

# 中小急流河川における護岸粗度の機能と 掃流力分布に着目した改修手法の提案

*Key Words* : 中小急流河川, 単断面河道, 合成粗度係数, 川幅水深比, B/H, 断面計画



原田守啓      大日コンサルタント株式会社 環境・水工部

# 1. はじめに

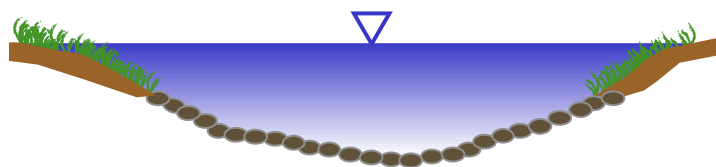
## 中小急流河川における河道災害と災害復旧

2/18

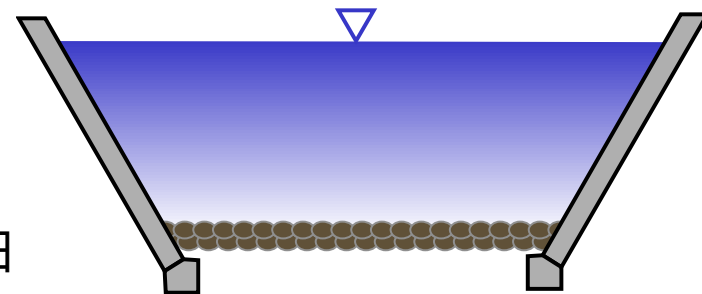


岐阜県飛騨地方；H11T18災害

➡ 「単断面，立ち護岸（1:0.5），河床掘削」により流下能力を向上する災害復旧



➡  
災害復旧  
（改良）



# 1. はじめに

## 改修後の再度災害に多くみられた被災形態

3/18

被災前河床高



H11災害復旧で改修した河川の多くが  
同じような被災形態で再度被災した。

岐阜県飛騨地方；H16T23災害

# 1. はじめに

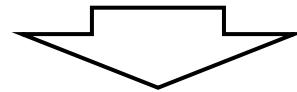
## 再度災害の発生に見る単断面河道の改修方法の課題

4/18

### □ このような被災形態は、何故生じたのだろうか？

**流下能力（のみ）を追及した改修の結果、河道の安定が損なわれ、河道災害を生じたと考えられる**

- 一般に護岸の粗度は自然河岸と比べて小さい **流速増加**
- 出水中の**河床掃流力が上昇** **河床低下** **護岸の根入れ洗掘** **破壊**
- 流水の運動量の増加に伴って、落差工・斜路工直下や湾曲部等の**流水運動の方向変化点における作用力が増大**して構造物被害が発生



**「河道の安定」を改めて計画に織り込んでおくことが急流河川における河道改修の大きな課題**

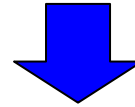
- **中小河川に関する河道計画の技術基準（H20.3）**では、「川幅を拡げることにより掃流力を上げない改修」を基本方針の一つとしている
- 中小急流河川の河道計画の技術体系を、「**河道の安定**」の観点から**検証**する必要性

# 1. はじめに

## 河道計画上の粗度係数の取り扱い（中小河川の場合）

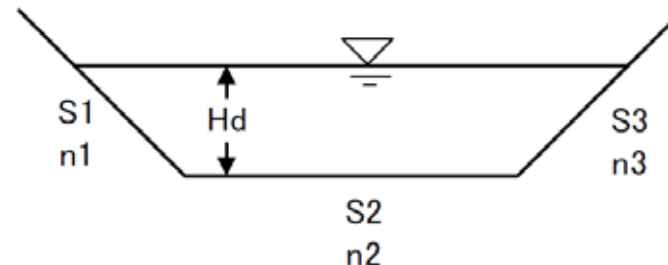
5/18

- 河床粗度係数の推定法
  - 代表粒径を粗度高さとしてManning-Strickler式等により評価
- 河岸（護岸）の粗度係数の設定法
  - 護岸の種類に応じて粗度係数を設定  
例：間知ブロック積み  $n=0.024$
  - 単断面中小河川では、**護岸が潤辺に占める割合が大きいことから護岸の粗度を評価する**（H19護岸の力学設計法改訂版）



- **合成粗度係数**により流下能力・代表流速を評価
  - 流下断面を各潤辺 $S_i$ と各潤辺の粗度係数 $n_i$ に支配される領域に分割し、「**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、**合成粗度係数**を求める。

$$N = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i^{3/2} \cdot s_i)^{2/3}}{\left( \sum_{i=1}^m s_i \right)^{2/3}}$$



