

ADVを用いた固液二相管流の乱流構造に関する実験的研究

Experimental Studies on Turbulent Structure of Solid-Liquid Upflow by Using ADV

楊永荻^{*}・平野宗夫^{**}・木本大介^{***}

by Yongdi YANG, Muneo HIRANO and Daisuke KIMOTO

Measurements of three dimensional velocities of solid-liquid upflow in a vertical pipe were made by using an acoustic doppler velocimeter (ADV). The neutral plastic particles with the density of 1.047kg/cm^3 and the diameters of 1.4mm, 0.66mm and 0.33mm were transported in a vertical pipe of 19cm inner diameter. The concentration of particles in the flow ranged from about 0.055% to 1.564%. It was found that the turbulence intensity of fluid increases with the increase of concentration and diameter of particles and larger than that of clear water flow at the same flow condition; while at the case of particle diameter 0.33mm and concentration 0.385%, the turbulence intensity decreases than that of a clear water flow at the same conditions.

Keywords : pipe flow, two-phase flow, turbulence structure, particle, ADV

1. まえがき

固体粒子を含む流れの乱流構造に関する研究は古くから盛んであり、浮遊砂流を含む開水路流に関する日野¹⁾やItakura²⁾の理論的研究、開水路や管路における固液、固気二相流に関する実験的研究³⁻⁸⁾など数多く行われてきた。粒子の介在による乱流構造の変化は、主に粒子と流体の密度差、粒子濃度、粒径などの影響によって起こると考えられるが、それについての定量的、定性的な認識はまだ不十分で、不明な点が多く残されている。例えば、鉛直円管流中にコルモゴロフスケール程度の直径の粒子を混入すると流れ場の乱れは減少し、それより大きい粒径の粒子の時は乱れが増加する⁷⁾という結果や、水平管路における中立粒子を含む流れでは乱れが濃度の増加を伴って増加する⁴⁾という実験結果があり、乱流構造のメカニズムに関する統一した見解はまだえられていないのが現状である。

本研究は、粒子を含む流れの乱流構造が、粒子の存在によってどのように変化するかを究明することを目的とする。その第一歩として粒子と流体の相互作用を検討するため、比重が流体に近い中立粒子を用いて、重力の影響を除去するため鉛直管内の上昇固液二相流を対象とする。流速の計測には最近開発された高精度ADV流速計を用い、粒子を含む流れ場の乱流構造を詳細に測定し、検討する。

^{*}正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

^{**}正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

^{***}九州大学工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

2. 実験装置および方法

実験は、図1に示すような直径19cm、長さ160cmの亚克力製円管を鉛直に設置し、給流ポンプなどで構成される循環管路で行う。実験用粒子は水の比重に近いポリスチレンビーズで、水中比重0.047、粒径は1.4, 0.66, 0.33mmの三種類を用いた。タンクに貯められた水と粒子はポンプにより縦形円管内を鉛直上方に流れ、固液二相流を形成する。測定部を通過した固液二相流は、オーバーフローの後再びタンクにもどり、循環を続ける。円管内部には整流のために多孔板を設ける。実験は粒子粒径、濃度および供給流量を変化させて行う。また、勾配はマノメータにより求め、粒子平均体積濃度は採水して測定する。

