正員	加	藤	洋	治*	正員	藤	井	雄	作*
正員	山			*		宮	永		大*

Frictional Drag Reduction by Injecting High-Viscosity Fluid

by Hiroharu Kato, Member Yusaku Fujii, Member Hajime Yamaguchi, Member Masaru Miyanaga

Summary

This paper presents a new concept to reduce turbulent frictional drag by injecting high-viscosity fluid into boundary layer. When the turbulent region of boundary layer is filled with high-viscosity fluid and the viscosity of the viscous sublayer is kept low, the velocity profile in the boundary layer should change substantially. The Reynolds stress in turbulent region becomes less which requests more velocity gradient there to keep the momentum transfer same. It results in a reduction of velocity gradient at the viscous sublayer which gives the reduction of shear stress at the wall.

Such a boundary layer structure could be realized by injecting two different fluids from double slits on a wall. Sugar sirup was used as the high-viscosity fluid at the experiment. The sugar sirup and water were injected into turbulent boundary layer on a flat plate through up-stream and down-stream slits respectively. A steady injection was realized by pushing out the fluid in a tank using compressed air. The shear stress was directly measured by shear stress pick-ups mounted flush on the wall.

The experimental result showed a substantial reduction of shear stress by injecting sugar sirup and water from the double slits. The maximum reduction rate was more than 50%. A series of water/ water injection experiment was also made to know the effect of injection itself.

記号表	添加了字
C: 摩擦抵抗係数	0:吹き出しなし
L:試験体長さ	1:下流側吹き出し,境界層下方
Q:吹き出し流量	2:上流側吹き出し,境界層上方
T:温度	s:砂糖
U:一般流速	w:水
U _{**} :代表流速	
<i>u</i> : <i>x</i> 方向の速度	1. 序 語
v:y 方向の速度,平均吹き出し流速	物体にかかる粘性抵抗の低減は,流体力学の研究の
x:平板に平行な座標	主要なものの1つであり、長年にわたり多くの研究が
y:平板に垂直な座標	れている¹)。粘性抵抗は普通2つの成分,すなわち圧力
μ:粘性係数	と摩擦抵抗によりなっており,圧力抵抗の低減につい
ν:動粘性係数	種々の剝離の防止法により,低減が実現している"。
φ :ボイド率	これに対し摩擦抵抗の低減については乱流遷移の制
	よるものが, 研究の主流をしめていたが²)-4), 最近, 種
	手はにとり、利本倍用層と制御し麻痺性は値を低減し

東京大学工学部

)最も 行わ 1抵抗 ては,

御に 巨々の 于法により、乱流境界層を制御し摩擦抵抗値を低減しよう という研究が盛んになっている⁵⁾⁻⁸⁾。これらは弾性皮膜,リ

ブレット, LEBU/OLD (Large Eddy Break-Up Device/ Outer Layer Device) 等である。一方液体については上述 の手法の他にポリマー溶液やマイクロ気泡の吹き出しが有 効な方法として研究されている⁹⁾⁻¹¹⁾。特にマイクロ気泡は 条件によっては摩擦抵抗値が一桁近くも下がることが注目 されている。

ポリマー溶液の効果については Virk による解説¹²⁾が詳 しい。それによれば、ポリマーの効果(トムズ効果)が現 れるにしたがって、境界層内の粘性底層的な領域が広がり、 レイノルズ応力が減少する。また境界層内へポリマー溶液 を吹き出した実験¹³⁾によれば、ポリマー溶液が粘性底層の 上側、すなわち遷移層に入った時、効果が大きい。

一方マイクロ気泡の吹き出しについても、マイクロ気泡 の分布は境界層の底に近い所で極大値を持つという計測結 果が得られている¹¹⁾。マイクロ気泡の効果のメカニズムに ついては、マイクロ気泡による見掛けの粘性係数の増加に よるとした解析がある。Madavanらは混合長さの理論を 使ってメカニズムを説明している¹⁴⁾。すなわち、遷移域から 乱流域の下部にマイクロ気泡が入り粘性係数が増加すると 乱流の混合長さが減少し、流れは層流的になり、壁面の速 度勾配が減少し、摩擦抵抗が減少するという説明である。

