

複断面開水路の高水敷，低水路境界部 における組織構造に関する検討

On the Large Eddies in the Junction Region Between Main Channel
and Flood Plane in an Asymmetrical Straight Compound Channel

長林 久夫* ・ 木村 喜代治**

By Hisao NAGABAYASHI and Kiyoji KIMURA

Experimental results are presented concerning the relation between flow resistance and the large eddies in the junction region of the main channel and the flood plane in an asymmetrical straight compound channel.

The mixing coefficient of the interface f is estimated owing to the apparent shear stress method. The relation between large eddies and upward flow in the junction region are investigated on basis of visualization technique using PTV method and turbulent measurement by fiber-optic laser Doppler anemometer (LDA).

Keywords: Compound Open Channel Flow, Secondary Current, Turbulence Measurements, PTV, LDA

1. はじめに

複断面河道の流れは低水路部と高水敷上の流れの流速差に起因する大規模な水平混合と高水敷，低水路の境界部（接合部）から上方に向かう斜昇流による混合現象とによって特徴づけられる。これらは，河道幅 B と低水路幅 b による相対水路幅 b/B 及び高水敷高 h と水深 H による相対水深 $(H-h)/H$ との割合によって，流体混合の割合が変わることが指摘され，接合部での抵抗を算定する手法も報告¹⁾ されている。また，高水敷上に植生を有する場合の模擬実験や低水路と高水敷の接合部の形状効果など種々の状況に関する検討がなされ，より複雑な流れの特性が検討^{2) 3) 4)} されている。しかし，矩形を組み合わせた水路においても水路の寸法比や壁面の粗度状況が異なると，その混合の状況は大きく変わることが知られているが，水平混合と斜昇流との関係など，接合部付近の乱流構造については多くの検討を必要としている。

本研究は矩形で構成された非対称形の複断面開水路において，滑面水路と高水敷上に粗度を有する場合について，抵抗特性と境界部付近の乱流特性の検討を行った。

* 正会員 工修 日本大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 日本大学教授 同上

(〒963 福島県郡山市田村町徳定下河原 1)

2. 実験方法

使用した水路は図-1に示すように、幅40cm、深さ40cm、有効水路長12.5mの長方形開水路内に設置された低水路幅20cm、高水敷幅20cmの非対称形の複断面開水路である。実験は滑面水路と高水敷上に5mmの球形粗度を一層に敷き並べた高水敷粗面水路について行った。

検討は以下の4種から構成されている。第1は滑面水路と高水敷粗面水路の抵抗特性の検討であり、水路勾配を1/2000から1/300までの水理量に対応した本水路の抵抗特性を評価した。ついで、高水敷粗面水路について、2成分と1成分の後方散乱ファイバー型レーザー流速計(KANOMAX(株))による3次元の乱流計測を行い、水路勾配1/1000と1/400の2種の勾配における乱流特性を比較検討した。第3は水路勾配1/5000において高水敷接合部の直下面と高水敷中央部の2ヶ所からフルオレセンナトリウム水溶液を注入して、境界面付近と高水敷底面近傍に発生する組織的な渦構造を検討したものであり、水深7cmで $(H-h)/h=1.4$ と水深12cmで $(H-h)/h=2.4$ の場合についての組織構造の渦特性を比較検討した。最後に水深12cmの場合をPTV法による可視化計測を行い、カレン解析システム(新日本製鐵(株))により流速成分を求め、接合部から自由水面領域までの水平断層面における乱流構造を比較検討した。

実験条件を表-1に示す。ここで、 N_c は(2)式による断面分割法にもとづく合成粗度係数を、 N は単断面法による粗度係数である。

3. 抵抗特性の検討

本研究で使用した複断面開水路の抵抗特性の検討は、高水敷、低水路境界面に見かけのせん断力を加味する福岡・藤田¹⁾の手法によって行っている。計算式を表-2にまとめる。図-1により、断面分割した合成粗度係数 N_c 及び合成径深 Re は(1)、(2)式となる。低水路、高水敷境界部での運動量交換による見かけのせん断

