

有限長直管内に凹凸棒を挿入した場合の 気流による共鳴現象

羽田 喜昭*・倉澤 英夫**・齋藤 正勝***

Resonance of the pipe flow in the case of inserting rugged rod in the circular pipe of finite length

Yoshiaki HANEDA, Hideo KURASAWA and Masakatu SAITOH

An experiment has been carried out on a sympathetic sound of the pipe flow in the case of inserting rugged rod in the circular pipe of 500mm length. One of the experimental condition was constant of the cross section area in the pipe; the rugged pitch of 8, 10, 14 or 20mm were used. The other condition was constant of the pitch (8mm); the cross section area was varied. The oscillation frequency of the air column in the pipe depended on rugged pitch. And the resonance sound of the pipe flow was generated in 8 or 10mm pitch of rugged rod but in 20mm pitch it was not generated. There was not case of generation of sympathetic sound for differing from cross section area. And it was found that dominant frequency was changed into like a stair in comparison with the velocity in the pipe according to the frequency analysis of the sound pressure fluctuation.

1. 緒 論

気流内に、凹凸のある物体を挿入すると流体力学的自励振動が生じ、この際発生する音はキャビティトーンと呼ばれ多くの研究⁽¹⁾⁽²⁾がなされている。管内にキャビティ部を持つ装置系を大別すると、二種類の場合が考えられる。一つは、管内壁にキャビティを有する場合であり、もう一つは、管内に挿入された棒にキャビティを有する場合である。前者の例としては、水道管のつなぎ用パイプに見られるペローズ構造を持つもの、または空調用ダクトのような急拡大部を持つものなどがある。管内にペローズ構造を持つ系については、中村ら⁽³⁾のマジックパイプに関する研究があり、また管内に急拡大部を有するキャビティ音に関しては、中野ら⁽⁴⁾の研究がある。

一方、後者の例としては、熱伝達を増進するための乱流促進体があり工業上幅広く応用されている。しかし、こうした装置系における管内気流の共鳴音に関する研究は、まだ行われていないように思える。

平成3年3月14日 日本機械学会第20回学生員卒業研究発表会にて一部発表

* 機械工学科 講師

** 機械工学科 助教授

*** 機械工学科 技官

そこで本研究では、なめらかな円管内に凹凸を有する丸棒（以下凹凸棒という）を挿入し以下のような実験的検討を行った。凹凸ピッチを変化させたときの円管内の気柱固有振動数について共振実験により測定する。次に、管内に空気を流し各凹凸ピッチにおける気流速度と管内の発生音及び気柱固有振動数について、その関係を調べ検討した。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験条件

図1に、直管内に挿入した凹凸棒の詳細図また表1に実験条件を示す。直管及び凹凸棒はいずれもアクリル製で、直管の長さは $L=500\text{mm}$ と一定である。断面積一定の実験では、直管内径 $D=40\text{mm}$ 、凹凸棒外径 $d=30\text{mm}$ とし、凹凸ピッチを8, 10, 14, 20mmと4種類に変化させた。またピッチ一定の実験では、凹凸ピッチを8mmとし、直管内径 $D=40, 50\text{mm}$ 、凹凸棒外径 $d=20, 30\text{mm}$ として実験を行った。なお突起面の厚さ及び深さは、図1に示す通りそれぞれ、2mm, 4mmと一定である。凹凸棒は直管内に同心になるようその両端を直径0.3mmの針金で固定し、実験を行った。

2.2.1 気柱の固有振動数測定装置

図2に気柱の固有振動数を測定するための装置概要を示す。図中のパイプが測定対象部であり残りの部分が加振部となる。加振部からは、一定周波数を持つ音波が発生し、パイプの管端に入射する。加振部の構造は、次のようになっている。スピーカからの音波を外部へ漏らさずパイプ内に伝えるため、円錐状の導管を木材で製作し、スピーカボックスに固定した。スピーカボックスは、塩化ビニール製でありスピーカ裏面からの音波を吸収させるため、グラスウールが詰めこまれている。

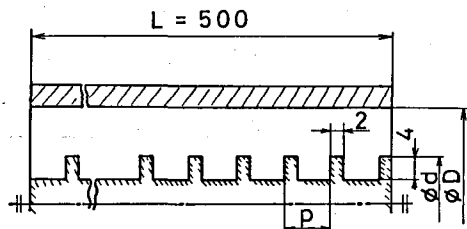


図1 直管内の凹凸棒詳細図

表1 実験条件

(i) 断面積一定					(ii) ピッチ一定				
D = 40 d = 30					p = 8				
P	8	10	14	20	ϕD	40	40	50	50
					ϕd	20	30	20	30

