9D-15 拡張収縮変形を伴う細気道内流れの攪拌効果

Stirring of flow in an expanding and contracting model of small airways

学 ○大河原 正義(千葉大学) 平良 享也(千葉大学)
正 田中 学(千葉大学) 正 世良 俊博(理研)

Masayoshi OGAWARA, Yukiya TAIRA, and Gaku TANAKA
Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan
Toshihiro SERA, RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako-shi, Saitama

Key words : Numerical analysis, Computer Fluid Dynamics, Small airways, Stirring, Mixing, Entropy

1. 緒言

肺気道の中でも末端部に位置する細気道に関しては、従来、レイノルズ数が非常に低いため、物質輸送のメカニズムとしては分子拡散が支配的であると考えられてきた。しかし近年、呼吸に伴う気道の拡張収縮変形により生じる流れが流体混合を増強するという新しいメカニズムが提唱されている⁽¹⁾。実際の細気道内の流体混合のメカニズムに関しては未だ不明な点も多いため、より実際に近いモデルを用いた評価が必要であると考えられる。そこで本研究では、大型放射光施設(SPring-8)のシンクロトン放射 X 線で撮影された画像データを基にモデルを再構築し、マイクロオーダースケールで著しい拡張収縮変形を伴う細気道内の流れの攪拌効果を評価することを目的としている。

2. 気道形状と計算格子作成

細気道モデルは、SPring-8 で撮影されたマウス肺気道データの一部である気道径 $55\mu\text{m}$ ~ $360\mu\text{m}$ の範囲の CT 画像を基に作成した。気道形状の決定は既報⁽²⁾によっており、抽出した気道輪郭を高さ方向に積層することによって 3 次元形状を再構築した。

計算格子生成ソフト GAMBIT, T-Grid を用いて、図 1 に示す総格子数 266,330 の計算モデルを作成した。計算格子は気道断面中央部の四面体格子と壁近傍(2 層)の三角柱格子で構成されている。

細気道の拡張収縮変形は、ヒトの生理的呼吸条件を基に図 2 に示す最大モデル体積 V_{max} が最小モデル体積 V_{min} の 1.5 倍の相似変形となるよう、モデルに以下に示す正弦波体積変化を与えた。

$$V(t) = \tilde{V} \sin \alpha t + \bar{V} \quad (1)$$

なお、比較対象とした剛体モデルの体積は、拡張収縮変形モデルの平均体積($\bar{V}$)とした。

3. 計算条件

作動流体は空気 (密度 $\rho=1.225\text{kg/m}^3$, 動粘性係数 $\nu=1.461\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$) とし、肺気道内流れの条件は層流, 3 次元, 非定常, 非圧縮とした。基礎方程式は連続の式と運動量保存式である。数値解析には、汎用熱流体解析ソフト FLUENT 6.3.26 を用いた。流れのパラメータは、モデル上端の管断面でレイノルズ数 $Re=0.06$ の流量一定条件 (吸気と呼気) となるようにモデル末端の各断面に断面積比に応じた流量条件を与えたものと、モデル上端の管断面 ($z=0\text{mm}$) でレイノルズ数 $Re=0.06$, 周波数パラメータ $\alpha=0.06$ (一回換気量 0.48mm^3 , 周波数 0.2Hz) の正弦波振動流となるように、モデル末端の各断面に断面積比に応じた流量条件を与えたものを使用し、それぞれ計算を行った。モデル上端の管断面では圧力一定とした。

Fig.1 Computational model

Fig.2 Behavior of expanding and contracting volume

4. 攪拌効果の評価方法

流れの攪拌効果を評価する方法として、色分けした流体粒子を使用する方法がある。この方法は上流部断面に配置した流体粒子が、下流部断面でどのように攪拌されているのかを調べる方法で、以下に示すエントロピー S から求められる κ で断面を分割したセル内の粒子の混合を定量的に評価することができる⁽³⁾。

$$S = \sum_{i=1}^{N_c} \left(w_i \sum_{k=1}^{N_s} n_{i,k} \log n_{i,k} \right) \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{S - S_0}{S_{\max} - S_0} \quad (3)$$

(2)式の N_c はセルの総個数、 N_s は識別色の数、 $n_{i,k}$ は i 番のセル内にある識別色 k の粒子数である。また、 w_i はセル内に粒子が存在しない場合と 1 色の粒子のみしか存在しない場合は 0 とし、それ以外の場合は 1 とする。

そこで本研究では、拡張収縮変形モデル内の流れの攪拌効果を検討するため、流量一定の吸気条件では図 3 右に示すように上部断面（断面(0)）に色分けされた流体粒子を配置し、下部断面（断面(i)～(v)）で混合状態を評価した。また、流量一定の呼気条件では下部断面（断面(i)～(v)）に同じく色分けされた流体粒子を配置し上部断面（断面(0)）での混合状態を評価した。振動流条件ではモデル中央部（モデル上部から 2.27mm）に色分けした流体粒子を配置し、粒子の混合状態をモデル上部断面と下部断面でそれぞれ評価した。それぞれの計算に対して、拡張収縮変形モデル($V_{\max}/V_{\min}=1.5$)と剛体モデルを比較して検討した。

5. 結果及び考察

流量一定吸気条件時の下部断面（断面(i)～(v)）での粒子の混合状態を図 4 に示す。図 4(a)は剛体モデルの混合状態であり、流体粒子が混合することなく下部断面から流出していることがわかる。それに対して図 4(b)の拡張収縮変形モデルでは、管壁付近で異なる色の流体粒子が重なって流出している断面がみられ、拡張収縮変形によって流体粒子が混合されていることがわかった。

粒子の混合状態を κ を用いて定量的に評価した結果、拡張収縮変形モデルでは 0.19、剛体モデルでは 0.13 となった。定量的に評価した結果からも断面内の混合が促進されていることが示された。

参考文献

- (1) Tsuda, A. et al, Kinematically irreversible acinar flow: a departure from classical dispersive aerosol transport theories, *J. Appl. Physiol.*, vol.92, (2002), pp. 835-845.
- (2) Sera, T. et al, Localized morphometric deformations of small airways and alveoli in intact mouse lungs under quasi-static inflation, *Respiratory Physiology & Neurobiology*, vol.147, (2005), pp.51-63.
- (3) Cookson A. N. et al, Mixing Through Stirring of Steady Flow in Small Amplitude Helical Tubes, *Annals of Biomedical Engineering*, vol.37, (2009), pp.710-721.

Fig.3 Branch number and initial position

Fig.4 Mixing in (a) rigid model and (b) expanding and contracting model