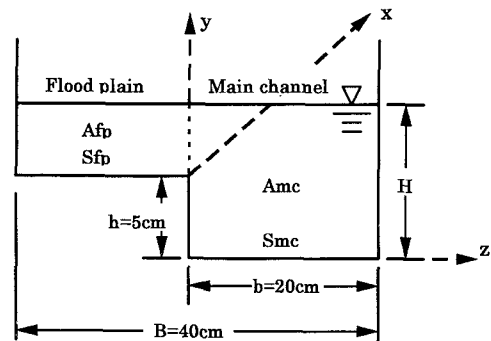


図-1 水路概略図及び記号の説明

表-1 測定水理量

Case	i	I	H	Q	V	Re	Nc	N
			(m)	(m ³ /s)	(m/s)	$\nu R/\nu$		
S410	1/4000	0.000216	0.10	0.00602	0.20	10900	0.0101	0.0105
S409		0.000211	0.09	0.00480	0.19	8890	0.0102	0.0104
S408		0.000185	0.08	0.00317	0.14	5980	0.0114	0.0113
S407		0.000195	0.07	0.00247	0.14	4760	0.0114	0.0108
S406		0.000184	0.06	0.00179	0.13	3500	0.0111	0.0097
S210	1/2000	0.000384	0.10	0.00787	0.26	14300	0.0103	0.0108
S209		0.000429	0.09	0.00682	0.26	12600	0.0102	0.0105
S208		0.000429	0.08	0.00551	0.25	10400	0.0100	0.0099
S207		0.000438	0.07	0.00374	0.21	7200	0.0113	0.0107
S206		0.000434	0.06	0.00329	0.23	6440	0.0093	0.0081
S110	1/1000	0.000961	0.10	0.01304	0.44	23700	0.0098	0.0103
S109		0.000950	0.09	0.00966	0.37	17900	0.0107	0.0110
S108		0.000953	0.08	0.00721	0.33	13600	0.0114	0.0113
S107		0.000948	0.07	0.00534	0.30	10300	0.0116	0.0110
S106		0.000963	0.06	0.00408	0.29	8000	0.0111	0.0097
S610	1/600	0.001613	0.10	0.01682	0.56	30600	0.0099	0.0103
S609		0.001608	0.09	0.01392	0.54	25800	0.0097	0.0099
S608		0.001553	0.08	0.01076	0.49	20300	0.0097	0.0097
S607		0.001548	0.07	0.00801	0.45	15400	0.0099	0.0094
S606		0.001572	0.06	0.00569	0.41	11200	0.0102	0.0089
S309	1/300	0.002488	0.09	0.01655	0.64	30600	0.0101	0.0104
S308		0.002755	0.08	0.01258	0.57	23800	0.0111	0.0110
S307		0.002994	0.07	0.00932	0.52	19700	0.0118	0.0112
S306		0.003413	0.06	0.00696	0.50	13600	0.0123	0.0107
FS7	1/5000	0.000142	0.07	0.00180	0.10	3330		
FS12		0.000190	0.12	0.00660	0.17	10300		
Case	i	I	H	Q	V	Re	Nc	N
			(m)	(m ³ /s)	(m/s)	$\nu R/\nu$		
R212	1/2000	0.000466	0.12	0.01020	0.27	16000	0.0125	0.0122
R210		0.000475	0.10	0.00700	0.23	11500	0.0129	0.0127
R209		0.000460	0.09	0.00590	0.22	9860	0.0129	0.0124
R208		0.000513	0.08	0.00460	0.21	8250	0.0126	0.0126
R207		0.000476	0.07	0.00370	0.20	6670	0.0118	0.0110
R112	1/1000	0.000890	0.12	0.01490	0.39	23200	0.0122	0.0116
R109		0.000906	0.09	0.00870	0.33	14800	0.0120	0.0114
R108		0.000928	0.08	0.00700	0.32	12600	0.0117	0.0111
R107		0.000890	0.07	0.00530	0.30	10000	0.0117	0.0105
R106		0.001057	0.06	0.00420	0.30	8080	0.0107	0.0097
R612	1/600	0.001534	0.12	0.01780	0.47	27900	0.0132	0.0127
R610		0.001695	0.10	0.01360	0.45	22500	0.0123	0.0124
R609		0.001603	0.09	0.01080	0.41	18400	0.0126	0.0122
R608		0.001613	0.08	0.00860	0.39	15300	0.0124	0.0119
R607		0.001618	0.07	0.00670	0.37	12300	0.0121	0.0112
R312	1/300	0.002710	0.12	0.02340	0.61	36200	0.0141	0.0129
R310		0.002874	0.10	0.01790	0.60	30000	0.0131	0.0122
R309		0.002817	0.09	0.01470	0.57	25600	0.0129	0.0118
R308		0.002915	0.08	0.01270	0.58	22800	0.0117	0.0108
R307		0.002915	0.07	0.00930	0.51	17000	0.0122	0.0109
FR7	1/5000	0.000176	0.07	0.00188	0.10	3480		
FR12		0.000197	0.12	0.00712	0.19	11100		
T112	1/1000	0.000961	0.12	0.01490	0.39	23300		
T412	1/400	0.002075	0.12	0.02060	0.54	32200		

