

マイクロバブルをトレーサに用いた PIV 計測法の開発 — 模型船周りの流場計測と波高影響調査 —

大場 弘樹*, 星野 邦弘**, 黒田麻利子***
澤田 祐希***, 辻本 勝***

Development of a PIV Measurement Method using Micro-bubble as Tracer - Measurement of Flow around a Ship Model and Study for the Effect of Wave Height -

by

OHBA Hiroki, HOSHINO Kunihiro, KURODA Mariko
SAWADA Yuki and TSUJIMOTO Masaru

Abstract

The stern flow field is changed with the ship motion induced by waves. Measurement of the stern flow field in waves is important in evaluating propulsion performance. In this study, a PIV (Particle Image Velocimetry) system using a micro-bubble as a tracer was used to measure the flow field around a VLCC (Very Large Crude oil Carrier) model. First, the comparison between the resistance test and self-propulsion test is carried out. From the comparison, the effect of propeller suction is quantitatively clarified by the measurement. Next, it was found that the amplitude of time variations of the stern flow field is proportional to the wave height by the tests with 3 kinds of wave height.

* (研究当時) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所 流体設計系

** 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所 企画部

*** 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所 流体設計系

原稿受付 令和2年4月17日

審査日 令和2年7月1日

目 次

1. はじめに	52
2. PIV システムについて	53
3. 試験結果	54
3.1 平水中流場計測	55
3.2 波浪中流場計測	56
4. 結言	61
参考文献	61

記 号

a_E : 展開面積比
 B : 船幅 [m]
 $B.R.$: ボス比
 D : プロペラ直径 [m]
 d_m : 中央喫水 [m]
 g : 重力加速度 [m/s^2]
 k : 波数 [1/m]
 L_{PP} : 垂線間長 [m]
 lcb : 前後方向浮心位置 [% L_{PP}]
 P/D : ピッチ比
 R : プロペラ半径 [m]
 t : 時間 [s]
 U : 主流方向速度 [m/s]
 U_A : 主流方向速度振幅 [m/s]
 U_{Ave} : 平均主流方向速度 [m/s]
 V : 上下方向速度 [m/s]
 V_A : 上下方向速度振幅 [m/s]
 V_{Ave} : 平均上下方向速度 [m/s]
 V_m : 試験速度 [m/s]
 V_{Zr} : 上下方向相対速度[m/s]
 Z : プロペラ翼数
 ζ_a : 入射波振幅 [m]
 ζ_w : 波高 [m]
 λ : 波長 [m]

1. はじめに

船舶から排出される温室効果ガスを削減するために、船舶の省エネ化や運航の最適化が重要となっている。船舶の省エネ化を実現化するためには建造前に推進性能を正確に評価し、船型改良を行う必要がある。船舶の推進性能を評価するために、船舶試験水槽において抵抗試験や自航試験が頻繁に行われている。近年では、推進性能を正確に評価し、船型改良を行うため、PIV(Particle Image Velocimetry)による流場計測が盛んに行われており^{1)~6)},

国内外の船舶試験水槽では導入が進んでいる。PIVを行う場合には、流体中に流体の動きに追従する目印となるトレーサを注入する必要がある。使用されるトレーサは固体粒子が多いが、一度散布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、水槽保守や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する。著者らはこの問題を解決するため、水槽中に残留しないマイクロバブル⁷⁾をトレーサとして使用する方法を開発し⁸⁾、気泡上昇速度が小さくその影響を無視できることを示すとともに、規則波中試験によるマイクロバブルの流体追従性を検証し、船舶試験水槽のPIV用トレーサとしてのマイクロバブルの有効性を確認している。

本研究では、船体周りの流場計測への適用を行い、プロペラの有無による平水中の船尾流場の把握と船尾流場への波浪影響の把握を本PIV計測システムにより明確にすることを目的として、VLCC(Very Large Crude oil Carrier)模型を対象として平水中の抵抗試験状態と自航試験状態の船尾流れの比較を行った結果と波高を3種類変えた試験結果について報告する。

2. PIVシステムについて

本研究で使用したPIVシステムの構成図を図1に示す。本システムは模型船前方の気泡吹き出し部からマイクロバブルを発生させ、そのマイクロバブルを模型船の船尾にある連続光のレーザシートと高速カメラで撮影する。本システムに用いたレーザシートとカメラの詳細な構成を図2に示す。本装置は船の幅方向に計測断面を変更できるようトラバース装置を有する。本システムの設置状況を図3に示す。

本システムに使用した高速カメラは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)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、1pixelあたりおよそ0.4mmである。レーザは出力4Wのグリーン光(532nm)の連続発振のものを使用し、2つのミラーを介して水中まで導き、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している。

