

ハイスピードカメラを用いた 土石流内の粒径別砂礫挙動の把握

鳥取大学工学部 和田孝志, 熊谷優宇人
虫明寛人, 三輪 浩

目次

1. 研究の背景と目的

2. 既往研究

3. 研究概要

(水路実験と“Dipp-Motion 2V”による
砂礫移動軌跡追跡)

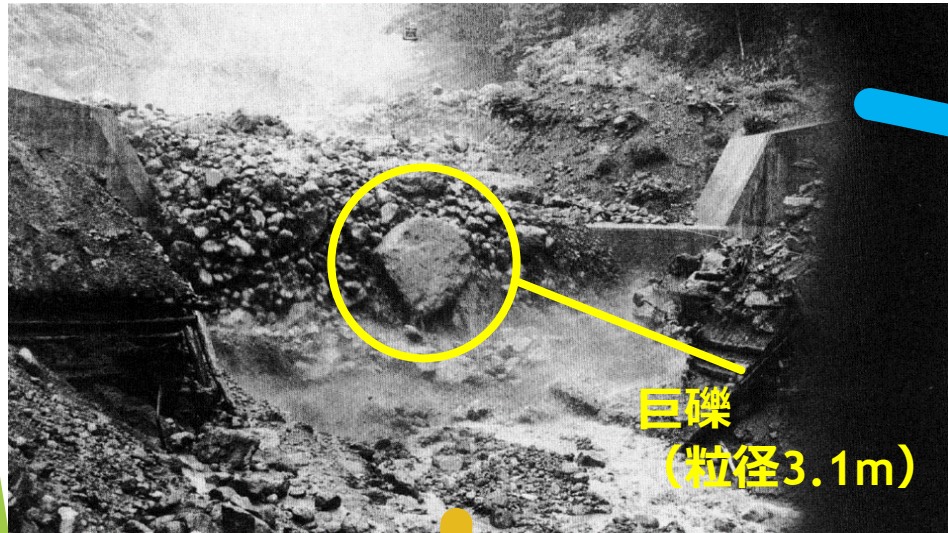
4. 実験結果と考察

5. まとめと今後の予定

1. 研究の背景と目的

土石流は**大小さまざまなサイズの砂礫**
で構成

⇒土石流の流下とともに**先頭部に大きな礫**、**後続部には細粒土砂が集積**



巨礫
(粒径3.1m)

焼岳上々堀沢での土石流(1976) (奥田ら, 1977)

出典：奥田ら，京都
大学防災研究所年報，
1977（一部加筆）

(砂防鋼構造物
研究会HPより)



那智川土石流災害 (和歌山県, 平成23年)



広島市土石流災害 (平成26年)

土石流被害
拡大要因

家屋・道路による狭窄部
での土石流の閉塞

防災上利用可能な特性
(透過型砂防堰堤での巨礫
捕捉)



雄忠志内川3号砂防堰堤 (北海道利尻島)



堆積深2.0m程度

広島市土石流災害 (平成26年)
(和田撮影)

1. 研究の背景と目的

6粒径配合混合砂礫, $L=175\text{cm}$, $q=100\text{cm}^2/\text{s}$, $\theta=15^\circ$

115cm下流地点通過 約0.37秒後



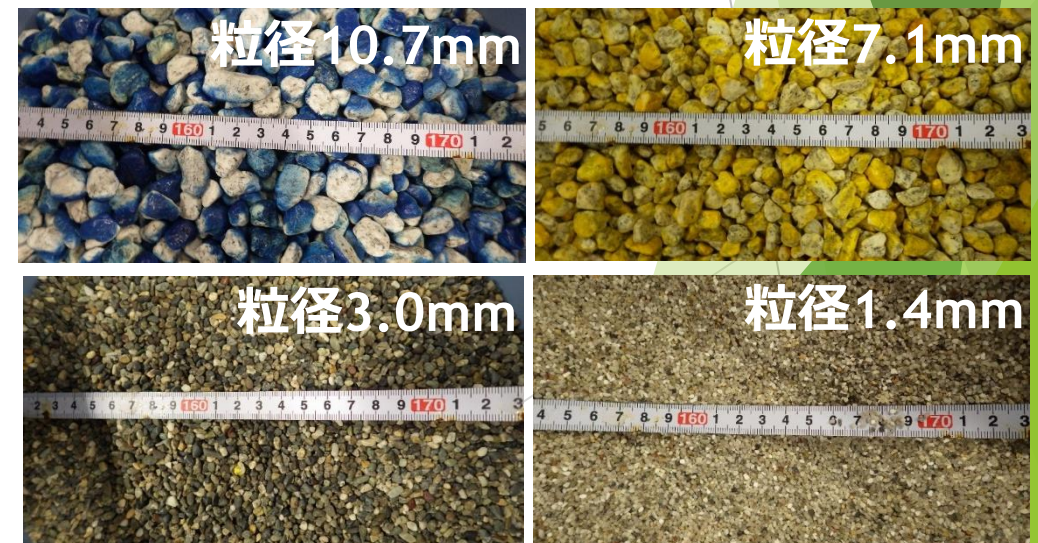
土石流先頭部の様子 (和田らの既往実験)

土石流現地観測や水路実験にて, 土石流流下に伴う先頭部での大礫集積が確認されている

土石流内部の逆グレイディング (大粒子の浮上) に関して, いくつかのメカニズムが提案されており, 統一的な見解が得られていない.



