

湧水侵食におけるガリ形成に関する実験的研究

EXPERIMENTS ON THE GULLY DEVELOPMENT DUE TO SEEPAGE EROSION

竹井 義博*・Adichai Pornprommin**・泉 典洋***

Yoshihiro TAKEI and Adichai PORNPROMMIN and Norihiro IZUMI

*学生会員 北海道大学大学院工学研究科（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）

**Member of JSCE, D. Eng., Assistant Professor, Department of Water Resources Eng., Kasetsart University
(Jatujak, Bangkok, 10900, Thailand)

***正会員 PhD 北海道大学教授 工学研究院（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）

Erosion by overland flow and seepage flow has been hypothesized as a dominant factor in the initiation and evolution of gullies and channels. Many studies on channelization due to erosion by overland flow have been carried out whereas only few studies have focused on seepage erosion. This study aims to acquire fundamental knowledge on the seepage erosion from experiments. The experiments were performed with the use of a wide chamber with variable bed gradients. By supplying water from the upstream end of the chamber filled with sediment, seepage flow is generated in the sediment layer. We used 0.6 mm silica sand and 1.2 mm silica sand to form the sediment layer in order to facilitate the observation of seepage erosion. We performed 28 cases of experiments with a variety of bed gradients and sediment layer thicknesses. We found that the width of gullies increases with increasing grain size and bed gradient, while channel spacing decreases.

Key Words : erosion, seepage flow, gully, experiment, silica sand,

1. はじめに

降雨によって発生した表面流が地表面を侵食することで、リルやガリと呼ばれる水路状の地形が形成されることは一般的によく知られている。ガリは、乾燥地や植生のない斜面、人工的な盛土の斜面などで形成され易く、一旦形成されるとさらに流れを集めることによって急速に発達する。ガリの急速な発達に伴い、土壤侵食量と下流への土壤流出量も劇的に増加する。大量の土壤流出は、農業生産性や道路・建造物の安全性の低下に繋がり、流出する土砂粒子の中に多量に含まれている栄養塩や農薬等による水質汚濁の進行、地下水層の閉塞など、様々な面で多大な被害を生じさせる。したがって、ガリ侵食の物理的なプロセスを理解し、ガリの形成と発達を効果的に制御する手法を見出すことは、地形学的観点のみならず工学的にも重要なことである。

これまでにもガリの形成プロセスに関する様々な研究が行われてきた^{1),2),3)}。中でも、ガリの形成スケール(幅や形成間隔)が何によって決定されるのかという問題は、ガリ形成の物理プロセスを理解する上で極めて重要である。表面流による侵食の場合、ガリの形成間隔は表面流の限界水深の1000倍程度となることが明らかとなっている^{4),5),6)}。それに対して湧水侵食に関する研究は幾つか行われているものの^{7),8),9)}、表面流侵食と比べるとガリの形成スケールが何で決まるかなど、不明な点が少なくないというのが現状である。最近では、

Pornprommin & Izumi^{10),11)}がプラスチック粒子浸透層モデルを用いて湧水侵食の実験を行うことで、浸透層厚・斜面勾配等のパラメータが侵食の発生・発達に及ぼす影響を調べている。さらにガリの初期形成間隔のメカニズムを明らかにするために、湧水侵食による水路化に関する線形安定解析を行い、水路の初期形成間隔を決定するのは湧水侵食の強さを表す単位当りの流量と斜面崩壊を起こりにくくする土塊同士の摩擦であることを示唆している¹⁰⁾。しかし、未だ仮説の域を出ず、十分な検証が行われているとは言い難いのが現状である。

本研究では、Pornpromminらの実験¹¹⁾と同様の実験を、粒子の種類をプラスチック粒子から、より現実に則したケイ砂に変えて行うことでガリの形成パターンをより詳しく明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験で用いた水路は、水路長120 cm、水路幅150 cm、水路高17.5 cmの可変勾配水路である。ポンプを用いて水路に水を循環させることで一定の流量を長時間にわたって流し続けることが出来る。図-1に実験装置の側面図を示す。破線は水の流れを表している。タンク(A)からタンク(B)への流量をバルブにより調節し、スクリーンを通じ均一な水の流れを水路(C)へ送ることが出来る。水路の床面は不透水層に相当し、浸透層が

