

河川合流部における二次流構造と流砂特性

Secondary Currents Structure and Sediments Characteristics in River Confluence

大本照憲*・森 高信**・平野宗夫***

By Terunori OHMOTO, Takanobu MORI, Muneo HIRANO

In this paper, experiments were conducted in the confluence with a training dike to investigate the interaction between vertical and longitudinal vortices, sediment discharge and the three-dimensional characteristics of the turbulence produced from the merging of two parallel streams with different flow discharge. The distribution of primary flow velocity, secondary currents and bed load were examined in detail by comparing with the two-dimensional turbulent mixing layer behind the thin flat plate.

The experimental results showed that the secondary currents with a vortex diameter of about a flow depth existed in the confluence and they developed due to the interaction of corner secondary currents during the merging process and received effects of vertical vortices within the mixing layer. In addition, the sand ridges, which are defined as sand wave with elongate ridges parallel to the main stream, were formed at even number multiple of a flow depth distant from the plate and downstream position behind it.

Keywords: River Confluence, Secondary Flow, Sediments, Sand Ridge

1. はじめに

河川合流部の流れおよび土砂流送は、合流角を有する場合、遠心力を起因とするPrandtlの第一種二次流により、その定性的特徴が概ね明らかにされている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、境界条件として最も単純な二河川平行合流については、鉛直方向に一樣な場と見なした二次元流れとして扱われる場合が多く、二次流を伴う流れの三次元的構造について十分な検討は成されていない⁽⁵⁾。著者等⁽⁶⁾は、前報において同規模の二河川が等しい流速で平行に合流する流れ場では、安定した水深スケールの縦渦が観察され、隔壁延長線上で上昇流、隔壁から横断方向に水深スケール離れた位置で下降流となる渦配列を示すことを明らかにした。本研究では、同一の境界条件で本川と支川に流速差のある場合、鉛直渦が水深スケールの縦渦にどのような影響を及ぼし、また、その時の土砂流送はいかなる性状を示すかを明らかにするために実験的検討を行った。

2. 実験装置及び方法

実験水路は、長さ6m、幅25cm、高さ23.5cmの亚克力樹脂製の可変勾配水路である。隔壁として厚さ1mmのステンレス板が水路上流端より長さ2mにわたって水路中央に設置されている。まず、移動床実験では、河床材料として中央粒径 $d_{50}=0.94\text{mm}$ の均一に近い珪砂を用いた。河床形状は、珪砂を水路全域に互って厚さ3cmで一樣に敷均し、表-1の実験条件で通水し、河床波が平衡状態に達したと見なされ

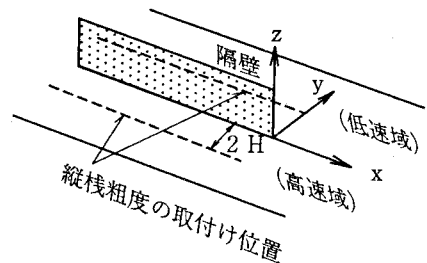


図-1 座標系

- | | | | | | |
|-----|------|----|---------|------------------|----------------|
| * | 正会員 | 工博 | 熊本大学助教授 | 工学部土木環境工学科 (〒860 | 熊本市黒髪2-39-1) |
| ** | 学生会員 | | 熊本大学大学院 | 工学部土木環境工学科 (〒860 | 熊本市黒髪2-39-1) |
| *** | 正会員 | 工博 | 九州大学教授 | 工学部建設都市工学科 (〒812 | 福岡市東区箱崎6-10-1) |

る時点で超音波測深器を用いて測定し、掃流砂量は隔壁末端より1m下流位置に於いて厚さ1mmの仕切板を有する捕砂器によって幅方向に1cm間隔で計測した。なお、表中の α は本川と支川の流速差を断面平均流速で正規化した無次元流速差の値を示す。流速変動は、水路床が滑面の場合および図-1に示すように隔壁から両側に水深の2倍の距離に高さ3mm、幅7mmの三角形断面の縦棧粗度を水路底面に設置した場合の7ケースについて、各々、表-2の水理条件下で隔壁

