

河川合流部の大規模渦構造と河床形状 Large Scale Vortex Structure and Sand Waves in River Confluence

大本照憲*・平野宗夫**・天野光歩***・松尾 誠***

By Terunori OHMOTO, Muneo HIRANO, Mituho AMANO and Makoto Matsuo

In this paper, the experiments were performed to investigate behavior of large scale vortices, the three-dimensional characteristics of the turbulent structure and sand waves in the confluent flow with a training dike, which was produced from the merging of two parallel streams. The results show that the secondary currents with a vortex diameter of about a flow depth exist in the confluence and they develop due to the interaction of corner secondary currents during the merging process. In addition, the three-dimensional characteristics of main flow velocity, Reynolds stresses and turbulent energy are discussed by comparing the confluence flow with the two dimensional turbulent wake behind the thin flat plate.

Keywords: River Confluence, Vortex Structure, Secondary Flow, Sand Wave

1. はじめに

河川の合流部は、河状特性を異にする二つ以上の川が衝突・混合するために大規模な渦が発生し、滞筋の偏倚、河床の局所洗掘・堆積を生ずる等、治水上の弱点となる¹⁾。このような問題に対する方策として、河川工学的には瀬割堤、導流堤または水制を設置するのが一般的である。瀬割堤は、流況の異なる両川の相互干渉を弱め、合流を円滑にする目的を有するが、合流後の流れの三次元的構造については不明な点が多い。従来の研究によれば、瀬割堤は流向の変化に伴うPrandtlの第一種二次流の発生を抑え、底面剪断応力の集中を防ぐ機能を持つことが明らかにされている²⁾。本研究では、図-1に示すように、合流角の影響がない同規模の二河川が平行に合流する流れ場を想定し、合流後の両川の縦渦(Prandtlの第二種二次流)の挙動、乱流特性および河床形状について実験的検討が成された。

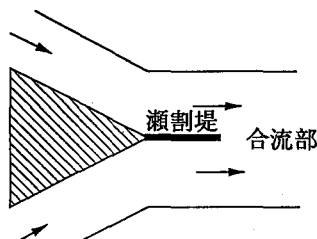


図-1 河川合流部の模式図

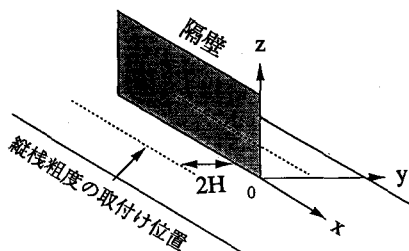


図-2 実験装置および座標系

- | | | | | |
|------|-----|----|---------------------|--------------------------------|
| * | 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) |
| ** | 正会員 | 工博 | 九州大学教授 | 工学部水工土木学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1) |
| *** | 正会員 | 工修 | 建設技術研究所(株)東京本社技術第5部 | (〒103 東京都中央区日本橋4-9-11) |
| **** | 学生員 | | 九州大学大学院工学研究科水工土木学専攻 | (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1) |

2. 実験装置及び方法

実験水路は、長さ 6m、幅 25cm、高さ 23.5cm のアクリル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。流速変動は、水路床が滑面の場合、粗度として中央粒径 $d_{50} = 1.7\text{mm}$ のポリスチレン粒子を一樣に貼付けて粗面とした場合および図-2 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 3 ケースにおいて、各々、表-1 の水理条件下で隔壁より

表-1 水理条件

流量	$Q=0.79(\text{l/sec})$
水深	$H=3.13\text{cm}$
平均流速	$U_m=10.1\text{cm/sec}$
摩擦速度	$U_* = 2.48\text{cm/sec}$
水路勾配	$I_0=1/500$
レイノルズ数	$Re=2775$
フルード数	$Fr=0.183$

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 型エンドフロープローブを使用し、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。中央粒径 $d_{50}=0.94\text{mm}$ および 0.57mm の 2 種類の均一

表-2 実験条件 (移動床実験)

	Run1	Run2	Run3	Run4
水深 $H(\text{cm})$	3.0	2.5	2.25	3.13
平均流速 $U_m(\text{cm/sec})$	24.8	29.1	32.5	19.6
摩擦速度 $U_*(\text{cm/sec})$	2.40	3.36	4.34	2.37
水路勾配 I_0	1/150	1/150	1/150	1/500
フルード数 Fr	0.46	0.59	0.69	0.35
中央粒径 $d_{50}(\text{mm})$	0.94	0.94	0.94	0.57
砂粒レイノルズ数 Re	22.6	31.6	40.8	13.5