このような研究結果は、境界層内の流体の粘性を境界層 の厚さ方向に層状に変化させることにより、乱流境界層を 制御し摩擦抵抗を変化させることが出来る可能性を示唆し ている。本研究は平板に2列のスリットを設け、上流側か らは高粘性液体を、下流側からは主流と同じ液体を吹き出 して、上述の状態を実現し、壁面のせん断応力を測定して、 このような状態で実際に摩擦抵抗が低下することを確かめ たものである。

2. 抵抗低減の機構

高粘性流体が乱流境界層中に層状に存在した時,壁面の せん断応力がどのようになるかを平板上の境界層を例にと って考察する。よく知られているように平均流に対するせ ん断応力 r は次式のように表せる¹⁵⁾。

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \tag{1}$$

ここで記号 と 'はそれぞれ時間平均値と変動成分で あり、 $-\rho \overline{u'v'}$ はレイノルズ応力と呼ばれている成分であ る。

平板乱流境界層の乱流特性値の測定結果^{[5)16)}によれば, 境界層の大部分をしめる乱流領域では,運動量交換はレイ ノルズ応力によるものがほとんどで,分子粘性によるもの ((1)式右辺第1項)は無視出来るほど小さい。一方,粘性 底層ではレイノルズ応力による運動量交換が急激に減少す るため,分子粘性による交換によらざるを得ない。すなわ ち壁面附近での速度勾配が大きくなって,これを受け持つ。 逆に云えば境界層の大部分で分子粘性による交換が小さ くてすむため,速度勾配が小さくてすみ,そのため,壁面 附近で大きな速度差すなわち大きな速度勾配をとることが 出来る。壁面でのせん断力 tw は

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=0} \tag{2}$$

で与えられるから、これが乱流境界層において tw が大きく なる理由とも云える。

(1)式において乱流領域に対し、何らかの方法で $-\rho u'v'$ の値を小さくすることが出来れば、運動量交換の ため $\mu \partial u/\partial y$ の項が大きくならざるを得ず、このことは壁 面での速度勾配を減少させることになる。ここで乱流領域 において、流体の粘性が増加しレイノルズ応力が減少する と、 $\mu \partial u/\partial y$ の μ は増加するが、それでもなお $\partial u/\partial y$ の値が 増加する可能性がある。すなわち Fig.1 に示すような速度 分布となり、壁面近傍の流体の粘性は変化しないので $\partial u/\partial y|_{y=0}$ の減少に比例して τ_u が減少する。このことは実 質のレイノルズ数の減少による再層流化とも云える。

乱流境界層のある層が高粘性流体となった時、境界層内 の速度分布や τ_w がどのようになるかを解析計算した例は、 先に述べたようにマイクロ気泡の吹き出しをあつかった Madavan らの研究¹⁴⁾がある。彼らは乱流モデルとして混 合長モデルを採用し、粘性変化の影響は van Driest の damping factor に表れるとしているので、高粘性流体 (マ イクロバブル) が buffer layer にある時、最も効果がある という結果を得ている。しかし乱流モデルにより、この結 論は変わり得る。

いずれにしても壁面のごく近傍においてµを変えずに 速度勾配を変えることが出来ればよい訳である。

3. 実験装置および実験方法

実験は東京大学工学部船舶海洋工学科のTE型キャビテ ーション・タンネルを、回流水槽のように使用して行われ た。高粘性液体としては砂糖水を用いた。高粘性液体には エチレングリコル、グリセリンなどがあるが、いずれも下 水に排出するのに問題があり、一方砂糖水は砂糖の濃度と 温度により粘性を自由に変えられ、水の粘性の30倍程度の 溶液までは簡単に作り得る。Fig.2 に砂糖の濃度と粘性係



Fig. 1 Concept of frictional drag reduction



Fig. 2 Viscosity of sugar sirup

数の関係を示す。

TE 型キャビテーション・タンネルの試験部断面は 120 mm×60 mm の長方形で、測定部長さは 370 mm である。 この試験部には 4 面に測定窓が設けられており、下面の窓 を取り外し、Fig. 3 に示す 2 重吹き出しスリットのある試 験体 (長さ L=350 mm)を取り付けて、実験を行った。吹 き出し平板面を試験部の下面より 20 mm 高くしたのは、 平板上の境界層内の速度分布をレーザ流速計(LDV)で計 測しようとしたためである。なお、試験体はすべてステン レス鋼で作られている。

