

2023.4.28 水工学オンライン連続講演会

実験室から現場の水理現象へ

名古屋工業大学・名誉教授
富永晃宏

実験室→数値計算→現場

相似則？
スケール効果？
掃流力？
混合砂？
3次元渦？

小 ← スケール → 大

現地の課題

現場からヒント

定性的類似性

室内実験
(要素抽出)

模型実験
(相似形)

現地観測

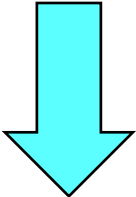
現場の
水理現象

定量的
評価

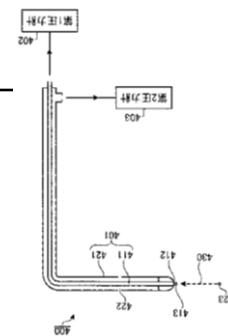
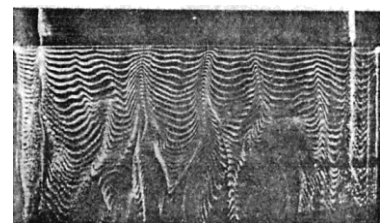
解釈と予測

数値計算

実験室における実験（模型実験でない）

- 実験水路はとても幅が狭い
 - 水深確保のため、鉛直方向に拡大した歪模型
 - 実験ケースに制限があり、条件が限定的
 - 力学的相似則が満足できない
- 
- しかし:
 - 流れを見ることができる（直接：可視化、間接：計測）
 - 水路で起きた現象は真実（実験条件に依存するが）
 - 流れの自己相似性に期待（実験水路→実河川）
 - 数値計算の検証

使用した流速計



水素気泡法

: 流れの組織構造の可視化, 流速計測, 流速遅い

ピトー静圧管

: 絶対流速, 微小な差圧測定, 底面流速



ホットフィルム

: 水流での計測, 100Hz、乱流計測可, ドリフトしやすい

電磁流速計

: 実験水路や現地河川で計測容易, 電磁ノイズ, 20Hz程度



レーザードップラー流速計

: 絶対流速, 非接触, 分解能高く乱流計測に最適

ADV

: 絶対流速, 水深大、20Hz~25Hz



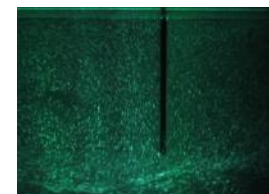
ADCP

: 野外計測, 横断面流速分布計測, 時間応答性低い



画像計測法(PIV)

: 平面一括計測, 情報量大, 乱流計測



河川において流れを知ることの意義

○ 河道疎通能

- 粗度係数の評価
- 流量観測

流速の横断分布
鉛直分布

平均流の
3次元構造

○ 河道の安定

- 潤辺境界の非一様性(複断面、樹木群・・・)
- 河道平面形状(蛇行・湾曲、砂州・・・)
- 河川構造物(水制、床止め・・・)
- 流砂輸送(洗掘、堆積)

局所流動

統計的乱れ

○ 河川環境

- 物理要素の生態系への影響
- 環境改善の方法

組織渦構造

本日の講演内容

これまでの実験1

○ 直線開水路流れ

- 二次流と3次元乱流構造
 - 断面形状と二次流構造
 - 複断面開水路流れ
 - 強制的二次流と流れ構造

博士論文へとつながる基礎研究
1981~1988

複断面流れ研究のブーム
1989~1997

二次流の創出と利用
2018, 2021

○ 開水路湾曲部の流れ

- 幅水深比の小さい長方形断面開水路
- 台形断面, 複断面開水路湾曲部の流れ
- 湾曲部に置かれた樹木群の影響

中小河川湾曲部の流れ
1998

湾曲部の洗掘制御+樹木
1999~2004

本日の講演内容

これまでの実験2

○ 水制周辺の水理

● 越流型水制

- 越流型水制の流れ構造
- 水制高さ、間隔の影響
- 設置角度の影響

PIVによる実験対象-水制が面白い
2000~2004

● 透過水制

- ハイドロバリア水制
- 聖牛の水理機能
- 杭群の配置形態と流れ構造

局所洗掘が小さい水制
2000, 2005

杭水制を系統的に
2018~2021

● 水制周りの河床変動

- 水制による河床変動創出
- 基礎工, 杭群による制御

水制を用いた多自然川づくり
2006~2009

局所洗掘の抑制
2013~2015

本日の講演内容

これまでの実験3

○ わんどの水理

● わんど内の流れ

- わんどの水交換機構
- 閉鎖的わんどの水交換
- 複断面河道のわんど

自然共生研究センターのわんど研究ゾーン
2002~2003

↓
様々なわんど形態
2005~2013

● わんどの土砂堆積抑制

- 矢田川人工わんどの土砂堆積
- わんど開口部遮蔽による土砂堆積抑制
- 水制や導流工を用いた土砂堆積制御

矢田川人工わんどの問題
2010~2013

↓
構造物による土砂堆積抑制
2011~2018

○ 淵を有する流れ

- 木曽川の深掘れ周辺の3次元流れ構造
- 河岸凸部と河床段落ちの相互作用

木曽川深掘れの問題
2018~2020

↓
河床凹部の流れ
2018

二次流と3次元乱流構造

○ 直線開水路流れ

- 二次流と3次元乱流構造
- 断面形状と二次流構造
- 複断面開水路流れ
- 強制的二次流と流れ構造

博士論文へとつながる基礎研究
1981~1988

複断面流れ研究のブーム
1989~1997

二次流の創出と利用
2018, 2021

- ① A. Tominaga, I. Nezu, K. Ezaki and H. Nakagawa, Three-dimensional Turbulent Structure in Straight Open Channel Flows, Journal of Hydraulic Research , vol.27-1, No.1, pp.149-173, 1989.
- ② A. Tominaga and I. Nezu, Turbulent Structure in Compound Open Channel Flows, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.117, No.1, pp.21-41, 1991.
- ③ A. Tominaga and I. Nezu, Turbulent Structure of Shear Flows with Spanwise Roughness Heterogeneity, Environmental Hydraulics, Balkema, pp.415-420, 1991.
- ④ A. Tominaga and D. W. Knight, Numerical Evaluation of Secondary Flow Effects on Lateral Momentum Transfer in Overbank Flows, River Flow 2004, vol.1, Balkema, 353-361, 2004.
- ⑤ Robert Lado Wurda Nyarsuk and Akihiro Tominaga, Influence of the Skew Arrangement of Roughness Elements on Secondary Currents in Open Channel Flow, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics), Vol. 74, No. 2, I_485-I_492, 2018.
- ⑥ 吉広健太, 富永晃宏, 斜め棧粗度による二次流の生成と浮遊ゴミ捕捉法に関する研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 77, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 24), I_441-I_449, 2021.

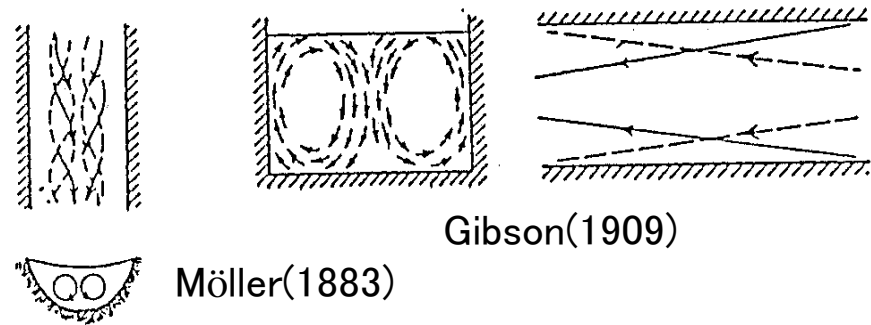
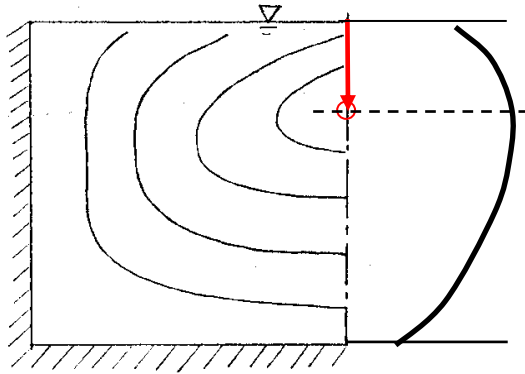
現場の二次流

— Prandtlの第2種二次流(乱れに起因する二次流) —

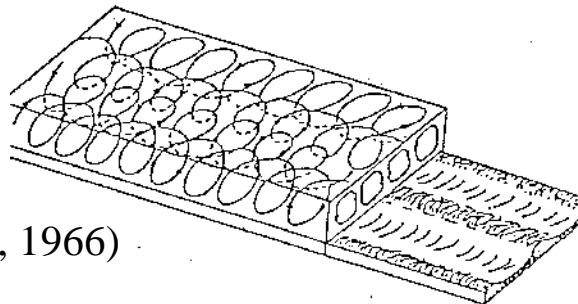
- 幅の狭い水路で最大流速が水面より下に現れる

— Velocity dip

- 一對の二次流の存在を示唆

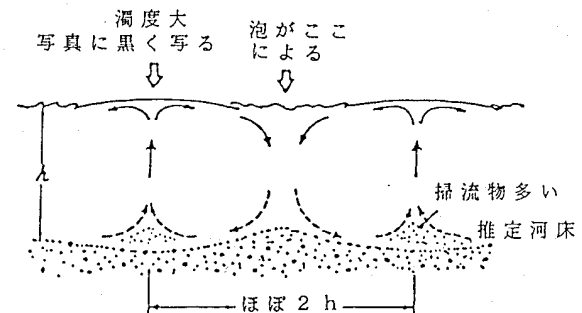


- 河床の縦筋の発生や浮遊砂濃度分布の横断方向変化特性などからも推測される



Sand ridge (karz, 1966)

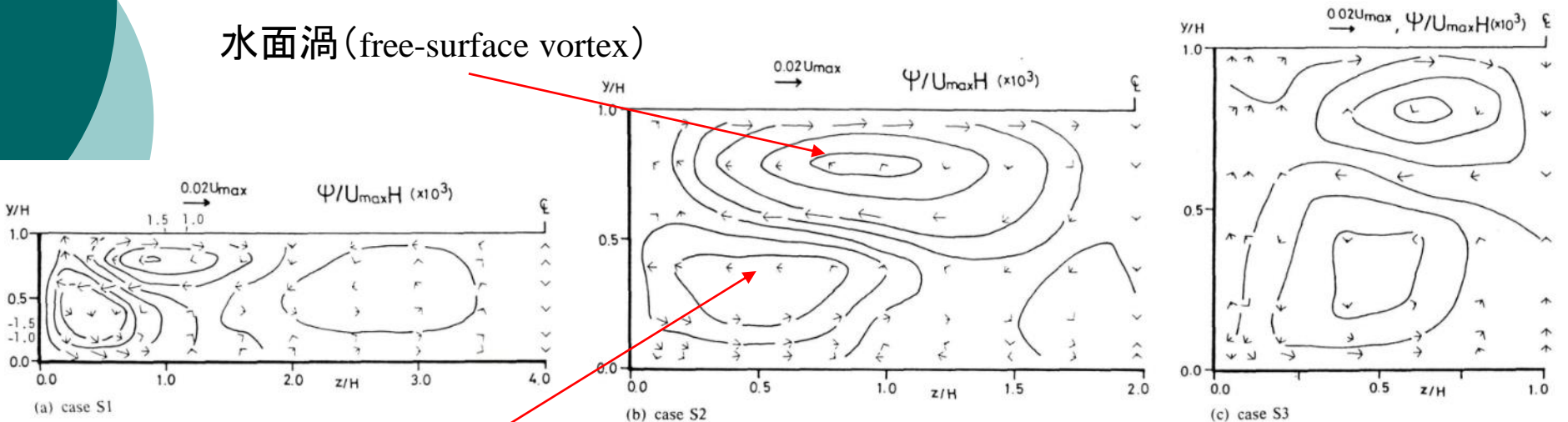
- 木曾川の洪水時における水面の航空写真に流れに平行な縞模様ができていることを発見—木下(1967)



① 直線水路の二次流ーアスペクト比の影響

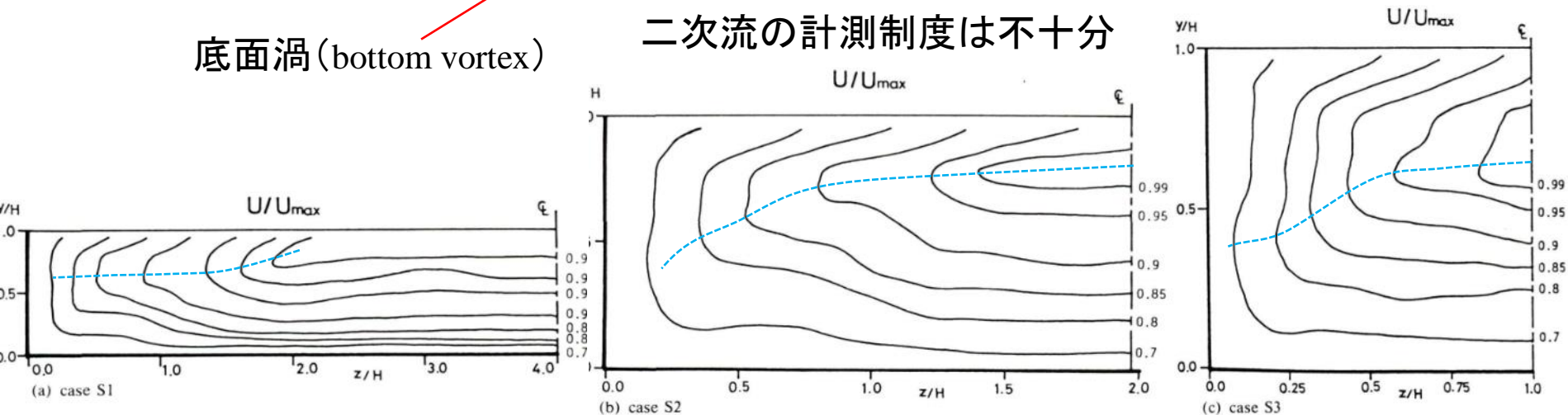
- 水面渦の幅は水深の2~2.5倍程度まで発達→水面での減速(velocity dip)

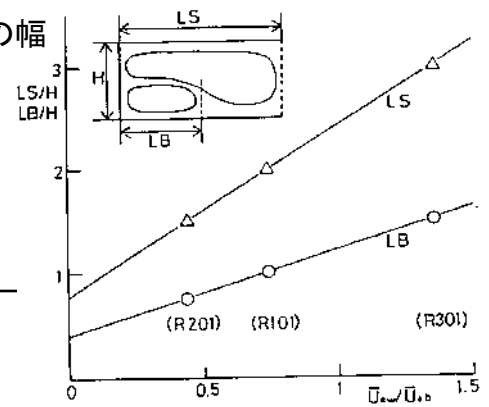
水面渦 (free-surface vortex)



底面渦 (bottom vortex)

二次流の計測制度は不十分





①

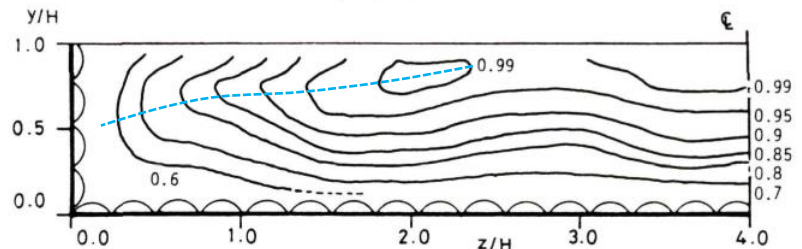
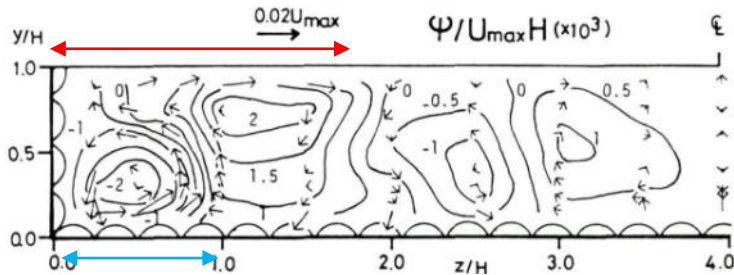
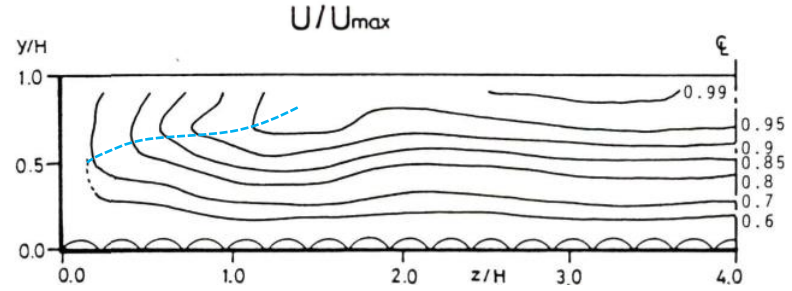
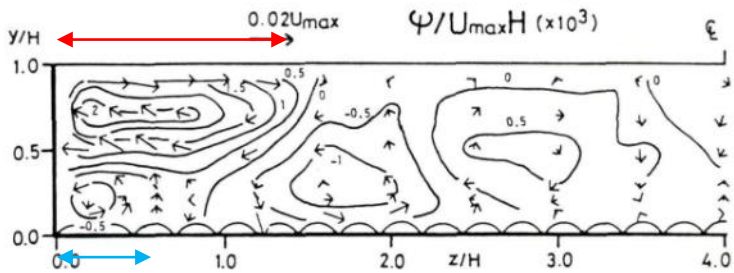
壁面粗度の影響 —底面と側壁の粗度の違い

- 側壁粗度の増大とともに水面渦、底面渦の幅が拡大
- 粗度により二次流が中央へ伝播し並列らせん流を形成

(a) case R11

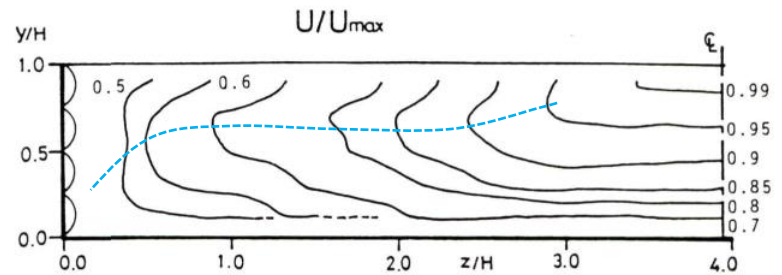
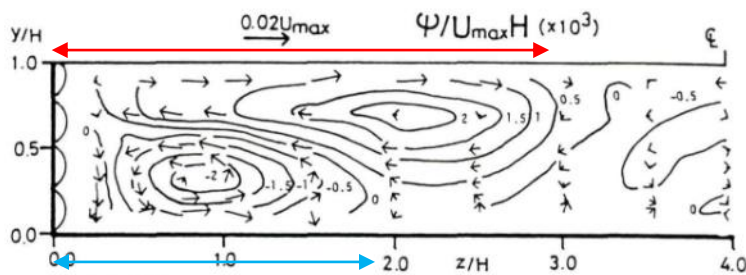
(a) case R11

側壁粗度/底面粗度



(b) case R21

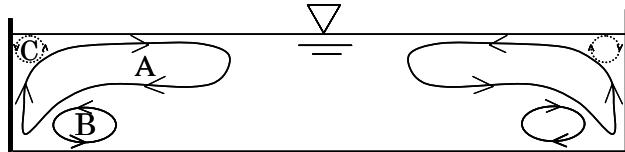
(b) case R21



(c) case R31

(c) case R31

① 断面形状の影響——側壁の傾斜



← DNSで明らかになった二次流構造

ホットフィルム

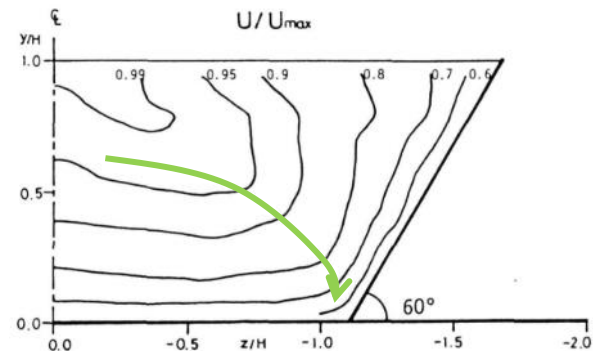
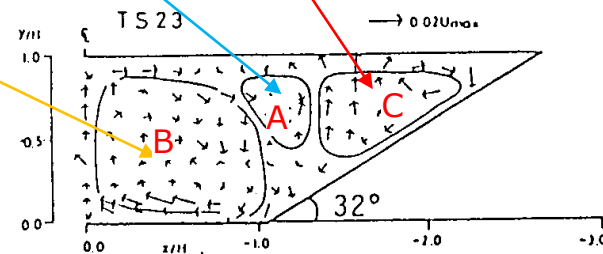
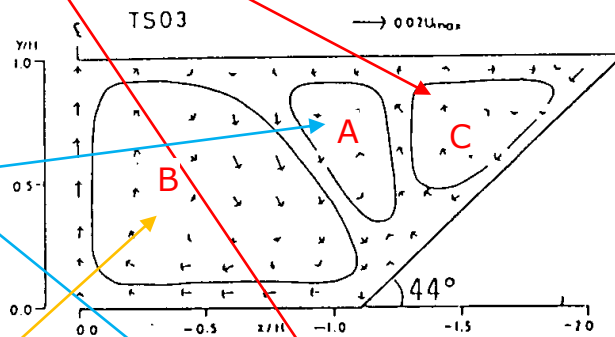
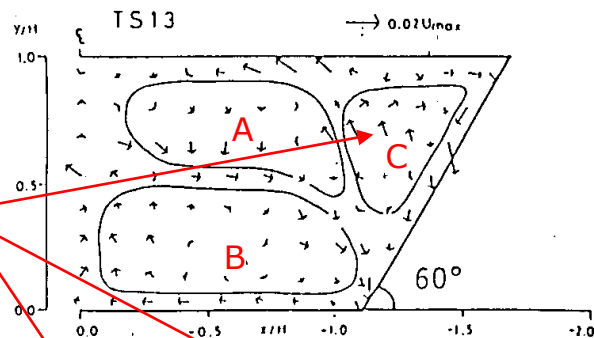
・新たな二次流渦
の出現



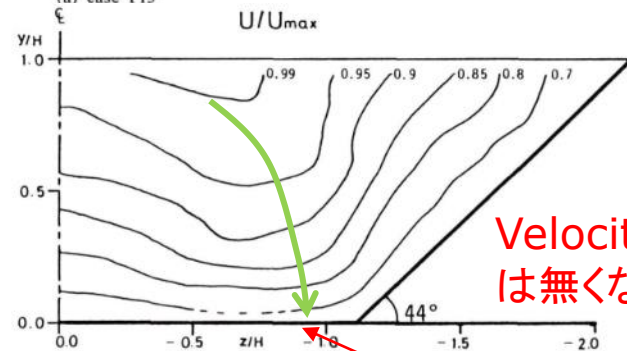
・水面渦の減衰



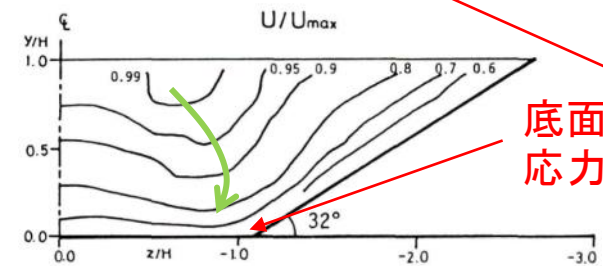
・底面渦の発達



(a) case T13



(b) case T03



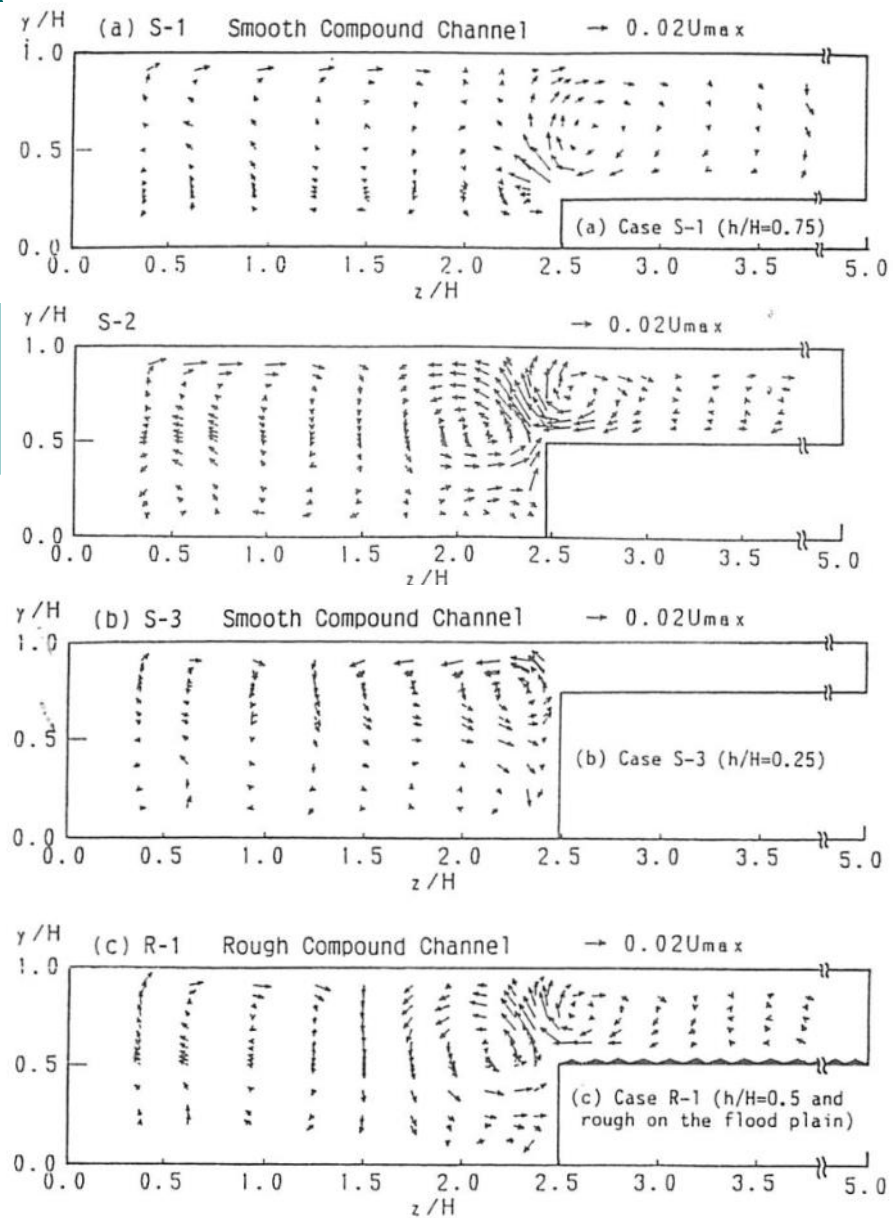
(c) case T23

Velocity dip
は無くなる

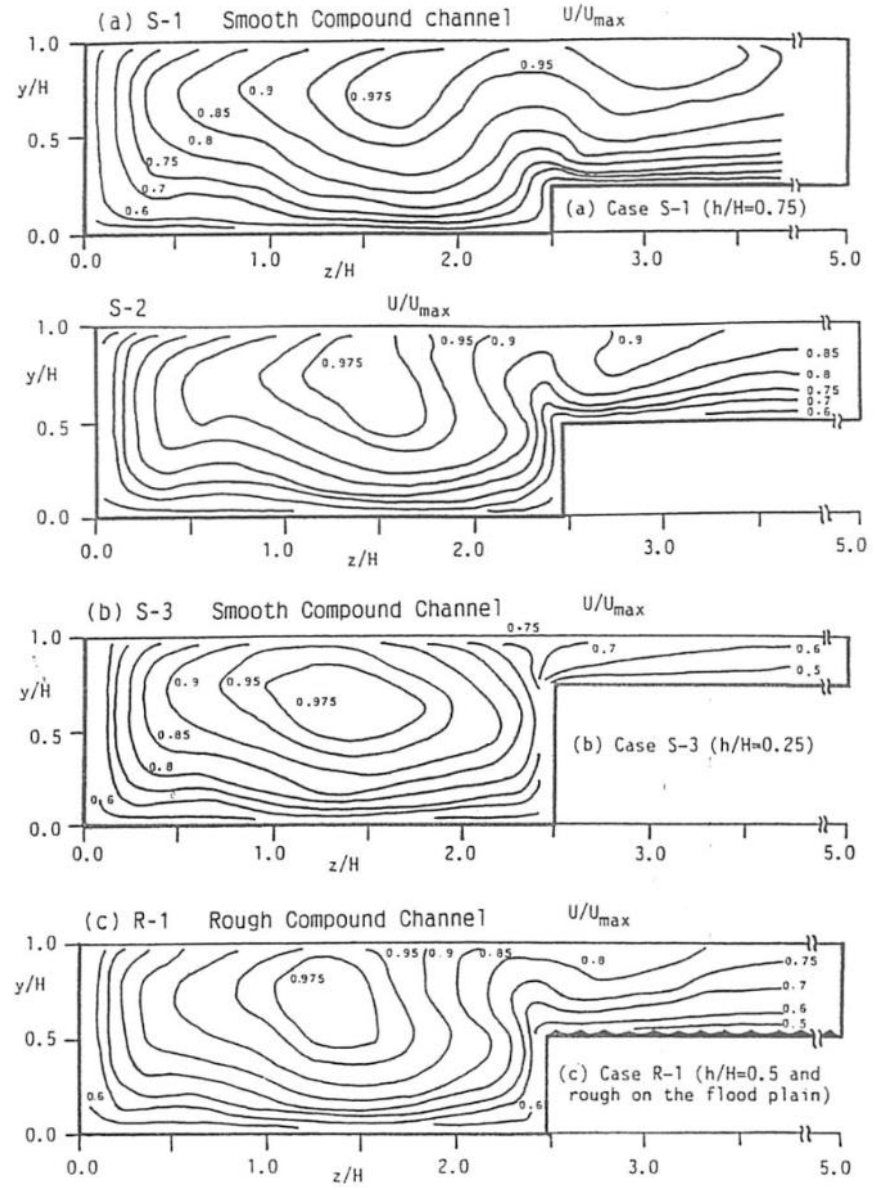
底面せん断
応力の増加

② 複断面開水路流れの乱流構造 1

二次流

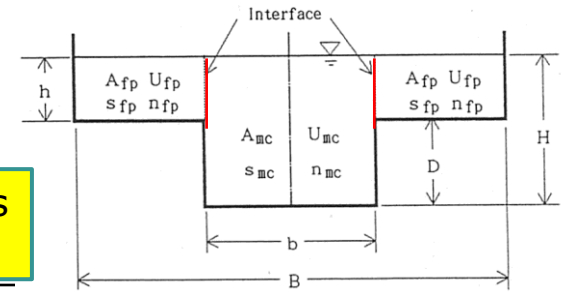


平均主流速

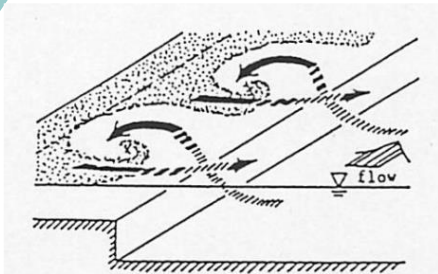


複断面開水路流れの特徴

Apparent shear stress
見かけのせん断応力

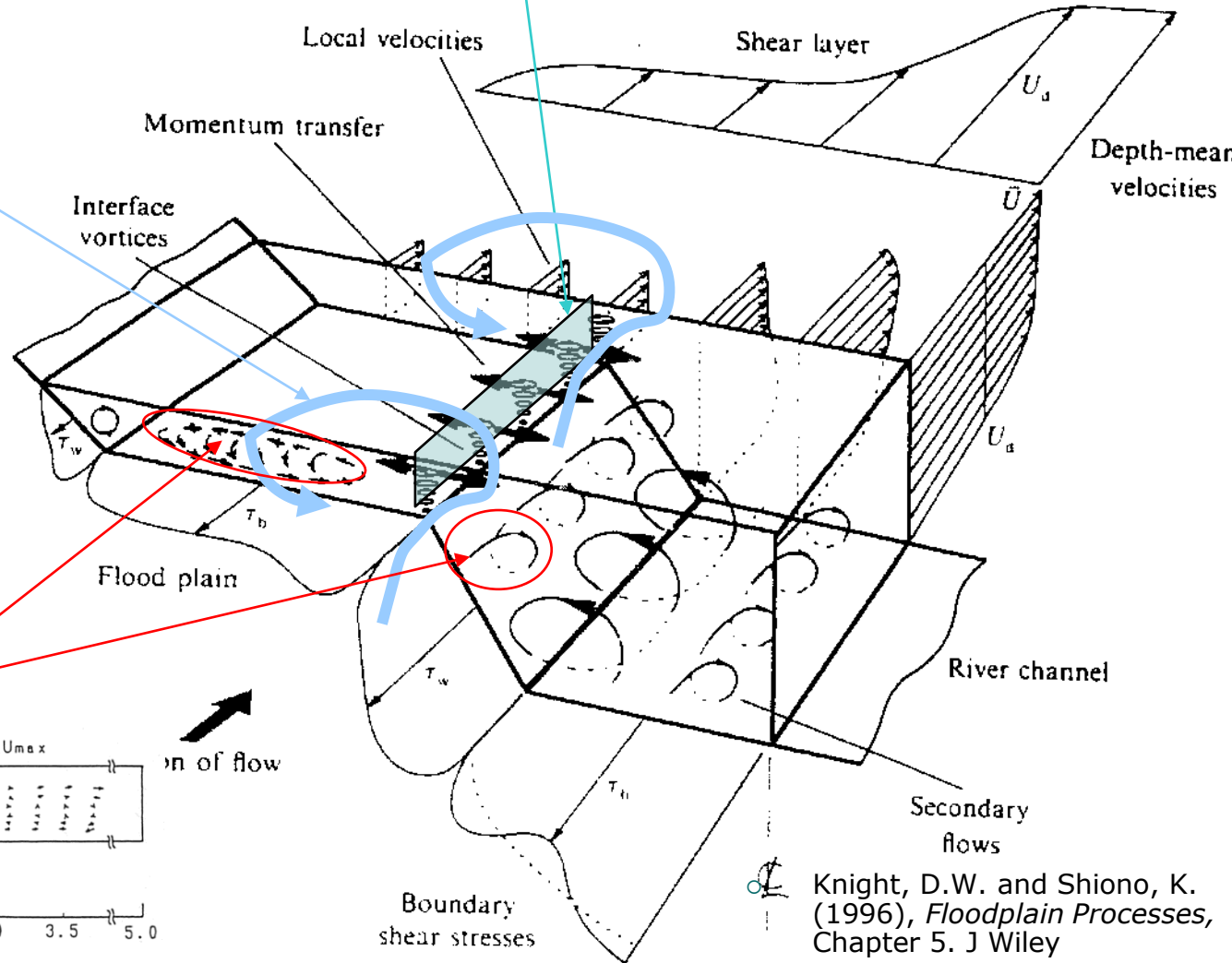
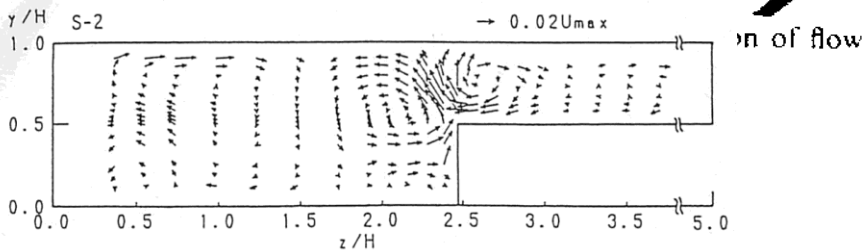


Planar vortices
大規模平面渦



(Fukuoka et al., 1986)

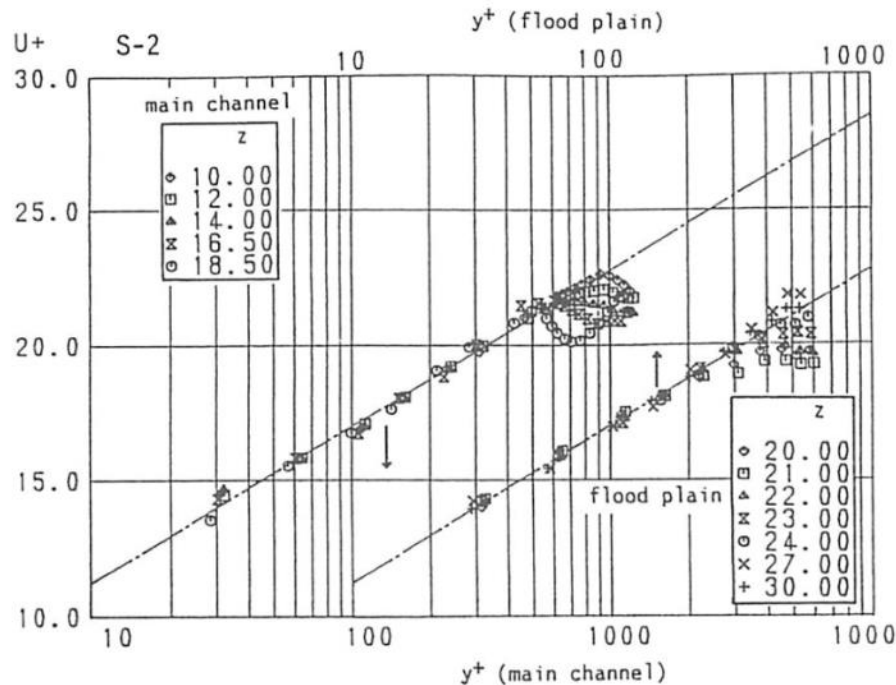
Secondary flow
二次流



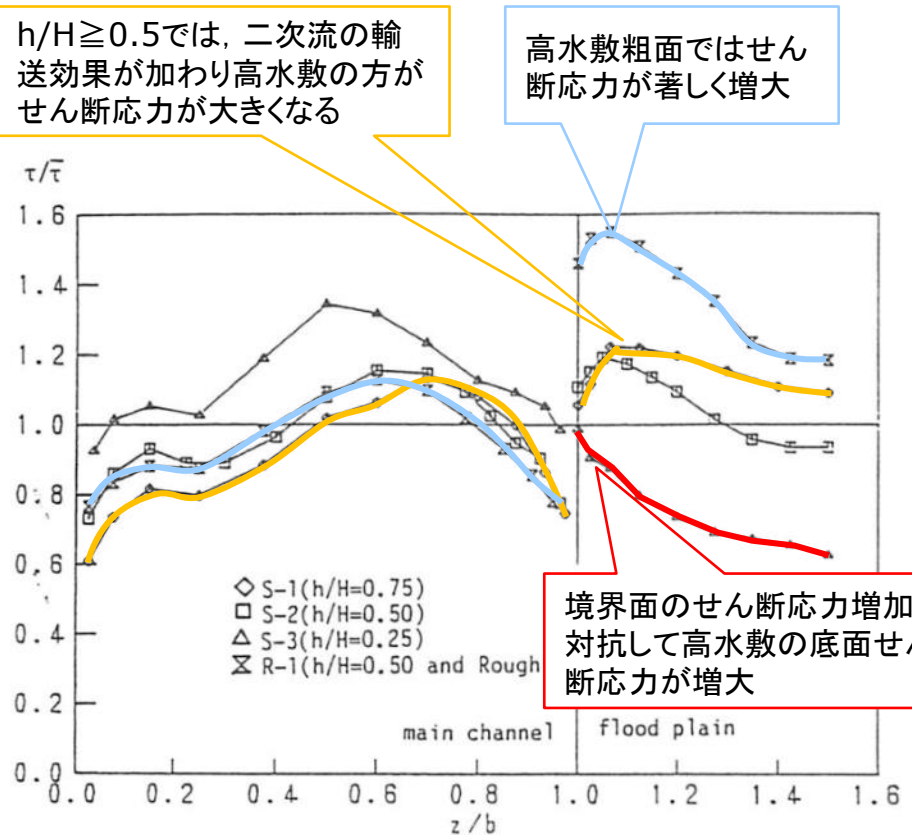
Knight, D.W. and Shiono, K. (1996), *Floodplain Processes*, Chapter 5. J Wiley

② 複断面開水路流れの乱流構造2

- 低水路・高水敷それぞれで、対数則分布から底面せん断応力を求めた



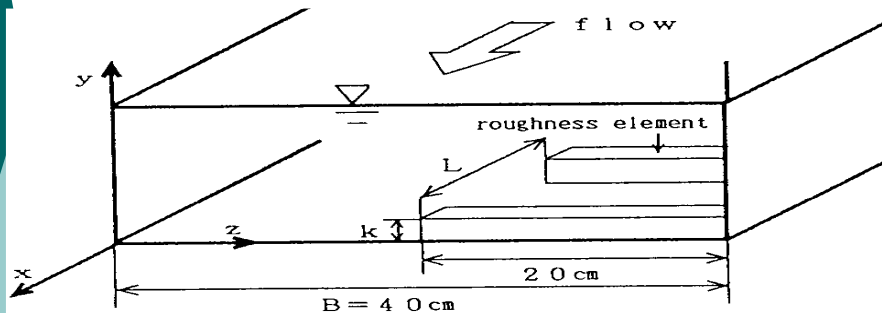
平均主流速の対数則分布から摩擦速度を算定



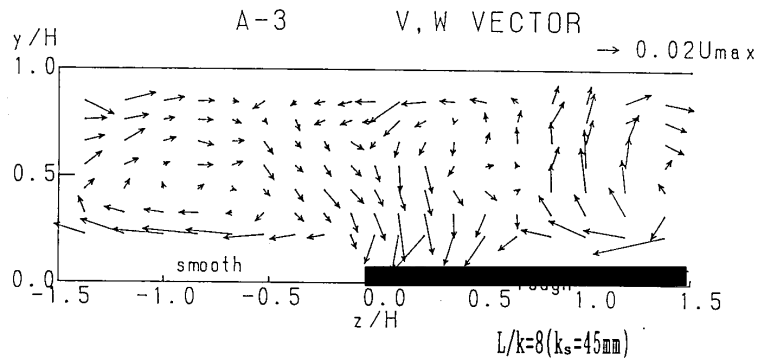
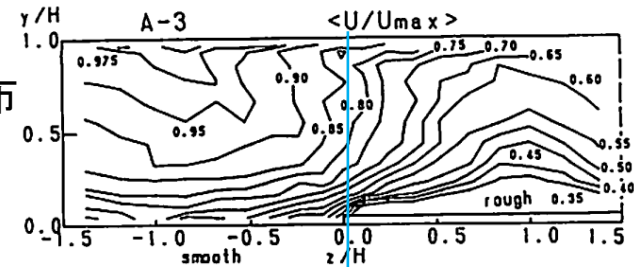
底面せん断応力

