

## 高粘性流体の吹き出しによる摩擦抵抗低減 (第2報)

正員 藤井雄作\* 正員 加藤洋治\*\*  
 正員 山口一\*\* 宮永大\*\*

Frictional Drag Reduction by Injecting High-Viscosity Fluid  
 (2nd Report)

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

## Summary

In the first report, the authors showed a new concept to reduce turbulent frictional drag by injecting high-viscosity fluid into boundary layer. The experimental result showed a substantial reduction of shear stress by injecting sugar sirup which was used as high-viscosity fluid and water from the double slits.

In this report, the experiment of water/sugar sirup injection was done in many conditions. The injected sugar sirup looked white that was because of a large difference in index of refraction between water and sugar sirup. So Laser Doppler Velocimeter could not be used for measurement of velocity distribution. In this report, the velocity distribution was measured by cross-correlation method using a pair of hot film anemometers. The velocity gradient became less at the vicinity of the wall when the water/sugar sirup was injected. It confirmed the hypothesis of drag reduction shown in the first report. A finite difference computation was also made for different viscosity layers in boundary layer.

## 記号表

$C_f$  : 摩擦抵抗係数  
 $L$  : 試験体長さ, 代表長さ  
 $Q$  : 吹き出し流量  
 $U$  : 一般流速  
 $U_\infty$  : 代表流速  
 $C$  : 濃度  
 $u$  :  $x$  方向の速度  
 $v$  :  $y$  方向の速度  
 $x$  : 流れに平行な座標  
 $y$  : 壁面に垂直な座標  
 $\mu$  : 粘性係数  
 $\tau$  : せん断応力  
 添字  
 $0$  : 吹き出しなし

1 : 下流側吹き出し, 境界層下方  
 2 : 上流側吹き出し, 境界層上方  
 $s$  : 砂糖  
 $w$  : 水, 壁面

## 1. 緒言

前報<sup>1)</sup>において, 乱流境界層の粘性底層より上部に高粘性流体を入れることにより, 壁面でのせん断応力が小さくなる事を実験により確かめた。すなわち, 平板上に発達した乱流境界層において, 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応力の変化を, 壁面に埋め込んだせん断力計により直接計測し, 適当な条件で吹き出しを行なえば壁面のせん断応力が減少する事を確かめた。

前報において抵抗低減効果が顕著であった遅い方の代表流速においては, 乱流が十分には発達していなかったため, 本報告においては, Turbulence-Stimulatorを取り付け十分に発達した乱流境界層とした上での実験を含めて, 吹き

\* 川崎製鉄(株)(研究当時, 東京大学大学院工学系研究科)

\*\* 東京大学工学部

出し実験を詳細に行なった。さらに、2本の熱膜流速計を用いた相互相関法により、砂糖水吹き出し時の流速分布の計測を行なった。また、数値計算を行い現象の再現を試みた。

### 2. 抵抗低減の機構

抵抗低減の機構については、前報で考察されているので簡単に述べる。

高粘性流体が乱流境界層中に層状に存在した時、境界層内のせん断応力分布がどのようなようになるかを考える。乱流境界層内のせん断応力は次式のように表せる。

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

ここで、記号  $\bar{\quad}$  と  $\prime$  はそれぞれ時間平均値と変動成分であり、 $-\overline{\rho u'v'}$  は、レイノルズ応力である。

乱流境界層中で粘性が高い部分があれば、そこではレイノルズ応力が小さくなることが考えられる。そこでは、運動量交換のため  $\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$  の項が大きくならざるを得ず、このことは、壁面での  $\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}|_{y=0}$  の値、すなわち、摩擦抵抗を減少させることになる。すなわち、Fig. 1 に示すような速度分布となり、壁面付近での粘性は変わらないので、 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}|_{y=0}$  の減少に比例して、 $\tau_w$  が小さくなる。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言える。一方、壁面での摩擦抵抗の減少は、境界層内の流れ方向の運動量変化の減少をもたらすはずであるから、境界層の速度分布は破線で示すように、吹き出しなしの乱流境界層のそれと交わったものとなる。

### 3. 吹き出し実験

ここでは、高粘性流体（砂糖水）を乱流境界層中の粘性底層より上部に吹き出すことにより、摩擦抵抗が低減する

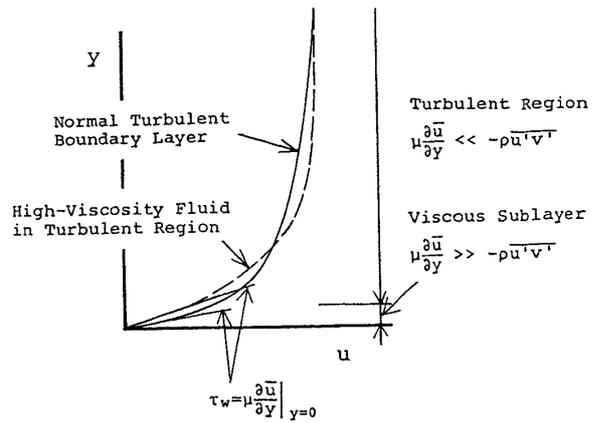


Fig. 1 Concept of frictional drag reduction

ことを確かめる実験を行なっている。この実験は前報においても行なわれ、摩擦抵抗が低減することはすでに確かめられているが、ここでは、さらに詳細な実験を行なった。

実験に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・トンネルを使用した。キャビテーション・トンネルの試験部に、Fig. 2 に示す2重吹き出しスリットのある試験体を取り付けて、実験を行なった。試験体に埋め込まれたせん断力計は、上流からNo.1~No.4と呼ぶことにする。試験体表面の位置  $x$  は、試験体長さ ( $L=350$  mm) で無次元化して表わすこととすると、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) での一般流速を代表流速  $U_\infty$  としている。

前報においては、吹き出し実験における遅い方の流速 ( $U_\infty=5.7$  m/s) において、乱流が充分には発達していなかったため、充分に発達した平板乱流境界層とするために試験体の上流部に Turbulence-Stimulator を取り付けた実

