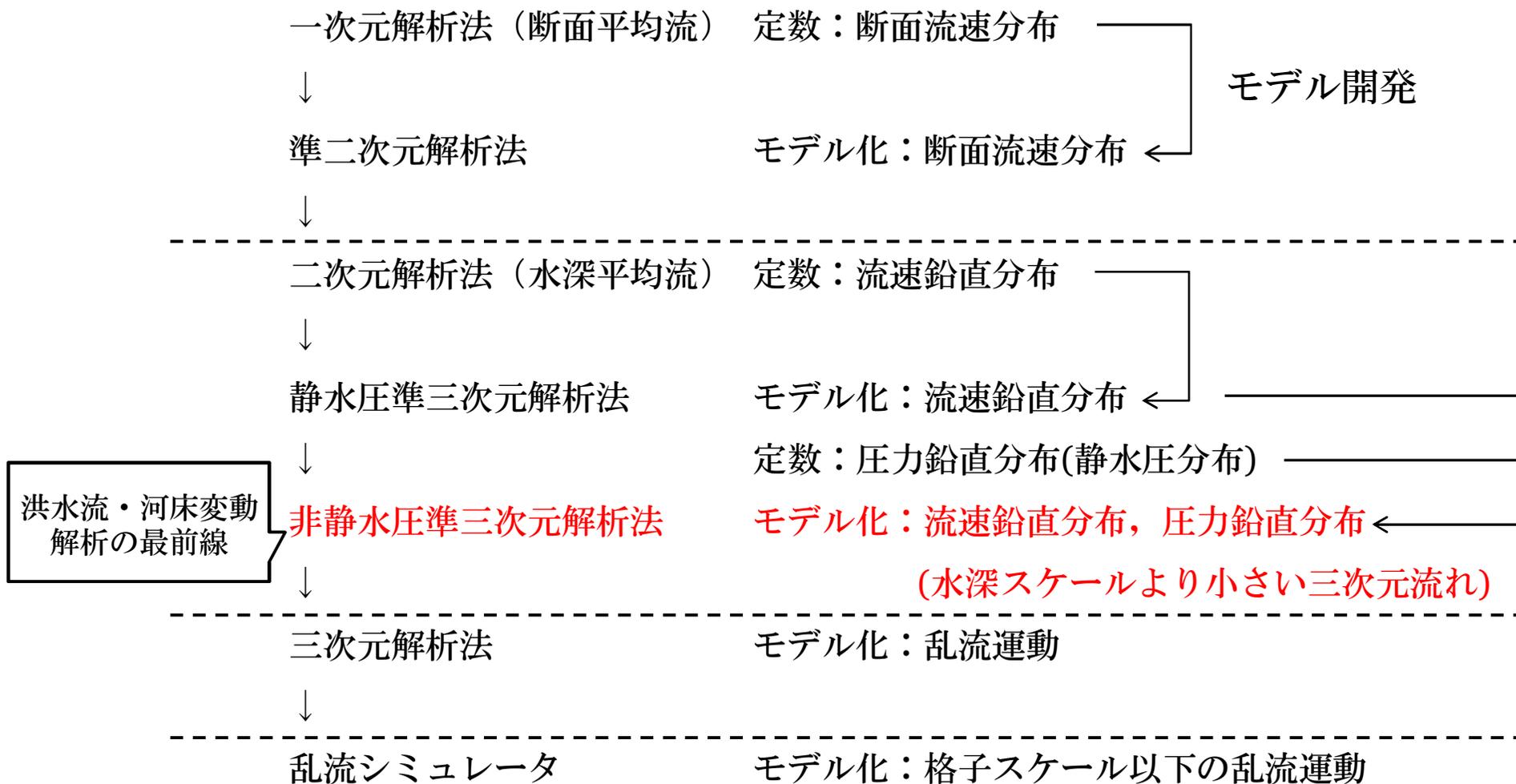


特定課題OS：「河道計画・管理のための流れ・地形変化の解析技術向上に向けて」話題提供  
2014年度河川技術に関するシンポジウム，東京大学農学部弥生講堂，2014.6.5

# 河川流解析の役割と適用範囲

中央大学研究開発機構  
内田龍彦

# 様々な流れの解析法に用いられている モデル化と簡略化



# BVC法に基づく水深積分モデルの分類

平面二次元解析法

流速分布  
(水面と底面の流速差)

$$\delta u_i = \varepsilon_{ij3} \Omega_j h + \frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i}$$

渦度分布 (流速) の影響評価

圧力分布の影響評価

水深平均渦度方程式

鉛直方向流速の方程式

水表面流速の方程式

流速分布・渦度分布に関する追加方程式

底面圧力の方程式

非平衡粗面抵抗則(NWL)

