

京都岩倉における地殻変動観測（Ⅰ）

——降雨の伸縮計，傾斜計に及ぼす影響について——

竹 本 修 三

THE OBSERVATION OF CRUSTAL DEFORMATIONS AT IWAKURA, KYOTO (I)

——On the Influence of the Precipitation on Extensometers and Tiltmeters——

by Shuzo TAKEMOTO

Synopsis

The influence of the precipitation on extensometers and tiltmeters has been investigated at Iwakura Observatory during the past 16 months.

Generally, when we observe crustal deformations for the purpose of prediction of earthquakes, careful consideration must be given to influences of meteorological changes, especially those of the precipitation in our country. At Iwakura Observatory, it is found that there exist some simple relations between the precipitation W and linear strains or ground-tilts ε_t . These relative expressions may be given as the following form.

$$\varepsilon_t = W\alpha \exp(-t/\tau_1) + W\beta \exp(-t/\tau_2).$$

1. 序 言

地震発生と関連を持つ地殻歪の蓄積を観測する目的での傾斜計・伸縮計等による地殻変動観測は、佐々博士，故西村博士をはじめとして，京都大学では20数年にわたる長い歴史を持っている。その結果，鳥取地震（1943年， $M=7.5$ ），東南海地震（1944年， $M=8.0$ ），吉野地震（1952年， $M=7.0$ ）等の大地震に際して地震と関係を持つと思われる直線ひずみや傾斜変化がとらえられた¹⁾。これらの事実はある程度，観測所を密に配置すれば，地殻変動の観測が大地震の予知に近づく有力な手掛りとなる可能性を示した。

しかしながら実際に伸縮計あるいは傾斜計によって観測される地殻変動記録は一般に，地球潮汐，海洋潮汐による海水荷重，さらに降雨・気圧・気温・地下水位の変化に伴う観測点付近の極く浅い土地の変形などが大きくきいてくる。従って，地震の発生と関連を持つ地殻変動が起ったとしても，その量が上記の諸量より大きい場合にはそれを検出することは比較的容易であるが，同程度あるいはそれ以下の場合は，地震発生と関連した地殻変動を識別するために，上記の諸量を何等かの方法で取り除かなければならない。その一つの方法として適当な filter を使用して地震と関係した地殻変動のみを取り出そうという試みが田中助教授によってなされている²⁾。

岩倉地殻変動研究所もこれら地震発生と関連を持つ地殻変動を観測することを目的の一つとして1965年4月以来継続して観測が行なわれているが，約16ヶ月の記録をみると，降雨と伸縮，傾斜変化との間に，非常に高い相関があるように思われる。そこで今回は，降雨という擾乱原因による土地の変形について述べてみたい。

