

2 成分LDAを 2 台用いた開水路流の 3 次元同時計測

3-D MEASUREMENTS OF OPEN-CHANNEL FLOWS WITH TWO SETS OF LASER DOPPLER ANEMOMETERS

瀬津家久¹・鬼束幸樹²・Dan NAOT³

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA and Dan NAOT

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学専攻

² Member of JSCE, Dr. of Eng., Professor, Dept. of Mech., Center for Tech. Ed.(P.O.Box 305, Holon, 58102, Israel)

Three-dimensional measurements of open-channel flows were conducted by making use of two sets of laser Doppler anemometers. One is able to measure the u-v components, and the other is able to measure the u-w components. The Reynolds stress ($-\overline{vw}$) could be first measured with high accuracy. The streamwise velocities which were measured by u-v measurement and u-w measurements were in a good agreement with each other. The third moments of the velocity fluctuations were agree well with the results of DNS(Direct Numerical Simulation). A new empirical formula, involving the van Driest damping function, expresses the spanwise turbulence intensity in the inner region.

Key Words : 3-D turbulence measurements, laser Doppler anemometer, van Driest damping factor

1. はじめに

開水路流の乱流構造を解明するために、古くはピトー管やプロベラ流速計などを用いた計測がなされ、主流速分布などが解明された。しかし、これらの流速計は応答が必ずしも良くなく、乱流計測には不向きであった。その後、1970年代に本格的に実用化された Hot-film 流速計の登場によって、開水路流の乱れの解明が急速に行われた。その結果、開水路等流の場合、乱れ強度分布は摩擦速度で無次元化することによって普遍関数表示できることが明らかにされた。ただし、キャリブレーション曲線が測定中にドリフトするなどの要因から、高精度な測定結果を得るのはかなり困難で、特殊な熟練を要した。また、Hot-film 流速計はセンサーの受感部が 1mm 程度あり、しかも、流体中にプローブを挿入しなければならないので壁面付近での測定は困難である。粘性底層を含んだ壁面領域を高精度に測定するには、レーザードップラー流速計(LDA)の出現を待たなければならなかった。LDAは1980年代に本格的に実用化された流速計で、キャリブレーションを必要とせず、また、非接触型であるため、極めて高精度な流体計測が可能である。2成分のLDAを用いた計測は今本・

石垣¹⁾、Steffler *et al.*²⁾、Nezu & Rodi³⁾などによって行われ、精度の高い乱れ強度分布やスペクトル分布などが得られた。彼らの用いた初期のLDAは前方散乱型であるが、現在は光ファイバー技術を応用した後方散乱型の方が取り扱いが容易であるため、こちらが主流となっている。

乱流方程式を Reynolds 平均してとらえた場合、乱れの相関項、いわゆる Reynolds 応力項が発生する。Reynolds 応力はテンソルで9つ発生するが、対称条件により結局は $-\overline{uu}$, $-\overline{uv}$, $-\overline{uw}$, $-\overline{vv}$, $-\overline{vw}$ および $-\overline{ww}$ の6つとなる。(ここに、 u , v , w は流下、鉛直上方、水平横断方向の流速の変動成分で、 $-$ は時間平均を示す)。これらの Reynolds 応力を知ることが乱流の解明に直接結びつくが、従来行われていた2成分LDA計測では、同時に3応力しか計測することができず、また、水路側壁および底面からの測定をそれぞれ別個に行っても、Reynolds 応力 $-\overline{vw}$ は計測できない。

ところで、完全に発達した開水路等流における渦度方程式には Reynolds 応力 $-\overline{vw}$ が含まれているが、Nezu & Nakagawa⁴⁾は渦度方程式を構成する諸量の内、Reynolds 応力 $-\overline{vw}$ 以外の項を全て実測し、2次流の

発生に乱れの非等方性が寄与していること指摘しているが、この説を実験的に検証するためには Reynolds 応力 $-\overline{vw}$ の実測が必要不可欠である。

以上のように、乱流の3次元同時計測は2次元計測では得られない貴重なデータを提供することが期待できる。本研究では、2成分のレーザードップラ一流速計を2台使い、3次元同時計測をすることによって全ての流速成分および全ての Reynolds 応力を測定することに成功した。さらに、現在まで明らかにされてこなかった横断方向の乱れ強度の壁面付近での分布を普遍関数で定式化した。

