

円形噴流における人為的に波状変形させた渦輪と分岐流れ形成の関係

Relationship between Artificially Wavy Deformed Vortex Rings and Separated Flows in a Round Jet

○田中恒平¹, 村松旦典²*Kohei TANAKA¹, Akinori MURAMATSU²

Vortex rings are periodically formed in the initial region of a round jet and change to a wavy shape in the azimuthal direction. It is suggested that the azimuthal deformation of vortex rings is affected by streamwise vortices. In order to investigate the relation between the azimuthal deformation of the vortex ring and the streamwise vortices, we attempted to artificially deform the vortex ring in the azimuthal direction by synthetic jets. The vortex rings azimuthally and wavyly deform, and at this time the streamwise vortices are generated at certain locations in the round jet. When the vortex ring and the streamwise vortex interact with each other, the vortex ring deforms to a wave shape, and the streamwise vortex deforms to be attached to the wave-shaped vortex ring. The flow induced by a pair of streamwise vortices forms a separated flow like a side jet.

1. 緒言

円形噴流の初期領域には周期的な渦輪列が形成され、ポテンシャルコア終端において、渦輪は周方向の不安定性により波状変形し 3 次元的に崩壊する^[1]。この崩壊過程において、渦輪の発達に伴い発生する縦渦の影響が示唆されている^[2]。さらに、縦渦により誘起される流れが生じ、噴流から分岐するサイドジェット^[3]を形成すると考えられる。しかし、これらの現象は不規則な非定常であり、現象を実験的に捉えることが困難である。

本研究では、噴流の周囲から周期的な擾乱を与え、渦輪の波状変形と縦渦の発生を周期現象として扱う^[4]。つまり、ノズル出口近傍に設けた 3 つの孔からシンセティックジェットを噴出し、これにより、渦輪は半径方向、主流方向に 3 次元的に波状変形する。そして、噴流のポテンシャルコアからサイドジェットのような半径方向外側への分岐流れが生じる。噴流断面の可視化及びダイナミック PIV による計測^[4]、3 次元可視化^[5]を行い、渦輪の波状変形と縦渦、そして分岐流れ形成の関係についての流れ場のモデルを提案する。

2. 実験装置および実験条件

実験に使用したノズルは、出口直径 $D_0=12$ mm, 面積縮流比 30.3 の円形縮流ノズルである。ノズル上部に、直径 2 mm の励起孔を等間隔に 3 つ設けた円筒形のアクチュエータを取り付ける。励起孔からはシンセティックジェットが形成され、シンセティックジェットは、スピーカに正弦波を入力することで生成する。

噴出気体には空気を使用する。噴流のレイノルズ数 Re は、渦輪列が形成され、且つ流速が低速となる 2,000 とした。 Re の代表速度は噴流の噴出速度 U_{c0} とし、こ

のときの U_{c0} は 2.55 m/s となる。代表長さはノズルの出口直径 D_0 である。また、自然遷移における噴流の渦輪の形成周波数 f_v が 120 Hz (無次元周波数 $St = f_v D_0 / U_{c0} = 0.565$) であったため、スピーカへの入力信号の周波数 f_s は 120 Hz とし、入力電圧の実効値 E_{RMS} は 0.2 V とした。このとき、シンセティックジェットの噴出口近傍での速度は 0.5 m/s から -0.2 m/s まで周期的に変化し、噴出速度 U_{c0} に対する乱れ度は約 7 % である。

3. 実験結果および考察

図 1 に噴流断面の可視化画像を示す。図中の x/D_0 と r/D_0 はそれぞれノズル出口直径 D_0 で無次元化した主流方向距離と半径方向距離である。図 1 (a) は自然噴流の主流方向断面、(b) は励起噴流の主流方向断面である。可視化位置は、右上に示す通りである。励起により渦輪の形成が促進され、1 つと 2 つ目の渦輪の間でサイドジェットのような分岐流れを形成している。(c) の画像は、分岐流れが形成される $x/D_0 = 2.0$ における水平方向断面である。黄色い矢印が励起位置を示している。励起位置と励起位置の間で分岐流れを形成し、渦輪の内側には 3 つの縦渦対が確認できる。また、渦輪の断面が主流方向断面では左右に傾き、水平方向断面では三角形に変形していることから、渦輪は 3 次元的に波状変形している。

図 2 に水平方向断面の時系列画像、およびそれに対応する渦度場を示す。励起周波数を基準に、一周期 $T (=1/f_s)$ を 4 分割して並べた。渦輪の内側に見られる縦渦 (S.V.) は、可視化画像に矢印で示すように対を成すように形成する。これは渦度場でも確認できる。図 2 の (1), (4) の渦度のコンター図において、縦渦対と回

1 : 日大理工・院(前)・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

転方向の異なる渦度が確認できる。可視化画像と見比べると、渦輪の位置でこの渦度が表れているため、波状変形した渦輪の渦度を計測している。

図3は、渦輪と縦渦の空間分布を示すための3次元画像である。レーザシートをスキャンングすることにより得られた断面画像を積層して3次元画像を作成し、縦渦にマークした。渦輪 (V.R.) 1の外側に見られる縦渦 (S.V.) 1は、下流の渦輪2の内側に潜り込む。渦輪2は波状変形が促進され、縦渦1から分岐した縦渦2は渦輪2に纏わり付くように変形する。回転方向の異なる縦渦と縦渦の間で分岐流れ (S.F.) が生じる。