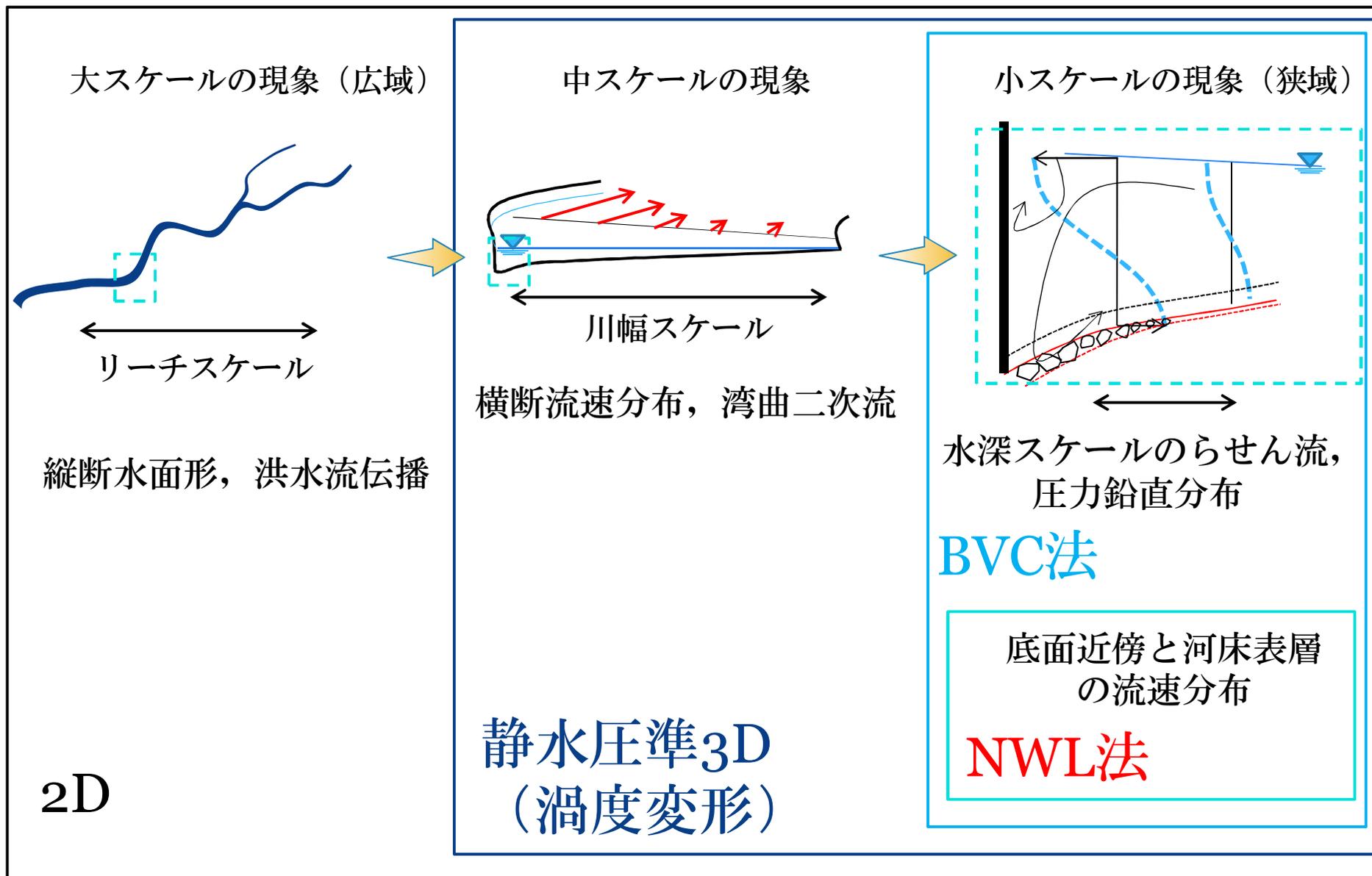
水深平均圧力の方程式

渦層の運動方程式

圧力分布・鉛直流速分布に関する方程式  
(水面圧力の方程式等)

