

【ノート】

【令和7年度 先端技術等調査研究事業】

流体計測および可視化技術を活用した製品開発の高度化

野口 暁人、吉川 穰
自動車産業支援部

流れの可視化・計測手法である粒子画像流速測定法(PIV)を習得するため、汎用の半導体レーザや加熱式スモークマシンなどを組み合わせた簡易PIVシステムを構築した。PCファンが作る5 m/s以下の流れを計測対象として、粒子画像の撮影には既設ハイスピードカメラを用い、速度場の解析にはオープンソースソフトウェアであるOpenPIVを利用した。PIVと熱線流速計の測定値を比較したところ定性的には良好な一致が見られ、簡易的な構成であっても流れの時空間構造の概要把握にPIVが有用であることを確認した。

キーワード：粒子画像流速測定法、熱線流速計、周波数解析

1. 緒言(背景・目的)

当センターでは、流体機械の設計・開発、流体現象の把握に向けて、商用の数値流体解析ツールを活用した技術支援を行っている。平成9年の導入時には、ファンの気流解析や発熱体の伝熱解析など、気体または液体の単相流れを対象とした数値シミュレーションに対応してきた。近年では、混相流れにも対応すべく、令和3年度から2年間で気液二相流れのシミュレーション技術¹⁾、令和5年度からの2年間で凝固を伴う液体の流動シミュレーション技術²⁾を培ってきた。このように数値シミュレーション技術の習得に取り組んできたが、実測値との定性的な一致は確認できても、定量的に一致させることは困難な場合がある。そのため、流体現象の解明に対しては、数値シミュレーションだけでなく、実験的にも調査を行い様々な視点から現象を捉えることが必要であり、今後は数値シミュレーションと実験を相補的にすることが重要であると考えている。

こうした背景から、当センターでは、令和3年度に数値シミュレーションの検証を目的に熱線流速計を導入した。熱線流速計は時間応答性に優れることから、乱流のような非定常流れの計測³⁾に古くから利用されてきたセンサである。一方で、近年では画像解析技術やコンピュータの性能向上により、ハイスピードカメラを用いた流れの可視化・計測手法である粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)⁴⁾が多く利用されている。PIVは熱線流速計と比較して、時間分解能では劣るものの、速度の空間分布を一度に取得できる手法である。可視化・計測結果からは、

流れの全体構造を視覚的に詳細に把握可能であり、数値シミュレーションの比較検証にも活用しやすいため、当センターでも注目している技術である。

そこで本研究では、PIVに関する基礎技術の習得を目的として、汎用半導体レーザなどを用いた簡易PIVシステムを構築し、実際にPCファンが作り出す5 m/s以下の低速流れを可視化・計測することで、PIVに必要な機器から解析方法までを学んだ。計測値については熱線流速計の結果と比較し、PIVの誤差要因について考察した。

2. 調査内容

2.1. PIV の測定原理

PIVは、レーザ光シートを照射した断面における微細粒子の散乱光をデジタルカメラで捉え、連続する2画像から解析される粒子の移動量をもとに、二次元速度場を計算する流れの可視化・計測手法である。PIVを行うには、図1に示すように、トレーサ粒子、レーザ光源、シート光学系、デジタルカメラが最低限必要である。

PIV ではトレーサ粒子の動きから速度を計算するため、流れに追従するトレーサ粒子が必要となる。粒子の流れへの追従性が悪い場合、流体の流れと粒子の動きに乖離が発生し誤差の要因となる。追従性は代表速度 U 、代表長さ L 、粘性係数 μ 、粒子密度 ρ_p 、粒子直径 d_p で定義されるストークス数 $St = \rho_p d_p^2 U / 18 \mu L$ で評価され、 St が小さいほど粒子は流れに追従しやすい。作動流体が気体の場合には、ラ

スキンノズル⁵⁾を用いて霧化したグリセリン水溶液やセバシン酸ジオクチル、液体の場合には、酸化チタン、アルミニウム、ポリエチレン、ガラスビーズなどの微粒粉が用いられることがある。

光源には主にレーザが用いられる。光源から照射されるビームをシート状に変換するには、ビームエキスパンダおよびシリンドリカルレンズを用いた光学系の他、高速でレーザ光を揺動させるガルバノミラーやポリゴンミラーが用いられる場合がある。

撮影にはデジタルカメラが用いられる。例えば、高フレームレートで撮影可能なハイスピードカメラや、2フレームを連続して撮影可能なダブルフレームカメラがある。これらのカメラはフレーム時間間隔を正確に短く設定できるため便利である。一方、低フレームレートのカメラであっても、レーザ発振と撮影のタイミングを適切に制御するフレームストラドリングを行うことでPIVが可能であるが、この場合は正確な信号同期が必要である。

