鳥類の気道流れを規範にした振動分岐流の
物質輸送促進に関する数値的検討*酒井英司^{*1}, 渡辺紀徳^{*2}, 姫野武洋^{*2}Numerical Study on Mass Transport Enhancement in
Oscillatory Flow of Avian Lung ModelEiji SAKAI, Toshinori WATANABE^{*3} and Takehiro HIMENO^{*3} Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

It is well known that the airflow in the gas exchange bronchi in avian lung has a unidirectional nature. Since the direction of the flow is against the blood flow, the gas exchange efficiency of avian respiration is higher than that of mammalian counterpart. To clarify flow phenomena in avian lungs, oscillatory flow fields and concentration fields in a right angle branched tube, model bifurcation of avian trachea, were numerically studied. The three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations were solved by SIMPLE method, while the convection equation of concentration was solved by CIP method based on the results of flow simulation. The results showed that separation vortex observed at the entrance of a side-daughter tube during inspiration drove the unidirectional net flow from the side-daughter tube to the daughter tube. Due to the convective inertia, unidirectional net flow persisted even in the expiration. It was clearly shown that the unidirectional net flow strongly enhanced axial mass transport. The effect of constriction just upstream of the bifurcation was also studied and increase in the magnitude of unidirectional net flow was observed in the case with constriction.

Key Words: Pipe Flow, Oscillatory Flow, Unidirectional Flow, Avian Lung, Mass Transport Enhancement

1. 緒 言

鳥類の肺気道内に見られる一方向流れの発生機序に関しては、古くから気道内の流れとの関連が指摘され、分岐や狭さく部における流れ構造が注目されている^{(1)~(8)}。

著者らは、前報⁽⁸⁾において、鳥類の気道分岐を模擬した直角分岐管における振動流の可視化および流量分配の測定から、分岐部に生じる渦と慣性が一方向流れの成因であることを実験的に明らかにした。

本報では、直角分岐管内振動流の数値解析を行い、流れ場と濃度場を詳細に調べることで一方向流れの発生機序に検討を加えるとともに、一方向流れによる軸方向の物質輸送促進について調べた。

おもな記号

a : 管半径
 d : 管径 $=2a$
 l : 分岐軸からの距離

L : 管長
 p : 圧力
 r : 半径方向位置
 R : 管路抵抗
 Re : レイノルズ数 $= U_{m,max} \cdot d / \nu$
 Re_s : ストークス厚さを代表長さとしたレイノルズ数 $= 2S\sqrt{\omega/\nu}$
 S : 振幅
 t : 時間
 T : 周期
 u : 流速
 U : 断面平均流速
 v_T : 一回換気量 $= 2S \cdot \pi a^2$
 α : ウォマスリイ数 $= a\sqrt{\omega/\nu}$
 μ : 粘性係数
 ν : 動粘性係数
 ρ : 密度
 ω : 角周波数

添 字

c : 狭さく部
 d : 娘管 (daughter tube)
 m : 母管 (mother tube)

* 原稿受付 2005年7月13日。

^{*1} 正員, 東京大学大学院工学系 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*2} 正員, 東京大学工学部。

E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

s : 枝娘管 (side-daughter tube)

u : 一方向流れ成分

max : 最大値

* : 無次元量

2. 数値解析方法

2・1 流路と境界条件 数値解析に用いた格子を図1に示す(格子点数を1/8に間引いて示した)。流路は従来の研究報告^{(1)(3)~(5)(8)}を参考に、鳥類の肺気道分岐のモデルとして、母管、娘管および枝娘管の径が $d = 50$ mm、長さ $L = 300$ mm、分岐角度 90° の直角分岐管モデルを構築した。分岐部のエッジはシャープな形状とした。直角分岐管を、母管と娘管からなる領域 [zone 1] と枝娘管からなる領域 [zone 2] の2領域に分けて計算を行った。両者の境界では格子点を2格子重ねて物理量の受渡しを行った。格子点数は、約210 000点である。なお、分岐付近および壁面に格子を密に配置した。

