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 矩形管内流実験および平板抵抗実験——

徳 永 純一郎* 延 永 尚 志*
中 谷 龍 男* 岩 崎 徹*
正員 福 田 和 廣** 正員 國 武 吉 邦*

Frictional Drag Reduction with Air Lubricant over Super-Water-Repellent Surface
(1st Report) —Frictional Drag Test in Rectangular Pipe Flow and
Resistance Test of Horizontal Flat Plate—

by Junichiro Tokunaga Takashi Nobunaga
Tatsuo Nakatani Toru Iwasaki
Kazuhiro Fukuda, *Member* Yoshikuni Kunitake, *Member*

Summary

This paper proposes a new concept for the frictional drag reduction technique. The new technique makes use of a specific coating surface (Super-Water-Repellent Surface) which has a highly repellent effect and an ability to form a thin air film over it under water. When supplying a small amount of air to the specific coating surface from the outside continuously, the supplied air (secondary air) is absorbed in and joined with the primary air film and spread to form a filmy air flow along the surface. This technique reduces the frictional drag because of this phenomenon.

A frictional drag test in the rectangular pipe flow and a resistance test of horizontal flat plate were carried out in order to verify the validity of this technique. As a result of these tests, it was confirmed that drag reductions of about 80% and about 55% were obtained for flow velocities of 4 m/s and 8 m/s, respectively.

1. 結 言

近年、地球温暖化防止の見地から二酸化炭素等の温室効果ガスの排出削減が強く求められている。海上を航行する船舶もその例外ではなく、船舶の省エネルギー化は単に輸送コストだけの問題にとどまらず、地球環境保全の立場から重要な課題の一つと言える。

船舶の省エネルギー化については、船体重量の軽減や、推進器の効率アップなどの方法とともに、船体が発生する抵抗の低減が重要である。船体の抵抗成分についてみると、大別して造波抵抗、形状抵抗、摩擦抵抗に分けられる。その内、摩擦抵抗が最も大きな比率を占め、貨物船やタンカ

ーでは全抵抗の70～80%を占める。造波抵抗の低減については、造波抵抗理論や数値計算などにより、船型とそれに適合する船首バルブの形状設計によって多くの成果を得ている。また、形状抵抗の低減についても、乱流モデルを仮定しレイノルズ方程式を使って船体まわりの流場を直接計算機で解くことにより、船型の改良を行い成果を得ている。しかしながら、船体の摩擦抵抗の低減については実用化されたものがなく、今後その開発が強く望まれている分野である。

流体摩擦抵抗の低減は、船舶のみならず流体力学においても重要な研究テーマの一つであり、長年にわたり研究が続けられてきた。これまでに摩擦抵抗低減法としてリブレット、LEBU (Large Eddy Break-Up Device)、弾性皮膜などのデバイスを使用する方法、固体表面に沿ってポリマー溶液やマイクロバブル^{1),2)}、さらにマイクロバブルと水の混合流体を吹き出す方法³⁾、表面をステップ状構造にし空気膜を保持する空気潤滑法⁴⁾などが提案されている。

一方、近年では摩擦抵抗を受ける固体表面の性状につい

* 三井造船(株)

** (株)三井造船昭島研究所

て着目した研究も行われている。Reed ら⁵⁾は流れ方向に微細な V 型溝を設けた表面の濡れ性を変化させて溝内を流れる空気の付着性について実験的に検討を行っている。また、渡辺ら⁶⁾は矩形管を用いた圧力損失測定実験により層流域で超撥水性表面の摩擦抵抗低減効果を確認し、この効果が表面と流体とのすべりに起因する現象であると説明している。

今回、著者らは摩擦抵抗低減法として、水中に浸漬すると表面上に薄い空気膜を形成する機能をもつ表面（以下、特殊撥水性表面、Super-Water-Repellent Surface: SWR-Surface と称す）とその表面への空気供給を組み合わせた新しい手法（SWR-Surface & Air Injection Method: SWRS & AI 法）を考案した。その抵抗低減原理は、流水中で特殊撥水性表面上に保持された空気膜に外部から連続的に少量の空気を供給し、その空気を捕捉させて膜状の空気流れを形成させ、表面と流水との接触を阻止することにより摩擦抵抗を低減しようとするものである。

第1報である本報では、本手法を船舶に応用するための第一ステップとして、本手法に利用する特殊撥水性表面の特性について述べ、本手法の有効性を確認するために実施した矩形管内流による摩擦抵抗実験およびキャビテーション水槽における水平平板の抵抗実験の結果について報告する。

