

円形噴流に形成する渦輪列の合体過程の制御 Control of merging process of vortex rings in a round jet

○井上奈穂¹, 村松旦典²*Naho Inoue¹, Akinori Muramatsu²

Abstract: The aim of this study is to control of the merging process of vortex rings in a round jet. The formation and merging process of vortex rings in the natural transition were observed using a planer laser Mie scattering and a high-speed camera. A relationship between the frequency of the pairing process and the Reynolds number is given. It is shown to be able to control the merging process by an acoustic excitation to a round air jet. The acoustic excitation with the frequency of pairing process promotes the merging of 4 vortex rings. The half frequency promotes the pairing of 2 vortex rings. It is considered that the half frequency is the preferred frequency. The excitation using a synthetic wave with two frequencies promotes the merging process of 3 vortex rings.

1. 緒言

円形噴流は最も単純な剪断流れの一つであり、自然現象でも数多く見られ工業分野でも利用されている。噴流の初期領域には周期的な渦輪列が存在することが知られており、それらの合体が起こることにより大規模な渦輪列が形成され、その後崩壊する。加えて、噴流の諸特性（拡散・混合・騒音）は渦輪の挙動と関連が深く、噴流中の渦を制御することにより噴流の諸特性を制御することが可能であり渦構造に注目した研究が活発に行われている^[1]。

噴流の制御には主に受動的制御と能動的制御の2種類がある。能動的制御は工業的にも応用がしやすく注目されており、渦輪の形成は音波を利用した能動的制御を利用するのが簡単であると考えている。

これまでの研究では自然遷移での渦輪の合体過程はレイノルズ数 Re により変化し、中でも Re が 5000 の場合に多くの合体がおき、最大で 5 個の渦輪の合体が見られた^[2]。混合層の周波数が f_v のときに f/N (N は整数) の周波数で励起し、 N 個の渦の合体が促進されると言われている^[3]。

2. 実験装置及び実験条件

噴流の主流方向に擾乱を与えるためにノズル出口直径 $D_0 = 16$ mm, 面積縮流比 17 の円形ノズル下部にフルレンジスピーカー FF225WX を同軸に取り付けている。

まず、自然遷移での噴流の渦輪の合体過程を観察するために可視化実験を行った。噴流のレイノルズ数は 1000 刻みごと 1000 から 10000 の範囲で設定した。空気噴流には微粒子を混入し、厚さ約 1 mm のレーザーシートを噴流の中心軸上を通るように照射し可視化された流れ方向断面をハイスピードカメラで撮影した。

先行研究^[2]と同様に、自然遷移の噴流で最も渦輪が安定して形成され、渦輪の合体も多く起こった Re が 5000 の噴流を音響励起による制御対象とした。実験条件を表 1 に示す。励起周波数は自然遷移の噴流の可視化結果から算出した渦の形成周波数 f_v を基準として $f_s = f_v = 420$ Hz, $f_s = f_v/2 = 210$ Hz, $f_s = f_v/3 = 140$ Hz, $f_s = f_v/4 = 105$ Hz とした。スピーカーに入力する信号波形はフリーソフト (Wave gene) を用いて正弦波を作成し、オーディオアンプで増幅した。

Table 1. Experimental conditions for acoustic excitation with sine wave

Jet gas	Air
D_0 [mm]	16
Re [-]	5000
U_{c0} [m/s]	4.82
f_s [Hz]	0, 420, 210, 140, 105
u'_{rms}/U_{c0} [%]	1, 2

3. 実験結果及び考察

ここでは、渦輪の合体を渦の中心が 1 つだけになることと定義する。自然遷移の噴流では Re が 3000 から 6000 の範囲で渦輪の合体が起こり、最大で 4 個の渦輪の合体が起こった。一度に合体する渦輪は 2 個までで、最も渦輪の合体が起こったのは Re が 5000 のときであった。

Re が 5000 のときに起こった 3 個の渦輪の合体過程を図 1 に示す。このとき起こった 3 個の渦輪の合体のパターンは 2 種類存在し、渦輪を発生順に (I), (II), (III) とすると先に発生した渦輪 (I) と (II) の合体が起こ

1 : 日大・大学院・航宇 2 : 日大・教員・航宇

り、その後(Ⅲ)の渦輪が合体するパターンと先に渦輪(Ⅱ)と(Ⅲ)の合体が起こり、それが(Ⅰ)の渦輪と合体するパターンとなっていた。これ以上下流での渦輪の更なる合体は起きておらず、それぞれの合体パターンが起こった数は同じとなっていた。また、4個の渦輪の合体過程としては2個の渦輪の合体が連続して起こり、その合体した渦輪同士が合体する形となっている。

Re が 5000 の自然遷移の噴流の 0.5 秒間の可視化画像から算出した渦輪の合体位置の分布図を図 2 に示す。なお、4 個や 3 個の渦輪の合体前に起こる 2 個の渦輪の合体についても図示している。渦輪の合体位置は一様ではないが、合体個数の増加にともない、半径方向・流出方向ともにノズル出口から離れている。