作動流体は水を想定した。出入口の条件として、母管入口にピストンを想定して、 $U = U_{m,max} \cdot \sin \omega t$ で表される正弦波振動流を与え、娘管および枝娘管出口は、圧力固定の条件下で ($p = 0$)、自由流入流出条件を与えた。これは、鳥類の呼吸過程で各気の中の圧力が等しい⁽⁹⁾ことを考慮したもので、前報⁽⁸⁾の実験装置におけるリザーバと接続管を模擬した条件である。境界条件として、壁面では粘着条件、対称面では対称条件を与えた。表1は、振動流の位相を整理したもので、 $\omega t = 0 \sim \pi$ が吸込流れ、 $\omega t = \pi \sim 2\pi$ が吐出し流れに相当する。

2・2 支配方程式 流れ場の計算では、三次元非圧縮 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、境界適合座標系に変換して離散式を誘導した。解析手法には、SIMPLE法を用いた。時間項の離散化は完全陰

解法とし、対流項の離散化にはべき乗法(一部、ハイブリッド法)を、粘性項と圧力こう配による生成項には中心差分法を用いた。

濃度場の計算は、流れ場が周期解に達した後、水と同密度を想定した拡散物質を流体中に注入する方法で解析した。

鳥類の肺内におけるガスの酸素分圧は大気の酸素分圧にほぼ等しい⁽⁷⁾ことを考慮して、分子拡散の効果は無視し、対流による物質輸送に注目した。濃度場の計算では移流方程式を支配方程式とし、解法には数値拡散の影響が小さいCIP法を用いた。

2・3 計算条件 流れの状態を表す無次元パラメータとして、以下に示す無次元一回換気量 v_T/a^3 と周波数パラメータ a^2 を用いた⁽¹⁰⁾。

$$v_T/a^3 = 2\pi S/a \dots\dots\dots (1)$$

$$a^2 = a^2\omega/\nu \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 v_T は一回換気量、 a は管半径、 S は振幅である。また a はウォマスリイ数であり、 ω は角周波数、 ν は動粘性係数を表す。 v_T/a^3 はストローハル数 ($= a/2S$) の逆数に相当する無次元数で、対流慣性力と非定常慣性力の比を表す。 a^2 は非定常慣性力と粘性力の比を表す。

計算は、鳥類の通常呼吸⁽¹⁾(換気周波数 ~ 0.5 Hz)とあえぎ呼吸⁽²⁾(換気周波数 ~ 10 Hz)の条件を参考にして、 $v_T/a^3 = 10 \sim 80$ 、 $a^2 = 2 \sim 40$ の範囲で行った。本計算範囲内におけるストークス層厚さを代表長さとしたレイノルズ数 R_δ は、直円管内振動流における乱流遷移条件⁽¹¹⁾がおおよそ780であるのに対して、 $R_\delta = 10 \sim$

Table 1 Oscillatory flow phase and flow direction

Oscillatory flow phase	Dimensionless time	Flow direction	Piston acceleration
$0 \sim \pi/2$	$t/T = 0 \sim 1/4$	Inspiration	Acceleration
$\pi/2 \sim \pi$	$t/T = 1/4 \sim 1/2$	Inspiration	Deceleration
$\pi \sim 3\pi/2$	$t/T = 1/2 \sim 3/4$	Expiration	Acceleration
$3\pi/2 \sim 2\pi$	$t/T = 3/4 \sim 1$	Expiration	Deceleration

Fig.1 Computational grids

Fig.2 Radial velocity profiles ($a^2 = 40$)

150の範囲である。したがって、計算では層流を仮定した。

3. 結果および考察

3.1 検証計算 解析手法の検証として、まず、直円管内振動流を解いた。流速分布の一周期内変化を図2に示す。○で示した計算結果が、実線で示した解析解とよく一致することから、本解析手法は妥当であると判断した。

3.2 流量分配と一方向流れ 本計算範囲内において、 v_T/a^3 と a^2 が比較的小さい場合には、娘管と枝娘管内の流れのおおのは流量振幅がほぼ等しく、母管内振動流の半分の振動流となった。しかしながら、 v_T/a^3 と a^2 がともに大きい場合では、それぞれの変動流速の一周期平均値が零にならず、娘管では正に、枝娘管では負に移行して、一周期を通して枝娘管から娘管へ向かう正味の流れ、すなわち一方向流れ成分が生じることがわかった。代表的な例として、図3と図4にそれぞれ一方向流れ成分がほとんど生じない条件($v_T/a^3=5$, $a^2=40$)と一方向流れ成分が明確に生じた

