

# LESによるエアシャワー噴流の数値解析

石山 達慎 (13116619)

指導教員 森西 洋平 助教授

## 1 はじめに

工業機器などの流体解析には主に実験的および理論的手法がある。流体の支配方程式を離散的に解く数値流体力学 (CFD) は複雑な流れ場に対しても適用可能であり工業機器の流体解析に多く用いられるようになってきた。本研究での解析対象として用いるエアシャワーノズルは、クリーンルームなどに用いられておりクリーンルームでの作業者の衣服の粉塵除去に有効な工業製品である。本研究では、エアシャワーノズル噴流を計算対象とする。エアシャワーノズルにはパンカーノズルが広く用いられている。

本研究の目的は、まず、数値計算手法の中でも DNS と比べて計算負荷の低い LES を用いて数値計算によりパンカーノズルの流動を再現することである。さらに、現在製品とし振動的な噴流のエアシャワーが考えられており、振動的な噴流を生成するためにパンカーノズルに渦発生体を付加し数値解析により渦発生体の影響を検討する。

## 2 数値解析手法

本研究で用いる計算手法は次のとおりである。

- Large Eddy Simulation (LES) を用いて数値解析を行う。
- 非圧縮性流れの支配方程式である連続の式および Navier-Stokes の式をノズル流入部速度  $U_0$  とノズル出口径  $d$  で無次元化してフィルター化操作を行い LES の基礎方程式とする。
- SGS モデルとして Coherent-structure Smagorinsky Model[1] を用いる。
- 空間離散化法はコロケート格子に 2 次精度中心差分を用い、3 次精度 Runge-Kutta 法を時間進行法とする

## 3 噴流の基礎

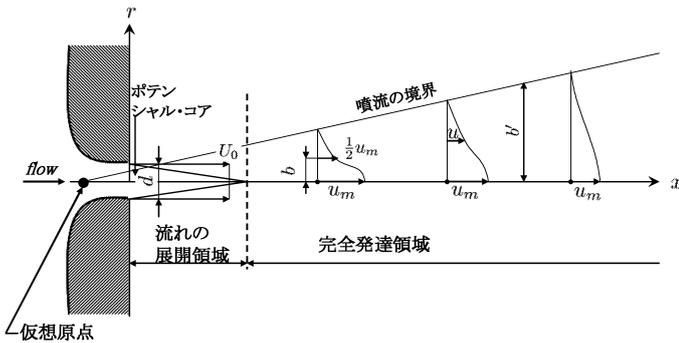


Fig. 1: Axisymmetrical jet structure

噴流の特徴を以下に示す。

- 噴流は図 1 に示すように、ノズル出口から速度が均一の領域であるポテンシャルコアが存在し、これが完全に消失するまでの領域は速度分布が変化し流れが未発達である展開領域となる。
- 未発達領域から速度分布が相似分布となる完全発達へ遷移する。
- 噴流の最大の特徴として、噴流境界では周囲の流体を誘引して巻き込むエントレインメント速度が存在し、噴流は流量を増しながら主流方向へ広がっていく。

## 4 計算条件

Table 1: Numerical condition

	Case 1	Case 2
Numerical area $L_x \times L_y$	$20d \times 20d$	$20d \times 20d$
Grid number $N_x \times N_y \times N_z$	$205 \times 105 \times 60$	$205 \times 105 \times 60$
Reynolds number $Re$	50000	50000
Vortex Shedder	×	○

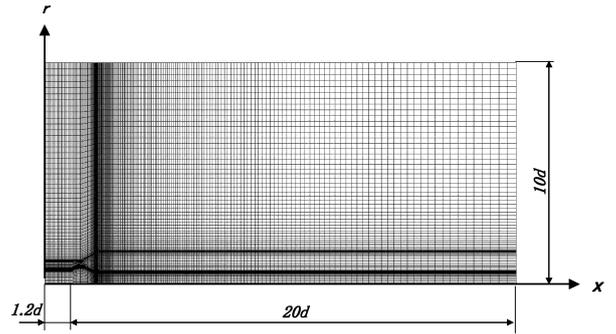


Fig. 2: Numerical grid

計算条件を表 1 に示す。計算領域は、噴流がノズル出口以降下流に向かい広がっていくことを考慮し、噴流が発達することを考慮して主流方向に  $20d$  の領域をとり、噴流の相似則である Tollmien の解などを基に噴流幅を検討して噴流幅は計算領域で半径方向に最大  $6d$  となる。余裕をとって半径方向に  $10d$  の計算領域を取り  $20d \times 20d$  の円筒形とした。