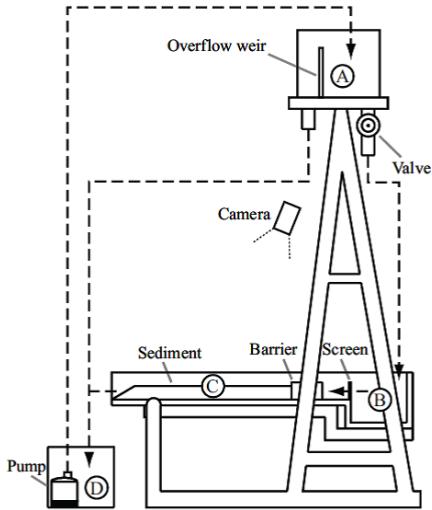


図-1 実験装置側面図

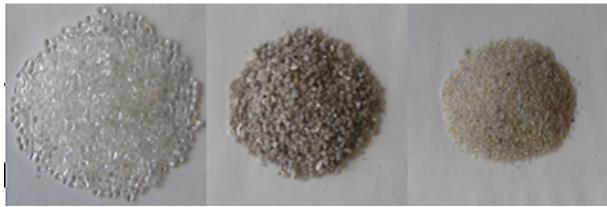


図-2 浸透層の粒子

表-1 砂のデータ

粒子	平均粒径 (mm)	安息角 (°)
3号ケイ砂	0.6	40
4号ケイ砂	1.2	32
プラスチック粒子	3.0	54

容易に滑り落ちないよう粗度として床面にケイ砂を均一に貼り付けている。浸透層は斜面方向の長さが 120 cm、幅が 150 cm である。層厚に関しては 10 cm と 12 cm の 2 ケースで実験を行った。粒子の含水比を一様にするため浸透層作成の際に粒子を十分に湿らせた。また、観察を容易に行うために下流端に勾配 1:1.5 の急傾斜部をつけている。

2.2 実験条件

実験条件については、Pornprommin らが行ったプラスチック粒子を用いた実験¹¹⁾を元に設定した。本研究はガリ形成の物理メカニズムの解明を目的としており、理想化された条件の下で実験を行う。粒径と他の長さスケールの比など、実現象と必ずしも一致しない条件下であるが、それぞれの条件の物理的意味はほぼ明らかであり、現象の本質の解明は十分可能と考えられる。

図-1 に今回の実験で使用した粒子とプラスチック粒子との比較を示す。浸透層作成には、プラスチック粒子と比較してより現実に近い平均粒径 1.2 mm の 3 号ケイ砂と 0.6 mm の 4 号ケイ砂の 2 種類をそれぞれ使用した。それぞれの粒子の写真を図-2 に示す。ケイ砂の安息角がプラスチック粒子より小さいことを考慮して斜面勾配を 0.025, 0.053, 0.08, 0.107, 0.134, 0.161, 0.188 の 7 ケース、浸透層の層厚は 10cm, 12cm の 2 ケースに設定し、計 28 ケースの実験を行った。下流端にて侵食が発生するまで 5 分毎に少しづつ流量を増加させ、侵食発生後は流量を一定に保つ。これは、流量を増加させ過ぎて表面流が生じない状態で浸透流を発生させ続けるためである。ただし、実現象でも余りに大きな流量の浸透流が発生することはまれであり、侵食の開始と同時にガリ形成が始まるところから、ガリの形成間隔は限界流量程度の流量に大きく影響を受けると予想される。ガリ発達の様子を 15 秒または 30 秒毎に浸透層の正面と真上からデジタルカメラで撮影していく。また、5 分毎に下流端での流量と上流端水深を計測する。実験から得たデータを元に、粒子の種類・斜面勾配・流量・浸透層厚がガリの発達に及ぼす影響を考察すると共に、Pornprommin らの実験¹¹⁾から得られた結果との比較を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 侵食の発達プロセス