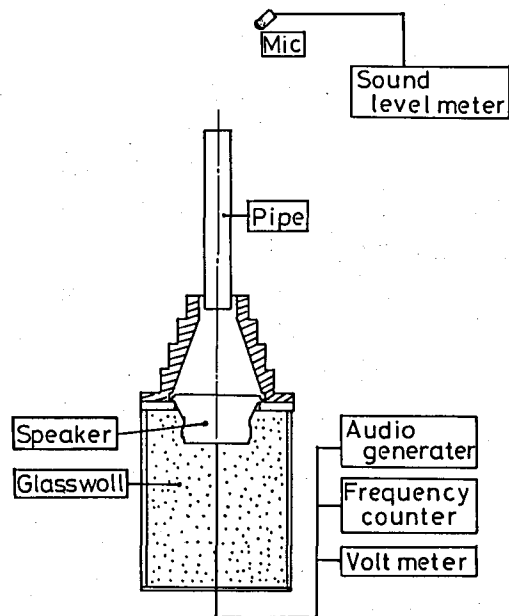


図2 気柱の固有振動数測定装置

2.2.2 実験方法

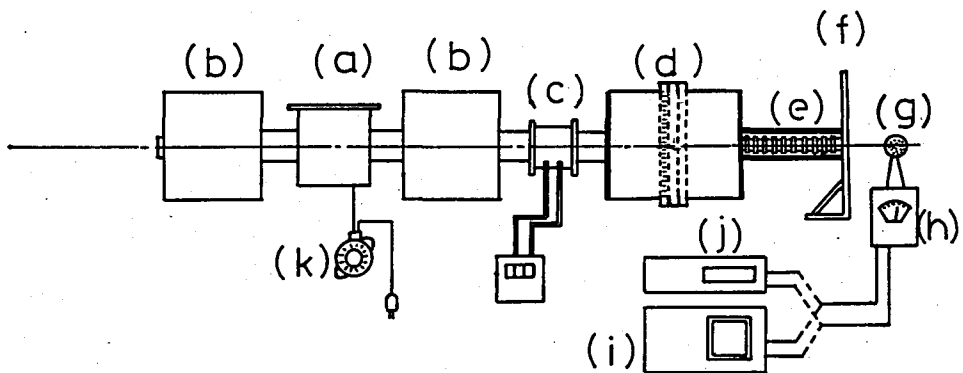
発振器により発生させた正弦波をアンプで増幅し、スピーカへ入力する。ここでアンプの出力電圧を電圧計で測定し、その値が一定値(2 V)となるようにアンプのボリュームを調整する。アンプで増幅された正弦波の周波数を周波数カウンタで読みながら、任意の周波数になるように発振器のダイヤルを調節する。このとき、放射音の音圧を1/2 インチマイクロホンを経て騒音計で測定する。測定はFスケールで行った。マイクロホンは、パイプ上面から約45°上方500mm 離れたところに設置した。発振器より発生する正弦波は、その周波数を200Hz から1200Hz まで20Hz おきに変化させ、各周波数において上記の測定を行った。特に共鳴音近くでは共鳴周波数が特定できるよう設定周波数を1 Hz ずつ変化させた。以上の実験を表1 に示す実験条件について行った。

2.3.1 気流による気柱共鳴音の実験装置

気流にともなうテストピース内からの発生音の違いを調べるための実験装置を図3 に示す。流れは、テストピース端部(e)から吸い込まれ、その流量は、流量計(c)で計測する。テストピース内の流れを安定させ、また正確に管内の共鳴現象を調べるため、一辺400mm、長さ600mmの直方体の空気だめを設けた。なお、空気だめ内の中央部には、金網2枚と整流格子として直径6 mm、長さ50mm のストローが設けられている。送風機自体の音、及びテストピース以外の気流による騒音を極力小さくするため、送風機は厚さ5 mm の鉄板箱(a)に納め、吸い込み、吐出し側には、消音器(b)を取り付けた。これにより、暗騒音は約50dB(F)以下である。テストピースの入口側は半無限空間を想定するため端板(f)が取り付けられている。

2.3.2 実験方法

送風機(a)部を流れる気流の流量は、スライダックス(k)を操作して調整した。その流量[G]は、流量計の指示値から求めた。このときテストピース内を流れる気流の平均流速[U₀]



