

埋込式体積歪データの精密補正及び異常識別について

石垣祐三*

Precise Corrections and Detecting Abnormal Changes of Volume Strainmeter Data

Yuzo ISHIGAKI

(Received June 13, 1995 : Accepted September 26, 1995)

Abstract

Borehole type volume strainmeters are now in operation at 16 locations in the Tokai District. As a first step of the study, their responses to barometric change and precipitation have been investigated.

For barometric change time-lag effect and seasonal variation of response coefficient changes are investigated. As a result, the single correlation method now in operation is available for practical use.

To remove the effect of precipitation the tank-model method and autoregressive (AR) model method are applied. Smooth correlation data wave obtained by the AR-model method rather than the tank-model.

Next using standard deviations of the corrected volume strainmeter data, some examinations were done to detect abnormal changes.

The examinations showed, volume strain changes at Higashi-izu associated with earthquake swarms eastern off Izu Peninsula, changes of unknown origin around the Omaezaki in 1987 and 1992, and so on are detected clearly.

§ 1. はじめに

気象庁では、東海地震の短期直前予知を目的として、東海地方の16地点において埋込式体積歪計（以下、体積歪計と記す）による観測を実施し、その変化を地震防災対策強化地域判定会（以下、判定会と記す）招集の基準としている。体積歪データには気圧変化等種々の環境の影響が含まれている。このデータを高精度で監視するために、現在では、リアルタイムで気圧補正（檜皮ら、1983）、潮汐補正（石黒ら、1984）を行っている。しかし、降水の影響を定量的にリアルタイムで補正する技術についてはまだ確立されていない。

本稿では、降水量データを用いて時間値レベルで雨量補正を行う方法について紹介する。

また、この補正方法により、精密に補正された体積歪データを用い、統計処理を行った後、客観的な異常識別を試みた。

その結果、伊豆半島東方沖の群発地震による体積歪変化、御前崎周辺の観測点の1987年及び1992年に集中した

変化等が明瞭に識別された。

§ 2. 体積歪データの補正

異常識別を行うための前処理として、気圧、降水等の影響の除去について考える。なお、本節以降は特にことわらないかぎり、時系列は時間値データ（体積歪、気圧データ：正時を中心とする5～10分平均、降水量：前1時間雨量）を用い、対象とする体積歪計の観測地点は、東海地区16地点とする。

2.1 気圧補正

檜皮ら（1983）は、次式による気圧補正を行い、良好な補正結果を得た。

$$Y' = Y + aP + C \quad (1)$$

Y' : 気圧補正歪 Y : 観測した歪

a : 一回帰係数（以下、気圧係数）

P : 観測した気圧 C : 定数

この方法による気圧補正方法を確かめるために次の2点について調査した。

a) 気圧の影響の遅延効果があるか。

b) 気圧係数の季節変化があるか。

まず、a) のために(1)式を次式のように拡張する。

* 地震津波監視課

* Earthquake and Tsunami Observation Division

$$Y'_n = Y_n + \sum_{i=0}^m a_i P_{n-i} + C \quad (2)$$

(2)式の最大遅延時間 m 及び各遅延時間毎の気圧係数の算出には、AIC最小化法を用いる(赤池ら(1972))。なお、 $m=0$ の時は、(2)式は、(1)式と同一となる。

データの前処理としては、降水の影響を避けるために、降水のない期間を用い、気圧、体積歪データとも1次式によるトレンド除去を行い、潮汐成分の除去のため、12時間、24時間のバンドカットフィルターをかけた後、増川ら(1983)の方法と同様に30～80時間のバンドパスフィルターをかけた。最大遅延時間は24時間まで計算した。結果を第1表に示す。

第1表によると、特に一定の次数を示す地点はない。そして、ほとんどの地点で次数0となった期間があること、決定された係数は0次の係数が他の係数に比べて1桁以上大きいこと、遅延効果のあるモデルで補正しても、実用レベルでは大差がなく、必ずしも単相関の場合よりもよいとはいえないこと(第1図)などが得られた。

今回の解析方法ではノイズ等の混入によるデータの不安定から求めるAIC最小となる解が定まらないことが

考えられ、時間値レベルの気圧の遅延効果が全く存在しないかどうかについては不明である。実用レベルでは気圧の遅延効果がないとしても問題はないと考えられる。

次にb)のために、遅延効果なしとして、1回の解析対象期間(スパン)を14日間、次の解析のスパンのはじめを前の対象期間のはじめからずらす期間(シフト)を3日間として順次解析し、なるべく1年以上の長い期間を対象に各地点の気圧係数を求め、相関のよいところをスパンの中央に対応する位置にプロットした(第2図a, b, c)。

この結果からは特に季節変化は認められない。また、同一観測点の1992年1月と9月の体積歪及び気圧データ(上述のフィルター処理後の)時間値プロット(第3図)からも有意の差は認められない。

1回の降水に対して降水時間帯は気圧の低い期間にほぼ一致しており、このため気圧低下による体積歪の伸びと、降水による縮み量とが一般的な観測点では相殺される傾向にある。この傾向は、降水量の多い暖候期において顕著となり、この期間の解析結果は、相関が悪くなるとともに見かけの気圧係数は小さくなる。降水により体

Table 1 Order of time-lag model that gives minimum AIC

Numbers of the table indicate the order of time-lag model that gives minimum AIC on the regression analysis for barometric response.

(unit:hour)

The symbol “-” indicates that results could not be obtained because of noise contamination.

The symbol ‘①’, ‘②’, ‘③’, ‘④’, ‘⑤’, ‘⑥’ correspond to the analysis period.

①91. Jan.25-91. Feb.9

②92. Jul.18-92. Jul.31

③93. Feb.7-93. Feb.16

④93. Apr.13-93. Apr.21

⑤93. Nov.21-93. Nov.29

⑥93. Dec.31-94. Jan.9

	Gamagori	tenryu	Kawane	Fujieda	Shimizu	Fuji	Toi	Higasiizu
① Order	0	2 2	2 3	2	2	2	4	1 2
② Order	0	5	0	0	4	0	2	-
③ Order	2	1 0	1	3	1 0	2 4	0	1
④ Order	1 4	0	0	0	1 1	5	1 1	1 7
⑤ Order	0	2 4	0	0	3	2 4	6	9
⑥ Order	0	0	2	0	1	0	0	1 2

	Hamaoka	Haibara	Irako	Mikkabi	Omaezaki	Shizuoka	Irozaki	Ajiro
① Order	6	2	1 3	8	2	2 2	-	8
② Order	-	0	1 0	1 7	6	6	-	1 4
③ Order	1	2 4	5	1 7	2 0	3	0	0
④ Order	4	0	1 2	0	1 2	1 7	2 4	2 3
⑤ Order	-	2 4	1 1	1	0	4	1 2	2 3
⑥ Order	0	0	3	0	2	5	1	1 2

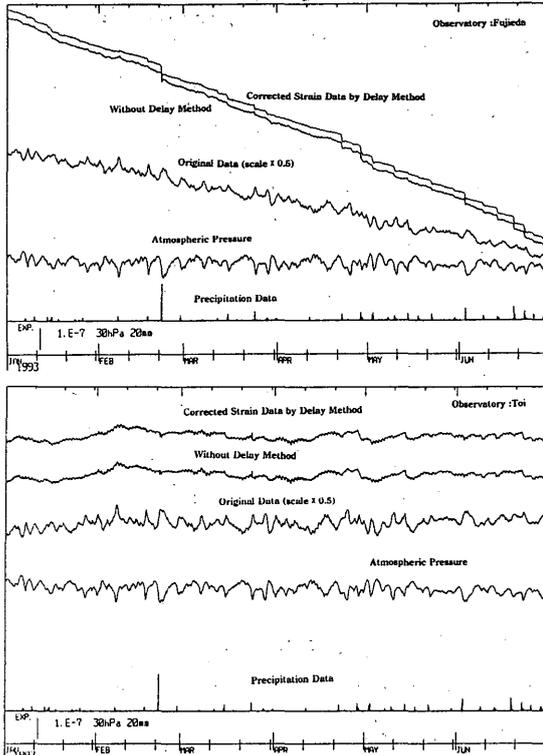


Fig.1 Comparison of corrected barometric effect between with delay and without delay method

積歪が伸びる石廊崎（本稿の対象観測点では同観測点と三ヶ日だけがこの傾向にある）の気圧係数のプロット（第2図c）では、夏期は相関係数が悪いためプロットされていないが、3月から4月に気圧係数が見かけ上大きくなる傾向が見られる。

楡皮ら（1983）は、各観測点の各月の係数をプロットして季節による気圧変動を論じているが、これらは、相関係数として0.90まで許した値を扱っており、先程述べた傾向が見られる。地下水位が年周期を示すことは一般に知られており、地下水位により地盤の状態が変化し、それにより気圧係数が変化することは可能性として考えられる。しかし、これらの変化はスパンを1月程度と今回の調査より長く取ったために主に降水のため気圧係数の推定に誤差が混入した時期も議論の対象に含めたことによる見かけの係数の変化であると筆者は考える。

この節における結論としては、体積歪に対する気圧補正は、遅延効果及び季節変化はないとしても実用上は差し支えないと考える。

2.2 潮汐補正

本稿では、特に潮汐についての調査は行わなかった。

気象庁では、BAYTAP-Gにより、あらかじめ求めておいた潮汐応答係数を用いた潮汐補正を行っている。これは弾性体としての地球潮汐のみならず、海洋潮汐による荷重変化の影響まで含めた変動の除去を目的としており、ほとんどの地点で良好に補正されている。ただし、海岸線に近い地点（石廊崎、網代等）ではもともとの海洋潮汐の影響が大きく十分には取り除かれていない。今後この問題についての調査が含まれる。

2.3 降水補正

体積歪計データは、一般に降水直後に縮み、その後数日間を掛けてゆっくりと伸びて、元のトレンドに戻る。

降水による影響を推定するには、a) タンクモデル、b) ARモデルの2つの方法があり、本稿ではこれらの方法を試みた。また、この他に地下水位を測定し、その結果を用いて補正する方法（小泉・吉田（1989））がある。本稿では、観測点のすべてには水位計が設置されていないこと、また、最近更新された体積歪計はケーシングと坑の隙間がフルホールセメンティングで埋設され、観測井内の水位は帯水層付近に設けられた通水孔周辺の水圧を反映するが、その変化は個々の降水には対応していないことから、地下水位を用いた方法については取り扱っていない。

a) タンクモデルによる補正では、二瓶ら（1983）が三ヶ日観測点において浜松測候所の降水量から5段のタンクモデルを用いて長周期の降水応答を解析している。本稿では、一般性のある2段のタンクモデルによる方法（田中、1979）を用いた。適用したタンクモデルの原理を簡単に示す（第4図）。

ここでE：蒸発定数（mm/hour）、R：敷居値（mm）、A1、A2：流出時定数（1/hour）、H1、H2：ボックス1、2の水位（mm）、dt：単位時間、P：dt時間の雨量（mm）、H0：ボックス1の最高位（mm）と置き、

$$Hr \begin{cases} = H1(t) - R & (H1(t) \geq R) \\ = 0 & (H1(t) < R) \end{cases} \quad (3)$$

と定義すると

$$H1(t+dt) \begin{cases} = H1(t) - A1 \cdot Hr \cdot dt + P(t:dt) - E \cdot dt & (H1 < H0) \\ = H0 & (H1 \geq H0) \end{cases} \quad (4)$$

である。これらを用いて

$$H2(t+dt) = (1 - A2 \cdot dt) \cdot H2(t) + A1 \cdot Hr \cdot dt \quad (5)$$

ここから得られるH2と対象する物理量（体積歪）を結びつけて考える。解析に当たっては主にパラメータA1、A2を試行錯誤により変えながら、H2の水位と体積歪データの時系列の形を合わせ、さらに他のパラメータについても調整していく。1989年のデータで大まかな

