

食塊の嚥下連成シミュレーション

swallowing simulation of bolus

学 沼守 崇志 (首都大院)

正 水沼 博 (首都大)

園村 光弘 (富士テクニカル リサーチ)

筒井 喜平 (ランスマア)

Takashi NUMAMORI, Tokyo Metropolitan University, Minamiosawa1-1, Hachioji-shi, Tokyo
Hiroshi MIZUNUMA, Tokyo Metropolitan University, Minamiosawa1-1, Hachioji-shi, Tokyo
Mituhiko SONOMURA, Fuji Technical Research, tenocho19-17, Hodogaya-ku, Kanagawa
Kihei TSUTSUI, Lancemore, Sarugaku-cho2-7-7, chiyoda-ku, Tokyo

The viscosity of liquid bolus is raised by thickener additives for patient with dysphagia. However the amount of the thickener additives has been decided by the experience. The appetite declines if the viscosity is raised too much. The method to decide the suitable viscosity is necessary. This study analyzed the swallowing flow using a finite element method. We produced the finite element model for the organs and conducted the coupled analysis between the organs and the liquid bolus. The relationship between the viscosity and the bolus velocity was discussed.

Key Words:swallow , fluid bolus , numerical analysis

1. 緒言

普段、人は食物を咀嚼(噛み砕き)、嚥下(飲み込み)する過程で、無意識の嚥下反射により気道への食物の侵入が阻止され、安全な食事が実現されている。しかし、老化や病気などにより神経系の反応が鈍くなるとこの嚥下反射が遅延又は消失してしまう場合がある。この場合、食物が気道へと侵入してしまう誤嚥が発生し誤嚥性肺炎になる危険性があり、死に到るケースも少なくない。誤嚥性肺炎は高齢者に発症するケースが多く、高齢化が進む今後ますます深刻な問題になると予想される。近年、嚥下障害者に対し増粘剤で液状食品の粘度を高め、喉頭への食塊到達時間を遅らせる対処がとられている。しかし、その増粘の程度について明確な基準はなく、経験的に決められている。粘度を高くしすぎると食欲減退の原因となるから、適切な粘度を議論する研究手法が求められている。

本研究は有限要素法により嚥下シミュレーションを行い、得られた結果から適切な粘度を議論することを目的としている。ここではまずその計算に必要な有限要素モデルを作成するとともに、その有限要素モデルを用いて液状食品との連成解析を試みた。その結果より誤嚥の発生と密接に関係する粘度と嚥下速度の関係について検討した。

2. 解析モデル

2.1 人体の有限要素モデル

図1に本研究で作成した有限要素モデルの概要を示す。このモデルは咀嚼に使用される顎モデル、食物の保持に必要な頬モデル、そして嚥下のための咽喉モデルから構成されている。

(a) 顎モデル

歯のモデルは成人女性の歯の形状を石膏により得たのち、3次元スキャンにより STL 形式の形状データを作成し、計算

メッシュを作成した。また、歯を除く顎部形状は同一人物の MRI 画像の輪郭を抽出することで得られ、STL ファイルに変換した後、メッシュを作成した。図1に示す顎モデルはこれらの2つのモデルをMRI画像から判定されたそれぞれの位置関係と比較し結合したものである。それぞれの材料モデルは食塊に比べ十分に硬いとし剛体モデルを使用し、要素形状は計算時間を短縮するため板状要素を使用している。

(b) 皮膚モデル

顎モデルと同様にMRI画像より得た形状を使用している。材料モデルはひずみOGDENゴムモデルを使用し、物性は文献^[1]の値を使用した。

(c) 咽喉モデル

人の咽喉を模した模型を3次元スキャンし、そのSTLデータから計算メッシュを作成した。大変形が可能であるように材料モデルは弾性モデルを使用し、要素形状は板状要素を使用している。また、物性値は文献^[1]の値を使用した。



Fig.1 Finite element model.

2.2 液状食塊の計算モデル

嚥下時の液状食塊の流れを解析するには、器官については移動境界を扱い、食塊については自由表面を扱わなければならないそこで、本研究では有限要素法の汎用ソルバーであるLS

- Dynaをソルバーとして用い、LS-DYNAに実装されているALE要素を使用する。このALE要素⁽²⁾はオイラー法とALE法の考え方共に適応が可能であり、本研究では計算メッシュの移動や変形を必要しないことからオイラー法の考え方で使用した。また、流体要素に対する設定パラメータは密度と粘度であり、低粘度として水の粘度 $\mu = 0.001 Pa \cdot s$ を使用し、高粘度として水の1000倍の粘度 $\mu = 1.0 Pa \cdot s$ を使用する。なお、両条件共に密度は $\rho = 1000 kg / m^3$ とし、この2つの粘度差による流動の差異を調べる。