スリットの詳細を Fig.4 に示す。このスリット部は交換 できるようになっており、スリット幅を変えた実験が行え る。しかし、今回の実験では試作したスリットの内、一番 幅の大きい0.6 mm のスリットのみを使用している。また スリットの下流側の角を曲面とし、吹き出す流体が壁面か ら剝離しないようにしている。

スリットの下流に Fig.3 に示したように5 ケのせん断 力計が埋め込まれるようになっている。ただし、今回の実 験は4 ケのせん断力計のみ使い一番下流のものにはダミー が埋め込まれている。せん断力計は上流から No.1~No.4



Fig. 4 Details of injection slits block

と呼ぶことにする。使用したせん断力計は三計エンジニア リング(株)製 S10W 型水用せん断力計(許容せん断応力 500Pa)である。このせん断力計は Fig.5 に示すように検力 部が直径 5 mm の円板で、そこにかかるせん断力を 2 本の 柱の変形で検知する構造である。せん断力計の定格容量は 1g,応答周波数は 30 Hz である。キャリブレーションは、 せん断力計を空中で垂直におき、検力用の円板の表面に糸 を張りつけ、その糸に静荷重をかけるという方法で行った。 しかし後に述べるように、このようなキャリブレーション だけでは十分でない。

本実験では小量の水および砂糖水を一定時間,定常に吹 き出すことが必要である。このような小容量のポンプはタ ーボ形のものは市販されておらず,ルーツ形,ギヤ形のも



Fig. 5 Details of shear stress pick-up



Fig. 3 Flat plate with double slits

42

日本造船学会論文集 第168号



Fig. 6 Injection set-up

のは流れに脈動が入るので好ましくない。

そこで, Fig.6 に示すように容器にためた溶液を空気圧 で放出するという方法で,吹き出しを行うことにした。吹 き出し流量は浮子式流量計で計測した。この流量計は水用 のものなので砂糖水に使用する場合には,実験の直前にそ の溶液を用いてキャリブレーションを行った。これは溶液 の粘性が濃度,温度により大きく変化し,流量計の読みと 実際の流量との間に差異が生じるためである。キャリブレ ーションは流量計を出た溶液をメスシリンダにため,所用 時間をストップウォッチで計ることによりおこなった。

一方溶液の粘性は毛細管式の粘度計で実験のたびごとに 計測した。上述のように粘性は温度により大きく変化する ので、同時に液温を計測している。

4. 実験結果

4.1 試験平面上の速度分布

前述のように試験体はキャビテーション・タンネルの底 面から突出した形状になっている。このような形状の時, 試験体上面の流速がどのようになっているかを,数値計算 および実測により検討した。

数値計算は、吹き出しと渦の2種の特異点を物体表面に 分布させた Hess-Smith 法に類似の方法で行い、試験流路 の上壁面は鏡像として計算に取り入れている。また、境界 層計算とのくり返し計算により境界層の排除厚の影響を考 慮している¹⁷⁾。

一方,LDVにより試験体表面の境界層内の流速分布を計 測した。そして境界層外縁の流速を推定し計算結果と比較 した。Fig.7は一般流の代表流速(U_w)が10.1 m/sの場合 である。試験体表面の位置xは試験体長さL(=350 mm) で無次元化してある。せん断力計 No.1の位置がちょうど x/L=0.5 である。またこの位置から10 mm上流(断面 Bと 呼ぶ)での一般流流速を代表流速U_wとしている。図に見ら れるように一般流の流速は吹き出しスリットから下流部で の増加は小さく,2%以下である。この増加は物体の形状と, 流路壁面の境界層の発達によるものであると考えられる。 U_w=5.7 m/sにおいても,同様の計算と計測を行ってせん 断力計近傍では平板とみなしてよいことを確かめている。 また吹き出しがない時の境界層内流速分布の測定結果の



