

<平成23年度助成>

摂取一口量と摂食姿勢を考慮した むせにくい高齢者用液状食品のレオロジー特性

*水沼 博・**道脇 幸博

(*首都大学東京、**武蔵野赤十字病院)

Key Words:

Swallowing, Liquid Foods, Rheology, Bolus, Posture, Video Fluorography, Numerical Simulation

1. 緒 言

食べたものがむせて肺に入り、雑菌が繁殖し肺炎となる誤嚥性肺炎は嚥下機能が低下した高齢者や、後遺症の残った脳血管障害の患者にとって大きな問題である。摂取一口量や摂食姿勢も誤嚥に関係し、しかも、嚥下動作は観察しにくい咽喉で主に起こり、1秒以下の短時間に終了し、個人ごとに特徴が異なる。X線ビデオ造影検査(Video Fluorography, VF)は嚥下障害の有効な診察法であるが、X線被曝や造影剤の誤嚥の危険があるため、その検査を支援する新たな診断手法が求められている。

誤嚥性肺炎を予防するために飲み物に対して増粘剤が添加されている。増粘されると一般にむせにくくなることが知られている。この理由は、粘度の増加が食塊の分散を抑制し、嚥下速度を低下させる効果があるためと考えられている。平成6年に厚生省が策定した高齢者用咀嚼・嚥下困難者用食品の粘度基準では単一円筒回転粘度計による測定で $1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上の粘度とされている。単一円筒回転粘度計はB型粘度計ともよばれ、試料中に回転円筒を浸し、その円筒に働くトルクから粘度を算出する粘度計である。欠点として、測定に数100cc程度の多くの試料を必要とし、液状食品によく見られる非ニュートン粘性の強い試料に対しては正確な粘性特性を測定できない点があげ

られる。増粘させるほど誤嚥が抑制されるとは限らず、かつ過度な増粘は食欲を減退させてしまうから、簡単に操作でき、かつ精度の良い粘度計が求められている。調理の現場でも利用可能な簡便な測定法としてガラス板上でガラスリング内側に試料を満たし、引上げた際の試料の広がりから、降伏値や粘度を推測する測定法が中濱ら(1997)により報告されている。この測定法は簡単である反面、ずり速度が定義できないなどの欠点がある。下笠ら(2007)は現場で簡単に使用することができる携帯型の回転粘度計を提案した。しかし、これら粘性特性と誤嚥の関係は十分明らかになっていない。

食塊の嚥下は、嚥下機能、姿勢や食塊レオロジー特性だけでなく食塊と咽喉のすべりにも依存する。一般に、液体が固体壁面上を流れるとき、壁面上で流体速度はゼロであるとするすべり無し境界条件が成り立つ。一方、食塊は嚥下のときに粘液で覆われた粘膜上をすべる。粘膜粘液が食塊粘度より十分低いとき、粘膜粘液は食塊の嚥下に対して潤滑液のように働き、粘液がない場合と比較すると、より少ない摩擦抵抗で食塊が嚥下される。このような粘膜粘液上の食塊摩擦は、固体食塊の場合にはRancら(2006)及びPrinzら(2007)により豚の粘膜上で、またMizunumaら(2009)により人工の粘膜上で測定された例があるものの、液状食塊の場合にはほとんど研究されていない。

本研究は、誤嚥抑制に最適な液状食品のレオロジー特性を摂食条件を含めて明らかにすることを

目的とした。現在一般的に用いられている増粘剤水溶液の各種レオロジー特性を調べるとともに、そのレオロジー特性のひとつである降伏応力の簡易測定法に関する検討を行った。また、レオロジー特性として、嚥下時の食塊のばらつきを抑制する効果をもつ伸張粘度に着目した。すなわち、伸張粘度が高いと山芋のように曳糸性を示すが、山芋は喉ごしが良くかつ経験的に嚥下障害者の誤嚥を抑制すると言われている。また、患者への負担を最小限としつつ精度の高い嚥下動作の予測を行うことを目的に、X線ビデオ造影検査の役割を補完する嚥下シミュレーションの利用についても研究を進めた。

2. 方 法

2.1 試料(液状食品)

本研究では主に以下の試料を用いた。

- ① 水飴
- ② 嚥下障がい者用とろみ調整増粘剤(つるりんこ、クリニコ)
- ③ 山芋(銀杏芋、千葉県産、**図1**)、粉末山芋(山芋パウダーお好み焼き用、ブランケネーゼ)
- ④ ヨード含有水性X線造影剤イオバミドール(オイパロミン300、コニカミノルタ)

水飴は3.1で述べるように比較的粘度は高いが、粘度はずり速度によらず一定となり、ニュートン流体とみなすことができる。一方、増粘剤水溶液は粘度も高く非ニュートン粘性を示す。山芋はすりおろしたとろろとして使用し、開口部0.5mm四方の金網を通すことにより固形粒子の粒度を調整した。とろろのまま固形分と液状部分に分離することは困難である。加熱乾燥後のとろろ固形分質量を測定し、その質量からとろろの固形分濃度は34w%とした。また、比較のためにフリーズドライ粉末山芋も試料として使用した。この山芋はフリーズドライ後に粉末加工したものであり、水を加えてとろろにする。扱いが便利な利点

がある。造影剤④はヨード含有率300mg/mlの透明液体で、密度 1340kg/m^3 、粘度 $8.2\text{mPa}\cdot\text{s}$ (20°C)のニュートン粘性流体である。この造影剤のみの嚥下は、水などの低粘度の飲料の嚥下を調べるために用いた。また、X線造影撮影のため、造影剤は水飴に対して質量濃度40w%、増粘剤水溶液に50w%の濃度で添加した。X線造影撮影用のとろろには、すりおろしたとろろの固形分濃度が20w%となるよう、造影剤を添加した。造影剤を添加したとろろは、遠心分離により固形分を主とする成分と粘質物質が溶解した造影剤溶液に分離できる。**図2**はすりおろした直後のとろろの造影剤水溶液を回転速度3500rpmで20分間遠心分離させた試料であり、これらの上澄みの粘液と沈殿固形分(**図3**)に分離した試料もそれぞれレオロジー特性の測定対象とした。



図1 銀杏芋(生山芋)



図2 遠心分離後の山芋固形分と粘質物質の造影剤溶液

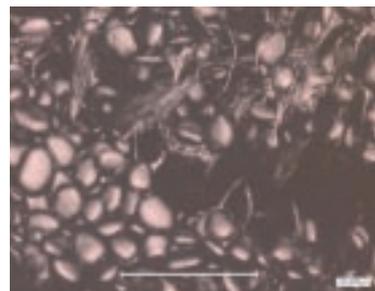


図3 レーザ顕微鏡によるとろろ固形分の撮影写真(スケールの長さは $100\mu\text{m}$)

2.2 単純流れ場における流動特性

A. ずり流れ

ずり流れとして回転式レオメーターを用いた。回転式レオメーター (Haake RS-600, Thermo Fisher、**図4**) は**図5**に示すように円錐と平板間、あるいは平行円板間に試料を満たし、回転円錐 (または円板) と固定円板間にずり流れを作る。山芋のとろろは粒径 0.5 mm 以下の固形分を含むため、それら粒子が円錐と平板のすきまには入り込み、測定誤差の生ずる可能性がある。したがって、山芋とろろの場合は平行円板間の流れを利用し、円板間隔 $h=0.5$ mm、円板直径 $D=35$ mm とした。平行円板間のずり速度 γ は $\gamma=r\omega/h$ と半径位置 r により変化してしまう。その流れは主として外周部 $r \cong D/2$ により支配されるものの、厳密さを欠く。したがって、その他の単相の溶液に対しては円錐平板間の流れを用いた。ずり速度 γ は円錐と平板間の角度 θ と円錐角速度 ω より $\gamma=\omega/\theta$ と求まり、半径位置 r によらず一定となる。これら回転ずり流れにより回転円板または円錐に働くトルクを測定し、ずり応力 τ を求めた。ずり粘



図4 回転式レオメーター

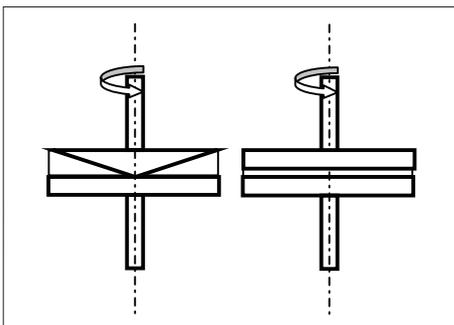


図5 円錐平板(左)、平行円板(右)

度 η は $\eta=\tau/\gamma$ より求めた。標準では一つのずり速度あたり、10 s の測定時間とした。試料液温は 20 °C とした。

B. 伸張流れ

伸張流は円板間に挟んだ液体の柱が表面張力によりその液柱直径を細くしていく流れを利用し、伸張応力と伸張速度の比から伸張粘度を求める。まず**図6**に示す直径 1.5 mm の上下2つの円板間に試料を充填し、液柱を作る。その後、各円板をリニアモーターにより上下に移動させ、液柱を一定の伸張速度 74 s^{-1} で伸張させる。上下の円板は、間隔 0.2 mm から 1.2 mm に移動した後に運動を停止し、伸張して直径が小さくなった液柱はその後に時間 t の経過とともに表面張力 σ により液柱直径 $D(t)$ をさらに縮小させる。伸張粘度 η_E はこの $D(t)$ の測定より Papageorgiou (1995) の方法に基づき

$$\eta_E = (2X - 1) \frac{\sigma}{dD(t)/dt} \quad (1)$$

として求めた。ここで、 X は補正係数で、McKinley and Tripathi (2000) らの結果に基づき、 $X=0.7127$ とした。高速ビデオカメラ (Memrecam GX-1 Plus, NAC Imaging Technology) により液柱形状をモニターし、伸張方向に均一な伸張流が作られていることを確認しながら、液柱の高さ方向中央の直径を LED/CCD 光学センサー (LS-7000, Keyence) により測定した。表面張力は Wilhelmy 法による表面張力計 (CBVP-Z, 協和界面科学) を用いて測定した。

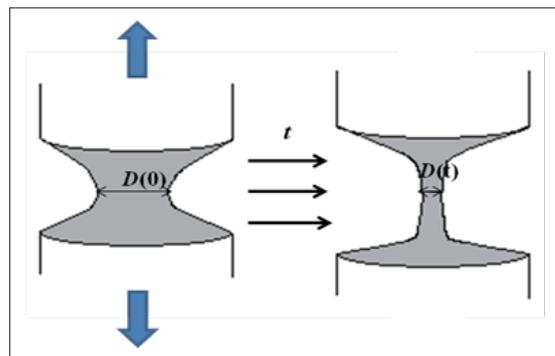


図6 表面張力による液柱直径の変化を利用した伸張粘度の測定

C. 簡易測定 (スプーン及び傾斜平板)

嚥下困難者用の液状食品の粘度を分類し、簡易的に判定する試みが幾つか試みられている。比較的よく利用されている方法にスプーンを傾けたときのこぼれ方をみて判定する方法がある。図7は日本介護食協会で例示されている図である。上記AやBの測定を介護や医療の現場で利用するのは困難であり、嚥下障がい症状に適した簡易的測定方法の開発と検証が求められている。ここでは、図7に示すスプーンによる粘度判定の検証を行うとともに、比較的簡単な傾斜平板を用いる方法についても、その測定精度の検討を行った。スプーンにより粘度範囲を判定する実験では、図7に示すところみのうち、フレンチドレッシングに相当するところみ調整食品をえらんだ。その食品をスプーンにとり、モーターで一定角度に傾け、そのときにスプーンから食品がこぼれる様子と角度の関係を調べた。

【ところみの目安の表示例】

ところみの強さ	+++++	++++	+++	++
ところみのイメージ	フレンチドレッシング状	とんかつソース状	ケチャップ状	マヨネーズ状
イメージ図				
使用量の目安	← 1g →		← 2g →	← 3g →

