

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14899

研究課題名（和文）壁面せん断応力センシングを駆使した壁面摩擦力分布の高精度予測モデルの創出

研究課題名（英文）High-accuracy prediction of skin friction by utilizing wall shear stress sensing

研究代表者

市川 賀康（Ichikawa, Yoshiyasu）

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：00825060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：非点収差PTV(APTV)と呼ばれる単視野3次元3成分流速計測手法を駆使し、矩形管流路底面に塗布された油膜内部の流動計測による壁面摩擦力の定量化手法を考案した。本研究では、気流のRe数を広く変化させながら、気流のせん断によって誘起される油膜内部の3次元流速分布を取得し、高精度に壁面摩擦力が定量化できることを従来手法との比較により示すことができた。これに付随し、APTVにおける粒子像と奥行位置の校正に関してニューラルネットワークによる方法を導入し、流路内における粒子位置決定のばらつきを、従来手法と比較して低減することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像計測に基づく流速計測手法に機械学習の要素を取り入れた高度化に取り組み、それが油膜のような高粘度液体内部の流速計測に有効であることを示した。また、ピトー管や熱線流速計などの大がかりな装置を用いて計測していた流動の壁面摩擦力を、光学的な計測手法を用いて、微小な領域における3次元流速分布を算出するだけで高精度に定量化できることを示すことができた。そのため、本研究は流体計測手法とその発展に大きく寄与するものであるといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we devised the quantification technique of skin friction by measuring inside the oil film by astigmatism PTV (APTV). An oil film was painted on the bottom surface of a rectangular channel, and the three-dimensional velocity distribution inside oil film was measured by APTV. The skin friction force was then quantified from the velocity distribution. In this study, measurements were conducted by varying the Reynolds number in various range, and the results were compared with those obtained by conventional friction force measurement techniques. Moreover, the calibration procedure of APTV using neural network technique was also devised in this study. The devised technique could determine the particles' depth position with small errors, and we thus concluded that the technique is valid for three-dimensional velocity measurement inside oil film.

研究分野：流体工学

キーワード：壁面摩擦力 非点収差PTV オイルフィルム 壁面せん断応力 3次元3成分流速計測

### 1. 研究開始当初の背景

流れにおける壁面摩擦力の定量化には、従来、極小サイズのピトー管や熱線流速計等を用いた流速計測に基づく手法が採用されていた。しかし、大きな計測誤差が生じることが問題とされていた。また、数値計算においても限られた Re 数レンジでしか計算が行われておらず、壁面摩擦力の予測は十分とはいえなかった。このような背景から、壁面摩擦力を高精度に計測可能とされている油膜を使用した画像計測法に着目し、特に油膜内部の流速分布を取得できれば摩擦力の定量化も容易に行えると考えた。また、油膜の膜厚分布も同時に取得できれば、壁面近傍における流れの変動が壁面摩擦に及ぼす影響も定量化可能と考えた。これが本研究の開始当初の背景である。

### 2. 研究の目的

本研究では、油膜の 3 次元的な膜厚と流速の分布に着目した壁面せん断応力センシングを駆使し、壁面摩擦力の正確な計測を行うこと、そして、それに付随する計測手法の高精度化を目的とした。

### 3. 研究の方法

層流域から乱流域まで流れの Re 数レンジを変更可能な矩形管を計測対象とし、単視野で 3 次元 3 成分流速が計測可能な非点収差 PTV (APTV) を用いて、矩形管底面に塗布された蛍光粒子入りの油膜の流動を計測した。そして、Re 数を変化させながら油膜内の流速分布を取得し、従来手法である圧力損失に基づく値との比較を行い、提案手法の有効性について検討した。

APTV を用いる際は、粒子の奥行位置決定のために奥行位置と粒子像の校正を行う必要がある。本研究では、粒子像の位置決定に粒子像の各種パラメータを用いたニューラルネットワークを適用した校正方法を導入した。本研究では、マイクロ流路中における流動計測を通じて、従来手法と比較しながら提案した校正手法の有効性について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) ニューラルネットワークを用いた APTV 校正手法の有効性

APTV では、光学的に歪んだ粒子像と奥行の位置関係について事前に校正する必要がある。本研究では粒子像の長軸および短軸、さらにその 2 つの軸の値から得られるアスペクト比や特徴的な像形状の情報、さらにはピクセル数の情報まで学習パラメータとして適用し、図 1 に示すニューラルネットワークによって、回帰的に粒子の奥行位置を一意に決定できるようにした。これによって得られる位置を、従来の校正手法<sup>①, ②</sup>と比較して正解値と出力値の差について比較を行ったところ、図 3 に示すように従来手法よりも小さいばらつき(標準偏差にして 2 μm 未満)で位置決定が可能であることを示した。またマイクロ流路中を流れる粒子をトラッキングして流速分布を求めた結果、ポアズイユ流れの特徴的な流速分布が捉えられており、提案手法が有効であることを確認した。

