

浮遊砂と泥流と土石流と掃流砂について

江頭進治

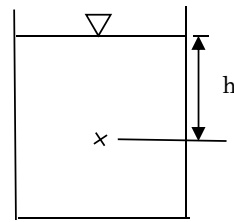
International Centre for Water Hazards and Risk Management (ICHARM)

Public Works Research Institute (ICHARM, 土木研究所)

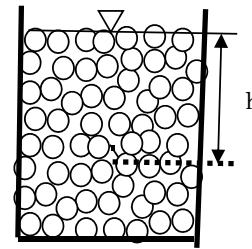
s-egashira77@pwri.go.jp

- ・流砂の形態、特に掃流砂と土石流の応力構造
- ・浮遊砂と泥流に関する実験とそれらの意義
- ・現地でしか見ることのできない現象
(浮遊砂と掃流砂がかかわる分級現象)
- ・今後の浮遊砂研究？

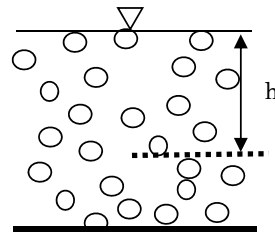
Question: Derive each formula to evaluate water pressure or pore water pressure in Fig. (a), (b) and (c)



(a)



(b)



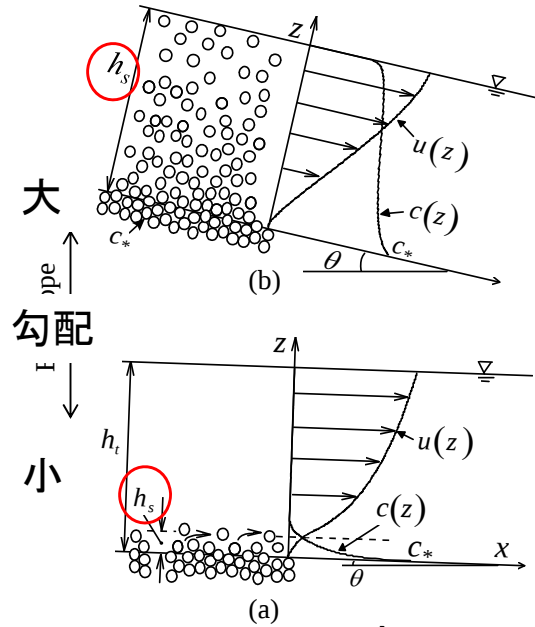
(c)

ρ mass density of water

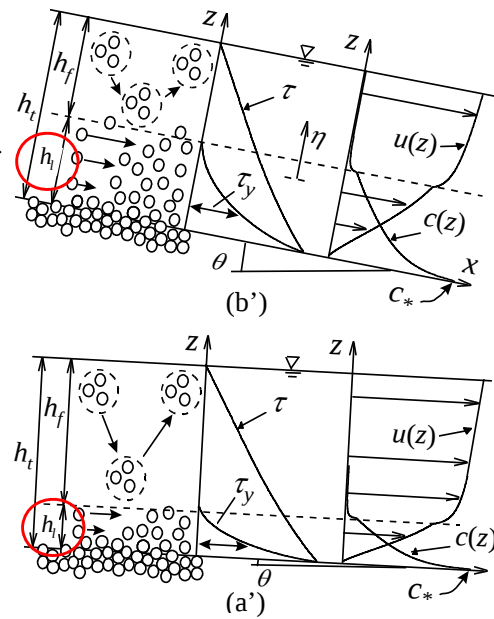
σ : mass density of sediment particles

Fig. (a) Sediment concentration $c=0$ by volume, (b) Sediment concentration $c=c_*$ and sediment particles are stationary, and (c) Sediment concentration $c=c$ and sediment particles are carried by turbulent suspension.

間隙水圧は水深のみで



間隙水圧は水深と土砂濃度で



泥流？

浮遊砂流

小 $nall$ ← 流量 $harge$ → 大

大 ← 粒径 → 小

流砂を伴う流れの分類

掃流砂と土石流

掃流砂層の流れ

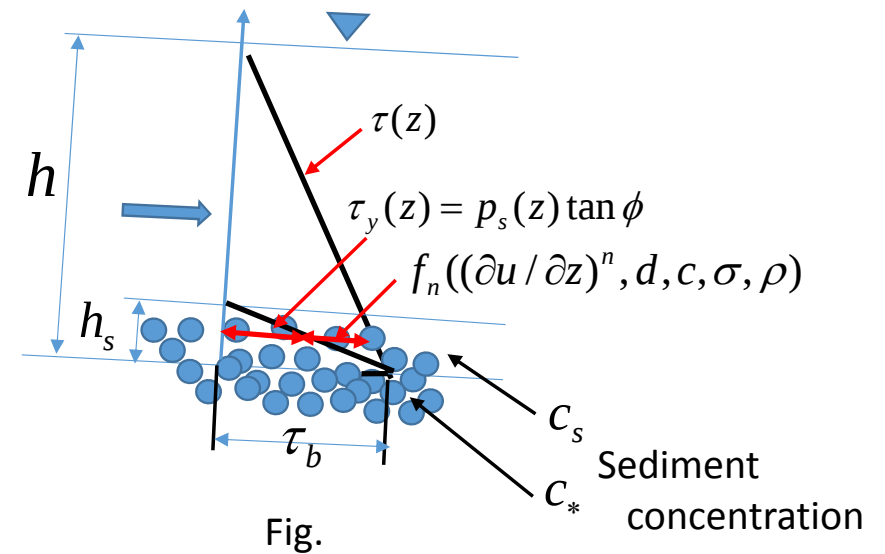
$$F_n(d, c, \sigma / \rho, e) \left(\frac{dv_s}{dz} \right)^n = \tau(z) - \tau_y(z)$$

掃流砂の移動体積

$$\frac{V_G}{d} \left(= \frac{c_s h_s}{d} \right) = \frac{1}{\cos \theta} \frac{1}{\tan \phi - \tan \theta} \tau_*$$

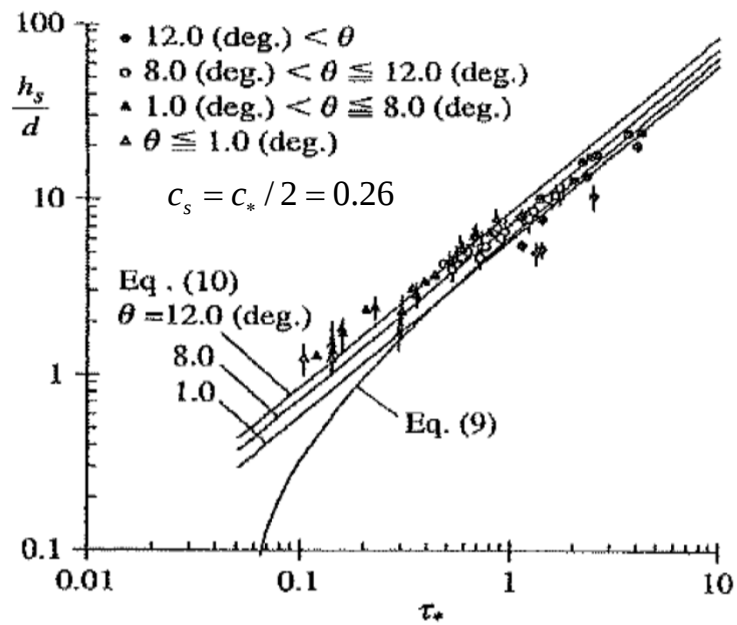
これを層厚比で書けば

$$\frac{h_s}{h} = \frac{\tan \theta}{c_s (\sigma / \rho - 1) (\tan \phi_s - \tan \theta)}$$

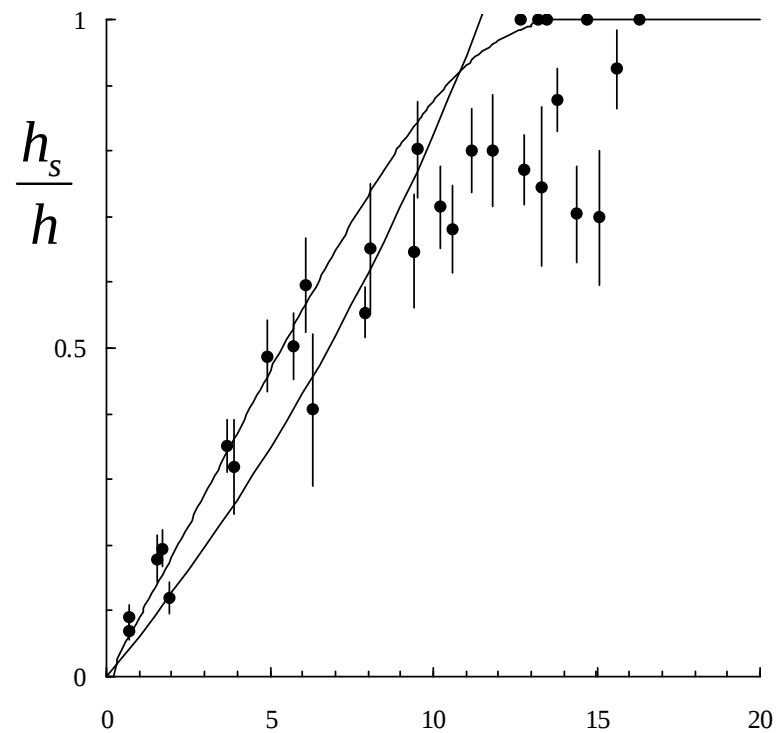


$\tau(z)$ 外力 (External shear stress)