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-2 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る時点で超音波測深器を用いて計測された。

3. 実験結果および考察

3.1 平均流特性：座標系は、図-2 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。図-3, 4 および 5 は、それぞれ、全潤辺が滑面の場合、底面のみ粗面の場合および底面に縦棧粗度を設置した場合の主流速の等値線および二次流ベクトルを示す。いずれの場合も主流速の等値線は、二次流ベクトルの方向に突出していることが認めら

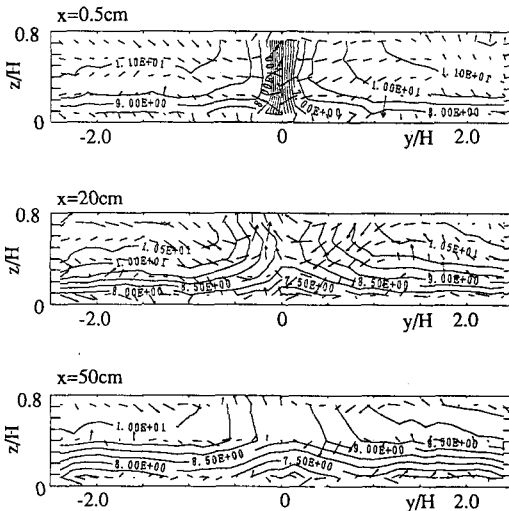


図-3 主流速の等値線および二次流ベクトル (滑面)

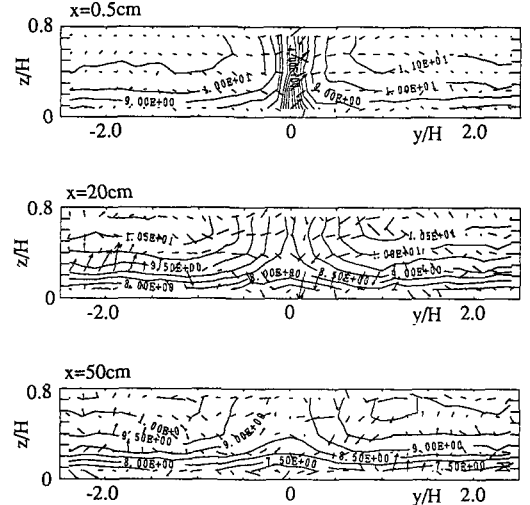


図-4 主流速の等値線および二次流ベクトル (粗面)

れ、二次流により主流方向の運動量が輸送されていることを示している。図-3の全潤辺滑面の場合、 $x=0.5\text{cm}$ では隔壁に向かう周囲流体の連行が顕著であり、 $x=20\text{cm}$ では隔壁下流位置で上昇流、隔壁から水深スケール離れた位置で下降流となる一対の縦渦が観察される。これらの縦渦は、コーナ・バイセクターの水面側渦が発達したことが考えられ、その両外側にはコーナ・バイセクターの底面側渦と推察される比較的弱い縦渦が観察される。更に下流の $X=50\text{cm}$ においても、これらの縦渦は $x=20\text{cm}$ の場合と同様の縦渦配列を示し、若干減衰しているものの主流速の等値線は波状分布を示していることから主流速への影響は無視し得ないことがわかる。図-4の底面が粗面の場合、全潤辺滑面の場合と比較して全体的傾向は類似しているが、 $x=20\text{cm}$ の隔壁下流位置で半水深より下層領域に比較的強い下降流が現れていることが注目される。これは、コーナ・バイセクターの底面側渦が底面粗度の影響によって側方への移動を抑制されたことが示唆される。また、二次流の強さが滑面に比べて粗面で大きく現れたのは、広幅の固定床開水路流の実験結果では安定した縦渦は路床が滑面の場合には水路隅角部を除いては観測されていない³⁾のに対して、路床が粗面では比較的安定して存在すること^{4),5)}と対応している。図-5の縦横粗度を路床に設けた場合、滑面における二次流ベクトルおよび主流速の特徴がより明瞭に現れ、二次流はあまり減衰しないことが認められる。なお、A. Nakayama and H. Rahai⁶⁾による風洞実験では、コーナー二次流の影響が後流に強く現れており、コーナ・バイセクターの水面側渦が底面側渦に比べて発達し、本実験と同様の結果を示している。このように、縦渦が隔壁背後で上昇流、隔壁から横断方向に水深スケール離れた位置で下降流を誘起するように配列したのは、流下に伴って後流への周囲流体の連行がコーナ・バイセクターの水面側渦を発達させ、底面側渦を抑制する働きをしたためであることが示唆される。図-6は、全潤辺が滑面の場合の欠損速度分布を示す。速度の無次元化には極大欠損速度($\Delta U = U_{\max} - U_{\min}$)、横軸 y の無次元化には半値幅 δ を用いた。図中の実線は、自由剪断流において後流の無次元速度分布を表すガウス分布を示す。本実験のように三次元性の強い開水路流の平板後流においても、無次元欠損速度は河床近傍を除いてほぼ相似形に近いことがわかる。尚、無次元化変数である極大欠損速度 ΔU および半値幅 δ に関しては、 ΔU は鉛直方向に直線的に増大し、流下方向に減少、また δ は鉛直方向および流下方向に増大する傾向のあることが認められた。