Fig. 7 Main flow velocity distribution

例を Fig. 8(a)(b)に示す。流速分布の計測は 7 つの断面 で行っているが、ここでは断面 B(x/L=0.471) と、その下 流 60 mm の断面 E(x/L=0.643) での結果を示している。 図に見られるように流速分布は対数則に乗っており、乱流 境界層と考えることが出る。ただし $U_{\infty}=5.7$ m/s、断面 B の計測結果は乱流が十分には発達していないことを示して いる。この場合、試験体の平面部の前縁 (Fig. 3 o S 点) か ら計ったレイノルズ数は $Re=5.4 \times 10^5$ であるが、境界層は その上流から発達しており実効のレイノルズ数はもっと大 きいものと思われる。

4.2 壁面のせん断応力

壁面のせん断応力は計測が困難な物理量の一つである。 本研究ではせん断力計で壁面のせん断応力を直接計った が、その精度について下記のように検討した。

Fig.9 は吹き出しがない場合のせん断力計の計測結果 で、(a)は U_{∞} =5.7 m/s,(b)は U_{∞} =10.1 m/s の結果であ る。また境界層の流速分布の測定結果(Fig.8)に平板境界 層の乱流領域の式

 $u^+=2.5 \ln y^++5.5$

をあてはめ, tw を求めた結果,および4.1で述べた特異点 法と境界層計算を組み合わせた数値計算の結果も掲げてあ る。図に見られるようにせん断力計による直接測定はせん 断力計により大きな差があるものの,計算値と一致してい る。一方,流速分布の測定結果から求めたものは全体的に 小さめの値となっている。

せん断力計の測定結果には下記のような誤差が含まれて いることが考えられる。

(1) せん断力計の形状誤差等,そのせん断力計に固有 で時間的に変化しない誤差

(2) 水を放置したことによる水質の変化, 受感部への 付着物等,実験の1シリーズ中ではあまり変動しないが, 実験する日が異なると現れる誤差

(3) 受感部の振動,電圧の変動等,実験中に変動する



injection

誤差

Fig. 9 に見られるようにせん断力計 No.3 は常に大きめの値を示している。この原因を推定するため、せん断力計の受感部と周辺部の凹凸を金属顕微鏡を使って調べた。その結果 Fig. 10 に示すように No.3 の受感部は前縁が周辺部より 40 μ m 程度高いことがわかった。このような形状であると流れの動圧により力が加わり、測定値は大きめになることが考えられる。他の3 ケは±5 μ m 程度で前縁部が周辺部と一致している。

ここで試みに No.3 の場合,境界層底部の流速分布がそ のまま保持されて,動圧がかかるとして力の大きさを計算 すると,高さ 40 μ m は U_{∞} =5.7 m/s のとき y^+ =8.9 に相当 し,力は 0.014 g となり,これは C_r に換算して 0.42×10⁻³ となる。これは Fig.9 に表れた差異と同じオーダーであ る。

Fig.9 に示したように一日の実験の前後での計測では再 現性は非常によいにもかかわらず,別の日には20%以上も 異なった測定値になることがある。この原因については以 下のようなものが考えられる。

本実験においては砂糖水を使用するため、実験後一日程 度でも、微生物の繁殖などにより水が白濁して来る。そこ で水を交換した後も壁面や受感面に糖分や有機物が付着し て、壁面の条件が変わって来る可能性がある。しかし、こ のような原因だけで Fig.9 に示したような変化が説明出 来るかどうか不明であり、さらに検討を要する問題である。

一方,実験の1シリーズ中の変動・誤差は小さく,測定 値の標準偏差は1~2%であった。また主流流速,吹き出し 流速,粘性計測の誤差はそれぞれ最大1.8%,1.2%,10% 程度である。粘性計測誤差が大きいのは砂糖水の温度が気 温より低く,計測中に変化するためである。

