

山崩れに就いて、第3報 別府市乙原の地沁り調査報告 (風化土中の地沁 第二例)

理學博士 野 滿 隆 治
田 坂 浩
山 下 幸 三 郎

緒 言

著者の一人野滿は先きに風化土内の山崩生否條件を理論的に研究し⁽¹⁾、次で之を河内堅上村龜ノ瀬附近に於ける往年の地沁りに適用檢證する爲め、田坂齋藤兩君の應援を得て地電氣抵抗法により同地の沁り面深度判定を行つた⁽²⁾。その測定作業が昭和18年 5~6 月にかけて大體完了して結果を檢討しつゝあつた處、同年7月九州地方の豪雨に伴ひ別府市水源池の溪谷に臨む乙原地區の傾斜面に龜裂を以て始まる地沁りと崖崩れが発生し、水源池を埋没せん形勢を示して市民を憂慮せしめた。市當局は其の危険を感じて著者に其の調査及び對策を依頼し來つた。著者にとつては地沁り進行中の研究を行ふに勿怪の好機會を與へられたわけで、直ちに應諾した。

それで市土木部には龜裂の時間的進行と龜裂分布狀況を調査して其の結果の報告を乞ひ、筆者等自身も直ちに同地に出張したが、地沁りは大體4日間にて一先づ落ち付き急激なる危険の様相は去つて居たので、吾々は先づ附近の事情を視察すると共に電氣的地下探査法により地沁り深度を判定したる上、對策を考究することに順序を定めた。それで直ちに抵抗測定作業に取懸つたのであるが、當時は生憎稻田繁殖の最中なるため思ふ様に測點の設置も測線の展張も出來ず、僅かに4點の測定を得たに止まつた。それで水稻收穫を待ち12

(1) 野滿隆治：山崩れに就いて，地球物理第6卷（昭和17年），135頁。

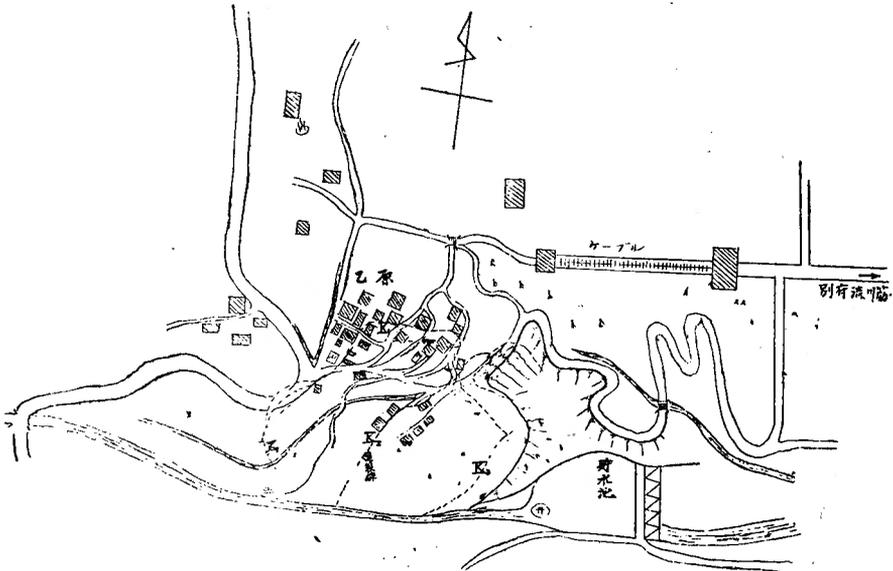
(2) 野滿，田坂，齋藤：山崩れに就いて，第2報．河内堅上地沁り面の電氣的探査（風化土中の地沁第一例）本誌本號，1頁。

月末再度出張の上, 改めて充分詳密に多數點の地抵抗垂直分布測定を實行した。それと共に平板測量及び水準測量をも併施して地形及び勾配の狀況をも明かにし, 更に土質標本數種を持歸り教室にて其の物理的諸性質を測定し, 地沁り機構研究の參考に供することにした。

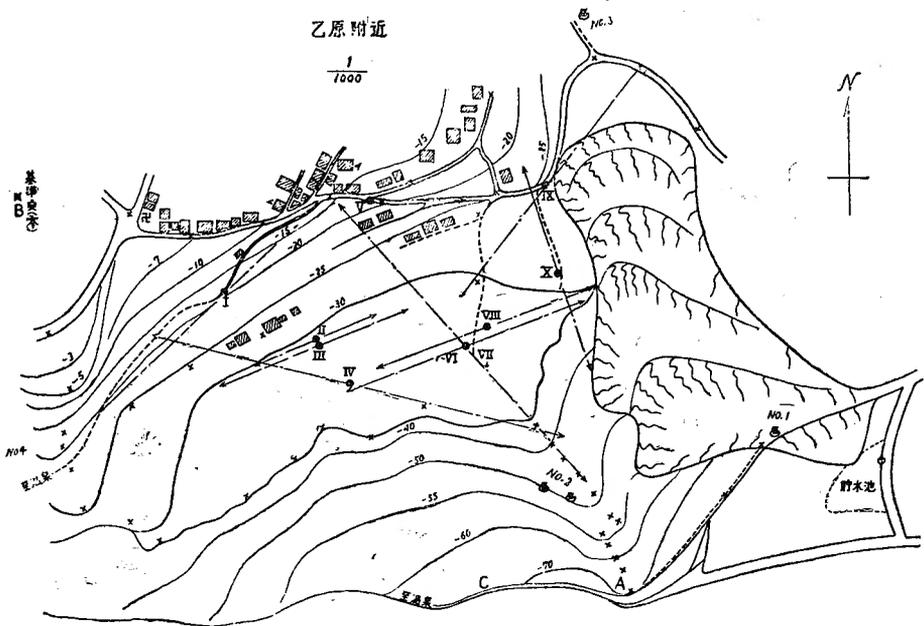
本文は其等のデータを用ひ, 地抵抗法による地沁り面判定の可能を示す一例を追加し, 又風化土中の山崩れ理論式を検證した結果を報告せんとするものである。前論文の河内堅上地沁り研究は何分にも十數年前の地沁り古疵調査であるから, 大體満足な結果を得たとはいふものの, 尙幾分物足らぬ感を持つて居たのであるが, 偶然にも其の直後に此の別府乙原地沁りに遭遇し, 現象の進展を始めより終りまで測定研究し得たのは有り難い仕合であつた。

本 論

1. 別府乙原地沁り地の位置, 地形, 地勢 別府の地沁り區域は同市のケーブルを登つて高臺地内を左折し, 朝見川の一小支谷(堰止めて市の水源池とす)に臨む乙原部落の傾斜地であつて, 第1圖は市の作製に係る地沁り地の位置を示した大體の見取圖である。地沁り現場だけの地形圖を我々が平板測量及び水準測量によつて作つたものが第2圖である。