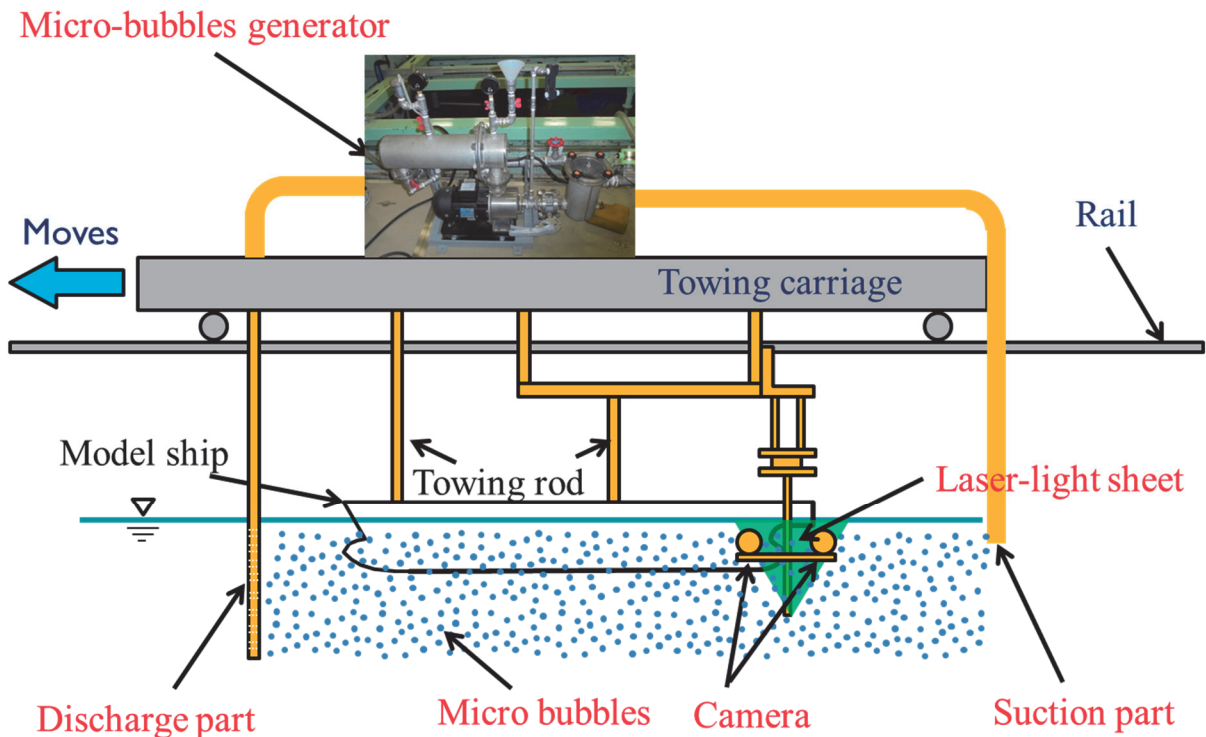


図1 側面配置図

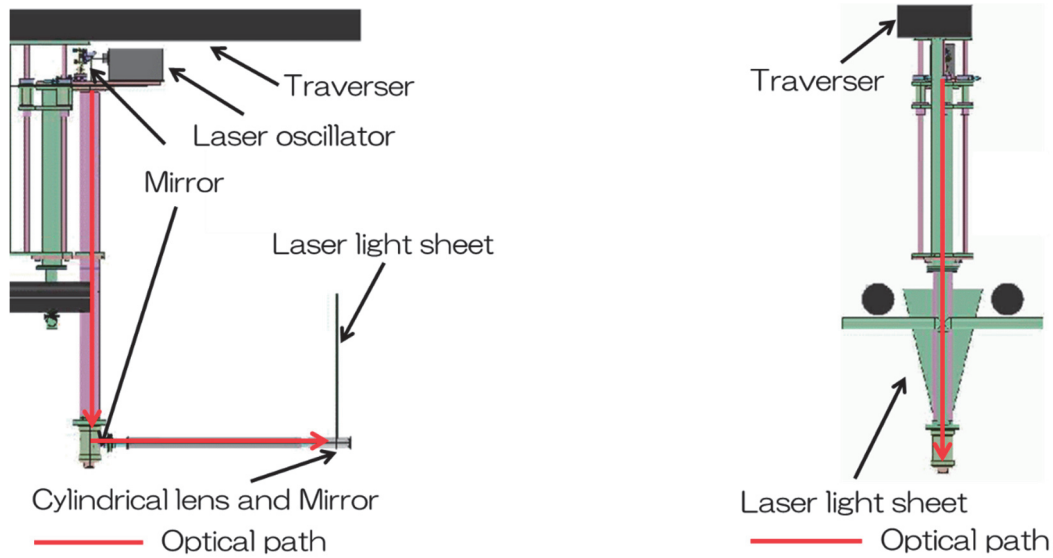


図 2 PIV 装置の正面図(左)及び側面図(右)



図 3 PIV 装置の設置状況

3. 試験結果

模型船周りの流場計測を海上技術安全研究所の中水槽(長さ 150 m, 幅 7.5 m, 水深 3.5 m)にて行った。計測に使用した模型船は長さ 4.16 m(実船 324 m)の VLCC である。使用した模型船及びプロペラの要目を表 1, 表 2 に示す。試験速度は $V_m=0.600$ m/s である。計測断面は模型船 C.L.(Center Line)と C.L.から左舷に $0.7R$ (R はプロペラ半径) の 2 断面とした。

表 1 模型船要目

Condition	Full		Ballast	
	Ship	Model	Ship	Model
ship length between perpendiculars (L_{PP}) [m]	324.00	4.160	324.00	4.160
ship breadth (B) [m]	60.00	0.7704	60.00	0.7704
draught at midship (d_m) [m]	20.50	0.2632	8.450	0.1085
trim by the stern ($Trim$) [m]	0.000		4.300	0.055
longitudinal centre of buoyancy (lcb) [$\%L_{PP}$]	3.3		1.5	

表 2 模型プロペラ要目

Item	Model
propeller diameter (D) [m]	0.1219
propeller pitch ratio (P/D)	0.72
expanded blade area ration (a_E)	0.41
number of propeller blade (Z)	5
boss ratio ($B.R.$)	0.17

以下で使用する座標の原点を x 軸は A.P., y 軸は水面とした. x 軸を主流方向, y 軸を鉛直上方, z 軸を右舷から左舷とする右手系である. なお, 速度は試験速度 V_m で無次元化している. 計測した画像の一例を図 4 に示す. 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 64pixel×64 pixel とし, オーバーラップ 50%にて FFT 相互相関法により解析した.

