

可視化手法による長方形開水路の側壁二次流の検討

ON THE MECHANISM OF SECONDARY FLOW ON A STRAIGHT OPEN CHANNEL BY USING VISUALIZATION TECHNIQUE

日本大学工学部	長林 久夫 Hisao NAGABAYASHI
日本大学工学部	木村喜代治 Kiyoji KIMURA
新太平洋建設	中塚 卓朗 Takurow NAKATUKA

Experimental have done in rectangular open channel for a small aspect ratio ($B/H=0.5$). In oder to visualiaze the secondary flow and the turbulent structures from inner region to outer region, vertical (or horizontal) light sheet and particle tracer methods were used. Pictures of flow patterns were digitized and culculated by a computer. The distributions of velocity component, two-dimentional divergence and vorticity components were displayed. By using of long period of turbulent structures, a model of space structures of secondry flow is proposed. Relation between the mechanism of wall turbulence and the mechanisms of secondary flow are described in detail.

Keywords:turbulent strucuters, secondry flow, visualization, open channel flow

1. はじめに

直線水路の二次流は、主流流速に比べ数パーセントの流速成分しか持たないが、主流流速を歪めたり、また最大流速位置を自由水面下に降下させるなど、多くの役割を担っている。近年の計測技術の進歩により、開水路の乱流機構もかなり明確になってきた。直線開水路の二次流に関する研究も精力的に行われ、二次流の発生項の検討^{(1)・(2)}、水路横断面内の二次流分布の検討^{(3)・(4)}等多くの成果を得ている。しかしこの二次流は、強度が微弱であることと、水路横断面内の空間的スケールがほぼ水深の2倍程度と壁面近傍の乱流構造の特性量と比べても、大スケールの構造を持つことより空間特性については不明な点が多い。本研究では点計測では困難とされている、二次流の空間特性、特に流下方向の空間構造の検討を、トレーサ法を用いた長時間可視化によって検討した。

2. 実験方法および解析方法

2-1. 実験方法

実験は幅10cm、長さ15mの滑面長方形開水路にて行った。測定水理量を表-1に示す。この水路は水路幅水深比が特に小さく、側壁効果の強い流れを対象としている。また底面効果は $y=6\text{cm}$ 程度までで、最大流速位置は自由水面下に存在している⁽⁵⁾。水理量は前報の染料と水素気泡の同時併用による可視化にほぼ一致させている⁽⁶⁾。表-1の実験条件よりRe数は5800と小さいが、後述する乱流構造に見られるように充分な乱流状態である。

計測断面は上流から10m下流の地点である。図-1に示すようにフラットライト（エリスポットライト936，500W）により任意断面を照射し、十分に浸潤させたオガクズ粒子（直径0.4～0.8mm）を用いて可視化を行った。

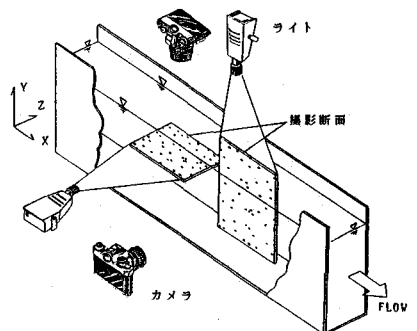


図-1 測定装置概略図

6 mm) のパスラインを可視化し、35 mmカメラで撮影した。計測断面は鉛直断面で $z = 1.5, 2.5, 5 \text{ cm}$ で、 $z^+ = U_* / \nu = 96, 160, 320$ と対数則の領域内であり $z = 2.5 \text{ cm}$ 断面は側壁からの二次流の効果が最も期待される測定面である。水平断面は $y = 6, 9, 15 \text{ cm}$ である。

2-2. 解析方法

各写真の粒子パスラインをデジタイザーで計算機に入力し主流流速と直交流速を求め、1 cm区間に内挿している。各写真は1/3 づつ重複するよう撮影しており、これを平均流速で合成し、最大計測時間33.3秒、計測距離3.8mの流速データを得た。各断面への平均流速による合成については、流速が壁面からの距離によって異なるため、低流速部の接合部への拡大効果や高速部への縮小効果等の歪みを生ずるが、ここで対象としているのは最小寸法1 cm程度以上の大規模な乱流構造を対称としており、歪みの効果の影響は小さいものと考えられる。

