

## 埋込式体積歪計による観測(2)

— 歪観測における地下水調査 —\*

二瓶 信一\*\*・佐藤 馨\*\*

### 1. はじめに

一般に地殻変動観測データは測器が設置されている地質の状態によって大きな影響をうける。特に地表面付近で変化しやすいものは地下水である(樞根1980, 山本1983)。測器周辺が均一な岩盤であることは稀で、多くの所では帯水層があり、降水や湧水、地下水の汲み上げで水位が変わる。地下水は水自体の移動、水圧変化だけでなく、移動に伴い熱を輸送して温度場を変える。埋込式体積歪計(以下、歪計)はきわめて高い分解能を有し、周囲の温度変化に対しても $10^{-7}$  strain/ $1\text{m}^{\circ}\text{C}$ の影響をうける(観測部地震課, 1979)。このようなことから歪計で観測される現象を説明するためには、埋設地点周辺の地下水状態を常時把握しておくことが不可欠である。

また、地下水系は地殻活動によっても変わり、地下水の移動が地球内部の情報を提供するため、地震予知のために地下水そのものの水位、水温、湧水量、含有物質等を観測している機関も多い。しかし地下水の状態は、地形や地質構造によって降水による応答が複雑であり(菅原1972, 岡1983)、さらに市街地、工業地帯、田園地帯、地下ガス採集地帯は人為的影響が大きく、地球内部からの応力の情報だけを分離することは容易でない。但し、地下水観測と各種の地殻変動測器を併用することにより、それらの応答差から地球深部からの情報の把握に一步でも近づくことができる。

気象庁では歪観測の一環として、大島における観測井内の温度観測(1981年5月~)と、静岡における地下水位、地下水温観測(1984年7月~)を行なっている。その他に、1982年頃から年1回の巡回検定の機会を利用して、簡易測定具により手作業で歪観測井の水位・水温の調査を行ってきたので、これらの結果を報告する。

### 2. 観測井の状況

歪計の地中変換部は、50~300mの深さの観測井の孔底に埋設され、膨張剤を加えたモルタルを用いて周囲の岩盤と固着し、地殻の伸び縮み変化に应答する。

観測井の構造は裸孔型とフルホール型に大別される(図2-1)。前者は主に固い地盤の観測地点で地表からある深さまではケーシングパイプが挿入されているが、その下部から地中変換部上部の数m~数10mは裸孔のままになっている。但し裸孔部は特に周囲の帯水層を考慮したものではない。後者のフルホール型は、ケーシングパイプを地中変換部の直上まで挿入し、ケーシングパイプと観測井のすき間および裸孔部にセメントミルクを圧入したものである。

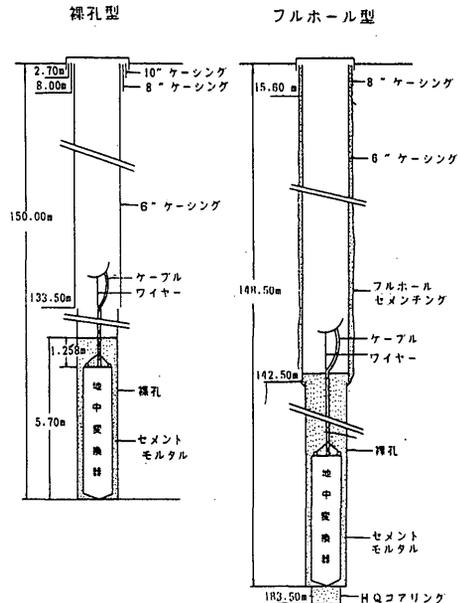


図2-1 歪観測井の構造  
裸孔型:湯河原, フルホール型:秦野

\* Shinichi Nihei and Kaoru Sato: On the Observation of Volume Strainmeter, (part 2) - Surveys of underground water - (Received Oct 23, 1987)

\*\* 地震火山部地震予知情報課

この方法は、周囲の帯水層の水が裸孔部とケーシングパイプのすき間を通じて他の帯水層と流通し、観測井が掘られる前の地下水の状態を乱すことを防ぐものである。しかし後述するように、フルホール型の観測井も地中の周辺とわずかながら水の出入りがある。時間遅れでも水の出入りがあることは、長い時間を見れば周辺の地下水状況を反映するものと考えられる。但しどの帯水層の状況かを特定することは出来ない。

埋設が良好な状態であれば、観測井内の水位変化は直接歪変化に作用するものではなく、周辺帯水層の地下水状態を反映する一つの指標にすぎない。歪変化は観測井外の地下水状態も反映した応力変化に応答するものである。

31観測地点の観測井の状態を表1に示す。歪計による観測は1975, 1976年に第1期12地点, 1980, 1981年に第2期19地点で開始された。第1期の地点は比較的岩質が良好であったため裸孔型であった。第2期分は第1期の経験から軟弱な地盤についてはフルホール型とし、また深度も人為的影響を避けるため100 m以深とした。

裸孔型の地点は18カ所である。観測井の深さに対する裸孔部の占める比は、三ヶ日・静岡・銚子で30～50%におよび、他は15%以下である。

勝浦は設置当初裸孔部があったが、1979年3月に裸孔部をふさぐ量のモルタルを孔口から流しこみ、さらに孔口をモルタルで閉めており、その後の地下水状態がどうか、裸孔部は完全にふさがったか確認できない。

設置当時から孔口が閉じられている地点は浜岡・榛原・銚子・天竜・川根・清水・大島の7カ所で、計器の保護には良いが地下水の調査はできない。後年、大島は1986年12月に、清水は1987年1月に開口した。

屋外に観測井がある地点のほとんどは、観測井に下水マスのフタをかぶせてあるだけで、観測孔口より雨水や土砂が流入した痕跡がある。静岡、横浜、秦野は後年孔口を整備した。

また、湯河原・三浦・鴨川・長柄・八日市場・大島では観測井の途中がつかえていて、地下水調査に支障がある。これら地点は地盤が弱いため孔つぶれを懸念して、埋設直後に多量のモルタルを流しこんだものと考えられる。大島では埋設から約6年後に開口したところ-60mまでモルタルが詰っていて、埋設直後-25mまであった水は存在していないこと

が判った。

その他、埋設直後に地中変換部が十分埋没するようモルタルを流しこんでいたが、孔口からたれ流したためケーブルや側壁の途中に付着して、後年の計測器挿入による調査に支障が大きい。

各埋設地点の地質断面図は二瓶ら(1987)に掲載されている。

### 3. 水位調査

#### 3.1 簡易測定

手作業による水位調査で用いた簡易水位計は、ピアノ線入りのケーブルの先端に電極を取付け、着水すると抵抗値が変わるものである。地上において抵抗値の変化をテスターで目視し、ケーシングパイプのふちからのケーブル長を測定する。信頼度は約3 cm以内で細かい水位変動は判らないが、1982年以降ほとんど毎年、季節・時刻・降雨の前後を問わず任意の時に測定を繰返すことにより、観測井内の通常の水位と変動幅を推定することができる。これら調査結果は、長期的な歪変化と並べて見ることによって周辺の地下の状態を知る手がかりともなり、また計測器による連続観測のための予備資料として有効である。

