地震とその予知—地震対策のために, (昭. 47) pp.26.
- 320) ROBERT K. MCCONNELL, JR., Isostatic Adjustment in a Layered Earth, *J. Geophys. Res.*, **70** (1965), pp. 5172-5188.
- 321) J. C. SAVAGE, A Theory of Creep Waves Propagating along a Ttransform Fault, *J. Geophys. Res.*, **76** (1971), pp. 1954-1966.
- 322) K. MOGI, Migration of Seismic Activity, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46** (1968), pp. 53-74.
- 323) M. ANDO, A Fault-Origin Model of the Great Kanto Earthquake of 1923 as Deduced from Geodetic data, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **49** (1967), pp. 19-31.
- 324) 山口梅太郎, 西松裕一, 岩石力学入門, 東京大学出版会 (1967)
- 325) 地理調査所, 一等水準点検測成果集録, 第1巻 (昭 30).
- 326) 高橋竜太郎, 平能金太郎, 相田勇, 愛媛県高縄半島における精密水準測量の結果報告, 四国地方地盤変動調査報告書, 四国地方経済復興開発委員会, 第7輯 (昭 25).
- 327) 愛媛県土木部河川課, 松山市における地殻変動の観測 (昭. 31).
- 328) 愛媛県, 愛媛県地質図・地質図説明書, (昭. 37).
- 329) 志知竜一, 私信 (1970年10月, 11月, 1972年2月).
- 330) J. M. A., The Rainfall in Japan, **8** (1940-1950), **9** (1951-1955),
- 331) 小牧昭三, 観測井記録の解析, 北伊勢地盤沈下報告書, (昭. 42), pp. 29-73.
- 332) 小沢泉夫, 汲水による地盤のひずみの観測, 京都大学防災研究所年報, **13号A** (昭. 45), pp. 79-90
- 333) 野間泰二, 松山市石手川伏流水について—愛媛県道後平野の水理地質学的研究, 第2報. 愛媛大学紀要, 第II部第2巻 (1957), pp. 107-116.
- 334) J. M. A., Catalogue of Major Earthquake in and near Japan, **1** (1926-1956), **2** (1957-1962), **3** (1963-1967).
- 335) 檀原毅, 松代地震に関連した地殻の上下変動. 測地学会誌, **12** (1966), pp. 18-45.
- 336) 坪川家恒, 地殻変動の継続時間と地震の規模との関係について. 測地学会誌, **15** (1969), pp. 76-88.
- 337) J. A. MESCHERIKOV, Recent Crustal Movements in Seismic Regions: Geodetic and Geomorphic Data. *Tectonophysics*, **6** (1968), Special Issue, pp. 29-39.

第4章 地震活動と水管傾斜計の観測

- 401) 気象庁, 松代群発地震調査報告, 気象庁技術報告, **62** (1968), pp. 7-18.
- 402) The party for Seismographic Observation of Matsushiro Earthquakes and the Seismometrical Section, Matsushiro Earthquakes Observed with a Temporary Seismographic Network. Part 2. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **44** (1966), pp. 1689-1714. Part 3. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45** (1967), pp. 197-223. Part 4. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45** (1967), pp. 887-917.
- 403) T. HAGIWARA and T. IWATA, Summary of the Seismographic Observation of Matsushiro Swarm Earthquakes. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46** (1968), pp. 485-515.
- 404) T. HAGIWARA, J. YAMADA and M. HIRAI, Observation of Tilting of the Earth's Surface

- Due to Matsushiro Earthquakes. Part 1. Bull. Earthq. Res. Inst., **44** (1966), pp. 351-361.
- 405) 萩原尊禮, 土地傾斜変化観測上の一問題点, 日本測地学会, 第30回講演会, (昭. 43).
- 406) T. HAGIWARA and T. RIKITAKE, Japanese Program on Earthquake Prediction. Science, **157** (1967), pp. 761-768.
- 407) K. KASAHARA, The Source Region of the Matsushiro Swarm Earthquakes. Bull. Earthq. Res. Inst., **48** (1970), pp. 581-602.
- 408) Y. TSUNEISHI and K. NAKAMURA, Faulting Associated with the Matsushiro Swarm Earthquakes. Bull. Earthq. Res. Inst., **48** (1970), pp. 29-51.
- 409) 萩原尊禮, 力武常次, 笠原慶一, 山田重平, 福井県北郷村に於ける土地傾斜変化および伸縮の観測. 日本学術会議福井地震調査研究特別委員会 (昭. 24), pp. 61-64.
- 410) M. ICHIKAWA, Reanalysis of Mechanism of Earthquakes which occurred in and near Japan, and Statistical Studies on the Nodal Plane Solutions Obtained, 1926-1968. The Geophysical Magazine, J. M. A., **35** (1971), pp. 207-274.
- 411) F. PRESS, Displacements, Strains, and Tilts at Teleseismic Distances. J. Geophys. Res., **70** (1965), pp. 2395-2412.
- 412) M. A. CHINNERY, The Deformation of the Ground Around Surface Faults. Bull. Seismol. Soc. Am., **51** (1961), pp. 355-372.
- 413) 竹本修三, 高田理夫, 地震に伴う Strain Step について. 測地学会誌, **15** (1969), pp. 68-74.
- 414) 大塚道男, 地震のマグニチュードと地表にあらわれる断層について. 地震 II, **18** (1965), pp. 1-8.
- 415) M. WYSS and H. BRUNE, Seismic Moment, Stress, and Source Dimensions for Earthquakes in the California-Nevada Region. J. Geophys. Res., **73** (1968), pp. 4681-4694.
- 416) T. MARUYAMA, Statical Elastic Dislocations in an Infinite and Semi-Infinite Medium. Bull. Earthq. Res. Inst., **42** (1964), pp. 289-368.
- 417) K. AKI, Analysis of the Seismic Coda of Local Earthquakes as Scattered waves. J. Geophys. Res. **74** (1969), pp. 615-631.
- 418) loc. cit., 415).
- 419) 竹本修三, 高田理夫, 近畿北部の中規模地震と Strain Step について. 地震 II, **23** (1970), pp. 49-60.
- 420) M. OHTAKE, Mico-structure of the Seismic Sequence Related to a Moderate Earthquake. Bull. Earthq. Res. Inst., **48** (1970), pp. 1053-1067).

第5章 諸分野への応用

- 501) Electric Power Development [Co., Ltd., Measurement of the Deformation of the Ground Caused by the Load of the Water Stored in the Sakuma Reservoir. (1961).
- 502) 関西電力株式会社, 黒部ダム測定報告書. (1971).
- 503) T. MINAKAMI, The Explosive Activities of Volcano Asama in 1935, (Part I). Bull. Earthq. Res. Inst., **13** (1935), pp. 629-644.
- 504) R. TAKAHASHI and T. MINAKAMI, Tilt Observations during the Recent Activities of Volcano Asama. Bull. Earthq. Res. Inst., **15** (1937), pp. 465-491.
- 505) T. MINAKAMI, On Volcanic Activities and Tilting of the Earth's Surface. Bull. Earthq. Res. Inst., **20** (1942), pp. 431-504.
- 506) J. P. EATON, A Portable Water-tube Tiltmeter. Bull. Seismol. Soc. Am., **49** (1959), pp. 301-316.

付録 1.1. 水管傾斜計の針先を鮮明に見る光学系. (本文 8 頁)

第 1.5 図の筆者改良の光学系は, 球面の覗き窓と球面収差と色収差を補正した対物レンズからなる. その原理を簡単に述べる. 第 1.1 図において球面窓を境にして右側が空気,

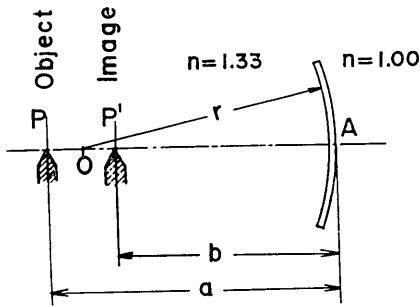


Fig. 1.1. Relationship between the object P and its image P' which is seen through the spherical glass field with water.

位置 b が一義的にきまる。いま $a=r$ とおくと $b=r$ となり実物と像とは一致する。

すなわち実物も像も眼の位置によって動かない。一方 $r=\infty$ とおくと上式は $a=b/n'$ となり平面窓の場合に相当する。いま $b \rightarrow x$ とおくと $a=x/n'$ で像と実物との距離は

$$x-a = \frac{n'-1}{n'} \cdot x = \frac{0.33}{1.33} \cdot x \doteq \frac{x}{4} \quad (1.2)$$

となる。境界面の外から水中の物体を見ると、その距離が $1/4$ だけ近づいて見える現象は周知のことである。従って平面窓の場合見る角度により像の位置が変わる。すなわち視差最小の状態は覗き窓が針先を中心とし極までを半径とする球面になっているときである。対物レンズは針先を見るだけでよいから設計に当っては近軸光線の取扱で充分である。従って球面収差と色収差の補正だけで充分である。

付録 1.2. 読取容器の製作工程 (本文 12 頁)

容器は上質の青銅铸件、たとえば JIS・H・5111・第 3 種または同等以上のもので作る。それも出来るだけ大型のインゴットから作ることが望ましい。それには大きな製作所で数多く注文するのがよい。ひずみ取りは铸造工場で熱い砂の上に長時間放置しておくが、さらに数年以上屋外に放置して雨露に晒しておく。筆者は F 型を 40 個発注し筑波観測所の屋上に数年間晒してから加工した。注意深く製作された铸件は旋盤加工の際、「す」(鬆)の全くないことわかる。「す」が深いと削り取らなければならないので、4 個組が同じ寸法に仕上がらない。粗悪な铸件は水が「す」を浸透し外部にしみ出すことすらあるとのことである。次に貯水部分に耐久性のよいいねいなメッキが施される。

先ず 30 ミクロン以上の厚さに銅メッキをして铸肌のピンホールの目つぶしを行ない、その上に 10~20 ミクロン厚のニッケルメッキをかける。途中クロムメッキをしてニッケルメッキした方が一層親和力がよいとのことである。このような厚目のメッキを一様の厚さにかけることは熟練と長時間の労力を要することで高価なものとならざるを得ない。この計器が外観の割に高価といわれる理由はこうした念入さによるものである。外部の塗粧についても念入なプライマー処理が施されている。表面処理技術に関しては当時の冶金学教

左側が水である。幾何光学によれば球面体を光が通過するとき物界と像界との間に次の関係式が成り立つ

$$n\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{a}\right)=n'\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{b}\right) \quad (1.1)$$

茲で

n, n' はそれぞれ空気と水の光の屈折率
($n=1.0, n'=1.33$)

r は球面の半径

$a=AP$ 極から物体までの距離

$b=AP'$ 極から像までの距離

上式により物体の種々な位置 a に対する像の位置 b が一義的にきまる。いま $a=r$ とおくと $b=r$ となり実物と像とは一致する。

室の浅原助教授のご意見に負うところが多い。最近明石製作所においてこのような煩雑なメッキ・塗粧を一切省略する方法として不銹鋼铸件で試作を行なった。インゴットや熱処理の吟味のむつかしさは砲金铸件の場合と同等としても、非常に長期間に亘る材料変形のデータが皆無である点で、地震観測用として使用することに若干不安を感じざるを得ない。

一方筑波における原型は砲金铸件にカドミウムメッキを施したものときいている。ほぼ30年を経過したが今なお健在である。漏水試験は1日当り 1～2 ミクロンならば合格である。

付録 1.3. 観測横坑の施工 (本文 12 頁)

観測横坑の掘削は発破によって掘進することは止むを得ないが、台石の据えられる付近は発破の薬量を少なくするとか、なるべく手掘で進むかして岩盤深部の損傷を避けるよう心掛け、その旨現場責任者と打合わせるべきである。坑道は原則として素掘のままが望ましいが、計器の直上は水滴、塵埃などの落下物に対し覆いが必要である。ライナープレートは施工が簡単で長寿命である。凝灰岩のように水分に遭うと急速に風化する岩盤は全面的に巻立を行なわなければならないが、「トルクレット」施工法が密着がよく最適のように思う。その場合も巻立の厚さは、5～7 cm で充分である。勿論、肌落、落盤の恐れのある場所は例外である。床コンクリートも 10 cm 程度で充分である。床も壁も 10 m 間隔に膨脹継手を入れるとよい。巻立を行なう前に坑道の精密な地質調査を行なっておけば後日観測結果を考察する際に役立つであろう。湧水に対する処置は巻立によって流出を止めることなく、むしろ樋や導孔によって自由に排出できるようにしてやらなければならない。

付録 1.4. 台石の加工 (本文 12 頁)

台石の素材は均質無疵のものを選び、仕上り寸法は縦×横×高さ=400×350×800 mm. あれば充分である。読取・日記両方式と一緒に置く場合には横巾は 500 mm 必要である。台石の天端は水磨き、側面は小叩き、床面以下に埋る部分は生地のまま、底面は荒削りでも平面にしておく。天端の仕上は最近の機械研磨では中凹みとなり易いから発註に際して注意を与えなければならない。仕上はていねいにやれば際限がなく、代金の大部分は加工賃である。計器を取付けるために埋込ボルト用の孔をあけるが、上から 10 cm 位の両側面にも 2 個の孔をあけておくと据付作業に便利である。ここに軟鋼棒を通し、運搬のとき、あるいは据付のとき微小調整に非常に役立つ。据付に際し高さや水平の調整には、5×10 cm の軟鋼板を各種の厚さのものを用意し、台石の四隅に敷いて調節する。セメントの配合は、セメント：砂：砂利=1：2：4 で、骨材は篩分けされたよいものを使わなければならない。

