微小気泡による摩擦抵抗の軽減

正員 土 井 康 明* 正員 茂 里 一 紘*
正員 堀 田 多喜男*

Frictional Drag Reduction by Microbubbles

by Yasuaki Doi, *Member* Kazuhiro Mori, *Member*
Takio Hotta, *Member*

Summary

A drag reduction for 3-dimensional body is attempted by microbubble injection. Two models with different lengths are used for experiments to distinguish the resistance due to on microbubble injection itself and the skin friction affected by microbubble covering. A reformed Wigley model is used to investigate the effect of microbubble injection on wave making. Measurements of the resistance and the longitudinal wave profiles are performed. The covering by microbubbles is realized by injected air through a porous pipe with pore size of 15 μm . The flow of microbubbles is observed and the bubble sizes are estimated based on the rising velocity of a bubble in still water.

The results show that it is possible to reduce the resistance of a 3-dimensional body by use of microbubbles if the body is well covered by microbubbles. Although the resistance increases where microbubbles are injected, the local frictional resistance is reduced more than 20 % where microbubbles cover the body. The total resistance is reduced more than 5 %. Based on a wave analysis, it is found that injecting microbubbles into water does not affect on wave making resistance.

1. 結 言

摩擦抵抗の軽減は船舶流体力学において最も興味ある事柄の一つであり、近年注目されている船舶の高速化を試みる際、非常に重要となる。これまで摩擦抵抗軽減法として Riblet, LEBU, 弾性表面, ポリマー, 微小気泡などが提案されており、その解説が Bandyopadhyay¹⁾ によってなされている。ところで、これら摩擦抵抗軽減のうち、気泡法は摩擦抵抗軽減効果が平板についてではあるが最大約 80 % も期待でき、液体中でのみ有効となることから船舶工学研究者にとっても魅力的な方法である。

気泡法による摩擦抵抗の軽減の試みは古くからなされており、船舶工学への応用として当初は空気膜による方法^{2),3)} がとられていたが、その後微小気泡法⁴⁾ も用いられることとなった。微小気泡法は最近では Madavan ら⁵⁾ により研究が進められており、国内では徳永⁶⁾ の報告がある。

ところで、これまでの研究は平板を用いたものであり、

船舶のように曲面を有した物体についてはなされていない。船舶への応用例として Edstrand ら⁷⁾ によるものなどがあるが、これらはバトックフロウ型のはしけの船底より気泡を吹き出しており、実質的には平板についての実験と同様である。この場合、気泡はその浮力により境界層内に保持されることから高い摩擦抵抗の軽減効果が達成できている。このように平行部の長いはしけ等については有効であるが、一般の船舶に対しては空気膜保持が困難であるため、これまで実用にならないとされてきた⁷⁾。

本研究では 3 次元形状物体においても微小気泡により摩擦抵抗の軽減が可能かを実験により調査した結果を述べる。また、これまでの研究では気泡吹き出し部後方の局所的な摩擦抵抗の軽減あるいは気泡吹き出し部を含めた全体の摩擦抵抗の増減は議論されているが、気泡吹き出し部の抵抗の増減に関しては明確にされていない。このことから気泡吹き出し部の抵抗増減を明らかにする。さらに、気泡吹き出しによる造波抵抗への影響、ならびに気泡吹き出しに要する仕事率について検討する。

* 広島大学工学部

2. 供試模型および実験装置

2.1 多孔質体

微小気泡を出す方法として、多孔質体、電気分解、噴流による気泡巻き込み法などがある。このうち噴流による方法は推力を発生するため、抵抗軽減を調査するには解析が複雑となる。電気分解による方法は McCormick ら⁴⁾が採用した方法であり、微細な気泡を発生させる方法として有効である。本研究の予備実験として、電気分解による水素気泡法を試みたが清水中での水素発生量は非常に少なく高速流中での摩擦抵抗軽減効果が期待できなかった。以上のことから、本研究では気泡のみを大量に吹き出せる多孔質円管(三井トイシ社製ポアセラム；気孔径約 $15\mu\text{m}$ 、肉厚約 10 mm)を採用した。気泡吹き出しはエアーコンプレッサーを用い、多孔質体を送る空気圧力が一定になるよう弁で自動調整した。多孔質体の気孔径として $15, 30, 60, 90\mu\text{m}$ のもののうち最も微細な気泡がむらなく出る $15\mu\text{m}$ を採用した。 $60\mu\text{m}$ 以上では静止時、気泡吹き出しに一部むらが見られた。実験に用いた多孔質体の気泡吹き出し量と空気圧力(ゲージ圧力)の検定図(気孔径 $15\mu\text{m}$ 、外径 70 mm 、長さ 400 mm)を Fig. 1 に示す。

