

嚥下困難者用食品の物性に関する研究

熊谷 仁

1. はじめに

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、嚥下機能が低下した高齢者が増加している¹⁾。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ことを誤嚥という。誤嚥の大きな理由の一つとして食塊が咽頭部通過時のタイミングがとれないことが挙げられ、高齢者では食塊の咽頭部での流速が大の場合、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、ゼラチンなどのゲル化剤や各種増粘剤を添加した様々な介護食の開発が行われている^{2,3)}。しかし、嚥下障害者にとっていかなる物性 (physical properties) の食物が適切かの科学的根拠は明確ではない。

一般に、「べたつき」の度合いが小さく、咽頭部での「まとまりやすさ」が良好な食品が嚥下機能の低下した高齢者に適しているとされる。この場合の「まとまりやすさ」とは、“口腔内において食塊形成をしやすい”という意味である⁴⁾。ゼラチンなどのゲル化剤を用いた食品がこうした意味でべたつきはそれほどではなく、“まとまりやすい”ことは、直感的には納得できる。現在、咀嚼・嚥下障害者用介護食に関する研究や品質評価の領域では、この「べたつき」、「まとまりやすさ」を、TPA試験 (Texture Profile Analysis) から得られる付着性、凝集性というパラメータでそれぞれ評価しようとする傾向が多く見られる。TPA試験では、円筒形の試料の上部にレオメータに装着した平らなブ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.* 歪みの関係を測定する。そして、応力 *vs.* 歪み曲線から後述のように、かたさ (hardness)、付着性 (adhesiveness)、凝集性 (cohesiveness) という3つのパラメータを求める⁴⁾。厚生労働省は、旧「高齢者用食品」(1994年策定⁵⁾)にあった「そしゃく・えん下困難者用食品」を廃止し、「えん下困難者用食品」の基準を策定した(2010年に消費者庁に移管)⁶⁾。この新基準では、TPA試験で求められる「硬さ」(硬さという漢字が用いられている)、「付着性」、「凝集性」が嚥下困難者用食品の指標として採用されている。しかし、TPA試験から求められるパラメータがヒトの口腔内における食物・食塊の挙動とどの程度関連があるかの根拠は明らかでない。TPA試験で求められるパラメータ、特に「凝集性」を“まとまりやすさ”の指標とすることについては疑問がある^{4,7)}。

誤嚥の大きな原因の1つが、上述のように咽頭部における食塊の流動性と密接に関係していることから、誤嚥しにくい食品物性の解明のためには、咽頭部における食物の流速と食物の物性との関係を検討するのが有力なアプローチである。従来、咽頭部での食物の流れはX線によるビデオ撮影法 (Videofluorography, VF) によって観察されてきたが、VFはX線を用いるために被験者に

対する被曝の問題があり、繰り返し実験を行うことができない。また、X線造影剤を添加すると、食物の物性が変化する問題がある。我々は、トロミ剤、ゲル化剤などから調製される食物について、超音波パルスドブラー法により測定される流速分布と物性との関係について検討を行ってきた⁸⁻¹⁴⁾。その結果、咽頭部最大流速 V_{\max} が誤嚥しやすい水では大きく、誤嚥しにくいとされる水では小さいことから、 V_{\max} が誤嚥の危険性の尺度となりうることを提唱した。

本研究では、本研究では、ゲル化剤から調製される試料を用いて、「えん下困難者用食品」の基準にある TPA 試験および咽頭部流速の測定を行い、得られたパラメータと咽頭部の流速との関係について検討を行った。また、物理的意味が明瞭な動的粘弾性やゾルの粘度¹⁵⁾の測定を行い、それらのパラメータと嚥下との関係についても検討を行った。

2. 方法

2. 1. 試料および調製法

試料としては、ゲル化剤である κ -カラギーナン製剤（クールアガー、新田ゼラチン株式会社、大阪）を用いた。また、比較対照試料として、誤嚥しにくいといわれているヨーグルト（明治ブルガリアヨーグルト LB81（低糖）、株式会社明治、東京）および誤嚥しやすいといわれている水（天然水南アルプス、サントリーホールディングス株式会社、大阪）を用いた。

