

# 噴流せん断層の衝突による直管共鳴音に対する低減法\*

倉澤 英夫\*\*・羽田 喜昭\*\*\*・小幡 輝夫\*\*\*\*

## The method of attenuation for the acoustic resonance of the pipe by impingement of the shear layer of a jet

Hideo KURASAWA, Yoshiaki HANEDA and Teruo OBATA

Self-sustained oscillation of a shear layer occurs in the jet-pipe system when a pipe is placed coaxially with a round jet axis. The velocity fluctuation in this phenomenon comes to have a periodical regularity, and then this phenomenon is accompanied by a pure tone radiating from the leading edge of the pipe. Though the level of this tone is generally very small, a high sound level is produced by the coupling of the acoustic resonance of the pipe to the periodic oscillation of the flow in the jet.

In this paper several methods are proposed in order to attenuate the acoustic resonance produced by this coupling, and the effect of attenuation for various methods is investigated experimentally.

### 1. 緒 言

噴流のような自由せん断層の遷移領域においては、そこに存在するかく乱が下流方向に向かって大きな運動を伴いながら発達して行く。このかく乱が物体に衝突するとき、レベルは小さいがそこから音が発生し、その音がかく乱の成長を制御してくる。両者の間に一つのフィードバックループが形成され、せん断層の自励振動が発生しかく乱の振舞いは周期的になる。このような自励振動現象は従来より数多くの研究結果<sup>(1)~(6)</sup>があり、エッジ音、キャビティ音、せん断層音と称せられる具体例が挙げられる。

このような現象に関連して、丸いノズルから噴出した空気噴流の中にノズルと同径の直管を置くと、噴流速度、直管までの距離によりそこから大きな共鳴音が発生してくる。この音の発生はもととせん断層の流体的自励振動に起因するが、この詳細な発生機構については既に報告<sup>(7)</sup>してきた通りである。

工業的な観点からすると、共鳴音の発生は騒音として捉えられる場合がほとんどである。特に近年掃除機を始めとして各種工業製品では、その性能の一つとして低騒音化が重要な課

\* 平成3年10月 日本音響学会秋季研究発表会にて一部発表

\*\* 機械工学科 助教授

\*\*\* 機械工学科 講師

\*\*\*\* 帝京大学 助教授

原稿受付 平成4年5月29日

題となってきた。また快適な生産環境を維持する場合にも、各種工業装置系で発生する音を制御することが重要である。音の発生は様々な要因で発生してくるが<sup>(8)(9)</sup>、その発生機構はまだ十分明らかでない場合も多く、その防止方法も確立されていない場合も多い。

本研究では、流れの持つかく乱とそこに存在する音響系とによる共鳴音、すなわち前述の円形噴流におけるせん断層の自励振動と直管の音響的固有振動数との相互作用により発生する共鳴音の低減について検討する。ここでは具体的ないくつかの低減方法を提起し、その効果を定量的に比較し、またその原因についても検討を加えた。

## 2. 実験装置および測定方法

最初に発生する共鳴音に対し、具体的な防止方法を取りつけていない系での実験装置について述べる。この実験では音響特性を測定する関係上、特殊な風洞を用いて空気噴流を作り出した。すなわち、通常の風洞では送風機等から発生する各種の音はそのまま気流中に含まれ、騒音レベルの高い噴流になってくる。ここでは送風機の前後に吸収型の消音器を設置し、かつ送風機そのものを実験室外に置くことにより、噴流出口での騒音レベルを極力押さえた。本実験での流速 $9.4\text{m/s}$ を例に示すと、噴流を流した場合と流していない場合の音圧レベルの差は $1\text{dB}$ 以内に留まっている。