付録 1.5. 観測坑の平面図 (本文 12 頁)

観測坑は、初期の地殻変動観測所においては既製の坑道が利用された。防空壕、鉦山の廃坑、廃棄した鉄道の隧道などである。第 1.9 図 (15 頁) の観測坑は筑波を除きいずれも

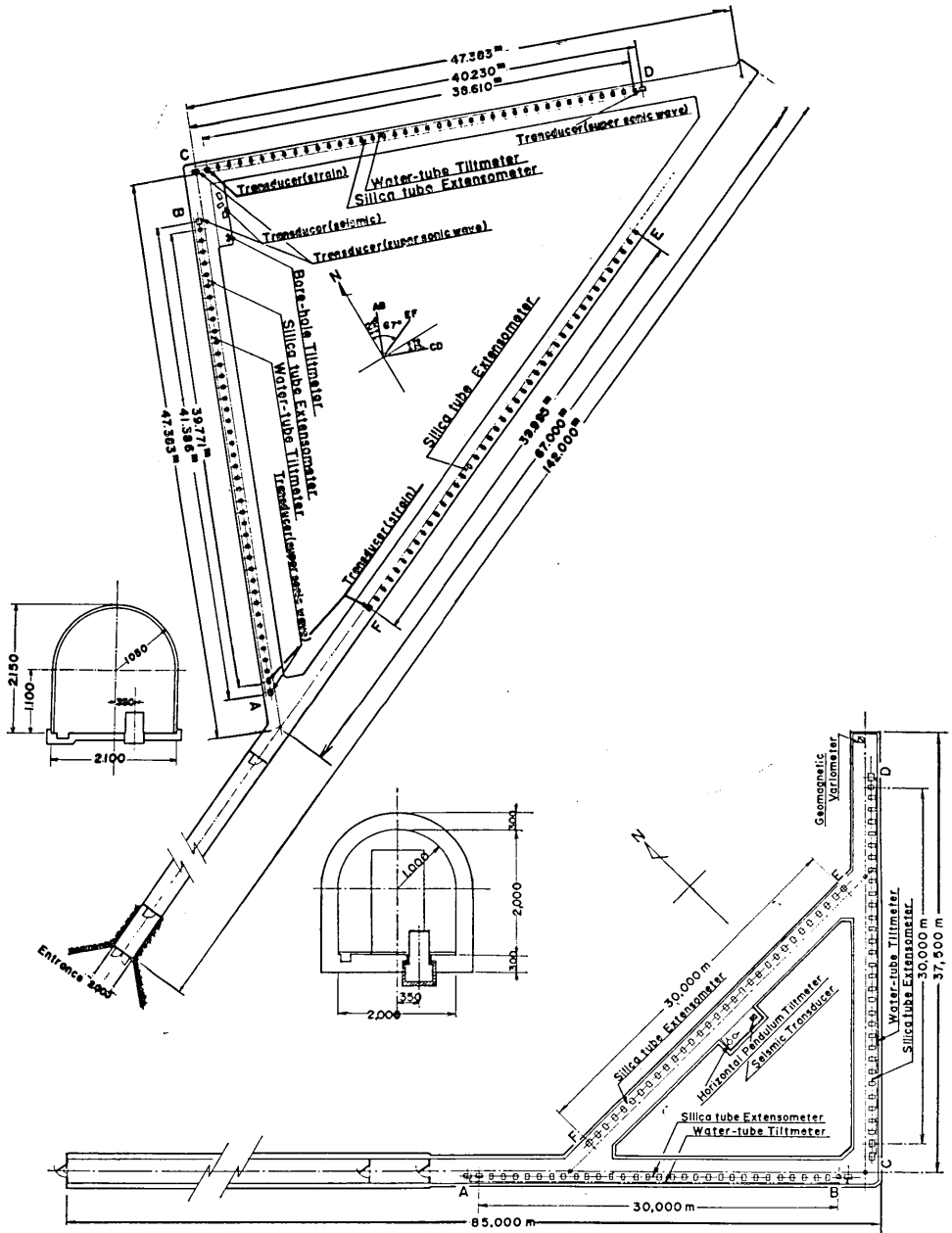


Fig. 1.2. Vaults for the observation of crustal movement.
 above; Fujigawa Crustal Movement Observatory (Tokyo University)
 below; Erimo Geophysical Observatory (Hokkaido University).

軍が掘った防空壕を利用したものである。

筑波の坑道は、従来土中室と称する半地下式の建物にくらべ、比較にならない程安定な

状態が得られたことで画期的なものであった。地震予知研究計画による規格の観測坑はこうした古い観測所の経験から作られた。一例として、富士川(1970年)、えりも(1971年)の両地殻変動観測所の観測坑を示す。

付録 2.1. 圧電素子の絶縁低下 (本文 31 頁)

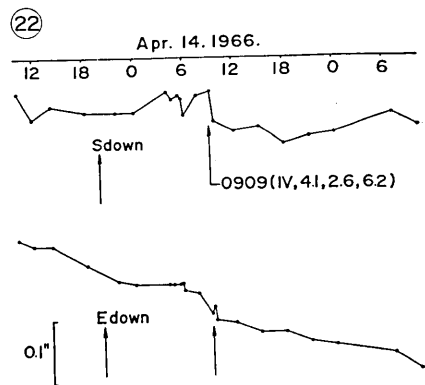
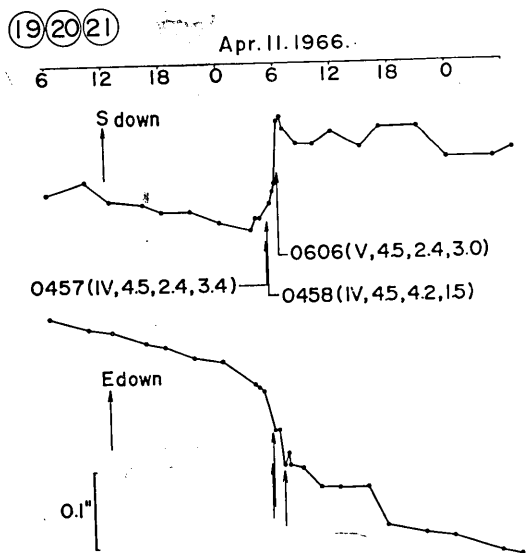
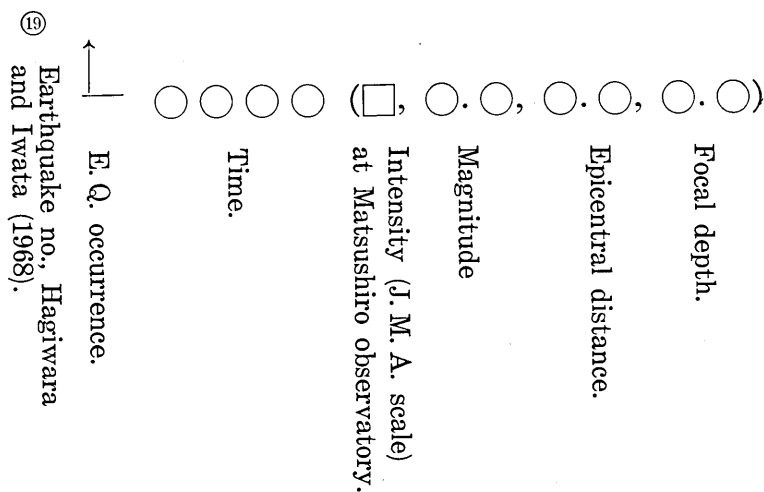
水中にある圧電素子は薄いポリウレタン被膜によって水と電氣的に絶縁されている。鋸山型では送受波器共用であるから被膜の経年変化には無関係であるが、北信型では送受波器は別別であるから、経年変化は見掛の水位差となる恐れがある。そのため被膜は特に薄く加工してある。約3ヵ月使用し回収した製作者(沖電気工業)の調査報告によれば次の通りである。

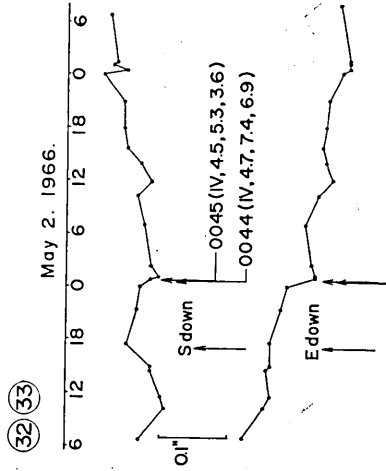
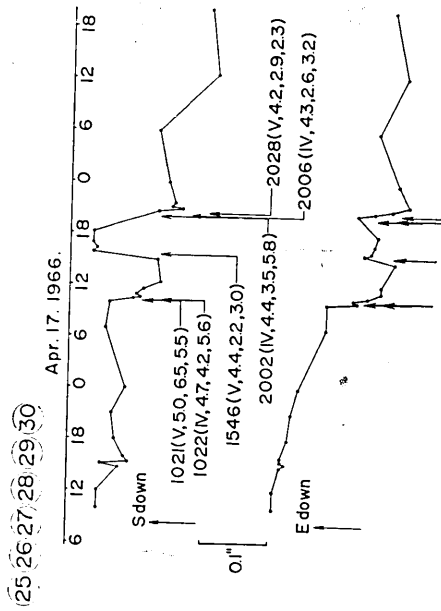
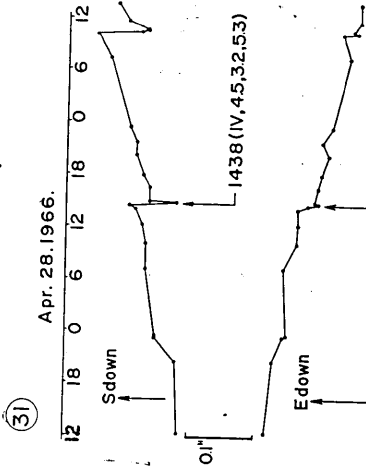
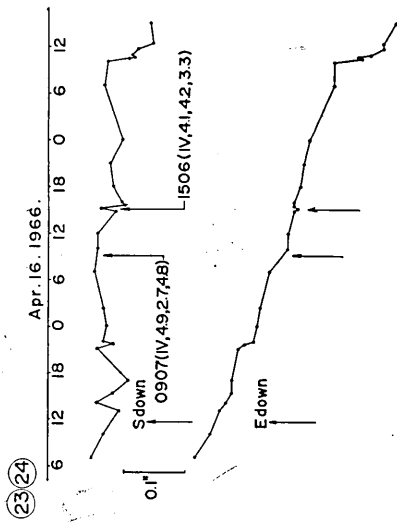
Table 2.1. Comparison of changed insulation resistance and capacitance with their normal values. Their changes were the main cause of a failure. (tested by Oki Electric Industry Co., Ltd.)

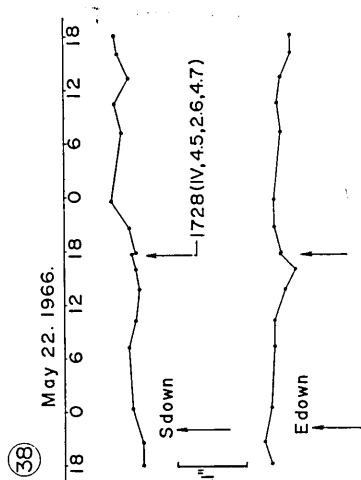
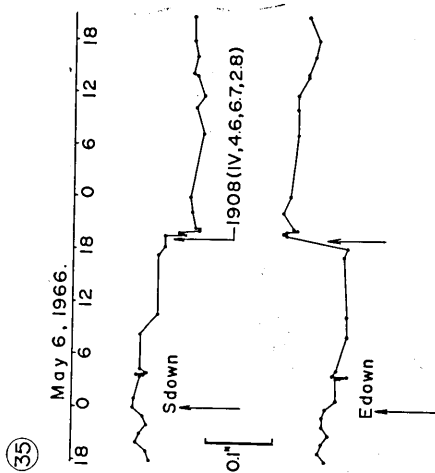
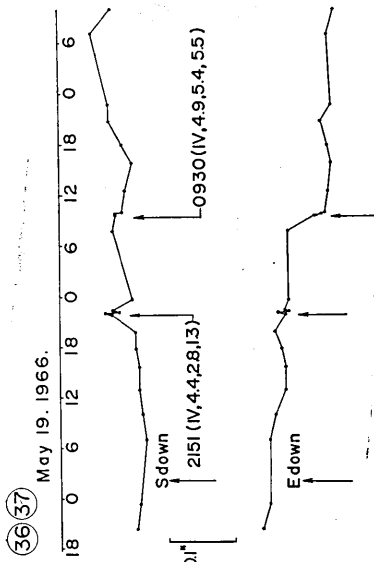
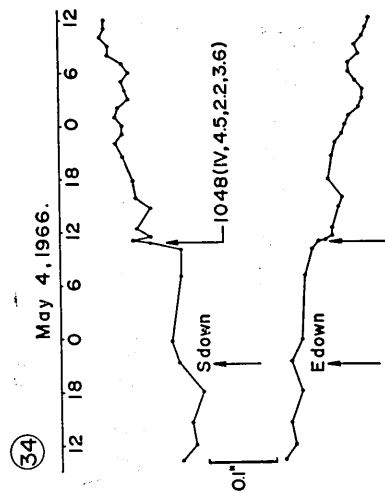
Element	Capacity	Insulation resistance	Normal value
1 — Transmitter Receiver	50,000 P.F. 70,000	70 Ω 200	Capacity 1,000~1,200 P.F. Insulation resistance $\infty \Omega$
2 — Transmitter Receiver	— 9,000	0 50,000	
3 — Transmitter Receiver	300,000 6,000	0 400,000	
4 — Transmitter Receiver	2,700 30,000	500,000 400,000	

