

砂礫床河川における乱流計測と 摩擦速度の推定について —局所的に非一様な河道において—



富永晃宏
名古屋工業大学



生態系と流速の関係

○ 魚類

- 淵・淀み－低速領域（休憩，避難，繁殖）
- 瀬－高速領域（採餌，産卵，活動）
- 魚道－遡上速度，乱れ

○ 底生生物

- 底面流速，はく離域

○ 付着藻類

- 底面せん断応力，乱れ



ワンドの流れ

○ 要求

- 低速域の確保
- 良好な水質の確保

○ 問題点

- 土砂の堆積（特にシルト・粘土）
- 外来種の繁殖
- 死水域なのに水の通りがよい流れ？

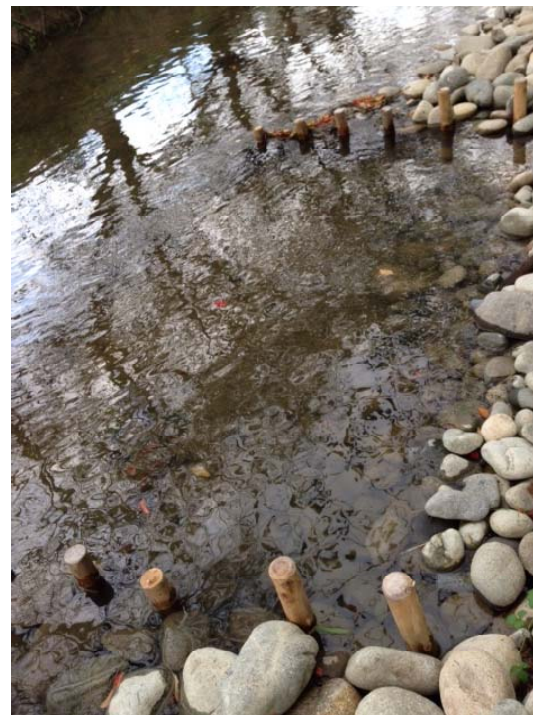


水制の効果

- 局所洗掘による淵の形成
 - 水深は深いが流れは速い
 - 埋まらない淵
- 下流への土砂供給
 - 砂州の形成
 - 死水域の形成ーワンド
- 主流域の高速化
 - 河床の低下

最近の事例

○ 黒川における捨石群





摩擦速度の意義

- 河道の底面せん断応力（または摩擦速度）を推定することは、河川の抵抗特性を理解する上で重要.
- 生態系に関係する流れを考える上では、せん断応力が重要. また、平均流速とともに乱れが重要であり、乱れは摩擦則でと関係する.
- 数値計算を行う上でも河床粗度から抵抗係数を推定することが重要.



目的

- 平均流速と乱れ統計量から摩擦速度を評価するいくつかの方法をテストすること.
- 非一様な流れ場において摩擦速度の評価を試み抵抗特性を検討すること.
- 2つの代表的な河道で計測.
 - 矢田川: 人工ワンドが作られた.
 - ワンド区間に著しい堆積が起こった.
 - 庄内川: 水制が設置された.
 - 先端の洗掘と下流の堆積が見られる.

野外計測



矢田川の観測地点（人工ワンド区間）

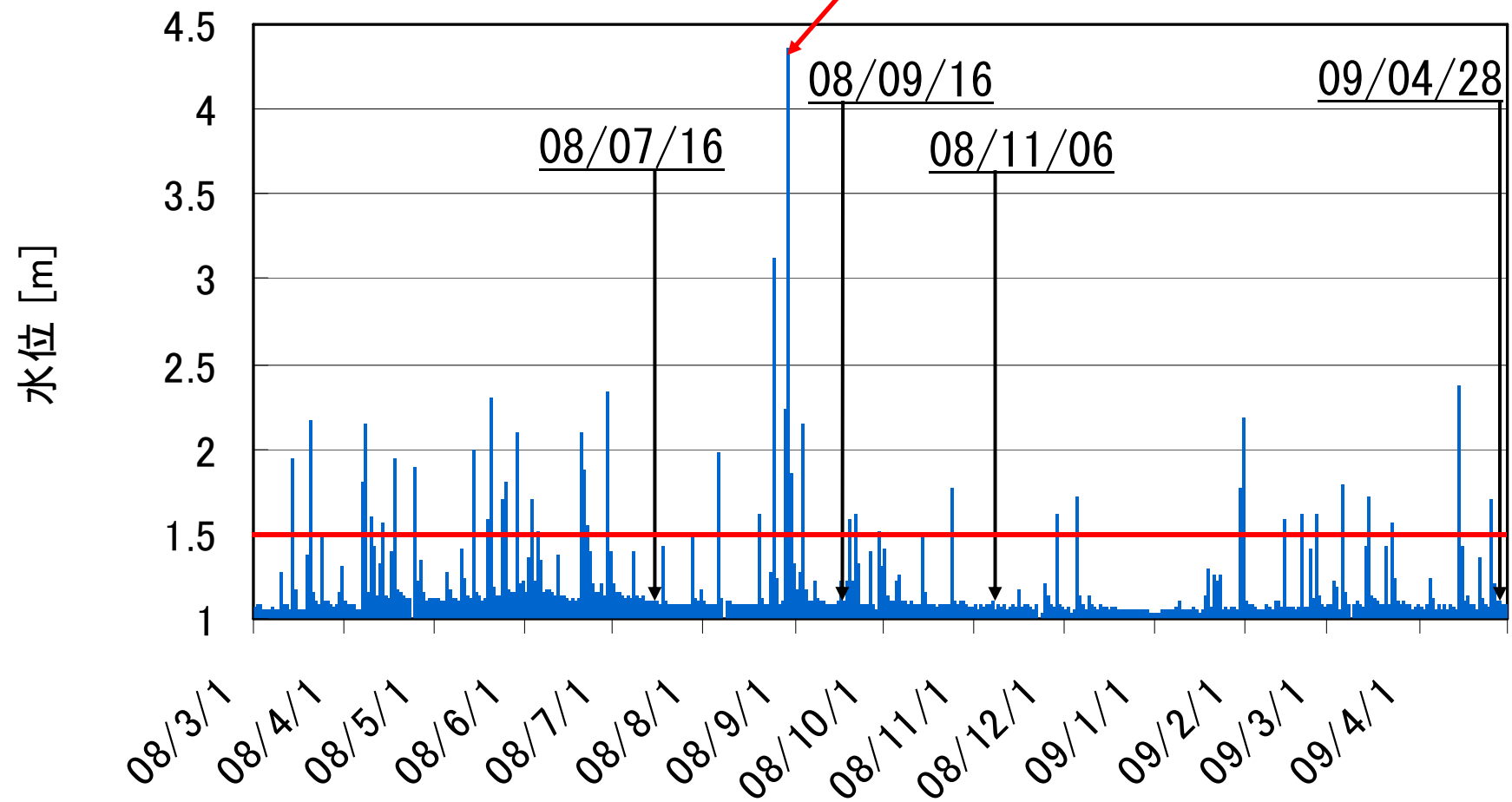


人工ワンド設置後の河床形状時間変化



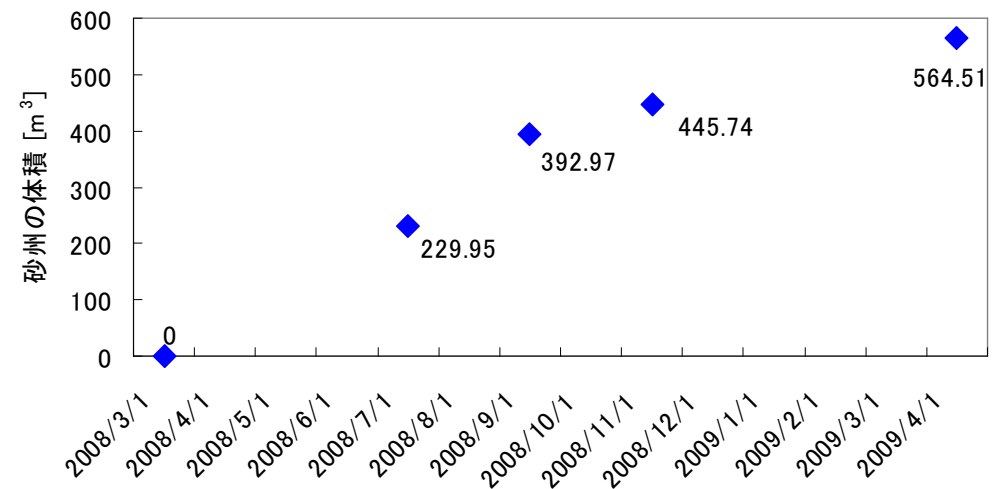
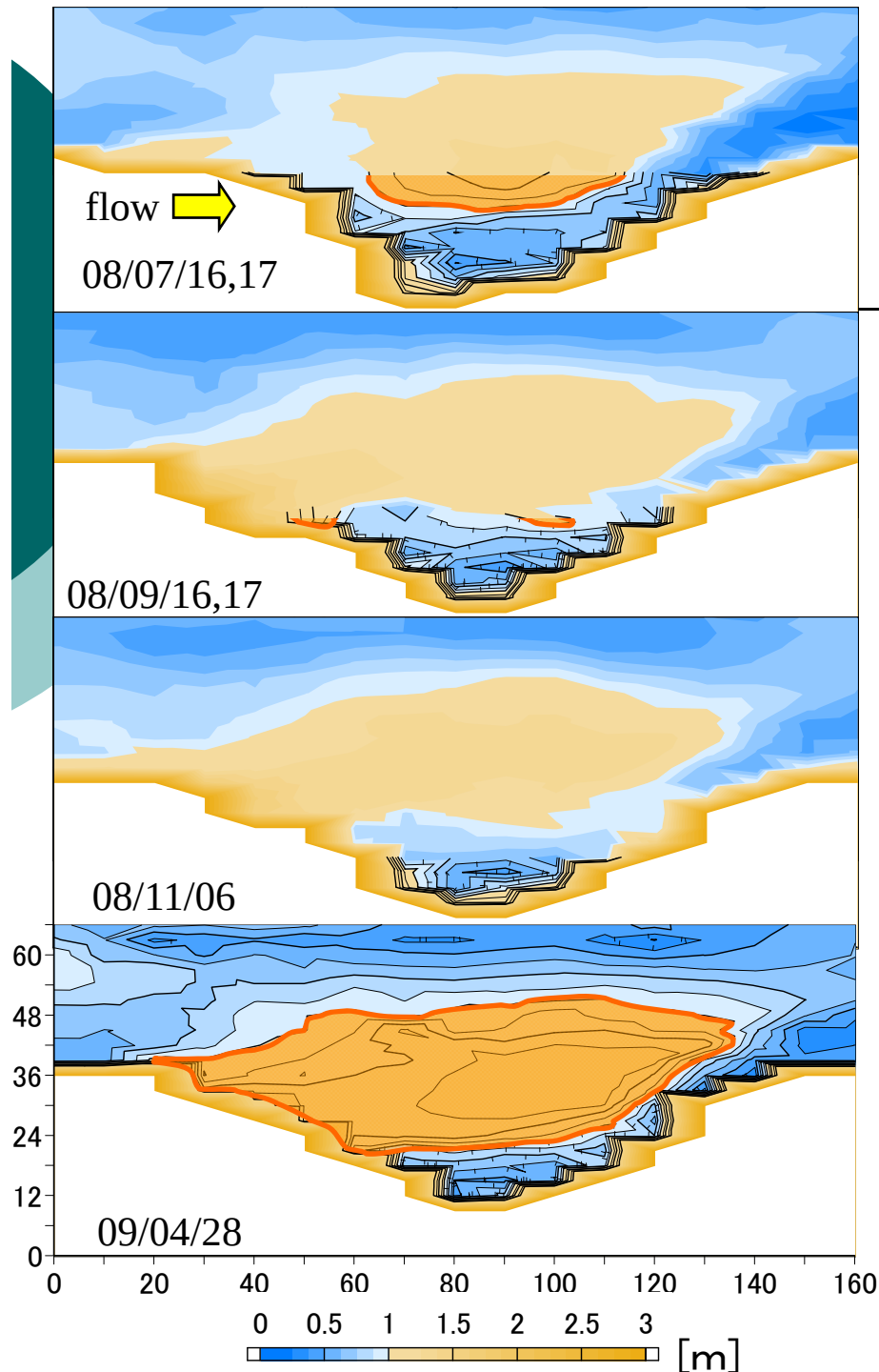
水位変化と観測日

大規模出水(08/08/31)



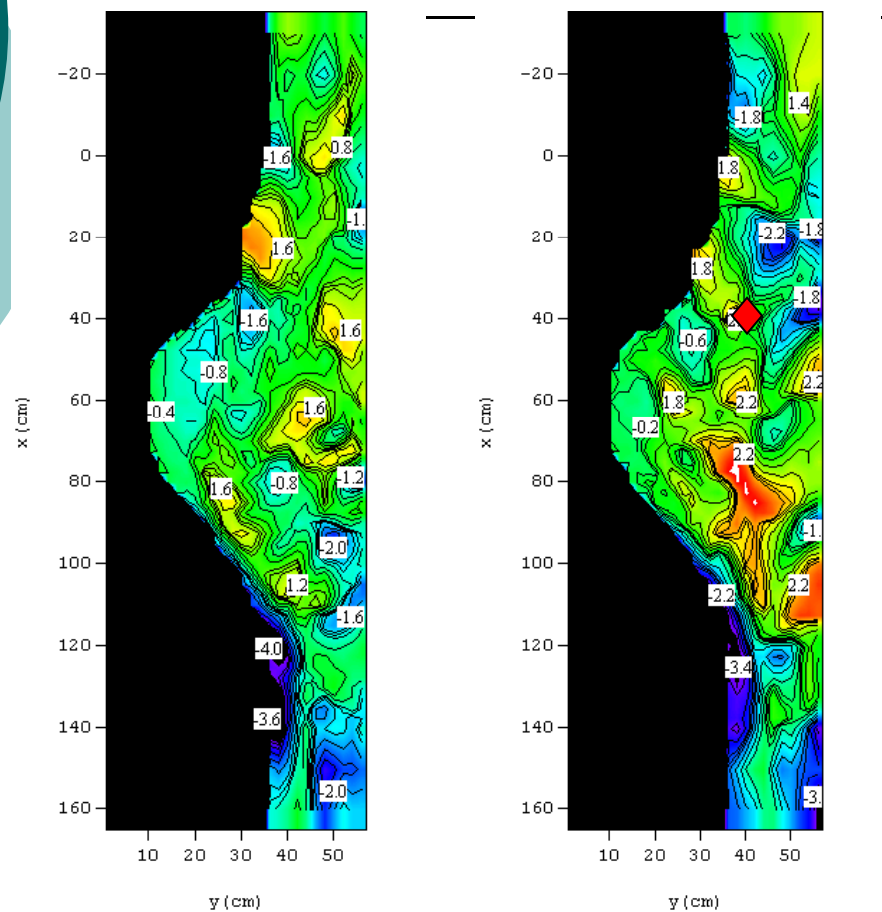
砂州の体積の時系列変化

河床高計測結果および平水時の水位を考慮し、河床高が1.0m以上のものを砂州とすると：



砂州の体積は増加し続けており、出水の多い時は堆積量も多くなっている。

移動床実験



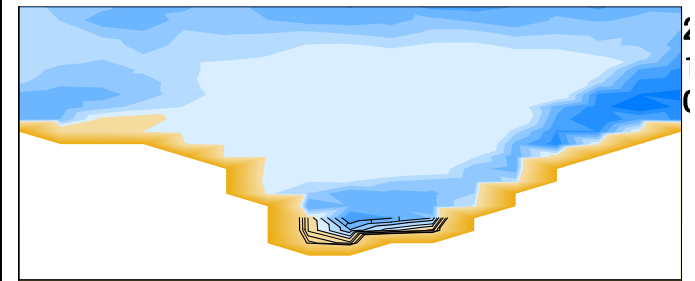
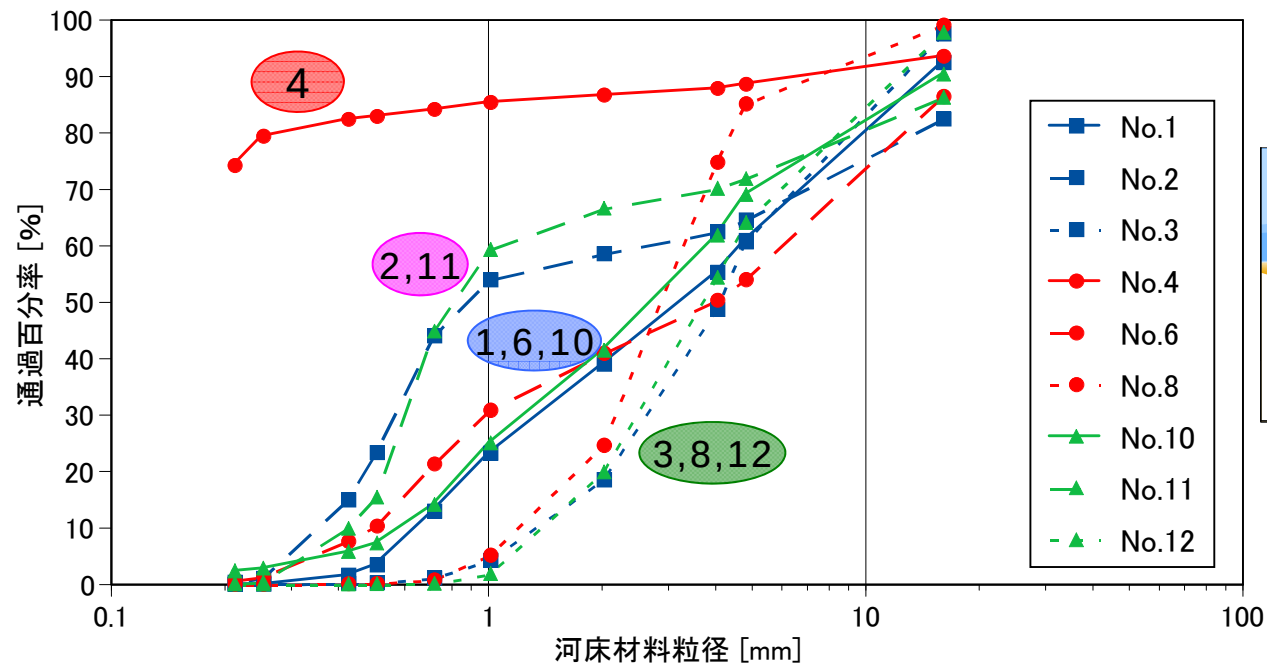
置き石無し