2. 特殊撥水性表面（供試表面）

矩形管内流による摩擦抵抗実験および平板抵抗実験には、著者らが作製した特殊撥水性表面を用いた。本表面は構成材料の化学的疎水性と表面に形成された微細な凹凸構造との相乗効果により極めて高い撥水性を発現する。

そのため、この特殊撥水性表面上に滴下した水滴は、ほぼ真球状となり水との接触角は 160° 以上に達する。また、 $30\ \mu\text{l}$ の水滴の転落角は 1° 以下で、表面にわずかな傾斜を与えると水滴は容易に転がり始める。

本表面の特筆すべき特性として、本表面を水中に浸漬すると、いかなる姿勢においてもその表面上に薄い空気膜を安定に形成し、さらに外部からこの表面に空気を供給するとその空気を取り込むことが挙げられる。

Fig. 1 は、表面の一部に円形状に特殊撥水性塗装を施した平板を上向きに水中に浸漬し、特殊撥水性表面部分に外部から空気を供給したときの様子を示す。取り込まれた空気は浮力の影響で盛り上がっているが、水中に留まっている。

さらに、水中に傾斜させて設置した二種類の平板表面にノズルを近づけて空気を吹き出したときの様子を Fig. 2(a), (b) に模式的に示す。通常塗膜表面および実用材料のなかで最も撥水性が高いとされている PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）表面では、Fig. 2(a) のようにノズルから吹き出された空気が表面に付着することなく小気泡となって浮上する。これに対し、特殊撥水性表面では、Fig. 2(b) に示されるように、吹き出された空気が表面に保持された空気膜に捕捉されて合体し、表面上を拡散しながら移動して平板上端部に蓄積される。そして、空気を連続的に供給すると空気の蓄積が進み、一定量に達した空気は浮力

Fig. 1 Shape of air held on SWR-Surface in water

(a) Conventional surface (b) Super-water-repellent surface (SWR-Surface)

Fig. 2 Behavior of air injected onto the inclined surface in water

の影響によりその一部が比較的大きな気泡となって浮上する。以下この過程を繰り返す。

このように特殊撥水性表面は水中で空気膜を安定に形成保持し、外部から供給された空気を取り込む機能を有しており、本摩擦抵抗低減手法ではこの機能を利用する。

3. 矩形管内流による摩擦抵抗実験

本手法による抵抗低減効果を調べるために、矩形管を用いて圧力損失を測定する管内流実験を実施し、併せて特殊撥水性表面に沿う空気流れの観察を行った。

3.1 実験装置および実験方法

実験には Fig. 3 に示す回流式管内流実験装置を用いた。貯水タンクから導かれた水はポンプにより圧送され、サージタンク、流量調整弁、そして長さ 2 m の助走区間を経て測定部に流入し、さらに長さ 0.5 m の助走区間を経て貯水タンクに戻る。助走区間および測定部は内寸が幅 60 mm × 高さ 30 mm の水平矩形管であり、流れ観察が可能なように透明アクリル樹脂製とした。助走区間を長さ 2 m としたのは、測定部に流入する流れを十分に発達させるためである。

長さ 4 m の測定部の上面側には供試平板およびその直前にスリット型ノズルが装着される。

測定部両側面には長さ 2.5 m 区間の流れ方向圧力損失を測定するため、供試平板前縁から 1 m および 3.5 m の位置に直径 2 mm の静圧測定孔を設けた。

本実験では、水流量は電磁流量計および流量調節弁により所定の値に設定した。また、ノズルからの供給空気量は、質量流量計および流量調節弁により空気量レベル (Air Supply Level: AL と略記) が所定の値になるよう設定した。

AL は次式で定義され、供給空気が管内平均流速と同一速度で膜状になって一様に流れると仮定したときの見かけ

の空気膜厚さ (単位: mm) に相当する。

$$AL = Q_a / (B \times U) \quad (1)$$

ここに

Q_a : 供給空気量

B : 矩形管の幅

U : 管内平均流速

測定区間の圧力損失は、可変リアクタンス差圧トランスジューサにより測定し、約 3 分間の時間平均を代表値として用いた。

3.2 実験結果の整理方法

矩形管内流実験では、測定区間の特殊撥水性表面部分の摩擦抵抗を直接測定せず、圧力損失を測定している。そのため、特殊撥水性表面の摩擦抵抗低減率 (Drag Reduction: DR と略記) は測定された圧力損失から換算して求める必要がある、ここでは次のようにして抵抗低減率を算定した。

