

開水路合流部流れの三次元構造

Three-Dimensional Structure of the Flow at an Open-Channel Confluence

岐阜大学工業短期大学部 藤 田 一 郎 Ichiro FUJITA
岐阜大学工学部 河 村 三 郎 Saburo KOMURA

Flow at an open-channel confluence is characterized by a free shear layer formed between converging flows and a separated shear layer formed from the downstream side of the junction. These shear layers are closely related to the formation of secondary flows at the confluence, which is of great importance in river engineering. In this study, three-dimensional turbulence characteristics of the flow at a right-angled open channel confluence accompanying these flow structures are investigated by turbulence measurements and a visualization of the near-wall flow by an oil-film method. From the experimental results, existences of a descending secondary flow along the free shear layer and a strong helicoidal flow accompanying a weak counter-rotating secondary flow along the separated shear layer are verified.

Keywords: confluence, secondary flow, turbulence, three-dimensional flow, flow visualization

1. まえがき

開水路合流部の流れは、合流する流れの境界に生じる自由せん断層と支流の流れが水路側壁から剥離して生じる剥離せん断層によって特徴づけられる。自由せん断層は流線湾曲の影響により、せん断層に沿う二次流を伴うと考えられる¹⁾。剥離せん断層は数多くの剥離渦によって形成されており、非定常な揺動を繰り返している。この二つのせん断層はどちらも水深方向に変化しているため、合流部の流れは非常に複雑な三次元流となっている。自由せん断層に沿う二次流は合流点における局所洗掘に影響を及ぼす点、剥離せん断層の存在は洪水の疎通能力を低下させる点、合流点下流の拡散現象、あるいは堆砂現象に影響を及ぼす点について河川工学上重要である²⁻⁵⁾。ところが、合流部の流れの詳細な構造に関しては、これまでほとんど検討されていないのが現状である。そこで本研究では、開水路合流部流れの三次元構造を明らかにするために詳細な乱流計測、ならびに流れの可視化による実験的な検討を行った。対象としたのは直角合流部の流れであり、剥離せん断層の非定常特性についても検討を加えた。

2. 実験装置および方法

実験は本流幅 $B_3=30\text{cm}$ 、支流幅 $B_2=20\text{cm}$ の循環式の水平床直角合流水路を用いて行った。実験条件を表1に示す。逆流域を含む平均流の計測には超小型(直径 3mm)の正逆プロベラ流速計、乱流計測には水平・鉛直の二成分ホットフィルム流速計を用いた。計測断面を図1に示す。Z軸(W成分)は水路床から鉛直上向きにとった。乱流計測は水面変動の影響が小さいと考えられるRUN B1, B2で断面DC, AA, AC (RUN B1), AD (RUN B2), AGの各4断面において行った。各断面における測定点の数は70~95である。流速測定は前もってタフトにより主流方向を求めておき、各プローブを各点でその方向に向けて行った。タフ

表-1 実験条件

RUN	Q_3 (l/s)	Q_2	B_3 (cm)	B_2 (cm)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)	U_m (cm/s)	Fr_1	Fr_2	Fr_3	Re_3
B1	2.5	0.2	30.0	20.0	5.44	5.39	5.02	16.6	0.168	0.064	0.236	8330
B2	2.5	0.4	30.0	20.0	5.51	5.44	5.02	16.6	0.124	0.126	0.237	8330

