

旧逢坂山トンネル内の地殻変動の長期観測と その異常の推算

小 沢 泉 夫

OBSERVATIONS OF THE CRUSTAL STRAINS IN THE OLD OSAKAYAMA TUNNEL FOR LONG YEARS, AND THE ESTIMATION OF THEIR ANOMALY

By Izuo OZAWA

Synopsis

The extensions have been observed in the directions of S 38° W, S 52° E and the vertical at the old Osakayama tunnel for long years. The simple and plain method have been devised in order to estimate the present anomalies of these observed crustal strains.

These standard secular changes are shown as follows, where T is year,

S 38° W: $(425.1 - 1.6T^{-1} - 660.6 \log T - 97.52T) \times 10^{-8}$, from Jan. 1, 1951,

S 52° E: $(-160.1 - 2.6T^{-1} - 1952.9 \log T + 398.21T) \times 10^{-8}$, from Jan. 1, 1960,

The vertical: $(19.3 + 2.0T^{-1} - 567.3 \log T - 93.09T) \times 10^{-8}$, from Jan. 1, 1970.

Then, relations between the monthly anomalies from these standard secular change and the monthly and daily precipitations and the monthly water-level have been studied.

は じ め に

旧逢坂山トンネルの中で伸縮計を使って長期間地殻変動の観測を行ってきた。今後これらの観測から地殻が現在どの程度の異常な状態にあるかを簡単に評価する方法を考えた。

ここで対照とする資料はトンネルの方向、S 38° W 成分の伸縮、直交する連結坑の方向、S 52° E 成分の伸縮、トンネル内に掘った垂直坑井内にある垂直成分の伸縮とこの坑井の水位、堅田（近畿建設局）と京都気象台の降水量とである。

過去約30年の観測期間中この地方には特に異常な地震活動は見られなかった。このことから現在より少し前までの観測値は地殻の正常な状態を示していると考え、これらの変化を外挿した現在または近い将来の状態に対して観測結果がどれだけ片寄っているかを以て異常度と考える。

また、長期の正常変化（平滑曲線）からの短期の片寄り（降雨、地下水位、坑温によるものと見做し、これらと地殻の短期変動との間の重畳関数を求めた。この関数と現在の降水量などを用いて、降雨、地下水位などの地殻の短期変動に及ぼす影響を求めた。また、これらの影響を除いたものがどのような結果になるかを求めた。

1. 観 測

旧逢坂山トンネルは東経 135°54′、北緯 34°59′ にあって、長さ約 670m の平行にある2本のトンネルとその2つを連結するトンネルから成立っている。また、トンネルの中に深さ約 6m（直径約 15cm）の井戸を掘った。これらのトンネルと井戸を利用して伸縮計を設置した。水平の S 38° W 成分（以後 R1 と呼ぶ）

は長さ 19.6m, 感度 $1.3 \times 10^{-8}/\text{mm}$, 水平の $S 52^\circ E$ 成分 (以後 $C1$ と呼ぶ) は長さ 10m, 感度 $0.137 \times 10^{-8}/\text{mm}$, 垂直成分 (以後 $V5$ と呼ぶ) は長さ 6m, 感度 $0.57 \times 10^{-8}/\text{mm}$ である^{1), 2)}。

2. 解析方法

観測の対照となっている地盤, 観測器械はともに塑性変形をするものである。過去の長期の観測曲線も塑性変形の実験結果³⁾ に近い形と見てもよかった。この理由で過去の観測曲線の平滑曲線 $Y(T)$ は, まず

$$Y(T) = A_0 + A_1 T + A_2 \log T \quad \dots\dots\dots (1)$$

の形を仮定した。ここに T は観測年数である。また, $C1$ の $Y(T)$ は $1/T$ の項を付けるとよく一致するので一般に $Y(T)$ の形で

$$Y(T) = A_0 + A_1 T + A_2 \log T + A_3 T^{-1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