三角フラスコに蒸留水を秤量し、所定量の κ -カラギーナン製剤のパウダーを添加し、マグネティックスターラーつきホットプレートを用いて攪拌しながら 80℃ まで加熱を行った。さらに 80 ± 2℃ を保持しながら 5 分間攪拌して完全に溶解させた。室温下で 55℃ まで降温し濃度調整後、直径 40 mm、高さ 15 mm のステンレス容器に分注し、20℃ の恒温槽に 22 ± 2 時間保持したものを試料として測定に用いた。以下、 κ -カラギーナン製剤を用いて調製した試料をゲル化剤試料と呼ぶことにする。

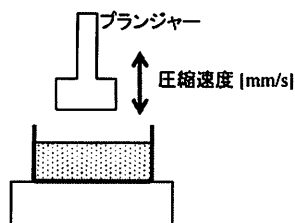
2. 2. TPA 試験

装置としては、山電（東京）社製のレオメータ、“レオナー RE-33005”（以下、RE-1）と“レオナー RE2-33005”（加速時間が短い改良型、以下、RE-2）の 2 台を用いた。

TPA 試験に関しては、「えん下困難者用食品」の基準の測定方法⁶⁾に準拠して、直径 40 mm のステンレス製のシャーレに高さあるいは深さ 15 mm に充填した試料を、直径 20 mm、高さ 8 mm の樹脂製円筒型プランジャーを用いてクリアランス 5 mm（変形率 66.6%）で、試料の中心部を 2 回連続圧縮した（図 1 (a)）。得られたテクスチャー曲線（応力 vs. 歪みプロット）から、1 回目の圧縮ピークの高さ H であるかたさ、その直後の引っ張り過程のピーク面積 B である付着性、2 回目の圧縮ピークと 1 回目の圧縮ピークの面積比 A_2/A_1 である凝集性を算出した（図 1 (b)）。それぞれの機器および測定速度に関して、同一濃度の試料について、試料調製を 2 回以上行い、15 回以上測定した。

測定速度については、基準での試験方法で定められた 10 mm/s に加え、一般的に多く使われて

(a) 定速2回圧縮試験



(b) TPA 曲線と各パラメータの算出法

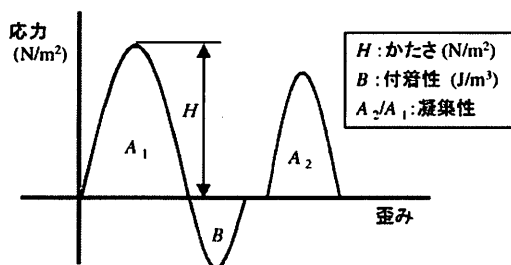


図1 TPA試験 (Texture Profile Analysis) の概要

きた速度である 1 mm/s でも測定を行った。測定温度は 20℃とした。

2. 3. 超音波パルスドプラー法による咽頭部の流速測定方法

超音波パルスドプラー法による咽頭部の流速測定方法は、既報の方法とほぼ同様である^{8,14)}。

超音波測定には医療用超音波診断装置 SSA-340A (東芝メディカル (株)) を用い、ドプラー測定が可能なりニアスキャンプローブ PLF-703NT を装着した。超音波の周波数は比較的深度が浅い部分の観察に適する 5.0MHz を使用した。

被験者は、咀嚼・嚥下機能に異常のない健康女性とした。被験者はなるべく自然な状態で咀嚼、嚥下できるように椅子に腰掛け、背筋を伸ばした状態で嚥下した。嚥下量は主として 6g とした。喉頭蓋を通過する直前の食塊を測定するため、超音波の進行方向は、水平に対して上向きに 60° の角度に固定した。嚥下した食物の流速の測定は、パルスドプラー法で行った。またプローブを当てて位置を特定するために、B モード、カラードプラーモードを使用した。B モードは、超音波の反射が器官毎に異なることを利用し、咽頭部の断面を観察して測定部位を確認する方法である。カラードプラーモードは超音波パルスドプラー法で測定された信号がカラー表示される。超音波の信号強度は咽頭部を通過する食物の小片の数に比例するが、その小片を以下、食物の粒子 (particle) と呼ぶことにする。得られた流速スペクトルから、ノイズをカットし粒子が確実に存在すると考えられる流速から最大流速 V_{\max} を求めた。

