船舶の摩擦抵抗低減デバイスとしての マイクロバブルの研究動向*

児玉良明, 高橋 孝仁, 牧野 雅彦, 北川 石英, 堀 利文**

1. はじめに

マイクロバブル(microbubbles), すなわち"微細な気泡"は様々な分野で利用法が研究されている。1つは魚や貝の養殖あるいは水質浄化のために直径数ミクロンから数十ミクロンの気泡を水中に注入するものであり^{[1][2]}, もう1つは人体の超音波診断のための造影剤として直径数ミクロンの安定した気泡を血液中に注入するものである^[3]。さらに, 水中を進む物体表面上に発達する乱流境界層中に直径0.数ミリの気泡を注入し物体表面が水から受ける摩擦抵抗を低減させるものがある^[4]。本解説では, 最後に挙げた摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブルについて, 船舶への実用化に向けた研究の動向を紹介する。

2. マイクロバブルの特徴

まず, マイクロバブルの例を示す。図1(a)に海技研の実験用小型流路の全体を示す。試験部は100×15×3000mmの透明アクリル製であり, 上流端から約1m位置で気泡が上面から注入される。(b), (c)図に気泡注入部と発生気泡を示す。空気は多孔質板を通して注入され, 水流のせん断力により千切れて気泡となる。(c)図では発生気泡が白い層状に下流(右方向)に流れる様子が見られる。多孔質板は公称孔径2~10 μ mのものが用いられるが, 発生気泡径は孔径に殆ど依存せず0.2mm~1mm程度である。図2に側面から撮影した気泡を示す。左端に1mm単位が目盛りが示されている。 x_a は吹き出し位置からの距離であり, t_a は相当空気厚さと呼ばれ, 吹き

出し空気量 Q_a , 吹き出し幅 B_a , 流れの平均流速 U を用いて

$$t_a \equiv \frac{Q_a}{B_a U} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

で定義される。気泡は上壁面近くに集中し, 壁面せん断応力を低減させる。

(a) 全体図

(b) 気泡注入部断面

(c) 発生した気泡

図1 海技研のマイクロバブル実験用小型流路

図2 気泡写真。孔径2 μ m, $U=7\text{m/s}$, $x_a=1\text{m}$, $t_a=1.3\text{mm}$ 。

*原稿受付 平成15年12月2日

**非会員 海上技術安全研究所 (三鷹市新川6-38-1)

マイクロバブルは大きな摩擦抵抗低減効果をもつ。川北ら^[5]はキャビテーション水槽の試験部内に水平に平板を設置し、配列多孔板(直径1mmの孔が多数開けられている)から気泡を吹き出し下流で壁面せん断応力を計測した。図3 (a)に $x_a=0.5m$ における計測結果を示す。縦軸は気泡状態と単相(気泡無し)状態の壁面せん断応力の比を、横軸に t_a を示す。低減効果は吹き出し空気量と共に線型に増加し、最大40%に達している。流速への依存性は見られない。Madavanら^[6]は吹き出しの直下流で計測し、最大80%の低減効果を得た。(b)図に $x_a=1.5m$ 位置での計測結果を示す。低減効果は $x_a=0.5m$ 位置と比べてやや減少し、また高速ほど減少している。これは、下流ほど高速ほど乱流によって気泡が境界層内に拡散し、壁近傍の気泡密度が低下するためと考えられる。

図3 マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果^[5]

マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果は、空気吹き出し位置から下流に、減少しながらもかなり長く持続する。筆者らは先ず図4に示す幅1m長さ12mの長尺平板模型船を作り、次にその平行部を増設して長さを50mにし、大型曳航水槽で最高速

度7m/sで曳航し、船首から3mの位置から多孔質板(PP), 配列多孔板(AHP), スリット板(SP)の3種類の板から気泡を吹き出した^[7]。SPには5mmの隙間が開けられている。図5(a)に壁面せん断応力の流れ方向分布を示す。低減効果は下流ほど減少するが計測距離のほぼ全長(約45m)にわたって持続している。AHPよりもPPの方が低減効果大きい。この理由は未解明であるが、気泡分布に違いが生じているためと思われる。(b)図に示す模型船の全抵抗も気泡により低減しており、摩擦の低減が全抵抗の低減に直結していることが示されている。5m/sと7m/sの2つの速度状態では、やはり高速の方が低減効果が小さい。SPはAHPよりも低減効果が大きく、PPとほぼ同等である。SPは、吹き出しによる圧力損失が最も小さく、汚損による閉塞の恐れも少ないので、実用に適した吹き出し方式であると言える。

図4 幅1m長さ12mの長尺平板模型船

(a) 壁面せん断応力の流れ方向分布

(b)全抵抗の低減量

図5 50m平板模型船上の摩擦抵抗低減効果分布.