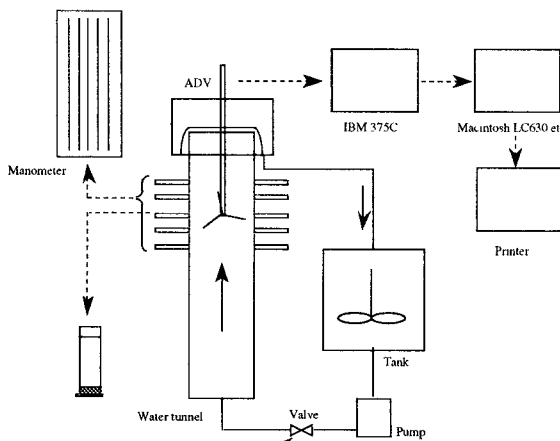


図1 実験装置

流速の計測はSONTEK製の超音波ドップラー3D精密流速計（ADV）を用いて行う。図2にADVの基本的な測定技術を示す。発信ビームに沿って短い水中パルスによって作動し、パルスが水中を伝わってゆくと、音波エネルギーの1部が水中に浮遊する微細粒子によって後方錯乱を起こす。3つのレーザビームがこのサンプリングボリュームで発生する“エコー”を検知しプローブに対する流れの相対速度によってドブラーシフトされる。個々のレーザビームで観測されるこのドブラーシフトは、受信および発信ビームの二等分線に沿った流速成分（ V_1 および V_2 ）に比例する。従って、3つのレーザビームで測定されるドブラーシフトは、3つの異なった方向に沿った流速の基本データとなり、ついで幾何学的に分類され、流速ベクトル“V”の直交する3成分を得ることができる。

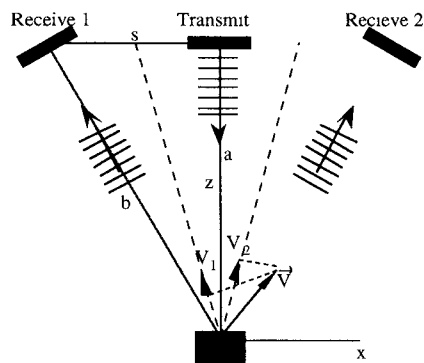


図2 ADVの測定技術

ADVの主な計測仕様は、超音波周波数が10MHz、流速測定分解能が0.1mm/sec、計測範囲が ± 1 mm/sec ± 2.5 mm/sec、計測周波数が0.1–25Hz範囲で入力設定可能となり、流速を計測すると同時に壁面までの距離を0.1mm単位まで測定できる。デジタル信号処理およびシステムコントロールは内蔵したPCボードで行う。

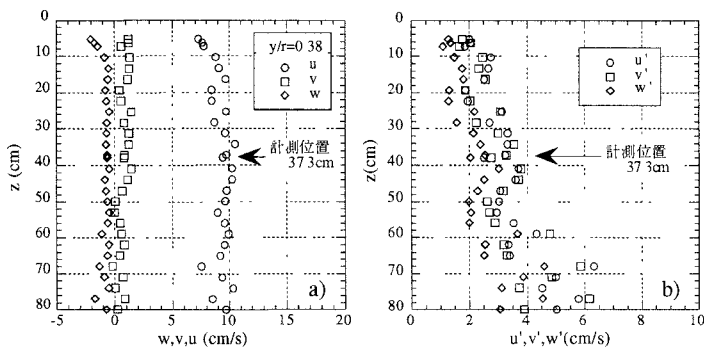


図3 計測位置

流速を計測する断面は、流入口部の急拡と整流板による影響と、流出口のオーバーフローによる影響を避けるため、流れ方向の流速の変化を調べて選定する。図3は壁面から3.6cmの所での流れ方向の流速分布である。図より、流出口付近では、オーバーフローのため流れ方向の流速が小さくなり、横方向の流速が大きくなる。また、流入口部の急拡の影響のため、整流板近くでは流速変動が激しく、特に乱れ強度が強くなる。このため、計測断面は流出口から下に37.3cmのところを選定した。

図4は混相流の濃度変化に対するADVの計測信号の応答を調べるため、同じ計測点での粒径1.4mmの異なる濃度の流れにおける流速波形を示したものである。異なる濃度条件での粒子による流速波形の欠損はあま