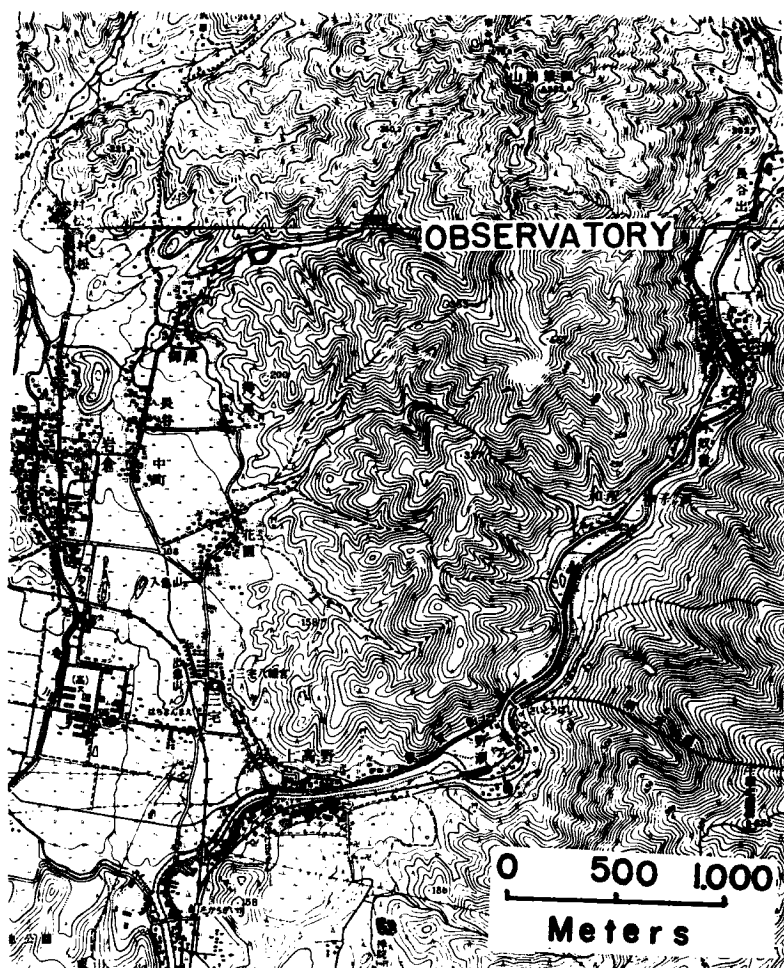


Fig. 1 Segment of topographic map of the northeastern part of Kyoto City.

2. 観測所及び観測計器

観測所は Fig. 1 に示す通り、京都市の東北、左京区岩倉長谷町の東経 $135^{\circ} 48' 11''$ 北緯 $35^{\circ} 05' 01''$ の地点にあり鉦山の廃坑を改修したものである。海拔約 150m ほどのところの坑道は巾 1.8m, 高さ 2m, 奥行き約 30m の横穴で観測室は三重の扉の一番奥にあり、観測室内部の様子は Fig. 2 に示す。

観測室には Super-invar 棒伸縮計が図の向きに水平方向 3 成分, それに Zöllner 吊り水平振子型傾斜が 2 成分, それぞれ直角におかれている。これら計器は 1964 年夏に設置されたが準備期間を経て, 1965 年 4 月 23 日より連続観測が開始された。計器の諸常数は Table 1 に示されている。

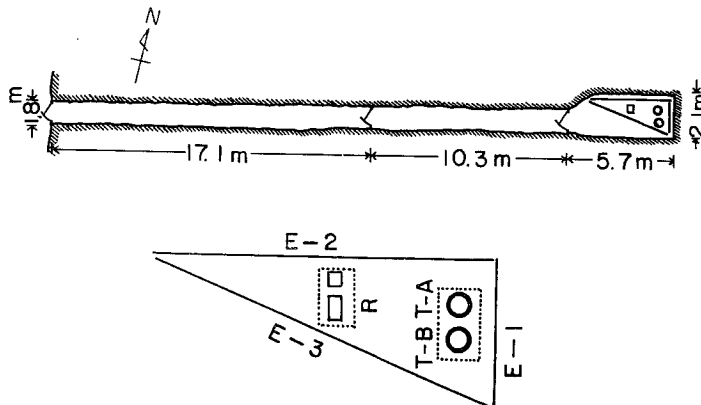


Fig. 2 Interior of the gallery and schematic view of arrangement of instruments.

Table 1 The List of Instruments of Iwakura Observatory.

Instrument	Mark	Azimuth	Sensitivity
Extensometer (Super-invar-Bar Extensometer)	E — 1	S 21° W	$9.5 \times 10^{-6}/\text{mm}$
	E — 2	E 21° S	$4.6 \times 10^{-6}/\text{mm}$
	E — 3	E 39° S	$2.9 \times 10^{-6}/\text{mm}$
Tiltmeter (Horizontal Pendulum Type)	T — A	N — S	$1.1 \times 10^{-2''}/\text{mm}$
	T — B	E — W	$1.3 \times 10^{-2''}/\text{mm}$

3. 観 測 結 果

連続観測のはじまった1965年4月23日から1966年8月末までの観測結果をに Fig. 1 示す。記録の読み取りは一日毎、各々零時の値を読むことにした。

坑道自体は古いものであるが、観測を行うにあたって、一部コンクリートで補修したり、新しく計器を設置したことによる影響は、時間と共に指数函数的に減少してゆき、観測開始後少なくとも半年くらいまではその量が無視できない。