U=7m/s.

3. マイクロバブルの実用化の可能性

マイクロバブルは大きな摩擦抵抗低減効果をもつ反面、空気を吹き出すために仕事を必要とするため、実用的な省エネ効果を推定するためには空気吹き出しの仕事量を考慮する必要がある。その一例として、約14ノットで航行する長さ100mの船にマイクロバブルを適用した場合の正味の省エネ率を、50m平板模型船で計測された低減効果と船底(水深7m)での静水圧に抗して空気を吹き出す仕事量を考慮して推定した^[8]。表1に示すように、5%の省エネ率が得られる。水深5mから吹き出す場合には省エネ率は7%に上昇する。

この推定から次のことが言える。マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果は大きく、実用化を検討するに値する。ただし、気泡発生に必要な仕事量も無視できない大きさであり、実際にはさらに各種圧力損失が上乘せされることを考慮すると、実用性を高めるため低減効果の一層の向上が望まれる。

表1 推定したマイクロバブルの正味の省エネ率

全長L	100m	船速U	7m/s
全幅B	20m	吹出し空気厚 t_a	4.6mm
喫水z	7m	正味の省エネ率	5%

図6にマイクロバブルを実船に適用した場合のイメージを示す。大型タンカーなどの肥大船型は平らで広い船底をもち、船首近くで気泡を注入すると、流れと浮力により、船尾まで船底を効率的

に覆い、大きな低減効果が期待できる。また、低速であることも有利に作用する。

図6 マイクロバブルの実船適用イメージ

4. 実船実験

海を走る実際の船では、船体表面は曲面と傾きをもち、波や船体運動があり、媒体が海水であったりと、水平な平板を用いた水槽実験では予測できない様々な影響を受ける。2年前、(社)日本造船研究協会のSR239研究委員会では、独立行政法人航海訓練所の長さ116mの練習船「青雲丸」を用いて、大型船を用いた世界で唯一のマイクロバブル実船実験を行った^{[9],[10]}。図7(a)に船首部付近に取り付けられた、「上」の字型の気泡吹き出し部を示す。実験では、プロペラ回転数を一定に保ち、気泡有無の状態での船速を計測することによって、気泡による抵抗低減効果を調べた。全ての吹き出し部から気泡を吹き出した場合には、気泡がプロペラに流入して推力低下が発生し、船速が低下した。しかし、図7(b)に示すように、「上」の字の上の横棒部分だけから気泡を吹き出した場合に、船速上昇と馬力低減が得られ、速力14ノット状態で3%の馬力低減が得られた。このとき、気泡吹き出し部での水深(1m)圧力に基づく気泡発生仕事は1%であり、正味で2%の省エネルギー効果が得られたことになる。すなわち大型船においてもマイクロバブルによって摩擦抵抗が低減することが示された。

(a) 船首側面に設置された3つの気泡吹き出し部(BI1～BI3)

(b) 気泡による船速増加と主機馬力低減

図7 青雲丸を用いたマイクロバブルの実船実験
[9], [10]

5. 摩擦抵抗低減メカニズム

マイクロバブルの実用化するためには摩擦抵抗低減効果を高めることが最も効果的であり、そのためには先ず低減メカニズムを解明する必要がある。しかし、30年以上の研究の歴史があるにも拘わらず、流れ場の複雑さのために、未だ解明されているとは言い難い。提案されているいくつかの説を以下に紹介する。

密度効果 乱流境界層において発生する時間平均せん断応力は次式で与えられる。

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y} - \rho \overline{U'V'} \quad (2)$$

右边第1項は分子粘性と速度勾配による項、第2項

は乱流による速度変動の相関に基づくレイノルズ応力項である。気泡が存在すると、第1項では粘性係数 μ が、第2項では密度 ρ が平均的に低下するため、せん断応力が減少することになる。これが密度効果(density effect)である。マイクロバブルの摩擦抵抗低減効果は、壁近傍に気泡が集中するほど、すなわち局所ボイド率が高いほど大きいことが多くの実験によって確認されており、この説を裏付けている。同時に、この説によれば、気泡径分布を制御することによって低減効果を増大させることは期待できないことになる。