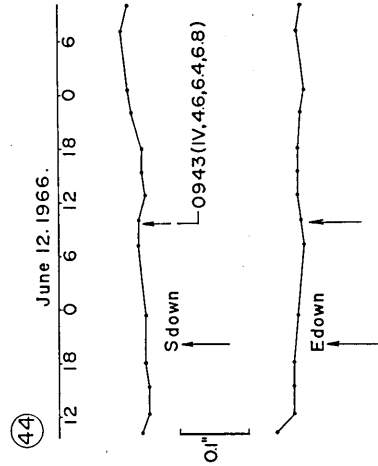
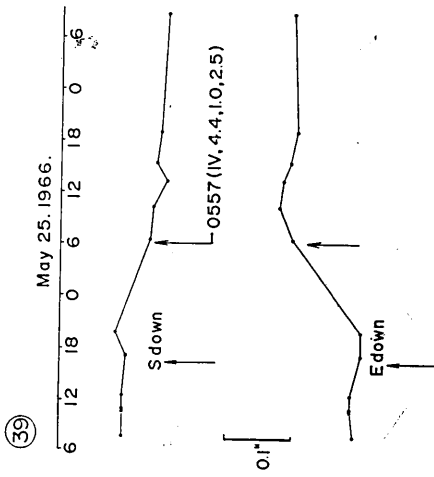
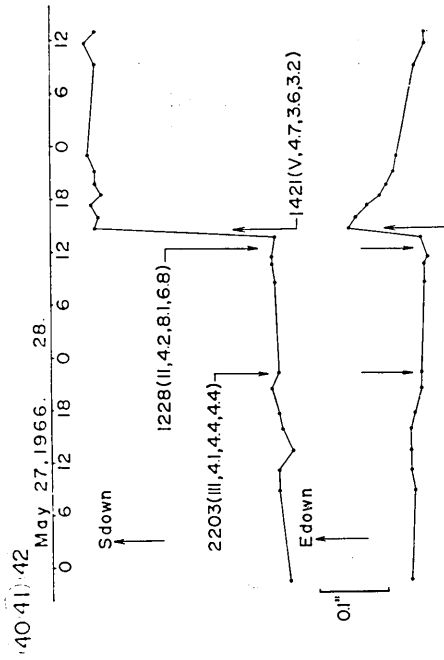
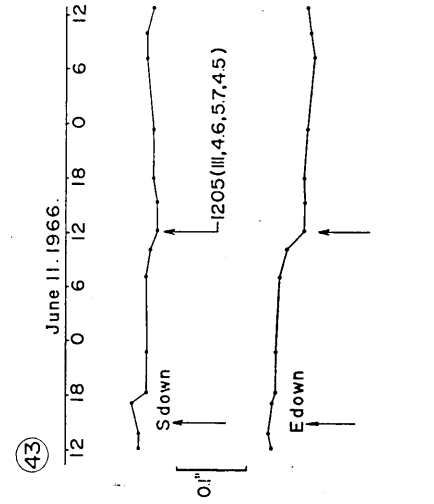
Appendix 4.1.

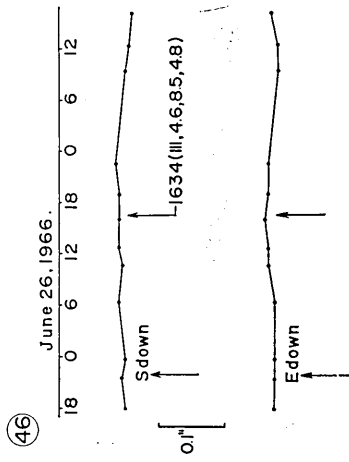
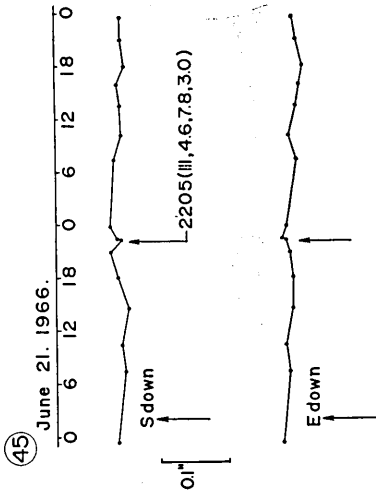
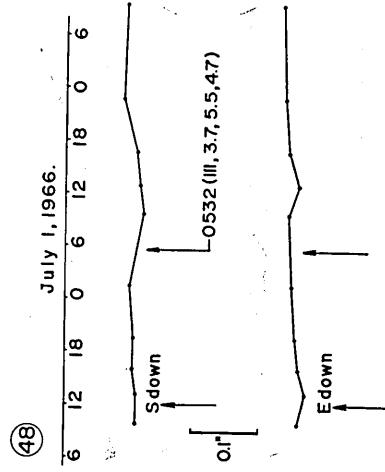
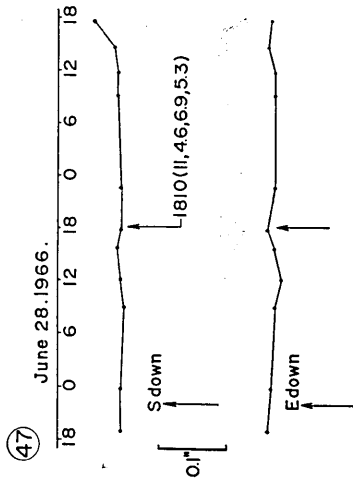
Anomalous precursory and subsequent tilt covering 2 day periods before and after major earthquakes during the Matsushiro swarm activity.

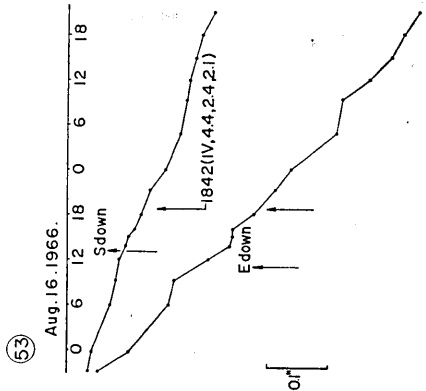
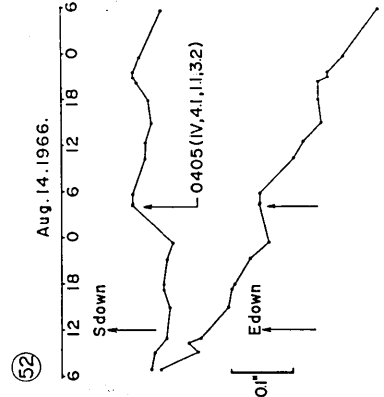
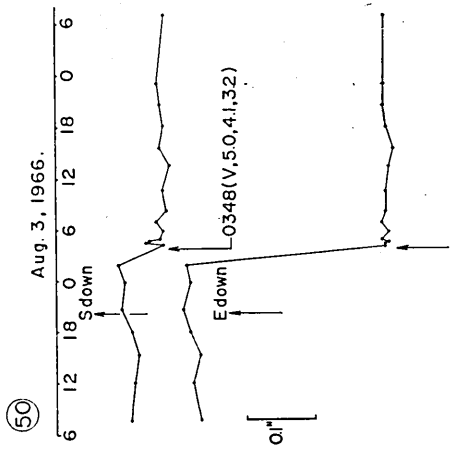
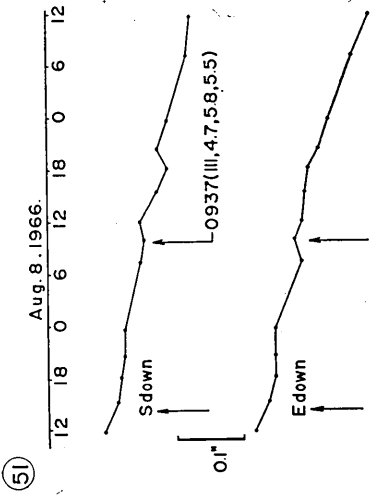
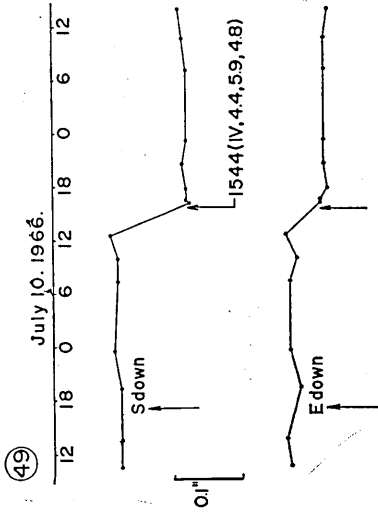


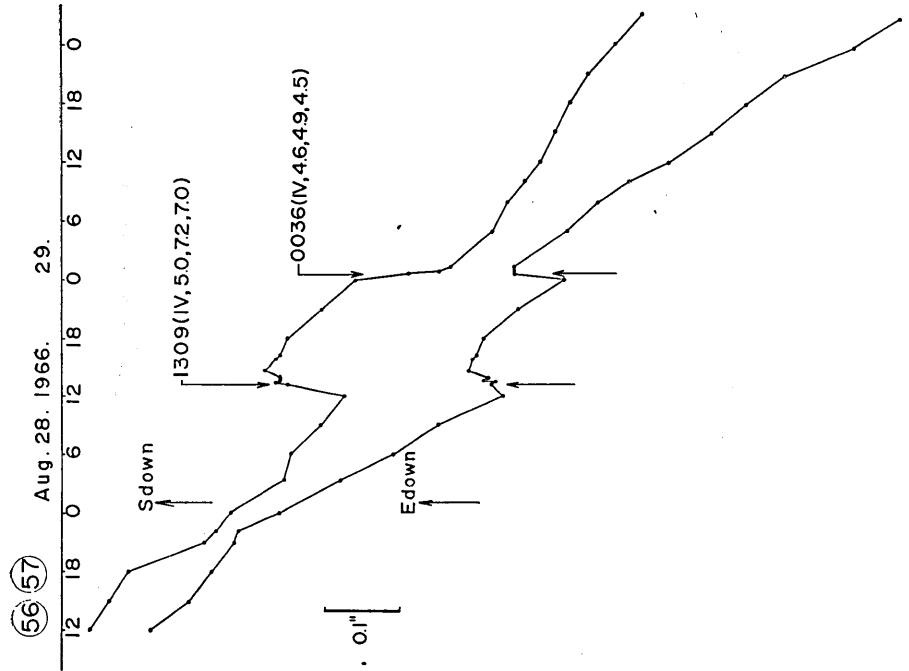
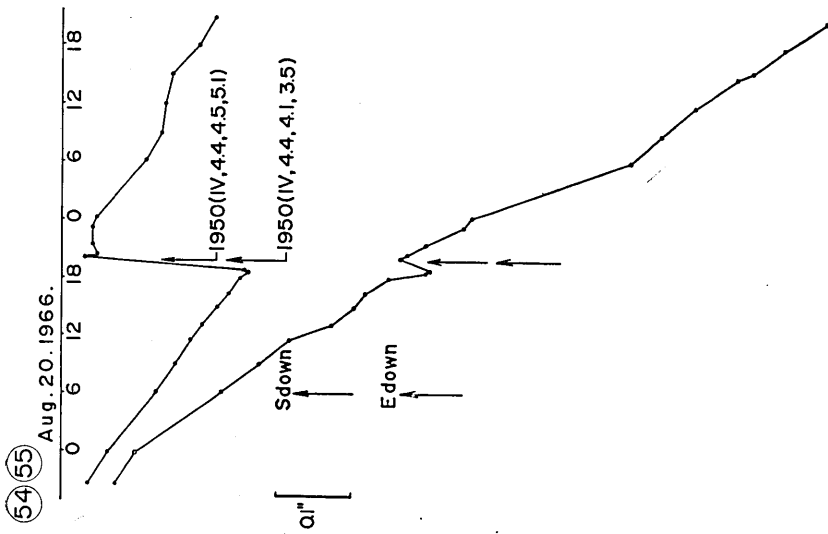


