# 実船実験用ボイド率計の開発

## Development of Void Fraction Measuring Device for Full-scale Test

by Akihiko Ikemoto, Student Member Hiroharu Kato Member Yuki Yoshida, Member

#### Summary

An optical measurement device of microbubble void fraction was developed especially aiming at the full-scale test. The strut with a side window was installed on the hull surface of M.S. Seiun-maru.

A CCD camera in the strut took pictures of microbubbles through the side window under a stroboscopic light. The image of microbubbles was processed by a PC using a picture processing software.

The void fraction distribution has a peak at the distance of 5-10mm from the hull surface. The void fraction also changed much according to the ship speed. Such the data is invaluable for the research on the turbulent frictional drag reduction of a ship by microbubbles.

## 1. 緒 言

近年、地球環境保全の技術に対する要求がますます高 くなってきている。船舶に求められる地球環境保全技術 の内、エネルギー効率向上の技術は船舶の高性能化の技 術でもあり、これまでも多くの研究がなされている。

特に船体抵抗低減の研究は造波抵抗低減の研究、圧力 抵抗低減の研究を経て、摩擦抵抗低減の研究にまで及ん でいる。摩擦抵抗低減の研究として、機械工学、航空学 の分野でリプレット、LEBU、ポリマー等の研究が挙げ られる。船舶についてはマイクロバブル<sup>1)~6)</sup>、気膜層<sup>7)</sup> <sup>~9)</sup>などが有望な方法として研究されている。特にマイク ロバブルは大きな抵抗低減効果が見込めること<sup>10)11)</sup>、ピ ッチングやローリングなどの船体動揺の影響を受けに くいと考えられることから、近年研究が活発に行われて

\* 東洋大学大学院工学研究科

- \*\* 東洋大学工学部
- \*\*\* 石川島播磨重工(株)船舶海洋事業本部

原稿受理 平成 14 年 1 月 10 日 春季講演会において講演 平成 14 年 5 月 15, 16 日 いる。

特に平成 13 年 9 月に実施された日本造船研究協会 SR239 研究部会(部会長:鈴木敏夫 大阪大学教授)に よる実船実験は、世界初のものとして注目を集めた。

本報告はこの実船実験に使用するために開発された ボイド率計に関するものである。船体表面の境界層中に どのようなマイクロバブルが存在し、局所のボイド率は どれほどか、さらにボイド率の空間的、時間的分布はど のようなものかを計測することは、マイクロバブルによ る摩擦抵抗低減のメカニズムを知る上でも、実用のため にも重要である<sup>12)13)</sup>。

実船実験は独立行政法人「航海訓練所」所属の背毀丸 を使用して行い、マイクロバブルは船首部から空気泡を 噴出することで実現した。実験の全般については他の報 告に譲ることとし、ここではポイド率計にしぼって報告 する。

#### 2. 実験装置

## 2.1 ボイド率計について

43

44

水中の気泡分布やボイド率の計測は機械工学の分野 で特に管内流について多く行われている。計測法として は気泡により電気抵抗やキャパシタンスが変化するこ とを利用したもの<sup>10)</sup>、電極式のプローブの先端に気泡が 接した時、電気抵抗が変化することを利用して、1ヶ1 ヶの気泡を計測するもの、ステレオ写真を撮り気泡形状 を推定するものなどがある。ただ気泡2相流中の気泡は その径が比較的大きく(直径数 mm)、その手法をマイ クロバブル(直径 1mm 以下)に直接適用することがで きない場合も多い。

実験室レベルの実験で行われるマイクロバブルの計 測法には、一般に次の3つの方法が使われている。

- a) レーザーやストロボを使い近接写真を撮り、それを 解析する方法<sup>14)15)</sup>。
- b) 気泡を含む水をそのまま吸引して、気相と液相を分離して、その量を計測する方法<sup>2)3)6)</sup>。
- c) 光ファイバーの先端に気泡が接したとき、光の屈折 率が変わることを利用した方法<sup>2)</sup>。

実船実験においては、簡単でロバストな方法が望まし い。上述の方法で b),c)は複雑であり実船実験に適してい るとはいえない。特に複雑なキャリブレーションを行う 必要があるものは実船実験での限られた条件と時間を 考慮すると採用することができない。また a)の方法では、 キャリブレーションを行うことなしに気泡の大きさと 個数分布を計測することができる。今回の実船実験では、 a)の計測方法を採用した。

