

鉛直円管内気泡乱流中における連続相の乱流構造変化 (高時間分解能時系列 PIV による乱流微細構造の抽出)

Turbulence Modification in Turbulent Vertical Pipe Bubbly Flow (Extraction of Microscopic Turbulent Structure by High Time Resolved PIV)

80223687 湊大樹(Dajju Minato) Supervisor 菱田公一(Koichi Hishida)

1. 緒論

分散系二相流は工業上多岐に渡り用いられており、装置の安全性や高効率化を目指し、広く研究が進められている。気液二相流において、乱れの促進と抑制はボイド率と気泡径に強く依存すること⁽¹⁾⁻⁽³⁾が知られている。しかし気泡が乱流構造変化に及ぼす影響とそのメカニズムについては、未だ統一された知見が得られていないのが現状である。

本研究では円管内希薄気泡流を取り上げ、気泡が乱流構造変化に与える影響について詳細な知見を得ることを目的とする。LED を用いた形状認識法(SIT) 及び時系列かつ高時間分解能での PIV/LIF 計測を用いて巨視的乱流構造と微視的な気泡周囲流動場の相互関係を捉えると共に、乱流エネルギーの生成・散逸とエネルギー・カスケード過程に気泡が与える影響を評価し、気泡の乱流構造変化への影響を明らかにする。

2. 計測方法

Fig.1 に実験装置概略図及び計測装置概略図を示す。周囲流体の流速計測には高繰り返し YLF レーザー($\lambda=527\text{nm}$)を光源に蛍光粒子をトレーサー粒子とした PIV を用い、気泡形状の認識には青色 LED($\lambda=473\text{nm}$)群を光源とした投影法(SIT)を用いた。高速度、高分解能 CMOS カメラと各光源の照射タイミングを同期させ、フィルタにより波長の分離を行うことで、流動場と気泡形状の同時計測が可能となる。本研究では高速度カメラを適用したことにより時系列 PIV 測定が可能となっており、データサンプリングレートは 500Hz(約 2ms, 画像サイズ 900pixel x 700pixel)である。

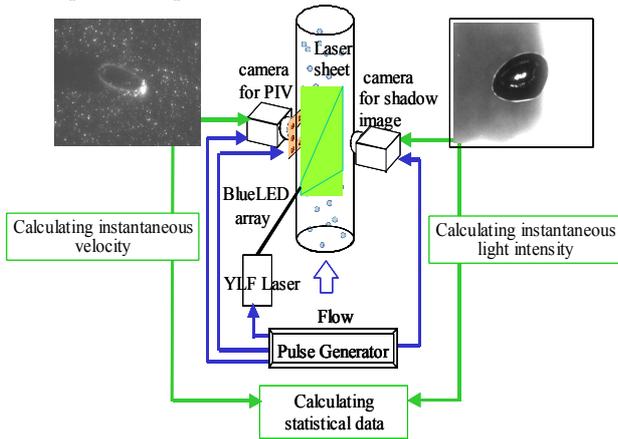


Fig.1 Schematic of measurement system

3. 実験方法

3.1 実験装置 実験流路は全長 2000mm, 直径 44mm のアクリル製円管であり、作動流体である脱気した水は流路内を上昇流として循環する。気相には空気を用い、流量の調節によりボイド率を調整した。テストセクションは流路入口から 1500mm 上方に位置しており、レーザーシートが入射される円管の中心を原点とし、流れ方向上向きを z 軸, 半径方向を r 軸とした。テストセクションには水とほぼ同じ屈折率を持つ FEP(フッ化エチレンプロピレン)樹脂を用い、アクリル製の矩形容器で周囲に水を満たすことで光学的な歪像を低減した。

3.2 実験条件 Table 1 に実験条件を示す。Bulk 速度 196[mm/s], レイノルズ数 9700, 平均ボイド率は 0.5% について実験を行った。また、気泡径の影響を調べるため界面活性剤として 3-pentanol を 60ppm 添加した。

Table 1. Experimental conditions.

Pipe diameter	2R	[mm]	44.
Bulk velocity (single phase)	$U_{s,b}$	[mm/s]	196
Pipe Reynolds number	Re_{2R}		9700
Estimated friction velocity	U_τ	[mm/s]	12.0
Reynolds number (V_d)	Re_τ		297
Void fraction	α	[%]	0.5