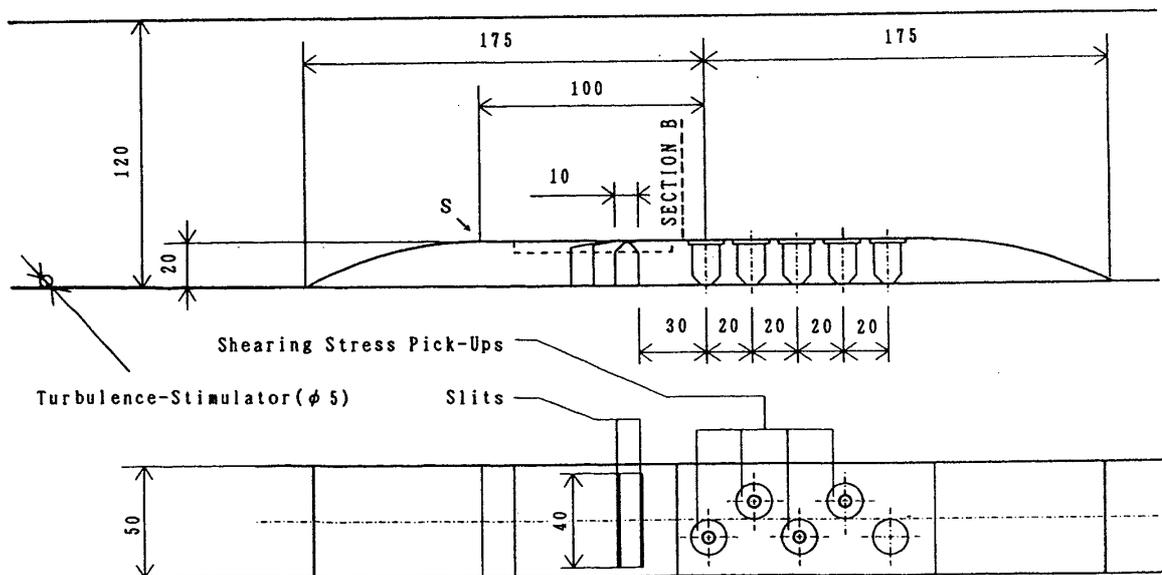


Fig. 2 Flat plate with double slits

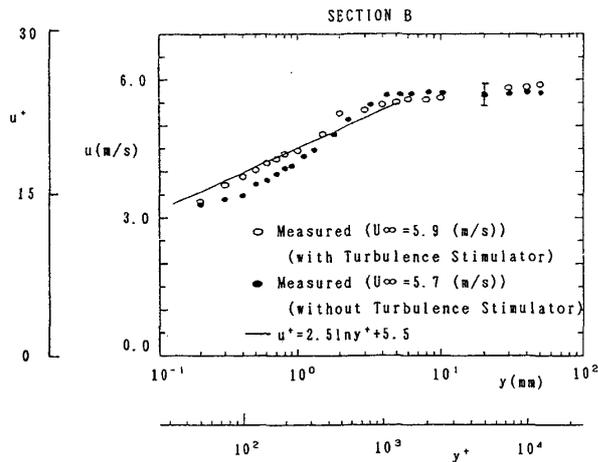


Fig. 3 Velocity distribution in boundary layer without injection (with/without Turbulence-Stimulator)

験も行うことにした。Turbulence-Stimulator は直径 5 mm の丸棒でこれを試験体の先端から 115 mm 上流の壁面に流れに対して直角に取り付けた。Turbulence-Stimulator を付ける前と付けた後での断面 B における流速分布の変化を, Fig. 3 に示す<sup>17)</sup>。図中の実験点には誤差範囲 (95%信頼度) も示してある。以下, 本論文では実験誤差はすべて 95%信頼度 (2 $\sigma$ ) で表示している。図に見られるように, Turbulence-Stimulator を付けた場合には, 流速分布は対数則に乗っており, 乱流境界層と考える事ができる。

試験体表面の流速分布から境界層外縁流速を推定し, 計算結果と比較した。これを, Fig. 4 に示す。このように, セン断力計近傍では, 平板とみなしてよいことが判る。

実験は下流側のスリットから水を吹き出し, 上流側のス

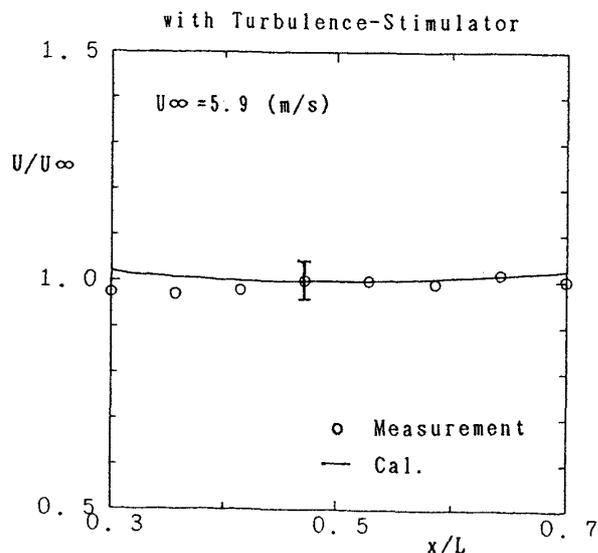


Fig. 4 Main flow velocity distribution

リットからは砂糖水を吹出す実験の他に, 吹き出しそのものの影響を調べる為に, 両方のスリットから水を吹き出す実験を行なった。結果の一例を, Fig. 5 に示す。ここで, 縦軸の  $C_f$  は吹き出しなしのせん断応力の値で, それぞれの実験中に計測し, その標準偏差が計測誤差の範囲内 (せん断力計 No.1 で最大 3%) に収まっていることを確認している。また,  $v_1, v_2$  はそれぞれ下流側および上流側スリットからの平均吹き出し流速である。図に見られるように全体の傾向は, 前報の Turbulence-Stimulator のない場合と同じである。すなわち,  $v_2/U_\infty=0.5$  付近までは,  $v_2$  の増加とともに  $C_f/C_{f0}$  の値はやや減少する。そして, 極小値をとった後, 急に増加し始める。

また, 吹き出しの効果は吹き出しスリットより下流にいくに従って急激に減少しており, 前報と同様, 境界層内の混合作用が大きい事が推察される。

次に, 下流側のスリットから平均吹き出し流速  $v_1$  で水を吹き出し, 上流側のスリットから平均吹き出し流速  $v_2$  で砂糖水を吹き出した実験を行なった。結果を, Fig. 6~9 に示す。

