

3次元MPS法を用いた嚥下動態シミュレータ「Swallow Vision®」の紹介ならびに

3D AVS Playerを用いたリアルタイム3次元嚥下動態の可視化

meiji

株式会社 明治 技術開発研究所

素材開発研究部 素材開発G

神谷 哲

Swallow Vision® 開発チーム

武蔵野赤十字病院: 道脇幸博、菊地貴博

株式会社 明治: 神谷 哲、外山義雄、神野暢子、長田 堯、羽生圭吾

本日の発表内容

- はじめに
(当社概要ならびに当社CFD活用例とポスト処理の重要性)
- 嚙下シミュレーター開発の経緯
(シミュレーターの必要性、使用方法の妥当性評価)
- 嚙下シミュレーター開発のための重要技術
(超えなければならない技術的ハードル)
- 嚙下シミュレーターの妥当性評価
(可視化結果と数値解析の定性的・定量的比較方法の一例)
- ケーススタディ、活用事例
(誤嚥モデル、ニュートン流体と非ニュートン流体の比較、物理量抽出)
- おわりに
(嚙下シミュレーターの課題と期待される効果)

はじめに

- 明治ホールディングスについて
- 当社におけるCAE活用事例

1-1 明治ホールディングスについて

meiji

株式会社 明治

売上 9863億円

従業員数:11269人

- ・乳製品ユニット
- ・菓子ユニット
- ・健康食品ユニット
- ・海外ユニット



業 明
内 再

Meiji Seika ファルマ株式会社

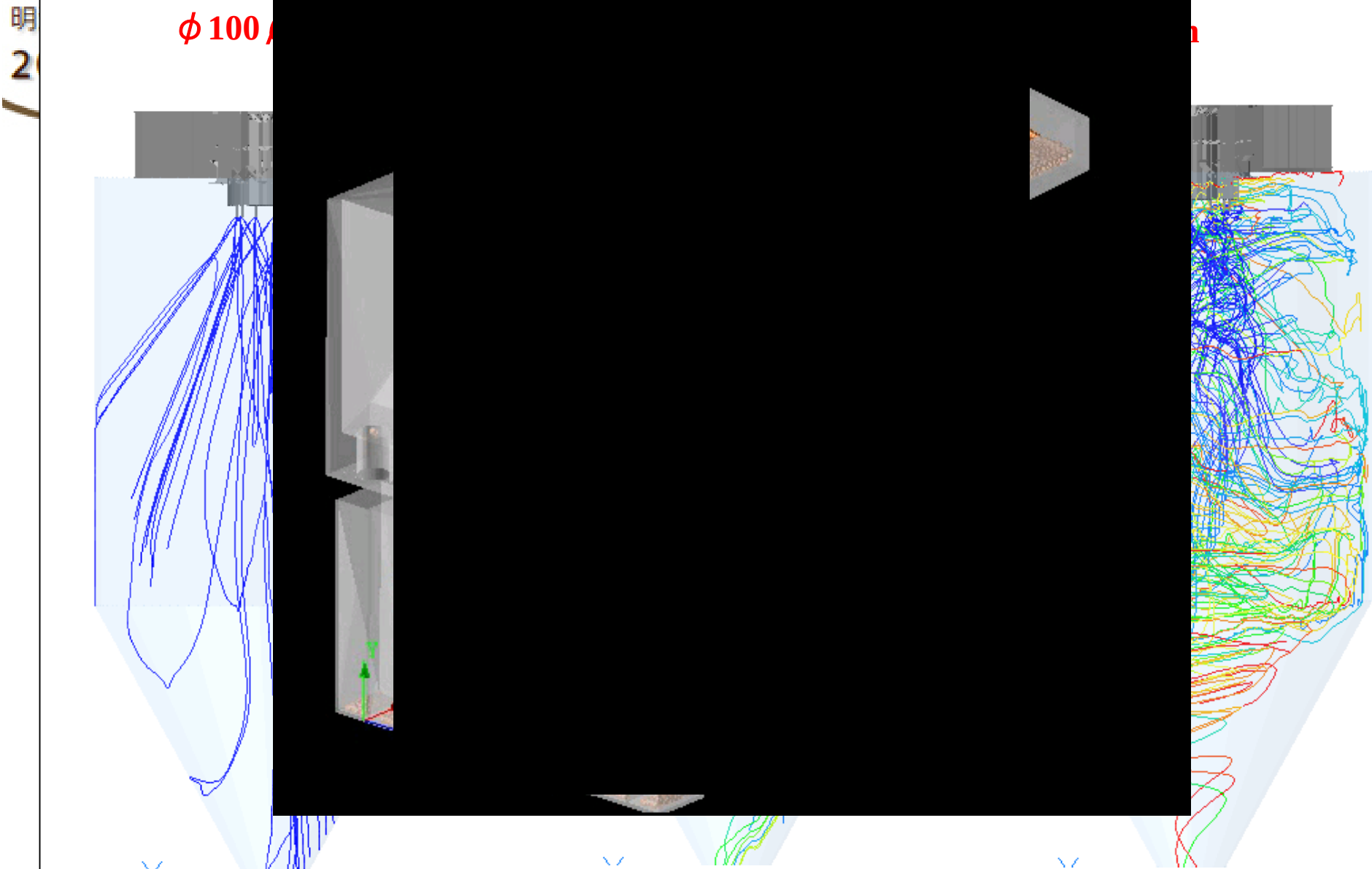
売上 1253億円

従業員数:4034人

- ・医療用医薬事業
- ・生物産業事業
- ・海外事業



1-2 当社におけるCAE活用事例



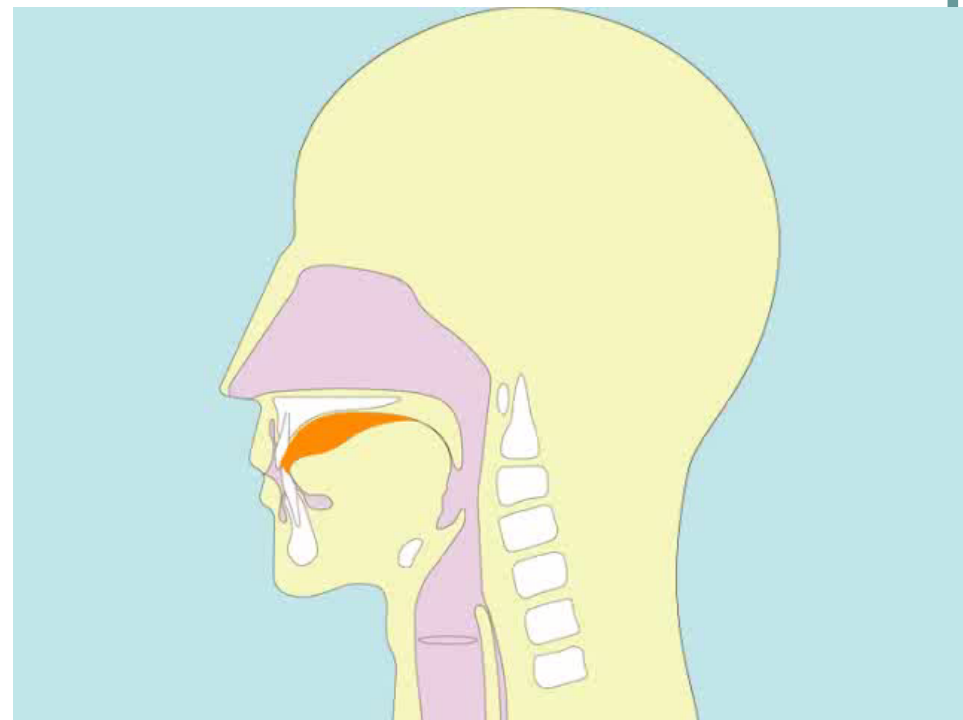
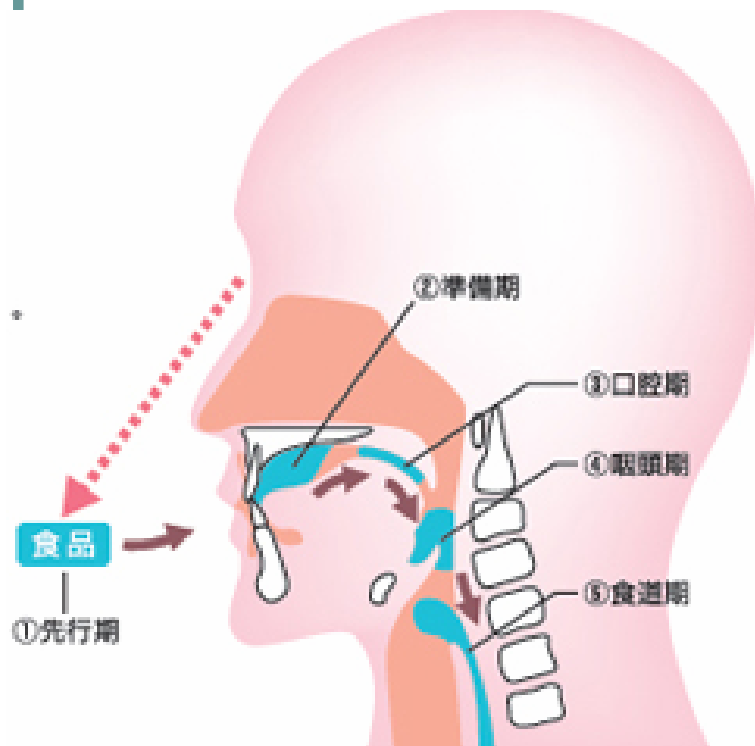
2. 嚙下シミュレーター開発経緯