表-2 合成粗度係数の算定

$$N_c = \frac{A_{mc} + A_{fp}}{Q} R_c^{2/3} I_b^{1/2} \quad (1)$$

$$R_c = \left(\frac{A_{mc} R_{mc}^{2/3} + A_{fp} R_{fp}^{2/3}}{A_{mc} + A_{fp}} \right)^{3/2} \quad (2)$$

$$\tau_{mc} S_{mc} + \tau_{as} (H - h) = \rho g A_{mc} I_b \quad (3)$$

$$\tau_{fp} S_{fp} - \tau_{as} (H - h) = \rho g A_{fp} I_b \quad (4)$$

$$\tau_{as} = \rho f (u_{mc} - u_{fp})^2 \quad (5)$$

$$\frac{\rho g n_{mc}^2 u_{mc}^2}{R_{mc}^{1/3}} (h + b + H) + \rho f (u_{mc} - u_{fp})^2 (H - h) = \rho g A_{mc} I_b \quad (6)$$

$$\frac{\rho g n_{fp}^2 u_{fp}^2}{R_{fp}^{1/3}} (B - b + H - h) - \rho f (u_{mc} - u_{fp})^2 (H - h) = \rho g A_{fp} I_b \quad (7)$$

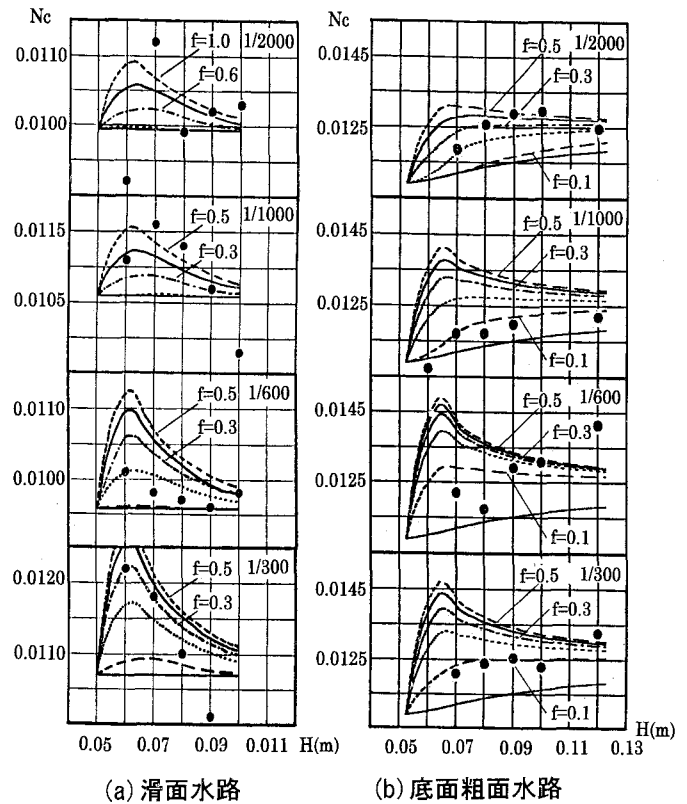
力を考慮した釣り合いは(3), (4)式となる. ここで, τ_{mc} と τ_{fp} は低水路, 高水敷の潤边上の平均せん断応力, τ_{as} は分割面に作用する見かけのせん断応力である. 分割面での境界混合係数を(5)式とすると見かけのせん断応力を考慮した基礎式が(6), (7)式で与えられる. 単断面水路にいて滑面と粗面の場合の粗度係数をあらかじめ求めておき, (6), (7)式を連立して u_{mc} と u_{fp} を求め, (1)式より合成粗度係数を算出した.

