

マジックパイプにおける発生音に関する研究

倉澤 英夫*・羽田 喜昭**・斉藤 正勝***

Experimental investigation on the sound generated from magic pipe

Hideo KURASAWA, Yoshiaki HANEDA and Masakatu SAITOH

A magic pipe is a flexible vinyl chloride pipe with bellows structure. The sound is generated by the air current running through the pipe, one of the generation reasons of which is taken as being related to cavity flow. So the characteristics have been examined of the sound generated from the magic pipe, which have been investigated from relation to cavity flow. In experiment the air has been issued from nozzle in atmosphere with blower, and the apparatus system has been made in which the sound is generated by setting up the magic pipe in the jet. It has been examined that the relation between the characteristics of the sound generated and the effects of the jet velocity, the pipe length or the pitch of bellows in the pipe. The results show that the generation reasons of the sound can be explained by the self-excited vibration phenomenon concerned with the cavity flow and the peak frequency of the sound spectrum is influenced by acoustic natural frequency of the pipe length.

1. 緒 言

マジックパイプとは、ベローズ構造を持つフレキシブルな塩化ビニール製のパイプである。この一端を手で持ち、振り回すと音が発生し、振り回す速さを変えると音の高さも次々と変化する。このようなパイプは子供の玩具として売られているが、類似した構造は工業装置系の中でも多く見られる。材質にこだわらないと、水道管の継ぎ用のパイプなど、フレキシブル性のある継手として多く利用されている。

パイプからの音の発生原因の一つは、その一端をふさいで振り回すと、音が発生してこない事実から、パイプ内に遠心力によって生じる気流に起因することが認められる。一方、ベローズ構造を持たない表面の滑らかなパイプに空気を流しても、一般に音は発生してこない。この二点から、マジックパイプの音の発生原因は、ベローズのような凹凸を持つ表面での流れに関係する、何らかの振動現象が関与していると推定できる。

* 機械工学科 助教授

** 機械工学科 講師

*** 機械工学科 技官

原稿受付 平成元年9月7日

このようなフローパターンの基本的な形として、キャビティフロー（キャビティ音）⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を挙げることができ、その関連性の検討が望まれる。事実、中村ら⁽⁴⁾は、音の発生をキャビティフローとの結びつきで捉え、その関連性を強調しているが、必ずしも十分な説明をなし得たとはいえない。この原因は、系が比較的複雑なこと、音が発生するとその影響が流れに強く作用するため、流体的な関連性が捉えにくいことなどが挙げられる。現象そのものおよびキャビティフローとの関係などをより深く調べるためには、より多面的な検討が必要とされる。

本研究では、以上の観点からマジックパイプからの発生音の特性を調べた上、キャビティフローとの関連性について検討を加えた。さらに、発生音の周波数成分に対し、より小さな成分まで調べ、それらの関係を検討した。

2. 実験装置

マジックパイプにおける音の発生は、中を気流が流れることにより生じる。この事実は、一端をふさいで振り回しても音が発生しないことから検証できる。そこで、パイプを振り回してパイプ内に流れを作り出すかわりに、パイプを固定して、その中に空気を流すような装置系を製作した。図1に装置の全体図を示す。送風機Bにより、大気中に空気を噴出させた。その流量は、スライダックスSにより、電圧を調整して変化させた。また、音の測定を行なう関係上、送風機本体からの放射音をできるだけ押える必要があり、送風機を厚さ10mmの合板内に収め、その周囲を鉛板で覆った。さらに、流路を通して伝播される音を除去するため、吸い込み、吹き出し側に消音器M1, M2を取りつけた。この消音装置の効果は、一例として、噴流の速度が30m/sで、音圧レベルが83dBであったものから、66dBに低下した。

