

開水路隅角部における秩序構造

Coherent structure of the corner flow in a turbulent open channel

徳 山 高 専 ○正 員 大 成 博 文
 徳 山 高 専 正 員 佐 賀 孝 徳
 徳 山 高 専 正 員 山 本 恭 子
 山 口 大 学 正 員 斎 藤 隆

1. はじめに

開水路乱流における隅角部の構造を解明する課題は、今日の河川工学および流体力学のいずれの分野においても極めて重要であり、意義深い。洪水流航測の研究で著名な木下は^{1), 2)}洪水流にはいくつかの特徴的な「構造的性」があり、そのひとつとして河岸周辺の立体流況の解明の必要性を指摘している。河岸は土砂の堆積や浸蝕が著しく進行する領域であり、さらには大規模な水平渦¹⁾の発生位置である。洪水時には濁りが激しく、岸に沿う表面流速の遅速変化や河岸沿の湧昇流の存在が明らかにされている²⁾。これらは、今日の河岸水理学における重要な課題であり、その流れの基本を解明するには隅角部における乱流構造の考察を不可欠としている。谷³⁾は、最近、非円形流路の隅流れの二次流れに関する従来の研究を詳しく解説し、二次流れの重要な属性としての縦渦の特徴を論じた。この「乱流二次流れ」としての縦渦の特徴は、渦の強さが弱いのに流れを完全に三次元化すること、さらには減衰がわずかで主流方向に長い距離を持続するとされている。ところが、これらの特徴は、固定点検出法を用いて一点計測の結果を集合させていること、しかも計測データが十分長い時間平均化が行われているなどのある意味では限定された条件下で得られたものである。

本論では、この従来の乱流二次流れとしての縦渦を「定常な縦渦」と呼んで、「秩序運動としての縦渦」と明確に区別する。本論の目的は、隅角部に形成された秩序運動としての縦渦の構造を明らかにし、二次流れの発生機構を解明することにある。また同時に、開水路固有の、側壁近くにおける自由表面付近の秩序構造を解明し、隅角部のそれとの相互作用についても考察することである。本研究の方法には、螢光染料をトレーサーとしたレーザースリット法^{4), 5)}が主に用いられた。その結果、隅角を形成する底壁面と側壁の両方に形成された縦渦の相互作用によって二次流れが形成されることが明らかにされた。また、側壁部から間欠的に発生する水平渦の挙動が明らかにされた。

2. 実験装置と方法

実験は長さ10 m、幅60 cm、深さ15 cm、勾配1/1000の総アクリル製開水路で行われた。壁面は滑らかであり壁面全体が0.3 mm以下の凹凸にレベル調整された。上流端には整流ハニカム（径4 mm、長さ3.2 cm）、下流端には水位調節用堰がそれぞれ設置された。流速計測および可視化は上流端より5 m付近で行われた。流速計測はレーザー流速計（DISA製55 Xシリーズ、出力2 Wアルゴンレーザー）でFig 1に示されるような方式で精度よく行われた。レーザー流速計の利点は、可視化が行われるおそい流れの流速計測が可能であることさらには、非接触計測であることから側壁近くでも流れを乱すことなく計測できることにある。隅角部の流速分布が水深方向および横断方向の両方で求められた。

Fig 2に横断面視法の概略が示されている。鏡（9 cm × 9 cm）はスリット面の形象に影響しない45 cm下流で側壁から鏡の中心で20 cmのところに設置された。レ

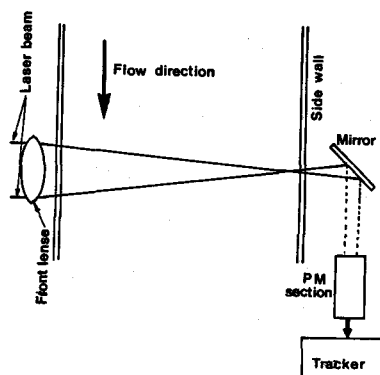


Fig. 1 Flow measurement system by LDV.