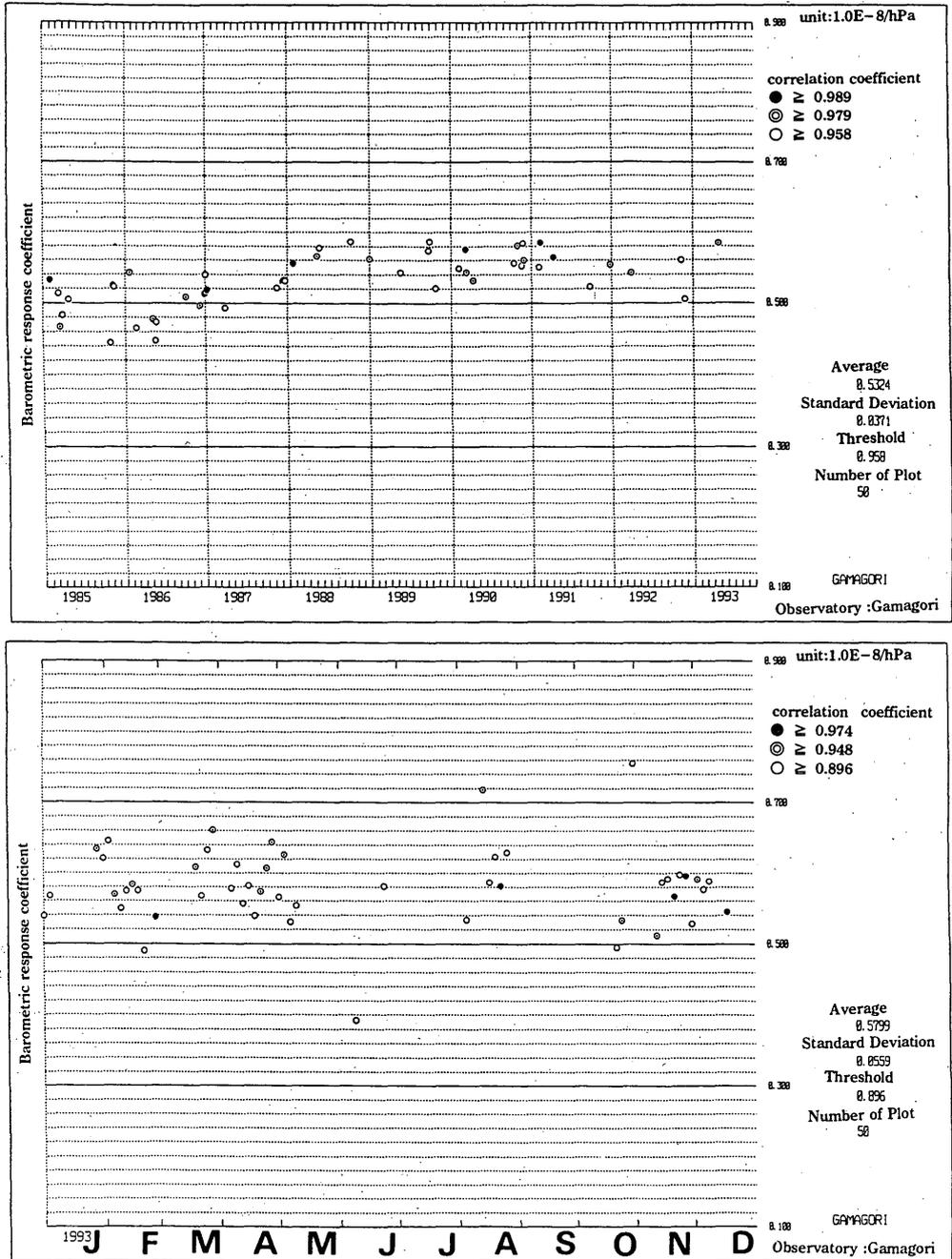


Fig.2 Barometric response coefficients change (Gamagori(a), Fujieda(b) and Irozaki(c)).
Periods: upper figure 1985-1993 lower figure 1993

パラメータを合わせ、これを1985～1991年のデータに当てはめる方法を取った。水位はほぼ年周期で変動することが降水量などから推察されることから、H1、H2の初期値はいったん0とし、1985年の水位を降水量を与え

て1回計算し、得られたH1、H2を初期値として用い、1985年から計算する方法をとった。ここから得られるH2に、更に適当な比例係数(歪/水位)を掛けて補正するため、パラメータは全部で6個(H0、E、A1、A

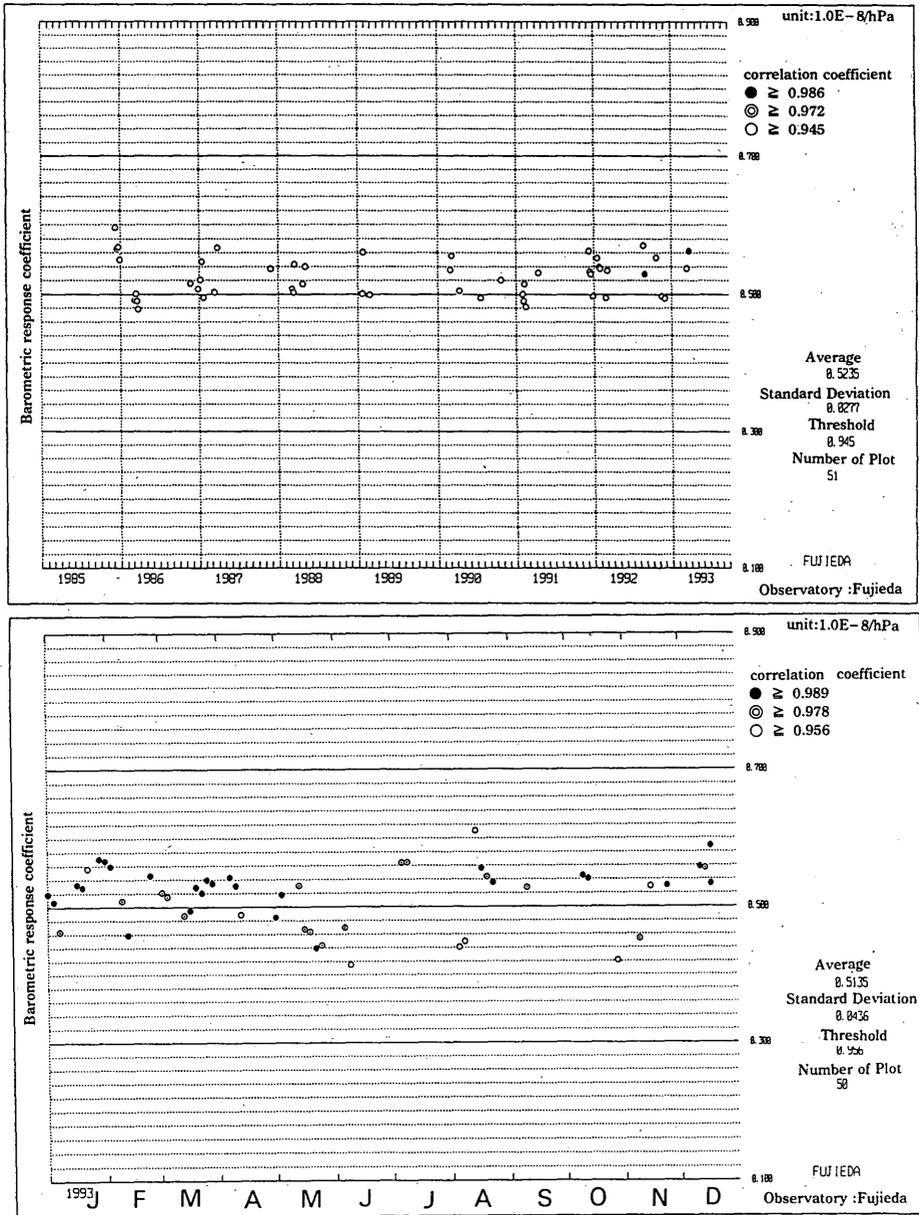


Fig.2-b

2, R, H2と体積歪の比例係数)である。第6図に補正結果の数例をARモデルを用いた補正と併せて示す。各地点のパラメータは付表1に示してある。

タンクモデルの利点としては、非線形の応答をするモデルであるので、降水量に対する歪変化量の頭打ちや過去の降水履歴により出力/入力が増えてくるのが表現できること、また解析に当たっては少数のパラメータで短時間の降水応答から年周期にいたるまでの長期応答ま

で補正でき、モデルの具体的なイメージが湧くことなど挙げられる。一方欠点としては、パラメータの推定のために解析者の試行錯誤が必要であること、任意性があること、ARモデルと比べて降水直後の当てはまりが悪いこと等が挙げられる。

次にb) ARモデルについて述べる。

解析方法は、基本的に地下水位データにおける降水の影響補正を行った松本・高橋(1993)の方法を踏襲した。

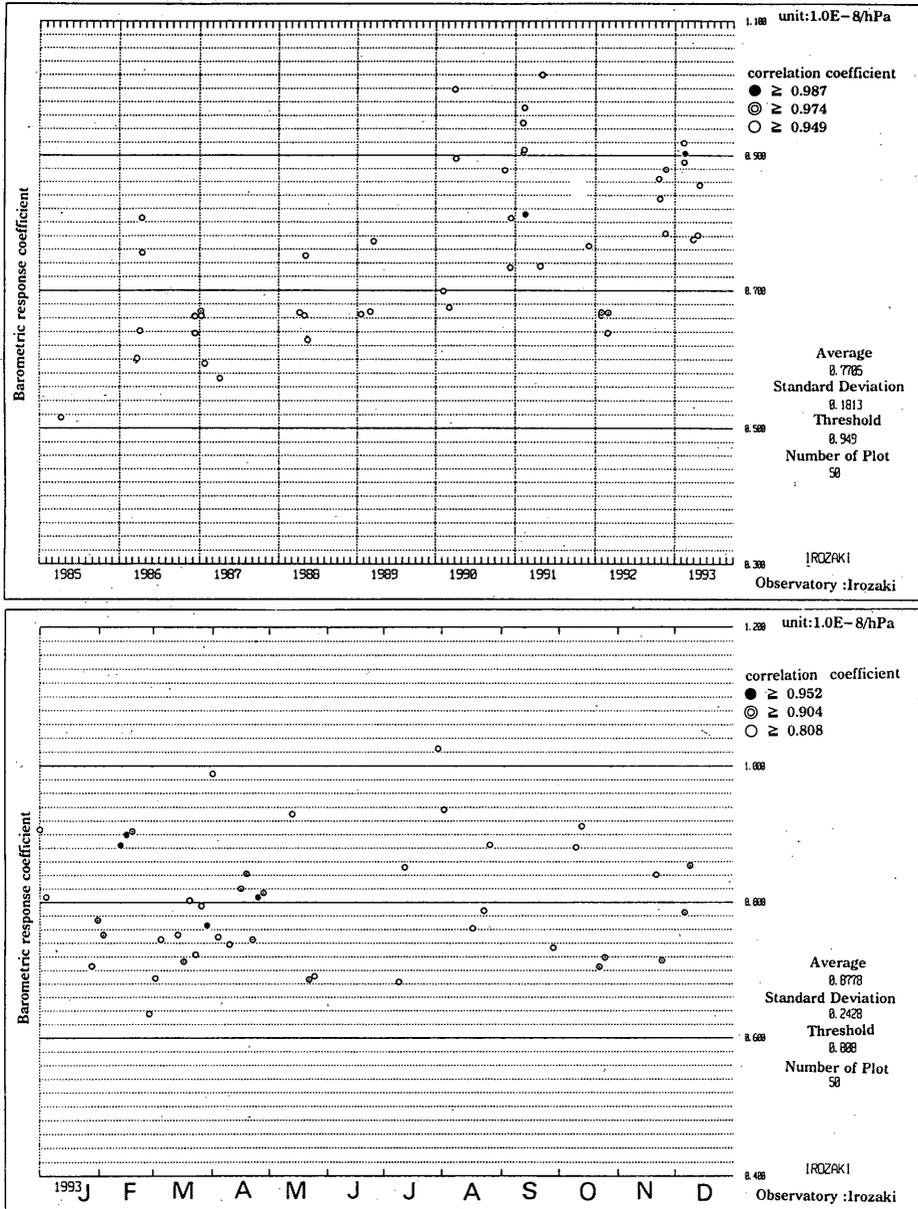


Fig.2-c

まず体積歪データが次式で表されると考える。

$$S_n = Tr_n + P_n + T_n + R_n + \omega_n \quad (6)$$

ここで S: 原データ

Tr: トレンド P: 気圧の影響

T: 潮汐の影響 R: 降水の影響

ω : 観測雑音 n: 観測時

気圧, 潮汐は従来の方法(一次相関とBAYTAP-G)を使用して, 補正した。

トレンドは, カルマンフィルターで適当な次数及びトレードオフパラメータを推定し, 除去した(第5図)。松本ら(1993)は, 顕著なトレンドの無い地下水位データを解析対象としている。体積歪データは各観測点毎のトレンドが大きく, 体積歪データに対する降水の影響をAR解析するためには, まずトレンドを除く必要がある。降水の影響は例えば数100時間にも及ぶことがあると考えられている(例えば樺根(1980))。ここでいう「トレ

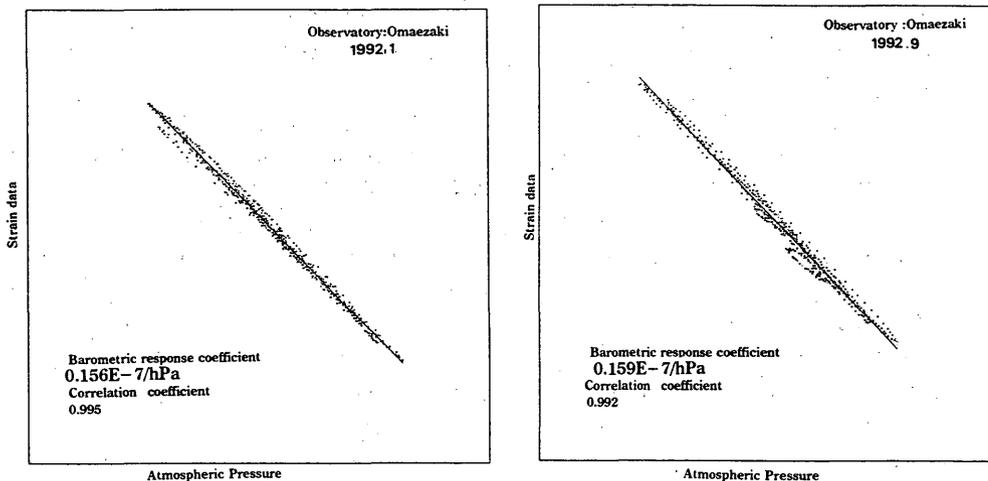


Fig.3 Barometric and volume strain filtered data correlation in Jan. and Sep, 1992, for Omaezaki.

