

# 基礎水理の実際問題への応用 ～中小河川研究を中心に～

(独) 土木研究所 自然共生研究センター  
専門研究員 原田守啓

# 本日の内容

- **話題① 土砂水理学における河床形態区分**  
⇒ **中小河川の川幅設定の議論への応用**
- **話題② 幅水深比が小さい開水路流れの三次元構造**  
⇒ **単断面河道の護岸粗度，断面形状の違いによる境界面せん断力分布の評価**
- **話題③ 粗面乱流の流れ場の鉛直構造**  
⇒ **礫床河川の遊泳性魚類の生息環境評価  
(ダム下流への土砂還元の影響評価)**
- **まとめ**

# 話題①

## 土砂水理学における河床形態区分

×

## 中小河川の川幅設定



原田守啓



高岡広樹



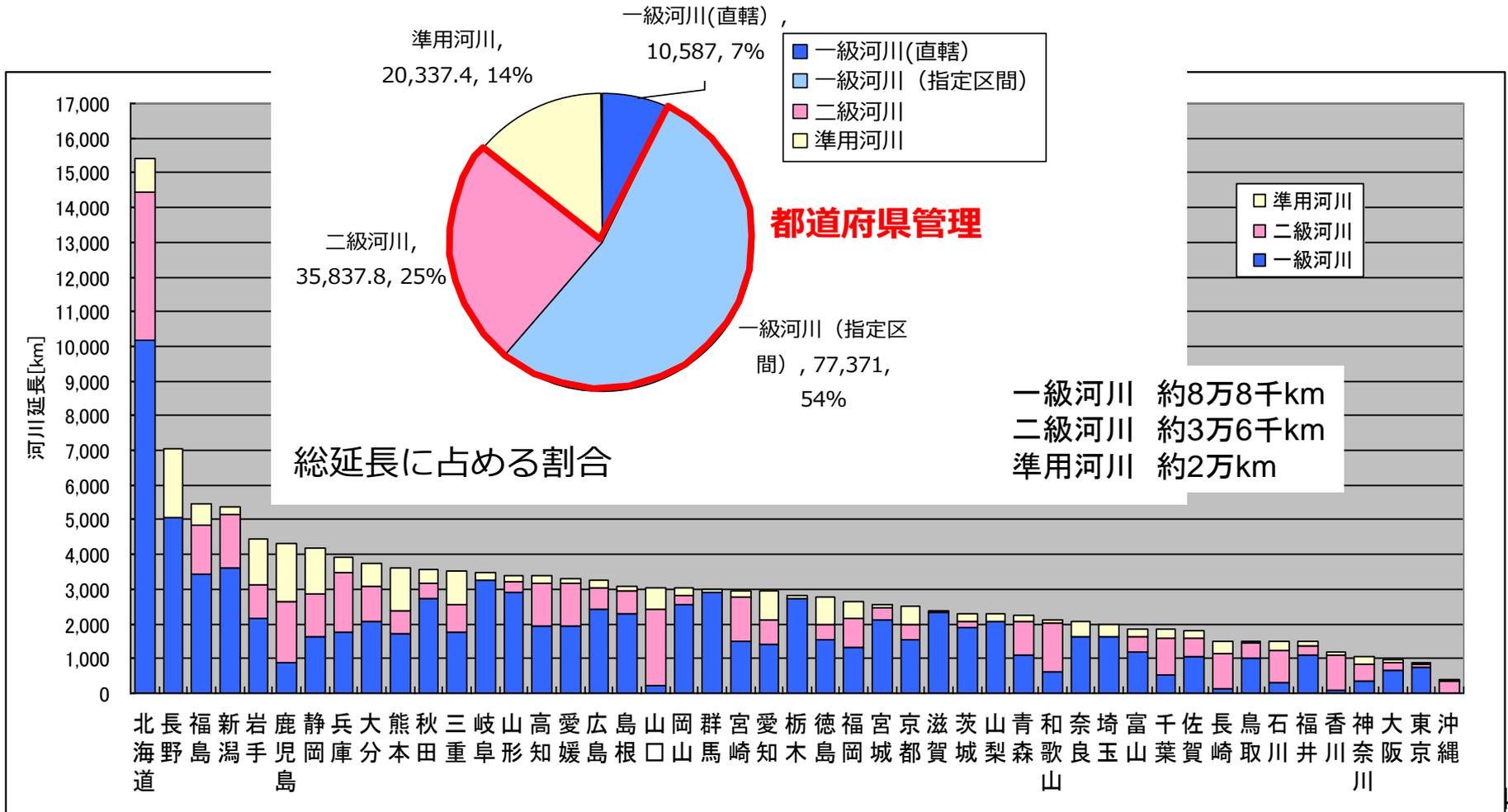
大石哲也



萱場祐一

# 中小河川の重要性

- ・日本の河川延長の大部分は、都道府県が管理する中小河川
- ・大河川の流域を構成するのは中小の流入支川





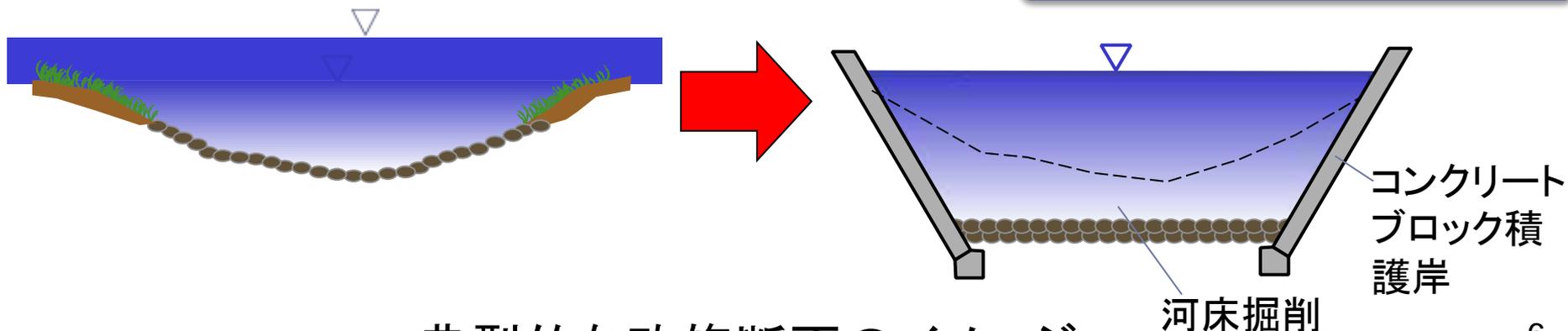
# 日本の単断面河道

- 我が国の中小河川改修は、昭和50年代に集中的に進められた。

S52~61 中小河川改修の進展  
(第5次, 第6次治水事業五箇年計画)

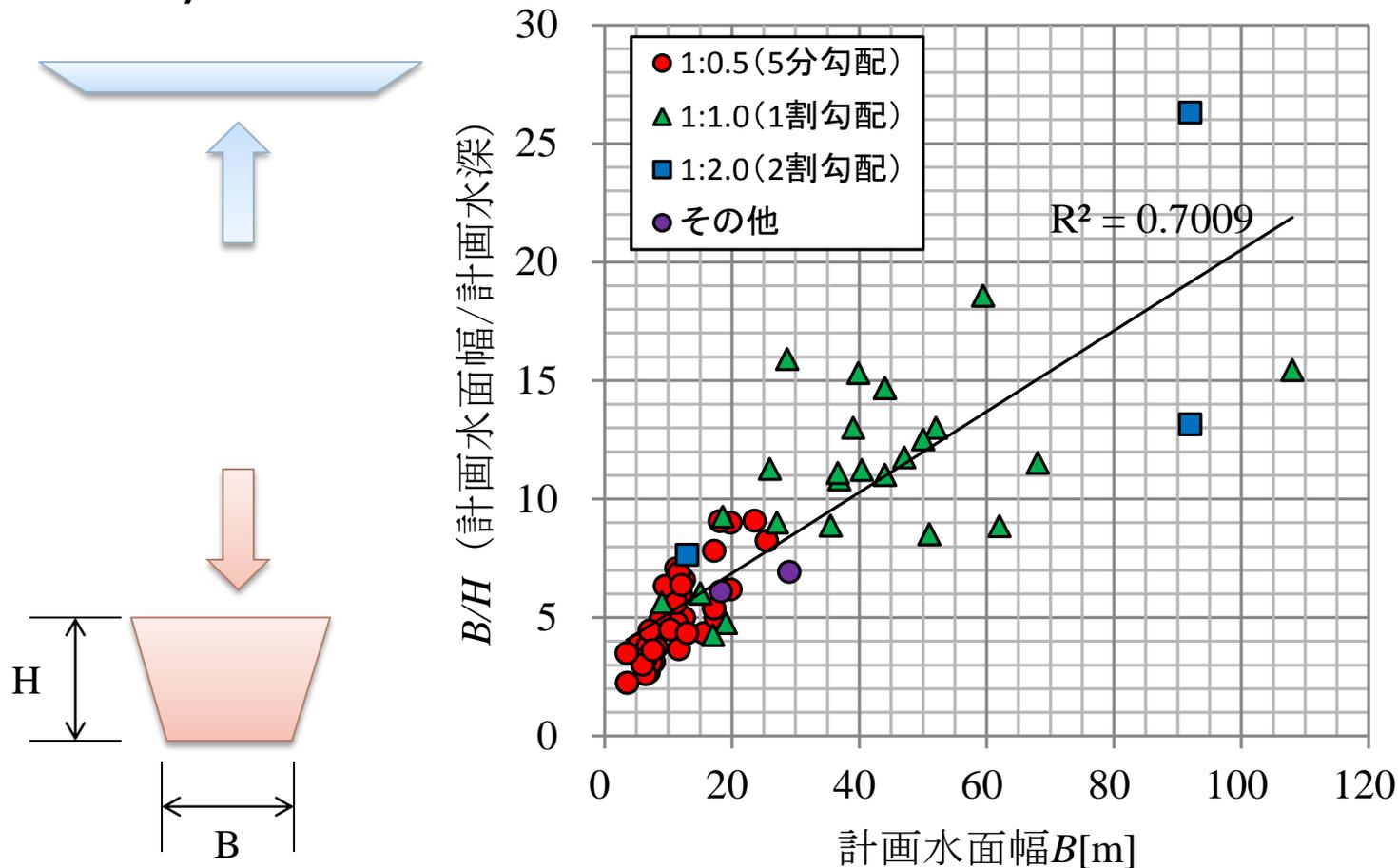
- 高度成長期と当時の技術基準を背景に、コンクリートブロック積を多用した**狭くて深い台形断面**に。

S51構造令  
ブロック積工法の標準化



# 中小河川改修における断面形状

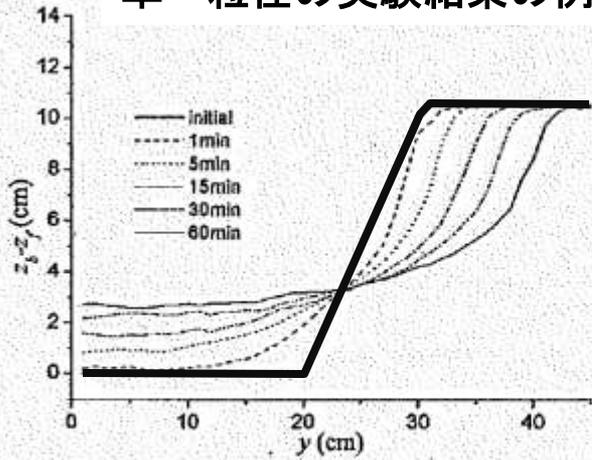
- 川幅が狭い河川ほど，より川幅水深比 $B/H$ が小さく，護岸を立てた**狭くて深い断面**を採用



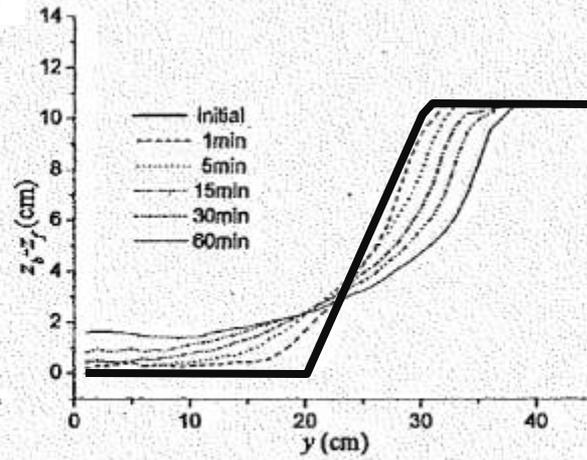
計画水面幅 $B$ と川幅水深比 $B/H$ の関係  
岐阜県S59計画資料より

# 護岸がなければ川はどうなるか？

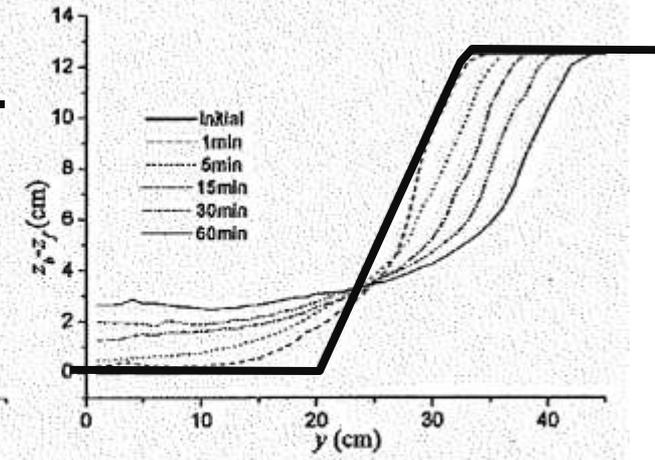
## 単一粒径の実験結果の例



(a) Case 1

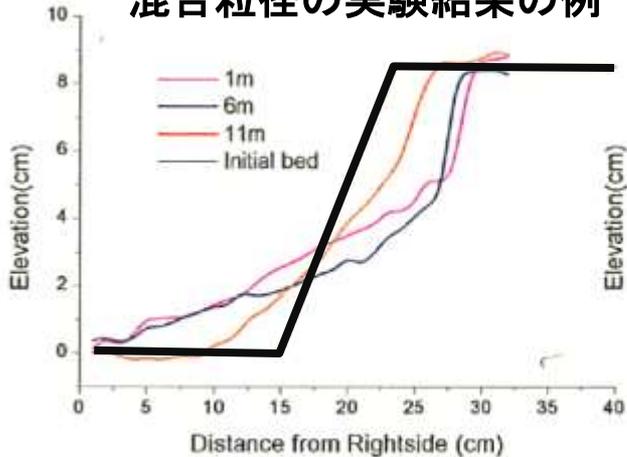


(b) Case 2

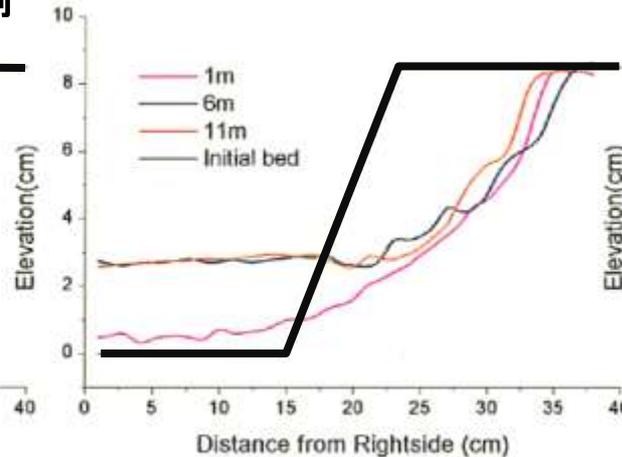


(c) Case 3

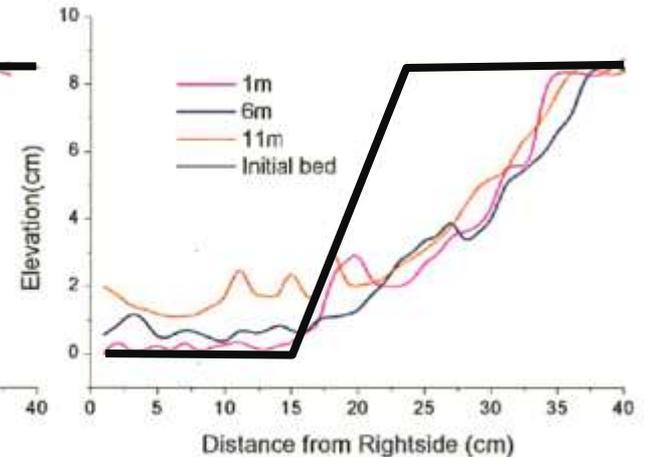
## 混合粒径の実験結果の例



(a) 1min



(b) 15min

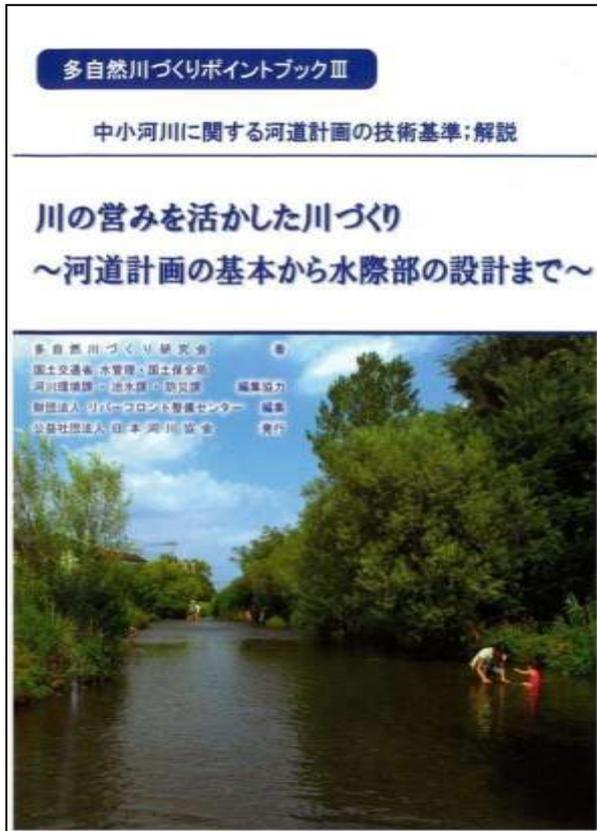


(c) 120min

狭くて深い断面は、自然河道に対して、河床面に大きな負担（河床面せん断力）が働いている。

# 多自然川づくりへの展開と 中小河川の新しい技術基準

- H20.3 「中小河川に関する河道計画の技術基準」
- H22.8 同基準改訂 →ポイントブックIII発刊
  - 都道府県が管理している場合が多い中小河川の河道計画について、かなり具体的な考え方を提示。



## 「多自然川づくりポイントブックIII」 中小河川に関する河道計画の技術基準；解説

A4版(270頁) 価格(税込)：2,500円

著者：多自然川づくり研究会

編集協力：国土交通省水管理・国土保全局

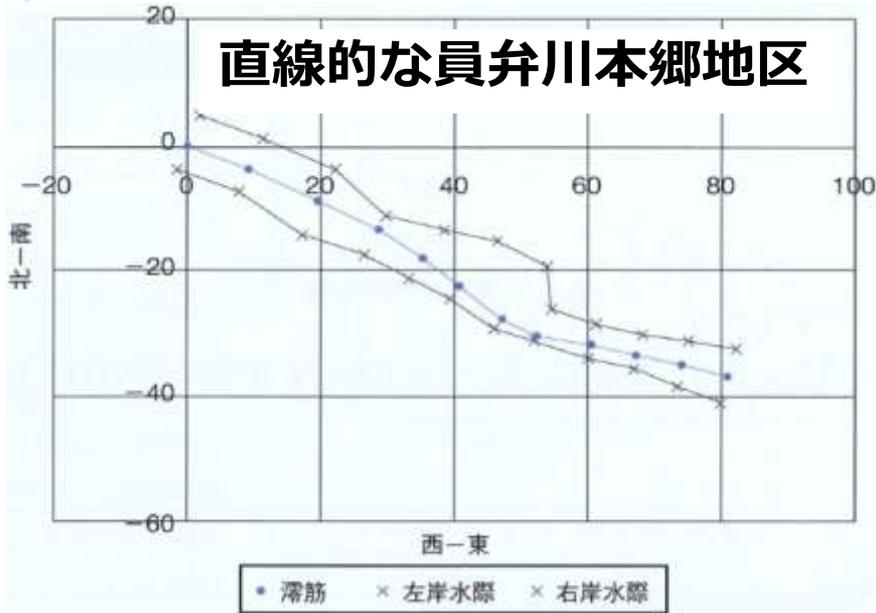
編集：財団法人 リバーフロント整備センター

発行：公益社団法人 日本河川協会

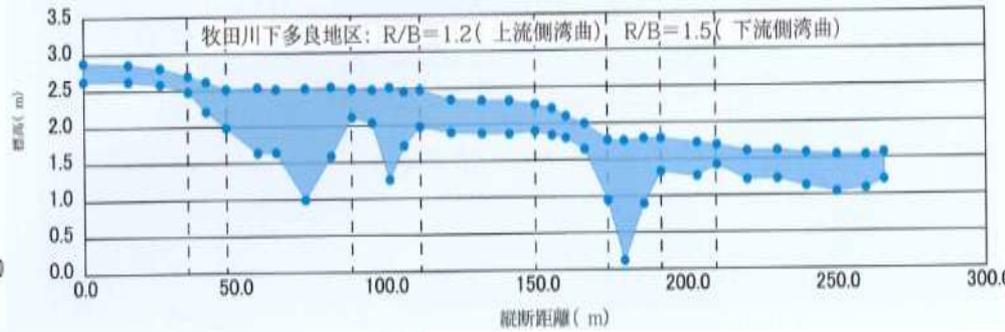
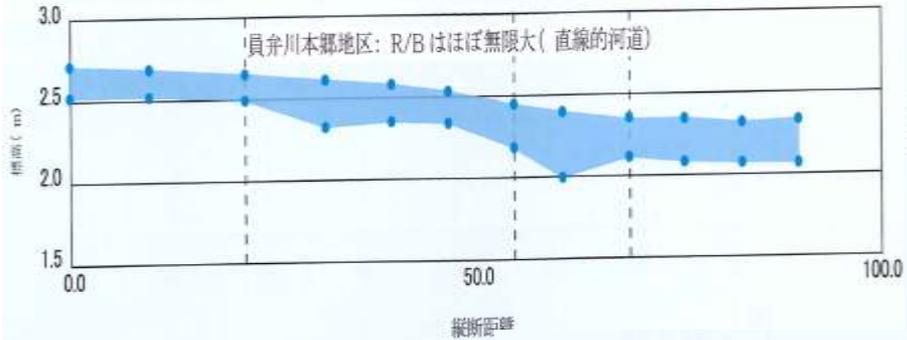
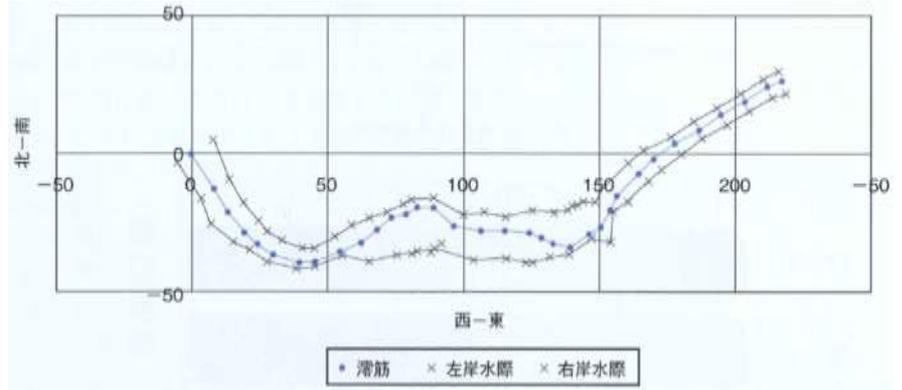


# まっすぐな川と曲がりくねった川

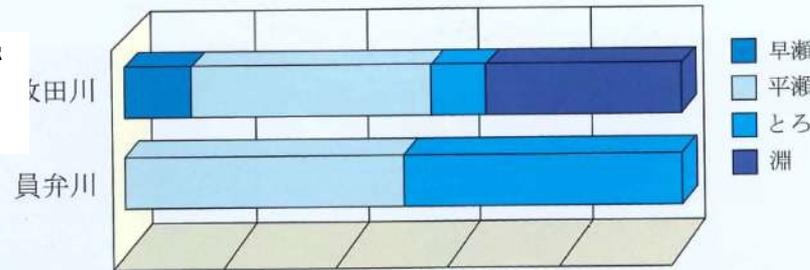
## 直線的な員弁川本郷地区



## 蛇行した牧田川下多良地区



平瀬とトロばかりで  
単調...