Fig. 3 にはまた岩倉観測所から直線距離にして約 4 km 離れている京都大学理学部附属気象学特別研究所における雨量の記録をあわせて示した。図を見て明らかなように、伸縮計・傾斜計共に降雨との相関が極めて高いことがわかる。特に 30 mm/day 以上の降雨についてはそれに伴って顕著な伸縮、傾斜変化があらわれて、その変化の形は各成分について一定のある pattern を持っているように思われる。これについては次節でやや立ちいって述べる。

また本観測所のあるあたりは琵琶湖の西側から大阪湾にかけての Belt 状をなす地震の多発地帯、即ち淀川地震帯の上にあり²⁾、この観測期間中にも 1966年の3月7日から18日にかけて、5回の局所的な有感地震が集中的に発生した。今後、観測資料のたまるのを待って、これら局所地震と地殻変動の関連についても調べて行きたい。

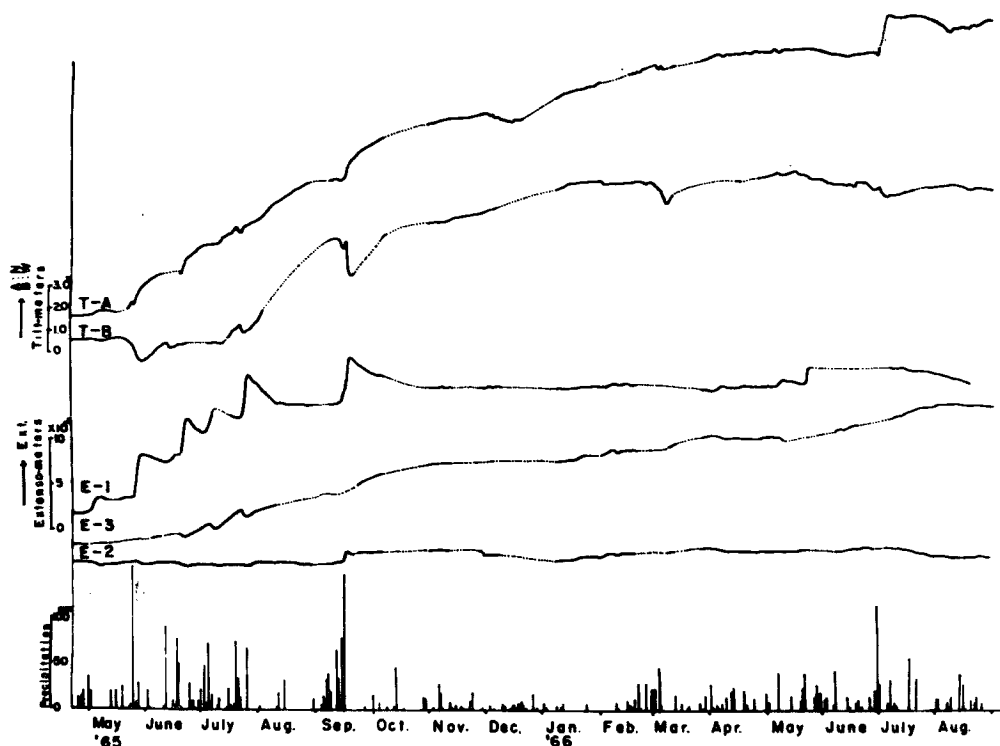


Fig. 3 Results of the observations. (Apr.23, 1965—Aug. 31, 1966)

T—A : NS component of tilting movement
 T—B : EW "
 E—1 : S21°W component of linear strain
 E—2 : E21°S "
 E—3 : E39°S "

4. 降雨による伸縮, 傾斜変化

伸縮計, 傾斜計等によって地殻変動を観測しようとする場合, 気象的な原因に基づく影響が非常に大きい。特に我が国においては, 降雨による影響をさけることはできない。これらについてはすでに多くの人々によって論じられてきた。

佐々博士は阿蘇, 上賀茂における水平振子型シリカ傾斜計による観測で, ある一定量以上の連続降雨があると数時間遅れて, 傾斜変化があらわれ, その後指数函数的に旧位置に復帰するがそれまでに時として1~2ヶ月も影響が残ること, また降雨による地盤の主なる傾斜方向は各地点で一定で降雨量や季節によって変ることがないと述べられている⁴⁾。

