

特別講演

特-1 目で見る呼吸の流れ

岐阜大学工学部・機械工学科

永田 拓

ヒトの気管は20回に及ぶ分岐を経て肺胞に至る複雑な管路系を構成している。この管路系内を往復する流れによって巧みなガス交換が行われる。この流れは複雑で、現在の流体力学の理解の及ばない未知な現象を多く含んでいる。

流れを単純化して、1回だけ分岐する管路内の流れを観察すると、管路の曲がり部の存在によって二次的に流れが誘起され、縦渦（管軸方向の軸を持つ渦）を含む複雑な流れになる。実在の気管内の流れは、さらに複雑であり、工業上多用される管路系内の流れとは著しく異なることが推察される。

このような複雑な気管内の流れを知るには、流れの構造、とりわけ縦渦の構造を、その発生機構から知る必要がある。そのための最も簡便で有効な方法は、流れを可視化し観察することであると思われる。従来、管路内の縦渦の観察は、工業的な曲がり管路内に発生する縦渦について多くなされている。そして、管路の横断面内の流れの速度分布や圧力損失が主として論じられている。しかし、分岐と合流を何回も繰り返し、管軸方向の変化が著しい気管内の流れを知るには、管路の横断面内の流ればかりでなく、管路に沿って流れを観察し、縦渦の発生と成長の経過、その縦渦の存続形態によって主流が受ける影響を明らかにすることが重要であると考えられる。

本報ではこのような観点から、上述の1回分岐のモデルを実在の気管に1歩近づけて、第1分岐部に加えて第2分岐部を有する気管模型内の流れについて可視化実験を行い、基本的な流れの構造と混合機構の一端を明らかにした。そして管路の横断面内で可視化される縦渦構造の解釈に対して、新しい視点が必要であることを示唆した。

実験は、層流状態、遷移状態および乱流状態の

呼気流と吸気流を明らかにするために、レイノルズ数 $Re=Ud/\nu$ （ U :parent tube内の平均速度、 d :内径、 ν :動粘度）の範囲を200~3000とした。さらに縦渦の存在のもとで流れが不安定化し、混合が促進される機構を知るために、呼気流れが突然一定時間停止し再び流れ始める「呼気断続流」についても同様な実験を行った。

主要な実験結果は、次のようにまとめられる。

- (1) 「呼気」の場合も「吸気」の場合も、二次流れとして形成される縦渦によって流れは特徴づけられる。レイノルズ数 Re の増大とともに、daughter tube 内に形成される縦渦の時間変動は著しくなり、呼気流の場合には、 $Re=3000$ では、2組の縦渦に加えて、さらに2組の縦渦が形成され、より複雑な渦構造を示す。
- (2) 呼気流の場合の縦渦の発生は、管路の曲率の存在に加えて、合流部での流体の衝突によって流れの方向が変わること、合流部にはく離渦が形成されることが要因となる。
- (3) 呼気流れが突然停止すると、停止前に定んでいた縦渦は半径方向に激しく動き、これに伴って個々の渦は大きく変形し崩壊する。しかし、呼気流の再流後すぐに縦渦が形成され、流れの秩序が回復する。
- (4) 分岐と合流を何回も繰り返す往復流のもとで、巧みなガス交換を行う気管内の流れの本質を知るには、管路の局所的な横断面内の速度分布についての知見ばかりでなく、個々の流体粒子を長距離に亘って追跡するラグランジュ的な観点が必要であり、可視化実験が有効である。とくに、色素が示す管横断面内の縦渦の形態は、その断面内の速度と対比すべきではなく、一種の写像と見なす新しい視点が縦渦の本質を理解する上で有効である。