2. 理論的考察

水路床に沿って流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上方に y 軸を、水平横断方向に z 軸を定義し、 x 軸、 y 軸および z 軸方向の瞬間流速をそれぞれ $\tilde{u}$, $\tilde{v}$, $\tilde{w}$, 時間平均流速をそれぞれ U , V , W , 流速変動成分をそれぞれ u , v , w とする。また、それぞれの流速変動成分の RMS 値 (乱れ強度) を u' , v' , w' とする。

完全に発達した2次元開水路流における x 軸、 y 軸および z 軸方向の乱れ強度分布は次式の半経験式によって表現できることが瀬津⁵⁾によって提案された。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \quad (1)$$

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \quad (2)$$

$$\frac{w'}{U_*} = D_w \exp(-\lambda_w \xi) \quad (3)$$

ここに、 U_* は摩擦速度、 $\xi = y/h$, h は水深である。式(1)~(3)における係数は、瀬津⁵⁾による Hot-film 流速計を用いた測定により、 $D_u = 2.30$, $D_v = 1.27$, $D_w = 1.63$, $\lambda_u = \lambda_v = \lambda_w = 1.0$ が求められた。さらに Nezu & Rodi³⁾ による前方散乱型 LDA を用いた高精度な計測によって、 $D_u = 2.26$, $D_v = 1.23$, $\lambda_u = 0.88$, $\lambda_v = 0.67$ が求められた。

壁面付近における乱れ強度 u'/U_* の分布は以下のように示される⁵⁾。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp\left(-\lambda_u \frac{y^+}{R_*}\right) \Gamma + Cy^+(1-\Gamma) \quad (4)$$

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B_{ui}}\right) \quad (5)$$

ここに、 $y^+ \equiv yU_*/\nu$ は無次元座標、 ν は動粘性係数、 $R_* \equiv hU_*/\nu$ は Reynolds 数であり、 Γ はダンピング関数である。等流では、ダンピング係数 B_{ui} は10をとり、 C は0.3をとる⁵⁾。また、壁面付近における乱れ強度 v'/U_* の分布は壁面の影響によって減衰を受けることが指摘されていたが、実測データの不足により長い間その定式化はなされなかった。最近、Onitsuka &

Nezu⁶⁾はLDAを用いて壁面付近の乱れ強度 v'/U_* の高精度な測定に成功し、次式を提案している。

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \exp\left(-\lambda_v \frac{y^+}{R_*}\right) \Gamma \quad (6)$$

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B_{vi}}\right) \quad (7)$$

なお、ダンピング係数 B_{vi} は26程度を示す。一方、壁面付近の水平方向乱れ強度 w'/U_* については、現在のところ定式化されていない。

3. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験に用いた水路は、長さ10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配水路である。水路側壁からの測定 (U-V 測定) には4ワットの後方散乱型4ビームアルゴンイオンレーザー流速計を、水路底面からの測定 (U-W 測定) には0.5ワットの後方散乱型4ビームアルゴンイオンレーザー流速計を使用した。また、水路には1/100mmの精度をもつ3次元トラバース装置が2台しか付けて備え付けられており、水路勾配を変化させても光軸は普遍である。U-VおよびU-W測定用レーザープローブを同時に位置設定することが可能であり、このような高精度なLDA計測システムによって3次元同時計測が可能となる。流速測定位置は水路上流端から約7mであり、水路の上流端にはトリッピングワイヤーが取り付けられている。

(2) 2台のレーザーの焦点合わせ

レーザー流速計の測定原理としては以下のようなものである。単一波長のレーザー光線を2本にスプリットし、1本の光線に対して40MHzの周波数シフトをさせた後、両者を交差させる。そして、光の干渉縞に散乱粒子が通過すると、ドップラーバースト信号が発生する。このドップラー周波数を計測することによって、理論的に散乱粒子の速度が計算されるのである。ところで、2台のLDAを用いて3次元同時計測をする上で最も重要なことは、焦点を正確に一致させることである。ドップラーバースト信号をオシロスコープで観察すると、レーザー光線の焦点が水中にある場合、焦点が壁面上にある場合およびレーザー光線が交差する前にガラスなどの壁面におつかった場合とでは、3者それぞれ全く異なる波形を示す。そこで、水路側壁から入射させたレーザー光線の焦点と、水路底面から入射させたレーザー光線の焦点を以下のようにして3次的に一致させた。

