

## 二次元噴流の初期領域の流れ場の数値解析

## Numerical analysis of the flow field in the initial region of a two-dimensional air jet

○粕谷守<sup>1</sup>, 須川貴史<sup>2</sup>, 中村拓也<sup>2</sup>, 村松旦典<sup>3</sup>, 菊池崇将<sup>3</sup>\*Mamoru Kasuya<sup>1</sup>, Takafumi Sugawa<sup>2</sup>, Takuya Nakamura<sup>2</sup>, Akinori Muramatsu<sup>3</sup>, Takamasa Kikuchi<sup>3</sup>

A two-dimensionally numerical simulation of a planar jet at the Reynolds number of 1,000 was tested using OpenFOAM. The OpenFOAM is an open source software based on the finite volume method and is recently and widely used.

## 1. 緒言

速度を持った流体がスリット、ノズルなどの孔から空間に噴出する現象を噴流現象と呼んでいる。工業的に広く利用されている流れで、数多くの研究がなされてきた<sup>[1]</sup>。近年、有限体積法をベースとしたオープンソースの数値解析ソフト OpenFOAM<sup>[2]</sup>が広く利用されるようになった<sup>[3]</sup>。OpenFOAM を使用して、流入条件（速度分布、乱れ度の空間分布及び周波数特性）を制御して噴流の発達過程の計算を行い、流入条件と発達過程の関係を探ることを最終目標としている。エラーなく数値計算が行えても実際の流れと合致しているか判断が困難である。そこで、数値計算に加えて空気噴流の可視化実験を行い、得られた計算結果との比較を行う。

## 2. 支配方程式及び計算領域

表 1 に計算条件、図 1 に計算領域を示す。非圧縮性流体運動に対する支配方程式はナビエ - ストークス方程式及び連続の式である<sup>[3]</sup>。

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

OpenFOAM の非定常解析のソルバーである pisoFoam を用いて 2 次元非定常解析を行った。これは非圧縮性流体に用いられる PISO 法を用いた非定常乱流解析ソルバーである。乱流モデルは Realizable k-ε モデルを用いた。昨年度の中山の研究では、 $Re = 500$  では Realizable k-ε モデルと laminar モデルで双方層流の結果が得られている<sup>[4]</sup>。乱流エネルギー  $k$  及び乱流エネルギー散逸  $\varepsilon$  は以下の式より算出する。

$$k = \frac{1}{2} (U_x'^2 + U_y'^2 + U_z'^2) \cong \frac{3}{2} U_y'^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} \times k^{1.5}}{L_m} \quad (4)$$

$U_x'^2, U_y'^2, U_z'^2$  は各方向の速度の乱れ成分を表し、5% の乱れがあると想定して計算している。また、 $C_\mu$  はモデル定数であり、その値は 0.09 である。 $L_m$  は代表長さを  $l$  としたとき、 $0.07 l$  である。 $l$  は後述のスリット幅  $h$  とした。

計算領域は、実験で使用した矩形ノズルの短辺の幅と同じ 4 mm をスリット幅  $h$  とした。十分な計算領域を取るため、スリット幅に対し  $31 \times 45$  倍となる水平方向 124 mm、鉛直方向 180 mm とした。計算領域は blockMesh を使用し、不等間隔な格子を作成した。計算負荷を軽減するために水平方向は、スリット部から離れていくにつれて要素サイズが大きくなるように、鉛直方向は上にいくほど大きくなるようにした。すなわち、要素サイズは、水平方向は図 1 に示す赤色の線の位置で 0.1 mm、黄色の線の位置で 0.2 mm、緑色の線の位置で 1.0 mm となっている。鉛直方向は下で 0.1 mm、上で 1.0 mm になるように設定した。要素の総数は 218,960 である。噴流初期領域の計算精度を重視するため、スリット部分から出る主流が通過する範囲は要素サイズを最も小さくした。また、主流の inlet1 に加え、平行流の inlet2 を加えることで、スリット付近での逆流を抑え、流出境界での圧力反射を軽減するようにした。図 1 の左右は slip で壁で流速が 0 にならないすべり条件とし、上側の流出境界は zeroGradient で圧力勾配

Table.1 Computational conditions

$Re$	1000
Gas	Air
Velocity	3.90 m/s
kinetic viscosity	$1.55 \times 10^{-5}$ m/s
Turbulence energy	$5.69 \times 10^{-2}$ m/s
Turbulence energy dissipation	$7.96 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Turbulent model	Realizable k-ε
Algorithm	PISO

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・院(前)・航宇 3 : 日大理工・教員・航宇

が 0 になるようにした。

### 3. 計算結果

$Re = 1000$  での可視化実験と数値計算による主流方向流速と圧力のコンター図を比較したものを図 2, 数値計算により得られた速度分布を図 3 に示す。

可視化実験結果では噴流剪断層のロールアップが確認できるが, 計算結果ではロールアップが確認できていない。これは可視化実験では噴流のわきの周囲流が無いため, 可視化実験の噴流の方が不安定になりやすいためである。また, 圧力のコンター図では横渦が形成されていないため, 圧力の変動が見られない。

