

嚥下障害者用介護食の物性に関する考察

Physical properties of foods for dysphagic patients

長谷川温子・田代晃子・熊谷仁

Atsuko HASEGAWA, Akiko TASHIRO, and Hitoshi KUMAGAI

1. 緒言

近年、65歳以上の高齢者が日本の総人口の20%以上という社会の高齢化に伴い、食物の嚥下 (swallowing) の際に食物が食道から胃という正常な経路を通らず、気管から肺へ到達してしまう、いわゆる誤嚥 (aspiration) を起こす高齢者が増大している¹⁾。誤嚥に起因する誤嚥性肺炎は、日本人の死因の第4位を占め¹⁾、特に高齢者に多い。誤嚥を起こす嚥下障害者 (dysphagic patients) に対しては、チューブを用いる経口栄養も試みられているが、高齢者のQOL (Quality of Life) を考えれば、種々の食物を口から食べられる喜びは大きく、嚥下障害者に適した食物が目ざされている^{2,3)}。

食物は、口腔内で咀嚼され唾液と混合して食塊 (bolus) となり (液状食品の場合には、咀嚼がほとんど行われないこともある)、嚥下 (swallow) され、咽頭部を通過して、喉頭の挙上により喉頭口が喉頭蓋 (epiglottis) で閉鎖され、同時に食道口が開大した食道 (esophagus) へと送られる。すなわち咽頭部を食塊と空気が時間差を持って通過する (図1参照)⁴⁾ が、嚥下時に食塊の一部の薄片が誤って気管へ入るのが誤嚥 (aspiration) である。高齢者では組織の弾性が低下することで喉頭が下降し、筋力が低下することも加わり、嚥下した食塊の通過時に喉頭の挙上が遅れる。また筋力が低下すると喉頭蓋の反転と喉頭の挙上に対して食塊の通過のタイミングが取れない可能性が高くな

る。よって、水やお茶などの低粘性の食物は誤嚥しやすく、ゲル化剤や増粘剤を添加して適度な“かたさ”や粘度を持たせた食物は誤嚥しにくいと言われており、ゼラチンや各種増粘剤を添加した様々な食物の開発が行われている²⁾。しかし、そうした開発は、医療現場の経験に基づいて行われており、嚥下障害者にとっていかなる物性 (physical properties) の食物が適切か未だ科学的には明らかではない。

誤嚥は、上述のように、咽頭部における食物の流動性と関係するので、咽頭部における食物 (あるいは食塊) の流速と食物の物性値との関係を検討するのが有力なアプローチである。従来、咽頭部における食物の流動性に関する多くの研究では、X線を用いたVF (Video-Fluorography) が用いられてきたが⁵⁾、X線被爆の危険があるため同一の被験者に対して多くの実験を行っていくこと、造影剤の添加によ

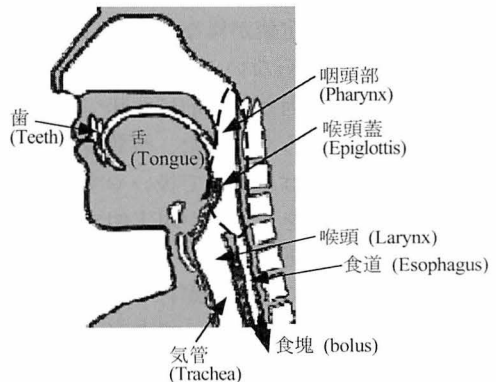


図1 ヒトの咽頭部周辺の正中断面図

て物性が変化する問題があった。我々は、これまで人体に害のない超音波を用いたパルス・ドップラー法により、嚥下時の咽頭部における流速測定を行い、物性値との関係について検討を行ってきた。その結果、咽頭部での最大流速が、誤嚥しやすいと言われる水では大きく、誤嚥しにくいと言われるヨーグルトはその1/3から1/2程度であることが明らかになった。また、摂食量によって流速が異なることも見出した⁶⁻⁸⁾。

食物の“嚥下しやすさ”に関わる物性値に関しての議論もいくつかある。我々は、ヨーグルトの流速分布と比較した結果、周波数 $f=1\text{ Hz}$ における動的弾性率(貯蔵弾性率) G' が約100 Pa 以上、動的粘性率 η' が約1 Pa·s以上のゲルや増粘剤溶液は誤嚥の危険性が少ないことを見出した^{6,8)}。一方、増粘剤溶液については、粘度 μ が咽頭部との最大流速と高い相関(相関係数 R が約0.9)があること、ずり速度 $\dot{\gamma}=10\text{ s}^{-1}$ の粘度 μ が $\dot{\gamma}=1\text{ s}^{-1}$ や $\dot{\gamma}=100\text{ s}^{-1}$ の粘度より相関が高いことを報告した⁹⁾。一方、食物の“飲み込みやすさ”にとっては、テクスチャー測定^{10,11)}から求められた「かたさ」、「凝集性」、「付着性」などのパラメータが重要という意見もあり¹²⁾、そうしたテクスチャー測定から得られるパラメータで嚥下障害者用食品の現行の基準は作られている¹³⁾。

誤嚥には様々な要因が関与しており、どの要因にどの物性が関わるかは難しい問題である。しかし、介護食の指標となる物性としては、測定装置によって測定値が異なる(できれば試料サイズにも依らないことが望ましい)¹⁰⁾こと、考えられる要因と物理的に意味づけが可能となることが必要であろう。また、複数の物性値が指標となる場合には、安価で扱いやすい装置で測定できる物性値を選ぶ方が現実的である。