これらの実験結果から下記のことがわかる。

- (1) Turbulence-Stimulator により乱流にした境界層においても, 高粘性流体の吹き出しは壁面せん断応力の低減に効果がある。本実験の範囲内で最も効果が大きかったのは, 代表流速  $U_\infty=5.9$  m/s,  $\mu_s/\mu_w=49$ ,  $v_1/U_\infty=0.29$ ,  $v_2/U_\infty=0.72$  で,  $C_f/C_{f0}=0.35$  が得られた。すなわち, 壁面せん断応力は, 1/3 程度になった。(Fig. 6) また, 図に見られるように,  $v_2$  をさらに増加させれば抵抗低減の効果が増すことが予想されるが, 吹き出し機構の能力によりそれ以上  $v_2$  を増した実験は行えなかった。
- (2)  $C_f/C_{f0}$  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取り, それ以上  $v_1$  あるいは  $v_2$  を増加させると,  $C_f/C_{f0}$  は急増し始める。
- (3) 壁面せん断応力の減少効果は, 下流にいくに従って急激に減衰する。これは, 前報と同様の結果である。
- (4) 吹き出す砂糖水の粘性の影響を見る為に, Fig. 7 に,  $\mu_s/\mu_w=1\sim 49$ , Turbulence-Stimulator なし/あり, 代表流速  $U_\infty=5.7\sim 5.9$  m/s,  $v_1/U_\infty=0.30\sim 0.29$  において, セン断力計 No.1 で測った結果をまとめて示す。本実験の範囲内では, 吹き出す砂糖水の粘性が大きい方が, 壁面せん断応力減少効果が大きくなっている。また, Turbulence-Stimulator のなし/ありは, ほとんど, 影響しない。
- (5) 代表流速の影響を見る為に, Fig. 8 に, 代表流速  $U_\infty=5.9$  m/s, 8.2 m/s, 10.2 m/s, Turbulence-Stimulator あり,  $v_1/U_\infty=0.29\sim 0.34$ ,  $\mu_s/\mu_w=20\sim 21$  において, セン断力計 No.1 で測った結果をまとめて示す。本実験の範囲内では, 代表流速が小さい方が, 壁面せん断応力減少効果が大きくなっている。
- (6) 下流側からの水の吹き出しの影響を見る為に,

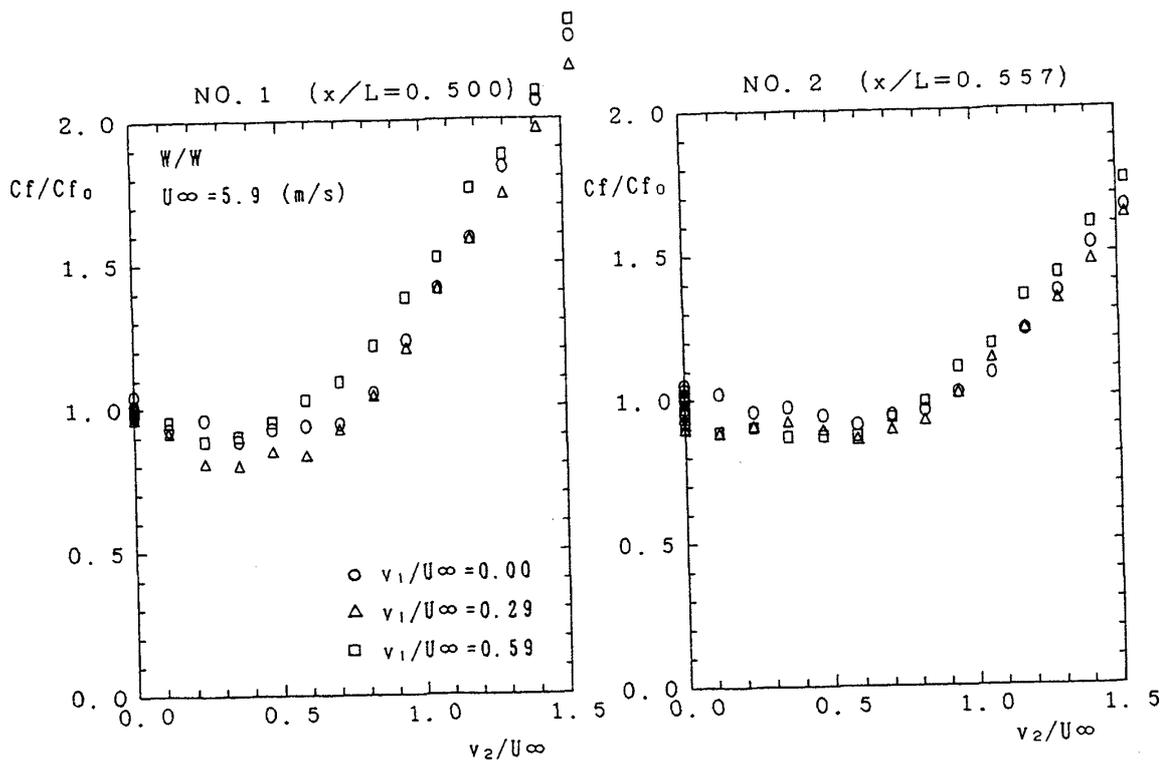


Fig. 5 Results of shear stress measurements  
(Water/Water,  $U_{\infty}=5.9$  m/s, with Turbulence-Stimulator)  
(Uncertainty of data in Fig. 5:  $\pm 9\%$ )

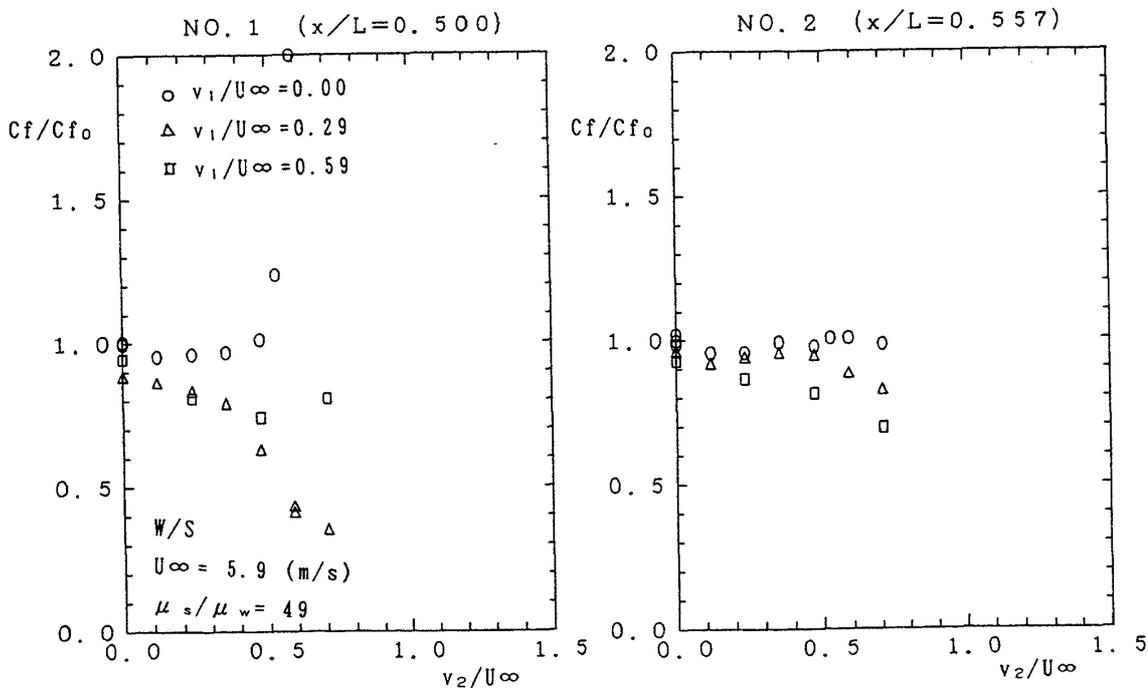


Fig. 6 Results of shear stress measurements  
(Water/Sugar sirup,  $U_{\infty}=5.9$  m/s,  $\mu_s/\mu_w=49$ , with Turbulence-Stimulator)  
(Uncertainty of data in Fig. 6:  $\pm 14\%$ )

