

# 地電流測定による地すべり現象の予測

## On the Forecasting of Landslide by Earth Electric Current

西尾 邦彦\*, 川邊 洋\*, 芝野 博文\*

Kunihiko NISHIO, Hiroshi KAWABE, Hirohumi SHIBANO

### 要 旨

地すべり現象のメカニズム解明およびそれに基づく地すべり発生予測方法の確立を目的として、静岡県由比地すべり地に試験地を設置し、種々の観測を行った。その結果、小規模地すべりにおける土中間隙水圧変化などから発生メカニズムに関するいくつかの知見が得られた。さらに地電流測定記録と間隙水圧、移動量との関係から、地すべりの前徴現象が認められ、発生予測に対する知見が得られた。

災害防止という観点から、この研究が地すべり発生予測方法確立の足がかりとなると考えたので報告する。

### Summary

To clarify the mechanism of landslides and to estimate their occurrence, an experimental area was established on the Yui Landslide in Sizuoka Prefecture. Several interpretations were made on the mechanism by an analysis of porewater pressure and on the forecasting of occurrence by data on earth electric current.

The data in this report may be the clue to averting natural disasters.

### I はじめに

毎年のように地すべり・山崩れによる災害が発生し、その度に自然災害が天災か、あるいは

---

\*東京大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, University of Tokyo

人災かが社会問題となっている。この問題に対する答は簡単には得られないが、天災であるにせよ、人災であるにせよ、防止対策工事は最大級の努力をもって行われなければならない。現象に対する研究、防止工技術が進歩した今日では既設の対策工事が災害防止に大きな効果を表わしていることは、各地で実証されているが、自然力は時にはこれらの人為的工作物によっても防ぎきれない大きなエネルギーを有していることがあり、このような災害に対しては避難体制が確立されなければならない。災害の規模が大きくなればなるほど、避難のための早期警報が必要となってくる。

しかし一方では、地すべり・山崩れの発生予測は非常にむづかしい。現在では地方自治体を中心にして災害時の避難体制が整備されつつあるが、これと呼応して、研究面でも危険の判断基準を、発生メカニズムの解明などから早急に確立することが要望されている。

ここで地すべり・山崩れ発生の予測方法を整理すると、次の二つの方法に大別できる。

第1は、地すべり・山崩れの誘因となる降雨、融雪、地震などの外力の大きさから、発生を予測する方法である。この方法は、両者の因果関係を示す十分な資料と、それらの資料に基づく発生メカニズム解明を必要とする。

第2は、地すべりの初期的兆候をとらえて、その後が続いて発生する大規模地すべりを予測する方法である。そのための資料としては伸縮計による移動量、パイプ歪計や傾斜計による歪量、間隙水圧変化などが利用できる。

本研究は第2の方法に準じて、地電流（地電位差）測定値の変化から地すべりの初期的兆候を検出しようとした。すなわち、静岡県由比地すべり地に設けた試験地に、伸縮計、間隙水圧計、パイプ歪計を設置するとともに大地の電位差を測定し、それぞれの測定結果から相互の相関を検討することにより、総合判断として電位差記録の意味するところを検討した。ちょうど人体の診断における心電図に相当する役割を期待しているわけである。

## II 地電流について

大地に地電流と呼ばれる電流が流れていることは既に知られているが、この地電流を巨視的に見ると、その発生原因は地球をとりまく磁場の変化によって誘起されるとするのが一般的である。しかし局所的地電流は、例えば土壤水分変化などによって変化する土体の電気化学的条件によるところが大きい。

地電流を直接測定することは不可能であり、一般に電位差を測定してそれにかえている。したがって地電流という語は地電位差の意味に使用されることが多い。

地電位差は各地点ごとに、それぞれ特定の方角で大きくなる傾向がある。力武<sup>4)</sup>はこれを地電位差の主方向と呼んだ。地すべり地で等電位線図を描いてみると主方向はおおよそ山腹斜面向

向であったが、これは地すべりの運動方向とも受けとれる。吉松は海岸近くで調査した結果、主方向が海岸線に直交する傾向があることを報告している。地すべり地における主方向の意味およびその決定要因については今後のテーマとする。

### III 地すべり現象に伴う電位差変化

#### 1 降雨と電位差変化

降雨は単に土中水分を増大させるだけでなく、土中の電気化学的性質をも変化させる。とくに測定電極周辺の水分変化が電位差に大きく影響することがわかった。このような場合、正極と負極の周囲が電気化学的に同一条件で同時変化すれば、測定電位差にはほとんど変化は現われないはずである。しかし電極が地表面に露出している場合は同時変化することはまれで、この場合、両電極周辺の状態変化過程が異なることが多い。したがって電位差記録にも降雨による特徴的変化パターンが表われる。これを降雨型電位差変化とよぶことにする。球形電極を地表面下1 mの深さに埋設した場合は、結果として降雨そのものの影響は認められなかった。

#### 2 土層中の水の流れと電位差変化

土層中を水が流れるとき、界面動電現象によって流動電位が発生する。両者の関係は次式で表わされる。

$$E = R \cdot Jv$$

ただしEは電位差(V/m)、Jvは水の体積流れ(m/s)、Rは係数。室内実験から $R \approx 8 \times 10^8$  (V・s/m<sup>2</sup>)が求められている<sup>3)</sup>。

地すべり地では一般に土層内の水の流れは微小であり、したがって流動電位も検出することができない程度に小さく、他の雑電流に消されてしまう場合が多い。しかし中・大孔隙中を流れる水は流速も比較的大きく、検出可能であると思われる。例えば間隙水圧計記録の急激な変化とともに表われる電位差記録上の変化は、この孔隙中を流れる水によって発生する流動電位と考えてよいようである。このような変化を間隙水圧型電位差変化とよぶことにする。

#### 3 電極に加わる土圧と電位差変化

埋設されている電極にかかる土圧が変化すると、電極電位も変化する。そのメカニズムは明らかになっていないが、室内実験によると、電極にかかる土圧の変化量と電位の変化量とは、限られた範囲内ではほぼ比例関係にある。

地すべり地に棒状電極を埋設し、電極がすべり面を貫通してさらに深部まで入っている場合、電極は地すべり土体の移動によって電極表面に土圧変化を受けることになる。その場合に、土

体が弾性変形する範囲では電位もほぼ土圧変化に応じて変化するが、土体移動量が増加し、電極周辺の土体が塑性変形の挙動を示すようになると、電極にかかる土圧は一定値以上には増加しなくなり、同時に電極電位の変化もその時点で停止すると考えられる。

今回行った試験の場合は棒状電極の先端に間隙水圧計を取付け、その間隙水圧計がほぼすべり面上に位置するように電極を設置した。したがって電極はすべり面を貫通していないことから、電極にかかる土圧と電位との関係、および土圧と移動量との関係が上記の状態とやや異なってくる。当試験地の地すべり現象はすべり面上部土体がクリープ状で滑動し、滑動土体は激しくリモールド作用を受けているように観察される。このような滑動土体中に、電極が鉛直方向に挿入されているので、棒状電極にかかる土圧は電極の位置によって方向・大きさが異なるランダムな力を受けると考えられる。このような場合の土圧と電極電位との関係はリモールド作用の激しさ、あるいはクリープ移動量と電位変化量とがほぼ比例関係にあると考えてよいであろう。

以上の電極周辺における現象は正極、負極の両方で発生するので、電位差記録としては両電極で発生する電極電位の差が記録されることになる。

#### IV 試 験 地<sup>1,2)</sup>

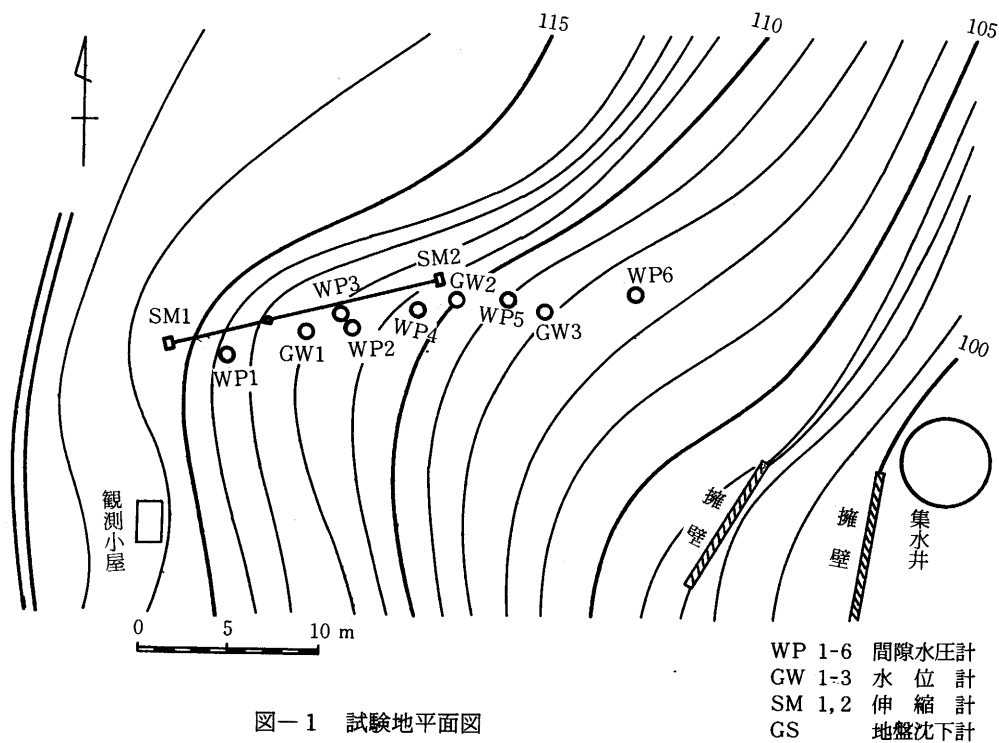
試験地は静岡県庵原郡由比町字久保田に設置した。地質構造は破碎された泥岩で、地表面に粘土層が露出している。地形は最大傾斜22°の東向き斜面であり、全長約60mの小規模地すべり地内のほぼ中央に位置している。試験地の平面図、縦断面図をそれぞれ図-1、2に示した。

試験地内の上部に小さな湧水点があり、降雨終了後も数日間は地表流が試験地内を流れている。その間、地表面は泥ねい化する。さらに無降雨日が続くと湧水は枯れ、地表面は次第に乾燥状態になる。

