

事業の実施内容及び成果に関する報告書

1 事業名

2022年度 嚙食時の安全と機能向上を目的とした情報発信のための咀嚼・嚥下シミュレーター開発とその評価 補助事業

2 事業の実施経過

(1) 事務手続き関係

2023年 4月14日 交付決定通知受理 (4/1付)
5月27日 交付誓約書・前金払申請書提出
6月16日 補助金受領 (5,000,000円)
11月10日 状況に関する報告書提出

(2) 事業関係

① 咀嚼・嚥下機構を模擬する実験装置の開発に関する研究

2022年 4月12日～ 5月 6日 実験装置の設計
5月 6日～ 5月20日 実験装置の設計チェック
5月23日～ 6月10日 計測制御系, 電源系統の設計およびチェック
6月13日～ 7月 1日 ハードウェア構想図の作成
7月 4日～ 8月31日 ソフトウェアとハードウェア全体のチェック
9月 1日～12月31日 実験装置の動作確認とプログラムの修正

② 咀嚼・嚥下時の触覚、風味、味覚検出するためのセンサーの検討と実験

2022年 6月20日～ 7月 6日 センサーの検討
7月 6日～10月31日 センサーの開発およびシステム検討
11月 1日～12月31日 センサーの開発および検出実験

③ 嚥下を模擬するためのコンピューター・シミュレーション方法の構築

2022年 5月12日～ 8月31日 有限要素解析モデルの構築
9月 1日～10月31日 有限要素法流体一構造連成解析モデルの構築
11月 1日～ 1月31日 有限要素法流体一構造連成解析の実施

④ 食の安全のためのアセスメント基準の提案

2022年 9月 7日～ 9月31日 咀嚼嚥下時の触覚や味の感覚と咀嚼・嚥下食物との物性値の因果関係解明
10月 1日～12月31日 咀嚼嚥下時の安全基準の検討および提案

3 実施内容及び成果

(1) 実施内内容

① 咀嚼・嚥下機構を模擬する実験装置の開発

従来の咀嚼模擬装置は、単純な上下運動、もしくは回転運動との組み合わせ咀嚼を模擬していた。咀嚼動作では下顎の上下運動と左右方向のズリの動作の他、舌で食塊を一つにまとめる動作が重要であるが、これらを考慮した実験装置はほとんどない。

本開発ではこの点に着目し、舌の形状と運動をデフォルメし、咀嚼中に食塊が反転・移動するような機構の開発、ならびに咀嚼中の力学的指標の抽出を試みる。

本格的な舌の動きを模擬した装置を作る前に、3Dプリンタを用いた機構検討用のモックを作成し、シリンダのストロークや動く、舌を模擬した材料の選定とシリンダとの接着方法などを行った。(Fig. 1)