本論文では、嚥下障害者用介護食にとって適切な物性値に関して、我々が行ってきた咽頭部での流速測定の結果に基づいて考察する。

2. 方法

2.1. 粘度測定

粘度は、流体(液体あるいは気体)の流動性を表す物性値である^{10,11,14)}。今、2枚の質量を無視できる平行平板間(面積 $S[\text{m}^2]$ 、板間距離 $L[\text{m}]$)に流体を入れ、片方の板に対して面に平行に力 $F[\text{N}]$ を加え、板が一定速度 $V[\text{m/s}]$ で動くとする。このとき、単位面積当たりにかかる力 F/S をずり応力 $\tau[\text{Pa}]$ 、速度勾配 V/L をずり速度(shear rate) $\dot{\gamma}[\text{s}^{-1}]$ というが、粘度 $\mu[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ はずり応力 τ とずり速度 $\dot{\gamma}$ とから以下のように定義される。

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

粘度 μ がずり速度 $\dot{\gamma}$ に依存せず一定の流体をニュートン流体、 μ が $\dot{\gamma}$ に依存する流体を非ニュートン流体という。また、増粘剤溶液などに見られるような、ずり速度の増大と共に粘度値が低下する現象をずり流動化(shear thinning)という。食品の場合、水や糖溶液など比較的単純な液体以外、多くの液体が非ニュートン流体なので、ずり速度 $\dot{\gamma}$ の関数として粘度 μ を整理する必要がある。

粘度計には様々なタイプのものがあるが、食品業界でよく用いられるのが、図2に示すコーン・プレート型粘度計とB型(回転円筒型)粘度計である。図2(a)に示すコーン・プレート型粘度計は、ずり速度 $\dot{\gamma}$ が試料の部位に依らず一定なので、ずり速度 $\dot{\gamma}$ の関数として粘度 μ を求めることができ、必要な試料の量も少ない。一方、図2(b)のB型粘度計の場合、ずり速度 $\dot{\gamma}$ が試料の部位によって異なるので、ニュートン流体以外では正確な粘度が求められず(実験式を用いてずり速度 $\dot{\gamma}$ の近似値を求めることはできる)、測定に大量の試料が必要である。物理的意味および試料の必要量から考えると、コーン・プレート型粘度計が正確といえるが、B型粘度計は安価で取り扱いが容易な長所もあり、よく普及している。また、コーン・プレート型粘度計は、コーンとプレート間の距離

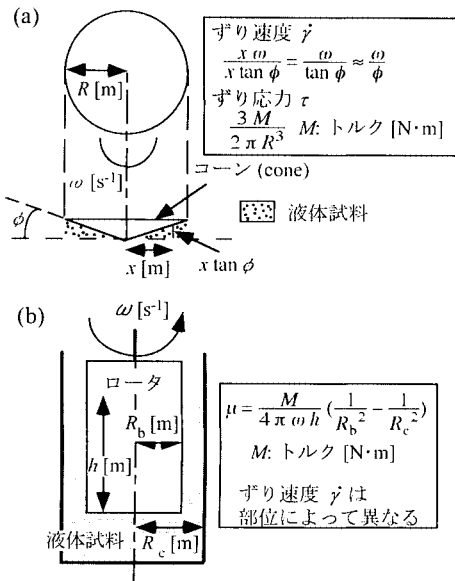


図2 コーン・プレート型粘度計(a)とB型粘度計(b)

が小さいので、増粘剤溶液のような均一な試料以外では測定できないが、B型粘度計はロータと容器壁の間隔が広いので不均質な試料でもみかけの粘度を求めることができる。食品には不均質な分散系が多いので、B型粘度計の方が適している場合もある。

本研究では、コーンプレート型粘度計としては、TA社製のレオメータAR-G2を“コーン・プレート粘度計モード”で用いた。また、東機産業社製のB型粘度計、BL/50を用い、ロータ回転数をマニュアルの実験式を用いてずり速度の近似値を求めた。測定は、ヒトの食塊温度(予備実験で測定) 25℃あるいは20℃で行った。

2.2. 動的粘弾性の概念と測定法

2.2.1. 動的粘弾性の理論

動的粘弾性測定法とは、試料に周波数 (frequency) f [Hz]の正弦的な応力を与えて検出されるひずみの応答から、物質の変形の度合いを表す粘弾性値を求める方法である。周波数 f の代わりに角周波数 ω [s^{-1}] (angular frequency) で整理する場合もあり、物理の振動・波動の理

論によれば、角周波数 ω は周波数 f と以下のように関係づけられる。

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

物理的に、観測時間は $\sim 1/\omega$ [s]と考えられるので、定性的に動的粘弾性測定は観測時間を変化させて、物体の変形および流動の度合いを測定する方法と解釈することができる。

試料が弾性体の場合、応力とひずみに位相 (δ) 遅れはない ($\delta = 0$) が、物体が粘性的な性質をもつと応力に対してひずみが位相 δ だけ遅れる。とくに、粘性体の場合には $\delta = \pi/2$ (90°) となる。この位相遅れ δ 、応力およびひずみの振幅から、動的な弾性率 G' [Pa]と粘性率 η' [Pa·s]が求められる。初等力学の知見で、力学的エネルギーが弾性体中に蓄えられることから、弾性率 G' を貯蔵弾性率 (storage modulus) とよぶ。

