

リブレット粗面流れにおける壁面領域内の平均流れ特性

The Mean Flow Properties of Wall Region in an Openchannel with Longitudinal Riblets

*

**

斎藤 隆

前田邦男

河元 明子

by Takashi SAITOU, Kunio MAEDA and Meiko KAWAMOTO

This paper presents a new method for evaluating the virtual origin of the mean flow over the riblet-mounted surface. First, the standardized distribution of mixing length is estimated from mean velocity measured in the wall region. From this result, the position of outer edge of boundary sub-layer is decided. Then, virtual origin is decided by comparison of the measured mean velocity in wall region with the calculated velocity from the distribution of mixing length estimated above. It became clear that the virtual origin and the thickness of viscous sub-layer is almost decided by roughness Reynolds number.

keywords : triangel riblet, virtual origin, mixing-length

1. まえがき

V字形リブレットによつて摩擦抵抗が滑面に較べて軽減され、摩擦抵抗が軽減される粗度 Re 数の範囲と最大の抵抗軽減率を Walsh が実験によつて明かにしている¹⁾。以来、多様なリブレットを用いた数多くの実験で同様な結果が得られることが報告されている²⁻⁴⁾。測定された平均流速分布から平均の摩擦抵抗を検討するには仮想原点位置の適切な評価が重要な課題である。仮想原点位置の決定には Clauserの方法と内層における速度欠損則を用いる方法が提案されているが、両者とも滑面での流れが前提とされていて、粗面に対しては適用出来ない。実測した粘性底層内における平均流速の直線分布からの壁面せん断力の算定は合理的であるが、測定技術上の困難さから一般的な方法ではない。Bechart & Batenwerfer⁵⁾ は粘性底層内にあるV字形リブレット粗度近傍流れの数値解析から仮想原点位置を求め、実験を行なっているが測定値との比較がされていない。また、数値解析から得られた仮想原点位置はリブレットの斜面勾配のみで規定され流れ場の条件が関係しないことに疑問がもたれる。Choi, Moin & Kim⁶⁾ はリブレット上の流れのDNS (

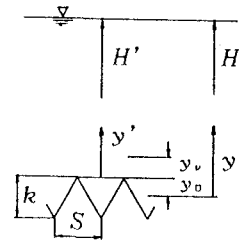
* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

** 正会員 ダム水工部副部長 中電技術コンサルタント(株)
(〒731-51 広島市佐伯区海老園 1-3-11)

*** 正会員 山口大学技官 工学部社会建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

Direct Numerical Simulation) で乱れ強さの分布を求め、滑面乱流では主流方向流れの乱れ強度が $Y^+ \sim 13$ で最大となることから、乱れ強さが最大となる位置を $Y^+ = 13$ として仮想原点位置を定めることを提案している。4通りの場合についての結果は Bechart & Batenwerferの方法での評価とほぼ一致している。この方法を実験的に検証するには乱れ速度を測定することが必要である。計算結果のリブレット上の乱れ強さの分布をみると評価断面によつて分布形状が異なっていて、乱れ強さが最大となる位置をどの様に決められたのが明かでない。また、壁面形状が異なると、壁面近傍における乱れの生成と散逸の機構が異なる両者を同一尺度で評価することには疑問がもたれる。

上述の様に、現時点では直接摩擦抵抗を測定する以外に粗面上の流れの仮想原点を適切にかつ合理的に評価する方法が確立されていない。本研究はリブレット頂間の平均流速の鉛直方向分布の測定結果から仮想原点位置を評価する方法を提案するものである。提案する方法は測定した平均流速分布から求められた混合距離の基準的分布を定めることで粘性底層の外縁高さが定まり、 $Y^+ = 10 \sim 40$ における実測流速と混合距離の分布式から算出される流速とが一致する様に仮想原点位置を試算で求めるものである。



図－１ 記号説明

2. 実験水路と実験方法

実験水路は幅60cm、深さ25cm、長さ10m のアクリル樹脂製の可変勾配水路である。水路床全面には一辺が2mm の正三角形断面で長さが10mのテフロンゴム紐を流れ方向と一致させて、三角形の一辺を床面に密着させて密に張り付けてリブレット粗面とした。水路上流端には乱れを極力抑えるために半径15cmの円弧を水路床に滑らかに接合し、その表面は水路床と同様にリブレットゴム紐が張り付けてある。

