



Title	地下水流による谷頭侵食に関する実験
Author(s)	佐倉, 保夫; SAKURA, Yasuo; 望月, 倫博 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 49, 229-239
Issue Date	1987-03-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.49.229
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14171
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p229-239.pdf



地下水流による谷頭侵食に関する実験

佐倉保夫・望月倫博*・川崎逸郎

千葉大学理学部地学教室

(昭和61年11月25日受理)

Experimental Studies on Valley Headward Erosion due to Groundwater Flow

By Yasuo SAKURA, Michihiro MOCHIZUKI* and Itsurou KAWASAKI

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Chiba University

(Received November 25, 1986)

From hydrological observations in the valley head area, it has been reported that headward migration of channels is closely related to the mechanism by which runoff is generated. The present study carried out the artificial rainfall experiments using an earth-fill model, and also the measurements of changes in groundwater heads and valley topography, to investigate the relationships between development of valley form and groundwater movement.

As a result, it becomes clear that the area where headward erosion occurs agrees with the groundwater discharge area, and valley head failure and fluidization of failure sand in valley floor occur usually when the normal component of the hydraulic gradient to valley floor exceeds the critical value. Under the uniform slope condition where only subsurface flow occurred, initial small V-shaped ditch developed into the horseshoe-shaped valley with steep side slope and flat floor. On the other hand, under the concave slope condition where surface flow is superior to subsurface flow, initial ditch developed into the narrow and longer U-shaped valley with gradual head slope.

I. はじめに

丘陵地および台地における河川水の涵養源は、湧水として地表へ流出する地下水である。豪雨や融雪などの特別な時期には、地表流による涵養も認められるが、その地表流の起源の多くは地下水面上昇したために浸潤線が谷壁斜面を横切って流出する地下水である。

一方、従来の地形学では、谷地形はその成長過程から、rill-gully-valleyと形態および規模が変化すると考えられてきた。すなわち、まず最初に雨水が集中して地表の低いところを流れ溝状のくぼみを作る。これがrillである。さらに表流水を集めると幅と深さを拡大して、gullyが形成され、gullyによる下刻が進みその深さが地下水面に達すると、湧出する水が絶えず流れるためvalleyになるとされていた。さらには、表流水の侵食営力が大きいため、表流水の下刻による侵食形態が、水系発達的主要因であると考えられていた。しかし、基盤岩類が露出した山岳地域ならともかく、未固結堆積物で構成される丘陵地や台地の源流の谷頭部においては、表流水による侵食の痕跡さえ認めることができない所も存在することから、上述の水系発達機構を一般に適用することは不可能であろう。

* 現在、静岡県農林部勤務

* Now with, Shizuoka Prefectural Office, Shizuoka, Japan.

近年の湿潤地域の丘陵地源流域における豪雨時の水流発生機構に関する研究成果によれば (Kirkby, 1978 a), 地表流の成分として, 降雨強度が土壤の浸透能より大きくなるために生ずるいわゆる Horton 地表流は極端に少なく, 飽和した土壤面に降った雨が集まって形成される地表流と, 飽和した土壤中から動水勾配に従って地表に流出する復帰流の和である飽和地表流が, 地表流のほとんどを占めることが明らかになってきた。この様な斜面水文学の新しい知識を踏まえて, 田村 (1974) は, 丘陵地や台地の河川源流部の谷頭形態を微地形区分し, それらの谷頭形態の形成要因として, 地表流以上に地中流の挙動の重要性を指摘した。白井 (1978) は, 千葉県の下総台地に分布する谷の谷頭地形の相違点に着目しその形態を分類するとともに, 現在でも集中豪雨時には馬蹄型をした急崖をもつ谷頭が斜面に平行に剝離した事例を示し, その時崖下や斜面中腹部から地下水が吹き出した事実を確認した。また, 流出した地下水が崩土を運び去り, 谷底を平滑化したことを報じた。その他下総台地では, 川崎ら (1979, 1984) による集中豪雨時の詳細な崩壊地の分布や発生機構, 予測に関する報告がある。さらに, Dunne (1980) は, 河川の谷頭侵食や分岐すなわち水系発達のマカニズムに関して, 浅層地下水だけでなく深層地下水の地表への流出にともなう piping あるいは spring sapping の重要性を指摘し, そのメカニズムを野外観測によって裏付けた。

以上のように地下水の谷頭部への集中が, 谷地形の変化に密接にかかわる現象は, 野外調査や観測などにより次第に解明されつつあるが, 谷地形の変化する時期は, 集中豪雨や融雪時に限定されているため野外調査と観測だけでは, そのメカニズムの解明に種々の困難をともなう。そこで本研究では, 谷地形変化と地下水挙動の関係を把握する目的から, 砂槽模型を用いた人工降雨実験を試みた。

