



平成28年度基礎水理シンポジウム

2016年12月5日 @土木学会講堂

土石流中の微細土砂の挙動について

筑波大学 堀田紀文

本日の発表内容

- ◆ 土石流の間隙水圧
 - 粒子間隙の乱れの影響を評価→応力構造
 - ◆ 抵抗係数に基づいた土石流の分類
 - 土石流の構成則の適用性と流れの遷移
 - ◆ 土石流における層流から乱流への遷移機構
 - レイノルズ数と間隙水圧による検討
- 土石流を統一的／シンプルに理解したい
- ◆ 混合粒径土石流における「微細土砂」

ここで言う土石流研究とは...

- Continuity equation for debris flow:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = E$$

- Continuity equation for sediment:

$$\frac{\partial(\bar{c}h)}{\partial t} + \frac{\partial(c_t M)}{\partial x} = E\bar{c} - c_* M$$

- Momentum equation:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \tau_0$$

H : flow depth,

M : discharge rate at the unit width,

E : entrainment rate at the bed,

$\bar{c}$: mean sediment concentration in the cross section,

c_t : transport sediment concentration,

c_* : sediment concentration in channel deposition,

β : compensation coefficient of momentum,

u : cross-sectional average velocity,

g : acceleration due to gravity,

H : elevation of flow surface ($H = h + z_b$, where z_b is the elevation of the bed),

τ_0 : shear stress at the bed,

ρ_m : density of debris flow.

- 土石流をひとつの流体とみなし(一流体モデル), 浅水流方程式で記述することを目指す.
- 構成則(:応力構造)と浸食速度式が分かれば良い.

土石流の間隙水圧

(堀田ら, 1998; Hotta, 2011)

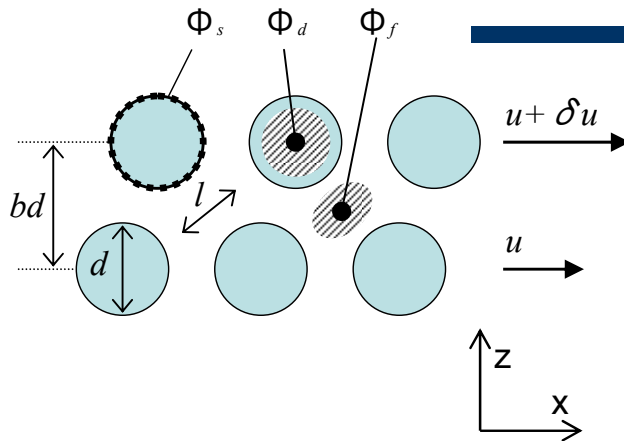
◆ 背景

- 土石流の応力構造についてはいくつか考え方があるものの、実験的には未確認
- 回転円筒水路を用いれば、従来静水圧と仮定されてきた土石流の間隙水圧が(模擬的に)測定可能

◆ 目的

- 粒子流の間隙水圧の測定を行い、土石流内部の応力構造について知見を得る

土石流の構成則



流れの中で層流状に動く粒子の運動によって生じるエネルギー散逸に基づきモデル化.

$$\begin{aligned}
 p_d &= k_g e^2 \sigma d^2 c^{1/3} (\partial u / \partial z)^2 \\
 p_s &= \alpha (p_s + p_d) \quad \alpha = (c / c_*)^{1/5} \\
 p_w &= \rho g \cos \theta (h - z) \\
 \tau_s &= p_s \tan \phi_s \\
 \tau_d &= k_g \sigma (1 - e^2) d^2 c^{1/3} (\partial u / \partial z)^2 \\
 \tau_f &= k_f \rho d^2 (1 - c)^{5/3} / c^{2/3} (\partial u / \partial z)^2
 \end{aligned}$$

砂礫粒子の衝突による応力

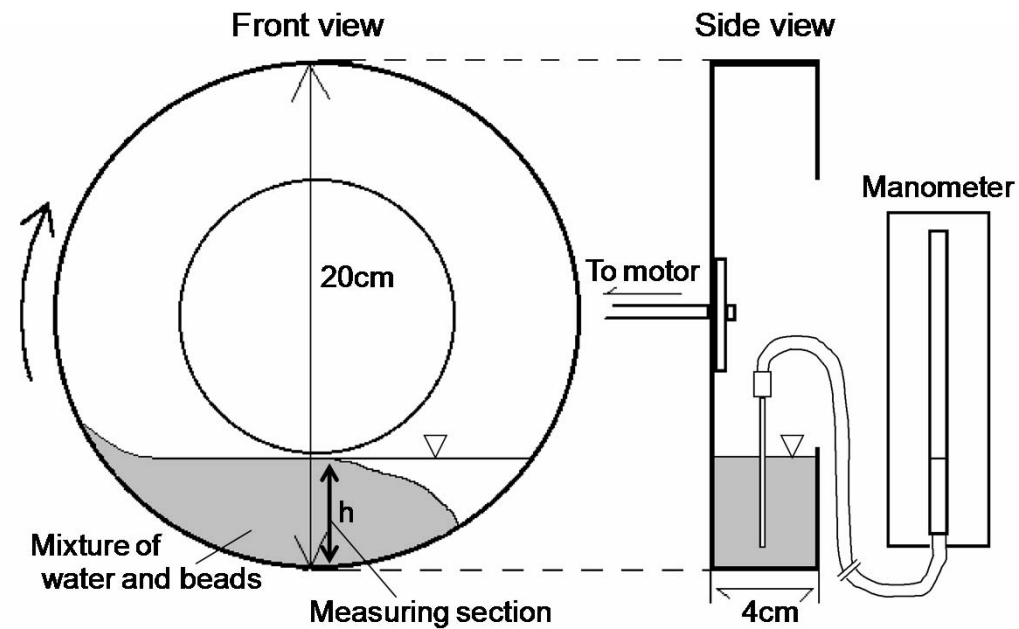
$$\begin{aligned}
 p &= p_s + p_d + p_w \\
 \tau &= \tau_s + \tau_d + \tau_f
 \end{aligned}$$

砂礫粒子の 間隙流体における応力
接触摩擦による応力 (レイノルズ応力)

ただし, d は粒径, u は流速, c_* は堆積層の砂礫濃度, e は反発係数, ϕ_s は内部摩擦角, k_g は定数 (0.0828), k_f は土石流間隙の形状係数であり, 0.16–0.25の値を取る.

(Egashira et al., 1997)