いま、摩擦抵抗をもたない抵抗低減率 100% の特殊撥水性表面区間の発達した流れは、特殊撥水性表面を対称面として現矩形管の高さを 2 倍とした仮想矩形管下半分の流れと等価であると見なすことができる。

矩形管の管摩擦係数 λ は水力直径 d_h を用いると縦横比に無関係に円管の λ とほぼ一致することが報告されているので⁷⁾、現矩形管と仮想矩形管の単位長さ当たりの損失ヘッド比を Blasius の抵抗公式を適用して計算すると次式のようなになる。

$$h_2/h_1 = (d_{h1}/d_{h2})^{5/4} \quad (2)$$

ここに

h : 損失ヘッド

添字 1: 現矩形管, 2: 高さ 2 倍の仮想矩形管

よって、特殊撥水性表面の摩擦抵抗低減率 $DR=100\%$ は次式で与えられる測定区間の圧力損失低減率 HR に対応する。

$$HR = 1 - (d_{h1}/d_{h2})^{5/4} \quad (3)$$

Fig. 3 Schematic of the test apparatus for a rectangular pipe flow

式(3)から HR は矩形管の寸法のみによって決まることがわかる。本実験に用いた矩形管について計算すると $d_{h1} = 40 \text{ mm}$, $d_{h2} = 60 \text{ mm}$ であるので $HR = 39.8\%$ となる。

したがって、特殊撥水性表面の摩擦抵抗低減率 DR は次式で与えられる。

$$DR(\%) = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} / 0.398 \times 100 \quad (4)$$

ここに

λ : 供試表面として特殊撥水性表面を使用した場合の管摩擦係数

$$\lambda = h / \left(\frac{L}{d_h} \frac{U^2}{2g} \right)$$

L : 測定区間の長さ, $L = 2.5 \text{ m}$

h : 測定区間の損失ヘッド

g : 重力加速度

λ_0 : 供試表面として通常の平滑な表面を使用した場合の管摩擦係数 (λ 算定時のレイノルズ数に対応)

3.3 矩形管による実験結果

測定部に通常の平滑平板および特殊撥水性コーティングした平板を装着した場合の実験結果をレイノルズ数 Re と管摩擦係数 λ の関係で Fig. 4 に示す。ここで、レイノルズ数 Re の代表寸法は矩形管の水力直径 d_h , 代表流速は管内平均流速 U を用いている。

通常の平滑表面で空気供給なしの場合、矩形管の管摩擦係数 λ は、図中に破線で示される Blasius の抵抗曲線とよい一致を示しており、本実験装置は妥当な結果を与えることがわかる。

特殊撥水性表面で空気供給あり ($AL = 0.5$) の場合、管摩擦係数 λ は平滑な表面の場合に比べ低レイノルズ数側では相当低い値となっている。そして、レイノルズ数 Re を増加させると $Re = 2.5 \times 10^5$ あたりから λ が増加し始め、平滑な表面の λ に漸近していく。Fig. 5 には実験結果を管中央流速 U_c と摩擦抵抗低減率 DR の関係で整理して示す。流速 $U_c = 1 \text{ m/s}$ では、100%に近い抵抗低減効果が認められ

るが、流速の増加に伴い抵抗低減率は次第に低下し、特に $U_c = 6 \text{ m/s}$ 以上ではその低下率が顕著になる傾向を示す。しかし、抵抗低減率 DR に着目すると $U_c = 4 \text{ m/s}$ では $DR = 80\%$ 以上、 $U_c = 8 \text{ m/s}$ でも $DR = 50\%$ を維持しており、本手法の有効性は明らかである。

なお、レーザドップラ流速計による測定で、管内平均流速 U と管中央流速 U_c の間に $U_c = 1.154 U$ なる関係が得られている。

次に、特殊撥水性表面の抵抗低減効果と本表面に沿う空気流れ挙動との相関を調べるために目視で空気流れの観察を行った。特殊撥水性表面上の空気膜の存在は気液界面で光が全反射して銀色に輝くことから判定できる。 $U = 1 \sim 3 \text{ m/s}$ の低流速域では、ノズルから吹き出された空気は矩形管側面の影響を受けてリップルを発生するものの比較的厚い空気膜を形成して測定部下流まで流れて行く。 $U = 4 \text{ m/s}$ になると、流水による擾乱のため、気液界面が不安定化し、空気膜の一部が気泡となって流水中に流出・拡散し、空気膜厚の減少、厚さむらが生じ始める。この気泡の水中拡散は流速が増加するに従い顕著になり、 $U = 5 \text{ m/s}$ 以上の中高流速域では供給した空気の大半が流水中に拡散し、空気膜は極めて薄いものとなる。

