「日本食品工学会誌」, Vol. 13, No. 1, pp. 1 – 12, Mar. 2012

連載 食品の物性そして水 XIII

◇◇◇ 解説 ◇◇◇

ハイドロコロイドによる食品のテクスチャーデザイン

船　見　孝　博

三栄源エフ・エフ・アイ株式会社

Physical Properties of Foods and Effects of Water on Them XIII Texture Design of Foods Using Hydrocolloids

Takahiro FUNAMI

San-Ei Gen F.F.I., Inc., 1-1-11, Sanwa-cho, Toyonaka, Osaka 561-8588, JAPAN

Texture is important in terms of both food palatability and the safety of eating. Recently, the importance of texture has been emphasized for the development of nursing-care foods in this aged society, where the number of patients with mastication and swallowing difficulties is increasing. Texture design of these food products is now one of the most important tasks in the food industry in Japan. Texture of these food products should be modified by modulating viscoelasticity using hydrocolloids so that they can be easily transformed into 'ready-to-swallow' bolus during oral processing. This article reviews the importance of texture as an essential attribute of foods and also the usefulness of hydrocolloids as an ingredient to modify food texture. The article also covers recent trials by the author's research team on bolus rheology and *in vivo* acoustic analysis during swallowing. The trials are to find some objective parameters describing the mastication and swallowing eases as an alternative to conventional bulk rheology and subjective sensory analysis.
Keywords: texture, hydrocolloid, dysphagia, bolus, acoustic analysis

1. 序　　論

食品は人の食欲を増進させて食生活を豊かにするとともに健康に貢献しなければならない．食品には栄養，嗜好，および生理などの機能が求められる [1]．食べることによって幸福感，満足感が得られてこそ食品といえる．したがって食品では嗜好（おいしさ）の要素が重要であり，これが医薬品と決定的に違うところである．

食品の嗜好性は，フレーバー，テクスチャー，外観，音，および温度などの感覚特性によって決まり，中でもフレーバーとテクスチャーが食品の嗜好性を決定する二大要因である [2]．フレーバー（味と匂いを含む）は比較的低分子の成分が関与し，化学的な経路によって感覚される特性である．一方，テクスチャーは比較的高分子の成分が関与し，物理的な経路によって感覚される特性である．

テクスチャーとは摂食過程において，口腔相および咽頭相で感覚される食品の力学的および熱的性質の総体である．テクスチャーは，分子，粒子，細胞，および組織を含む食品構成要素の分散，凝集，および配列状態によって決まる．テクスチャーは食品のおいしさの約 30% を占めるといわれており，ご飯，麺，パン，肉などの主食（1 回の食事で大量に摂取するもの）に限れば，その割合はさらに高い [3]．摂食過程で起こるテクスチャーおよびそれに付随するフレーバーの変化を感覚することが食のよろこびへとつながる．

加工食品のテクスチャーはハイドロコロイドの添加によって調整できる．ハイドロコロイドとは，直径 10 ～1000 nm の粒子が，水を連続相に分散している状態をいう [4]．あるいはそのようなコロイド状態を制御するために食品を含む様々な分野で使用される多糖類やタンパク質を示す [5]．ハイドロコロイドは，増粘，ゲル化，保水，分散，安定，皮膜形成，起泡，乳化など，食品中で様々な機能を示し，テクスチャーモディファ

（受付 2011 年 8 月 15 日，受理 2011 年 11 月 24 日）
〒561-8588 大阪府豊中市三和町1-1-11
Fax : 06-6333-2076, E-mail : tfunami@saneigenffi.co.jp

イヤーとしてマヨネーズ，ドレッシング，デザートゼリー，アイスクリームなどほとんど全ての加工食品に使用されている．食品に使用されるハイドロコロイドは天然物を起原としており，例えば寒天やカラギナンは海藻，グァーガムやローカストビーンガムは植物の種子，ペクチンは柑橘およびリンゴの皮，キサンタンガムやジェランガムは微生物（発酵），キチンやキトサンは動物（甲殻類の甲羅など）を起原とする（Fig. 1）．

近年の超高齢社会では咀嚼機能や嚥下機能に障害をもつ人が増加しており，食品におけるテクスチャーの重要性が強調されている．食物繊維としての生理効果のみならず，摂食の安全という観点から食品ハイドロコロイドの研究が進められており [6]，介護食のテクスチャーデザインが試みられている．摂食機能が低下した人でも容易に咀嚼，嚥下できるように，レオロジー，コロイド，およびトライボロジーの観点から食品のテクスチャーを調節しなければならない．例えば，嚥下困難者にはとろみのついた液状食品やプリンなど，食塊が咽頭相を通過する速度が比較的遅い食品が提供される [7]．また，ハイドロコロイドは食品のテクスチャーだけでなく，フレーバー（味と匂い）の放出を調節できる．テクスチャーはおいしさの基盤であり，テクスチャーを最適化するための技術開発が求められている．

本稿では食品におけるテクスチャーの重要性とハイドロコロイドによる介護食，特に嚥下食のテクスチャーデザインについて述べる．本稿における用語の定義として，「介護食」とは咀嚼／嚥下困難者向けの食品だけでなく，摂食機能が正常な高齢者向けの食事を含み，「嚥下食」は嚥下困難者に特化した食品のことを示す．介護食のテクスチャーデザインを行うにあたって重要なことは，咀嚼のしやすさ（噛みやすさ），嚥下のしやすさ（飲みやすさ）を客観的に表すことである．これらの指標の数値化を目的とした著者らの研究グループの最近の研究成果についても紹介したい．

2．テクスチャーの重要性

食品におけるテクスチャーの重要性は Schiffman ら [8,9] によって間接的に示されている．彼らはブレンダーによって磨り潰した 29 品目の食品をパネル（正常体重を有する成人）に提供し，その食品が何であるかを回答させた．パネルは目隠しをしており，テクスチャーの糸口なく，フレーバーのみで食品を特定するという実験である．正答率は驚くことに，キャベツではわずか 4%，豚肉では 15%，牛肉では 41%，ニンジンでは 51% であった．この結果は，食品の認識におけるテクスチャーの重要性を明確に示している．

食品のテクスチャーは摂食過程で感覚される特性である．ヒトの摂食は最初の一噛みから嚥下に至るまでの過程であり，その過程では様々な器官と筋肉が協同的に作用し（Fig. 2），一連の口腔動作が順序正しく行われている [10]．ヒトの摂食過程は Fig. 3 に示すモデルで表すことができる [11]．三次元に示されたこの口腔内摂食モデルにおいて，x 軸は時間を示し，摂食が進行するにつれて増加する．y 軸は滑らかさの度合いを示し，食塊と唾液の混和が進行するにつれて増加する．z 軸は構造の度合いを示し，咀嚼が進行するにつれて減少する．このモデルによれば，構造の度合いを平面 ABCD より下側のレベルまで低下させるとともに滑らかさの度合いを平面 EFGH の右側のレベルまで増加させることで，固体状食品ははじめて嚥下できる状態になる．ステーキのような固体状食品では，食塊を形成するために咀嚼によって構造を破壊し，さらに唾液と

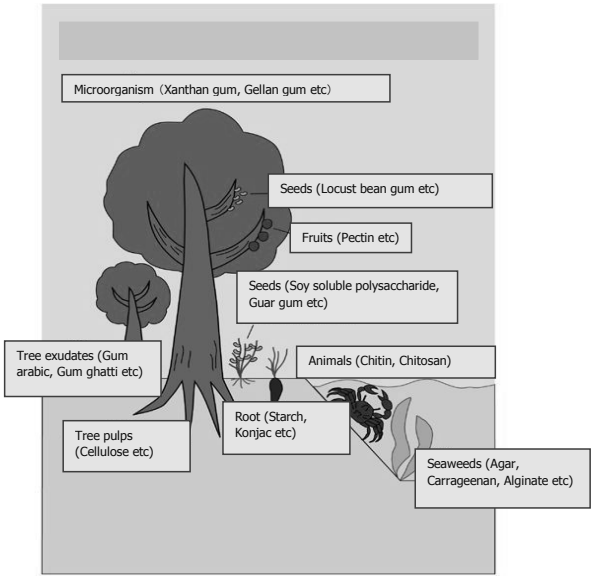


Fig. 1　Source of food polysaccharides in nature.