II. 実験方法

1. 実験装置

実験装置の概略は, Fig. 1 に示した。実験土槽は, 鉄製アングルで補強した厚さ 10 mm のペニア製で, その大きさは, 長さ 130 cm, 幅 80 cm, 深さ 40 cm である。土槽の隅および内壁は, シリコン樹脂とアクリル樹脂系塗料の塗布により防水処理を施した。人工降雨発生装置には, フォッグジェット・ノズルを使用した。加圧ポンプで貯水槽の水をこのノズルへ圧送することにより, 雨滴侵食を生じさせない微噴霧状

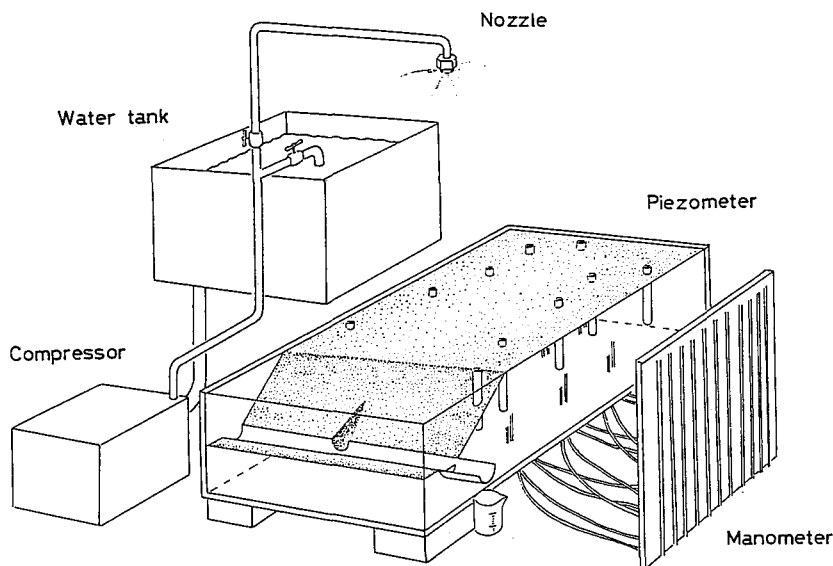


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

の雨を作りだした。また、降雨強度の調節は、バルブで貯水槽へ還流する圧送水の水量を制御することにより行った。その結果、ほぼ一様に散布できる降雨強度の範囲は、10~50 mm/hであった。

実験土槽の排水は、Fig. 1に示した排水路を介してのみ行われる。排水路には無数の小穴があけてあり、地下水流出の妨げにならないように配慮してある。排水路の上端は、土槽の底から20 cmの位置に設置してある。また排水路には越流堰が設けてあり、土槽の底から17.5 cmのほぼ一定水位条件のもとで排水を行った。

地下水頭と地下水面の計測のために、土槽の底から6 cmと11 cmの高さを中心として、長さ2 cmのストレーナーをもつ10 mmφのアクリルパイプ製のピエゾメーターを22本、そして、地下水面近傍で約10 cmのストレーナーをもつ20 mmφの塩化ビニール製パイプによる地下水面観測孔を10~14本設置した。なおピエゾメーターは、水マノメーターとビニールパイプで接続してある。

2. 砂の物理特性

実験土として、千葉県君津産の山砂を使用した。ふるい分け法で得られた粒径分布をFig. 2に、飽和土の水分量から求めた間隙率および変水位透水試験による透水係数の値をTable 1に示す。ゲイ・リュサック形比重ビンを用いた比重試験による真比重の値は、およそ2.7であった。なお、土槽への砂の充填には、封入空気が残存しないように、また均一に詰まるように、水を満たした土槽内に砂を投入し、つき棒で締め固めるいわゆる水締め方式を採用した。粒径分布以外は、実験終了後に土槽から採土器により試料採取して試験を行った。その結果、砂の間隙率は約40%でほぼ均一であり、透水係数の平均値は 2.6×10^{-3} cm/secで、場所によるバラツキや異方性は認められず、ほぼ等方均質な地層条件が満足された。

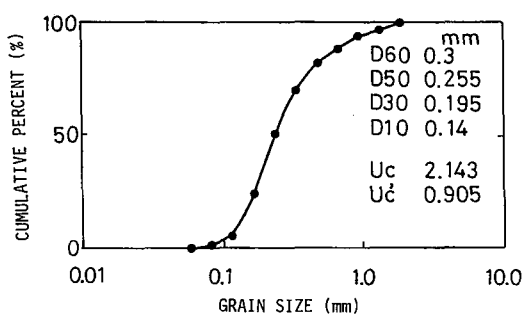


Fig. 2. Grain-size distribution of the experimental soil.