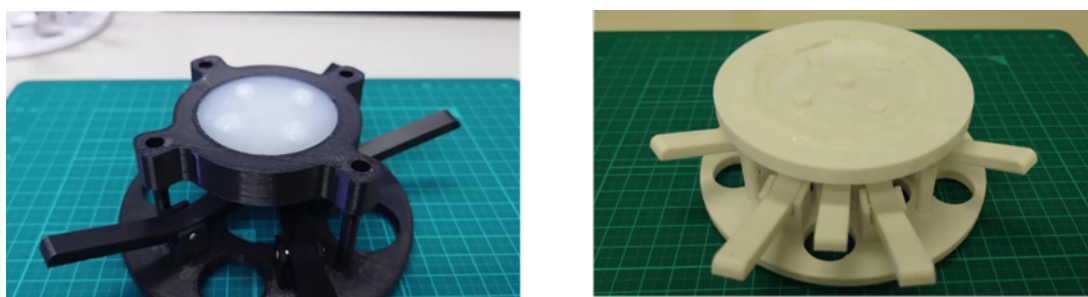


Fig. 1 舌運動を模擬する機構検討用のモデル（3Dプリンターで作成）

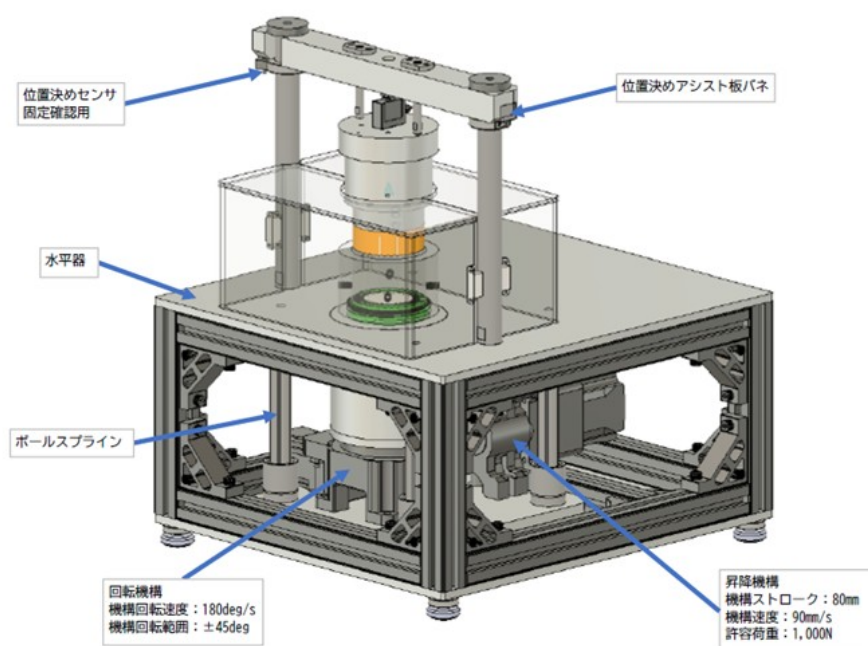


Fig. 2 回転機構と昇降機構の詳細

(別紙1)

また、実験装置は、現時点では適切なモデリングができていないため、舌部分はあとから追加できるような装置構造として、全体の咀嚼運動を模擬する機構の開発を行っている。咀嚼運動は、上下に昇降する機構と回転方向に動く機構の組み合わせによって行う (Fig. 2 参照) 設計と決定した。

Fig.2 に示す装置においては、昇降速度 90mm/s 、ストローク 80mm、許容荷重は論文等を参考にして、1000N 程度とした。回転速度は $180^{\circ}/s$ 、回転角度は 45° とした。装置の大きさは 500mm×550mm×630mm として卓上に乗る大きさにして設計した。

咀嚼時に抽出する力学的パラメータの抽出方法は、Fig. 3 に示すようにロードセルによる力 (許容 2000N、圧縮・引張兼用)、トルクセンサーによるトルク ($50N \cdot m$) の計測のほか、下顎に相当する部分に面圧やせん断応力を計測できるようなセンサーを設置した機構設計、電気系統設計、制御設計を行った。