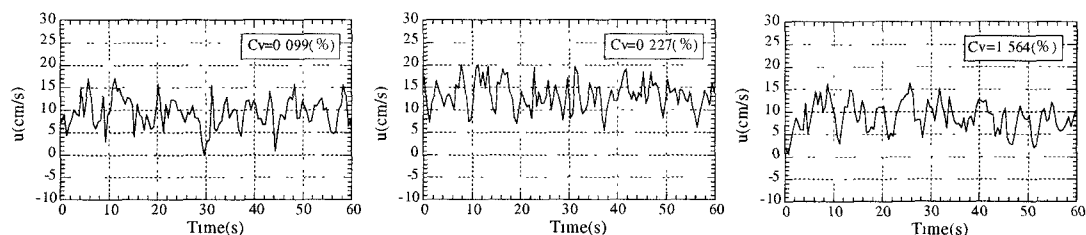


図4 濃度に対するADVによる流速波形

りなく、熱膜流速計を使う際⁴⁾に生じる粒子と熱膜との接触による波形に及ぼす影響を取り除く補正を必要としないという利点

が現われる。

実験条件は表1に示されている。

表1 実験の条件

No.	流量 (ℓ/s)	平均流速 (cm/s)	粒径 (mm)	濃度 (%)	勾配 ($\times 1000$)	摩擦速度 (cm/s)	Re数	Fr数
k-9	3.020	10.659	1.400	0.099	8.438	8.863	20241	0.07811
k-10	3.680	12.986	1.400	0.227	11.563	10.375	24661	0.09517
k-11	2.283	8.056	1.400	0.556	6.475	7.764	15647	0.05904
k-12	2.452	8.654	1.400	0.798	6.750	7.927	17041	0.06342
k-13	2.700	9.528	1.400	1.564	7.375	8.286	18134	0.06982
k-14	2.115	7.464	0.660	0.055	6.000	7.474	14174	0.05470
k-15	2.368	8.356	0.660	0.211	7.000	8.073	15587	0.06124
k-16	2.390	8.434	0.330	0.087	4.125	6.197	16017	0.06181
k-17	1.734	6.120	0.330	0.385	3.750	5.909	11623	0.04485
k-18	2.140	7.550	-	-	5.125	6.908	14338	0.05533
k-19	2.556	9.019	-	-	6.750	7.927	17128	0.06610
k-20	2.494	8.802	-	-	6.500	7.779	16715	0.06450
k-21	1.871	6.601	-	-	2.625	4.944	12069	0.04837

3. 実験結果と考察

3.1 平均流速の分布

図5は濃度と粒径の変化による三成分の平均流速分布の変化を示したものである。図より、流れ方向の

粒子を含む平均流速は清水流と比較して、いずれの条件においても管路中央部付近で減少し、壁面近くで大きくなることが明らかである。

また、図のaに示すように、粒子濃度の増加に伴ってその変化は大きくなり、図のb,cのように粒子の粒径の減少によりその変化は小さくなるのが分かる。これは田中ら⁶⁾やWang et al⁸⁾の固気、気液上昇流における測定結果と同様な傾向を示しているが、林ら⁴⁾の水平管路での中立浮遊粒子を含む流れの流速分布の実験結果とは異なっている。

また、半径方向と円周方向の平均流速 w と v については、粒子の存在による変化は顕著でない。

3.2 乱れ強度の分布

図6と7は流れ方向と半径方向の乱れ強度の分布についてその変化を示したものである。図より、いずれの条件についても粒子を含むことにより乱れ強度が変化している。管路中央部付近では u の乱れ強度の変化は比較的小

