



4D呼吸シミュレータによる 吸入気酸素輸送シミュレーション

研究・開発機関 : (株) JSOL
 利用施設 : 自社設備
 計算規模 : 1ノード、PCサーバー、180分×6 CPU
 利用ソフトウェア : Altair Engineering, AcuSolve

Before

- 空気中の酸素分子が吸入されて肺内でのように輸送されるかは、呼吸器疾患の治療を考えるうえできわめて重要な問題です。
- 気管支拡張剤の中には血中酸素濃度が低下するものがありますが、原因は良く分かっていませんでした。
- 肺内局所の酸素濃度を直接計測することはできないので、現状は、推測の域に留まっています。

After

- 気管から肺胞までの4Dモデルを作成し、2秒間の吸息運動によって酸素濃度分布がどのように変化するかを、気流の運動方程式と酸素の拡散方程式を連成することによって算出しました。
- 肺内の酸素濃度分布は部位により大きく異なり、末梢気道の拡張は酸素濃度を低下させる、という結果が得られました。換気障害に対する薬物療法の再検討が必要と考えられます。

背景と目的

吸息運動によって肺内にとりこまれた酸素分子は肺胞で二酸化炭素と交換されて血中に入り、全身に運ばれます。血液中の酸素濃度は、肺胞におけるガス交換能力だけでなく、口(もしくは鼻)から肺胞までどのように酸素が輸送されるか、ということにも左右されます。

我々の安静時の吸息時間はおおよそ2秒です。その間に酸素分子が肺胞まで届かなかつたらば、せっかく吸った酸素分子はそのまま呼気流に乗って大気中に排出されてしまいます。

空気中のガス分子の輸送には、気流と拡散の双方が作用します。従来の呼吸生理学では、肺細葉内(終末細気管支よりも末梢の領域)のガス輸送は、拡散だけで行われるとされており、気流の効果はほとんど考慮されていませんでした。しかし、細葉に至るまでの酸素輸送は気流によってなされ、細葉内においても気流の効果は無視できません。

安静吸息中の気管での平均流速は約2m/sなので、0.1秒程度で肺内気道に至ります。しかし、内径2mm以下の気道では、流速は10分の1以下となり、吸息時間の間に肺胞領域まで到達しないことも充分ありえます。気管支拡張作用のある薬剤を吸入して気道が1.3倍に拡張した場合、気流量が同じであれば流速は0.6倍になり、肺胞に届かないままに呼気流によって排出される可能性があります。その場合は、血液中の酸素濃度が低下することが予想されます。

そこで精度よく吸入気酸素輸送のシミュレーションを行い、適切な対処を行うことが重要となってきました。

利用成果

気管から亜細葉までの1本の気流路が2秒間の立位吸息運動(気流量一定)によって移動変形する4D肺モデルを作成しました(図1. 亜細葉とは、細葉のサブユニット。1本の終末細気管支が平均3回分岐して8本の最終呼吸細気管支になり、亜細葉に空気を供給する濃い青色領域)。亜細葉以外の領域は、終末枝と同じ径の空間充填流路で構成されています。

気流の運動方程式と酸素分子の拡散方程式を連成し、気道内の酸素濃度分布を算出します。亜細葉の部位は、右肺上葉主軸領域、右肺上葉反回領域、右下葉の主軸領域の3か所(図2右側の末端部分)を設定しました。なお、吸気開始直前の肺内の酸素濃度は肺静脈血酸素分圧と等しいと仮定しました。

その結果、亜細葉の部位、経路のパターン(主軸系か反回系か)によって終末枝の酸素濃度が大きく異なることがわかりました。また、内径3mm以下の気道をすべて1.3倍に拡張すると、終末枝の酸素濃度が低下すること、低下は主軸系で著しいことがわかりました(図2)。なお、内径7mm以上の気道をすべて1.3倍にした場合は、ほとんど変化しませんでした。

