



噴流のシミュレーションと可視化

Simulation and Visualization of Jet Flows

伊藤 秀治 Hideharu Ito

近年、製品開発やクリーンルームの設立等を目的に様々な分野において流体の可視化技術が多く用いられるようになってきている。可視化とは流体现象を見える化してカメラで撮影する計測手法である。流体现象の解明には主にシミュレーションが利用されてきたが、可視化技術を取り入れることで実際の流れを評価することができ、より信頼性の高い結果を得ることができる。また、定性的に流体の流れを確認できるだけでなく、撮影した映像を解析することで流速を算出することも可能となっている。

そこで、当社でもシミュレーションだけでなく可視化技術を取り入れてノズルの開発を行った。その事例を交えて流体の可視化技術について紹介する。

Over the past few years, fluid visualization technology has been widely used in various fields for such purposes as product development and establishment of clean rooms. Visualization is a measurement technique in which fluid phenomena are made visible and then photographed with a camera. Although the elucidation of fluid flow phenomena has been primarily done using simulation, incorporating visualization technology will enable evaluation of actual flow rates and provide more reliable results. Furthermore, not only can the fluid flow be checked qualitatively, but also the flow velocity can be calculated by analyzing the captured video images.

Therefore, we decided to use visualization technology as well as simulation in our nozzle development process. This paper describes the fluid visualization technology with examples.

1 はじめに

当社では、空気圧制御機器、流体制御機器、薬液用機器などの開発及び設計を行っている。これら流体を扱う機器類の開発・設計を行う中で性能・信頼性向上のために用いる評価手法として流体のシミュレーションが挙げられる。

流体のシミュレーションは以下の流れで行われる。

- ① コンピューター上で対象となる流路をモデル化する。
- ② モデル化した流路に流体の圧力・流量等の条件を設定する。
- ③ 流路モデルを要素に分割し、有限要素法を用いて解析を実施する。
- ④ 各断面での解析結果を表示し、分析する。

この手法により設計の妥当性確認が試作の前に可能となり開発期間の短縮につながる。

しかし、流体は主に機器内部を流れているため、実際の流れを確認することは困難であり、流体のシミュレーションの結果の是非は当社では確認することが難しかった。

そこで、シミュレーション結果の是非を確認しながら当社でノズルの開発を行ったので、その事例を交えて流体の可視化について紹介する。

2 シミュレーション・可視化対象について

本稿にて流れのシミュレーションと可視化を行ったノズルについて紹介する。

本ノズルは水平なガラス面上に付着したパーティクルを除去することを目的としている。ノズルから大流速のエアをガラス表面へ吹き付けながらダクトから排気を行うことで、ガラス上のパーティクルを取り除いている(Fig.1)。このノズルは大きく分けて(1)ノズル本体、(2)ノズルボディ、(3)ダクトの3つのパーツで構成されている。このパーツごとの役割及び構造について説明する。

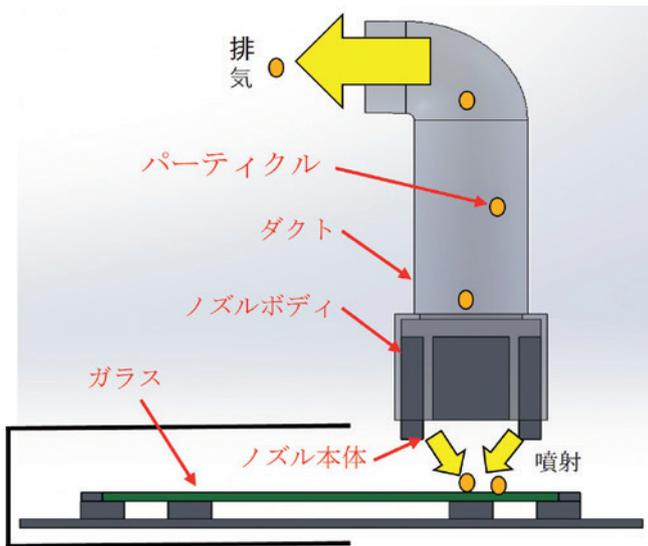


Fig. 1 洗浄の様子

ノズル本体はFig.2のように3枚のSUSプレートで接合することで作製されている。このノズルの流入口から供給されたエアがノズル内の流路を通り、中心の厚み0.1mmのプレートの櫛刃の隙間からエアが噴き出す構造となっている(Fig.3)。