2.2 摩擦抵抗に及ぼす影響

気泡の吹き出し部分ならびに気泡に被覆される部分の抵抗増減を分けて調べることが本研究の目的である。このため Fig. 2 に示すような軸対称回転体模型を用いた。模型 I は多孔質円管の前後端に整流用キャップを取り付けたもので、そのほとんどが多孔質体であり近似的に気吹き出し部

Fig. 1 Air flow rate of microbubbles as a function of gauge pressure.

の抵抗増減が調べられる。模型 II は模型 I の気泡吹き出し部分と後尾部の間にアクリル円管 (A 部) を挿入したものである。以後 A 部を気泡被覆部と称する。いま模型 I と模型 II の圧力抵抗が同程度であるとすれば、(模型 II の全抵抗) - (模型 I の全抵抗) は気泡被覆部の摩擦抵抗となると考えられる。ただしこれは無限流中の場合でありキャピテーションタンクのような管路内流れでは管路内圧力勾配の影響が含まれることになる。しかながら、この管路内圧力勾

Fig. 2 Models used.

配は気泡吹き出しの有無による差を考える場合、相殺されることになる。このことから近似的に気泡被覆部の気泡有無による摩擦抵抗の増減が調べられる。

模型の抵抗計測には模型内に組み込まれた検力計を用い、模型支持用ストラットに働く抵抗は除去している。Fig. 3に模型 I の検力装置ならびに模型支持部の概略を示す。

模型前部に取り付けたロードセルは角柱にきり穴を設けたもので前後各 2 枚の歪ゲージを張り付けている。模型後部はスライドベアリングにより支持している。模型と模型支持用ストラットとの間隙にはスポンジを埋めている。空気は模型支持用ストラットを通してフレキシブルなビニールパイプにより多孔質円管に供給される。検力計の検定は模

Fig. 3 Experimental setup.

Fig. 4 Calibration curve of load cell for model II.

Fig. 5 Correction of resistance for air injection.

型をキャビテーションタンクに取り付けた状態で行った。
model IIの力と歪 ϵ との検定結果をFig. 4に示す。高負荷時、線形性が保たれていないが再現性は確認されている。なお、空気供給時、その供給圧力に応じて計測値が若干増加した。このためFig. 5に示す補正曲線により計測値を補正した。計測は西日本流体研究(株)のキャビテーションタンクで行った。タンクは開放状態として実験を行っている。以下用いる主流流速(U)は模型上流約20 cmに設置したピトー管により計測したものをを用いる。なお、このキャビテーションタンクの計測部の幅は500 mmであるため、制限水路影響が現れるが、本研究の目的が比較実験であることから特にこの修正は行っていない。

2.3 造波抵抗におよぼす影響

気泡吹き出しが造波抵抗におよぼす影響を調査するためにFig. 6に示すような模型を用いた。これは全長3 mのWigley 模型の船首部に多孔質円管を取り付け、さらに船首部を整形したものである。抵抗動力計による抵抗計測ならびに波高計測による造波抵抗の解析を行った。船体側方0.3 mと1.5 mに設置したサーボ式波高計を用いて、縦切法により波形を計測した。造波抵抗は船体側方1.5 mの縦切波形をNewmann Sharma 法により解析して求めた。実験は広島大学工学部試験水槽にて行った。

3. 計測結果および考察

3.1 摩擦抵抗に及ぼす影響

模型Iおよび模型IIの気泡を出さない場合の全抵抗 R_t 、 R_n をFig. 7に示す。気泡被覆部の摩擦抵抗とキャビテーションタンク内の圧力損失による抵抗成分がこれらの差に相当すると考えられる。なお、計測時の水温は15.7°~16.0°Cであった。

気泡を吹き出した場合の全抵抗の増減量をFigs. 8, 9に示す。残留気泡をなくすため計測は一速度ごとにキャビテーションタンクの流れを停止させて行った。吹き出し気泡量をパラメータとして主流流速(U)をベースに示しており、流量は多孔質体が吹き出す空気量、ゲージ圧力は多孔質体に送る空気圧である。なお、Fig. 9中に同一実験状態で複数回計測することにより得た計測値を示す。模型Iでは気泡量が増加するにつれ抵抗増となっているのに対して、模型IIでは高速域で抵抗減となっており、また気泡量が増加するにともない抵抗減少量も多くなっている。これまで

Fig. 6 Model used

Fig. 7 Total resistance curves of model I and model II.