④

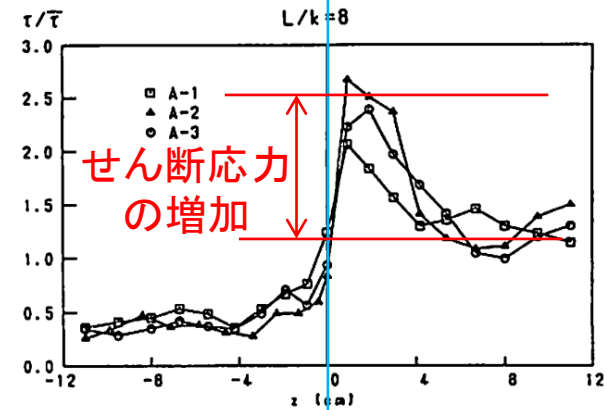
片側粗面開水路の二次流



平均流速分布

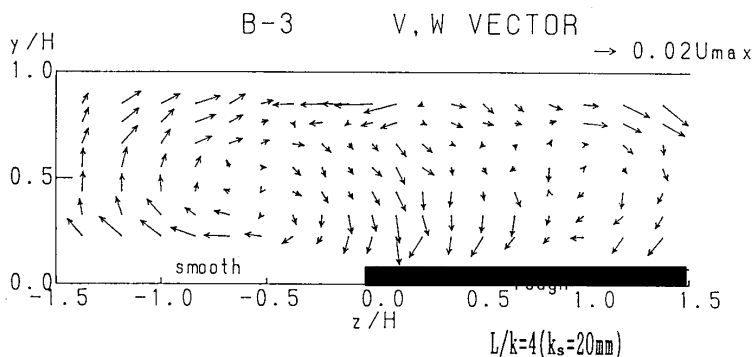


底面せん断
応力分布

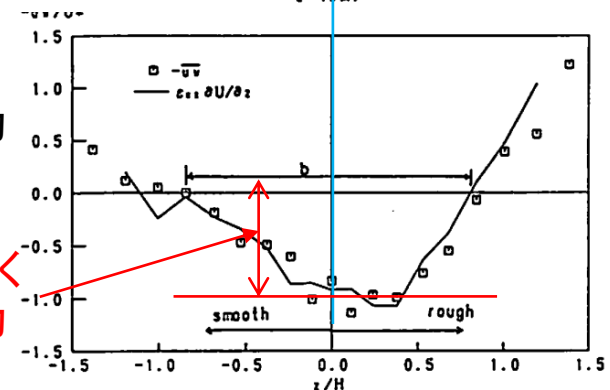


二次流

滑面 粗面



レイノルズ応力

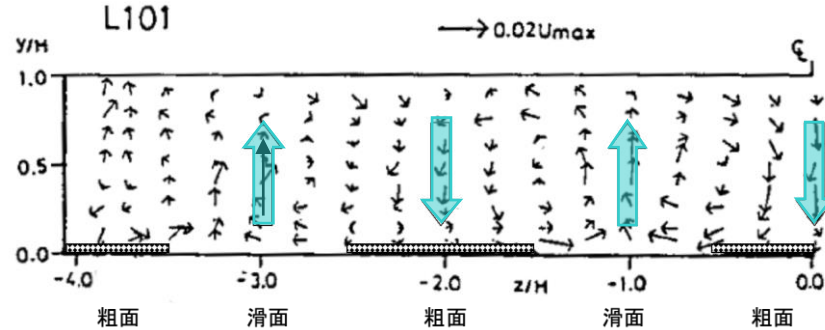


境界面に働く
せん断応力

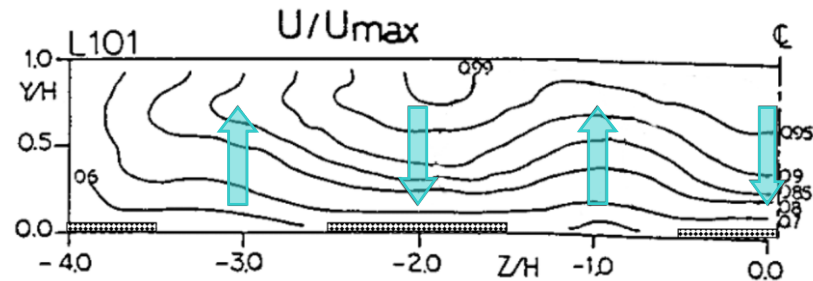
並列らせん流の強制的発生

- 粗面と滑面を横断方向に配置

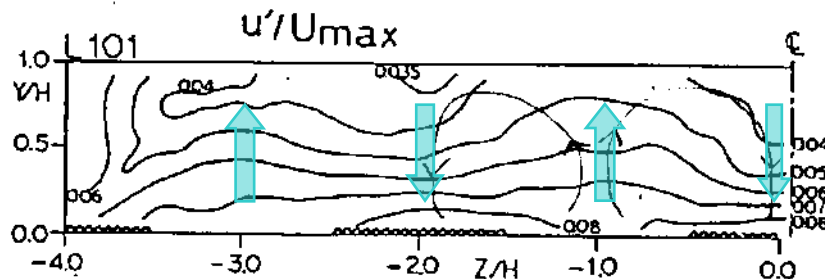
▪ 二次流：粗面上で上昇流，滑面上で下降流



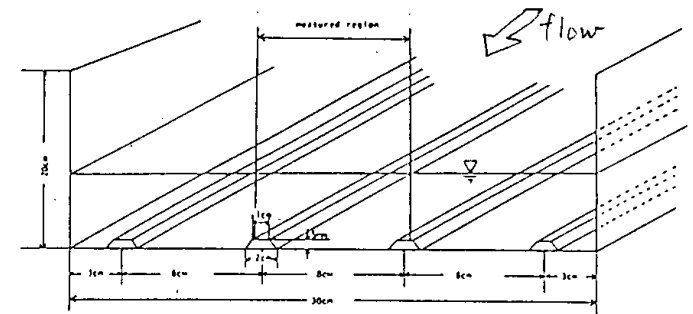
▪ 主流速：粗面上が高速，滑面上が低速



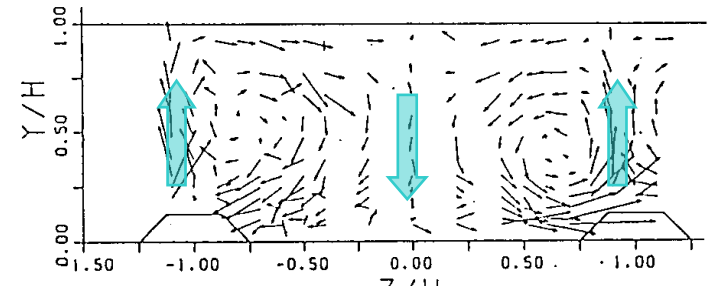
▪ 乱れ強度：粗面上が小，滑面上が大



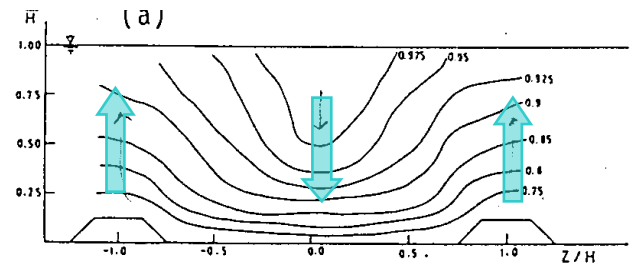
- 縦筋状の突起を配置



▪ 二次流：凸部で上昇流，平坦部で下降流



▪ 主流速：凸部で低速，平坦部で高速



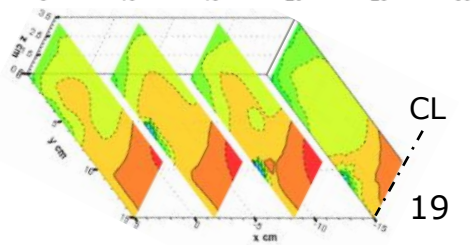
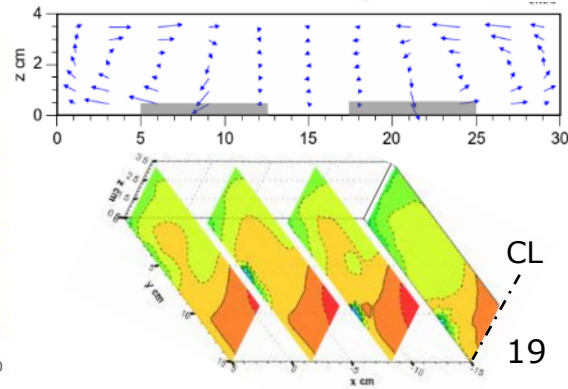
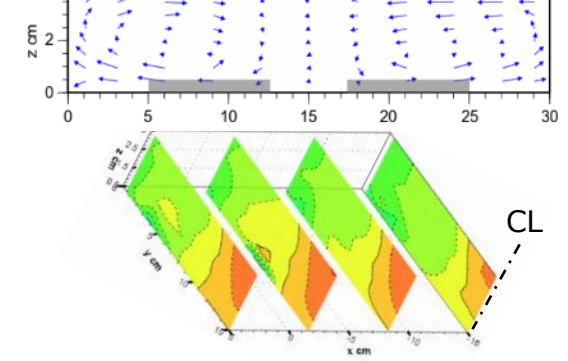
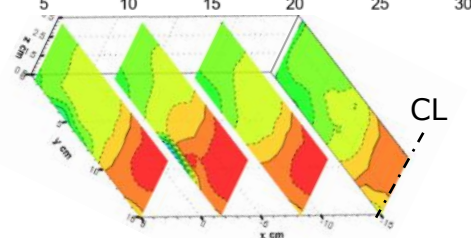
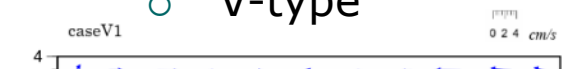
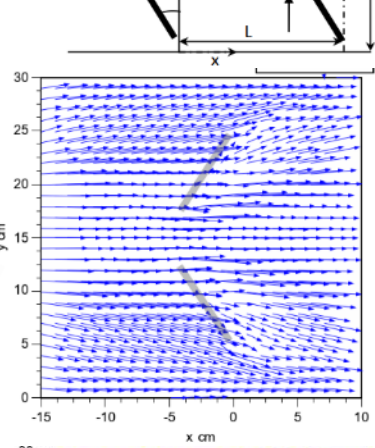
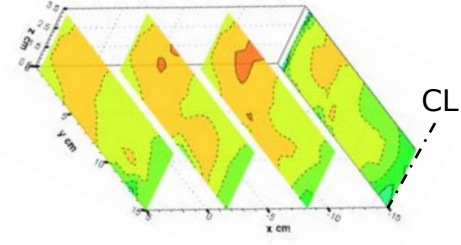
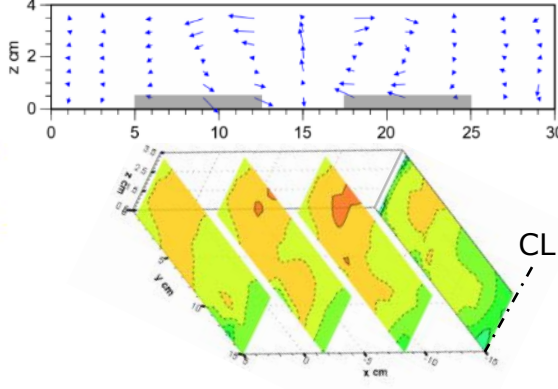
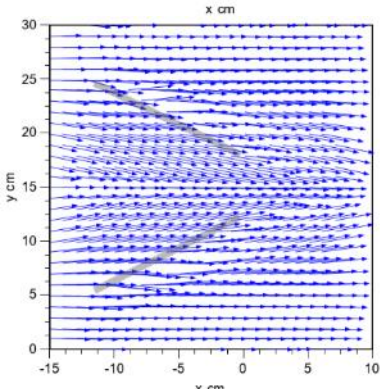
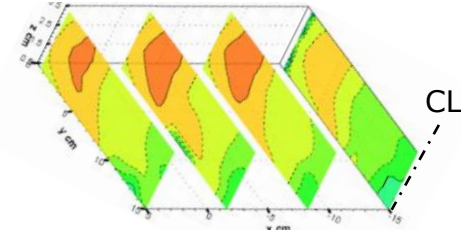
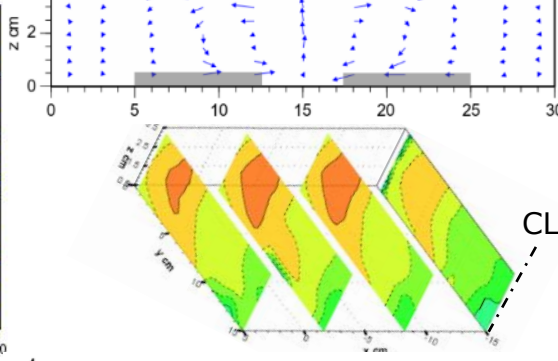
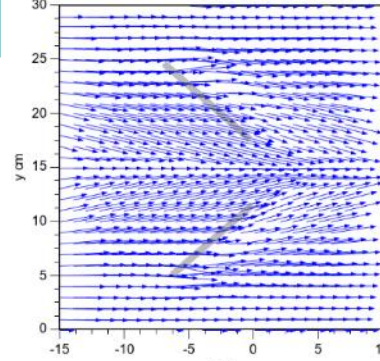
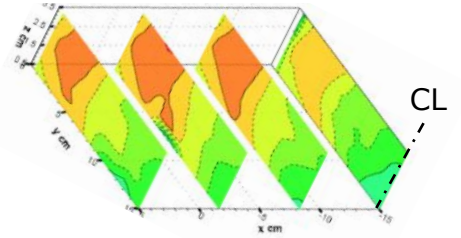
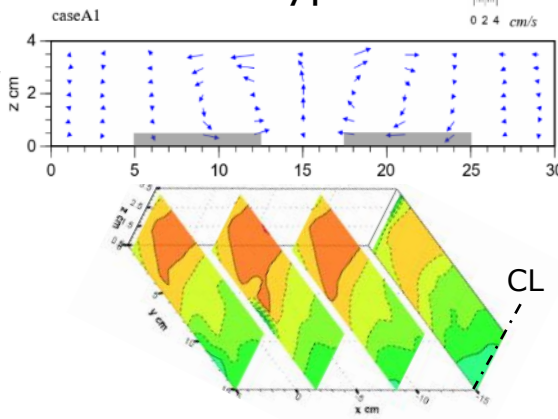
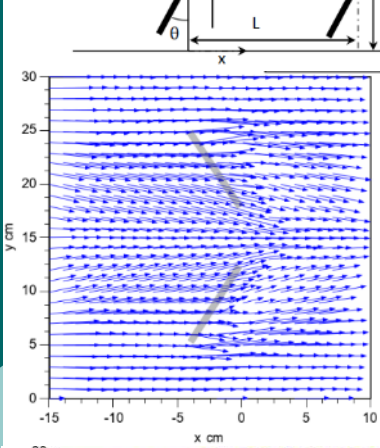
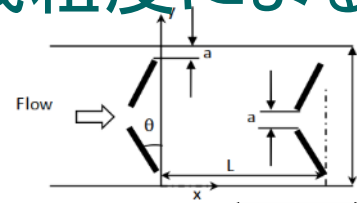
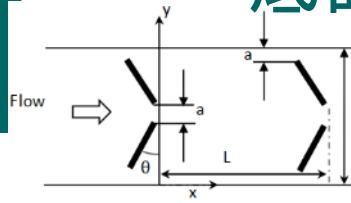
⑤ 底面に設置した斜め棧粗度による二次流の生成

$L/k=40$ ($k=5\text{mm}$)

○ A-type

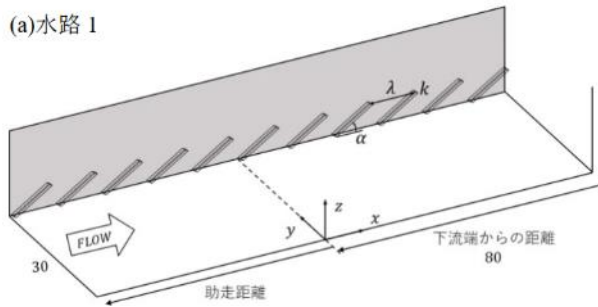
画像計測法 (PIV)

○ V-type



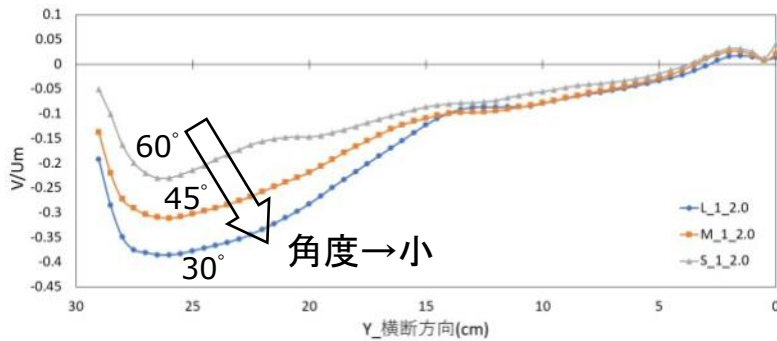
⑥ 側面に設置した斜め棧粗度による二次流の生成

(a)水路 1

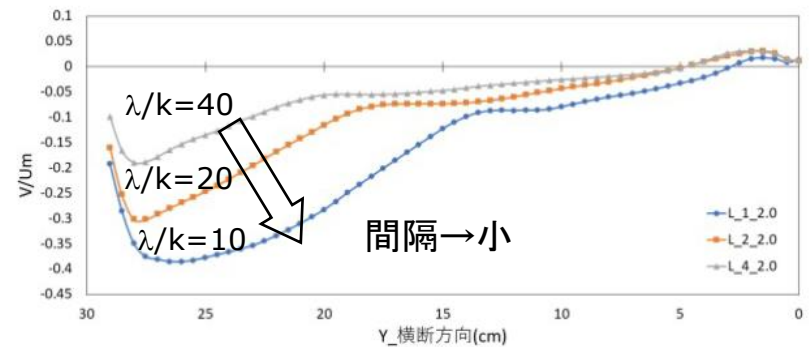


Case	設置角度 α (°)	設置間隔 λ (cm)	助走距離 L(m)	棧粗度高さ k(cm)
M_1_2.0	45.0	10.0	2.0	1.0
S_1_2.0	60.0	10.0	2.0	1.0
L_1_2.0	30.0	10.0	2.0	1.0
L_1_1.6	30.0	10.0	1.6	1.0
L_1_1.2	30.0	10.0	1.2	1.0
L_2_2.0	30.0	20.0	2.0	1.0
L_4_2.0	30.0	40.0	2.0	1.0

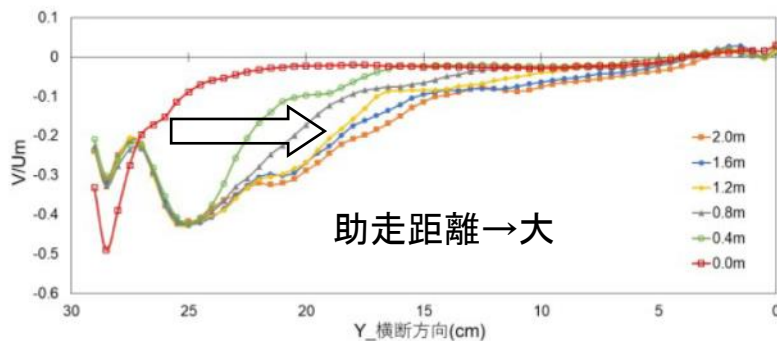
画像計測法 (PIV)



設置角度による流下方向平均横断流速



設置間隔による流下方向平均横断流速



助走距離による流下方向平均横断流速

- 最大化条件:
設置角度 30° が最大
設置間隔が粗度高さの10倍で最大(抵抗最大)
- 二次流の発達過程:
粗度間16区間程度でほぼ発達

湾曲部の流れ

○ 開水路湾曲部の流れ

- 幅水深比の小さい長方形断面開水路
- 台形断，複断面開水路湾曲部の流れ
- 湾曲部に置かれた樹木群の影響

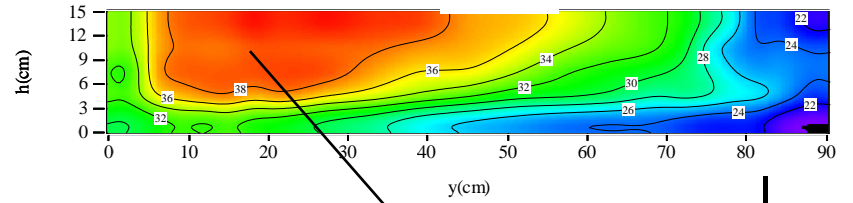
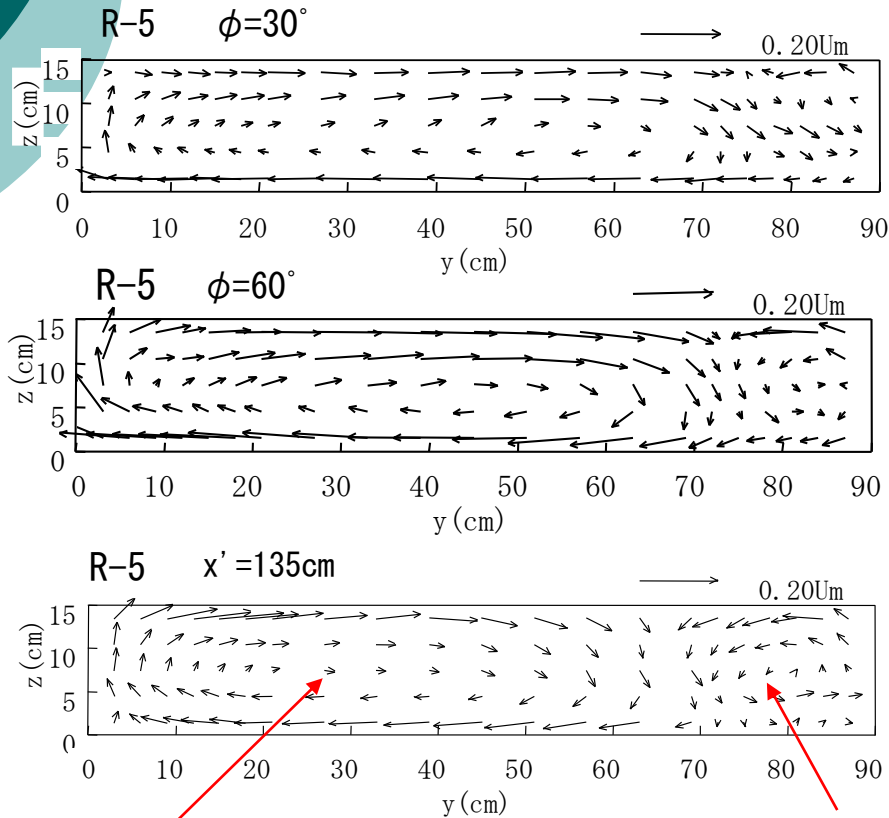
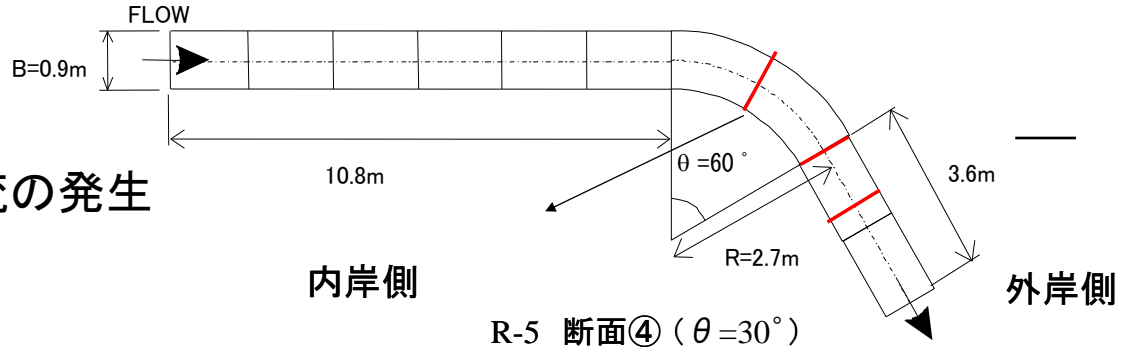
中小河川湾曲部の流れ
1998

湾曲部の洗掘制御+樹木
1999~2004

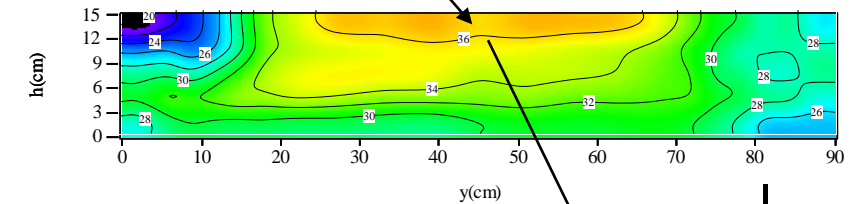
- ① 富永晃宏・長尾正志・千葉茂樹，幅水深比の小さな長方形断面開水路の湾曲部流れ構造に関する実験的研究，土木学会論文集，No.607/II-45，pp.19-28，1998.
- ② 富永晃宏・長尾正志・大沼保仁，台形断面開水路湾曲部の2次流構造，水工学論文集，第42巻，pp.895-900，1998.
- ③ 富永晃宏・長尾正志，複断面開水路湾曲部の流れ構造，応用力学論文集，vol.1，pp.693-700，1998.
- ④ 富永晃宏・長尾正志・木村聡洋，開水路湾曲部における運動量輸送機構に及ぼす河道内樹木群の効果，応用力学論文集，vol.2，pp.637-644，1999.
- ⑤ 富永晃宏・青木健太郎・木村聡洋，円柱粗度による湾曲部河床変動の制御に関する実験的研究，水工学論文集，第45巻，pp.769-774，2001.
- ⑥ A. Tominaga and K. Naito, Control of Flow and Bed Evolution in Curved Open Channels With Stick Roughness, Proc. of 30th IAHR Congress, C-2, 63-70, 2003.

① 幅の狭い開水路湾曲部の流れ

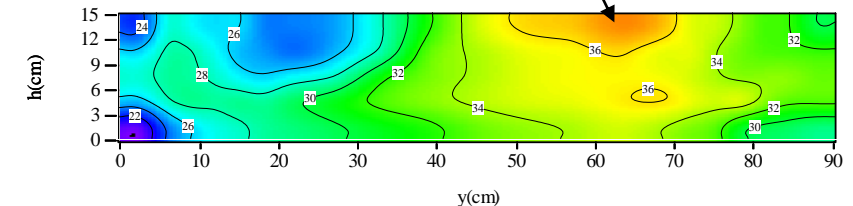
- Prandtlの第1種二次流の発生
- 外岸渦の発生が特徴



R-5 断面⑥ (湾曲出口 $\theta=60^\circ$)



R-5 断面⑨ (湾曲下流135cm)

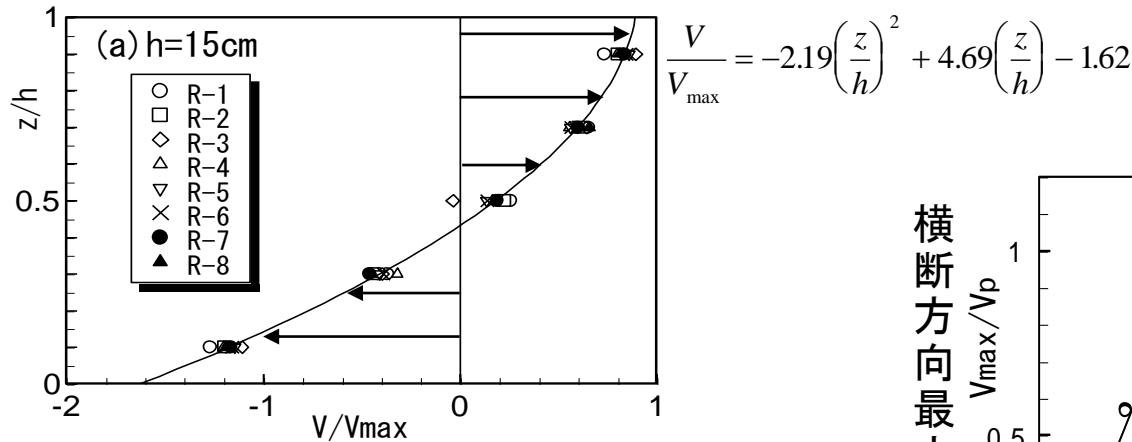


湾曲渦 第2種二次流の影響? 外岸渦

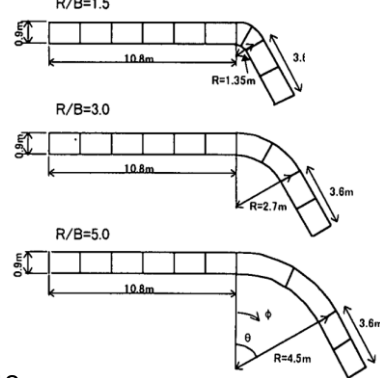
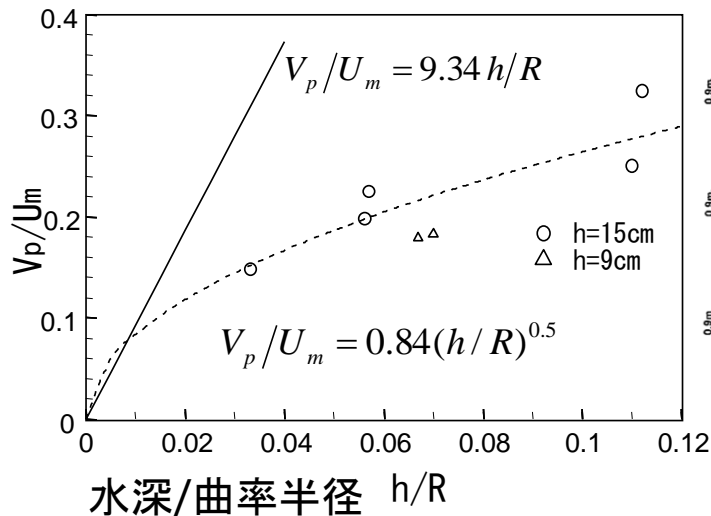
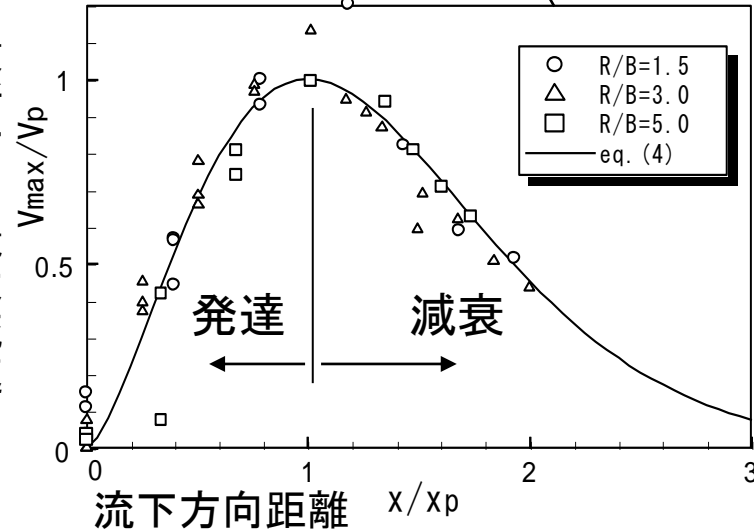
①

二次流の強度及び発達・減衰過程

横断方向流速の鉛直分布



横断方向最大流速



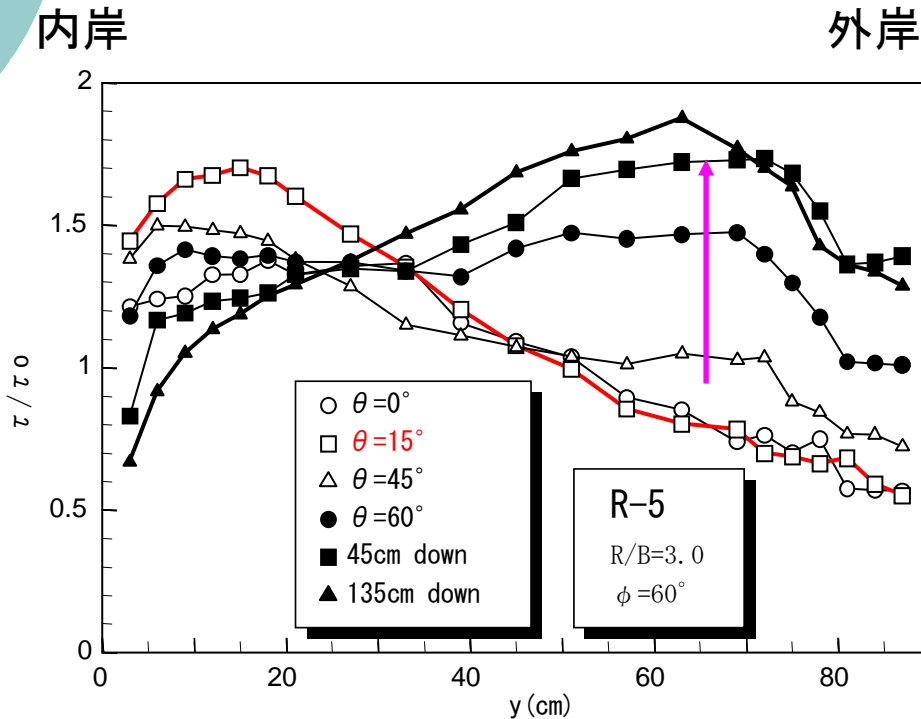
$$\frac{V_{\max}}{V_p} = \left(\frac{x}{x_p}\right)^{3/2} \exp\left\{1 - \left(\frac{x}{x_p}\right)^{3/2}\right\}$$

○ 経験式を求めてみた

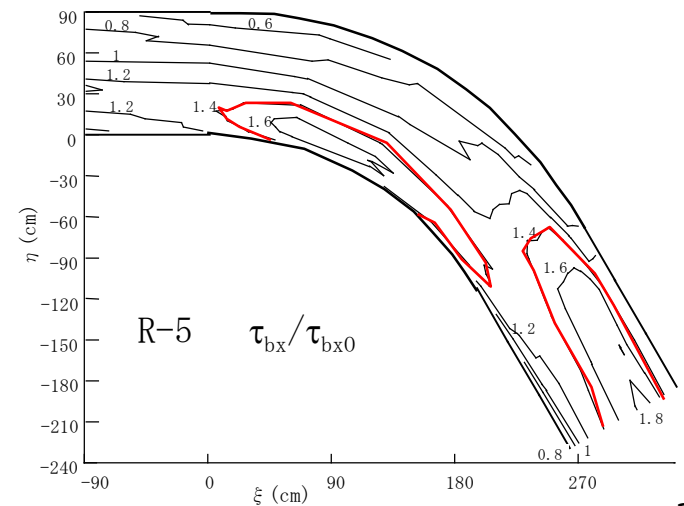
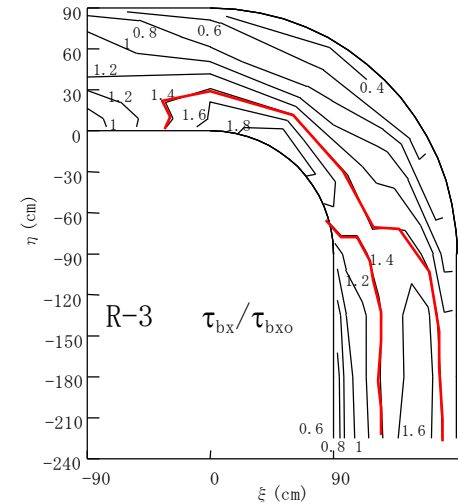
①

底面せん断応力分布の変化過程

- $\theta=15^\circ$ までは内岸が大きい
- $\theta=45^\circ$ から湾曲出口を経て下流直線部にかけて著しく増大
- このせん断応力の増加と二次流による輸送によって外岸洗掘が進行



底面せん断応力横断分布

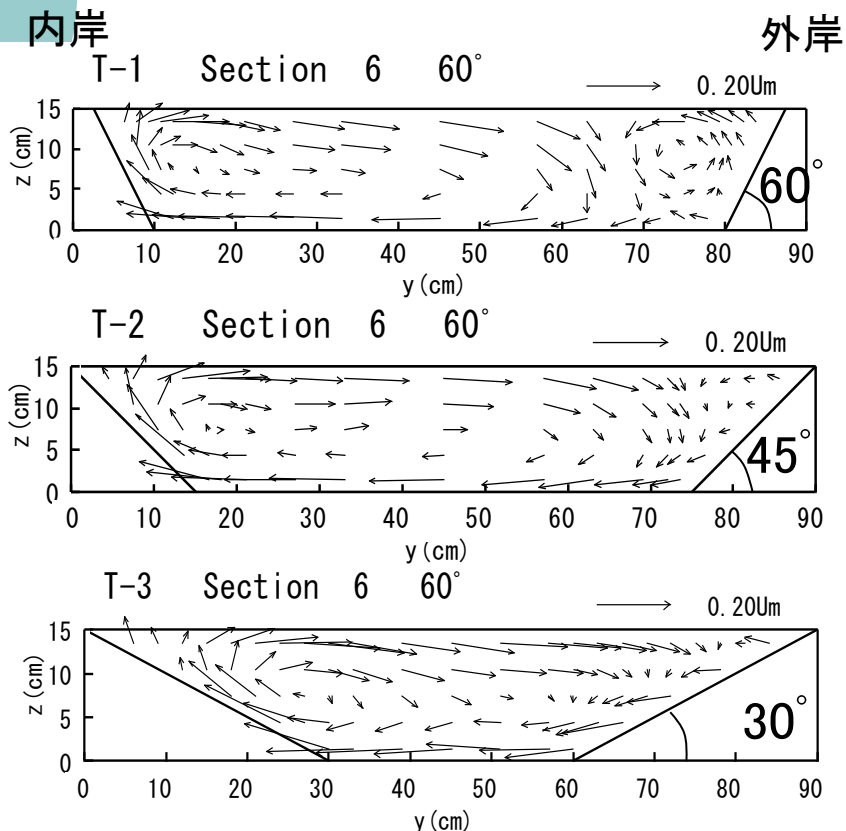


②

台形断面開水路湾曲部の流れ

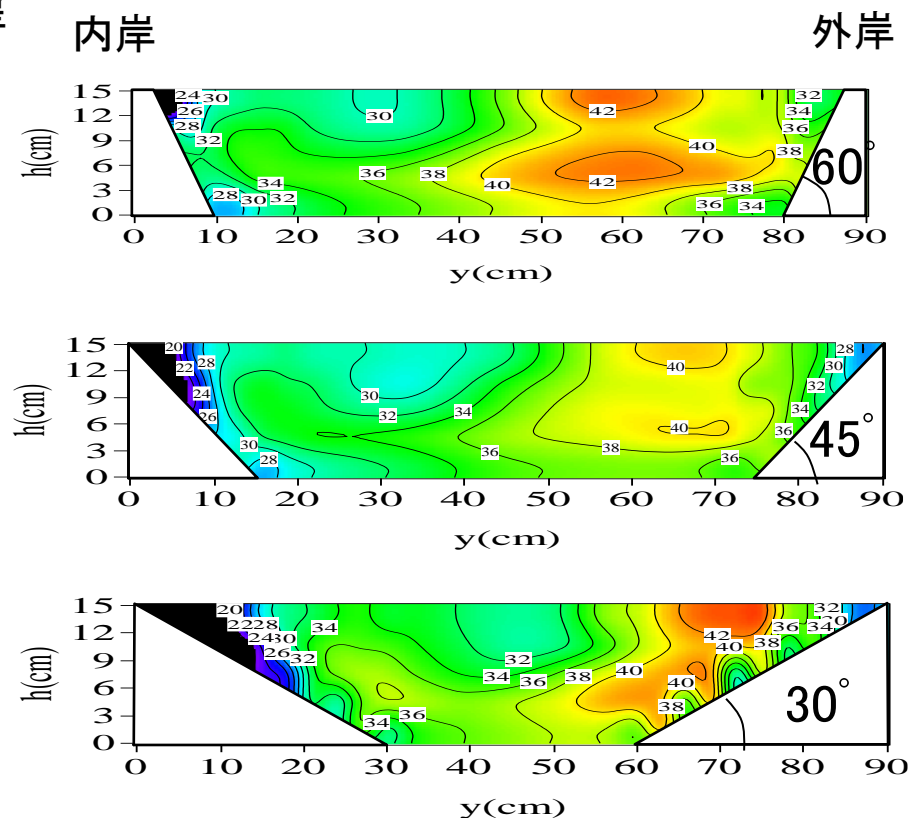
二次流構造の変化

(湾曲出口60°)

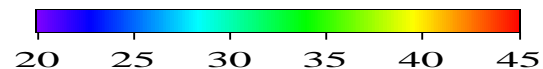


主流速分布の変化

(湾曲下流135cm)



○ 外岸渦が縮小→消滅



③ 複断面開水路湾曲部の流れ

二次流構造の変化

主流速分布の変化

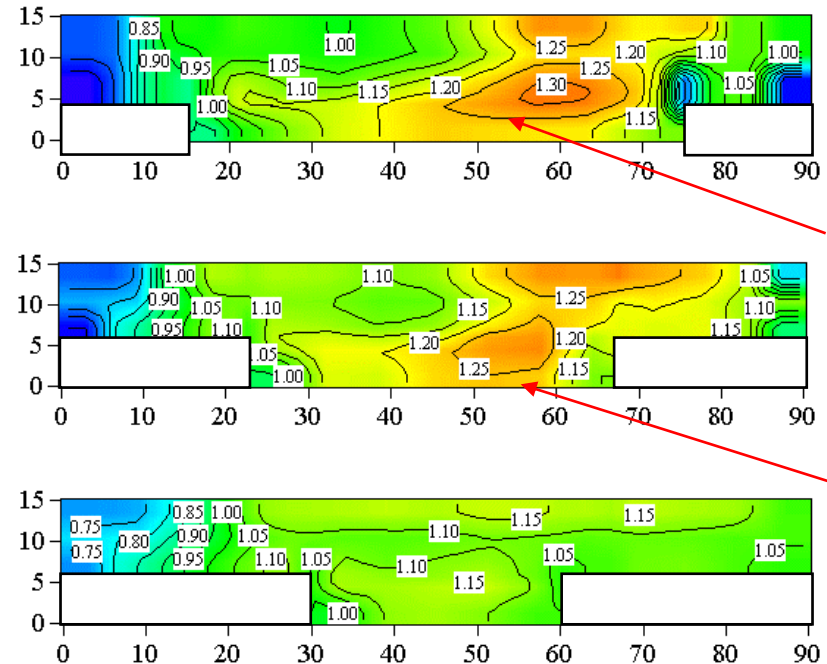
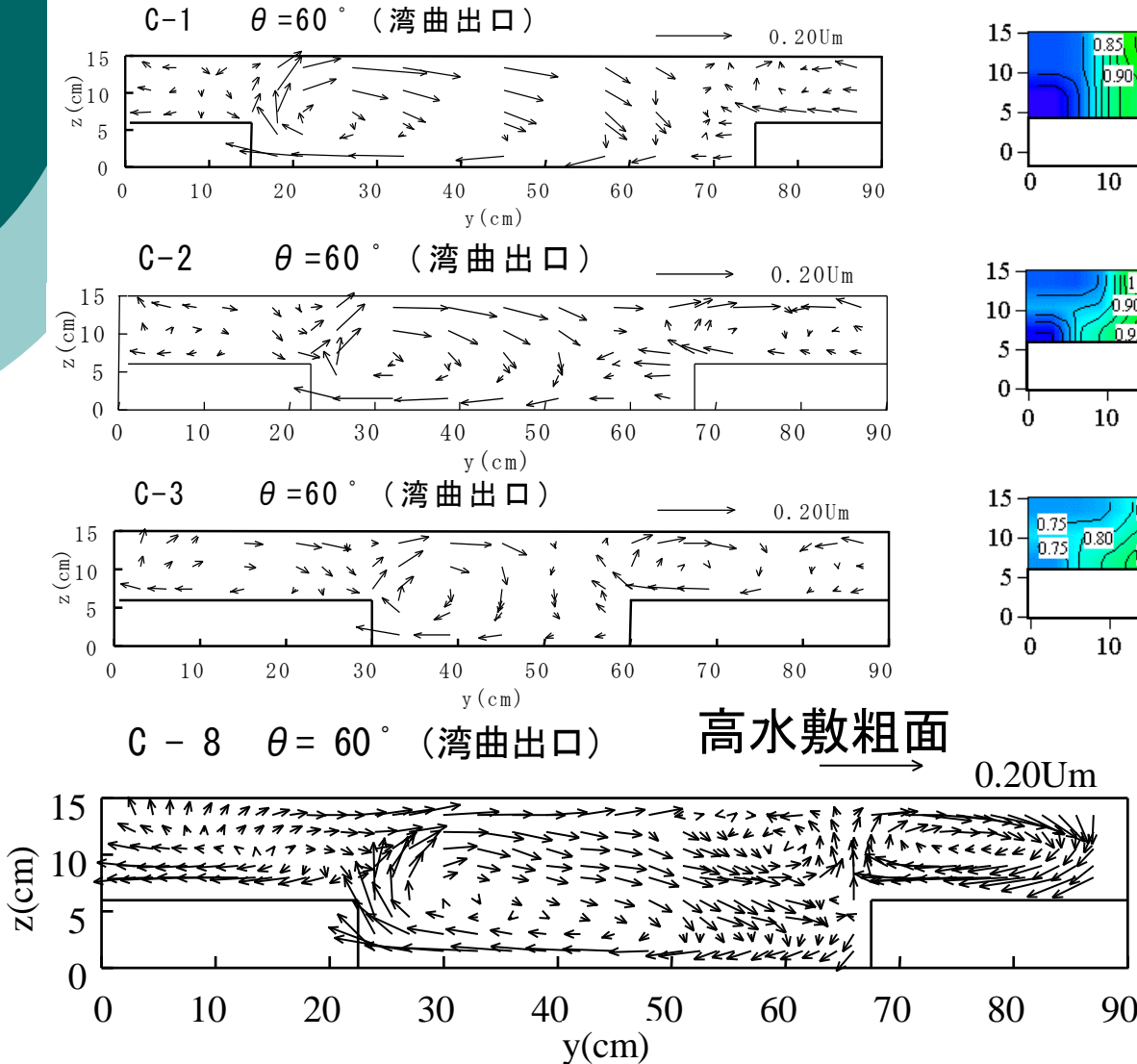
内岸

(湾曲出口60°)

外岸

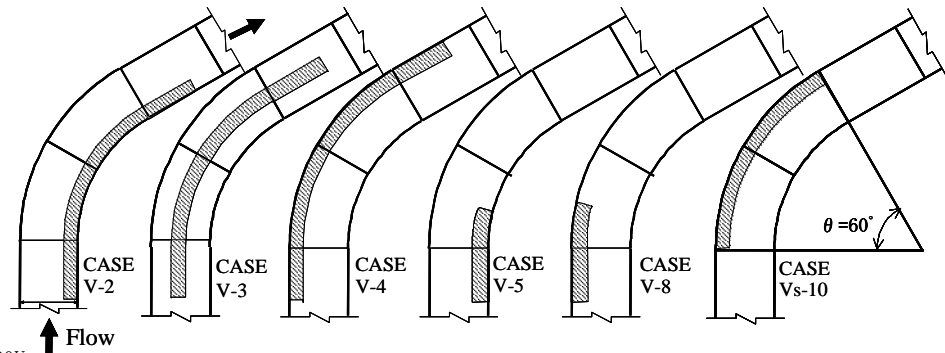
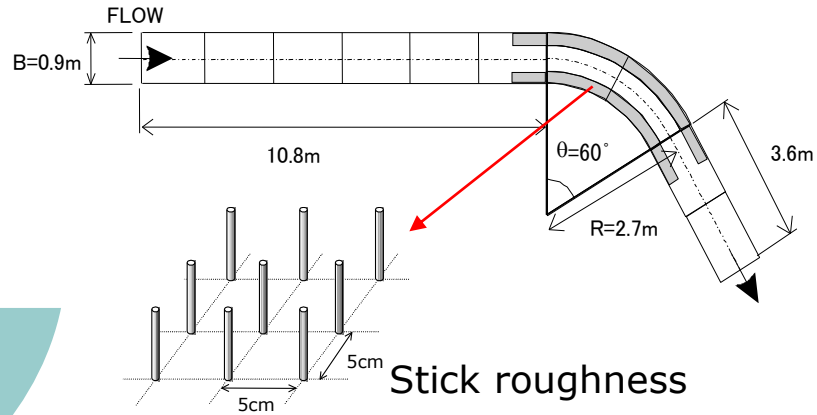
内岸

外岸



- 高水敷, 低水路のそれぞれで渦が形成
- 低水路底面が高速に

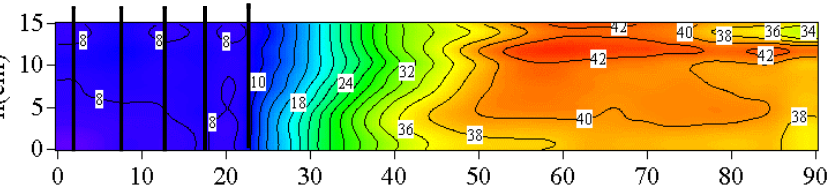
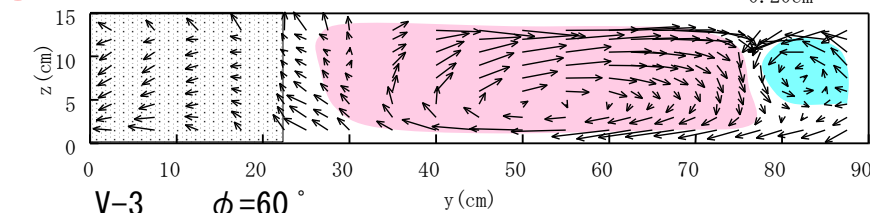
湾曲部の植生の影響



⑥

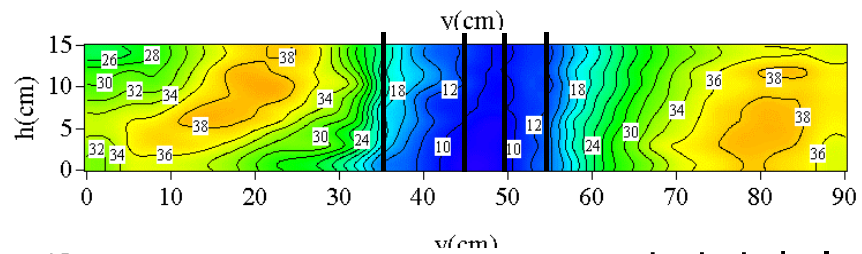
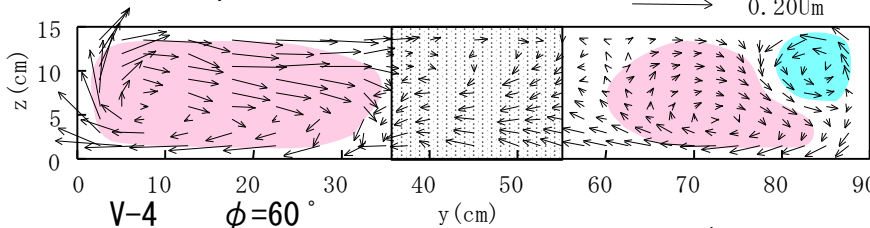
内岸

V-2 $\phi=60^\circ$



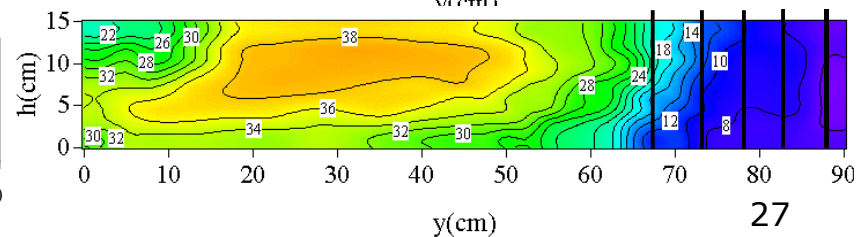
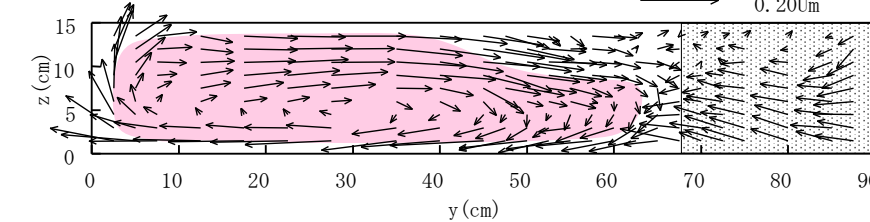
中央