粒子の移動量は、2画像の相互相関係数に基づいて解析される。相互相関係数は、2画像のずれ量に対する類似度を表現しており、相関のピーク位置を調べることで、粒子の移動量を推定することが出来る。具体的には、図2のように、画像を32 pixel × 32 pixel程度の小領域に分割し、各領域における粒子パターンの移動量と2画像の撮影間隔から速度を計算する。

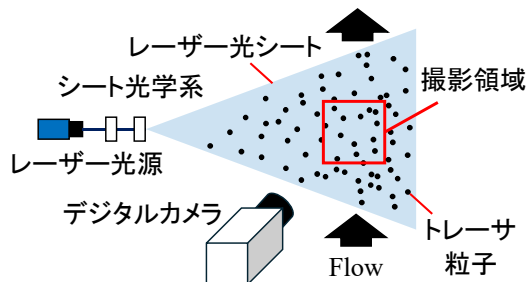


図1: PIVに用いる撮影系の概略図

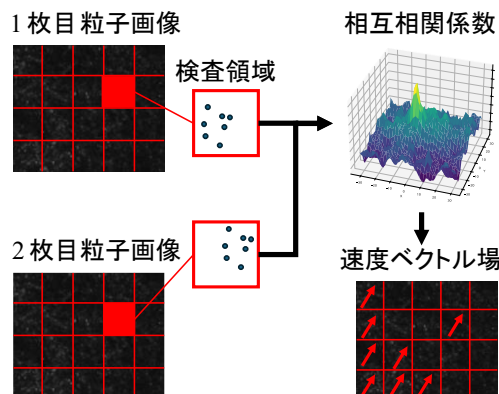


図2: PIVの解析概要

2.2. PC ファンによる吐出流れの概要

本研究で使用したPCファンは図3の通りである。座標系は、PCファン出口中心を原点とし、向きは図3、図4に示す方向に設定した。 x 、 y 、 z それぞれの速度成分を u 、 v 、 w 、時間平均速度を $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ とした。ファンの中央部には約 $\phi 20$ mmのハブおよびモータの筐体がある。翼は外周開口部にあり、翼が回転することで $+x$ 方向に空気が押し出される構造となっている。PCファンの回転周波数 N は6500 rpm、羽枚の数 Z は7枚、ケーシング外形寸法は40 mm × 40 mmである。PCファンには、 $+y$ 方向を0 deg.としてサポート1があり、反時計周りに120 deg.、240 deg.の位置にサポート2、3が配置されている。

PIVとの比較・検証用に、 $x = 10$ mm、 -30 mm $\leq y \leq -10$ mmおよび 10 mm $\leq y \leq 30$ mmの範囲を2 mm間隔で熱線流速計(Smart CTA 7250、日本カノマックス)を用いた速度計測を行った。プローブには速度2成分の同時計測が可能なX型熱線プローブを使用した。まず、図4のように x 軸に平行に設置し速度 u 、 v を測定した。 $y = 18$ mmにおいて、 $\bar{u}$ は4.2 m/sであり、 $\bar{v}$ は0.7 m/sであった。次に、X型熱線プローブを x 軸に平行のまま、 y 軸から z 軸に向かって90度回転させ速度 u 、 w を測定した。その結果、 $y = 18$ mmにおいて $\bar{w}$ は2.6 m/sであり、PCファンが作り出す流れが三次元的であることを確認した。