萩原博士は筑波山におけるシリカ傾斜計及び水管傾斜計による観測で, 降雨のために顕著な変化がすべての傾斜計について記録されたがその傾斜方向は各々が同じでないと述べておられる⁵⁾。また, 同博士等らは油壺における傾斜計, 伸縮計による地殻変動観測では目立った降雨による影響が出ていないが, これは坑道の性質によるものであらうと述べられている⁶⁾。

小沢教授は雨と土地の伸び縮みとの関係を逢坂山の記録について, 「坪井の方法⁷⁾」即ち, ある $F(x)$ と $f(x)$ という二つの量があるとき, 一方が他に $\varphi(x)$ なる重みを附して求めた平均で表わせるとき, つま

り、

$$F(x) = \int_0^{2\pi} f(x+a)\varphi(a)da$$

の形をとるとき、降雨量を $f(x)$ 、土地の伸縮度を $F(x)$ としてこの重畳函数 $\varphi(x)$ を求めておられる⁸⁾。

高田教授は井手における観測から、降雨後2日目に傾斜、伸縮変化の peak が現れ、一般に2～3週間その影響が続くことから6～20mm/dayの降雨で15日、20mm/day以上の降雨について20日その影響が残るものとして、2日目に peak を持つ三角形を考え、これを降雨の Effective Value と考えて解析を行っておられる⁹⁾。

伸縮・傾斜変化に及ぼす降雨の影響は、もちろん単純なものではなく、直接きいてくる雨自身の load、雨による土地の含水量の変化に伴う stress field の変化等にたよってひきおこされるものの外に、間接的なものとして、降雨による観測室内外の温度変化、地下水流の増減等による影響も考えなければならない。

今回、岩倉観測所における記録でも降雨による影響が最も大きな disturbance の原因であることは先に述べた。ここではさらに詳しくこれを見てゆく。

16ヶ月余の観測で岩倉観測所においては30 mm/day を越えない降雨についてはその影響が記録の上に認められない。従って現在の計器の感度では30 mm/day以下の降雨は一応その影響を無視してよさそうである。この期間中30 mm/day を越えるような降雨があり、しかも伸縮計、傾斜計共に記録のとれている例は6例だけであった。これを Fig. 4 に示す。図は、原記録を直接 trace したもので、そのまま大きさを較べることはできないがその変化の形は雨量に関係なく各成分によって一定であるように思われる。Fig. 5 にはまたこの期間の傾斜変化のベクトル図を示す。

Fig. 4 の6つの例(A)～(F)の中で(B)に示されている1965年の5月末から6月はじめにかけての変化が最も興味深い。即ち、6月26日1日にだけ154 mm という16ヶ月間の全観測期間中最大の降雨があり、しかも