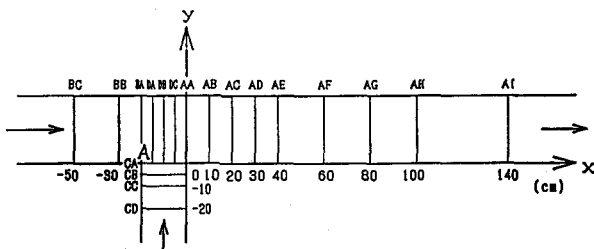


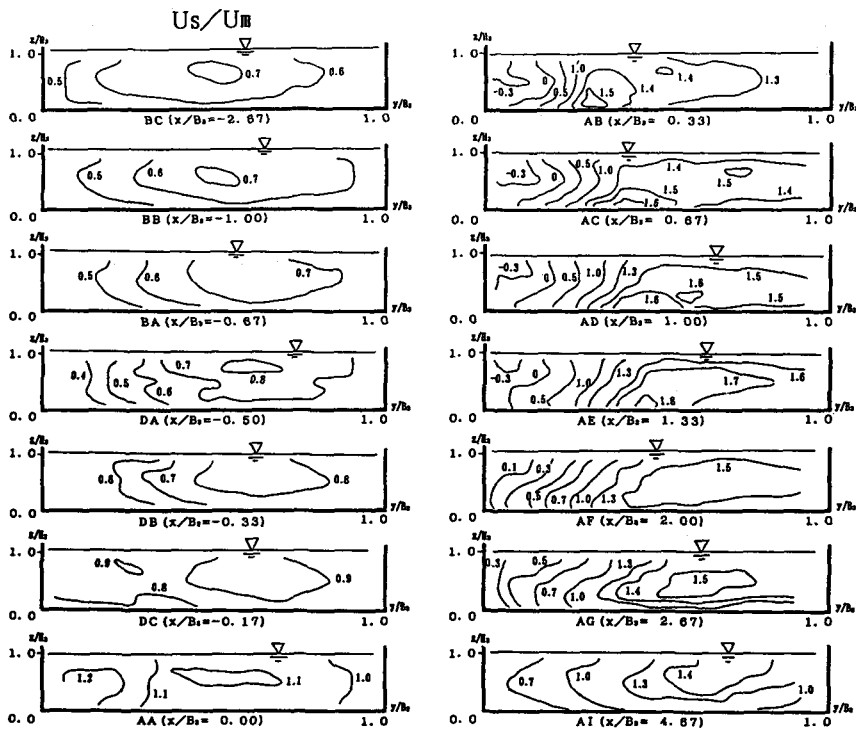
図-1 測定断面

トによる流向測定結果はおおむね正確であったが、流線の曲率が大きい測定点では流向に誤差が生じていたため、主流に垂直な水平成分が主流の5パーセントよりも大きくなる場合にはホットフィルムプローブの向きを修正し、垂直方向成分が5パーセント以下となるように調整した。プロベラ流速計で剥離せん断層内（剥離泡）の流速を測定する場合には、流向が不明確なためプローブをX軸方向に固定した。サンプリング周波数はプロベラの場合が10Hz、ホットフィルムの場合が50Hzとした。流れの可視化は底面近傍の流れに対して行った。本流・支流の上流側に塗布した粘性の高い白色ペイントが底面せん断力によって下流に引き伸ばされてきた軌跡から明確な底面流線のパターンを得ることができた。

3. 実験結果

3. 1 平均流速

RUN B2の横断面内の平均流速分布を図2に示す。ここに、 U_m :合流後の流れの断面平均流速、 U_s :主流方向平均流速。合流点では圧力の上昇があり、その影響は本流のかかなり上流側にまで及んでいる。そのため、合流点に接近するにつれて流速分布形の対称性は大きくくずれている。断面AAで剥離した支流流れは剥離せん断層を形成しながら流下し、断面AG付近で水路側壁に再付着する。剥離から再付着するまでの領域では三次元的な剥離泡が形成されているが、最大流速が剥離せん断層外縁の水路床近傍で生じている点が特徴的である。再付着後の断面では最大流速の位置は水面の方へ移動している。一方、平均流速が負となる逆流域の幅は水面よりも中層部で最大となっており、逆流域は底層部から消失している。逆流域は三次元剥離泡の平均的な形状に対応していると考えられるが、合流点で発生した剥離渦が中層部で水路中央側に引き伸ばされるような三次元変形をしながら流下し、底面の方から散逸していることがわかる。このような傾向は他のケースにおいても現われている。



3. 2 乱れ強度

剥離前の断面AAと、剥離せん断層が発達した断面ADにおけるRUN B2の三方向の乱れ強度分布を図3と図4に示す。断面AAでは、水路中央付近の縦に細長い領域でどの成分にも乱れ強度の増大がみられる。これは合流部自由せん断層の影響と考えられるが、特に水平成分(v_s)が水面近くで極大値を示しているのはせん断層内の鉛直渦が水面付近で明確に存在しているためと思われる。

