

氏 名	木 綿 隆 弘
生 年 月 日	
本 籍	石 川 県
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 乙 第 130 号
学 位 授 与 の 日 付	平 成 8 年 9 月 30 日
学 位 授 与 の 要 件	論 文 博 士 (学 位 規 則 第 4 条 第 2 項)
学 位 授 与 の 題 目	同 軸 二 重 円 管 噴 流 に 関 する 研 究
論 文 審 査 委 員	(主 査) 岡 島 厚 (副 査) 上 野 久 儀, 新 宅 救 徳 木 村 繁 男, 土 屋 良 明

学 位 論 文 要 旨

Abstract The flow of the double coaxial pipe jets has been studied extensively in this thesis by both experiments and numerical simulations. The studies were concerned with various configurations of the coaxial nozzles and various ratios of inner jet velocity to outer jet velocity, in order to examine the effects of the configurations and velocity ratios on the development of jet flow, the structures of the inner and outer vortices and the behaviors of their interactions in the flow field. The mean and fluctuating properties within the outer and inner mixing region are present. The results of mean and turbulence quantities computed by the $k - \varepsilon$ turbulence models show good agreement with the results of the hot-wire velocity measurements. The results for the numerical simulation and the flow visualization indicate the existence of a recirculating region along the axis of coaxial jets when the ratio of inner jet velocity to outer jet velocity is small. It is found that, for the velocity ratios $\bar{u}_i/\bar{u}_o \leq 0.5$, the values of the Strouhal number St_L based on the pipe length L are constant, and that these values increase in a stepwise manner to the values of integral multiples, with the increase of ratio of the pipe length to the width of annular jet. A fluctuating velocity with strong intensity appears in the nozzle with the pipe lengths of $L/D_o = 0.5$ to 1. The results of measured distributions of vorticity show the coherent structures in the inner and outer mixing regions of the jets and the detailed flow configurations of vortex pairing. For the velocity ratios $\bar{u}_i/\bar{u}_o \geq 0.5$, however, the velocity fluctuation frequency comes from the alternate-shedding of lip wake vortices in the inner mixing regions, and performs in such a way that the Strouhal numbers St_{bi} based on the lip thickness of inner nozzle are constant at 0.2 for any outer pipe length of the jets. Furthermore, this thesis presents the coaxial jet response to forced excitation. It is found that the recirculating region shrinks and moves upstream and the velocity fluctuation intensity is enhanced, which are due to the intensified vortex pairing in inner mixing layer. Turbulence suppression is confirmed to be due to the earlier transition of the shear layer vortices.

1. 緒言

噴流と周囲流れ場との境界に形成される自由せん断層には渦構造が存在し、この渦構造が周囲流体からのエントレインメントや混合に寄与し、さらに騒音の発生源ともなっている。このような噴流の混合過程を明らかにすることは、工業的にはエアジェットルーム、燃焼器、ジェットポンプなどの設計において重要な課題の一つである。

本論文で対象とする噴流は、例えば繊維機械の一つであるエアジェットルームのメインノズルの噴流をモデル化したもので、図1に示すように、噴流中心部に充分発達した速度分布を有する円形噴流とその外周部にポテンシャルコアをもつ環状噴流から構成される同軸二重円管噴流である。本論文では、このような同軸二重円管噴流の混合発達過程を明らかにするため、空気および水による噴流実験、さらに数値シミュレーションによって定常特性やそれぞれの噴流の境界に形成される外側混合層及び内側混合層内に形成される非定常渦構造、そして混合層の相互渦干渉などを研究し、さらに、噴流制御の可能性を調べるため、外側環状噴流に外部強制加振を与え、その影響について検討した。