Table 1. Saturated hydraulic conductivity and porosity of experimental soil.

	n (%)	K (cm/s)
Surface sand	40.7	2.94×10^{-3}
Subsurface sand (lateral)	40.4	2.88×10^{-3}
Subsurface sand (vertical)	40.8	2.03×10^{-3}
Mean value	40.6	2.63×10^{-3}

3. 実験条件

a) 初期地形条件 まず土槽内にFig. 1に示したような台地面と台地斜面からなる台地地形を設定した。台地斜面の形状として次の2つの場合を考えた。Fig. 6に示した一様斜面形と凹型斜面形である。そして台地斜面中央部に排水路につながる長さ15 cm、深さ3 cmのV字溝を設け、1次谷の谷頭の初期条件とした。

b) 降雨条件 一様斜面では、降雨強度を20 mm/hにして雨を約1.8時間降らせた。その後、降雨強度を23 mm/hに増大させて、約2時間降雨を継続させた。一方、凹型斜面形では、降雨強度を23 mm/hとして約3時間雨を降らせた。

c) 排水路における砂の除去 斜面崩壊で崩れた砂は、流動化して排水路まで運搬される。排水路に到達した砂は、河川流によって速やかに運搬されるものと仮定した。しかし排水路では、一定水位で排水できるように堰を設けたので、そこに砂が集積する。そのため、その砂を逐次集めて土槽外へ除去することで、この仮定を満たすとした。

4. 計測項目および方法

a) 降雨強度 降雨装置は、土槽全体にできるだけ一様に散布するように作成したが、ノズルを土槽の中央に設置したため、降雨分布に多少のバラツキが認められた。そこで、降雨量の値は、排水量が一定となったときの流量を土槽の表面積で割ることにより決定した。

b) 地形変化 実験開始後2～3分間隔で、ステレオ写真撮影を行った。また、降雨停止時の簡易測量により地形変化を追跡した。

c) 地下水挙動 地下水頭分布は、2～5分間隔で22本のマノメーターの水位を目視によって計測した。地下水面についても同様の間隔で地下水面観測孔に水面計を挿入して測定した。ピエゾメーターおよび地下水面観測孔の配置をFig.3に示す。なお、地下水頭と地下水面の値は、土槽下底を基準としたため、初期条件ではすべて17.5 cmである。

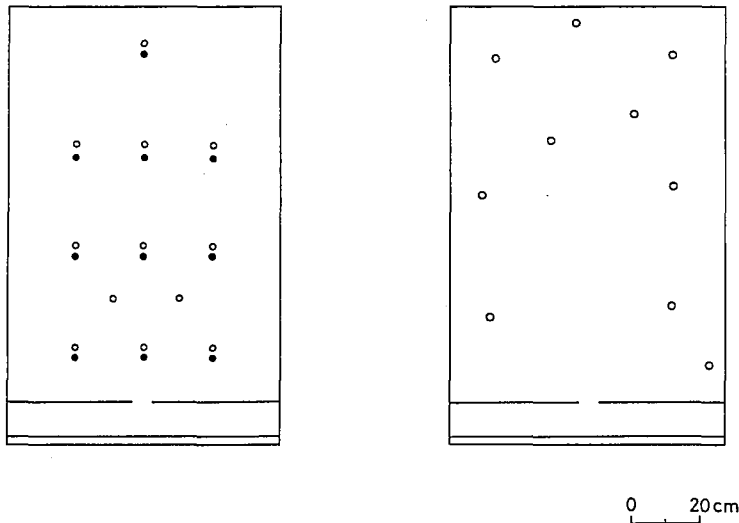


Fig. 3. Disposition of piezometers (left side) and observation wells for groundwater table (right side).

III. 実験結果

1. 一様斜面の場合

降水強度 20 mm/h の実験開始直後から、V字溝からの地下流出が始まり、5分後には、地下水面上昇にともなう地下水流出強度の増大により、V字溝の側壁脚部で崩壊が生じた。7分後には初期のV字溝は完全に崩れ、その後は谷頭部でのみ崩壊が進行し、谷頭形状は馬蹄型となった。この間、崩壊した砂は谷床へ流出した地下水と混合して流動化し、一部は谷床へ推積するとともに、その多くは排水路まで運搬された。また、開析されていない斜面では、飽和帯が斜面に平行に下方から上方へ成長した。しかし谷の急崖周辺においては、排水が良好なため飽和帯は認められなかった。降雨開始25分後では、地下水流出の定常化にともない谷頭の後退が停止した。その間も谷床においては、湧出した地下水とそこに降った雨に起因する飽和地表流による僅かな下刻や側刻が進み、水流の位置も一定ではなく蛇行状に変化する様な微地形変化が認められた。

