

## 第 5 章

# 超撥水壁面近傍の流動と流動抵抗の評価

### 5.1 緒論

本章では、APT<sub>V</sub> を使用して超撥水壁面に形成される固液界面及び気液界面近傍の流動を計測する。1 章で述べた通り、界面に働くせん断応力を取得できれば、超撥水壁面が有する抵抗低減効果に言及できる。また、気液界面の形状とその近傍の流速分布を関連付けることが、超撥水壁面の抵抗低減効果の解明につながると考えられる。しかし、気液界面形状を調査した研究は少なく、また同時に気液界面近傍の流動を直接計測して流動抵抗を評価した例はない。

4 章までに、単視野で 3 次元 3 成分流速を計測できる APT<sub>V</sub> を使用して、壁面近傍の流速及び壁面せん断応力の分布を計測してきた。APT<sub>V</sub> は流路中を流れる粒子の 3 次元的位置を特定できるため、気液界面の形状が抽出できると考えられる。

本章では計測対象として、図 1.6 に示した流れに対して平行なリブ及び溝を有する形状に撥水加工を施したものを超撥水壁面として選択した。そして、超撥水壁面に形成される固液及び気液界面近傍の流動計測の結果に基づいて流動抵抗を評価することを目的に、APT<sub>V</sub> によって超撥水壁面近傍の流速分布を計測した。

### 5.2 抵抗低減効果の評価方法

長方形断面を有する矩形管について、長さ  $L$  の区間における圧力損失  $\Delta P$  は、

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho U_{\text{ave.}}^2}{2} \quad (5.1)$$

で算出される [109]。ここで、 $D_h$  は水力直径、 $U_{\text{ave.}}$  は平均流速、 $\rho$  は流体の密度、 $f$  は管摩擦係数である。また、平行平板における 2 次元ポアズイユ流れの流速分布  $u(z)$  は、流路高さ  $h$  及び単位長さあたりの圧力損失  $dP/dx$  を考慮すると、

$$u(z) = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{dP}{dx} \right) (h-z)z \quad (5.2)$$

で表される [100]. このとき, 壁面におけるせん断応力  $\tau_w$  は式 (1.2) で評価できるため, 式 (5.2) を  $z$  で微分して  $z=0$  とおくと,

$$\tau_w = \frac{1}{2} \left( \frac{dP}{dx} \right) h \quad (5.3)$$

となる. ここで, 流路幅  $w$  が流路高さ  $h$  より十分大きいとき, 水力直径  $D_h$  は  $D_h \approx 2h$  と仮定できる. そのため, 式 (5.3) は,

$$\tau_w = \frac{1}{4} \left( \frac{dP}{dx} \right) D_h \quad (5.4)$$

となる. ここで式 (5.1) は,

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{dP}{dx} = \frac{f}{D_h} \frac{1}{2} \rho U_{ave.}^2 \quad (5.5)$$

と変形できるので, 式 (5.4) より管摩擦係数  $f$  は,

$$f = \frac{2D_h}{\rho U_{ave.}^2} \left( \frac{dP}{dx} \right) = \frac{2D_h}{\rho U_{ave.}^2} \cdot \frac{4\tau_w}{D_h} = \frac{8\tau_w}{\rho U_{ave.}^2} \quad (5.6)$$

と算出される. 摩擦抵抗を評価する際は, 管摩擦係数  $f$  とレイノルズ数  $Re$  の積が使用される. 平行平板を流れる層流の場合  $fRe = 96$  という関係が成立する. そして  $fRe < 96$  となるとき, 流動抵抗の低減効果があるといえる. 先行研究において, Maynes ら [11] らや, Kim ら [12] は超撥水壁面を持つ流路全体の圧力損失を計測し,  $fRe$  の値を算出して抵抗低減効果を評価した. 一方, 式 (5.6) より  $U_{ave.}$  と  $D_h$  が一定であるならば, 壁面におけるせん断応力  $\tau_w$  から管摩擦係数  $f$  を評価できる. このことより, 超撥水壁面近傍の流速分布を計測し, 界面のせん断応力  $\tau$  を算出すれば, 流動抵抗を評価できると考えられる. ここで,  $fRe$  は,

$$fRe = \frac{8\tau}{\rho U_{ave.}^2} \frac{D_h U_{ave.}}{\nu} = \frac{8\tau}{U_{ave.}} \frac{D_h}{\mu} \quad (5.7)$$

となる.

1 章で述べた通り, 気液界面において流れがすべる. ここですべり長さを  $\lambda$ , 界面におけるすべり速度を  $u_{slip}$  とすれば, Navier のすべりモデル [110] から式 (1.5) が成立する.

式 (1.5) より、界面におけるせん断応力を算出するためには、界面における速度勾配  $\partial u/\partial z|_{\text{interface}}$  を取得する必要がある。APTV による流速計測から速度勾配を評価できるが、この速度勾配を算出するためには、すべり速度  $u_{\text{slip}}$  が必要である。更に、 $u_{\text{slip}}$  を決定するためには気液界面の形状（位置）を特定する必要がある。よって、気液界面近傍の流速計測は必須といえる。

## 5.3 実験装置及び実験方法

### 5.3.1 超撥水壁面の設計コンセプト

超撥水壁面の抵抗低減効果は、リブ幅  $l_r$  及び溝幅  $l_g$  の影響を受けるといわれている。本研究では、Maynes ら [11] によって提案された、流れ方向に対して平行なリブ及び溝を持つ流路寸法と  $f\text{Re}$  の関係を表すモデル (cavity-liquid-vapor model, CLV model, 式 (5.8)) に基づき、超撥水壁面のリブ及び溝の寸法を決定した。このモデルでは、流路の上下面に超撥水壁面を仮定している。また、溝部分に形成される気液界面は変形しないものとし、この界面において液体側と気体側の流動のみが考慮されている。このとき、 $f\text{Re}_{\text{CLV}}$  は、

$$f\text{Re}_{\text{CLV}} = \frac{8}{\left[ \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{1}{\cos(F_c \pi/2)} \right) (1 - e^{-4\delta_c^{2/3}/W_c}) W_m + \frac{1}{12} \right]} \quad (5.8)$$

で定義される。式 (5.8) を計算した結果を図 5.1 に示す。ここで、横軸は溝部の割合  $F_c (= l_g/(l_g + l_r))$ 、縦軸は摩擦係数  $f$  とレイノルズ数  $\text{Re} (= D_h U_{\text{ave.}}/\nu)$  の積の  $f\text{Re}$  である。なお、 $W_c$  は水力直径に対する溝の幅 ( $= l_g/D_h$ )、 $W_m$  は水力直径に対する溝及びリブの 1 セットの長さ ( $= (l_g + l_r)/D_h$ )、 $\delta_c$  は水力直径に対する溝の高さ ( $= h/D_h$ ) である。この結果によると、 $F_c$  の増大に伴って  $f\text{Re}$  が低下することがわかる。