粗度層の運動方程式

# BVC-NWL法(非静水压準三次元解析法+非平衡粗面抵抗則)

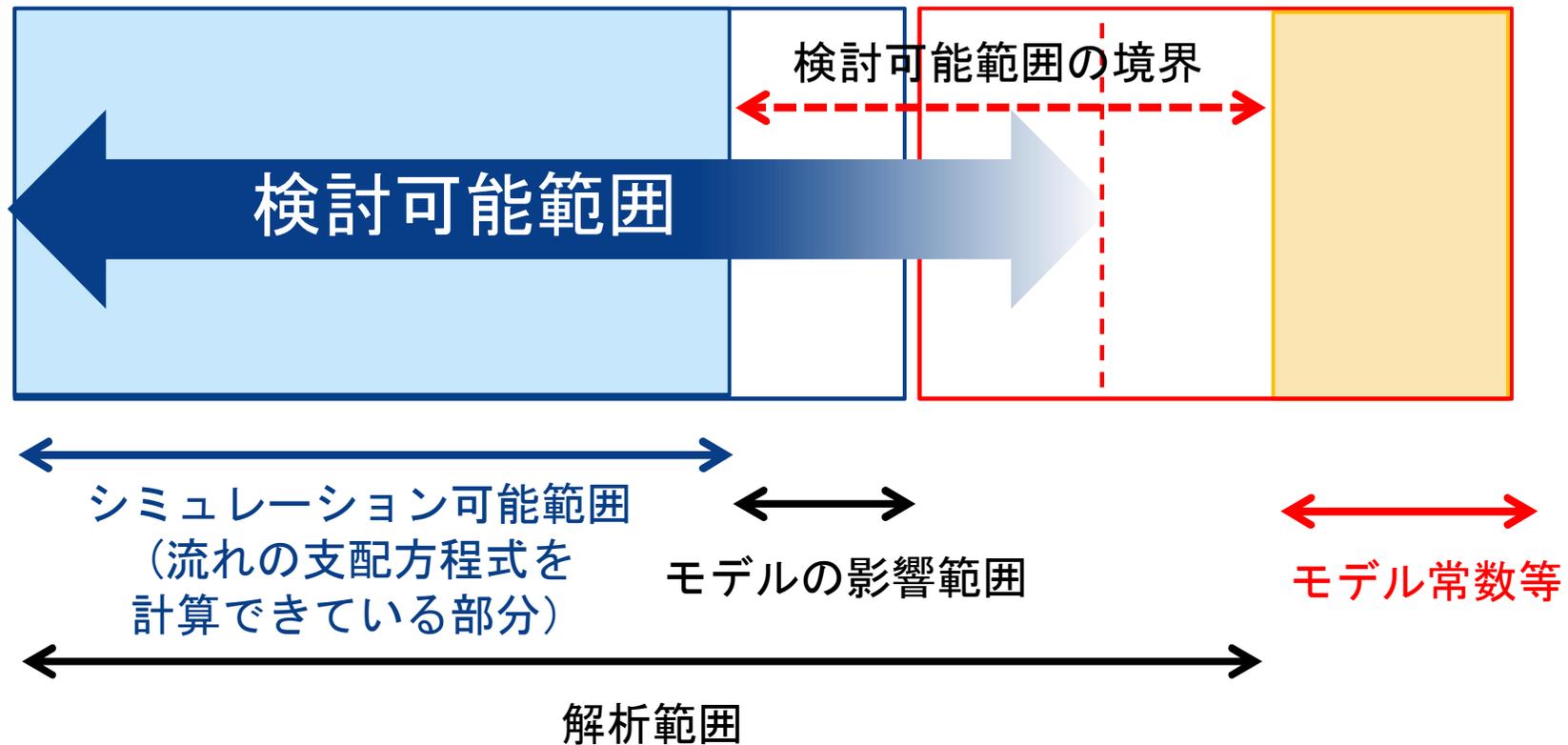


# モデル化とシミュレーション

解析モデル＝

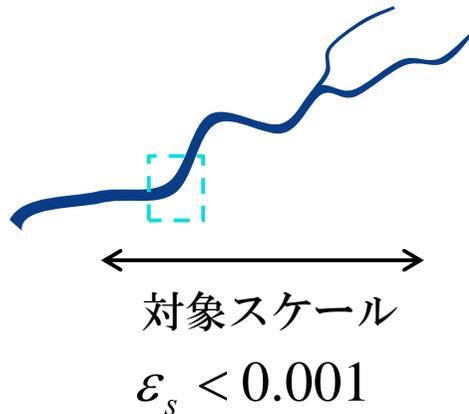
基礎方程式

＋ モデル(簡略化)

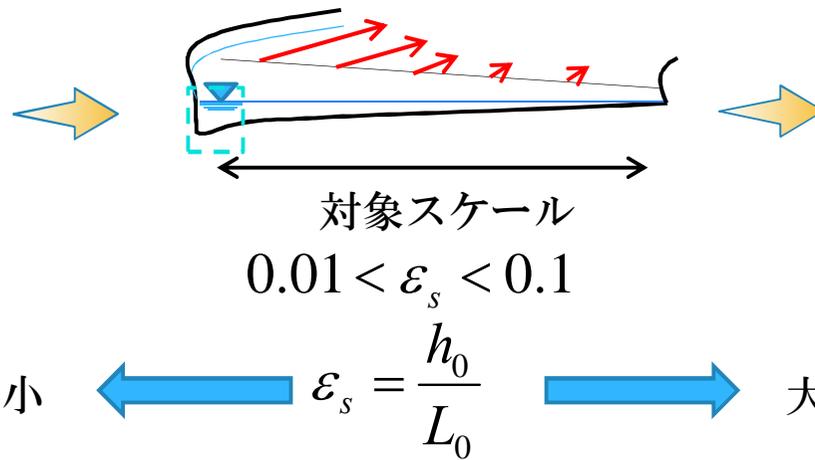
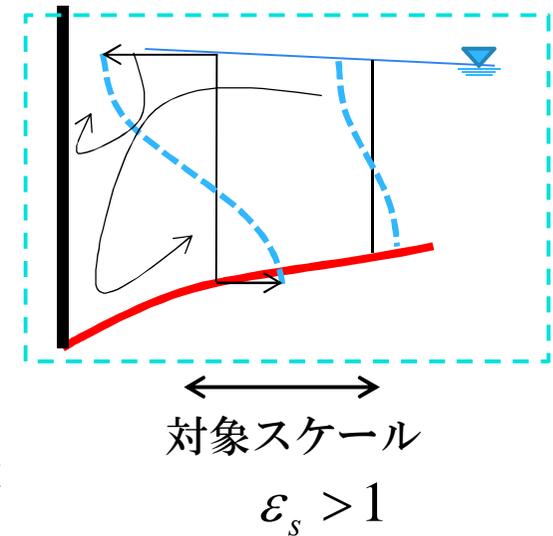


# 運動方程式から見た各種モデルの適用範囲

大スケールの現象（広域）



小スケールの現象（狭域）



小 ←  $\varepsilon_s = \frac{h_0}{L_0}$  → 大

## 浅水流パラメータ

$$\varepsilon_s = \frac{h_0}{L_0}$$

$h_0$  : 代表水深  
 $L_0$  : 対象スケール (水平スケール)

