

氏名（本籍）	いちかわ よしやす 市川 賀 康（熊本県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第960号
学位授与の日付	2017年9月30日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	微小スケール流路における界面近傍流動の3次元計測法の開発

論文審査委員	（主査）教授 山本 誠
	教授 荒井 正行 教授 石川 仁
	教授 上野 一郎 准教授 元祐 昌廣

論文内容の要旨

近年の MEMS 技術や微細加工技術の発達に伴い、多くの流体機器はミリ～サブミクロンオーダーまでスケールダウンしている。特に μ TAS や lab-on-a-chip に代表されるマイクロ流体デバイスをベースとした化学・生物分析用チップの研究開発は非常に盛んに行われており、非常にめざましい発展を遂げている。マイクロ流体デバイスは物質反応の高効率化や省エネルギー性などの利点は多いが、スケール効果によって単位長さあたりの圧力損失が増大し、その結果として流動抵抗が増大する。そのため、マイクロ流体デバイスの発展のためには、微小スケール流路内における流動抵抗の低減が必須といえる。

流動抵抗低減のために、壁面に形成した微細形状に撥水加工を施した、超撥水壁面に関する研究が行われている。超撥水壁面を有する流路の流動抵抗に関しては、流路全体の圧力損失計測によって抵抗低減効果に言及しているものが多いが、壁面近傍で形成される気液界面における流動が抵抗低減効果にどのように作用するのか理解するのは困難である。一方で、気液界面近傍や微細構造近傍の流動、特に詳細な流速分布が直接計測によって取得し、流動抵抗の指標である壁面せん断応力を定量化できるなら、抵抗低減効果を有する超撥水壁面形状の最適化、または微細流動制御による流動抵抗制御につながると考えられる。そのためにも、界面近傍流動計測に特化した手法の開発が必須である。

近年の流体計測技術の発展は、多次元・多成分化はある程度果たせているものの、壁面近傍では未だ点計測の段階に留まっており、壁面近傍で形成または変化する微細な流動構造を大局的に捉えきれていない。点計測で使用されている MEMS ベースのセンサは、流路中にセンサを挿入して計測を行う、いわゆる接触式のセンサが主で、流路壁面から約 30 μ m

程度の領域における流速計測できているのみである。そのため、微小スケール流路に接触式センサを挿入すると流れ場を乱してしまい計測に使用できないという弱点がある。壁面近傍流動を高精度に計測し、そして空間的な流動の様子の詳細を把握可能な、非接触な 3 次元流動計測方法が必要とされている。

本研究では、単視野 3 次元 3 成分 (three-dimensional three-component, 3D3C) 流速計測法として、粒子像の奥行方向に対する形状変化を利用した、astigmatism particle tracking velocimetry (APTV) に着目した。APTV はイメージセンサ前方に設置されたシリンドリカルレンズによって誘起される、流路中を流れるトレーサ粒子像の非点収差 (astigmatism) から、流路奥行方向の特徴量を抽出し、粒子追跡法 (particle tracking velocimetry, PTV) と組み合わせることによって、計測体積内において流速の 3D3C 計測が可能となる。そのため、 μ PIV を使用して壁面せん断応力を算出する際に必須である厳密な壁面位置推定や速度場のスキューンを行う必要なく、高さ方向に対する相対的な流速分布から速度勾配の算出が可能となり、せん断応力を分布として決定可能になると考えた。そこで、気液界面近傍流動の直接計測によって流動抵抗の評価を行うことを目的に、

1. 壁面近傍領域における流速計測
2. 壁面近傍の流速分布から決定される壁面せん断応力分布とその精度評価

の 2 項目に着目し、APTV による壁面せん断応力分布計測手法を開発し、この手法を界面流動に働くせん断応力の計測に適用して、流動抵抗の評価に取り組んだ。

本論文の第 1 章は緒論であり、超撥水壁面を使用した流動抵抗低減及び気液界面近傍流動計測に関する先行研究をまとめ、計測対象及び課題を明確化する。そして壁面近傍流動及び壁面せん断応力計測に関する計測手法及びイメージングによる単視野 3 次元流動計測方法についてまとめ、本研究の研究背景及び研究目的、そして本論文の概要を述べる。