実船実験は新造時にあらかじめ実験を行うことを考 慮して計測器の取り付けを行っておく場合と(一番簡単 には外板に窓を開け、船内から観測することが考えられ る。)、既存船にドック期間を利用して計測器を取り付 ける場合がある。本実験は後者の場合で、船体に穴を開 けるなどの工事は一切行うことが出来なかったので、そ の構成や構造もその制限を考慮したものになった。

またマイクロバブルが境界層のどこにあるか、すなわ ち境界層の厚さ方向のマイクロバブルの分布が研究の 上から重要な情報である。またバブル径も抵抗低減効果 に影響があることが考えられ、是非計測すべき項目であ る。

以上述べた条件を考慮し、船体外板に直角に翼形状の ストラットを取り付け、その側面に窓を開けストラット 内部の CCD カメラとストロボライトでマイクロバブル を観測するタイプのボイド率計を開発することにした。 ストラットを取り付けることにより、外板に沿った境界 層流れは乱され、観察したバブルの分布はストラット自 身の影響を受ける。この影響の大きさを知るためストラ ットまわりの流れの CFD 計算を行い、影響の少ないス



Photo 1 Strut



Fig.1 Measurement principle

トラット形状を選定した。後に詳細に述べるように観察 したバブル分布にストラット自身の影響はほとんどな い。

またストラット側面の窓はその構造上、外板直下の流 れを見ることが出来ない。すなわち、そのままでは境界 層底部のボイド率を計測することが出来ない。一方研究 の上からは境界層底部のボイド率分布の計測は是非と も必要である。そこでストラットの周囲にフェアリング を取り付け、外板に沿った流れが滑らかに観測窓の所に 来るようにした。

2.2 ストラット

設計・製作したボイド率計は側面の窓が片側のみのも の、窓が両側面にあるものの2種類である。CFD計算 による船体周りの流れ分布を参照し、出来るだけ外板付 近の流線にそった角度にストラットを取り付けるので あるが、流線の変化の大きい箇所では数度の誤差が生じ ることが考えられる。この時ストラットの両側面の窓か ら、両側を流れるマイクロバブルを同時に観測できれば、 取り付け角度の誤差による影響は補正出来る。

SS8 に取り付けるボイド率計は、窓をストラット両側 に設け、左右舷で気泡の観測が行えるようにした。しか しながら、両側に窓のあるタイプはストラットの幅が大 きくなり、SS6 に取り付ける窓が片側だけのものより流 れを乱す影響は増大してしまう。

#### 2.3 ボイド率計の構造

実船実験では、船速が 21kn 程度の条件での測定が行 われる。そのため、ぶれのない気泡静止画像を撮影する ためには、カメラのシャッタースピードを速くして撮影 するか、ストロボ光源を使用し撮影を行うという2つの 方法が考えられる。シャッタースピードを速くする方法 では、光源をかなり明るいものにしなければならない。 しかし、光源を明るくすると、発熱も大きくなり、熱に よるカメラなどへの影響を考慮する必要がある。したが って、この実船実験ではストロボ光源を使用することに した。

また、カメラとストロボ光源を収めるストラットは、 前にも述べられたように流れを乱さないようにするた め、薄く・小さいものが望ましい。そのため、カメラは CCD カメラ(IK-M43H 東芝社製)と LED ストロボ

(KDSB・50/11W・K 京都電機器社製)を採用した。CCD カメラと LED ストロボは Photo 1 に示すように 400× 100×55mm のストラット内に設置した (両側用のスト ラットは 400×100×70mm)。CCD カメラに関しては、 そのまま設置してはストラットの幅 (厚み)を大きくし なければならない。そのため Photo 1 に示すようにミラ ーを使用することにより、観測窓に対して CCD カメラ を平行に設置し、ストラットの幅を小さくできるように した。

