

# CFD を用いた空気圧管路系の流動解析

鈴木智哉\*, 村山栄治\*, 川上幸男\*\*

## Flow Analysis of Pneumatic Tubes by Computational Fluid Dynamics

Tomoya SUZUKI\*, Eiji MURAYAMA\*, Yukio KAWAKAMI\*\*

In order to operate correctly the complicated pneumatic system, it is necessary to investigate the flow characteristics. Therefore in this research, the geometric model is created for a flow path and performed fluid measurement conducts fluid analysis for the flow of the air in a difficult flow path by Computational Fluid Dynamics. And the flow of air is visualized from an analysis result. Finally, comparison and examination are performed for the flow characteristic by the difference in the flow path.

**Key Words:** Computational Fluid Dynamics, Pneumatic Tube, Flow Characteristic

### 1. 緒 言

空気圧機器を使用した空気圧システムは、工場内での FA 化などにより製造業をはじめとした幅広い産業分野において利用されている。そのなかでも、空気圧管路は重要な構成要素の一つである。最近では、空気圧機器の小型化、内部構造の集積化や製造加工コストの削減を目的として、平面に溝を加工し、上部板で密閉し、流路を形成するため、断面が円形でない事例等が多く見受けられる。この場合、機器に組み込まれた空気圧管路の流量特性を把握するには、実験的にこれらの特性試験を行うことは難しい状況となっている。

本研究では、断面形状が円形だけではなく、円形以外の実験による流体計測の困難な種々の管路に対して CFD(Computational Fluid Dynamics)解析を活用して、それらの流量特性について明らかにすることを目的とする。具体的には、CAD により構築した流路解析モデルに対して、CFD シミュレーションを行い、管路内部での流動状況を明らかにすることにより、流路前後での圧力差や流量との関係の導出を行う。対象とする円形以外の管路断面形状は、矩形断面流路(正方形・長方形)、三角形断面流路、楕円断面流路、ボールエンドミル断面流路などであり、最終的には音速コンダクタンス  $C$  と臨界圧力比  $b$  との関係を用いて、それぞれの形状ごとに整理することを考えている。ここでは、空気圧流路のなかでも内部流路として広く用いられている円形断面流路の流路解析の結果について報告する。

### 2. 数値計算法

本研究では、有限体積法を用いた流体解析ソフトウェアである ANSYS FLUENT(ANSYS Inc.)を用いて流動解析を行う。CFD において乱流を数値解析するための数学モデルとして、RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)、LES(Large Eddy Simulation)、DNS(Direct Numerical Simulation)の3つに大きく分類される。なかでも RANS の乱流モデルとして、最も広く有効性が確認された  $k-\varepsilon$  モデルを使用して解析を行う<sup>1)</sup>。また、使用する  $k-\varepsilon$  モデルの基礎方程式を(1)~(5)に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\bar{u}_i u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \right\} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \left( C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \right\} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

ここで、 $u$ :流速、 $p$ :圧力、 $k$ :乱流エネルギー、 $\varepsilon$ :乱流エネルギー散逸率、 $\nu_T$ :渦粘性係数、 $C_\mu$ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ :モデル定数とする。モデル定数には、一般的に幅広い乱流流れの範囲に対して使われる以下の値を用いる<sup>1)</sup>。

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (6)$$

### 3. 解析対象

解析には、Fig.1 に示すような内径 4[mm]、長さ 250[mm]の空気圧管路を流路解析モデルとして作成する。また、管路出口付近での空気の流れを実際の流路環境に近い条件にするため、管路端部に内径 24[mm]、長さ 150[mm]の拡大管部分を設けた。

\* 芝浦工業大学大学院理工学研究科  
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)  
(E-mail: md13040@shibaura-it.ac.jp)

\*\* 芝浦工業大学システム理工学部  
(〒337 - 8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