$U = 5 \text{ m/s}$ ($U_c \approx 6 \text{ m/s}$) 付近を境に抵抗低減率の低下勾配が大きくなるのは、空気膜厚の減少に伴い、空気膜内の速度勾配が大きくなるとともに時間的・空間的に流水が特殊撥水性表面に接触する機会が増大するためと推定される。

なお、本実験では空気供給で生ずる体積流量増加による流速増加の補正は行っていない。通常の平滑な平板に空気を供給した場合には抵抗低減効果はなく、供給空気量分だけ流れが加速されるので逆に抵抗が増加する。 $AL = 0.5$ の場合、管摩擦係数 λ は流速にほとんど依存せず約 2.5% の増加となった。

Fig. 4 Friction factors for a rectangular pipe flow with conventional surface and SWR-Surface

Fig. 5 Frictional drag reduction of SWR-Surface in the rectangular pipe flow

4. 平板抵抗実験

次に、外部流における本手法の有効性を調べるために、水平平板による抵抗実験を実施した。

4.1 実験装置および実験方法

本実験では、キャビテーション水槽を使用した。水槽測定部に設置した実験平板の写真を Fig. 6 に示す。測定部横断面は内寸 600 mm×600 mm の正方形で、測定部長さは 3 m である。測定部両側面および下面には透明なアクリル樹脂製の窓があり、流れの観察ができる。

実験平板本体は、Fig. 7 に示すように測定部の上部 3 箇所から薄板バネで中央部に水平に支持されており、前側の薄板バネ支持部近傍に検力計が取り付けられている。薄板バネおよび検力計は流れの影響を受けないように翼型のカバーで保護されている。また、このカバーと実験平板本体の間は、平板本体側に凹部を設け接触しないようにしている。

Fig. 6 Photograph of resistance test apparatus for a flat plate in the cavitation tunnel

実験平板本体は全長 2.14 m、全幅 425 mm、厚さ 25 mm のアルミニウム製で、その下面側には前縁から 0.17 m の位置にスリット型の空気供給ノズル、その後方に長さ 1.85 m、幅 400 mm、厚さ 5 mm の供試平板が装着される。実験平板本体の浸水面積は 1.876 m²、供試平板の浸水面積は 0.74 m² である。

空気の供給はエアコンプレッサにより行い、空気は減圧弁、質量流量計、ニードル弁を介してキャビテーション水槽測定部の上部から翼型のカバー内のビニールチューブを通して実験平板本体に導かれる。

実験では、測定部の主流速度をピトー管により測定し、実験平板本体の抵抗はあらかじめ検定した検力計により約 2 分間測定し、その時間平均を代表値とした。また、供給する空気の量は質量流量計をモニタしながらニードル弁により所定の空気量レベル AL となるよう調整した。AL は矩形管内流の場合と同様、式(1)で定義されるが、 B は供試表面の幅、 U は主流速度と置き換えられる。

なお、キャビテーション水槽で実施した今回の実験は、完全な外部流とは異なる。平板周り流れは管内流であり実験平板の抵抗測定には流れ方向圧力勾配の影響や平板を設置したことによる流速分布への影響が含まれることになる。しかし、本実験では通常の平滑表面と特殊撥水性表面の抵抗差を求めることが目的であるため、これらの影響に対する補正は特に行っていない。

また、測定される実験平板本体の全抵抗は、摩擦抵抗と形状抵抗の和であるが、ここでは形状抵抗は無視できるものとして結果を整理する。

4.2 実験結果

4.2.1 通常塗装表面の場合

実験平板本体の抵抗特性を把握するため、供試平板として通常塗装の平滑平板を装着し空気供給なしの場合について実験を実施した。なお、通常塗装用の塗料として、実際

Fig. 7 Schematic of resistance test apparatus for a flat plate

の船舶で使用されている船底塗料を用いた。実験結果を平板本体の全長を代表長さにとったレイノルズ数 Re と抵抗係数 C_d の関係で Fig. 8 に示す。図中には次式で与えられる Prandtl-Schlichting の摩擦抵抗曲線を破線で併示した。

$$C_f = \frac{0.455}{(\log_{10} Re)^{2.58}} \quad (5)$$

実験結果は、式(5)の摩擦抵抗曲線よりやや高めに位置しているがおおむねよく一致しており、本実験装置は妥当な結果を与えることがわかる。実験結果がやや高めとなったのは、形状抵抗の影響や翼型カバーによる流れの乱れの影響によるものと推定される。