Fig.1 にボイド率計の概要を示す。以下、実験結果の 解析に用いた片側用ボイド率計(SS6に設置)について 述べる。ボイド率を求めるためには、撮影された気泡画 像の流体体積が解らなければならない。そのため Fig.1 に示すように観測窓の外側に遮蔽板を取り付け、撮影深 度を10mm に限定することにより、一定流体体積内の気 泡を撮影するようにした。また光源である LED ストロ ボは、光を直接気泡に当ててしまうと、ハレーションを 起こしてしまい気泡をうまく撮影できない。そのため遮 蔽板の一部を鏡面状にして 45°傾け、LED ストロボの 光を気泡下部から当てハレーションを起こさないよう にした。

気泡の画像データは、ビデオキャプチャーボード
 (PK-VS/AG200 NEC 社製)を使い、動画データ(mpeg2
 形式) で PC に取り込んだ。

2.4 フェアリング

フェアリングは厚さ 1mm のステンレス板を使い、船 体外板になめらかにつながるように Fig.2 に示すように 製作した。

#### 3. 実船実験



Fig.2 Strut with fairing

 Table 1
 Principal particulars of the training ship

S	eiun-maru		
全長	116.0 m	総トン数 588	4 トン
長さ	105.0 m	排水量 6325	<b>5.4</b> トン
幅	17.9 m	最大速力 21	.0 ノット
深さ	10.8 m	航海速力 19	0.5 ノット
計画満載喫水	6.3 m	航続距離 1500	)0 マイル
連続最大出力	10500PS	常用出力 945	50 PS



Photo 2 Seiun-maru



Fig.3 Computational result of void fraction distribution

## 3.1 青雲丸主要目

実験は 2001 年 9 月 13~15 日、独立行政法人「航海訓 練所」所属の練習船「青雲丸」(photo 2)を使用し、伊豆 諸島東側の海域で行われた。Table 1 に青雲丸の要目を示 す。

3.2 ボイド率計の取り付け位置

Fig.3 は CFD 計算により推定したボイド率分布計算 結果である。マイクロバブルは船首付近の2ヶ所から放 46

#### 日本造船学会論文集 第191号

 Table 2
 Void-measuring installation point

装置	長手方向	幅方向	高さ方向
	x (SS)	y (mm)	z (mm)
装置 No.1	8	350	0
装置 No.2	6	260	0



Fig.4 Void-measuring installation point



Photo 3 Void-measuring device attached on the bottom

出され、船側から船底へ回り込んでいる。この計算結果 を基にボイド率が大きい場所にストラットを取り付け ることにした。

ボイド率計は Table 2、Fig.4 に示すように、青雲丸 の船底 SS8 と SS6 の 2 ヶ所に設置し計測を行った。 Photo 3 は船底に取り付けたボイド率計の写真である。

# 3.3 実験条件

実験は船速 14~21kn の条件で、50 点計測を行った。 マイクロバブル(空気)は両舷各 2ヶ所のマイクロバブ ル吹き出し部から吹き出され、最大で合計 110m^3/min である。最大吹き出し量(MAX)と 1/2 吹き出し量 (1/2MAX)の、2種の条件で実験を行った。

## 4. 解析

## 4.1 解析手順

まず動画編集ソフト (Ulead Video Studio 5 SE Basic



Fig.5 Picture of microbubbles





UleadSystems 社製)を使用し、動画ファイル (mpeg2 形式)から、Fig.5 に示すような静止画像ファイル (bmp 形式) に変換を行う。そして、静止画像ファイルを、画 像処理ソフト Cosmos32(ライブラリー社製)を使用し、 画像の解析しボイド率を求める。

## 4.2 画像解析方法

画像解析は幅 25mm で、深さ方向に船底から 5mm ず つ 30mmまでの範囲で行い、気泡画像 150 枚の解析結 果の平均をボイド率とした。

解析の手順は以下のようである。

- (1) 気泡を白色、背景を黒色に二値化する。(Fig.6)
- (2) 気泡の面積を計測する。



Fig.7 Error caused by overlapping



Fig.8 Computational grid

(3) 面積の値から等価円直径をもとめる。

(4) 等価円直径を気泡の直径として体積を求める。こ のとき、気泡数が少なく気泡が一ヶ一ヶ分かれている場 合は、この作業のみでも正確な局所ボイド率が求められ る。しかし、気泡数が多く複数の気泡が重なり合った場 合、解析ソフトは重なり合った複数の気泡を1つの気泡 と誤認してしまう。Fig.7 は直径1mmの気泡が2つ(合 計体積1.04mm^3)のとき、気泡の重なり方によって解 析結果の体積がどのように変化するのかを示したもの である。気泡が完全に重なっている場合(c=0)から、 気泡が接している場合(c=1)までの状態がランダムに 起こるとすると、体積の平均は1.04mm^3に近い値にな ることがわかる。したがって2つの気泡が重なり合った 場合には多数のデータの平均をとれば、ほぼ正確な局所 ボイド率が得られる。