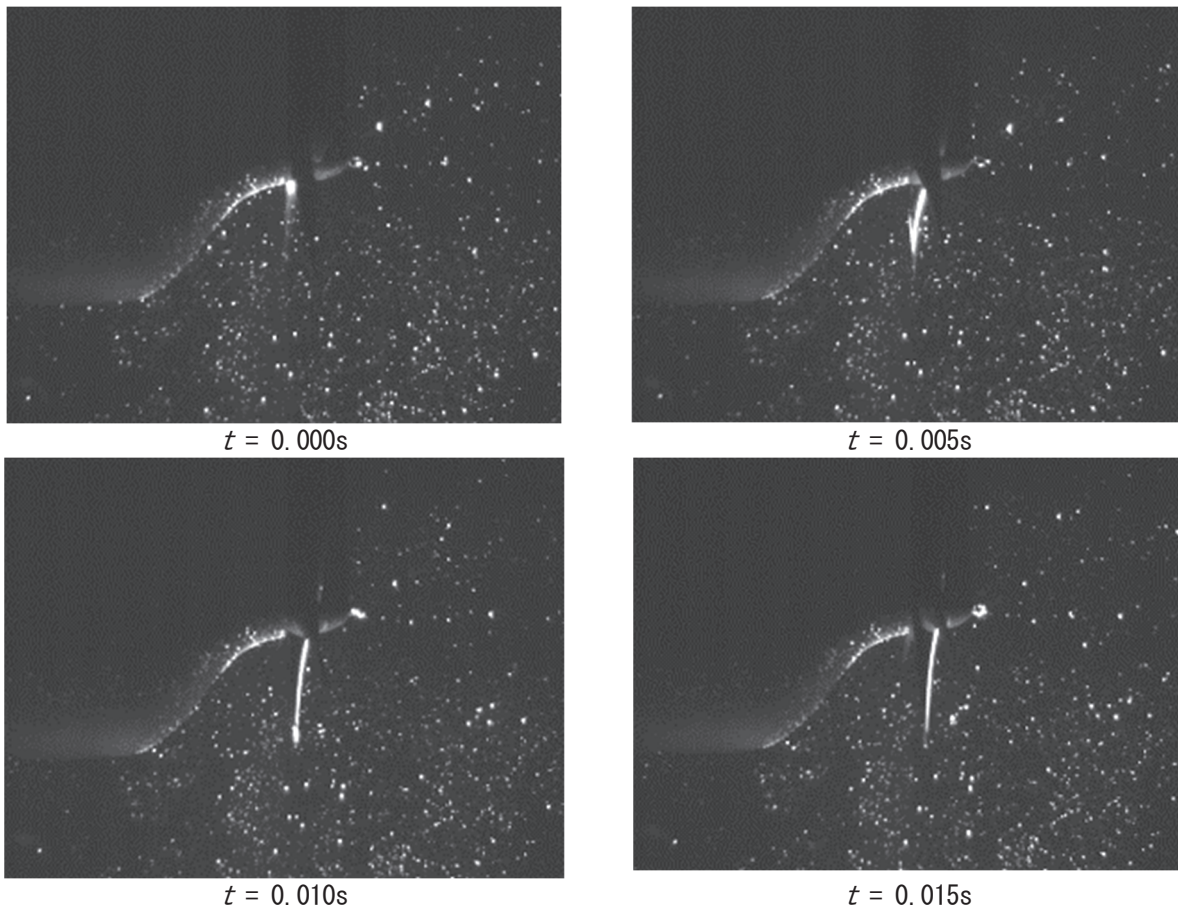


図 4 計測画像(自航試験状態, $\lambda/L_{pp} = 1.1$)

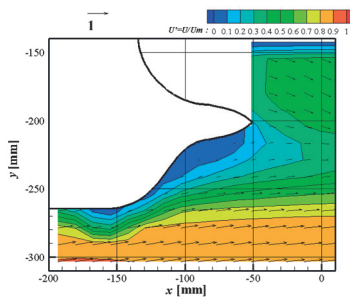
3. 1 平水中流場計測

平水中の抵抗試験状態の平均速度ベクトルと主流方向速度のコンターの計測結果を図 5 に示す. 喫水は満載状態で, 計測結果は空間固定座標での平均値である. なお, 画像サンプリングは 200fps で, 約 5500 枚の画像平均から算出した. 上図(a)が計測断面を C.L.としたとき, 下図(b)が計測断面を $0.7R$ としたときのものである. なお, この計測結果は空間固定座標での平均値である. これから船尾の流場変化が把握できる. C.L.では船尾管上部後方で下降する流れがあることもわかる. また, レーザシートを模型船の下から照射しているため, 船尾管の上部などはレーザが遮られて常に計測することはできない.

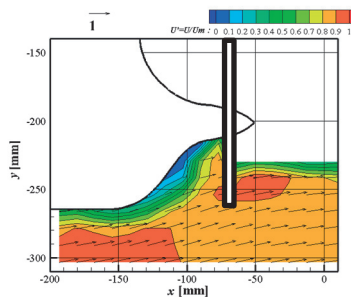
図 6 は平水中自航試験状態における船尾流場の計測結果の一例である．図 5 と同様に(a)は C.L.断面，(b)は C.L. から左舷へ 0.7R の断面の計測結果である．C.L.断面の計測では，プロペラ後方に強い旋回流が存在するために 1 時刻目に画面中に存在した気泡が 2 時刻目にはレーザーシートの厚みを突き抜けて同じ気泡が次の撮影画像中に存在しない場合がある．その場合は，計測することができない．この計測領域は $(-50\text{mm} \leq x \leq 10\text{mm}, -230\text{mm} \leq y \leq -140\text{mm})$ である．この領域の計測結果を図 6 と 7 から除外した．また，プロペラが作動することにより流れが加速され，プロペラ前方に大きな上昇流れが発生する．

次に，自航試験状態と抵抗試験状態の平均流速の差分を図 7 に示す．

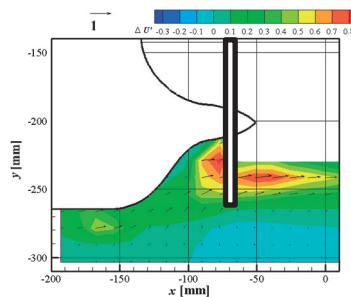
先に述べた通り自航試験状態ではプロペラにより流れが加速されているため，流速が速くなっていることがわかる．



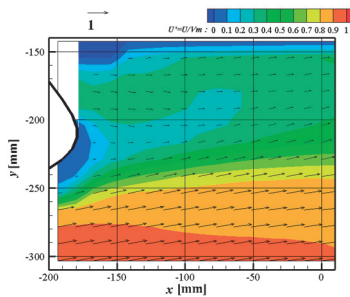
(a) 計測断面：C.L.



