

噴流剪断層の攪乱による一共鳴現象*

倉澤 英夫**・山之上寛二***・齊藤 正勝****

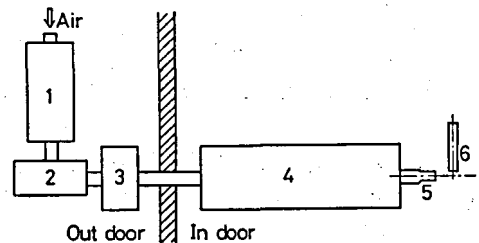
1. 緒 言

音は情報伝達の一手段として重要不可欠なものである反面、社会生活においては場合によって非常に有害なものとも成り得る。このような有害性は一般に騒音公害と呼ばれる言葉で代表され、騒音の低減化が重要となってくる。しかし、具体的に低減化あるいは制御しようとする場合に、その発生機構が明確でないと適切な対策が構じられないといえる。特に、騒音発生の原因として、各種流体機械等に見られるような流れに起因して生じる音に関しては比較的未知な部分も多く、中でも流れが系の音響的固有振動数を励起するような場が存在すると、非常に大きな音が発生し騒音対策上問題になってくる。

そこで、本報では流れに起因して生じる一音響的発振現象に関し、その発生機構を明らかにしていくことを目的として行った。これらに関連して、筆者等は既に一定流速の下で軸対称の噴流中に同じ軸に有限長さの円管を挿入し、そこで生じる共鳴現象に関し若干の知見⁽¹⁾⁽²⁾を得、噴流剪断層中の不安定性の攪乱の発達過程が重要な役割を果すことを明らかにしてきた。一方、前報⁽³⁾においては同様に噴流中にリング状の物体を挿入し、実質上流れに系の持つ音響的固有振動数が影響を及ぼさない場に対する流れの、とりわけ剪断層の持つ普遍的特性を詳細に調べた。ここでは両者の実験結果を踏えて、有限長さの直管を噴流軸と直交して配置し一定流速の条件下で生じる直管の共鳴現象に関し検討した。

2. 実験装置・実験方法

実験装置の全体図を図1に示す。送風機等から発生する騒音をできるだけ除去するために、送風機本体を屋外に設置すると共に、送風機の吸い込み、吐き出し側には吸収型消音器を取り付けてある。作動流体の空気は測定部での温度変化を小さくする目的で冷却器を通過させ、整流格子、金網を通してノズルに導いた。このとき、実験室内の暗騒音の音圧レベル (S. P. L.) は46~48dB であり、自由噴流の音圧レベルは噴流出口端速度 12m/s



2 送風機 1.4 吸収型消音器
3 冷却器 5 ノズル 6 挿入直管

図1 実験装置全体図

* 昭和61年3月13日 日本機械学会 北陸信越学生会第15回学生員卒業研究発表講演会にて発表
** 機械工学科 助教授
*** 機械工学科 教授
**** 機械工学科 技官
原稿受付 昭和61年9月11日

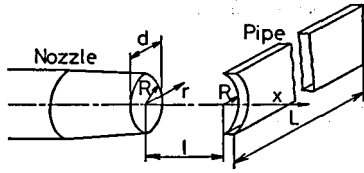
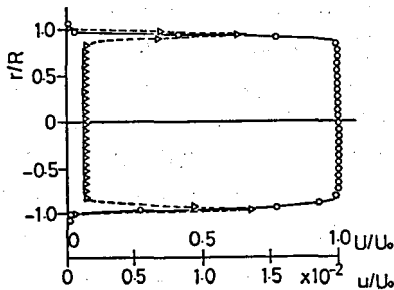


図2 測定部および座標系



○平均速度(U) ▽乱れ速度(u)