複数の砂礫混合条件(2粒径混合)で土石流先頭部の大粒子集積メカニズム (逆グレイディングの形成メカニズム) を水路実験により検証



水路実験に用いた砂礫

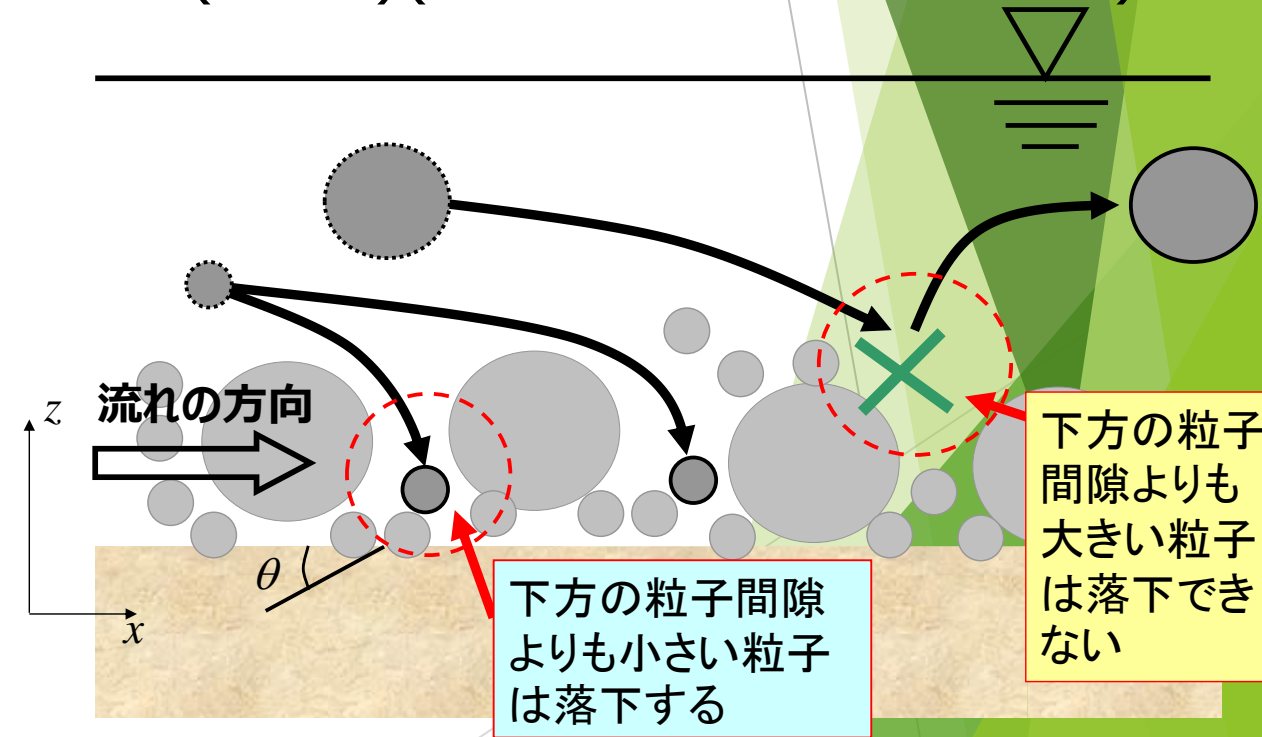
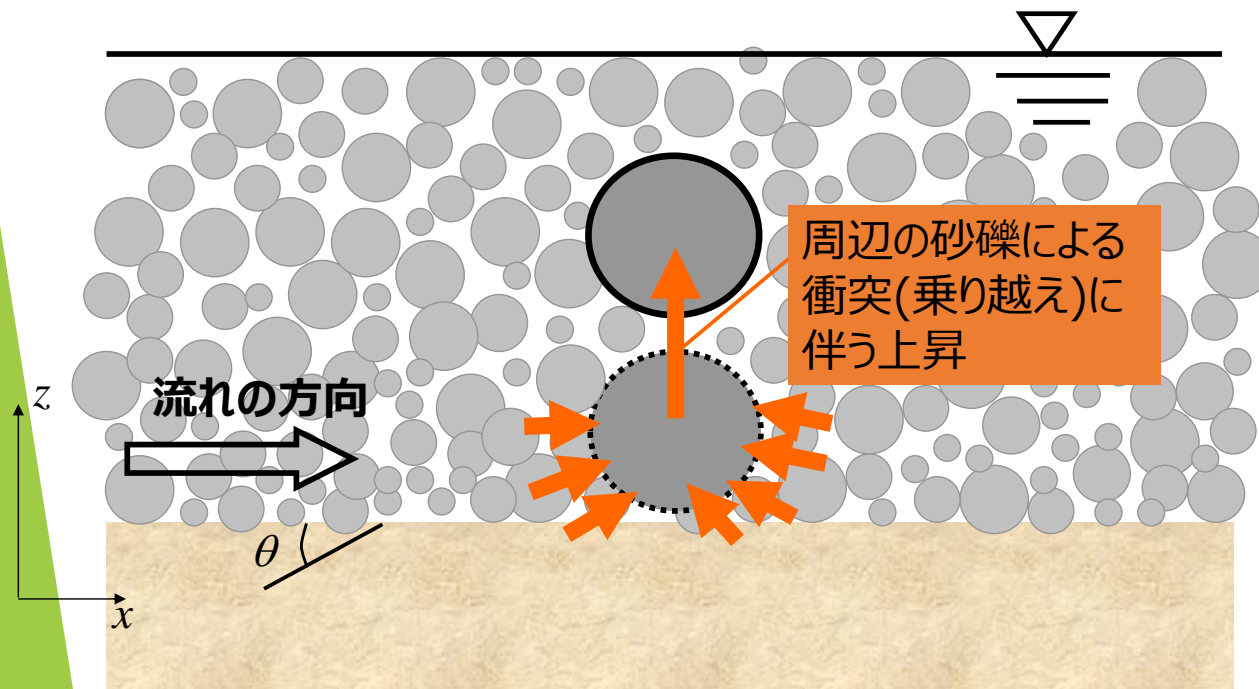
1. 研究の背景と目的

土石流内部の逆グレイディング（大粒子の浮上）等に関する既往提案モデル

周辺粒子の衝突（乗り越え？）による大粒子上昇 小粒子の選択的落ち込みによる大粒子残存

Bagnold(1968), Takahashi(1980)など

Middleton(1970),
宮本(1985)(※小粒子が支配的な場合)など



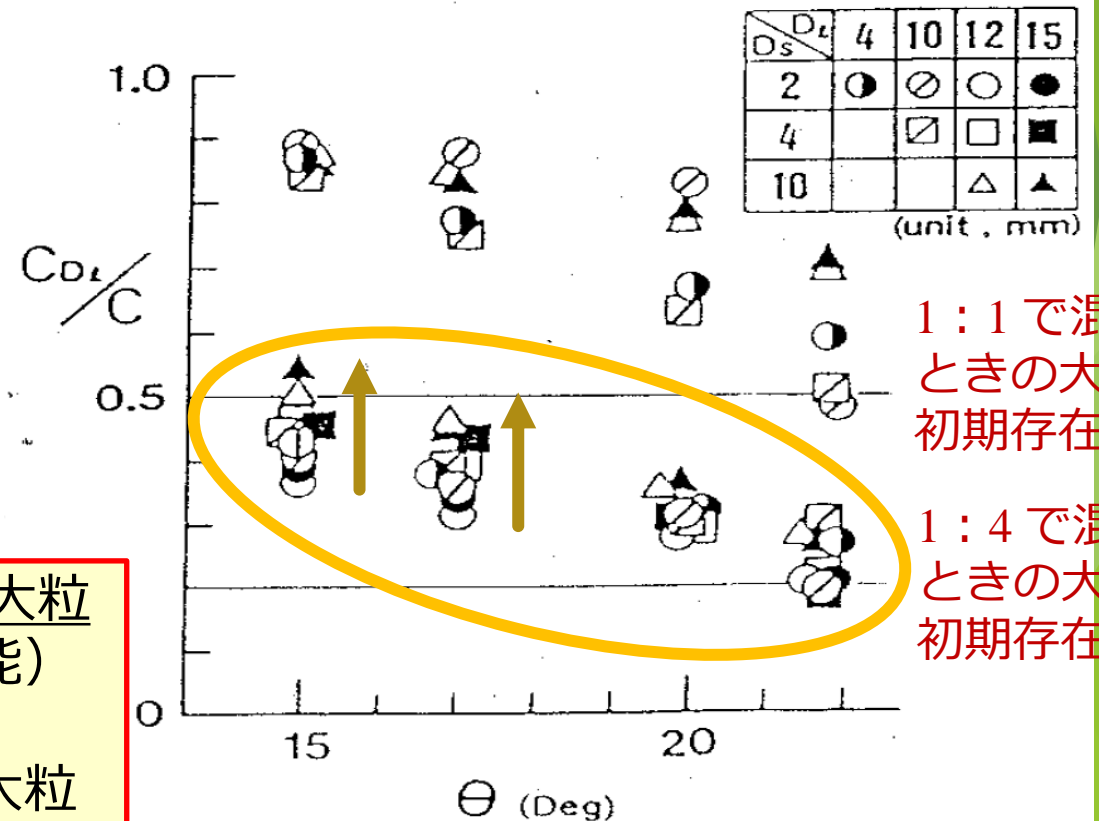
土石流内部の逆グレイディング形成(大粒子上昇)に関する主なメカニズム

2. 既往研究 宮本1985の研究について

- 全長12m, 幅10cmの可変勾配直線水路を用いて, $\theta = 15^\circ, 17^\circ, 20^\circ, 22^\circ$ の4通りの勾配, 流量1~3L/secの条件で実験
- 2mm~15mmの5粒径から2粒径を1:1または1:4に混合
- 土石流先頭部から20L分を採取し, 大粒子と小粒子の存在割合を計測

宮本の実験における実験砂混合パターン

diameter ratio D : d unit:mm	gradient (degree)			
	15°	17°	20°	22°
4 : 2	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4
10 : 2	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4
12 : 2	1:4	1:4	1:4	1:4
15 : 2	1:4	1:4	1:4	1:4
10 : 4	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4
12 : 4	1:4	1:4	1:4	1:4
15 : 4	1:4	1:4	1:4	1:4
12 : 10	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4
15 : 10	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4	1:1 1:4