水・お茶100mlあたり

図7 スプーンによる粘度(ところみ)の簡易的判定
http://www.udf.jp/about/toromi.html

傾斜平板法は図8に示すように、流体を水平な平板上に厚さ h となるように置き、平板の傾斜角度を0度から徐々に傾けていき、流動が始まる時の角度 θ を測定する。この方法は流体の塑性的性質として降伏応力 τ_y を測定するものであり、Paslay and Slibar (1958) により導かれた関係式

$$h = \frac{\tau_y}{\rho g \sin \theta} \quad (2)$$

に流動が始まる角度 θ と流体厚さ h を代入し、 τ_y を測定する。測定用の供試流体にはキサントタン系増粘剤(つるりんこ水溶液、クリニコ)を使用し、

濃度は0.8~3.0w%の間で変化させた。

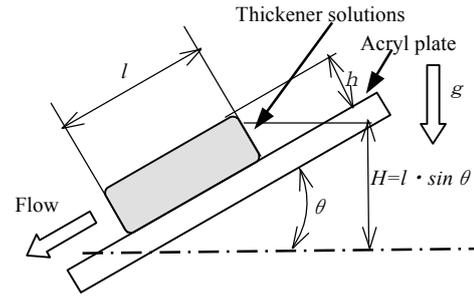


図8 傾斜平板による降伏応力の測定

D. 食塊のすべり

液状食塊の粘膜粘液上のすべり特性を調べるため、図8の降伏応力測定用の傾斜平板を食塊の流動が生じ得る角度に一定に傾け、食塊がこの平板上を滑り落ちる様子を観察した。平板表面はアクリルの乾燥面と、唾液で覆われた咽頭粘膜を模擬した人工粘膜面の2種類とした。人工粘膜は図9に示すように水溶性の高分子 Polyethylene oxide (PEO-15, Mw 3.6 x 10⁶, 製鉄化学) を、常温では水に溶けない Polyvinyl alcohol (PVA124, クラレ) をつなぎとして壁面に固定した面である。Mizunumaら(2009)はこの湿潤状態の人工粘膜面上で、ゼリーの摩擦係数を測定し、豚の咽喉粘膜とほぼ同等の摩擦係数が得られることを報告している。

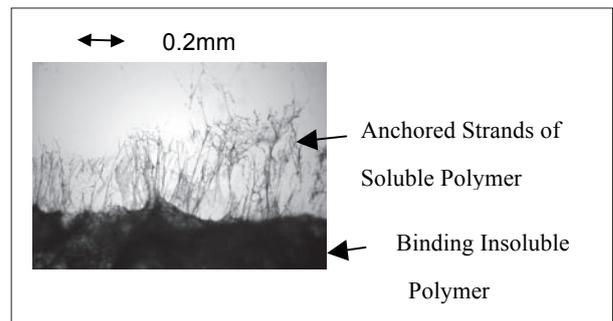


図9 高分子被膜による湿潤した人工粘膜

すべりの影響は高粘度の食塊ほど大きな影響を受けると推測されるため、試料としては高粘度の水飴、増粘剤溶液、山芋とろろとした。これらの試料はいずれも2.1で述べたものであり、造影剤溶液を含んでいる。水平な平板上に試料を円板状

に配置し、その後に平板を一定角度に傾け、その後の平板上の食塊流動をカメラで撮影した。

2.3 ビデオ嚥下造影撮影と嚥下の数値シミュレーション

表1に示す条件の下でビデオ嚥下造影撮影 (Video Fluorography, VF) を被験者に対して実施した。撮影の目的は主として試料粘性特性が嚥下に及ぼす影響を、被験者の姿勢を変えて評価する点にある。試料容積は標準で5ccとし、10ccと増やしたときの嚥下の変化、及びリクライニング角度を変えたときの嚥下の変化についてもVF測定を行った。被験者は健常な成人男性とした。本研究は武蔵野赤十字病院の倫理委員会の承認を得て行い、全ての被験者から、研究の説明の理解と参加への同意を試験前に書面にて得た。撮影は武蔵野赤十字病院において実施した。

VF測定はX線被爆のため取得データの量に

制限がある。また、X線の陰影は造影剤だけでなく骨などの影響も受けるため、取得画像から識別する食塊輪郭の分解能に関しても制限がある。このような測定の制約を補完する目的で、著者らは嚥下の数値シミュレーション手法を開発してきた (Mizunumaら (2009), Sonomuraら (2011))。本研究においても、VFの結果をより詳細に検討するため、食塊の速度と広がり大きい低粘度の造影剤溶液の場合について、数値シミュレーションの結果と比較検討した。計算方法はSonomuraら (2011)の方法と同じとした。また、食塊のまとまりが良く、VFの食塊輪郭が明瞭な高粘度食塊については、その輪郭測定をもとにして食塊内部の流動を数値シミュレーションし、その食塊の流動過程を定量的に検討する方法を開発した。すなわち、図10に示すように、側面と正面のVF画像(a)からまず食塊部分の2次元的輪郭座標をとりだす

表1 ビデオ嚥下造影撮影の条件

	VF 評価項目	試料	姿勢 (撮影)	試料容積	被験者
①	試料粘性特性 (直立姿勢)	造影剤溶液	直立 (正面/側面)	5 cc	健常者男性 (61歳)
		水飴			
		増粘剤溶液 山芋とろろ			
②	試料粘性特性 (リクライニング姿勢)	造影剤溶液	150度リクライニング (側面)	5 cc	健常者男性 (20歳)
		水飴			
		増粘剤溶液 山芋とろろ			
③	試料容積	山芋とろろ	直立 (正面/側面)	5 cc	健常者男性 (61歳)
				10 cc	健常者男性 (24歳)
④	傾き角度	造影剤溶液	120度 (側面)	5 cc	健常者男性 (45歳)
			150度 (側面)		

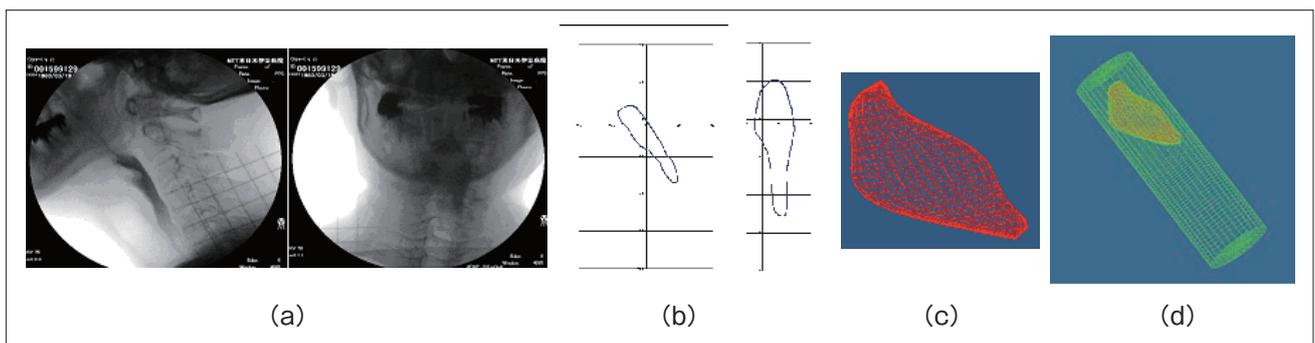


図10 VF画像に基づく食塊内部流動のシミュレーション～側面・正面からVF撮影し(a)、食塊の輪郭を抽出し(b)、食塊の3D FEMモデルを作成し(c)、食塊輪郭の時間変化に対応する内部流れを計算(d)

(b)。得られる同時刻の正面と側面の輪郭座標を組み合わせることで3次元輪郭モデル(c)を作成する。作成のとき、2次元食塊輪郭の座標データは100点前後とし、3次元の食塊表面輪郭は鉛直方向と水平周方向に均等に分割する。これらの作業を嚙下の連続する複数時刻に対して行い、食塊輪郭の時間的変化を表す時系列データとしてまとめ、汎用構造解析ソフトLS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.)を用いて食塊内部の流れを計算した。食塊内部流れを解析する手法としてALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 法を用いた。ALE法は構造体解析に用いられるLagrange要素と流体解析に用いられるEuler要素の2つの要素を併用する方法で、要素が大変形する場合の解析をすることができる。食塊モデルを覆うように円柱状に計算領域となるメッシュを設定し(図10(d))、その設定したメッシュ領域内に食塊輪郭を定義し、食塊内部をALE要素で満たした。モデル化した嚙下時の食塊輪郭の変形に従う食塊内部の流動を数値解析した。

3. 結果と考察

3.1 液状食品の単純流れ場における流動特性

A. ずり流れ

造影剤溶液と水飴造影剤溶液は粘度がずり速度によらず一定のニュートン流体であり、粘度は

20℃でそれぞれ8.2mPa・s及び0.62Pa・sである。これら以外は全て粘度がずり速度によって変化する非ニュートン流体である。図11は円錐平板レオメーターにより測定した増粘剤の造影剤水溶液に対する粘性特性を示す。増粘剤濃度は1w%とした。粘度 η は(b)に示すようにずり速度とともに減少し、典型的な嚙下障がい者用とろみ液の粘性特性を示す。水飴造影剤溶液と比較すると、ずり速度が約60s⁻¹で粘度は等しいが、これより低いずり速度では増粘剤溶液の粘度は水飴の粘度より高く、高いずり速度では逆に粘度は低い。

すりおろしたままの山芋とろりの粘性特性を図12に示す。平行平板レオメーターにより測定した。ずり応力は一般にずり速度とともに増加するが、測定結果は(a)に示すようにずり速度60s⁻¹近くで急に低下した。ペースト状の食品ではしばしば粘度測定時に壁面スリップが観察され(HallidayとSmith(1995), Plucinskiら(1998))、スリップの発生とともに図12(a)のようなずり応力の低下が生ずる。粘弾性の強い流体でしばしば観察される、平行平板間の測定部から試料が流出するような不安定現象は観察されず、したがって山芋とろりにおいても壁面スリップが生ずると推測される。高いずり速度での急激なずり応力の低下はとろりの造影剤溶液でも図13に示すように測定された。低粘度の造影剤溶液を加えているため、粘