実験で観測した侵食の発達プロセスを明らかにする為、図-3 に浸透流の方向と直角方向から見た断面図を示す。まず (a) は浸透流が発生している様子である。(b) では斜面下流端で浸透流による粒子の侵食が始まり、しばらくすると (c) で示すように侵食面先端より 2–5 cm の位置に亀裂が発生する。その後その亀裂から一気に斜面が崩落し、浸透流が堆積した土砂を下流へ押し流すとともに新たな亀裂が発生する。このように亀裂の発生・土砂の削剥・土砂の掃流という 3 つのプロセスの循環により侵食は進行する。この発達プロセスはどのケースの実験においても見ることができた。

3.2 粒子の違いによる発達プロセスの変化

連続写真を基に作成したそれぞれ 3 号ケイ砂と 4 号ケイ砂における 10 分毎のガリの発達経過の一例を図-4 と図-5 に示す。縦軸は水路下流端からの距離、横軸は水路左端からの横断方向距離を表している。実験条件は斜面勾配 0.188、層厚 12 cm としている。ガリの規模を示す指標の一つとして、各実験で最終的に形成されたガリの中で幅が最大のものの平均値をガリ幅と定義する。図-4、図-5 におけるガリ幅はそれぞれ 61 cm, 82 cm となり、粒径が小さい方がガリ幅が大きい。また、ガリが上流端まで発達するのに要した時間は 3 号

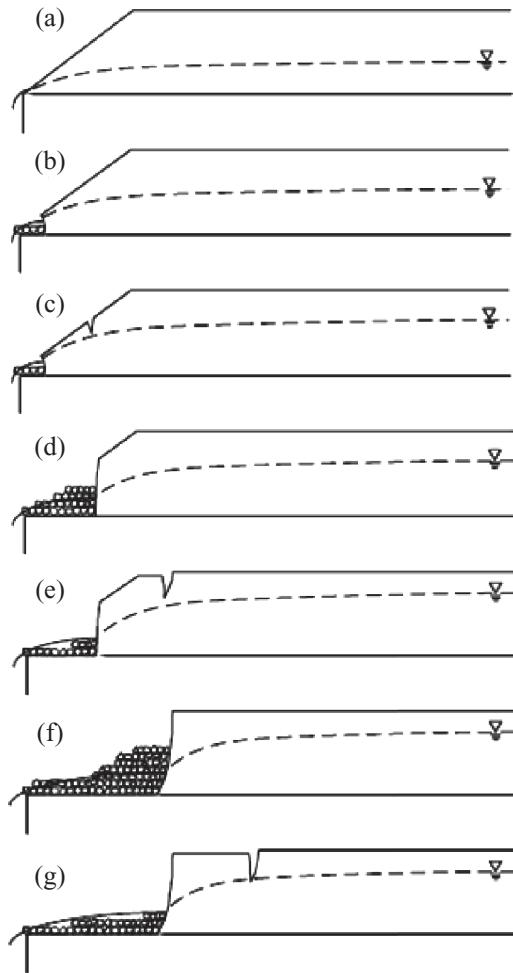


図-3 侵食進行プロセス

ケイ砂の場合は 120 分であるのに対し、4 号ケイ砂は 828 分と明らかに遅いことが分かる。さらに、層厚 10 cm とした時の 4 号ケイ砂の実験の 7 ケース全てにおいて、初期侵食が発生する以前に水深が層厚より大きくなり表面流侵食が発生してしまい、有効な結果を得ることが出来なかった。

プラスチック粒子を用いた浸透層におけるガリの発達経過を図-6 に示す。実験条件は斜面勾配 0.188、層厚 10 cm としている。ケイ砂の場合、多くのケースでガリ頭部が分岐し、複雑なガリ形状を呈したのに対し、プラスチック粒子の場合、形状が単純でほとんどのケースにおいてスプーン形状をしている。また、ガリの発達時間は 16 分とケイ砂と比べて非常に早い。本章第 1 項で述べたガリ先端に発生する亀裂の幅は、プラスチック粒子の場合 2~3cm であったのに対してケイ砂は 3~4cm となり、亀裂が大きい程、削剥した後堆積した土砂を下流端に流すのに多くの時間を要していた。