動的粘弾性測定から求められるパラメータはこの G' と動的粘性率 η' の2つと考えてよいが、物質の内部構造や状態に関しての情報を得る場合、いくつかのパラメータを定義しておくと便利である。損失弾性率 (loss modulus) G'' [Pa] は、角周波数 ω と動的粘性率 η' を用いて

$$G'' = \omega \eta' \quad (3)$$

のように表される。“損失”弾性率という名称は、 G'' が粘性挙動を反映しており、粘性流体中の物体の運動により力学的エネルギーが失われることからきている。また、以下のように複素弾性率 G^* [Pa]を定義する。

$$G^* = G' + i G'' \quad (4)$$

ここで、 i は虚数単位である。粘性に関しては、複素粘性率 η^* [Pa·s]を以下のように定義する。

$$\eta^* = G^*/(i\omega) \quad (5)$$

(3)、(4)、(5)式から、

$$\eta^* = \eta' - i \eta'' \quad (6)$$

となる。ここで、 η'' [Pa·s]は

$$\eta'' = G''/\omega \quad (7)$$

で定義されるパラメータである。また、損失正接とよばれる $\tan \delta$ は、 G' 、 G'' 、 η' と以下のような関係があり、試料は $\tan \delta$ が小さいほど

弾性的 (固体的)、大きいほど粘性的 (液体的である)。

$$\tan \delta = G'' / G' = \omega \eta' / G' \quad (8)$$

2.2.2. 動的粘弾性の挙動による食品ハイドロコロイドの分類

多くの食品は、水に“微粒子”が分散したハイドロコロイドである。食品ハイドロコロイドは動的粘弾性の角周波数 ω 依存性からレオロジー的に図3のように分類される^{14, 15)}。図3(a)に示すように、測定周波数全域において貯蔵弾性率 G' が損失弾性率 G'' よりも1桁以上大きく ($\tan \delta < 0.1$)、 G' 、 G'' 共に ω に関わらずほぼ一定なハイドロコロイドを真のゲル (弾性的ゲル) といい、寒天やゼラチンなど通常のゲルがこの分類に属する。(3)式から $\log_{10} \eta'$ vs. $\log_{10} \omega$ のプロットは傾き-1の直線になる。図3(b)に示すように、 $G' > G''$ で、 ω の増加に伴って G' および G'' がわずかに増加するハイドロコロイドを弱いゲルという。また、図3(c)に示すように、低角周波数域で $G' < G''$ 、高角周波数域で $G' > G''$ となるハイドロコロイドは真の高分子溶液といわれる。希薄な高分子溶液 (dilute polymer solution) とは、図3(d)に示すように、測定の全角周波数範囲で $G' < G''$ 、 $\log_{10} G'$ vs. $\log_{10} \omega$ プロットが傾き2の直線、 $\log_{10} G''$ vs. $\log_{10} \omega$ プロットが傾き1の直線になる ((3)式から η' は角周波数によらず一定) ハイドロコロイドを意味する。

2.2.3. 動的粘弾性の測定法

動的粘弾性の測定は、TA社製のレオメータAR-G2を用い、角周波数 ω が $0.1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ の範囲で行った。最初に試料毎に応力とひずみとの関係を測定し、線形領域において貯蔵弾性率 G' および損失弾性率 G'' の角周波数 ω 依存性を求めた。また、(3)~(7)式を用いて、 η' 、 η^* を算出した。複素粘性率 η^* は後述の「Cox-Merzの経験則」の適用性を検討する際に用いた。測定温度は、試料によって、15℃、23℃、

25℃等に変えて実験を行った。

2.3. Cox-Merzの経験則

2.1. で述べた粘度 μ と、2.1.1. で述べた動的な粘性率 (η' 、 η'' 、 η^*) は異なる物性値である。ゲルなどの固体・半固体に関しては、 η や η' は測定できるが粘度 μ は測定不可能で、液体に関しては、 μ 、 η' 、 η'' 、 η^* のすべてが測定可能である。液体の場合に、粘度 μ と動的粘性率の大きさを関係づけるのがCox-Merzの経験則である。上述のように、粘度 μ はずり速度 $\dot{\gamma}$ の関数 ($\mu = \mu(\dot{\gamma})$)、 η^* 、 η' 、 η'' は角周波数 ω の関数 ($\eta^* = \eta^*(\omega)$ 、 $\eta' = \eta'(\omega)$ 、 $\eta'' = \eta''(\omega)$) であるが、Cox-Merzの経験則は、「ずり速度 $\dot{\gamma}$ と角周波数 ω の値が等しいとき、粘度 μ と複素粘性率 η^* の絶対値 $|\eta^*|$ ($= (\eta'^2 + \eta''^2)^{1/2}$) の値は等しい」というもので、数式で書くと以下のようなになる^{14, 16)}。

$$\mu(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)| \quad \text{at } \dot{\gamma} = \omega \quad (9)$$

複素粘性率 η^* の絶対値 $|\eta^*|$ は、レオロジーでの習慣上、単に η^* とかくことが多いので、

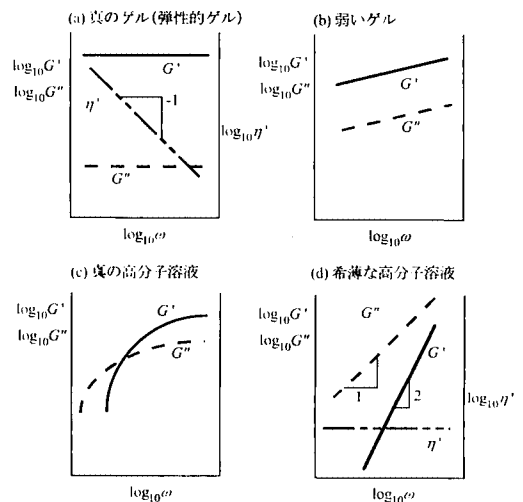


図3 食品ハイドロコロイドのレオロジー挙動
 G' , 貯蔵弾性率; G'' , 損失弾性率;
 η' , 動的粘性率; ω , 角周波数

本稿でも以下では絶対値 $|\eta^*|$ を η^* とかくことにする。

Cox-Merzの経験則は多くの高分子溶液に適用できるが、「弱いゲル」に関しては、 η^* が μ の数倍程度になるという報告もある¹⁷⁾ので、本研究では用いた増粘剤溶液に関してCox-Merzの経験則の成立の有無を確認した。

