

マジックパイプの発音機構

中村, 泰治
九州大学応用力学研究所 : 教授

深町, 信尊
九州大学応用力学研究所 : 技官

<https://doi.org/10.15017/4743706>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 59, pp.61-66, 1983-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

マジックパイプの発音機構

中 村 泰 治* 深 町 信 尊†

概 要

マジックパイプとは、長さ約870 mm、内径約24 mmの、ベローズ構造をもつ撓み易い塩化ビニール製薄肉パイプの玩具であって、これを手で振りまわすと美しい音をだす。本論文はマジックパイプの発音機構に関する実験結果を述べたものであって、回転パイプ中にベローズに沿う管内流が発生し、そこで生じたエッジトーンにより気柱固有振動が励起されることを示す。

Key words: Sound generation, pipe flow, bellows, edge tone.

1. は し が き

ここにいうマジックパイプとは、図1に示すように、長さ約870 mm、内径約24 mmの、ベローズ構造をもつ塩化ビニール製薄肉パイプの玩具である。その一端を手で掴み振りまわすと美しい音を発する。パイプを速く振りまわすと、つぎつぎと高い音色の音にかわる。マジックパイプという所以であろう。

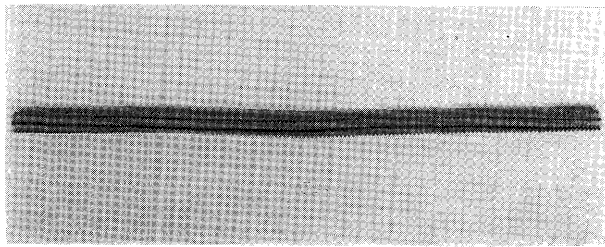


図 1 マジックパイプ

この玩具は、すでに10年位前に国内で流行したそうであるが、現在でも観光地の茶店などでみかけることが多い。戸田盛和著「統一おもちゃセミナー」¹⁾に“振りまわすと音のでる管”として紹介されているが、それによると、もとヨーロッパで流行したものらしい。上記「統一おもちゃセミナー」では、この玩具がどんな機構で音をだすかあまり触れていないが、本論文ではその発音機構について行なった2, 3の実験結果を述べる。

* 九州大学教授，応用力学研究所

† 九州大学技官，応用力学研究所

2. 実験装置と実験結果

まず、パイプを振りまわして音をだし、これをマイクロフォンで受けてみると、でてくる音は、両端を開口端とする直パイプの気柱固有振動であることがわかった。その基本振動は約 180 Hz であり、パイプを早く振りまわすと、つぎつぎと高次の固有振動が励起されるのである。

発音機構に関していくつかの因子が考えられるが、パイプの撓み易さは全く関係がない。これは、パイプにテープを巻きつけて直管としても、振りまわすとき全く同様な音がでることからわかる。つぎに、一方の手でパイプを振りまわすとき、他方の手でパイプの手元の端を塞ぐと、音は全くでない。したがって、パイプを振りまわすとき、遠心力によって、手元より先端に向う空気流がパイプ内で発生し、この流れが音の発生に関係することがわかる。

もっとも重要なことはベローズ構造の存在で、内面の平滑なパイプを振りまわしても音は全くでない。また、マジックパイプの内面に紙を挿入しただけでも、音がでなくなる。要するに、音の発生は、内面の凹凸に沿う管内流に関係するようである。

これだけの予備調査を行なったのちに、テープによって直管としたマジックパイプを水平に固定し、熱線流速計検定用小型風洞より風を送り、音の発生をみた。図 2 に示すように、マジックパイプの下流端の中央に熱線プローブをおき、管内の平均流速を求める。それと同時に、パイプに小穴を開けてもう一つの熱線プローブをパイプ内部に差し込み、凹凸近くの流速変動を測定する。さらに、管外の適当な位置にマイクロフォンをおいて、マジックパイプよりでる音を計測する。流速変動と音圧変動の信号は、実時間フーリエ解析器によってそのパワースペクトルが求められた。