$$\approx \frac{W_0}{U_0}$$

$W_0$  : 代表鉛直流速  
 $U_0$  : 代表流速

# 運動方程式の各項の大きさ

水深積分された運動方程式

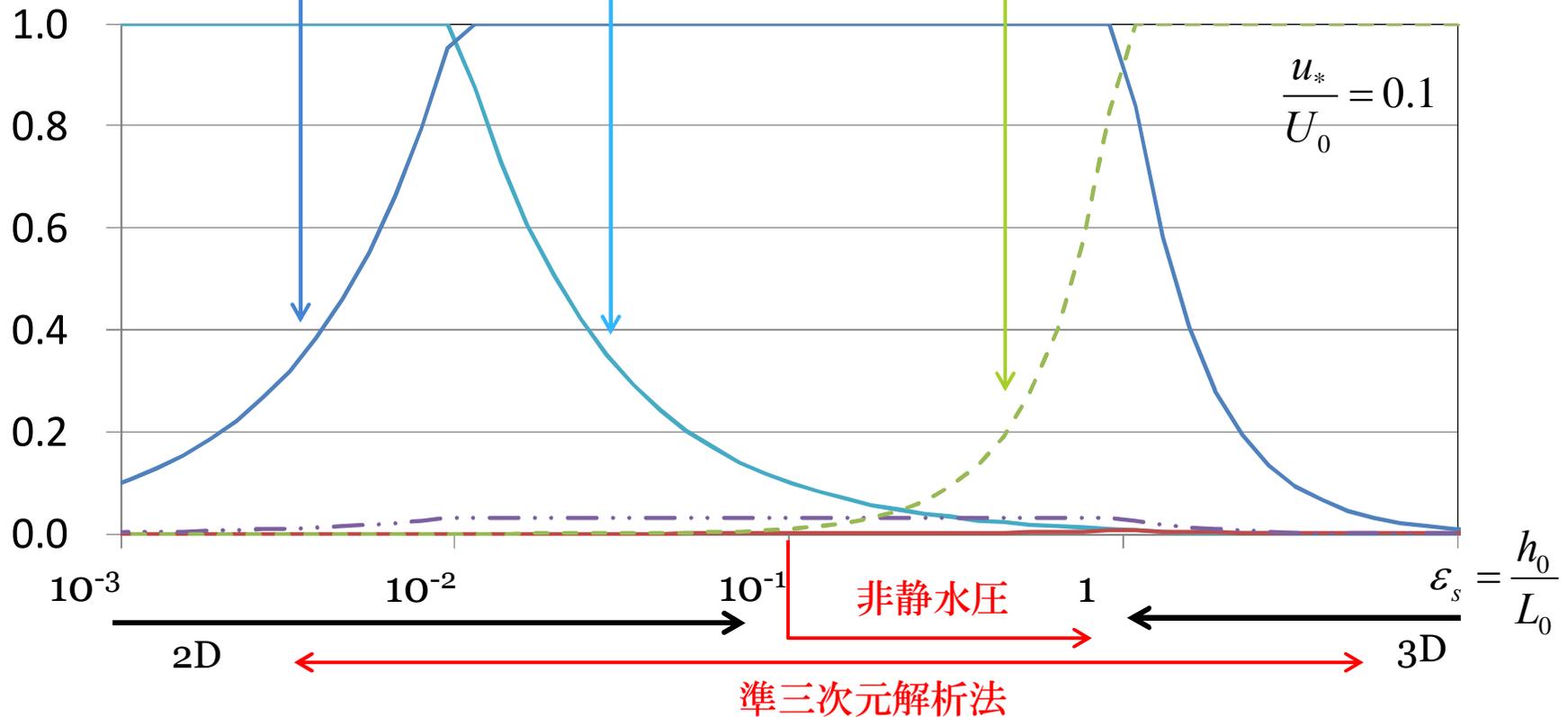
$$\rho \left( \frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} \right) = -\rho g h \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \tau_{0i} - \left( \frac{\partial \rho g h^2 / 2}{\partial x_i} \right) - \left( \frac{\partial h dp}{\partial x_i} + dp_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial h \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

移流項

重力項, 底面  
せん断応力項

非静水圧項

最も大きい項を1としたときの  
各項の大きさ



# 底面流速の方程式

Y面でストークスの定理(渦度の積分=循環)を考えると、底面流速の方程式が得られる。

## 底面流速の方程式

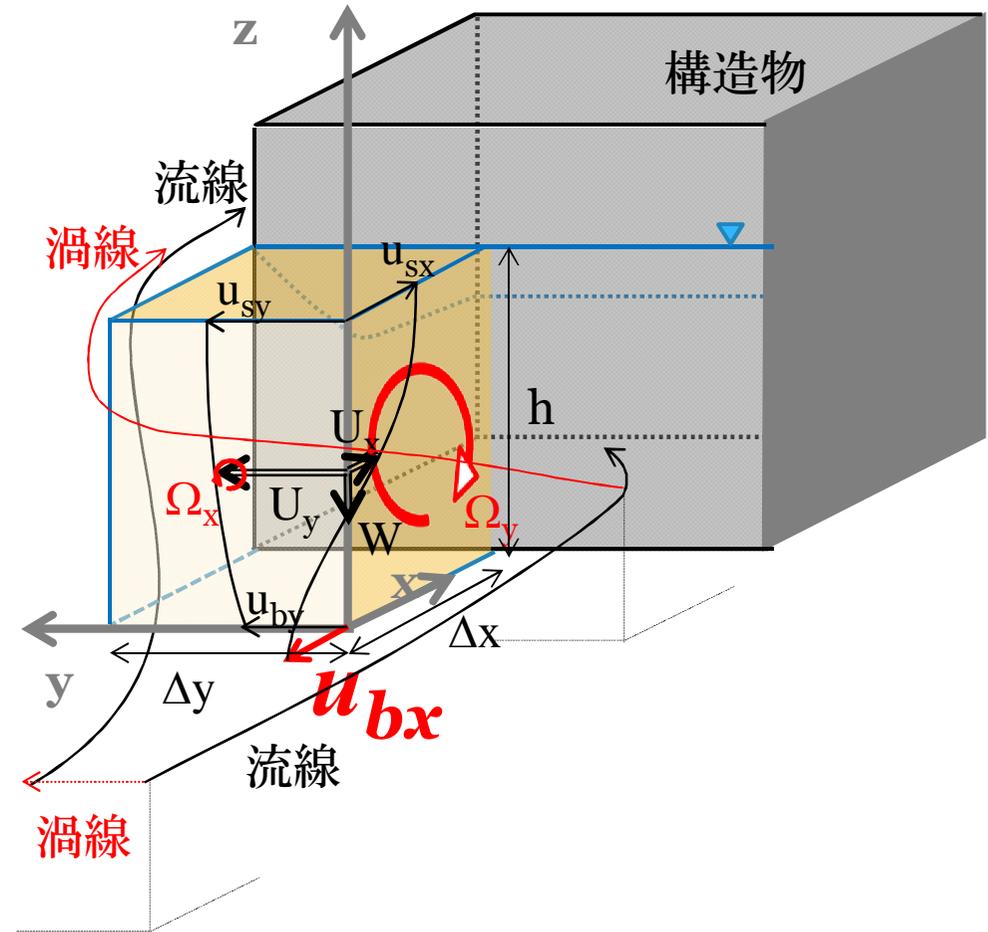
$$u_{bx} = u_{sx} - \Omega_y h - \frac{\partial Wh}{\partial x} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = ER_{\sigma i} + P_{\omega i} + \frac{\partial h D_{\omega ij}}{\partial x_j}$$