横断方向に20cm間隔で設置した静圧管で水面の水位を分解能が1/100mmである差圧計を用いて流れ方向に1m 間隔で測定した結果を最小自乗法で3次曲線で近似し、平均流速を測定する断面の上流と下流の2m 区間以上でエネルギー勾配と河床勾配とが5%以内で一致するように水路下流端のせきで流れ場を設定して平均流速分布の測定を行なった。

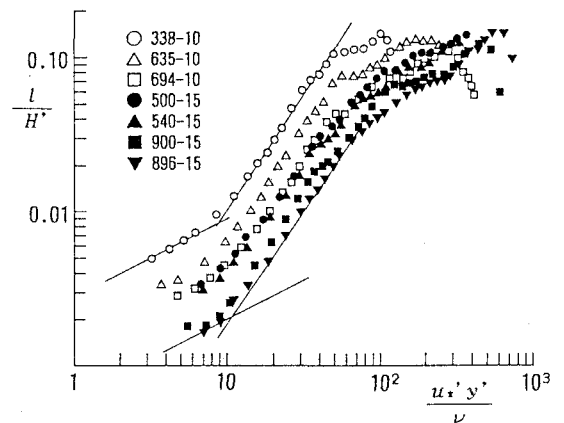
平均流速の測定には、横断方向の平均化と鉛直方向の分解能を考慮して、開孔部断面が0.5mm x 3mmである偏平断面のピトー管を使用した。

3. 実験結果とその検討

通常、レイノルズ応力で定義されるが、本研究ではせん断応力と平均流速の勾配とを関係づける係数を便宜的に混合距離とする。せん断力を三角形分布とし、連続した5点の平均流速を最小自乗法で2次曲線で近似し、その中央点での接線勾配を速度勾配として求めた混合距離の分布の一部を示したのが図－2である。

表－１ 実験条件

Data No.	$Ib \times 10^4$	$\nu \times 10^2$	Q	H^*	Re	Ie/Ib
338-10	0.4962	0.8349	1497	163	2988	0.9911
635-10	0.3900	1.010	3339	309	5510	0.9956
694-10	0.5022	0.8246	5147	500	10403	1.0328
500-15	1.474	0.8143	5139	514	10386	0.9975
540-15	1.7606	0.8864	6251	585	11754	0.9837
900-15	0.6411	0.8645	8752	789	16873	1.0136
896-15	1.0139	0.8658	11342	967	21833	0.9799
147-15	0.8340	0.8398	11625	1182	23249	1.0276
333-20	3.273	0.8246	3596	413	7268	0.9783
490-20	2.580	0.8864	6057	605	11389	0.9838
750-20	1.8547	0.8464	11313	1029	22277	0.9880
814-20	1.759	0.8246	11765	1160	23779	0.9636
960-20	1.4677	0.8296	13202	1434	26523	1.1037
337-25	5.375	1.010	4627	436	7635	0.9612
618-25	4.568	0.8658	12222	1186	23527	0.9974
909-25	2.820	0.8607	16484	1666	31919	0.9917
472-30	10.22	0.8040	11454	1279	23744	1.0013
341-35	9.750	0.9652	6507	639	11236	0.9915



図－２ 混合距離分布

$Y^{*+} < 40$ の範囲での各実験の描点は、 $Y^{*+} (= U_*' Y' / \nu, U_*': H'$ とエネルギー勾配で与えられる摩擦速度) の値が10程度を境にして、図中の1/2乗と3/2乗の直線でもって近似することができると判断される。そこで基準となる分布を次式で与える。

$$\begin{aligned} \frac{l_s}{H'} &= 0.003 \left(\frac{u_*' y'}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} & \text{for } \frac{u_*' y'}{\nu} < 7.44 \\ &= 0.0011 \left(\frac{u_*' y'}{\nu} \right) & \text{for } \frac{u_*' y'}{\nu} = 7.44 \sim 13.44 \\ &= 0.0003 \left(\frac{u_*' y'}{\nu} \right)^{\frac{3}{2}} & \text{for } \frac{u_*' y'}{\nu} > 13.44 \end{aligned} \quad \dots (1)$$