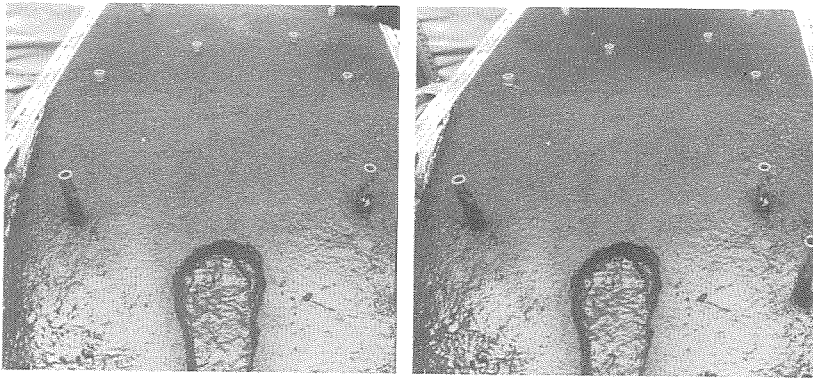
降雨開始およそ1.8時間後、降雨を一時停止して降雨強度を23 mm/hに増大させて実験を再開した。再開15分後、再び急崖の後退によって谷頭が伸張した。しかしその数分後には、地下水流出の定常化によって急崖の後退は停止した。

一様斜面における谷地形の変化過程をステレオ写真で示したのがFig.4であり、降雨を一時停止して地

t = 5 min.



t = 10 min.



t = 25 min.

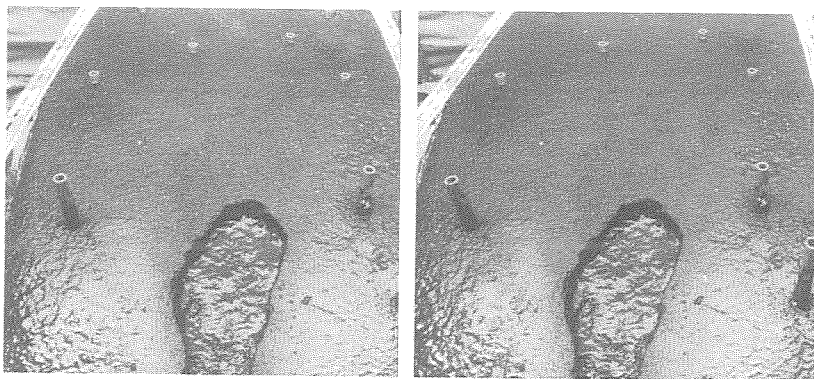
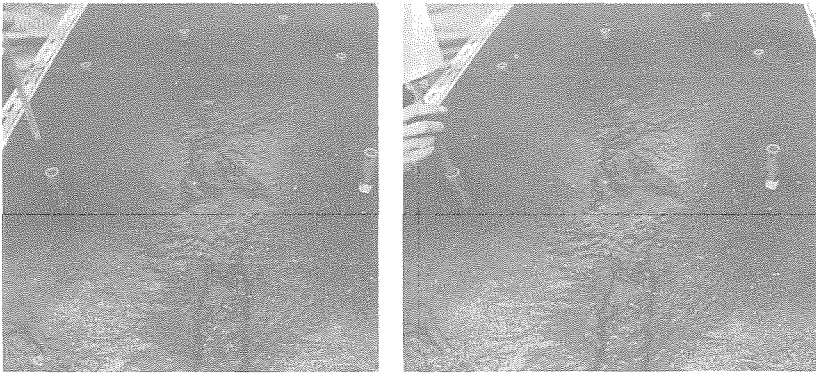


Fig. 4. Stereogram of development of the valley form by headward erosion in the case of uniform slope and rainfall intensity of 20 mm/h.

$t = 4 \text{ min.}$



$t = 10 \text{ min.}$



$t = 25 \text{ min.}$

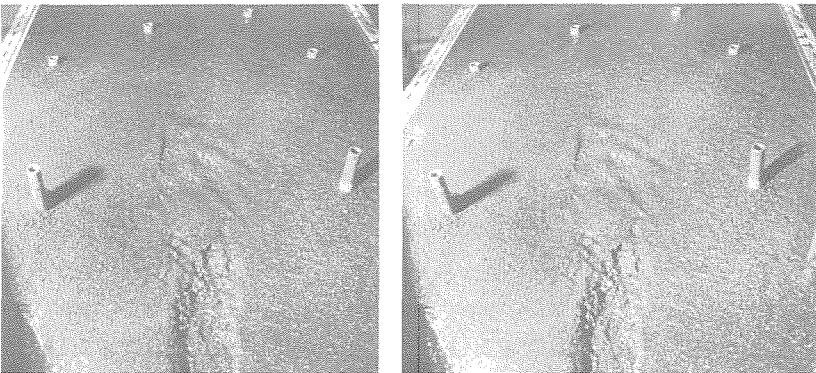


Fig. 5. Stereogram of development of the valley form in the case of concave slope and rainfall intensity of 23 mm/h.