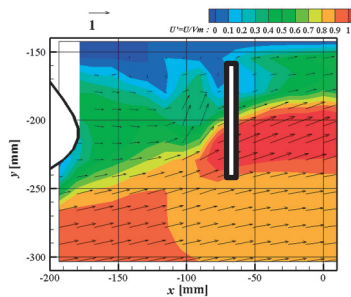
(a) 計測断面：C.L.



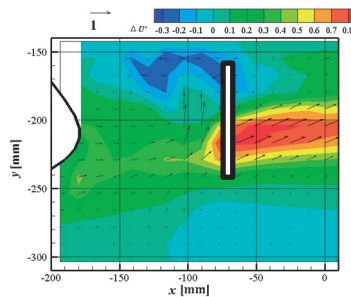
(a) 計測断面：C.L.



(b) 計測断面：0.7R



(b) 計測断面：0.7R



(b) 計測断面：0.7R

図 5 速度ベクトルと主流方向のコンター(平水中抵抗試験状態)

図 6 速度ベクトルと主流方向のコンター(平水中自航試験状態)

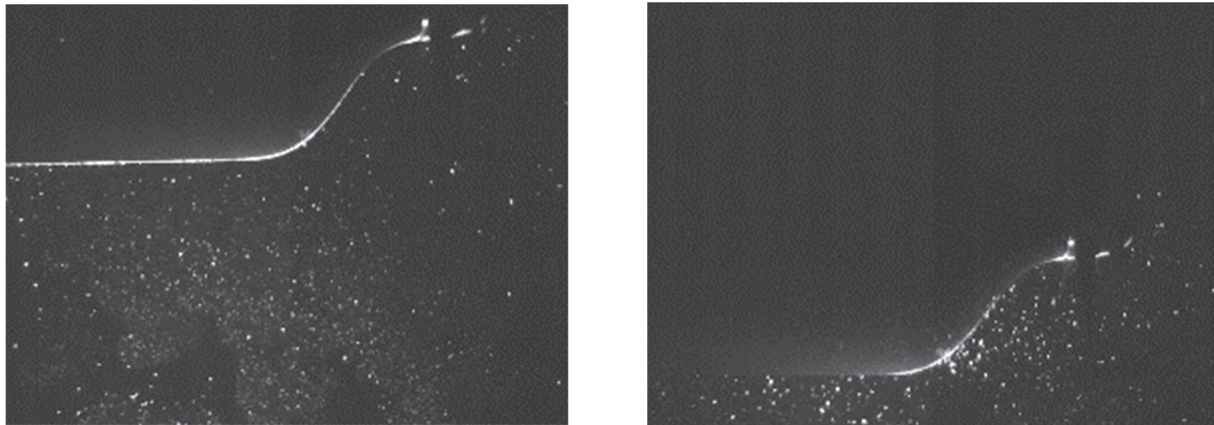
図 7 自航試験状態と抵抗試験状態の差

3. 2 波浪中流場計測

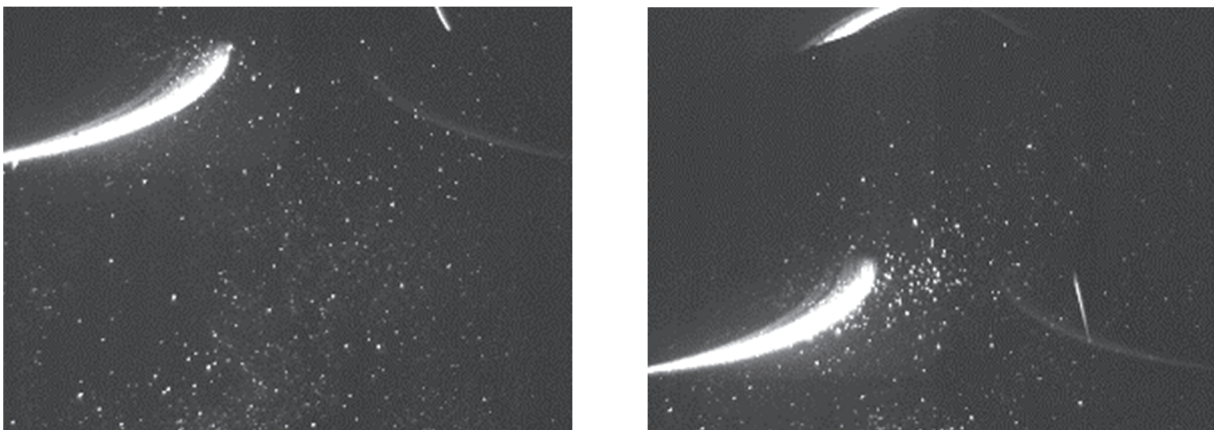
波浪中で自航する模型船の船尾流場の計測を 400m 水槽 (長さ 400m, 幅 18m, 水深 8m) で実施した．喫水状態はバラスト状態で平水中の実船自航点に対応する回転数でプロペラが作動している状態で試験を行った．試験速度は $V_m=0.600\text{ m/s}$ である．波高は実船相当で 2 m, 4 m, 5 m の 3 種類を行った．なお，波長船長比は船体運動のピークである $\lambda/L_{pp}=1.1$ で実施した．

計測画像の一例を図 8 に示す．

波浪中船体運動が船尾流場に及ぼす影響を調べるため，流場計測結果を空間固定座標から船体固定座標に変換した．船体運動は，図 1 の Towing carriage の模型船取り付部に設置している船体運動計測用ポテンシオメータで上下揺，縦揺を計測した．運動計測および PIV 計測の計測トリガーを同時入力することにより計測時間同期を取った．計測した船体運動を用いて空間固定から船体固定へ座標変換を行い，座標原点の x 軸は A.P., y 軸は静止時水面とした．x 軸は船首から船尾方向，y 軸は鉛直上方を正とした．なお，速度は試験速度 V_m で無次元化して示す．



(a) C.L.



