

○京都大学、原田 一哉

京都大学農学部、水山高久

1. はじめに

現在の土石流発生危険渓流は、溪床勾配が15度以上の区間があって、それより上流の集水面積が5ha以上となっている。この15度というのは無限長斜面平面すべり発生条件式である $\tan \theta \geq (\gamma_b / \gamma_t) \tan \phi$ (θ : 斜面勾配、 ϕ : 砂層の内部摩擦角、 γ_b : 砂礫層の飽和単位重量、 γ_t : 砂礫層の水中単位重量) に自然の砂礫を用いた場合に約14度であり、実際の土石流発生勾配の下限値に一致している¹⁾。しかし、一般的な土石流の発生勾配の下限値である15度以下であっても、山腹・溪岸の崩壊や流木によって天然ダムができ、これが決壊して急激な出水があった場合に、土石流に似た流れが発生する。これは段波先頭部は土石流並に土砂濃度が高くなっているが、後続の等流部分が掃流状集合流動で、いわば土石流と掃流の領域の間に発生する流れである。これを鉄砲水(flashflood)と呼ぶことにする。実際、1993年の鹿児島県では、台風による記録的な豪雨によって流れ出た土砂が暗渠を塞ぎ、鉄道の軌道跡がダムの役割を果たして水を貯めた。それが決壊して鉄砲水が発生し多数の死傷者を出している。この鉄砲水が流下した区間は約5度であった。その流下する様子は、土石流と同様轟音を伴う濁流で、強大なエネルギーを持ち、流下した後は家屋は流され、大きな被害を与えている。したがって本研究では鉄砲水と土石流の流下途中での勾配の変化に伴う変形の違いを明らかにすることを目的とし、鉄砲水が山地の谷から扇状地にてきた場合を仮定し、水路勾配を途中で変え、鉄砲水の挙動を調べることにする。

2. 実験の概要

実験に使用した水路は幅7cm、深さ15cm、長さ3mの透明アクリル張り可変勾配水路である。この水路の上流端から2mのところまでそこから下流側の水路を交換して勾配を変化させることができるようになっている(図-1)。水路には実験用砂を3cmの厚さで敷き、上流端から一気に一定流量の給水を行って段波を発生させている。給砂はしていない。流下する段波の様子を毎秒60コマのビデオカメラで撮影して、Dynas-2D(ビデオ運動解析システム)で解析している。Dynas-2Dは運動動作を定量的に解析するために作られたもので、具体的にはテレビ画面上で映像の形を、この実験では横から見た波形をマウスで入力し、入力した各点をx-y座標におとすことができる装置である。今回はこれで波形と流下速度を求めた。また、流下する段波の先頭部、20cm後方および50cm後方の水と砂礫をスコップで採取して濃度の計測を行った。採取した地点は、勾配変化のない水路では下流端からの50cm上流側の地点、勾配が途中で変わる水路では勾配変化点から下流側へ20cm、50cm、80cmの各地点である。実験材料は一様粒径の砂で、平均粒径 $d: 4.89\text{mm}$ 、最大粒径 $d_{\max}: 10.5\text{mm}$ 、比重 $\sigma/\rho: 2.59$ 、内部摩擦角 $\phi: 43.6^\circ$ 、となっている。粒度分布を図-2に示すが、ほとんどが一様な分布になっている。実験条件を表-1に示す。勾配は土石流発生の下限値の15度から停止勾配の3度までで、水路を付け替えて5度、7度、10度に変化させた。給水量は20l/min~50l/minの10リットルおきの4種類である。