以上の考察をまとめると以下のようになる。

(1) 本実験で使用したタイプのせん断力計は静的荷重 によるキャリブレーションの他に,条件のわかった流場で 計測し,測定値をチェックする必要がある。 44

日本造船学会論文集 第168号



(a) $U_{\infty} = 5.7 \, \text{m/s}$



(b) $U_{\infty} = 10.1 \, \text{m/s}$

Fig. 9 Shear stress measurement without injection



Fig. 10 Surface irregularity of shear stress pick-up No. 3

(2) せん断力計の測定値の絶対値は誤差が大きいが, 相対値の比較,たとえば吹き出しのある,なしの比較など の場合には,No.3のピックアップ以外は誤差は小さく出 来,本実験では6%以下と考えられる。

4.3 吹き出し実験

実験は下流側のスリットから水を吹き出し、上流側のス リットから所定の粘性の砂糖水を吹き出す実験の他に、吹 き出しそのものの影響を調べるため、2つのスリ³ットとも 水を吹き出す実験を行った。

砂糖水を吹き出すと, Fig. 11 のように溶液は白濁して見 える。これは砂糖水の光の屈折率が水の屈折率と大きく異 なるために起きる現象であると思われる。このように白濁 するため,流れの様子や混合の様子を見るのには都合がよ いが, LDV による流速計測は出来ない。また吹き出す水を 着色して流れの様子を可視化する実験も行った。

せん断力計の信号は、一般流速、静圧のデータとともに 6チャンネルのトランジェント・レコーダ(理研電子(株) 社製)に同時記録し、パーソナルコンピュータ(NEC PC 9801 VX)で解析した。データのサンプリング・タイム は 0.5 ms、データ数は 8192 ケである。

実験条件は下記の通りである。

- (1) 代表流流速 2種 U∞=5.7 m/s, 10.1 m/s
- (2) 砂糖水濃度 2種 vs=9.2, 28 cSt
 μs=11, 35 cP

 $\mu_s/\mu_w = 11, 30$

(3) 吹き出し流量 水 0~15 l/min

砂糖水 0~101/min

また吹き出し流量をスリット断面積で割り,平均吹き出し流速 v₁, v₂ を定義している。

4.4 水/水 吹き出し実験

スリットからの吹き出しにより境界層内の流れは変化 し、せん断力が変化する。この吹き出しの影響を調べるた め、2つのスリットの両方から水を吹き出した実験を行っ た。Fig. 12 に U_{∞} =5.7 m/s, Fig. 13 に U_{∞} =10.1 m/s の場 合を示す。図には変化の顕著なせん断力計 No. 1~3 のデー タを示している。ここで縦軸の C_{10} は吹き出しなしのせん 断応力の値で、それぞれの実験の前後で計測し、その変化 が計測誤差の範囲内におさまっていることを確認してい



 $U_{\infty} = 10.1 \text{ (m/s)}$ $v_1/U_{\infty} = 0.34 \text{ (}Q_1 = 5.0 \text{ l/min)}$ $v_2/U_{\infty} = 0.61 \text{ (}Q_2 = 9.0 \text{ l/min)}$





Fig. 12 Results of shear stress measurements (Water/Water, U_{∞} =5.7 m/s)



Fig. 13 Results of shear stress measurements (Water/Water, U_{∞} =10.1 m/s)

る。また、 v_1 、 v_2 はそれぞれ下流側および上流側のスリット からの平均吹き出し速度である。吹き出した流体が層状に 流れると、模式的には v_1 の液体が境界層の底部に、 v_2 の液 体がその上を流れることになる。Fig. 12, 13 に見られるよ うに、全体の傾向は、 $v_2/U_{\infty}=0.5$ 附近までは、 v_2 の増加と ともに、 C_f/C_{f0} の値はやや減少する。そして極小値を取っ た後、急に増加し始める。吹き出しにより遅い流体が壁面 近傍を流れれば、壁面での速度勾配は減少し、 τ_{40} すなわち C_f が減少することが考えられる。さらに吹き出し流速が 増えれば、境界層内の速度分布は wall-jet 形となり、 C_f は 増加することになる。 これらの効果は吹き出しスリットより下流に行くにした がって、急速に減少しており、境界層内の混合作用が大き いことが見てとれる。Fig. 12 に見られるように、 U_{∞} =5.7 m/sの場合に、一番上流にあるせん断力計 No.1では、 v_1/U_{∞} =0.30 で C_f/C_{f0} が最も小さくなり、 v_1/U_{∞} =0.61 で はかえって増加しているが、上述のように吹き出し速度が あまりに大きいと wall-jet 形となるためと思われる。しか し、このような流速分布はすぐ減衰し、No.2 以下のせん断 力計では吹き出し流速が大きいほど C_f 減少効果が大きく なっている。