$\tau_y(z)$ 降伏応力 (クーロン摩擦)



掃流砂層の厚さ h_s / d



掃流砂層の厚さ h_s / h

微細砂を用いた

浮遊砂あるいは泥流に関する実験

—掃流砂や土石流との類似性はあるのかないのか—

浮遊砂と泥流（江頭ら 1993） ---ただし非粘着性材料 $d_{50} = 0.16\text{mm}$ c は輸送濃度の意味

表-1 流れの抵抗に関する実験

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	h	h/h_0	k_s
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s		cm		cm
A-3-1	7.0	124.0	124.0	0.0	0.000	1.00	1.000	0.113
A-3-2	7.0	124.2	118.4	5.8	0.047	0.99	0.995	
A-3-3	7.0	124.4	105.3	14.4	0.116	0.96	0.965	
A-3-4	7.0	124.3	105.1	16.0	0.129	1.00	1.000	
A-3-5	7.0	122.8	100.6	21.2	0.172	0.99	0.995	
A-3-6	7.0	121.5	92.0	28.3	0.233	1.08	1.085	
A-3-7	7.0	125.9	85.5	36.8	0.292	1.28	1.286	
A-4-1	7.0	128.1	128.1	0.0	0.000	1.02	0.995	0.114
A-4-2	7.0	128.5	121.6	5.7	0.044	1.04	1.020	
A-4-3	7.0	128.4	114.9	12.8	0.099	1.05	1.029	
A-4-4	7.0	126.6	106.6	19.2	0.152	1.04	1.015	
A-4-5	7.0	128.2	105.3	26.2	0.204	1.03	1.010	
A-4-6	7.0	127.6	96.8	33.2	0.260	1.14	1.113	
A-4-7	7.0	126.0	89.6	35.0	0.278	1.27	1.240	

(固定床実験)

表-2 粒子拡散に関する実験

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	h	k_s
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s		cm	cm
B-1	7.0	131.7	119.8	11.9	0.091	1.05	0.115
B-2	7.0	129.9	108.9	21.0	0.162	1.03	
B-3	7.0	126.9	103.4	23.5	0.185	1.03	
B-4	7.0	127.7	100.7	27.1	0.212	1.12	
B-5	7.0	132.8	101.9	31.0	0.233	1.10	
B-6	7.0	132.4	99.2	33.2	0.251	1.14	

(固定床実験)

表-3 粒子濃度の鉛直分布に関する実験

Run No.	θ	q_m	q_w	q_s	c	c_0	h
	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s			cm
C-1	3.0	129.3	129.1	0.2	0.002	0.031	1.23
C-2	7.0	128.1	126.1	2.0	0.016	0.044	1.04
C-3	3.0	127.2	125.1	2.1	0.016	0.095	1.23
C-4	7.0	129.4	121.9	7.5	0.058	0.114	0.98
C-5	7.0	128.2	116.7	11.5	0.090	0.211	1.03
C-6	7.0	128.2	107.5	20.7	0.162	0.233	1.01
C-7	7.0	129.4	106.8	22.5	0.174	0.279	1.03
C-8	7.0	129.2	103.6	25.7	0.199	0.318	1.02
C-9	7.0	127.5	99.7	27.7	0.218	0.298	1.04

(固定床実験)

表-4 平衡河床勾配に関する実験

Run No.	θ	θ_e	q_m	q_w	q_s	c
	deg.	deg.	cm ² /s	cm ² /s	cm ² /s	
D-1	8.7	8.16	59.3	44.3	15.0	0.253
D-2	8.4	8.15	51.3	38.1	13.2	0.257
D-3	9.8	8.90	54.4	40.2	14.3	0.262
D-4	8.7	8.36	55.3	40.0	15.2	0.275
D-5	10.5	9.50	59.2	42.1	17.1	0.290
D-6	9.5	9.02	67.0	47.2	19.8	0.296
D-7	10.5	10.44	58.7	40.6	18.1	0.308
D-8	12.0	11.51	57.2	37.5	19.7	0.345

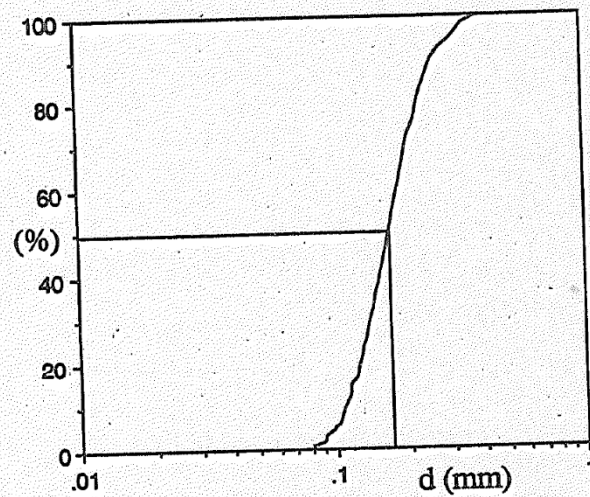


図-1 微細砂の粒度分布

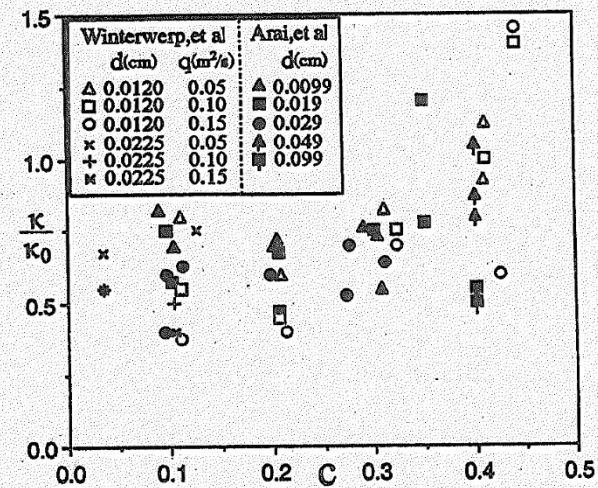


図-2 カルマン定数(文献3、4)による)

