

# 内面ヒダ付き管の気流音

坂尾富士彦\*

## Aerodynamic sound of flow in corrugated tubes

Fujihiko Sakao\*

### ABSTRACT

Aerodynamic sound emitted by flow through a finite length duct with corrugated inner surface is experimentally investigated. As the mechanism of sound generating oscillation, so far popular "cavity-tone" mechanism was definitely denied. The principal reason is : With corrugation of helical geometry, no characteristic sound came on, while a pair of a nozzle edge and a leading edge both of which are helical, with constant distance, made essentially as loud sound as a pair of normal edges. Other reasons are : Sound level exponentially depends on the total length of the corrugated part, and frequency of principal peak coincide with the estimated value based on corrugation pitch, rather than on the length of recess.

**Key Words :** Aerodynamic sound, External sound, Corrugated duct, Cavity-tone mechanism denied

### 1. 緒 論

かつての一時期、マジックパイプなる玩具が流行した。これは外径は $\phi$  3 cm, 長さ 1 m 足らずの, あまり厚くない軟質のプラスチック管で, 軸に垂直な断面は内外壁とも円である。しかしその直径は軸方向に変化し, 壁内面の, 中心軸を含む断面はピッチ 6 mm, 深さ 3 mm の波状をしている。一端を手で持って振り回すと, 遠心力で生じる気流によって明瞭な共振音が発生する。共振は管内気柱のそれで, 振り回す早さ, 従って流速によって励起される次数, 即ち音の高低が変化し, 一種の楽器のようである。

これについてはずっと以前に「ながれ」誌上の解説 (1) もあるが, 音は「エッジトーンと共鳴による」と云うに留まり, 機構の詳細は触れられていない。筆者には, むしろ「キャビティ・トーンと共鳴」なら, そうかも知れないと思われるが, 「エッジトーン」の語には違和感を感じる (末尾の註も参照)。いずれにせよ, どこで発生した何の変動がどう発達して, フィードバック・ループを閉じさせ自励振動を維持して音を出すのかの詳細には全く触れられていない。

この玩具に限らず, 流路の内面に波状の起伏があると, 流れによって大きな音が発生する場合がある。壁の内面に管を並べた形式の熱交換器で, ある条件の下では音響共鳴も手伝って, 甚だしく大きい音が発生する実例も報告されている (2)。天然ガスを送る管の内面にヒダがある (蛇腹?) ために大きな音と振動が生じる恐れがあり, その研究に取り組んでいる人もいると, 伝え聞いた事もある。ヒダ付き管の気流音が工学や現場でも重要だとは, ずっと古くからも (3) 云われている。

ヒダ付き管の気流音に就いての研究は筆者の知る限りでは, 特に近年のは多くない。古いのが, 数少ない実験研

究の一つ (3) では, 或いは軟質の管をヒダ付きに加工し, 或いは異なる直径の穴を開けた板多数を重ねて「ヒダ付き管」状の流路を構成して, 発生する音を測定し, 各種のパラメータとの関連を調べている。実験, 特に後者の方法での実験には非常な労力を要したと思われるが, 音発生の機構は解明されたとは云い難い。音の周波数と実験条件の関係その他は示されているが, 音発生の機構そのものにはあまり関心がないようにも見える。また, 実験結果には互いに矛盾するものが多いと述べている。矛盾の原因は云う迄もなく, 機構の理解が不十分なために, 異なる結果に導く因子を見落としているためであろう。

近年になって倉澤ら (4) は, 表面にヒダを付けた円柱を平滑な円管内に挿入して, 中間の環状領域の気流により発生する音を調べ, 熱線風速計による風速変動の測定結果とも比べた。風速変動の測定は音発生機構の解明には極めて有益であるが, 出口付近を除いてヒダ付き管内部で行うのは一般には極めて困難である。然るにこの方法でなら比較的容易に実行できる。模型製作も格段に簡単であり, 非常に賢明なやり方と思われるが, たとえ環状の2重連結領域での現象が, 本来の円, 単連結領域での現象と同じか, 我々に未知の機構がその影響を受けないか, 筆者は一抹の不安を感じる。なお, ヒダの断面は丸みがなく角ばっており, ピッチが 6 mm から 20 mm までに対して凸部は 2 mm と一定で, 凹部の割合が大きい。