- 嚙下、誤嚙について
- 嚙下シミュレーター開発の意義
- 開発に必要な技術

2-1 嚥下、誤嚥について

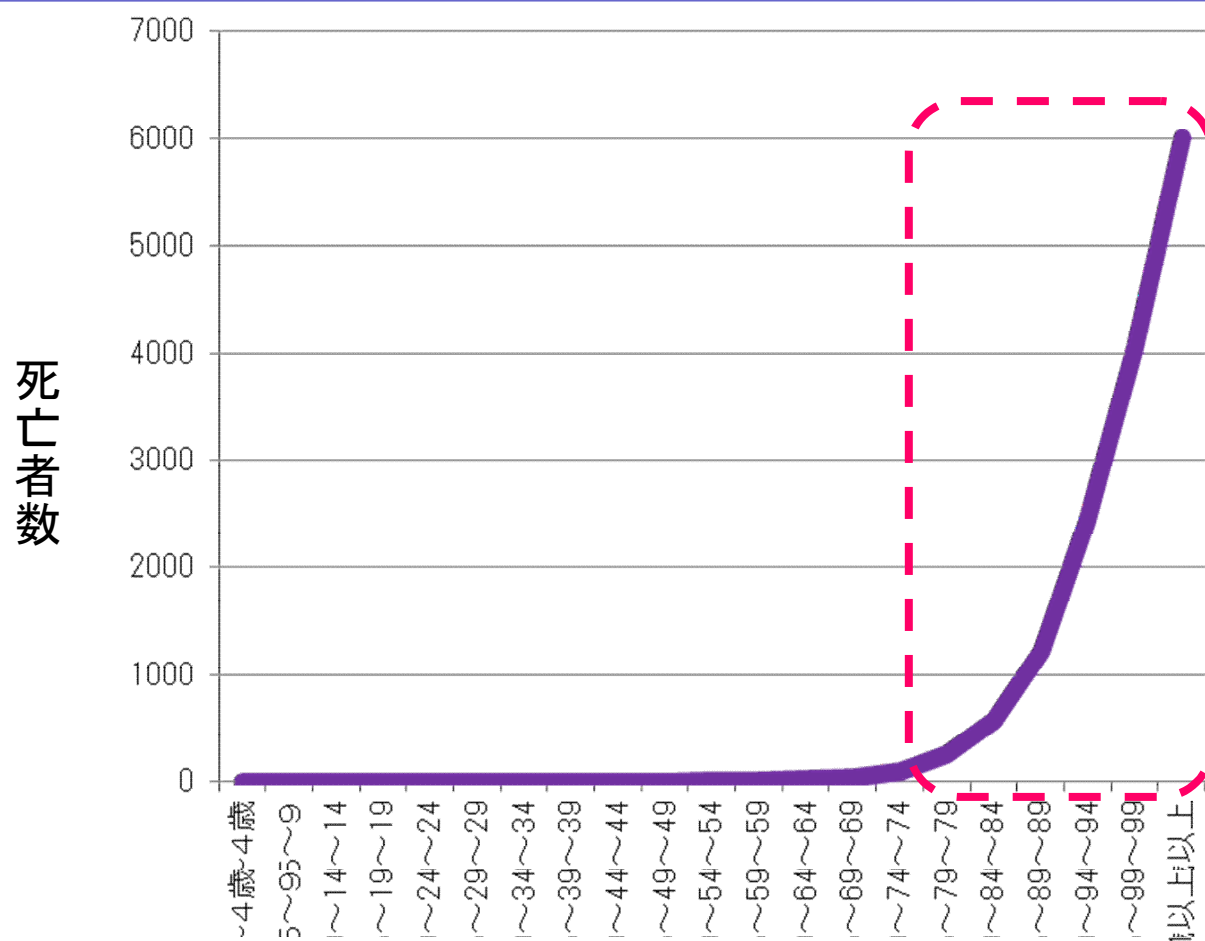
嚥下とは・・・

食物を認識して、噛みくだき、飲み込みやすい状態にして、
口腔から咽頭、食道、胃へと食物を送り込む一連の動作



誤嚥・・・なんらかの原因で、食物が食道でなく、気道に入ること

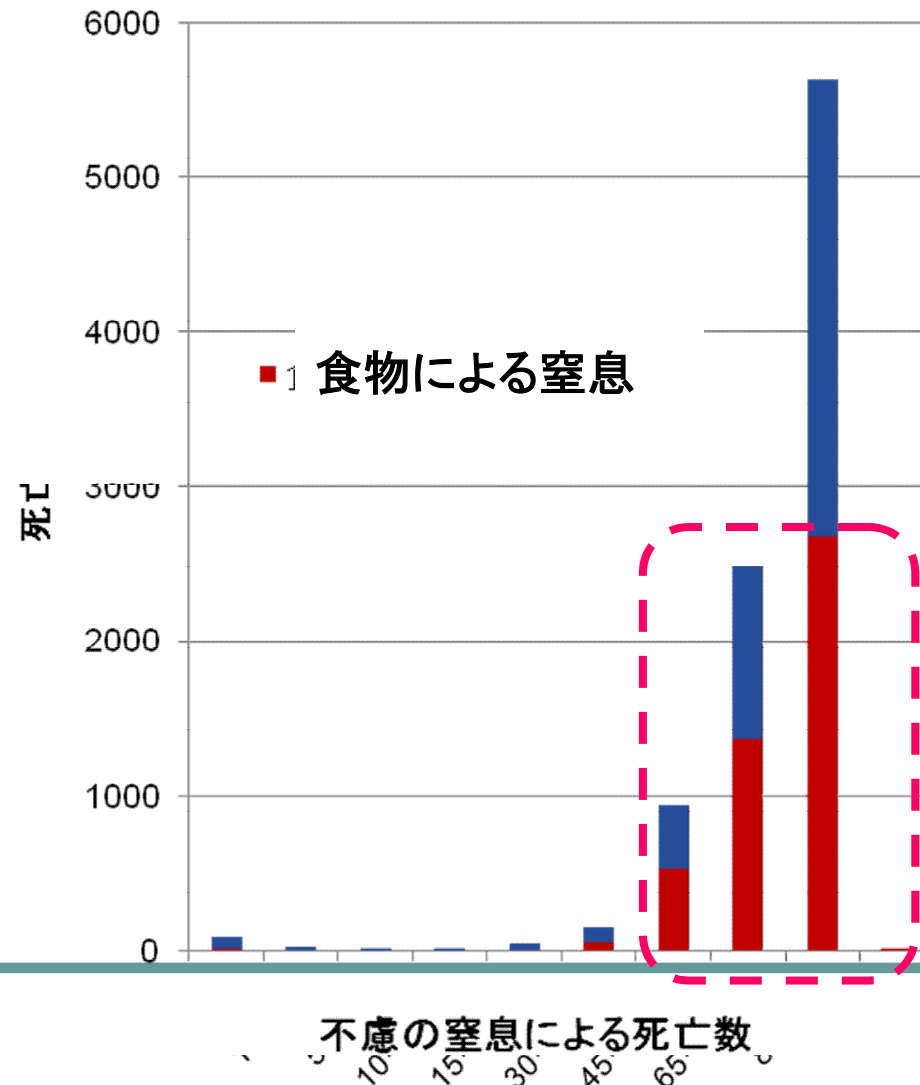
2-2 肺炎の年齢階層別死亡者数 (10万人対)



高齢者の肺炎の主原因

→ 飲み込み障害(誤嚥)による肺炎

2-3 不慮の窒息による死亡数



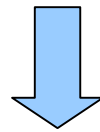
嚥下困難

→ 老化現象

2-4 嚥下シミュレーター開発の意義

meiji

→ 嚥下をサポートする商品を開発・提供

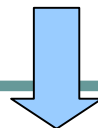


患者様やお客様に、製品の価値を正確に検証し、伝える手段がなかった。

- ・薬品、流動食、機能性食品 → 動物実験などで効果を検証
- ・トロミ剤、ゼリー→患者様に実際に食べてもらって評価
→誤嚥(窒息、肺炎)のリスク、肉体的な苦痛を伴う

「客観的に推定して、事前にメニューを提案すること」はできない

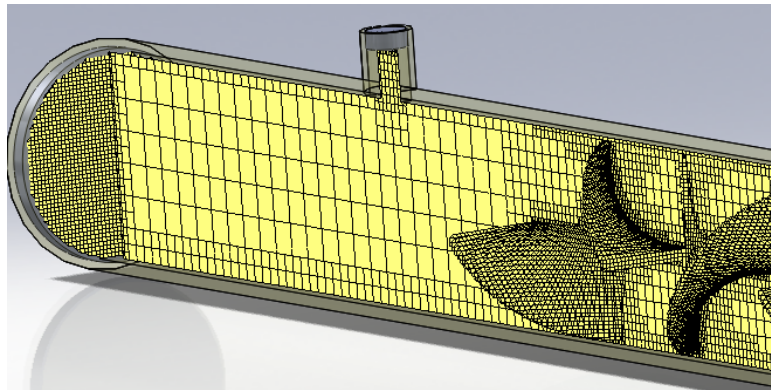
食品メーカーの責任として、製品価値を正確に伝える手段の開発が必要



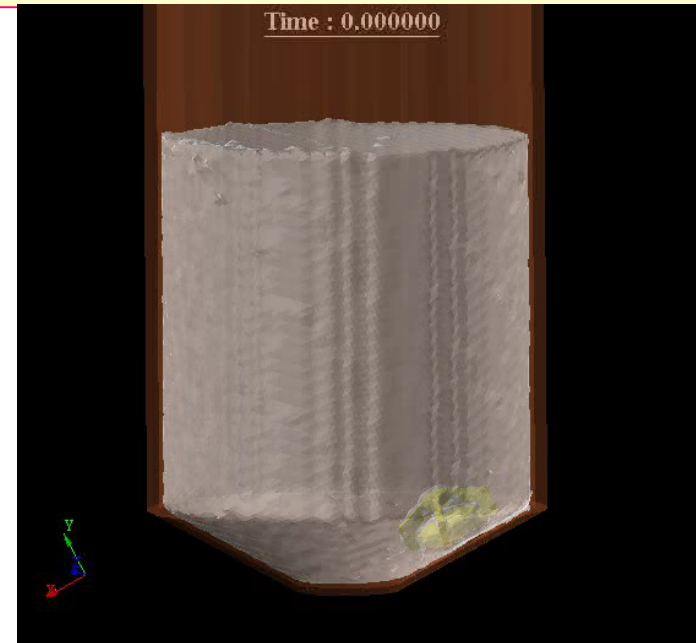
嚥下シミュレーターの開発

2-5 嚥下シミュレーター開発に必要な技術

嚥下シミュレーション→食塊の瞬間的な大変形や飛沫の表現必要
→従来の格子法(有限要素法など)を用いた解析法では困難



格子法



粒子法

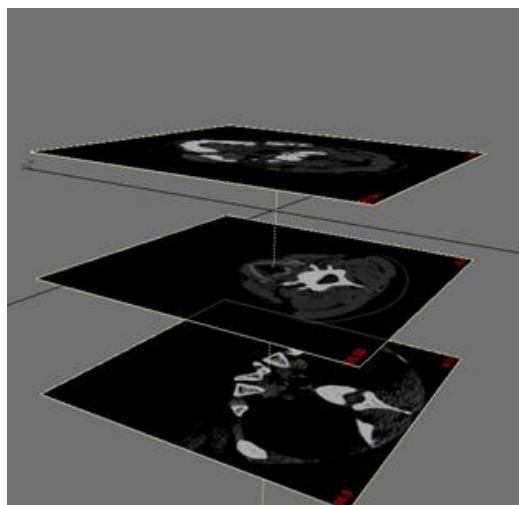
飛沫、大変形の解析が可能な粒子法(MPS法)の採用を検討

3. 嚥下シミュレーター開発の重要技術

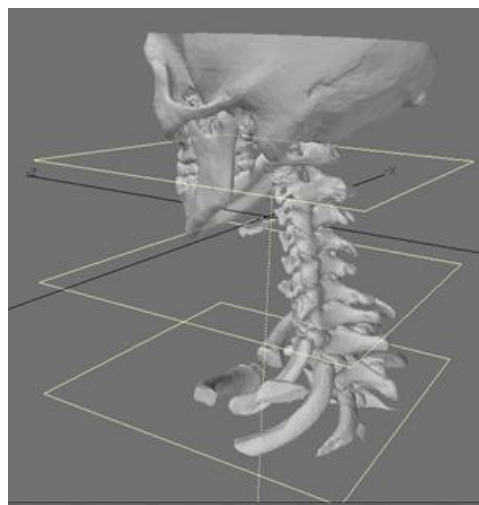
- 位置・運動情報のある立体モデルの作成技術
(武蔵野赤十字病院:道脇先生チーム)
- モデル変形を考慮したソルバー開発・応用技術
(プロメックソフトウェア社、構造計画研究所のご協力: Particleworks)
- 生体、製品の物性値測定、評価技術
(株式会社 明治チーム)
- 可視化技術
(サイバネット社ご協力 Micro AVS, 3D AVS Player)

3-1 位置・運動情報のある立体モデルの作成技術 (武蔵野赤十字病院:道脇先生チーム)

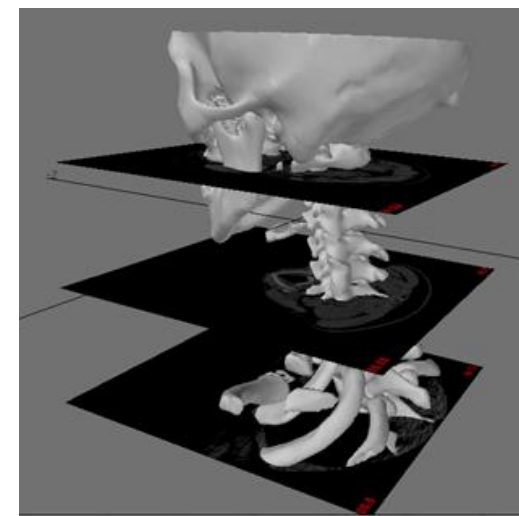
- 非嚥下時の立体モデルを構築(基本構造モデル)
 - (1) 頭頸部CT撮影(水平断=0.625mm間隔)
 - (2) CT画像や、CTデータ立体構築ソフトMimicsによって作成した3Dモデルを、3次元空間内に貼り付け、ガイドとして利用
 - (3) ガイドを参考に3D-CGソフト(Autodesk 3ds Max 2012)にて形状作成