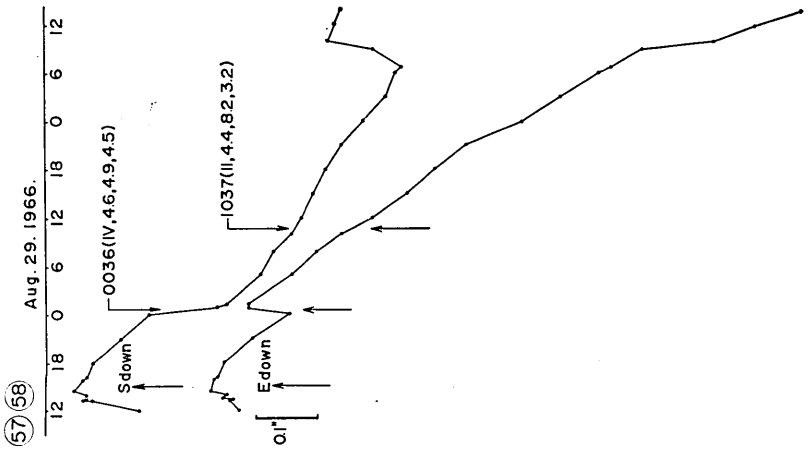
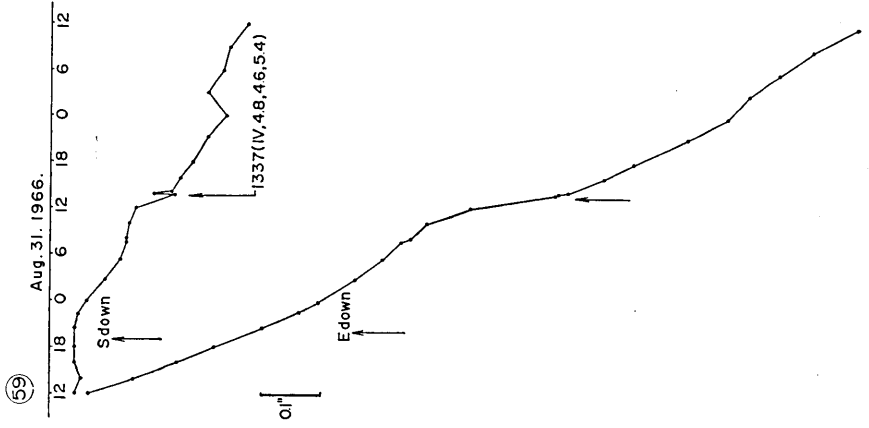
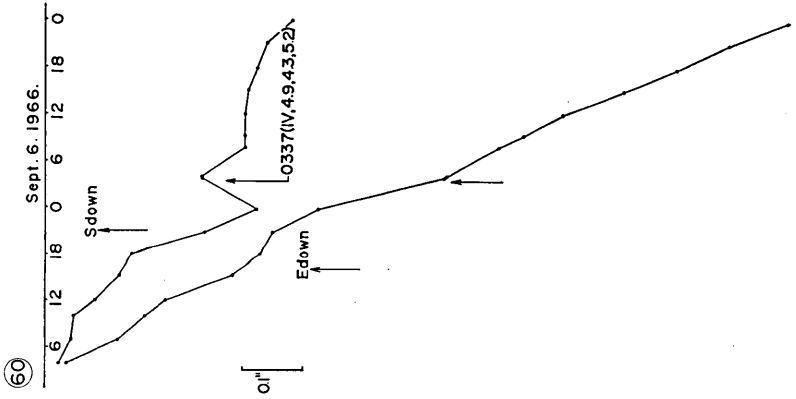


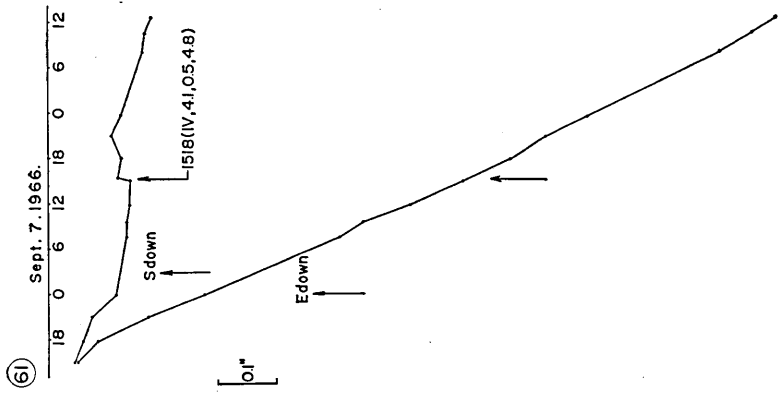
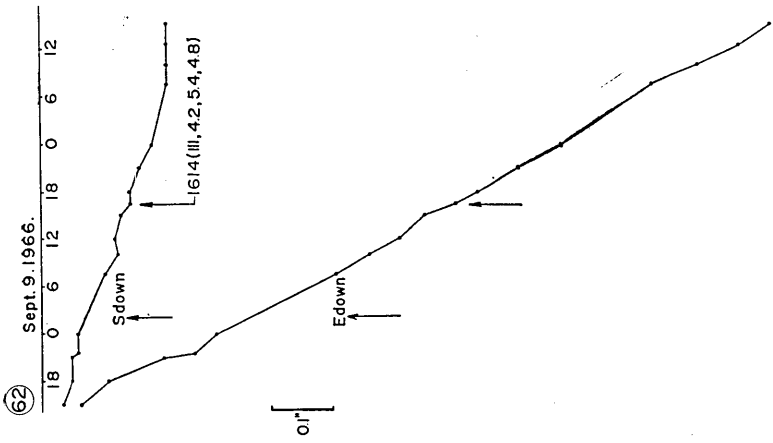
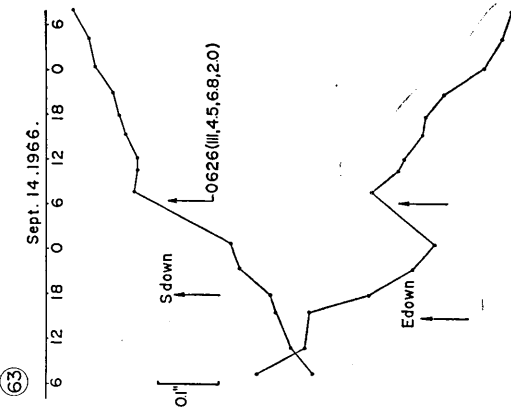


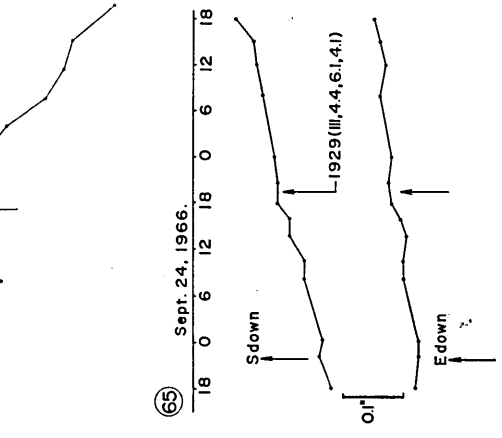
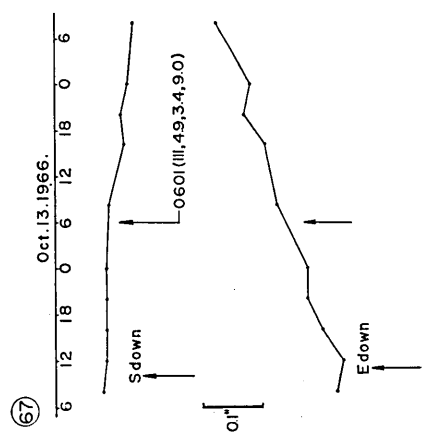
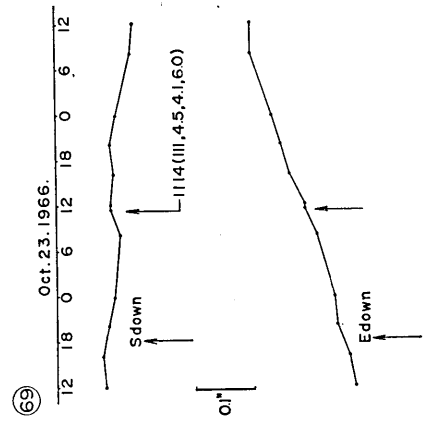
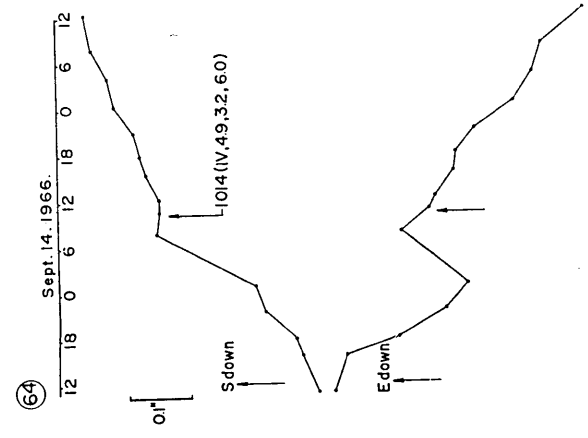
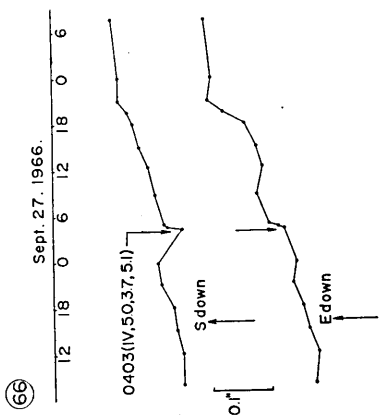
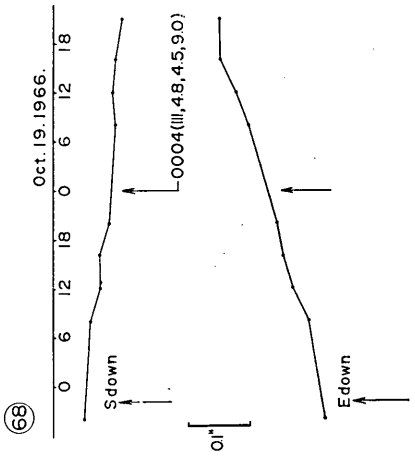


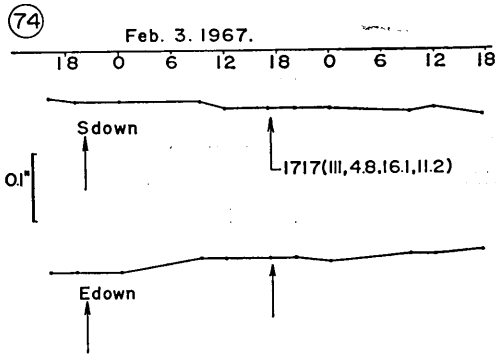
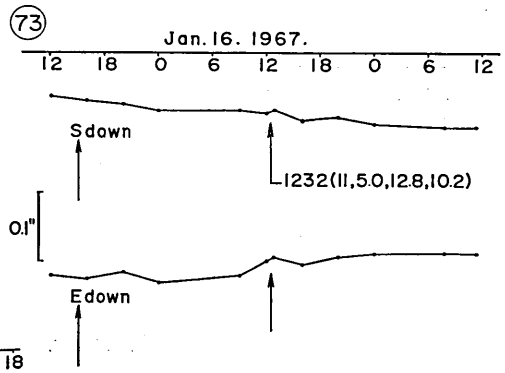
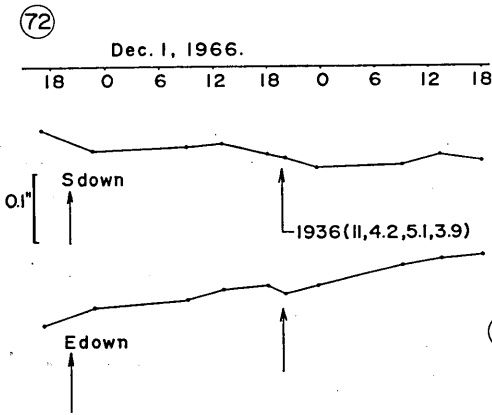
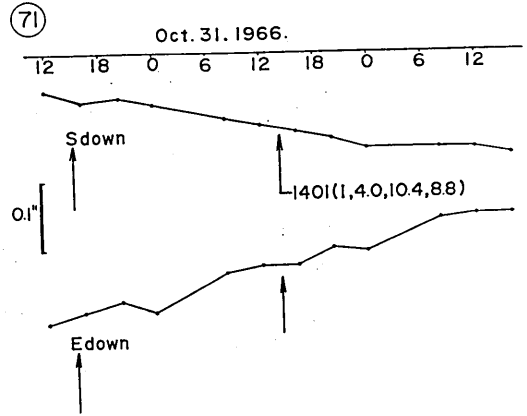
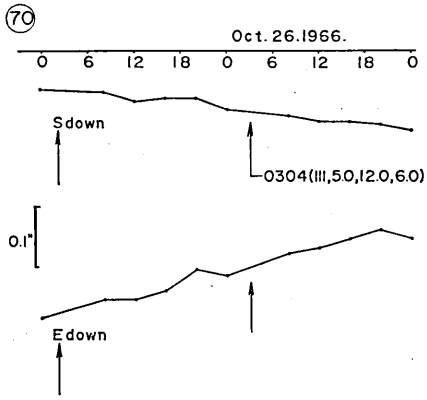


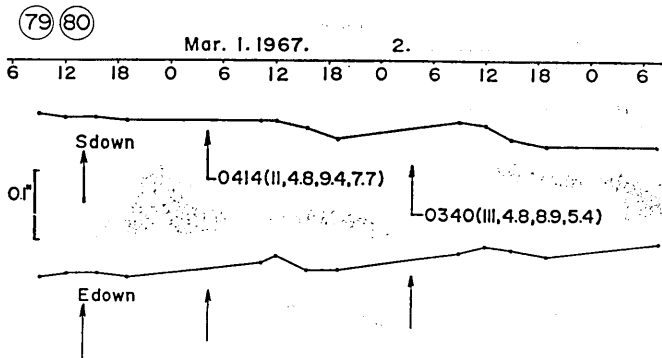
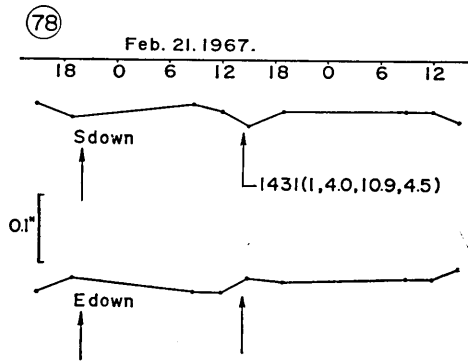
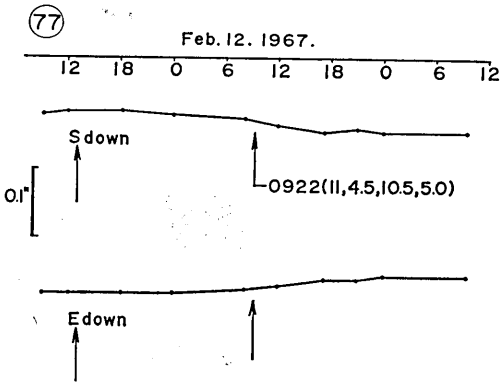
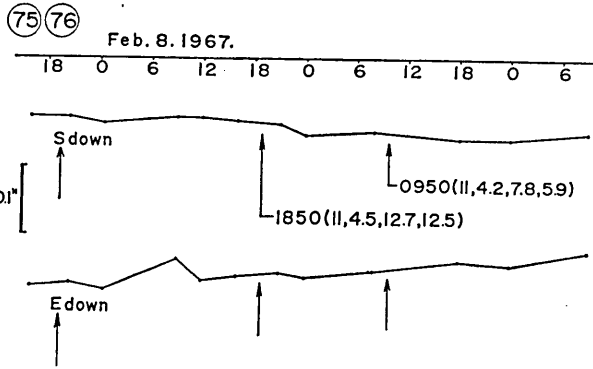












Appendix 4.2.