図 2 に計算格子の  $x-r$  断面を示す。計算格子はノズル出口とノズル壁面に格子を引き付けている。流体に振動を与えるために、渦流量計に用いられている渦発生体の原理を用いて流入部に渦発生体を与える。この寸法は JIS Z8766 [2] を参考に決定した。

本研究では、パンカーノズルの数値計算を実行し噴流の特徴を再現できているか確認を行い、パンカーノズル流入部に渦発生体を付加し、数値計算を行い渦発生体の効果を検討する。以降、パンカーノズルを Case 1、渦発生体を付加したノズルを Case 2 として示す。

## 5 結果および考察

### 5.1 パンカーノズルの数値解析

図 3 に、パンカーノズルの速度分布を示す。図 3 はノズル出口から  $x/d = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$  の断面における  $u/U_0$  の流速分布が示されている。半径座標はノズル出口径  $d$  で正規化しており  $r/d$  としている。図 3 から、ノズル出口から主流方向下流部に向かって噴流が広がる様子が再現されていることがわかる。

図 4 にパンカーノズル噴流の速度分布を Tollmien の解とあわせて示す。ノズル出口から  $x/d = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$  の断面において、それぞれの断面での噴流中心速度  $u_m$  で正規化した流速  $u/u_m$  の分布を示している。半径座標は半値幅  $b$  で正規化しており  $r/b$  としている。図 4 から、ノズル出口から  $x/d = 2, 4$  の断面では速度分布が Tollmien の解とは一致しておらずノズル出口の影響が残っていることがわかる。 $x/d = 8 \sim 16$  の断面では速度分布形状が Tollmien の解とよく一致しており噴流相似解がよく再現された結果となっている。

図 5 に、ノズル出口から  $x/d = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$  の各断面の乱流エネルギー  $\overline{q^2}/(2U_0^2) = 1/(2U_0^2)(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$

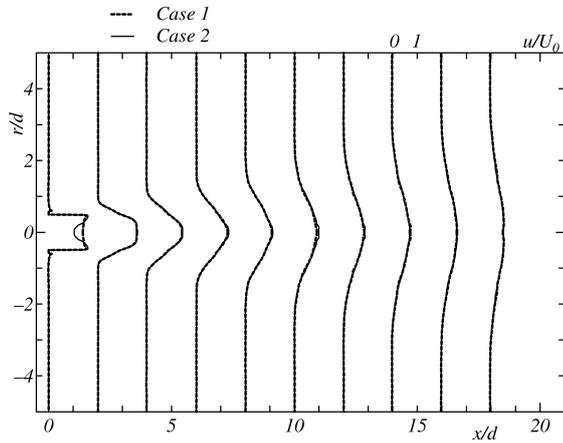


Fig. 3: Comparison of velocity profile

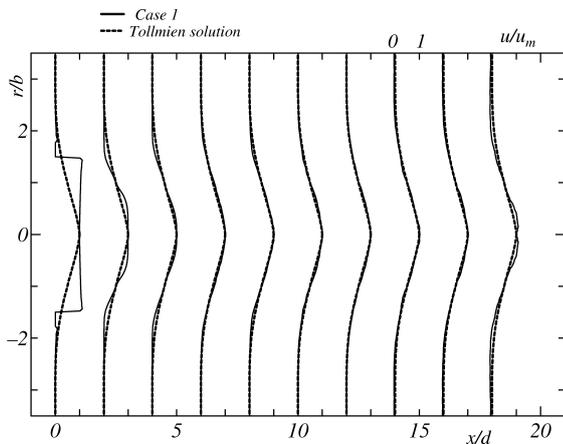


Fig. 4: Comparison of Tollmien solution

分布を示す。半径座標はノズル出口径  $d$  で正規化している。図 5 から、 $x/d = 1$  以降の断面の  $|r|/d = 0.5$  付近で乱流エネルギーが大きくなっており、噴流中心部では乱流エネルギーが低くなっている。これはポテンシャルコアの影響によるものと考えられる。 $x/d = 1$  以後の断面では乱流エネルギーの大きさが徐々に小さくなり  $x/d = 10$  あたりからは  $r/d = 0$  とその周りの  $\bar{q}^2/2$  との差が小さくなっており、これは、ポテンシャルコアがなくなり噴流が発達したためと考えられる。つまり  $x/d < 10$  までは未発達領域であることがわかる。自由噴流が  $x/d = 10$  以降で十分に発達することが文献 [3] で示されており、本計算結果もこれを反映した結果となっている。