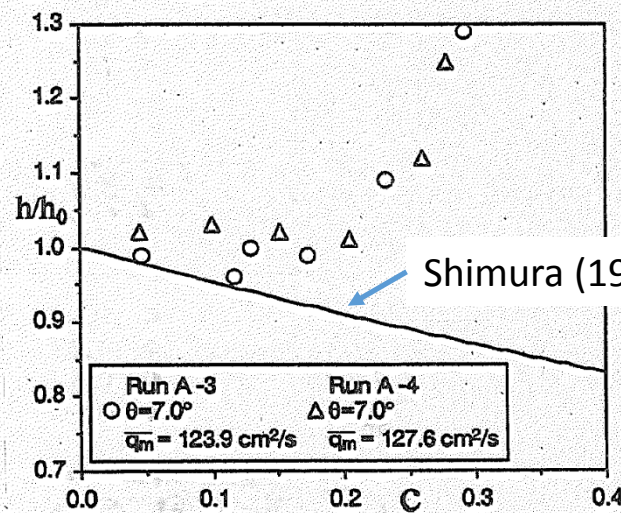


図-3 濃度による水深の変化

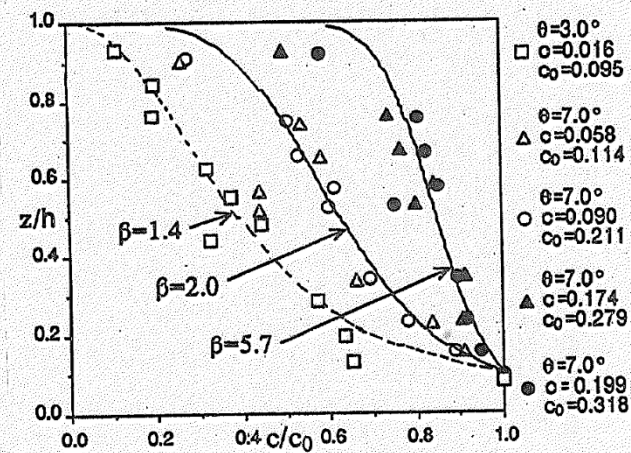


図-4 濃度の鉛直分布

$$\beta = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon}$$

ε Eddy viscosity

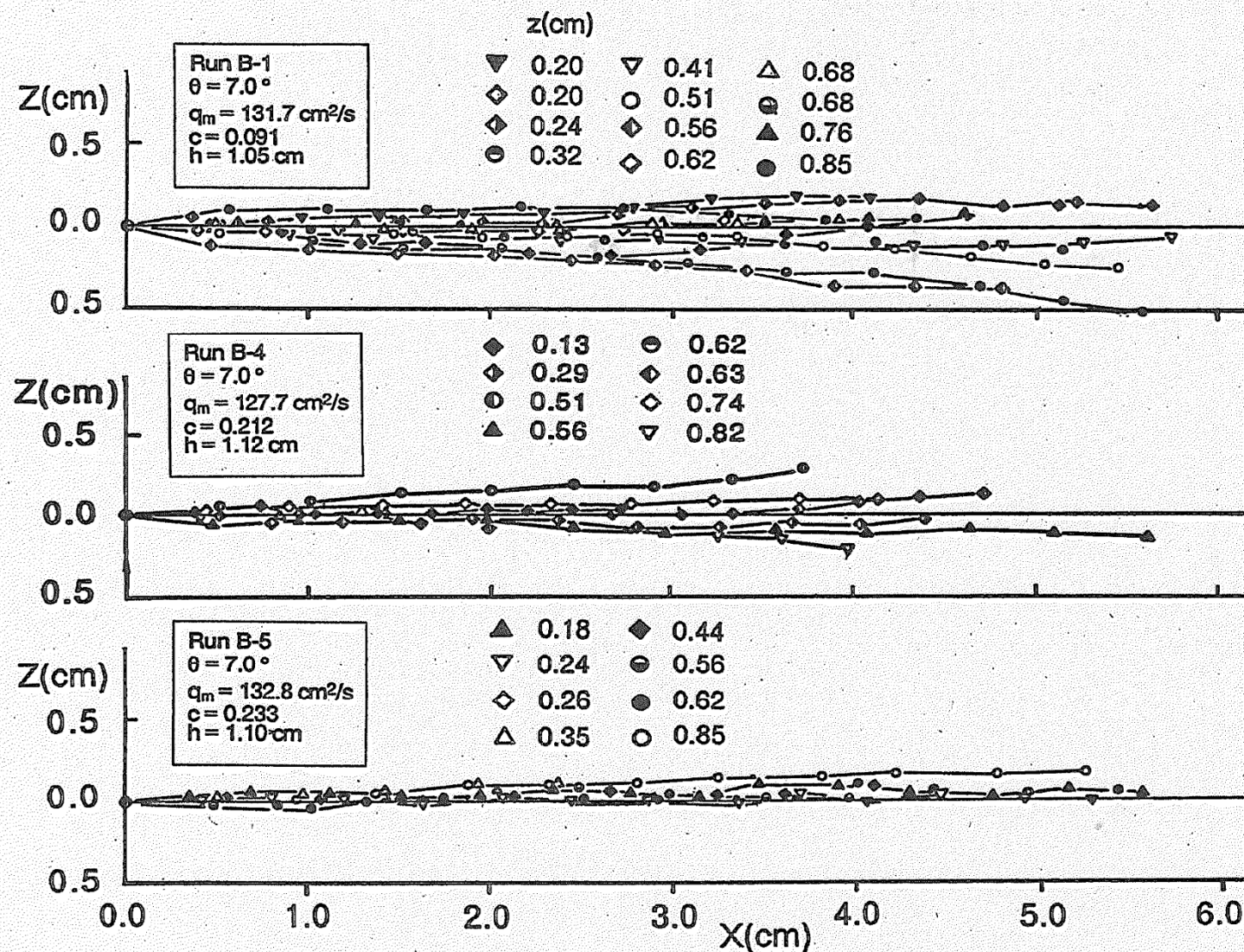


図-5 トレーサー粒子の軌跡

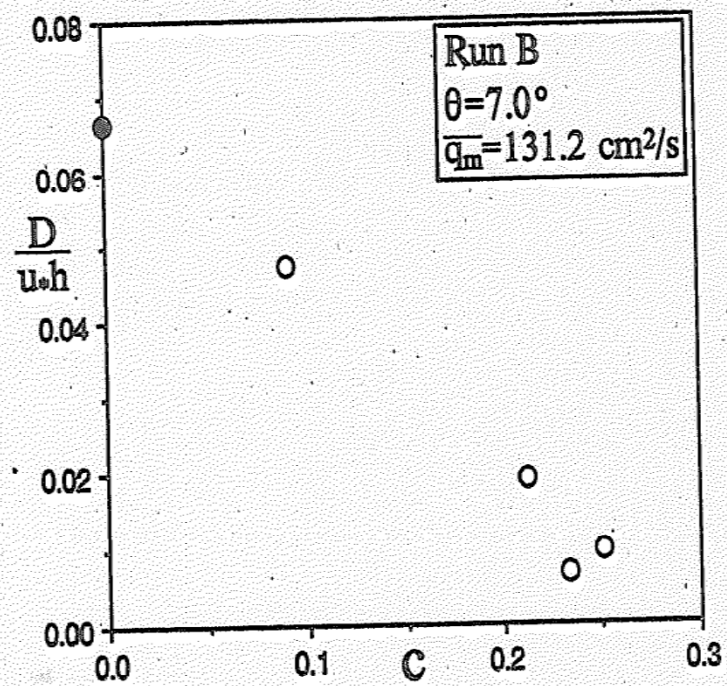


図-6 トレーサー粒子の拡散係数

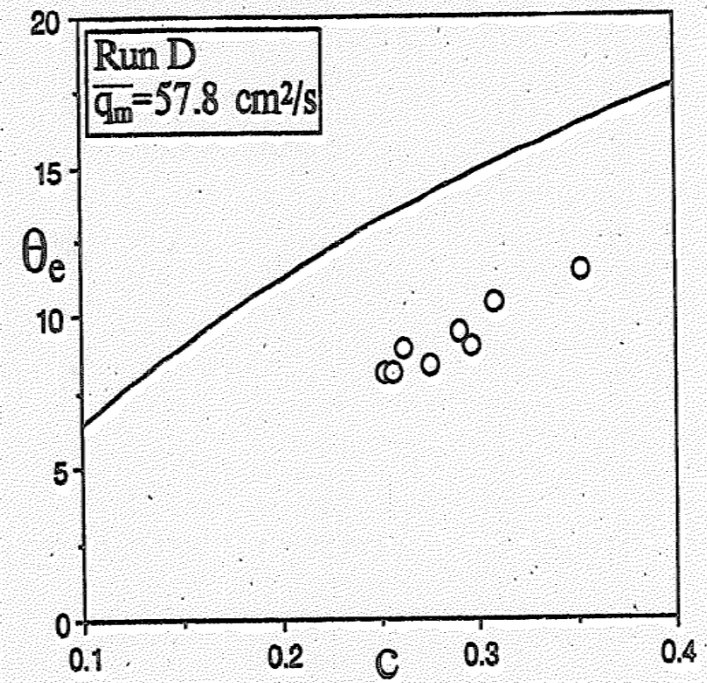


図-7 平衡河床勾配

固定床の実験で分かったこと

- ・濃度が小さいときには 古典的な解析ができる
- ・濃度の増加
 - (1) 流水抵抗の増加
 - (2) 濃度の鉛直分布は一様化するが、渦拡散は減少

乱れ応力以外の応力の出現



微細砂を用いた掃流砂(層流域)の実験を行うと
見えてくるものがあるはず！！

Conditions of flume tests (Itoh, Egashira 2007)

Run	d (cm)	θ_e (deg.)	q_m (cm ² /s)	h_t (cm)	h_t/d	c_f	u_τ (cm/s)	τ_*	w_0 (cm/s)	w_0/u_τ	R_{e*}	F_r	R_e	T (°C)
003	0.0292	9.72	9.71	0.336	11.5	0.117	7.46	1.20	3.67	0.492	16.7	1.59	746	11.0
113	0.0292	9.75	29.8	0.539	18.4	0.176	9.45	1.93	3.67	0.388	19.0	2.42	2049	7.2
104	0.0292	9.71	50.4	0.707	24.2	0.208	10.8	2.52	3.67	0.340	21.9	2.71	3495	7.5
017	0.0292	9.83	102	1.19	40.9	0.257	14.1	4.31	3.67	0.260	27.5	2.50	6812	6.2
010	0.0292	10.0	216	1.60	54.8	0.270	16.5	5.87	3.67	0.222	34.2	3.41	15330	8.3