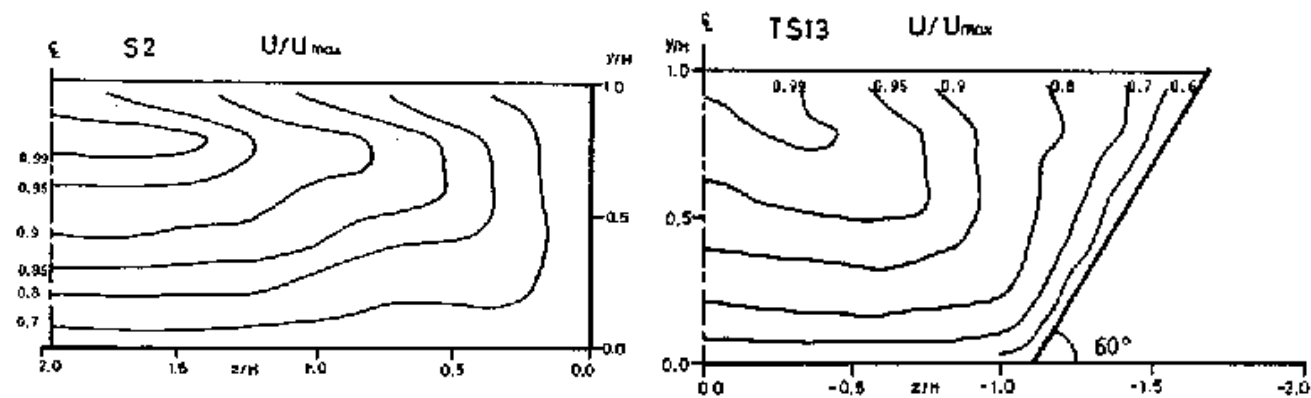


## 2. 既往研究に基づく単断面河道の 合成粗度係数の算出法の不確実性

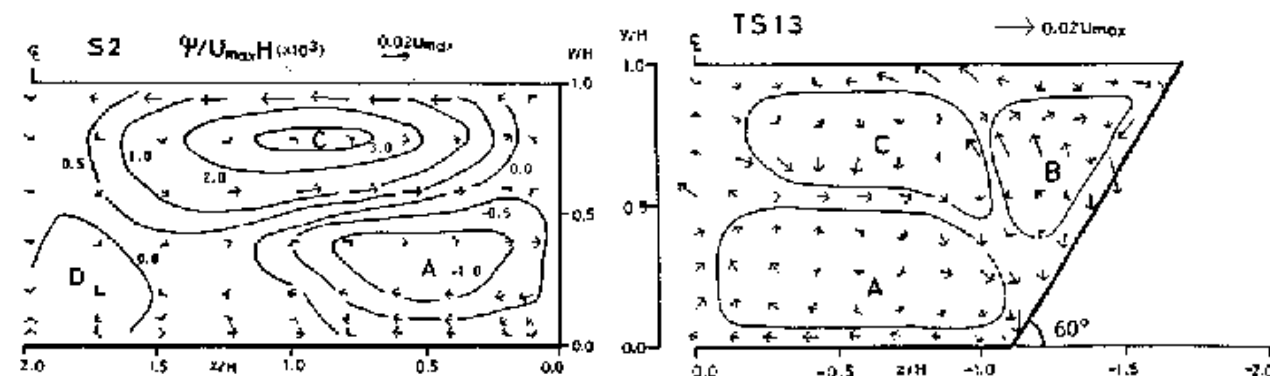
6/18

- B/Hの小さい水路に発生する最大流速点のもぐりこみ
  - B/Hの小さい水路の流れに生じる、最大流速点のもぐりこみは古くから知られており、これは川幅水深比及び側壁の勾配に応じて生じる第二種二次流に起因すると考えられている
  - このような3次元流が生じる場においても、合成粗度係数による評価は適切だろうか？

