

# V字型リブレット粗面開水路の抵抗則

齋藤 隆<sup>1</sup>・前田邦男<sup>2</sup>・赤司信義<sup>3</sup>・大成博文<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山口大学名誉教授 (〒755 山口県宇部市上宇部山門2908-3)

<sup>2</sup>正会員 中電技術コンサルタント技術開発部 (〒734 広島市南区出汐2-3-30)

<sup>3</sup>正会員 工博 西日本工業大学教授 土木工学科 (〒800-03福岡県京都郡苅田町新津1638)

<sup>4</sup>正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745 徳山市城ケ辻3-15-20)

滑面では全体の平均流速分布を用いての摩擦速度の評価が行われているが、粗面上の壁面領域での流速分布は粗度の形状・配列によって異なるため、流速分布全体を対象とした摩擦速度の評価方法は見当たらない。滑面と粗面での対数領域における流速分布は相対的に相似であり、対数領域での速度の絶対値は壁面領域での流速分布に依存する。混合距離モデルに従うと、壁面領域での混合距離分布が抵抗則を規定すると云える。リブレット粗面における仮想原点位置、混合距離分布の定式化の方法を提案し、その結果を用いて評価された抵抗則は従来の実験ならびにDNSによる結果と良好な一致が得られた。

*Key Words* : riblets, the law of wall, mixing-length, open channel, virtual origin

## 1. 緒言

流れ方向の溝を横断方向に規則的に配置した粗面(リブレット)では滑面より摩擦抵抗が小さくなること NASA の実験で明らかにされ、多くの確認実験が行われている。この結果、リブ高さあるいはリブ間隔を用いたレイノルズ数の値が 20~30 以下の範囲で摩擦抵抗が軽減され、摩擦抵抗の軽減率は最大で 8% 程度であることが明らかにされている<sup>1)~4)</sup>。実用面から逆圧力勾配下における流れ<sup>5)</sup>において、さらには3次元物体<sup>6)</sup>においてもリブレットは抵抗軽減に有効なデバイスであることが報告されている。抵抗が軽減される機構の解明を目的に、壁面近傍<sup>7)</sup>のみならずリブレット溝内での流れ特性の計測<sup>8,9,10)</sup>、ならびに $\kappa-\epsilon$  model<sup>11),12)</sup>、DNS<sup>13),14)</sup>による流れ場の解析が行われている。これらの実験ならびに解析で明らかにされたことで共通している結果は次の通りである。すなわち、リブレット粗度のごく近傍( $y^+ < 18 \sim 20$ )において滑面とは異なる流れ場が形成されているが、その上方では急速に滑面における流れへ移行していることである。このことより、いずれの研究者もリブレット粗面上の流れの特徴は壁面のごく近傍領域に限定され、抵抗軽減のメカニズムはこの流れ場に集約されることを指摘している。

流体、航空、機械の分野では開水路流れが、また土木の

分野ではリブレット粗面が馴染みが薄いことで、リブレット粗面開水路流れについての研究は行われていない。

粗面上の流れを扱う場合、開水路では仮想原点位置の境界層では仮想原点位置と摩擦速度の評価が重要な課題である。境界層流れでは、種々な滑面での摩擦速度の評価方法を修正することで粗面での摩擦速度の評価方法が検討されている<sup>15)~20)</sup>。最善であるのは全領域の流速分布を用いての評価方法であるが、全領域での流速分布が滑面でのそれほど明確でないことから決定的な方法が見いだされていない。

開水路粗面流れでは viscous sublayer での流速分布の測定が困難であることから、対数則を前提にして摩擦速度が決められている。この方法は現時点での工学上の精度を満足するものであるが、対数分布則が厳密に成り立つ領域が明らかにされていないので、抵抗軽減率が最大 8% 程度である問題を対象とする場合には十分な精度であるとは云い難い。

Viscous sublayer における流速分布は仮想原点の変化に対して敏感に変わるので、摩擦速度をより精度良く評価するには、この領域をも含めた流速分布でもって評価する方法が最善であると考えられる。平均流速分布を考える場合、粗度近傍における複雑な流れ場を仮想の平均流れ場に置き換えることが一般的に行われている。本研究でもこの方法を踏襲し、平均流速分布の導出には

混合距離モデルを用いる。

本研究は、平均流速分布が不明である難点を克服し、精度良い仮想原点位置の評価方法を確立することを目的としたもので、次章で記述する混合距離モデルを用いる方法を提案するものである。

## 2. 混合距離分布の推定法

2次元開水路等流れでのせん断力は次式で与えられる。

$$\frac{\tau}{\rho} = -\bar{uv} + \nu \frac{dU}{dy} = U_*^2 \left(1 - \frac{y}{H}\right), \quad U_* = \sqrt{gHI_e} \quad (1)$$

混合距離モデルに従うと、レイノルズ応力と混合距離との関係は次式で定義される。

$$-\bar{uv} = l^2 \left| \frac{dU}{dy} \right| \frac{dU}{dy} \left( = \frac{\tau}{\rho} - \nu \frac{dU}{dy} \right) \quad (2)$$

式(1)に式(2)を代入すると次式が得られる。

$$\frac{dU_*}{dy_*} = 2 \left(1 - \frac{y_*}{H}\right) \left\{ \sqrt{1 + 4(l^*)^2 \left(1 - \frac{y_*}{H}\right)} + 1 \right\}^{-1} \quad (3)$$

Van Driest's damping function を導入すると、混合距離分布は次式で与えられる。

$$l = \kappa y \sqrt{1 - \frac{y}{H}} \cdot \Gamma, \quad \Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (4)$$