(b) 0.7R(左：船尾が最も高い状態、右：船尾が最も低い状態)

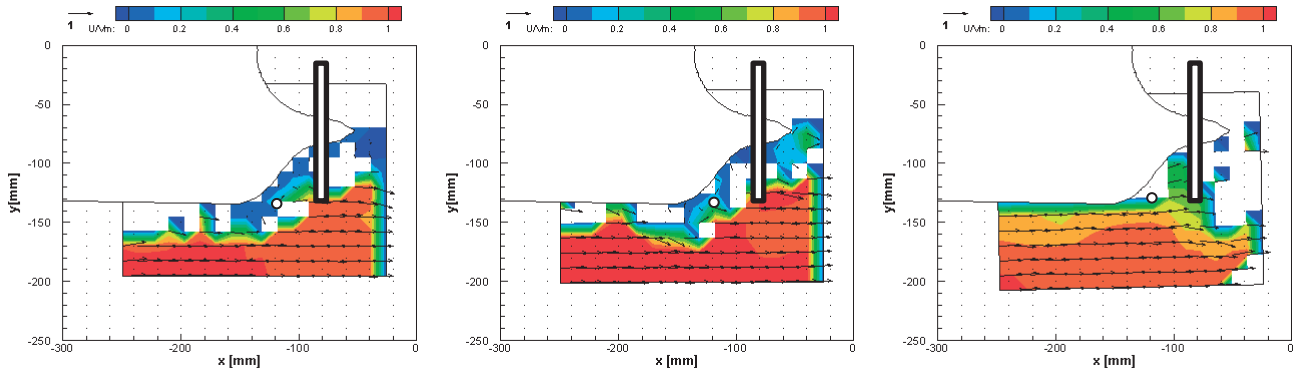
図8 計測画像 (自航試験状態： $\lambda/L_{pp}=1.1$).

波浪中自航状態における船尾流場へ及ぼす波高影響を調べるため、実船換算入射波高を $\zeta w=2, 4$ および 5m と変化させた場合の、瞬時速度ベクトルと主流方向速度のコンターの比較を図9と図10に示す。なお、画像サンプリングは 200fps である。図の(a)が波浪による船体運動で船尾が上昇した状態、(b)が波浪による船体運動で船尾が下降した状態の主流方向のコンターとベクトル図である。また、左が実船相当の波高が 2m の時、中央が実船相当 4m 、右が実船相当の波高が 5m の時である。また、ベクトルが無い部分は速度による制限を設定し、過誤ベクトルとして除去した部分である。

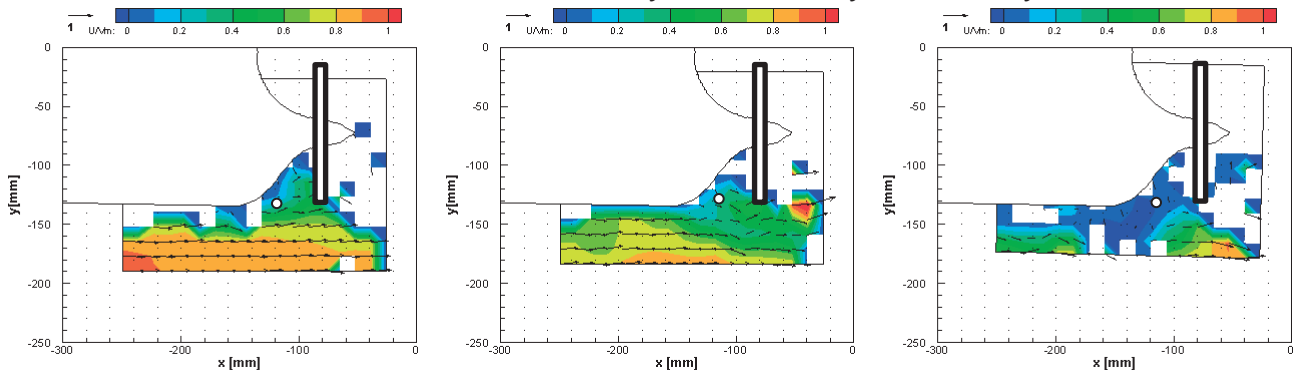
図9から、(a)の状態を比較すると全体的に波高が大きくなると流速の船速に対する比が小さくなっていることがわかる。一方(b)では、波高が大きくなると流速は遅くなることがわかる。

次に、 $0.7R$ の試験結果を図10に示す。こちらもC.L.の場合と同様に、(a)では全体的に波高が大きくなると流速の船速に対する比が小さくなっていることがわかる。一方(b)では波高が大きくなると流速が遅くなっていることがわかる。

コンター図では全体的な傾向はわかるが、数値的に判断することは難しいため、図9及び図10にある白丸の点での時系列流速を評価した。抽出した位置のデータが欠落している場合、その前後の計測値を使用し、線形補間した。抽出した時系列は図11のとおりノイズが含まれているため、傾き制限を掛けた後、30点の移動平均を施し、平滑化して実線で示す。一方、平水中流場計測の場合は定常流れであるため約5500枚の画像から得られた解析結果を平均化処理している。波浪中の船体動揺時の船尾流れは非常流れであり、解析結果は連続PIV計測の1画像セットから得られたデータであり、解析誤差の影響を強く受ける。この影響の回避法として、実験状態の再現性と安定性を評価したうえで、同一状態の実験データの複数平均をとる方法が考えられる。この場合、サンプル画像数の増減による解析結果の変化と安定性を評価しなければならない。これらは、今後の研究課題としたい。

