論文

開口端を有するダクトにおける脈動流に関する研究*

弓野 崇**, 岩澤 敦***, 加藤 康晴†, 谷田 好通††

Pulsating Flows in a Two-Dimensional Duct with Sudden Expansion

Takashi YUMINO, Atsushi IWASAWA, Yasuharu KATO and Yoshimichi TANIDA

ABSTRACT

The purpose of the present paper is to study the characteristics of flow and gas exchange in the pulsating flow in the respiratory net work both by flow visualization and by numerical simulation.

The pulsating flow in a two-dimensional duct was visualized by the smoke-wire method, and its time-dependent velocity profile in the duct was measured with reasonable accuracy. The behavior of the pulsating flow around the duct intake was observed by the tobacco-smoke method and it was shown that the breathing air causes the streaming that brings about gas exchange.

The numerical results confirmed the experimental results and predicted the behavior of gas diffusion at the intake.

Key words: Pulsating flow, Gas exchange, High-frequency ventilation, Tobacco-smoke method

1. まえがき

高等動物の主な呼吸器は肺であるが、それは多分岐する気道とその末端にある無数の肺胞よりなっている¹⁾。気道は管状で鼻口に始まり鼻、鼻腔、咽頭、喉頭をへて気管、気管支、細気管支等々から肺胞管へと倍々に分岐して肺胞に達する。肺胞は伸縮性のある微小な袋状のもので、横隔膜と胸壁(肋骨)の移動により膨張、収縮することによって鼻口を通して外気を吸入し、肺胞気を排出する。

呼吸器系を流体力学的に見ると、流れは時間平均流量が0の脈動流であり、それが複雑な分岐管で生ずる。内田は直円管(直径 d)における脈動流(振動数 f)を解析的に調べ、脈動流の挙動は無次元振動数 $\alpha = (d/2)\sqrt{2\pi f/\nu}$ (ν は流体の動粘性係数)に依存することを示した²⁾。生理学においてはこの無次元数をウォーマー・スリー(Womersley)数とよんでいる。次に、角田らは曲がり管における脈動流を可視化実験と数値解析により調べ、脈動流においても流れ方向に軸をもつ一對の渦より

なる定常的な2次流れが生ずることを示した³⁾。分岐管は丁度曲がり管を2個抱き合わせた構造をもつことから、やはり同様な2次流れが生ずる⁴⁾。また、分岐管は流れ方向に幾何学的に非対称であることから、脈動流では吐き出し行程と吸い込み行程では流れも非対称となり、その一周期にわたって時間平均すると、定常的な2次的流れが残る。これはストリーミングと呼ばれるもので⁵⁾、これにより、流体粒子が管軸方向に非可逆的に移動して、流体の強制的な移送・交換が行われる⁶⁾。さらに、分岐管においては、吸気の場合分岐部で流れの剝離・混合が生じ、定常な場合でも直管におけるポアズイユ流れの数倍の圧力降下が生ずることが示されているが⁴⁾、脈動流における流れの挙動や圧力損失等の詳細は明らかでない。

一方、呼吸におけるガス交換に関しては、正常呼吸の場合、一回呼吸気量が気道容積の1/3程度であるにもかかわらず、肺胞気が排出されるが、このようなガス交換は分子拡散のみならず、上述の流れとの干渉によって効率よく達成されると考えられる。直円管の定常流における拡散に関してはTaylor拡散⁷⁾が知られているが、脈動流に関しても理論的、実験的に調べられている^{8)~10)}。しかし、分岐管に関しては、Taylor的拡散、2次流れ、ストリーミング等が共存し、それらがどのような度合いで拡散に影響しているか明らかでなく、限られた範囲に対して脈動時の拡散が実験的に調べられているに過ぎな

* 原稿受付 1996 年 3 月 13 日

** 正会員 東海大学工学部

*** 日産自動車㈱

† 東海大学工学部大学院

†† 正会員 東海大学工学部

い^{11),12)}。さらに,人工呼吸では1回の換気量を正常呼吸の10分の1程度に小さくして数Hz程度の高周波数の呼吸法が採用されている。高頻度換気(High-Frequency Ventilation: HFV)と呼ばれているが,このような高周波数呼吸でも正常呼吸と同じ程度のカス交換が達成されているが,その理由は十分に解明されていない^{13),14)}。