3.3 ガリの分岐プロセス

図-4、図-5 で示したように、ケイ砂を用いた場合はガリが途中で分岐する現象が発生した。一方、プラス

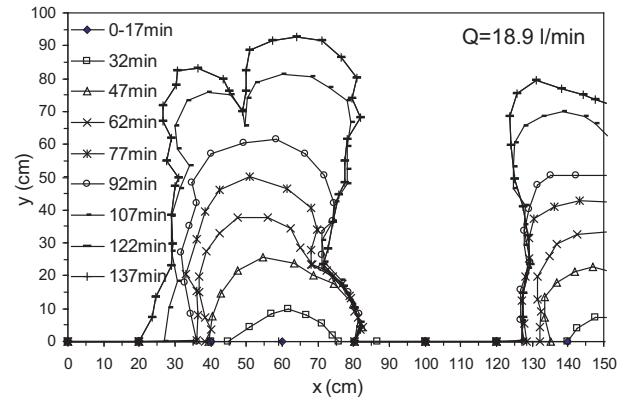


図-4 ガリの発達経過 (3 号ケイ砂)

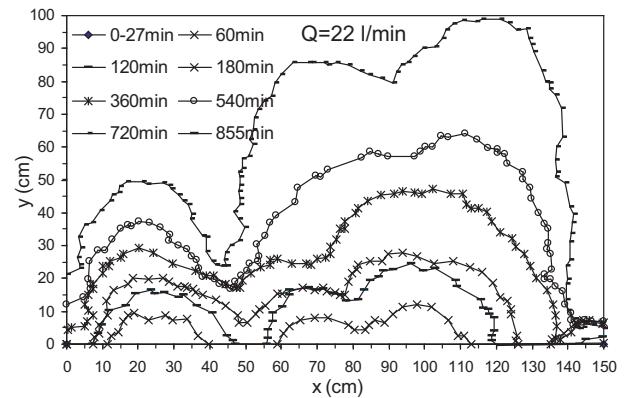


図-5 ガリの発達経過 (4 号ケイ砂)

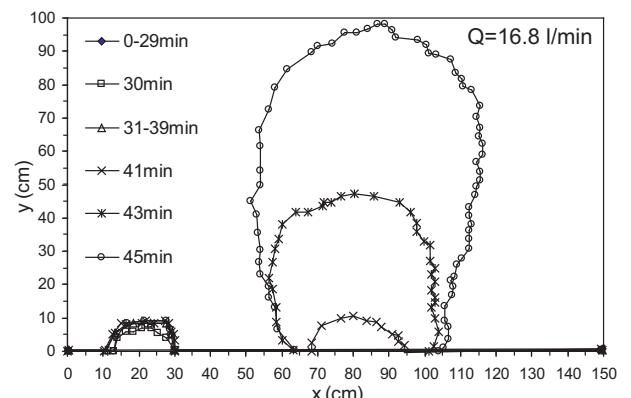


図-6 ガリの発達経過 (プラスチック粒子)

チック粒子の場合は図-6 に示すように分岐は発生しない。これは、プラスチック粒子のどのケースにおいても同様であった。図-7 に分岐が発生した全 9 ケースにおける斜面勾配の変化に対する下流端から分岐発生地点までの距離の関係を示す。分岐は斜面勾配が小さいほど発生しやすく、分岐の発生地点は斜面勾配の増加に伴い下流端から遠ざかっている。

