

<平成26年度助成>

テーラーメイド嚥下数値解析に基づく機能性食品の開発

石 神 徹

(日本大学生物資源科学部食品生命学科)

高齢化社会の現在、口から入った食物が誤って肺に取り込まれる誤嚥が問題となっている。低粘度の液状食品は咽頭部の流速が高くなるため、食塊の通過のタイミングがとりにくい。一般的な介護食として高粘度の液状食品が利用されているが、べたつき感が強く食感として好まれない。誤嚥を防止でき、食感も良い食品が求められている。従来、高齢者個人の障害や形状に最適な食品の力学物性を明らかにするべく、咽頭部における食塊の流れ場計測が行われてきたが^{1,2)}、この方法ではある一断面の速度分布しか計測することができない。そこで、近年になり咽頭部における詳細な速度分布を把握するために数値解析が行われている。Kamiya *et al.*³⁾はMPS (Moving particle simulation) 法を用いて、Sonomura *et al.*⁴⁾は有限要素法を用いて、咽頭部における液体の流動を計算しており、詳細に現象を捉えることができている。しかしながら、これらの研究において、トロミ剤など特有の粘弾性や流動に顕著に影響を及ぼすと考えられる表面張力を考慮していない問題がある。また、従来の手法では、複雑な咽頭形状を表現するためのメッシュ作成が煩雑である課題も存在する。そこで、本研究では、表面張力が影響する流れの数値計算手法として、現在最も高精度な手法であるVOF (volume-of-fluid) 法をベースに、複雑な咽頭形状を容易に表現可能な埋め込み境界法とトロミ剤や流動食の非ニュートン性を考慮した、新たな数値計算手法の確立を目指した。

本研究では主に、以下の検討を行った。まず、トロミ剤として用いられる増粘剤水溶液のモデル

物質として、数種の生体高分子水溶液のレオロジー特性の測定ならびにモデル化について検討した後、数値解析へ適用可能な咽頭形状のボクセル(数値)データ化の検討、埋め込み境界法を用いた、VOF法に基づく気液二相流の数値解析手法の確立、最後にこれらを統合したテーラーメイド嚥下数値解析技術の構築を目指した。

応力制御型レオメーター(MCR302, Anton Paar GmbH)を用い、各種生体高分子水溶液(キサンタンガム、ヒアルロン酸ナトリウム、アルギン酸ナトリウム)のレオロジー測定を行った。Fig. 1に粘度及び溶液の弾性の強さを表す第一法線応力差を示す。その結果、第一法線応力差は小さいことから(Fig. 1(b))、トロミ剤として使用されている濃度域では、溶液の弾性は小さく、純粘性非ニュートン性流体とみなせることがわかった。また、Fig. 1の実線はCarreau modelによるモデルラインであり、アルギン酸ナトリウム、ヒアルロン酸ナトリウム、キサンタンガムの順にせん断減粘性が強くなっていることがわかる。

次に、咽頭形状のボクセルデータ化について、検討を行った。画像解析ソフトImage Jを用いて、任意の咽頭部の画像を、空洞部を1、咽頭部を0のように、領域全体を二値化した。Fig. 2に使用した咽頭形状のサンプル画像とボクセルデータを示す。これは、局所的な咽頭部の体積分率を表現しており、以下で説明する埋め込み境界法における固体体積分率として用いることができる。以上より、数値解析用のボクセルデータの作成に成功した。