置き石有り

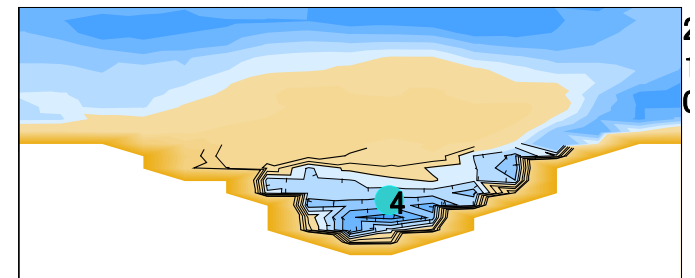
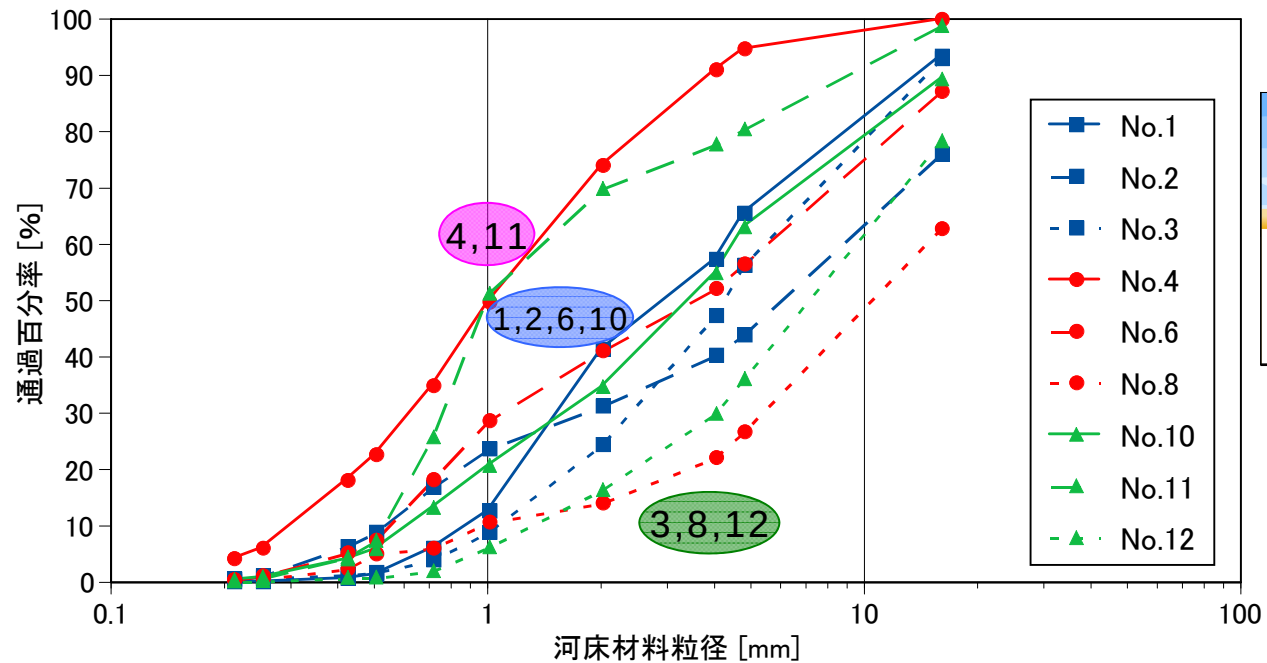
置き石無し

置き石有り

(一様粒径 $d_{50}=0.43\text{mm}$)₃



2008年8月



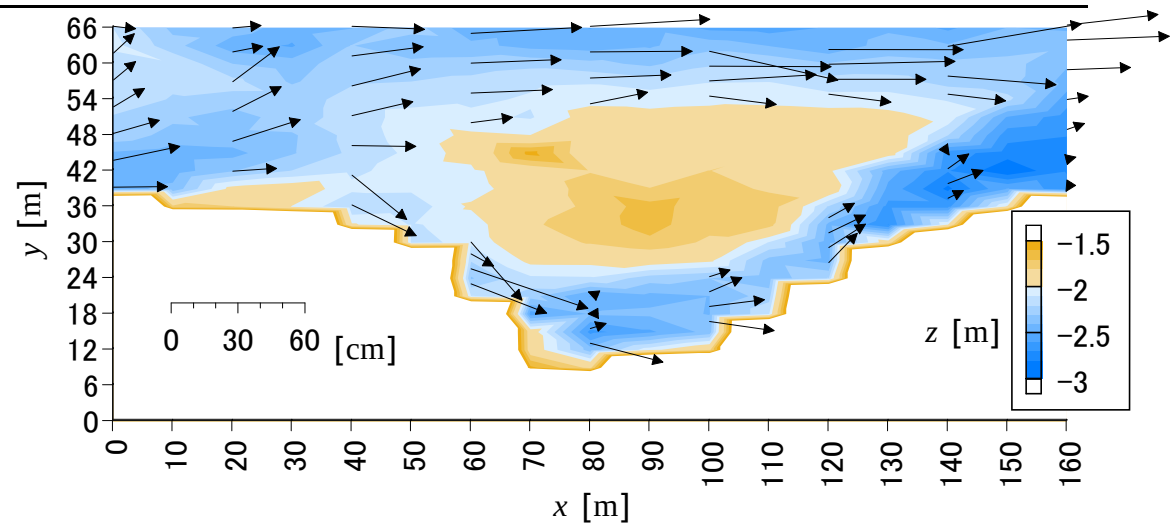
2008年11月

河床材料の粒径分布

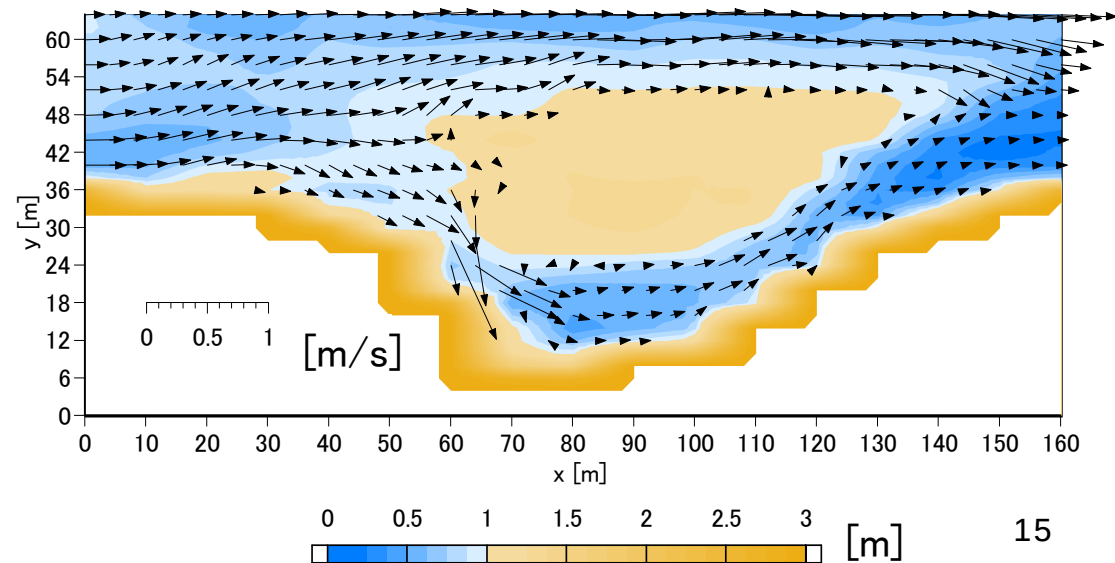
河床形状と水深平均流速分布

2008.7.16(閉塞前)

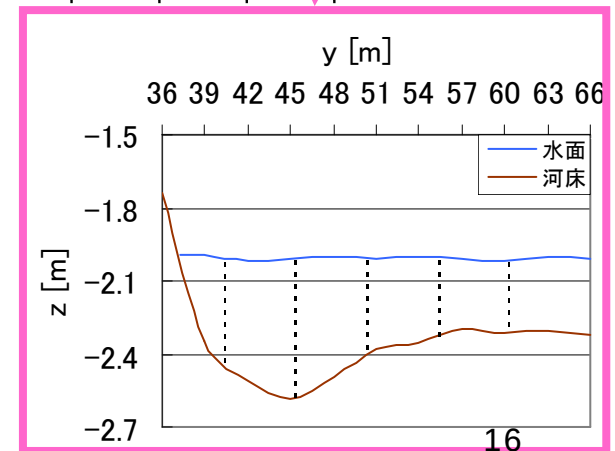
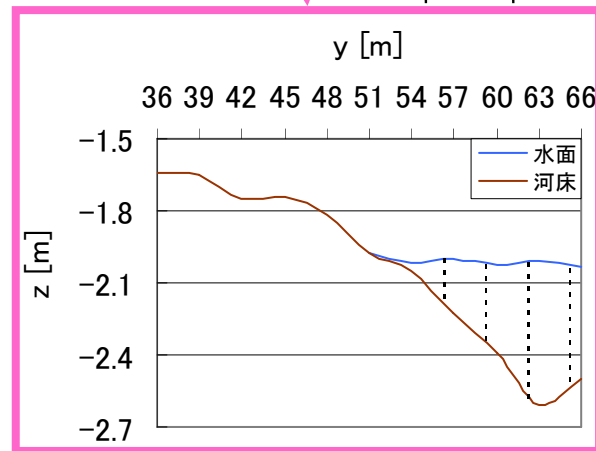
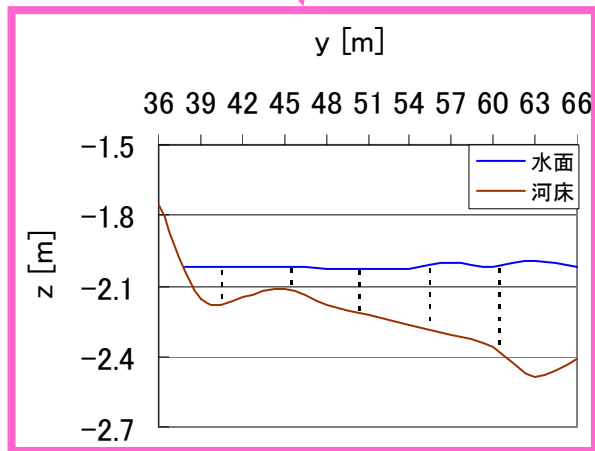
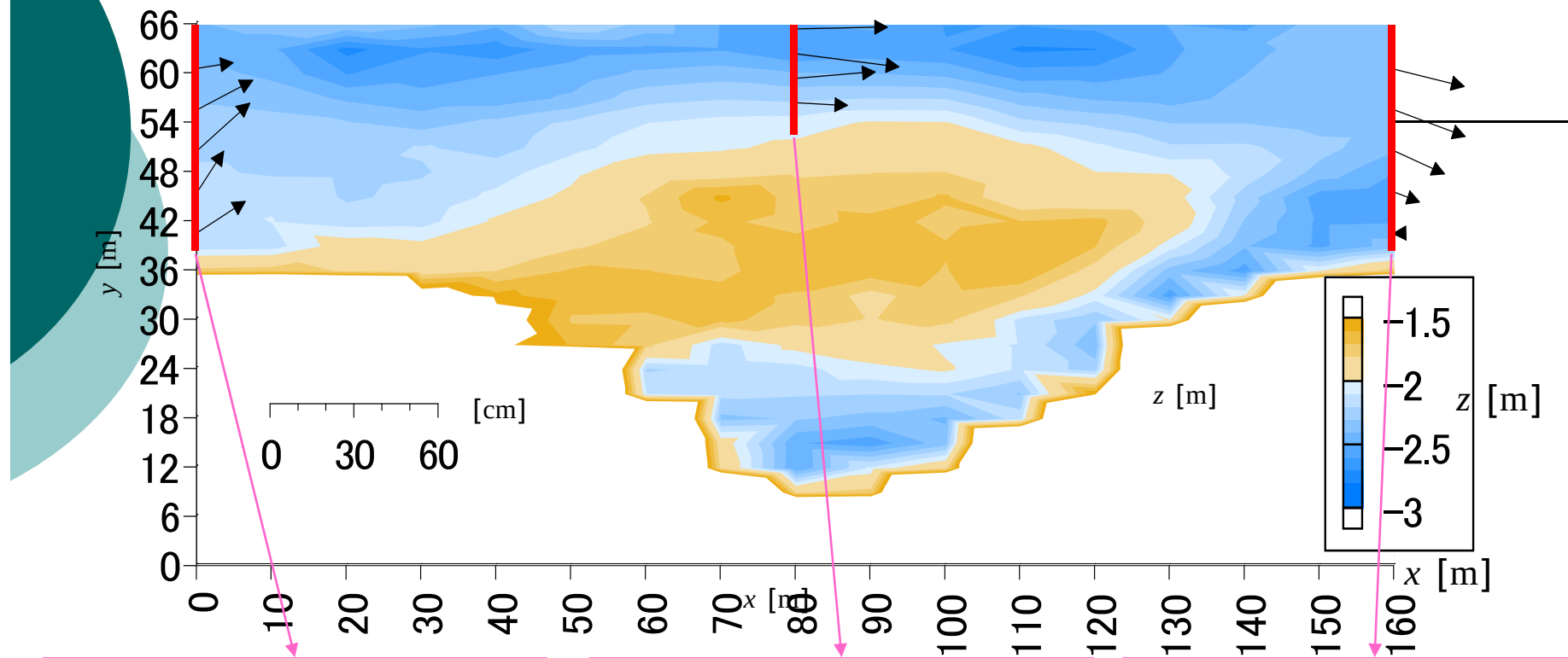
○ 電磁流速計



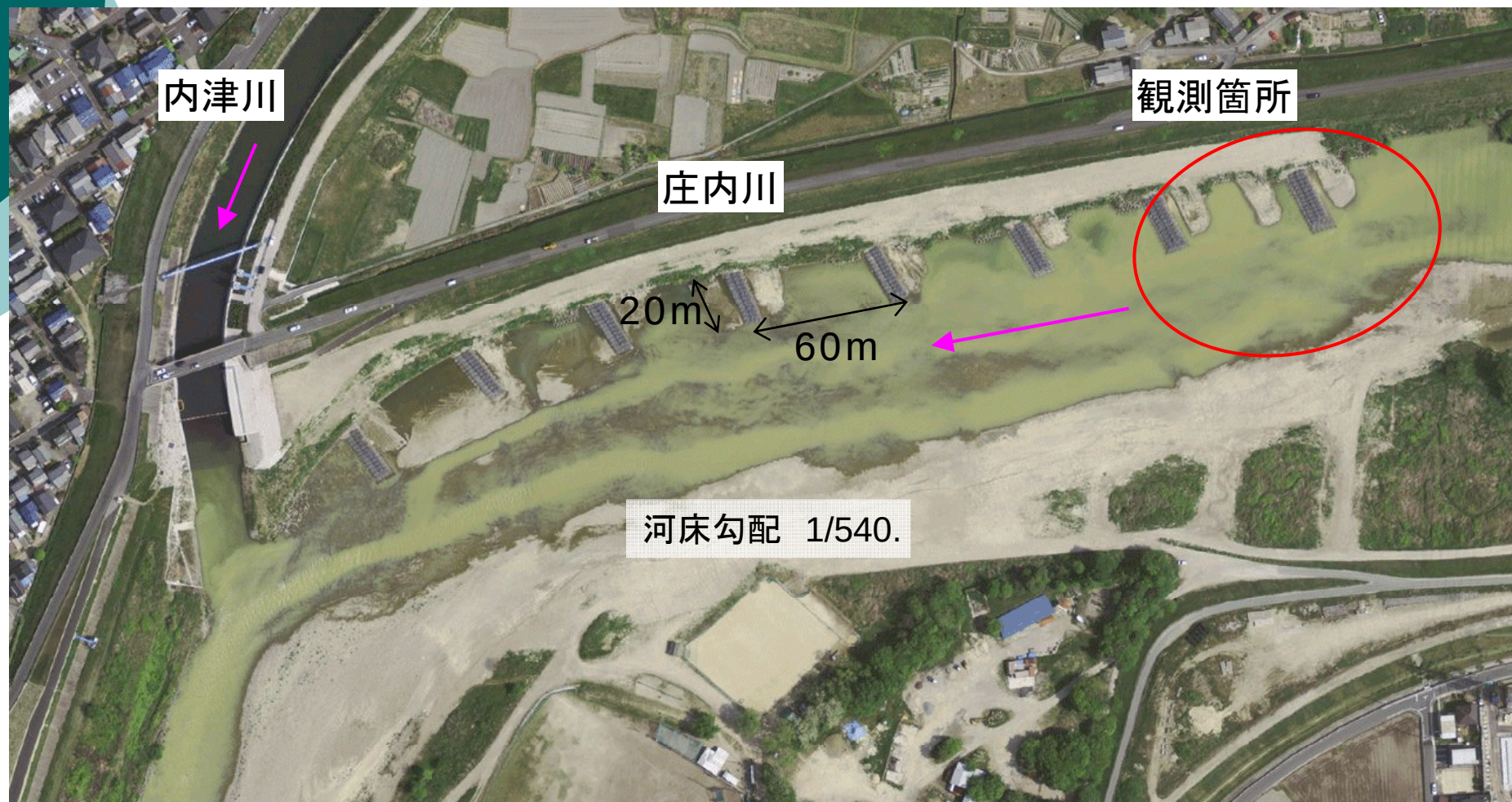
○ 2次元数値計算



ADV流速計測断面 2008.11.5(閉塞後)