の形とした。実際の計算としては, 毎年 1 月 1 日の観測値を $X(T)$ として, 最少自乗法で A_0, A_1, A_2, A_3 の係数を求めた。これらを Fig. 1~4 に示す。次に

$$Z(T) = X(T) - Y(T) \quad \dots\dots\dots (3)$$

より観測値 $X(T)$ の標準 (平滑) 曲線 $Y(T)$ よりの片寄り $Z(T)$ を求めた。また, 現在の異常度は現在を除いた以前の資料から求めた $Y(T)$ を現在に外挿してこれと $X(T)$ とから $Z(T)$ を求めた。

月単位のような短期の変化に対しては, $Y(T)$ をそのまま変数変換により標準曲線 $Y(T, m)$ とした。ここに m は T 年の m 月であることを示す。このようにして

$$Z(T, m) = X(T, m) - Y(T, m) \quad \dots\dots\dots (4)$$

よりその月の異常度 $Z(T, m)$ を求めた。 $Z(T, m)$ にはいわゆる年変化が含まれているので, 10年以上の資料で

$$\bar{Z}(m) = \frac{1}{N} \sum_{T=1}^N Z(T, m), \quad m = 1, \dots, 12 \quad (\text{Jan., } \dots, \text{Dec.}), \\ T = 1, \dots, N \quad \dots\dots\dots (5)$$

を求め, さらに

$$ZA(T, m) = Z(T, m) - \bar{Z}(m) \quad \dots\dots\dots (6)$$

を以てその月の異常度 $ZA(T, m)$ とした。現在の観測精度では概して $ZA(T, m)$ で満たされるであろう。

降雨, 地下水位などの変化を $P(T, m)$ としたとき $Z(T, m)$ との間の重価関数を初期の段階として次のようにして求めた。 $Z(T, m), P(T, m)$ の長年の平均をそれぞれ $\bar{Z}(m), \bar{P}(m)$ としたとき

$$\bar{Z}(m) = \int_a^b \bar{P}(m-\tau) \varphi(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる重価関数 $\varphi(\tau)$ を考える。ここで

$$\bar{Z}(m) = A_0 + \sum_{k=1}^6 (A_k \cos km + B_k \sin km), \\ \bar{P}(m) = a_0 + \sum_{k=1}^6 (a_k \cos km + b_k \sin km), \quad \dots\dots\dots (7-1)$$

で表示できるとする。 P が降水量, 気温などでは式 (7) の積分区間の下限は $a=0$ である。しかし, 地下水位の場合は $a < 0$ のこともあるかもしれない。式 (7) と式 (7-1) とから

$$\varphi(\tau) = C_0 + \sum_{k=1}^6 (C_k \cos k\tau + S_k \sin k\tau), \\ C_0 = \frac{A_0}{12a_0}, \quad C_k = \frac{1}{6} \frac{a_k A_k + b_k B_k}{a_k^2 + b_k^2}, \quad S_k = \frac{1}{6} \frac{b_k A_k - a_k B_k}{a_k^2 + b_k^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と求められる⁴⁾。これらを用いると, $P(T, m)$ が現在地殻に与えている影響 $Z1(T, m)$ は

$$Z1(T, m) = \int_a^b \bar{P}(T, m-\tau) \varphi(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (9)$$

で与えられ, この影響を除いた異常度 $ZA(T, m)$ は

$$Z\Delta l(T, m) = Z(T, m) - Zl(T, m) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で与えることにする。

また、この重価関数 $\varphi(\tau)$ は平均年変化に使う便法によらずに直接に

$$Zl(T, m) - \bar{Z}(m) = \sum_{\tau=a}^b \{P(T, m-\tau) - \bar{P}(m-\tau)\} \varphi(\tau) \quad \dots\dots\dots (11)$$