断面ADでは、剥離せん断層の外縁に沿って著しい乱れ強度の増大がみられる。平均流速=0を示す破線は三次元剥離泡の平均的な形状を表わしている。流下・水平成分が底面近傍で最大値を示しているのに対し、鉛直成分は中層部において最大値が現われている点特徴的である。これは剥離せん断層の外縁に沿う下降流が水路床付近では剥離泡側へ向かう横断流となるためと考えられる。自由せん断層の影響は、水平成分にわずかな第2の極大値が現われている点を除けば、この断面までは及んでいない。

3. 3 乱流エネルギー

図5と図6に乱流エネルギー k の分布を示す。断面DBと断面AAでは自由せん断層の部分で局所的に乱流エネルギーが増大している。断面ACあるいは断面ADでは剥離せん断層の外縁で乱流エネルギーが増大し、底層付近で極大値が現われている。断面AGでは断面ACまたは断面ADの半分程度にエネルギーの最大値が減衰し、その位置が水面の方へ移動していることがわかる。

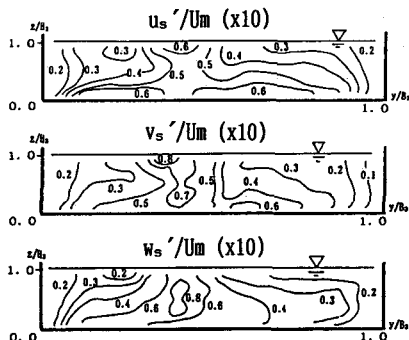


図-3 乱れ強度 (RUN B2, 断面AA)

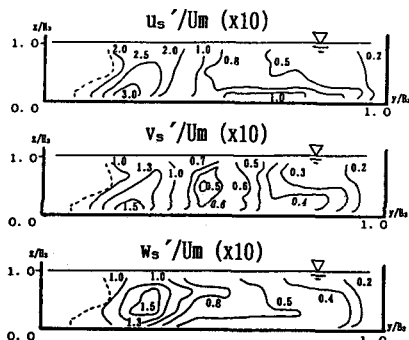


図-4 乱れ強度 (RUN B2, 断面AD)

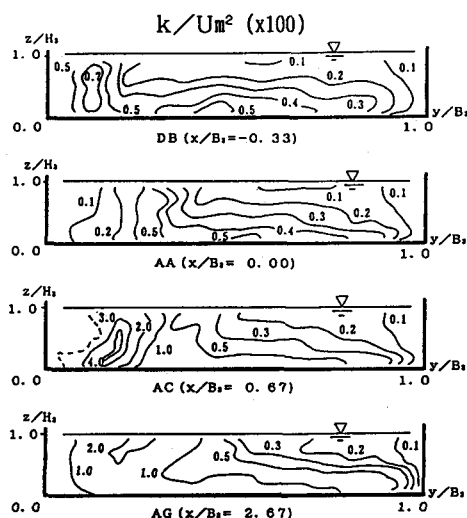


図-5 乱流エネルギー (RUN B1)

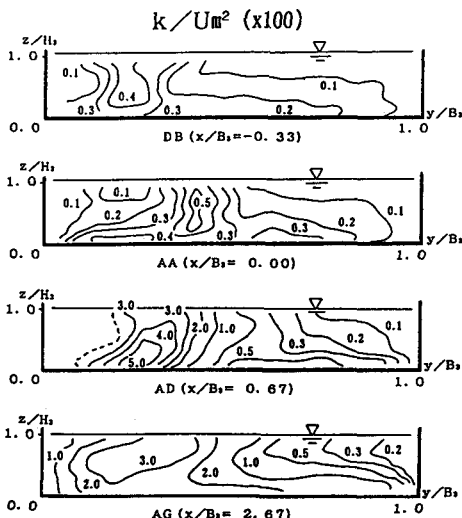


図-6 乱流エネルギー (RUN B2)

