

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20672

研究課題名（和文）実形状数値計算による嚥下過程の力学メカニズム解明と新しい嚥下機能の評価法の提案

研究課題名（英文）Clarification of swallowing mechanisms by numerical simulation using realistic geometry

研究代表者

石田 駿一（Ishida, Shunichi）

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：80824169

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：数値流体力学と医用画像を用いて、三次元実形状の嚥下流動計算モデルを構築した。咽頭運動の適応が欠落すると咽頭圧が十分に生じず、高粘度の食塊の嚥下時や前傾姿勢での嚥下時に食塊の残留が多くなり、誤嚥リスクが増加することを示した。また、咽頭収縮が低下することで粘度の高い食塊において嚥下が困難になり、安定な嚥下のためには咽頭収縮による咽頭圧が重要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

嚥下機能が低下し、正常な嚥下が困難な状態を「嚥下障害」と呼ぶが、評価・診断指標は主観によるところが大きい。嚥下流動の詳細な様子を観察するのは困難であり、正常な嚥下においてさえどのような力学条件で達成されているのか十分明らかではない。

本研究では、嚥下流動のコンピュータシミュレーション（数値流体力学解析）により、正常な嚥下における力学条件に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：We developed a computational fluid dynamics model of swallowing based on medical imaging. The model showed that the impaired pharyngeal motion causes insufficient pharyngeal pressure, which increases the pharyngeal bolus residue. In addition, the decreased pharyngeal contraction made swallowing of high-viscosity boluses more difficult, suggesting that pharyngeal pressure due to pharyngeal contraction is important for stable swallowing.

研究分野：計算生体流体力学

キーワード：計算バイオメカニクス 消化器系バイオメカニクス 計算力学 数値流体力学 嚥下 嚥下障害

### 1. 研究開始当初の背景

嚥下とは、咀嚼に続く消化吸収機構の出発点であり、多くの器官が複雑に連動することによって食塊を口腔から食道、胃へと輸送する過程である。嚥下機能が低下し、正常な嚥下が困難な状態を嚥下障害と呼び、器官運動と食塊運動のタイミングのずれによって気道側への食塊の侵入（誤嚥）を許し、致死率の高い誤嚥性肺炎を誘発する。嚥下機能の評価方法には嚥下造影検査が用いられるが、基本的に医者がビデオを観察して主観的に判断する検査であり、定量的な評価に至っていないのが現状である。嚥下流動は、空気（気体）、食塊（固体、液体）、唾液（液体）の多相流体であり、力学的に見れば嚥下過程は、器官の運動を境界条件とした多相流体の力学的相互作用の問題である。しかしながら、従来の嚥下研究（例えば Logemann, 1998）のような観察と経験に基づく医学的なアプローチでは、力学的理解の欠如から、正常な嚥下でさえもどのような力学場において達成されているのか説明できていない。本研究課題では、嚥下機能の定量的な評価方法の確立を目指し、嚥下流動における器官運動と食塊運動との力学的相互作用を、三次元実形状嚥下流動シミュレーションにより明らかにする。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、医用画像に基づく三次元実形状の嚥下流動計算モデルを構築し、嚥下過程における器官運動と食塊運動の力学的関係を明らかにする。種類や量などの食塊の条件および、器官運動や姿勢などの嚥下条件の違いによる嚥下動態の変化を、流体力学変数によって整理・検討することにより、器官運動と食塊運動の力学的な相互作用を定量的に記述し、正常な嚥下を達成する力学的条件を解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では嚥下過程を、食塊、空気、唾液の多相流体に対する器官運動の移動境界問題と考え、3次元計算力学モデル化する。入力変数として、食塊種類および嚥下条件を与え、出力変数として圧力、流速、応力分布の流体力学変数および、食塊残留量分布、誤嚥量の嚥下動態を得ることで食塊運動と器官運動の力学的相互作用を明らかにする。嚥下条件として器官運動パターン、嚥下姿勢、食塊量を考える。医用画像から器官形状および運動を取得することで実形状嚥下モデルを作成し、これら入力変数の組み合わせによって、流体力学変数がどのように変化し、それが嚥下動態（嚥下量、誤嚥量、食塊残留量）とどのような相関を持つのかを網羅的に検討する

### 4. 研究成果

健常な男性のCT画像と嚥下造影（VF）画像に基づき、正常嚥下の計算モデルを開発した。形状はCTから構築し、中心断面における形状がVFと一致するように3Dモデリングソフトウェアを用いて運動を与えた。構築したモデルを図1に示す（Ohta et al, Am J Physiol Gastrointest liver Physiol, 2019）。通常、我々は様々な姿勢で多様な食物を嚥下することができる。これは、嚥下の際に姿勢や食物の性質に応じた嚥下動作の変化（適応）が生じているためである。本研究では、嚥下動作の適応に障害のある嚥下障害に着目し、食塊の物性に関わらず同じ嚥下動作をするものとしてモデル化した。