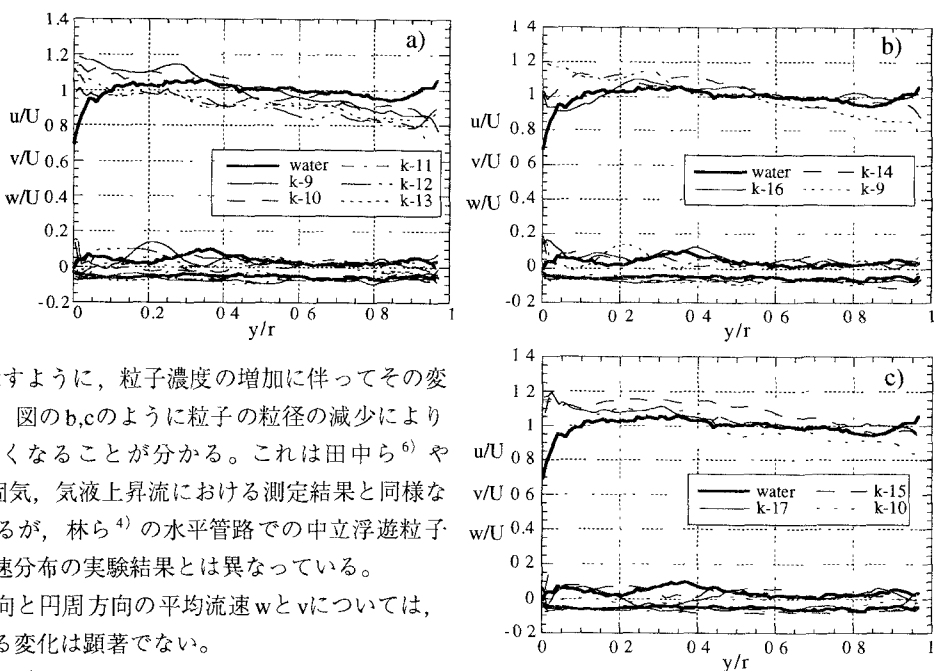


図5 平均流速の分布

さく、 w の乱れ強度の変化が大きくなり、壁面近くでは u の乱れ強度の変化が大きく、 w の乱れ強度の変化が小さくなることが明らかである。清水流と比較して、図6aと図7aに示すように、濃度（粒径=1.4mm）の増加に伴い u と w 両方の乱れ強度が増加する。図6b,cと図7b,cに示すように濃度がほぼ一定の場合は、粒径が大きいほど乱れ強度が清水流より増加しているが、粒径0.33mm, 粒

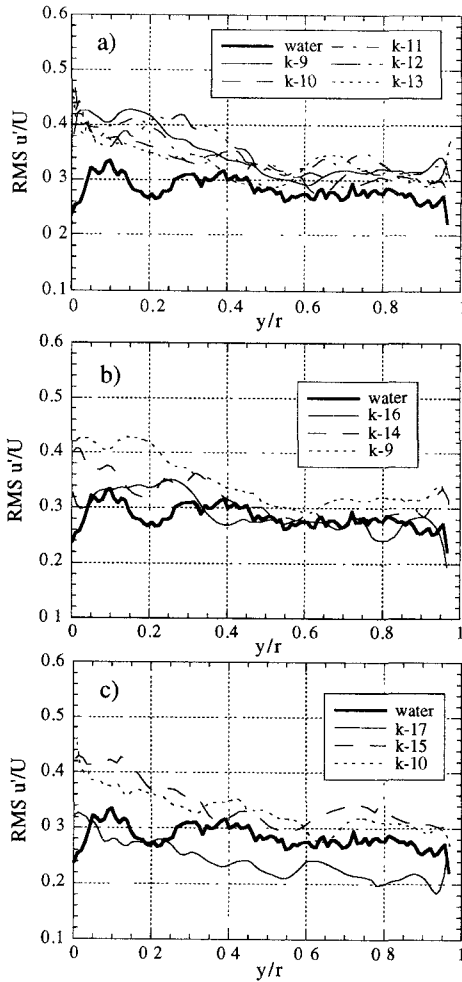


図6 u の乱れ強度の分布

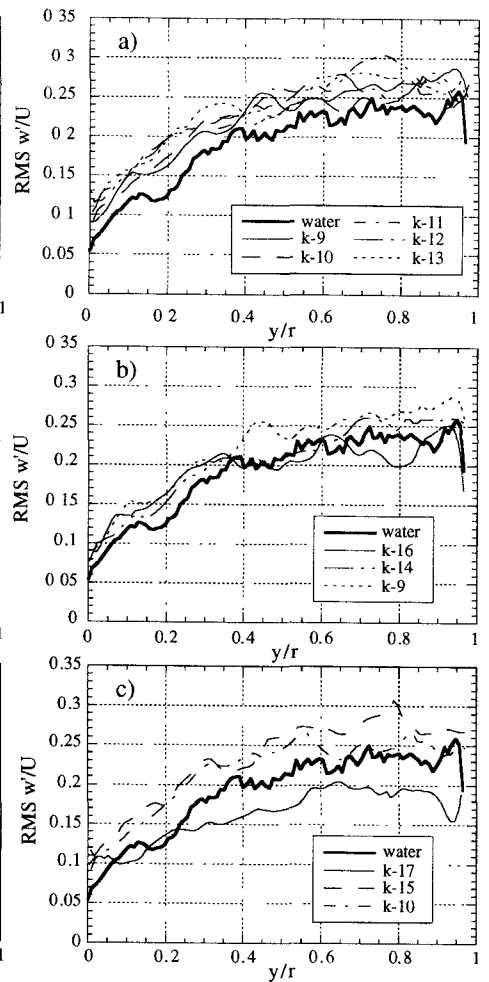


図7 w の乱れ強度の分布

子の体積濃度が0.385%である場合には、乱れ強度が逆に減少している。これにはTsuji et al⁷⁾の固気流での実験結果と同様な現象が定性的に現れている。以上により、粒子の存在による乱れ強度の変化は粒径、粒子濃度の影響により規定されることが分かる。