本研究では、下方観察によって超撥水壁面近傍の流動を観察するため、流路下面はガラスを使用している。そのため、流路の片側だけにパターンがあることになる。このモデルより、APTV による流速計測に基づいて  $f\text{Re}$  を評価した結果は、式 (5.8) に基いた値よりも大きな値が算出されると予想される。

本研究では、ネガ型のフォトレジストである SU-8 を使用し、フォトリソグラフィによってシリコンウェーハ上に型取り用のパターンを作成した。そして、PDMS で型取りをして流路を作成した。流路作成の手順を図 5.2 に示す。まず、ベースとなる長方形断面の矩形流路を成形する。そして、矩形流路パターンの上に更に SU-8 を塗布してリブ及び溝部分を成形した。この成形の過程では、フォトマスクの上から紫外光を照射する必要がある。しかし、細かいパターンを成形する場合は (図 5.2(e))、フォトマスク上のスリットを透過する紫外光が回折することになる。このことから、パターンが適切に形成できない可能性がある。これを防ぐため、 $F_c = 0.5$ 、即ち  $l_r = l_g$  となるようにパターンの幅を決定した。

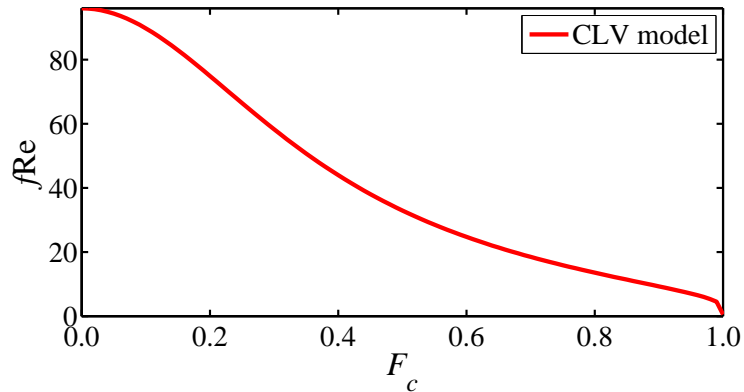


Fig. 5.1 Relationship between frictional drag  $fRe$  and geometry of rib and groove  $F_c$  calculated by Eq. (5.8).

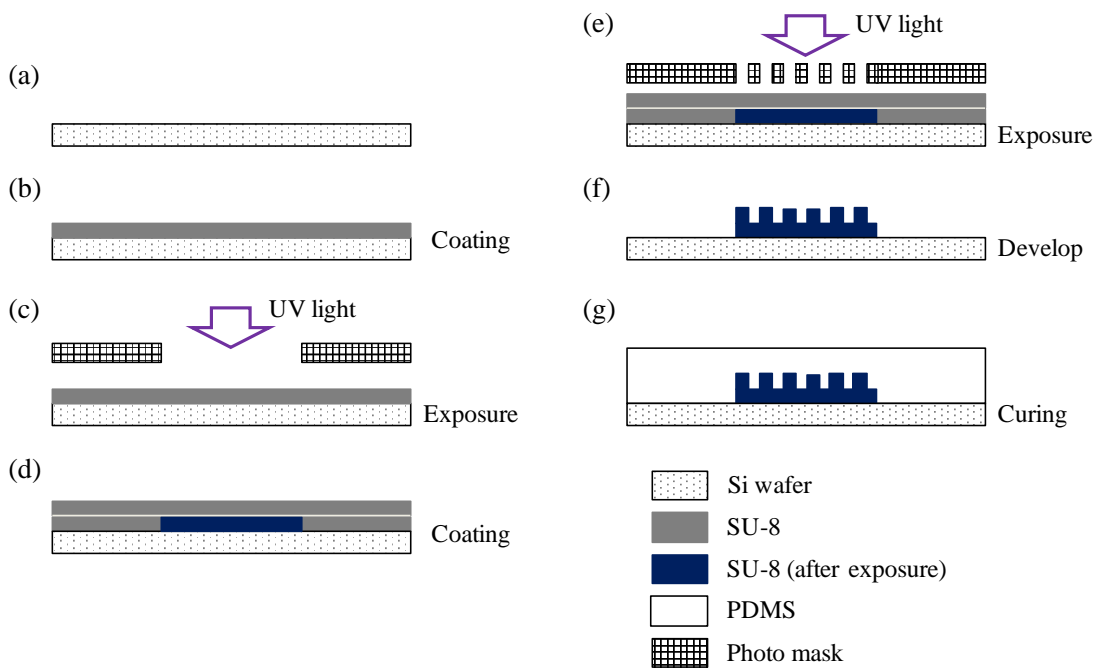


Fig. 5.2 Microfabrication process for making PDMS channel with longitudinal ribs and grooves.

### 5.3.2 使用流路及び計測方法

5.3.1 項で述べたコンセプトに基づいて、パターンを持つ流路を作成した。作成した流路壁面の SEM 画像を図 5.3 に示す。図中のハイライトした部分はリブ部分である。また、作成した流路断面の概略図を図 5.4 に示す。座標系は、流れ方向が  $x$  軸、スパン方向を  $y$  軸、高さ方向を  $z$  軸としている。このとき、リブのエッジ部分を  $z = 0 \mu\text{m}$  とし、溝内部が  $z < 0$  となるよう  $z$  軸を定義した。壁面には、流れ方向に対して平行なマイクロ

ケールのリブ及び溝がスパン方向に対して 50 個設置されている。流路幅は  $W = 5 \text{ mm}$ ，流路長さは  $L = 65 \text{ mm}$ ，微細構造部分を除いた流路高さは  $H = 34 \mu\text{m}$  である。リブ及び溝，そして溝深さをレーザ変位計で計測したところ， $l_r = 43 \pm 2 \mu\text{m}$ ， $l_g = 57 \pm 2 \mu\text{m}$ ，溝深さは  $h = 44 \mu\text{m}$  であった。この壁面に対して撥水処理を行うために，シラン化合物 (perfluorooctyltrichlorosilane) を Sofla らの方法 [111] に従って蒸着させた。流路底面は 1 mm 厚のスライドガラスを使用し，ガラス側に穴を開けて送液のためのチューブを接続した。

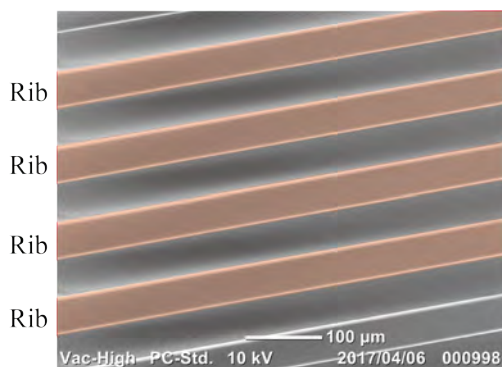


Fig. 5.3 SEM image of superhydrophobic surface.