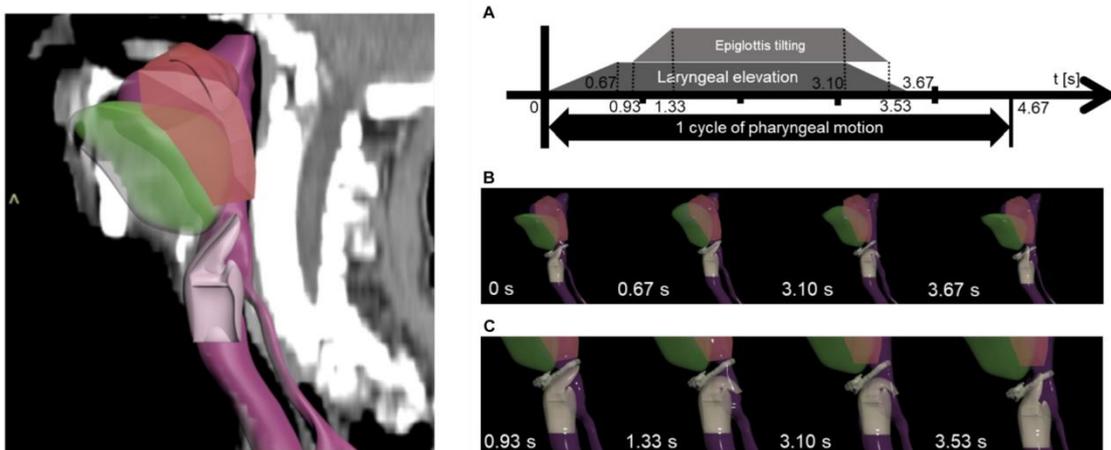


図1: 左: 医用画像に基づく嚥下計算モデル。右: 構築したモデルの嚥下動作の様子。

食物はニュートン性流体としてモデル化し、食物流動を気液二相・移動境界問題としてモデル化した。計算手法には気液二相キュムラント格子ボルツマン法 (Sitompul and Aoki, J Comput Phys 2019) を用い、適合格子サブドメイン法 (Miki et al, Comput Meth Biomech Biomed Eng, 2012) と GPGPU による高速計算を実現した。

図 2 に、様々な粘度の食塊を嚥下するシミュレーションの様子を示す。初期に 5 ml の食塊を口腔内に配置する。食塊は舌運動によって咽頭へと輸送され、重力と咽頭収縮によって食道へと輸送される。食塊が咽頭を通過する際には、喉頭蓋と呼ばれる蓋が気道を閉鎖し、食塊が気道へ侵入するのを防いでいる。粘度の低い食塊の場合には、食塊は左右に分かれて喉頭蓋を通過し、食道へと流入している。一方で、粘度の高い食塊では、嚥下動作後に多量の残留が生じている。これは、嚥下動作の適応が欠落しているために食塊通過のタイミングと咽頭収縮のタイミングがずれてしまい、咽頭収縮によって上手く食塊を輸送できなかったためと考えられる。粘度の低い食塊の嚥下においては、重力によって輸送されることで、嚥下動作の適応が欠落していても十分な量の食塊を嚥下することができたと考えられる。

さらに、嚥下姿勢（前傾が正、後傾が負）と食塊粘度を変化させるパラメトリック計算を実施し、残留した食塊の量を計測した（図 3）。前傾姿勢になることで、重力によって輸送されにくくなり、残留量が増加することが明らかになった。

残留した食塊は、嚥下動作後に気道

へと落下する誤嚥につながり、誤嚥リスクと密接に関わっている。一般に、嚥下障害の患者の食事は、誤嚥リスク低下の目的でとろみ剤等で粘度を増加させることが多い。しかしながら、嚥下動作の欠落した嚥下障害においては高粘度食塊の嚥下は誤嚥リスクが高いことが示唆された。