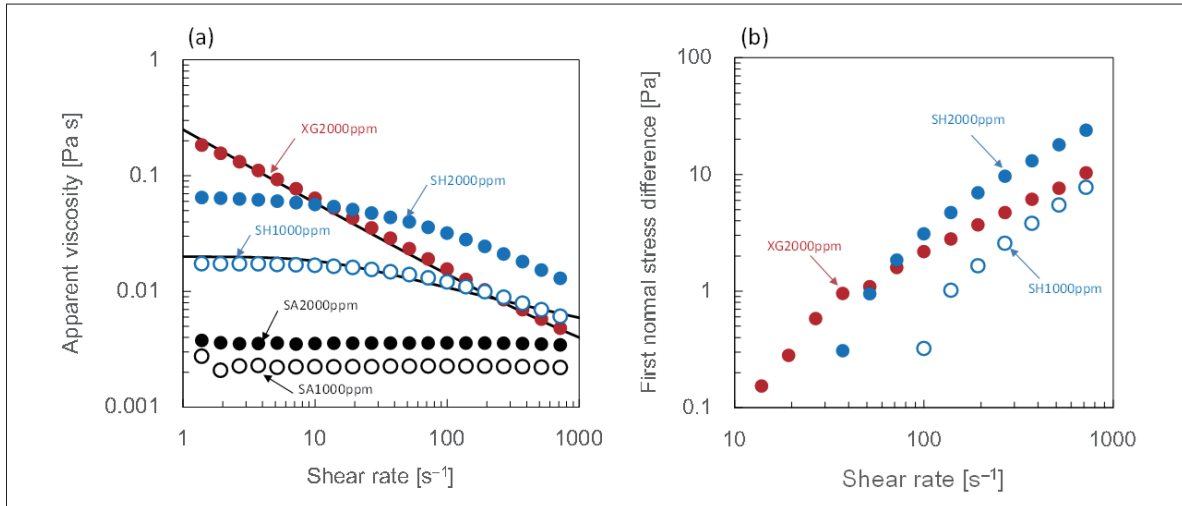


Fig. 1 Rheological properties of thickened liquids. (a) Apparent viscosities; (b) first normal stress differences.

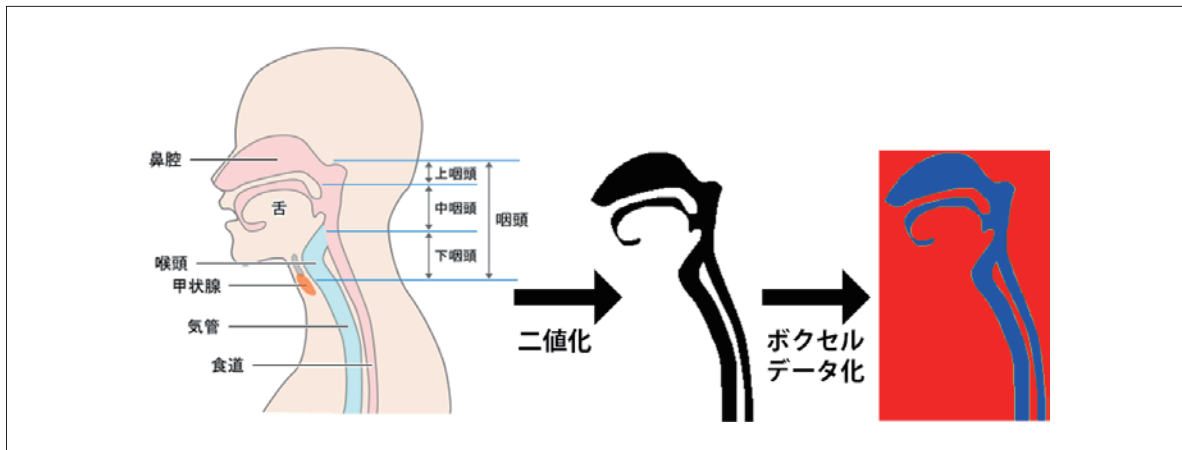


Fig. 2 Scheme of preparation of voxel data of pharynx geometry

埋め込み境界法⁵⁾は、計算格子中に占める固体領域の体積割合を基に、流体の流速を修正することで、流体と固体間に働く相互作用力を算出し、流体及び固体の振る舞いを計算する手法である。埋め込み境界法では、境界適合格子や重合格子ではなく、直行格子を用いるため、単相流体と同程度の計算コストで計算することが可能である。まず、体積平均流体速度を以下のように定義する。

$$\mathbf{u} = (1 - \alpha)\mathbf{u}_f + \alpha\mathbf{u}_p$$

α は計算格子中に占める固体領域(本研究では咽頭部)のセル平均体積割合、 \mathbf{u}_f は流体速度、 \mathbf{u}_p は固体内部の格子点における固体速度(本計算では、固体は動かないものと仮定したため \mathbf{u}_p は0とした)である。