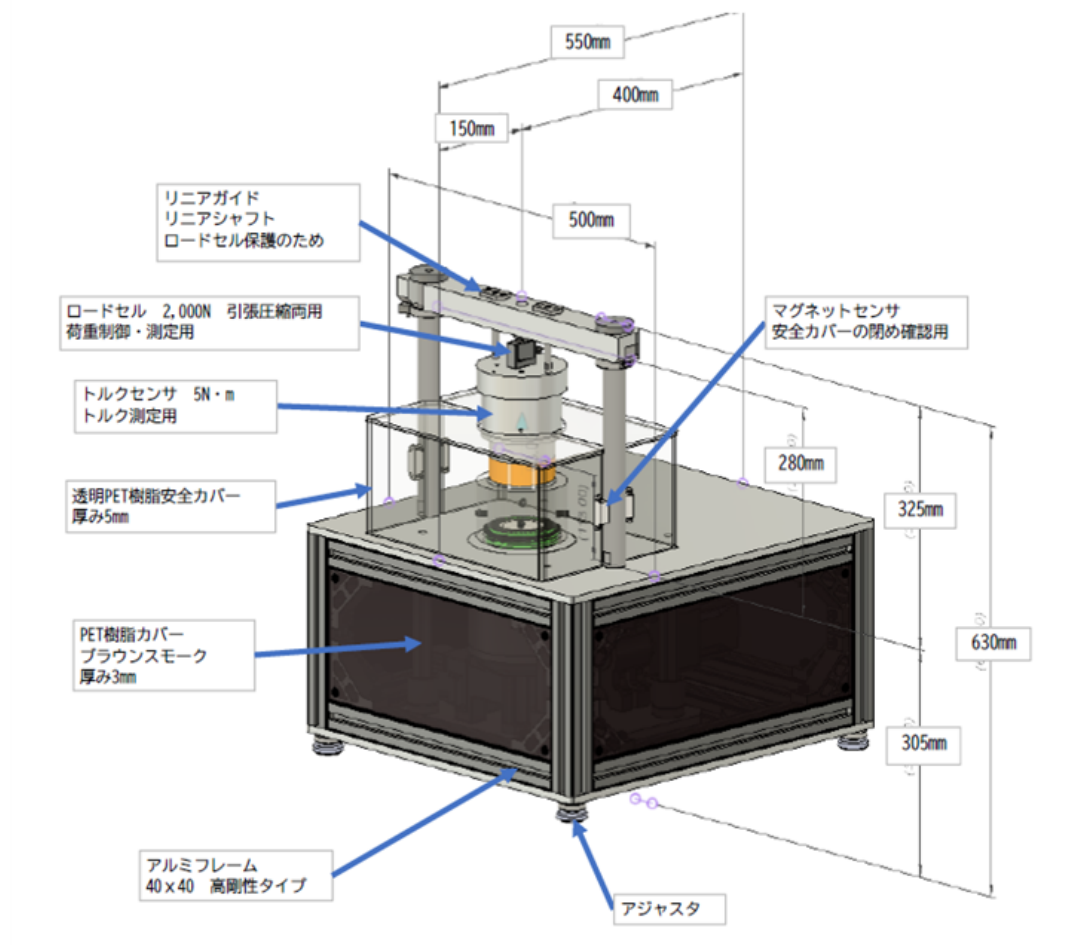


Fig. 3 装置寸法とセンサー類の全体配置図

(別紙1)

② 咀嚼・嚥下時の触覚、風味、味覚検出するためのセンサーの検討と実装

従来、咀嚼・嚥下時の触覚、風味、味覚を検出するためのセンサーはにおいセンサーなどを使用していることが多かった。本研究では、嚥下の模擬実験装置を用いて、まずは食塊が斜面を滑落する際の挙動をレーザーセンサやカメラを用いて計測して、まずは咀嚼・嚥下の際の被加工物の物理的な性質を求めたあとにセンサーを検討することとした。レーザーを使った食塊到達時間の検出は安価な方法ではあるが、トリガーの設定などはサンプルの種類によって調整が必要であった。

また、レーザーでは透明体や薄く拡散するサンプルの測定は物理的にも原理的にも困難であった。そこで、今回開発する装置では、食塊の到達検出や食塊厚さの計測はすべて画像処理で行うことにした。具体的な機器構成をFig. 4に示す。短時間に高精度で液体を吐出できるポンプとして、サーボ駆動のピストンタイプのポンプ（ハイパーポンプ）を選定した。特に高粘度やゼリーなどの食塊の吐出を考慮して、通常の逆止弁タイプのポンプでなく、ロータリーバルブによる吸引と吐出を切り替えるタイプを選定した。複数のカメラをPCで制御し、食塊の滑落速度や拡散面積、食塊厚さや動的な接触角測定などを自動計測とデータ処理が行える仕様とした。実際の装置の概要をFig. 5(a)およびFig. 5(b)に示す。Fig. 5(a)およびFig. 5(b)に示す嚥下模擬装置の機器構成の中では、透明体の検出は通常のカメラでは困難であり、実際には近赤外カメラと特殊照明の組み合わせで透明体の検出を行うこととした。(Fig.6参照)

