

嚥下困難者に適した食品のテクスチャーを解明するための 数値シミュレーターの開発

道脇幸博*・菊地貴博・園村光弘

武蔵野赤十字病院特殊歯科・口腔外科

Swallowing Simulator Developed to Clarify Physical Features of Food Suitable for People with Swallowing Difficulties

Yukihiro MICHIWAKI*, Takahiro KIKUCHI and Mitsuhiro SONOMURA

Oral Surgery Division, Japanese Red Cross Musashino Hospital, Tokyo 180-8610

ABSTRACT

A parameter study using the swallowing simulator Swallow Vision[®] was performed to clarify food texture suitable for people with swallowing difficulties. Two types of numerical model were made from medical images: a 25-year-old healthy volunteer and a 78-year-old patient with a history of aspiration pneumonia. The two models were clearly different from each other in features and swallowing movement. The Newtonian liquid flow was analyzed using MPS method (Particleworks[®]) among the meshless numerical methods. The results provided new knowledge about shear rate changes over time and distinct differences between the two models. The swallowing simulator was considered useful in analyzing every affect involving swallowing difficulties from patients to food texture. Additional study is necessary to analyze the effects of non-Newtonian fluid and elastic food on swallowing difficulties. *Soy Protein Research, Japan* **17**, 32-36, 2014.

Key words : Swallowing difficulty, Swallowing Simulator, Food texture, Shear rate

高齢者は、肺炎に罹患しやすい¹⁾。肺炎の種類としては、誤嚥性肺炎が最も多く、70歳以上では、80%が誤嚥性肺炎とされている²⁾。すなわち高齢者の肺炎の主因は、嚥下（飲み込む）機能の低下である。

なぜ高齢者では嚥下機能が低下するのか。臨床疫学的には加齢変化、すなわち口腔や咽頭など関連器官の老化と考えられる。老化に伴う負の因子が各人の代償

機能を越えるほど大きくなったために、誤嚥が起こり、ひいては肺炎に至ると推測されている。

臨床の経験知では、食品の形状や硬さ、粘性によって誤嚥のリスクが変動する。しかし、たとえば液状食品の場合、どの程度の粘性がどんな理由で誤嚥のリスクを低減するのかは明らかでない。臨床研究で証明するには、粘性の異なる食品を被験者に嚥下してもらう必要があるが、人の個体差や年齢差、代償能力の差を考慮すると、多数例が必要で莫大な費用負担になるば

*〒180-8610 東京都武蔵野市境南町1-26-1

かりでなく、誤嚥性肺炎のリスクを伴うため、倫理的な問題点も大きい。

新たな研究手法として、数値シミュレーション法がある。有限要素法による解析では、モデル形状と嚥下運動があまりに単純化され、また食塊モデルもゼリーに限定されている³⁾。粒子法（MPS法）を使った研究では、モデルが平面モデルであり、嚥下運動の一部の検討にとどまっているため、誤嚥の解析に至っていない⁴⁾。

われわれは、嚥下の実形状・運動データに基づく立体の嚥下シミュレータ（Swallow Vision[®]）を制作して数値解析（MPS法）によって嚥下と誤嚥のメカニズムを解明する研究を行っている。

本研究では、嚥下困難者に適した食品のテクスチャーを解明するために、健常成人モデルに加えて誤嚥の既往のある高齢者モデルを制作し、形態と運動さらに液状食塊の挙動について比較検討した。その結果、本シミュレータは嚥下困難者に適した食品性質を解明するために有用であると考えられたので報告する。

方 法

Swallow Vision[®]の概要

基本形状として安静時（非嚥下時）のCT画像を立体構築した（Fig. 1）。次に、3DCGモデリングソフト3ds Max（Autodesk社製）を用いて嚥下造影検査（以下VF）の画像を基本形状と重ねて表示し、VF動画のフレームごとに基本形状をマニュアルで変形させVF画像へ一致させた（Fig. 2）。VF画像だけでは不明な箇所は、cineMRIなどによる知見から適宜推定した。

このVF動画に基づく形状モデルを、時々刻々変形する壁面としてParticleworks 4.0（プロメテックソフ

トウェア株式会社、株式会社構造計画研究所）での解析に用いた。使用したVFは1/30sごとの動画であるが、解析精度を向上させるために3DCGモデリングソフトの形状の線形補間機能によって、1/300sごとに壁面データを作成した。また、使用したParticleworksは、この強制変位する壁面データを読み込むためのカスタマイズしたものである。Particleworksでは、MPS法を用いて食塊の流れを解析する⁵⁾。非圧縮性流れの支配方程式は連続の式（質量保存則）およびナビエ・ストークス方程式（運動量保存則）である。