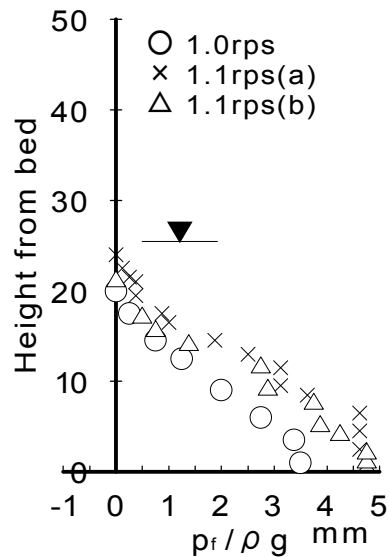
実験装置



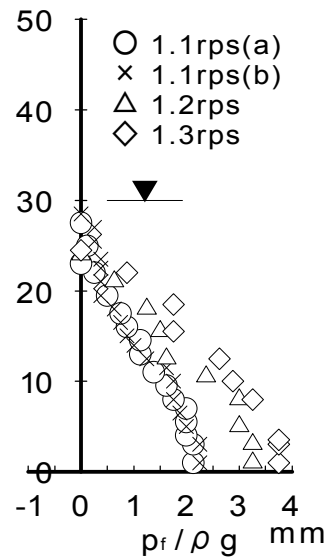
回転円筒水路

粒子の衝突の影響を極力可能な限り除外するため、回転円筒水路を(製作して)用いた。間隙水圧はピトー管によって測定し、マノメーターで読み取った。

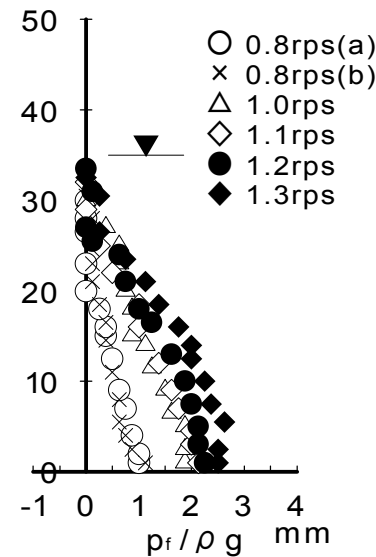
実験結果：間隙水圧分布



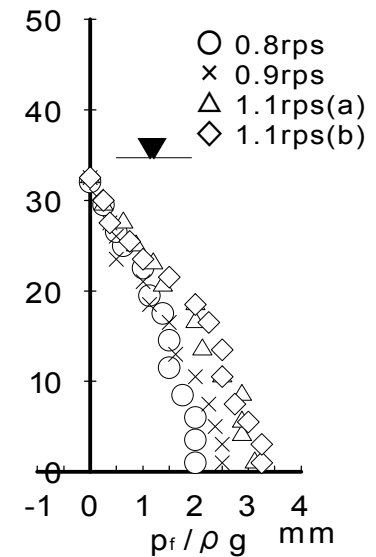
(b) 2mm glass beads



(d) 4mm glass beads



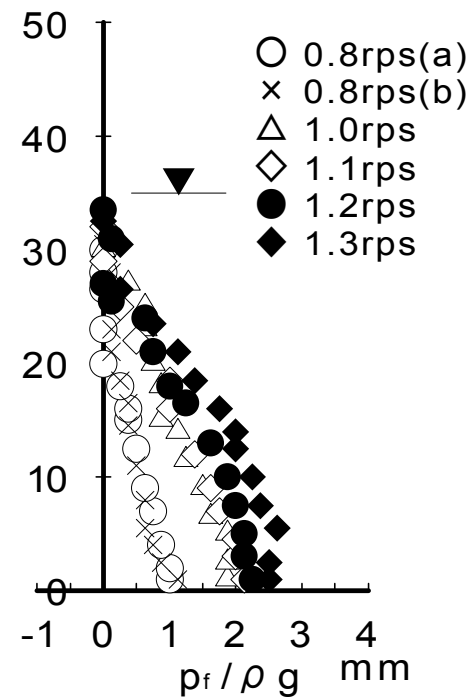
(f) 6mm glass beads



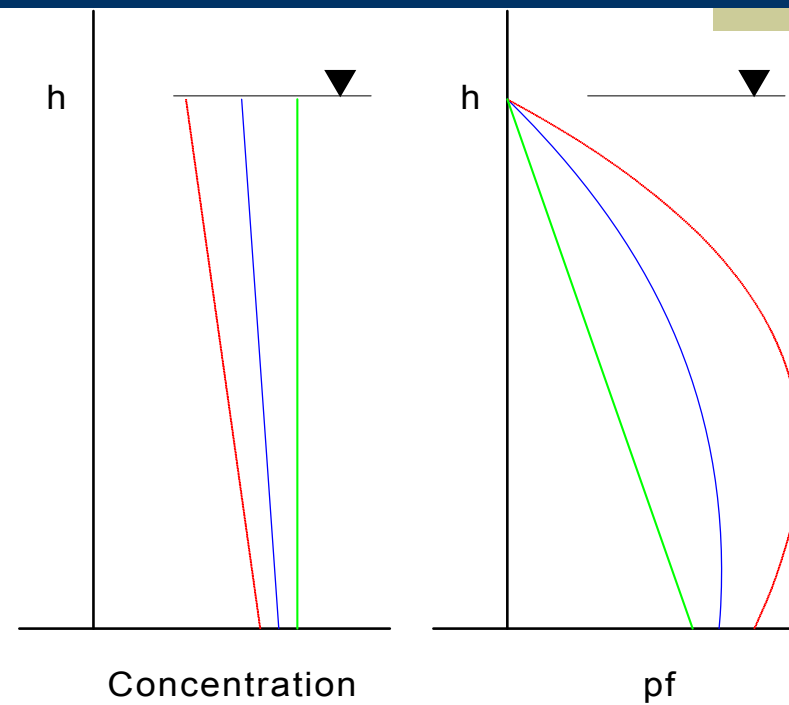
(h) 6mm pla. beads

土石流の間隙水圧は静水圧より大きな値を示す。
実験条件によって値は異なり，分布形も変化。

レイノルズ応力としての間隙水圧

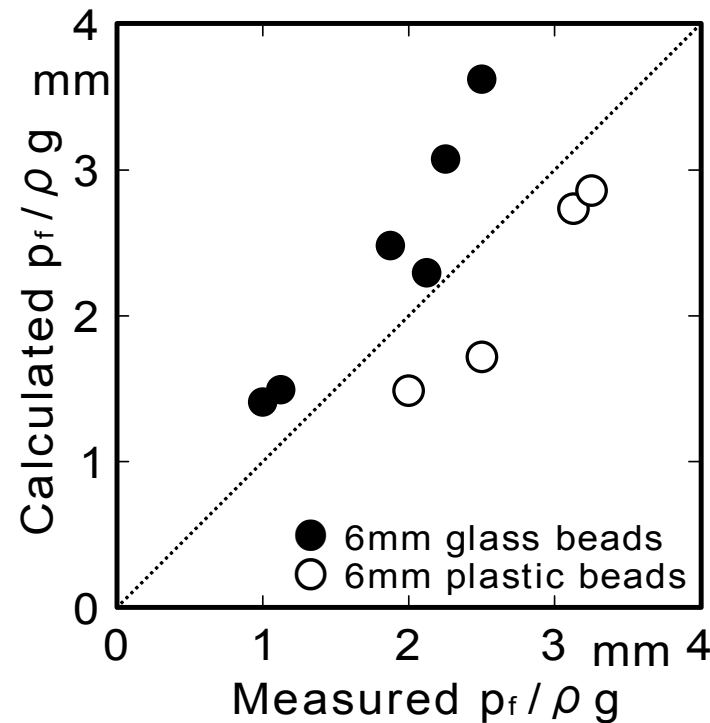


(d) 6mm glass beads



間隙水圧の分布形はレイノルズ応力と考えれば(濃度分布によって)説明可能.

レイノルズ応力としての間隙水圧



水路床での間隙水圧を実験値と理論値で比較

→概ね一致

(小粒径のケースは除外: 浸透流の影響あるため)

結果の意味

実験で確認済み(宮本, 1985)

$$\begin{array}{l} p = p_s + p_d + p_w \\ \tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f \end{array}$$

この項が
確認できた

既知(外力と釣り合い)

実験的には長らく未確認

土石流の構成則はいくつか提案されており, 応力構造についての考え方はそれぞれ異なる(椿ら, 1982; 高橋ら, 1996; Egashira et al., 1997).

間隙水圧の測定によってEgashira et al. (1997) の妥当性を確認?

抵抗係数に基づいた土石流の分類

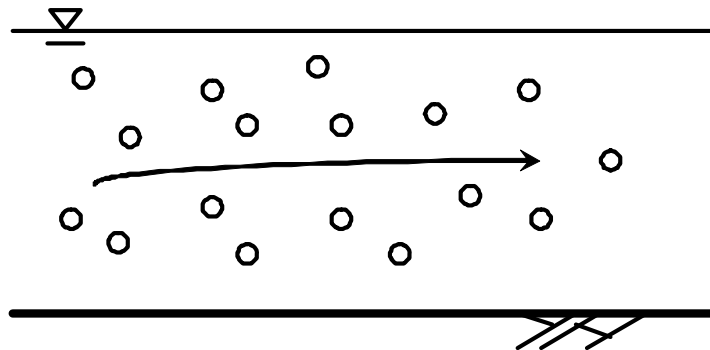
(Hotta & Miyamoto, 2008)

- ◆ 「構成則」の適用性
 - 幅広い現象である土石流をどこまで説明可能か？
- ◆ 過去の実験データを抵抗係数を用いて分類
 - 算出に必要なパラメータが少なく、多くの実験データを活用することができる
 - 土石流の(理論的な)抵抗係数を構成則から導出
- ◆ 何を期待(予想)したか？
 - 水流と同様に、層流～乱流の遷移に伴い土石流の抵抗係数も系統的に変化するのでは？

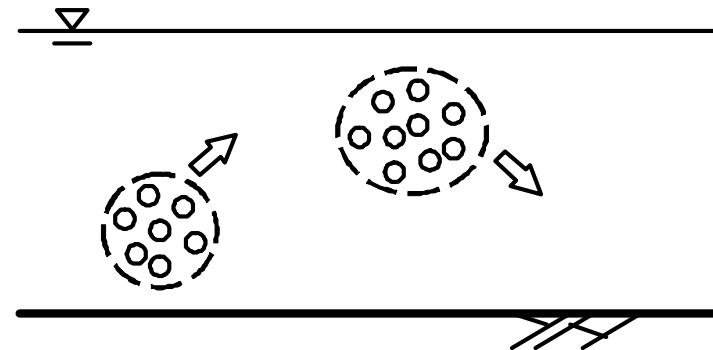
土石流における層流／乱流

流れの構造に着目

Laminar flow



Turbulent flow



それぞれ、さまざまな流れが報告されているが...

層流・・・砂礫粒子の流線は平行で、混合なし.

石礫型土石流の構成則は層流状態で導出.

乱流・・・砂礫粒子は混合しつつ流下.

抵抗係数 (f-h/d関係)

$$f = \frac{2gh \sin \theta}{u_m^2}$$

----- 実験値から求める抵抗係数. 流動深, 平均流速, 水路勾配を用いて計算

$$f = \frac{25}{2\rho_m} K(c) \left(\frac{h}{d} \right)^{-2}$$

$$K(c) = \frac{1}{\alpha} k_g \sigma e^2 c^{\frac{1}{3}} + k_g \sigma (1 - e^2) c^{\frac{1}{3}} + \rho k_f \frac{(1 - c)^{5/3}}{c^{2/3}}$$

----- 固定床上の石礫型土石流における理論的な抵抗係数. 土石流の構成則から濃度cと相対水深h/dの関数として導出される. (流速分布を仮定)

$$f = 2 \left(A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \right)^{-2}$$

----- 粗面乱流の抵抗係数(理論値)で, 粗度 k_s による相対水深(h/k_s)の関数となる

k_s を d と同程度と仮定すれば, f - h/d 関係で三者を比較可能

実験データの選定

以下のような基準で検討に用いる実験データを選定.

--一定勾配の水路を用いて定常・等流で実施された
均一粒径の実験

--固定床上の実験

固定床上の実験についても, 実験データから平衡濃度 c_e (高橋, 1977)が計算できる場合には, 濃度 c と c_e との比較を行い, $c > c_e$ となるケース(: 堆積が生じていると考えられる)は除いた.

$$c_e = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi_s - \tan \theta)}$$

検討に用いたデータ

Table 1 Summary of experiments analyzed in the study

Reference	Material	d (mm)	Inclination (deg)	h/d	c (%)	Comparable with c_e ?	Number of cases examined
Takahashi et al. (1996)	sand	2.6, 3.6	16, 18	5.1, 6.6	29, 30	Yes	2
Ashida et al. (1988)	sand, glass beads	2.7–7.8	18–28	3.0–7.4	25–51	Yes	18
Ashida et al. (1986)	pearl clay	0.01	5.8	1100–5300	16–23	No	13
Mainali and Rajaratnam (1994)	sand	0.21–0.42	16	81–229	3–44	No	28
Egashira et al. (1989)	sand, glass beads	0.9–4.1	16–28	4.0–14.1	24–43	Yes	16
Arai and Takahashi (1996)	sand	0.31	17	35, 42	23, 40	No	2
Egashira et al. (1993)	sand	0.16	3, 7	61–77	0–9	Yes	11
Suzuki et al. (2003)	sand	2.2, 2.9	13, 17	6.3–13.2	15–37	Yes	92
Egashira et al. (1990)	sand	1.4, 3.7	0.72–15	6–18	0–24	Yes	21
Total							203

9つの実験(論文)から全203ケース.
濃度や粒径についても幅広い実験を収集できた.

結果：抵抗係数と h/d

h/d で綺麗に整理される

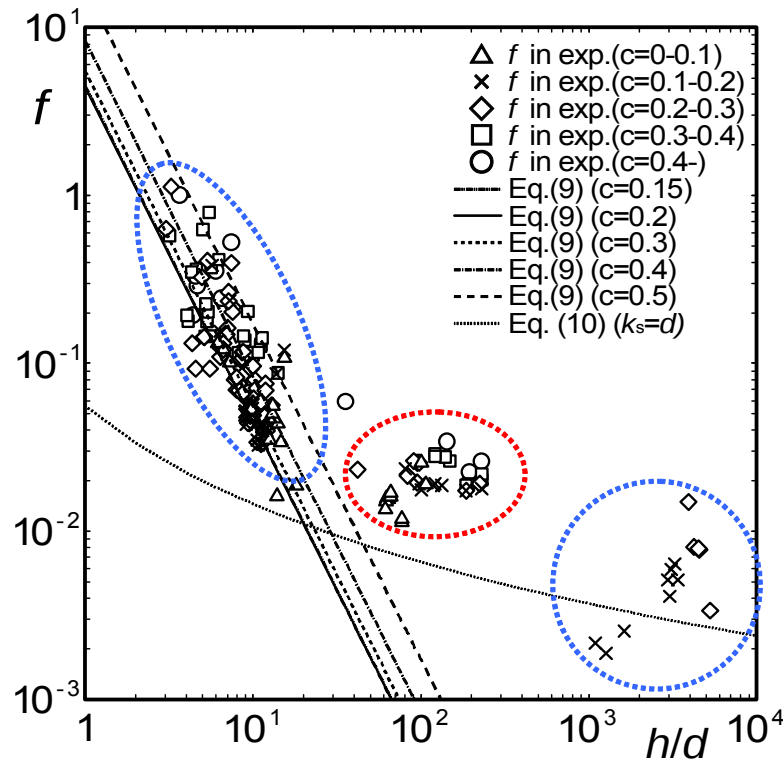


Fig. 3 Relationship between f and h/d for all experiments

3つのグループに分けられた

$h/d: <20$

石礫型土石流における抵抗係数の理論線と良好に対応.