この噴射エアは0.1mmという非常に狭い流路を通して出てくるため、流速は非常に大きな値が得られる。

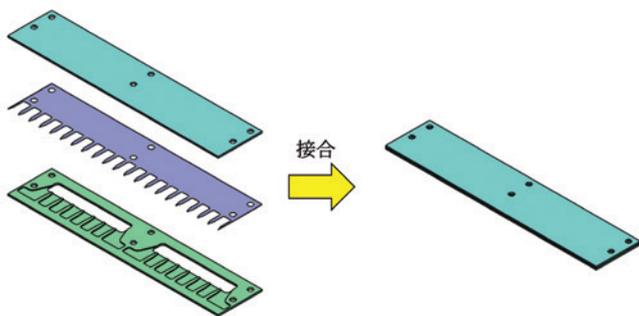


Fig. 2 ノズル本体

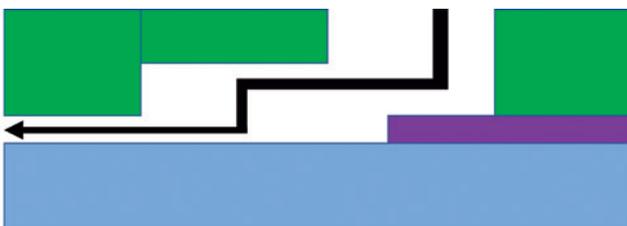


Fig. 3 ノズル本体内部の流路イメージ

このノズル本体にエアを供給する流路がノズルボディである。ノズル本体をノズルボディの下部にねじで固定し、供給されてきたエアがノズルボディ内部の流路A→B→Cを通りノズル本体の流入口へエアを送る構造となっている(Fig.4)。

また、このノズルボディは連結構造となっており、使用時にはこのノズルボディ同士をOリングでシールし、連結していくことで様々な長さの長ノズルとしての運用が可能となっている(Fig.5)。この際、流路Aは下流に対して十分大きな容積を有しているので連結しても全てのノズルボディ内で圧力が一定になりやすく、ノズルの連結位置によって流量が変動しない。

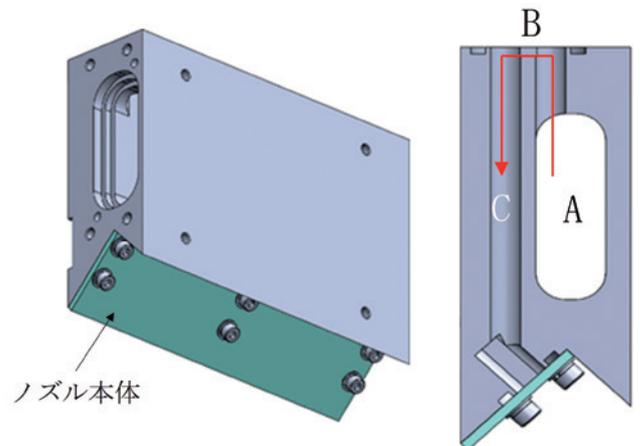


Fig. 4 ノズルボディと内部流路

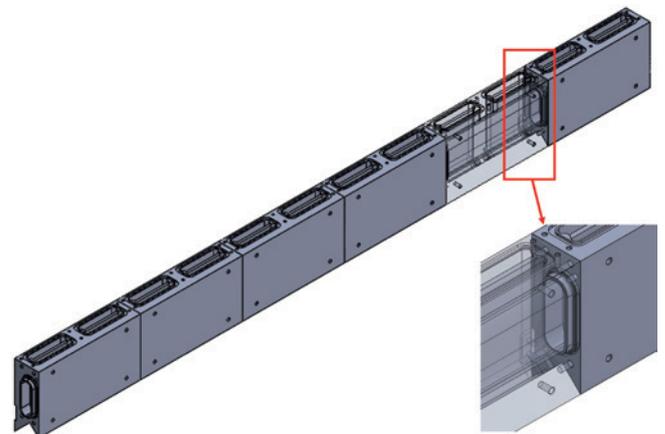


Fig. 5 ノズルの連結構造

実用時にはこの連結したノズル2本を対向する形でダクトに組付けた状態で使用する(Fig.6)。両側のノズルからエアを噴射することで両ノズルの中心点でエアがぶつかり合い、ダクト上部から排気しやすくなっている。ダクト上部には排気口につながるポートが設けられており、ダクト内部全体を均一に排気しやすいよう上部に向かってテーパがついた形状となっている。