\*\*, Shibaura Institute of Technology

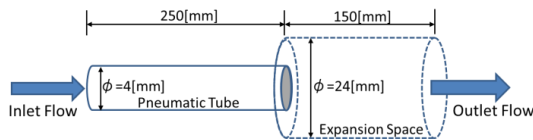


Fig. 1 Model of circular tube with expansion space

#### 4. 流入流量計測実験・CFD 解析条件

CFD 解析を行うにあたり，流入口と流出口の境界条件を規定する必要がある．そのため，Fig. 1 のような内径 4[mm]，長さ 250[mm]の円管路を使用し，Fig. 2 に示すような実験回路を用いて，タンク内に空気を充填，圧力制御弁を 0.5 [MPa(gauge)] に設定し，大気開放の条件で，円管路へ流入する流量計測実験を行った．計測した流量値をもとに，Table 1 に示す解析条件で CFD 解析を行う．

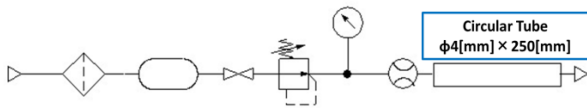


Fig. 2 Pneumatic experiment circuit  
Table 1 Simulation conditions

Fluid	Air - ideal gas
Temperature[K]	298
Inlet Mass Flow rate[kg/s]	0.0150
Outlet Pressure [MPa(gauge)]	0
Turbulence Model	Standard k-ε model
Solution Method	Pressure-Based Coupled Solver SIMPLE

#### 5. 結果・考察

流入流量計測実験で計測した値と，CFD 解析によって求めた値の結果を Table 2 に示す．また，CFD 解析により求めた圧力と流速の分布をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示し，管路端部の拡大部分での流速分布図を Fig. 5 に示す．

Table 2 より，実験で計測した値と CFD で解析した値を比較すると，ほぼ近い値である．流入流速や圧力を比較すると，多少のずれがあるが，これは今回の解析には管路内の壁面管摩擦などが解析上で考慮されていないためと考えられる．また，圧縮性流れで断面積一定の管路部分では，マッハ数 1 で臨界状態となる<sup>3)</sup>．Fig. 5 の流速分布の結果を見ると，圧縮性流れの管路内部流れの傾向を CFD 解析でとらえられていると考えられる．

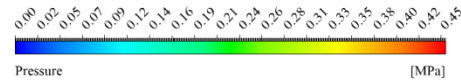


Fig. 3 Result of simulated pressure

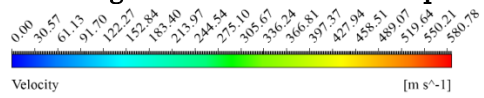


Fig. 4 Result of simulated velocity

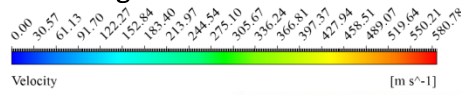


Fig. 5 Result of simulated velocity in expansion space

Table 2 Result of experiments and simulations

	Experiments Values	CFD Results
Inlet Mass Flow rate[kg/s]	0.0150	0.0150 Boundary condition
Outlet Mass Flow rate[kg/s]	0.0150	0.0151
Inlet Velocity[m/s]	139.4	164.2
Inlet Pressure [MPa(gauge)]	0.5	0.451
Outlet Pressure [MPa(gauge)]	0	0 Boundary condition

#### 6. 結 言

今回は，円管路を流路解析モデルとして構築し，実験値と CFD 解析の比較を行いながら，流動状況を可視化することが出来た．今後は，矩形や三角形などの断面形状の異なる流路についても流動状況を調べて，音速コンダクタンス  $C$  と臨界圧力比  $b$  の関係を使って，断面形状ごとに流量特性の検討を行う予定である．

最後に本研究を実施するにあたり SMC 株式会社よりご支援を賜ったことを記し，謝辞に代える．

#### 参考文献

- 1) H.K.Versteeg,W.Malalasekera : An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 森北出版, pp.43-85, (2011)
- 2) 小林敏雄, 富樫盛典: バックステップ流れにおける乱流モデルの比較, 日本機械学会論文集, No.93-0633, 71-78, (1993-11)
- 3) 松尾一泰: 圧縮性流体力学, 理工学社, pp.64-65, (1994)