庄内川の観測地点（水制設置区間）

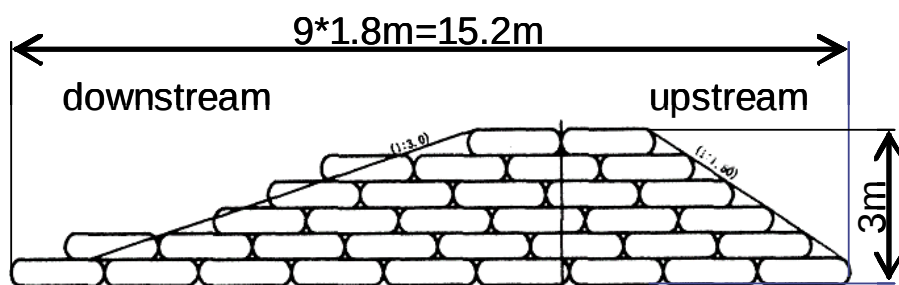


対象水制群



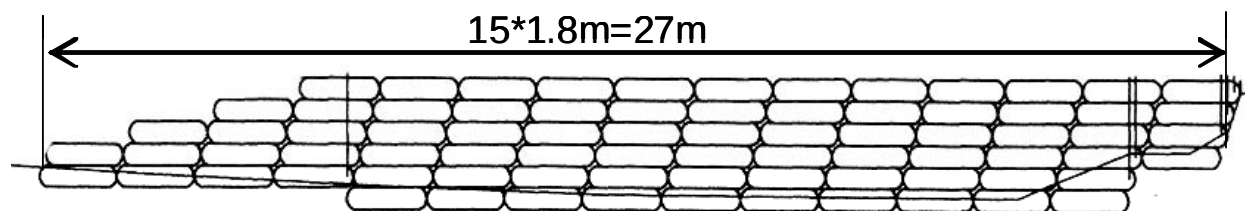
- 庄内川32.5km地点
- 2009年3月施工

水制形状



水制横断面図

河床材料
 $d_{50} = 11\text{mm} \sim 36\text{mm}$



水制縦断面図

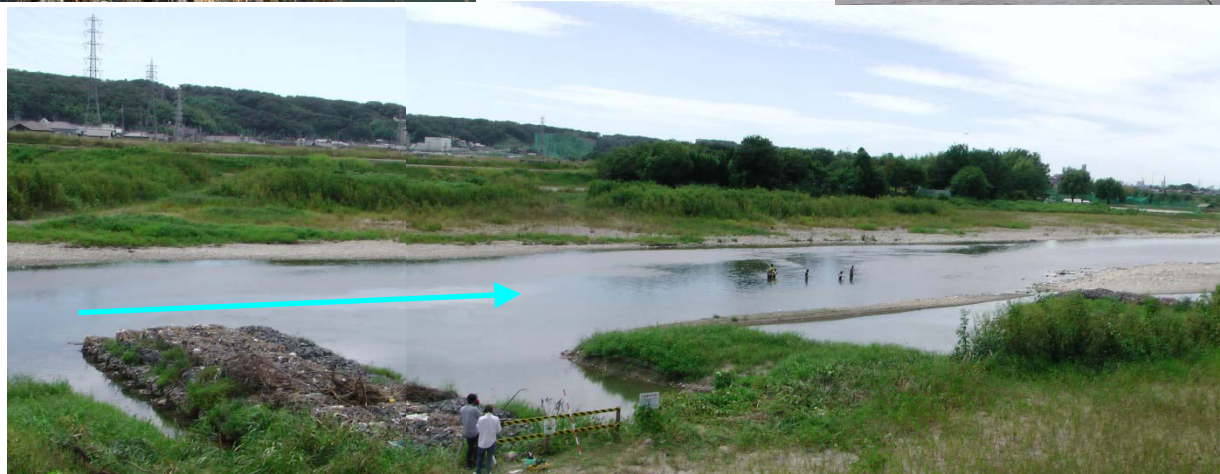
水制先端の様子



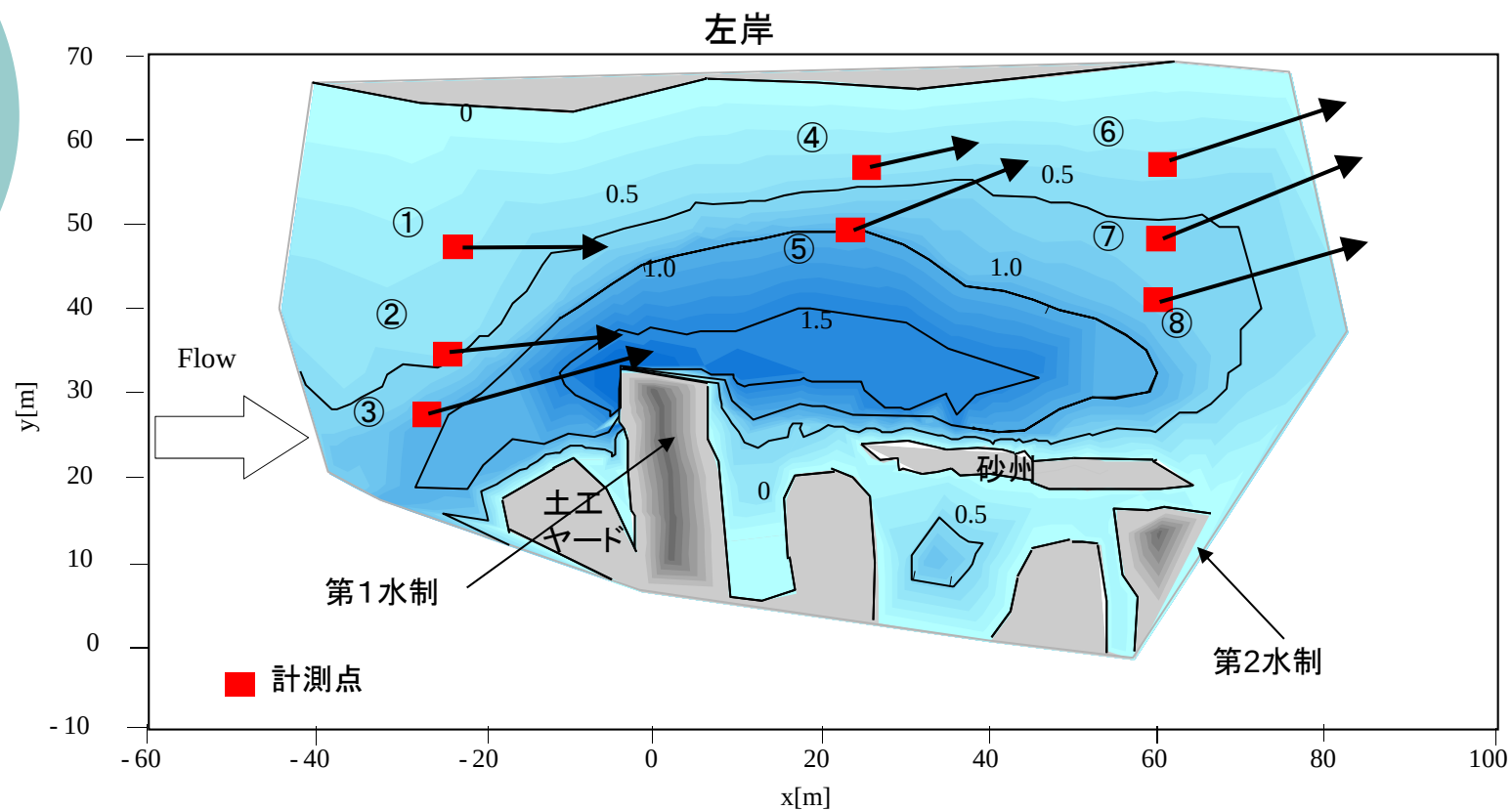
第1水制前の土エヤード



第1, 2水制間の堆積状況

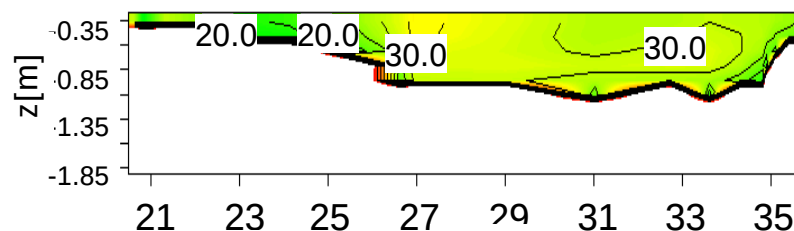
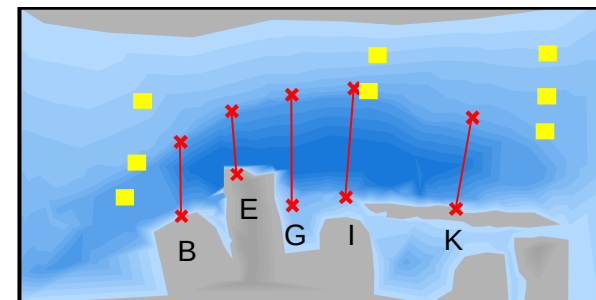


河床形状と平均流速ベクトル(先頭水制付近)



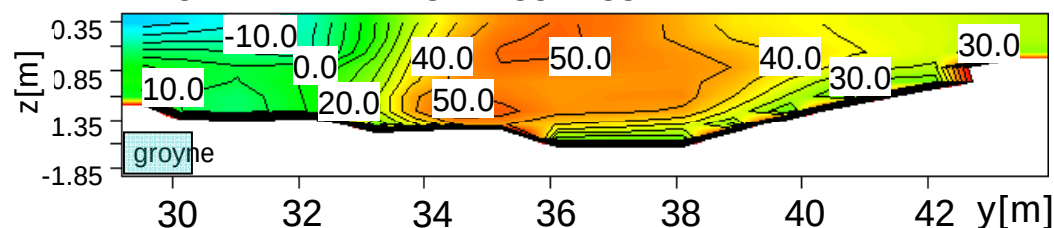
- 建設時の土工ヤードが水制の両側に残存している

主流速コンター(ADCPによる)



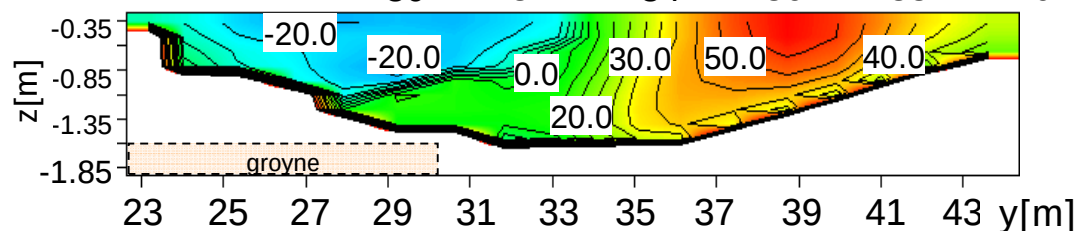
B-B'
X=-12m

右岸側

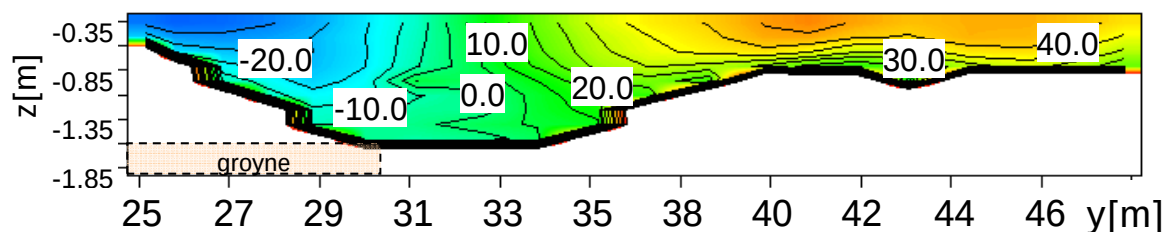


E-E'
X=0m

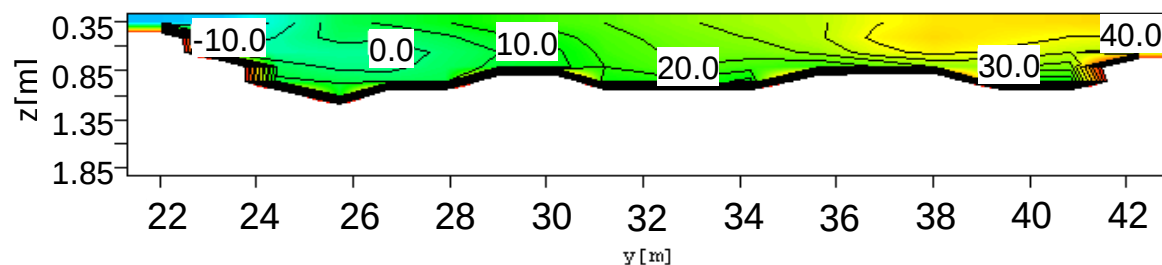
左岸側



G-G'
X=10m



I - I'
X=21m



K-K'
X=45m



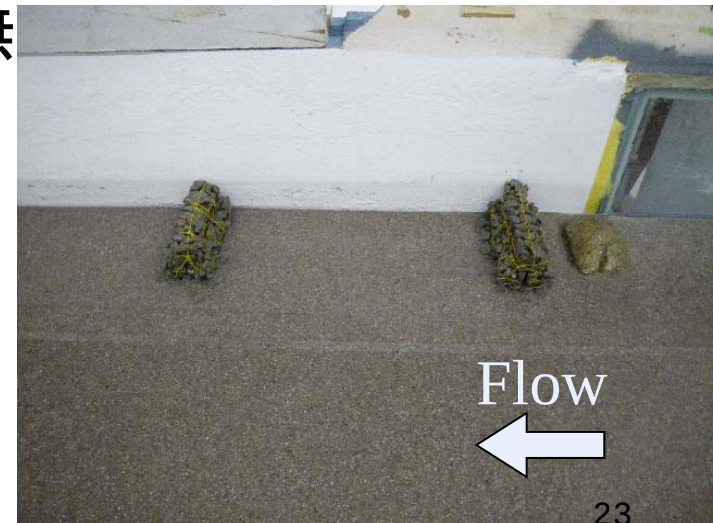
河床変動実験

○ 実験条件

- 河床平均粒径 0.586mm
- 通水時間65分

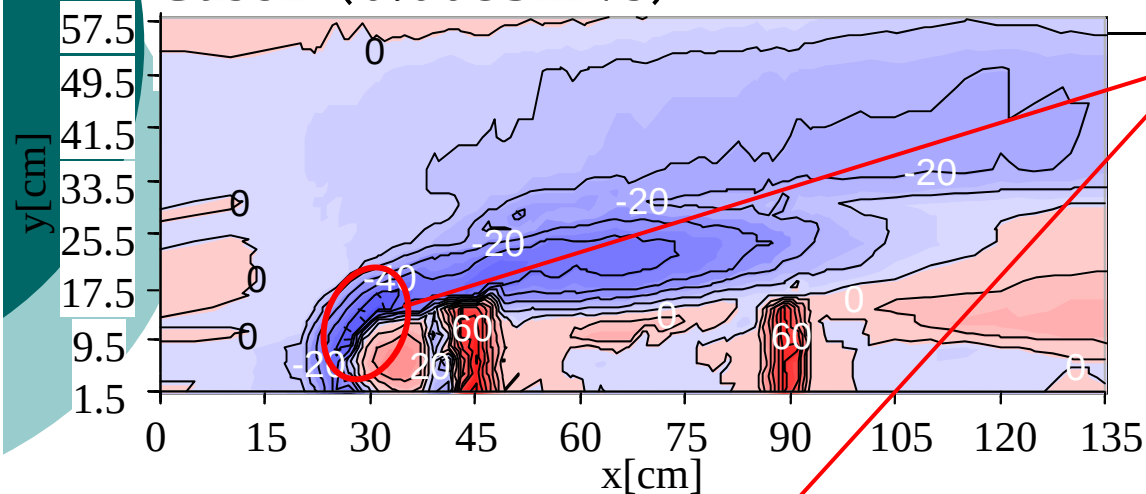
◆ 配置

- 水制2基(根固め有り)
- 第一水制前面のヤードの有無



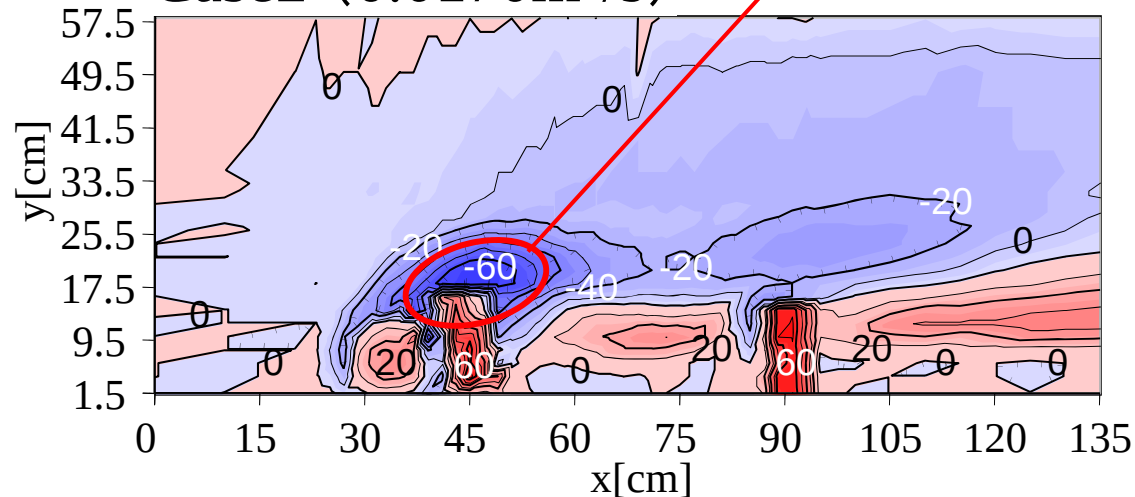
河床高コンター（上流ヤード有り）

Case1 ($0.0085\text{m}^3/\text{s}$)



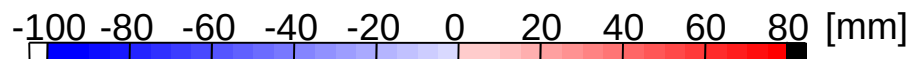
流量により洗掘が
最大となる位置が異なる

Case2 ($0.0170\text{m}^3/\text{s}$)