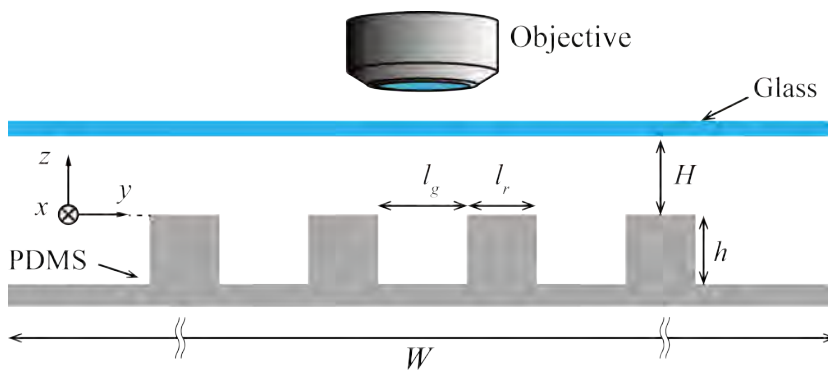


Fig. 5.4 Cross-sectional view of the microchannel made of PDMS and glass plate. The PDMS has microribs and microgrooves.

図 5.5 に，使用した APTV システムの概略図を示す。作動流体として，直径  $d_p = 1 \mu\text{m}$  の蛍光粒子を超純水に混合したものを使用した。また，用いた校正関数は，第 2 章で述べた方法に基づいて決定し，約  $F = -3400 \text{ pixel}^2$  付近で壁面位置 (ガラス壁面,  $z = 34 \mu\text{m}$ ) となるようにした。作動流体の送液にはシリンジポンプ (Pump Elite11, Harvard apparatus) を使用し，流量を  $Q = 50 \mu\text{L/h}$  ( $\text{Re} = 5.5 \times 10^{-3}$ ) とした。計測を実施した場所は，助走区間を考慮し流路入口から数 cm 離れた部分で，流路のスパン方向中心付近とした。

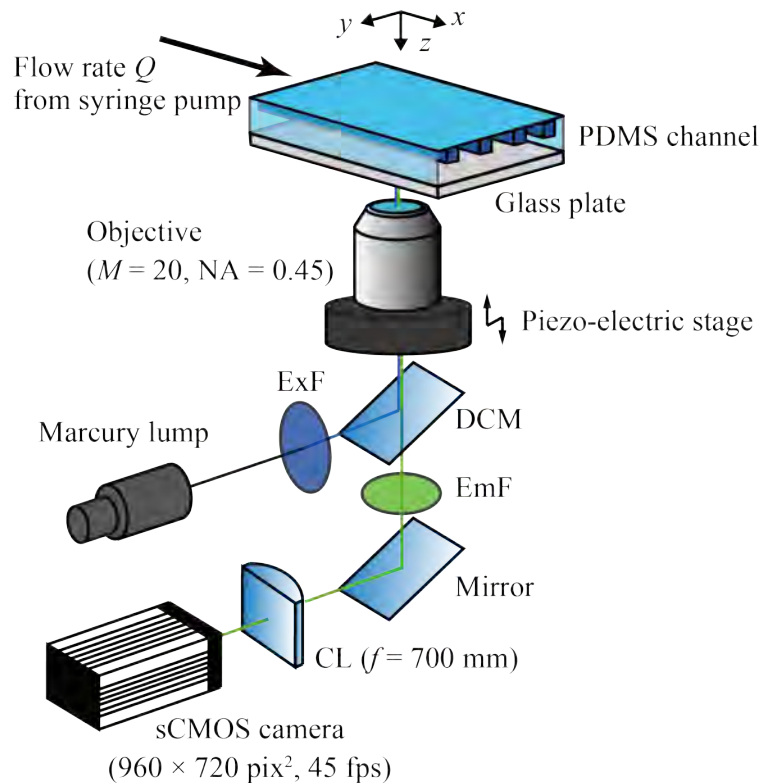


Fig. 5.5 Schematics of APTV system.

## 5.4 予備実験

図 5.4 に示した超撥水壁面を有する流路の計測を実施する前に次の 3 点を予備実験として確認し、超撥水壁面近傍の流動計測を実施した。

- (1) 気液界面が形成されるか
- (2) APTV によって流路形状の特定が可能か
- (3) 流動計測によって流動抵抗の評価が可能か

### 5.4.1 気液界面の形成

まず、作成した超撥水壁面に気液界面が形成されるか確認した。このために、流路を型取りした後、シラン化合物による撥水処理を行った流路と、プラズマ処理によって親水化処理を施した流路を比較した。この 2 種類の流路を使用し、蛍光染料（フルオレセイン）水溶液を流し、目視で蛍光観察を行った。使用した対物レンズはの倍率は  $M = 4\times$  ( $NA = 0.13$ ) である。その結果を図 5.6 に示す。図 5.6(a) 及び (b) を比較すると、プラズマ処理によって親水化処理を施した流路（図 5.6(b)）では、溝部分に染料が侵入し明確な縞模様

なっている。一方、撥水コーティングを行った流路 (図 5.6(a)) は、リブ及び溝部分の縞模様が不明確である。更に、 $M = 40\times$  ( $NA = 0.6$ ) の対物レンズを使用し、溝部分における最大輝度を奥行方向に計測位置を変化させながら算出した。その結果を図 5.7 に示す。図 5.7 は、溝部分の最大輝度値をリブ部分の輝度値で無次元化したものをプロットしている。図 5.7 より、撥水処理をしたものは親水処理をしたものと比較して輝度値が小さいことがわかる。以上のことより、2つの流路でコントラストの差が確認されたため、超撥水壁面の近傍に気液界面が形成されていると判断した。