1:1で混合した
ときの大粒子
初期存在割合

1:4で混合した
ときの大粒子
初期存在割合

土石流先頭部の大粒子存在割合

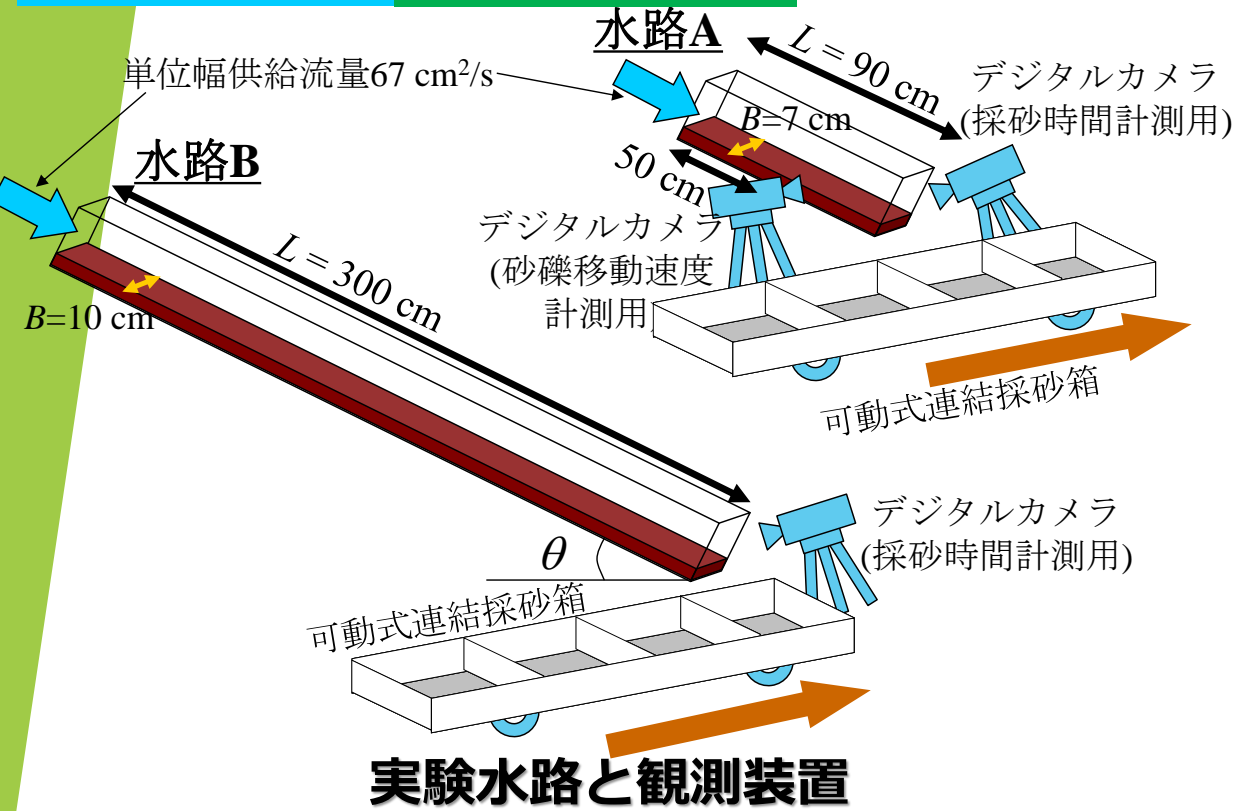
- 流れの抵抗は1:4混合時は小粒子, 1:1混合時は大粒子により受け持たれる (均一粒径としての扱いが可能)
 - 水路勾配が小さいほど大粒子集積が顕著
 - 大粒子が同じ大きさの場合, 小粒子が大きいほど大粒子集積が顕著 (1:4混合時)
- 主な原因は小粒子の落ち込み? 大粒子の上昇?

2. 既往研究 和田・前田・三輪2020の研究について

[動画へ⇒](#)

実験条件

水路実験 実験概要



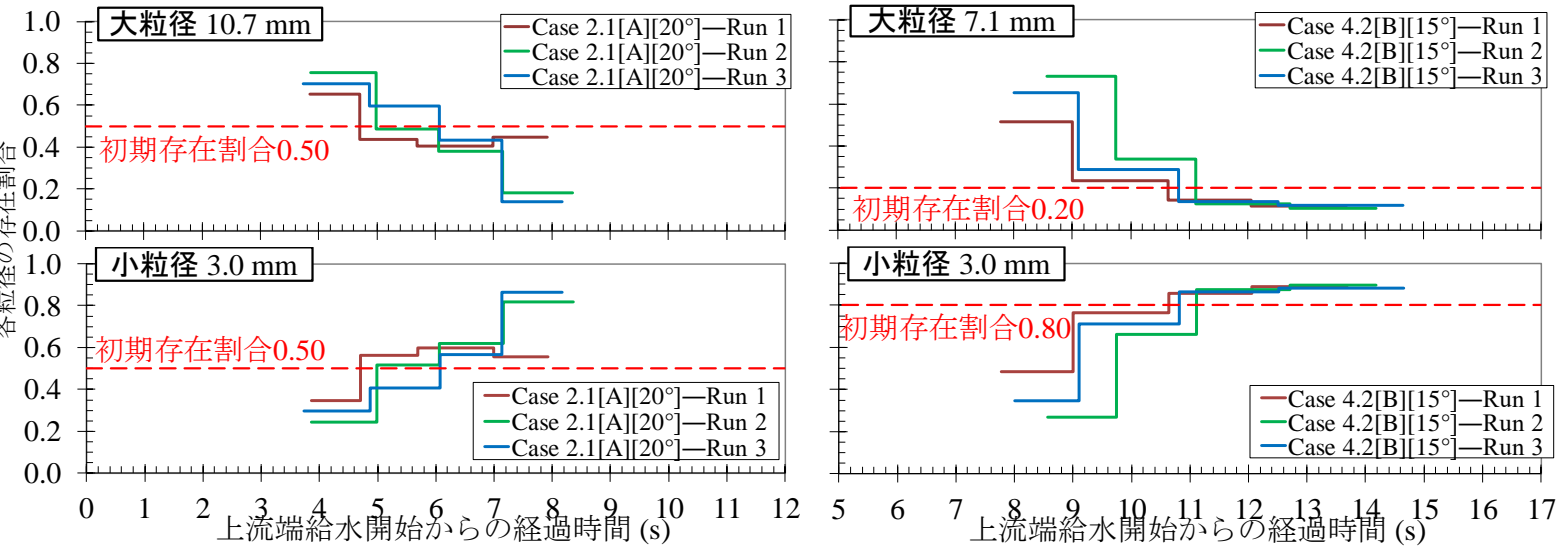
- ◆ 4種類の異なる粒径砂礫から2種類配合
- ◆ 水路下端で土石流先頭部を分割して採取し、土石流先頭部の大小粒子存在割合を把握
- ◆ 流下距離および水路勾配も変化させる

Case	実験砂粒度構成			実験水路	水路勾配 $\theta(^{\circ})$
	粒径 $d_L(\text{mm})$: $d_S(\text{mm})$	配合割合 $P_{L0} : P_{S0}$	平均粒径 $d_{m0}(\text{mm})$		
Case 1.1	10.7 mm:	1 : 1	9.25	A	15, 20, 25
Case 1.2	7.1 mm	1 : 4	8.10	A	15, 20, 25
				B	15
Case 2.1	10.7 mm:	1 : 1	8.55	A	15, 20, 25
Case 2.2	3.0 mm	1 : 4	6.44	A	15, 20, 25
				B	15
Case 3.1	10.7 mm:	1 : 1	8.50	A	15, 20, 25
Case 3.2	1.4 mm	1 : 4	6.28	A	15, 20, 25
				B	15
Case 4.1	7.1 mm:	1 : 1	5.77	A	15, 20, 25
Case 4.2	3.0 mm	1 : 4	4.53	A	15, 20, 25
				B	15
Case 5.1	7.1 mm:	1 : 1	5.65	A	15, 20, 25
Case 5.2	1.4 mm	1 : 4	4.19	A	15, 20, 25
				B	15
Case 6.1	3.0 mm:	1 : 1	2.46	A	15, 20, 25
Case 6.2	1.4 mm	1 : 4	1.97	A	15, 20, 25
				B	15