条件($v_T/a^3=50$, $a^2=40$)について、各管における断面平均流速の一周期内変化を示す。縦軸の流速と横軸の時間は、それぞれ母管における断面平均流速の振幅 $U_{m,max}(=S\omega)$ と周期 T で無次元化して示してある。無次元周期 $0 < t/T < 1/2$ が吸込流れ、 $1/2 < t/T < 1$ が吐出し流れに相当する。図3、4中の○は母管、△は娘管、および□は枝娘管における断面平均流速をそれぞれ表している。●は娘管と枝娘管における断面平均流速の差で、枝娘管から娘管へ向かう一方向流れ成分 U_u を2倍したものを表している⁽⁸⁾。図3では、●が一周期にわたってほとんど零であり、娘管と枝娘管内の流量振幅はほぼ一致し、母管内の流れが二分される流れ場になっている。一方、図4では、図3と同様に娘管と枝娘管における流量振幅がほぼ等しいものの、娘管では変動流速の一周期平均値が正に、反対に枝娘管では負に移行して、非対称な流れとなっている。そのため、●は零にはならず一周期を通して正の値をもつ。このことは、一周期を通して枝娘管から娘管へ正味の方向流れ成分が存在していることを意味している⁽⁴⁾⁽⁸⁾。

一方向流れ成分の波形に注目すると(図4)、一方向流れ成分は、田中らの報告しているような定常流⁽⁴⁾ではなく、一周期内で増減する流れであることがわかる。一方向流れ成分は、吸込流れの位相 $t/T=1/8$ 付近から急激に増加し始め、 $t/T=3/8$ 付近で最大となった後、緩やかに減衰する。 $t/T=3/4$ 付近では減衰が小さくなり、横ばい傾向が見られる。後述するように、一方向流れ成分が増加し始める位相($t/T=1/8$)と減衰が抑えられ横ばい傾向になる位相($t/T=3/4$)は、それぞれ分岐部にはく雑渦が形成される位相に対応している(図5参照)。田中らの実験では、 $a^2 \sim 760$ と本研究に比べて振動数の高い流れを対象としていたために、一方向流れ成分が減衰する前に次の周期を迎え、一方向流れ成分があたかも定常流のように観察されたものと推測される。

3.3 流れのパターンの観察 図5は、一方向流れ成分が明確に生じた $v_T/a^3=50$, $a^2=40$ について、最大吸気流量期($t/T=1/4$)、流れの反転期($t/T=1/2$)、および最大呼気流量期($t/T=3/4$)の流速分布を示したものである。分岐部内には、対称面上の軸方向流速分布を、母管の断面平均流速の振幅 $U_{m,max}$ を用いて無次元化し、図5中のスケールバー($u/U_{m,max}=1.0$)に従って示してある。また、分岐近傍の流れ場については、断面内の流速分布を二次流れ速度ベクトルと軸方向等速度線により示した。二次流れ速度ベクトルについては図5中のスケールアローに従って、また

Fig. 3 Periodical variation of flow rate ($v_T/a^3=5$, $a^2=40$)

Fig. 4 Periodical variation of flow rate ($v_T/a^3=50$, $a^2=40$)

Fig. 5 Axial velocity profiles and secondary flow vectors

軸方向の等速度線については $u/U_{m,max}=0.2$ 間隔で示した。流れ場の理解を容易にするために、 $t/T=1/4$ に関しては、対称面上および断面内の渦度分布を併せて示した [図5(a)']。

図5(a)と図5(c)を比較すると、軸方向流速および二次流れのパターンは吸気と呼気の対称な時刻で大きく異なり、それぞれ分岐部における分流と合流が流れの発達を特徴付けている。流れ場の全体的な傾向は、前報における観察結果⁽⁸⁾と一致しており、図5に示したおのおのの位相に特徴的なはく離渦が観察される。