ーザーの出力を最大にして発信させ、強力な光膜（厚さ2mm）が流れの中に形成された。トレーサー（蛍光染料水溶液、比重1.005）は、上流端より2.5m下流付近で側壁に沿うように一挙に200cc程度が流し込まれた。トレーサーの大部分は下流端まですぐに流れ去るが、その一部が底壁および側壁の両粘性底層内に滞留しながら流下し続けた。その過程で両底層内のトレーサーは流れの秩序運動自身によって巻上げられ、スリット面では隅角部の秩序運動自身の断面が時々刻々と明瞭に可視化された。

Fig.3には側壁付近の水表面流況の可視化方法が示されている。トレーサーには蛍光染料の粉末1g程度が一度に使用され、それが上流端下流1m付近の側壁近くの水表面に投入された。トレーサーは流下とともに水表面にむらなく広がり、水表面付近の秩序構造を明瞭に表現した。照明には蛍光ランプ（40ワット、4本）が用いられた。蛍光染料はこの蛍光ランプの照射によって鮮やかに文字通りの蛍光を発した。撮影はモータードライブカメラを用いて比較的短シャッター速度で連続的に行われた。Table 1に本実験条件を示す。

3. 隅角部の流れ構造

3.1 平均流速分布

前述のレーザー流速計の利点を生かして、隅角部の平均流速が精度よく計測された。Fig.4に水深方向（y）および横方向（z）の平均流速分布の一例が示されている。水深方向の平均流速分布は、水路中央部で水表面の流速が最大となるのに対し、隅角部では側壁に近づくに従って最大流速点が底壁面方向にだんだんと移動するという隅角部固有の注目すべき特徴を示している。この各断面における最大流速点がプロットされたのがFig.5である。各最大流速点を連ねると、曲線は序々に隅角部に向っている。これは、隅角部に流れ込む乱流二次流れの存在によってもたらされたものと思われる。そこで、この曲線によって分割される領域を図に示すようにそれぞれ側壁領域、底壁領域と名付ける。水深方向の流速分布のもうひとつの特徴は、各断面の流速分布の相違が底面近くで比較的少なく、底面から離れるに従ってしだいに顕著になっていることである。Fig.4の右側には横方向に計測した流速分布が示されている。この分布の特徴は、水面近くで側壁に対する速度勾配がゆるいのに対し、底面に近づく

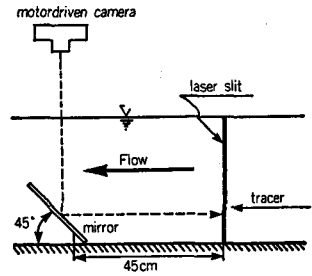


Fig.2 Laser slit method.

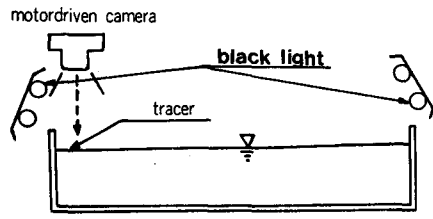
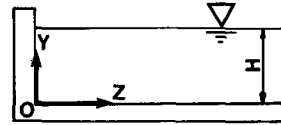


Fig.3 Flow visualization system of the free surface.

Table. 1. Experimental condition.

CASE	U_m	U_r	H	Re
	cm/s	cm/s	cm	$U_{max}H/\nu$
B	5.43	0.33	6.71	4720



(C)

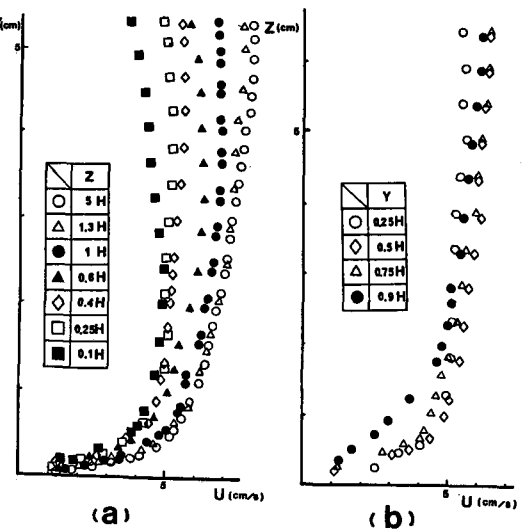


Fig.4 Mean velocity distributions of the corner flow.