このような噴流中に、図1に示すように噴流と同軸に直管を挿入した。ノズル断面は直径 $28\text{mm}$ の円形で、噴流の出口前に $100\text{mm}$ のストレート部分が存在する。このためノズルの管壁で、既に境界層が発達してくることになる。一方、挿入した直管はノズル径と同様に、内径 $28\text{mm}$ で外径は $34\text{mm}$ である。直管の上流側は $6^\circ$ の外テーパで、先端の厚みは $1\text{mm}$ に仕上げてある。この実験で用いた管長は一定で、 $L=390\text{mm}$ を用い、この管長の選択は従来の研究結果<sup>(7)</sup>を背景にして選択した。また、用いた主な記号は図中に示す通りである。以後、図1に示した噴流と直管の関係を基本系と呼ぶことにし、本研究では基本系で発生する共鳴音に対し、様々な防止方法を試みた。

実験はノズル出口流速 $U_0$ を $9.4\text{m/s}$ と一定にし、直管の位置を上流から下流へ移動させた。せん断層中での速度情報に対する測定はI型の熱線プローブを用い、その波形およびスペクトルを調べた。直管への噴流衝突により発生する音は、直管の後端 $300\text{mm}$ の位置に $1/2$ インチのマイクロホン置き、精密騒音計で測定した。なお本実験において、ノズル出口での噴流の持つ特性は管壁部分での境界層部分を除くと一様で、乱れの大きさは通常の風洞と比較して大差ないことを確認している。

## 3. 具体的な防止方法

挿入した直管からの共鳴音の発生原因の一つには、後述するようにノズルから噴出した噴流が、層流からランダムな乱流状態に移行する時に生じる大きな渦形成にある。この渦は噴流のポテンシャルコア領域と外側の静止領域との間に形成されるせ

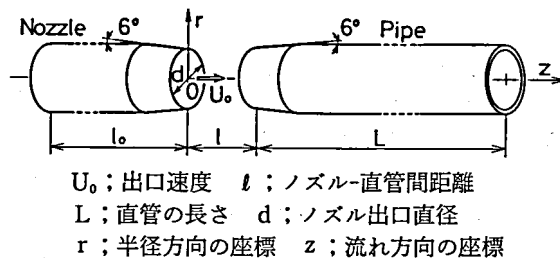
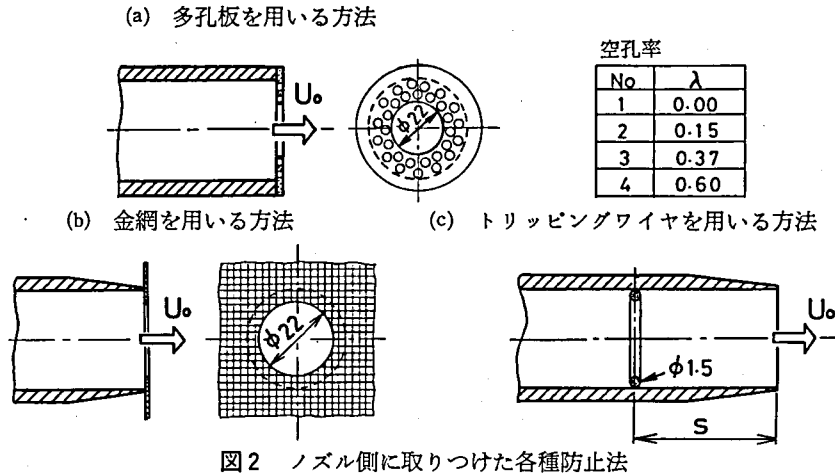


図1 基本になる実験系



ん断層領域に作られ、下流方向に向かって成長する。渦の物体への衝突により空力音が発生し、それがまた渦の発生を制御し、結果として流れが周期的になり自励振動が発生する。更にこの自励振動が、直管からの共鳴音を誘起してくる。

以上のことから共鳴音を防止する一つの方法として、ノズル出口での壁面近くのせん断層領域を何らかの方法で制御し渦の形成に影響を与えることが考えられる。このような考えから、せん断層の振舞いに影響を与えると予測される次の3種類の防止方法を試みた。