水理条件	水深 : H	cm	19.96
	流量 : Q	cm ³ /s	2650
	平均流速 : U	cm/s	13.3
	動水勾配 : I		1/950
	レイノルズ数 : Re	UR / ν	5770
摩擦条件	フルード数 : Fr	U / $\sqrt{gR}$	0.212
	摩擦速度 : U*	cm/s	0.64
撮影条件	トレーサ (材料)		0.4~0.6 mm
	測定位置		$z = 1.5, 2.5, 5 \text{ cm}$ $y = 6.0, 9.0, 15 \text{ cm}$
	シャッター速度		1/8 sec
	シャッターパルス 撮影区間		0.8 sec 380 cm

表-1 実験条件

3. 平均乱流構造の検討

3-1. 平均流速分布と二次流

図-2は可視化実験からの平均流速分布状況を示している。図-2Aは鉛直断面、図-2Bは水平断面を示す。 $z = 2.5 \text{ cm}$ の主流流速分布は従来の点計測⁽⁵⁾ ($Re = 22000$) による分布とほぼ一致しており充分発達した乱流であることが分かる。また、最大流速で無次元化した分布形状も各断面とも妥当な傾向を示しており、長時間可視化の有効性を示している。ただし直交流速成分については、一断面での平均流速が全て正あるいは負のものが有り、後述する二次流スケールに比べ、平均値評価時間が若干短いものと推定され、断面内の平均化を行っている。図より主流流速と直交流速の比はほぼ1パーセントオーダーであり、従来報告されている二次流の流速成分⁽⁴⁾ とほぼ一致している。図-2Aの $y/H = 0.4$ 以下の底面側への分布は壁面近くには下降流が見られ、水路中央領域から隅角部への二次流の輸送が予想される。図-2Bの水平断面の直交流速は $y = 6 \text{ cm}, 9 \text{ cm}$ で流向が逆転しており、二次流の効果を見ることができる。各断面での直交流速の分布を示したのが図-3であり、流向に従って二次流のフローパターンを示した。これより、

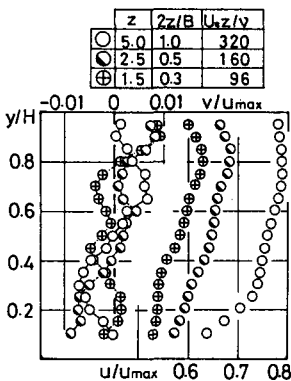


図-2A 鉛直断面

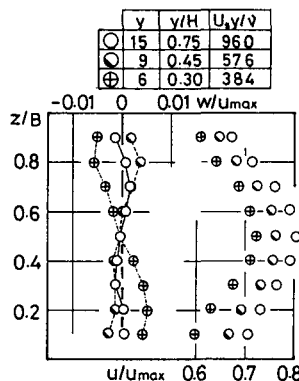


図-2B 水平断面

図-2 平均流速分布の検討

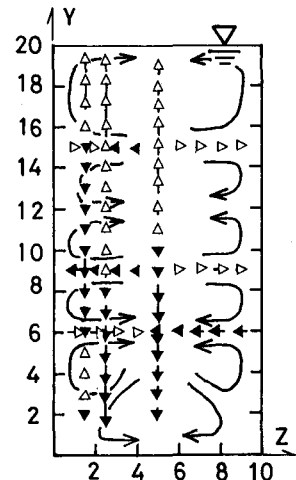


図-3 二次流流速の検討

底面側の水路隅角部へ下降流， $y = 6, 12\text{ cm}$ に中央向きの流れ，水面側の隅角部に上昇流が示されている。また自由水面近傍では $y = 16\text{ cm}$ から水面までの上昇流があり，他の領域に比べ比較的大きな渦構造をなしており，従来報告されている二次流のフローパターンと一致している。

3-2. 乱流特性量分布

図-4, 5は可視化データからの乱流特性量の分布を示している。これらの特性量は全て断面平均摩擦速度 $U_* = \sqrt{gRT}$ で無次元化している。図-4に乱流強度の分布を示している。底面近傍の摩擦速度のオーダは，主流，直交流速ともに二次元開水路のものと良く一致している⁽⁸⁾。また図-4 Aの鉛直断面 $Z = 1.5\text{ cm}$ の分布に側壁効果が見られ，底面から自由水面まで他の断面に比べ強度が一様化している。また図-4 B水平断面の主流乱流強度は，水路中央部で対称となり，平均値評価時間による乱流特性量への影響は少ない。