4.2.2 特殊撥水性表面の場合

実験平板本体に特殊撥水性コーティング平板を装着し、空気を流した場合の実験結果を Fig. 9 に示す。今回の実験では、空気量レベルを $AL=0.5, 1.0$ の2通りとした。

特殊撥水性コーティング平板の場合の抵抗係数 C_d の値は、図中に併示した通常塗装の平滑平板の場合と比較して低レイノルズ数側で大幅に低くなり、レイノルズ数が増加

Fig. 8 Drag coefficient of the flat plate installed with conventional surface

Fig. 9 Drag coefficients of the flat plate installed with conventional surface and SWR-Surface

するに従い平滑平板の抵抗曲線に漸近していく傾向を示す。

本実験結果は、外部流に対して本手法が有効であることを示すものである。

次に、この抵抗低減はすべて特殊撥水性表面部分で生じているものと考え、その摩擦抵抗低減率 DR を以下のような方法で算出した。

いま、実験平板本体下面の供試平板部分に発生する抵抗 R_s は、Prandtl-Schlichting の式を適用できるものとする

$$R_s = 0.2275 \rho U^2 b \left\{ \frac{L_2}{(\log_{10} Re_{L2})^{2.58}} - \frac{L_1}{(\log_{10} Re_{L1})^{2.58}} \right\} \quad (6)$$

ここに

L_1 : 実験平板本体前縁から供試平板前縁までの距離、

$$L_1 = 0.17 \text{ m}$$

L_2 : 実験平板本体前縁から供試平板後縁までの距離、

$$L_2 = 2.02 \text{ m}$$

b : 供試平板の幅、 $b = 0.4 \text{ m}$

この供試平板を通常塗装の平滑平板から特殊撥水性コーティング平板に代えて得られる抵抗低減分 ΔR は、測定された抵抗を R_1 とすると

$$\Delta R = R_0 - R_1 \quad (7)$$

ここに

R_0 : 平滑平板を装着した場合の実験平板本体の抵抗

したがって、特殊撥水性表面部分の摩擦抵抗低減率 DR は次式で求められる。

$$DR(\%) = \Delta R / R_s \times 100 \quad (8)$$

以上の方法により、空気量レベル AL をパラメータとして流速 U と抵抗低減率 DR の関係で整理した結果を Fig. 10 に示す。

Fig. 10 から、本手法は矩形管内流の場合と同様、外部流に対しても顕著な摩擦抵抗低減効果を発揮することがわかる。抵抗低減率 DR は、 $U = 2 \text{ m/s}$ では 95% 以上の極めて

Fig. 10 Frictional drag reduction of SWR-Surface on the flat plate

(a) Front part of the flat plate

(b) Rear part of the flat plate

Fig. 11 Photographs of air flow on the flat plate
($U=3\text{ m/s}$, $AL=0.5$)

高い値を示し、流速の増加とともにほぼ単調に低下する特性を示すものの、 $U=5\text{ m/s}$ で70%、 $U=8\text{ m/s}$ でも50%以上の高い値を維持している。

抵抗低減率DRに及ぼす空気量レベルALの影響をみると、 $U=4\text{ m/s}$ 以下の低流速域では $AL=1.0$ より $AL=0.5$ の方が抵抗低減率がやや高くなっている。 $U=5\text{ m/s}$ 以上では逆に $AL=1.0$ の方が抵抗低減率が高くなる。しかし、本実験範囲では供給空気量の影響はほとんどないと言える。

Fig. 11には $U=3\text{ m/s}$, $AL=0.5$ の場合の実験平板に沿う空気流れの状況を示す。実験平板本体の前部ではノズルから吹き出した空気が一部気泡化しているが、ほぼ膜状になって流れており、後部では形成された空気膜が特殊撥水性表面部分を越えて実験平板本体の後縁付近まで延びている様子がわかる。

5. 考 察

矩形管内流試験および平板抵抗試験の結果は、本手法が摩擦抵抗低減に大きな効果を発揮することを示した。本手

Fig. 12 Velocity distributions measured by laser-Doppler velocimeter ($U=5\text{ m/s}$, $AL=0.5$, in the center plane)

