

K-2

円形噴流に圧力擾乱により形成したヘリカルモードの数値実験

Numerical simulation of a helical mode formed in a round jet using acoustic disturbances

○小林佑輔¹, 村松旦典²*Yuusuke Kobayashi¹, Akinori Muramatsu²

A round jet has symmetric modes related to the formation of vortex rings and asymmetric modes (helical modes) that rotate in a spiral. Koch et al. were formed the helical mode in a round jet using 4 speakers and visualized the helical mode using smoke. In this study, numerical simulations using OpenFOAM are conducted to investigate the conditions for the formation of a helical vortex structure by adding a phase difference to acoustic disturbances.

1. 緒言

円形噴流には、渦輪列の形成に関連する対称モードとらせん状に回転する非対称モード(ヘリカルモード)が存在する。ヘリカルモードは Koch ら⁽¹⁾によって、4個のスピーカーに位相差を付けて稼働して、らせん状に渦が形成できることを可視化実験によって示しているが、詳細については述べられていない。

本研究では、Koch ら⁽¹⁾と同様に音響擾乱を加えた場合について、OpenFOAM を利用した数値実験を行い、らせん状の渦構造ができる条件を調べた。

2. 計算方法及び計算条件

支配方程式は非圧縮の場合の Navier-Stokes 方程式と連続の式である。OpenFOAM のソルバは非圧縮非定常計算の PISO 法を使い、乱流モデルを使わない implicitLES (DNS) を用いた。

計算領域は、田中らの研究⁽²⁾をもとに図 1 のように半径方向に $5D_0$ 、主流方向に $15D_0$ の円柱領域とした。領域の側面 (side) 及び出口 (outlet) の境界は総圧一定の流出入を考慮した開放境界条件とした。ノズルは直径 $10D_0$ の壁面に設置されている。

ノズルの円筒部壁面に周方向に等間隔に音響励起するための励起口を設けた。励起口は、図 2 のように 3 個、4 個及び 6 個である。励起孔で境界条件として式 (1) で表される圧力振動を与えており、励起孔の間隔分位相をずらしている。ここで A は振幅であり、 f_s は励起周波数、 ϕ_i は励起孔の位相差である。

$$\frac{P}{\rho} = A \sin(2\pi f_s t + \phi_i) \quad (1)$$

噴流のレイノルズ数が 2000 の場合の渦輪の形成周波数 f_v が 120 Hz であり⁽²⁾、これをもとに励起周波数 f_s は

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

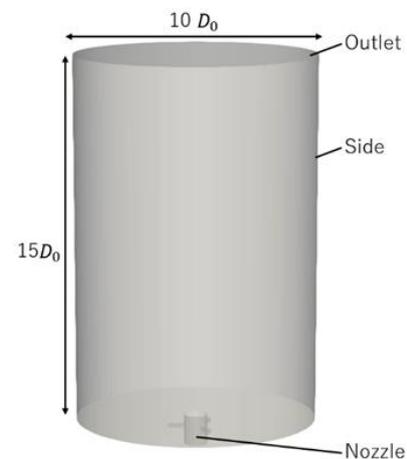


Figure 1. Computational domain

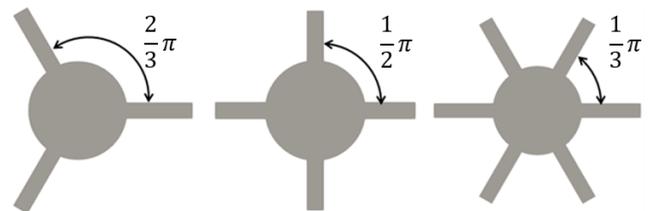


Figure 2. Excitation holes on a round nozzle

120 Hz とした。

円形ノズルの入口で、主流方向に対し式 (2) で表される Top-Hat 型の速度分布を与える。

$$U_z(r, t) = \frac{U_c^{inlet}}{2} \{1 + U^{noise}(r, t)\} \left[1 - \tanh\left\{a \left(\frac{r}{D_0} - r_0\right)\right\}\right] \quad (2)$$

ここで U_c^{inlet} は噴流中心速度でありレイノルズ数を 2000 にするために $U_c^{inlet} = 2.5 \text{ m/s}$ とした。 a 及び r_0 は定数であり本研究では実測値に基づいて $a = 30$ 、 $r_0 = 0.45$ とした。 $U^{noise}(r, t)$ は擾乱であり、ホワイトノイズとして U_c^{inlet} の $\pm 0.5\%$ の擾乱を空間的及び時間的に

与えた。 D_0 はノズル直径， r は噴流中心からの距離である。 また主流に直交する 2 方向の速度は 0 とする。 計算条件及び離散化手法を表 1 に示す。

Table 1. Calculation conditions

Jet fluid	air
Reynolds Number, Re	2000
Inlet Velocity, U_c^{inlet} [m/s]	2.5
Time Step, Δt [s]	1.0×10^{-5}
Algorithm	PISO
Max courant number	0.5
Time schemes	Euler method
Gradient schemes	Linear
Divergenceschemes	Linear
Laplacian schemes	Linear corrected