図-2 に本水路における合成粗度係数の計算値と実測値との比較を示す. 図中の曲線は(1)式から(7)式による計算値であり, ●印は実験値をプロットしている. 高水敷が滑面の場合の N_c は $H=6\text{cm}$ でピーク値を示している. 水路勾配 $1/600$ と $1/300$ との実験値は計算式の傾向に従うが, $1/1000$ の緩勾配になると N_c のピーク値は $H=7\text{cm}$ 程度となる. また実験値から見た境界混合係数 f は緩勾配で大きく, 急勾配では $f=0.3$ 程度である. 高水敷粗面水路における N_c の計算値の $H=6.5\text{cm}$ でピーク値を持つが実験値には明確なピーク値が見られない. また, f は $1/2000$ で $f=0.3$, $1/300$ で $f=0.1$ 程度であり, 急勾配ほど f 値が小さくなる傾向が認められた. これより, 緩勾配の場合はいずれの水路においても f が高く, 低水路と高水敷との接合部における混合が抵抗特性に大きく寄与していることが分かる.

4. 低水路, 高水敷境界部における乱流特性量の分布と組織構造の検討

4.1 蛍光染料法による組織構造の検討

水路勾配 $1/5000$ において滑面水路と高水敷粗面水路の水深 7cm (Case FS7, FR7) と水深 12cm (Case FS12, FR12) の場合について, 蛍光染料 (フルオレセンナトリウム水溶液) を境界部の $y=-1\text{cm}$ と高水敷中央 ($z=-10\text{cm}$) の底面部に注入し, レーザスリット光を照射し, $y=1.5\text{cm}$ の水平断面における形象を可視化した. 形象の一例を図-3 に示す. 図より, 高水敷上と接合部における染料模様から周期的に染料が低水路側に向かって伸びているのが観察される. このとき高水敷に向かう染料模様は明確ではない. これらの染料の放出角度 θ と放出長さ L そして次の染料模様が発生するまでの距離間隔 DL をビデオ画像より測定して頻度分を求めたものを図-4a, b に示す. 高水敷上の分布は折れ線で示し, 接合部に沿った分布は棒グラフで示している. 水深 7cm の場合の放出角度と発生間隔は水路の粗滑に違いは少なく平均値は放出角度が境界部でほぼ 40 度,