主流速成分



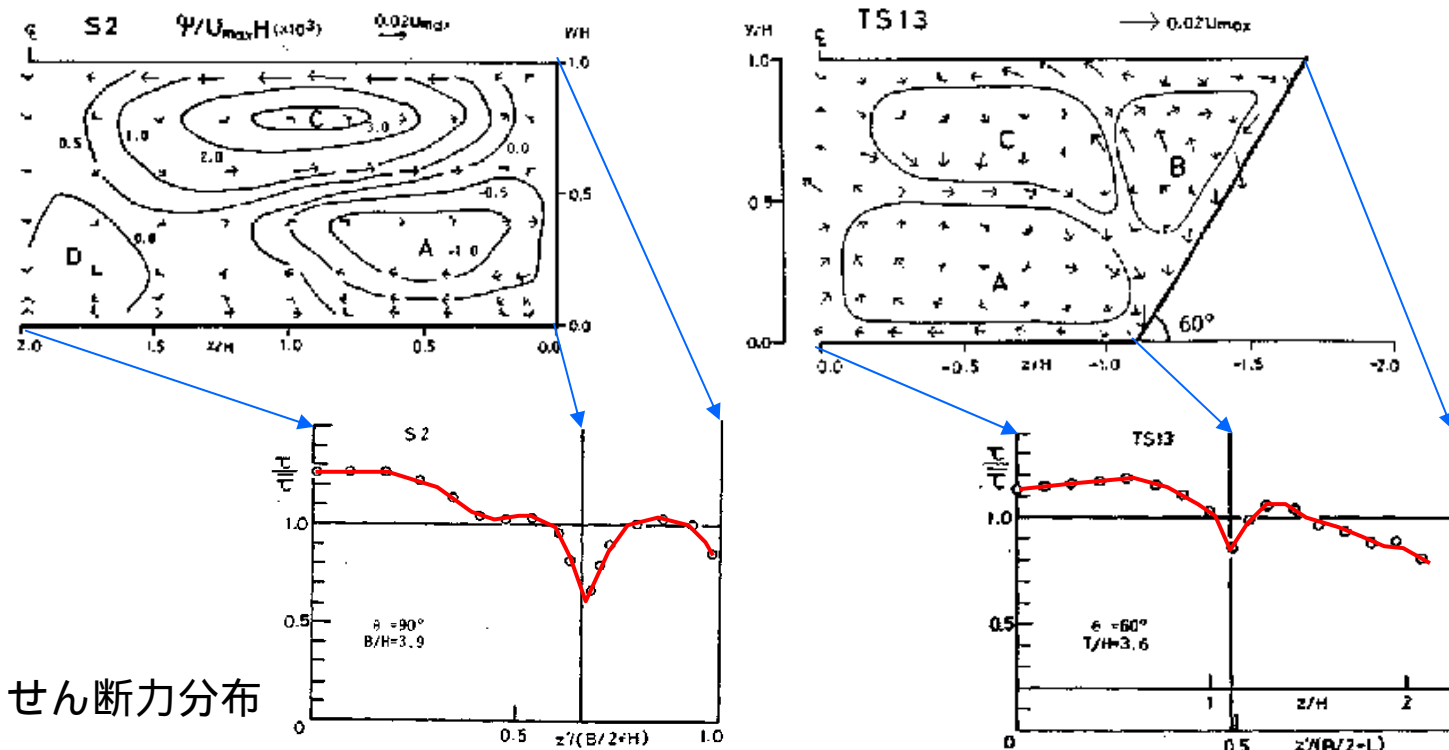
二次流パターン



## 2. 既往研究に基づく単断面河道の 合成粗度係数の算出法の不確実性

7/18

- 潤辺に作用するせん断力の分布
  - 矩形断面の側壁では半水深の位置、台形断面の側壁ではより下がった位置に、せん断力最大の点が現れる
  - 側壁のせん断力の分布は、二次流パターンに対応している
  - **側壁の粗度は、底面の粗度と同様に作用するだろうか？**



せん断力分布

### 3. 合成粗度係数の適用性の検討 (1) 実験の概要と実験ケース

8/18

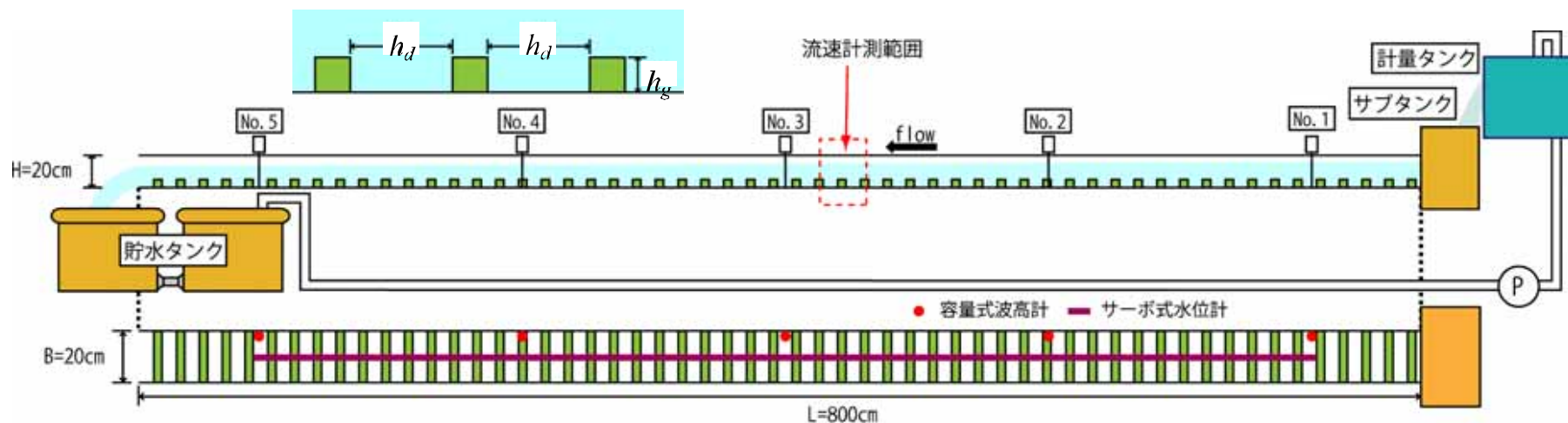
#### □ 実験水路の概要

- 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 ~ 18.0 /s)



#### □ 計測内容

- サーボ式水位計, 容量式波高計より  
水位を把握 エネルギー勾配, 摩擦速度 $U^*$ の算出
- 超小型プロペラ流速計により  
断面内の主流速分布を計測 (一部区間に6断面を設定)