次に、自然遷移の噴流の可視化画像から算出した渦形成周波数 f_v を基準とした周波数で音響励起を行った結果を示す。 $f_s = f_v = 420$ Hz (乱れ度を 2%) で励起を行った結果、4 個の渦輪の合体が連続して起こった。合体過程としては、先に発生した 2 個の渦輪が合体しその渦輪後に発生した渦輪 2 個が合体しながらそのまま吸い込まれるように合体していた。渦輪の合体位置の分布図 (図 3) を自然遷移と比較すると渦輪の合体位置がほぼ一定となり、ノズル出口に近づいている。

$f_s = f_v/2 = 210$ Hz で励起を行った場合、乱れ度が 1% と 2% の両条件ともに、2 個の渦輪の合体が連続して起こるようになる。しかし、 $f_s = f_v/3 = 140$ Hz で励起を行ったときには、連続して 3 個の渦輪の合体が起こることはなかった。また、 $f_s = f_v/4 = 105$ Hz では渦輪の合体が不規則に起こっていた。

最後に、合成波で励起した結果を示す。合成波の周波数はそれぞれ、 f_v と $f_v/2$, f_v と $f_v/3$, f_v と $f_v/4$ とした。

f_v と $f_v/2$ の合成波で励起した結果、 f_v での励起結果同様、4 個の渦輪の合体が起こった。 f_v と $f_v/3$ の合成波で励起した結果、3 個の渦輪の連続した合体が起こった。合体パターンは先に発生した 2 個の渦輪が合体した後に、3 個目の渦輪が合体するパターンとなっている。 f_v と $f_v/4$ の合成波 (乱れ度 2%) で励起したとき、4 個の渦輪の合体が連続して起きるようになる。

4. 結論

レイノルズ数 Re が 5000 の円形空気噴流について自然遷移では不規則に連続して発生する渦輪の合体が起こり、一度に起こる合体は 2 個までだが最大で 4 個の渦輪の合体が起こる。

渦形成周波数を基準とした周波数の擾乱を加えることにより渦輪の合体個数を制御できる。

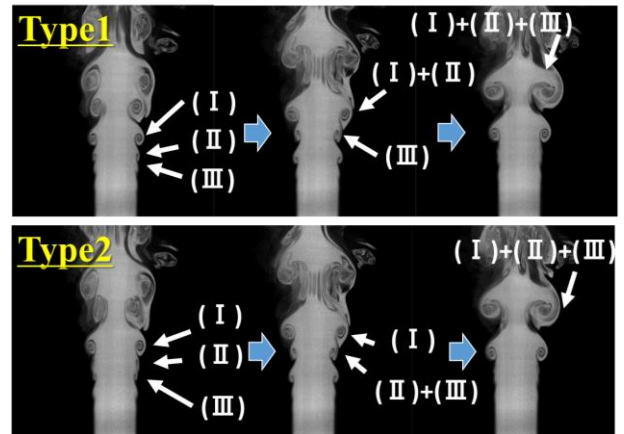


Figure 1. Merging process of 3 vortex rings in the natural transition at Re of 5000

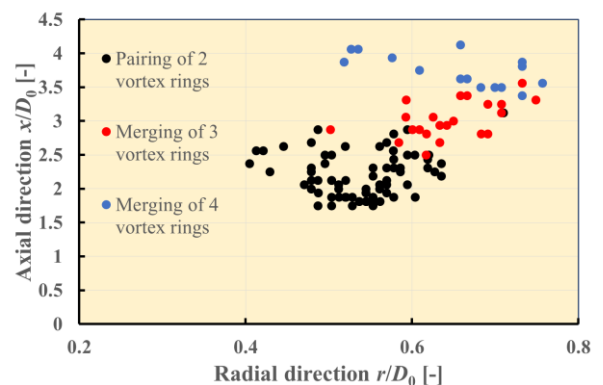


Figure 2. Distribution map of merging positions in the natural transition at Re of 5000

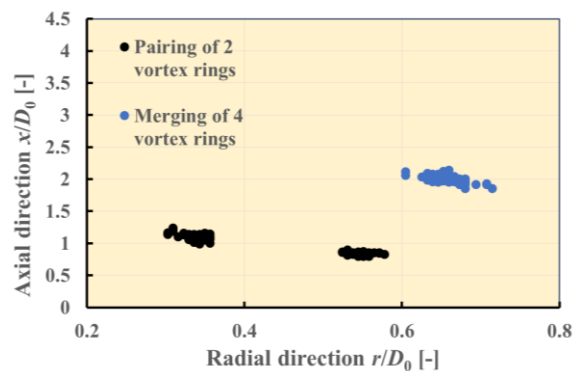


Figure 3. Distribution map of merging positions in the excited jet with the frequency of vortex formation (turbulent intensity 2%)

5. 参考文献

- [1] 豊田 国昭:「噴流の渦」, ながれ, Vol.24, No.2, pp.151-160, 2005
- [2] 園田 祥太:「円形噴流における渦輪の合体過程」, 日本大学理工学部・航空宇宙工学科・卒業研究報告書, 2017