4.3 装置周りの流線計算による補正

ボイド率計自身とフェアリングが、気泡の流れにどう 影響するのか、装置のまわりの流れを CFD(非構造格



Fig.9 Secondary flow vectors at the leading edge of strut (x=0mm)



Fig.10 Secondary flow vectors at the center of strut (x=135mm)



Fig.11 Secondary flow vectors at the tailing edge of strut (x=400mm)







子による汎用熱流体解析プログラム Star CD) により 推定した。 計算ケースは、ストラット:幅70mm (ケ ース1) および幅 55mm (ケース2) の2種類、主流速: 7 m/s および 10m/s の2種類で行った。計算領域は、上 流がストラット中央より前方 1600mm、下流はストラ ット中央より後方 2600mm、上方は船底より 600mm、 側方を中央縦断面より 1300mmとし、要素数約44万 点、乱流モデルはk –  $\epsilon$ モデルを使用した。Fig.8 に計 算格子を示す。上流境界での条件は、ストラット中央よ り 42m上流から境界層が発達しているとして、上流境界 位置での流速分布を 1/7 乗則より与えた。したがって 相当するレイノルズ数は、7m/s で約 3×10<sup>8</sup>である。

Fig.9 は x=0mm (前部中央横断面) におけるベクトル 図である。ストラットの排除効果のため、ストラット上 部で上向きのベクトルが見られるが、下部の流れはスム ーズである。Fig.10 の x = 135mm(観測窓中央横断面) では、目立った 2 次流れもなく流れは良好である。Fig.11 x=400mm (後部中央横断面) では縦渦が見られるが、 船体に比べ小さなものであり船体周りの流れはほとん ど乱されることはないと考えられる。

Fig.12 はストラットまわりの流線を示したものであ る。ストラットの排除効果のため、ストラットの前部で は流線が上向きになり、また後部では下向きになってい ることがわかる。しかし、ボイド率計測に重要なストラ ットの下部では、ほぼ平行な流線になっており問題はな いと考えられる。

Fig.13 は流線の x=135mm (観測窓中央部)と、x=-128mm (ストラット前方のフェアリング部)とストラ ットの無限前方での高さの位置関係を示したものであ る。x=-128mm においては直線に近い単調増加の傾向 が見られ、値は無限前方における位置の方が高めを示し ている。観測部分である x=135mm においては、流線の 高さ約 30mm までは x=-128mm と同様、直線に近い 単調増加を示し、そこから更に高くなると上に凸の傾向



Fig.13 Relation between stream lines

が出てきている。この上に凸の傾向はストラットの3次 元形状影響によるものと考えられる。しかし、ボイド率 の解析範囲は高さ30mm以内であるため、このストラッ トの3次元影響はほとんどないと考えられる。このグラ フ(Fig.13)の数値を用いて、フェアリングによる縮流影 響(およびストラットによる3次元形状影響)の補正を 行った。

#### 5. 結果

#### 5.1 ボイド率

Fig.14、15、16 に、解析結果の一例を示す。グラフの 横軸(船底からの距離)は、補正前と補正後の数値を示 している。

どの条件でも、船底から 5~10mm(補正前)の値が ピークを示している。予想に反して船底(0mm)付近で は、比較的小さな値となった。また図に見られるように 船速 19kn でボイド率が最大となり、それより流速が大 きくても小さくてもボイド率は減少している。図には示













さないが船速 14kn では気泡は、ほとんど見られなかった。

5.2 気泡直径・個数・体積分布



Fig.17 Distribution of the number and volume (v=19kn)