試験地内には図-1に示した位置に間隙水圧計兼電極、伸縮計、地下水位計、地中温度計、地盤沈下計を設置した。

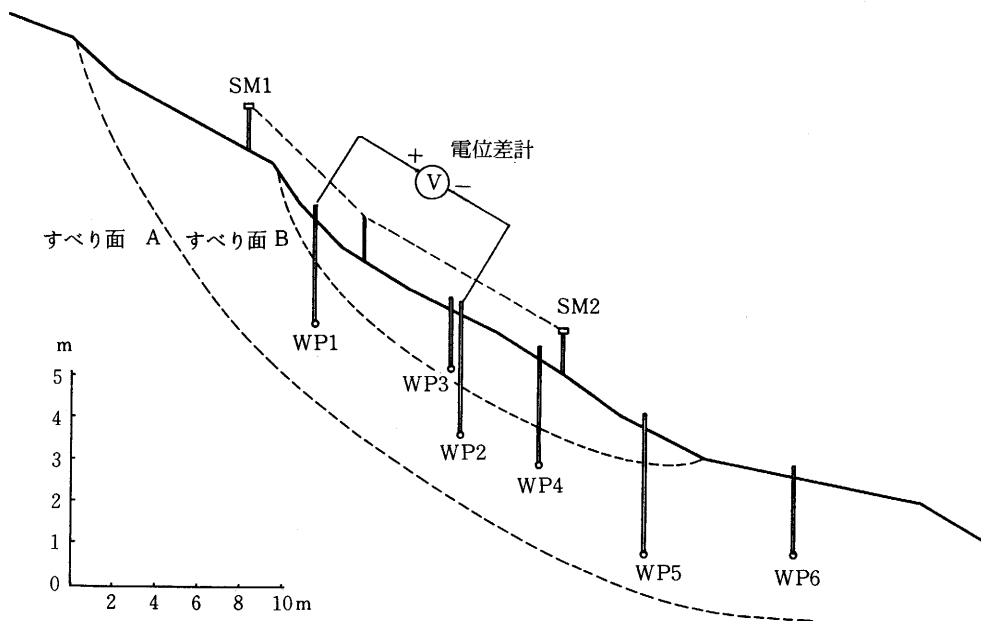
間隙水圧計埋設時のボーリング資料による土質柱状図を図-3に示す。間隙水圧計(WP)1~4の一带は地表面下1~2mの深さまで高含水比の粘土層で、降雨時にはすべり面Bでクリープ現象を起こす。WP5~6一带では、表層は砂質及びシルト質であるが、1~2m深より高含水比の粘土層が現われる。WP6はとくに砂層と粘土層の境界が明瞭に別れており、被圧帯水層が認められた。地すべり源頭部はWP1の上方約10mの位置にあり、小規模の滑落崖をなす。

電位差測定電極はWP1~6から適宜2本をとり出して正・負極としたが、そのいろいろな組み合わせの中で最も良い結果が得られたWP1、WP2をそれぞれ正・負極として測定した結



図一 試験地平面図

the plain figure of experimental area



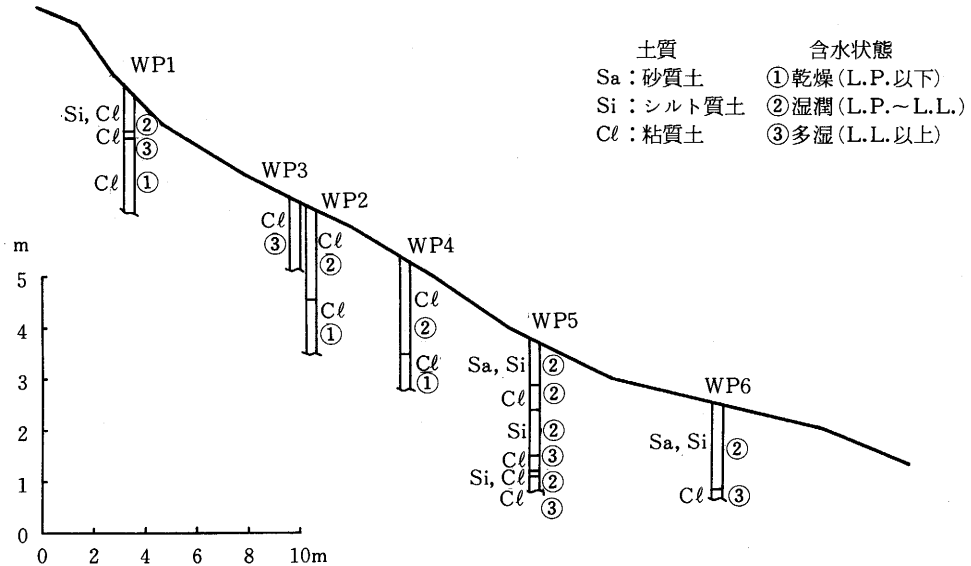
図二 試験地縦断面図

the longitudinal section of the experimental area

表一 1 間隙水圧計埋設深\*

間隙水圧計番号	埋 設 深 (m)
WP 1	2.48
WP 2	2.85
WP 3	1.38
WP 4	2.54
WP 5	2.98
WP 6	1.83

\*電極の長さも同じ。



図一 3 土質柱状図

pillar-shaped figure of the soil

果について解析する。この場合の正・負極間の距離は 7 m である。電極としての地中長さは WP 1 (正極) が 2.48m, WP 2 (負極) が 2.85m である。

V 結果と考察

1 間隙水圧変化

試験期間 (昭和53年 9月~54年 4月) の各種測定結果の日変化を図一 4 に示した。

間隙水圧計は WP 1 と WP 4 の示す値が一般に大きく, また同時に変化の度も大きい。

WP 1, 4 以外の間隙水圧計の示す値は小さく, 自由地下水面を水圧に換算した値に大よそ等

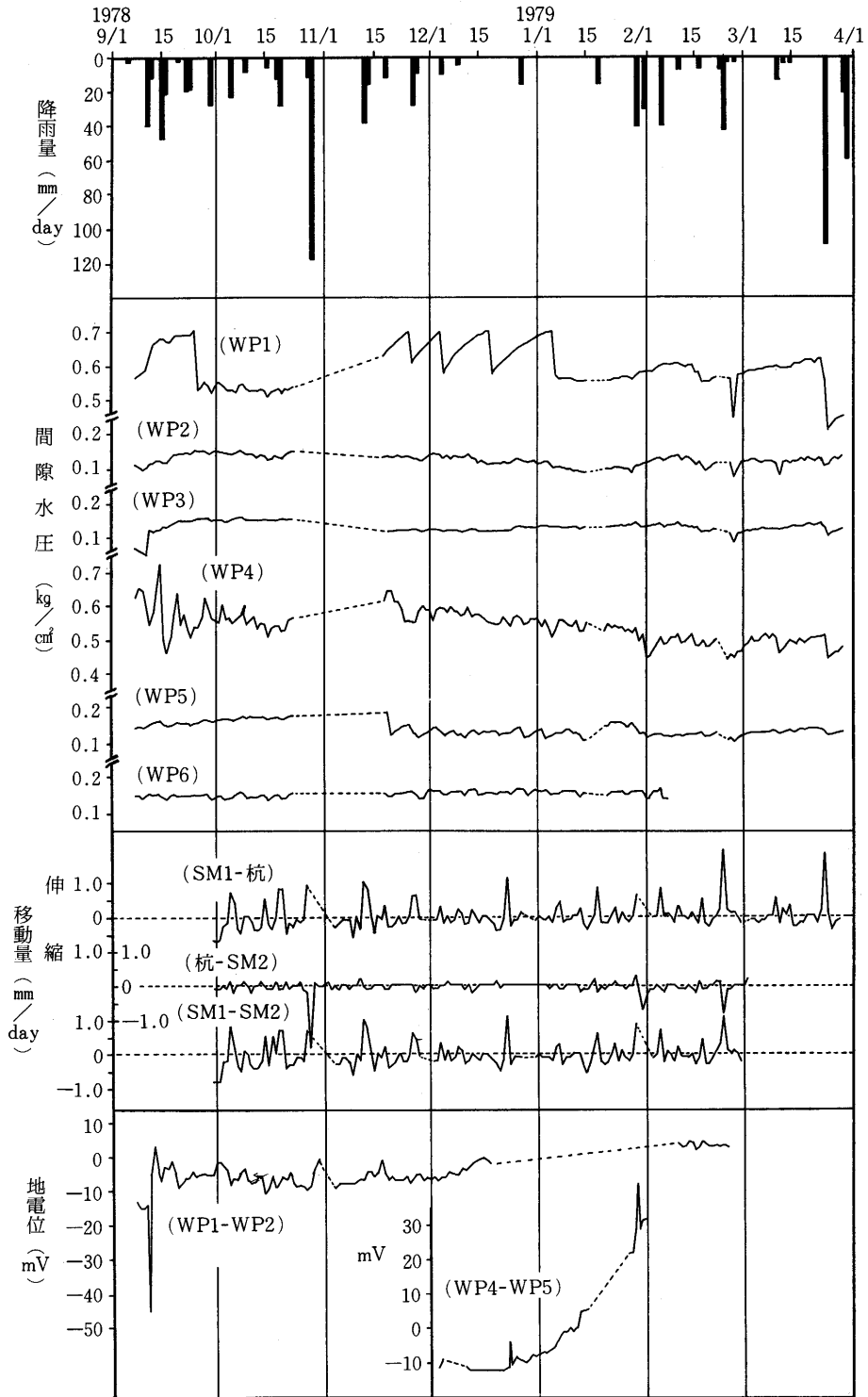


図-4 各種測定値の日変化

daily value of the observed data

しい。

間隙水圧計記録で特徴的なことは、水圧上昇時は緩やかに変化するが、下降時には急激に水圧が減少していることである。最も大きな下降速度を示した例は、WP 1において3分間に $0.14 \text{ kg/cm}^2$ の変化量であった。平均下降速度は $0.024 \text{ kg/cm}^2 / 1 \text{ 分}$ (WP 1),  $0.011 \text{ kg/cm}^2 / 1 \text{ 分}$ (WP 4)である。上昇一下降の周期は一定しないが、周期が長いときには振幅も大きくなる傾向がある。間隙水圧変化と降雨との関係はほとんど認められていない。

このような急激な下降を示す間隙水圧の変化特性は、土体のリモールド現象に伴う間隙空間の体積変化によるものと思われる。すなわち、間隙水で満たされた孔隙が土体移動とともに被圧されていく過程では水圧上昇はゆるやかであるが、その孔隙に水の逃げ道が開かれると、水が非圧縮性であるために、ごく微量の水が逃げるだけで水圧は大きく降下する。このような水みちの開閉現象と孔隙の体積変化によっていろいろな間隙水圧変化のサイクルが生ずると考えられる。

## 2 移動量

伸縮計の一端は本来不動点に設置するのがよいが、当試験地では設置条件が悪く、インバー線の両端がともに地すべり滑動区域内にある。したがって伸縮計記録は土体の絶対的移動量を意味せず、2点間の相対的移動量を示している。

伸縮計は直線状に2基を設えつけ、上部のものをSM 1、斜面下方のものをSM 2とした。2基の伸縮計の動きはそれぞれ異なる2種類の動きを示している。第1はSM 1におけるマイナス（縮む方向）の動き、すなわち地すべり上部が下方に滑り落ちてくる動きであり、降雨と無関係に発生している。図-2のすべり面Aによる定常的クリープ現象と考えられる。第2は下段のSM 2に表われるプラス（伸びる方向）に動く滑動、すなわち地すべり下部が相対的に下方へ移動する現象である。この動きは降雨および間隙水圧変化とよく対応して発生している。すべり面Bによる滑動と推定される。

## 3 地電位差

### 1) 降雨初期の電位差変化

設置した電極は上部が地表面に露出した棒状電極であるため、降雨の影響を受ける。降雨だけの影響で電位差が変化したと考えられる記録のうちから、2例を図-5・1, 5・2に示す。電位差変化は降雨開始とともに上昇を開始するが、変化量は2~5 mV程度と小さく、また15~60分後には元の値にもどる。図-5・2の場合は降雨(15mm/30分)後に $0.1 \text{ mm/day}$ のクリープ現象が伸縮計によって記録されているが、その影響が降雨型電位差変化の後に続いてゆるい曲線として表われている。今回の一連の測定では、降雨型電位差変化は多いが図-5・1, 5・



