



4D呼吸シミュレータによる 臨床呼吸機能検査の再現 —呼吸機能メカニズムの解明—

研究・開発機関 : (株) JSOL
 利用施設 : 自社設備
 計算規模 : PCサーバ、1ノード(8CPU)
 利用ソフトウェア : Altair Engineering, AcuSolve

Before

- 呼吸器疾患の診断に用いられる検査の中には、異常がどこでどのように起こっているのか、いまだ十分把握できていないものがあります。
- フローボリューム曲線や呼吸抵抗、クロージングボリュームといった検査がそれに該当します。
従来、末梢気道病変が原因と考えられてきましたが、呼吸中の末梢気道を直接観察することは困難なため、推測の域にとどまっています。

After

- 気管モデルに動的狭窄症状を加えたシミュレーションを行うことにより、フローボリューム曲線や呼吸抵抗の挙動が再現されました。末梢気道の狭窄ではこれらはほとんど変化が無く、この現象は最先端の動態画像技術によって、臨床的にも確かめられました。
- 計算科学的アプローチによって、呼吸器学が大きく変わりつつあります。

背景と目的

最もよく行われている呼吸機能検査は、呼吸中に口から出入りする空気量を計測するスパイロメトリーと呼ばれるものです。空気をゆっくり吸い込んでから力いっぱい吐いたとき(=最大努力呼気)、最初の1秒間に吐き出された空気量を1秒量、全呼気量に対する1秒量の割合を1秒率、と呼びます。空気量と流量の関係をプロットしたものが、フローボリューム曲線です。

1秒率が70%未満であると慢性閉塞性肺疾患(COPD)と診断されます。COPDの代表病型である肺気腫(肺が空気で腫れる、という意味)のフローボリューム曲線は極めて特徴的で、息を吐き出した途端に気流量が激減します(図1赤線)。

一方、気道抵抗の増加もしくは肺コンプライアンス(肺の柔らかさの指標)の増加だけでは全般的に気流量が低下するだけです(図1緑線)。

医学書には、肺気腫のフローボリューム曲線は末梢気道の呼気時閉塞によって起こると書かれていますが、観察事実はなく、理論的根拠もあいまいです。そこで、4D呼吸シミュレータを用いて、そのメカニズムの解明を試みました。

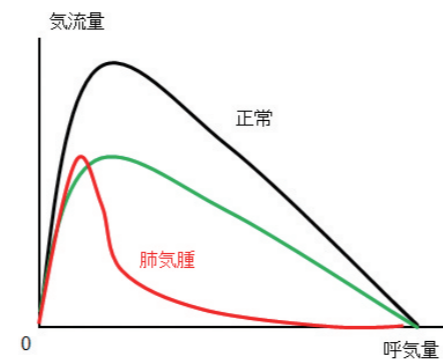


図1. フローボリューム曲線

利用成果

シミュレーションによる肺気腫メカニズムの解明: 肺気腫の最も大きな特徴は肺の過膨張です。ヒトの肺は約40個の垂区域と呼ばれる小領域に分割され、各々の垂区域枝によって空気が供給されます。

そこで、図2のような4D有限要素肺モデルを作成し(節点数 695,403)、最大努力呼気時の気流解析を行いました。気管中央部が呼気開始0.1秒後に急激に狭窄し、内径が50%に減少するという条件を与えたところ、肺気腫の臨床的な所見に合致した結果が得られました。ところが全垂区域枝に同様の狭窄条件を与えても、フローボリューム曲線はほとんど変化せず、全気道抵抗が若干増加するだけでした(図3)。