と与えて、これを最少二乗法で求めることが考えられる。

さらに短期の毎日の変化に対しては、ありがちな欠測に対する処置、また、前からの積算値を求めることのわずらわしさをなくす方法として、毎日の日変動量を資料とすることとした。まず、長年月日の資料より

$$\bar{z}(d) = \sum_{T=1}^N z(T, d) / N, \quad d=1 \sim 365, \quad T=1, \dots, N \quad \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる標準日変化量を1月1日から数えた各日に対して求めておく。次いで、問題にしている日の変化量

$$z1(T, d) = z(T, d) - \bar{z}(d) \quad \dots\dots\dots (13)$$

を求め、同じように降水量などの $P(T, d)$ との間の重価関数 $\varphi(\tau)$ を同様にして求めて、その日迄の $P(T, d-\tau)$ の影響を次のようにして除いて、その日の異常値 $za(T, d)$ を求める。すなわち適当な日数 b を考え

$$za(T, d) = z1(T, d) - \sum_{\tau=0}^b p(T, d-\tau) \varphi(\tau) \quad \dots\dots\dots (14)$$

これまで述べた重価関数の求め方はすべて、例えば降雨を例に述べると、重価関数は降水量によらず一定であると仮定されている。この関数は降水量の大小により異なることは多くの研究者によって述べられている⁵⁾。また、季節によっても変わることも述べられている。しかし、季節による相異は逢坂山トンネルのようにあまり寒冷でない所では降水量の大小以外のことは現在の観測精度では有効な議論は困難である。

$\varphi(\tau)$ を降水量の関数と考えて一般的に解くことは容易ではない。今の所ひずみ量 $z(\tau)$ と降水量 P との関係を例えば

$$z(\tau) = (AP/\tau) \{\exp(-BP^\alpha/\tau)\} \quad \dots (15)$$

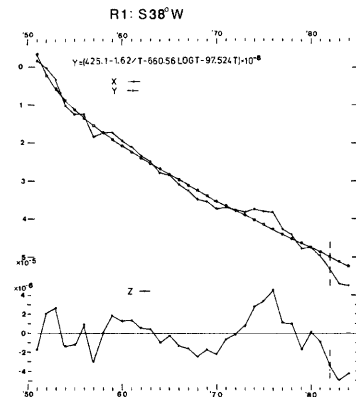


Fig. 1 Standard and anomalous extensions in the direction of S 38° W. X are the observed change, Y are the standard change, and Z are their anomalies.

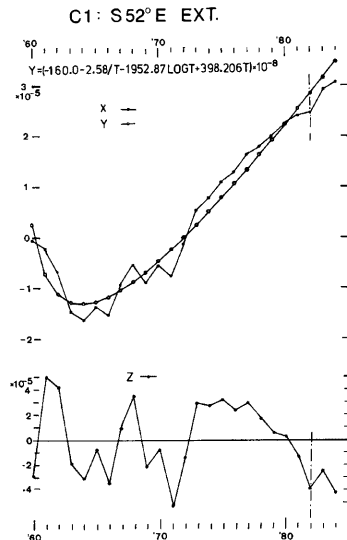


Fig. 2 Standard and anomalous extensions in the direction of S 52° E. X are the observed changes, Y are the standard changes, and Z are their anomalies.

のような形に仮定して試行計算により各係数を求めることとした。実際の計算では τ の代りに $\tau' = \tau + \alpha$ を用いる。ここに、 τ は雨が降ってからの経過日数、 α は 1 に比べて充分小さい任意の数である。

3. 解析 結果

長期変動について、R1 (S 38° W)-extension では、1951年 1 月 1 日より 1982年 1 月 1 日まで用いて求めた標準曲線は

$$Y(T) = (425.1 - 1.6T^{-1} - 660.6 \log T - 97.52T) \times 10^{-8}, \dots\dots\dots (I)$$

ここに $\log$ は自然対数、 T は 1951年 1 月 1 日より数えた年数である。Fig. 1 は R1 の観測値 $X(T)$ 、標準曲線 $Y(T)$ 、 $X(T)$ の $Y(T)$ からの偏差 $Z(T)$ を示す。1983年以降の $Y(T)$ は外挿による推定値を示す。

C1 (S 52° E)-extension: については 1960年 1 月 1 日を起源として同様に

$$Y(T) = (-160.0 - 2.6T^{-1} - 1952.9 \log T + 398.21T) \times 10^{-8}, \dots\dots\dots (II)$$