第1圖 昭和18年7月下旬の別府地沁り地域位置と龜裂線(點線)の分布



第2圖 別府地じり地の地形と地抵抗測定點並に測線展開方向（鎖線）

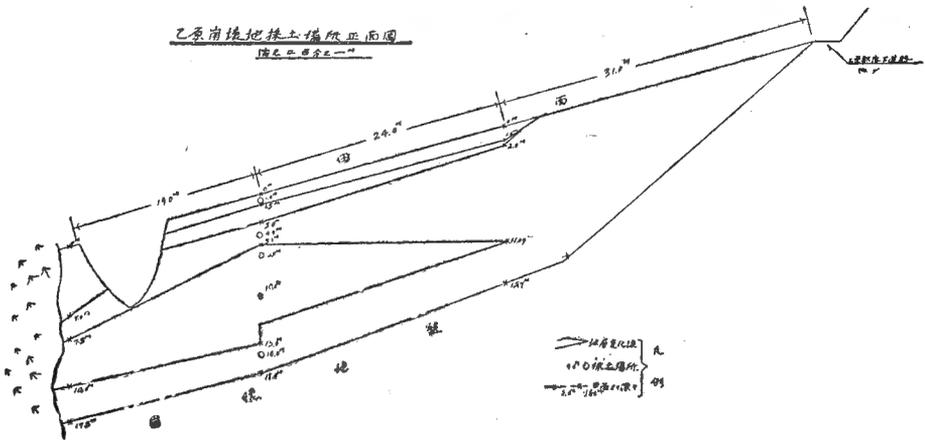
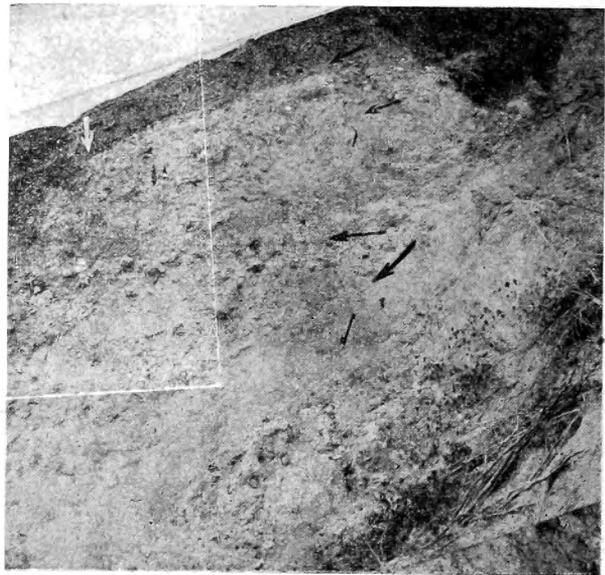
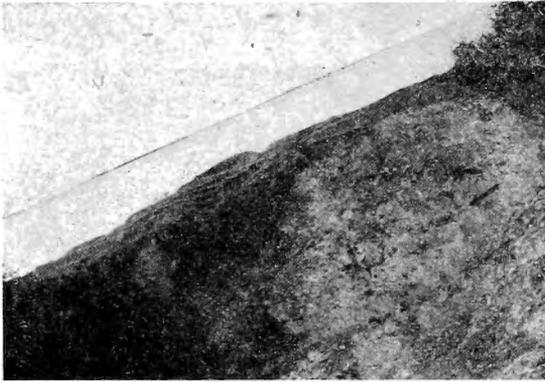
大體乙原部落より溪谷に向ひ舌状になつた水田で，其の軸線に沿ふ長さは180米，幅は上端の廣い處で170米，面積約2ヘクタールの地域である。第2圖中の○×は測點を示す。高度は西北端のB點(×)を基準にしたものである。

地域の東端は元來一小谷であつたものが，地じりの縁邊たる關係上脆弱なるために，谷に集流する雨水によつて烈しい浸蝕を受け屢々崖崩れをなし，今では壁高20米に近い著しい Gully を形成して居る（第3圖）。

地勢は第2圖の等高線及び第3圖の寫眞より判る通り，平均しても隨分の急勾配をして居るが，中央部には廣い平坦部（-30 m 等高線）を挟んで，其の上部と下部とが特別の急斜となり，地じり軸方向に馬鞍狀の斷面をなし地じり常習地の特徴を示して居る。尙ほ其の狀況を見易くする爲に，同圖中のアラビア數字を以て示した諸點を通る直線（後述の地抵抗測定線）に沿ひ斷面圖を作つて見ると第4圖の様になる。

地質は大體火山岩の霽爛したものであるが，多數の石礫を包有する。其の岩塊石礫の狀況より判斷するに，京大別府研究所附近と同様，火山破裂に伴ふ轉石灰砂の風化せるものかと思はれる。溪谷の向ふ側は高處まで岩盤であるのに，地じり區は殆んど全部如上の土壤であつて，只溪谷底に沿ひ平たき岩盤の露出せる處が第2圖C點附近で見られる。其の

山崩れに就いて第3報，別府市乙原の地之り調査報告



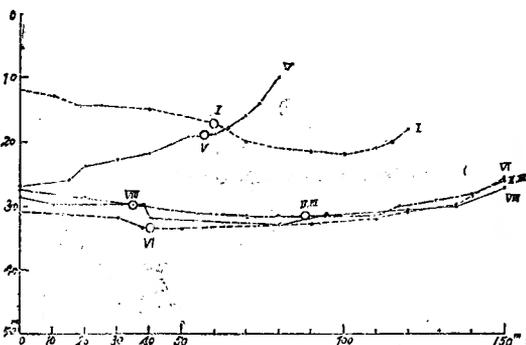
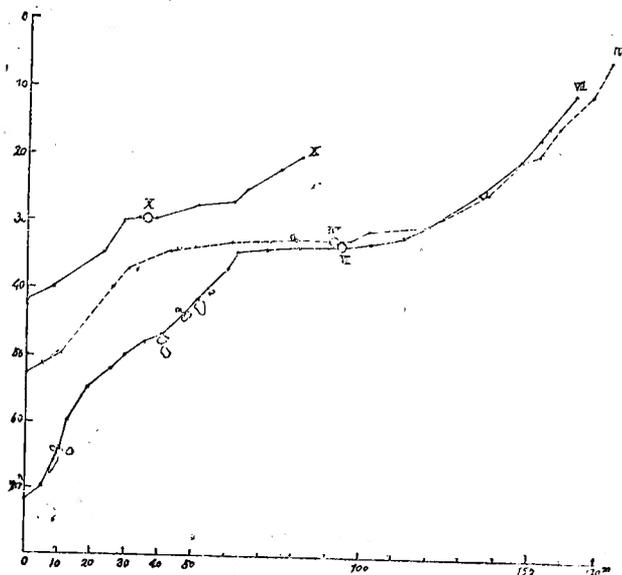
第3圖 別府地之り東端の雨窓と地層の露出寫真並に成層狀態見取圖

C 點は基準點 B より 60~70 米低所であるから，地這り區にも其の深度あたりに基岩盤があるものと思はれる。従つて，溪谷自身は一の斷層線であらうと想像される。