水制頂を超える大規模
出水時には、水制先端
が洗掘される。

水制頂以下の出水時
には、ヤード前方が洗
掘され、水制先端は埋
め戻され、下流へ洗掘
域が伸びる。

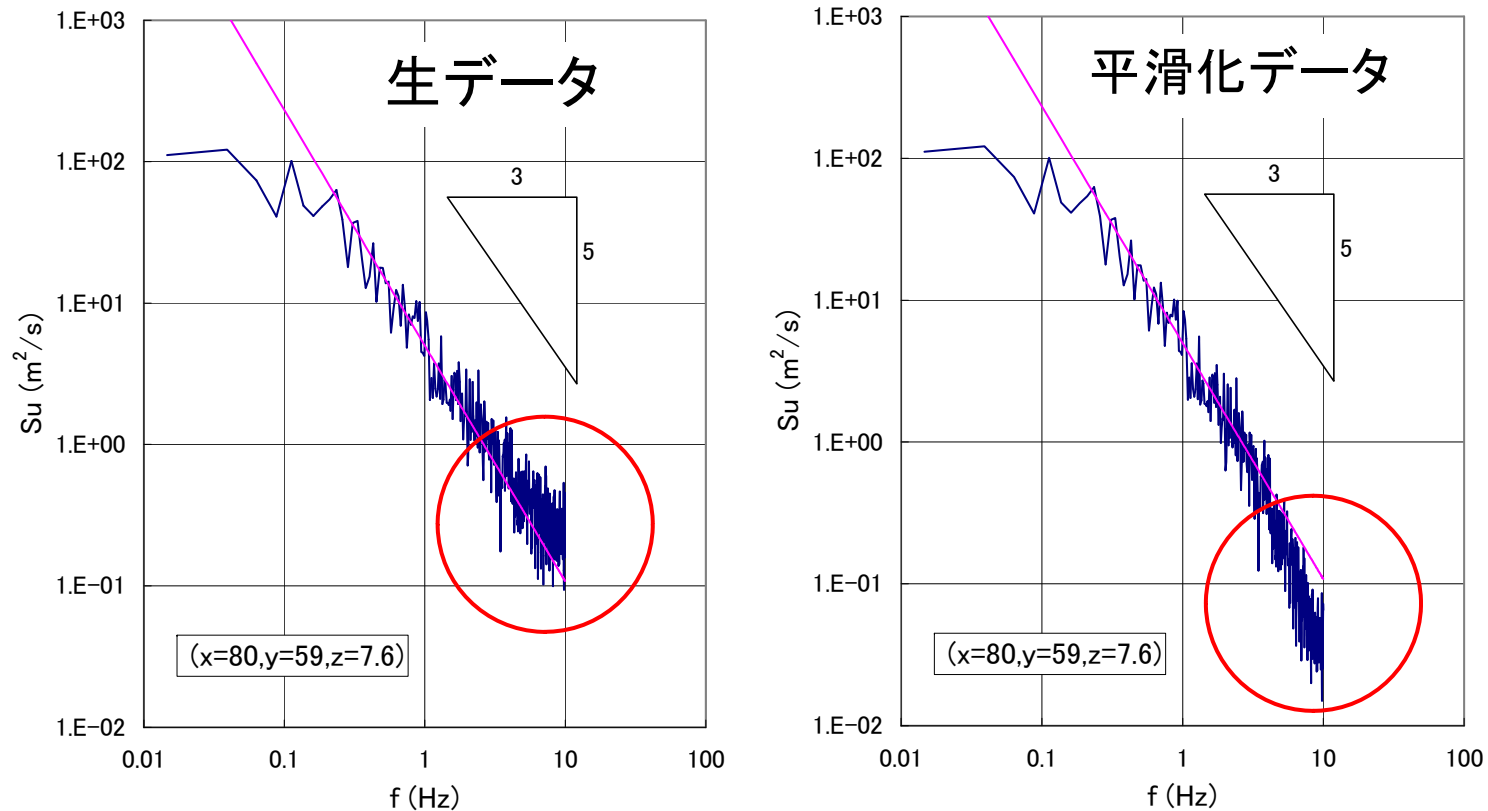




流速計測方法

- 流速鉛直分布はADV (NorTec製)で計測.
- サンプルング周波数と計測時間:
 - 矢田川 ---- 20Hz and 205s
 - 庄内川 ---- 25Hz and 164s
- ADV のノイズがスペクトル解析から観測された.
- しかし, 解析にはADVの生データを用いた.

ADV ノイズについて



- ◆計測データにはノイズの影響が見られる.
- ◆高周波ノイズをフィルターで除去すると, 除去後の乱れ強度は3-4%生データから減少した.
- ◆解析には信号処理なしでADVの流速生データを用いた.



底面せん断応力の推定方法

- 平均主流速, レイノルズ応力, 乱れ強度の鉛直分布を用いて3種類の評価法を採用した.
 - これらの方法は2次元の一樣開水路流において妥当なものであるが, ここでは非一樣な開水路流れ場に適用を試みた.
 - 簡単のために, 底面せん断応力の代わりに摩擦速度を検討した.
-
- 以下を用いて
 - 平均主流速の対数則分布
 - レイノルズ応力の直線分布
 - 乱れ強度の普遍分布

対数則による摩擦速度の評価

○ 完全粗面の対数則

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + B \quad \Rightarrow \quad U = \frac{u_*}{\kappa} \ln z + Bu_* - \frac{u_*}{\kappa} \ln k_s$$

○ 平均主流速分布の片対数表示における線形回帰

$$\begin{aligned} \kappa &= 0.41 \\ B &= 8.5 \end{aligned}$$

$$u = A \ln z + C$$



相当砂粒粗度

摩擦速度

$$u_* = \kappa A$$

$$k_s = \exp \left\{ (Bu_* - C) \cdot \left(\frac{\kappa}{u_*} \right)^{2.8} \right\}$$

粗面の流速分布構造

◆ 水理学的滑面

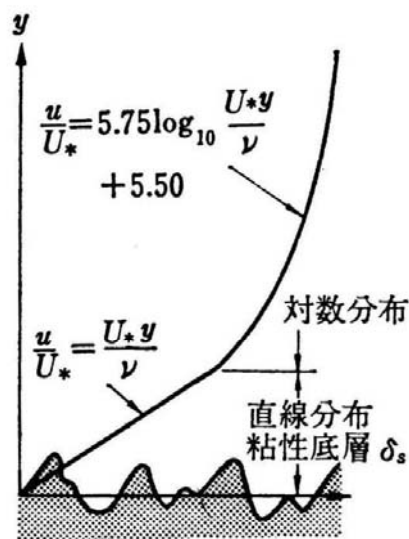
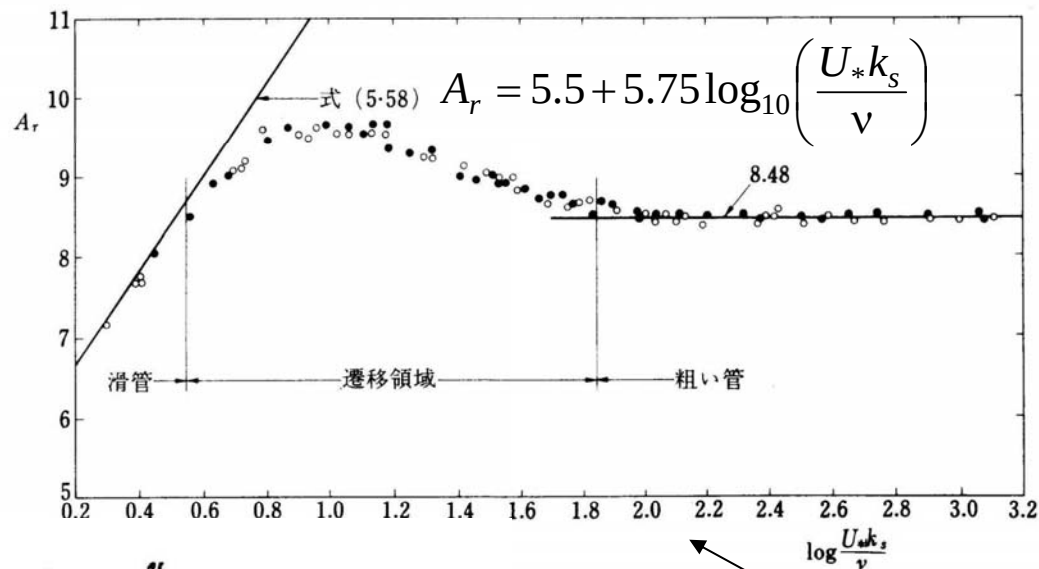
◆ 遷移領域

◆ 完全粗面

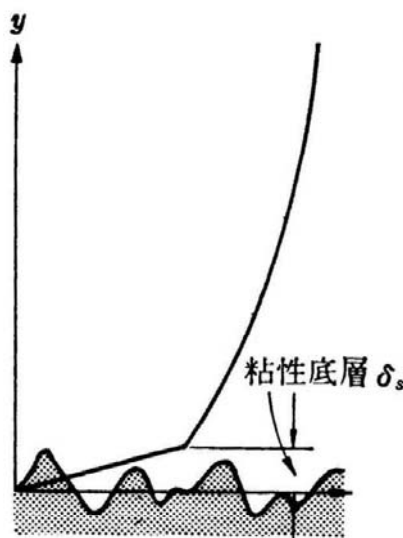
$$\frac{U_* k_s}{\nu} < 5$$

$$5 < \frac{U_* k_s}{\nu} < 70$$

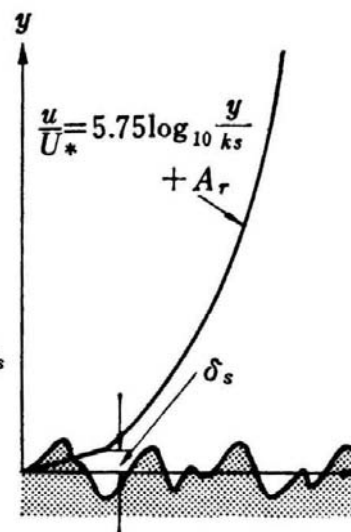
$$70 < \frac{U_* k_s}{\nu}$$



(a) 滑 面



(b) 滑粗遷移域



(c) 粗 面

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + A_r$$

Nezu&Rodi 1986

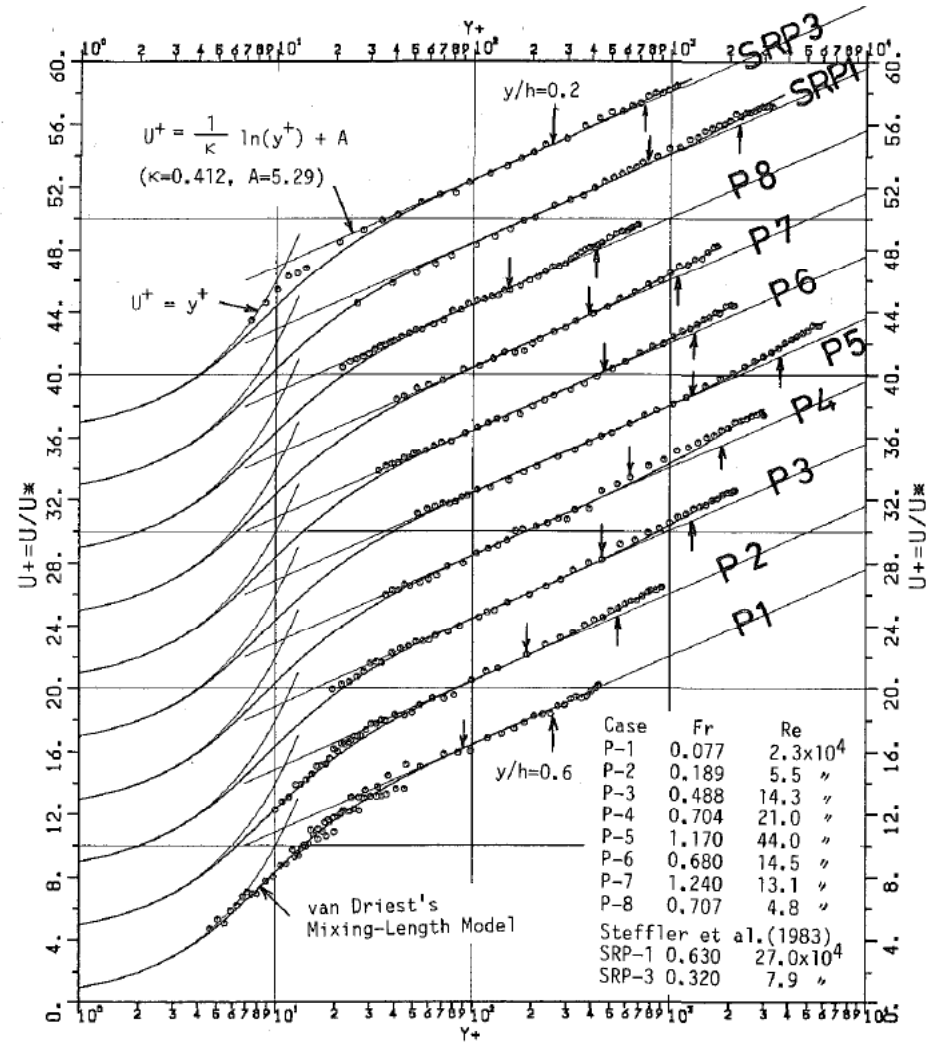


FIG. 6.—The Law of The Wall for The Present Data and Steffler et al.'s (30) Data

矢田川における平均流速分布と対数則

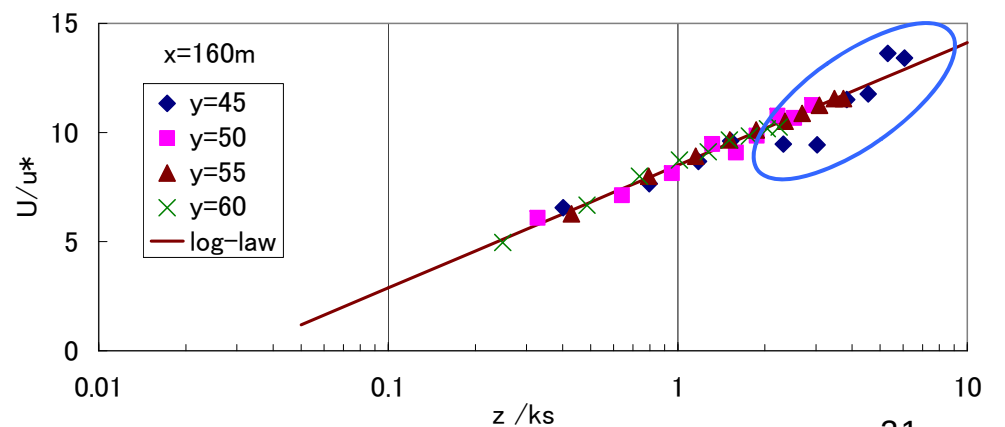
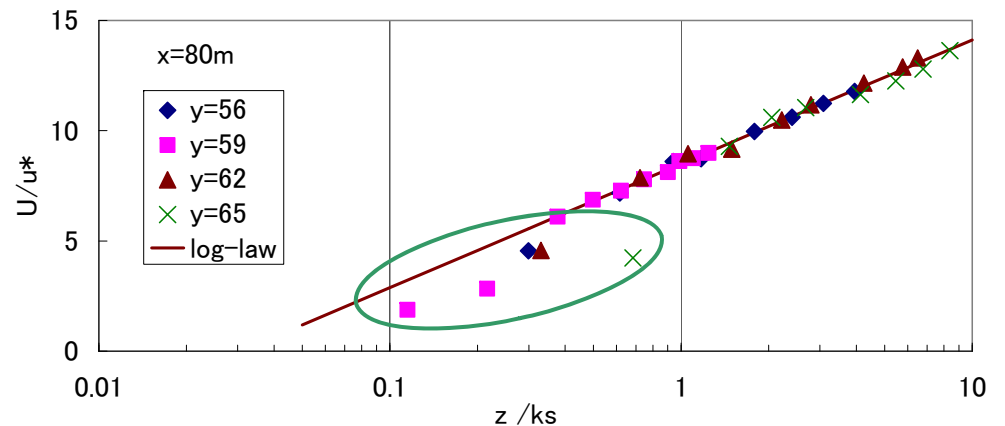
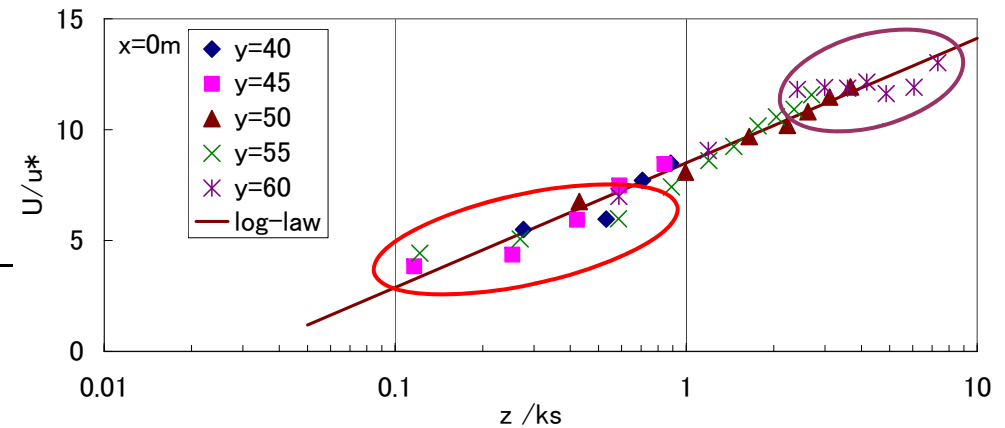
- ウェイク領域が見られず対数則は水面まで成立している。

