実船実験用ボイド率計の開発

学生員 池本 晶彦*
正員 吉田 有希***

正員 加藤 洋治**

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、航空学の分野でリブレット、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^{1)~6)}、気膜層^{7)~9)}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¹⁰⁾¹¹⁾、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いる。

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¹²⁾¹³⁾。

実船実験は独立行政法人「航海訓練所」所属の青雲丸を使用して行い、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、ここではボイド率計にしばって報告する。

2. 実験装置

2.1 ボイド率計について

* 東洋大学大学院工学研究科

** 東洋大学工学部

*** 石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部

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¹⁰⁾、電極式のプロープ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。

- 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¹⁴⁾¹⁵⁾。
- 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²⁾³⁾⁶⁾。
- 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²⁾。

実船実験においては、簡単でロバスタな方法が望ましい。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ため、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。

Fig.2 Strut with fairing

Table 1 Principal particulars of the training ship Seiun-maru

全長	116.0 m	総トン数	5884 トン
長さ	105.0 m	排水量	6325.4 トン
幅	17.9 m	最大速力	21.0 ノット
深さ	10.8 m	航海速力	19.5 ノット
計画満載喫水	6.3 m	航続距離	15000 マイル
連続最大出力	10500PS	常用出力	9450 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

3. 実船実験

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

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 $110\text{m}^3/\text{min}$ である。最大吹き出し量 (MAX) と $1/2$ 吹き出し量 ($1/2\text{MAX}$) 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

Fig.6 The analyzed picture

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々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 ($x=0\text{mm}$)

Fig.10 Secondary flow vectors at the center of strut ($x=135\text{mm}$)

Fig.11 Secondary flow vectors at the tailing edge of strut ($x=400\text{mm}$)

Fig.12 Streamlines along strut

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 10 m/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 4 4 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 3×10^8 である。

Fig.9 は $x=0$ mm (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 $x=135$ mm (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 $x=400$ mm (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、ストラットの前方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 $x=135$ mm (観測窓中央部) と、 $x=-128$ mm (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。 $x=-128$ mm 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 $x=135$ mm においては、流線の高さ約 30mm までは $x=-128$ mm 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

Fig.14 Distribution of local void fraction
(v=17kn, 1/2MAX)

Fig.15 Distribution of local void fraction
(v=19kn, 1/2MAX)

Fig.16 Distribution of local void fraction
(v=21kn, 1/2MAX)

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多く行う必要がある。

6. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 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。
- 2) 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

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

- 1) 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
- 3) 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
- 4) 渡辺修、増子章、白勢康 (1998) 長尺模型船を用いた微小気泡吹き出しによる摩擦抵抗低減実験、日本造船学会論文集、Vol.183, pp.53-63
- 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, 22nd symposium on Naval Hydrodynamics, Washington
- 6) 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 (2nd report) *J. Society of Naval Architects of Japan*, Vol.186, pp. 73-81
- 10) 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