法による摩擦抵抗低減のメカニズムについては、流れの現象が複雑であるので断定的に論じることはいできないが、著者らは基本的には特殊撥水性表面と流水の間に介在する薄い空気膜の潤滑作用によるものと推定している。

そこで、特殊撥水性表面近傍の流れの様子を調べるために矩形管内の流速分布の測定を行った。計測は、矩形管内流れにおいて特殊撥水性表面区間を通過時の流動特性の変化を調べるために、レーザドップラ流速計により、流れ方向各位置の管中央面高さ方向の流速分布測定を実施した。測定は、管内平均流速 $U=5\text{ m/s}$ 、空気量レベル $AL=0.5$ の条件について行った。

Fig. 12に測定結果を示す。ここで、 x は空気供給ノズルからの距離である。特殊撥水性表面近傍では、空気膜の存在により水の流れが加速され、水があたかも滑っているような挙動を示していることがわかる。

気液界面の安定性については、有名なKelvin-Helmholtzの理論がある。しかし、本現象で生じる特殊撥水性表面上の空気膜は非常に薄く、界面の安定性の議論に空気膜内のせん断力が無視できない。そのため、安定性の議論を詳細にするには、Kelvin-Helmholtzの理論で取り扱われなかった影響項も考慮する必要がある。今後、この辺りも考慮した空気膜の安定性問題、さらに空気膜形成のメカニズムなどのついて解明する必要がある。

6. 結 言

特殊撥水性表面とその表面への空気供給を組み合わせた新しい着想の摩擦抵抗低減法を提案し、矩形管内流による摩擦抵抗実験および水平平板による抵抗実験を実施して本手法の有効性について検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 著者らが作製した特殊撥水性表面は、水中に浸漬すると表面上に薄い空気膜を形成し、その表面に外部から空

気を供給するとその空気を取り込む機能があることを示した。

(2) 特殊撥水性表面を用いた矩形管内流による摩擦抵抗実験で、管中央流速 4 m/s で 83%、8 m/s で 50% の高い抵抗低減率が得られた。この時の供給空気量は空気膜厚換算で 0.5 mm であった。

(3) 平板抵抗実験では、抵抗低減率は流速 4 m/s で約 80%、8 m/s で 55% と矩形管内流による摩擦抵抗実験と同様な結果が得られた。

(4) 矩形管内流についてレーザドップラ流速計による流速分布測定を実施した。その結果、特殊撥水性表面近傍では空気膜の作用により水の流れが加速され、水があたかも滑っているような挙動を示すことがわかった。

以上、第1報としての本報では、矩形管管内流と平板に沿う流れに対して、本手法が摩擦抵抗低減に関して有効であることを示した。今後、本現象の理論解析や船舶模型における効果などについて調べる予定である。

謝 辞

本研究は、競艇公益資金により日本財団の援助を受けて(財)シップ・アンド・オーシャン財団が行う技術開発基金による補助金を受けて実施した。関係各位に深く感謝申し上げます。

また、本研究を進めるに当たって、(財)応用科学研究所

渡辺信淳京都大学名誉教授、鄭容宝博士には特殊撥水性表面作製技術について有益な議論や助言をいただきました。

ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Madavan, N. K., Deutsch, S., and Merkle, C. L.: Measurements of Local Skin Friction in a Microbubble-modified Turbulent Boundary Layer, *J. Fluid Mech.*, Vol. 27 (1984), pp. 356-363.
- 2) 高橋孝仁, 角川明, 児玉良明: 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 (1997), pp. 1-8.
- 3) Kato, H., Miyana, M., Haramoto, Y., and Guin, M. M.: Frictional Drag Reduction by Injecting Bubbly Water into Turbulent Boundary Layer, *ASME FED*, Vol. 190 (1994), pp. 185-194.
- 4) 佐藤徹, 中田崇, 竹下理人, 土屋好寛, 宮田秀明: 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 (1997), pp. 121-128.
- 5) Reed, J., Weinstein, L.: Flow Visualization Study of Grooved Surface/Surfactant/Air-Sheet Interaction, *AIAA Paper*, 89-0962, (1989).
- 6) 渡辺敬三, Yanuar, 大木戸勝利, 水沼博: 超撥水性矩形管の抵抗減少効果に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 62, 601 号 (1996), pp. 102-106.
- 7) 例えば, 機械工学便覧基礎編 A 5 流体工学, 日本機械学会編.