CT画像



CT立体構成モデル

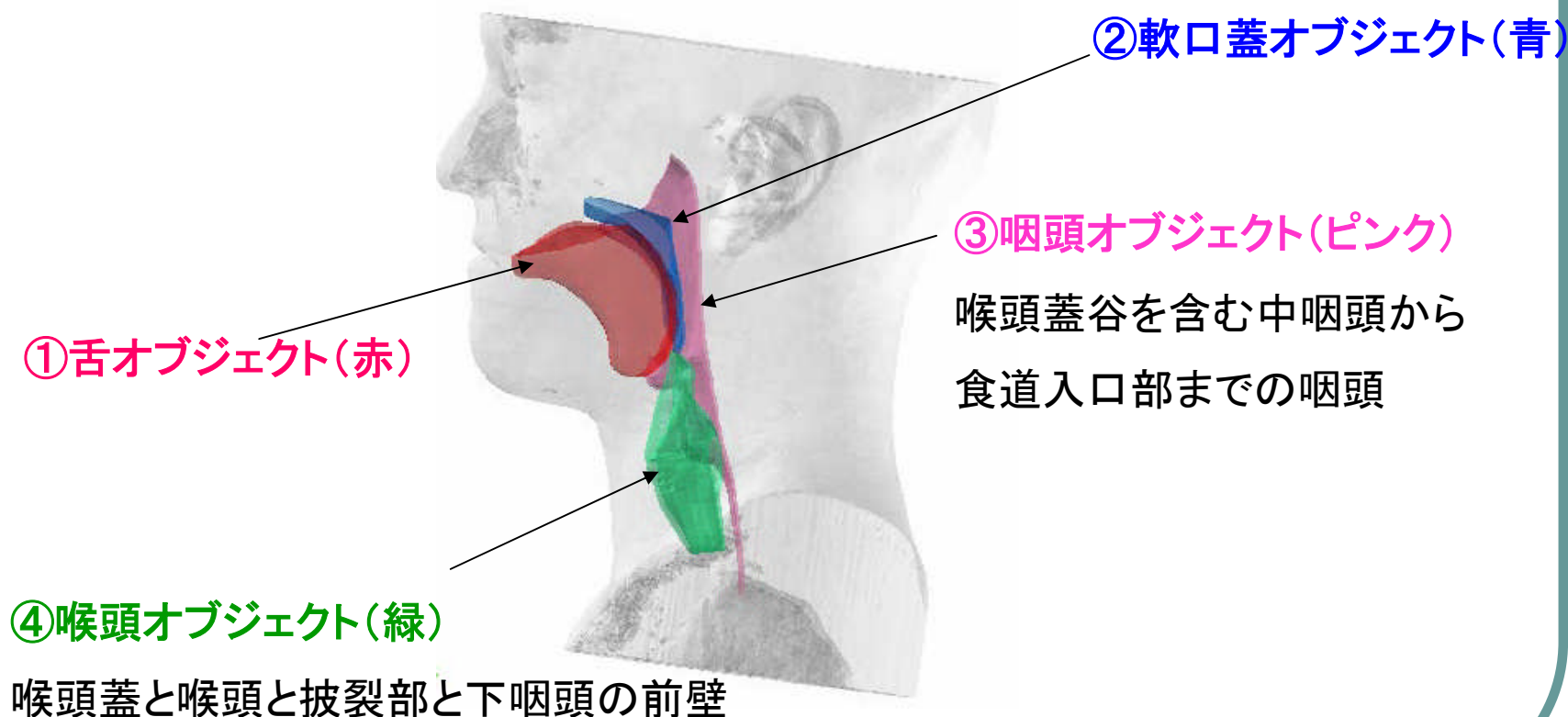


作図用ガイドとして利用

3-2 位置・運動情報のある立体モデルの作成技術 (武蔵野赤十字病院:道脇先生チーム 担当)

● CGモデルの解析オブジェクトへの再現

(4) 舌、軟口蓋、咽頭、喉頭の4パーツへ分割



3-3 立体モデルの運動情報を考慮

(武蔵野赤十字病院:道脇先生チーム 担当)

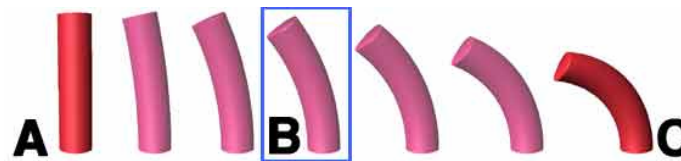
(5) 嚥下造影を撮影(連続レントゲン写真)・・・VF

側面と正面の動きを比較して同期
動画ファイルは30fps。



(6) 側面と正面のVF画像を3D-CGソフト内にガイドとして貼付、モデルを変形

立体モデルを貼り付けたVF画像を参考にモデルを変形、アニメーション化
(見えないところは、シネMRIや解剖の知識から推定して作成)



(7) 立体データを、1/300秒ごとにobjデータへ出力

(8) Particleworksのプリ処理にて距離関数dfファイルを作成

3-4 モデル変形を考慮したソルバー開発・応用技術 (プロメテックソフトウェア社・構造計画研究所)

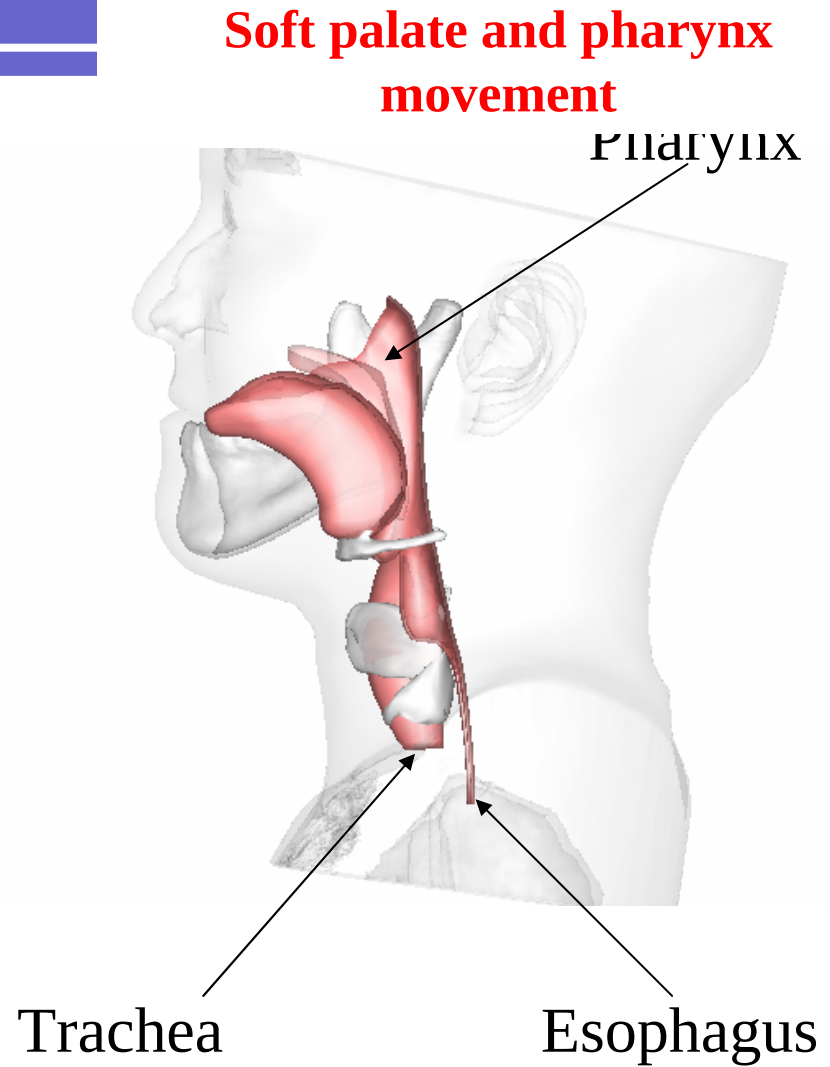
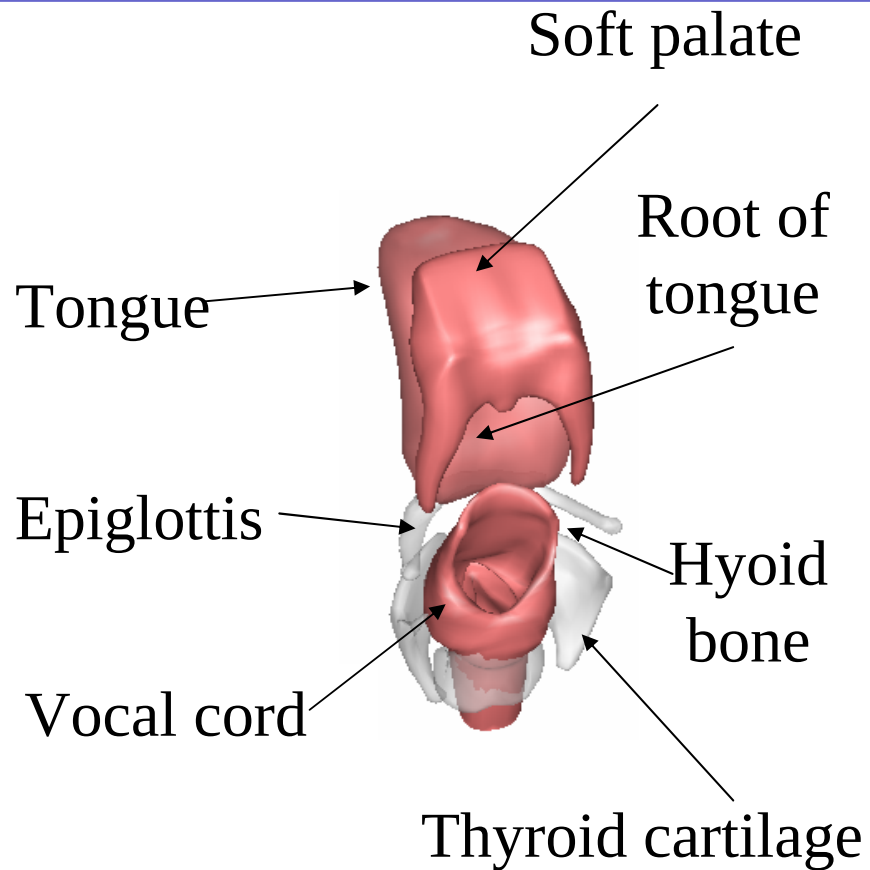
- 刻み時間毎に変化する4つの構造の取り扱い

①舌、②軟口蓋、③咽頭、④喉頭

- ・刻み時間・・・1/300sec
- ・約700枚/構造=4構造×700=2800枚のDFファイルを利用
- ・連番ポリゴンファイルの作成

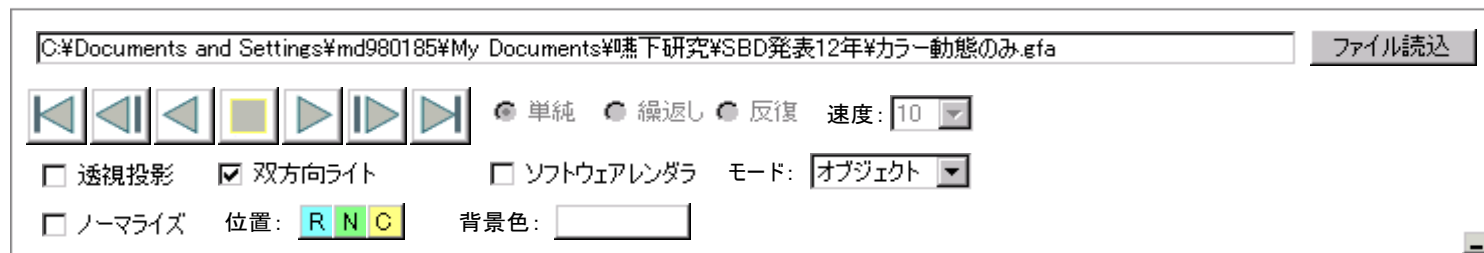
- 連番ポリゴンファイルとして読込

嚥下動作中の各器官の動き



3-5 位置・時間情報を考慮した嚙下動態モデル(強制変形)