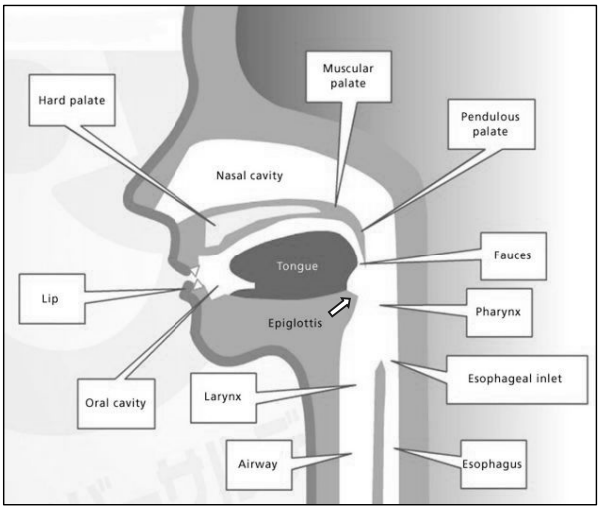


Fig. 2　A diagram of human oral organs associated with food consumption.

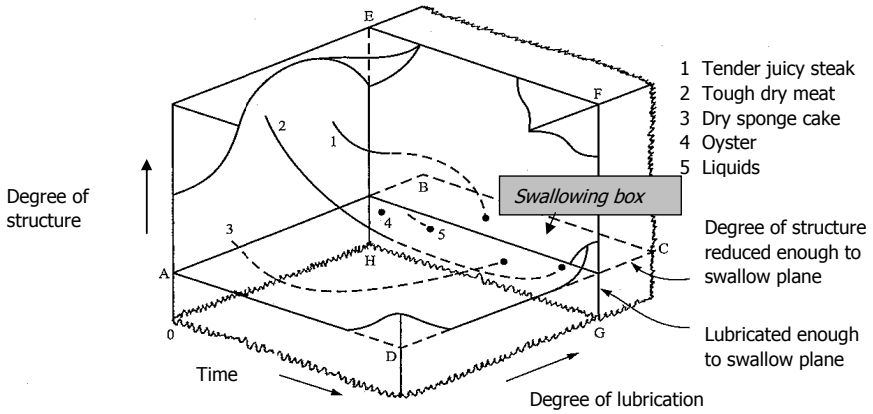


Fig. 3 In-mouth process model from mastication to swallowing. Cited from Hutching & Lillford (1988), Journal of Texture Studies, 19, 103-115 with modification.

混合して食塊を滑らかにすることが必要であるのに対し，液体や生牡蠣は小さい仕事量で食塊を形成することができるためすぐに嚥下することができる．固体状食品と液状食品でヒトの摂食行動を比較した場合，固体状食品の方が「嚥下ボックス」に到達するまでにより長時間を要し，さらに嚥下できる状態の食塊が形成されるまでにより大きな構造変化が起こる．液状食品に比べて固体状食品でよりテクスチャーが重要となる理由として以下の3つが考えられる [12,13]．1）液状食品に比べて固体状食品の方が摂食過程における力学，幾何学，および界面特性の変化が大きいこと，2）液状食品に比べて固体状食品の方が口腔内の滞留時間が長いこと，3）ヒトは粘りより弾性に対する感度が高いこと [14]．

固体状食品あるいはゲル状食品の開発ではテクスチャーの調節がいかに重要であるかがわかる．

3．ハイドロコロイドの機能

ハイドロコロイドのゲル化機能を利用することで食品のテクスチャーを制御することができる．ゲル化はハイドロコロイドの主要な機能であり，そのためハイドロコロイドのゾルーゲル転移に関する研究が盛んに行われている．ハイドロコロイドのゾルーゲル転移は，レオロジー，熱分析，光散乱，円二色性分析，核磁気共鳴，電子スピン共鳴，原子間力顕微鏡など，種々の物理化学的手法によって解析できる．ハイドロコロイドのゾルーゲル転移についてこれまで多くの研究がなされているにもかかわらず，分子レベルの理解までは到達できていないのが現状である．

代表的なゲル化剤としてカラギナンおよびジェランガムのゲル化機構が超分子構造との関連で議論されている [15–17]．溶液状態においては，いずれの多糖類分子も加熱によって無秩序なランダムコイル（一本鎖）構造をとる．冷却によって規則性のあるダブルヘリックスへと構造転移し，さらにダブルヘリックス同士が水素結合やファンデルワールス力などの弱い物理結合によって会合し，熱可逆性のゲルを形成する．静電反発を遮蔽するカチオンの存在下で水素結合によるヘリックス間会合が促進され，熱安定性が増加し，それに伴ってゾルーゲル転移における熱的ヒステリシスが増大する．食品多糖類のゲル化機構を Fig. 4 に模式的に示す．

食品多糖類ではいくつかのゲル化機構が提唱されている．フィブラスモデル [18–20] では，多糖類分子の伸張，屈曲，会合，および凝集によってゲルは弾性を発現し，ゲル形成に必ずしも連続的な3次元網目を伴

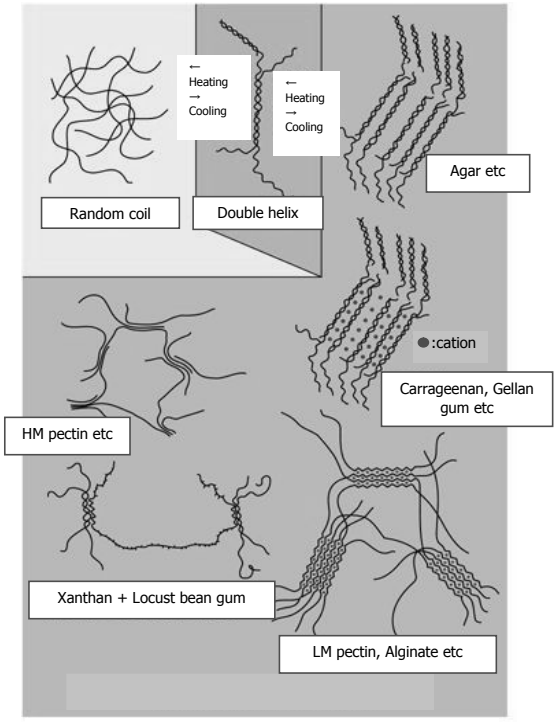


Fig. 4 Gelation mechanism of food polysaccharides (schematic drawing).

