

複断面開水路の高水敷、低水路境界部に生ずる大規模渦構造の検討

On the Large Eddies in the Junction Between the Main
Channel and the Flood Plane in an asymmetrical
straight compound channel

長林 久夫* , 木村 喜代治**
by Hisao NAGABAYASHI, 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 plain in an asymmetrical straight compound channel. Owing to the apparent shear stress method, the mixing coefficient the interface f is estimated. On the bases of these results and the visualization technique, it is recognized that structural relation between large eddies and upward flow generated in the junction region.

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先端部の低水路から上方に向かう斜昇流による混合現象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、卓越する流体混合の形態が変わることが知られている。これらの大規模平面渦や斜昇流は低水路、高水敷境界部における運動量輸送を伴い単断面水路とは異なる抵抗特性を有しており、その抵抗評価法にはいくつかの手法が提案されている。本研究は、複断面開水路の抵抗特性を特徴づけるこれらの混合現象に着目して、可視化手法による渦機構と抵抗特性の関係を検討することを目的としている。

2. 実験方法

実験装置は幅40cm、深さ40cm、有効水路長12.5mの長方形開水路内に図-1に示す非対称形の複断面開水路を設置した。非対称の複断面水路とした理由は、水路幅が狭いために対称形の複断面水路では高水敷幅及び低水路幅が小さくなり、相対水深の小さな場合より主流流速への高水敷側の側壁効果を考慮する必要がある。また低水路幅も小さくなるために低水路の流れに二次流れの効果を検討する必要が生じてくるので、

* 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字中河原1)

表-1 測定水理量

No	i	I	II	Q	V	Re	Nc	N
			(cm)	(m ³ /s)	(cm/s)	VR/ν		
1	1/4000	0.0002157	10	0.00602	20.1	10936	0.0101	0.0105
2		0.0002112	9	0.00480	18.5	8885	0.0101	0.0104
3		0.0001851	8	0.00317	14.4	5975	0.0114	0.0113
4		0.0001953	7	0.00247	13.7	4758	0.0113	0.0108
5		0.0001844	6	0.00179	12.8	3500	0.0111	0.0096
6	1/2000	0.0003841	10	0.00787	26.2	14302	0.0103	0.0107
7		0.0004293	9	0.00682	26.2	12622	0.0102	0.0104
8		0.0004293	8	0.00551	25.0	10396	0.0099	0.0099
9		0.0004382	7	0.00374	20.8	7192	0.0112	0.0107
10		0.0004342	6	0.00329	23.5	6441	0.0092	0.0080
11	1/1000	0.0009606	10	0.01304	43.5	23709	0.0098	0.0102
12		0.0009496	9	0.00966	37.1	17881	0.0107	0.0109
13		0.0009532	8	0.00721	32.8	13604	0.0113	0.0112
14		0.0009478	7	0.00534	29.6	10262	0.0116	0.0110
15		0.0009633	6	0.00408	29.2	8002	0.0111	0.0096
16	1/600	0.0016129	10	0.01682	56.1	30582	0.0098	0.0103
17		0.0016077	9	0.01392	53.6	25785	0.0096	0.0099
18		0.0015527	8	0.01076	48.9	20304	0.0097	0.0096
19		0.0015479	7	0.00801	44.5	15400	0.0098	0.0093
20		0.0015723	6	0.00569	40.6	11153	0.0101	0.0088
21	1/300	0.0024875	9	0.01655	63.6	30644	0.0101	0.0103
22		0.0027548	8	0.01258	57.2	23738	0.0110	0.0110
23		0.0029940	7	0.00932	51.8	17925	0.0118	0.0112
24		0.0034129	6	0.00696	49.7	13647	0.0122	0.0106
25	1/7000	0.0001279	12	0.00333	8.8	5846	0.0197	0.0212
26	1/6000	0.0000927	10	0.00254	8.5	4625	0.0156	0.0163
27		0.0001415	9					
28	1/5000		9	0.00269	10.3	4980	0.0111	0.0114
29		0.0001895	10	0.00493	16.4	8956	0.0115	0.0120