Y^{*+} が13.5～40の範囲にある実測の混合距離を上第3式の値で除し、その平均値を α とする。実測の混合距離に α の値を乗じて描点したのが図-3である。係数 α とリブレットの高さを基準にしたリブレット頂から測った水深 H'/k_s との関係を示したのが図-4である。図中に記入してある数値はリブレット頂から測った水深で求めた内部スケールによる粗度 Re数 ($U_*' k / \nu$) である。図において粗度 Re数がほぼ等しい描点は図中に示している-1乗の直線上にあると見ることができる。大胆ではあるが係数 α は H'/k の-1乗に比例すると仮定して、 $H'/k = 10$ での値(α) $H'/k_s = 10$ と粗度 Re数との関係を示したのが図-5である。図中の曲線は次式による値である。

$$(\alpha)_{\frac{H'}{k}=10} = 160 \left(\frac{u_*' k}{\nu} \right)^{-1} + 2.8 \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \therefore \alpha &= \left\{ 160 \left(\frac{u_*' k}{\nu} \right)^{-1} + 2.8 \right\} \left(\frac{k}{H'} \right) \\ &= \left\{ 160 + 2.8 \left(\frac{u_*' k}{\nu} \right) \right\} \left(\frac{u_*' H'}{\nu} \right)^{-1} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

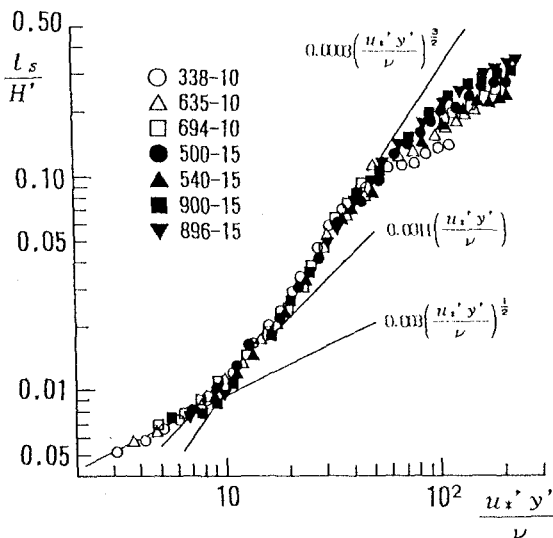


図-3 規格化した混合距離の分布

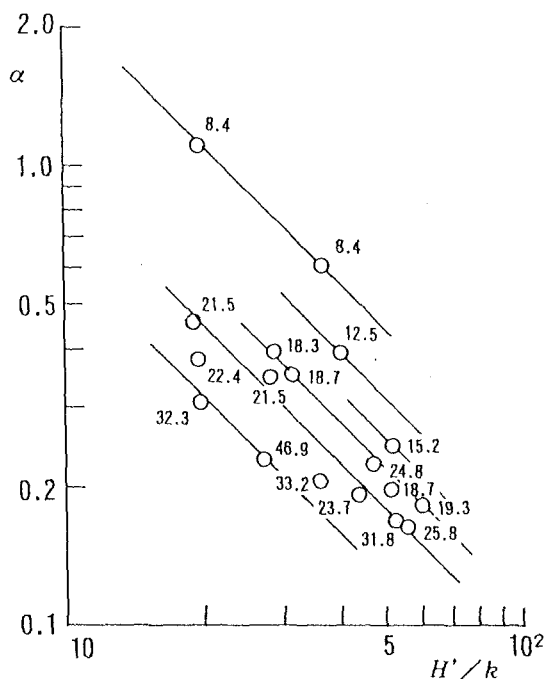


図-4 混合距離の規格化倍数

式(1)、(2)、(3)の関係を用いると、混合距離の分布は次式で与えられる。

$$\frac{l}{H^*} = \alpha \frac{l_s}{H^*} \quad \dots \dots (4)$$

上述した一連の変換による結果の総合精度を検討したのが図-6である。図より $U^*Y'/\nu < 40$ の範囲においてほぼ10%以内の精度で平均流速分布から求めた混合距離が評価されている。混合距離の算定する際に流速勾配が使われていることを考慮すると十分な精度で評価されていると判断される。

混合距離と過動粘性係数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_{*'}^2 \left(1 - \frac{y'}{H^*}\right) &= l^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy} \quad \rightarrow \quad \frac{l}{H^*} = \frac{u_{*'}}{H^*} \sqrt{1 - \frac{y'}{H^*}} \left/ \left(\frac{du}{dy} \right) \right. \\ &= (\nu + \varepsilon) \frac{du}{dy} \quad \rightarrow \quad \frac{\nu + \varepsilon}{u_{*'} H^*} = \frac{u_{*'}}{H^*} \left(1 - \frac{y'}{H^*}\right) \left/ \frac{du}{dy} \right. \end{aligned}$$