V-3 $\phi=60^\circ$



外岸

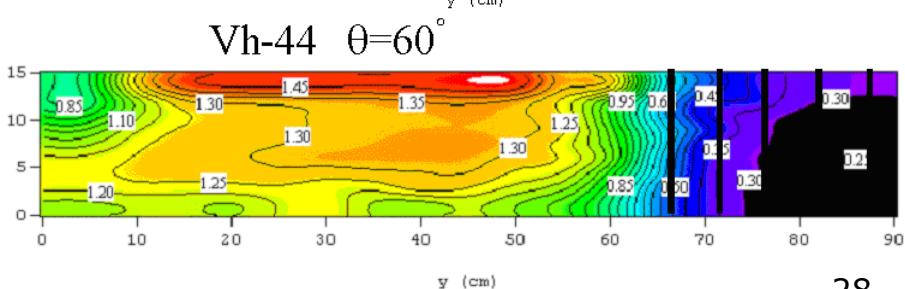
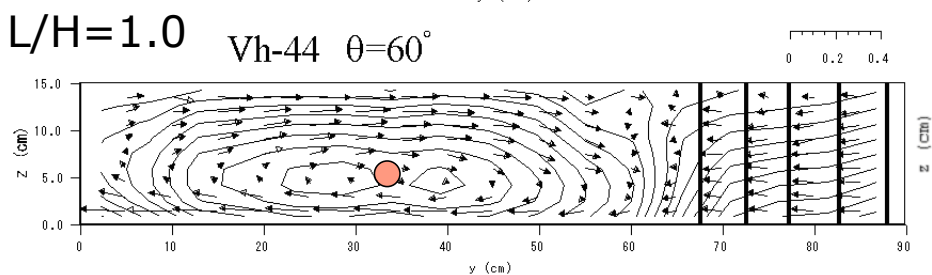
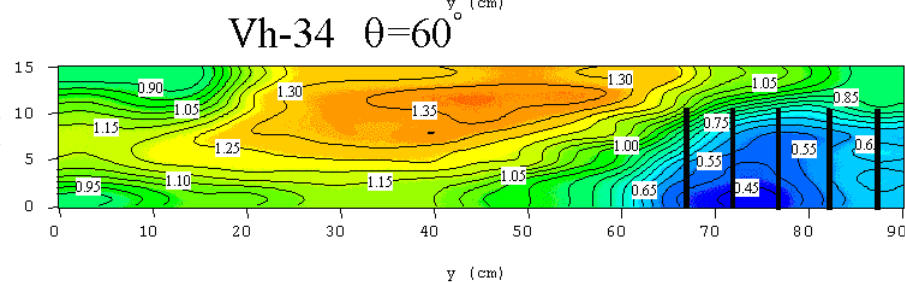
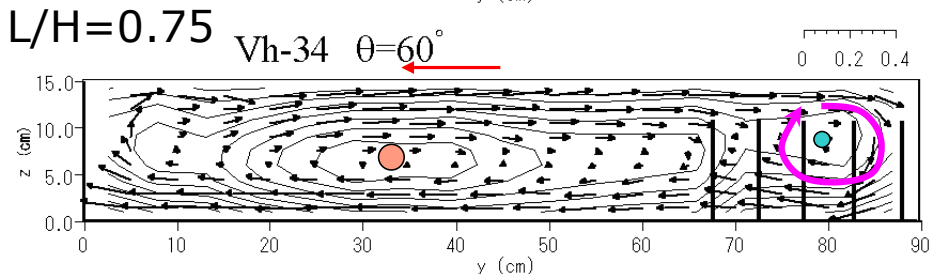
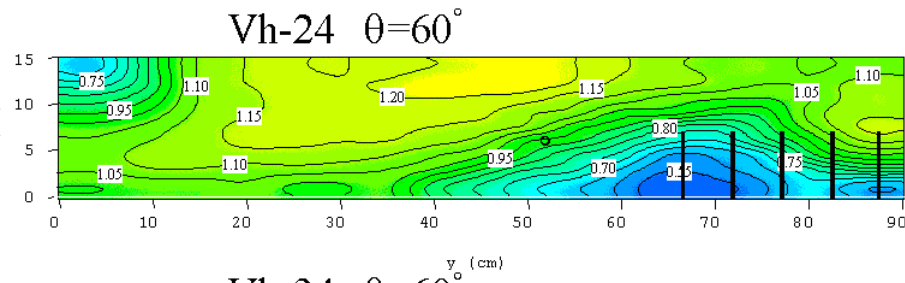
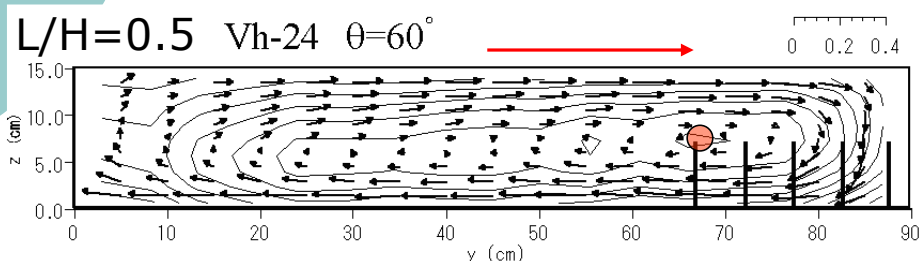
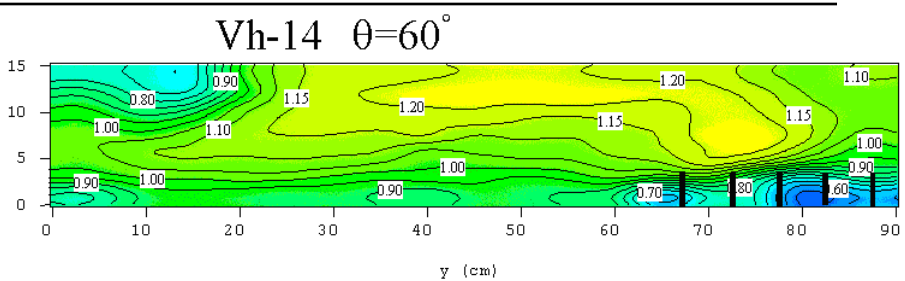
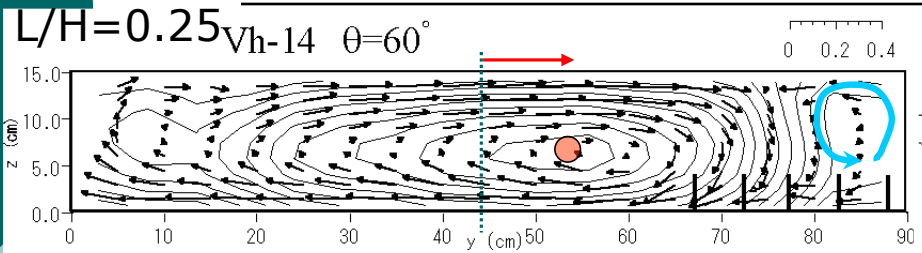
V-4 $\phi=60^\circ$



⑤, ⑦ 外岸の杭群の高さを変えた場合

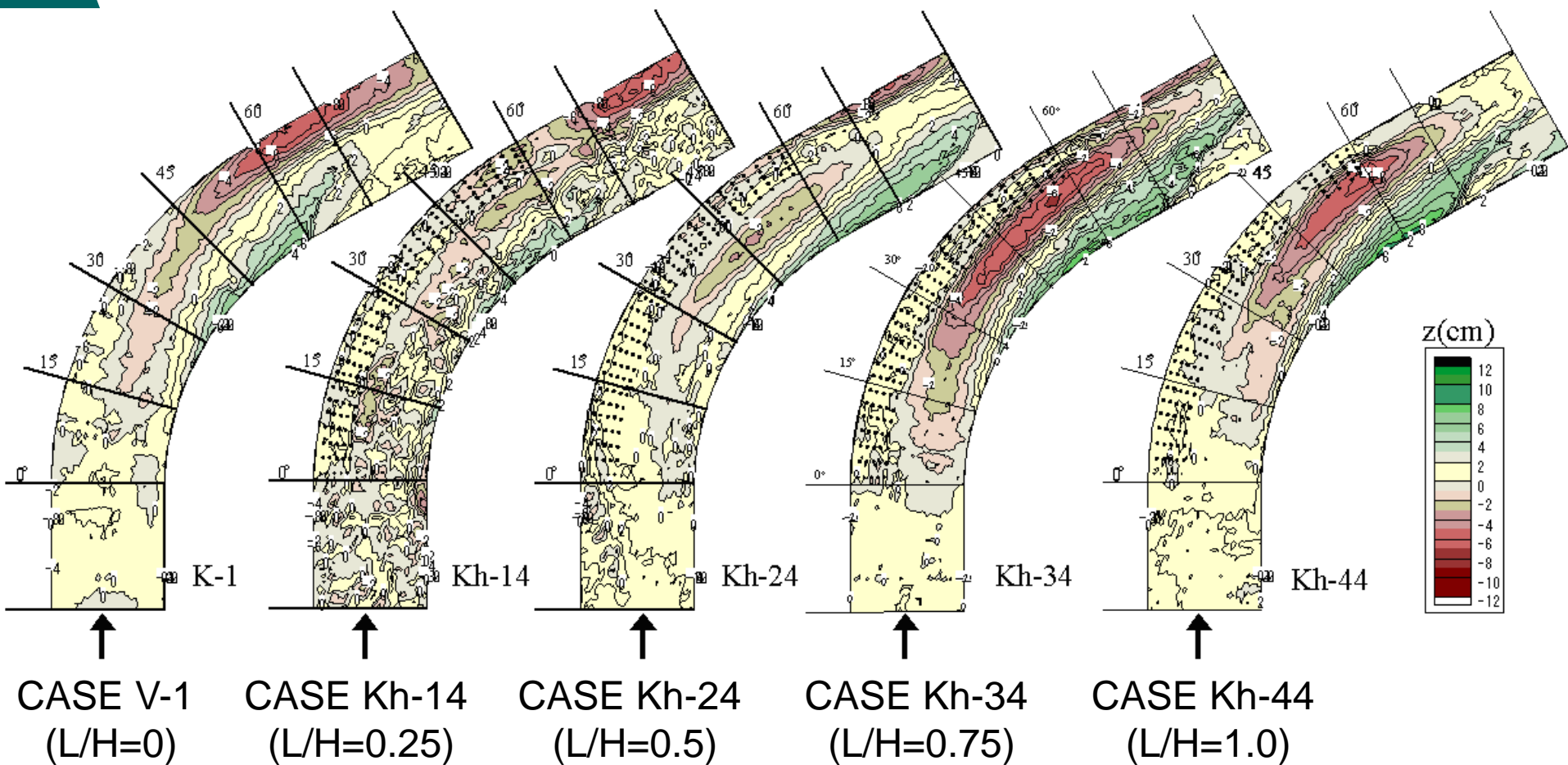
- 外岸の湾曲部分全体に杭群を設置
- 杭高さ／水深: $L/H=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$

電磁流速計



⑤, ⑦

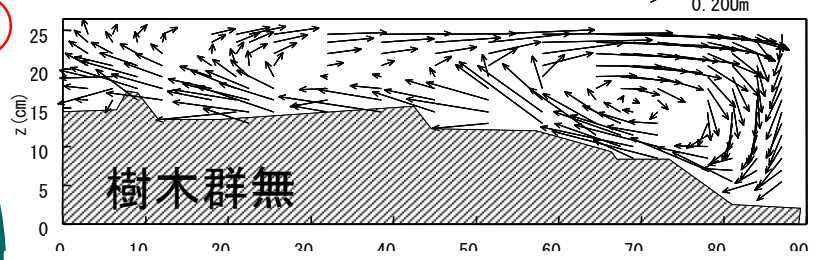
河床高コンター(通水5時間後)



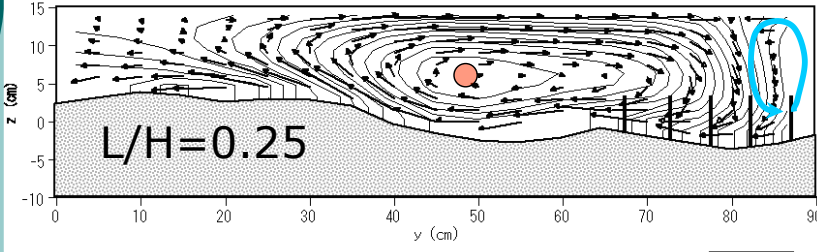
- 外岸の樹木群は外岸の洗掘を抑制するが、樹木群高さが高いとき、樹木群横がかなり洗掘される
- 樹木群高さが低いとき樹木群内が若干洗掘されるが、全体的に洗掘が抑制される

7

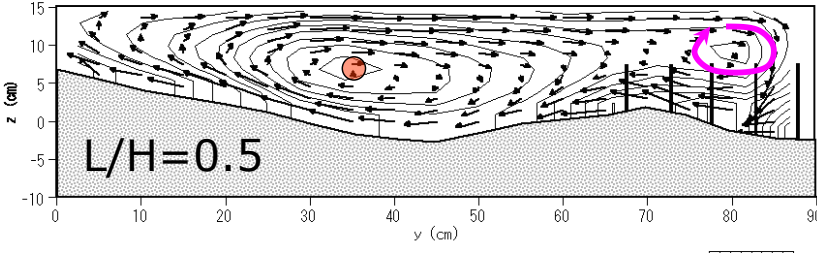
K-1 $\phi=60^\circ$



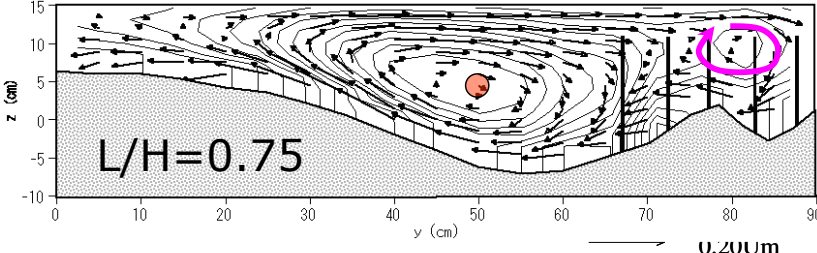
Kh-14 $\theta=60^\circ$



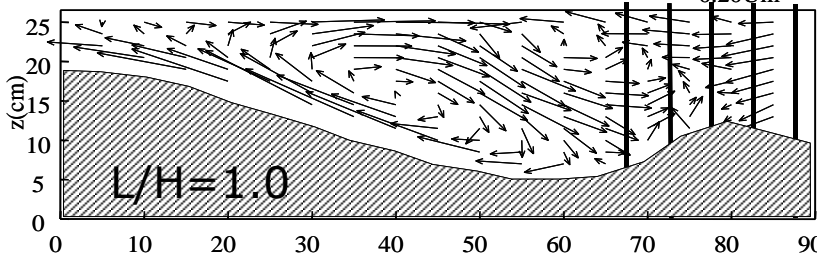
Kh-24 $\theta=60^\circ$



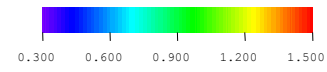
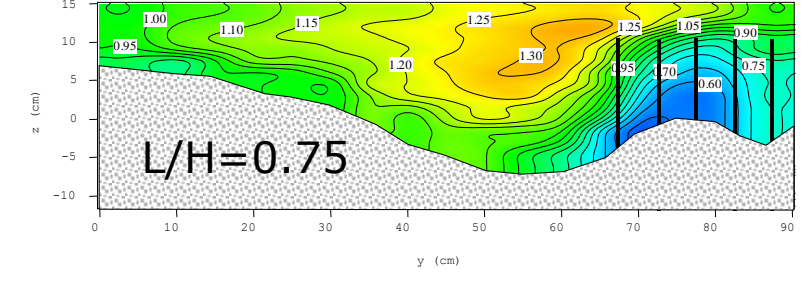
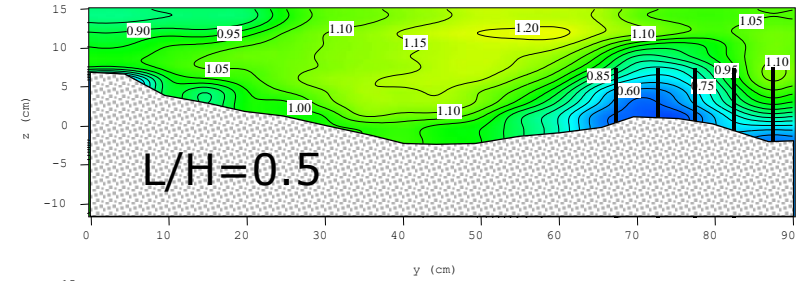
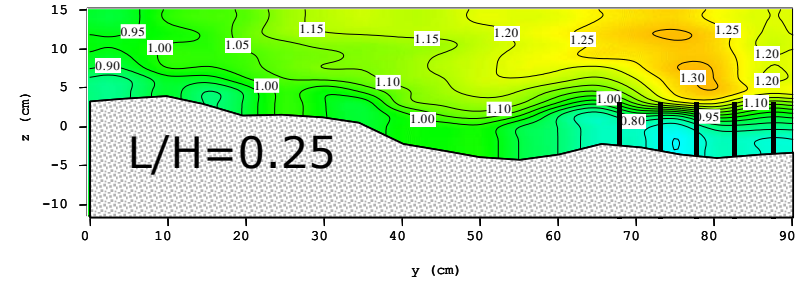
Kh-34 $\theta=60^\circ$



L/H=1.0



河床変動後の二次流と主流速



電磁流速計

越流型水制の流れ

○ 水制周辺の水理

● 越流型水制

- 越流型水制の流れ構造
- 水制高さ、間隔の影響
- 設置角度の影響

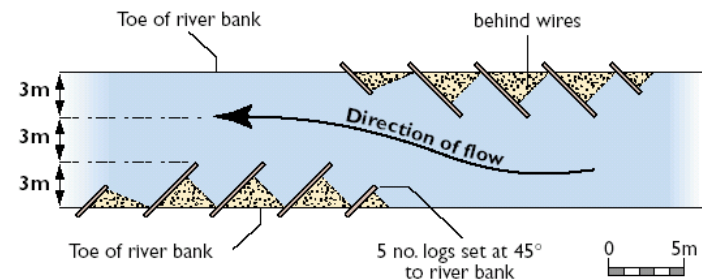
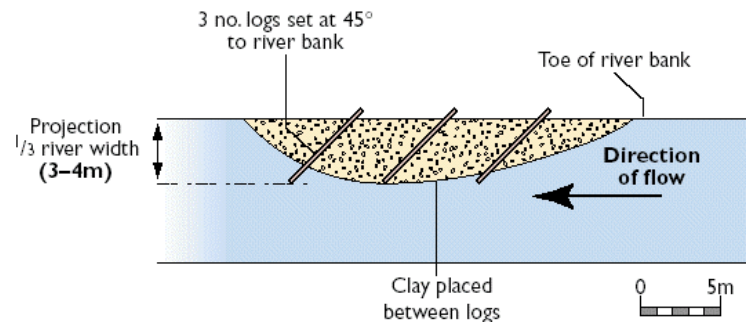
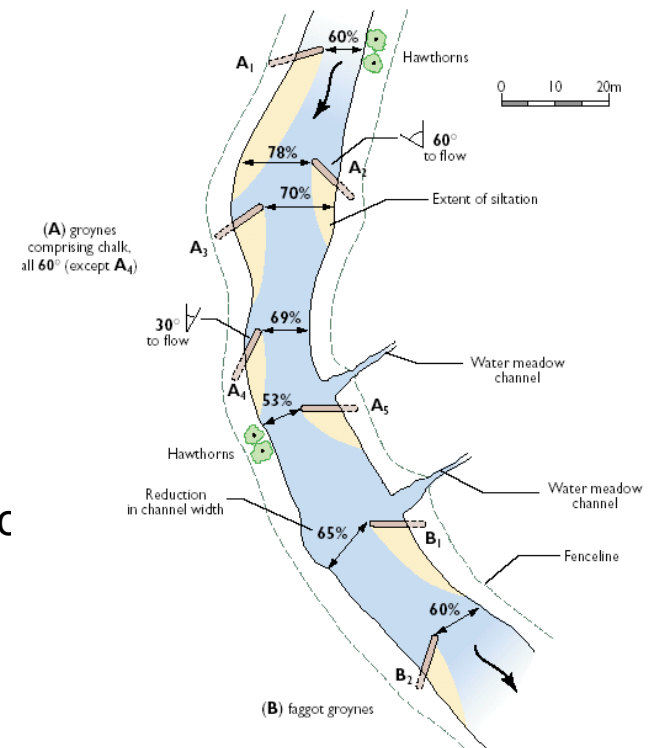
PIVによる実験対象-水制が面白い
2000~2004

- ① 富永晃宏・中野義郎・藤田享良，越流型水制域内の流れ構造の可視化解析，水工学論文集，第44巻，pp.1041-1046，2000.
- ② 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・長坂剛，越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響，応用力学論文集，vol.3，pp.805-812，2000.
- ③ 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎，斜め越流型水制周辺の流れ構造のPIV解析，水工学論文集，第45巻，pp.379-384，2001.
- ④ 富永晃宏・井嶋康二，越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果，水工学論文集，第46巻，475-480，2002.
- ⑤ 富永晃宏・田本典秀，越流型水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果，水工学論文集，Vol.48，805-810，2004.
- ⑥ 富永晃宏・中居毅・内藤健・中村尚子，開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響，水工学論文集，Vol.48，547-552，2004.
- ⑦ 富永晃宏・大島昌志・鄭載勳・田本典秀，越流型水制域内の流れ構造に及ぼす水制断面形状の影響，応用力学論文集，Vol.7，1069-1076，2004.
- ⑧ 鄭載勳・富永晃宏，高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造，水工学論文集，vol.53，pp.913-918，2009.

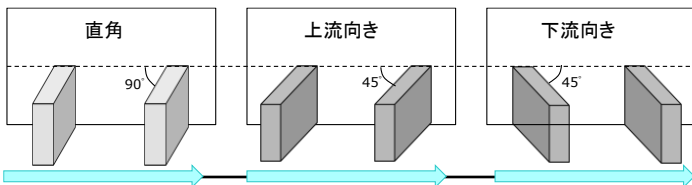
河川復元マニュアル(英国)より River Restoration Manual

RRC(River Restoration Centre, UK)

- Restoring meanders to straightened rivers
(直線河道の蛇行復元)
- Enhancing redundant river channels
(不要な河道の改善)
- Enhancing straightened river channels
(直線化された河道の改善)
- Revetting and supporting river banks
(河川堤防の護岸と支保工)
- Controlling river bed levels, water levels and flc
(河床高, 水位及び流れのコントロール)



③ 越流型における設置角度の影響を抽出

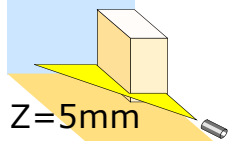
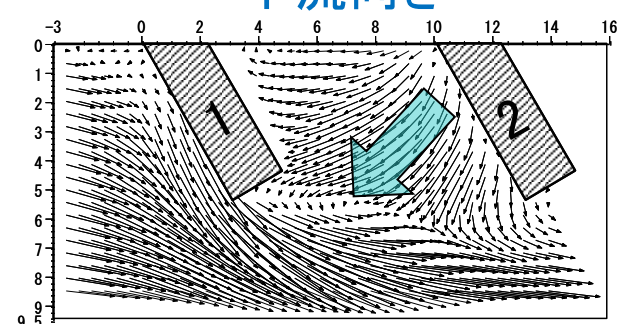
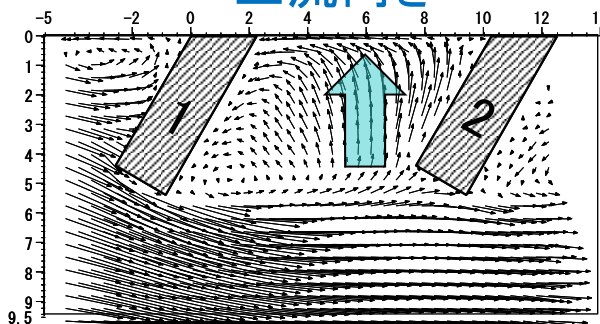
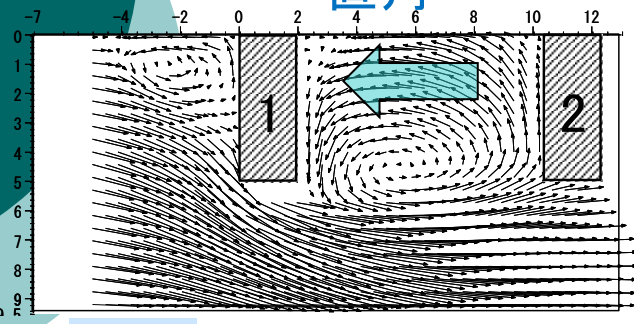


- 極端に縦横比が小さく、角度が大きい
- 水制前面からのはく離れと上面からのはく離れが同程度
- **越流型**での実験→3次元性の強い流れが発生

直角

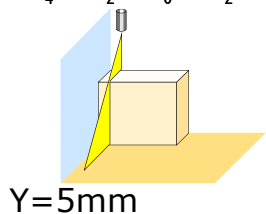
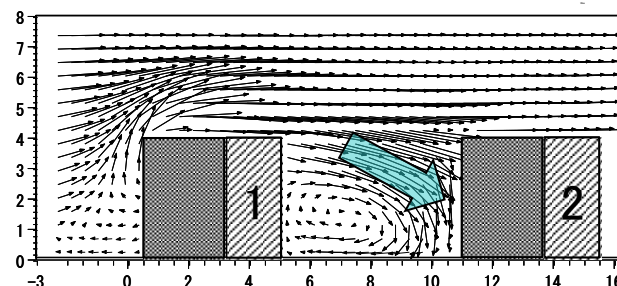
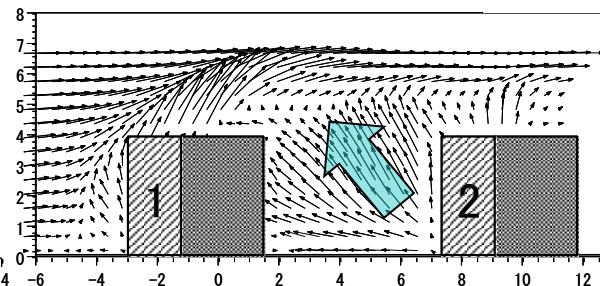
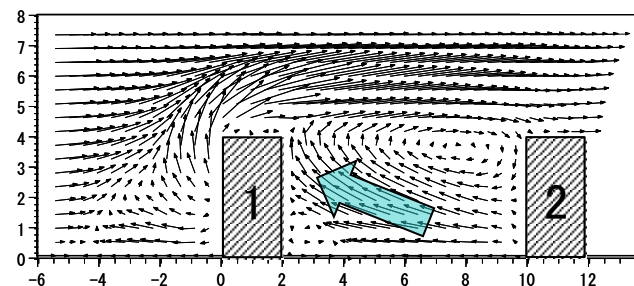
上流向き

下流向き



○ 底面付近の流れ

- 直角は平面渦, 下流から上流へ大きな流れ
- 上流向きは主流側から側岸へ
- 下流向きは下流水制から主流側へ



○ 側岸付近の流れ

- 直角は下流から上流へ少し上向きに
- 上流向きは下流から斜め上向きに
- 下流向きは下流へ下向きに

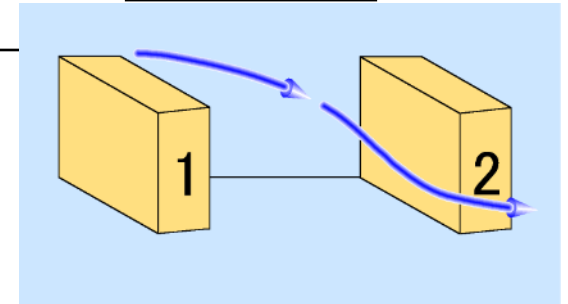
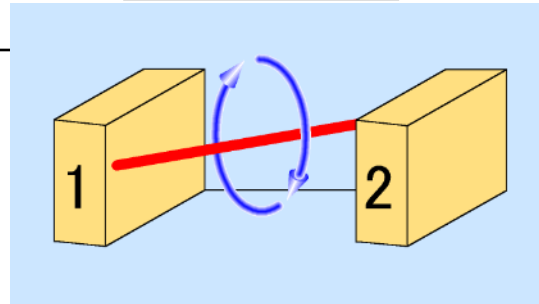
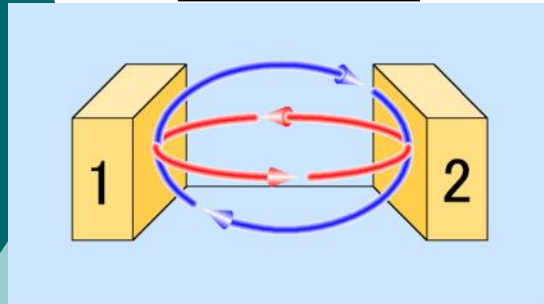
画像計測法 (PIV)

③ 設置角度による水制域の流れ構造パターン

直角水制

上流向水制

下流向水制



2R

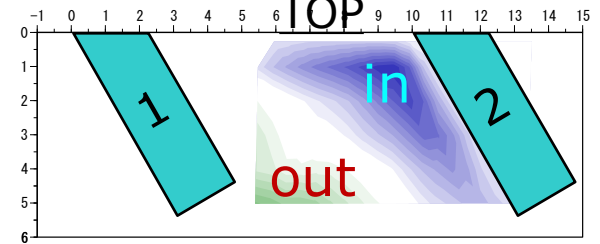
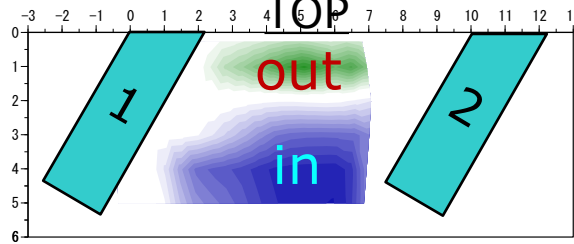
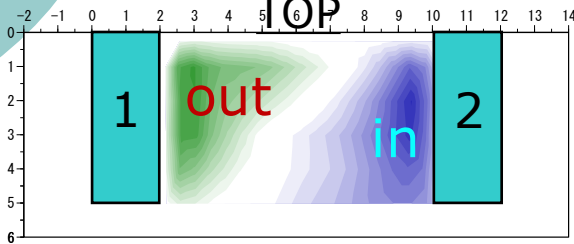
2U

2D

TOP

TOP

TOP



[unit:cm]

[unit:cm]

[unit:cm]

2R

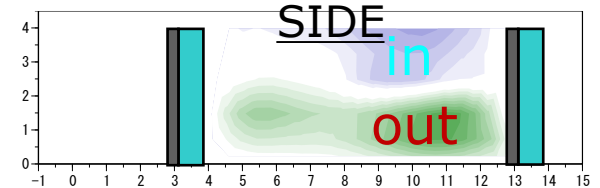
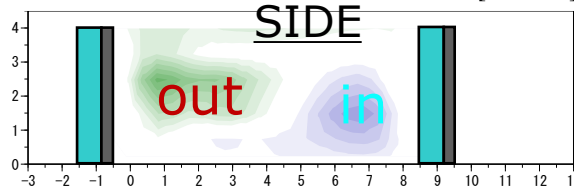
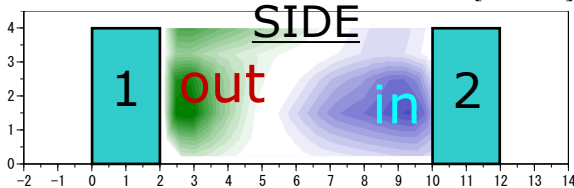
2U

2D

SIDE

SIDE

SIDE



[unit:cm]

[unit:cm]

[unit:cm]

横断渦と平面渦が合成された、傾斜した渦構造

底面付近で水制域側面から流入し、上面から流出する縦渦構造

水制域上面から流入し、底面では側面から流出する一方向流的特性

④

越流型の水制間隔が大きい場合

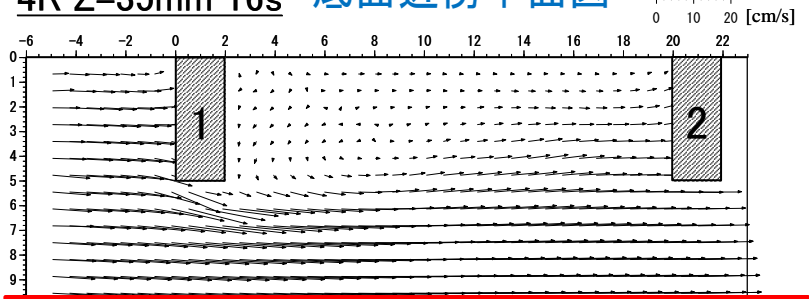
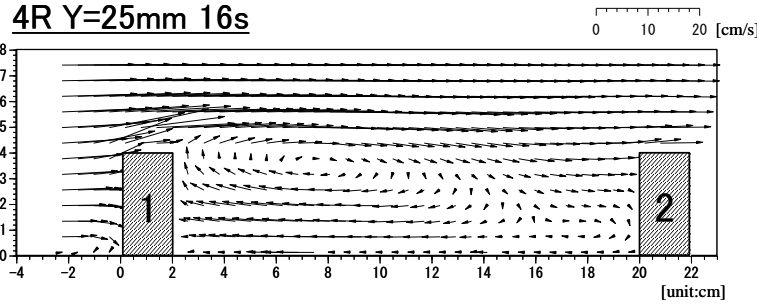
- 設置角度に特有の渦構造は水制間隔の変化によっても維持されている

S/L=4

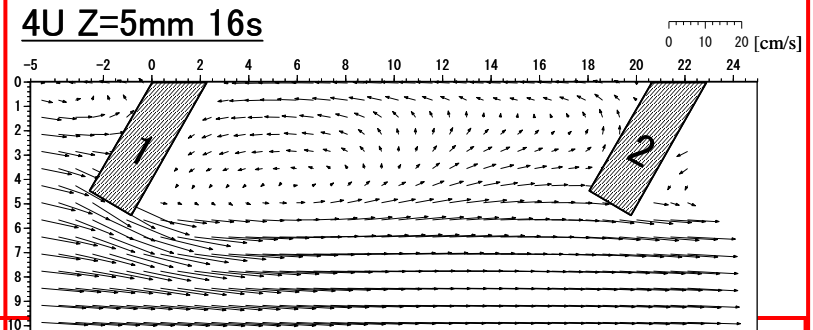
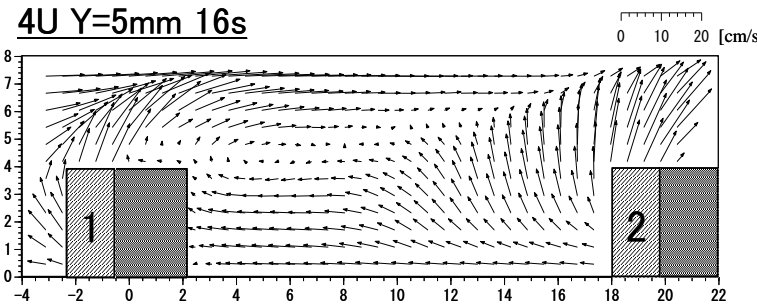
側岸近傍側面図

4R Z=35mm 16s 底面近傍平面図

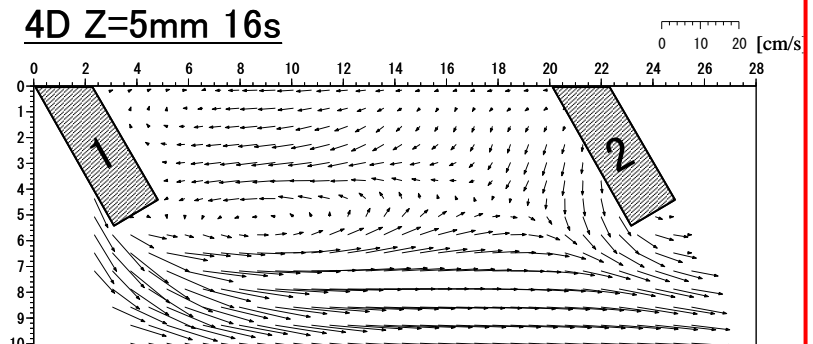
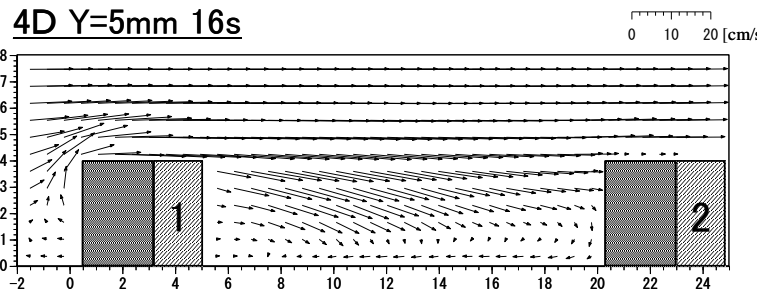
直角



上流向



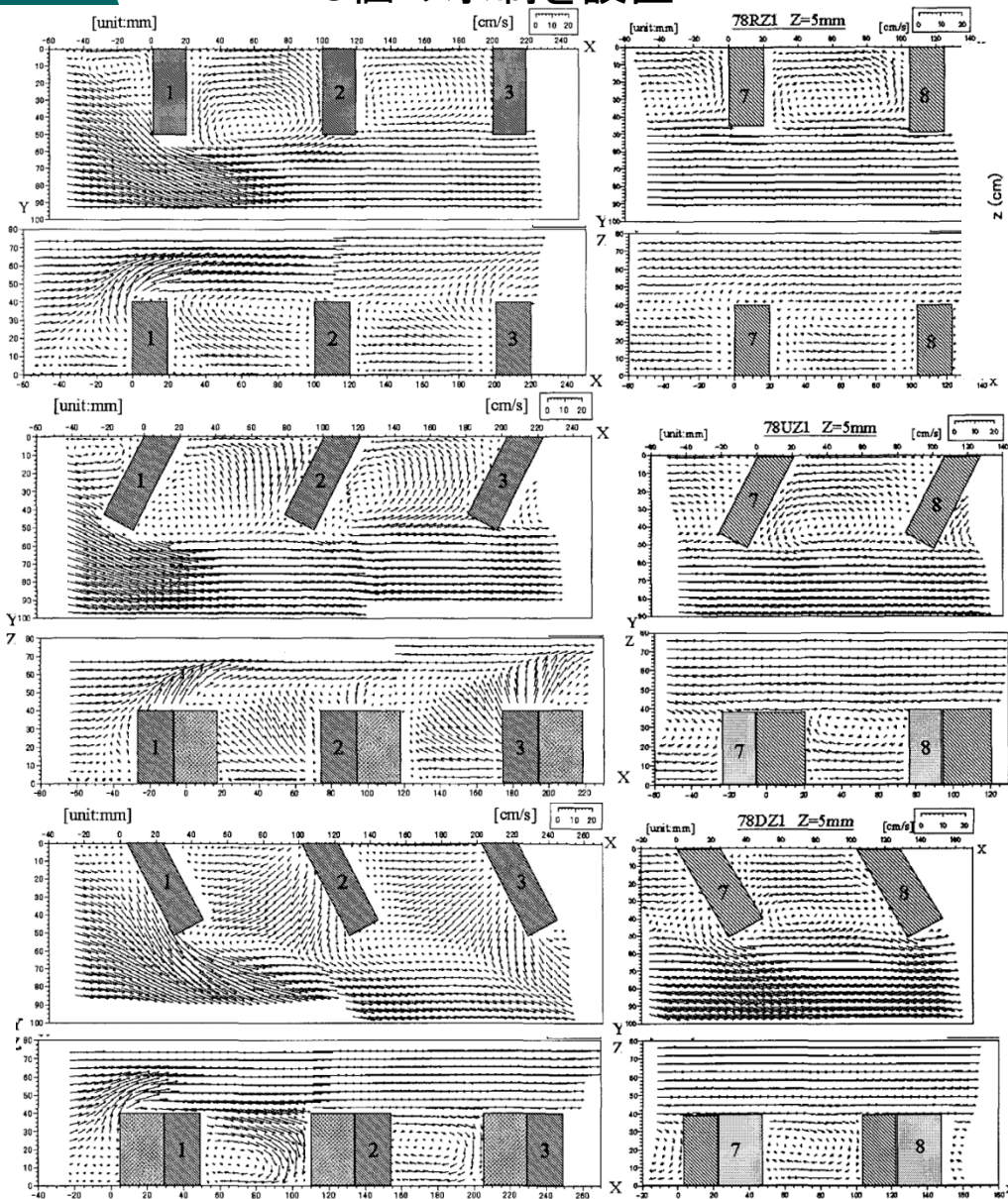
下流向



⑤

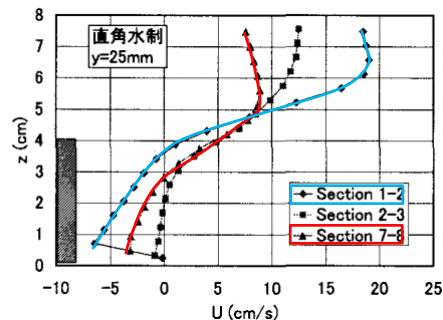
連続水制の場合

○ 8個の水制を設置

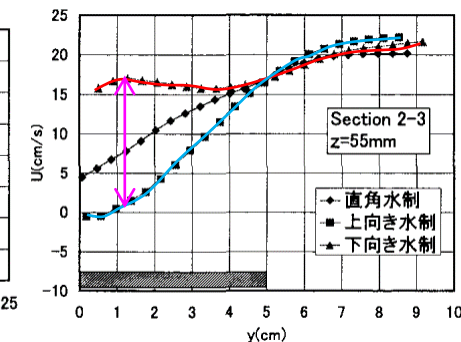
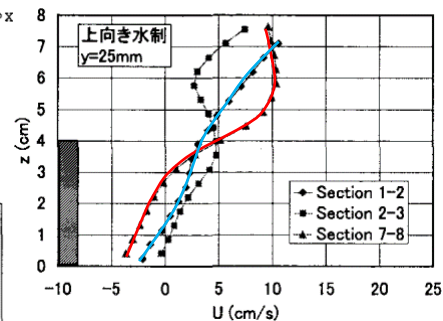
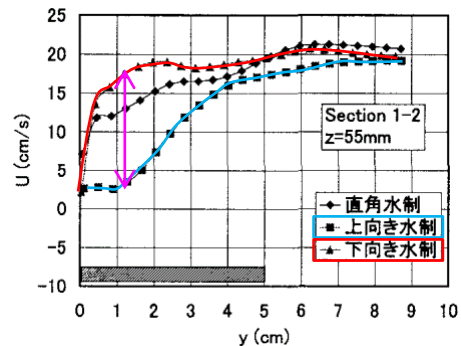


画像計測法(PIV)

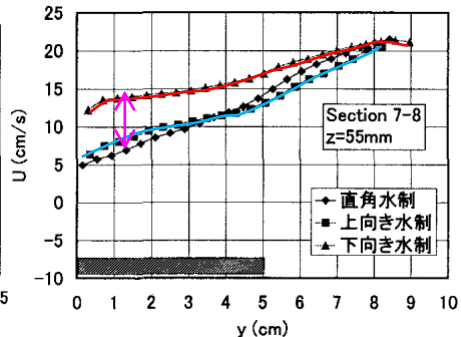
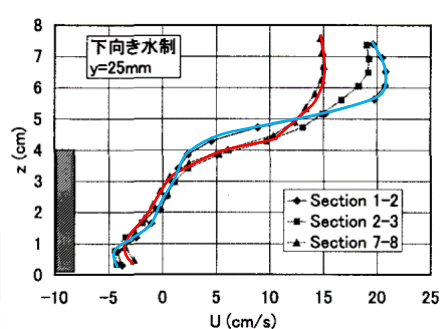
水制中央における主流速鉛直分布



水制上部における主流速横断分布



上向きでは上流側で水制上の流速が小さくなる

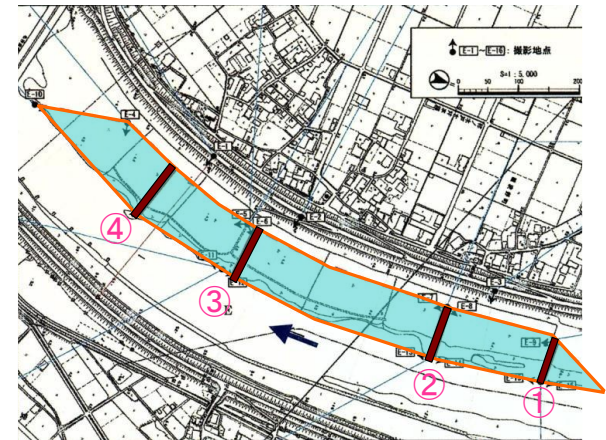


下向きでは下流まで水制上の流速が大きくなる

⑧

高水敷に現れたケレップ水制（揖斐川）

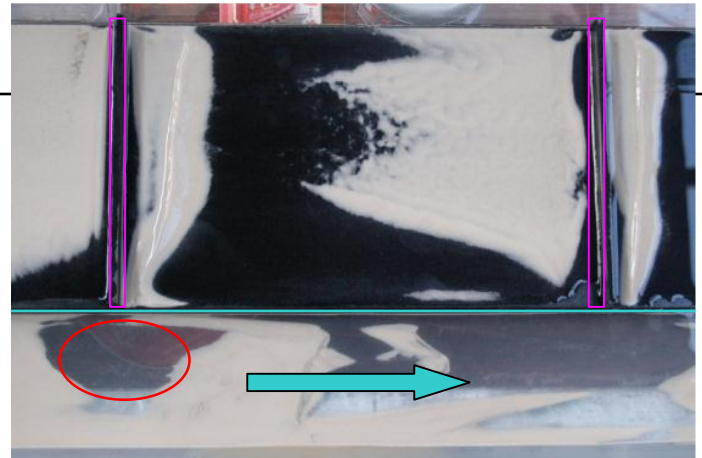
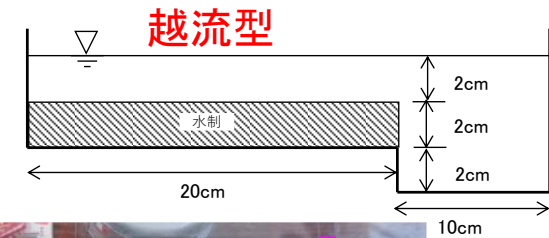
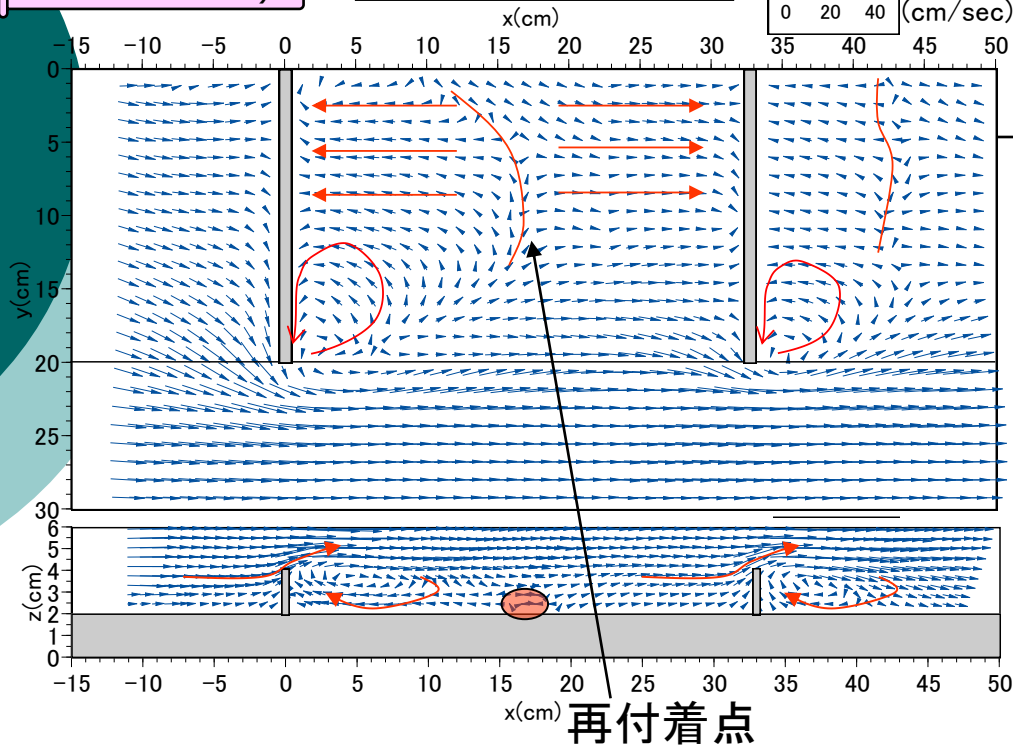
- 揖斐川の高水敷の掘削によりケレップ水制が出現
- 水制長は川幅の1/2程度
- 埋没したのは水制間の土砂堆積
→このままでは再び埋没？



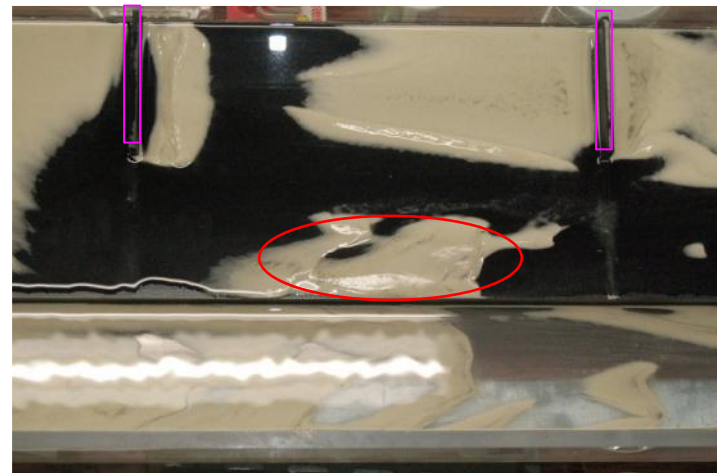
⑧ 水制模型による流れと浮遊砂堆積実験1

画像計測法(PIV)

