

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19560158
研究課題名 (和文) 異なるコンプライアンス端を有する分岐管内振動気流解析
研究課題名 (英文) EXPERIMENTAL ANALYSIS OF OSCILLATORY AIR FLOW IN MULTI-BIFURCATED CHANNEL TERMINATED WITH DIFFERENT COMPLIANCE
研究代表者 川橋 正昭 (KAWAHASHI MASAOKI) 埼玉大学・副学長 研究者番号：70008853

研究成果の概要：肺の末端組織である呼吸細気管支の各分岐子端は、異なるコンプライアンスを有する肺胞組織に接続されており、その部分で生じている呼吸振動流の挙動、特にコンプライアンスの相違による各分岐子の時定数の違いが要因となって生じる振り子流は、重要な呼吸換気メカニズムの一つと考えられてきたが、その詳細は明らかにされてこなかった。本研究では、多分岐呼吸細気管支の実寸モデルを用いて、振り子流の存在および流れの時系列的变化の詳細を実験的に明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：呼吸流、人工換気、HFOV、振り子流、マイクロ PIV

1. 研究開始当初の背景

(1) 呼吸疾患を有する患者への呼吸管理法として、多くの臨床手法が用いられる中で、肺への物理的負担の少ない高頻度振動換気法 (HFOV) の有効性が注目されており、特に呼吸機能不全を示す早期早産児の呼吸管理において劇的な効果が認められてきた。しかし、HFOV による換気メカニズムが明らかにされてこなかったことから、臨床応用時の最適化については、経験値に頼らざるを得ない状況となっている。

(2) これまでに、HFOV について、様々な換気メカニズムが提唱されてきたが、その中で最

も重要なメカニズムと考えられてきた振り子流の存在については、その理論的予測がなされてきたものの、その存在と、振り子流の挙動の詳細についての実験的解析はなされてこなかった。

(3) このような状況の中、臨床関係者から振り子流を含めた HFOV における呼吸換気メカニズムの解明への強い期待が寄せられていた。

2. 研究の目的

(1) 人間の呼吸における気管から肺末端組織までの流体力学的現象は、吸気と機能的残気

間のガス交換の基本的メカニズムであるが、その詳細についての解析は容易ではない。近年の流体力学における理論的および実験的解析手法の発展は、それらの結果を、呼吸の実現象を模擬して検証できる状況を出現させている。

(2)呼吸現象の解明は、呼吸障害を持つ患者に対する人工換気法適用に関連して緊急の課題となっており、現在その効果が期待されている高頻度振動換気法(High Frequency Oscillatory Ventilation: HFOV)適用時の気管から肺末端組織までの呼吸振動流の詳細を検討し、人工換気をもたらす臨床的効果の要因解析および最適適用条件の検証などが期待されている。

(3)これまでのマイクロスケール呼吸細気管支モデル内のHFOV適用時振動気流について実験結果から、HFOVでは単に通常呼吸時の乱流混合拡散、振動流境界層におけるストリーミングなどによるガス交換機構が促進されるのではなく、呼吸頻度の増加により肺末端組織の物理的性質と関連して顕著に現れる現象により、ガス交換が促進されることが明らかになりつつある。その具体的現象として、気管支分岐の各分岐子端のコンプライアンスの違いによる時定数の相違から分岐子間で振り子流の発生が考えられる。しかし、振り子流の流動特性などの詳細はこれまで明らかにされてこなかった。

(4)多分岐気管支構造の各分岐子端に接続されるコンプライアンスの相違は、呼吸振動流に対する各分岐子側の時定数の違いをもたらし、吸気時における各分岐子への分流、および呼気時におけるそれぞれの分岐子からの合流が同位相とならない。この結果、一方の分岐子から他方の分岐子への振り子流が生じる可能性がある。通常呼吸では呼吸周波数が極めて低く、振り子流は顕著には現れないが、HFOVでは振り子流が顕著に現れる。

そこで本研究では、気管の第一分岐から最終分岐にいたる各分岐でのコンプライアンスの相違がどのように現れ、その相違が通常呼吸時から高頻度換気に至るまでの呼吸周波数の範囲でどのように振り子流を発生させるか、また生じた振り子流の詳細な流動状態がどのようなものであり、それがガス交換にどのような役割を果たしているのかについて明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、以下に示すような方法および順序により、使用した呼吸細気管支モデル内で生じる振り子流の実験および理論解析を行った。

