マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の開発 - 船舶試験水槽での適用と検証-

大場 弘樹*, 星野 邦弘**, 辻本 勝*

Development of a PIV Measurement Method using Micro-bubble as Tracer -Application and Verification in Ship Model Basin-

by

Hiroki OHBA, Kunihiro HOSHINO, and Masaru TSUJIMOTO

Abstract

In this paper, it has been proposed to utilize microbubbles instead of solid particle as a tracer for measuring the field in various towing tanks. The developed PIV system consists of a portion where continuous laser sheets are irradiated to visualize the flow field and 2 high-speed cameras for stereo vision of the visualized images. It is possible to visualize and photograph the flow of any cross section around the ship model by changing the position and the direction of continuous laser sheet light. Validation of the developed PIV system was carried out by the measurement of uniform flow and the measurement of the flow of the regular waves and it confirms that the system has capability to measure flow field in various towing tanks.

* 流体設計系,

^{** (}研究当時) 流体設計系

原稿受付 2019年4月26日

審 査 日 2019 年 8 月 5 日

目 次

1.	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	• 92
2.	気泡発生装置および発生気泡の性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 92
3.	実験装置および実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 94
4.	実験結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 95
	4.1 一様流	· 95
	4.2 規則波 ·····	· 98
5.	結言 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	100
参	∺考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100

1. はじめに

船舶の水槽試験では抵抗試験や自航試験により実船の抵抗や推進性能を推定する試験が多く行われているが近年はより正確な推進性能評価,船型改良のために PIV (Particle Image Velocimetry) による流場計測が盛んに行われている.曳航水槽や回流水槽への PIV 適用は既に一般的となり,様々な計測事例 いのが報告されている.船舶試験水槽で PIV により模型船の流場計測を行う場合,流体中に目印となるトレーサを注入する必要がある.トレーサとして固体粒子が用いられることが多く,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事が多い.しかし,試験水槽に供給した固体粒子は水槽の水を完全に抜いて清掃しない限り,回収はほぼ不可能であり,水槽施設の保守及び精度管理の観点から PIV 装置の導入ができない船舶試験水槽も多く存在し,弊所でも400m水槽や実海域再現水槽等には固体粒子を供給することができない.そのため,水槽中に残留しないマイクロバブルをトレーサとして用いる手法の検討を行った.

マイクロバブルをトレーサとして使用した流場計測については既に実施されているが^{*n*~9},これらは自由表面 を持たない流場を対象としている.今回開発するシステムは,船舶試験水槽での平水中及び波浪中における模型 船の船尾流れを観測することを目的としており,自由表面を持つ流場の計測となる.

船舶試験水槽でマイクロバブルをトレーサに用いて PIV を行うシステムを開発し,その精度検証のため,一様 流と規則波中の流場計測を行い,本システムの計測精度の検証を行った.これにより,本システムの有効性を確 認したので報告する.

2. 気泡発生装置および発生気泡の性状

マイクロバブルの主な発生方式には気液せん断方式,キャビテーション方式,加圧溶解方式,細孔方式,超音 波方式がある.本研究で使用した気泡発生装置は気液せん断方式とキャビテーション方式を組み合わせたもので ある.これはポンプを用いて気体と水の気液混合体を作り,これを内部に突起が複数個ある円筒状のミキサー(図 1)に送り,加圧しながら攪拌混合することで微細気泡を発生させるものである¹⁰.使用したマイクロバブル発生 装置の写真を図2に示す.



図1 気泡発生のイメージ



まず、トレーサとして用いる気泡の基本的な性状を調べるため、この気泡発生装置で生成した気泡の直径を計 測した.気泡径の計測は、気泡を混入した透明な容器にレーザシート光を照射し、マイクロスコープにより計測 した.なお、マイクロスコープの解像度は720 ppi×480 ppiであり、撮影範囲は6.5mm×4.3mm、1ppiあたり9.1µm である.計測画像を輝度値に閾値を設け、2 値化し、個々のピクセル数をカウントした.最後に気泡は真球だと 仮定し、カウントしたピクセル数より気泡径を求めた.なお、解析に使用した画像は10枚である.その結果を図 3 に示す.

この結果から発生した気泡の直径は10µmから60µmの範囲に分布しており,気泡直径は平均で31µmである. マイクロバブルの上昇速度(V_r)は,(1)式のStokesの式¹¹により推定でき,その速度は気泡の抗力と浮力が釣り 合う速度で上昇し、気泡径の2乗に比例して速くなる.

$$V_r = \frac{gd^2}{18\nu} \tag{1}$$

ここで,

g:重力加速度[m/s²] d:気泡径[m]

v:水の動粘性係数[m²/s]

である.

水の動粘性係数は水温により変化するが,実験時の水温(15℃)において平均気泡径での上昇速度は0.47mm/sと計算され非常に遅いことがわかる.気泡径の小さい泡は上昇速度が遅いことに加え、泡が負に帯電している性質があり、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り¹¹⁾,トレーサとして有用だと考えられる.