裸孔型観測井の水位は、周辺の帯水層の間隙水圧の変化に比例する。その中で水位がほぼ一定の地点は周辺の帯水層の状況もほぼ安定していると言える。反対に観測井内の水位変化が大きい地点は、周辺部で揚水や土地造成などがあり帯水層も不安定であると思われる。歪変化は地下水の状態を反映して、前者の地点は安定した長期変化を示し、後者の地点は不規則な変化や特異な変化を示す(二瓶ら1987)。

三浦や長柄、大島ではこれまでに急激で大きな歪変化が発生した(気象庁地震予知情報課1986, 上垣内ら1987)。また富津では降水の後、近傍にある河川の増水による動圧での地形変形と考えられる顕著な歪変化が発生している。しかしこれら地点の観測井はフルホール型であるため観測井内の水位は周辺部より時間遅れの変化も考えられ、短時間の地下水の動きを確認することは出来なかった。

図3-1と表1に各地点の水位の状況を示す。設置直後の水位は作業報告書によるものであるが、設置工法で水を使用するため、一般に設置直後の水位は高く、時間の経過と共に次第に低下する。

(a) 設置当初から水位がほぼ一定の地点

裸孔型：伊良湖・横須賀・館山・蒲郡・藤枝・清

表1 歪観測井における地下水状況

(観測井深度, 水位はケーシングパイプ上端をゼロとし、地下へマイナスで表す。)

地点名	埋設年月	観測井		岩質	水位		孔底		水温		観測井の状況 〔 〕内は測定可能深度に 変更が生じたもの。(-m)
		深度 (-m)	裸孔部(-m) F:フルボール型		設置直後 (-m)	測定値 (-m)	設置直後 (℃)	測定値 (℃)	測定深度 (-m)	測定年月	
伊良湖	1975. 9	141	120~135	黒色片岩	4.0	4	22.0	17.7~19.3	10~130	1983. 7	
三ヶ日	1975.10	51	17~45	粘板岩	1.8	1~3	19.4	16.1~16.8	10~40	1983. 7	浅く裸孔部多。〔45〕
御前崎	1975.11	208	197~202	泥岩	4.5	6~7	23.5	18.0~19.8	15~100	1983.10	ケーブルが絡み合っている。
静岡	1975.11	60	35~53	砂岩	3.0	7~8	18.5	17.4~17.6	8~56	1982. 6他	浅く裸孔部多。 1984. 3 孔口整備。
石廊崎	1976. 2	133	126~126.4	安山・角礫岩	11.8	45	20.0	17.5~21.6	50~126	1983.10	
網代	1976. 9	120	101~115	玄武・溶岩	2.1	58	26.0	16.3~23.6	60~113	1983.10	温泉地域。
横須賀	1976. 9	146	134~140	泥岩	0	1	21.0	14.8~19.0	5~135	1987. 6他	室内。モルタルに亀裂。
館山	1976. 8	190	180~184	泥岩	0.5	0	26.0	16.8~19.9	10~120	1983. 6他	
勝浦	1976. 9	180	162~175	泥岩	5.0		24.5				室内。セメント床下閉。
銚子	1976.12	100	46~94	砂岩	5.8		17.0				室内。セメント床下閉。
浜岡	1977. 2	250	231~245	泥岩	2.8		24.0				室内。セメント台下閉。
榎原	1977. 2	250	230~245	泥岩	8.2		20.5				室内。セメント台下閉。
蒲郡	1979.12	100	73~94	花崗閃緑岩	2.2	1~2	19	16.5~17.4	10~50	1983. 7	室内。モルタルに亀裂。
天竜	1979.12	149	139~144	粘板岩	0.5		19				孔口溶接閉。
川根	1979.11	101	80~95	粘板岩	0		18				孔口溶接閉。
藤枝	1979.12	101	80~96	礫岩	0	1~2	21.5	17.9~19.5	5~70	1983.10	
清水	1979.10	125	F	泥岩	1.9	1~2	20	15.6~17.8	1~114	1987. 6	孔口溶接閉。 1987. 1 オープン。
富士	1980. 2	92	F	凝灰角礫岩	30.7	29~45	17	16.2~16.6	15~63	1987. 6他	
土肥	1980. 2	152	F	凝灰岩	20.1	70~	19.8	18.6	75	1983.10他	
東伊豆	1980. 1	251	230~245	安山岩	56.3	91	53				温泉地域。
湯河原	1980. 2	150	134~144	火山礫凝灰岩	0.1	14~17	21	16.9~24.7	60~113	1983.10他	モルタルに亀裂。〔133〕
秦野	1979.11	148	F	固結砂礫	45.0	25~30	19.5	15.5~16.6	30~130	1983. 5他	
三浦	1979.10	150	F	砂岩	14.3	4~5	20.5	16.5~16.9	5~32	1982. 6他	〔30〕
横浜	1979.10	203	F	泥岩	20.0	0~35	19.4	16.0~18.3	35~140	1984. 6他	1986 孔口整備。
日野	1980. 2	148	F	固結細砂	69.5	60~70	16	15.3~17.3	70~129	1983. 5他	室内。
富津	1980.12	150	F	泥岩	3.5	7	19.0	16.3~18.9	10~100	1983. 6	
鴨川	1981. 1	150	F	泥岩	14.3	25~32	19.0	16.7~17.0	30~45	1983. 6	〔44〕
大多喜	1980.12	250	F	泥岩	15.2	18~19	20.0	15.2~17.2	30~140	1983. 6	
長柄	1980.10	250	F	細粒砂岩	7.2	8	19.0	15.3~15.7	15~78	1983. 6	〔78〕
八日市場	1980.11	300	F	泥岩	4.8	24~26	19.5				〔46〕
大島	1981. 4	291	F	火山礫凝灰岩	25.0	60以深	21.5				孔口モルタル閉。 1986.12 オープン。〔60〕