3. 4 レイノルズ応力

レイノルズ応力の水平・鉛直成分を図7, 8に示す。水平成分は乱流エネルギーとほぼ同様な分布パターンを示し、自由せん断層と剥離せん断層の部分で極大値が現われている。鉛直成分は剥離後の断面で中層部に極大値が生じているが、その値は水平成分の1/3程度であり、水平方向のせん断力が支配的であることがわかる。断面AGでは底面付近の値が増大しており、流速分布が等流状態に回復しつつあることを示している。

3. 5 流向特性

主流ベクトルの水平方向の流向分布を図9に示す。合流直後の断面DB, AAでは水面から半水深程度までは二次元的な流向特性を示しているが、底面付近では流向が左右に分かれていることがわかる。一方、図10に示す主流ベクトルの鉛直成分からは流向が左右に分岐する位置で鉛直成分が最も大きい値を示すことがわかる。この位置は自由せん断層に対応しており、自由せん断層に沿って下降流が存在していることがわかる。

3. 6 二次流ベクトル

剥離後の断面における二次流ベクトルを図11, 12に示す。RUN B1では剥離せん断層の外側で強い下降流が生じており、それが底面で左右に分かれていることがわかる。下降流の一方は剥離泡の底面内部に強く引き寄せられ、他方は反対側へ向かっている。剥離泡の内部では上昇流が強く、剥離泡外側の下降流とともにひとつの縦渦(らせん流)が生じている。この縦渦の影響で反対側にもうひとつの弱いらせん流が生じている。断面AGでは底層における強い横方向の流れは認められないが、縦渦の中心が水面の方へ浮上している

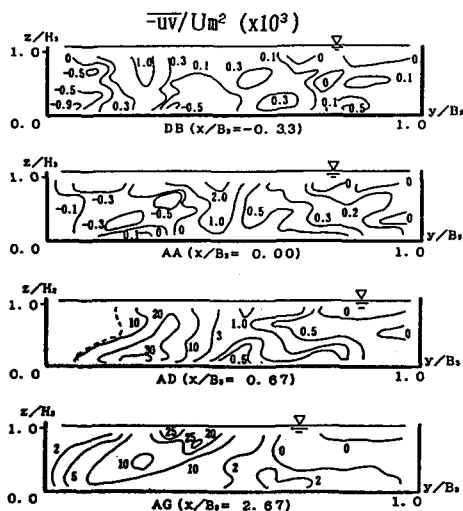


図-7 レイノルズせん断応力
(水平成分, RUN B2)

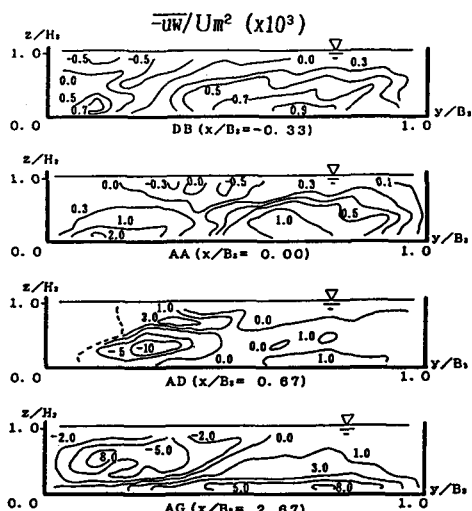


図-8 レイノルズせん断応力
(鉛直成分, RUN B2)

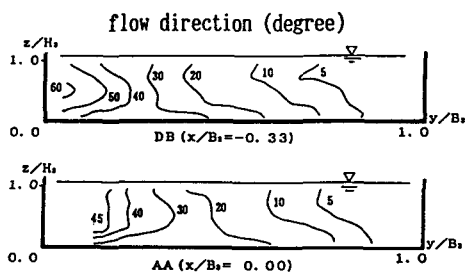


図-9 流向分布(RUN B2)

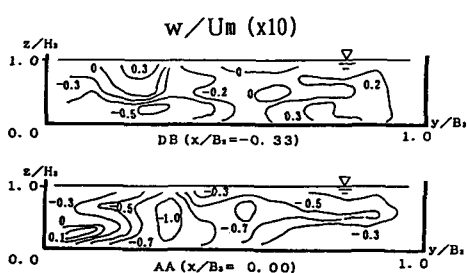


図-10 主流ベクトルの鉛直成分(RUN B2)