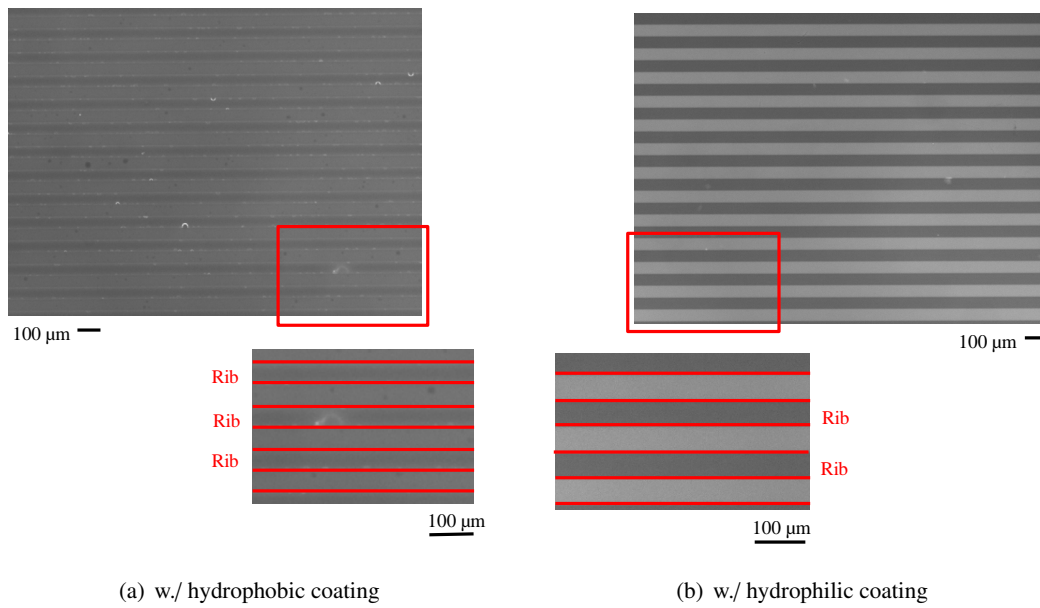


Fig. 5.6 Comparison between w./ hydrophobic coating and w./ hydrophilic coating by fluorescence observation.

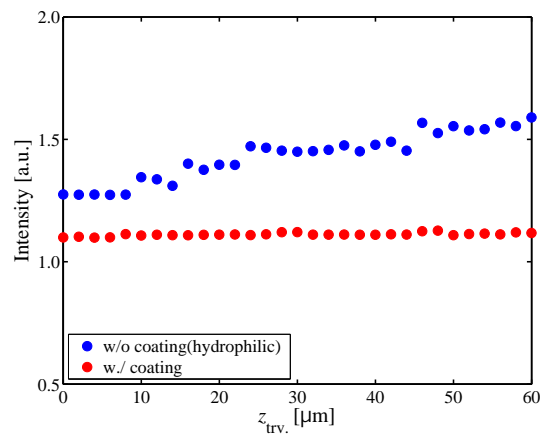


Fig. 5.7 Fluorescence intensity distribution for depth direction at the groove part comparing between w./ hydrophobic coating and w./ hydrophilic coating.

### 5.4.2 流路形状の特定

APTV では、粒子の位置及び流速分布から流路の断面形状が特定できると期待される。そこで、流路断面の流速分布を使用して断面形状が特定可能か確認するため、幅  $w = 2 \text{ mm}$ 、高さ  $h = 30 \text{ }\mu\text{m}$  の矩形流路を使用し、流量  $Q = 15 \text{ }\mu\text{L/h}$  における流速  $u$  成分の計測を行った。その結果を図 5.8 に示す。図 5.8 より、流路上下面で  $u$  は小さく、そして中央付近で  $u$  の値が大きくなるという、ポアズイユ流れの特徴を確認した。 $z = 30 \text{ }\mu\text{m}$  付近では、粒子の数が少ないことに起因し、壁の特定には至っていない。そのため、計測する粒子数を増加させれば、流路形状の特定が可能と考えられる。

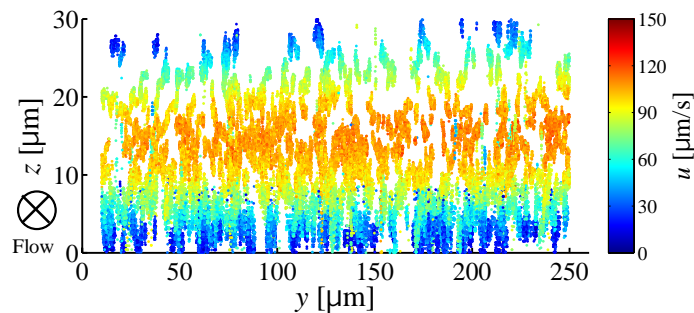


Fig. 5.8 Cross-sectional velocity distribution  $u$  of rectangular channel,  $h = 30 \text{ }\mu\text{m}$  in height,  $w = 2 \text{ }\mu\text{m}$  in width. The flow rate is  $Q = 15 \text{ }\mu\text{L/h}$ .

### 5.4.3 流動計測による流動抵抗評価の実現性

式 (5.7) に示したように、抵抗低減効果を評価するには、界面に働くせん断応力  $\tau$  を算出する必要がある。そこで、平行平板流路を使用し、APTV による流速計測の結果から  $f\text{Re} = 96$  を評価できるか確認する。また 4 章では、流路下面側の壁面近傍流動から壁面せん断応力を算出した。一方、計測対象である超撥水壁面は、計測の都合上、流路上方に溝及びリブが設置される。そのため、流路上方側の流速から  $f\text{Re}$  を算出した場合と、流路底面側の流速から  $f\text{Re}$  を算出した場合で、計測の精度に差がないか確認する必要がある。図 5.9 は、図 5.8 の  $u$  成分の計測結果を  $y$  軸方向に積分し、平均化した結果である。この計測結果を考慮して、流量を変化させながら  $f\text{Re}$  を算出した結果を図 5.10 に示す。なお、 $\tau_w$  算出の際は系統誤差を考慮して、流路底面側では  $3 \leq z \leq 15 \text{ }\mu\text{m}$ 、流路上面側では  $15 \leq z \leq 27 \text{ }\mu\text{m}$  における流速分布を使用した。図 5.10 より、どの流量においても  $f\text{Re} = 96$  となっていることがわかる。また、流路上方側、下方側の速度データを使用しても、同程度のばらつきを有している。そのため、超撥水壁面における界面の近傍流速を計測し、 $f\text{Re}$  を評価することで、抵抗低減効果へ言及できることが示唆される。



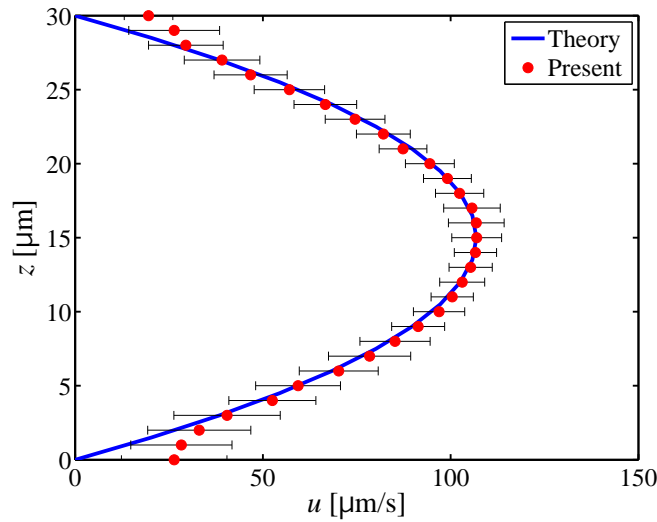


Fig. 5.9 Averaged velocity distribution  $u$  in  $z$  direction. The channel geometry was  $h = 30 \mu\text{m}$  in height and  $w = 2 \text{ mm}$  in width. Flow rate was  $Q = 15 \mu\text{L/h}$ .

