103 開口端を有するダクトにおける 脈動流の可視化

東海大(院) 加藤 康晴○
東海大学・工 弓野 崇
日産自動車 岩沢 敦
東海大学・工 谷田 好通

Pulsating Flows in a Two-Dimensional Duct with Sudden Expansion

Yasuharu Katou* Takashi YUMINO* Atusi IWASAWA** Yoshimichi TANIDA*

Experiments and numerical calculations have been carried out to elucidate the gas exchange in pulsating flow through a two-dimensional duct with sudden expansion, which simulates the nose. The pulsating flow was visualized by the tobacco-smoke method and the smoke wire method, and the streaming was studied numerically by the time-line method. the results show that the streaming occurs around the open end of the duct to bring about a forced gas exchange.

1. はじめに

生物の肺呼吸によるガス交換のメカニズムについては、まだ解明されていない部分が多く残っている。成人の場合、1回の呼吸量は約500cm³であるが、肺胞をのぞく気管内の総容積は約1500cm³であるから、その1/3の量しか呼吸しないことになる。このため、わずかな吸入気が気管支内で効率よく拡散し、肺の隅々まで循環していくものと考えられている。このガス交換を促進する要因の一つとして、気管支はY型に分岐しており、流れ方向に幾何学的非対称性を持つことによって生じる二次流れ(Streaming)が考えられる¹⁾。また、鼻口部分においても、呼気と吸気の流れが非対称であるため二次流れが発生することが期待できる。そこで本実験では、鼻口、および気管をシミュレートした開口端を持つダクトモデルを用いて、ダクト開口部付近の流れを、タバコ煙注入法およびスモークワイヤー法により可視観察を行った。また、二次元鼻口モデルを用いて、開口端近傍の脈動する流れを差分法によって数値解析し²⁾、脈動流の挙動を明らかにすると共に、Streamingによるガスの強制交換について調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

Fig.1に脈動流発生装置の概略図を示す。モーターの駆動によりピストンに往復運動(吸排気容積459cm³)を与え、それによりチャンバーを通して吸排気ダクト内に脈動流を発生させる。チャンバー及びダクトは透明アクリル樹脂製で可視化可能な構造となっている。吸排気ダクトは100×30mmの矩形断面を持ち、長さは1500mmである。タバコ煙法においては、ダクト出口より

* Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratuka

** Nissan Technical Center

150 mmの位置にタバコ挿入口が設けてありタバコを挿入することができる。スモークワイヤー法においては、ダクト出口より下流6 mmの位置には長さ120 mm、直径0.04 mmのタングステン線を張ることができる。なお、ダクト下流には、外乱を防ぐために側壁を設けた。

2・2 実験方法

タバコ煙法は、脈動流発生装置によりダクト内部に脈動流を発生させ、火のついたタバコを挿入し、ダクト内にタバコ煙を充満させスリット光線を開口端側より照射することにより可視化を行う。実験は暗室で行い、任意のクランク角で開口端における煙の状態を撮影する。

スモークワイヤー法は、流動パラフィンと灯油を混合したオイルをタングステン線に塗布し、コンデンサー・通電回路を用いて通電し発煙させる。タバコ煙法と同様に実験は暗室で行い、ダクト開口端における煙の状態を撮影する。

Fig.1 Experimental set-up

3. 数値計算法

3.1 基礎式

二次元、非定常、非圧縮性流れのナビエ・ストークスの運動方程式と連続の式から渦度輸送方程式を求め、無次元化して(1)式を得る。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

次に流れ関数 ψ を用いると、渦度は、

$$\zeta = - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

(1)及び(2)式の両辺を面積積分して風上差分化し、過緩和法により ζ と ψ を求める。以上のようにして流れ関数 ψ 、渦度 ζ 、流速 u 、 v を求める。

3・2 計算領域及び初期条件、境界条件

計算領域はダクトが無限に並んだモデルを考え、その対称性を利用して計算を行った。また計算は初期条件としてポテンシャル流を与え、Fig.2に示す鼻口モデルにおいて次のような境界条件を用いて行った。