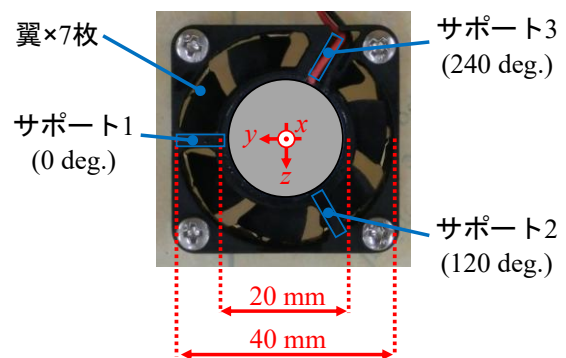


図3: PCファン

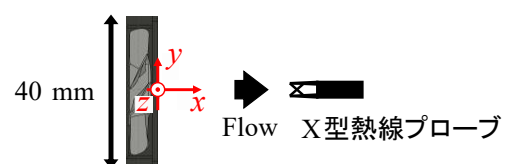


図4: PCファンの座標系

2.3. 簡易PIVシステムの構築および撮影条件

本研究で構築した簡易PIVシステムを図5に示す。トレーサ粒子には、加熱式スモークマシン(ケニス社製、L400WFLG)で霧化したグリセリン水溶液(ケニス社製、FLG-1)を利用した。光源には出力4.75 W、波長445 nmの半導体レーザー(Civil Laser社製、青レーザーモジュール)を利用した。シート光学系には、焦点距離40 mmの凹レンズと焦点距離80 mmのシリンドリカルレンズを用い、 $z = 0$ の xy 平面にレーザー光シートを照射した。この時、光シートの最小厚みは約1 mmであった。カメラにはハイスピードカメラ(Photron 社製、FastCam MINI AX200)を用い、焦点距離100 mmの単焦点レンズ(ケンコートキナ社製、atx-i 100 mm F2.8 FF MACRO)を装着した。レンズのF値は2.8とした。

ハイスピードカメラの撮影条件は、2画像の粒子移動距離が15 pixel以下、露光中の粒子の移動量が2 pixel以下となるように、60 mm × 60 mmの領域を解像度は768 pixel × 768 pixel、フレームレートは10,800 fps、露光時間は0.02 msと設定した。

ハイスピードカメラで取得した粒子画像をもとに、二次元速度場 u 、 v を計算した。解析にはオープンソースソフトウェアであるOpenPIV⁶⁾を用い、検査窓の大きさは32 pixel × 32 pixelとした。算出した速度場に対して時間平均を施し、流れの特徴的な空間構造を可視化した。また、速度変動 $\Delta u = u - \bar{u}$ に対して高速フーリエ変換(Fast Fourier transform、FFT)を用いた周波数解析を行い、速度変動のパワースペクトルを確認することで、流れに特徴的な速度変動周波数の特定を試みた。

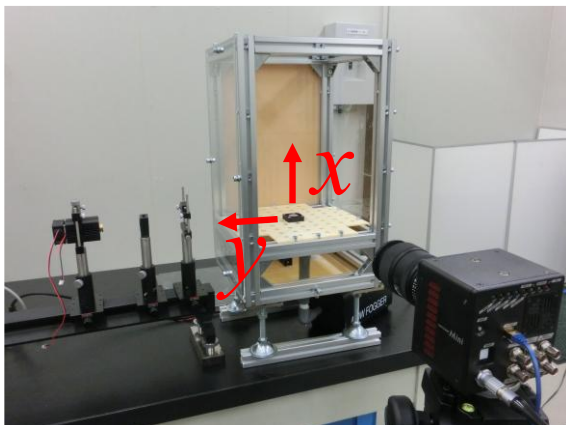


図5-1: 全体像

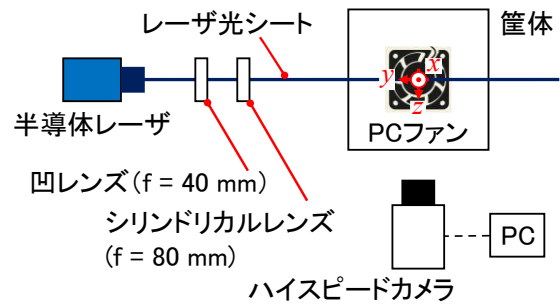


図5-2: 概要図

図5: 簡易PIVセットアップ

3. 調査結果

3.1. 時間平均速度場

$z = 0$ mmの xy 平面における時間平均速度について、速度成分のコンター図およびベクトル場を図6に示す。まず、図6-1の $\bar{u}$ 分布では、ハブとモータの直下流にあたる $-10 \text{ mm} \leq y \leq 10 \text{ mm}$ の領域で低速領域が形成された。開口部の $y = \pm 20 \text{ mm}$ 近傍からは、下流に向かって x 軸に対して非対称な放射状の高速領域が形成された。 $y \geq 0$ mmの領域においては、 $x = 10 \text{ mm}$ 付近で $\bar{u}$ は極大となり、下流に向けて徐々に減速した。一方、 $y < 0$ mmの領域では、開口部下流の $x = 5 \text{ mm}$ 付近で $\bar{u}$ は極大となるが、その下流で急激に減速した。ここで、図6-2の $\bar{v}$ 分布を見ると、 $10 \text{ mm} \leq x \leq 30 \text{ mm}$ の領域で $+y$ 方向へ向かう流れが発生していた。図6-3のベクトル図からも、 $y < 0$ mmの開口部から噴出する流れが $10 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}$ の領域で中心部に流入する様子が確認できた。中心部への流入は、ハブ・モータ直下で負圧領域が形成されているためであり、非対称な速度場の形成はサポート位置の非対称性に起因するものと考えられるが、物理的なメカニズムの解明には、他断面の速度場やハブ・モータ筐体表面の圧力など、追加の計測が必要であると考えている。