滑面では  $B=26$  なる値が適切であることが確認されている<sup>10)</sup>。境界層流れにおいて、対数速度分布が成立する領域は inner layer と defect-law region とが重なり合う overlap region であることが Izakson, Millikan によつて導出され、多くの実験事実によつて確認されている。これらの結果からカルマン常数の値としてほぼ  $\kappa=0.41$  であることが得られている。開水路流れでは Nezu & Rodi によつて  $\kappa=0.412$  なる値が得られている。上述のように、対数則は異なる速度分布則が重なり合う領域で成立すること、対数分布が成立する領域が滑面におけるほど明確でないことを考慮して、本研究では  $\kappa=0.412$  とした。

粗面における viscous sublayer での流速分布が確定されていないので、式(3)、(4)を用い次の手順で仮想原点位置を決めていく。

- 1) 境界層での研究結果から、リブレット粗面での流速分布と滑面でのそれと著しく違わないとの観点から、仮想原点位置の近似値として滑面での流速分布を用いて求める(4章)。すなわち、Van Driest's damping coefficient  $B$  を系統的に変えて得られる流速分布と実測値とが全体的に合致する仮想原点位置  $y_0$  と  $B$  の値とを求める。
- 2) 1)で得られた  $B$  の値で与えられる混合距離分布

表-1 実験条件

Data	$I_B$	Re	$H^*$	$k^*$	$I_E / I_B$
No.	$\times 10^{-4}$	$\times 10^4$			
323	0.875	0.228	138.9	7.29	0.588
531	0.417	0.476	273.5	8.86	1.197
413	1.273	0.391	224.0	9.29	0.959
315	1.875	0.375	212.8	11.51	0.699
694	0.502	1.042	534.2	13.25	1.159
900	0.641	1.677	813.4	15.58	1.065
147	0.834	2.373	1135.7	18.74	0.928
500	1.474	1.044	554.2	19.11	1.112
540	1.761	1.169	617.2	19.67	1.080
490	2.580	1.132	588.6	20.81	0.915
333	3.273	0.914	403.4	20.84	0.915
750	1.846	2.217	1085.2	24.94	1.089
814	1.759	2.368	1206.2	25.58	1.054
909	2.820	3.176	1608.9	30.60	0.918
618	4.568	2.336	1234.4	34.50	1.072
472	10.220	2.341	1323.2	48.56	1.075

と実測の流速分布から得られた混合距離分布との偏差を修正項として導入することで、リブレット粗面での混合距離分布を定式化する(5章)。

- 3) 2)で得られた混合距離分布を用いて計算された流速分布と実測の流速分布とが全体的に合致する仮想原点位置と混合距離分布の修正項に含まれている未知係数  $B_0$  とを求める(6章)。
- 4) 2), 3)の手順を繰り返して仮想原点位置と修正項の未知係数とを確定する。本研究では、一回の計算で仮想原点位置は大きく変わらず、流速分布の一致が良好であった。

## 3. 実験装置と方法

実験水路は幅 60cm、深さ 25cm、長さ 10m の三面アクリル樹脂製の変可変勾配水路である。水路床全面には一边が 2mm の正三角形テフロン紐が水路と平行して密に張り付けられ、高さ  $k=1.73$ mm、間隔  $s=2$ mm のV字形リブレット粗面となっている。

実験は、まず横断方向に 20cm 間隔で設置した静圧管の平均水位と基準水位との差として 1m 間隔で水面形状を測定する。水面形状を最少二乗法で3次曲線で近似して、上流より 5~8m の区間における水面勾配が河床勾配と一致する様に下流端の可動せきで調節する。ほぼ等流状態であると確認された区間の中央部で平均流速分布を測定した。

流速測定には、リブレット粗面間で平均した流速を得るために、開口部の厚さ 0.5mm、幅 3mm の扁平断面

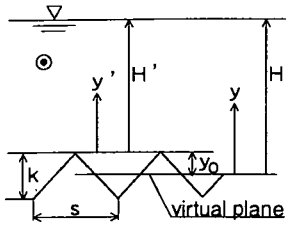


図-1 座標系

の境界層用ピトー管を使用した。ピトー管係数はオリフィス型検定装置で検定した。流速と水位差の測定には分解能が 0.01mm  $H_2O$  である容量変換式差圧計を用い、0.1Hz の low pass filter を通して pen recorder に記録した。この filter を通すことで、記録は滑らかな指数関数的に漸近していく曲線となる。ほぼ 5 分間での出力が変化しなくなった時点で読み取りを行った。

実験は表-1 の条件で行った。漸縮、漸拡している管路流れにおいては、一様断面での流速分布と異なることが知られている。開水路における漸拡、漸縮の流れでも同様なことが予測されるので、その影響を示すひとつの指標として河床勾配 ( $I_b$ ) に対するエネルギー勾配 ( $I_E$ ) の値  $I_E / I_b$  を表に掲げた。

使用した座標系は図-1 に示す通りである。リップ頂を原点として評価された諸量には ' を付けて、原点を仮想原点にして評価された諸量と区別する。

本実験でのフルード数は 0.15~0.59 (3 case を除くと  $Fr$  は 0.32 以下) であるので、フルード数の影響については今後の検討課題として、本研究ではフルード数の影響についての検討は行わない。

#### 4. 仮想原点位置の概算

図-2 は Driest's damping coefficient  $B$  を系統的に変えて得られる流速分布と実測値とを比較した一例である。○描点はリップ頂を原点として実測値を整理したもので、 $U/U_*' \sim U_*' y/\nu$  の関係である。●描点は測定値の分布が計算曲線と全体的に最も合致する様に仮想原点を試算によって定め、座標原点の移動による摩擦速度の修正をした結果である。図中に示してある  $B$  の値は一連の計算曲線からの内挿値である。