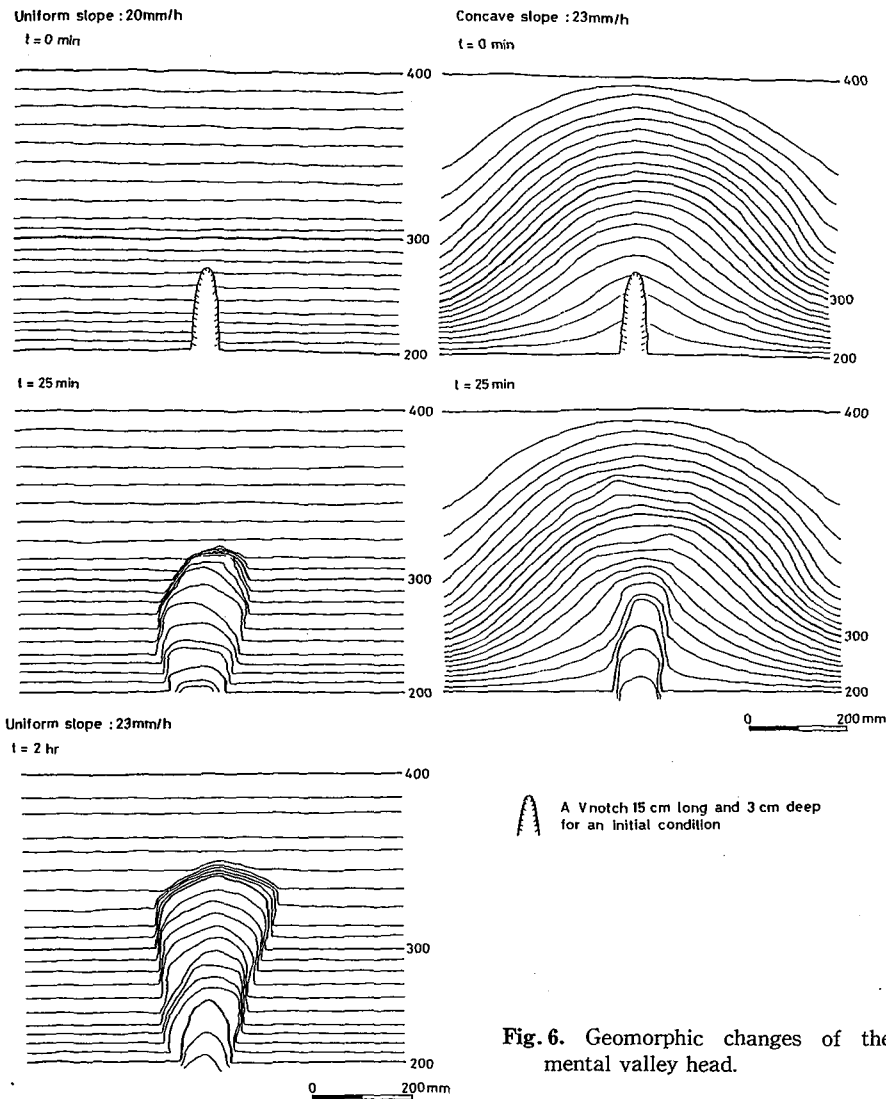


Fig. 6. Geomorphic changes of the experimental valley head.

形計測した結果が、Fig. 6である。また、降雨強度 20 mm/hにおける地下水流動の変化の様子は Fig. 7に、その後の 23 mm/hで定常状態となった 25分後の様子を Fig. 8に、それぞれ示した。

この結果、一様斜面を刻むV字溝からは、馬蹄型で急崖をもつ谷が形成されること、そして急崖周辺の斜面上の水分量は、同一高度の一様斜面のそれと比べて少ないこと、すなわち、急崖の形成により谷床と斜面の間で地下水面勾配が大きくなるため、急崖周辺部の水は地下水として排水され易いことなどが明らかになった。

2. 凹型斜面の場合

降雨強度 23 mm/hの降雨開始直後から地下水流出は増大し、2分後にはV字溝の側壁で崩壊が発生した。一方、V字溝周辺には地下水のしみ出しによって舌状の飽和帯が形成された。5分後には谷頭部でも崩壊が生じ、未開析斜面から谷へ向かう地表流が急崖を侵食するのが観察された。V字溝は一様斜面の場合と比べるとやや細長い谷地形へと変化した。また、V字溝を発端とした崩壊とは関係なく、舌状の飽和