1) y 方向の位置合わせ

ガラス製 (x 方向に3mの一枚平板ガラス) の水路底面は、 x - z 平面に平行である。そこで、オシロスコープに映し出される波形を見ながら、2台のレーザーの焦点を水路底面に焦点を合わせる。この作業で y 方向の位置を合わせることができる。

2) x 方向の位置合わせ

表-1 実験条件

case	h cm	Fr	Re $\times 10^3$	R_*	U_{*v} cm/s	U_{*w} cm/s
R148	5.0	0.06	2.0	148	0.30	0.29
R251		0.11	4.0	251	0.51	0.50
R454		0.23	8.0	454	0.92	0.90

次に、表面に凹凸のない直方体の一面を $y-z$ 平面と平行に底面に設置する。そこで、同様にオシロスコープの波形を見ながら、2台のレーザーの焦点を直方体の鉛直壁上に生じるようにトラバースを調整する。この作業で x 方向の位置を合わせることができる。

3) z 方向の位置合わせ

x 方向の位置合わせで使用した直方体を、今度は $x-z$ 平面に鉛直断面が平行になるように設置し、この鉛直断面上に焦点がくるように設定する。

以上の作業で、2台のレーザーの焦点は x, y, z 座標共に一致する。なお、両者の流速計の測定時間を同期させるため、バーストインヒビットコントローラーを用いた。また、測定時間は両者とも140sとした。

(3) 実験条件

実験条件を表-1に示す。ここに、 $Fr = U_m / \sqrt{gh}$ はFroude数、 $Re = U_m h / \nu$ はReynolds数、 U_m は断面平均流速、 g は重力加速度、 U_{*v} 、 U_{*w} はそれぞれ水路中央で行われたU-V測定およびU-W測定で得られた流速分布において、次式の内層のlog則より求めた摩擦速度である。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A \quad (8)$$

ここに、 $U^+ = U / U_*$ は無次元時間平均流速である。等流においては、Reynolds数およびFroude数に関わらず、 $\kappa = 0.41$ 、 $A = 5.3$ の普遍定数を示すことがNezu & Rodi³⁾によって明らかにされた。同表より、U-V測定で得られた摩擦速度 U_{*v} と、U-W測定で得られた摩擦速度 U_{*w} とがほぼ一致していることが分かる。従って、 U_{*v} と U_{*w} との平均値を U_* とする。

4. 実験結果および考察

(1) 流れの発達状態と流速の一致性

流れが完全に発達するには、径深（＝断面積／潤辺）の240倍の距離を流下する必要があることをGessner⁷⁾は管路流で示した。本実験においては実験装置の関係で、計測点は径深の約175倍である。そのため、上流端にトリッピングワイヤーを設置し、乱流遷移を促進させた。図-1にU-V測定によって得られた摩擦速度 U_{*v} で無次元化されたReynolds応力 $-\overline{uv}$ の分布を示す。ただし、横軸はそれぞれ1つつシフトさせており、図中の曲線は次式の理論式である。