※結果のばらつきを考慮して各Caseで3回試行

水路実験 実験結果

先頭部に近づくほど土石流内部の**大粒子存在割合が増加**，**小粒子存在割合が減少**

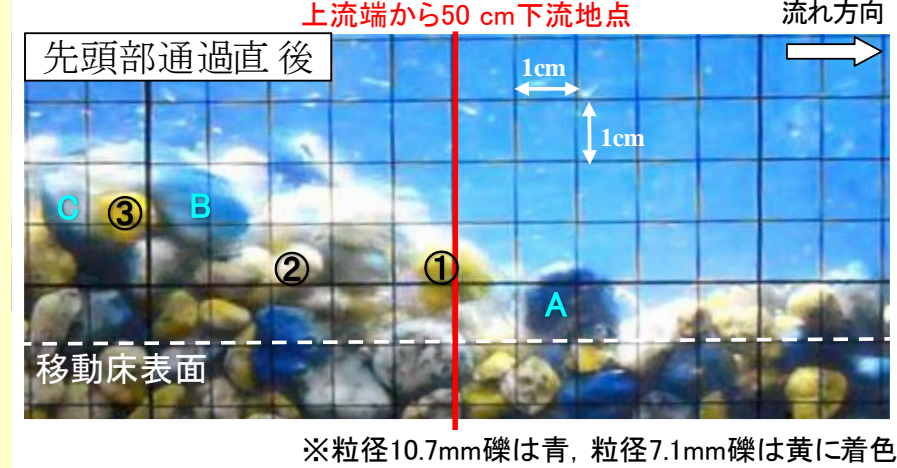


水路下端での土石流内部の粒径別存在割合の時間変化

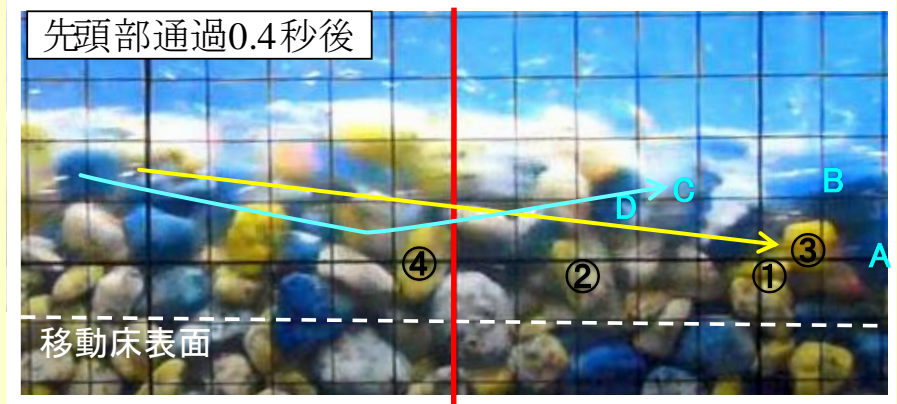
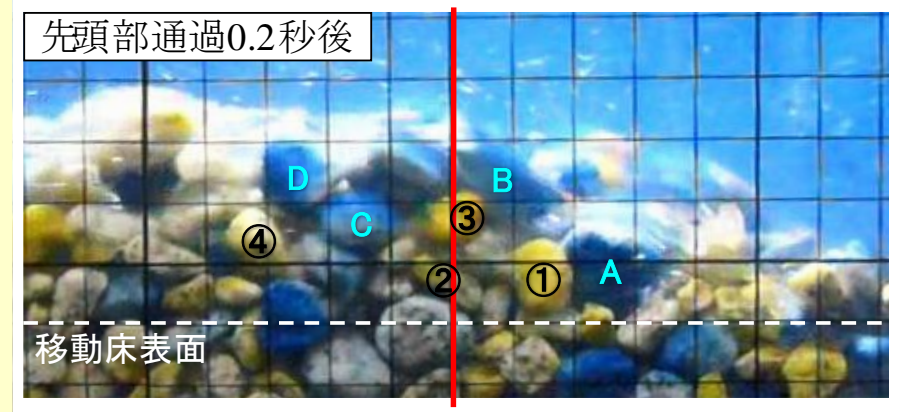
流動層内部では

- ・大粒子は比較的一定の高さで流下
- ・小粒子は流下とともに**流動層下層に落ち込み**

下層の小粒子は大粒子による遮蔽のため上昇し難く、**上層の粒子よりも流下方向の移動が遅い**



※粒径10.7mm礫は青，粒径7.1mm礫は黄に着色



先頭部流動層内部の砂礫移動の様子 (10.7mm:7.1mm=1:1配合 20°)

3. 研究概要 (実験水路)

~1000FPS(画角小さい)

供給流量
470 cm³/s

L = 10 cm
L = 90 cm

360FPS
CHU30_C_RS
(松電舎)



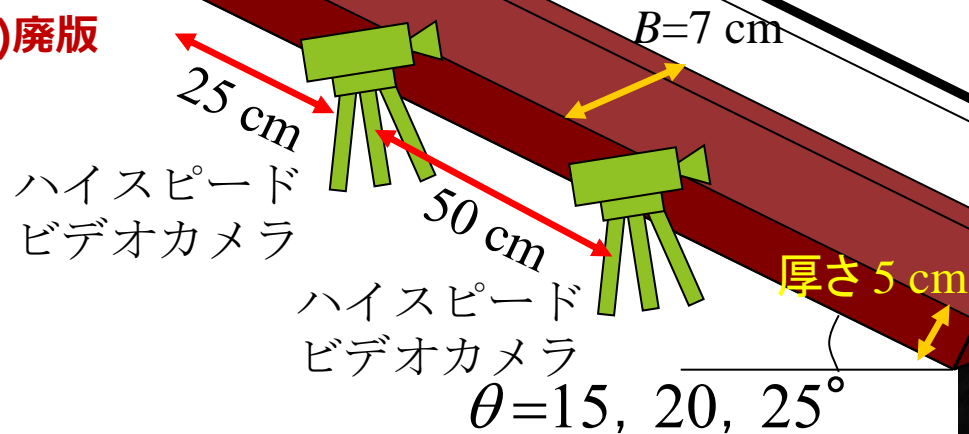
実験水路 (長さ100cm, 幅7cm)

EXILIM_EX_F1(CASIO)廃版

240FPS



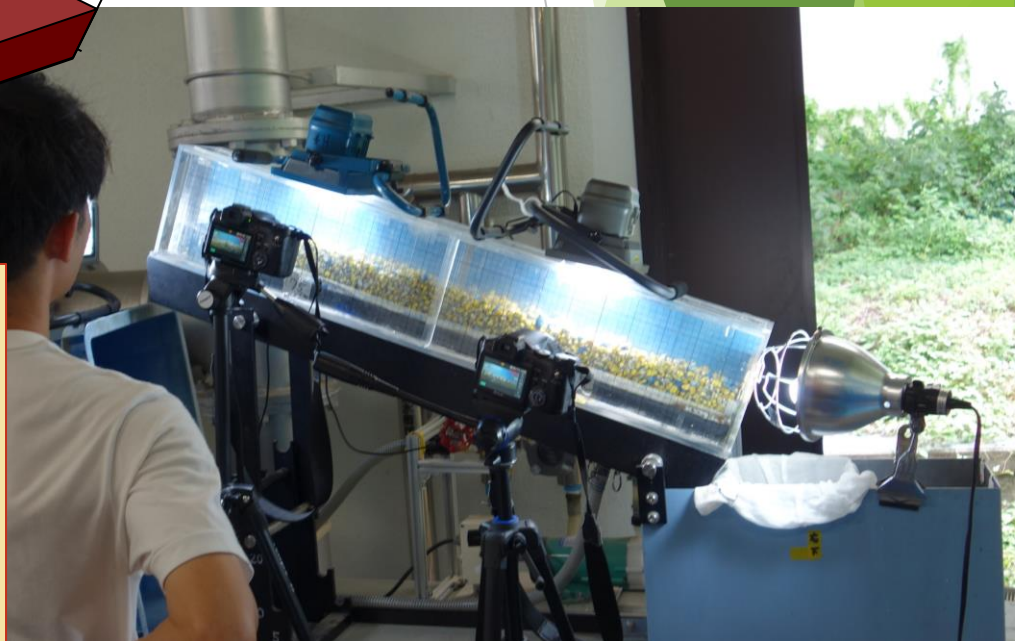
LUMIX_DMC_FZ200
(Panasonic)



実験水路と器具配置

実験の手順

- 1.水路に実験砂(2粒径混合)を詰め, ジョウロで給水し飽和状態にする
- 2.上端より給水し, 流下砂礫の様子をハイスピードカメラで撮影
- 3.水路勾配を変えて, 1., 2.を繰り返す
- 4.解析ソフト(Dipp-Motion)を用いて, 大小砂礫の移動軌跡(移動速度)データを取得



実験水路内の実験砂設置とカメラ配置状況

3. 研究概要(実験条件)

実験砂として混合する粒径の組み合わせ、混合比率を変えて、実験ケースを作成

土砂設置長さ(cm)	90
土砂厚さ(cm)	5
土砂設置幅(cm)	7
V(cm ³)(空隙込み)	3150
水路勾配(°)	15,20,25



動画へ⇒

実験砂として混合する粒径

実験ケース (大粒子 : 小粒子 = 1 : 4)

V(cm ³)(空隙込み)	大 (20%) / 小 (80%)		先頭部1秒間の P _L ※ 3回施行の平均値		
	大 (20%)	小 (80%)	15°	20°	25°
Case 5	10.7mm	7.1mm	0.379	0.232	0.240
Case 6	10.7mm	3.0mm	0.340	0.251	0.234
Case 7	10.7mm	1.4mm	0.265	0.242	0.201
Case 8	7.1mm	3.0mm	0.294	0.251	0.211
Case 9	7.1mm	1.4mm	0.257	0.228	0.196
Case 10	3.0mm	1.4mm	0.242	0.181	0.169