次に、 $\bar{u}$ 分布の $x = 10 \text{ mm}$ におけるプロファイルを、熱線流速計の測定結果とともに図7に示す。PIVで計測されたプロファイルの形状は、熱線流速計のそれと同様の傾向を示した。一方で、プロファイルの最大値は熱線流速計では4.4 m/sであったのに対して、PIVでは3.1 m/sであり、速度が小さく評価された。この原因としては、粒子画像の輝度不足と流れの三次元性が考えられる。PIVの画像解析では、連続する2画像から粒子の移動量を計算するため、2画像に共通す

る粒子を明瞭に撮影することが重要となる。そのため、撮影の輝度が不足し粒子とノイズの区別がつかない場合には、相互相関係数のピークが不明瞭になり、速度の誤差要因になり得る。また、流れに三次元性があり、シート面に対して奥行き方向の面外速度がある場合、シート面から粒子が発生・消失するため、2画像に共通する粒子を撮影することができない。この場合にも輝度不足の時と同様の理由で誤差が発生する。本研究においては、広い範囲の撮影を試みたため照明強度を十分確保できなかったこと、シート面に垂直な速度 w が存在することの2つが主な誤差要因と考えている。

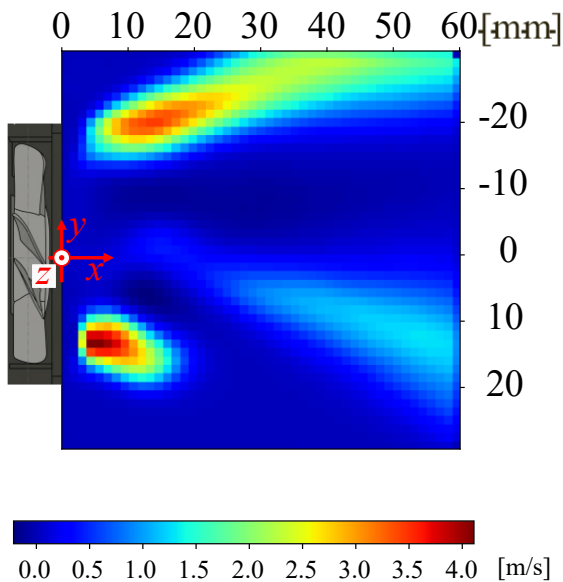
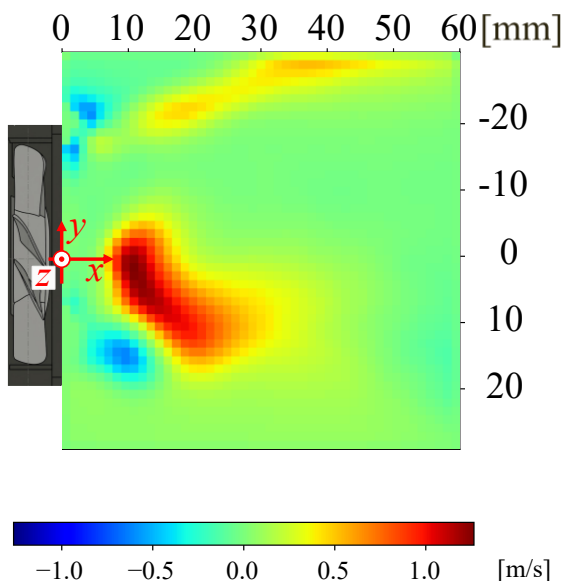
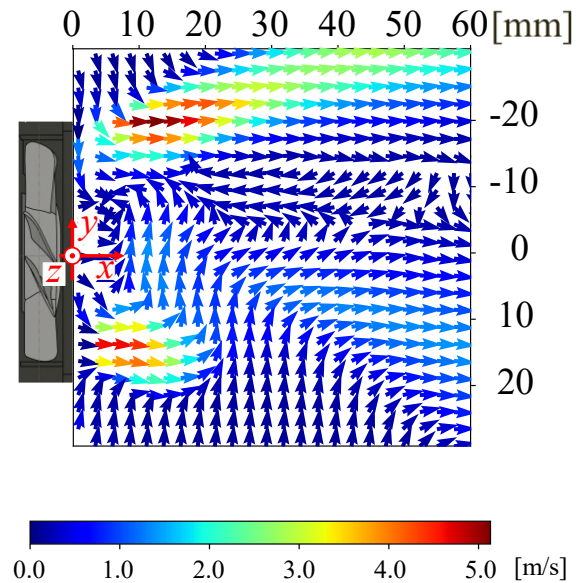
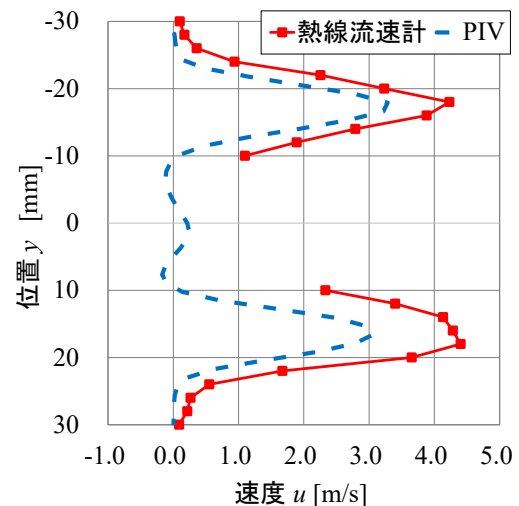
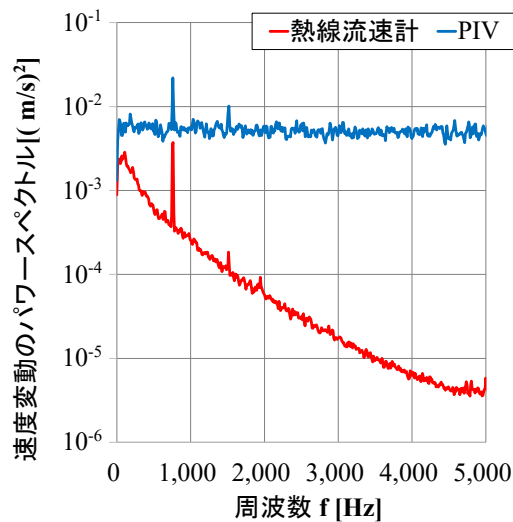
図6-1: 時間平均速度 $\bar{u}$ 分布図6-2: 時間平均速度 $\bar{v}$ 分布