Flow discharge

10 → 30 → 50 → 100 → 200 (cm²/s)

d : Sediment grain size

h_t : Flow depth

h_t/d : Relative flow depth

c_f : Flux sediment concentration

u_τ : Shear velocity defined as $u_\tau = \sqrt{gh_t \sin \theta}$

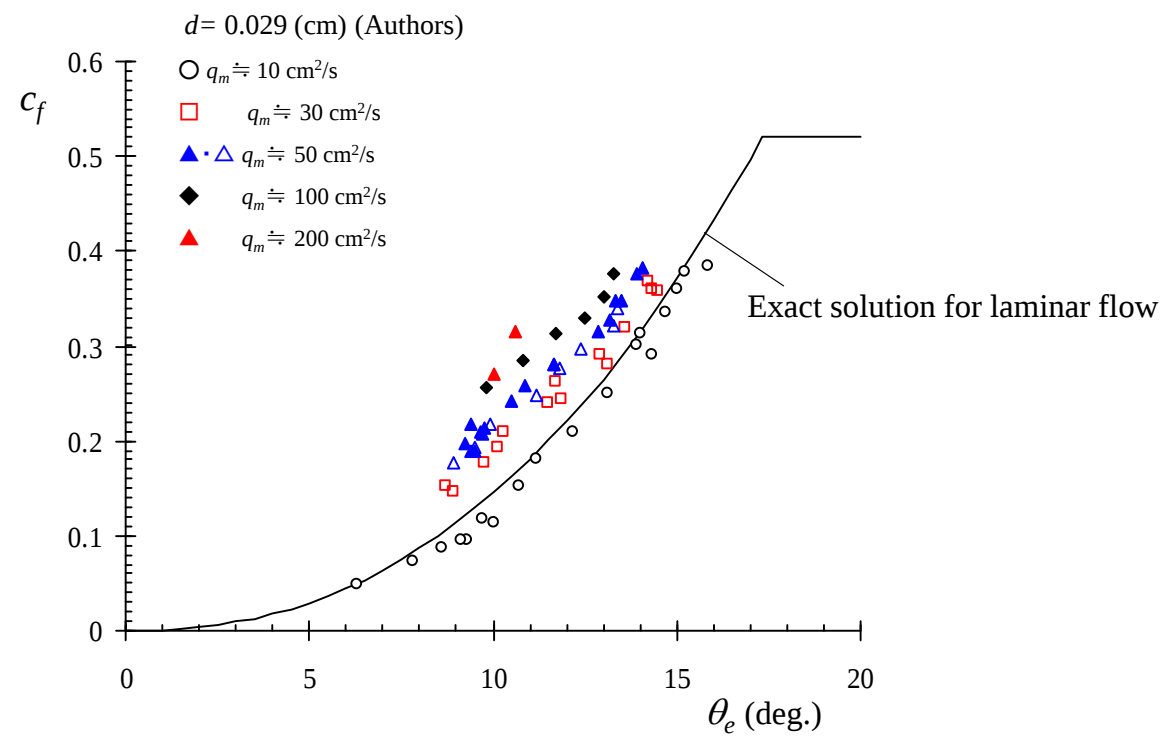
w_0 : Settling velocity of sediment particle

R_{e*} : ($= u_\tau d / \nu$)

R_e : Reynolds number

F_r : Froude number

T : Temperature of water

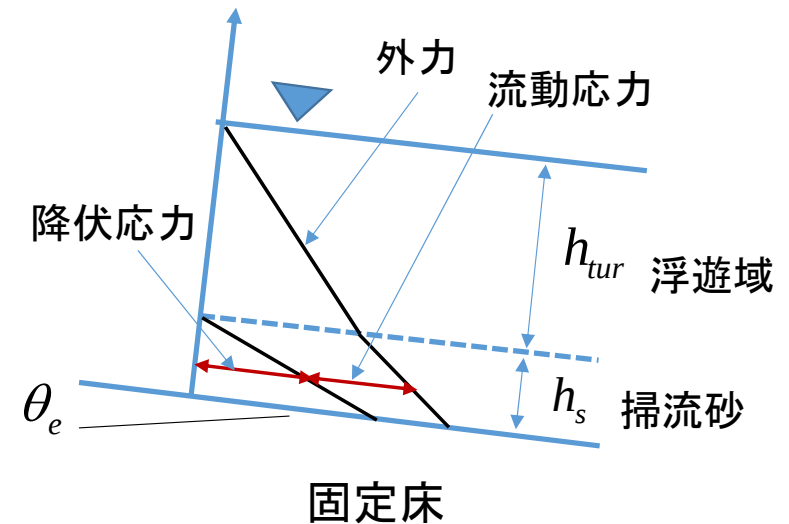
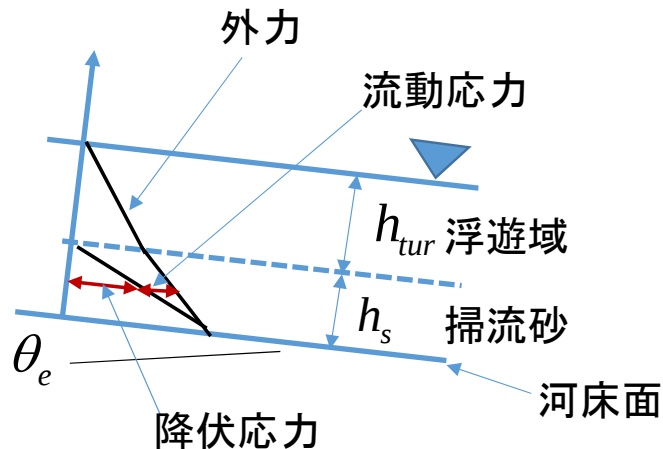


平衡勾配と輸送濃度 (Itoh, Egashira (2007)).

微細砂 (0.17mm, 0.29mm) を用いた固定床と移動床の実験で次のことが判明

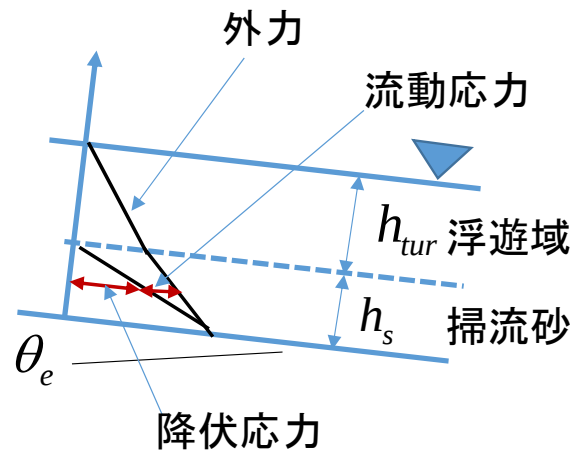
- (1) 流量大で輸送土砂濃度が小さい — 古典的な浮遊砂の扱い
(勾配が小さい)
- (2) 流量が小さい領域 (レイノルズ数が小さい)
浮遊砂のない状態 — 平衡勾配は、掃流砂や土石流に同じ
- (3) 流量が増加 — 掃流領域と浮遊領域の形成
→ 平衡勾配の減少

(1), (2), (3) より応力構造は図のようであること

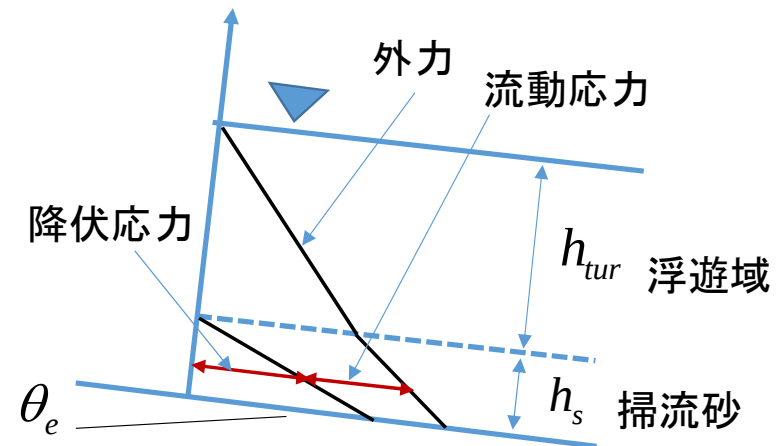


次のテーマは

移動床あるいは固定床において浮遊砂がいかに発生し、
どのような役割を果たすのか



移動床



固定床

浮遊砂の役割

Work shop on DWIDM

2016年11月ネパール West Rapti 川の調査
萬矢、江頭、(Sharma)

Experiences of our field trip

- How sediment size changes along the channel-

Atsuhiro Yorozyu, Ph.D.