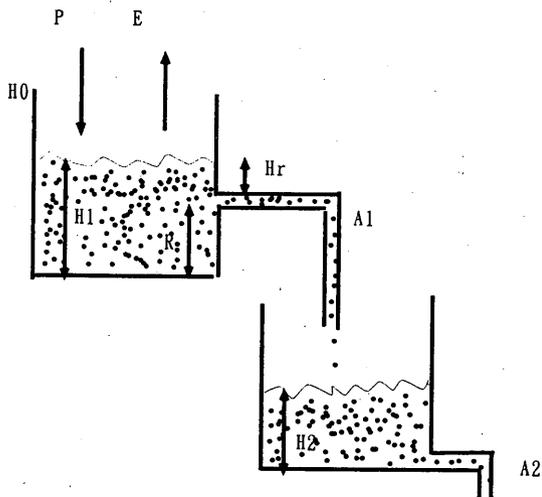


Fig.4 Schematic picture of two boxes tank-model.
See the text detail.

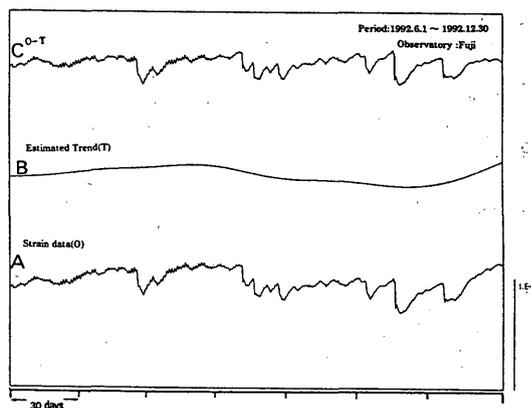


Fig.5 Estimation of trend by Calman filter method
A: Original strain data (0) but, barometric and tidal responses are reduced.
B: Estimated trend(T)
C: O-T

「ノイズの除去」とは、地殻変動本来の長期的な変動成分と共に長い周期の降水による変動も除去していることになる。従って、時間値レベルの議論では、高々数日程度の降水の影響を対象としていることを念頭に置き解析を進める。

これらの影響を除去すると、上式との残差 Y_n は、

$$Y_n = S_n - (T r_n + P_n + T_n) = R_n + \omega_n \quad (7)$$

となる。これを降水量 r_n を用いて

$$Y_n = \sum_{i=1}^m c_i Y_{n-i} + \sum_{i=0}^{m-1} d_i r_{n-i} + \varepsilon_n \quad (8)$$

(ここで、 m : 最大遅延時間; ε : 観測雑音) と考え、AIC 最小化法により、 m 及び降雨の影響の係数 c_i, d_i ($i=1, m$) を求める。そして得られた係数を用いて、

$$R_n = \sum_{i=1}^m c_i R_{n-i} + \sum_{i=0}^{m-1} d_i r_{n-i} \quad (9)$$

を求め、補正する。ここで、 d_i だけ $i=0$ からとしているのは、降水直後の応答を考慮に入れるためであり、次数を c_i, d_i で一致させているのは雨量に対する体積歪応答を式(8)で表現することに由来する(松本ら(1993))。

最大遅延時間は40時間まで計算した。

解析結果の数例をタンクモデルによる補正とともに第6図に示す。タンクモデルによる補正より、ARモデルによる補正の方が滑らかな補正值が得られている。タンクモデルは同時刻の雨量データを考慮することができないため、降水直後の応答を補正することができなかったが、ARモデルではそれが改善されている。ただし、地点によっては、降水補正が完全ではない。その原因としては、

○アメダス地点と歪観測地点の距離が遠い。

○春先の雪どけ等直後の降水によらない季節による地下水位の長期的変動があり、AR係数が解析期間により若干変化する（一般に冬期間の解析は同じ雨量に対する変動が小さくなる）。

○あまりに多量の降水では、線形の関係が成り立たない。
○体積歪データと降水データの時間値の定義の相違等が考えられる。

ARモデルによる補正係数を付表2、付図1に示した。付図1は、横軸に次数 m をとり、自己回帰係数(c_i)、雨量補正係数(d_i)をプロットしたものである。 m の次数は、概ね30～32時間程度になった。係数は c_i 、 d_i とも、ほとんどの地点ではおよそ3次までの次数の係数がそれより高い次数の係数に比べて1桁程度大きな値である。

降雨に関する補正係数(R)で、直後は降水による縮み(−)の後に伸び(+)の係数がある。これは、降雨直後の重し効果が、間隙水圧効果に変わるとを唆していると考えられる(吉田ら(1984))。

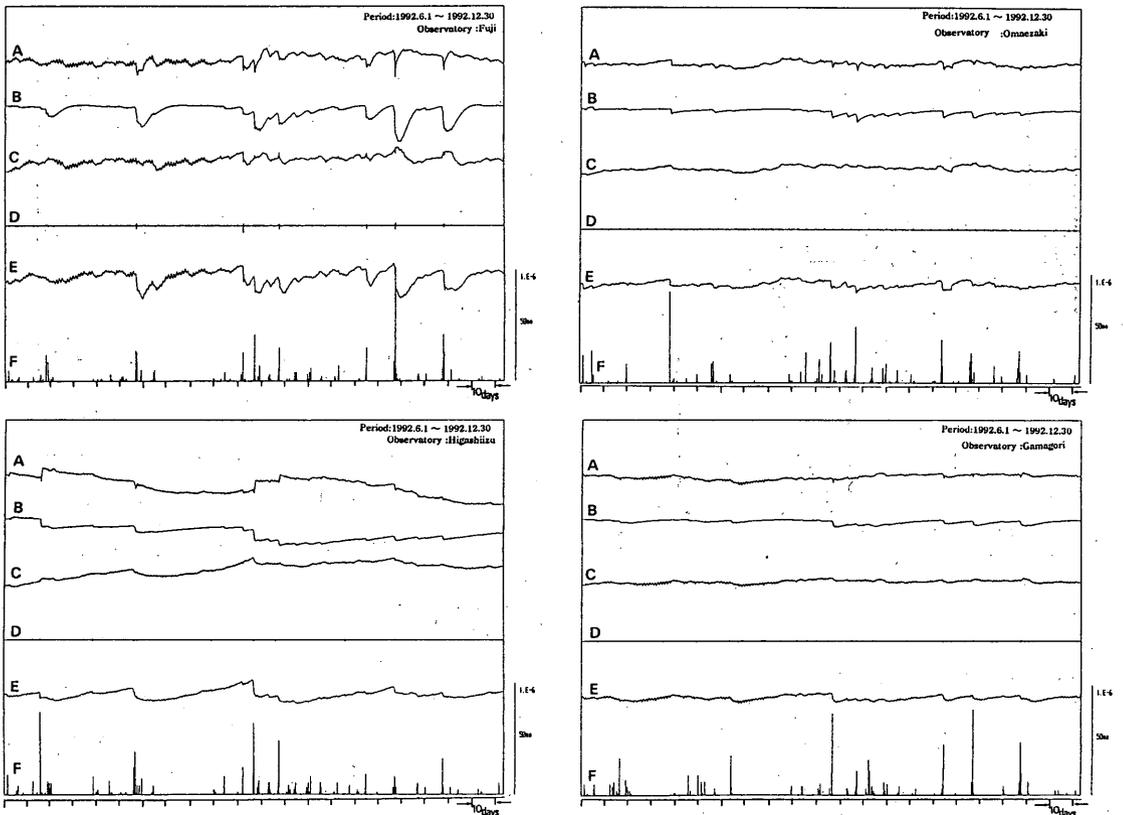


Fig.6 Samples of auto-regression analysis for the volume strainmeter (hourly data)

- A: corrected data by two boxes tank-model method
- B: estimated precipitation response using auto-regressive model
- C: corrected using auto-regressive model (E-B)
- D: residual
- E: original data (trend and barometric and tidal responses are reduced)
- F: observed precipitation data

次に数日より長い周期の降水の影響について考える。時間値の計算処理では無理があることから、体積歪データは日平均値、降水量は日降水量を使用し、どの程度降水の影響が推定されるのか調べた。方法は、基本的に時間値の降水補正と同様である。

気圧、潮汐の補正は従来の方法により補正し、トレンドは各観測点の永年変化の形に合わせ直線か2次式で除去する。

日降水量 r を用いて

$$R_n = \sum_{i=1}^k c'_i R_{n-i} + \sum_{i=0}^k d'_i r_{n-i} \quad (10)$$

(R : 降水の影響) を求め、補正する。

プログラムは、TIMSAC78のMULMARを一部変更して使用した。最大LAGは40日間で計算した。AIC最小を取る k の値については、26~27日間になった。

解析結果の1部を第7図に示した。三ヶ日は降水による伸び変化が大きく、かつその影響が長く続く観測点であり、その影響はほぼ補正されている。しかし降水によらない体積歪データのゆらぎと降水補正後の変動がほぼ同レベルである。このことは清水についてもいえる。各観測点の周期1月以上の変動はこの降水補正を行った後も大きく残る傾向があり、次節以降で述べる時系列上の異常を探す方法で1月程度以上の異常識別を行うことは難しいと考えられる。しかし、長期間の時系列変化において目視により異常が認められた場合に、上述の方法は、降水による体積歪データの変動かどうかを判断する補助資料として活用できると考えられる。

本節では体積歪データの降水補正について述べた。その結果、ARモデルによる時間値レベルの補正により1月程度以内の異常変化を降水による雑音と区別できる可能性を得た。

§ 3. 異常識別

気圧、潮汐、降水による影響を除いた体積歪データを用いた異常識別の方法について考える。

3.1 時間差分による統計処理

本節の目的は、体積歪の変動状況を各地点のデータ毎に一定の手法を用いてとりまとめ、異常が出た際に、それが“どの程度”の異常なのかを知るための基礎データを得ることである。データとしては1985~1992年の気圧、潮汐補正及びARモデルによる降水補正後の時間値を用いた。ただし、気圧係数はスパン14日、シフト3日で各年毎に解析し、相関係数がよい方から約20個の平均による値を採用している。このような処理を行う意味は、主に体積歪計地上増幅部の基盤交換またはセンサーの埋設

状況の経年変化等により物理換算定数(歪/電圧)の変更を行った際、この変更時期が遅れた場合及び誤差が大きかった場合に気圧係数が見かけ変動することに対処するためである。また、作業、停電等明らかに人為的原因とわかっているデータの変動については、24時間差分の標準偏差(およそ $1.0E-8$)以内の変動に収まるまでの時間帯を欠測扱いとした。ただし、人為的もしくは機械的との疑いがある個所でも、原因が不明の場合はそのままデータとして採用している。