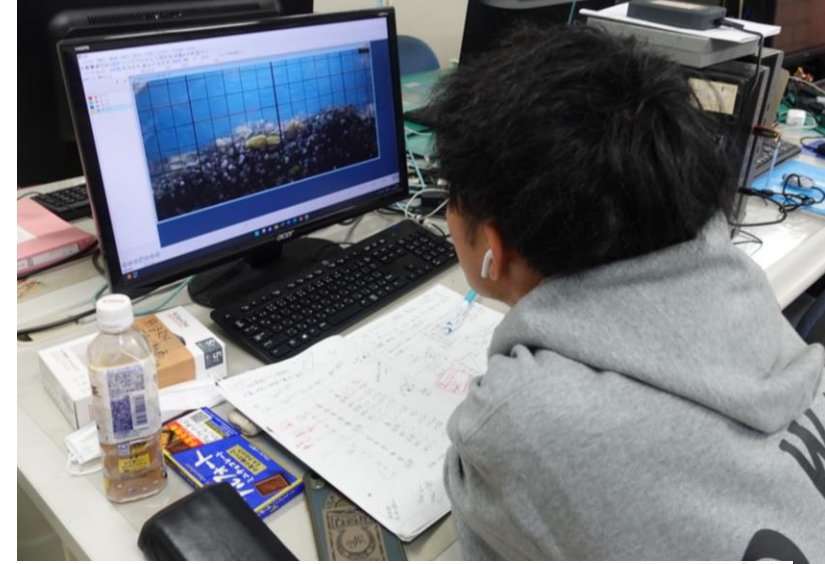
実験ケース (大粒子 : 小粒子 = 1 : 1)

大 (50%) / 小 (50%)		先頭部1秒間の P _L ※ 3回施行の平均値		
大 (50%)	小 (50%)	15°	20°	25°
1575	1575	0.700	0.649	0.629
10.7mm	7.1mm	0.682	0.704	0.686
10.7mm	3.0mm	0.598	0.685	0.655
10.7mm	1.4mm	0.625	0.769	0.699
7.1mm	3.0mm	0.619	0.632	0.562
7.1mm	1.4mm	0.517	0.605	0.524
3.0mm	1.4mm			

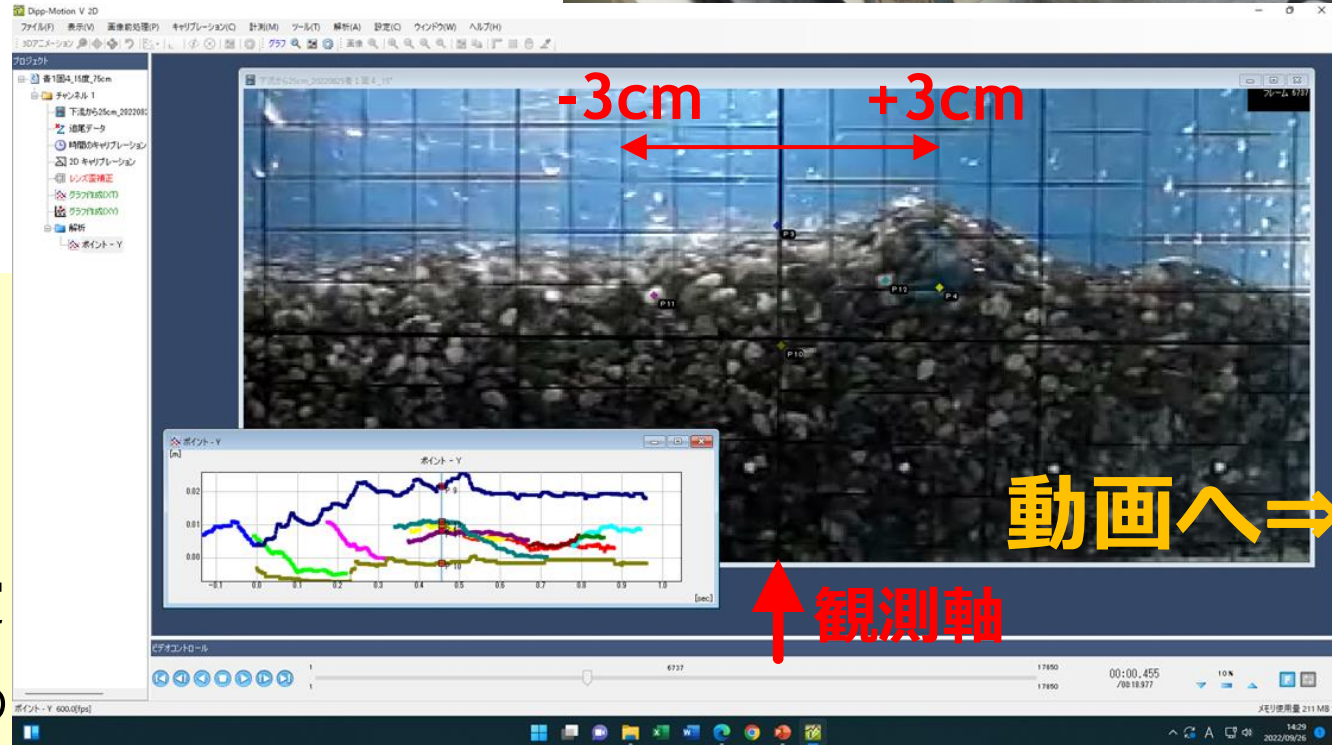
3. 研究概要(実験条件)

使用ソフト : Dipp-Motion

市販ビデオカメラ, スマホ動画, ハイスピードカメラ, エコー画像, 顕微鏡画像などの業務用カメラまで、あらゆるカメラで得られる動画画像から画像処理(座標化)を行い、物理量(変位・加速度・距離・角度など)を計算できるソフトウェア



- ・ 撮影動画を1コマずつ再生可能
- ・ 動画のデイタイザー



先頭部砂礫の移動軌跡追跡の概要

- ★ 観測軸に土石流先頭部到達後0~1秒間で、観測軸から-3cm~+3cmの範囲内で動いている砂礫を対象
- ★ 観測軸における水位と河床位の時間変化も測定
- ★ 大粒子, 小粒子を20個程度選定し, それぞれの粒子の1コマごとの重心位置をプロット(座標化)

Dipp-Motionによる砂礫移動軌跡追跡の様子 (10.7mm:3.0mm = 1 : 4, 流下距離75cm地点) 12

4. 実験結果と考察

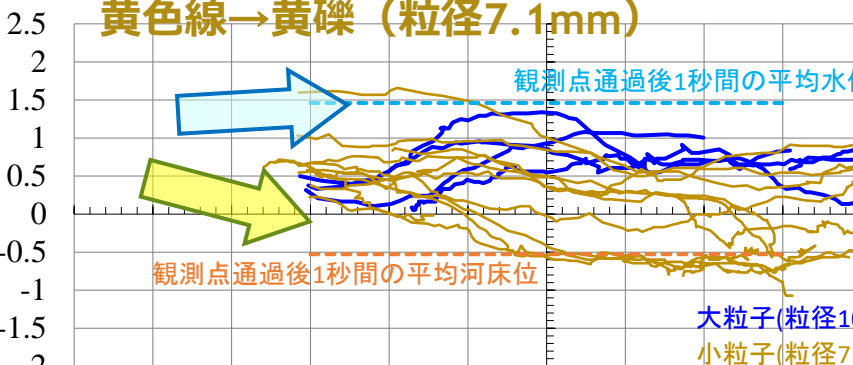
青線→青礫 (粒径10.7mm)

黄色線→黄礫 (粒径7.1mm)