まず、吸気位相における対称面上の軸方向流速分布を見ると [図5(a)], 分岐管内の流れは、広瀬らの定

常直角分岐流れの観察結果⁽¹²⁾と同様に、大きく分けて壁付近(Wall layer)と中心部(Free stream region)の流れから構成されている。母管から内壁側(図1のInner wall)にわずかに寄った分布をもつ流れが分岐部に流入する。この流れの中で、管壁付近の流れは枝娘管へ流入し、管中心部の流れは流速が速いため慣性が大きく、娘管へ流入する⁽⁸⁾⁽¹²⁾。そのため、娘管内の流速分布は母管内の流速分布に似た形となり、大きな変化は見られない。一方、枝娘管内の流れは、図1でDistal wallと示される末しょう壁側にとがった流速のピークが生じ、反対の中枢壁側(Proximal wall)に逆流が生じる。この逆流は、母管内壁付近から流入した流れが中枢壁側の角ではく離して生じたはく離領域

内〔渦 A〕に発生したものである。断面図内に見られるように、二次流れの向きに従い末しょう壁近傍の高流速領域が管壁に沿って中枢壁側の逆流領域へ輸送され、断面内で混合・かくはんされるため、軸方向流速分布は下流に移行するのに伴い平坦化する。逆流領域の形成により枝娘管入口面積は狭められるため、枝娘管流入量は娘管流入量よりも小さい。

次に、図 5(b)で流れの反転期における対称面上の軸方向流速分布を見ると、娘管外壁側(Outer wall)に小さい逆流領域〔渦 B〕の形成が観察される。渦 B の形成し始める $t/T=5/12$ において、流線を見ると、Karino ら⁽¹³⁾、東野ら⁽¹⁴⁾の定常分岐流れの観察結果と同様に、この逆流領域から枝娘管入口のはく離領域〔渦 A〕へ壁面に沿った流れが観察された。この渦 B は、前述の渦 A や後述する渦 C に比べ弱く、流れ場の発達に大きな影響を及ぼさないと考えられる。枝娘管内の流れを見ると、吸気位相において逆流領域を形成した中枢壁付近の流体から分岐に向かう合流流れに転じ、 $t/T=1/2$ では完全に合流流れになる。ここで注目すべきことは、分岐内に明確なはく離渦が存在していないのにもかかわらず、枝娘管から娘管へ流れが駆動されている点で、慣性が流れ場を支配していることを示唆している。

図 5(c)で呼気位相における対称面上の軸方向流速分布を見ると、枝娘管から母管へ流入する流れによって、母管外壁側にとがった分布が生じる。同時にこの流れは中枢壁側の角ではく離して、母管内壁側のはく離領域〔渦 C〕に逆流を形成する。吸込流れと同様に、断面内に発達する二次流れの向きに従い、外壁側の高流速領域が管壁に沿って内壁側の逆流領域に輸送され、混合・かくはんされるため、下流に移行するのに伴い軸方向の流速分布は平坦化に向かい、外壁付近に小さなスパイクをもつ分布となって分岐部から流

出する。娘管内の流れに注目すると、枝娘管から母管へはく離領域〔渦 C〕をまわり込む流れが形成されるようになり、その流れによって進行をじゃまされるため、母管への流入量は、枝娘管と比較して小さい。

以上の観察結果から、流れ場の全体的な特徴は、渦と慣性によって特徴付けられているものと推察される。

3・4 渦による圧力損失と一方向流れ 図 6 は、一方向流れが明確に生じた $v_T/a^3=50$, $\alpha^2=40$ における娘管と枝娘管の分岐入口圧力差 $p_d - p_s$ の一周期内変化を示したものである。圧力は、図 7 に示すように、一般的な圧力損失係数の導出概念に基づき、各管の出口付近の値を外挿することにより算出した分岐入口の圧力差を、母管における断面平均流速の振幅を用いて定義した動圧で無次元化したものである。したがって、 $p_d - p_s$ は分岐部に生じるはく離渦に起因する圧力損失の差を表しているものと考えられ、以降の一方向流れの発生機序に関する定性的な議論に有用である。

娘管-枝娘管入口圧力差 $p_d - p_s$ の波形を見ると、一周期内に二つのピークが確認される。一つめの大きいピークは、 $t/T=1/4$ 付近にあり、吸込流れにおいて枝娘管入口にはく離渦〔渦 A〕が形成する位相に相当する。二つめのピークは、 $t/T=3/4$ 付近にあり、吐出し流れにおいて母管内壁側にはく離渦〔渦 C〕が形成される位相に相当する(図 5)。したがって、それぞれの渦により娘管-枝娘管入口に圧力差が生じているものと考えられる。