同一観測点の長期間のデータを使用するため、前処理として各観測点毎に適切なトレンド除去を行う。トレンド除去の方法は全期間を通じて各観測点の永年変化の形により1次式、もしくは2次式で行った。ただし、東伊豆は、1990年にセンサーの改修を行っているので前後2つの時系列に分け、解析した。この後、各観測点について時間間隔を変えて(1~24時間の1時間毎、及び2~48日間の2日間毎)時間値の差分をとり、伸び(+), 縮み(-)方向別の標準偏差を第8図のような方法でそれぞれ標準偏差($\sigma + \sigma -$)を求めた。これは、一般的に観測点毎に降水補正及びトレンド除去を行った場合でも伸び、縮み方向に大小があるために実際に異常識別を行う上での指標となる数字を得る作業である。結果の一部を第2表に示した。第2表は、各観測点の3時間及び24時間差分の標準偏差を5倍したものを示したもので、24時間差分は降水補正を行わない場合を併せて示してある。

全体として、降水補正を行わない場合に比べ、補正を行うことにより σ は $1/2 \sim 2/3$ 程度になっている。それと共に、伸び方向と縮み方向の σ がほぼ同じ値の観測点が多くなっている。このことは、次節の第10図の変動の時系列の例を併せみると、観測値のゆらぎ(本来の地殻変動のゆらぎ+補正しきれなかった残差)がホワイトノイズ的に発生していることを示唆している。

第2表で降水補正を行った後も標準偏差が大きいのは、川根、清水、富士、石廊崎、東伊豆、網代があげられ、これらの観測点に共通することは降水による変動が非常に大きいことである。川根を除くと糸魚川-静岡線より西の観測点は小さい標準偏差が得られている。このことは、これらの観測点が東の観測点より比較的早く堅い地層に埋設されていることと関係していると考えられる。

また、3時間及び24時間の5 σ が大きく変わらないことも特徴としてあげられる。このことは、24時間差分においては、データに潮汐成分が補正後も残っている場合でもその影響が取り除かれていることが考えられ、差分をとる時間帯としては有効であることを示している。

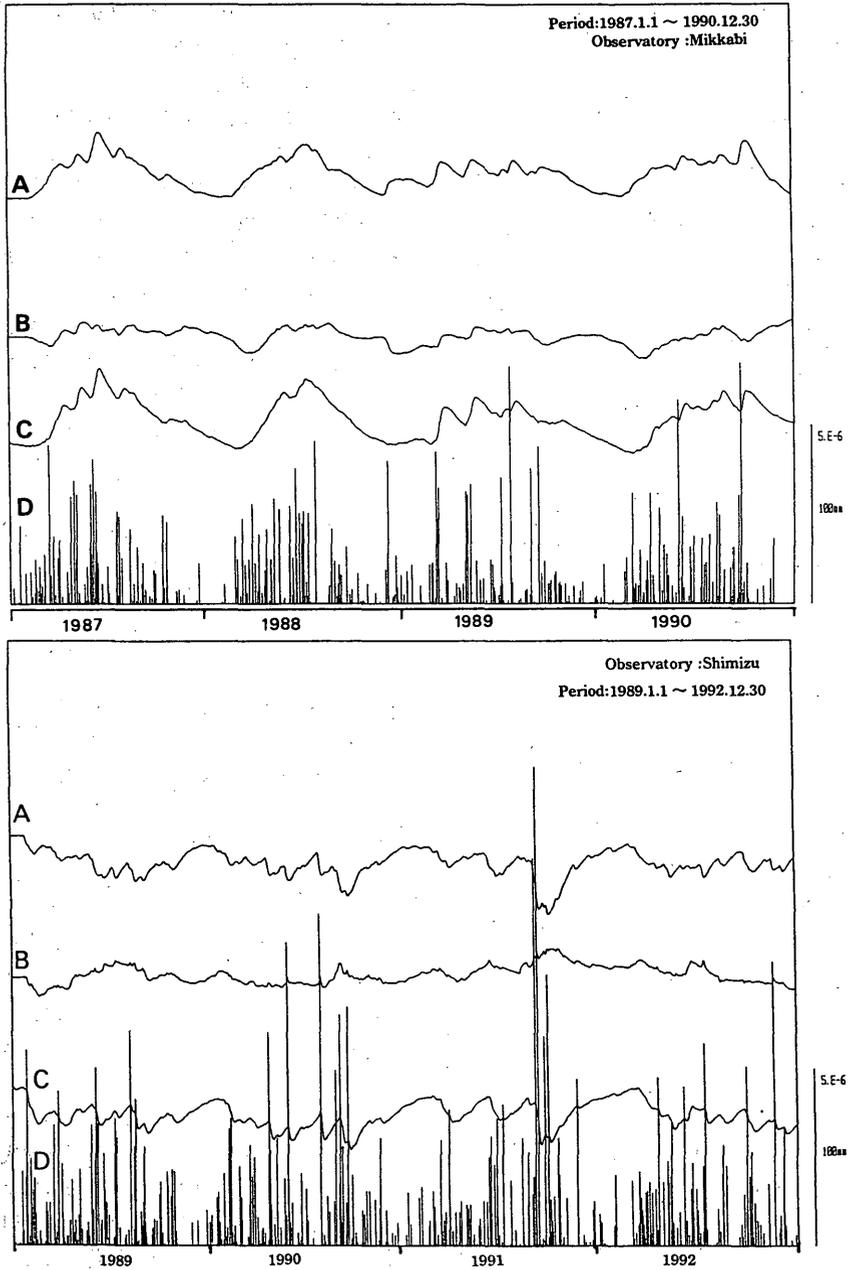


Fig.7 Samples of auto-regressive analysis for the volume strainmeter (daily data)
 A: estimated precipitation response using auto-regressive model
 B: corrected using auto-regressive model
 C: original data (barometric and tidal responses are reduced)
 D: precipitation data

3.2 異常識別の試み

現在判定会招集は、体積歪変化 $0.5 E - 6$ (= $50 E -$

8) が3時間以内に起こることを基準の一つとしている。これは基準値としては非常に大きい値である。このこと

Table 2 Five times standard deviations for each observation data of first order difference for $\Delta t=3$ hours and 24hours

The table A indicates five times standard deviations for corrected data for barometric and tidal effect. The column '5σ(+)' and column '5σ(-)' correspond to the (expansion/compression) sense.

The table B indicates data corrected for precipitation effect.

* :New Observatory

(unit:1.0e-8)

Observatory	difference for 24 hours				for 3 hours	
	A		B		B	
	5σ(+)	5σ(-)	5σ(+)	5σ(-)	5σ(+)	5σ(-)
Gamagori	3.1	5.0	3.5	3.4	1.5	1.5
Irako	2.9	6.0	2.5	2.7	2.3	2.4
Mikkabi	69.6	32.2	-	-	-	-
Tenryu	5.8	11.4	4.4	4.9	1.8	1.8
Kawane	7.1	26.0	5.4	10.6	1.5	2.3
Ihaibara	4.6	8.8	4.2	6.2	1.5	2.1
Omaezaki	4.8	10.3	4.9	6.6	1.7	1.7
Ihamaoka	5.4	20.0	3.7	4.9	2.2	1.3
Fujieda	2.1	5.5	1.8	3.0	0.9	1.1
Shizuoka	32.1	26.1	*3.1	*2.7	*3.5	*4.3
Shimizu	8.0	28.3	7.0	12.6	2.2	3.3
Fuji	12.1	27.6	10.1	16.1	2.8	4.3
Toi	3.8	5.7	3.4	3.5	2.1	2.0
Irozaki	18.8	12.7	13.0	11.7	7.3	6.9
Higashiizu	5.7	18.0	4.7	8.4	1.6	2.8
Ajiro	10.0	17.1	9.2	12.2	3.9	4.3

は、第2表から直ちにわかる。本節では、先に得た標準偏差をもとに、有意な体積歪変化を見逃さず、かつノイズを拾わない異常識別の基準値の設定を試みる。

ここでは主に緩やかな異常を識別することに主眼を置き、k時間差分の $n \times \sigma$ 以上が、i時間連続することを各観測地点の異常検出の条件として、それぞれ異常識別を行った。i時間連続を異常検出の条件に加えたことは、前述のように降水補正が完全ではないことから、特に降水の強い時間帯のデータの突出による影響を避けるためである。その概念を第9図に示す。

すなわち、 $[\min(\Delta S_n / \Delta t_n), n=1, i)] \geq 5\sigma$ を条件とする。ここで ΔS_n は差分値、 Δt_n は時間幅、iは連続条件である。第9図のAのような短周期ですぐ元のレベルに戻る変化の場合は、時間差分の条件には当てはまるが、時間連続条件により棄却される。Bのような変化は、ある時間幅(図9の $\Delta t_1, \Delta t_2$ 程度)で差分を取ると時間差分及び連続条件ともに満たす。

1例として、 $k=24, n=5, i=0, 3, 6, 12, 18$ とし御前崎の85~92年の異常識別を行った。第10図にその結果を示す。それぞれの基準値では、 $i=12$ の条件がノイズによる影響がなく、かつ不明の変化をとらえて

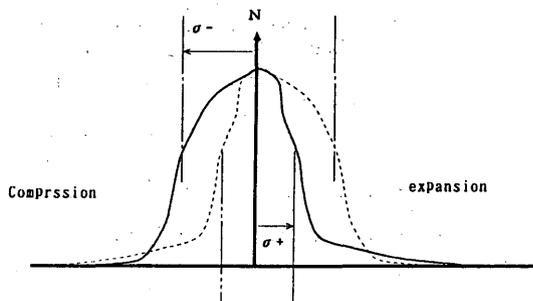


Fig. 8 A method of obtaining standard deviations for two senses

Two different normal distributions are fitted, one the right side (expansion: solid line), the other on the left side (compression: broken line), independently.

いるのがわかる。この方法をもとに各地点について、次の3個の方法により異常識別を行った。

方法①

差分時間(k), 連続条件(i), σ の何倍(m)かを適当に変えて識別される異常変化及び降水による影響を調査する。

方法② (概念については第11図参照)

- ・1時間差分をとり、 σ (24時間差分)の数分の1程度以上になったとき、差分の前値を0とする(トリガー)。
- ・そこから横軸に時間軸、縦軸に歪量を取り、そこで囲まれる面積(S)を計算する作業を開始する。
- ・面積(S)が σ の何倍かを基準にして異常識別を行う。
- ・トリガーから120時間経った場合には面積の計算をやめ、最初の状態に戻す。

最後の処理はトレンドを1次式か2次式で除去するが、伸び、縮み方向にある期間で偏った場合に、打ち切り時間を無限に与えてしまうと0線からの歪変化量が小さくても面積(S)が大きくなり、異常と識別されてしまうことを避けるための回避措置である。

方法③

方法①の基準を甘くするかわりに、数点同時現象のみピックアップする。

3.3 異常識別結果

第12~15図に示した。図の下から観測点を西から順に並べ、基線の上方向が伸び、下が縮みで、各観測点の標準偏差を基準に線分の長さが変化の大きさに対応するようにプロットした。スケールは右下に示した。変化が大きいものは他の観測点と重ならないように適当に折り曲げてある。推定される原因を付した。記号は、次の通り。
u→原因不明の変化 e→群発地震または地震による変

Observatory: Omaezaki

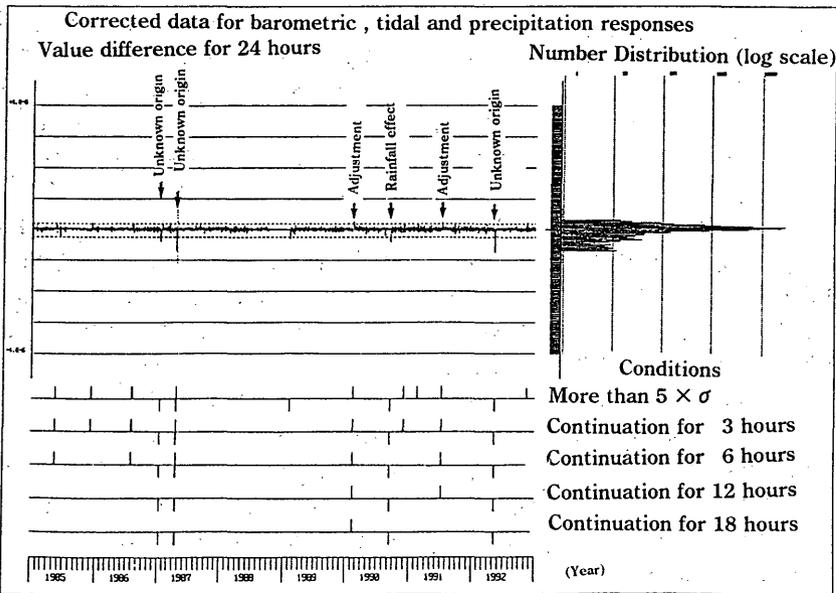
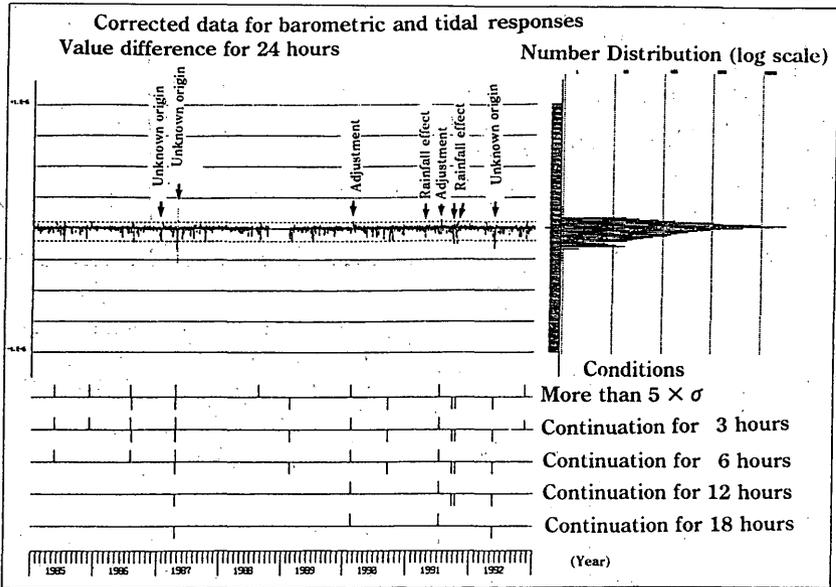


Fig.10 Examples of detecting abnormal changes at Omaezaki under some conditions

化 v → 伊豆大島噴火による変化 無印 → 雨による変化
 第12図は、前節の異常識別の方法①を適用し、24時間差分値が12時間連続して5σ以上となることを条件として異常識別を行った結果である (K=24, n=5, i=12).