にしたがって速度勾配が急になっていることである。
 また、水面近くでは水路中央部の一様流速になるの
 かなり側壁から離れてしまうが、逆に底面近くでは側
 壁からすぐのところで一様流速に達してしまう。

以上の平均流速分布特性を踏まえながら隅角部での
 秩序構造を検討する。

3. 2 隅角部の秩序構造

Fig. 6 にレーザースリット法による隅角部可視化写
 真が拡大して示されている。スリット断面は上流方向
 に45度傾斜しており、流れの中に鏡を置かずにそのまま接写撮影されたものである。写真底面に底壁、左側
 に側壁、上部にそれぞれ水表面が写出されている。また、Fig. 7 には右岸隅角部の秩序構造の連続写真が示
 されている。1 コマ間隔は0.26 秒であり、これらより秩序運動の空間構造をある程度明らかにすることがで
 きる。以上の可視化写真より、底壁および側壁の両方に秩序運動としての縦渦（対）が多数形成され、それ
 らが複雑な三次元構造を有し、隅角の各規模の二次流れの形成に大きな役割を果していることが明らかであ
 る。まず、第1 に最も重要な注目点は、乱流二次流れ特有の隅角部に向って流れ込む挙動が多くの写真に認
 められることである。上流より側壁に沿って注入されたトレーサーは、底壁と側壁の両粘性底層内に滞留し
 秩序運動自身がトレーサーを巻上げてゆく。巻上げの主役は壁面近くに形成された縦渦対であり、それらが
 発達し、さらには縦渦同士の相互作用を繰り返して大規模化し、両壁面から離れたところまでトレーサーを
 輸送する。ところが、隅角を二分割する45度線上付近にはトレーサーが存在しない場合が多い。この場合両
 壁面付近にはトレーサーが存在し続けていることから、トレーサーが存在しない流体は、両壁から離れた部

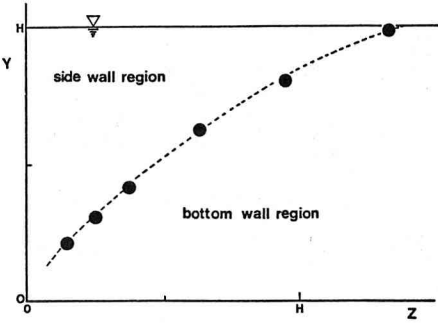


Fig. 5. Maximum velocity point in the vertical section.



Fig. 6. An enlarged photograph of the coherent structure of the turbulent corner flow.