図3 ノズル出口端における平均、乱れ速度分布

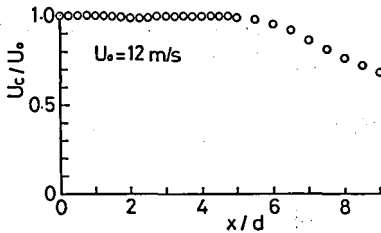


図4 軸上平均速度の軸方向変化

Crow 等⁽⁶⁾の自由噴流の特性結果と定性的に一致している。更に図4は軸上での平均速度 U_c の距離に対する変化を示している。 $x/d \approx 5$ までポテンシャルコアが存在することを示しており、これについても Moore, Crow 等の実験結果とよく一致している。したがって、ここで用いる噴流の特性としては、乱れが小さく、また出口端で一様な流速を持つ極く一般的な噴流であるといえる。

3-2 矩形断面を持つ直管の共鳴現象

矩形断面を有する $L=285\text{mm}$ の直管を図1のように置き、間隙 l を変化させた場合の音圧レベルの変化を図5に示す。管を下流方向に移動させると、 $l/d=0.36$ で急激に S. P. L. が大きくなり極大 P_0 を示し。その後緩慢に減少してくる。更に l を増大させると、再び、 $l/d=0.75$ で S. P. L. の急増 P_1 が現われて減少する。このような繰返し $l/d=2.5$ 程度

で約49dBである。次に、測定部および座標系を図2に示す。ノズル口径は $\phi 28\text{mm}$ で出口前に100mmの直管部を設けてある。挿入直管には2種類の断面形状を選んだ。1つは図2に示したように、先端を半径14mmとノズル半径と同一に加工し、幅6mm、高さ14mmの矩形断面、もう一方は内径28mm、外径34mmの円形断面を持ち、両端を切り落とし、一方の先端部については 6° のテーパ加工を施してある。実験は出口端速度 U_0 を 12m/s と一定にし、直管を噴流軸に直交して置き、かつその先端部が $r/R=1$ の線上に揃えた。測定は $\phi 5\mu\text{m}$ のホットワイヤで速度、1/2インチのコンデンサ型マイクロホンを挿入管後端より300mm、管軸に対し 45° の位置に置いて音圧を測定した。更に、周波数分析には狭帯域の周波数分析器を用いた。

3. 実験結果および考察

3-1 自由噴流の特性

ノズル出口端における自由噴流の平均速度分布、乱れ速度分布を図3に示す。平均速度分布はノズル出口端で、ほぼ一様になっているが、出口前の直管部等の内壁の影響により境界層の発達を観測され、薄い剪断層が存在する。この剪断層は下流に進むにつれて、外側の空気を巻き込み不安定ながらも離散的な大きな渦輪を形成し⁽⁴⁾、いずれ渦輪自身の伸長等により崩壊し、乱流に遷移して行く。また、乱れ速度分布は平均速度分布に対応して、中心のポテンシャル領域では一様でその値は小さく、剪断層部で増大している。このような特性はいずれも Moore⁽⁶⁾

まで観測され、 P_0, P_1, \dots の極大が現われる。そこで、図中の音圧レベルの高い点A、低い点Bに着目して音圧、速度変動の波形を比較した。図6はA点での波形で(a)は音圧、(b)は管の先端より4mm上流側で、 $r/R=1$ 上の剪断層中での速度、(c)は管後端のほぼ中央での速度の波形を示している。(a)、(b)、(c)、ともに周期的に変動しておりほぼ同調していることがわかる。また、(c)の速度波形から管内には周期的な体積流量の変動の存在が認められる。一方図7に示すように音圧レベルの低いB点においても各波形は周期的に変動し、かつほぼ同調している様子が観測できるが、(c)の測定では変動量も小さく、乱れが重なっていることが観測された。図8に図6の(a)、(b)に対するスペクトル結果を示す。図中、(a)は音圧、(b)は速度に対する結果で、速度に関しては最大値を0 dBとした相対レベル(R.L.)で表示してある。前述の周期的な波形を裏づけて、音圧、速度変動とも同じ周波数に卓越したピークがあり、両者の周波数が固定化されていることが認められる。更に、最大の卓越周波数 f_p (以後、単に卓越周波数と記す)に対する2次、3次の高調波もそれぞれに現われている。このとき、卓越周波数は管長から計算すると管の固有振動数の1次成分 f_r の600Hzと一致しており、図5の同位置における音圧レベルの急増は管の共振が生じた結果と理解できる。同様にB点のスペクトル結果を図9に示す。B点においても