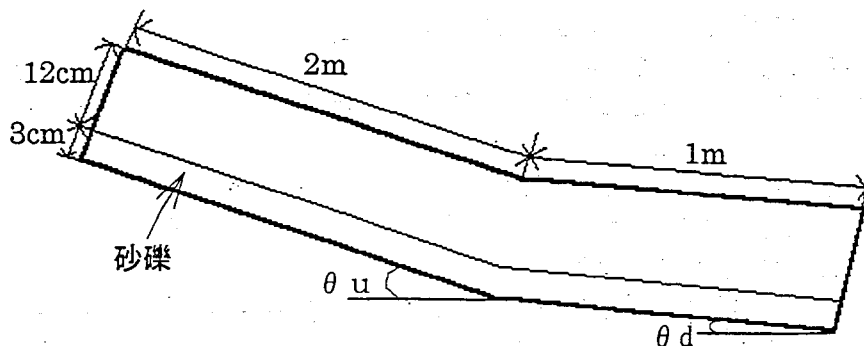


図-1 実験水路

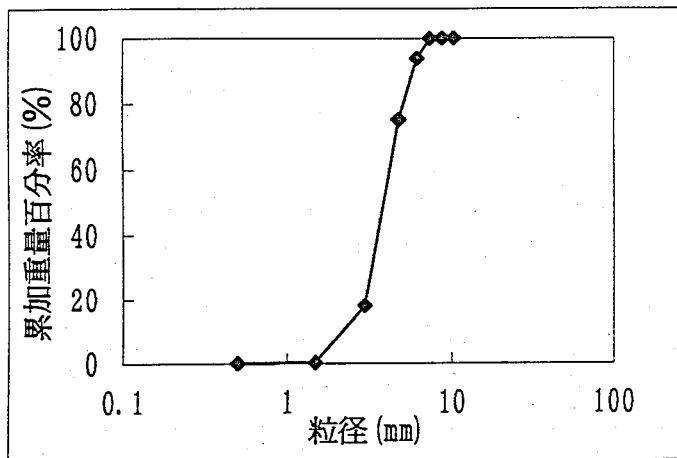


図-2 粒度加積曲線

Q(l/min)	一様勾配	上流 θ_u	下流 θ_d
20,30,40,50	15	15	10
20,30,40,50	12	12	7
20,30,40,50	10	10	5
20,30,40,50	8	8	3
20,30,40,50	5	15	8
20,30,40,50	3	12	5
20,30,40,50		10	3
20,30,40,50		15	5
20,30,40,50		12	2

表-1 実験条件

3. 結果

3.1 発生領域

図-3に勾配と流量をパラメータに鉄砲水の発生領域を示す。土石流、鉄砲水、掃流との区別は先頭部に砂礫が集中しているか、後続部も高濃度であるか、の2点をビデオ画像で判断している。鉄砲水の発生領域は、従来の掃流状集合流動の発生領域と一致している2)。

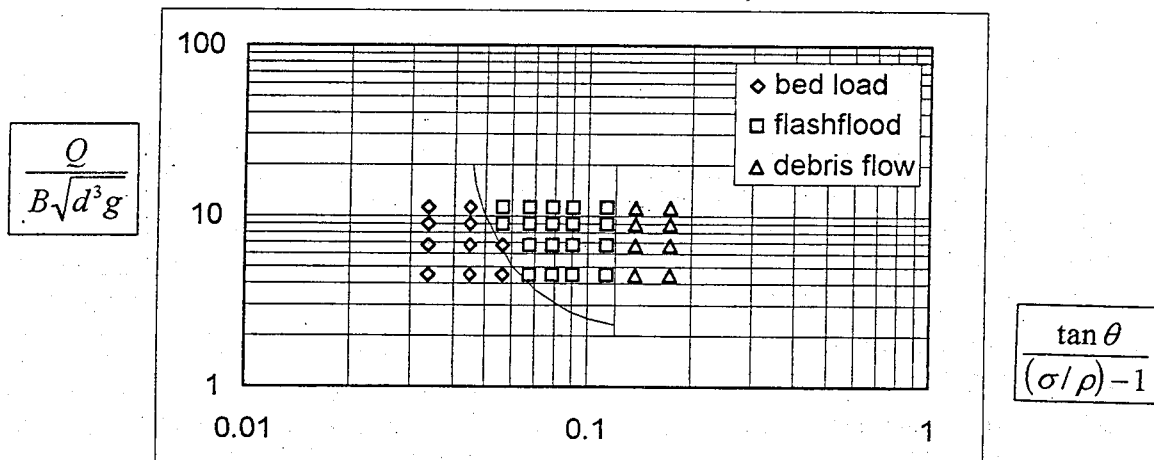


図-3 鉄砲水の発生領域

3.2 先頭部の波形

実験で得られた波形を次に示す(図-5)。全般的な傾向として勾配変化点を過ぎると波高が低くなるのが分かる(図-4)。また、勾配変化点を過ぎてあるところで、先頭部が崩壊して急激に進む現象がみられる。これは上流側の勾配が急であり、勾配の変化する角度が大きいほど顕著である。原因として考えられるのは、急勾配域で形成された土砂濃度の高い先頭部を速度を保ったまま維持するには大きな駆動力が必要であり、低勾配では駆動力が不足、速度が落ち先頭部が崩壊するのではないかと考えられる。その後、鉄砲水の流れは段波の先頭部は崩れたり、盛り上がったりを繰り返しながら流下する。