文献 (3), (4) の著者らは, 音発生の機構はキャビティ・トーンと同じと考えているようである。即ちヒダの凸部から剥離した気流剪断層が, 剥離時に音 (又は疑似音波, 或いは流体力学的変動) の影響を受けて過度変動を生じ, それが発達しながら移流して下流の凸部との相互作用により過度変動を再生すると同時に音 (又は疑似音波など) を出すと云う, 最も素直と思われる考え方であ

\* 自宅 : 広島県 廿日市市 阿品 3-6-20 〒738-0054

e-mail : sakao-f @ lime. ocn. ne. jp

る。ただ(4)では、風速による周波数の増減などが予想通りとしているが、周波数の値そのものの、実測値と予想値の比較は筆者の気付いた範囲では行われていない。

(3), (4) 両者とも、筆者の実験(後述)の特に重要な要素である螺旋状のヒダでの音は全く対象外である。

ここに報告する筆者の実験は、ヒダ付き管の気流音の発生機構・音発生に導く自励振動の機構の、所在場所を含めた探究を直接の目的として始めたもので、可能ならその制御も目的に含まれる。実験対象、少なくとも出発点としては、かつての「マジックパイプ」その物を選んだ。但しその手持ちは1本のみで、今日では同じ物は探しても見付からないので、それを加工し変型するのは躊躇せざるを得ない。長さや配置その他の条件を自由に変えて実験できるよう、実質的に同形の物を自作する事から始めた。

その過程で、マジックパイプが広範囲の条件下で確実に音を出すのに、一見同等な自作品では音の発生自体が容易でなかったのを初め、色々な困難に遭遇した。しかしそのお蔭で、ヒダ部分の全長が音の大きさを決める最も重要な因子であるとの発見もできた。また代用品を探す過程で、ヒダが螺旋状であると音が(容易には)発生しない事実も見出し得た。