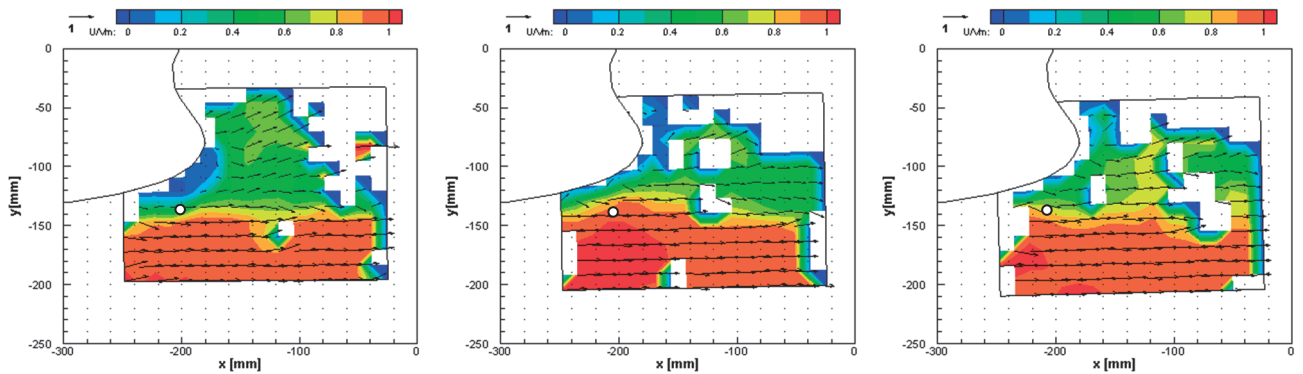


(a) 船尾が最も高い状態の計測結果 (左: $\zeta_w = 2$ m, 中央: $\zeta_w = 4$ m, 右: $\zeta_w = 5$ m)

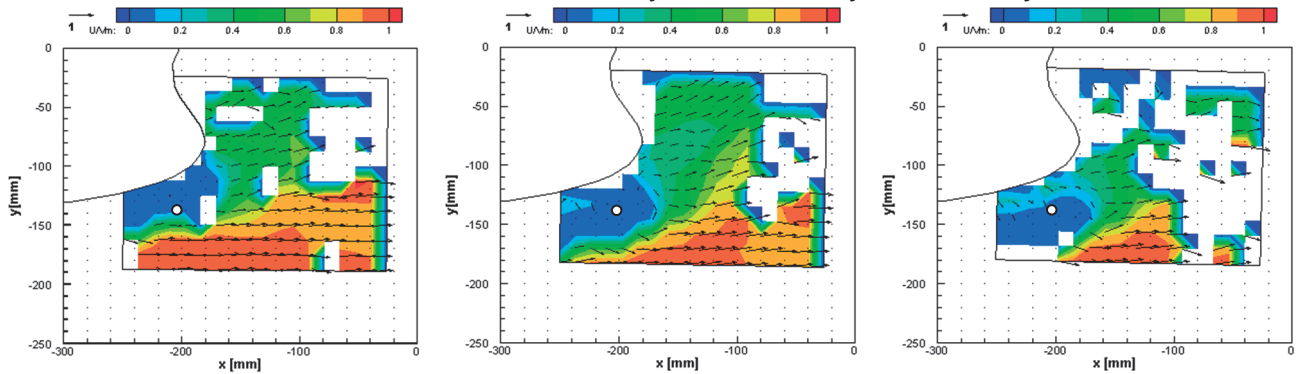


(b) 船尾が最も低い状態の計測結果 (左: $\zeta_w = 2$ m, 中央: $\zeta_w = 4$ m, 右: $\zeta_w = 5$ m)

図 9 瞬時速度ベクトルと主流方向速度のコンター(計測断面: C. L.)



(a) 船尾が最も高い状態の計測結果 (左: $\zeta_w = 2$ m, 中央: $\zeta_w = 4$ m, 右: $\zeta_w = 5$ m)



(b) 船尾が最も低い状態の計測結果 (左: $\zeta_w = 2$ m, 中央: $\zeta_w = 4$ m, 右: $\zeta_w = 5$ m)

図 10 瞬時速度ベクトルと主流方向速度のコンター(計測断面: $0.7R$)

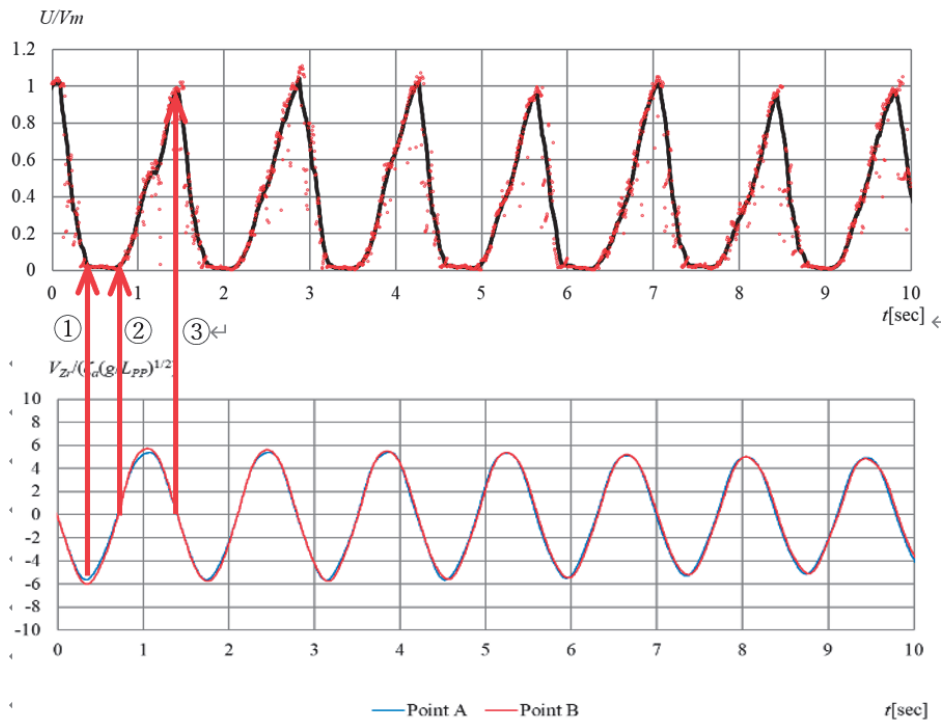


図 11 主流方向速度の時刻歴 (点：計測点，線：補間値)

主流方向の時系列を示した図 11 から、波浪中では流速変動の山の部分が尖り、谷の部分は平坦となっており、正弦的になっていないことが分かる。その理由としては、伴流により船尾流場の上下方向で速度分布が異なり、さらに船体運動に伴って主流に対する船体形状が変化し、船尾伴流も時々刻々と変化するためである。

