

松代地震観測井における地中の温度とひずみの 観測について

鈴木宏芳・高橋末雄・高橋博

国立防災科学技術センター

Observations of Underground Temperature and Strain at Matsushiro Observation Well

By

Matsuo Takahashi, Hiroyoshi Suzuki and Hiroshi Takahashi

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

The underground temperature was observed at the Matsushiro Observation Well from Aug. 1966 to Aug. 1967 with intent to research the relation between earthquake activity and geothermal activity. But geothermal variations which seemed to be caused by anomalies of underground water were observed.

And underground strain was also measured at the same well. The results are reported in this paper.

まえがき

国立防災科学技術センターでは、松代群発地震に伴う調査の一環として、松代地震観測井において、1966年8月より、地温の観測を行なった。

当初の目的は、地震活動と火山性活動の関連性などを調べるため、地温や温度の勾配などの変化を観測することにあつたが、実際はそのような変動よりも、むしろ、皆神周辺に大量に湧出した、異常湧水によると思われる地温変動が観測された

ので、それについて報告する。

また、同観測井において、ひずみの観測も行なつたので、その結果についても報告する。

1. 地中温度について

1.1 測定方法

観測井における地温の測定は、主としてサーミスターによつた。最深-200mは、他の観測装置とともに観測容器中に、深度-150m、-100m、-50mは、防水装置をほどこしたサーミスターを、

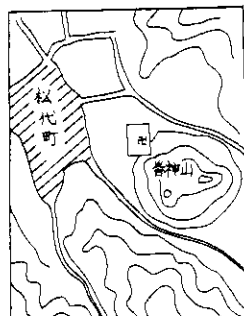
観測ケーブルにそわして設置した。なお-200mの観測装置は基盤にセメンチングされているが、他の深度のものは孔口まで水をみたした内径97mmのケーシング中にある。

測定は、サーミスターより、ケーブル、地上の測定室の切換調整器をへて、ペン書き記録計によって行なった。

使用した測定器類を表-1-1に示す。

表-1-1 使用測定器
List of the used apparatus.

サーミスター	宝工業製 SB型 測定範囲 0~50℃ 感度 1mv/2.5℃(入力調整器接続のとき 入力調整器電源 宝工業製 (1966.11.16~1967.1.14は防災センターの定電圧装置使用)
記録計	1966.8.6~1967.1.14 東亜電波製 EPRペン書き記録計 1967.2.16~1967.8.10 横河電気製 LERペン書き記録計 使用感度 10mv フルスケール(1℃が1cmに相当)
ひずみ温度計	共和電業製 カールソン歪計 使用温度範囲(℃) -30~70 温度測定精度(℃) ±1
抵抗指示計	土木測器センター製 M-4 S型



A: 観測井
B: 神水
C: コンクリート管

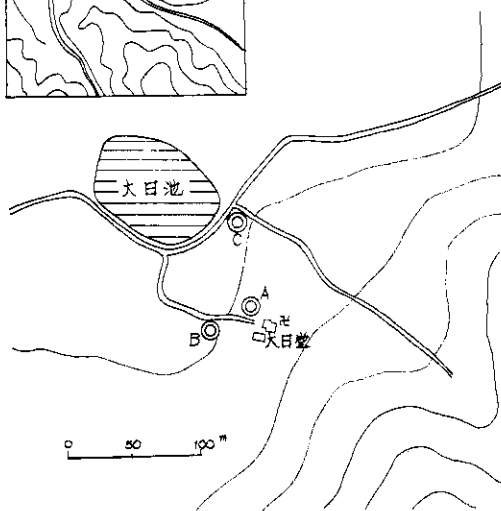


図-1-1 温度測定位置図
Locations of the temperature measurements.

測定は連続観測を一時行なったが、地温のため、温泉のような敏感な変化²⁾があらわれないので、防災センターの研究者が、松代に行ったときに測定することとした。従って、測定回数は、月におおよそ2~3回となった。

また深度200mにうめ込まれた、ひずみ計の抵抗値による温度観測も数回行なった。

観測井孔口、および、観測井付近の、2つの湧水(御神水および、昔の温泉試験孔よりの湧出といわれているコンクリート管よりの湧水)も、今回の異常湧水現象により、湧出量、水質などに大きな影響をうけたので、これらを観測井の測定の際に、水銀温度計によって測定した。これらの測定地点を図-1-1に示す。

測定は1966年8月6日より行なわれたが、途中記録計の故障が数回あり、信頼できる記録は、測定開始後1ヶ月程度と、1967年1月以後のものである。1967年8月上旬に、地下の測器の不調によると思われる、原因不明の記録変動があらわれてその後回復しないので、サーミスターにつ