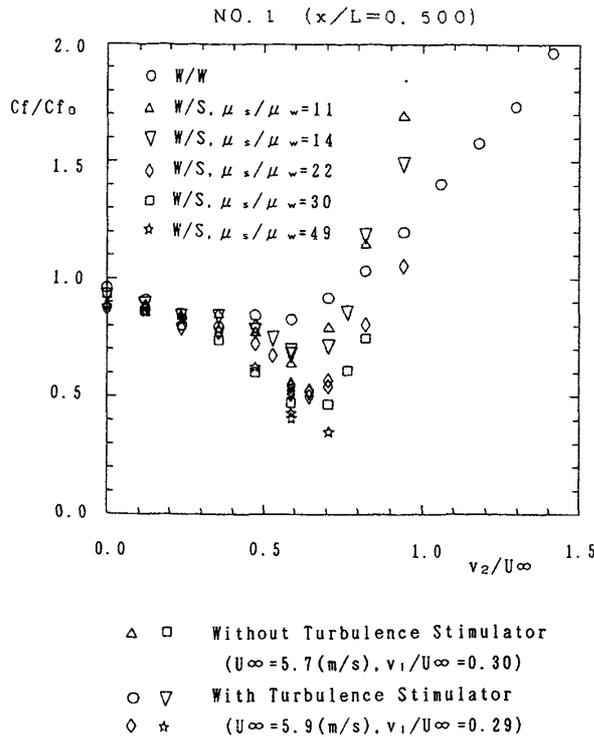


Fig. 7 Effect of  $\mu_s/\mu_w$  on  $C_f/C_{f0}$   
(Uncertainty of data in Fig. 7:  $\pm 14\%$ )

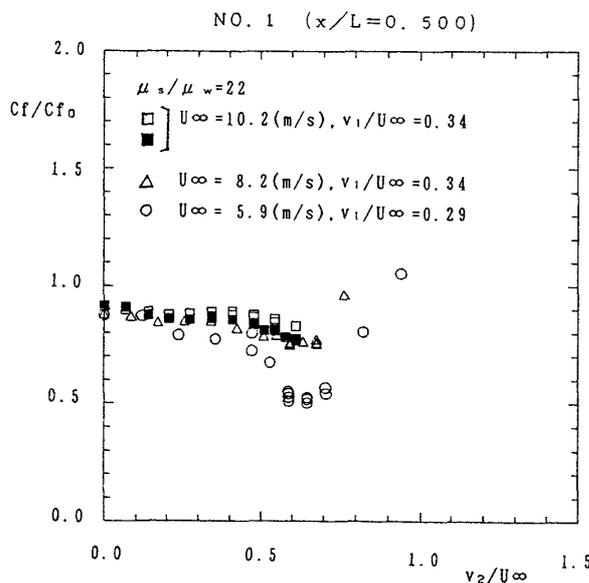


Fig. 8 Effect of  $U_\infty$  on  $C_f/C_{f0}$   
(Uncertainty of data in Fig. 8:  $\pm 14\%$ )

$v_2/U_\infty$  を一定にして、 $v_1/U_\infty$  を変化させた場合の、せん断力計 No. 1 で測った結果の一例を、Fig. 9 に示す。明らかに、 $v_1/U_\infty$  に最適値が存在することがわかる。また  $v_1=0$  では  $C_f/C_{f0}$  は 1 より大きくなっている。すなわち、粘性底層に粘性の小さい流体が存在することが、壁面での摩擦応力減少に重要な要素であることがわかる。

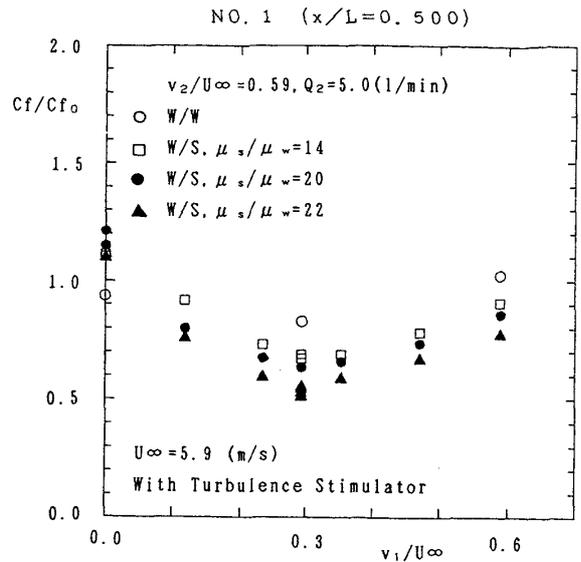


Fig. 9 Effect of  $v_1$  on  $C_f/C_{f0}$   
(Uncertainty of data in Fig. 9:  $\pm 14\%$ )

### 3. 熱膜流速計を用いた相互相関法による流速分布の計測

水/砂糖水吹き出し実験において示された、摩擦抵抗低減のメカニズムを解明する為には、そこでの流速分布がどうなっているのかを知ることは重要である。

水/砂糖水吹き出し実験においては、吹き出された砂糖水は水と混合し、水と砂糖水の光の屈折率の違いから、白濁して見える。この為、レーザー光が全く通らず、LDV による流速の計測はできない。そこで、熱膜流速計を用いた相互相関法により流速分布の計測を試みることにした。これは、2本の熱膜流速計の出力  $x(t)$ ,  $y(t)$  の相互相関より、相関が最大となる遅れ時間  $\tau$  を求め、この値と熱膜流速計の距離から流速を求めるものである。熱膜流速計は乱流境界層の乱れ度を計測するのに十分な周波数応答性を持っているので、理想的には上流側プローブで検知された渦や大規模構造による流速の変動<sup>16)</sup>は、下流側のプローブにある遅れ時間を以てそのまま現われることが期待される。そして、この遅れ時間は、プローブ間隔  $L$  をそのときの流速  $u$  で進むのに要する時間に等しいと考えられる。

2つの時刻歴  $x(t)$  と  $y(t)$  の対について、相互相関関数  $R_{xy}(\tau)$  は次のようになる<sup>2), 18)</sup>。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (-1 \leq R_{xy}(\tau) \leq 1)$$

ここで、例えば、 $x(t)=y(t+\tau_0)$  であるならば、相互相関関数  $R_{xy}(\tau)$  は、 $\tau=\tau_0$  で最大値 1 をとる。