さて、図 6 と図 4 の比較から、一方向流れ成分 U_u の波形(図 4 の●)と娘管-枝娘管入口圧力差 $p_d - p_s$ の波形がよく似ているため、両者の関連が推察される。しかしながら、圧力の波形に比べて一方向流れ成分の波形は位相が遅れており、また、圧力の変化に比べて

Fig. 6 Periodical variation of pressure difference, $p_d - p_s$ ($v_T/a^3=50$, $\alpha^2=40$)

Fig. 7 Extrapolation of pressure ($t/T=1/4$)

Fig. 8 Control volume for model calculation

一方向流れ成分の変化は緩やかである。特に大きな相違は、 $t/T=1/2$ のように圧力差がほぼ零であっても、一方向流れ成分が存在している点である。

一方向流れ成分が生じている娘管と枝娘管について、娘管出口と枝娘管出口の圧力が等しいとの境界条件($p=0$)から、図8のように検査体積をとり、一方向流れ成分 U_u に関する一次元モデル式を考えると、

$$\partial(\rho U_u)/\partial t \cdot (2L-d) = p_d - p_s - R U_u \cdots \cdots (3)$$

ここで、 R は娘管と枝娘管における管路抵抗を表し、この条件下では、娘管および枝娘管において半径方向の流速分布を一周期内で平均して得られる一方向流れ成分の流速分布は放物線状であるため、Poiseuille 流れとして $R=8\mu(2L-d)/a^2$ により評価した。

図4には、式(3)より求める一方向流れ成分の一周期内変化を破線で、数値計算結果を●で併せて示した。両者はよく一致し、図8のように検査体積をとると一方向流れ成分の形成を式(3)によって大まかに記述することができる。記述した一方向流れ成分の波形と圧力波形の相違は、式(3)の左辺の一方向流れ成分に作用する非定常項の効果であり、結局この項を考慮することにより、一方向流れ成分のもつ慣性力効果が現れていると考えられる。

一方向流れ成分 U_u の発生は、以下のように説明される。まず、一方向流れ成分は、吸込流れにおいて枝娘管入口に形成するはく離渦 [渦 A] に起因する圧力差を駆動力として、枝娘管から娘管へ向かう方向に、

反時計回りに駆動される ($1/8 < t/T$)。流れの反転期において渦 A が消滅しても、一方向流れ成分は自身のもつ慣性の効果により維持され、存在し続ける ($t/T \sim 1/2$)。吐出し流れにおいて、母管内壁側にはく離渦 [渦 C] が形成されるようになると、減衰傾向が緩和され横ばい状態となるが ($t/T \sim 3/4$)、渦 C の消滅後は、速やかに減衰する ($3/4 \sim t/T < 1/8$)。

図6で、娘管-枝娘管入口圧力差 $p_d - p_s$ の大部分が正であるのに、一方向流れ成分が娘管から枝娘管に時計回りに駆動されないのは、一方向流れ成分を時計回りに駆動すると、娘管出口で圧力が高く、反対に枝娘管出口では圧力が低くなり、娘管および枝娘管出口で圧力が等しいとした境界条件に反するからで、流れ場の面からは、枝娘管入口に生じる渦 A が娘管から枝娘管に向かう流れをブロックするためとも考えられる。

3・5 一方向流れによる物質輸送促進 母管入口から分岐内に取り込まれる新気の挙動に注目し、一方向流れ成分の形成が軸方向の物質輸送に及ぼす影響について調べた。その際、 v_T/a^3 の値を 50 に固定し、 a^2 を変化させることで、娘管-枝娘管内に生じる一方向流れ成分の大きさ U_u^* を変化させた。

図9は対称面上の新気の挙動を、位相 90° おきに示したものである。(i) は、一方向流れ成分がほとんど生じない条件 ($v_T/a^3=50$, $a^2=2$, $U_u^*=U_u/Sw=0.01$)、(ii) は、一方向流れ成分が少し生じる条件 ($v_T/a^3=50$,