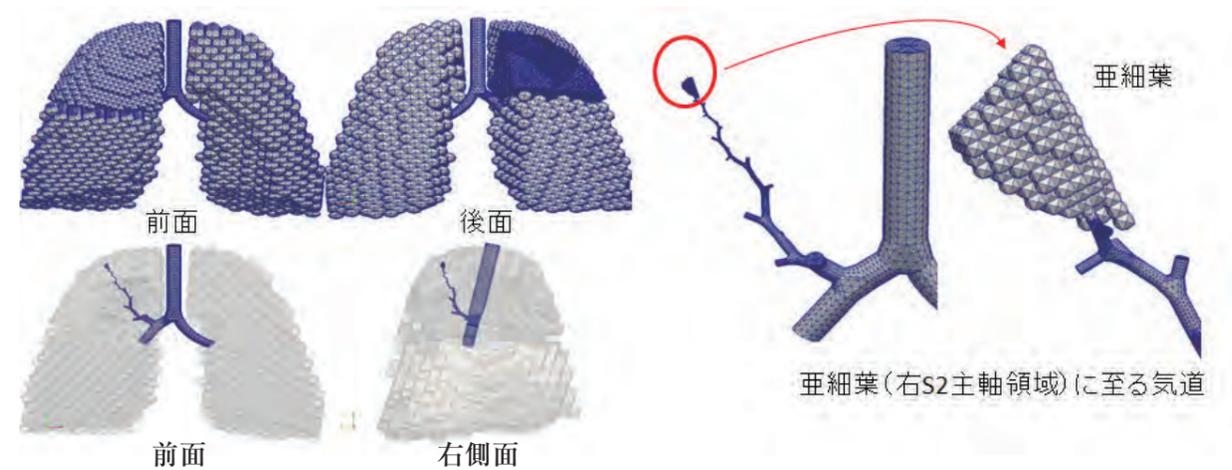


図1. 気管から亜細葉までの全肺4Dモデル(亜細葉が右肺上葉主軸領域にある例)

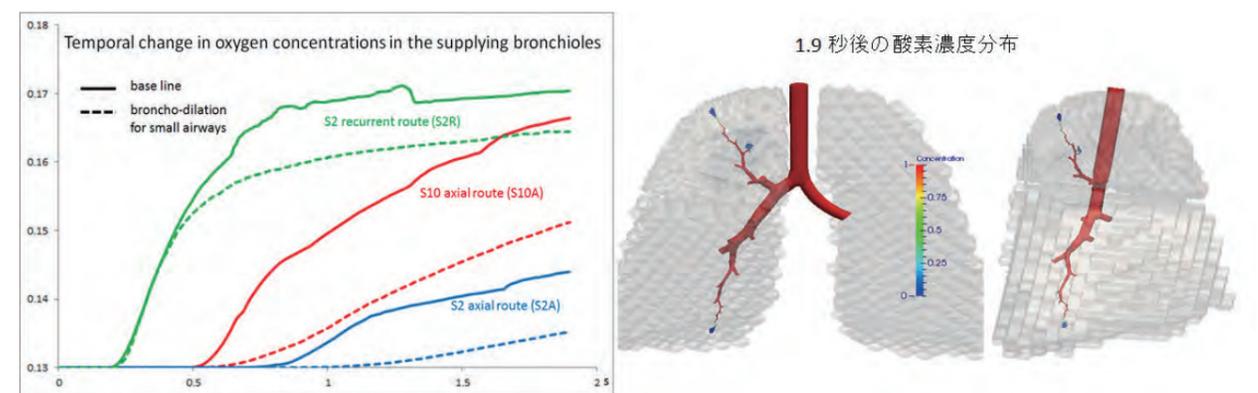


図2. 最終呼吸細気管支の酸素濃度の推移. 実線: 基準状態、破線: 径3mm以下の気道が拡張

まとめ: 末梢気道拡張効果のあるベータ2刺激剤で動脈血酸素分圧が低下することが知られていますが、今回の酸素輸送シミュレーションの結果、その原因が末梢気道拡張自体である可能性が強く示唆されました。

呼吸器疾患の治療に対して計算科学技術の果たす役割は、今後ますます大きくなると考えられます。