(1)呼吸細気管支モデルのそれぞれの分岐子端のコンプライアンスを定量的に調べる方法を検討して、各分岐子端に接続されるコン

プライアンス比を定量的に設定する。

(2)異なる終端コンプライアンスを有する単一分岐管内に、異なる呼吸数に相当する振動換気流を供給し、振動流速分布の時系列計測を行うことにより、振り子流の発生を確認するとともに、その流動特性の詳細を明らかにする。

(3)吸気相終了時に、吸気と機能的残気との接触面が到達する第20分岐近傍で生じる振り子流について、マイクロスケール細気管支単一分岐モデルを用いた実測を行い、発生する振り子流がどのようにガス交換を促進するかについて明らかにする。

(4)気管支多重分岐モデル内の時系列流速分布計測を行い、各分岐におけるそれぞれの分岐子端のコンプライアンスの相違が、どのような振り子流を形成するかについて明らかにする。

(5)実験に用いる細気管支分岐モデル内の呼吸振動流についての数値解析を行い、実測値との比較検討から数値解析における適切な計算条件の設定を行い、得られた結果から、振り子流構造とコンプライアンス値および呼吸周期との相関関係の詳細を明らかにする。

4. 研究成果

(1)はじめに、実験に用いた呼吸細気管支マイクロチャンネルモデルおよびモデルチャンネル内の振動気流分布計測システムを示す。まず、人肺のコンプライアンス値をもとに、同じオーダーのコンプライアンス値を有する分岐子端モデルを作成し、設定したコンプライアンス比に基づき、気管支の第18世代～第20世代分岐部に相当する実寸の2次元多分岐呼吸細気管支モデルに接続し、HFOVドライバーにより、臨床時相当の振動換気状態を実現した。構成された実験システムが、図1に示されている。

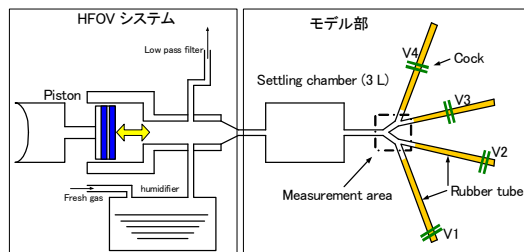


図1 HFOV 駆動系および呼吸細気管支モデル

使用したモデルチャンネルの流路幅は $450\mu\text{m}$ 、奥行きは $500\mu\text{m}$ であり、この流路内における安静時呼吸周波数 0.8Hz から HFOV 適用時周波数 20Hz の範囲での振動気流の流速分布が、マイクロ PIV 計測システムにより時系列的に調べられる。使用した流速計測システムの概観図が、図2に示されている。

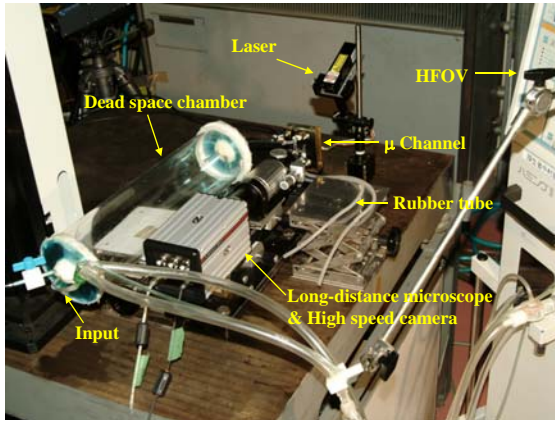
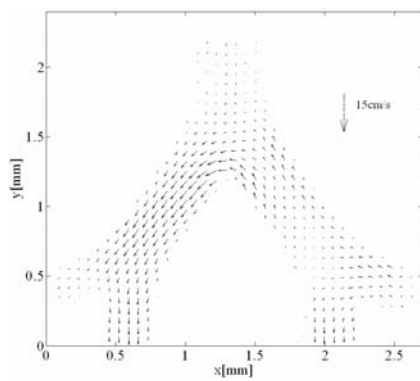
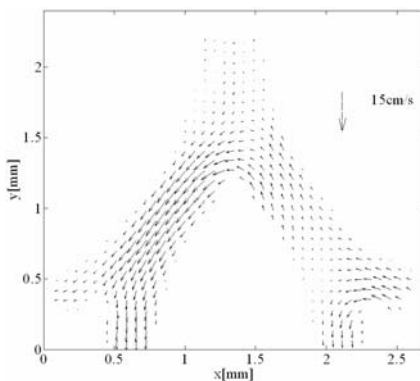


図2 マイクロPIV計測システム概観図

図2に示されている速度分布計測システムにより、振動流の各位相における流速分布をフェイズロック法により計測し、1周期間の流速変動からどの位相状態で、振り子流状態が生じるかを明らかにした。
(2) 得られた結果の一部がいかかに示されている。