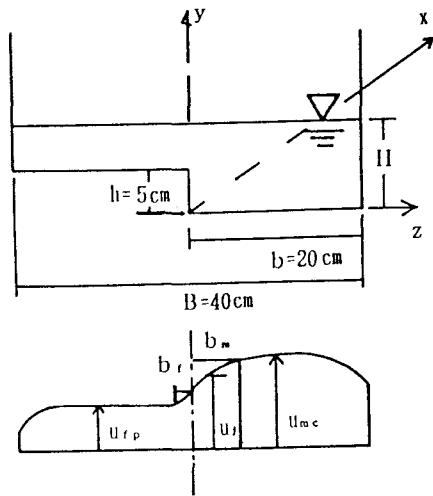


図-1 装置概略図および記号の説明

b/h は4程度以上とする必要がある。また低Reynolds数の場合には発達した乱流状態を得るには、低水路水深が3cm以上必要であることなどによる。これより高水敷高hを5cm、低水路幅bを20cm、高水敷幅(B-b)を20cmとした。

本研究における、非対称断面の複断面水路の抵抗特性を調べるために、低水路、高水敷の粗度条件を滑面で同一とした、水路勾配1/2000, 1/1000, 1/600, 1/300, 水深を6cmから10cmまで1cm間隔ごとに等流水深に対する流量を求めた。測定水理量を表-1に示す。Ncは(2)式の断面分割法による合成粗度係数、Nは単断面法による粗度係数である。

ついで、低水路、高水敷境界部での流体の輸送機構を可視化するために、水深9cm, 10cm, 水路勾配に1/5000, 1/6000及び水深12cm, 水路勾配1/7000の5ケースについて高水敷境界部直下面より、フルオレセインナトリウム水溶液を注入して、水面から1cm, 3cmにおける形象を35mmスチルカメラで撮影した。これより高水敷および低水路に向かう形象の長さ、発生間隔、角度に対する検討を行った。そのとき水深9cm, 12cmの2例について、2成分電磁流速計による流速測定を行った。

3. 抵抗特性の検討

複断面開水路の流れの抵抗評価法は単断面法及び断面分割法のカテゴリーに区分され、多くの手法が提案されている。断面分割法においても井田法⁽¹⁾に代表される高水敷と低水路の分割面でのせん断力を考慮しない慣用的な手法と等流速線からせん断力が生じないように境界面を設定する”zero stress interface method”^{(2), (3)}及び高水敷、低水路境界面の見掛けのせん断力(Apparent Shear Stress)を加味した手法^{(4), (5)}に区分される。本研究では比較的少ないファクタで解析可能な福岡・藤田⁽¹⁾の手法に基づいて抵抗特性を検討する。

図-1に示す非対称の複断面開水路の断面分割法による合成粗度係数Nc及び合成径深Rcは次式により求まる。

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

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

低水路、高水敷境界部での運動量交換による見掛けのせん断力を考慮したつり合いは以下のである。

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

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

ここで、 τ_{mc} と τ_{fp} 低水路、高水敷の潤边上の平均せん断力、 τ_{as} は分割面に作用する見掛けのせん断力である。分割面での境界混合係数 f を(5)式とすると見掛けのせん断力を考慮した基礎式が(6)、(7)式で与えられる。

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

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

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

低水路、高水敷上の粗度係数が既知の場合には(6)、(7)式を連立することにより、 u_{mc} 、 u_{fp} が得られ、(2)、(1)式により合成粗度係数が算出される。

図-2に本水路における合成粗度係数の計算値と実測値の比較を示す。滑面水路では水理量により粗度係数が変化するので、低水路と高水敷上の水深に対する粗度係数を事前に算定することは困難である。しかし滑面水路の粗度係数に対してはReynolds数の変化が最も効果的であるので、ここでは勾配に対応した粗度係数は一様であるものとして、単断面とした場合の実流量から逆算した粗度係数を低水路、高水敷に与えている。図中の曲線は(1)から(7)式による計算値、○印は実験値をプロットしている。これより勾配1/300, 1/600では f 値が比較的小さく、緩勾配になるにしたがい f 値が大きくなる傾向が認められる。