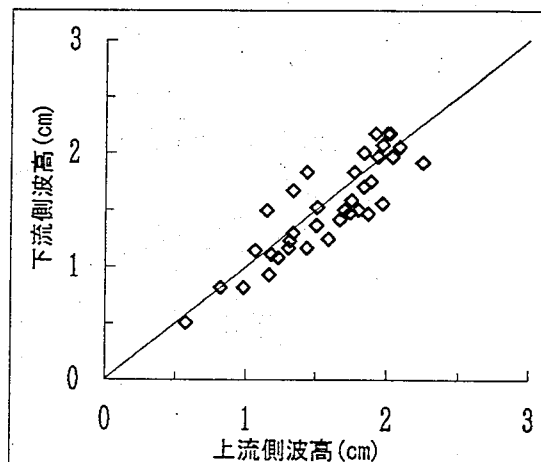
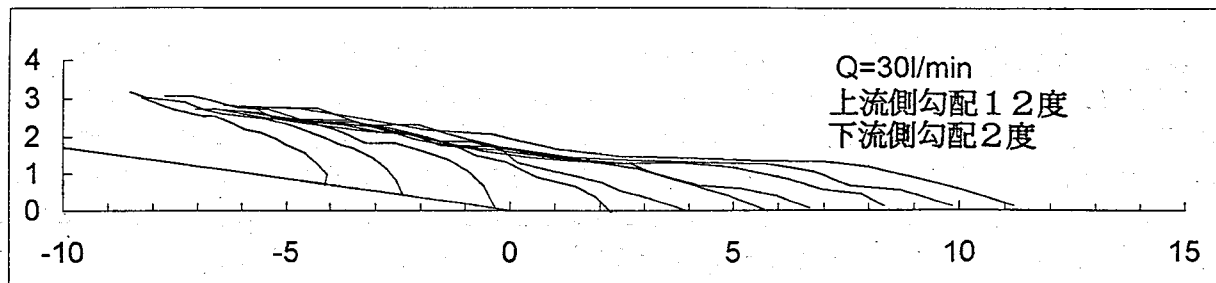