図-5はレイノルズ応力の分布であり，図-5 Aの鉛直断面の水路中央部の底面側に $-u'v'$ が正の領域が見られ，底面からの乱れの発生が分かる。 y/H が0.4以上の領域ではほぼゼロとなり，側壁に近づく

	z	$2z/B$	$U_* z/v$
○	5.0	1.0	320
●	2.5	0.5	160
⊕	1.5	0.3	96

	y	y/H	$U_* y/v$
○	15	0.75	960
●	9	0.45	576
⊕	6	0.30	384

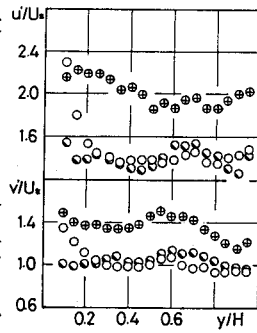


図-4 A 鉛直断面

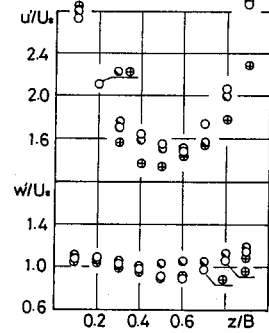


図-4 B 水平断面

図-4 乱流強度分布特性

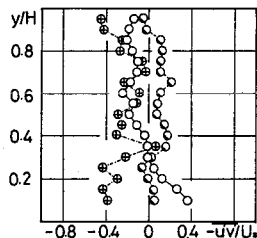


図-5 A 鉛直断面

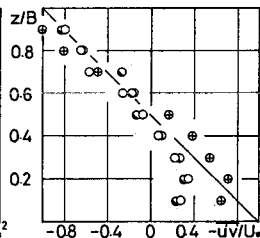


図-4 B 水平断面

図-5 レイノルズ応力分布特性

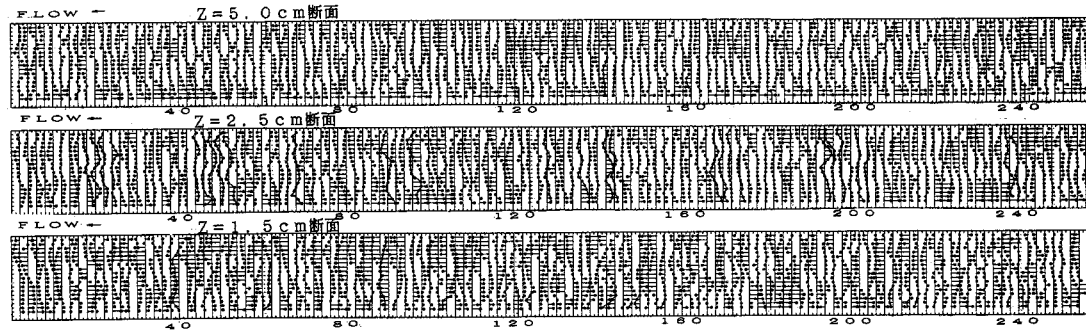


図-6 A 鉛直断面主流流速分布

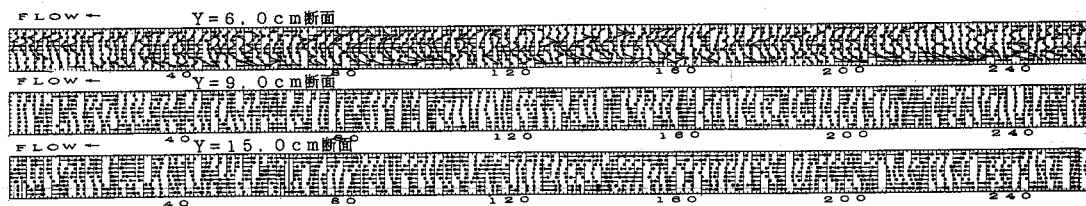


図-6 B 水平断面主流流速分布

図-6 長時間流速分布特性の検討

ほど負となり側壁効果を示している。図-5 Bは水平断面の分布を示している。図中の実線の二次元分布と比較すると、 $y=6\text{ cm}$ の底面分布は底面近傍から中央部まで強度が大きく、図-3の二次流のフローパターンより二次流が水路中央部へ向かう領域であることが分かる。二次流が側壁に向かう $y=9, 12\text{ cm}$ の領域では z/B が0.3程度まで二次元分布より小さな値をとるのが見られる。