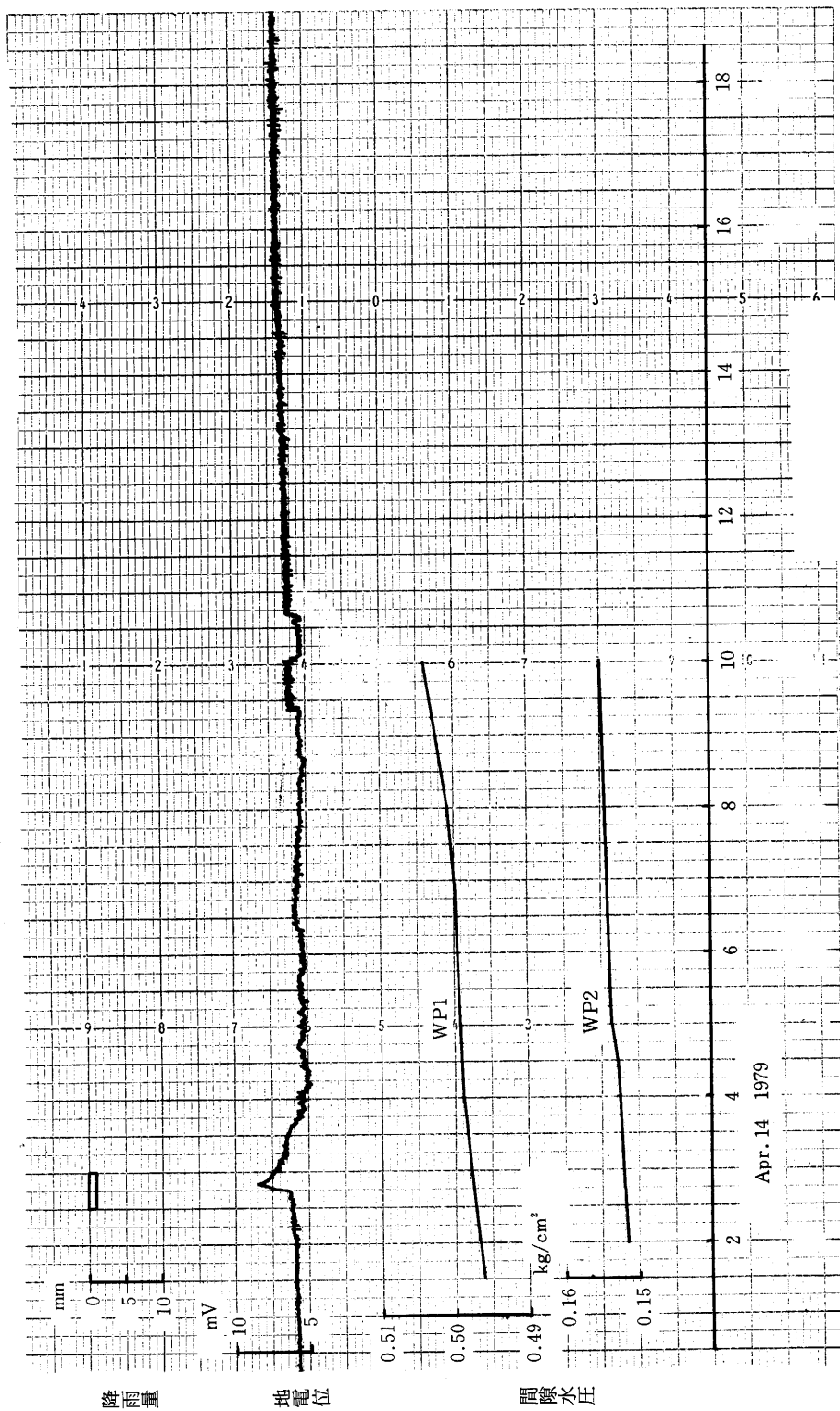


図-5.1

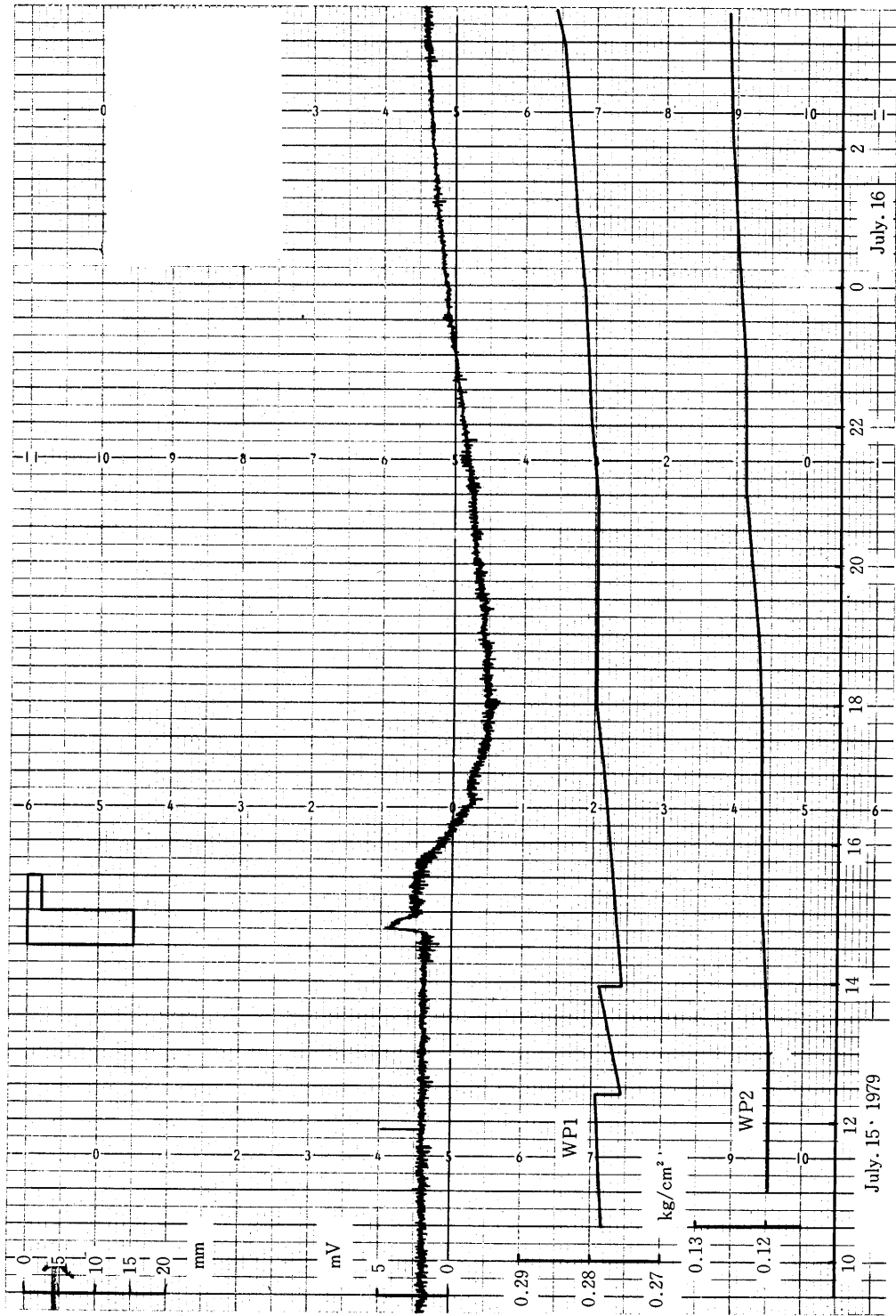


图-5.2

2の型で表わされた。

## 2) 間隙水圧と電位差

電極周辺における土中水の流れは流動電位発生の原因となり、電位差記録にも表われる。記録上、電位差がプラスに変化するか、マイナスに変化するかは、いずれの電極で流動電位がとらえられたかによって決まる。当試験地では WP 2 が電位差の変化をよくとらえている。

間隙水圧変化による電位差変化の例を図一6・1～6・5に示す。間隙水圧低下と共に電位差変化もほぼこれに対応し、特徴的な変化を示している。両者の変化が表われる時刻にややずれがある場合もあるが、この時間的なずれは、流動電位発生地点と電極との位置関係のちがいによって生ずると解釈される。すなわち電極が棒状であるため、地表面より電極先端部の間隙水圧計に至るまでの間の平均値としての電位差を記録するのに対し、間隙水圧は電極先端における一点での記録である。この位置的相異によってタイム・ラグが生ずるものと推定される。電位差の変化は2～5 mV程度である。間隙水圧と電位差とのそれぞれの変化量の間には明らかな相関は認められない。

## 3) 土体のひずみと電位差

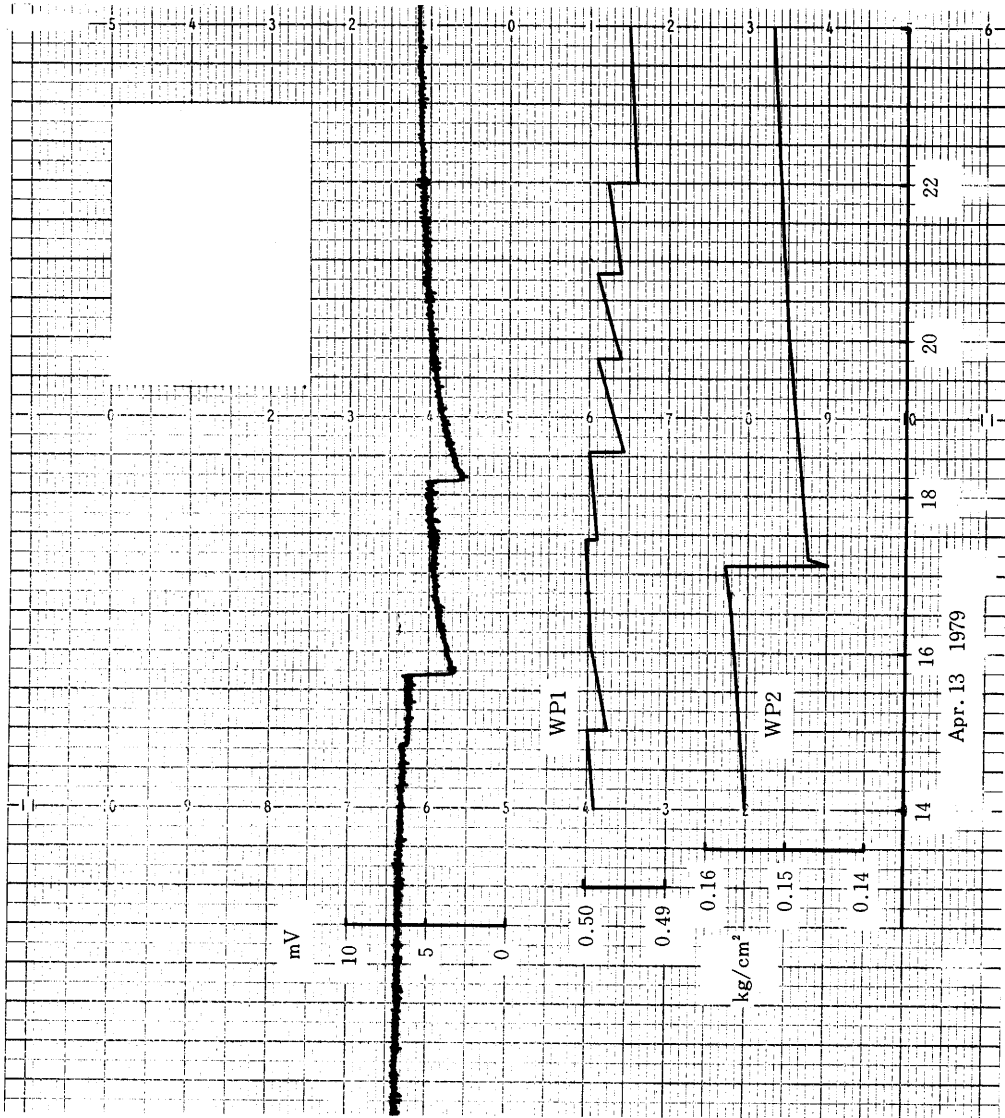
伸縮計記録に表われるような土体の変化はいわゆる地すべり現象であり、ある程度はつきりしたすべり面も存在する全体的な移動現象である。それにひきかえ、土中の水みちの開閉、土体体積の膨脹・収縮に関係する程度のマイクロな土体のひずみは伸縮計記録にはほとんど表われないが、間隙水圧を変化させる原因とはなり得るし、両者の関係は密接であると推定される。すなわち間隙水圧の急激な変化が多発している場合は土体のマイクロなひずみも発生していると考えてよい。このようなマイクロなひずみが面的につながり、ある面的大きさとしてまとまるときに、地すべり現象に至ると思われる。したがってこのマイクロな土体の動きを早期に知ることができれば、地すべり発生予測の一手段となりうるし、また間隙水圧変化とそれに伴う電位差変化が意味をもつことになる。