水深積分渦度方程式

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g' \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + P_{si}$$

水表面の運動方程式

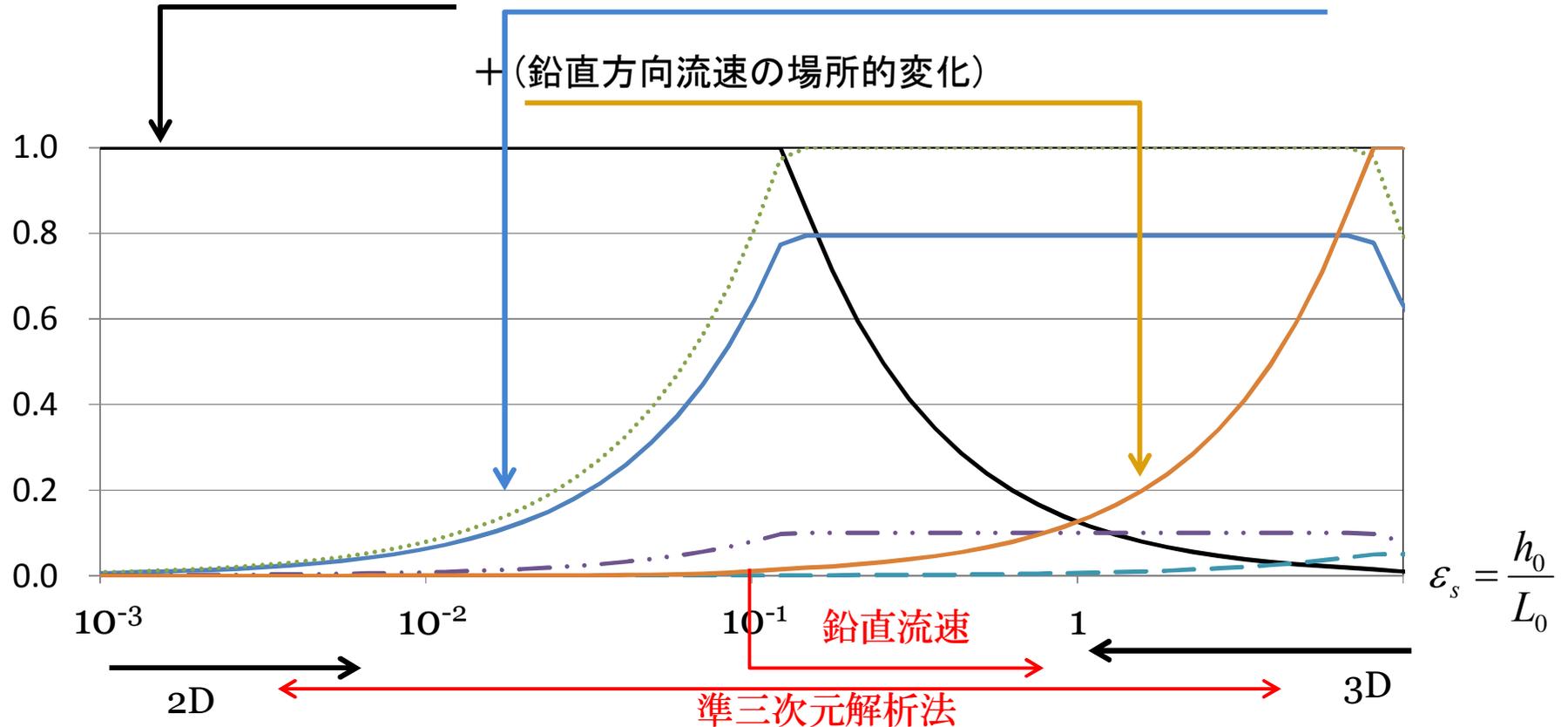


(底面流速場) = (水深平均流速場) + (渦度分布の影響 : 水面流速, 渦度の移流項) + ...  
 + (圧力分布の影響 : 鉛直方向流速の場所的変化)

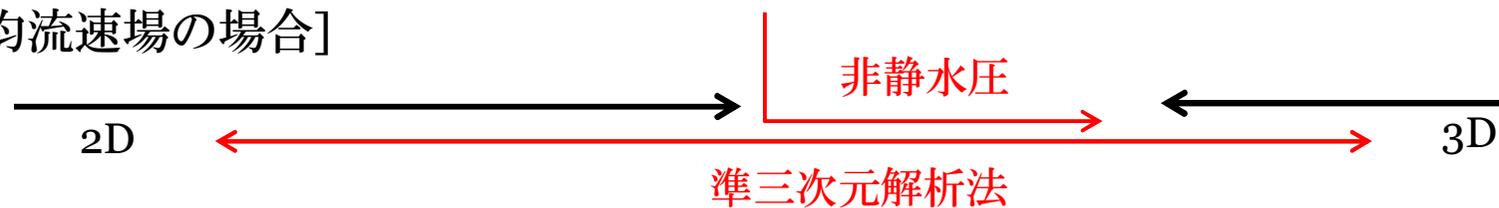
# 底面流速の決定要因

## 底面流速の方程式

(底面流速場) = (水深平均流速場) + (流速鉛直分布の変形：水面流速，渦度の移流項) + …



[水深平均流速場の場合]