4. 長時間乱流構造の検討

4-1. 主流流速分布特性

図-6は主流流速を断面平均流速を差し引いて 2 cm 間隔で示している。これより低速流体、高速流体のパターンが良く理解できる。図-6 Aの鉛直断面分布には、二次流が水路中央部向きの流向を持つ $y=6, 2\text{ cm}$ に実線を表示している。 $Z=1.5\text{ cm}$ での高速低速流体の周期は比較的長い。また高速流が底面近傍に見られるのは比較的短い時間であり、 $x=40, 90, 150, 210\cdots$ とほぼ周期的に存在している。 $z=2.5\text{ cm}$ の断面では $x=20, 50, 85, 140, 165, 200\cdots$ とほぼ 40 cm 間隔で高速流体中に低速部が存在する $\sin$ 波形状の分布パターンを持つ⁽⁹⁾ものがある。この $\sin$ 波形パターンは低速流が側壁から水路中央部へと輸送された結果であり、二次流の周期性と強い相関をもつものと推測される。

4-2. 長時間乱流構造の検討

図-7は $z=2.5\text{ cm}$ 断面の瞬間乱流構造の等流速線図を示している。等高線の強度は最大値および最小値の大きな量で無次元化してある。図-7 Aは主流流速分布、図-7 Bは鉛直流速分布、図-7 Cは平面渦度 $(\delta u/\delta y - \delta v/\delta x)$ の分布を、図7-Dには二次元発散 $(\delta u/\delta x + \delta v/\delta y)$ の分布を示している。各断面の実線は図-4の二次流が側壁から中央へと輸送される $y=6, 12\text{ cm}$ の地点を示し

$$\begin{array}{|c|c|} \hline \text{ stippled } & > 0.3 \\ \hline \text{ hatched } & < -0.3 \\ \hline \end{array} \quad (A - \bar{A}) / A_i \quad A_i = A_{\max} \text{ or } A_{\min}$$

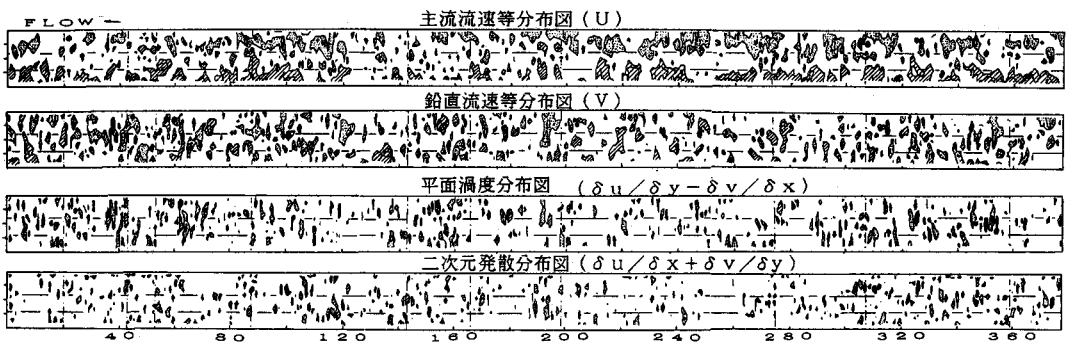


図-7 長時間乱流特性の検討 (鉛直断面)

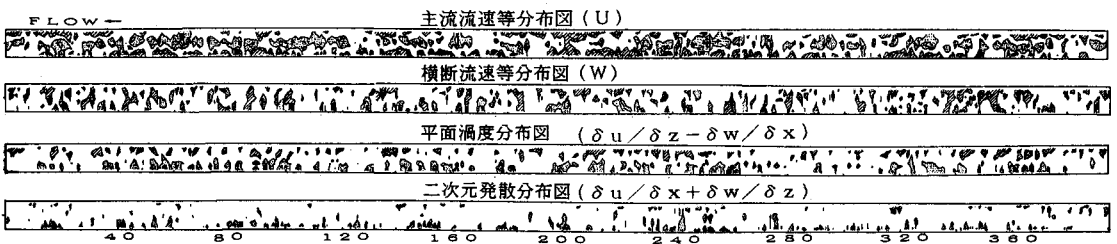


図-8 長時間乱流特性の検討 (水平断面)