水深の浅い早瀬と  
深い淵のメリハリが  
効いている!



# 川幅を確保すると、 砂州がついて環境が多様になる



川幅が水深の10倍

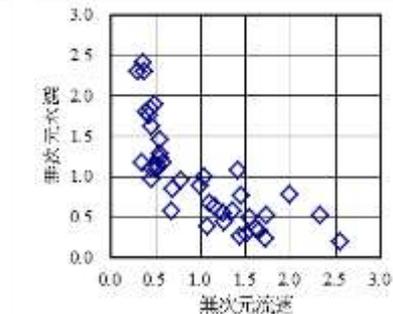
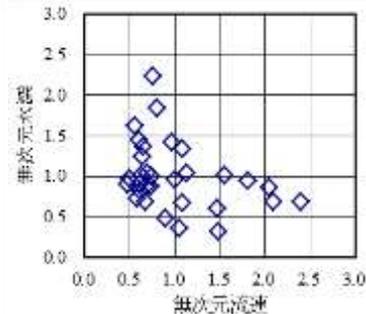
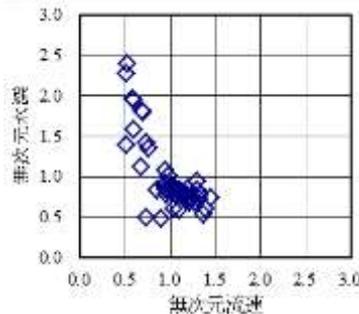
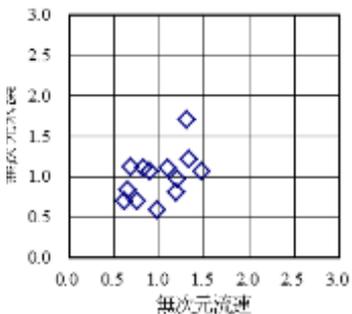
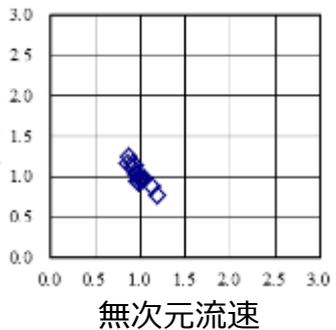
川幅が水深の17倍

川幅が水深の31倍

川幅が水深の48倍

川幅が水深の85倍

無次元水深



注1 「川幅が水深の○倍」の「水深」は、洪水で川が満杯の時の水深を基準にしています。

注2 上記グラフの水深と流速は、流心部に沿って縦断的に測定されたもので、水際部の数字は含まれていません。



# 水際がとっても大事



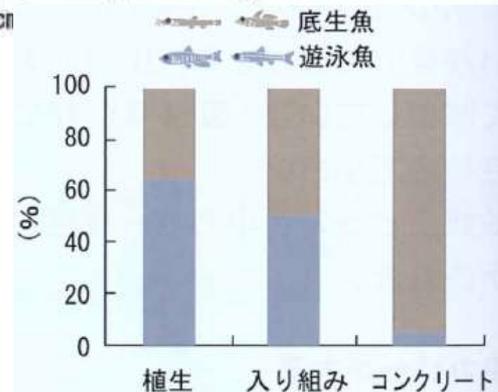
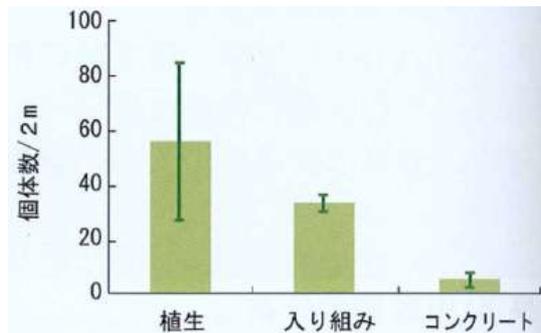
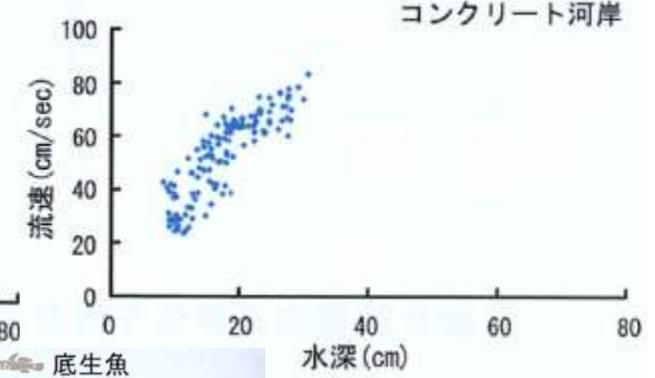
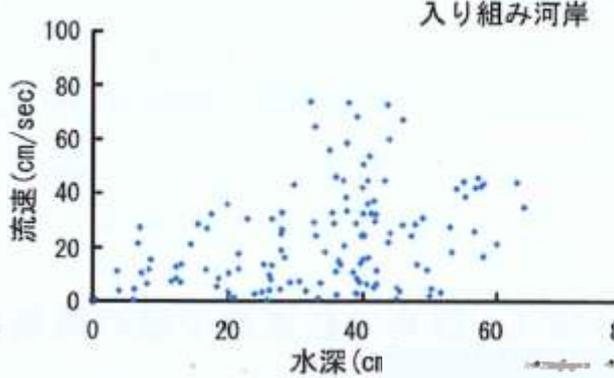
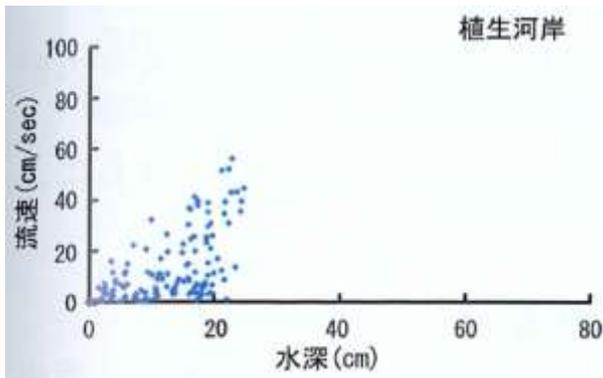
C: 植生河岸



B: 入り組み河岸



A: コンクリート護岸



# 流速・水深の多様性は 何に依存しているのか？

水深

## 横断方向の異質性

みお筋の横断方向に沿った流速・水深・底質・光の空間的な変化

中流域では主として**水際部の形状**、**植物の繁茂**によってもたらされる。

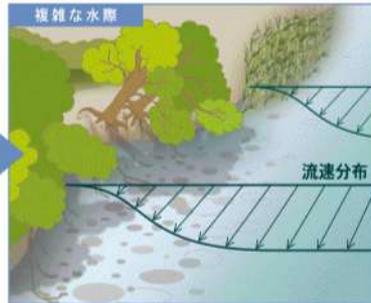
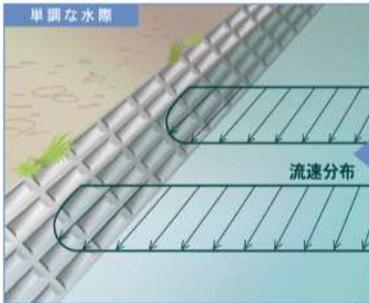
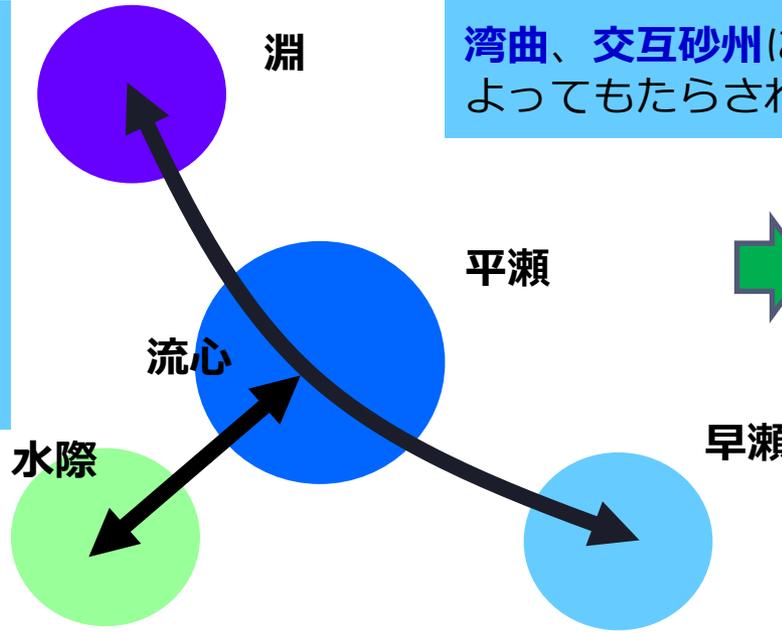
## 縦断的な異質性

流心に沿った流速・水深・底質の異質性

**湾曲**、**交互砂州**に伴う**瀬・淵の形成**によってもたらされる。

川幅拡幅による  
**瀬淵の形成**  
(湾曲部は内岸拡幅)

自然河岸・  
水際部の形成



# 河床形態の区分

河床形態		形状・流れのパターン		移動方向	河床波の特性	
		縦断面図	平面図			
小規模河床形態	低水流領域	砂漣		直線状 曲線状	下流 河床波の移動速度は、流水の速度よりも小さい。砂漣の波長は河床材料の粒径の約 500~1500倍である。	
		砂堆		三日月状 舌状	下流 河床波の上流側斜面は、通常勾配の急な下流側斜面に比べると緩やかに傾斜している。砂堆の波長は水深の約 4~10倍である。	
		遷移河床				発達初期段階にある小さな砂漣と砂堆が、平坦河床の間に広がっている。
	高水流領域	平坦河床				多量の流砂が平坦な河床上を流れている。
		反砂堆			上流 停止 下流	河床波と同位相の水面波と強い相互干渉を持つ河床波
中規模河床形態	交互砂州			停止 下流	水流は水路内を曲がりくねって流れる。交互砂州の波長は水路幅の約 5~16倍である。	
	複列砂州			下流	-	
	うろこ状砂州			下流	うろこ状砂州の $B/H$ が非常に大きい領域で発生する。それは魚のうろこのように見える。	

# 河床形態の発生領域区分

## • 小規模河床形態

## • 中規模河床形態

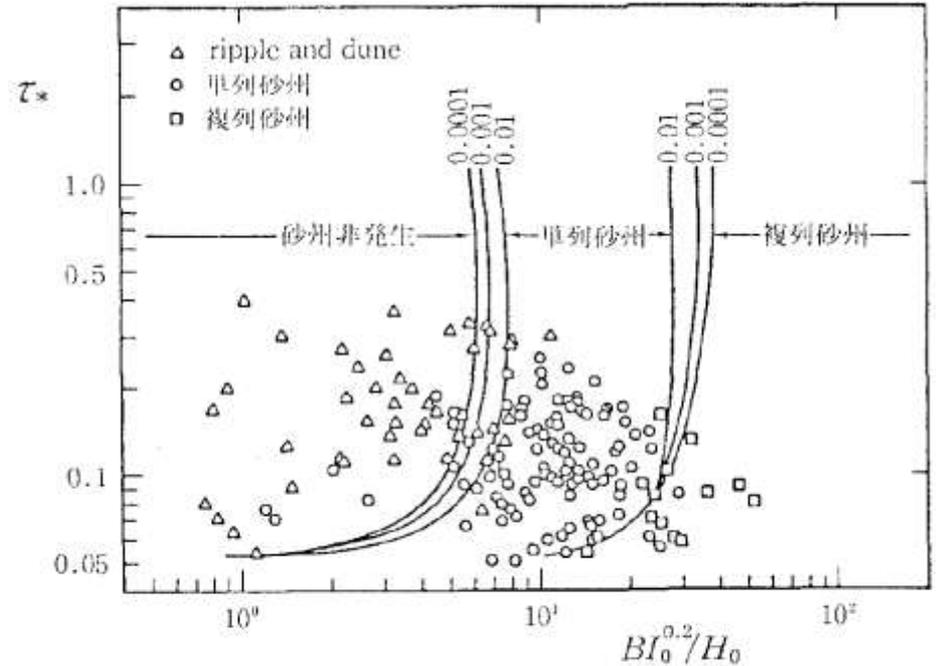
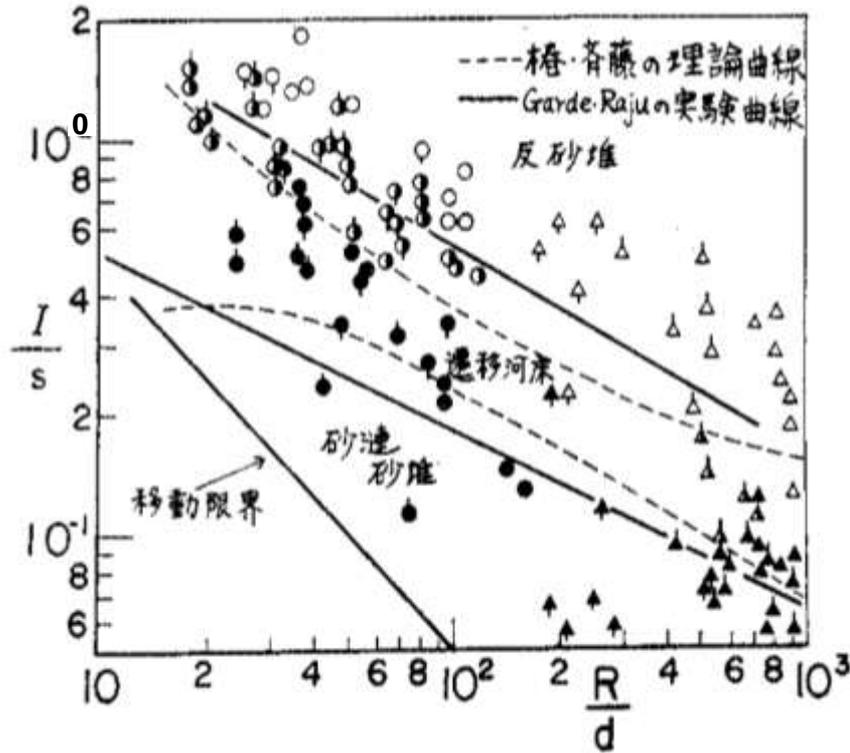


図-1.3 河床形態の領域区分 (Garde らおよび椿らの方法)

図-5. 理論解析結果を修正して作った実用的な区分図

$\tau_* > 0.1$  の範囲 簡略化表現

$$BI_0^{0.2}/h_0 < 7$$

砂州非発生領域

$$7 < BI_0^{0.2}/h_0 < 30$$

単列砂州領域

$$30 < BI_0^{0.2}/h_0$$

複列砂州領域

土木学会水理委員会  
移動床流れの抵抗と河床形態  
研究小委員会(1973) 一部修正

黒木・岸(1984)

# 河床形態の発生領域区分

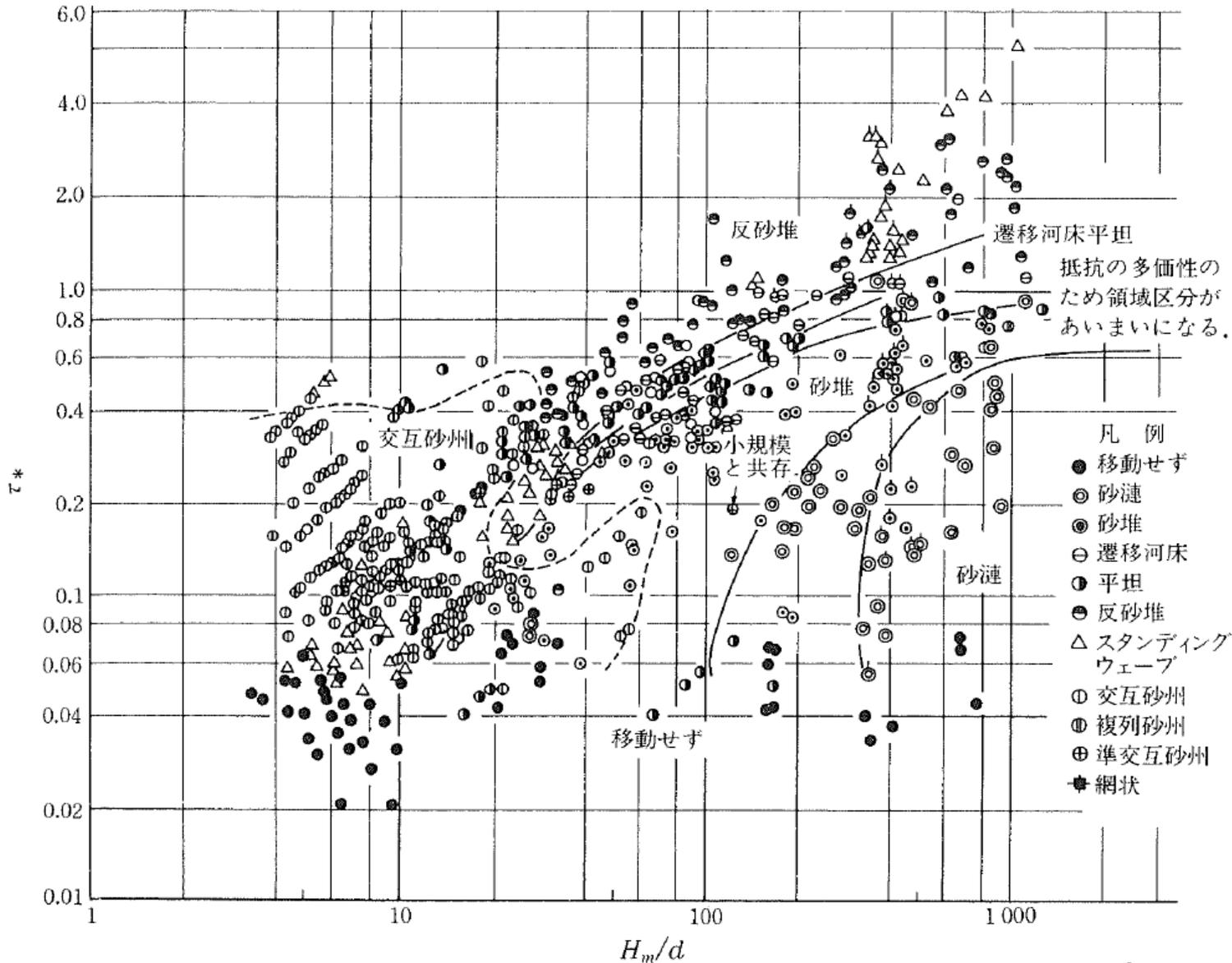


図-3.1 中規模河床波の発生域( $B/H_m=10\sim 20$ の場合)

# 方法：現地調査と対象地点の選定

## • 現地調査（川幅，代表粒径）

- 岐阜県，三重県の約100河川300箇所
- 直線区間の典型的な河道断面について、川幅( $B$ )，代表粒径( $dr$ )について調査。

## • 標高

- 基盤地図情報数値標高モデルの5mメッシュ（未整備地域は10mメッシュ）データを利用。

## • 流域境界

- 標高データより全調査地点の流域界をArcGISのツールであるArcHydroにより求めた。

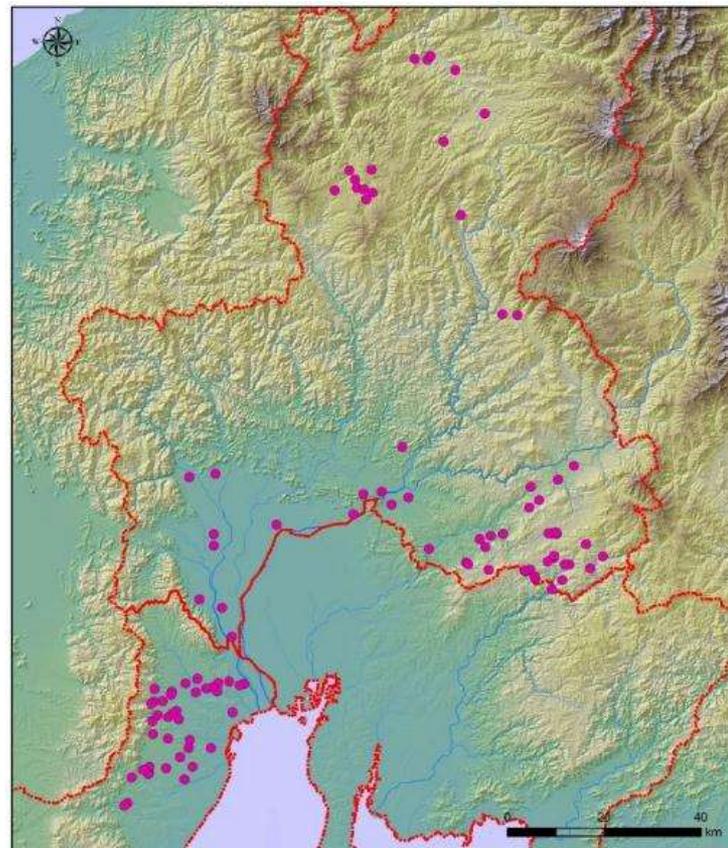
## • 河床勾配

- 河川に沿って50m間隔で標高値を抽出し，縦断図を作成し，それを基に平均河床勾配を算出した

## • 対象地点の選択

- 「河床勾配が1/1,200以下（河床変動が活発）」
- 同一河川のうち，「セグメントが異なる」，「代表粒径( $dr$ )が1オーダー以上離れている」，「流域面積が200km<sup>2</sup>以下」で複数地点のデータを抽出

● 抽出された地点



三重県，岐阜県の解析対象地点  
(74 河川95 箇所)

# 方法：川幅水深比の算出

確率 $T$ の $t$ 継続時間確率降雨量

$$r_t^T = \frac{bT^m}{(t+a)^n}$$

$r_t^T$  : 確率 $T$ の $t$ 継続時間確率降雨量 (mm/h)

$T$  : 確率年 (年)

$t$  : 継続時間 (h)

$a, b, m, n$  : フェア式パラメータ

継続時間(t)

$$t = 1.67 \times 10^{-3} \left( L / \sqrt{S} \right)^{0.7}$$

$L$  : 流域最遠点から調査地点までの流路長 (m)

$S$  : 平均流路勾配

(洪水到達時間\_土研式)

1年確率 $t$ 時間雨量

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f r_t^1 A$$

$Q_p$  : ピーク流量

$f$  : 流出係数 (土地の地被状態に依存)

$A$  : 流域面積

等流水深

$$H = \left( \frac{nQ_p}{B\sqrt{I_b}} \right)^{3/5}$$

+

調査地点の  
川幅 ( $B$ )



川幅水深比  
( $B/H$ )

なお、粗度係数は、河川砂防技術基準(案)計画編等を参考に、岩河床や低平地で0.030とし、それ以外は0.035と設定

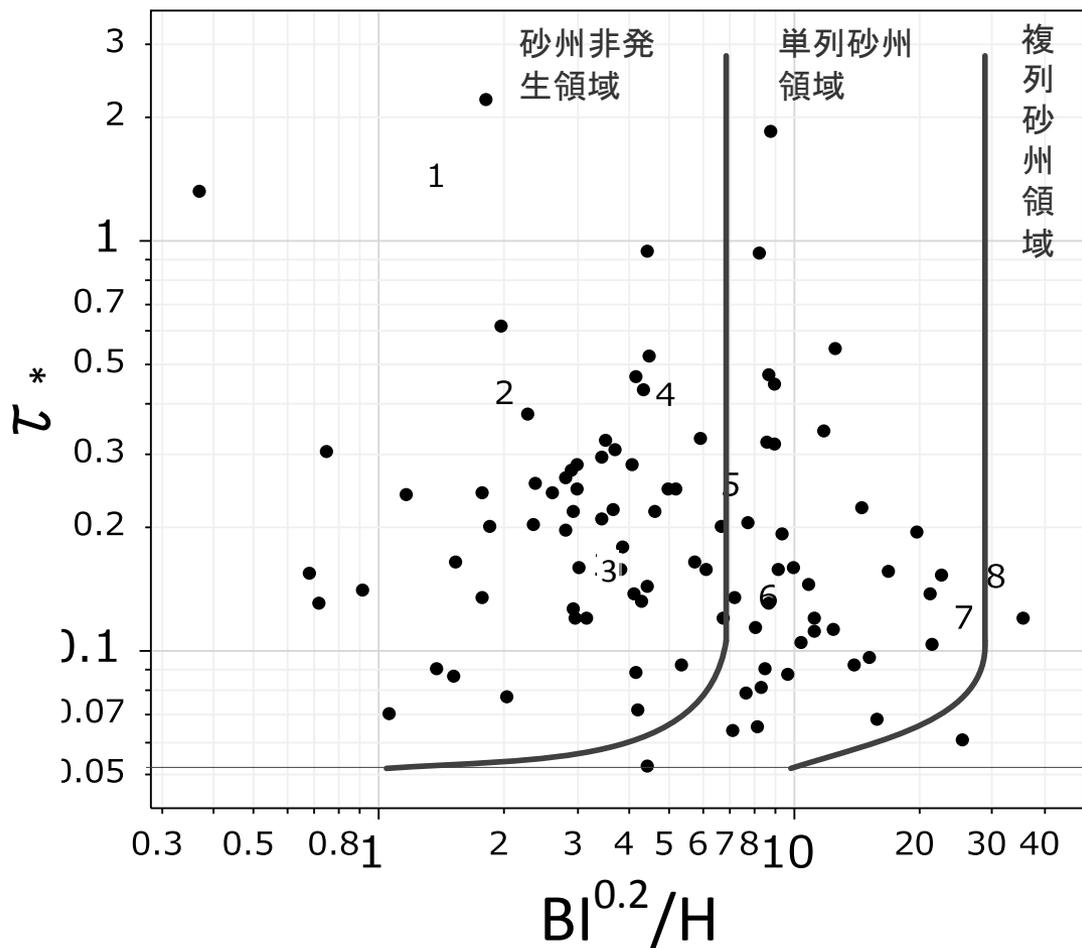
# 川幅水深比と河道景観との関係

川幅(B)、川幅水深比(B/H)