いては1967年8月に測定を中止した。

1.2 測定結果について

サーミスターで測定された値を表-1-2に、ボーリング孔付近の湧水温度値を表-1-3に、またひずみ計によって測定された温度を表-1-4に示す。これらをまとめて図示すると、図-1-2のごとくなる。

これらの測定値のうち、サーミスター温度の1966年10月~11月の大きな変動は、入力調整装置の故障によるものであり、また1967年8月以降の値は、地中の測定装置部分の、永久的故障によるもので、測定値としては信頼できないもので、本来は表示すべきではないものである。

連続測定は、-200mについては、1966年9月3日から同11日まで行なった。11月16日から、1967年1月14日は故障した定電圧装置のかわりに別の定電圧装置を用いて測定した。1967年2月以降は、定電圧装置の修理もおわり、記録

表-1-2 サーミスター温度測定表

List of the temperature measured by the thermister.

	50m(℃)	100m(℃)	150m(℃)	200m(℃)	備 考
1966. 8. 6	22.5	24.5	25.8	26.0	
9. 3	22.5	23.0	23.0	23.7	-200m連続測定
9. 4	22.7	23.3	22.8	23.6	"
9. 5	-	-	-	23.4	"
9. 6	-	-	-	23.4	"
9. 7	-	-	-	23.4	"
9. 8	-	-	-	23.4	"
9. 9	-	-	-	23.5	"
9.10	-	-	-	23.5	"
9.11	-	-	-	23.5	"
10. 7	(18.2)	(16.2)	(16.2)	(22.3)	定電圧装置不調
10.25	(25.2)	(24.2)	(-)	(23.4)	"
10.26	(25.1)	(24.0)	(22.9)	(23.5)	"
11. 1	(23.0)	(22.8)	(19.8)	(20.5)	"
11.16	22.4	23.1	22.7	23.1	別の定電圧装置を使用
11.27	22.8	23.6	22.9	23.5	"
1967. 1.14	20.9	22.8	22.0	22.8	"
2.16	19.8	22.0	21.4	22.2	
3. 6	19.8	22.2	21.6	22.4	
3.17	19.5	21.9	21.3	22.0	
3.29	19.3	22.0	21.5	22.2	
4.20	19.8	21.9	21.3	22.2	
4.21	19.8	21.9	21.3	22.2	
5. 9	20.1	22.2	21.4	22.4	
5.20	20.2	22.0	21.6	22.4	
5.25	20.2	22.0	21.5	22.3	
5.26	20.3	22.0	21.5	22.3	
6. 1	20.3	22.1	21.5	22.3	
6.22	20.2	22.0	21.4	22.4	
6.29	20.3	21.9	21.3	22.2	
7.14	20.3	22.1	21.6	22.3	
7.17	20.3	22.0	21.5	22.3	
8. 4	(19.8)	(22.8)	(21.7)	(15.3)	地中測器故障
8.10	(19.7)	(22.8)	(21.7)	(14.7)	"