より下流に0.5cm,20cm,50cmの三断面において計測された。センサーには熱線流速計システムにX型エンドフロブローブを使用し、流速の主流方向成分と鉛直方向成分の同時計測、および主流方向成分と横断方向成分の同時計測が同一地点で行われた。計測結果は、サンプリング周波数150HzでAD変換した後、一測点4096個のデータに関して統計処理を施した。

表-1 実験条件（移動床）

	RunS1	RunS2	RunS3	RunS4	RunS5
無次元流速差 α	0	0.125	0.25	0.5	1.0
水 深 $H(\text{cm})$	3.0	2.5	3.13	3.13	3.13
本川平均流速 $U_1(\text{cm/s})$		32.8	33.8	37.4	44.6
支川平均流速 $U_2(\text{cm/s})$		28.8	26.5	22.6	15.0
断面平均流速 $U_m(\text{cm/s})$	24.8	30.0	30.1	29.8	29.8
水路勾配 I_0	1/150	1/400	1/400	1/400	1/400
河床材料 $d_{50}(\text{mm})$	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94

表-2 実験条件（固定床）

	滑 面			縦 棧 粗 度			
	RunF1	RunF2	RunF3	RunF4	RunF5	RunF6	RunF7
無次元流速差 α	0	0.5	1.0	0	0.25	0.5	1.0
水 深 $H(\text{cm})$	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13
本川平均流速 $U_1(\text{cm/s})$		12.62	15.00		11.58	12.75	15.39
支川平均流速 $U_2(\text{cm/s})$		7.50	4.93		9.02	7.57	5.16
断面平均流速 $U_m(\text{cm/s})$	10.1	9.98	10.10	10.1	10.25	10.08	10.19
水 路 勾 配 I_0	1/500	1/500	1/500	1/500	1/500	1/500	1/500
フルード数 Fr	0.183	0.180	0.182	0.183	0.185	0.182	0.184
レイノルズ数 Re	2775	3124	3161	2775	3208	3155	3189

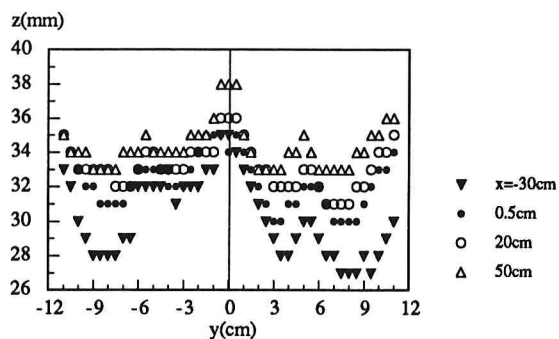
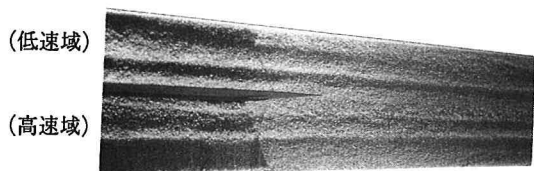
3. 流砂特性