図 11 の下段は船体の上下方向速度の時系列であり、上段の主流速度の時系列と対比すると、①下降速度最大値（平均喫水位置）で主流方向速度がゼロ、②下降速度ゼロ（船底が最も沈下し下降から上昇へ運動方向転換）の点まで主流方向速度がゼロの状態が続く、②から主流方向速度は③上昇速度ゼロ（船底が最も上昇し上昇から下降へ方向転換）の点まで増加する。この傾向が一般的なものであるかの判断をするためには、より多くの条件での実験結果を蓄積する必要がある。

流速の時系列を平滑化した結果を図 12 及び図 13 に示す。計測断面 C.L.の時系列抽出点を Point A ($x = -122$ mm, $y = -136$ mm)、計測断面 0.7R の時系列抽出点を Point B ($x = -205$ mm, $y = -140$ mm)として、船体にできるだけ近く、解析可能な位置とした。なお、(a)は実船相当の波高が 2m のとき、(b)は実船相当の波高が 5m の時の結果である。また、今回の試験ではカメラの画角の関係でメイン曳航ロッドを船体中央より後方 862mm に設置した。

上下変位は上昇方向を正とし、縦揺角は船首上げを正としている。また、計測した上下変位及び縦揺角を用いて、Point A, B での上下方向相対速度(V_z)を入射波振幅(ζ_a)、重力加速度(g)、垂線間長(L_{PP})を用いて無次元化した結果を図 14 に示す。ここで、入射波振幅は時系列をフーリエ解析して得られる値である。

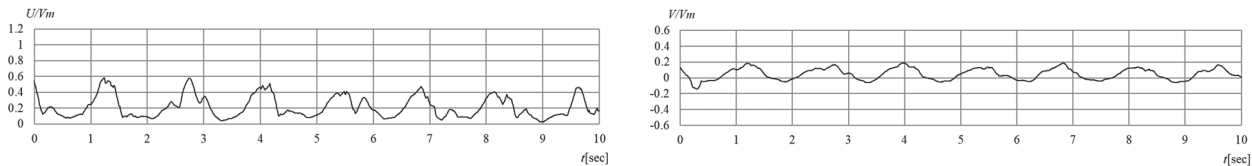
図 12 の C.L.の結果を(a)と(b)で比較すると、波高の高い(b)の時系列の方が x 軸方向速度の最大値、 y 方向速度の振幅が大きくなっていることがわかる。

図 13 の 0.7R の結果についても(a)と(b)で比較すると、C.L.の時と同様に波高 5m の時に、波高 2m の時よりも x 軸方向速度の最大値、 y 方向速度の振幅が大きくなっていることがわかる。

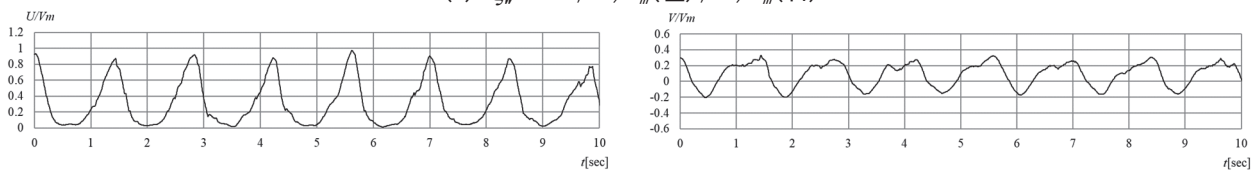
速度の時系列(図 12, 図 13)と V_z の時系列(図 14)から、位相遅れが約 90 度(0.35s)あり、流速が変化していることが分かる。

次に計測した流速の時系列結果を用いて、フーリエ解析を行い、出会い周期での振幅を求めた結果を図 15 に示す。図 15 の(a)が主流方向の速度振幅、(b)が上下方向の速度振幅である。図中の直線は得られた 3 点の速度振幅を用いて、線形近似した結果である。図 15 (a)の主流方向流速の結果から、波高の 1 乗に比例して変化することが分かる。図 15 (b)の上下方向流速の結果から、同様に波高の 1 乗に比例して変化することが分かる。

同様に流速の時系列結果を用いて、平均流速を求めた結果を図 16 に示す。図 16 の(a)が主流方向の平均速度、(b)が上下方向の平均速度である。図 16 (a)の主流方向流速の結果から、Point A では波高の 1 乗に比例して変化するが、Point B については波高による平均流速の変化は見られない。これは平均流速で見ると船体から離れることで船尾伴流の影響が小さくなるためである。図 16 (b)の上下方向流速の結果から、緩やかではあるが波高の 1 乗に比例して変換することが分かる。これは波高が大きくなると相対運動振幅も大きくなりそれが上下方向の平均流速に関係しているためである。

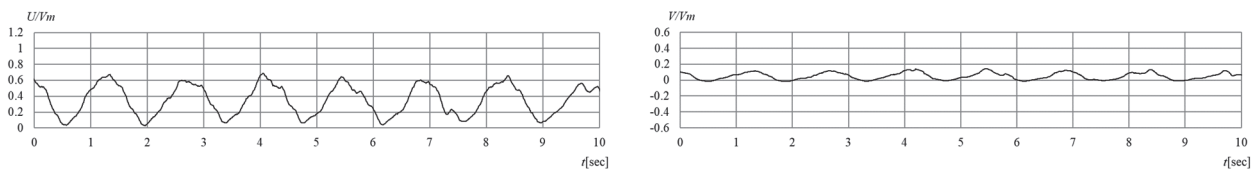


(a) $\zeta_w = 2$ m, U/V_m (左), V/V_m (右)

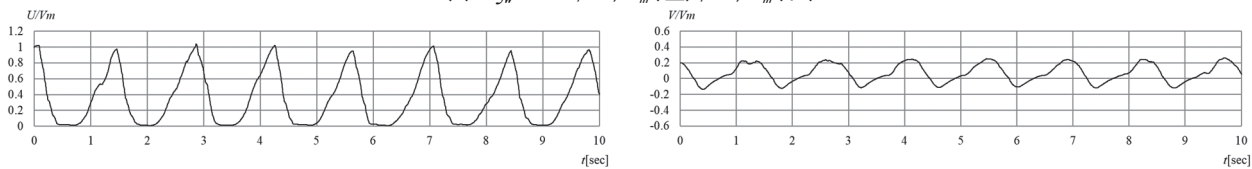


(b) $\zeta_w = 5$ m, U/V_m (左), V/V_m (右)

図 12 速度の時刻歴(Point A, C.L.).