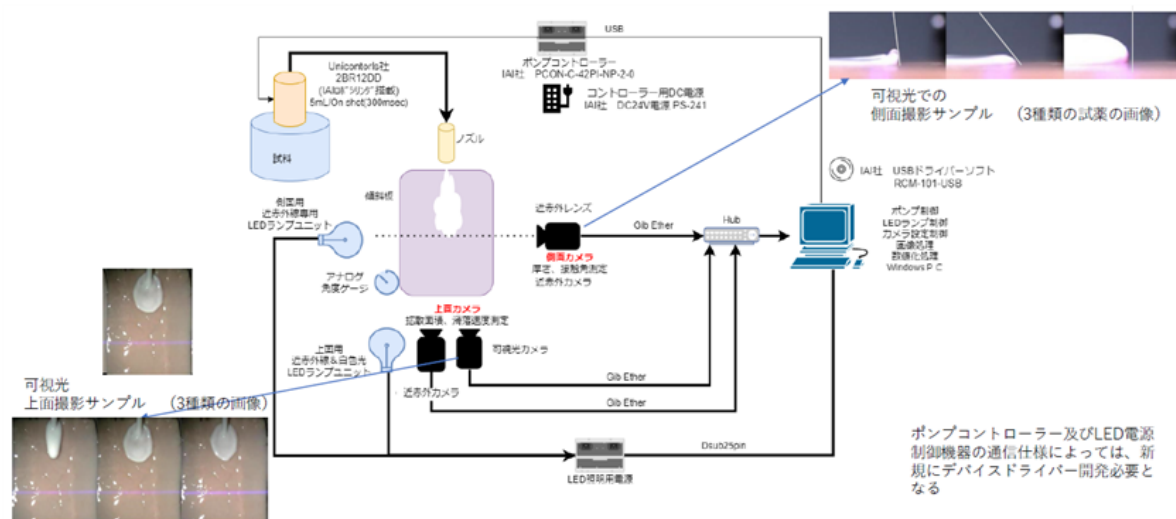


Fig. 4 嚥下模擬装置の機器構成レイアウト

(別紙1)

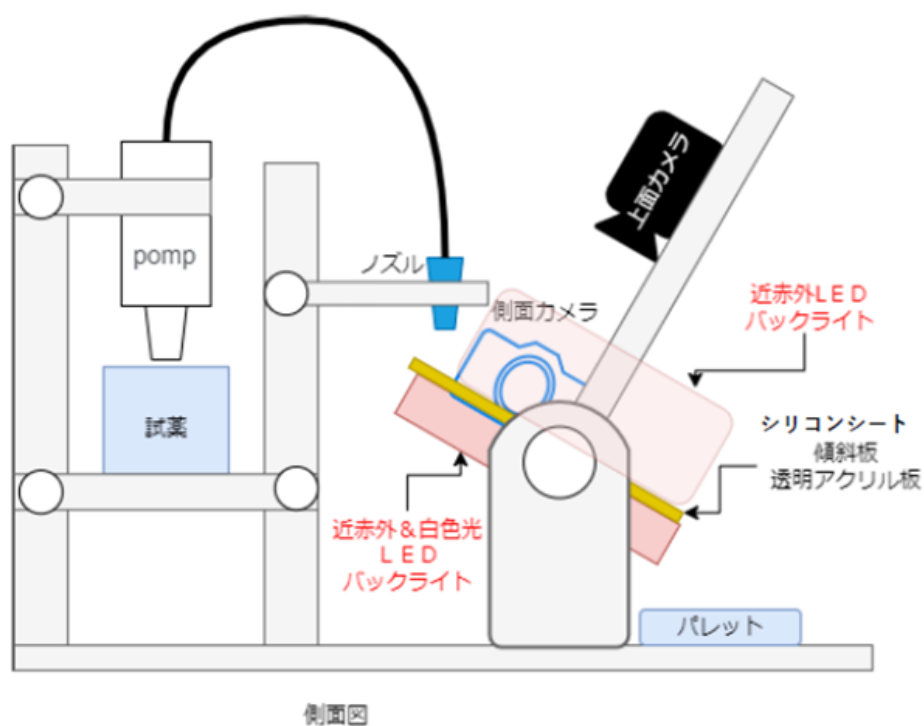


Fig. 5 (a) 装置の概要 (a. 側面図)