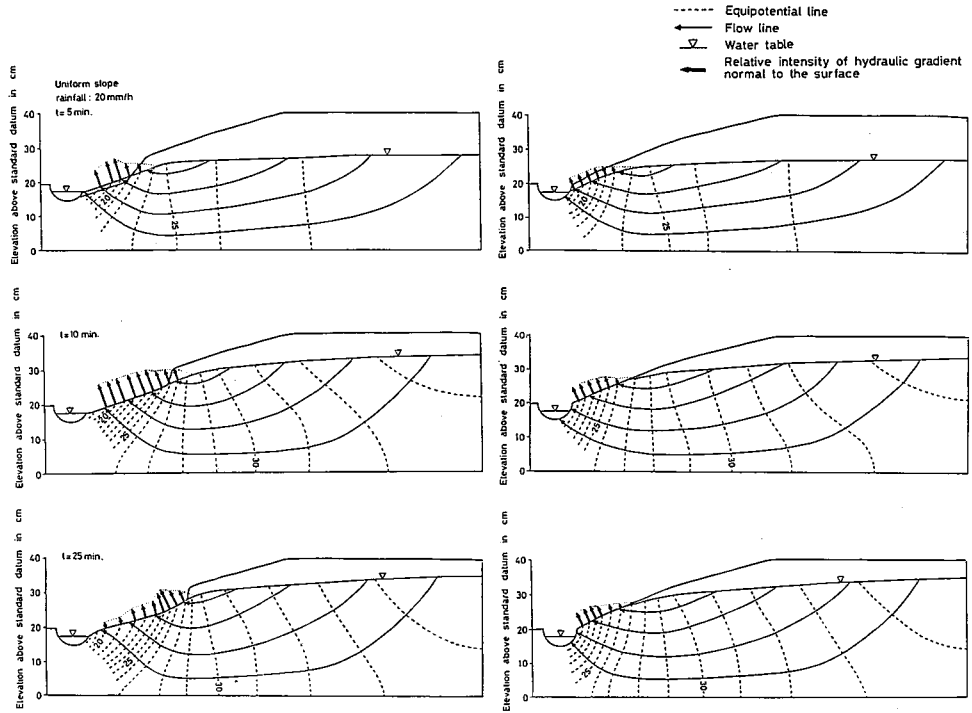


Fig. 7. Chnges of groundwater movement.
 (Figures on left and right sides show the cross sections in the center of the valley and the non-dissect point 20 cm away from the center, respectively.)

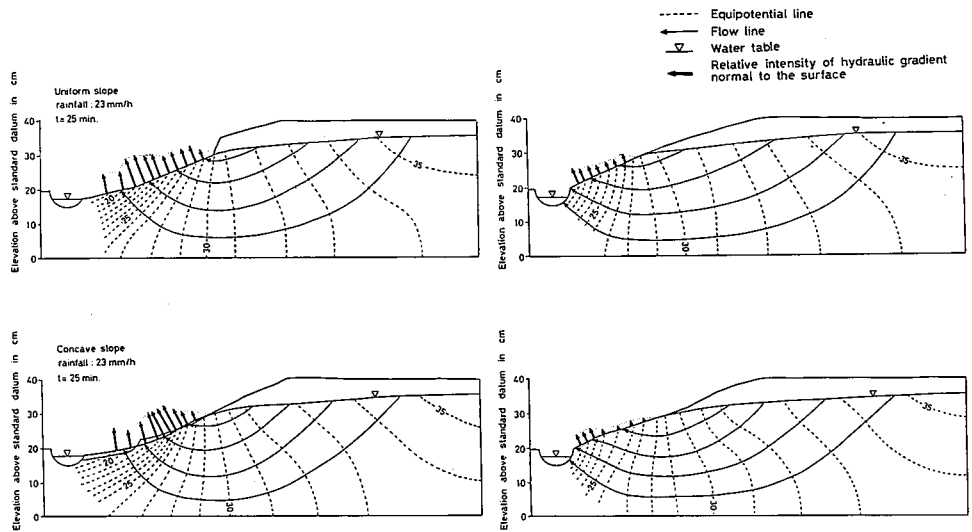


Fig. 8. Comparison of the groundwater movement in uniform slope with that in concave slope after 2 minutes of rainfall intensity of 23 mm/h.

帯の先端付近でも砂の滑動がみられた。

降雨開始 10 分後では、斜面中腹部の砂の滑動が顕著になり、下方から伸張してきた谷頭の上方に平坦な堆積面を形成した。その末端部から湧出した水流により谷頭部が侵食され、緩やかに斜面につながる細長い谷地形が形成された。谷の側壁も同様な侵食をうけて丸みをおびた形態となった。25 分後では、崩壊による地形変化は停止している。ただし水流発生地点より下流側では、水流による下刻が僅かに継続していた。この実験は、降雨開始 25 分後で終了した。谷地形の変化の過程を Fig. 5, 6 に、定常状態に達した 25 分後の地下水流動の様子を Fig. 8 に示した。