$h/d: >1000$

清水乱流における抵抗係数の理論線とだいたい対応.

$h/d: 30-300$

2つの理論線から外れて分布

---- 流れの遷移が生じている？
なぜ理論線から外れる？

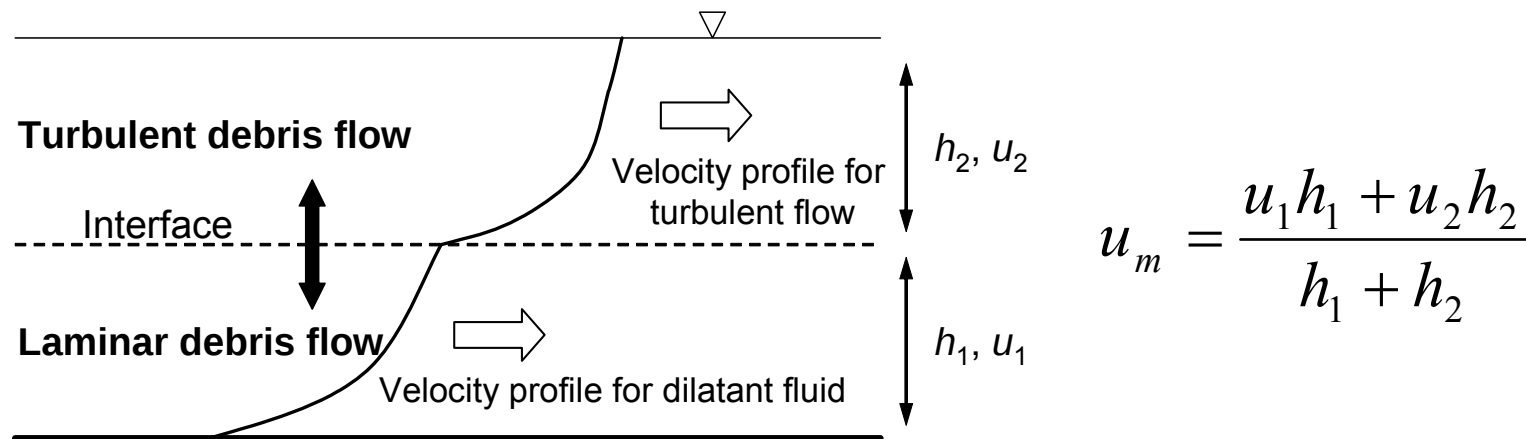
中間域に属した実験の概要

中間域に属した実験は、全て乱流型泥流を意図して実施された研究によるものだった。しかしながら、個別の実験結果をみると、必ずしも十分に発達した乱流ではない→遷移域
また、流れ内部のインターフェースについても指摘。

- 江頭ら(1993): 流れ中の粒子の追跡から、濃度が大きな実験で層流状の流れになっていることを見出し、レイノルズ応力に対する粒子間応力の増大の影響を指摘している。
- Mainali and Rajaratnam (1994): 粒径の大きな実験において、流れ内部に濃度や流速に関する(掃流状集合流動のような)インターフェースが存在する。
- 新井・高橋(1996): 流れ下層での乱れ強度が清水乱流と比較して小さい。

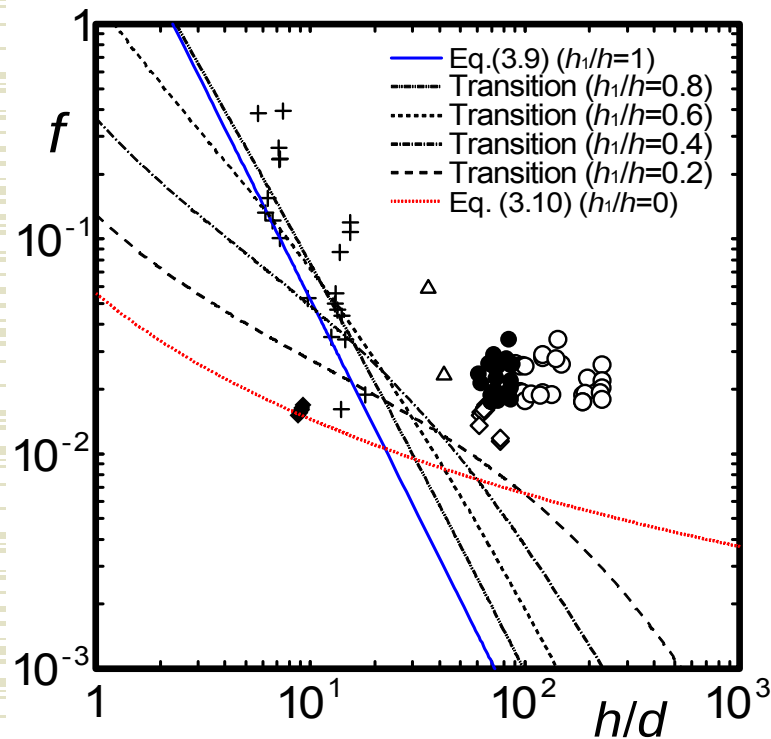
流れの遷移のモデル化

層流～乱流の遷移は土石流では(水流と異なり)連続的？



掃流状集合流動(高濱ら, 2000)や乱流型泥流(橋本・平野, 1995)に関する研究と同様の視点から, 層流～乱流への遷移域に属する流れの内部にはインターフェース(上層:乱流, 下層:層流)が存在していると仮定し, このインターフェースの位置が変化することによって流れの遷移が生じるとしてモデル化を行った. u_m を用いて抵抗係数を求める.

遷移域における f の変化



流れ内部のインターフェースの位置によって、 f と h/d の関係が変化することが分かる。

インターフェース位置が下がる(：流れ全層が乱流へ)につれて、石礫型土石流の理論線から清水乱流への理論線に。

その際、 f の理論線は遷移域の実験値をかすめるようにシフトする。

土石流における層流～乱流への遷移形態として、このようなインターフェースを考えることは有効では？

まとめ

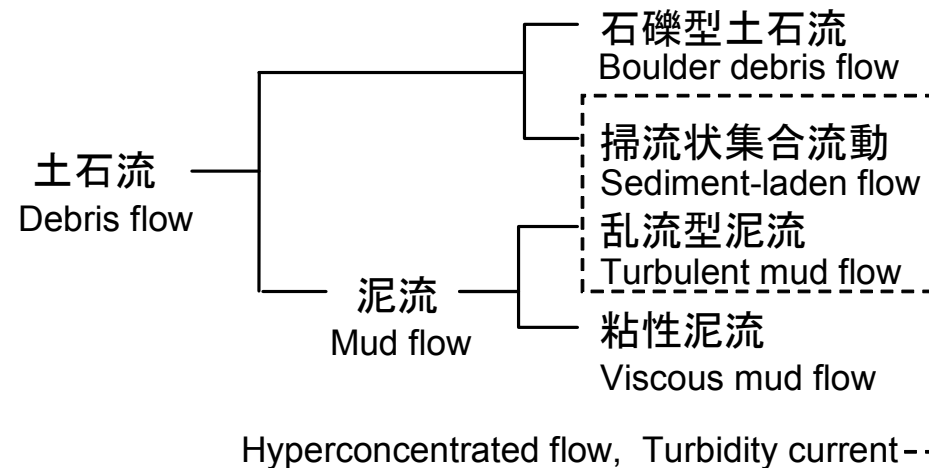
- ◆ 土石流においても、(水流と同様)層流と乱流が存在している.
- ◆ ただし、両者の遷移は(一気に生じる水流とは異なり)連続的に生じている可能性がある.
- ◆ 多様だと思われる土石流は、流れの構造に着目すれば統一的に理解可能？

土石流における 層流から乱流への遷移機構

土石流における層流～乱流の遷移を、 h/d を用いて整理することができた→**どのような意味をもつのか？**

- 一般に、層流～乱流への遷移はレイノルズ数によって記述される
- 土石流におけるレイノルズ数を提示した上で、層流～乱流への遷移との対応を確認
- 乱流状態では、粒子間応力（衝突・接触）が失われて、**間隙水圧～全圧**となると考えられるので、間隙水圧を測定すれば、流れの遷移が確認できる

土石流の分類



土石流の区分は主に現象面から行われてきた
流動機構との関連ではどのように土石流を分類する
ことが出来るのだろうか？

多様な流れを統一的に(なるべく単純に)取扱いたい

土石流のレイノルズ数

抵抗係数と同様,
構成則から導出.

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho_m L^2}{\mu} \approx \frac{\rho_m h^2}{\mu} = \frac{\rho_m}{F(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^2$$