座標系は、図-1に示す隔壁の末端における河床位置を原点とし、主流方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直上方にz軸を取る。写真-1,2,3および4は、各々、表-1のRun S1,S2,S4およびS5に対応した水理条件下で通水し、240分経過した際の河床波の平面状況を示したものである。Run S1およびS2では、本川と支川の河床は動的平衡状態に近く、Run S3,S4およびS5では低速流域側に当たる支川の河床材料は静止状態にあり、高速流域側の本川河床は動的平衡に近い状態となっている。写真-1から隔壁下流位置および隔壁から2倍の水深スケール離れた位置に3本のSand Ridgeが主流と平行に形成されていること、および隔壁直下流部のSand Ridgeはその両側のSand Ridgeに比べて扁平であることがわかる。また、写真-2では、隔壁下流位置に主流と平行なSand Ridgeが明瞭に現れている。一方、写真-3および4から、本川と支川の流速差を表す α の増加に従って、Sand Ridgeは流下に伴って低速側に若干移動していることが注目される。河床波をさらに詳細に見るため、縦断方向に対する河床高の横断分布の変化を図-2に示す。図より、流速差の無いRun S1では河床は $y=0$ に関してほぼ左右対称で、流下方向に相似形を保つことがわかる。流速差の有る場合には、河床は α の増加に伴ってその形状に非対称性が現れ、 $\alpha=0.5$ および 1.0 では隔壁下流位置のSand Ridgeは静的平衡河床高よりも高くなっている。これは、 α の増加と共に二次流が強まり、その結果、河床材料が低速側に流送されたことが考えられる。図-3は、流速差 α に対する掃流砂量の横断分布の変化を示す。図より明らかに、掃流砂量は河床形状に規定されSand Troughで多くSand Ridgeで少ない。また、その極大位置は、 $\alpha=0.25$ では本川中央部の $y=6.5\text{ cm}$ に、 $\alpha=0.5$ では $y=4.5\text{ cm}$ に当る。写真-3および図-2の河床波形状から $\alpha=0.5$ においては流心部が低速側に若干シフトしたためであることが予想される。

4. 流れの三次元構造

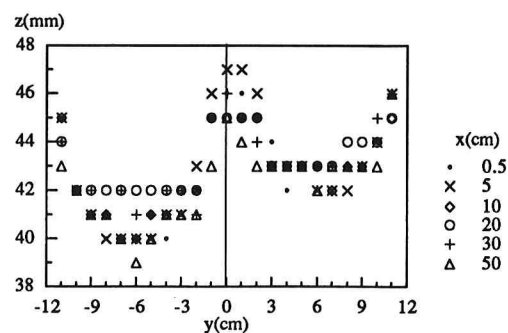
4.1 二次流ベクトルおよび流れ関数

写真-1 河床波 (Run S1)
($\alpha=0$)



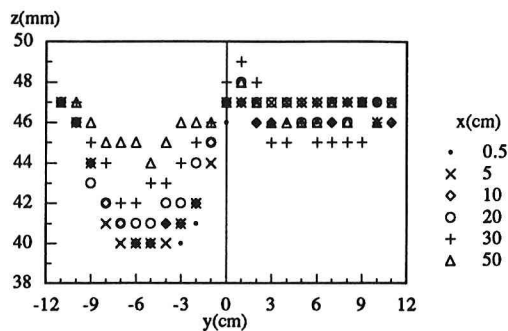
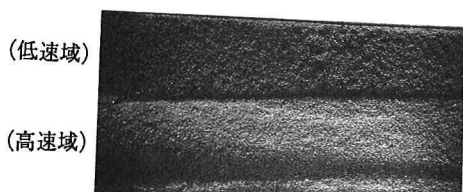
(a) Run S1 ($\alpha=0$)

写真-2 河床波 (Run S2)
($\alpha=0.125$)



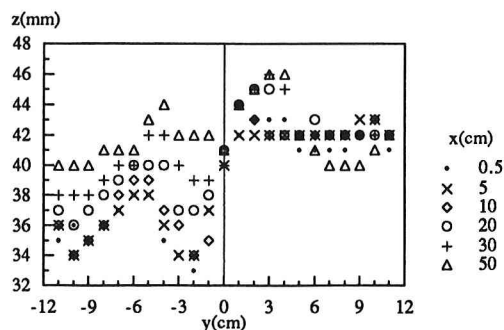
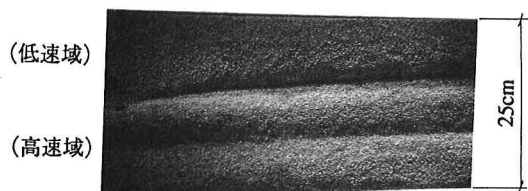
(b) Run S2 ($\alpha=0.125$)