非常に浅い流れ：
仮想底面の信頼度が低い

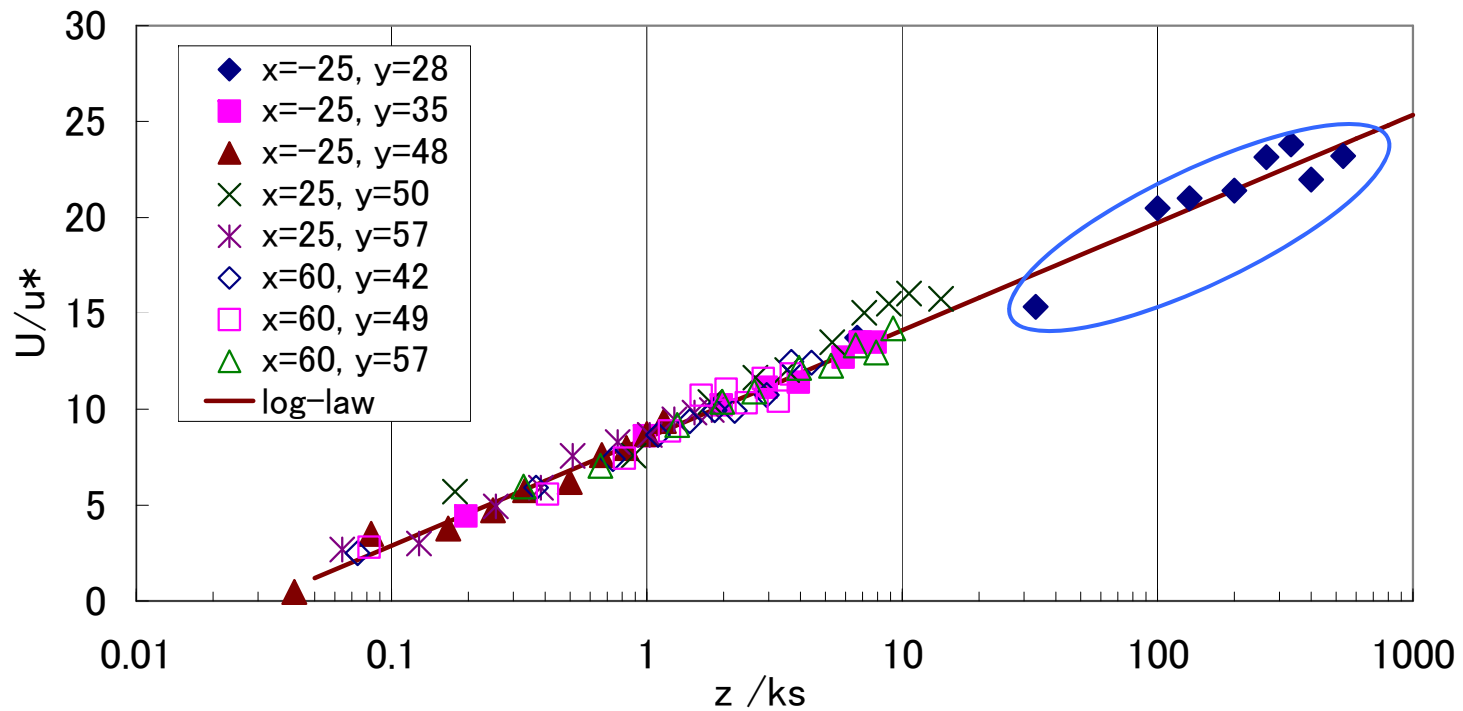
側壁近傍：
上層がずれる

河床材料が大きく深い流れ：
礫の後流の影響

はく離域の近傍：
上層がずれる



庄内川における平均流速分布と対数則



底面近くの流速が速く, 相当粗
度が非常に小さくなる

レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布による摩擦速度の推定

- レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ は直線分布をする.
- 底面では, それは摩擦速度の2乗となる.

$$\frac{-\overline{uw}}{u_{*t}^2} = \left(1 - \frac{z}{h}\right)$$

- 摩擦速度はレイノルズ応力分布の近似直線の底面までの外挿で求められる.
- この方法で求められた摩擦速度を u_{*t} とする.

Nezu&Rodi 1986

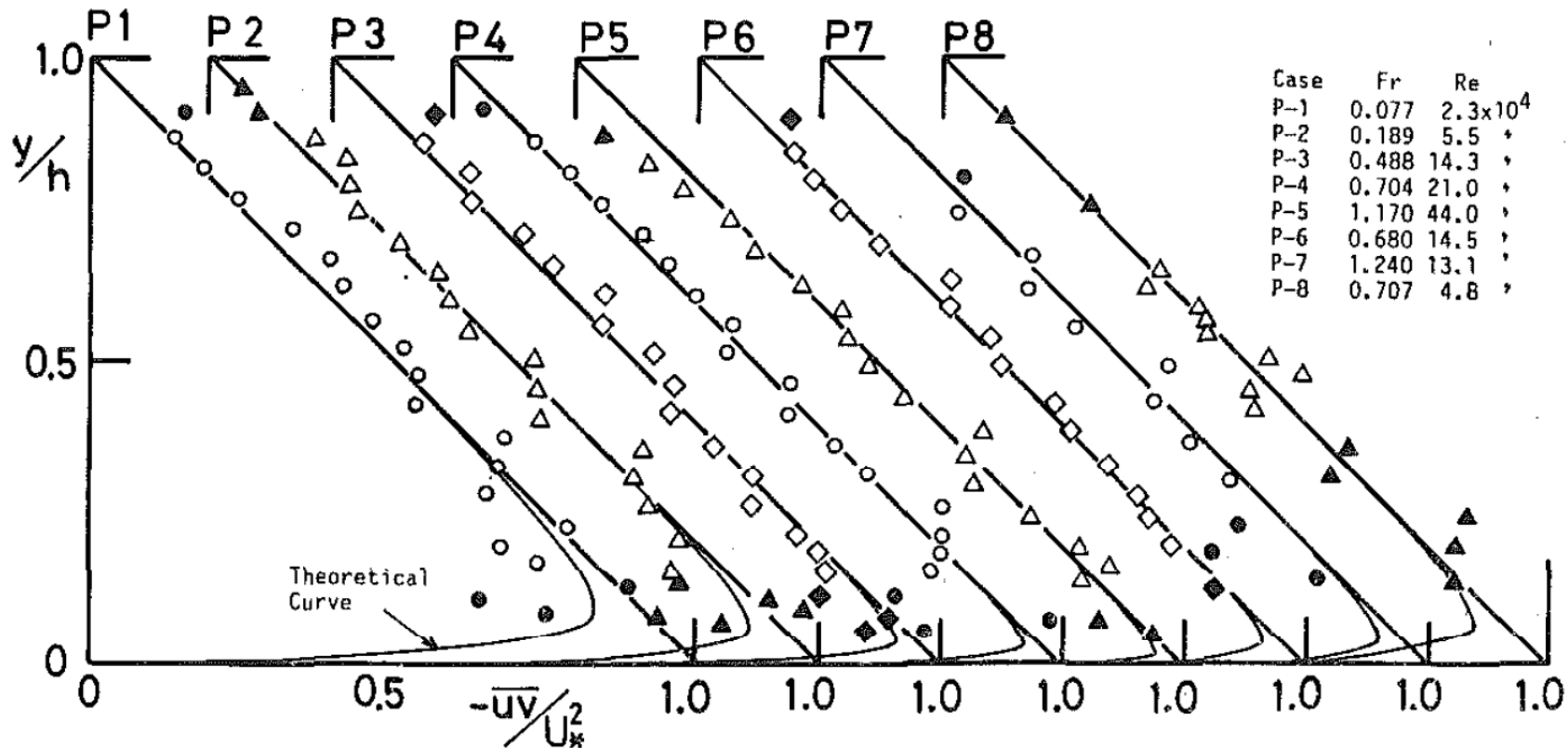


FIG. 3.—Reynolds Stress Distribution

Nezu, I. & Rodi, W., Open channel flow measurement with a laser Doppler anemometer, J. Hydraulic Engineering, vol.112, No.5, 335-355, 1986

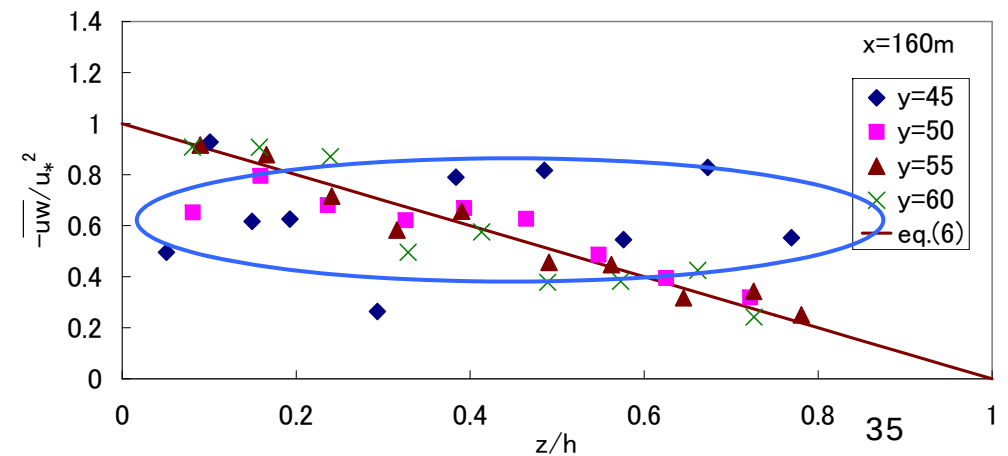
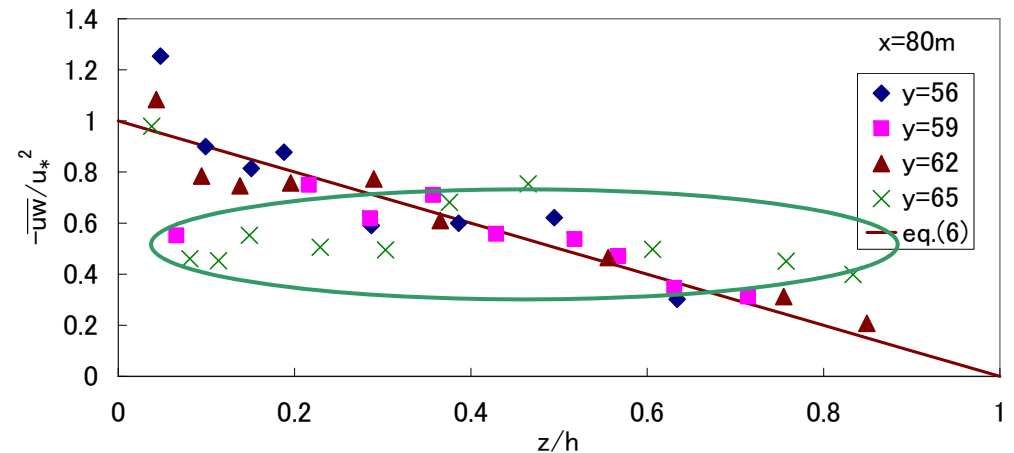
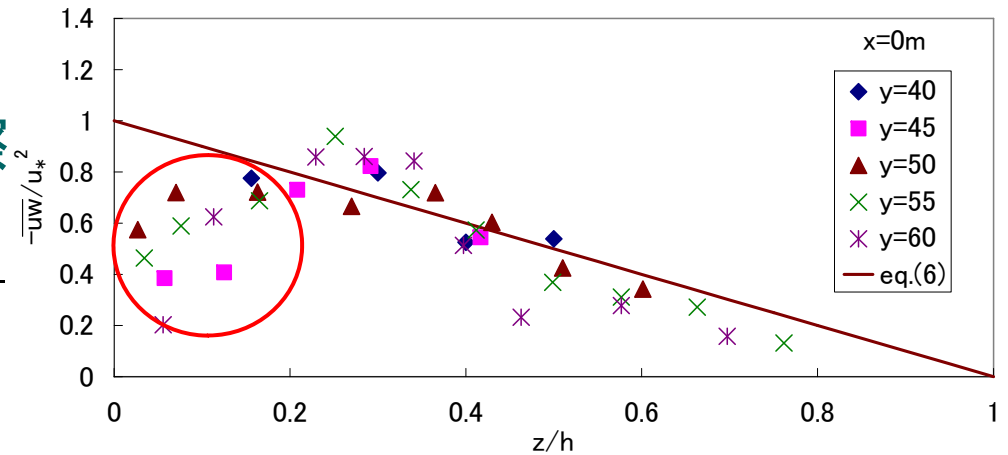
矢田川におけるレイノルズ 応力 $-\overline{uw}$ の分布(推定摩擦 速度 u_{*t} で無次元化)

- 分布はかなりばらついている。
計測の困難さと計測時間が短いことによるもの

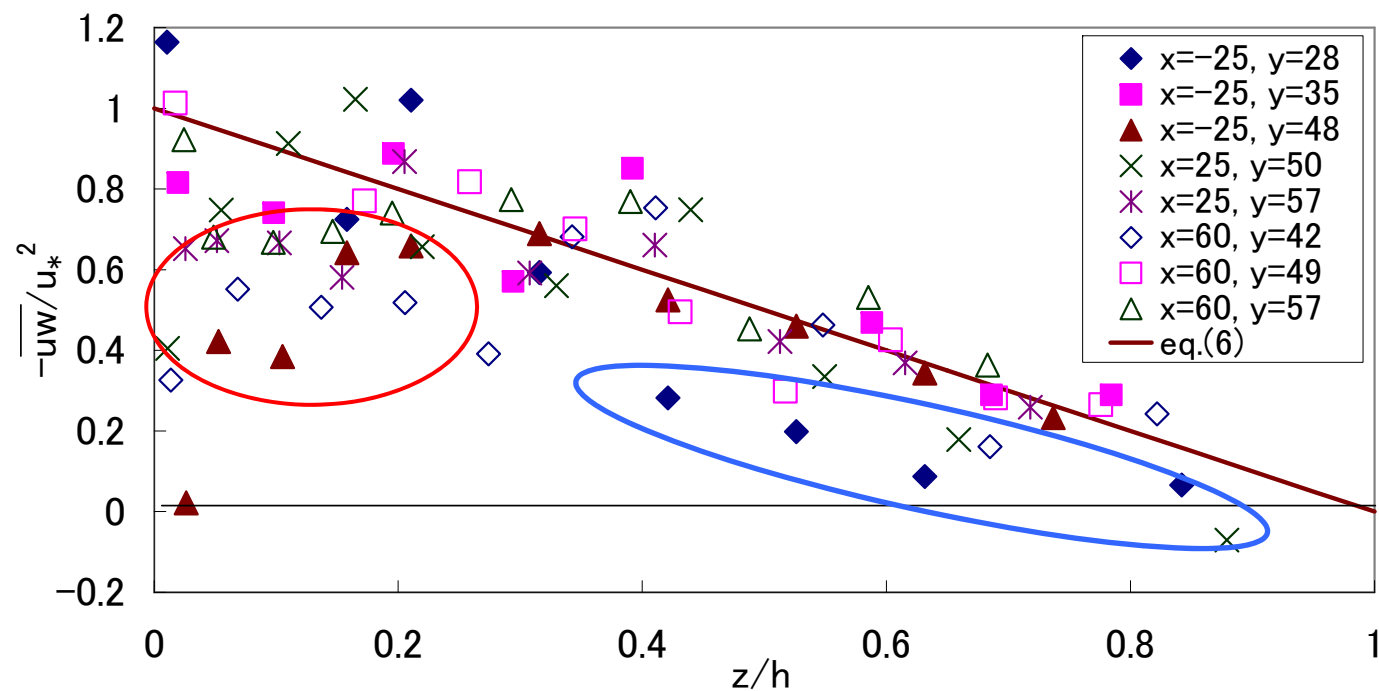
非常に浅い流れ：
粗度底層が相対的に厚く
なっている

側壁近傍：
ほぼ一定となる傾向。

はく離域近傍：
底面せん断応力を反映し
ない。



庄内川におけるレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布 (推定摩擦速度 u_{*t} で無次元化)



相対的に浅い所:
値は底面近くで減少している.

相対的に深いところ:
値は水面近くで減少する.

乱れ強度 u' の普遍分布による摩擦速度の推定

- 2次元開水路流では、乱れ強度は次の禰津 & 中川(1993)の普遍分布に従う

$$\frac{u'}{u_{*r}} = 2.3 \exp\left(-\frac{z}{h}\right)$$

$$u' = \sqrt{u^2}$$

$$\frac{v'}{u_{*r}} = 1.63 \exp\left(-\frac{z}{h}\right)$$

$$v' = \sqrt{v^2}$$

$$\frac{w'}{u_{*r}} = 1.27 \exp\left(-\frac{z}{h}\right)$$

$$w' = \sqrt{w^2}$$

- この式へのフィッティングから得られた摩擦速度を u_{*r} とする.