被験者は咀嚼・嚥下機能に異常がない 20 歳代の健康女性 1 人とした。本試験はヘルシンキ宣言の精神に則り、共立女子大学・共立女子短期大学研究倫理審査委員会の承認を受けると共に、被験

者に研究の趣旨および試験内容を十分に説明し同意を得て行った。

2. 4. 動的粘弾性¹⁵⁾

動的粘弾性とは、物体に角周波数 ω [rad/s]の微小な正弦的な応力を与えて検出される歪みの応答から求められる物性である。応力に対しての歪みの位相遅れ δ と応力と歪みの振幅から、試料の弾性的性質を表す貯蔵弾性率 G' [Pa]と粘性的性質を表す動的粘性率 η' [Pa·s]が求められる。また、動的粘弾性測定から物質の内部構造や状態に関する情報を得る場合、いくつかのパラメータを定義しておくことと便利である。損失弾性率 G'' [Pa]は、

$$G'' = \omega \eta' \quad (2)$$

のように表される。また、動的粘弾性の挙動を解析する際、複素平面で考えた方が便利なので、以下のように複素弾性率 G^* [Pa]を定義する。

$$G^* = G' + i G'' \quad (3)$$

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。

$$\eta^* = G''/(i\omega) \quad (4)$$

(2), (3), (4)式から、

$$\eta^* = \eta' - i \eta'' \quad (5)$$

となる。ここで、 η'' [Pa·s]は

$$\eta'' = G'/\omega \quad (6)$$

で定義されるパラメータである。

動的粘弾性測定は、AR-G2 (TA インストルメント社製) および Rheosol-G5000 (UBM 社製) を用いて行なった。AR-G2においては、治具として主には直径 40 mm (1", ギャップ 24 μ m) のコーンプレートを使用した。低濃度試料で機器の感度的に測定が難しくなる試料に関しては直径 60 mm (0.5", ギャップ 15 μ m) のコーンプレートを使用した。測定濃度範囲は 1~5% であるが、1% 台を中心に測定を行った。Rheosol-G5000 における測定濃度範囲は 2~5% とした。測定温度は 20 $^{\circ}$ C とした。

2. 5. ゾルの粘度¹⁵⁾

一般にゲル化剤を用いて調製されるハイドロコロイドの場合、低濃度においては流動性のあるゾル (sol)、高濃度では弾性を有するゲル (gel) となる。液体の流動性の程度を表す物性値が粘度 (viscosity) μ で、その挙動からゾルとゲルの境界であるゾル-ゲル転移点 (sol-gel transition point) を知ることができる。

液体の粘度 (流動粘度) μ は以下のように定義される。

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (7)$$

ここで、 τ はずり応力、 $\dot{\gamma}$ はずり速度である。(7)式から、粘度 μ の値が小さいほど、流体は流れやすい。 $\dot{\gamma}$ に関わらず μ が一定の流体をニュートン流体というが、多くの食品溶液は粘度 μ がずり速度

に依存する非ニュートン流体である。非ニュートン流体に関して議論をする場合、ずり速度 $\dot{\gamma}$ を規定する必要がある。

また、液体の場合、粘度 μ 、 η' いずれも実測可能だが、この液体に関する粘度 μ と動的粘性率との関係を示すのがCox-Merzの経験則¹⁵⁾である。 $\mu = \mu(\dot{\gamma})$ (「粘度 μ がずり速度 $\dot{\gamma}$ の関数」の意味)、 $\eta^* = \eta^*(\omega)$ 、 $\eta' = \eta'(\omega)$ 、 $\eta'' = \eta''(\omega)$ であるが、Cox-Merzの経験則は、 $\dot{\gamma} = \omega$ のときに、 μ と複素粘性率 η^* の絶対値 $|\eta^*|$ が等しいことを主張しており、数式で表すと以下ようになる。

$$\mu = |\eta^*| = (\eta'^2 + \eta''^2)^{1/2} \text{ at } \dot{\gamma} = \omega \quad (8)$$