わない．分子のコンホメーション変化は食品からのフレーバー放出にも関係するが，これについては後述する．無秩序なランダムコイル構造（ゾル状態）あるいは秩序性のあるヘリックス構造（ゲル状態），どちらのコンホメーションのときに味物質とより強く結合するかということは興味深い問題である（もちろん，味物質の疎水性や静電特性によっても挙動は異なる）．分子会合および分子凝集の程度はゲルの力学特性だけでなく熱的性質（ゲルの弾性率の熱可逆性あるいは熱不可逆性）にも影響を及ぼす．また，ゲルの離水にも影響を及ぼす．離水はフレーバーの感覚強度増加という点では好ましい場合がある．すなわち，離水が多いほど味を強く感じ [21]，これは食品のジューシー感と味覚強度の関係と同じである [22]．反面，離水は摂食の安全という面からみると好ましくない場合がある．とくに嚥下食の場合，離水が多くなるほど誤嚥のリスクが高まる．これは水が乱流的に振る舞うことに関係があり，逆流や誤嚥を誘発することがある [10]．単一のハイドロコロイドが食品に求められる全ての要件を満足するものではなく，したがって求められる機能によって適切に選択する必要がある．複数のハイドロコロイドをブレンドすることが実用的な解決策であるといえる．新製品の開発や既存製品の改良のために，個々のハイドロコロイドの特性だけでなくそれらの相乗効果についてもよく理解する必要がある．

4．テクスチャーとフレーバー放出

口腔内における味覚強度は食品の粘度あるいはゲル強度の増加により減少することが実験的に確かめられている．砂糖，塩化ナトリウム，カフェインあるいは酒石酸の感覚閾値は水＜泡＜ゲルの順に高くなる [23]．

ゲル状食品における甘味の感覚強度は，多糖類ゲル（ジェランガム，κ－カラギナン，アルギン酸カルシウム，およびキサンタンガム／ローカストビーンガム併用ゲル）の破断歪みが減少するにしたがって増加する [24]．破断歪みが小さく，脆いテクスチャーのゲルは摂食過程の初期段階で容易に崩壊し，食塊の表面積が増加することにより口腔内で唾液と接触しやすくなるため甘味を感じやすいと考えられる．実際，食塊の平均粒子径は食品の力学特性によって異なることが報告されており，かたくて脆い食品（例えば，ピーナッツ）で小さく，壊れにくい食品（例えばジャーキー）ほど大きくなる [25]．つまり，食塊におけるゲル粒子のサイズは，唾液との相互作用という点でフレーバーの感覚強度に影響を及ぼす．別の実験では，甘味と酸味を合わせた総合的なフレーバー強度が，種々の食品多糖類から調製したデザートゲルの破断応力の増加によって直線的に減少することが示されている [26]．しかしながら，ゼラチンのゲルは回帰直線よりも上方に，ジェランガム（低アシル型）／キサンタンガム／ローカストビーンガム併用のゲルは回帰直線よりも下方に位置する．ゼラチンゲルが同じ破断応力を示す他のゲルに比べてフレーバーの感覚強度が高くなるのはゲルの融解温度が低いためであり，これによりフレーバーの感覚強度が増強される．併用ゲルでフレーバーの感覚強度が低くなる理由は変形しやすく，壊れにくいテクスチャーによるものであり，フレーバー成分がゲルの中に閉じ込められるとともに，食塊の唾液との接触面積が減少することによる．フレーバーの感覚強度が成分の放出（量および速度）よりもむしろテクスチャーによって影響を受けるという報告もある [27]．

液状およびペースト状食品では，多糖類（アルギン酸，カルボキシメチルセルロース，およびグァーガム）添加による粘度増加によってフレーバーの感覚強度が減少する [24]．フレーバーの感覚強度は粘度の増加によって単調に減少するわけではない．一定濃度までは感覚強度は変化しないが，コイル重なり合い濃度である C^* を越えると急激に減少し，これは多糖類の種類によらず同じである．言い換えると，多糖類が無秩序なランダムコイル構造をとる限り，フレーバーの感覚強度に及ぼす多糖類の影響は C^* で規格化されるということである．粘度の増加によりフレーバーの拡散係数が減少し，フレーバーの感覚強度が低下するものと考えられる．多糖類がフレーバーの感覚強度に及ぼす影響は味－匂い相互作用の観点からも説明できる．ハイドロキシプロピルメチルセルロースおよびλ－カラギナンの添加により，鼻腔内の香気成分濃度は変化しないにもかかわらず，塩味およびガーリックフレーバーの感覚強度がともに減少することが示されている [28]．

固体状および液状食品のいずれにおいても，ハイドロコロイドを用いて食品のテクスチャーを調節することにより，フレーバーの感覚強度を制御できること，さらにはテクスチャーの調節により意図的に好ましいフレーバーを増強し，好ましくないフレーバーをマスキングできることを理解する必要がある．

5．テクスチャーと力学特性

テクスチャーは微小変形領域よりも大変形領域における食品の力学挙動と関係がある．これはヒトの咀嚼様式を考えれば理に適っている．実際，歯で噛んで食べる固体状食品では，微小変形領域のいかなる力学特性もヒトの咀嚼行動には全く影響を及ぼさないが，歪みが 70% を越える大変形（場合によっては破断歪み以上の歪み）における力学特性は影響を及ぼすことが報告されている [29]．最近，舌と口蓋で押し潰して摂食するようなやわらかい食品でも歯で噛んで食べる食品と同様の結果が報告された [30]．大変形のレオロジー

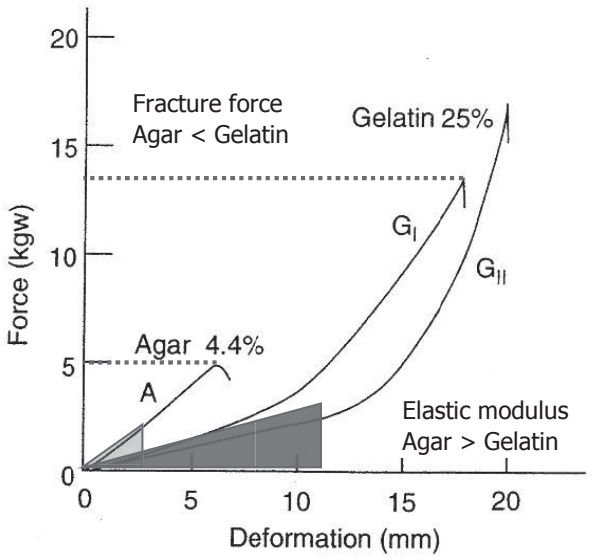


Fig. 5 Force–deformation curves for uniaxial compression of polysaccharide gels. Cylindrical gels of 20 mm in diameter and 30 mm in height were compressed at 10 mm/min. The curves G_I (pattern I) and G_{II} (pattern II) occurred with approximately equal probability. Cited from Nishinari *et al.* (1980), Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi, 27, 227-233 with modification.

が実用上は重要であるが，微小変形領域のレオロジーに比べて数学的な取扱いが難しく，その理論を理解することが難しいのが現状である．

大変形領域における食品の力学特性は破断応力，すなわち変形によって試料が破断されるときの応力によって評価される場合が多い．食品産業界では破断応力をゲル強度とよぶ場合がある．一方，線形領域における応力ー歪み曲線の傾きから弾性率を求めることができる．ここで，破断応力と弾性率は物理的意味が異なることに注意する必要がある．濃度 4.4%(w/v) の寒天ゲルと濃度 25%(w/v) のゼラチンゲルを比較した場合，弾性率は寒天ゲルの方が大きいが，破断荷重はゼラチンの方が大きい（Fig. 5）[31]．テクスチャーとの関連では，弾性率は ‘firmness’ あるいは ‘hardness’（いずれも硬さ）と関係が強いのに対し，破断荷重や破断応力は ‘toughness’（強さ）あるいは ‘chewiness’（噛み応え）など，‘firmness’ に ‘springiness’（弾力性）や ‘cohesiveness’（結着性やまとまり感）などの要素を含めたより複雑なテクスチャー感覚と関係が強い．破断応力の高い試料が必ずしも感覚的に ‘firm’ あるいは ‘hard’ と評価されるわけではない．

食品テクスチャーの客観的測定として Texture Profile Analysis (TPA) がよく用いられる．TPA は General Foods の研究グループによって開発され [32,33]，現在，日本では，消費者庁が管轄する特別用途食品制度における「えん下困難者用食品」（消食表第 277 号）の公定法として採用されている．