ガリの分岐現象に関して主に 2 つの要因が考えられる。一つは、ガリ先端部で起こる侵食の横方向への拡

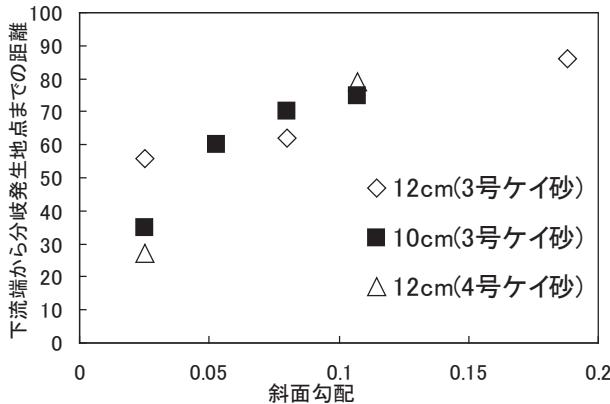


図-7 斜面勾配の変化に対する下流端から分岐発生地点までの距離

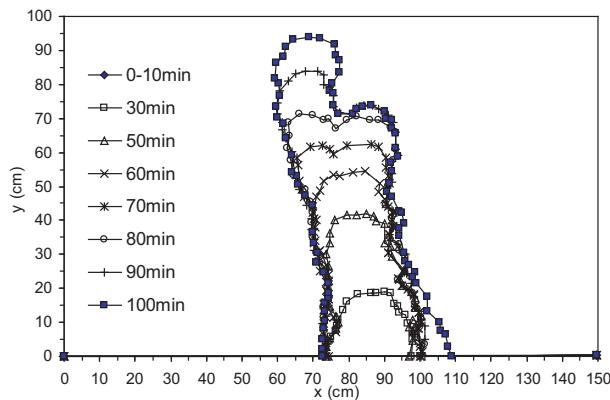


図-8 ガリの発達経過. 3号ケイ砂. $Q=16 \text{ l}/\text{min}$

大である。流量が同じである場合、斜面勾配が大きいほど浸透流速が増加し、斜面方向へのガリの発達が促進されるため侵食が横方向へ拡大しづらくなる。一方で、斜面勾配が小さい場合、浸透流速は減少し、水深が増大する。するとガリの先端でより活発な侵食が発生し先端のガリ幅が肥大化すると共に不安定となるため、分岐現象が発生すると考えられる。もう一つは、土砂の不均一さが分岐に及ぼす影響が考えられる。Howardの研究^{12),13)}によると、主に浸透層内の含水比のばらつきにより土砂の崩れやすさに違いが生じ、ガリが発達する箇所とそうではない箇所の差が大きくなることでガリの分岐現象がより顕著に表れる。プラスチック粒子の場合、ケイ砂と比較して粒子同士の摩擦力や粒子と不透水層との限界摩擦力が小さく、ガリ発達の差が生じにくいため分岐が発生せず、比較的滑らかな輪郭のガリが発達すると考えられる。

3.4 流量による発達プロセスの変化

図-8、図-9に流量以外の条件を同じにして流量をそれぞれ侵食が発生し始めた時点の流量（以後、限界流量と呼ぶ）である $16 \text{ l}/\text{min}$ および限界流量より約 8

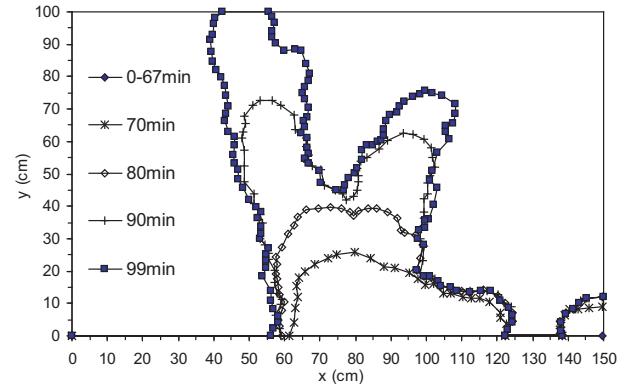


図-9 ガリの発達経過. 3号ケイ砂. $Q=24 \text{ l}/\text{min}$

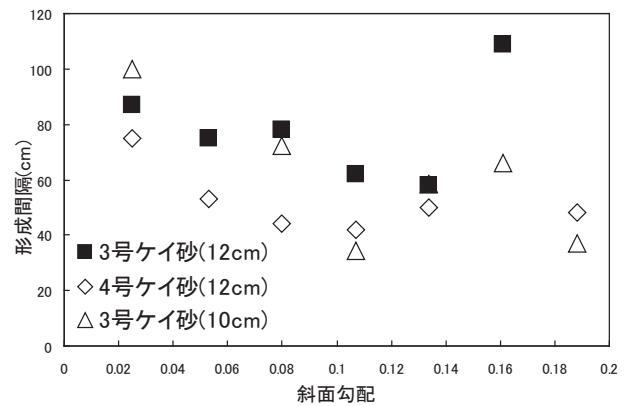


図-10 斜面勾配に対する形成間隔 (ケイ砂)