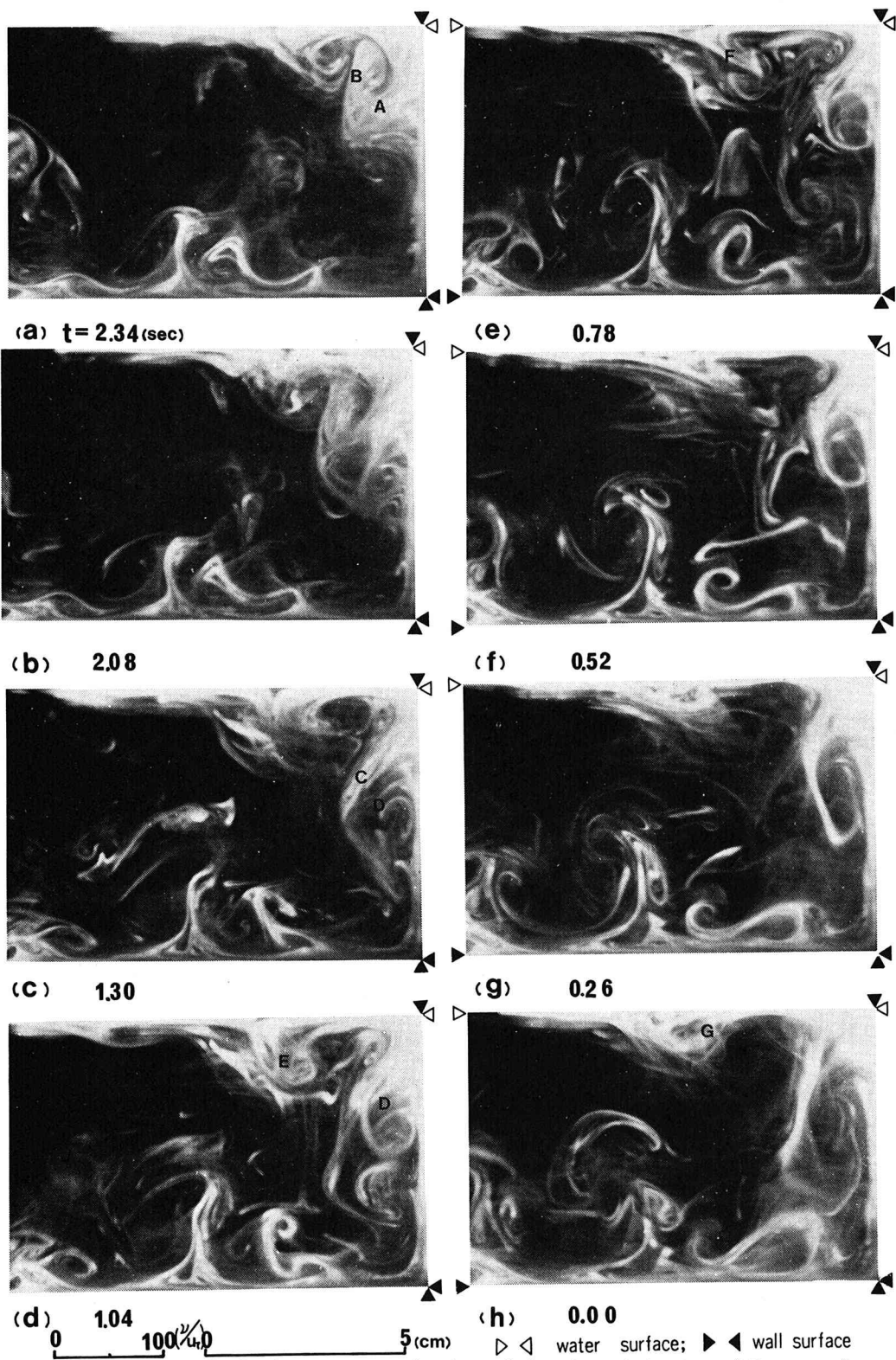


Fig 7. Continuous stream wise views of the coherent structure of the corner flow.

分から隅角部へと侵入してきたと考えられる。そして、この隅角へ向う二次流れは、隅角に近い両壁に形成された縦渦のひとつひとつによって誘起された流れが集合することによって形成されたものと思われる。また、この隅角に向う二次流れの領域は、前述の Fig. 5 で示された最大流速点を連ねた曲線とほぼ一致し、最大流速点の変化が二次流れと深く関係を有することを示している。

そこで、それぞれの壁面に形成された縦渦の特徴について検討することにしよう。この場合、水深 H と内層スケールの相互関係は、 $H = 247 \frac{\nu}{u_{\tau}}$ (ν : 動粘性係数、 u_{τ} :

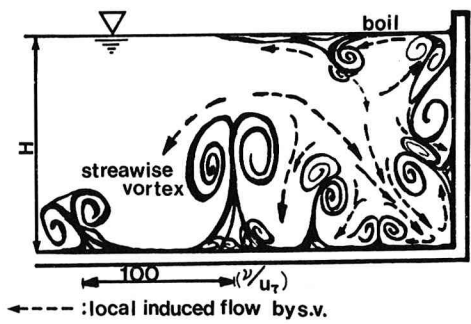


Fig. 8. A model of the turbulent corner flow.