噴流は出口端流速が一樣で、かつ流れの乱れを小さくする目的で、噴流出口前に収縮ノズルを設けて噴出させた。噴流出口端でのノズル直径は30mmである。

マジックパイプは図示したように、噴流と同一軸上に置き、その前後をスタンドに固定した。詳細な形は図2に示す。パイプの材質は、厚み1.5mm程度の塩化ビニール製である。パイプの表面は、ペローズ構造を持ち、内径の最大値は29.2mm、最小値は23.2mmで、凹凸面の高さは3mmである。凹凸面の山と山のピッチは、特に断わらない限り6mmのパイプを使用した。パイプの挿入位置は、噴流出口から入口端までの距離が150mmである。

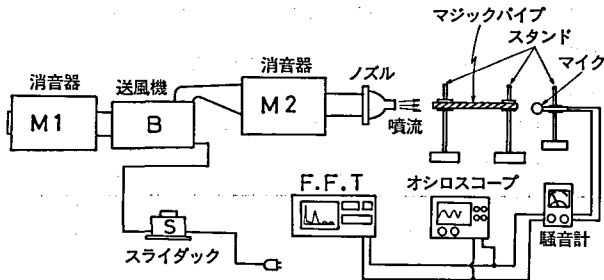


図1 実験装置および測定系

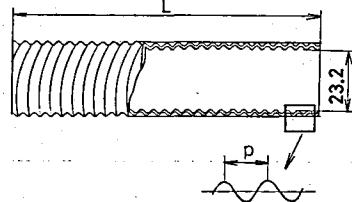


図2 マジックパイプの形状

実験は噴流の流速を変化させて、音の特性を調べた。ここで、マジックパイプ内の流量をこの装置系で正確に見積もることは難しく、ノズル出口端での速度をパラメータにした。なお、パイプの挿入位置がノズル直径の5倍であることを考慮すると、噴流の速度分布は相似則が成立する領域⁽⁵⁾になると推定できる。したがって、パイプ内への流量とノズル出口端での流速は比例すると予測できる。

測定は1/2インチのマイクロホンを騒音計につなぎ、その出力をオシロスコープに入れ、同時に、高速フーリエ変換器(F.F.T)によりスペクトル分布を採取した。マイクロホンの位置は、風が直接当たらないように、パイプの斜め後方500mmの位置に置いた。流速の設定は、ピトー管を用いて行った。

また、実験に先だって、同一の位置に、ベローズ構造を持たない直管を挿入しても、音が発生しないことを確認した。さらに材質が金属性で、ベローズ構造を有するパイプを挿入した場合には、塩化ビニール性のパイプと同様に音が発生することを確認した。

3. 実験結果

3-1 発生音の特徴

一般に噴流中にパイプが存在しなくても、流速が増大すると、噴流等から生じる音は大きくなる。図3は、このような場合の噴流等から生じる音を示している。本研究の流速範囲では、音圧レベルは流速に対し直線的に増大している。ただし、この音圧レベルの変化は噴流のみの音でなく、風量調整などの装置系全体からのノイズも混入している。図中、一点鎖線で示す位置は、実験をしないときの実験室内の暗騒音の大きさである。

上述の音響的環境の中で、 $L=450, 700\text{mm}$ のマジックパイプを置いたとき発生する音圧レベルを図4に示す。全体的に見ると、実線で示すように、流速に対しほぼ直線的に増大している。ところで純粹にマジックパイプのみの音圧レベルを見積るためには、噴流等から生じる音の影響を除去する必要がある。すなわち、噴流出口端流速 $U_0=27.5\text{m/s}$ において、図3の ΔS 分だけ、図4でも低く見積もることにより真値に近い値が得られる。図4の破線はこの考え方により修正を施した結果で、流速との関係はやはり直線的である。ただし詳細にデータを見ると、流速により大きくなりやすい位置と、なりにくい位置が存在するように思われる。