### (1) 部分的なりモールド現象と電位差変化

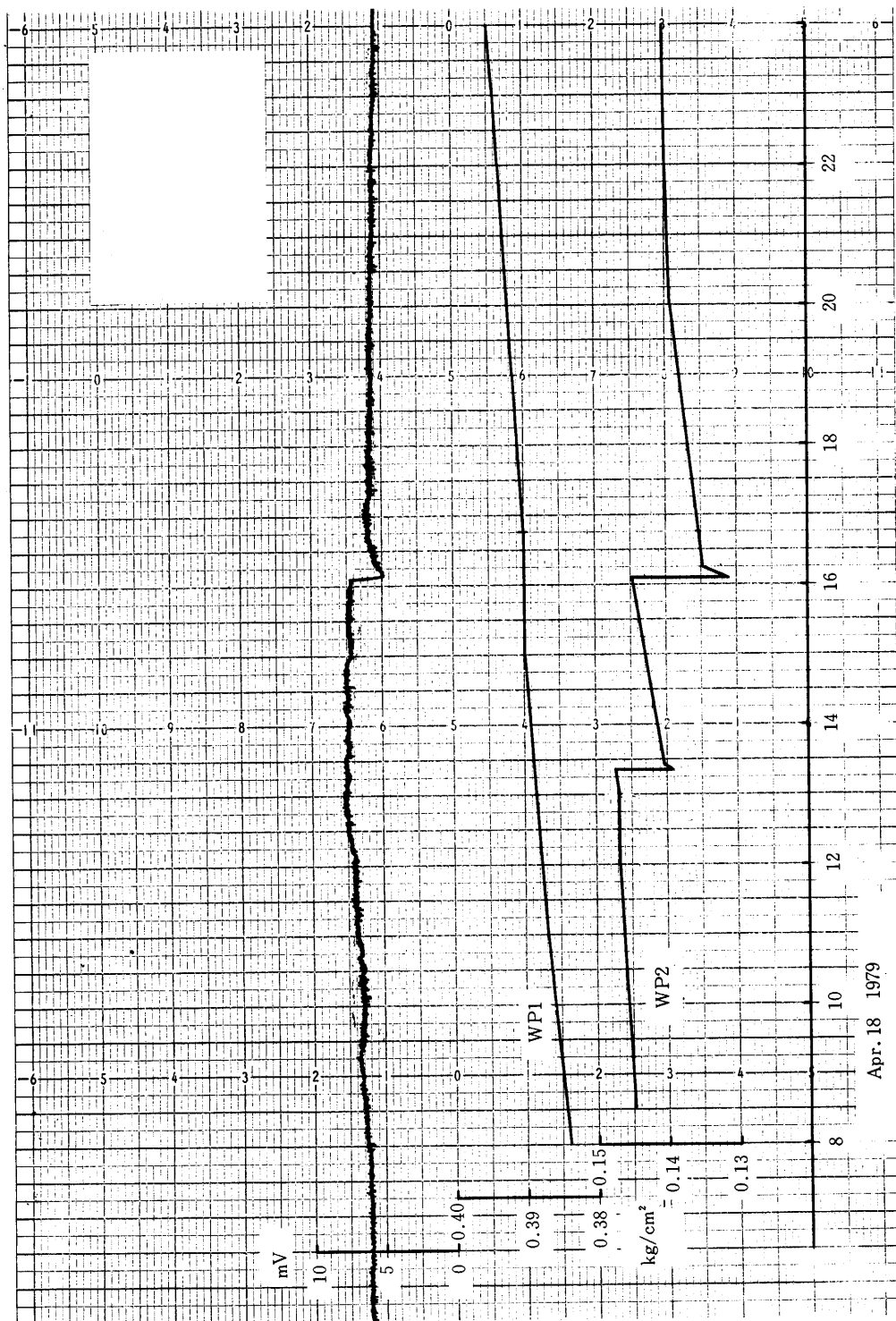
伸縮計記録には表われない程度のマイクロな土体ひずみが連続して発生する現象を、部分的りモールド現象とよぶことにすれば、この現象は間隙水圧および電極にかかる土圧の連続的不規則変化をもたらす。したがってその場合の電位差変化は図一7・1～7・4に示すような不規則に振動する雑音型変化として表われる。これをりモールド型電位差変化とよぶことにする。この型の変化は降雨との相関は低いが、間隙水圧変化との相関が高い。図一7・3, 7・4の場合は、伸縮計記録にはそれぞれ0.5mm/24時間, 0.3mm/15時間の移動量が記録されていた。

### (2) 全体的クリープ現象と電位差変化

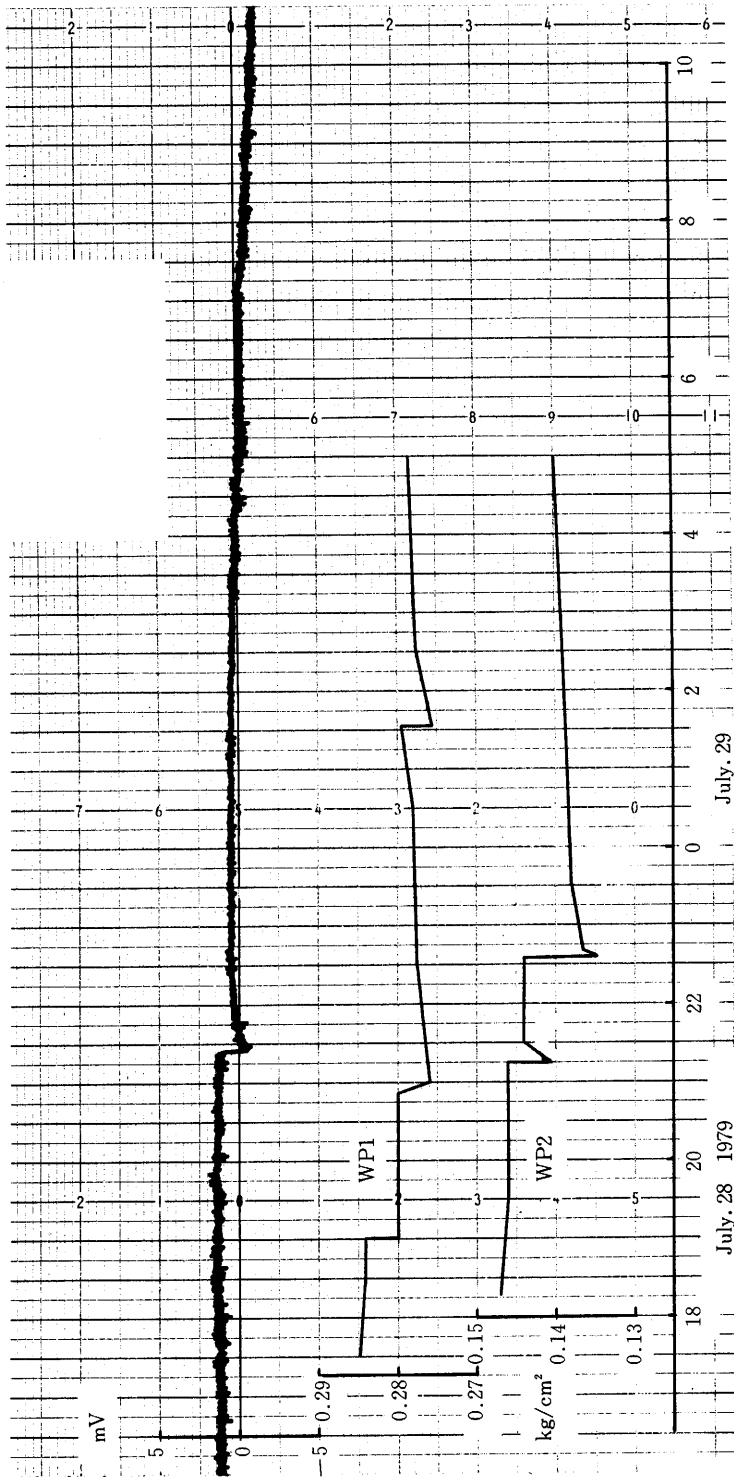
地すべり地全体にわたるクリープ現象は初めに上部でひずみが発生し、次第に下部に波及していく過程をたどる。この現象は伸縮計記録に表われる程度の移動量となる。当試験地の場合、