を求めた。これらを Fig. 2 に示す。

V5 (Vertical)-extension: この成分の標準曲線は同様に

$$Y(T) = (19.3 + 2.0T^{-1} - 567.3 \log T - 93.09T) \times 10^{-8}, \dots\dots\dots (III)$$

で、紀元は 1970年 1 月 1 日である。これに関するものを Fig. 3 に示す。

体積変化: 紀元を 1970年 1 月 1 日とした標準曲線は同様に

$$Y(T) = (-592.0 + 10.8T^{-1} + 535.2 \log T - 145.8T) \times 10^{-8}, \dots\dots\dots (IV)$$

これに関するものを Fig. 4 に示す。R1, C1, V5 の直線ひずみはいずれも 10 年以内にそれぞれの絶対値は 10^{-5} の桁を越えた。しかし、体積ひずみは 10 年で 6×10^{-6} であった。しかし、偏差値 $Z(T)$ はある程度大きく、他の直線ひずみのどれよりも小さいということはない。このことは塑性体の一般的性質と一致している。

現在、異常度は少々大きいけれども特に大きいと判定する程ではない。

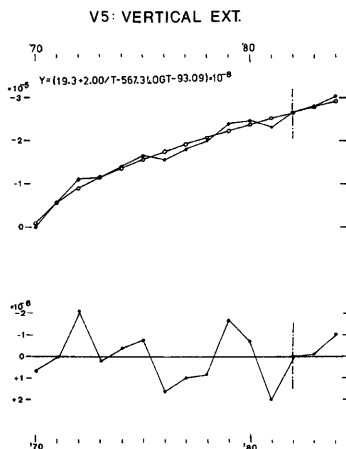


Fig. 3 Observed (solid circles), the standard (empty circles) and the anomalous extension in the direction of the vertical. The lower curve is the anomaly.

DILATATIONAL STRAIN

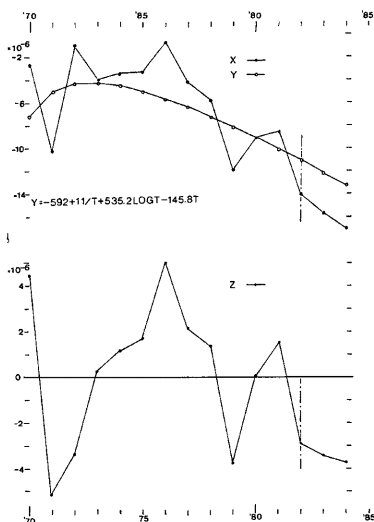


Fig. 4. Standard and anomalous dilatational strain. X are the observed changes, Y are the standard changes, and Z are their anomalies.

4. ひずみ偏差と降水量、地下水位との関係

平均年変化とフーリエ級数を用いる式(7)~(10)による方法の1例として、R1と降水量との関係を Fig. 5 に示す。最上段の R1 と降水量との関係を、第2段左のリサージュ図に書き換えるるとほとんど一つの円に近い形となる。R1 と降水量との間には約3ヶ月の位相差がある。第2段の右に、坑内温度と R1 との関係を示す。これもまたほとんど一つの円に近い形となる。R1, 降水量, 坑内温度はいずれも一年周期が優勢で、これらの間には大きな位相差がある。下から第2段の ϕ は R1 と降水量との間の重畳関数を経過月 τ に対して示している。最下段の棒グラフは近年の月降水量を示す。その上の黒丸の折線グラフは R1 の $Z(T, m)$ を示す。白丸の折線グラフは月降水量と重畳関数とで降雨の影響 $Z1(T, m)$ を求め式(10)の $ZA1(T, m)$ を求