本計測においては、データの時刻歴を有限フーリエ変換し、任意の周波数帯において相互相関関数(の不偏推定量)を求められるようにしている。

計測で用いた熱膜流速計は、プローブ間隔  $1=1.1$  mm、熱線部直径  $d=51\mu\text{m}$  である。計測は、水/砂糖水吹き出し実験において効果が顕著であった、せん断力計 No. 1 の位置で行なった。サンプリング・タイム  $5\mu\text{s}$  で、各プローブにつき 16384 個のデータを一回の計測で採取した。解析は、計算機のメモリーの関係から、これを、8 等分して、2048 個づつに分けて相互相関関数を求める等の処理を行なった。

本方法では 2 つのプローブはタンデムに置かれ、下流側のプローブは上流側のプローブの伴流中に入ることが考えられる。本実験での配置ではプローブ直径  $d=51\mu\text{m}$  に対し 2 つのプローブの距離  $1=1.1$  mm であるから、 $1/d\approx 22$  であり、十分離れているとは言えない。このような場合、下記の実験式が知られている。

$$\frac{u_1}{U} = 0.939 \sqrt{\frac{C_{Dd}}{x}} \exp\left(-\frac{11.09}{C_{Dd}} \frac{y^2}{x}\right) \quad (u_1 = U - u)$$

この式により計算すると、 $u/U \approx 0.8$  となる。そこで吹き出しなしの時の境界層内で LDV によりキャリブレーションを行なうことを試みたが、得られた波形はノイズに埋れた形となっており、よい相関は得られなかった。そこで上流部に金網(#5)を張り、乱れた一様流場とした上で LDV との同時計測を行なった。幾つかの流速において合計 22 回の同時計測を行なった結果、熱膜流速計による値は、LDV による値の 88.8% となった。その検定直線からの計測点の差異の標準偏差は 9.2% であった。

計測は、水/砂糖水吹き出し実験において効果が顕著であった条件 ( $U_\infty=5.9$  m/s,  $v_1/U_\infty=0.29$ ,  $v_2/U_\infty=0.59$ ,  $\mu_s/\mu_w=23$ ) に合せて行なった。また、吹き出しの組合せは、吹き出し実験において効果が顕著であった ( $v_1/U_\infty, v_2/U_\infty$ ) = (0.29, 0.59) を中心として、この他、( $v_1/U_\infty, v_2/U_\infty$ ) = (0.00, 0.59), (0.59, 0.59) の、全部で 3 通りとした。

計測した代表的波形を、Fig. 10 に示す。目で見てはつきりと相関が有る事が判る波形が得られた。また、これらの波形の解析結果を Fig. 11 に示す。このように、全周波数に対する相互相関関数は、明確なピーク値を持っている。

こうして得られた、砂糖水吹き出し時の境界層底部の流速分布を、Fig. 12 に示す。ここに示した流速分布はキャリブレーションの係数 0.888 で割ることにより修正した後のものである。また図中の実線は、吹き出しをしない時の LDV による流速測定結果を折れ線で結んだものである。一般的な傾向として、 $v_2/U_\infty=0.59$  において、 $v_1/U_\infty=0.00$ , 0.29, 0.59 と大きくなるに従い、 $y=0.4\sim 1.5$  mm 付近において速度勾配  $\partial u/\partial y$  が小さくなっていると言える。一方、それより壁面に近い部分の速度勾配  $\partial u/\partial y|_{\text{wall}}$  は大きくなっている。砂糖水のみ吹き出し時  $v_1/U_\infty=0.00$  においては、粘性底層にまで砂糖水が入っていると考えられるので、壁面における速度勾配  $\partial u/\partial y|_{\text{wall}}$  が小さくなっていても  $\tau_w$  は必ずしも小さくならない。 $v_1/U_\infty=0.29$  においては吹き

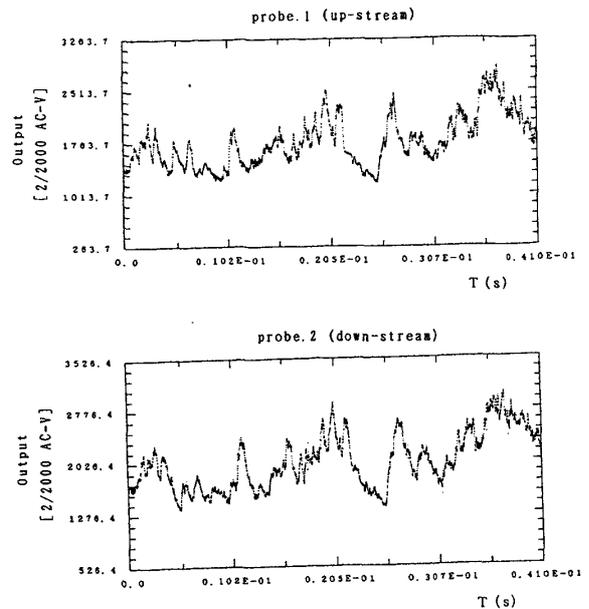


Fig. 10 Output from hot-film anemometer  
( $y=0.6$  mm,  $v_1/U_\infty=0.00$ ,  $v_2/U_\infty=0.59$ ,  $\mu_s/\mu_w=23$ )

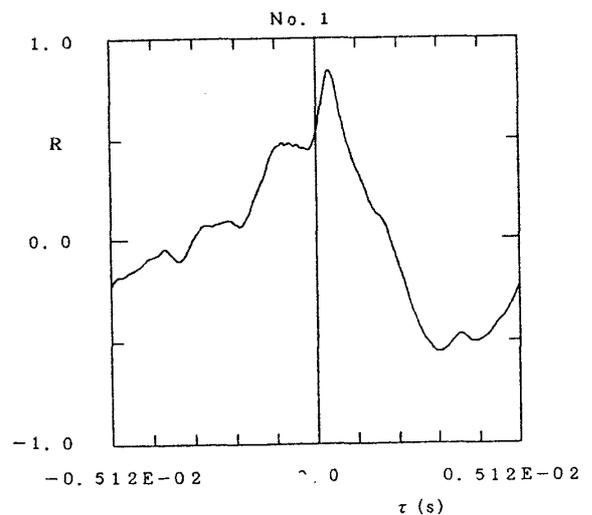


Fig. 11 Crosscorrelation-function of Fig. 10

出しなしの場合に比べ壁面における速度勾配  $\partial u/\partial y|_{\text{wall}}$  は小さくなっていると思われ、はじめに予想した機構 (Fig. 1 参照) により  $C_f$  の減少が得られているものと考えられる。 $v_1/U_\infty=0.59$  では予想通り、壁面における速度勾配は再び急になっている。

