

低密度 2 次元噴流初期領域の渦形成に密度が与える影響

Effect of density on vortex formation in the initial region of a two-dimensional jet with low density

○須川貴史¹, 村松旦典²*Takafumi Sugawa¹, Akinori Muramatsu²

If a low density gas, such as helium gas, is discharged from a slit into the still atmosphere, lateral ejections were observed in the initial region of a planar jet. As a factor for side-jets formation, it has been suggested that vorticity is enhanced by a baroclinic torque. Since it is difficult to measure the baroclinic torque by an experiment, we performed a three-dimensional and unsteady numerical simulation of a two-dimensional helium gas jet. Each of the terms in the vorticity transport equation was calculated from the simulation results. The density effect is different by locations in the jet.

1. 緒言

低密度気体噴流の主流に一部が枝分かれし、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^[3]が示唆されている。しかしながら、密度勾配と圧力勾配は実験から計測するのは困難であり、定量的に判断することが出来ない。本研究では、商用 CFD ソフトウェア Fluent を利用し、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、噴流初期領域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。

2. 渦度輸送方程式

剪断層が不安定になる原因の 1 つが渦度の生成である。式(1)に密度変化を伴う場合の渦度輸送方程式^[3]を示す。

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

右辺の左側から伸張項、バロクリニックトルク項、膨張項と拡散項を示しており、密度変化により生じるのは第 2 項と第 3 項である。2 次元流れでは第 1 項の伸張項が消失してしまうことから、3 次元流れとして計算を行った。

3. 計算手法

3 - 1. 支配方程式及び境界条件

支配方程式は 3 次元の連続の式、圧縮性 Navier-Stokes 方程式、化学種の保存方程式とした。また、理想気体の状態方程式も使用する。

実際に可視化実験に使用した 2 次元噴流風洞^[4]を想定し、計算領域^[5]を設定した。スリット幅 $h = 4 \text{ mm}$ をもとに主流方向 x を $20h$ 、主流に直行する方向 y を $15h$ 、

スパン方向 z を $3h$ とした。またノズル出口で Top-Hat 型の速度分布を与えるために、流入境界から主計算領域の間に助走区間を 5 mm 設けている。流入境界条件にはスリット幅 h を代表長さとした Re をもとに算出した流速を流入速度として与えている。また、流出境界での圧力の反射や逆流を抑えるために、スリット出口の周囲から主流速度の 10% の co-flow を流入させている。流出条件は標準大気圧一定の圧力出口条件、側面は滑り壁条件とした。スパン方向の側面を周期境界条件とすることで、2 次元噴流を模擬している。

3 - 2. 計算条件

表 1 に実際の可視化実験で顕著にサイドジェットの形成が確認できているヘリウムガス噴流 $Re = 1,000$ の計算条件を示す。 Re をもとに算出した流入速度は $U_{co} = 30.5 \text{ m/s}$ となり、co-flow の流速は 3.05 m/s を与えた。最小の要素サイズ $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ と流速から算出されるクーラン数 C が 1 以下となるように Time step size Δt を $3.0 \mu\text{s}$ とし、このとき $C = 0.91$ となっている。ソルバーは圧力ベースソルバーを使用し、速度と圧力のカップリングには連成型を使用している。

Table 1. Calculation conditions for He gas jet at $Re = 1,000$

Jet gas	Helium gas
Reynolds number Re	1,000
Jet velocity U_{co}	30.5 m/s
Velocity of air co-flow	3.05 m/s
Time step size Δt	3.0 μs
P-V coupling scheme	Coupled
Viscosity model	LES
SGS model	Smagorinsky-Lilly
Transient formulation	Second order implicit

1 : 日大理工, 院(前期), 航宇 2 : 日大理工, 教員, 航宇

非定常な流れ場を対象としているため、粘性モデルは LES モデル、SGS モデルには Smagorinsky-Lilly モデルを使用し、そのモデル定数 C_s は 0.1 とした。

4. 計算結果および考察

得られた計算結果から渦度輸送方程式の各項の値を算出した。差分には 2 次精度中心差分を利用し、時間差分の間隔は $30 \mu s$ 、空間差分は隣り合う要素の中心間隔とした。混合気体の動粘性係数 ν は、モル分率と Wilke の式⁶⁾から算出した粘性係数と密度 ρ を利用し算出している。