ただし、レオロジーでは習慣上、 η^* の絶対値 $|\eta^*|$ を単に η^* と書くことが多い。また、 η'' が小さい液体では、 $\eta^* \approx \eta'$ となる。

粘度測定には、不均質な試料の測定も可能なB型粘度計、BL/50 (東機産業)を用いた。500ml (内径 90mm) ビーカーに試料を入れ、回転数 6, 12, 30, 60 rpm での2分後の粘度を測定した。測定温度は20°Cとした。ロータは試料の粘度に対応したものを、No. 1～4 およびBLの5種類の内から選択した。また、回転数は東機産業が示している換算係数を用いて、ずり速度 $\dot{\gamma}$ に変換した。

3. 結果と考察

最初に、用いたレオメータ (RE-1 および RE-2) および測定速度によるテクスチャー曲線の差異について述べる。図2(a)に、測定速度1 mm/s、図2(b)には測定速度10 mm/sでの測定により

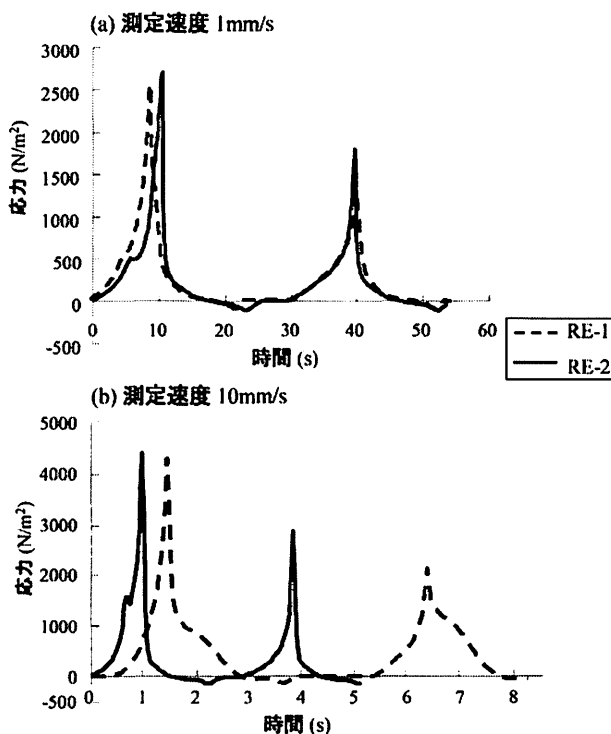


図2 ゲル化剤試料 (3%) のTPA曲線

得られたゲル化剤試料（濃度 3%）の測定温度 20℃におけるテクスチャー曲線を示す。装置の応答遅れの程度を明瞭にするために、横軸は時間(s)としてある。図 2(a)に示す測定速度 1 mm/s におけるテクスチャー曲線に関しては、2つのレオメータで得られたテクスチャー曲線の波形がほぼ一致し、時間的なずれはほとんど認められなかった。一方、図 2(b)に示す測定速度 10 mm/s のテクスチャー曲線に関しては、RE-1 と RE-2 では波形が大きく異なり、2回の圧縮にかかる時間においても RE-1 を用いた場合にはほぼ 7～8 秒であるのに対して、RE-2 ではほぼ 5 秒弱であった。つまり、厚生労働省の基準にある測定速度 10 mm/s の方が、使用機器による測定値の差異が大きいことがうかがわれる。

図 3 に、ゲル化剤試料についてかたさ、付着性、凝集性の濃度依存性のゲル化剤濃度依存性を示す。濃度増加にともなって、かたさの値は増加し、付着性についても増加する傾向はみられた。しかし、