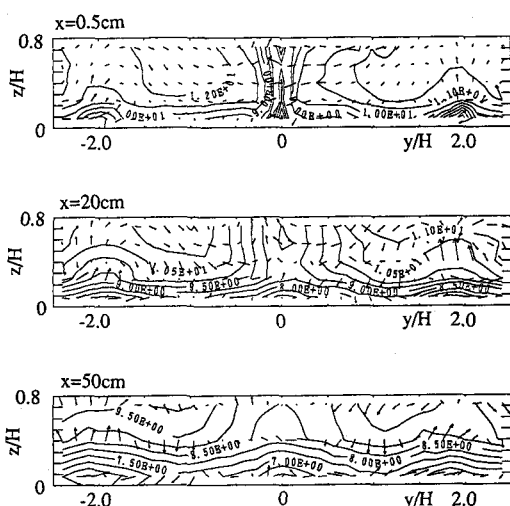


図-5 主流速の等値線および二次流ベクトル (縦横粗度)

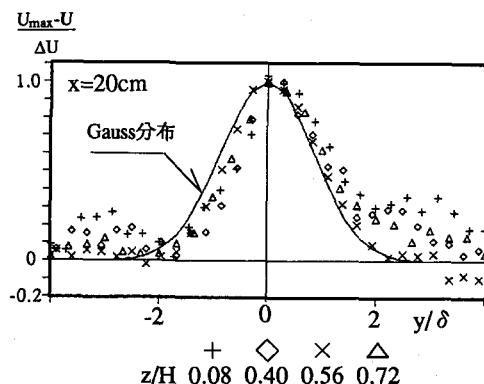


図-6 欠損速度分布 (滑面)

3.2 乱れ特性: 図-7~11は、全潤辺が滑面の場合の計測結果である。後流の三次元性が顕著に現れた $x=20\text{cm}$ における乱れエネルギーの横断分布を図-7に示す。乱れエネルギーは、鉛直方向には河床上方に向かって減少する傾向を持ち、横断方向に関しては、河床から半水深までの領域では、 $y/H=0$ で極小値を示し、半水深から自由水面までの領域では、 $y/H=\pm 0.5$ の近傍で極大値を示してい