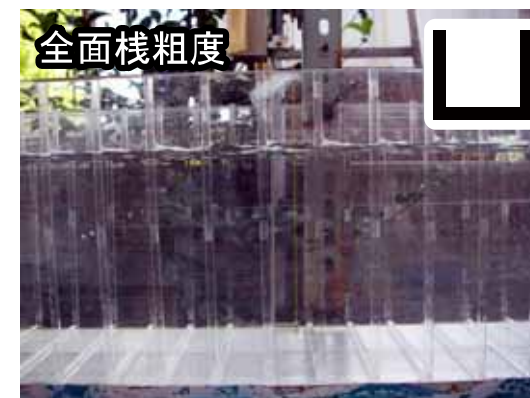
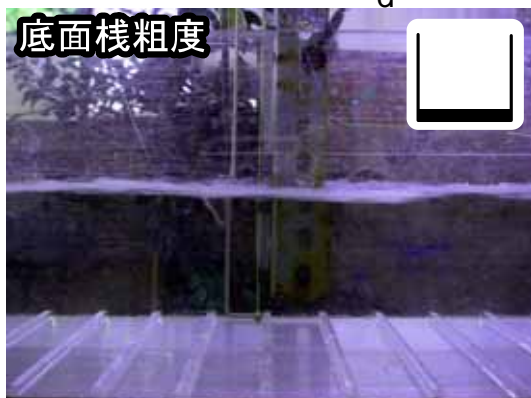




### 3. 合成粗度係数の適用性の検討 (1) 実験の概要と実験ケース

#### □ 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 $h_d$ ：45mm, 100mm, 210mm



#### □ 実験ケース一覧

粗度条件	水路勾配	棧粗度高さ $h_g$ [mm]	棧粗度間隔 $h_d$ [mm]	流量Q [L]	Froude数		水路幅水深比B/H		実験粗度係数n	
	$1b[1/X]$				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	45,100,210	4.0 ~ 18.0	0.38	1.54	1.2	6.6	0.013	0.028
		10	45,100,210	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	45,100,210	4.0 ~ 18.0	0.32	2.50	1.1	9.9	0.011	0.023
		10	45,100,210	4.0 ~ 18.0	0.34	2.27	1.0	9.5	0.011	0.027
全面	400,200,100,50,25	5	45,100,210	4.0 ~ 18.0	0.24	1.26	1.1	6.1	0.020	0.033
		10	45,100,210	4.0 ~ 18.0	0.26	0.87	1.0	5.1	0.019	0.048

### 3. 合成粗度係数の適用性の検討

#### (2) 合成粗度係数と実験粗度係数の比較

10/18

##### □ 合成粗度係数の算出方法

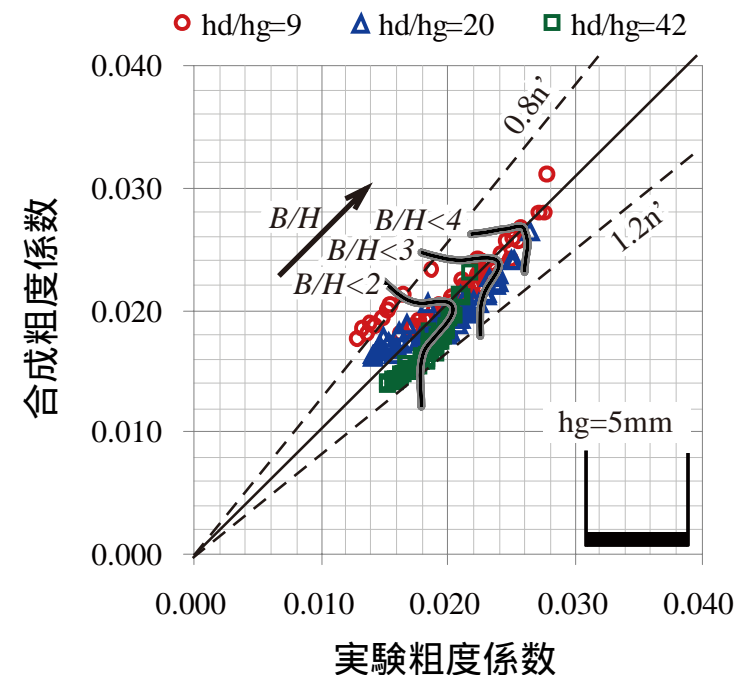
- 粗度設置面の粗度係数 $n$ ：棧型粗度の抵抗特性に関する鉛直二次元対数則に、粗度設置面の支配面積に基づく径深を適用して算出

$$n = \frac{H^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \left[ \left\{ 5.75 + 0.12 \left( \frac{h_d}{h_g} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{h_g} + 1.50 \log_{10} \frac{h_d}{h_g} - 1.91 \right] \right. \quad (\text{足立, 1964})$$

- 粗度を設置していない面の粗度係数 $n$ ：実験結果より $n=0.009 \sim 0.010$
- これらを合成した粗度係数と実験粗度係数を比較

##### □ 底面のみ粗度を配置したケース

- $n$ が大きい領域では、合成粗度係数と実験粗度係数がよく一致する
- $n$ 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 $\pm 10\%$ 程度の差を生じている。
- $B/H$ が小さくなるにつれて、差が顕著になっている。