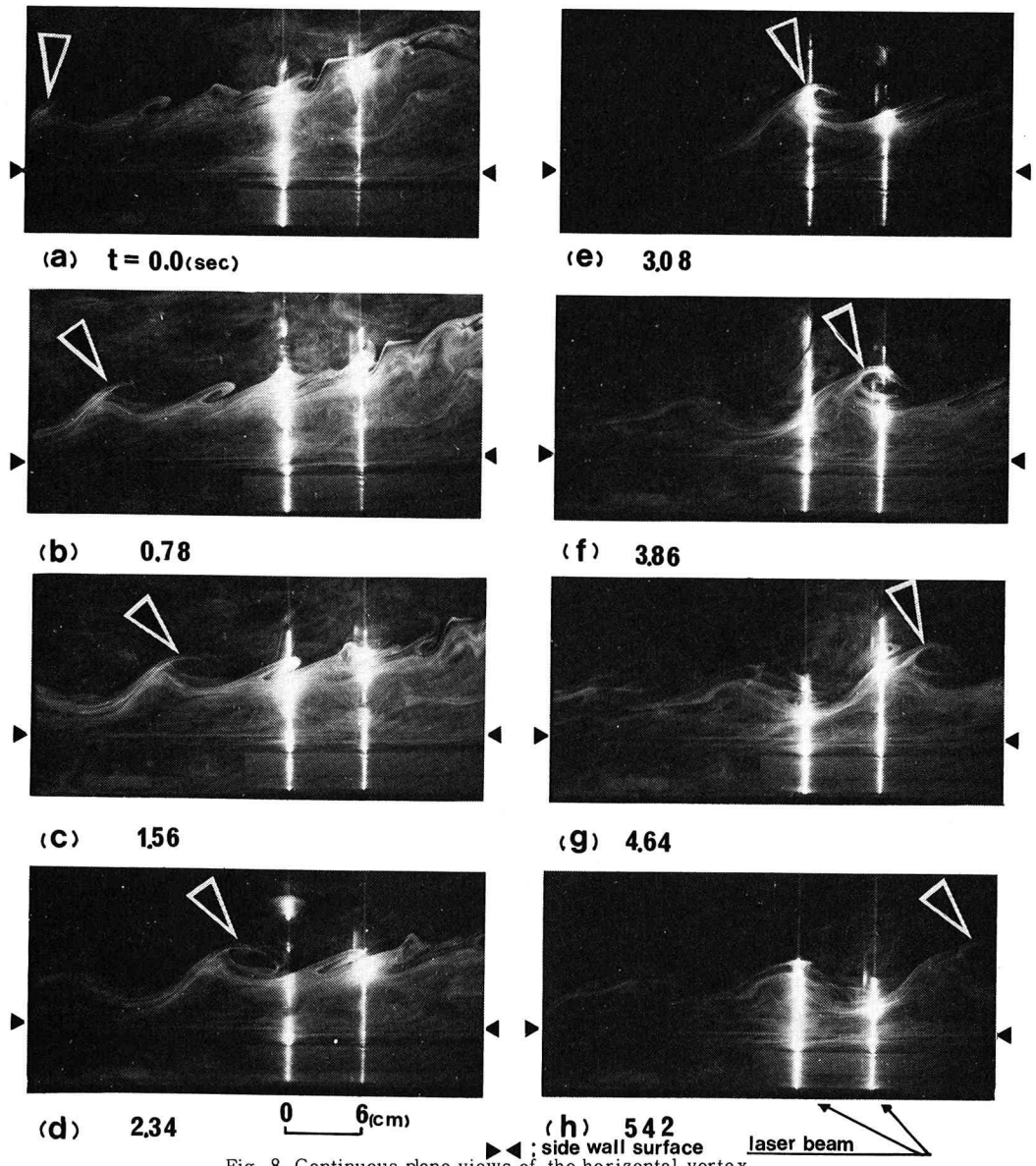


Fig. 8. Continuous plane views of the horizontal vortex.