ことがわかる。

RUN B2では剥離泡の規模が大きい
ため、断面ADでは
大部分の二次流が
剥離泡底面に向か
っており、剥離泡
の反対側の二次流
はほとんど認めら
れない。このこと
より、ホットフィ

ルム流速計では計測できない逆流
領域では非常に強い上昇流が存在
していることが推定できる。断面
AGでは断面ADにおける縦渦の影響
が強く残っており、RUN B1と同様
にその中心は水面の方へ移動して
いる。

3. 7 パワースペクトル

RUN B1,断面ACの水面近く($z/H_3 = 0.9$)におけるパワースペクトル
の横断方向の分布を図13に示す。
主流・水平成分(u,v-comp.)のスペ
クトルには剥離せん断層の外側の
 $y/B_3 = 0.133 \sim 0.333$ の領域におい
て低周波数帯に明確な2つのピー
クが認められる。それぞれのピー

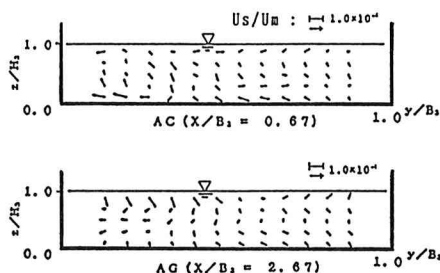


図-11 二次流ベクトル(RUN B1)

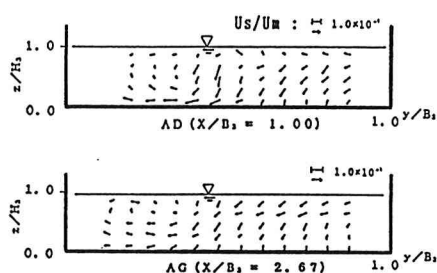
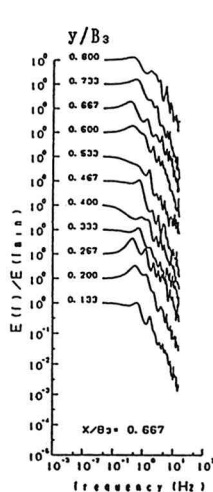
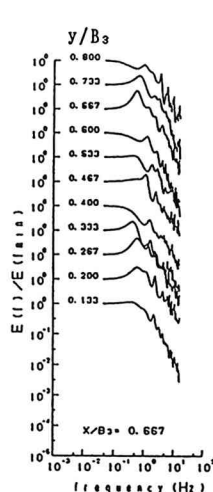


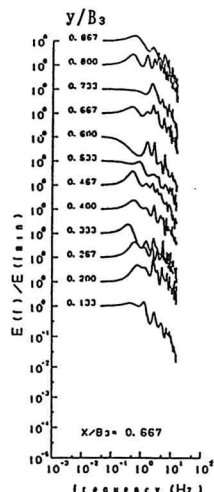
図-12 二次流ベクトル(RUN B2)



(a) u-comp.

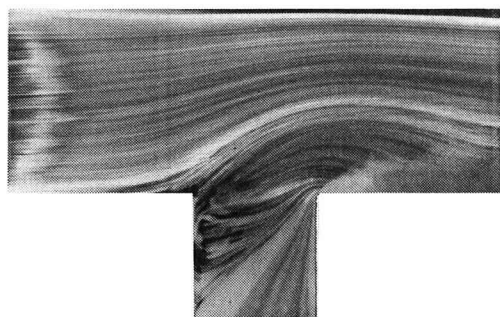


(b) v-comp.

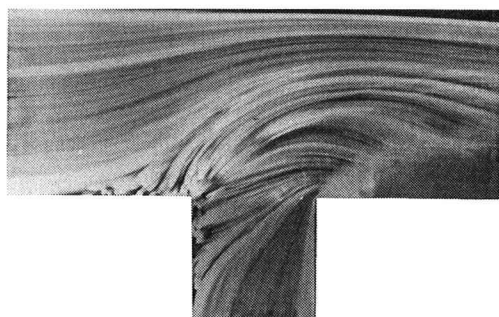


(c) w-comp.