上記の手順で得られた仮想原点位置  $U_* y_0/\nu$  ならびに  $B$  の値と粗度レイノルズ数  $U_* k/\nu$  との関係を示したのが図-3, 4 である。概略値であるが、後述する解析のため、それぞれの関係を図中に実線で示した次式で与える。

$$\frac{U_* y_0}{\nu} = 0.60 \left( \frac{U_* k}{\nu} \right)^{0.65} \quad (5)$$

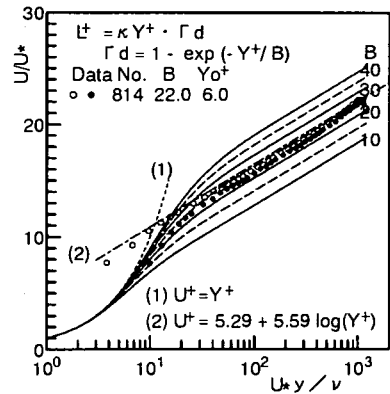


図-2 仮想原点の算定方法

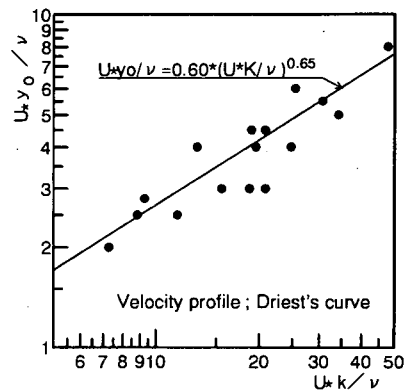


図-3 仮想原点位置と粗度レイノルズ数との関係

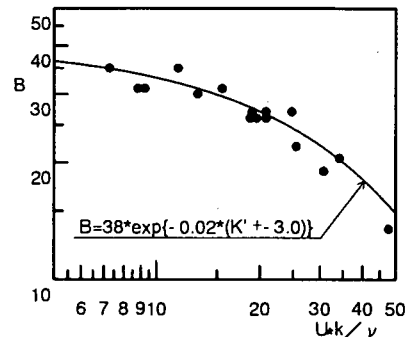


図-4 Driest's damping coefficient  $B$  と粗度レイノルズ数との関係

$$B = 38 \cdot \exp \left\{ -0.02 \cdot \left( \frac{U_* k}{\nu} - 3.0 \right) \right\} \quad (6)$$

両式を用いて評価される流速分布の近似の程度を調べたのが図-5 である。図中の実線は式(6)を式(4), (3)に代入して計算された流速分布である。描点は仮想原点位置

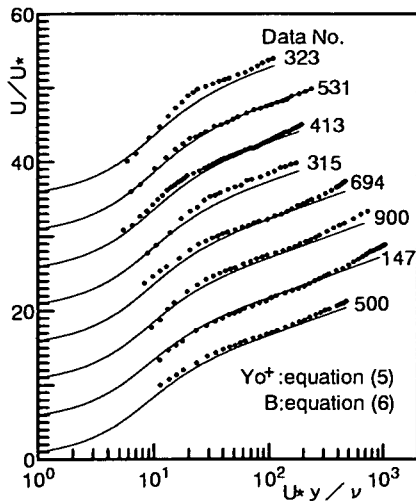


図-5-a 流速分布

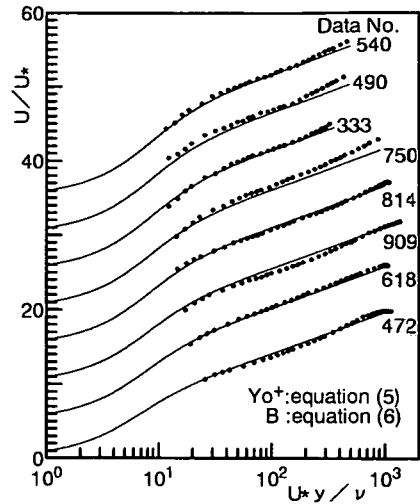


図-5-b 流速分布

を式(5)で与えて整理した実測値である。図において、 $I_E / I_B < 0.7$  で減速流(拡大流れ)となっている Data No. 323, 315 を除くと、実験描点と計算値とは大勢的には合致しているが、両者の分布形状に微妙な差異が見られる。対数領域と見られる  $y^+ > 70$ ,  $y/H < 0.5$  の間で実験描点に合う計算曲線を基準にしてみると、Buffer layer と水表面付近で実験描点は計算曲線より上方にあることが認められる。この違いは仮定した混合距離分布と実測したその分布との差によるものである。より精度の高い流速分布を予測するには、その根底となる混合距離分布を詳細に検討することが必要である。

### 5. 混合距離分布の検討

混合距離  $L_{mix}$  は、連続した5点の実測の流速値を最少二乗法でもって二次曲線で近似し、中央点での速度勾配を用いて式(2)で求めた。式(6)で与えられるBの値を用いて式(4)で得られる混合距離  $L_{mix}$  で正規化した実測値の分布が図-6である。壁面のごく近傍では流速の測定精度、水表面近くでは速度勾配の評価精度の低下による描点の散乱が大きいことを考慮して、描点の平均的な傾向として次の2点が注目される。

- 1)  $y^+ < 30 \sim 50$  では下に凸な分布形状である。
- 2)  $y^+ > 50 \sim 70$  では右下がりのほぼ直線的な分布と見ることができる。

上記2点の仮定した混合距離からの偏差を修正項として定式化する。

砂粒粗度の様な突出粗度近傍には粗度に起因する乱れ(粗度からの剥離渦, 粗度後流の乱れ)に規定される流れ

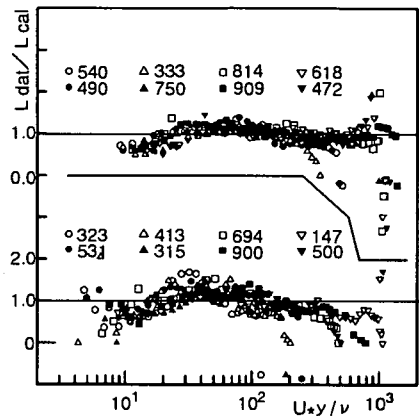


図-6 混合距離分布

B : 式(6)  $y_0^+$  : 式(5)