水深9cmと12cmの染料注入法による可視化の検討に相

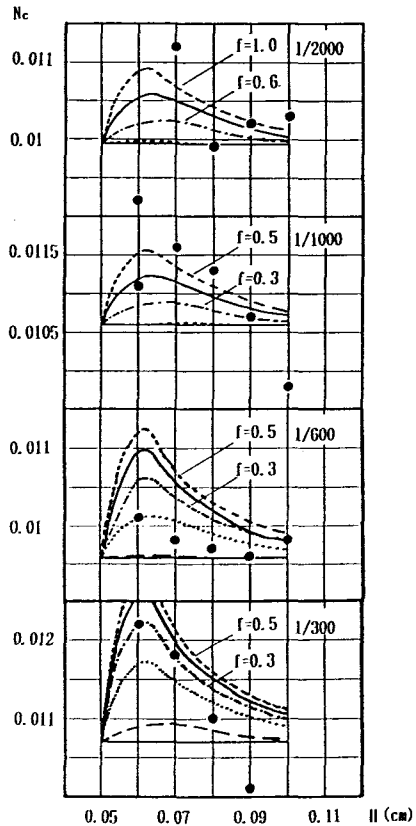


図-2 見掛けのせん断力法による合成粗度係数の算定分布特性、●：実験値、—— 計算値

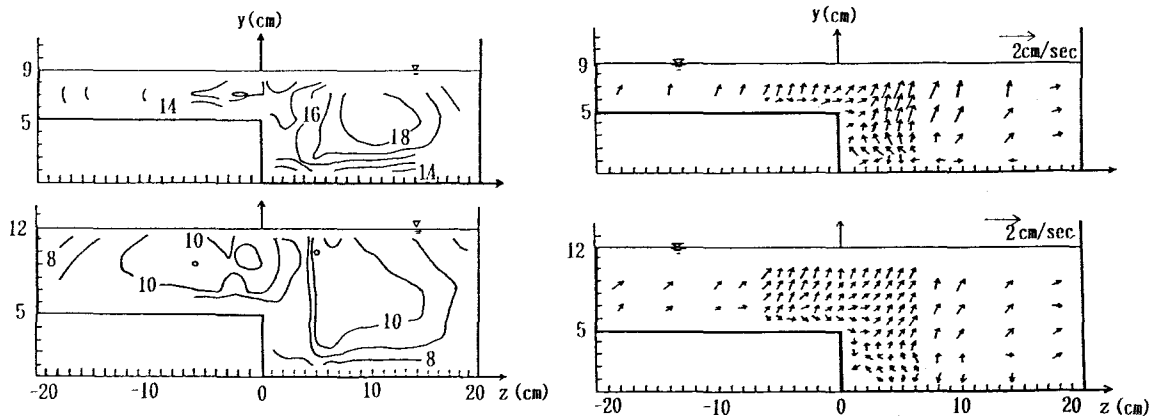


図-3 等流速分布曲線と流向ベクトル分布図

った。主流流速の等値線図および水路横断面内の流向ベクトルを図-3に示す。電磁流速計の性質から水面近傍での計測が困難であること及び水路寸法に対する電磁流速計の寸法効果により低水深の場合データ数は少ないが、主流等流速線は低水路、高水敷の分割面を中心に、低水路側で低速領域が高水敷側で高速領域が生じ、大規模平面渦による高水敷側への高速流体の輸送及び斜昇流による低水路下部からの低速流体の輸送が確認される。またベクトル図からは斜昇流に従った流向がみられた。

主流流速 u の水路横断方向分布を図-4に示す。図中の実線はRajaratnam and Ahmadi⁽⁶⁾による混合域の分布とLiu⁽⁷⁾による成果を引用したもので(8)から(10)式によっている。

低水路側 ($0 < z < b_1$)

$$u = \left\{ 1 - 0.75 \left(\frac{b_1 - z}{b_m} \right)^2 \right\} (u_{m0} - u_{f0}) + u_{f0} \quad (8)$$

高水敷側 ($-b_2 < z < 0$)

$$u = (u_{f0} - u_{f0}) \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{-z}{b_f} \right)^2 \right\} + u_{f0} \quad (9)$$

$$u_{f0} = \left(0.2 + 0.14 \frac{y-h}{H-h} \right) (u_{m0} - u_{f0}) + u_{f0} \quad (10)$$

ここで u_{m0} , u_{f0} は低水路、高水敷分割面の影響を受けない低水路上の流速及び高水敷上の流速である。また b_m , b_f は経験的に $b_m = 3.78 h$, $b_1 = 2/\sqrt{3} b_m$ そして $b_f = 0.64 h$, $b_2 = 2.5 b_f$ である。

図より、低水路、高水敷境界部付近の流速は計算式と比較すると、低水路側では減速効果、高水敷側では上方の測線での加速傾向が強く、福岡ら⁽⁵⁾の可視化観測による大規模平面渦の三次元性を良く説明している。