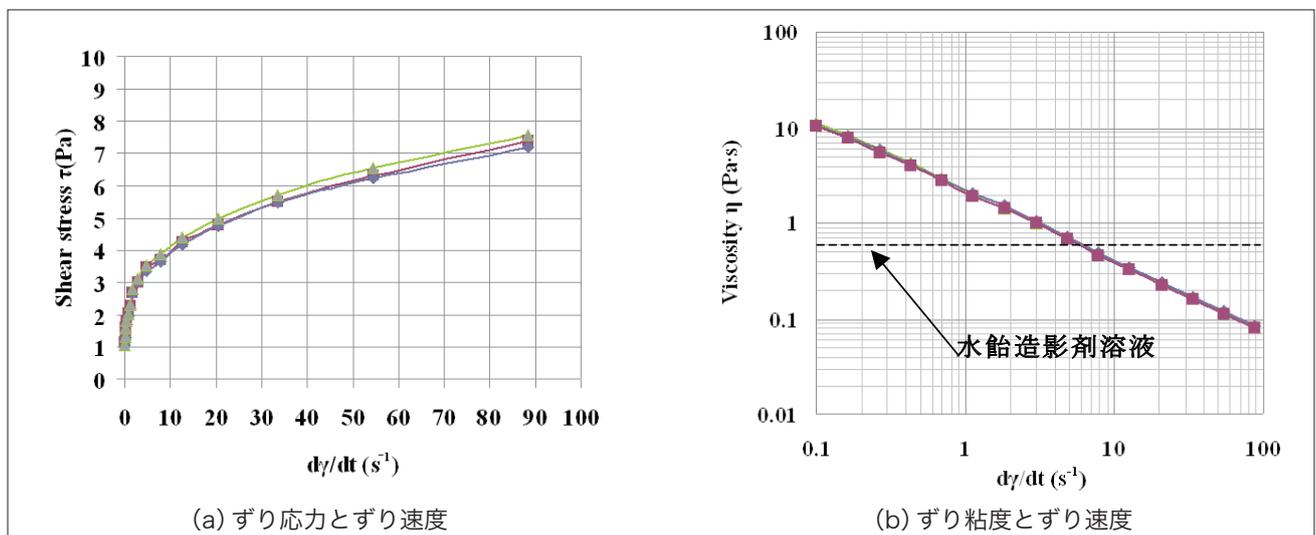


図11 増粘剤の造影剤水溶液の粘性特性

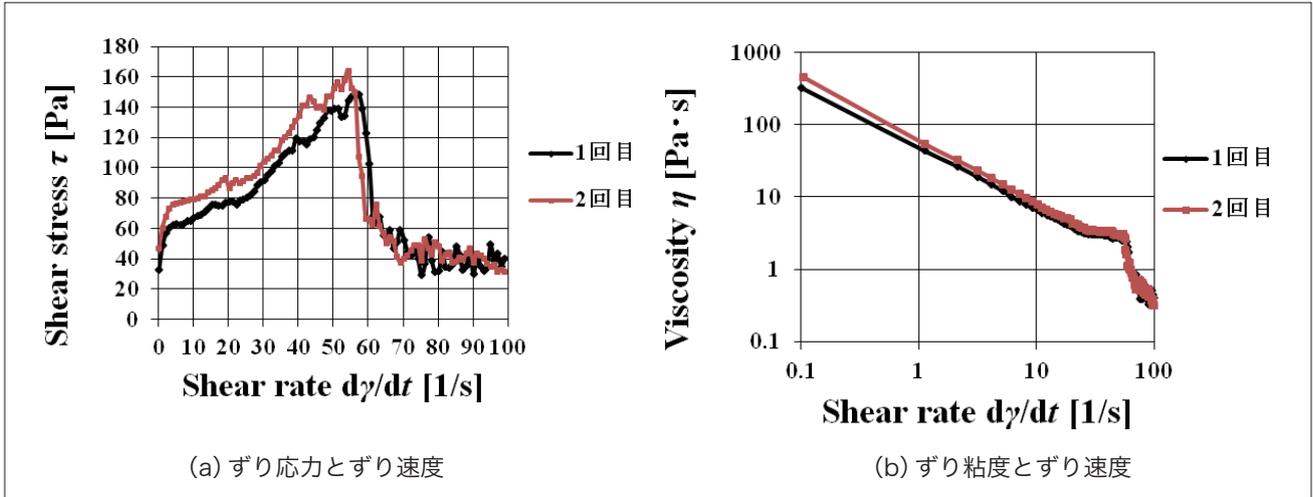


図 12 山芋とろろのみの粘性特性

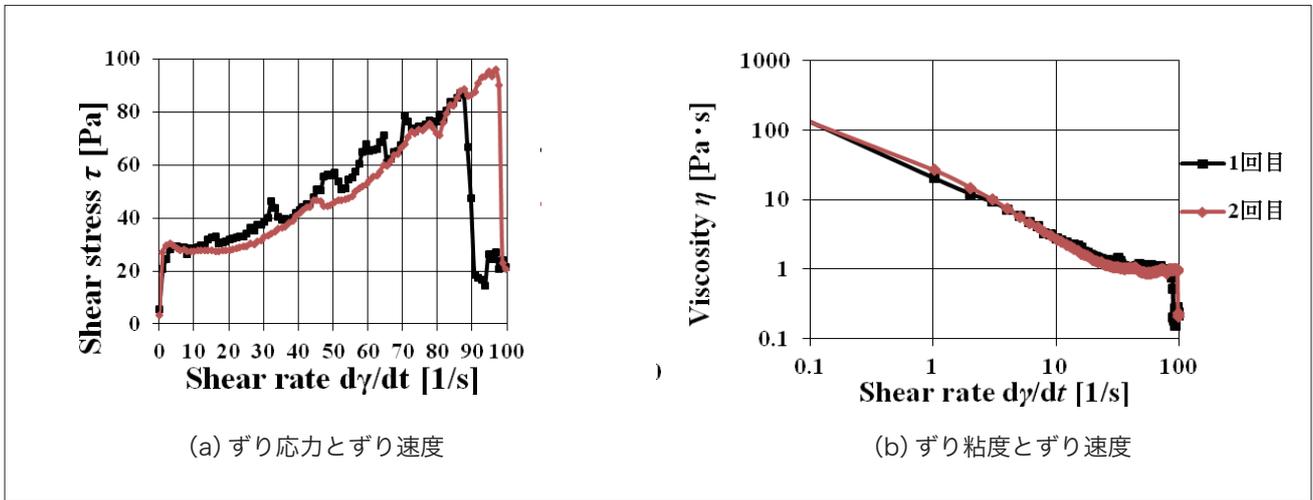


図 13 とろろ造影剤溶液の粘性特性

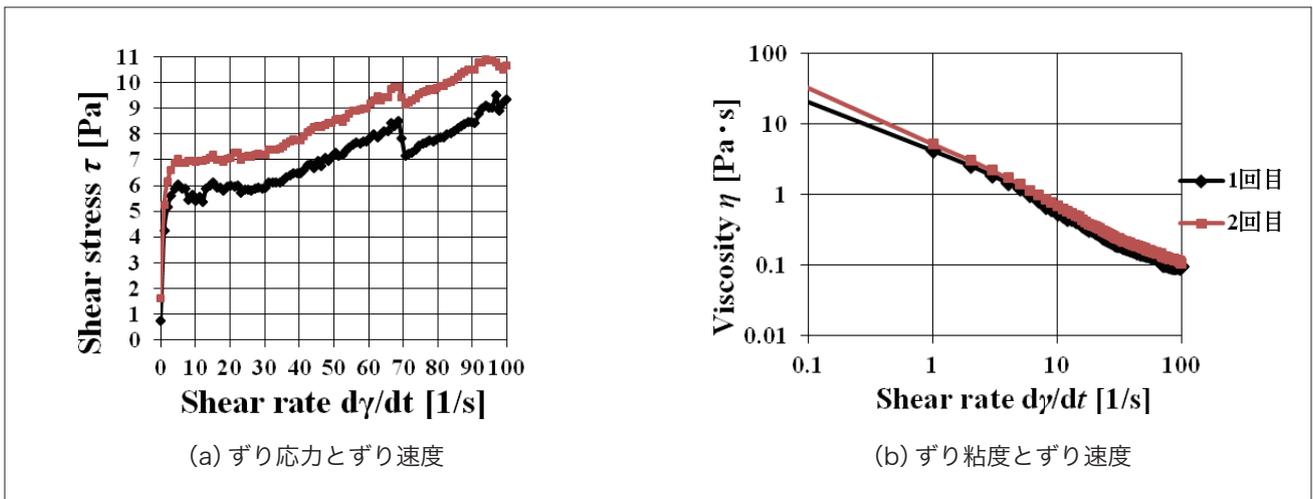


図 14 とろろ造影剤から遠心分離した粘液の粘性特性

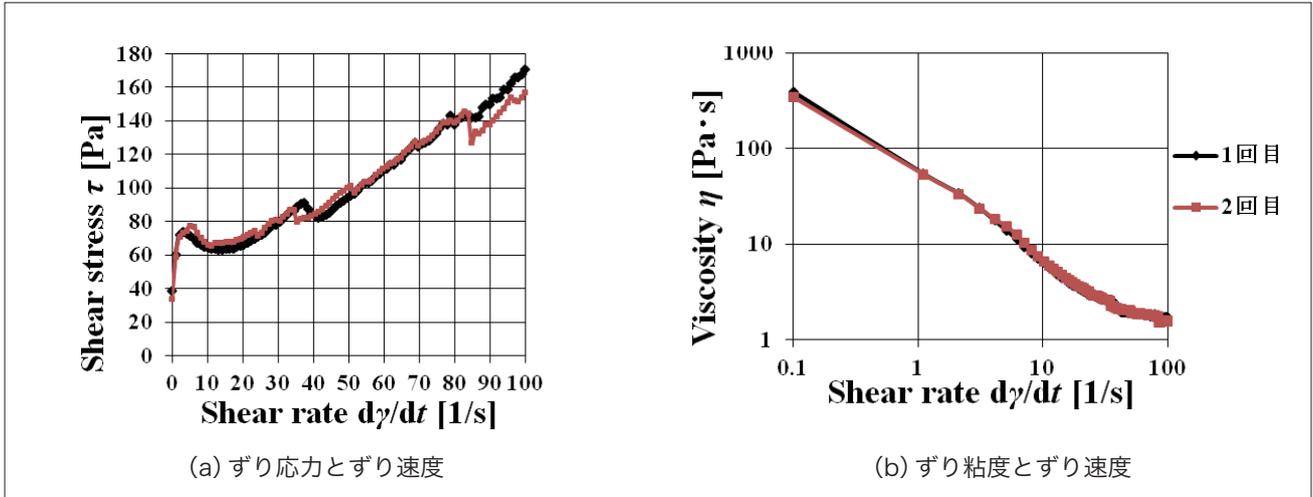


図 15 とろろ造影剤から粘液を遠心除去した成分の粘性特性

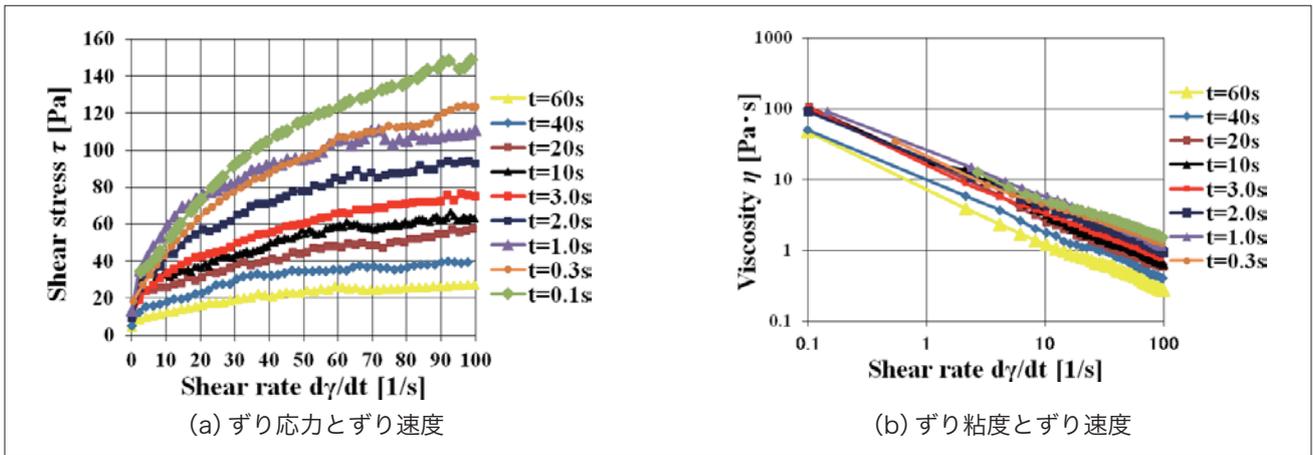


図 16 粉末山芋 24w%水溶液の粘性特性

度はとろろのみの場合に比べ低く、ずり応力の低下が生ずるずり速度は高くなっているが、図12と13の定性的なずり速度依存性はよく似ている。一方、とろろの造影剤溶液から遠心分離された上澄みの粘液と沈殿成分の粘性特性は図14と図15に示すように測定ずり速度の範囲ではずり応力の急激な低下は観察されなかった。比較のために測定した、粉末山芋 24 w % 水溶液の測定結果は図16に示すようにずり応力の急激な低下は観察されなかったが、測定時間により顕著な差異が観察された。ずり速度 1 点あたりの測定時間を短くするにつれずり応力は高くなり、測定時間が 0.1 秒と 60 秒とで最大 5 倍程度の差異が生じた。測定時間が長くなるにつれ、とろろの山芋成分の構造が変化する可能性が考えられる。

B. 伸張流れ

2.2B で述べた伸張流を用い、液柱が表面張力により液柱直径を細くしていく変化を測定し、その直径の時間的変化を図17に示した。試料は2.1で述べた山芋とろろ造影剤溶液から遠心分離により分離した上澄み粘液成分である。時間 $t = 0 - 1$ s は円板間に液柱が静止した状態で保持され、

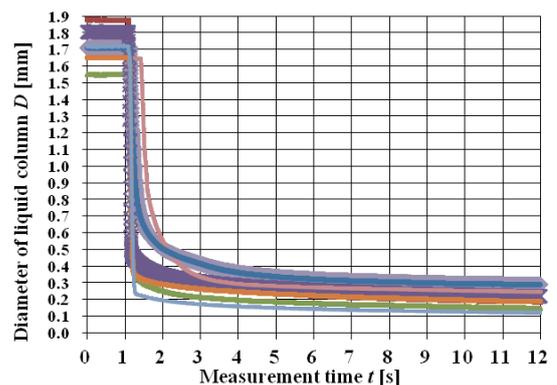


図 17 とろろ造影剤溶液から分離した粘液の伸張粘度測定

$t = 1$ s 直後に円板の移動により一定の伸張速度で液柱が伸張され、円板停止後の約 $t = 3 - 4$ s から表面張力による液柱の伸張が始まる。図には9回の測定結果が示されているが、ほぼ再現性の良い結果が得られている。 $t = 4 - 10$ s 間の測定結果から式(1)を用いて得られた伸張粘度の平均値は3800 Paとなり、同じ試料の図14のずり粘度0.1-10 Pa·s に比べ $10^2 - 10^4$ 倍の高い値となっている。ニュートン流体の場合、伸張粘度はずり粘度の3倍(トルトン粘度)となるが、直鎖状高分子の溶液や棒状粒子の懸濁液は伸張粘度がずり粘度よりも数桁高くなることが知られている。山芋とろろの場合も、すり下ろすときに細胞内から流出する粘液成分が直鎖高分子状となっているものと推測される。遠心分離前のすり下ろしたままの山芋とろろも高い曳糸性を示すが、伸張粘度が高すぎるため用いた測定装置では表面張力により液柱が伸張されず、測定できなかった。むしろ液柱を保持する円板を引っ張り、変形と引っ張り力を測定する単純な固体用の引っ張り試験を用いるべきと考えられる。一方、増粘剤溶液は全く曳糸性がなく、伸張粘度も測定できなかった。粉末山芋も曳糸性が弱く、伸張粘度を測定することができなかった。山芋をフリーズドライ状態にして粉末化するとき、曳糸性の原因となる直鎖状成分が破断されると推測される。

高い伸張粘度をもつ流体は、自由表面を持つ流れにおいて表面の飛沫を抑制することが知られている。伸張粘度の高い食品は嚥下の過程で食塊のばらつきを抑制できると予想される。ばらけやすい食品は、誤嚥の危険の高い食品の一つとして知られている。山芋のとろろはのどごしが良くかつ食塊をまとめる効果があるため、嚥下障がい者に重宝に使われている。高橋ら(2010)は山芋とろろの刻み食をまとめる効果を嚥下造影撮影により研究し、山芋とろろが刻み食の咽頭残留を抑制する効果があることを指摘している。山芋とろろは

ここで測定されたように高い伸張粘度を示すから、山芋とろろの食塊をまとめる効果は、単にずり粘度だけでなく伸張粘度も含めて検討する必要がある。

C. 簡易測定(スプーン及び傾斜平板)

嚥下障がい者用増粘剤は、多数のメーカーから様々な種類のものが市販されている。その成分は大別すると澱粉系、グアーガム系、キサンタン系の3つに分類される。ここでは各メーカーが使用方法にポタージュ状などと記載している最も低い濃度を基準として澱粉系(ムースアップ2.4w%水溶液、日清サイエンス)、グアーガム系としてA(トロミアップA1.5w%水溶液、日清オイリオグループ)及びB(トロミファイン0.8w%水溶液、キューピー)、そしてキサンタン系としてA(つるりんこ1.5w%水溶液、クリニコ)、B(スルーキング1.5w%水溶液、キッセイ薬品工業)及びC(トロミクリア1.3w%水溶液、ライオン)を使用した。簡易測定を行う前に、これら各種増粘剤の粘性特性を円錐・平板レオメーターにより測定した。図18に示すように、すべての増粘剤が非ニュートン粘性を示し、グアーガム系とキサンタン系はずり速度が1から 100 s^{-1} へと増すにつれ、粘度は70~80%低下した。一方、澱粉系の粘度変化は35%の低下にとどまった。共通して最も低いトロミと称される濃度で、キサンタン系は最大で2.8倍程度の差が生じた。また、ずり速度 100 s^{-1} では同程度の粘度となる澱粉系とグアーガム系Bはずり速度 1 s^{-1} で10倍の粘度の差異が生じている。

簡易測定のひとつとして、スプーンからたれる様子をスプーン傾き角度60度と30度の場合について撮影し、図19から図22に示した。増粘剤による差異もあるが、共通して傾き角度が大きいほど液柱太さが太くなる。したがって、スプーンからたらしたときの液柱太さをとろみの強さのめやすとして使う場合、スプーンを傾ける角度も一定にするなどの工夫が必要になる。スプーンによる測

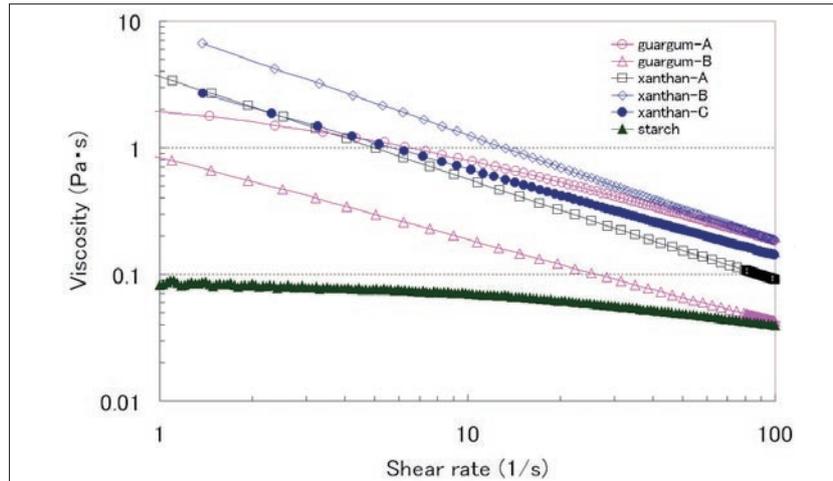


図 18 各種市販増粘剤水溶液の粘性特性～ guar gum A (トロミアップ A 1.5w%), B (トロミファイン 0.8w%) ; xanthan A (つるりんこ 1.5w%), B (スルーキング 1.5w%), C (トロミクリア 1.3w%); starch (ムースアップ 2.4w%)

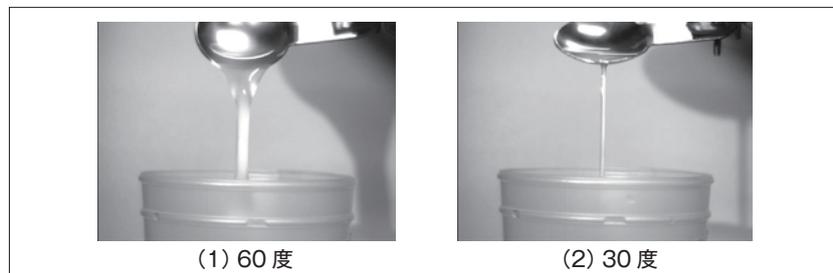


図 19 スプーン角度による差異 (デンボン系)

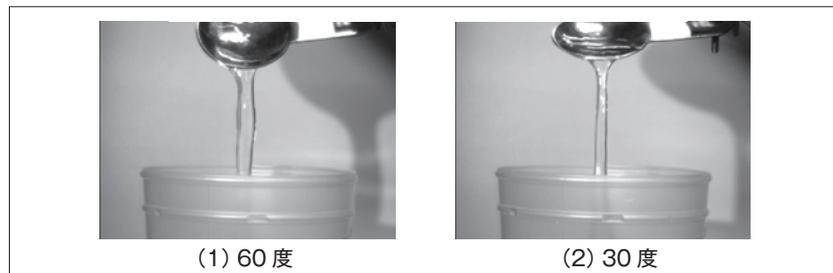


図 20 スプーン角度による差異 (キサンタン A)

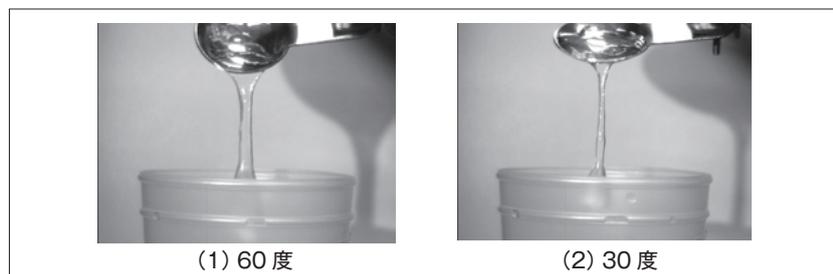


図 21 スプーン角度による差異 (キサンタン B)

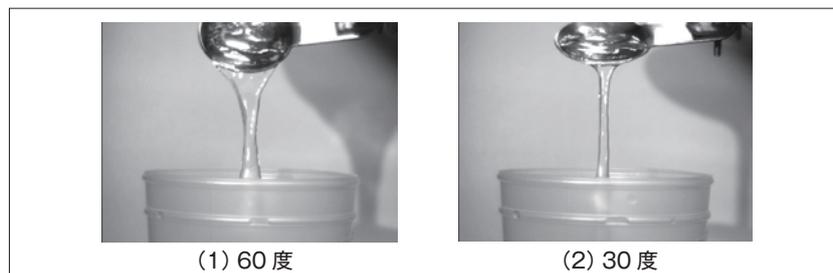


図 22 スプーン角度による差異 (キサンタン C)

定のもう一つの問題点は、その結果がどのような試料の物性と関係しているのかが不明な点である。

嚥下障がい者用増粘剤溶液の粘性特性の特徴は図11(a)に示されるように低ずり速度で高いずり応力を示し、塑性的に振る舞う点である。この塑性的特性に対応する降伏応力 τ_y を2.2Cの傾斜平板を用いた簡易的方法により求めた。試料にはキサタン系増粘剤(つるりんこ、クリニコ)を濃度0.8w%~3.0w%で用いた。円錐平板レオメーターによる粘性特性の測定結果を図23(a)に示す。ずり速度 20 s^{-1} 以上の曲線をずり速度ゼロに外挿し、そのずり応力を降伏応力とする。得られた降伏応力と増粘剤濃度の関係は図23(b)に示すようにほぼ線形関係にある。傾斜平板の傾斜角度を増加させ、試料が流動を開始する角度 θ から式(2)により降伏応力を求めプロットすると、図23

(b)に示すようにレオメーターの結果とほぼ一致した。降伏応力だけで試料の粘性特性を全て表現することはできないが、この方法は測定者の主観も入りにくく、精度の良い測定が可能である。

D. 食塊のすべり

図24は食塊先端の平板に沿う移動距離を時間に対して示している。平板の傾斜角度は水飴と増粘剤溶液の場合は15度とし、山芋とろろの場合は45度とした。また、水飴を湿潤面上に置くと粘液との混合拡散が早く、食塊としての輪郭が識別できなくなるため、湿潤面上での測定を行えなかった。水飴を水平な乾燥面においたときの写真を図25(a)に、15度平板を傾けたときの側面の写真を(b)に示す。平板を傾けると(b)のように水飴は液膜の流れのように平板上を流れ始める。増粘剤溶液も速度は遅いものの、ほぼ同様に流れる。