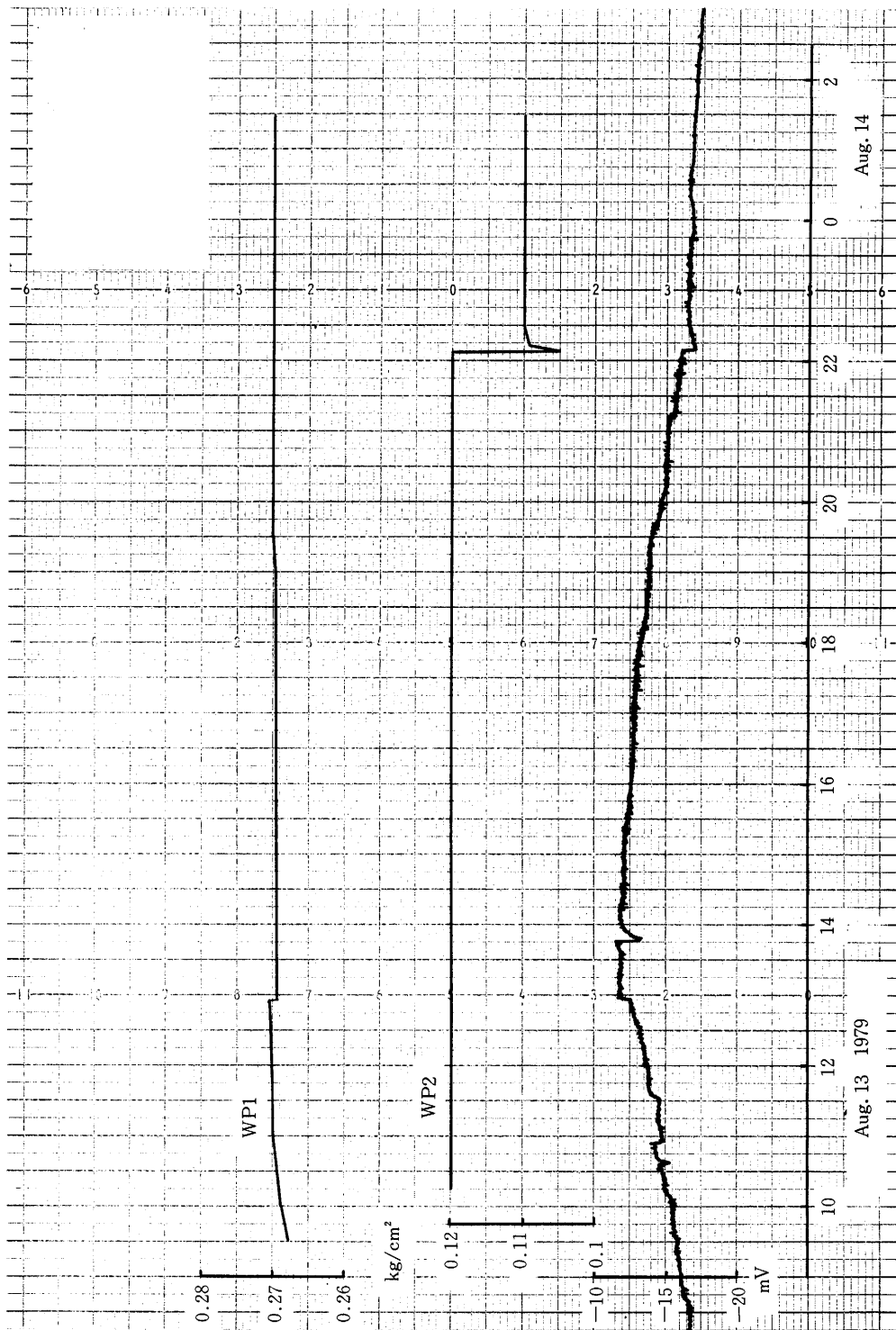
6.1



☒-6.2



☒—6.3



☒-6.4

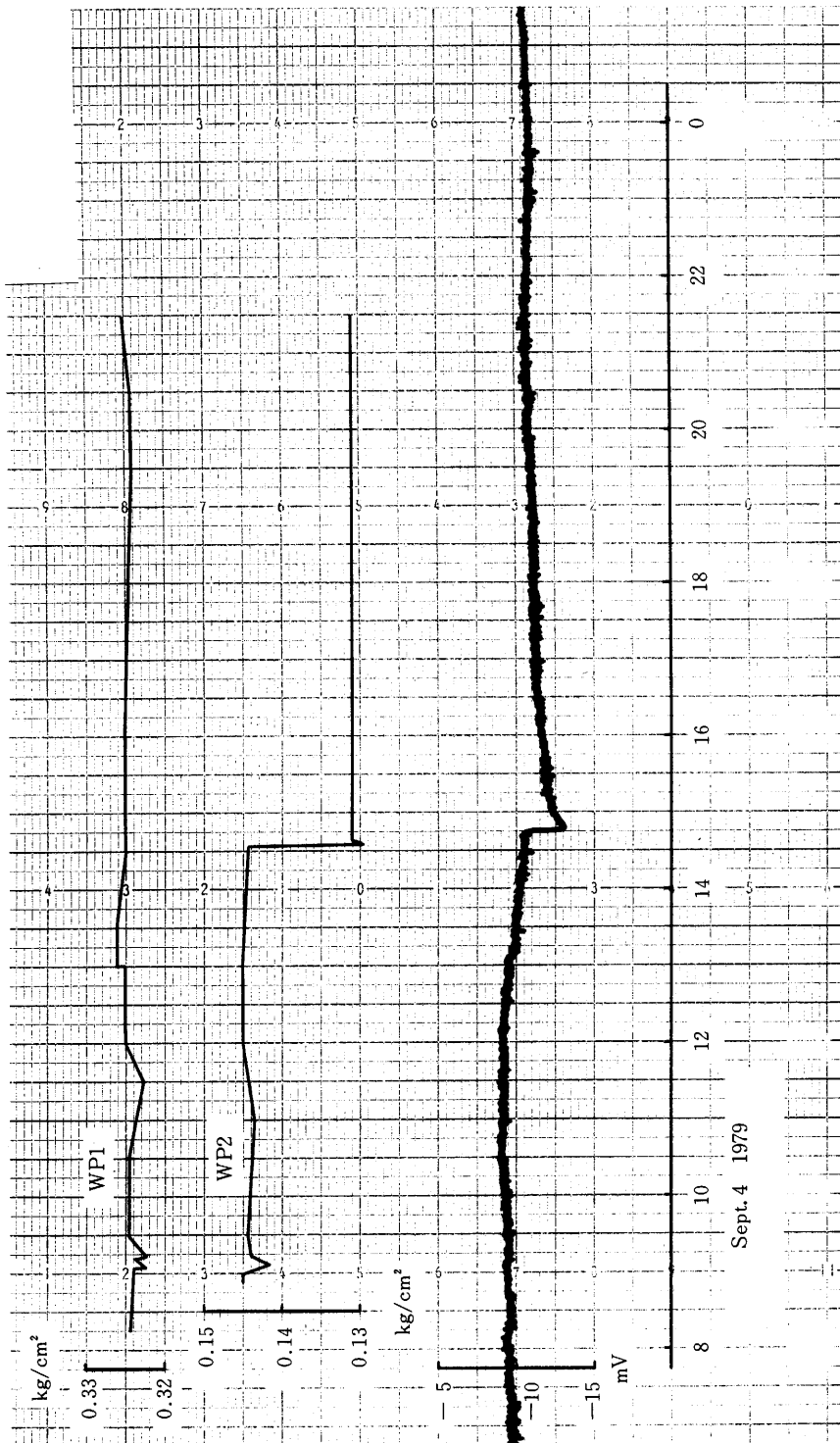


图-6.5



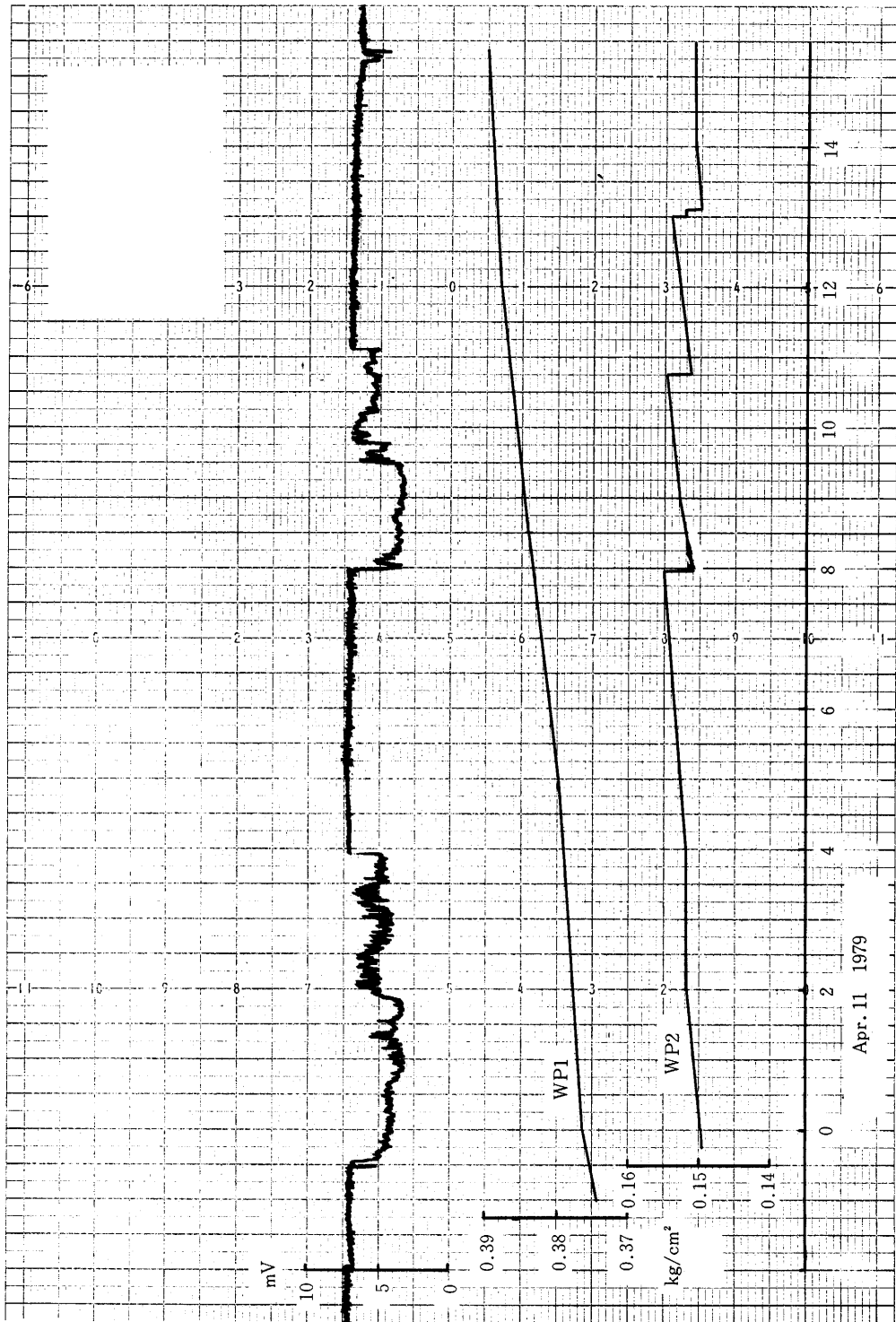
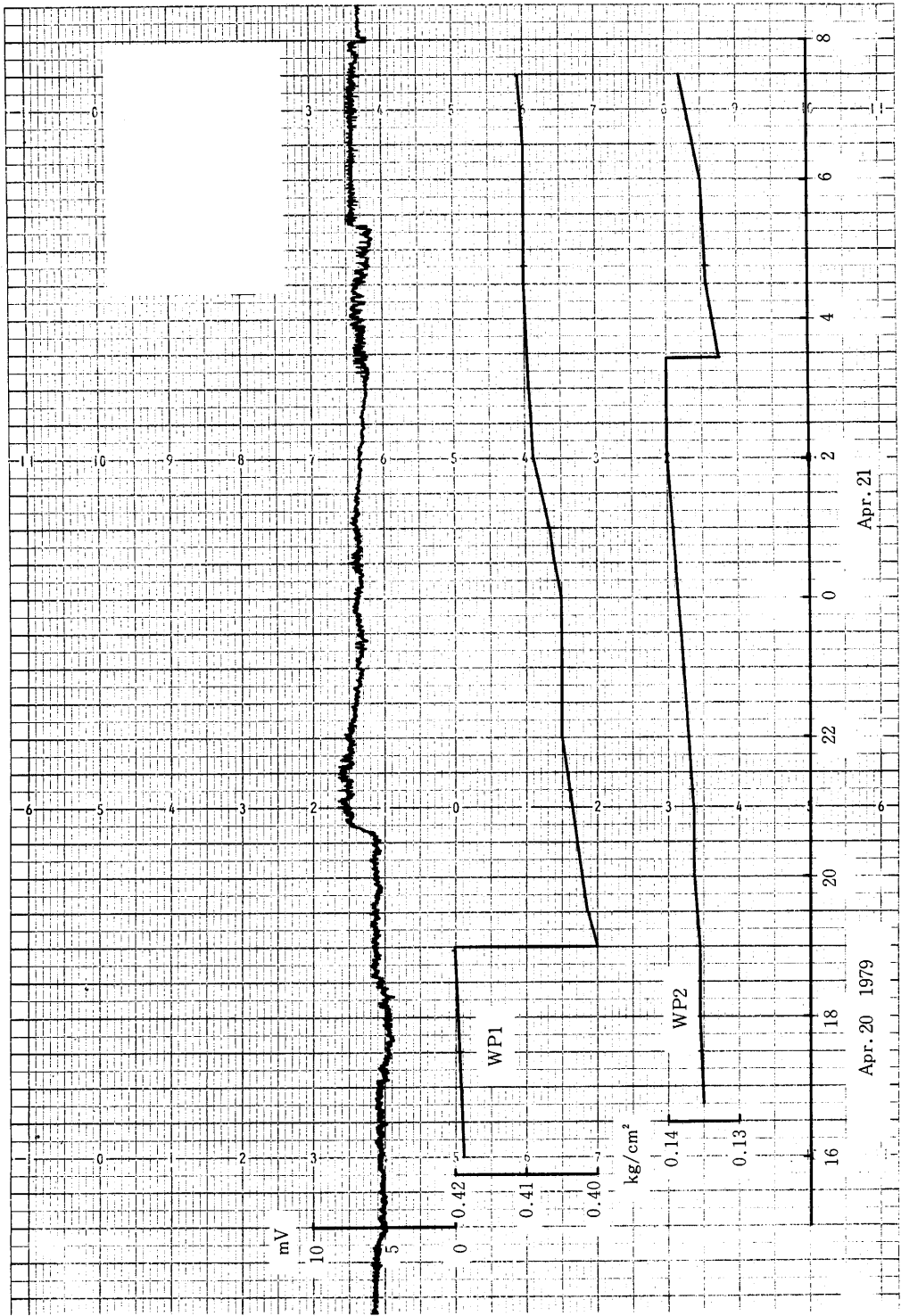
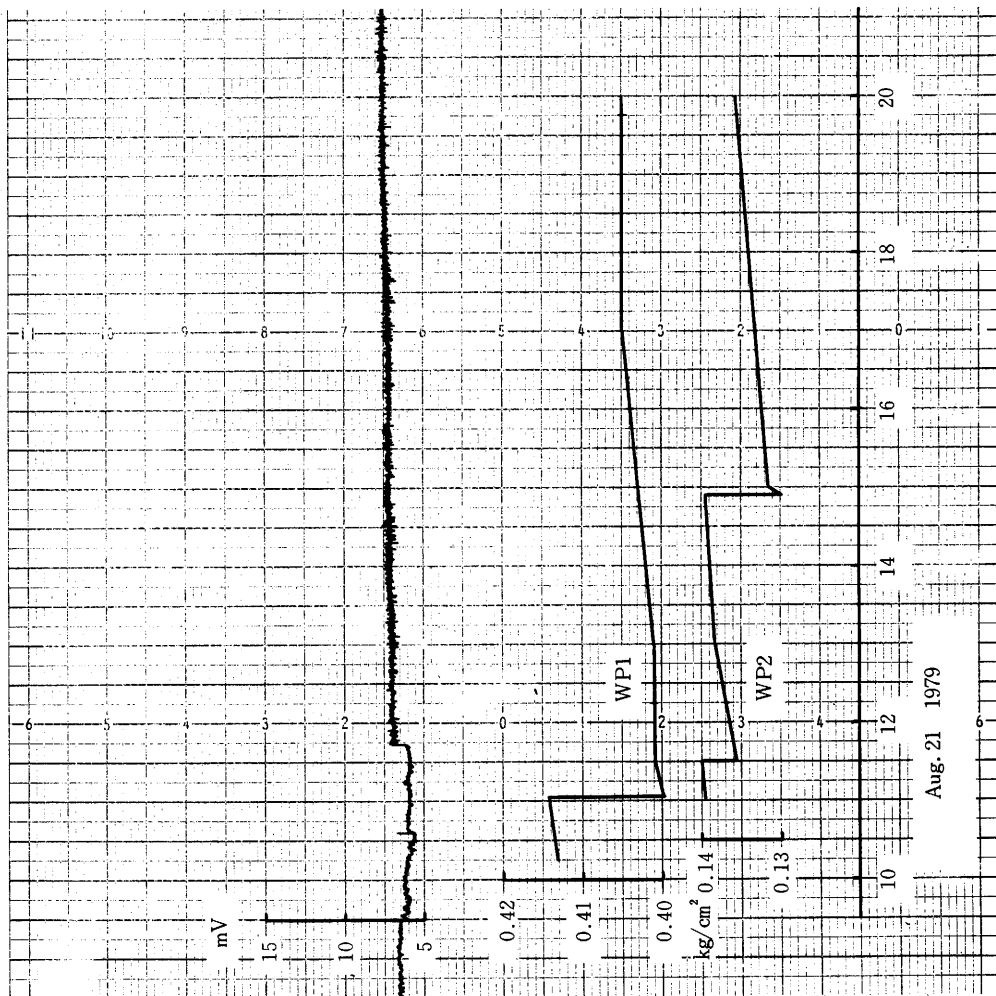