2.4. 咽頭部での流速測定

咽頭部の流速測定は、医療用超音波診断装置SSA-340（東芝メディカル㈱）を用いて、既報の方法⁶⁻⁸⁾に従って行った。プローブは、ドップラー測定可能なリニアスキャンプローブPLF-703Tを用い、超音波測定周波数は、比較的深度が浅い部分の観察に適する5.0MHzに設定した。被験者は、健常女性で、背もたれのついた椅子に腰掛け、背筋を伸ばして試料食物を嚥下した。喉頭蓋を通過する直前の食塊の流速を測定するために、プローブの接触点を顎下とし、超音波の進行方向は、水平に対して60°の角度に固定した。Bモードで咽頭部の断面を観察して測定部位を確認し、カラードップラーモードによって流速スペクトルを得た。嚥下量は、1回あたり6gとし、20~30回の実験で得られた流速スペクトルをImage-Pro Plus ver.5.0（日本ローパー㈱）を用いて平均化し、食物粒子の流速分布である流速スペクトルを得た。

超音波による流速測定実験は、共立女子大学の研究倫理委員会の承認を得、被験者に実験内容について詳細に説明したうえで行った。

2.5. 試料

モデル試料として、市販の増粘剤であるキサンタンガム（太陽化学㈱、ネオソフトXD）、グアガム（太陽化学㈱、ネオソフトG）、カルボキシメチルセルロース（CMC；日本製紙ケミカル㈱、MG-1）、 α 化デンプン（三和澱粉工業㈱、タピオカアルファーTP-2）を用い、濃度を変えた溶液を調製して実験に用いた。咽頭部の流速測定に関しては、比較試料として、誤嚥

しやすいといわれる水（サントリー㈱、南アルプス天然水）、誤嚥しにくいといわれるヨーグルト（明治乳業㈱、明治ブルガリアヨーグルト低糖LB81）を用いた。

3. 結果と考察

3.1. 増粘剤溶液の粘度

図4に、コーン・プレート型粘度計とB型粘度計を用いて得られた増粘剤溶液の流動特性（粘度 μ のずり速度 $\dot{\gamma}$ 依存性）曲線をいくつか示す。コーン・プレート型粘度計およびB型粘度計は同程度の粘度値を示しており、B型粘度計でも近似的な流動特性曲線が得られることがわかる。ただ、粘度の大きさにもよるが、B型粘度計では、変化させることができるずり速度は1桁程度（例えば、 $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ ）で、粘度が $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以上の溶液については、 $\dot{\gamma} = 20 \text{ s}^{-1}$ 以上のずり速度における測定値を得ることは難しいようである。

キサンタンガムは、介護食にもよく使われる増粘剤だが、図4に示すように顕著なずり流動化（ずり速度に伴う粘度値の低下）を示した。一方、CMC溶液の粘度値はずり速度によらず

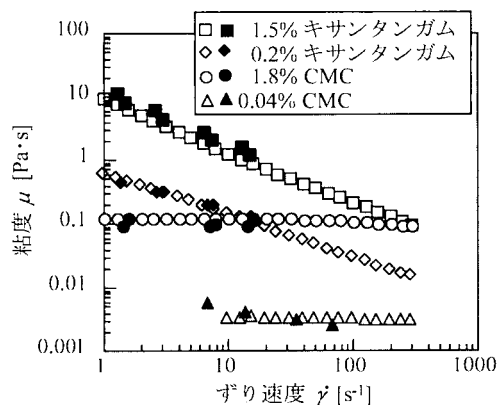


図4 増粘剤溶液の流動特性(粘度 μ vs. ずり速度 $\dot{\gamma}$)の例
白抜き(○△◇□): コーン・プレート型粘度計
黒(●▲■◆): B型粘度計
測定温度は25℃

ほぼ一定で、ニュートン流体に近かった。その結果、図4の0.2%キサントガム溶液、1.8%CMC溶液では、ずり速度によって粘度値の大小が逆転した。このことから、異なる試料間で粘度値を比較する場合、ずり速度を規定しなければ意味がないことがうかがわれる。

3.2. 動的粘弾性とCox-Merzの経験則の妥当性

貯蔵弾性率 G' および損失弾性率 G'' の角周波数 ω 依存性から、キサントガム溶液は高濃度では弱いゲル、低濃度では真の高分子溶液、グアガム溶液は高濃度では真の高分子溶液、低濃度では希薄な高分子溶液、CMC溶液は検討した範囲で希薄な高分子溶液であることが確認された(データ省略)。ただ、動的粘弾性挙動から「弱いゲル」であることが確認されたキサントガム溶液も見かけ上は、トロミのある液体であった。

得られた貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' とから、(3)~(7)式を用いて、複素粘性率 η^* を算出した。図5に、 $\dot{\gamma} = \omega$ のときの増粘剤溶液の粘度 μ と複素粘性率 η^* を対比して示す。図5(a)に示すCMCおよびグアガム溶液に関しては、 $\dot{\gamma} = \omega$ のとき $\mu \approx \eta^*$ で、Cox-Merzの経験則(9)式が成立していることが確認された。一方、図5(a)に示すキサントガム溶液に関しては、レオロジー的に真の高分子溶液とみなせる低濃度の試料については、 $\dot{\gamma} = \omega$ のとき $\mu \approx \eta^*$ でCox-Merzの経験則(9)式が成立するが、弱いゲルとなる高濃度の試料では、複素粘性率 η^* が粘度 μ の数倍程度の値を示した。つまり、図5からは、レオロジー的に希薄な高分子溶液および真の高分子溶液に関してはCox-Merzの経験則が成立するが、弱いゲルに関しては成立しないことが確認される。弱いゲルに関しては、Cox-Merzの経験則が成立しないことは、IkedaおよびNishinariの κ -carrageenanについての報告¹⁷⁾と同様である。