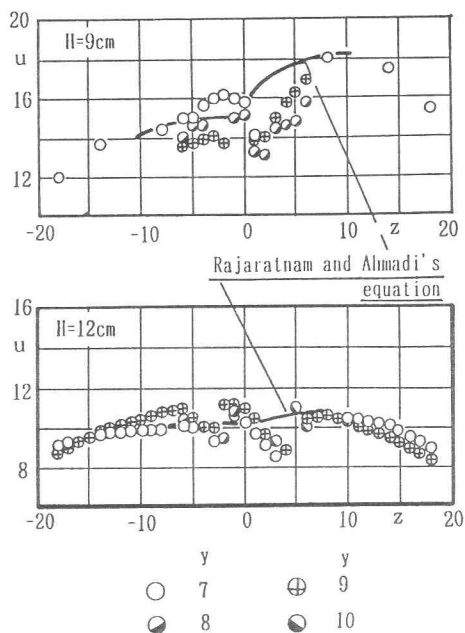


図-4 主流流速の横断分布

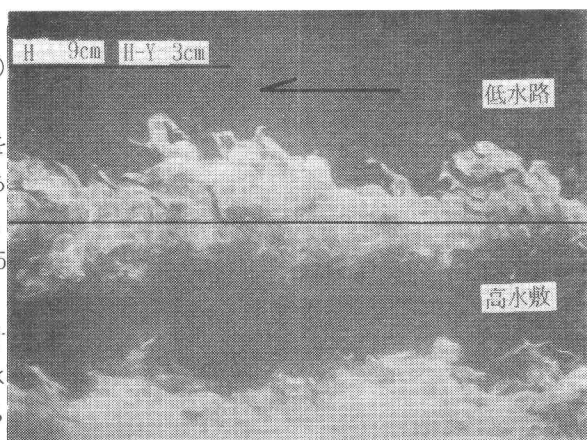


写真-1 染料注入法 $H=9\text{cm}$, $H-y_f=3\text{cm}$

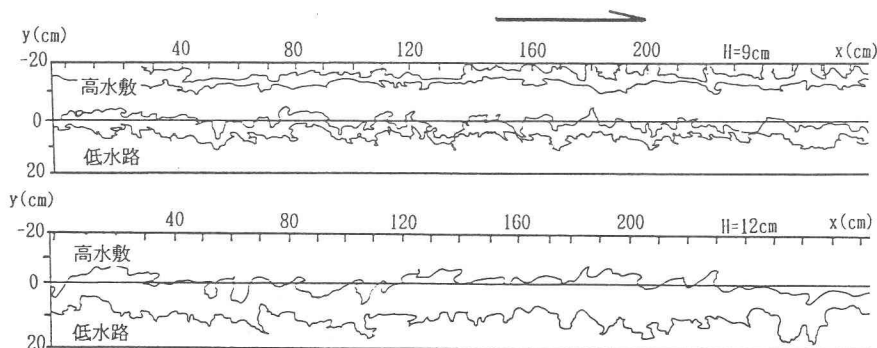


図-5 染料模様のスケッチ, 上段 $H=9\text{cm}$, 下段 $H=12\text{cm}$

4. 染料法による低水路、高水敷境界部における組織構造の検討

低水路、高水敷境界部に注入した染料による形象の一例を写真-1に示す。これより低水路側から高水敷上に染料が輸送される状況と低水路側の右岸側壁に向かう形象が観察される。1秒間隔で撮影された写真を平均流速で合成⁽⁸⁾して、図-5に示す形象のスケッチを得る。 $H=9\text{cm}$ の場合と高水敷左岸側壁からも染料を注入しており、側壁効果をみることができる。これより高水敷側と低水路側へ向かう形象の長さスケールと角度および発生間隔をヒストグラムとして図-6に示す。計測面はいずれも水面から3cm下方の流況を示