図 1 に噴出から 16.2 ms 後のスリット中心位置 ($z = 0 \text{ mm}$) での Z 軸周りのバロクリニックトルクのコンター図を示す。噴流の形状を見るため、密度の等値線を黒実線で表したものを重ねている。ここから、バロクリニックトルクは噴流初期の剪断層よりも噴流渦の上流部 ($x/h = 3 \sim 3.5$) や、渦が崩壊し流れが大きく蛇行を始める位置 ($x/h = 6 \sim 8$) で強く生じ、噴流流れを大きく変形させていることが示された。バロクリニックトルクは渦の生成や消散、流れの蛇行に寄与していると考えられる。

噴流剪断層における渦度輸送方程式の各項の比率を調べるために、任意の点において各項の割合を計算した。噴流初期の剪断層 (Position 1)、噴流渦の上流部 (Position 2 と 3)、バロクリニックトルクが強い位置 (Position 4) の 4 点を選択し、その位置関係を図 2 に示す。表 2 には、各点の座標と渦度の実質微分の合計、その内の各項の比率を示す。噴流初期の領域のため最も強い Z 軸周りの渦度の 4 項の計算を行った。拡散項は Position 1, 2, 3 で支配的である。Position 1 では拡散項を除くと伸張項が支配的である。Position 1 は噴流初期の剪断層領域のため、バロクリニックトルクが強く生じると考えたが、非常に低い値となった。Position 2 と 3 では伸張項と拡散項が強く、バロクリニックトルク項と膨張項は Position 2 でそれを打ち消す方向に働いているが、Position 3 では非常に小さい値を示した。Position 4 では伸張項とバロクリニッ

クトルクが支配的で、打ち消す方向に膨張項が働いている。わずかな位置の違いによって各項の比率や働きが大きく変化していることから、今後は定性的な観点も踏まえ各項の働きについて精査し、また、ここでは議論していない縦渦についても調べる必要がある。

参考文献

- [1] Monkewitz, P. A., et al., J. Fluid Mech., **213**, pp.619-639, (1990).
- [2] Kyle, D. M. et al., J. Fluid Mech., **249**, pp.619-664, (1993).
- [3] Chassaing, P., et al., Variable Density Fluid Turbulence, Kluwer Academic Publishers, (2002).
- [4] 村松旦典, 矢崎亮助, 川邊健太, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集(CD-R), (2015).
- [5] Sugawa, T., Muramatsu, A., International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (2017).
- [6] 蒔田薫, 粘度と熱伝導率, 培風館, p96, (1975)

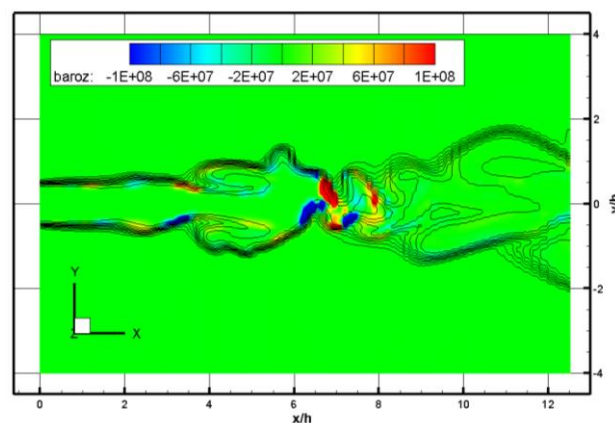


Fig. 1. Contours of density and baroclinic torque around Z-axis of He gas jet at $Re = 1,000$

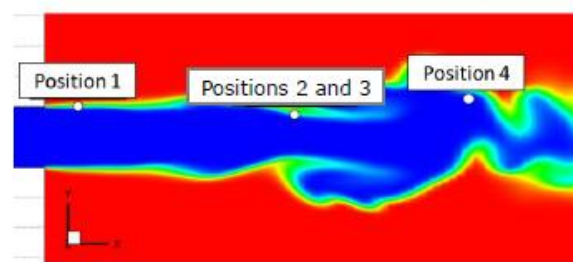


Fig. 2. Investigated positions on density contour of He gas jet

Table 2. The contributing rate in the vorticity transport equation

Terms	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
Coordinates ($x/h, y/h, z/h$)	(0.3, 0.45, 0)	(3.75, 0.375, 0)	(3.75, 0.25, 0)	(6.75, 0.25, 0)
Total [$1/s^2$]	-1.41×10^9	-1.95×10^8	-2.43×10^8	1.20×10^8
Stretching [%]	4.40	97.6	-163.8	70.1
Baroclinic torque [%]	-0.96	-32.6	-3.94	64.5
Dilatation [%]	-3.7	-82.9	2.75	-2.79
Diffusion [%]	100.2	118	265	-31.8