Fig. 9 Visualization of fresh gas inspired from the mother tube (i) : $v_T/a^3=50$, $a^2=2$, (ii) : $v_T/a^3=50$, $a^2=8$, (iii) : $v_T/a^3=50$, $a^2=40$

$\alpha^2=8$, $U_d^*=0.05$), (iii) は、一方向流れ成分が明確に生じる条件($v_T/a^3=50$, $\alpha^2=40$, $U_d^*=0.18$)に相当する。図9では周期解に達した流れ場に対し、位相0°($t/T=0$)から、母管入口端を通して分岐管内に流入する新気の挙動を示しており、濃度場の過渡的な変化を表したものである。

まず、一方向流れ成分が生じない場合(i)に注目すると、娘管と枝娘管における吸込流れと吐出し流れの流量振幅はほぼ等しいため、吸込流れにおいて母管入口から分岐内に運搬された新気の大部分は、吐出し流れにおいて、再び母管入口まで戻される($t/T=4/4$)。したがって、新気の大部分はガス交換に寄与しない。他方、一方向流れ成分が明確に生じる場合(iii)では、娘管および枝娘管における吸込流れと吐出し流れの流量振幅は非対称であるため(図4)、吸込流れにおいて娘管内に運搬された新気は、吐出し流れにおいて母管入口へ戻されることなく、一周期後も娘管内にとどまる($t/T=4/4$)。この新気は、次の周期の吸込流れで娘管出口から体内に取り込まれ、ガス交換に供せられることになる。図9から、一方向流れ成分の形成により軸方向の物質輸送が促進されることがわかる。

図10は、濃度場が周期解に達した後で、軸方向のガス輸送特性を表す指標として、一周期当たりに母管入口から流入する新気量 $G_{m,in}$ のうち、娘管出口から流出される新気量 $G_{d,out}$ の割合 $G_{d,out}/G_{m,in}$ を定義し、一方向流れ成分の大きさ U_d^* と併せて示したものである。横軸は、母管における断面平均流速の振幅で定義したレイノルズ数 $Re(=U_{m,max}d/\nu)$ である。注目すべきことは、一方向流れ成分の増加に伴い、軸方向の

Fig. 10 Enhancement of axial gas transport by unidirectional flow

Fig. 11 Schematic view of constriction ($d_c/d=0.8$)

無次元ガス輸送量 $G_{d,out}/G_{m,in}$ が増加する点で、一方向流れ成分が軸方向のガス輸送を強力に促進していることがわかる。今回の計算例では、一方向流れの形成により、 $G_{d,out}/G_{m,in}$ は最大 27 倍に増加した。

3・6 狭さく部の影響 鳥類の気道において、分岐直前に狭さく部が存在することが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽¹⁵⁾。そこで、図11のような狭さく部をもつモデルで数値解析を行い、狭さく部が一方向流れ成分の発生に及ぼす影響について調べた。ここでは、枝娘管軸から $d \sim 5d$ の範囲で母管の径を 80% に絞った。すなわち $L_c=4d$, $d_c/d=0.8$ である。狭さく部の両端には、流れのはく離を減ずる目的で 30° のテーパを設けた。図12は、 $v_T/a^3=50$, $\alpha^2=40$ について各管における断面平均流速の一周期内変化を示したものである。縦軸の流速と横軸の時間は、それぞれ母管における断面平均流速の振幅と周期で無次元化されている。図3や図4と同様に、図12中の●が、枝娘管から娘管へ向かう一方向流れ成分を2倍したものを表している。図12中の破線は、狭さく部を設置していない場合における一方向流れ成分の一周期内変化で、すなわち図4の●に対応する。図12において、●と破線の比較から、狭さく部により一方向流れ成分が一周期を通して大幅に増加していることがわかる。この場合、約 1.5 倍の増加が見られた。

図13は、 $v_T/a^3=50$, $\alpha^2=40$ について、最大吸気流量期($t/T=1/4$)、流れの反転期($t/T=1/2$)、および最大呼気流量期($t/T=3/4$)の流速分布を、図5と対応させて示したものである。

図13(a)に見られるように、狭さく部を通過した流れが、分岐における流速分布に大きな影響を与えていることがわかる。すなわち、狭さく部により吸込流れが加速され、とがった分布をもつ縮流が分岐部に流入している。こうした傾向は、Wang ら⁽³⁾ の定常分岐流