CASE A1 $z=25\text{mm}$

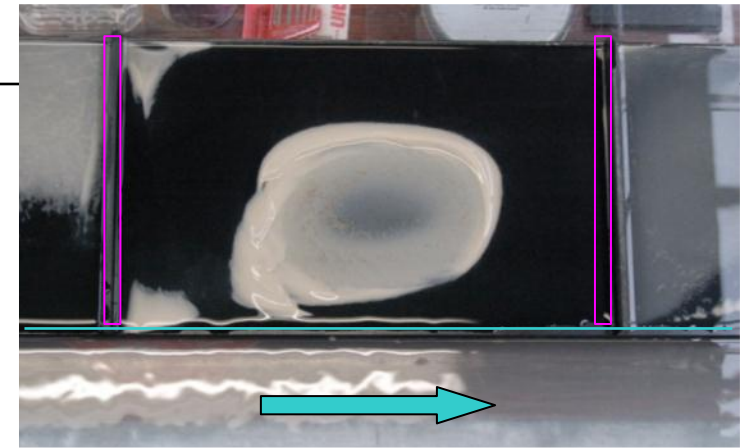
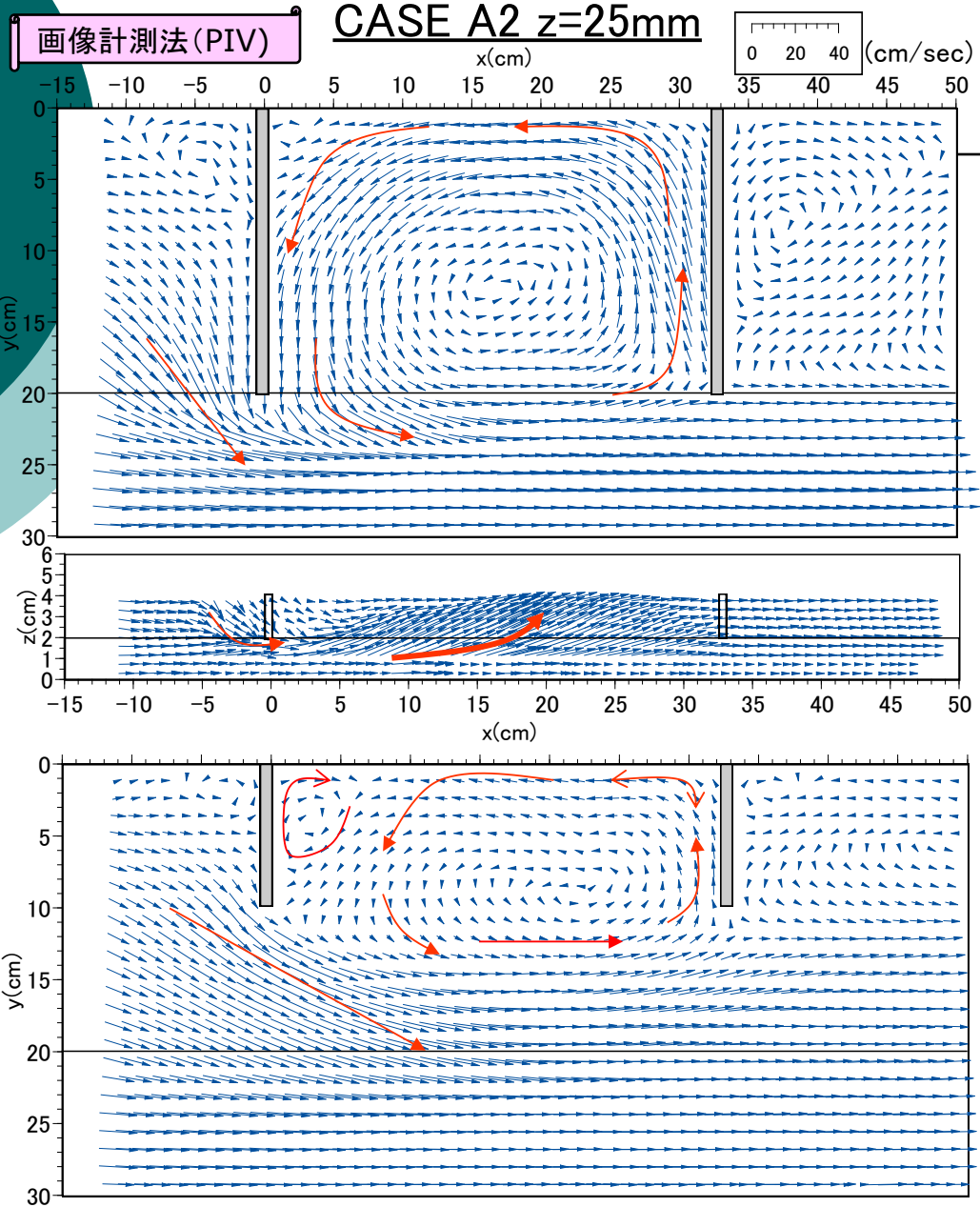
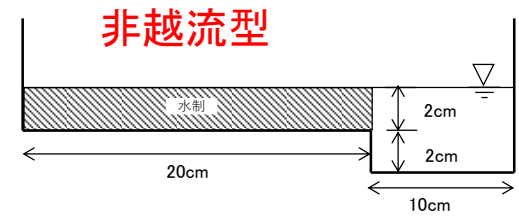


- 水制下流で横断渦
- 水制頂部を乗り越えた剥離渦の再付着点が $x=15\text{cm}$ と $x=42\text{cm}$ で形成
- 平面渦は水制先端付近の小規模渦



⑧ 水制模型による流れと浮遊砂堆積実験2

非越流型



- 水制域全体に大規模循環渦を形成
- 低水路境界の水制間で強い上昇流
- 水制を短くした場合、第2水制前面から流入する平面渦が形成される



透過水制周辺の流れ

○ 水制周辺の水理

● 透過水制

- ハイドロバリア水制
- 聖牛の水理機能
- 杭群の配置形態と流れ構造

局所洗掘が小さい水制
2000, 2005

杭水制を徹底的に
2018~2021

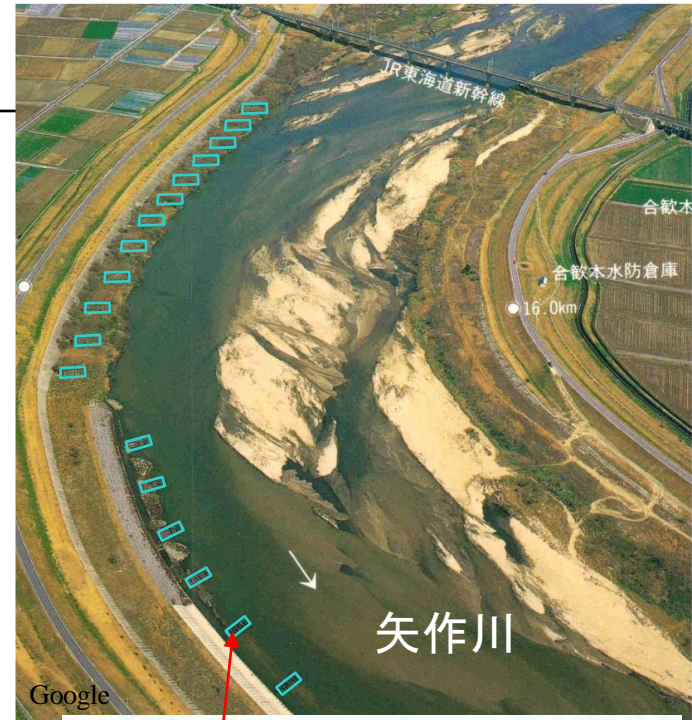
- ① 富永晃宏・長尾正志・長坂剛, 水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.1035-1040, 2000.
- ② Obaidullah SAFIE, Akihiro TOMINAGA, Effects of pile density and arrangement on flow characteristics and sediment deposition around a pile-group dike, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics), Vol. 75, No. 2, I_487-I_498, 2019.
- ③ 大柿貴利, 富永晃宏, 杭水制の配置形態が背後の流れ構造に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1(水工学), vol.75, No.2, I_493-I_498, 2019.
- ④ Obaidullah SAFIE, Akihiro TOMINAGA, Effects of Pile Arrangement on the flow around a pile - group groyne, Journal of JSCE, Vol.8, 207-220, 2020.
- ⑤ 富永晃宏・市川亜也佳, 開水路における角柱粗度群背後の流れ構造に及ぼす配置法の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2, pp.I_717-I_726, 2014.
- ⑥ Obaidullah SAFIE, Akihiro TOMINAGA, Flow Resistance and Velocity Reduction due to a Pile Group in an Open Channel, Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 2022.
- ⑦ Obaidullah SAFIE, Effects of pile-group layouts on the flow and bed characteristics in an open channel, Doctoral Thesis, Nagoya Institute of Technology, 2022.

現地河川に見られる杭出し水制

木曽川



豊川

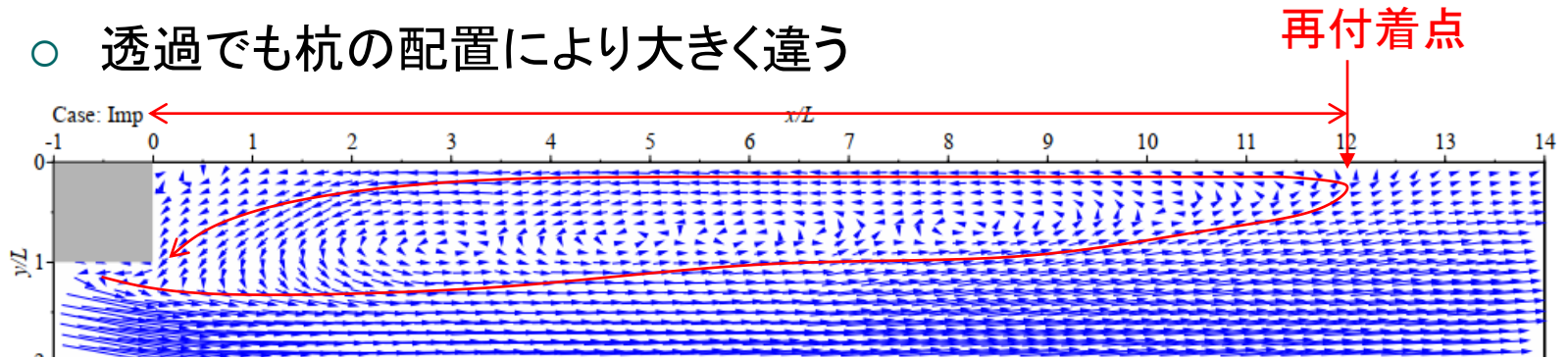


④

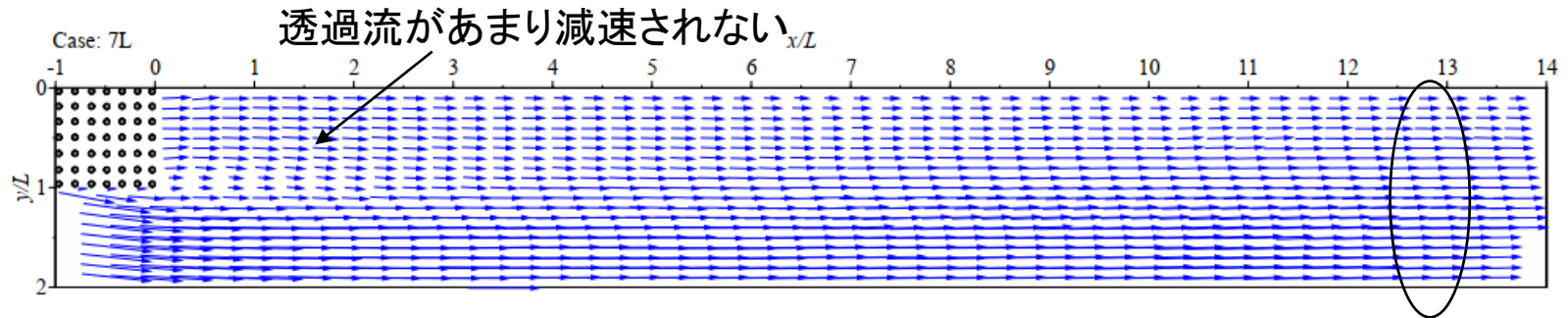
透過水制と不透過水制の下流の流れ

- 透過流により再循環渦が消滅
- 透過でも杭の配置により大きく違う

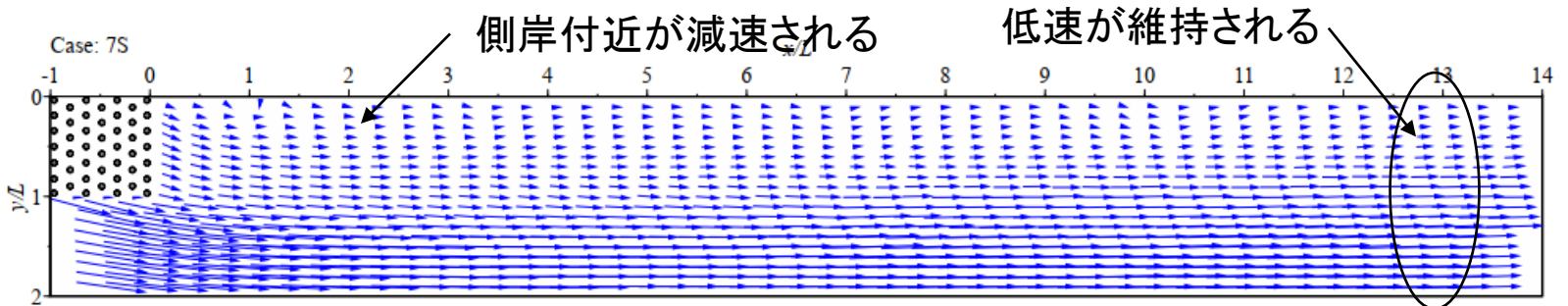
不透過



透過
平行配置



透過
千鳥配置

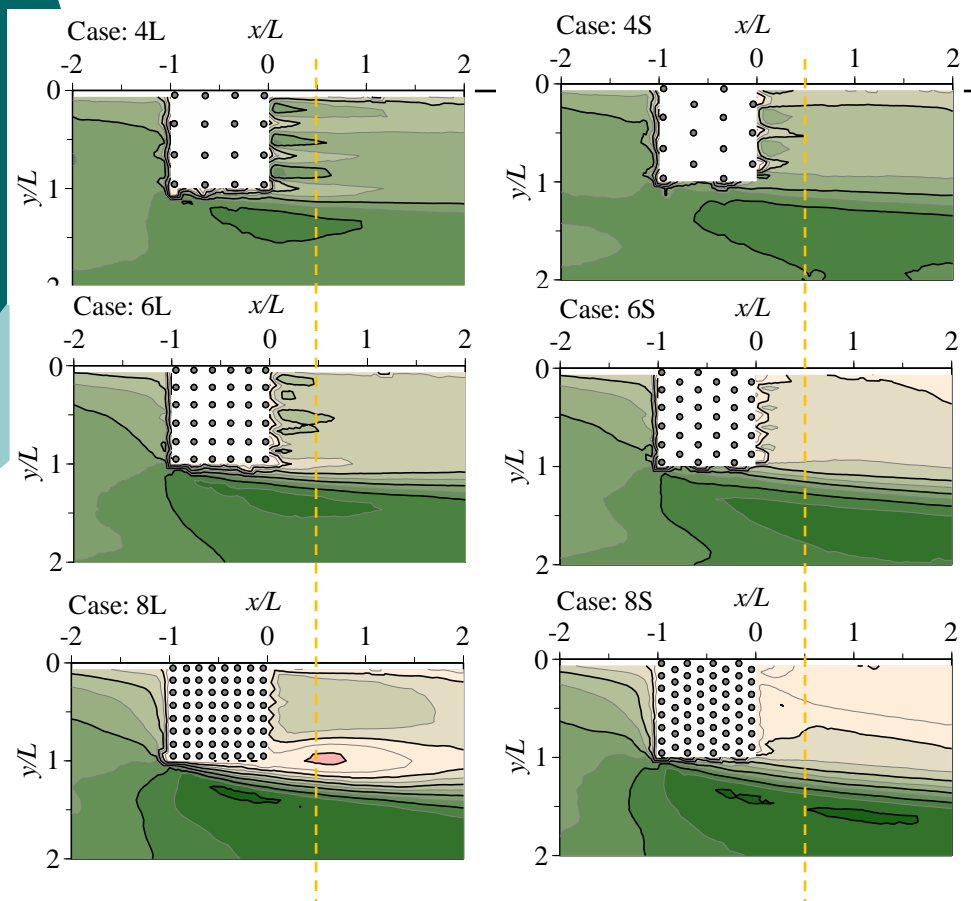


②, ④ 杭密度の影響

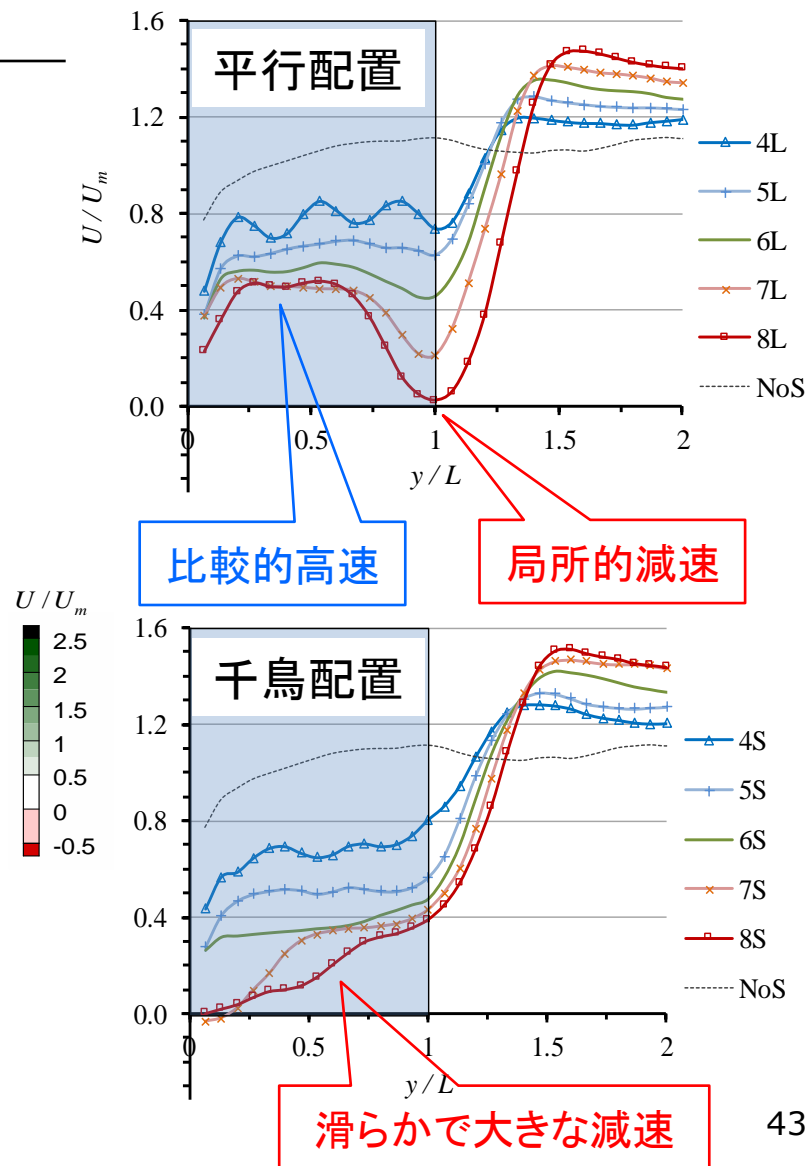


平行配置

千鳥配置



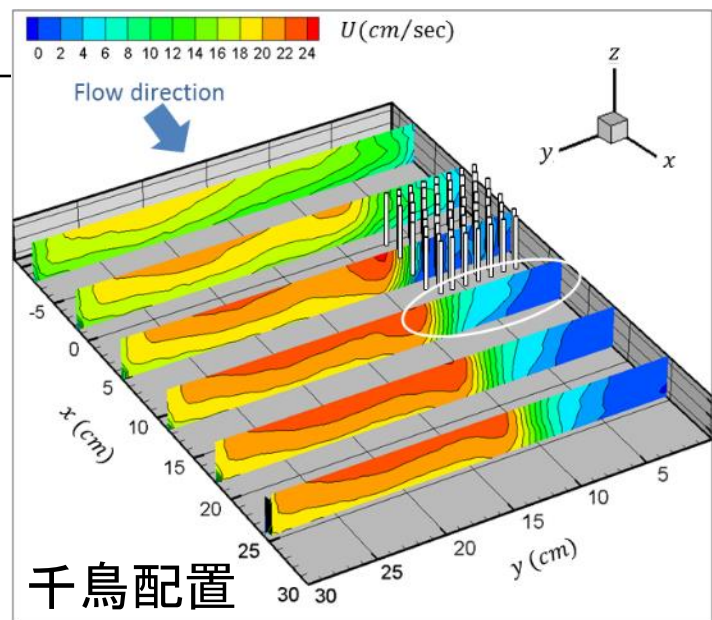
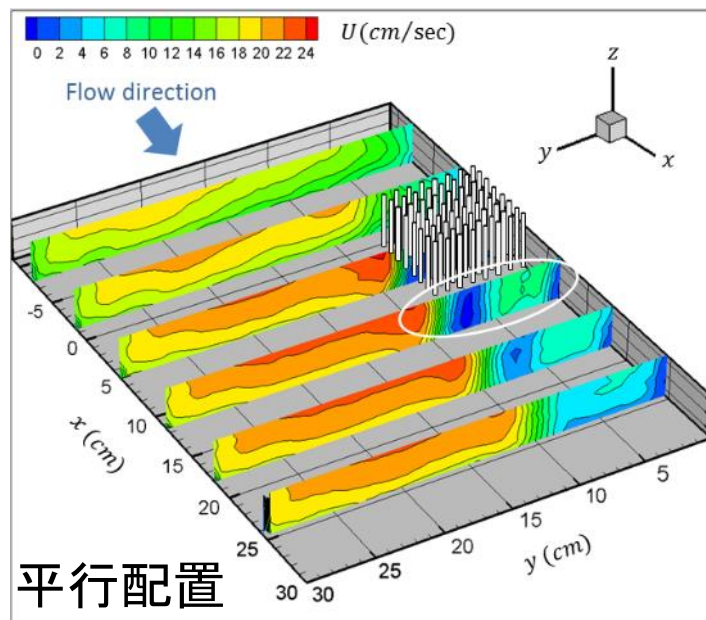
主流速横断分布 ($x/L=0.5$)



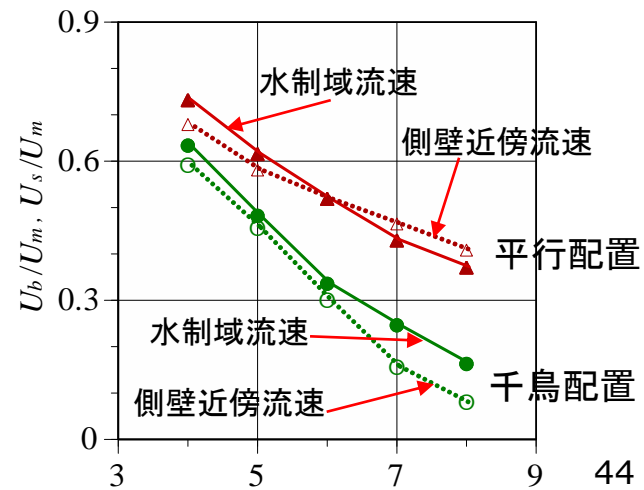
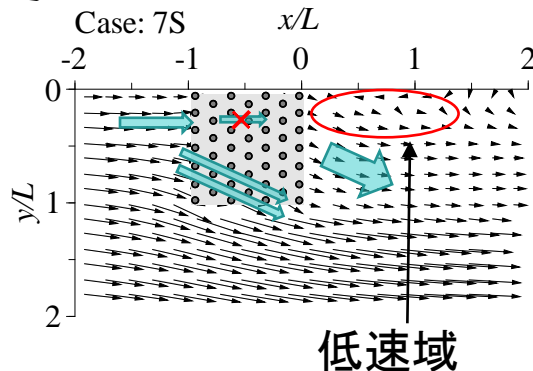
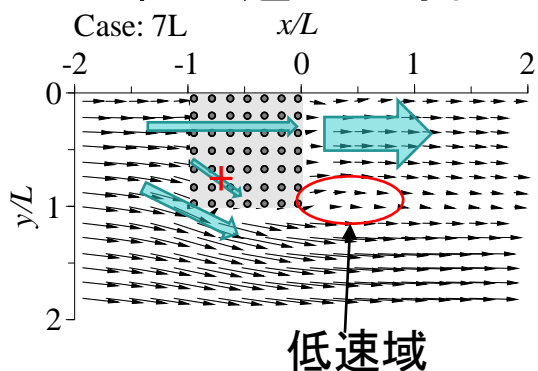
- 杭密度の増大とともに水制域流速は減少
- 千鳥配置の方が平行配置より当然低速
- 平行配置では杭群先端付近で大きく減速

②, ④

杭群配置方法による背後の流れ構造の違い



○ 杭群を通過する流れの方向と障害となる杭の配置の違いが原因と考えられる



②, ④

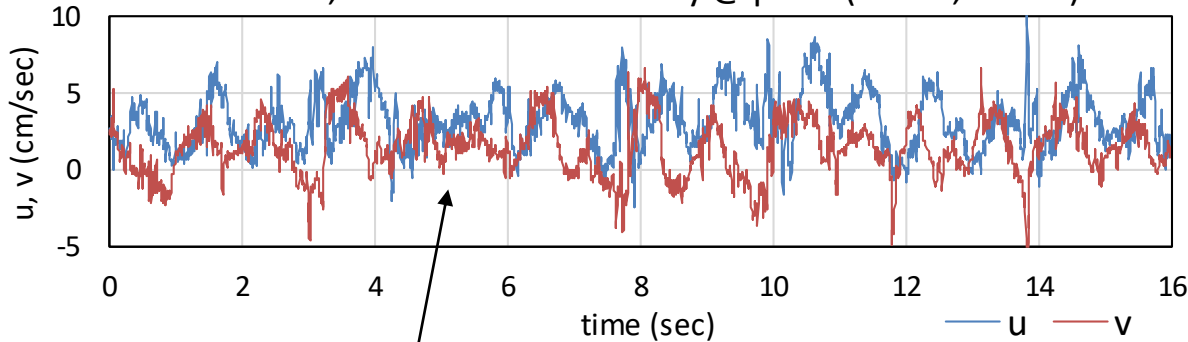
画像計測法 (PIV)

杭群背後の乱れが全く違う

○ 瞬間流速時間変化

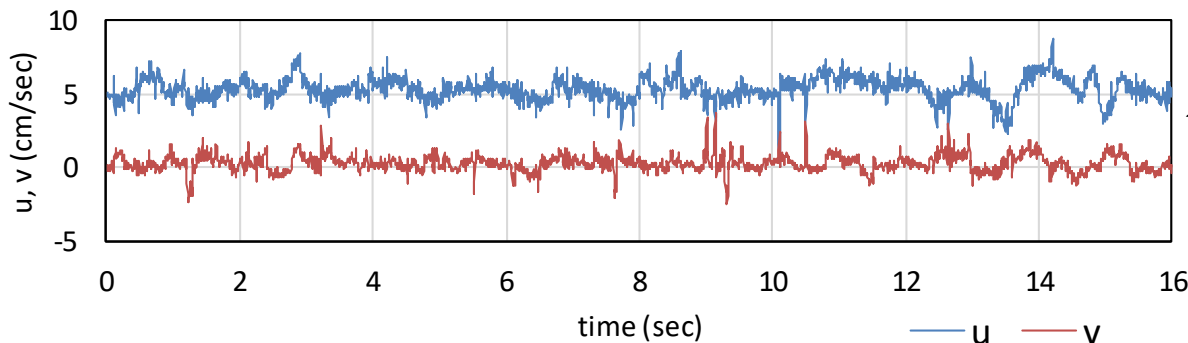
平行配置

Case 8L, Instantaneous velocity @ point (20cm, 7.5cm)



周期的な組織渦構造が見られる

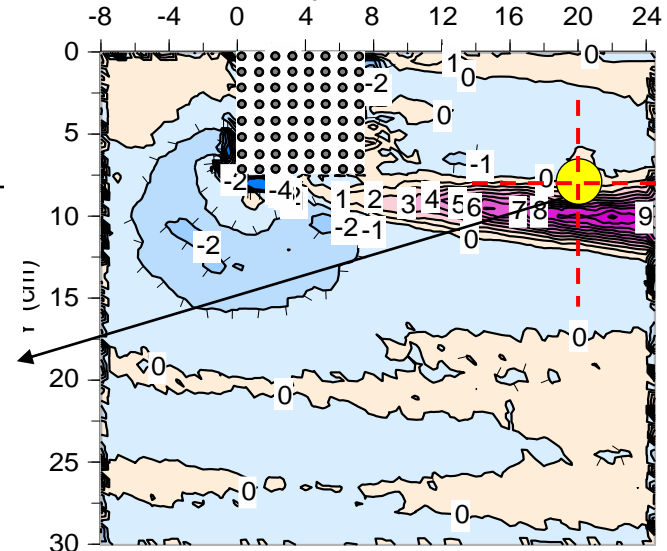
千鳥配置 Case 8S, Instantaneous velocity @ point (20cm, 7.5cm)



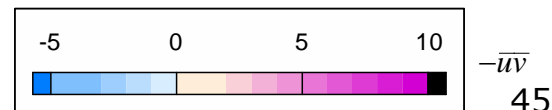
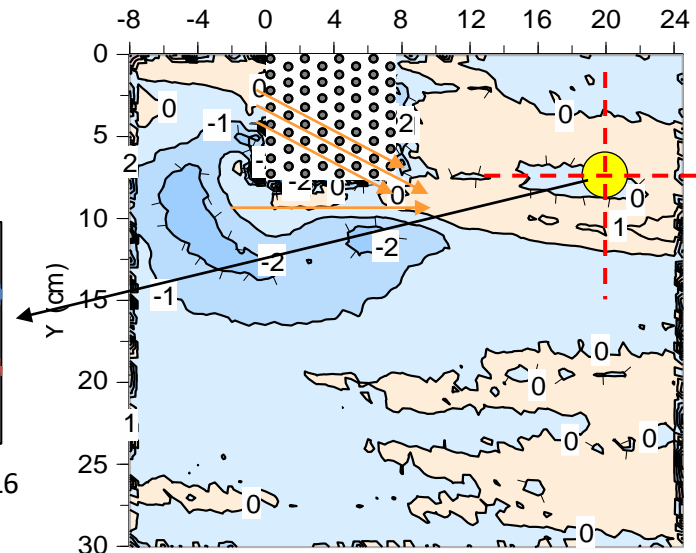
斜め通過流がせん断層の乱れを減少させる?

○ レイノルズ応力

平行 case 8L



千鳥 case 8S



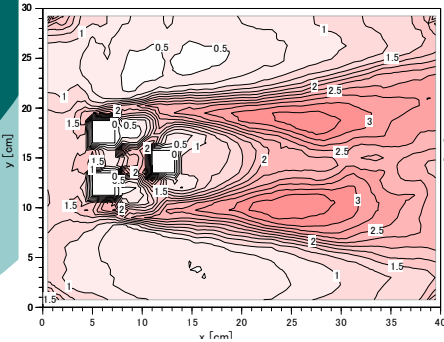
⑤

角柱粗度群背後の乱れ構造

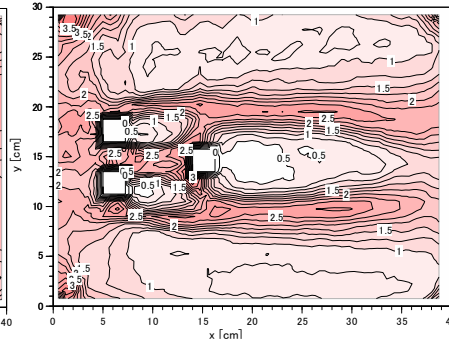


○ 乱れ強度 u' のコンター

caseTS23 ($dx=3\text{cm}$, $dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)



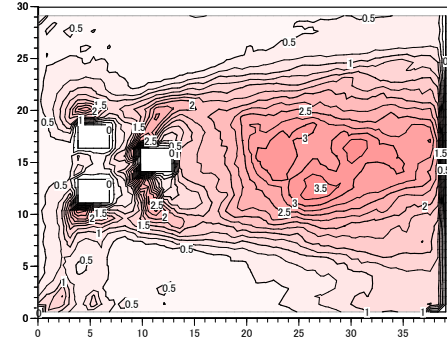
caseTS26 ($dx=6\text{cm}$, $dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)



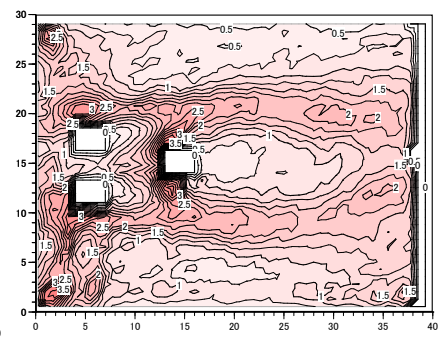
$dx=6\text{cm}$ となると、第2粗度の後方の低乱れ領域が拡大し、下流でも高乱れ領域は両端に分離したまま細長くなる

○ 乱れ強度 v' のコンター

caseTS23 ($dx=3\text{cm}$, $dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)

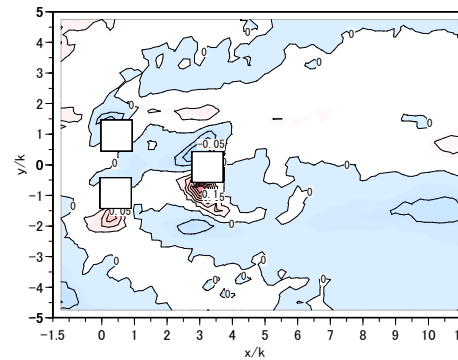
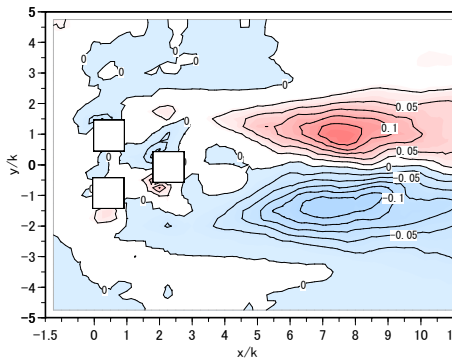


caseTS26 ($dx=6\text{cm}$, $dy=2\text{cm}$, $h=2.5\text{cm}$)



- $dx=3\text{cm}$ では、 v' の分布は、粗度群下流域では u' の分布と全く異なり、乱れのピークは水路中央にある。
- $dx=6\text{cm}$ の場合は、 u' と同様に粗度群の外縁のせん断層に沿って大きな値を示している。

○ レイノルズ応力- uv のコンター

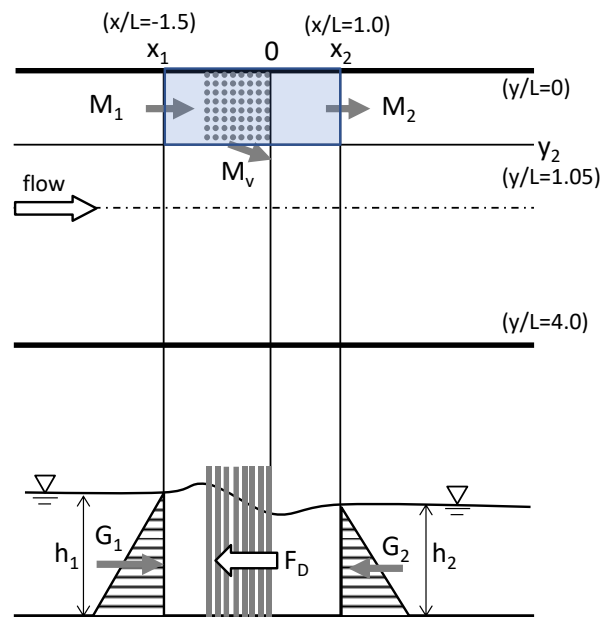
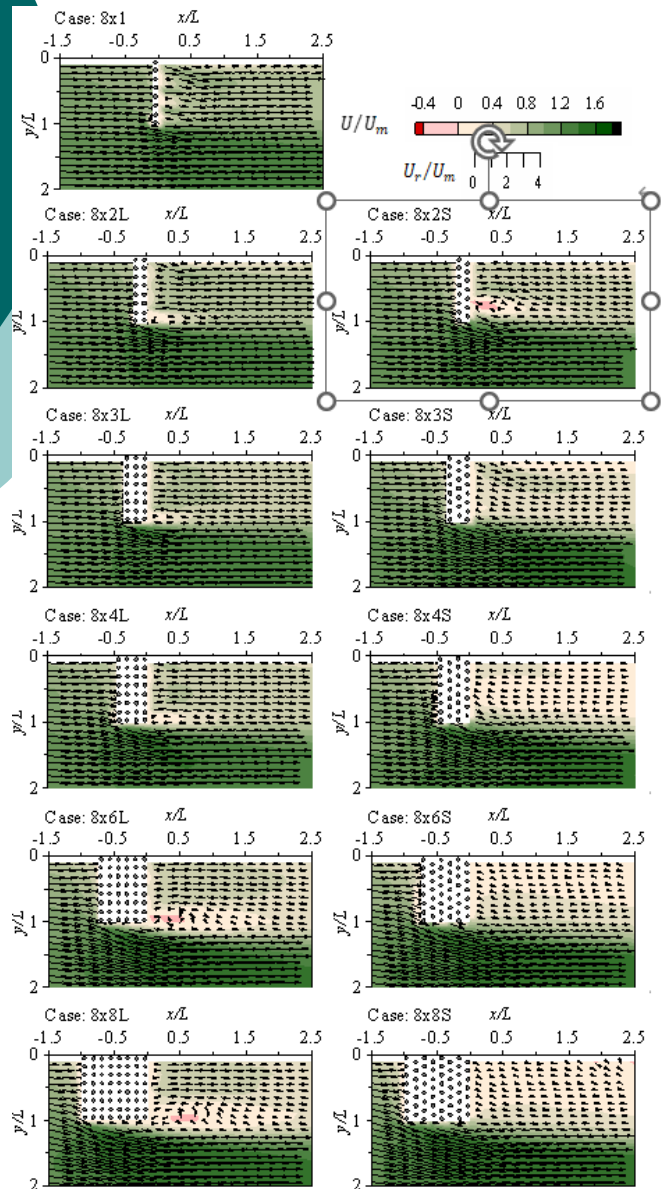


- $dx=3\text{cm}$ では粗度群下流領域において水路中央軸を挟んで、正と負のピーク領域が存在する。
- $dx=6\text{cm}$ では、粗度群下流側にレイノルズ応力の顕著なピークが認められない。大きなレイノルズ応力は粗度の前縁の水はね部において見られるのみである。

⑥, ⑦ 運動量式から抗力と抗力係数の推定

- 流下方向の列数を変化
平行配置と千鳥配置

Safie&Tominaga
IAHR2022



$$M_1 + G_1 = M_2 + M_v + G_2 + F_D \quad \rightarrow \quad (2) \leftarrow$$

$$\dots\dots\dots M_1 = \rho \int_0^{y_2} \int_0^{h_1} U(x_1, y, z)^2 dz dy \leftarrow$$

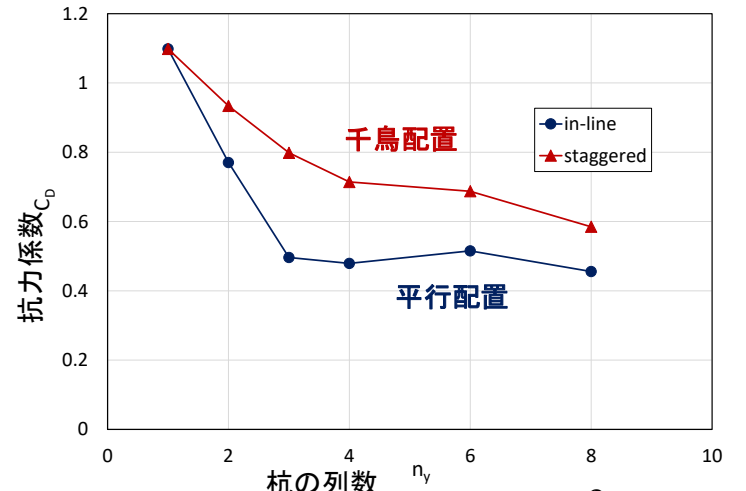
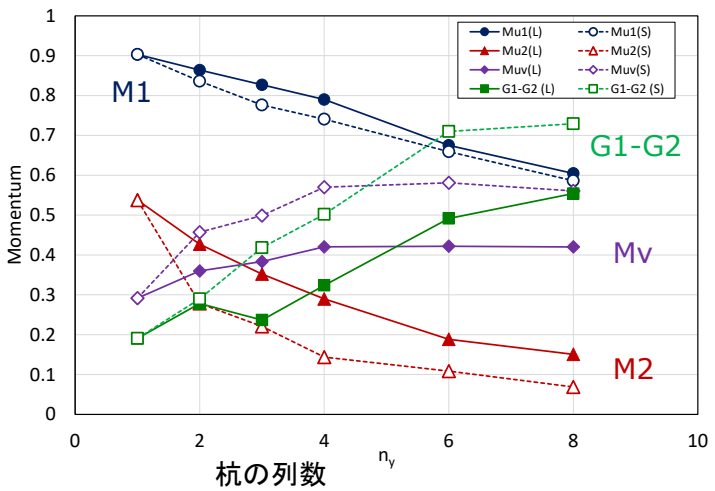
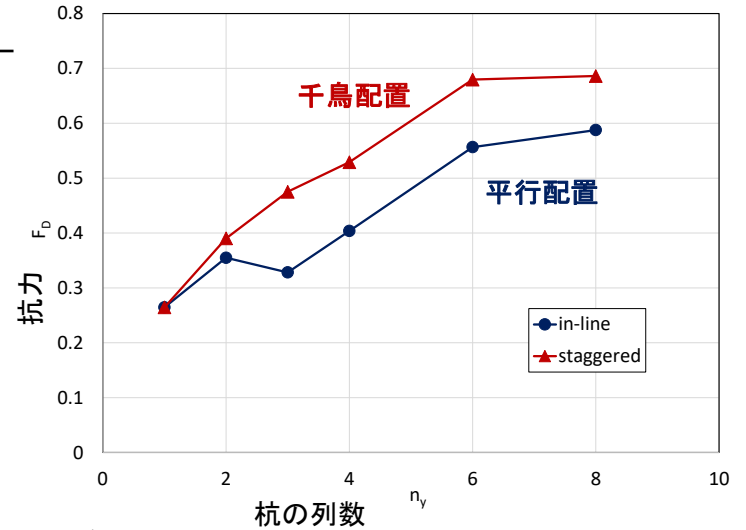
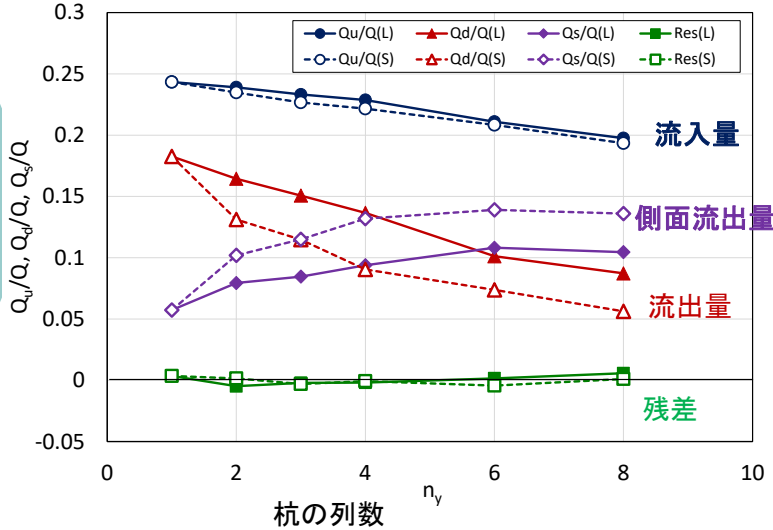
$$\dots\dots\dots M_2 = \rho \int_0^{y_2} \int_0^{h_2} U(x_2, y, z)^2 dz dy \leftarrow$$

$$\dots\dots\dots M_v = \rho \int_{x_1}^{x_2} \int_0^h U(x, y_2, z) \cdot V(x, y_2, z) dz dx \leftarrow$$

$$\dots\dots\dots G_1 = \rho g h_1^2 y_2 / 2, \quad G_2 = \rho g h_2^2 y_2 / 2 \leftarrow$$

⑥, ⑦

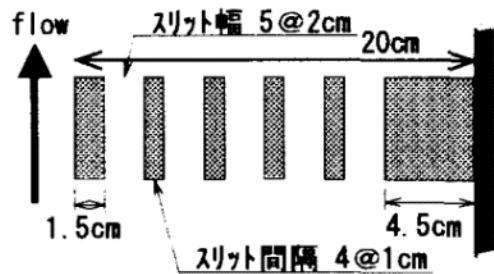
推定された運動量式の各項



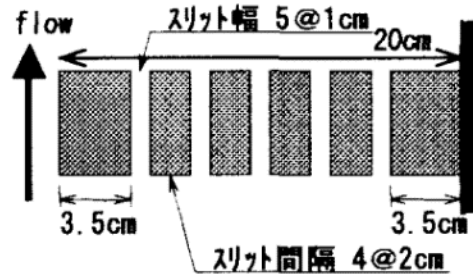
①

ハイドロバリア水制とは

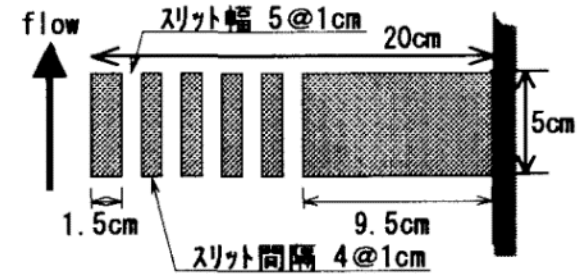
- 水制に透過部を作る
- 透過流が角度を有すると, 斜め透過流と偏向主流の衝突を期待
- 実験で確認してみた



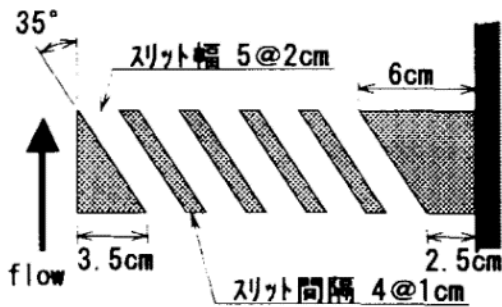
(a)ケースS1



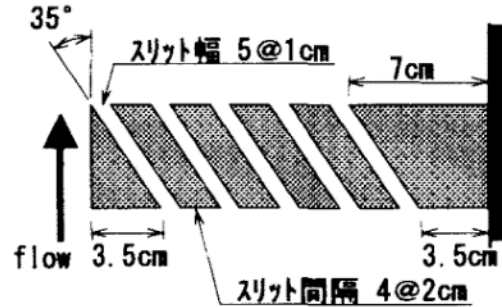
(b)ケースS2



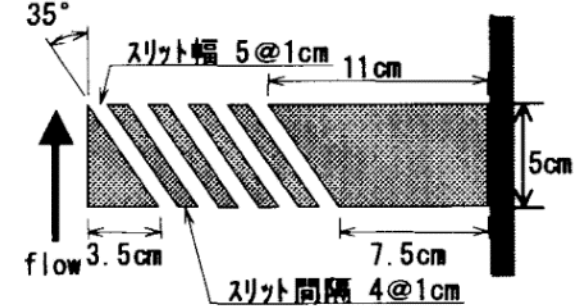
(c)ケースS3



(d)ケースH1



(e)ケースH2

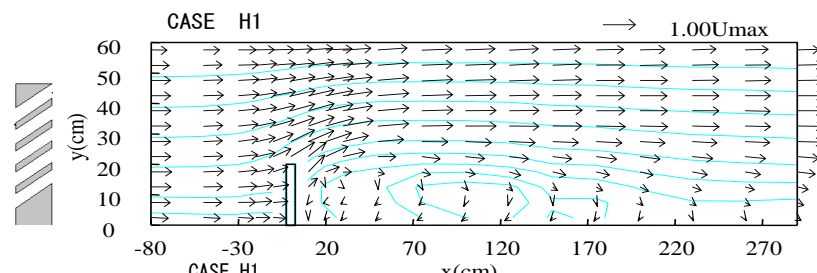
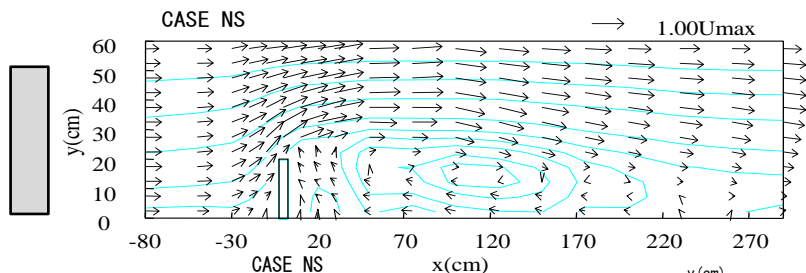


(f)ケースH3

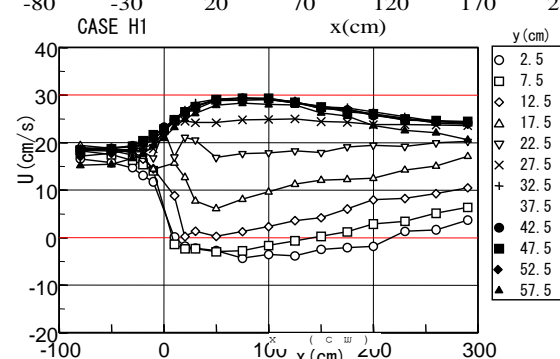
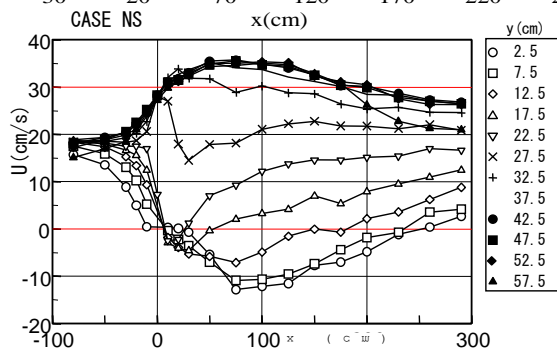
① 斜めスリット型水制の実験(非越流型)

不透過

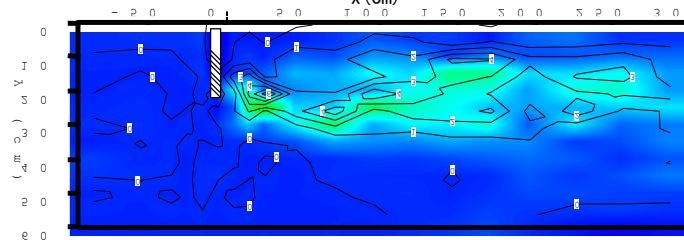
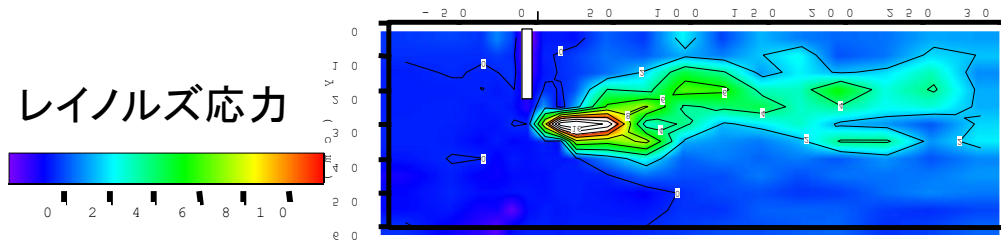
斜め透過



主流速縦断分布



レイノルズ応力



- **不透過水制**: 水はねが大きく、水制背後に大きな渦が存在し、側岸付近の逆流が大きい、流速差は比較的早く減少する
- **斜め透過水制**: そこそこの横断主流速差が下流域まで長く持続し、水制背後に側岸に接した低速域が安定に存在し、背後の逆流は弱い。**レイノルズ応力は減少**

水制周辺の河床変動

- 水制周りの河床変動

- 水制による河床変動創出
- 基礎工, 杭群による制御

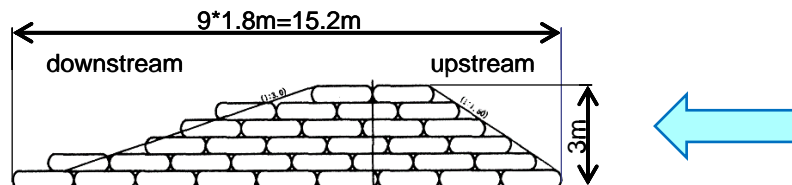


- ① 富永晃宏, 庄建治朗, 内藤健, 松本大三, 伝統的河川工法「聖牛」の水理機能と河床洗掘防止効果に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol.49, 1009-1014, 2005.
- ② 松本大三, 富永晃宏, 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, Vol.50, 1009-1014, 2006.
- ③ 松本大三・富永晃宏・石川光雄, 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, vol.52, pp.637-642, 2008.
- ④ Sayed Hashmat Sadat & Akihiro Tominaga, Mitigation of local scour hazard at the foot of single spur dike by using optimum footing, Advances in River Sediment Research, Taylor & Francis Group, London, 869-878, 2013.
- ⑤ 富田和希・富永晃宏, 導流工設置による水制工周辺の流れ構造と洗掘抑制効果, 土木学会論文集B1, Vol.69, No.4, I_895-I_900, 2013.
- ⑥ Akihiro Tominaga and Hiroki Suetsugu, Creation of meandering configuration in straight rivers by using groynes on either bank, Advances in River Sedimentation Research, Taylor & Francis Group, London, 559-568, 2013.
- ⑦ Obaidullah SAFIE, Mizuki ITO and Akihiro TOMINAGA, Effects of Pile-Group Layouts on Bed Deformation around The Structure, Journal of JSCE, Ser. B1, Vol. 77, No. 2, I_769-I_774, 2021.