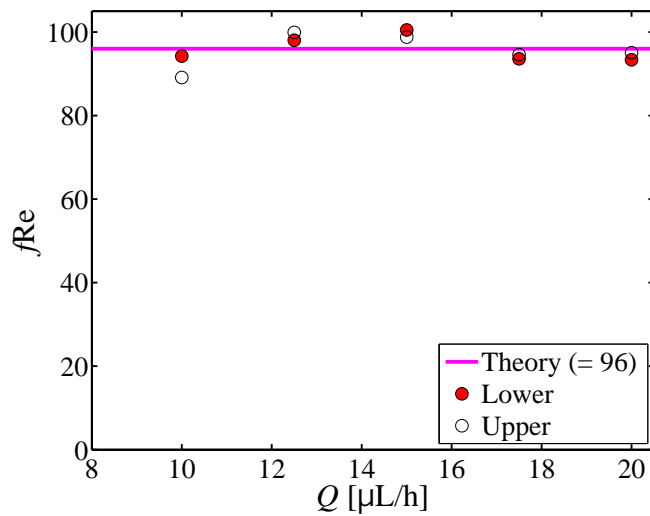


Fig. 5.10 Friction factor  $f$  and Reynolds number  $\text{Re}$  products  $f\text{Re}$  of upper and lower wall surface in rectangular flow channel at each flow rate  $Q$ .

## 5.5 超撥水壁面近傍の流速分布

以上の予備実験を踏まえ、超撥水壁面 (図 5.4) を有する流路の流速を計測した。計測位置は図 5.11 に示す通りである。溝部が 3 箇所、リブ部が 3 箇所構成される。横方向右向きを  $x$  軸、縦方向下向きを  $y$  軸とし、画像の左上を原点とした。計測は 45 fps で 25,000 フレームの粒子画像を撮影した。流路断面における  $u$  成分の分布を図 5.12 に示す。この

とき、図 5.4 に示した部分は流路入口から十分離れているため、2次流れは生じていないと考えられる。また、予備実験で溝部分に気液界面が形成されることを確認している。そのため、図 5.12 から溝部分において  $z < 0 \mu\text{m}$  の領域で  $u$  成分が存在し、定性的にはメニスカス形状が形成されていることが確認できる。このことより、APTV によって気液界面近傍の流速  $u$  成分の分布が取得できるだけでなく、形成される気液界面の形状を抽出できていることが示唆される。このとき、溝の部分の流速はリブ部分の流速より大きいことも確認できる。これは気液界面部分で粘性抵抗が低下し、作動流体が流れやすくなったためと考えられる。

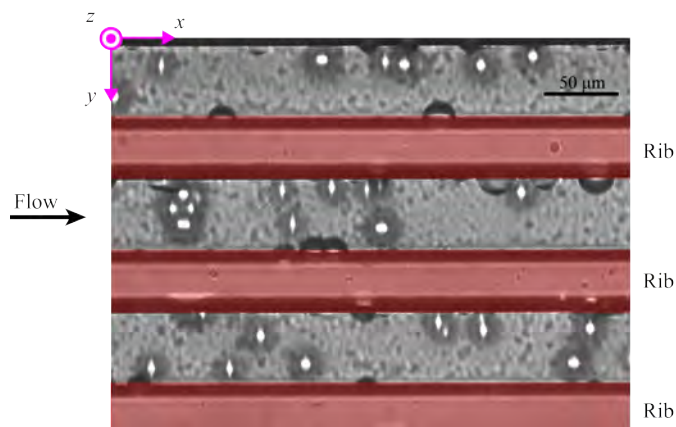


Fig. 5.11 Measurement location in superhydrophobic surface channel. Streamwise direction is  $x$ -axis and spanwise direction is  $y$  axis.

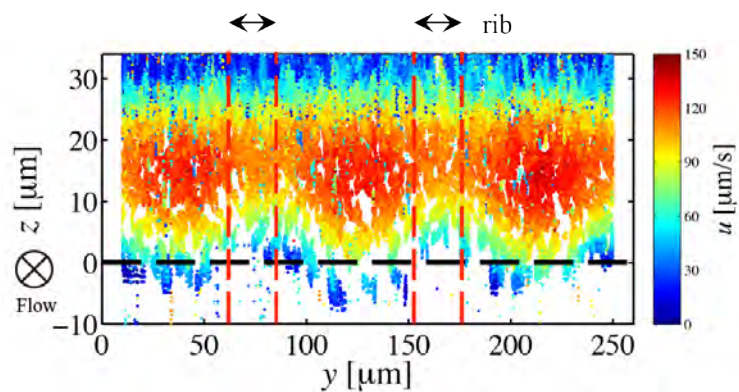


Fig. 5.12 Phase averaged velocity component  $u$  distribution in measurement area.

## 5.6 界面形状の抽出

図 5.12 では 3 箇所 の 溝 部分 で  $u$  成分 を 取得 し て い る . 一 方 , 粒 子 が 存 在 し な い こ と に 起 因 し た 空 白 領 域 も 確 認 で き る . こ の た め , 界 面 の 輪 郭 を 明 確 に す る た め に , 本 実 験 で は 3 箇 所 の 溝 部 分 に お け る  $u$  成 分 の デ ー タ を 合 算 し , 1 箇 所 の 溝 を 仮 定 し て 界 面 形 状 を 抽 出 す る こ と を 試 み た . ま た , 図 5.12 か ら も わ か る よ う に , 空 白 領 域 だ け で な く 流 速 や 位 置 決 定 に 伴 う 誤 差 が 確 認 さ れ た . こ の た め , こ の ま ま で は 界 面 の 形 状 を 抽 出 で き な い . そ こ で , 通 常 の PTV と 同 様 に  $u$  成 分 を 格 子 点 上 へ 補 間 す る こ と と し た [60]. 格 子 点 へ の 補 間 に は , 距 離 の 逆 数 補 間 (inverse distance rearrangement, IDR) を 使 用 し た . こ れ は , 図 5.13 に 示 す よ う に 格 子 点  $(i, j)$  と 流 速 デ ー タ  $\mathbf{U}_k$  の 距 離  $r$  と ,  $r$  を 変 数 と し た 重 み 関 数  $w(r)$  を 用 い る 方 法 で あ る . こ の 方 法 を 使 用 す る と ,  $n$  個 の 流 速 デ ー タ を 使 用 し た 格 子 点  $(i, j)$  の 流 速 は 以 下 の 式 に よ り 決 定 さ れ る .