TPA では，一定の大きさおよび形状に整形した食品試料を，GF Texturometer (USA)，Instron (MA, USA)，あるいは TA-XT2 (Stable Micro System, Surrey, UK) などの試験機に装着したプランジャーを用いて一定速度で 2 回連続圧縮する．プランジャーの動きはヒトの咀嚼を模倣している．プランジャーの表面積は食品試料と等しいかあるいは大きくすべきであり，変形率は通常 90％以上である [34]．このようにして得られた荷重（応力）ー時間（歪み）曲線を TPA 曲線とよぶ．TPA 曲線から「かたさ」(hardness),「もろさ」(fracturability あるいは brittleness),「変形回復性」(springiness),「凝集性」(cohesiveness)，および「付着性」(adhesiveness) などの一次パラメータ,「ガム性」(gumminess) および「咀嚼性」(chewiness) などの二次パラメータを求めることができる [34]．代表的な TPA 曲線と各特性値の定義（求め方）を Fig. 6 に示す．テクスチュロメーター (Texturometer) はプランジャーの駆動速度が一定の割合で変化するとともに円弧状の軌道を描くという点が他の機器と異なる．他の試験機ではプランジャーは一定速度で直線状の軌道を描く．

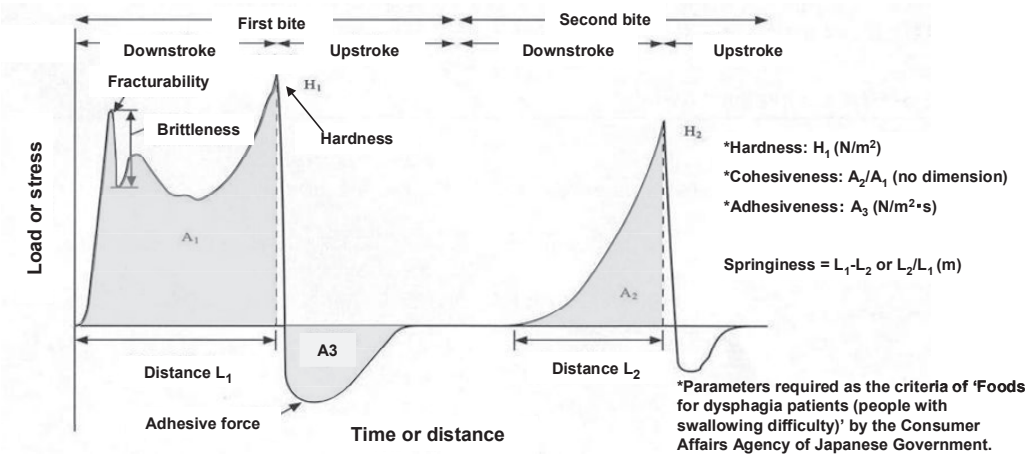


Fig. 6 Representative Texture Profile Analysis (TPA) curve and the definition of each TPA characteristic.

TPA から得られる各パラメータはそれぞれが独立して振舞うのではなく，互いに連動している．最近，同じ試料を用いて異なる試験機で測定した場合，得られる結果が必ずしも同じでなく，とくに高い変形速度（例えば 10 mm/s）における「付着性」と「凝集性」で試験機間に差異がみられることが報告されている [35]．なお，TPA 特性がヒトの感覚特性と必ずしも一致しないことに注意する必要がある．例えば，TPA から得られる「かたさ」は定義に基づく測定値（いわば呼称）であり，TPA から得られる「かたさ」とヒトが感覚するかたさは必ずしも一致しない．TPA から得られる「付着性」とヒトが感覚するねばり，TPA から得られる「凝集性」とヒトが感覚するまとまり感についても同様である．

口腔内でのテクスチャーの第一印象は大変形領域におけるレオロジー挙動よりも微小変形におけるレオロジー挙動の方がより関係していると考えられ，この場合，粘弾性試験（静的および動的）の方が食品テクスチャーに関して有益な情報を与える．食品の力学特性とテクスチャーの関係を議論する場合，大変形領域と微小変形領域の両方の測定を行うことが望ましい．

6. テクスチャーへの新たなアプローチ

6.1 食塊レオロジー

食品は咀嚼によって形状と大きさが変化し，最終的には嚥下に適した形態となる [10]．咀嚼は固体状あるいは半固体状食品を摂食する上で主要な口腔動作であり，咀嚼によって食品は十分小さな粒子の集合体となり，唾液とよく混和されて滑らかな食塊となる．食塊の粒子サイズ，滑らかさ，およびまとまりが一定の基準に達したときに嚥下が誘発される [36]．このような観点から，食品の断片化挙動と食塊に関する研究が嚥下食のテクスチャーを調節するための重要なアプローチとなる．このようなアプローチはテクスチャー研究では従来から行われているが，野菜やナッツなど，流動性や変形性の低い固体状食品 [25,37–39] あるいは結着性の高い肉類 [40] がもっぱらの研究対象であり，嚥下食の基材としてよく利用される粘弾性体としてのゲルはほとんど扱われていない．最近，ゼリーやジャムなどのゲル状食品について，食塊レオロジーと感覚的な飲みやすさの関連が検討され，嚥下を誘発する重要な要因として食塊の伸張性が採り上げられている [41]．この結果は，食塊が咽頭相を通過するときのずり速度を再現して測定したずり粘度が嚥下挙動を支配するレオロジーパラメータであるという主張 [42] とは別の考え方である．食塊の力学的な凝集性（まとまり）は嚥下挙動を支配するもう1つの重要なレオロジーパラメータであり，これは至適嚥下モデル [43] でも示されている．いずれにしても，口腔内でいかに容易に，いかに簡単に食品が飲み込める状態の食塊になるかが，嚥下食のテクスチャーデザインにとって重要である．

多糖類ゲルを用いた食塊レオロジーに関する最新の研究 [44] では，ゲル試料を人工唾液存在下および非存在下で機械的に模擬咀嚼することによりモデル食塊を調製し，レオロジー測定がなされている．模擬咀嚼は力学シミュレータ（Fig. 7）を用い，平板プランジャーによりゲル試料を連続的に破壊した（シミュレータの構造および模擬咀嚼の条件は Fig. 7 を参照）．多糖類ゲルとして脱アシル型ジェランガム（以下, ジェランガム）由来のゲル（弾性的要素の強いゲル）およびジェランガムとサイリウムシードガムの併用ゲル（塑性的要素を含むゲル）を用いた．ここで，ジェランガムは発酵によって得られる多糖であり，D–グルコース，D–グルクロン酸，D–グルコース，L–ラムノースの繰り返し構造をモノマーとする．主として，デザートゼリーやゼ

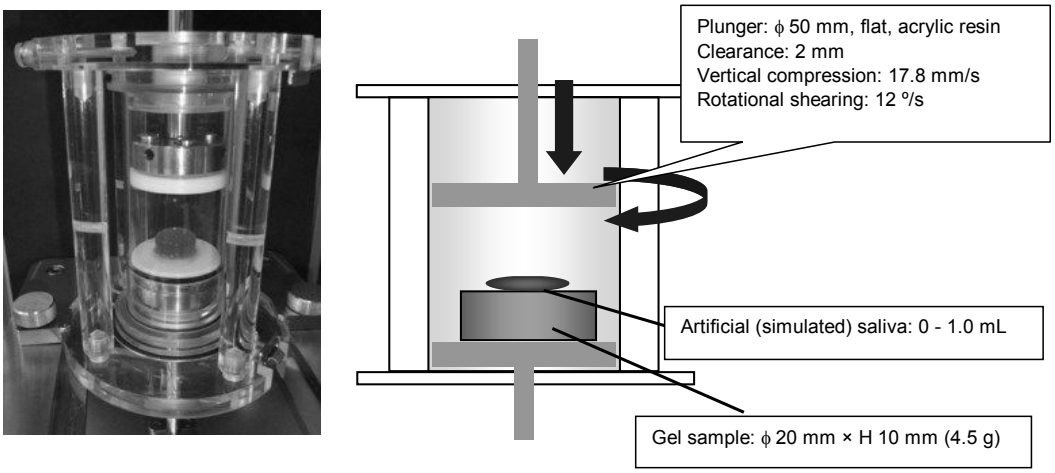


Fig. 7 Instrumental mastication simulator. Cited from Ishihara *et al.* (2011), Food Hydrocolloids, 25, 1210-1218 with modification.