3D AVS Playerにて再生



3-6 生体、製品の物性値測定、評価技術 (株式会社 明治 担当)

- 表面張力はポテンシャル力として考慮する

$$C_f = \frac{138\sigma}{\rho l_0^2 \left(\frac{r_e}{l_0} \right)^5}$$

C_f : 流体粒子ポテンシャル係数、 σ : 表面張力、 ρ : 密度、 l_0 : 粒子径、 r_e : 影響半径

- 流体粒子と壁面の濡れ性は物体と液体の組み合わせで変わる(接触角の測定が必要)

$$C_{fs} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta) \cdot C_f$$

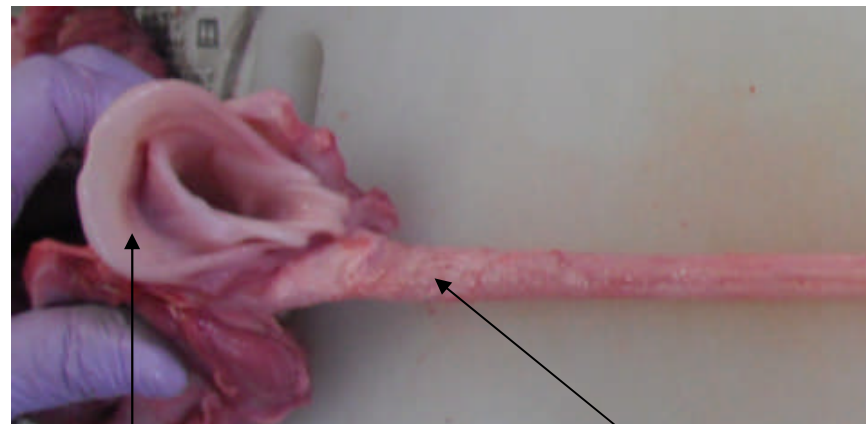
C_{fs} : 流体粒子-壁面ポテンシャル係数、 θ : 接触角

3-7 生体、製品の物性値測定、評価技術 (株式会社 明治 担当)

- 生体組織上(舌、咽頭など)の接触角の測定
(豚の生体組織を採取し、接触角を測定)



豚の舌



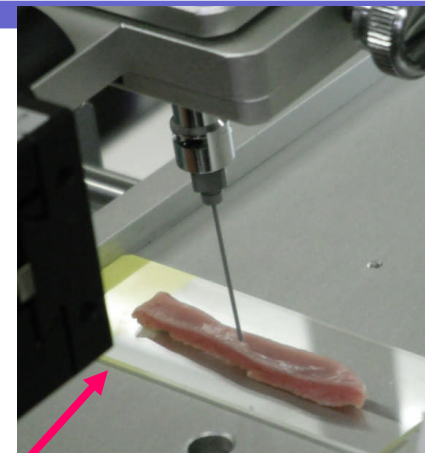
豚の喉頭蓋

豚の食道

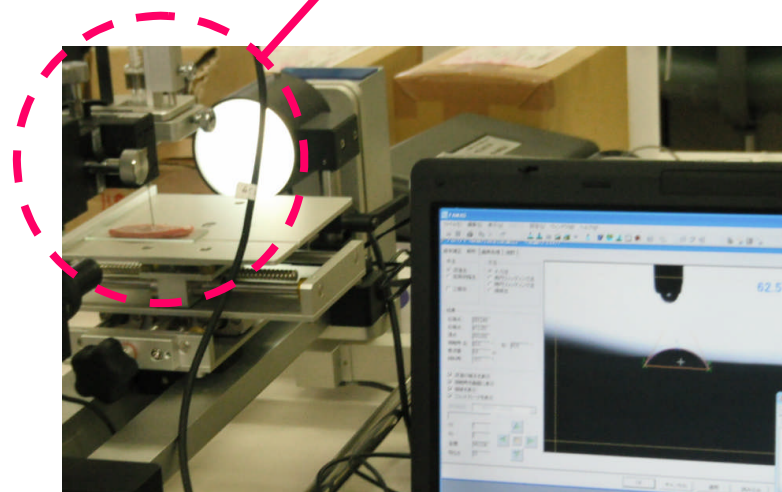
3-8 生体組織上の接触角測定

◎測定機器:

接触角計: DropMaster500 (協和界面科学)
針先: 0.4mm



表面張力測定



接触角測定

4. 嚙下シミュレーターの妥当性評価

- 実際の嚙下造影(VF)の様子
- シミュレーション条件
- VFとシミュレーションの定性的な比較
- 画像処理技術と組み合わせた定量評価方法
- 誤嚙シミュレーション (Micro AVS ポスト処理)

4-1 実際の嚥下造影(VF)の様子

嚥下対象: 水+イオパミドール(造影剤)、フレームレート30fps

画像処理ソフト ImageJによる特殊加工実施



4-2 シミュレーションの設定条件

解析ソフト: Particleworks2.5

(強制変形カスタマイズ)

生体モデル: 武蔵野赤十字病院作成

健常者 水嚥下モデル

粒子径: 2mm

影響半径: 4.1

食塊量: 6cc

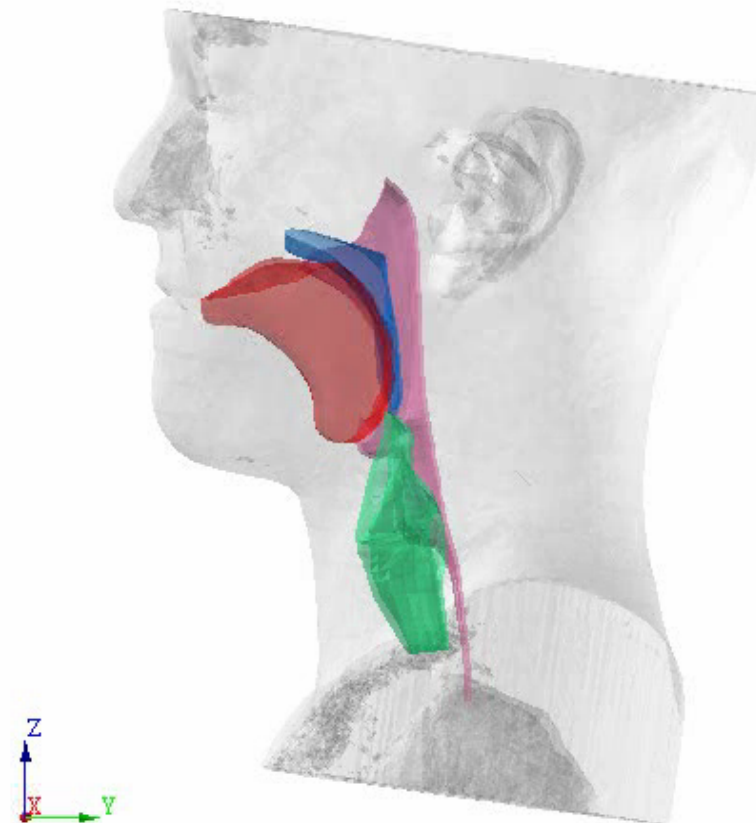
解析対象: 水+イオパミドール(造影剤)

粘度: $2.5\text{mPa}\cdot\text{s}$ (ニュートン流体)

表面張力: 0.072N/m

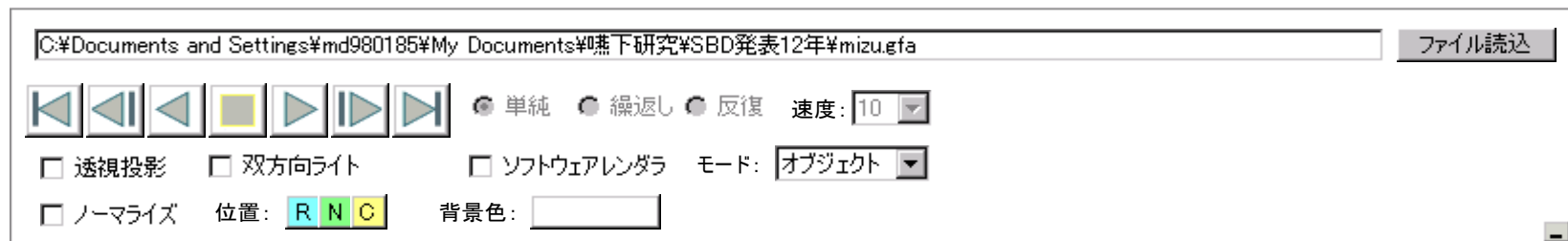
表面張力: ポテンシャル係数使用

Time : 0.033500

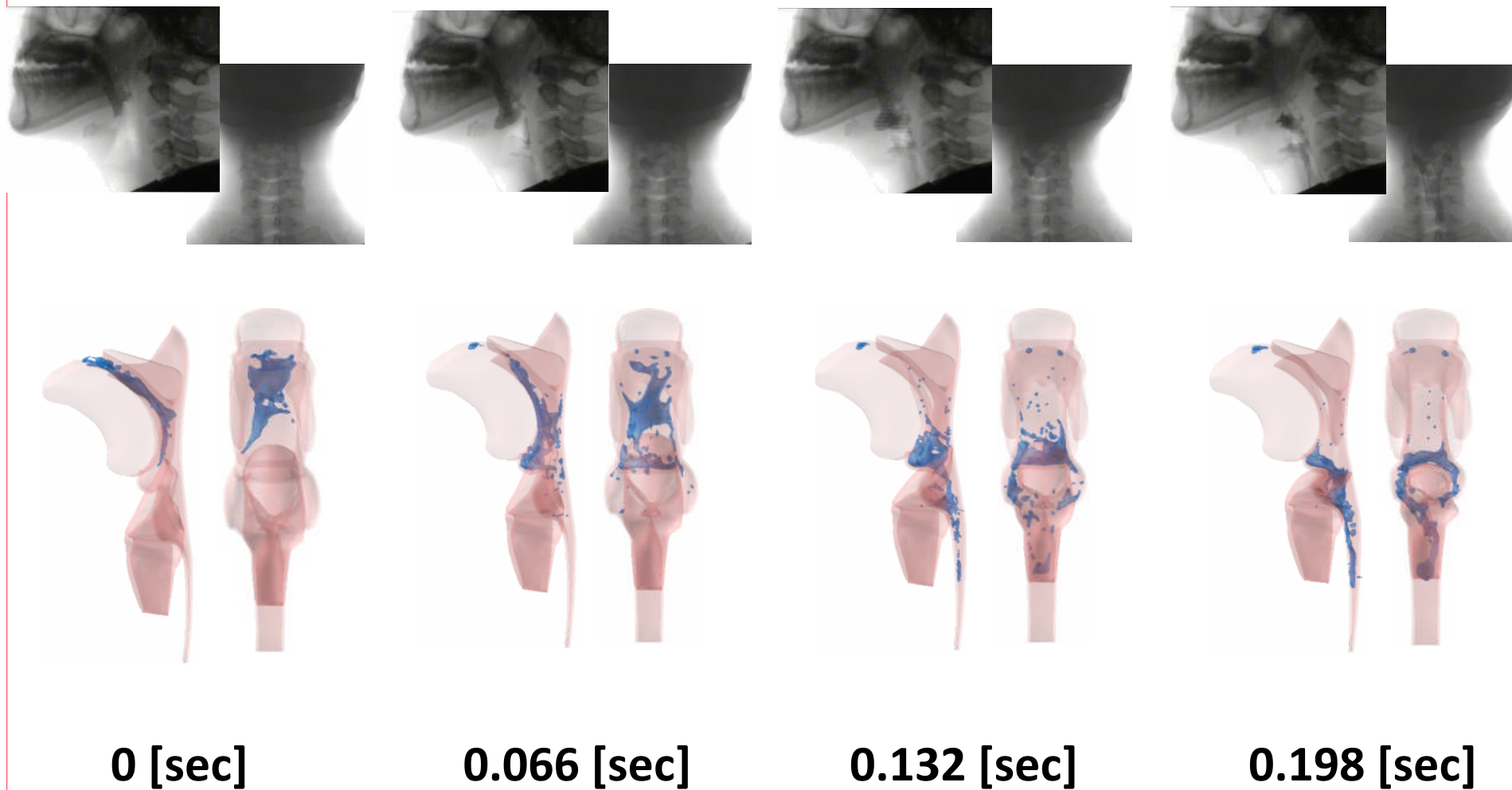


4-3 シミュレーターでの嚙下の様子 (リアルタイム視点変更可能 3次元嚙下動作動画)