4. 結果及び考察

Fig.2 に気泡径の確率密度分布を示す。3-pentanol 添加時では平均気泡径約 0.9mm, 3-pentanol 不添加時では平均気泡径約 2.0mm となり、3-pentanol の添加により気泡同士の合体が抑制され気泡径が異なることが確認できた。これ以下、3-pentanol 添加時を Small Bubbles 3-pentanol 不添加時を Large Bubbles とする。Fig.3 に平均局所ボイド率 $\langle\alpha\rangle$ を示す。横軸は流路中心からの距離を流路半径で無次元化した。 α_f は実験より得られた画像内の割合を計測時間 T で平均して求めた。Fig.2 より、両条件ともに壁面から気泡径の 0.5 ~ 1.0 倍離れた位置に局所ボイド率のピークが存在することから、気泡が壁面近傍を集中して上昇する傾向が認められる。この傾向は Fig.4 に示す Large Bubbles 時における実際計測画像からも確認できた。次に、局所ボイド率分布が巨視的乱流構造に与える影響を調べるため、Fig.5 に液相の流れ方向平均速度 $\langle U_z \rangle$ 及び変動速度 $u_{z,rms}$ を示す。気泡流では $\langle U_z \rangle$ は壁面近傍で増加し、流路中心付近で減少している。これは、壁面近傍を集中的に上昇する気泡群が壁面付近の液相を加速させることにより $\langle U_z \rangle$ が平坦化するためであり Fig.6 に示した Large Bubbles における瞬時流れ方向流速図よりも気泡の浮力による液相の加速が確認できた。気泡流において流路全域で増加している変動速度 $u_{z,rms}$ は、気泡群が作り出す伴流と気泡同士、又は気泡と壁面による相互作用により増加していると考えられる。Fig.7 に $\langle u_z' u_r' \rangle$ で定義されるレイノルズ応力分布を示す。レイノルズ応力は単相時に比べ気泡介在時では著しく減少している。この減少が瞬時微視的流動場におけるどのような現象に起因するかを調べるために Fig.8 に単相時, Fig.9 に気泡介在時 Large Bubbles の $r u_z' u_r'$ で定義した瞬時レイノルズ応力を示す。単相時では、レイノルズ応力がピークを持つ $r/R \approx 0.8$ 付近を中心に強い正の瞬時レイノルズ応力が存在しているが、気泡介在時では壁面近傍と気泡周囲で正負共に強い

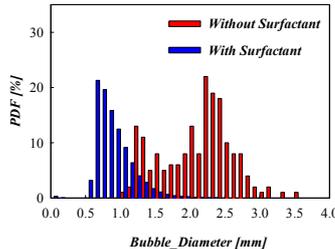


Fig.2 Bubble Diameter PDF

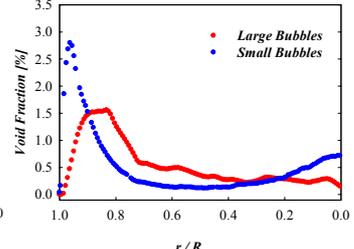


Fig.3 Mean Local Void Fraction

値が存在し、それ以外の領域では強い値は見られない。これより、瞬時・局所的には顕著な運動量輸送が起きているが、時間平均することで打ち消し合い巨視的な運動量輸送が抑制されていることがわかった。Fig.10 に乱れの生成と散逸を示す。単相時に比べ気泡介在時では、乱れの生成は著しく抑制され、乱れの散逸は増加する傾向が確認できる。生成の減少より、平均流による大規模渦の生成が著しく抑制されている可能性が示された。乱れの散逸がどのような領域で増加しているかを調べるため、Fig.11 に単相時、Fig.12 に気泡介在時 Large Bubbles における瞬時散逸を示す。瞬時散逸は次式より算出した。

$$\phi = \nu \left[\left(\frac{\partial u_z'}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r'}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z'}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_r'}{\partial r} \right)^2 + 2 \frac{\partial u_z'}{\partial r} \frac{\partial u_r'}{\partial z} \right] \quad (1)$$

Fig.11、Fig.12 より気泡周囲で散逸が増加しており、特に気泡間距離が小さい領域と気泡と壁面の間で著しい散逸が起きていることが分かった。この著しい散逸は気泡が周囲に複雑な流動場を形成しているためであると考えられ、Fig.13 に渦度変動強さ分布を示した。壁面近傍領域において強い渦度変動が存在しており、壁面を集中的に上昇する気泡群が気泡周囲領域で複雑な渦度場を形成していることが確認できる。この複雑な渦度場における渦の時間スケールを調べるため、Fig.14 に $r/R=0.8$ 、 $z/R=0.8$ における流れ方向速度の時間相関を示す。これより、気泡介在時では渦の時間スケールは顕著に短くなり、気泡同士・壁面と気泡の相互干渉が起き易い壁面近傍ではより顕著に渦の時間スケールが短くなっていると考えられる。様々なスケールの渦が持つエネルギーが気泡の介在によってどのように変化するかを調べるため $r/R=0.8$ 、 $z/R=0.8$ における流れ方向速度のエネルギースペクトルを Fig.15 に、壁面垂直方向速度のエネルギースペクトルを Fig.16 に示す。両方向ともに、単相時より気泡介在時で波数のほぼすべての領域でエネルギーが増加しており、特に中～高波数で顕著である。また、流れ方向では気泡径の違いがほとんど見られないが、壁面垂直方向では気泡径が大きい条件では誘起するエネルギーも渦のスケールも大きくなっている。以上より、流動場に介在する気泡は、気泡径よりも大きなスケールから支配的に散逸する小スケールまでの渦が持つエネルギーを顕著に増加させ、そのために流路全域にわたって散逸を増加させると考えられる。