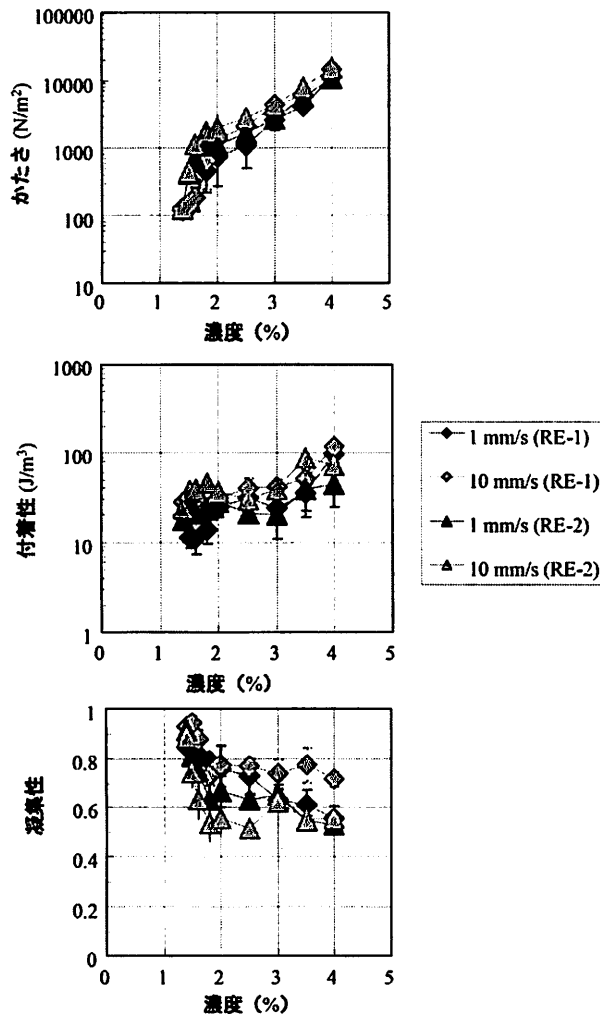


図3 TPA曲線から求められるパラメータの濃度依存性

凝集性については、濃度に対する単純な増加あるいは減少の傾向はみられなかった。また、図2のテクスチャー曲線の差から予想される通り、装置 RE-1 と RE-2 とで測定値にかなりの差がみられ、凝集性については、その差が顕著であった。測定速度については、1 mm/s、10 mm/s での測定値に多少の差がみられた。

図4に、超音波測定によって得られた咽頭部最大流速 V_{\max} のゲル化剤濃度依存性を示す。図には比較のため、誤嚥しやすいとされる水と誤嚥しにくいとされるヨーグルトの V_{\max} のデータも示してある。 V_{\max} の値は、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、既報の結果⁸⁻¹⁴⁾と同様で、誤嚥の要因や嚥下困難者にとってゲル化剤を用いた食品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。

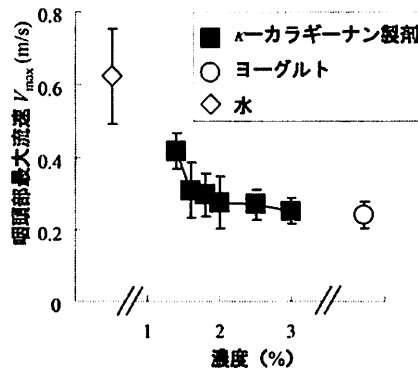


図4 咽頭部最大流速 V_{\max} の濃度依存性

TPA 測定から求められる3つのパラメータ、かたさ、付着性、凝集性の中では、かたさが濃度に対して単調に増加しており（図3）、濃度に対して単調に減少している V_{\max} （図4）との相関は最も高いと予想される。そこで、図5に、装置 RE-1 を用いて得られたかたさと咽頭部最大流速 V_{\max} との関係を示す。図には比較のため、水とヨーグルトのデータも示してある。かたさの増加に伴って、 V_{\max} の値は減少し、ヨーグルトの値に近づく傾向がみられた。また、かたさの値が約 1000 N/m² 以上あれば、ヨーグルト並みの V_{\max} 値になることも確認された。このことから、TPA 試験から求められるパラメータの中では、かたさが誤嚥の危険性の尺度となりうると考えられる。しかし、図2や図3で見られるように、かたさの値は測定装置によって異なる。

