2309 肺構造の虚脱過程における変形挙動の推定に関する研究

A study on estimation of the deformation behavior in the collapse process of lung

○学 勝山 雄介(早大)

正 宮下 朋之(早大)

Yusuke KATSUYAMA, Waseda University

Tomoyuki MIYASHITA, Waseda University

Key Words: lung, finite element method, simulation, modeling

1. 緒言

近年、術後の創部痛が低減され、患者への負担が少なく早期の回復や社会復帰が期待できる低侵襲手術の社会的要求が高まっている。末梢性肺癌に対する区域切除術においても低侵襲な胸腔鏡下手術が注目されている。利点も多い胸腔鏡下手術だが、肺内部に存在する癌の3次元位置を正確に特定し、術具挿入用の穴を用意する必要がある。肺癌の位置を正確に測定できる画像診断装置として術前に行われるマルチスライス CT 撮像装置があり、撮像は肺が膨張した状態で行われるが、手術は分離肺換気により肺を虚脱させた状態で行われ、虚脱前後で癌位置が移動し、手術時に術前画像で判断された癌位置を正確に把握することが困難となる。正確に手術を行うには、術前 CT 撮像時に検出された癌が虚脱後にどの位置に移動するかを術者に提示する必要がある。そこで、本研究では肺の有限要素モデルを用いた虚脱肺中の癌位置を求めるシミュレーションの構築を目的とした。

従来では、肺の有限要素モデルの表面要素に対して垂直方向に圧力を負荷させてモデルを収縮変形させていた(1)(3)が、実際は横隔膜が運動することで肺の内外で圧力差が発生して虚脱が行われる。したがって、この手法が実際の虚脱現象を正確に表現できているかは不明確である。本研究では肺虚脱の収縮特性を表現するため、熱伝導による有限要素解析をモデルに適用させる手法を提案した。熱伝導による変形解析結果と圧力負荷による変形解析結果および実際の肺を虚脱させた実験結果との比較を行い、肺虚脱を有限要素解析で表現する上でどのような解析手法が有効なのかを考察する。

2. 有限要素法に基づく変形計算

本研究では有限要素法による解析を用いる。有限要素法とは、対象としている連続体を有限の自由度をもつ要素に分割し、要素ごとに導かれたつりあい式を合成して全体系のつりあい式を構築し、解析する方法である。弾性体が外部から力を受けて変形するとき、物体の任意の点における変位、ひずみ、応力などの変数を決定し、変形挙動を明らかにするには構成式と各種変数を支配する方程式を与えられた境界条件下で解く弾性境界値問題の解析が必要である。弾性体の変形挙動を支配する方程式と境界条件が、ある種の物理量の関数を極値にするオイラーの方程式として導ける場合、汎関数を極大・極小あるいは停留させることにより、元の弾性境界値問題の解を得ることができる。

本研究では、有限要素モデルに仮想的な熱膨張率を定義し、節点に一樣な温度変化を与えてモデルを収縮変形させるため、熱膨張を考慮した物体の応力とひずみの関係式が離散化の過程において必要になる。物体に温度変化 ΔT が作用した場合、物体に発生する応力 σ 、せん断応力 γ 、ひずみ ϵ 、せん断ひずみ τ 、ヤング率 E 、横弾性係数 G 、ポアソン比 ν 、熱膨張率 α を用いると、応力とひずみの関係式は式(1)となり、

モデルの収縮過程はこの基礎方程式によって表現される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_x - \alpha \Delta T = \frac{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)}{E} \\ \epsilon_y - \alpha \Delta T = \frac{\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)}{E} \\ \epsilon_z - \alpha \Delta T = \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \end{array} \right. \quad (1)$$

3. 有限要素モデル

3次元画像編集ソフトウェアである mimics によりブタ肺の CT 画像から抽出した肺領域の 3D モデルを構築後、HyperMesh に読み込んで有限要素モデルを生成した。気管支(trachea)モデルは図 1 左図で示され、要素は三角形、要素数は 5408 で中空構造である。気管支以外の部分である肺実質(parenchyma)モデルは図 1 右図で示され、要素は四面体、要素数は 47981 である。解析モデルはこれらを組み合わせたモデルであり、気管支モデルと肺実質モデルは境界上の互いの節点を共有している。なお、山本らの構築したヒト肺の有限要素モデル(3)の要素数は 2886 であり、このモデルを圧力負荷により収縮変形させ、実測の CT データとシミュレーション結果の最終移動量を比較し、妥当な結果を得ている。したがって、本研究におけるモデルは解析を行う上で妥当な要素数であると言える。

Fig.1 FEM model
(left:trachea, right:parenchyma)

4. 解析

4-1 材料特性

レオメータから得られたブタ肺の肺実質と気管支の粘弾性試験結果をもとに Zener's Model で近似させたモデルの材料特性を表 1 に示す。近似式は式(2)で、 β は時定数である。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\beta} \sigma = (G_l + G_e) \frac{dy}{dt} + \frac{G_e}{\beta} \gamma \\ \beta = \frac{\eta}{G_l} \end{array} \right. \quad (2)$$

Table.1 Material Property

	parenchyma	trachea
Young's modulus kPa	2.0736	13.453
Poisson's ratio	0.35	0.45
Mass density [kg/m ³]	0.87	0.95
Ge kPa	0.768	4.67
Gl kPa	0.242	10.3
β s	0.0358	0.0199