Senior Researcher

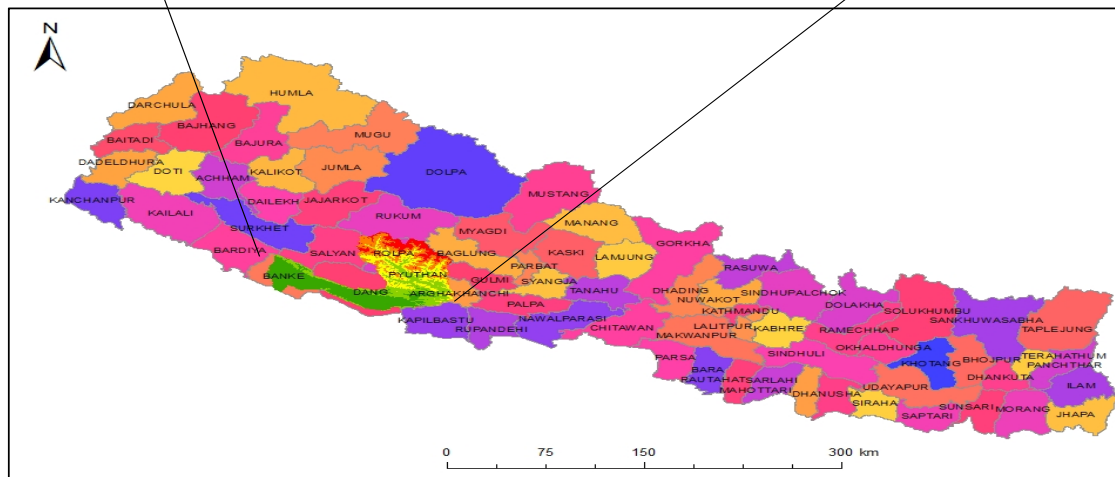
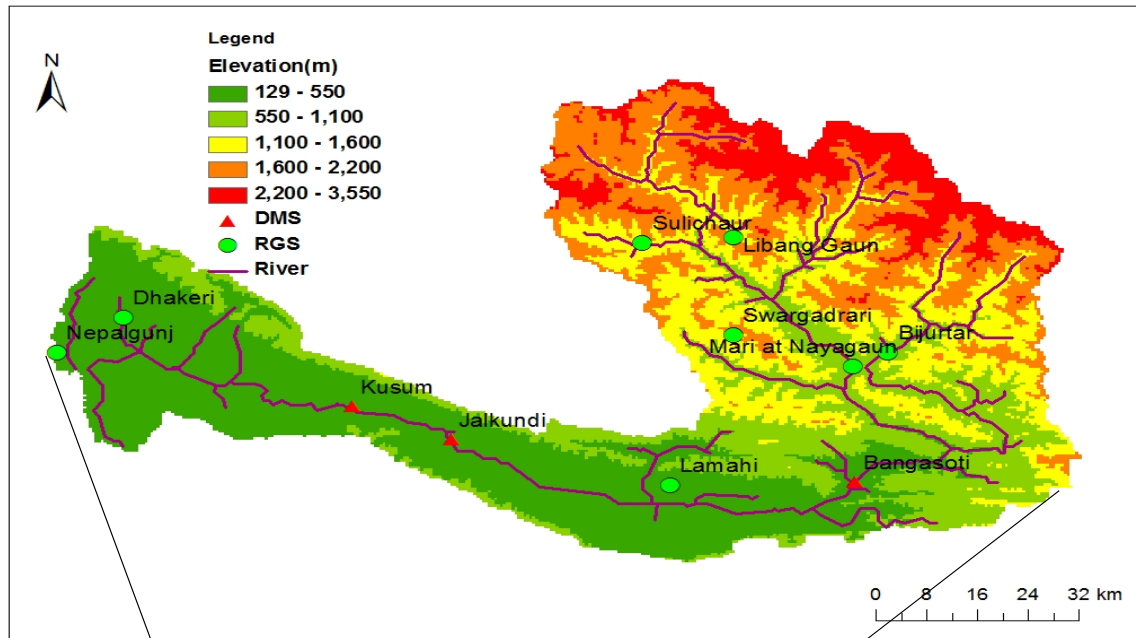
Associate Professor of GRIPS

International Centre for Water Hazard and Risk Management

under the auspices of UNESCO (ICHARM)

Public Works Research Institute

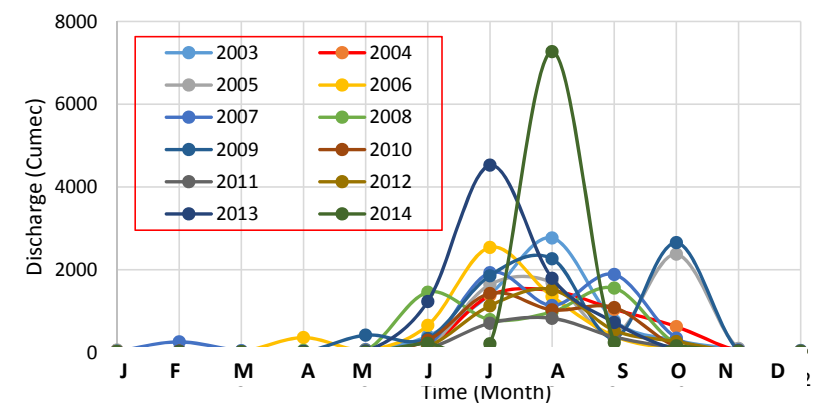
Study Area and River (General Information)