3.3 乱流エネルギーの分布

図8は乱流のエネルギー分布についてその変化を示したものである。清水流の場合には、乱流のエネルギーは横断面では壁面近くで小さくなる。粒子

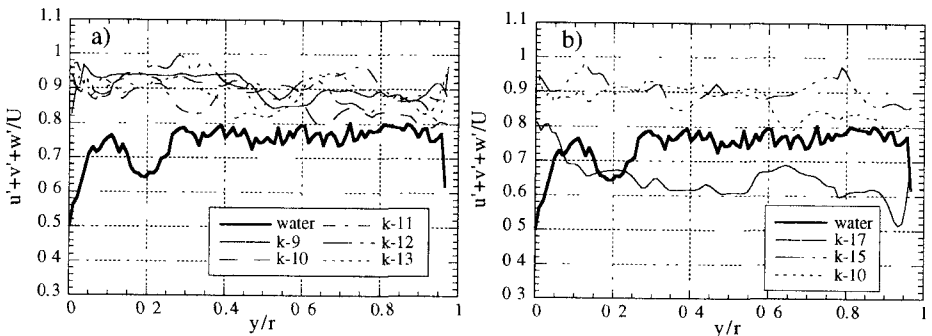


図8 乱流エネルギーの分布

が存在する場合には、乱流のエネルギー分布は平坦化される。乱れ強度について示した結果と同じように、

粒径0.33mm, 粒子の体積濃度が0.385%であるケースでエネルギーが清水流より減少することを除き, 乱流エネルギーは, 粒子の粒径および濃度の増加に伴い大きくなっている。

3.4 Reynolds応力の分布

断面におけるuとwの乱れによるRenyolds応力の分布を示すと図9のようになる。粒径, 粒子濃度の変化により, 清水流の場合と比べ,

いずれの条件についてもRenyolds応力の分布は壁面近くでは正值で大きく, 中央部では負値でかなり小さくなっている。これは平均流速分布の変化の現象に対応して, 断面方向に平均流速の勾配が大きくなることによると考えられる。

3.5 乱れの歪度と尖度の分布

図10-12は乱れの統計量について, それぞれ乱れの歪み度の分布と尖り度の分布を示したものである。図ではかなりのバラツキが見られるが, 清水流でも, 粒子が存在し粒径と濃度が異なってもほぼ同じ傾向が見られる。したがって, 粒子の存在する条件が異なっても, 乱れの統計上の特性はあまり変わっていないことが分かる。

4. むすび

本研究においては, 粒子を含む流れの乱流特性を明らかにするため, 粒子の比重が水とほぼ同じ中立粒子

を用いて, 鉛直管内に固液二相流を発生させ, ADV三成分流速計を用いて流れ場を詳細に測定した。粒子を含む流れでは, 粒子の存在により乱流構造が変化し, 粒子の粒径, 濃度などの異なる条件によりその変化のしかたが異っている。現象が複雑なので, その乱流構造の変化のメカニズムについてはまだ多くの不明な点が残っている。また, 今回の実験においては, パイプの長さが不十分のため, 流入部の影響がデータに現れることが見られた。そのため, 同じ実験装置により測定されたデータのみを用いて比較, 検討を行った。今後, さらに実験装置を改善し, 実験の範囲を