Nezu&Rodi 1986

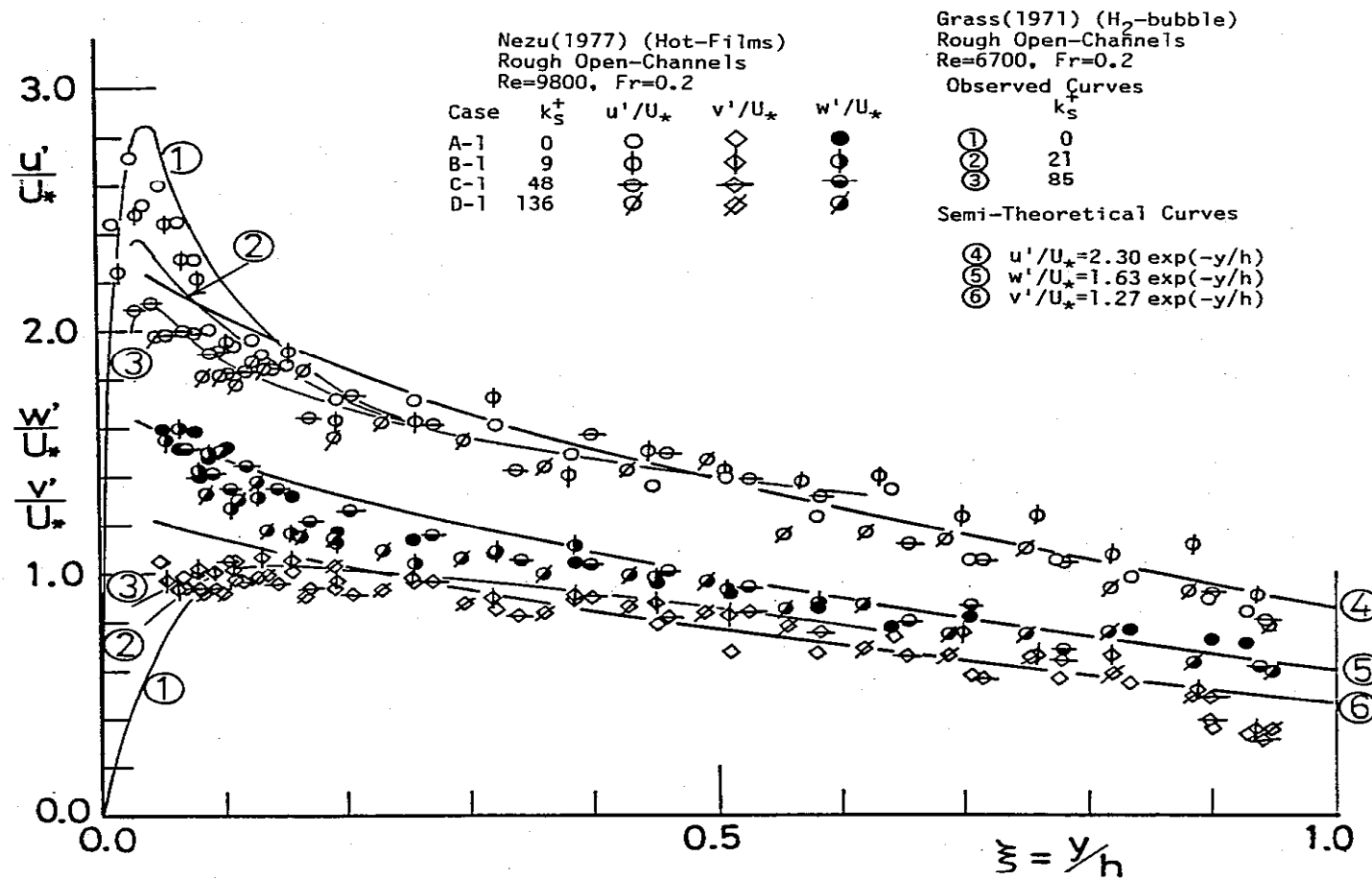


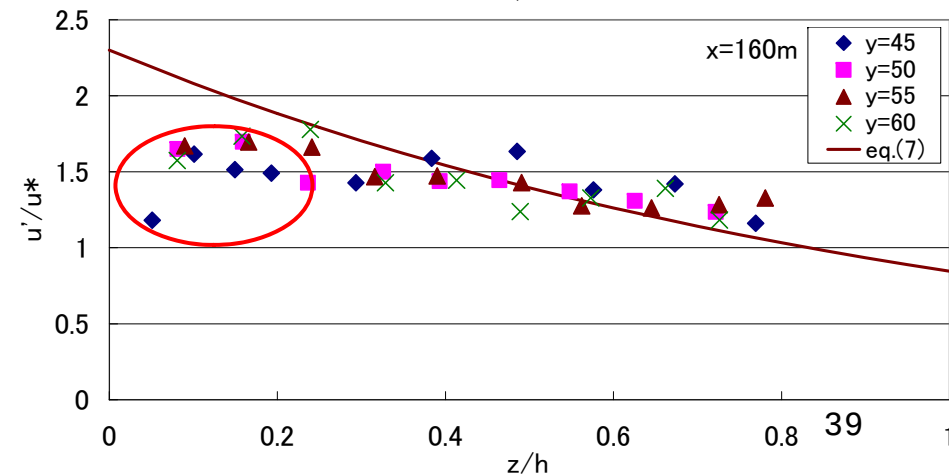
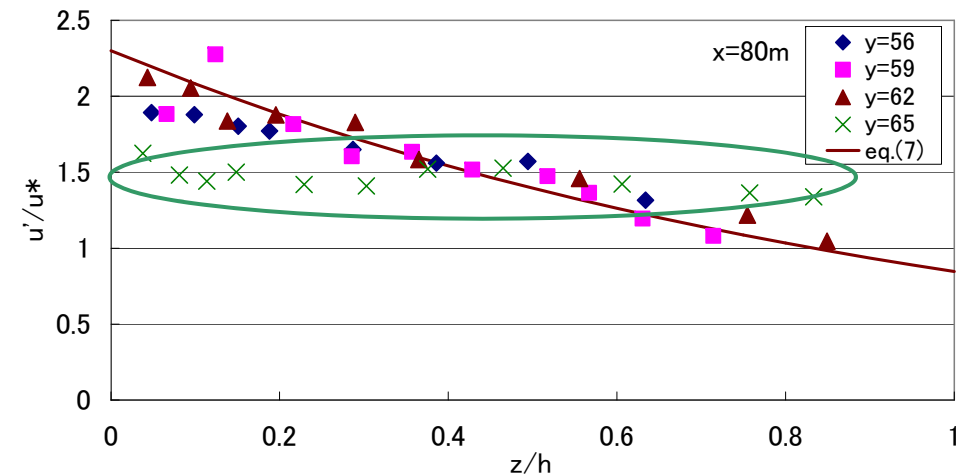
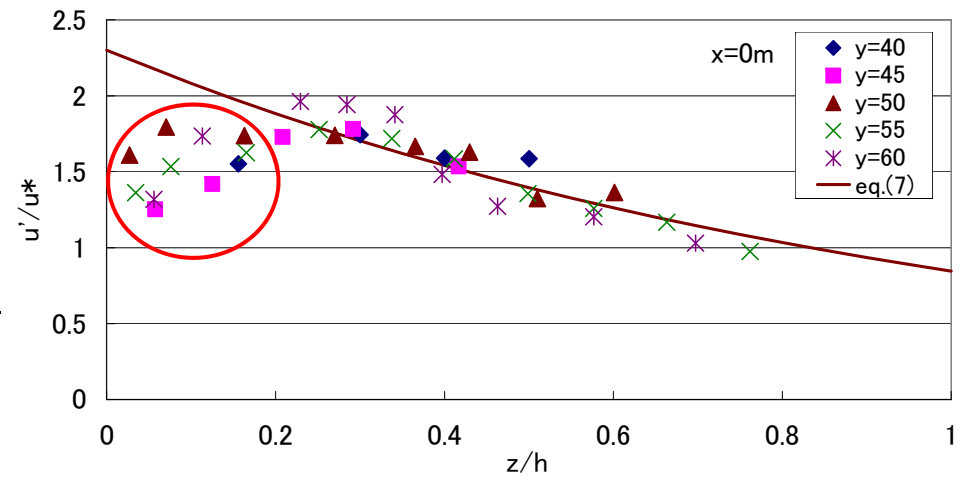
Figure 4.7 Variation of turbulence intensities u' , v' and w' over smooth and rough beds as a function of y/h and roughness k_s^+ .

矢田川における乱れ強度 u' の分布 (推定摩擦速度 u_{*r} で無次元化)

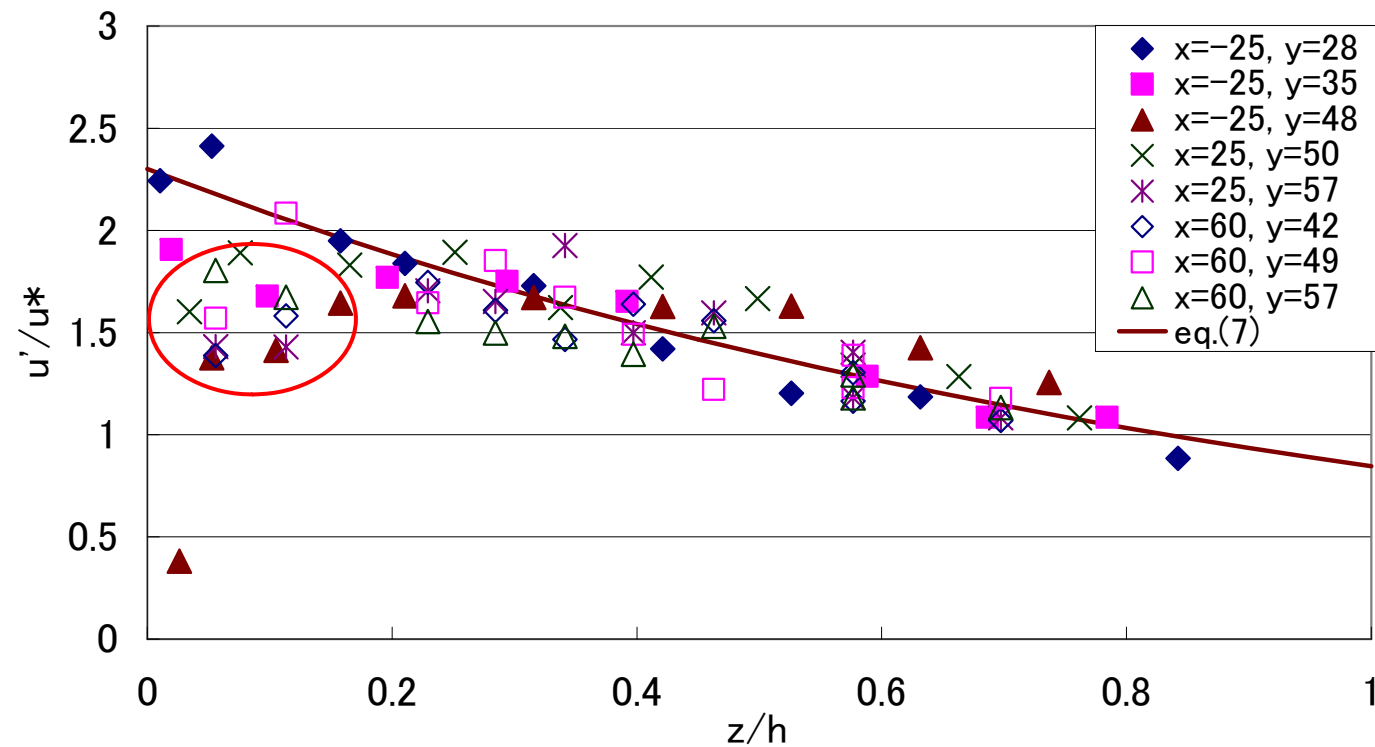
- 乱れ強度の分布と普遍分布の一致度は安定的で一致度が高い。
- 局所的摩擦速度は $z/h > 0.2$ の範囲の乱れ強度から見積もられる。

底面近傍:
 u' は粗度底層内で小さな値となる。

側壁近傍:
一定値になる傾向にある。



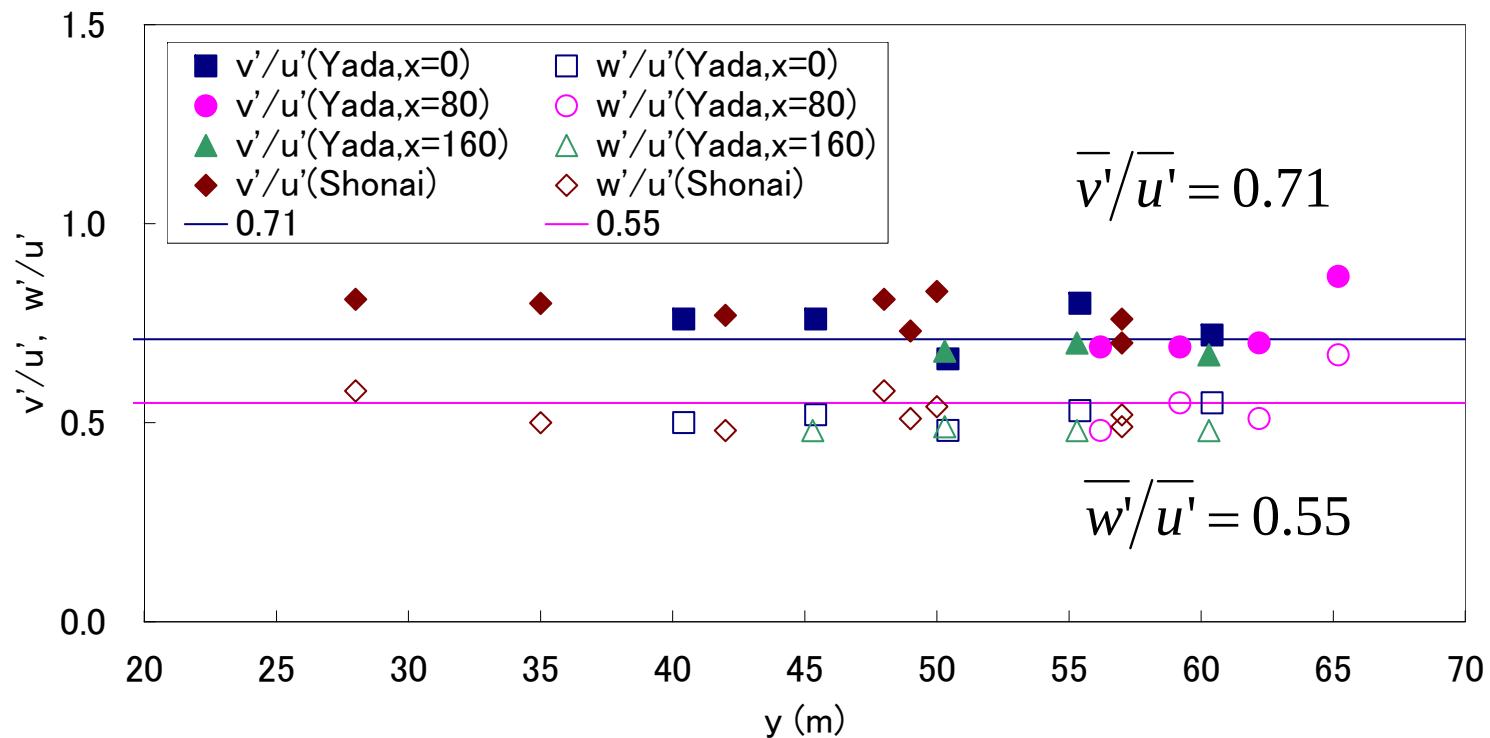
庄内川における乱れ強度 u' の分布 (推定摩擦速度 u_{*r} で無次元化)



底面近傍:
 u' は粗度底層で減少する.

水深平均の乱れ強度の比 $\overline{v'}/\overline{u'}$ $\overline{w'}/\overline{u'}$

- 乱れ強度の普遍的な非等方特性がしっかりと維持されている。





3つの方法で得られた摩擦速度の比較

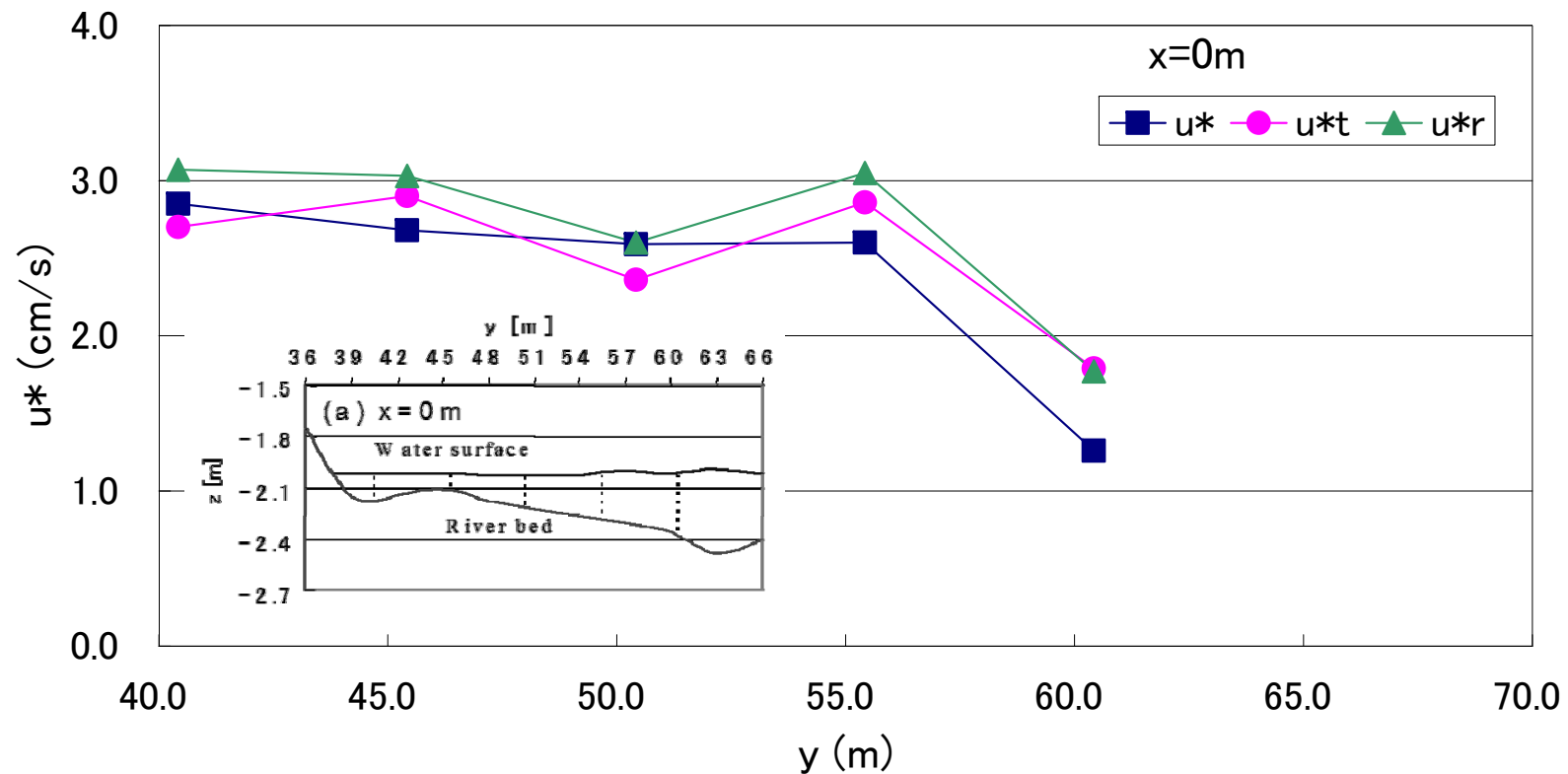
- 3種類の平均摩擦速度はすべての断面でよい一致を示している.