次に、VOF法はセル平均体積率 C (計算セルを流体が占める時 $C=1$ 、気体が占める時 $C=0$ 、セル内に界面が存在する時 $0 < C < 1$) により自由界面を記述する方法である⁶⁾。このスキームの特徴としては、界面の追跡精度、体積保存性が良いという長所がある反面、精度の高い界面張力の評価ができないという短所もある。そこで本研究では、界面捕獲のスキームとして、VOF法に界面張力の評価精度が高い level-set 法⁷⁾を組み合わせさせた CLSVOF (a coupled level set and volume of fluid) 法⁸⁾を用いた。これは、界面の追跡に関してはすべて VOF 法に任せ、界面の法線ベクトルや曲率が必要な時に、level-set 法を補助的に用いる手法である。VOF 法では不可能であった精度の高い界面張力の評価を行うことができる、優れ

た界面捕獲手法である。なお、VOF法には数多くの種類が存在するが、本研究では Yokoi により開発された THINC/WLIC 法⁹⁾を用いた。

以上の検討に基づき、テーラーメイド嚙下数値解析の定式化を行った。咽頭形状を表現するための埋め込み境界法と自由界面を捕獲するための CLSVOF 法を組み合わせ、トロミ剤などの水溶性高分子の非ニュートン性を表現するための Carreau model を導入した数値解析の基礎方程式は、以下に示す連続の式と Navier-Stokes 方程式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\eta \mathbf{D}) + \frac{1}{\rho} \sigma \kappa \nabla H_\psi - \mathbf{g} + \Phi \alpha$$

ここで、Navier-Stokes 方程式の左辺は非定常項と対流項、右辺は順に圧力項、粘性項、界面張力項、重力項、埋め込み境界法に基づく固液界面を表す速度強制項である。 η は粘度であり、高分子水溶液のレオロジー測定の結果に基づき Carreau model で表現すると、以下の式で表される。

$$\eta = (\eta_0 - \eta_\infty) \left[1 + \left(\beta \cdot \sqrt{2(\mathbf{D}:\mathbf{D})} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} + \eta_\infty$$

η_0 , η_∞ はそれぞれゼロせん断速度粘度、無限せん断速度粘度、 n はべき乗則次数でせん断減粘性の度合いを表す。右辺第 3 項は表面張力を表し、 σ は表面張力係数、 κ は界面曲率、 H_ψ は Heaviside 関数と呼ばれる level-set 法に基づく密度関数である。右辺最終項は埋め込み境界法に基

づく速度強制項であり、咽頭部のような複雑な固体界面形状を表現することができる。 Φ は局所体積分率であり、ボクセルデータにおける 0, 1 の値が採用される。 α は以下の式の通りである。

$$\alpha = \frac{w - u}{\Delta t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\eta \mathbf{D}) - \frac{1}{\rho} \sigma \kappa \nabla H_\psi + \mathbf{g}$$

また、気液自由表面は以下の相関数 χ の移流方程式を解き求める。

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \chi) - \chi \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

THINC/WLIC 法では、VOF 関数 C は、 χ をセル体積で平均化して求められる。

$$C = \frac{1}{\Omega} \iint \chi dx dy$$

移流した VOF 関数から、level set 法の相関数と Heaviside 関数を構築すると、Navier-Stokes 方程式の右辺第三項の界面張力項の計算が可能になる。