- 50m
- 100m
- 150m
- 200m
- 神水
- 丁川(上管)
- 坑口(-4m)
- 試計計NO.1
- " NO.2
- " NO.3

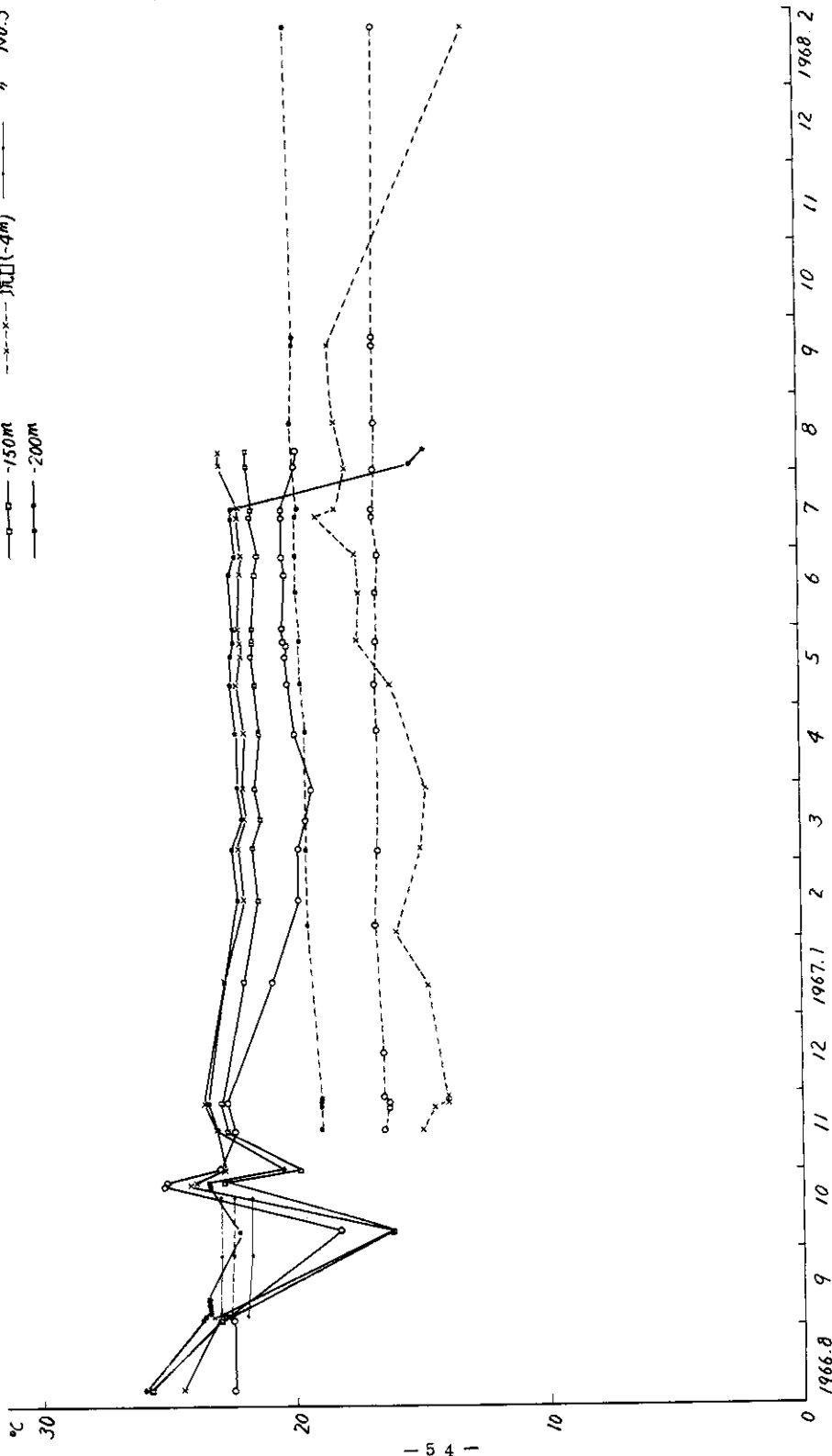


図-1-2 温度測定図
Variation of temperature

表-1-3 観測井附近湧水温度
Temperature of the ground water near the observation well.

	神水	コンクリート管	坑口(-4m)	気温
1966. 7.	16.5	—	—	—
11.16	16.5	19.0	15.0	—
11.25	16.3	19.0	14.5	18.0
11.27	16.3	19.0	14.0	—
11.29	16.5	19.0	14.0	5.7
12.16	16.5	—	—	-1.0
1967. 1.13	—	—	14.8	8.3
2. 3	—	—	16.0	—
2. 6	16.8	19.5	—	3.0
3. 5	16.7	19.5	—	—
3. 6	—	—	15.0	0.5
3.29	—	—	14.8	13.7
4.21	16.6	19.5	—	—
5. 9	16.7	19.7	16.1	22.2
5.26	16.6	19.7	17.4	24.6
6.15	16.6	19.8	17.3	12.7
6.29	16.5	19.8	17.4	—
7.14	16.7	19.8	19.0	—
7.17	16.7	19.7	18.2	—
8. 3	16.6	19.9	17.8	—
8.21	16.6	19.9	18.2	—
9.21	16.6	19.8	18.4	—
9.24	16.6	19.8	—	—
1968. 1.25	16.5	20.0	13.0	—
2. 9	16.4	19.8	—	—
7.21	16.7	20.0	—	—

計も新たに安定性のよいものを備えたので、これ以後の測定値は信頼できる。

1.3 結果の考察

サーミスターによる最初の温度測定は、8月6日で、その時の測定によると、-50m 22.5℃、-100m 24.5℃、-150m 25.5℃、-200m 26.0℃であり、この値は、試験孔掘進中に行われた、孔底温度測定値³⁾

(図-1-3)にくらべると、-200mを除いて、いずれも高い温度を示している。-200mの温度は、25.5℃と孔底温度測定値とはほぼなじみであるが、後者は湧水どめのセメント注入後の値である。それ以前の-198mの孔底温度は22.6℃であることから、この時期にサーミスターによって測定された温度は、測器およびケーシングパイプを固定するために注入された、セメントの固化熱による影響を受けたものであると思われる。このことはそれからほぼ1ヶ月経過した9月3日の測定では-50mを除いて1~3℃温度がさがっていることから推定される。またボーリング中に-199mから大量に湧出した湧水の温度が、孔口で22℃であるから、-200mの真の値は22~23℃程度であったと思われる。

なお孔底温度は、地表から注入する泥水(御神水を使用)により、正常な地温より多少低目であったと思われる。-200mについて連続観測した9月3日から9月11日の間に0.2℃の温度降下が見られ、また9月4日と10月20日の歪計による温度測定でも、約0.1℃の温度降下が見られたので、この頃でも正常な地温にはまだもどっていないものであろう。

表-1-4 ひずみ計による温度測定記録(-200m)
Temperature measured by strain meter.