上述のように、呼吸器系においては、気道における脈動流とガス交換が注目されているが、両者の相関についてはまだ十分に明らかにされていない。一方、鼻口に関しては今まであまり注目されていないが、ダクト開口端と考えられる鼻口も形状が非対称で、吸気と呼気とで流れの様相が大きく異なり、その一周期にわたって時間平均すると、定常的な2次の流れが残る。それにより新気と肺胞気とを効率よく交換する機能をもっていると考えられる。そこで、本研究は全体計画としては、鼻口と分岐管における脈動流とガス交換を実験的、数値解析的に調べて各要素における有効拡散係数を評価し、呼吸器系のシミュレーションモデルを確立することを目的とするが、まず本論文では鼻口に注目し、それをモデル化した開口端を有する2次元ダクトにおいて脈動流の挙動を実験的、数値解析的に調べる。なお、本研究における呼吸条件は高頻度呼吸に相当する。

2. 実験

2.1 実験装置と実験方法

実験装置は、Fig.1 に示すように、タンク (28×28×28 cm 立方)、2 次元ダクト (断面: 高さ 10 cm×幅 (2h) 3 cm, 長さ 150 cm) および脈動流発生装置よりなる。タンクおよびダクトは、流れの可視化観察のために、透明プラスチック製である。脈動流発生装置は、単筒ピストン機関を改造したもので、行程体積 V_T (呼吸気量に相当) は 459 cm³ である。ダクト開口端 (空気取り入れ口) には、外部の攪乱を防ぐために、側壁が取り付けられている。

実験は、任意の周波数の脈動流を作って、流れの可視化（スモーク・ワイヤ法およびタバコ煙法）と熱線流速計を用い、流路幅方向断面（ $z=0$ ）で計測を行った。実験条件を Table 1 に示す。

ここで、

$$\text{レイノルズ数: } Re = \frac{U_0 \cdot 2h}{\nu}$$

 ν : 空気の動粘性係数

平均流速振幅: $U_0 = \frac{\pi f V_T}{A}$

A: ダクト断面積

無次元振動数 (ウォーマースリー数)

$$\alpha = h \sqrt{\frac{2\pi f}{\nu}}$$

Fig.1 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Wormersley number α	3. 96, 4. 84, 5. 59, 6. 84, 8. 83
Reynolds number Re	160, 240, 320, 480, 796
Distance of endwall H	3h, 6h, 9h, 13h
Measuring point L mm	50, 100, 150, 750

以下に実験法を簡単に述べる。なお、流れは双方向流であるから、吐出し行程時を基準にして考えることにし、タンク側を上流、開口端側を下流とする。

ダクト内の脈動流の速度分布は、スモーク・ワイヤ法および熱線流速計によって測定した。スモーク・ワイヤ法では、直径 0.1 mm のタングステン線をダクト軸に直角に流路幅一杯 (30 mm) に張り、それに流動パラフィンと灯油を 1:1 に混合したものを適当な量だけ塗布し、エンコーダ信号によって任意の位相角 (下死点基準) で通電して発煙させる。この場合、暗室内でカメラのシャッタを解放にし、遅延回路を用いて適当な遅延時間でストロボを発光させ 1 本目のタイムラインを撮影する。さらに適当な遅延時間でストロボを発光させ、2 本目のタイムラインが得られ、その移動距離よりその点における流速を求めることができる。一方、比較のために、熱線流速計による測定も行った。しかし、流速が低い (0~50 cm/s) 上に、脈動流であるから流速 0 の状態が必然的に存在し、ピストンのビビりの影響やサイクル変動もあるので、3 サイクルにわたって信号の平均化処理を行った。

ダクト開口端における流れの観察は、主としてタバコ煙法を用いて行い、スモーク・ワイヤ法も併用した。前述の脈動流の特徴のために、タバコ煙の供給が困難であったので、ダクト壁にあけた孔に紙巻きタバコを直接ダクトに挿入した(開口端上流 25 cm)。このため、浮力の影響が若干みられ、変化が微小なダクト内のストリーミングの観察はできなかった。開口端下流に生ずる渦を