## 2. 実験方法

管を通る気流を発生させるには、下流の出口側から吸い込むのが本来は望ましく、その準備も進行中であるが、

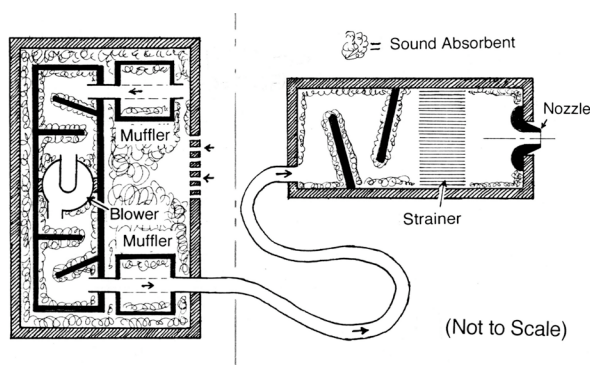


図1. 静かな空気流の発生装置。

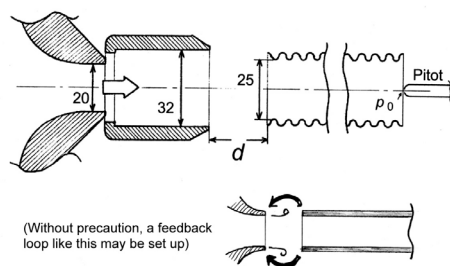


図2. 噴流出口の問題と対策。

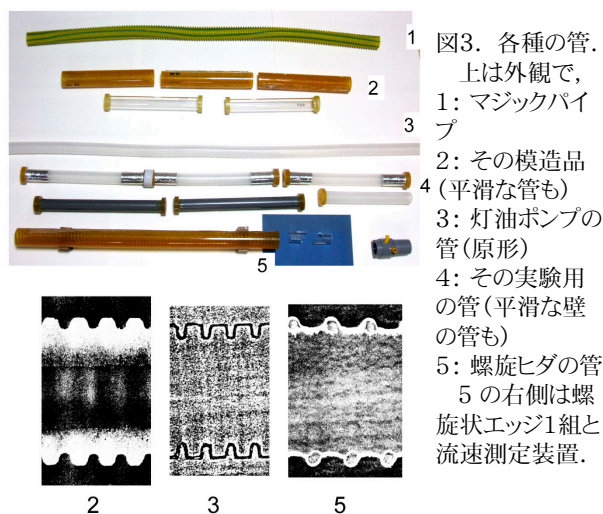
今回は簡単な、上流側から噴流を吹き込む方法を採用した。

外周・風路いずれからの騒音をも遮断する対策を施した「送風機箱」からの気流を、蛇腹管と集合・遮音箱を通して円形ノズルに導く(図1)。ノズル関連の部分は図2に示す。ノズル出口内径は20 mm, 出口直後の剪断層は層流であり、自由噴流の状態では耳では何の音も聞こえない。このまゝで下流に管を置くと、図の下方に示すように層流剪断層内の変動と管の入口縁との相互作用による強力なフィードバック発振と音が生じて研究対象の音を隠しかねない。それを防ぐため、ノズル出口を囲んで少し太い、内側に輪型の突起がある短い管を、隙間を置いて取り付け、剪断層を乱して層流でなくした。流れは乱されると同時に拡がり、下流の管の外側にも回る。発生する音は、管の内部を通り抜ける気流とヒダの相互作用によるもののみと考えられる(後述の実験結果により証明される)。

現象に取って重要なのは管内部の流速であるから、出口断面中央に全圧管を設けて流速を測った。そこでの風速は最大20 m/sである。出口での全圧はノズル上流の淀み点圧力の半分弱であった。

実験対象とする内面ヒダ付き管の中で、「マジックパイプ」は全長86.5 cm, 最小内径25 mm, 最大内径31 mm, 長さ86.5 cm, 内面の起伏はピッチ6 mm, 高さ3 mmである。ヒダの断面は長方形の角を丸めたものの組み合わせに近い。凸部と凹部の長さは近いが、凹部の方が少しだけ短い。これらの点は文献3)とも4)とも異なる。

前述のように今日では「マジックパイプ」は手に入らず、唯一の手持ち品は加工したくないので、似た形状の代用品を作った。工作の都合上、縦に2つ割りにした各部分を作って合わせ、接着した。1個の長さは約22 cmと短い。複数個を縦に接いで長くできる。内径も、内面の軸



下側は2, 3, 5各々の断面形状。

2(模造マジックパイプ): 最外側の黒い部分が管壁。最小内径25.0 mm, ピッチ6.0 mm, 凹部の長さ約4.0 mm。  
3(灯油管): 黒い太い輪郭が管壁。最小内径21.0 mm, ピッチ4.9 mm, 凹部の長さ約3.5 mm。



方向形状もマジックパイプのその忠実な再現を意図したもので、計測上は差が認められない。内面が平滑な直管（内径はヒダの最小内径に等しい）をも用意し、それらを組合わせて3本合計で長さは65ないし72 cm、内面全部ヒダ付き、上流または下流側の1/3 或いは2/3 がヒダ付き、などと変えられる。

後に市販の大形灯油ポンプ用のホースで、径はやゝ小さいが似た断面形状のヒダ付き管があるのを発見し、同様な模型を作った。以上各種の管の外観と断面形状を図3に示す。後に述べる螺旋ヒダ管のそれも一緒に示してある。

マジックパイプの内面に薄いシートを円筒状に巻いて入れれば、ヒダを被って平滑な内面にできる。これも全長の1/3 づつ変える。シートは薄く遮音が幾分不完全かも知れず、実 最小内径 効的に内面の音吸収を増加させた可能性も不用意には否定できない。

発生する音は、噴流ノズル出口の横、中心軸から20 cm の位置に公称径 12.7 mm の計測用コンデンサマイクロホン置いて測る。主な検討対象は音のパワースペクトルである。実験室は無響室ではないが、音源とマイクロホンの距離が他の物体とのそれに比べて小さいので、反響の影響は大きくはないと考えられる。なお、20 cm の距離は周波数 300 Hz での近傍場限界の目安に等しい。対象周波数は概ね 500 Hz 程度以上なので、20 cm は最適に近い選択であろう。