・狭くて深い川(B/Hが小さい川)は、河床が低下しやすく、岩盤化、低下を防ぐ対策(護床工)がとられ、河道の安定性が損なわれやすい。また、水生生物の生息場所となる瀬・淵も形成されない。

# 河床形態区分と河道景観との関係



黒木・岸(1984)

$BI^{0.2}/H < 7$   
 $7 < BI^{0.2}/H < 30$   
 $30 < BI^{0.2}/H$

砂州非発生  
 単列砂州  
 複列砂州



1. 殿川  $B=6, B/H=3$



2. 明智川  $B=7, B/H=5$



3. 千旦林川  $B=10, B/H=9$



4. 妻木川  $B=10, B/H=10$



5. 辛沢川  $B=11, B/H=17$



6. 藤川  $B=17, B/H=23$

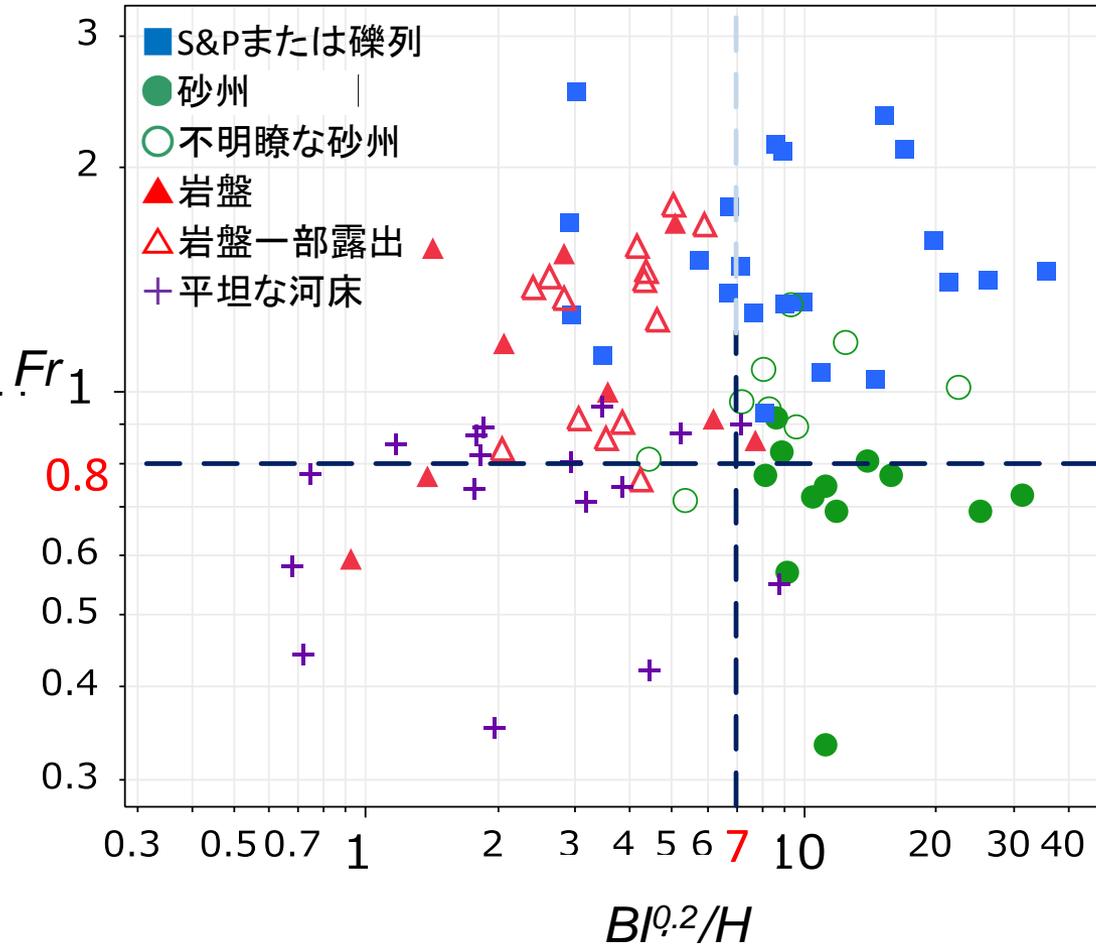


7. 鳥井戸川  $B=23, B/H=52$



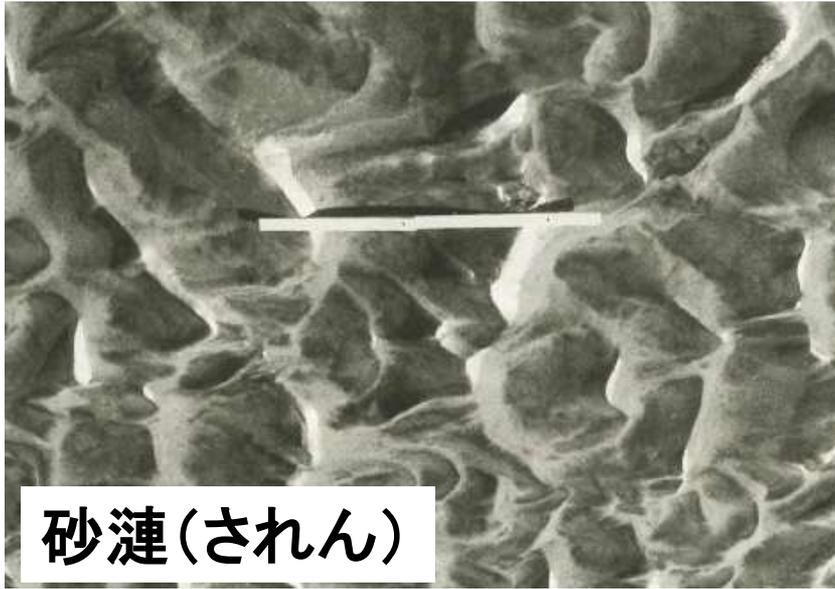
8. 三滝川  $B=59, B/H=85$

# 中小河川の断面設定（川幅水深比）と河道景観の関係



# 小規模河床形態①

表 1-1 河床波の特徴と定義<sup>1)</sup>



砂漣(されん)

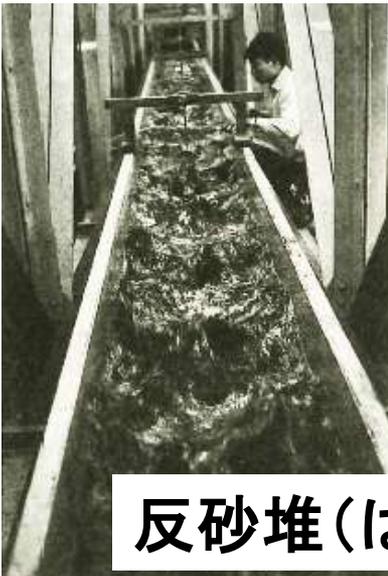


砂堆(さたい)

河床形態	形状・流れのパターン		移動方向	
	縦断面図	平面図		
小規模河床形態 低水流領域	砂漣		直線状 曲線状	下流
	砂堆		三日月状 舌状	下流
	遷移河床			
高水流領域	平坦河床			
	反砂堆			上流 停止 下流
中規模河床形態	交互砂州		$L_s$	停止 下流
	複列砂州			下流
	うろこ状砂州		$B_s$ $L_s$	下流

# 小規模河床形態②

表 1-1 河床波の特徴と定義<sup>1)</sup>

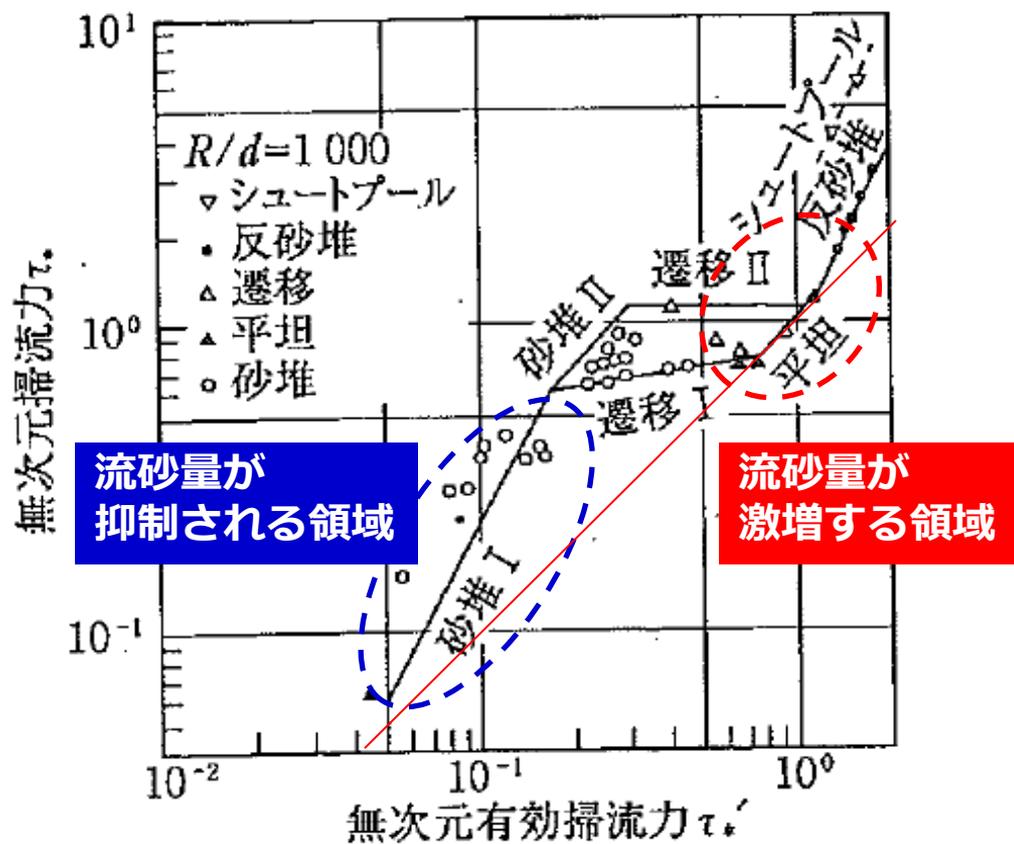


河床形態	形状・流れのパターン		移動方向	
	縦断面図	平面図		
小規模河床形態 低水流領域	砂漣		直線状 曲線状	下流
	砂堆		三日月状 舌状	
	遷移河床			下流
高水流領域	平坦河床			
	反砂堆			上流 停止 下流
中規模河床形態	交互砂州			停止 下流
	複列砂州			下流
	うろこ状砂州			下流

# 河床波発生領域の遷移を通じた 流砂量増加の可能性

- 掃流力 = 河床面に作用する有効掃流力  
+ 河床波による形状抵抗に対応した応力

名称		形状・流れのパターン	
		縦断面図	平面図
Lower regime	砂漣		
	砂堆		
Transition	遷移河床		
Upper regime	平坦河床		
	反砂碓		



# 話題①のまとめ

- 土砂水理学の既存の知見から、多種多様な中小河川の姿を、傾向として説明できそうである。
- 中小河川改修は、多くの場合、  
狭くて深い単断面への改修により、  
河床変動を激化（主に河床低下）させてきた  
可能性が指摘される。

## 【疑われる事象】

- 交互砂州発生領域 ⇒ 非発生領域 へのシフトによる流砂量増
  - 砂堆発生領域 ⇒ 遷移領域・平坦河床領域 へのシフトによる流砂量増
  - 反砂堆領域 ⇒ 粗な河岸が平滑な護岸に置換されStep-poolが形成されない
- 
- 川幅拡幅の目標値の提示に向けて引き続き検討。
  - 土砂供給の量と質の問題も背景にあると考えられるが、議論に耐えるだけのデータがないことが課題。

## 話題②

# 幅水深比が小さい 開水路流れの三次元構造

×

# 単断面河道の境界面せん断力分布 と断面形状



原田守啓



藤田裕一郎  
岐阜大学  
工学部

岐阜大学  
学生諸君

# 境界面せん断力分布に関する既往研究

## 滑らかな断面形状の場合

- 滑らかな断面形の潤辺に作用するせん断力分布の研究は、自然河道の安定流路形状に関する研究と関わりながら進展
- Lundgren & Jonsson(1962)
  - せん断力分布を検討し、実用上はarea methodで十分とした。

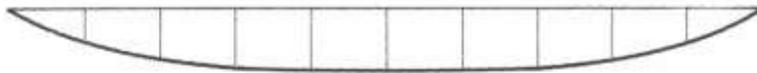


FIG. 1.—VERTICAL DEPTH METHOD

Vertical depth method

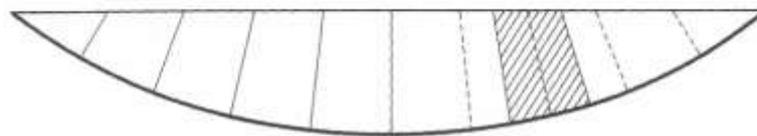


FIG. 2.—NORMAL DEPTH AND AREA METHODS

Area method

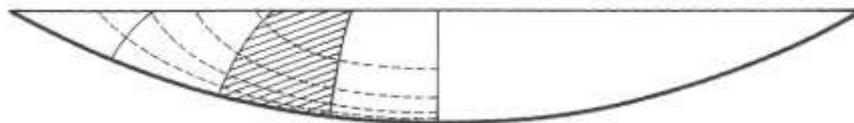


FIG. 3.—ISOVELS DASHED AND ORTHOGONALS SOLID

log velocity distribution method

せん断力分布評価方法の概念図

# 隅角部を有する断面の場合

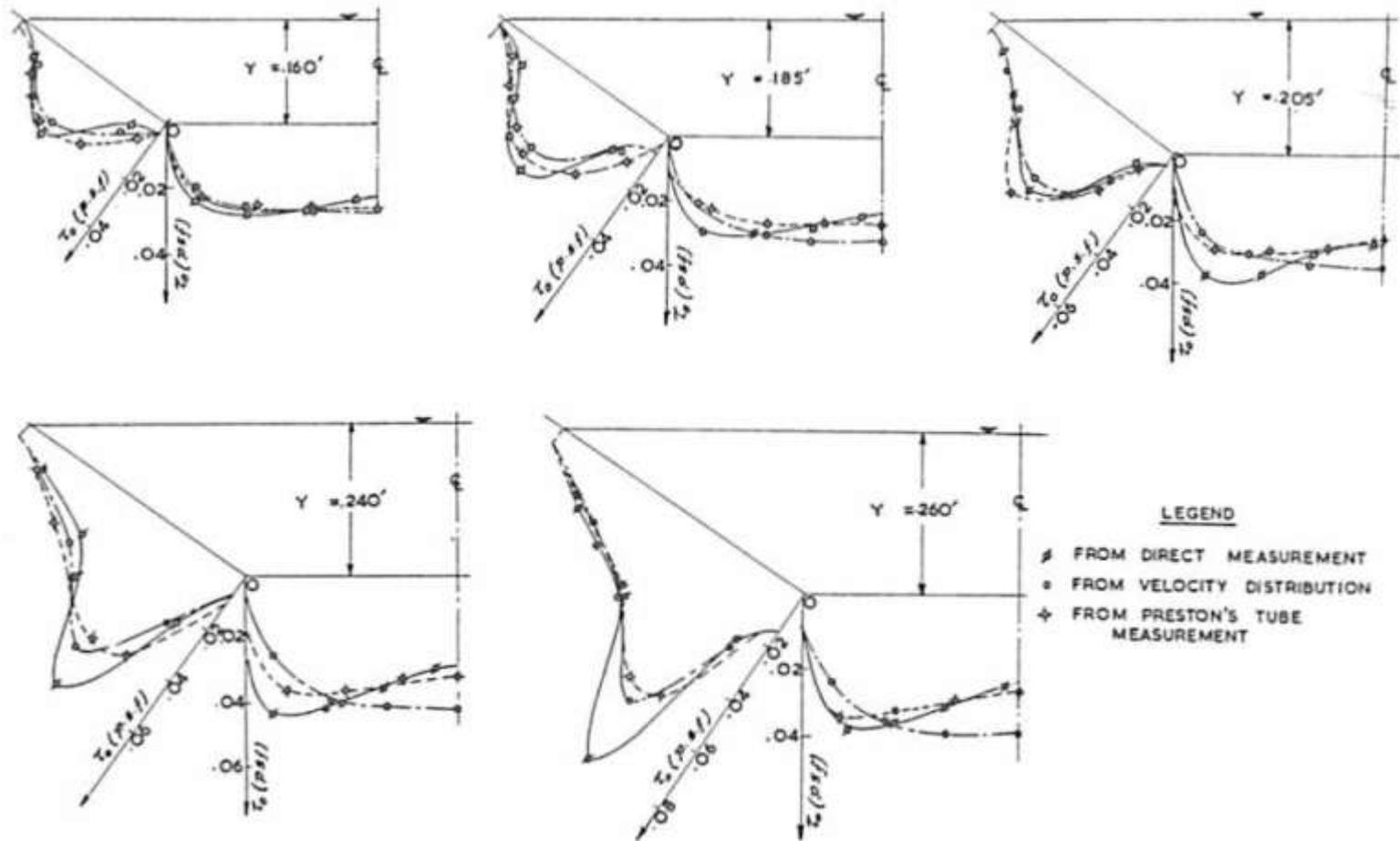
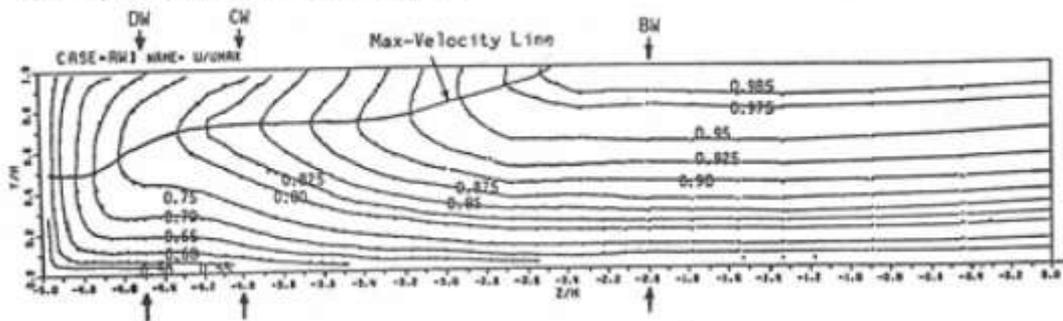


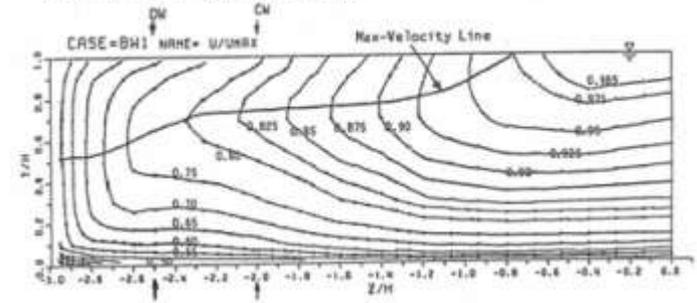
FIG. 19.—DISTRIBUTION OF SHEAR STRESS AROUND SEMIPERIMETER OF ARTIFICIALLY ROUGHENED TRAPEZOIDAL CHANNEL (SS 1-1/2 H:IV), DENSE