IV. 考 察

1. 地下水挙動と谷頭侵食

人工降雨実験で観察された谷頭の後退過程は、地下水挙動の変化過程と密接な対応関係を示した。実験開始直後から始まる谷壁の崩壊は、谷壁斜面において、地下水面上昇と地下水の湧出により、セン断応力が増大しセン断抵抗を上回ったために生じた斜面崩壊現象である。まず最初に、V字溝の崩壊が始まり、次に谷頭部に崩壊が生じて初期設定したV字溝の形態が崩れると、以後は谷頭部のみで崩壊が進行し、谷地形は上流側へと成長した。すなわち、この崩壊地点の上流方向への推移は、地下水面上昇過程と対応している。また、地下水面上昇を停止する地下水挙動の定常化にともなって谷頭崩壊も停止している。さらに一様斜面の場合のように、より降雨強度の大きな雨を再開した時には、谷頭部の崩壊が再び始まり、谷が上流側へ成長することを確認した。

一方、崩壊により谷床に推積した崩土は、谷床へ湧出した地下水と混合して流動化状態となり排水路へと流出した。この流動化の現象は、土石流と類似したもので、Fig. 7 で示した地下水挙動と関係していると考えられる。

Fig. 7 の地下水挙動の変化から、谷頭部の崩壊地点が地下水面上昇とともに上流側へ移動することは、地下水流動系でいう地下水流出域、すなわち地下水上昇流の存在域の上流側への移動に起因することを示唆している。また、地下水面上昇により谷壁斜面を浸潤線が横切るようになり、谷床での地下水の湧出が生ずるとともに、実験土槽の流域全体の水が Fig. 7 で示した流線に沿って谷へ集中するために、Fig. 4, 5, 6 で示した谷地形の変化が生起したと考えられる。

Fig. 7, 8 には、地下水の流出域で等地下水頭線の作図から求めた動水勾配の斜面上に垂直な成分が、ベクトル表示してある。その最大値は、およそ 0.7 であった。Fig. 7 の左側は谷に沿った土槽中央の断面で、右側の図は中央から 20 cm 離れた未開析斜面の断面における地下水挙動を示している。これらを比較すると、動水勾配の大きさは、前者は後者の 1～3 倍程度の値を示し、また、谷頭崩壊と砂の流動化の生ずる過程の方が、それを停止する定常状態時に比べて若干大きな値を示すことなどが認められた。

Cedergren (1977) は、地下水流動が単位体積当りの土壤に及ぼす力を次式で表した。

$$F = \rho g (\Delta h / \Delta l) \quad (1)$$

ここでは、 ρ は地下水の密度、 g は重力加速度、 $\Delta h / \Delta l$ は地下水の動水勾配である。従って、 F は、動水勾配と比例しており、谷床の地表付近の動水勾配と谷地形変化の関連性についての検討が重要な問題となる。また Dunne (1980) は、湿潤地域において水系網を発達させる主要な機構として、spring sapping の重要性を指摘するとともに、野外での動水勾配の測定から、Terzaghi (1943) や Zaslavsky and Kassiff (1969) による piping が発生する臨界条件を満たした場合に、piping によって谷頭斜面が後退したことを報じている。彼らが提唱した粘着力が無視できる砂の場合の piping の発生条件は、次の式で示される。

$$-\rho_f g \nabla h \vec{n} > (\rho_s - \rho_f) (1 - p) g \cos \theta \quad (2)$$

ここで、 ρ_s 、 ρ_f は砂と水の密度、 ∇h は斜面近傍の動水勾配、 \vec{n} は斜面に垂直な単位ベクトル、 p は砂の間隙率、 θ は斜面の傾斜角、 g は重力加速度である。

(2)の条件を本実験に適用すると、pipingが生ずる臨界動水勾配の値は、およそ0.9となる。実験結果の最大値は0.7程度であるから、pipingの形成条件を満たしていないことになる。試験的に行った本実験の砂の浮き上がる瞬間の動水勾配は、数回の測定で0.5~1.0とバラツキがみられたが、1.0以上では必ず砂粒は浮き上がり、一瞬のうちにboiling状態になることが確認された。従って、本実験における動水勾配では、その測定精度に問題はあるけれども、谷地形を大きく変化させる直接的な営力であると断定することはできない。

2. 斜面形と谷頭形態の関係

実験土槽の末端に設定したV字溝から出発した谷の成長により、一樣斜面からは急崖をもつ馬蹄型の谷が、凹型斜面からは斜面になだらかにつながる谷頭部と丸みをおびた側壁をもつ細長い谷が形成された。主要因はそれぞれ異なり、一樣斜面では谷の外周斜面の水分量は少なく地表流が生じないため、地下水の湧出であるが、凹型斜面では、谷の外周斜面の上方で浸潤帯の成長が著しいため発生した飽和地表流であると特徴づけることができる。

Kirkby (1978 b) は、地中流と地表流のどちらかが卓越する場合で、流域の三次元形状は異なり、いずれかの流れの支配下で最も効率的な形状となることを推論している。すなわち、本実験で形成された谷地形はKirkby (1978 b) の推論と対応しており、急崖で馬蹄型の谷頭部をもちしかも谷底の横断面が平坦な谷は、地中流卓越型であり、一方、なだらかに上部斜面につながる谷頭部と若干丸みのある急崖の側谷をもち、谷底の横断面形も前者より凹型を示す細長い谷は、地表流卓越型であるということが出来る。