$$\tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f = \mu (du/dy)^2$$

$$\text{Re}_2 = \frac{\rho_m UL}{\mu'} \approx \frac{\rho_m u_* h}{\mu'}$$

$$\tau - \tau_s = \tau_d + \tau_f = \mu' (du/dy)$$

土石流のレイノルズ数として,
これら以外は考えにくい
一長一短で, 検討が必要

--Re1: バッキンガムの π 定理から(ダイラタント流体として)
→シンプルで使い易いが, 物理的な解釈が困難

--Re2: 運動方程式中の慣性項と粘性項の比から(宮本・伊藤, 2003)
→物理的な意味が明確だが, 速度勾配を含むため, 流れ全層への適用が困難

実験

幅広い条件下での実験が必要なので開水路を利用

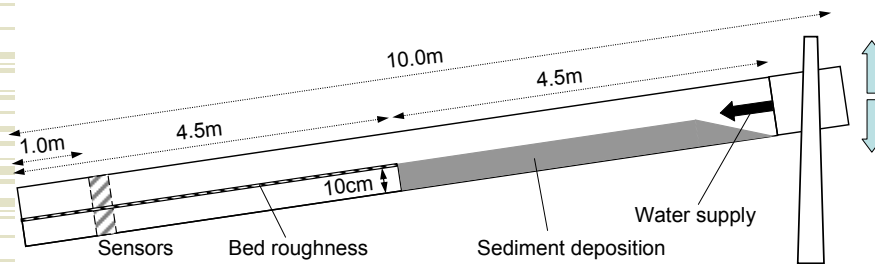


◆ Re_1 と Re_2 の計算のために

- 流量 Q_s
- 流動深 h
- 濃度 c

◆ 底面での間隙水圧の測定

- 圧力センサーの自作



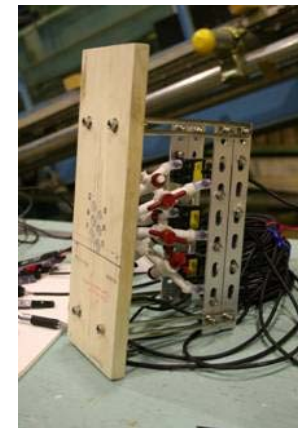
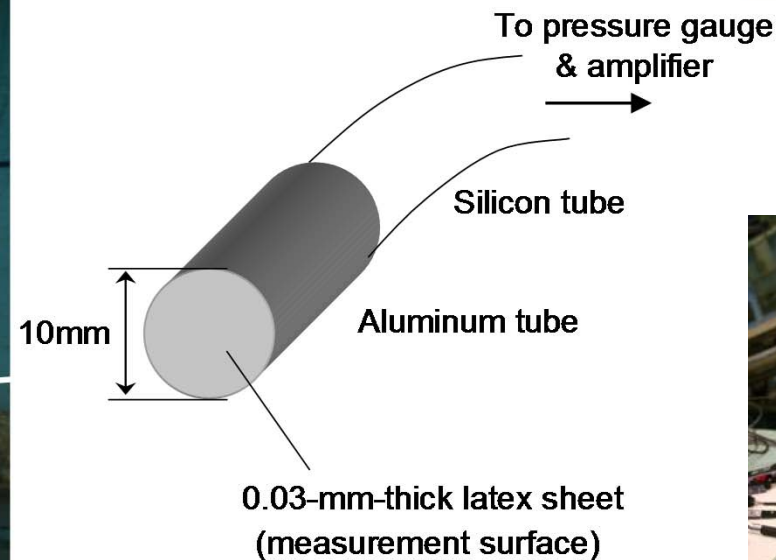
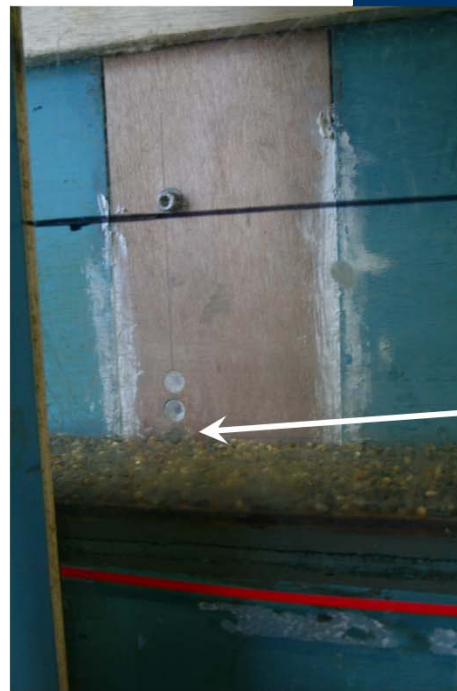
実験水路

実験条件

d (mm)	θ (i) (degree)	Water supplied (q) (l/sec)
0.2		1
0.7	13	2
1.3	15	3
2.2	17	3.5
2.9		

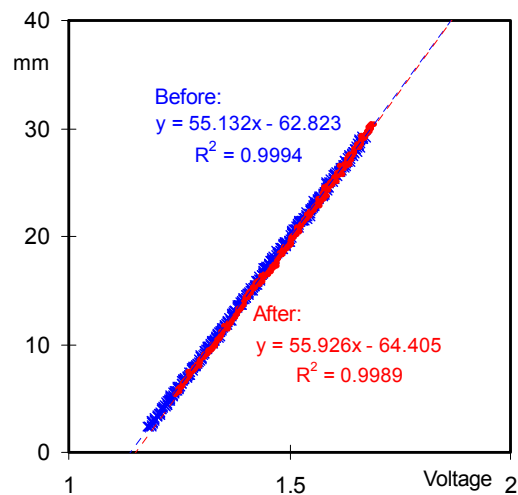
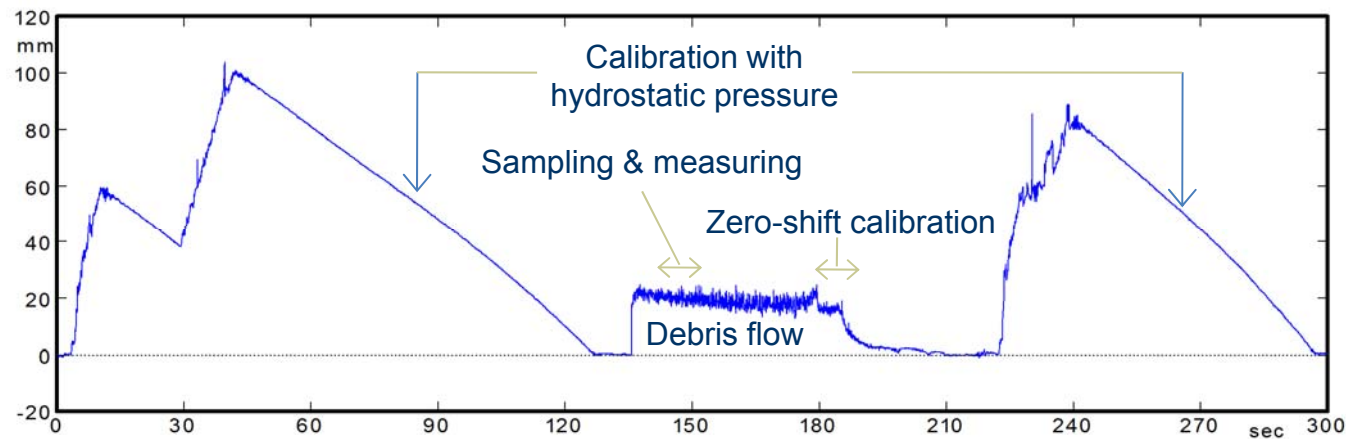
圧力センサー

開水路での土石流の間隙水圧測定は難しい



- ◆ 流動深が2～3cm程度のため、液体用の圧力センサーの使用は困難
- ◆ 気体用の微差圧センサーを使用
- ◆ 自作ダイヤフラムの取り付け(＋バルブ・・・内圧の解放のため)
- ◆ 実験前後に毎回校正を行った

圧力センサーの校正

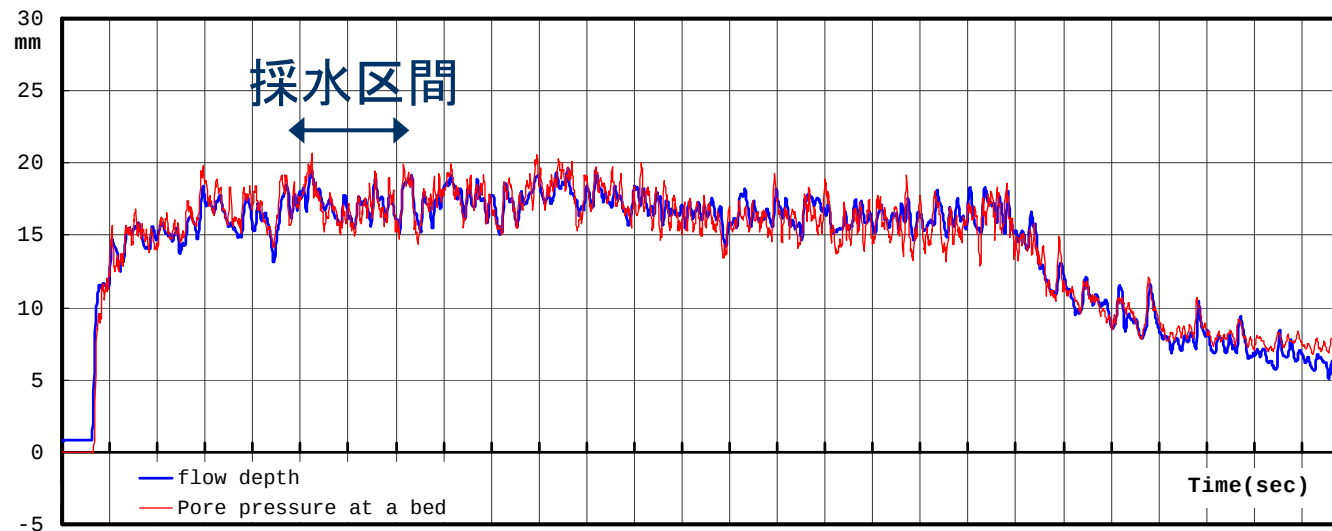


実験で行う一連の作業

実験前後の校正が一致したときのみ
データを使用(ダイアフラムはよく破損する
ので)

土石流の流下実験の終盤に水のみを流
して、ゼロ値の確認／補正も行った

流動深と間隙水圧の波形



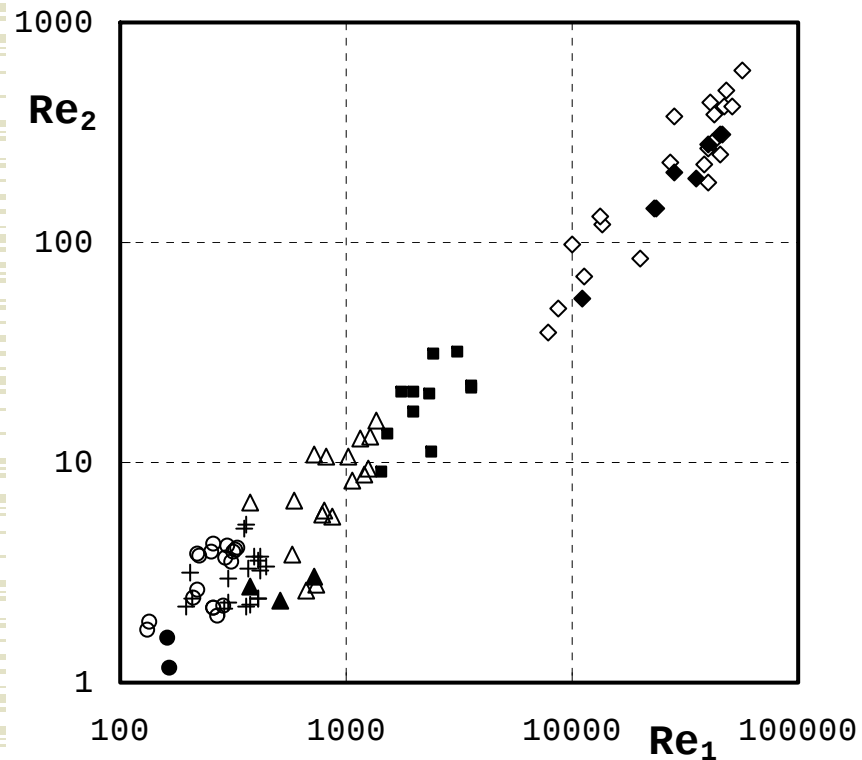
(a) d1.3i13q2-3

圧力測定の場合

(Hotta, 2012)

流動深と間隙水圧の変動はよく対応する
この例では、両者の値にほとんど違いがないことから、底面での間隙水圧は静水圧に近いことが分かる
各実験の間隙水圧は採水区間の値から求める