	1	2	3
1966. 9. 4	22.6	23.05	21.95
9.28	22.5	23.0	21.9
9.29	22.5	23.0	21.75
10.20	22.48	23.0	21.8

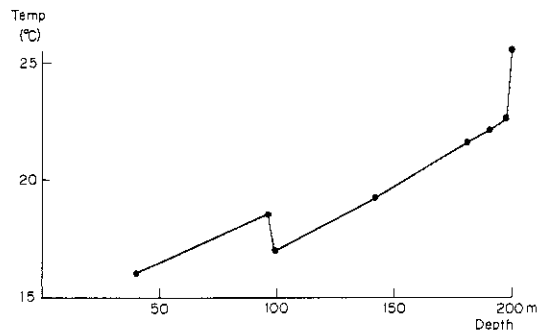


図-1-3 観測井孔底温度測定結果
(200mの値はセメント注入後)

Measurement of temperature at bottom of the observation well.

観測井の温度は1966年11月から1967年2月にかけては徐々に低下し、特に-50mの温度が下り、1967年2月~7月には、-50mをのぞきほぼ一様となり、安定化したことを示している。この安定化した温度を求めると、-100m 22.0℃、-150m 21.4℃、-200m 22.3℃となり、特に-200mの温度は観測された-198mの湧水とくらべても妥当なものであろう。

-100mと-150mの温度は、浅い-100mの方が-150mよりも高く、両者とも孔底温度よりも高い。また-100mから-200mの間でも温度差は1℃程度にすぎない。このような現象は、ちょうどこの時期、皆神山周辺で大量に湧出した異常湧水によるものと考えられる。-150mは皆神山溶岩が湖底堆積層に変わる所であり、この層は比較的不透水性の地層であり、また-100mは皆神山溶岩の中で、この溶岩は非常にクラックの多い溶岩であることが試錐で明らかになっている。

第2活動期の末期、地下水の変動が観察されていたが、第3活動期のピークの直後、1966年9月初旬から、松代町の東寺尾、加賀井、長礼、田中、瀬関、牧内、屋地一帯に大量の湧水が発生した。1966年8月から9月にかけて、観測井の各深度の測定値が孔底温度より高く、しかも温度差がないのは、特に9月初めには各深度の温度がほとんど同一となったのは、セメントの固化熱の影響だけでなく、異常湧水が地表噴出直前の状況となり地下の割目を全面的にひたしたために生じたものと考えられる。湧水の最盛期はおしくも定電圧装置の故障時期にかさなったが、以後次第に湧水量は減少し、1967年4月頃にはかなり減少した。湧水現象の退潮期にはほぼ比例して、全体に温度の低下と深度別の差が大きくなっていることが上記の考えに合致するものと思う。湧水現象は極めて徐々におとろえつつあるが、今なおつづいており、各深度の温度は1967年春以来、あまり変化をみせないものと考えられる。この異常湧水は、やや温度の高い、温泉性の Cl^- の非常に多いものと皆神山麓の弱アルカリ性で、温度のややひくい Cl^- の少ないものと2系統ある。後者は観測井付近を中心にして多量に湧出したものである。-198mの湧水は前者の影響をうけたものと思われ、掘さく当時すでに Cl^- がやや多かった。温泉性の地下水は、地震活動と深く関係した原因によって上昇してきて、上方の地層に滲透したが、湖底堆積

層は不透水質で、それより上方の皆神山安山岩は透水質なので、地下水が湖底堆積層中のクラック等を通して、皆神山溶岩中に入り、より浅所の温度上昇の原因になったものと思われる。このことはあとで説明する地表湧水からも考えられる。

-50mのものは、1967年2~4月と5~7月の温度をくらべると、ほぼ1.0℃あとの方が高くなっており、これは有意なものと考えられる。深度が50mであるから、季節変化とは考えられず、この原因は皆神山系の Cl^- のない湧水によると思われる。この湧水の地表温度は、15~18℃で、この湧水によって-50m付近の温度が低下したが、その後この湧水のおとろえとともに地温が上昇したと考えられる。