写真-3 河床波 (Run S4)
($\alpha=0.5$)



(c) Run S4 ($\alpha=0.5$)

写真-4 河床波 (Run S5)
($\alpha=1.0$)



(d) Run S5 ($\alpha=1.0$)

Flow

図-2 河床形状

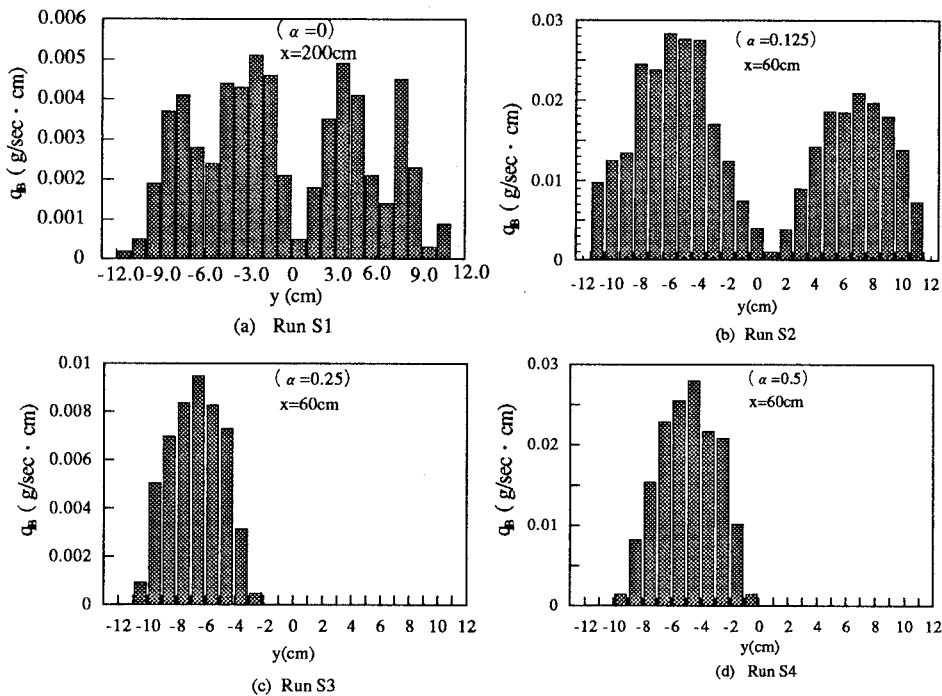


図-3 掃流砂量の横断分布

図-4 から 7 は、各々、Run F5, F6, F2 および F3 における二次流ベクトルおよび流れ関数の等値線を示す。合流直前まで河床に縦横粗度を設けた場合、図-4 および 5 から二次流は $y/H = \pm 2$ の近傍の狭い領域において上昇流、 $y/H = \pm 1$ を中心とする広い領域で下降流を示し、水路中央の $y/H = 0$ の近傍では上昇流となっており、その中心位置は流下に伴って若干低速側領域に寄っていることがわかる。一方、 $\alpha = 0.5$ の滑面の場合には、図-6 より二次流の水平成分は鉛直成分に較べて大きく、高速流域および低速流域のいずれにおいても水路中央の方向に向きを取ることがわかる。また、二次流の鉛直成分は $x = 0.5\text{cm}$ では水路中央の $y/H = 0$ で上昇流であるが、流下に従って中央から若干低速側領域に寄った位置で上昇流、それ以外の領域では弱い下降流となっていることが認められる。ところで、本川と支川に流速差のない Run F1 および Run F4 においては、 $y/H = 0$ および ± 2 の近傍で上昇流、また $y/H = \pm 1$ の近傍で下降流となる水深スケールの縦渦列が観察され、その位置は大きく変化しない。本川と支川に流速差のある場合には、共通して水路中央部における上昇流位置が流下と共に低速側領域にシフトし、その偏倚量は α の増加と共に大きくなる。このことは、河床波および掃流砂量の横断分布とも対応している。 $\alpha = 1.0$ の滑面の場合には、図-7 から低速領域の $y/H = 1$ 近傍において斜め上昇流および高速領域の $y/H = -1$ 近傍において斜め下降流となる一つの縦渦が見出され、その空間スケールは鉛直方向には水深、横断方向には 2 倍の水深を有する扁平な形状であり、これまでの合流部で見いだされた縦渦列とは大きく異なる。同様の縦渦パターンは $\alpha = 1.0$ の Run F7 においても観察されている。この原因として、本川と支川の流速差によって生ずる鉛直渦が、主流速の鉛直方向変化による傾き効果によって縦渦成分を有するよう変形すること、さらに、隅角部に形成される本川側の縦渦が支川側の縦渦を吸収し、その空間スケールを拡大することの両者が考えられる。また、写真-4 に見られる Sand Ridge と Sand Trough の位置は、各々、図-7 に示された上昇流と下降流の位置に符合していることから、この扁平な縦渦によって河床波が形成されたことが考えられる。

4.2 主流速

主流速は、底面近傍を除けば隔壁直下流では後流の影響が顕著に現れ、その後、自由混合層の分布形に近づくことが観察された。図-8 および 9 は、自由混合層が十分発達した Run F6 および Run F3 の $x = 50\text{cm}$ における主流速の無次元横断分布を示す。なお、河床よりある高さにおける極大流速差 $\Delta U (=U_{\max} - U_{\min})$ を代表流速とし、 ΔU を主流速の横断方向変化率の極大値で除した値 $\delta (= \Delta U / |\partial U / \partial y|_{\max})$ を代表長さとしてい

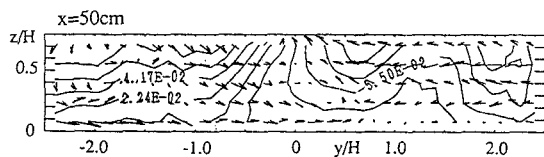
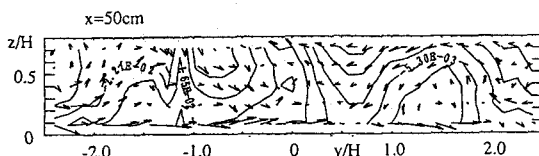
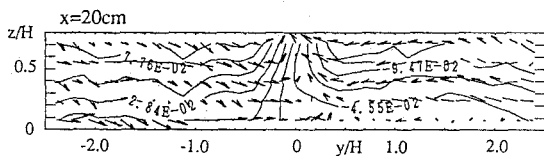
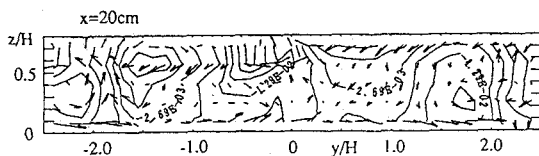
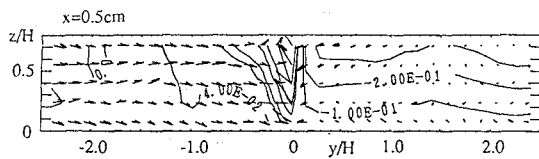
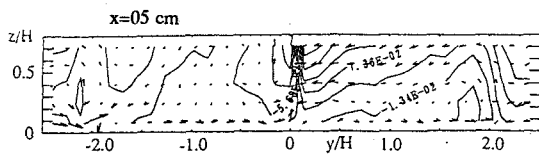


図-4 二次流ベクトルと流れ関数の等値線 (Run F5)