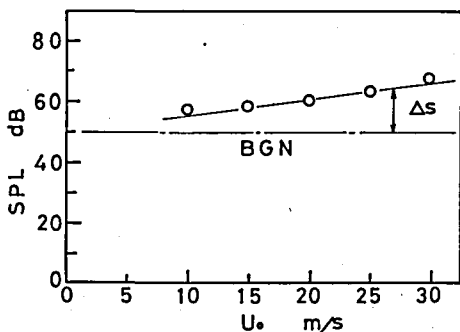


図3 流速変化に対する噴流の放射音特性

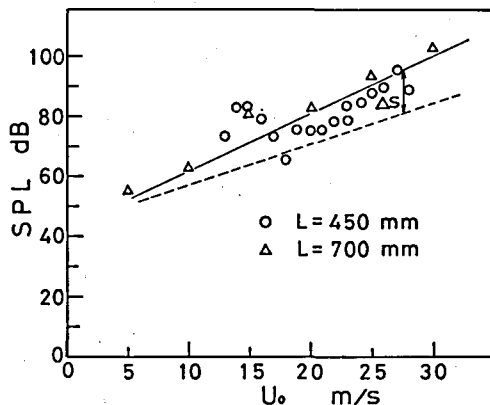


図4 流速変化に対するマジックパイプの放射音特性

次にマジックパイプから音が発生している場合の、音圧波形に対する2つの例を図5に示す。パイプの長さは、いずれも700mmである。(a)は流速15m/s, (b)は20m/sの場合である。(a)の波形は極めて正弦波的であり、その周期性が明瞭で、かつ振幅も一定している。一方、(b)は振幅が不揃いで、ピークとピークの間隔も一定でなく、正弦波的な波形とはかなり異なる。しかし、全くのランダムな波形とは明らかに異なり、▽印で示す間隔は一定で、かつその間に存在する波形はお互いに相似になっている。このことは、多くの振動モードが重畳していると推測できる。

波形(a), (b)に対するスペクトル結果を図6に示す。(a)は15m/s, (b)は20m/sに対応している。縦軸は音圧変動の各周波数成分ごとの大きさを表わしており、単位はdB表示である。(a)では、正弦波的な波形に対応して、1つのスペクトル成分のみが、極めて卓越した分布を有する。以後、最大のスペクトル成分を持つ周波数をピーク周波数と呼ぶことにする。この場合のピーク周波数は650Hzである。

ところで、両端開口の管長Lに対する、n次の気柱固有振動数は次式により求められる。

$$fn = \frac{nc}{2L'}$$

ただし、L'は開口端補正をしたパイプ長^⑥であり、cは音速である。

上式で、L=700mmで、1次の固有振動数を算出すると、230Hz程度になり、ピーク周波数の650Hzは、ほぼこの3次成分に相当する。

(b)は流速が20m/sと増大した場合で、ピーク周波数は900Hzとなる。周波数の値は(a)の場合と異なるが、(a)と同様にパイプの固有振動成分と一致し、流速の増大に伴ってより高い次数の4次成分が出現したことがわかる。また、スペクトル分布の形においても、(a)とは差が見られ、ピーク周波数の他にも、それに近い大きさを持つ成分が観測され、いくつかの振動モードの共存が認められる。

以上に示したとおり、マジックパイプから生じる音は、そのピーク周波数がパイプ長の固有振動数に一致していることから、パイプの共鳴現象であることがわかり、これらに関する実験

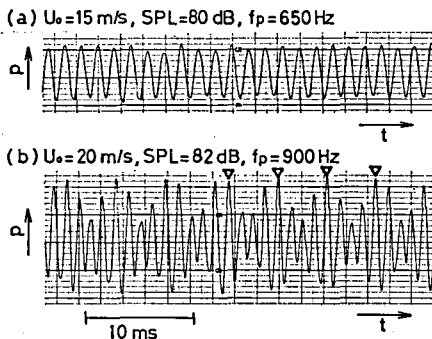


図5 マジックパイプから発生した音の波形例 (L=700mm)

