



## 4D肺モデルと計算流体力学による呼吸シミュレータの開発

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、4CPU  
 利用ソフトウェア : Altair Engineering, AcuSolve

### Before

- 呼吸は生命を支える最重要の機能で、肺内の空気を輸送する「換気」と酸素と二酸化炭素を交換する「ガス交換」からなっています。
- このうち、換気は計算力学的なアプローチが最も期待できる現象ですが、複雑な3次元構造が複雑に運動する4D肺モデルを作成するのは容易ではなく、研究はほとんど進んでいませんでした(4D = 3D空間+時間)。

### After

- 比較的単純なアルゴリズムを組み合わせることによって、気管から肺胞までの4Dモデルを計算機内に作成し、呼吸中の気流を数値解析することが可能になりました。
- 主要肺疾患に関する従来認識を塗り替える解析結果が得られました。計算科学の導入が、肺疾患の診断治療を一新することになりそうです。

### 背景と目的

口から吸い込まれた空気は、気管から気管支、細気管支、と枝わかれする気道を通して、肺胞に到達します。肺胞は厚さ10ミクロン程度の壁(肺胞壁)からなり、ここでガス交換が行われます。図1中央のように気管支は20回近く枝分かかれ、数10万本の細気管支になっています。肺胞は、模式図ではブドウの実のような独立した構造として書かれていますが、実際はスポンジのような形状です(図1右)。しかし、スポンジと違い、内部空間は細気管支を根とするツリー構造であり、ループする気流路は正常肺にはありません。

呼吸運動による肺内気流の解析は、肺疾患の診断治療にとって必須であるばかりでなく、スポーツ科学や環境科学にとっても、重要な研究テーマです。

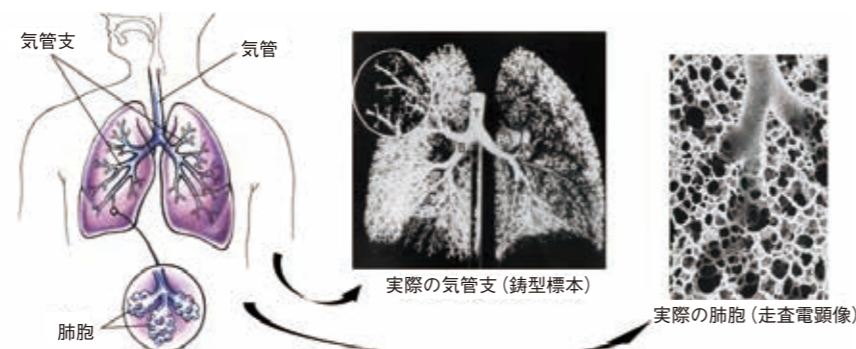


図1. 肺の模式図と実際の肺の画像

### 利用成果

図2は、数理的に構成された肺の4Dモデルの1例です。数値計算が可能ないように、気道および肺胞は四面体の有限要素で構成されています。呼吸運動とともに全節点が移動する4D有限要素モデルです。図2右の肺胞モデルは約1300個の肺胞からなっています。「いくら」のようなツブツブが肺胞です。図1の模式図とはずいぶん違いますが、このモデルの方が解剖学的知見と合致しています。ヒト肺には3億個の肺胞があるといわれていますので、約20万分の1に相当します。

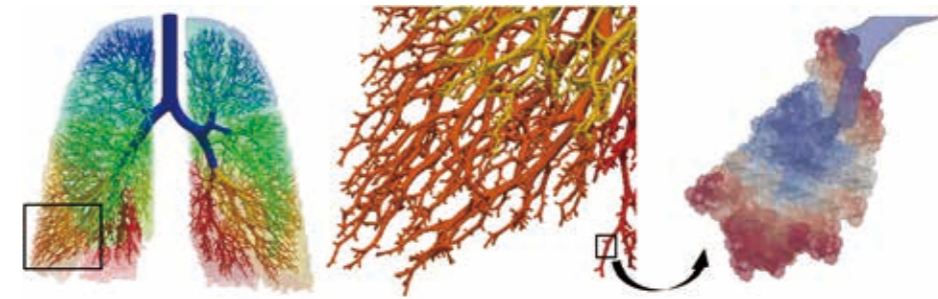


図2. ヒト肺4Dモデルの1例

図3左は、1本の呼吸細気管支の領域(亜細葉といいます)以外は、最終気管支と同じ内径の空間充填気流路で代替して構成した全肺モデルの1例です。亜細葉までの気流路は、解剖学的な知見に基づいて構成されています。

このモデルを用いて、安静吸気の際に空気と酸素分子が肺胞までどのように輸送されるかを計算した結果を図3中央と右に示しました。気管内の平均流速は約2m/s、呼吸細気管支内の平均流速は約10mm/s、肺胞管内の平均流速(相対速度)は約1mm/sと算出されました。呼吸筋の運動によって生じる肺胞運動が肺内の気流を生み出し、ガス輸送と吸入粒子の再排出に大きな役割を果たしていることが明らかになりました。

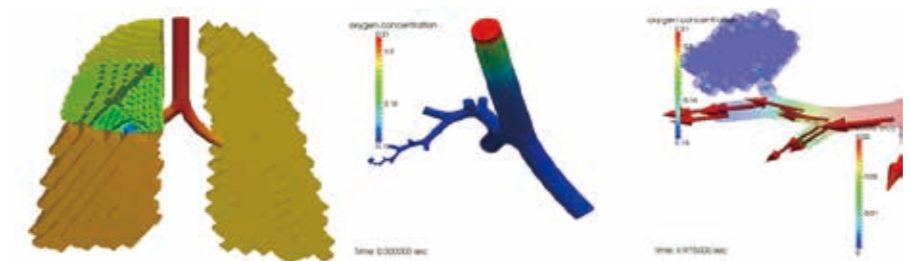


図3. 気管から肺胞までの4D肺モデルを用いた肺内気流解析結果

現時点では計算機内でだけ呼吸するモデルで、呼吸生理や病態生理の基礎研究を目的として数値解析を行っています。将来的には、実際の医用画像を用いた被験者個別モデルを作成することが可能になるでしょう。そうなれば、計算科学が呼吸器疾患の診断治療を大きく前進させることが期待されます。病気の方々だけでなく、健康維持やスポーツ、特殊な職業など、各々の条件に応じた最適な呼吸法を開発するのにも役立つと考えています。