観測井孔口(-4m)の温度は、湧水の水位より浅いと思われ気候に大きく左右されている。御神水は以前から湧出している Cl^- の少ない湧水で、これは湧量の測定も行われている。コンクリート管は皆神山麓の、深さ100m程度のところから出ているボーリング湧水であり、第3活動期以後 Cl^- が時とともに、急激に増大しており(図-1-4)、それとともに、赤褐色沈澱を生じるようになり、水温もわずかず増加を示しており、温泉系の湧水の影響を強くうけていることがうかがえる。

これらの温度変化をみると、御神水は年間を通じて、水温がほとんど変化しないが、1967年1~2月がやや(0.2℃くらい)高く、それに関係

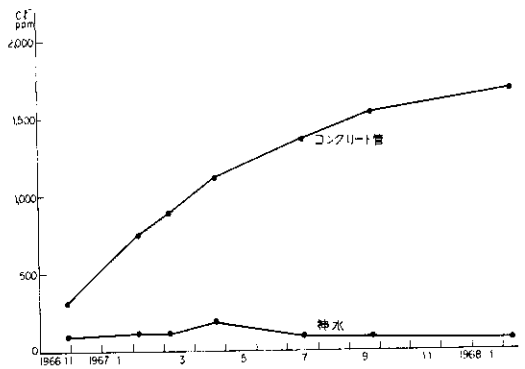


図-1-4 湧水中の Cl^- 濃度変化
Cl⁻ variation in the ground water.

があるのか、1967年2～4月に、一時的に1966年11月の約2倍の CO_2 濃度を示し、温泉性地下水の上昇が、一時的ではあるが、あったかようである。1966年9月より、地下深所にあった CO_2 量の多い高温の地下水が、何らかの原因で地下水圧が上昇してきて、それまで地下浅所を流れていた、御神水系の CO_2 の少ない湧水が地表に流出したものであろう。試験孔付近で深度を推定すると-50～-100mの間に、その2つの地下水の境界が存在すると思われ、また2つの地下水の混合も行われているであろう。それが神水の温度と CO_2 の上昇に表われているものであろう。湖底堆積層は、比較的不透水性のため、地下水による温度の上昇が、皆神山溶岩よりも少なかったものと思われる。

1.4 まとめ

観測井における地中温度の観測から次のような解釈ができるものと考えられる。

1966年第2活動期末期から現われたした温泉性地下水の上昇活動が、第3活動期とともに著しく活潑となり、1966年8月には、すでに地表付近にまで達し、岩石の割目をみだしていた。1966年9月には、ついに地表面に達し、皆神山周辺一帯に、多量の湧水を発生させた。この湧水には CO_2 にとむ、やや温度の高い地下深部から上昇してきた湧水と、 CO_2 のとぼしい温度のやや低いものが知られている。観測井付近に湧出しているものは、後者に属するが、付近の昔のボーリング孔から湧出している湧水の CO_2 濃度が、時とともに高まっていることから、前者の影響を強くうけた地下水が少くとも深度200m程度にあり、これが湧水の最盛期には、地表近くまで上昇してきたものと思われる。このため、観測井内の温度は、-50mから-200mまで、ほとんど同じ温度になったと考えられる。この異常湧水も、1966年11月以後は、しだいにおとろえていったことに対応して、地下の温度はしだいに以前の状態にもどっていった。しかし、湧水活動は、なおつづいており、1967年春頃になって地下地温はほぼ一定の所におちついた。地下深部の地下水の影響をうけているため、-100m付近の地温は-200m付近とはほぼ等しく、火山灰質で水を通しにくい-150m付近は地下水の影響も少なく、-100mより低い温度を示している。-50mの地温が低いのは、深部の地下水の影響をうけていないやや

低温の表層付近に存在する地下水の影響下にあるためと思われる。

2. ひずみ計によるひずみの観測

2.1 測定方法

測定は、深度200mの管体内に設置されたカーボン型ひずみ計によって行われた。³⁾このひずみ計は、検出部内の2本の抵抗線の抵抗比の変化を検出して、ひずみ量を測定するものである。検出部からの出力は、ケーブルを経て、地上の観測室内の入力調整器を通して、打点記録計により記録される。

測器の主な性能は次のとおりである。

カーボン型ひずみ計 共和電業製CS-10FM2型

ひずみ測定範囲 引張り 500×10^{-6}

圧縮 $1,000 \times 10^{-6}$

最少検出ひずみ 6.5×10^{-6}

使用温度範囲(°C) -30～+70

直線性、ヒステリシス 定格値の1.5%

記録計 富士電機製6打点記録計

記録紙送り速度 $20 \text{ m}^2/\text{h}$

測定範囲(入力調整器と組み合

せた場合のフルスケール100mm)