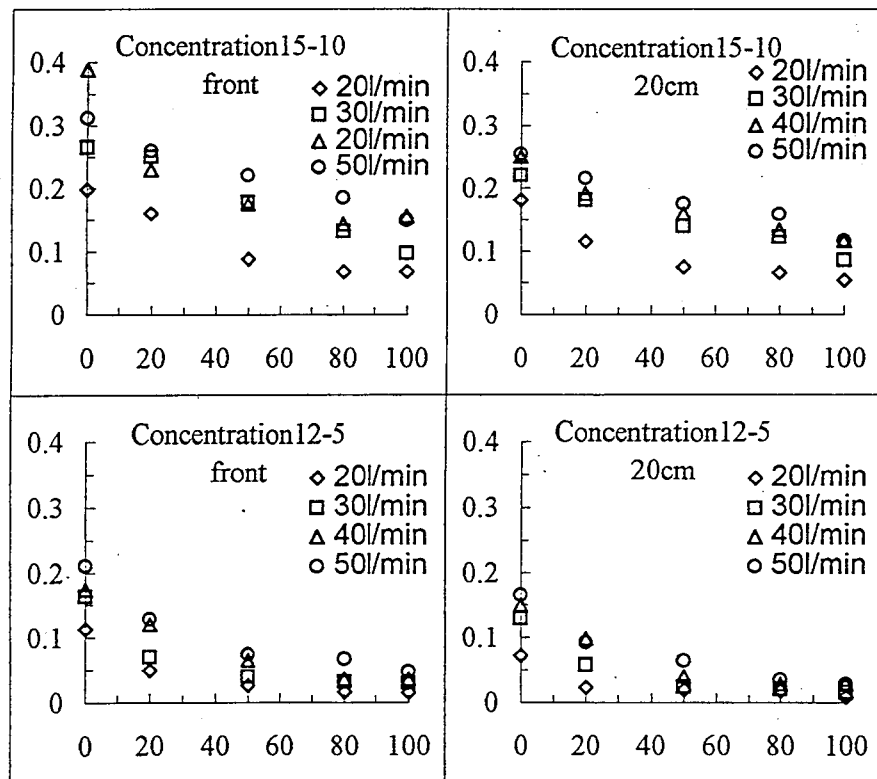
図-4 波高の低下



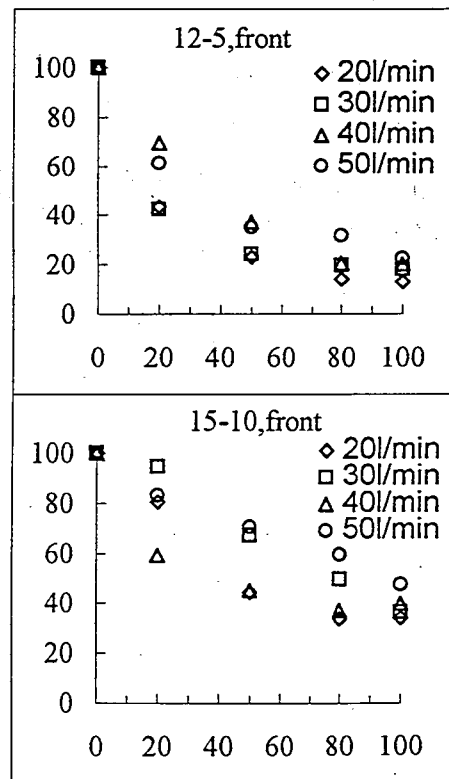
図一5 鉄砲水の0.033秒毎の波形
原点は勾配変化点で目盛りの単位はセンチメートル

3.3 土砂濃度

結果を図一6に示す。給水量が少ないときは土砂の集中した先頭部が形成されておらず、勾配が変化しても濃度の変化は少なく全般に濃度は低い。特に後続流では極めて低い濃度を示している。このことから先頭から後続までほとんど濃度変化のない掃流といえる部分では濃度には勾配変化の影響は少ないといえる。一方、鉄砲水の領域では、下流側の勾配が8度以上の土石流の流下区間に当たる勾配の時は濃度の変化は少ない。しかし、上流側の勾配に関わらず下流側の勾配が2度から5度の土石流の堆積、停止勾配になると急激に濃度が減少している。また、下流側の勾配が同じ時は上流側の勾配に関わらず、勾配変化点からの距離が大体同じ所で濃度が一定に近づいている。濃度の減少分は堆積しているの、わかりやすいように勾配変化前の濃度を100とした図を図一7に示す。土砂の堆積条件として、 $U_{*c2}/U_{*2} > 2$ または $B_d/B_u > 3$ があげられている。（ U_{*c2} は河床内の移動最大礫の限界掃流力、 U_{*2} は土石流水深に相当する水の掃流力、 B_d は流路拡幅点から下流側の河幅、 B_u は上流側の河幅）また、土石流の停止条件は、 $\theta > 10$ （ θ は河床勾配）、 $B_d/B_u > 3$ または $B_d/B_u < 0.2$ 、 $\theta_d/\theta_u < 0.5$ （ θ_d は勾配変化点から下流側の河床勾配、 θ_u は上流側の勾配）がある3）。今回の実験で急激に濃度が減少して体積が起こっている場合は、大体この条件を満たしている。



図一6 鉄砲水の勾配変化点からの濃度変化



図一7 濃度減少率

図一6と図一7は、x軸は勾配変化点からの距離(cm)で、x=0の値は上流側勾配の一樣勾配での実験値、x=100の値は下流側勾配の一樣勾配の実験値を用いている。

4. 考察

鉄砲水の先頭部は土石流と同様、高濃度の流れになっており、抵抗係数も掃流より土石流の傾向に近い。したがって、先端部に関してはほぼ土石流の流れであり、土石流と異なるのは後続流で、鉄砲水の場合は土砂濃度が高く抵抗係数の大きい先頭部を土砂濃度の低い後続部が押している形をとっていると考えられる。今回の実験では勾配が途中で緩くなったとき先頭部の土砂濃度は低下し短い間に堆積することがわかった。しかし、鉄砲水が発生するときには多量の出水があり、しかも勾配変化に伴って抵抗となっていた先頭部が崩れて堆積してなくなると、後続の水が勢いよく流れていくと考えられる。その水流が再び土砂を浸食することもあり得る。そのため、砂防計画をたてる上では、残った大量の水をどう処理するかが問題になると考えられる。

あとがき

今回の実験ではポンプの関係上50l/min以上の流量での実験を行っていない。したがって鹿児島で起きた鉄砲水の災害現場のような低勾配では鉄砲水は発生しなかった。ダムなどで水をためて一気に流す方法で実験を行うことも考えられる。また、この実験では一様粒径の砂を用いたが、次回は混合粒径の砂を使って、透過型ダムでの土砂の捕捉について実験を行って現在の土石流対応型の透過型ダムで十分に鉄砲水が止められるのか、また、先頭部が止められても後続の水流で二次流出が起きないかなど調べることも必要と考えられる。

参考文献

- 1) 福原隆一・小橋澄治・水山高久(1994) : Flashfloodの流動特性.平成6年度砂防学会研究発表会概要集、pp.191-194
- 2) 小橋澄治編 : 山地保全学.文永堂出版、pp.179-214
- 3) 塚本良則・小橋澄治編 : 新砂防工学.朝倉書店、pp.73-96