Reading of water-tube tiltmeters at the Matsushiro
Seismological Station.

(April 6, 1966—March 7, 1967)

Unit: micron.

1 micron = 0.005 sec. in arc.

$\doteq 2.5 \times 10^{-8}$ radian.

(2.424 $\times 10^{-8}$ radian)

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	1
1966		(micron)		2100	32	-79		
Apr. 6	1530	0	0	2400	35	-80		
	1730	5	-5	Apr. 11	0315	37	-86	
	1930	6	-1		0345	34	-87	
	2235	3	-4		0410	34	-88	
7	0930	22	-12		0512	30	-98	
	1130	13	-14		0530	26	-98	
	1330	15	-14		0546	25	-100	
	1530	23	-23		0610	09	-107	
	1730	21	-23		0635	08	-104	
	2130	21	-20		0652	11	-107	
8	0830	29	-28		0810	15	-108	
	1030	22	-28		1000	15	-113	
	1300	28	-34		1200	12	-113	
	1530	32	-39		1500	16	-113	
	1800	27	-38		1700	11	-123	
	2130	23	-40		2100	11	-125	
	2400	26	-43		2400	19	-126	
9	0230	24	-44	12	0500	19	-130	
	0300	23	-46		0700	17	-131	
	0315	29	-47		0800	19	-132	
	0600	28	-47		1000	21	-133	
	0800	32	-47		1300	20	-143	
	1000	30	-48		1700	20	-142	
	1145	25	-54		1900	21	-146	
	1430	20	-53		2045	22	-146	
	1530	18	-57		2104	16	-145	
	1800	22	-58		2115	24	-145	
	2100	21	-58		2130	17	-146	
	2400	23	-60		2145	17	-147	
10	0600	27	-68		2400	19	-147	
	1000	24	-71	13	0126	19	-147	
	1230	29	-72		0140	21	-148	
	1600	30	-75		0700	18	-149	
	1800	32	-76		1000	19	-153	

2				3			
date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
	1145	27	-155		2030	60	-302
	1400	23	-155		2045	64	-302
	1810	25	-161		2350	37	-304
	2154	25	-166	Apr. 22	0313	54	-308
	2400	25	-167		0644	61	-308
Apr. 14	0400	19	-167	Apr. 17	1015	60	-309
	0430	21	-167		1140	58	-311
	0519	20	-167		1400	61	-316
	0535	21	-167		1517	61	-315
	0546	26	-169		1702	52	-321
	0730	20	-170		1709	50	-323
	0905	19	-176		1718	50	-322
	0924	19	-174		2130	44	-320
	0932	28	-178		2222	53	-322
	1200	31	-179		2236	60	-324
	1500	30	-182		2249	58	-323
	1800	35	-182		2316	50	-326
	2100	33	-185		2329	48	-327
	2400	32	-186		2342	50	-327
15	0700	26	-189	23	0309	51	-324
	1000	30	-194		0635	43	-330
	1300	35	-197		1005	43	-332
	1400	28	-199		1200	44	-332
	1515	33	-201	18	1400	49	-337
	1655	38	-201		1420	50	-341
	2100	28	-203	19	1540	50	-336
	2139	33	-205		1805	52	-340
	2400	30	-208		2125	53	-341
16	0217	30	-210	20	2340	45	-342
	0700	27	-213		0600	45	-347
	1000	28	-219	21	0725	45	-347
	1200	28	-219		1010	47	-349
	1445	34	-221		1135	42	-351
	1512	29	-222		1400	49	-355
					1550	47	-352
					1754	45	-356
					2100	45	-360
					2350	37	-361
					0540	43	-358
					0640	39	-362
					1005	41	-359
					1300	39	-364
					1500	38	-364
					1805	42	-370
					2000	37	-371
					2300	35	-372
					26	26	-373
					0802	39	-375
					0915	38	-376
					1200	29	-375
					1400	29	-379
					1600	29	-380
					2025	29	-381
					2245	29	-381
				27	0705	26	-388
					1005	28	-391
					1200	27	-390
					1400	29	-391
					1613	28	-393
					2020	27	-395
					2310	21	-398
					2320	21	-399
				28	0705	18	-398
					1000	18	-402
					1208	17	-402
					1400	15	-402
					1425	13	-405
					1440	27	-408
					1445	19	-407
					1624	19	-408

5

Date	time	NS	EW	Date	time	NS	EW
	1800	17	-409		0100	-35	-487
	2010	15	-411	May 5	0200	-34	-490
	2147	15	-409		0500	-31	-491
	2320	13	-412		0400	-32	-491
Apr. 29	0720	7	-417		0500	-33	-489
	1013	3	-415		0600	-31	-487
	1022	16	-419	May 7	0700	-35	-487
	1050	18	-418		0800	-37	-490
	1141	12	-420		0900	-37	-489
	1340	9	-420		1000	-39	-491
	1540	9	-421		1100	-38	-492
	1800	19	-420		1200	-38	-493
	2110	14	-423	3	1300	-37	-492
	2240	7	-425		1400	-37	-492
	2400	10	-426		1500	-37	-493
30	0701	4	-426		1600	-40	-494
	0912	1	-427		1700	-36	-494
	1200	5	-430		1800	-38	-493
	1400	6	-429		1900	-39	-491
	1530	8	-429		2000	-42	-492
	1750	3	-430		2100	-41	-494
	1807	6	-430		2200	-39	-492
	2103	7	-431	4	2300	-40	-492
	2340	6	-439		2400	-43	-493
May 1	0435	5	-436		0100	-43	-496
	0449	3	--	6	0328	-41	-496
	0453	3	-432		0335	-40	-497
	0524	-4	-435		0340	-42	-499
	0650	-4	-435		0350	-39	-495
	1015	3	-441		0424	-41	-496
	1130	2	-443		0815	-41	-499
	1443	-1	-442		1037	-36	-499
	1452	-1	-443		1720	-36	-498
	1730	-8	-443		1815	-34	-499
	2120	-5	-446		1930	-34	-483

4

Date	time	NS	EW	Date	time	NS	EW
	2400	-4	-448		1942	-28	-481
	0052	-1	-456		1953	-30	-480
May 2	0107	1	-456		2002	-24	-481
	0218	-1	-455		2015	-24	-484
	0700	-3	-453		2025	-25	-483
	1015	-3	-457		2216	-26	-480
	1200	-1	-461		0006	-27	-482
	1400	-4	-459		0715	-23	-484
	1545	-8	-458		1010	-25	-484
	1800	-9	-459		1145	-23	-484
	2100	-9	-458		1400	-25	-487
	0005	-15	-464		1409	-26	-489
	0020	-8	-466		1610	-27	-489
	0107	-12	-466		1803	-26	-490
	0125	-11	--		2050	-26	-487
	0645	-13	-463		2345	-27	-487
	1020	-16	-468	8	0707	-30	-490
	1430	-13	-470		1002	-29	-494
	1800	-10	-473		1250	-26	-492
	2115	-17	-470		1445	-30	-494
	2345	-19	-473		1540	-24	-494
4	0700	-16	-474		1800	-27	-494
	1000	-16	-476		2225	-32	-493
	1051	-25	-478	9	0704	-38	-497
	1100	-30	-480		1010	-38	-497
	1122	-25	-482		1300	-37	-499
	1220	-29	-482		1510	-38	-500
	1440	-25	-484		1800	-39	-501
	1545	-29	-485		2045	-39	-502
	1753	-30	-481		2305	-41	-503
	2025	-33	-482	10	0705	-41	-504
	2200	-35	-483		1000	-40	-503
	2300	-33	-485		1310	-40	-505
	2400	-33	-486		1530	-40	-506
					1810	-42	-507

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
	2035	-41	-508		1143	-72	-540		2157	-100	-571
	2245	-42	-509		1370	-71	-540		2205	-102	-571
May 11	0723	-40	-512		1407	-72	-542		2212	-98	-569
	1030	-40	-511		1630	-73	-541	May 24	0725	-107	-607
	1310	-46	-513		1800	-72	-541		1020	-107	-606
	1533	-44	-514		2100	-73	-542		1040	-107	-606
	1830	-47	-515		2325	-71	-543	May 20	0750	-100	-572
	2050	-48	-516	May 16	0705	-73	-542		0943	-99	-580
	2315	-49	-516		1005	-73	-543		0953	-99	-582
12	0108	-51	-518		1310	-72	-547		1000	-97	-583
	0735	-53	-518		1535	-77	-547		1237	-96	-584
	1030	-48	-519		1755	-73	-547		1555	-94	-585
	1257	-52	-522		2045	-75	-548		1800	-97	-584
	1306	-52	-521		2330	-77	-549		2050	-101	-582
	1530	-53	-522	17	0137	-81	-554		2245	-101	-585
	1755	-54	-522		0148	-81	-555	21	0705	-106	-584
	2100	-55	-522		0705	-82	-555		1030	-100	-586
13	0710	-58	-526		1005	-82	-556		1104	-98	-601
	2320	-57	-524		1315	-83	-559		1115	-99	-601
	1000	-59	-528		1720	-83	-557		1455	-102	-604
	1300	-60	-529		2120	-82	-560		1800	-98	-603
	1530	-61	-529		2320	-84	-560		2050	-98	-601
	1755	-62	-530	18	0735	-84	-560	22	0020	-101	-603
	2100	-63	-531		1050	-84	-565		0710	-102	-604
14	0707	-64	-532		1310	-85	-567		1010	-100	-604
	1005	-62	-532		1550	-88	-566		1340	-99	-607
	1310	-63	-532		1755	-89	-566		1555	-100	-610
	1550	-63	-533		2030	-93	-564		1735	-101	-606
	1800	-63	-533	19	2325	-92	-566		1745	-100	-606
	2035	-62	-533		0710	-90	-566		2030	-102	-604
	2231	-63	-534		1005	-91	-568		2330	-107	-604
15	0710	-66	-536		1300	-92	-571	23	0710	-104	-606
	1005	-70	-538		1545	-92	-571		1025	-106	-605
					1755	-93	-570		1315	-102	-606
					1951	-93	-566		1600	-105	-609
									1827	-150	-581
									1947	-152	-583

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
June 9	0935	-193	-634	June 9	0935	-193	-634
	1210	-192	-633		1210	-192	-633
	1525	-191	-635		1525	-191	-635
	1710	-193	-636		1710	-193	-636
	2110	-193	-636	June 15	0715	-203	-651
	2347	-193	-635		1000	-198	-654
10	0950	-197	-636		1335	-199	-654
	1210	-195	-637		1540	-200	-653
	1350	-195	-636		1800	-203	-653
	1705	-197	-637		2135	-202	-654
	1819	-193	-638	16	0005	-203	-655
	2245	-193	-638		0715	-202	-654
11	0705	-193	-639		1010	-202	-655
	1010	-192	-641		1400	-201	-658
	1213	-190	-646		1800	-209	-657
	1520	-190	-646		2135	-206	-655
	1800	-191	-646		2350	-205	-655
12	0715	-193	-649	17	0720	-205	-654
	1000	-193	-648		1030	-205	-656
	1250	-191	-647		1310	-205	-658
	1525	-192	-647		1610	-206	-658
	1800	-192	-647		1805	-207	-656
	2200	-195	-648		2045	-210	-656
13	0030	-196	-649	18	0710	-211	-656
	0705	-198	-647		1005	-211	-657
	1000	-196	-648		1350	-210	-660
	1330	-196	-650		1800	-211	-659
	1540	-197	-648		2105	-213	-658
	1800	-198	-649	19	0340	-213	-659
	2148	-196	-650		0850	-213	-659
14	0010	-198	-651		1205	-214	-663
	0725	-199	-650		1500	-214	-664
	1030	-200	-651		1750	-215	-663
	1335	-198	-651		2040	-221	-663