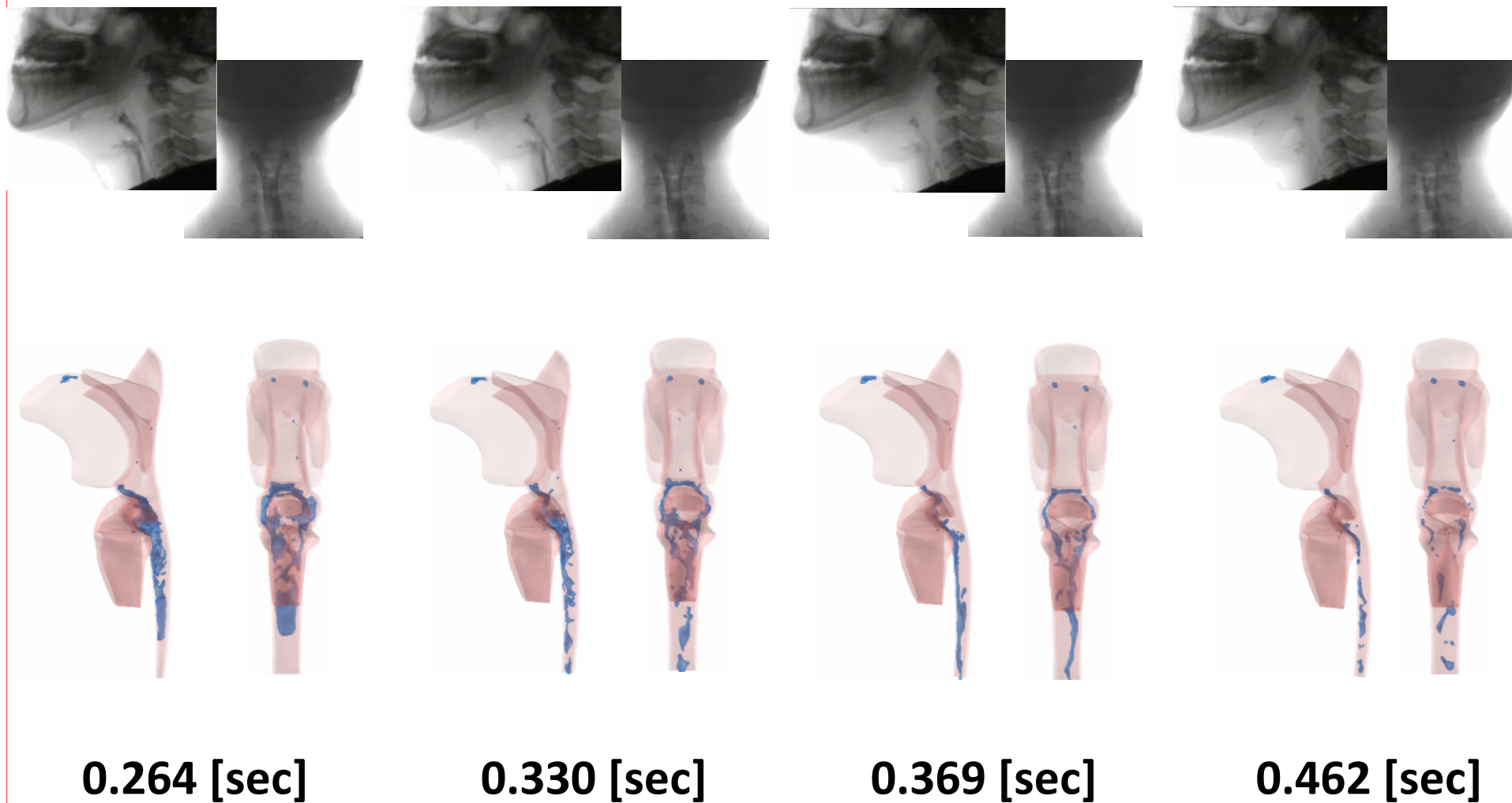
3D AVS Playerにて再生



4-4 VFとシミュレーションの定性的な比較 (準備期～口腔期～咽頭期)



4-5 VFとシミュレーションの定性的な比較 (咽頭期～食道期)



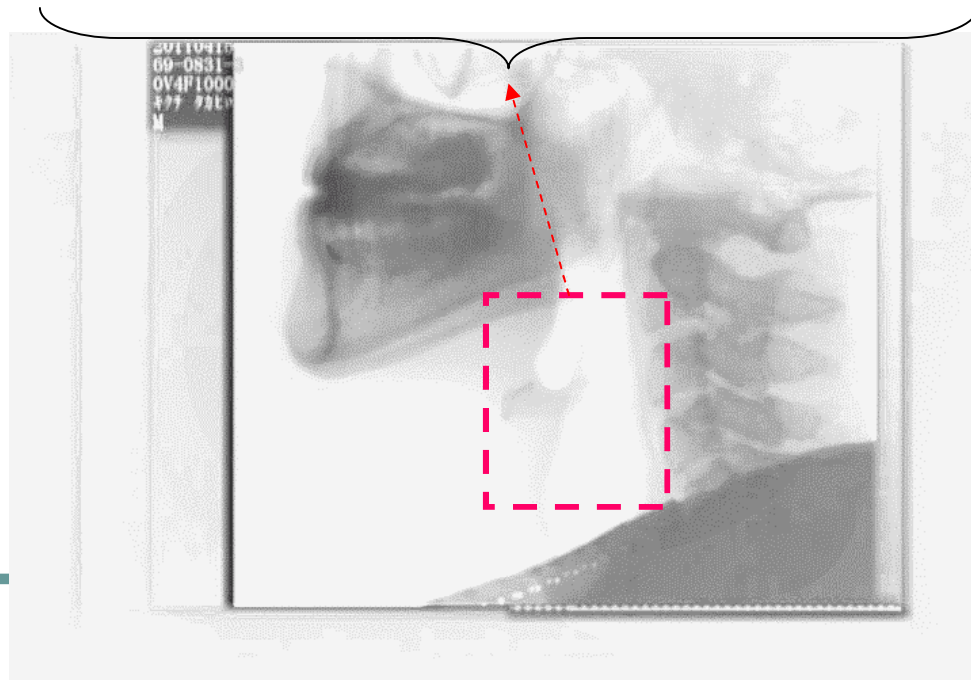
シミュレーション結果の定量的な妥当性評価方法 (喉頭蓋谷近傍の正規化輝度変化の比較)

正規化輝度

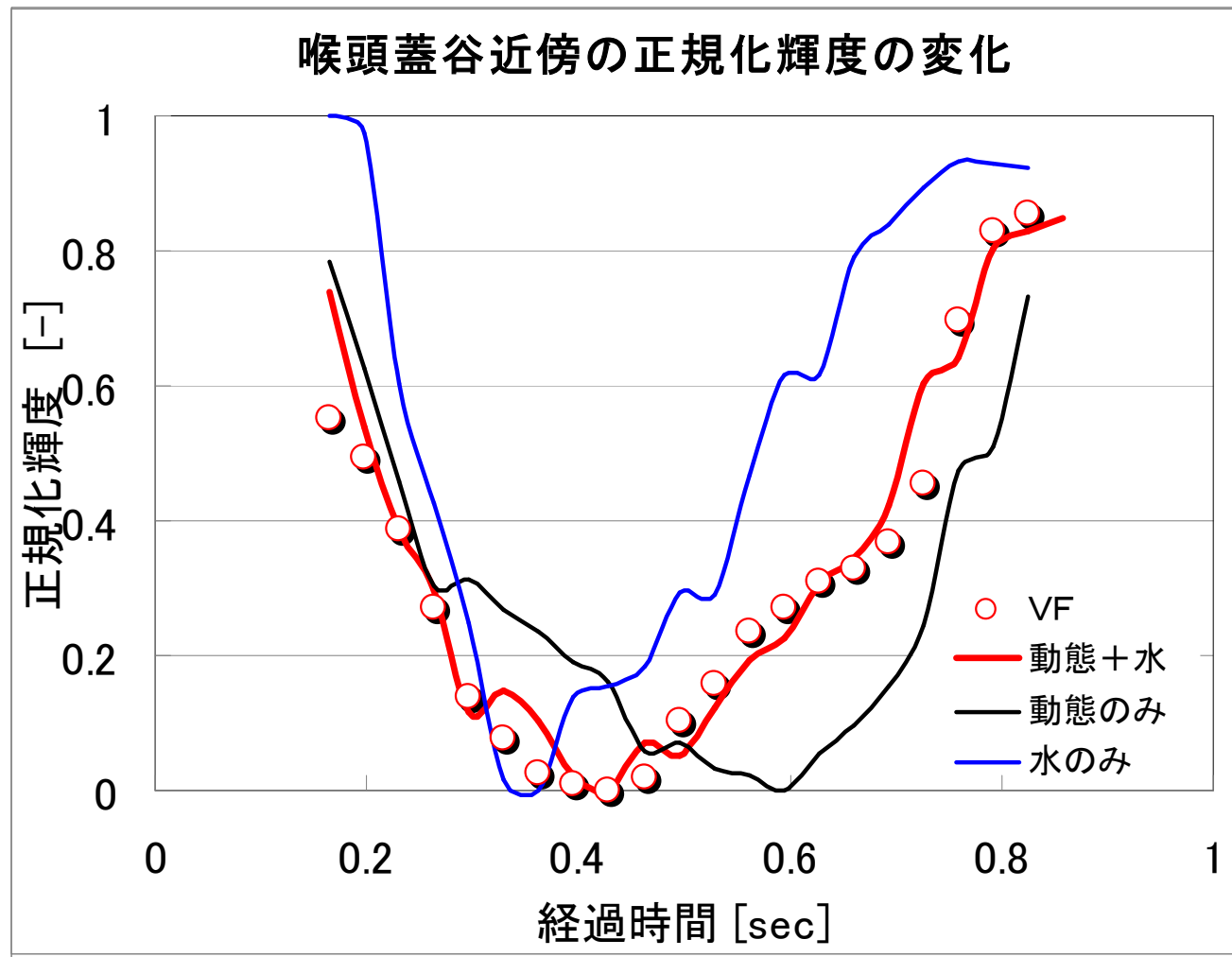
$$B_n = \frac{B_t - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}$$

喉頭蓋谷近傍の正規化輝度

→ 嚥下動作中、食塊の有無と生体の挙動によって輝度が変化



4-7 嚥下造影とシミュレーションの定量的比較 (正規化輝度使用の妥当性と解析の精度評価)