#### (a) 多孔板による方法

ノズル出口端に厚さ2.5mmの多孔板を取りつける。寸法は図2(a)に示す通りで、中心部分を直径22mmの穴でくり抜き、残りの部分に直径1.2mmの小さな孔を開けた。小さな孔の部分の割合は、次式に示す空孔率( $\lambda$ )によって定義づける。

$$\lambda = nd_p^2 / (d^2 - d_1^2)$$

但し、 $n$ は孔の個数、 $d_p$ は孔の直径、 $d$ はノズル径、 $d_1$ はくり抜いた穴の直径で、実験は図中の表に示す4種類の空孔率について行った。

ここで中心部分を直径22mmの穴でくり抜いた理由は、渦の形成は噴流の外側領域に限定され、中心部分の流れは直接関係しないこと。更に、中心部分をくり抜くことにより流れに対する抵抗をできるだけ小さくし、圧力損失を小さくすることにある。

#### (b) 金網による方法

ノズル出口端に平織金網を取りつける。この場合も多孔板の場合と同じ理由から、中心部分を放電加工により直径22mmの穴で切り取った。金網は木枠にたるまないように取りつけ、図2(b)に示すよう

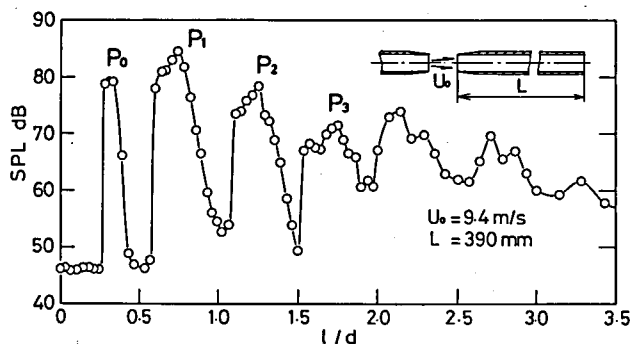


図3 基本系における直管挿入位置に対する音響特性

にノズル端に密着させて置いた。また使用した金網は線径0.2mm から0.4mm の間で10, 20, 30メッシュの3種類を選んだ。

#### (c) トリップワイヤによる方法

図2(c)に示す通り、ノズル内壁に直径1.5mmの針金を環状にして取りつけた。この目的は、ノズル内壁に形成される境界層を層流から乱流に遷移させることにある。取り付け位置はノズル出口端より上流方向に向かって0, 10, 50, 80mmの4種類の位置である。

## 4. 実験結果

### 4-1 基本系における音響特性

基本系における音圧レベルと直管挿入位置との関係を図3に示す。直管を下流方向に移動すると図中 $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ などに示されるように、音圧レベルが急増する位置が現れる。この大きさは流速に依存するが、本実験ではいずれも80dBを越えている。自由噴流の場合あるいは図3でレベルの低い位置ではいずれも46dB程度の値であることからすると、その差は極めて大きい。したがって、このような音が実際の工業装置系の中で生じてくると大きな騒音問題となる可能性がある。

音圧レベルの急増は、せん断層中下流方向に向かって成長するかく乱(渦)と、その直管への衝突によって発生する圧力パルスにより起こる自励振動にその原因がある。自励振動が起こると、さらにそれが直管の持つ音響的固有振動を励起し大きな共鳴音を作り出す。このような共鳴音はまた流れの中により明瞭な渦の存在を伴う。

渦が形成された可視化の一例を図4に示す。可視化はスモークワイヤ法<sup>(10)</sup>によるものである。暗くした部屋の中で、ワイヤに流動パラフィンを塗布し通電加熱により気化させ、それを噴流のトレーサとしてストロボを瞬間的に閃光させ、写真撮影した。実験条件は噴流出口流速9.4m/s、管長380mmでその挿入位置は $l=62\text{mm}$  ( $d/l=2.21$ )である。写真は何枚かの写真を並べたものであるが、大きな渦が形成され下流方向に移動して