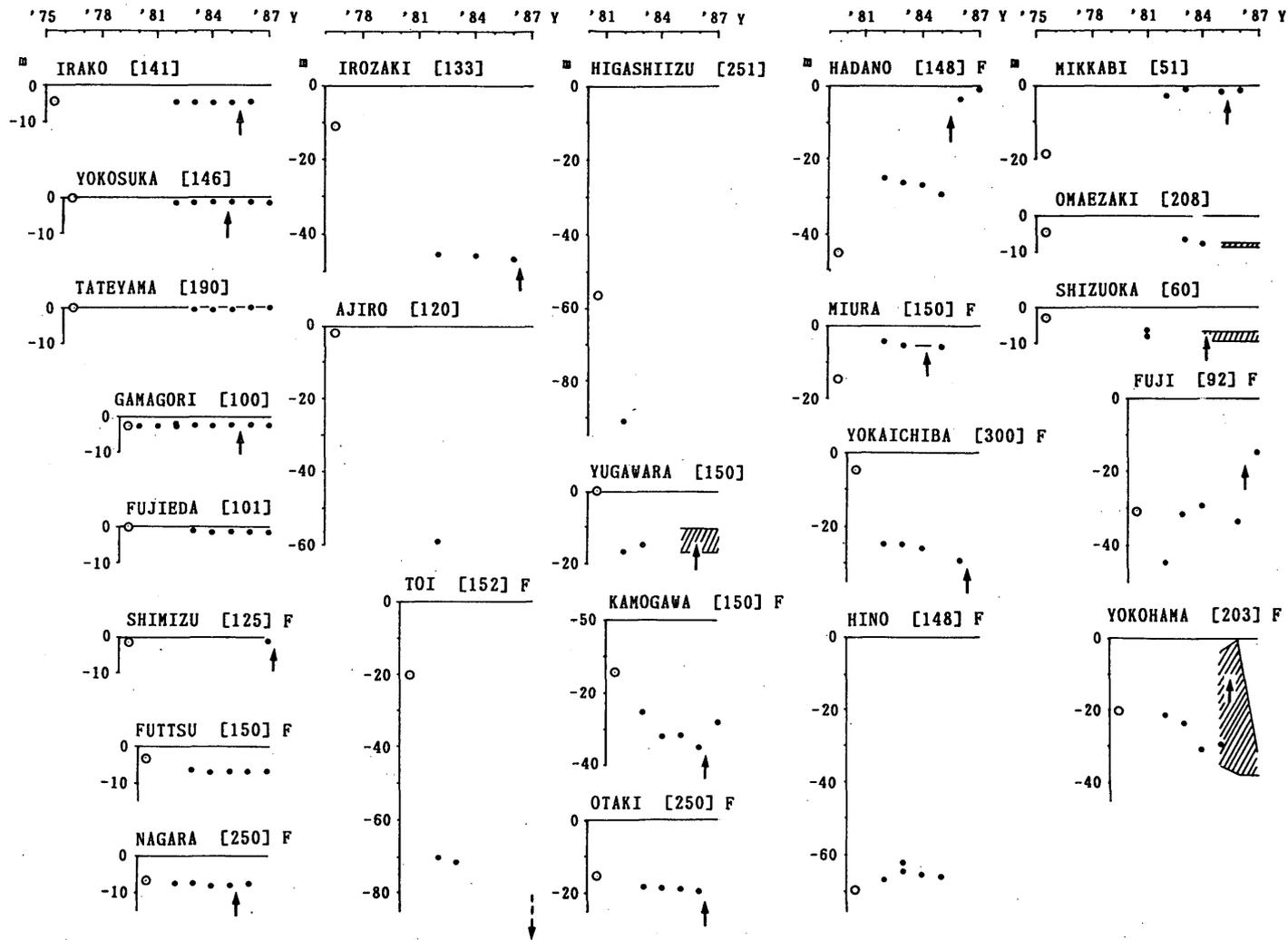


図3-1 歪観測井内水位。はじめの白ヌキ丸は設置直後の水位を示す。地点名のうしろの〔〕内は観測井の深度(m), Fはフルホール型の観測井, 上向き矢印は注水あるいは流入, 下向点線矢印(土肥)は水位が-80m以下, 斜線部は連続観測中の水位変化の範囲を示す。

## 水

フルホール型：富津・長柄

裸孔型の横須賀、館山、蒲郡、藤枝、清水の観測井内水位は、ほとんど地表に近い。

## (b) 設置当初の水位が大きく低下した地点

裸孔型：石廊崎・網代・土肥・東伊豆・湯河原

フルホール型：鴨川・八日市場

(a)の地点に比べて設置直後の水位が低いこと、低下した後安定していることから、設置作業による水は比較的早期に観測井から外部に流出したのではないかと考えられる。網代ではその他に1979年1月の伊豆大島近海の地震(M7.0)の後、大きな歪変化が繰返し現れた。当時近くの温泉の汲上げ量が異常に減少した報告や、観測井内の水位が設置当時に比べて-60mと大きく低下したといわれたことから、地震によって帯水層の状態が変化した可能性もあり、この時期に裸孔部から流出したとも考えられる。

## (c) 設置当初の水位の方が低い地点

裸孔型：三ヶ日

フルホール型：秦野・三浦

このうち、三ヶ日は観測井の深さが51mと浅く、しかも55%は裸孔部であるため、周辺の工場の地下水利用状況が観測井内の水位に直接反映している。その他は一応フルホール型であるが、地下水が観測井内に浸み込むこともある。あるいは先に述べたように孔口から雨水が流入した疑いも残っている。また、秦野、三浦では極く近傍で土地造成が行なわれた影響で帯水層の状況が変わったとも考えられる。

## (d) 水位変動が大きい地点

裸孔型：三ヶ日・御前崎・静岡・富士・湯河原・日野

フルホール型：横浜・鴨川・八日市場

静岡は観測井の深さが60mと浅く、観測井の32%は裸孔部であるため、周辺部の地下水利用状況が観測井内の水位に反映している。

御前崎(深さ208m)や湯河原(深さ150m)の観測井は深い裸孔型で、まとまった降水に際して、孔口だけからとは考えられない量の急激な水位の上昇が観測されている。フルホール型の横浜でも、まとまった降水で観測井内の水位の急上昇があったが、これは孔口付近から地下水流入であった(②-(c)参照)。

フルホール型の富士、日野でも周辺部の地下水の

変動が観測井内の水位に大きく影響しているらしい。これら地点は歪変化も不規則である。

この他に、静岡・網代では1981～1983年頃、静岡地方気象台と網代候所職員により、毎日手作業による水位測定を行なった(太田ら1982, 吉田ら1984)。また、蒲郡の水位は名古屋地方気象台職員により、観測開始当初より約4カ月毎に測定されたデータである。

## 3.2 連続調査観測

## (a) 静岡

静岡地方気象台職員の調査により、静岡の歪変化と水位は相関が高いことが判り、1984年7月から計測器による連続観測を始めた。

水位計は、半導体歪ゲージをとりつけたシリコンダイヤフラムを圧力センサーとして用いている。原理としてはシリコンダイヤフラムに静水圧が加えられるとゲージの電気抵抗が変化することにより水圧に比例した電気出力が得られる。大気圧の変化によって生じる分は大気開放パイプをつけて打消す(図3-2)。測定範囲は0～10m、精度は±1cm、分解能は0.1cmである。