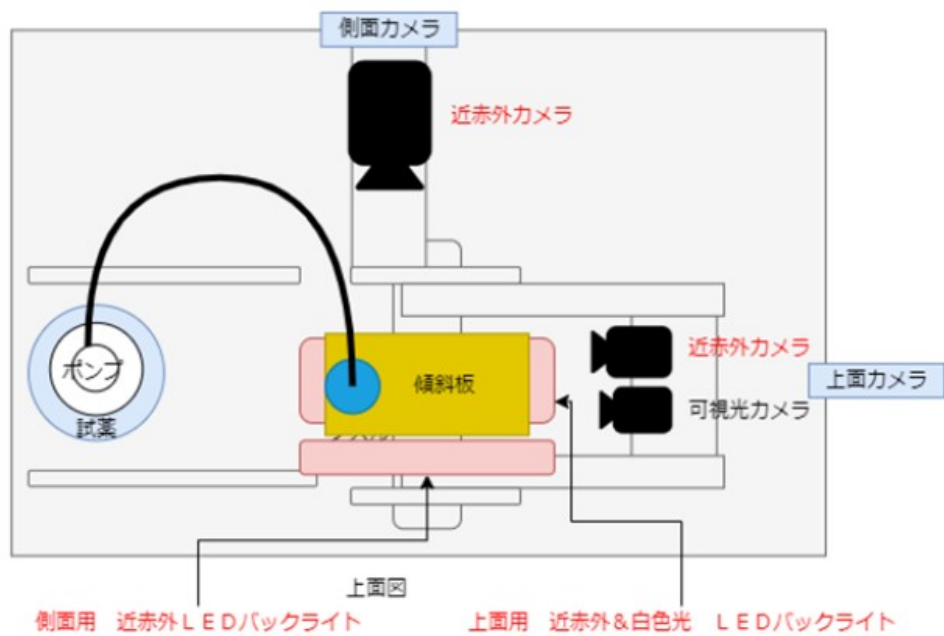


Fig. 5(b) 装置の概要 (b. 上面図)

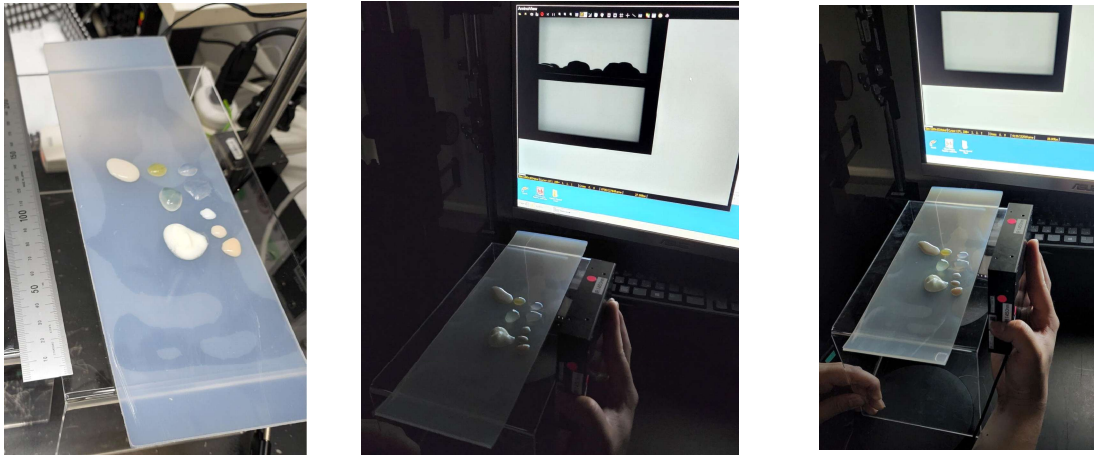


Fig. 6 近赤外カメラと特殊照明の組み合わせによる透明体の検出実験

近赤外カメラと特殊照明の組み合わせによる透明体の検出実験を行った。Fig. 5(a) および Fig. 5(b)に示す滑落平面の素材がシリコンのような場合は、近赤外カメラを使う方が適切であることを明らかにした。一方、滑落面の素材を親水性のPVAを用いた場合は、PVA自体に水を含んでいるため、近赤外カメラではサンプルと滑落平面のコントラストの比較をすることができない。以上のように Fig.6 示す透明体の検出実験の結果からは、親水性のPVAを利用する場合は、透明体を使わない計測に限定することが適切であることを実証した。以上のことから、本システムでは、近赤外カメラと可視光カメラの双方を設置することで、食塊が斜面を滑落する際の挙動をレーザーセンサやカメラを用いて計測し、特に高粘度やゼリーなどの食塊の吐出を考慮して、通常の逆止弁タイプのポンプでなく、ロータリーバルブによる吸引と吐出を切り替えるタイプを選定した。複数のカメラをPCで制御し、食塊の滑落速度や拡散面積、食塊厚さや動的な接触角測定などを自動計測とデータ処理が行える嚥下模擬装置を開発することができた。