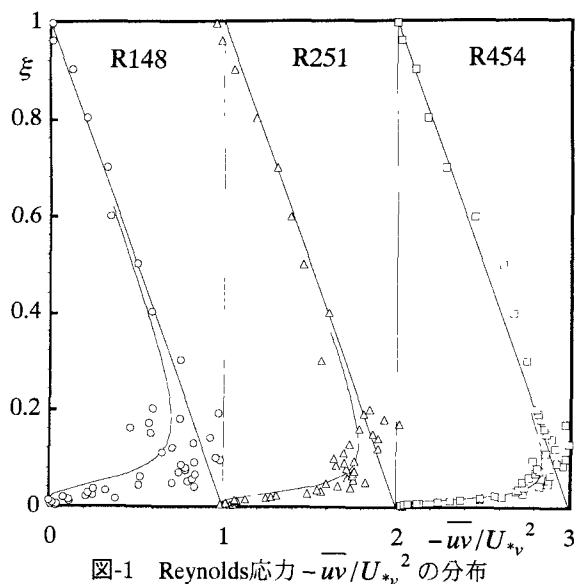
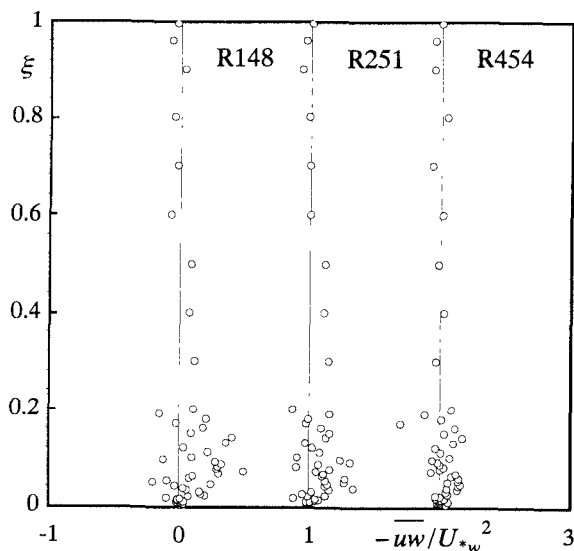
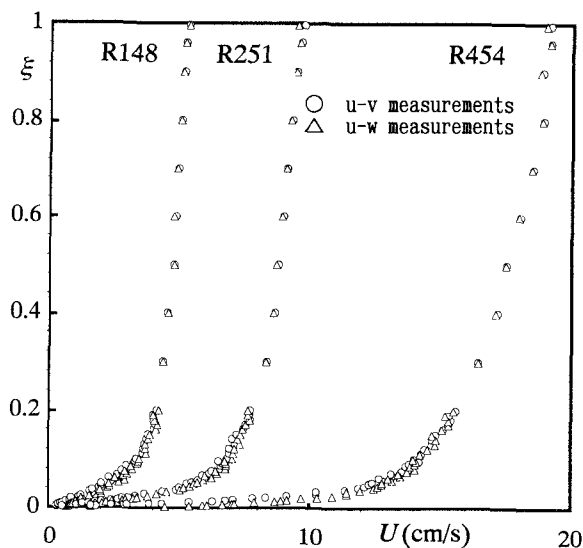
図-1 Reynolds応力 $-\overline{uv}/U_{*v}^2$ の分布図-2 Reynolds応力 $-\overline{uw}/U_{*w}^2$ の分布

