

60 PIV/LIF を用いた微小気泡を含む流れの 乱流速度分布の計測と数値シミュレーション

推進性能部 *長屋茂樹、角川明、児玉良明
 東京大学 川村隆文
 慶応義塾大学 菱田公一

1. はじめに

船舶などの表面摩擦抵抗を低減するための方法があるなかで、物体表面の境界層内にマイクロバブル（微小気泡）の注入による方法は、80%におよぶ低減効果が報告されるなど、大きな効果が期待される [1]。推進性能部では、開放型融合研究プロジェクトとしてマイクロバブルによる表面摩擦抵抗低減に関する研究を行っており、実船に近いスケールでの模型実験では、模型船に働く全抵抗が10%以上低減されること明らかにするなど、その効果を検証している [2]。今後、実用化に向けてより高効率の抵抗低減が必要であり、そういったシステムの最適設計のためには、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減のメカニズムの理解が重要である。しかしながら、そのメカニズムは明らかにはなっていない部分も多く、メカニズム解明のためにマイクロバブルを含む流れの乱流特性を詳細に知る必要があるが、マイクロバブルを含む流れのような気液二相乱流の研究の中でも、これまであまり研究が行われてはいない。

本研究課題では、マイクロバブルを含むチャンネル内の気液二相乱流流場を、PIV と LIF を組み合わせた計測装置による速度場解析と、直接数値シミュレーション (DNS) による検証によってその特性を明らかにし、抵抗低減のメカニズム解明のための基礎データとすることを目的とする。

2. PIV/LIF による流場計測

2.1 実験方法

チャンネル乱流の計測実験は、推進性能部の小型高速流路で行った。図1および表1に小型高速流路の概略

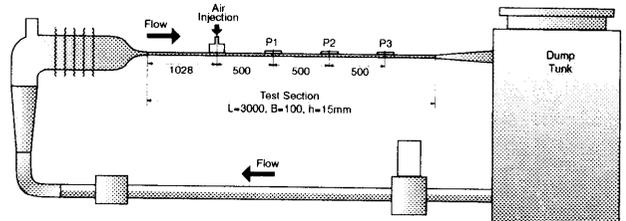


図 1: 小型高速流路

表 1: 小型高速流路緒元

試験部長さ	3000 mm
チャンネル高さ	15 mm
チャンネル幅	100 mm
最大流速	10 m/s
摩擦速度 Reynolds 数 Re_τ (10 m/s)	7.0×10^3

を示す。チャンネル高さは15mmで、最大流速10m/sの完全乱流での実験が可能である。

PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像速度計測法) は、流体中のトレーサー粒子を鮮明に撮影することが重要であるが、マイクロバブルを含む流れでは、レーザー光線がバブル表面で散乱してしまい、バブル近傍の粒子画像を得ることが困難である。そこで LIF (Laser Induced Fluorescence : レーザー誘起蛍光法) を応用し、トレーサーに入射レーザー光によって入射光とは異なる波長の蛍光発光をするものを使用し、PIV のためのトレーサー画像に LIF の蛍光粒子の画像を用いる。一方、バブル表面でのレーザーの散乱光は光学フィルターにより除去することで、気泡周りの流場の計測を行うことの出来るシステムの構築を行った [3]。PIV/LIF システムの概略を図2に示す。本

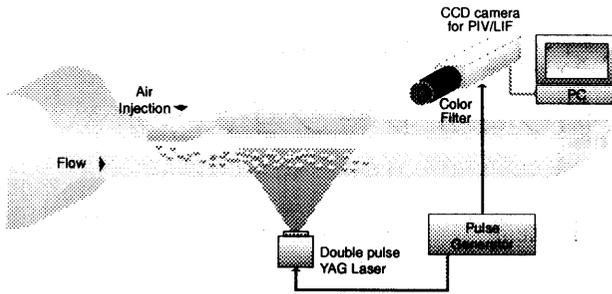


図 2: 計測システム概略図

システムでは、蛍光粒子を用いることから、光源にはレーザー出力が 30mJ、波長 532nm のダブルパルス YAG レーザーを用いた。レーザーおよび CCD カメラの同期は、パルスジェネレータから行う。蛍光粒子にはローダミン B と 6G を蛍光色素とする蛍光発光粒子を作成し用いた。以上のシステムを用いて計測を行った。

2.2 実験結果

気泡を含む流れを撮影した画像を図 3 に示す。このような気泡が存在する流れに対して、図 4 には通常の非 LIF トレーサー画像、図 5 には LIF によって撮影されたトレーサー画像を示す (流速 $u = 5.0\text{m/s}$)。通常画像では気泡表面での散乱光が強く CCD が飽和しており、解析が困難であることがわかる。一方 LIF による画像では、フィルターを介して蛍光を捉えているためトレーサーの輝度は低いが、気泡周囲部分でトレーサーが捉えられている。今後はこの方法により詳細な流場計測を行う予定である。

3. 数値シミュレーション

マイクロバブルを多数含む流れの乱流構造について詳細な情報を得るために、実験と平衡して直接数値シミュレーションを行った。数値計算の利点は、実験においては計測が難しい 3 次元的な乱れの構造についての情報が得られることと、気泡径や表面張力、重力などのパラメータを任意に変更して、その影響が評価できることである。

気泡を含む流れの数値計算においては、気泡のモデリングが重要になる。気泡のモデリングの方法は大きく分けると、球形気泡の抵抗係数などの経験式を使用

した構成方程式を用いる方法と、気液界面を境界条件により直接取り扱う直接シミュレーション法に分けられる。直接シミュレーション法は計算負荷は非常に大きく、取り扱える気泡数も限られているが、気泡の運動に関して不確定性を含むモデルを用いる必要がないことが利点である。このため、本研究においては直接シミュレーション法を採用した。計算方法は川村 [4] に準じる。気泡は Kawamura et al. [5] と同様に、球形からの変形を球面調和関数に展開する方法により取り扱う。

計算対象は流路半幅 H と摩擦速度 u_τ をベースとするレイノルズ数 $Re_\tau = 180$ の完全に発達したチャネル乱流である。このレイノルズ数は実験で用いた高さ 15mm の流路においては流速 0.42m/s に相当する。現状ではこれより大きい流速に対しては直接数値シミュレーションの適用は難しい。計算領域は流れ方向、壁垂直方向、スパン方向にそれぞれ $6.4H$ 、 $2H$ 、 $3.2H$ であり、計算格子点数は各方向に 64 点を取った。

本報告においては、粘性長さで無次元化した気泡径 $D^+ = 71$ の場合と $D^+ = 90$ のときの結果について示す。計算領域中の気泡の数は 36 個及び 18 個とした。体積平均ボイド率は約 3% から約 9% となる。計算開始に先立ち気泡を含まない状態で完全に発達したチャネル乱流を計算しておき、図 6 に示すように気泡を導入する。気泡を導入することにより摩擦係数が変化するが、流れの駆動力である平均圧力勾配を制御することによって、流量を一定に保つ。

まず、ボイド率が約 3% のときの壁面の平均摩擦係数の時間歴を図 7 に示す。気泡が導入されると $D^+ = 71$ の場合で約 14%、 $D^+ = 90$ の場合で約 12% 平均摩擦係数が増加する。これは、実験とは異なる傾向であるが、レイノルズ数の大きな違いがその原因であると考えられる。気泡を導入することの巨視的な影響として、平均密度の低下、実質粘性の増加および乱れの変調がある。今回シミュレーションの対象とした低レイノルズ数の気泡流乱流においては、実質粘性の増加の影響が相対的に大きくなり、抵抗係数が増加したと考えている。

図 8 に $D^+ = 90$ のケースについて平均ボイド率が約 3% のときと約 9% のときについて乱流強度のプロファイルを示す。気泡が存在する場合は壁垂直方向成

分とスパン方向の変動速度が大きくなるが、流れ方向の変動速度は小さくなっているのが分かる。また、この傾向はボイド率が高いほど顕著になる。

4. おわりに

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減のメカニズム解明のために、マイクロバブルを含むチャネル乱流の速度場計測のためのシステム構築と直接数値シミュレーションを行った。今後は、実験と数値シミュレーションの間で互いの結果を比較出来るように両者の検証条件を歩み寄らせることが重要である。実験に関しては、気泡吹き出し部の上流に、スリットからの水の吹き出しを設けて剪断流をコントロールし、任意径の気泡を得ることを意図した装置を用いて、流速の低い領域での実験を行う計画である。数値計算に関しては、計算機の高性能化に伴って、よりレイノルズ数の高い大規模の計算を行い、気泡径の影響などについて検証をすすめる。これらの結果の比較からマイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果のメカニズム解明をすすめる予定である。

参考文献

1. Madavan N. K., et al., J.Fluid Mech., Vol.156, 1985
2. Kodama Y., et al., International Journal of Heat and Fluid Flow 21, 2000
3. Tokuhiro A., et al., International Journal of Multiphase Flow, Vol.24, pp. 1383-1406, 1998
4. 川村隆文、第74回船研発表会講演論文集、2000
5. Kawamura T., et al., Second International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Stockholm, 2001