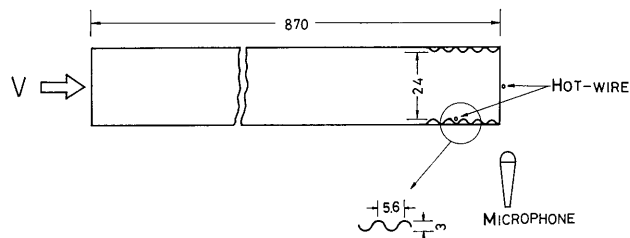


図 2 平均および変動流速計測用の熱線流速計と音圧変動計測用マイクロフォンの配置図

図 3 にそれらの波形の例を示す。図 3a よりわかるように、発生音はほぼ純音に近い。一般に、音圧変動のスペクトルは鋭いが、速度変動には乱れの成分が比較的多く含まれ、スペクトルのピークは低い。

図 4 は、手による振りまわしあるいは風洞を用いた送風によって得られた音の振動数を示したものである。また、図中の直線 f_n は直管パイプの気柱固有振動数を示す。ここに、

$$f_n = \frac{nc}{2l}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

であって、 l は開口端補正をしたパイプ長²⁾ ($=884$ mm)、 c は音速である。この結果は、発生音がパイプの気柱固有振動であることを明瞭に示している。ただ、基音 (180 Hz) は非常に弱く、あいにく、

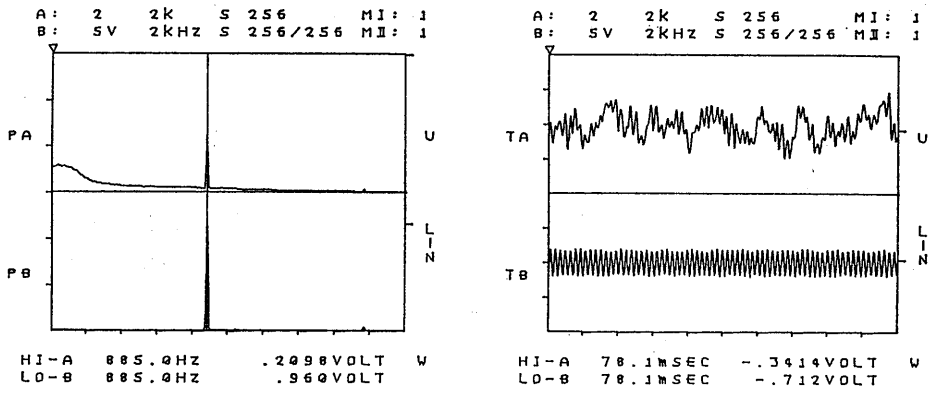
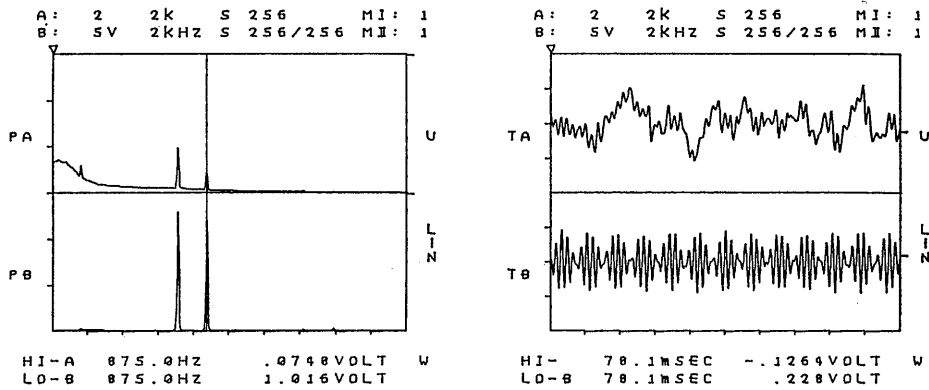
(a) $V = 12.5 \text{ m/s}$ (b) $V = 11.0 \text{ m/s}$