# 流れの構造との関係①

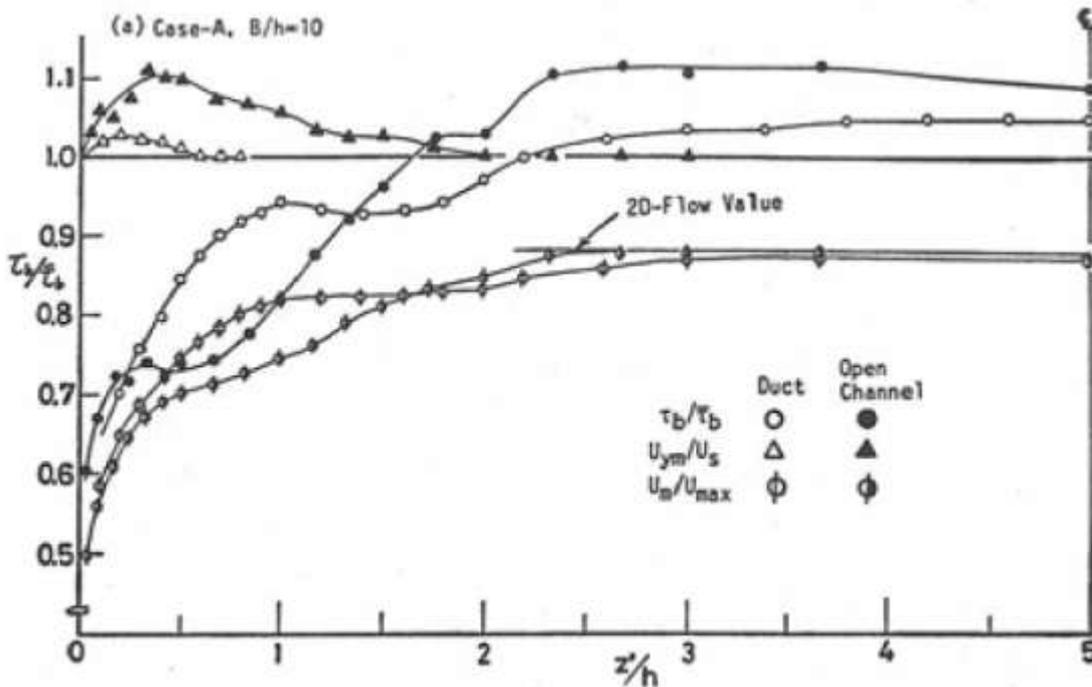
(a) Open Channel Flow,  $B/h=10$



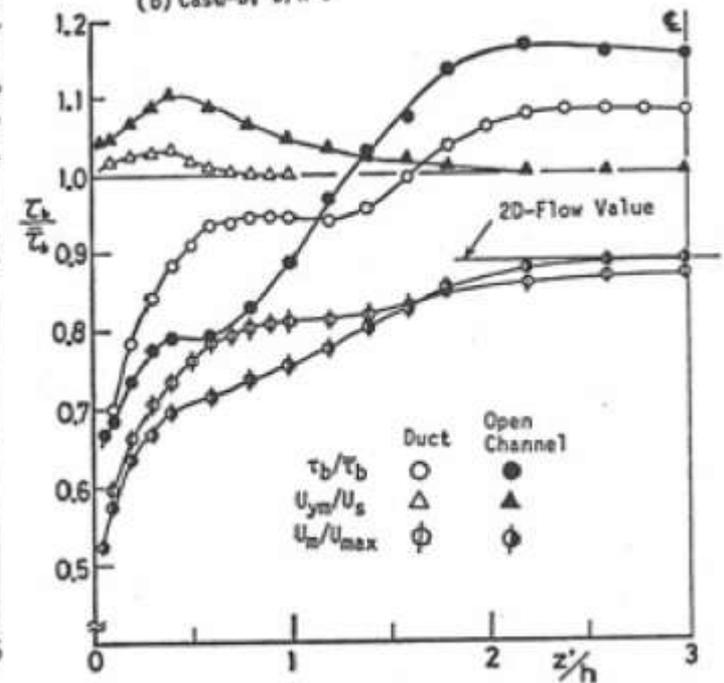
(b) Open Channel Flow,  $B/h=6$



(a) Case-A,  $B/h=10$

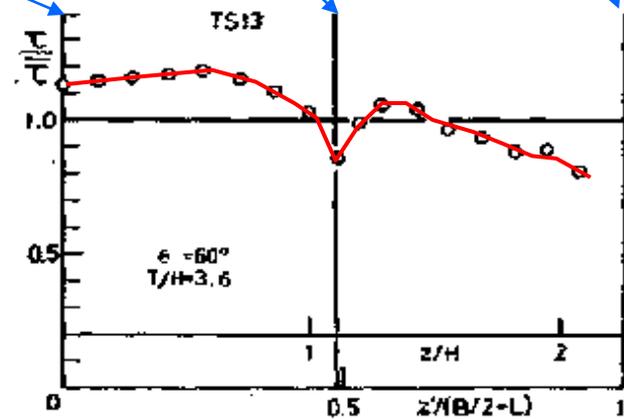
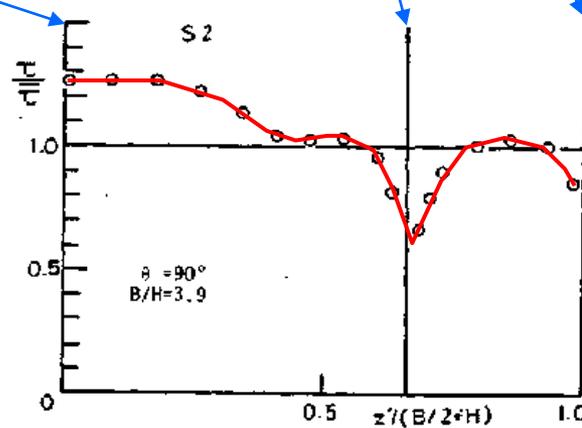
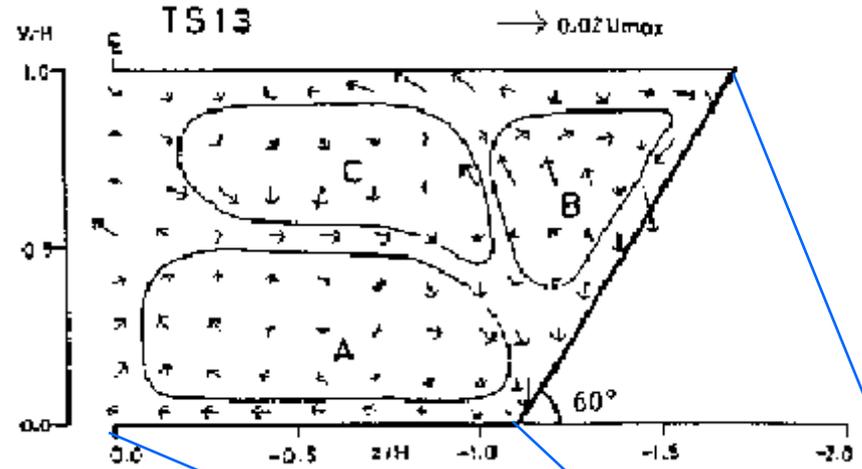
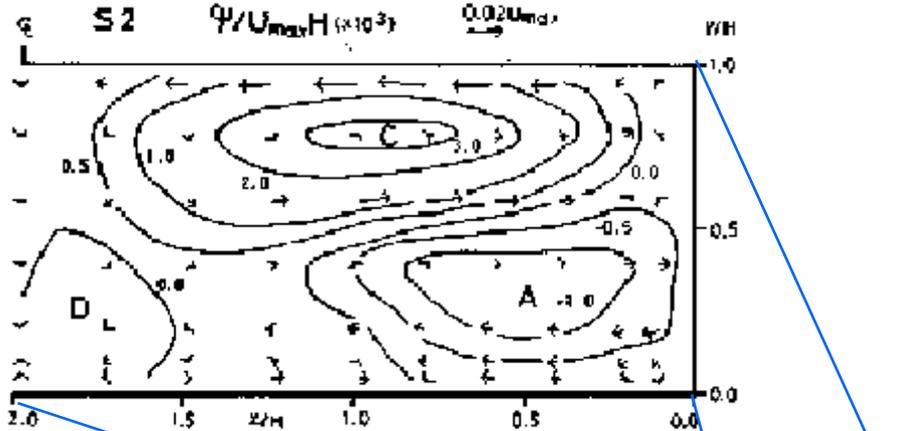


(b) Case-B,  $B/h=6$



# 流れの構造との関係②

二次流パターン



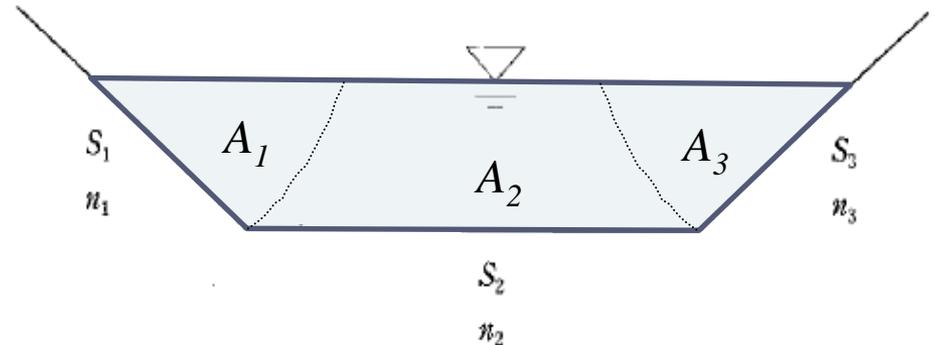
せん断応力分布

富永(1987)

# 合成粗度係数算出方法に対する不安

- 合成粗度係数 $N$ の算出方法

$$N = \left[ \frac{\sum S_i n_i^{3/2}}{S} \right]^{2/3}$$



- $S_i$  : 各潤辺の粗度係数,  $n_i$  : 各潤辺の粗度係数,  
 $A_i$  : 各粗度が規定する断面積
- 上式は、各分割面積部分の平均流速は互いに等しく、  
かつ全体の平均流速に等しいとの仮定に基づき、  
Manningの等流公式に基づいて導かれている。
- 元来は、H. A. Einstein (1942) が、移動床実験のために簡易な取り扱いを仮定したもの

# 実験の概要

## 実験水路の概要

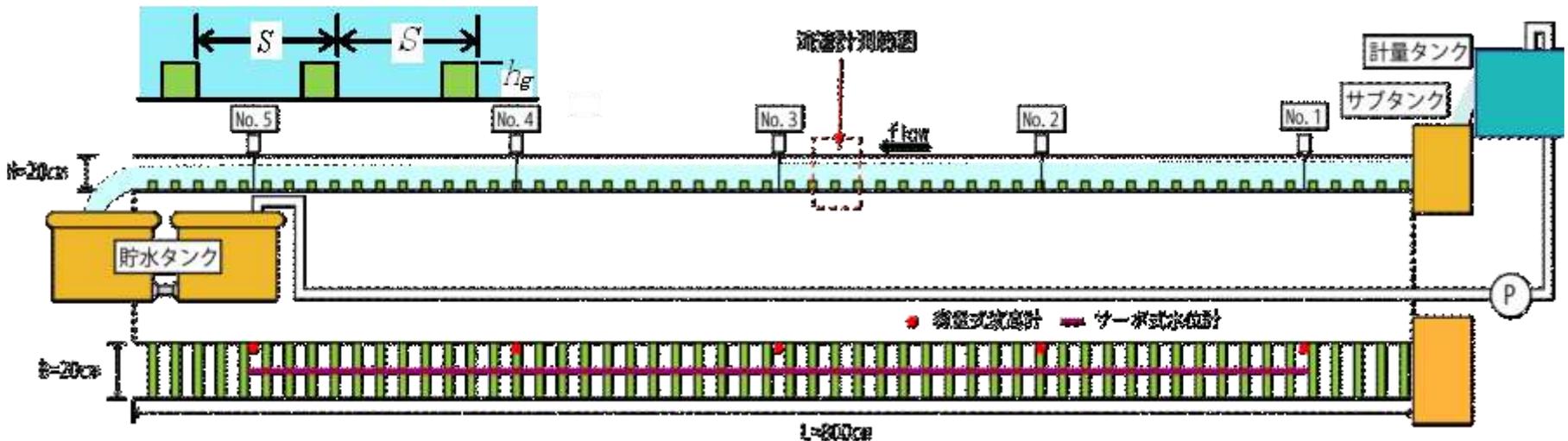
- 底面幅20cm,側壁高さ20cm,水路長8m
- 縦断勾配5段階(1/25~1/400)
- 流量10段階(4.0~18.0ℓ/s)

急勾配含む  
広いレンジ



## 計測内容

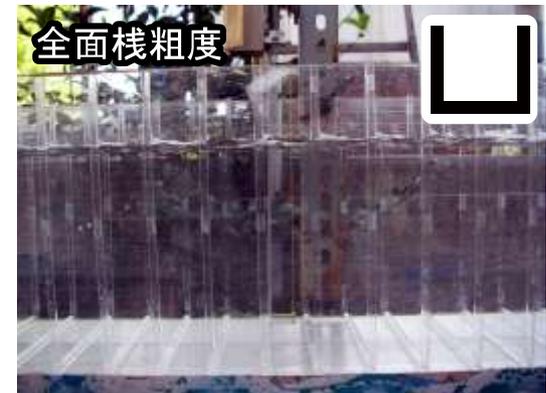
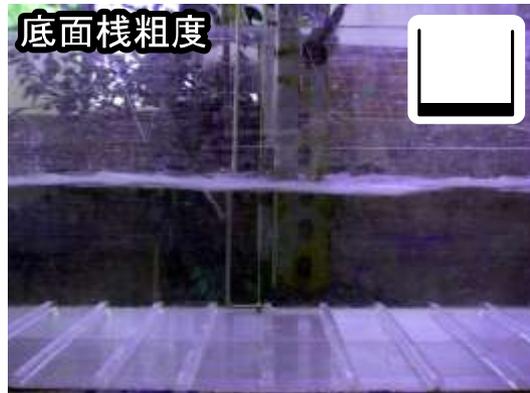
- サーボ式水位計, 容量式波高計より  
水位を把握→全水頭よりエネルギー勾配, 摩擦速度 $U_*$ の算出



# 実験条件

## ● 粗度設置条件

- 粗度配置：なし（滑面）、底面のみ、側壁のみ、全面 の4パターン
- 粗度高さ $h_g$ ：5mm,10mm
- 粗度間隔 $S$ ：3通り



粗度条件	水路勾配	粗度高さ	粗度間隔	流量 $Q$ [ℓ]	Froude数		水路幅水深比 $B/H$		実験粗度係数 $n$	
	$I_b[1/X]$	$h_g[\text{mm}]$	$S[\text{mm}]$		min	max	min	max	min	max
なし(滑面)	400,200,25	-	-	4.0~18.0	0.66	3.07	1.8	11.6	0.009	0.010
底面のみ	400,200,100,50,25	5	35, 70, 140	4.0~18.0	0.38	1.54	1.2	6.6	0.013	0.028
		10	55, 110, 220	4.0~18.0	0.28	1.19	1.1	5.6	0.013	0.038
側壁のみ	400,200,100,50,25	5	35, 70, 140	4.0~18.0	0.32	2.50	1.1	9.9	0.011	0.023
		10	55, 110, 220	4.0~18.0	0.34	2.27	1.0	9.5	0.011	0.027
全面	400,200,100,50,25	5	35, 70, 140	4.0~18.0	0.24	1.26	1.1	6.1	0.020	0.033
		10	55, 110, 220	4.0~18.0	0.26	0.87	1.0	5.1	0.019	0.048

# 粗度配置による抵抗特性

- 抵抗特性についての仮定

- 底面配置は鉛直方向，側壁配置は水平方向に，乱流対数則に則って，同じ粗度効果を発揮すると仮定

## 【仮定に基づく予測】

- 本実験では粗度高さ，間隔，水路幅固定のため，足立(1964)によれば，相対水深 $H/h_g$  ( $B/H$ ) のみで抵抗特性が説明可能.

$$\frac{U}{U_*} = 1.50 \log_{10} \frac{S}{h_g} - 1.91 + \left\{ 5.75 + 0.12 \left( \frac{S}{h_g} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \left( \frac{H}{h_g} \right)$$

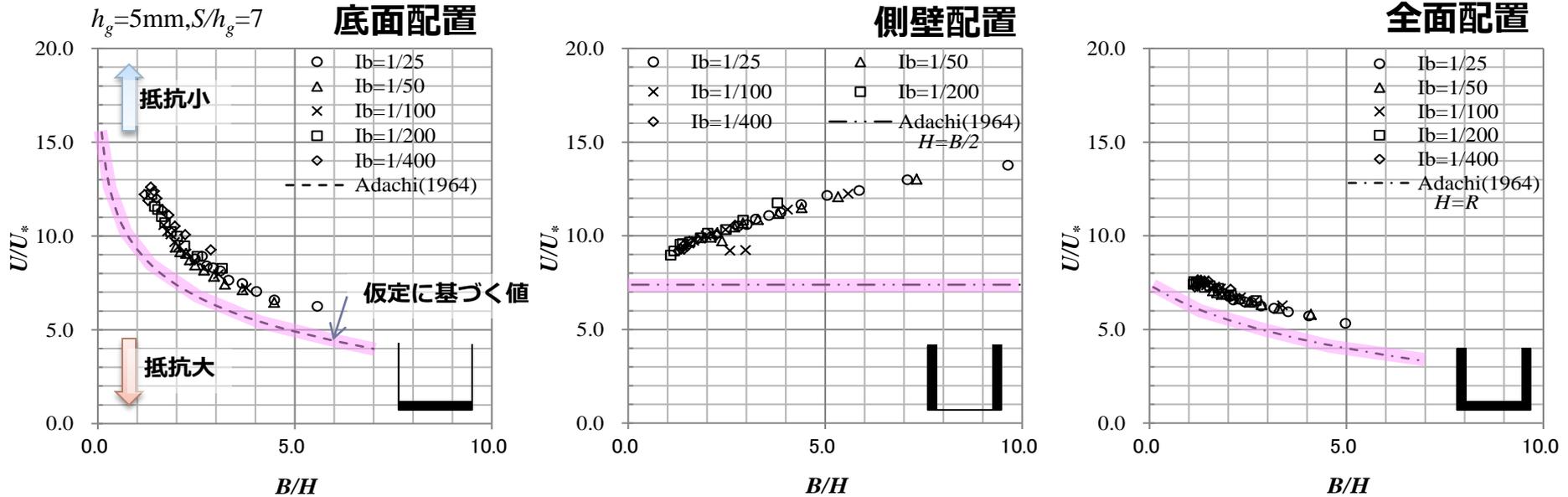
潤辺に作用するせん断応力の総和に着目すれば，

$$\rho g h I_e \cdot B = B \bar{\tau}_b + 2h \bar{\tau}_w$$

ここに， $\bar{\tau}_b$  底面平均せん断応力  $\bar{\tau}_w$  側壁平均せん断応力

- 底面配置の抵抗は，足立式より小さいはず。
- 側壁配置の抵抗は，足立式 $H$ に $B/2$ を適用した値より小さいはず。
- 全面配置の抵抗は，足立式 $H$ に径深 $R$ を適用した値に等しい。

# 粗度配置による抵抗特性の違い



• 縦断勾配に関わらず，抵抗特性は相対水深の変化で表現されている。

## 底面配置

– 概ね予想通り（滑な側壁が潤辺に占める割合の増加を反映）

## 側壁配置

–  $B/H$ が大きくなるにつれて，抵抗が大きく減少

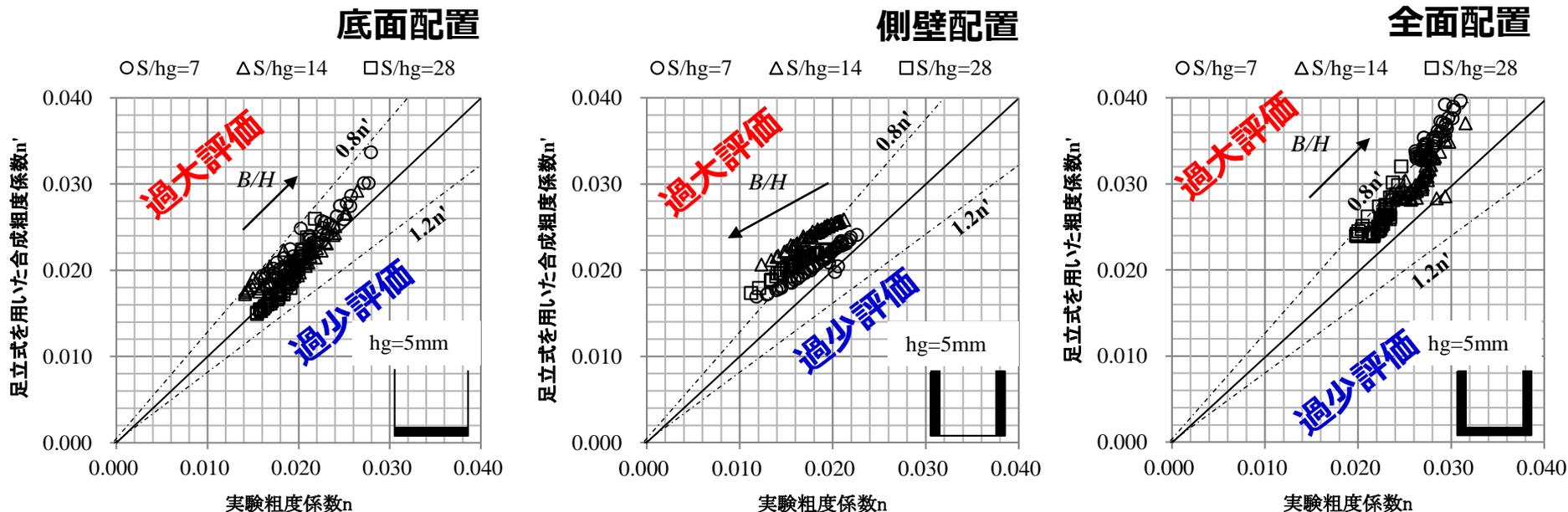
– **側壁の粗度の影響範囲は有限**であることに対応する結果

## 全面配置

– 径深 $R$ を適用した足立式より全体的に抵抗が小さい

– **隅角部を有する断面に，鉛直・水平に対数則を想定することの限界**

# 合成粗度係数Nと実測粗度係数の比較



## ● 底面粗度

- $B/H$ が大きい領域では、合成粗度係数と実験粗度係数が比較的良好に一致する
- $B/H$ が小さい領域でのばらつきが大きく、合成粗度係数に対して $\pm 10\%$ 程度の差

## ● 側壁粗度

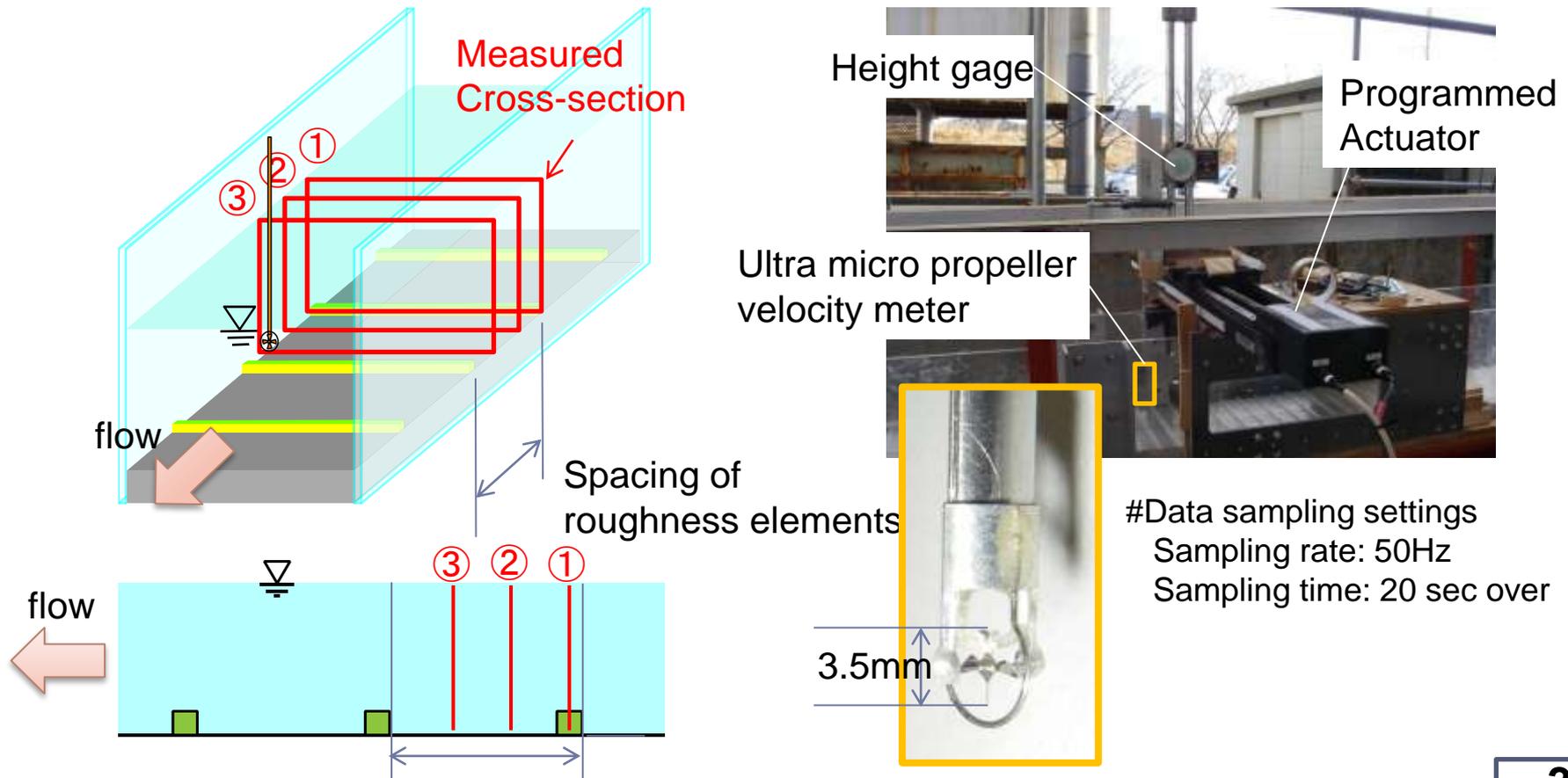
- 実験粗度係数が合成粗度係数を全体的に下回る
- $B/H$ が大きくなるにつれて、差が拡大する（抵抗が小さくなる）ことが確認される。
- **側壁に大きい粗度を配置しても、合成粗度係数により期待される程は作用しない**

## ● 全面粗度

- 実験粗度係数が合成粗度係数を全体的に下回る

# 横断面流速分布の計測

- 棧型粗度直上と，流下方向に10mm, 20mmの位置  
3断面を計測⇒縦断方向に平均



# 主流速横断面分布(3断面平均)

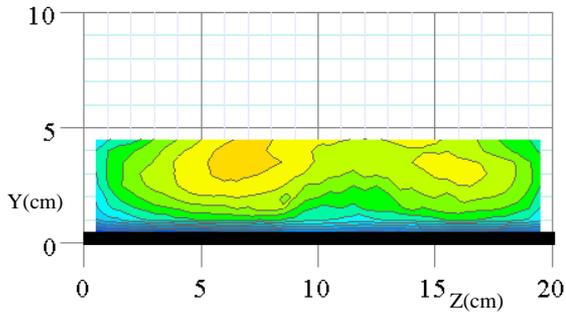
## 底面配置

## 側壁配置

## 全面配置

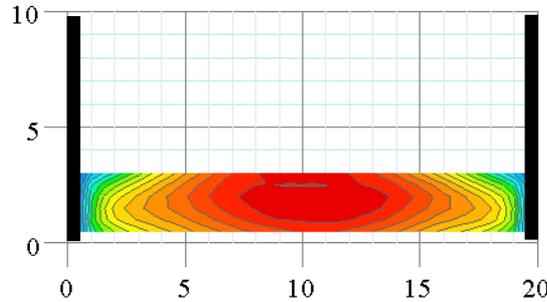
(1) RB25-1

$h=5.0\text{cm}, U=79.4\text{cm/s}$



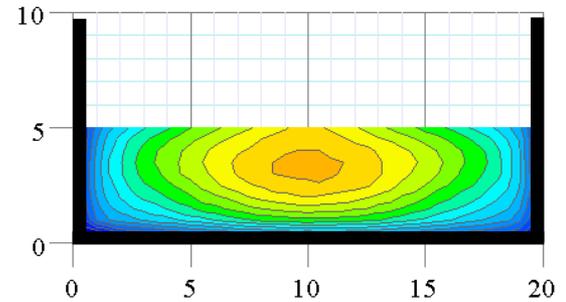
(5) RW25-1

$h=3.4\text{cm}, U=117.4\text{cm/s}$



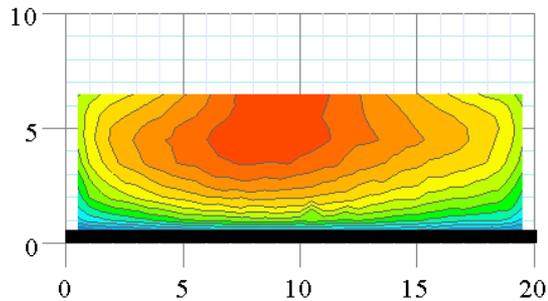
(9) RA25-1

$h=5.7\text{cm}, U=70.7\text{cm/s}$



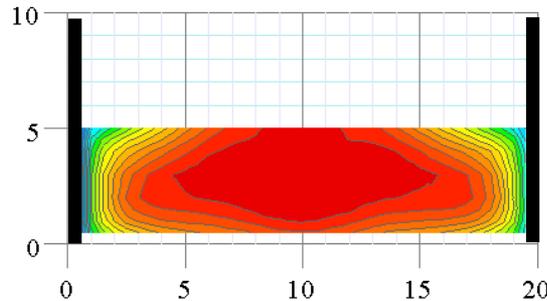
(2) RB25-2

$h=7.2\text{cm}, U=107.4\text{cm/s}$



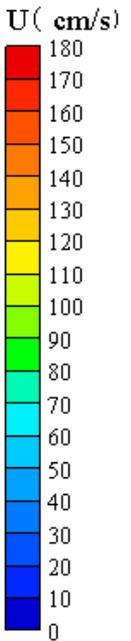
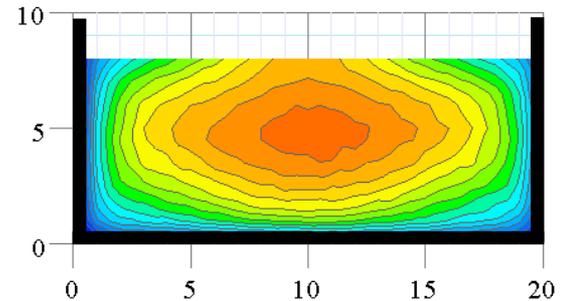
(6) RW25-2