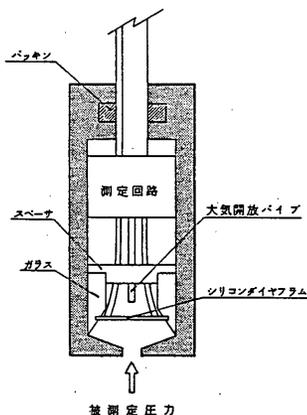


図3-2 水位計原理図

図3-3に歪と水位の日平均値による変化を示す。歪は縮みのトレンド、水位は上昇のトレンドを持っている。夏期は水位が低下し、正月や盆休暇では上昇する。静岡は都市部でありながら観測井が裸孔部の多い浅型であるため、付近の工場等の地下水利用による人為的影響を大きくうける。これに比べて降水の影響は緩く明瞭でない。水位の年周変化量は約2m、週変化量は約20cm、日変化量は約2cm程度で

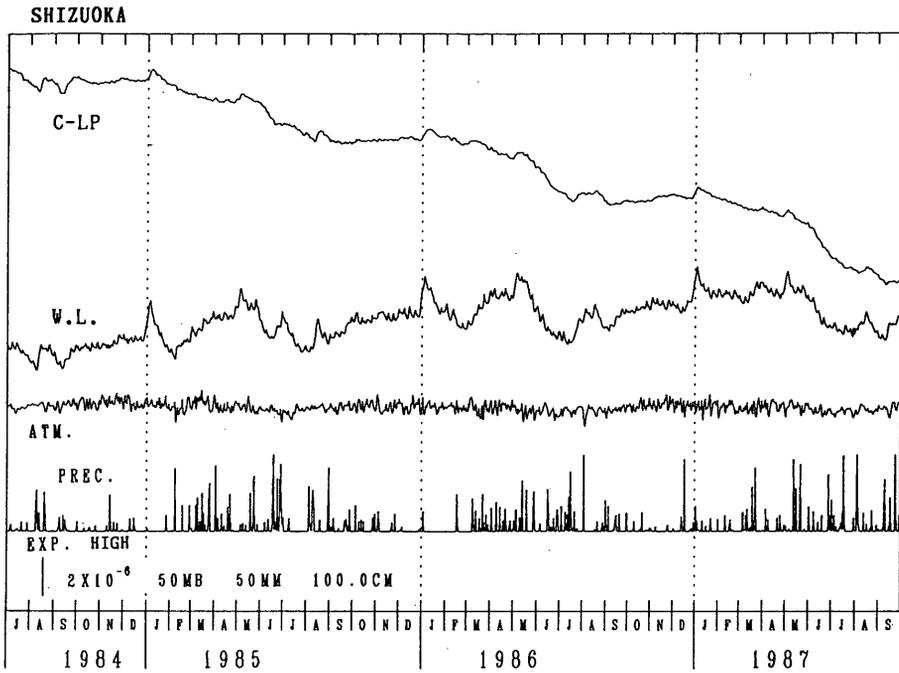


図3-3 静岡の歪変化(C-LP)と水位変化(W.L.)

ある。

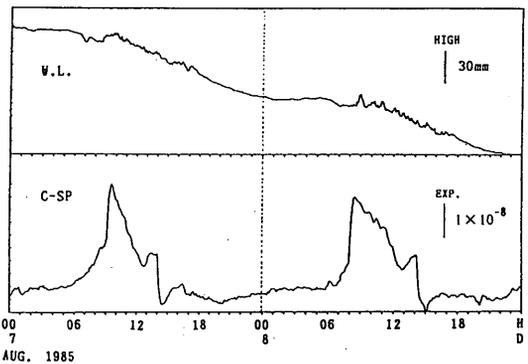
歪と水位の関係は長期的と短期的では応答が違う。日単位の変化では水位が上昇すると歪は伸び、しかも4~5日前の水位と相関が良い(吉田ら1984)。時間単位では逆に2桁小さいオーダーで水位が上昇すると歪は縮み、水位の方がやや遅れる。歪の日変化量は約 $1.5 \times 10^{-7}$  strainであるが、その中に毎朝8時頃 $1 \times 10^{-8}$  strainの急激な伸び変化と夕刻同量の縮み変化が現れ、夏期に顕著で休日には現れない(図3-4(a))。水位変化も日中はじょう乱が見られるが分単位の変化では歪との相関はない。このように歪と観測井内の水位は、分単位、時間単位、日単位、年変化、それ以上の長期変化でそれぞれに応答が違う。

また図3-4(b)に分値の歪と水位の変化を示す。矢印部は観測地点近傍でマンション建設のため杭打ち工事によるもので、シルト層をつき破る段階で毎回現れる(石垣1987)。歪には応力変化として即現れるがそれに対応した水位変化は見られない。このことは、極く短時間の応力変化に歪計は敏感に対応するが周辺の地下水にはあまり影響しないか、あるいは地下水が間もなく周囲から補給されて地下水状態

が元に戻ることも考えられる。先に述べたように、歪変化は観測井内の水位変化を直接うけるものではなく、地下水の状態を含めた周辺の応力変化を反映するものである。この工事例は応力変化に対する歪計の応答を示すものである。

#### (b) 湯河原

1985年4月より気象研究所により連続観測が実施されている。湯河原は通常-15m位の水位であるが裸孔型であるため、降水によって1~2日で水位が



(a) 夏期の変化

図3-4 静岡の歪変化(C-SP)と水位変化(W.L.)

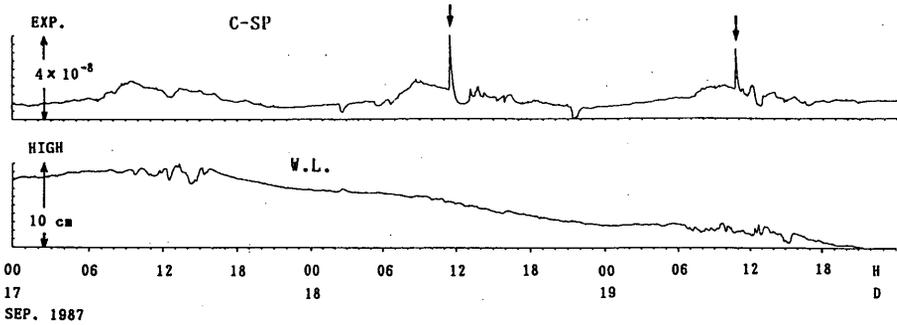
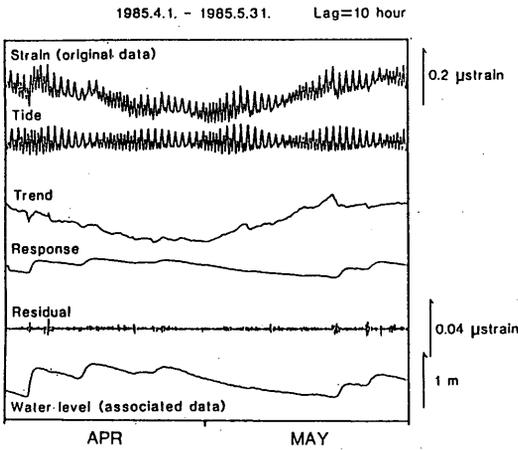