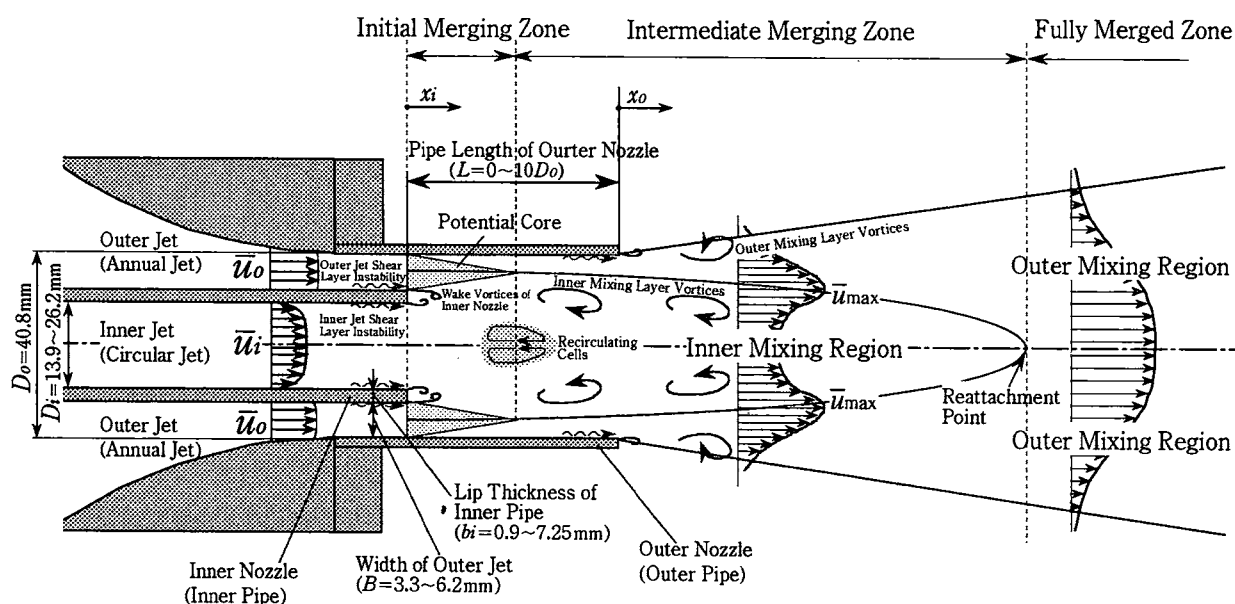


図1 同軸二重円管噴流の流れ場

2. 噴流の時間平均流れ特性

内側ノズル出口付近から完全発達領域に至る広い領域での、外側ノズル長さ L/D_o (L : 外側ノズルのパイプ長さ、 D_o : 外側ノズル外径) が10まで変化した場合の同軸二重円管噴流の流れ場の時間平均流れ特性について、平均速度や乱れ強さの分布、そして、レイノルズ応力分布等を測定し、噴流の広がりや相似性、速度・乱れ強さのピーク値やその位置など、ノズル下流域における混合状態と噴流の発達過程を調べた。速度分布において、外側及び内側混合領域において軸方向平均速度の高い相似性が確認され、円形噴流の分布ともほぼ一致した。そして、速度欠損が回復する再付着点位置は、外側ノズル長さ L に依存せず、外側ノズル出口からの距離 x_o が外側噴流直径 D_o の5~6倍であること、再付着点より下流において広がり角は外側ノズル長さ L に関係なく等しいことなど示した。また、速度変動の乱れには、外側ノズル端より生じる外側乱れと、内側ノズル端より生じる2つの内側乱れがありやその分布状態などを示し、外側混合領域での軸方向速度の乱れ強さ u'_{rms}

の相似性、さらに、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ においては、ノズル出口近傍で $L/D_o=0, 1$ ノズルに若干差異があることなどを明らかにした。

3. 逆流域の形成

内側ノズル出口からの距離 $x_i/D_o \leq 2.5$ のノズル出口近傍の流れ状態を調べ、層流域及び標準 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた乱流域の数値シミュレーションにより、図2に示すように同軸二重円管噴流の内側ノズル出口から離れた位置に逆流を伴う再循環領域が存在することを初めて見出し、流れ

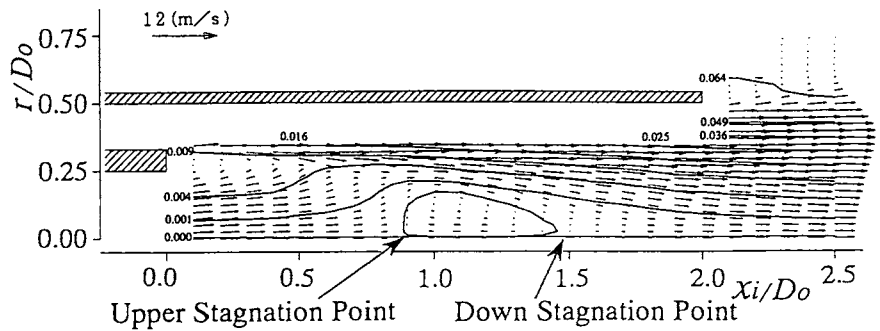


図2 逆流域形成時の流線パターン
($L/D_o=2, \bar{u}_i/\bar{u}_o=0.3, \bar{u}_o=12\text{m/s}$)