この図を基準に考えてみる。5σは、おおよそ5.0E-8程度が目安である。87年に集中した御前崎周辺の観

測点(浜岡, 御前崎, 榛原)の変化(付図A)。伊豆半島東方沖の群発地震による東伊豆の変化、及び大島噴火による各観測点の変化等をよくとらえている。

東伊豆で群発地震と対応した変化で目視により変化が認められたものは、この他85年10月、93年1月の変化であり、いずれも縮み変化である。また、大島噴火及び87年12月(千葉県東方沖: M6.7)、89年10月の地震(伊豆

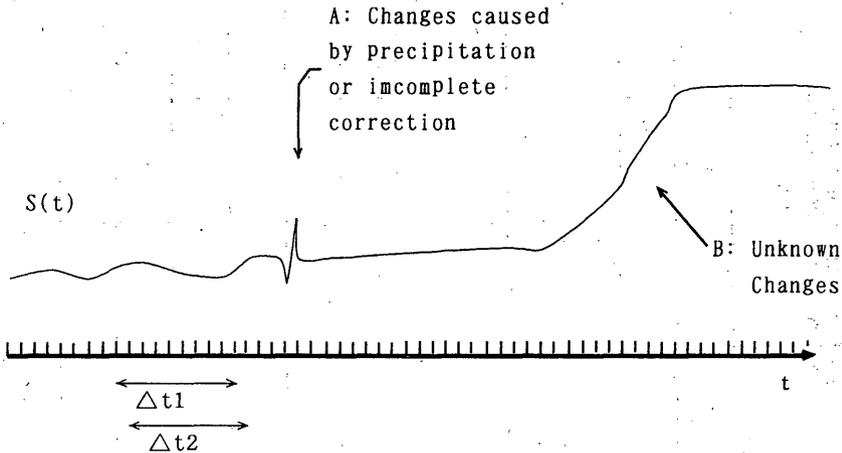


Fig.9 General ideas for detecting abnormal changes
 ΔS_n is first order difference with interval Δt_n . Under the condition
 $[\min \{ \Delta S_n / \Delta t_n, n=1, i \}] \geq 5\sigma$, the change A is rejected, but the change B
 is picked up.

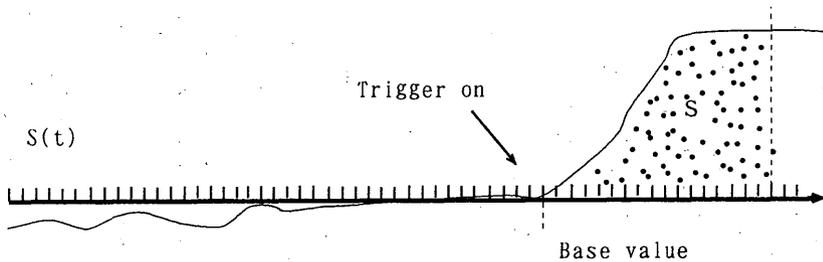


Fig.11 A method for detecting abnormal changes by time integral

大島近海：M5.7)は伸び変化である。

92年に御前崎，また93年に榛原で変化があるが，浜岡については91年7月から92年8月にかけて，観測点近傍で行われた工事によるノイズの影響で，この期間に異常があったかどうか不明である。なお，82年にも5月に榛原で伸び，10月に御前崎で縮みの現象があった（付図B）。榛原，御前崎周辺で，約5年ごとに大きな変化が観測されていることがわかる。

第13図は，方法①を適用し，240時間差分値が12時間連続して 5σ 以上となることを条件として異常識別を行った結果である（ $K=240$ ， $n=4.5$ ， $i=12$ ）。

より緩やかな変化を検出することが目的である。降水による変化の検出が第12図より大幅に少なくなったが，やや急激な変化に対しては，検出力が落ちている。緩やかな変化に対しては，第12図ではとらえきれなかった変化が検出できているのがわかる。蒲郡（付図C），石廊崎の緩やかな変化がはっきり検出されている。

第14図は方法②（面積による方法）を適用し， 0.2σ トリガー， $S=700\sigma \cdot \text{時間}$ とした異常識別結果である。

第12図，第13図でとらえられた異常変化はほぼ漏れなくとらえている。第12図にあった変化で今回検出されなかったものは，天竜の変化で，短期間に元のレベルに戻るような型の変化である。逆に増えているものとしては，東伊豆の85年10月の群発地震による変化がある。なお，東伊豆は1990年前後の2期間にわけ2次式でトレンド除去しているが，トレンド成分が非常に大きいため期間の端（1985，89，91，94年）は，トレンド成分が残っている。そのため，少しの変動でも異常と識別されてしまっている。これは対象期間を短くすれば回避できると考えられる。ただし，期間を極端に短くすると（1月程度），ステップ状の変化を含む期間に対してはトレンド除去が適切に行われないため，逆に異常変化が検出できない弊害が出てきてしまうので，トレンド除去方法，トリガレベル，敷居値のパラメータ等の設定について今後検討

Fig.12 Result of detecting abnormal changes by method 1
(24 hours difference more than 5 times σ for 12 hours continuously)

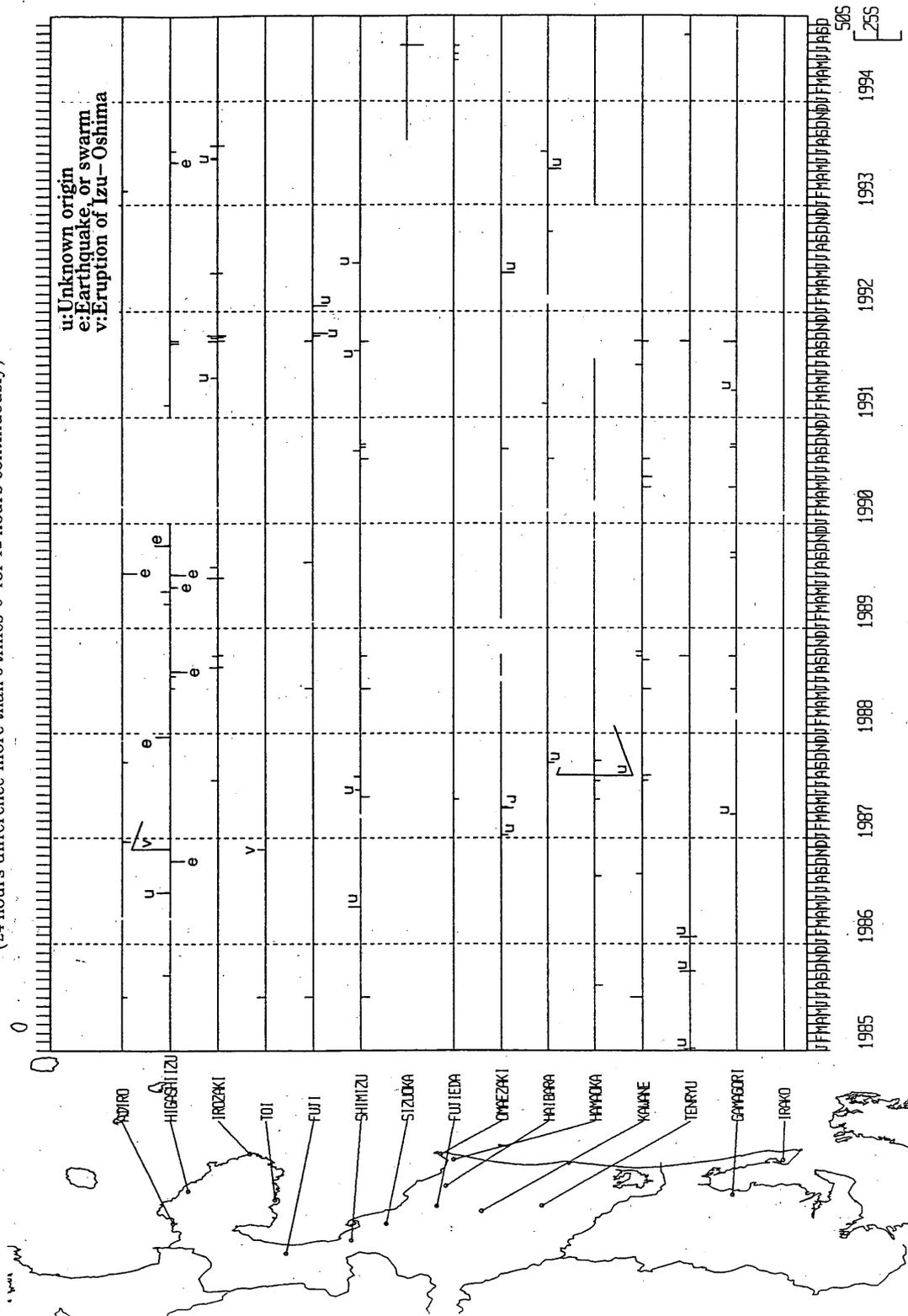


Fig. 13 Result of detecting abnormal changes by method 1
(240 hours difference more than 4.5 times σ for 12 hours continuously)