Swallow Vision[®]ではナビエ・ストークス方程式の右辺の項を分離して解く半陰的アルゴリズムを適用した。また、食塊の表面張力と壁面への濡れ性も食塊の動態において重要と考えられるため、粒子間のポテンシャル力モデル⁶⁾を導入した。



Fig. 2. Three dimensional structure images superimposed on VF frames. (a) Oral phase of swallowing with the bolus on the tongue. (b) The bolus was transferred into the pharynx (pharyngeal phase). The epiglottis rotated to cover the inlet of the larynx. (c) After bringing the bolus into the esophagus (esophageal phase), every organ returned to the position for respiration. 3D structure images fit well to VF images over the whole swallowing phases.

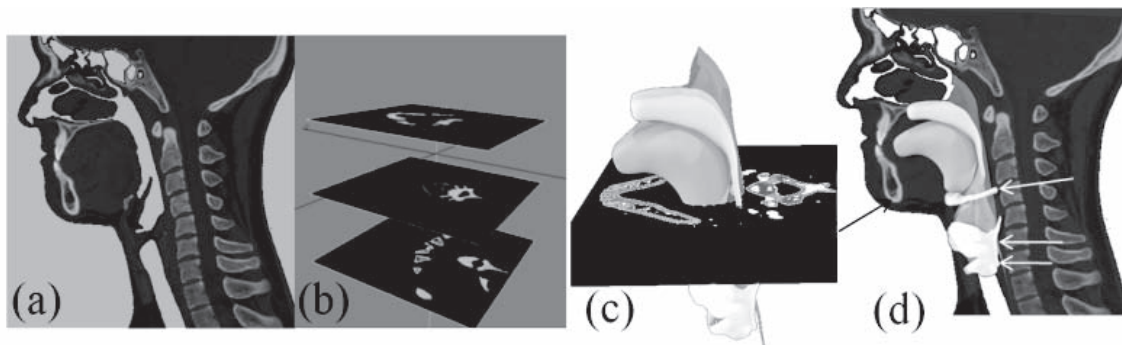


Fig. 1. How to make 3D structure images of swallowing organs. (a) Mid-sagittal section of CT image, (b) CT images were arranged on clear polygons. (c) To verify the structure, 3D reconstructed organs were superimposed on the CT images. (d) 3D structure image of the whole swallowing organs.

シミュレーションの精度はSwallow Vision[®]から得られたデータとVF画像を比較して、検証した。定性的検証では器官の動きと食塊の流れ、定量的検証には喉頭蓋谷近傍での食塊量の通過量の時間的な推移を解析した。なお食塊量は、Swallow Vision[®]では喉頭蓋近傍を流れる粒子数、VFでは同部位を通過する検査液（X線造影剤）の濃淡と定義して、時々刻々の両者の変化量を計測した。その結果、定性的、定量的にもよく一致しており、医用工学的に妥当と考えられた（Fig. 3）⁷⁻¹¹⁾。

対象者および試験方法

被験者2名（25歳の健常男性、誤嚥性肺炎の既往のある78歳の男性患者）の頭頸部のCT（スライス厚さ0.625 mm）と嚥下造影画像（VF）を撮像した。このデー

タをもとに3DCGモデリングソフト上で、モデルを制作してSwallow Vision[®]のモデルとし、Particleworksによる水嚥下の解析を行った。なお高齢患者ではVF検査時に食道入口部が開放せず、食塊が梨状窩に貯留して食道内に入らなかった。そこで、ずり速度解析のシミュレーションモデル用に、食道入口部を開放させた。

結 果

モデルの妥当性の検証

青年モデル（Fig. 4）と高齢患者モデル（Fig. 5）について、実画像との比較によって臨床的な妥当性を確認した。

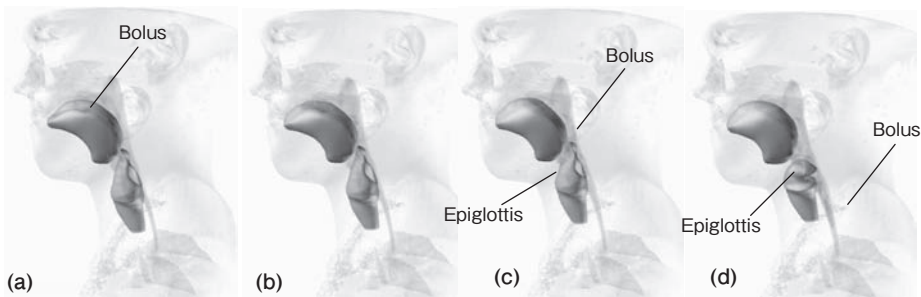


Fig. 3. The Swallow Vision[®] simulated organs] movement and bolus flow. (a) At the beginning of swallowing, the bolus residue is in a cavity on the tongue surface, and the organs are preparing to contract. (b) The tongue begins transferring the bolus to the pharynx in a traveling wave movement. (c) The tongue continues transferring the bolus, which enters the pharynx. (d) The proximal bolus enters the esophagus while the distal bolus settles between the tongue base and epiglottis (valleculla). During this phase, the tongue continues to lift closing the nasopharyngeal space and preventing backflow of the bolus. The epiglottis tilts down to close the laryngeal inlet.