800×10^{-6}

精度 フルスケールの2%

2.2 測定結果

測定は埋設直後の1966年7月9日より、連続的に行われたが、1967年4月に3成分中、2成分はもはや変動を検出しなくなり、残り1成分も変動がはげしく、観測値の信頼性が失われたため1967年に観測をうちきった。なお、観測期間中数回にわたってひずみ量の絶対測定を行なった。

観測装置埋設後1ヶ月以内に、すでに予想以上の縮小を示し、検出部の測定可能範囲をかなり越えていることが、絶対測定の結果から明らかになったが、このひずみ量は、実際にひずみがかわったのか、うめ込み直後の試験で明らかになった測器の絶縁低下によるものか、明らかでないが、相対的なひずみの変化の方向は、一応信頼できるものと思われる。なお、埋設直後の著しい変動が、たまたま、松代群発地震中、地殻変動のもっとも著しくあらわれた第3活動期にかさなったため、観測装置の埋設方法によるものか、地殻変動によるものかも明らかでない。

図-2-1-a、図-2-1-bに示した観測値は、打点記録紙上の各成分の一点を原点として、それ

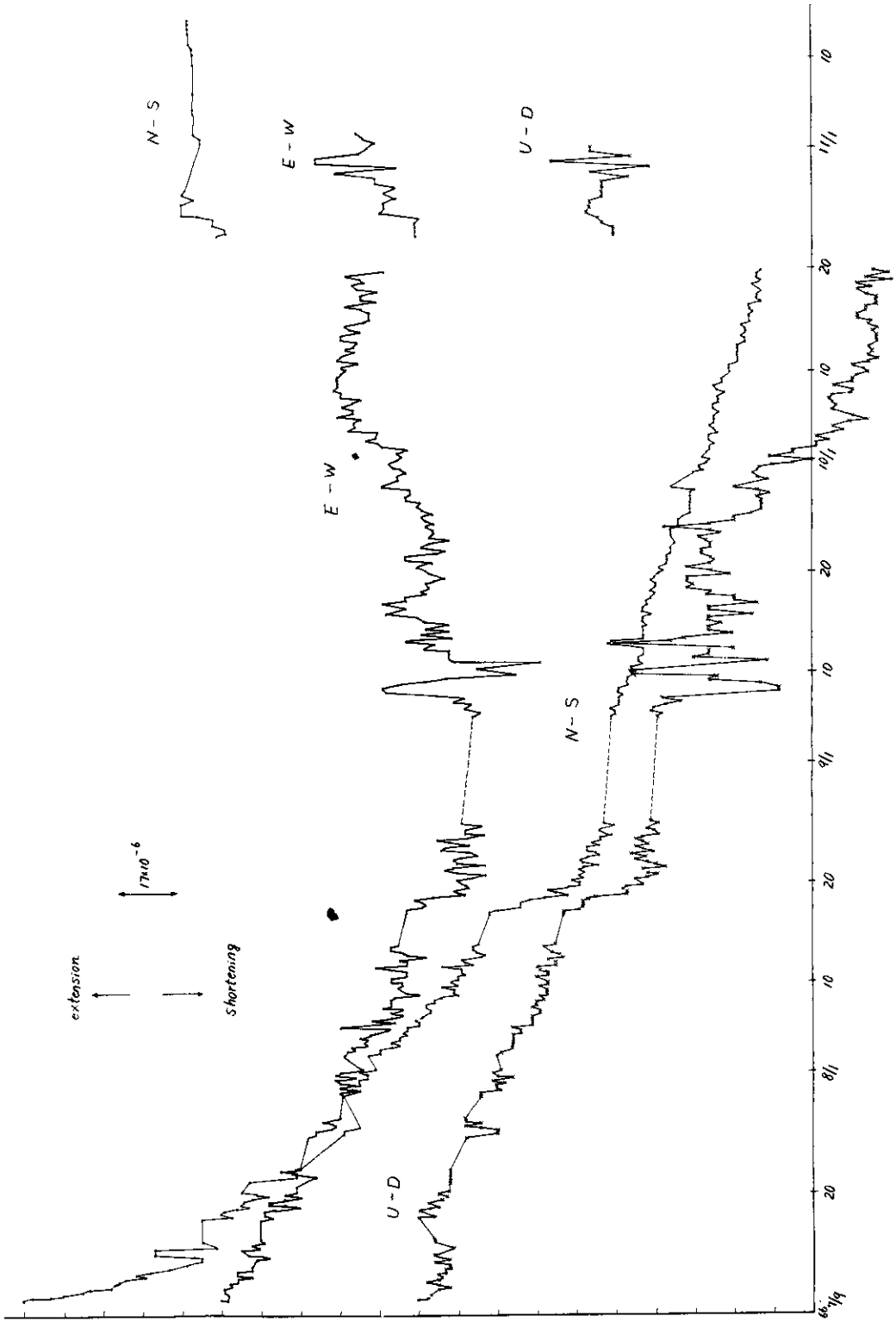


図-2-1-a ひずみ測定結果
Results of strain measurements.