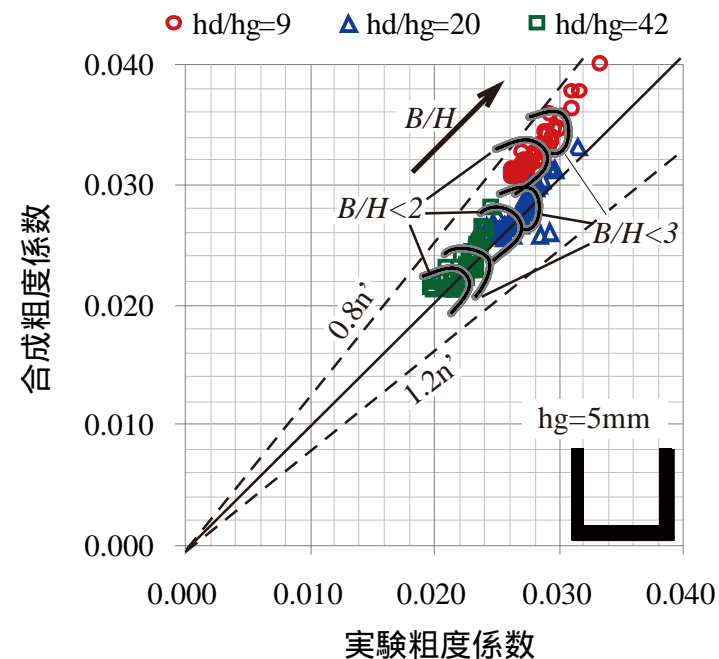
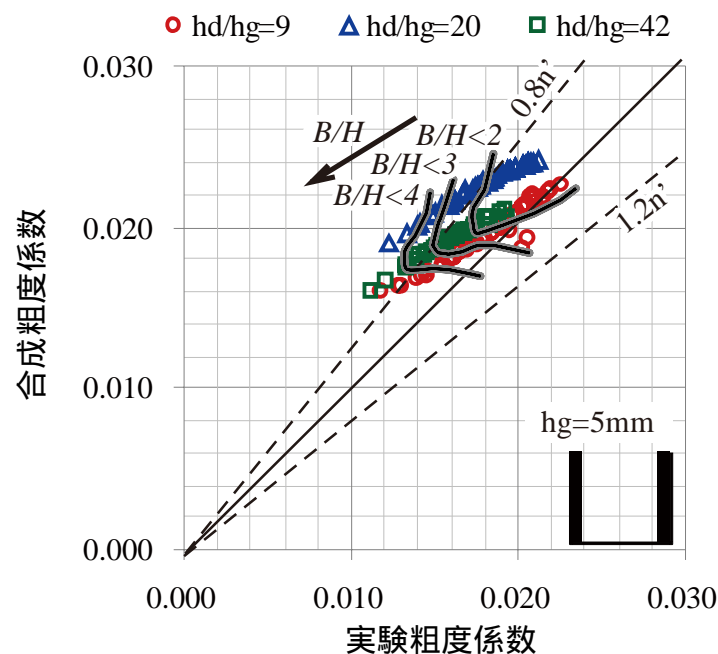


### 3. 合成粗度係数の適用性の検討 (2) 合成粗度係数と実験粗度係数の比較

11/18

#### □ 側壁のみ・全面に粗度を配置したケース

- 側壁粗度では、実験粗度係数が合成粗度係数を全体的に下回る
- とくに、 $n$ が小さくなるにつれて、実験粗度係数が合成粗度係数を下回る割合が大きくなっていく
- $B/H$ に着目すれば、 $B/H$ が大きくなるにつれて、差が拡大する
- すなわち、側壁に配置した粗度の抵抗効果は、断面分割法により期待される程は作用しないことを示している。