#### 4. 数値計算

乱流境界層への高粘性流体の吹き出しによる摩擦抵抗の低減の原因は、高粘性流体の存在により、そこでのレイノルズ応力が小さくなり、その為、そこでの速度勾配が大きくなり、その結果、壁面での速度勾配が小さくなるからであると考えた。このことを確かめる為に、数値計算を行な

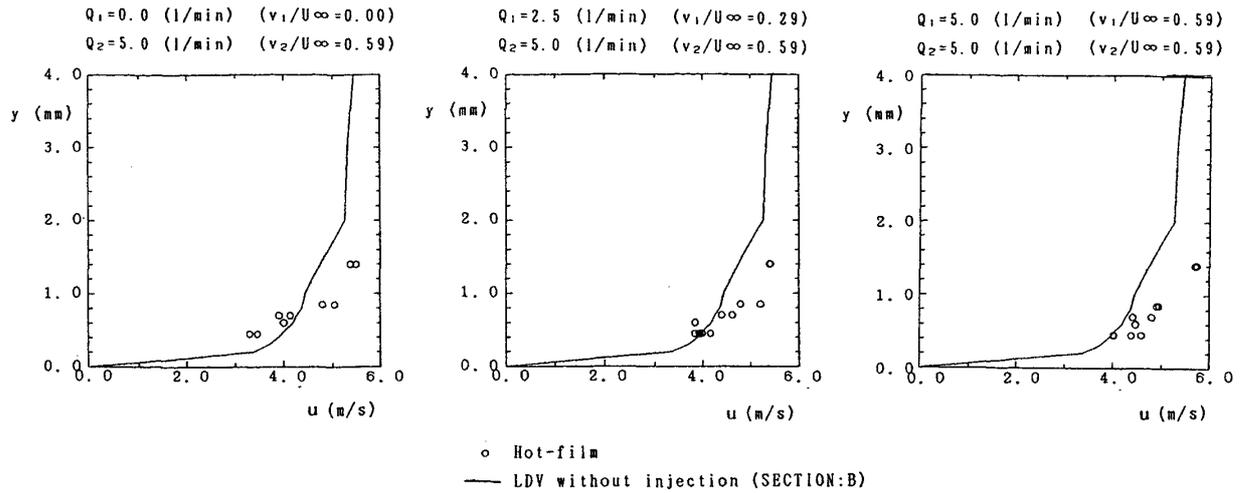


Fig. 12 Velocity distribution in boundary layer when water and sugar-sirup are injected (\$\mu\_s/\mu\_w=23\$)

う。

このような場合、本来は、経験的な乱流モデルは用いない計算を行ないたい。なぜなら、乱流モデルが経験的に与える乱流の乱れ度あるいは渦粘性係数が、高粘性流体によってどうなるかがそもそも未知であるからである。そうすると、Navier-Stokes 方程式の直接計算ということになるが、解の安定性の問題、計算時間の問題など、問題が山積していて有意な解が得られるかどうか疑問である。そこで、粘性の変化の影響に関する仮定を含んだ既存の乱流モデルを用いて流場のシミュレーションを行ない、実験結果と定性的に、できれば、定量的に一致する計算結果が得られれば、用いた乱流モデルが含んでいた仮定は適当であったと言える。この場合、いくつもの複雑な、あるいは、間接的な仮定を含んだモデルはかえって好ましくない。ここでは次に示すように、渦粘性係数を代数的に与えるゼロ方程式モデルを用いた。

$$\nu_t = \begin{cases} (\nu_t)_{inner} & 0 < y^+ \leq 500 & \text{内層} \\ (\nu_t)_{outer} & 500 < y^+ & \text{外層} \end{cases}$$

$$(\nu_t)_{inner} = l^2 |\omega|$$

$$|\omega| = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right)^2}$$

$$l = 0.4y \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{26}\right) \right\}$$

$$y^+ = \frac{y v_{*0}}{\nu}$$

$$v_{*0} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$(\nu_t)_{outer} = (\nu_t)_{inner} \Big|_{at y^+=500}$$

このモデルにおいて、粘性の影響は、\$y^+\$ に現われる。すなわち、粘性が大きくなると \$y^+\$ が小さくなり、混合長さ \$l\$ が小さくなり、渦粘性係数 \$\nu\_t\$ が小さくなるという仮定を含んでいることになる。また、間欠係数 \$\gamma\$ を省略しているため、渦粘性係数 \$\nu\_t\$ は大きめに計算され、壁面のせん断応力

も大きめに計算されると考えられるが、大勢に影響はないと考えられる。

また、水/砂糖水吹き出し実験においては、吹き出した砂糖水の拡散が大きな影響を与えていると考えられる。吹き出された砂糖水の拡散は、分子拡散に較べて乱流拡散が支配的であると考えられる。そこで、拡散については乱流拡散のみについて考え、これを乱流モデルより与えられた渦粘性係数にリンクさせることにより解くことにする。

吹き出し実験における流場は二次元と考えることができるので、数値計算も二次元で考えることにする。解法は、差分法・陰解法・近似因数分解法とする<sup>9),10),13)</sup> 計算に使用した格子配列を Fig.13 に示す。流れ方向は等間隔に 16 の計算点 (\$I=1\sim 16\$) を、高さ方向は等比数列によって与えられる 22 の計算点 (\$J=1\sim 22\$) を持った形状とした。粘性底層 (\$y^+ < 5\$) に 3 つ以上の計算点が入るようにしている。計算は、代表長さ \$L\$、代表速度 \$U\$、代表密度 \$\rho\$ で無次元化して

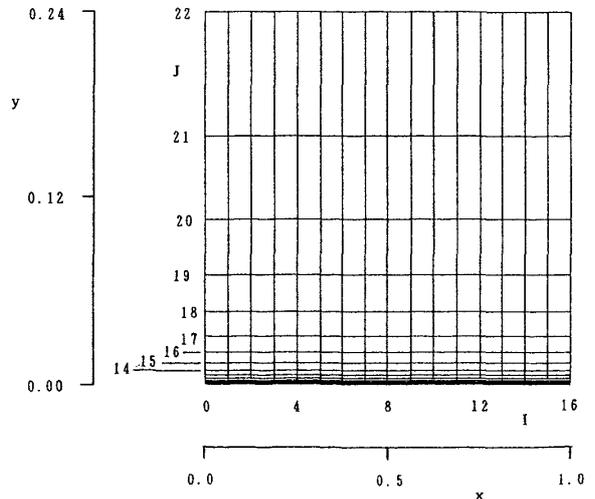


Fig. 13 Grid used for computation

行なった。Fig. 13 以下の図の値は、上述の無次元化した値である。

まず、Fig. 14 に示すように境界層内の粘性を層状に変えた計算を行なった。ここでは、流入境界条件として平板上に発達した乱流境界層の速度分布 ( $Re_x=10^6$ ) を与えて計算を行なった。与える粘性の最大値は、水の5倍、10倍、15倍、20倍の4種類とした。この結果より、摩擦抵抗が最小となるのは、 $(\mu_s/\mu_w)_{max}=10$  のときであった。 $(\mu_s/\mu_w)_{max}$  をさらに大きくすると、摩擦抵抗は再び増大した。粘性を変化させない計算と  $(\mu_s/\mu_w)_{max}=10$  とした時の計算における摩擦係数の流れ方向の変化の様子を、Fig. 15 に示す。このように流入境界近傍を除くすべての計算断面において、粘性を変える前と比べ摩擦抵抗は約30%低減している。流入境界近傍で摩擦係数が大きくなっているのは、流入境界に与えた速度分布の影響であると思われる。粘性を変える前と後における、境界層内のせん断応力分布の違いを Fig. 16 に示す。このように、境界層の乱流域においては、高粘性流体によりレイノルズ応力が小さくなっており、分子粘性によるせん断応力が大きくなっている。そして両者を加