3. 計算結果および考察

上記の有限要素モデルは固形と液状食塊双方の嚥下シミュレーションを考えたものである。ここで行う咀嚼を必要としない液状食品の嚥下シミュレーションでは咽喉モデルのみで検証を行うことができるため、咽喉モデルのみを使用した。嚥下シミュレーションは、嚥下反射における舌骨の運動から誘起される喉頭蓋による喉頭の閉鎖運動と、喉頭の挙上および蠕動運動を節点の変位運動として与え解析した。また、液状食塊の嚥下開始点を舌後方とし、重力を作用させ、運動する咽喉モデルとの連成解析を行った。また、実際の正常な嚥下においては舌による液状食品の突き上げが存在するが、ここでは舌後方を滑り落ちて発生する誤嚥を想定し、舌の運動は無視した。

図2に高粘度の結果を、そして図3に低粘度の結果を時刻 $t=0ms$, $120ms$, $240ms$, $360ms$ に対して示す。流動が始まると、低粘度の $t=120ms$ の場合においては喉頭閉鎖の完了している喉頭蓋上面に液状食塊がすでに到達している。それに対し高粘度の場合は $t=120ms$ では喉頭蓋上面に到達しておらず、 $t=240ms$ において同位置への到達している。このことからこれらの粘度の違いにより $120ms$ 程の到達時間の差異が存在することがわかる。この喉頭蓋への到達時間の遅延は嚥下反射の遅れを補う点で意義がある。現在、嚥下困難者に対し行われている液状食品の高粘度化を議論するうえでこの遅れは重要であり、本手法により検証することができた。さらに、喉頭の挙上が再現できることが各粘度の結果より確認できることから大変形を伴う嚥下反射運動の再現が十分可能であることが分かった。図4に $t=100ms$ の低粘度食塊中央断面における流速ベクトル場を示す。ベクトル場はキャピラ状に上方から下方へ覆い被さるように流動場を表しており、液滴としての流動が達成されていることを確認できた。その他に定量的な評価は応力場、圧力場などに対しても可能であり今後これらについても考察を進める。一方、本報告で試みた嚥下シミュレーションは嚥下反射の発生タイミングを任意に決めて行ったものであるから、実際の嚥下反射の再現が不十分である。今後はこの嚥下反射の再現を試み、X線造影検査画像とも比較し、液状食塊の嚥下シミュレーションの精度を向上させる。

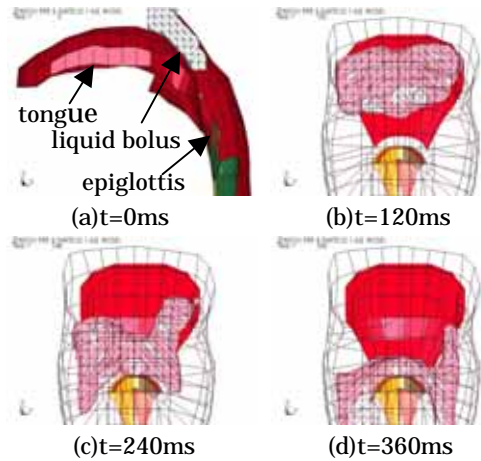


Fig.2 Flow of liquid bolus (high viscosity)

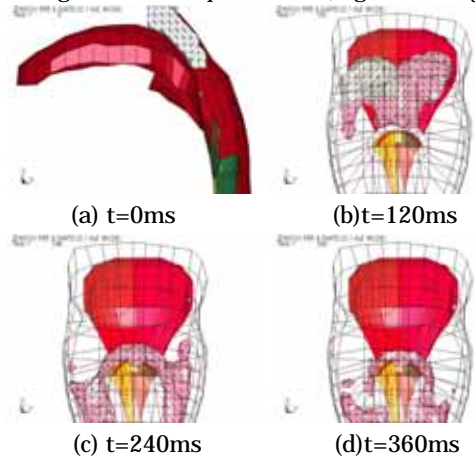


Fig.3 Flow of liquid bolus (low viscosity)

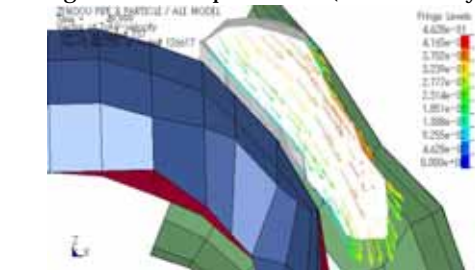


Fig.4 Vector field in bolus (low viscosity)

4. 結言

数値解析による嚥下シミュレーションのモデルを作成し解析を試みた。その結果より以下のことが分かった。

- (1) 作成した咽喉モデルは嚥下に伴う大変形解析が十分可能である。
- (2) 誤嚥抑制パラメータである粘度の差による喉頭蓋到達時間の差異が確認でき、本モデルでも粘度の効果について定性的な評価が可能である。

参考文献

- (1) 山田 博, 人体の強度と老化, 日本放送出版協会, pp.66-91
- (2) John O. Hallquist, LS-Dyna Theoretical manual, Livermore Software Technology Corporation, pp151-178