実験結果: Re_1 と Re_2 の比較



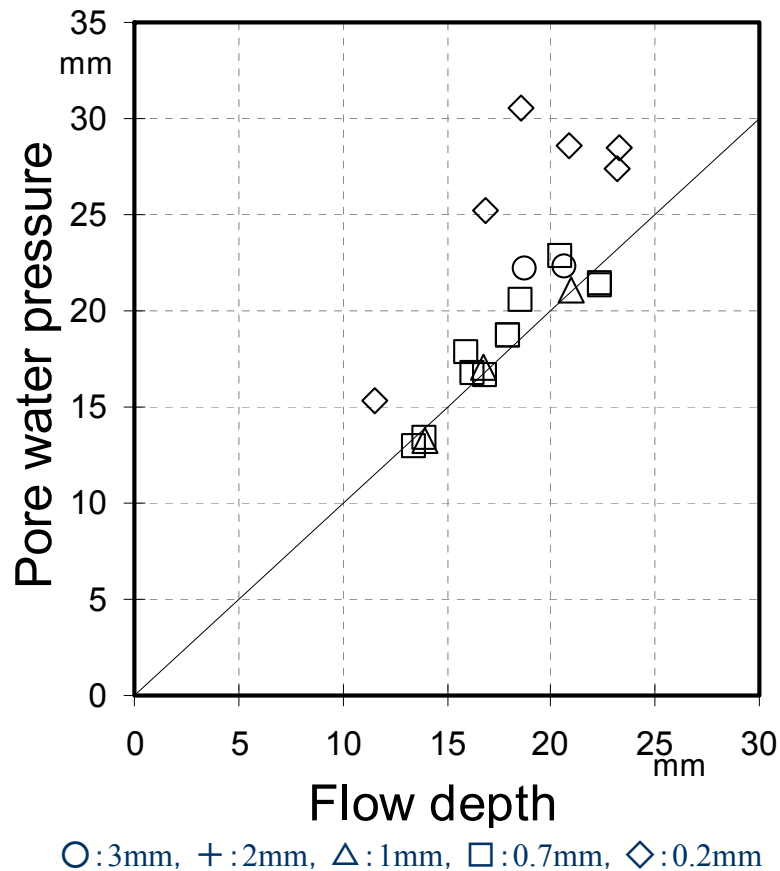
Re_1 と Re_2 は良好に対応した
(Re_2 : 流速の直線分布を仮定)

レイノルズ数によって土石流における流れの遷移が表現出来る場合には, どちらを適用しても大きな違いはない

Re_1 と Re_2 の関係

○: 3mm, +: 2mm, △: 1mm, □: 0.7mm, ◇: 0.2mm
黒塗りは間隙水圧の測定を行った実験

実験条件による間隙水圧の違い



流動深と間隙水圧の関係

間隙水圧は、流動深と同程度～流動深より大きな値を取っていることが分かる

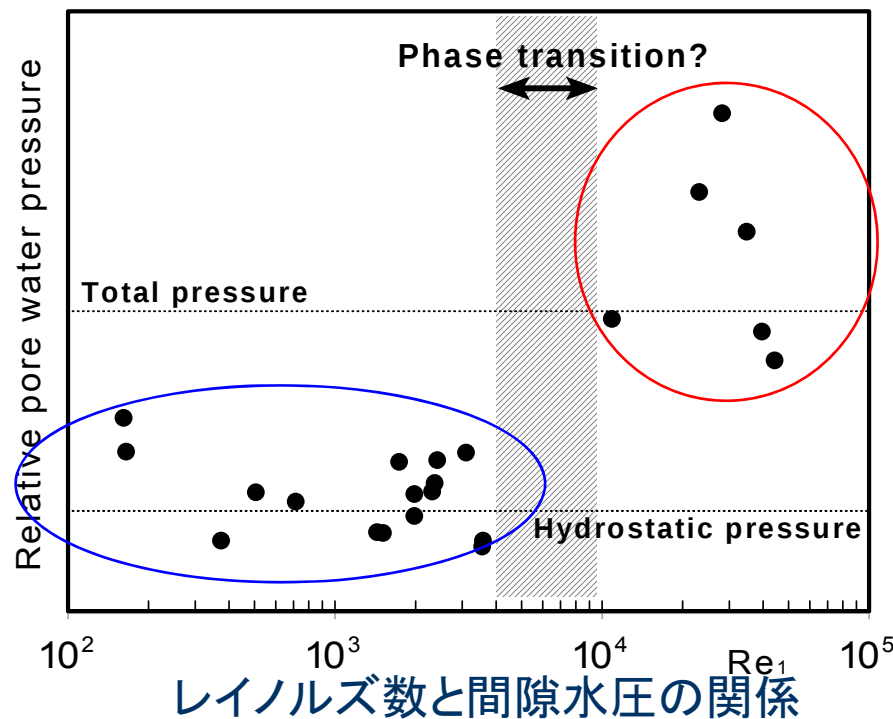
粒径1～3mmでは、構成則から導かれる値と概ね一致

粒径0.2mm(◇)のケースで大きな値を取っている

これらの結果がレイノルズ数で整理できるか？

レイノルズ数と間隙水圧

間隙水圧低い
→層流状態



間隙水圧高い
→乱流状態

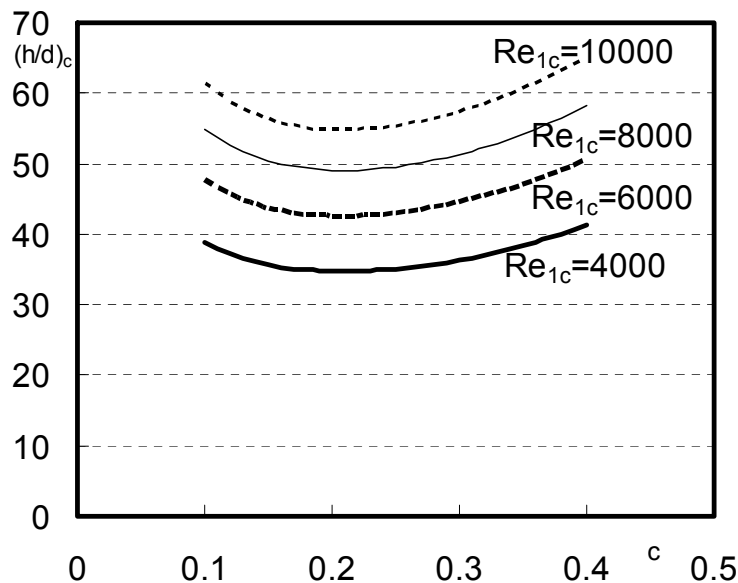
間隙水圧を基準化(静水圧と全圧で揃えた)し, レイノルズ数(Re_1)と比較したところ, $Re_1=4000 \sim 10000$ で層流～乱流への遷移が生じていた:**レイノルズ数で整理できた**

Re₁に関して: 流れの遷移(限界レイノルズ数)

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho_m L^2}{\mu} \approx \frac{\rho_m h^2}{\mu} = \frac{\rho_m}{F(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^2$$

↓

$$\frac{h}{d} = \sqrt{4000 \frac{F(c)}{\rho_m}}$$



流れの遷移時のh/dとcの関係

- ・全圧力＝間隙水圧となる流れが存在することが確認された

- ・限界レイノルズ数を定めてRe₁を変形すると、左式のように表記可能である。左図から、流れの遷移が生じる条件は、濃度に関係なく、ほぼ一定のh/dとして表されることが分かる

← ex) Re_{1c}=4000 ではh/d=35～40で遷移

層流～乱流への遷移がh/dだけで表現可能という結果は、抵抗係数の結果と対応

Re₂に関して: 土石流における「連続的な遷移」

$$Re_2 = \frac{\rho_m UL}{\mu'} \approx \frac{\rho_m u_* \delta}{\mu'} = Re_\delta$$



$$\frac{\delta}{h} = \frac{Re_\delta \mu'}{h \rho_m u_*}$$

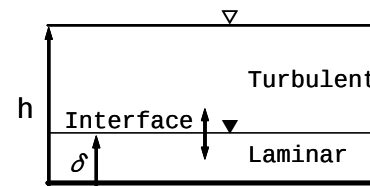
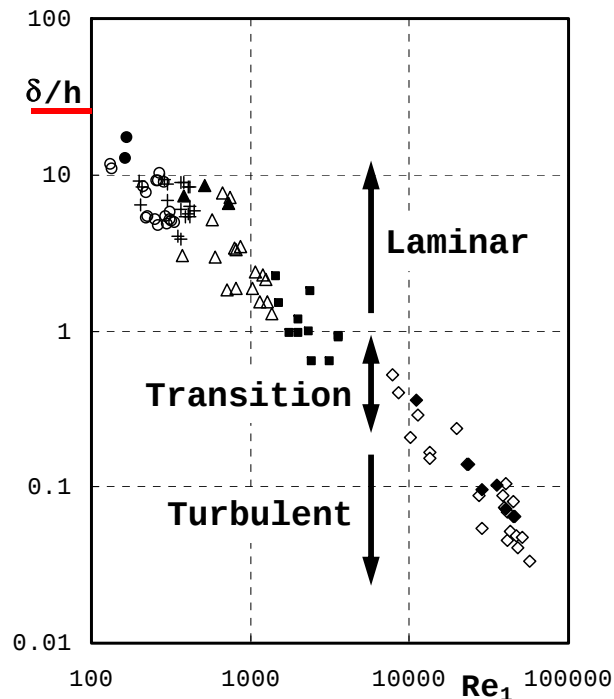


Fig. 10 Vertical shifting of δ in transition



--Re₂の代表長さを粘性底層厚さ
 δ と(し, Re₂をRe _{δ} と)すれば,
 δ/h を用いて**流れの遷移を(Re
の関数として)記述可能に.**

(Re _{δ} は10~20: 清水と同程度)

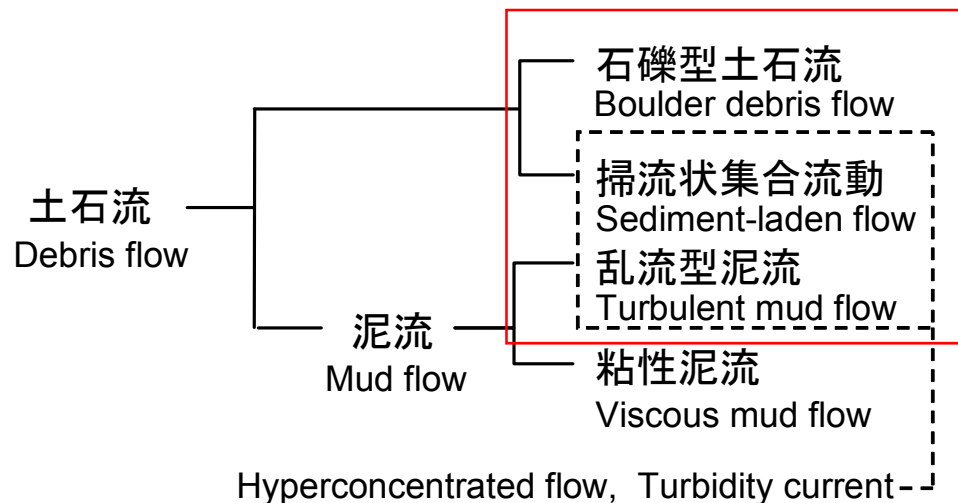
--抵抗係数fの検討における結果
と対応している.