え合わせた全体としてのせん断応力の値 (○印) は粘性を変えた後の方が小さい。また、粘性を変化させる前との速度分布の違いを、Fig. 17 に示す。この時、無次元境界層厚さは、 $\delta/L=0.02$  である。このように、壁面での摩擦抵抗が小さくなっているときは、高粘性とした層における速度勾配が大きくなっている。

粘性を層状に変化させた計算においては摩擦抵抗低減の効果は流れ方向ではほぼ一定となっていたが、水/砂糖水吹き出し実験においては効果が顕著であったのは、一番上流側に位置するせん断力計 No. 1 のみであった。この理由として、境界層内の乱れや吹き出しによる拡散作用が大きく、吹き出した砂糖水が急激に薄まってしまふからであると考えられる。このことを、確かめるために、境界層内の拡散を考慮した計算を行なった。

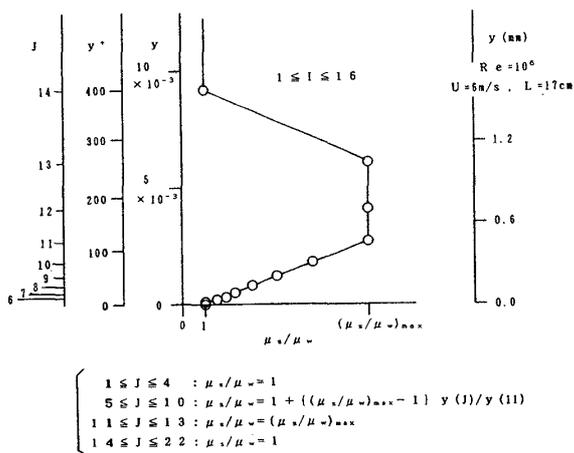


Fig. 14 Viscosity distribution in boundary layer

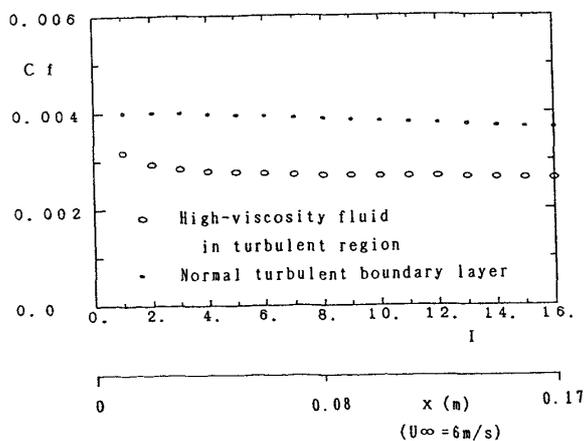


Fig. 15  $Cf/Cf_0$  along flow  $\{(\mu_s/\mu_w)_{max}=10\}$

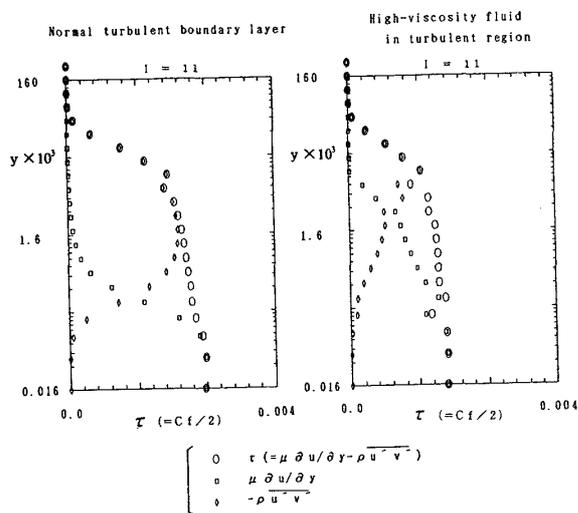


Fig. 16 Shearing-stress distribution in boundary layer (Before and after changing viscosity)

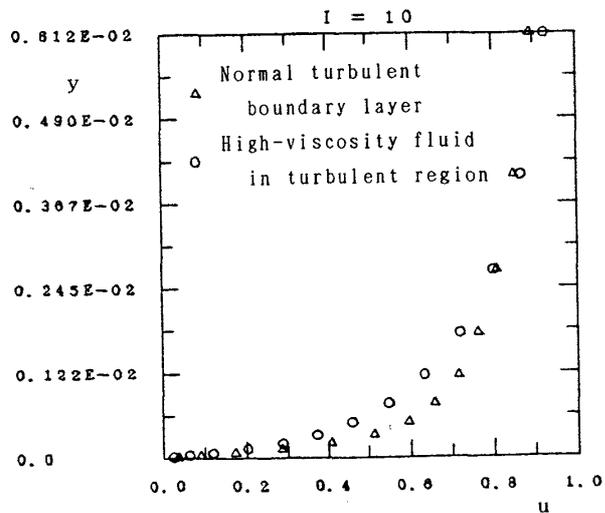


Fig. 17 Velocity distribution before and after changing viscosity

濃度の流入境界での与え方は吹き出しスリット幅を考慮し、Fig. 18 に示すようにステップ状に与えた。

まず、粘性を変える前の計算結果の流速  $u, v$  を用いて、流入境界に濃度分布を与えて、拡散方程式を解き全計算平面における濃度分布を求めた。つぎに、この濃度分布を粘性分布に換算した上で、再び、ナビエ・ストークス方程式を解くプログラムを動かした。この結果の一例として、摩擦係数の流れ方向の変化の様子を Fig. 19 に示す。このように、流入境界から2番目の計算断面 ( $I=2$ ) において、摩擦抵抗は濃度分布を与える前と比べ、27%程度小さくなっている。代表流速を吹き出し実験において効果の大きかった  $U_\infty=6$  m/s とすると、代表長さは16.7 cm となり、計算空間の流れ方向は16等分割となっているので、1区間が大体1 cm に相当する。せん断力計 No. 1 は下流側吹き出しスリットから3 cm のところにあり、各せん断力計は2 cm おきに並んでいるので、せん断力計 No. 1 の位置は3番目の計算断面 ( $I=3$ ) に、以下せん断力計 No. 2, 3, 4 の位置は、それぞれ、5, 7, 9番目の計算断面 ( $I=5, 7, 9$ ) にはほぼ対応している。Fig. 19 に示した壁面摩擦係数の流れ方向の変化を見ると、せん断力計 No. 1 の位置で約23%あった摩