方向の順流、逆流の識別が可能な自作のタンデム形プローブによる計測と空気噴流のスモークワイヤ法及び水噴流の蛍光染料注入による可視化実験により検証した。数値シミュレーション結果と実験結果は良く一致し、速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o (=内側噴流中心速度/外側噴流速度)が小さいほど、また、外側ノズル長さ L や内側ノズル肉厚 b_i が大きいほど再循環領域は拡大することを示し、再循環領域の上流よどみ点位置は速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o に、下流よどみ点位置は外側ノズル長さ L に影響することを明らかにした。

4. 噴流中の非定常渦

外側ノズル長さ L 、外側噴流幅 B 、内側ノズル肉厚 b_i のノズル形状と速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o を変えて、せん断層の位置や外側せん断層と内側せん断層の強さを変化させた場合の渦形成に及ぼす影響を調べ、外側混合層と内側混合層内の渦の相互干渉について検討した。

(1)せん断層内の渦 外側ノズルのパイプ長さを変えることにより外側せん断層から生じる渦の発生位置を変え、せん断層内の渦構造を示し、内側混合層と外側混合層の渦との干渉で生じると考えられる外側ノズルのパイプ長さによる渦励起現象と渦構造、卓越周波数との関係を調べた。外側ノズルのパイプ長さによる渦励起現象が生じる場合の速度変動周波数 f は、図3に示すように外側ノズルのパイプ長さ L によるストローハル数 St_L (= fL/\bar{u}_o)値で整理でき、 $L/B=4$ と8付近でステップ状に $St_L \approx 0.64N$ ($N=1, 2, 3$)と L/B に対して変化し、それぞれのモードはノズル内部に1, 2, 3個の渦が形成される流れパターンと対応することを位相平均渦度分布の測定結果から明らかにした。このパイプ長さによる渦励起現象は、速度比が比較的小さい $\bar{u}_i/\bar{u}_o \leq 0.5$ の場合の内側ノズルパイプ端部上面からの片側せん断層の渦が内側混合層内で成長発達し、外側ノズルのパイプ端部からの外側混合層内の渦と干渉することで生じることを見出した。そして、この渦励起現象による渦の軸対称性が強いことを示した。

(2)渦合体现象 混合層内の渦合体と乱れ増加との関係を調べ、外側ノズルのパイプ長さにより励起、形成された外側混合層の渦は、外側ノズル出口近くで巻き上がり、下流域で二つの渦が合体し、外側ノズル出口近くで乱れ強さが増大することを明らかにした。このような渦合体现象は、同一方向の渦から成る外側混合層や $\bar{u}_i/\bar{u}_o < 0.5$ の小さい速度比の内側混合層内において生じ易いことを見出した。

(3) 内側ノズルの後流渦 速度比や内側ノズルのパイプ肉厚をえるることにより、内側ノズルのパイプ端部後流のせん断層から生じる渦の形成状態をえることで、外側、内側混合層内の渦の相互干渉について調べ、同軸二重円管噴流に特徴的な外側ノズルのパイプ長さによる渦励起現象に対する速度比の影響についても検討した。速度比が増加した速度比 $\bar{u}_i/\bar{u}_o \geq 0.5$ の場合、外側ノズル長さ L には依らず、内側ノズルのパイプ端部上下面二つのせん断層による交互渦の流れパターンになり、ストローハル数 $St_{bi} [=f(b_i + \delta^*)/\bar{u}_o \approx 0.2]$ で整理される内側ノズル肉厚に依存する渦周波数になることを明らかにした。そして、速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_o を0~1の範囲で変えた場合、

