基礎論文

食道の蠕動運動による食塊の輸送シミュレーション

井村誠孝¹⁾, 豆野裕信¹⁾, 浦西友樹²⁾, 黒田嘉宏³⁾, 大城 理¹⁾

1. はじめに

生体内ではほとんどの管腔で、蠕動運動という生体環境に適した輸送方法が見られる。蠕動運動とは、連続した輪状筋の収縮によって、管内の物質を一定方向に輸送する運動のことで、上流の筋肉が収縮することにより物質の逆流が防止されるという利点がある¹⁾。食道でも蠕動運動による食塊の輸送が行われており、高粘性の食塊であっても、胃までの輸送が可能である。

近年、特に高齢者で問題となっている嚥下障害は、食塊を舌によって口から喉へ送る口腔期、喉から食道へ送る咽頭期、食道内から胃へと送る食道期のい

ずれかの時期で、嚥下機能がうまく働かなくなる障害である。嚥下障害が生じる原因としては、器質的原因、機能的な原因、心理的原因などが挙げられ、食べる際の姿勢を指定して、粘性の小さい流動食を与えるなどの対策をしている。食道内を通過する食塊の挙動は、主に嚥下造影 (videofluorography; VF) 検査によって明らかにされているが、実際に食塊を嚥下する必要があるため、多様な条件下での実験は負担が大きく、また食道を詰まらせてしまう粘度を持つ食塊での実験は困難である。

これまでに、消化器のシミュレーションは多数実施されている^{2, 3)}。沼守らは人体の顎、皮膚、咽頭をそれぞれ MRI 画像や模型の 3 次元スキャンか

Bolus Transport Simulation by Peristaltic Movement of Esophagus

Masataka IMURA, Hironobu MAMENO, Yuki URANISHI, Yoshihiro KURODA, Osamu OSHIRO

Abstract :

In this study, the authors analyze the behavior of the bolus by peristalsis by simulation. The esophagus and bolus are represented by spring-mass model. Circular muscle contraction of the esophagus by peristalsis is represented by changing the natural length and the coefficient of the spring. The interaction of the bolus and esophagus is treated as contact between spheres and virtual spring and damper are introduced to represent consistent contact. The profile of estimated elapsed time of swallowing showed qualitative matching with in vivo experiment result.

Key words :

Peristalsis, Spring-Mass Model, Damper, Viscoelasticity

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科, Graduate School of Engineering Science, Osaka University

2) 京都大学医学部附属病院 (元大阪大学 大学院基礎工学研究科), Kyoto University Hospital (Formerly: Graduate School of Engineering Science, Osaka University)

3) 大阪大学 サイバーメディアセンター, Cybermedia Center, Osaka University

ら得られたパラメータを用いて有限要素モデルで作成し、嚥下を再現している²⁾。また、小林らは肝臓の特性をクリープ試験により測定して材料特性モデルを作製し、有限要素法を用いて肝臓にかかる力と変形の関係を定式化し、構築したモデルで肝臓の変形を再現している³⁾。しかし、食道の蠕動運動についてのシミュレーションは、数学的な解析^{4,6)}や簡略化されたモデルでの研究⁷⁾などがあるが、食塊の変形まで含めた系としてのシミュレーションはなされていない。

本研究では、食道の蠕動運動における食塊の挙動のシミュレーションを行う。生体シミュレーションで粘弾性体を扱う際に用いられる主な物理モデルには、有限要素モデルやバネ質点モデルがあるが、本研究では食塊の粘性を考慮するために、粘性要素の導入が比較的容易なバネ質点モデルで食道と食塊のモデルを構築する。

2. 食道のモデリング

2.1 食道の構造

食道は内面が粘膜で被われた筋肉性の管で、咽頭の高さから始まり、気管および心臓の後部、脊柱の前を下り、横隔膜を貫いて胃へと繋がる⁸⁾。全長は成人では約 0.25m、半径は約 10mm で、全長にわたって同じ太さではなく、食道入口部、気管分岐部、食道裂孔部の三箇所の狭窄部がある。食道入口部では輪状軟骨、気管分岐部では気管、食道裂孔部では横隔膜がそれぞれ食道周囲にあるために食塊が詰まりやすい箇所となっている。本論文では、食道の咽頭側を上流、胃側を下流と表記する。食道の内部は図 1 のように内側から順番に粘膜、筋層、外膜の 3 層から構成されている。粘膜は重層扁平上皮で構成されており、食塊が通過する際に傷つかない程度の強度を有している。筋層は内側の輪状筋の層と外側の縦走筋の層から構成されている。輪状筋は収縮して食塊を輸送し、食塊を逆流させないという役割を持つ。縦走筋は輪状筋と連携して収縮し、食塊を前進