全体平均移動速度(青)
 流下方向: 15.24cm/s
 鉛直方向: 1.03cm/s

全体平均移動速度(黄)
 流下方向: 11.14cm/s
 鉛直方向: -1.29cm/s

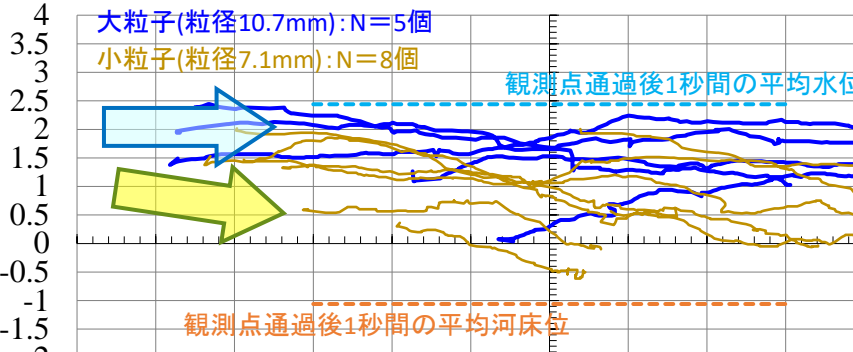
勾配15°



大粒子(粒径10.7mm): N=5個
 小粒子(粒径7.1mm): N=13個

流下方向: 25.00cm/s
 鉛直方向: 0.41cm/s
 流下方向: 18.69cm/s
 鉛直方向: -3.16cm/s

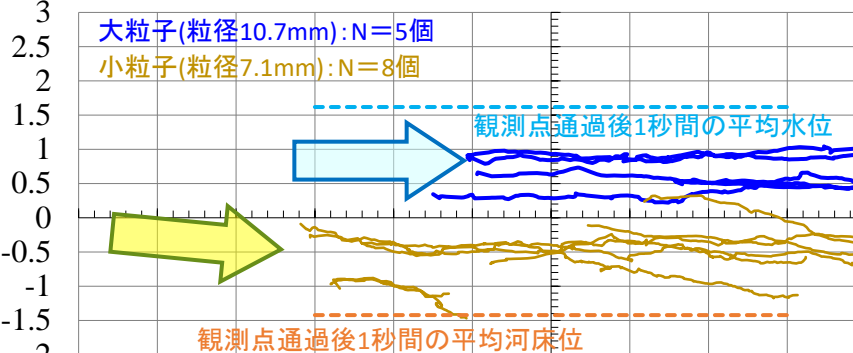
勾配20°



大粒子(粒径10.7mm): N=5個
 小粒子(粒径7.1mm): N=8個

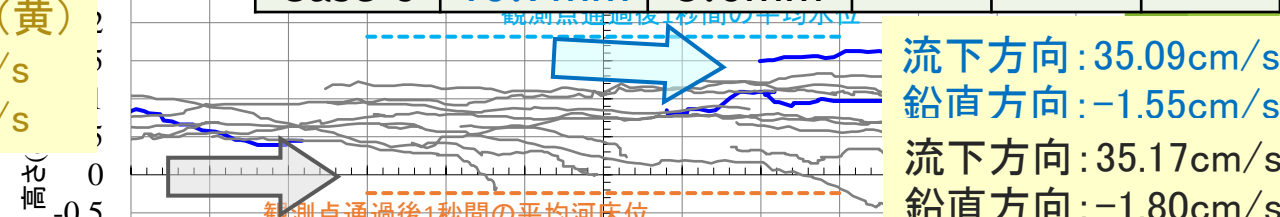
流下方向: 21.72cm/s
 鉛直方向: 0.20cm/s
 流下方向: 14.36cm/s
 鉛直方向: -1.33cm/s

勾配25°



大粒子(粒径10.7mm): N=5個
 小粒子(粒径7.1mm): N=8個

	大(20%)	小(80%)	先頭部1秒間の P_L		
			15°	20°	25°
Case 5	10.7mm	7.1mm	0.379	0.232	0.240
Case 6	10.7mm	3.0mm	0.340	0.251	0.234



流下方向: 35.09cm/s
 鉛直方向: -1.55cm/s
 流下方向: 35.17cm/s
 鉛直方向: -1.80cm/s

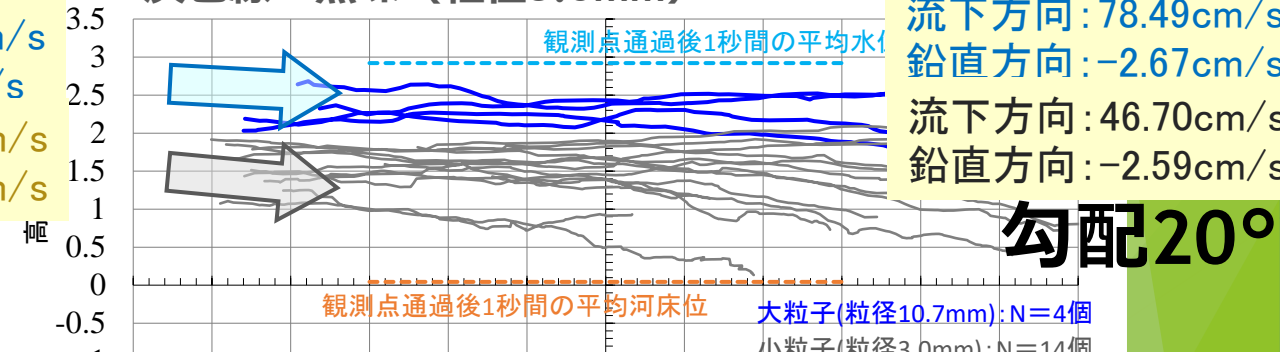
青線→青礫 (粒径10.7mm)

灰色線→黒礫 (粒径3.0mm)

大粒子(粒径10.7mm): N=4個
 小粒子(粒径3.0mm): N=14個

流下方向: 78.49cm/s
 鉛直方向: -2.67cm/s
 流下方向: 46.70cm/s
 鉛直方向: -2.59cm/s

勾配20°



大粒子(粒径10.7mm): N=4個
 小粒子(粒径3.0mm): N=14個

- 小粒子は河床方向に落ち込む
- **緩勾配の方が**小粒子の落ち込みが顕著
- 同じ大粒子径では、**小粒子が大きい方が**河床鉛直方向の大小粒子の移動方向の違いが顕著
 →移動速度の鉛直分布は？

上流側

観測点(流下距離75cm地点)からの距離 (cm)

下流側

上流側

観測点(流下距離75cm地点)からの距離 (cm)

下流側

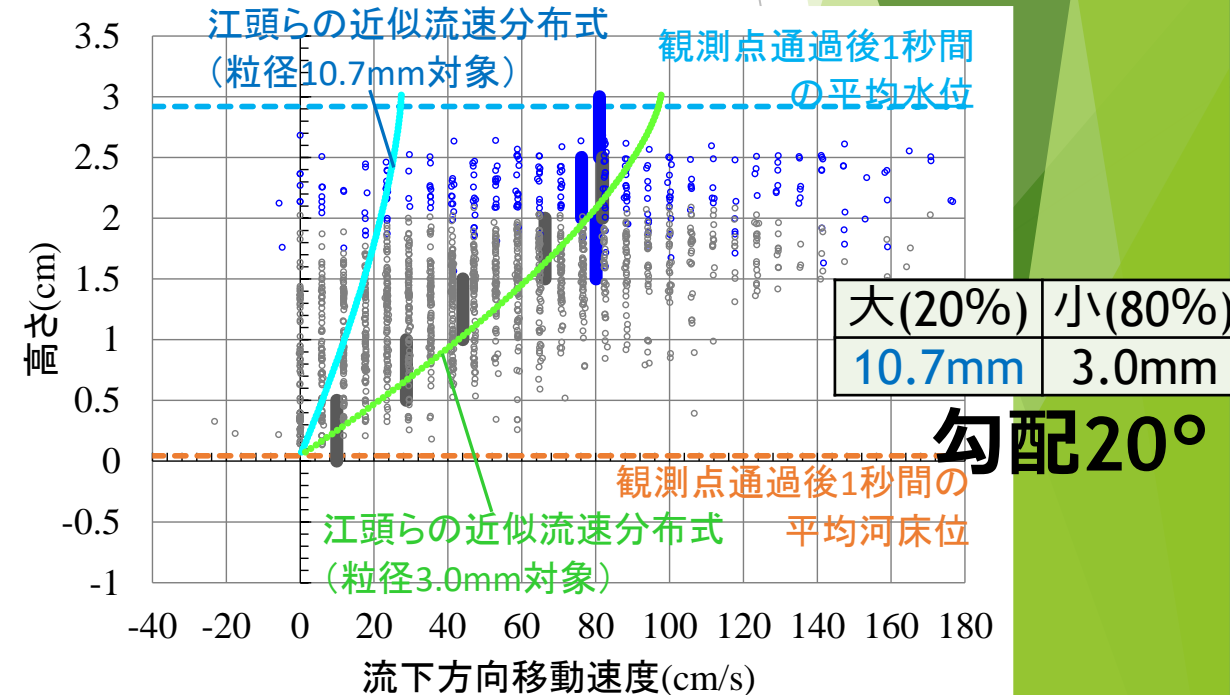
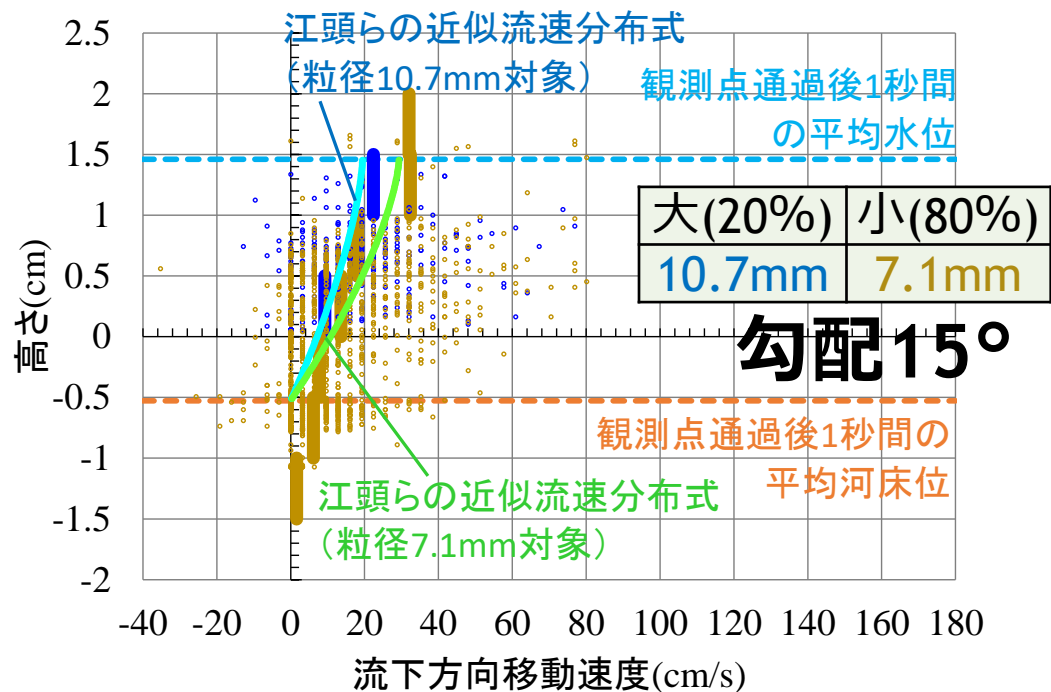
Dipp-Motionで座標化した砂礫移動軌跡 (左図10.7mm:7.1mm=1:4, 右図10.7mm:3.0mm=1:4)