図-6 二次流ベクトルと流れ関数の等値線 (Run F2)

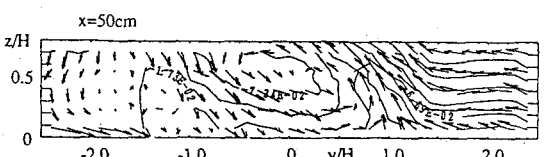
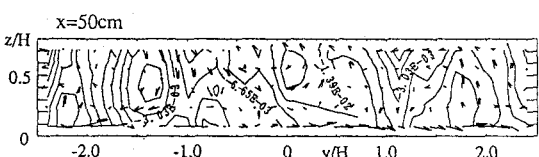
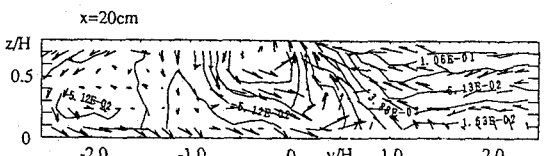
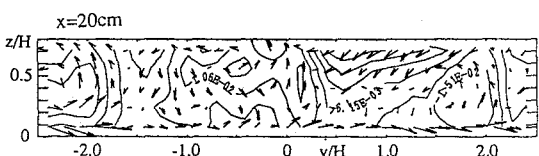
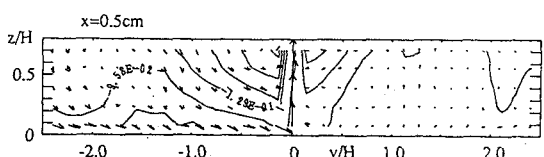
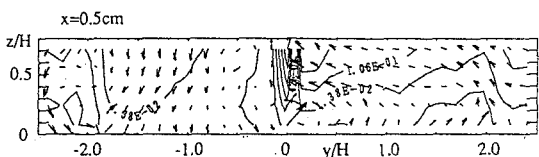


図-5 二次流ベクトルと流れ関数の等値線 (Run F6)

図-7 二次流ベクトルと流れ関数の等値線 (Run F3)

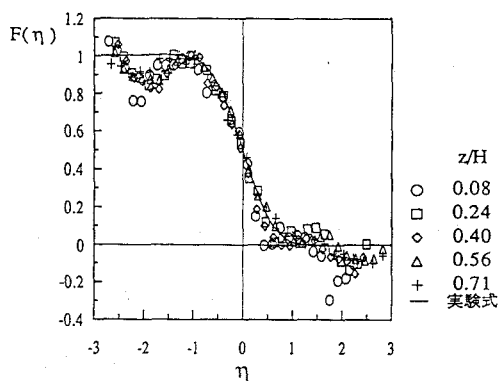


図-8 無次元主流速分布 (Run F6)

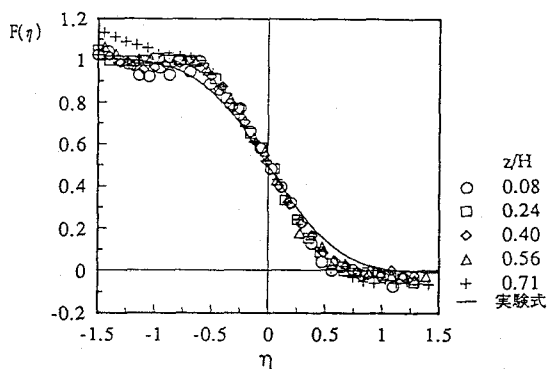


図-9 無次元主流速分布 (Run F3)