$1/\text{min}$ 大きい $24 \text{ l}/\text{min}$ とした場合の 10 分又は 20 分おきのガリ発達経過を示す。浸透層には 3号ケイ砂を使用し、斜面勾配 0.053、層厚 10cm としている。限界流量を厳密に測定することは非常に困難なため、侵食が発生した時間から前後 5 分の間に測定した流量の平均値としている。図-9 は図-8 と比べると侵食が始まる際の初期水路幅が大きく、ガリの発達が活発であることが分かる。また、流量が小さいケース（ケース 1）は実験開始後 10 分で侵食の発生が見られたのに対し、流量が大きいケース（ケース 2）では 67 分後とかなり遅い。これは表面流侵食を起こさずに限界流量を超える流量を再現するため徐々に増加させた為である。実際に侵食が下流端から上流端まで進行するのに要した時間はケース 1 が 90 分であるのに対しケース 2 は 32 分と約三分の一であった。

3.5 ガリ幅の変化

図-12、図-13 にケイ砂、プラスチックそれぞれの実験における斜面勾配の変化に対するガリ幅の関係をそれぞれ示す。図-12 中に破線の○印で示すようにガリ幅が急に落ち込む箇所が見られるが、これはガリが側壁付近にて発達したケースである。本来であれば側壁の外側部分にまで達するはずのガリの成長が側壁に