場が形成される。そこでの乱れ寸法は粗度寸法に相当し、混合距離は滑面のそれより大きな値となる。この領域での混合距離は上に凸な分布となる<sup>29,30</sup>。

#### (1) 水表面効果による修正項 $\Gamma_s$

境界層の外層(outer layer)は完全な乱流であるが、 $y/\delta \geq 0.4$  において回転~非回転の間欠性がある(Bradshaw)。この領域は主流流れの運動量が境界層内に取り込まれる流れ場である。開水路における流れの駆動力は重力であるので、このような運動量の取り込みは必要でなく、また不可能である。

従って、開水路流れではwake領域の存在は物理的に考え難いことから、上記2)の偏差は水表面の存在による

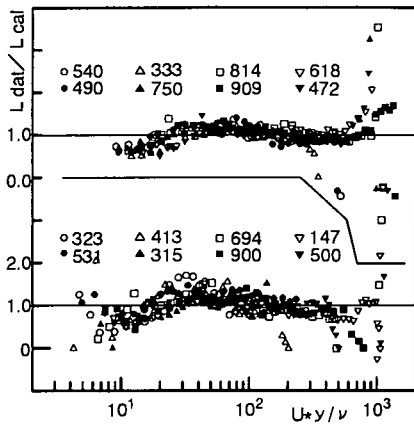


図-7 混合距離分布(水表面の効果)  
 $L_{dat} / L_{cal}$  と  $U_{xy}/\nu$  との関係

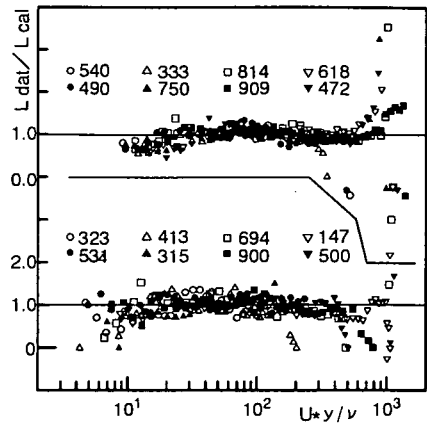


図-8 混合距離分布(viscous layerでの修正)  
 $L_{dat} / L_{cal}$  と  $U_{xy}/\nu$  との関係

影響と考える。

水表面は境界であることから、その影響は Van Driest's function で評価されている壁面の影響と同様に指数関数的に減少していくと考えられる。また、 $y^+ > 50 \sim 70$  での仮定値からの偏差が直線的に変化していることから、水表面からの距離によって指数関数的に減少していると推測される。図-6における全描点の平均的な勾配を考慮して、下記の式(9)と与えられる修正項 $\Gamma_s$ を導入することにする。すなわち、混合距離分布を次式で与える。

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (8)$$

$$\Gamma_s = \exp\left[-\left(\frac{y}{H}\right)^3\right] \quad (9)$$

上式で与えられる混合距離の値( $B=26$ )でもって実測値を正規化した結果が図-7である。図-6と比較して  $y^+ > 50$  での右下がりの傾向はかなり緩和された。

## (2) viscous sublayer における修正項 $\Gamma_d$

リブレット粗面での乱れ強さは、滑面でのそれと比較して、viscous sublayer 内だけで小さくなっていること<sup>9,10,12</sup>、主流方向の乱れ強さが最大となる位置は滑面でのそれとほぼ同じであること<sup>7,20</sup>、buffer layer 内で滑面に較べて揺動が小さい縦渦の二重構造が形成され、とくに下層にある縦渦の揺動が小さいこと<sup>7</sup>、リブ頂の両側上方に安定した縦渦<sup>19</sup>が形成されていることなどが明らかにされている。

viscous sublayer での乱れ強さの減少、ならびにリブ頂の両側上方での安定した縦渦が存在することから、安定した縦渦で形成されている層とその上、下層との間の運動量交換が阻害されていると考えられる。この結

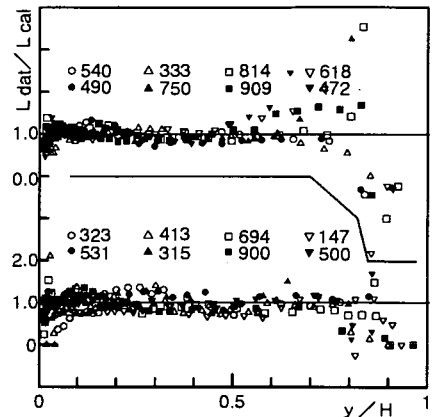


図-9 混合距離分布  
 $L_{dat} / L_{cal}$  と  $y/H$  との関係

果として混合距離は滑面での値より局所的に小さくなると考えられる。混合距離の減少は安定した縦渦の中心付近( $y_c^+$ )で最大となり、その範囲は安定した縦渦の大きさに比例すると考えることができる。リブ頂の両側上方に形成される安定した縦渦はリブの形状に規定されることから、その大きさはリブ寸法( $k^+ \approx s^+$ )に比例したものである。

上記の考えに基づいて、混合距離分布を次式で与える。次章において実験結果より $B_0$ が定められる。

$$l = \kappa y \sqrt{1 - \frac{y}{H}} \cdot \Gamma_d \cdot \Gamma_s \quad (10)$$

$$\Gamma_d = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (11)$$

$$B = B_0 \left[ 1 + \exp \left\{ - \left( \frac{y^* - y_c^*}{k^*} \right)^2 \right\} \right], \quad y_c^* = 13 \quad (12)$$

$y_c^*$ の値は, Choi<sup>14)</sup>の仮想原点位置についての提案を考慮し, 図-7での偏差が最大となる平均的な位置で定めた. 次章で得られた  $B_0$ の値を用いて算定された混合距離で実測値を正規化した結果が図-8, 9である. 両図において流速測定ならびに混合距離算定の精度を考慮すると, 混合距離分布は実測結果を良く再現している.