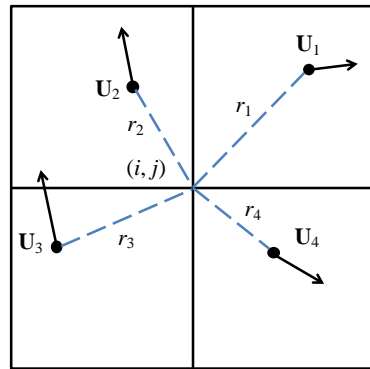


Fig. 5.13 Grid point  $(i, j)$  and velocity data around the grid point.

$$\mathbf{U}_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n w(r_k) \mathbf{U}_k}{\sum_{k=1}^n w(r_k)} \quad (5.9)$$

また , 重 み 関 数  $w(r)$  を ガ ウ ス 分 布 と す る こ と で , ガ ウ シ ア ン フ ィ ル タ を 用 い た 空 間 平 均 の 補 間 が 可 能 に な る . こ こ で , ガ ウ ス 分 布 は ,

$$w(r) = \exp \left\{ - \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (5.10)$$

で 与 え ら れ る . な お , 標 準 偏 差  $\sigma$  は , Agüi ら に [112] よ っ て 提 案 さ れ た 領 域 の 面 積  $A_0$  と 全 体 の デ ー タ 数  $N_0$  に 関 す る 式 (5.11) を 使 用 し た .

$$\sigma = 1.24 \sqrt{\frac{A_0}{N_0}} \quad (5.11)$$

格子点への補間後，補間時に生じた誤差を除去し，更に空白点にメディアンフィルタを施して流速データの分布を取得した．格子点補間前後の断面平均流速分布をそれぞれ図 5.14, 5.15 に示す．補間後の空間分解能（グリッド間隔）は  $3.63 \times 1.45 \mu\text{m}$  ( $y \times z$ ) である．図 5.14 と図 5.15 を比較すると，両者は同様の分布を示しており，適切に格子点補間が行われているものと考えられる．このとき，溝の中心部分を原点とした．

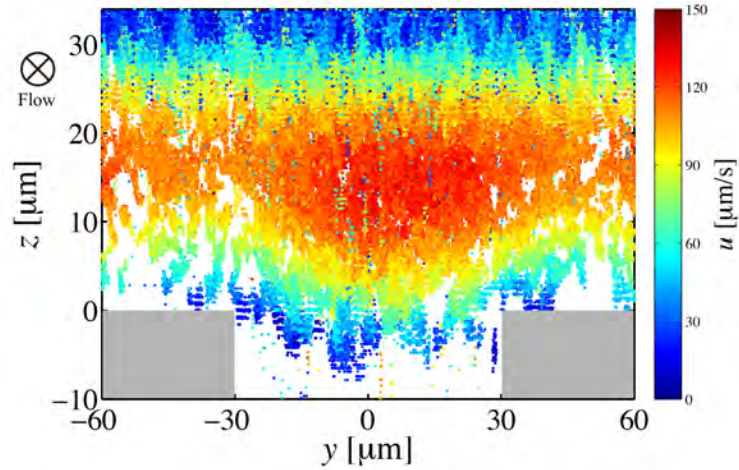


Fig. 5.14 Phase-averaged velocity component  $u$  distribution around a rib and groove parts at the cross-section of the microchannel.

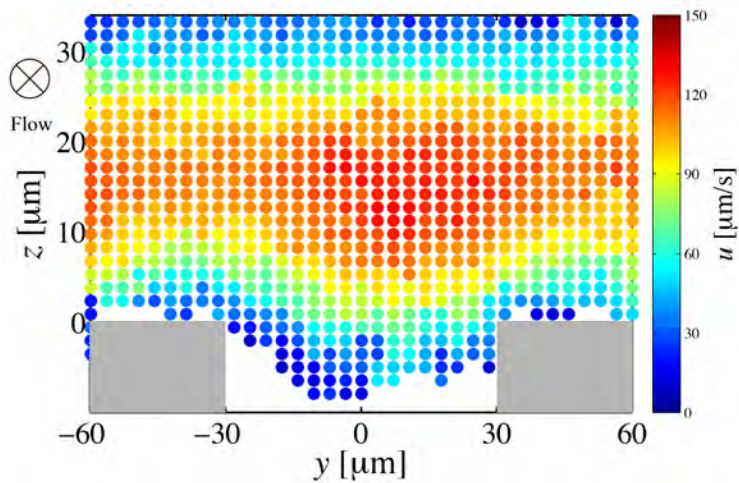


Fig. 5.15 Velocity component  $u$  distribution after interpolating and rearranging  $u$  to grid points.

次に、図 5.15 を使用して気液界面近傍の  $u$  分布から界面の概形を抽出する。図 5.16 より、界面のある  $y$  位置における変位量  $\Delta h(y)$  は、曲率半径  $R$  と接触角  $\theta$  によって幾何的に導出される [113]。以下に導出方法を示す。

曲率半径  $R$  の中心位置を原点として、任意の点における変位  $\Delta h(y)$  は、

$$\Delta h(y) = \sqrt{R^2 - y^2} - R \cos \gamma \tag{5.12}$$

となる。このとき、 $\gamma = \theta - \pi/2$  であるため、

$$\Delta h(y) = \sqrt{R^2 - y^2} - R \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \tag{5.13}$$

となる。従って、

$$\Delta h(y) = \sqrt{R^2 - y^2} - R \sin \theta \tag{5.14}$$

が成立する。

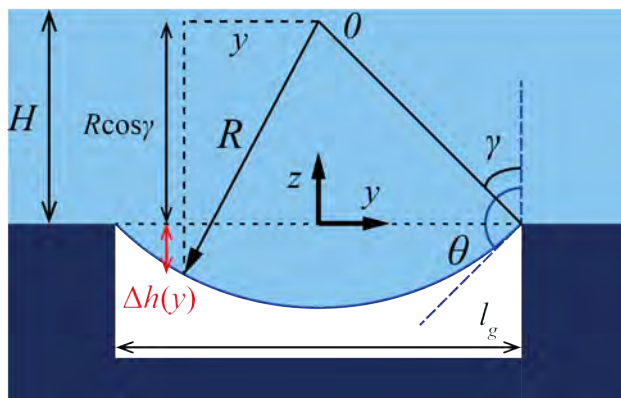


Fig. 5.16 Schematics of the liquid–gas interface displacement  $\Delta h$  in a cross-section of the microchannel. The profile of the displacement is expressed by Eq. (5.14).