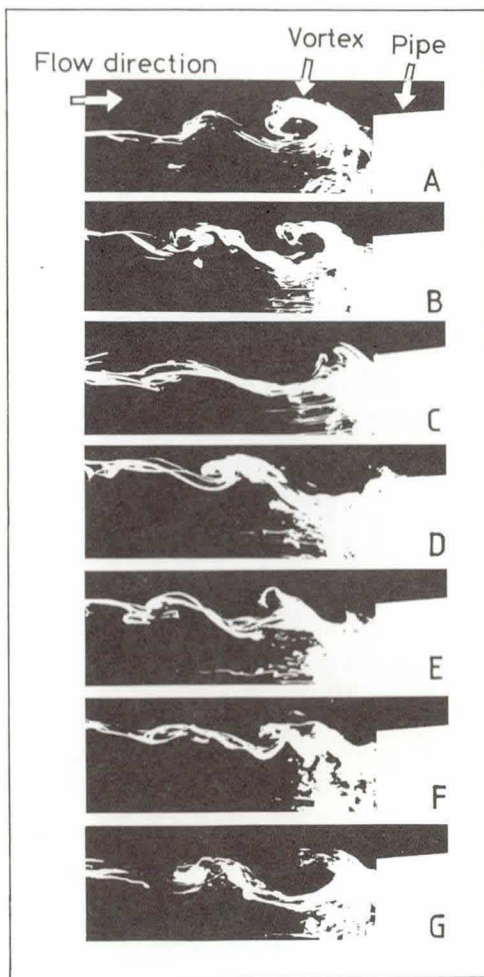


図4 基本系におけるせん断層の可視化  
( $U_0=9.4\text{m/s}$ ,  $L=380\text{mm}$ )

いく様子が理解できる。共鳴の発生により渦が増大させられることも事実であるが、渦が共鳴発生の大きな原因となっている。そこで具体的な防止方法のところで述べたが、可視化結果に見られるような渦形成を制御することにより音の発生が抑制できると期待され、次の定量的な結果を得た。

#### 4-2 各種防止を用いた場合の音響特性

##### (a) 多孔板を用いた場合

多孔板をノズル出口端に取りつけた場合の音響特性の結果を図5(a)に示す。 $\lambda=0$ は、中心を $\phi 22$ の穴でくり抜いただけで小さい孔は全く開いていない。 $\lambda=0.6$ は半分以上、小さな孔を開けた場合である。 $\lambda=0$ では上流側で70dBを越える音圧レベルが存在すると同時に、下流方向の $l/d=0.5$ 以上でも大きなピークこそ出現しないが音圧レベル全体が高い値に留まり、多孔板の効果は小さい。 $\lambda=0.15$ にすると最大60dB以下になり、音圧レベルは大きく減少してくる。しかし、 $l/d>1.3$ での下流域で共鳴音の発生はないが、やはり全体に大きめの値に留まっている。 $\lambda=0.37, 0.60$ とさらに空孔率を大きくすると、両者とも高いピークは出現せず、共鳴は発生してこない。したがって、空孔率を大きくすると、効果的であることがわかる。

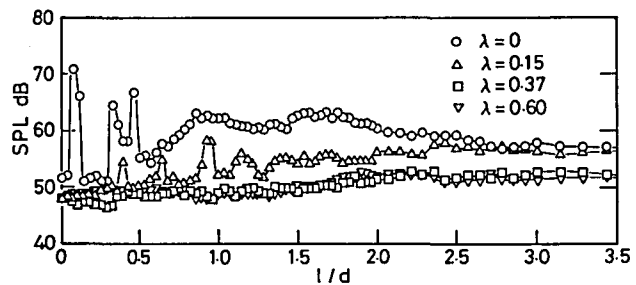
ところで $\lambda=0$ の多孔板の取り付けは、ノズル出口端にオリフィスを有する系に対応づけられる。空孔率が0以外では純粋なオリフィスの特性とは異なっているが、似た傾向を示すことも事実であろう。オリフィスが存在すると、図6に示すように縮流を伴った噴流となって、ノズル出口後にやはり