Table 3 Section averaged friction velocity

Section	$\bar{u}_*$ (m/s)	$\bar{u}_{*t}$ (m/s)	$\bar{u}_{*r}$ (m/s)
Yada (x=0m)	0.024	0.025	0.027
Yada (x=80m)	0.032	0.030	0.032
Yada (x=160m)	0.022	0.016	0.021
Shonai (x=-25m)	0.020	0.022	0.022
Shonai (x=25m)	0.018	0.016	0.019
Shonai (x=60m)	0.025	0.022	0.028
	0.0235	0.0208	0.0248

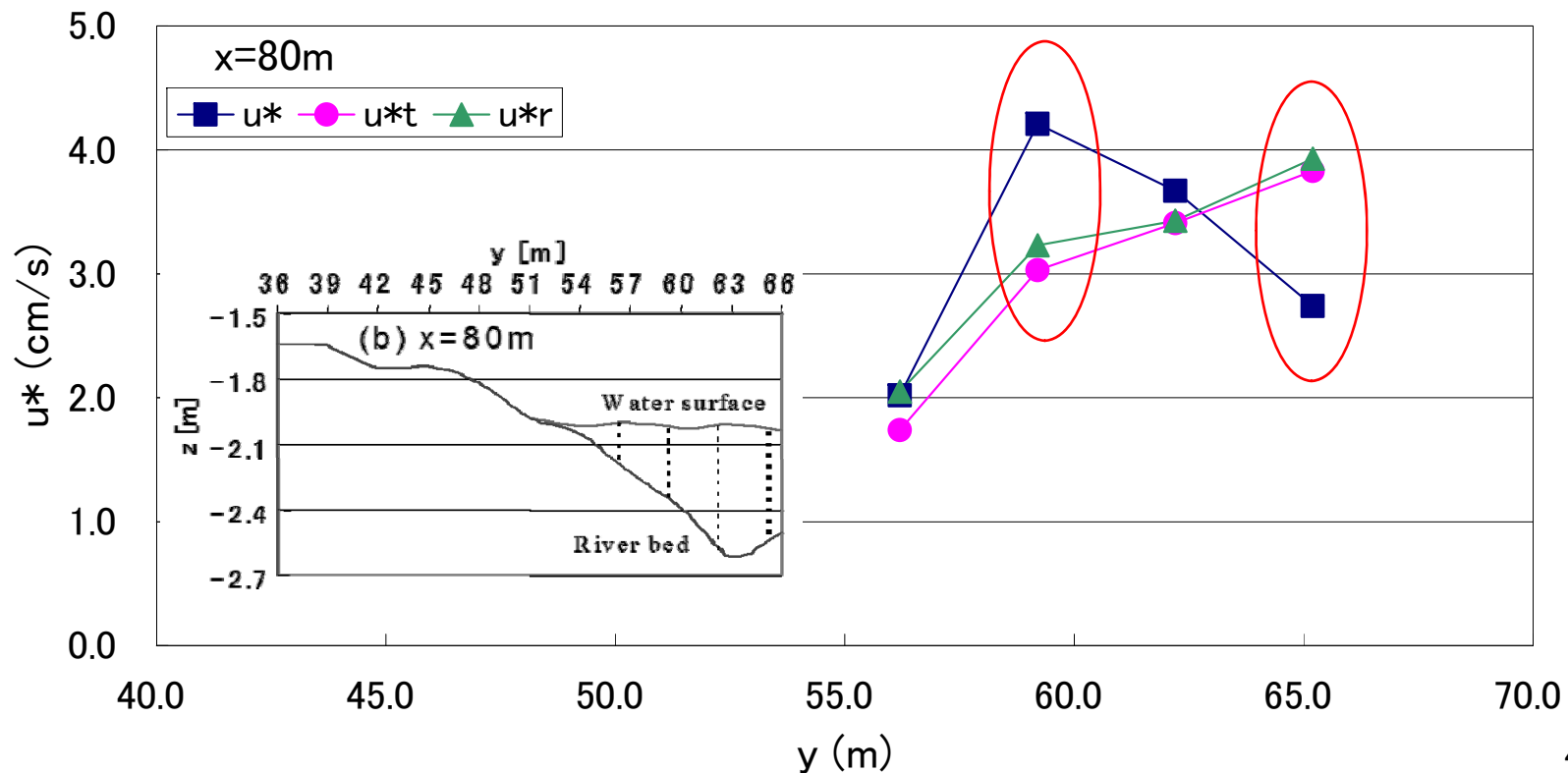
矢田川 $x=0\text{m}$ における摩擦速度の比較

- 横断分布はほぼ同様である.



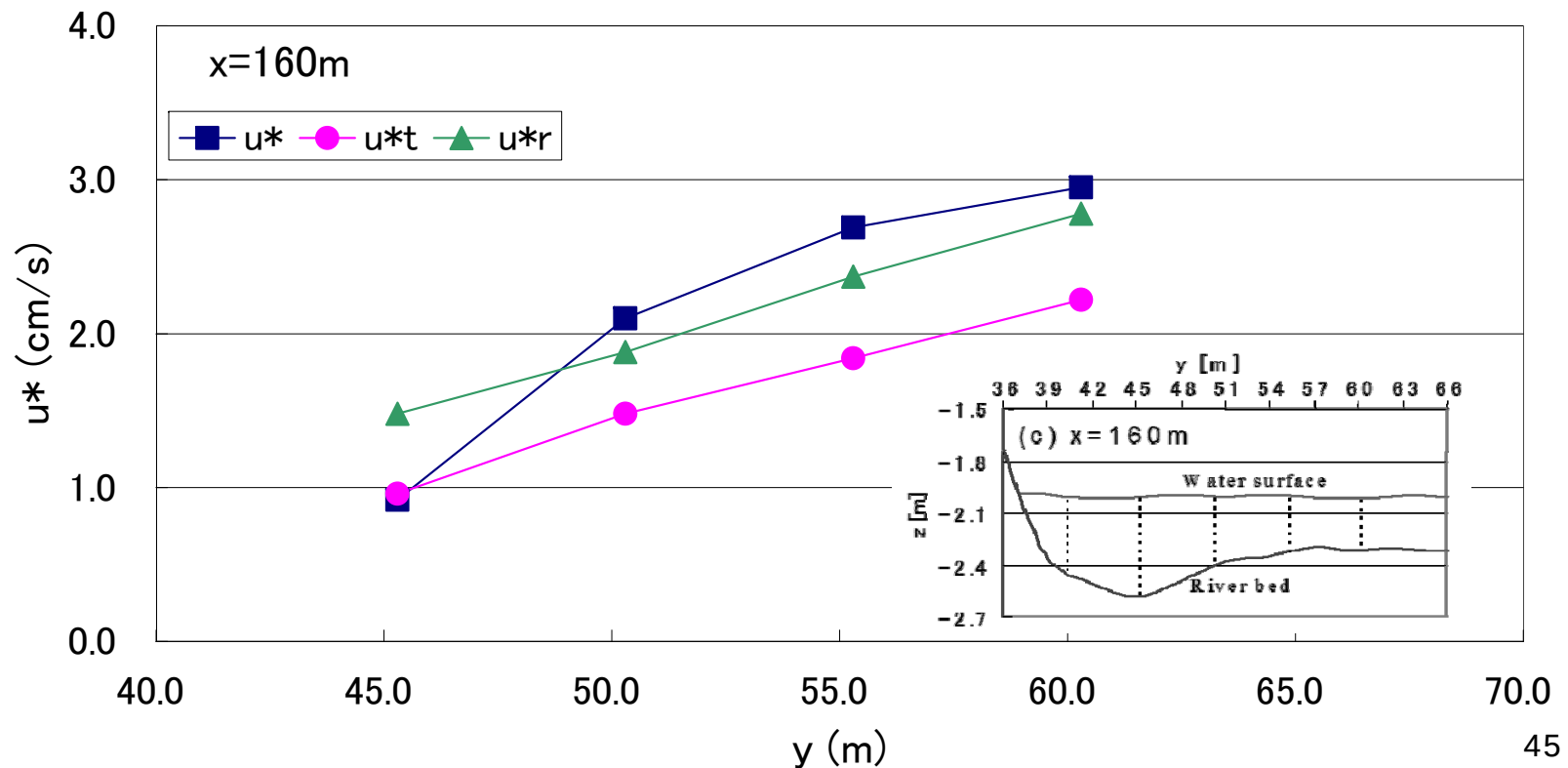
矢田川x=80mにおける摩擦速度の比較

- u_{*t} と u_{*r} の分布はほぼ同じであるが, u_* の分布が他と異なっている.
- これは大きな礫サイズと流れが縮流して加速する条件が関係していると思われる.

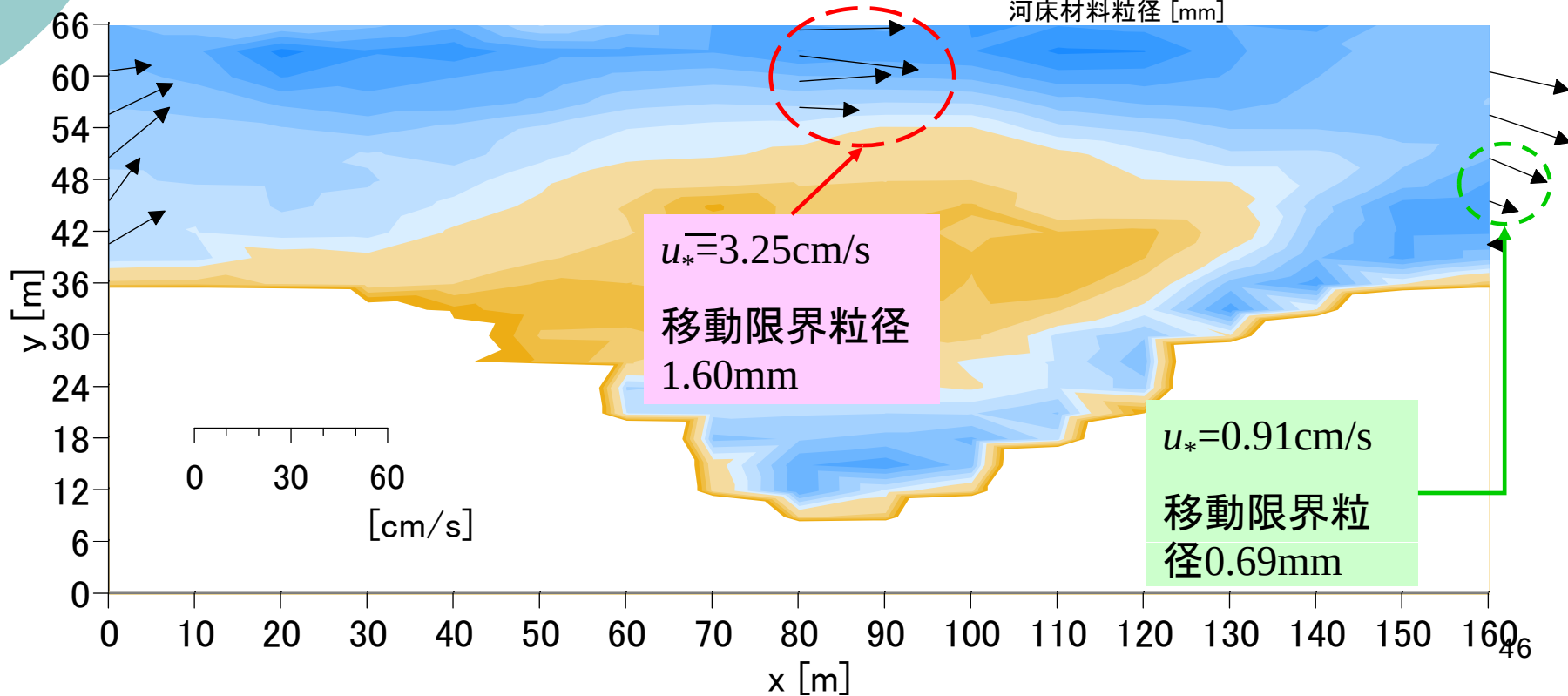
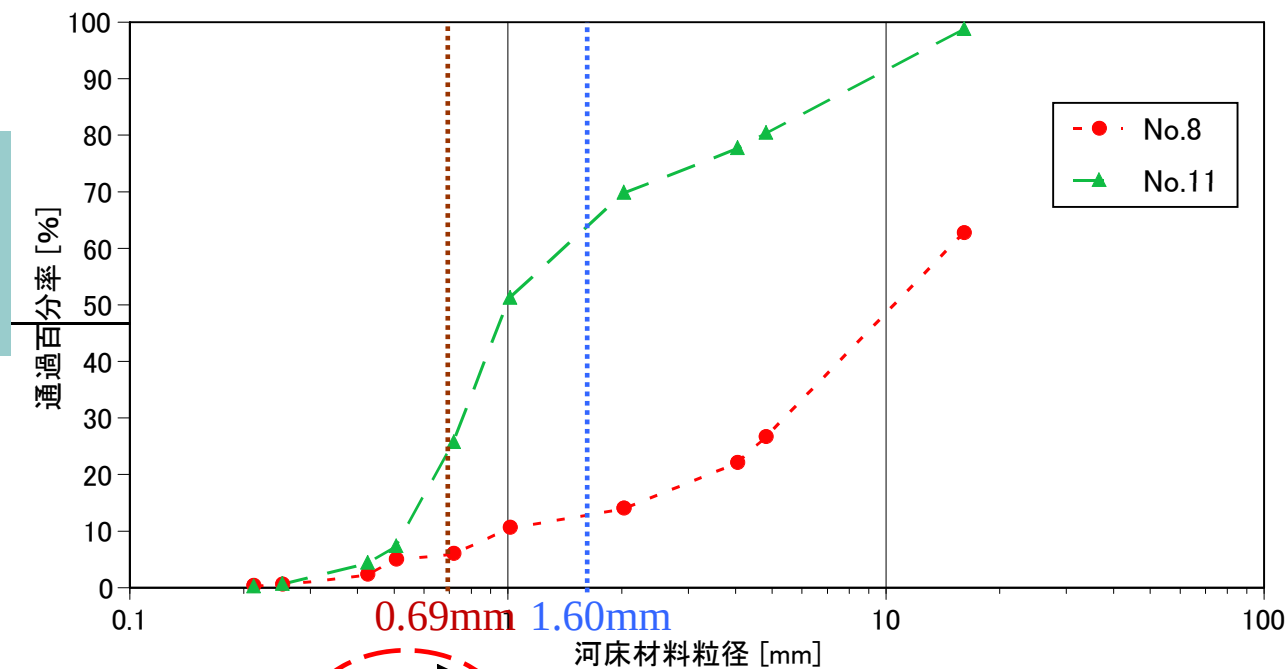


矢田川x=160mにおける摩擦速度の比較

- u_{*t} は $y \geq 50\text{m}$ で他の2方法と比べて過小評価となる.
- この領域では, 水深が狭くて深い領域から減少している過程にあり, 流れは拡散しつつある.

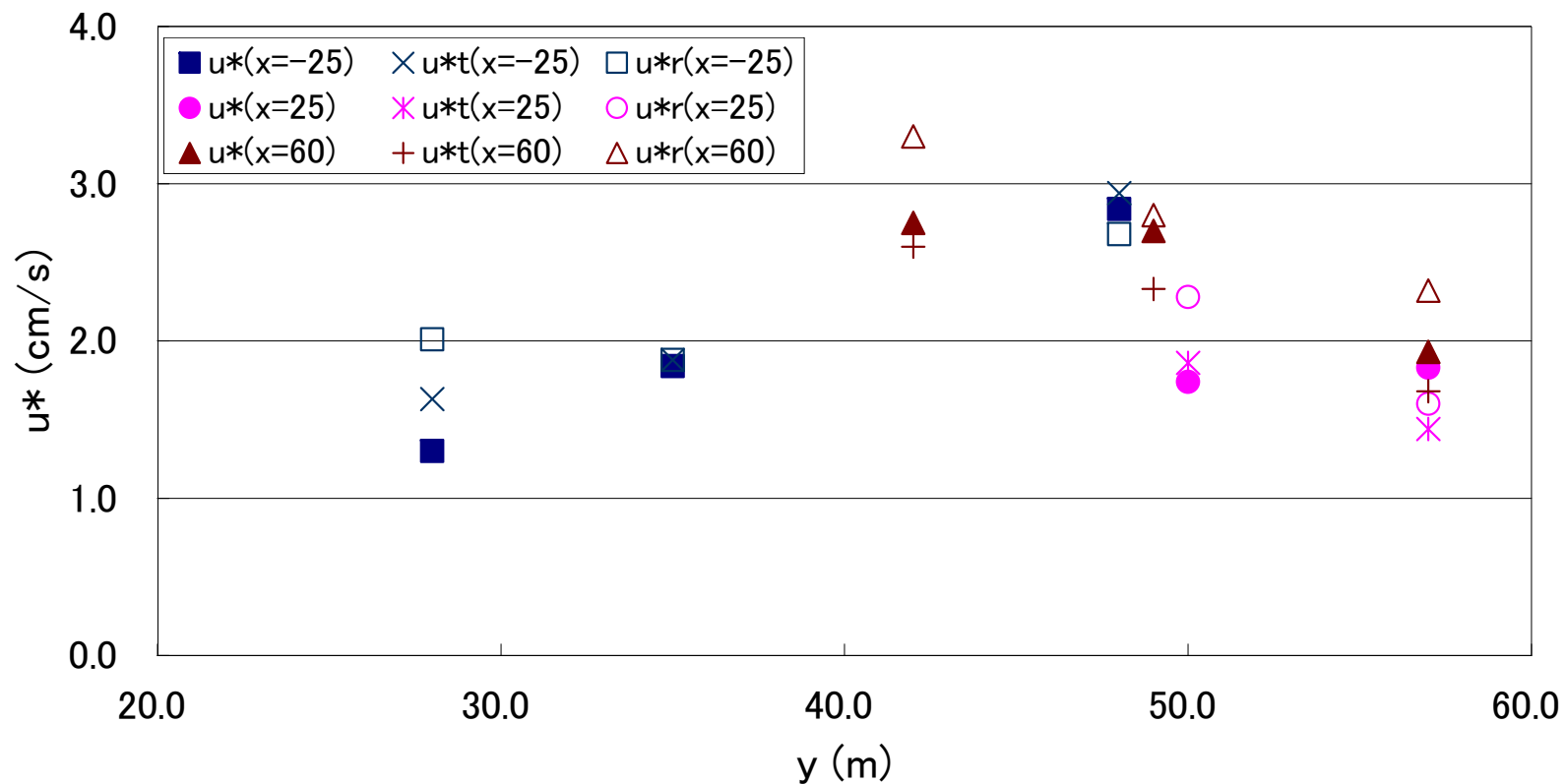


摩擦速度と 粒径分布の関係



庄内川における摩擦速度の比較

- 3種類の摩擦速度がほぼ一致しているのが認められる.
- 特に, u_* と u_{*t} は良く一致している.
- しかし, u_{*r} はこれらより大きくなる傾向にある.