図6に、ゲル化剤試料の動的粘性率 $\eta'(\omega = 6.28 \text{ rad/s})$ と粘度 $\mu(\dot{\gamma} = 6.68 \text{ s}^{-1})$ の濃度依存性を示す。Rhosol-G5000 および AR-G-2 2つの装置間で、濃度2%以上で測定した η' の値には大きな差異はなかった。このことから、 η' は、TPA 測定から得られるパラメータに比べて、装置依存性がないことが確認できる。 η' は、濃度上昇に伴い増加する傾向が見られたが、1.5～1.6%では増加傾向が顕著であった。また低濃度領域では、粘度 μ と η' は近い値となった。 ω と $\dot{\gamma}$ の値が近いときに、 η' と μ の値が近いのは、上述のように Cox-Merz の経験則により説明できることであり、増粘剤に関する既報の結果¹²⁾ともほぼ一致する。こうした η' および μ の挙動から、用いたゲル化剤に関しては、

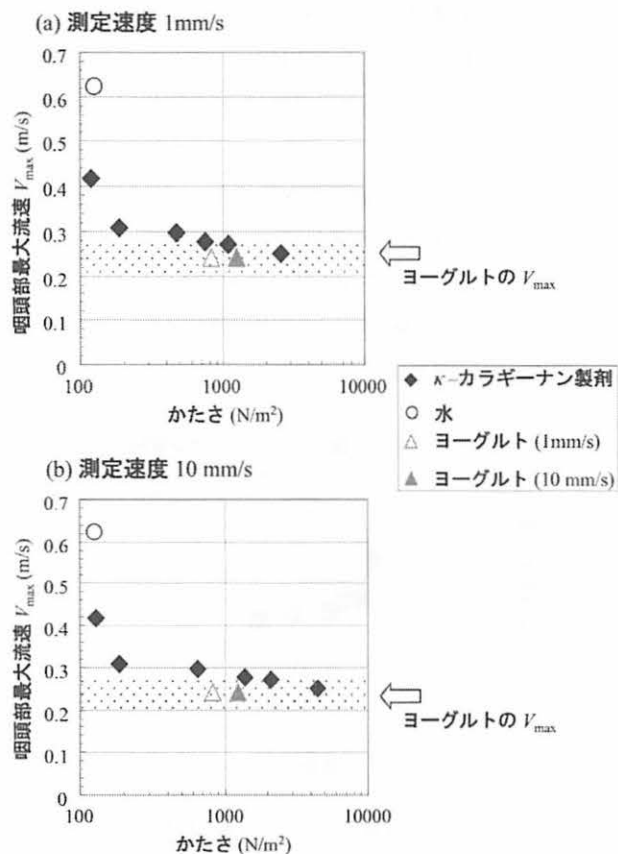


図5 咽頭部最大流速 V_{\max} とかたさとの関係

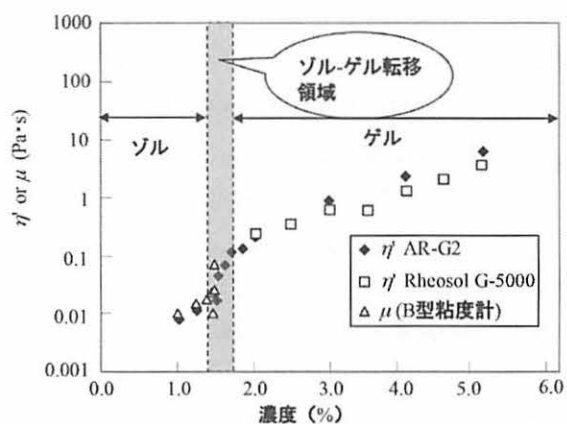


図6 ゲル化剤試料の動的粘性率 η' と粘度 μ の濃度依存性
 $\omega = 6.28 \text{ rad/s}$ $\dot{\gamma} = 6.68 \text{ s}^{-1}$

ゾル・ゲル転移濃度が1.5～1.6%付近であることが示唆された。

図7に、動的粘性率 η' と咽頭部最大流速 V_{\max} の関係を示す。 V_{\max} の値は、 η' の増加に伴って減少したが、その減少率はゾル領域では大きく、ゾル・ゲル転移点付近から次第に緩やかになり、ゲル領域ではヨーグルトの V_{\max} の値に近づいた。また、長谷川らの報告⁸⁻¹⁰⁾どおり、1 Pa・sでヨーグルトの流速に到達した。よって動的粘弾性率 η' は、嚥下困難者用食品物性の指標になりうることを示唆された。