渦を形成してくると推測できる<sup>(11)</sup>。したがってこのよう

な場合には、図6の破線で示すようにオリフィスの径と同一径の内径22mmの直管を置くと、渦が衝突し大きな共鳴音が発生する可能性を持っている。

これを調べるために、内径22mm、外径26mm、長さ390mmの直管を挿入し、多孔板を取りつけ音響特性を測定した。結果を図5(b)に示す。 $\lambda=0$ および $\lambda=0.15$ では上流側でいくつかの音圧レベルのピークが発生し多孔板の効果は小さく、下流側でもかなり大きな値になっている。 $\lambda=0.37$ と空孔率を大きくすると、 $l/d<1$ では大きな音

(a) 挿入直管内径28mmの場合



(b) 挿入直管内径22mmの場合

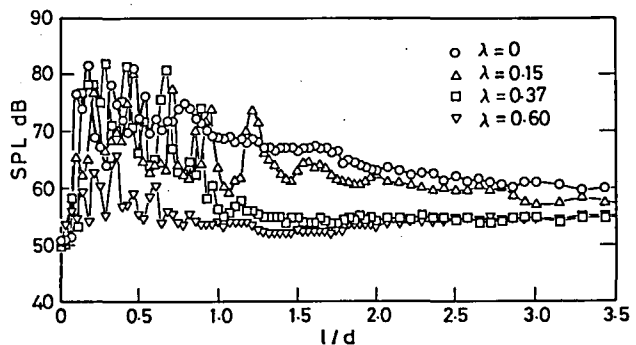


図5 多孔板を取りつけた場合の音響特性

が発生するが、下流域に置かれると音圧レベルは非常に小さくなる。さらに $\lambda=0.6$ にすると多孔板の効果は大きく、上流側でも高々65dBが最大で、他は極めて小さく下流側では全く共鳴音は発生してこない。このように直径22mmの直管では直径28mmの場合に比較すると、多孔板の効果はやや減少することがわかる。より一層空孔率を上げることによりかなり効果を上げられると期待できるが、工作設備等の問題から空孔率の大きなものの制作が難しく、現段階では確認していない。

#### (b) 金網を用いた場合

金網を用いた結果を図7に示す。この程度の目の粗さを持つと、目の粗さに関係なくいずれも共鳴音は全く発生してこない。音圧レベルは、直管の挿入位置に関係なく極めて小さく一定であり、この効果は基本系での音響特性を示す図3と比較するとき顕著である。更に多孔板と比較すると流動抵抗も非常に小さくなり、この点からも優れた防止方法といえる。また、構造状から多孔板のような縮流を起こすこともなく、それによる渦の発生もないと推定できる。

#### (c) トリッピングワイヤを用いた場合

トリッピングワイヤを用いた結果を図8に示す。取り付け位置は4種類である。ノズル出口端に取りつけた $s=0$ の場合では基本系と比較し大きな相違がなく、その効果はほとんどない。これはノズル出口端に小さなオリフィスを取りつけた場合に相当し、やはり縮流によって渦が発生すると考えられる。このため、音圧レベルの低下にほとんどその効果が現れなかったとみられる。 $s=10$ にすると、その効果は極めて大きくなる。ノズル出口端近くに直管が位置するときは多少音圧レベルが上昇するが、その他では一様にレベルが小さくなる。 $s=50$ は、トリッピングワイヤ法の中で最もその効果は大きく、共鳴は発生せず極めて小さな値になる。これはノズル内壁での境界層が、トリッピングワイヤにより層流から乱流に遷移し、ノズル出口でのせん断層部分でのかく乱がランダム化されたためと考えられる。更に $s$ を大きくし、 $s=$