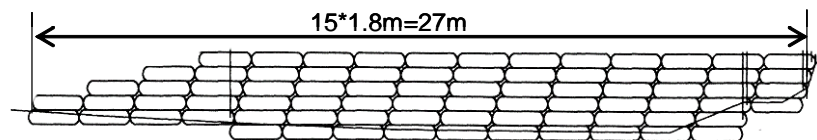
現地における越流型水制群（籠マット）

- 庄内川32.5km地点
- 2009年3月施工

- 水理的には不透過と同様
- むしろ形状の効果が大きい
- 環境面では透過の効果



水制横断面図

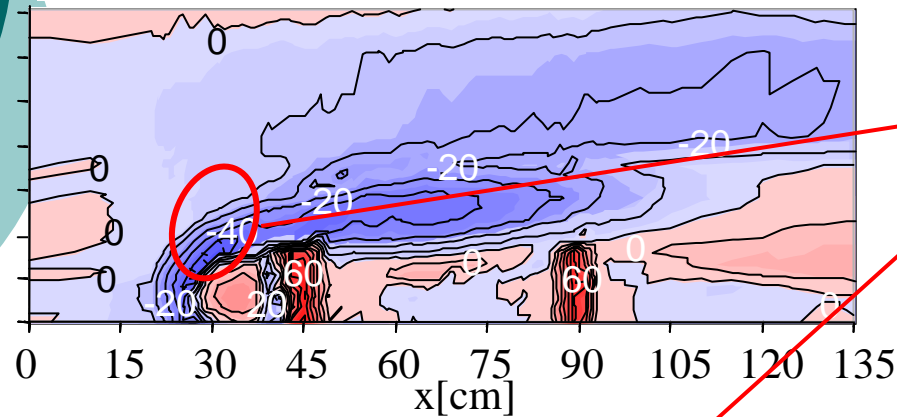


水制縦断面図

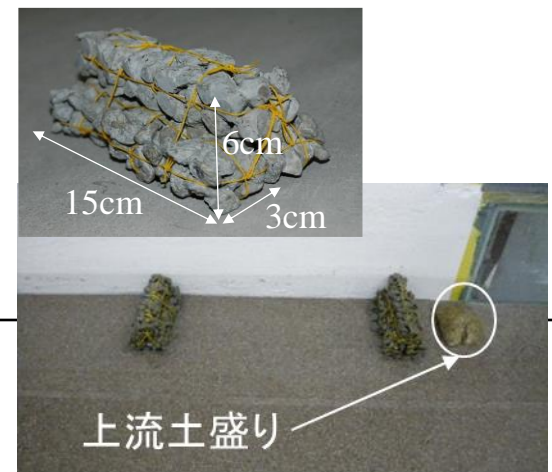
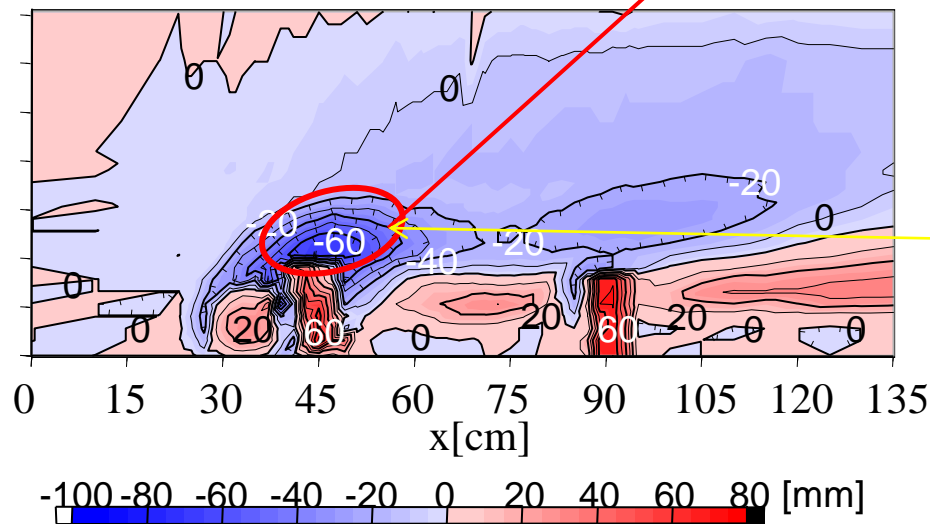
土盛りが導流工の役割

実験 水平縮尺 1/133, 鉛直縮尺 1/25 歪模型

非越流 水深4cm, 流量8.5L/s

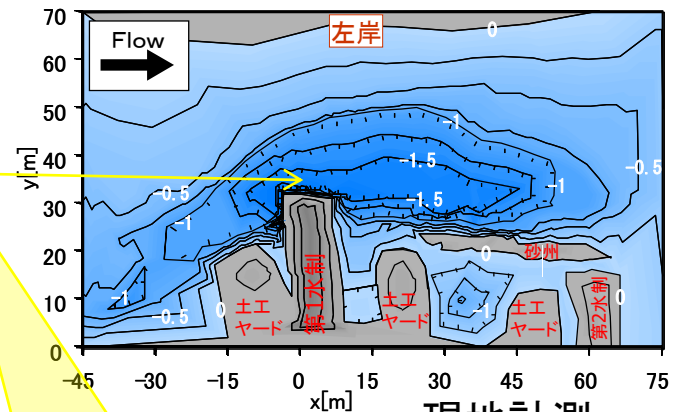


越流 水深8cm, 流量17L/s



流量により洗掘が最大となる位置が異なる

- 水制頂以下の出水時には、土盛り前方が洗掘され、水制先端は埋め戻され、下流へ洗掘域が伸びる。
- 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。



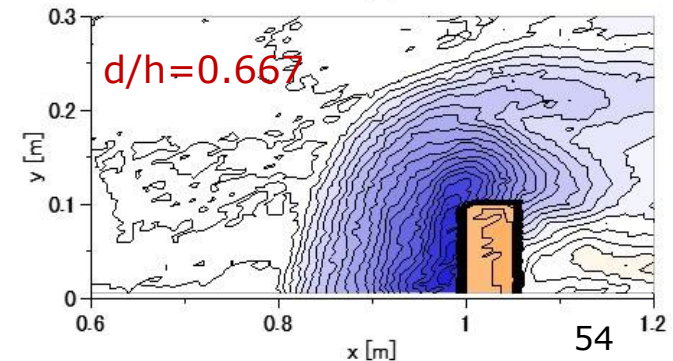
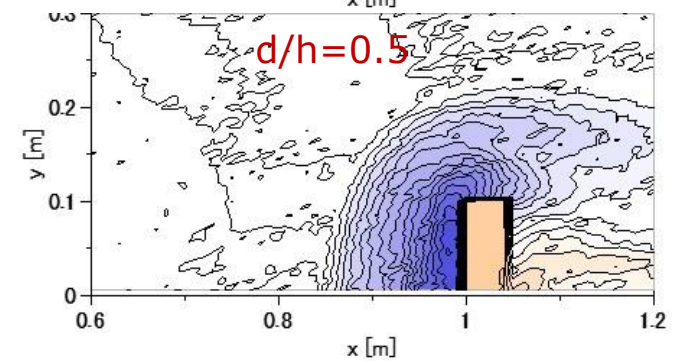
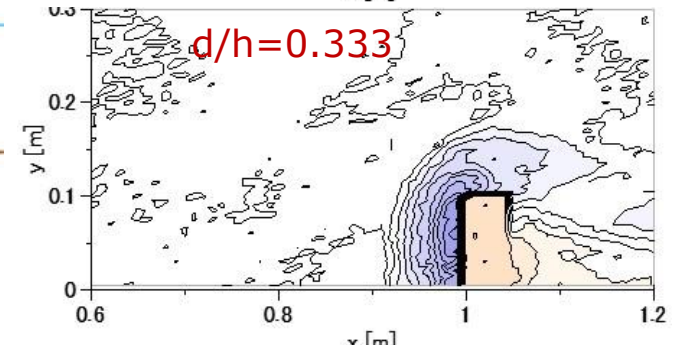
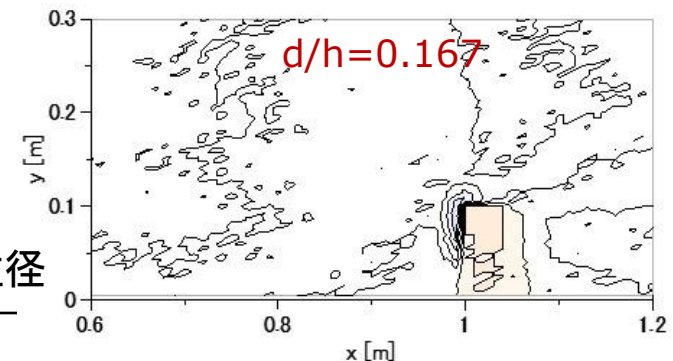
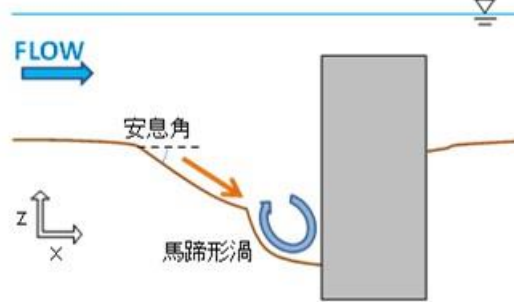
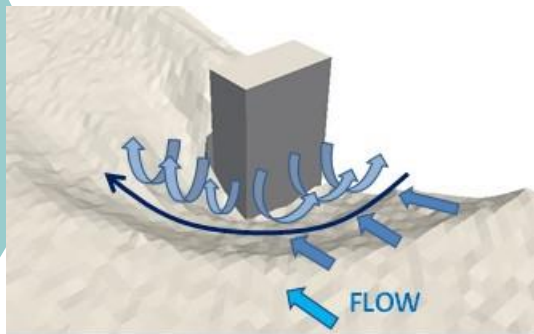
よく再現されている

現地計測

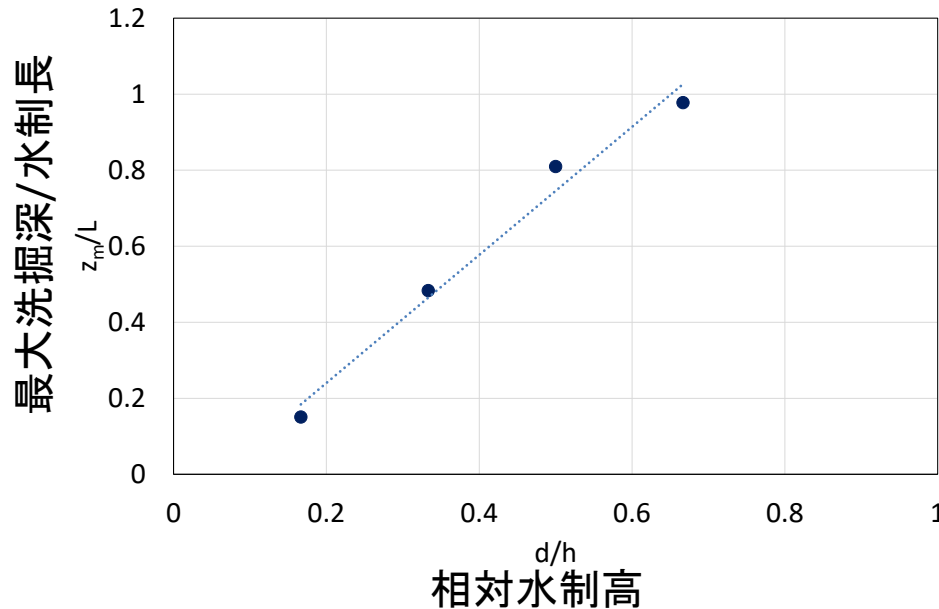
⑤

相对水制高と洗掘深の関係

水制長 $L=10\text{cm}$, $Fr=0.553$, $d_m=0.61\text{mm}$ の一様粒径

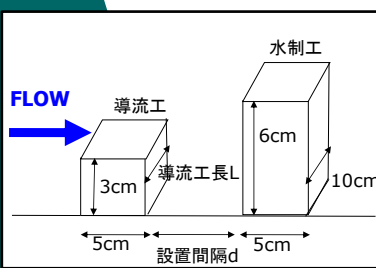


最大洗掘深の変化

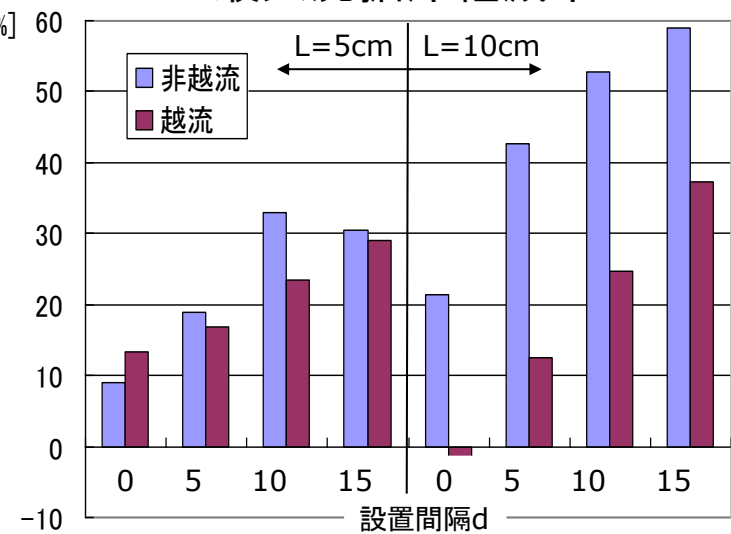


⑤ 背の低い導流工による洗掘抑制実験

最大洗掘深軽減率

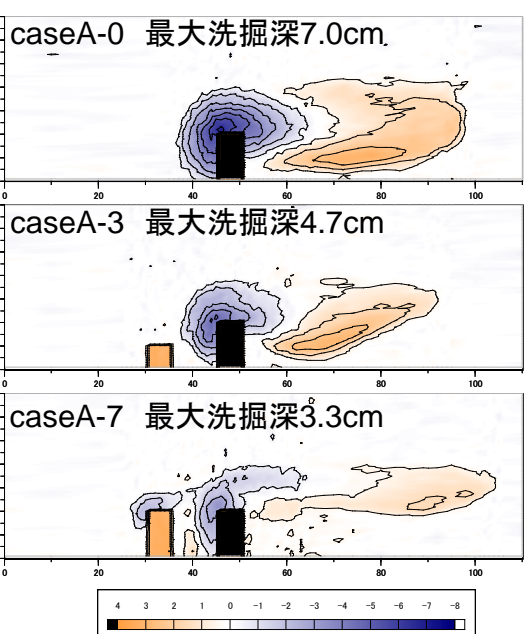


ケース名	導流工長 L [cm]	設置間隔 d [cm]	流量 Q [m ³ /s]	水深 h [cm]
caseA-0			0.0106 (非越流)	5.0
caseA-1, 2, 3, 4	5	0.5, 10, 15		
caseA-5, 6, 7, 8	10	0.5, 10, 15		
caseB-0			0.0168 (越流)	7.0
caseB-1, 2, 3, 4	5	0.5, 10, 15		
caseB-5, 6, 7, 8	10	0.5, 10, 15		

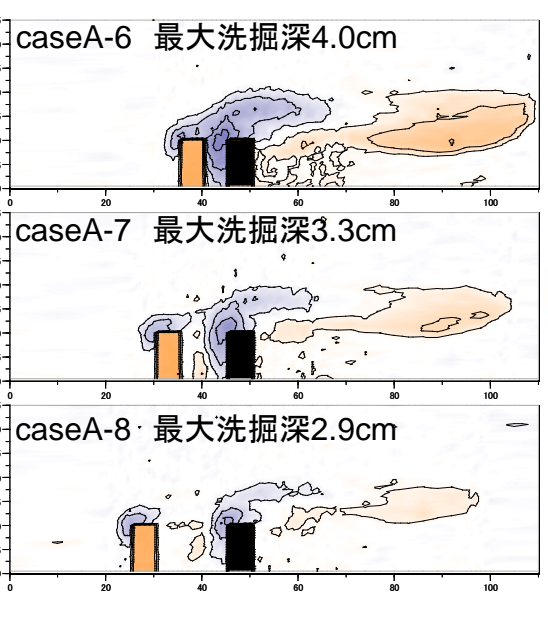


ケース名	流量 Q [lit/s]	水深 h [cm]	断面平均流速 U_m [cm]	フルード数 Fr	レイノルズ数 Re	径深 R [cm]
CaseA-0~8	10.6	5.0	35.75	0.511	16911	4.28
CaseB-0~8	16.8	7.0	40.47	0.489	26803	5.66

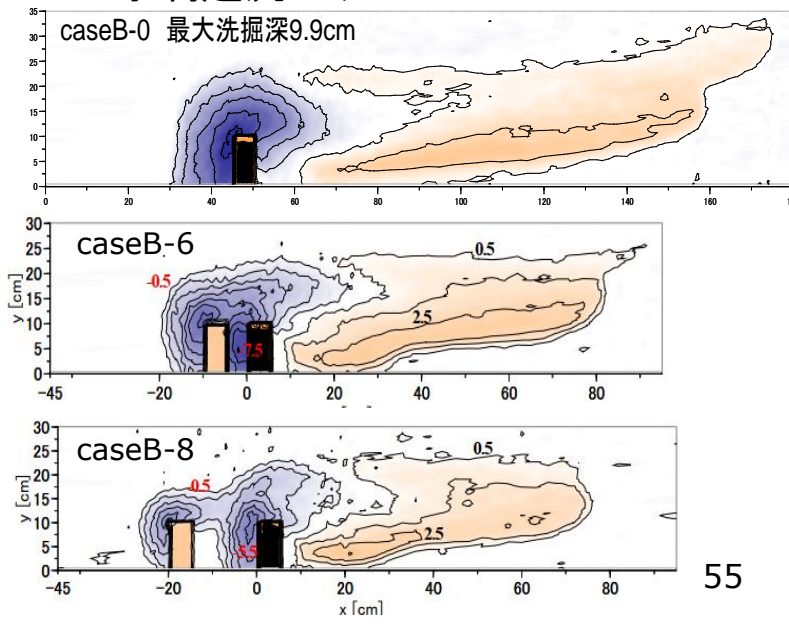
導流工長の違いによる比較



導流工間隔の違いによる比較



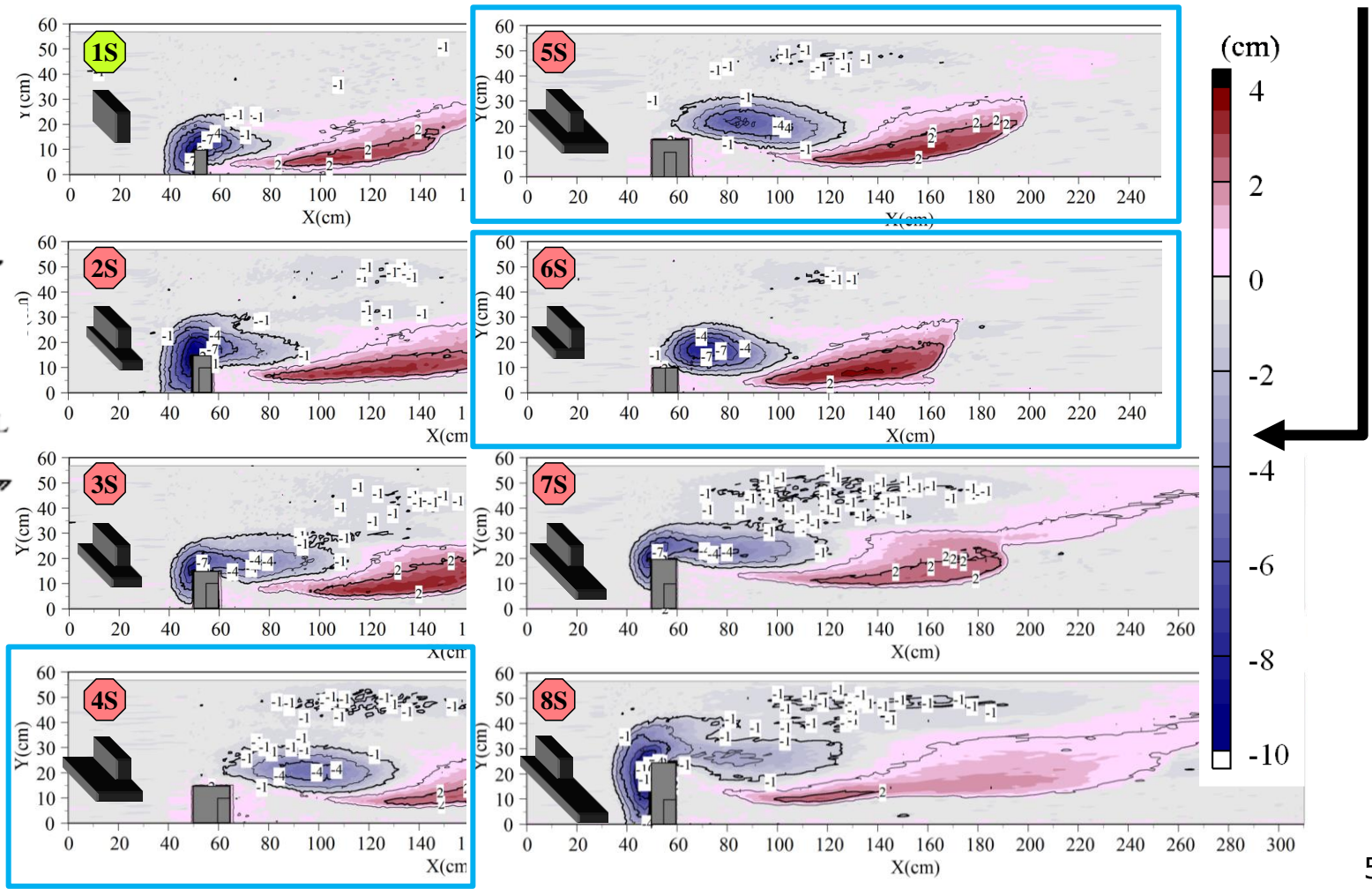
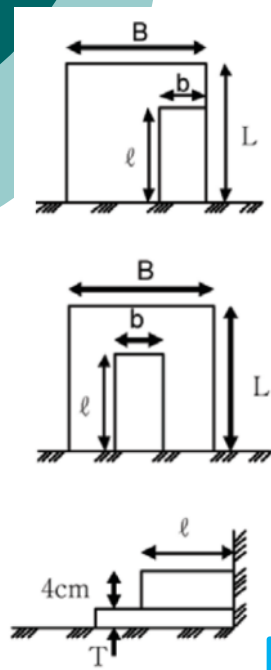
水制越流のケース



④ 水制の下に広い基礎工を設けて洗掘抑制

Table of Hydraulic Parameters		
Discharge (m^3/s)	0.010 (emerged)	0.018 (submerged)
Flow depth h (cm)	5.0	7.5
Slope, S	0.002	0.002
Mean Vel. u (cm/s)	33.3	40.0
Shear Vel. u_* (cm/s)	3.13	3.84
Froude No. Fr	0.476	0.466
Reynolds No. Re ($\times 10^4$)	2.1	3.9

○ footing



聖牛の機能と特徴

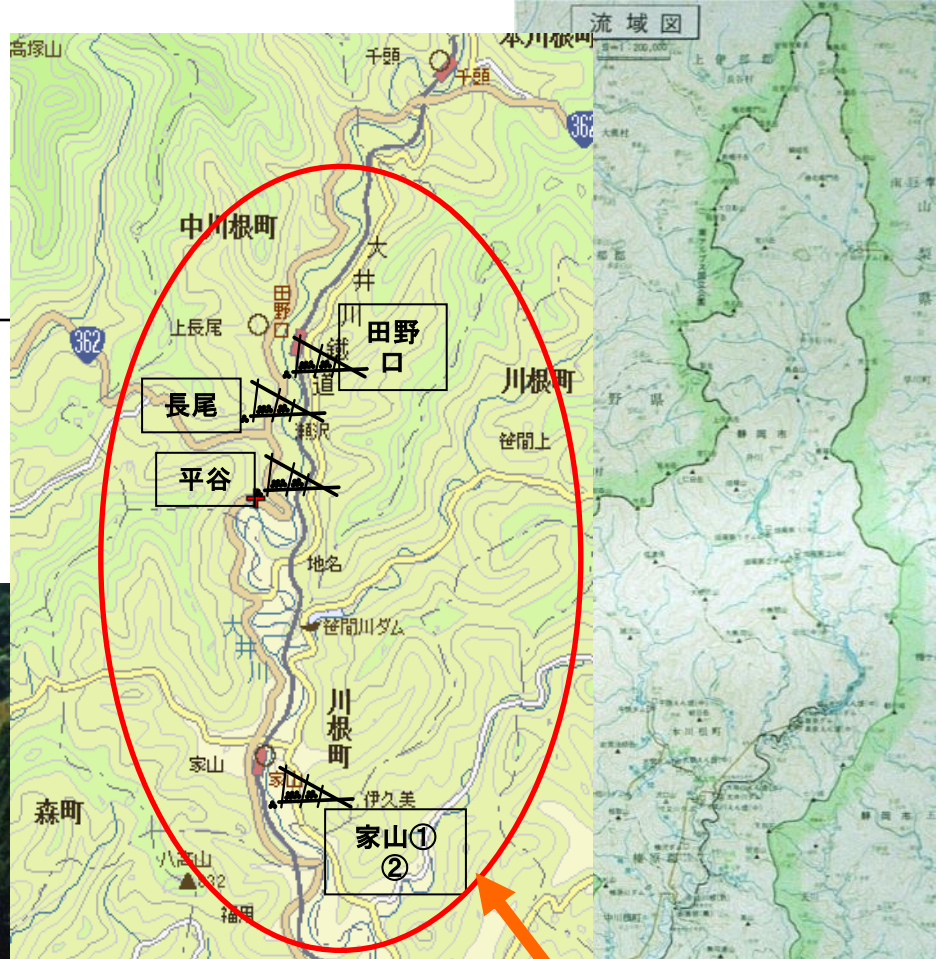
(透過型水制の一種)

- 水理的機能
 - 粗度機能－河岸の流速減速
 - 水はね機能－組合せである程度期待
- 水理的効果
 - 河床洗掘防止効果
 - 河岸保護効果
- 形態的特徴
 - 自然素材の使用
 - 蛇籠を用いた押さえ
 - 河床変動に適合して変形

施工が容易
変形に柔軟に対応
自然的印象



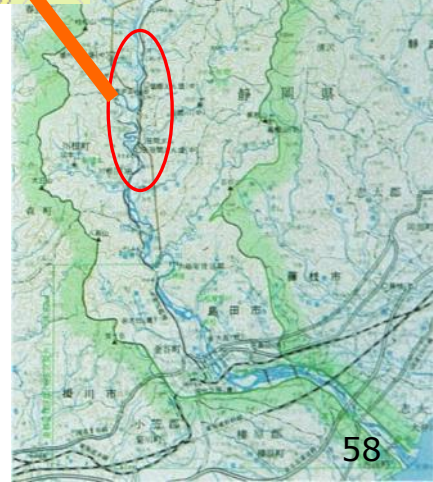
① 大井川の聖牛調査



平谷地区(2002年5月)



- 前列3基, 後列2基を1群とした聖牛が4群
- 聖牛群間隔は横断長の約6倍



実際の聖牛の効果 (長尾地区の聖牛)



2002年5月

- 水衝部に当たる位置に設置
- 先頭の頭部の洗掘大
- 後方護岸付近の洗掘あるも
- 後方の河床は維持



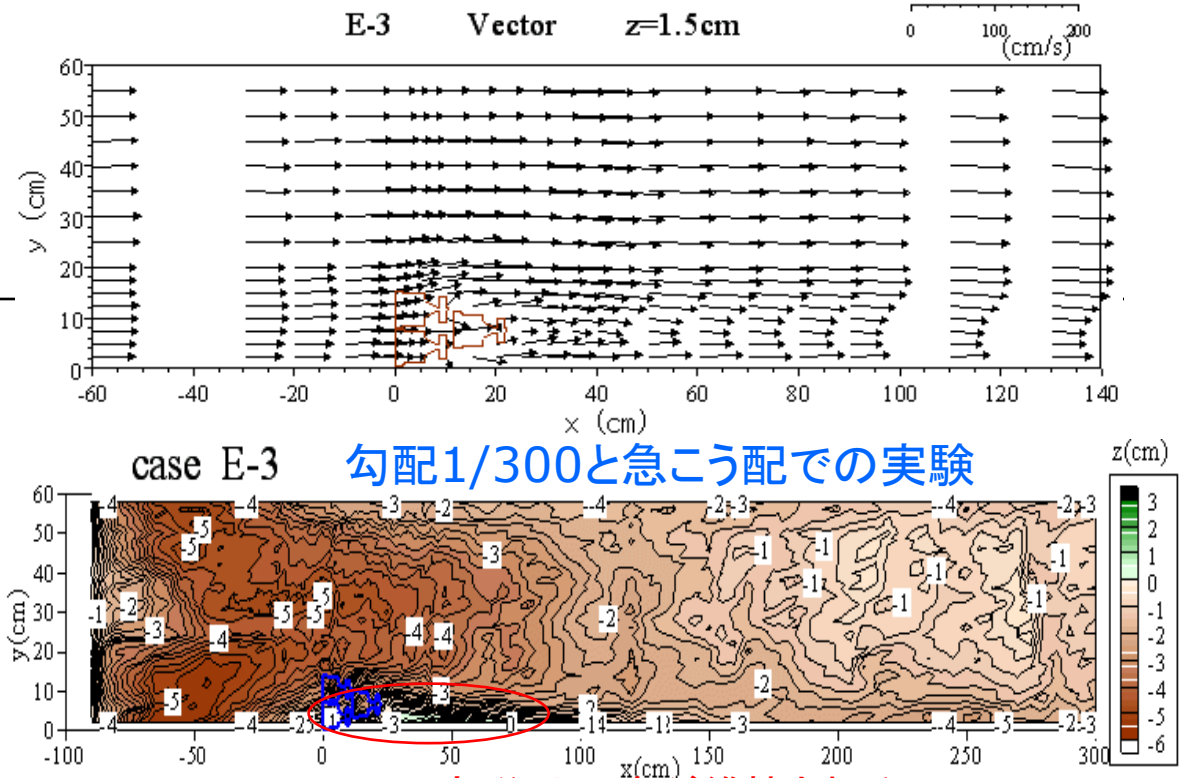
2003年8月



①

室内実験で再現してみる

○ 著しい河床低下があるが、聖牛ごく近傍の側岸部は低下せず



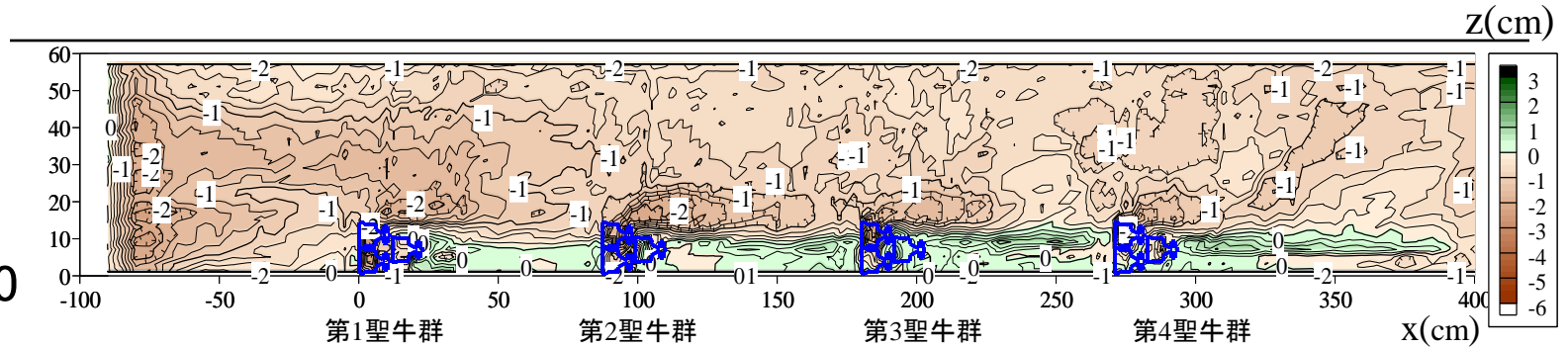
現地の河床変動と非常によく似ている

①

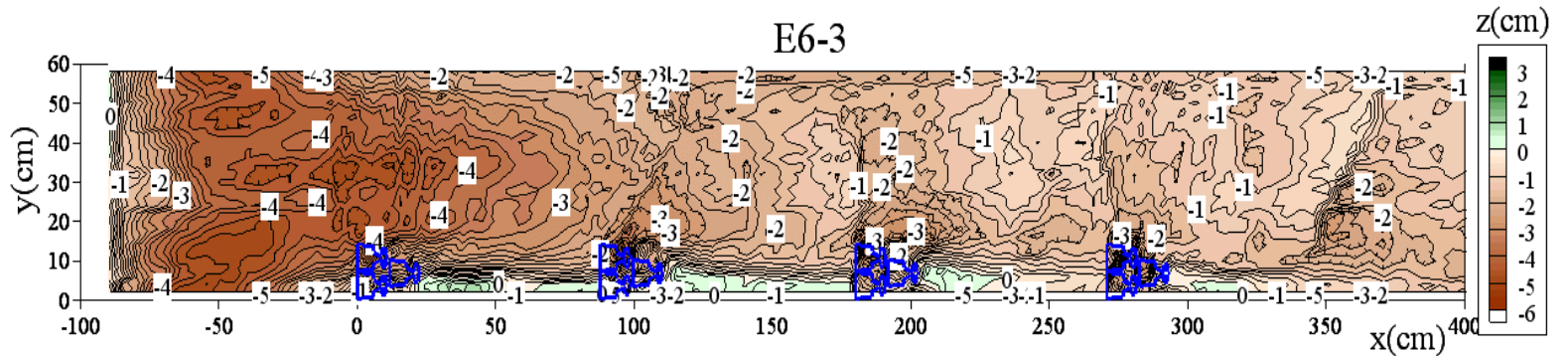
河床変動

- 聖牛設置幅の6倍間隔で河岸侵食防止効果は十分
- 底部に蛇籠を有する聖牛の形状特性が杭水制とは異なる

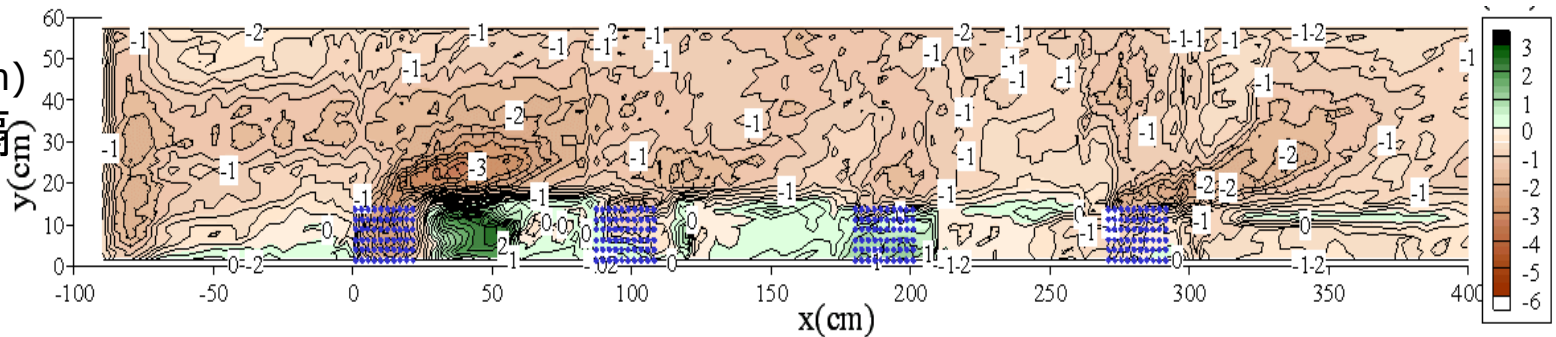
case
G6-3
勾配
1/1000



case
E6-3
勾配
1/300



円柱群(5mm)
2.5cm間隔
格子

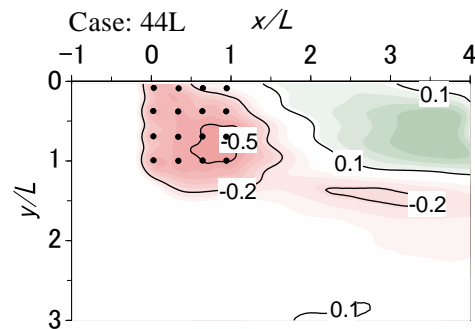
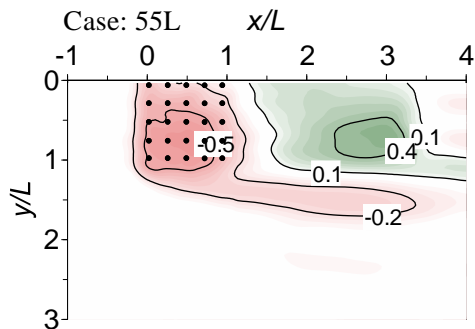
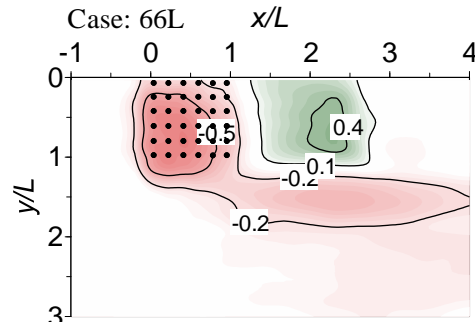
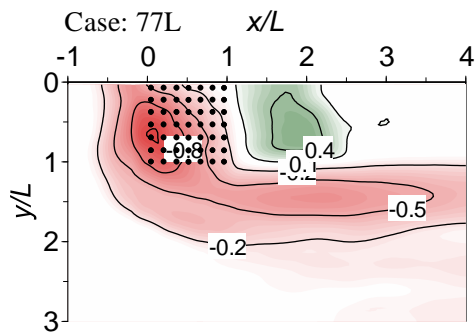
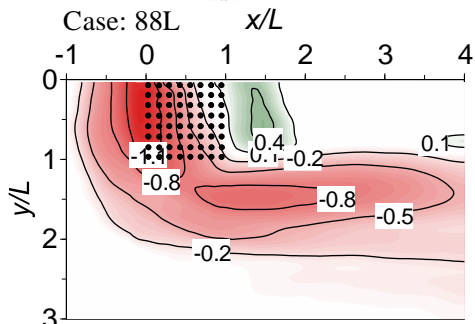
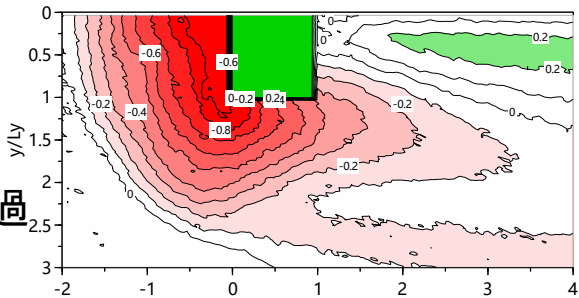
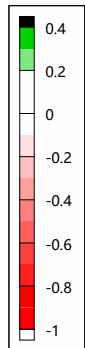


7

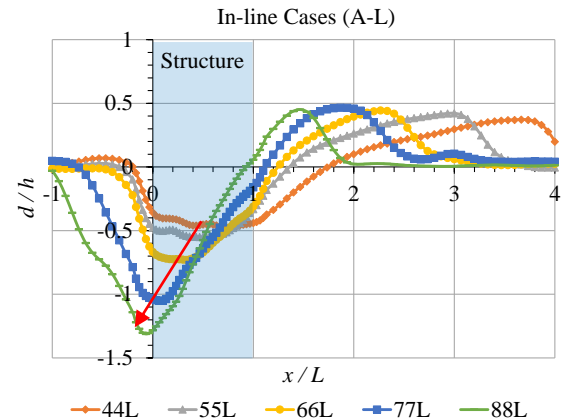
杭水制周辺の局所洗掘

- 杭密度の減少とともに最大洗掘深は減少
- 杭密度の**増加**とともに洗掘域が杭群内部から前面へ拡大

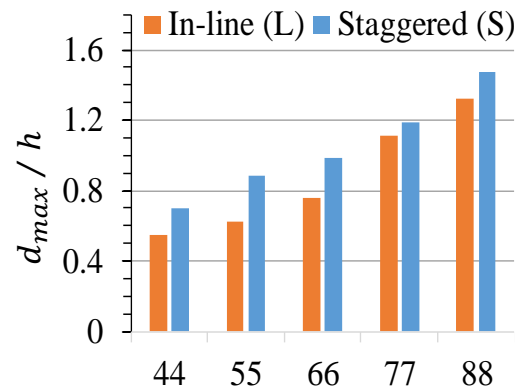
不透過



河床高コンター



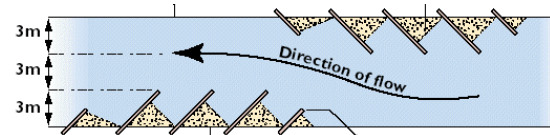
河床高縦断分布



最大洗掘深

②

直線化された河道の改善



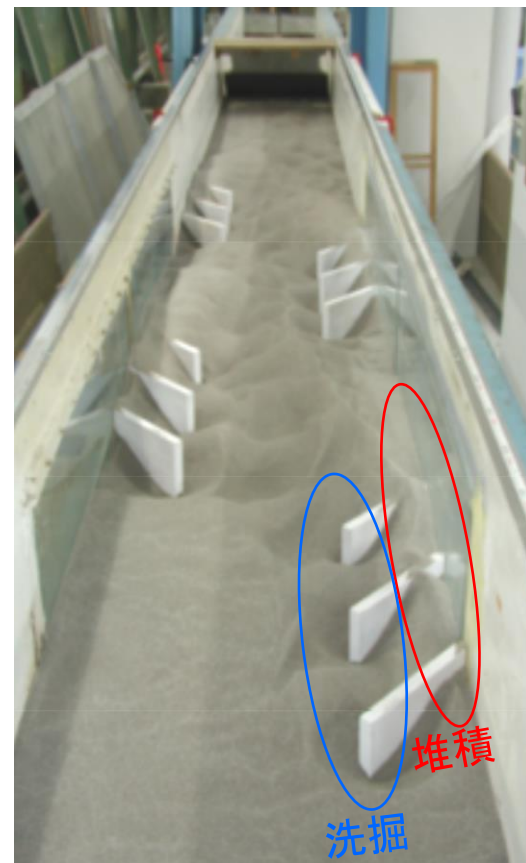
- 単調化した河道に瀬と淵を有する多様な河床形態を創出



FLOW ↑ 下向き水制

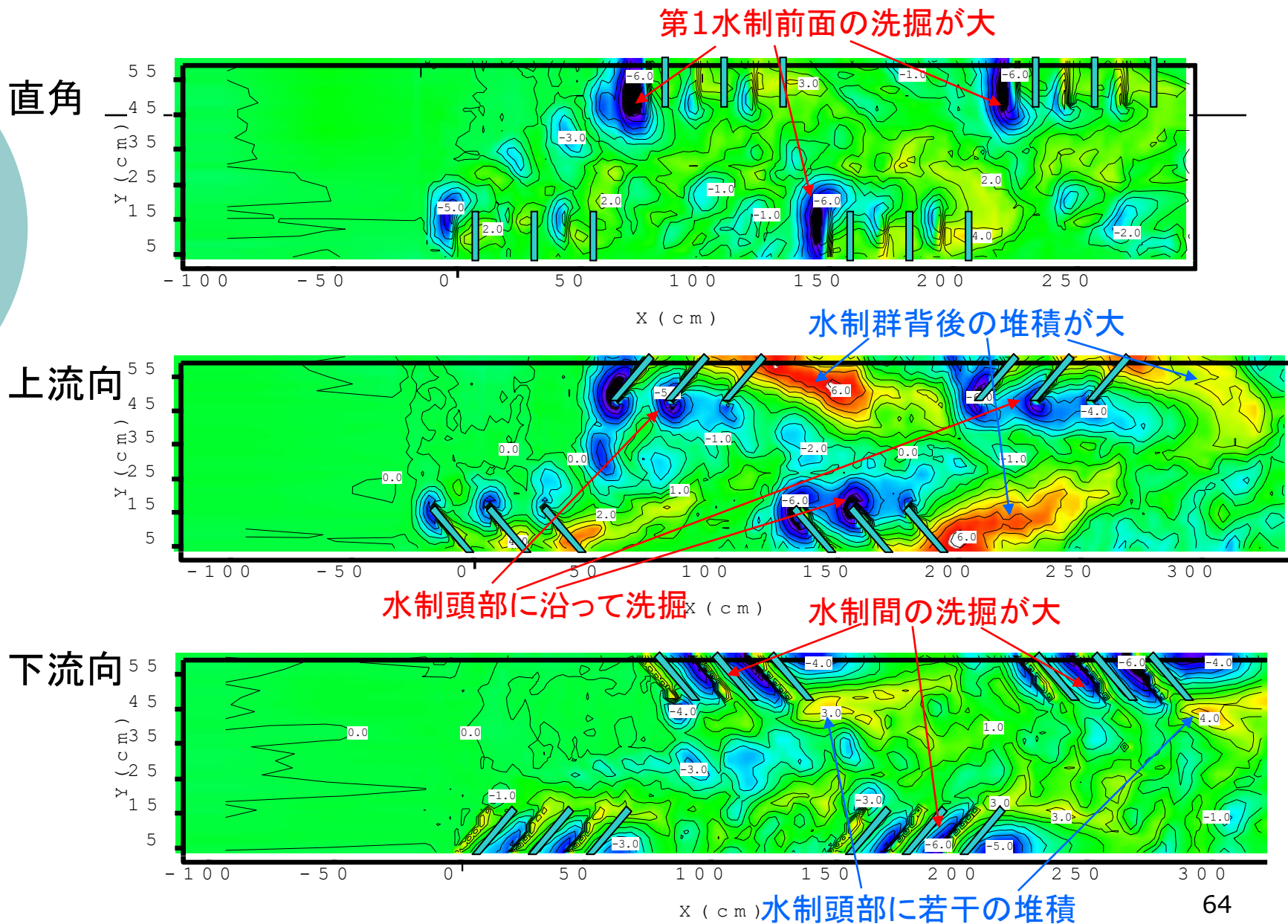


FLOW ↑ 直角水制



FLOW ↑ 上向き水制

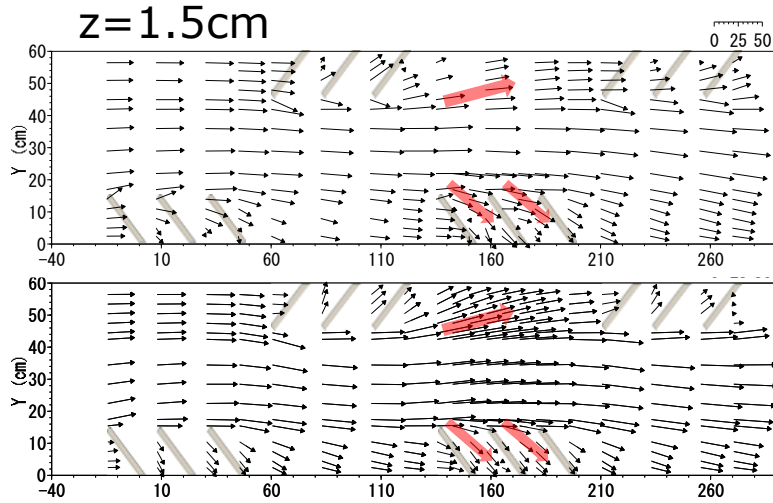
② 水制設置角度と河床高コントー



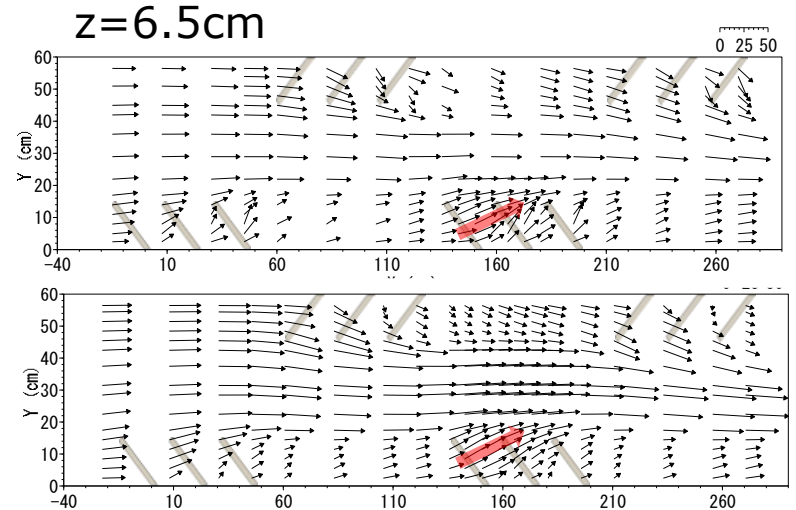
固定床における水制群の流速分布(実測値と計算値)