卓越したピークが観測され、音圧、速度変動が同調し周波数の固定化が起こっていることが認められる。しかし卓越周波数の680Hzは管の共振周波数の600Hzとは明らかに異なっている。このような共振時、非共振時に対する周波数特性は、噴流速度9.4m/sで噴流軸と同軸に有限長さの直管を挿入した場合にも本実験とは流速、実験系は異なるが、定性的に全く同様の結果⁽¹⁾が得られている。また、キャビティ音と呼ばれる現象においては剪断層がキャビティの後端のエッジ部に衝突して、速度変動の周波数の固定化が生じることが報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾されている。これらから、直管を挿入することにより剪断層中に生じた攪乱が直管の前縁部に衝突し、Feedback作用が働き、攪乱の発生周期の固定化が共振、非共振にかかわらず生じたと考えられる。

図10に卓越周波数の間隙に対する変化を示す。図中の+印は同速度においてリング状の物体を噴流軸と同軸に挿入した場合の卓越周波数の結果⁽³⁾を表わしており、各ステージに代表

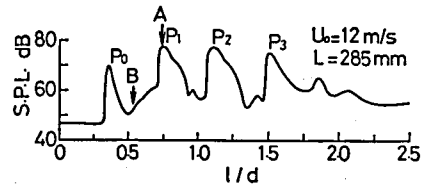


図5 距離に対する音圧レベル変化

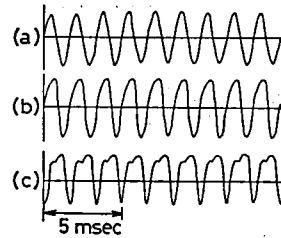


図6 A点における波形

- (a) 音圧波形 (b) 剪断層中の速度波形
(c) 管後端速度波形

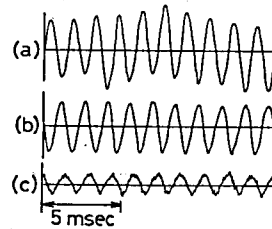


図7 B点における波形

- (a) 音圧波形 (b) 剪断層中の速度波形
(c) 管後端速度波形

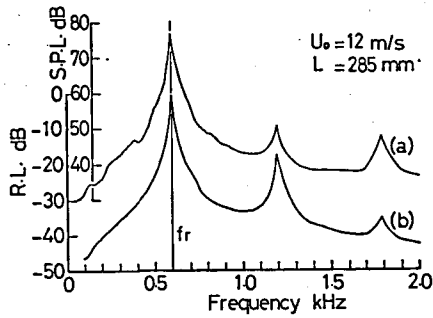


図8 図6における(a), (b)に対するスペクトル。

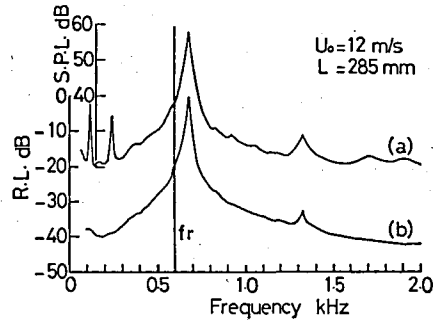


図9 図7における(a), (b)に対するスペクトル。

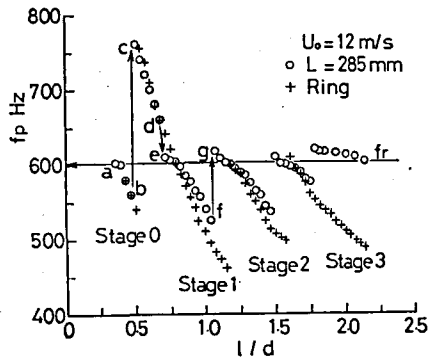


図10 最大卓越周波数の変化