Fig. 8 Resistance changes of model I in the presence of microbubbles.

Fig. 9 Resistance changes of model II in the presence of microbubbles.

の研究では特に気泡吹き出し部の抵抗増減については触れずに進められてきたが、本研究により気泡吹き出しにより抵抗増加となることが判明した。気泡吹き出しにより模型Ⅰの抵抗が増加したことは気泡吹き出し部の摩擦抵抗あるいは気泡で被覆された模型後端部の圧力抵抗の増加に起因しているが、この抵抗増加の成分については以下の3.3において考察する。模型Ⅱの全抵抗に対する抵抗軽減率は7 m/sで約6%であり、さらに高速域で減少する傾向にある。

ここで、気泡被覆部の摩擦抵抗の気泡有無による変化率 ΔR を近似的に次式で表す。

$$\Delta R = \{(R_{II} - R_I) - (R_{II} - R_I)\} / (R_{II} - R_I - \Delta P) \quad (1)$$

ここで、気泡を吹き出した場合の模型Ⅰと模型Ⅱの全抵抗を R_I , R_{II} としている。また、 ΔP はキャピテーションタンク内の圧力損失による抵抗成分で $(R_{II} - R_I - \Delta P)$ は気泡被覆部の摩擦抵抗に相当する。なお ΔP は正方形断面ダク

トについてのブラジウスの式から算出している。ところで、気泡を吹き出した場合の ΔP はダクト内の気液二相流の摩擦損失比 r から求められ、Lottes-Flinn⁸⁾らは次式を与えている。

$$r = (1 - \alpha)^{-m} \quad (2)$$

α はボイド率で、 $m=2$ としている。いま主流流速6 m/s、気泡吹き出し量を $1.85 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ として本実験状態に適用すると、摩擦抵抗の増加率は0.2%程度と推定される。このことから、気泡吹き出しによる ΔP の増加は無視した。このように算出した ΔR をFig. 10に示す。気泡被覆部の摩擦抵抗はほとんどの状態で減少されており、軽減率は20%以上達成できる場合もある。Fig. 11には写真撮影結果得た気泡軌跡を示す。流速4 m/sではA部の半分程度しか気泡で覆われていないが、6 m/sではA部はすべて気泡で覆われている。模型ⅡのA部が気泡で覆われるにしたがい、摩擦抵抗の軽減量が大きくなることがわかる。

しかしながら軽減率は平板の場合(約80%)のように高くない。抵抗軽減のパラメータとして流速、気泡量、気泡径等が考えられるが、本実験における流速、気泡量等はMadavan⁹⁾の平板における実験のものと概ね同じである。気泡径については通常の写真撮影では高速流中の気泡を捕えることが困難であるため、気泡の上昇速度から気泡の外径を算定した。気泡上昇速度 u_b は次式のように与えられている⁹⁾。

$$u_b = \{d^2(1 - \rho_p/\rho_f)g\} / (18\nu_f) \quad Re < 2 \quad (3)$$

$$u_b = 0.33g^{0.76}(1/\nu_f)^{0.52}(d/2)^{1.28} \quad 2 \leq Re < 4.02M^{-0.25} \quad (4)$$

$$Re = (du_b/\nu_f), \quad M = (g\mu_f^2)/(\rho_f\sigma^3)$$

ここで、 d は気泡直径、 g は重力加速度、 ρ_p および ρ_f は気体および液体の密度、 μ_f および ν_f は液体の粘性係数および動粘性係数、 σ は液体の表面張力である。一様流により気

Fig. 10 Frictional resistance changes of part A in the presence of microbubbles.