(a) $\zeta_w = 2$ m, U/V_m (左), V/V_m (右)



(b) $\zeta_w = 5$ m, U/V_m (左), V/V_m (右)

図 13 速度の時刻歴(Point B, 0.7R)

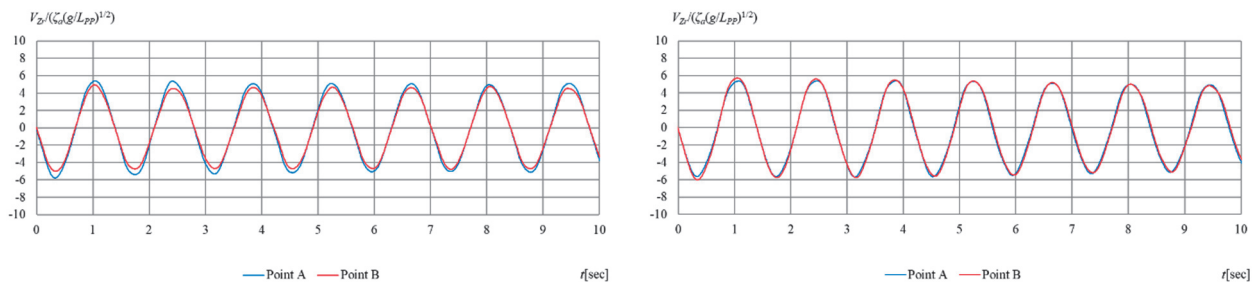
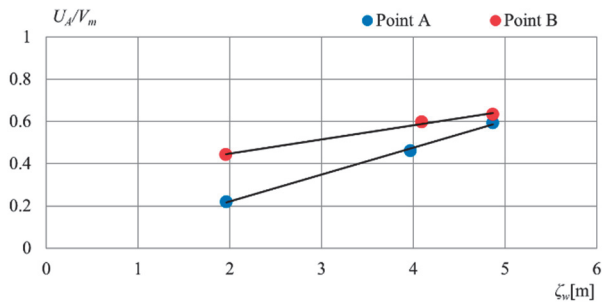
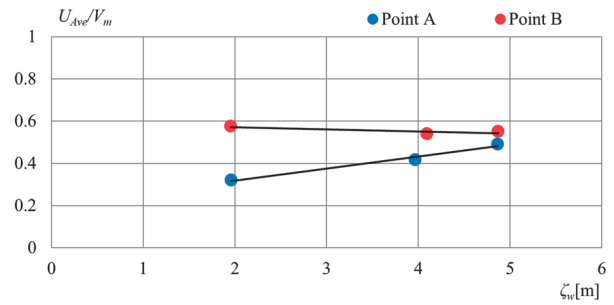


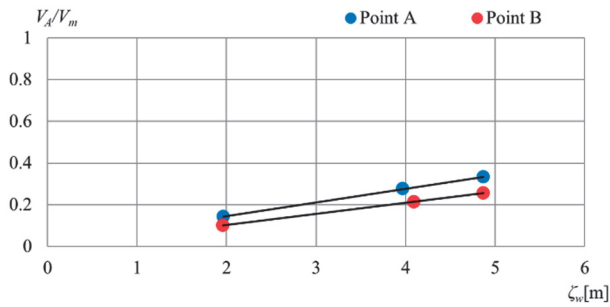
図 14 上下方向相対速度(左: $\zeta_w = 2$ m, 右: $\zeta_w = 5$ m)



(a) 主流方向速度

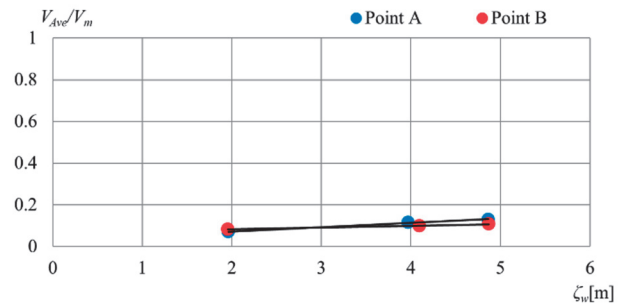


(a) 主流方向速度



(b) 上下方向速度

図 15 速度振幅と波高の関係



(b) 上下方向速度

図 16 平均速度と波高の関係

4. 結言

マイクロバブルをトレーサに用いて、模型船周りの流場計測を行い、船尾流場と波振幅の関係について調査した。本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) マイクロバブル PIV システムにより、抵抗試験状態、自航試験状態の船尾流場を解析し、双方を比較することで、プロペラによる吸込みの影響を把握することが可能である。
- (2) マイクロバブル PIV システムにより、波浪中の船体と波との相対運動により船尾流場が変化する様子を把握することが可能である。
- (3) バラスト状態の VLCC 模型を対象に、波長船長比 1.1 の波浪中でマイクロバブル PIV 試験を実施した結果、主流方向および上下方向の速度振幅及び平均速度は波高の 1 乗に比例して変化することが分かった。ただし、船体から離れた $0.7R$ では主流方向の平均速度は波高の影響を受けないことが示された。

今後、本計測法の改良（時・空間分解能等）や精度・適用性検証を行い、波浪中で運動する船の船尾流場の定性的な諸性質とともに、船尾流場の定量的な考察を行いたい。

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: 船用省エネ装置 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, Kim Ho, 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) 剣地利昭, 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) 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.463-464
- 8) 大場弘樹, 星野邦弘, 辻本勝 : 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—, 海上技術安全研究所報告, 2019, 第 19 巻 第 1 号 pp. 91-100.