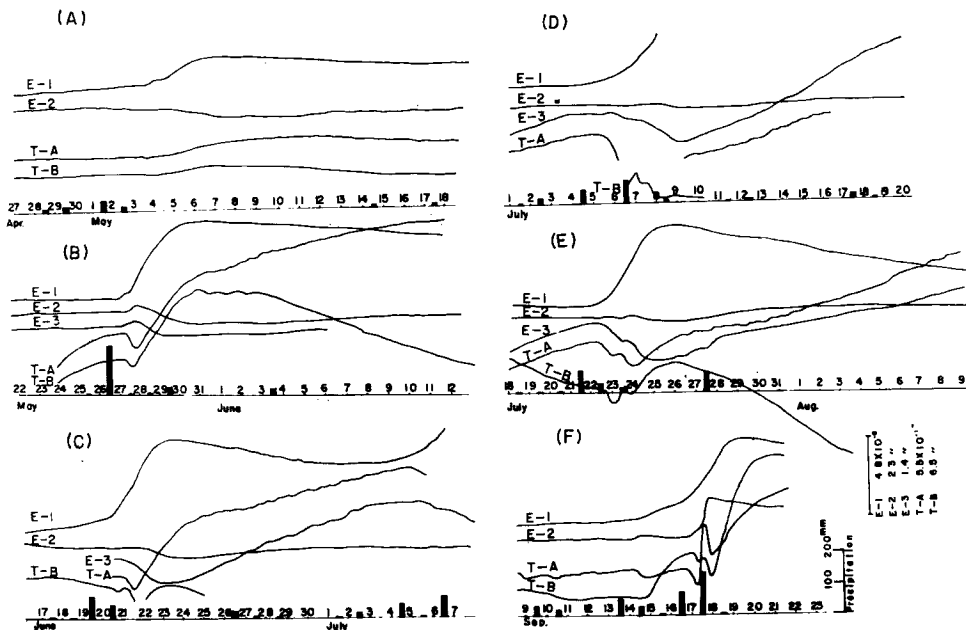


Fig. 4 Observed curves of linear strains and ground tilts before and after the precipitation,

その後5月3日から6月12日まで1日に 30 mm を越えるような降雨がみられない。従って、5月27日以後に現われている大きな異状伸縮、傾斜変化はただ26日に降った 154 mm/day という雨によるものであると見なすことができる。するとこれは前後に雨の影響がまったくないような状態のところ、1日だけ W mm という雨が降ったことによってひきおこされる伸縮、傾斜変化の典型的なモデルであると考えることができる。そこで (B) についてその変化の方向から、計器を新しく設置したことによる影響及び secular な坑道の変形と思われるものを引きさってやって、一応純粋に降雨の影響による変化と考えられるものを示したのが Fig. 6 である。

これを見ると割合 simple な形を示している。伸縮計、傾斜計共に降雨の影響が現われはじめてから大体半日後と3日後くらいのところに2つの peak を持ち、その後次第に減衰してゆく。半日後の第一の peak は E-1 についてはあまりはっきりしないが E-2, E-3, は共に伸びそれぞれ 1.9×10^{-7} , 0.9×10^{-7} の値に達する。その後収縮に転じ、第2

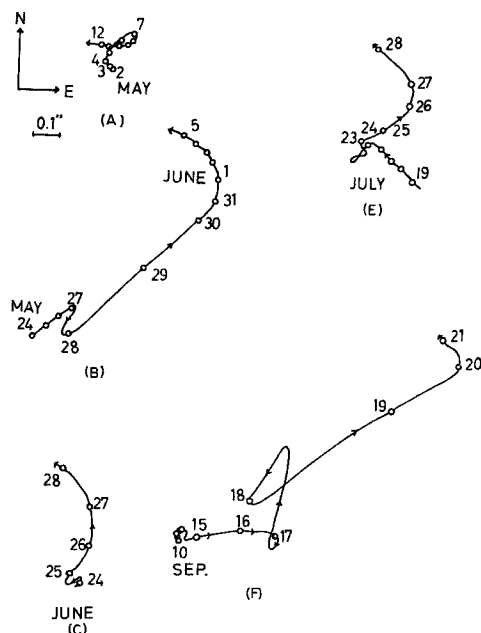


Fig. 5 Vector diagrams of the ground tilt at the same period as Fig. 4

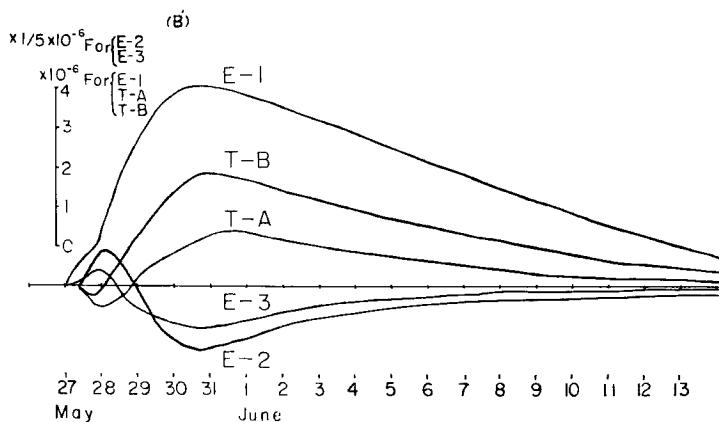


Fig. 6 Ground deformation caused by precipitation.