粘性底層内では $\varepsilon=0$ 、式(4)とから粘性底層外縁の高さは次式と求まる。

$$\frac{u_{*'} y'}{\nu} = \frac{1}{2} \left(\frac{u_{*'} H^*}{\nu} \right) \left[1 - \left\{ 1 - 4 / (0.003) \cdot \left(160 + 2.8 \frac{u_{*'} k}{\nu} \right) \frac{u_{*'} H^*}{\nu} \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad \dots \dots (5)$$

粘性底層外縁の高さ U^*Y_m/ν に及ぼす U^*K/ν と U^*H'/ν の影響を調べたのが図-7である。図中の曲線は $U^*H'/\nu=5, 40$ での計算値である。図より、粘性底層外縁の高さは U^*H'/ν による変化はなく、ほぼ U^*K/ν の値によつて規定されている。 U^*K/ν の値が大きくなると粘性底層外縁の高さは低くなる。粗度 Re 数 U^*K/ν の値が5程度である場合には、粘性底層外縁の高さはリブレット頂からほぼリブレットの高さと同程度の高さにあるが、 U^*K/ν の値が大きくなつていき、10程度の値では粘性底層外縁の高さはリブレット頂からリブレットの高さの3割程度の、20程度になると約1割ほどの、50程度の値になると2%程度の高さに低下している。すなはち、 U^*K/ν の値が大きくなつていくと粘性底層外縁の位置はリブレット頂に近ずいていき、後に検討される仮想原点位置によつて変化の度合は若干違がうが、粗度高さに対する粘性底層厚さは急激に薄くなる。粗度が粘性底層内に埋没されている場合には、粗度としての役割はないが、粘性底層外縁位置がリブレット頂とほぼ一致することになると、粗度として役割することになる。この結果、 U^*K/ν の値がある値以上になると粗面となり、摩擦

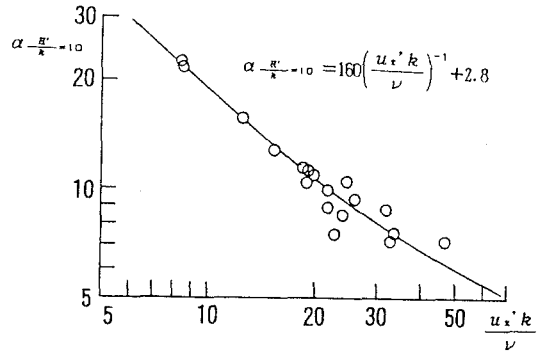


図-5 $(\alpha)_{H^*/K=10}$ と (U^*Ks/ν) との関係

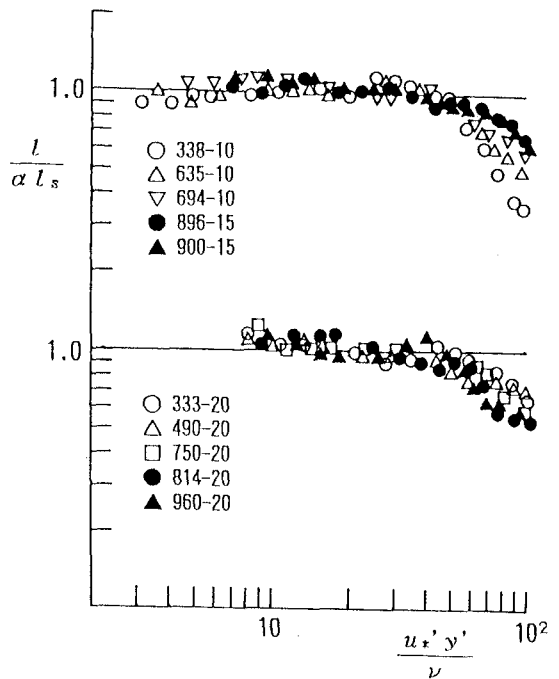


図-6 混合距離分布の定式化での精度

抵抗の軽減効果が消滅すると説明することができる。

DNSの結果では、リブレット頂両側に縦渦が形成されていて、Re数が大きくなるとそのスケールは小さくなるが、渦度が強くなることが明らかにされている。上述したように U^*K/ν の値が20以上になると、粘性底層外縁の高さはリブレット高さの1割以下であることから、粘性底層と類似の流れ場を仮定する事に疑問がもたれる。今後この点についての検討を行いたい。