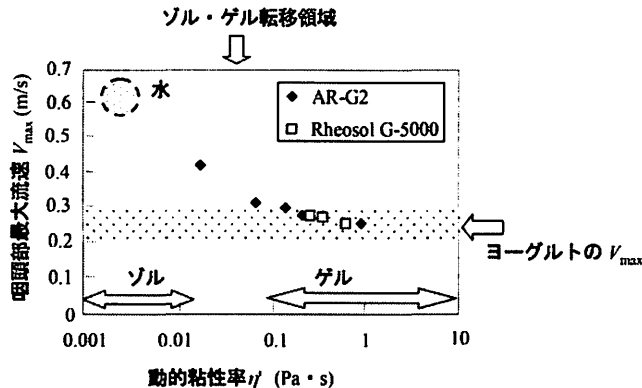


図7 ゲル化剤試料の咽頭部最大流速 V_{\max} と η' との関係
 $\omega = 6.28 \text{ rad/s}$ $\dot{\gamma} = 6.68 \text{ s}^{-1}$

以上、TPA 試験から求められるパラメータの中では、かたさが咽頭部最大流速 V_{\max} との相関が高く、嚥下困難者用介護食の指標となりうることを示された。しかし、図2や図3で見られるように、かたさの値は測定装置によって異なる。嚥下困難者用介護食の指標としては、当然のことながら、測定装置に依存しない物性値であることが望ましい。図6に見られるように、動的粘性率 η' は、咽頭部最大流速 V_{\max} との相関が高いうえに、装置によらない物性値である。よって、嚥下困難者用介護食の基準としては、 η' の値の範囲についても検討すべきと考えられる。

4. 結論

- (1) TPA 試験から求められるパラメータである、かたさ、付着性、凝集性の値は測定装置によって得られる値に差異が見られた。その差は、厚生労働省の基準にある測定速度 10 mm/s の方がレオロジー測定でよく用いられる 1 mm/s の場合の方が顕著だった。
- (2) かたさは咽頭部最大流速 V_{\max} との相関が高く、嚥下困難者用介護食の指標となりうることを示された。
- (3) 動的粘性率 η' は、咽頭部最大流速 V_{\max} との相関が高いうえに、装置によらない物性値である。よって、嚥下困難者用介護食の基準としては、 η' の値の範囲についても検討すべきと考えられた。

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, 林箒子 編:「嚥下障害食の作り方」, 日本医療企画, 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, 2003, pp. 329-336.
- 4) 熊谷仁, 谷米(長谷川) 温子, 田代晃子, 熊谷日登美, 化学と生物, 49, 610-619 (2011).
- 5) 厚生省生活衛生局新開発食物保健対策室: 高齢者用食物の表示許可基準の策定について (1994).
- 6) 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 (2009).
- 7) K. Nishinari, K. Kohyama, H. Kumagai, T. Funami, and M. C. Bourne, *Food Science and Technology, Research*, 19, 519-521 (2013).
- 8) 長谷川温子, 乙黒明子, 熊谷仁, 中沢文子, 日本食品科学工学会誌, 52, 441-447 (2005).
- 9) 長谷川温子, 中沢文子, 熊谷仁, 日本食品科学工学会誌, 55, 330-337 (2008).
- 10) 長谷川温子, 中沢文子, 熊谷仁, 日本食品科学工学会誌, 55, 541-548 (2008).
- 11) H. Kumagai, A. Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama and H. Kumagai, *Food Science and Technology, Research*, 15, 203-210 (2009).
- 12) A. Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama, H. Kumagai, and H. Kumagai, *Biosci. Biotech. Biochem.*, 74, 1598-1605 (2010).
- 13) A. Tashiro, K. Ono, A. Hasegawa-Tanigome, H. Kumagai, and H. Kumagai, *Japan J. Food Eng.*, 11, 177-185 (2010).
- 14) 谷米(長谷川) 温子, 小倉聖美, 秋間彩香, 神山かおる, 熊谷日登美, 熊谷仁, 日本食品工学会誌, 14, 87-96 (2013).
- 15) 熊谷仁, 熊谷日登美, 日本食品工学会誌, 10, 137-148 (2009).
- 16) W. P. Cox, E. H. Merz, *J. Polym. Sci.*, XXVIII, 619-622 (1958).