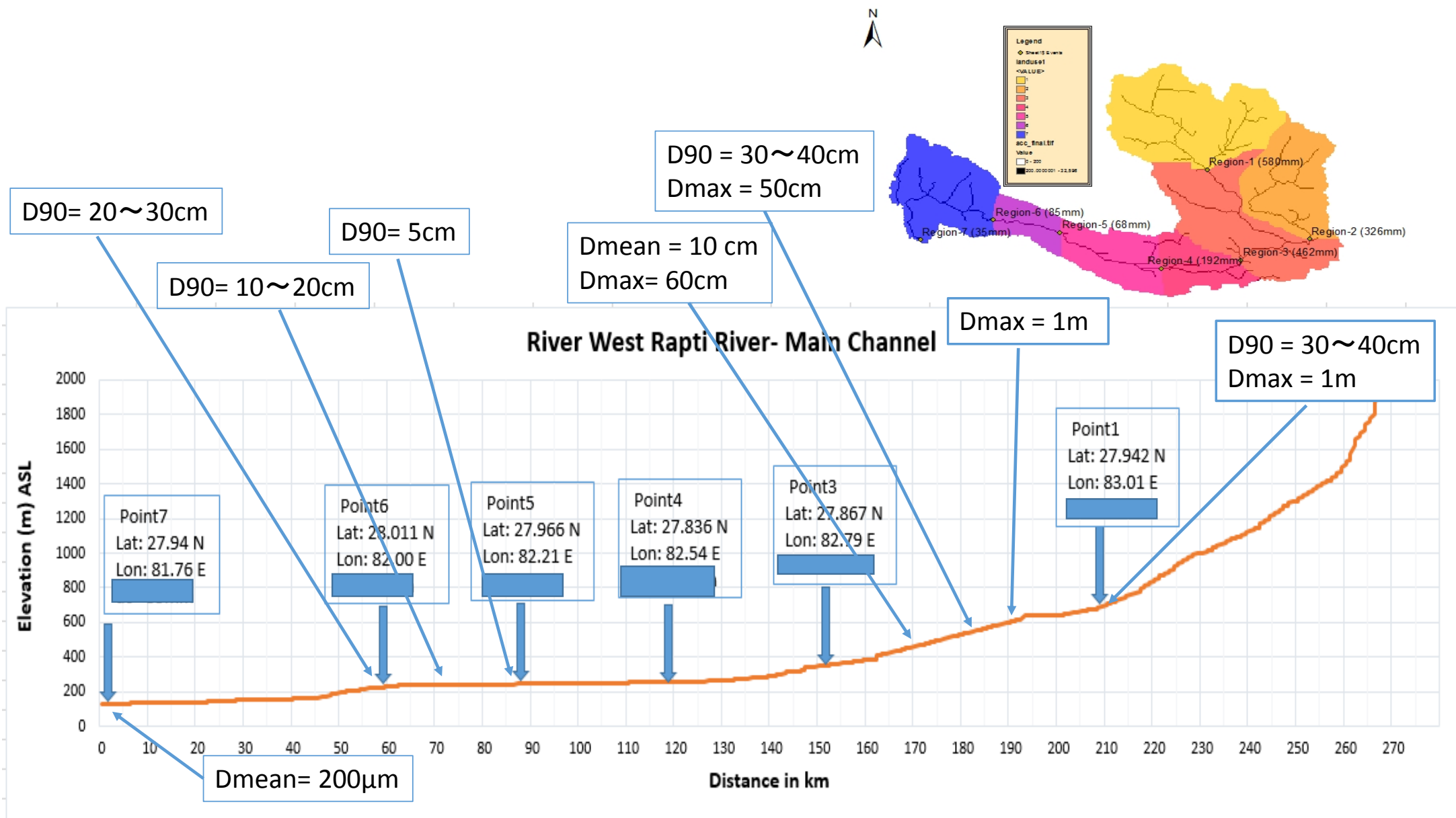


West Rapti Basin of Nepal

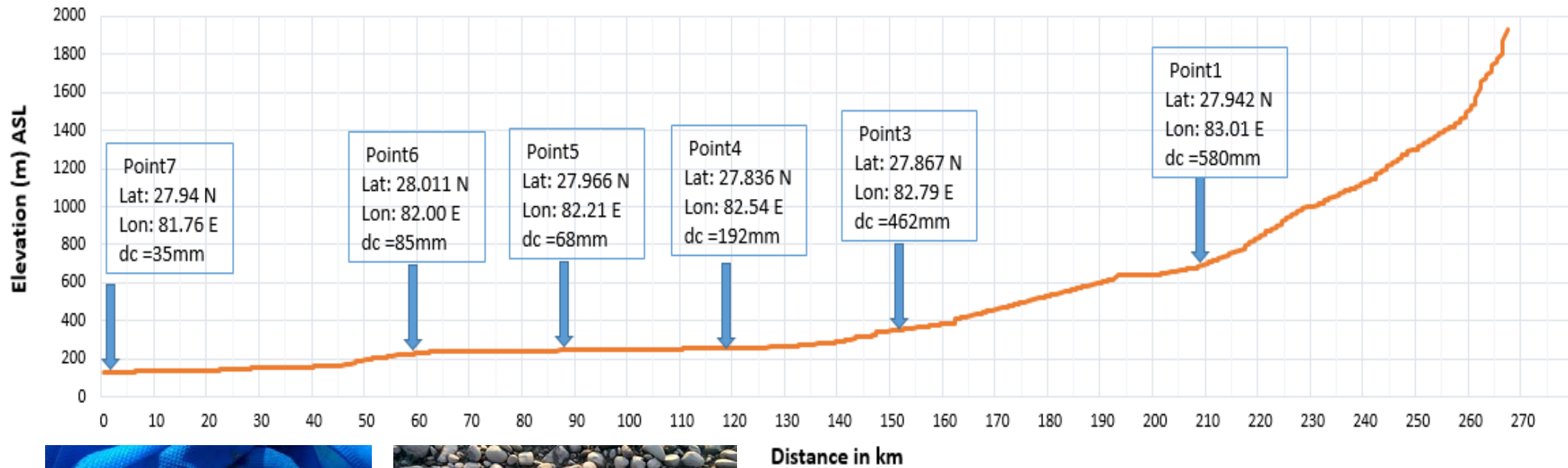
- **Elevation:** 129m - 3550m (msl)
- **Catchment Area :** 6,700 Km²
- **Length:** 257 km
- **River:** Class II river
- **Floodplain width:** 0.20-1.7 Km

Discharge Hydrograph of West Rapti River





River West Rapti River- Main Channel



20~30kmの区間で見事にsortingが起こり、
沖積部にはミリオーダーの砂粒子も見当たらない

何故！！ 何故 砂礫のフロントは伝播しない

河岸近傍には微細砂しか見当たらないので川底に潜って採取

動くか否かのチェック

$$h = 5 \sim 10m$$

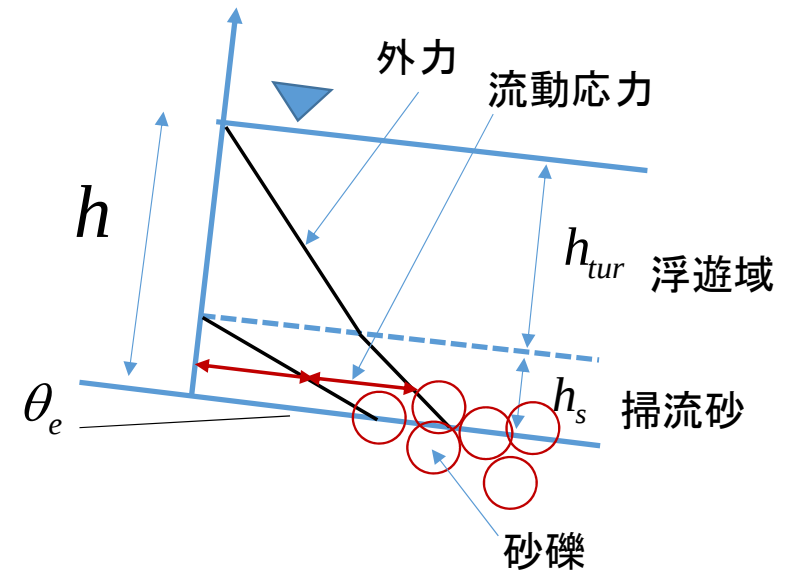
$$\sin \theta_e \cong i_b = 1000 \sim 1/10000$$

移動限界粒径は小さく見積もっても

$$i_b = 1/1000 \quad d_c = 6 \sim 12cm$$

$$i_b = 1/10000 \quad d_c = 0.6 \sim 1.2cm$$

➡ 砂礫フロントは伝播しないといけない



砂礫に対して通常の外力が作用すれば砂礫は輸送されるはずであるが、

微細砂(200~400ミクロン)から構成される掃流砂や浮遊砂が多く、
微細砂で構成される掃流砂が外力を食う(降伏応力を構成)ために
砂礫は動くことができない。

West Rapti 川では、これが、sediment sorting の本質かもしれない！！

浮遊砂の発生

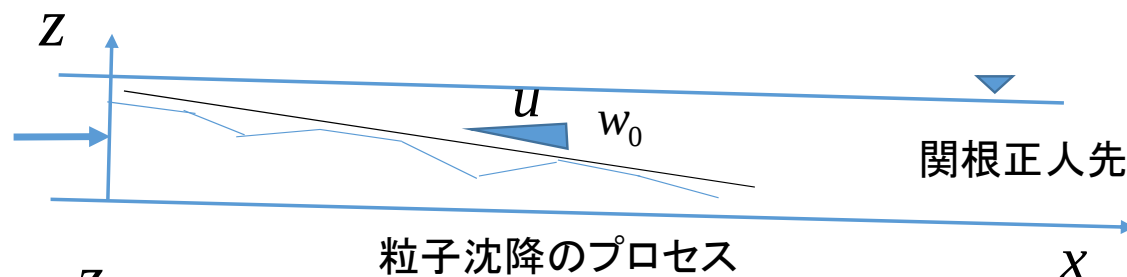
固定床から直接
固定床上の掃流砂から
移動床上の掃流砂から

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial cu_s}{\partial x} + \frac{\partial cv_s}{\partial y} + \frac{\partial cw_s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

$$u_s = u \quad v_s = v \quad w_s = w - w_0 \quad w_0 \text{ 粒子沈降速度}$$

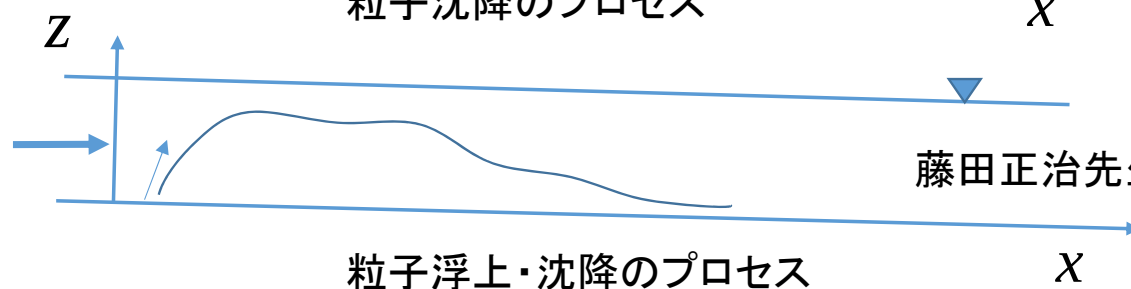
u_s, v_s, w_s 粒子速度成分

u, v, w 流体速度成分



関根正人先生()

時間平均の粒子速度は
 $(\bar{u}_s, \bar{w}_s) = (\bar{u}, w_0)$



藤田正治先生()

浮上はボイル等の上昇流



流れの強いところは、微細砂はすでに流されている。

水面の雲状の模様
はボイル

しからば、**浮遊砂は浮上のみに着目すれば、何とかなるのではないか……**

——→ 上昇流の機構……掃流砂層の速度と水流の速度間の不安定？

——→ 上昇流の機構……sand waves 背面の再付着点近傍の不安定？

小規模河床波の Reattachment近傍における 上昇流の可視化

2016/12/2

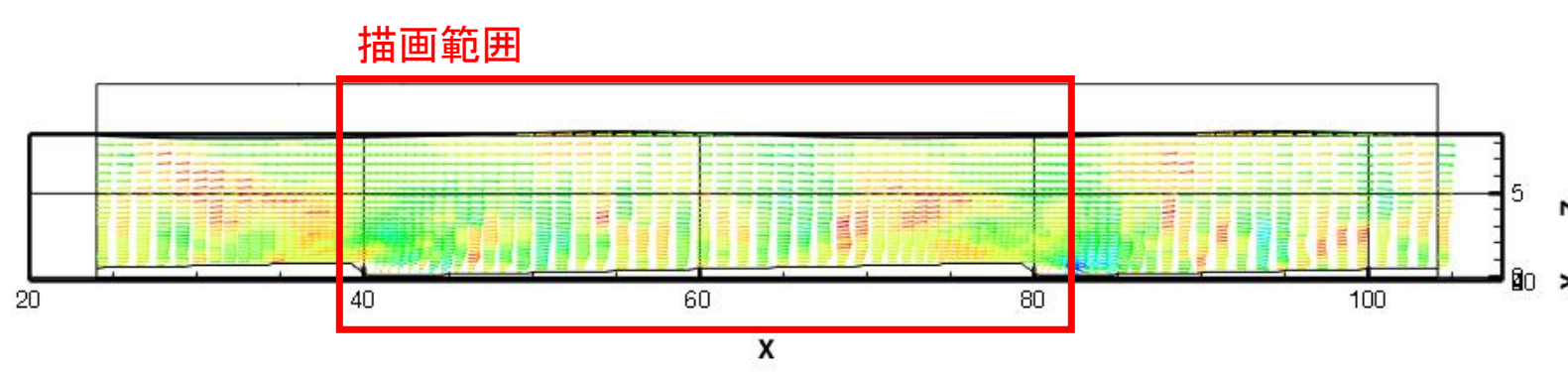
小関博司

中山昭彦先生(アイオワ大→神戸大(名誉教授)→マレーシアの大学の教授(専任))のご指導の下
LES解析によって組織渦等に着目しながら解析を進めている。

ケースstudy(2)