上流向き

実測値
計算値



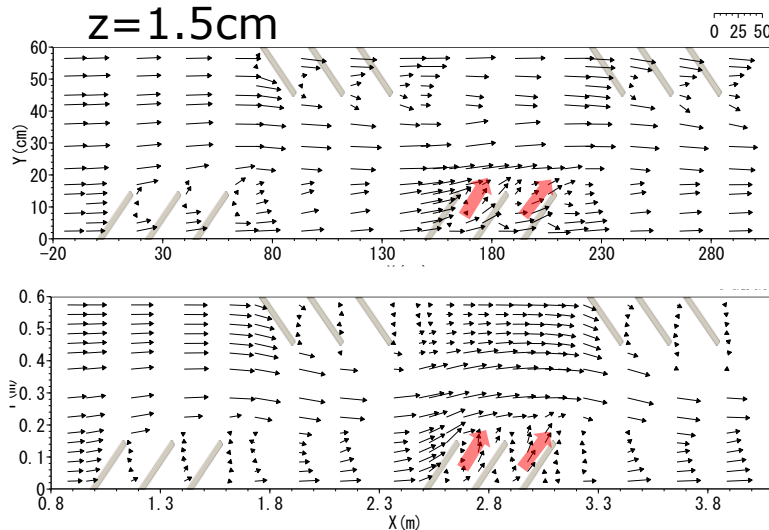
底面では側岸に向かう流れ



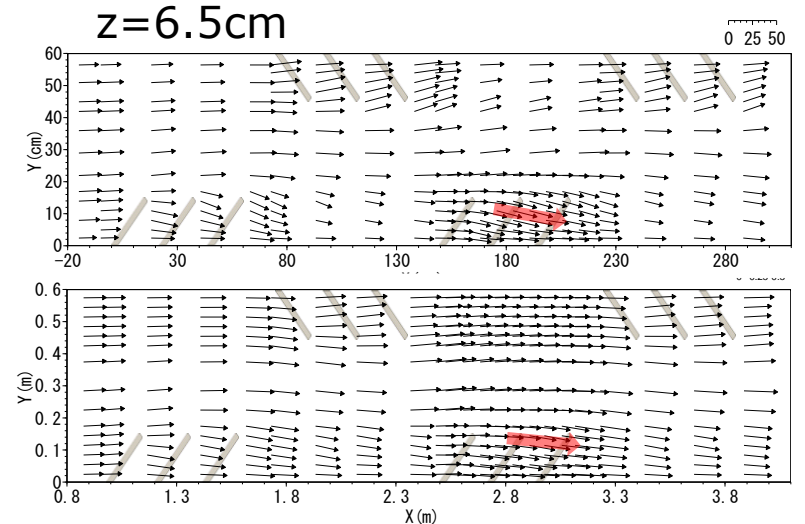
水制上部を直角に横切る流れ
側岸付近が低速, 中央部が高速

下流向き

実測値
計算値



底面では主流域に向かう流れ



水制上部を直角に横切る流れ
側岸付近が高速になり, 横断方向に一様化

③

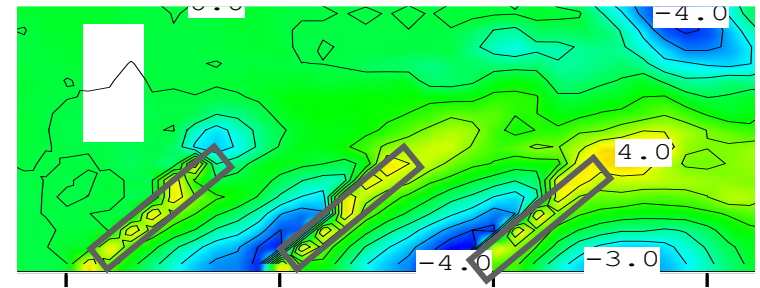
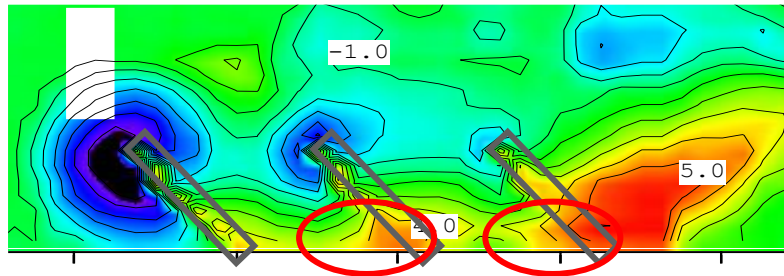
不透過水制群を蛇籠で代用

dm=7.7mmの石を間隙率70%でネットに詰めた

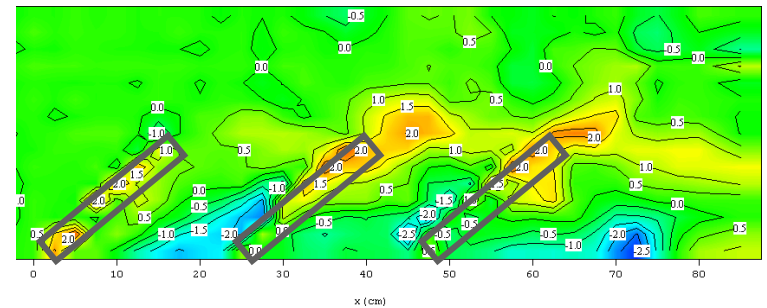
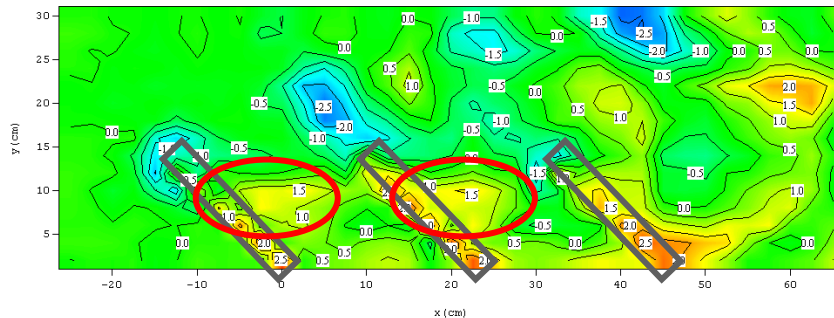


- 先頭水制は前面の洗掘により、河床に沈み込む
- その結果、局所洗掘は大幅に減少
- 角度による洗掘・堆積の傾向は維持されている
- 上向きでは水瀬頭部が沈み、下向きでは根部側が沈む

不透過



透過
(蛇籠)

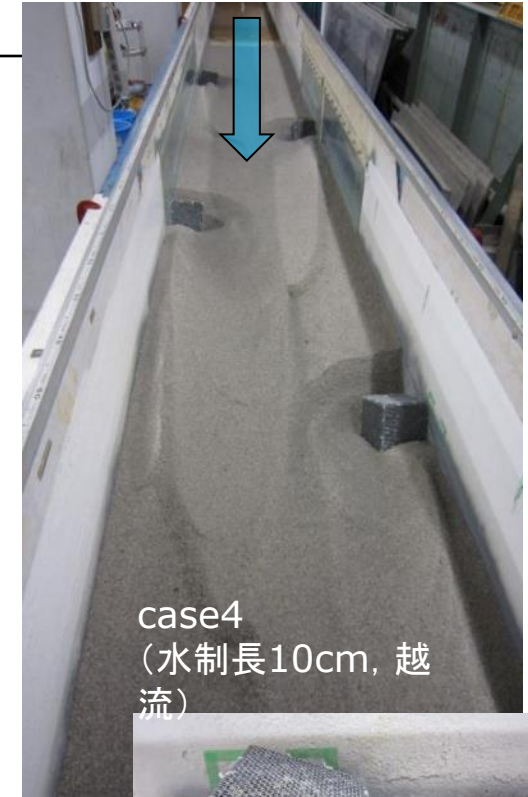
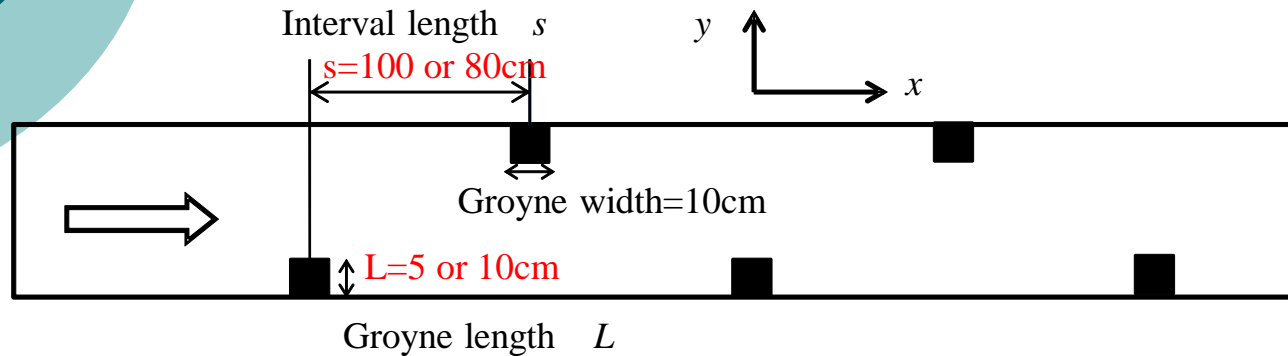
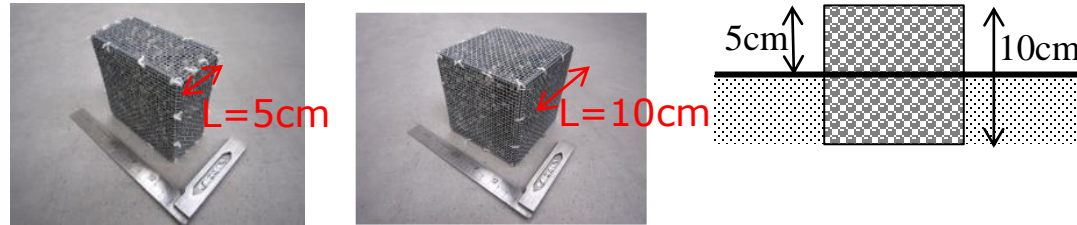


先端が洗掘，根元が堆積

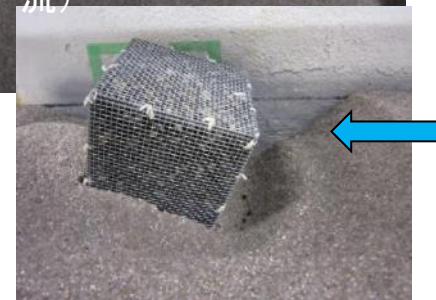
根元が洗掘，先端が堆積

⑥

石詰箱型ブロックによる蛇行河道の創出実験



case4
(水制長10cm, 越流)



この形で安定

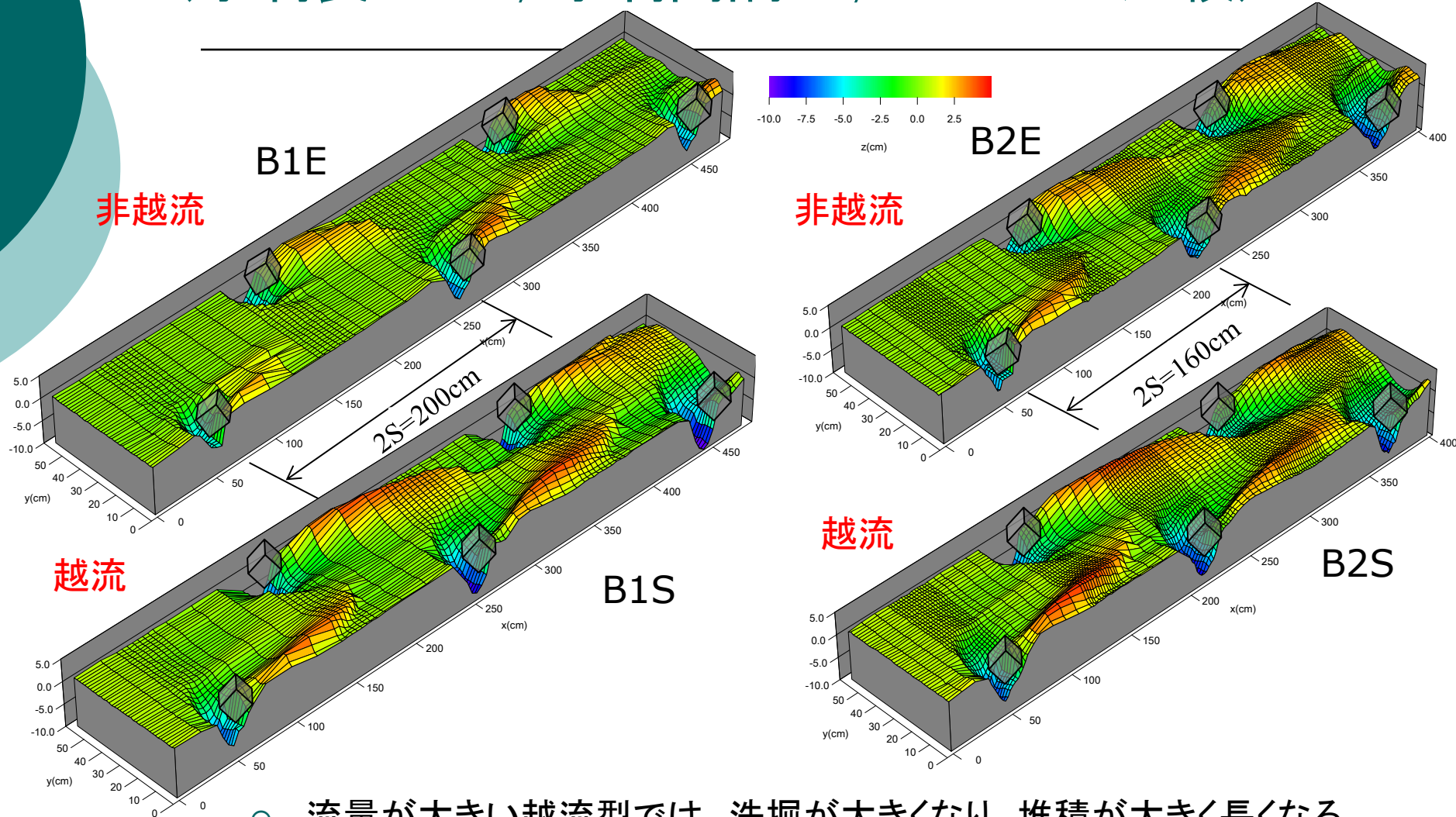
ケース名	水制長 L[cm]	水制間隔 d[cm]	流量 Q [lit/s]	水深 h [cm]	断面平均流速 u_m [cm/s]
A1E	5	100	7(非越流)	4.0	29.20
B1E	10			4.7	24.99
A1S	5		13(越流)	6.3	34.74
B1S	10			6.8	32.02
A2E	5	80	7(非越流)	4.0	29.44
B2E	10			4.7	25.31
A2S	5		13(越流)	6.4	34.50
B2S	10			6.8	32.24

- ・石詰 : 3mm~4.8mmの石
- ・中央粒径 $D_{50}=0.571$ mm
- ・水路勾配は1/500
- ・通水時間は75分

⑥

河床高コントー

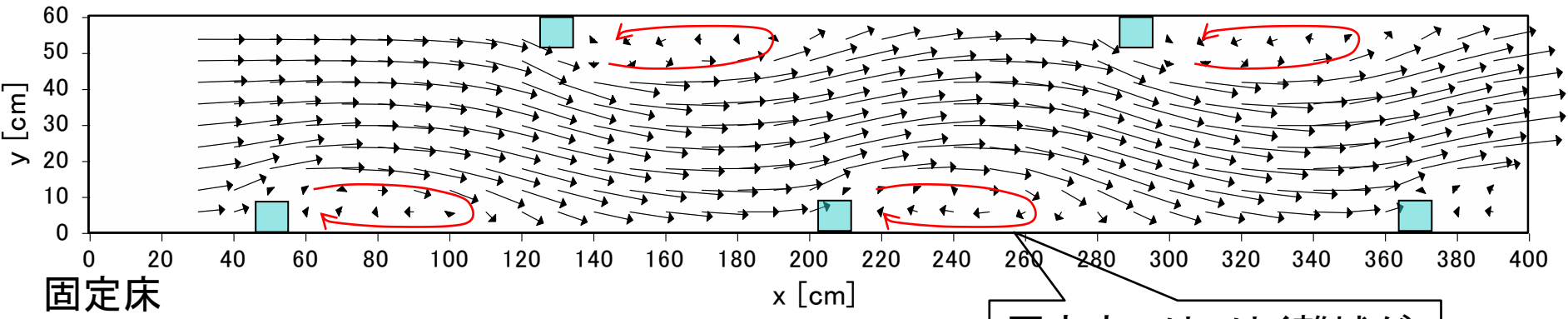
(水制長10cm, 水制間隔80, 100cmの比較)



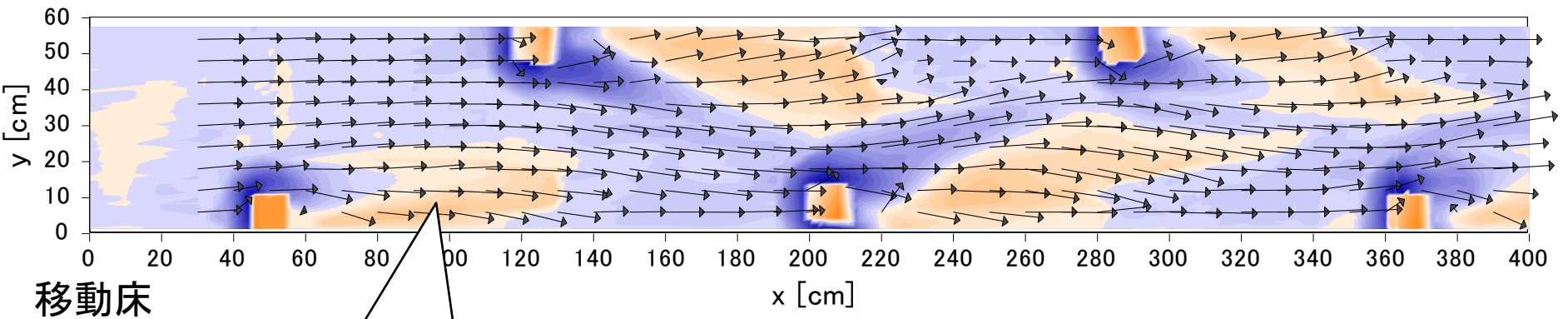
- 流量が大きい越流型では、洗掘が大きくなり、堆積が大きく長くなる。
- 間隔が80cmのとき、堆積が下流の水制にまで達する

⑥

固定床と移動床の流れ方の違い

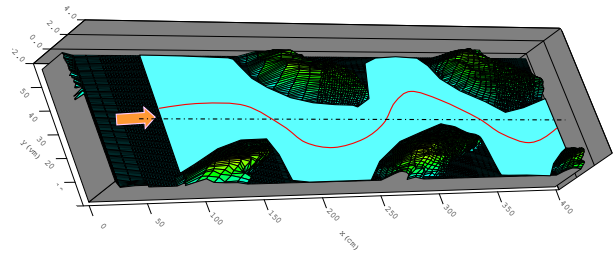


固定床では、はく離域が存在し、蛇行している



移動床では堆積上を越える流れが発生し、側岸部が高速になる

水位低下後には蛇行



わんど内の流れ

- わんど内の流れ

- わんどの水交換機構
- 閉鎖的わんどの水交換
- 複断面河道のわんど

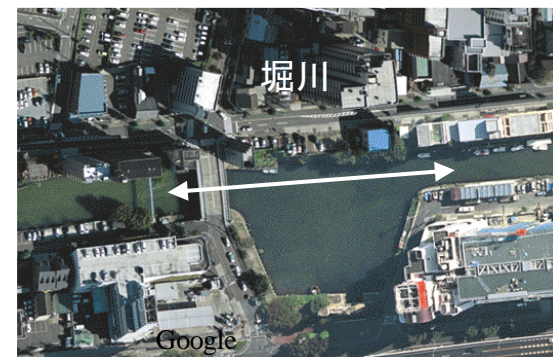
自然共生研究センターのわんど研究ゾーン
2002~2003

様々なわんど形態
2005~2013

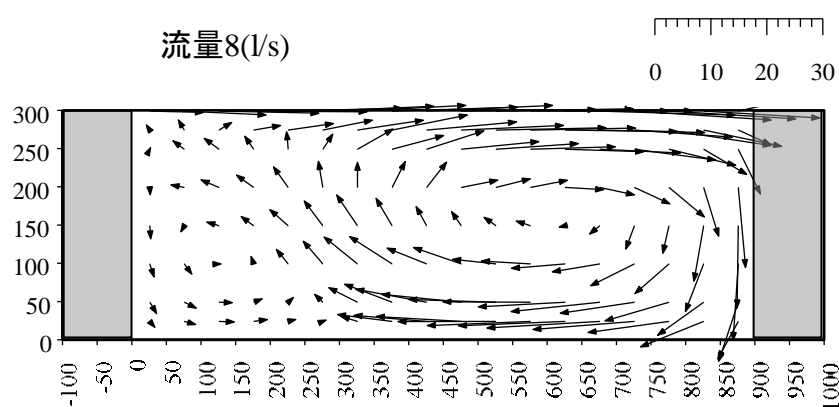
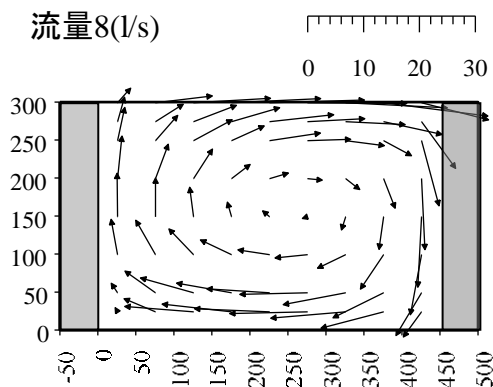
- ① 富永晃宏・谷川幸男・久田陽史, 人工わんどの水交換機構とその制御に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, 571-576, 2002.
- ② 富永晃宏・久田陽久, 人工わんどの水交換機構に与えるわんど形状と植生の影響に関する研究, 水工学論文集, vol.47, 517-522, 2003.
- ③ 富永晃宏, 鄭載勳, 阪巻実佳, 複断面開水路高水敷に設けられた凹部の流れ構造, 応用力学論文集, vol.8, 883-891, 2005.
- ④ 富永晃宏, 北村福太郎, わんどの水交換に及ぼす連絡水路形状の影響, 水工学論文集, Vol.51, 727-732, 2007.
- ⑤ 富永晃宏・ヌグロホ, E. O., 閉鎖的なわんどの水交換に及ぼす開口部形状の影響, 水工学論文集, vol.53, pp.895-900, 2009.
- ⑥ Tominaga, A. & Jong, J., Effects of conjunction channel on water exchange in riverside embayment, Journal of Hydro-environment Research, vol.4, 163-173, 2010.
- ⑦ Nugroho, E. O. and Tominaga, A., Turbulence Characteristics in an Embayment with Various Entrance Configurations, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.54, 181-186, 2010.
- ⑧ 鄭載勳, 富永晃宏, 複断面河道に設けられたわんど周辺の3次元流れ構造, 応用力学論文集, vol.13, 735-743, 2010.
- ⑨ Nugroho E., O. and A. Tominaga, Experimental Investigation of Flow in An Embayment with Two Entrances, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1, Vol. 67, No. 4 I_205-I_210, 2011.

側岸凹部流れの存在

- 水制群, 人工わんど, 入り江



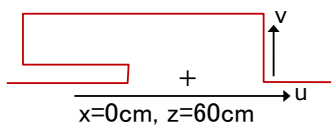
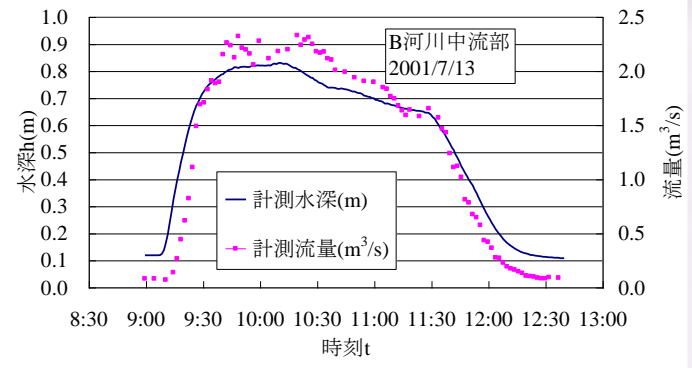
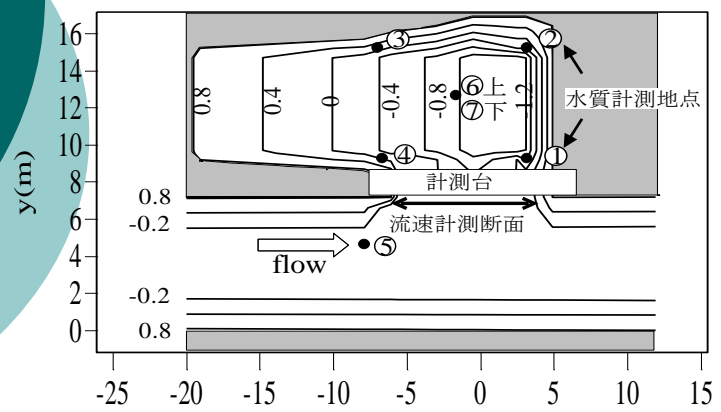
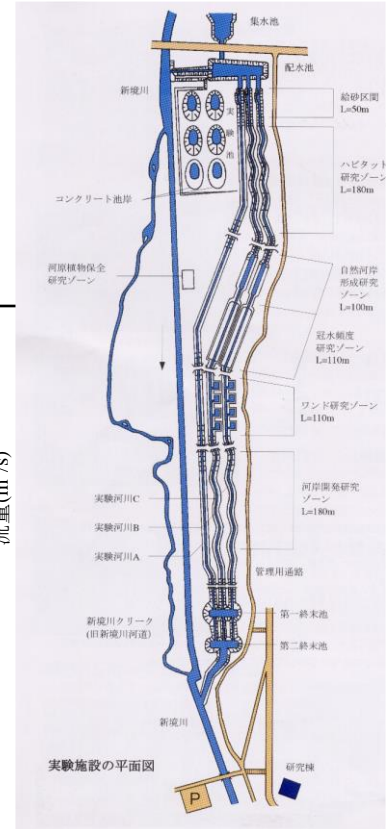
側岸凹部流れの基本形



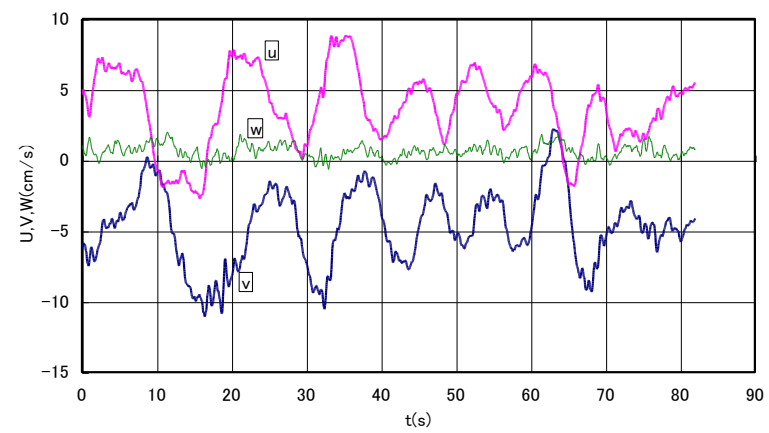
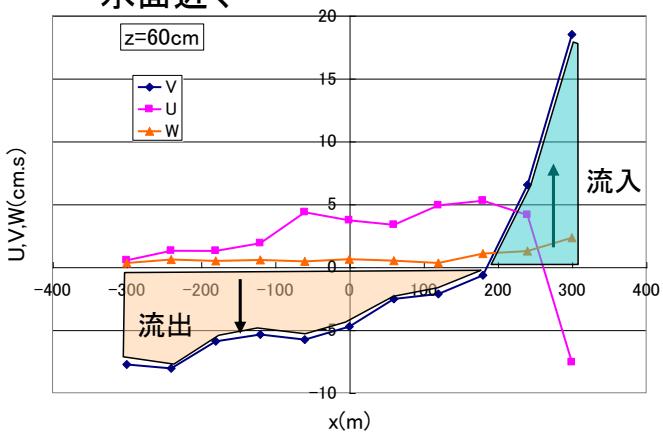
②

自然共生研究センター わんど研究ゾーンでの出水実験

電磁流速計



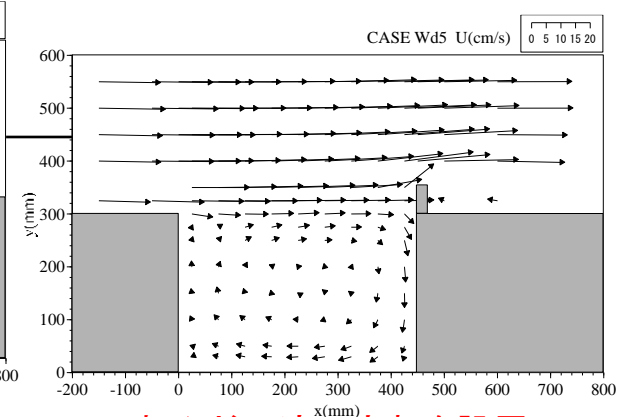
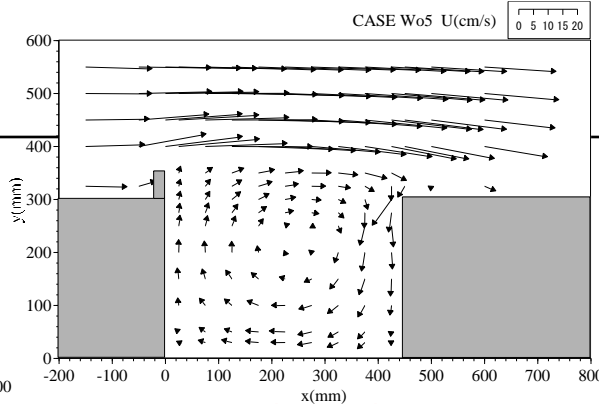
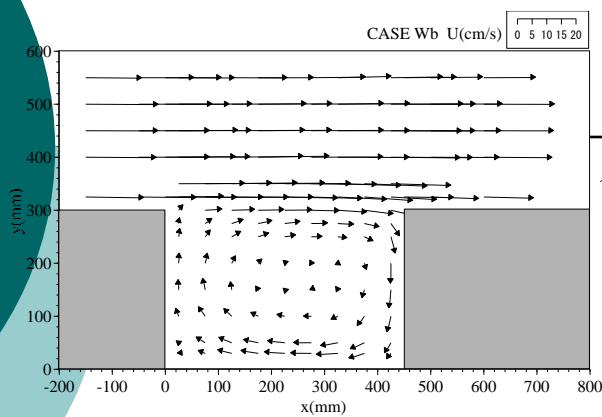
水面近く



下流部でわんど内への流入が生じ、上流部でわんどからの流出があり、水交換が行われている

周期7s~10s程度の長周期変動
uとvの位相は90°程度ずれている

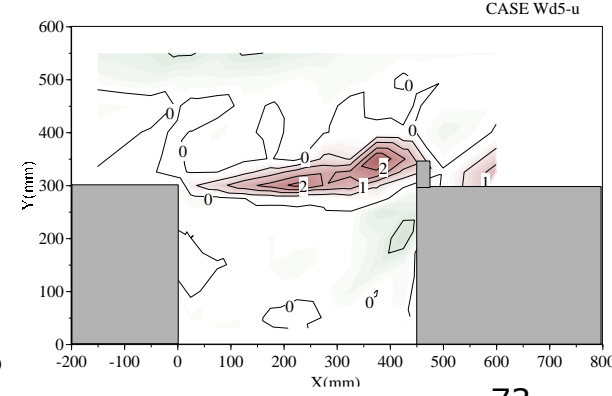
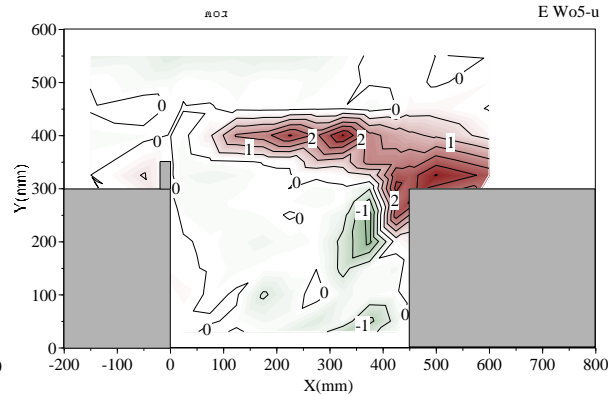
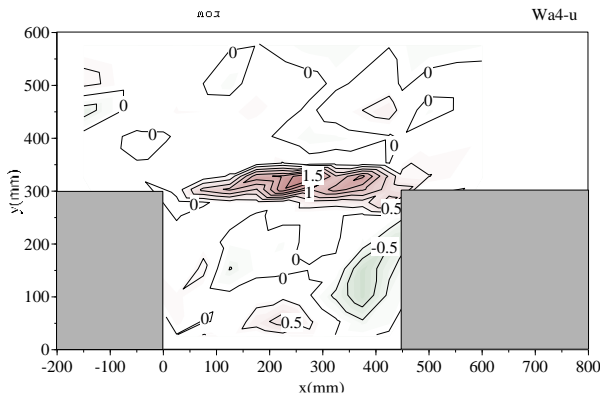
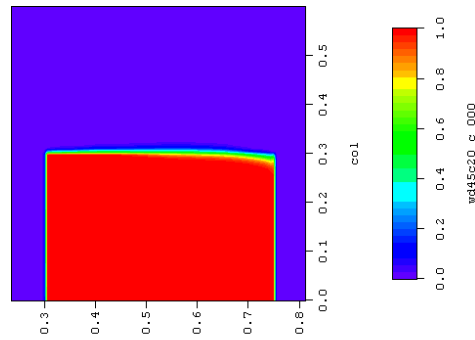
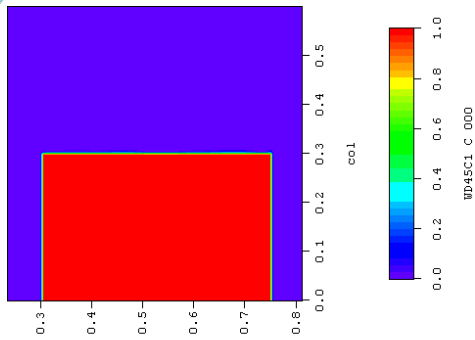
① 人工わんどの水交換機構とその制御法



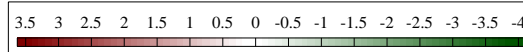
わんど上流に突起を設置

わんど下流に突起を設置

- 常識とは逆に上流に突起を設けることで、境界部の渦も大きくなり、わんど内への流入傾向を強、循環流を強める。
- 逆に下流部に配置することで境界部に発生する渦がわんど内へ流入しにくくなり、循環流が弱まる。

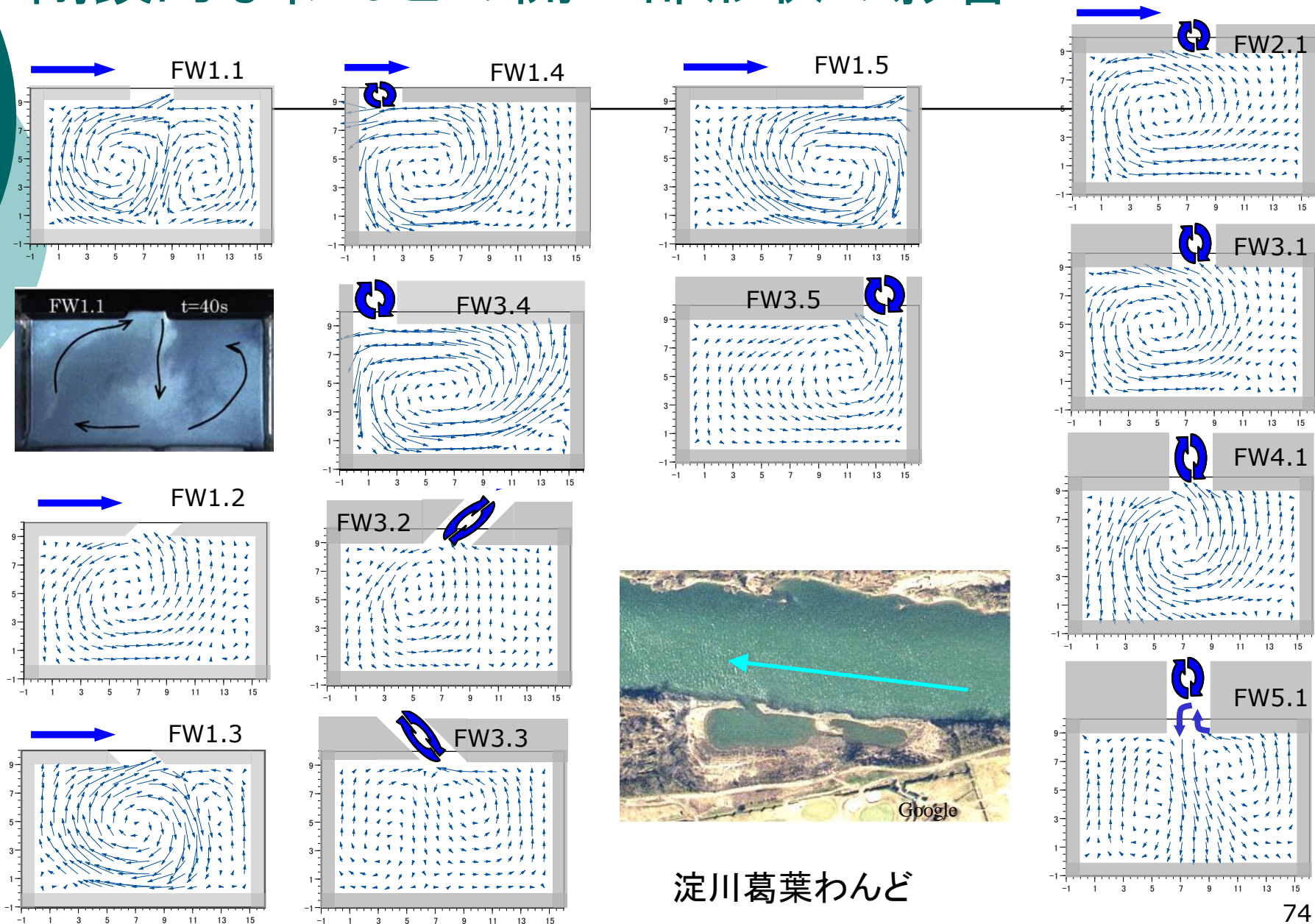


レイノルズ応力分布



④, ⑤, ⑥

閉鎖的なわんどの開口部形状の影響



淀川葛葉わんど

④, ⑤, ⑥

水交換速度

- わんど内の濃度の減衰過程の近似曲線の傾きから水交換速度を定義

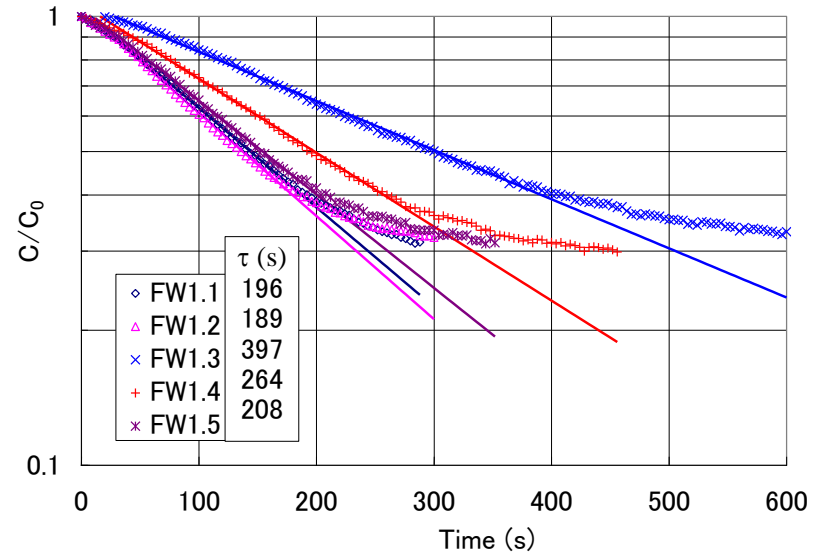
$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{t}{\tau} + A$$

τ : 滞留時間

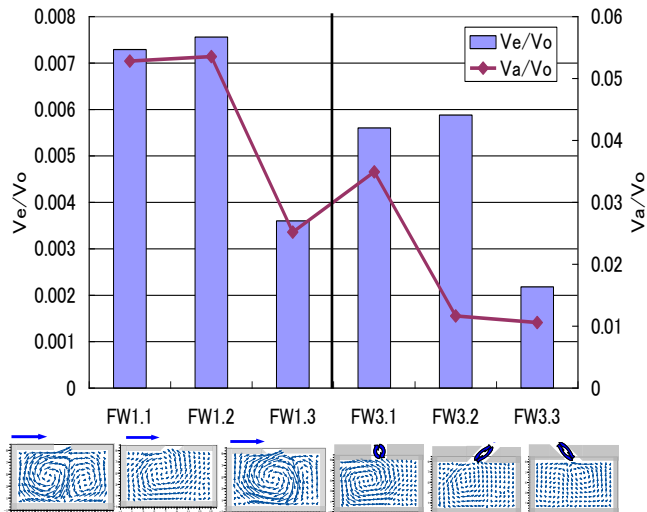
$$V_e = \frac{D \cdot L}{\tau \cdot b}$$