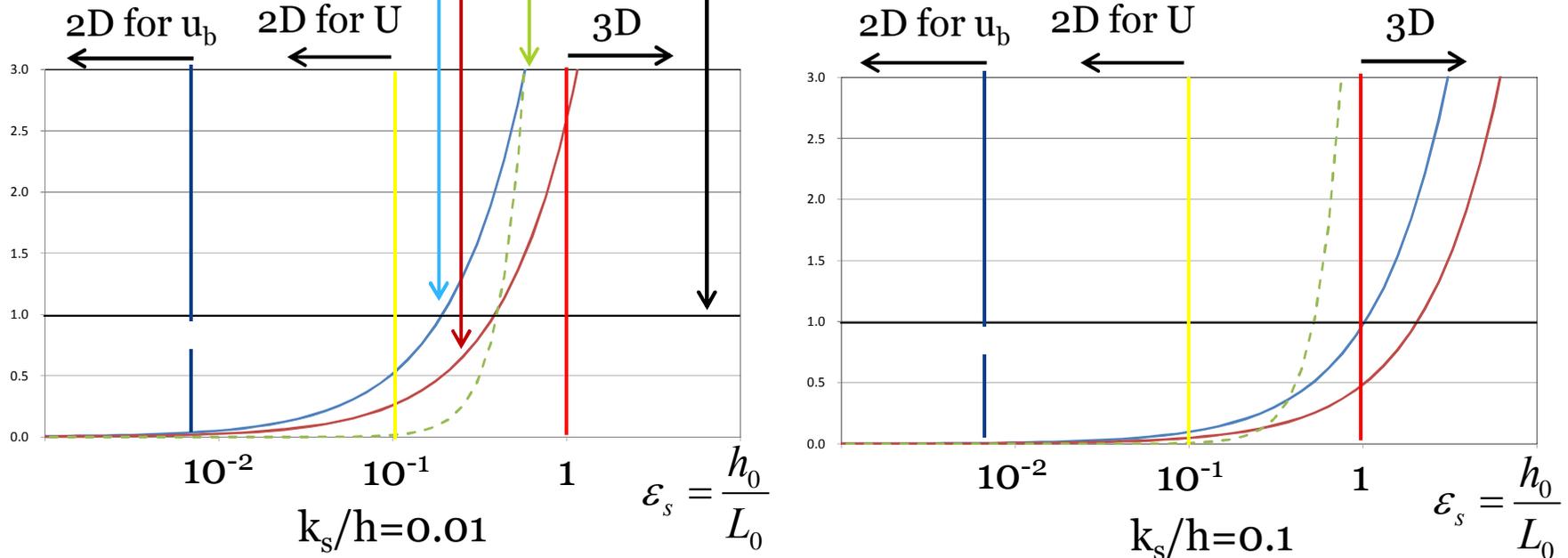
# 渦層の運動方程式の各項の大きさ

$$\frac{\partial u_{vi}}{\partial t} + u_{vj} \frac{\partial u_{vi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial h}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial dp_b}{\partial x_i} - g \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{\tau_{bi}}{\rho \delta z_b} - \frac{\tau_{ti}}{\rho \delta z_b}$$

移流項      水深変化項      非静水圧項      重力項・せん断応力項

(平衡粗面抵抗則で考慮される項)

重力項，せん断力項に対する各項の大きさ



- $\epsilon_s > 0.1$  : 渦層内の流れの非平衡性は無視できない.
- 相対粗度が小さいほど渦層内の非平衡性は大きくなる.
- ⇒ 渦層内の非平衡流れは砂河床の局所洗掘の解析において特に重要となる.
- (洗掘部では水深が大きく，流れスケールは逆に小さいため)