図 3 流速変動と音圧変動ならびにそのスペクトル図, 上図が流速変動, 下図が音圧変動を示す

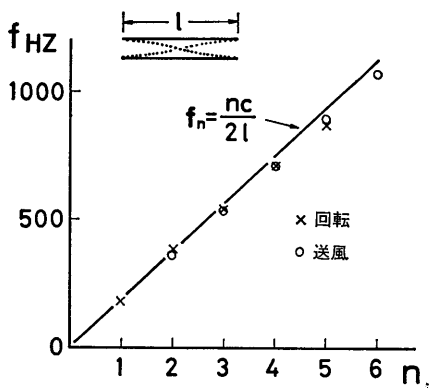


図 4 発生音と気柱固有振動

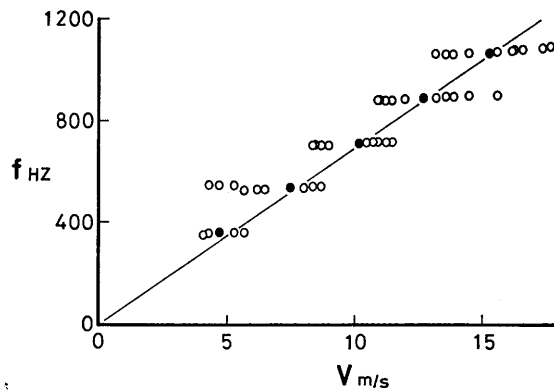


図 5 発生音の振動数と流速, 黒印は音圧変動スペクトルの極大を示す

測器の冷却用ファンの騒音が混入したため、スペクトル解析による識別が困難であった。そこで、九州芸術工科大学安藤由典教授の御好意により、フルートの音と合わせて基音が同定された。

図5は発生音の振動数と風速の関係を求めたものである。風速に対する音の振動数変化は不連続的であって、発生音はある風速範囲で特定の次数の音にロックされ、そのうち、風速の増大とともに、つぎつぎと高次の音に飛び移る。遷移領域では隣り合った次数の2音が同時に発生する場合がある(図3b参照)。また、このときヒステレシス現象として、2音のパワーの大小関係が、風速を増すときと下げるときで逆になる。図5において、マイクロフォン出力のスペクトル図より、それぞれの次数の音のパワーが極大となる風速を求めてみると、(図中黒丸)原点を通る直線となる。したがって、 $S_t = fd/V$ によってストローハル数を定義し、 d としてペローズ間隔(=5.6 mm)をとれば、

$$S_t = fd/V = 0.39, \quad (2)$$

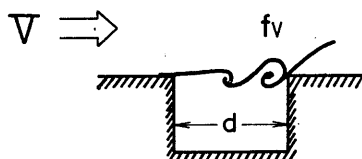
となった。

3. 考 察

単一のジェットあるいは剪断層は、それ自身のみで発振することは難しいが、下流に鋭いエッジがあるとき、その擾乱によって容易に発振する。この現象が一般にエッジトーン(edge tone)として知られているものである。エッジトーンはパイプオルガンなど多くの管楽器の発音機構となっているものであるが、近年、固体ロケット燃焼室の音響振動とか遷音速風洞の有害な騒音あるいはダムの水門とか航空機のフラップの振動など、色々な工学的問題に関係して活発な研究の対象となっている^{3),4)}。

とくに、凹み(cavity)の上流端で剝離した剪断層が鋭い下流端の存在によって発振する³⁾。図6に示すように、剪断層の発振振動数 f 、凹みの間隔 d ならびに流速 V でストローハル数 $S_t = fd/V$ を作るとき、 S_t は一般にはほぼ一定で、凹みの深さと幅にあまりよらない。図7は色々な剪断層発振の分類マトリックスであり、文献(3)より転写したものである。図中、第1行は純粋に流体系としての振動をあらわし、第2行と第3行は、流体振動系が、それぞれ、音響系あるいは弾性構造系と連成する場合を示している。また、第1列の基本形に対して、第2列には色々な例が挙げられている。とくに、壁面がペローズとなった管路で剪断層の発振がみられることは、図7の第1行右端に示されている。