$h=6.2\text{cm}, U=128.2\text{cm/s}$



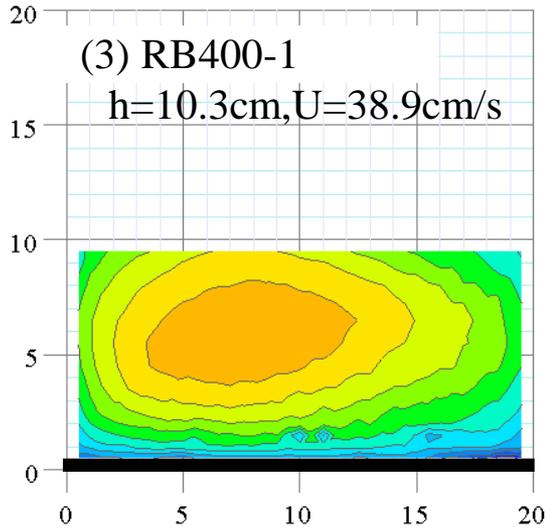
(10) RA25-2

$h=8.7\text{cm}, U=89.0\text{cm/s}$

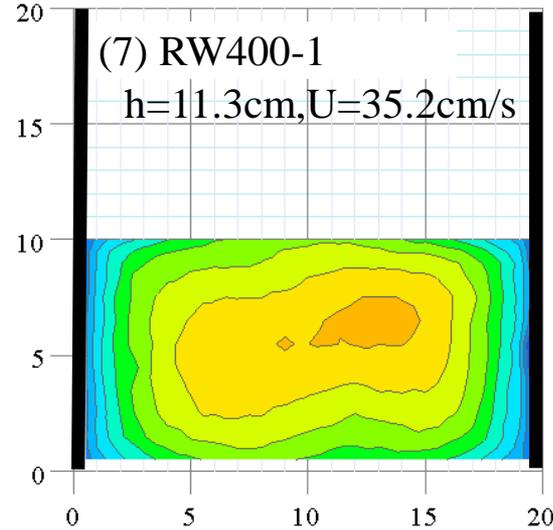


# 主流速横断面分布(3断面平均)

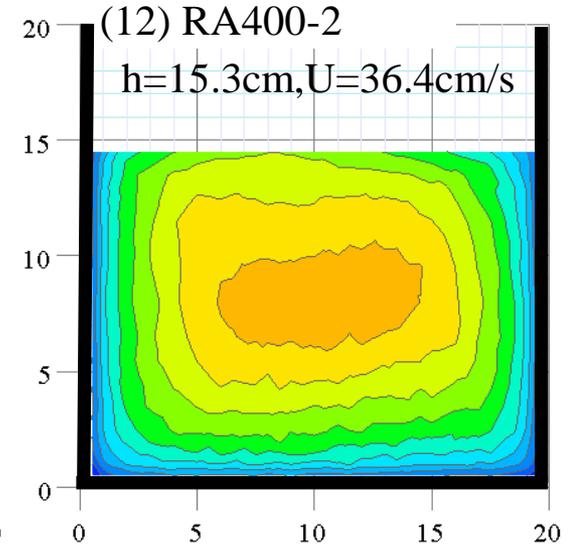
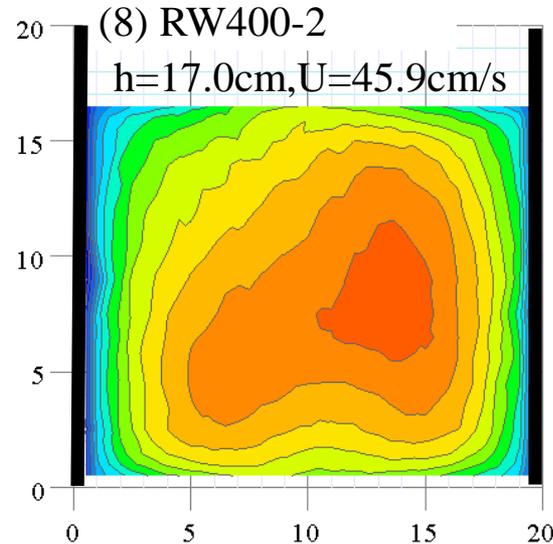
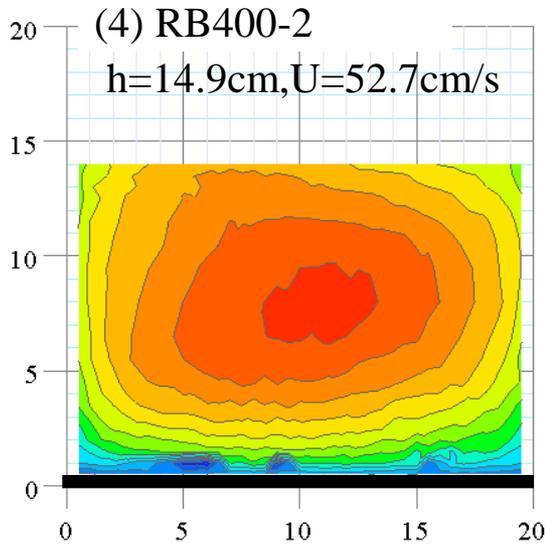
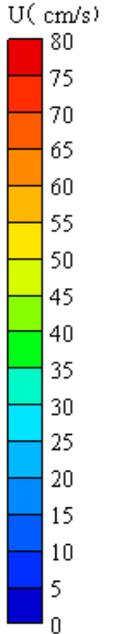
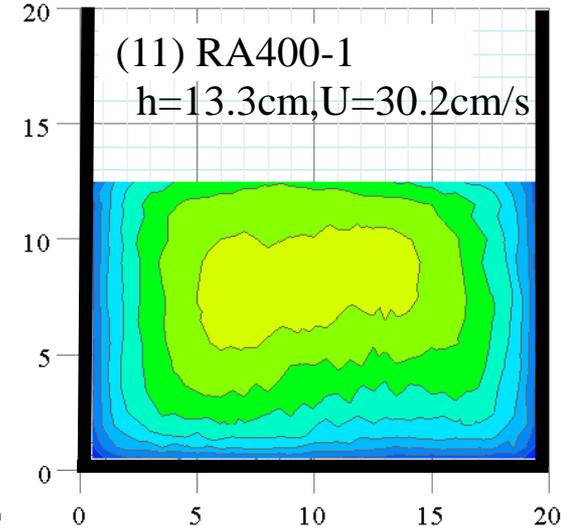
## 底面配置



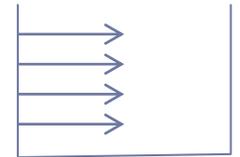
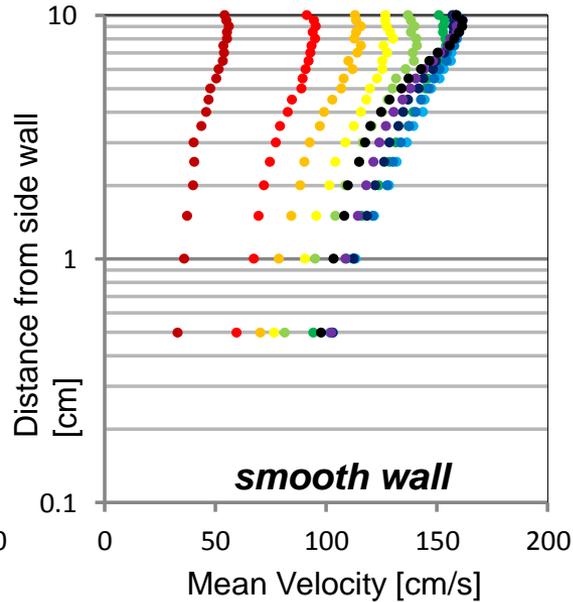
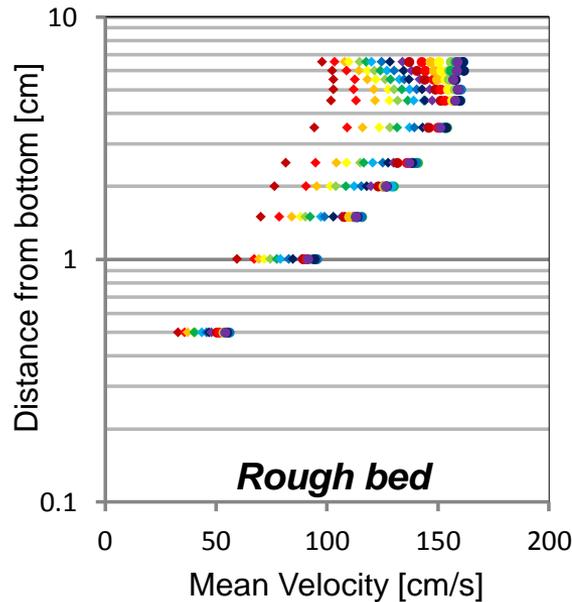
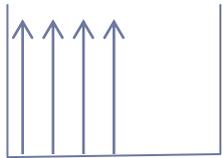
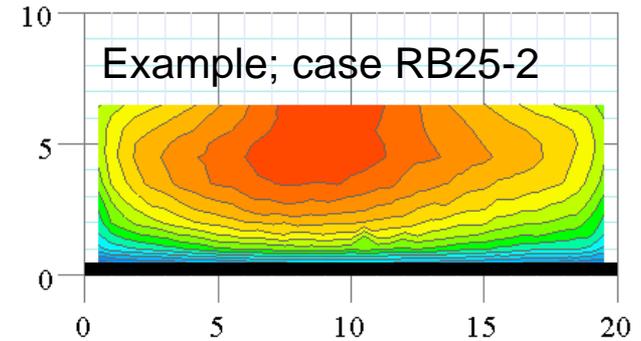
## 側壁配置



## 全面配置



# 局所摩擦速度の推定



Log-law on Rough Boundary:

Log-law on Smooth Boundary:

Red circles mean Unknowns

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \frac{z}{k_s}$$

$$\frac{u}{u_*} = 5.5 + 5.75 \log_{10} \frac{u_* z}{\nu}$$

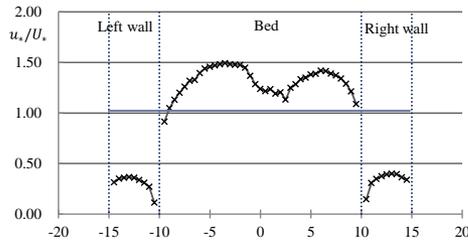
# 摩擦速度分布の推定結果

## 底面配置

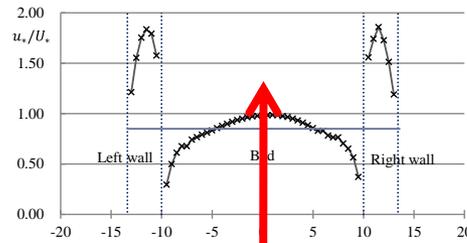
## 側壁配置

## 全面配置

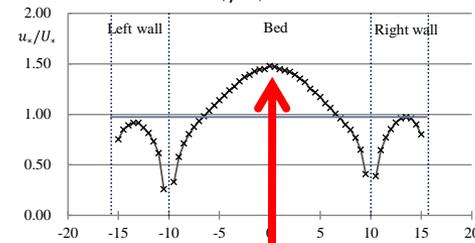
(1) RB25-1  $\bar{u}_*/U_* = 1.02$   $B/H = 4.0$



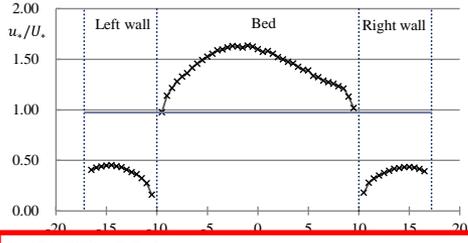
(5) RW25-1  $\bar{u}_*/U_* = 0.81$   $B/H = 5.9$



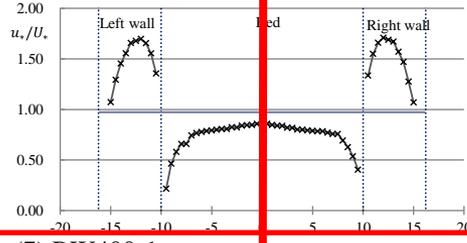
(9) RA25-1  $\bar{u}_*/U_* = 0.96$   $B/H = 3.5$



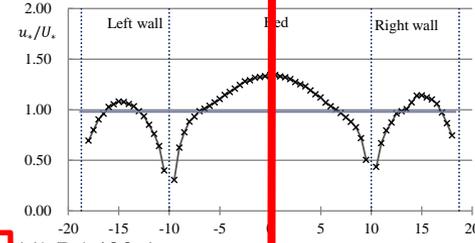
(2) RB25-2  $\bar{u}_*/U_* = 0.97$   $B/H = 2.8$



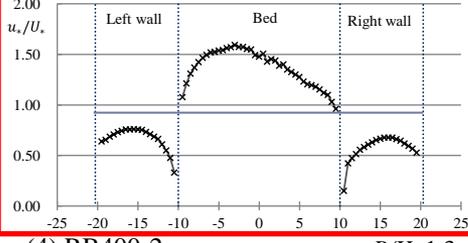
(6) RW25-2  $\bar{u}_*/U_* = 0.97$   $B/H = 3.2$



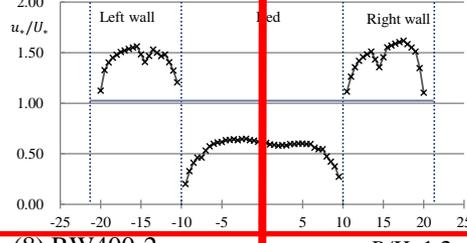
(10) RA25-2  $\bar{u}_*/U_* = 0.97$   $B/H = 2.3$



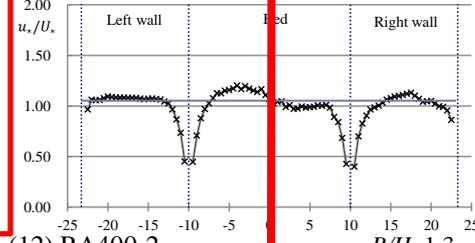
(3) RB400-1  $\bar{u}_*/U_* = 0.90$   $B/H = 1.9$



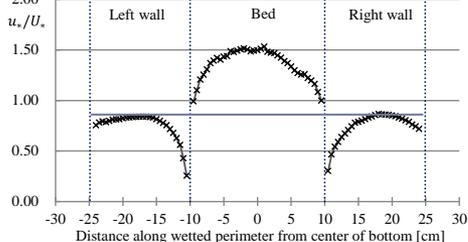
(7) RW400-1  $\bar{u}_*/U_* = 1.02$   $B/H = 1.8$



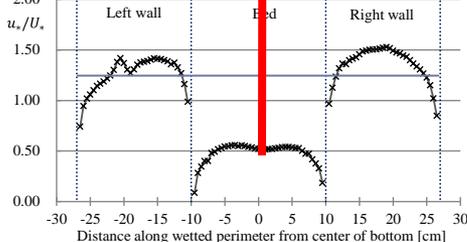
(11) RA400-1  $\bar{u}_*/U_* = 1.05$   $B/H = 1.5$



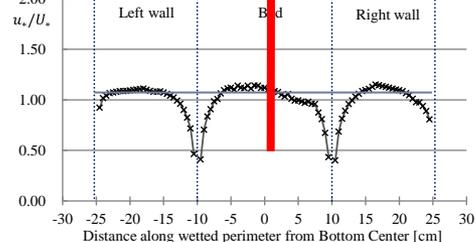
(4) RB400-2  $\bar{u}_*/U_* = 0.85$   $B/H = 1.3$



(8) RW400-2  $\bar{u}_*/U_* = 1.24$   $B/H = 1.2$



(12) RA400-2  $\bar{u}_*/U_* = 1.13$   $B/H = 1.3$



B/H大  
Shallow  
wide



B/H小  
Narrow  
deep

- <考察のポイント>
- ・誤差
  - ・分布形状
  - ・ $u^*_{max}$ 発生点
  - ・隅角部と水面付近

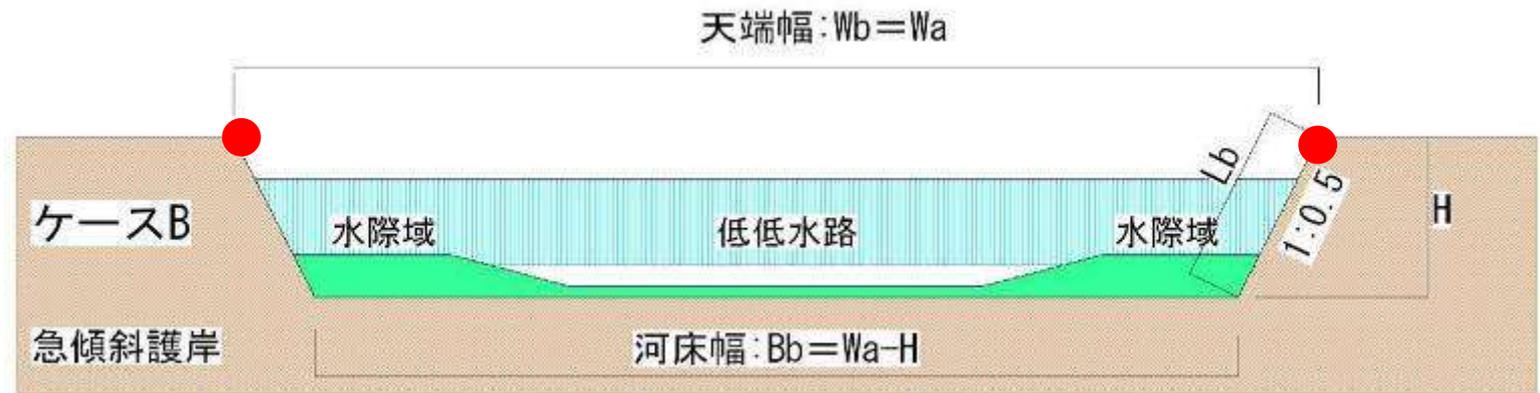
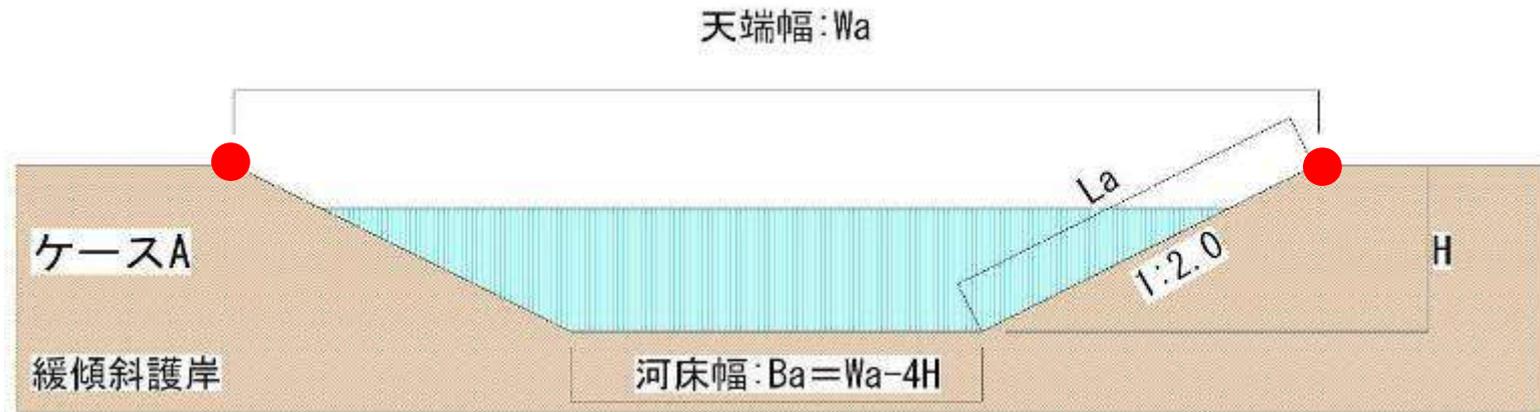
- ・底面と側壁
- ・B/Hと中央部 41

主流速分布に基づくせん断応力分布の推定結果

# 話題②のまとめ

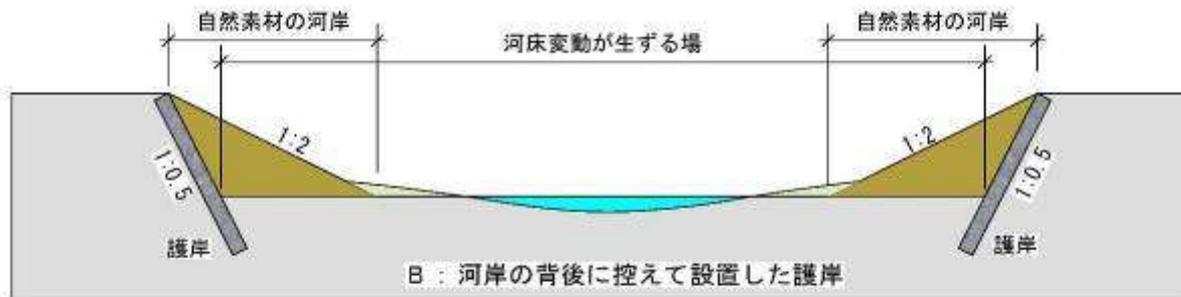
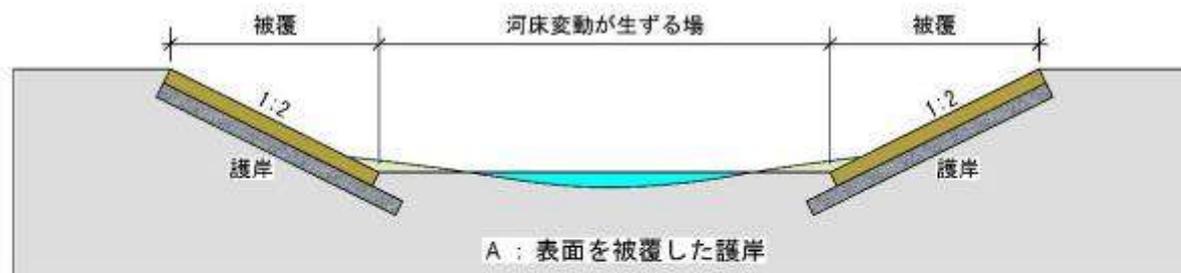
- **隅角部を有する断面は、流れの三次元性が強い。**
  - $B/H$ が小さい ( $B/H < 5$ ) 条件では、全体が三次元流れとなる (境界面垂直軸に対数則が成立しない)
- **側壁に配置した粗度の影響範囲は有限。**
  - 側壁の粗度の効果が及ぶ領域は、河床勾配、粗度の大きさに関わらず有限
  - $B/H$ が大きい条件では、底面に作用するせん断力は側壁から離れるにつれ上昇
- **現実の中小河川の単断面河道では...**
  - 急勾配に設置された護岸の粗度の抵抗は限定的であり、**河床面が掃流力の大部分を受け持つ。**
  - 合成粗度係数は、隅角部を有する断面では**粗度係数を過大評価 (流速を過少評価)** する。