5. 結言

円管内上昇気泡流において、流路全域における乱れの生成の抑制と散逸の著しい増加が確認された。これは、壁面近傍を集中的に上昇する気泡群が誘起する平均流速の平坦化より平均流から生じる大規模渦の生成が著しく抑制されると共に、気泡が気泡径よりも大きなスケール渦から支配的に散逸する小スケール渦までのエネルギーを顕著に増加させることが原因であると考えられる。

参考文献

- (1)Serizawa.A.et.al., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2 (1975), pp. 235-246.
- (2)Theofanous.T.Get al., *J. Fluid Mech.*, Vol. 116 (1982), pp. 343-362.
- (3)Fujiwara, A. et al., *4th Int. Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, Louisiana, USA, (2001), CD-ROM

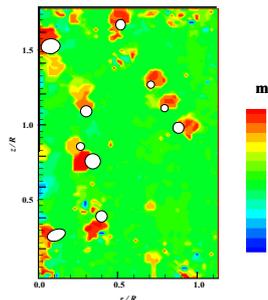
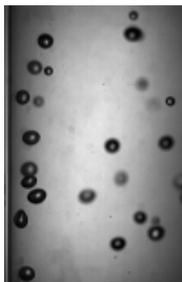


Fig.4 Bubble Image (Large Bubbles) Fig.6 Instantaneous Velocity

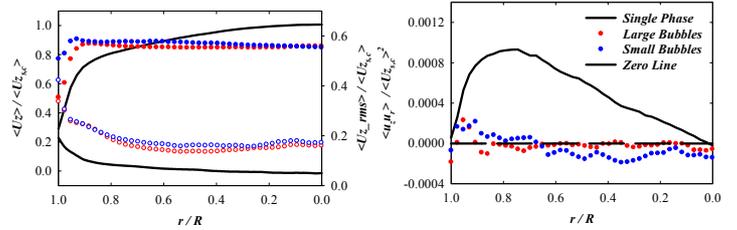


Fig.5 Mean and fluctuation velocities

Fig.7 Reynolds Stress

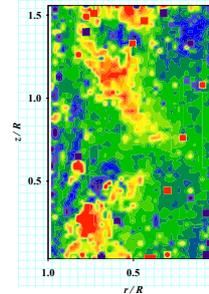


Fig.8 Instantaneous Reynolds Stress (single phase)

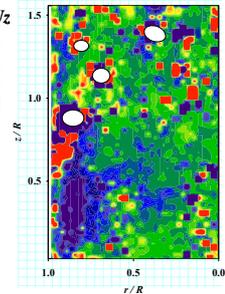


Fig.9 Instantaneous Reynolds Stress (Large bubbles)

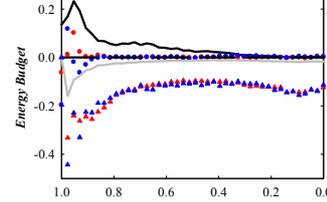


Fig.10 Energy Budget

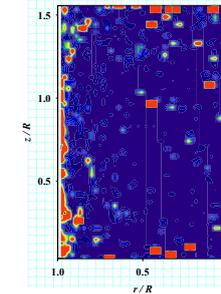


Fig.11 Instantaneous Dissipation (single phase)

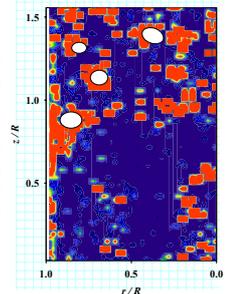


Fig.12 Instantaneous Dissipation (Large bubbles)

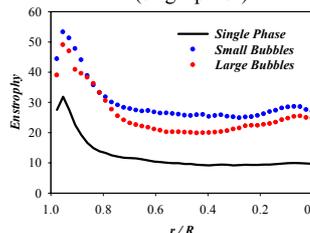


Fig.13 Enstrophy

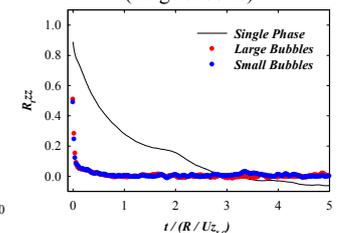


Fig.14 Time Correlation ($r/R=0.8$, $z/R=0.8$)

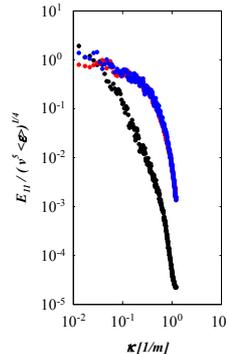


Fig.15 Energy Spectrum (Streamwise Velocity)

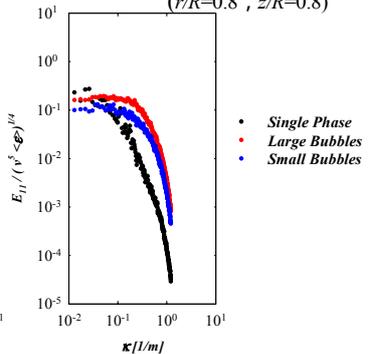


Fig.16 Energy Spectrum (Vertical Velocity)