の peak では E-2 : 3.3×10^{-7} , E-3 : 2.1×10^{-7} の値をとり、その後次第に減衰して旧位置に復帰する。E-1 の変化は E-2, E-3 に較べて、order 1つ大きく、他の成分の第2の peak に相当するあたりで唯一の極値 5×10^{-6} の伸びを示している。一方傾斜計についても同様に2つの peak を持ち、第一の peak まで南西に0.14秒、その後急に方向が変り3日目頃まで東北に0.6秒、そこでまた方向が反転し、次第に平常に戻ってゆく。

これを Fig. 4 の (B) 以外の例についてみると (A) は変化の絶対量が小さいので第 1 の peak は、はっきりしないが第 2 の peak の変化の方向は (B) と良く合っている。(C) は記録が完全でないので E-2, E-3 の最初の peak がわからないが他は良く合っている。(D) は E-1, T-A, B が変化の途中で scale out しているので一応除くとして、(E), (F) については 7 月 21 日, 22 日及び 9 月 16 日, 17 日の雨がそれぞれ二日間連続して降ったものでなく、一度途中でとぎれたものと考えれば、それぞれ第 1 の peak に相当するヤマが 2 つあらわれているのが良く説明つく。

以上のように降雨という擾乱原因に基づく伸縮、傾斜変化を考える場合、少くともこの岩倉観測所に関する限り、2 つの独立した変化を考えてやるのがよいように思える。即ち一つは降雨後数時間遅れて変化が現われはじめて半日後に peak に達する、坑道方向つまり等高線を切る方向に伸び、標高の低い方へ傾むく変化でその変化量は雨量には単純には比例せず Fig. 4 の (F) にみられるように台風のような短かい時間にどっと雨が降った時に大きく、雨量そのものよりもそれを時間微分したものに depend しているようである。また第 2 の peak は降雨後大体 3 日であらわれ坑道に直角方向、即ち等高線にそう方向で大きな伸びを示し、それに直角な方向では収縮、傾斜の方向は標高の高い所へ向いて下がっている。変化の量は雨量 30~80mm/day くらいまでは雨量の増加と共に変化量も増すがそれ以上では saturate する。

そこで、降雨 W mm/day があった時にそれに伴う伸縮、傾斜変化を ε_t とすれば、 ε_t は $\varepsilon_t' = \alpha W t \exp(-t/\tau_1)$, $\varepsilon_t'' = \beta W t \exp(-t/\tau_2)$ の和、

$$\varepsilon_t = \varepsilon_t' + \varepsilon_t'' = \alpha W t \exp(-t/\tau_1) + \beta W t \exp(-t/\tau_2)$$

であらわせる。ここに τ_1 , τ_2 は観測点特有の定数で、岩倉観測所においては $\tau_1 = \frac{1}{2}$, $\tau_2 = 3$ の値をとる。また α , β は各成分によってそれぞれ異った値をとる。 $A = \alpha W$, $B = \beta W$ とした時、 B/A の種々の値に対する ε_t の値は、Fig. 7 のようになる。

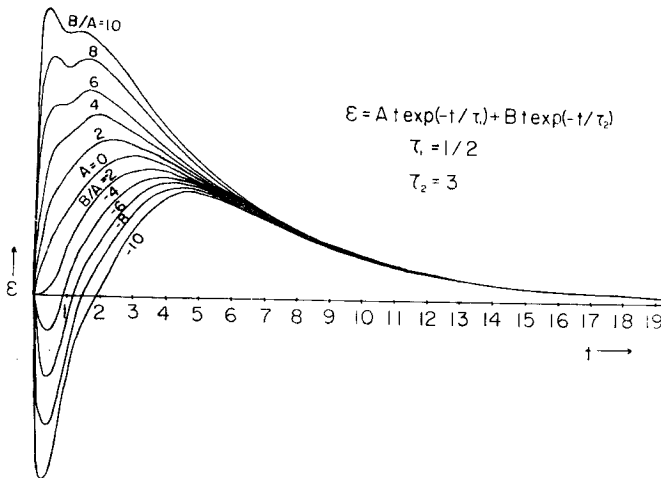


Fig. 7 Theoretical curves of $\varepsilon = A t \exp(-t/\tau_1) + B t \exp(-t/\tau_2)$ for various B/A .