ている。斜線は負領域を、点領域は正を示している。また縦一点鎖線は主流流速分布図で $\sin$ 波形状の分布で低速域の見られた領域を示す。図-7Bの直交流速 (v 成分) は主流に比べて流下方向スケールが小さく、水深方向に比較的大きな領域を有している。図-7Cの平面渦度分布では底面近傍に比較的少なく、 $y = 6, 12 \text{ cm}$ と水面近傍に多く存在している。底面近くに渦度が存在する領域には $\sin$ 波形状分布が見られず、位相が異なっている。図-8Dの二次元発散も渦度と同等のスケールであり、直交流速のスケールに比べても小さく、 $2 \sim 3 \text{ cm}$ のスケールで、またその発生位置は渦度の存在しない箇所に見られる。

図-8は $y = 6 \text{ cm}$ の水平断面の瞬間乱流構造である。図-8Aは主流流速を、図-8Bに直交流速 (w 成分) を、図-8Cは渦度、図-8Dに二次元発散を示す。主流流速、直交流速の等速線の高速、低速領域の大きさは、鉛直断面のそれとほぼ同オーダである。両岸から低速域が中央へ張り出した領域では、直交流速も中央向きの流れとなっている。その周期の間では、一方向の流方が卓越している。渦度の分布は、左岸側が正、右岸側が負領域であり、主流により渦度の方向が固定されているのが分かる。二次元発散は両側壁に多く存在し、渦度の外縁部に見られる。

5. 乱流構造の重相関解析

前項の乱流構造のからは、正、負領域の規模、特性量の発生、非発生位置等情報量が多く主観の強い検討となった。ここでは、これらの相関をより明確に検討するため、特性量相互の相関解析を行った。図-9にはそのなかで特徴的なものを示した。図-9A, Bはレイノルズ応力を主流流速の正負で区分したもので、宇民、上野の関数⁽¹⁾に相当する。図-9Aは主流流速の高速域に対応するレイノルズ応力を示し、斜線は高速流体が自由水面からの下降流を、点領域は高速域が上昇する interactions を表している。斜線の下降流の発生位置は主流流速が $\sin$ 波形状をなす領域の位置とは異なっているのが分かる。また図-9Bの低速流体とレイノルズ応力との相関からは低速流体が上昇する injection (斜線) が周期的に存在している。またこの領域も主流が $\sin$ 波形状になる領域とはその位置が異なっている。図-9Cは低速流と発散の重相関を示している。これより側壁から中央へと向かう流速の状況が良く観察される。また主流流速が $\sin$ 波形状になる領域との相関も強く、 $y = 6, 12 \text{ cm}$ の測線の周囲に分布しており、二次流の周期性が観察される。水面からの下降流、底面からの上昇流は、強いシュアーにより渦度を発生するものと考え図-9D, Eに示すレイノルズ応力と渦度との重相関を求めた。図-9Dは水面からの下降流を、図-9Eは底面から

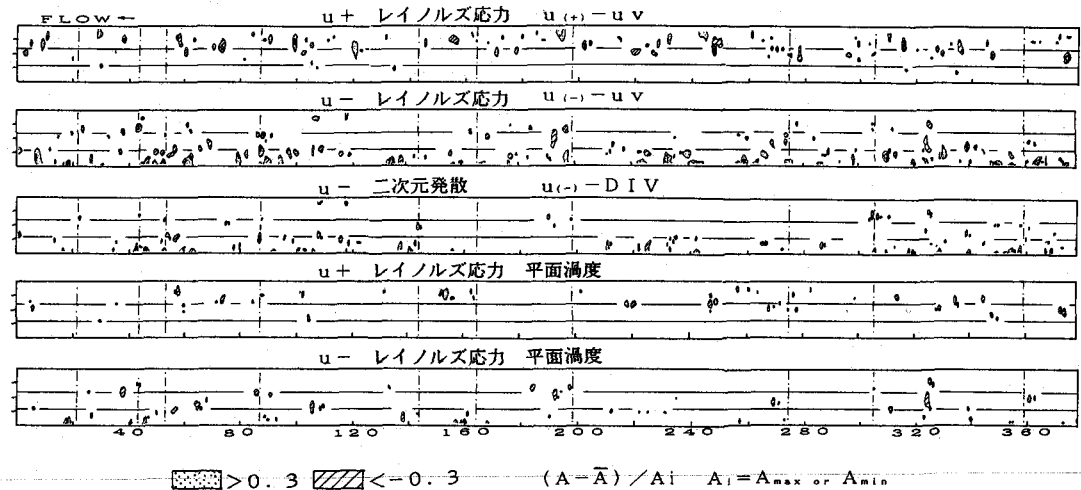


図-9 乱流特性量重相関解析

の上昇流を示し、その領域は互いに同位置ではなく、発生位置がずれているが、主流流速の $\sin$ 波形状の領域とも異なり、僅かづつ位相が異なるものと考えられる。このよう低速流体と二次元発散の相関からは側壁から中央部向きの流れの構造が、低流速流体と平面渦度は底面から強く上昇する i jections の分布を、高速流体と平面渦度の相関は自由水面から降下する流体の分布を知ることができる。これらと前述の瞬間乱流構造の分布をもとに図-10に示す二次流の3次元構造が推定される。