可視化するには、スリット光線を下流側より照射して観察、撮影を行った。撮影は写真撮影の他、ビデオ撮影も行った。

2.2 ダクト内脈動流の流速分布

Fig.2 に、スモーク・ワイヤ法と熱線流速計で測定した流速の時間的変化の1例を示す。スモーク・ワイヤ法で得られた結果は、熱線流速計のものと比較的良好一致しているが、やや時間遅れをもって変化している。これは、スモーク・ワイヤ法の場合、通電から発煙までの時間遅れによるものと考えられる。このようにして得られた結果より、流路断面における流速分布の脈動1周期における時間的変化を求めたものを Fig.3 に示す。これは、開口端の影響を受けないダクト中央付近での速度分布であって、吐き出し行程と吸い込み行程における速度分布は対称であり、熱線流速計による測定結果 (Fig.4 a) とほぼ一致している。図にみられるように、ウォーマースリー

Fig.2 Time-dependent velocity profile

数 α が大きくなると、粘性の影響が管壁付近に限定されてくるために、管中心付近で速度分布が一様になり、また管壁付近と管中心付近とで時間的位相差が顕著になって、流速が反位相で変化するようになる。一方、ダクト開口端付近では Fig.4 b に見るように、吐出し行程と吸い込み行程における速度分布の対称性はくずれ、吸い込み流速が吐き出し流速より大きくなっている。これはダクト開口部の端部に剥離渦が発生し、流れがダクト中心部付近に偏って流れるためと考えられる。これらの結果は後述の数値計算結果と比較的良好一致している。

2.3 ダクト開口端における脈動流の可視化

本研究では主としてダクト開口端付近における流れの

Fig.3 Time-dependent velocity profile
 $\alpha = 4.84$, $U_0 = 12.0$ cm/s, $L = 750$ mm

(a) $L = 750$ mm

(b) $L = 50$ mm

Fig.4 Time-dependent velocity profile (Hot-wire anemometer) $\alpha = 5.59$, $U_0 = 15.8$ cm/s

Fig.5 Schematic diagram of the intake

挙動に注目するが、剥離を伴う複雑な脈動流を熱線流速計で測定することは難しく、またそれより流れを全体的に把握することも困難であることから、ここでは可視化によって流れを観察、解析することにする。

Fig.5に開口端における流れの概略図を示す。本実験では、ダクト開口端下流に、下流側よりの攪乱を防ぐためと数値計算結果とも比較することを考慮して、側壁（間隔 $2H$ ）を設けている。

Fig.6は、下流側壁の間隔が広い ($H = 13h$) 場合において、脈動1周期におけるダクト開口端における脈動流をタバコ煙法によって可視化した場合を示す。吐き出し行程 ($\omega t = 0^\circ \sim 180^\circ$) に入ると、ダクト開口端より流出する流れは開口端の角で剥離し、1対の渦を形成する。この1対の渦は次第に成長し、渦中心は下流に移動してゆく。脈動流が吐き出し行程から吸い込み行程 ($\omega t = 180^\circ \sim 360^\circ$) に入ると、渦の外側から開口端の角をまわってジェット状の流れがダクト内に流入し、それとともに1対の渦は下流に押し出されて次第に減衰、拡散して行く。

これに対して、開口端下流に狭い側壁 ($H = 3h$) を設けた場合には、Fig.7に示すように、吐き出し行程で作られた1対の渦は下流へ顕著に移動することなく、吸い込み行程においては周囲のジェット状の吸い込み流れに引きずられるようにダクト内に吸い込まれる。このように、渦の動きは側壁の間隔によって大きく変わるが、側壁の間隔が小さくなると、側壁による鏡像効果により渦の移動が抑制され、またダクト開口端下流における吸い込み流速の増加と相まって、渦があまり下流に移動することなく、再びダクト内に吸い込まれるようになると考えられる。

Fig.8は、以上のような可視化写真より渦中心位置の時間的変化を求めたものである。これを見ると、上述のように、下流側壁の間隔が大きい場合には渦は下流に移動して次第に消滅するが、下流側壁の間隔が小さくなると渦は一旦下流に移動した後、再び上流に移動していることがわかる。渦が下流に移動する速度は、ダクト内の平均流速の13%程度である。

以上の結果より、開口端を有するダクトにおいては、脈動流はその吐き出し行程で渦を生成・放出し、吸い込み行程で渦の周囲から外部の流体を吸い込んでおり、し

Fig.6 Flow pattern around the intake
 $\alpha = 4.84$, $H = 13h$
 Film: iso 400, Exposure: 1/30 s
 Lens aperture: 1.4

Fig.7 Flow pattern around the intake
 $\alpha = 4.84$, $H = 3h$
 Film: iso 400, Exposure: 1/30 s
 Lens aperture: 1.4