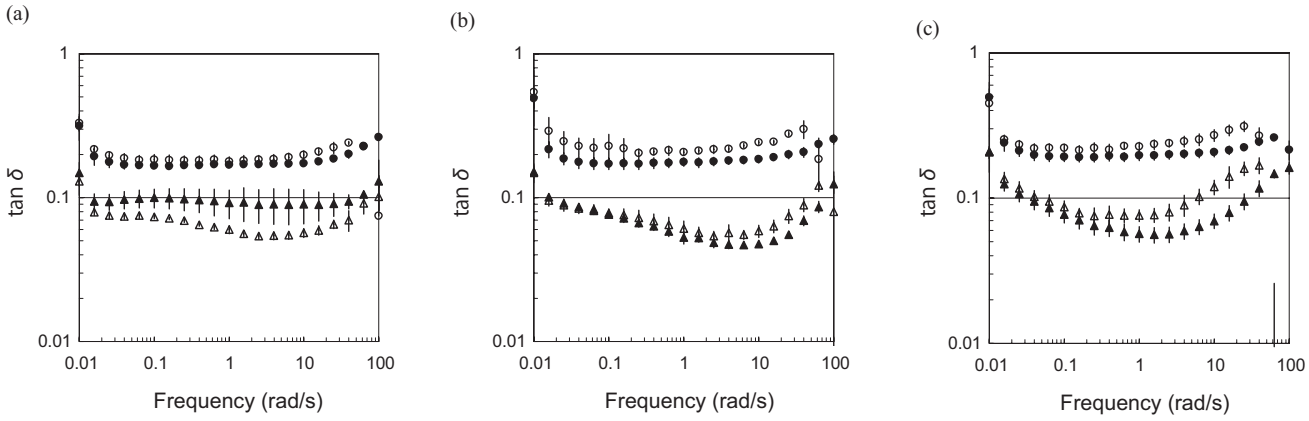


Fig. 8 Frequency-dependence of dynamic mechanical loss tangent tan δ for model bolus. (a) in the absence of artificial saliva; (b) in the presence of 0.5 ml artificial saliva; (c) in the presence of 1.0 ml artificial saliva. Measurements were carried out at 20℃ at a fixed strain of 1% within the frequency range of 0.01–100 rad/s. ○: 1.0% gellan/psyllium composite gel (1,000 Pa compression stress); ●: 1.5% gellan/psyllium composite gel (4,000 Pa compression stress); △: 0.075% gellan single gel (1,000 Pa compression stress); ▲: 0.15% gellan single gel (4,000 Pa compression stress). Compression stress is the determination at 67% strain and at 10 mm/s. Data are presented as means ± SD of triplicate. Cited from Ishihara *et al.* (2011), Food Hydrocolloids, 25, 1016–1024 with modification.

リー飲料のゲル化剤として使用されている．一方，サイリウムシードガムはオオバコの一種である *Plantago* 種の種子外皮から得られる多糖であり，D-キシランの主鎖にL-アラビノース，D-キシロース，D-ガラクツロン酸，L-ラムノースからなる側鎖が結合した高度な分岐構造をもっている．サイリウムシードガムは高い保水性を有し，高濃度では餅様のゲルを形成すること，腸内細菌による被分解性が低く，食物繊維として有効であることなどの特徴があり，麺類，水産練製品，惣菜類の保水剤あるいは健康食品の食物繊維源として使用されている．

モデル食塊はマイクロゲル（ゲル粒子）の集合体と考えることができ，マイクロゲルの形成挙動はバルクゲル（咀嚼前のかたまりのゲル）の粘弾性特性によって決まる．ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルから調製したモデル食塊はレオロジー的に弱いゲル（構造化された液体）の性質を示し，ジェランガム単独のモデル食塊よりもレオロジー的に構造の均一性が高い．また，ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルから調製したモデル食塊はジェランガム単独のモデル食塊に比べて唾液の添加量による動的粘弾性値の変化が小さい（Fig. 8）．このようなレオロジー挙動の相違は唾液との親和性に起因するものであり，モデル食塊の親水度によって決まる．ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルから調製したモデル食塊はジェランガム単独のモデル食塊に比べ表面が親水的であり，これはサイリウムシードガムの機能によるものである．ヒト唾液の界面摩擦力は水に比べて2桁低く [45]，唾液との親和性が食塊の滑らかさを決める要因となる．マイクロゲルの結着剤および食塊の円滑剤としての唾液の効果が，ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルでより発揮されるものと考えられる．結論として，レオロジー的に弱いゲルの挙動と唾液との親和性が高いことが，飲みやすい食塊を得るための鍵である．

さらに，食塊レオロジーと感覚的な飲みやすさの関係が定量的に解析されている [44]．動的複素粘性率 η^* と周波数 ω の間に成り立つ累乗回帰式 $\eta^* = K^*\omega^{n*}$ および動的粘性率 η^1 と周波数の間に成り立つ累乗回帰式 $\eta^1 = K'\omega^{n'}$ において，感覚的に飲みやすいと判定された試料は，指数 (n^*, n') が 0.80 ～ 0.90，係数は K^* が 5～50，K' が 1～10 の範囲にある．これらは嚥下食のテクスチャーデザインにおける力学指標として有効と考えられる（三栄源エフ・エフ・アイ株式会社の権利化技術の一部）．

6.2 嚥下音解析

レオロジー測定は食品の力学特性および微細構造特性を表すのに有益であるが，口腔内の複雑な摂食動作を再現することはできず，結果としてレオロジー測定と感覚評価が必ずしも一致しないという現象が起こる．実際，テクスチャー解析という目的でのレオロジー測定には限界がある．摂食過程で器官や筋肉から発せられるシグナルはヒトの感覚と直接関係し，テクスチャーの動的な変化を表す可能性がある．これらのシグナルを計測することがレオロジー測定を補完だけでなく，新たなテクスチャー計測の手法となり得る．

このような目的で食品のテクスチャー解析に生体計測を用いることができる．生体計測には筋電位測定 [46–49]，咀嚼圧測定 [50–54]，舌圧測定 [55–57]，およ

び超音波流速測定 [42,58] などがある．嚥下造影検査 [59–61] および嚥下内視鏡検査などの画像解析は，摂食過程における食品の形状変化および生体内輸送を可視化して捉えることができる．ダイナミクスという観点からは，生体計測は機器測定と感覚測定の中間に位置する．摂食過程における食品の動的な変化を理解し，定量化することがテクスチャー研究の鍵といわれており [10]，生体計測は介護食ならびに嚥下食のテクスチャーデザインに活用されるべきである．

多糖類ゲルをモデル食品とした嚥下音解析が報告されている [44,62]．嚥下音解析は非侵襲的な手法として診断目的で使用されているが，テクスチャー研究での使用はあまり多くない．水を摂食したときの代表的な嚥下音プロファイルを Fig. 9 に示す．プロファイルは 3 つのセクションに分けられ，時系列にそれぞれ喉頭蓋の閉鎖音 t_1，食塊の流動音 t_2，喉頭蓋の開口音 t_3 に帰属される [63]．各口腔動作の継続時間（t_1, t_2, t_3）と嚥下音の音響バランスを求めた．ここで嚥下音の音響バランスとは，低周波数領域（0.3～0.9 kHz）の音圧に対する高周波数領域（3.0–4.5 kHz）の音圧の比である．この値が大きいほど高周波数領域の寄与が大きく，定性的には甲高い音であることを示す．