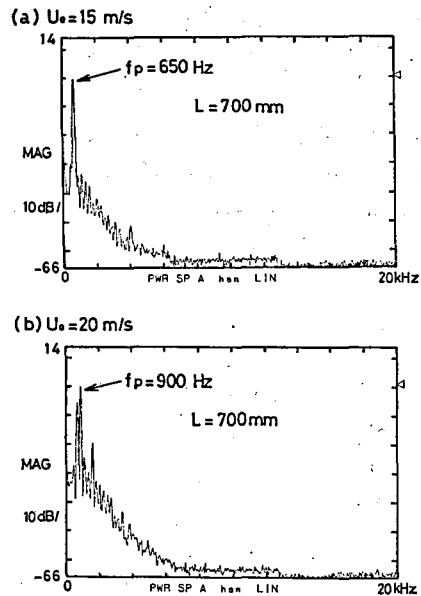


図6 図5に対応する波形のスペクトル分布

結果⁽⁴⁾⁽⁷⁾と一致する。ただし、共鳴する次数は、流速により変化している。

3-2 音の発生とキャビティ音との関連性

ピーク周波数の流速に対する依存性を図7に示す。図中には、 $L=450, 700\text{mm}$ の場合を示してある。いずれも、ピーク周波数は流速の増大に伴って階段状に変化し、かつその周波数は、それぞれのパイプ長の固有振動数に一致していることがわかる。図中には、固有振動数の次数を n で示した。パイプ長が異った場合に励起される固有振動数を比較すると、同一流速に対し少くとも極端に離れた固有振動数は励起されない。また、固有振動数が変化する不連続点での流速は、パイプ長が異っても近い流速値で変化する。このような観点からすると、両者に共通したスケールでの現象が引き金になって、共鳴音が発生したと推測され、その原因はペローズ構造にあると考えられる。事実、最初に凹凸のないパイプでは音が生じないことを示した。以上の点から、キャビティフロー（キャビティ音）との関連性が示唆される。これに関し、既に中村ら⁽⁴⁾は、マジックパイプの発生音をキャビティ音との関係から考察を行っているが、必ずしも十分な説明はなし得ていないといえる。本論文でも基本的には同じ観点に立つもので、より注意深く、キャビティ音との関連性をここで調べた。

図8にマジックパイプのペローズ構造とキャビティフローとの類似性を示す。キャビティ音の発生は次のように説明される。キャビティが存在する表面を空気が流れると、キャビティの上流端Aで流れは剝離し、剝離した部分は強いせん断流れを作り、渦を形成する。そのせん断層は渦の形成と共に、キャビティの下流端Bに衝突し、上流側への圧力の帰還により渦の発生周期が周期的になる。この結果、流体的自励振動が生じ、これに伴って自励振動に一致した周波数を持つ空力音が可聴でき、これをキャビティ音と称する。

ペローズ構造を有する流れも、図に示す通り、基本的にはキャビティフローと全く同様に捉えることが可能である。山の頂点A'から形成されたせん断流れは、渦を形成し下流側の山の頂点B'に衝突する。この関係は、キャビティフローと極めて類似した流れの形成が予測でき、自励振動の発生が推測できる⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