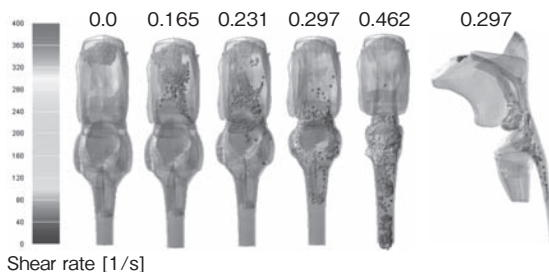


Fig. 4. Swallow Vision[®] can analyze not only liquid bolus flow but also the shear rate change. These rear and side view images of a 25-year-old healthy volunteer show the bolus configuration and shear rate over time. The bolus flows smoothly and quickly.

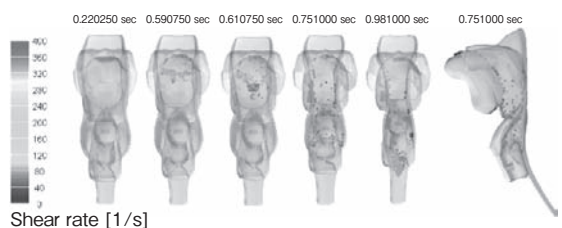


Fig. 5. The simulation images of a 78-year-old male patient model with opening esophagus inlet show that the bolus scatters in the pharynx and flows more slowly than that of the healthy volunteer. The shear rate was slower than that of the healthy volunteer.

構造の比較

青年モデルと比較すると、誤嚥の既往のある高齢患者モデルでは、頸椎の彎曲が強く、舌、舌骨、甲状・輪状軟骨の位置が下垂していた。また舌骨は、青年モデルでは下顎骨にほぼ平行であったが、高齢患者モデルでは舌骨大角部が上方に位置し水平方向に対する角度が大きかった。甲状軟骨と輪状軟骨の間の距離も延長し、咽頭空間は長くなって喉頭蓋付近では空間が膨らみ体積が増加していた。

嚥下運動の比較

高齢患者では、舌の送り込み運動の不良、舌骨や甲状・輪状軟骨の挙上量不足を認め、喉頭蓋の反転運動はほとんど見られなかった。咽頭空間の挙上と収縮も不足していた。いずれも嚥下運動の不良を意味する。また食道入口部の開放は見られず、食塊は梨状窩近傍で貯留した。

食塊の流れの比較

青年モデルでは、液体がまとまって嚥下されていたが、高齢患者モデルでは液体が口腔から咽頭まで分散し、まとまりがなく、梨状窩で貯留した。そこで、ずり速度解析用に食道を開放した高齢患者モデルを新たに制作した。

青年モデルでのずり速度の変化をみると、先頭の粒子速度が速く尾部の速度が遅かった。時刻毎に見ると舌根部を通過中に速度は増し、喉頭蓋谷でやや減速し、梨状窩を通過して食道腔に移送されている。嚥下運動中の食塊のずり速度は、50-300[1/s]であり、頻度が高いのは、50-150[1/s]であった。

食道入口部を開放させた高齢患者モデルでは、嚥下の口腔期と咽頭期において液体の流れが全般に遅く、時刻毎の到達点が青年モデルに比べて遅れていた。ずり速度は50-300[1/s]であったが、50-100[1/s]の範囲であった。

考 察

嚥下困難は、加齢変化のマイナス側面でもあり、高齢社会の進行によってますます増加すると考えられる。対処法には、機能の維持回復を目指す医学的なアプローチと、嚥下困難に応じた食物の根拠に基づく選択という食物側からのアプローチがある。

二つの方法の前提は、嚥下困難の程度の医学的な区分と、区分ごとに適切な食物を選択する基準が明らかにされていることであるが、両者とも明らかでない。まず、要因の抽出と整理を行い、次いで要因を絞り込むことが必要な段階である。そこで我々は数理モデルを制作して、計算工学の手法による検討を行っている。本報告では、健常青年モデルと高齢患者モデルについて、液状食塊の流れを解析した。その結果、医用画像からでは明らかにできなかった嚥下された食塊のずり速度を計測することができた。