## 6. 仮想原点位置の再評価

最初に式(4), (6)で近似した混合距離分布が前章で式(10)~(12)と修正された. この結果, 流速は異なる分布となる. 4節と同様な方法で, 修正された混合距離分布で計算された流速分布と実測値とが全領域で合致する仮想原点位置を定める.

式(12)中の  $B_0$ の値を系統的に変えて計算された流速分布と実測値とを比較したのが図-10である. ○描点はリブ頂を原点として, ●描点は計算曲線と合致する様に試算で求めた仮想原点位置を原点にして得られた結果である. 図中に記した  $B_0$ は計算曲線から内挿で求めた.

$B_0$ と  $k^*$ との関係を, 仮想原点位置  $y_0^*$ と  $k^*$ との関係を図-11, 12に示す. 両図中に記入されている実線は次式で与えられる.

$$B_0 = 26 \quad \text{for } k^* \leq 3$$

$$B_0 = 26 \cdot \exp\{-0.03 \cdot (k^* - 30)\} \quad \text{for } k^* \geq 3 \quad (13)$$

$$\frac{U \cdot y_0}{\nu} = 0.60 \cdot \left( \frac{U \cdot k}{\nu} \right)^{0.63} \quad (14)$$

$k^* \leq 3$ では  $B = B_0 = 26$ となり, Nezu & Rodiによつて得られている値と一致し, 混合距離ならびに流速分布は滑面におけるそれらと一致する.

$k^*$ が大きくなっていくと式(13)で与えられる  $B_0$ の値は小さくなっていき, 図-10で明らかな様に, 対数領域における流速分布は滑面のそれより下方へ移動して, 流速係数は小さくなり, 摩擦抵抗係数は大きくなっていく.

式(14)を変形すると, 粗度高さに対する仮想原点位置は次式となる.

$$y_0 / k = 0.60 (k^*)^{-0.37}$$

$k^*$ が大きいほど仮想原点位置はリブ頂に近づいていく.  $y_0 / k^* = \text{const}$ とした場合に較べて,  $k^*$ が大きいほど摩擦速度を評価する水深が小さくなるので, 図-10における描点が右上に移動し, 流速係数は相対的に大きくなり, 摩擦抵抗係数は小さくなっていく. 上述の様に, 式(13)と式(14)とは  $k^*$ の変化による摩擦

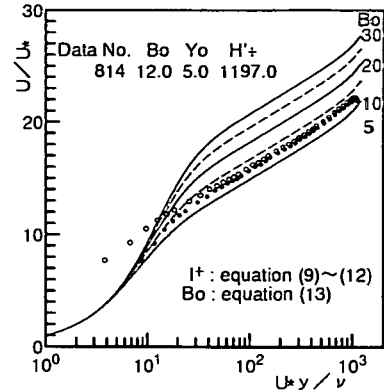


図-10 仮想原点位置と  $B_0$ の算定図

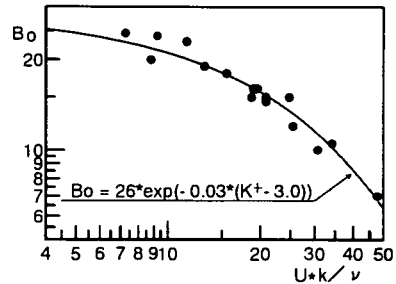


図-11  $B_0$ と  $k^*$ との関係

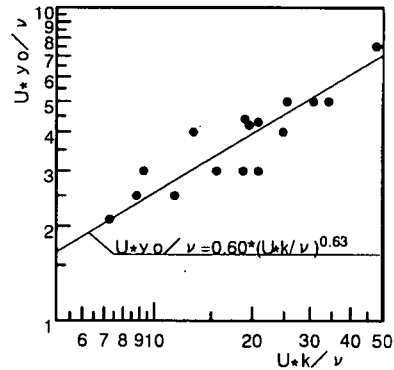


図-12 仮想原点位置  $y_0^*$ と  $k^*$ との関係

抵抗係数は小さくなっていく.

上述の様に, 式(13)と式(14)とは  $k^*$ の変化による摩擦抵抗係数に及ぼす効果は相反している. 両式での  $k^*$ の変化による摩擦抵抗係数に与える効果の度合いによつて抵抗軽減率は極値をとることが考えられる.

式(10)~(13)で与えられる混合距離分布を用いて計算した流速分布と, 式(14)で仮想原点位置を用いて整理

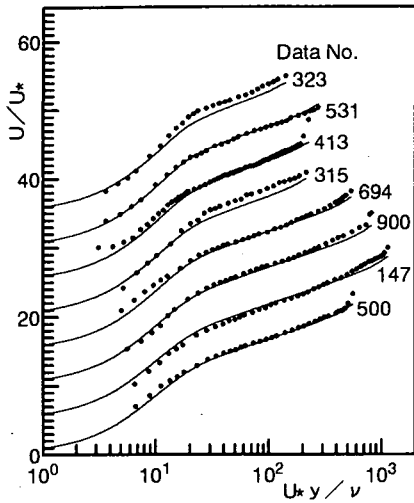


図-13-a 流速分布

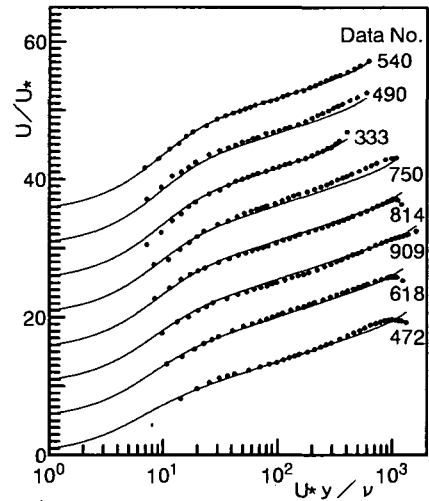


図-13-b 流速分布

した実測値とを比較したものが図-13である。 $I_E/I_D$ が0.7より小さいData No. 323, 315の実験を除くと計算値と実測値との一致は極めて良好である。