以上の基礎方程式を数値的に計算した。数値計算の妥当性を評価するために、Chinyoka *et al.*¹⁰⁾ による液滴の単純せん断問題を計算した。Fig. 3 に計算結果を示す。図より、本計算結果は、既往の研究と良好な一致を示しており、本計算手法の妥当性が示された。このようなテーラーメイド嚙下数値解析のための、複雑形状と流体の非ニュートン性(せん断減粘性)を表現可能な数値解析手法はこれまで報告例がなく、極めて新規性が高いと言える。

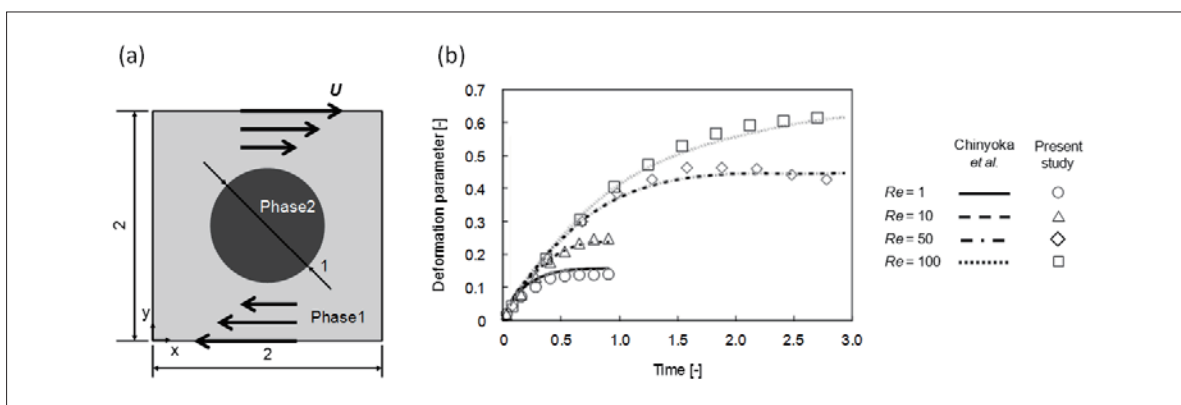


Fig. 3 Validation test of the simulation model developed in this study. (a) Setup for droplet deformation under a shear flow; (b) time variation in a deformation parameter, D . $Re = 1, 10, 50$ and 100 . Capillary number = 0.2 (the lines: the results of Chinyoka *et al.*; the points: the results of the present study).

最後に、本計算手法を嚥下過程に応用した計算を行った。トロミ材を咽頭部に流下させる計算を行った。Fig. 4 に計算結果を示す。実際の咽頭の滑らかな曲率形状とは異なり、ボクセルデータには粗さがあるため、当該部で一部の流体が滞留するような非現実的な挙動が観察されたものの、咽頭部に沿って流下していく様子が確認でき、本研究で開発した数値解析技術が嚥下過程に応用可能であることを示した。

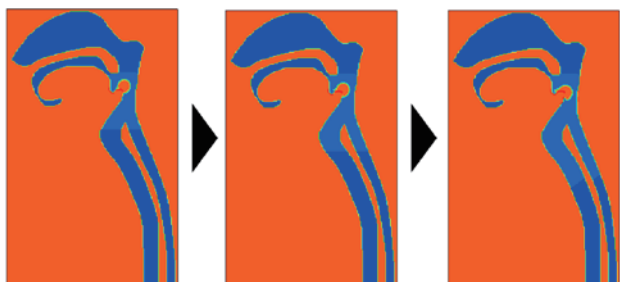


Fig. 4 Interfacial motion of thickened fluid during swallowing

本研究では、嚥下過程を表現可能な数値解析技術の確立を目指し、トロミ材などの水溶性高分子特有の粘度特性の把握、ならびに咽頭部のボクセルデータ化を行い、これらを反映した高精度な自由界面流れの数値解析技術を新規に開発した。本手法は嚥下過程に応用可能であることは示したものの、ボクセルデータの数値的な粗さが原因で、現実的な挙動とは乖離が見られたため、今後の課題として、ボクセルデータに前処理を行い、咽頭形状を数値的に平滑化することで、さらなる高精度化につながると考えられる。