3. 実験装置および実験方法

船舶試験水槽用に開発した計測システムの全体構成を図4に示す.このシステムはレーザシート光の前方の 吹き出し部からマイクロバブルを噴出し、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同期した2台の高速度カメラにより連続的にステレオ撮影するものである.



また,今回はこのマイクロバブルをトレーサとして噴出する部分には塩化ビニールのパイプに複数の穴を開け た吹き出し部を使用した.気泡の吐出速度は水面からの距離によって噴出速度が異なる.そして,流れを整流す るためにパイプを翼型に成形した.

次に,計測システムに使用した PIV システムについて詳細な構成図を図5に,計測時の写真を図6にそれぞれ示す.





図5 PIV 装置の正面図(左図)及び側面図(右図)



図6 計測状況

この PIV システムに使用した高速度カメラは VGA サイズの画像を毎秒 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.カメラの撮 影範囲は 250mm×190mm 程度であり, 1ppi あたりおよそ 0.4mm である.

次に、レーザ光学系の光源には出力 4W のグリーン光 (532nm)の連続発振レーザを用いた. このレーザ光源 を2つのミラーを介して水中まで導き、これをシリンド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、 鉛直上方にレーザシート光を照射する. この装置は模型船での計測を考え、船幅方向に動かすためのトラバース 装置を有する. これにより計測する断面を変更することが可能である.

なお, 解析ソフトには Dantec Dynamics 社の Dynamic Studio version 3.20 使用し, 検査領域は 32ppi×32ppi とし、オーバーラップ 50%にて FFT 相互相関法により解析た.

4. 実験結果と考察

4.1 一様流

マイクロバブルをトレーサとした PIV 計測の精度検証のため,海上技術安全研究所の4つの水槽にて一様流中 を行い,規則波中の流場計測を動揺試験水槽にて行った.

使用した試験水槽は動揺試験水槽(長さ=50m, 幅=8m, 深さ=4.5m), 実海域再現水槽(長さ=80m, 幅=40m, 深さ=4.5m), 中水槽(長さ=150m, 幅=7.5m, 深さ=3.5m), 400m 水槽(長さ=400m, 幅=18m, 深さ=8m)である.

以下で使用する座標系は、x軸を主流方向、y軸を鉛直上方、z軸を左舷方向とする右手系である。各方向の速度 を U、V、W とし、添え字 p は PIV で計測した流速、e は対地速度を示す。

計測画像の一例を図7に示す.



図7 計測画像(中水槽, Ue=0.6m/s)

図 8 は中水槽にて曳引台車を対地速度(Ue)0.6m/s で動かし, PIV にて流速を計測した結果であり、中央部における流速を抽出したものである.

Up, *Vp*, *Wp* を比較すると *Up* と *Vp* より *Wp* の時間変化が大きいことがわかる. これは *Up* と *Vp* は面内方向の 速度であるのに対し, *Wp* は面外方向の速度であるためであると考えられる.面外方向の精度は面内方向位置の精 度の $1/\tan\theta$ 倍になり ¹²,本計測においてのレーザシートとカメラの角度 θ は約 20 度であるため,面外方向速度は 面内方向速度に対して 2.7 倍精度が悪いと考えられる.

Up0.8 *Up*=0.587[m/s] 0.7 Up [m/s] $S_{Up}^2 = 0.000185 [m^2/s^2]$ 0. 0.5 0.4 15 2.0 **T** [s] Vp 0.2 Vp=0.009[m/s] 0.1 $V_p \, [m/s]$ $S_{Vp}^2 = 0.000193 [m^2/s^2]$ -0.1 -0.2 **T** [s] Wp 0.2 Wp=0.000[m/s] 0.1 Wp[m/s] $S_{Wp}^2 = 0.000468 [m^2/s^2]$ -0.1 -0.2 T [s]

図 8 の右側の値は平均値(\overline{Up} , \overline{Vp} , \overline{Wp})と分散(S_{Up} , S_{Vp} , S_{Wp})であるが,先に述べたとおり, Upと Vpは面内方向の速度であるため分散が小さく, Wpでは面外方向の速度であるため分散が大きいことがわかる.

図8 速度の時刻歴 Up(上図), Vp(中図), Wp(下図)

次に、図8のデータを用いて作成した確率密度分布を図9に示す. Up については正規分布に従っていることがわかる. Vp と Wp については若干の偏りがあるものの正規分布に近い形である.

最後に、図10に PIV で計測した主流方向の平均速度(Up)と対地速度(Ue)の比較を示す.