ることがわかる。図-8および図-9は、それぞれ $x=2.0\text{cm}$ におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ および $-\overline{u'v'}$ の横断分布を示す。 $-\overline{u'w'}$ はいずれも鉛直上方に減少し、 $y/H=0$ で極小となることがわかる。また、 $z=2.25\text{cm}$ の $|y/H| \leq 1$ の領域で $-\overline{u'w'} < 0$ を示すのは、図-3に示すように主流速の等値線が $y/H=0$ に対して凸状の分布を示し、極大流速点が水面下に没し、運動量が上方に運ばれたためである。また、 $-\overline{u'v'}$ の絶対値が極大値を示す位置は、主流速の横断分布の変曲点にはほぼ一致し $-\overline{u'v'}=0$ を示す $y/H=0$ および $y/H=\pm 1$ はそれぞれ二次流の上昇流および下降流と対応していることが認められた⁷⁾。次に、乱れエネルギーの収支式における発生項について考察する。図-10および図-11は、それぞれ $-\overline{u'v'}\partial U/\partial y$ および $-\overline{u'w'}\partial U/\partial z$ の横断分布である。 $-\overline{u'v'}\partial U/\partial y$ は $y/H=\pm 0.5$ 付近で極大値をとり、 $|y/H| > 1$ の領域ではほぼゼロに近いことがわかる。一方、 $-\overline{u'w'}\partial U/\partial z$ は鉛直上方に減少し、 $y/H=0$ で $-\overline{u'w'}/U^2 \times 100$