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
May 29	0915	-152	-586	June 4	0900	-172	-620
	1140	-155	-594		1115	-170	-621
	1300	-152	-594		1240	-170	-623
	1450	-152	-594		1640	-170	-624
	1740	-151	-593		1835	-172	-624
	2115	-151	-597		2210	-174	-621
30	0815	-155	-593		2320	-174	-621
	1120	-155	-600	5	0905	-173	-620
	1340	-155	-600		1110	-173	-621
	1520	-156	-600		1320	-174	-623
	1845	-158	-600		1610	-173	-623
	2250	-160	-603		1915	-175	-623
31	0910	-159	-604	6	0915	-176	-624
	1133	-159	-607		1215	-179	-625
	1400	-158	-609		1350	-178	-626
	1715	-163	-604		1600	-179	-627
	2000	-167	-608		1925	-179	-626
	2220	-163	-606	7	0840	-181	-626
June 1	0600	-161	-605		1123	-181	-626
	0945	-163	-611		1445	-182	-629
	1230	-164	-612		1835	-183	-628
	1515	-164	-613	8	0913	-189	-631
	1800	-162	-610		1145	-184	-632
	2115	-166	-610		1445	-187	-632
2	0115	-167	-613		1800	-188	-633
	0630	-164	-611		2122	-192	-633
	0930	-167	-613		2300	-193	-632
	1200	-166	-614				
	1400	-163	-616				
	1715	-167	-615				
	2010	-166	-613				
	2325	-169	-615				
3	0910	-165	-616				

10				11			
date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
June 20	2325	-222	-663	July 2	2245	-239	-673
	0830	-219	-662		0925	-238	-672
	1200	-219	-663	July 9	1205	-249	-675
	1500	-219	-666		1504	-248	-676
	1800	-220	-665		1800	-248	-677
	2115	-221	-664		2055	-251	-676
	2330	-223	-664		2305	-252	-677
21	0720	-221	-666	July 10	0720	-252	-677
	1020	-222	-665		1000	-252	-679
	1425	-220	-667		1225	-254	-676
	1800	-223	-667		1612	-231	-686
	2050	-225	-666		1620	-232	-686
	2212	-222	-665		1757	-232	-688
	2220	-223	-664		2030	-233	-687
22	0720	-224	-668	July 11	0710	-232	-687
	1005	-222	-666		1055	-233	-687
	1325	-222	-668		1400	-234	-688
	1525	-223	-669		1800	-235	-688
	1800	-221	-670		2230	-236	-688
23	0850	-223	-668	July 12	0720	-238	-689
	1205	-223	-668		1040	-236	-689
	1500	-223	-670		1400	-236	-688
	1800	-224	-671		1800	-238	-690
	2105	-225	-671		2100	-240	-690
	2320	-227	-669	July 13	0800	-238	-689
24	0705	-229	-671		1115	-237	-691
	1000	-228	-671		1430	-239	-691
	1355	-229	-671		1755	-238	-689
	1750	-229	-672	July 14	2205	-240	-691
	2040	-230	-672		0800	-238	-690
	2330	-230	-671				
25	0715	-231	-672				

12					13						
date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
	1120	-237	-692	July 20	0720	-247	-691		1515	-260	-692
	1545	-239	-688		1230	-247	-690		1800	-260	-691
	1925	-241	-688		1600	-246	-693		2130	-275	-689
	2320	-238	-689		2050	-252	-688	Aug. 1	0000	-273	-690
July 15	0805	-239	-689		2340	-253	-689	July 26	0600	-272	-688
	1200	-237	-692	21	0415	-251	-689		0800	-259	-691
	1600	-242	-691		0815	-251	-690		1200	-260	-691
	2005	-245	-687		1230	-251	-689		1600	-259	-689
	2355	-242	-690		1620	-250	-693		2100	-263	-690
16	0400	-241	-693		2015	-254	-691	27	0000	-262	-690
	0805	-241	-689		2335	-254	-688		0600	-259	-689
	1200	-240	-693	22	0820	-253	-689		1000	-260	-691
	1421	-240	-694		1220	-252	-688		1440	-264	-691
	1550	-242	-691		1425	-252	-689		1800	-264	-691
	1649	-241	-690		1620	-253	-690	28	2200	-263	-690
	1711	-242	-690		2140	-253	-688		0000	-264	-689
	1751	-242	-690		2350	-257	-687		0500	-264	-688
	2129	-243	-688	23	0610	-254	-691		1200	-263	-692
	2350	-243	-689		0930	-254	-689		1530	-263	-692
17	0815	-242	-688		1215	-254	-690		1610	-265	-691
	1215	-241	-693		1500	-254	-691		1800	-266	-689
	1620	-242	-692		1800	-254	-691	29	2100	-266	-689
	2030	-246	-690		2100	-255	-693		0000	-266	-692
18	0010	-245	-693	24	0000	-254	-689		0600	-266	-690
	0805	-244	-689		0400	-255	-693		1030	-265	-743
	1600	-242	-695		1100	-256	-690		1315	-263	-744
	2045	-249	-689		1415	-256	-689		1530	-266	-744
	2355	-250	-690		1630	-257	-690		1800	-265	-743
19	0420	-249	-692		1800	-258	-691	30	0000	-270	-691
	0925	-247	-691		2100	-258	-692		0630	-270	-689
	1320	-247	-693	25	0000	-257	-690		0820	-269	-693
	1645	-245	-693		0500	-259	-687		1610	-265	-690
	1900	-249	-692		0800	-258	-690		1745	-270	-689
	2355	-250	-689		1115	-258	-693		2210	-273	-687
								31	0000	-272	-690
									0700	-265	-742
									1105	-263	-744
									1500	-262	-744
									1800	-263	-743
									2055	-266	-742
									2142	-267	-743
									2350	-265	-744

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
Aug. 5	0740	-264	-743		1755	-213	-816		1815	-104	-1157
	1110	-262	-744		2030	-212	-819		2100	-101	-1159
	1500	-262	-745		2340	-211	-822		2355	-99	-1171
	1800	-261	-746	Aug. 11	0650	-206	-836	Aug. 19	0510	-87	-1190
	2010	-261	-744		1100	-204	-843		0900	-84	-1198
6	0000	-262	-744		1225	-204	-844		1200	-82	-1208
	0710	-260	-745		1500	-204	-845		1500	-78	-1217
	1120	-260	-745		1800	-202	-847		1645	-75	-1223
	1515	-259	-746		2125	-201	-854		1750	-74	-1225
	1805	-259	-748	12	0000	-200	-859		2040	-71	-1230
	2040	-258	-745		0615	-194	-866		2355	-66	-1235
	2335	-259	-746		0925	-192	-873	16	0600	-157	-1026
7	0745	-257	-747		1254	-192	-880		0910	-155	-1028
	1140	-255	-749		1640	-188	-882		1200	-154	-1039
	1500	-251	-753		1810	-188	-885		1340	-152	-1046
	1800	-250	-755		2130	-186	-896		1500	-151	-1047
	2025	-249	-755	13	0015	-184	-900		1600	-149	-1047
	2330	-249	-755		0700	-177	-905		1800	-147	-1054
8	0715	-244	-763		0910	-176	-917	17	0000	-139	-1066
	0945	-243	-761		1025	-173	-914		0450	-134	-1081
	1155	-244	-763		1100	-172	-918		0915	-132	-1083
	1515	-239	-764		1500	-171	-927		1200	-131	-1092
	1800	-236	-765		1716	-173	-928		1500	-129	-1099
	2015	-239	-768		1800	-173	-929		1800	-127	-1103
	2330	-236	-771		2115	-172	-934		2100	-123	-1108
9	0655	-230	-778		2330	-170	-940		2230	-124	-1113
	1135	-229	-783	14	0415	-183	-937	18	0000	-124	-1117
	1505	-227	-785		0430	-183	-937		0100	-124	-1117
	1800	-226	-787		0540	-183	-937		0109	-121	-1120
	2030	-226	-791		1020	-179	-948		0130	-122	-1120
	2315	-224	-794		1330	-179	-951		0600	-116	-1132
10	0040	-222	-796		1500	-177	-957		0915	-115	-1137
	0710	-216	-804		1800	-178	-956		1145	-112	-1145
	1115	-214	-807		2015	-182	-956		1545	-104	-1154
	1450	-214	-811		2100	-183	-959		2350	-35	-1426

16				17			
date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
Aug. 22	0610	- 28	-1453	Aug. 29	0000	187	-2036
	0740	- 25	-1460		0048	201	-2023
	0900	- 26	-1465		0057	209	-2023
	1106	- 26	-1468	Aug. 26	0115	212	-2023
	1155	- 25	-1475		0500	223	-2037
	1500	- 20	-1484		0750	227	-2045
	1800	- 17	-1495		1000	233	-2053
	2100	- 15	-1510		1200	236	-2063
23	0000	- 9	-1518		1500	240	-2074
	0300	- 5	-1527		1800	244	-2088
	0455	- 3	-1543	27	2100	249	-2093
	0520	- 3	-1543		0000	256	-2111
	0600	- 2	-1545	30	0300	263	-2123
	0905	- 1	-1558		0600	266	-2135
	1200	0	-1565		0640	268	-2139
	1500	2	-1579		0900	259	-2149
	1800	4	-1589		1000	245	-2172
	2055	11	-1602		1200	247	-2185
	2225	16	-1608		1355	249	-2200
	2350	17	-1612		1600	247	-2215
24	0100	19	-1617	28	1800	247	-2227
	0310	25	-1627		2025	247	-2243
	0615	27	-1635		2225	248	-2255
	0900	30	-1643		2355	251	-2262
	1100	32	-1650		0245	257	-2274
	1300	33	-1658	31	0520	262	-2283
	1510	34	-1663		0730	264	-2289
	1800	38	-1673		0800	264	-2292
	2100	45	-1685		1000	265	-2300
25	0000	48	-1697		1200	267	-2312
	0300	54	-1707		1345	280	-2340
	0600	56	-1719		1353	278	-2341
	0900	59	-1730		1405	279	-2344
	1200	63	-1741		1555	282	-2356
	1515	68	-1752		1800	286	-2366
					2105	423	-2855
					2115	291	-2384
					0000	297	-2397
				Sept. 1	0500	291	-2404
					0600	296	-2414
					0800	298	-2425
					1200	304	-2440
					1500	314	-2461
					1800	320	-2473
				2	2100	323	-2488
					0005	332	-2503
					0200	340	-2521
					0600	343	-2534
					0905	346	-2545
					1003	354	-2553
					1010	349	-2553
					1200	355	-2567
					1500	359	-2578
					1800	361	-2593
					2100	370	-2609
					0000	376	-2624
					0210	382	-2642
					0600	386	-2657
					0900	388	-2671
					1200	394	-2687
					1500	405	-2708
					1800	410	-2722
					2100	413	-2736
				4	0000	419	-2751
					0330	428	-2774
					0730	430	-2792
					0940	430	-2804
					1200	431	-2814
					1500	422	-2823
					1800	422	-2840
					2105	423	-2855

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
Sept. 14	0050	515	-3877	Sept. 19	2355	375	-4031
	0745	483	-3856		0730	365	-4040
	1040	484	-3865		1000	361	-4039
	1215	480	-3867		1200	358	-4039
	1530	484	-3873		1510	355	-4041
	1800	478	-3874		1810	353	-4043
	2100	476	-3880		2110	347	-4046
	0030	470	-3893		0000	346	-4044
	0415	468	-3899		0800	340	-4051
	0800	463	-3902		1000	339	-4053
	1230	461	-3916		1200	335	-4052
	1600	455	-3921		1500	333	-4053
	1800	448	-3924		1800	328	-4054
	2100	452	-3924		2100	324	-4054
	Sept. 16	0650	451		-3943	Sept. 21	0000
0910		450	-3947	0745	317		-4061
1200		447	-3958	1000	314		-4060
1510		445	-3964	1200	311		-4060
1800		444	-3965	1500	308		-4060
2100		440	-3967	1800	306		-4058
2350		435	-3974	2100	301		-4058
0800		428	-3986	0020	299		-4057
1000		423	-3986	0805	298		-4061
1200		422	-3991	1000	292		-4060
1500		417	-4001	1145	290		-4061
1800		414	-4001	1500	288		-4057
2100		410	-4002	1800	285		-4057
0000		406	-4006	2100	281		-4058
Sept. 18		0735	397	-4019	Sept. 23		0000
	1000	392	-4020	0715		277	-4058
	1200	390	-4020	0950		273	-4058
	1500	387	-4024	1200		270	-4057
	1800	385	-4028	1515		268	-4055
	2100	379	-4028	1810		265	-4052
	2355	379	-4028	2215		261	-4053

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	
Sept. 5	2235	427	-2864	Sept. 9	0730	540	-3434	
	0035	431	-2873		1000	544	-3445	
	0400	436	-2895		1200	543	-3455	
	0700	440	-2912		1500	545	-3465	
	1000	441	-2921		1625	548	-3473	
	1200	448	-2928		1800	548	-3480	
	1510	456	-2950		2100	551	-3493	
	1800	460	-2959		2355	555	-3507	
	2050	484	-2963		0000	560	-3537	
	2350	501	-2978		10	0730	560	-3552
	0350	483	-3019		1230	560	-3565	
	0400	483	-3020		1505	560	-3575	
	0745	497	-3047		1800	560	-3589	
	0910	497	-3055		2100	560	-3605	
	1200	497	-3068		2350	562	-3614	
Sept. 7	1500	498	-3088	Sept. 11	0730	562	-3647	
	1750	501	-3105		1000	560	-3654	
	2100	504	-3122		1200	560	-3668	
	2355	512	-3141		1505	559	-3675	
	0730	516	-3187		1800	555	-3686	
	0930	516	-3195		2100	552	-3696	
	1150	517	-3211		2340	554	-3709	
	1500	517	-3229		12	0520	555	-3718
	1521	513	-3230		0900	551	-3740	
	1800	514	-3245		1100	550	-3746	
	2100	511	-3257		1500	548	-3764	
	2345	514	-3271		1800	544	-3772	
	0800	521	-3315		2115	542	-3784	
	1030	522	-3326		13	0000	540	-3792
	1230	524	-3334		0405	543	-3813	
1500	526	-3351	0730	542	-3818			
1800	529	-3360	1100	535	-3834			
2100	529	-3378	1545	530	-3838			
2133	531	-3388	1800	528	-3855			
2355	531	-3395	2130	518	-3870			