第 2 章では、シリンドリカルレンズによって誘起される非点収差の結像の原理及び奥行位置決定に関する特徴量の取得方法について述べ、実際に本研究で使用した粒子の奥行位置と粒子像の特徴量を関連付ける校正関数の取得と誤差の評価を実施する。そして、校正関数の使用方法について述べる。また、現在までに先行研究で提案されている校正関数との比較を行う。併せて、使用した APTV に関する計測システムについても説明を行い、取得した粒子画像から流速決定に至るまでの前処理及び後処理についての詳細を示す。

第 3 章では、まず APTV による壁面近傍流速の計測が可能かどうかを確認するために、流路高さ 2 mm の平行平板流路において 2 次元ポアズイユ流れを計測対象に、レイノルズ数を変化させながら壁面近傍 20 μ m 以内の流速計測を実施した。その結果、瞬時の流速分布には粒子の重心位置決定の不確かさによる値のばらつきは生じるものの、時間及び空間平均の流速分布は 2 次元ポアズイユ流れの理論解及び μ PIV による計測結果と一致することを

確認した。また、3 次元的に分布する粒子の様子も取得し、APTV が壁面近傍領域の計測に有効であることを確認した。

第 4 章では、ミリ～マイクロスケール流路を使用して取得した壁面近傍領域における流速分布を使用し、壁面せん断応力分布の定量化方法についてコンセプトを示す。第 3 章で取得した流速分布の壁面極近傍領域において理論解に従わない流速分布が系統誤差として確認されており、まず、壁面位置の情報が不明でもこの系統誤差の影響を受けず、速度勾配を決定する方法を考案した。そして精度評価を実施したところ、壁面位置が不明でも壁面最近傍に位置する粒子から粒子径の 3 倍以上の距離に存在する粒子の流速データを使用すれば高精度に壁面せん断応力を定量化できることを示した。また、ミリスケール流路においては、壁面近傍における流速分布を直線近似可能と仮定すれば、相対的な 2 点の流速データからでも精度良く壁面せん断応力を算出可能であることを示した。検討した上記の手法の妥当性を検証するために、平行平板流路におけるポアズイユ流れだけでなく、急激に流速が変化するような構造を有するマイクロチャンネルにおいても壁面せん断応力分布を算出した、そして計測結果の妥当性を示すために数値計算を実施したところ計測結果とよい一致を示し、急激に流速が変化する場においても壁面せん断応力を高精度でイメージング可能であることを示した。

第 5 章では、APTV によって超撥水壁面が形成する気液界面近傍流動の計測を実施した。本章では、流れ方向に対して平行な長方形断面を有するリップを微細加工によって作成し、更に撥水加工を施すことで超撥水壁面を作成しており、その設計コンセプトや流動抵抗評価方法について示した。そして APTV による計測で取得した、超撥水壁面の溝部分で形成される気液界面近傍流動において、流路断面の流速分布から界面の概形や変位を抽出した。また、界面の接触角と曲率半径から決定される変位の理論モデルとの比較を行った。更に、界面近傍流速から気液界面に働くせん断応力の定量化によって流動抵抗を評価し、超撥水壁面を持たない長方形断面矩形流路における流動抵抗と比較して、使用した超撥水壁面が流動抵抗低減効果を有することを示した。

第 6 章では、数値計算によって流動抵抗を見積る方法について検討を行った。現在までに超撥水壁面近傍流動に関する先行研究では、界面の変位や界面に働くせん断応力の影響を考えずに数値計算モデルや解析モデルが構築されており、気液界面における流動のすべり長さや流動抵抗低減効果を過剰に見積るといった問題を有していた。一方、第 5 章で詳細な気液界面近傍を取得しているため、界面形状や界面近傍流速から算出されるすべり長さを境界条件として適用可能であると考えた。そこで、界面における局所的なすべり長さを抽出した後、界面形状変位と実験によって取得したすべり長さを考慮した数値計算モデルを構築した。更に流速分布及び流動抵抗に関して、数値計算結果と実験結果を比較し、良い一致を示すことを確認した。そのため、構築した数値計算モデルが流動抵抗評価に有効であることを示した。