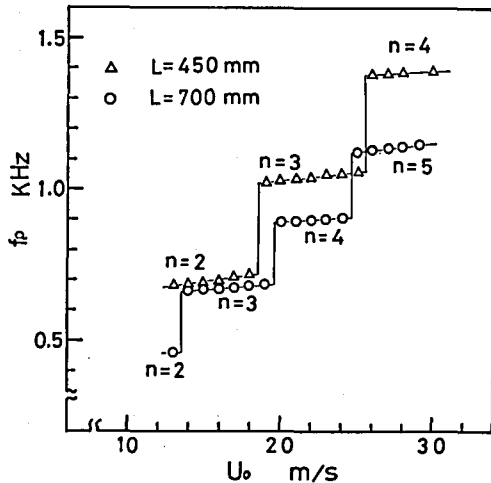


図7 流速に対するピーク周波数の変化

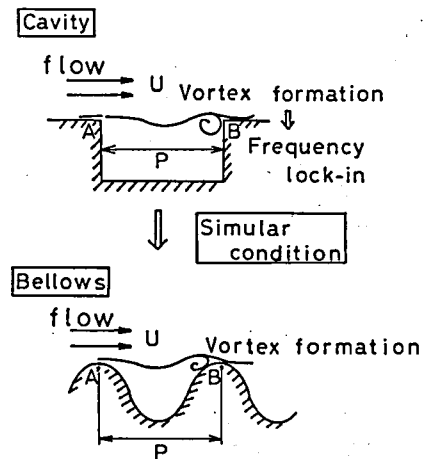


図8 キャビティフローとペローズ構造の類似性

図9は、キャビティ音の結果を背景にして、本実験結果に対するピーク周波数の変化の仕方を解釈したもので、両者の関係をモデル的に表現している。キャビティ音における、自励振動による周波数の変化は、定性的に流速の増大に対し、 $\alpha_m \sim \beta_m$, $\alpha_{m+1} \sim \beta_{m+1}$ のように段階的な変化をする。今、図中に、マジックパイプの固有振動数 $f_{r,n}$ を鎖線で示す。マジックパイプの場合には、ピーク周波数の変化が $f_{r,n}$ の飛び飛びの値しか取れないため、キャビティ構造で生じた周波数は、図中矢印で示すように、近い固有振動数の値を取るように強要される。このような関係で見ると、 $a_n \sim b_n$, $a_{n+1} \sim b_{n+1}$ のように階段状に変化し、キャビティ音との関係からピーク周波数の変化が説明できる。なおマジックパイプのピーク周波数が固有振動数に強要される背景には、音響的に強い作用が流れ場にも作用したためと考えられ、流れ場と音場との連成振動として扱うべきと考えられる。この種の現象の存在は、筆者らが行った実験^{4,5}が挙げられるが、本実験系では今後、更に詳しい実験が望まれる。さらに、図7のピーク周波数は流速に対して、やや右上りの勾配を示すが、この関係もキャビティ音から考察することができる。例えば、区間 $a_{n+2} \sim i$ では、キャビティ音の周波数は固有振動数より低い値であるので、ピーク周波数はその影響を受けて低くなる傾向を持ち、区間 $i \sim b_{n+2}$ では、逆に高くなる傾向を示す。全体として、 $a_{n+2} \sim b_{n+2}$ は右上りの勾配を示す。この関係は他のピーク周波数に関しても同様に示される。

次に、図10にベローズ構造の山と山の間隔、ピッチPを変えた場合のピーク周波数の変化を示す。ピッチはビニール製のパイプがフレキシブルであることを利用して、一様にパイプの長さを縮めることにより、通常時の6mmから5, 4mmにした。パイプ長さは、全て300mmである。ピーク周波数はパイプ長が同じであるためピッチに関係なく、いずれも同一で、固有振動数の2, 3次成分が出現する。しかし、階段状に跳躍する流速の値は、ピッチにより異なりピッチが大きいほど大きな流速で跳躍する。キャビティ音から、定性的に次のように