される鋸歯状の变化形態をとる。直交する管の場合には a 点で管の共鳴周波数 fr に一致した値で観測され始め、このとき、音圧レベルは P_0 と急増している。その後、リングの場合に沿って降下し、対応して音圧レベルも降下する。b 点まで降下すると急激に c 点に跳躍し、リングの場合とはほぼ等しい値に移る。更に間隙を増すとリングの場合に沿って降下し共鳴周波数に接近してくると、d 点で急激に fr に引き込まれ e 点に移り共鳴音 P_1 を生じる。その後、再びリングの場合にはほぼ沿って降下し、f 点で g 点の fr に跳躍して共鳴音 P_2 を生じる。このように直管の場合にも卓越周波数は本来的にはリングの場合に沿って変化しようとしているといえ、この値が挿入直管の共鳴周波数に近づくとこれに引き込まれ共鳴音が生じるとみなされる。ただし、この場合にステージ 2 以後への跳躍においては、見かけ上卓越周波数の跳躍点をひとまずリングの場合に沿うものと仮

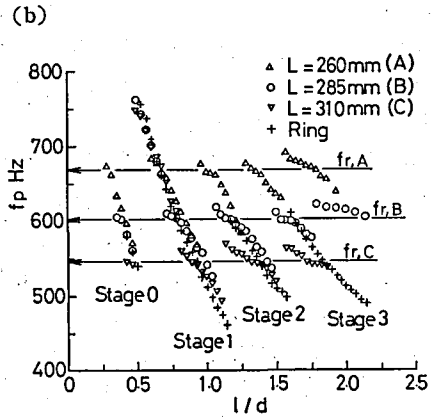
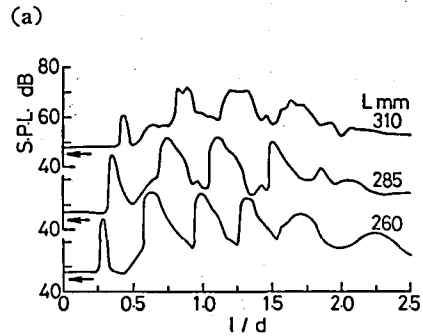


図11 距離に対する (a) 音圧レベル、(b) 最大卓越周波数の変化

想した点で考える必要がある。次に3種類の管長に対する音圧レベル、卓越周波数の間隙に対する変化を図11に示す。いずれの場合も卓越周波数は基本的にはリングの各ステージ、あるいはその延長線上に沿った変化形態をとり、各管長については $L=285\text{mm}$ と全く同様に考えられ、卓越周波数が各管長に対応する共振周波数に近づくと引き込みが生じ、音圧レベルが急増し共振音が生じる。また、音圧レベルの極大位置は管長が長い程下流方向に現われるがこれは次のように考えることができる。管長が短くなると管の共振周波数は高くなっていく。卓越周波数は本来リングの場合に沿って変化すると考えられるので、リングの各ステージ、あるいはその延長線と各共振周波数との交点を考えると、管長が短い程上流側に移動するので、共振発生位置は短い程上流側に移動するといえる。なお、下流方向 ($l/d > 2.5$) に進むと擾乱の周期性は薄れ、流れそのものも乱流に遷移していくと考えられ、このような共振現象は観測できなくなる。

3-3 円形断面を持つ直管の共振現象

ノズルと直管の相対的關係を図12に示す。間隙 l は図中の l_1 で定義した。図13に4種類の管長に対する音圧レベルを示す。矩形断面同様にいくつかの極大が約 $l/d \approx 2.5$ まで存在するが、極大への立ち上がりは矩形管に比較すると急激ではない、しかし、管長が長くなるにつれて極大の発生位置が下流方向に移動していると見られ、矩形管の場合と基本的には同じ現象であることを示唆している。そこで、 $L=311\text{mm}$ の場合における図中のA、B点の波形を観測した。