## 5.2 渦発生体付きノズルの数値解析

図 3 をみるとノズル出口部分での流速分布に大きな特徴が現れている。パンカーノズルの流れの流速分布と比較すると、分布形状が中心部で凹んでいるのは、渦発生体付きノズルの出口噴流の流速分布が噴流中心速度がその周囲の速度より遅いためである。これは、渦発生体後方で流速が減少し剥離が生じ、その影響でノズル出口での噴流中心速度が遅くなることに起因する。しかしその下流部では速度分布が急速に消失することが分かる。噴流が下流に向かって拡がるのはパンカーノズルの場合と同様である。図 3 から分かるパンカーノズル噴流と渦発生体付きノズル噴流の明確な違いはノズル出口部分での流速分布のみである。

図 5 をみると噴流中心部での乱流エネルギーの分布にパンカーノズルと渦発生体付きノズルに大きな違いが現れている。これは、図 3 の比較で述べたノズル出口での速度分布形状の違いに起因する。乱流エネルギーは、速度分布の速度勾配に大きく左右され

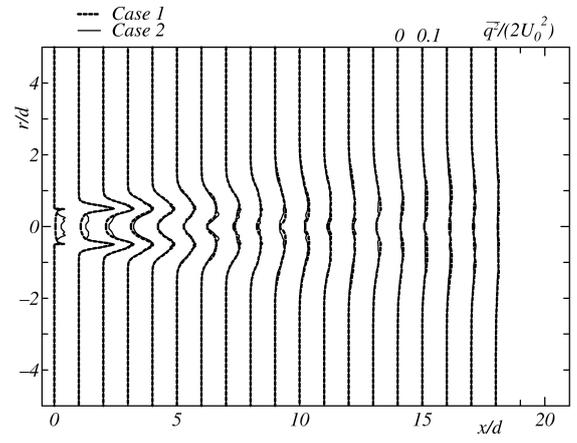


Fig. 5: Comparison of Turbulent kinetic energy profile

るために、ノズル出口での乱流エネルギーの分布形状がパンカーノズルと渦発生体付きノズルで大きく違うのである。乱流エネルギーが大きい位置では、乱れが生成されている。このことから、ノズル出口付近ではパンカーノズルに比べて渦発生体付きノズルのほうが乱れた噴流となることがわかる。しかし、ノズル出口から  $x/d > 4$  の断面では、パンカーノズルと渦発生体付きノズルの乱流エネルギー分布の明確な違いは見られない。これは、噴流が下流に向かって拡散していることを示す。

以上のことから、今回用いた渦発生体では、ノズル内およびノズル出口から  $x/d = 4$  の断面までは渦発生体の影響から噴流に乱れを与えることが出来た。しかし、噴流全体に、振動を与えることが出来たかは確認できなかった。

## 6 まとめ

本研究ではエアシャワーノズルを計算対象として LES による数値解析を行った。パンカーノズルによる数値解析を行い噴流速度の相似則から本数値計算の信頼性の確認を行った。さらにパンカーノズルに渦発生体を付加した場合の数値解析を行い渦発生体の影響について検討を行った。

### パンカーノズルの数値解析

- 自由噴流の特徴である下流に向かって拡がっていく現象および噴流の相似則を再現することが出来た。
- 噴流の乱流エネルギーの分布から発達領域は  $x/d \geq 10$  となることがわかる。この結果は従来の実験結果と整合した結果 [3] であることが言える。

### 渦発生体付きノズルの数値解析

- 今回の渦発生体を付加したノズルの場合の流速分布は、パンカーノズルの場合と比較してノズル出口付近で中心部が凹になる分布となった。
- 乱流エネルギーの分布を渦発生体付きノズル噴流とパンカーノズル噴流と比較すると、ノズル出口付近では大きく形状が異なり乱れの生成が起こっていることがわかった。このことから、渦発生体付きノズルのノズル出口での流れはパンカーノズルと比較して流れが変わっていることがわかった。

## 参考文献

- [1] 小林宏充, コヒーレント構造を基にした SGS モデル, 第 18 回数値流体力学シンポジウム (2004), pp.1-10
- [2] 日本規格協会編, JIS Z8766 渦流量計-流量測定法, 日本規格協会 (2002), 12
- [3] 社河内 敏彦, 噴流工学:基礎と応用, 森北出版 (2004), p.4