図 1 食道の構造

Fig.1 Structure of Esophagus

させる役割を持つ。

2.2 形状のモデリング手法

本研究では食道および食塊をバネ質点モデルでモデル化する。バネ質点モデルでは、各質点に働くバネからの力を計算し、合計することで全体の挙動を解析する。粘弾性体の挙動を解析する際には、運動方程式に粘性係数の入った項を付け足すだけでよいので、比較的容易に粘性を導入することができる。本研究では、筋肉の粘弾性を考慮するため、質点間のバネにダンパを並列に結合する Kelvin-Voigt モデルを用いる。

2.3 食道と食塊の三次元モデル

構築する食道のモデルを図 2 に示す。図中の各線分は Kelvin-Voigt モデルによって表現された筋肉である。筋肉は 3 種類あり、種類によってバネ係数、自然長、粘性係数が異なる。最も内側で環状になっている太い線分（以下、内バネ）で表されるバネとダンパが輪状筋を表現し、縦方向に走行している線分（以下、縦バネ）と外側へ向かう線分（以下、外バネ）で表されるバネとダンパが縦走筋を表現する。また、外バネの一端を固定することにより、周辺組織との平均的な相互作用を表現する。

図2 食道のモデル
Fig.2 Model of Esophagus

図4 蠕動による食塊の輸送
Fig.4 Peristaltic Transport of Bolus

図3 食塊のモデル
Fig.3 Model of Bolus

本研究では食塊も図3のようにバネ質点モデルによりモデル化する。食塊の体積が0となることを防ぐため、食塊を構成する質点には大きさの概念を加えて、球の集合体として扱う。食塊の粘弾性は Kelvin-Foigt モデルで表現する。

3. 蠕動運動のモデリング

3.1 蠕動運動

食道の蠕動運動とは、食道粘膜への食塊による機械刺激を入力として、数十 mm 上流側の輪状筋が収縮するという一連の動作の連続により、食塊を胃の方向へ輸送する運動のことである⁹⁾。本研究では図4に示すように、食塊によりある高さの内バネが自然長より一定値以上伸びると、上流に

ある内バネのバネ係数を大きく、自然長を短く変化させることで、輪状筋の収縮を表現する。

3.2 食道を構成する各質点に働く力

食道を構成する質点 i を考える。質点 i は、バネとダンパにより近傍の質点と接続されている。質点 i に働く力の総和 $\mathbf{F}_i$ は、以下の式で表される。

$$\mathbf{F}_i = m\mathbf{g} + \sum_j \left\{ -k \left(L - |\mathbf{r}_{ij}| \right) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} - D\mathbf{v}_{ij} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $m, \mathbf{g}, k, L, D$ は、質量、重力加速度、バネ係数、バネ自然長、粘性係数を表している。 $\mathbf{r}_{ij}$ 、 $\mathbf{v}_{ij}$ は、質点 j に対する質点 i の相対位置および相対速度である。

3.3 食塊を構成する球同士の接触

食塊を構成する各球の接触による反力はペナルティ法を用いて求める。ペナルティ法とは、拘束を侵した物体に、拘束を侵した量 (= ペナルティ) に応じた反発力を与えることで拘束違反を解消する方法である。球 i と球 j の中心間距離が、球 i の半径と球 j の半径の合計より小さくなった時に接触したと考え、両球の中心を結ぶバーチャルバネによる力を発生させる。接触の際に、自然長が $R_i + R_j$ のバーチャルバネにより球 i に働く力 $\mathbf{F}_p$ は以下の式で求められる。

$$\mathbf{F}_p = -k_p \left\{ |\mathbf{r}_{ij}| - (R_i + R_j) \right\} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \quad (2)$$

3.4 食道と食塊の相互関係

食塊は、筋肉が順序よく収縮する蠕動運動によって生まれる、食道から受ける上下の圧の差により移動する。食道と食塊の接触は、食道を構成する質点により作られる面と、食塊を構成する球との接触として扱う。食道の粘膜の粘性は、球と面の接触の際に生じるバーチャルバネにダンパを付加することで表現し、食塊の粘性は、球と平面の接触の際に面の接線方向の粘性摩擦力を考慮することで表現する。