図-3 U-V測定及びU-W測定による主流速分布

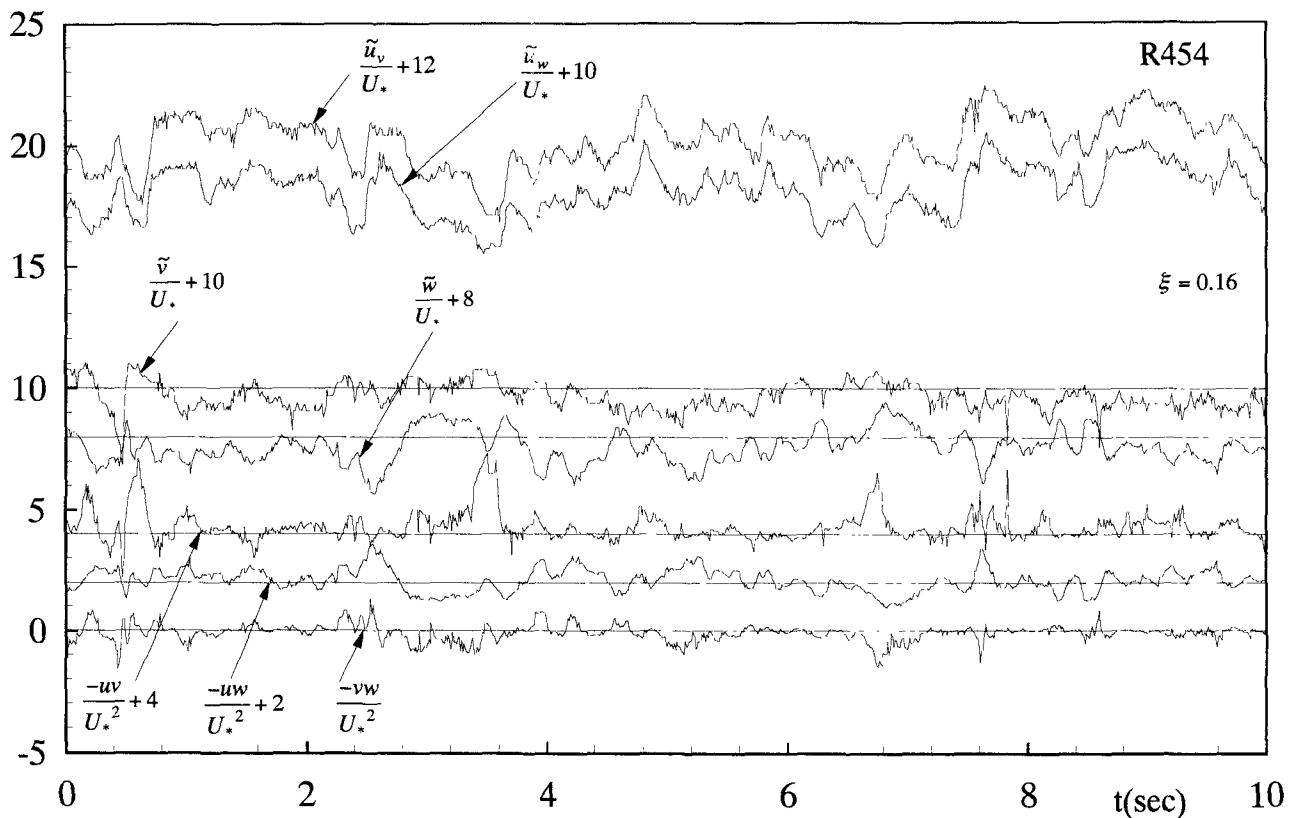


図-4 U-V測定およびU-W測定によって得られた時系列およびReynolds応力 $-vw$ の時系列

$$\frac{-\overline{uv}}{U_*^2} = 1 - \frac{y^+}{R_*} - \frac{dU^+}{dy^+} \quad (9)$$

底面から水面までの全ての領域において、実験値は式(9)の理論式に従っていることがわかる。これは、本実験精度が高いこと及び本実験流れがGessnerの条件を満たしていないものの、トリッピングワイヤーを使用することで完全に発達した乱流となっていることを示すものである。しかし、Reynolds数 R_e が2000のケースでは、低Reynolds数すぎて河床では乱れが十分に発達せず、データにばらつきが見られる。

開水路流では壁面や水面の影響により2次流が発生するが、アスペクト比(=水路幅/水深)が5以上の場合、水路中央では2次流が発生しないことをNezu & Nakagawa⁸⁾は示した。本実験流れのアスペクト比は8.0であり、水路中央断面では2次流がほとんど発生しない条件となっている。また、水路中央では対称条件によりReynolds応力 $-\overline{uw}$ は理論的にゼロとなる。図-2にU-W測定によって得られた摩擦速度 U_{*w} で無次元化されたReynolds応力 $-\overline{uw}$ の分布を示す。ただし、横軸は1つつシフトさせている。底面ではややばらついているが、系統的なずれは認められない。

図-3はU-V測定およびU-W測定で得られた時間平均主流速の生データをそれぞれ○印および△印で示したものである。ほぼ両者の流速値が一致していることが観察される。

(2) Reynolds応力 $-vw(t)$ の算出

図-3より、U-V測定およびU-W測定によって得られた時間平均された主流速がほぼ一致することが確認された。ここでは、瞬間流速の一致性について確認する。図-4はU-V測定によって得られた瞬間流下方向流速 $\tilde{u}_v(t)$ 、瞬間鉛直方向流速 $\tilde{v}(t)$ 、瞬間Reynolds応力 $-\overline{uv}$ およびU-W測定によって得られた瞬間流下方向流速 $\tilde{u}_w(t)$ 、瞬間横断方向流速 $\tilde{w}(t)$ 、瞬間Reynolds応力 $-\overline{uw}$ を平均摩擦速度 U_* によって無次元表示した時系列の一例(R454の $\xi=0.16$ のデータの一部10秒間)である。ただし、図中に示すようにそれぞれ縦方向にシフトして表示している。同図を見ると、まず、U-V測定によって得られた瞬間流下方向流速 $\tilde{u}_v(t)$ とU-W測定によって得られた瞬間流下方向流速 $\tilde{u}_w(t)$ とがほぼ同様な挙動を示していることが認められる。この流速の同一性については他のケースについても同様な傾向を示した。これは、両レーザーの焦点がほぼ同一であることを示し、瞬間鉛直方向流速 $\tilde{v}(t)$ および瞬間横断方向流速 $\tilde{w}(t)$ もほぼ同一点で計測されたことを示すものである。