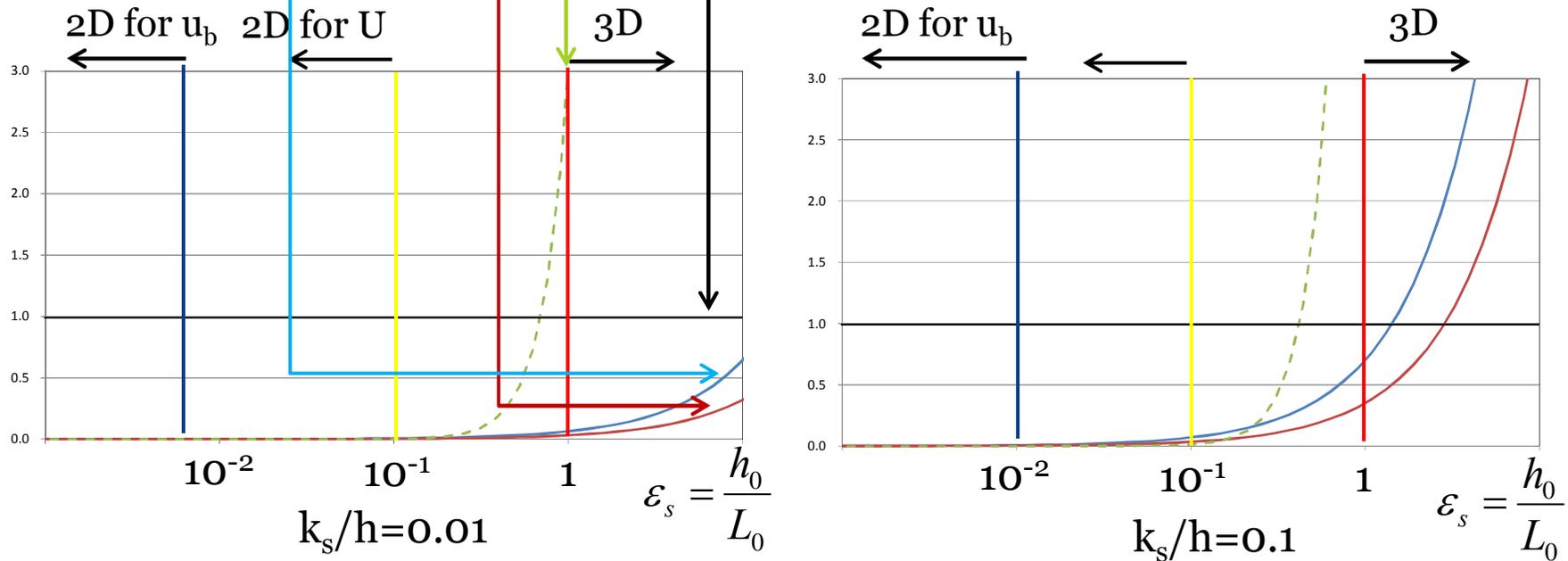
# 粗度層の運動方程式の各項の大きさ

$$\frac{\partial u_{vi}}{\partial t} + u_{vj} \frac{\partial u_{vi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial h}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_b}{\partial x_i} - g \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{\tau_{ti}}{\rho \delta z_r} - \frac{D_i}{\rho \delta z_r}$$

移流項      水深変化項      非静水圧項      重力項・せん断応力・流体力項

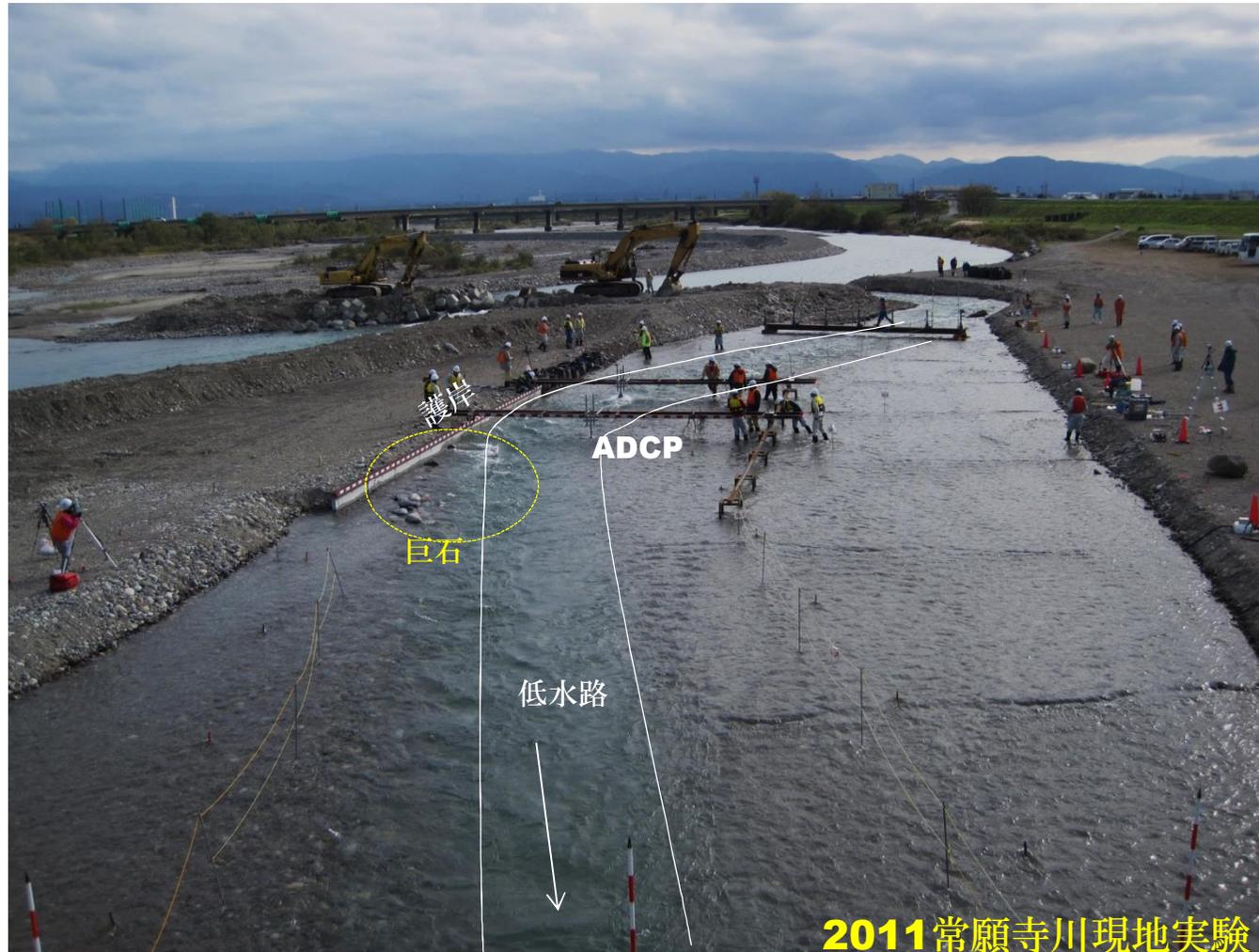
(平衡粗面抵抗則で考慮される項)