実効粘性の増加 微細な粒子や気泡が流体中に存在すると実効粘性を増加させることが理論的にも実験的にも示されている^[11]。この効果は(2)式右边について、第1項では μ を増大させるが粘性底層の厚みを増大させることにより $\partial u / \partial y$ を減少させるのでどちらとも言えないが、第2項では乱流運動を減衰させるため低減の方向に働く。従って、流れのレイノルズ数がある程度以上大きくて第2項が卓越している場合は、せん断応力が減少すると期待される。

乱流変動効果 境界層中の乱流が気泡の存在によって変動し摩擦が低減する。その一例として北川ら^[12]が図1に示す流路においてPTV/LIF/ISTと呼ばれる光学的方法を用いて、マイクロバブル流れの液相と気泡の速度変動を同時に計測した結果を示す。図8(a)に速度場の計測例を示す。上端が壁面であり、流れは左から右である。明暗を反転しているため気泡が白く写っている。(b)図にレイノルズ応力(速度変動相関)を示す。横軸は上壁からの距離をチャンネルの半幅(7.5mm)で無次元化したものである。注入気泡量を流路内平均ボイド率 α で表す。 $\alpha = 0.5\%$ における液相のレイノルズ応力は単相状態($\alpha = 0\%$)よりやや低下している。気泡の速度変動相関はこれらよりもずっと小さく、液相の速度変動相関(レイノルズ応力)が気泡のそれに引きずられて低下していると推察される。

図8 PTV/LIF/IST法によるマイクロバブル流れの乱流変動計測^[12]

6. おわりに

摩擦抵抗低減デバイスとしてのマイクロバブルは、大きな低減効果をもち且つ生成方法が単純なため、船舶への実用化が期待されている。実用化するためには、低減メカニズムを解明するなど技術的な基礎を確立する必要がある。

マイクロバブルは学術的にも興味深い研究対象である。その摩擦抵抗低減メカニズムには乱流現象が深く関わっている。関連して最近、滑面の数倍の大きさの摩擦を発生する粗面にマイクロバブルを流すと、その摩擦が滑面にバブルを流した場合と同じレベルまで減少するという、恰もバブルが実質的に粗面を滑面のように見せかけてしまうという、実験結果が報告された^[13]。実用的にも重要な情報である。

摩擦抵抗低減メカニズムに関わる要素として、乱流変動効果という力学的な作用以外に、清水と海水では気泡の挙動が異なるなど物性的な要素も含まれている。また、物体表面に超撥水性塗膜を形成し、気膜を形成することによって注入空気量

を著しく減少させたという、面白いアイデアもある^[14]。

最後に、メカニズム解明研究の奥深さの一例として、DNS^[15]が未だにマイクロバブルの摩擦抵抗低減効果をシミュレートできていないことをコメントする。

参考文献

- [1] 道奥康治, 水工学論文集, 第44巻 (1999)
- [2] 大成博文, 日本学術会議第21回混相流シンポジウム講演論文集, 21, PP.6-13 (2002).
- [3] 斉藤智宏他, 電子情報通信学会技術研究報告 US2001, pp. 53-60, (2001).
- [4] 児玉良明, 日本造船学会試験水槽委員会シンポジウム, pp.150-185 (2002).
- [5] 川北千春, 日本造船学会論文集第188号, pp.11-21 (2000).
- [6] Madavan, N.K. et al., Physics of Fluids, Vol.27, No.2, pp.356-363 (1984).
- [7] 高橋孝仁他, 日本造船学会H15秋季講演会 (2003).
- [8] Kodama, Y. et al., 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR (2002).
- [9] 児玉良明他, 日本造船学会論文集 第192号, pp.1-13 (2002)
- [10] 永松哲郎他, 日本造船学会論文集 第192号, pp.14-27 (2002).
- [11] Legner, H.H., Phys. Fluids 27 (12) pp.2788-2790 (1984).
- [12] 北川石英他, 第7回オーガナイズド混相流フォーラム講演論文集, pp.31-32 (2003).
- [13] Deutsch et al., ASME FEDSM2003-45647 (2003).
- [14] Fukuda et al., J. of Marine Science and Technology, vol. 5, pp.123-130 (2000).
- [15] Kawamura, Int. J. of Heat and Fluid Flow, 23, pp.627-638 (2002).