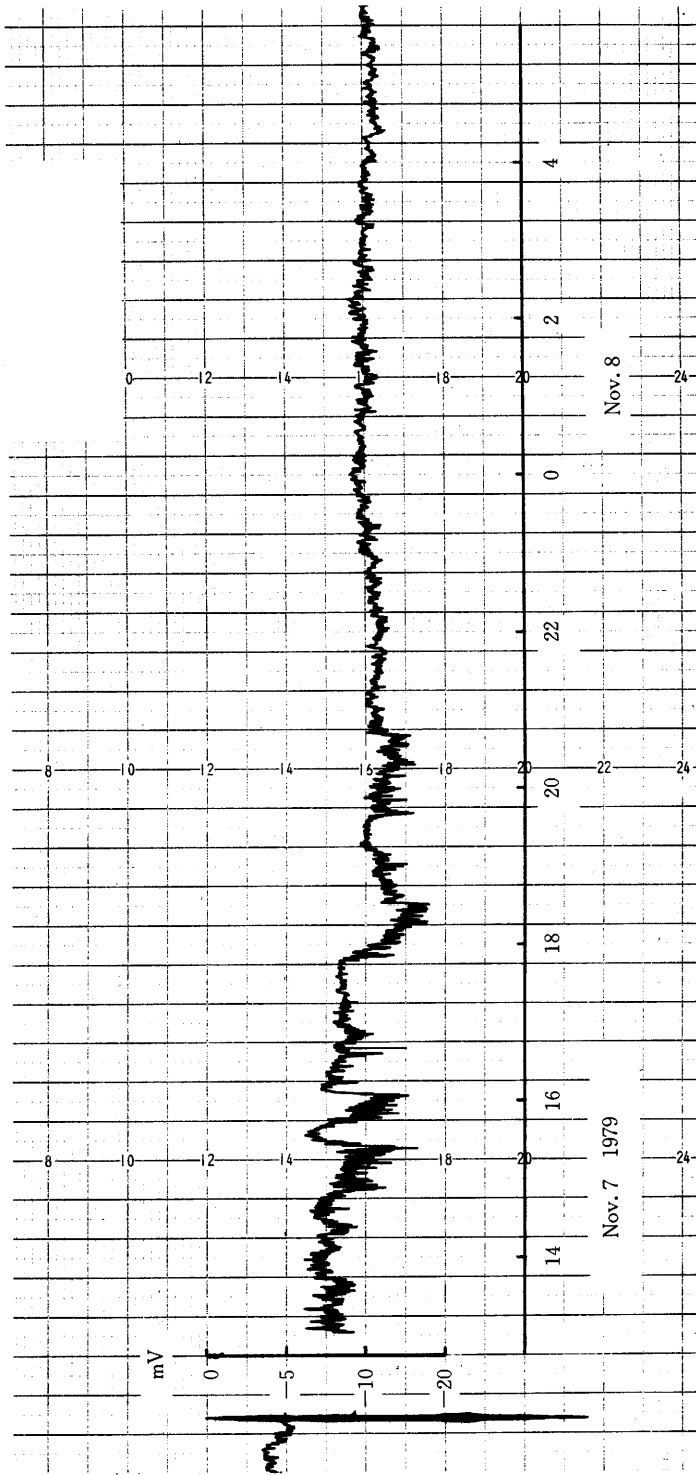
图-7.1



☒-7.2



☒-7.3



☒-7.4

上部滑動に対して電位差記録が上に凸型のゆっくりした変化を、また下部の滑動に対して下に凸型の電位差変化をそれぞれ当てはめてみると、この一連の現象がうまく説明できる。これらの変化パターンは電極設置条件などでいろいろ変わると思われるが、電極設置が適切に行われた場合は、地すべり現象に対する多くの情報をもたらす、発生予測に十分利用することができると考えられる。

全体的クリープ現象は、電位差記録には大きなうねり型変化で表わされた。これをクリープ型電位差変化とよぶことにする。その例を図—8・1～8・6に示した。

図—8・1では10時20分（以後10：20とかく）に発生し始めた降雨型電位差変化に続いて、クリープ現象を示すクリープ型電位差変化が表われている。クリープが上部から下部に波及する現象が降雨の波とともに数回にわたって発生している。伸縮計記録には当日0.8mmの移動量が記録されている。

図—8・2の例は、総降雨量140mmと測定期間中最大の降雨があり、伸縮計も4.6mm/6時間とこれもまた最大の移動量を示した。電位差記録は8：00ごろより急激なクリープ型変化を示している。この時期に上述の4.6mmの移動量も発生している。

図—8・5では、伸縮計移動量は0：30までにSM—1（上部）で0.4mm、それ以後11：00までにSM—2（下部）で0.7mmをそれぞれ示した。電位差記録もこのような現象を追って、クリープ型変化によって説明できる。