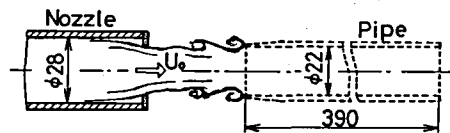


図6 オリフィスによる縮流と渦の形成

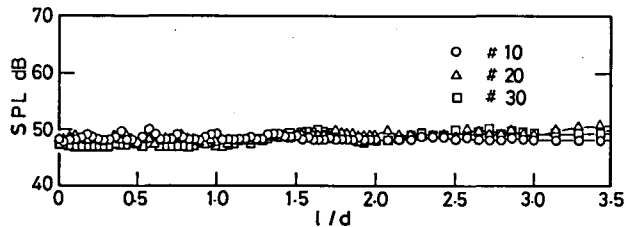


図7 金網を取りつけた場合の音響特性

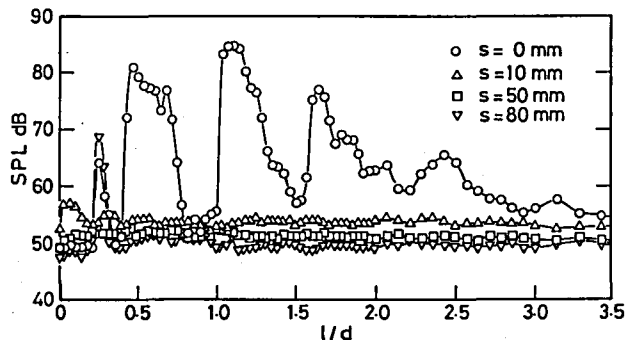


図8 トリッピングワイヤを取りつけた場合の音響特性

80にすると、 $l/d=0.3$ にSPLの鋭い山が出現し、音圧レベルが大きくなる。今の段階ではなぜこのような山が出現するか明らかではない。このように、トリッピングワイヤ法では適切な取り付け位置が存在している。

#### 4-3 波形およびスペクトルの比較

せん断層中（約 $r/R=1$ ,  $x/l=0.5$ の位置）での速度変動をホットワイヤおよび熱線流速計にて測定した。熱線流速計からの出力信号は高速フーリエ変換器に入れ、スペクトル分析を行った。ただし、ここでの窓関数はハニングを用いた。また、直管の挿入位置は、いずれも基本系での音圧レベルが最も大きくなる $l/d=0.75$ に固定してある。

図9に基本系および各防止法を適用した場合での速度の変動波形およびスペクトルを示す。図9(a)は、基本系の場合で $l/d=0.75$ の位置では、図3で示す通り85dBの大きな共鳴音 $P_1$ が発生している。このとき速度の波形は一定振幅で周期的に変動していることがわかる。対応してスペクトルには410Hzに最も卓越した成分が現れ、この高次成分も出現してくる。ピーク周波数の410Hzは、管長から計算される音響的固有振動数と一致しており、共鳴周波数となっている。このように共鳴音が発生している状態では、せん断層のかく乱は周期的に変動し、かつその周波数は直管の固有振動と一致してくることがわかる。更にこの周波数は、図4の可視化結果に示す渦の発生周波数とも一致しているが確認されている。

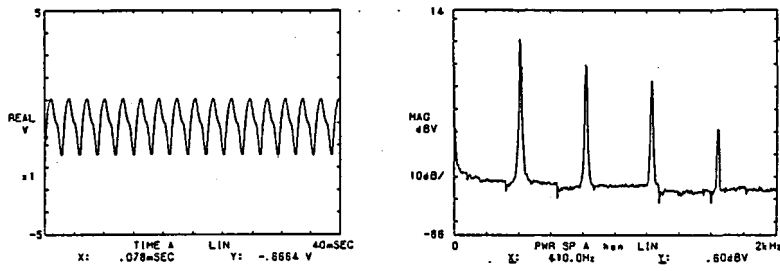
図9(b)は $\lambda=0.6$ の多孔板を取りつけた場合の結果である。速度の波形からは明らかに周期性が観測できない。比較的大きな乱れの中に小さなかく乱が重畳しているように思われる。スペクトル分布では1.2kHz近辺にいくつかの卓越した成分が観測されるが、これが何に原因するか今の段階では確定できない。この点を除くと、波形がランダム化したことに対応し、鋭いピークは存在してこない。