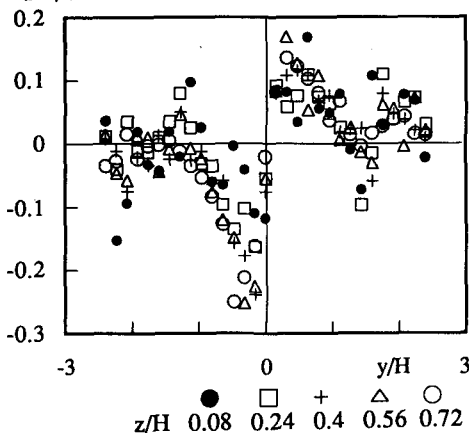


図-8 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布

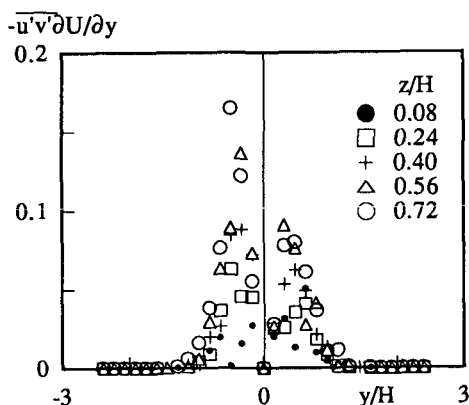


図-10 $-\overline{u'v'}\partial U/\partial y$ の横断分布

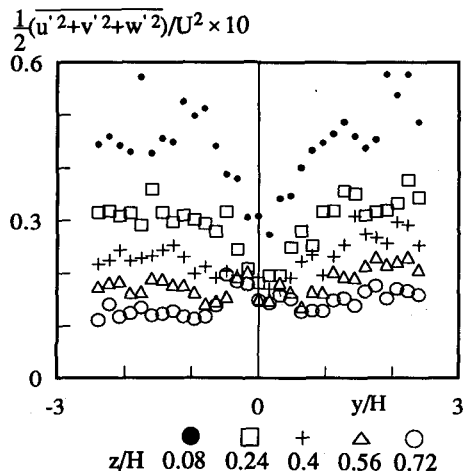


図-7 乱れエネルギーの横断分布

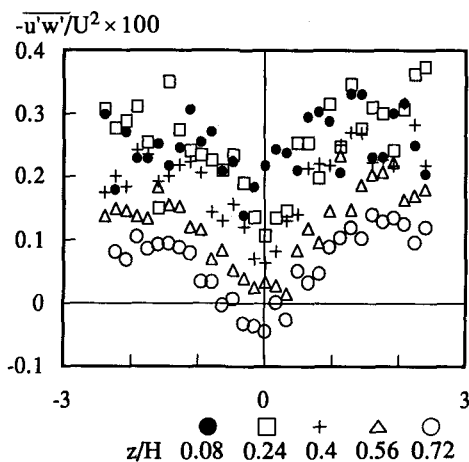


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の横断分布

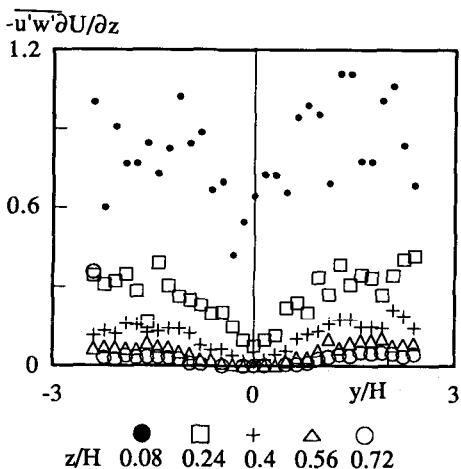


図-11 $-\overline{u'w'}\partial U/\partial z$ の横断分布

極小値を示す。これら2つの乱れエネルギーの発生項の分布特性を比較すると、河床から半水深付近までの領域では、 $-\overline{u'w'}$ が卓越し、半水深付近から自由水面までの領域では $-\overline{u'v'}$ が卓越している。また、このような傾向は、先に述べた乱れエネルギーの横断分布の傾向とほぼ一致することが認められる。全般的に、乱れエネルギーに関しては、半水深から自由水面までの領域では平板後流の影響が支配的であり、半水深から河床までの領域では河床の影響が支配的であるとみなされる。

3.3 河床形状および掃流砂量：移動床流れにおいて、水深スケールの縦渦すなわち二次流が発達した場合、河床には明瞭な縦筋が形成される⁹⁾。写真-1および写真-2は、それぞれ表-2のRun1およびRun-4の実験条件で通水し、240分経過した際の河床形状である。写真-1から隔壁下流位置およびその両側に主流方向に平行にSand Ridgeが形成されていることおよび隔壁の直下流部のSand Ridgeはその両側のSand Ridgesに較べてやや偏平な形状であることがわかる。写真-2においては、河床全域に砂漣または砂堆が形成されており、特に注目すべきことは隔壁直下流部に深掘れが生じていることである。隔壁直下流部では、主流速および乱れの強さは極小値を示すのに対して、主流方向の乱れの三次モーメントは、極大値を示した。これは、高速流体塊の隔壁直下流部への連行を意味し、隔壁下流位置の深掘れと密接な関係のあることが推察される。図-12は、表-2のRun1～3の

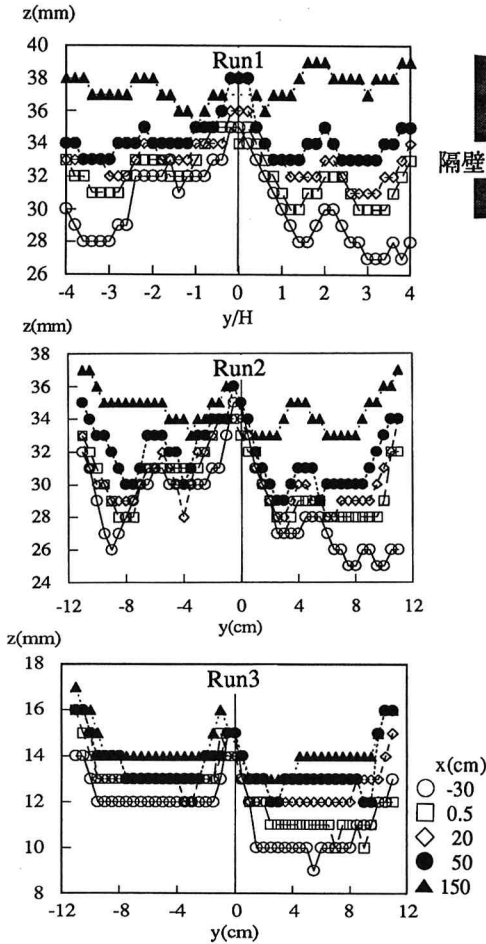


図-12 河床の横断形状

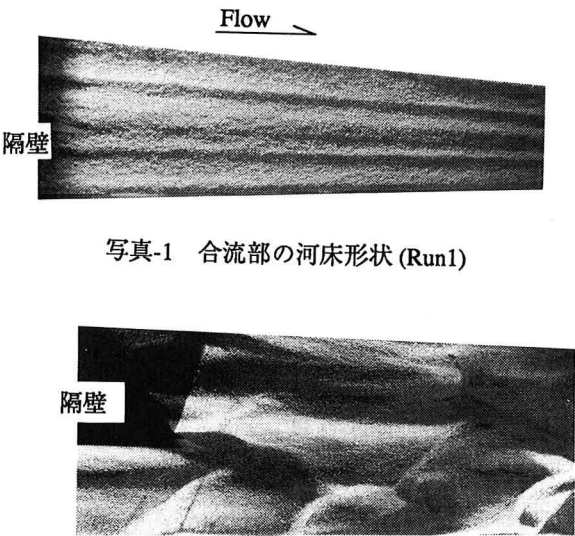


写真-1 合流部の河床形状 (Run1)