# 河床幅を確保する



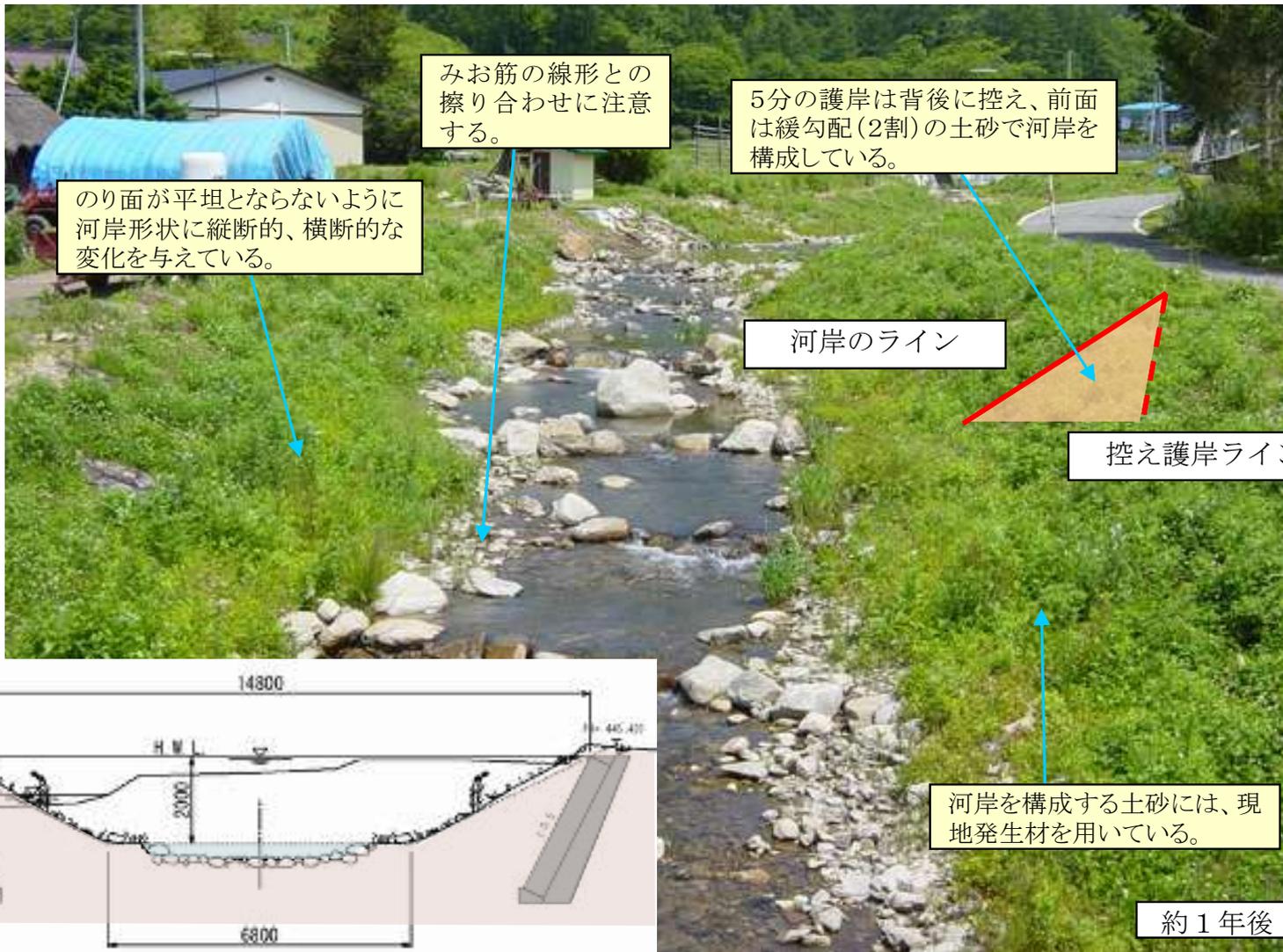
河岸を2割にして河床幅が狭くなる場合には、護岸を立てて河床幅を確保する。

# ●護岸は立てて控え、河岸と護岸を分ける



例：護岸を5分として控え前面に2割の土羽河岸

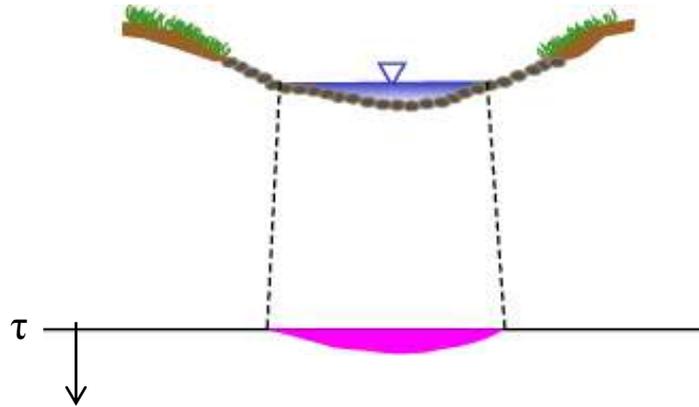
# 自然な河岸・水際部の形成 (元町川：岩手県)



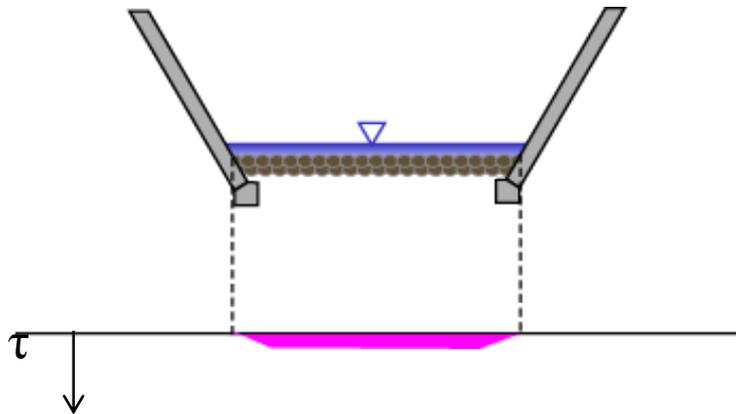
岩手県元町川の事例

境界面せん断応力分布  
(平水時のイメージ)

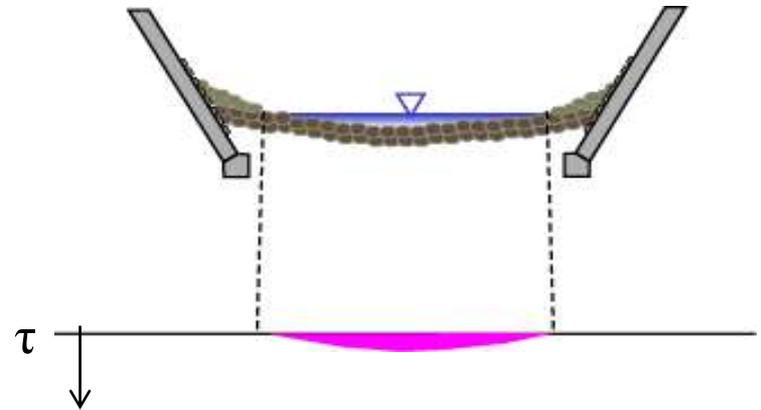
自然河道



幅固定で掘り下げた河道

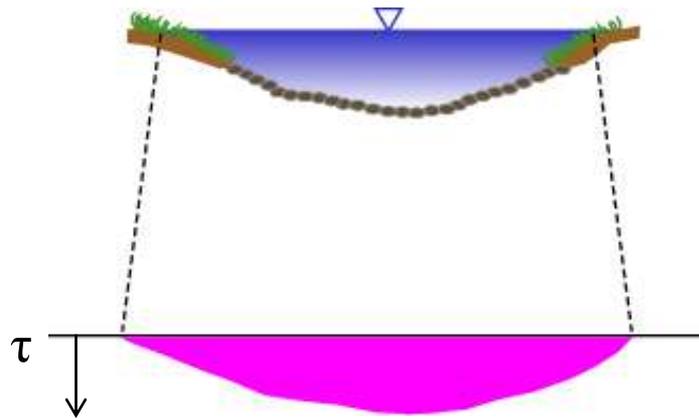


護岸粗度と法尻部の処理を施した断面

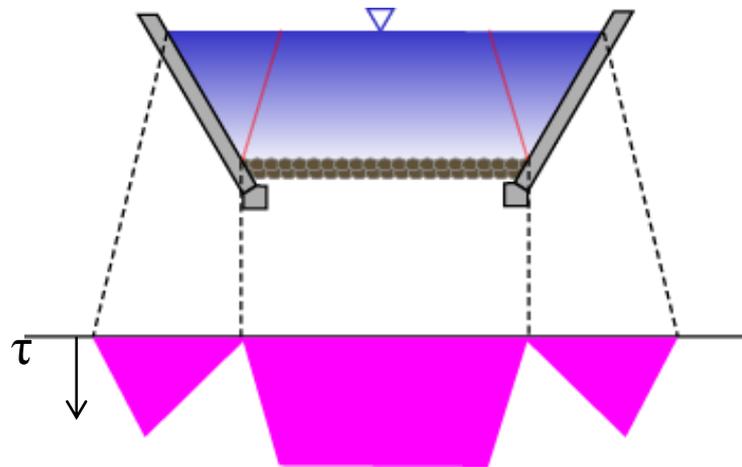


境界面せん断応力分布  
(洪水時のイメージ)

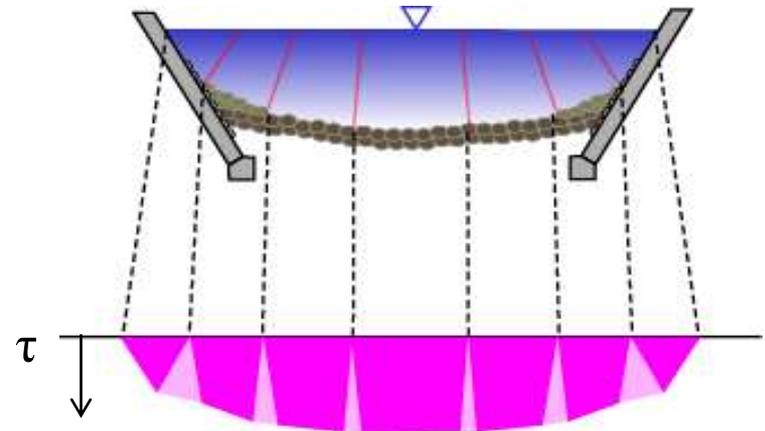
自然河道



幅固定で掘り下げた河道



護岸粗度と法尻部の処理を施した断面



川幅拡幅し、水際部を形成することは、断面形を自然河道に近づける ⇒ 環境面だけでなく、水理的にも好ましい。

# 話題③

## 粗面乱流の流れ場の鉛直構造

×

## 礫床河川の遊泳性魚類の生息環境評価 (ダム下流への土砂還元の影響評価)



原田守啓

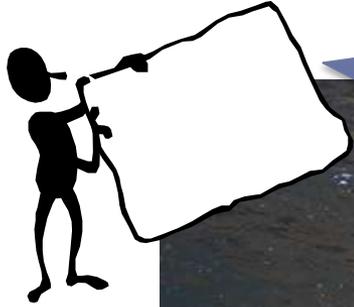


小野田幸生



萱場祐一

# 場の見方の違い



水深に対して比較的大きな粗度要素がランダムに配置されている開水路流れ、混合粒径の移動床...

水理学



魚から見たら、実際どうなの？



マイクロハビタット  
浮石・沈み石、河床空隙、餌環境、産卵場・流れ避難場  
付着藻類、ベントス...

河川生態学



# 粗度領域区分と抵抗則 (例)

- 大規模粗度領域  $h/d_{84} < 1.2$

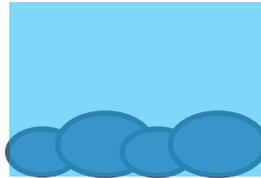
$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = \left( \frac{R}{0.365d_{84}} \right)^{2.34} \left( \frac{B}{h} \right)^{7(\lambda_1 - 0.08)} \quad \text{Buthurst(1978)}$$

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = 1.18 \exp[1.1\epsilon e^{-0.8\sigma} e^{5.5I} (h/d_{84})] \quad \text{河村(1996)}$$



- 中規模粗度領域  $1.2 < h/d_{84} < 4$

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = \left\{ 1.842 \frac{B}{d_{84}} \log \left( \frac{R}{1.2d_{84}} \right) + 14.66 \right\} \times \left( \frac{B}{h} \right)^{7(\lambda_1 - 0.08)} \quad \text{Buthurst(1978)}$$



- 小規模粗度領域  $h/d_{84} > 4$

– Manning型  $n = 0.041d_{50}^{1/6}$

Strickler式

$$n = \frac{0.113R^{1/6}}{1.16 + 2.00 \log(R/d_{84})}$$

Limerinos式

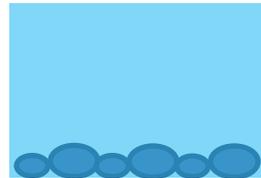
– 対数型

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = 6.25 + 5.75 \log \frac{h}{k_s}$$

Keulegan(1938)

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = 5.75 \log \left( \frac{aR}{3.5d_{84}} \right) \quad a=11.16(\text{矩形}) \sim 13.46$$

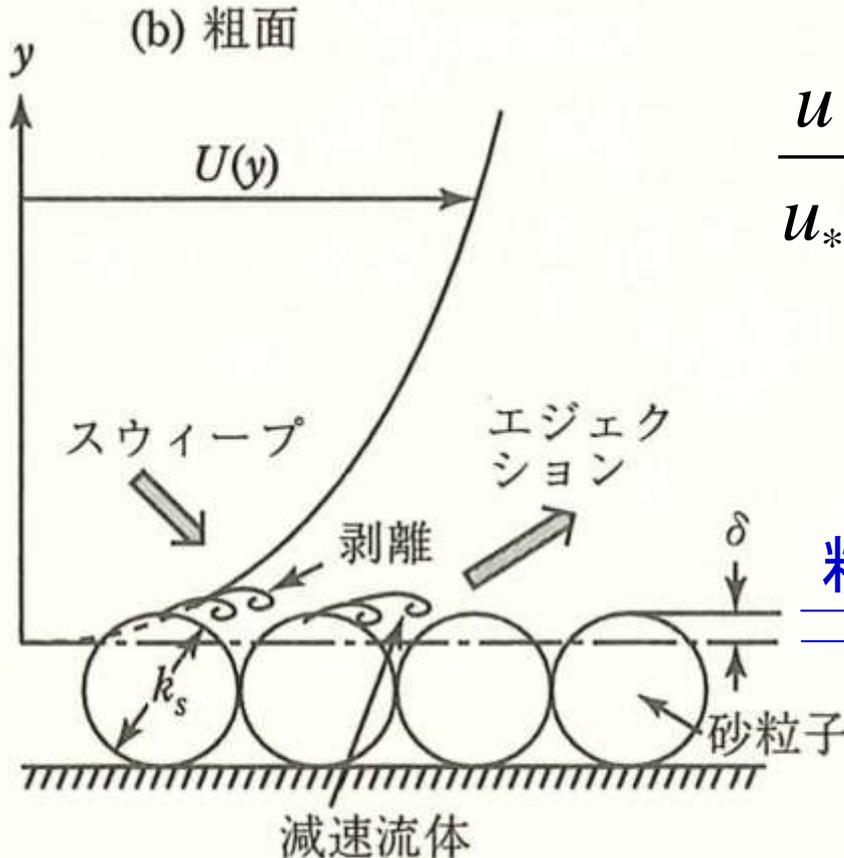
Hey(1979)



粗度が大きい領域の抵抗則は、相対水深が支配的なパラメータ

# 粗面の乱流対数則と仮想原点

- 粗面への乱流対数則理論式の導入



$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{(z_c + \delta)}{d} + 8.5$$

$$\delta/d = 0.15 \sim 0.3$$

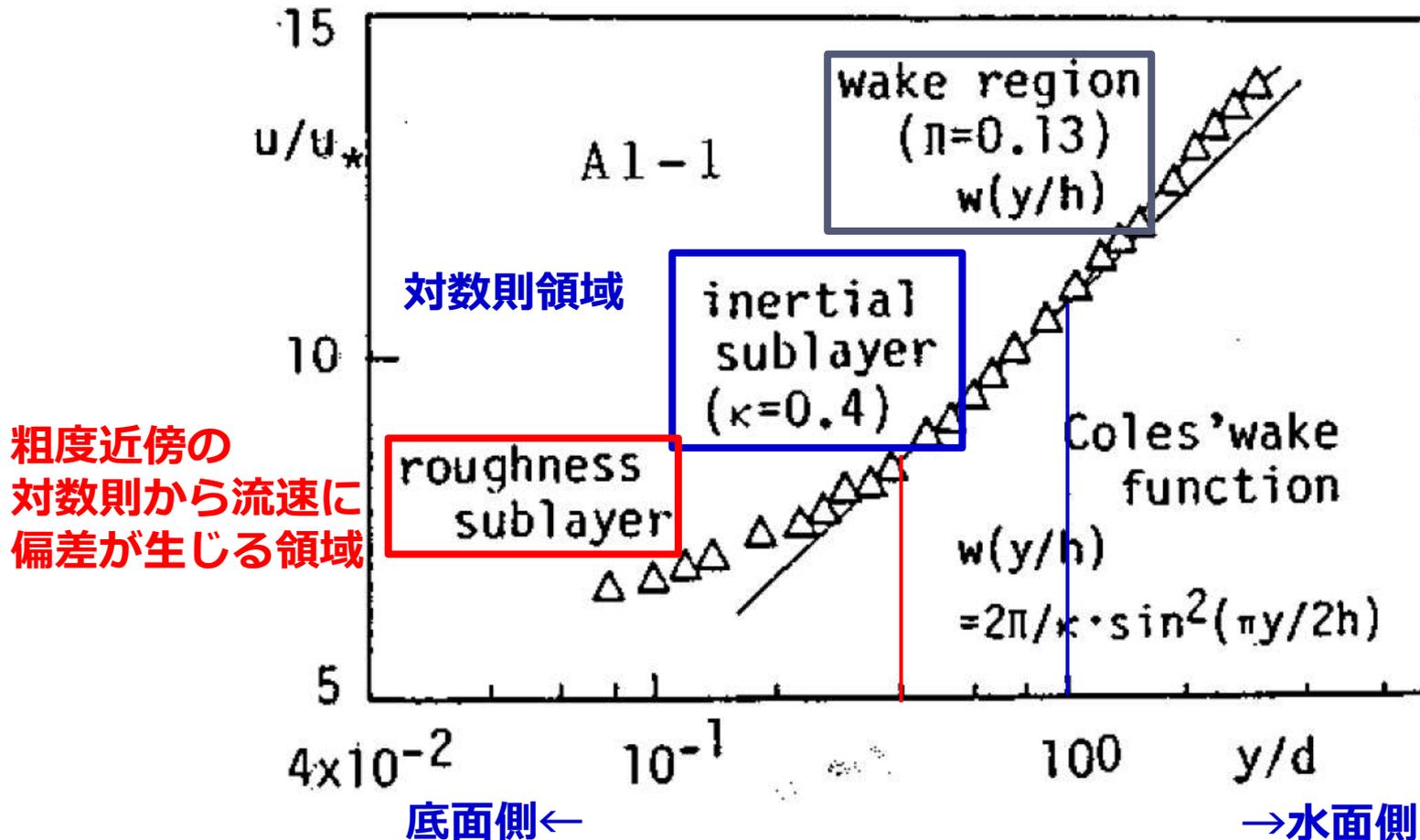
Nezu&Nakagawa(1993)

粗度頂部  $z_c$       仮想底面  $z_0$   
(仮想原点)

仮想底面をうまく設定すれば、  
粗面上の流速鉛直分布が対数則で概ね記述できる。  
⇒水理学の実用性の点では十分満足

# 粗面上の流れの鉛直構造

- 中川・辻本・清水 (1990)



図—5 流速場の区分

# 粗面上の流れの鉛直構造

• Nikora(2007)

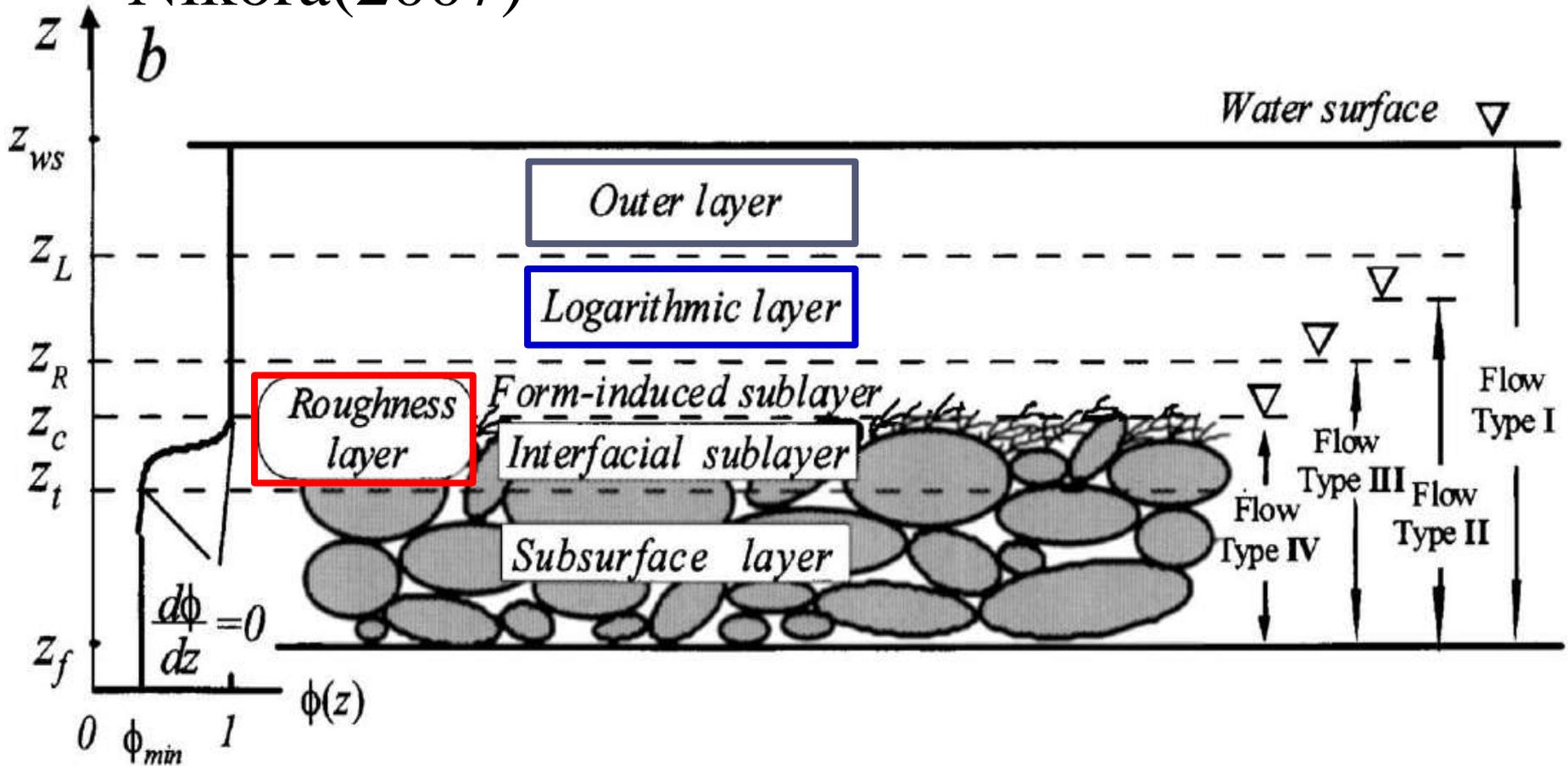


Fig. 1. Flow subdivision into specific regions: (a) impermeable bed; (b) permeable bed