V_e : 水交換速度

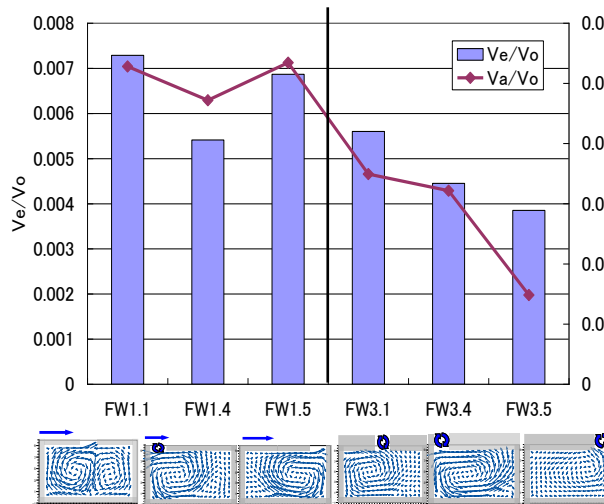
染料による可視化



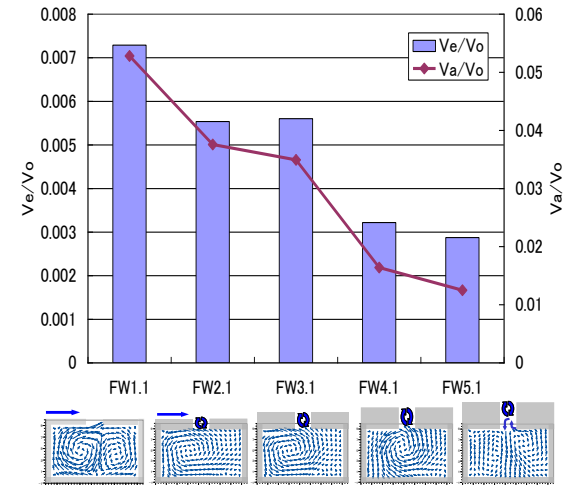
わんど内平均濃度の時間変化



連絡水路角度の影響



連絡水路位置の影響

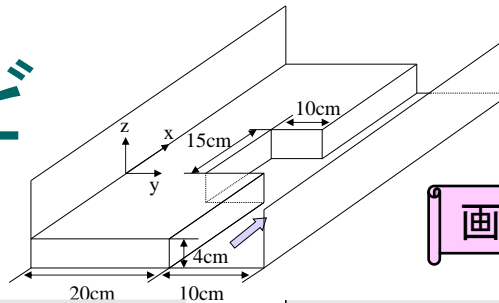


連絡水路長さの影響

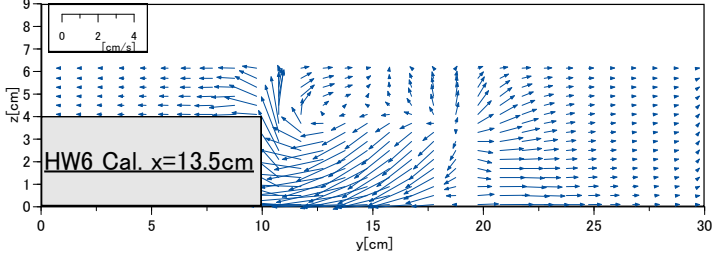
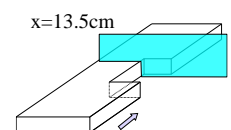
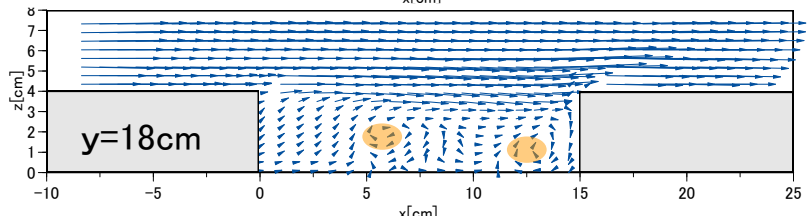
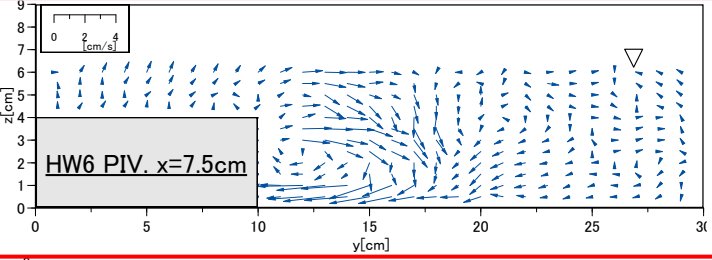
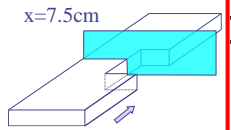
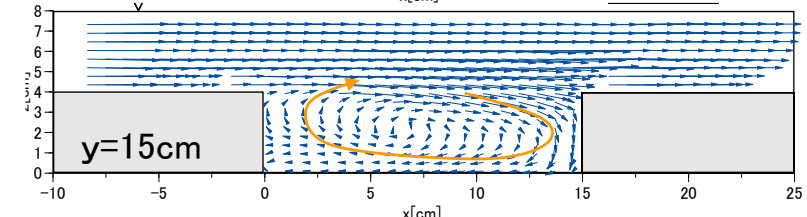
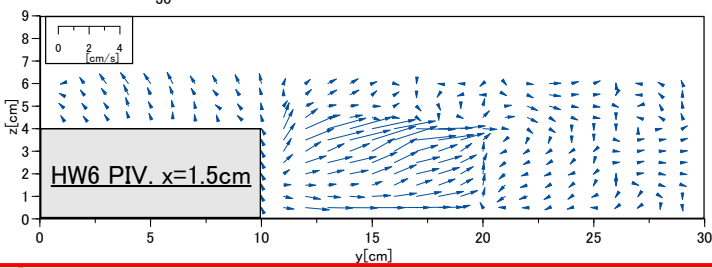
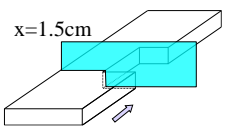
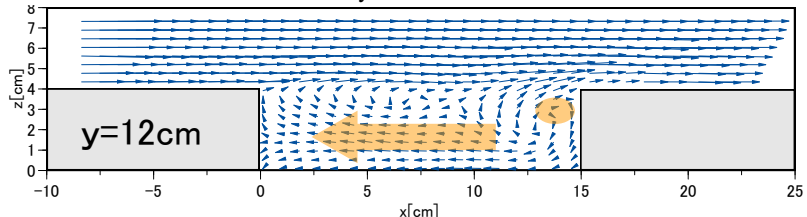
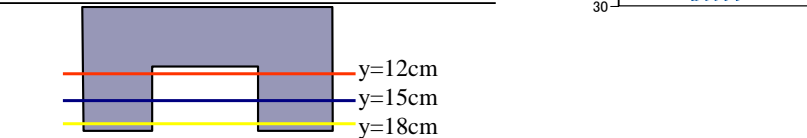
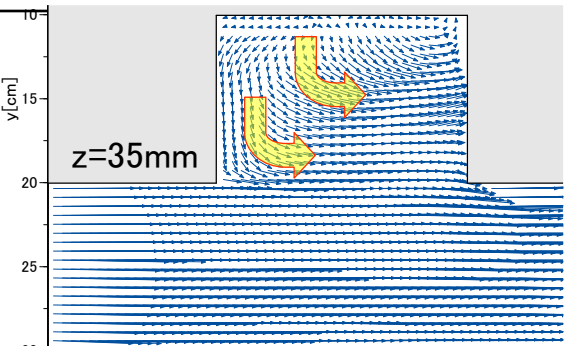
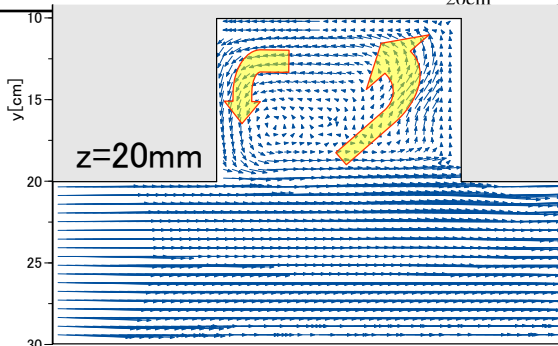
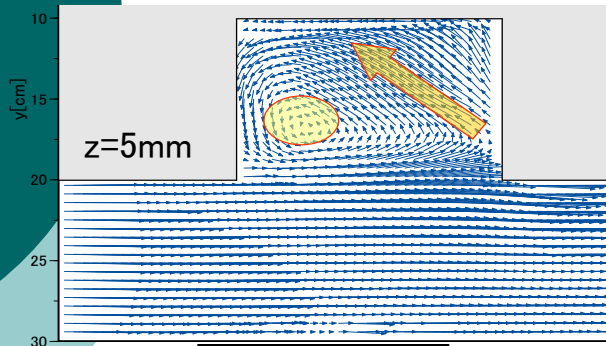
8

複断面河道のわんど

○ 3次元流れ構造



画像計測法 (PIV)



わんどの土砂堆積制御

- わんどの土砂堆積抑制

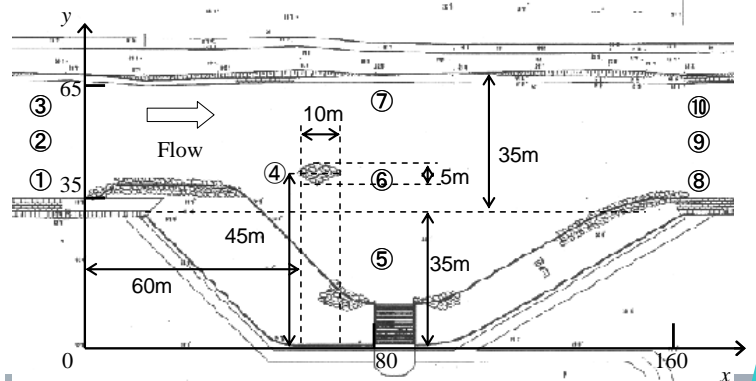
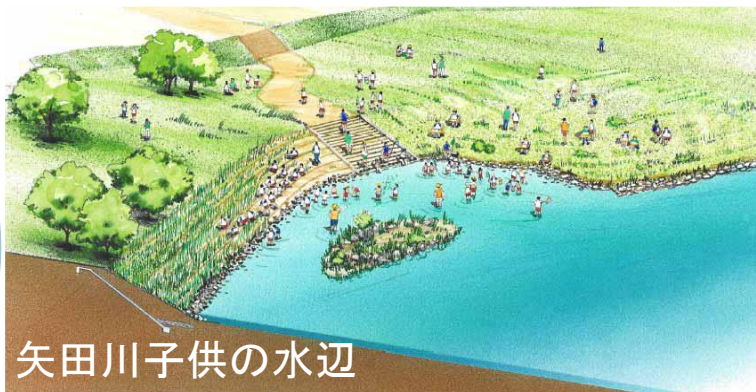
- 矢田川人工わんどの土砂堆積
- わんど開口部遮蔽による土砂堆積抑制
- 水制や導流工を用いた土砂堆積制御

矢田川人工わんどの問題
2010~2013

↓
構造物による土砂堆積抑制
2011~2018

- ① 富永晃宏，榑 卓也，砂礫床河川に設置された人工わんど周辺の河床変動，水工学論文集，第54巻，793-798，**2010**.
- ② 富永晃宏・堀部扶実・榑卓也，わんどの開口部遮蔽による土砂堆積抑制効果，土木学会論文集B1，Vol. 67，No. 4，I_1057-I_1062，**2011**.
- ③ 鄭載勲・富永晃宏，様々な形状を有する高水敷わんどの流れ構造と土砂堆積機構に関する研究，土木学会論文集B1，Vol. 67，No. 4，I_1051-I_1056，**2011**.
- ④ 富永晃宏・小島直也・市川亜也佳，開水路側岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.69，No.2，pp.I_519-I_528，**2013**.
- ⑤ 富永晃宏・庄建治朗・加藤智道・小島直也，水制による河岸凹部の流れ構造の制御に関する研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol.71，No.4，pp.I_649-I_654，**2015**.
- ⑥ 富永晃宏・小島直也・庄建治朗・加藤智道，水制による河岸凹部の土砂堆積制御に関する研究，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72，No.4，I_541-I_546，**2016**.
- ⑦ 富永晃宏・加藤智道・庄建治朗，導流工を用いた河岸凹部の土砂堆積制御，土木学会論文集B1(水工学) Vol.73，No.4，I_691-I_696，**2017**.

① 矢田川人工わんど設置後の河床形状時間変化



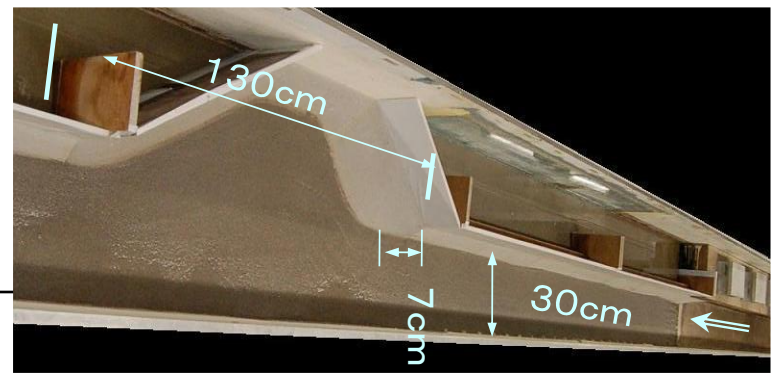
①

電磁流速計

模型実験の試み

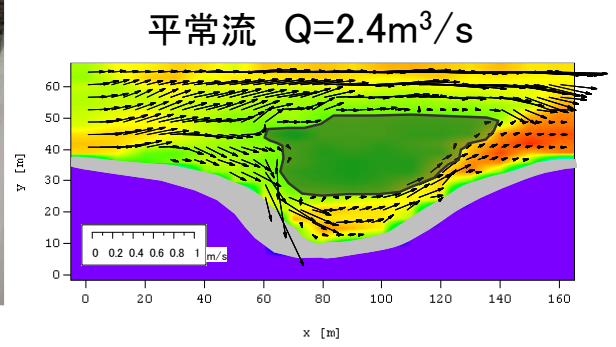
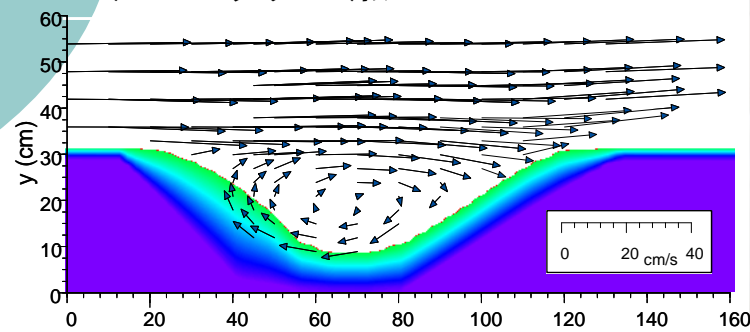
○ 矢田川ワンドの歪み模型

水平縮尺 = 1/117 低水路幅 B=0.3m 流量 Q=0.006m³/s
 鉛直縮尺 = 1/36 水深 h=0.055m 摩擦速度 u_{*}=0.022m/s

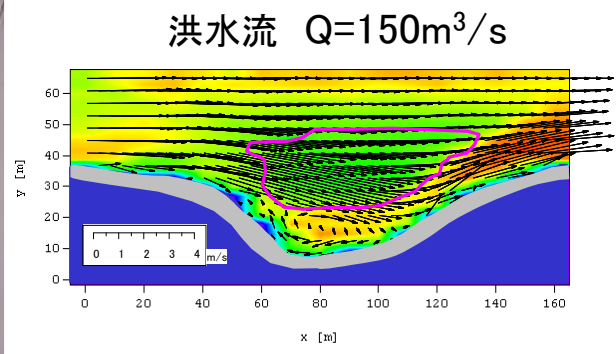
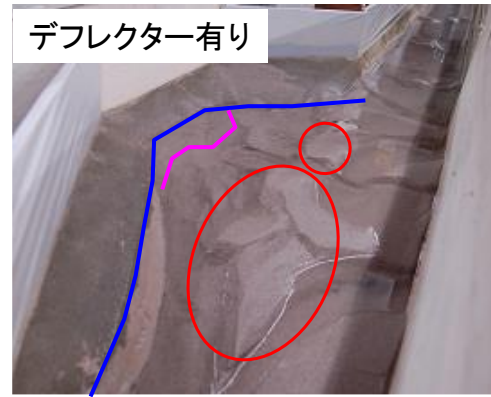
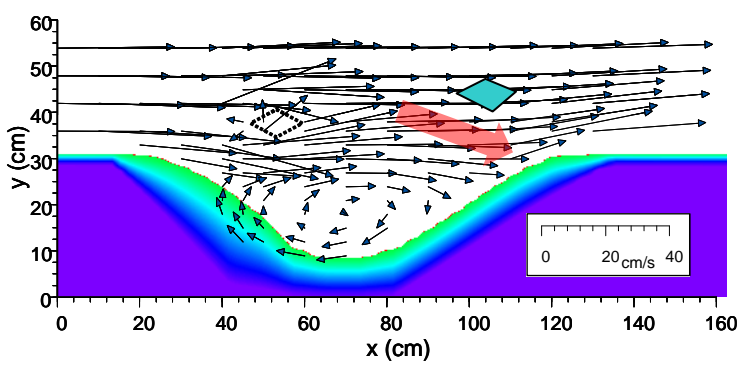


(一様砂平均粒径 0.43mm)

デフレクター無し



デフレクター有



出水時の流速ベクトル

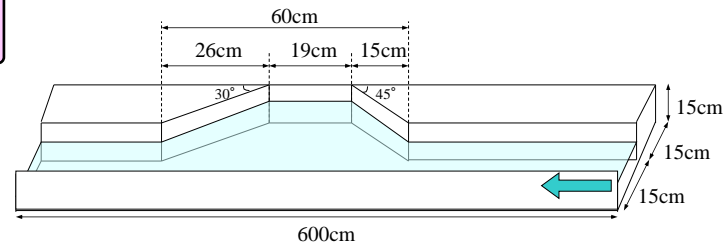
移動床実験による再現は困難

2次元数値計算

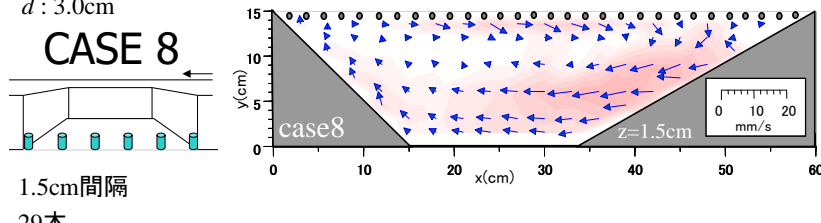
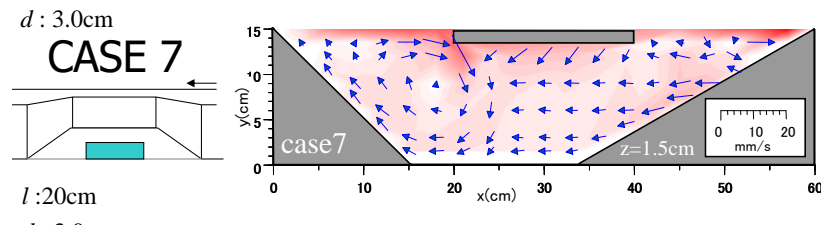
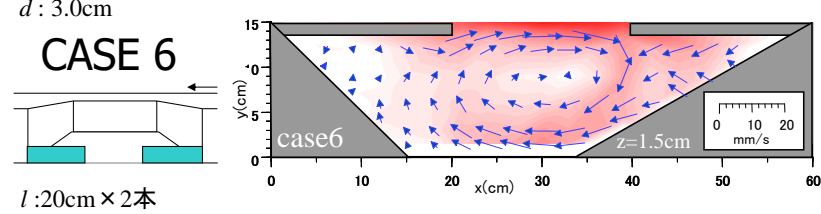
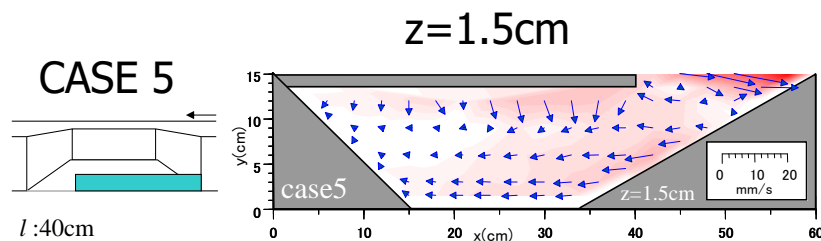
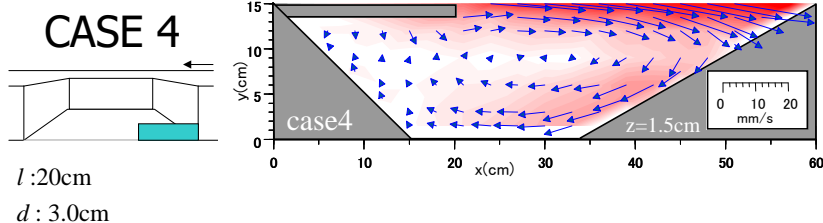
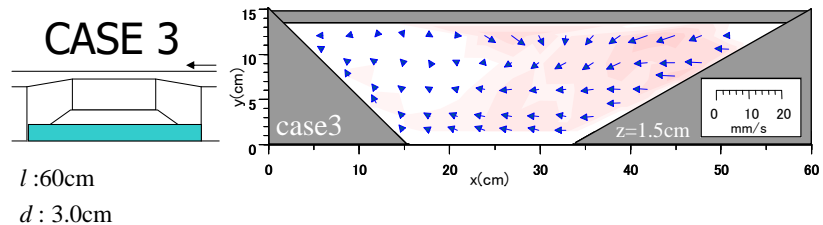
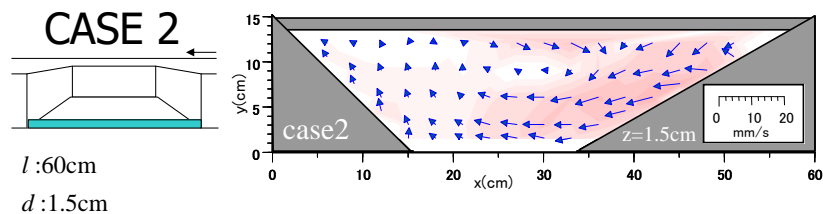
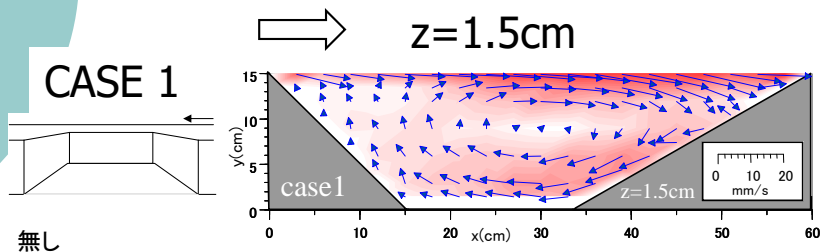
②

電磁流速計

わんど開口部に障害物



- ワンド開口部に沿って閉塞板を設置
- ワンド開口部に沿って杭群を設置

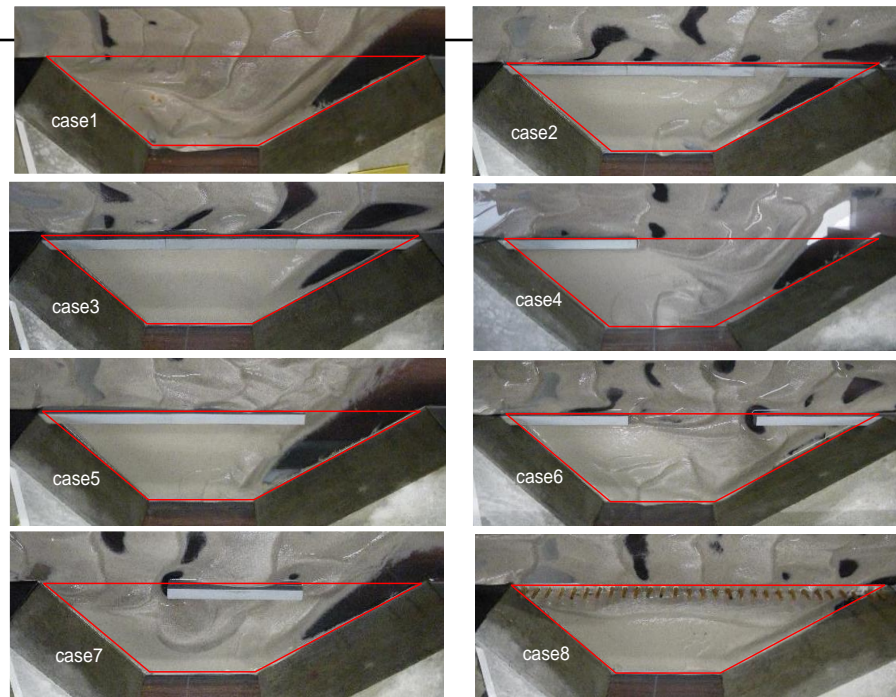
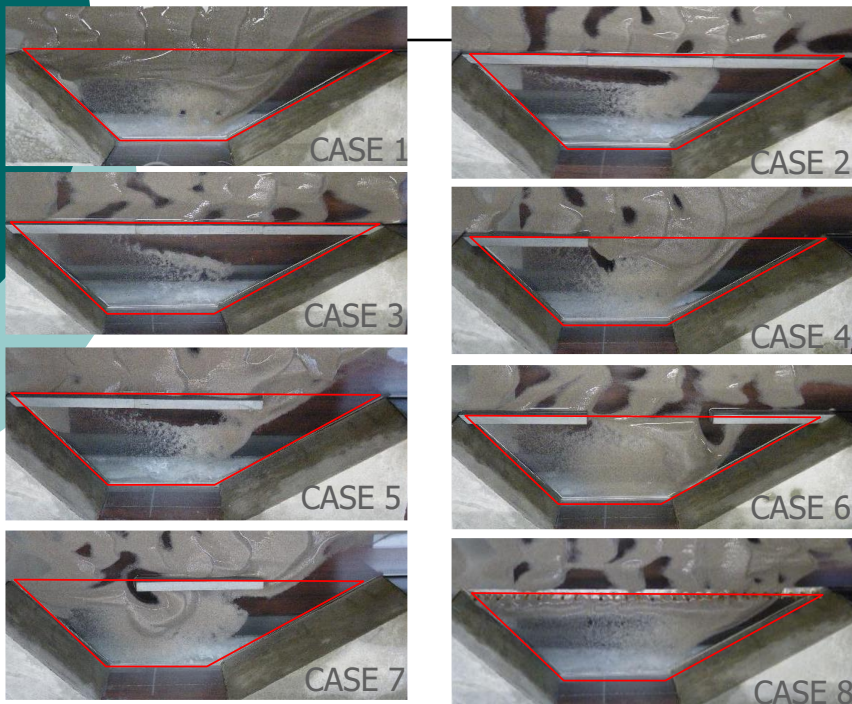


② わんど開口部に障害物の土砂堆積実験

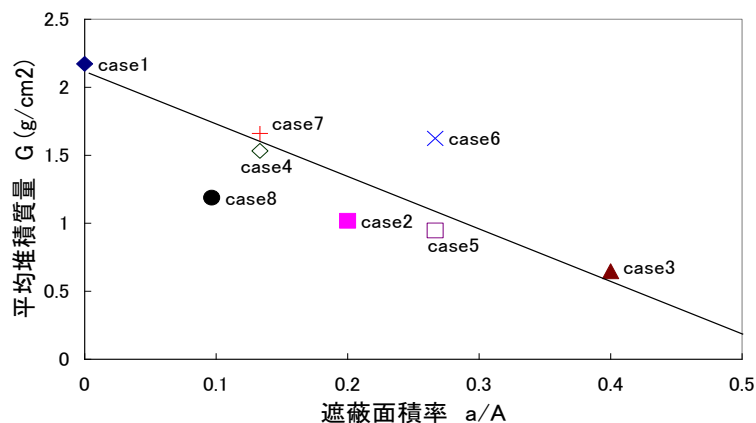
○ 6号砂: $d_{50}=0.30\text{mm}$, 8号砂: $d_{50}=0.13\text{mm}$

○ 一様粒径: 6号砂のみ(掃流砂のみ)

○ 混合砂: 6号砂と8号砂(掃流砂+浮遊砂)



遮蔽面積率と
平均堆積量
の関係



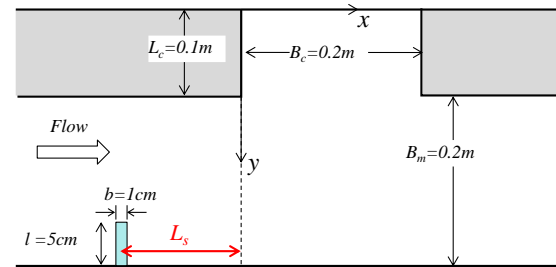
○ 混合砂の場合、ほとんど浮遊砂が占める

○ わんど開口部の遮蔽面積が大きいほど
わんど内の平均合成流速が小さくなり、
堆積量は減少する

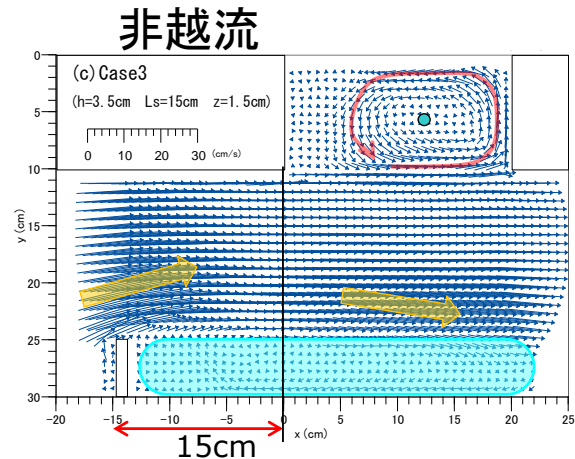
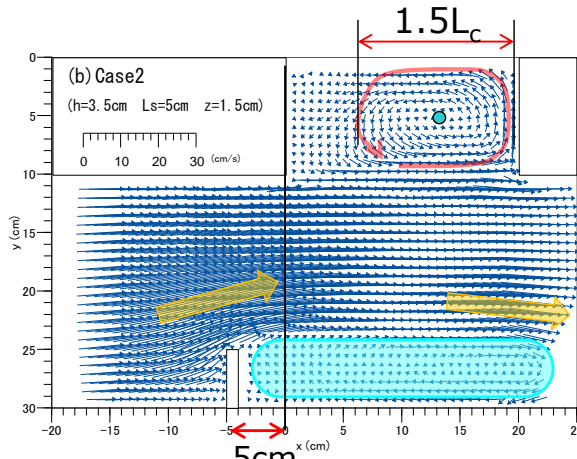
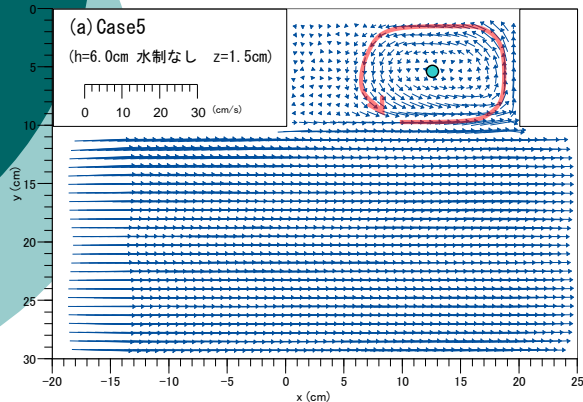
4

画像計測法 (PIV)

わんど対岸に水制を設置

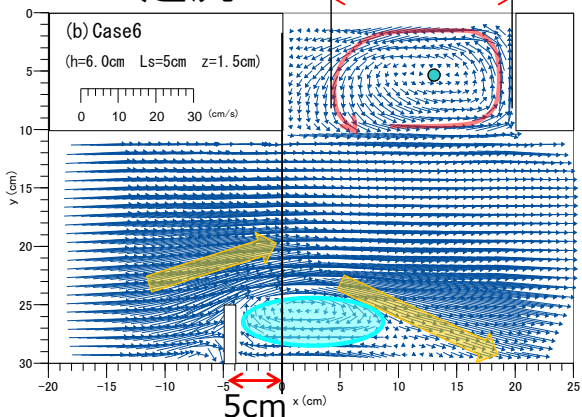


水制なし

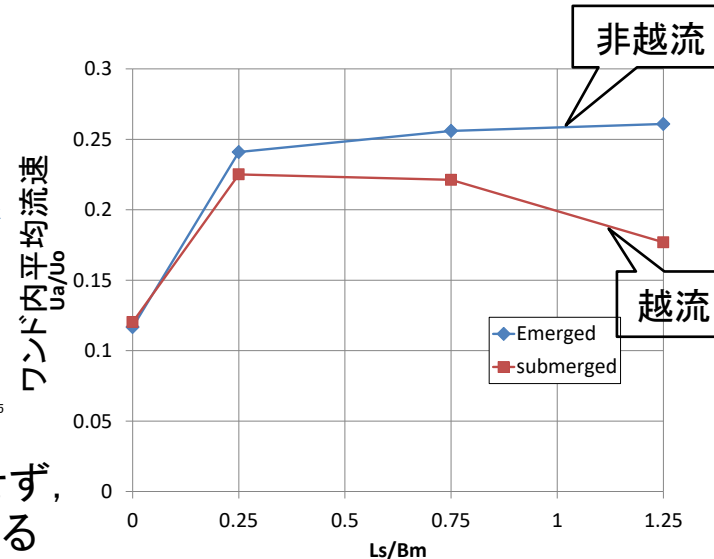
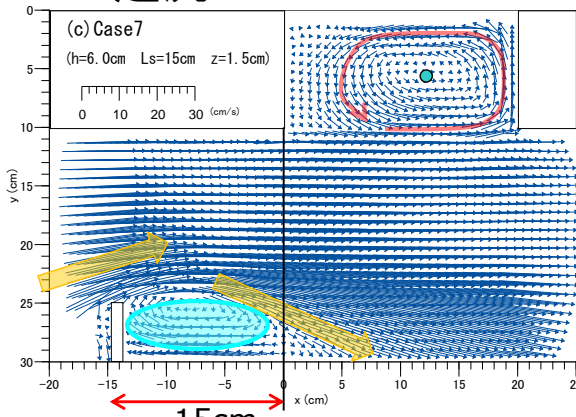


非越流

越流



越流

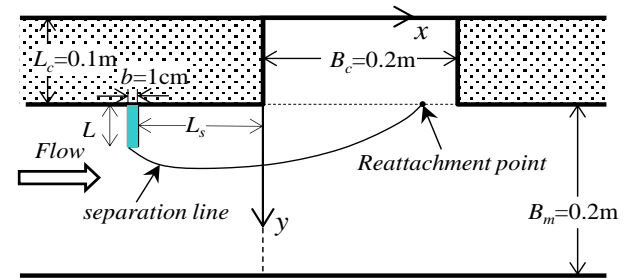


- 水制設置により凹部内の再循環流の構造はほとんど変化せず、水制により加速された流れによってわんど内流速が大きくなる
- 非越流と越流では主流域の流速ピーク位置が異なる

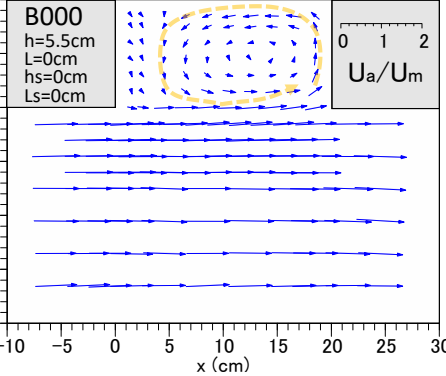
⑥

わんど上流に水制を設置する

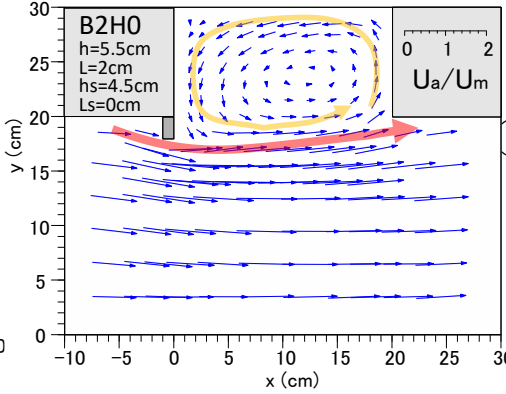
電磁流速計



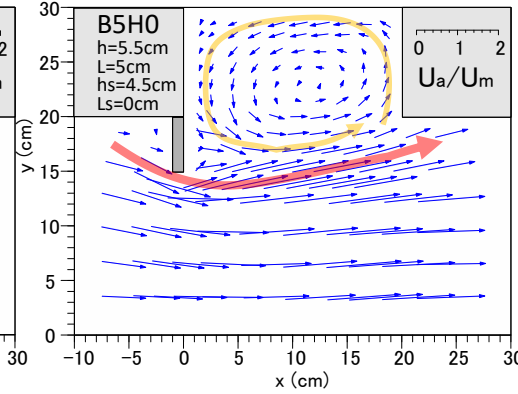
水制なし



越流

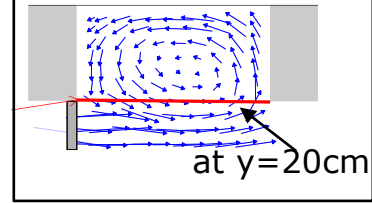


越流

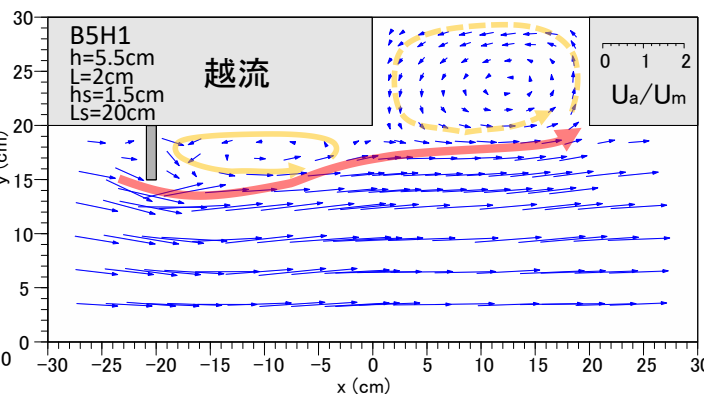
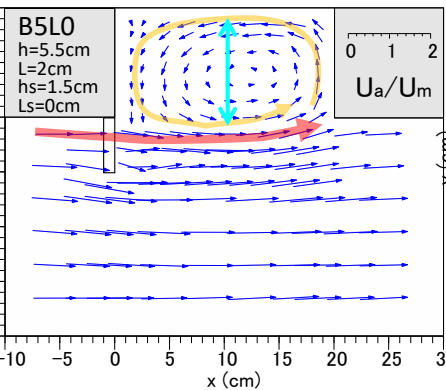


質量交換率:

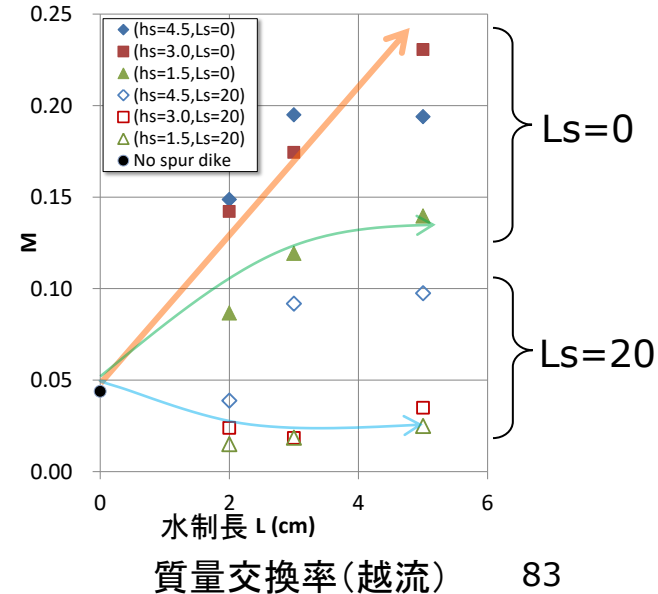
$$M = \frac{1}{\rho U_m B_c} \int_0^L \rho |V| dx$$



越流



- 質量交換率は、\$Ls=0\$では水制長の増加とともに増大
- 再循環渦の横断方向スケールが増大した結果、凹部境界において横断方向流速が大きいことによる
- \$Ls=20\$では水制高さ3cm以下ではかえって減少

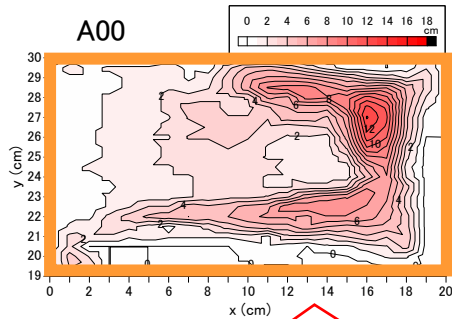


⑥ 砂堆積形状の5つのタイプ

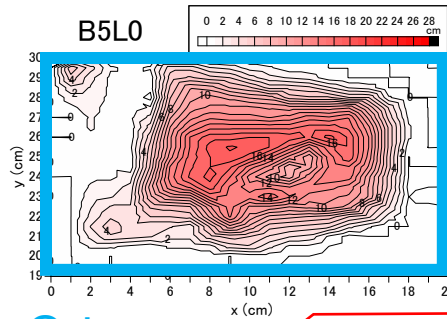
非越流ケース

越流ケース

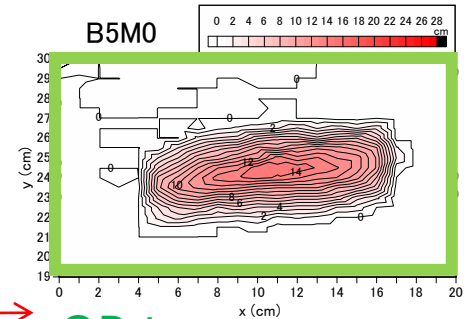
	emerged		submerged					
	LC	L	Ls=0			Ls=20		
	LC	L	hs=1.5	hs=3	hs=4.5	hs=1.5	hs=3	hs=4.5
L=0	LC	L	L	L	L	L	L	L
L=2	LC	LC	O	O	O	LC	LC	L
L=3	OH	L	O	OP	OP	L	L	L
L=5	O	O	O	OP	OP	L	L	OH



LC type



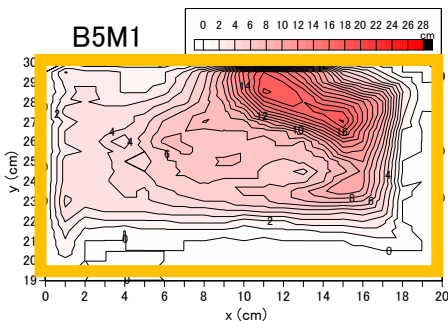
O type



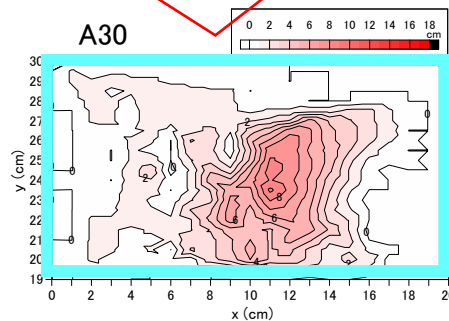
OP type

low → high

渦強度



L type



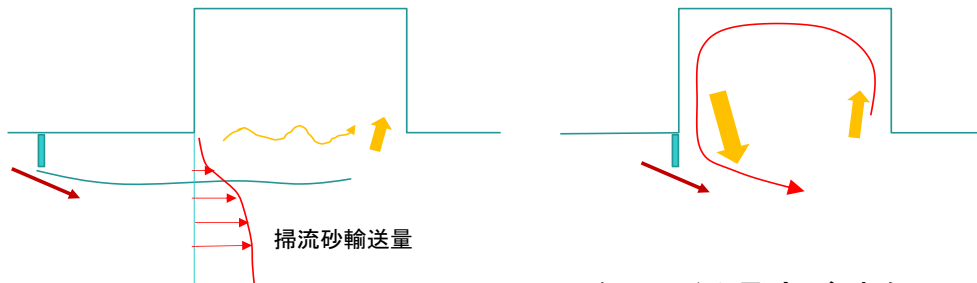
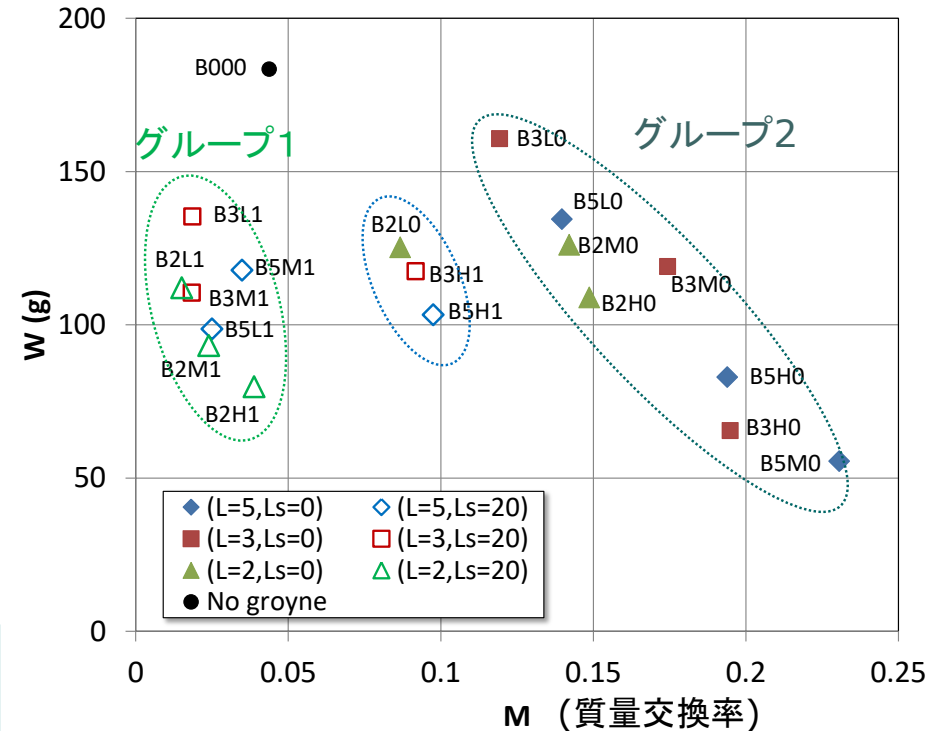
OH type

渦強度の増加とともに堆積タイプは
L, LC, OH, O, OPと変化する

⑥

質量交換率と砂堆積量との関係

- 分布は3つのグループに分けられる
- グループ 1 ($L_s=20\text{cm}$, M 小)
 - 質量交換率は小さいが、砂堆積は減少している
 - これは接近する掃流砂の抑制の効果と考えられる
- グループ 2 ($L_s=0\text{cm}$, M 大)
 - 砂堆積量は質量交換率の増加に比例して減少している
 - 強い再循環流がワンド内から砂を排出する効果と考えられる
- グループ 3 (M 中)
 - この中間的なケースでは、複合的效果により砂堆積が減少したと考えられる



水制の水はね効果によりワンド内への掃流砂輸送が抑制される

強い再循環流が砂をワンド内へ輸送するが、ワンド内から外への排出の方が大きくなる

⑦ わんどの土砂堆積抑制の現場 福井県・足羽川の船着場

- 右岸8ヶ所, 左岸9ヶ所に船着場, 水汲場を設置
- いくつかは完全埋没, いくつかは堆積により水深減少

・洪水時には堆積は防げない
・平水時に流れによってシルトを排出したい



中央に土砂堆積



上流側に土砂堆積



完全に埋没し植生繁茂

7

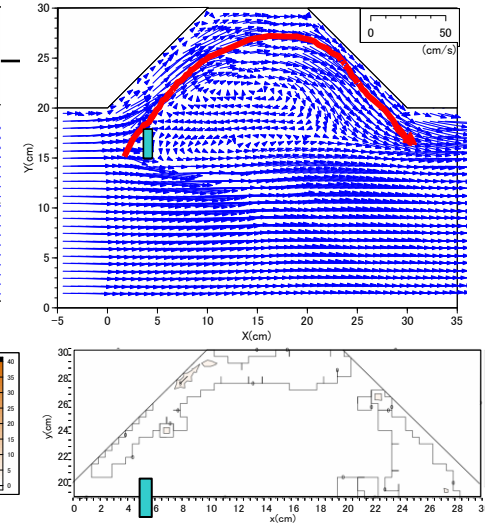
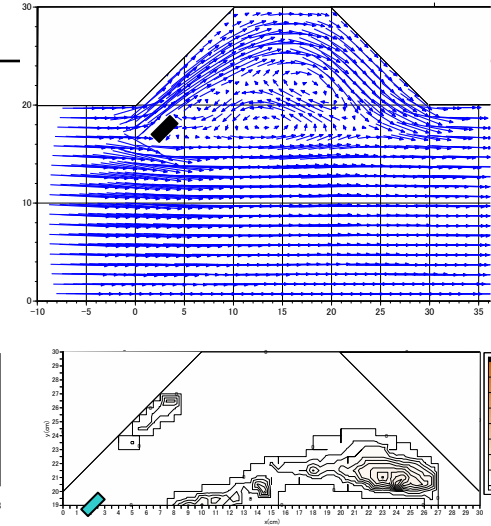
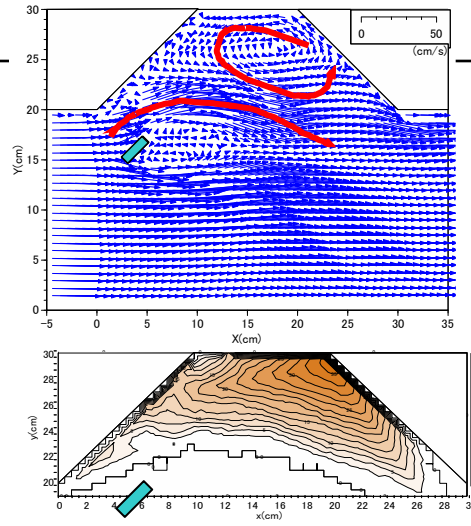
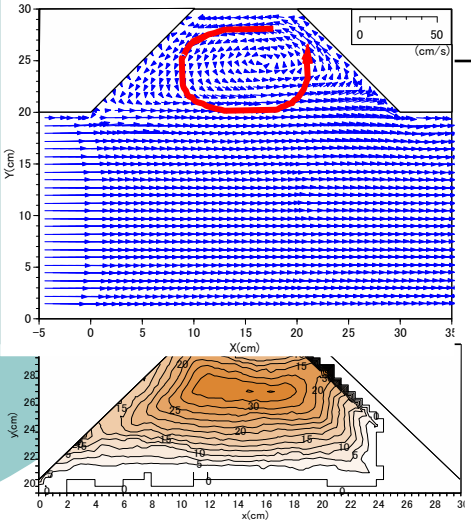
導流工非越流時の流れ構造と土砂堆積

導流工なし

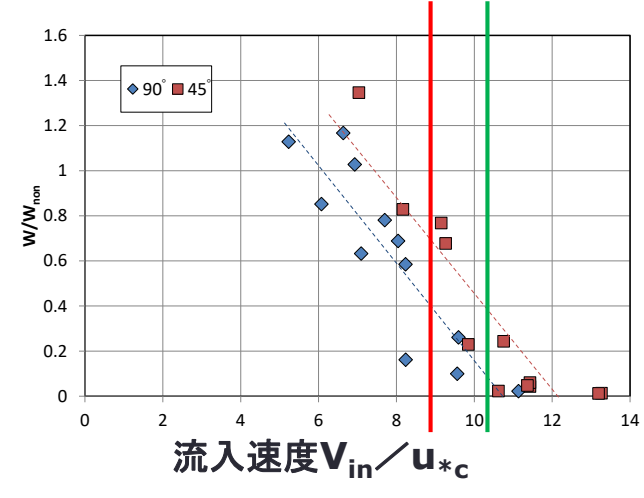
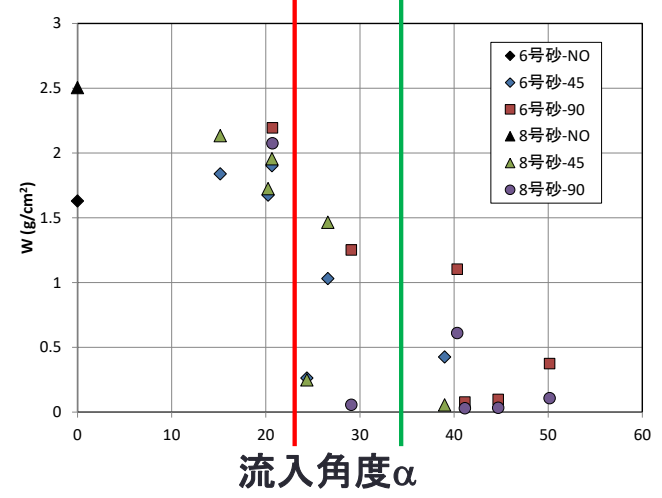
L3A545

L3A345

L3A590



凹部内土砂堆積形状 (8号砂)



凹部内土砂堆積量と流入角度の関係

凹部内土砂堆積量と流入速度の関係

淵を有する流れ

○ 淵を有する流れ

- 木曾川の深掘れ周辺の3次元流れ構造
- 河岸凸部と河床段落ちの相互作用

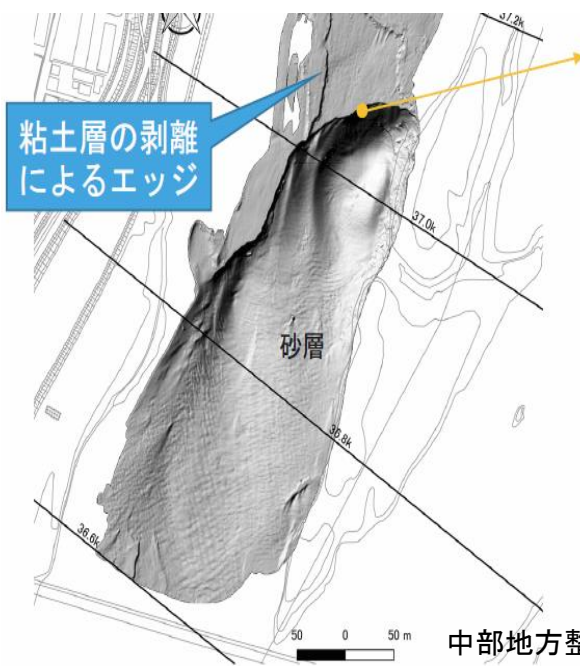
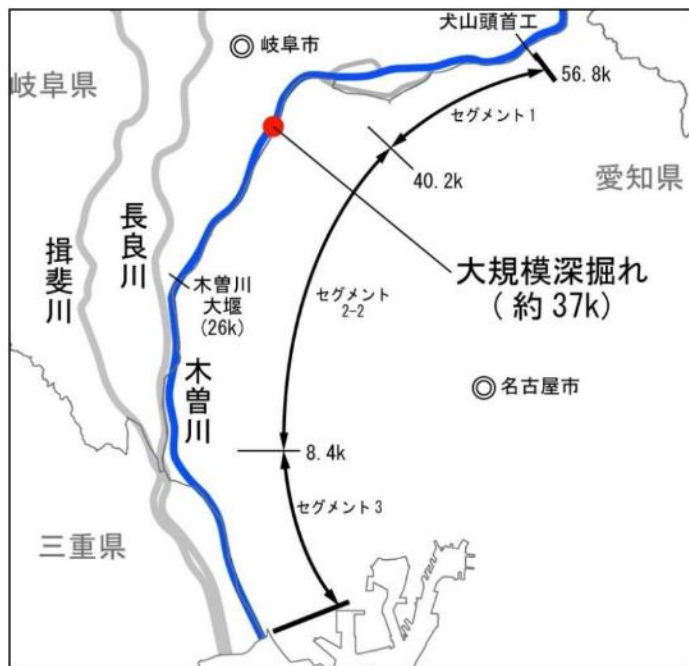
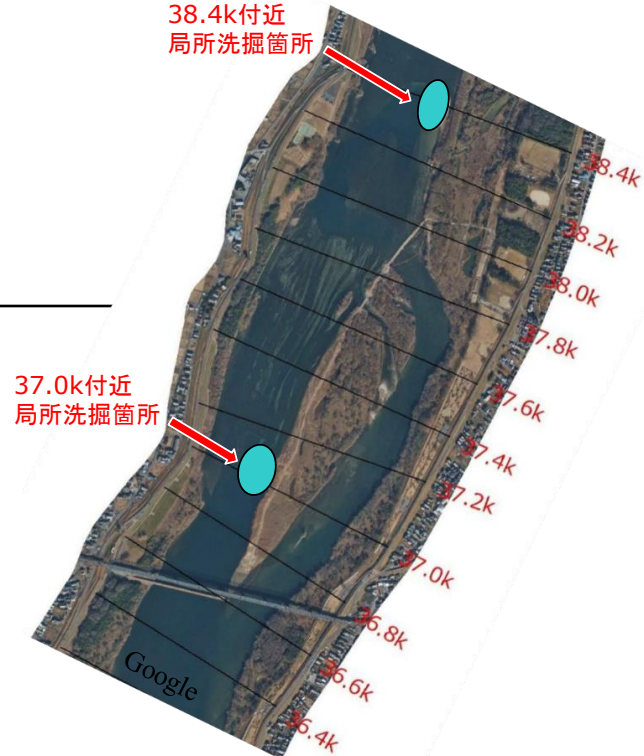
木曾川深掘れの問題
2018~2020

河床凹部の流れ
2018

- ① 冨永晃宏, 橋本直彦, 松本大三, 島田譲治, 片側に淵を有する直線河道の3次元流れ構造, 応用力学論文集, Vol.10, pp.825-832, **2007**.
- ② Yuji Hara, Akihiro Tominaga, Yuka Kuno & Naohiko Sassa, Generation mechanism of deep scour around a narrowed section in rivers, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, vol.37, 719-725, **2017**.
- ③ 冨永晃宏, 佐々直彦, 原悠二, 久野由雅, 木曾川における大規模深掘れ周辺の3次元流れ構造, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, I_643-I_648, **2018**.
- ④ 佐々直彦・冨永晃宏, 木曾川における局所洗掘進行過程に関する考察 (An estimation of generating process of local scouring in the Kiso river), 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_709-I_714, **2018**.
- ⑤ 佐々直彦, 冨永晃宏, 久野由雅, 深掘れ部を有する河道の3次元流れ構造, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol. 74, No. 2, I_475-I_484, **2018**.
- ⑥ 久野由雅, 佐々直彦, 冨永晃宏, 河岸凸部と河床段落ちが存在する河道の3次元流れ構造と洗掘特性, 土木学会論文集B1(水工学), vol.74, No.5, I_793-I_798, **2018**.