3. 計算結果及び考察

計算結果を図 3 及び図 4 に示す。 図 3 は励起孔が 3, 4 及び 6 個の場合の Q 値によるコンター図である。 ここでは、振幅 $A = 1.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ， 励起周波数 $f_s = 120 \text{ Hz}$ とし、等値面は速度の大きさ U で色付けしている。 図 3 より励起孔が 3, 4, 及び 6 個のいずれの場合でもらせん状の渦構造が $x/D_0 = 3.0$ 付近まで存在することが確認できる。 励起孔が 3 個の場合は $x/D_0 = 9.0$ 付近までの噴流の分布に偏りが見られ、励起孔が 6 個の場合は噴流の拡がり小さくなっている。

図 4 は励起孔を 3 個にし、励起周波数 f_s を 60, 120, 180Hz にした場合の計算結果である。 図 4 も図 3 と同じく Q 値によるコンター図であり、図 3 と同様に等値面は速度の大きさ U で色付けしている。 図 4 より励起周波数 f_s が大きくなるほどらせん状の渦構造が維持で

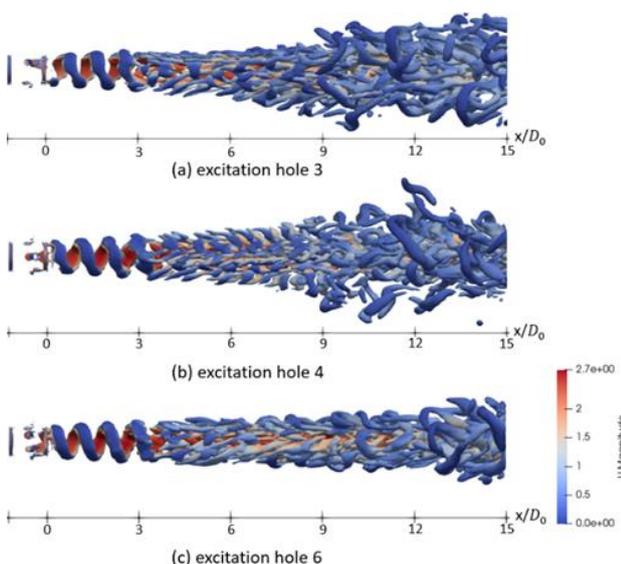


Figure 3. Comparison by excitation frequency

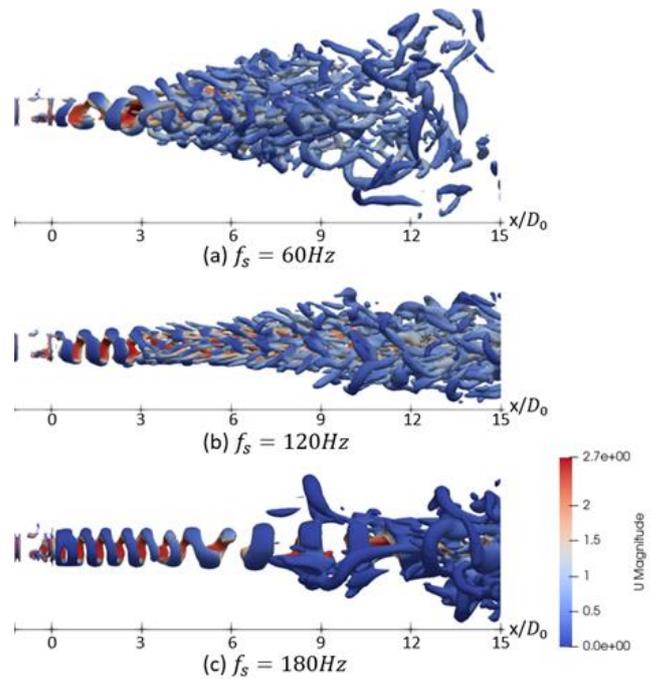


Figure 4. Comparison by excitation frequency

きていることが確認できる。 また励起周波数が大きくなるほどらせん構造の一周期が小さくなることが分かる。

図 4 と同じく励起孔を 3 つにした場合で、振幅 A を 0.75, 1.5, 及び 3.0 m^2/s^2 と変化させた場合について計算した結果、振幅 A が小さくなるほどらせん状の渦構造が持続しているのが確認できている。

4. 結論

励起孔が 3, 4 及び 6 個のすべての場合でらせん状の渦構造が形成されていることが確認できる。

励起周波数が大きくなるほど渦構造が持続し、らせん構造の一周期が小さくなる。 また、らせん状の渦を維持するためには、圧力擾乱の大きさは大きすぎない必要がある。

5. 参考文献

[1] C. R. Koch, M. G. Mungal, W. C. Reynolds, and J. D Powell, " Helical Modes in an Acoustically Excited Round Air Jet" Physics of Fluids A, Fluid Dynamics 1, 1443 (1989).
 [2] 田中恒平, 村松旦典, "人為的に分岐流れを形成した円形噴流近傍場の渦構造", 第 34 回数値流体力学シンポジウム, (2020).