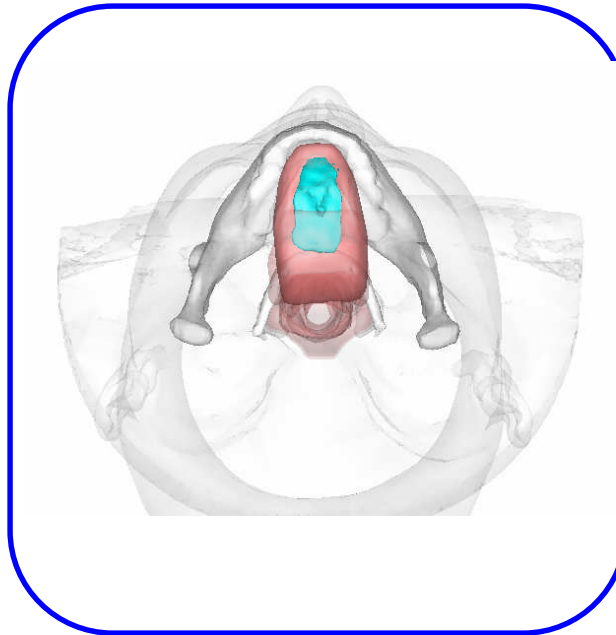


5. ケーススタディ、活用事例

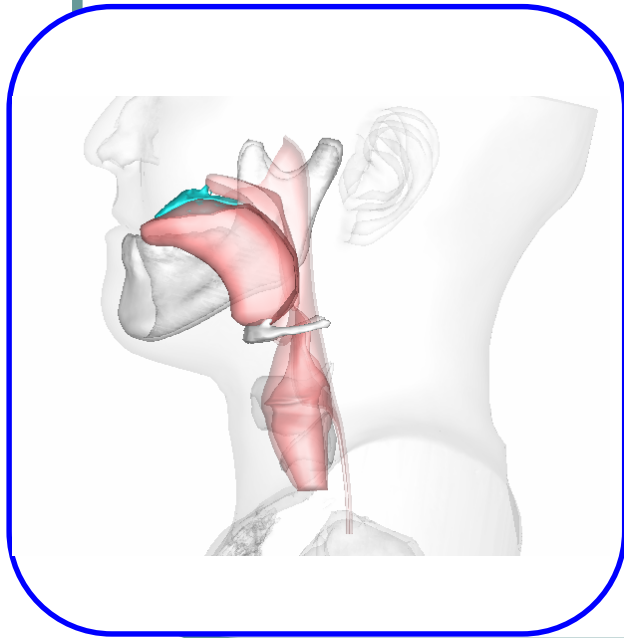
- 正常嚙下の様子
- 誤嚙モデルでの嚙下シミュレーション
- ニュートン流体、非ニュートン流体の比較
- 嚙下中の物理量抽出例、評価例

正常嚥下 (2.5mPa·s Newtonian fluid)

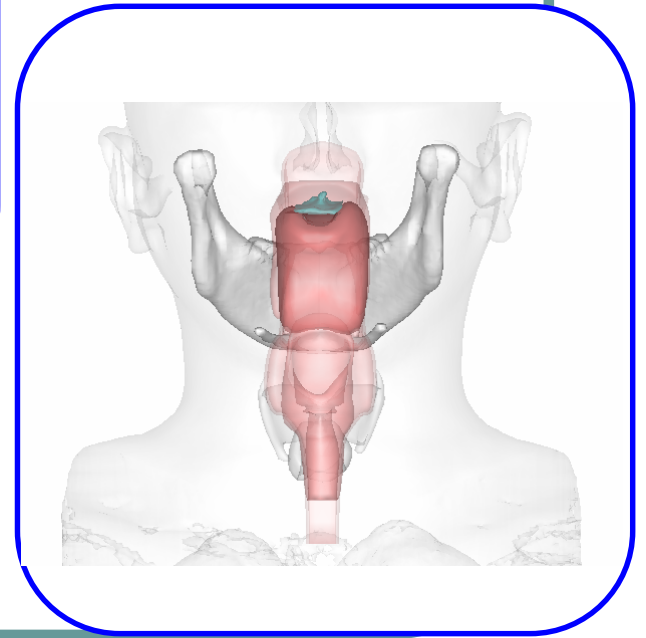
Top view



Side view

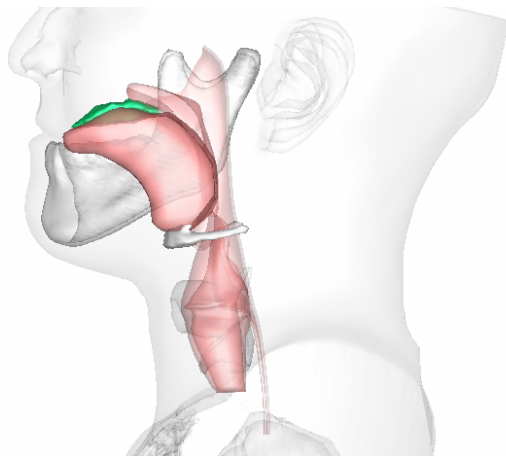


Back view

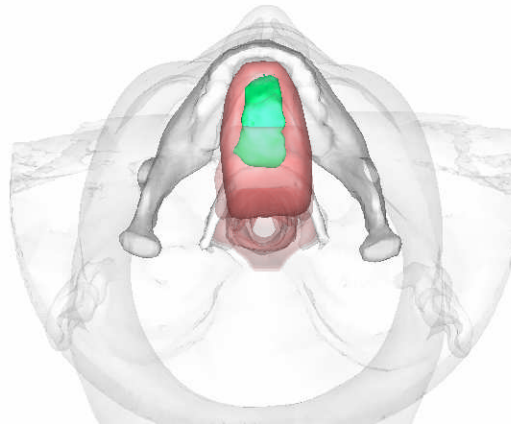


前誤嚥＋後誤嚥（1mPa・s Newtonian fluid）
（**数値実験**・・・水嚥下の生体モデルの物性値のみ変更）

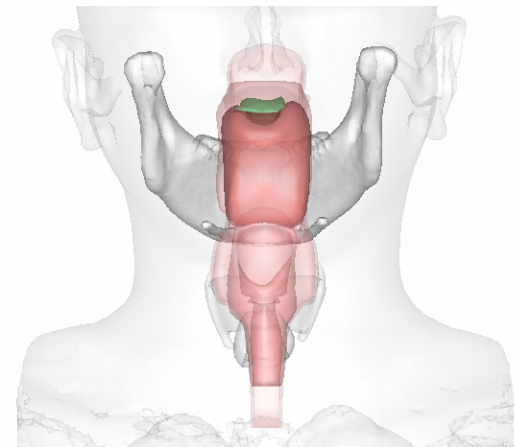
Side view



Top view



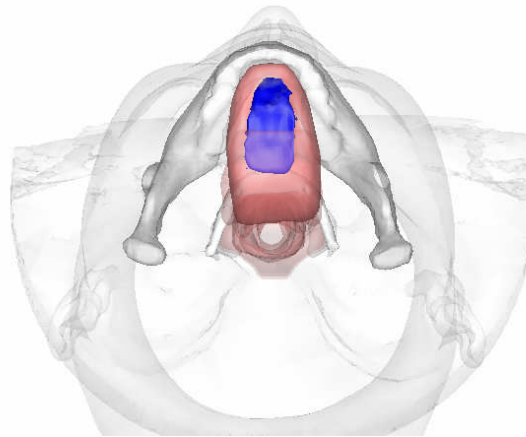
Back view



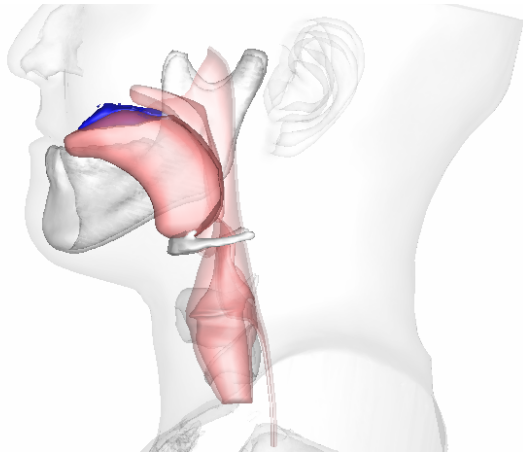
後誤嚥 (100mPa·s Newtonian fluid)

(**数値実験**・・・水嚥下の生体モデルの物性値のみ変更)

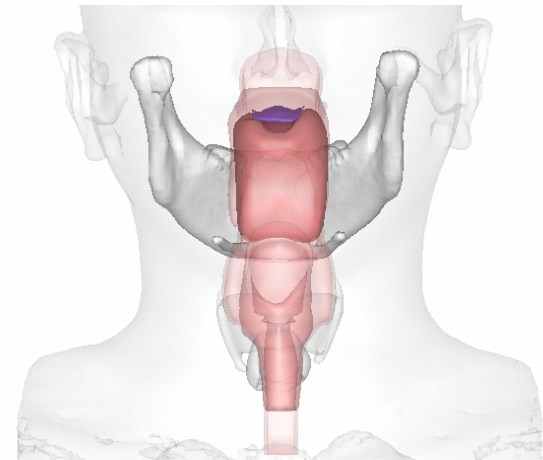
Top view



Side view



Back view



嚥下中の食塊の様子(フライスルー)

Micro AVSでの処理

A-4 誤嚥動画の比較

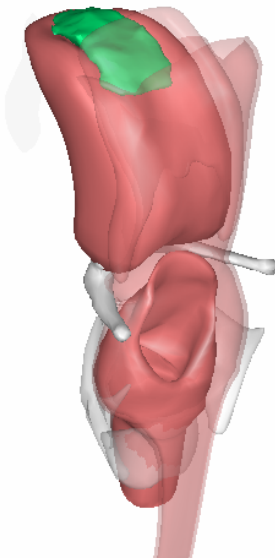
(**数値実験**・・・水嚥下の生体モデルの物性値のみ変更)

Using same dynamic 3D model but physical properties were different

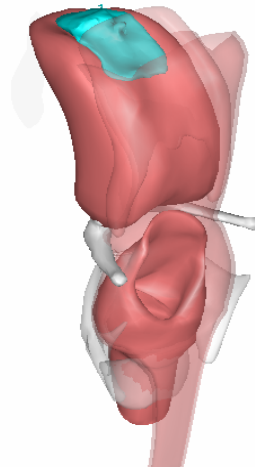
Misswallowing

(Timing :too fast)

Low viscosity
high contact angle



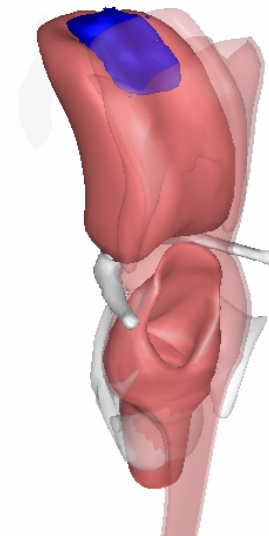
Normal swallowing



Misswallowing

(Timing : too late)

High viscosity
low contact angle



水とろみ調整食品の比較(背面より)