- a : 送風機 b : 消音器 c : 流量計 d : 空気だめ
 e : テストピース f : 端板 g : マイクロホン h : 騒音計
 i : FFT j : 周波数カウンタ k : スライダックス

図3 気流による気柱共鳴音の実験装置

は次式により求めた。

$$U_0 = G/A$$

$$A = \pi(D^2 - d^2)/4$$

ここでAは、管内の断面積、Dは管内径、dは凹凸棒の凸部外径である。

各流速での音圧の大きさ、波形及びピーク周波数の測定は、前節と同じ騒音計(h)と周波数カウンタ(j)及び高速フーリエ変換器(FFT)(i)を用いて行った。

3. 実験結果

3.1 気柱の固有振動数

図4は、2.2節で述べた通り凹凸棒を有する直管に音波を入射したときの放射音の音圧レベルと周波数の関係をピッチをパラメータにして示す。いずれのピッチでも周波数を変化させると音圧レベルが急激に増大する周波数が現われる。これを周波数の小さい方からそれぞれ fr_1 , fr_2 , fr_3 , fr_4 とするとこれは、供試直管の一端に加えた音波による共振を意味し、共振周波数となっている。さらに fr_1 と fr_2 , fr_2 と fr_3 の周波数の差が各ピッチにおいてほぼ等しいことから、供試直管内の気柱の固有振動数であると言える。しかし、 fr_3 と fr_4 の周波数の差は、 fr_1 と fr_2 , fr_2 と fr_3 の差とは異っているおり、これは実験装置の他の部分の影響が加わって共鳴してしまったためと考えられる。次に図5は、凹凸棒のピッチと共鳴周波数の関係を示したものであり、実験の範囲内では、凹凸ピッチと共鳴周波数は比例していることがわかる。また凹凸棒を挿入しない場合に対する両端開口の円管の気柱の一次固有振動数は約340Hzと計算される。このことより凹凸棒を挿入すると固有振動数は、円管の場合より小さくなっていることがわかる。これについては、さらに検討が必要である。

実験条件(ii)のピッチが一定の場合については、断面積が大きくなると若干固有振動数が増加するが、 $D=40\text{mm}$, $d=30\text{mm}$ の場合と大きな差は見られないことを実験で確認している。このことより、円管内に凹凸棒を挿入した場合、凹凸棒のピッチの違いが大きく固有

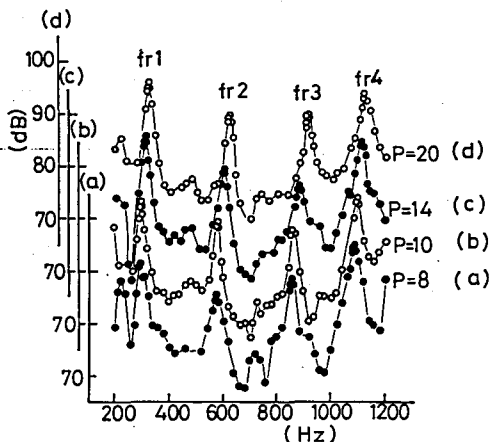


図4 気柱の固有振動数

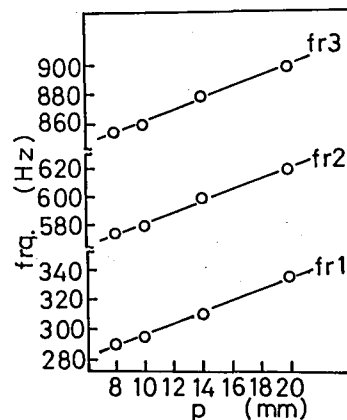


図5 凹凸のピッチと共鳴周波数の関係

振動数に影響をおよぼすことがわかる。

3.2 気流による気柱共鳴音

図6は、実験条件(i)における凹凸ピッチを変化させたときの管内平均流速 U_0 とそのとき円管より発生する音の音圧レベル SPL との関係を示す。P=8, 10, 14において $U_0=20\text{m/s}$ 以下の領域では流速に応じて音圧レベルが大きく変動している。しかし P=8, 10では、それ以上の流速において音圧レベルの変動は、小さくなっている。それに対し P=14の $U_0=20\text{m/s}$ 以上の領域及び P=20では実験範囲内において、流速にほぼ比例して音圧レベルが上昇している。また音色については、P=8, 10では、極めて純音に近いものが発生しているのに対し、P=14では約 $U_0=10\text{m/s}$ 以下で純音が認められるもののそれ以上の流速においては純音は認められない。さらに P=20m/s では、全流速範囲において純音は認められなかった。また全体的に純音の発生するピッチでは音圧レベルが大きく、ピッチが大きくなるにしたがって音圧レベルが小さくなっていることがわかる。