Fig. 12 Periodical variation of flow rate ($v_T/a^3=50$, $\alpha^2=40$)

Fig. 13 Axial velocity profiles and secondary flow vectors

Fig. 14 Relationship between U_u^* and Re

れの報告と同様で、娘管流入量を増やす効果をもつ。

また、枝娘管入口に生じるはく離渦〔渦 A〕を比較すると、狭さく部の設置により渦 A が発達し、枝娘管入口の全体を覆っているようすが観察される。

以上の観察から、狭さく部は、吸込流れを加速して慣性を増加させる効果と、枝娘管入口に形成するはく離渦を発達させる効果により、一方向流れ成分の大きさを増加せしめていると考えられる。

図 14 は、本計算範囲内における一方向流れの大きさ U_u^* と母管における断面平均流速の振幅で定義したレイノルズ数 Re の関係を示したものである。本計算範囲内では、狭さく部による一方向流れ成分の増幅効果は Re に大きく依存せず、一方向流れ成分 U_u の大きさは各 Re において 1.3～1.5 倍に増加した。

4. 結 言

鳥類の気道を模擬した直角分岐管における振動流の流れ場および濃度場を数値解析により調べた結果、以下の結論が得られた。

(1) 無次元一回換気量 v_T/a^3 と周波数パラメータ α^2 が比較的大きい場合には、吸込流れにおいて枝娘管入口にはく離渦〔渦 A〕が発達し、渦 A による圧力損失を駆動力として、枝娘管から娘管へ正味の一方流れ成分が駆動される。渦 A の消滅する吐出し流れにおいても、自身のもつ慣性力の効果で、一方流れ成分は存在し続ける。

(2) 新気の挙動の観察から、一方流れ成分は軸方向の物質輸送を強力に促進することを示した。今回の例では、一方流れ成分がほとんど生じない場合に比べ、一方流れ成分が明確に生じた場合では、一周当たりのガス輸送量は、最大で 27 倍に増加した。

(3) 鳥類の気道に存在する狭さくは、一方流れ成分の大きさを大幅に増加せしめる。今回の計算範囲内では、1.3～1.5 倍に一方流れ成分の大きさが増加した。

本研究の一部は、平成 17 年度文部科学省科学研究

費 [萌芽研究: 17656272], および, 文部科学省 21 世紀 COE プログラム「機械システム・イノベーション」の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Butler, J. P. et al., *Respir. Physiol.*, 72, (1988), pp. 241-256.
- (2) Calder, W. A. Jr. and Nielsen, K. S., *American Journal of Physiology*, 213, (1967), pp. 883-889.
- (3) Wang, N., R. B. et al., *Respir. Physiol.*, 73, (1988), pp. 111-124.
- (4) Tanaka, G. et al., *Trans. of JSME, Series B*, Vol. 68, No. 672, (2002), pp. 2209-2215.
- (5) Shimawaki, S. and Shimizu, M., *Proc. International Conference on New Frontiers in Biomechanical Engineering*, (1997), pp. 109-112.
- (6) Shimawaki, S. et al., *Trans. of JSME, Series B*, Vol. 65, No. 637, (1999), pp. 3015-3021.
- (7) Yamada, Y. et al., *Science of Body, Heat and Flow*, Ohmsha, (1998), pp. 70-72.
- (8) Sakai, E. et al., *Trans. of JSME, Series B*, Vol. 71, No. 708, (2005), pp. 2083-2091.
- (9) Cohn, J. E. and Shannon, R., *Respir. Physiol.*, 5, (1968), pp. 259-268.
- (10) Jan, D. L. et al., *J. Appl. Physiol.*, 67, (1989), pp. 147-159.
- (11) Hino, M. et al., *J. Fluid Mech.*, 75, (1976), pp. 193-207.
- (12) Hirose, T. et al., *Biomechanism*, 11, (1992), pp. 99-109.
- (13) Karino, T. et al., *Biorheology*, 16, (1979), pp. 231-248.
- (14) Higashino, F. et al., *Trans. of JSME, Series B*, Vol. 47, No. 423, (1981), pp. 2139-2148.
- (15) Jones, J. H. et al., *Respir Physiol.*, 45, (1981), pp. 121-131.