- ① B4では、一次元脈動流を与えた。
- ② B2, B5では、 $\psi = 0$ 及び滑りなしの条件を与えた。
- ③ B6では、平行流の条件を与えた。
- ④ B1では、 $\psi = 0$ 、 $\zeta = 0$ と与えた。
- ⑤ B3では、 $\psi = \cos(2\pi Ft)$ 、 $\zeta = 0$ と与えた。

Fig.2 2D duct model

4. タバコ煙による流れの可視化

Fig.3はダクト出口付近の流れパターンを撮影した写真の一例であり、Fig.4およびFig.5はこれらの写真からダクト出口から渦の中心までの距離 L と渦対の中心間距離 B を測定したものである。ここで、クランク角は 0° が下死点、 180° が上死点（共に流量は0）であり、 0° から 180° までは吐き出し過程（流量は正）、 180° から 360° までは吸い込み過程（流量は負）となっている。これらによると吐き出し行程のクランク角 60° 付近においてダクト出口のエッジに渦の発生が見られ、その後、渦は成長し徐々に大きくなりながらダクトから離れていく。さらに、吸い込み行程中では渦の周りから吸い込まれる吸気の干渉を受け渦間の距離 B は減少するがこの間にも渦は成長を続け、その後崩壊していく。一方、吸気は渦の周囲からダクト内に吸い込まれるが渦（排気）とほとんど混合していないことから、ダクトの出口において強制的なガス交換が行われていることが確認できた。

Fig.4 Transport of vortex

Fig.3 Flow patterns visualised by tobacco-smoke method Fig.5 Distance of vortex pair
 $(\alpha=6.83, f=0.50\text{Hz}, H=\infty)$

5. タイムライン法による可視化

時々刻々に変化する脈動流を一周期に渡り積分することによって得られる定常な二次流れをStreamingという。吐き出し過程と吸い込み過程で流れが対称であれば二次的流れは0となるが、非対称管路における脈動流派は吐き出し時と吸い込み時で流れが非対称であるため、二次的流れが残ることになり、このStreamingがガス交換に影響を及ぼしていると考えられる。

Fig.6は、 $H/h=2.9$ 、 $Re=1000$ 、 $F=0.0312$ 、 $\alpha=6.99$ の条件において脈動流を計算し、その結果を時間平均して求めたStreamingを示したものである。ここで、開口端出口下流域の渦は左回り、開口端出口の渦は右回りであり、これらの図からStreamingの存在が確認された。しかし、Fig.6は脈動流をオイラー的に観察したものであるが、ガス交換を調べるためには、流体粒子の運動をラグランジュ的に調べる必要がある。そこで、ダクト開口端における渦の生成を流脈的に明らかにするために、ダクト開口端にタイムラインを作り、その時間変化を調べた。Fig.7はFig.6と同様の条

件の下で、吐き出し過程の始点である位相 0° の時にダクト開口端（図中に矢印と点線で示された位置）にタイムラインを発生させ、脈動の一周期における時間変化を示したものである。この図を見ると、タイムラインはダクト部から吐き出されると次第にダクト出口外側に広がっていき、脈動が進んで吸い込み過程にはいると、ダクト中心側よりも壁面側から強く吸い込まれていくことが解る。これは前述の可視化実験からも解るように、脈動によって開口端にはキノコ状の渦が生じ、ダクト内の流体が外部に押し出されると共に渦外周部より外部の流体が吸い込まれて、強制的にガス交換が行われていることを示している。

Fig.8は、スモークワイヤー法によるタイムラインの可視化写真の一例であるが、Fig.7と同様な結果が得られている。

Fig.7 Time-lines(calculated)

Fig.6 Streamig

Fig.8 Time-lines(smoke-wire method)

6. まとめ

タバコ煙法およびタイムラインの時間変化よりダクト開口端近傍におけるStreamingによる強制的なガス交換を確認できた。

文献

- 1) Kamm,R.D.,Slustsky,A.S.&Drazen,J.M. 1984 High-frequency ventilation.CRC Crit. Reviews in Biomed.Eng.9(4),347-379
- 2) 岩沢敦, 開口端を有する二次元ダクトにおける脈動流の数値解析, 93年度, 東海大学修士論文