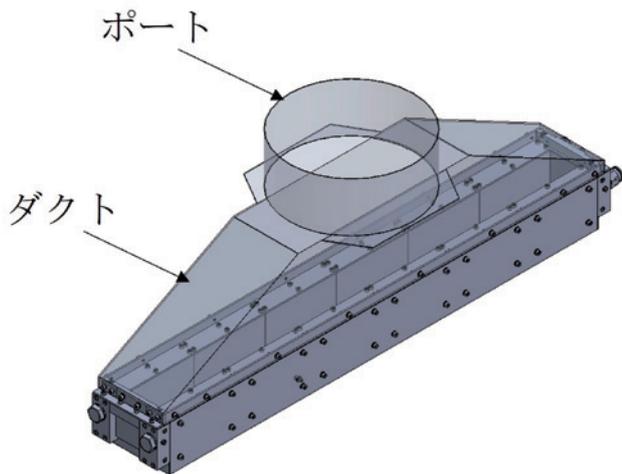


Fig. 6 ノズル完成形

3 噴流のシミュレーション

ガラス表面についたパーティクルを綺麗に取り除く性能を満足するには、まずどのように流体が流れるべきかを推測する必要がある。

その条件として以下の2つの条件A・Bが推測される (Fig.7)。

- A. ガラス表面にノズルの噴流が衝突すること
- B. ガラス表面に衝突したエアがダクトの外側へ流出しないこと

条件Aの理由はパーティクルがガラス表面に静電気により付着している場合、これを取り除くにはまず噴流を吹き付けてガラス面からパーティクルを引き離さなければならないためである。そのため、噴流がガラス表面に衝突しない流れでは全てのパーティクルは取り除くことはできないと推測される。

条件Bの理由は噴流をガラス面に吹き付けた際に引き離されたパーティクルがダクト外部へ飛散するのを防止するためである。噴流はガラス表面に衝突した後、ダクト内側とダクト外側の方向に分かれて流れることが推測されるため、ダクトの外側に流れていかないエアの流入流量と排気流量のバランス、さらにノズルとガラスの位置関係が重要となると考えられる。

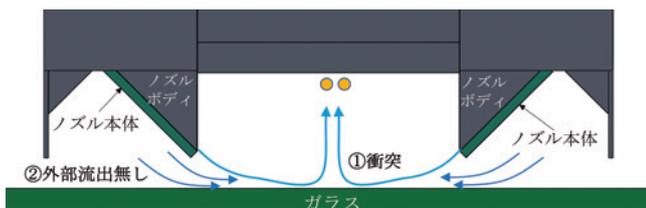


Fig. 7 洗浄時の理想の流れ

これらの条件をクリアする流路モデルの作製及び流量条件の設定をして、シミュレーションを行う。

Table 1に改善前後のモデルの構造及び流量条件を、Fig.9・Fig.10にそれぞれのシミュレーション結果を示す。またノズル角度・ノズル高さはFig.8に示す箇所のパラメータに相当する。

Table 1 シミュレーション条件

	流入流量(L/min)	排気流量(L/min)	ノズル高さ(mm)	ノズル角度(°)	結果
条件1 (改善前)	3000	8700	20	60	Fig. 9
条件2 (改善後)	3000	8700	7	45	Fig. 10