図14は共振位置A点における波形で (a), (b), (c) に対する測定位置はそれぞれ矩形管の場合と同じであり、各波形いずれも周期的に変動していることが認められる。これに対しB点においては、図15 (b) の剪断層中の速度変動は周期的であるが、大きさは一定しておらずやや不安定である。更に (a) の音圧は周期、大きさ共にかなり変動していると思える。次にA、B点における (a), (b) に対する波形のスペクトルを図16, 17に示す。A点では明確

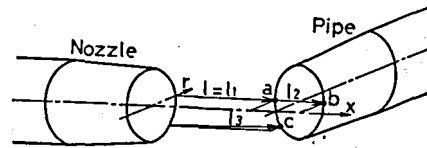


図12 円形断面を持つ管の配置図

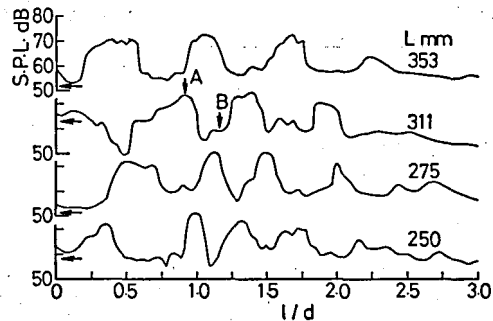


図13 距離に対する音圧レベルの変化

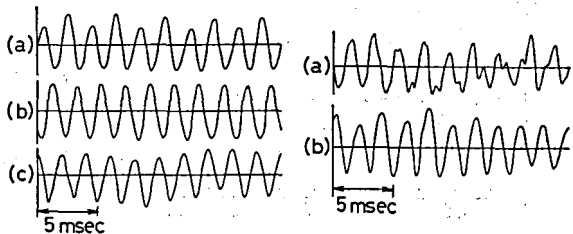


図14 A点における波形 図15 B点における波形

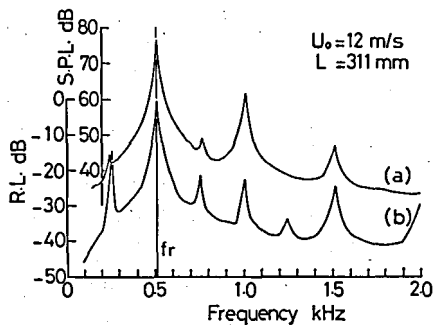


図16 図14における(a), (b)に対するスペクトル

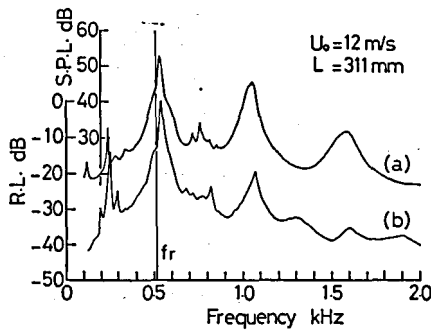


図17 図15における(a), (b)に対するスペクトル

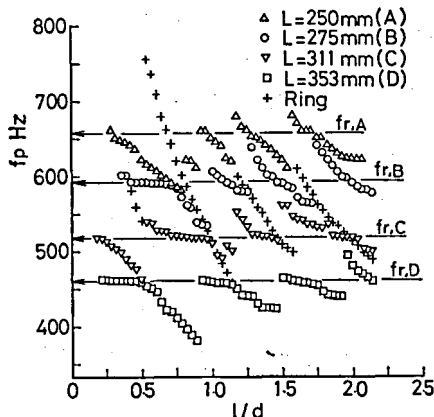


図18 最大卓越周波数の変化

な卓越周波数が現われ、管長に対する共鳴周波数と一致している。一方B点でのスペクトルは変動量もかなり大きく測定誤差も大きくなるが、時間的平均値を持って描いたものである。測定誤差を考慮する必要もあるが、この場合には共鳴周波数と卓越周波数が異っていると考えるのが妥当といえる。以上のことから、共鳴現象の発生として矩形管の場合と同様に考えることが可能であるといえる。波形、周波数のゆらぎが大きく、かなり変動する原因としては次のことが考えられる。卓越する周波数の固定化は剪断層中に生じた攪乱が挿入された物体の前縁部に衝突し、Feed back 作用が働いた結果起こると考えられる。この時周波数の値は間隙1によって決定されてくると推測できる。この1は矩形管の場合には衝突距離として一義的に定義づけられるが、円形断面の場合には図12に見るように剪断層部が挿入した直管のどの位置に衝突するかを一義的に決めることができなく、距離が一義的に確定されないことが、音圧、速度変動に対するゆらぎを大きくしていると考えられる。ただ、比較的大きく影響する因子としては、形状からして図12中のa点での間隙 l_1 、次いでb点の $l_2(=l_1+2R)$ が考えられる。図18は測定値の変動量が比較的大きな場合も含まれるが、ある程度の時間に渡った時間平均で各管長における卓越周波数の間隙に対する変化を示している。矩形管同様にリングの場合に対する結果も示してある。全体的に漸近線の1つとして、やはりリングの場合をとることが可能である。