中山<sup>[4]</sup>の  $Re = 1000$  の計算結果では圧力反射が確認された。中山は `internalField` の Y 軸方向に主流の 5% を入れることで `coflow` としていたが, 速度分布を見たときに `coflow` で流速の変動があった。`internalField` は任意の方向全体が初期値として与えられる。これを, 主流を `inlet1`, 並行流を `inlet2` として `fixedValue` で任意の値を与えるようにし, `internalField` の Y 軸方向の初期値は 0 に限りなく近い値を入れるよう変更した。その結果, `coflow` での流速の変動は無くなり, 圧力反射も抑えることが出来た。しかし, `inlet1` と `inlet2` の境付近で流速が落ちてしまった。従来では, 計算領域全体に初期値として流速を与える状況となっていた。しかし, 今回は初期値を限りなく 0 に近い値を与えているので, 図 3 の速度分布から分かるように境界付近で速度が 0 に近い値となり, 流速の減少が起こってしまったと考えられる。

### 4. 今後の課題

現状の流速の与え方では,  $Re$  があがるにつれて圧力コンター図に反射が表れる。これは適切なバッファ領域を作成し軽減したいと考えている。流入条件に Top-hat 型の速度分布や擾乱の時空間分布を加えられるようにしていきたい。

### 5. 参考文献

- [1] 社河内敏彦:「噴流工学 基礎と応用」, 森北出版株式会社, Vol. 1, No.1, p.222, 2004.
- [2] 一般社団法人 オープン CAE 学会:「OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析」森北出版株式会社, Vol. 1, No. 1, pp 217, 2016.
- [3] 菅谷陽一, 大竹智久, 村松且典:「OpenFOAM を用いた後方のはく離一再付着流」, 日本大学理工学部学術講演会論文集, 2014

[4] 中山和磨:「OpenFOAM を用いた 2 次元空気噴流の非定常数値計算」, 日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業研究報告書, 2017

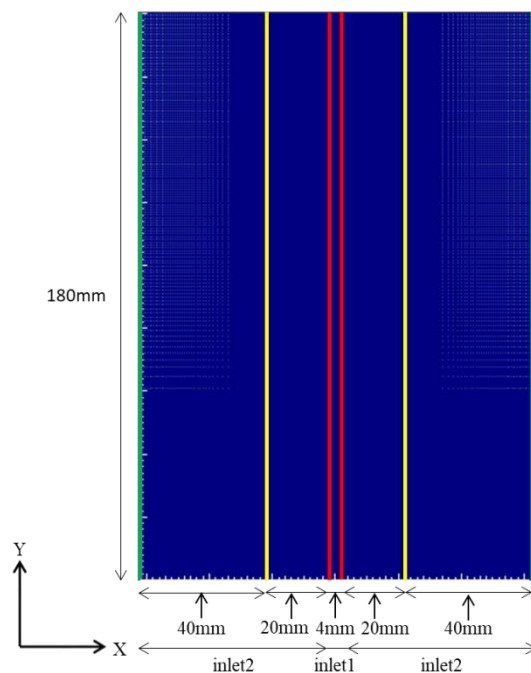


Figure 1. Calculation domain

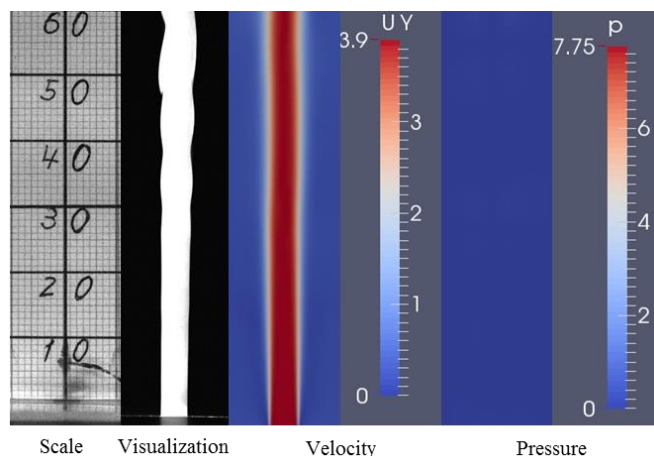


Figure 2. Comparison of visualization and calculation

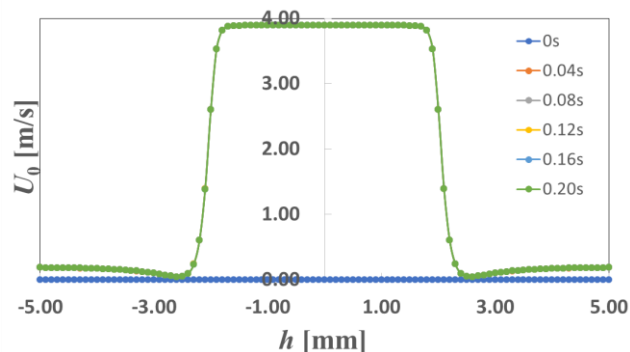


Figure 3. Velocity profiles of the inlet boundary condition