K3-9

2 次元ヘリウムガス噴流の 3 次元数値計算

Three-dimensional calculation of a two-dimensional helium gas jet

須川 貴史[1]，村松 旦典[2]
Takafumi Sugawa[1], Akinori Muramatsu[2]

It has been suggested that an important factor for side-jets formation is vorticity generation by the baroclinic torque caused by the cross product of the density gradient and the pressure gradient. An aim of this research is to estimate an effect of the baroclinic torque on the side-jets formation by a numerical calculation. A two-dimensional, helium gas jet was computed by using LES.

１．緒言

低密度気体噴流の主流の一部が枝分かれし，主流とは異なる方向へ噴流が噴出する現象をサイドジェット[1]-[2]という．サイドジェットの形成要因に密度勾配と圧力勾配の外積によって生じるバロクリニックトルクによる渦度生成が示唆されている[3]．しかしながら，密度勾配と圧力勾配は実験で計測するのは困難であり，定量的に判断することができない．本研究では，商用 CFD ソフトウェア Fluent を使用し，3 次元計算領域で 2 次元ヘリウムガス噴流の非定常数値計算を行う．計算結果から，噴流剪断層において渦度輸送方程式の各項が占める割合を調べ，密度変化が渦度生成に与える影響を評価することを最終的な目的とする．ここでは得られた計算結果について，実際の噴流可視化実験結果[4]と比較し報告する．

２．渦度輸送方程式

剪断層が不安定になる原因の一つが渦度の生成である．式(1)に密度変化を伴う渦度方程式を示す．

$$\frac{D\boldsymbol{\omega}}{Dt} = (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u} - \frac{1}{\rho^2}\boldsymbol{\nabla}p\times\boldsymbol{\nabla}\rho - \boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u} + \nu\Delta\boldsymbol{\omega} \qquad (1)$$

右辺の左側から伸張項，バロクリニックトルク項，膨張項と拡散項を表しており，密度変化により生じるのは第 2 項と第 3 項である．

３．境界条件と計算条件

設定した計算領域を図 1 に示す．計算の妥当性を実験から調べることを想定し，実際の噴流実験装置[6]のノズル幅 4 mm をもとに計算領域を設定した．スリットの幅 h を 4 mm とし，バッファ領域を含めた計算領域はその 10 倍×7.5 倍×4 倍の 40 mm×30 mm×16 mm となっている．

流入（図 1 中の下面 inlet 部分）の境界条件として式(2)で表される Top-Hat 型の速度分布[5]をスリット部に与えた．

Table.1 Computational conditions for He gas jet at *Re* = 200

Jet gas	Helium
Ambient fluid	Air
Viscosity model	LES
SGS model	Smagorinsky-Lilly
Formulation	Implicit
Solver	Density-Based
Time step [s]	1.0×10^{-5}
Courant number *C*	0.612

$$U_{(y)} = \frac{U_{C0}}{2}\left[1-\tanh\left\{\frac{1}{4}\frac{Y}{\theta_0}\left(\frac{y}{Y}-\frac{Y}{y}\right)\right\}\right] \qquad (2)$$

このとき，U_{C0} はスリット中心での流速，Y は半値半幅，θ_0 は境界層の運動量厚さ，y はスリット中心からの距離である．また $\theta_0 = 0.045h$ とし $Y/\theta_0 = 10\sim20$ の範囲で値をとるように Y の値を調整した．流入スリット部の計算要素サイズは Top-Hat 型の速度分布を十分に解像できるように 0.1 mm×0.2 mm×0.5 mm とした．計算負荷を抑えるために，スリット部から遠ざかるにつれて要素サイズが大きくなるようし，要素の総数は 768,000 となった（図 2）．DNS では解像度が不十分なので LES を使用した．また 2 次元噴流を想定していることから，噴流の流出境界を流入境界と平行になる面とし，側面の境界条件は図 1 中の①の面を周期境界，②の面を標準大気圧とした．

表 1 に *Re* = 200 のヘリウムガス噴流（U_{C0} = 6.02 m/s）のときの計算条件を示す．*Re* = 200 としたのは事前の可視化実験結果から層流状態になっていることが確認できているためである（図 5 右側）．ここで，U_{C0}と最小の要素サイズの大きさからクーラン数 C を求め，$C<1$ となるように計算の時間間隔を調整した．また，前計算としてレイノルズ平均モデル（標準 k-ε モデル）を利用した定常計算を行い，その結果を初期値とし非定常計算を行うことで，計算負荷の軽減を図っている．

１：日大理工・院（前）・航宇　２：日大理工・教員・航宇

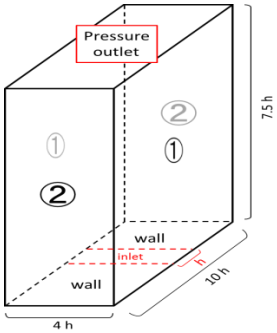


Fig.1 Boundary condition.