図6-3: 時間平均ベクトル場

図6: 時間平均速度場 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 図7: $x = 10$ mmにおける速度 $\bar{u}$ のプロファイル

3.2. 速度変動のパワースペクトル

$\bar{u}$ が極大となる $x = 10$ mm、 $y = 18$ mmの位置における速度変動のパワースペクトルを図8に示す。PIVと熱線流速計のいずれのスペクトルにおいても、周波数 f が約750 Hzと約1500 Hzでピークが確認された。第一ピークは、ファンの回転周波数 N と翼枚数 Z の積で定義される、翼通過周波数 $f_{\text{BPF}} = N \times Z = 758$ Hzと良く一致しており、第二ピークはその倍音成分であると考えられる。第一ピークにおける、両者の変動強度および周波数に注目すると、強度の絶対値については定量的に一致していないものの、ピーク周波数については良好に一致することが確認できた。



(Version 0.25.3)," 2024. [Online]. Available:
<http://doi.org/10.5281/zenodo.5009150>.

図8: $x = 10 \text{ mm}$ 、 $y = 18 \text{ mm}$ における速度変動 Δu のパワースペクトル

4. 結言

半導体レーザなど汎用機器を利用した簡易PIVシステムを構築し、PCファンが作り出す5 m/s以下の低速流れを対象として可視化・計測を行った。構築した簡易PIVシステムでは、速度の定量評価は困難であるものの、熱線流速計の測定結果と定性的に一致した速度データを取得できたため、流れ場の概略把握に活用できることが確認された。今回はPCファンの中心を含む1断面のみを測定対象としたが、今後多角的な計測を行うことで、より詳細な流れ場の時空間分布特性の解明に貢献できるものと考えている。定量性については、その要因も含め今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 吉川穰ほか, 多相流シミュレーション技術の高度化研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告, 2023, p. 9-15.
- 2) 吉川穰ほか, 固化流れシミュレーション技術の開発, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 2025, p. 43-47.
- 3) 谷一郎ほか, "流体力学実験法", 岩波書店, 1977, p. 170-196.
- 4) 可視化情報学会, "PIVハンドブック第2版", 森北出版, 2018, p. 3-11.
- 5) W. H. Echols and J. Young, "Studies of portable air-operated aerosol generators", NRL Report 5292, 1963.
- 6) OpenPIV Consortium, "OpenPIV/openpiv-python: