

嚥下の数値シミュレータ Swallow Vision®の臨床応用一体位と粘度による食塊流れの相違一

## Clinical usefulness of swallowing simulator Swallow Vision®-Analysis of aspiration affected by positional changes and food bolus viscosity-

○道脇 幸博，菊地貴博（武蔵野赤十字病院），

神谷 哲，外山 義雄，高井めぐみ，羽生 圭吾（（株）明治 研究本部）

Yukihiro MICHIWAKI, Takahiro KIKUCHI (Japanese Red Cross Musashino Hospital)  
Tetsu KAMIYA, Yoshio TOYAMA, Megumi TAKAI, Keigo HANYU (Meiji Co., Ltd.)

**Abstract:** We have been developing a swallowing simulator Swallow Vision® to clarify biomechanics about swallowing and dysphagia. In this study, effects of changes of position and bolus viscosity were analysed to evaluate the usefulness of Swallow Vision®. Two types of numerical models were used, one was created from 25yrs healthy volunteer swallowing liquid of 3ml with 2.5mPa·s, the other was from 82yrs mild dysphagia patient also swallowing liquid of 3ml with 2.5mPa·s. The results analyzing affects of bolus viscosity showed that lower viscosity caused aspiration before and after swallowing and that higher viscosity caused aspiration after swallowing. The position change effects were different between the two models, which seemed that position change effect to prevent aspiration is yet controversial and should be valued more in detail. In conclusion Swallow Vision® will be useful as a tool to numerize clinical knowledge and make the biomechanics clear.

**Key Words:** Swallowing, Numerical simulator, Position, Viscosity

### 1. 背景

高齢社会の進行にともなって、高齢者の肺炎が急増している。例えば、肺炎による死は、脳卒中を抜いて、直接死因の第3位になった（平成23年度以降）。その80%以上は、誤嚥性肺炎である。すなわち、肺炎死が増加したのは、高齢者の誤嚥性肺炎が急増しているからである。今後、世界的に高齢化が進行することから、誤嚥性肺炎は、さらに大きな課題になろう。

一方、誤嚥性肺炎は、特定の細菌による肺炎ではないので、例えば肺炎球菌ワクチンによる予防効果はない。根本的な予防策は、嚥下機能の維持と嚥下障害の改善、ならびに誤嚥性肺炎の発症予防であるが、有効な対策は出せていない。嚥下と嚥下障害の仕組み（バイオメカニクス）が明らかにされていないからである。

嚥下は、食塊を胃に移送するプロセスである。また口腔と咽頭が気道を兼ねているために、嚥下には、呼吸を守るプロセス（誤嚥防止）も含まれている。

そのため、嚥下のバイオメカニクス解明研究は、食物の位置と流れ（以下、食塊の流れ）、時々刻々と変わる器官等の位置と形態の経時的変化（以下、器官の運動）、および両者の関係を明らかにする必要がある。しかし、CTやMRIを含むどんな計測法も、食塊の流れと器官の運動を十分には計測できない。嚥下のバイオメカニクス解明のボトルネックは、この計測の不十分性である。

そこで、われわれは嚥下の数値シミュレーション（Swallow Vision®）によるバイオメカニクス解明研究を行っている。

### 2. Swallow Vision®の概要

#### 2.1 生体のモデリング法

先行研究<sup>1,2)</sup>と同様に、健常被験者（25歳男性）と軽度誤嚥患者（82歳男性脳梗塞）のCT画像ならびにX線造影剤を嚥下したときの嚥下造影画像（以下VF）を基に、以下のように、生体の形状と運動を再現した。

まず、CT画像から各器官のサーフェスデータを作成した。次に、サーフェスデータをVFの嚥下開始前の首の角度と喉頭の高さに合うように変形して形状モデルを作成した。次いで、嚥下の運動を模擬するために、生体の一部の粒子に強制変位を与えた。強制変位を与える部分（Control Region, 以下CR）は各器官の役割や解剖学的特徴を考慮して配置し、変位は時刻ごとにVF動画に一致するよう設定した。CR以外の生体の粒子は、CRの移動によって受動的に運動する設計である。

#### 2.2 食塊のモデリング法

計算法は、大変形に適した粒子法、特にMPS（moving particle simulation）法に基づく市販のソフト（Particleworks, 構造計画研究所）をカスタマイズして使用している。量、表面張力、接触角、スリップ係数、粘性（power-law model）などを規定できる。量や粘性、接触角、表面張力については、実測値を考慮している。

#### 2.3 妥当性確認(Validation)法

##### 2.3.1 定性的評価

VFとシミュレーションモデルでの食塊の流れを、側面像で時刻毎に対比している。シミュレーションは、VFやCTでは不明瞭な舌や咽頭などもモデル化しているため、画像の対比とは別に、それらの器官の運動と食塊の流れの整合性も検証している。

##### 2.3.2 定量的評価

VFで最も輝度変化を識別しやすいのは、喉頭蓋近傍である。そこで、喉頭蓋近傍の食塊流れを正規化輝度によって算出する方法を考案し、側面像と背面像で確認している。

### 3. 研究目的

本研究では、食塊の粘度と体位による誤嚥リスクの相違についてSwallow Vision®を使って解析した。

### 4. 研究方法

#### 4.1 使用した生体モデルと食塊モデル

生体モデルは、先述の方法で作成した 25 歳の健常男性と 82 歳の軽度誤嚥患者の数値モデルである。食塊モデルは、密度や表面張力、量等を変えず、粘性のみを変えた 3 種類の数値モデルである。

4.2 食塊の粘度による誤嚥リスクの比較

ニュートン流体 2.5mPa・s を正常嚥下する 25 歳健常男性の生体モデルを使って、1 mPa・s と 100 mPa・s を嚥下した時の誤嚥の有無と型を解析した。

4.3 体位の変更による嚥下量と残留量，誤嚥量の変化

嚥下障害者に対する至適体位に関しては、リクライニング 30～60 度とする見解と座位とする見解がある。そこで、座位で嚥下した 25 歳健常男性と 82 歳軽度誤嚥患者の数値モデルを使って、体位を水平位，30° 挙上位，60° 挙上位に変更した時の，嚥下量と咽頭残留量ならびに誤嚥量を解析した。なお嚥下運動は，座位の時と同じ，食塊モデルの粘度は 2.5mPa・s で，その他は前述 4.1 項と同じ条件である。

5. 結果

5.1 食塊の粘度による誤嚥リスクの比較

2.5mPa・s の液体を正常嚥下する数値モデルに，より粘度が低い液体（1 mPa・s）を嚥下させた時には，嚥下運動中と嚥下運動後に誤嚥した。詳細にみると，喉頭蓋が反転する前に喉頭内に入った液体のうち，一部は嚥下中に気管内に侵入（誤嚥）した。そして，声門上に残留していた残りは，嚥下後の声門が開いた時に，気管内に侵入した（誤嚥）。すなわち，嚥下運動に比べて食塊の流れが速すぎるのが誤嚥の原因であった。

粘度が高い液体（100 mPa・s）を嚥下させたときには，嚥下終了後に誤嚥しており，嚥下運動に比べて食塊の流れが遅すぎるのが原因であった（Fig. 1）。







	During Swallowing	After Swallowing
<b>Viscosity:1mPa・s</b> (Newtonian Fluid)		
<b>Viscosity:2.5mPa・s</b> (Newtonian Fluid)		
<b>Viscosity:100mPa・s</b> (Newtonian Fluid)		

Fig.1 Viscosity affects aspiration risk-25yrs male model-

5.2 体位による誤嚥リスクの変化

座位で健常嚥下する 25 歳男性モデルでは，水平位では残留量が増加し，30° と 60° の挙上位では，残留量は増えなかったが誤嚥量が増加していた（Fig. 2a）。

82 歳軽度誤嚥患者モデルでは，水平位で残留量が増加した以外は，大きな変化はなかった（Fig. 2b）。

6. 考察

実臨床での誤嚥検査の Gold Standard は VF である。VF

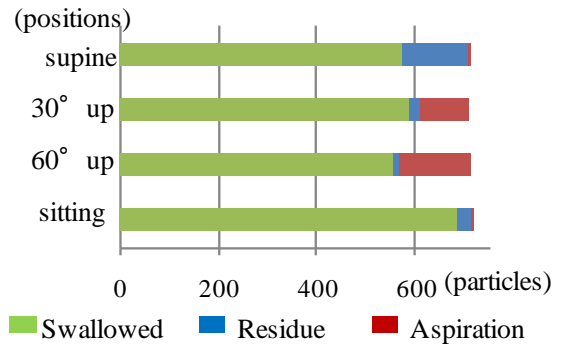


Fig.2a. Positions affect aspiration risk-25yrs male-

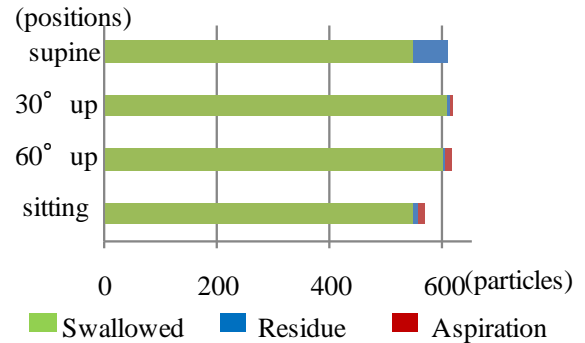


Fig.2b. Positions affect aspiration risk-82yrs male-

で，至適粘度を検討する場合，造影剤に加える増粘剤を増減して，粘度の異なる検査食を作り，これらを実際に飲んで貰って，X線透視下に誤嚥の有無等を判断する。被験者は，数回のX造影検査を受けることになり，X線被曝に加えて，検査中に誤嚥するリスクを伴う。さらにそのリスクを冒したにも関わらず，用意した粘度では至適粘度を決定しかねることもある。至適体位の決定でも同様である。

これに対して，数値シミュレーションでは，机上で予備実験を試行し，予測を立てることができる。その上で，実際のVF等の検査に移行すれば，一義的には被験者の負担軽減ができる。

また予測と実検査の一致度の検討を通じて，シミュレーションの改良と予測の精度向上を図ることができる。すなわち，実臨床の経験知が数値化されて蓄積されていく。

数値化された経験知は，客観化と普遍化の過程に入り，広く活用されやすくなる。嚥下の数値シミュレーション（Swallow Vision®）は，臨床の経験知を数値化するツールとしても極めて有用であると考えられる。

7. 結論

嚥下の数値シミュレーション（Swallow Vision®）の解析例として，粘度と体位の違いによる誤嚥型や誤嚥リスクの相違を数値化して提示した。さらに研究を進めて，臨床の経験知の数値化，ならびに嚥下のバイオメカニクス解明に活用していく予定である。

参考文献

- 1) T. Kikuchi, Y. Michiwaki, T. Kamiya, et al.: Human swallowing simulation based on videofluorography images using Hamiltonian MPS method. Computational Particle Mechanics: Volume 2(3) p: 247-260, 2015
- 2) 道脇幸博: 舌・舌骨・喉頭の下垂と誤嚥のリスク—数値シミュレータ Swallow Vision®による解析—。臨床バイオメカニクス, Vol. 35:91-98, 2014