熱線風速計による速度変動の測定は行っていない。

### 3. 実験結果と検討

実験の初期、マジックパイプは容易に音を出すのに、その模型では、内面の寸法や形には測定できる限り差が認められないにも拘らず、同じような音はなかなか発生できなかった。いろいろな工夫の後、小さい差はなお残るが、かなりよく鳴るようにできた。鳴らなかった原因の1つは、2つ割りの形で作った模型の合わせ目の密封が僅かに不十分で、音の洩れにより共鳴が弱かったためと推定される。見た目には隙間のない合わせ目全部にコーキングを施すと音が大きくなった。他の1つは、後に示すように発生する音はヒダの全長が長いほど大きい事で、製作の都合で短い模型を個別に試験すると音が出難かった訳である。

図2に示す剪断層を乱す工夫の結果、ノズルから管の入り口までの距離は、実験した範囲(20–50 mm)では、発生する音に殆ど影響しなくなった。即ち、純粋に管内のヒダによる音が対象である。

音のパワースペクトルの例を図4, 5に示す。横軸は周波数で0~5 kHz の直線目盛、縦軸はパワースペクトルレベルで10 dB/div の対数目盛である。鋭いピークは管内気柱の共振によるものである。但し周波数は、これ迄に発表した結果(5–8)でもそうであったが、開管の共振周波数より少し低い。開口端の補正、内部気流による共振周波数の低下を考慮してもなお少し差が残るが、理由は分からない(ヒダによる低下の有無は考慮していない)。

図4は全長の2/3 がヒダ付きの場合で、ヒダ部分は連続しており、平滑な1/3 の部分が一方の端にある。上側の図はヒダ部分が上流、下の図は下流の場合の音のスペクトルである。両者の差はほとんど無い。前者だけ周波数2.5 kHz の

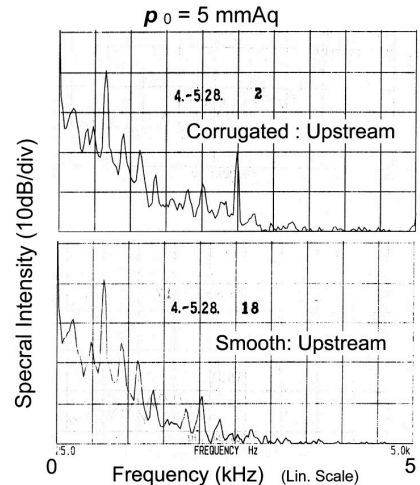


図4. 音のスペクトルの例と、ヒダの位置の影響の例。模造マジックパイプ、全長712 mm の端から約2/3 がヒダ付き。

辺に原因不明のピークがあるが、その他は驚くほど一致している。但し常にこれほど一致はしないが、若干の例外を除けば差は小さい(この差には後に再び触れる)。この点は Petrie ら(3)の主張と異なる。

この例で最も顕著なピークの周波数は約650 Hz である。風速は5 mmAq に相当して9.02 m/s であり、剪断層内の変動の移流速度はその約1/2 とし、 $f = u/d$  の  $d$  としてヒダのピッチ6 mm を取って推定した値は約750 Hz で、管内の流速分布を考慮すれば、両者の一致はよいと云えよう。

以下では主としてスペクトル中の最も高いピークのレベルの、条件に依る変化を調べる。これには、固定された周波数での共鳴と、流速などの条件で変化する特徴的な周波数との関係が影響するので、例えば流速を上げると却って下がる等の事があり(図5)、ピークのレベルを正確に把握するのは困難な筈であるが、実際には多くの場合、あまり問題なく見定める事ができた。