ダム上流



ダム直下



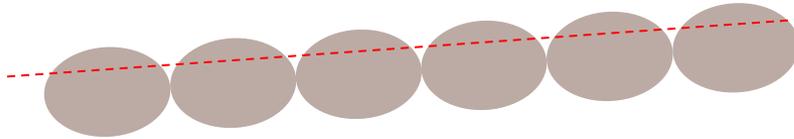
# ダム下流への土砂還元



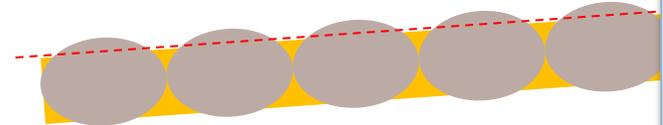
- 置き土砂の例

# 土砂供給の多寡による巨視的变化

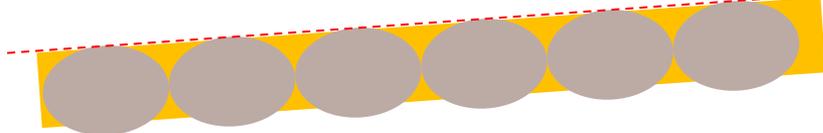
礫のみの状態



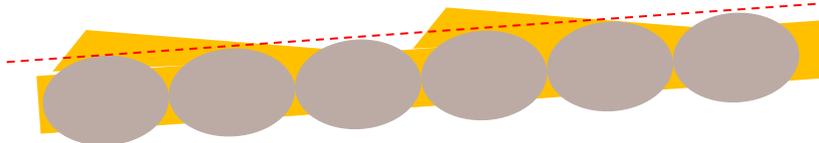
礫間を砂が流れる状態



砂に覆われた状態



礫床上に河床波が発生



平均河床	流水抵抗	水深	平均流速	流砂量
低	大	大	小	小

河床表層の凹凸の変化



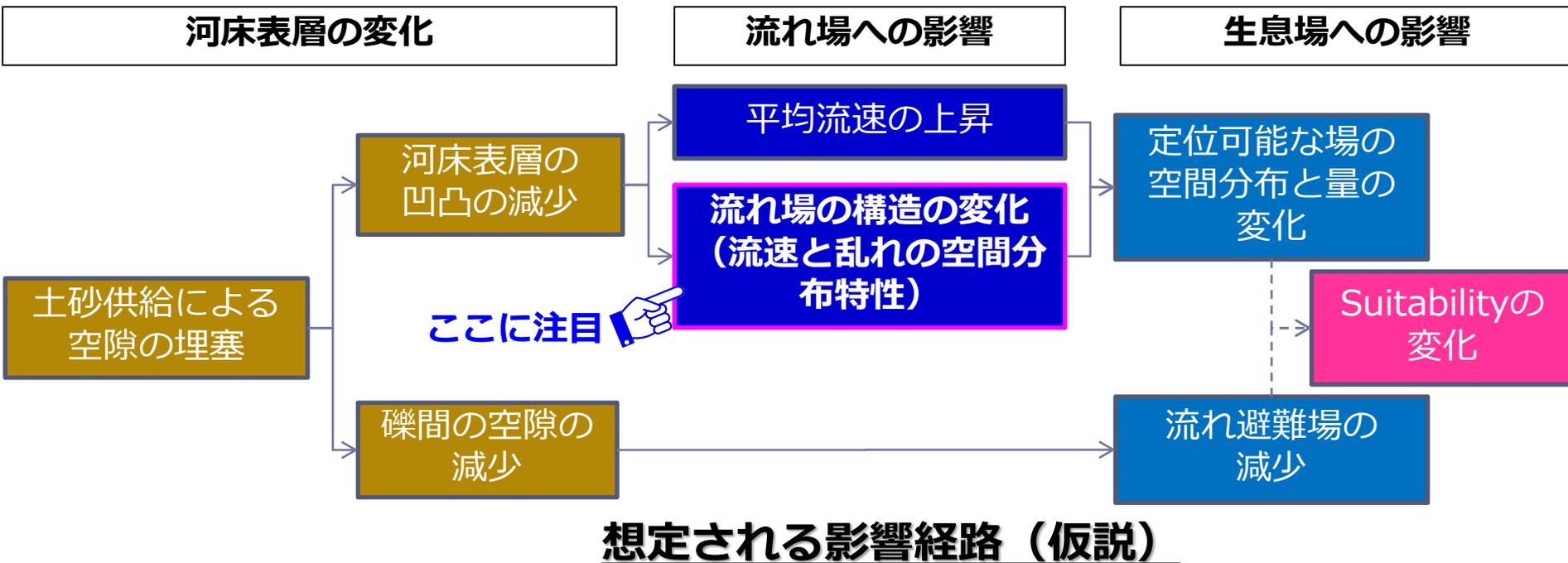
平均流速・水深の変化だけでなく、  
流れの鉛直構造にも影響が及ぶはず

高	小	小	大	大
---	---	---	---	---

実際には、流砂量（供給土砂量）を増やしていくと、礫床と砂による河床波が共存した状態となり、現象の記述がより困難になる

# 土砂供給による 遊泳性魚類への影響（仮説）

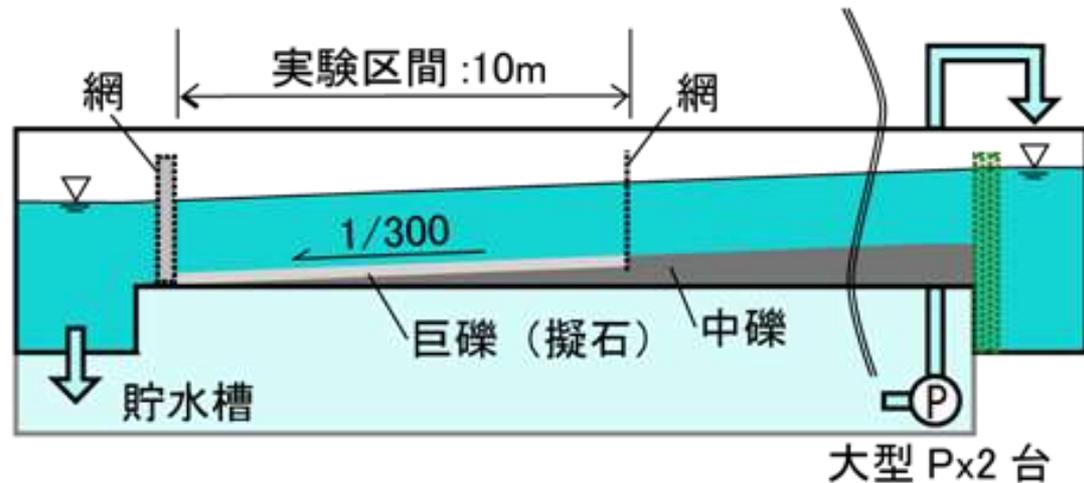
- ダム直下流などにみられる粗粒化した河床への土砂の供給
- あまり議論されてこなかった遊泳性魚類への影響



- ダム下流の粗粒化した河床を実物大でダム下流域の粗粒化した河床を模した実物大の実験系を構築
- 空隙の閉塞度合いを変化させながら、河床表層状態の変化に伴う流れ場の変化とそれに対する遊泳魚の応答を明らかに！

# 実験水路と計測の概要

- 仮説に示す影響経路の検証のため、大型実験水路にダム下流の粗粒化した河床を模した実物大の実験系を構築
  - ( $B=1.5\text{m}$ ,  $L=10\text{m}$ ,  $I_b=1/300$ ,  $d_{\text{max}}=50\text{cm}$ )
- 巨礫の空隙を、砂利（細礫）で2段階で閉塞させ、同一流量で通水後、河床表層の変化と流れを詳細に計測



- ・三次元超音波流速計による流速計測
- ・レーザー変位計による河床高面計測

# 実験条件

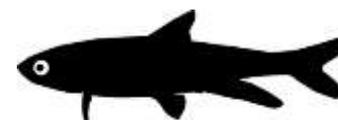
- 流れの鉛直構造について議論するため、水深を同程度に揃えた（等流でない）条件で条件設定。

実験ケース毎の水理量(流速計測時)

ケース名	Q (m <sup>3</sup> /min)	H (cm)	U (cm/sec)	Fr	U* (cm/sec)
①粗粒化	28.0	44.4	70.1	0.34	(12.0)
②礫添加1	28.0	40.8	76.3	0.38	(11.5)
③礫添加2	28.0	40.9	76.0	0.38	(11.6)

遊泳性魚類の体長と巡航速度の設定例

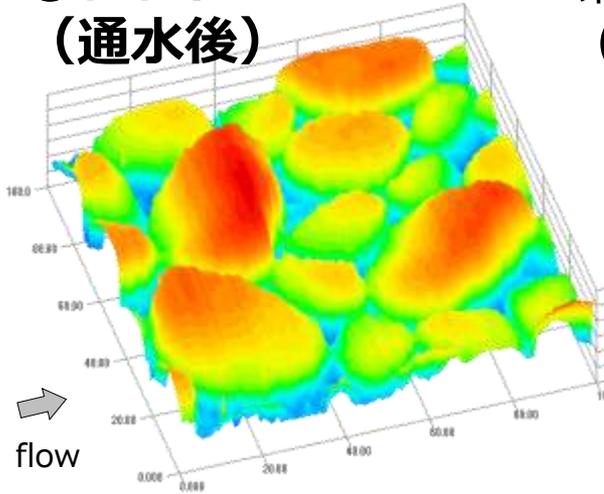
和名	体長(BL) [cm]	巡航速度 3BL [cm/s]
アマゴ・ヤマメ	10	30
アユ	15	45
オイカワ	13	39
カワムツ	15	45
ウグイ	25	75



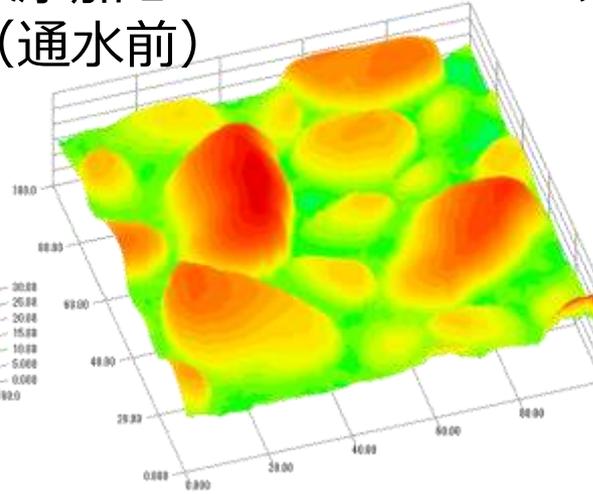
一般に体長BLとして  
2~3BL(cm/sec),  
サケ科魚類は  
3~4BL(cm/sec)  
左表は、すべて3BLで表示。

# 河床高平面分布

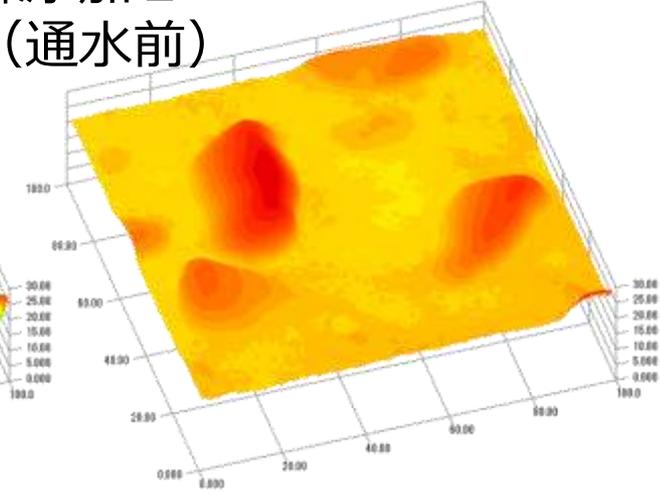
① 粗粒化  
(通水後)



礫添加 1  
(通水前)

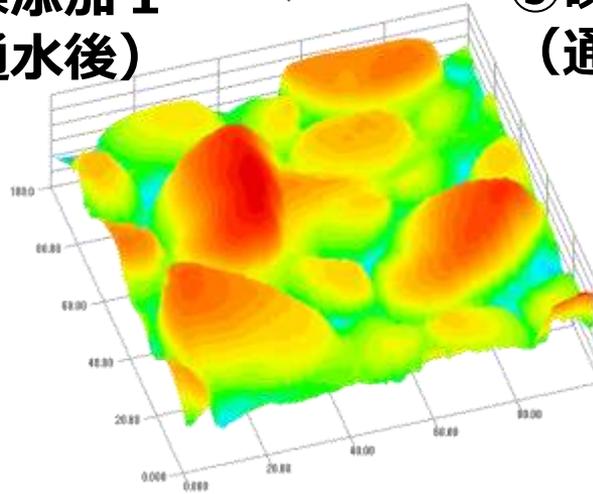


礫添加 2  
(通水前)



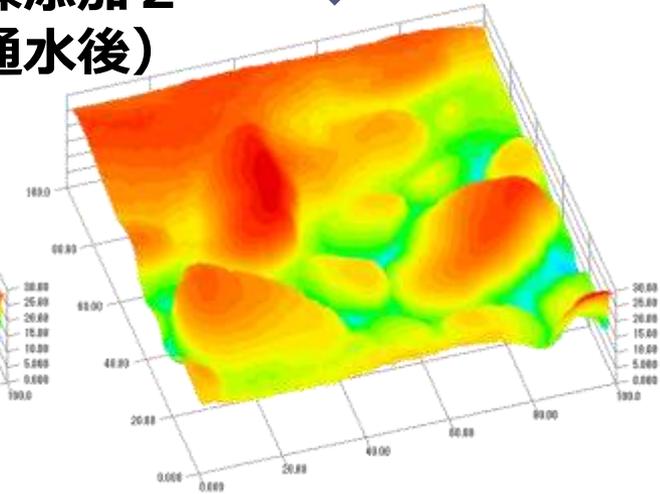
↓ 通水

② 礫添加 1  
(通水後)

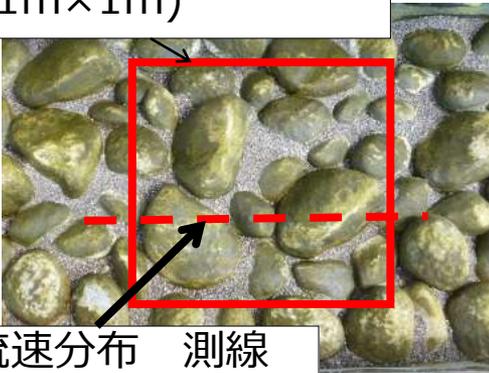


↓ 通水

③ 礫添加 2  
(通水後)



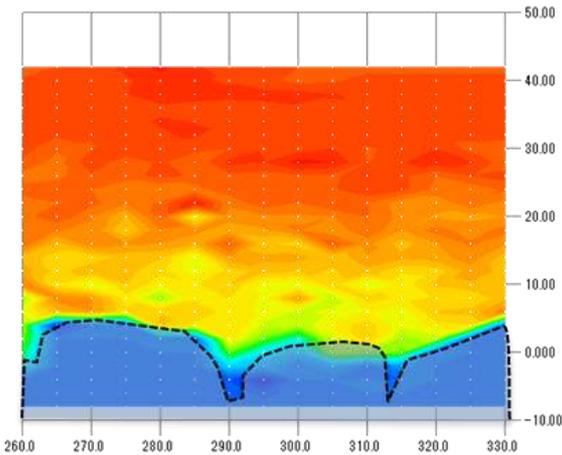
河床高計測範圍  
(1m×1m)



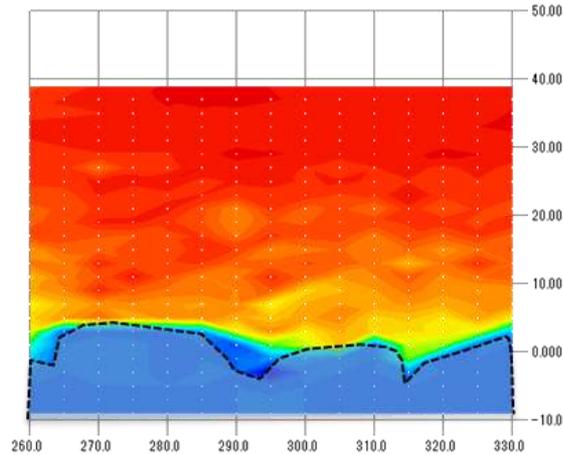
流速分布 測線

# 時間平均流速の縦断面分布

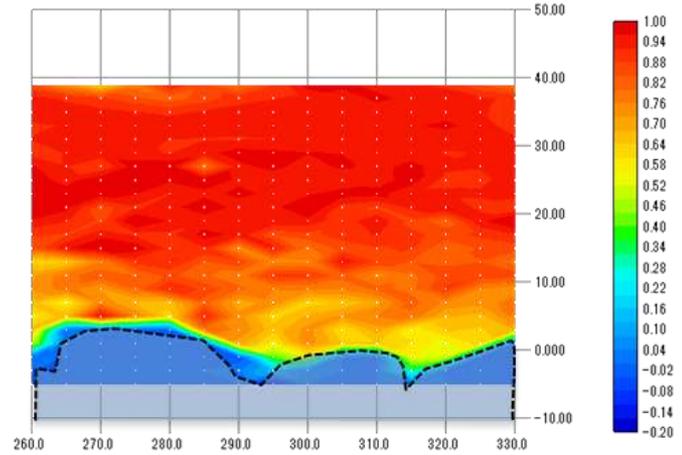
①粗粒化



②礫添加 1

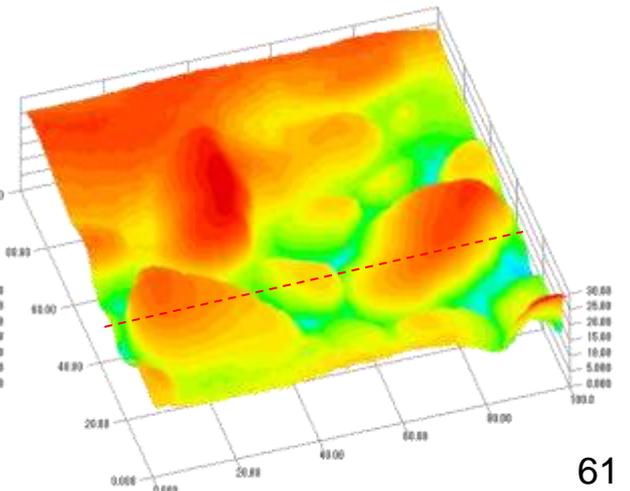
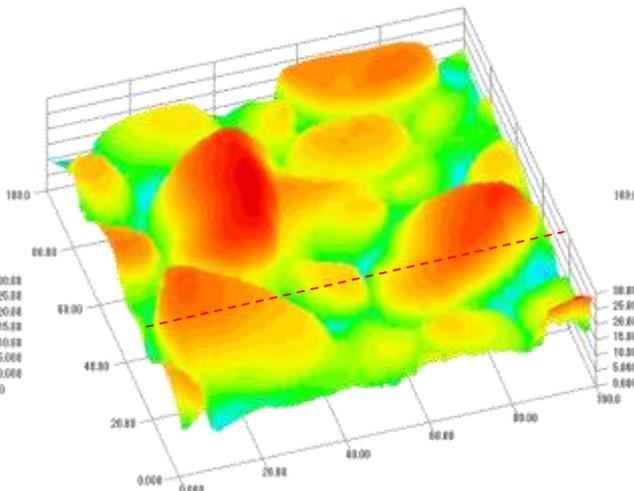
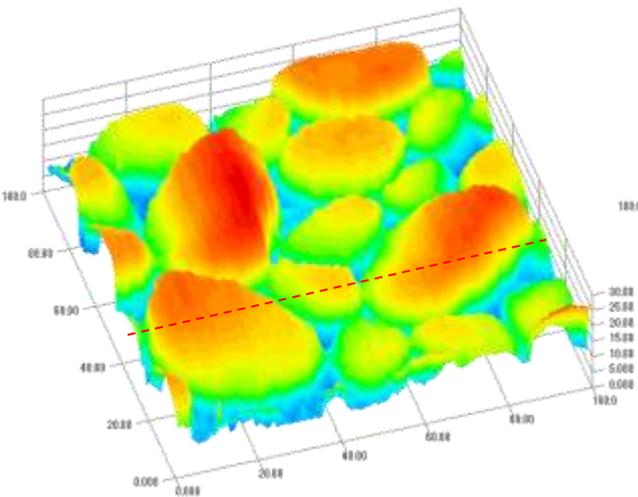


③礫添加 2

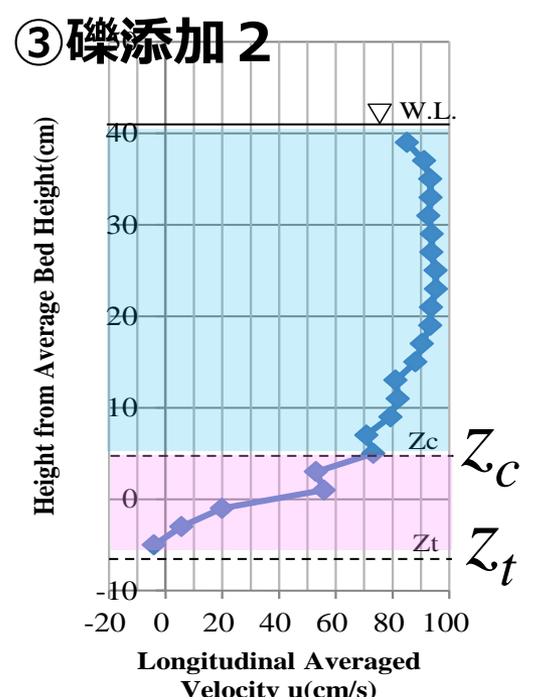
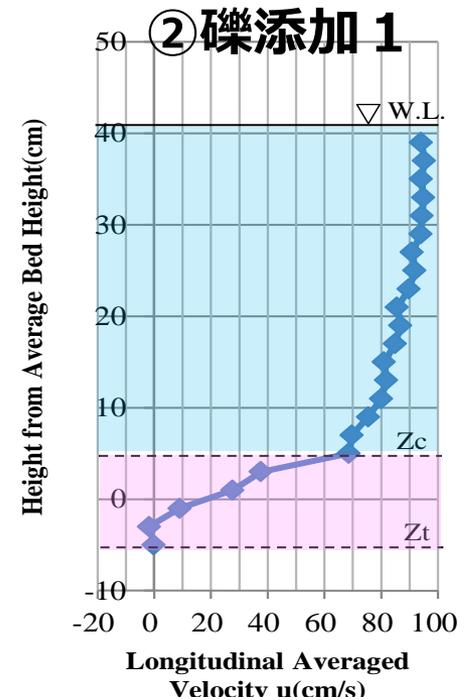
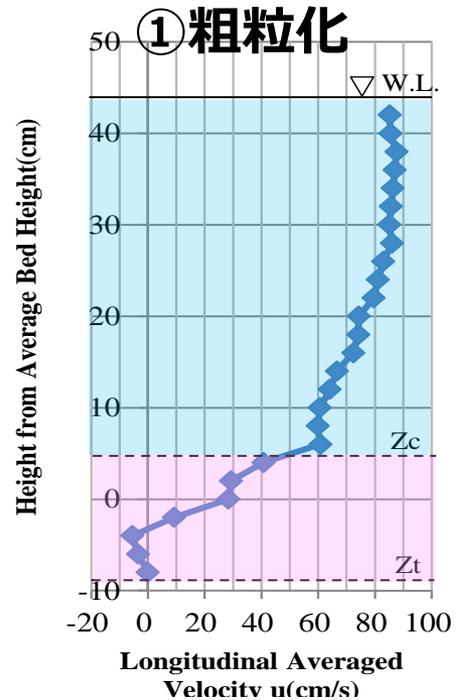


主流速成分 の鉛直二次元空間分布

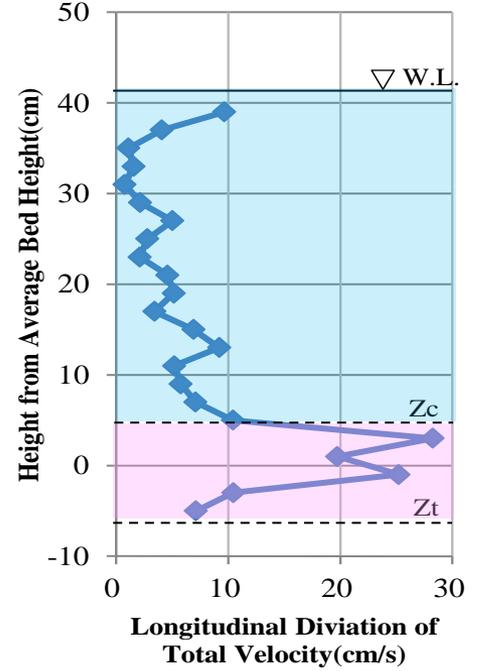
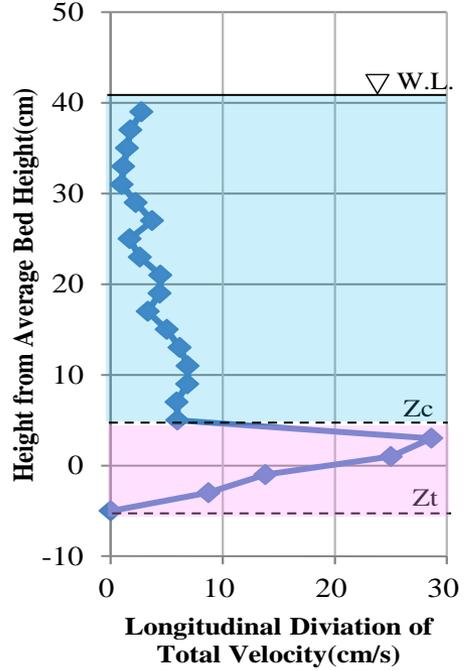
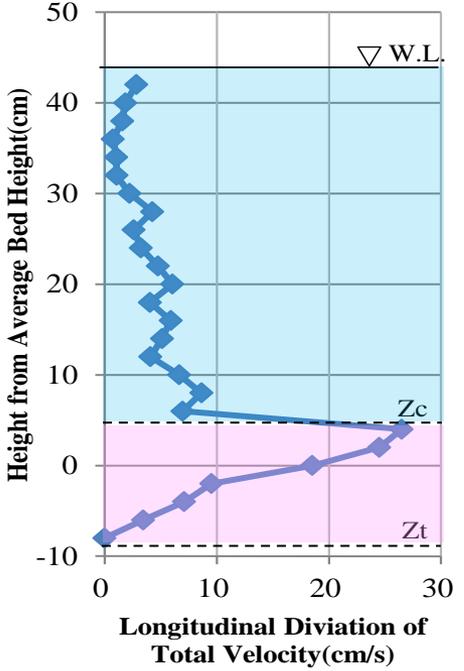
計測点は縦断方向5cm  
高さ方向2cm(魚類個体サイズを意識)