図-13 パワースペクトル (RUN B1,断面AC, $z/H_3=0.9$)



(a) RUN B1



(b) RUN B2

図-14 油膜法により可視化された合流部の底面流線

クは約0.5Hzと約1.0Hzである。低周波側の値は剥離せん断層外の大規模な渦群の通過に伴う流速変動、高周波側は個々の剥離渦の通過に伴う流速変動によるものと考えられる。このような傾向は別の相対水深においても現われている。

3. 8 底面流線

油膜法によって可視化した底面流線を図14に示す。本流と支流の上流側から側壁に沿って流下してきた底面流線は合流部に接近するにつれて側壁から剥がれ、大き

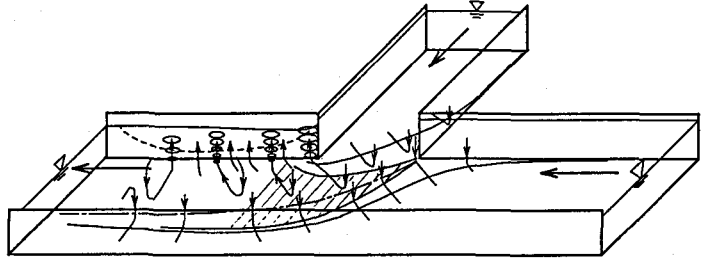


図-15 合流部流れの三次元構造推定図

く左右に湾曲している。これは合流点における圧力上昇のため側壁に沿う流れがゆるやかに三次元剥離していることを示している。合流部においては底面流線が流下方向に発散するパターンを示すくさび状の領域が存在しているが、流れの連続性を考慮すればこの領域において下降流が生じていることが容易に推定できる。また、剥離後の部分ではすべての底面流線が剥離泡側に向かっており、強い横方向の流れが生じていることがわかる。これらの結果はこれまでの乱流計測による二次流ベクトル等の計測結果とも一致している。

4. 流れの三次元構造に関する考察

以上の乱流計測および流れの可視化によって得られた知見をもとにして推定した流れの三次元構造図を図15に示す。底面の斜線部分が油膜法で可視化されたくさび状の底面流線発散領域を示す。この領域の中心線は自由せん断層の中心にほぼ一致しているが、この領域では底面付近で下降流が生じる。一方、剥離泡の内部では数多くの鉛直渦によって上昇流が生じており、それが剥離せん断層に沿う縦渦の大きな発生要因となっている。

5. あとがき

本研究では、直角合流部における流れの構造を乱流計測と可視化によって検討した。その結果、合流部における2種類のせん断層にともなって生じる二次流が、合流部の流れの三次元構造を特徴づけていることがわかった。特に、剥離せん断層に沿う流れは平面的には鉛直渦群で構成されているが、内部的には剥離泡内部の上昇流とせん断層外縁の下降流によって生じる縦渦を伴う複雑な三次元流であることが明らかとなった。

最後に、本実験に協力していただいた卒業研究生の佐々木浩二、横博之の両君に謝意を表する。

参考文献

- 1) 谷一郎: せん断流れにおける縦渦の形成, ながれ, Vol.2, pp.160-165, 1983.
- 2) 板倉忠興: 河川における乱流拡散現象に関する研究, 北海道開発局土木試験所報告, No.83, pp.1-90, 1984.
- 3) 藤田・河村: ホドグラフ法による合流部流線の解析, 土木学会論文集, 第399号, II-10, pp.55-64, 1988.
- 4) Komura, S.: River-bed variations at confluences, Proc. of International Symposium on River Mechanics, Vol.1, pp.773-784, 1973.
- 5) Ashmore, P. and Parker, G.: Confluence scour in course braided streams, Water Resources Research, Vol.19, No.2, pp.392-402, 1983.
- 6) 神田・山崎: 開水路合流部の流れの水理学的特性, 建設工学研究所報告, 第19号, pp.137-153, 1977.
- 7) Fujita, I. and Komura, S.: Visualization of the flow at a confluence, Proc. 3rd International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, pp.611-618, 1988.