たがって吐き出し行程と吸い込み行程とでは非対称の流れを形成している。これより鼻口においても定常的な2次的流れ（ストリーミング）が生じて、強制的なガス交換が行われていると考えられる。上述の可視化実験では、

Fig.8 Axial location of the vortex center

脈動流によるストリーミングの強さやガス交換量を定量的に求めることは困難であるので、それらを以下の数値解析によって調べることにする。

3. 数値解析

3.1 解析モデルと解法

数値解析においても、実験の場合と同様、2次元流れ場を考え、2次元の非圧縮性・粘性流れに関する渦度輸送方程式と渦度の式を有限体積法により差分化し¹⁵⁾、過緩和法により解いた。

解析モデルとしては、実験の場合と同様開口端を有する2次元ダクトを考える。しかし、数値解析において、開口端下流側に無限に相当するような領域を考えることは望ましくないこと、また領域を有限に限定したとき脈動流の境界条件を与えることは難しいこと、などを考慮して、Fig.9に示すように鼻口がある間隔で無限個並んで現象が周期的に変化しているものとして、その内の一つの領域（図中、点線内）を取りだして計算領域とする。

Fig.10はそれを示したものである。

計算領域は、ダクトの半幅 h を基準として、ダクト長さ（ X 方向）を $100h$ 、計算領域全体の長さを $120h$ とし、ダクト開口端下流部の幅 H は $3h, 6h, 12h$ の3種類とした。ここでは、計算領域は等間隔格子で分割し、その分割数は X 方向に600、 Y 方向に10（ダクト内）とした。なお、境界条件として、無限上流（境界 B4）に1次元脈動流の解、無限下流（B6）に平行流条件、B1では $\phi = 0, \zeta = 0$ を、B3では $\phi = \cos(2\pi Ft)$ 、 $\zeta = 0$ と与えた。

3.2 結果および考察

3.2.1 ダクト開口端における脈動流の挙動

Fig.11に、無限に長いダクト内の1次元脈動流の数値計算結果を示す。ここで、流速 u は平均流速の振幅 U_0 で

Fig.9 2D duct model

Fig.10 Numerical region

Fig.11 Time-dependent velocity profile by 1D numerical solution of pulsating flow in the infinity duct
 $\alpha = 4.84, Re = 477$

無次元化しており、脈動の位相間隔 30° おきの流速分布が示されている。図中の位相 180° は吐き出し行程の終点（以下、上死点とする）、 $360^\circ (0^\circ)$ は吸い込み行程の終点（以下、下死点とする）を示す。この数値計算結果は1次元脈動流の厳密解とよく一致しており、また第2章

で述べたように、脈動流の特徴、すなわちダクト壁面付近における逆流現象やダクト中心付近における流速の平坦化などを見ることができる。

次に、得られた1次元脈動流を、開口端を有する2次元ダクトの上流境界に境界条件として与えて計算する。以下、一例として $H = 3h$ の場合の結果を示す。Fig.12 は流線（上半分）、渦度分布（下半分）を示す。これより、吐き出し行程（位相 $0^\circ \sim 180^\circ$ ）において流れはダクトから噴流状に噴出し、ダクト開口端の角で流れが剝離して渦が生成される。渦度分布を見ると、ダクト開口端の角に

生ずる渦は強い右まわりの渦であるが、ダクト中心部に左まわりの弱い渦が生じており、これらの渦が対になってダクト開口端下流に広がって行く。ついで、吸い込み行程（位相 $180^\circ \sim 360^\circ$ ）に入ると、ダクト開口端下流の壁面側からダクト内へ強い吸い込み流れが生じ、開口端角からダクト内にかけて流れの剝離泡が発生し、それによってダクト中心部では流速が大きくなる。また、それとともに、流路全体に広がっていた渦も一部吸い込まれるが、ダクト中心部の左まわりの渦は孤立化して下流に流されて行く。再び吐き出し行程に入ると、右まわりの渦は新たにダクト開口端角に生ずる渦と合流して行く。開口端における流れの挙動は、流路や流れの条件が変わっても基本的に大きな違いは現れなかった。これらの結果は、定性的に実験でえられたものと一致している。

3.2.2 ダクト内の流れに対する開口端の影響

実験および数値計算の結果より、ダクト開口端で脈動流は空間的、時間的に非対称であって、いわゆるストリーミングが生ずる。そこで、ダクト内流速分布の開口端による歪みを調べ、ストリーミングの強さとその存在する範囲を評価してみる。