次に図7は、図6の音圧変動を周波数分析したときのピーク周波数 f_p と平均流速の関係を示す。黒ぬりは、各次数における音圧レベルの最大値を示している。P=8, 10とも流速に応じてピーク周波数は階段状

に変化している。すなわち、発生音はある流速範囲で特定の次数の周波数を維持し (Lock-in) 流速の増大とともに、高次の周波数に不連続に移っていく。これは、マジックパイプの実験⁽³⁾と同様の現象である。P=8とP=10では、流速が約6m/s以下で両者とも周波数はほぼ一致している。しかしそれ以上の流速範囲では、P=10の方が同一周波数の発生音がP=8に比べて速い流速になっている。また同一周波数にロックインされている流速範囲はP=10の方がP=8より広がっている。P=14では、流速が約10m/s以下でピーク周波数が特定できたが、それ以上の領域では特定できなかった。またP=20では、全領域でピーク周波数は、特定できなかったため図には示していない。

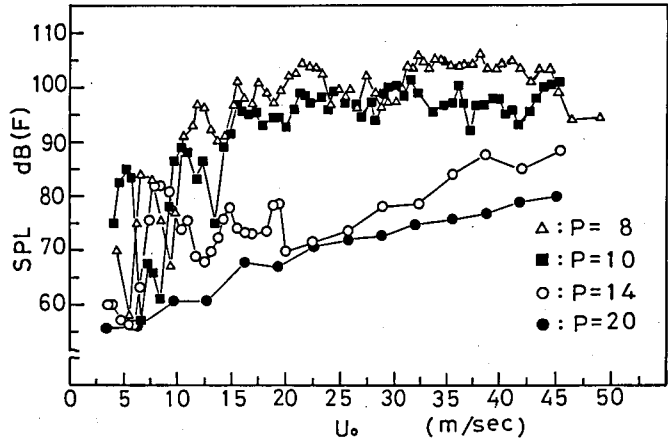


図6 管内平均流速と音圧レベルの関係

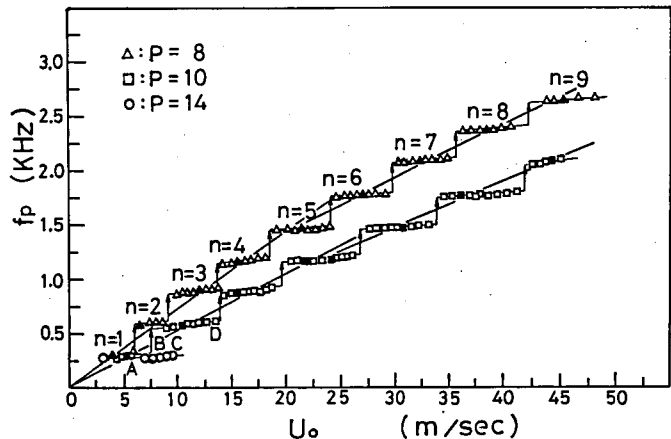


図7 管内平均流速と音圧変動のピーク周波数の関係

P=8とP=10で図中の黒印を結ぶと $n=4$ 位までは、ほぼ原点を通る直線になっていることがわかり、その傾きはP=8の方がP=10より急になっている。しかし、 $n=5$ 以上では傾きが両者ともゆるやかになっており、原点を通る直線とはなっていない。この傾きが変化する流速は、図6における音圧レベルの大きさが比較的一定値となる流速約20m/s以上にほぼ対応している。このことから流速が遅く低次の周波数が発生している場合と流速が速く高次の周波数が発生する場合とで流れの形態にも何らかの変化が生じていると推測できる。

図8は、P=10における流速15m/s以下での音圧変動の代表的なスペクトル分布を示す。図中A, B, C, Dは、図7中の記号に対応した流速における結果である。特にBは $n=1$ と $n=2$ の中間的位置に対応している。A, C, Dは極めて卓越した周波数が存在し、対応した波形は正弦波である。これに対しBでは、図に示す通り、ほぼ同じレベルでの周波数がいくつも現われており、波形も不規則である。またBにおける卓越した周波数は、A, Cの卓越した周波数以外の周波数も含んでおり、このことよりB点においては必ずしも隣り合った2音が同時に発生しているのではないことがわかる。以上のように図7中の $n=1, 2, 3$ の値と図4中の fr_1, fr_2, fr_3 の値がほぼ一致していること、またその他の周波数についても跳躍前後の周波数の差が等しく、さらに音圧変動の波形が正弦波であることから、図7に示すところの連続的に周波数が変化する部分で発生している音は、管内の気柱の共鳴によって発生したものといえる。