4.5 水/砂糖水吹き出し実験

下流側スリットから v_1 の平均吹き出し速度で水を吹き 出し、上流側スリットから v_2 で砂糖水を吹き出した時の C_f/C_{f_0} の変化を、下記の4条件について計測した。

Test Number	U_{∞}	μ_s/μ_w	Reference
1	5.7 m/s	30	Fig. 14
2	5.7 m/s	11	Fig. 15
3	10.1 m/s	30	Fig. 16
4	10.1 m/s	11	Fig. 17

これらの実験から下記のことがわかる。

(1) 水/砂糖水の吹き出しによって、水/水の吹き出し より格段に大きい壁面せん断応力の低下が得られる。最も 効果が大きかったのは、下記の条件である。 U_{∞} =5.7 m/s, μ_s/μ_w =30, v_1/U_{∞} =0.30, v_2/U_{∞} =0.73 で C_f/C_{f0} =0.47 が 得 られた。すなわち壁面せん断応力は 1/2 以下となった。

(2) *C₁/C₁₀* の変化は一般に, *v*₁, *v*₂ の増加とともに減 少し, ある条件で極小値をとり, それ以上 *v*₁ あるいは *v*₂ を 増加させると, *C₁/C₁₀* は急増し始める。

(3) せん断力の減少効果は下流に行くに従い急激に減 少する。本実験ではせん断力計 No.4の位置(下流側スリッ トより 90 mm)で、いずれの条件でもほとんど効果がなく なっている。



Fig. 14 Results of shear stress measurements (Water/Sugar sirup, U_{∞} =5.7 m/s, μ_s/μ_w =30)



(Water/Sugar sirup, $U_{\infty} = 5.7 \text{ m/s}, \mu_s/\mu_w = 11$)



Fig. 16 Results of shear stress measurements (Water/Sugar sirup, $U_{\infty}=10.1 \text{ m/s}, \mu_s/\mu_w=30$)



(Water/Sugar sirup, $U_{\infty}=10.1 \text{ m/s}, \mu_s/\mu_w=11$)

(4) 本実験の範囲内では $U_{\infty}=10.1 \text{ m/s}$ よりも $U_{\infty}=5.7 \text{ m/s}$ の方が, $\mu_s/\mu_w=11$ の溶液より $\mu_s/\mu_w=30$ の溶液の 方がせん断力減少効果が大きい。

Fig. 18 は v_2/U_{∞} を一定にして v_1/U_{∞} を変化させた場合 の、せん断力計 No.1 (x/L=0.500) で計った C_f/C_{f0} であ る。 $U_{\infty}=10.1 \text{ m/s}$ の場合には v_2/U_{∞} の2個の流速の結果 を掲げてある。両者の v_2 の差は小さいので同じものとして 考察してよい。 U_{∞} =5.7 m/s の実験では明らかに v_1 に最適 値が存在するのがわかる。一方、 U_{∞} =10.1 m/s の実験では 吹き出し能力の制限のため C_1/C_{10} の極小値附近で実験が 終わっている。いずれにしても、粘性底層に粘性の低い流 体が存在することにより壁面での摩擦応力が減少すること がわかる。



日本造船学会論文集 第168号



Fig. 18 Effect of v_1/U_{∞} on C_f/C_{f0}

5.考察

5.1 簡単な解析結果との比較

麻岡と山田はキャビテーション気泡群が境界層内にある 時,壁面のせん断応力がどのように変化するかを,前述の Madavanらの計算¹⁴⁾と類似の方法で計算している¹⁸⁾。この 計算で,キャビテーション気泡群の効果は流体の粘性の増 加としてのみ表われているとしているから,計算結果はそ のまま本実験の結果と比較して考えることが出来る。