そこで、上述の計算結果より、開口端によるダクト内流速（ダクト軸方向成分）の歪みを調べた。その結果を平均流速振幅 U_0 で流速 u を無次元化して Fig.13 に示す。図 a は、開口端よりの距離がかなり大きな位置 ($X/h = -9.85$) での流速であって、開口端の影響をほとんど受けておらず、吐き出し行程と吸い込み行程ではほぼ対称な分布を示している。しかし、開口端に近づくにしたがって、流速分布の対称性が失われてくる（図 b）。すなわち、吐き出し行程ではあまり大きな変化は見られないが、吸い込み行程では、ある位相でダクト壁面での流れの剝離による逆流が生じ、ダクト中心部の流速を増大させる結果、吐き出し行程と吸い込み行程とで流速分布が非対称となる。しかし、開口端 ($X = 0$) では角をまわる流れが強く加速されるために、図 c のように見かけ上十分上流の図 a に近い流速分布になっている。ここで、ダクト上流の $X/h = -9.85$ の点を基準として、各点における

Fig.12 Streamlines (upper) and equivorticity contours (lower)
 $\alpha = 6.84$, $Re = 477$, $H/h = 3$

Fig.13 Time-dependent velocity profile $\alpha = 4.84$, $Re = 477$, $H/h = 3$

Fig.14 Distortion of velocity
 $\alpha = 4.84$, $Re = 477$, $H/h = 3$

脈動の1周期を通じた最大流速の差で流速の歪みを定義して、 X/h に対して示したものがFig.14である。これによると開口端に近づくにしたがって、剥離渦の影響を強くうけて歪みが40%にも達している。脈動流のストローク ($s/h = 10.2$) と比較すると、開口端の影響のおよぶ範囲はほぼストロークの大きさに等しく、それより上流では開口端の影響は小さい。

以上の結果より、ストリーミングの強さは開口端近傍では極めて強く、その範囲は脈動流のストロークの大きさにほぼ相当すると考えられる。

3.2.3 脈動流の可視化

ストリーミングの存在は空間の各点において流速を時間平均することによっても調べることができるが、ガス交換の観点からは流体粒子をラグランジュ的に追跡することが必要である。そこで、二つの可視化手法、すなわち粒子トレーサ法とタイムライン法を用いて調べる。

a. 粒子トレーサ法による可視化

まず、脈動流における強制的なガス交換の状態を視覚的にとらえるために、粒子トレーサ法により流れを観察した。

ダクト開口端およびダクト内の任意の位置において、ダクト幅(Y)方向の格子点上で、ある1周期の間に下死点を始点として30°の位相間隔で次々と粒子を発生させ、その後さらに脈動を繰り返したときに、粒子がどのように分散してゆくかを調べる。

Fig.15は、そのようにしてえられた結果の1例で、粒子発生後の各サイクルの吐き出し行程と吸い込み行程の終点(上死点と下死点)における粒子の分散状態を示したもので、脈動を繰り返しながら粒子が流れ場に広がってゆく様子がわかる。これを見ると、ダクト内に吸い込まれた粒子は、ある距離まで達するとそれ以上ほとんどダクト内部に進入することなく安定して脈動を繰り返す。

Fig.15 Distortion of velocity
 $\alpha = 6.84$, $Re = 477$, $H/h = 3$

これは、ダクト開口端の影響によるストリーミングがある範囲に限定されることによるものであって、ダクト内部への粒子の到達距離はほぼ脈動流のストロークの大きさ ($s/h = 5.10$) に相当しており、前述の流速歪より推論した結果と一致する。一方、ダクト開口端から下流に放出された粒子の一部は、強いストリーミングに乗って移動し、次第に下流に広がってゆく様子が観察される。

b. タイムライン法による可視化

粒子トレーサ法では、脈動によってガスが交換される様子を見ることができたが、ガス交換量を定量的に調べるために、流れの中にタイムラインを作り、それを時間的に追跡するタイムライン法で可視化した。

Fig.16は、脈動流の吐き出し行程の始点(下死点、位相0)の瞬間に開口端に直線状のタイムラインを発生させ、その動きを脈動1周期に渡って追跡したものである。これを見ると、タイムラインは開口端から吐き出されると開口端に生ずる渦に乗って次第に下流外側に広がって行くが、吸い込み行程に入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る。その結果、タイムラインはキノコ状となり、吸い込み行程の終点においても初期の直線状のタイムラインの位置に戻ることはない。