球から接触面 H に下ろした垂線の足 P までの長さを L とすると、接触の際に自然長が R のバーチャルバネにより球 S に働く力 $\mathbf{F}_p$ は、

$$\mathbf{F}_p = -\mathbf{k}_p (L - R) \mathbf{n} - D \mathbf{v}_s \quad (3)$$

と表される。ここで、食道の粘膜の粘性係数を D 、H に対する球 S の相対速度を $\mathbf{v}_s$ 、接触面 H の単位法線ベクトルを $\mathbf{n}$ としている。

また接触の際、接触面 H には作用反作用の法則により、式 (3) と向きが反対で大きさが同じ力が働く。接触面 H は三角形とし、垂線の足 P から各頂点までの距離を d_i ($i=1, 2, 3$) と表す。各頂点に働く力 $\mathbf{F}_i$ を、合計が $-\mathbf{F}_p$ となり、点 P からの距離が遠くなるに従って小さくなるものとして、以下の式で与える。

$$\mathbf{F}_i = \left(1 - \frac{2d_i}{\sum_i d_i} \right) \mathbf{F}_p \quad (4)$$

3.5 食塊の粘性

食塊の粘性は、球と接触面の間の粘性摩擦力で表現する。球 S の接触面 H に対する相対速度 $\mathbf{v}_s$ のうち、接触面 H に平行な成分を $\mathbf{v}_t$ とすると、球に働く粘性摩擦力 $\mathbf{F}_\mu$ は、食塊の粘性摩擦係数を μ として

$$\mathbf{F}_\mu = -\mu \mathbf{v}_t \quad (5)$$

と表される。

4. シミュレーション実験

4.1 実験の目的

姿勢の変化や食塊の粘性の違いが、食塊の蠕動輸送に与える影響を調べるシミュレーション実験を行った。食事の際の姿勢を食道の重力方向に対する角度で表現し、食塊の粘性については3節で述べた手法を用いて再現することで、角度と粘性をそれぞれ変化させて様々なパターンのシミュレーションを行った。計算に用いた計算機は、CPU が Intel Core i5-2450M 2.50GHz、メモリが 4GB である。本実験における運動方程式の数値解は、オイラー法による逐次計算により求め、タイムステップは 0.1ms とした。

4.2 各パラメータ

表 1 に本実験で用いた食道のバネの各パラメータを示す。食道モデルの断面は四角形とし、食道の長さが 0.25m となるように、モデルを構成する縦方向のノードを 51、間隔を 5mm と設定した。質点の合計数は合計 408 個である。

食道を構成する質点の重さは 0.1g で、内バネが

表 1 食道を構成する筋肉のパラメータ

Tab.1 Parameters of Muscles of Esophagus

種類	自然長 [mm]	バネ係数 [N/m]	粘性係数 [N·s/m]
内バネ	5.0	50	0.2
外バネ	5.0	1000	0.2
縦バネ	5.0	500	0.2

表 2 食塊のパラメータ

Tab.2 Parameters of Bolus

球の半径 [mm]	自然長 [mm]	バネ係数 [N/m]	粘性係数 [N·s/m]
1.5	5.0	1000	0.2

1.0mm 以上伸びると、10mm 上流の内バネの自然長が 1.0mm、バネ係数が 1000N/m に変わるように設定した。

食塊モデルは計算の単純化のために、 $3 \times 3 \times 3$ の球 27 個で表される立方体を用いて表現した。表 2 に食塊の各パラメータを示す。

食塊を構成する球同士の接触の際生じるバーチャルバネのバネ係数は 2000N/m とした。また、食道と食塊の相互作用を表現するために考慮した、球と面の接触の際生じるバーチャルバネのバネ係数は 2000N/m とし、粘膜の粘性係数は 0.01 とした。

4.3 結果

本実験では、以下の二つの条件を変えて、複数の条件下でシミュレーションを行った。

1. 食道の角度 θ を 0deg から 90deg まで 15deg 刻みで変化させる。
2. 食塊の粘性摩擦係数を 0.01, 0.1, 0.5 と変化させる。

θ が 0deg は食道が鉛直な状態を指す。食塊は、下面が食道の上面と接した状態から、食道に向かって初速度 0.5m/s を与えられるものとする。

結果の一例として、図 5 に角度 15deg、粘性摩擦係数が 0.01 の場合の、食塊移動の様子を示す。

また、各パラメータにおける食塊の食道通過時間を図 6 に示す。

4.4 考察

図 6 の結果より、食道の角度が地面に対して水平に近づくに従って食道通過時間が長くなることと、食塊の粘性摩擦係数が高くなるにつれて食道通過時間が長くなることが確認できた。提案モデルは、食塊通過時間の条件依存性を定性的に再現可能であると言える。粘性が高くなるにつれて、角度依存性が強くなるという結果は、粘性の高い食物の摂取時には姿勢に細心の注意を払わなければならないということを示唆している。