先の食塊レオロジーの検討と同様に，ジェランガム単独ゲルおよびジェランガムとサイリウムシードガムの併用ゲルが試料として用いられている．嚥下音解析と嚥下時の感覚評価は，咀嚼および嚥下機能に障害をもたない通常体重の成人をパネルとして実施された．ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルはジェランガム

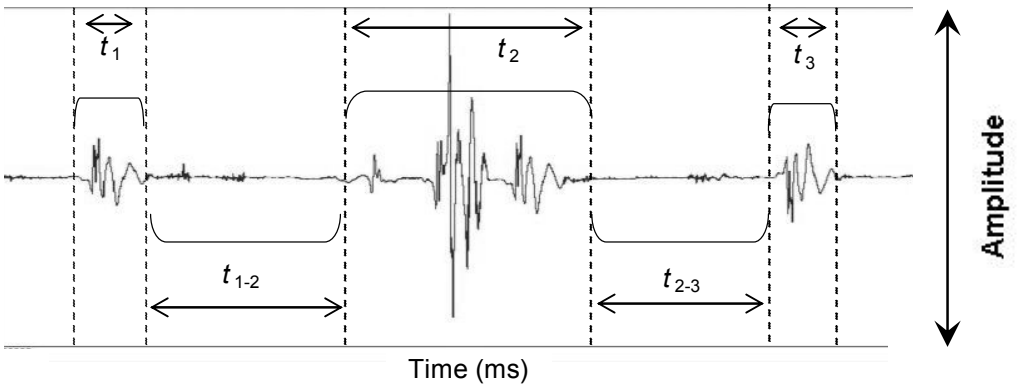


Fig. 9 Representative profile of the swallowing sound (in the case of water). Each oral event is assigned to the closure of the epiglottis (t_1), the flow of food bolus (t_2), and the opening of the epiglottis (t_3) in order of occurrence. Cited from Ishihara *et al.* (2011), Food Hydrocolloids, 25, 1016–1024.

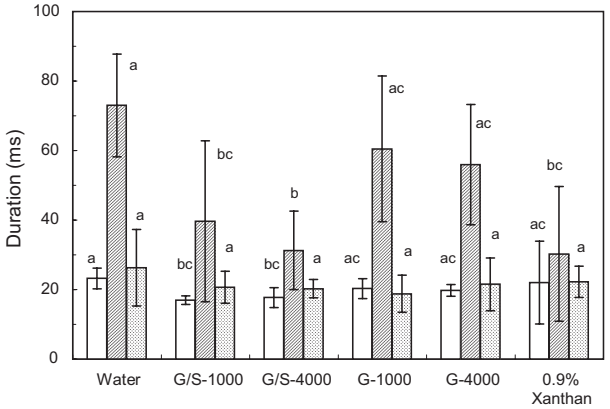


Fig. 10 Duration of each oral event during swallowing for polysaccharide gels. Open: the closure of the epiglottis t_1; diagonal: the flow of food bolus t_2; dotted: the opening of the epiglottis t_3. Abbreviations G/S and G represent gellan/psyllium composite gel and gellan single gel, respectively. Numbers 1,000 and 4,000 represent the compression stress in Pa at 67% strain and at 10 mm/s. Data are presented as means ± SD of seven subjects. Data with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) when compared within the same treatment group. Cited from Ishihara *et al.* (2011), Food Hydrocolloids, 25, 1016-1024.

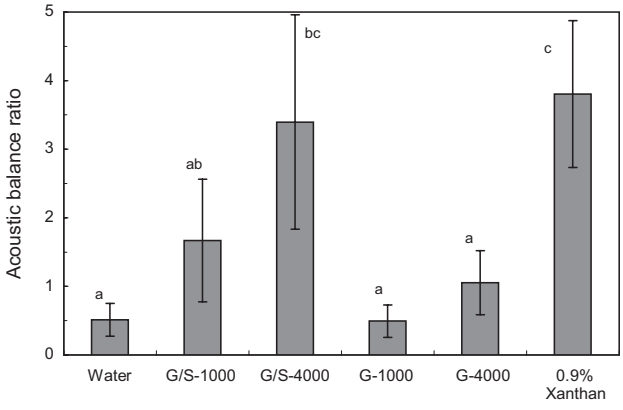


Fig. 11 Acoustic balance ratio of the swallowing sound for polysaccharide gels. Abbreviations G/S and G represent gellan/psyllium composite gel and gellan single gel, respectively. Numbers 1,000 and 4,000 represent the compression stress in Pa at 67% strain and at 10 mm/s The ratio of the sound pressure (in dB) at a high-frequency (3.0–4.5 kHz) range to that at a low-frequency (0.3–0.9 kHz) range was determined. Data are presented as means ± SD of seven subjects. Data with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$). Cited from Ishihara *et al.* (2011), Food Hydrocolloids, 25, 1016–1024.

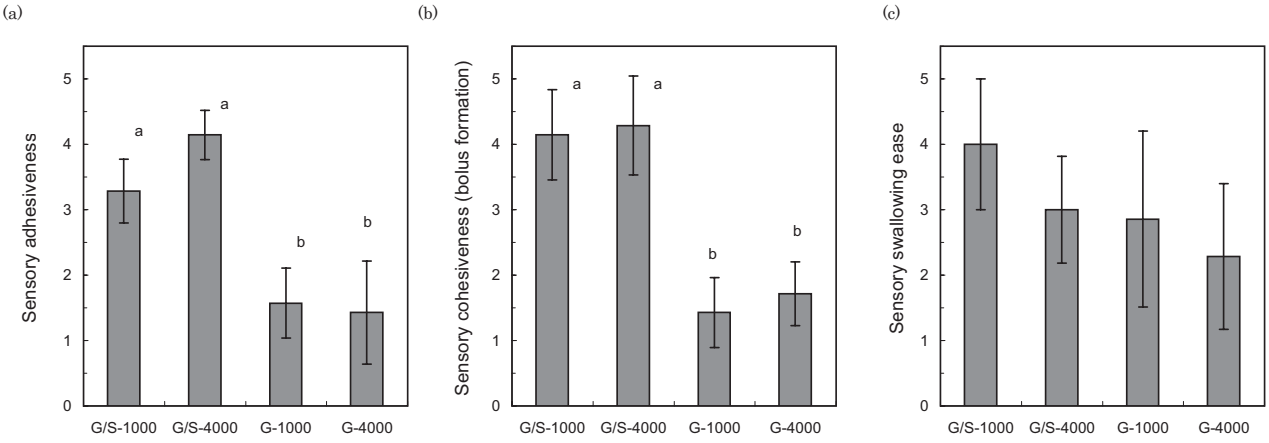


Fig. 12 Sensory scores during swallowing for polysaccharide gels. Abbreviations G/S and G represent gellan/psyllium composite gel and gellan single gel, respectively. Numbers 1,000 and 4,000 represent the compression stress in Pa at 67% strain and at 10 mm, Each sensory attribute was evaluated on a structured 5-degree scale; the larger the score, the greater the perceived intensity is for each sensory attribute. Data are means ± SD of seven subjects. Data with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$). Cited from Ishihara *et al.* (2011), Food Hydrocolloids, 25, 1016-1024.