4. まとめ

以上の結果から、渦輪の波状変形と縦渦、分岐流れ形成の関係を図4のようにモデル化する。まず、励起により噴流剪断層が変形し縦渦が形成されると同時に渦輪が形成される。渦輪と縦渦は互いに干渉することで、渦輪は波状変形し、縦渦は波状変形した渦輪に纏わり付くように変形する。この縦渦対により誘起される流れがサイドジェットに類似する分岐流れを形成している。

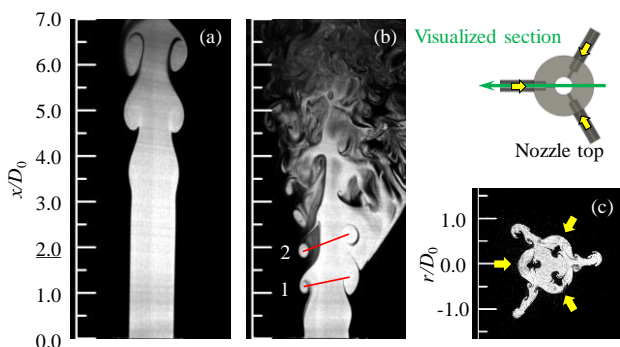


Figure 1. Streamwise cross-sections ((a) Unexcited, (b) Excited) and horizontal cross-section at $x/D_0 = 2.0$.

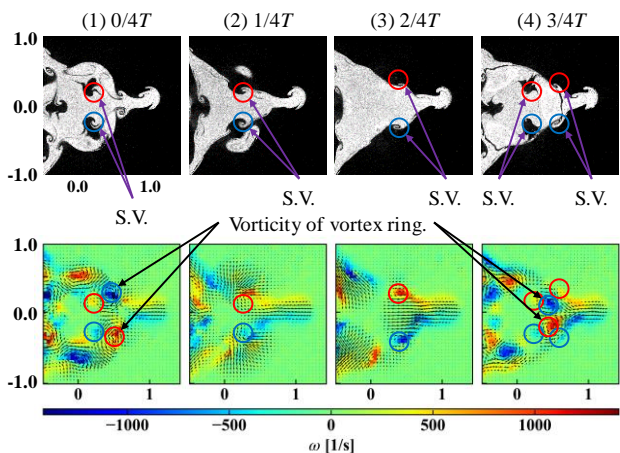


Figure 2. Time series images and vorticity fields of excited jet at $x/D_0 = 2.0$.

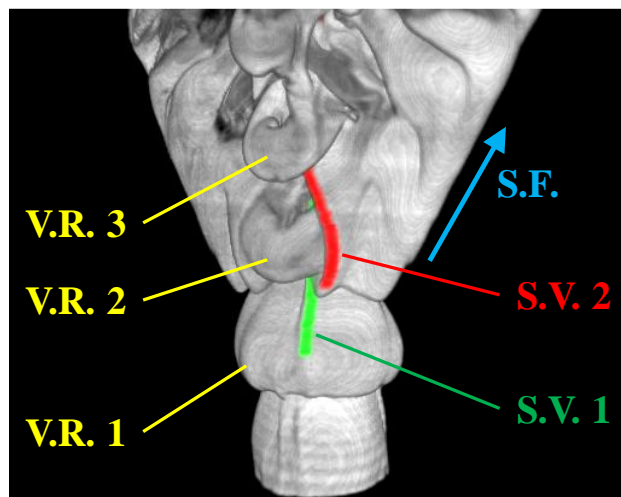


Figure 3. 3D image.

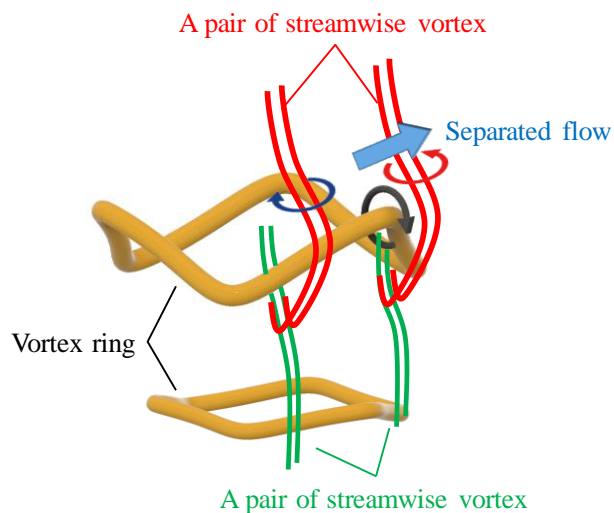


Figure 4. A model of vortex structures and separated flow.

5. 参考文献

- [1] 豊田国昭：「噴流の渦」，日本流体力学会誌ながれ，24，pp.151-160，2015.
- [2] 森隼人 他 3 名：「軸対称噴流中の渦輪と縦渦の干渉」，日本機械学会論文集 B 編，Vol.70，No.697，pp.27-33，2004.
- [3] Muramatsu, A. et al: “Side jets generated in a round helium gas jet”, 2nd International Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows, CD-R, 2008.
- [4] 田中恒平, 村松且典：「渦輪を周方向に変形させた円形噴流の可視化と PIV による計測」，第 47 回可視化情報シンポジウム，2019.
- [5] 川邊健太 他 2 名：「ミー散乱を利用した気体噴流の 3 次元的可視化」，日本機械学会 2014 年度年次大会，2014.