解析対象

生体モデル:水 正常嚥下モデル

食品モデル:水 + 造影剤

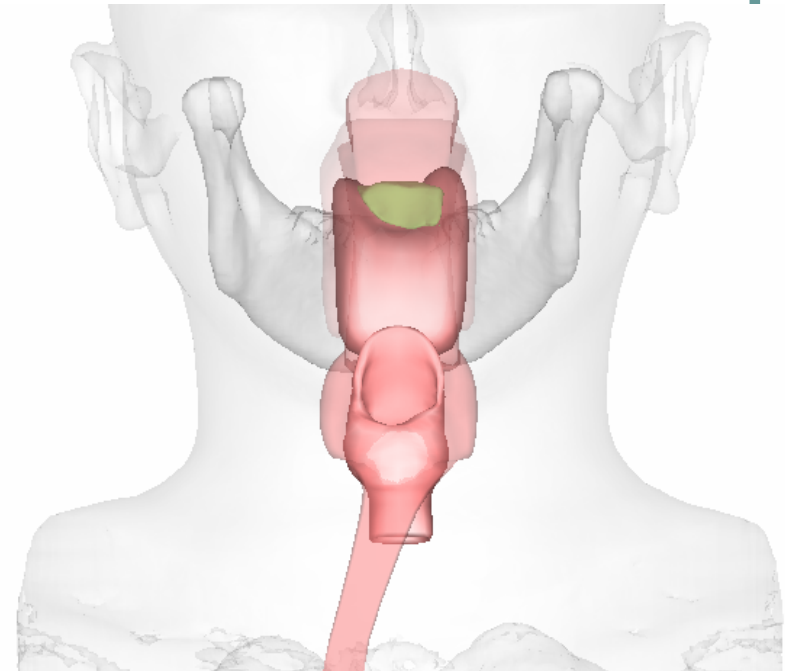
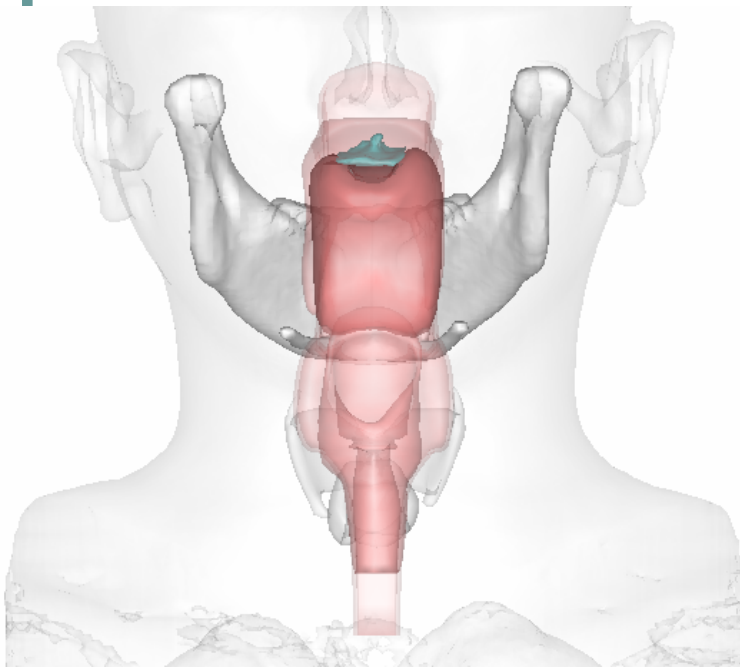
(ニュートン流体)

解析対象

生体モデル:とろみ調整食品 正常嚥下モデル

食品モデル:とろみ調整食品 + 造影剤

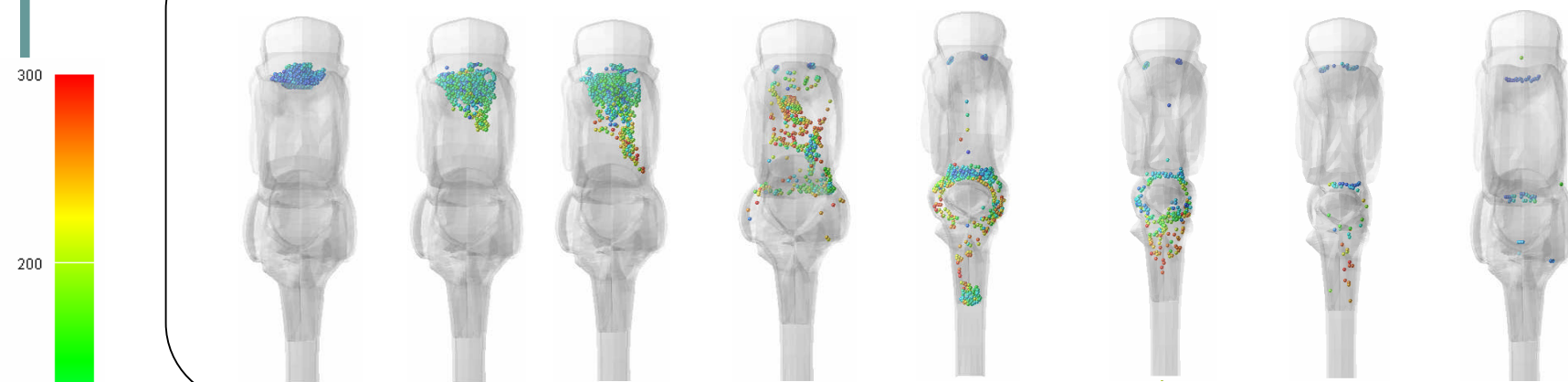
(非ニュートン流体)



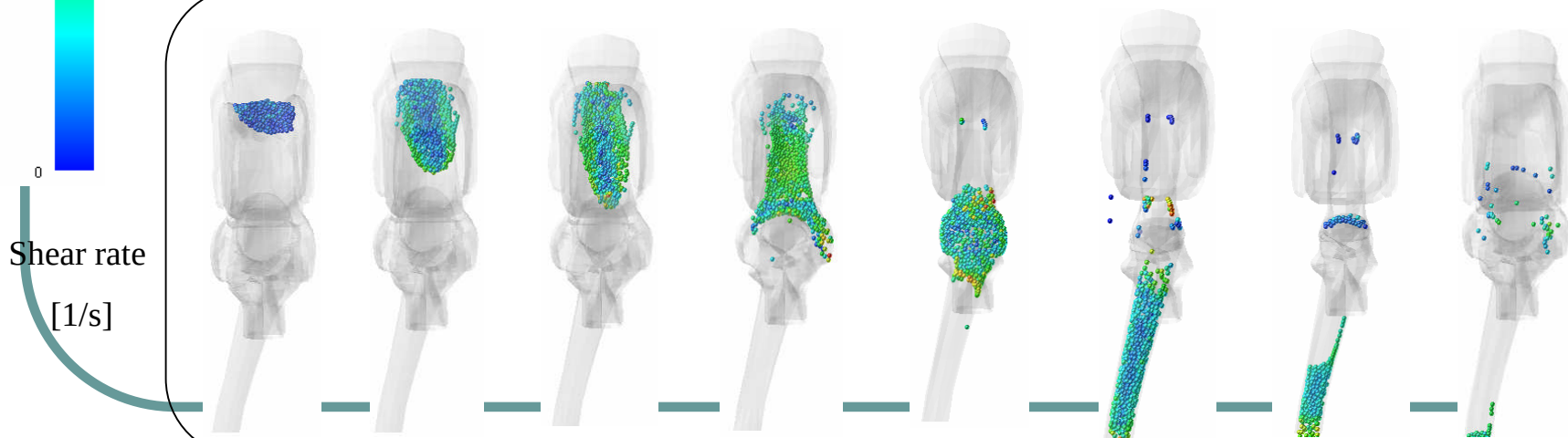
25歳 健常者(男性) 食品毎に固有のモデルを作成

嚥下動作中に食塊が受けるせん断速度

水+造影剤 (ニュートン流体)



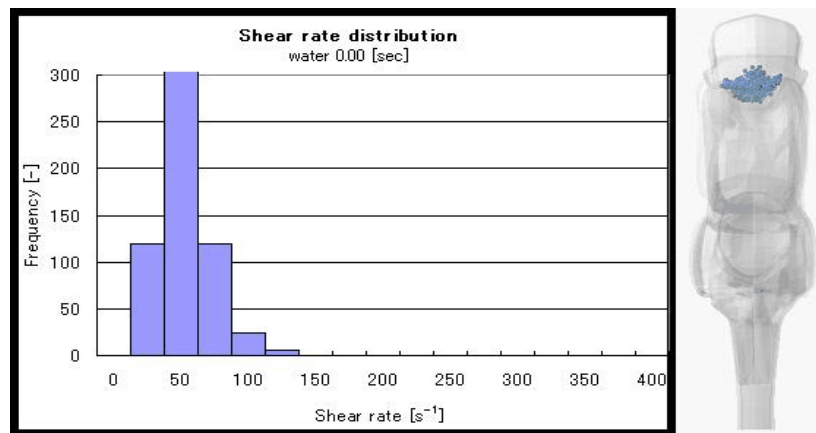
とろみ調整食品+造影剤 (非ニュートン流体: 擬塑性流体)



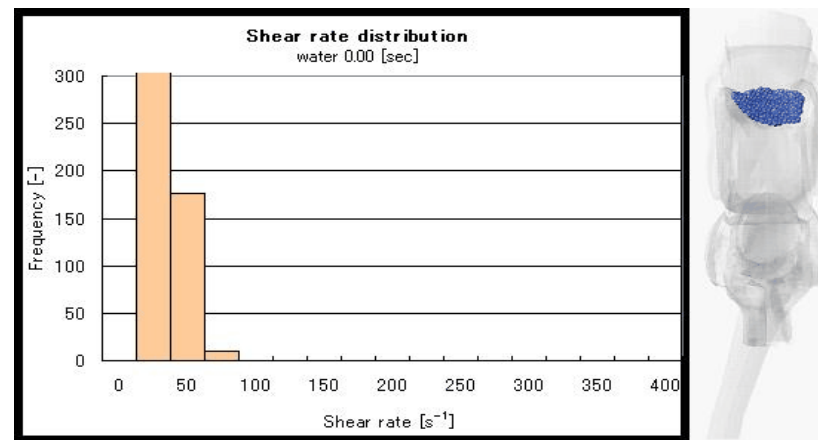
0[sec] 0.13[sec] 0.16[sec] 0.23[sec] 0.37[sec] 0.5[sec] 0.7[sec] 0.93[sec]

嚥下動作中に変化するせん断速度

水+造影剤 (ニュートン流体)



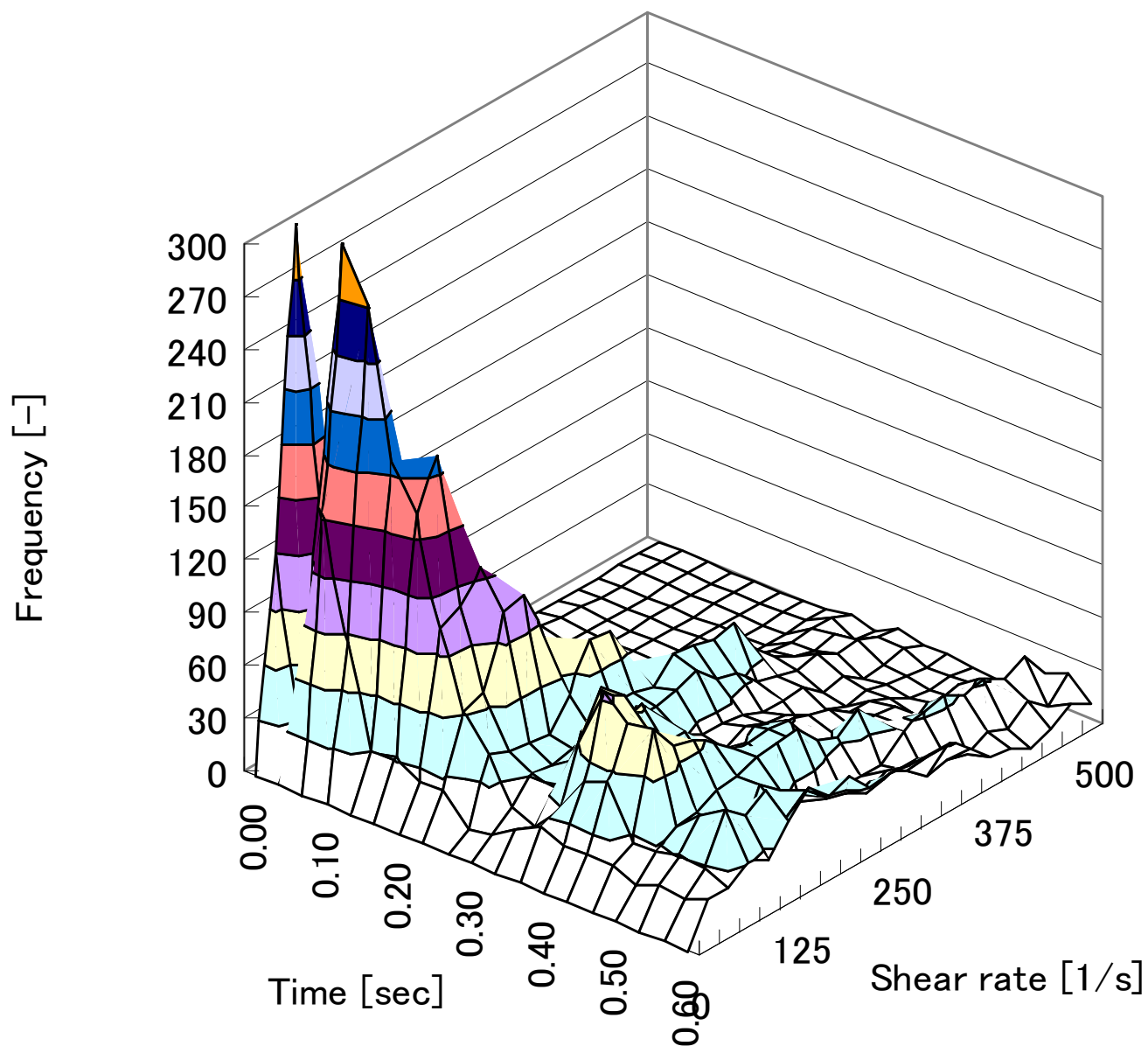
とろみ調整食品+造影剤 (非ニュートン流体)