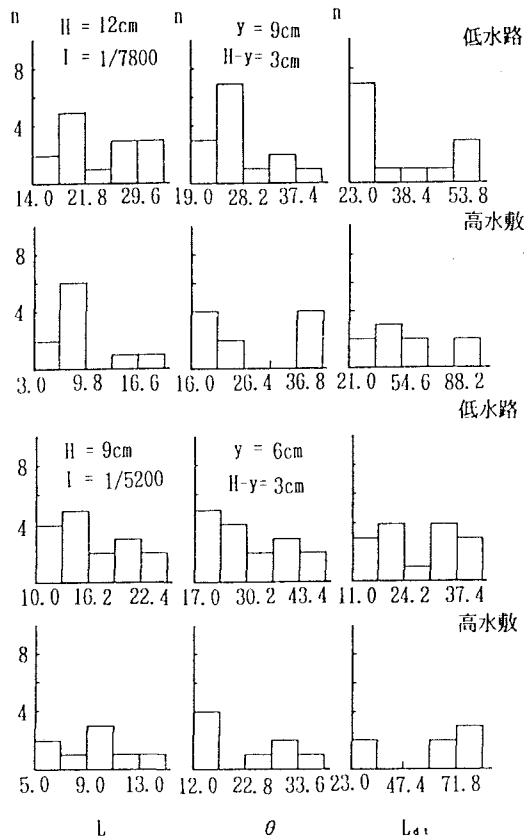


図-6 形象の長さ L 、放出角度 θ 、放出間隔 L_d

している。図-6 a, は水深12cmの低水路と高水敷へ向かう形象を、図-6 c, dは水深9cmを示す。

前項において検討したように、水深が増加すると低水路、高水敷上の見掛けのせん断力は減少する傾向にあり、水深が増加した場合には大規模水平渦は減少して、斜昇流の効果が卓越してくるものと推定される。この条件は福岡・藤田の b/B が0.5、 H/h が2の条件に相当しており、大規模平面渦と高水敷先端部からの斜昇流が観測される領域に相当している。高水敷上では両ケースともに各事象において長短に区分された2つのピークを有する分布を示し、大規模水平渦と斜昇流のスケールが推定できる。また低水路側もピークの異なる分布がみられる高水敷側での発生間隔の短い、斜昇流に相当する渦規模オーダーが卓越する。

図-7に可視化から得られた、形象長さ L 、角度 θ 、放出間隔 L_d の平均的特性を示す。

水深の変化に対応した、形象の長さ L は高水敷上ではほぼ一様であるが、低水路上では水深の増加とともに増加している。角度も低水路上で変化がみられる。放出間隔は高水敷、低水路ともに水深に対する増加傾向を示している。

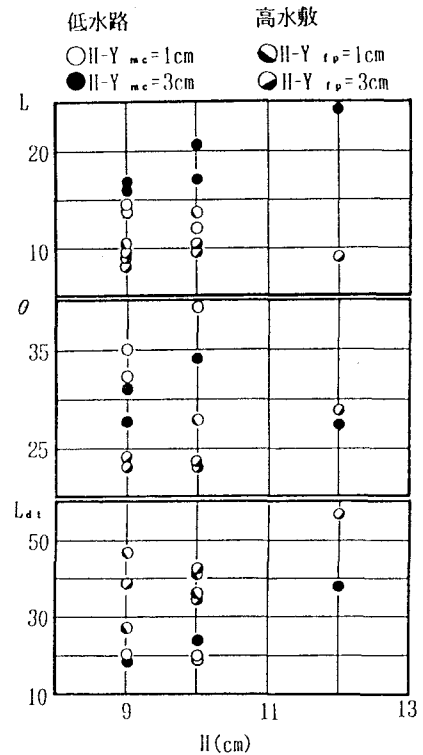


図-7 水深と染料模様の関係

5. 結言

非対称断面における複断面開水路の抵抗特性と流速分布特性及び染料注入法による低水路、高水敷境界部における流動特性を染料模様により検討した。大規模平面渦の三次元性による、境界面から低水路側での低速領域と高水敷上の高速域が確認された。また染料模様からは大規模平面渦と斜昇流による形象の平均的特性が示された。

実験、資料整理に尽力された卒業研究生の皆様に感謝致します。

〔参考文献〕

- (1) 井田至春: 広巾水路の定常流 — 断面形の影響について —, 土木学会論文集, 第69号別冊(3—2), 1960
- (2) Yen, C. I. and Overton, D. C.: Shape effect on resistance in flood-plane channels, J. Hydr. Div., ASCE, vol. 99, No. HY1, pp. 219-238
- (3) Fukuhara, T. and Murota, A.: Prediction of flow resistance in compound channel with Flood plane roughness, Intl. Conf. on River Flood Hydraulics, edid by W. R. White, pp. 153-162
- (4) Knight, D. W. and Demetriou, J. D.: Flood plain and main channel flow interaction, J. Hydr. Engineering, Vol. 109, No. 8, pp. 1073-1092, 1983
- (5) 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, No. 411/ II-12, pp. 63-72, 1989
- (6) Rajaratnam, N. and Ahmadi, R. M.: Hydraulics of channels with flood plains, J. Hydraulic Reserch, Vol. 19, No. 1, pp. 43-60, 1981
- (7) Liu, B. Y.: Study on sediment transport and bed evolution in compound channels, 京都大学学位論文, 227p, 1991
- (8) Nagabayashi, H., Kimura, K. and Matsumura, N.: The spatial structure of the secondary current in the straight open channel, 7th Congress APD-IAHR, Beijing, pp. 221-226, 1990