その他、大きな電位差変化を示した例をいくつか示した。いずれの場合も同様のクリープ型変化によって地すべり滑動を説明することができる。

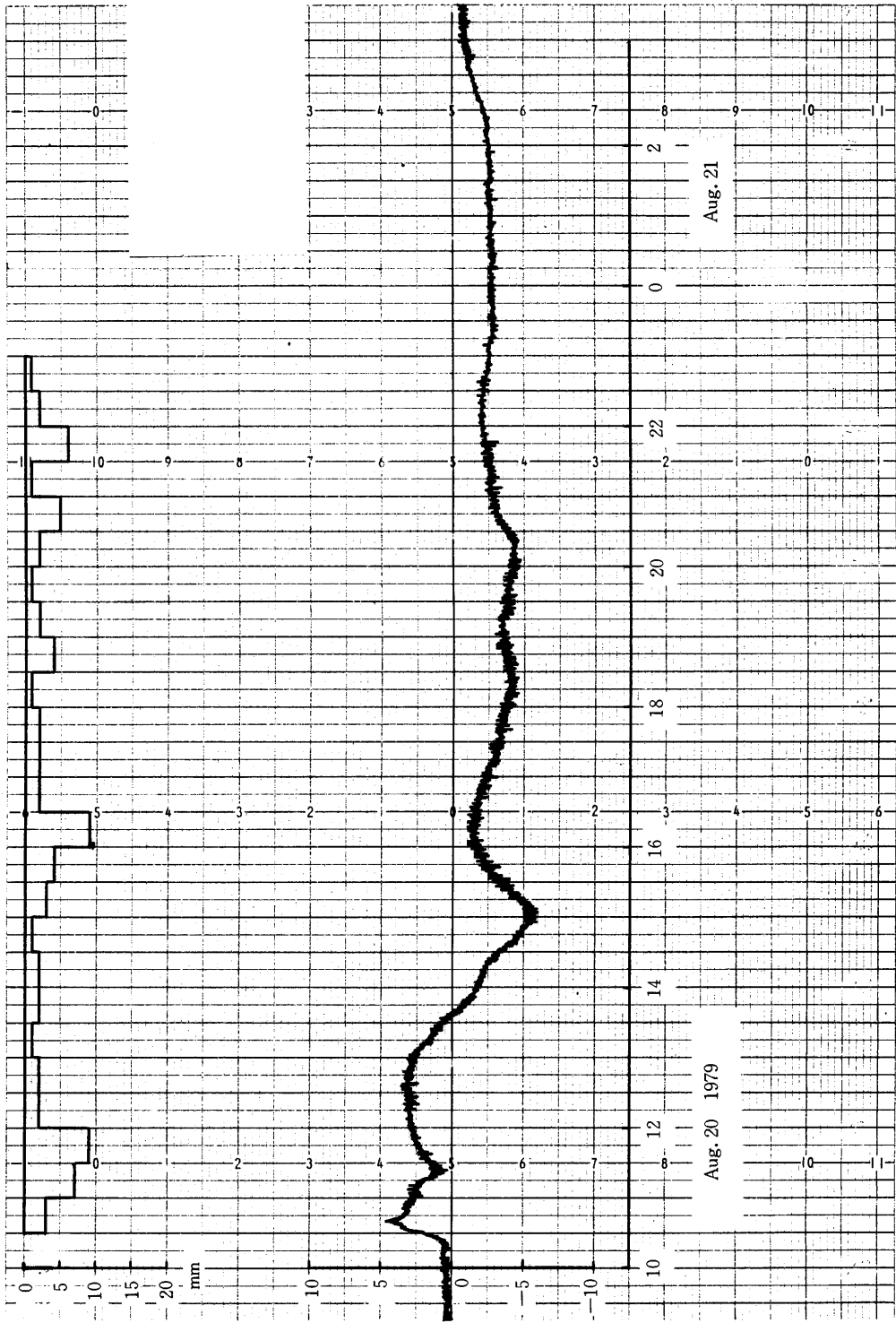
## VI ま と め

今回観測された地すべり移動量はいずれも微小であり、地すべりの初期的兆候といえる程度のものであったが、それに対して電位差記録はそれぞれ特徴ある型の変化を示した。

電位差変化の型を、降雨型、間隙水圧型、リモールド型(雑音型)、クリープ型に仮りに分類したが、それぞれ特徴ある型を示しているのので、これらに基づいて電位差記録から実際の現象を推定することは容易である。ただし今回は細部にわたる現象と電位差変化について多くの仮定を導入しているのので、これらについて検証することは今後の課題として残る。

地すべり予測という意味からは、例えば水みちの開閉現象から、伸縮計にかろうじて記録される程度の土体ひずみをとらえることができる電位差測定は有力な手段となりうる可能性がある。

残された課題としては電極材質、形状、設置位置を固定化すること、主方向の検討などがある。材質については今回使用した水道用鉄管（表面亜鉛メッキ）でも別に支障はなかった。



☒-8.1

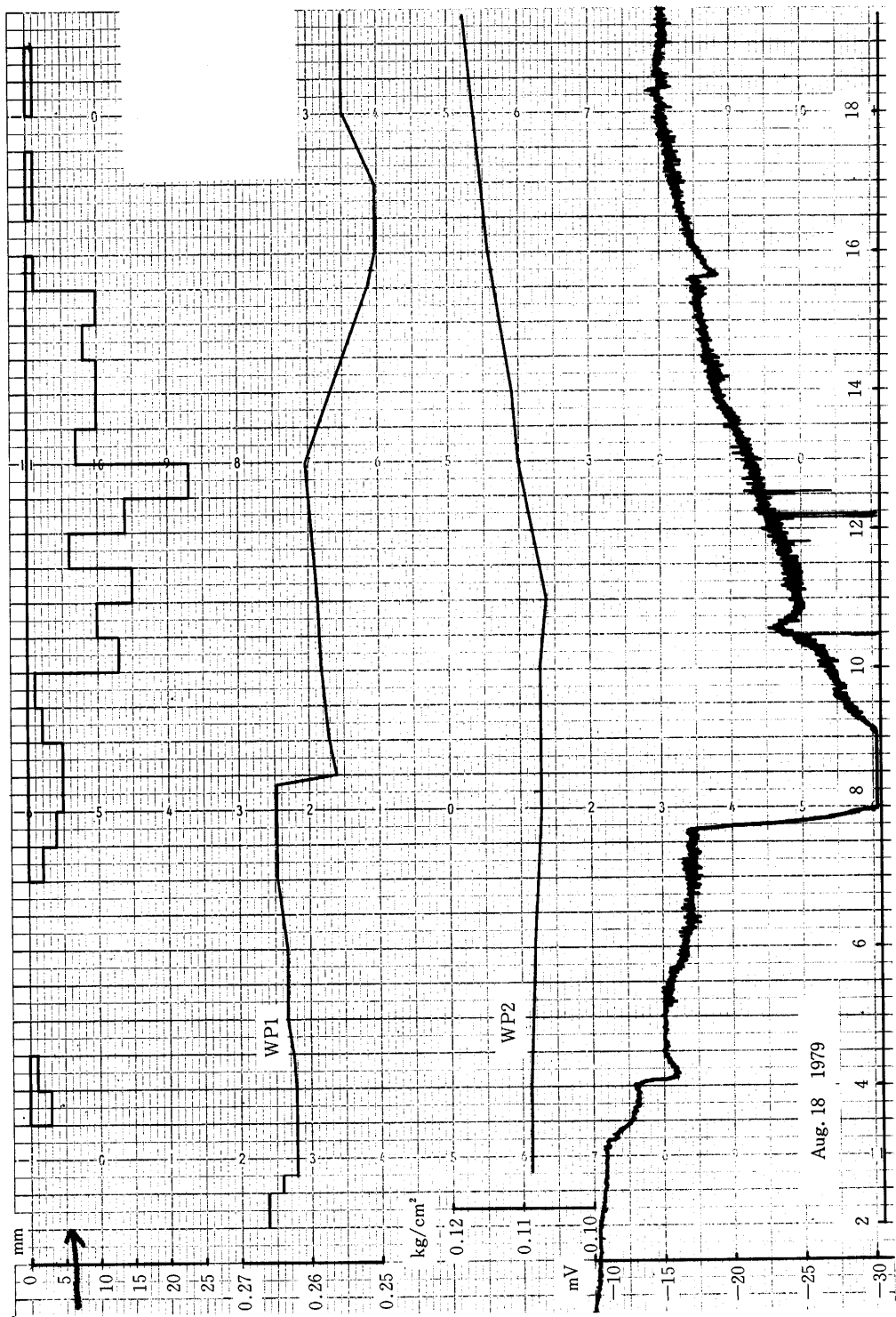
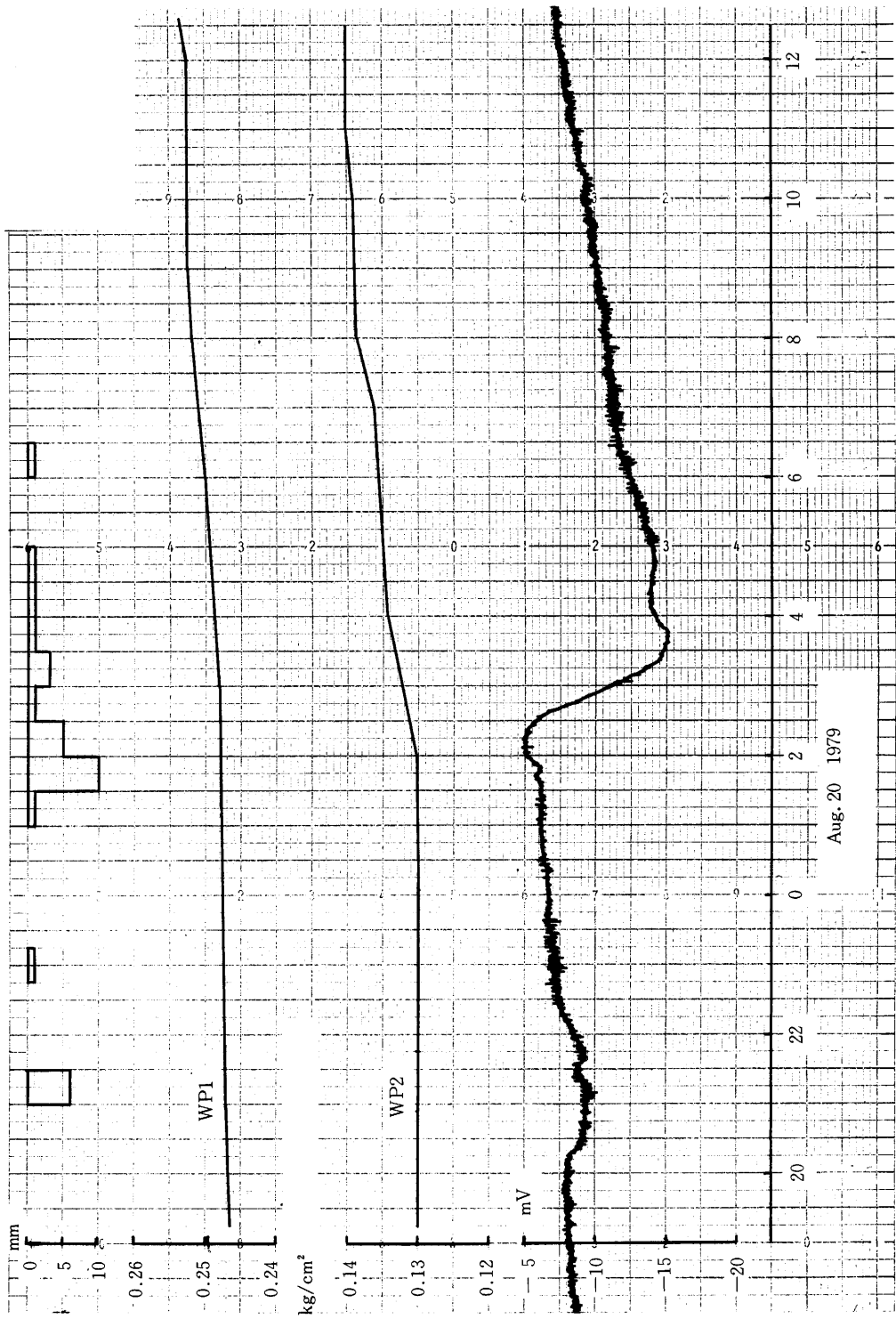