$\bar{u}_i/\bar{u}_o \leq 0.5$ において外側ノズル長さによるストローハル数 $St_L \approx 0.64N$ で整理される周波数は、速度比の増加に伴い、より高いまたは低い N 次モードへ段階的に変化した後、速度比 $\bar{u}_i/\bar{u}_o \geq 0.5$ で内側ノズル肉厚に依存する渦周波数 St_{bi} になる。

5. 低レイノルズ数域の噴流渦構造

水噴流実験によるレイノルズ数 $Re \leq 10^4$ の層流域の混合層内の渦構造を熱膜プローブを用いた計測や可視化実験からの画像処理により調べた。層流域では外側ノズルのパイプ長さによる渦励起現象は生じず、速度変動周波数は速度比に比例して増加することを明らかにした。そして、渦の三次元構造を画像処理により示し、速度比 U_i/U_o (U_o, U_i : 外側、内側ノズル断面の平均速度)が0.5を境として軸対称モードとヘリカルモードの渦が存在することを見出した。また、図4のように速度比が $U_i/U_o = 0.3$ の層流域での同軸二重円管噴流の渦合体などの流れパターンの様相を数値シミュレーションや可視化実験より明らかにし、乱流域と同様に渦合体現象は $U_i/U_o > 0.4$ で生じ難くなることを示した。

6. 強制加振時の流れ特性

供試噴流ノズルの上流側に配置したスピーカにより外側環状噴流へ加振振動数 $f_0 = 140 \sim 700$ Hz、外側噴流出口の振動振幅が $u'_{rms}/\bar{u}_o = 1\%$ (u'_{rms} : 軸方向速度変動 u' のr.m.s.値)で正弦波振動を与え、平均速度や速度変動の周波数や乱れ強さなどの計測および条件付きサンプリングによる位相平均渦度分布を求め、再循環領域やパイプ長さによる渦励起現象への影響、混合層内渦構造の発達・合体・崩壊過程について、比較的低い速度比 ($\bar{u}_i/\bar{u}_o = 0.15 \sim 0.4$)における同軸二重円管噴流の流れ場に強制振動が及ぼす影響について検討した。

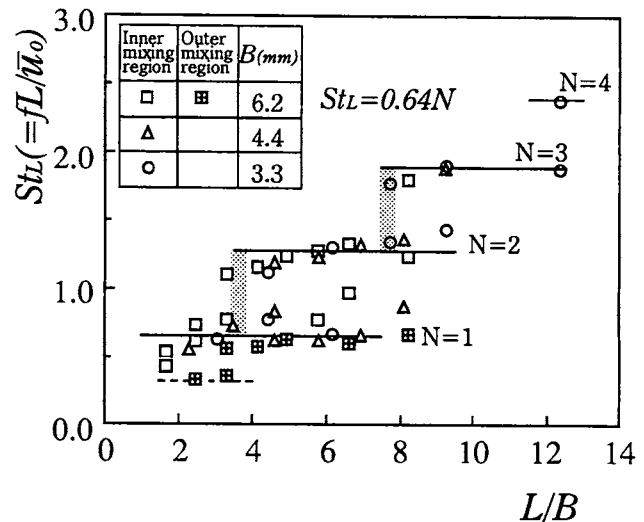
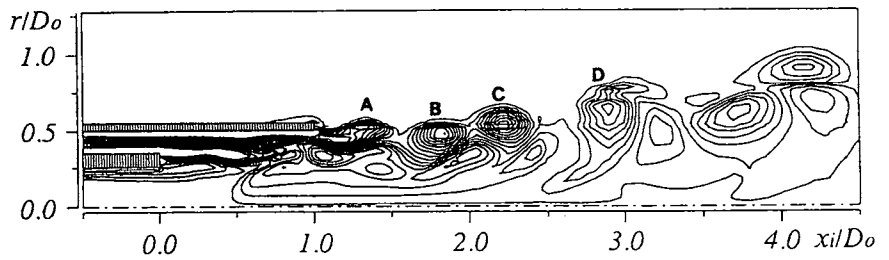
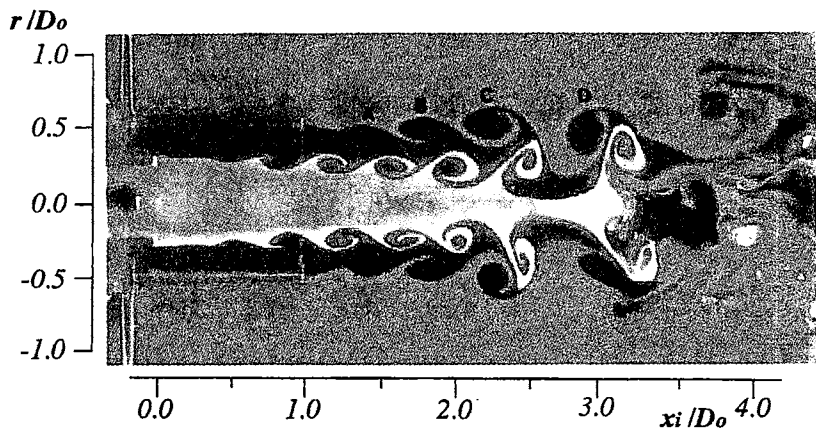