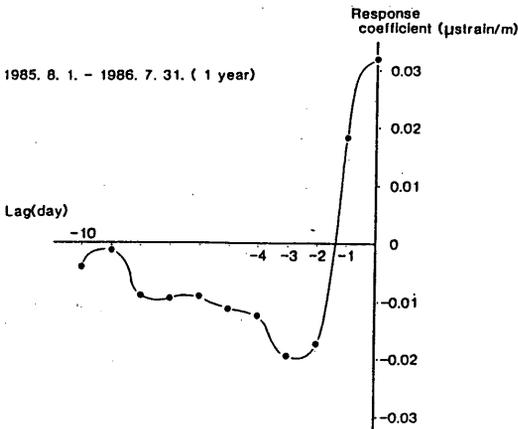
図3-4 (b) 工事(矢印)による変化

上昇し4~5mの変動をする。歪と水位の関係は極く短い周期では水位の上昇で歪はわずかに縮み、20~30時間の周期までは水位の上昇に対し歪は伸びの

応答をする。さらに長い周期に対しては水位の上昇に対し歪は顕著な縮み変化を示していることが報告された。これは降水による直接荷重→歪計付近の間隙水圧の増加→より広範囲の地下水層の荷重という過程で説明されている(小泉ら1986)。



(a) BAYTAP-Gによる歪応答解析例



(b) 水位に対する歪の応答

図3-5 湯河原の歪変化と水位変化 (小泉らによる)

(c) 横浜

横浜では観測開始以来、毎年5月末から6月はじめに急激な縮み変化で始まる $10^{-6}$  strainに達する同一パターンの年周変化が発生している(図3-6)。1985年5月から7月の間にフルホール型の観測井でありながら25mの水位上昇が発見され、これが年周変化と関連するものか調査するため、1985年11月より気象研究所により連続観測が実施されている。

1985年11月より水位は単調に減水していたが、1986年5月14日深夜に-33mであった水位が1時間で10m上昇し、1.5日後現地で孔口付近まで増水した痕跡が確認された。当夜は朝までに110mmの豪雨があり、地下50cm付近の帯水層が急上昇して、歪ケーブル取出口から観測井内に一気に流れこんだものと推定される。しかし観測井内の水位の急上昇では歪変化は発生していないこと、その後孔口を整備して雨水の流入を防いだ以降、歪変化が発生しても観測井内の水位は単調に減少していることから、観測井内の水位が直接歪に影響をおよぼしたものではない。但し、5月以外の豪雨では水位に変化はなく、該当の帯水層からの流入はなかったと思われる経験から、何等かの季節に関わる要因で、地表付近の帯水層の状態が急変し、時間遅れて地中変換部付近の地下状態が急変するものと推定される。また、毎年8月半ばにわずかな伸びのヤマが現れるパターンから、人為的な要因による地下水状態の変化も考えられる。

図3-6には年周変化を除いて推定した歪の長期

トレンドを破線で示す。なお孔口を完全に整備した後1986年5月に地表面付近までであった観測井内の水位は、はじめ1日当たり-30cm以上の低下を示したが、次第に緩やかになり、1987年12月末の水位は約-37mである。

この他、東京大学理学部脇田宏氏の協力を得て、御前崎、三浦、横須賀でも水位の連続観測による調査を行なった。

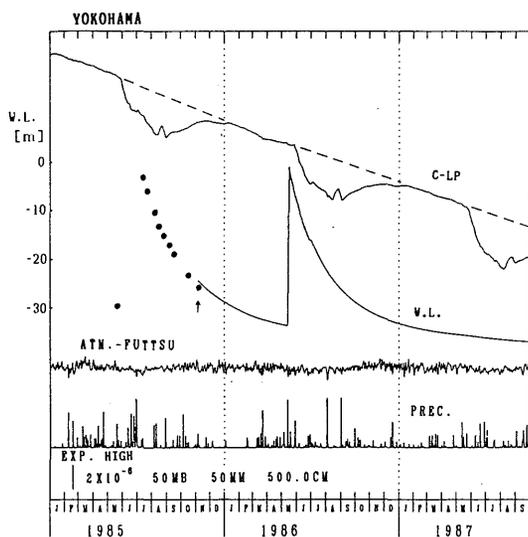


図3-6 横浜の歪変化(C-LP)と水位変化(W.L.)。黒丸は手作業による測定、↑は注水を示す。

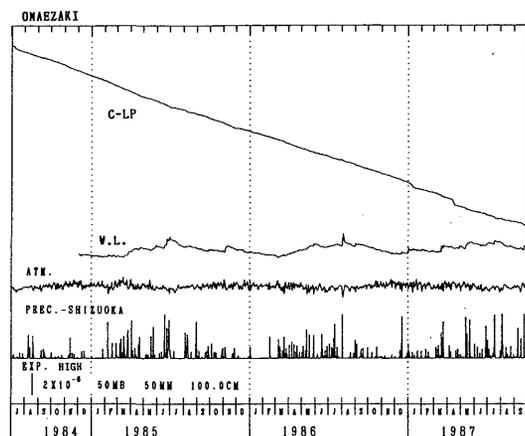


図3-7 御前崎の歪変化(C-LP)と水位変化(W.L.)。

御前崎の観測井は208mであるが-200m付近に5mの裸孔部がある。夏期は水位が上昇し、まとまった降水でも上昇する(図3-7)。数時間に50cm上昇したこともあり、孔口と地中の裸孔部の双方から雨水の流入が考えられるが、歪は降水時に雨量強度に対応したパターンの一時的な縮み変化( $10^{-8}$ strain)が見られただけである。1987年1月と4月に歪の縮み変化が観測されたが降水はなく、地下水位には対応した異常は見られなかった。これらのことから、この時の歪変化は地下水以外の要因によるものと考えられる。

三浦と横須賀では観測孔口からの蒸発散量にほぼ見合う程度の水位低下が見られる以外の変化はなかった。

#### 4. 注水テスト

観測井内に水を注入することにより、人為的に観測井内の水位を変化させて

- 1) 地中変換部の埋設状態
- 2) 周囲の地下水に対する観測井の応答

を調べることができる。

歪計は、埋設が完全な状態であれば、上部に点荷重がかかってもほとんど変形をしないので、観測井内の水位を変えても歪データに影響はない。しかしもし孔底の歪計の上部にかぶせてあるモルタルに亀裂が生じていると、観測井内の水位変化が直ちに静水圧として歪計に作用する。