21

date	time	NS	SW	date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
	1200	196	-3969		1610	228	-3739				
	1600	192	-3863		2000	227	-3722				
	2000	193	-3857	Oct. 14	0000	239	-3734				
	2300	195	-3855		0800	231	-3723				
Oct. 7	0800	198	-3853		1200	232	-3724				
	1200	197	-3849		1600	236	-3722				
	1600	197	-3841		2045	238	-3717				
	2000	198	-3840	15	0000	239	-3717				
	0000	201	-3835		0800	239	-3710				
	0800	200	-3835		1200	239	-3708				
	1200	201	-3831		1600	243	-3707				
	1600	202	-3827		2000	246	-3702				
	2015	202	-3824	16	0800	250	-3694				
	2335	205	-3822		1200	250	-3691				
9	0800	207	-3817		1600	248	-3691				
	1200	207	-3815		2000	253	-3687				
	1600	206	-3809		0800	257	-3679				
	2000	206	-3809		1200	257	-3675				
	2345	209	-3807		1600	258	-3674				
10	0800	211	-3799		2000	259	-3669				
	1200	213	-3799		0800	261	-3664				
	1600	216	-3792		1200	264	-3659				
	2005	213	-3790		1600	264	-3656				
	2350	215	-3788		2000	267	-3654				
11	0800	217	-3780		0800	269	-3645				
	1200	218	-3781		1200	268	-3641				
	1600	217	-3774		1600	269	-3636				
	2000	218	-3770		2100	271	-3636				
12	0000	219	-3776	20	0800	277	-3630				
	0800	221	-3763		1200	277	-3623				
	1200	222	-3765		1600	277	-3614				
	1600	222	-3758		2000	282	-3614				
	2000	222	-3753		0800	283	-3614				
13	0000	222	-3753	21	0000	288	-3611				
	0815	223	-3743		1200	288	-3606				

20

date	time	NS	SW	date	time	NS	EW
Sept. 24	0020	262	-4053		2330	199	-3984
	0815	256	-4048	Sept. 29	0735	199	-3975
	1035	256	-4048		1100	201	-3975
	1345	251	-4049		1410	200	-3977
	1600	251	-4047		2130	196	-3971
	1800	247	-4044		2340	196	-3970
	2040	247	-4043	30	0730	196	-3961
25	0000	246	-4044		1000	196	-3961
	0800	242	-4040		1700	199	-3958
	1200	240	-4042		2000	194	-3954
	1500	239	-4040	Oct. 1	0000	194	-3956
	1800	233	-4038		0730	193	-3950
	2100	232	-4036		1100	192	-3949
26	0000	229	-4035		1800	196	-3940
	0800	227	-4030	2	0000	191	-3935
	1200	227	-4031		0800	193	-3931
	1500	225	-4028		1130	193	-3932
	1800	224	-4026		1800	195	-3926
	2100	220	-4023	3	0000	191	-3922
27	0415	219	-4024		1730	190	-3920
	0430	227	-4018		1130	190	-3914
	0455	221	-4015	4	0000	189	-3907
	0845	218	-4011		0730	191	-3904
	1215	216	-4013		1100	190	-3902
	1500	213	-4011		1400	191	-3902
	1800	211	-4007		1800	187	-3897
	1930	209	-4000		2100	189	-3895
	2100	206	-3995	5	0350	192	-3991
28	0000	206	-3996		0800	190	-3887
	0745	204	-3994		1200	189	-3885
	1145	204	-3990		1630	190	-3881
	1500	203	-3988		2000	193	-3881
	1815	201	-3986	6	0000	194	-3875
	2100	200	-3983		0800	195	-3872

	1600	288	-3601	1600	339	-3492	1600	393	-3394	1600	444	-3313		
	2000	290	-3598	2000	339	-3486	2000	395	-3393	2000	446	-3307		
Oct. 22	0000	291	-3596	2350	341	-3487	Nov. 5	0000	398	-3392	Nov. 12	0000	449	-3309
	0815	294	-3593	0800	342	-3481		0800	402	-3391		0800	451	-3302
	1200	296	-3590	1200	342	-3481	Oct. 29	1200	402	-3388		1200	451	-3305
	1600	295	-3588	1600	345	-3479		1630	402	-3383		1630	453	-3301
	2000	297	-3584	2000	346	-3473		2000	404	-3379		2000	453	-3297
	2345	299	-3583	30	351	-3475	6	0000	407	-3378	13	0000	457	-3298
23	0800	301	-3577	0800	353	-3466		0800	408	-3374		0800	457	-3289
	1125	298	-3573	1200	351	-3466		1200	409	-3373		1200	457	-3292
	1600	298	-3573	1600	354	-3463		1600	410	-3370		1600	461	-3290
	2000	299	-3568	2010	353	-3460		2000	409	-3370		2000	463	-3285
	2345	300	-3565	31	355	-3463	7	0000	413	-3367	14	0000	466	-3287
	0800	302	-3562	0800	359	-3452		0800	414	-3364		0800	466	-3282
24	1200	305	-3555	1200	361	-3450		1200	414	-3363		1130	465	-3282
	1600	306	-3555	1600	363	-3450		1600	414	-3357		1600	469	-3281
	2000	308	-3549	2000	365	-3445		2000	419	-3355		2000	471	-3278
	2350	312	-3547	2350	368	-3446	Nov. 1	2335	419	-3357	15	0000	472	-3276
25	0800	313	-3541	0800	368	-3437		0800	425	-3350		0840	472	-3270
	1200	315	-3541	1200	368	-3436		1200	425	-3350		1200	472	-3267
	1600	315	-3538	1600	370	-3436		1600	426	-3344		1600	474	-3266
	2000	315	-3531	2000	372	-3431		2000	425	-3345		2000	476	-3264
26	0000	319	-3533	2	374	-3432	9	0000	428	-3344	16	0000	479	-3264
	0800	321	-3526	0800	377	-3426		0815	428	-3339		0810	480	-3262
	1200	323	-3524	1200	378	-3426		1215	429	-3339		1200	481	-3260
	1600	323	-3521	1600	378	-3421		1600	430	-3332		1600	481	-3259
	2000	324	-3518	2000	380	-3416		2000	432	-3331		2000	485	-3256
27	0000	326	-3521	3	380	-3416	10	0000	435	-3332	17	0000	486	-3255
	0900	329	-3510	0820	384	-3412		0800	436	-3327		0815	486	-3250
	1200	332	-3508	1200	384	-3411		1200	438	-3327		1215	488	-3247
	2000	334	-3503	1600	385	-3411		1600	438	-3323		1600	487	-3246
	2350	334	-3504	2000	386	-3408		2000	439	-3320		2030	489	-3245
28	0800	336	-3498	4	392	-3405	11	0000	443	-3322	18	0000	491	-3244
	1200	337	-3499	0800	394	-3401		0800	442	-3315		0800	495	-3242
				1200	393	-3397		1200	442	-3316		1200	495	-3238

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	
	1600	494	-3238		1600	540	-3171		0800	589	-3114	
	2000	498	-3237		2000	542	-3167	Dec. 3	1300	590	-3105	
Nov. 19	0000	503	-3233	Nov. 26	0000	543	-3169		1700	588	-3104	
	0800	503	-3231		0840	544	-3153		2000	591	-3103	
	1200	504	-3230		1200	547	-3153		4	0000	593	-3103
	1600	504	-3226		1600	548	-3160		0800	593	-3102	
	2000	504	-3223		2000	548	-3160		1200	595	-3100	
20	0000	506	-3223	27	0000	550	-3162		1800	593	-3099	
	0815	507	-3221		0900	550	-3155		2200	596	-3097	
	1200	507	-3220		1200	552	-3156		5	0800	594	-3086
	1700	507	-3217		1600	556	-3154		1200	593	-3085	
21	0000	513	-3215		2000	554	-3149		1700	594	-3081	
	0820	514	-3213		2345	556	-3152		2000	596	-3083	
	1200	517	-3210	28	0815	557	-3145		6	0010	599	-3081
	1700	516	-3206		1200	557	-3145		0800	601	-3082	
	2000	515	-3204		1600	557	-3144		1200	601	-3077	
22	0000	519	-3205		2000	561	-3142		1600	601	-3074	
	0820	520	-3202		0800	564	-3142		2000	605	-3073	
	1200	522	-3202		1200	564	-3138		7	0000	608	-3079
	1600	522	-3199		1635	568	-3137		0815	607	-3077	
	2000	523	-3198		2020	569	-3134		1200	610	-3070	
23	0000	527	-3199	30	0010	571	-3135		1600	608	-3067	
	0830	526	-3193		0935	570	-3132		2000	611	-3067	
	1200	528	-3192		1310	568	-3130		8	0000	614	-3068
	1610	529	-3187		1700	572	-3132		0810	611	-3064	
	2000	529	-3186		2240	578	-3137		1200	615	-3062	
24	0000	530	-3185	Dec. 1	0900	577	-3135		1600	616	-3060	
	0815	533	-3181		1300	576	-3132		2000	616	-3061	
	1200	534	-3183		1800	579	-3121		9	0000	619	-3062
	1600	535	-3179		2000	580	-3123		0830	619	-3057	
25	0000	537	-3177	2	2330	583	-3121		1200	619	-3057	
	0800	538	-3180		0900	582	-3115		1600	620	-3051	
	1200	540	-3175		1315	579	-3113		2000	621	-3050	
					1800	581	-3112		10	0000	624	-3053
					2330	588	-3109		0830	624	-3048	
									1200	625	-3048	
									1625	626	-3044	
									2000	629	-3043	
									0000	629	-3047	
									0800	628	-3039	
									1200	629	-3041	
									1600	630	-3041	
									2000	632	-3040	
									0000	634	-3041	
									0900	634	-3036	
									1200	633	-3035	
									2000	635	-3030	
									0000	640	-3034	
									0900	639	-3026	
									1200	640	-3026	
									1600	641	-3028	
									2000	644	-3025	
									0000	648	-3026	
									0900	645	-3020	
									1200	644	-3019	
									1600	647	-3021	
									2000	653	-3022	
									2345	653	-3017	
									0900	651	-3014	
									1200	651	-3017	
									1600	653	-3014	
									2000	653	-3013	
									0000	656	-3012	
									0900	655	-3011	
									1200	653	-3009	
									1600	656	-3008	
									2000	657	-3007	
									0000	659	-3004	
									0840	661	-3002	

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
Jan. 1	0900	730	-2920		1600	749	-2876
	1200	730	-2919		2000	753	-2874
	1500	728	-2915		2345	756	-2878
	1900	719	-2913	Jan. 10	0900	752	-2872
2	0900	727	-2918		1200	753	-2873
	1200	727	-2910		1600	753	-2874
	1500	731	-2912	11	2000	754	-2870
	1900	732	-2912		0000	757	-2872
3	0900	734	-2907		0900	752	-2868
	1200	733	-2907		1200	754	-2868
	1500	734	-2907		1600	754	-2869
	1900	736	-2905		2000	757	-2867
4	0900	736	-2900	12	0000	760	-2868
	1200	736	-2901		0900	759	-2868
	1500	737	-2900		1200	759	-2865
	1900	742	-2902		1600	759	-2866
5	0900	738	-2899		2000	760	-2861
	1200	734	-2892	13	0000	763	-2861
	1500	742	-2894		0900	762	-2860
	1900	739	-2896		1200	762	-2859
6	0900	738	-2895		1600	764	-2859
	1200	744	-2891	14	0000	767	-2858
	1400	747	-2888		0930	767	-2855
	1900	744	-2891		1200	768	-2853
7	0900	748	-2887		1645	768	-2853
	1200	741	-2889		2000	768	-2852
	1400	751	-2886	15	0000	769	-2852
	1900	751	-2884		0920	769	-2850
8	0900	745	-2881		1200	769	-2849
	1200	746	-2875		1600	770	-2850
	1500	751	-2880		2000	771	-2848
	1900	752	-2879	16	0000	773	-2851
9	0000	751	-2883		0900	773	-2849
	0900	747	-2877		1200	749	-2879