次に、実験条件(ii)のピッチ一定のもとで断面積を変化させた実験において、 $D=40\text{mm}$, $d=30\text{mm}$ については前述の通りである。しかし他の断面積においては、流速が数m/s以下で純音の発生も認められたが、他の流速においては純音が発生せず、ピーク周波数は特定できなかったため図には示していない。

なお図7におけるピーク周波数は、図8の卓越する周波数の最大値を周波数カウンタで読んだものである。

4. 気流による気柱 共鳴音の検討

図9は、図7のP=8, 10における、平均流速とストロハル数との関係を示したものである。黒印は各次数の音圧レベル最大値を示す。ストロハル数 St は、次式で定義した。

$$St = \frac{f_p(p-a)}{U_0}$$

ここで、 U_0 は平均流速、 f_p はピーク周波数、 P は凹凸ピッチ、 a は凸部厚さである。

図9より流速が遅い領域ほど、流速がわずかに増大するとストロハル数は急激に減少している。しかし、流速が増大する

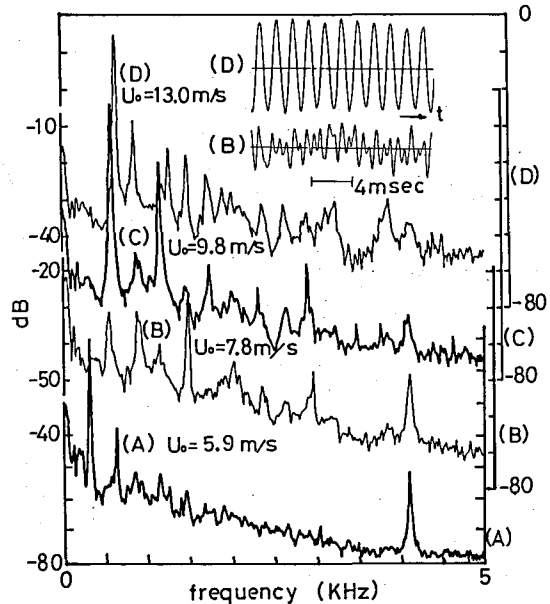


図8 音圧変動のスペクトル分布

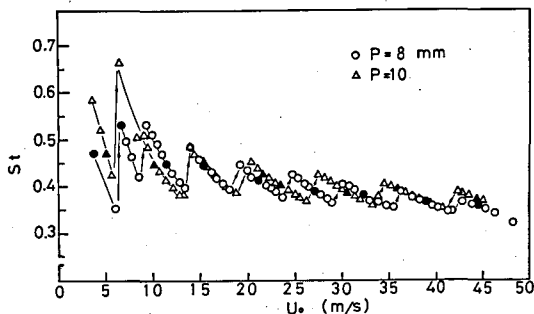


図9 管内平均流速とストロハル数の関係

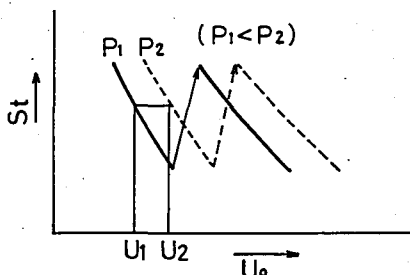


図10 凹凸ピッチの大小による管内平均流速とストロハル数の関係

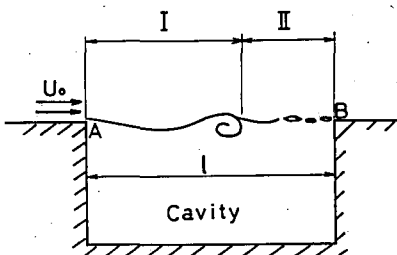


図11 キャビティ部流れの模式図

と、共鳴音を発生させるだけのエネルギーがなく音としては聞こえない。また流速が遅くなることによって、せん断層で形成される渦は低調波成分を持つようになり、 l がある値以下になるとこの渦の低調波成分とでは共鳴を起こさず、それより高次数の周波数で共鳴音が発生する可能性がある。本実験において $P=14, 20$ では、キャビティ部の幅 l がII部の領域にあり、渦が崩壊してしまっているため、特定の周波数による上流側への圧力の帰還作用が生じず、そのため共鳴音が発生しなかったと推察される。以上述べたように共鳴音の発生機構についてはさらに多くの検討が必要である。また気柱の共鳴音によって管内の乱れがより大きくなれば、熱伝達増進にも大きく影響することが予測できる。これらについても今後この実験結果を踏まえて検討していく必要がある。