メッシュ20の金網を取りつけた場合の結果を図9(c)に示す。速度波形に周期性が観測されず、ランダムな状態になっていることが認められる。また、多孔板と比較すると高い周波数を持った小さなかく乱の重畳も存在していない。スペクトル分布では、750Hzにわずかに小さな卓越成分が見られるが、その他では210Hzを最大にして右下がりのなだらかな分布となっている。すなわち、特定の変動成分を持ったかく乱が存在せず、周期性が失われていることがわかる。このように、金網によるせん断層中のかく乱のランダム化が、共鳴音発生の防止につながったといえる。

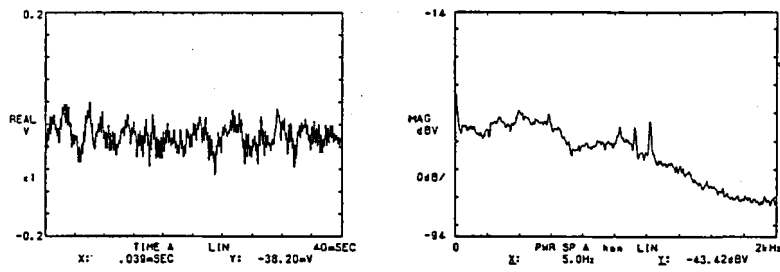
図9(d)は、トリッピングワイヤを $s=50$ に取りつけた場合である。速度波形は金網の場合と同様に、周期性は見られずランダムな波形になっている。更に、スペクトルでも卓越した周波数成分は全く出現せず、195Hzを最大にしてなだらかな分布となっている。これはノズル内壁に形成される境界層が、トリッピングワイヤの存在により層流から乱流に遷移したためと考えられる。このため、ノズルから噴出した噴流の持つせん断層は既に乱流に遷移し、金網の場合と同様にランダムな流れになったと考えられる。

以上各種防止を行った場合、いずれも速度の波形はランダムになり、スペクトルからはほぼ卓越した成分が消え、全体になだらかな分布に移行している。これは共鳴が発生している場合のように渦が周期的に発生し、せん断層に自励振動が起こっている安定した流れとは明らかにパターンが異なっている。このように周期的な渦の崩壊が、共鳴音の発生防止につながったといえる。