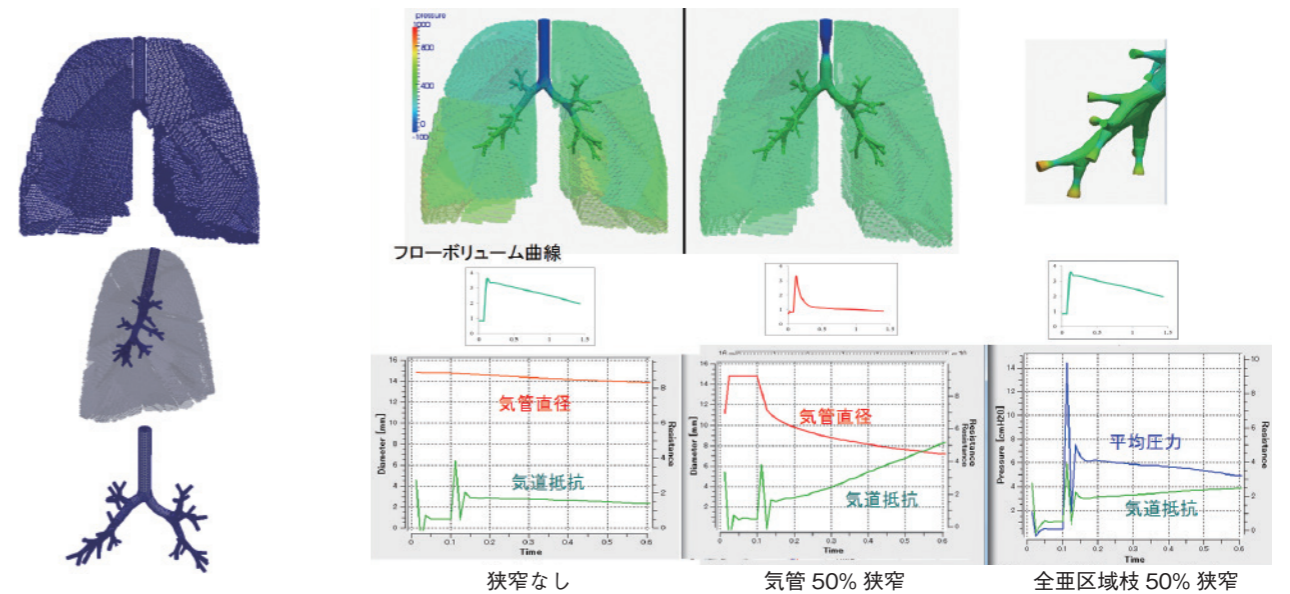


図2. 全垂区域4D有限要素肺モデル

図3. 最大努力呼気シミュレーション(3ケース)

動態画像によるメカニズムの正当性確認: 気管の動的狭窄は、ごく最近、最先端医用画像技術(4DCT)によって確かめられました(図4)。気管の後壁には軟骨がないので(膜様部といいます)、容易に変形します。このような変形は、気管の一部で起こるのではなく、胸郭内にある肺外気道、すなわち、縦隔内気道の全域で起こっています。最大努力呼気だけでなく、安静呼吸中にも、軽度ではありますが同様の変形が起こります。

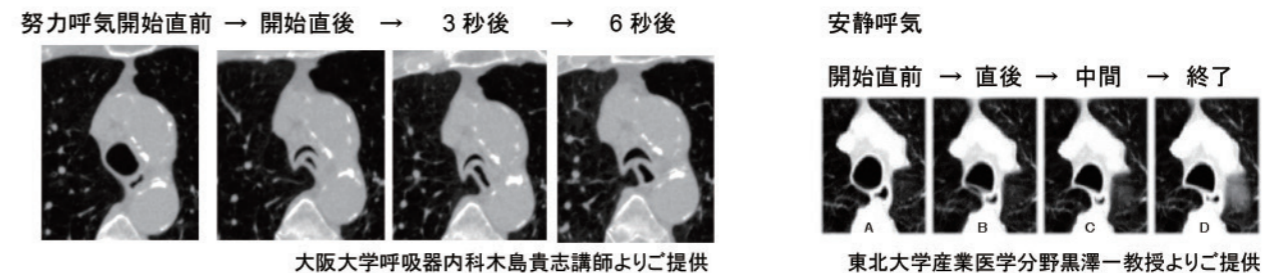


図4. 肺気腫で呼気中に気管が変形する様子を捉えたダイナミックCT画像(左:最大努力呼気、右:安静呼気)

まとめ: 従来、呼吸器疾患の画像診断は呼吸停止下に撮影された画像によってなされており、呼吸中に何が起こるかについては、十分には解明されていませんでした。このように動態イメージングと計算科学技術の融合により、呼吸器疾患の診断治療が大きく変わりつつあります。