また、地表流と地中流の流速に関してDunne (1978) は、前者は後者の1000~5000倍となることを示し、地中流より地表流の方が流れの抵抗が小さいため、より多量に速やかに流下することを指摘している。谷地形の形成過程は、水循環の視点からみれば、流域における排水システムの形成過程であるとみなすことができる。そこで次のような排水システムの形成機構について検討した。

一定降雨強度で雨を降らせた場合、地下水面上昇とともに谷頭の伸張は活発になるが、その後の地下水挙動の定常化に対応して谷頭の伸張も停止する。さらに降雨強度の大きな雨を降らせると同様な過程を繰り返す。すなわち、地下水挙動の定常化は、単位時間当りの水の供給量に対して流域の貯留量に限界があることを示唆している。従って、貯溜可能量の枠を越えて過剰に供給された水は、流域の外へ排出されることになる。その時、流域のもつ排水能力が排水量に対応しきれないと、谷頭部の崩壊が発生して、より効率的に排水ができるように地表流発生域が拡大し、新しい排水システムが形成されるのである。従って、谷頭侵食は、流域の排水能力を越えて供給された水をより効率的に流域外へ排水させるために地表流発生域を拡張させる現象であって、それによって形成された谷頭形態は、地表流発生域の拡張が最も効率的に進展する形状を示しているのではないかと推察された。

V. まとめと今後の課題

本研究では、谷地形変化と地下水挙動の関係を把握する目的から、等方均質な砂層からなる台地斜面モデルを用いた人工降雨実験を行った結果、次のことが明らかになった。

- 1) 谷頭の伸張は、地下水挙動の変化に対応して起こる。すなわち、谷頭侵食の生ずる領域は地下水の水利水頭分布に関連しており、地下水流出域である地下水の上昇流発生域に限定される。
- 2) 降雨開始直後から始まる谷壁の崩壊は、谷壁斜面における安定性の問題であり、地下水面上昇と地

下水の湧出によりせん断応力がせん断抵抗を上回ったために生じた斜面崩壊現象である。また、谷頭崩壊や谷床の砂の流動化現象は、湧出水の地表付近における動水勾配の斜面垂直成分の大きさと密接に対応している。

- 3) 地下水流が卓越して形成される谷頭形態は、急崖をもつ馬蹄型となる傾向がある。一方、地下水の湧出を営力としながらも地表流が侵食営力として卓越して形成される場合には、谷頭部に緩斜面をもつ細長い谷地形となることが認められた。

豪雨時の地下水挙動と未固結砂からなる台地を開析する谷地形の変化が密接な関係にあり、地下水の上昇流が谷頭崩壊の主な発生要因となっていることが明らかになった。しかし、谷頭侵食の発生機構については、検討が不十分な点も少なくない。谷頭形態の成因についても、若干の知見を得ることができたが、理論的な解析までには至っていない。従って、今後の課題として実験だけでなく野外においても、谷頭付近における水流発生機構をより綿密に検討していく必要があろう。

謝辞 本研究の一部は昭和 58 年度文部省科学研究費補助金自然災害特別研究(1) (研究代表者：新藤静夫，課題番号：58020010) によって行われた。記して感謝いたします。

文 献

- CEDERGREN, H. R., 1977. *Seepage, Drainage and Flow Nets. 2nd ed.*, John Wiley & Sons, 534p.
- DUNNE, T., 1978. Field studies of hillslope flow processes. *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, (ed. M. J. KIRKBY), 227-293.
- DUNNE, T., 1980. Formation and controls of channel networks. *Progress in Physical Geography*, 4, 211-239.
- 川崎逸郎・白井哲之・高橋秀樹, 1971. 集中豪雨時に発生する崩壊地の予測に関する調査—北総台地のばあい—, 千葉県北部林業事務所.
- 川崎逸郎・白井哲之・飯竹重夫・金井太一・八田明夫, 1984. 集中豪雨に発生する崩壊地の予測に関する調査—銚子半島・飯岡台地のばあい—, 千葉県北部林業事務所.
- KIRKBY, M. J., 1978a. *Hillslope Hydrology*. John Wiley and Sons, 389p.
- KIRKBY, M. J., 1978b. Implications for sediment transport. *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, (ed. M. J. Kirkby), 325-363.
- 白井哲之, 1978. 下総台地東部の侵食谷の形態に関する考察—未固結砂層地域の谷地形—. 千葉大学教育学部紀要, 27, 153-174.
- 田村俊和, 1974. 谷頭部の微地形構成. 東北地理, 26, 189-199.
- TERZAGHI, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, 510p.
- ZASLAVSKY, D. and G. KASSIFF, 1965. Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soil. *Geotechniques*, 15, 305-316.