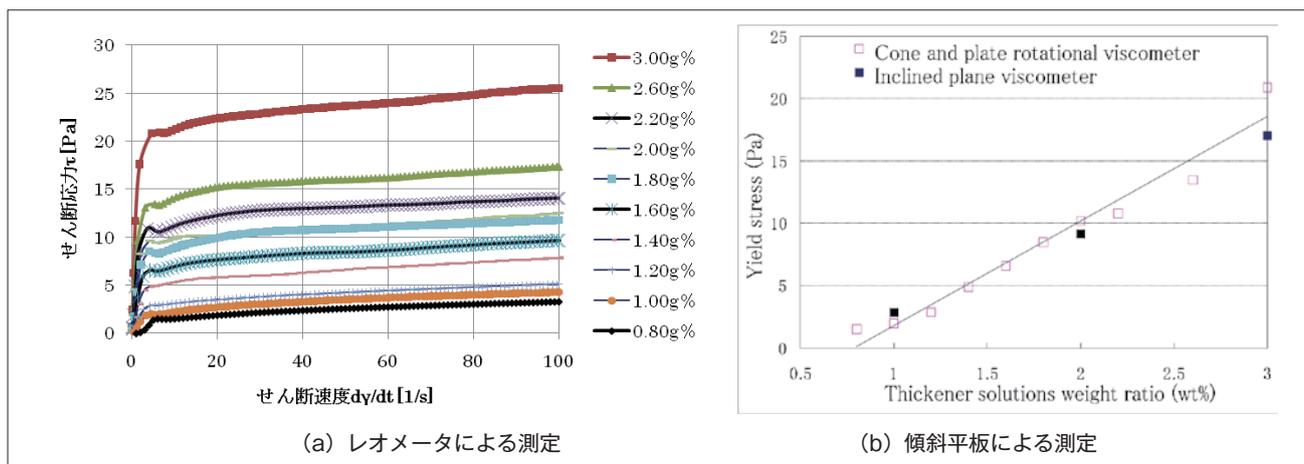


図23 傾斜平板による降伏応力の測定

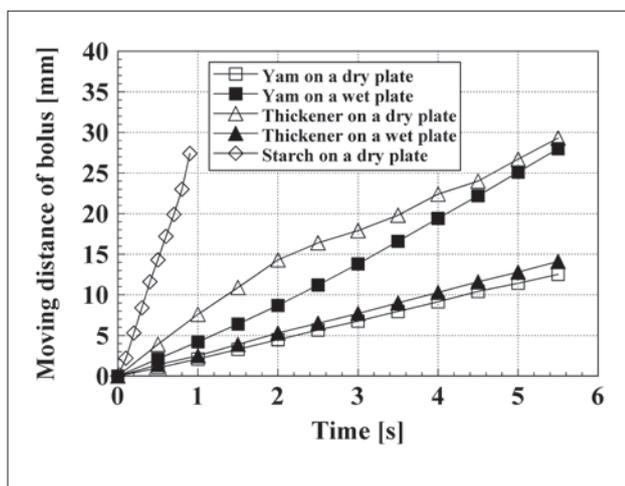


図24 傾斜した乾燥及び湿潤平板上の食塊すべり

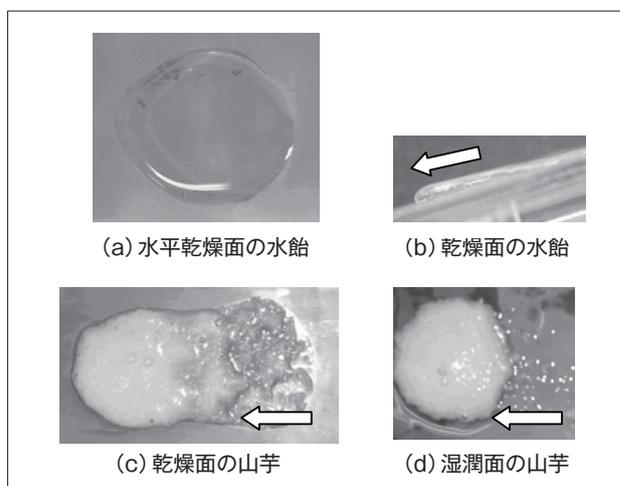


図25 傾斜面上の水飴と山芋とろろ

流動が始まる低い速度では増粘剤溶液は粘度が水飴より高く、水飴に比べ食塊の移動速度が遅く移動距離も短くなっている。湿潤面の場合、増粘剤溶液は水飴ほどではないものの粘膜粘液中に拡散混合し輪郭が広がる。湿潤面の移動も乾燥面に比べ遅くなる。これに対し、山芋とろろの移動は逆に湿潤面で早く、乾燥面で遅い。乾燥斜面上と湿潤斜面上の山芋とろろの写真を図25(c)と(d)に示す。乾燥面(c)ではとろろは壁面に付着しながら流動するのに対し、湿潤面(d)では固体のように初期の輪郭を保ったまま湿潤面上をスリップする。これらの結果は、緒言でも述べたように食塊粘度が粘膜粘液より十分高いときには、粘膜粘液が食塊の嚥下に対して潤滑液のように働き、粘液がない場合と比較すると、より少ない摩擦抵抗で食塊が嚥下されることを示している。このような

摩擦は、次節3.2Bで述べる数値シミュレーションの予測精度を向上させる上で必要不可欠になる。今後、どのような粘度からこのような固体的スリップが粘膜上で生ずるか、さらに研究を進める計画である。

3.2 嚥下流動に及ぼす諸因子の影響

A. ビデオ嚥下造影撮影

表1の直立姿勢①の撮影結果について、造影剤を嚥下したときの撮影例を図26に示す。撮影は正面と側面の2方向から行った。撮影が行われるのは1方向からのみであるため、各方向の撮影は別々に行った。図中には、図の後の時刻のVF画像から得られた食塊の輪郭線とその時刻に対応する番号も示されている。側面の輪郭線から、その最下端の食塊速度 V_h と最上端の食塊速度 V_t を求め、それらを図27に各試料ごとに示した。造影

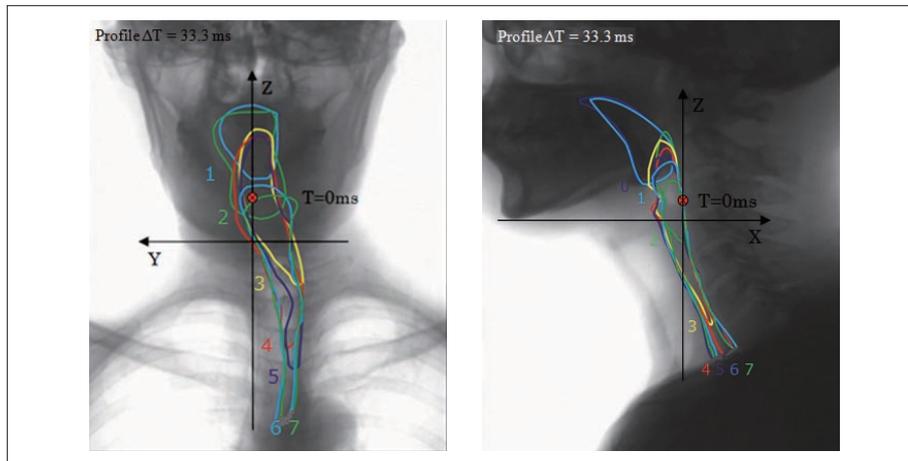


図26 直立姿勢の嚥下による食塊の移動～VF画像からの食塊輪郭の抽出。輪郭番号は画像の時刻の経過を表し、背景の画像は輪郭1を抽出した時刻の画像。食塊は造影剤

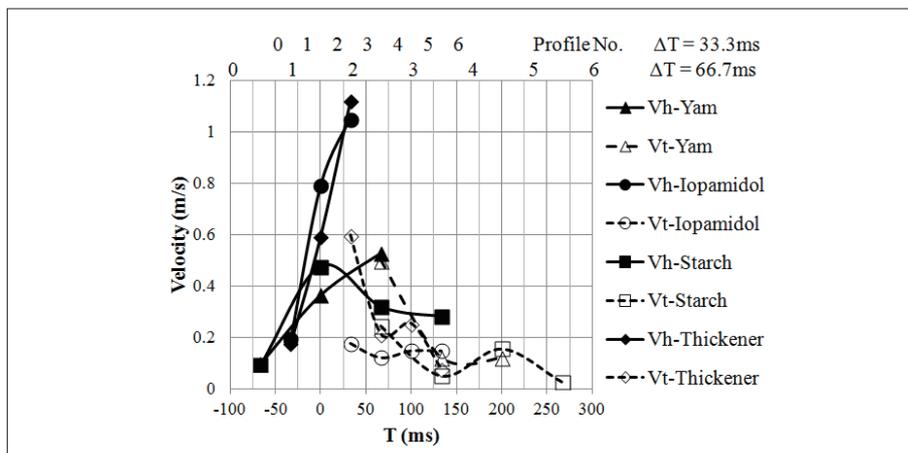


図27 食塊最下端の食塊速度 V_h と最上端の食塊速度 V_t

剤と増粘剤溶液の V_h は喉頭の挙上後に喉頭付近から食道にかけて高い速度となり、一方、 V_l は各試料で顕著な差異は測定されなかった。増粘剤溶液は図7でフレンチドレッシング程度と分類される程度のとろみであり、図11の粘度はずり速度 60 s^{-1} 以上で水飴より低くなり、造影剤溶液の粘度に近づく。食塊速度は食塊粘度と相関すると考えられるから、食塊速度が同程度となる増粘剤溶液と造影剤溶液は 100 s^{-1} 以上のずり速度で粘度が近い値になる。そのような比較的高いずり速度の流れが、喉頭から食道にかけての喉頭挙上後の速い流れに生じていると考えられる。Kumagaiら(2009)と熊谷ら(2009)は粘度と超音波ドップラー測定による食塊速度との相関から $20 \sim 30\text{ s}^{-1}$ のずり速度における粘度を物性指標とすることを提案している。本研究におけるVFの結果はこれらの結果に近い。一般に、誤嚥は食塊の速度を遅くするだけで解決する訳ではなく、介護食の物性についてさらに多角的見地からの検討が必要であろう。

上述の結果は、水飴のように粘度一定 η_0 の食品と粘度がずり速度 γ により変化する ($\eta(\gamma)$) 介護用増粘剤溶液とを組み合わせるVFを行うことにより、嚥下を支配するずり速度を明かにできる可能性を示している。誤嚥は一般に食塊速度 v が速いと起こりやすく、その速度は食塊粘度が低いと速い ($v=f(\eta)$)。したがって、介護食の粘度を適切に調整することが誤嚥予防に必要である。一方、その粘度は食感が良くなるように、ず

り速度によって著しく変化するように調整されているため、どのずり速度で粘度を調整すべきなのかわかっていない。ここで実施したように、介護食と粘度一定の食品の嚥下速度をVFから測定し、もしその嚥下速度が一致すれば、図28に示す各食品の粘度曲線が交差する点 $\eta(\gamma_s) = \eta_0$ を求め、その点のずり速度 γ_s が嚥下を支配するずり速度と推測できる。複数の粘度一定の食品のVFを行う必要があるが、いったん嚥下を支配するずり速度がわかれば、その値をとろみの調整をするときに使用するずり速度とすれば良いことになり、より安全な食事の提供に役立つはずである。

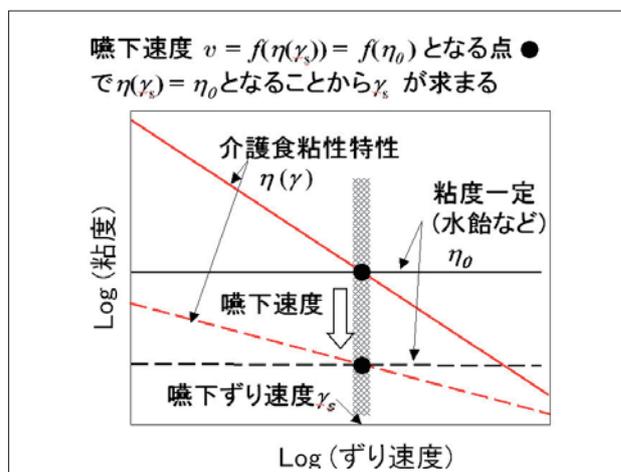


図28 嚥下速度を決定する食塊粘度とずり速度の決定方法
 ~●介護食と粘度一定の水飴などの嚥下速度が等しくなる交差点

V_h と V_l との速度差により食塊は嚥下方向に伸張される。図29は咽頭から食道にかけての食塊の伸張を矢印で示している。山芋とろろはその速度差が低く、食塊の伸張が抑制されている。食塊は低粘度の場合に伸張だけでなく幅も広がる傾向

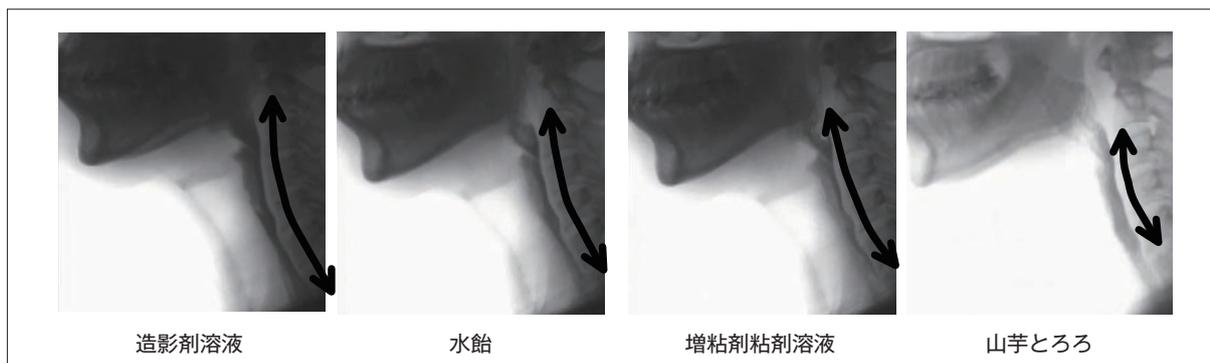


図29 食塊の伸張

が観察された。食塊の広がりには誤嚥の危険を高める。嚥下による食塊の広がりを調べるため、**図 26**の食塊輪郭の長さを求め、**図 30**(a)(b)に側面と正面の結果を示した。図より側面のVF(a)より正面のVF(b)において、造影剤溶液と増粘剤溶液の食塊の広がりが顕著に示されている。低粘度食塊の広がりをみるには、側面より正面からのVFが適していると考えられる。

造影剤と増粘剤溶液は上述のように喉頭の挙上後に高い速度 V_h で喉頭付近から食道に進入する。これに対し食道は入口、心臓近くの気管分岐部及び横隔膜の食道裂孔部で狭窄がある。したがって、喉頭の挙上後に食道に入った造影剤と増粘剤溶液の食塊は2番目の気管分岐部の狭窄を全て通過できず手前で一時的に貯留し、留まった食塊が狭窄部から喉頭に向かって滞留水位を上昇させた。**図 31**(a)はそのような造影剤嚥下時の貯留水位が上

昇したときのVF画像の例であり、貯留食塊の画像((a)の長方形枠部分)をとりだし、画像フレーム番号とともに時系列的に(b)に図示した。(b)のフレーム#20が(a)に対応し、1フレームあたりの時間間隔は33.3msである。フレーム#26以降で食道のぜん動運動により貯留食塊は嚥下される。このような貯留は V_h が高い造影剤と増粘剤溶液のみに観察された。食塊容積が多く、かつ食道のぜん動運動の低下がさらにあると、貯留する食塊が梨状陥凹から喉頭内へ入り込み、誤嚥の原因になる可能性が考えられる。**図 32**は直立姿勢で山芋とろろを5ccと10ccを嚥下した場合の食塊速度を示す。10ccの食塊の場合、 V_h が一定となる結果となった。食塊容積の効果についてはさらに測定条件と測定数を増やす必要がある。

図 33は150度のリクライニング姿勢による嚥下のVF画像と各食塊輪郭の経時変化を示す。低

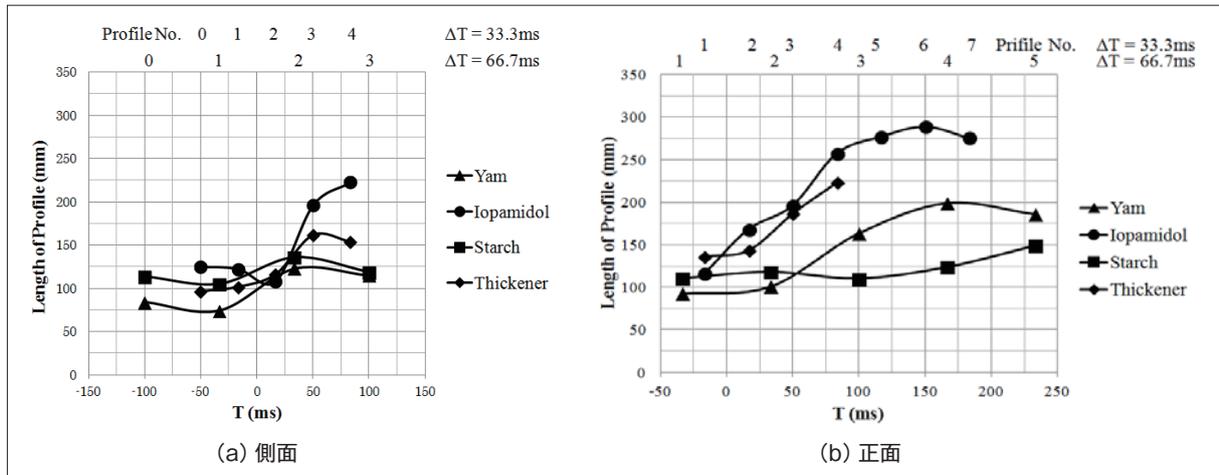


図 30 直立姿勢の嚥下における食塊輪郭の長さ

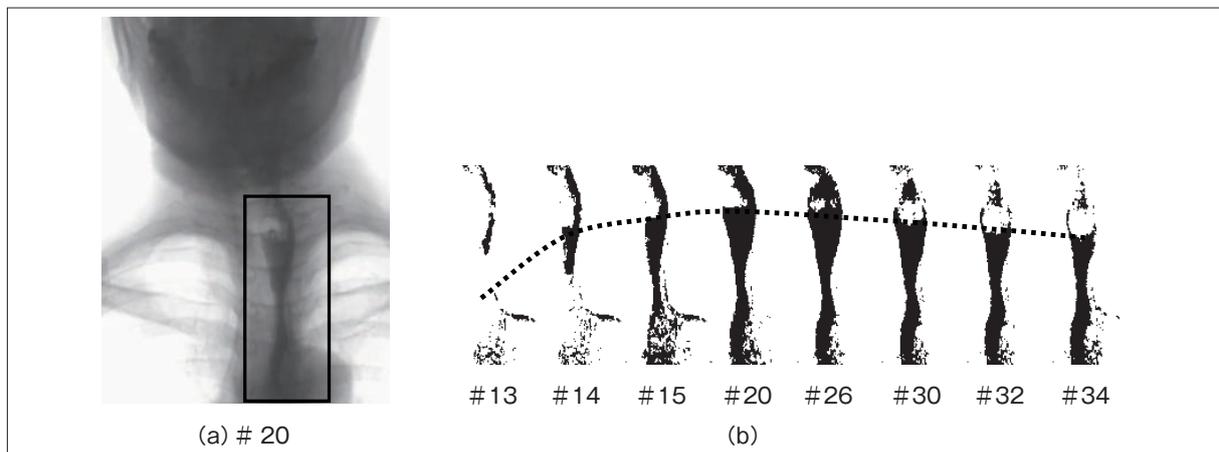


図 31 梨状陥凹への低粘度食塊の貯留～造影剤溶液

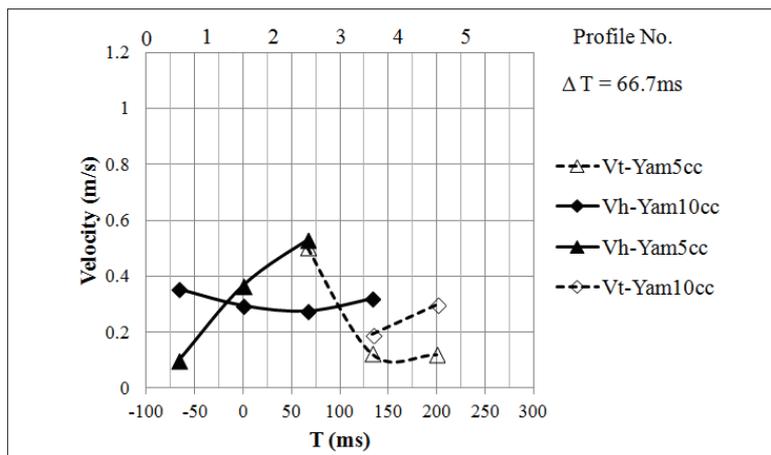


図 32 試料容積による差異～山芋とろろ、直立姿勢の側面からの撮影

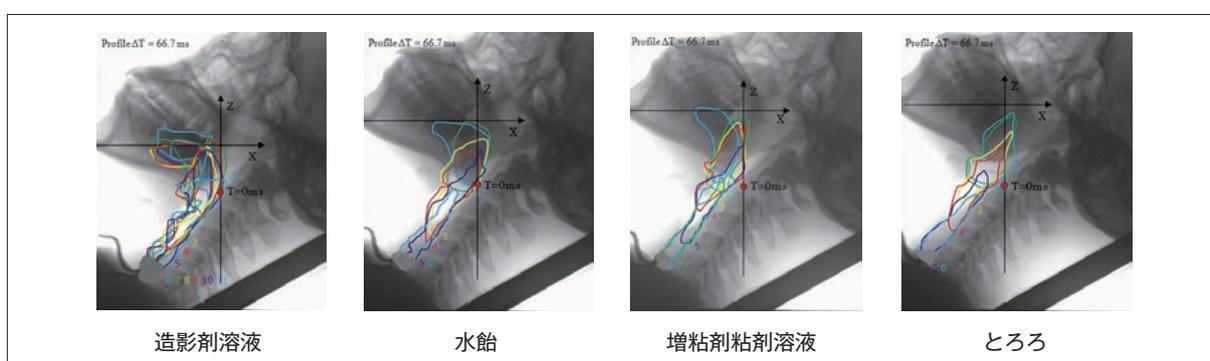


図 33 リクライニング姿勢150度による嚥下

粘度の造影剤溶液の食塊輪郭は他の試料に比べいりくんだ複雑な形状であり、食塊は複雑な流れになっていると推測される。輪郭から求めた食塊速度 V_h と V_t を図 34 に示す。直立姿勢の場合に比べ、食塊速度は低下し、食塊試料による差異も小さくなっている。嚥下による食塊の広がり調べのため、図 33 の輪郭の長さを求め、図 35 に示した。図より造影剤溶液の輪郭長さは他の食塊の場合よりも明らかに長く、造影剤溶液が複雑に広がった

流れであることを示している。

低粘度の食塊は上記のように複雑な流れになると推測される。図 36 は 150 度のリクライニング姿勢で低粘度の造影剤溶液を嚥下したときの VF 画像を経時的に示す。画像の番号は 33.3ms 間隔の画像の番号を表す。食塊は口腔内を後方に移動し (#10)、口腔後方に達した食塊の一部が咽頭へ漏れて進入し、さらにその食塊は下咽頭へ進入する。その後、喉頭の挙上が始まり、食塊は食道に

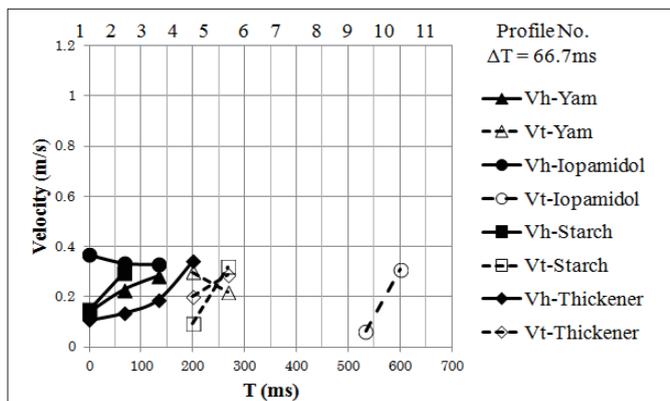


図 34 リクライニング姿勢150度における食塊最下端の食塊速度 V_h と最上端の食塊速度 V_t

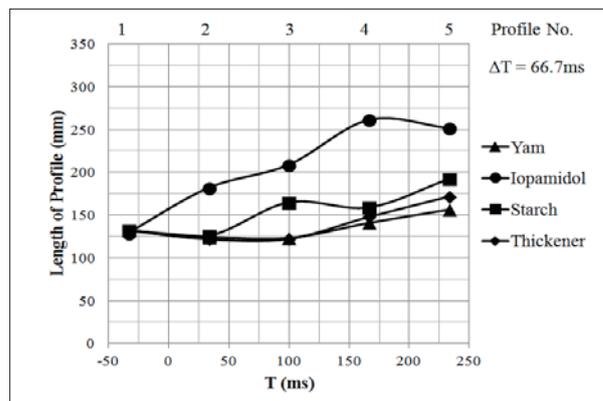


図 35 リクライニング姿勢150度における食塊輪郭の長さ

進入する。被験者は健常者であり、誤嚥はしていないが誤嚥の危険の高い嚥下といえる。増粘剤溶液の場合も、喉頭の挙上前に食塊が下咽頭まで進入する同様の嚥下が観察された。その他の水飴と山芋とろろの場合、そのような喉頭挙上前の食塊進入は観察されなかった。図37は山芋とろろの場合のVF画像を示し、食塊が口腔内を後方に移動後、喉頭が挙上し(#23)、喉頭蓋が喉頭入口を覆った(#26)後に食塊が咽頭に進入し(#27)、食道へと食塊が嚥下される(#31)。リクライニング姿勢の低粘度食塊の場合、直立姿勢と異なる点は、喉頭挙上前に食塊が口腔から咽頭へ進入する

点といえる。図38は図36、37と異なる被験者によりリクライニング角度120度と150度で造影剤溶液を嚥下したときのVFから求めた食塊速度と食塊輪郭長さを示す。嚥下の過程は図36の場合とほぼ同じであり、また120度と150度との差異はほとんどなかった。この範囲のリクライニング角度の差はこの場合に関しては嚥下に差異をもたらさなかった。

B. 嚥下の数値シミュレーション

低粘度の食塊は前節で述べたように嚥下速度が高く、食塊の広がりも複雑であり、VFからその嚥下の詳細を把握することは容易でない。このよ

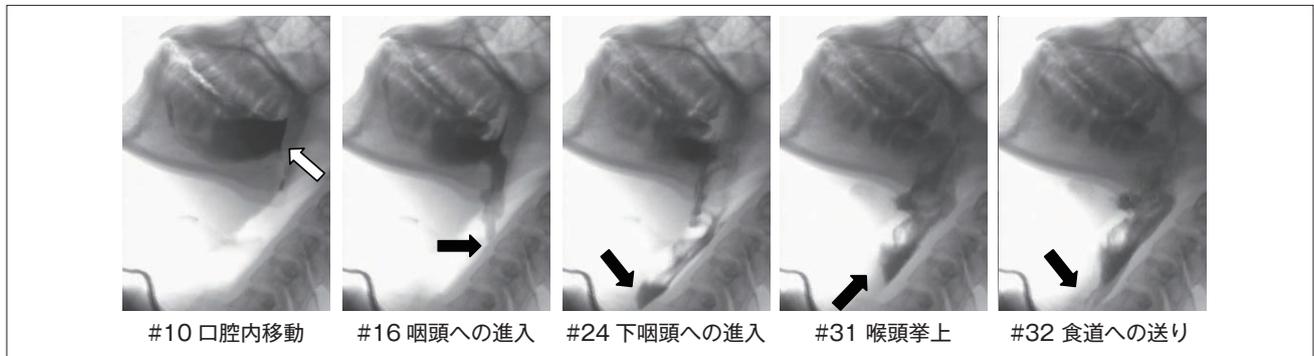


図36 喉頭挙上前の造影剤溶液の咽頭及び食道への進入

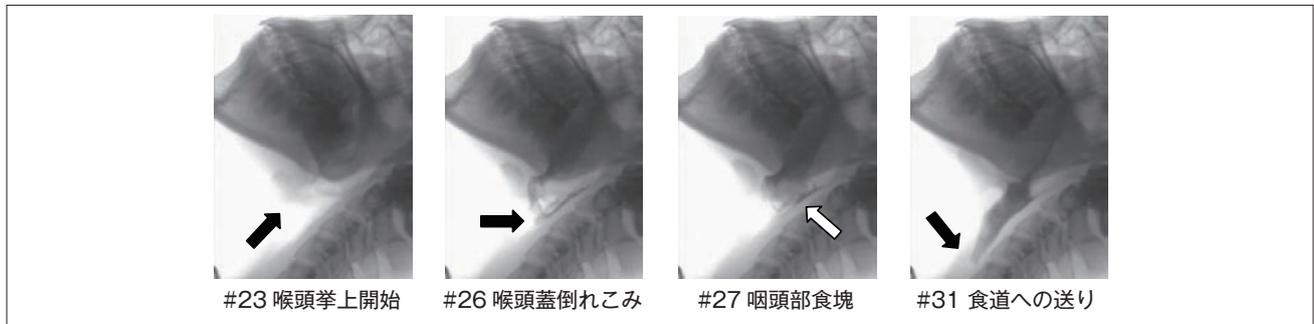


図37 喉頭挙上後の山芋とろろの正常嚥下

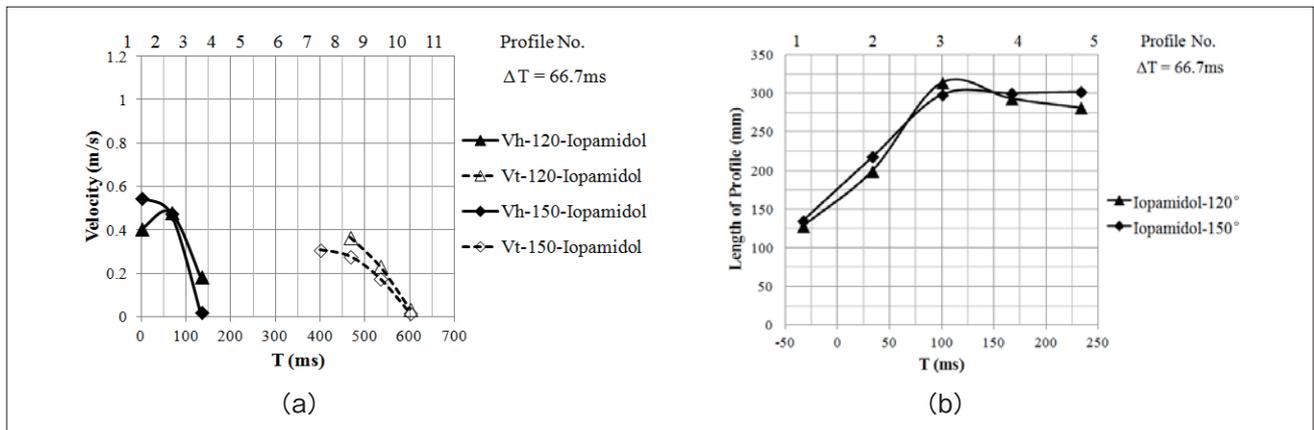


図38 リクライニング120度及び150度による食塊速度(a)と食塊輪郭長さ(b)～造影剤溶液

うなVF測定の問題点を解決するため、著者らが開発している数値シミュレーターを利用し、前節の造影剤溶液5ccの嚥下についてシミュレーションを行った。図39(a)がVFの側面図を示し、(b)と(c)が(a)に対応すると考えられる時刻のシミュレーション結果である。(b)と(c)では、食塊が倒れこんだ喉頭蓋を覆い、左右に分岐する様子を明瞭に示している。図39より前の時刻の、喉頭蓋の倒れこみがまだ浅い時刻からの嚥下の過程を図40に示す。食塊は(a)で舌根と咽頭後壁によりはさまれ、(b)(c)で左右に分岐し、(d)で再び合流する様子が示されている。数値シミュレーションはVFを補完して詳細な嚥下過程を予測する手段として利用可能である。

高粘度の食塊は嚥下の過程でまとまりが良く、VFで比較的明瞭にその輪郭をとらえることができる。その食塊輪郭を利用して食塊の内部流動を解析し、被験者の咽喉が食塊にどのように働いたかを知ることができれば、患者の障がいの様子を

定量化し、その障がいにあった食べやすく、かつ誤嚥しにくい食品を提供することが可能になると考えられる。また、上述の数値シミュレーションを行うにも、その障がいの程度を定量的にモデル化することが必要になる。この観点から2.3で述べた画像解析と数値シミュレーションを組み合わせた解析手法を開発した。対象とした増粘剤溶液とそのVF画像はNishinariら(2011)の画像を中心とした研究の中で利用されたものとした。この増粘剤溶液は図11の溶液よりほぼ1桁高い粘性特性を示す。被験者の正面と側面から撮影されたVFから2次的食塊輪郭を求め、それらから求めた食塊の3次的嚥下過程を図41に示す。次に、これら食塊輪郭の内部を増粘剤溶液の粘性特性を反映した流体(指数則粘性流体)で満たし、輪郭の3次的変形と運動により誘起される食塊内部の流体の流れを数値シミュレーションにより求め、図42に示した。食塊の先端と後端の速度差により食塊形状が伸張する様子が示されている。

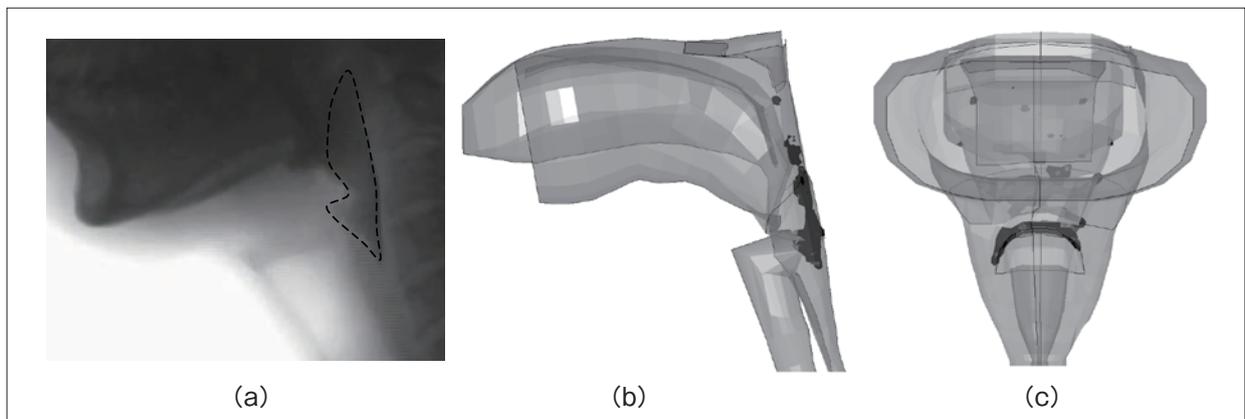


図39 低粘度液体の嚥下のVF(a)と数値シミュレーション(b)(c)

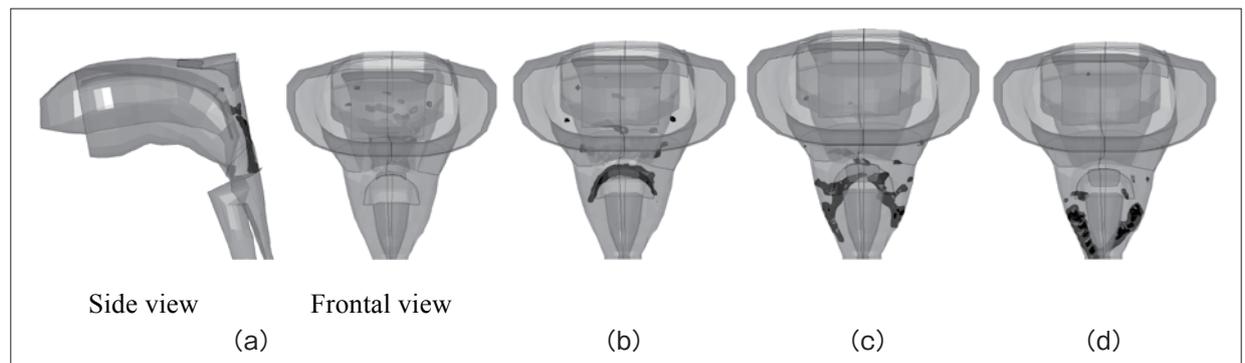


図40 低粘度液体の嚥下シミュレーション

また輪郭からはわからないが、45msと60msでは喉頭近傍の食塊後端で流れが停滞し、一部で逆流していることも示されている。図41と図42はいずれも健常者であるが、図43は健常者(a)と嚥下障がい者(b)の比較を示している。障がい者の食塊速度は健常者の約2/3程度と遅い。特に後端