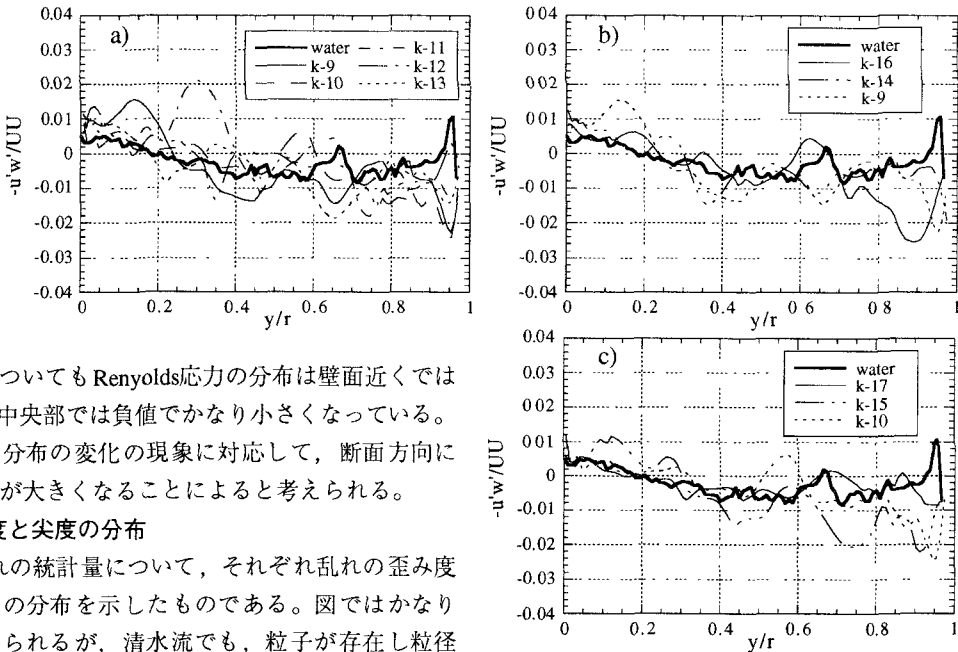


図9 Reynolds応力の分布

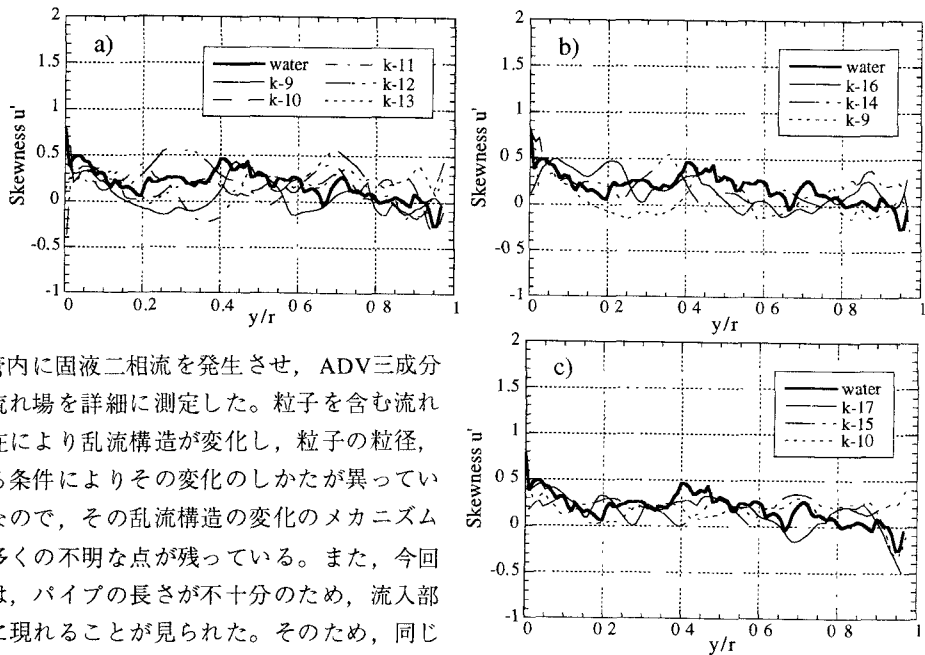


図10 u乱れの歪み度の分布

げ、データを積み重ねて詳細に検討を続ける予定である。

本研究は平成7年度文部省科学研究費一般研究(B) (課題番号: 07455198, 研究代表者: 平野宗夫) の援助のもとに行われた。記して謝意を表する。

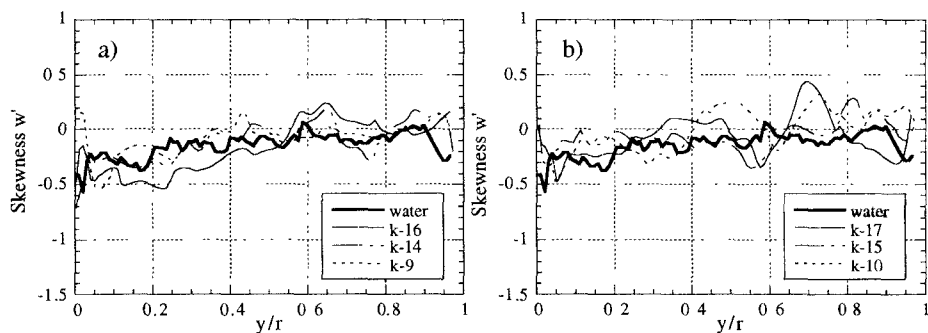


図11 w乱れの歪み度の分布

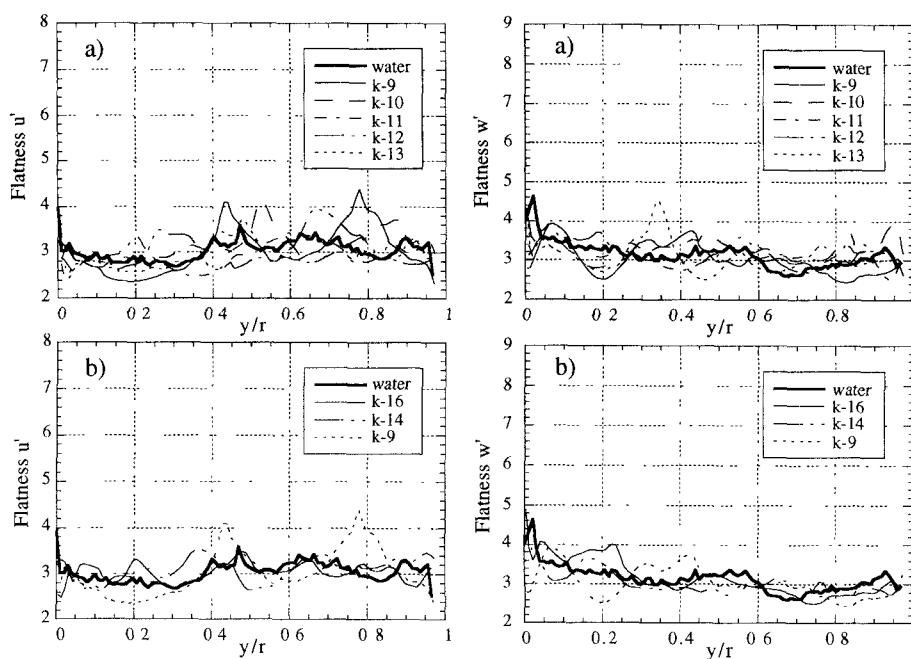


図12 uとw乱れの尖り度の分布

参考文献

- 1) 日野幹雄: 固体粒子群を浮遊した流れの乱流構造の変化, 土木学会論文集, 第92号, pp 11-21, 1963
- 2) Itakura T. and Kishi T.: Open Channel Flow and Suspended Sediment, JHD, ASCE, 106, HY8, pp1325-1343, 1980
- 3) 平野宗夫, 大本照憲, 松枝修治: 流速変動と浮遊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, 1984
- 4) 林泰造, 佐藤邦明, 青野利夫: 中立浮遊粒子を含む水流の乱流構造に関する実験的研究, 第30回水理講演会論文集, pp 625-630, 1986
- 5) 楊永荻, 平野宗夫: 固液二相流の相間作用, 混相流, 第8巻, 4号, pp.306-314, 1994
- 6) 田中敏嗣, 高木康志, 辻裕, 森川敬信: 鉛直管内固気二相流の測定, 日本機械学会論文集 (B篇), 55巻516号, pp.2302-2309, 1989
- 7) Tsuji Y. Morikawa Y. and Shiomi H.: LDV Measurements of a Air-Solid Two-Phase Flow in a Vertical Pipe, J. Fluid Mech., Vol 139, pp.417-434, 1984
- 8) Wang S.K., Lee S.J., Jones Jr O.C. and Lahey Jr R.T.: 3-D Turbulence Structure and Phase Distribution Measurements in Bubbly Two-Phase Flows, Int. J. Multiphase Flow, Vol.13, No.3, pp.327-343, 1987