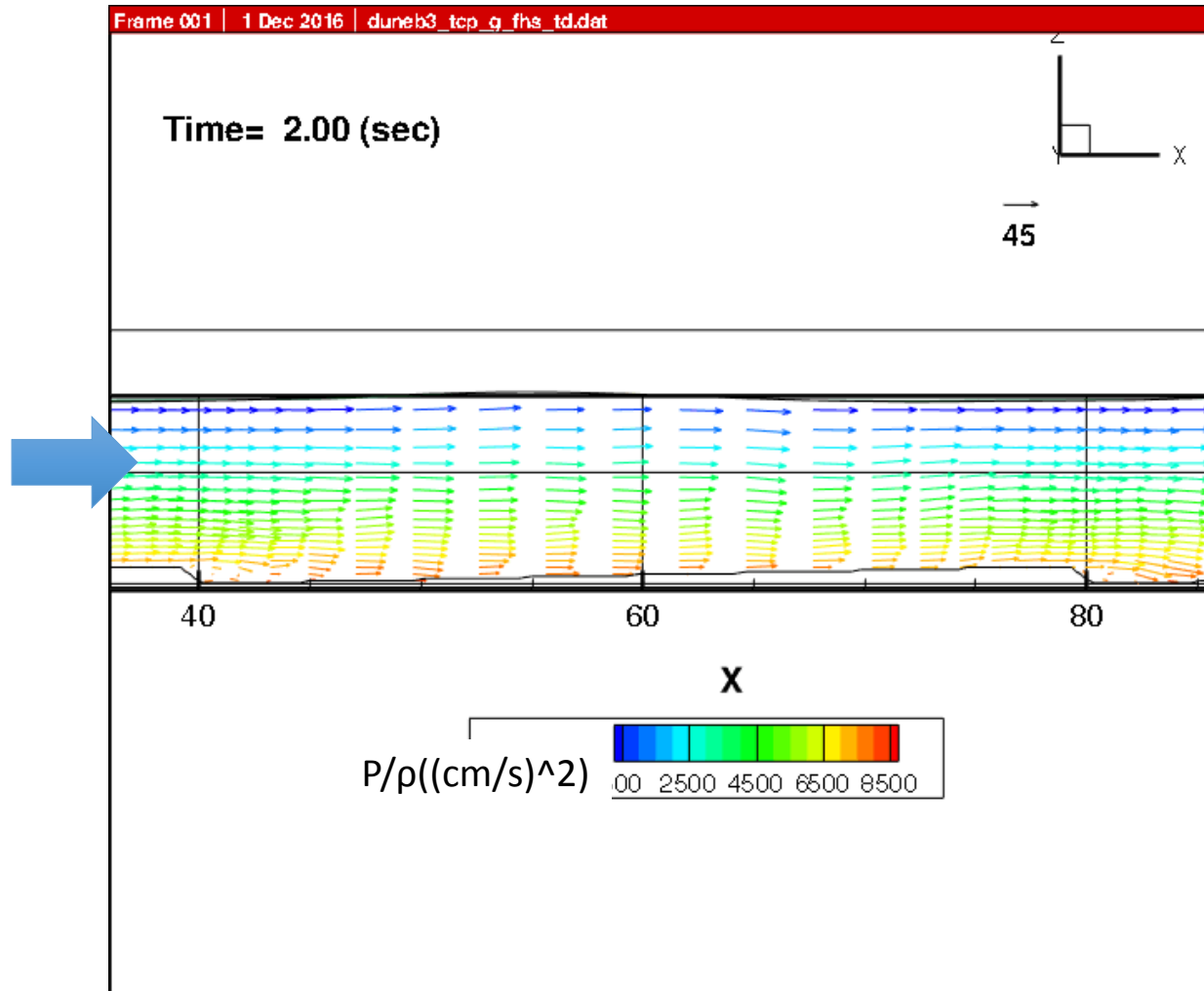
- 時間解像度 $dt=5E-5\text{sec}=1/20000\text{sec}$
- 格子解像度 $dz: 0.10\text{-}0.30\text{cm}$, $dx: 0.2\text{-}0.6\text{cm}$, $dy: 0.50\text{cm}$
- 計算領域: $x=80\text{cm}$ (二波長分), $y=32\text{cm}$, $z=11.50\text{cm}$
- 計算対象時間: $2.0\sim 3.45\text{sec}$ (CPU時間162hour)
- 波長 $L: 40\text{cm}$
- 波高 $H: 0.80\text{cm}$
- 波形勾配 $H/L: 0.02$