本結果を、Cordova-Fraga らが磁気マーカを用

図 5 シミュレーション結果の例
Fig.5 Example of Simulation Result

図 6 食塊の食道通過時間
Fig.6 Esophageal Transit Time

いて食道の解剖学的傾きと食道通過時間との関係を実験的に求めた結果¹⁰⁾と比較する。Cordova-Fraga らの実験では、平均食道通過時間は食道の角度が 0, 45, 90deg の場合それぞれ 5.2 ± 1.1 s, 6.1 ± 1.5 s ならびに 23.6 ± 9.2 s と報告されている。本研究の結果と比較すると、定性的ではあるが、本研究のシミュレーションは食道の角度と食塊通過時間の関係を表現できていると考えられる。全体的に食道通過時間が短くなってしまっていることの原因は、食道に加わる大気圧の差や、周りの臓器との関係を考慮できていないことなどが考えられる。食道内圧検査用カテーテルや、X 線検査により、食道の収縮力、形状の情報を取得し、シミュレーションに導入することで、食道の角度と食道通過時の、より正確な関係性が求められると考えられる。

現状のモデルでは、嚥下障害の原因のうち、食道に起因するものでありかつ器質的な原因を扱えるが、将来的には、神経系を含めたモデルを構築することで、機能的もしくは心理的な原因を含めたシミュレーションが可能となる。嚥下障害のある患者個人の特徴を反映したモデルを用いて、食塊の物理特性および患者の姿勢に関する網羅的なシミュレーションを実施することにより、嚥下面で安全な摂食が可能な食品をあらかじめ知ることができ、誤嚥を防止しつつ食を楽しむ QOL の向上につながると考えられる。

5. おわりに

本研究では、食道と食塊の三次元モデルを生成し、食道の蠕動運動による食塊の挙動の解析を行った。食道と食塊のモデルにはバネ質点モデルを用いて、食道の角度と、食塊の粘性と変形を考慮したシミュレーションを行った。シミュレーション結果より、食道の角度が地面に対して水平に近づくに従って食道通過時間が長くなることと、食塊の粘性摩擦係数が高くなるにつれて食道通過時間が長くなることが確認でき、提案モデルは、食塊通過時間の条件依存性を定性的に再現可能であると言える。今後の課題は定量的な実験との一致性であり、本稿で述べた食道の蠕動運動と共に、嚥下開始時に作用する嚥下圧や、周囲の臓器との関係性を考慮することなどが必要である。

参考文献

- 1) 岩切勝彦, 川見典之, 梅澤まり子: 食道運動障害の診断. 日医大医会誌, 5(4):193-201, 2009.
- 2) 沼守崇志, 水沼博, 園村光弘: 食塊の嚥下連成シミュレーション. 日本機械学会年次大会講演論文集, 2:53-54, 2007.
- 3) 小林洋: 精確な穿刺の実現を目的とした肝臓の物理モデル構築に関する研究. 早稲田大学大学院理工学研究科博士論文, 2008.
- 4) Brasseur J.: A Fluid Mechanical Perspective on

- Esophageal Bolus Transport. *Dysphagia*, 2(1):32-39, 1987.
- 5) Meng Y., Rao M. A. and Datta A. K.: Computer Simulation of the Pharyngeal Bolus Transport of Newtonian and Non-Newtonian Fluids. *Food Bioprod. Process.*, 83(4):297-305, 2005.
- 6) Misra J. C. and Maiti, S.: Peristaltic Transport of Rheological Fluid: Model for Movement of Food Bolus Through Esophagus. *Appl. Math. Mech. - Engl. Ed.*, 33(3):315-332, 2012.
- 7) Yang W., Fung T. C., Chian K. S., et al.: Finite Element Simulation of Food Transport Through the Esophageal Body. *World J. Gastroentero.*, 13(9):1352-1359, 2007.
- 8) 栗屋和彦, 尾曾越文亮: 基礎解剖学. 朝倉書店, 1974.
- 9) Herman I. P.: 人体物理学. NTS, 2009.
- 10) Cordova-Fraga T., Sosa M. and Wiechers C.: Effects of Anatomical Position on Esophageal Transit Time: A Biomagnetic Diagnostic Technique. *World J. Gastroentero.*, 14(37):5707-5711, 2008.