尙其の上の風化土層も地這り地の南半では少くとも 3~4 層の多少異なつた土質になつて居る。それは前掲雨壑の絶壁を

見れば明瞭であつて，第 3 圖の寫真に見える楔狀の仕切りが先づ以て吾人の目を惹く。此の楔狀の上縁も下縁も赤褐色に變色し判然たる區劃線を引いて居り，而も其の線の處に石礫が他よりも多く集つて居る。此の層が平板層をなさず楔狀となつて居るのは往時にも地這りがあつて滑落した部分の名残りではな

いかと筆者は想像する。楔狀部が途中で折れた形を示して居るのも其を裏書きする一事實の様である。楔狀部の上には更に二本の地表に平行なる區劃線が見られる。一は表土 1.5 m ほどの黒變した土の底面であつて，之は土壤學に所謂 A 層に外ならぬ。本地域は水田にする位であるから，少くとも此の部分は比較的滲透性が悪く水を滯溜せしむるに足り，永年の耕作によつて腐蝕質や膠狀物質が多量に形成せられ黒土となつて居ることは云ふまでもない。次は其の下（地表下約 3 m）にも一本界線がある。此の界は前三者ほど鮮明ではないから，最初は氣付かなかつたのであるが，後述の地抵抗測定結果から 2.5~3 m の深

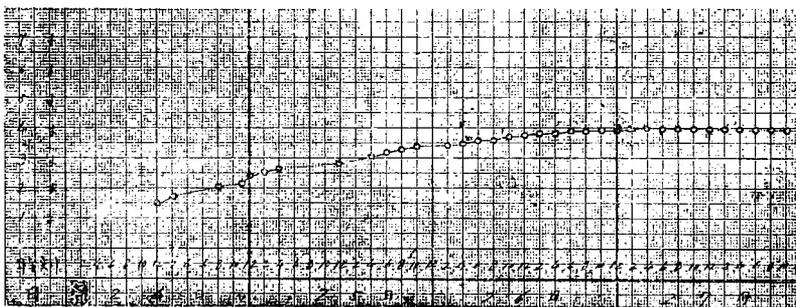


第 4 圖 地這り區域諸斷面
(上) 縦斷方向 (下) 横斷方向

度に層界の存在を示唆するものがあるので，現地を再検すると果して判然と之を認むることが出来たのである。第3圖の寫真にさへ充分認識せられる。之は畢竟土壤學にB層と稱するものの下底であらう。各層の深度及び形は同圖の見取圖を参照されたい。

2. 地沁り當時の現象 此の地には二十數年前にも地沁りがあつて，上部急傾斜區にある人家は其の爲め柱が多少傾いたので，後に修繕を行ひ低い方の柱に 10~20 cm の繼ぎ足をして平均を取つたのが今日まで數軒残つて居る。即ち此處は一つの地沁り常習地であるらしい。

今回の地沁りは，七月中旬九州各地に大水害を生じた大雨に伴ひ，同月二十四日早朝第1圖に K_1 と記入せる線に沿つて地割れが出来，附近の地盤が降下し始め家の建具が開閉困難となる状況なので，區民より其の旨市役所に報告して來た。市役所では直ちに係員出向の上，地割れの進行を時々刻々に測定すると共に，附近の異狀を調査して廻つた。其の結果によると，龜裂線 K_1 上端の部落内に於ける一點で地割れが進展した様子は第5圖の通りである。最初二日間は比較的迅速に進行して1晝夜に 1.3 寸くらの割で開きつゝあ



第5圖 別府地沁りに伴ふ龜裂の幅の増進

つたのが，三日目には次第に緩かとなり，四日目には殆んど落ち付いて進行せず，以後無事であつた。其の形勢は大體指數函數的である。

尚ほ地割れ線は巡視して見ると，此の外にも第1圖中の K_2 , K_3 二線が K_1 線に平行してあり，特に最上の K_1 線には東西兩端に近く數本の副龜裂を分岐して居る。又既記雨壑の絕壁附近には之を繞つて二つ或は三つの龜裂があり，其の最前線からは崖崩れを生じて，雨壑を著しく廣めると共に崩落土砂の一部は市水源貯水池に迫り，當局を憂慮せしめた。

以上の龜裂線と第2圖の等高線とを對象して考ふるに，地沁り軸線は地形が舌狀に尾根を伸ばして居る線，即ち V-VII-A，又は貯水池目懸けた IV の展張線方向にあると思はれ

山崩れに就いて第3報, 別府市乙原の地沁り調査報告

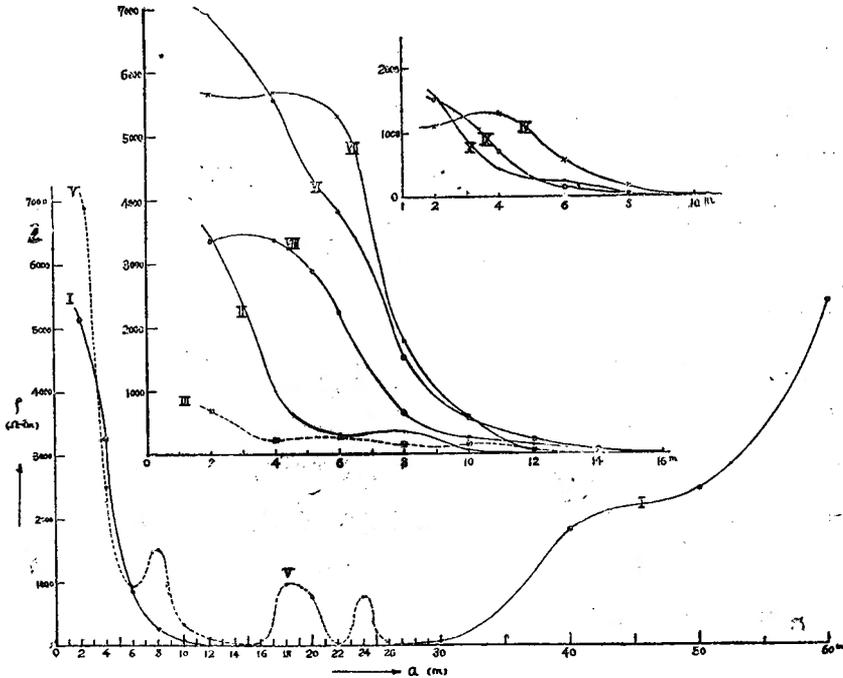
る。而して其の先端Aの邊では溪流自身が多少彎曲して居つて、此の考へを支持する様である。尙ほ軸線方向は雨壑壁に對し多少斜交して居るので、夫れに向つて押し出す分運動があるから、同所の谷壁に平行な龜裂線をも現出し、又其の最前線から崖崩れを發生するのも當然ではあるまいか。

地沁り區域の東縁は此の雨壑線たること云ふまでもなく、雨壑が此處に異常の發達を示して居るのも其の爲である。蓋し元來は淺い谷でも其處に集まる雨水が地沁り縁線を浸蝕することは頗る容易なる結果に外ならぬ。又西の縁は第2圖そのものの左端附近であつて、等高線の第二舌状部より少し西と思はれる。即ち K_1 龜裂線が西端から南へ曲がつて居る處が直ちに地沁りの西縁であらう。尤もこの西縁から東縁までの地塊全部が一團として沁つたものか、或はこの西縁附近は別塊として沁つたものかは、事後に残つた證據のみでは斷言出來ないけれども、恐らく後者が眞に近いものかと筆者は想像する。