(a) 滑面水路 (b) 底面粗面水路

図-2 合成粗度係数 N_c と水深 H との関係

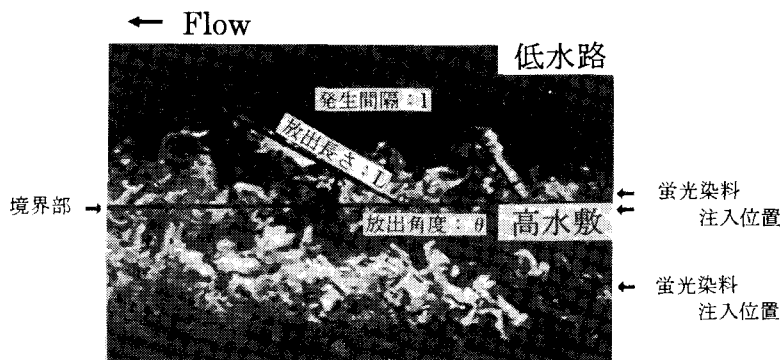


図-3 染料注入法による組織渦の検討

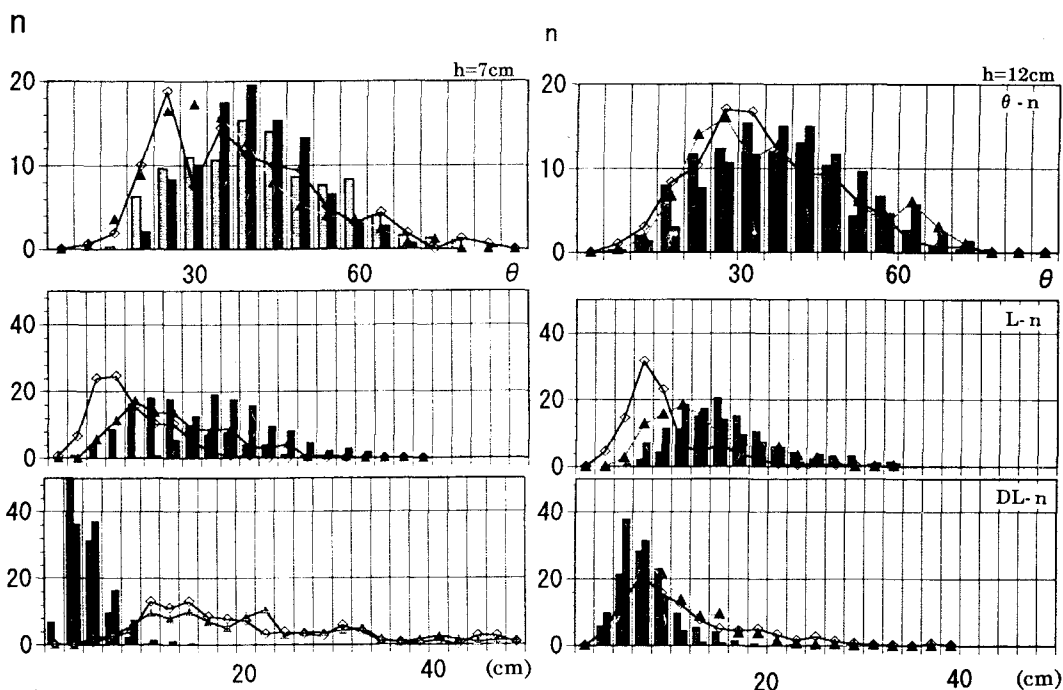


図-4a : H=7cm

図-4b : H=12cm

図-4 染料模様の放出角度, 長さ, 間隔の検討

(低水路: □高水敷粗面 ■滑面 高水敷: -△- 高水敷粗面 ▲滑面)

高水敷上で 22 度である。発生間隔は接合部で 5cm 付近に集中しているのに対して高水敷上では 10cm から 40cm の間に幅広く分布している。また放出長さは粗面水路では接合部、高水敷上ともに 10cm 程度であるが、滑面水路では接合部の方が長く、高水敷上は短い分布となっている。染料模様の特徴が複断面水路特有の低水路と高水敷の接合部における斜昇流や水平大規模渦によるものと考え、高水敷上の発生間隔は平面渦の効果によって幅広く変化することが理解できる。一方、図-2 で指摘したように緩勾配水路における境界混合係数は滑面水路の方が大きくなり、滑面水路の接合部における放出長さが長いのは斜昇流に依存していると推定される。図-4b の水深 12cm の場合にはいずれの項目においても水路の粗滑による違いは少なくなり、高水敷上と接合部における分布は類似した傾向となる。これより、高水敷上の水深が増加すると渦周期に及ぼす平面大規模渦の効果はしだいに小さくなることが理解できる。