吸い込み行程の終点におけるタイムラインを調べると、脈動1周期の間にダクト内の流体がダクトから下流に押し出されている(Fig.16中のハッチ部)。結局、これだけの量の流体がダクト内から下流に流出し、同量の流体が

Fig.16 Extension of the particles around the intake
 $\alpha = 6.84$, $Re = 477$, $H/h = 3$

ダクトの下流からダクト内に流入しているわけで、それが脈動による強制的なガス交換量となる。図の場合、強制的なガス交換量は脈動のストローク体積の約34%である。正常呼吸におけるガス交換効率は約15%であり、高頻度呼吸においては効率はさらに悪いと考えられるから、鼻口のストリーミングによるガス交換が極めて効率的であることがわかる。一方、呼吸器系を解析する際には通常、吸気行程において鼻口から新気を吸い込むとして解析するが、上記の結果は、鼻口においてガス交換効率を考慮する必要があることを示している。

4. むすび

開口端を有するダクトにおける脈動流の挙動を可視化実験および数値解析で調べ、次の結果を得た。

- 1) 脈動流の吐き出し行程において、ダクト開口端に一对の渦が形成されるが、吸入行程において、渦の周囲から外気がジェット状に吸い込まれて、流れは時間的、空間的に非対称な変化をする。
- 2) これより、ダクト開口端まわりに強いストリーミングが生じ、それによって強制的なガス交換が行われる。これが呼吸におけるガス交換を助けていると考えられる。

3) ダクト開口端がダクト内脈動流に影響をおよぼす範囲は、脈動のストローク程度であり、その範囲内でストリーミングによってガスの混合が行われるが、それより上流ではストリーミングは無視することができる。

最後に、本研究に協力してくれた当時本学大学院生長谷川正人、小林和典および卒業研究生宮沢英樹、丸山貴和、鈴木崇、貝原英樹、三島久明、菊池孝幸、橋本泰岳、高橋宏、菊池原裕、大崎正道の諸氏に感謝いたします。

また、本研究は文部省科学研究補助金（重点領域研究(1)、生体の機能と構造に関する計算バイオメカニクスの「呼吸器系におけるガス交換に関する研究」を分担）の交付を受け遂行されたものであって、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) West, J. B. ed., Bioengineering Aspects of the Lung, Lung Biology in Health and Disease Vol.3, Dekker, 1977
- 2) Uchida, S., The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe, ZAMP, VII, 1956, 403
- 3) 角田勝, 須藤浩三, 曲がり管内二次流れの可視化法, 可視化情報, 10-29, 1990, 263.
- 4) Pedley, T. J. et al., Gas Flow and Mixing in Airways. 文献(2), 163
- 5) 鈴木滋雄, 分岐管における拍動流中の流れと拡散, 東京大学修士論文, 1991
- 6) Haselton, F. R. & Scherer, P. W., Flow Visualization of Steady Streaming in Oscillatory Flow through a Bifurcating Tube, J. Fluid Mech., 123, 1982, 315
- 7) Taylor, G. I., Dispersion of soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Tube, Proc. Royal Soc. London. A219, 1953, 186
- 8) Watson, E. J., Diffusion in Oscillatory Pipe Flow, J. Fluid Mech., 133, 1983, 233
- 9) Joshi, C. H. et al., An Experimental Study of Gas Exchange in Laminar Oscillatory Flow. J. Fluid Mech. 133, 1983, 245
- 10) 西田, 藤岡, 小渡, 谷下, 振動流に発生する乱れのテラー拡散に対する影響, 日本機械学会論文集 (B編) 58-555, 1992, 3298-3304.
- 11) Scherer, P. W. et al., Gas Transport in Branched airways during High-Frequency Ventilation, Annals of Biomed. Engg., vol.12, 1984, 385-405
- 12) 西田, 吉村, 谷下, 対称分岐管内振動流における軸方向拡散の評価, 日本機械学会論文集 (B編) 60-570, 1994, 417-424
- 13) Kamm, R. D. et al., High-Frequency Ventilation. CRC Critical Reviews in Biomed. Engg., 9(4), 1984, 347
- 14) Yumino T. & Tanida Y., A Computational Analysis of Gas Transport in Respiratory Network, Proceedings of the School of Engg. Tokai University, Vol. XX, 1995, 45-60
- 15) Gosman, A. D. et al., Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, Academic Press, NY., 1969, 94