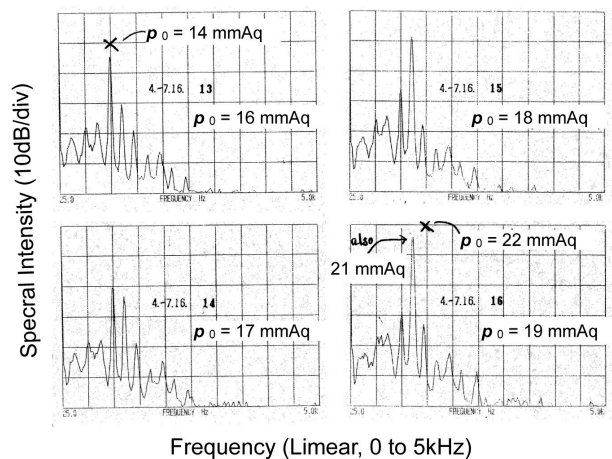


図5. 流速変化によるピークの位置及び高さの変化例。模造マジックパイプ、全長652 mm ヒダ付き。

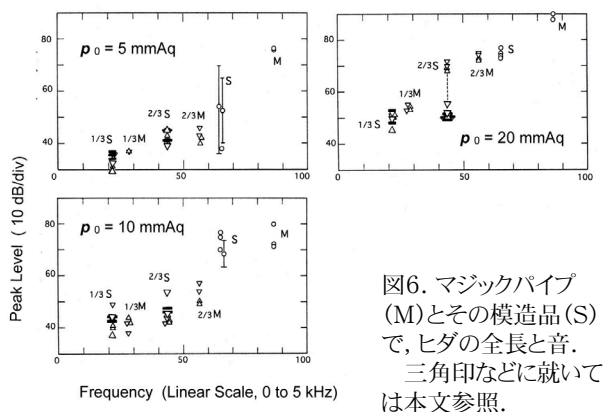


図6. マジックパイプ (M)とその模造品 (S) で、ヒダの全長と音。三角印などに就ては本文参照。

Petrie ら (3) も、模型のヒダの総数が多いと音が大きいと報告しているが、図など具体的なデータは示していない。筆者はこれ迄 (5-8) も、ヒダ部分の全長が長いほど音が大きいと主張してきたが、今回は今迄無かった条件での結果も付け加え、図6, 7 に示す。

これらの図の縦軸はスペクトル中の最高ピークのレベルで、10 dB/div の対数目盛り、横軸は縦に何本か接いだ管の、ヒダのある部分の長さの総和である。図6 中の記号「M」はマジックパイプ、「S」はその模造管、先頭の例えば「1/3」は、全長の約1/3がヒダ付きである事を示す。円はヒダが全長にわたる事、三角形はヒダが上流、逆三角形はヒダが下流であることをそれぞれ示す。文献 (3) とは逆に、ヒダが下流の方が小さい差ながら音が大きいとの傾向がはっきり見られる。黒く塗りつぶした長方形 (或は横線) はヒダまたは平滑部分が中央にある場合を示す。それに合わせての再実験の結果は、少し大きい三角形で示してある。

配置が上下流に対称でも、どちらか一方に寄せた配置でも、あまり大きな差は無いように見える。

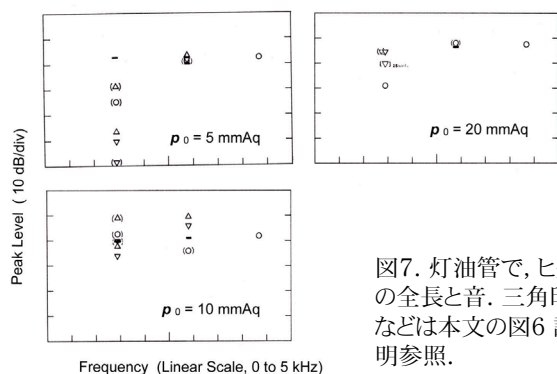


図7. 灯油管で、ヒダの全長と音。三角印などは本文の図6 説明参照。

図7 は別の、灯油ポンプのホースから作った模型 (内径はやゝ小さい、図3 参照) での結果である。この場合は上述とは逆、文献 (3) と一致して、ヒダが上流の方が、その逆よりも音が大きいようである。その差が大きい場合もあるが、それはデータの散らばりが大きいケースに限られる事に留意すべきである。

### 3.1 音の発生機構

かつては筆者も、いわゆる Cavity Tone と同様に、多くのヒダの一つ一つの凹みで、山の頂上で剪断層が剥離と同時に音 (など) で変調され、発達した変動が下流の山と相互作用して生じるフィードバックが基本と考えていた。発生する音の周波数は各々のヒダについての  $u/d$  で決まるが、ヒダ表面の流速は下流ほど減少するので、大抵の流速でどこかに管の共鳴に都合の良い  $u/d$  の部分があり、大きい音を出すと考えていた。一部にだけヒダのある管を作ったのも、この事を確かめるためであった。処が実験の結果は、位置に関係無くヒダの総数が音の大きさを決める。本物のマジックパイプでも模型でも同様に、ヒダが全長の 1/3 より 2/3、更にそれよりも 3/3 の方が、同じ流速ではずっと大きい音が出る。ピークの高さは流速によって変る  $u/d$  と、管の共鳴周波数との関係で微妙に変化するが、おおまかに云えばヒダの全長が 1/3 増すごとに 20 dB づつ増加する。また、3/3 以外の場合、ヒダを上下流のいずれの側にするかによっても大差は無いと見られる……例外はあるが。違いはデータの散らばりの大きい箇所でも 10 dB 以下で、ヒダの長さによる違いに比べれば小さい。

ヒダの長さが全長の 1/3 づつ増える毎に音が 20 dB づつ増える事実からは、ほぼ全てのヒダが音の発生に寄与する事、しかも、各部分が独立に出す音が合計されるのではなく、全体が一つの増幅器のような作用をすると考え他はない。

周波数についても、図4 の所で例示したように、音の最大ピークの周波数は、 $u/d$  の  $d$  としてヒダのピッチを取って推定した値に近い。実測値が少し低いのは、ヒダ表面の風速が主流より低い事を考慮すれば理解できる。ピッチでなく凹部の長さに基づく推定値は 1.5 倍になり、合うと見るのは無理である。個々の凹部のキャビティーンと考えるのは、この点からも無理であろう。

### 3.2 螺旋ヒダ付き管の実験

音が、ヒダの凹部のキャビティーンではないとの筆者の主張の、最大の論拠は図8 以下に示す螺旋ヒダ付き管の音の実験結果である。マジックパイプの代用品を探

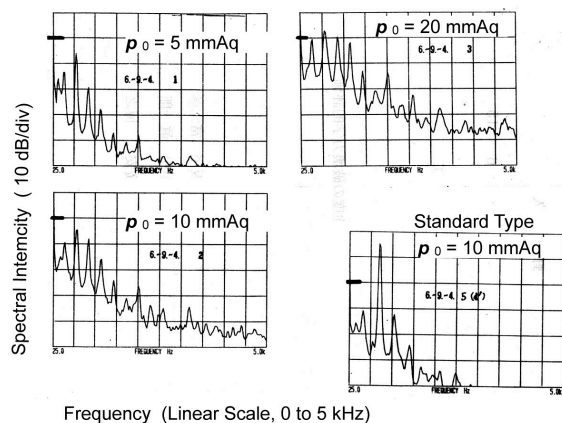


図8. 螺旋ヒダ管と、通常のモデル管 (右下) の音の比較。縦軸上の太い横線は同一レベルを示す。



す過程で、掃除機や洗濯機の螺旋ヒダ状のホースは、流れによる音を出さない事は直ぐに分かった。しかし、内面のヒダは外形ほど深くないので、これだけで断定するのは躊躇われた。そこで洗濯機のホースの周囲にエポキシ樹脂を鋳込んで内面が充分に凹凸の大きい螺旋状のヒダである管を作って実験した結果が図8である。この管の断面も図3に示してある。

図8で、縦軸上の太い横線は同一レベルを示す印である。4つの図の内、右下のみはマジックパイプ模型の結果で、同じ風速で螺旋管より 20 dB も大きい音を出す事が分かる。比較模型は長さ約 215 mm、螺旋ヒダ管は 557 mm であり、図6、7の議論を参照すれば長さの違いで更に 20 dB 以上増加して当然とも考えられ、「螺旋管では音は出ない」と云っても大過ないであろう。

図9は、これと対比される螺旋状エッジの音の実験結果である。噴流を作る円形ノズルの下流に、軸に垂直な前縁を持つ円筒を置けば、両者間の剪断層内の渦度変動と前縁の相互作用を含むフィードバック発振により音が生じ、管の共鳴と周波数が一致すれば大きな音になる事は周知である。そのノズルの縁と管の前縁を共に螺旋状にし、両者間の距離は一定に保つ。その結果の例が図9の上2つで、下は垂直縁の結果の例である。種々な事情で、実験条件の対応は正確でないが、少なくとも大雑把には、ノズルと縁が螺旋状でも垂直縁に遜色ない音が発生し得ると云えよう。然るに、螺旋状ヒダの管では音が殆ど出ない。個々のヒダの間の剪断層が発振の主役ならば、それはあり得ない筈である。