4.2 乱流構造の検討

水深 12cm, 水路勾配 1/1000 と 1/400 の高水敷粗面水路における主流流速を断面内の最大流速で無次元化

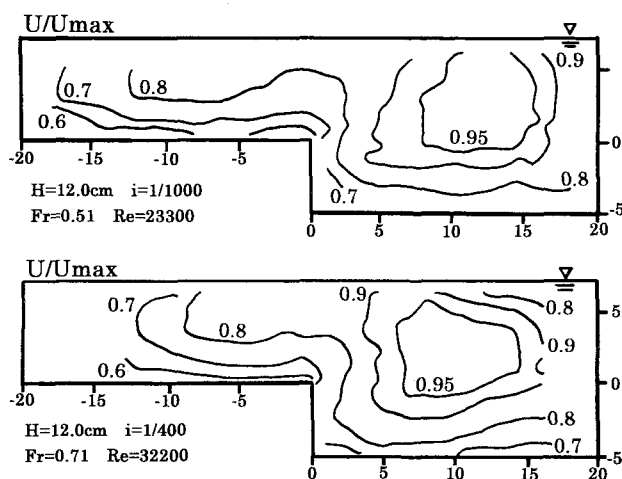


図-5 主流流速コンター

した分布と2次流のベクトルをそれぞれ図-5、図-6に示す。aは1/1000、bは1/400である。図-5において、両ケースの流速等値線の分布状況は類似しており、幅の狭い水路の特性である最大流速位置が水面から効果する状況を示している。しかし、接合部では1/1000で $0.8u_{\max}$ の等値線が上昇している。図-6では、高水敷上の2次流は両水路とも幅10cm程度の大規模なセル構造を形成しており、高水敷の底面近傍には接合部に向かう2次流れが存在するのが特徴である。また接合部から低水路側の領域にある2次流は、1/1000は水面側に大きな2次流を形成しており、低水路との境界面からの強い上昇流が、この領域の主流流速分布の上方への歪みを説明している。

図-7a,bに乱れエネルギー K/u_{*R}^2 （ここで $K=(\bar{u}^2+\bar{v}^2+\bar{w}^2)/2$ と二次流の生成項 $(\bar{w}^2-\bar{v}^2)/u_{*R}^2$ の分布を示す。これより、高水敷の底面近傍から境界部にかけて強い乱れエネルギーが存在し、エネルギーが境界部から上方に向かう様子が示されている。二次流の発生項では接合部付近で複雑な分布状況を示しているが、高水敷底壁近傍と接合部下端の隅各部領域の符号は互いに逆転しており逆の回転方向を有する2次流を生ずることを説明している。

4.3 低水路、高水敷接合部における流れの構造に関する検討。

水路勾配1/400における $y=7\text{cm}$ と $y=11.5\text{cm}$ の水平断面可視化の解析結果の一例を図-8aと図-8bに示す。図にはある時刻 t における $\tilde{w}$ 方向流速の等値線分布(1)と低水路高水敷境界線上における流速成分 $\tilde{u}$ と $\tilde{w}$ をある時刻 t から4/30秒間隔に3断面合成したもの(2)、そして横断方向の主流流速分布を示している。 $y=7\text{cm}$ では時間経過とともに低水路側の主流流速が減速している状況を示しており、(1)の $\tilde{w}$ 成分の空間分布では

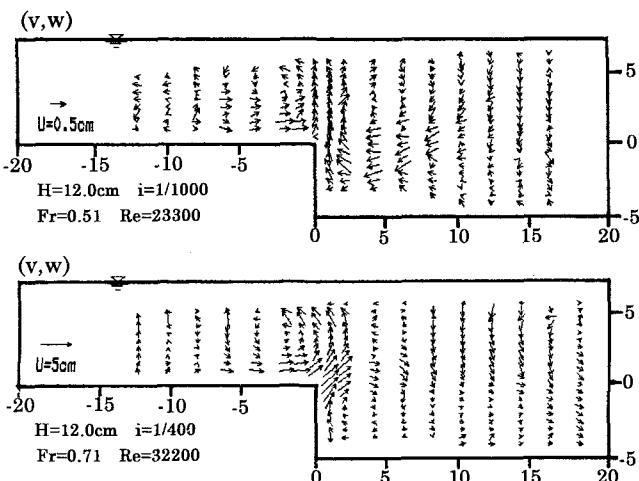


図-6 2次流ベクトル図

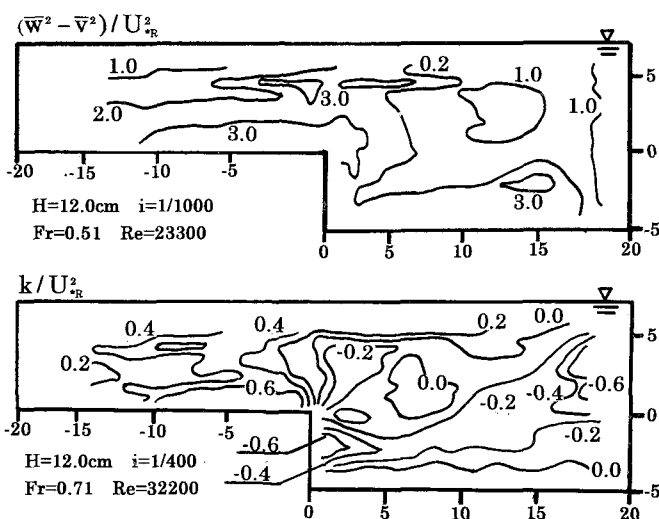


図-7 乱れエネルギー分布と二次流発生項分布

では下流側（図の上部）に低速の流体が高水敷上へ向かう領域が示されている．一方，上流側（図の下部）では低水路側に向かう領域が広範囲に認められ，主流流速において高速な流体の背後に強い正の $\tilde{w}$ 成分流速が生じている．これより，低速流体が低水路から高水敷に向かう事象は境界上での斜昇流によるものであり，そして高水敷から低水路に向かう運動は低水路と高水敷との速度差に起因する水平大規模渦によるもので，広範な空間スケールを有していることが認められる．図-8b の $y=12\text{cm}$ では低水路側の流速が加速する状況である．このとき水平断面の空間分布は低水路から高水敷に向かう流れが卓越している．その中で上流側では境界部を境として両側壁に向う流れが見られており，斜昇流の効果に起因すると考えられ，図-6 の水面付近における流速ベクトルの流況を説明している．

5. 終わりに

非対称断面における複断面開水路において滑面水路の場合と高水敷上が粗面の2状態について，抵抗特性と乱流特性，そして低水路高水敷境界に生ずる組織構造を実験的に検討した．その結果，緩勾配では境界混合係数 f が大きくなり，接合部での見かけのせん断力が増加するが，急勾配水路では f が小さくなること，また，高水敷上の水深が高い場合にも f 値は小さくなり，かつ，滑面水路と高水敷粗面水路の渦特性が類似すること，そして，高水敷粗面水路において斜昇流はより上方に上昇し，大規模平面渦は高水敷低壁近傍から接合部にかけて生ずることなどが確認された．本研究は平成5年度日本大学工学部大学院設備拡充費（代表 木村喜代治）の援助を受けて実施されたものである．