●が動揺試験水槽,■が実海域再現水槽,◇が中水槽,△が 400m 水槽の結果である.各水槽にて行った一様流の 計測結果が線形近似した実線と良くあっており,相関係数(*R*)は 0.99 以上であり,高い相関を持つことを確認し た.表1は水槽ごとに線形近似した傾き(*a*)と相関係数を示す.どの水槽においても*R*は0.99 以上であり,高い相 関が得られた.傾きについては水槽の違いに依らず対地速度と比べ 3%程度差異があり,この要因として光学系 の配置、カメラの検定、トレーサの影響等が考えられ,今後の検討が必要ある.



衣1 傾さ及い相関係数			
$\overline{Up} = a\overline{Ue}$	а	R	
Wave Tank	0.983	0.9989	
Actual Sea Model Basin	0.963	0.9997	
150m Towing Tank	0.968	0.9996	
400m Towing Tank	0.956	0.9997	
All	0.973	0.9987	

表1 傾き及び相関係数

4.2 規則波

ー様流中の流場計測による検証に続いて,規則波中の流場計測を行った.水槽中に波高(Hw)=0.050m,周期(T) = 2sの波を造波機により発生させ,曳引台車は停止させた状態で計測を行った.

計測画像を図 11 に示す.図 12 に解析結果の 0.5 秒毎の速度ベクトルを示す.波浪中の波粒子速度を捉えているため,速度ベクトルの方向が時間的に変化していることがわかる.



図 12 速度ベクトル(H_w=0.050m, T=2s)

図 13 に示す結果は図 12 の解析結果より y 方向に 3 点の速度ベクトルを抽出し,時系列での速度を描画した結果 である. 上段(a)が y=-0.187m,中段(b)が y=-0.224m,下段(c)が y=-0.261m の結果である. なお、静止水面を y 軸の 原点としている.

図中の実線が微小振幅波理論により求められた理論値であり、点は計測値である.



y=-0.224, -0.261m では Up, Vp 共に理論値と計測値が良く一致していることがわかる. y=-0.187m では Vp の一致 は良いが Up については全体的に増速側にシフトしていることがわかる. この原因としてはマイクロバブルを水 槽中に噴出するときの速度によるものだと考えられる. 水深が浅くなるにつれて Up の一致が悪くなるのは水面 に近い部分においてマイクロバブルを噴出する速度が速く,水面から遠くなるにつれて速度が遅くなるためだと 考えられる. そのため,マイクロバブルの噴出速度が計測する流速に対して大きい場合には噴出方法の改善が必 要である. マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測により一様流及び規則波の流場計測を行った.本研究により得ら れた結果を以下に示す.

(1) 一様流中の流場計測結果では対地速度と計測値との相関係数が 0.99 以上であり高い相関関係がある.また,水槽を変えて計測を行っても計測上問題はないことが確認された.

(2) 規則波中の流場計測では微小振幅波理論により求めた理論値と比較した結果,両者の波形は良い一致を示した.

以上の結果によりマイクロバブルをトレーサにして波浪場の流場計測ができることがわかった.

参考文献

1) L. Gui, J. Longo, F. Stern (2001), : Towing tank PIV measurement system, data and uncertainty assessment for DTMB Model 5512, Experiments in Fluids, Volume 31, pp. 336-346

2) 犬飼泰彦, 金子唯明, 長屋茂樹, 越智文俊: 舶用省エネ装置 IHIMU 半円型ダクトの作動原理と実船流場への 適用, IHI 技報, Vol. 50 No. 4, 2010

3) 安藤智子,池田剛大,木村校優:船用プロペラ周りの PIV 計測および CFD 解析,数値流体力学シンポジウム 講演論文集,26th,2012

4) 大川博史,赤松佳祐,KimHo,戸田保幸:肥大船の波浪中運動・抵抗増加と波による伴流分布の変動に関する 研究,,日本船舶海洋工学会論文集,第17号,2013

5) 剱地利昭, 吉田敦: 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

6) Keiske A, Kim H, Hiroshi O, Yasuyuki Toda (2014) Phase-Averaged SPIV Flow Field Measurement for Ballast Condition of KVLCC2 in Waves, Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, Korea, June 15-20, 2014, pp. 802-807

7) 堀純也,塩田賢志,川村真未,尾崎眞啓,高橋浩司:マイクロバブルを用いた血液回路内可視化法の検討,医療機器学,79(7),576-577,2009-10-01.

8) 黒田正法,吉岡修哉,大上芳文:微細気泡をトレーサに用いたバックステップ流れの PIV 計測,日本機械学会 流体工学部門講演会講演論文集,2013

9) 南川久人,山田哲史,塩見洋一:加圧溶解式マイクロバブルを用いた PIV, UVP 計測,日本機械学会流体工学 部門講演会講演論文集,2007

10) HACK UFB 株式会社: HACK UFB ハイブリット HACK UFB ハイブリット方式の優位性,

http://www.hackufb.co.jp/wp-content/uploads/2016/02/2a3d99c5aed9ca3a2bea9607f62e3257.pdf

11) 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.463-464

12) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版 (2002), pp.167-168