### 7. 摩擦抵抗係数

境界層流れでは、同じ主流速での実験を行い、運動量厚さ $\theta$ を用いたレイノルズ数が同じである断面での抵抗係数の比を抵抗軽減率としている。すなわち、上記断面における両者での運動量厚さの変化率の比が抵抗軽減率である。

リブレット粗面開水路での実験は見当たらず、抵抗軽減率の定義はなされていない。抵抗軽減率を現象的に見ると、同じ河床勾配の水路に同じ流量を流して、両者における摩擦抵抗係数の比で抵抗軽減率を定義するのが単純でかつ明快である。本研究では、河床勾配と流量(レイノルズ数)と同じである条件で抵抗軽減率を評価する。

基準となる滑面の摩擦抵抗係数は流量が一致する水深( $H^*$ )を試算で求めることで得られる。式(3)を積分した結果と一致する流速係数を用いると、水深を試算する労力は大幅に軽減され、簡便となる。通常、流速係数は対数分布則を積分して得られる次式が用いられている。

$$V/U_* = As + 1/\kappa \{ \ln(U_* H/\nu) - 1 \}$$

$VH/\nu = (V/U_*) (U_* H/\nu)$ と書けるので、単位幅流量は $H^* = U_* H/\nu$ だけで規定されるが、viscous sublayerにおける流速分布の対数分布則からの偏差が考慮されていないので、精度が要求される場合、特に $H^*$ が小さい場合には、この偏差が流速係数に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。次節でこの検討を行う。

### (1) 流速係数についての検討

対数領域の下端境界面高さを $y_*^*$ とし、流速分布を次式で与えて、滑面の流速係数を検討する。

$$\frac{U}{U_*} = f(y_*^*) \quad \text{for } y_*^* \leq y_*^* \quad (15)$$

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0^*}\right) \quad \text{for } y_*^* \geq y_*^* \quad (16)$$

上式を積分して、平均流速(流速係数)は次式で得られる。

$$\frac{V}{U_*} = \frac{1}{H^*} \left[ \int_{y_0^*}^{y_*^*} f(y_*^*) dy_*^* - \frac{y_*^*}{\kappa} \left\{ \ln \frac{y_*^*}{y_0^*} - 1 \right\} - \frac{1}{\kappa} \left\{ \ln(y_0^* + 1) \right\} + \frac{1}{\kappa} \ln(H^*) \right] \quad (17)$$

上式右辺の第2, 第3項との和は通常用いられている流速係数で、第1項がviscous sublayerにおける流速分布の偏差による修正項である。

第1項の流速係数、摩擦損失係数に与える影響を評価したのが図-14, 15である。 $Vs^+$ ,  $f_{vs}$ はVan Driest's damping functionを導入した混合距離分布( $B_0 = 26$ ,  $\kappa = 0.412$ )を用いて得られる流速係数、摩擦損失係数の値である。図中の破線は式(17)の第1項を省略した結果( $A_{vs} = 2.86$ )で、 $H^*$ が小さい場合にはリブレットでの抵抗軽減率に相当する誤差がある。

水表面の混合距離分布に与える影響として式(9)が導入されているので、式(17)の第一項の[ ]内の値は一定ではないが、その影響は小さいと考えられ、図-14の破線で示されている傾向からほぼ一定値と考えられる。通常用いられている流速係数の定数項を次式で置き換えた

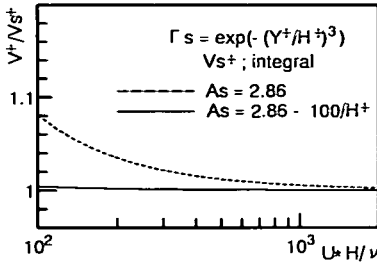


図-14  $(V/U_*)/(V/U_*)_s$  と  $U_* H/\nu$  との関係

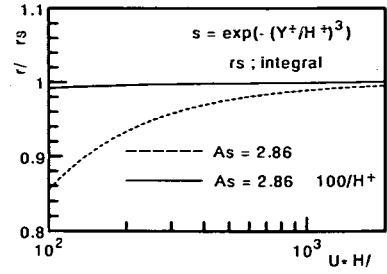


図-15  $f_r/f_{r_s}$  と  $U_* H/\nu$  との関係

結果を図-14, 15に実線で示してある。

$$A_s = 2.86 - \frac{100}{H^+} \quad (18)$$

通常用いられている流速係数の定数項を上式で与えることで、滑面で確定されている流速分布を積分して得られる流速係数と極めて良く一致した値が得られている。

## (2) 抵抗軽減率

先に定義した抵抗軽減率についての実験結果と計算結果とを比較する形で図-16に示す。図に示した実験値と計算値曲線は下記の手順で計算した。

- (a) 摩擦損失係数の実験値:  $B_0$  を決める際に用いた図-10中に表示した  $y_0$  から順次  $H = H^+ + y_0$ ,  $U_* = (gH I_\epsilon)^{1/2}$ ,  $H^+ = U_* H / \nu$  が定まる。