抵抗特性

マンニングの粗度係数

$$n_1 = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{g}} \left(\frac{u_*}{U_m} \right)$$

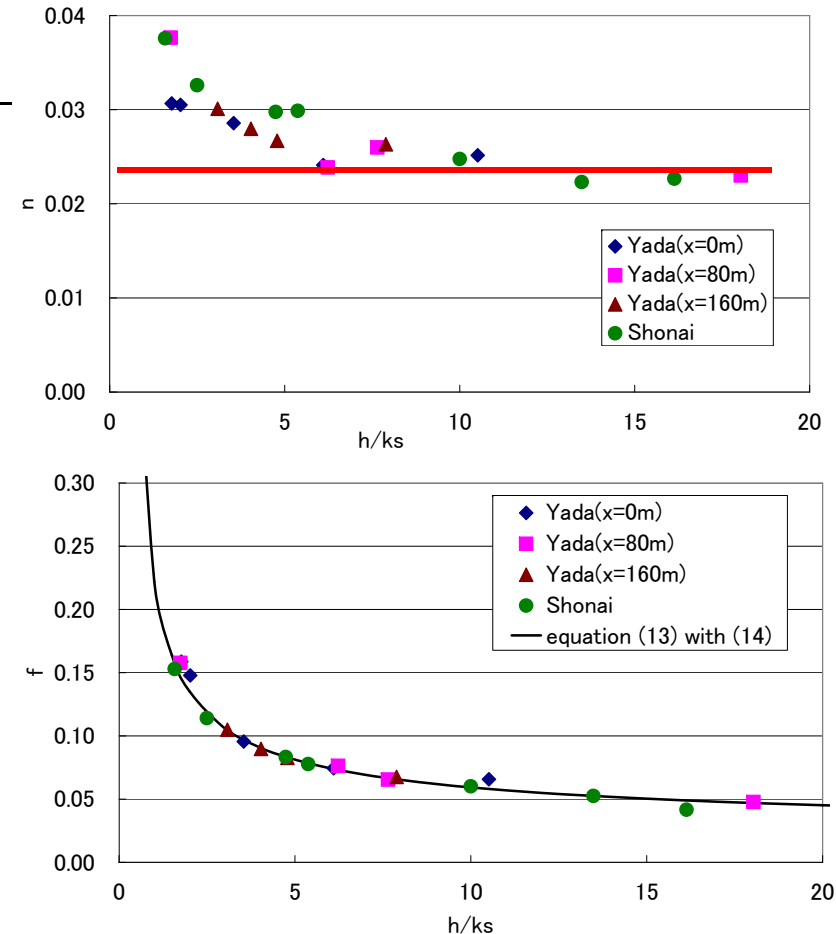
Darcy-Weisbach の摩擦損失係数

$$f_1 = 8 \left(\frac{u_*}{U_m} \right)^2$$

完全粗面の対数則分布から得られる
平均流速

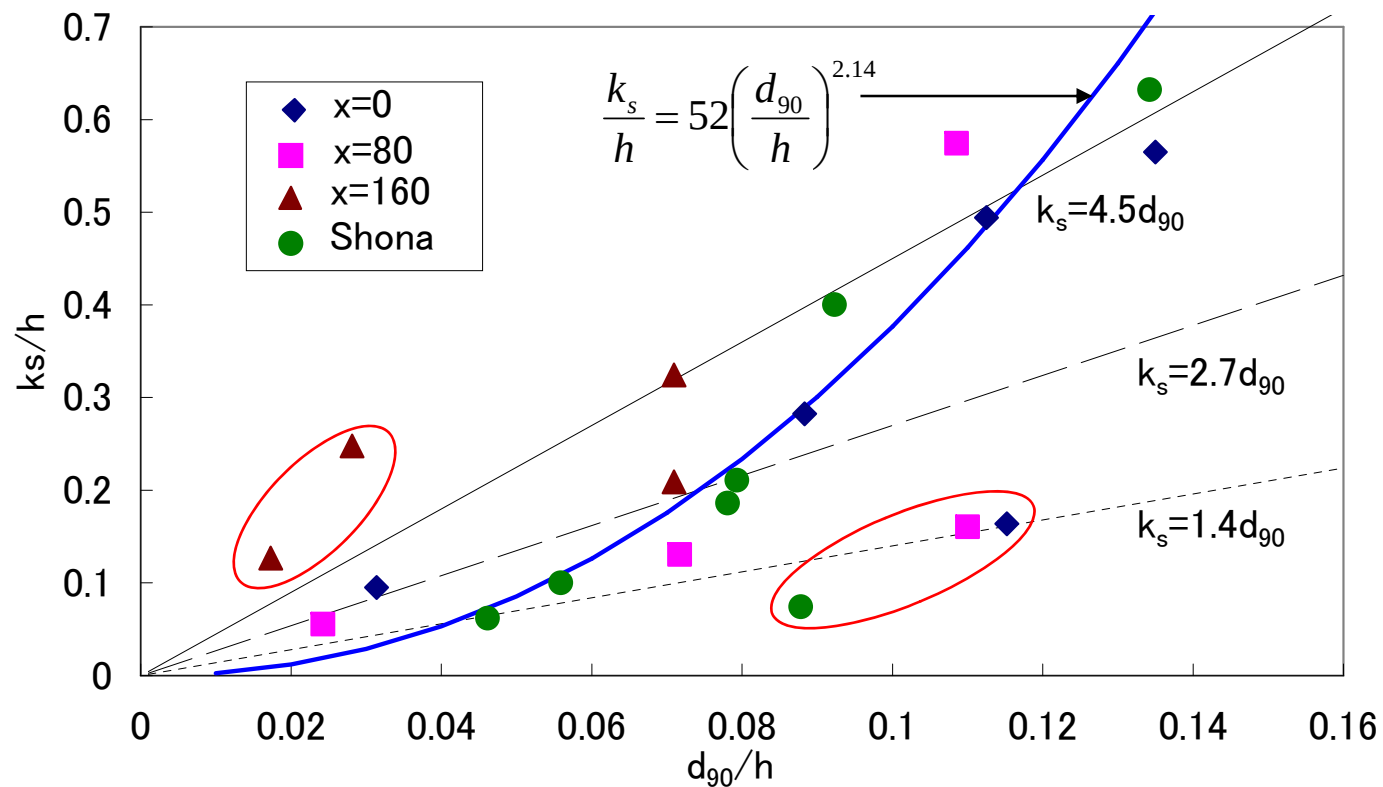
$$\frac{U_m}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) + B - \frac{1}{\kappa}$$

- n の値は $h/k_s > 6.0$ でほぼ一定となる.
- f の理論値との一致は対数則がほぼ全水深に渡って成立していることを意味する.



相当砂粒粗度と河床材料 d_{90} のとの関係

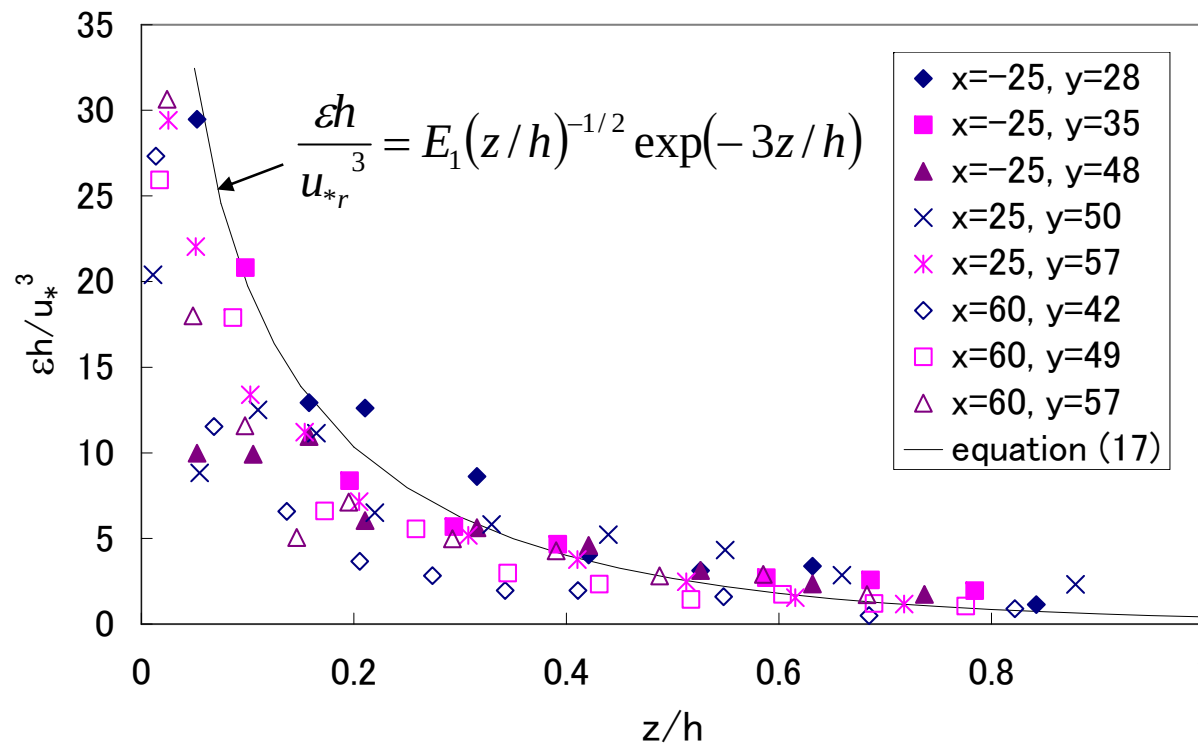
- k_s の値は広くばらついているが、ひどく離れたケースを除けば、ある関数関係が認められる。



スペクトル解析と粘性逸散率

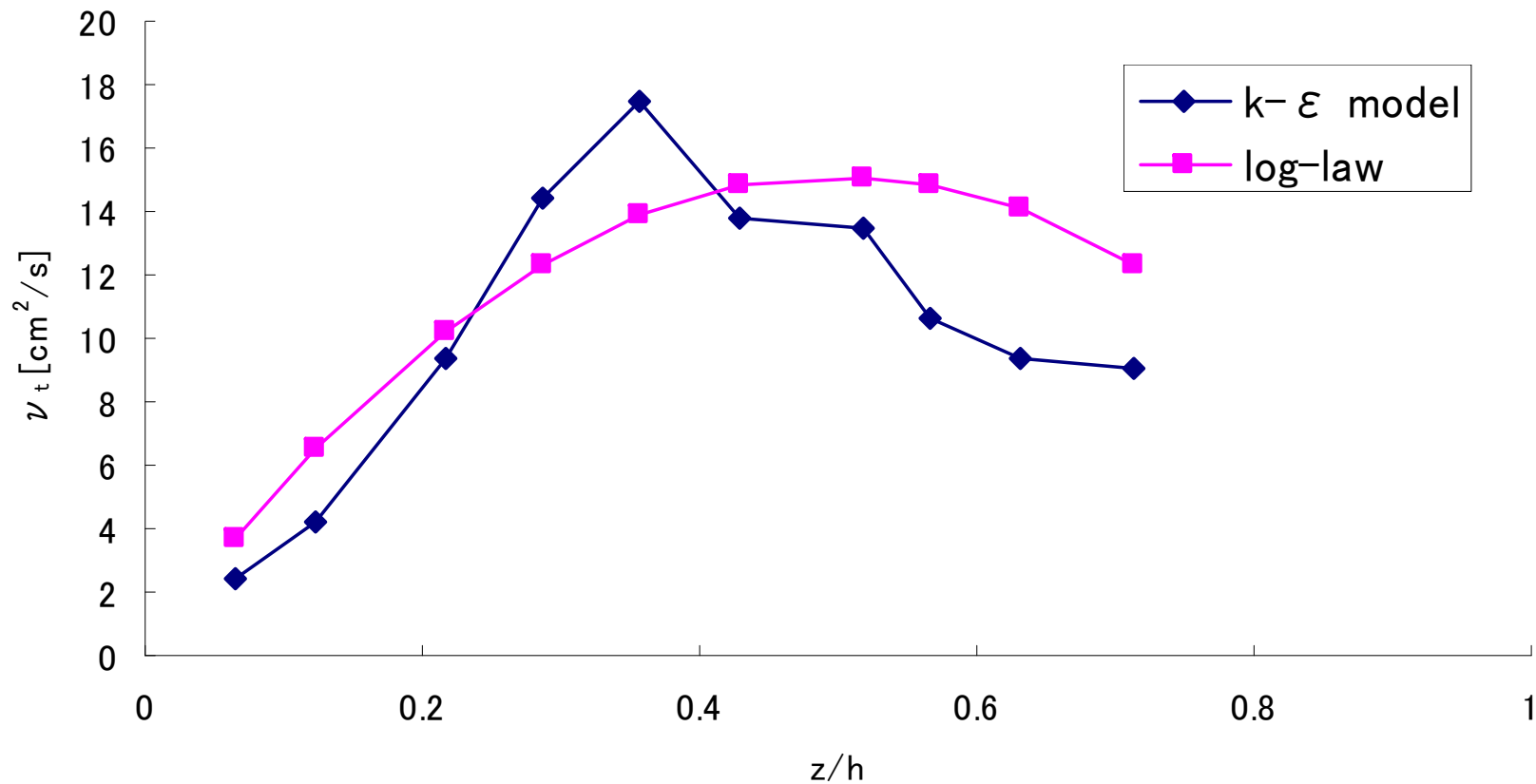
- コルモゴロフの $-5/3$ 乗則が慣性小領域で適用できる.
- 粘性逸散率 ε は次式から求められる.

$$S_u = \frac{A}{(2\pi)^{2/3}} \bar{u}^{2/3} \varepsilon^{2/3} f^{-5/3} \quad (A=0.5)$$

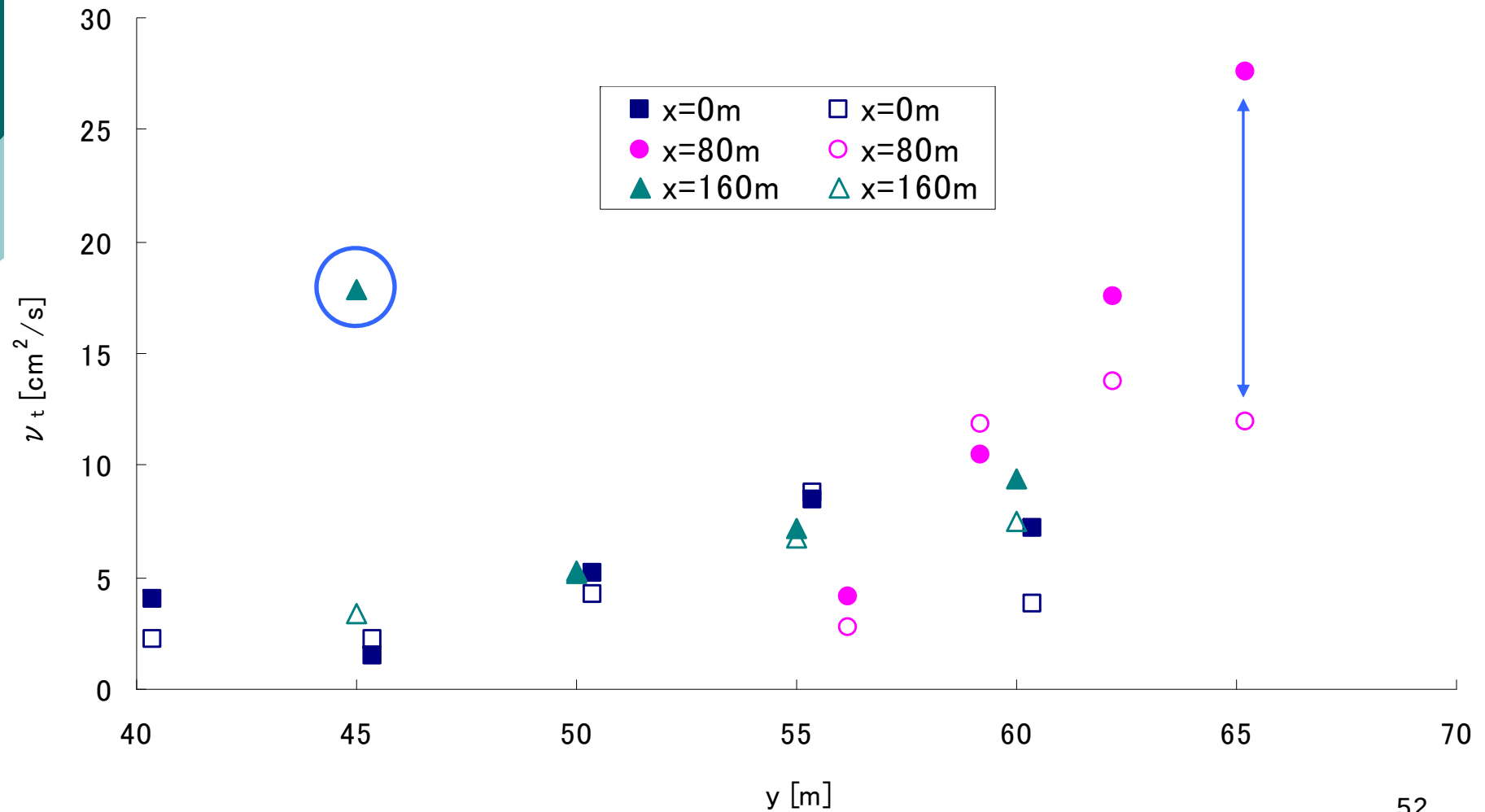


k- ε モデルと対数則による渦動粘性係数の比較

○ 渦動粘性係数鉛直分布の比較例 ($x=80, y=59$)



渦動粘性係数水深平均値の比較





結論

- ADV による流速計測は、平均流速及び乱れの両方において十分な計測精度を有している.
- 開水路における乱れの自己相似性は、非一様な流れ場においても成立している.
- 3種類の方法で推定された摩擦速度は、平均的にはある程度の一致を示したが、条件により不一致が見られた.
- はく離域を除いて、主流速分布の対数則の適用性は高い.
- 野外計測において、乱れ強度分布はレイノルズ応力よりも計測が容易で、摩擦速度に関する有用な情報を与える.

- 果たして洪水時にはどうか？
- 河床が移動している場合はどうか？