また、弱いゲルであるキサントガム溶液については、動的粘性率 η' の方が複素粘性率 η^*

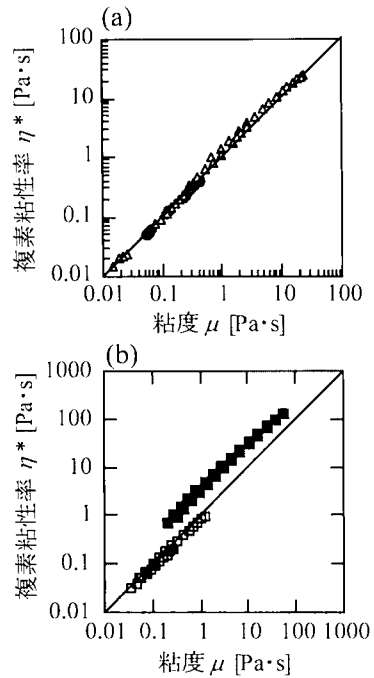


図5 増粘剤溶液の粘度 μ と複素粘性率 η^* の比較
(a) CMC(○)とグアガム(△)
(b) キサントガム:■, 弱いゲル;□, 真の高分子溶液

より粘度 μ に近い値を示した(データ省略)。真の高分子溶液および希薄な高分子溶液に関しても、 $\eta'' \ll \eta'$ のため、 $\mu \approx \eta' \approx \eta^*$ となった。つまり、本研究で検討した増粘剤溶液については、粘度 μ もしくは動的粘性率 η' がほぼ等しくなることが確認された。

3.3. ヒト咽頭部における食物の流速測定

図6に、超音波パルス・ドップラー法によって得られた、誤嚥しやすい水と誤嚥しにくいヨーグルトのカラースペクトルを示す。本研究では、咽頭部を通過する食物の小片を粒子とよぶことにするが、スペクトルの赤色の部分は粒子密度(粒子数)が高く、青い部分は粒子密度が低いことを意味している。誤嚥しやすい水が、誤嚥しにくいヨーグルトに比べて流速の分布が広く、流速が大きい粒子が存在した。ヨーグルトの場合、流速が大きい粒子が存在しないため、

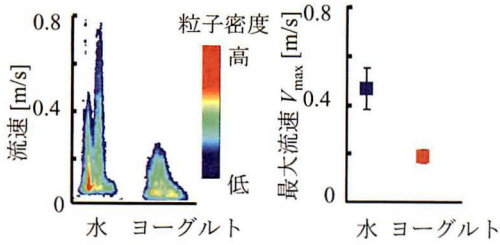


図6 水とヨーグルトの咽頭部における流速スペクトル

嚥下時に食塊の通過のタイミングが取れない高齢者が誤嚥しにくいと考えられる。図6のカラースペクトルからノイズをカットするため、粒子数の最頻値(mode)から -12dB に減少した流速から、最大流速 V_{max} を求めた。図6右に水とヨーグルトの最大流速を示すが、水の最大流速が約 $0.5\sim 0.6\text{m/s}$ 程度なのに対し、ヨーグルトの V_{max} は約 0.2m/s であった。このことは、最大流速 V_{max} によって誤嚥のしにくさが予測できることを意味している。

図7に、CMC溶液とキサンタンガム溶液に関して、咽頭部流速の濃度依存性を示す。図には比較のために、誤嚥しやすい水(濃度0%の点)と誤嚥しにくいヨーグルトのデータも示してある。流速スペクトルを解析して得られる平均流速 v_m 、最大流速 V_{max} 共に、増粘剤濃度の増加に伴って減少し、ヨーグルトの値に近づく傾向がみられた。このことは、上述の誤嚥の要因や嚥下障害者にとってトロミ剤溶液やヨーグルトが誤嚥しにくいという経験則と矛盾しない。ただ、図7において、各増粘剤の粘度が2桁程度変化しているが、平均流速は2倍程度しか変化していない。単純な管内層流なら流速は粘度に反比例するはずなので^{10, 14)}、ヒトの嚥下においては管内流動と異なり、様々な器官が流下速度を精密に制御しているためと考えられる。しかしいずれにせよ、図7の結果は、流速の大きさによって誤嚥の危険性を判断できる可能性を示している。また、平均流速と最大流速とでは、最大流速の方が平均流速より変化が大きく、誤嚥の危険性を判断するのに便利である。