木曽川における深掘れ

- 沖積河川における局所洗掘
 - 粘土層の侵食・はく離
 - 砂層の露出
 - 洪水による洗掘
- 木曽川の局所洗掘
 - 深さ約20mに及ぶ大規模な深掘れ(37.0k付近)
 - 深掘れ域で平面渦が発生



木曽川深掘れの発生過程

- 36.8k地点右岸側で洗掘が進行
- 平成9年で36.8kと上流の37.0kの最新河床高の差は5m程度ある
- 36.8kの河床低下は平成12年頃を境に落ち着いたが, 37.0kの河床低下はその後急激に進行

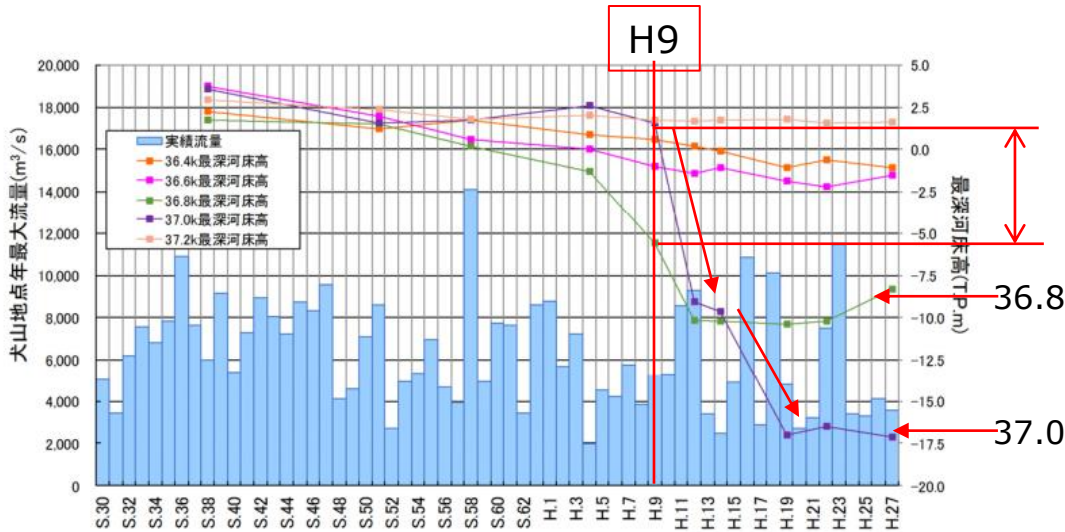


図-3 年最大流量の経年変化と河床低下の進行状況

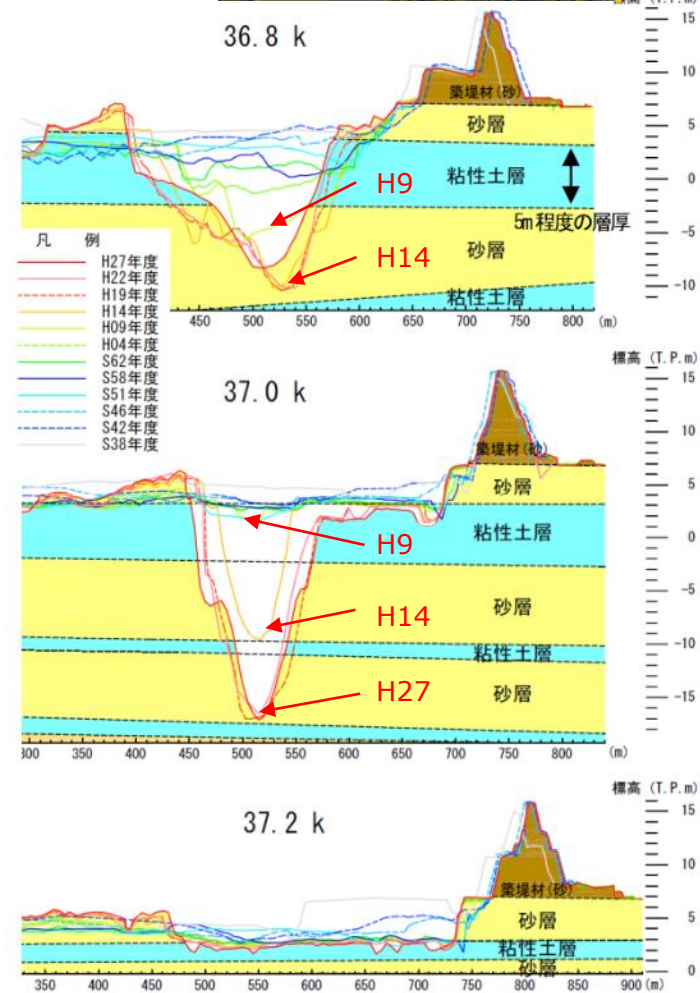
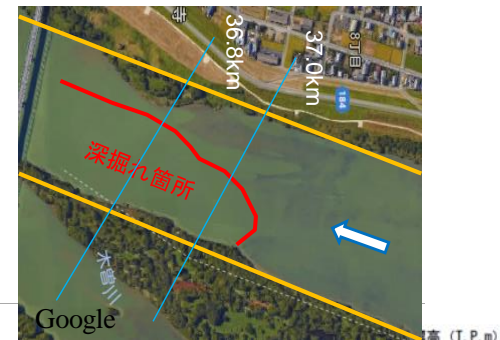
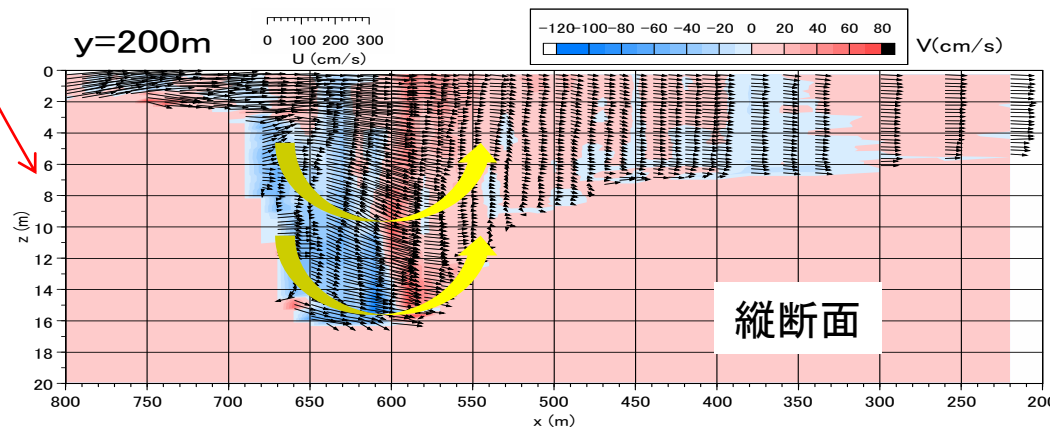
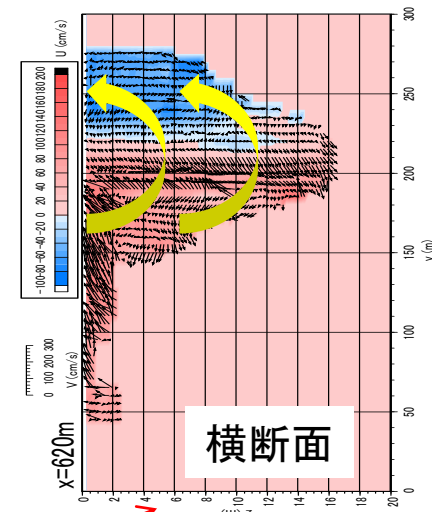
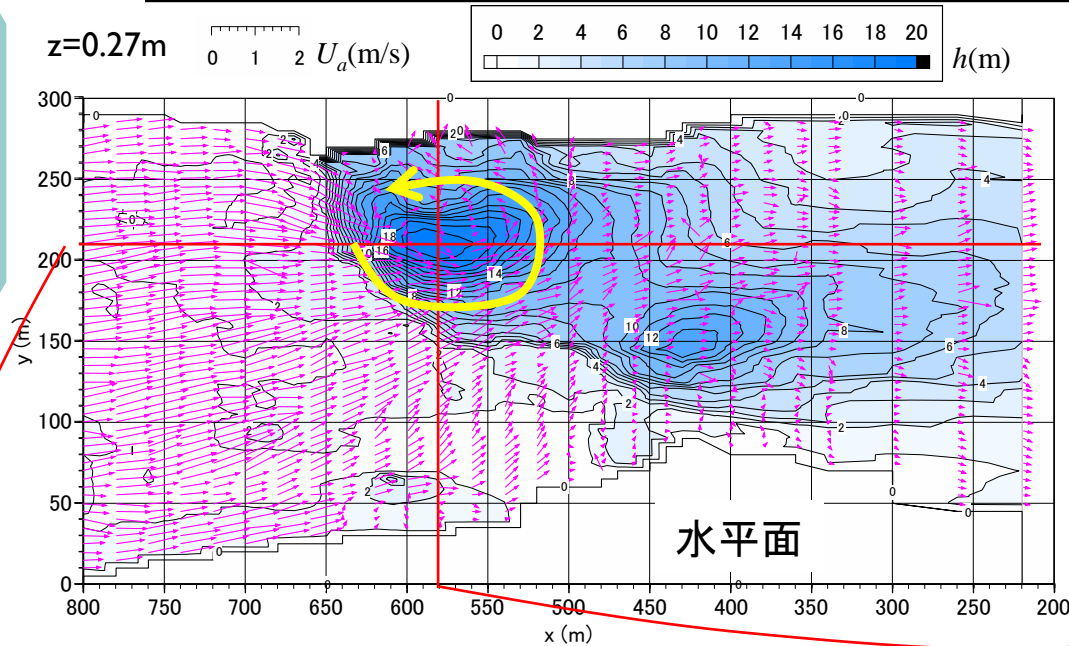


図-4 横断形状の経年変化

深掘れ部の流速計測



- 曳航式ADCPによる平面流速ベクトル
- 2016年4月26日の観測時の流量は約 $230\text{m}^3/\text{s}$



- 反時計回りの平面渦が深掘れの河床付近まで存在
- 底面近くでも高速な流れが発生

中部地方整備局木曾川上流河川事務所提供

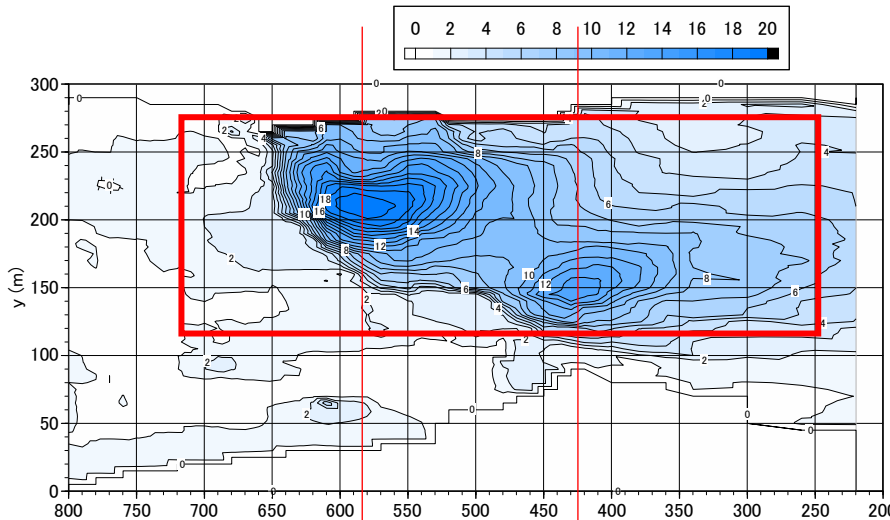
②, ③

木曾川深掘れ模型実験の試み

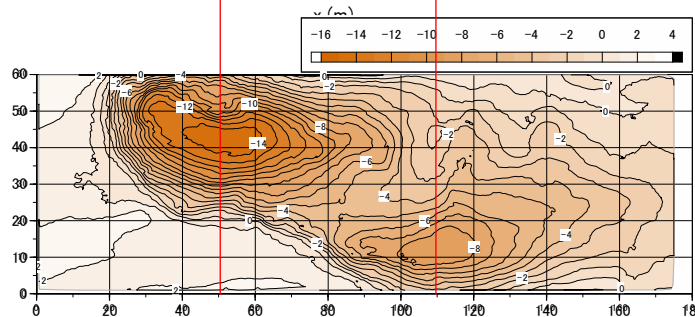
- 使用する水路: 60cm勾配可変水路
- 模型: 深掘れのある $x=250\sim 720\text{m}$, $y=115\sim 275\text{m}$ の領域
- 水平縮尺1/259, 鉛直縮尺1/173の歪模型



現地の河床
コンター

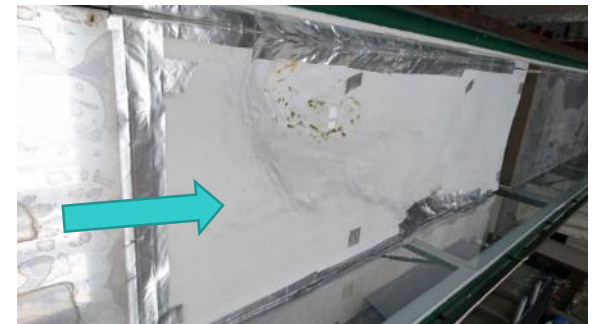


実験水路



流量は中規模出水時に相当。
鉛直渦の流れ構造の把握のため、
流速を高めを設定。

実験流量(l/s)	現地換算(m ³ /s)
3.3	3189.5
4.5	4349.3
5.7	5509.1

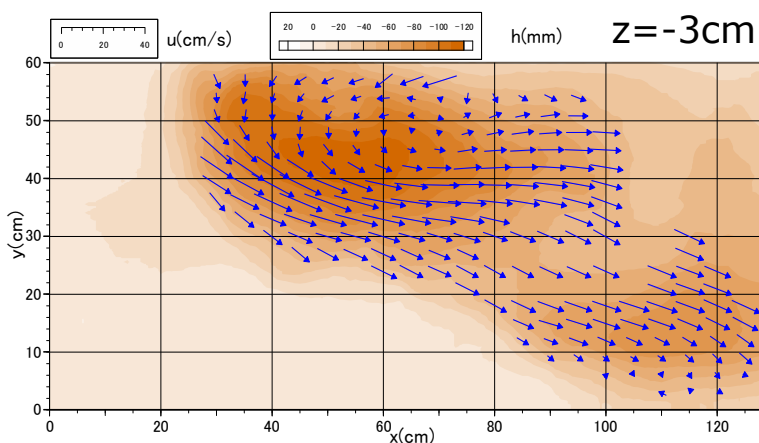
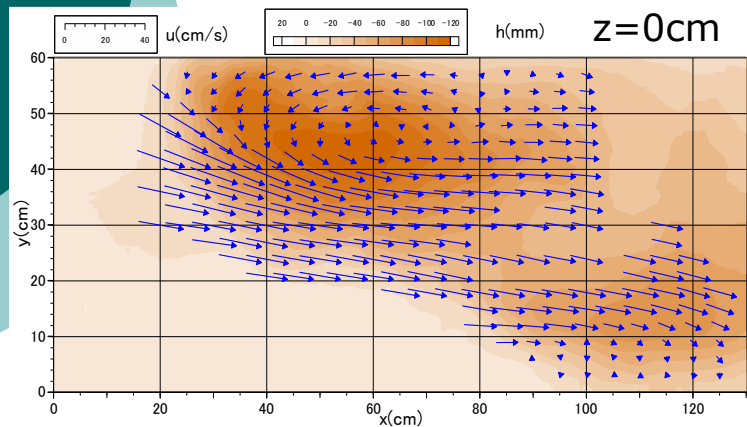


②, ③

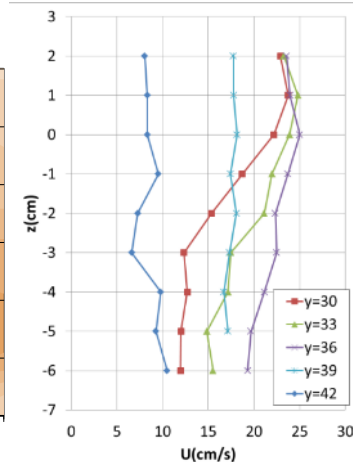
電磁流速計

実験結果(現地観測との比較)

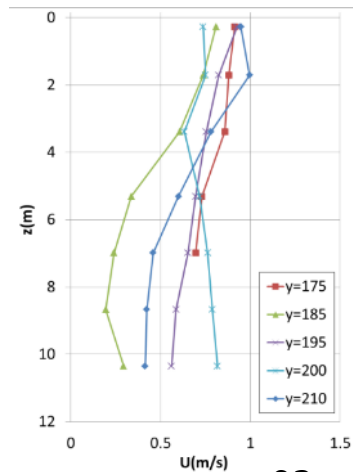
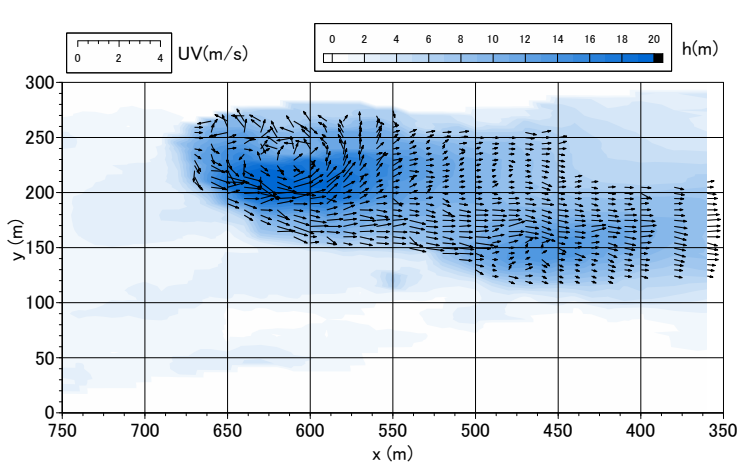
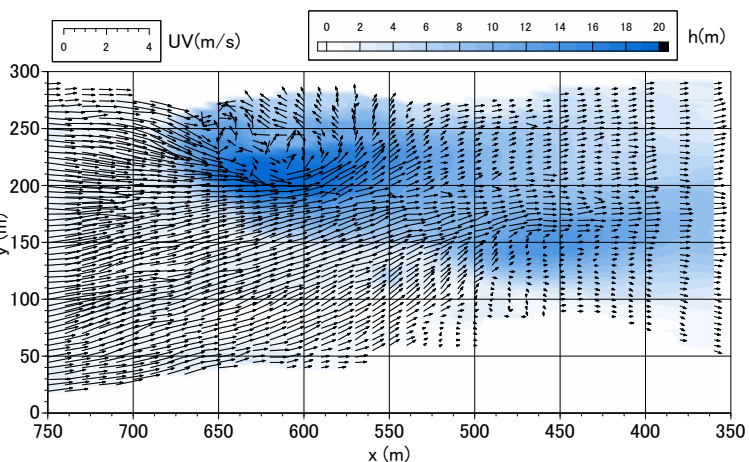
実験結果UVベクトル(Q=4.5L/s)



主流速鉛直分布

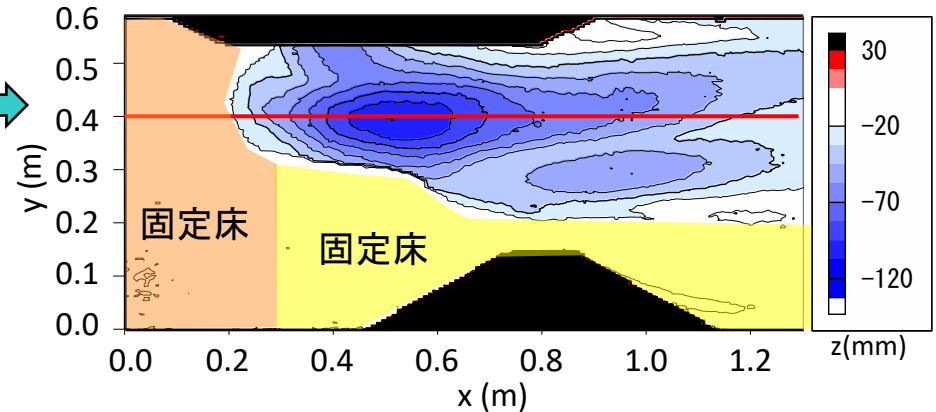
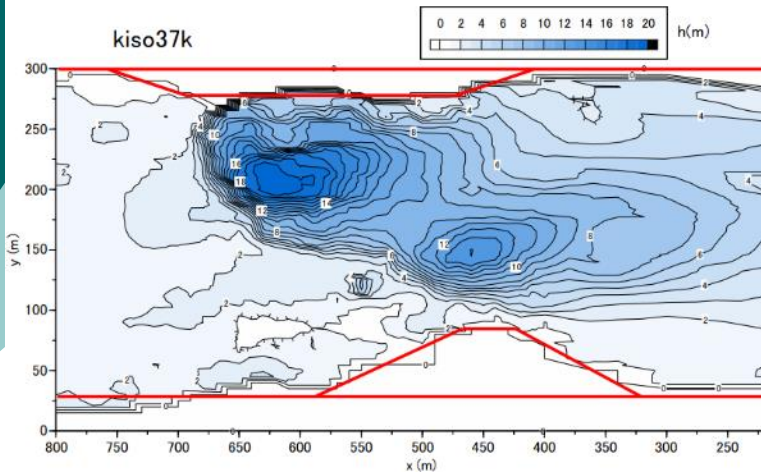


観測結果UVベクトル(Q=1200m³/s)

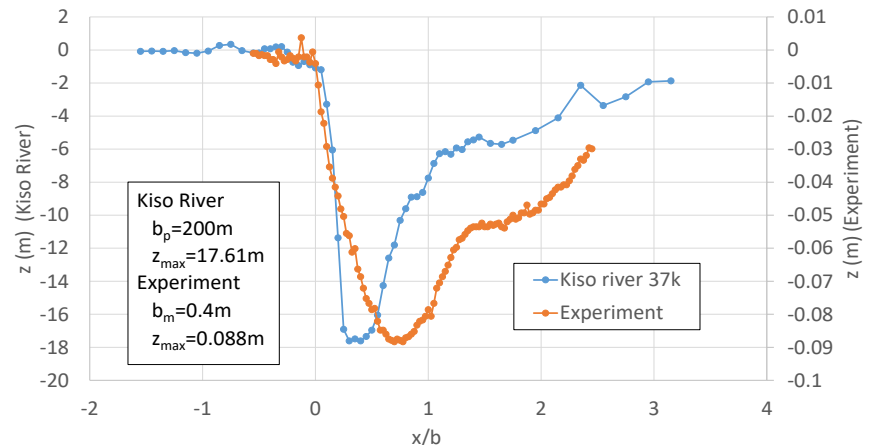


⑥

左右岸の凸部による洗掘実験



- 固定床と移動床の境界を設け、左右両岸に台形の凸部を設置
- 移動床の砂の粒径は0.61mm
- 右岸側凸部回りの洗掘を防ぐために、右岸側の凸部回りを固定した

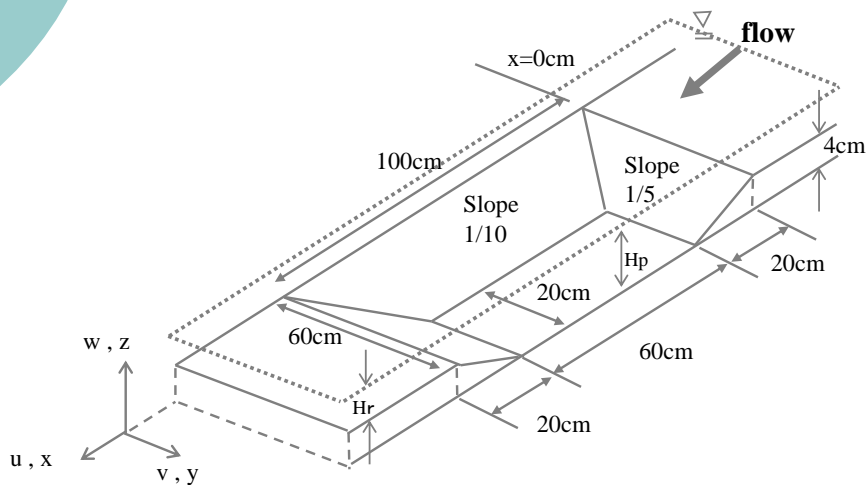


洗掘の縦断面形状

①, ⑤

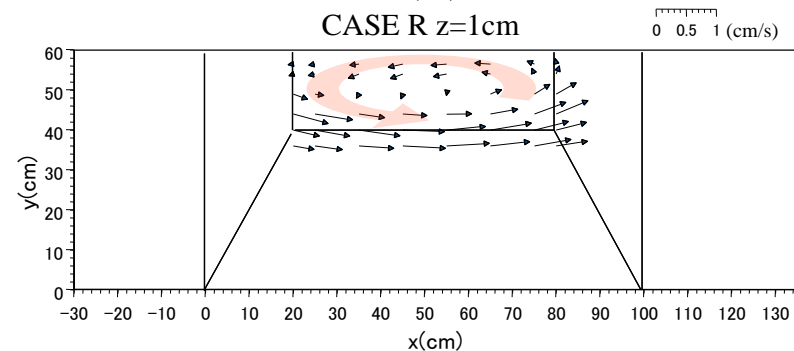
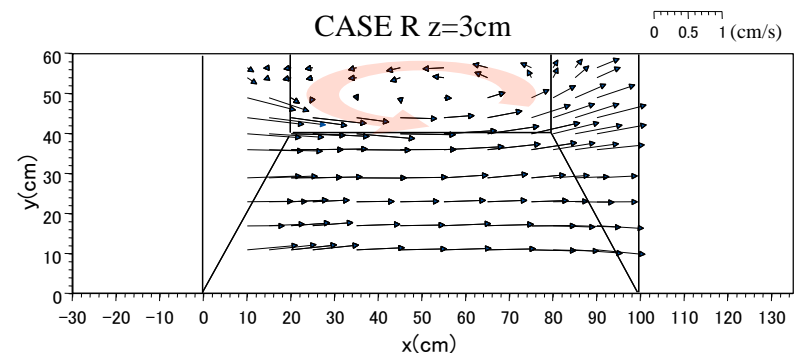
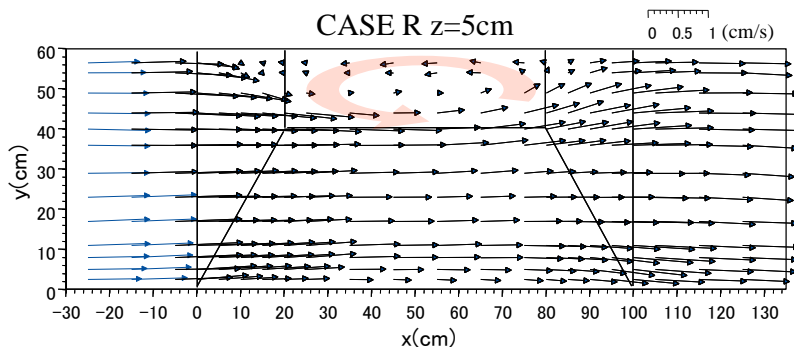
片側に淵を有する直線河道

- 片岸に淵を有する水路の実験
- 最深部を避けるように流れがはく離し、平面渦を形成



片岸に淵を有する水路(勾配1/800)

- ・左岸最深部
幅20cm, 長さ60cmの長方形
深さが4cm
- ・最長部の長さ100cm



⑤

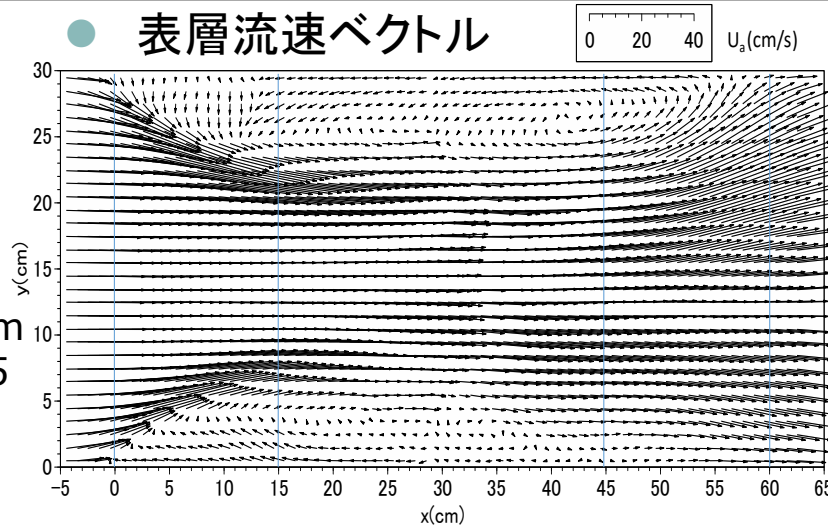
緩傾斜の段落ち流れで発生する平面渦

予備実験結果

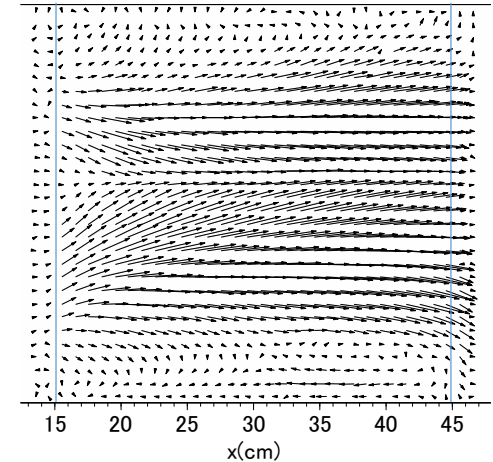
流量 $Q=1.5\text{L/s}$
 水路幅 $B=30\text{cm}$
 段落ち高さ $d=3.3\text{cm}$
 下流端水深 $H_r=2.5\text{cm}$
 段落ち勾配 $S=1/4.55$

ただし、渦は不安定
 下流端条件で変化

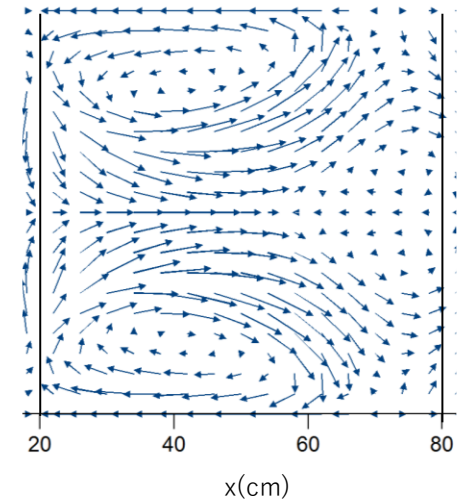
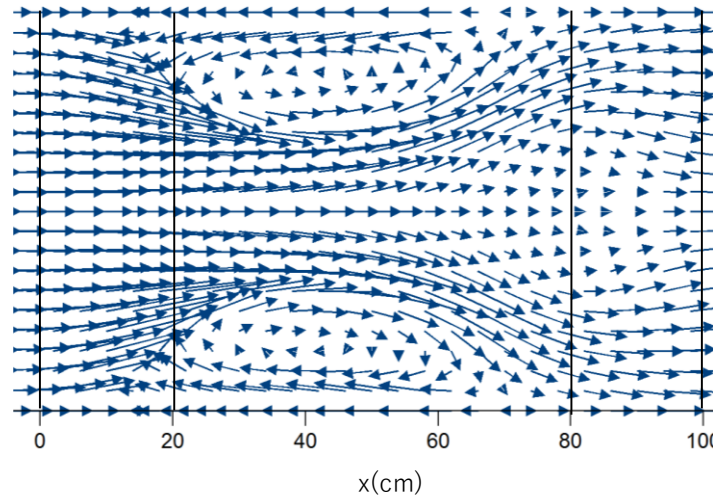
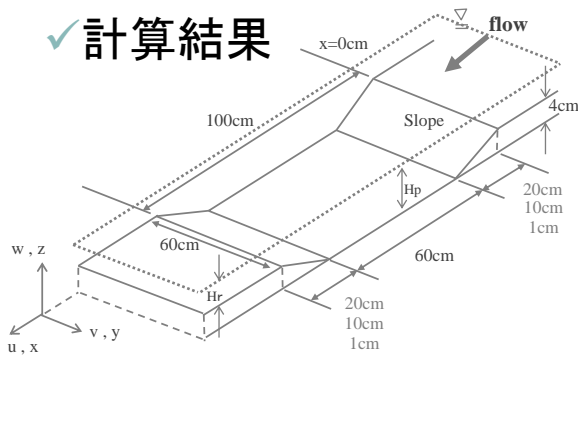
● 表層流速ベクトル



● 底層流速ベクトル



✓ 計算結果



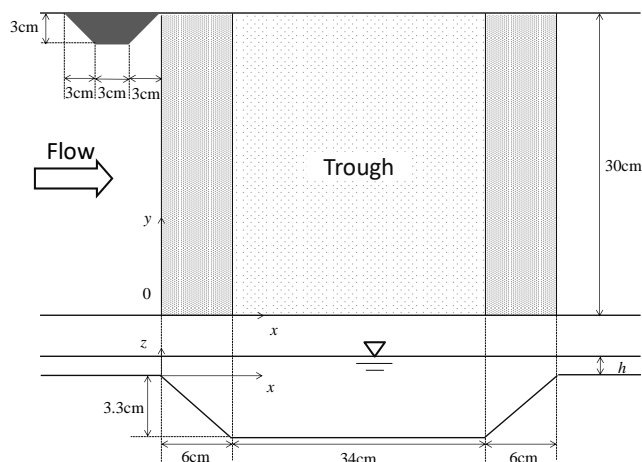
○ 数値計算では進入角度が小さくなるほどこのような平面渦が顕著になる

⑥

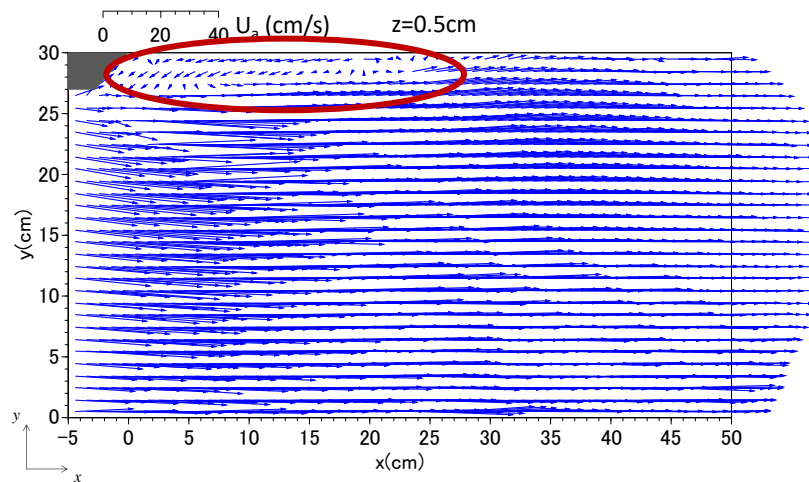
段落ち流れと水制の組み合わせ

— 水制下流に段落ちがあると平面渦が発達 —

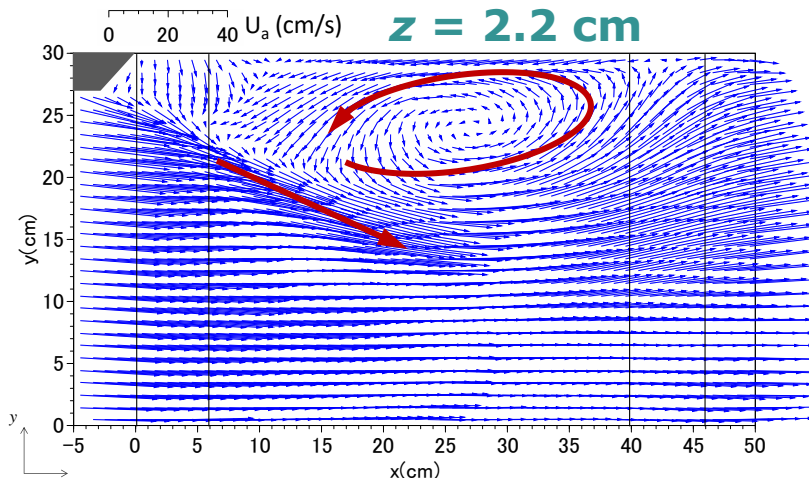
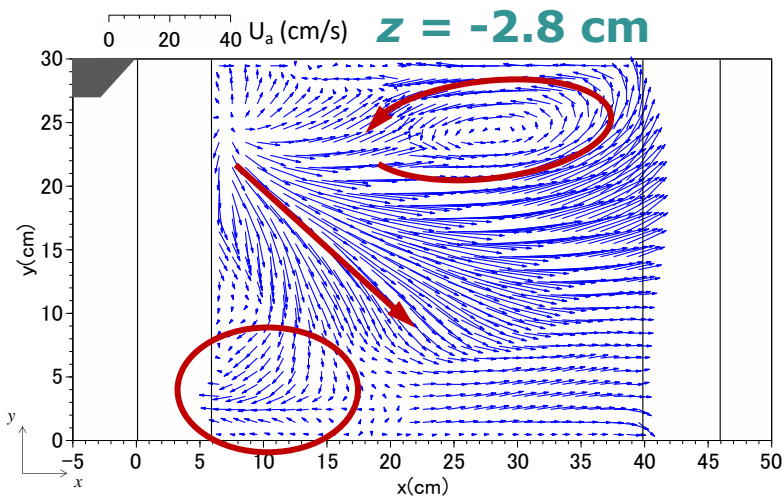
水制のみ (段落ちなし)



水制下流に段落ち (底面)

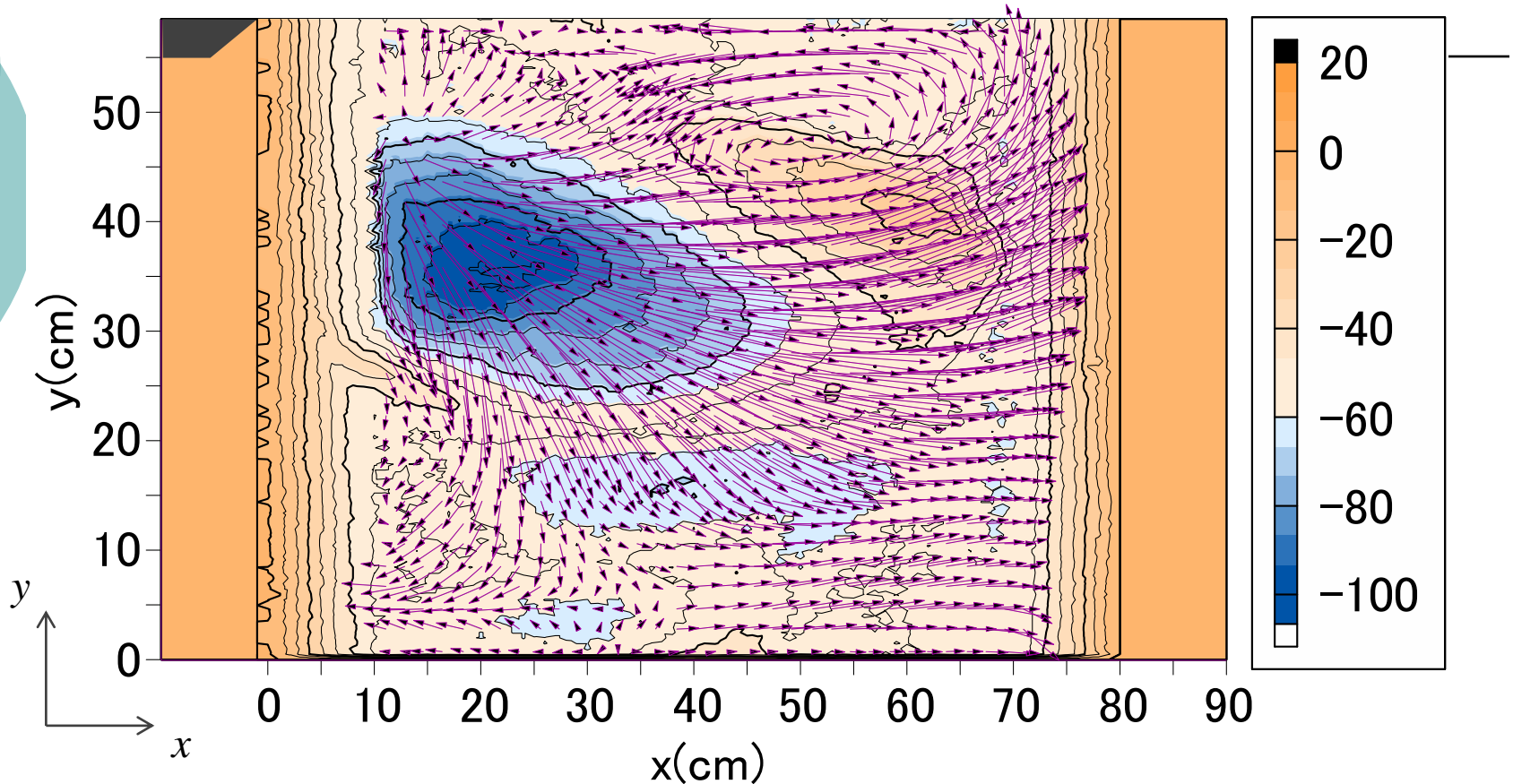


水制下流に段落ち (水面)



⑥

移動床実験結果



- 大規模な洗掘が発生するが、平面渦の中心ではなく、流れが発散する中心付近に発生している → 現地の状況と異なる
- 洗掘発生後の流速は計測していないため、流れ構造の変化は把握できていない

今後の水理実験の展望

- 数値計算の発達に期待するも・・・
- 目に見える実験は面白い
- 何らかの発見がある → 使えるデータを
- 現地観測がもっと必要
- まだまだ謎は多いー理論が弱い
- 条件がとても複雑ー予測のあいまいさ
- 実験と現地の水理現象が合わない原因を考えよう