次に、画像処理による各種力学的パラメータの計測をFig. 7に示すプロセスで行うようにした。すなわち、Fig. 7に示す計測プロセスにより、これまで計測できていなかった動的な接触角の測定およびその評価方法を確立し、計測方法を標準化することを目指す。さらに、従来の装置との差別化を図ること目標として、各種機種選定のための検証を実施し、装嚥下模擬装置を開発した。

(別紙1)

② 嚥下を模擬するためのコンピューター・シミュレーション法の構築

従来、嚥下のコンピューター・シミュレーションでは、液体と生体の相互作用を考慮した解析がなされている。このような解析では、粒子法を用いて計算していることため、呼吸による気流の影響や形状変化による咽頭空間の負圧の影響は無視されてきており、嚥下を模擬するための解析には多くの連成解析が必要になると考えている。今回は生体—液体—流体の相互作用を考慮した解析モデルを設定して、簡易的に利用できるようにシミュレータの開発を最終的に目指した。

解析では、将来的な生体器官内部の応力計算などを実施することを考慮して、弾性解析や流体解析の複数物理の連成計算が可能な有限要素解析を行った。本解析では、マルチフィジックスの連成解析に強い有限要素法ソフトである Comsol Multiphysics を用いている。一般的には、弾性体の強制変形と応力計算および液体と気体と弾性体の連成、さらには自由表面を伴う嚥下の計算を最初から実施することは困難であることが予想されるため、まずは嚥下の物理に対応する複数の連成を伴う攪拌解析を実行し、Comsol Multiphysics の可能性を評価した。Fig. 8 に示すように、剛体の回転運動と流体の流動と拡散、さらには自由表面を有する解析モデルにおいて、比較的短時間かつ安定的に計算をすることが可能であることが判明した。この解析の結果からは、有限要素法で嚥下の解析はパラメータの設定を適切に行うことで可能であると結論づけた。

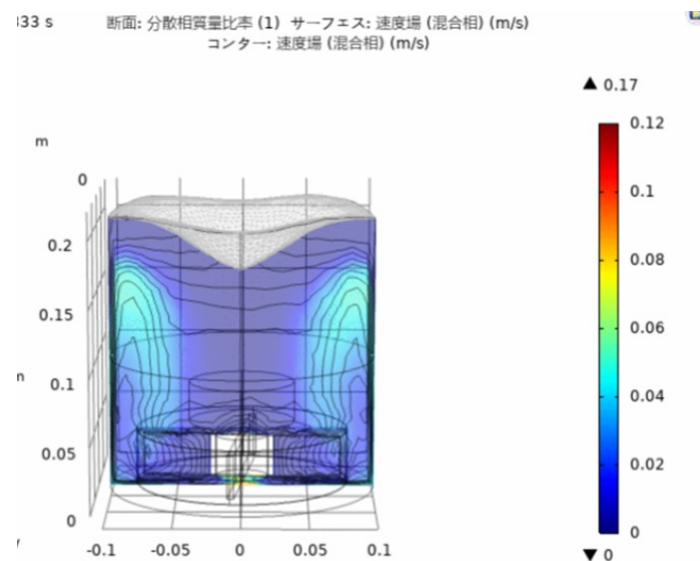


Fig. 8 複数の物理量（剛体運動、回転、自由表面、拡散）による連成解析例

③ 食の安全のためのアセスメント基準の提案

咀嚼嚥下時の触覚や味の感覚と咀嚼・嚥下食物との物性値の因果関係、を明らかにして、最終的には食の安全のためのアセスメント基準を提案することを考えている。現在までのところでは、食の安全のためのアセスメントパラメータを抽出するために下記の物理量の因果関係を解明する必要があると考えている。

(提案するパラメータ候補)

液体嚥下実験装置から得られるアセスメントパラメータ

- (1) 斜面流下中の液体の動粘性係数の分布
- (2) 斜面流下中の液体の圧力分布
- (3) 斜面流下中の液体の速度分布
- (4) 斜面流下中の液体（または固体）の固相率の分布
- (5) 斜面流下中の液体（または固体）の固相率の時間変化率
- (6) 斜面流下中の液体の運動量の時間変化率