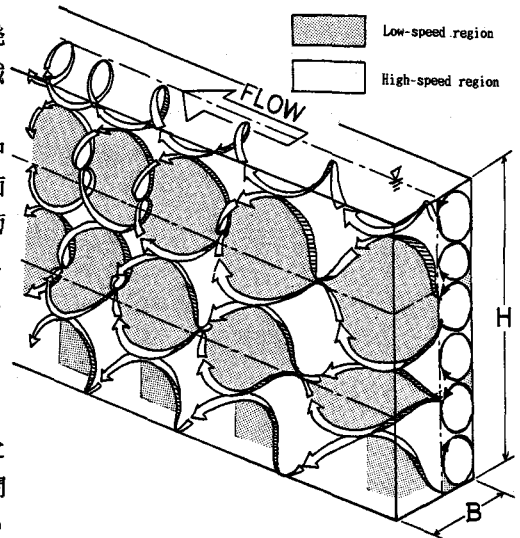


図-10 二次流の空間構造モデル

6. おわりに

側壁効果の強い長方形開水路において、トレーサ法による可視化から長時間の乱流構造を求め、二次流の空間構造の検討をおこなった。その主要な結果は以下のようである。①可視化解析の空間構造把握の利点に加え、長時間測定を行うことにより、点計測データとの整合性を

計った結果、主流方向流速は良い結果を得た。しかし直交流速成分には二次流効果（平均周期40cm程度）が大であり、約3.8mの計測範囲では7～8周期の二次流の平均値評価時間であり、より長時間の測定を必要とする。②可視化データからの平均乱流特性量はほぼ従来の結果を満足している。また水平断面のレイノルズ応力分布には二次流が側壁から中央へ向かう領域では二次元分布に比べ大となり、側壁へ向かう領域では小となる傾向が認められた。③長時間流速分布特性からは側壁近くの底面側に周期的に高速流体が見られ、その発生時間は比較的短い。また $z = 2.5$ cm の測線には $y = 6.12$ cm を中心に高速流体中に低速流体が $\sin$ 波形状の地点が認められ、この周期はほぼ40cm程度である。④長時間乱流特性量関の相関をとることにより、多くの情報量から流れの3次元性の効果を検討した。低速流体と発散の相関は $y = 6.12$ cm の測線上に多くの値が存在し、横方向流の効果をみることができ、また低速流体と渦度、高速流体と渦度はそれぞれ、低速流体の底面からの i jections、高速流体の水面からの下降流の周期を見ることができ、これらから図-10に示す二次流の空間構造のモデルを推定した。

このような、側壁効果の強い流れも、二次元開水路で報告されている並列螺旋流のモデルを想定することにより、前述した乱流構造が良好に説明できる。しかしこの測定でも二次流空間特性および周期性の検討は充分ではなく、今後、より長時間の計測と、複数断面の同時測定から二次流の空間構造の検討を行いたい。

〔参考文献〕

- (1) H.A.EINSTEIN AND H.LI: Secondary Current in Straight Channels, A.G.U., vol.39(1958)
- (2) 吉川・池田: 正方形断面を持つ直線水路の速度分布に関する研究, 土木学会論文集, 250号, 1976
- (3) 祢津・中川: 一様開水路および閉管路の三次元乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, 369号, 1986
- (4) 富永・江崎: 長方形開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 357号, 1985
- (5) 長林等: 土木学会全国大会 昭和59, 60, 61年
- (6) 長林・木村: 染料注入法水素気泡法の同時併用による開水路乱流の可視化, 流れの可視化N026, 1987
- (7) 長林・木村: トレーサ法による長方形開水路乱流構造の可視化, 流れの可視化, VOL.8, N030, 1988
- (8) 祢津: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究: 土木学会論文集, 第261号, 1977
- (9) 岸・黒木: 文部省化学研究費報告, 昭和56年3月
- (10) 宇民・上野: 開水路乱流の組織構造に関する実験的研究: 京都大学防災研究所年報, 第29号, B-2, 昭61