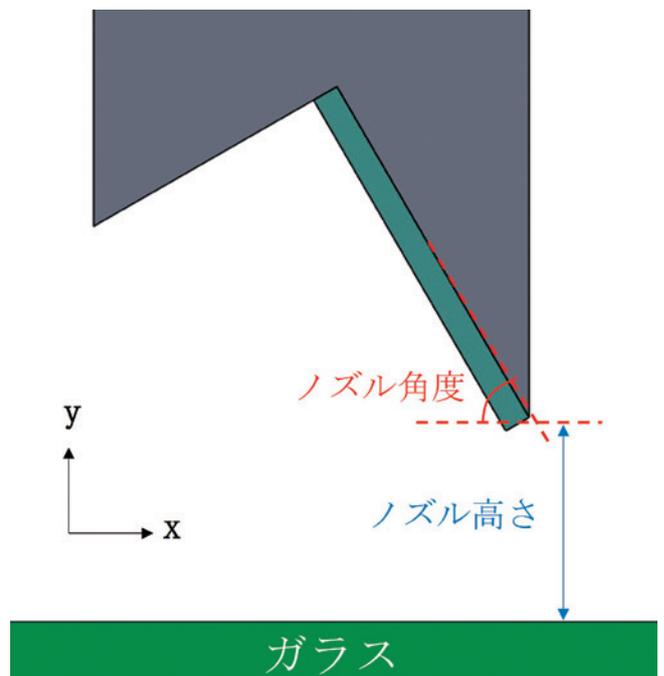


Fig. 8 ノズル角度・ノズル高さ

改善前であるFig.9ではノズルから出た噴流がガラス面に衝突するが、その後エアがダクトの外へと流出している様子が確認できる。これはノズルの角度に起因すると推察される。ノズルの角度がガラス表面に対して60°と急であるため、ダクト内部へと向かうx軸方向のエアの流速ベクトルがy軸方向の流速ベクトルに比べて小さい。そのため、エアがガラス面に衝突したのちにダクト外部へと流れ出るエアの割合が大きくなっていると推測される。

この結果を受けて、ノズルの角度を改善した。改善後のFig.10ではガラス面に噴流が衝突した後、ダクト外へとエアは流出せずに内部へと引き込んでいる様子が確認できた。しかし、ノズル角度を60°から45°へと浅くすることによって排気によって噴流が上方へ吸い上げられてしまい、ガラス表面へと噴流が届かなくなってしまう。この問題はノズルをガラス面へ近づけることで噴流が当たりやすくなり対処できた。

本シミュレーション結果より、条件2のモデル条件・流量条件がパーティクル除去に最適であると判断した。

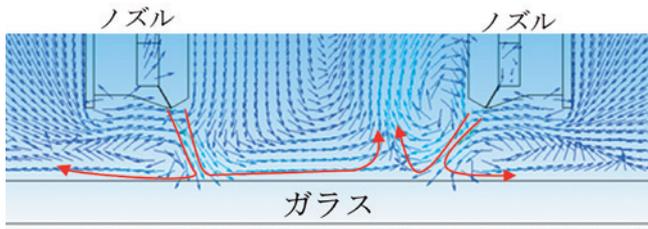


Fig. 9 条件1の流体シミュレーション結果

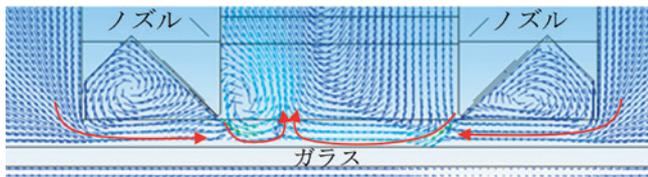


Fig. 10 条件2の流体シミュレーション結果

4 流体の可視化技術について

流体の可視化とは通常目に見えない流体现象を見える化して、カメラで撮影できるようにする計測手法であり、流体のシミュレーション結果が実状に則しているか確認する最も分かりやすい手法である。

しかし、その手法は流体の種類や確認したい現象によって様々であり必要に応じて選択しなければならない。例えば可視化対象が気体であれば空気の流れに追従して挙動するスモークを散布し、対象が液体であればその液体に比重を合わせた粒子を混入させて、その挙動をカメラで撮影する必要がある。本稿では、実際に当社で実施したPIVについて紹介する。

PIV(粒子画像流速測定法)とは流れ場における多点の瞬時速度を非接触で得ることができる流速計測法である。

流れに追従する多数の微粒子を散布し、可視化用のレーザーシートを照射することで2次元断面として、照射面の流れ場の細かな挙動変化の情報を得られるようになる。そしてカメラでその粒子の挙動を露光時間を延ばして撮影するだけで粒子が時系列で流れる様子を追跡することができる。得られた映像を用いてフレーム間の微小時間 Δt における粒子の変位ベクトル Δx を画像処理により求めることで、流体の局所速度ベクトル $v = \Delta x / \Delta t$ を算出する。これにより流速分布の定量評価が可能となる。ただし、流速の遅い所と速い所での差が大きい場合には計測精度に誤差が生じる可能性がある。