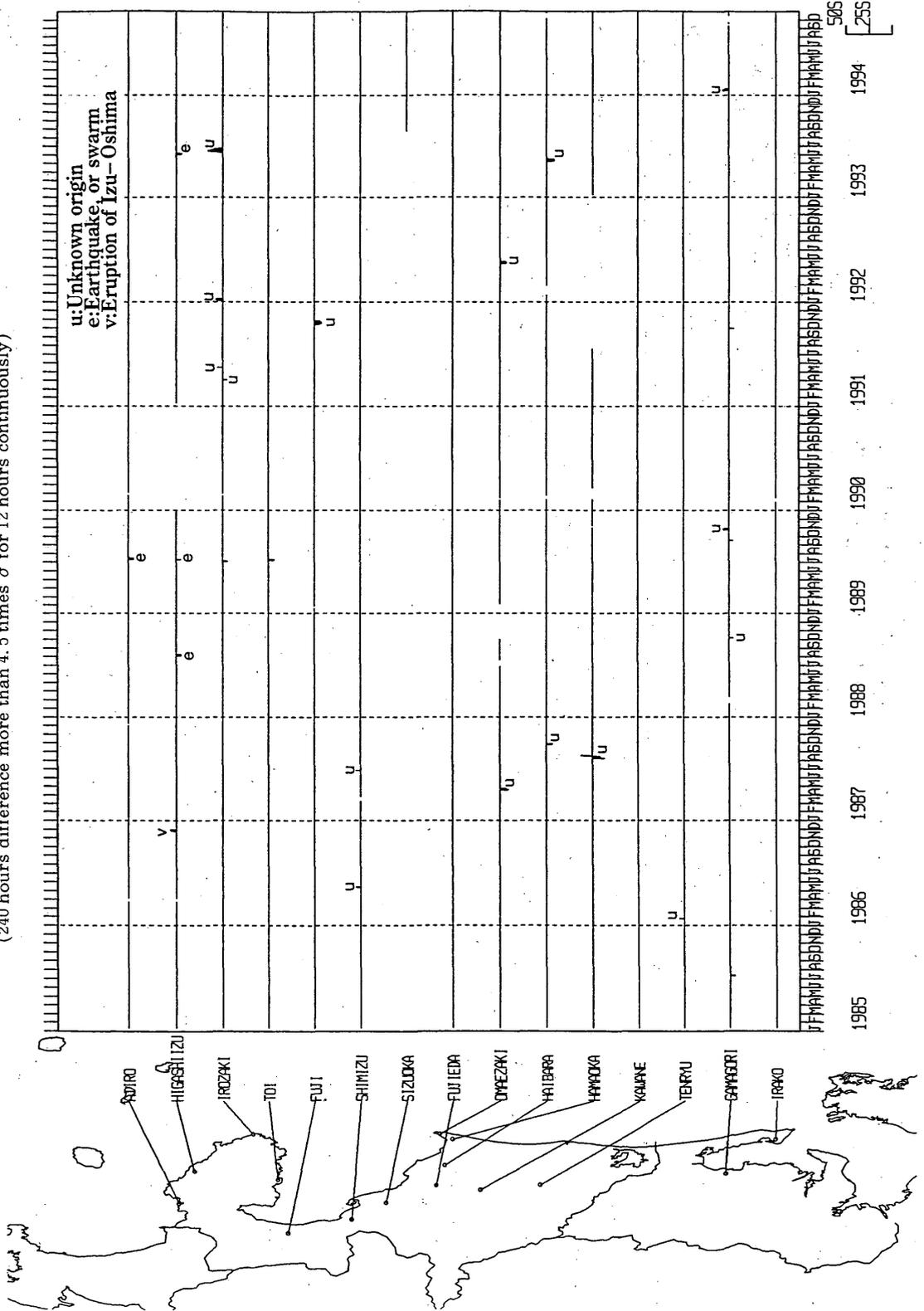


Fig.14 Result of detecting abnormal changes by method 2
(Time integral: 0.2 times σ trigger and more than 700 times $\sigma \cdot$ hour)

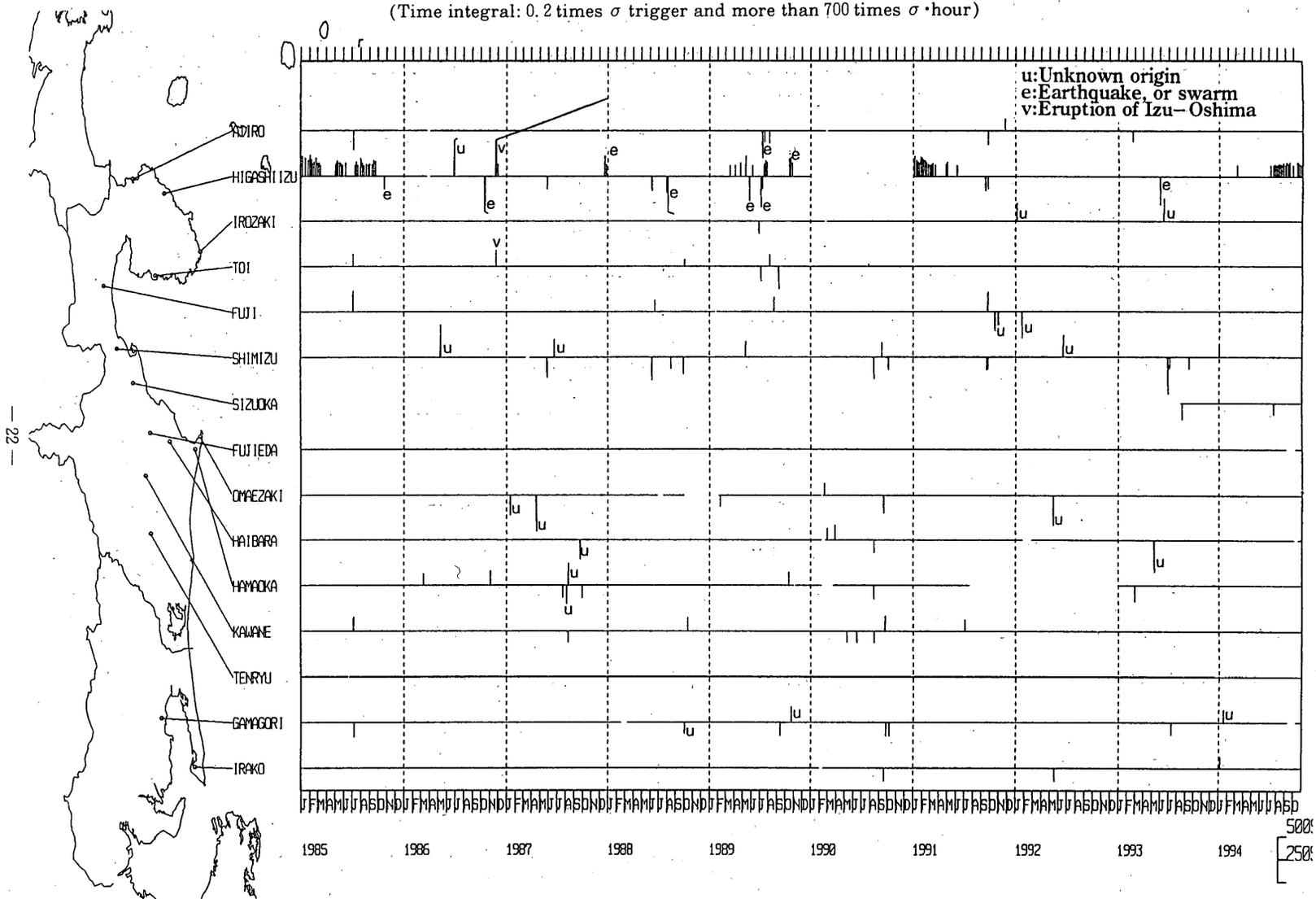
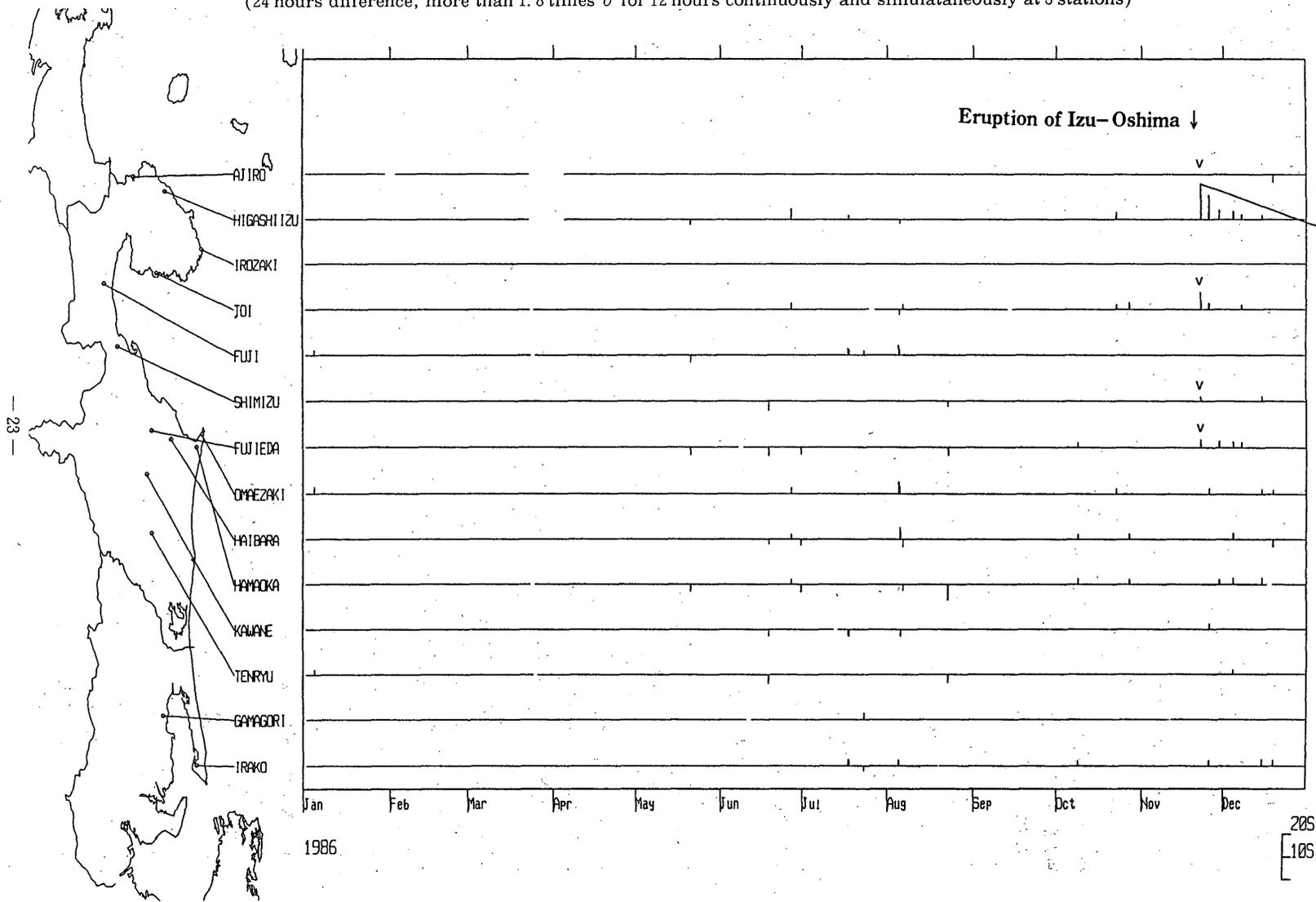


Fig.15 Result of detecting abnormal changes by method 3
 (24 hours difference, more than 1.8 times σ for 12 hours continuously and simulataneously at 3 stations)



埋込式体積歪データの精密補正及び異常識別について

する必要がある。

第15図は、方法③を適用し、24時間差分値が12時間連続して1.8σ以上、かつ3点以上となることを条件として異常識別を行った結果である ($K=24$, $n=1.8$, $i=12$)。

1986年伊豆大島噴火をケーススタディーとした。

第12図では、東伊豆、土肥だけでとらえられていた変化であるが、藤枝、清水でもとらえられている。実際、目視でこの時の記録を見ると、他にも、富士、川根の伊豆大島の西方向の観測点で変化が見られる(付図D)。

この方法の利点としては、非常に小さいレベルで異常がとらえられることにある。特に地震によるステップのように多地点で観測が期待される現象に関しては、 n を小さくして条件の観測点数を増やすことにより効率的にとらえられる。

一方、欠点としては、検出されるケースが降水による影響による変化であることが多いので、目視による確認作業が多くなる点がある。

§4. 議 論

前節までに体積歪データに異常があった場合に、24時間～10日までの時間帯域で異常識別を行う方法を示した。ただし、実際の前兆的な地殻の異常がこの帯域で見られるという保証は無い。つまり、これらの異常識別の方法は1例にすぎない。理想的には各観測点ですできるだけノイズの影響を受けない差分時間、連続時間を設定し、複数の時間差分設定で監視することが望ましい。

また、体積歪以外の地殻変動観測機器(傾斜、地下水等)についても、併せて上記の異常検出と同様のレベルで監視していくことも必要である。

なお、これより短い時間帯(例えば1時間以内の変化)は、分値レベルで行うことが望ましい。ここで示した降水補正の方法は、たとえ分単位の水データが得られたとしても、解析に使うハウスホールダー変換の行列が膨大になってしまうことから、解析的にも、補正のためにシステムにかかる負荷からみても実用化は難しい。しかし、雨の無い期間に各観測点の標準偏差を気圧潮汐補正データから求めておいて、同時異常現象としてとらえる仕様にしておけば、少なくとも、その期間については前節と同様の異常識別ができる。

また、これらの方法による異常監視をシステム化していく上での問題点としては、次のことが考えられる。

- ①各観測点毎の除去するトレンド量の管理
- ②各観測点の標準偏差の管理
- ③降水データ欠測の場合の処理

①については、今回は長期間のトレンドを算出し、除去したが、緩やかな異常を識別するためには前1ヶ月程度のトレンドを除去する必要がある。②は更新された観測点の異常識別を適切に業務に載せるために試験観測の段階からデータをなるべく早くから取る必要があろう。また、既存地点のパラメータ(補正のための係数の管理を含む)も適宜最新の値に更新していく必要もある。③は、今後更新されていく地点は現地の雨量データの収集も行えるので改善されていくと考えられる。

また、とらえた変化が地殻変動の異常であった場合に、それを説明するモデル(例えば、プレスリップ、マグマの上昇等)をすぐに探索できることが要求され、今後の課題としたい。

謝 辞

本調査は平成5～6年度に地震防災対策強化地域判定会委員打ち合わせ会において報告したものをとりまとめたものである。気象大学校高橋道夫教授には当時この調査の方向を含め指導していただき、判定会委員及び関係機関の方々には貴重なご意見をいただいた。本調査の元となった観測データは地震予知情報課諸氏の努力によるものである。体積歪データの雨量補正手法に関しては、地質調査所松本則夫氏に協力していただいた。

また、気象研究所吉田明夫室長、上垣内修主任研究官には本稿のとりまとめに当たりご指導していただいた。

これらの方々には心からお礼申し上げる。

文 献

- 赤池弘次・中川東一郎(1972):ダイナミックスシステムの統計と制御,サイエンス社,189P
- 石黒真木男,佐藤忠弘,田村良明,大江昌嗣(1984):地球潮汐データ解析——プログラムBAYTAP-Gの紹介——,統計数理研究所彙報,32,71-85.
- 樞根勇(1980):水文学,272p,大明堂
- 北川源二郎(1993):時系列解析プログラミング,390P,岩波書店
- 小泉岳司・吉田明夫(1989):湯河原体積歪計に対する地下水の影響,気象研究所研究報告,40,21-28.
- 田中寅夫(1979):傾斜計・伸縮計記録に現れる降雨の影響とシミュレーション,測地学会誌,25,91-101.
- 二瓶信一,檜皮久義(1983):三ヶ日における埋込式体積歪計に対する降雨の影響,験震時報,48,18-22.
- 檜皮久義,佐藤馨,二瓶信一,福留篤男,竹内新,古屋逸夫(1983):埋込式体積歪計の気圧補正験震時報,47,91-111.

松本則夫・高橋誠 (1993): 地震に伴う地下水位変化検

出のための時系列解析, 地震 2, 45, 407-415.

吉田明夫, 二瓶信一, 太田金房, 薄田真司 (1984): 静

岡と網代における体積歪観測坑内の水位変化と歪変化,

気象研究所研究報告, 35, 199-207.

付表1 タンクモデルのパラメーター

観測点	パラメーター						雨地点	係数
	R	E	A 1	A 2	H0	*		
伊良湖	40	0.1	0.01	0.001	300	*	伊良湖	0.7
三ヶ日	40	0.1	0.01	0.001	200	0	三ヶ日	-20.0
御前崎	50	0.1	0.04	0.02	300	*	御前崎	1.0
静岡	-	-	-	-	-	-	静岡	-
石廊崎	10	0.2	0.1	0.05	300	*	石廊崎	-3.5
榛原	100	0.1	0.02	0.002	300	0	御前崎	1.0
浜岡	10	0	0.2	0.05	200	*	御前崎	2.0
蒲郡	30	0.15	0.01	0.001	150	0	蒲郡	0.8
天竜	0	0.4	0.4	0.005	300	*	天竜	0.7
川根	30	0.1	0.05	0.01	300	*	本川根	2.0
藤枝	5	0.5	0.02	0.001	300	*	静岡	0.6
清水	10	0.1	0.2	0.001	300	*	清水	2.5
富士	10	0.02	0.04	0.01	200	*	吉原	3.5
土肥	-	-	-	-	-	-	土肥	-
東伊豆	50	0.2	0.04	0.0005	300	*	稲取	1.6
網代	100	0.2	0.02	0.0005	300	0	網代	3.0

* : H0に達した地点

付表2 各観測点の雨量補正係数(続き)

40 IIRAKO		31 DMAEZAKI		36 INOZAKI		37 AJIRO		35 SHIYUOKAZ		
自己回帰係数	雨量補正係数	自己回帰係数	雨量補正係数	自己回帰係数	雨量補正係数	自己回帰係数	雨量補正係数	自己回帰係数	雨量補正係数	
1	0.13377180D-01	0.77125340D-09	0.11265000D-01	0.80247770D-09	0.12535180D-01	0.14239150D-09	0.90596850D-09	-0.13364780D-08	0.11317470D-01	0.51908760D-09
2	-0.31634380D+00	0.35589370D-09	-0.42323190D-01	0.10878540D-09	-0.15147750D+00	0.49322830D-09	-0.14259100D+00	0.15971830D-09	-0.19155740D-01	0.24678130D-09
3	-0.13287820D-01	0.16201730D-10	-0.40366350D-01	0.10118540D-09	-0.22103560D+00	0.42317040D-10	-0.10630940D-01	0.17203380D-09	-0.24619090D-09	0.2206390D-09
4	-0.24104760D-01	0.23494440D-10	-0.44705450D-01	0.31929710D-12	-0.41401370D-01	0.96454470D-10	-0.46667270D-01	0.91124320D-10	-0.43233360D-01	0.10296370D-09
5	-0.97370680D-02	0.51140420D-10	-0.17724750D-01	0.34088430D-10	-0.22175360D-01	0.42634250D-10	-0.444448670D-02	0.22878060D-10	-0.69248430D-01	0.58289650D-09
6	0.56205440D-01	0.84183110D-11	0.11912810D-01	0.66664500D-11	0.55406200D-01	0.62999830D-10	-0.59095410D-01	0.55294130D-12	-0.87342990D-02	0.93610940D-09
7	-0.13014160D-01	0.22396480D-10	-0.31647170D-01	0.48398510D-10	0.19543280D-02	0.92457500D-10	0.63009620D-02	-0.17135180D-08	0.82956120D-10	0.25661120D-10
8	-0.48713390D-01	0.15215910D-11	-0.41887300D-01	0.48144880D-10	0.37470770D-01	0.56166890D-10	0.31368350D-01	-0.61359580D-09	0.45559690D-03	0.37319320D-12
9	0.43218440D-01	0.41853480D-10	-0.15890290D-01	0.78294240D-11	-0.26037080D-01	0.20711840D-10	0.15491130D-01	0.94708690D-10	0.44463630D+00	0.27509360D-10
10	0.37524310D-01	0.21751300D-11	0.21115410D-01	0.36135350D-11	0.70370390D-01	0.28584070D-10	0.16678650D-01	-0.39613430D-10	0.84314870D-01	0.88791680D-09
11	0.41738990D-01	0.32229270D-10	0.19097090D-01	0.22651080D-10	-0.32900330D-01	0.47033470D-11	0.24977620D-01	-0.79752030D-10	-0.46478840D-01	0.63472120D-09
12	0.22446420D-01	0.37588610D-10	0.10195730D-01	0.31005510D-10	-0.39592340D-01	0.83504340D-10	0.17104670D-01	0.49001090D-10	-0.12254810D-01	0.21907870D-09
13	-0.17345950D-01	0.70871160D-10	0.21150220D-01	0.33154970D-10	0.679335670D-01	0.29625460D-10	0.24517770D-02	0.11888670D-09	0.26721320D-02	-0.13263960D-10
14	-0.73968840D-01	0.37169300D-10	-0.56350500D-01	0.69150510D-10	-0.26339240D-01	-0.11989240D-10	-0.67831330D-01	0.72944250D-10	0.15680730D-02	-0.60054750D-11
15	-0.67306620D-01	0.15601390D-10	-0.74904260D-02	0.13178550D-10	-0.79679870D-01	-0.11389690D-09	-0.98762550D-02	-0.47718390D-10	-0.48123820D-02	0.54541830D-09
16	0.26037560D-01	0.89372500D-10	-0.32420800D-01	0.20551910D-10	0.45266220D-01	0.77805650D-10	-0.32750300D-02	0.74513220D-10	-0.15915480D-01	0.1361120D-10
17	0.62677420D-01	0.27435600D-10	0.43905160D-01	0.23218290D-10	0.13089680D-01	0.79481400D-10	-0.33741530D-01	-0.15626860D-09	-0.20322030D-01	-0.35236540D-11
18	0.64311850D-02	0.21802240D-10	-0.46682440D-01	0.31529420D-11	-0.24268230D-01	0.66588460D-10	-0.29458480D-02	-0.92949590D-10	0.12627210D-01	-0.27255000D-10
19	-0.49177350D-01	0.16269680D-10	0.22181760D-04	0.28236660D-10	-0.36283420D-01	0.51378120D-10	0.64186850D-02	-0.25016470D-10	0.11673910D-01	-0.13288050D-10
20	-0.13036620D-01	0.24492830D-10	0.94117860D-02	-0.26319650D-10	0.69661220D-01	0.42154770D-10	0.68258910D-01	-0.44643010D-10	0.25730090D-01	-0.60417260D-11
21	-0.22436500D-02	0.34826040D-10	0.27045340D-01	0.13715090D-10	-0.20183450D-01	0.37303190D-10	0.15033960D-01	0.35395610D-10	-0.39528190D-01	0.19888460D-10
22	-0.63443980D-02	0.14681210D-10	0.25303180D-01	0.85675300D-11	-0.49351000D-01	0.74238770D-10	0.75890820D-01	0.26343800D-10	0.19976230D-01	0.39411940D-10
23	0.16864880D+00	0.26287460D-10	0.42310830D-01	0.10673170D-10	0.11649140D+00	0.90816920D-10	0.35083790D-01	0.20409730D-09	0.34020780D-01	0.53232920D-09
24	0.20984650D+00	0.11807440D-09	0.71065710D-01	0.95524130D-10	0.21913770D+00	0.36692600D-10	0.27877320D-01	0.14215220D-10	-0.18388400D-02	0.76136280D-09
25	-0.85477360D-01	0.25986790D-09	-0.13454760D-01	0.10523660D-09	-0.84550090D-01	0.80265090D-10	-0.22401880D-02	0.20191050D-09	-0.33520160D-02	0.91170590D-10
26	-0.21983500D+00	0.14059540D-09	-0.79128580D-01	0.91189450D-10	-0.26602110D+00	-0.17139040D-09	-0.33745330D-01	0.9569380D-09	-0.3160100D-01	0.59531580D-09
27	-0.68098250D-01	0.30197360D-10	-0.38564180D-01	0.29293530D-10	-0.32809730D-01	-0.11260460D-09	-0.69241400D-01	0.19219280D-09	-0.25975810D-01	0.40387280D-09
28	0.42322300D-01	0.46603930D-10	-0.51436850D-01	0.13175230D-10	0.77392810D-01	0.13084980D-09	-0.26110760D-01	-0.56651600D-10	-0.37535770D-01	0.23809680D-09
29	-0.15739900D-01	0.10601450D-10	-0.10624380D-01	-0.16226590D-11	0.59573350D-02	0.17250630D-10	-0.23583350D-01	0.90431730D-09	-0.30103340D-01	0.20780380D-09
30	0.64524600D-01	0.17022610D-10	0.90945020D-02	-0.71996520D-10	-0.79252940D-01	0.44144600D-11	-0.19533460D-01	-0.37908450D-10	-0.30178380D-01	0.17873890D-09
31	-0.34279860D-01	0.30792090D-10	0.43421170D-01	-0.28654050D-10	-0.30878740D-01	0.14017580D-09	-0.29480290D-02	-0.85151030D-10	0.30328890D-02	0.50622350D-10
32	0.12320090D-01	0.12183880D-10	-0.2324850D-01	0.22646690D-10	-0.2234850D-01	0.22646690D-10	0.11131180D-01	-0.12428200D-10	0.31989420D-03	-0.43986960D-09
33	-0.22639330D-01	0.19838620D-10	-0.22306550D-01	-0.57484390D-10	-0.23386130D-01	-0.57484390D-10	-0.23386130D-01	0.39155140D-10	0.21848780D-02	-0.44989600D-09
34	-0.13076270D-01	0.25750950D-10	0.84652270D-02	0.12151850D-10	0.84652270D-02	0.12151850D-10	0.62984650D-09	-0.93869920D-10	0.18372320D-01	0.44510650D-09
35	-0.20593000D-01	0.89784320D-11	-0.29818630D-01	0.41971160D-10	0.56619680D-01	0.15640220D-09	-0.76932820D-09	-0.34223830D-10	0.38397300D-01	-0.23104580D-10
36	-0.52558700D-01	0.40375450D-10								
37	-0.31010070D-01	0.71380480D-10								
38	-0.90624050D-01	0.66278960D-10								
39	0.63830220D-01	0.76440880D-11								
40	-0.39503090D-01	0.21986410D-10								

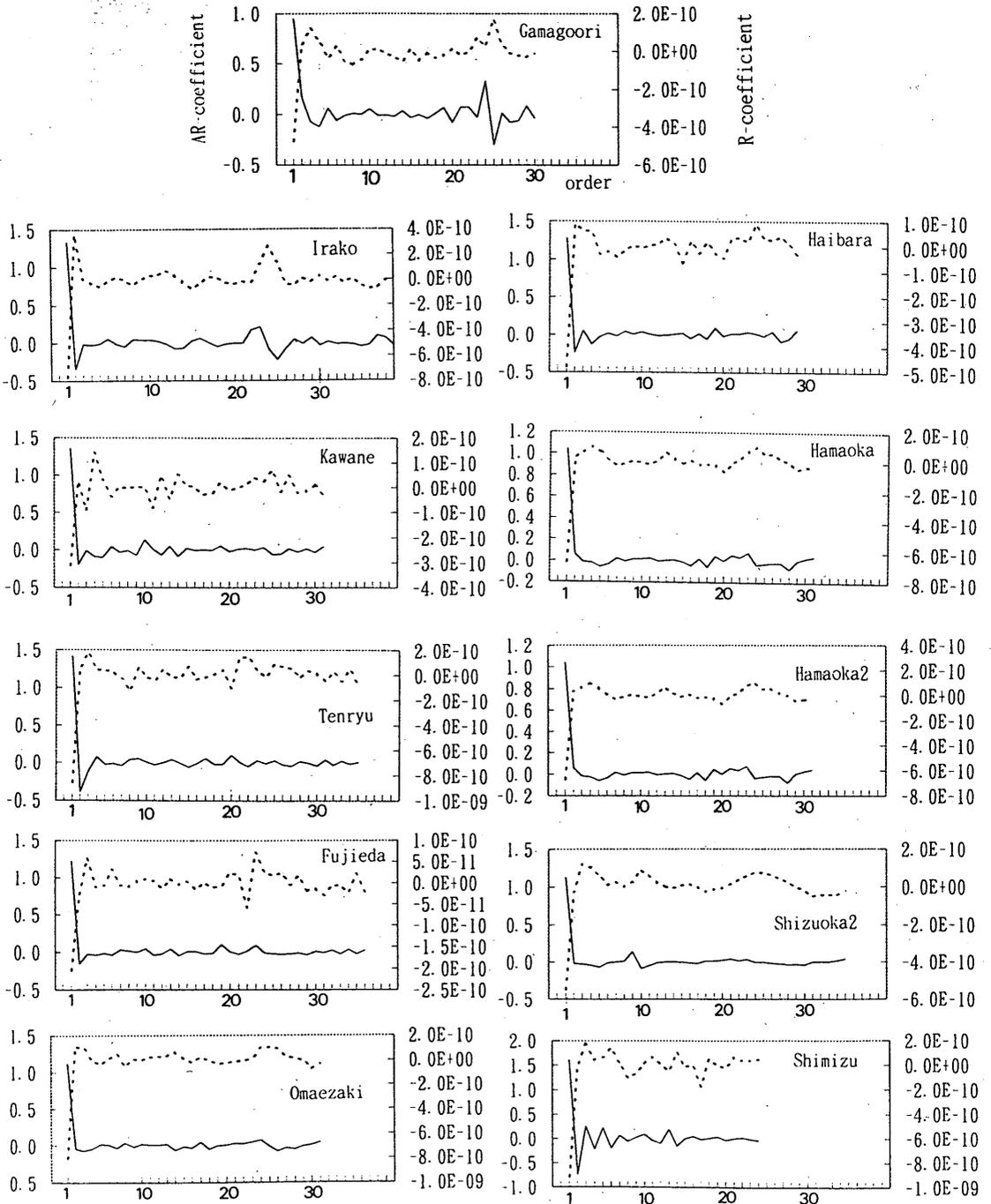
31 HANAOKAZ		雨量補正係数	
自己回帰係数	雨量補正係数	自己回帰係数	雨量補正係数
1	0.10439290D-01	0.87183720D-09	0.31801170D-01
2	0.58413800D-01	0.18011300D-10	0.65848880D-10
3	-0.16230690D-01	0.65848880D-10	0.10284030D-09
4	-0.22575940D-01	0.65932550D-09	0.10284030D-09
5	-0.59515120D-01	0.65932550D-09	0.10284030D-09
6	-0.19718270D-01	0.29069400D-10	0.78409220D-09
7	-0.10626850D-01	0.78409220D-09	0.68695230D-09
8	0.12578800D-01	0.68695230D-09	0.15138890D-10
9	0.19570830D-01	0.15138890D-10	0.5782390D-09
10	-0.68071290D-02	0.15138890D-10	0.15138890D-10
11	0.19847250D-02	0.67311780D-09	0.729106880D-10
12	0.729106880D-10	0.67311780D-09	0.18743310D-01
13	-0.18743310D-01	0.95483240D-10	0.47260600D-01
14	0.47260600D-01	0.10853010D-10	0.16068720D-01
15	-0.16068720D-01	0.14953000D-09	0.59492450D-01
16	-0.59492450D-01	0.13224660D-09	0.43514710D-01
17	0.43514710D-01	0.8448880D-09	0.22516680D-02
18	-0.22516680D-02	0.64078400D-10	0.52538010D-01
19	0.52538010D-01	0.40546040D-10	0.33645940D-01
20	0.33645940D-01	0.21193650D-09	0.72939690D-09
21	0.72939690D-09	0.75036290D-09	0.37698110D-01
22	-0.37698110D-01	0.52004380D-09	0.28285650D-01
23	0.28285650D-01	0.52004380D-09	0.20944990D-01
24	-0.20944990D-01	0.57051150D-10	0.20013270D-01
25	0.20013270D-01	0.19573540D-09	0.79716030D-09
26	-0.79716030D-09	0.28605120D-02	0.58407710D-09
27	0.58407710D-09	0.32761540D-09	0.21472270D-01
28	0.21472270D-01	0.32761540D-09	0.37266680D-01
29	0.37266680D-01	0.35560490D-10	
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			

埋込式体積型データの精密補正及び異常識別について

Appendix figure 1

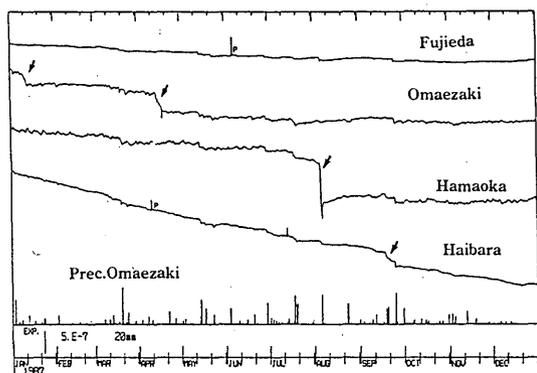
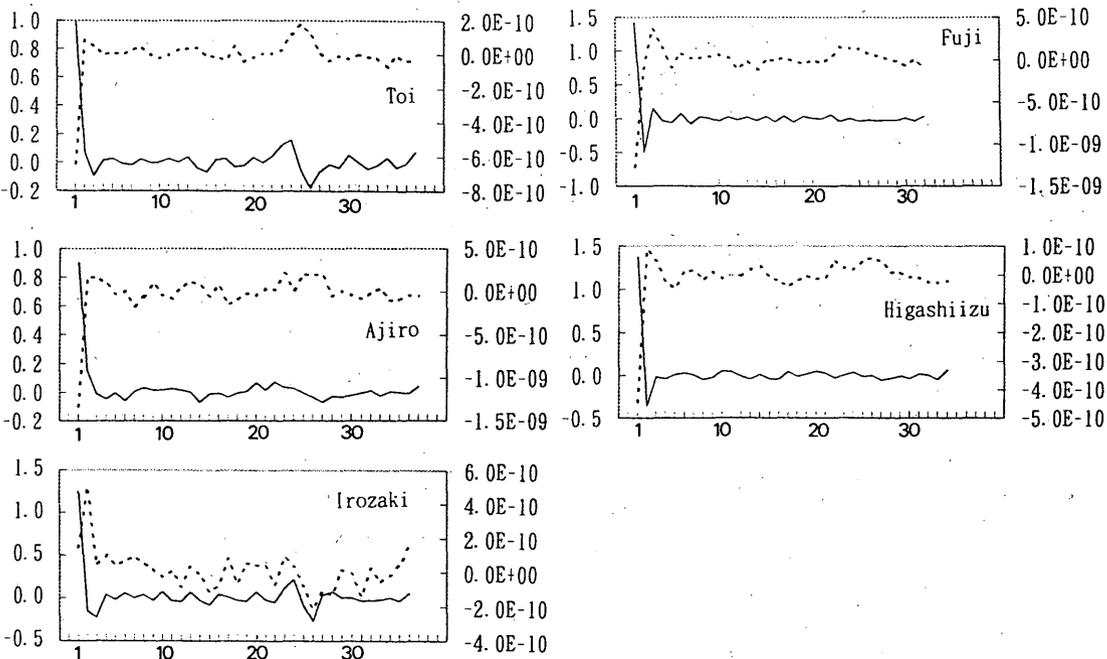
Auto-regressive (AR) and precipitation response (R) coefficients for each observatory
 Right side scale indicates
 R-coefficient (ci), the other side indicates AR-coefficient (di).

..... R-coefficient — AR-coefficient

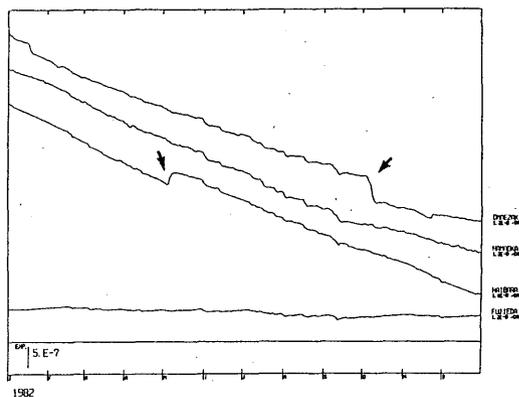


Appendix figure 1 (continued)

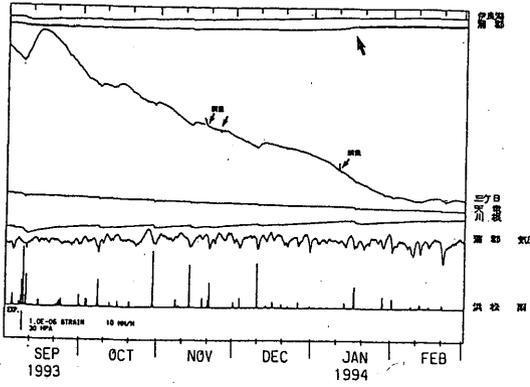
Auto-regressive (AR) and precipitation response (R) coefficients for each observatory
 Right side scale indicates R-coefficient (ci), the other side indicates AR-coefficient (di).



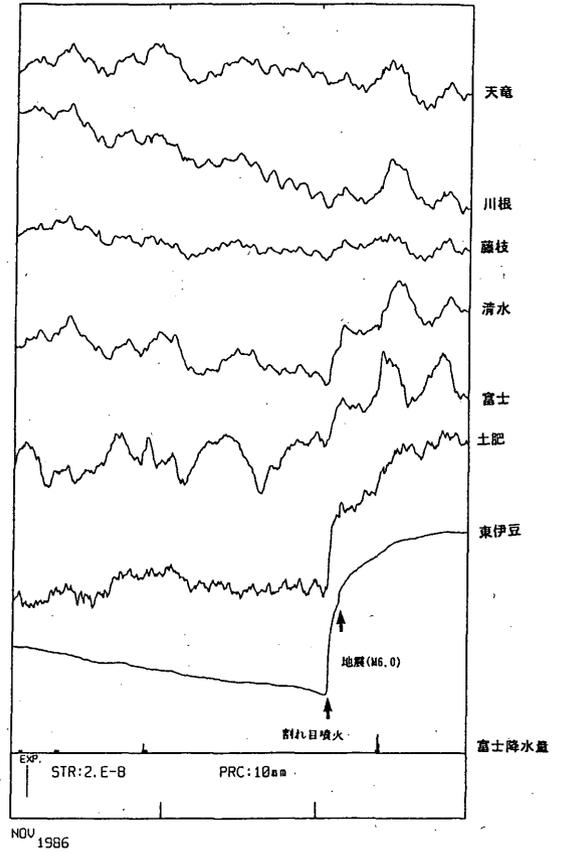
Appendix figure A
 Volume Strain Change around Omaezaki in 1987



Appendix figure B
 Volume Strain Change around Omaezaki in 1982



Appendix figure C
Volume Strain Change around Gamagoori in
1993 and 1994



Appendix figure D
Volume Strain Change around Izu-Peninsula in
1986