3. 地抵抗の測定 地沁り面深度判定の一資料として、吾々は同地域の10點に於て各深度に對する電氣地抵抗を測定した。第一回は市の委囑と共に八月上旬同地に出張實施したが、本地域は急傾斜の段々畑に拘らず、灌漑水の便があるため全部水田となつて居り稻の

第1表 別府地沁り地見懸け比抵抗 ρ (オーム, 糎)

測點 a	I (初日)	I (末日)	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
2 m	5020	5275	3450	690	1105	6900	6900	5650	3360	1510	1570
4	2760	3768	1004	226	1305	2510	5520	5650	3360	703	414
6	1130	565.2	302	264	565	942	3580	5270	2220	151	245
8	352	170.8	352	151	161	1507	1510	1760	653	25.1	25.1
10	31.4	62.8	63	151	×	314	565	596	251	×	18.8
12	×	×	×	38	×	91	226	×	151	×	×
14			×	×	×	×	88	×	88	×	×
16	×	×	×	×		×	×	×	×		×
18				×		960	×		×		
20	×	×				754	×		×		
22						×					
24						754					
26						×					
30	94.2	×				×					
40	2510	301.5									
50	3140	1725.									
60	6210	4520									
70	距離ト レズ	同左									



第6圖 別府地之り地の電気抵抗垂直分布

繁茂期であつたので、思ふ様に測線が張れず、僅かに4點の測定を行つて大體の目安を附けられただけに終つた。それで稻の收穫が終り灌漑水なく乾田となるを待ち、晩秋に再度出張して京大別府研究所員の援助を求め晴天一週間内に多數の測定を実施した。其の結果は第1表及び第6圖の通りである。方法は等間隔四極法によつた。各測點で測定深度を異にせるは、地形(崖など)や藪、樹林、人家等の具合で測線の張れる範圍が制限せられるからである。又測點Iだけは測定作業期間の初日と終日と二回實施して、其の間に著しい差が起るか否かを檢する目的であつたが、大勢には變化なきことを示して居る。

表左端の a といふのは慣例によつて四電極相互間隔を示し、 \times 印は測器の感度以下で測れぬといふ意味にした。測器は横川製 L-10 型を使用した⁽³⁾が、 $a=10$ m なら比抵抗が $20 \Omega\text{-cm}$ 、 $a=100$ m ならば $200 \Omega\text{-cm}$ 以下くらゐになると感じないのである。斯様な低抵抗が孰れの地點でも僅か 10 m 内外から現れたのは一つの著しい事實で、前論文の堅上地之地區に較べ甚だ淺い。尙ほ第1表の結果より異種土層界面の深度を判定するには、Tagg

(3) 前出 (2)。

第2表 各測點に於ける異層界面の深さ (m)

地點 界面	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
第一 (B層底)	—	2.3	2.4	2.4	2.6	2.8	2.2	2.2	3.1	2.4
第二	4.7	4.4	4.9	4.8	4.4	5.2	4.6	5.1	—	5.0
第三	—	7.4	7.1		8.1	—	7.0	—		

の方法及び横川會社法を併用した。其の結果を第2表に示す。

測點 I と V の外は α が十數米しか張れなかつたので、深度 10 m 以内の界面しか判定出來ない。特に IV, IX, X では最も短距離に限られたので、他の點に現はるゝ第三界面に相當するものさへ判定出來ない。表中に空白に残してあるのは不明の意味で存在せぬといふのではない。之に反し、短線を入れてあるのは測定の範囲内ではあるが存在しない意味である。又太字に書いたのは極微抵抗に急減する界面を示す。

尙ほ表に示した界面の外、 $\alpha=30$ m まで張れた V 地點では深さ 20 m 弱から抵抗の稍と大きくなる層があり、又 $\alpha=60$ m まで取れた I 地點では深度 50~60 m から非常な高抵抗層が存在することを示して居る。

初、上の結果を兩壑壁面に見る地層と對照して考へるに、吾々の抵抗測定は極間隔 α を最短 2 m より始めて居るから其以下の深度にある界面は勿論出て來ない。故に谷壁に見る A 層底面 (0.5~1.5 m) は判定外である。とすると、第2表の第一界面は所謂 B 層底面に相當する。事實其の深度が 2.2~3.1 の間にあつて、谷壁面の該層深度も段々田面の崖端では 3 m、崖脚下では 2 m 位の處が多いのと一致する。

No. I 地點で第一界面が地抵抗分布に現はれて來ないのは、同地點が高處にあつて水田外 (同點を通る道路の下から水田となり、高い方は畑地) なる爲に A, B 層の發達が充分ならざるものと解せられる。

次に表の第二界面 (深度 4.4~5.2 m) は恐らく谷壁面に見る楔狀部上面に該當する。兩者の深度が略ほ一致するからである。IX 測點で第二界面が存在せぬのは、同地點が雨壑上端に近い處であつて楔狀部も事實其處に無いのと符節を合する。

第三界面とした 7~8 m 深度のものは楔狀部下底面としては淺すぎる。肉眼で見た谷壁面の狀況だけからは此の第三界面の意味は判らない。然し後に深度 6 m から採つた土と

楔状部中心なる深度 10 m の土との透水係数抗剪力其他種々の物理的性状を検査測定して、両者は著しく差があることを知るのである。従つて思ふに、此の楔状部が昔しの地回り土塊であるならば、其の時代の A 層（或は A, B 層）なりしものがある筈で、その底面が今の第3界面に該当するのではあるまいか。若し左様であれば後述の物理的諸性質を了解する上にも眞とに好都合となるのである。

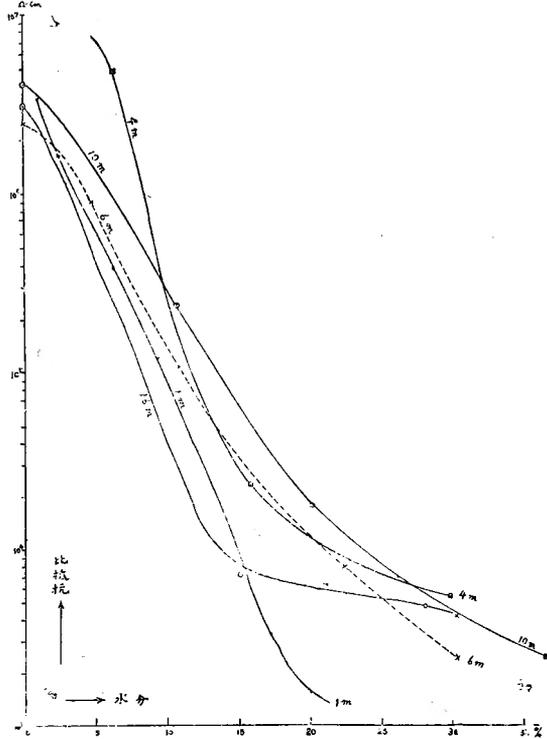
尙測點 No. I に現はれる深度五六十米からの高抵抗層は基岩盤に違ひない。岩盤の露出を見る溪流左岸 C 點の高さが No. I 測點より 50 m ほど低いのと一致する。