また、注水後の水の減少のしかたで、注水後の水位から下の深さでの周辺部との地下水応答が判る。

○横須賀(1984年11月テスト)では、20cmの水位変化で直ちに $0.93 \times 10^{-6}$ strain ( $0.47 \times 10^{-9}$ strain/cm)に達する大きな縮み変化をした。この量は歪計センサーが流体中で静水圧の変化をうけた時と同値であることから、歪計上部のモルタルに亀裂があり、観測井内の水圧増が直ちに歪計に圧縮として作用したものと考えられる。但し観測井の水位変化は極めて小さく、また地震波形の記録も得られるので、亀裂は歪計上部付近の極く一部に限られ、岩盤とのカップリング状態は良好と考えられる。注水した水は減少しないため、歪データはオフセットした状態になった。

○湯河原(1985年3月, 12月テスト)では、注水400cmで $6 \times 10^{-9}$ strain ( $1.5 \times 10^{-11}$ strain/cm)の縮み変化が現れ、歪計上部のモルタルに微小亀裂の恐れがある。但し、地震波形記録からカップリング

状態は良好と考えられる。注水直後の水位減少の  
時定数は約100分であった。

○蒲郡(1985年6月テスト)では、注水と同時に、  
 $10^{-12}$  strain/cmの縮み変化をする。約1mの注水  
を繰り返したが、-108cmより上部は注水と同時に  
流出してしまう。

その他の地点では注水による歪計への影響は認め  
られなかった。試験の結果を表2に示す。

## 5. 水温調査

### 5.1 簡易測定

地下水の状態を間接的に測定する方法の一つとし  
て温度検層がある。また100mよりも深い所の温度  
検層データとその中間の岩石の熱伝導率がわかれば  
heat flowも知ることができる。歪観測では設置当  
時温度検層がされていないため、以下に述べる手作  
業による調査を行なった。

水位測定と同様、ケーブルの先端にサーミスタを  
取付け、水中の任意の深さでのサーミスタの抵抗値  
を測定する。分解能は $10^{-3}$ °C、精度は地上での較正  
により1°Cである。水位測定と違って一つの観測井  
の何点でも測定し、深さを変える毎にサーミスタが  
周囲の水と温度の平衡状態になるのを待つ作業であ  
るため、水位測定ほど繰り返して行っていない。や  
はり季節・時刻・降雨の前後を問わない測定である  
が、同一観測地点で時期を変えて測定した経験では、  
地表面を除いてほぼ類似の結果を得た。

測定は水頭から最も深い地点で-140mの間で行  
なった。これは、①携帯用簡易温度計として重量と  
大きさの点からケーブル長に制限があること、②観  
測井内が狭く、あまり深く挿入すると計器が途中で  
つかえて回収できなくなる、③2で述べたように孔  
内にモルタルが投入されたり土砂状のものが流れこ  
んで、孔底が上がっている等の理由による。

測定結果を表1に、各地点の温度の鉛直分布を図  
5-1に示す。温泉地帯の網代、湯河原では下部で  
高温である他は、日本での一般的な所と変わらない  
(約2°C/100m)(山本1983)。温度勾配は東海地域  
と南関東地域で差は見られないが、沖積層が厚い南  
関東地域や不規則変化が発生する地点は低温の傾向  
が見られる。これは地下水を介して熱が水平移動し  
ていると思われる。

水温変化は裸孔型の観測井とフルホール型でさほ  
どの違いはない。つまり裸孔型での温度変化も、周

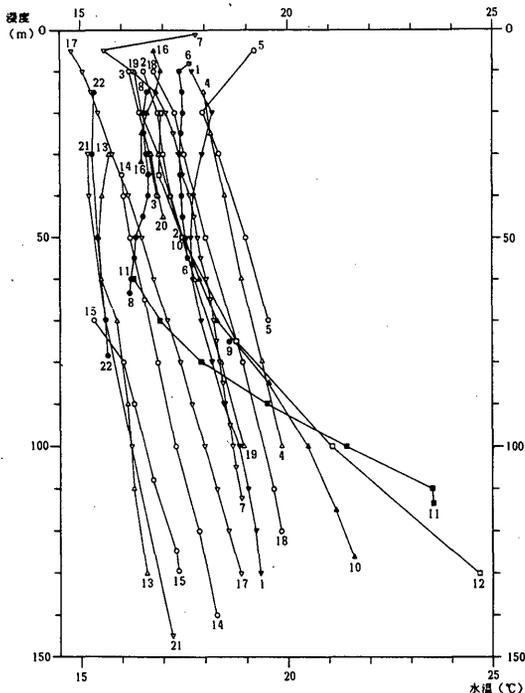


図5-1 歪観測井内の温度分布。(図中の番号は、  
1：伊良湖、2：蒲郡、3：三ヶ日、4：御前  
崎、5：藤枝、6：静岡、7：清水、8：富士、  
9：土肥、10：東伊豆、11：網代、12：湯河原、  
13：秦野、14：横浜、15：日野、16：三浦、17  
：横須賀、18：館山、19：富津、20：鴨川、21  
：大多喜、22：長柄)測定月日は表1を参照。

辺帯水層の水の移動による熱輸送によるものが主で  
あり、観測井内の水位変化に伴う緩慢な水の移動に  
よるものはわずかである。30%の裸孔部を持つ静岡  
(水位の日変化量は約2cm)で、午前と午後の時間  
差で温度測定したところ、10m以深の温度勾配は変  
わらないが、帯水層に相当する-30m付近で温度分  
布が変わる(図5-2)。また日野では1年違いの同  
じ5月で、観測井上部はそれほどでもないが-120  
m以深で約1°Cの温度差があった。

なお、表1には設置直後の気温、水温、孔底温度  
も示すが、外気温の差および水を使用する工法のた  
め、後年の測定時と条件が異なる。温泉地帯にある  
東伊豆は設置当時から孔底温度は54°Cであった。

### 5.2 連続調査観測

大島では1981年5月から、静岡では1984年7月か  
ら計測器による温度の連続調査観測を行なっている。  
また北海道大学の島村英紀氏の御協力により、三ヶ

表2 歪観測井における注水試験

地点名	実験年月	W L (c m)		経 過 1		経 過 2		備 考	
		注水前	注水直後	W L (c m)	T 1	W L (c m)	T 2	歪計への影響	そ の 他
伊良湖	1985, 6	-467	-40	-60	(20分)			なし	
三ヶ日	1985, 6	-164	-137	-145	(約10分)	-153	(約28分)		工場揚水と重なる。
静岡	1984, 1	-783	-237	-245	(10分)	-508	(約500分)	なし	
石廊崎	1986, 7	-4641	-1630	-1690	(60分)	-2183	(約15時間)	なし	
横須賀	1984, 11	-139	-119					顕著	歪計直上のモルタルに亀裂。 水位減なし。
蒲 郡	1985, 6	-203	-108	-188	(10分)			有	歪計上部のモルタルに軽度の亀裂。 -1m 以下は注水しても直ちに流出。
清 水	1987, 6	-35	0					なし	
富 士	1986, 10	-3352	0	-100	(約 9日)	-15m	(約250日)	なし	
湯河原	1985, 3	-1670	-1170		(約100分)			有	歪計上部のモルタルに軽度の亀裂。
秦 野	1985, 8	-2925						なし	
三 浦	1984, 1	-568	-438					なし	蒸発散以外に水位減なし。
横 浜	1985, 7	-468	-327	-327	(約30分)			なし	注水の有無にかかわらず1cm/1時間の 水位変化あり。
鴨 川	1986, 6	-3479	-3394					なし	孔口より下水流入と重なる。
大多喜	1986, 9	-1940	-1450	-1450	(約5時間)			なし	
長 柄	1985, 6	-714	-557	-556	(約20時間)			なし	
八日市場	1986, 10	-2895	-2630	-2632	(約30分)	-2632	(約60分)	なし	