当社でPIVによる可視化試験を実施した時の様子をFig.11に示す。

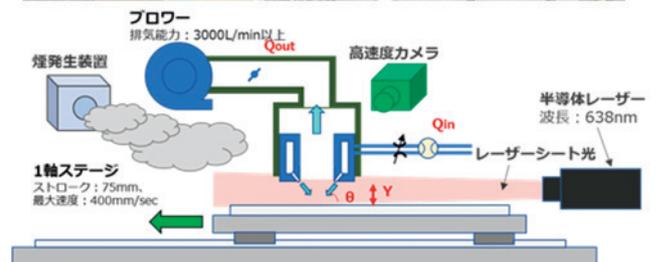


Fig. 11 可視化試験の様子

この試験は試験装置を簡易化するために本来のシミュレーションモデルの1/3サイズのモデルで行い、流量も1/3の値を用いて、下記の手順で行った。

- ①可視化したい断面に対して平行にレーザーシート光を照射する。
- ②照射面に対して高速カメラを垂直方向に設置し、ピントを合わせる。
- ③ワーク周辺にスモークを散布した状態でノズルからエア噴射、ダクトから排気を行い、その様子を高速カメラで撮影する。

このとき、計測対象が噴流のように流速が大きいほど短時間における粒子の挙動を捉えなければならないため、カメラのフレームレートを上げる必要がある。しかし、高フレームレートで撮影するにはそれが可能なカメラ及び高エネルギーを照射可能なレーザー源が必要となる。そのため、可視化する対象・現象によって、カメラやレーザーを選択する必要がある。

可視化試験で撮影された映像からPIVにより解析して求めた流体の平均流速ベクトルをFig.12、Fig.13に示す。

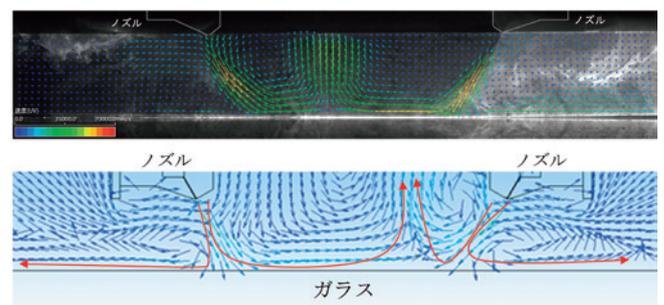


Fig. 12 可視化とシミュレーションの流速ベクトル比較 (条件1)

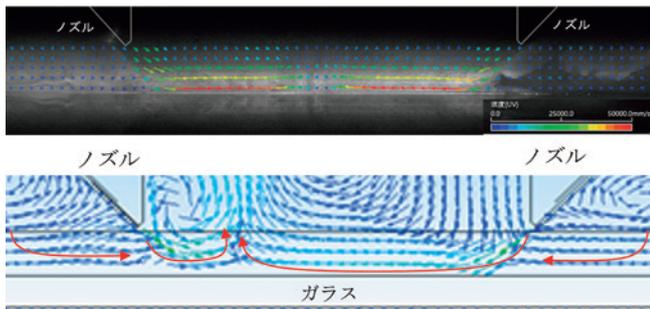


Fig. 13 可視化とシミュレーションの流速ベクトル比較 (条件2)

条件1、2ともにシミュレーションと同様の流れが可視化試験からも確認された(Table 2)。条件1ではガラスに噴流が衝突した後にダクトの外側へとエアが流れ出しており、条件2ではダクト内部へとエアを吸い込む流れとなっている。また流速もシミュレーションと可視化で3~7m/secの誤差に収まっており流速計測の精度も高いことが分かった。この可視化結果から噴流のシミュレーションでは実状に則した結果が得られていることが確認できた。

Table 2 シミュレーションと可視化結果比較

		ダクト外側への流出の有無	エア衝突点の流速(m/sec)	結果
条件1	シミュレーション	有り	48	Fig. 9
	可視化	有り	41	Fig. 12
条件2	シミュレーション	無し	53	Fig. 10
	可視化	無し	50	Fig. 13

5 おわりに

今回はノズル開発の事例を用いて可視化技術の紹介をしたが、空圧機器の性能評価以外にも当社で様々な用途で活用することができる。例えばレーザー溶接を可視化することで溶接欠陥の原因究明が可能となり、クリーンルーム内部を可視化することで防塵対策などにも活用することができる。今後も可視化技術を活用し更なる技術力向上を目指す。

執筆者プロフィール



伊藤 秀治 Hideharu Ito
機器事業本部
Components Business Division