

PS-7 マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の 水槽試験への適用

流体設計系 * 大場 弘樹、星野 邦弘、辻本 勝

1. はじめに

船舶の試験水槽では近年 PIV (Particle Image Velocimetry) による流場計測が盛んに行われている。PIV には流れを可視化するためのトレーサ (流体の流れを追跡するために使われる物質) が必要不可欠であり一般的には、銀コート中空ガラスビーズやナイロンパウダー等の水の比重に近い固体粒子を用いることが多い。しかし、固体粒子は散布後ほぼ回収が不可能であるため、水槽保守や精度管理の点から固体粒子の水槽への散布には問題がある。

そこで、固体粒子とは異なり時間経過とともに消滅するマイクロバブルをトレーサとして使用すれば前述の問題を解消できる。マイクロバブルをトレーサとして用いた流場計測は既に行われているが^{例え}ば¹⁾、これらは自由表面を持たない流場を対象としている。本システムでは、船舶試験水槽での平水中及び波浪中における模型船の船尾流場を計測することを念頭に置いており、自由表面を持つ流場の計測となる。

今回はマイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測システムの精度検証として一様流と規則波中の流場計測を行った。その検証結果を報告する。

2. マイクロバブルの性状

ここでは、トレーサに用いるマイクロバブルの性状について述べる²⁾。

マイクロバブルは泡の直径がマイクロメートルと小さいのはもちろんであるが、日常生活において見かける泡とは異なる特徴を有する。

まず、マイクロバブルは泡の体積が小さいため浮力が小さく、このため上昇速度は小さく、気泡径が $30\mu\text{m}$ 、水温 15°C だった場合、 0.43mm/s である。

次に、マイクロバブルの内部圧力の増加である。気泡は気液界面に包まれた状態で存在し、その界面には水の表面張力が作用する。表面張力はその内部の気体を圧縮する力として機能する。外部圧力に対して内部圧力の上昇は(1)式に示す Young-Laplace の理論式により推定できる。

$$\Delta P = 4\sigma/D \quad (1)$$

ここで、 ΔP は内部圧力の上昇量、 σ は表面張力の大きさ、 D は気泡直径である。(1)式から内部圧力の上昇は気泡直径と反比例の関係であることがわかる。マイクロバ

ブルでは内部圧力が上昇すると気泡は収縮運動を行う。この運動は、概ね $50\mu\text{m}$ 以下で発生する現象である。また、内部圧力が上昇すると、ヘンリーの法則に従って気泡は水に溶解する。通常気泡サイズであれば図-1 のとおり、上昇と共に気泡は大きくなり、水面に到達すると破裂する過程をたどる。

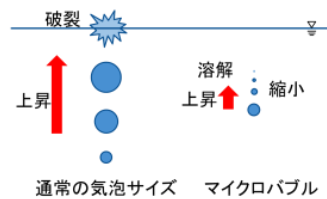


図-1 気泡サイズによる性状の違い

最後に、マイクロバブルは負に帯電している性質がある。そのため、気泡同士が反発しあうことで、気泡の結合が発生しづらい特徴がある。

以上の特徴が挙げられるが、気泡上昇速度が小さく、気泡の結合が発生しづらい特徴を有するマイクロバブルはトレーサとして有用だと考えられる。

3. 実験装置

3.1 全体構成

マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測システムの開発を行っている。計測システムの全体構成を図-2 に示す。

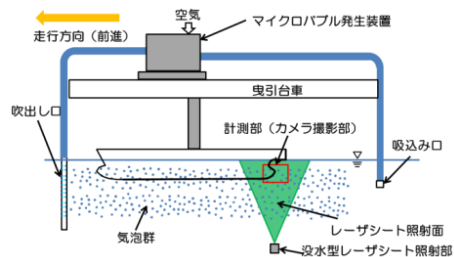


図-2 システム全体構成

このシステムは曳引台車の前方の吹出し口からマイクロバブルを吹出し、その後方にあるレーザシート光によりマイクロバブルを照明し、マイクロバブルの動きを2台の高速カメラにより連続的にステレオ撮影するものである。

3.2 マイクロバブル発生装置

本システムで使用したマイクロバブル発生装置の方式は、気液剪断方式とキャビテーション方式を複合的

に組み合わせたものである。これはポンプを用いて気体と液体の気液混合体を作り、これを内部に突起が複数ある円筒状のミキサーに送り、攪拌混合することで微細な気泡を発生させるものである³⁾。

3. 3 光学装置

本システムに使用した光学装置の詳細を図-3に示す。

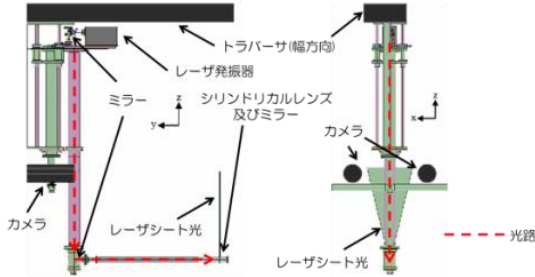


図-3 光学装置

この光学装置に使用した高速度カメラは VGA サイズ (640pix×480pix) の画像を毎秒 200 フレームで撮影することができ、最低被写体照度は 10lux (F 値 1.4 時) である。レンズには焦点距離 12mm、F 値 1.2 のものを使用した。

次にレーザー光学系の光源には出力 4W のグリーン光 (532nm) の連続発振レーザーを用いた。このレーザー光源を 2 つのミラーを介して水中まで導き、これをシリンダリカルレンズにより扇形に拡散させてシート状に成形し、最後にミラーを介して鉛直上方にレーザーシート光を照射する。この装置は模型船での計測を考慮し、船幅方向に動かすためのトラバース装置を有する。

4. 計測システムの精度検証

計測システムの精度検証のため一様流と規則波中の流場計測を行った。水槽は弊所の動揺試験水槽 (長さ=50m、幅=8m、深さ=4.5m) を使用した。

まず、一様流の計測では曳引速度 (V) を 0.4、0.6、0.8m/s の 3 種類とし、それぞれ 5 回ずつ計測を行った。2 本のパイプからなる吹出し口の後方にそれぞれ PIV の計測断面、ピトー管を設置して同時に計測し、両者の計測値を比較した。なお、以下で使用する座標系は x 軸を主流方向、 y 軸を計測画像遠方から近方、 z 軸を鉛直上方とする右手系である。

計測画像中心でのベクトルを 1 点抽出して時系列での平均流速を求め、PIV で計測した主流方向の平均速度 (\bar{V}_x) とピトー管で計測した主流方向の平均速度 (\bar{V}_{xp}) の比較した結果 (図-4) 良い一致を示した。

一様流の流場計測に続き、規則波中の水粒子速度分布の計測を行った。実験状態は波高 $H_w=0.050$ m、波周期 $T=1, 2$ s とし曳引車は停止状態で行った。水深が 0.261m でのベクトルを 1 点抽出し、微小振幅理論による理論値を比較した。その結果を図-5 に示

す。点が計測値、実線が理論値である。 V_x 、 V_z 共に計測値と理論値がよく一致していることがわかる。

4. まとめ

マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法を水槽試験に適用し、一様流と規則波中の流場計測を行った。その結果を以下に示す。

- ① 一様流の計測を行い、ピトー管による計測値と流速を比較して良い一致を示した。
- ② 規則波中の計測を行い、微小振幅波理論により求めた理論値と比較して良い一致を示した。

以上の結果によりマイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の有効性を示した。

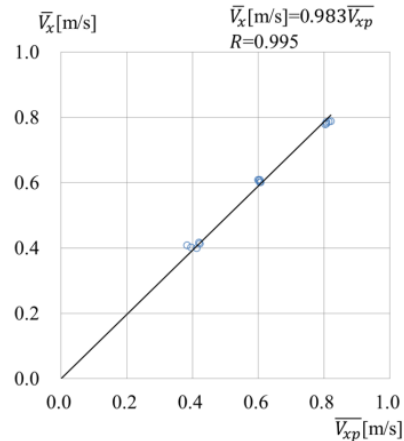


図-4 計測速度比較

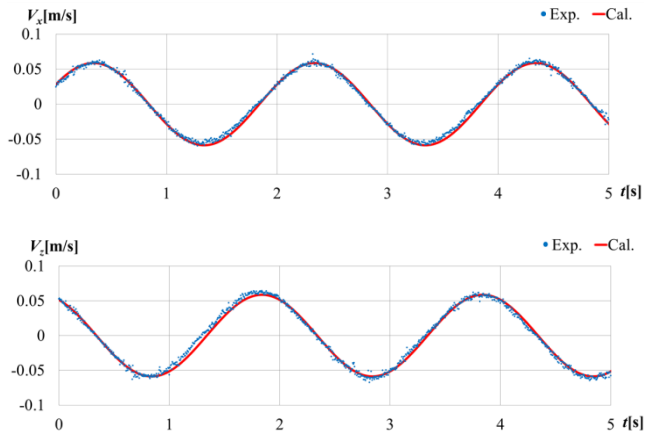


図-5 時系列流速 ($H_w=0.050$ m, $T=2$ s) V_x (上), V_z (下)

参考文献

- 1) 剣地利昭他：マイクロバブルを可視化トレーサに用いた渦輪に現れる周方向波に関する研究，函館工業高等専門学校紀要 47，13-18，2013。
- 2) 石井淑夫他：泡のエンジニアリング，株式会社テクノシステム，2005，pp. 463-467
- 3) 株式会社アスプ：アスプハイブリット方式の優位性，http://www.asupu.com/asp_dl_t1.pdf。