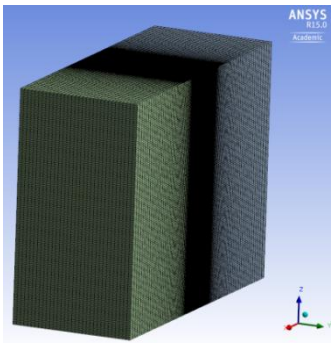


Fig.2 Calculation Mesh.

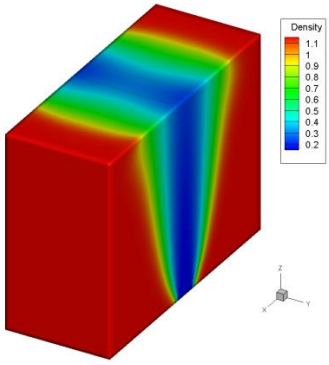


Fig.3 Density contour by standard k-ε model (Time= 0.0 s).

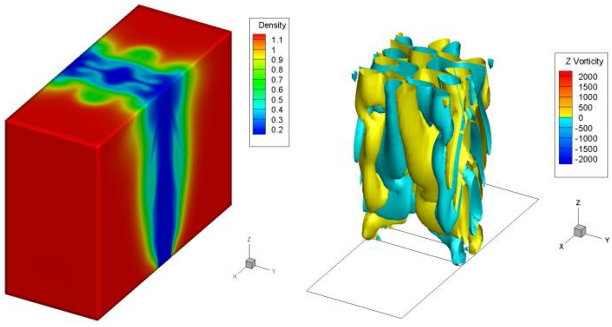
４．計算結果と考察

図 3 に前計算で行った標準 k-ε モデルでの定常計算結果の密度コンター図を示す．ここからヘリウムガス噴流は Re = 200 のとき層流状態となり，可視化実験結果（図 5 右側）と一致していることが示された．また，スリットの短辺側から主流方向断面を見ると，各断面での密度コンターは変化しなかったことから，周期境界となっていることが確認できた．

得られた定常計算結果から LES による非定常計算を行い 0.1 sec だけ時間を進めたときの密度コンター図を図 4(a)に示す．層流状態が保たれると予測したが，結果は流入スリットから 8 mm 下流の位置で渦輪を形成し，発達していく様子が示され（図 5 左側），可視化実験結果と大きく異なるものとなった．また，スリットの短辺側から主流方向断面の密度コンターを見ると，渦輪の大きさなどが各断面で大きく違っていることが示された．

長方形噴流の 3 次元的可視化実験[4]から，サイドジェットの形成には，流れ方向の渦（縦渦）の発達や結合が関係していると考えられる．そこで，噴流中の縦渦の発達過程を見るために，縦渦の等値面（ω_x = 42, -42）を図 4(b)に示す．黄色が正，水色が負の渦度を表しており，噴流中を複雑に入り込んでいることが示された．また，スリット部の各頂点から縦渦が形成されていることが示されている．これは長方形噴流の 3 次元的可視化実験の結果でも確認されているが，想定している 2 次元噴流はスリット短辺側で無限遠に続いていくもので，示されたような縦渦は発生しないはずである．このことから，今回得られた非定常数値計算結果は，2 次元噴流よりも長方形噴流として 3 次元的に空間発達している様子と酷似していると考えられる．

今後は，実験データなどとの比較を行いながら，計算条件を精査する必要がある．



(a) Density contour　　(b) Streamwise Vortex

Fig.4 Calculate results by LES (Time= 0.1 s).

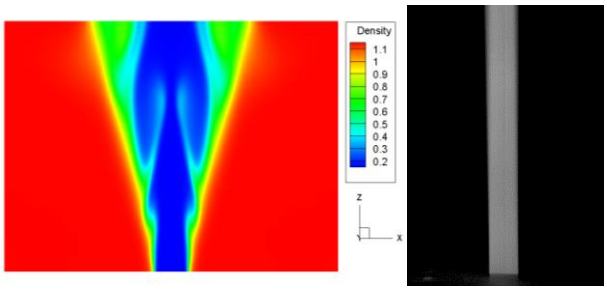


Fig.5 Density contour and Visualization experiment of nozzle center (He gas, Re = 200, U_{C0} = 5.88 m/s).

参考文献

[1] P. A. Monkewitz, D.W. Bechert, B. Barsikow and B. Lehmann., Self-excited oscillation and mixing in a heated round jet, J. Fluid Mech., 213, pp. 619-639, 1990.

[2] D. M. Kyle and K. R. Sreenivasan, The instability and breakdown of a round variable-density jet, J. Fluid Mech., 249, pp. 619-664, 1993.

[3] Chassaing, P., Antonia, R.A., Anselmet, F., Joly, L., Sarkar, S. Variable Density Fluid Turbulence, p16-17, 2002.

[4] 須川 貴史，平成 27 年度卒業研究報告書，2016.

[5] 竹内 伸太郎，三宅 裕，梶島 岳夫，日本機械学会論文集(B 編)，68 巻 665 号， pp 30-37，2002.

[6] 矢崎 亮助，平成 26 年度卒業研究報告書，2015.