液状食塊は、粘性値がずり速度に依存する非ニュートン流体がほとんどであるため、食塊のずり速度は、大変重要である。しかし、生体計測ではずり速度算出に必要なデータが得られない。そのため、いろいろな粘性値を持つ流体との官能評価から嚥下中のずり速度は約50[1/s]とされてきた¹²⁾。

本解析では、ニュートン流体（X線造影剤と水の混合液）ではあるが、ずり速度の最頻値は、50-150[1/s]であった。今後は、非ニュートン流体についての解析が必要であるが、代表値を50[1/s]とすることについては、検討の余地があることがわかった。

今後は、食塊モデルの種類を増やし、非ニュートン流体、弾性体についても検討をすすめる。嚥下困難者に適した食品のテクスチャーを検討する。その結果、嚥下困難者に適した食品の提供・開発が促進され、嚥下困難者の生活の質の向上、高齢者の肺炎罹患率の低減そして医療費の抑制に貢献すると考えている。

要 約

嚥下困難者に適した食品のテクスチャーを解明するために、嚥下シミュレータSwallow Vision[®]を使って解析した。まず医用画像から健常成人モデルと誤嚥の既往のある高齢患者モデルを制作し、粒子法（MPS法）を使って嚥下中の食塊の流れの数値解析を行った。その結果、両モデルは形態と運動、食塊の流れにおいて、著しく異なっていた。また本研究によって従来明らかにできなかったニュートン流体のずり速度を明示することができた。嚥下の数値シミュレーションは、嚥下困難者と食物の関係を網羅的に解析する手法として有用と思われたので、今後は非ニュートン流体、弾性体についても検討していく。

文 献

- 1) 厚労省（2012）：平成23年度患者調査の概況，平成24年11月27日大臣官房統計情報部 人口動態・保健社会統計課 保健統計室。
- 2) Teramoto S, Fukuchi Y, Sasaki H, Sato K, Sekizawa K, Matsuse T and Japanese Study Group on Aspiration Pulmonary Disease (2008): Japanese Study Group on aspiration pulmonary disease. High incidence of aspiration pneumonia in community - and hospital - acquired pneumonia in hospitalized patients: a multicenter prospective study in Japan. *J Am Geriatr Soc*, **56**, 577-579.
- 3) Sonomura M, Mizunuma H, Numamori T, Michiwaki Y and Nishinari K (2011): Numerical simulation of the swallowing of liquid bolus, *J. Texture studies*, **42**, 203-211.
- 4) 石田駿一，今井陽介，石川拓司，金城亜紀，松本範明，山口隆美（2011）：嚥下造影画像に基づく嚥下の計算力学解析。第24回計算力学講演会論文集，2305。
- 5) Prometech Software (2012): Particle Works Theory Manual.
- 6) 近藤雅裕，越塚誠一，滝本正人他（2007）：MPS法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデル，Transactions of JSCES Paper No. 20070021.
- 7) Kamiya T, Toyama Y, Michiwaki Y and Kikuchi T (2013): Development of a numerical simulator of human swallowing using a particle method: Part 1. Preliminary evaluation of the possibility of numerical simulation using the MPS method, 35th Annu Int IEEE EMBS, *Proc 35th Annu Int IEEE EMBS*, 4454-4457.
- 8) Kamiya T, Toyama Y, Michiwaki Y and Kikuchi T (2013): Development of a numerical simulator of human swallowing using a particle method: Part 2. Evaluation of the accuracy of a swallowing simulation using the 3D MPS method, *Proc 35th Annu Int IEEE EMBS*, 2992-2995.
- 9) 道脇幸博，菊地貴博，神谷 哲，外山義雄（2013）：立体の実形状・運動モデルを用いた嚥下時の食物流れのMPS法による解析，計算工学講演会論文集，**18**, 4.
- 10) 道脇幸博，菊地貴博，園村光弘，神谷 哲，外山義雄，長田 堯，越塚誠一（2013）：飲み込み時の実形状・運動モデルを使った，口腔～咽頭・食道までの食物流れの数値シミュレーション。第26回計算力学講演会論文集，312。
- 11) 道脇幸博（2014）：舌・舌骨・喉頭の下垂と誤嚥のリスク：数値シミュレータSwallow Vision[®]による解析。臨床バイオメカニクス，**35**, 91-98.
- 12) WOOD, F W (1968): Psychophysical studies on the consistency of liquid foods. in Rheology and Texture of Foodstuffs, *SCI Monograph*, **27**, 40.