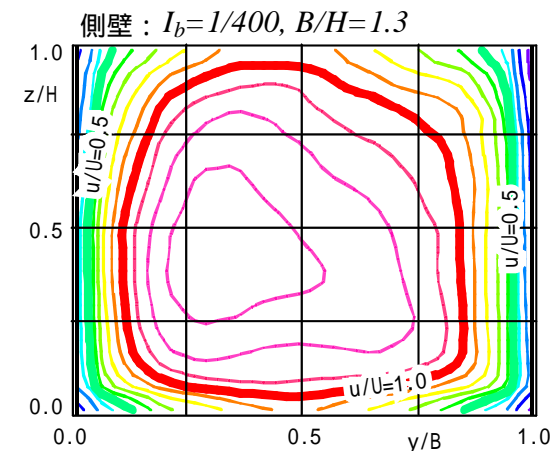
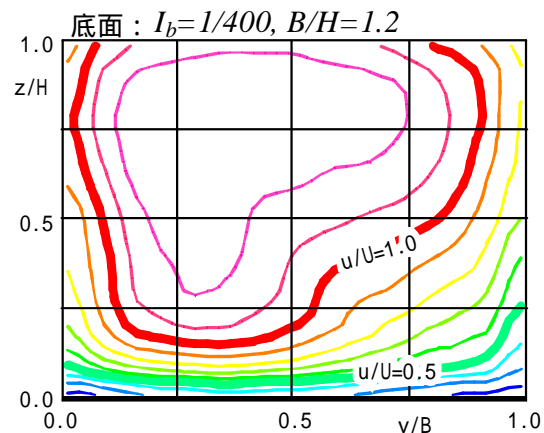
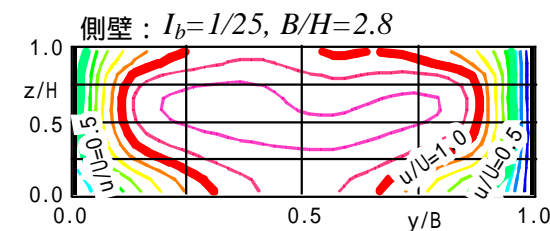
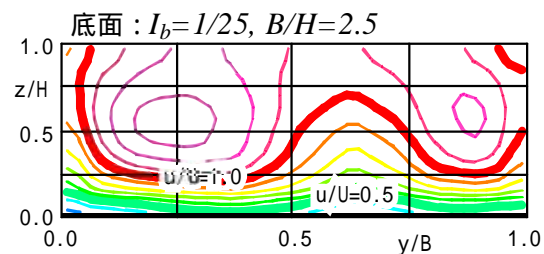
### 3. 合成粗度係数の適用性の検討 (3) 断面内流速分布に基づく考察

#### □ 底面のみ粗度を配置したケース

- 最大流速点のもぐりこみが確認され、 $B/H$ が大きいケースには、側壁の影響がより顕著に表れている。

#### □ 側壁のみ粗度を配置したケース：

- 側壁近傍の流速は低減されているが、その影響範囲は限定的であり、断面の高さ方向・横断方向に広く流速の大きい領域が広がっている。



底面のみ粗度配置

側壁のみ粗度配置

ともに、 $h_g=5\text{mm}$ ,  $h_d=45\text{mm}$ ,  $Q=18$  /sで、縦断勾配が異なる

### 3. 合成粗度係数の適用性の検討 (4) 実験結果に対する水理学的考察

13/18

- **底面の粗度の流水抵抗効果** > **側壁の粗度の流水抵抗効果** ……何故か?
  - 潤辺の粗度の流水抵抗効果は、接近流速と乱れに対する反力として定まる

側壁から十分離れた位置の流れ：  
鉛直二次元対数則に従った流れで  
なり、流速分布はほぼ一様

潤辺（側壁から離れた位置の底面）  
に作用する流体力は一様

せん断力分布が一様で評価可能

側壁近傍の流れ：  
乱れ強度の非等方性によって三次  
元的な流れとなっていて、とくに、  
水面付近・隅角部の流速が小さい

潤辺に作用する流体力が一様でない

せん断力分布は一様とはならず、  
平均して底面より作用が小さい

- 各潤辺のManningの粗度係数から断面を分割して合成粗度係数を算出する方法は、**側壁が垂直に近くなるほど、実際の粗度係数との差が大きくなる（底面に設置した状態ほどは効かない）**と推察される。
- また、**側壁が潤辺に占める割合が高い単断面水路において、よりそれが顕著になると**考えられる。



## 4. 結論と提案

### (1) 水理実験結果に基づく合成粗度係数の適用性

14/18

#### □ 水理実験に基づく結論

- 粗度が底面のみのケースでは、水路幅水深比 $B/H$ が小さい領域で、合成粗度係数と実験粗度係数の差が拡大する。
- 底面,側壁,全面に粗度を配置したケースの比較から、側壁に配置した粗度は底面に配置した粗度に比して流れに対する抵抗が小さい。
- 断面内流況の計測結果を併せた検討により、側壁に配置した粗度の抵抗の効果は側壁近傍に限定されている