仮想原点の位置をリブレット頂から y_0^+ 下方にあるとし、式（1）の混合距離分布形を

$$\frac{l}{H^+}=A_1\left(\frac{H^+-y_0^+}{H^+}\right)^{1+\frac{\pi}{2}}(y^+-y_0^+)^{\pi}$$

とおくと、

$$d\left(\frac{u}{u_*}\right)=\frac{1}{A_1}\left(\frac{1}{H^+}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{H^+}{H^+-y_0^+}\right)^{1+\frac{\pi}{2}}\frac{(H^+-y^+)^{\frac{1}{2}}}{(y^+-y_0^+)^{\pi+1}}dy^+$$

上式を積分することで $U^*y'/\nu < 40$ での流速分布は次式のように得られる。

$$y_v'\sim y'^+<7.44$$

$$\frac{u}{u_*}=\left(\frac{u}{u_*}\right)_{y_v'}+\frac{1}{A_1}\left(\frac{1}{H^+}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{H^+}{H^+-y_0^+}\right)^{\frac{5}{2}}\left|\sqrt{(H^+-y^+)(y^+-y_0^+)}+(H^+-y_0^+)\sin^{-1}\sqrt{\frac{y^+-y_0^+}{H^+-y_0^+}}\right| \quad (6)$$

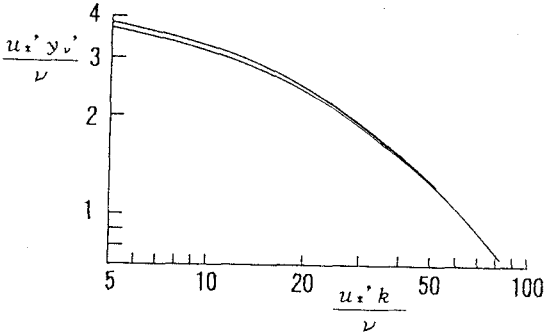
$$y'^+=7.44\sim13.44$$

$$=\left(\frac{u}{u_*}\right)_{y_1}+\frac{1}{A_2}\left(\frac{1}{H^+}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{H^+}{H^+-y_0^+}\right)^{\frac{3}{2}}\left|\frac{2(H^+-y^+)^{\frac{1}{2}}}{(H^+-y_0^+)^{\frac{3}{2}}}+\frac{1}{H^+-y_0^+}\ln\left|\frac{\sqrt{H^+-y^+}-\sqrt{H^+-y_0^+}}{\sqrt{H^+-y^+}+\sqrt{H^+-y_0^+}}\right|\right|$$

$$y'^+>13.44$$

$$=\left(\frac{u}{u_*}\right)_{y_2}+\frac{-2}{A_3}\left(\frac{1}{H^+}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{H^+}{H^+-y_0^+}\right)^{\frac{7}{4}}\left|\sqrt{\frac{H^+-y^+}{y^+-y_0^+}}-\sin^{-1}\sqrt{\frac{H^+-y^+}{H^+-y_0^+}}\right|$$

粘性底層外縁の高さを式（5）であたえ、 $U^*y'/\nu=10\sim40$ の範囲で実測された流速と上式で計算される流速とが一致する y_0 を求め、その平均値と K^+ との関係を示したのが図－8である。壁領域での流速であるので、 y_0 の評価に及ぼす測定流速誤差の影響が大きいが描点散乱の原因である。図から仮想原点位置の具体的な位置を求めると、 K^+ が10程度である場合はリブレット頂からリブレット高さの4割程度下方であるが、 K^+ が20では1～1.5割、 K^+ が50では2%と K^+ の増大にともない仮想原点位置はリブレット頂に近ずいていく。前述した粘性底層外縁位置も K^+ の増大にともないリブレット頂へ低下するので、粘性底層厚さは K^+ の増大にともない急激に薄くなつていく。以上の結果から、 K^+ の増大にともない仮想原点より上方に突出している粗度高さの粘性底層厚さに対する割合は大きくなり、摩擦抵抗の軽減が減少していき、リブレットが粗面としての役割をもつことになる。