5. 結 言

管内に凹凸棒を挿入し、気柱共鳴音に関する実験を行った結果、次のことが明らかになっ

につれてその減少の仕方は、ゆるやかになっている。また黒印のストロハル数は、流速に対して一定ではなく、流速が増大すると小さくなっている。また同一次数におけるストロハル数は $P=10$ の方が $P=8$ より流速の速い領域に移動している。このことよりストロハル数と流速との関係は凹凸ピッチの大小によって定性的に次のような関係が考えられる。すな

わち同一次数の音は、凹凸ピッチを大きくすると図10のように流速の速い領域に移動する。しかし凹凸ピッチがある値以上になると、共鳴音は発生しなくなる。それは、図11に示すようなキャビティ部付近の流れが推察されるためである。図11のI部は、キャビティの上流端Aで流れが剥離した部分から強いせん断流れを作り渦が形成される領域を示し、II部はI部で形成された渦が崩壊してしまっている領域を示している。キャビティ部の幅 l の長さがI部の範囲内にある場合は、せん断層で形成された渦がキャビティの下流端Bに衝突し、上流部への圧力の帰還により渦の発生周期が周期的となり流体的自励振動が生じる。しかしII部では、せん断層で形成された渦が崩壊し、特定の周波数による圧力の帰還作用が生じず流体的自励振動は発生しない。I部内においてキャビティ部幅 l が長くなると同一次数の音は流速が速い領域で発生するようになる。逆に l を短くしていくと、流速が遅い領域で同一次数の音が発生する。しかし、あまり流速が遅くなる

た。

- 1) 凹凸棒を管内に挿入し、音波を入射しその周波数を変化させると、ある周波数で気柱の共鳴現象をおこす。この際の周波数は単なる円管の両端開口の気柱固有振動数より若干低い周波数である。また気柱の固有振動数は、凹凸ピッチに大きく依存しピッチを大きくすると固有振動数も増加する。
- 2) 凹凸棒を有する円管内に気流を流すとある条件下で、1)で調べた固有振動数を有する共鳴音が管から発生する。この条件は流速にもよるが定性的に凹凸のピッチがある値以上では発生せず、また円管内径と凹凸棒の外径との差が大きいと音が発生しにくい。
- 3) 管内から発生する音の音圧レベルは流速によって変化する。特に凹凸ピッチが8, 10, 14 mmの流速20m/s以下では大きく変動する。しかし、凹凸ピッチが14mmの流速20m/s以上及び凹凸ピッチ20mmでは、実験範囲内において流速に比例して音圧レベルは増大しており、共鳴音の発生の有無によって音圧レベルの変化のしかたは大きく二つのタイプが存在する。
- 4) 気流により管内から発生する音圧レベルの変動を周波数分析すると、ピーク周波数は凹凸ピッチが8, 10mmでは流速に応じて階段状に変化する。しかし凹凸ピッチ14, 20mmでは、低流速域をのぞいてピーク周波数は特定できず共鳴音の発生は認められない。ピーク周波数が連続的に変化する領域で発生する音は、純音に近いのに対し周波数が跳躍する部分で発生する音は、純音ではない。

謝 辞

終わりに、本研究に際して御協力頂いた、本校機械工学科卒業生、宮林英雄君、上村貴敬君、林智康君、須釜知幸君に心から感謝いたします。また、本研究の一部は、(財)長野県テクノハイランド開発機構及び(財)浅間テクノポリス開発機構、平成2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) D. Rockwell, E. Naudascher: "Review — Self-Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities" Trans. ASME, Vol. 100, June, 1978, pp 152~164
- (2) K. D. Stephanoff: "Self-Excited Shear-Layer Oscillations in a Multi-Cavity Channel With a Steady Mean Velocity" Trans. ASME, vol. 108, September, 1986, pp 338~342
- (3) 中村泰治, 深町信尊: "マジックパイプにおける音の発生" ながれ, 第3号, 1984, pp 199~203
- (4) 中野政身, 浅野 寛: "軸対称キャビティを通過する管内気流の共鳴現象" 機械学会講演論文集, No. 910-17, 1991, pp 51~53