### 3.3 高速の気流の場合…周波数はピッチが支配

図10、11は大きい風速での音の例である。これは図1.2の装置ではなく、可変速の掃除機を利用して吸い込む方法によった。掃除機自体の騒音は管の音に比べ

て小さくデータには影響しない。風速は途中に、中心軸上にピトー管を持つ短い管を挿入して測った。

図10、11の左上は長さ 215 mm のマジックパイプ模型、左下は灯油管を用いた 290 mm の管、右上は長さ 557 mm の螺旋ヒダ管の結果である。（風速に対応する全圧は各データに記入）。ここでも螺旋管の音は他よりずっと小さい。

この配置では共鳴の影響は小さく、音の周波数は風速と代表長さに基づく一つが主である。風速が大きく管は比較的短いのでほぼ全長が「入り口付近」の流速分布と考えられる。螺旋管以外の2つに就いて、 $u$ （移流速）として中心風速の 1/2 を、 $d$ としてヒダのピッチを採った  $u/d$  を周波数の推定値として実測値と比較する。なお、凹部の長さを  $d$  としての推定値を（）内に示す。結果は、

マジックパイプ模型では

推定 2852 (約 4300) Hz と実測 3300 Hz (図10)、

同 4034 (約 6050) Hz と 4350 Hz (図11)、

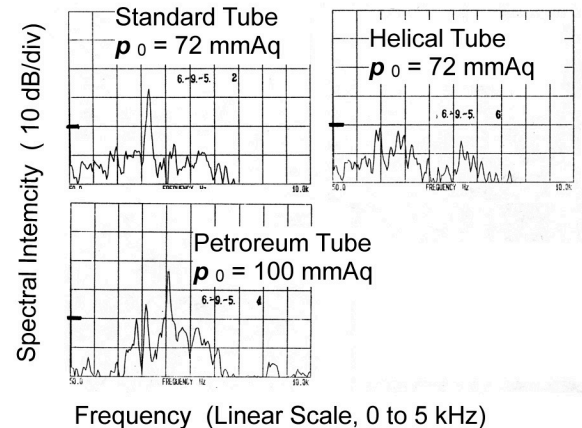


図10. 流速が大きい場合の音。縦軸上の太い横線は同じレベルを示す。

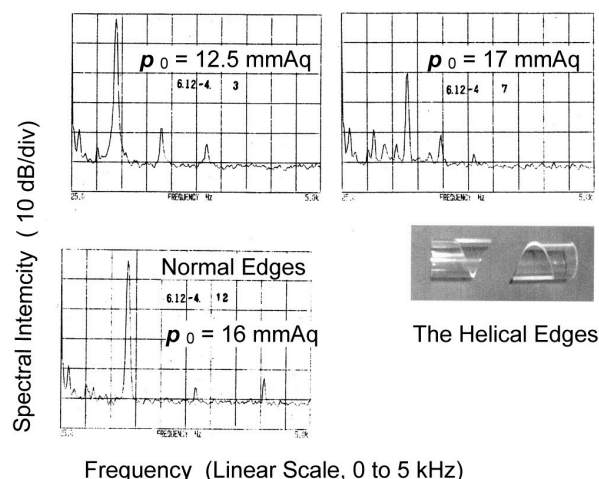


図9. 螺旋状のエッジでの音(上2枚)。下左の垂直エッジの音との間に、螺旋ヒダ管の場合のような大きな差は見られない。

右下は、ノズル出口とエッジの写真、但し相互の角度は実際の使用時と 180° 近く異なる。

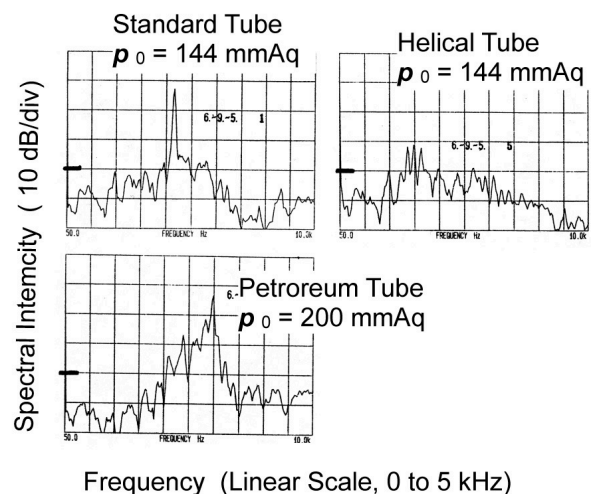


図11. 流速が大きい場合の音。縦軸上の太い横線は同じレベルを示す。

灯油管では

推定 4116(約 5800)Hz と実測 4100 Hz(図10),

同 5800(約 8150)Hz と 6000 Hz(図11)

のように、ピッチによる値が比較的良く一致する一方、凹部の長さによる値は高過ぎる。

ピッチに基づく推定値より実測値が高い場合があるのは、入り口近くでは周辺部の流速が断面内平均より高いためであろうか。

図4 の所での検討とも合せ、周波数は(移流速度/ピッチ)で支配されると言い切れると考える。即ちヒダの凹部の長さではなくピッチによってである。全く別の流れでも、同様にピッチによって周波数が決まる現象が観察された由である(荏原総合研究所・丸田氏 (9))。