以上より、

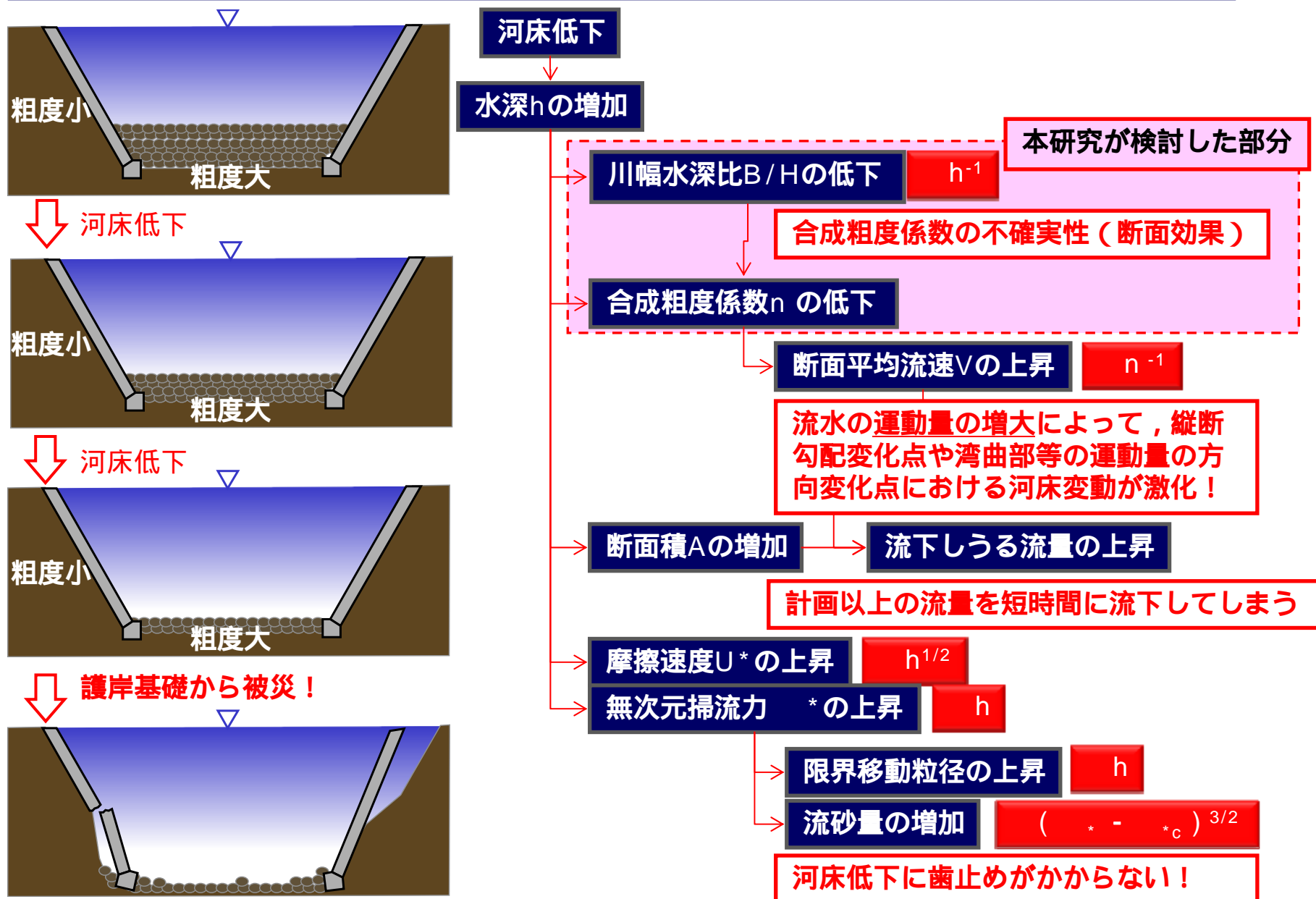
**断面分割法に基づく合成粗度係数は、側壁の粗度を過大評価する傾向がある。**

このように、 $B/H$ が小さい単断面河道における合成粗度係数の想定は、実河道の粗度を過大評価している可能性が高い。



**中小急流河川における河道の安定に配慮した改修について提案**

# 補足：河床低下が悪循環を生む仕組みの図式



## 4. 結論と課題

### (2) 中小急流河川の改修にあたっての留意点と提案

16/18

#### □ 提案1：河床面せん断力を閾値にして川幅水深比を設定

- 河床面せん断力（摩擦速度 $U^*$ , 掃流力）に閾値を設けて川幅を設定
- $B/H$  5程度を下限値とする
- 出水時に砂州が発生するかにも留意

#### 従来の典型的な改修断面

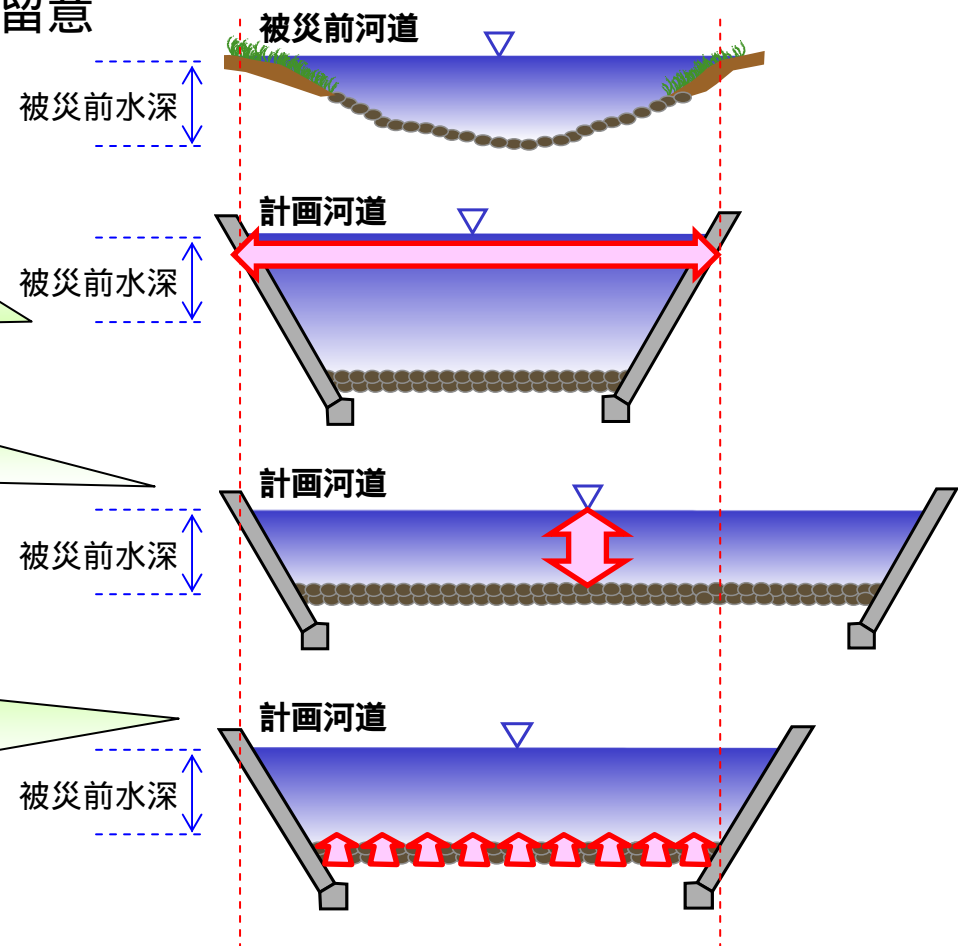
河床を下げるほど流下能力が上がるが、河床への負担が大きく、河床低下が生じると、ますます流路の粗度が低下して悪循環へ **河道災害発生!**