更に、前述の l_2 を考えるともう1つの漸近線が表われることが予測され、図中から対応したものを読みとることが可能と思える。また、各管長に対して、卓越周波数が管長に対応する共鳴周波数に一致した位置では音圧レベルも大きくなっており、直管の共鳴音が生じている。以上のように、円形断面の共鳴現象についても全体的には矩形管の場合とほぼ同様に捕えることができるが、剪断層の衝突位置が矩形管の場合と異なり一義的に定まりにくいいため、全体的に不安定になるといえる。

4. 結 言

軸対称噴流の出口近傍に噴流軸と直交して直管を置き、噴流出口端速度 12m/s の一定下でノズル、直管間の距離を変えて、そのとき生じる音響的発振現象について2種類の断面形状に対し実験的検討をした。その結果、以下のことが明らかになった。

1 矩形管の場合において、噴流の剪断層部が挿入直管の前縁部に衝突し、音圧、速度変動の周波数の固定化が起こる。この周波数(最大卓越周波数)はノズル—直管間の間隙によって変化するが、基本的にはリングの場合に観測された各ステージモードに沿って変化する。

この時、最大卓越周波数が矩形管の音響的固有振動数に近づくと、引き込みが起こり共鳴が発生するといえ、このような共鳴現象はノズル出口直径の2.5倍程度まで現われる。

2 円形断面を持つ管の場合には、剪断層の管に衝突する位置が一義的に定まりにくいいため、全体的に不安定となるが、基本的には矩形管の場合と同様に共鳴現象の発生を考えることができる。

3 共鳴発生位置は、リングの場合の最大卓越周波数の変化形態からして、本実験条件程度の管長に対しては管長が短い程共鳴周波数が高くなるため、上流側に移動するといえる。

最後に、本研究を進めるに当たり、東京大学工学部、平田 賢 教授、並びに同研究室の方々に助言を頂いたことに対し感謝の意を表します。更に、実験に際し協力してくれた本校卒業生の飯森 卓治君、綿貫 克也君に感謝致します。

文 献

- (1) 倉澤英夫・小幡輝夫・平田 賢, 音響学会誌41巻11号 (1985) p. 777
- (2) 倉澤英夫・小幡輝夫・平田 賢・山之上寛二, 音響学会講演論文集, 60-10 (1985) p. 521
- (3) 倉澤英夫・小幡輝夫・平田 賢・笠木伸英, 機械学会論文集掲載予定
- (4) 倉澤英夫・小幡輝夫・平田 賢・笠木伸英, 流れの可視化, vol. 3-10 (1983) p. 21
- (5) C. J. Moore, J. Fluid Mech. 80 (1977) p. 321
- (6) S. C. Crow and F. H. Champagne, J. Fluid Mech. 48 (1976) p. 547
- (7) D. A. Rockwell and A. Schachenman, J. Sound vib. 85 (1982) p. 321
- (8) S. A. Elder, J. Acoust. Soc. Am. 72 (1982) p. 532