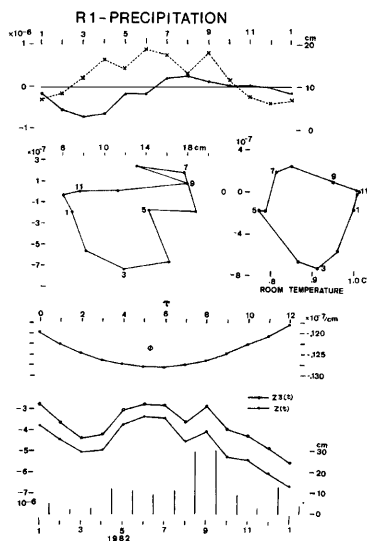


Fig. 5 Relation between the mean monthly annual values of R1 extension and those of the precipitation. The solid line shows the extension, and the dotted line shows the precipitation in the upper diagram. The left diagram shows the extension vs. the precipitation at third stage. The right diagram shows the extension vs. the room temperature at the third stage. The curve shows their weighted function ϕ at the second stage. The base diagram shows the curve of the observed anomalous extension (solid circles), their compensated values (empty circles) by the effect of the precipitation, and the spectra of the precipitation.

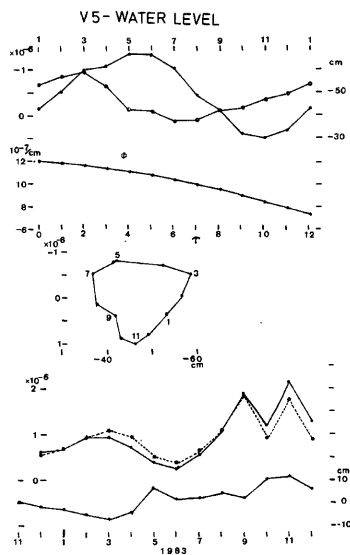


Fig. 6 Relation between the mean monthly annual values of V5 extension and those of the water-level. The solid circles show the extension, and the empty circles show the water-level at the upper stage diagram. The curve shows their weighted function ϕ at the third stage. The second stage diagram shows the extension vs. the water-level. The curves show the observed anomalies (solid circles), the compensated values (empty circles), and the water-level in the recent year at the base diagram.

めたものである。この2つの折線グラフの間には大きな相違は少い。月月の変化としたとき降雨の影響はほとんど一年周期のような形になってしまっているのであろう。

同様なことを $V5$ と地下水位について試みた。これを Fig. 6 に示す。この場合も $R1$ と降水量との関係のように式 (10) の補正は特に重要ではないようである。結論としては月月の値については式 (6) の値でほとんどその目的を達しているようである。

日日変化と降水量

大量の降雨があったときひずみの観測に大きな影響のあることは周知である。逢坂山トンネルでは多くの場合その影響は僅かの日数で回復の方向に転じ、その変化は間もなく見分け難くなる。一見影響の一部しか回復しないかの如く極く緩慢な回復が続けているようである Fig. 7, Fig. 8。

例として Fig. 9 に1983年9月～12月の $V5$ の日日の変化量と日降水量との関係を示す。ここでは式 (12)～(13)の方法によって $z1(T, d)$ を示している。また重畳関数 ϕ は式 (14) を使って求めた。この期間の降雨の影響は9月28日の25.8 cmの豪雨に主に支配されている。従ってこの ϕ の値もこのような豪雨に対するものである。この場合 ϕ は雨後4～5日目に絶対値が極大となっているけれども5 cm以下の降雨ではほとんど1日以内に極大が現れるのが常例である。