上記、(1)～(6)の物理量と食の安全アセスメントパラメータの因果関係としきい値を実験と解析によって、決定し食の安全のためのアセスメント基準を提案し、実際に計測した物理量との関係を構築した。

本研究において作成する、嚥下模擬装置では、市販のさまざまな液体、ゼリーなどの検出が安定的に可能かどうか検証を行うとともに、パラメータの自動計算とその精度について、確認が必要である。さらに、嚥下・呼吸のコンピュータ・シミュレータでは、汎用ソフトウェア内での弾性体の強制変更方法について検証を行うとともに、簡易形状での解析を行い、解析手法の妥当性の確認を行う必要がある。具体的には、嚥下模擬実験装置の数値解析を実施し、各種の嚥下条件下における実験と解析結果を比較することで、解析手法の妥当性を評価しながら、さらに液体嚥下実験装置から得られるアセスメントパラメータの重要性を絞り込んでいく作業を広げて精度を高めていく必要がある。

(別紙1)

(2) 成 果

- (i) 舌運動を模擬する機構検討用のモデルを考案し、回転機構と昇降機構を用いて、咀嚼中の下顎の上下運動と左右方向のズリの動作の他、舌で食塊を一つにまとめる動作を考慮した実験装置を開発した。
- (ii) 従来、レーザーでは透明体や薄く拡散するサンプルの測定は物理的にも原理的にも困難であったが、近赤外カメラと特殊照明の組み合わせで透明体の検出を行うことによって、食塊の到達検出や食塊厚さの計測はすべて画像処理で行う、嚥下模擬装置を開発し、その有効性を検証した。
- (iii) 嚥下を模擬するためのコンピュータ・シミュレーションモデルを構築し、生体—液体—流体の相互作用を考慮した解析モデルを設定して、簡易的に利用できるようにシミュレータの開発を行った。第一ステップとして、嚥下の物理に対応する複数の連成を伴う攪拌解析を実行し、Comsol Multiphysics の可能性を評価した。すなわち、剛体の回転運動と流体の流動と拡散、さらには自由表面を有する解析モデルにおいて、比較的短時間かつ安定的に計算が可能であることが判明した。解析の結果からは、有限要素法で嚥下の解析はパラメータの設定を適切に行うことで可能であると結論づけた。

(3) 成果を公表している研究室ホームページ上のURL

<https://ra-data.dendai.ac.jp/tduhp/KgApp/k03/resid/S000468>

(4) JKA補助事業バナーを表示している研究室ホームページ上のURL

<http://www.rm.dendai.ac.jp/watarilab/index.html>

4 事業実施に関して特許権、実用新案権等を申請又は取得したときはその内容

なし

5 今後予想される効果

現在、咀嚼、嚥下に関する明確な基準は、各メーカーが独自に評価しているだけであり、食の安全確保の観点からも、安全のアセスメント方法や比較基準が求められている。今後は、機械学習を用いた誤嚥しにくい物性範囲の探索、すなわち、パラメトリック・スイープで網羅的な嚥下シミュレーションを実施し、そのビックデータを機械学習で処理し、誤嚥しにくい食品物性を探索することを検討したい。高齢化社会においては、高齢者の窒息死亡者数の増加や5歳以下の子供の窒息事故も現実になっており、の安全のためのアセスメント基準の明示と情報の伝達が不可欠と考えている。

6 本事業により作成した印刷物（研究論文3報）

(別紙1)

- (1) T. Kamiya, et.al., Visualization of Aspiration due to Changes in Rheological and Tribological Parameters Using a Three-Dimensional Swallowing Simulator Nihon Reorogi Gakkaishi Vol.51, No.3, pp.1~8. (論文受理済み)
- (2) T. Kamiya, et.al., Development and preliminary validity evaluation of numerical simulation of human 2 swallowing using a particle method, 日本食品工学会誌 (審査論文修正中)
- (3) T. Kamiya, et.al., Newtonian and Non-Newtonian Food Bolus Behaviors Obtained from Validated Swallowing 4 Simulator Based on Moving Particle Simulation, Food Science and Technology Research (投稿中)

7 その他 (国際会議講演の予定 1 報)

国際会議で発表予定

AMPT2023 (The 24th International conference on advances of materials and processing technologies, Sep., 2023, in Malaysia) (abstract 提出済み)