単独ゲルに比べて t_2，すなわち食塊が咽頭相を通過するのに要する時間が短い（Fig. 10）．ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルの t_2 は 0.9% キサンタンガム溶液に類似しており，水よりも小さい．ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルの嚥下音の音響バランスは相対的に 0.9% キサンタンガム溶液に近く，ジェランガム単独ゲルは相対的に水に近い（Fig. 11）．また，ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルはジェランガム単独ゲルに比べて感覚的なまとまり感（咽頭相での食塊形成性）に優れる（Fig. 12）．

ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルがジェランガム単独ゲルに比べて t_2 が短くなる理由として 2 つの仮説が考えられる．1 つはジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルの食塊がジェランガム単独ゲルの食塊よりも咽頭相を速く通過するという仮説である．しかし，ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルの t_2 が水よりもキサンタンガムの t_2 に近いことを考えれば，この可能性は低い．もう 1 つの仮説はジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルの食塊はジェランガム単独ゲルの食塊に比べて，流速のばらつきが小さく，ばらばらの粒子ではなく一塊となって咽頭相を通過するというものである．超音波パルスドップラー法を用いた実験から，嚥下時の多糖類溶液の流速が多糖類濃度の減少（粘度の低下）にしたがってより広範囲に分布するとともに最大流速が増加することが知られており [42]，水で t_2 が最大になることと一致している．ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルとジェランガム単独ゲルにおける t_2 の相違もまた，咽頭相における流速分布の違いによって説明できる．つまり，ジェランガム・サイリウムシードガム併用ゲルでは咽頭相通過時に食塊流速のばらつきが小さく，これが感覚的なまとまり感の増加に関係していると考えられる．

将来的には，若年者とは摂食能力が異なる高齢者を対象にして同様の検討を行い，結果の妥当性を確認する必要がある．

7. 結　　論

摂食過程における食品の動的な変化を理解し，定量化することはテクスチャーを表す上で必須であり，このような観点から食塊レオロジーと生体計測は有益である．テクスチャーは数多くの属性の集合体であり，テクスチャー研究には，心理学，生理学，および物理化学など，多くの研究分野が関与している．テクスチャーを総合的に理解するためには異なる研究領域の融合が必要である．リーズ大学（UK）の Chen 博士の主宰で開催された第 1 回 Food Oral Processing 会議 2010[64] は 1 つの転機であり，テクスチャーに関係する異なるバックグラウンドの研究者が世界中から一同に介した．テクスチャー研究の発展のため，このような異分野連携がさらに活性化されることを期待したい．

引　用　文　献

1) K. Nishinari.; Polysaccharide rheology and in-mouth perception, In A. M. Stephen, G. O. Phillips, P. A. Williams (Eds.), Food polysaccharides and their applications 2nd ed., pp. 541-588. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
2) K. Kohyama; Textural characteristics, In K. Nishinari, H. Ogoshi, K. Kohyama, T. Yamamoto (Eds.), Handbook of Texture Creation (in Japanese), pp. 185-191. Tokyo: Science

Forum, 2005.

3) K. Nishinari; New texture modifiers for foods, Interactions among different food hydrocolloids and their potential of application. Kagaku to Seibutsu, **34**, 197-204 (1996) (in Japanese).
4) H. van Olphen, K. J. Mysels; International Union of Pure and Applied Chemistry. Commission I.6: Colloid and Surface Chemistry, La Jolla, C. A.: Theorex, 1975.
5) P. A. Williams, G. O. Phillips; Introduction to food hydrocolloids, In G. O. Phillips, P. A. Williams (Eds.), Handbook of hydrocolloids, pp. 1-19. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2000.
6) K. Nishinari; Texture and rheology in food and health. Food Sci. Technol. Res., **15**, 99-106 (2009).
7) L. A. Quinchia, C. Valencia, P. Partal, J. M. Franco, E. Brito-de Fuente, C. Gallegos; Linear and non-linear viscoelasticity of puddings for nutritional management of dysphagia. Food Hydrocolloids, **25**, 586-593 (2011).
8) S. Schiffman; Food recognition by the elderly. J. Gerontol., **32**, 586-592 (1977).
9) S. Schiffman, G. Musante, J. Conger; Application of multidimensional scaling to ratings of foods for obese and normal weight individuals. Physiol. Behav., **21**, 417-422 (1978).
10) J. Chen; Food oral processing-A review. Food Hydrocolloids, **23**, 1-25 (2009).
11) J. B. Hutchings, P. J. Lillford; The perception of food texture - the philosophy of the breakdown path. J. Texture Studies, **19**, 103-115 (1988).
12) K. Nishinari; Rheology, food texture and mastication. J. Texture Studies, **35**, 113-124 (2004).
13) K. Nishinari; Rheology in food and health. Nihon Reoroji Gakkaishi (J. Soc. Rheol. Jpn.), **35**, 35-47 (2007) (in Japanese).
14) S. S. Stevens, M. Guirao; Scaling of apparent viscosity, Science, **144**, 1157-1158 (1964).
15) T. Funami, M. Hiroe, S. Noda, I. Asai, S. Ikeda, K. Nishinari; Influence of molecular structure imaged with atomic force microscopy on the rheological behavior of carrageenan aqueous systems in the presence or absence of cations. Food Hydrocolloids, **21**, 617-629 (2007).
16) T. Funami, S. Noda, M. Nakauma, S. Ishihara, R. Takahashi, S. Al-Assaf, S. Ikeda, K. Nishinari, G. O. Phillips; Molecular structures of gellan gum imaged with atomic force microscopy (AFM) in relation to the rheological behavior in aqueous systems in the presence of sodium chloride. Food Hydrocolloids, **23**, 548-554 (2009).
17) S. Noda, T. Funami, M. Nakauma, I. Asai, R. Takahashi, S. Al-Assaf, S. Ikeda, K. Nishinari, G. O. Phillips; Molecular structures of gellan gum imaged with atomic force microscopy in relation to the rheological behavior in aqueous systems. 1. Gellan gum with various acyl contents in the presence and absence of potassium. Food Hydrocolloids, **22**, 1148-1159 (2008).
18) A. P. Gunning, A. R. Kirby, M. J. Ridout, G. J. Brownsey, V. J. Morris; Investigation of gellan networks and gels by atomic force microscopy. Macromolecules, **29**, 6791–6796 (1996).
19) A. P. Gunning, V. J. Morris; Light scattering studies of tetramethyl ammonium gellan. Int. J. Biol. Macromol., **12**, 338–341 (1990).
20) V. J. Morris, A. R. Kirby, A. P. Gunning; A fibrous model for gellan gels from atomic force microscopy studies. Prog. Colloid Polym. Sci., **114**, 102–108 (1999).
21) G. Sala, M. Stieger, F. van de Velde; Serum release boosts sweetness intensity in gels. Food Hydrocolloids, **24**, 494-501 (2010).
22) K. Nishinari; Coordinate of texture - texture controlling technology, In K. Nishinari, H. Ogoshi, K. Kohyama, T. Yamamoto (Eds.), Handbook of Texture Creation (in Japanese), pp. 287-291. Tokyo: Science Forum, 2005.
23) A. Mackey, K. Valassi; The discernment of primary tastes in the presence of different food textures, Food Technol. Chicago, **10**, 238-240 (1956).
24) E. R. Morris; Rheological and organoleptic properties of food hydrocolloids, In K. Nishinari, E. Doi (Eds.), Food Hydrocolloids, Structures, Properties, and Functions, pp. 201-210. New York: Plenum Press, 1993.
25) M. L. Jalabert-Malbos, A. Mishellany-Dutour, A. Woda, M. A. Peyron; Particle size distribution in the food bolus after mastication of natural foods. Food Qual. Prefer., **18**, 803–812 (2007).
26) R. Clark; Influence of hydrocolloids on flavour release and sensory-instrumental correlations, In G. O. Phillips, P. A. Williams (Eds.), Gums and Stabilisers for the Food Industry 11, pp. 217-224. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2002.
27) K. G. C. Weel, A. E. M. Boelrijk, A. C. Alting, P. J. J. M. van Mil, J. J. Burger, H. Gruppen, A. G. J. Voragen, G. Smit; Flavor release and perception of flavored whey protein gels: Perception is determined by texture rather than by release. J. Agric. Food Chem., **50**, 5149-5155 (2002).
28) D. J. Cook, R. S. T. Linforth, A. Taylor; Effects of hydrocolloid thickeners on the perception of savory flavors. J. Agric. Food Chem., **51**, 3067-3072 (2003).
29) K. Kohyama, T. Sasaki, F. Hayakawa; Characterization of food physical properties by the mastication parameters measured by electromyography of the jaw-closing muscles and mandibular kinematics in young adults. Biosci. Biotechnol. Biochem., **72**, 1690-1695 (2008).
30) S. Ishihara, M. Nakauma, T. Funami, T. Tanaka, K. Nishinari,

K. Kohyama; Electromyography during oral processing in relation to mechanical and sensory properties of soft gels, J. Texture Studies, **42**, 254-267 (2011).