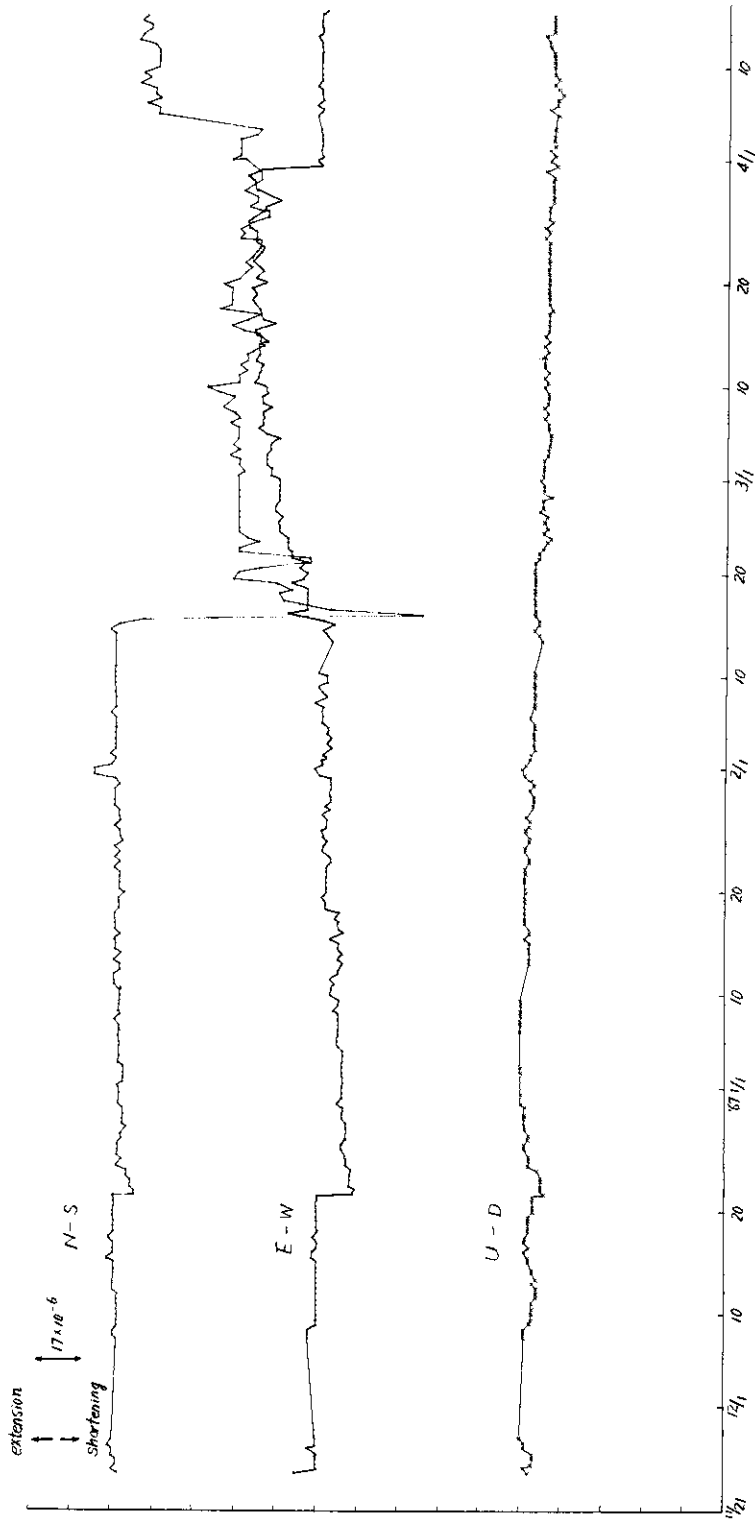


図-2-1-1-b ひずみ測定結果
Results of strain measurements

からのずれをよみ取ったものである。記録の読取り間隔は、変動量の大きさによって、適当に変更させたが、大体は次のとおりである。

観測期間	読取り時刻
1966.7.9 ~ 8.26	毎日0時, 6時, 12時, 18時
1966.9.5 ~ 10.19	毎日0時, 8時, 16時
1966.10.23 ~ 1967.4.15	毎日0時, 12時,

観測期間中の欠測は次のとおり

1966. 7.28
8.14 ~ 8.16
8.27 ~ 9. 4
10.20 ~ 10.22
11.15 ~ 12. 6
1967. 2.11 ~ 2.12

これらの欠測期間のうち、前後の関係のわかるものは、読取り値を連続させたが、測器故障、あるいは記録計交換等によって、前後の関係のわからないものは、原点をとりなおした。原点にとった日時は次のとおりである。