(a) コンプライアンス比(4:4:4:2)



(b) コンプライアンス比(4:4:2:2)

図3 呼気から吸気へ移り変わる直前の呼吸位相における分岐モデル内流速分布 (振動流周波数: 20Hz)

これらの結果は、振り子流の発生を実験的に明らかにするとともに、振り子流の流速分

布を定量的に明らかにすることに成功している。

(3) 用いた呼吸細気管支の形状、コンプライアンス値、および呼吸周波数条件のもとで、各分岐子間でどの程度の位相差が生じるかについて、理論的に検討した。

用いた呼吸気管支の理論モデルが図4に示されている。

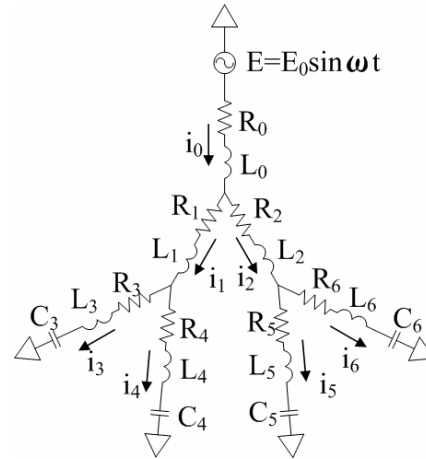


図4 供試験モデルのL-C-R理論モデル

図4に示したモデルにおける周波数応答を調べた結果の例が、図5に示されている。このときの各分岐子の終端コンプライアンス比は(4:4:2:2)であり、呼吸周波数は20Hzである。

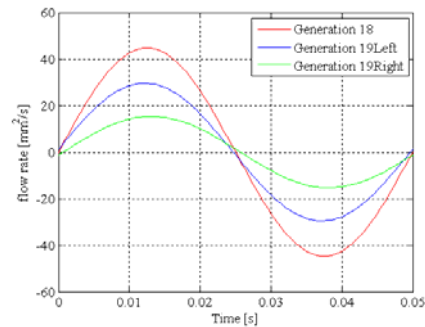


図5 多分岐呼吸気管支モデル分岐子の周波数応答

得られた結果より、呼吸振動流における分岐子間での位相差が示されており、吸気から呼気への移行の位相差による振り子流の発生が裏付けられている。

(4) 以上の実験的解析および理論解析より、異なるコンプライアンスを有する分岐管内振動気流の特性が明らかにされ、HFOVによる振動換気における主要なメカニズムである振り子流の存在と、その定量的流動状態が明らかにされた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①KIM J-K, 川橋正昭, 岩崎雄介, 平原裕行, 振り子流を伴う呼吸細気管支モデル内の振動気流実験解析, 実験力学(日本実験力学会誌), 8巻, 78-83, 2008, 査読有

②Kim, J-K., Kawahashi, M., Hirahara, H. and Iwasaki, Y, Experimental Analysis of Oscillatory Airflow in a Bronchiole Model with Stenosis, Journal of Visualization, vol.12, 109-118, 2009, 査読有

[学会発表] (計 7 件)

① Kim, J-K., Measurement of oscillatory airflow in a micro bronchial tube model with semicircle stenosis, 9th Asian Symposium on Visualization, June 5, 2007, 香港科学技術大学(香港).

② Kim, J-K., Experimental Analysis of Pendelluft Airflow Generated by HFOV in Human Bronchial Lung Model, 18th International Symposium on Transport Phenomena, August 28, 2007, KAIST(韓国).

③ Kim, J-K., Experimental analysis of pendelluft air flow as a micro channel of respiration bronchiole region, 日本機械学会全国大会講演会, 2007年9月12日, 関西大学.

④川橋正昭, 呼吸細気管支モデル内の振動流解析, 可視化情報学会全国講演会, 2007年9月26日, 岐阜大学.

⑤岩崎雄介, マイクロ気管支モデルを用いた振り子流解析, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2007年11月17日, 広島大学.

⑥ Kim, J-K, Experimental Analysis of Airflow in a Multi-bifurcated Micro Channel Simulating Oscillatory Flows at Respiratory Bronchioles in Condition of HFOV, 13th International Symposium on Flow Visualization, July 4, 2008, ニース国際会議場(フランス).

⑦Kawahashi, M., PIV measurements of pendelluft flows generated in a multi-bifurcated bronchial model in HFOV, 2008 Korea-Japan Joint Seminar on Particle Image Velocimetry, Dec. 5-7, 2008, 建国大学(韓国).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川橋 正昭 (KAWAHASHI MASAAKI)

埼玉大学・副学長

研究者番号：70008853

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし