

嚥下の数値シミュレータ Swallow Vision®による嚥下現象のモデル化と可視化

Modeling and visualization of swallowing action using the 3-dimensional computer swallowing simulator “Swallow Vision®”

○ 神谷 哲，外山 義雄，高井 めぐみ，羽生 圭吾（(株)明治 研究本部）

道脇 幸博，菊地 貴博（武蔵野赤十字病院）

Tetsu KAMIYA, Yoshio TOYAMA, Megumi TAKAI, Keigo HANYU (Meiji Co., Ltd.)

Yukihiro MICHIWAKI, Takahiro KIKUCHI (Japanese Red Cross Musashino Hospital)

**Abstract:** The aim of the present study was to correlate the movements of the human organs with the bolus flow configuration, including changes in the physical properties of a bolus, using “Swallow Vision®,” a 3-dimensional human swallowing simulator. Swallow Vision® was developed through the use of realistic human organ models and a meshless 3-dimensional moving particle simulation method. The human organ model used to create Swallow Vision® was reconstructed using computed tomography images and video fluorography images. The quantitative and qualitative accuracy of the bolus flow configuration and organ movement depicted by Swallow Vision® has already been validated. Swallow Vision® could visualize changes in a food bolus configuration to be presented as a 4-dimensional movie with real-time changes in perspective. And also the numerical visualization made possible with Swallow Vision® correlated with the complex movements of human organs, as well as the bolus flow configuration, including the associated changes in physical properties.

**Key Words:** Swallowing, Simulation, Visualization, Human organ, Physical properties

1. 背景

日本は総人口の1/4が65歳以上の高齢者となる、いわゆる超高齢者社会に突入している。日本人の死因の第3位は肺炎であり<sup>(1)</sup>、高齢者の肺炎の多くは誤嚥性の肺炎とされている。高齢者の健康寿命の延伸の観点からも、誤嚥性肺炎の低減は社会的に重要な課題と考えられる。誤嚥防止のためには嚥下のバイオメカニクスの理解や食品物性の違いが嚥下時にどのような影響を及ぼしているか明らかにする必要があるが、嚥下研究において動物実験は臨床的意義に疑問があり、また嚥下困難者自身の喫飲による検証は、被験者自身に肉体的負荷を与えるだけでなく、検証自体が誤嚥のリスクを伴うといった課題がある。

2. 目的

本研究の目的は、嚥下現象を正確に模擬したコンピュータ・シミュレーションを開発し、生体器官の形態や挙動、食品物性の影響などを網羅的に検討することである。本稿では、著者らが開発した立体嚥下動態シミュレータ“Swallow Vision®”（以下SV）における各種のモデル化手法と妥当性確認方法ならびにシミュレータから抽出される様々な情報の可視化結果とその意味について考察する。

3. Swallow Vision®の概要とモデル化手法

Fig. 1にSVの構成要素を示す。SVは主に①嚥下動態の生体モデル化技術、②食塊のモデル化技術、そして③嚥下動態と食塊モデルを統合した解析技術、以上3つの技術的特徴を有し、以下にそれぞれの特徴について説明する。

3.1 嚥下動態のモデル化<sup>(2)</sup>

SVでは嚥下に関わる生体の器官を異なる機能を有する4つのオブジェクト（舌、軟口蓋、咽頭、喉頭蓋）に分割し、各器官が食塊に及ぼす力のタイミングや向きをより視認しやすくした（Fig. 2）。このオブジェクトについて、それぞれ静的および動的な形状モデルを作成した。

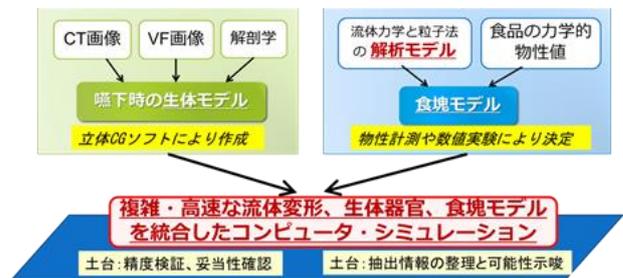


Fig. 1 Technical components of Swallow Vision®

静的形状モデルは、はじめにCTの断層画像から立体構造を構築したのち、骨や空気層を抽出し、最後に手で器官を4つのオブジェクトに分割してモデリングした。この手動でのモデリングは、解剖学的な知識および解釈によって行った。作業は画像処理ソフトウェアMimics (Materialize社)及び3D slicer(The Slicer Community)を使用した。モデリングの工程をFig. 3に示す。

動的形状モデルは、嚥下造影（Video fluorography:以下VF）の画像を利用し、時間とともに変化する生体形状の情報を抽出し、時間とともに変形する形状モデルを作成した。

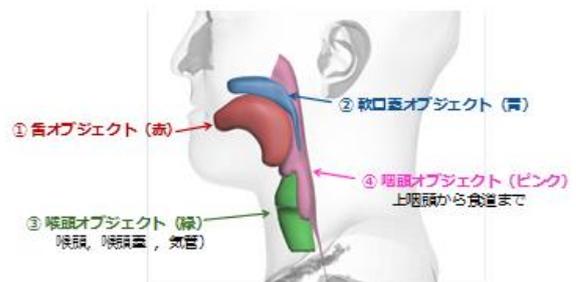


Fig. 2 Modeled objects of human organ

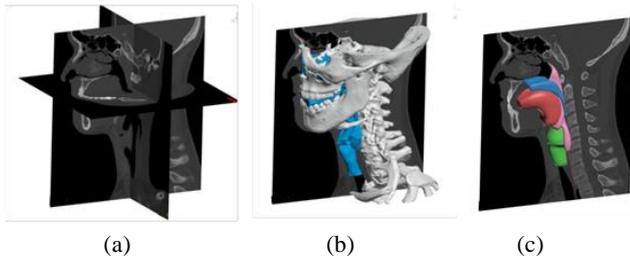


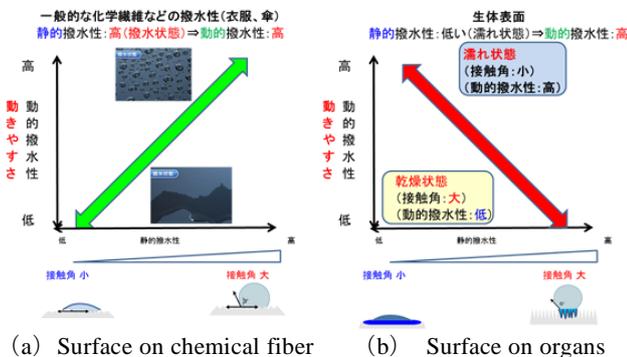
Fig. 3 Static modeling process of human organs.

(a) 3D reconstruction by CT images, (b) Extraction of bone structure and air, (c) Extraction and drawing of organs.

SVに利用したVF画像は約30fps(1秒間に約30枚の画像)のフレームレートで出力されているものを使用した。形状モデルの変形にはコンピュータグラフィクス(以下CG)ソフトウェア3ds Max(Autodesk社)を用いた。CGソフトウェア上に静的形状モデルとVFの画像データを配置し、静的形状がVF画像と重なるようにCGソフトウェア上で手動にて形状を変形させた。さらにCGソフトウェアは時系列のデータ間の生体運動を滑らかに補完することができるモーフィング機能があり、この機能を利用してVF画像のフレームレートの10倍の形状データ(1秒間に約300個の形状データ)を作成した。静的形状と同様に、VFで確認できない部分はcineMRIからの情報や、解剖学的な知識および解釈によって行った。すべてのオブジェクトの動的形状モデルを統合させたものが、嚥下動態モデルである。

3.2 食塊のモデル化<sup>(3)</sup>

食塊単体のモデル化であれば、食品そのものが有する物性値(粘度、密度、表面張力など)を利用すればよい。しかし、食塊の嚥下シミュレーションを行う場合は、食塊単体の物性値だけでなく、食塊と生体の接触表面における相互作用を考慮しなければならない。Fig. 4(a)に示す通り一般的な化学繊維などの表面は、静的な撥水性が高い(接触角が大きい)ほど、動的な撥水性(≒動きやすさ)が高い。一方、生体表面はFig. 4(b)に示す通り一般的な化学繊維などの挙動とは異なり、静的な撥水性が高い(接触角が大きい)ほど、動的な撥水性(≒動きやすさ)が低い。つまり、生体の場合、接触角が大きいほど、食塊が動く際の抵抗になると言える。



(a) Surface on chemical fiber (b) Surface on organs  
Fig. 4 Difference between surface on the chemical fiber and the human organ

これは、口腔内が湿っている場合と乾燥している場合では、乾燥している方が食物を飲みこみづらいという臨床的な経験からも理解できる。一般的な化学繊維と生体の表面特性の違いは、表面粗さに起因する毛細管現象による食塊

水分の壁面法線方向への吸い込み抵抗、また唾液などの存在に起因する生体表面上の滑水平面(ハイドロプレーン)の形成に伴う見かけ表面粗さの低減による親水化などに影響を受けると考えられる。よって生体表面と食塊の相互作用を内包したモデル化には濡れ性(≒撥水性)を考慮する必要がある。

SVでは、人の生体器官に近いと言われている豚の生体器官(舌、食道)<sup>(4)</sup>の接触角と、壁面におけるスリップ係数(≒壁面での見かけ粘度に影響)を、適宜パラメータフィッティングを行いながら調整し、食塊と生体表面の相互作用を考慮した食塊モデルとして採用している。

3.3 生体モデルと食塊モデルを統合した解析手法

嚥下時の食塊は短時間のうちに大変形ならびに飛沫を伴って流れるため、一般的な“メッシュ”と呼ばれる格子を解析対象空間に配置して計算する方法は、メッシュ作成の手間や計算精度の面などから適切ではないと考えた。そこでSVでは、流体の大変形や飛沫の取り扱いが可能な計算手法である粒子法を採用した。これは計算対象となる流体を微小な粒子と仮定し、その粒子ひとつひとつに流体的な挙動を示すための物性値を与えて計算を行う“メッシュフリー”の計算手法である。具体的には汎用3次元粒子法ソフトウェアParticleworks(プロメテックソフトウェア社)に、壁面の強制変形を行う独自のカスタマイズを施したソフトウェアをソルバーとして使用した。

SVは、3.1節で示した医用画像と解剖学的知見を駆使して作成した嚥下動態モデル、ならびに3.2節で示した生体表面と食塊の相互作用を考慮した食塊モデルをParticleworks上で統合し、複雑、かつ高速で変形・移動する食塊の挙動を物理的に模擬することが可能となった。

4. 解析結果の妥当性確認

数値シミュレーションを利用する場合は、その計算結果の妥当性を確認する作業が必要不可欠である。定性的な妥当性確認は、各時刻におけるVF画像とシミュレーション画像の食塊の位置や形状について比較することで行われた。各時刻においてシミュレーション結果は、喉頭蓋谷近傍の特徴的な食塊の形状をよく再現しており、SVは定性的に実現をよく模擬できていると考えられる。ある時間におけるVF画像とシミュレーションの定性的比較結果をFig. 5に示す。

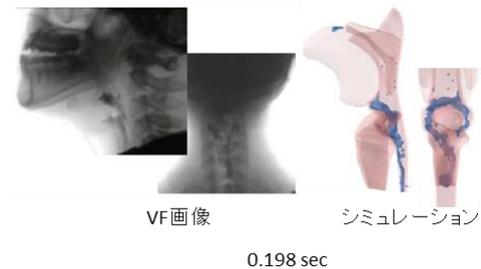


Fig. 5 Qualitative validation result of Swallow Vision ®

定量的な妥当性確認は、Fig. 6(a)に示した検査領域(喉頭蓋谷近傍)の輝度変化に着目し、嚥下中の最大輝度と最小輝度を用いて正規化した輝度の変化量とタイミングをVF画像とシミュレーションで比較することで行われた。Fig. 6(b)からわかるように、シミュレーションの正規化輝度はVF画像の輝度と比較して、変化量とタイミングがほとんど同じであった。以上のことから、SVによるシミ

シミュレーションは定量的にみても実現象を精度よく模擬できていると考えられる。

程度で、ほぼ一定の粘度で嚥下されていることがわかる。

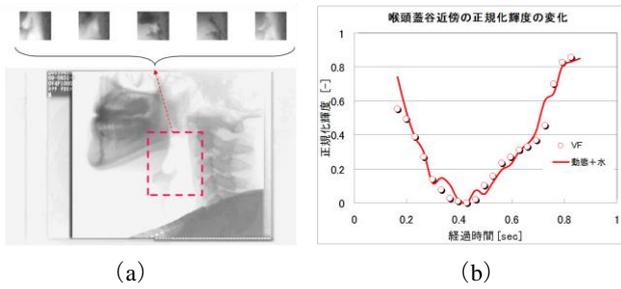


Fig. 6 Quantitative validation result of Swallow Vision®  
(a) Brightness changes in the red broken square:ROI on VF image, (b) Changes of normalized brightness in the ROI.

## 5. 嚥下時の食塊の可視化

### 5.1 健常者の嚥下の様子

Fig. 7にSVでの食塊の可視化結果を示す。上段はニュートン流体（水+造影剤）、下段は非ニュートン流体（とろみ調整食品+造影剤，明治：トロメイク SP:2wt%に調整）の嚥下時の食塊の様子を示す。

両方の解析結果は定性的ならびに定量的な妥当性が確認できている。図から分かるように、水は嚥下時に多数の飛沫を伴って飲み込まれるのに対し、とろみ調整食品では嚥下時に食塊がひとまとまりになって飲み込まれている様子が目視で確認できる。水嚥下中に飛沫が発生すると誤嚥のきっかけになると考えられる。このことから、嚥下時に飛沫発生が少ないとろみ調整食品は、飛沫を発生しながら飲み込まれる水より飲み込み易い物性の食品と考えられる。このようにSVによる食塊の可視化は、これまで明らかにされていない嚥下時の食塊の詳細な形状変化の情報から、さまざまな考察を行うことができる。

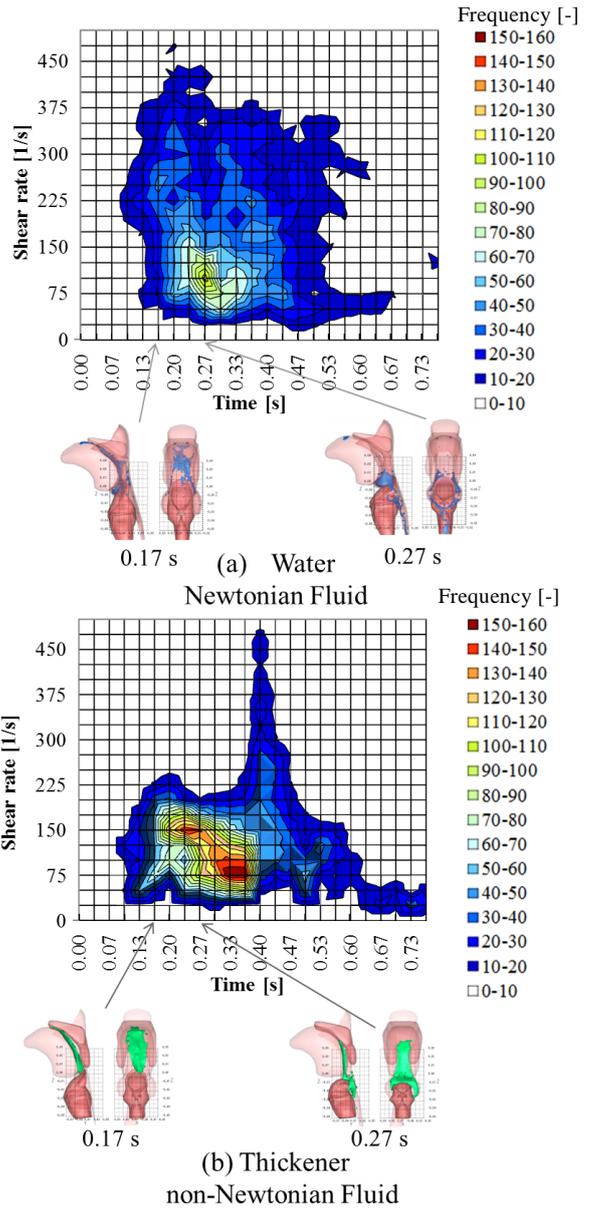


Fig. 8 Comparison of shear rate profile between water and thickener

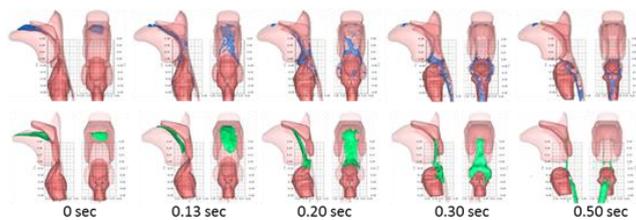


Fig. 7 Comparison of bolus configuration between swallowing  
(Upper : Water, Lower : Thickener:Tromake SP 2wt%)

## 6. 嚥下時に変化する食塊物理量の数値的な可視化

### 6.1 せん断速度の変化

SVは嚥下動作中の食塊の物理量の変化や生体に掛かる力についても抽出できる<sup>6)</sup>。Fig. 8に嚥下動作中に変化する食塊のせん断速度のプロファイルを示す。水と比較してとろみ調整食品のせん断速度の方がより分布が狭く、せん断速度頻度のピークも高いことがわかる。

### 6.2 嚥下中の物性値の変化

次に嚥下動作中のとろみ調整食品の粘度変化を Fig. 9に示す。とろみ調整食品は非ニュートン流体であり、嚥下動作中のせん断速度から粘度変化を計算できる。Fig. 8(b)に示した通り、とろみ調整食品のせん断速度分布は、ある程度確認できるものの、粘度に換算した場合、さほど大きな差になっていないことがわかる。このとろみ調整食品の場合、食塊が食道に流入するまでのピーク粘度は 200mPa・s

### 6.3 生体にかかる力の変化

次に食塊が生体器官に与える力の抽出結果について Fig. 10に示す。この図は生体を側方から見ており、鉛直上向きがZ方向、右向きがY方向である。各時間における食塊の位置、ならびにその時に生体器官にかかる力（≒生体が食塊を押している力）を抽出した。初期位置から時間進行とともに、食塊が移動し、その際に各生体器官にかかる力をグラフで表し、さらにその力の大きさと向き（ベクトル）を生体モデルの上に重ねて示した。図から分かるように舌以外の器官は、食塊の移送に伴い、ある特定の時間にしか高いピークの力を受けていないのに対し、舌は常に力を受けており、食塊移送中に何度も様々な方向に高い力のピークを観測することができる。つまり、舌はすべての時刻において他の器官と協調しながら食塊を送り込む、重要な役割をしていることがわかる。また、各生体器官にかかる力の合力（方向と大きさ）は食塊が移動する方向とほぼ等しいことがわかる。シミュレーションから抽出された力の大き

きさと向きから、実際の食塊の移動方向を説明できることから、本シミュレーションで使用している生体モデルのバイオメカニクス(形状変化と運動)は妥当であると考えられる。

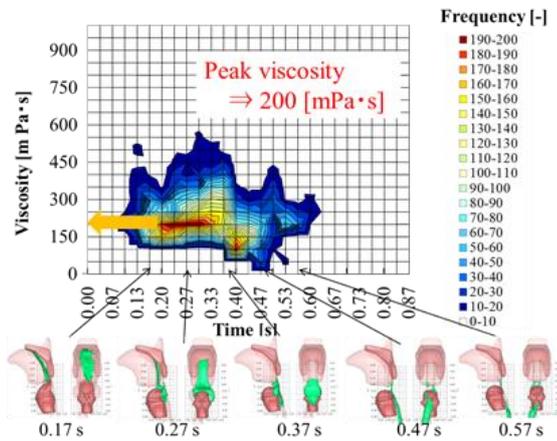


Fig. 9 Viscosity changes during swallowing

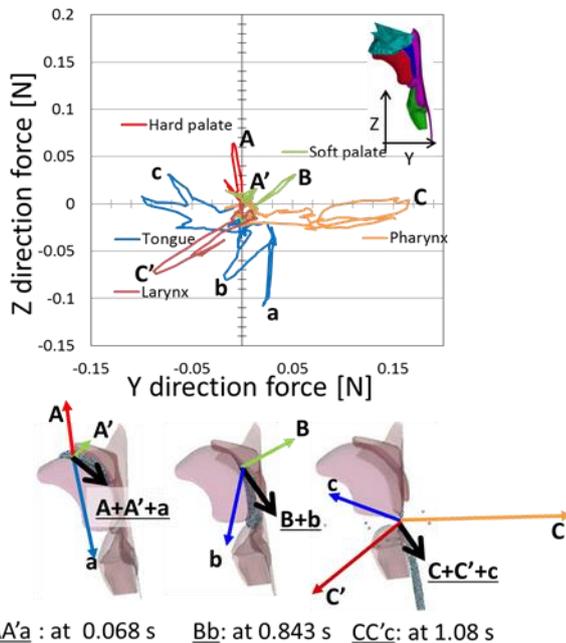


Fig. 10 Profile of forces on human organ and resultant force

#### 6.4 誤嚥粒子の可視化<sup>(6)</sup>

嚥下運動において食塊は高速かつ複雑に変形するため、誤嚥の原因を特定することは容易ではない。誤嚥した食塊の大きさや形状を医用画像上で特定することはできても、誤嚥食塊が口腔や咽頭をどのような軌跡で輸送されてきたか確認することは不可能である。そこでSVを用いて誤嚥食塊の軌跡を可視化し、正常嚥下した食塊との軌跡を比較することで、誤嚥の状況を確認した。SVを用いてとりも調整食品を正常嚥下する生体モデルに、水物性の食品モデルを嚥下させ意図的に誤嚥させた。次に誤嚥した粒子について汎用可視化ソフトウェア Micro AVS(サイバネットシステム)を用いて軌跡を可視化した。Fig. 11に誤嚥した粒子を赤、正常嚥下した粒子を青の軌跡で示した。

図より舌上の初期食塊位置に大きな違いは見られなかった。しかし、誤嚥粒子は咽頭通過時に正中近傍を通過する傾向が見られ、喉頭蓋を左右から回り込み、収縮中の梨状窩に押し込まれて誤嚥することが確認された。以上のように

誤嚥食塊の軌跡を追跡することによって、正常嚥下した食塊との差異が明確になり、より誤嚥原因を考察することが可能となった。

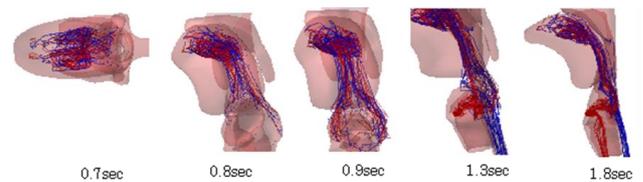


Fig. 11 Path lines of aspirated particle

#### 7. 結論

本稿では著者らが開発した立体嚥下動態シミュレータ“Swallow Vision®”における各種のモデル化手法と妥当性確認方法ならびにシミュレータから抽出される様々な情報の可視化結果とその意味について考察した。一般的に、食品を通してお客様に提供する価値としては、食の1次機能である栄養機能、2次機能である嗜好・食感機能、そして3次機能である健康性・生体調節機能の3機能が考えられる。一方で食の0次機能というべき、安全性、特に物性面における安全性や飲み込み易さについては、評価する指標が明確でないため議論されることが少ない。本稿で示したとおり、SVを使うことで、食品そのものが持つ0次機能として物性面における安全性について知見を深めることができる。またSVを用いることで、既存商品の評価に対してこれまでに無い新しい視点や評価軸を与えることが可能になり、隠れていた商品の価値を再発見してお客様に伝えられる可能性も考えられる。

#### 参考文献

- (1) 厚生労働省、平成25年度版人口動態統計
- (2) Y. Michiwaki, et al., How to Make a Three Dimensional Realistic Model for Human Swallowing, Proceedings of 35th Annual International IEEE EMBS transaction, 2013.
- (3) T. Kamiya, et al., 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), Proceedings of 35th Annual International IEEE EMBS transaction, 2013.
- (4) H. Ranca et al., Friction coefficient and wettability of oral mucosal tissue: Changes induced by a salivary layer. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Volume 276, Issues 1–3, Pages 155–161, 2006
- (5) T. Kamiya and Y. Michiwaki, Numerical visualization of human swallowing action and food bolus configuration with 3-dimensional swallowing simulator “Swallow Vision®” PART 2 : VISUALIZATION OF CHANGES IN LIQUID BOLUS PROPERTIES DURING SWALLOWING. Proceedings of 16th International Symposium on Flow Visualization June24–28, 2014, Okinawa, Japan.
- (6) 羽生圭吾, 立体嚥下シミュレータSwallow Vision®による正常と異常の解析 5) 誤嚥時の食塊の嚥下経路の可視化, 第21回 日本摂食嚥下リハビリテーション学会, 2015, 9.12.