Fig. 10 は1983年6月～7月の降水量と $V5$ の $z1(T, d)$ とを示している。重畳関数は降水量によって変わ

ることを考慮して、降雨の影響 $z1(r)$ を

$$z1(r) = 3.4 \times 10^{-8} P r \exp(-0.35r/P)$$

と仮定した。ここに r は雨後の経過日数、 P は降水量 (cm) である。Fig. 10 の白丸の折線グラフは $z1(r)$

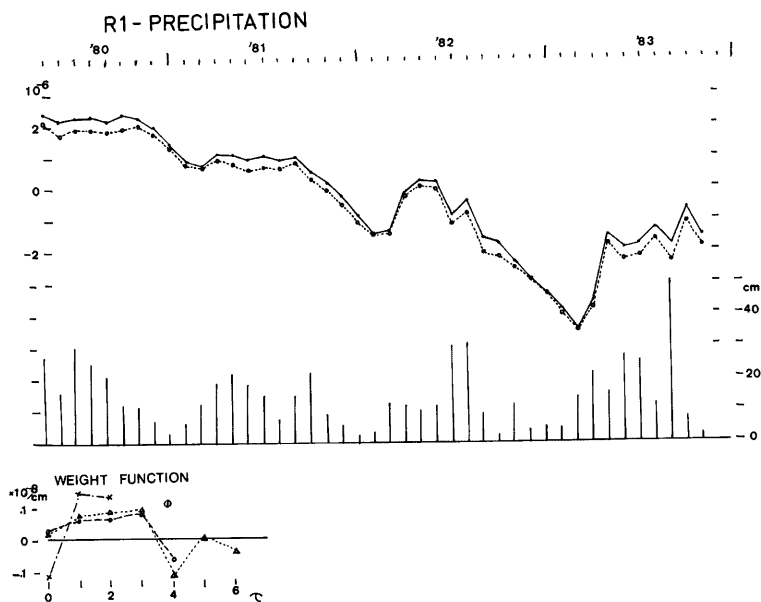


Fig. 7 The monthly values of $R1$ extension and the monthly precipitation at the recent years. The solid circles show the anomalies of the monthly extension, and the empty circles show their compensated values by the precipitation. The spectra show the monthly precipitations.

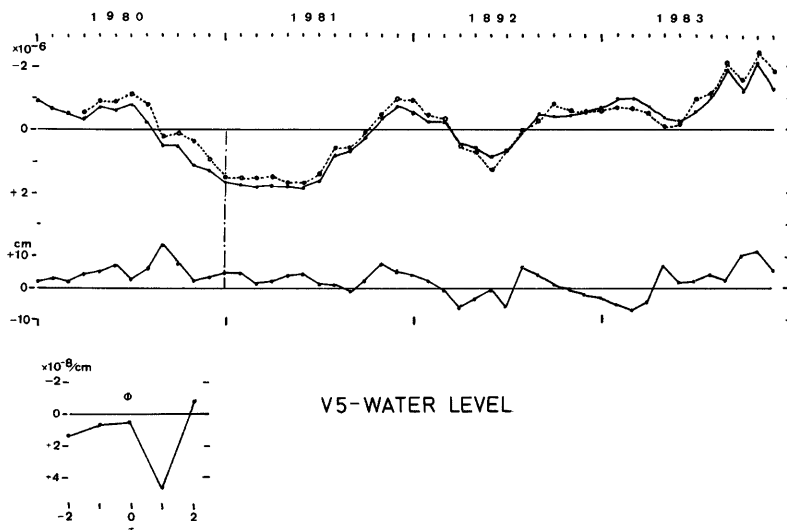


Fig. 8 The relation between V5 extension and the water-level at the recent years. The solid circles show the observed anomalies of V5, and the empty circles show their compensated values by the effect of the water-level. The middle stage diagram shows the monthly water-level. The base diagram shows their weighted function Φ .