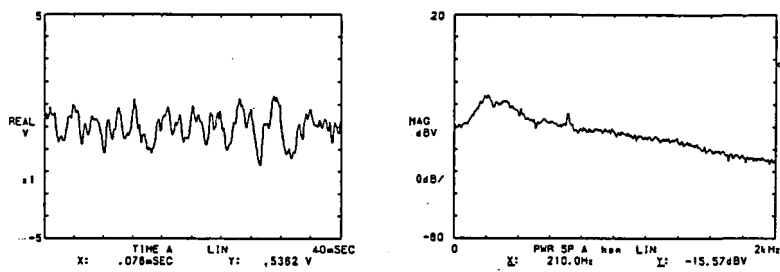
## (a) 基本系の場合



## (b) 多孔板の場合



## (c) 金網の場合



## (d) トリップングワイヤの場合

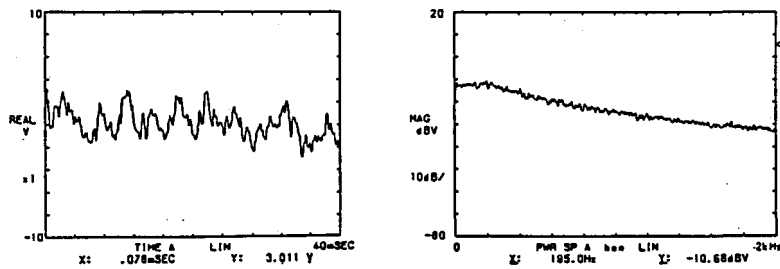


図9 基本系および防止法を取りつけた場合の速度の波形とスペクトル



## 5. 結 言

円形噴流の中に直管を置くと挿入位置により音圧レベルが急激に増大し、直管の管長によって決まる共鳴音が発生してくる。共鳴音の発生位置は、本流速では概ね直径の3倍以内に限定されている。このような共鳴音の発生は既に報告してきたが、噴流せん断層中に形成される渦が重要な役割を果たしている。この事実を踏まえ、具体的に音を低減化するために3つの方法を試み、次の結論を得た。

- (1) 具体的な防止方法として、ノズル出口端に中心部分をくり抜いた多孔板を取りつける方法、同様に中心部分をくり抜いた金網を取りつける方法およびノズル内壁にトリッピングワイヤを取りつける方法を提案した。
- (2) 多孔板の場合には、他の2つに比較するとその効果は小さい。特に空孔率が小さいと悪いが、これを大きくすると効果的であることが確認された。また、空孔率を大きくすることは流動抵抗を減らす上でも有利である。
- (3) 本実験で使用した金網のメッシュサイズでは、いずれも共鳴音は全く発生せず非常に効果的であり、かつ金網は空孔率も大きいことから流動抵抗も非常に小さく、この点でも優れた防止方法であるといえる。3つの方法の中では最も簡単で効果的であった。
- (4) トリッピングワイヤ法ではその取り付け位置により大きく影響され、ノズル出口端あるいは逆にかなり上流に取りつけると効果が小さい。出口端から50mm程度上流に取りつけたとき、最も効果的で共鳴音は発生しなかった。
- (5) 防止策を施し、共鳴音が発生しない場合の速度変動の波形およびスペクトル分析の結果をみると、速度の波形は周期性がなくなりランダム化してくる。対応して、そのスペクトル分布においても大きく卓越した成分がなくなることが確認された。これはノズル出口直後に形成されてくる大きな渦が、各防止法により壊されたためと推測できる。

なお、本研究の一部は、(財)浅間テクノポリス開発機構、平成3年度研究補助金により行われた。関係各位に心から感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) Powell, A. "On the edge tone," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 33. No. 4, 1961
- (2) Rockwell, D. and Knisely, c. "The organized nature of flow impingement upon a corner." J. Fluid Mech., Vol. 93. 1974
- (3) Ziada, S. and Rockwell, D. "Oscillation of an unstable mixing layer impinging upon an edge." J. Fluid Mech., Vol. 124. 1982
- (4) Elder, S. A. "Forced oscillation of a separated shear layer with application to cavity flow-tone effects." J. Acoust. Soc. Am., Vol. 67. 1980
- (5) Hussain, A. K. M. F. and Zaman, K. B. M. Q. "The free shear layer tone phenomenon and probe interference." J. Fluid Mech., Vol. 87. 1978
- (6) 社河内, 伊藤他 "噴流・エッジ系における噴流の発振現象" 日本機械学会論文集, 51巻469号, S 60
- (7) 倉沢, 小幡他 "軸対称噴流一有限長直管の自励振動現象" 日本機械学会論文集, 53巻494号, S 62

- (8) 例えば, 日本音響材料協会編 “騒音・振動対策ハンドブック” 技報堂
- (9) 例えば, 日本機械学会 “機械の騒音発生機構と低騒音設計手法研究分科会” 研究成果報告書  
平成元年4月
- (10) 浅沼強編 “流れの可視化ハンドブック” 朝倉書店
- (11) 日本機械学会 “写真集 流れ” p. 65. 丸善