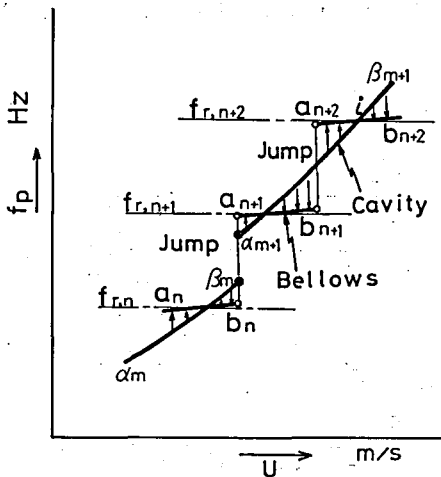


図9 キャビティ音によるマジックパイプのピーク周波数の変化モデル

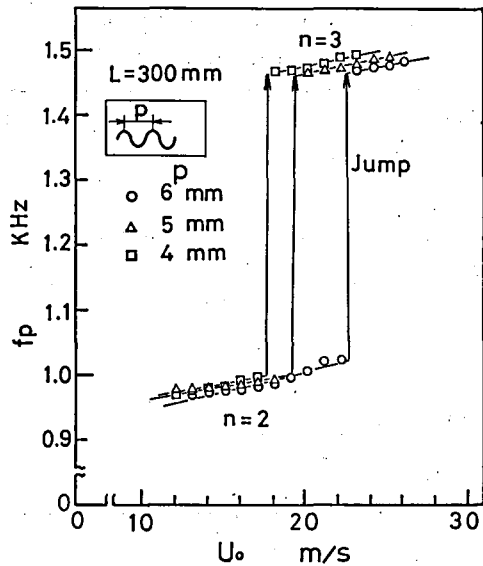


図10 ピーク周波数の跳躍に対するピッチの影響

考察できる。流速をパラメータにして、キャビティの間隔 P を変えたとき、自励振動の変化の様子を図11に定性的に示す。同一流速では、間隔が大きくなると周波数が降下し、同一ピッチでは、流速が大きいくほど周波数が高くなる。したがって、ピッチが P_1 から P_2 と大きくなると、同じ周波数になる流速は、 U_1 から U_2 に増大する。この関係から、同一の周波数を基準に跳躍位置を考えると、ペローズ構造のピッチが大きくなると、より大きな流速でピーク周波数が跳躍することになる。