さて、同一点における瞬間鉛直方向流速 $\tilde{v}(t)$ および瞬間横断方向流速 $\tilde{w}(t)$ の時系列が得られたので、それらをそれぞれの時間平均値 V 、 W と変動成分 $v(t)$ 、 $w(t)$ に分離することによって瞬間Reynolds応力 $-\overline{vw}(t)$ を算出することができる。図-4中にReynolds応力 $-\overline{vw}(t)$ の時系列を示す。

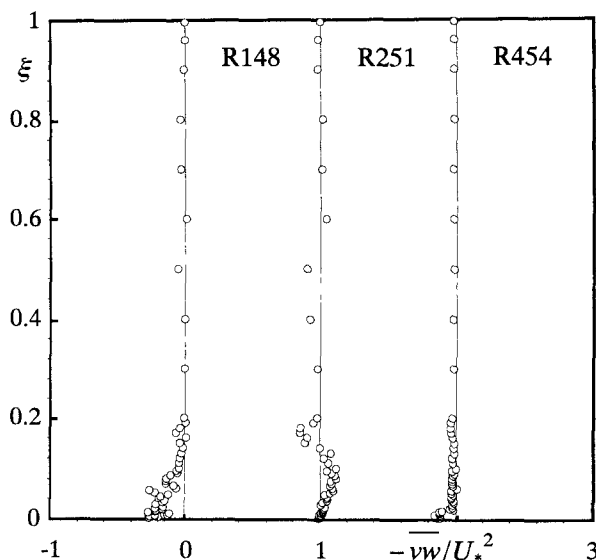


図-5 Reynolds力 $-vw$ の分布

次に、算出されたReynolds応力 $-vw(t)$ の妥当性を検討するために、摩擦速度で無次元化された時間平均Reynolds応力 $-vw$ の鉛直分布を図-5に示す。本実験流れのような発達した開水路等流の水路中央ではReynolds応力 $-vw$ は理論的にゼロとなる。図-5を見ると、R148およびR251については、底面付近で若干有限の値を有している。これは、底面付近であるために流速が遅く、散乱粒子が少なく計測のサンプル数が少なかったためか、両者のレーザー光線の焦点が厳密には一致しておらず、その微小なずれで生じたものか、また、局所的な2次流が存在するためか現段階では判断できない。しかし、ほとんどの領域ではReynolds応力 $-vw$ はかなりゼロに近い値を有している。

(3) 底面付近における乱れ強度分布

乱れ強度 u'/U_* の底面付近の分布は式(4)によって示される。乱れ強度 v'/U_* については、近年まで定式化されてこなかったが、Onitsuka & Nezu⁹⁾は式(6)を提案した。図-6に底面付近の乱れ強度 v'/U_* の分布を示す。ただし、縦軸をそれぞれ1つつシフトさせて表示させている。なお、図中の右下がりの曲線は橋津⁹⁾の式(2)であり、右上がりの曲線は式(6)である。底面付近の乱れ強度 v'/U_* が式(6)によって表現できることがわかる。ただし、R148およびR454については底面のごく近傍において乱れ強度 v'/U_* が式(6)に従わず、逆に増加している。これは、レーザー光線が底面のガラスに反射したことによるものと考えられる。

乱れ強度 w'/U_* の底面付近の分布については未だ定式化されていない。図-7に底面付近の乱れ強度 w'/U_* の実測値をプロットで示す。なお、図中の右下がりの曲線は橋津⁹⁾の式(3)である。パフ層よりも上部においては実測値が式(3)によって表現されていることがわかる。しかし、粘性底層およびパフ