実測した流速分布を積分して単位幅流量(レイノルズ数  $VH/\nu$ )が得られる。

流速係数, 摩擦損失係数は次の関係から求まる

$$\frac{V}{U_*} = \left(\frac{VH}{\nu}\right) / \left(\frac{U_* H}{\nu}\right), \quad f_r = 8 / \left(\frac{V}{U_*}\right)^2$$

- (b) リプレット粗面での各実験値に対応する滑面における摩擦損失係数: 式(18)の修正式を用いると, レイノルズ数は次式で書ける。

$$\frac{VH}{\nu} = \frac{V}{U_*} \frac{U_* H}{\nu} = \left\{ 2.86 - \frac{100}{H^+} + \frac{1}{\kappa} \ln(H^+) \right\} H^+$$

実験でのレイノルズ数  $(VH/\nu)$  を与え  $H^+$  を試算で求める。  $H^+$  と  $VH/\nu$  から流速係数, 摩擦損失係数  $f_{r_s}$  が求まる。

- (c)  $H^+$  と粗度レイノルズ数 ( $k^* = U_* k / \nu$ ) とを系統的に変えて, 式(10)~(13)で与えられる混合距離分布を式(3)に代入し積分することで, 流速分布, 流速係数, 摩擦損失係数  $f_r$ , レイノルズ数が順次求まる。すなわち, リプレット粗面における一連の  $(H^+, k^*) \sim VH/\nu$

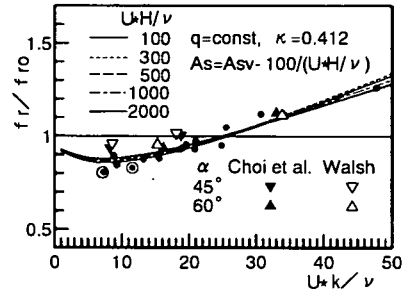


図-16 抵抗軽減率と粗度レイノルズ数との関係

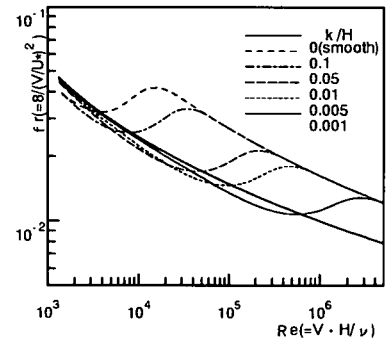


図-17 摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関係

の関係が得られる。

- (d) (c)で系統的に与えた  $(H^+, k^*)$  の組み合わせから得られたレイノルズ数に対する摩擦損失係数  $f_{r_0}$  が, (b)で行ったと同じ方法で計算される。

実験描点は((a)での  $f_r$ )/(b)での  $f_{r_0}$ )で, 計算曲線は((c)での  $f_r$ )/((d)での  $f_{r_0}$ )である。図には比較のために Choi H. et al. <sup>15)</sup>, Walsh <sup>1)</sup>の実験結果と Choi H. et al. <sup>15)</sup> のDNSによる結果とが描点されている。十分に等流条件が満たされていない丸で囲んだ描点(Data No. 323, 315)を除くと, 計算曲線は実験ならびにDNSによる解析結果と良好に一致している。

上記(c)でのリプレット粗面における摩擦抵抗係数



$f_r$  とレイノルズ数との関係を Moody 図の形式で示したのが図-17 である。図には比較のため滑面の摩擦係数が記入されている。

$H^*$  をパラメータにして示している図-16 から明かな様に、滑面の曲線と交差する点での粗度レイノルズ数の値はほぼ  $k^* = 25$  である。紙面の都合で除いたが、 $k/H$  をパラメータにした  $f_r \sim k^*$  の図を描くと  $k^* = 100$  で摩擦抵抗係数が最大となる。したがって、図-17 で各  $k/H$  の曲線において  $f_r$  が極大値をとる点において、 $k^* = 100$  である。図-17 の結果は  $k^* < 50$ ,  $k/H = 0.017 \sim 0.055$  での実験結果からの外挿であるので、 $k^* > 50$  での計算結果は実験で確認する必要がある。

Tominaga & Nezu<sup>21)</sup> が河床勾配と水深を系統的に変えた粗面開水路での実験結果を図と同様な表示をすると、図-17 における  $k^* < 50$  での曲線と類似した結果となっている。

## 8. 結語

リブレット粗面開水路で測定した平均流速分布から算定した混合距離分布と、滑面水路でのそれと類似した分布からの偏差を定式化することで、全領域の流速分布を明らかにして、精度良く仮想原点位置を算出する方法、ならびに抵抗軽減率の評価方法を提案した。これらの検討から得られた主要な知見は次の通りである。すなわち、

- (1) 対数領域での混合距離分布の大略の傾向から、混合距離分布に及ぼす水表面の影響を評価する修正項として式(8) が得られた。
- (2) リブに起因する流れ場の特性を考慮して、viscous sublayer における混合距離分布の修正項として式(9)~(12) が得られた。
- (3) リブレット粗面での仮想原点位置として式(13) が得られた。(1)~(3)の結果を用いて計算した流速分布は実測値との一致は極めて良好である(図-13)。
- (4) 粗度レイノルズ数の増大による減衰係数の変化と仮想原点位置の変化が平均摩擦係数に及ぼす効果は相反している。両者の効果の結果として抵抗軽減率が極小値をとる(図-16)。
- (5)  $H^*$  が小さくなると、通常用いられている流速係数の評価式ではリブレット粗面での抵抗軽減率以上の誤差がある。常数項の代わりに式(20)を用いることで、流速係数は精度良く簡便に評価できる。
- (6) 定式化された混合距離分布と仮想原点位置を用いて計算された抵抗軽減率と実験ならびにDNSによる結果との一致は極めて良好である(図-