では健常者のように食塊が咽頭から押されるような流れとならず、この特徴は障がい者の嚥下機能の低下を表すと解釈できる。

4. 結 言

液状食品の粘性特性が嚥下に及ぼす影響をVF

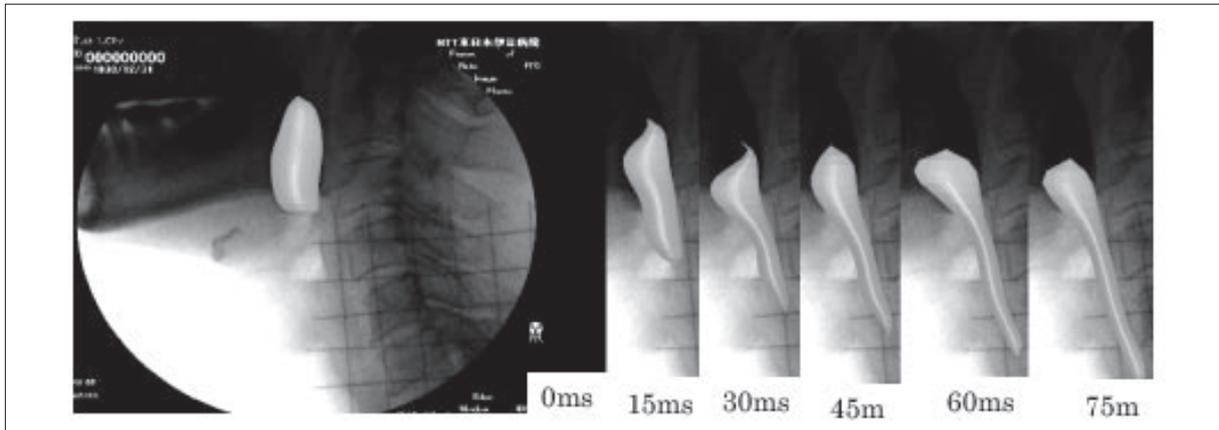


図41 正面と側面からのVF画像に基づく食塊の3次元的嚥下過程の再現

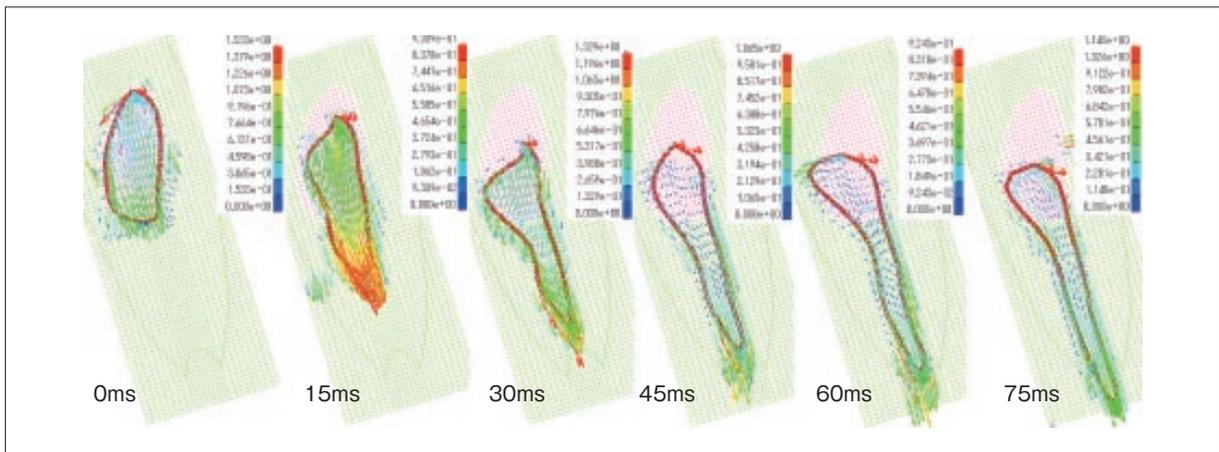


図42 食塊内断面の速度ベクトル図

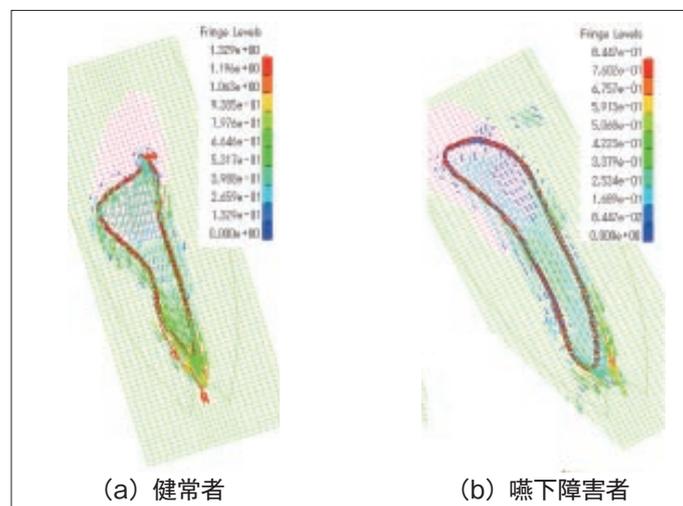


図43 食塊内断面の速度ベクトルの比較

により調べた。介護用に利用される増粘剤溶液は一般にずり速度が高くなるにつれ粘度が低下する。用いた増粘剤溶液の粘度もずり速度が高くなると低下し、一定粘度 $0.62 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ の水飴と比較するとずり速度が $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ では水飴より高く、 $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ では逆に低くなる。嚥下のVFの結果は増粘剤溶液と低粘度の造影剤溶液が、水飴と山芋とろろよりも食塊貯留と直立姿勢の嚥下速度とに関してより誤嚥の危険性を高める結果を示した。従って、更に検討が必要であるが、嚥下障がい者用の介護食のずり粘性特性としては、ずり速度 $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ で $0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以上の粘度が必要と推測される。また、増粘剤を水飴のようなニュートン流体と組み合わせてVFの試験をすることにより、嚥下のずり速度、そして嚥下速度と粘度との関係を推定できることも示唆した。これらについては引き続き研究を続ける。

増粘剤溶液のずり粘性特性を簡易的に計測する方法として、傾斜平板により降伏応力を測定する方法は、その降伏応力と嚥下ずり速度の粘度との相関から間接的に調べることが可能であるが、あらかじめその相関を調べておく必要がある。スプーンによる判定はその物理的意義が明らかではなく、スプーンの傾斜角度にも依存するので、適切な判定方法とは言えない。ずり速度を測定条件として与えられる粘度計がより良いと考えられる。

VFは嚥下障がい診断するうえで重要な手法であるが、VFを補完する目的で新たにVFと数値シミュレーションを組み合わせる方法を開発した。その結果は嚥下障がいのシミュレーションを個々の患者に合わせて実施するうえで必要不可欠な障がいの定量的モデル化を可能にすると期待できる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり研究助成事業として支援していただいた(公財)浦上食品・食文化振興財団の皆様に深く感謝の意を表します。

文 献

- P. J. Halliday, A. C. Smith, Estimation of the wall slip velocity in the capillary flow of potato granule pastes, *J. Rheol.* 39(1) (1995), 139-149.
- H. Kumagai, A. Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama, H. Kumagai, Relationship between flow properties of thickener solutions and their velocity through the pharynx measured by the ultrasonic pulse Doppler method, *Food Sci. Technol. Res.*, 15(3), 203-210 (2009).
- 熊谷仁、熊谷日登美、レオロジーと食品工学—嚥下障害者用介護食の物性を中心として、*日本食品工学会誌*, 10(3), 137-148 (2009).
- 中濱信子, 大越ひろ, 森高初恵, おいしさのレオロジー, 弘学出版, P.71-72, (1997)
- K. Nishinari, M. Takemasa, L. Su, Y. Michiwaki, H. Mizunuma, H. Ogoshi, Effect of shear thinning on aspiration, *Food Hydrocolloids* 25 (2011) 1737-1743.
- G. H. Mckinley, A. Tripathi, How to extract the Newtonian viscosity from capillary breakup measurements in a filament rheometer, *J Rheol*, 44, 653 (2000).
- H. Mizunuma, M. Sonomura, K. Shimokasa, H. Ogoshi, S. Nakamura, and N. Tayama, Numerical modeling and simulation on the swallowing of jelly, *J. Texture Studies*, 2009, Vol.40, pp.406-426.
- P. R. Paslay, A. Slibar, Flow of an incompressible visco-plastic layer on an inclined plane, *Trans. Soc. Rheol.*, 2, 255-262 (1958)
- D. T. Pageorgiou, On the breakup of viscous liquid threads, *Phys Fluid*, 7(7), 1529, (1995).
- J. Plucinski, R. K. Gupta, S. Chakrabarti, Wall slip of mayonnaises in viscometers, *Rheol. Acta*, 37 (1998), 259-269.
- J.F. Prinz, R.A. de Wijk, L. Huntjens, Load dependency of the coefficient of friction of oral mucosa, *Food Hydrocolloid.*, 21 (2007), 402-408.
- H. Ranc, A. Elkhyat, C. Servais, S. Mac-Mary, B. Launay, P. Humbert, Friction coefficient and wettability of oral mucosal tissue: Changes induced by a salivary layer, *Colloid Surface A.*, 276 (2006), 155-161.
- 下笠賢二, 水沼博, 大越ひろ, 小寺浩貴: 嚥下障害者用液状食品のための携帯粘度計の研究開発, *ライフサポート学会*, Vol. 19, No. 1, 23-30, 2007.
- M. Sonomura, H. Mizunuma, T. Numamori, Y. Michiwaki, K. Nishinari, Numerical Simulation of the swallowing of liquid bolus, *J. Texture Studies*, 42 (2011) 203-211.
- 高橋智子、二藤隆春、小野江茉莉、田山二郎、大越ひろ、とろろを用いたゲル—ゾル混合系食物の物性、食べやすさ、および咽頭相における嚥下動態、*日摂食嚥下リハ会誌*, 14(3), 201-211 (2010).

Rheological characteristics of liquid care foods for swallowing disorders and their relationship with bolus volume and swallowing postures

Hiroshi Mizunuma*, Yukihiro Michiwaki**

**Tokyo Metropolitan University*

***Musashino Red Cross Hospital*

Rheological characteristics of care foods and their simple measurement methods were discussed. Shear thinning viscosity and extensional viscosity were measured for commercial thickener solutions and grated yam using a rotational rheometer and a capillary thinning extension viscometer. The shear viscosities measured were compared with the flow patterns fallen from a spoon and the yield stresses obtained from an inclined plate method. The flow pattern fallen from a spoon depended on the inclining angle and it was difficult to correlate the flow pattern and the viscous property. The yield stresses obtained from an inclined plate method gave a good correlation with the rheometric measurements. However, the yield stress cannot give the viscous property direct in a high shear region, which was found to be critical in pharyngeal swallowing. A video fluorography test was applied to liquid foods. A thickener solution used had lower viscosity than a starch solution at the shear rates higher than 60 s^{-1} and showed higher bolus head velocity than the starch solution. The starch solution had a constant viscosity of $0.62\text{ Pa}\cdot\text{s}$, independent of shear rate. The viscosity of the thickener solution was higher than that of the starch solution at the shear rate lower than 60 s^{-1} . Thus, a liquid bolus that has the viscosity higher than $0.6\text{ Pa}\cdot\text{s}$ at the shear rates higher than 60 s^{-1} reduces the bolus head velocity.

Numerical simulations were introduced to complement and enhance video fluorography of swallowing. The simulation showed an good agreement with the video fluorography for a normal subject. The characteristics of swallowing disorder were revealed by the combination of simulation and video fluorography. Numerical simulation is a promising tool to prevent a miss swallowing.