式 (5.14) を図 5.15 の界面近傍における  $u$  成分の座標に適用し、最小二乗近似によってフィッティングした。その結果を図 5.17 に示す。ここでは、フィッティングによって決定した界面の位置を  $z = H'$  と定義する。これにより、フィッティングによって、 $R = 74 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 116 \text{ deg}$  という値が得られた。Tsai ら [18] によれば、流れ方向に対して平行な溝及びリブを有する PDMS 製の超撥水壁面の接触角は  $\theta = 120 \text{ deg}$  と報告しており、本実験で取得した接触角の値と近い値を示している。また、フィッティングによって変位の最大値は  $7 \mu\text{m}$  程度となった。Sbragaglia ら [114] によって示された解析モデルでは、気液界面

の最大変位  $\delta_{\max}$  は式 (5.15) で算出できることが示されている。

$$\delta_{\max} = \frac{(l_g/2)^2}{2R} \quad (5.15)$$

本研究で使用した壁面構造を考えると算出結果は約  $6 \mu\text{m}$  となり、これまでに得られている結果に近い値となった。そのため、式 (5.14) によるフィッティングは適切に行われたと考えられる。以上より、溝部分で形成される気液界面の概形は、流路断面の流速  $u$  成分の分布より抽出できることが示された。

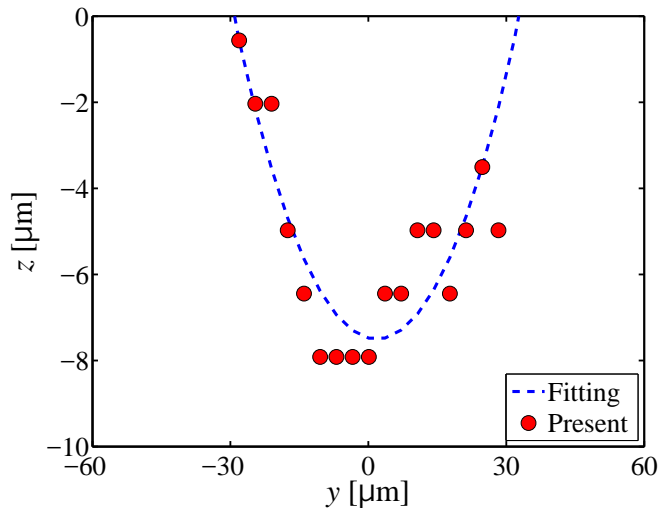


Fig. 5.17 Estimated location of the liquid–gas interface by the least square approximation from the grid data of the velocity component  $u$ .

## 5.7 $fRe$ の算出

気液界面に働くせん断応力  $\tau$  を算出するためには、界面位置  $z = H'$  における速度勾配  $\partial u / \partial z|_{z=H'}$ 、即ち、界面に働くせん断速度 (shear rate)  $\gamma$  を算出する必要がある。そのため、これまでに得られた流速分布に対して何らかの関数を適用しなければならない。

現在までに超撥水壁面を使用した流れ場について、速度分布の解析モデルが複数考案されている [114–120]。しかし、これらのモデルを適用する際は流路高さが無限大 ( $H \rightarrow \infty$ ) のときに限る等、制約がある。このとき、本研究で使用した流路と条件が一致するものはなかった。また、流路構造は類似しているが、全く異なる速度分布を示すものも存在する [121, 122]。そのため、他の方法を考える必要がある。

図 5.18 に示すように気液界面近傍では流れがすべる。そのため、粒子は流れに追従し、気液界面近傍では 3 章で示したような、粒子の回転運動に起因する誤差は生じないと考

えられる。Kikuchi ら [104] や Zheng ら [123] は、共焦点  $\mu$ PIV を使用して壁面近傍と自由界面近傍の流速を計測しており、壁面近傍では誤差が生じ、一方、自由界面の近傍では理論的な分布に従う流速を取得している。そのため、APTV によって取得した気液界面近傍の流速も粒子の回転に起因する誤差は生じないと判断した。以上より、本研究では  $-50 \leq y \leq 50 \mu\text{m}$  において、 $H/2 \leq z \leq H'$  の範囲の  $u$  を 2 次関数で近似して界面位置  $z = H'$  における局所的なせん断応力  $\tau$  を算出し、 $fRe$  を評価する。

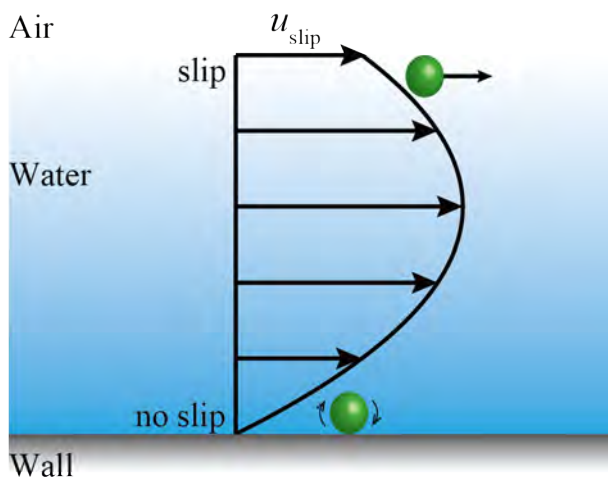


Fig. 5.18 Schematic of comparison of particles behavior between solid–liquid interface and liquid–gas interface.

### 5.7.1 超撥水壁面の抵抗低減効果

局所的なせん断応力  $\tau$  を評価する前に、超撥水壁面そのものが有する抵抗低減効果を評価する。そのために、流路高さ  $H$  の部分のスパン方向に対する平均流速を求め、すべり長さを算出する方法を適用する [18, 122, 124, 125]。このすべり長さを有効すべり長さ (effective slip length,  $\lambda_{\text{eff}}$ ) という。これは、規則的に固液界面と気液界面が配置された超撥水壁面における見かけのすべり長さと同値である。図 5.15 において、 $0 \leq z \leq H/2$  における  $u$  成分を  $-50 \leq y \leq 50 \mu\text{m}$  の範囲で平均した結果を図 5.19 に示す。2 次の近似曲線も併せて示す。 $z = 0 \mu\text{m}$  における  $u$  を  $u_{\text{slip}}$  とすれば、式 (1.5) より  $\lambda_{\text{eff}} = 3.0 \mu\text{m}$  となった。

このとき、 $\lambda_{\text{eff}}$  を使用して  $fRe$  は次式で評価できる [122]。

$$\frac{\lambda_{\text{eff}}}{H/2} = \frac{32}{fRe} - \frac{1}{3} \tag{5.16}$$

これによると  $fRe = 62.8$  となり、約 35% の抵抗低減効果が期待できる。一方、式 (5.16)

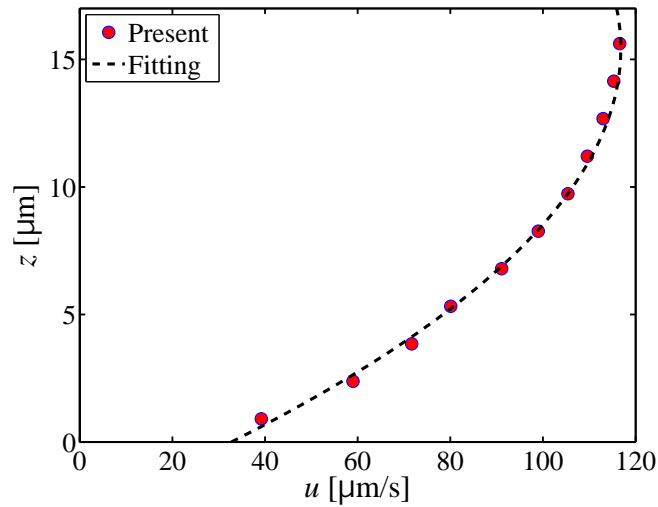


Fig. 5.19 Experimental averaged velocity profile for  $-50 \leq y \leq 50 \mu\text{m}$ .