先に述べたようにこのボイド率計では気泡直径、個数の 計測が容易に出来る。Fig.17 に気泡の個数・体積分布の 一例を示す。個数分布をみると直径 0.5mm、体積分布 では直径 1mm のものが最も多く分布している。Fig.17 は船速 19kn での計測結果(Fig.15 と同じ)であるが、船 速 17kn、21kn での計測結果とほぼ同じ傾向を示 している。気泡直径が抵抗低減効果にどのように影響す るかは実用上からも重要であり、今後このような計測を

6. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

多く行うことが必要である。

 CCD カメラ、LED ストロボを用いることにより、 実船実験においてもボイド率を計測することができた。
 CFD により装置周りの流れを推定した結果、流れの 乱れによる問題はなく、またフェアリングによる縮流の 影響も補正することができた。

3) ボイド率は船底から 5~10mm(補正前)の位置でピ ークを示しており、船底(0mm)付近での値が予想より 低くなっている。

4) 船速 19kn のとき、ボイド率が最も高い値となった。 5) 気泡分布は、個数分布では直径 0.5mm が、体積分布 では直径 1mm が最も高い値となった。

謝辞

この研究は日本造船研究協会 SR239 研究部会の一環 として実施された。ご指導いただいた鈴木敏夫委員長を 始めとする委員各位に謝意を表します。また、装置周り の流線推定において CFD 計算結果を提供していただい 50

日本造船学会論文集 第191号

た石川島検査計測(株)の静谷 建 氏に厚くお礼申し上げ ます。

## 参考文献

- McCormick ME, Bhattacharyya R (1973) Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. Nav Eng J 85:11-16
- 2) Guin M M, Kato H, Yamaguchi H et al (1996) Reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel. J Mar Sci Technol 1:241-254
- 高橋孝仁、角川明、児玉良明(1997)マイクロバ ブルによる摩擦抵抗低減の流れ方向分布、日本造 船学会論文集、Vol.182, pp.1-8
- 5) Yoshida Y, Takahashi Y, Kato H et al (1998) Study on the mechanism of resistance reduction by means of micro-bubble sheet and on applicability of the method to full-scale ship, 22<sup>nd</sup> symposium on Naval Hydrodynamics, Washington
- 川北千春、高野真一(2000)流れ方向圧力勾配と 曲面形状がマイクロバブルによる摩擦抵抗低減 効果に及ぼす影響、日本造船学会論文集、Vol.188, pp.11-21
- 7) 佐藤徹、中田崇、竹下理人、土屋好寛、宮田秀明 (1997) 空気潤滑による模型船の摩擦抵抗低減実 験、日本造船学会論文集、Vol.182, pp. 121-128
- 8) 徳永純一郎、延永尚志、中谷龍男他 (1998) 撥
   水性表面上に形成する空気膜を利用した流体摩
   擦抵抗の低減(第1報)、日本造船学会論文集、
   Vol.183, pp. 45-52
- 9) Fukuda K, Tokunaga K, Nobunaga T et al (1999) Frictional drag reduction with air lubricant over super water repellent surface (2<sup>nd</sup> report) J. Society of Naval Architects of Japan, Vol.186, pp. 73-81
- Bogdevich VG, Evseev AR, Malyuga AG et al (1977) Gas saturation effect on near-wall turbulence characteristics. Second International Conference on Drag Reduction, Cambridge, England, BHRA, pp25-37
- 11) Madavan NK, Deutsch S, Merkle CL (1985)

Measurements of local skin friction in a microbubble-modified turbulent boundary layer. J Fluid Mech 156:237-256

- 12) Yoshida Y, Takahashi Y, Kato H et al (1997) Simple Lagrangian formulation of bubbly flow in a turbulent boundary layer (bubbly boundary layer flow), J Marine Science and Technology, Vol.1, pp.73-81
- 13) Kato H, Iwashina T, Yamaguchi H et al (1999) Effect of microbubbles on the structure of turbulence in a turbulent boundary layer. J Mar Sci Technol 4:155-162
- 14) 角川明、川島英幹、高橋孝仁、児玉良明 (1997) マイクロバブルの分布と抵抗低減、70回船舶技術 研究所研究発表会講演論文集、
- 15) 森口泰敬、加藤洋治、伊藤裕樹、橋本陽子(2001) マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果に及ぼす気 泡径および局所ボイド率の影響、日本機学会2001 年度年次大会講演論文集(II), pp. 261-262