4. 土質試料の諸性質實驗 地回り面深度の判定を行ふ前に、更に同問題に關係すべき土壤の物理的諸性質を測定検討して置く必要があるので、第3圖雨壑壁見取圖に示した點から各層の土質標本として地表下 1, 4, 6, 10, 16 m に於ける土を適量づつ採取し、京都に持歸つて實驗測定した。地表下 1 m は所謂 A 層、4 m と 6 m とは楔状部上面の上と下、10 m は楔状部中央、16 m は楔状部より下の深土を採つた積りである。採土當時は未だ地抵抗測定結果の整理を行つて居なかつたので、地表下 3 m 内外にある地層境界の存在に氣付かず、楔状部上面が土壤學に謂ふ B 層の底面と思ひ込み 2~3 m の所の土は採らなかつたのであるが、後になつて地抵抗垂直分布の検討から 3 m 内外に異層境界あるべきことが示唆され而も再度出張の際に雨壑壁面を熟視すれば明かにそれが現存するのを知つた次第である。か様な次第で所謂 B 層に當る土質標本を缺いたのは遺憾であるが、4 m 深度の土と大差なかるべきことは其の間の層界を最初に見落としたこと並に地抵抗變化の差が僅少なることから推定せられるので、2~3 m 層の土を新たに採取檢定するほどのことは無いと見て止めた。

(i) 電氣抵抗：—本地域の大地抵抗が 10 m 内外の電極間隔にて横川式測定器にかゝらぬ程小さくなる事實を了解する一助にもと思つて、採取土毎に水分を種々に變へて其の電氣抵抗を測つた。土は硝子の太管に填め、兩端より眞鑄板を以て壓さへ電極とし、コーラウシ電橋法によつた。又加へた水は最初には京都水道水を用ひた。第3表及第7圖は測定の結果である。之によれば、各層の土壤何れも水分の増加に伴ひ電氣抵抗は激減する。又 A 層の黒土田面下 1 m のものと楔状部を載せて居る田面下 16 m の土とが他よりも著しく抵抗小で、田面下 6 m のもの之に亞ぎ小さく、C 層土（深さ 4 m）と楔状部の土（深度 10 m）とは抵抗が大きいことが判つた。

第3表 別府乙原土質の電気比抵抗と水分（京都水道水を加ふ）

土種	水分(%)	比抵抗 (Ω -cm)
A (田面下1米)	1.0	3400000
	2.4	1640000
	6.2	382000
	15.0	8690
	17.0	3260
C (深サ4米)	6.2	4810000
	15.7	232000
	29.7	5470
楔状部上端 (深サ6米)	0	2500000
	4.7	909000
	10.7	107000
	22.3	7970
	30.3	2420
楔状部下10米	0	4100000
	10.5	241000
	20.0	17200
	36.5	2000
楔状部下16米	0	3120000
	15.0	7240
	21.0	6350
	28.0	4780



第7圖 各層土壤の電気抵抗と水分との關係
(京都水道水を加へて)

然し現場に於ける地抵抗が横川式大地抵抗測定器にかゝらぬほど小さくなることを了解せんと最初の腹案とは相當の懸隔がある。それは無論吾々の室内實驗では殆んど鹽分を含まない京都水道水を加へて水分を加減したのみならず、水を加へてから餘り時間を置かずに實驗したので土壤内の可溶成分を溶解することも不充分な爲めであらう。若しも水田灌溉水の如きものが地下に滲透し而も土中に滯溜すること長い月日の土壤水を以て充分な含水量をもつ現場の土であれば、上記實驗の抵抗値よりは遙かに僅微な抵抗になり得べきことは想像に難くない。

況んや本地域は後火山作用の殘存する處であつて、其後現場を詳細に視察し廻つたところ温泉の湧出するもの4箇所もあることを發見した。第2圖に記入してある位置で、第4表の様な温度及び比抵抗のものである。温度は昭和19年4月1日午前10時頃（氣温19.0°）の

測定に係り, 比抵抗は其の時採水したものを京都に持ち帰り測つたものである。尚ほ京都水道水の比抵抗をも測定して表中に添記して置いた。

斯様に狭い地区内に 4~5 口も温泉が地表まで湧出して居るのを見れば, 尚ほ表面まで現はれない潜在温泉も少なくないと想像され, 本地域内の地

第4表 地之り内の温泉

温泉番號	温 度	比 抵 抗
No. 1	25.8°C	725Ω-cm
2	25.8	4000
3	38.7	1650
4	45.0	1510
京都水道水	—	12250

下水中には相當の温泉水が瀰漫混入して初めから相當の鹽分を含み比抵抗の小なるものであらうし, それが粘土質の土壤内に長日月滯溜して居る間には土壤内の可溶成分をも多量に捕捉して愈々濃鹽微抵抗となつて然るべきことが想定される。それで試みに No. 1 温泉水を各層土壤に飽和状態とし電極板を緊迫して水が滲み出る程度にしたときの比抵抗を測定したところ第5表及第8圖の結果

第5表 No. 1 温泉水を飽和せしめた各層土壤の比抵抗 ρ

を得た。既に之だけで數百 Ω-cm の小抵抗になる土壤があるのである。而も之は温泉水を混和して間も無く測つたのであるが, 更に田面下16m

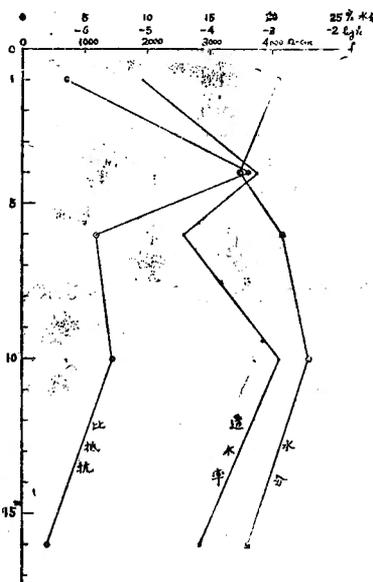
試料土	田 面 下				
	1 m	4 m	6 m	10 m	16 m
比抵抗 (Ω-cm)	705	3620	1180	1450	400

の土壤に温泉水を飽和せしめ數日放置して後測定したところ 291 Ω-cm まで低下した。是等の實驗によつて乙原地域内の大地比抵抗が或条件下では横川式測器に懸らぬほど微小抵抗になつて居る事情を了解することが出来る。

(ii) 透水係數 次に各試料土の透水係數 (k) を測つて見た。其の方法は著者の一人が嘗つて行つた

第6表 各層土壤の透水係數 k

試料土	田 面 下				
	1 m	4 m	6 m	10 m	16 m
透水係數 k (cm/sec)	3.6×10^{-6}	5.6×10^{-4}	3.9×10^{-5}	1.3×10^{-3}	7.2×10^{-5}
log k	6.935	4.748	5.591	3.114	5.857