まとめ

- ◆ 土石流の間隙水圧の測定を行い、間隙水圧=全応力となる流れ(乱流)が存在することを見出した
- ◆ 実験結果とレイノルズ数の比較から、レイノルズ数が流れの遷移を表現することを示した上で、遷移がほぼ相対水深だけで記述できることを明らかにした
- ◆ 抵抗係数の整理によって得られた結果の根拠

ここまでの研究全体を一言で

- ◆ 土石流の多様性は、流れの構造の変化に伴うものであり、土石流の「性質」が変化しているわけではない



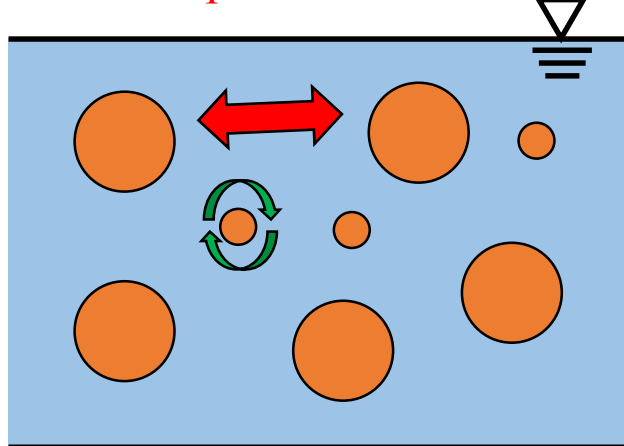
少なくともこれらは
全部同じ「土石流」
→構成則で理解可能

- ◆ 均一粒径土石流の「微細土砂」は粒径ではなく乱流への追従性により定義され、相対水深を用いて概ね表現可能.

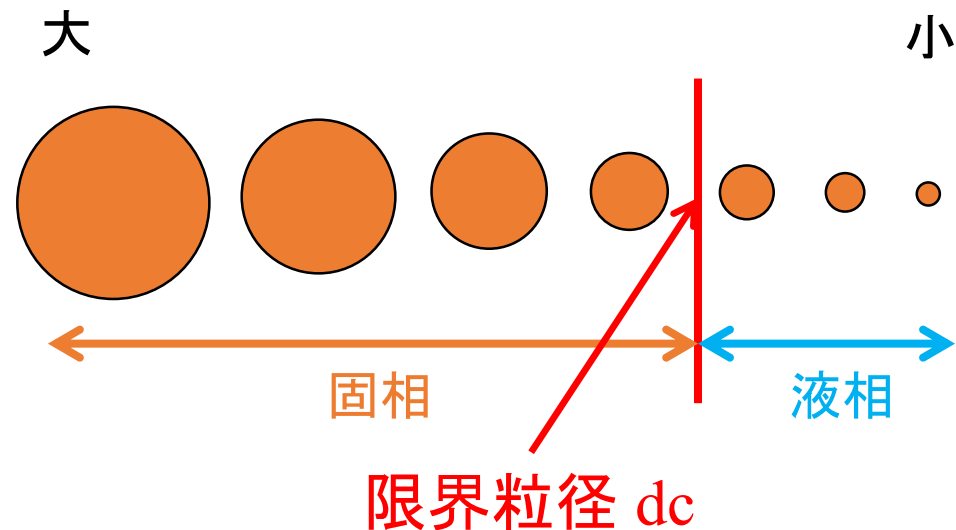
混合粒径土石流中の 微細土砂の挙動

- ◆ 微細土砂を含む混合粒径土石流では、微細土砂が液相化し土石流の流動特性に影響(芦田ら, 1985).
 - 土石流の応力構造に固相として寄与しない.

Particle-particle interactions

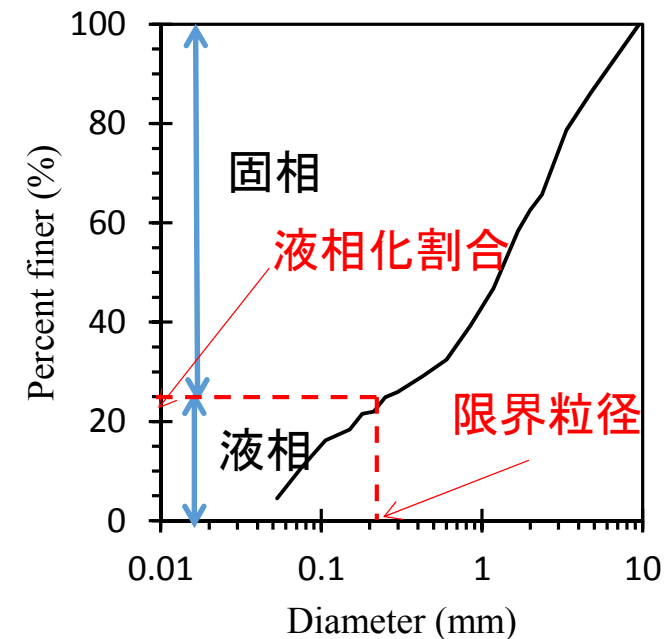
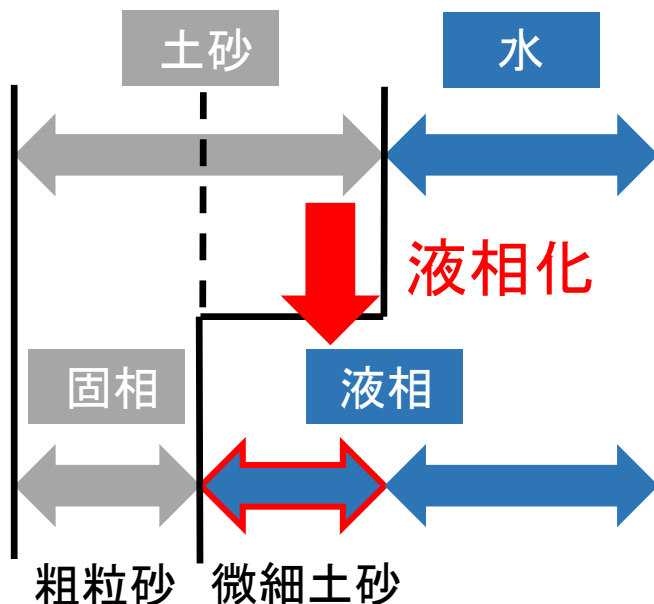


Mixed into water
and no interactions

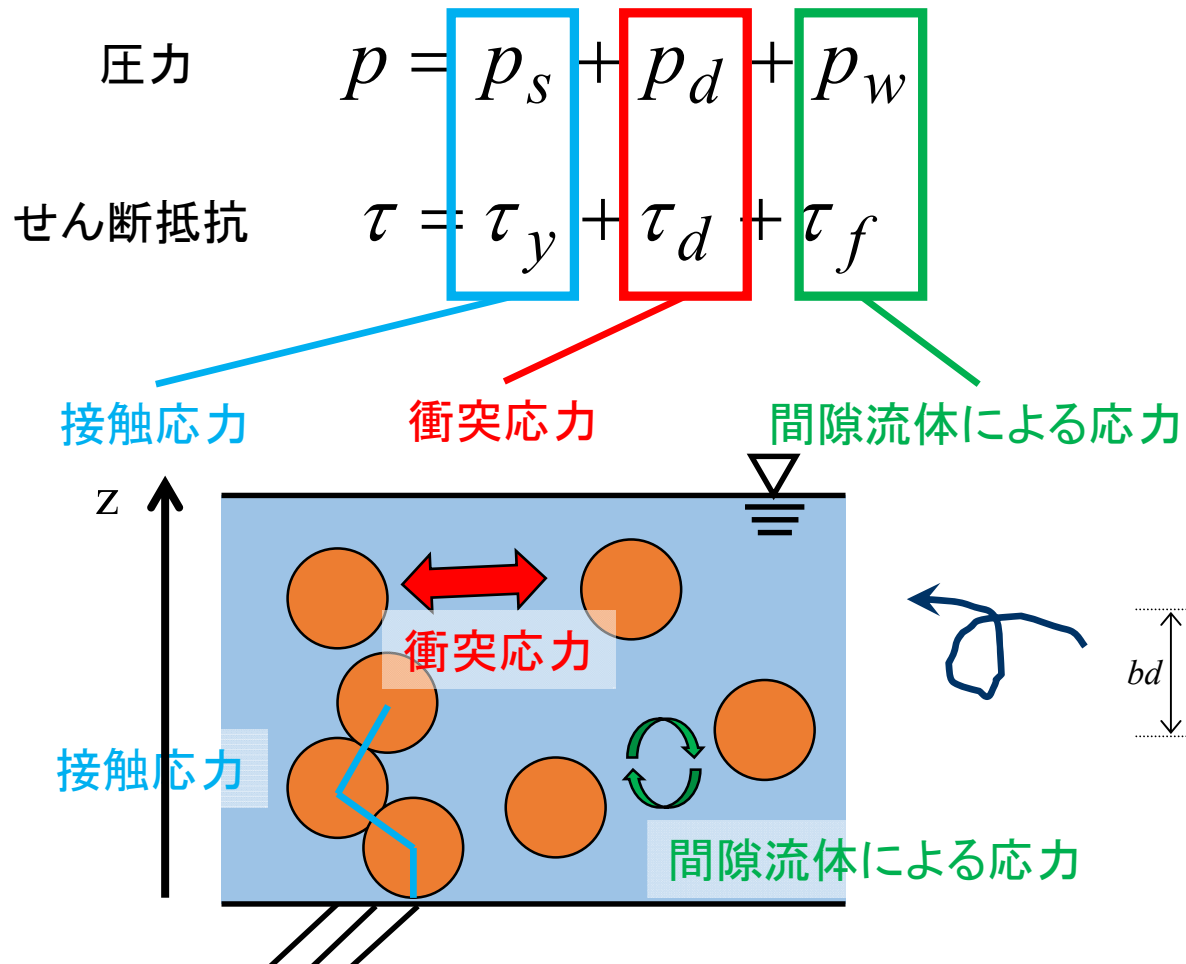


微細土砂の液相化の影響

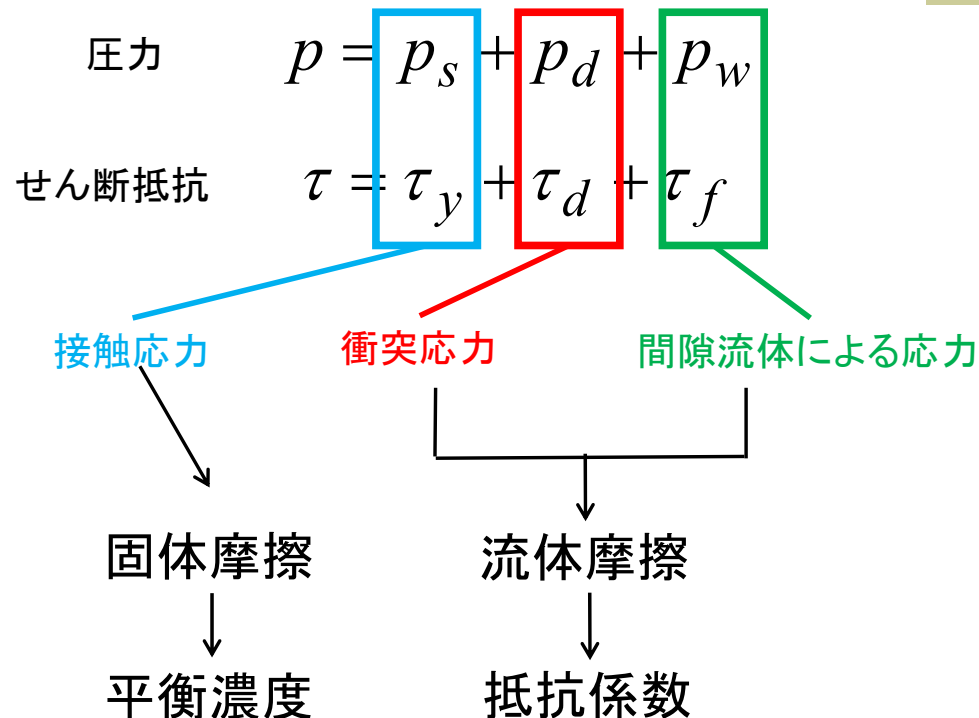
- ◆ 間隙流体密度の上昇に寄与(江頭ら, 1998)
 - ◆ 代表粒径が大きくなる(西口ら, 2011)
- 以上をモデル化し数値計算に反映したところ再現性向上