嚥下動作中 → 食塊はさまざまなせん断速度となって移送される

とろみ調整食品は、まとまりを保ちながら嚥下される。

嚙下動作中のせん断速度分布 (水+造影剤)

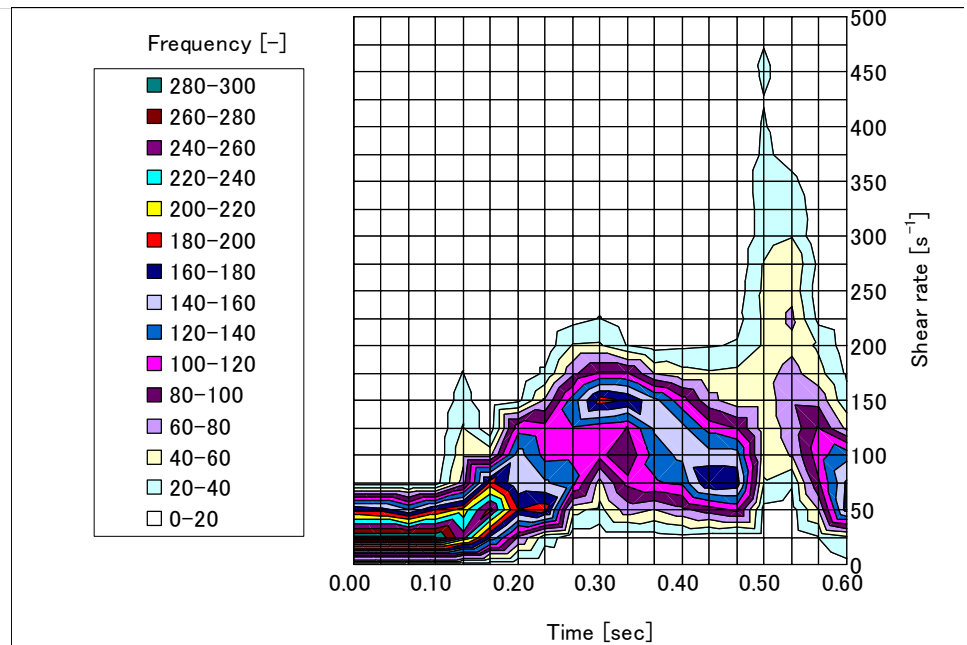
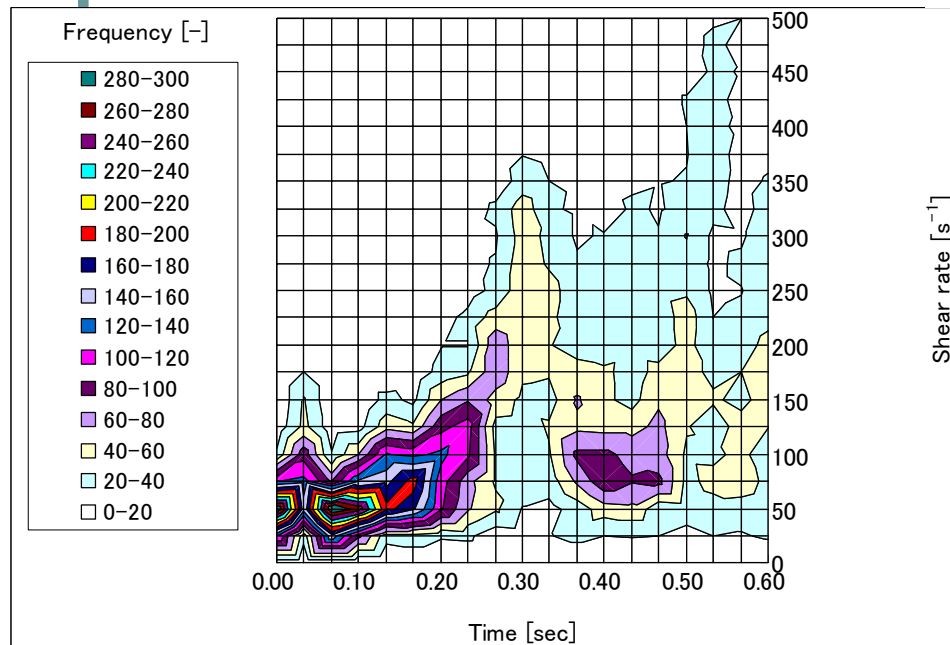


せん断速度 頻度分布図

(ニュートン流体と非ニュートン流体との比較例)

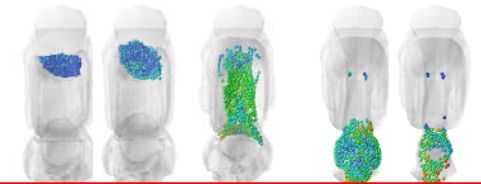
水+造影剤 (ニュートン流体)

とろみ調整食品+造影剤 (非ニュートン流体)



せん断速度分布の幅が広い

嚥下動作中のせん断速度の変化が激しい



せん断速度分布の幅が狭い

嚥下動作中のせん断速度の変化が少ない

画像と頻度分布図より→とろみ調整食品は、水よりまとまりがよく、飛沫が形成されにくい

5. おわりに

- まとめ

5-1 まとめ

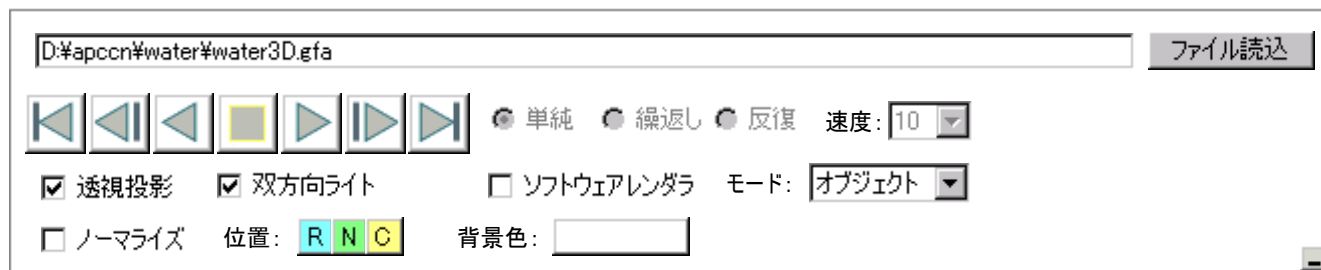
- ① 位置情報のある立体解剖モデルに運動データーを加味
→解剖学的、臨床的妥当性を評価しながら頭頸部のモデル化
- ② Particleworks(強制変形カスタマイズ)を用いた嚥下動態シミュレーターを開発
- ③ 健常者の水の嚥下動態を用いたシミュレーションが可能

→嚥下造影と比較して、**定性的・定量的に嚥下動態が高い精度で一致**
モデル作成手法、嚥下シミュレーションの正確性の証明

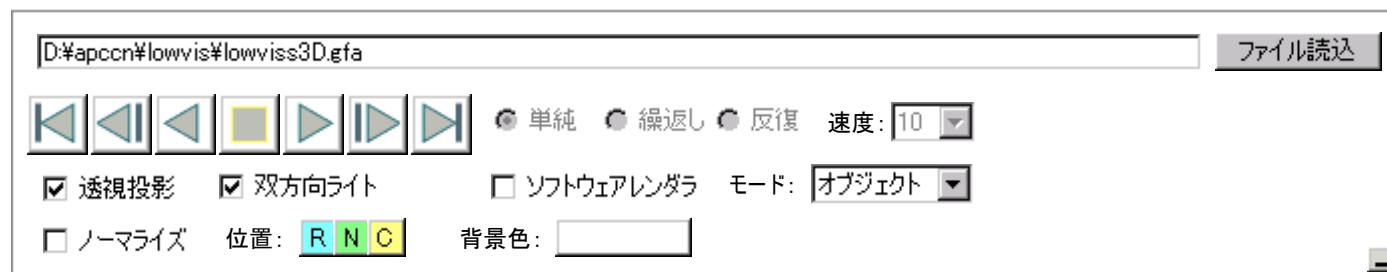
(嚥下シミュレーターの利点)
→**3次元的視野で嚥下動態を把握**
嚥下時の**数値化**(誤嚥量、壁面応力、せん断速度)
- ④ 水の動きしかできないモデルに異なる物性の食塊を嚥下させると誤嚥
→人は食塊の物性によって動態を最適化して嚥下している。

付録
4次元嚙下シミュレーション動画
3D AVS Player

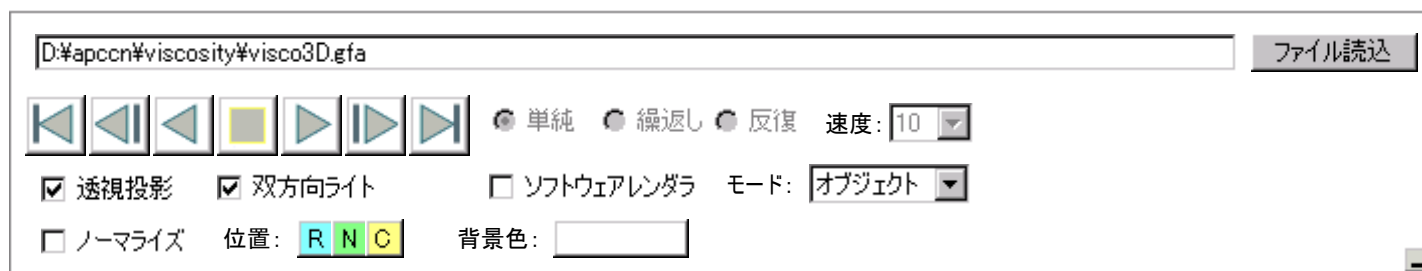
正常嚙下(水)



誤嚥 (食塊が早く落ちる場合: 低粘度液 1mPa·s)



誤嚥 (食塊が遅く落ちる: 高粘度液 100mPa・s)



正常嚙下 (非ニュートン流体:とろみ剤:トロメイク)