第 7 章では、第 6 章までに得られた結論を総括し、今後の展望及び課題について述べる。

論文審査の結果の要旨

近年の MEMS 技術や微細加工技術の発達に伴い、マイクロ流体デバイスをベースとした化学・生物分析用チップの研究開発が盛んに行われている。マイクロ流体デバイスは、比界面積の増加に伴う物質反応の高効率化など利点は多いが、スケール効果によって流動抵抗が増大するという問題を抱えている。近年では流動抵抗の低減を目的に、気液界面を形成して流れのすべりを誘起する、超撥水壁面に関する研究が行われている。しかし、超撥水壁面が抵抗低減効果を示すことは報告されているが、気液界面近傍の流動状態がどのように抵抗低減に作用するかというメカニズムは不明であった。また、マイクロ流体デバイスのように微小スケールの流路内に流動抵抗を評価するセンサは設置できないため、他の計測手法が必要であった。超撥水壁面近傍の流動を直接計測できることで、超撥水壁面が流動抵抗に及ぼす影響を定量的に議論できるだけでなく、壁面形状の最適化や流動抵抗の制御につながることを期待される。

本研究は、以上の背景を鑑み、超撥水壁面に形成される気液界面近傍の流動から抵抗低減効果を直接評価することを目的に、単視野で 3 次元 3 成分流速の計測が可能な非点収差 PTV (APTV) を駆使し、界面近傍の流動を対象とした計測手法の開発に取り組んだものである。

本論文は全 7 章で構成されている。以下に、各章で記述された内容を示す。

第 1 章は緒論である。超撥水壁面を使用した流動抵抗低減及び気液界面近傍の流動計測に関する過去の研究動向をまとめ、計測対象及び課題を説明している。それに加え、本研究の位置づけを明確にし、本研究を実施する意義を唱え、本研究の目的を述べている。

第 2 章では、APTV の原理及び計測システムについて述べている。そして、奥行位置と粒子像の形状を対応付ける校正関数の取得を通じて、APTV による計測精度について言及がなされた。

第 3 章では、APTV によって壁面近傍の流速計測が可能であること示すために、平行平板流路内の 2 次元ポアズイユ流れが計測され、理論解との比較が行われた。その結果、本研究の計測システムや実験条件では壁面から $3\mu\text{m}$ 離れた位置までの流速を計測できることが明らかとなった。また、壁面の極近傍領域には粒子径に由来する系統誤差が生じ、実際の流速分布に従わない流速が取得されることも報告された。

第 4 章では、APTV による壁面せん断応力分布の定量化方法を構築すること

を目的に、ミリ～マイクロスケールの平行平板流路において流速計測が行われ、速度勾配の決定方法について議論がなされた。その結果、APTVを使用した計測では、 μ PIVに代表される流速計測手法と比較して奥行方向に流れ場をスキャンすることなく速度勾配が決定できること、そして壁面せん断応力を分布として定量化可能であることが示された。また、本研究における実験条件では、壁面から粒子径の3倍以上離れた位置の流速データを使用して速度勾配を算出すれば、高精度に壁面せん断応力が定量化できることも明らかにされた。

第5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、超撥水壁面近傍に形成される固液界面及び気液界面近傍の流速がAPTVによって計測された。その結果、超撥水壁面に形成される気液界面の概形を、気液界面近傍の流速分布から取得できることが明らかになった。また、固液界面及び気液界面近傍の流速を直接計測することで、超撥水壁面が有する抵抗低減効果の評価が可能になることが示された。更に、固液界面と気液界面の局所的な流速分布よりせん断速度及びせん断応力を算出すると、この2つの界面の間で流動抵抗に明確な差異が生じることが明らかにされた。

第6章では、数値計算によって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、第5章で取得した気液界面近傍の流速分布と気液界面の形状を境界条件とした3次元数値計算モデルが構築された。そして、計算結果と実験結果との比較が行われた。その結果、実験によって明らかにされた気液界面の変位とすべり長さを境界条件として設定すれば、超撥水壁面の流動抵抗低減効果が適切に推定・評価できるようになることが明らかにされた。

第7章は総論であり、本研究で得られた成果を取りまとめると共に、今後の展望と課題が述べられ、本研究の総括が行われた。

本論文は、界面流動の計測手法を確立したという点で熱流体工学分野に多大に貢献するものであるだけでなく、壁面近傍の局所的な流動から超撥水壁面における抵抗低減効果の推定・評価を行った点で広く工学分野に貢献しうる多くの有益な知見を与えている。よって、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。

以上