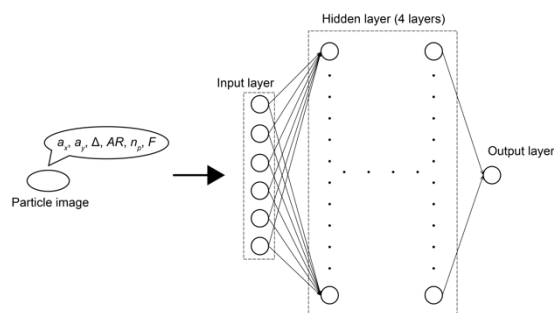


図 1 構築したニューラルネットワークの概略図

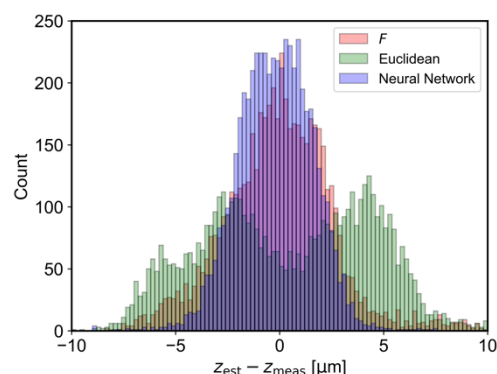


図 2 従来手法と提案手法を使用した、粒子の奥行位置のばらつき(正解値との比較)

(2) 油膜内部の流動計測による壁面摩擦力の算出  
矩形管底面に蛍光粒子を含有したシリコンオイルを塗布し、気流のせん断によって駆動される油膜の内部流動を APTV によって計測した。気流の Re 数を  $10^3$  オーダまで上昇させながら、油膜内部の流速分布を取得し、速度勾配から算出した壁面せん断応力に基づき、壁面摩擦力を算出した。このとき、矩形管の圧力損失も同時に計測を行い、圧力損失に基づく壁面摩擦力も同時に取得して比較を行った。その結果を図 3 に示す。図 3 より、流速分布計測に基づく値は概ね圧力損失に基づく値と概ね一致していることが確認でき、提案手法そのものが有効であることを確認した。低い Re 数で一致していない値があるが、

これは使用したシリコンオイルの粘度が気流の流速に対して大きく、せん断によって油膜内部の流動が想定通りに誘起されなかったことに起因している。その後、壁面噴流などによる壁面摩擦力分布計測にも取り組み、本手法が適用可能であることも確認している。

また、計測を行った際、APT<sub>V</sub> は前述したニューラルネットワークによる校正を適用している。油膜内部の流速分布計測を行った際、速度勾配を算出しているが、壁面摩擦力の値のばらつきは、粒子位置決定のばらつきに起因したエラーに起因していることを確認した。粒子位置決定のばらつきがあるため、油膜の厚さそのものの正確な予測は困難であった。そのため、ニューラルネットワークによる粒子の奥行位置決定の精度に関しては改善する必要がある、現状の課題となっている。

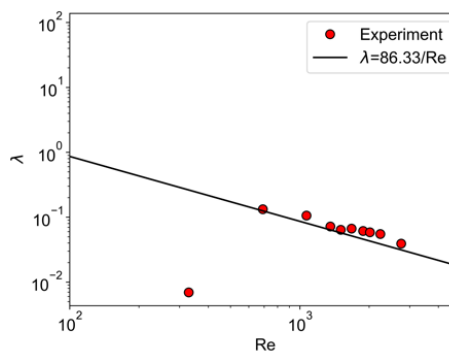


図3 壁面摩擦力分布とその比較

#### <引用文献>

- ① Cierpka, C., Rossi, M., Segura, R., and Kähler, C. J., “On the calibration of astigmatism particle tracking velocimetry for microflows,” Meas. Sci. Technol., 22(2011), 73
- ② Ichikawa, Y., Yamamoto, K., and Motosuke, M., “Three-dimensional flow velocity and wall shear stress distribution measurement on a micropillar-arrayed surface using astigmatism PTV to understand the influence of microstructures on the flow field,” Microfluid. Nanofluid., 22(2018), 73

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshiyasu Ichikawa, Ryota Kikuchi, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke	4. 巻 60
2. 論文標題 Determining particle depth positions and evaluating dispersion using astigmatism PTV with a neural network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 6538-6546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.427571	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 市川賀康, 山本憲, 元祐昌廣	4. 巻 58
2. 論文標題 マイクロ流路内流動の3次元計測と混合制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 伝熱	6. 最初と最後の頁 27, 32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 市川賀康, 菊地亮太, 山本憲, 元祐昌廣
2. 発表標題 非点収差PTVにおける機械学習を用いた粒子軌行位置の校正とその有効性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市川賀康, 元祐昌廣
2. 発表標題 オイルフィルム内部の流動に基づいた摩擦力計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市川賀康, 山本憲, 元祐昌廣
2. 発表標題 Pythonを用いた粒子追跡ベースの3次元流動計測の取り組み
3. 学会等名 オープンCAEシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------