第8圖 各層土壤の透水係數, 比抵抗(温泉水を飽和せしめたときの)及び地之りより約3週間後の現場水分

(4) 方法に多少の改良を加へた簡易法によつた。結果は第6表及び第8圖の如くになつた。

即ち、透水性も比抵抗同様深度1 m 土と6 m 及16 m 土に於て小さく、4 m 及び10 m 土に於て大きい。このことは楔状部が嘗ての地沁り崩土の名残りならんとの想定を愈々確信に導くものである。

尙ほ透水係数と比抵抗とが同一趨勢の相異を示すのも至當であつて、透水性良好なる土は比較的粗粒にして孔隙大なる爲め土壤水の通過容易にして永く滯溜することなく従つて鹽分の溶解少なきに反し、透水性不良なる土中には土壤水が永く滯溜して土中の可溶成分溶出が多くなり電気抵抗を小ならしむるからである。

(iii) 地沁地下各層の現場土壤水分分布:—上記の試料土は昭和18年8月18日に採取したのであるから、地沁り後3週間ほど経つては居るが、その試料土を一部づつ、別府研究所で即日秤量し更に之を充分乾燥して秤量し採取時の水分を算定した。第7表は其の結果を示すもので、第8圖中にそれを圖示併記した。地沁り時の水分とは多少違つて居る筈ではあるが、土の透水率が前記程度のもので而も水田灌漑中のことであるから、著しい相違はないと思はれる。

圖で特に目立つことは4 m 土の水分が他より著しく少なく、透水係数や比抵抗の山と正反對に角突き合はせて居ることである。而して此の事實も當

第7表 地沁地下各層の現場水分(重量比)

試料土	田 面 下				
	1 m	4 m	6 m	10 m	16 m
水分%	21.8	17.9	21.6	23.9	19.1

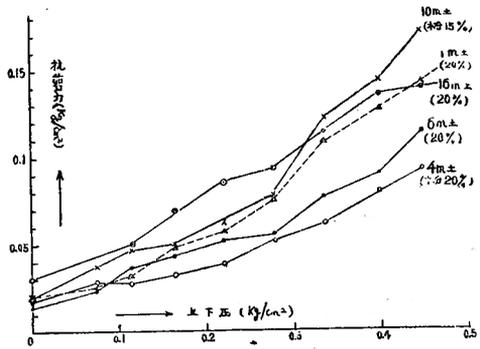
然で、田の水に浸つて居る難透水のA層の下にある透水性のよい土からは水分が早く逃げ降る結果に外ならぬ。然らば同じく透水性の良好なる10 m 土に於て水分が却つて多くなつて居るのは如何といふに、一つには其の下が難透水性の層であるから水分がそこに貯へられる爲もあらうし、今一つには水が上から來るばかりでなく既記の如き温泉其の他の潜在湧泉によつて透水性のよい層には餘分の水分が供給されることも考へられる。

(iv) 剪斷強度:—剪斷強度は土壤工學界に常用される三段箱引拔式測定器を横斷面積4 cm×4 cm に縮小した小型に製作して測定した。

試料土は現場ありのまゝに採取することが出來ず崩して持歸つたものであるから、一應

(4) 野滿, 豊原, 神本: Contact surface between the fresh- and salt-water under the ground near a sandy sea-shore. 京都帝大理學部紀要 9 (1927), 279.

風乾して搗崩した上に種々な水分を加へ練直して試験する外ないが、最初は單に此の練直し土を適當に剪斷器に填めただけで測定を行つた。ところが其の若干例を示すと第9圖の様になつて、上下壓の増加に伴ふ剪斷抗力の増大が直線的でなく、双曲線狀の趨勢を示すのみならず、所々に階段的な不連続急増を呈するのである。此の不連続は或は測定誤差によるか



第9圖 豫壓を加へず不完全なる剪斷試験結果の數例

とも思つて見たが、然しそれが大抵は曲線の大勢に照らし急増する一方で急減を示す所は殆んどないことから、どうも測定誤差の爲ではない。而も曲線の趨勢が双曲線狀では粘着力と摩擦力との分離が困難となり、強いて上下壓の比較的小さい範圍内だけから夫れ等を分離推定すると餘りに過小な値を與へ、著者の風化土内に於ける地這り理論式に代入して別府地這り深度を算出すれば僅々數十纏といふ限界深度を與へるのである。それで之は如何なるわけか。著者の理論が別府では實際に當嵌らぬのか、但しは剪斷試験の方法に何か不備の點があるのか、熟考を重ね後者即ち實驗方法の不可によるといふ結論に達した。なぜならば試料土を練直しただけでは地下數米乃至十數米の現場に於ける状態とは緊密度に於て著しい相違がある筈である。即ち現場では其上の土柱の重さに等しい壓力を永年受けて緊迫されて居る。仍て練直し土壤の剪斷試験には其れ相當の豫壓を長時間加へてよく緊迫して置く必要があることに想到したのである。豫壓を加へないものは粒子配列が何としても疎散であるから、剪斷試験に於て上下壓を増す際にそれが粒子配列を變更せしめない程度の微小範圍内では剪斷抗力が上下壓に比例して増加し直線關係を示すであらうが、或定限を超えると粒子配列が元のまゝでは持ち切れずに一部の粒子が他の粒子間に落込みなどして新たな緊密配列になる。すると其處に土壤強度の急増不連続點が現はれる。そして新配列により支へ得る上下壓増加の範圍内までは復剪斷抗力が比例的直線關係を保つであらう。以後上下壓を更に増加するに伴ひ幾回も不連続急増點を現出し、而も全體としての趨勢は双曲線的に尻上りになつて然るべきである。斯く考へると上下壓と剪斷抗力との關係が第9圖の様になる理由が諒解出来るのである。仍つて練直し土を用ふる剪斷試験は前

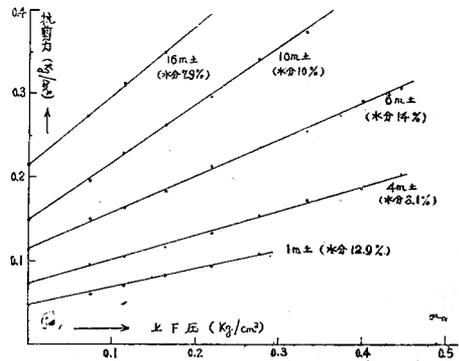
以て現場に於ける土柱の重さに等しき豫壓を相當長時間懸けた後に，其の豫壓以下の上下圧範圍内に施行せねばならぬことが判る。さうすれば實驗途中に粒子配列の變化は起らぬから，抗剪力の不連続急増點などは出来ないであらう。

それで著者等は其の様にして全部實驗をやり直した。豫期の通り抗剪力は豫壓を加へない場合よりは著しく大きく，又不連続急増點などは現はれないのであつた。其の若干を第8表第10圖に例示する。