T 1, T 2 : 注水からの経過時間。

W L : ケーシングパイプ上端をゼロとした水位 (地下へマイナスで表す)。

日・御前崎・網代・東伊豆・湯河原・日野でも水温観測を行ない歪変化との対応を調査している。

センサーは主に水晶温度計を使用している。これは水晶の発振周波数が温度によって変化することを利用して周波数変化量を取り出すものである(島村1986)。

歪計の地中センサーにはシリコンオイルが充填されているため、歪計センサーとしての熱膨張係数は $10^{-4}$ strain/°Cで岩石の熱膨張係数より1桁大きい。

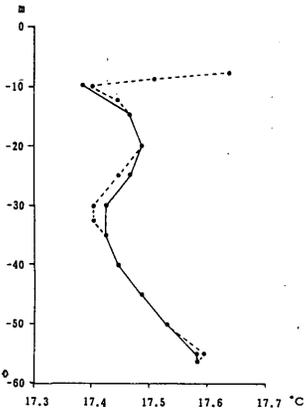


図5-2 静岡における温度分布。実線は09時から12時の測定値。点線は13時から15時の測定値。-30m付近で4時間の時間差がある。

また周辺の温度上昇に対して歪計の応答は縮みのセンスを示す。

(a) 大島

大島ではフルホール型の観測井孔底の歪計直上約1mのモルタル中に、直径32mm、長さ250mmの容器に入った温度計を埋設し、1981年5月から観測を行なっている。センサーは水晶発振式で0.5°Cの絶対精度を有し、1/1000°Cの分解能がある。図5-3に歪と温度の変化状況を示す。観測初期は埋設時のモルタルの固化に伴う発熱分の放熱による急激な温度低下を示していたが、1982年5月には安定して $16.270 \pm 0.001$ °Cの状態が約1年続いた後、1983年5月から上昇の傾向となった。1985年と1986年に雷災をうけたが1986年11月までの3.5年間に約50m°C(約14m°C/年)の温度上昇が観測された。この温度変化は、①温度センサーのドリフトと、②実際の温度変化が考えられる。もし②であるとすれば、大島の歪計の熱応答は $2 \times 10^{-7}$ strain/m°Cであること(上垣内ら1986)を用いれば、温度変化による歪変化は $2.8 \times 10^{-6}$ strain/年である。歪変化は1982年から1986年11月まで約 $1.1 \times 10^{-5}$ strain/年の縮み変化を続けていたが、温度の影響を除いた歪変化は $8 \times 10^{-6}$ strain/年であったことになる。

1986年7月から現在までm°Cのオーダーながら温度の上昇・下降が観測され、歪計にも温度変化に見合

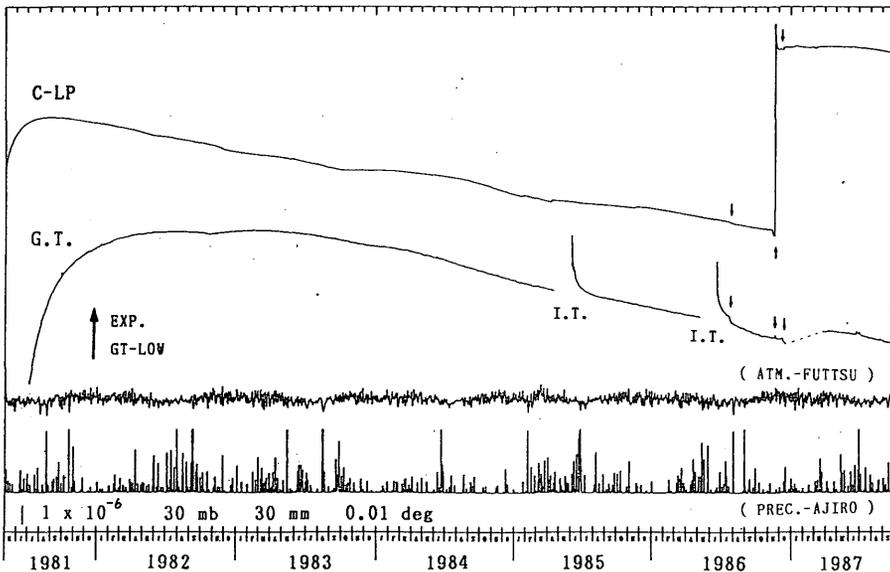


図5-3 大島の歪変化(C-LP)と地下温度変化(G.T.)。I.T.は雷災による欠測、小矢印は定常的でない温度変化を伴った歪変化を示す。温度は下向に上昇を示す。

う縮み・伸びの変化をしていることから、大島の火山活動に関連する温度変化があったものと報告されている。また同年11月21日の大島の割れ目噴火に際しては、 $1.2 \times 10^{-4}$ strainの急激で大きな歪の伸び変化と、同時に20分間で7 m°Cの温度低下が観測された。温度下降を岩体の断熱膨張によるものと考えたとオーダは一致する(上垣内ら1987)。

なお大島では設置時に観測孔口がモルタルで封じられており、1986年12月に開口したところ地下-60 mまでモルタルが充填されており、その上部に水は存在していなかった。

#### (b) 東伊豆

東伊豆の観測井は深さ251 mで-230~-245 mに裸孔部がある。1982年から水晶発振式のセンサーを用いて水温観測を行なっている。精度は $1 \times 10^{-3}$ °C、分解能は $10^{-5}$ °Cである。東伊豆は温泉地帯のため温泉水の影響により、設置したセンサーの寿命が短く、これまでに7本のセンサーでとびとびの期間のデータが得られている。1982年の観測結果から1°Cの温

度低下に対して $0.5 \times 10^{-4}$ strainの歪の伸び変化が観測されている。東伊豆は1980年7月以来伸び変化が顕著に増大し、前述のことから、歪の伸び変化は主に温度低下によるものと説明されてきた。歪の伸び変化は1982~1984年頃の1日当たり $2.3 \times 10^{-7}$ strainの伸び量をピークに減少の傾向となり、1987年には $1 \times 10^{-7}$ strain/日の伸び量になっている(図5-4)。

一方、温度の低下量も1982年の1日当たり4 m°Cから1986年には0.4 m°Cと小さくなって、定性的には温度低下による歪の見かけの伸び変化の減少と見ることができる。温度観測期間と1日当たりの歪伸び量と温度低下量は次のとおりである。