時空間平均  
主流速成分u  
鉛直分布

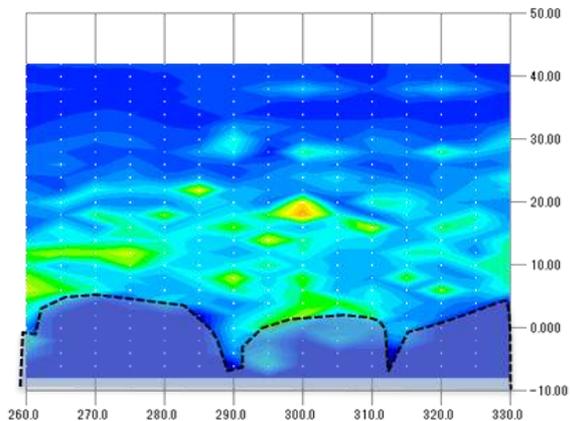


縦断方向の  
空間偏差

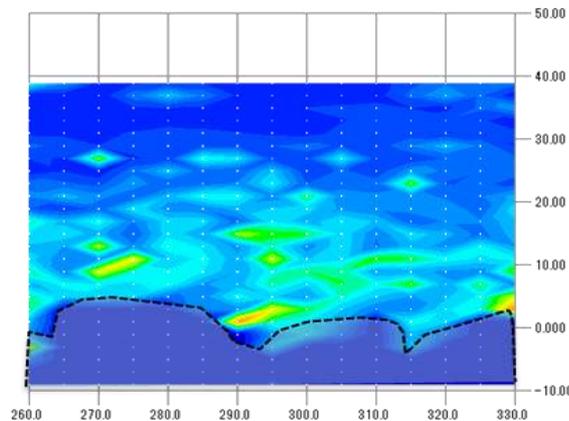


# 流速変動成分の縦断面分布

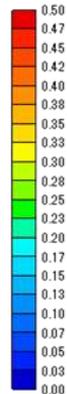
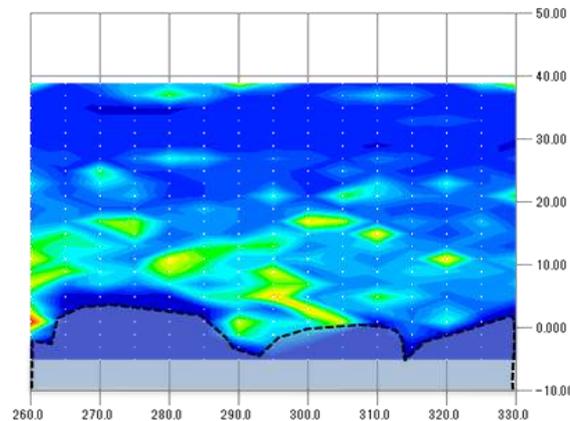
① 粗粒化



② 礫添加 1

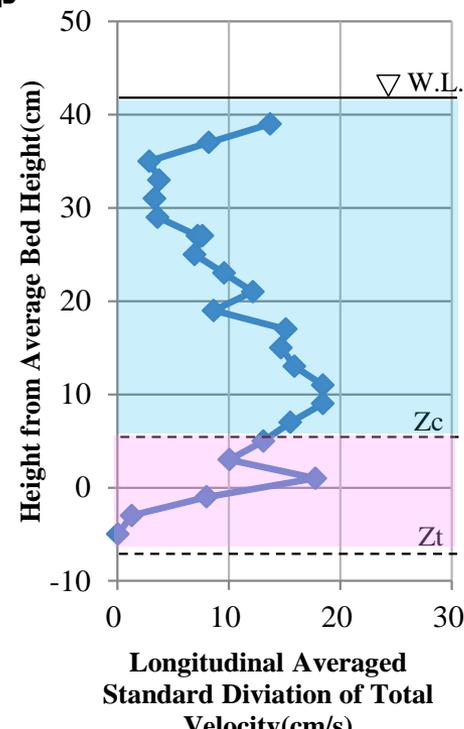
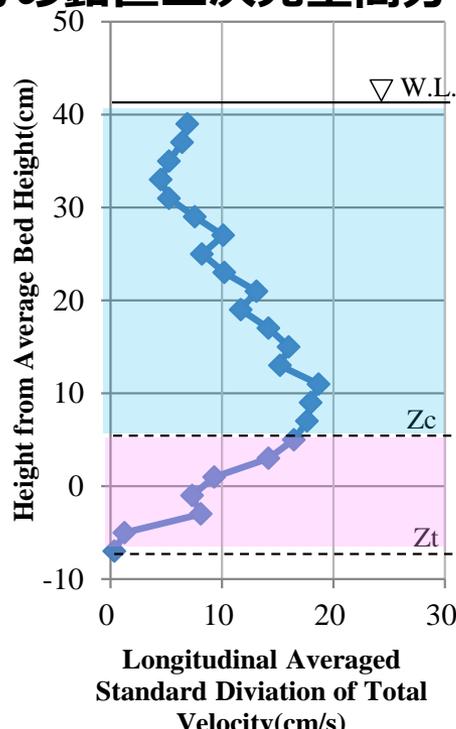
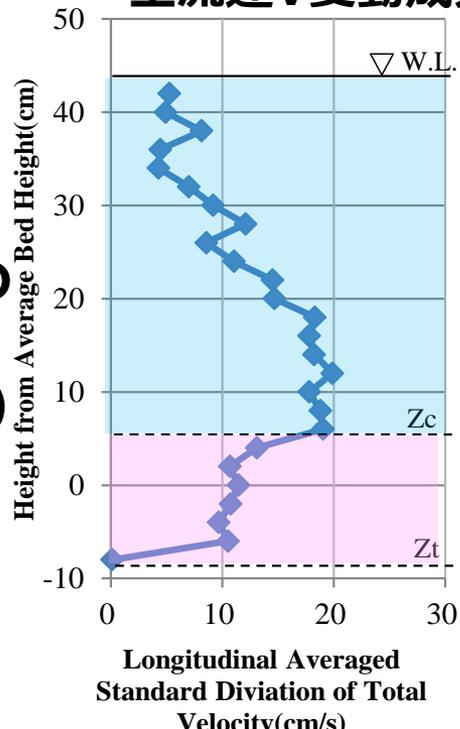


③ 礫添加 2



## 全流速V変動成分の鉛直二次元空間分布

流速変動成分の  
鉛直分布  
(縦断方向平均)



# 実際の空間利用（昼）

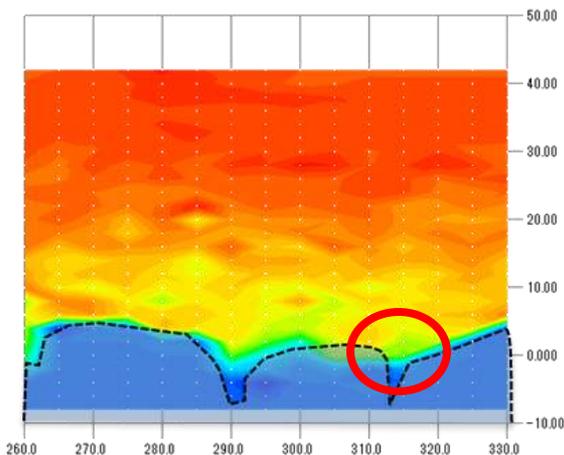


# 実際の空間利用（夜）

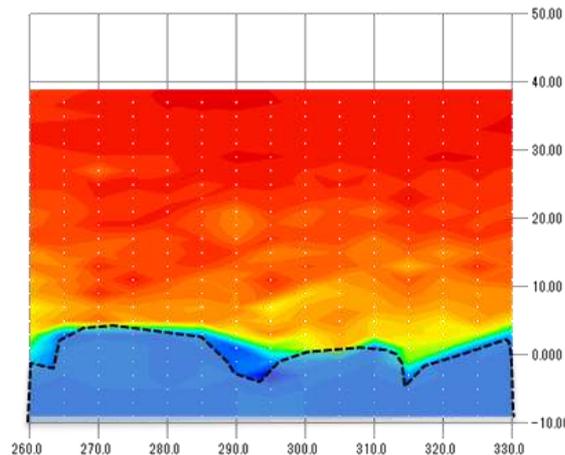


# 魚類個体が定位していた場所

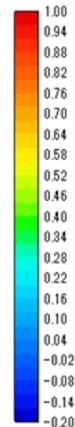
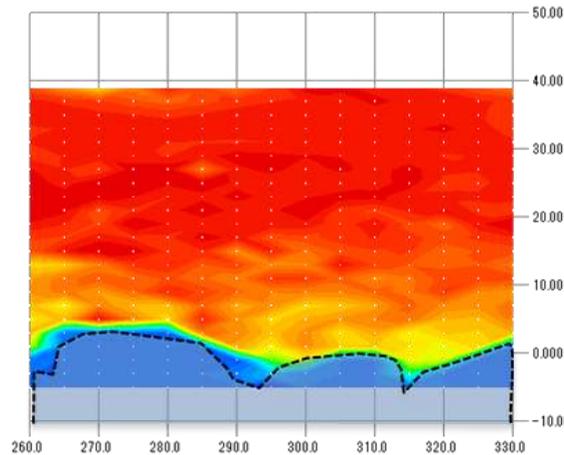
①粗粒化



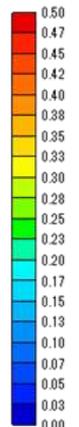
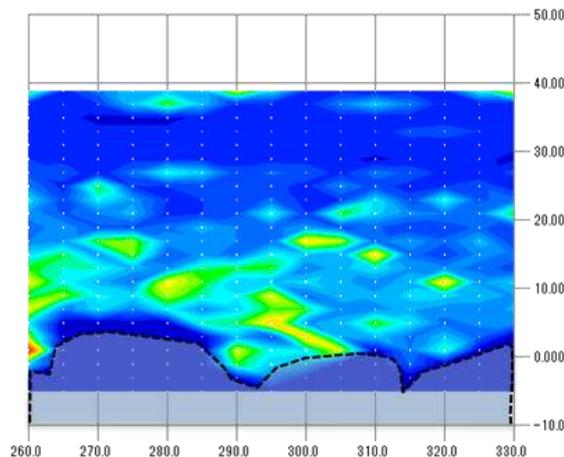
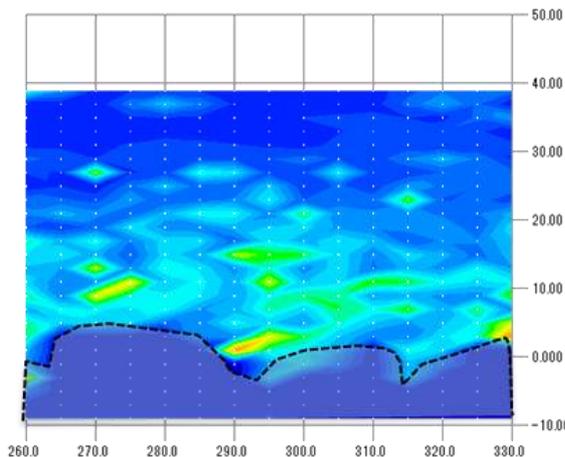
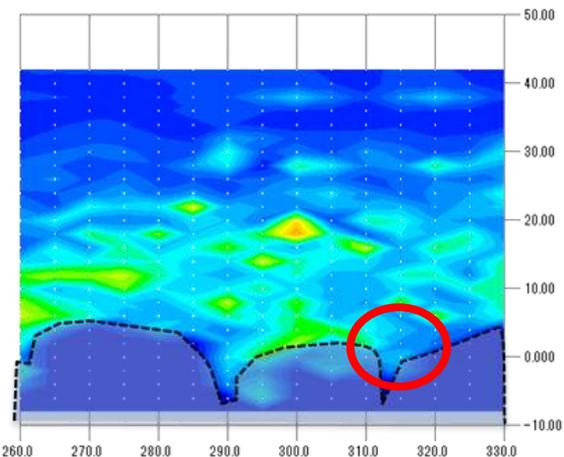
②礫添加 1



③礫添加 2



主流速成分 の鉛直二次元空間分布



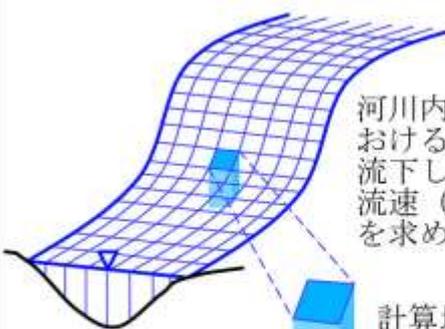
全流速V変動成分の鉛直二次元空間分布

# 話題③のまとめ

- **遊泳魚類個体の遊泳能力に対して、流速が大きい場では、遊泳魚も底層を利用する。**
  - 鉛直平均流速が巡航速度を上回る場でも、底層に、流速の小さい領域が存在する。
  - Roughness Layerが定位場になっている。
  - **鉛直平均流速だけでは、遊泳性魚類の空間選好性を議論できない。**
- **粗度層内は、時間平均流速と乱れの空間偏差が大きい。**
  - 遊泳魚個体は、流速が遅く、しかも変動の少ない（乱れが少ない）場所を好んでいるように見える。
  - 「乱れ」も空間選好性に関係している可能性が高い

# 生息環境評価手法PHABSIM

**水理解析モデル**  
(本検討では平面二次元不定流を採用)

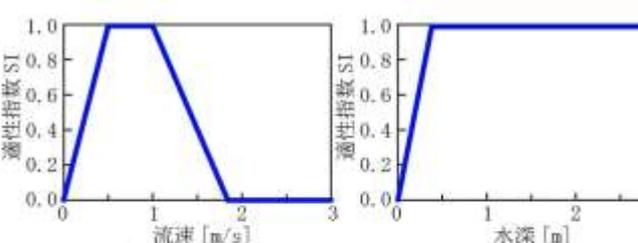


河川内の各計算地点における、ある流量が流下した際の水深、流速（鉛直方向平均）を求める

河床形状モデル

計算地点毎の面積、水深、流速等を算出

**適性指数 (SI) モデル**  
(評価対象・成長ステージ毎に異なる)



適性指数 SI

流速 SI モデルの例

水深 SI モデルの例

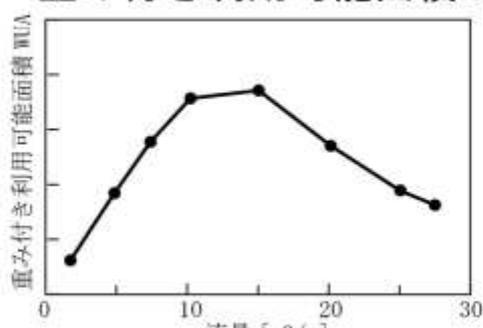
評価対象種の生息場として適した度合いを、流速、水深、底質、植生カバー等の物理指標ごとに、0～1の適性指数で表現するモデル

水深はともかく、鉛直平均の流速で代表しても大丈夫？



計算地点毎の合成適性指数 CSI (0～1) を算出  
 重み付き利用可能面積 WUA = 「面積 × 合成適性指数 CSI」 の評価区間全体

**流量 - 重み付き利用可能面積の関係**



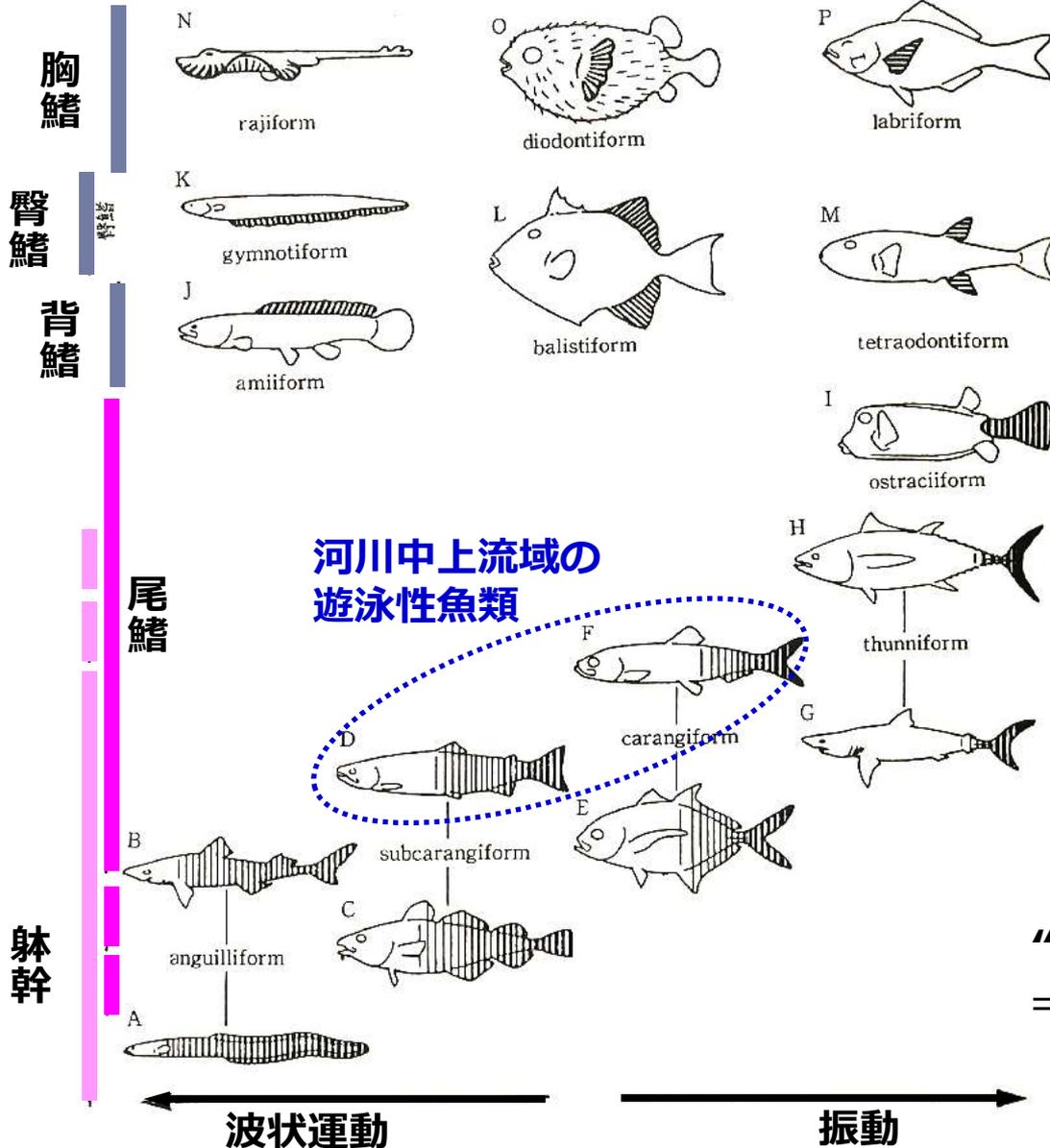
重み付き利用可能面積 WUA

流量 [m³/s]

複数の流量に対して重み付き利用可能面積 WUA を算出することにより、流量と評価対象種の生息場の量の関係を示す

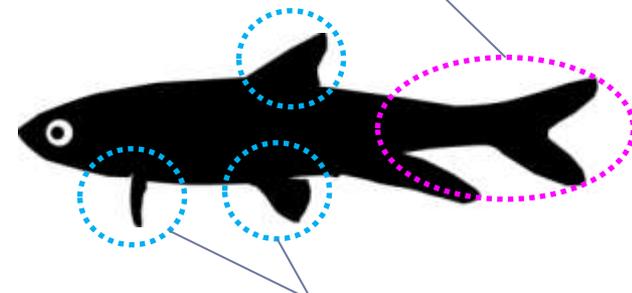
Suitability Index モデルは、もともと水理解析と親和性が高いモデルとするために、**水深、（鉛直平均）流速、底質の代表粒径**といった平面二次元的な取扱いが容易な変数に対してSIが整理された。

# 流れ場と魚：遊泳生理の視点



“時間平均流速”と深い関係

推進力は尾鰭と軀幹



各種のヒレは、  
姿勢制御・制動・方向転換  
突進時にはたたまれる。  
⇒ヒレが発達する魚種は  
運動性能が高く、  
乱れが強い流れに適応???

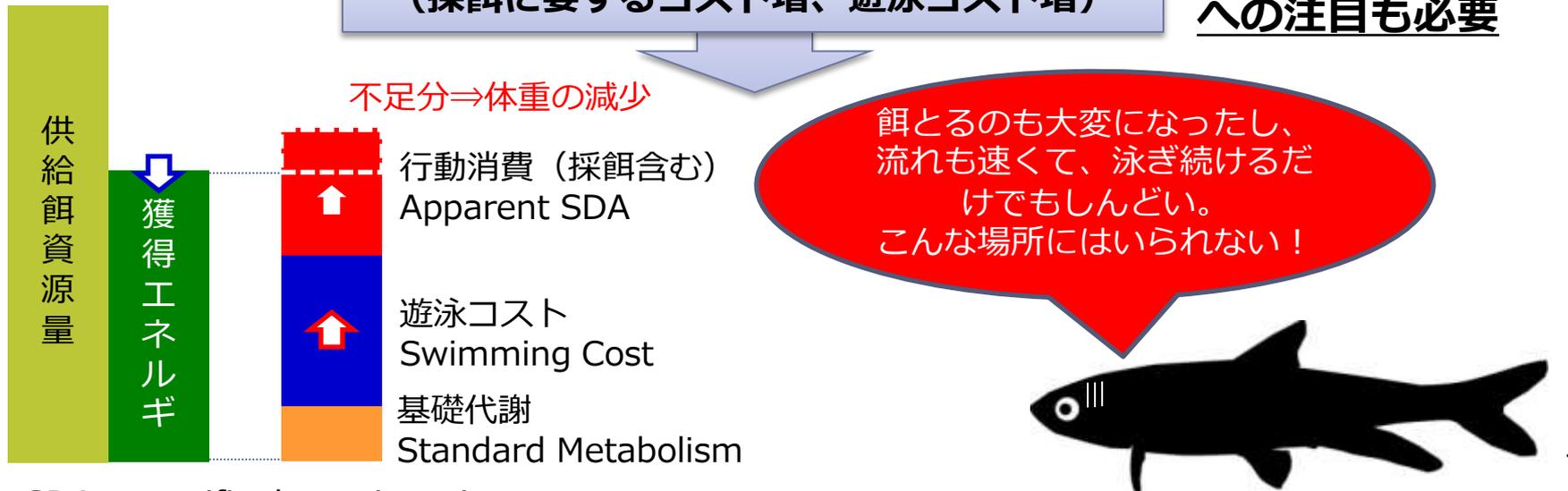
“流速変動（乱れ）”と深い関係  
⇒「乱れ」も空間の評価に必要

# 個体エネルギー収支の視点



流れ場の変化による採餌行動への影響  
(採餌に要するコスト増、遊泳コスト増)

採餌行動、  
エネルギー収支  
への注目も必要



SDA : specific dynamic action

# 全体まとめ

## • 土砂水理学、開水路水理学の実際問題への適用

### 【話題①、話題②】

- 単断面河道は（幸か不幸か）河道の形状が実験水路的。  
既存の水理学の知見が適用しやすい領域
  - **多くの場合、境界値問題に帰結する**  
(流量・土砂供給量、河床材料の構成・基盤岩の存在等)
  - **河川で起きている実現象の観測データの不足が課題。**
  - **現場で運用されている従来の技術体系への導入と普及戦略**

### 【話題③】

- 生物視点から、粗度が比較的大きい流れ場を記述するには、従来の水理学では重視されてこなかった、河床面近傍の現象への注目が必要。
  - **生物側の時空間スケールで場を記述する水理学の発展に期待**