擦抵抗低減効果は、せん断力計 No. 4 の位置では約8%とほとんど失われている。このように境界層内の乱流拡散により高粘性流体は急激に拡散し、効果が減少することが計算によっても確かめられた。吹き出し実験においては、乱流境界層本来の乱れの他に吹き出しによる乱れが加わっていると考えられ、拡散作用がこの計算より大きいことは推測される。

## 5. 結 論

- (1) 前報と同様、乱流境界層の粘性底層より上部に高粘性流体を入れることにより摩擦抵抗が低減することを確かめた。本実験では、最大65%程度の減少が得られた。
- (2) 熱膜流速計を用いた相互相関法による流速計測は、今回のように、光が通らず、物性値が一様でない乱れた流れにおける流速計測法として有効であることが分った。また、計測の結果、効果の大きかった水と砂糖水の吹き出し条件においては、砂糖水の層における速度勾配が大きく、壁面近傍の水の層における速度勾配が小さくなっていた。これは、当初考えた摩擦抵抗低減のメカニズムが適当であることの検証の1つとなる。
- (3) 計算により、高粘性流体により摩擦抵抗が低減しているときは、高粘性流体が入っている層においてレイノルズ応力が小さくなり、その不足分の一部を流体が高粘性であることと速度勾配が大きくなることにより、受持っているという構造になっていることが分った。また、計算では粘性係数  $\mu$  に最適値が存在する。さらに、境界層内の拡散作用は非常に大きく、吹き出し実験において下流にいくと効果が急激に減衰してしまうことの説明がなされた。

## 6. 謝 辞

実験に御協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に、厚く謝意を表します。特に計測用プログラムを作製していただいた、前田正二助手に深く感謝します。数値計算に関してご指導頂いた、運輸省船舶技術研究所推進性能部の児玉良明博士に感謝します。実験の解析および数値計算には東京大学大型計算機センターの汎用機 HITAC M-682 H を使用しました。関係各位に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) アメリカ機械学会性能試験規約：計測の不確かさ、日本機械学会誌、丸善
- 2) 藤井光昭：時系列解析、コロナ社
- 3) 藤井雄作：高粘性流体の吹き出しによる摩擦抵抗低減、東京大学工学系研究科修士論文(平成3年2月)
- 4) 藤井雄作、増本大器：高粘度流体の吹き出しによる摩擦抵抗低減の可能性、東京大学船舶工学科卒業論文(平成元年2月)
- 5) Hough, G. R. (Ed.): Viscous Flow Drag Reduc-

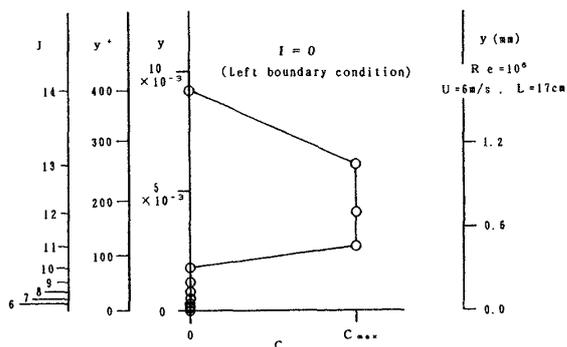


Fig. 18 Concentration distribution of left-boundary-condition

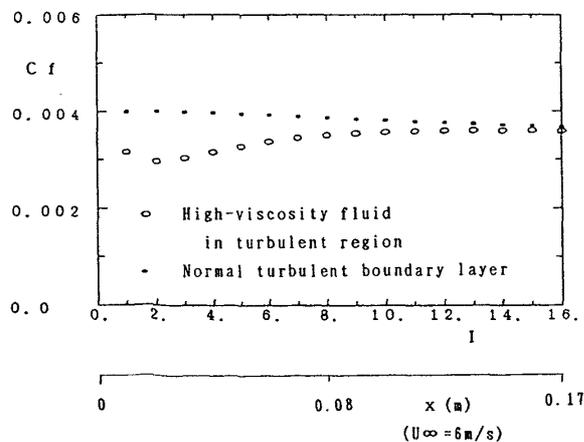


Fig. 19  $C_f/C_{f0}$  along flow (in consideration of diffusion of sugar-sirup)

- tion, Progress in Astro. and Aero. Vol. 72 (1980), AIAA
- 6) ITTC Resistance Comm.: Frictional Drag Reduction Concepts, 17th ITTC Proceedings, Vol. 1 (Sept, 1984), pp. 116-120
  - 7) 加藤洋治, 藤井雄作, 山口一, 宮永大: 高粘性流流体の吹き出しによる摩擦抵抗低減, 日本造船学会論文集 (平成2年11月), Vol. 168, pp 39-50
  - 8) Kato, H., Fujii, Y., Ymaguchi, H. and Miyanaga, M.: Frictional Drag Reduction by Injecting High-Viscosity Fluid into Turbulent Boundary Layer, 第一回 ASME-JSME 流体工学部門合同会議
  - 9) Kodama, Y.: Computation of the Two-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations of Flow Past a Circular Cylinder Using an Implicit Factored Method. Papers of SRI (Ship Research Institute) Vol. 22, No. 4 (1985)
  - 10) Kodama, Y.: Computation of High Reynolds Number Flows Past a Ship Hull Using the IAF Scheme, 日本造船学会論文集 (Jun, 1987), pp 24-33
  - 11) 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
  - 12) Madavan, N. K. et al.: Numerical Investigations into the Mechanisms of Microbubble Drag Reduction, J. Fluid Eng. ASME, Vol. 107 (1985), pp 370-377
  - 13) 日本機械学会編: 流れの数値シミュレーション, コロナ社
  - 14) Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory, 7th Ed. McGraw-Hill Book Co.
  - 15) 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
  - 16) 巽友社編: 乱流現象の科学, 東京大学出版会
  - 17) Yamaguchi, H., Kato, H., Komura, T., Maeda, M. and Oshima, A.: Measurement of the Flow Field Downstream of a Sheet Type Cavity Using LDV, the Second Symposium on Flow Measuring-Techniques, July 13. 1984, Association for the Study of Flow Measurements
  - 18) Y・W・リー著: 不規則信号論, 東京大学出版会