第8表 豫壓を加へたる剪斷實驗例若干

上下壓 (kg/cm ²)	抗 剪 力 (kg/cm ²)				
	田面下 1 m 土 水分 12.9%	田面下 4 m 土 水分 8.1%	田面下 6 m 土 水分 14%	田面下 10 m 土 水分 10%	田面下 16 m 土 水分 7.9%
0	0.046	0.072	0.115	0.150	0.216
0.075	0.060	0.095	0.151	0.197	0.274
0.114	0.070	0.106	0.164	0.230	0.314
0.164	0.082	0.117	0.185	0.268	0.350
0.219	0.095	0.134	0.213	0.298	0.400
0.277	0.108	0.153	0.237	0.342	0.446
0.334	0.115	0.174	0.258	0.377	0.488
0.398		0.188	0.293	0.431	0.548
0.447		0.205	0.311	0.457	0.592

此の様に上下壓と抗剪力との關係が整然たる直線的になれば，夫れより粘着力と摩擦力との分離決定は何等の不安なく行ひ得る。それで再度實驗による各層土の粘着力，と摩擦係数 μ との種々の水分に對する値を求めて第9表及び第11圖を得た。豫壓を加へない場合には各層土とも抗剪力に著しい差はない似よつたものであつたが，豫壓を加へると其の豫壓の大なるに従つて即ち深部の土ほど抗剪



第10圖 豫壓を加へた場合の剪斷實驗例若干

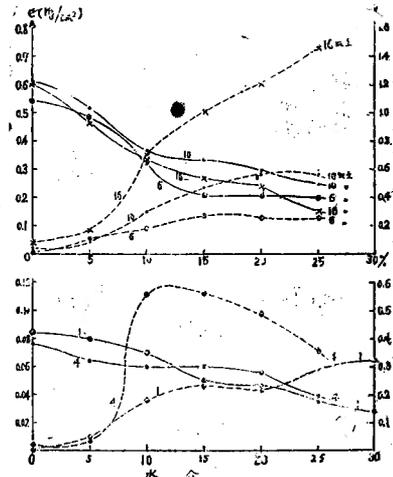
力増強し特に其の内の粘着力の増大が甚だしい。6 m 土以深は水分25%までになつて居るのは，其の邊まで，豫壓を加へるとき水が滲み出で飽水状態になるからである。

尙茲に一言して置かねばならぬことがある。練直し土で地中現場に於ける強度を判定する目的には，豫壓を加ふるの必要は上記の如く明瞭であるが，然し斯様にしても水分の少

第9表 豫壓を加へたる場合の各層土の粘着力 c (kg/cm^2) 及び
摩擦係数 μ と水分 (重量比%) との関係

水分	田面下 1 m 土		4 m 土		6 m 土		10 m 土		16 m 土	
	c	μ	c	μ	c	μ	c	μ	c	μ
0%	0	0.42	0.004	0.88	0.008	1.09	0.020	1.22	0.040	1.20
5	0.009	0.40	0.035	0.82	0.051	0.97	0.042	1.03	0.081	0.93
10	0.036	0.35	0.112	0.80	0.090	0.65	0.150	0.74	0.352	0.66
15	0.046	0.25	0.112	0.80	0.133	0.42	0.235	0.69	0.504	0.53
20	0.044	0.22	0.098	0.28	0.131	0.41	0.281	0.61	0.601	0.47
25	0.058	0.18	0.071	0.19	0.129	0.40	0.280	0.50	0.780	0.30
30	0.064	0.14								

い部分は到底一般に現場の値を代表するものにはならないのである。それは粘土細工をしたことのある人ならば誰でも常識的に諒解が出来る筈である。粘土を充分乾燥粉碎したものは如何に豫壓を加へたと云ふほどの粘着力を示すことはない。上記の實驗結果でも水分 0%では粘着力が皆殆んど 0乃至極微になつて居る。而して乾燥粘土粉に水分を加へて練るにつれ漸次粘着力を増し、或水分に至つて極大に達する。然るに一旦充分水を加へてベタベタになつた粘土を逆に蒸發乾燥させると、水分減少につれて強度を減するかといふに却つて益々凝集力増大する。乾燥し切つた粘土塊は極めて堅強で、鎚で叩い



第11圖 豫壓を加へたる場合各層土壤の粘着力 c (線點) と摩擦係数 μ (實線)

て割ることもナイフや鋏で切斷することも中々容易でない。即ち水分が 0 に近づくほど抗剪力は愈々甚大なるものとなつて、上記の實驗結果とは全く反對になることが常識的に想定せらるゝのである。此の點に就いては別に研究發表の豫定である。

ところで實際の野外土壤は湿つたり乾いたり幾度も幾度も繰返して居るのであつて、盛夏の地面表皮以外には砂漠地方を除き、地中で完全乾燥状態になることはないから、上記實驗の如く乾燥粉末状態の土に漸次水を加へて行つた抗剪力が現場の土と假令同一水分でも同一抗剪力になつて居るとはいへないこと明白である。然し飽水状態に近い水分の多い

範圍だけは乾燥より濕潤にした場合も濕潤より乾燥にした場合も其の經路如何に關せず略ぼ同一であらう。而して地沁問題に必要なのは其の邊の強度であるから，我々の今の目的には上記の實驗結果を利用し得ると信ずる。是等の疑點を避くる上から試料土には現場状態のまゝ崩れぬ様に採取することが最も望ましいのであるが，我々にはそれが出来なかつたので止むを得ない。

(v) 見懸け比重：—豫壓を加へた練土の一定體積を測つて見懸け比重を定めた。地沁問題の目的には飽水状態即ち豫壓を加へ水が滲み出る程度にして其の滲出水だけ拭き取つて測つたのが第10表である。

第10表 各層土の飽水状態に於ける見懸け比重 w

土 種	田面下 1 m	4 m	6 m	10 m	16 m	平 均
見懸比重	1.85	1.72	1.82	1.81	1.87	1.81

5. 別府乙原地沁り深度の判定 著者の理論によると，圓弧狀地沁りは傾角 α の山腹に於て最大深度 h が

$$h \cong \frac{3}{2} \frac{c \sec \alpha}{w(\tan \alpha - \mu)} \quad (1)$$

になれば生起するし，沁面の長さが非常に大で大部分直線狀の沁面縦斷形状なる地沁りは

$$h \cong \frac{c \sec \alpha}{w(\tan \alpha - \mu)} \quad (2)$$

になれば發現する筈である。茲に w, c, μ は土壌の見懸け比重，粘着力，摩擦係数を表はす。ところで，問題の別府乙原地沁りは比較的短い上に，若しも著者想定の如く楔狀部が舊時の沁り跡とすれば其の寫眞及び見取り圖から窺はれる通り其の下面は弧狀になつて居るから，本地域には弧面地沁りが起り易い様に思はれる。それで前項測定 of 土壤特徴數を用ひて各層土に對する沁面深度を(1)式によつて計算して見よう。