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
	1200	688	-2959		1500	690	-2956
	1600	662	-3001		2000	692	-2956
	2000	661	-2999	Dec. 25	0000	695	-2958
	2345	663	-2997		0915	694	-2953
Dec. 18	0900	665	-2995		1200	695	-2956
	1200	665	-2994		1600	697	-2953
	1600	666	-2994		2000	698	-2954
	2000	668	-2992	26	0000	698	-2953
19	0000	671	-2992		0900	697	-2947
	0900	670	-2990		1200	698	-2949
	1200	669	-2993		1600	700	-2948
	1600	671	-2987		2000	701	-2946
	2000	671	-2988	27	0000	703	-2947
	2340	672	-2988		0900	701	-2942
20	0900	674	-2985		1200	704	-2943
	1200	674	-2981		1600	706	-2943
	1600	674	-2978		2000	707	-2940
	2000	674	-2977	28	0900	706	-2936
21	0000	678	-2979		1200	708	-2940
	0900	678	-2976		1500	708	-2939
	1200	677	-2975		1900	707	-2931
	1600	679	-2974	29	0830	708	-2932
	2000	679	-2974		1200	712	-2930
22	0000	679	-2974		1500	713	-2929
	0900	679	-2972		1900	713	-2929
	1200	684	-2972	30	0830	703	-2927
	1600	681	-2970		1200	708	-2926
	2140	685	-2970		1500	707	-2926
23	0000	686	-2971		1900	723	-2923
	0900	685	-2966	31	0830	721	-2920
	1200	686	-2968		1200	719	-2921
	1600	688	-2963		1500	719	-2923
	2000	689	-2962		1900	725	-2924
24	0000	690	-2965	1967			
	0900	690	-2957				

date	time	NS	EW	date	time	NS	EW	date	time	NS	EW
	1200	774	-2845		2000	799	-2815		0845	815	-2784
	1250	773	-2844		0000	801	-2819		1200	819	-2793
	1600	776	-2846	Jan. 24	0915	798	-2810		1600	820	-2787
	2000	775	-2844		1200	798	-2814	Feb. 8	1900	819	-2788
Jan. 17	0000	777	-2843		1600	800	-2813		1200	842	-2759
	0750	778	-2843		2000	804	-2811		1600	843	-2758
	1120	778	-2843	25	0000	805	-2814		2100	844	-2757
	2010	780	-2841		0920	804	-2806		1900	829	-2785
18	0000	781	-2841		1200	802	-2809	2	1900	829	-2785
	0830	781	-2839		1600	805	-2808		1200	828	-2781
	1200	783	-2839		2000	805	-2804		1600	828	-2778
	1400	781	-2838	26	0000	807	-2807		1900	829	-2778
	2100	783	-2838		0915	806	-2803	3	0910	829	-2774
19	0000	786	-2836		1230	806	-2803		1200	831	-2774
	0910	783	-2836		1600	806	-2804		1700	831	-2774
	1200	783	-2832	27	2000	808	-2802		2000	831	-2775
20	0000	786	-2833		0920	808	-2799	4	0000	831	-2775
	0630	786	-2828		1200	809	-2801		0910	832	-2773
	1200	787	-2829		1600	809	-2802		1200	831	-2773
	1900	790	-2827		2000	811	-2799		1730	833	-2772
21	0000	792	-2830	28	0000	812	-2800		2000	834	-2772
	0910	791	-2824		0915	809	-2797		2345	834	-2773
	1200	791	-2824		1200	810	-2795	5	0945	834	-2770
	1700	792	-2823		1645	811	-2797		1200	835	-2770
	2000	795	-2823		2000	814	-2799		1730	837	-2770
22	0000	795	-2824	29	2300	812	-2795		2015	837	-2769
	0900	794	-2821		0900	812	-2795	6	0000	841	-2770
	1200	794	-2823		1200	818	-2793		0915	838	-2765
	1600	797	-2821		1630	813	-2794		1230	839	-2766
	2000	797	-2820	30	1900	815	-2795		1700	840	-2764
23	0000	797	-2822		0900	815	-2792		2030	840	-2763
	0920	795	-2817		1215	820	-2789	7	0000	841	-2764
	1200	795	-2819		1530	825	-2788		0830	840	-2760
	1600	796	-2917		1900	820	-2789		1200	839	-2762

	0930	866	-2732		1630	887	-2713		0930	914	-2679
	1230	867	-2729		1900	889	-2708		1200	916	-2681
	1700	867	-2730	Feb. 25	0830	892	-2711		1700	917	-2679
	2000	869	-2731		1200	892	-2709		2100	918	-2682
	2340	869	-2728		1500	895	-2708	Mar. 6	0000	918	-2681
Feb. 17	0945	868	-2725		1900	895	-2704		0900	916	-2676
	1230	869	-2725	26	0900	892	-2705		1200	919	-2676
	1700	869	-2726		1200	894	-2704		1700	921	-2674
18	0000	870	-2729		1500	897	-2705		2100	921	-2676
	0915	871	-2724		1900	901	-2699		0000	920	-2676
	1230	872	-2725	27	0900	905	-2699		0915	920	-2676
	1830	872	-2725		1200	898	-2698		1220	920	--
19	0000	874	-2725		1500	900	-2700				
	0730	870	-2723		1900	899	-2701				
	0930	872	-2722	28	0900	900	-2696				
	1745	873	-2723		1200	901	-2695				
	1940	874	-2724		1530	901	-2695				
20	0900	878	-2721		1900	902	-2696				
	1200	877	-2721	Mar. 1	1015	902	-2692				
	1500	877	-2721		1200	902	-2690				
	1900	881	-2717		1530	904	-2694				
21	0845	877	-2721		1900	907	-2694				
	1200	879	-2721	2	0900	902	-2689				
	1500	883	-2717		1200	903	-2687				
	1900	879	-2718		1500	907	-2688				
22	0900	879	-2717		1900	909	-2690				
	1200	879	-2717	3	0800	909	-2686				
	1500	882	-2714		1600	913	-2693				
	1915	884	-2712		2000	913	-2684				
23	0830	882	-2713		2340	912	-2684				
	1200	881	-2714	4	0910	910	-2684				
	1500	883	-2711		1140	911	-2683				
	1915	884	-2712		1800	914	-2682				
24	0800	886	-2710		2000	915	-2684				
	1300	886	-2713	5	0000	914	-2684				

Appendix 4.3. Magnitude versus dislocation area calculated by formula (4.3).

P/L	K	M= 5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0
0.5	(733)	14.8 x 7.4	13.3 x 6.7	11.6 x 5.8	10.4 x 5.2	9.4 x 4.7	8.3 x 4.2	7.4 x 3.7	6.5 x 3.3	5.8 x 2.9	5.2 x 2.6	4.6 x 2.3
0.6	7.12	110 km ²	89.0	67.3	54.0	44.0	34.8	27.4	21.4	16.8	13.5	10.6
		11.5 x 6.9	10.3 x 6.2	9.1 x 5.5	8.1 x 4.9	7.3 x 4.4	6.5 x 3.9	5.8 x 3.5	5.1 x 3.1	4.6 x 2.8	4.1 x 2.5	3.6 x 2.2
0.7	6.96	79.5	64.0	50.0	39.6	32.0	25.4	20.3	16.6	13.9	10.2	7.9
		9.6 x 6.7	8.5 x 6.0	7.6 x 5.3	6.8 x 4.8	6.0 x 4.2	5.4 x 3.8	4.8 x 3.4	4.3 x 3.0	3.8 x 2.7	3.4 x 2.4	3.0 x 2.1
		64.4	51.0	40.3	32.6	25.2	20.5	16.3	12.9	10.2	8.2	6.3
0.73	6.92	9.1 x 6.6	8.2 x 6.0	7.3 x 5.3	6.5 x 4.8	5.8 x 4.2	5.1 x 3.7	4.6 x 3.4	4.1 x 3.0	3.6 x 2.6	3.2 x 2.3	2.9 x 2.1
		60.0	49.2	38.6	31.2	24.4	18.9	15.6	12.3	9.4	7.4	6.1
0.8	6.81	8.1 x 6.5	7.3 x 5.8	6.4 x 5.1	5.8 x 4.6	5.2 x 4.2	4.6 x 3.7	4.0 x 3.2	3.6 x 2.9	3.2 x 2.6	2.9 x 2.3	2.5 x 2.0
		52.6	42.3	32.6	26.7	21.8	17.0	12.8	10.5	8.3	6.7	5.0
0.9	6.69	7.1 x 6.4	6.3 x 5.7	5.6 x 5.0	5.0 x 4.5	4.5 x 4.1	4.0 x 3.6	3.5 x 3.2	3.1 x 2.8	2.8 x 2.5	2.5 x 2.3	2.2 x 2.0
		45.5	36.0	28.0	22.5	18.5	14.4	11.2	8.7	7.0	5.8	4.4
1.0	6.59	6.3 x 6.3	5.6 x 5.6	5.0 x 5.0	4.5 x 4.5	4.0 x 4.0	3.6 x 3.6	3.2 x 3.2	2.8 x 2.8	2.5 x 2.5	2.3 x 2.3	2.0 x 2.0
		39.7	31.4	25.0	20.2	16.0	13.0	10.2	7.9	6.3	5.3	4.0

*A Water-tube Tiltmeter and its Applications to
Crustal Movement Studies.*

By Juhei YAMADA,
Earthquake Research Institute.

It is well established that earthquakes and crustal movements are related closely to one another. Geodetic means, i.e. repetition of precise surveys in a seismic area, have been the principal data sources in this research field. However, it is generally difficult to repeat the surveys frequently. Thus some complementary means are needed in order to observe the episode of strain accumulation at a fixed point continuously. Instruments for this purpose must be provided with long-term stability which is comparable to the geodetic means' to be complemented. A water-tube tiltmeter, which refers to the water level in a long tube, seems to satisfy this condition as is proved in the following discussion.

This paper presents and discusses various aspects of crustal movements in Japan on the basis of the water-tube tiltmeter records, which the writer and his collaborators obtained in the past twenty years. The paper consists of five chapters as follows:

Chapter 1 is on the instrumentation. A water-tube tiltmeter is basically a simple U-tube instrument. However, the best results are obtained only after proper designing and careful operation of the instrument. For this purpose, the writer reviews the history of a tiltmeter with special discussions on its vital parts, they are, optical system for precise reading, materials and manufacturing process for durability, instrumental response, etc., Discussions are also developed on several factors such as changes in the air temperature, atmospheric pressure, underground water and tidal phenomena, which may disturb the observations. It is true that the overall accuracy depends on the condition how well the reading is corrected for these external factors.

Chapter 2 deals with a remote recording system for a water-tube tiltmeter. A reliable and practical system of remote operation has long been searched for by various groups in this field, as it will improve the observation definitely. It will eliminate uncomfortable vault work from the observers and will give us undisturbed continuous records. Development of the system has been desired urgently through the writer's experience in the Matsushiro swarm earthquakes, when restless vault observations were often conducted, manually.

Thus a supersonic equipment was constructed and tested by the writer and his collaborators successfully, as is described in this chapter. Basically, it takes sing-around method, in which the repetition cycle of a supersonic pulse is given as a function of the water depth. It detects the water level changes with the accuracy of less than one micron.

A proto-type model thus constructed is a brazen water reservoir of the tilted bottom. A piezo-electric element (transmitter-receiver) is mounted at the lower surfaces of the bottom plate via an ebonite insulator. Oblique incidence of sound waves to the tilted bottom plate causes converted transverse waves, which propagate through the plate until it is transmitted into water as a longitudinal pulse. The signal reflected at the water surface returns to the receiver along the same path, and efficient transmission of the signal are achieved. Consequently, the high S/N ratio and stability are attained.

Chapter 3 presents and discusses the secular changes recorded at the three observatories, Aburatsubo, Nokogiriyama and Matsuyama. Particularly interesting is a comparison of the records at Aburatsubo and Nokogiriyama, which are separated only for 20 km across the Bay of Tokyo. It is generally supposed that the observed tilting consists of the two components, i.e. the regional tectonic movement and the local one contaminating it. Hence,

correlation of tilting at the two adjacent stations depends on the condition which component predominates.

At a coastal observatory, which is locally affected by the tidal loading, good harmony between continuous observations and levellings may not be seen always. As for the long-term changes, however, the results of water-tube tiltmeters, levelling surveys and mareographs are in good harmony with each other, so far as their basic trends, or the rhythm of changes are concerned,

Notable evidence for migration of crustal movements has been discovered recently. Locus of the tilt vector at a station is generally accompanied by irregular features which are superposing the general trend of secular movements. Phase of the irregularities at Nokogiriyama lead Aburatsubo for about one year, indicating that these events migrate from east to west across the Boso Peninsula at a very low velocity, say 20 km/yr or 0.06 cm/sec.

This effect seems to bring forward new interesting problem in crustal movement studies. First, it enables us to predict movements at Aburatsubo from the Nokogiriyama's data, if the phase relation of the two is established empirically. Secondly, it attracts our notice on the rheological aspects of crustal movements. A brief discussion has been developed from these points of view.

Chapter 4 is on the subject of observations in the Matsushiro swarm earthquake area. The observed earth's tilt due to the seismic activities are compared with a elastic dislocation model of earthquakes. Practically, the writer installed two components of 40-meter water-tube tiltmeters in the vault of the Matsushiro Seismological Observatory, J.M.A., and continued observations there for about one year including the principal stages of activity.

The paper first refers to sixty-two major shocks of intensity scale IV or V in order to examine anomalous tilt events in 24 hours before and after the respective shock. By this work, which is perhaps the most detailed tilt observations in the epicentral areas ever conducted, lots of notable evidence for precursory effects have been obtained. These results offer hopeful examples to the studies of earthquake prediction.

Tilt steps, or sudden changes in tilting, were observed for most of these earthquakes, and were compared with the elastic dislocation models by Press and Chinnery successfully. Thus, an empirical formula has been derived to explain the relation between the seismic magnitude and the fault geometry. This formula seems consistent with the existing magnitude-fault length relations derived by various authors. A chart of tilt field about a fault origin has been drawn for the purpose of quick interpretation of the Matsushiro swarm earthquake. This chart enables us to estimate quickly the fault slip by knowing a tilt step at the station. Then, the seismic moment can be estimated by combining the slip with the fault area presumed from seismic observations and the rigidity of the crust. The seismic moment versus magnitude formula thus derived harmonized well with the similar one deduced from seismic waves.

Chapter 5 describes further applications of a water-tube tiltmeter, taking the tilt monitorings at the Sakuma and Kuroyon dams as well as at the Kilauea caldera, as examples.

Finally, the detailed data and technical descriptions are given in the appendix.