「液相化」とは？



2通りの評価法があり得る



こちらの取り扱いが多い

$$c_e = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi_s - \tan \theta)}$$

こちらでも評価してみる

$$f = \frac{25}{2\rho_m} K(c) \left(\frac{h}{d} \right)^{-2}$$

解析の流れ

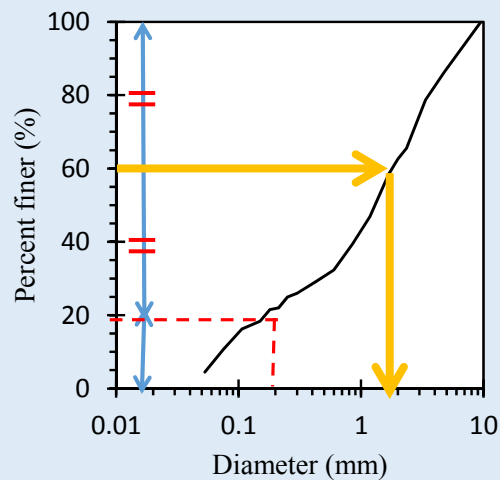
平衡濃度の実験値・理論値が一致する間隙流体密度 ρ を求める

$$c = c_d + c_f \quad \rho = \sigma \frac{c_f}{1 - c_d} + \rho_w \frac{1 - c}{1 - c_d}$$

d50

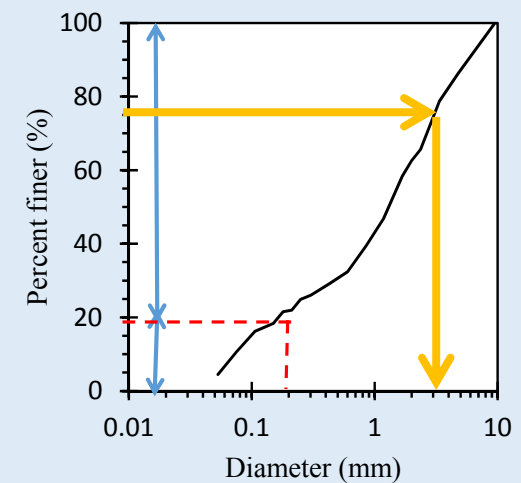
代表粒径を求める: d50と体積平均粒径(dm)

dm



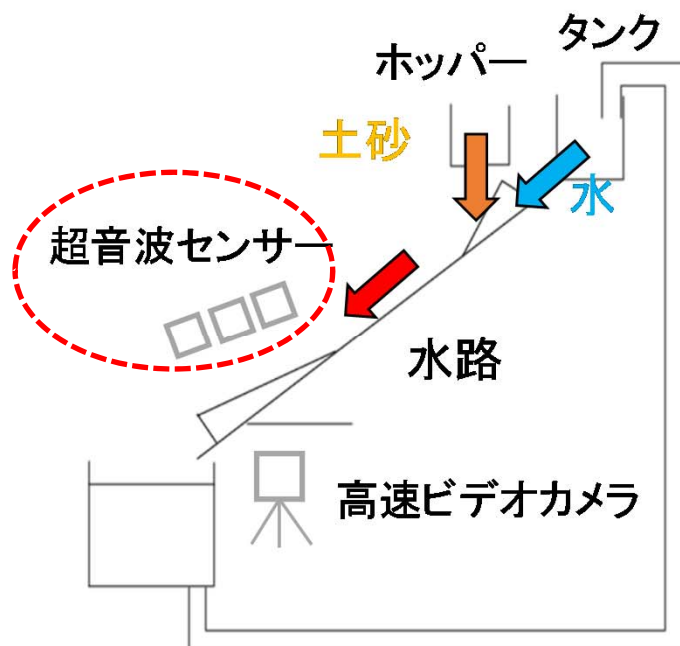
濃度分布・流速分布の計算

抵抗係数(理論・実験)との比較



平衡濃度と抵抗係数から求められた「微細土砂」は一致するのか？

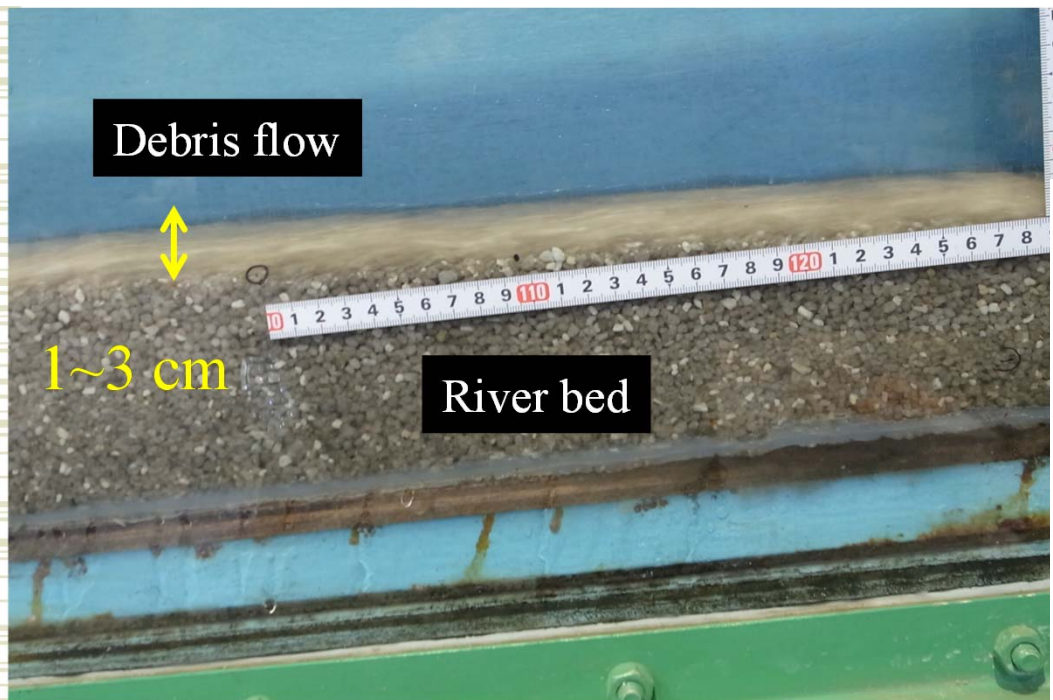
実験



実験水路

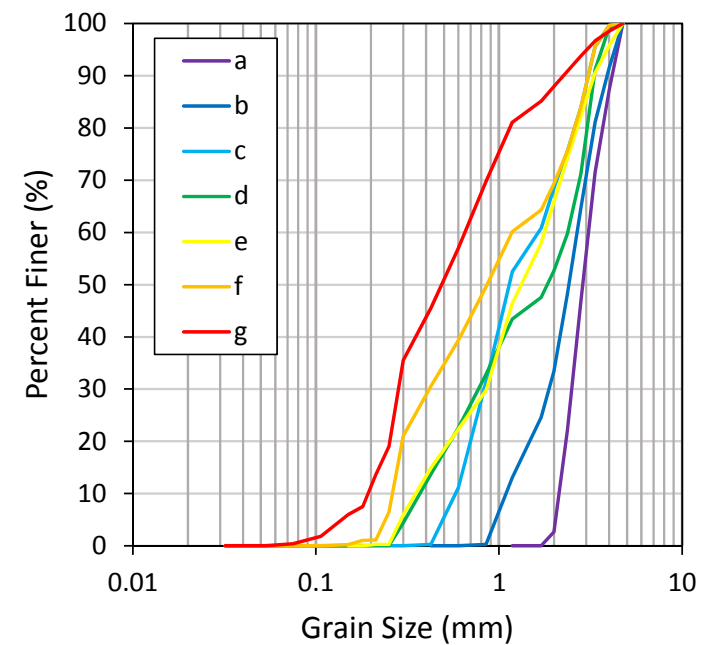
@ 国立研究開発法人土木研究所
遠東水理実験所

実験



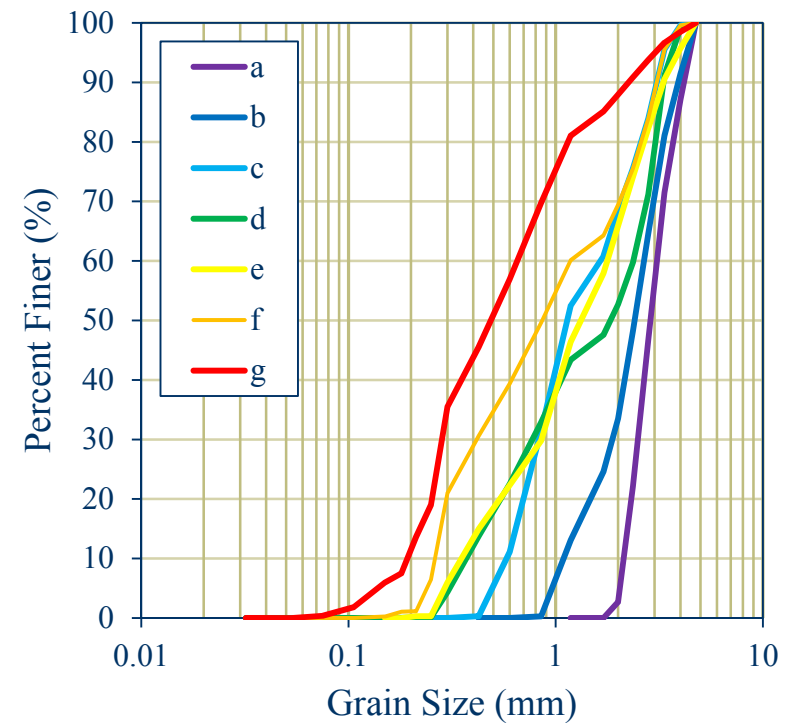
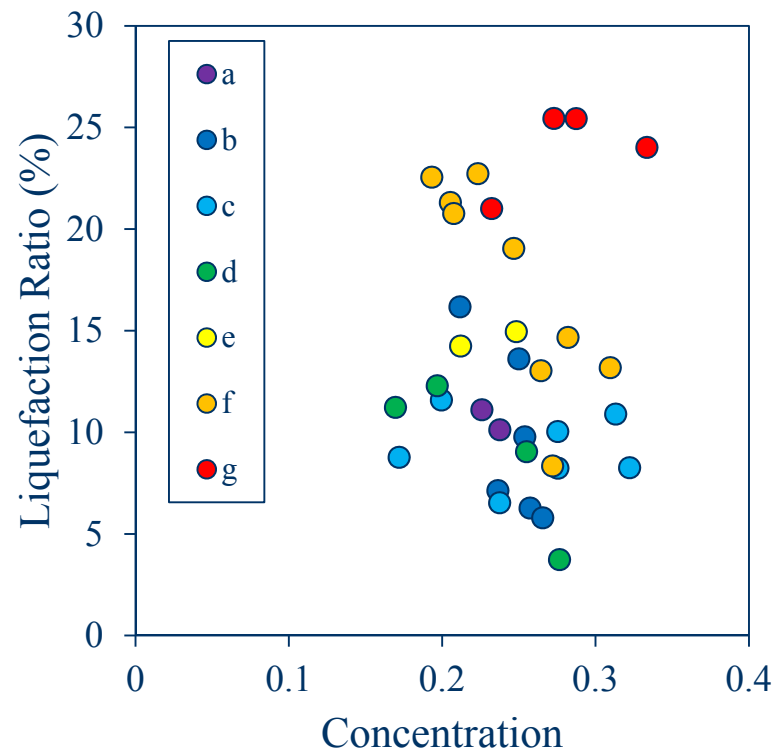
3台の超音波センサで平衡勾配を測定
他に, 流量, 輸送濃度, 流動深, 流速分布
→ 平衡濃度を算出し, 液相化の割合を求める