観測期間	1日当たりの温度低下量
1982年3-4月	4 m°C
1983年3-5月	3.7
1984年1-2月	1.07
1985年2-3月	1.3
1986年7-9月	0.44

この結果、温度1 m°Cに対する歪計の応答は0.5

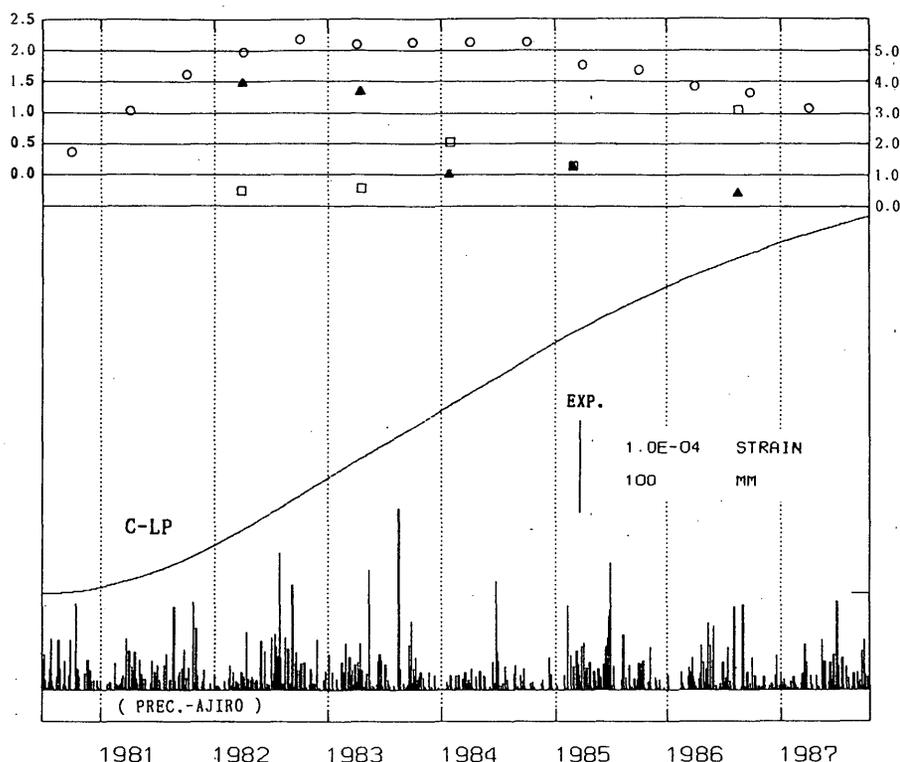


図5-4 東伊豆の歪変化と温度変化。○は半年毎の1日当たりの歪伸び量( $\times 10^{-7}$ strain, 左上スケール)。▲は1日当たりの温度低下量(1 m°C, 右上スケール)。□は1 m°C当たりの歪伸び量( $\times 10^{-7}$ strain, 右上スケール)。

から  $3 \times 10^{-7}$  strain に増大し、これは温度センサーのドリフトでは説明ができない。東伊豆では温度の低下を鈍らせ、更に歪計の伸びを抑制するような要因が生じているものと推定される。

このように大島でも東伊豆でも温度変化は歪計に現れる現象をよく説明しており、温度観測による成果は大きい。我々は  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  strain までの小さな歪変化を監視しているが、それらの歪変化も温度変化を伴うものかどうかを知ることは、特異変化の識別のためにも必要なことである。そのためには  $1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$  以下の分解能でも長期的に安定して動作し、また温泉水にも耐えうるセンサーの開発が望まれる。

#### あとがき

地殻変動観測は周辺の環境条件による影響が大きい。特に地下水の動きは非定常であるため、地下水の動向を常時把握しておくことが不可欠である。埋込式体積歪計も観測開始以来10数年間に各地点で種々の特異な現象が観測された。しかし歪計1要素だけのデータではその現象が地下のどのような状況を反映しているかの説明をすることはできない。

一方、石廊崎や網代の歪計で伊豆大島近海地震や伊豆半島東方沖の地震との関連現象が現れたり、大島の火山噴火に関連して周辺部まで波及する現象が観測されたり、大島の歪計には火山活動の微細な経過に対応する現象が見られるなど、埋込式体積歪計の有効性も評価されている。これら現象の確証を得るためにも、地下水観測に適する観測井を整備すること、 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$  まで長期的に安定して動作し、温泉にも耐えるような温度計を開発すること、これらの連続観測およびセンターへのテレメータが望まれる。

#### 謝辞

温度と水位の連続観測に当たり北海道大学の島村英紀氏、東京大学の脇田宏氏、気象研究所の各諸氏に多大の御支援をいただき、厚く御礼申し上げます。また本報告は歪観測の感度検定に携わった大勢の担当官の労苦の成果であります。特に、測定器材の製

作については上地清市技官に、横浜の水位観測については高橋博技官に、印刷に当たっての作表については松島功技官に御協力をいただき合わせて深く感謝致します。また山本雅博調査官からも多くの御助言をいただき御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 石垣祐三(1987):静岡の歪計に現れた短周期変化について、歪ニュース, 58.
- 上垣内修・佐藤馨(1987):昭和61年(1986年)伊豆大島噴火-体積歪計, 災害時火山現象調査報告, 66-82.
- 権根勇(1980):水文学, 大明堂
- 気象庁観測部地震課(1979):地殻変動連続観測と埋込式歪計(I), 測候時報, 46, 9-25.
- 気象庁地震課地震予知情報室(1978):埋込式体積歪計による観測結果について, 地震予知連絡会会報, 20, 34-35.
- 気象庁地震予知情報課(1986):東海・南関東地域における歪観測結果(観測開始から1985年12月までの概要), 地震予知連絡会会報, 36, 271-275.
- 小泉岳司・吉田明夫・二瓶信一・高橋博(1986):体積歪計孔内における水位観測(2)(湯河原・横浜), 測地学会講演予稿集, 65, 115.
- 二瓶信一・上垣内修・佐藤馨(1987):埋込式体積歪計による観測(1)——1976年~1986年の観測経過, 験震時報, 50, 25-48.
- 岡太郎(1983):自然丘陵地における土壌水流動——観測とその解析——, 京大防災研究所年報, 26B-2, 1-12.
- 太田金房・吉田明夫(1982):地下水位と歪との関係, 東管技術ニュース, 67, 56-62.
- 島村英紀(1986):精密地下水温計, 北海道大学地球物理学研究報告, 47, 1-15.
- 菅原正己(1972):流出解析法, 共立出版
- 山本莊毅(1983):地下水調査法, 古今書院
- 吉田明夫・二瓶信一・太田金房・薄田真二(1984):静岡と網代における体積歪観測孔内の水位変化と歪変化, 気象研究所研究報告, 35, 199-207.