今回はまだ記録の数も少なく、それも 5 月~9 月という限られた期間のみにあらわれた変化であるから、これだけの例から降雨による伸縮、傾斜変化の一般的な論議はできないことはもちろんである。そこでごく大まかな定性的なことに限って述べてみると、まず降雨後およそ半日後に peak を持つ第 1 の変化は雨量による load, これは観測所の入口から 10 m 程離れたところを流れている谷川の水量の増減に大きく関係していると思われるが、それだけでなしに付近の土の急激な重量変化に伴うそれが降雨の直接の影響としてきいてくる項であり、3 日目前後に最大の変化が現われる項は、一度雨が土中にしみ込んだものが地下水量

の変化、観測室内外の温度変化等をひきおこし、それによってじわっときいてくる間接的な影響と考えるのがいまの場合、一番自然であると思われる。

いずれにしても詳しい論義はもっと Data の数の増えるのをまたなければならない。

5. 結 語

以上をまとめてみると、岩倉観測所では 30 mm/day を越えるような降雨については顕著な伸縮、傾斜変化を示し、その pattern は雨量に関係なく一定で、前頁に示した関係式で表わされる。即ち、降雨の影響は二つの変化に分けられ、まず変化があらわれてから半日後に peak を持つような降雨が直接きいてくる項と、約 3 日目に peak を持つような降雨の間接的な影響と思われる項とである。

今後、Data の数をふやしてゆくと共に、他観測所における記録をも参照して、改めて降雨の伸縮計、傾斜計に及ぼす影響についてさらに詳しく、観測所の地域性によらない普遍的なものについて調べてみるつもりである。

最後に終始ご指導いただいた高田教授、数多くの有益な助言をいただいた田中助教授、古沢保氏、実際に観測を行うにあたって技術的な援助をお願いした小林年夫氏、山田勝氏、計算をしていただいた葛川俊子嬢に深甚なる感謝をささげます。

なお、本論文に使わせていただいた気象学特別研究所における雨量の記録について理学部大学院の米谷俊彦氏のお世話になった。あわせてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば, Sassa, K. and Nishimura, E.: On Phenomena Forrunning Earthquakes. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 32, 1951, pp.1—6.
- 2) Tanaka, T.: Study on the Relation between Local Earthquakes and Minute Ground Deformation, Part 2. An Application of the Digital Filtering to the Tiltgram for the Detection of Minute Anomalous Tilting of the Ground. Des. Prev. Res. Inst. Bull. No.108. pp.57—67.
- 3) 岡野健之助, 平野勇: 京都周辺に発生する微小地震(2), 京都大学防災研究所年報, 第 9 号, 1966, pp.21—26.
- 4) Sassa, K.: Ground Deformation caused by Meteorological Changes. Jap. Journ. Astron. Geophys., Vol. 1, pp.17—26. (in Japanese)
- 5) Hagiwara, T. Observation of Changes in the Inclination of the Earth's Surface at Mt. Tsukuba (Third Report). Bull. Earthq. Res. Inst. Vol.25, 1947, pp.27—31.
- 6) Hagiwara, T. et al Observation of the Deformation of the Earth's Surface at Aburatsubo, Miura Peninsula. Part IV. Bull. Earthq. Res. Inst. Vol.29, 1951 pp.455—468.
- 7) Tsuboi, C.: A Problem of Weighted Mean. Bull. Earthq. Res. Inst Vol. 19, 1940, pp.458—475.
- 8) 小沢泉夫: インヴァール線及びインヴァール棒伸縮計による土地の伸縮の観測と雨の影響について, 防災研究所研究報告, 第 3 号, 1950, pp.69—74.
- 9) Takada, M.: On the Observation of the Crustal Deformation and Meteorological Effect on It at Ide Observatory. Dis. Prev. Res. Inst. Bull., No.23, pp.1—12.