実験砂はa~gの7種類



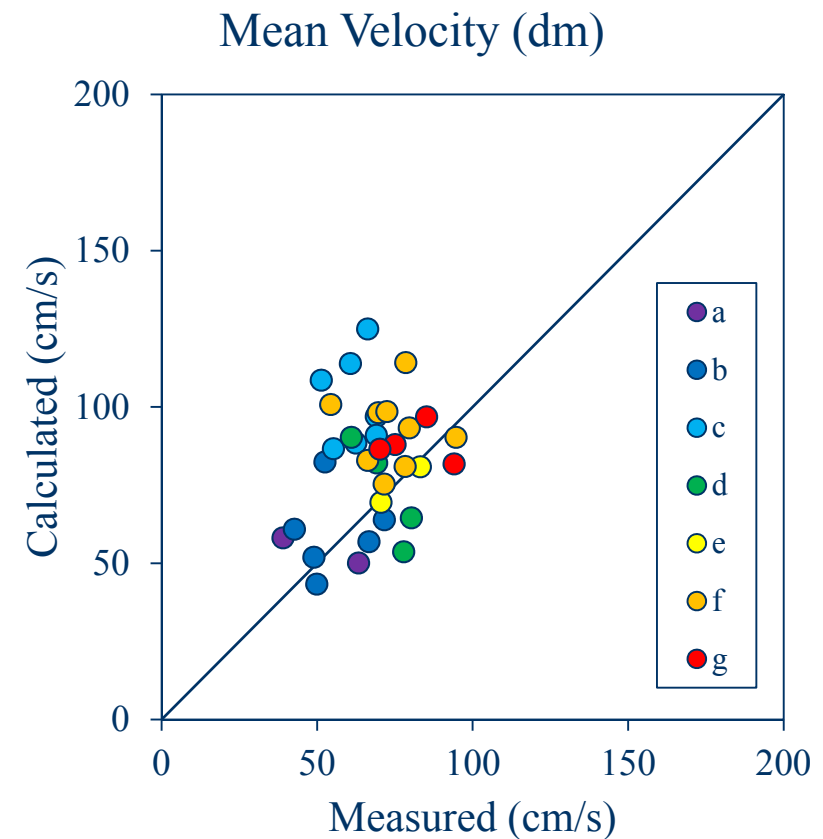
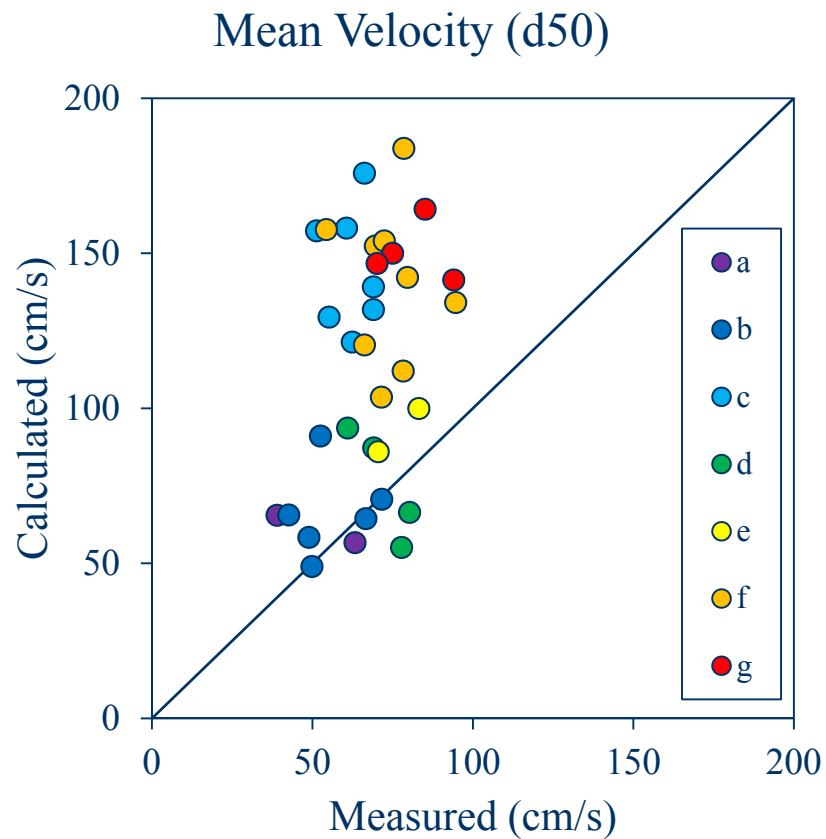
粒度分布

結果：液相化



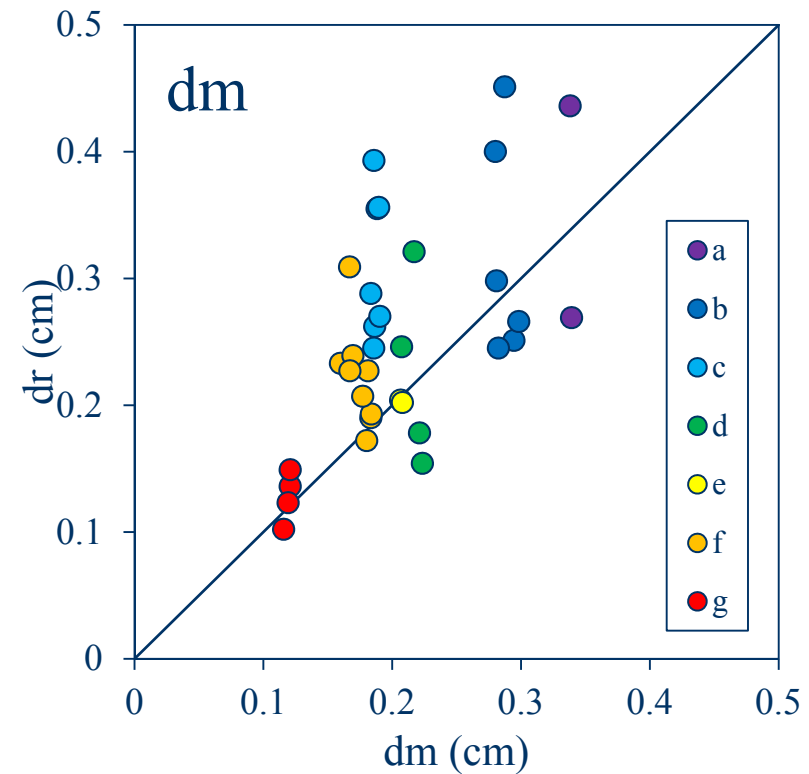
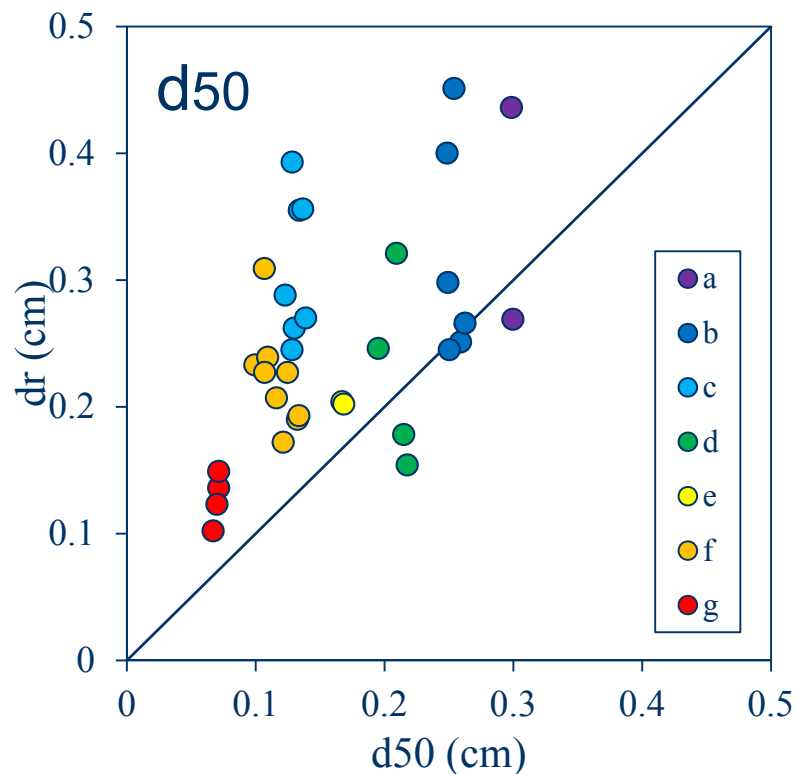
実験条件により，平衡濃度から求まる液相化の割合はいろいろ．

結果：(理論・実験)平均流速



代表粒径をdmとした方が再現性が高いが過大評価の傾向.

結果：抵抗係数との比較



抵抗係数の理論値と実験値が一致する粒径 d_r は、 d_{50} 、 d_m より大きい。
→平衡濃度と抵抗係数から求める「微細土砂」は一致せず。

考察

- ◆ 抵抗係数から求まる微細土砂の粒径が，平衡濃度から求まるそれより大きかった.
- ◆ このことは，骨格応力には寄与するが，流動応力には寄与しない微細土砂の存在を示唆する.
→実際の土石流(混合粒径)中にはコバンザメのような粒子が存在する？
- ◆ 平衡濃度から求められる微細土砂だけを考慮した場合に現象を正しく評価できない可能性あり.