#### 技術基準に則った改修断面

川幅の拡幅によって流下能力の向上をはかる  
図には片岸拡幅の原則を反映していない

#### 河床面せん断力と $B/H$ に着目した改修断面

流下能力の確保 + 河道の安定を条件として、 $B/H$ を設定  
川幅は、 $> 5H$  となる。



## 4. 結論と課題

### (2) 中小急流河川の改修にあたっての留意点と提案

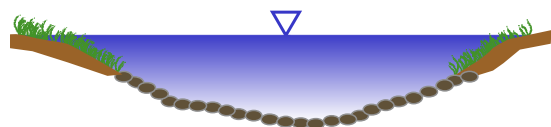
17/18

#### □ 提案2：河床面せん断力の評価には水深を用いる

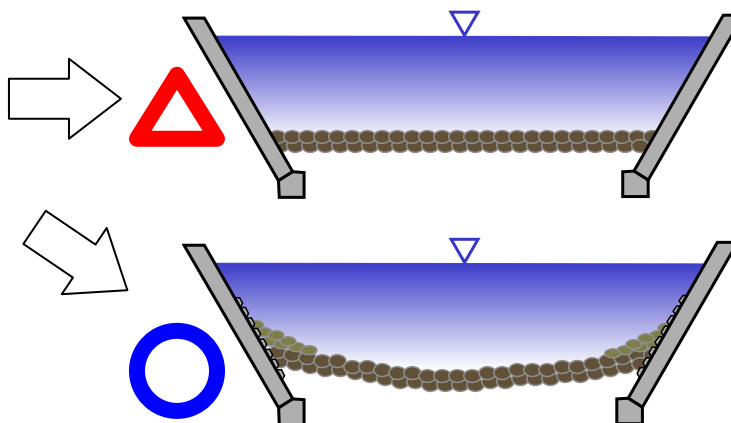
- 径深 $R <$  水深 $h$        $U_*(R) < U_*(h)$
- 側壁の影響が及ばない領域では、鉛直二次元的な流れとなっていることから、**河床面に作用するせん断力は、水深 $h$ により評価すべき**

#### □ 提案3：護岸粗度と法尻部の処理によって潤辺に作用するせん断力分布を滑らかにする

- 法尻部への寄石や護岸の低い位置への粗度の付与によって、横断形状を滑らかにして、**全潤辺にバランス良く出水時のせん断力を分配**する



自然河道の断面形状は、出水によって放物線、舟形断面に近いものとなっている



横断形状を滑らかにするとともに、粗度の横断的な変化を緩和して、潤辺全体でバランス良くせん断力を受け持つ

#### □ 提案4：施工時の配慮事項

- 護岸根入部の埋め戻しや河床整正時に、**弱点を作らない**

- 中小急流河川の改修において、「河道の安定」を確保することが河道計画の課題となっていることを指摘した。
- 開水路流れの構造に関する既往研究成果から、 $B/H$ が小さい単断面河道の合成粗度係数の算出方法の不確実性を指摘した。

- $B/H$ が小さい水路において、棧型粗度を用いた水理実験を幅広い条件設定で行い、合成粗度係数と実験粗度係数のズレがどの程度生じるか検討した。
- 既往研究も踏まえ、側壁に配置した粗度（護岸の粗度）は、底面に配置した粗度よりも流れに対する抵抗の効果が小さいと結論した。

- これらの成果を踏まえ、中小急流河川の改修における留意点と断面計画の考え方を提案し、「中小河川に関する河道計画の技術基準」に示された「川幅を拡げる改修」にあたって、川幅の拡幅の度合いについて一定の論拠を与えた。
- 今後も研究を続け、提案の効果を定量的に実証して、実務に資する研究としていきたい。

ご清聴ありがとうございました。