江頭らの近似流速分布（鉛直土砂濃度を一定）による流速分布の妥当性検証

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{2}{3} \left[\frac{\left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c} + 1 \right\}}{f_d + f_f} - \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c} \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{1/5} \tan \Phi_s / \tan \theta}{f_d + f_f} \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left\{ 1 - \left(\frac{h-z}{h} \right)^{3/2} \right\}$$

$$f_d = k_d (1 - e^2) \frac{\sigma}{\rho} \bar{c}^{1/3} \quad f_f = k_f (1 - \bar{c})^{5/3} / \bar{c}^{2/3}$$

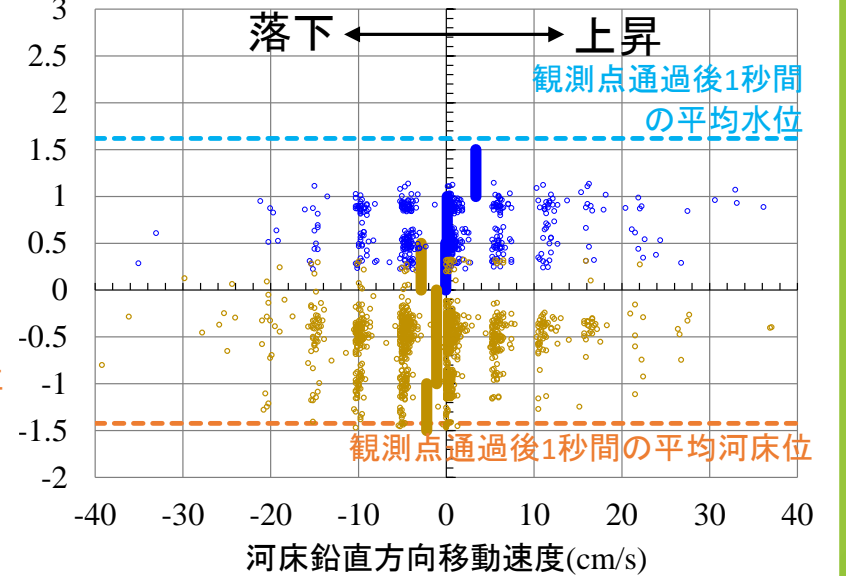
$u(z)$: 高さ z における流速, u_* : 摩擦速度($=\sqrt{gh\sin\theta}$), g : 重力加速度, θ : 河床勾配, σ : 砂礫の質量密度, ρ : 水の質量密度, c : 砂礫の断面平均体積濃度, c_* : 河床堆積物の充填濃度, h : 土石流流動深, d : 砂礫の代表粒径, f_d : 非弾性衝突によるせん断応力に関する係数, f_f : 間隙流体のレイノルズ応力に関する係数, k_d, k_f : 実験定数 (それぞれ0.0828, 0.25), e : 反発係数 (0.80)



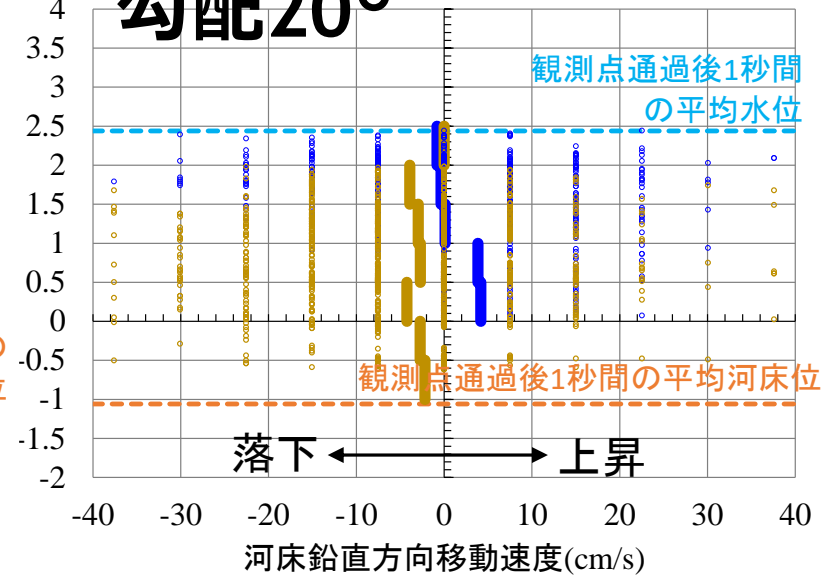
大小粒径砂礫の1コマごとの移動速度 (流下方向) ※図中の縦線は0.5cmごとの鉛直平均値を示す