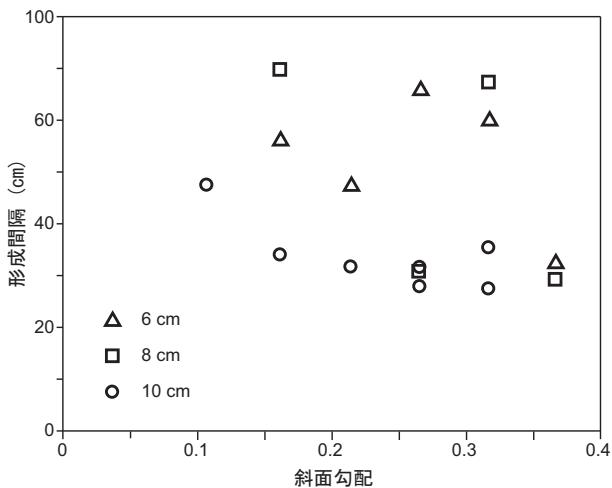


図-11 斜面勾配に対する形成間隔（プラスチック）

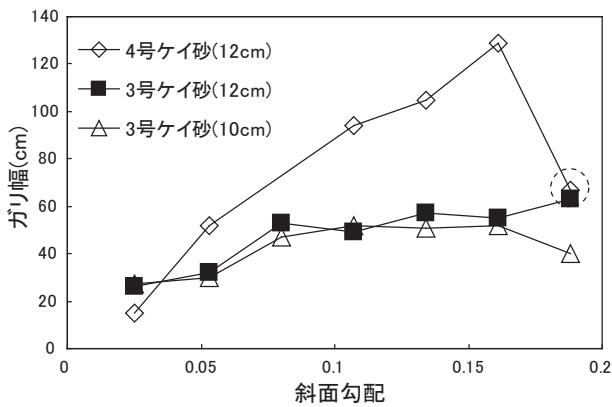


図-12 斜面勾配に対するガリ幅（ケイ砂）

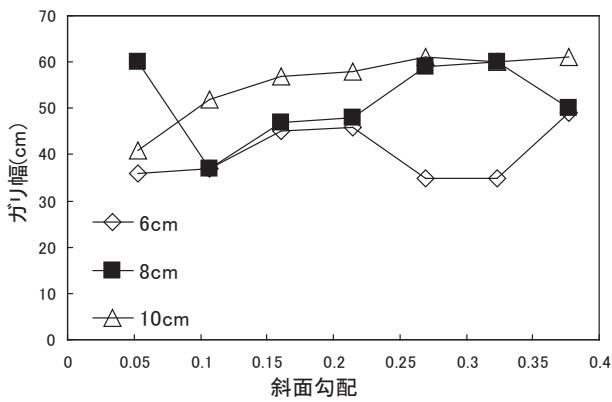


図-13 斜面勾配に対するガリ幅（プラスチック）

より妨げられた為、ガリ幅が極端に小さくなっているものと考えられる。その点を考慮し、側壁に形成されたガリ幅を実測値の2倍程度と考えると、粒径に関わらず斜面勾配の増加に伴い、ガリ幅は拡大する傾向がある。その中でも、4号ケイ砂の場合は特に大きな幅のガリが形成した。プラスチック粒子の場合にも斜面勾配の増加に伴うガリ幅の増加を示す箇所が見られる

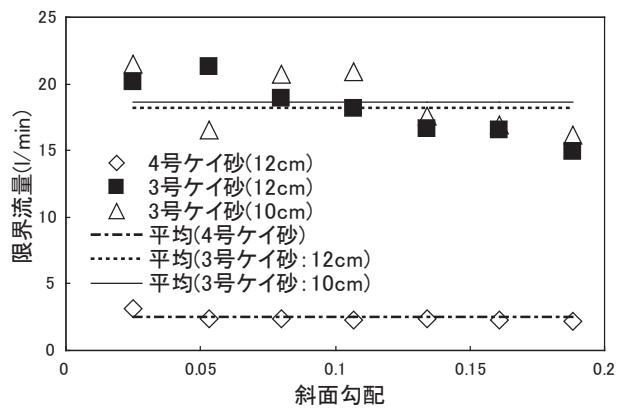


図-14 斜面勾配に対する限界流量（ケイ砂）

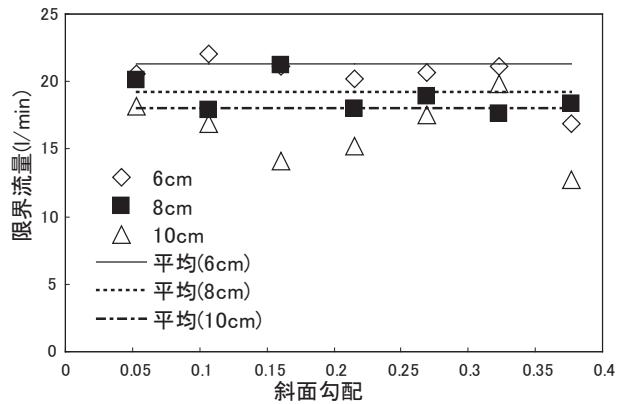


図-15 斜面勾配に対する限界流量（プラスチック）

が、ケイ砂ほど明確ではない。また、層厚の変化による目立った影響は見られなかった。

3.6 ガリの形成間隔

図-10、図-11にそれぞれケイ砂とプラスチックにおける斜面勾配に対するガリの形成間隔の関係を示す。ここで表す形成間隔とは、異なる2つのガリの中心間の距離を示す。実験水路の幅に限界があるため、形成数は最大で3つである。また、ガリが一つしか発達しなかったケースもあり、それらのデータは除外した。このように限られたデータからではあるが、斜面勾配、粒子の種類、層厚が形成間隔に及ぼす影響を見てゆく。

Pornprommin らの仮説¹⁰⁾によると、流れの集中する長さスケールは水深と相関があり、斜面崩壊の長さスケールは層厚と相関がある。この2つの相関により形成間隔が決まる。この仮説を前提に考えると、斜面勾配が増加すると水位差が増加するため、図-10に示すように形成間隔は斜面勾配の増加に伴い減少していく傾向にあることがうかがわれる。プラスチック粒子においても似たような傾向が見られるが、ケイ砂の方がより顕著に結果が表れている。また、微小な変化ではあるが、ケイ砂の場合は層厚の増加に伴い形成間隔

が拡大するのに対し、プラスチックの場合は層厚の増加に伴い形成間隔が減少する傾向にあった。

また、上述の仮説を確かめる為、図-14、図-15に各実験における斜面勾配の変化に対する限界流量の関係をそれぞれ示す。各実験の平均値を比較すると、ケイ砂、プラスチック共に浸透層厚の増加に伴い限界流量が減少しており、Pornprommin らの仮説¹⁰⁾を照明できている。また、同じ層厚であっても、4号ケイ砂のほうが明らかに限界流量が小さいことが分かる。