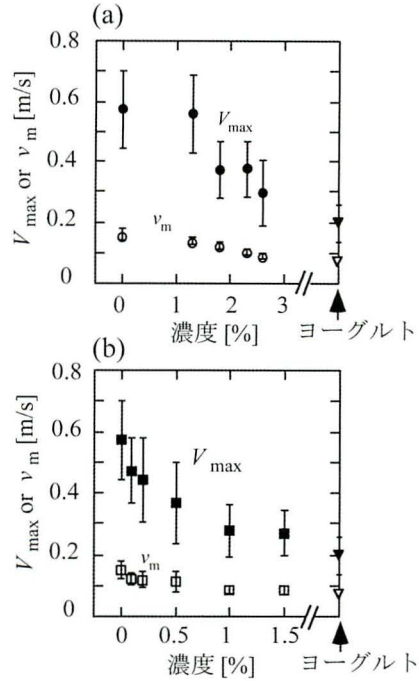


図7 咽頭部の平均流速(v_m)および最大流速(V_{max})の増粘剤濃度依存性
(a) CMC (b) キサンタンガム

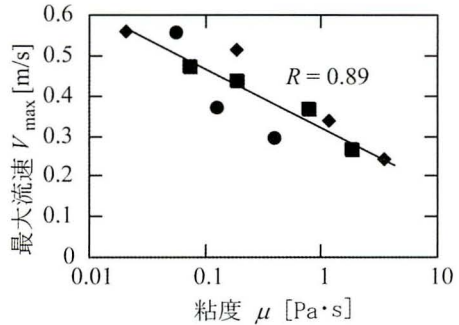


図8 咽頭部最大流速 V_{max} と粘度 μ (25°C)との相関
ずり速度 $\dot{\gamma} = 6.3\text{s}^{-1}$
●, CMC; ■, キサンタンガム; ◆, グアガム

図8に、CMC、キサンタンガム、グアガムに関して、ずり速度 $\dot{\gamma} = 6.3\text{s}^{-1}$ での粘度 μ と最大流速 V_{max} との関係(片対数プロット)を示す。 $\log_{10}\mu$ と V_{max} の間には相関係数 R が約 0.89 の高い相関がみられ、これは、粘度 μ が嚥下障害者

用介護食の物性指標として有効であることを意味している。

3.4. 嚥下障害者用介護食の物性指標に関する考察

3.4.1. 粘度について

ヒトの嚥下は、様々な器官が関与する非常に複雑な現象であり、嚥下のしにくさには、粘度、粘膜への付着性、弾性率や「かたさ」、含水率など、食物の様々な物性や特性が関わってくるといわれている。

介護食の流動性に着目した場合、流動に関わる物性値は粘度 μ （密度も関係するが、食品の場合、密度はほぼ水（ $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ）程度と考えてよい）なので、物理的観点から、液状食物の物性指標は粘度のはずである。実際、本稿の図8や前報⁹⁾において、粘度 μ と咽頭部の最大流速 V_{max} に高い相関があることが示され、粘度が液状食品の重要な物性指標となることがうかがわれる。

本稿の図8では、ずり速度 $\dot{\gamma}=6.3\text{s}^{-1}$ での粘度 μ と咽頭部の最大流速 V_{max} との間に相関係数 $R=0.89$ の相関があることを示した。前報⁹⁾において我々は、ずり速度 $\dot{\gamma}$ が 1s^{-1} 、 10s^{-1} 、 100s^{-1} の粘度の中では $\dot{\gamma}=10\text{s}^{-1}$ の粘度が V_{max} との相関が最も高いことを報告した（ $R=0.92$ ）。超音波測定から求められる平均流速（図7）とヒト咽頭部のサイズから、咽頭部でのずり速度は $\sim 10\text{s}^{-1}$ （おそらく数十 s^{-1} ）と推定される⁹⁾ことから、 $\dot{\gamma}\sim 10\text{s}^{-1}$ における粘度が最大流速 V_{max} と相関が高いことは妥当な結果と考えられる。物性指標として最適なずり速度値については、今後の検討が待たれる。ただ、図4で示したように、食品業界でポピュラーなB型粘度計などの安価で使いやすい粘度計を用いた場合、数十 s^{-1} のずり速度における粘度測定は困難である（ $\dot{\gamma}$ の上限が約 10s^{-1} ）。よって、 10s^{-1} に近い粘度値を用いることも実用上、有効と考えられる。

固体食品やゲルなどの半固体食品などについ

ては、粘度 μ を定義できない。しかし、ヒトは固体・半固体状の食物を咀嚼し唾液と混合し、食塊として嚥下する。そうした食塊の「みかけの粘度」と咽頭部流速との関係については、今後、詳細に検討する必要がある。固体・半固体食品の食塊は不均質なスラリー状なので、みかけの粘度測定には、B型粘度計の方がコーン・プレート型粘度計より適していると考えられる。

3.4.2. 動的粘弾性について

我々は、既に周波数 $f=1\text{Hz}$ における貯蔵弾性率 G' が約 100Pa 以上、動的粘性率 η'' が約 $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上のゲルや増粘剤溶液は誤嚥の危険性が少ないことを報告した^{6,8)}。動的粘弾性は、応力とひずみに線形関係が成立する微小変形下で測定されるので、本来は、試料の流動性と直接の関係はないはずである。しかし、増粘剤溶液に関しては、3.2.で述べたように、Cox-Merzの経験則がほぼ成立し（弱いゲルに関しても数倍程度のずれで、物性値のオーダーは一致している）、かつ η^* に対する η'' の寄与が小さいので、 $\dot{\gamma}=\omega$ のとき、 $\mu\equiv\eta^*\equiv\eta'$ となる。このことから、粘度 μ の代わりに動的粘性率 η' を用いることができる。周波数 f に関しては、 $f=1\text{Hz}$ は（1）式から角周波数 $\omega=6.28\text{s}^{-1}$ に相当する。図8に示したように、 $\dot{\gamma}=6.3\text{s}^{-1}$ における粘度 μ は咽頭部最大流速 V_{max} と高い相関があるので、増粘剤溶液に関しては $f=1\text{Hz}$ における動的粘性率 η' が物性指標になると解釈できる。