重力項，せん断力項に対する各項の大きさ

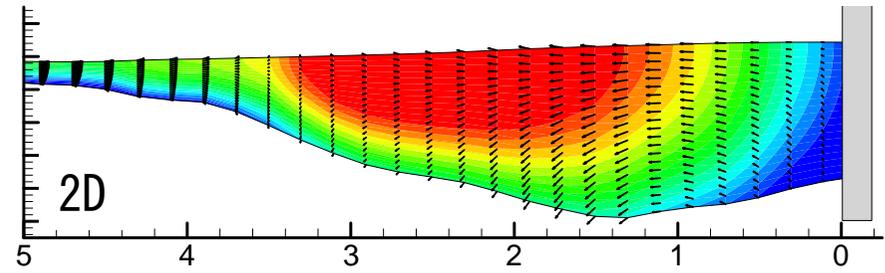
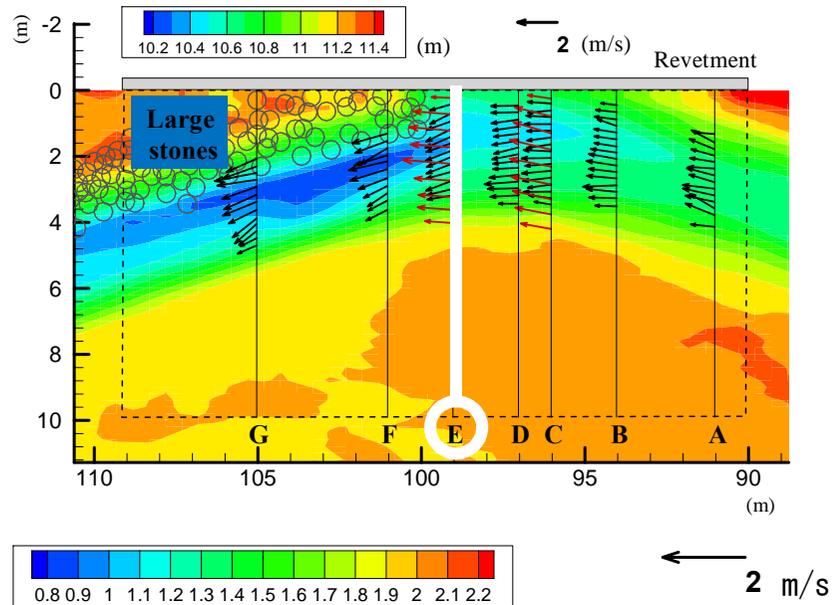


$\epsilon_s > 0.1$  : 渦層内の流れの非平衡性は無視できない。  
 渦層とは逆に相対粗度が大きいほど粗度内の非平衡性は大きくなる。  
 ⇒粗度層は通常河床と定義される面より下であるため，  
 礫床河川の局所流解析では非平衡粗面抵抗則が必要であることが分かる。

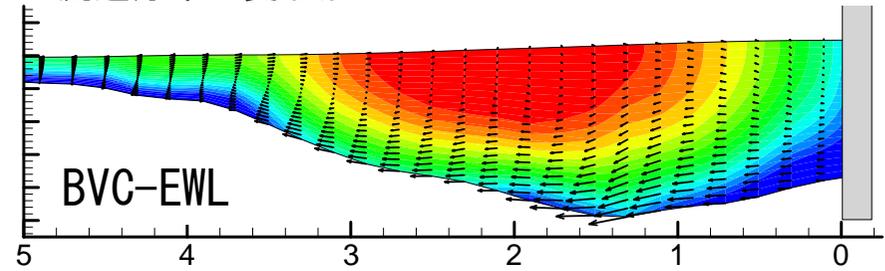
# 礫床河川の水衝部三次元流れの解析における 非静水压準三次元解析法と非平衡粗面抵抗則の応用例



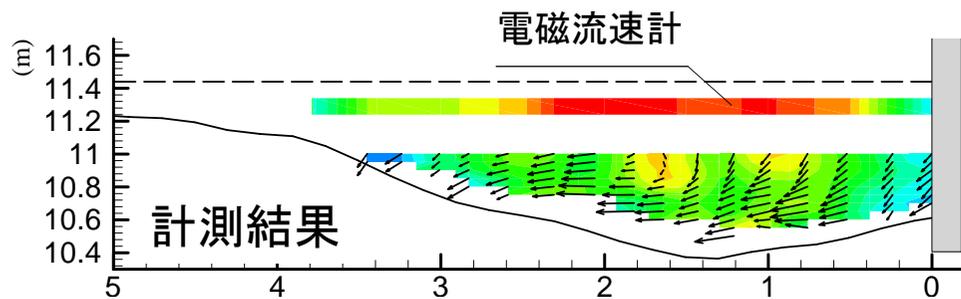
# 水衝部の三次元流れの比較



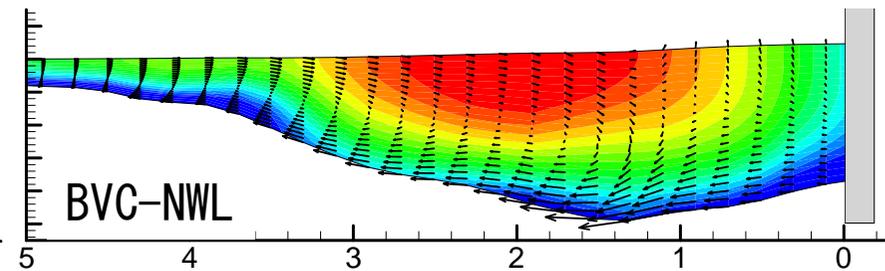
2D  
流速分布の変形無



BVC-EWL  
二次流は計算されるもその強度はかなり弱い



ADCPを応用することで現地スケールの局所三次元流が計測できるようになった.



BVC-NWL  
実験と同様に断面中央部に二次流中心が確認され、実験と同程度の二次流強度が再現された

# まとめ

流れの解析では、**広域の流れを解析できる枠組みの中で**、

流速鉛直分布を決定する渦度の変形と圧力効果を考慮できる**非静水圧準三次元モデル(BVC法)**と底面極近傍と河床表層の流れの非平衡性が解析できる**非平衡粗面抵抗則(NWL)**が開発され、

洪水流伝播の解析をする中で、構造物近傍の局所三次元流れや河床表層の流速分布を同時に計算できるようになった。

運動方程式を無次元化して各項のオーダーを比較することにより、流れの三次元性、非静水圧分布及び非平衡粗面抵抗則がどの程度の流れのスケールから重要となるかを明らかにした。  
そして、非静水圧準三次元解析法と非平衡粗面抵抗則を組み合わせたBVC-NWL法は、礫床河川の水衝部の三次元流れをよく説明できることを示した。