图-8.2



☒-8.3



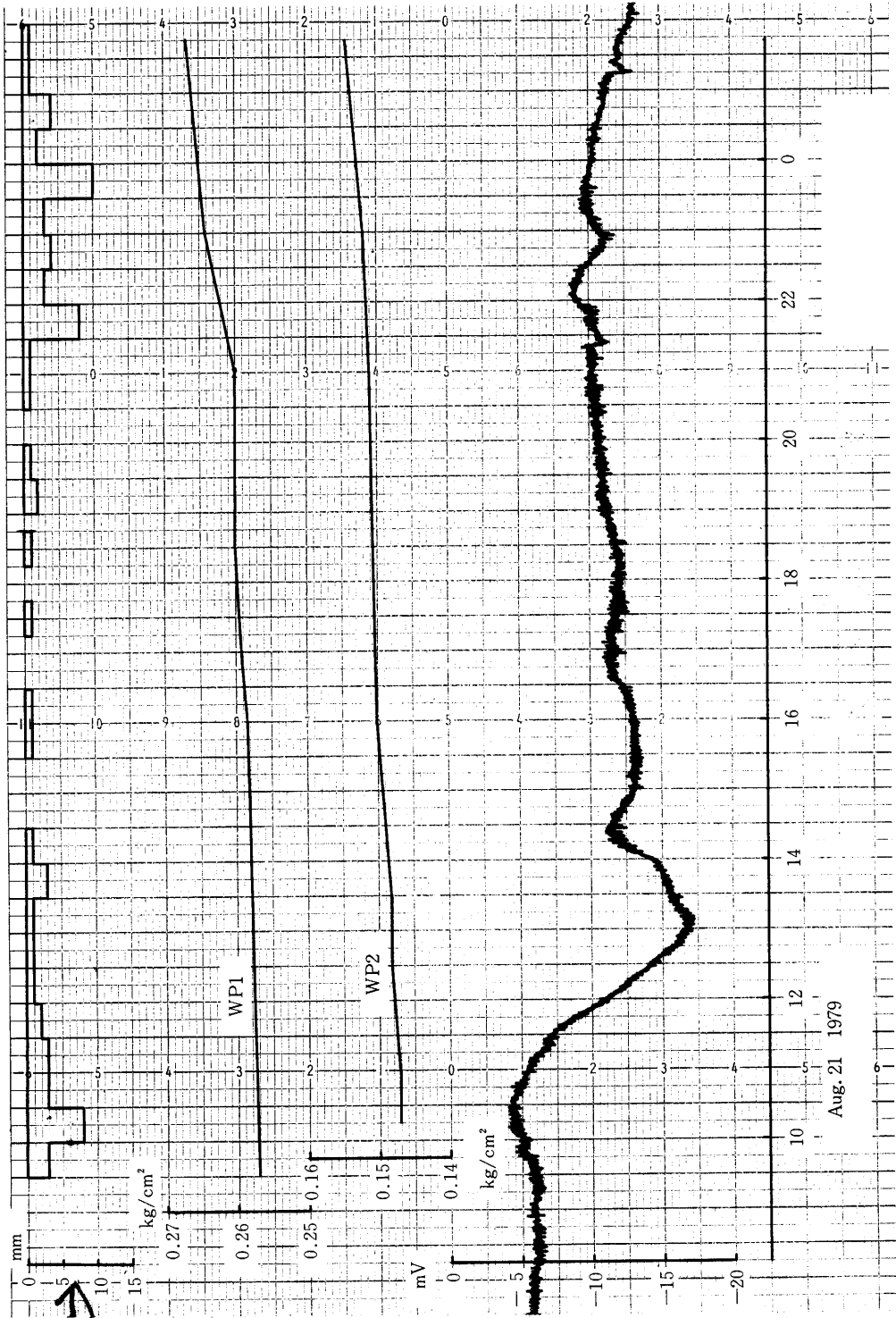
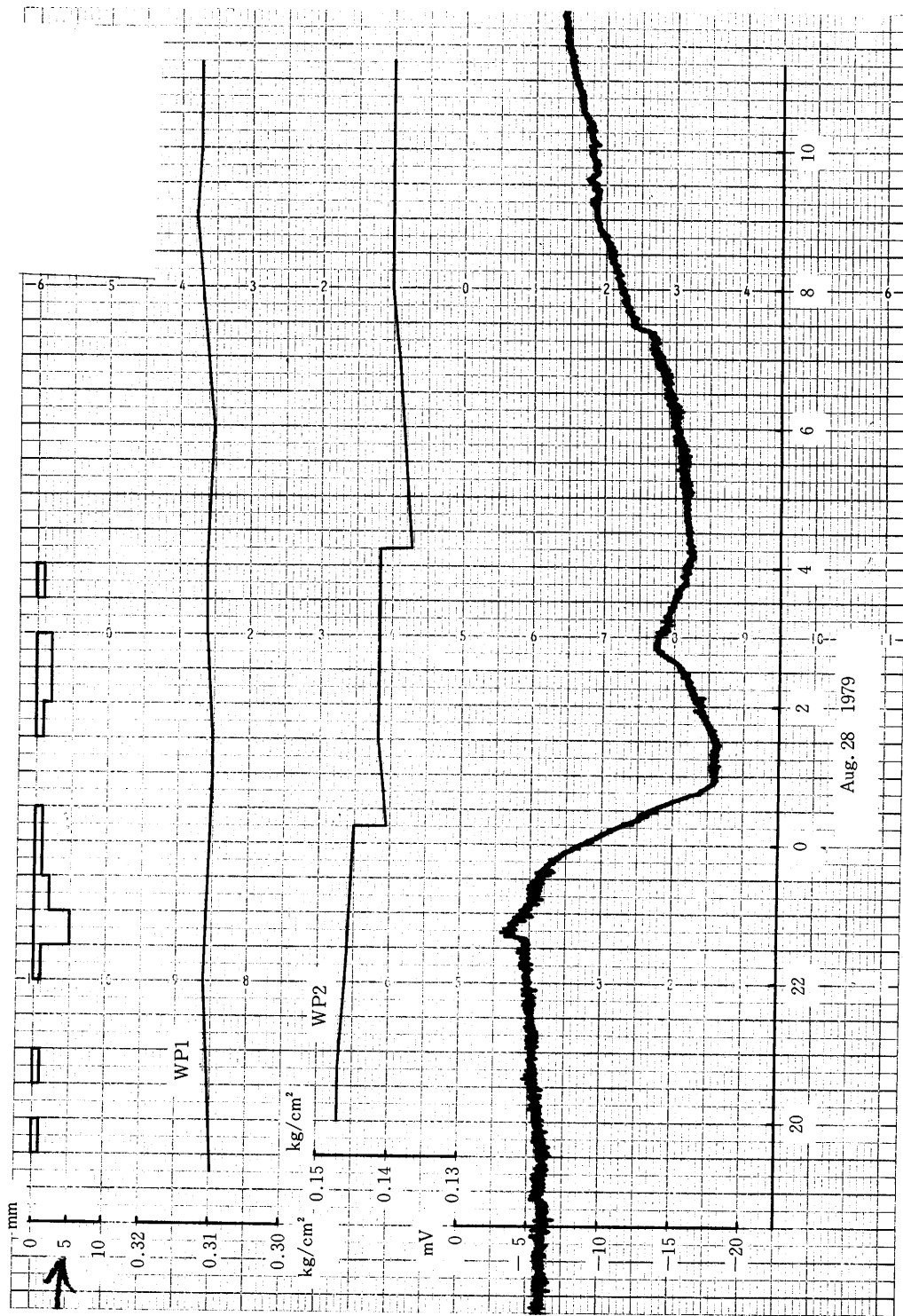
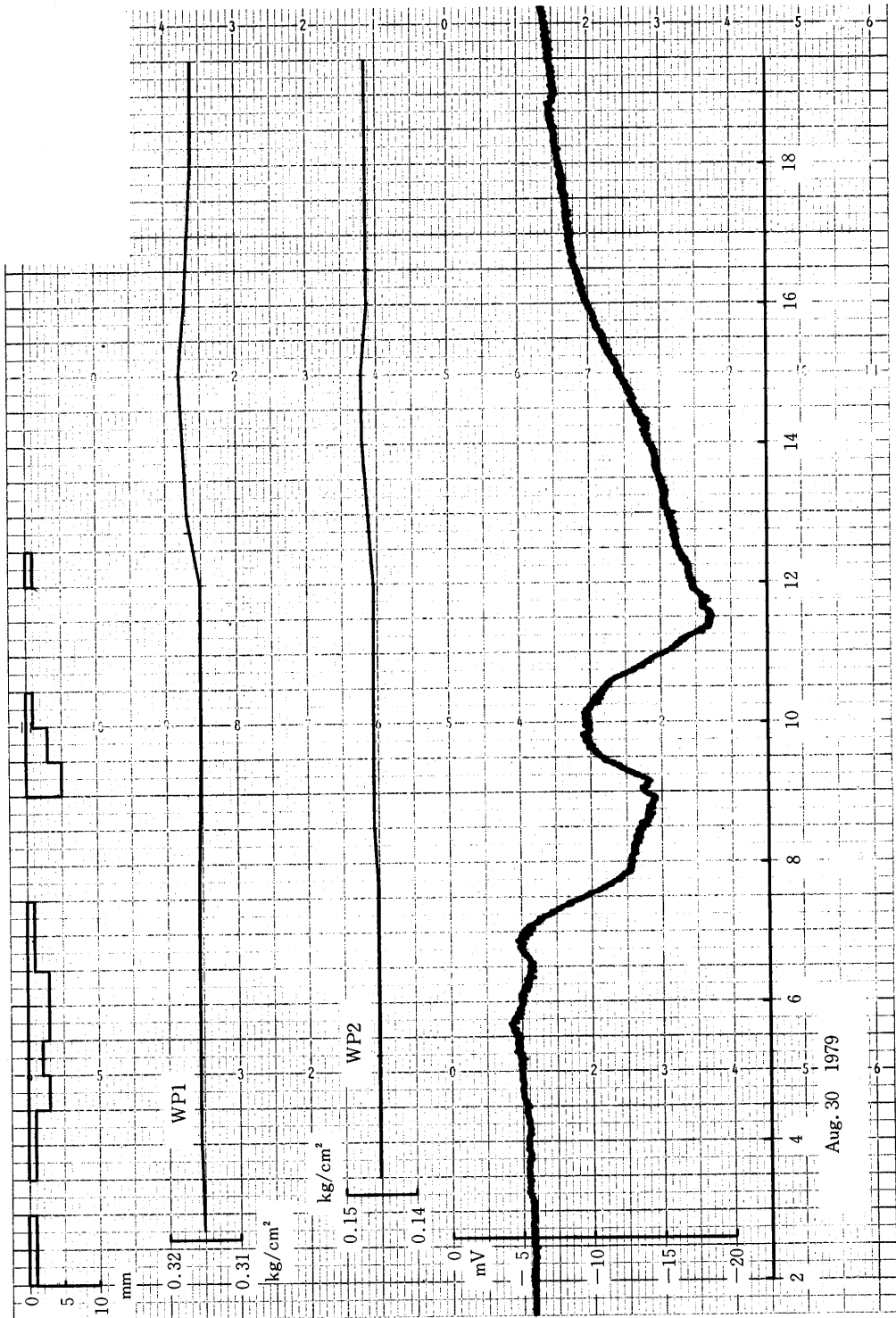


图-8.4



☒-8.5



☒-8.6

## 引用文献

- 1) 西尾邦彦ほか：地すべりの原理解析と対策施工の検討。東京営林局。1979
- 2) ————ほか：昭和55年度科研報告書。1980
- 3) ————：土体内の水の運動に関する基礎的研究。東大演報。1981
- 4) 力武常次：地球電磁気学／岩波書店。東京。1972

(1986年5月31日受理)