Fig. 11 Path of microbubbles around model II.
(top: 4 m/s, bottom: 6 m/s, flow rate $18.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)

泡が流されているとして算定した結果、気泡径は多孔質体に送る空気圧がゲージ圧1気圧では約1mm、ゲージ3気圧では約1.3mm程度となった。実際には境界層内を気泡が流れるため、これ以下であると考えられる。Merkleら¹⁰⁾によると平板の摩擦抵抗軽減に有効な気泡径の最大は約1mm程度で、このときの境界層厚さは約10mmとなっており、ほぼ同程度の大きさと考えられる。

ところで、これまでの平板に関する研究から微小気泡による摩擦抵抗の軽減は気泡が直接壁面に付着することによるのではなく、そのメカニズムは不明であるが乱流境界層の構造を変化させるためと考えられている。以上のことから、本模型での摩擦抵抗軽減率が低いのは、模型は気泡で覆われてはいるものの、浮力の作用により気泡を境界層内に充分保持できていないことによると考えられる。

3.2 気泡吹き出しに要する仕事率

コンプレッサーを用いて空気を圧縮するのに要する仕事率を算定する。いま、単位時間の間に圧力 P_1 (絶対圧力)、容積 V_1 の状態の空気を圧縮して圧力 P_2 、容積 V_2 の状態にした場合、外部から空気になった仕事率は等温変化の場合、

$$Wi = P_1 V_1 \cdot \ln(P_2/P_1) = P_2 V_2 \cdot \ln(P_2/P_1) \quad (5)$$

また、断熱変化の場合、

$$Wa = (P_2 V_2 - P_1 V_1) / (k - 1) \quad (6)$$

となる。ここで、 k は比熱比(1.4)である。(5)、(6)はコンプレッサーで空気を圧縮する際に消耗する機械的損失は考慮せず、理想的な状態での損失を算出した式に相当す

る。

実験状態から状態変化は等温変化に近いと考えられる。(5)あるいは(6)式を用いて空気圧縮に要する仕事率を算出したところ、抵抗軽減による利得よりはるかに大きい仕事率が必要である事が判明した。多孔質体を通して気泡を出す効率が高まれば小さい圧力で微小気泡を生成できるが、ここでは既存の多孔質円管を用いたため圧力損失が大きくなった。どの程度の通気抵抗の多孔質円管であれば仕事率が向上するかを調べるため、逆に空気圧縮に使用できる圧力の上限を算出した結果を等温変化、断熱変化各々の場合についてTable 1に示す。Table 1に示した圧力より少ない圧力で気泡を吹き出せれば、仕事率が向上したことになる。Table 1より空気圧縮に使用できる圧力の上限値

Table 1 Maximum gauge pressure to compress air of which flow rate is $18.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

	isothermal change	adiabatic change
velocity (m/s)	gauge pressure (kgf/cm ²)	gauge pressure (kgf/cm ²)
5.0	0.01	0.02
6.0	0.03	0.04
6.5	0.05	0.08
7.0	0.08	0.12

Fig. 12 Resistance change of model III in the presence of microbubbles.

はかなり低く、この模型スケールで仕事率を向上させることは難しい。しかしながら実船スケールでは気泡吹き出しに要する仕事量は相対的に少なくなり、全体としての仕事率の向上が図れる可能性はある。

3.3 気泡吹き出しが造波抵抗におよぼす影響

Model IIIを用いて、静止時における気泡吹き出しによる造波の様子を観察した結果、多孔質円管を中心とした波が発生していた。この波は多孔質体より吹き出した気泡が浮力により上昇することによりできたものである。この波が航走時どのようになるかを調査した。抵抗計測の結果得た気泡有無による全抵抗 C_t を比較し Fig. 12 に示す。曳航電車の速度制限から船速が 3 m/s 以下であるため気泡吹き出しにより全抵抗値は全速度域にわたり増加している。これは 3.1 で示した現象と同様である。なお、Model III の気泡吹き出し量は 2 気圧で $0.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 、4 気圧で $0.97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ である。Model II の例からこの程度の気泡吹き出し量でも高速域では抵抗軽減が達成できると考えられ

る。また、造波抵抗への影響は同一気泡量であればボイド率が相対的に高くなる低速域の方が大きくなると考えられる。Fig. 12 に波形解析の結果得た造波抵抗 C_w を示す。気泡の有無による造波抵抗の差異は少ない。気泡吹き出しにより造波抵抗が僅かに増加しているが、全抵抗の増加量に対する割合は僅かである。Fig. 13 に航走時の船首部まわりにおける波形の様子を示す。また、Fig. 14 に船体側方 30 cm における縦切波形を示す。気泡吹き出しの有無による差異は僅かである。以上の結果より、気泡吹き出しが造波抵抗におよぼす影響は少いことがわかる。