計算は、 $U_{\infty}=10 \text{ m/s}, x=0.30 \text{ m}, Re=3.0\times10^6$ として、 Fig. 19 のように境界層内の $y_1 \sim y_2$ の流体のボイド率がス テップ状に ϕ になったとして、 C_f の値を求めている。 ϕ と 気泡群を含む水の粘性係数の間には、Sibree の式

 $\mu = \mu_w / (1 - 1.09 \phi^{1/3})$ (3) が成り立つとしているから、これは $y_1 \sim y_2$ 間の流体の粘性 係数が(3)式にしたがって、 μ_w から μ_s にステップ状にな ったとした計算と同じである。

Fig. 20 は $\Delta y = y_2 - y_1 = - 定 (0.5 \text{ mm})$ にして y_1 を変化 させた時の C_f/C_{f0} の計算結果である。

ここで, y_1 は下流側のスリット幅に, Δy は上流側のスリ ット幅に対応する量である。計算と実験ではレイノルズ数 が異なり,また流れのパターンも異なっており,定量的な 比較は出来ないが,高粘性流体を吹き出した影響について は比較・考察することが出来る。計算では, $y_1=0.6 \text{ mm}$, Δy



Fig. 19 Calculation condition



Fig. 20 Calculated C_f/C_{f0} value according to void ratio (viscosity) and its position in boundary layer

=0.5 mm, ϕ =0.6 すなわち μ_s/μ_w =12.4 のとき, C_f/C_{f0} = 0.90, ϕ =0.7 すなわち μ_s/μ_w =31.1 のとき, C_f/C_{f0} =0.82 と なっている。

この計算における C_f/C_{f0} の極小値は ϕ =0.5 すなわち μ_s/μ_w =7.4 の流体が、 y_1 =0.1 mm から y_2 =0.6 mm(Δy = 0.5 mm)の間にある時で C_f/C_{f0} =0.68 である。

これらの計算結果を Fig. 14-17 に示した実験結果と比 較すると定性的な傾向が合うのみならず,定量的にもほぼ 妥当な結果と云えよう。

実験においては 5.2 に述べる混合の影響が大きく, y_1 あるいは v_1 の値も理論的に求めた最適値よりずっと大きな値のとき, C_f/C_{f0} が極小となるのであろう。

5.2 境界層内の混合について

Fig. 11 に吹き出し時の流れの様子を示したが、大規模な 乱れが生じている。これは乱流境界層本来の乱れによるも のの他、吹き出しによる攪乱がこれに加わったものであろ う。せん断力の計測結果にも、混合によると思われるもの がある。例えば Fig. 17 (U_{∞} =10.1 m/s, μ_s/μ_w =11)の v_1/U_{∞} =0.0 のデータを見ると大きな波打ちが見られ、特に v_2/U_{∞} が 0.5 から 0.6 に増加すると C_f/C_{f0} が大幅に減少する。も し吹き出した流体が安定に層状に流れるなら、この条件で は境界層底部には高粘性流体が流れ、このような変化は生 じないはずである。このことからも吹き出した流体が大規 模な混合をしていることが考えられる。この場合測定値の 再現性がよいことから、時間的には安定な混合となってい るものと思われる。

また吹き出しスリットは製作当初はスリット幅が一定の まま吹き出し口に達し、このためスリットの下流側のコー ナーが角ばっていたが、その場合には吹き出した流体は、 スリットを出てすぐ混合し、Fig.14-17に示したような *C₁/C₁₀*の低下効果はほとんどなかった。そこで、このコー ナーの角をまるめ、吹き出した流体が壁面にそって流れる ように形状を改良している。吹き出しスリットの形状、吹 き出し方法などをさらに改良し、初めに期待していた大規 模な乱れの少ない層状の流れが実現出来れば、少量の高粘 性流体の吹き出しでも効果がある可能性がある。またスリ ット幅、吹き出し角度、吹き出し速度、流体の特性などに ついて最適な条件を求めることも必要である。

さらにこの現象の解明には、境界層内の流速分布、濃度 分布,乱れ度の計測などが必要であり、これらは今後の課 題である。

6. 結 論

平板上の2つのスリットの上流側から高粘性流体(砂糖水)を、下流側から主流と同じ流体(水)を吹き出して、 その下流の壁面のせん断力の変化を、壁面に埋め込んだせん断力計で直接測定し、下記の結論を得た。