また、生体材料を近似するのに適した Mooney-Rivlin の近似による材料特性もモデルに設定する。

4-2 解析条件

図 2 のようにモデルを剛体壁 (surface) 上に設置した。図 3 中の矢印部の第一岐気管支部分を完全固定し、-Z 方向に重力加速度 $g=9.8067[m/s^2]$ を作用させた。圧力負荷による変形解析では、大気圧である 3245[Pa] をモデル表面要素に対して垂直方向に図 4 のような時間変化で負荷させた。熱伝導による変形解析では、モデルの全節点に図 5 のような時間変化で熱を負荷させた。モデルの初期温度は 20[°C] とした。気管支の熱膨張率を 0[1/°C] とし、肺実質の熱膨張率を 0.01, 0.015, 0.02, 0.025[1/°C] とし合計 4 パターンの解析を行った。Mooney-Rivlin 材料モデルにも上記の熱膨張率を定義して解析を行った。なお、実験よりモデルと剛体壁との摩擦係数は 0.38 とした。解析には汎用有限要素解析ソフトウェアである MSC.Marc/Mentat を用いた。

Fig.2 boundary condition

Fig.3 fixed displacement

Fig.4 pressure load

Fig.5 temperature

4-3 解析結果

解析結果を評価するために、ブタ肺を用いた虚脱実験を行った。マルチスライス CT を用いてブタ肺の CT 画像を撮影した。撮影の際に CT マーカーを設置し(図 6)、マーカーから各点の移動量を計測した。ブタ肺の第一岐気管支部分を固定することで解析条件と同様の条件を付与した。気道から空気を送り込み、完全に吸気された状態が内圧 25[kPa] であり、20, 15, 10, 5, 0[kPa] と吸気状態を変化させ、その都度 CT 撮影を行い虚脱を再現した。なお、ブタ肺の有限要素モデルは内圧 25[kPa] 時のブタ肺 CT 画像より生成したものである。

Fig.6 points

肺実質の熱膨張率が 0.02[1/°C] の解析結果が最も実験値との合成変位誤差の平均値が小さく、この場合の熱伝導による変形解析結果と圧力負荷による変形解析結果を比較する。図 7 に各解析における変形後のモデルの形状を示す。解析手法が異なることで変形形状が異なることが分かる。これは、モデルが剛体壁と接触している部分では要素に圧力が作用せず、剛体壁からの反力を受け、剛体壁との接触部分で要素が潰れるように変形したためだと考えられる。実際の虚脱において、このように肺が押し潰されるような変形は行われなため、熱伝導による変形解析の方が実際の虚脱現象に近いものと考えられる。

Fig.7 deformed shape
(left:pressure load, right:heat transfer)

図8は各解析における実験値との合成変位誤差である。各平均値は、熱伝導による変形解析が32.6[mm]、圧力負荷による変形解析が36.4[mm]となった。

Fig.8 difference of displacement with experimental data

図9～11は各方向における変形後のモデルの最終移動量を表している。全体として、ほぼ全ての方向、ポイントにおいて両解析間の移動方向が同じであることが分かる。X方向について言及すると、実際の肺はY軸を中心に回転するように虚脱するが、ポイント5, 6, 8, 9, 10では両解析結果と実験結果の移動した方向が異なることが分かり、解析では肺特有の回転しながら行われる虚脱を表現しきれないことが分かる。Z方向について言及すると、両解析結果と実験結果の移動方向が一致していることが分かる。他の方向よりも両解析間における移動量の差が大きく、特にポイント1, 2, 4, 5, 6においては圧力負荷による変形解析の移動量は実験値をも上回っていることが分かる。これは剛体壁との接触付近の要素が変形するに従って鉛直下向き(-Z方向)に力が作用し始め、変位が大きくなるためであり、実際の虚脱現象とは異なる変形を行うことが分かる。

また、粘弾性体とMooney-Rivlin体の異なる材料特性のモデルで熱伝導による変形解析を行い、結果を比較することにより、材料特性が異なるとモデル変形形状も異なるということが分かった。

Fig.9 displacement X

Fig.10 displacement Y

Fig.11 displacement Z

5. 結言

本研究では、肺虚脱の収縮特性を表現するために熱伝導による有限要素解析をモデルに適用させた。その結果、熱伝導による変形解析は剛体壁の影響をほとんど受けずに変形し、肺虚脱を32.6[mm]の合成変位誤差で変形予測可能であり、圧力負荷による変形解析と比べて、肺虚脱の変形予測を行う手法として有効であることが分かった。

参考文献

- (1) 小林洋, 吉沢愛子, 岡本淳, 宮下朋之, 山川宏, 藤江正克, 腫瘍の位置提示ナビゲーションシステムへの応用を目的とした肺の虚脱シミュレーション, Vol.12, No.1(2010)
- (2) 油谷直樹, 中本将彦, 小西晃造, 胸腔鏡手術支援における腫瘍位置推定のための肺変形に用いる表面部位の検討, 電子情報通信学会, Vol.106, No.509(2007)
- (3) <http://library.naist.jp/mylmediod/dllmediod/show.cgi?bookid=107785>