一方、ゲルに関して η' が指標として有効である物理的解釈は難しい。ただ、 η' は、液体、固体いずれでも測定でき（粘度 μ は液体のみ）、ゲル化剤についても、ゾル領域からゲル領域まで濃度増加に伴って連続的に増加するパラメータである。よって、ゾルの粘度（ $\mu\equiv\eta'$ と考えられる）値以上の η' 値であれば、咽頭部流速は小さくなる可能性はある。上述のように、ゲルは粉碎され、唾液と混ざった食塊となって嚥下されるので、ゲルの η' とその食塊粘度と

の関係、ゲル化剤のゾル-ゲル転移点近傍における η' の変化などについて定量的に検討する必要がある。

貯蔵弾性率 G' が嚥下障害者用介護食の物性指標となりうる(G' が100Pa以上)^{6, 8)}理由について考察する。増粘剤やゲル化剤濃度の上昇に伴い、 η' 、 G' は共に増加するので、 η' に閾値(1 Pa·s)が存在すれば当然、 G' にも存在する。(8)式から、 $G' = (\omega \eta') / \tan \delta$ なので、 $\omega = 6.28 \text{ s}^{-1}$ ($f = 1 \text{ Hz}$)で測定を行う場合、ゲルまで含めて考えると(上述のように、ゲルは $\tan \delta < 0.1$ である)、 $\eta' > 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ なら、 $G' > \sim 100 \text{ Pa}$ となる。

粘度 μ に関して、 $\dot{\gamma} = 6.3 \text{ s}^{-1}$ より高いずり速度の粘度 μ の方が、咽頭部最大流速との相関がいくぶん高いと述べた。動的粘弾性についても、周波数 $f = 1 \text{ Hz}$ 、すなわち $\omega = 6.28 \text{ s}^{-1}$ より大きな角周波数における η' や G' の方が介護食の指標としては適切かもしれない。しかし、固定周波数でゲルの動的粘弾性測定を行う場合、周波数を $f = 1 \text{ Hz}$ とすることが多い。 $f = 1 \text{ Hz}$ ($\omega = 6.28 \text{ s}^{-1}$)の η' と G' と咽頭部最大流速 V_{max} との相関はかなり高く、過去の物性データと比較するためにも、 $f = 1 \text{ Hz}$ における粘弾性値を用いることは有効と思われる。

上述のように、物理的意味からは、咽頭部での食塊の流速と関係するのは食塊の粘度である。しかし、介護食の物性設計の観点からは、食物そのものの物性と咽頭部流速との関係を把握する必要がある。動的粘弾性は、試料のサイズや形状によらない物性値で、粘度 μ と異なり、ゲルでも測定できる。特に動的粘性率 η' は、ここまでの議論から増粘剤溶液に関しては粘度 μ と対応づけやすく、現象論的に、介護食の指標として適した物性と考えられる。食物の動的粘性率 η' と食塊の粘度との関係の把握は、今後の検討課題である。

3.4.3. その他の物性・テクスチャーについて

上述のように、嚥下障害者用介護食の“物性”

としては、「かたさ」、「凝集性」、「付着性」といったテクスチャー測定で求められるパラメータが重要という研究者がいる。テクスチャー測定では、円筒形の試料の上部に平らなプランジャーを当てて上下して試料に大変形を与え、応力 vs. ひずみの関係をもとめる。そして、1回目の圧縮ピークの頂点におけるピークを「かたさ」、その直後の引っ張り過程の負の応力を示すピーク面積を「付着性」、2回目の圧縮ピークと1回目の圧縮ピークの面積比を「凝集性」という^{11, 12)}。こうした「かたさ」、「付着性」、「凝集性」などのパラメータは、大変形下で測定するので、微小変形下で測定する動的粘弾性より、ヒトの咀嚼行動や食感(狭義のテクスチャー)に合うといわれてきた。1回目の圧縮ピークを「かたさ」というのは、まだしもその意味を考えやすい。「付着性」に関しては、負の応力を示すピーク面積はプランジャーを持ち上げる際にプランジャーに付着する試料の量が多ければ大きくなることから、「付着性」といわれるのだろう。「凝集性」に関しては、1回目の圧縮で破壊される試料(ビスケット、煎餅など)では、2回目のピーク面積は0に近くなるので、“ばらばらになりやすい”試料では小さくなる。適度に“かたい”食物が咀嚼・嚥下しやすく、まとまりやすい食塊を形成できる食物は誤嚥しにくいということは経験的に知られており、また本稿の最初に述べた咀嚼・嚥下の過程や誤嚥の機構を考えても妥当といえる。よって、「かたさ」を介護食のかたさの指標とし、“まとまりやすさ”を「凝集性」で評価する意図があると考えられる。また、「付着性」については、つきたての餅などがのどに詰まりやすいことから、飲み込みやすさと関係があるとしているのだろう。しかし、この3つのテクスチャーパラメータの意味を考えるといくつかの問題がある。一つには、こうしたテクスチャーパラメータは試料の大きさやサイズに依存するので、本来の意味での物性(physical properties)ではない^{10, 11)}。よって、異なる測定機器間で値

を比較することが難しいので、これらを指標とする場合、測定値のみでなく、測定装置やプランジャーの形・サイズ、プランジャーの移動速度を細かく規定する必要がある。プランジャーの移動速度によっても、測定値が変わってくるが、どのような移動速度が適切かを決定する根拠はあまりない。二つ目に、「凝集性」、「付着性」については、その物理的意味の解釈にも問題がある。プランジャーの上下で測定された「凝集性」が、ヒトの口腔内における“まとまりやすさ”に対応するかには疑問がある。付着性についても、ステンレスやテフロンなど元来、試料が付着しにくい素材でできているプランジャーを用いて得られた「付着性」が、ヒトの口腔内や咽頭部の粘膜に対する付着性と対応するかには疑問がある。また、このような物理的意味づけが難しいパラメータは、“流動しやすさ”、“べたつきやすさ”、“変形しやすさ”、“ばらばらになりやすさ”など、嚥下に関わる特性が複合されて現れる可能性がある（つまり、要因が分離できない）。

本稿で述べてきたように、粘度は流動性と関係するのが物理的にはっきりしている。その結果、図8に示したように、粘度 μ は咽頭部における流動性と非常に高い相関がみられる（生体計測において、相関係数 R が0.9というのは極めて高いといえる）。これは、「付着性」、「凝集性」に関しては、官能検査などによる“飲み込みやすさ”との相関以外の十分な実験的根拠が得られていないのと対照的である。

今後、“べたつきやすさ”、“ばらばらになりやすさ”などを評価できる物性・特性を明らかにしていくことが必要で、テクスチャー測定法を洗練化していくアプローチも試みる必要がある。また、上述の動的粘弾性挙動からコロイド中の高分子の絡み合い構造との対応を見たり、ヒトの粘膜に近い素材と食物との付着力を測ることも有力なアプローチと考えられる。

ヒトの咀嚼・嚥下は、非常に複雑な現象であり、機器による物性測定のみで、誤嚥のしにく

さを議論することは危険である。しかし、食品物性研究者は、測定する物性の意味づけを明確にし、適切な物性指標を提言していくことが必要である。機器による物性に関する検討、介護や医療現場における経験の蓄積や臨床試験、食品素材メーカーにおける素材開発を三位一体にして検討を進めていくことが、介護食に適切な物性を明らかにしていくうえで必要と思われる。

4. まとめ

嚥下障害者用介護食の物性に関して、主に、ヒト咽頭部における食塊の流速分布の観点から考察を行った。

超音波パルス・ドップラー法による測定の結果、誤嚥しやすいといわれる水では最大流速が大きく、誤嚥しにくいといわれるヨーグルトでは小さかった。また、増粘剤に関しては、粘度 μ と最大流速との間に高い相関がみられ、粘度 μ が嚥下障害者用介護食の物性指標として適切なことが確認された。ただ、粘度測定のみでずり速度 $\dot{\gamma}$ が数十 s^{-1} 程度が望ましいと考えられるが、 $10s^{-1}$ 近くのずり速度（食品業界でよく使われるB型粘度計のずり速度の上限に近い）であれば、介護食の物性指標として満足であることが確認された。増粘剤溶液に関しては、Cox-Merzの経験則がほぼ満たされていることが確認された。このことを踏まえて、既に我々が報告してきた周波数 $f=1\text{ Hz}$ における動的粘性率 η' や貯蔵弾性率 G' も嚥下障害者用介護食の物性指標になりうる理由について考察した。

引用文献

- 1) 総務省：高齢化の状況及び高齢社会対策の実施の状況に関する年次報告 平成20年度版
- 2) 藤谷順子，金谷節子，林静子 編：「嚥下障害食の作り方」，日本医療企画，東京，2002
- 3) 高橋智子：摂食と嚥下，「おいしさの科学事典」，山野善正編，朝倉書店，東京，

- 2003, pp. 329-336
- 4) 河村洋二郎：「口腔生理学」，永末書店，京都，1982
- 5) T. Takahashi, T. Nitou, N. Tayama, A. Kawano, and H. Ogoshi; Effect of physical propertyes and oral perception on transit speed and passing time of semi-liquid food, *J. Texture Studies*, 33, 585-598 (2003)
- 6) 長谷川温子，乙黒明子，熊谷仁，中沢文子：嚥下したゲル状食品の咽頭部での超音波による流速比較，日本食品科学工学会誌，52, 441-447 (2005)
- 7) 長谷川温子，中澤文子，熊谷仁：超音波により測定した咽頭部での液状食品の流速に及ぼす嚥下量の影響，日本食品科学工学会誌，55, 330-337 (2008)
- 8) 長谷川温子，中澤文子，熊谷仁：嚥下困難者用食品の咽頭部での超音波による流速比較，日本食品科学工学会誌，55, 541-548 (2008)
- 9) H. Kumagai, A. Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama and H. Kumagai; Relationship between Flow Properties of Thickener Solutions and their Velocity through the Pharynx Measured by the Ultrasonic Pulse Doppler Method, *Food Science and Technology, Research*, 15, 203-210 (2009)
- 10) 熊谷仁，熊谷日登美，萩原知明：食品の物性そして水 I 食品工学における物性そして水，日本食品工学会誌，9, 79-89 (2008)
- 11) 熊谷仁，熊谷日登美：4. 食品の物性，「食品学。－食品の化学・物性と機能性」，加藤保子，中山勉 編，南江堂，2007，pp. 117-132
- 12) 高橋智子，大越ひろ：市販増粘剤を用いた飲料の飲み込み特性および力学的特性の特徴－市販増粘剤の使い易さも含めて－，*New Food Industry*, 44, 33-41 (2002)
- 13) 厚生労働省医薬食品局食品安全部長通知：特別用途食品の表示許可等について
- 14) 熊谷仁，熊谷日登美：食品の物性そして水 V 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, 137-148 (2009)
- 15) K. Nishinari; Rheology of physical gels and gelling process, *Reports on Progress in polymer Physics in Japan*, 43, 163-192 (2000)
- 16) W. P. Cox and E. H. Merz; Correlation of dynamic and steady flow viscosities, *J. Polymer Science*, XXVIII, 619-622 (1958)
- 17) S. Ikeda and K. Nishinari; “Weak gel” type rheological properties of aqueous dispersions of nonaggregated k-carrageenan helices, *J. Agric. Food Chem.*, 49, 4436-4441 (2001)