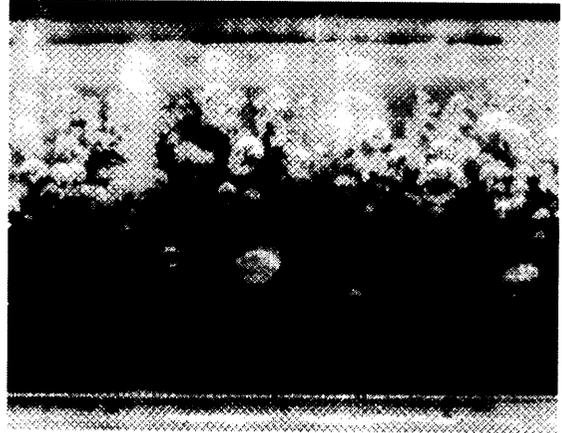


図 3: 気泡流れの通常画像 (流速 $u=5.0$ m/s)



図 4: 非 LIF トレーサー画像



図 5: LIF トレーサー画像

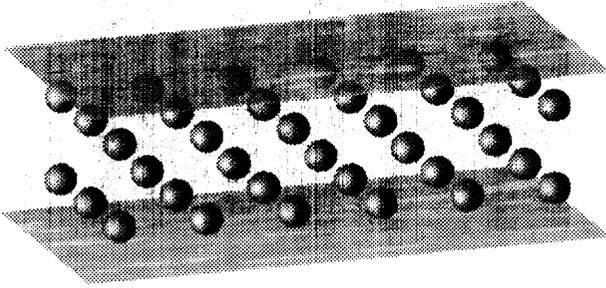


図 6: 気泡の初期分布 ($D^+ = 71$)

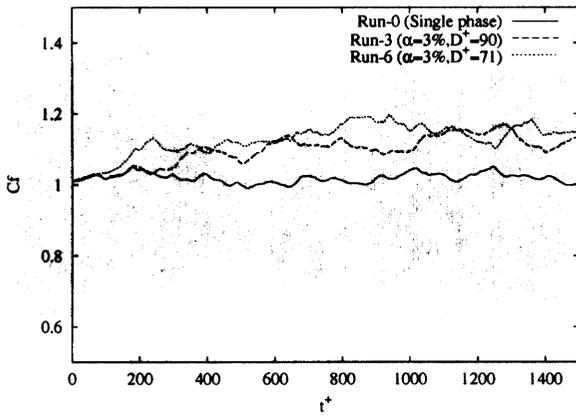
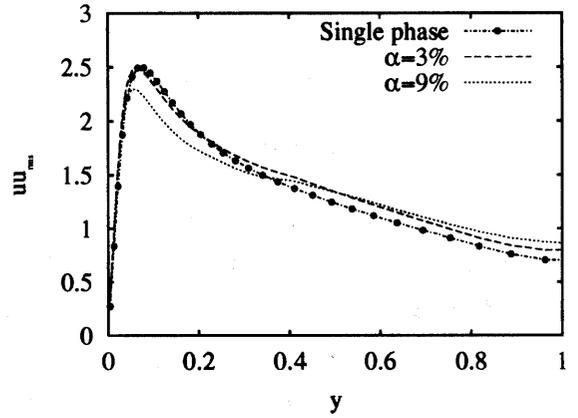
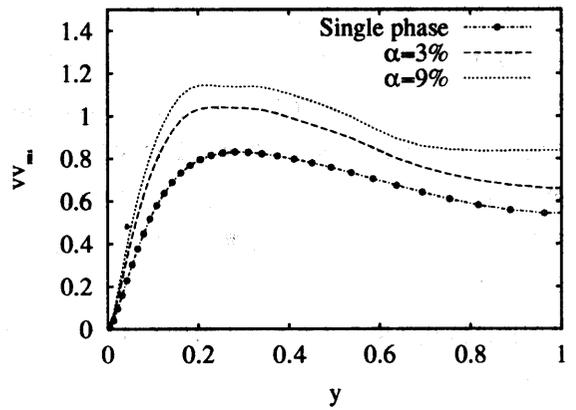


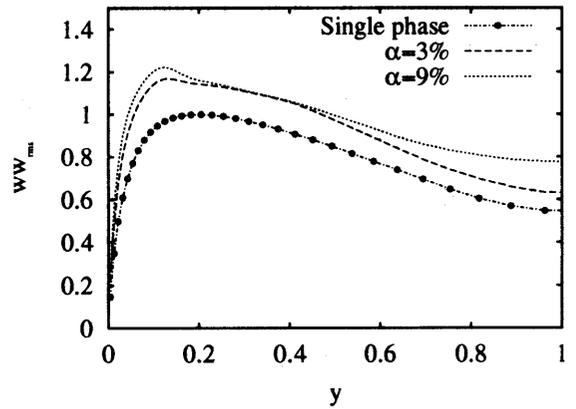
図 7: 無次元化した摩擦係数の時間履歴 (平均ボイド率約 3%)



(a) 流れ方向成分



(b) 壁垂直方向成分



(c) スパン方向成分

図 8: 乱流強度のプロファイル。 $y = 0$ は壁面、 $y = 1$ はチャンネル中央。