図－7 U^*Y_m/ν と U^*K/ν との関係

先に得られた仮想原点位置を用いて摩擦係数 f_r を求め、同じ水深とエネルギー勾配である滑面の摩擦係数 f_{ro} で除した値 f_r/f_{ro} と K^+ との関係を示したのが図-9である。図中の円と四角の黒描点は Choi, Moin & Kim⁶⁾ が行なったDNSで得られた結果である。従来行なわれた実験結果では、 $f_r/f_{ro} = 1$ となるのは $K^+ = 20 \sim 30$ で、描点の散乱範囲とほぼ一致し、 f_r/f_{ro} の K^+ による変化は同じ傾向を示しているが、 f_r/f_{ro} の K^+ による変化の度合いが大きくて、抵抗の軽減率が最大20%と従来の実験結果に比べて2倍となっている。この違いは従来のほとんどの実験では仮想原点位置を流積が同じになる高さ、三角形リブレットではリブレット高さの半分の高さとしていることによるものと考えられる。

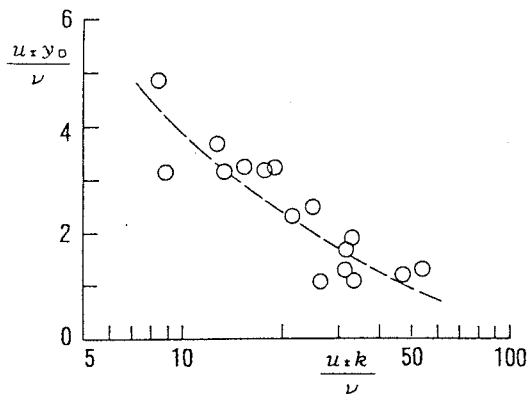


図-8 U^*Y_0/ν と U^*k/ν との関係

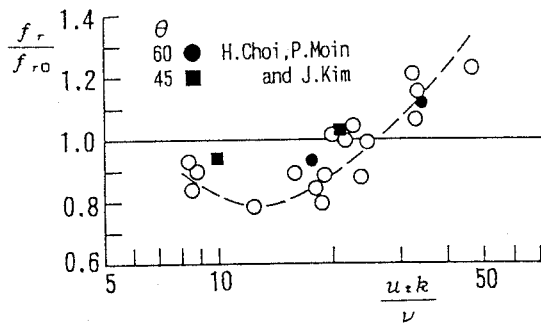


図-9 f_r/f_{ro} と K^+ との関係

4. むすび

偏平ピトー管を用いて測定した平均流速の鉛直方向の分布から渦動粘性係数の分布を定式化することで粘性底層外縁の高さを評価し、渦動粘性係数の分布を用いて得られた平均流速分布式で与えられる平均流速と実測した平均流速とが一致する仮想原点位置を試算で求め、摩擦抵抗係数の算定をおこなった。一連の検討で得られた結果を要約すると、次の通りである。すなはち、

- 1) 混合距離の分布から得られる粘性底層外縁位置 Y_m^* は式(5)でもつて与えられ、図-7の様に式中には H^* が含まれているが K^+ のみで規定される。 K^+ が大きくなると粘性底層外縁位置はリブレット頂に漸近していく。 K^+ が大きい場合については今後の検討が必要である。
- 2) 提案した方法で評価した仮想原点位置 Y_o^* は、図-8に示してある様に、 K^+ が10程度のときリブレットのほぼ中点の深さの位置から K^+ によつてリブレット頂に漸近していく。
- 3) Y_m^* と Y_o^* の差が粘性底層の厚さであるので、 K^+ による Y_m^* と Y_o^* の変化から、粘性底層の厚さ δ は K^+ が10程度で $U^*\delta/\nu \sim 8$ から K^+ の増大にともなつて K^+ が50程度で $U^*\delta/\nu \sim 2$ にまで減少していく。
- 4) 粘性底層厚さならびに仮想原点位置は K^+ のみでほぼ規定され、両者の K^+ による変化の状態からリブレット粗面の摩擦抵抗の K^+ による変化を定性的に説明することができる。

参考文献

- 1) Michal J. Walsh : AIAA J., 21-4(1983), pp.485
- 2) V.D.Nguyen, A.M.Savil and R.V.Westphal : AIAA J., 25-3(1987), pp489-499
- 3) J.J.Rohr, G.W.Reidy and E.W.Hendricks : Experiments in Fluids, 13(1992), pp361-368
- 4) Kwing-so Choi : J.Fluid Mech., 208(1989), pp417-458
- 5) D.W.Beichert and M.Bertenwerfer : J.Fluid Mech., 206(1989), pp105-129
- 6) H.Choi, P.Moin and J.Kim : J.fluid Mech., 255(1993), pp503-539