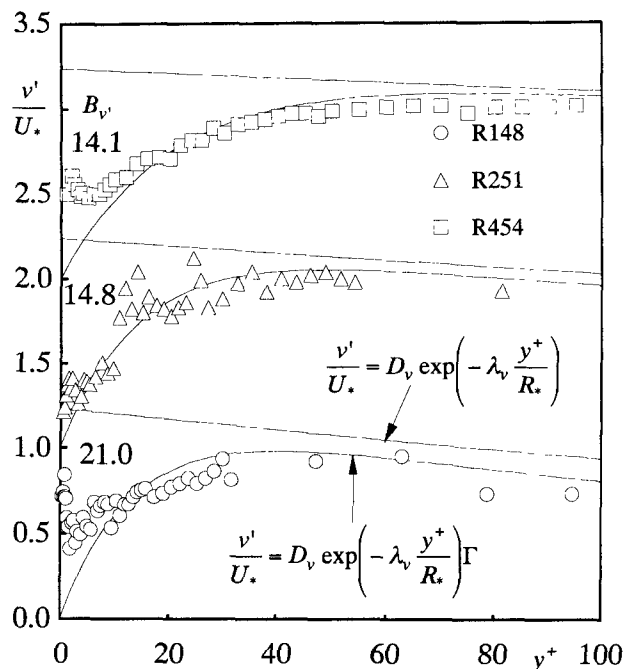


図-6 乱れ強度 v'/U_* の底面付近の分布

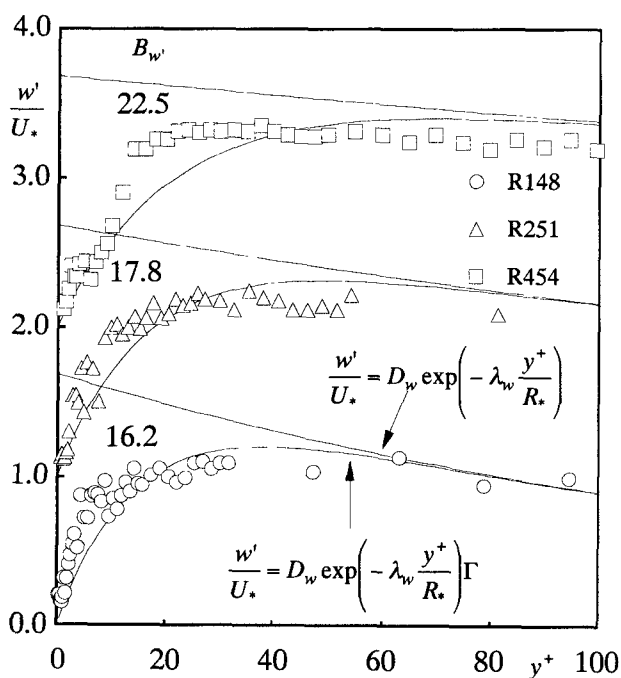


図-7 乱れ強度 w'/U_* の底面付近の分布

層においては式(3)よりも下側に分布している。そこで、底面付近の乱れ強度 w'/U_* の普遍関数を以下のように提案する。

$$\frac{w'}{U_*} = D_w \exp\left(-\lambda_w \frac{y^+}{R_*}\right) \Gamma \quad (10)$$