図3 速度変動周波数の変化

パイプ長さによる渦励起周波数 f_L が卓越するノズルにおいて、加振周波数 f_0 が渦励起周波数 f_L の0.5倍以上において強制振動数 f_0 成分が流れ場で優勢になり、強制振動数 f_0 が高いほど上流側で渦合体が生じることを明らかにした。そして、外側ノズル長さ L が小さく加振の影響が外側混合層にも出る $L/D_0=0\sim 1$ ノズルの場合、再循環領域への強制加振の影響が比較的少なく、乱れ強さには外側混合層に強制加振の影響が出るが、加振により乱れの成長、減衰が上流側に移行し、乱れ強さが非励起時より減少する場合は $L/D_0=1$ ノズルで生じた。外側ノズル長さ L が大きく外側混合層に



(a) 渦度分布 (層流計算, $Re=5000, bi/D_0=0.1$)



(b) 可視化写真 ($Re=3000, bi=2.5\text{mm}$)

図4 流れパターン ($L/D_0=1, U_i/U_0=0.3$)

層に加振の影響があまり及ばない $L/D_0\geq 2$ ノズルの場合、加振時に内側混合層内のみ渦合体を促進させることにより、乱れの増加が生じ、再循環領域が縮小することを明らかにした。

7. 結言

本論文は、同軸二重円管噴流が発達する過程における時間平均特性や混合層内の非定常渦構造を詳細に調べ、混合層内の渦形成に及ぼすノズル形状や作動条件の影響について明らかにした。その結果、同軸二重円管噴流に特徴的な逆流現象やパイプ長さによる渦励起現象と渦構造との関係を明確にし、さらに強制加振を与えた場合の噴流流れ場の混合制御の可能性を見い出した。

学位論文の審査結果の要旨

平成8年7月13日、8月9日に、第1、2回学位論文審査委員会を開催し、8月12日口頭発表を行い、同日最終審査委員会を開催した。協議の結果、以下の通り判定した。

申請者は本学工学研究科修了後、引き続き自然科学研究科システム科学専攻に入学し、平成2年3月単位取得満期退学した。申請論文は、エアジェットルームのメインノズルの噴流をモデル化した同軸二重円管噴流の混合発達過程を明らかにするため、空気および水による噴流実験、可視化実験さらに数値シミュレーションを行っている。噴流の流れ場の時間平均流れ特性に関し、ノズル下流域における時間平均的混合状態と噴流の発達過程を解明し、特に、数値シミュレーションにより内側ノズル出口近傍に逆流を伴う再循環領域が形成されることを初めて見い出し、実験と可視化実験により検証した。次に、二重円管噴流のそれぞれの境界に形成される外側及び内側混合層内に形成される非定常

な渦構造，そしてその混合層の相互渦干渉などを研究し，それぞれの混合層内の渦形成に及ぼすノズル形状や作動条件の影響について明らかにした。その結果，同軸二重円管噴流に特徴的な外部パイプ長さによる渦励起現象と渦構造との関係を明確にして新たな渦形成機構を見出し，その構造を明らかにした。さらに噴流制御の可能性を調べるため外側環状噴流に外部強制加振を与え，噴流流れ場の混合制御の可能性を検討している。以上，要するに申請論文は同軸二重円管噴流の混合発達過程を渦の形成とその構造に注目して系統的に明らかにしたもので，今後の噴流の研究とその応用機器の分野に資するところ大であり，博士（工学）論文として値するものと認定する。