1966.7.9 ~ 8.26	7月 9日12時の値を0とする
" 9.5 ~ 10.19	9月 5日12時の値を0とする
" 10.23 ~ 1967.4.15	10月23日 9時の値を0とする

これらの測定値は、記録紙上の読取値をそのまま用いたもので、水平成分が傾斜して装置されていることに対する考慮はしていない。

なお記録紙中に、測器の異常と思われる大きな変動が、しばしばみられたが、そのまま読取っておいた。図上の1目盛が 17×10^{-6} のひずみに相当し、+がのびで、-がちぢみである。

また表-2-1と図-2-2には、土木測器センター製M-4S指示計によって測定した、ひずみの絶対量を示した。この図でみてもわかるとおり、このひずみ計の測定範囲(引張りに対して

表-2-1 M-4Sによるひずみの絶対測定結果
Strain measure with an M-4S type strainmeter.

	+ : のび - : ちぢみ $\times 10^{-6}$		
	N-S	E-W	U-D
1966.9. 3	-2872.40	+1643.12	-1090.00
9.29	-2905.21	+1592.85	-1074.42
10.20	-2939.09	+1575.63	-1108.26
1967.4.20	-2998.38	+1506.75	-2377.26

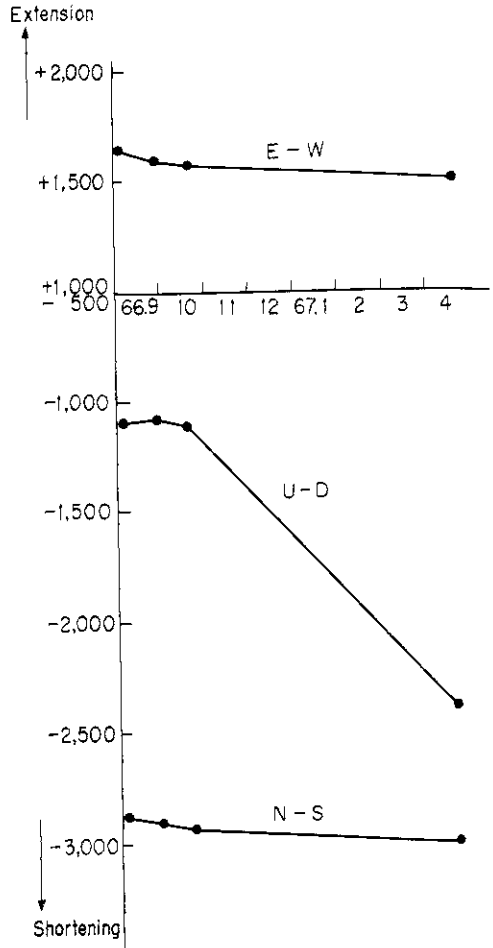


図-2-2 M-4Sによるひずみの絶対測定結果
Strain measured with an M-4S type strain meter.

500×10^{-6} 圧縮に対して 1000×10^{-6} を3倍近く越えているが、測器の絶縁が非常に落ちていることより、真のひずみ量なのか、明らかでない。図-2-2でみるところ、この測定期間内では、そのような異常な変化は、U-Dを除いてない。またこの最後の測定時(1967.4.20)には、異常が著しく、不安定となり、打点記録計では、すでに記録不能の状態にあった。従って、観測期間末期のものは、信頼性がきわめて少ない。

全体としてすべて縮少の傾向を示しているが、これが地殻変動によるものかを明らかにできなかったことは残念である。今回使用したひずみの検

出部は、本来はダム等に埋設し、その変形を検出するためのもので、地殻変動の著しい場合、変位、圧力にたえるには、ともに不足であったと考えられる。地震や火山に関連した地殻変動の研究のための試錐孔内のひずみ計について、今後研究を重ねて、使用に耐えうるものをいずれ試作したい。

謝 辞

寒暑、雨雪にかかわらず休まず、毎日観測井における記録紙の交換（地震計）、日付記入、異常の点検等を行なっていただいた、松代町屋地の柳沢セキさんに深く感謝します。観測に際し、幾多の御協力を賜った松代町（現水産大学教官）春

日功氏と、地温観測に助力を賜った、地質調査所中村久由氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高橋・高橋・鈴木(1967): 試錐による松代群発地震地域の地下構造調査, 防災科学技術総合研究速報 5, PP57-69.
- 2) 春日功(1967): 松代地震による加賀井温泉の変化. 地学雑誌 Vol 76 PP16-26
- 3) 高橋・高橋・鈴木(1967) 試錐内観測装置, 防災科学技術総合研究速報, 5, PP71-81