さて、3.1 で気泡吹き出しによる抵抗増加は気泡吹き出し部の摩擦抵抗増加と気泡に被覆された船体後端部の圧力抵抗の増加が考えられると述べた。ところで上述のように気泡吹き出しによる造波抵抗への影響は少ないことから、船体まわりの圧力の変化も少ないと考えられる。Fig. 15 は model III の船速 2 m/s における気泡の軌跡を示したものである。船首部から吹き出した気泡は船体中央まで達して

Fig. 13 Bow wave patterns.
(top: without bubbles, bottom: with bubbles
flow rate: $6.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, gauge pressure: 2
 kgf/cm^2 , $F_n = 0.281 (1.6 \text{ m/s})$)

Fig. 14 Change of longitudinal wave profile in the presence of microbubbles.

($F_n=0.352$ (2 m/s), $y/L=0.09$, flow rate: $6.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
gauge pressure: 2 kgf/cm²)

Fig. 15 Path of microbubbles around model III.

($F_n=0.352$ (2 m/s), flow rate: $6.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
gauge pressure: 2 kgf/cm²)

いないことから、船尾境界層には直接影響しておらず、粘性圧力抵抗への影響も少ないと推察される。以上のことから気泡吹き出しによる抵抗増加の主成分は気泡吹き出し部の摩擦抵抗の増加と考えられる。

4. 結 言

3次元形状物体において微小気泡により摩擦抵抗の軽減が可能であるか否かを実験により調査するとともに、気泡吹き出し部における抵抗の増減についても調査した。さらに、気泡吹き出しによる造波抵抗への影響を調べるためにWigley 模型の船首部を改造した模型を用いて実験を行い以下の結論を得た。

- 1) 気泡被覆部では抵抗減少となるが、気泡吹き出し部では抵抗増加となる。
- 2) 3次元形状物体においても気泡で覆われる部分を多くすると摩擦抵抗軽減が可能である。
- 3) 気泡吹き出しによる造波抵抗への影響はほとんどない。

今回用いた多孔質体では気泡吹き出しに要する仕事率が大きく、模型スケールでの仕事率の向上は達成できなかったが、実船スケールでの仕事率向上の可能性はあると考え

られる。今後、気泡の吹き出し方法についても検討を加えたい。

本研究の一部は広島大学での卒業研究として行われたもので、研究を遂行した清川二郎君、三井一郎君、山本尚貴君、有田規久夫君、池本克也君らに謝意を表します。また、西日本流体技研(株)にはキャビテーションタンクを使用させていただき、三井トイシ(株)からは多孔質円管を供与していただいた。関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Bandyopadhyay, P.R.: Review-Mean Flow in Turbulent Boundary Layers Disturbed to Alter Skin Friction, J. of Fluid Eng., Vol.108 (1986), pp.127-140.
- 2) Edstrand, H., Rodstron, R.: The Resistance of Barge with the Bottom Air Lubricated, Modell. France Statens Shep. Nr. 12 (1949).
- 3) 平田賢, 西脇仁一, 鳥居薫: 気液二層境界層の壁面摩擦に関する研究, 日本機械学会論文集第33号254号 (1967), pp.1653-1660.
- 4) McCormick, M. E., Bhattacharyya, R.: Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis, Naval Engineers J. 85 (1973), pp.11-16.

- 5) Madavan, N.K., Deutsch, S., Merkle, C.L.: Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles, *Phys. of Fluids*, Vol. 27 No. 2 (1984), pp. 356-363.
 - 6) Tokunaga, K.: Reduction of Frictional Resistance of a Flat Plate by Microbubbles, *Tran. of the West-Japan Soc. of Naval Arch.* No. 73 (1987) pp. 79-83.
 - 7) 田古里哲夫：粘性抵抗減少法，粘性抵抗シンポジウム (1973), pp.169-188.
 - 8) Lottes, P.A., Flinn, W.S.: A Method of Analysis of Natural Circulation Boiling Systems, *Nucl. Sci. Eng.*, 1-6 (1956), 420.
 - 9) 流れの可視化学会：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店 (1986), p.159.
 - 10) Merkle, C.L., Deutsch, S., Pal, S., Cimbala, J.: Microbubble Drag Reduction, 16th Symp. on Naval Hydrodynamics (1987), pp. 199-215.
-