写真-2 合流部の河床形状 (Run4)

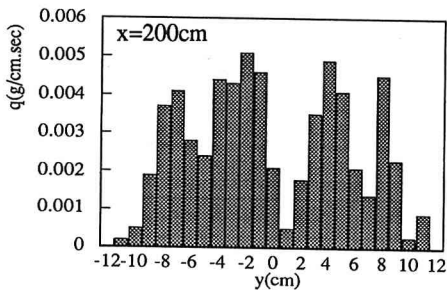


図-13 掃流砂量の横断分布 (Run1)

条件で通水した際の河床の横断形状を示す。Sand Ridgesは、Run-1およびRun-2では $y/H=0$ および $y/H=\pm 2$ 付近に発生しているのに対してRun-3では $y/H=0$ にのみ現れ $y/H=\pm 2$ には発生していない。縦筋河床の発生領域は、砂粒レイノルズ数が8以上で、かつ掃流力が下限に限界掃流力、上限に3倍の限界掃流力の範囲にあることが観察されている⁸⁾。Run-1およびRun-2は、縦筋河床の領域内にあるが、Run-3では掃流力が3倍の限界掃流力を越え縦筋河床の形成領域外に当たるため、隔壁下流位置以外ではSand Ridgesが現れなかったものと考えられる。図-13は、一例としてRun-1の $X=200\text{cm}$ における掃流砂量の横断分布を示す。写真-1および図-12を参照すれば、掃流砂量は $y/H=0$ および $y/H=\pm 2$ のSand Ridgesにおいて極小値、 $y/H=\pm 1$ および $y/H=\pm 3$ のSand Troughsにおいて極大値となり、掃流力が横断方向に大きく変化しているものと見なされる。

4. あとがき

合流角の影響がなく、同規模の二河川が等しい流速で平行に合流する流れ場を対象として、主流速、二次流、乱れ特性および河床形状について調べられた。得られた結果を要約すれば、以下の通りである。

- (1)開水路流の平板後流は、十分発達した領域においては河床近傍を除いてほぼ相似形を示すことが認められた。
- (2)合流部において、安定した水深スケールの縦渦が観察され、それらは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配列を示す。
- (3)乱れエネルギーの横断分布の特徴は、乱れエネルギーの生成項の検討から河床から半水深までの領域では $-u'w'$ が卓越し、半水深から自由水面までの領域では $-u'v'$ が支配的であることから説明できる。
- (4)河床形状は縦筋河床の形成領域においては水深スケールの縦渦に対応し、Sand Ridgesは隔壁延長線上および隔壁より水深の偶数倍離れた位置に主流に平行に発生する。

<参考文献>

- 1)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
- 2)玉井信行，上田悟：乱流モデルによる河川合流部の流れの予測，第31回水理講演会論文集，pp. 437-442，1987
- 3)I.Nezu, H.Nakagawa and A.Tominaga : Secondary Currents in a Straight Channel Flow and the Relation to its Aspect Ratio, Turbulent Shear Flow 4, ed.by L.J.S.Bradbury etc, Springer-Verlag, pp.246-260, 1983
- 4)林 泰造，大橋正和，小谷祐司：開水路流れにおける縦渦の乱流特性について，第28回水理講演会論文集，pp. 263-269，1984
- 5)平野宗夫，大本照憲，松枝修治：流速変動と浮流砂濃度に関する実験的研究，第30回水理講演会論文集，pp. 619-624，1986
- 6)A.Nakayama and H.R.Rahai: "Measurements of Turbulent Flow Behind a Flat Plate Mounted Normal to the Wall", AIAA Journal, Vol.22, No.12, pp.1817-1819, 1984
- 7)天野光歩，大本照憲，平野宗夫：河川合流部の乱流構造，土木学会第45回年次学術講演会，1989
- 8)大本照憲，平野宗夫：縦筋河床の形成領域と掃流力の分布特性に関する研究，土木学会論文集，第399号/II-10, pp.75-84, 1988