る。また、図中の実線はM.Gaster等により提示された二次元混合層における無次元主流速分布をプロットしたものであり、次式によって与えられる。

$$F(\eta) = (U - U_{min}) / \Delta U \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh(\eta) \left[1 + \frac{2}{3} \operatorname{sech}^2(\eta) \right] \right\} \quad \dots \dots (2)$$

$$\eta = (y - y_c) / \delta \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 y_c は $(U_{max} + U_{min})/2$ に相当する y の値である。図-8 および 9 より無次元化した主流速の横断分布は $\alpha=0.5$ および 1.0 のいずれも $\eta=0$ の近傍では、鉛直方向にはほぼ相似形が保たれている。また、二次元混合層に対して適合性の高い式 (2) は、底面の境界が影響する三次元混合層においては、 $\alpha=0.5$ の場合には $\eta=0$ の近傍で適合性は良いが、波状性を示す $\eta=\pm 2$ の近傍において二次流の影響が強く現れることが認められ、この影響を取り入れる必要がある。また、 $\alpha=1.0$ の場合、 $\eta=0$ の近傍で実測値の横断方向変化率が実験式 (2) と較べて大きい。この要因として、 $\alpha=1.0$ の場合には低速側の $y/H=1$ 近傍で上昇流、高速側の $y/H=1$ 近傍で下降流となる扁平な縦渦が考えられ、主流速はこの二次流による運動量輸送によって変形し、相対的に $y/H=1$ 近傍で小さく $y/H=1$ 近傍で大きくなったためであることが示唆される。

5.まとめ

本研究では、合流部として幾何学的境界条件が最も単純な二河川平行合流における土砂流送特性および流れの三次元構造について実験的考察を行った。得られた結果は、以下の通りである。

- (1) 二河川平行合流部においては、隔壁延長線上にSand Ridge が形成され、合流前の本川または支川に Sand Ridge が存在する場合には、合流後も存続する。
- (2) 本川と支川の流速差が大きい場合、Sand Ridge は流下に従ってその位置を低速側領域にシフトする。
- (3) 掃流砂量は、二河川平行合流部にSand Ridge が発生した場合には横断方向に大きく変化し、河床波形状に強く規定される。
- (4) 合流前に存在した水深スケールの縦渦は、本川と支川の流速差から生ずる鉛直渦によって変形するが、その度合は流速差および合流前の縦渦によって異なる。特に、無次元流速差 $\alpha=1.0$ に於いては、低速領域の $y/H=1$ 近傍において斜め上昇流および高速領域の $y/H=1$ 近傍において斜め下降流となる一個の扁平縦渦が見出され、この原因として、本川と支川の流速差によって生ずる鉛直渦が、主流速の鉛直方向変化による傾き効果によって縦渦成分を有するよう変形すること、さらに、隅角部に形成される本川側の縦渦が支川側の縦渦を吸収し、その空間スケールを拡大することの両者が示唆された。
- (5) 無次元主流速分布は、鉛直方向にはほぼ相似形を保ち、二次流の主流速への影響は底面近傍で大きい。

<参考文献>

- 1) Mosley, M.P.: An experimental study of channel confluences, J. Geol., Vol.84, pp.535-562, 1976
- 2) Best, J.L.: Sediment transport and bed morphology at river channel confluences, Sedimentology, Vol.35, pp.481-498, 1988
- 3) Roy, A.G. and Normand Bergeron: Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material, Geomorphology, Vol.3, pp.99-112, 1990
- 4) 岸 力 編：沖積河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究，自然災害特別研究成果報告書，昭和62年度文部省科学研究費，1988
- 5) 棚津家久，中川博次，室屋浩幸，松本利典：開水路合流部の混合層における乱流構造と組織渦の制御に関する研究，土木学会論文集，第387号／II-8，pp.153-162，1987
- 6) 大本照憲，平野宗夫，天野光歩，松尾 誠：河川合流部の大規模渦構造と河床形状，水工学論文集，第36巻，pp.373-378，1992
- 7) M.Gaster, E. Kit, and I. Wygnansky: Large-Scale Structures in a Forced Turbulent Mixing Layer, J. Fluid Mech., Vol.150, pp.23-39, 1985