地面の平均勾配は第4圖の IV, VII, X 測線方向の縦斷圖上で測ると夫々 $29^\circ, 39^\circ, 30^\circ$ を得るから平均して $\alpha=33^\circ$ と見る。又水分は地沁當時飽水状態にあつたと考へて，第11圖の終端に於ける c, μ を採用する。見懸け比重は第10表の平均値 $w=1.81$ を使用する。

先づ A 層 1 m 土に對しては， $c=0.064 \text{ kg/cm}^2=64 \text{ g/cm}^2$ ， $\mu=0.14$

$$\therefore h = \frac{3}{2} \frac{64 \times 1.19}{1.81(0.65 - 0.14)} \text{ cm} = 1.24 \text{ m}$$

以上ならば這り得る筈になる。然るに第3圖のA層土は段々水田の壁面上手で1.5米，下手では0.3~0.5米で平均は1.04mより稍薄い様で，眞とに危機一髪ながら滑動は止められる様である。其の上斯様な浅い層では地表面を階段水田にしてあるといふことが滑動防止の効果著しいこと，砂防工事等に於ける場合と同様であらう。

次に4m土に對しては， $c=0.071 \text{ kg/cm}^2$ ， $\mu=0.19$ であるから滑動條件は

$$h \cong \frac{3}{2} \frac{71 \times 1.19}{1.81(0.65 - 0.19)} \text{cm} = 1.52 \text{ m}$$

となり，此の層では樂々に這れるわけである。而して滑落條件を満足する限り同じ土質では深いほど這り易いのであるから，此の土層の下底換言すれば楔狀部上面突起部（田面下5m内外）の處から地這りが起つたものと推定される。

6m土に對しては， $c=0.129 \text{ kg/cm}^2$ ， $\mu=0.40$

$$\therefore h \cong \frac{3}{2} \frac{129 \times 1.19}{1.81(0.65 - 0.40)} \text{cm} = 5.10 \text{ m}$$

で滑落條件は充分に満足される。故に此の土層内に於ても地這りが發生し得る。之と同質の土は以下何米まであるか判別されて居ないが，次の10m土は滑落條件に達せぬこと遠いものなることが下記計算でわかるから，6m採取土の續きは薄いものと推定される。又既述の如く1m土と6m土とは其の性狀頗る類似して居るから，或は楔狀部滑落以前のA層なりしものではないかと想像されるので，恐らく6m附近が既に其の下限かも知れない。そして赤褐色に色どられて居る楔狀部上面が其の上限であるから，今の計算と4m土に對する計算とを合併して考察すると，比較的透水性のよい4m土が難透水性の6m土上にあるが爲め，大雨に伴ひ多量の水が4m土内に蓄積して6m土の上部を柔け，其の界5~6mの處から滑落したものではあるまいか。4m土が比較的粘土分少く水を導き易いであらうことは其の粘着力・水分相關曲線を見ても首肯される。此の土の粘着力だけが，水分13%附近に顯著な極大を有するのがそれで，粘着力は粘土分に依存し，粘土分の粘着力は水分が粘土粒子間隔だけでは充分行き渡つた時に極大となるべく其以上になると粘土粒は水中に浮いた形になつて粘着力は却つて減少する筈だからである。

10m土に對しては， $c=0.280 \text{ kg/cm}^2$ ， $\mu=0.50$

$$\therefore h = \frac{3}{2} \frac{280 \times 1.19}{1.81(0.65 - 0.50)} \text{cm} = 18.4 \text{ m}$$

以上ならば滑落すべきも、楔状部の下底でも其程深くはないから、此の土内では地沁りは起り得ない。

最後に 16 m 土に對しては、 $c=0.73 \text{ kg/cm}^2$, $\mu=0.3$

$$\therefore h \cong \frac{3}{2} \cdot \frac{730 \times 1.19}{1.81(0.65-0.3)} \text{ cm} = 20.6 \text{ m}$$

を得るから、滑落は出来ない。然し割合滑落條件に近い。楔状部往時の滑落は、地表面が今よりも更に急勾配であつたとき、此の層の上部を沁り面として發生したと想像される。而して今は其のときの地沁りにより地表面の勾配を緩和し、更に其の上に新たな火山灰の降下や雨水の洗掘堆積作用などによつて楔状部の上を蔽ひ隠して、舊地沁面は稍と安定を保ち得るに至つたものと思はれる。

之だけの計算をした上で、先きの電気地抵抗測定から判定した主界面（極微抵抗界面）の深さに對照して見ると、電気抵抗極微層は楔状部上面と一致し、それが地沁面らしく、三者ともに 5~7 m の間にあるのである。之によつて、吾々當初の目的たる電気抵抗法による地沁面の探究も可能である様だし、又著者の理論式も割合信が置ける様に感ぜられる。

綜 括

以上の所論を下に綜括し要點を摘記して置く。

- 1) 昭和18年7月24~27日に別府市乙原部落の急勾配地に起つた地沁に關し、種々調査研究した。
- 2) 先づ自分等で平板測量から水準測量まで行つて地形圖を作り、地面の勾配などを明かにした。
- 3) 更に地域を視察して廻り、地層が土壤學に所謂 A, B 層の顯著に發達して居るのみならず其の下に楔状の異層が挟まり、又深度 50 m 内外に堅岩盤の伏在することを認め、更に此の狭い區域内で4箇所も温泉の湧出することを發見した。この爲に此の地の土壤水は水田灌溉による滲透水と共に隨分鹽類に富み電気抵抗の小なるべきことを推定した。
- 4) 地沁當時の龜裂の分布及びその進行狀態は別府市役所に調査して貰つて、其の概略を紹介した。
- 5) 沁り面の深度を判定する爲に、一方では各層の土壤試料を採取して種々の物理的性質を實驗調査し、其のデータをを用ひ著者の風化土内地沁理論式に代入して、土層の楔状

部上面附近即ち地表下約 5~7 m の極めて浅い地之なることを推定した。

- 6) 他方では本地域の電気抵抗垂直分布を10点につき測定し、電極間隔 10 m 内外の極めて浅い處に極微抵抗層あることを知つた。其のデータから極微抵抗層の上面を判定すれば 5~7 m の深度になり上記の想定地之面即ち土層中の楔狀部上面と一致するのである。而してこの界面の直上層は透水性よく直下は難透水性であるから、大雨に伴ひ地下水水分が其の界面上に蓄積飽水して地之を惹起したものらしい。
- 7) 即ち之によつて先きに河内龜ノ瀬の地之地で初めて試みた地抵抗法による地之面判定が可能なりとの自信を一層深めることが出来た。
- 8) 尚ほ本研究の副産物として、土壤の剪断抗力試験には試料を現場のまゝ採取出来ずに練り直して行ふ場合には是非共其の採取深度相當の壓力を加へて押し固めた上に其の豫壓程度までの上下壓範圍で實驗せねばならぬことを確めた。でない現場に於ける土壤の抗剪力とは丸きり異なる値を得るであらう。

本研究は文部省科學研究費によつて遂行した。地形測量及び地抵抗測定には瀬野博士、小谷秋甫、齋藤泰一諸君の應援を得た。厚く謝意を表する。