謝 辞

本研究は、平成26年度公益財団法人 浦上食品・食文化振興財団の研究助成(研究課題名「テーラーメイド嚥下数値解析に基づく機能性食品の開発」)の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) T. Takahashi, T. Nitou, N. Tayama, A. Kawano, H. Ogoshi; “Effects of Physical Properties and Oral Perception on Transit Speed and Passing Time of Semiliquid Foods from the Mid-Pharynx to the Hypopharynx”, *J. Texture Studies*, **33**, 585-598 (2002).
- 2) H. Kumagai, A. Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama, H. Kumagai; “Relationship between Flow Properties of Thickener Solutions and their Velocity through the Pharynx Measured by the Ultrasonic Pulse Doppler Method”, *Food Science and Technology, Research*, **15**, 203-210 (2009).
- 3) T. Kamiya, Y. Toyama, Y. Michiwaki, T. Kikuchi; “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 Annual International Conference of the IEEE EMBS Osaka, Japan* (2013).
- 4) M. Sonomura, H. Mizunuma, T. Numamori, H. Michiwaki, K. Nishinari; “Numerical Simulation of the Swallowing of Liquid Bolus”, *J. Texture Studies*, **42**, 203-211 (2011).
- 5) T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki, Y. Miyake; “Turbulence Structure of Particle-Laden Flow in a Vertical Plane Channel due to Vortex Shedding”, *JSME. Int. J., Ser. B*, **44**, 526-535 (2001).
- 6) C.W. Hirt, B.D. Nichols; “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”, *J. Comput. Phys.*, **39**, 201-225 (1981)
- 7) M. Sussman, P. Smereka and S. Osher; “A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow”, *J. Comput. Phys.*, **114**, 146-159 (1994).
- 8) Y. Kagawa, T. Ishigami, K. Hayashi, H. Fuse, Y. Mino, H. Matsuyama; “Permeation of Concentrated Oil-In-Water Emulsions through a Membrane Pore: Numerical Simulation Using a Coupled Level Set and the Volume-of-Fluid Method”, *Soft Matter*, **10**, 7985-7992 (2014).
- 9) K. Yokoi; “Efficient Implementation of THINC Scheme: a Simple and Practical Smoothed VOF Algorithm”, *J. Comput. Phys.*, **226**, 1985-2002 (2007).
- 10) T. Chinyoka, Y. Y. Renardy, M. Renardy and D. B. Khismatullin; “Two-Dimensional Study of Drop Deformation under Simple Shear for Oldroyd-B Liquids”, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **130**, 45-56 (2005).

Development of functional food based on tailor-made numerical analysis of swallowing

Toru Ishigami

*Department of Food Bioscience and Biotechnology
Nihon University*

In this study, we newly developed the numerical simulation model that can express the flow behavior of thickened liquid bolus through pharynx when it is swallowed. Firstly, the rheological properties of several kinds of biopolymer aqueous solutions used as thickened liquid were measured using a stress controlled rheometer. The solutions showed the shear thinning characteristics, which can be well fitted with Carreau model. For the numerical expression of pharynx geometry, the photographic or animation images of pharynx were converted to the voxel data using a image analysis software, Image J. We then constructed a numerical simulation model based on volume-of-fluid method that can accurately capture the interfacial motion with Carreau model for the description of the rheological characteristics of thickened liquid and the immersed boundary method for the description of the solid-liquid interface (pharynx geometry). The results of the validation tests indicate our numerical simulation gives accurate solution in the simulation. Finally, we applied the numerical simulation model with the simulation of the swallowing process of the thickened liquid bolus. The flow behaviors of liquid bolus through the pharynx can be successfully calculated, explaining that our simulation model developed in this study was useful for the understanding the swallowing process. However, the roughness of the voxel data employed generated the numerical error. Thus, we will develop the post-treatment method of the voxel data in the future works.