さて、ここでマジックパイプの発音機構を考えると、それはエッジトーンの一種である可能性が濃



$$St = \frac{f_v d}{V} = \text{const.}$$

図 6 凹みにおけるエッジトーンの発生(剝離剪断層の発振)

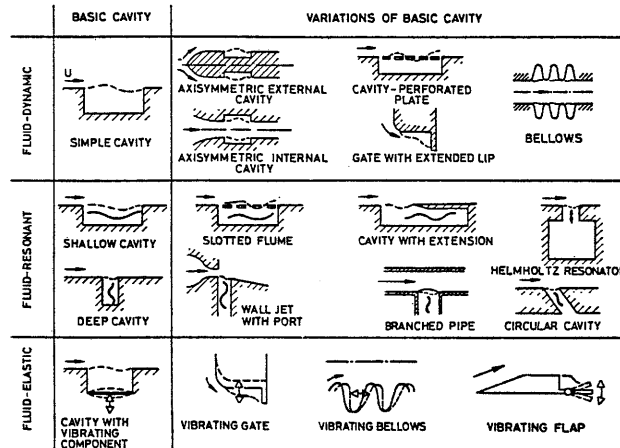


図 7 凹みにおけるエッジトーンの分類マトリックス (文献 (3) による)

い。すなわち、マジックパイプ内を流れる空気の流速が増すとき、ベローズで生じた流体振動系の振動数が増す。そして、その振動数がパイプの気柱振動の固有振動数に接近したとき、気柱振動が強く励起されるものと考えられる。

なお、図5に示すように、共振点付近の引込み現象（ロックイン）の存在は、剪断層の発振が気柱振動を励起する一方、気柱振動そのものも剪断層の発振に強い影響をおよぼすことを意味している。したがって、励振は単なる共振ではあり得ず、流体—音響連成系に生じる一種の連成自励振動であると考えられる。この点に関し、弾性構造物のカルマン渦による励振について触れたい。

カルマン渦の発生は、2列の剪断層の干渉によって生じる流体系の発振現象である。共振風速の近くでは、カルマン渦の放出振動数が構造物固有振動数に近くなり、構造物の振動が強く励起される。これがカルマン渦による構造物の励振であるが、よく知られたように、この場合でも励振は単なる強制振動であり得ず、引込み現象など、構造物の振動がカルマン渦の放出に強い影響をおよぼす。したがって、カルマン渦による構造物の励振は、流体—構造物連成系に生じる連成自励振動（連成フラッタ）にはかならない。先述のように、マジックパイプの音響励振も、流体—音響連成系に生じる連成自励振動であって、その意味で、これら両者の励振の構造は類似するところが多い。それゆえ、マジックパイプの音響励振も、構造物のカルマン渦励振も、ともに総称して渦励振と呼ぶことが許されるであろう。

4. あとがき

以上、マジックパイプの音の発生がエッジトーンによることを述べた。前記安藤由典教授によれば、楽器音響の観点からも、マジックパイプの音は純音で、非常に澄んだ音色であることが特徴のようである。また、この原理を応用した楽器は見あたらないそうである。

故鷲津久一郎東京大学名誉教授は、唐津鏡山の山頂においてマジックパイプを求められた際、同行し

た筆者の一人に発音機構の調査を提唱された。ここに本研究の動機を記し、あわせて、先生の永年に亘る学恩に深謝する次第である。また、基音同定のほか、楽器音響について有益な御意見を賜った九州芸術工科大学安藤由典教授に謝意を表する。

文 献

- 1) 戸田盛和：「統」おもちゃセミナー，日本評論社，1979，83-91.
- 2) Morse, P. M.: *Vibration and Sound*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1948, 247-248.
- 3) Rockwell, D. and Naudascher, E.: *Review-Self-sustaining oscillations of flow past cavities*, J. of Fluids Engineering, A.S.M.E., Vol. 100, June, 1978, 152-165.
- 4) Rockwell, D. and Naudascher, E.: *Self-sustained oscillations of impinging free shear layers*, Annual Review of Fluid Mechanics, Annual Review Inc., Vol. 11, 1979, 67-94.

(昭和 58 年 5 月 31 日 受理)