大(20%)	小(80%)
10.7mm	7.1mm

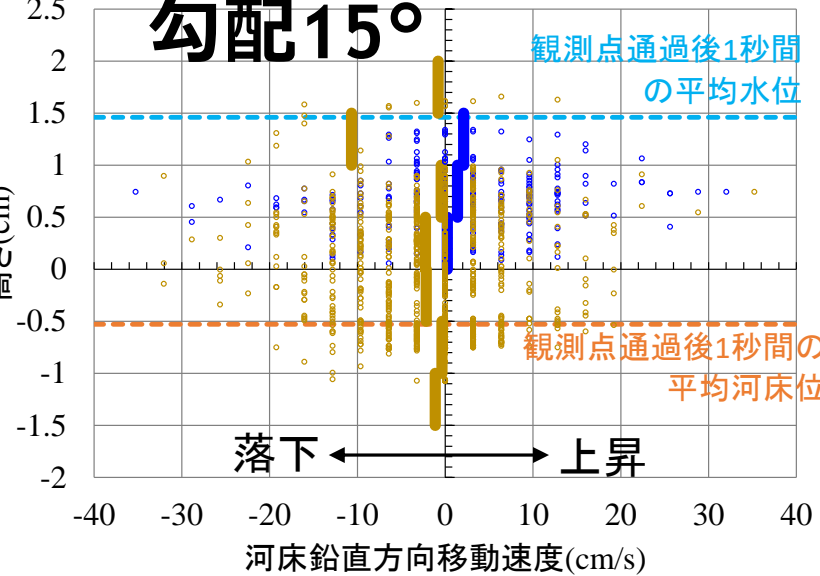
勾配25°



勾配20°

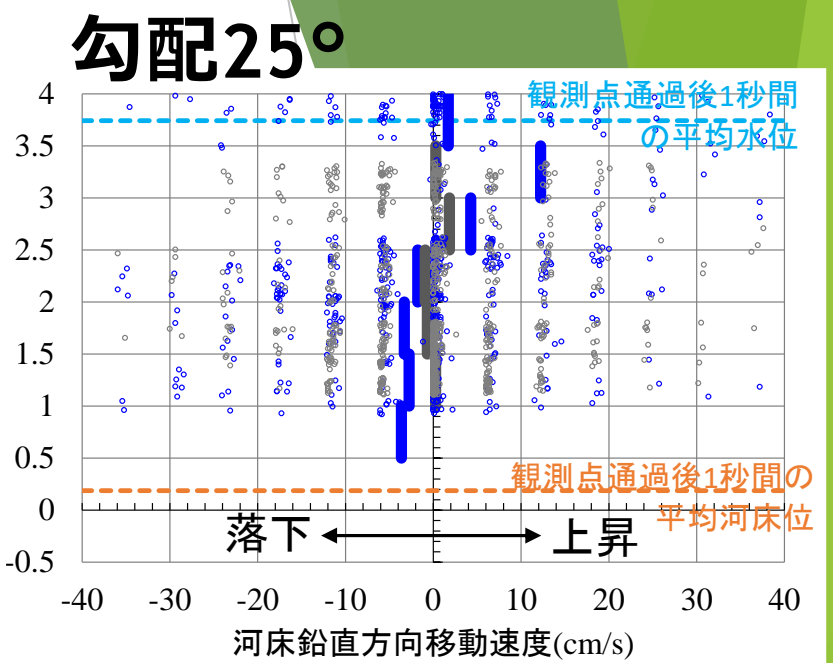
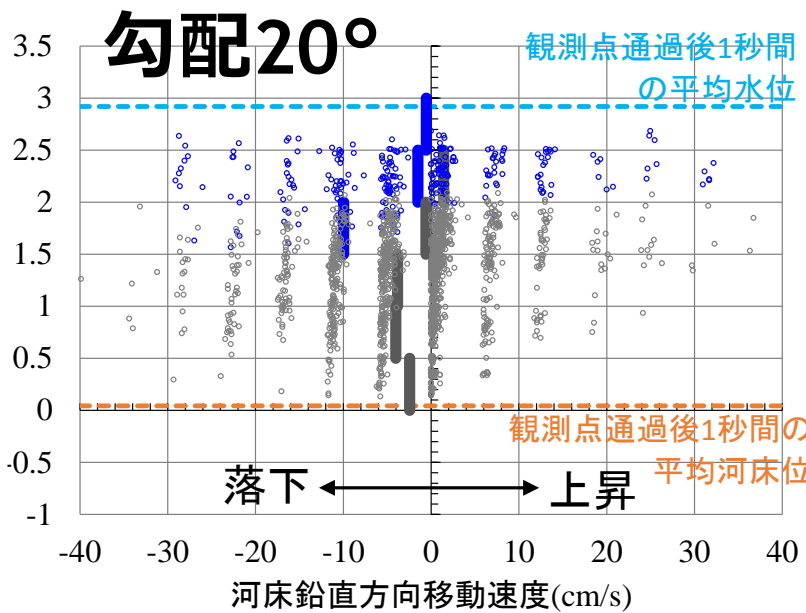
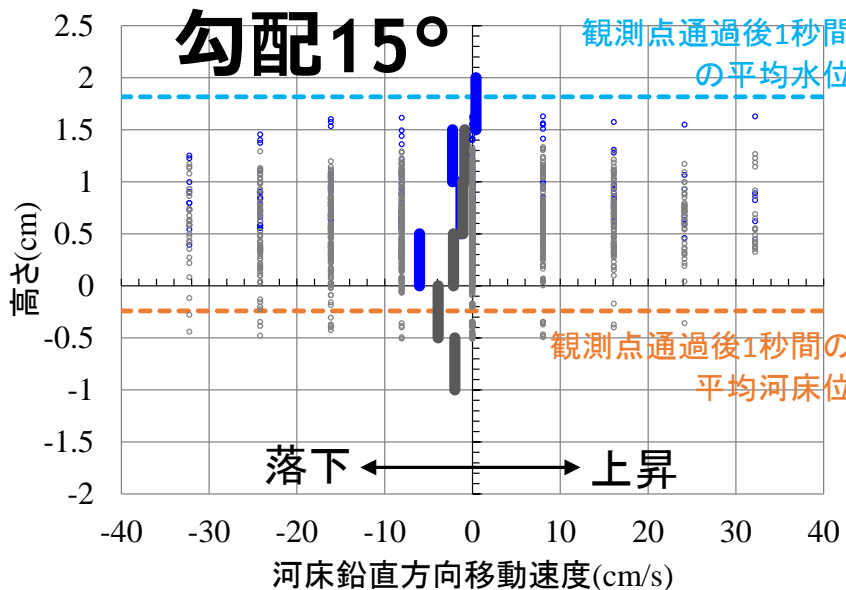


勾配15°



河床面からの高さ(cm)	0.5cm毎の鉛直方向移動速度平均値(cm/s) ※上昇方向を正とする, ()はサンプル数					
	10.7mm大粒子径			7.1mm小粒子径		
	15°	20°	25°	15°	20°	25°
-1.0~-0.5	—	—	—	-1.144 (14)	—	—
-0.5~0.0	—	—	—	-0.371 (458)	—	—
0.0~0.5	0.234 (137)	—	—	-2.153 (250)	-2.192 (48)	-2.223 (199)
0.5~1.0	1.396 (179)	—	—	-2.255 (341)	-2.728 (135)	-1.098 (527)
1.0~1.5	2.105 (35)	4.176 (63)	—	-0.447 (265)	-4.242 (241)	-1.112 (642)
1.5~2.0	—	3.852 (80)	-0.055 (208)	-10.679 (9)	-2.719 (423)	-2.865 (48)
2.0~2.5	—	0.120 (312)	0.106 (426)	-0.801 (12)	-2.952 (443)	—
2.5~3.0	—	-0.346 (304)	3.378 (29)	—	-3.915 (144)	—
3.0~3.5	—	-0.809 (158)	—	—	—	—

大(20%)	小(80%)
10.7mm	7.1mm



河床面からの高さ(cm)	0.5cm毎の鉛直方向移動速度平均値(cm/s) ※上昇方向を正とする, ()はサンプル数					
	10.7mm大粒子径			3.0mm小粒子径		
	15°	20°	25°	15°	20°	25°
-1.0~-0.5	—	—	—	-2.013 (4)	—	—
-0.5~0.0	—	—	—	-3.906 (132)	—	—
0.0~0.5	-6.042 (16)	—	-3.623 (19)	-2.171 (872)	-2.448 (119)	—
0.5~1.0	-1.313 (319)	—	-2.751 (91)	-1.083 (632)	-4.014 (305)	0.260 (350)
1.0~1.5	-2.280 (53)	—	-3.293 (98)	-0.877 (202)	-3.836 (510)	-0.671 (227)
1.5~2.0	0.403 (20)	-9.963 (43)	-1.771 (202)	—	-0.599 (496)	-0.911 (130)
2.0~2.5	—	-1.515 (209)	4.260 (75)	—	1.429 (24)	1.830 (81)
2.5~3.0	—	-0.547 (39)	12.234 (22)	—	—	0.285 (124)
3.0~3.5	—	—	1.699 (111)	—	—	—

5. まとめと今後の予定

- 移動軌跡追跡データを鉛直方向の区間ごとに平均化させることで、流下方向流速分布が**小粒子対象の流速分布式と一致**
 - 小粒子が支配的な2粒径混合砂礫土石流では、流れが小粒子によって受け持たれる（宮本(1985)）
- 河床鉛直方向の移動速度分布は明確ではなかった
 - （→深さ別の鉛直方向の移動速度に違いはない？）
 - 移動軌跡追跡の対象砂礫が少なく，砂礫の移動軌跡の読み取りデータを増やす。
- 実験結果と**混合粒径土石流の大粒子に関する既往提案上昇速度式**（Takahashi(1980), 宮本(1985)など）との比較

ご清聴ありがとうございました。