侵食が発生し土塊が削剥するかどうかは、土塊同士の接触面における摩擦力と、土塊自身の重量の相対的な関係により決まると考えられる。斜面勾配や浸透層厚の増加に伴い土塊の斜面方向への力は増加するため、上述のように斜面勾配や浸透層厚の増加、粒径の減少によってガリ幅の拡大や限界流量の減少が生じたものと考えられる。その中でも、上述の結果が示す通り侵食の発生やその後の発達スケールは粒子の種類に最も強く依存すると推察できる。

また、プラスチック粒子の場合、ケイ砂よりも侵食が発生し易く侵食が発達する速度も速いため、少なくとも本実験のスケールにおいては幅を決定する上で大きな影響を与えたかったと考えられる。

4. 結論

本研究では、異なる粒径のケイ砂を用いて湧水浸食の実験を行った。主要な結論は以下の通りである。

1. 粒径が小さいほど限界流量は小さく、ガリ幅は拡大する。
2. 斜面勾配が小さいほどガリの分岐現象が起こりやすい。
3. 斜面勾配が増加するに連れてガリの幅は拡大するのに対し、限界流量は減少する。
4. ガリの形成間隔は、斜面勾配の増加に伴い減少する。
5. 侵食の発生に関する支配的パラメータは浸透層を構成する粒子であると推察できる。

参考文献

- 1) Dunne, T., Formation and controls on channel networks, *Prog. Phys. Geog.*, 4,, 211–239, 1980.
- 2) Higgins,C.g.,Drainage systems developed by sapping on Earth and Mars, *Geology*,10,147-152, 1982.
- 3) Kochel, R. C., and J. F. Piter, Morphology of large valleys on Hawaii: Evidence for groundwater sapping and comparisons with Martian valleys, *J. Geophys. Res.*, *Proc. Lunar Planet Sci. Conf. 17th, Part1*, 91,, Suppl., E175–E192, 1986.
- 4) Izumi, N. and G. Parker, Inception of channelization and drainage basin formation, upstream driven theory, *J. Fluid Mech.*, No. 283, pp. 341–363, 1995.
- 5) Izumi, N. and G. Parker, Linear stability analysis of channel inception: downstream-driven theory, *J. Fluid Mech.*, Vol. 419, pp. 239–262, 2000.
- 6) Izumi, N. and K. Fujii, Channelization on plateaus composed of weakly cohesive fine sediment, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, F01012, doi:10.1029/2005JF000345, 2006.
- 7) Adam, T. K. S., Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger delta, *Eng. Geol.*, 35,, 123–133, 1993.
- 8) Chu-Agor, M., G. V. Wilson, and G. A. Fox, Numerical modeling of bank instability by seepage erosion undercutting of layered streambanks, *J. Hydrol. Eng.*, 13, 1133–1145, 2008.
- 9) Schumm, S. A., K. F. Boyd, C. G. Wolff, and W. J. Spitz, A groundwater sapping landscape in the Florida panhandle, *Geomorphology*, 12, 281–297, 1995.
- 10) Pornprommin, A., and N. Izumi, Inception of stream incision by seepage erosion, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JF001369, 2010.
- 11) Pornprommin, A., and N. Izumi, Experimental study of channelization by seepage erosion, *J. Appl. Mech., JSCE*, 11, 709–717, 2009.
- 12) Howard,A.D.,Groundwater sapping experiments and modeling,in Sapping Features of the Colorado Plateau:, *A Comparative Planetary Geology Field Guide*,edited by A.D.Howard,R.C.Kochel, and H.Holt,NASA Spec.Publ.,SP-491,71-83.
- 13) Howard,A.D.,Simulation modeling and statistical classification of escarpment planforms, *Geomorphology*,12,187-214.
- 14) Lamb,M.P,W.E.Dietrich, and J.G.Venditti,Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?, *J. Geophys.Res.*, 113, F02008,doi:10.1029/2007JF000831.

(2010年3月9日受付)