16)。したがって、開水路流れでもリブレットは境界層流れと同様な効果がある。

以上、提案した仮想原点位置の評価方法は全領域における流速分布を対象としているので、形式は異なるが滑面での Clauser method, 古屋・藤田の方法と同様な手法であるが、せん断力が直線分布であることを利用しているので、境界層流れに対しては何らかの条件が必要である。

平均流速分布を精度良く詳細に測定することで一般の粗面開水路における仮想原点位置(摩擦速度)の評価に適用できる方法である。

謝辞: 実験を行った、当時の大学院生 倉本和正(現中電技術コンサルタント)、卒研究生 国弘理恵(現鉄建建設)、小澤隆に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Walsh, M. J. : Riblets as a viscous drag reduction technique, *AIIA Journal*, vol.21, No.4, 485-486, 1983.
- 2) Walsh, M. J. and Anders, J. B. jr. : Riblet/LEBU research at NASA Langley, *Applied Scientific Research*, 46, 255-262, 1989.
- 3) Squire, L. C. and Savill, A. M. : Drag measurements on planar riblet surfaces at high subsonic speeds, *Applied Scientific Research*, 46, 229-243, 1989.
- 4) Rohr, J. J. , Anderson, G. W. , Reidy, L. W. and Hendricks, E. W. : A comparison of the drag reducing benefits of riblets in internal and external flows, *Experiments in Fluids*, 13, 361-368, 1992.
- 5) Truong, T. V. and Pulvin, P. H. : Influence of wall riblets on diffuser flow, *Applied Scientific Research*, 46, 217-227, 1989.
- 6) Coustols, E. and Savill, A. M. : Resume of important results presented at the Third Turbulent Drag Reduction Working Party, *Applied Scientific Research*, 46, 183-196, 1989.
- 7) Choi, Kwng-So. : Near-wall structure of a turbulent boundary with riblets, *J. Fluid Mech.*, vol.208, 417-458, 1989.
- 8) 鈴木雄二, 笠木伸英 : 3-D PIV によるリブレット壁面上の乱流場計測, 第 24 回乱流シンポジウム講演論文集, 315-321, 1992.
- 9) Tang, Y. P. and Clark, D. G. : On near-wall turbulence-generating event in a turbulent boundary layer on a riblet surface, *Applied Scientific Research*, 50, 215-232, 1993.
- 10) Park, S-R. and Wallace, J. M. : Flow alteration and drag reduction by riblets in turbulent boundary layer, *AIIA Journal*, vol.32, No.1, 1994.
- 11) Djenidi, L. and Antonia, R. A. : Riblet flow calculation with a low Reynolds number  $\kappa - \epsilon$

- model, *Applied Scientific Research*, 50, 267-282, 1993.
- 12) Launder, B. E. and Li, S. P.: On the prediction of riblet performance with engineering turbulence models, *Applied Scientific Research*, 50, 283-298, 1993.
  - 13) Chu, D. C. and Karniadakis, G. E. : A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surface, *J. Fluid Mech.*, vol.250, 1-42, 1993.
  - 14) Choi, H., Moin, P. and Kim, J.: Direct numerical simulation of turbulent flow over riblet-mounted surface, *J. Fluid Mech.*, vol.250, 1-42, 1993
  - 15) Bechert, D. W. and Bartenwerfer, M.: The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs, *J. Fluid Mech.*, vol.206, 105-120, 1989.
  - 16) Luchini, P. , Manzo, F. and Pozzi, A.: Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross-flow, *J. Fluid Mech.* vol.228, 87-109, 1991.
  - 17) Luchini, P.: Viscous sublayer of riblets and wire arrays, *Applied Scientific Research*, 50, 255-266, 1991.
  - 18) Manen, A. D. Schwarz-von, van Geloven, A. F. M., Nieuwenhuizen, J., Stouthart, J. C., Prasad, K. K. and Nieuwstadt, F. T. M: Friction velocity and virtual origin estimates for mean velocity profiles above smooth and triangular riblet surface, *Applied Scientific Research*, 50, 233-254, 1991.
  - 19) 古屋善正, 藤田秀臣: 金網粗面上の乱流境界層, 日本機械学会論文集(第2部), 32巻, 237号, 725-733, 1966.
  - 20) Bandyopadhyay, P. R.: Review - Mean flow in turbulent boundary layers disturbed to alter skin friction, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, Vol.108, 127-140, 1986
  - 21) Tominaga, A. and Nezu, I. : Turbulent structure in steep open-channel flows, *Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ.*, Vol.53, No.3, 151-177, 1991
  - 22) Hooshmand, A. , Youngs, R. A. , Wallace, J. M. and Balnt, J.-L.: An experimental study of changes in the structure of a turbulent boundary layer due to geometry changes, *AIIA paper*, 83-0230, 1983.
  - 23) 齋藤隆, 佐賀孝徳, 羽田野袈裟義, 本名元: 粗面抵抗則に関する一考察, 山口大学工学研究報告, 第34巻, 第1号, 89-95, 1983.
  - 24) 齋藤隆, 羽田野袈裟義: 急勾配粗面水路の抵抗則について: 第28回水理講演会論文集, 143-148, 1984.

(1996.9.27 受付)

## THE RESISTANCE LAW OF OPEN CHANNEL WITH THE V-GROOVED RIBLET SURFACE

Takashi SAITOU, Kunio MAEDA, Nobuyoshi AKASHI and Hirohumi OHNARI

The method using the mean velocity profiles was developed for the resistance law of open channel with the v-grooved riblet surface. First, an approximation to the virtual origins were estimated by the closest match between the measured velocity profiles and the velocity profile calculated using several values of van Driest's damping coefficient. Then, the profiles of the mixing length were evaluated from the measured velocity profiles. The present method can be applied to the other kind of roughness. However, although the linear profile of the shear stress in the open channel flow can be employed, other techniques are required to apply the present method for boundary layer flow.