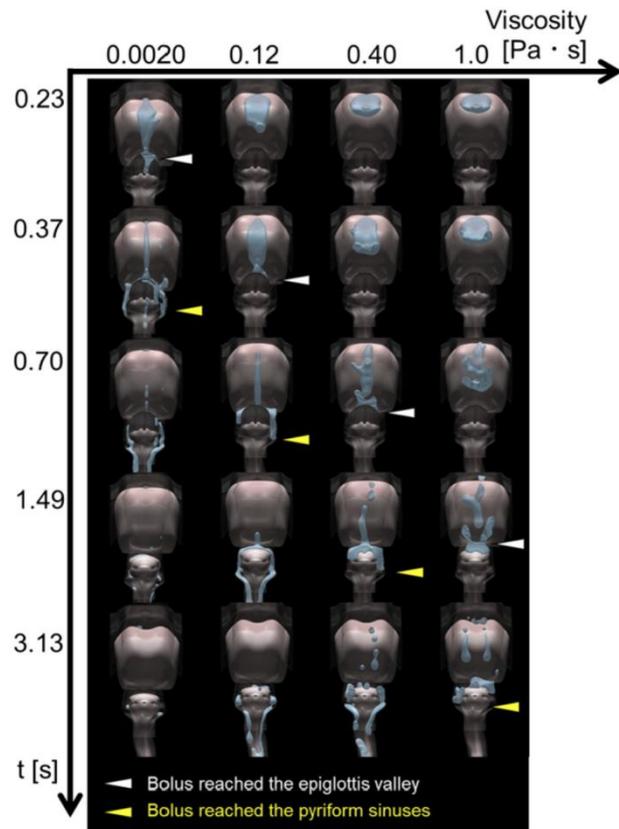


図2: 異なる粘度の食塊の嚥下シミュレーション。(背面から見た図)

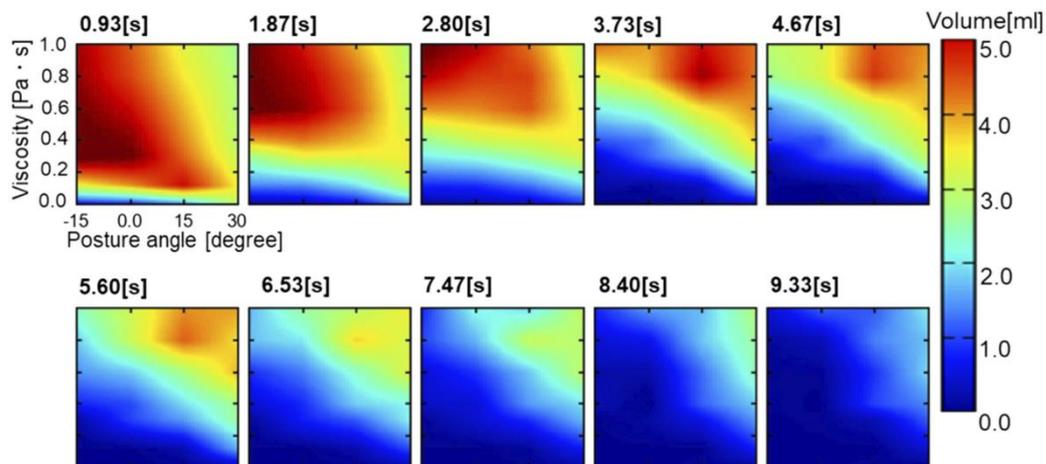


図3: 嚥下姿勢と食塊粘度を変化させたときの食塊残留量の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Oyama Tomoki, Ishida Shunichi, Maeyama Kohei, Miyagawa Taimei, Imai Yohsuke	4. 巻 6
2. 論文標題 Liquid transport produced by a cluster of peristaltic contractions in a circular channel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 93102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.6.093102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishida Shunichi, Matsunaga Daiki	4. 巻 5
2. 論文標題 Rheology of a dilute ferrofluid droplet suspension in shear flow: Viscosity and normal stress differences	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 123603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.5.123603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohta Jun, Ishida Shunichi, Kawase Tetsuaki, Katori Yukio, Imai Yohsuke	4. 巻 317
2. 論文標題 A computational fluid dynamics simulation of liquid swallowing by impaired pharyngeal motion: bolus pathway and pharyngeal residue	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology	6. 最初と最後の頁 G784 ~ G792
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1152/ajpgi.00082.2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Rika Ebara, Shunichi Ishida, Taimei Miyagawa, Yohsuke Imai
2. 発表標題 Effect of peristaltic frequency on gastric emptying: a simulation study
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Maeyama, Shunichi Ishida, Yohsuke Imai
2. 発表標題 Cumulant lattice Boltzmann method for peristaltic transport of power-law fluids
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田駿一, 福嶋泰人, 太田淳, 川瀬哲明, 香取幸夫, 今井陽介
2. 発表標題 嚥下の三次元数値シミュレーション: 嚥下の冗長性と咽頭圧の関係
3. 学会等名 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田駿一, 福嶋泰人, 太田淳, 川瀬哲明, 香取幸夫, 今井陽介
2. 発表標題 嚥下流動の数値流体力学解析
3. 学会等名 第33回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunichi Ishida, Hiroki Kitade, Satoshi Ii, Yohsuke Imai, Shigeo Wada
2. 発表標題 Development of a CFD simulator of whole cerebral blood flow
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅井悠佑, 石田駿一, 今井陽介
2. 発表標題 流体中の膜挙動に対する isogeometric 流体構造連成手法の開発
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田駿一
2. 発表標題 格子ボルツマン法による生体流れの数値計算
3. 学会等名 第31回格子ボルツマンの基礎と応用に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関