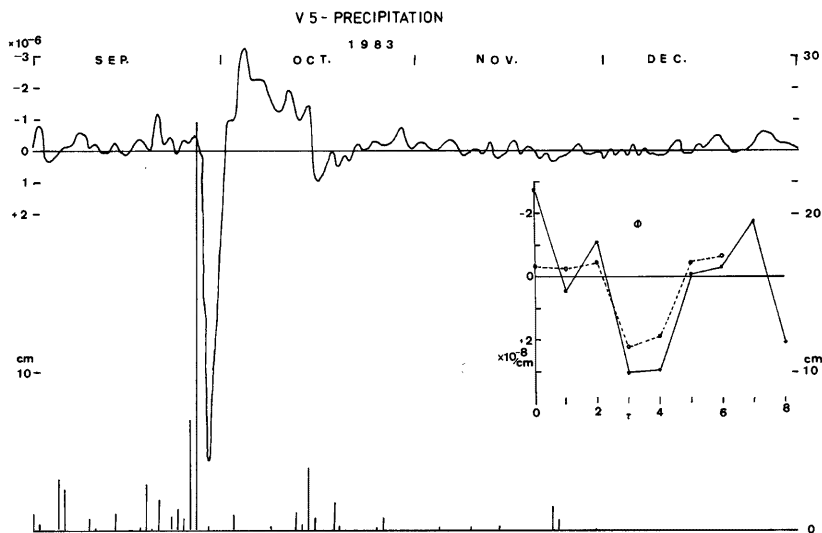


Fig. 9 The daily changes of the V5 extension (full line) and those of the precipitation (spectra) on September to December in 1983. The middle stage diagram shows their weighted function Φ .

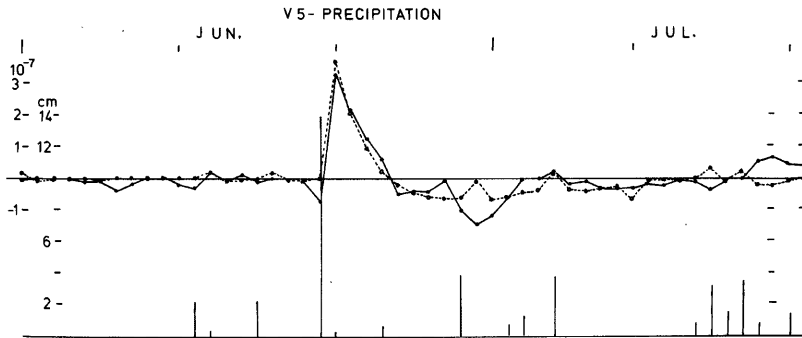


Fig. 10 Daily changes of V5 extension curve and those of the precipitation spectra on June to July in 1983. The solid curve shows the daily change of V5 extension, and the empty circles show their calculated changes by the precipitations.

の積算曲線を示す。こうして求めた降水の影響は大むね $\alpha_1(T, d)$ と一致しているが、その一致はまだ不充分であろう。R1, C1 に対しては暫定的に

$$R1: 2.8 \times 10^{-8} P \tau \exp(-0.35 \tau / P),$$

$$C1: -1.4 \times 10^{-8} P \tau \exp(-0.35 \tau / P).$$

と求めた。この式は式(15)と少し型が異っている。式の形、係数については今後更に多くの資料と照合して修正したい。勿論、これらの式は旧逢坂山トンネルのそれぞれの成分固有のもので一般的なものではない。

これらの解析計算は1つの成分の1つのプロセスはどれも 10K バイト以内のものであったのですべてパソコン(HC-20)を用いた。

末筆ながらここに述べた観測に使用した計器のあるものは地球物理教室の工作室の諸氏に工作をお願いした。森本喜一郎、小林年夫、西正男、田中耕三郎、藤井伸蔵、多中勝美の諸氏に御礼申し上げます。また、最近、観測に同行された藤井和成氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 小沢泉夫, 逢坂山トンネルにおける地殻変動の観測, 地震, 第2輯, Vol. 27, 1974, pp. 313-320.
- 2) Ozawa, I., On the extensometer whose magnifier is a Zöllner suspension type tiltmeter, and the observations of the tidal strain by means of the instruments, Annali di Geofisica, Vol. 18, 1965, pp. 263-278.
- 3) 例えば
横堀武夫, 材料強度学, 1964, 岩波全書, pp. 242-269.
Andrade E. N. DAC., On the viscous flow in metals and allied phenomena, Proc. Roy. Soc., London, A 84, 1910, pp. 1-12.
- 4) Tsuboi, C., A problem of weighted mean, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo, Vol. 19, 1941, pp. 458-475.
- 5) 例えば
二瓶信一, 検皮久義, 三ヶ日における押込式体積歪計の降雨によるシミュレーション, 地震学会講演予稿集, 1981, No. 2, p. 111.
田中寅夫, 昭和58年度京大防災研究所研究発表講演会, 古沢 保, 同上講演会.