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B_{wt}}\right) \quad (11)$$

式(10)を図-7に示す。ややばらつきがあるものの、右

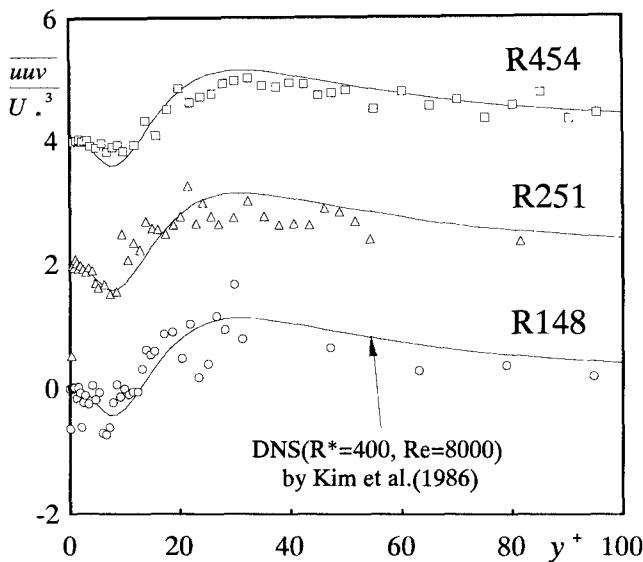


図-8 乱れの3次相関 $\overline{uuv}/U_*^3$ の分布

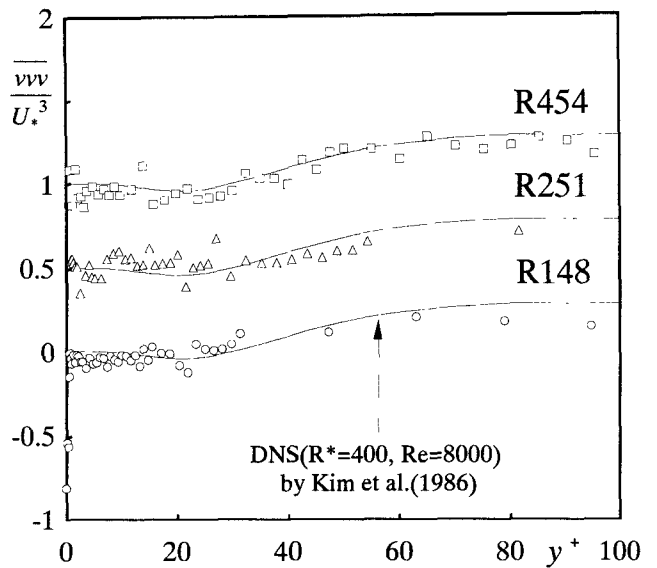


図-9 乱れの3次相関 $\overline{vvv}/U_*^3$ の分布

上がりの式(10)によって実測値が表現されているといえる。

(4) 乱れの高次相関

乱れの3次モーメントはbursting現象と密接に関わっており、これを解明することでburstingの特性を明らかにすることができる⁹⁾。また、3次モーメントは乱流拡散項を構成するため、特にその解明が望まれている。図-8および図-9に摩擦速度で無次元化された乱れの3次モーメント $\overline{uuv}$ および $\overline{vvv}$ の分布を示す。なお、図中の実線はKim et al.¹⁰⁾によって行われた $R_* = 400$ 、 $Re = 8000$ における閉管路のDNS(Direct Numerical Simulation)結果である。本実験結果はDNSの結果と一致しており、底面付近の乱れ特性は閉管路流と開水路流とでは同一であることおよび本実験の3次モーメントの測定精度が高いことを示している。

5. おわりに

2台のLDAを用いて2次元開水路等流の3次元計測を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 水路の底面および直方体の鉛直壁を利用することで、正確に2台のレーザーの焦点を一致させることに成功した。
- (2) 2台のレーザーの焦点を一致させることで、全てのReynolds応力成分の計測に成功した。
- (3) 横断方向の乱れ強度分布の壁面付近における分布が計測され、その普遍関数分布式を式(9)のように提案した。

本研究では、2台の2成分LDAを用いた全Reynolds応力の計測を行った。今後この技術を活用して、開水路等流及び不等流における2次流の発生機構を明らかにしたい。

謝辞：本研究を行うに当たり、(財)住友財団より補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Imamoto, H. and Ishigaki, T., *Osagka Symp. Flow Measurements*, vol.1, pp.17, 1983.
- 2) Steffler, P.M., Rajaratnam, N. and Peterson, A.W.: LDA measurements of mean velocity and turbulence distribution in a smooth rectangular open channel, *Water Resources Engineering*, Report 83-4, Dept. of Civil Eng., Univ. of Alberta, Canada, 1983.
- 3) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.112, No.5, May, pp.335-355, 1986.
- 4) Nezu, I. and Nakagawa H.: Cellular secondary currents in straight conduit, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, vol.110, pp.173-193, 1984.
- 5) 橋津家久：開水路流の乱流構造に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1977.
- 6) Kouki ONITSUKA and Iehisa NEZU: Turbulent Structure in the near-wall region of 2-D Open Channel Flows, *The 7th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements*, 1998 (to be published).
- 7) Gessner, F.B.: Corner flow, *AFOSR-HTTM Stanford Conf. On Complex Turbulent Flows* (eds. S.J.Kline, B.Cantwell & G.M.Lilley), vol.1, pp.182-212, 1981.
- 8) Nezu, I. & Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 9) Nakagawa, H. and Nezu, I.: Prediction of the contributions to the Reynolds stress from the bursting events in open-channel flows, *J. Fluid Mech.*, vol.80, pp.99-128, 1977.
- 10) Kim, J., Moin, P. and Moser, R.: Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, vol.177, pp.133-166, 1987.

(1998.9.30受付)