参考文献

- 1) 福岡・藤田：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，No411/II-12，pp. 63-72, 1989
- 2) 福岡・渡辺・上坂・津森：低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造，土木学会論文集，No. 509/II-30, 79-88, 1995
- 3) 中川・福津・阿部・志村：低水路・高水敷間の法面勾配が流速分及び二次流に及ぼす影響，水工学論文集，第39巻，pp. 417-422, 1995
- 4) 池田・村山・空閑：複断面開水路の安定性とその3次元構造：土木学会論文集，No. 509/II-30, 131-142, 1995

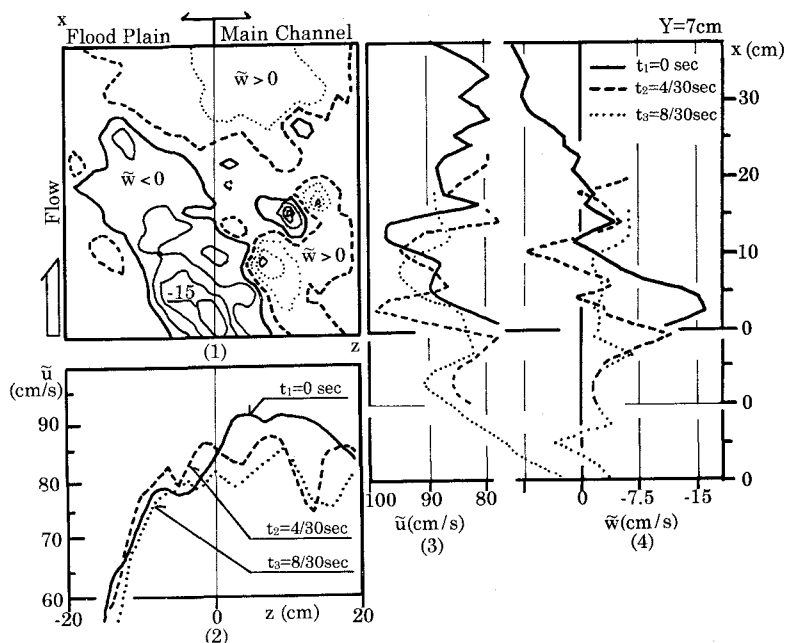


図-8a PTV 法解析 (Case T412, $Y=7\text{cm}$)

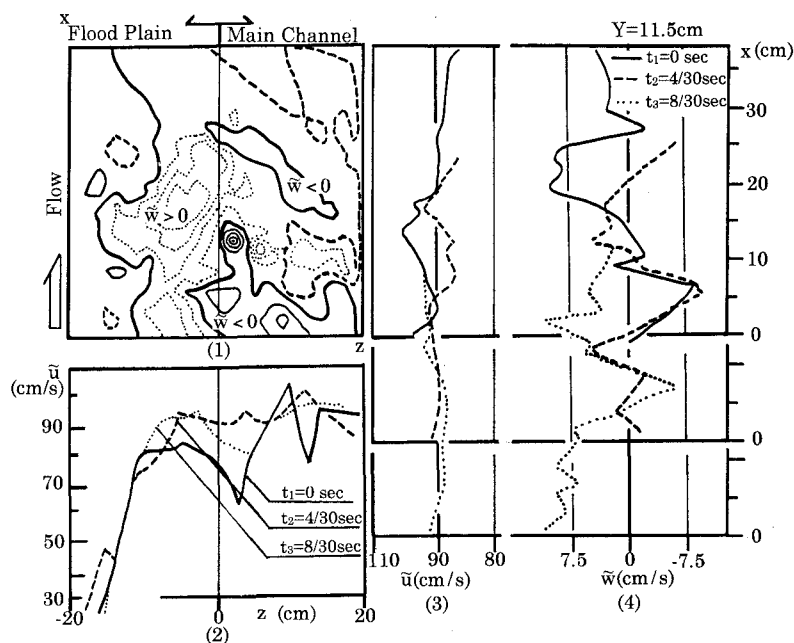


図-8b PTV 法解析 (Case T412, $Y=11.5\text{cm}$)