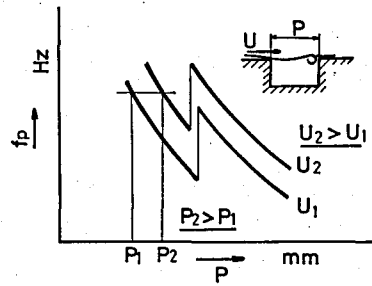


図11 キャビティ音におけるピッチと流速の関係

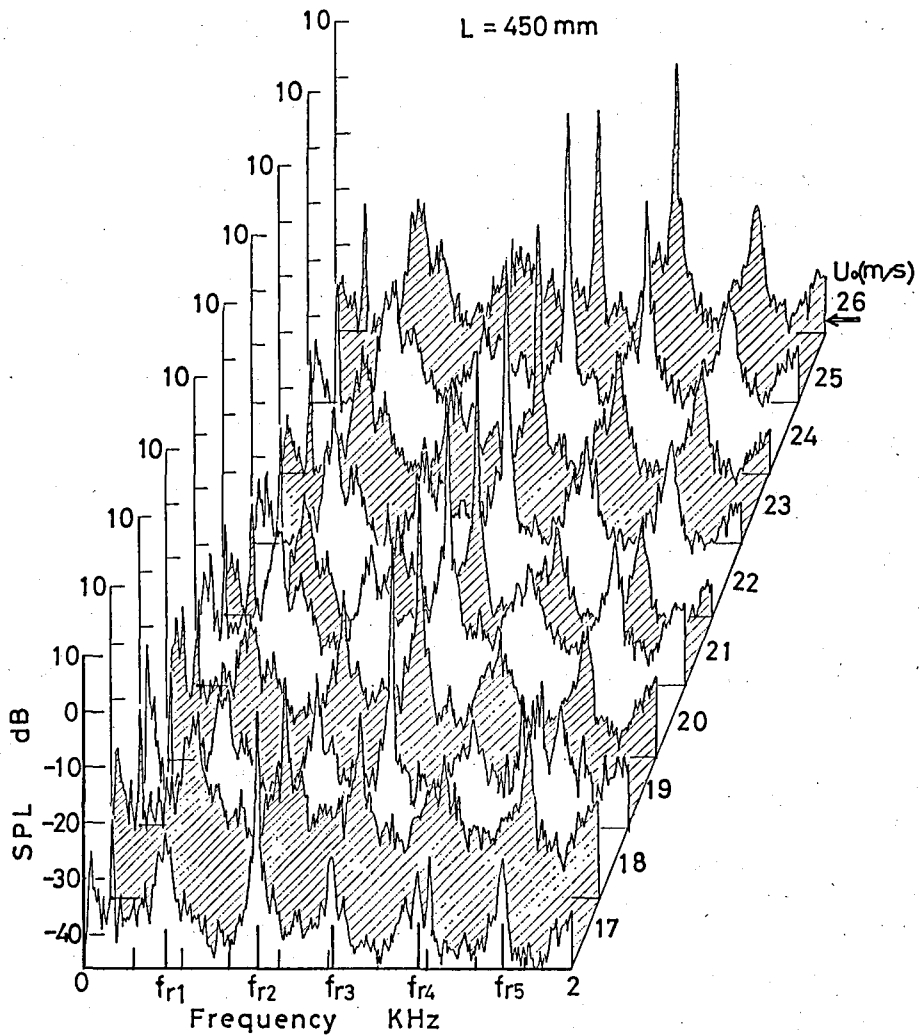


図12 流速変化による音のスペクトル分布の変化

以上、キャビティフローとの関連性とその整合性を示したが、次の問題点も含んでいる。マジックパイプの表面は連続した凹凸面を持っている。1つの凹面を持つキャビティフローの現象を連続したものに、そのまま拡張してよいかどうか。さらに、内部の流れの様子が把握されていないなど、今後より詳しい実験が要求される。

3-3 ピーク周波数とその調和成分

音圧変動のスペクトル分布において、卓越するスペクトルを持ついくつかの周波数成分が共存している例を、図6-(b)に示した。この関係をより詳細に検討するため、周波数帯域を拡大して調べた。図12は、2kHzまでの周波数帯域を拡大し、流速をパラメータにして、スペクトル分布を3次元的に表示した。例えば、流速17m/sでは、ピーク周波数は fr_2 の720Hzになる。その他、卓越する成分がいくつか存在し、明らかに差異のある振動モードを取り出すと、いずれもパイプの固有振動数に一致している。ここでは、 fr_1 から fr_5 まで観測でき、その共存がわかる。

卓越するスペクトル間の流速に対する特徴を見ると、次の関係が存在する。 $U_0=17\text{m/s}$ では、 fr_2 が最も卓越し、 fr_3 、 fr_4 、 fr_5 はほぼ同程度のレベルを示す。流速が18m/sに増大すると、 fr_3 の値が増大してき、 fr_2 と fr_3 の差は小さくなる。さらに流速が19m/sと増大すると、 fr_3 が fr_2 より大きくなり、ピーク周波数の移行、すなわち跳躍が起こる。この関係は、 fr_3 から fr_4 への移行も同様に考えることができ、ピーク周波数の移行は序々に行なわれる。

発生する共鳴音は、ピーク周波数により特徴づけられ、その成分が現象支配の主体であることは間違いない。しかし、ピーク周波数の卓越度を別にすると、多くの固有振動数が共存している。また、図7で見る限り、ピーク周波数は極めて不連続的に周波数が移行すると理解された。ところが、固有振動数間のレベルの変化を見ると、流速の増大と共に、次の次数を持つ固有振動数が序々に大きくなり、その移行は連続的に行なわれていることになる。

以上のスペクトル分布を基にして、卓越する成分を抽出し、エネルギー的に大きい順に5番目までを図13に示す。いずれの成分も固有振動数に位置してることがわかる。図中に示した○印は、図7に示すピーク周波数の値に対応する。全体として、いずれも卓越する周波数は右上りの傾向を示し、3-2節の結果と一致する。ピーク周波数以外の次数に関し、どの段階で、どの次数成分が大きいかという確定的な関係は見られないが、ピーク周波数に近い次数成分が比較的大きいレベルを有する傾向が観測される。