は気液界面が変形しないこと，そして気液界面に対してせん断応力が働かないことを前提としている．本研究では図 5.15 に示すように，気液界面が変形している．そのため，適切な評価を行うために，界面に働く局所的なせん断応力  $\tau$  を算出して抵抗低減効果を評価することが望ましいと考えられる．

### 5.7.2 局所的な $fRe$ の分布

図 5.15 に示した流速の計測結果を使用し，スパン方向の  $fRe$  の分布を算出した．その結果を図 5.20 に示す． $fRe$  の算出には，高さ  $H = 34 \mu\text{m}$  の平行平板流路を仮定して，平均流速を  $U_{\text{ave.}} = 81.7 \mu\text{m/s}$ ，水力直径を  $D_h = 68 \mu\text{m}$  とした．図 5.20 より，固液界面及び気液界面近傍の流速分布から算出された  $fRe$  の値は，全て  $fRe = 96$  を下回っている．特に  $fRe$  の値は気液界面部分よりリブ部分の方が大きくなった．そのため，気液界面の存在が超撥水壁面の抵抗低減効果に寄与するといえる．

一方，リブ部分で  $fRe = 96$  とならなかった理由は，気液界面の変位に伴う  $U_{\text{ave.}}$  及び  $D_h$  の変化を考慮していないためと考えられる．そこで，まず  $D_h$  は流路高さの 2 倍で定義できることより，気液界面部分で変位  $\Delta h(y)$  を考慮して  $D_h = 2(H + \Delta h(y))$  とする．次に， $U_{\text{ave.}}$  は  $y$  軸上の各位置で流速が放物線状に分布すると仮定して，流速の最大値  $U_{\text{max}}$  より， $U_{\text{ave.}} = 2/3 U_{\text{max}}$  とする．これらの値を使用して  $fRe$  を再計算した．その結果を図 5.21 に示す．図 5.21 より，左側のリブ部分で  $fRe$  の値が 96 付近で分布していることが確認される．一方，右側のリブ部分の値は 96 よりも小さい．図 5.15 より，右側のリブ上方の流速が左側のリブ上方の流速よりも大きくなっていることが確認できる．このため，最大流速  $U_{\text{max}}$  の見積りに起因し，左右のリブ部分の  $fRe$  の値に差が生じたものと考えられる．

次に，計測した  $fRe$  の平均値  $fRe_{\text{ave.}}$  を算出すると  $fRe_{\text{ave.}} = 82.2$  となった． $fRe = 96$



と比較すると 14.4% の抵抗低減効果を持つと考えられる。一方、この  $fRe$  の値は  $\lambda_{\text{eff}}$  に基づいた算出結果よりも大きい。そのため、 $\lambda_{\text{eff}}$  を使用して抵抗低減効果を推定すると、効果そのものが過大に推定される可能性があることが示唆された。

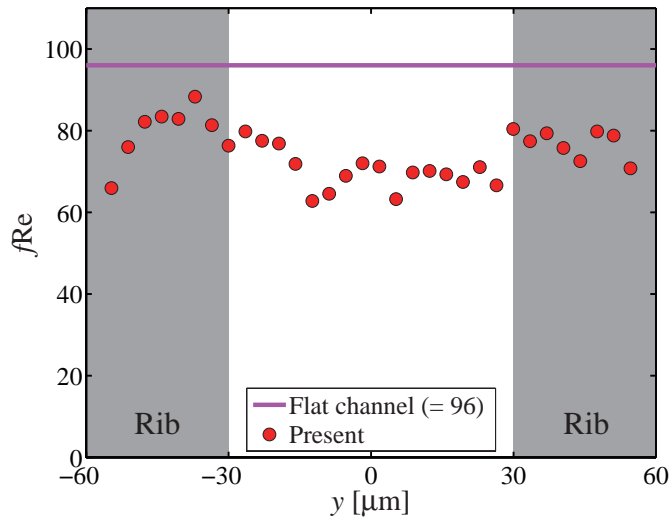


Fig. 5.20 Local  $fRe$  distribution on the superhydrophobic surface.

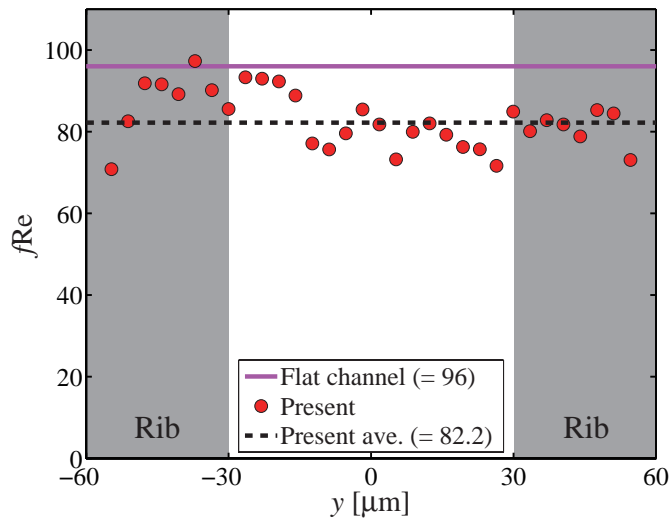


Fig. 5.21 Local  $fRe$  distribution on the superhydrophobic surface by taking account of fixed  $U_{\text{ave.}}$  and  $D_h$ .

## 5.8 結論

本章では、超撥水壁面の流動抵抗低減効果を評価することを目的に、流れ方向に対して平行なリブ及び溝で構成される超撥水壁面を有する流路を作成し、固液界面及び気液界面近傍の流速を APTV によって計測した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 超撥水壁面の溝部分で形成される気液界面の形状を、気液界面近傍の流速分布から取得可能である。
- (2) 固液界面及び気液界面近傍の流速を直接計測することによって、超撥水壁面が有する抵抗低減効果を評価できる。
- (3) 本研究で使用した超撥水壁面の固液界面及び気液界面近傍の流速を計測した結果、気液界面の部分における  $fRe$  の値が固液界面の部分における値を下回り、超撥水壁面が抵抗低減効果を有していることを確認した。