#### 4. 終りに

以上の結果から、「マジックパイプ」や類似のヒダ付き管の管内気流の音の発生において、個々のヒダの凹みがキャビティ・トーンの「キャビティ」として働くとの発振機構は明確に否定できたと考えている。発生する音の周波数の検討も音の強さがヒダの全長と共に指数関数的に増加する事もその根拠であるが、ヒダが螺旋状の管では音が出ない事が決定的な理由である。剪断層の発振ではノズルの縁と管の入り口の縁が螺旋状でも、間隔が一定なら、垂直な縁と類似の音が生じ得るのに。

では真の発振機構はどんなものであろうか。筆者は今、環状の渦変動が移流しつつ、内部のヒダの各々と相互作用して音を出す事に間違いはなかろうと考えている。特に入り口付近で発生する渦変動が重要ではなかろうか。それを確かめようと、入り口をベルマウスにして渦変動が生じ難くしてみたが、やはり音が出た。或いは最初のヒダが重要なのかも知れない。他にも多くの実験を考え実行したが、未だ決定的な結果は得ていない。

或いは数理(または数値)計算によって、流れがあれば、管内部のヒダの全長に亘って、ある周波数範囲の、多分進行する音波を増幅する作用がある、と云う事になるかも知れないが、残念ながら筆者には手が出せない。

#### 5. 参考文献

- (1) 中村, 深町: ミュージックパイプにおける音の発生, ながれ, 3 (1984) p. 199.
- (2) 青木他: 第21回流体力学騒音シンポジウム (2001).
- (3) Petrie, A. M. Huntley, J. D.: J. Sound Vib., 70 (1980) pp.1-9 (当時迄に行われた研究の紹介もある)
- (4) 倉澤ほか: 音響学会誌 56 (2000-9) pp. 639-947
- (5) 坂尾: FD2002 (流体力学会 2002 年講演会) 講演論文集 (2002) pp. 294-5.
- (6) 坂尾: FD2004 講演論文集 (2004) pp. 674-5.
- (7) Sakao, F.: Proc. 11th Asian Cong. Fluid Mech. 22-25 May 2006, Kuala Lumpur, Malaysia (2006) pp.354-359
- (8) 坂尾: FD2006 講演論文集 (2006) 要旨とCD
- (9) 丸田: Private Communication (2006)

(緒論への註) エッジトーンは元来、平らな薄い噴流が正対する鋭角のくさびの先端に当たるときに生じる音と筆者は理解しており、普通はキャビティトーンと呼ばれる壁の凹みの上を過ぎる流れの音をそう呼ぶのには違和感を感じる訳である。但し文献 (1) では、用語その他はともかく、音の発生がフィードバックによる自励振動と音響共鳴とによることは正しく記述している。

その他に一般向けの本の中で、「マジックパイプの音はエッジトーン」とし、「これで謎は解けた」と書いたものも見たが、流れと物体がありさえすればエッジトーンが発生するかなのような記述で、フィードバックによる発振の考えはないようなので、文献として引用するに値しない。