(1) 上述の水/砂糖水の吹き出しにおいて,適当な条件

で吹き出しを行えば壁面のせん断力が減少する。本実験で は最大 50%程度の減少が得られた。水/水の吹き出しでも せん断力のわずかな減少が見られたが、そのメカニズムは 異なるものと思われる。

(2) 本実験の範囲内では、一般流速が小さい方が、また吹き出し流体の粘性が高い方が効果が大きい。また乱れが大きいため、下流に行くとその効果は急激に減衰する。

(3) 吹き出しにより大規模な乱れが生じていると思わ れ、これがせん断力減少効果を減殺している。

(4) 本研究で述べた現象は、境界層内の乱流領域での レイノルズ応力が高粘性流体の存在により減少し、そのた め壁面での速度勾配が減少して、摩擦抵抗が減少するとい う機構であると考えられる。しかしその機構の詳細な解明 には、速度分布、濃度分布、乱れ度などミクロな計測が必 要であり、これらは今後の課題である。

7.謝辞

実験にご尽力いただいた東京大学工学部船舶海洋工学科 流体工学研究室の諸氏,特に実験初期に実験と現象の考察 を熱心に行ってくれた増本大器君に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 田古里哲夫:粘性抵抗減少法,日本造船学会,粘性 抵抗シンポジウム(昭48年5月),pp.169-188
- 2) Lachmann, G. V. (Ed.): Boundary Layer and Flow Control, Vol. 1, 2 (1961) Pergamon Press
- 中口博:Laminar Flow Control, 日本航空学会誌, Vol. 10, No. 107 (1961), pp. 377-389
- 4) 石田洋治: 層流制御技術について, 日本航空宇宙学 会誌, Vol. 31, No. 356 (1983), pp. 475-484
- 5) 2nd International Conference on Drag Reduction, Cambridge, England (Sept. 1977), BHRA Fluid Engineering.
- 6) Hough, G. R. (Ed.) : Viscous Flow Drag Reduction, Progress in Astro. and Aero. Vol. 72 (1980), AIAA
- Bandyopadhyay, P. R.: Review-Mean Flow in Turbulent Boundary Layers Distributed to Alter Skin Friction, J. Fluids Eng., ASME, Vol. 108 (June 1986), pp. 1270-1400
- Liepmann, H. W. and Narasimha, R. (Eds.): Turbulence Management and Relaminarisation, IUTAM Symposium, Bangalore, India (1987) Springer-Verlag
- ITTC Resistance Comm.: Frictional Drag Reduction Concepts, 17th ITTC Proceedings, Vol. 1 (Sept, 1984), pp. 116-120
- Madavan, N. K. et al: Measurements of Local Skin Friction in a Micro bubble-modified Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech. (1985), Vol. 156, pp. 237-256

- Bogdevich, V. G. et al.: Gas-saturation Effect on Near Wall Turbulence Characteristics, 2nd, Int. Conf. on Drag Redution, BHRA Fluid Eng. (1977), Paper D2, pp. D2~25~D2-37
- 12) Virk, P.S.: Drag Reduction Fundamentals, AIChE Journal, Vol. 20, No. 4, (July 1975), pp. 625 -656
- Tiederman, W. G. et al.: Wall-layer Structure and Drag Reduction, J. Fluid Mech., Vol. 156 (1985), pp. 419-437
- 14) Madavan, N. K. et al. : Numerical Investigations into the Mechanisms of Microbubble Drag Reduc-

tion, J. Fluids Eng. ASME, Vol. 107 (1985), pp. 370-377

- 15) 生井武文,井上雅弘:粘性流体の力学,理工学社
- Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory, 7th Ed. McGraw-Hill Book Co.
- 17) Yamaguchi, H. et al.: Development of Marine Propellers with Better Cavitation Performance, 3rd Report, J. Soc. Naval Arch, Japan, Vol. 164 (Dec. 1988), pp. 28-42
- 18) 麻岡秀行,山田義博:キャビテーション発生による 摩擦抵抗の低減,東京大学船舶工学科卒業論文(昭
 62年2月)

⁵⁰