計算領域と描画範囲

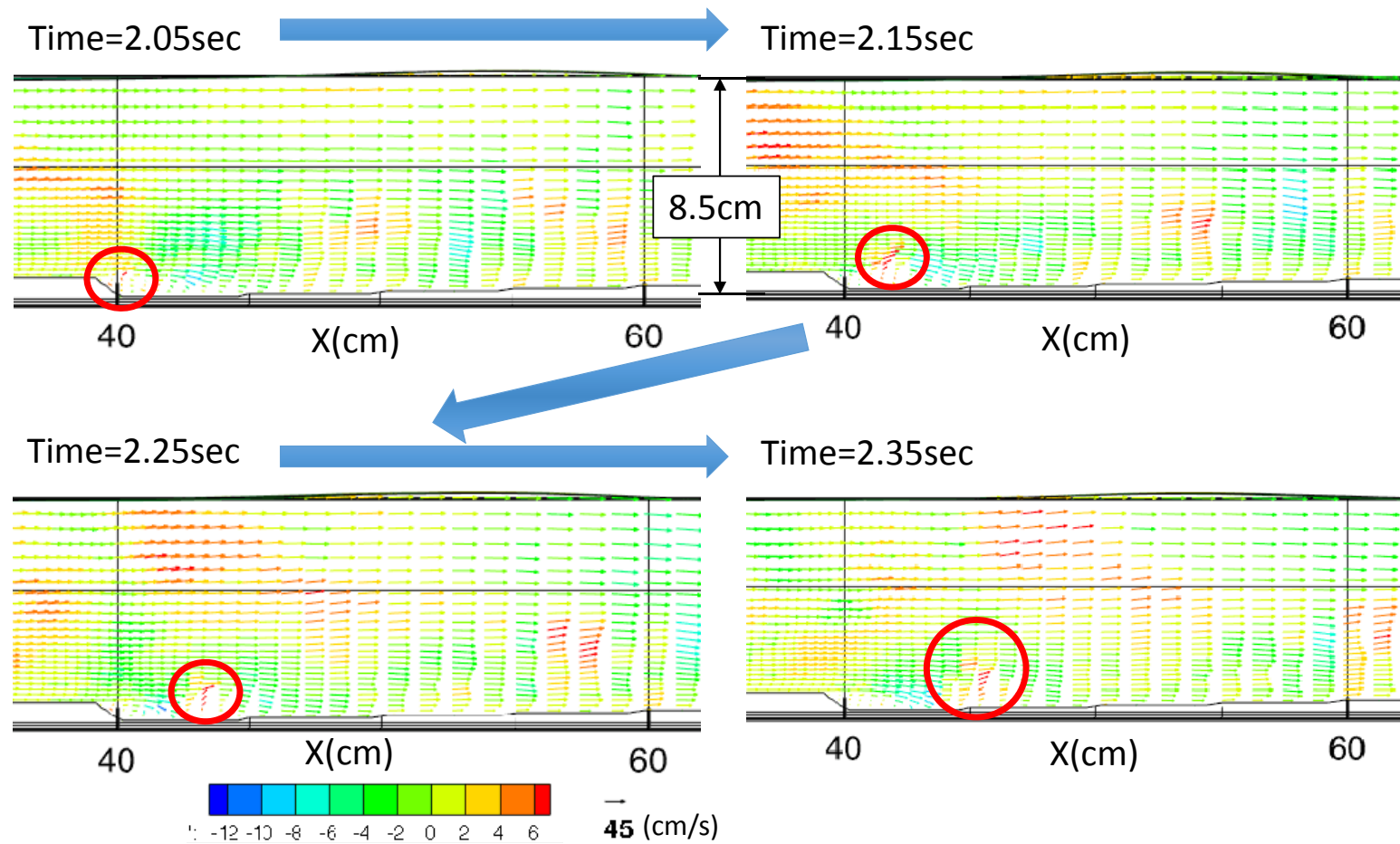


- ・計算領域は二波長分、そのうち $x=40\sim 80\text{cm}$ の流況を描画。

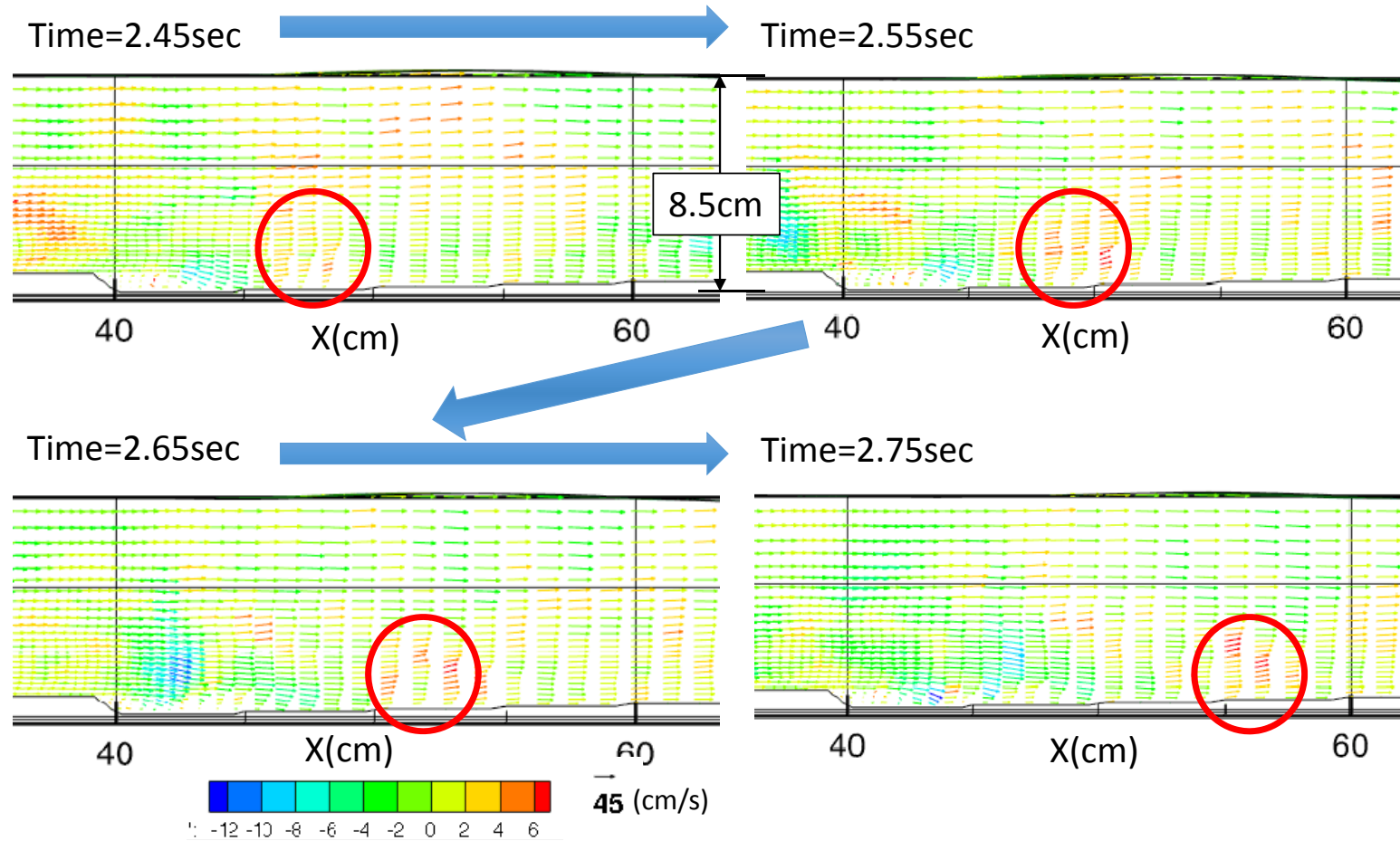
計算結果(縦断図、動画)



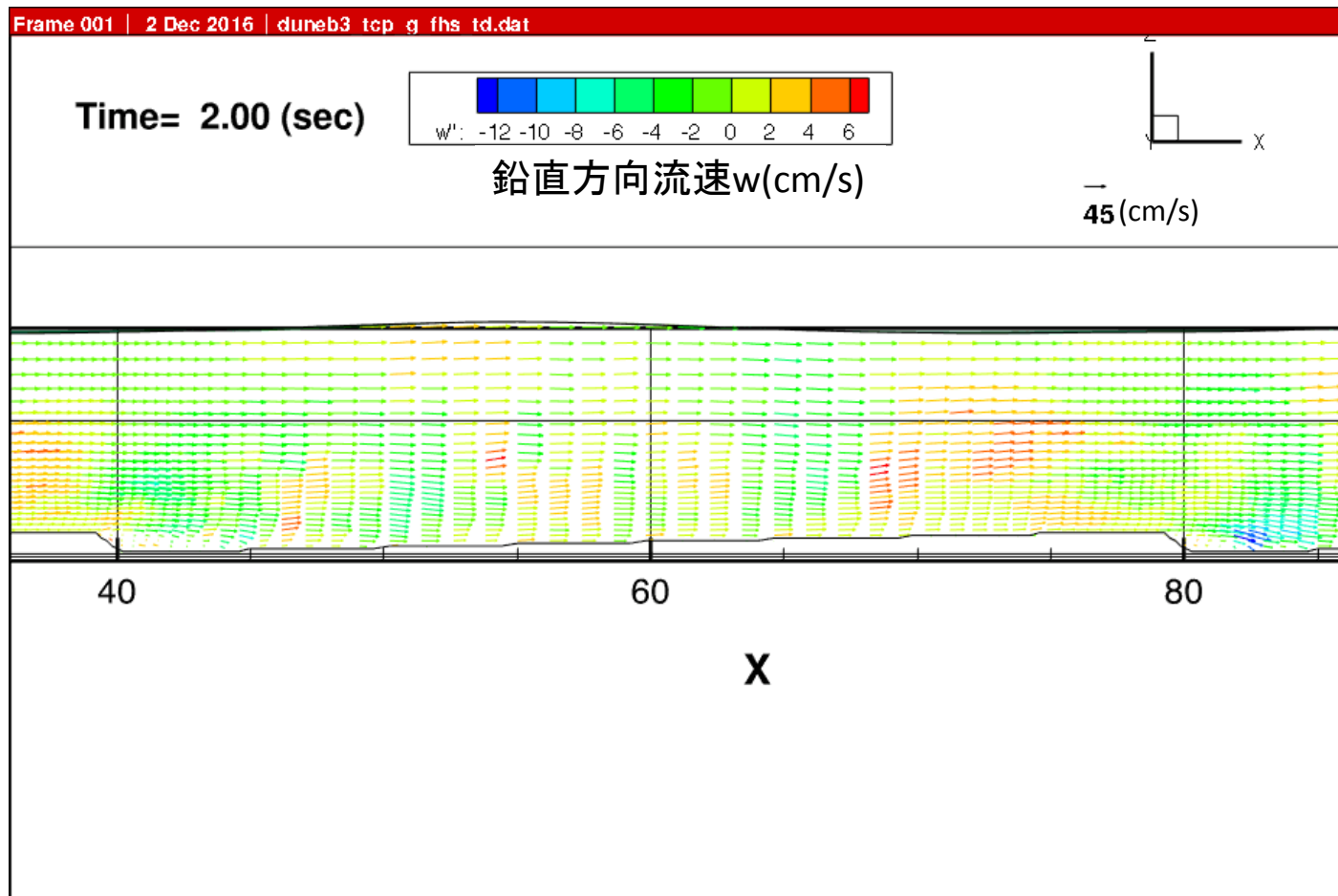
上昇流の発生と流下(瞬間値)



上昇流の発生と流下(瞬間値)



計算結果(動画、速度ベクトル)



まとめ

- ・掃流砂と土石流の応力構造 流砂力学の中心
- ・移動床上における浮遊砂流の掃流砂の領域は、勾配の増加に伴い増加し、平衡勾配は、掃流砂のみの場合よりも緩くなる。
- ・West Rapti川の砂礫と微細砂の分級現象において、微細砂は基本的な役割を果たしている。自然河川には類似の現象があるのかもしれない。→現地を見るのが楽しみ
- ・今後の浮遊研究: 従来から指摘されているように、ボイル等による流砂の浮上現象に着目する必要がある。
(掃流砂層からの浮上現象、再付着点近傍の浮上現象など)