摩擦速度)となり、流れ場の約半水深の位置が内層と外層の境界面となる。水路中央部の内層内の縦渦の特徴⁶⁾について概略すると、(1)縦渦はほとんど常に対で存在する、(2)縦渦は内層を形成するそれぞれの領域にそれぞれの規模で形成される、(3)壁近くに形成された縦渦とそれらの相互作用が局所的な上昇流や下降流はかを誘起する、(4)単独の渦が発達して水深規模になることはあり得ず、大規模化は小スケールの縦渦同士の複合化によって達成される、(5)縦渦管は常に左右に揺動するなどである。隅角部に形成される縦渦も基本的にはこれらの性質を兼備えるものであるが、いくつかのさらに固有の特徴を有するようである。隅角部は一般に水路中央部に比べて低流速であり、それぞれの壁面の摩擦速度はより小さいはずである。そうであれば壁近くの縦渦は u_r に規定されて形成されることから、 u_r の相連した分の縦渦の変化が存在することになる。また、隅角のそれぞれに形成された縦渦は自ら発達しようとして壁から離れようとするときに互いに影響を及ぼしあうはずである。著者らの観察によれば、隅角部近くに形成された縦渦は、その形成される場所がほぼ固定され、その場所での規模も制約される場合が多いようである。すなわち、多くのフィルムをながめてみると、より隅角に近い方に形成された縦渦の背丈が常に小さくてより遠い方が大きい場合が多く見られる。基本的にはこれらの背丈の異なる縦渦同士が相互に作用しあい、隅角へ向う流れを誘起していると思われる。側壁部には、この場合ほぼ2つの縦渦が形成され続け、それらが同様に隅角へ向う流れを誘起する。縦渦の付根には low speed streak が存在し、当然のことながらその数は2つである。こうして、底面と側壁の両方に形成された縦渦と縦渦同士の相互作用の集合によって乱流二次流れが形成されると言えよう。

さて、もうひとつの注目点は、側壁部の水表面近くの構造についてである。トレーサーはいずれの写真においても比較的多く存在し、秩序構造自身の観察をより容易にしている。最も典型的で明瞭なのが、Fig 7 (a)より始まる一連の挙動である。比較的側壁上部に形成された縦渦Aは同時に側壁水表面に向う縦渦対Bの一部となり、(a)では水表面衝突直前の状態である。(b)で衝突し、その後は両方に広がり始める。(c)においては、側壁近くの水表面よりすぐ下(Cの部分)の流体が側壁の渦(D)の誘起も加わって下方へ追いやられる。一方、水路中央に向ってはますます広がりを見せ、それによって渦Eが形成される。渦対Eの中央部分(F)では急激な下降流が形成される((d))。その後も渦Eは自ら変化し、さらに中央へと広がりながら、渦(G)へと変化してゆく((e)~(h))。これらは、河岸ボイルの原型と思われる。これに関連して、注目しておくべきことは、EやGのような水表面近くに形成される渦が比較的多く見られることである。以上の一連の挙動が側壁水面に出現する水平渦の発生・発達と深く関係していることは容易に推察可能である。Fig 9 には、側壁近くから発生した水平渦が流下しながら水路中央へと発達してゆく一連の連続写真が示されている。2本の白い線は、その高さが0.9Hのところに入挿されたレーザー光線であり、光線間隔は6cmである。この水平渦は間欠的に発生し、次々に発達してゆくがその様は乱流境界層の外層に出現する大規模渦とよく類似しているように思われる。また、これも木下²⁾が実河川で観察した巨大な水平渦の原型と考えることができるであろう。今後、この水平渦の発生因の詳細や発達形態についてさらに検討が必要であろう。

隅角部と水面付近の秩序構造に関する概念的なモデルがこれまでの観察結果を踏まえてFig. 8に示されている。

4. おわりに

開水路隅角部における秩序構造を明らかにし、従来の乱流二次流れの形成機構を解明した。二次流れの形成には秩序運動としての縦渦とそれらの相互作用が重要な役割りを果し、さらには水平渦の挙動とも関係するという知見を得た。今後、詳細な検討が必要である。

本研究に際して、木下良作、宇民正、上野鉄男各氏から貴重な助言を得た。また、文部省科研費昭和59年度奨励研究の援助を得た。ともに謝意を表します。

【参考文献】

- 1)木下良作：流れの可視化、Vol.1, No.3, 1981
- 2)木下良作：土木学会論文集 354号/II-1, 1984
- 3)谷 一郎：ながれ、2-2, 1983
- 4)大成博文ほか：水理講演会論文集、No.28, 1984
- 5)大成博文ほか：土木学会論文集 354号/II-1, 1984
- 6)大成博文ほか：第16回乱流シンポジウム講演集、1984