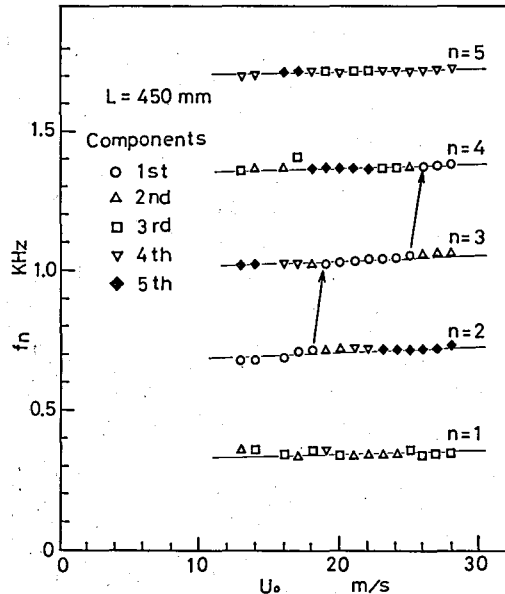


図13 速度に対する卓越するスペクトル成分の関係

4. 結 言

マジックパイプとは、一般にベローズ構造を持つ塩化ビニール性のパイプであるが、このような構造を持つパイプは、単に模型的な形でなく、工業装置系でも多く存在する。このような流管から発生する音の特性に関し、流速、パイプ長さ、および凹凸のピッチを変えて調べた結果、次の事が結論として要約される。

(1) 音の発生は、流れの存在とベローズ構造を有する凹凸に原因することが、その対偶の実験により確認された。

(2) 発生する音は、パイプ長の気柱固有振動数が励起された結果で、ピーク周波数は速度の増大と共に、その次数が次々と高くなり階段状に変化する。この結果は、他の実験結果⁽³⁾⁽⁷⁾とよく一致する。

(3) 音の発生原因は、項目(1)の流れの構造と併せて発生する音の特性を調べた結果、キャビティフローにおいて出現する自励振動現象との関連から説明でき、その整合性がいくつかの観点から示された。

(4) ピーク周波数以外の卓越する成分に関しても調べ、特に、跳躍時におけるピーク周波数の変化について一定の関係を示した。

なお、ここでの測定は、音の特性のみで終わっているため、キャビティフローとの関係も必ずしも十分な成果が得られていない。今後、モデルをさらに単純化し、かつ流れの振舞いについても検討をする必要がある。

最後に、本研究を行うに当たり、助言を頂いた本校名誉教授、山之上寛二氏に心より感謝の意を表します。また実験に際しては本校機械工学科卒業生である木下正光君、小林浩君に御協力を頂きました。ここに心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) S. A. Elder, T. M. Farabee, F. C. DeMetz "Mechanisms of flow-excited cavity tones at low Mach number." J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, No. 2, 1982, pp. 532~549
- (2) V. Sarohia "Experimental investigation of oscillations in flows over shallow cavities" AIAA Journal, Vol. 15, No. 7, 1977, pp. 984~991
- (3) D. Rockwell, A. Schachenmann "The organized shear layer due to oscillations of a turbulent jet through an axisymmetric cavity" Journal of Sound and Vibration Vol. 85, No. 3, 1982, pp. 371~382
- (4) 中村泰治, 深町信尊, "マジックパイプの発音機構" 九州大学応用力学研究所報, 第59号, 昭和58年, pp. 61~66
- (5) N. Rajaratnam (野村安正訳) "噴流" 森北出版, 1981
- (6) 福田基一, 奥田襄介, "騒音対策と消音設計" 共立出版, 昭和51年
- (7) 宮坂忠昭, 春原真一, "発音性流管の計測への応用 (固有振動数と流速との基礎実験)" 長野工業高等専門学校紀要, 第13号, 昭和57年, pp. 63~68
- (8) D. Rockwell, E. Naudascher "Review-Self-sustaining oscillations of flow past cavities" J. of Fluids Engineering. A. S. M. E., Vol. 100, 1978, pp. 152~165
- (9) C. Knisely, D. Rockwell "Self-sustained low-frequency components in an impinging

- shear Layer" *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 116, 1982, pp. 157~186
- (10) D. Rockwell "Oscillations of impinging shear layer" *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 5, 1983, pp. 645~664
- (11) 倉澤英夫, 小幡輝夫, 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 (B編)* 53巻, 494号, 昭62, pp. 3018~3026
- (12) 倉澤英夫, 山之上寛二, 小幡輝夫, "軸対称噴流一直管系の自励振動現象 (かく乱の周波数の固定化と共鳴現象の関係)" *長野工業高等専門学校紀要*, 第18号, 昭62, pp. 21~30