31) K. Nishinari, H. Horiuchi, K. Ishida, K. Ikeda, M. Date, E. Fukada; A new apparatus for rapid and easy measurement of dynamic viscoelasticity for gel-like foods, Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi, **27**, 227- 233 (1980) (in Japanese).
32) H. H. Friedman, J. E. Whitney, A. S. Szczesniak; The Texturometer – a new instrument for objective texture measurement. J. Food Sci., **28**, 390-396 (1963).
33) A. S. Szczesniak; Objective measurements of food texture, J. Food Sci., **28**, 410-420 (1963).
34) M. C. Bourne; Principles of objective texture measurement, In M. C. Bourne (Ed.), Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement 2nd ed., pp. 107-188. New York: Academic Press, 2002.
35) K. Kohyama, Y. Nouchi, T. Sasaki, T. Funami, K. Nishinari; Bite-speed effects in two-bite texture analysis. Abstract of the 57th Nihon Reoroji Touronkai, 328-329 (2009).
36) M. E. Malone, I. A. M. Appelqvist, I. T. Norton; Oral behavior of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations. Food Hydrocolloids, **17**, 763-773 (2003).
37) P. W. Lucas, J. F. Prinz, K. R. Agrawal, I. C. Bruce; Food physics and oral physiology. Food Qual. Prefer., **13**, 203-213 (2002).
38) A. Mishellany-Dutour, A. Woda, R. Labas, M. A. Peyron; The challenge of mastication: preparing a bolus suitable for deglutition. Dysphagia, **21**, 87-94 (2006).
39) M. A. Peyron, A. Mishellany-Dutour, A. Woda; Particle size distribution of food boluses after mastication of six natural foods. J. Dent. Res., **83**, 578–582 (2004).
40) L. Mioche, P. Bourdiol, S. Monier, J. F. Martin, D. Cormier; Changes in jaw muscles activity with age: effects on food bolus properties. Physiol. Behav., **82**, 621-627 (2004).
41) J. Chen, L. Lolivret; The determining role of bolus rheology in triggering a swallowing. Food Hydrocolloids, **25**, 325-332 (2011).
42) 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**, 203-210 (2009).
43) J. F. Prinz, P. W. Lucas; An optimization model for mastication and swallowing in mammals. Proceedings of Royal Society London, Series B, **264**, 1715–1721 (1997).
44) S. Ishihara, M. Nakauma, T. Funami, S. Odake, K. Nishinari; Swallowing profiles of food polysaccharide gels in relation to bolus rheology, Food Hydrocolloids, **25**, 1016-1024 (2011).
45) J. H. H. Bongaerts, D. Rossetti, J. R. Stokes; The lubricating properties of human whole saliva. Tribol. Lett., **27**, 277-287 (2007).
46) K. Kohyama, Y. Nakayama, H. Watanabe, T. Sasaki; Electromyography of eating apples: Influence of cooking, cutting, and peeling. J. Food Sci., **70**, S257-S261 (2005).
47) K. Kohyama, K. Ohtsubo, H. Toyoshima, K. Shiozawa; Electromyographic study on cooked rice with different amylose contents. J. Texture Studies, **29**, 101-113 (1988).
48) K. Kohyama, H. Sawada, M. Nonaka, C. Kobori, F. Hayakawa, T. Sasaki; Textural evaluation of rice cake by chewing and swallowing measurements on human subjects. Biosci. Biotechnol. Biochem., **71**, 358-365 (2007).
49) K. Kohyama, M. Yamaguchi, C. Kobori, Y. Nakayama, F. Hayakawa, T. Sasaki; Mastication effort estimated by electromyography for cooked rice of differing water content. Biosci. Biotechnol. Biochem., **69**, 1669-1676 (2005).
50) K. Kohyama, E. Hatakeyama, H. Dan, T. Sasaki; Effects of sample thickness on bite force for raw carrots and fish gels. J. Texture Studies, **36**, 157-173 (2005).
51) K. Kohyama, M. Nishi; Direct measurement of biting pressures for crackers using a multiple-point sheet sensor. J. Texture Studies, **28**, 605-617 (1997).
52) K. Kohyama, M. Nishi, T. Suzuki; Measuring texture of crackers with a multiple-point sheet sensor. J. Food Sci., **62**, 922-925 (1997).
53) K. Kohyama, T. Sakai, T. Azuma, T. Mizuguchi, I. Kimura; Pressure distribution measurement in biting surimi gels with molars using a multiple-point sheet sensor. Biosci. Biotechnol. Biochem., **65**, 2597-2603 (2001).
54) K. Kohyama, T. Sasaki, H. Dan; Active stress during compression testing of various foods measured by a multiple-point sheet sensor. Biosci. Biotechnol. Biochem., **67**, 1492-1498 (2003).
55) F. Nakazawa, M. Togashi; Evaluation of food texture by mastication and palatal pressure, jaw movement and electromyography, In K. Nishinari (Ed.), Hydrocolloids part 2 fundamentals and applications in food, biology, and medicine, pp. 473-483. Amsterdam: Elsevier., 2000.
56) J. Takahashi, F. Nakazawa; Palatal pressure patterns of gelatin gels in the mouth, J. Texture Studies, **22**, 1-11 (1991).
57) J. Takahashi, F. Nakazawa; Effects of dimensions of agar and gelatin gels on palatal pressure patterns, J. Texture Studies, **23**, 139-152 (1992).
58) F. Nakazawa, M. Ohno, A. Morita, J. Takahashi; Ultrasonic measurement of the velocity through the pharynx of swallowed rice boiled with differing water content. J. Home Econ. Jpn., **51**, 1067-1071 (2000).
59) P. Clave, M. De Kraa, V. Arreola, M. Girvent, R. Farre, E.

Palomera, M. Serra-Prat; The effect of bolus viscosity on swallowing function in neurogenic dysphagia. Aliment. Pharm. Ther., **24**, 1385-1394 (2006).

60) M. Okazawa, H. Konishi, T. Yoshida, A. Katsumata, Y. Iida, M. Fujishita; Properties of rice porridge (gruel) as a meal for patients with swallowing disorder. J. Gifu Dent. Soc., **35**, 7-12 (2008).

61) E. Saitoh, S. Shibata, K. Matsuo, M. Baba, W. Fujii, J. B Palmer: Chewing and food consistency: effects on bolus transport and swallow initiation. Dysphagia, **22**, 100-107 (2007).

62) M. Nakauma, S. Ishihara, T. Funami, K. Nishinari; Swallowing profiles of food polysaccharide solutions with different flow behaviors, Food Hydrocolloids, **25**, 1165-1173 (2011).

63) S. L. Hamlet, R. L. Patterson, S. M. Fleming, L. A. Jones; Sounds of swallowing following total laryngectomy. Dysphagia, **7**, 160-165 (1992).

64) International conference on food oral processing - physics, physiology and psychology of eating -, London: The Royal Society of Chemistry, 2010.

要　　旨

テクスチャーは食品の嗜好性および摂食の安全という両面で重要である．近年の超高齢社会においては，咀嚼および嚥下困難者の摂食能力に配慮した食品（いわゆる介護食）の開発が活発化しており，介護食は他の加工食品に比べてテクスチャーの重要性が高い．介護食のテクスチャーデザインは食品産業における最も重要な課題の１つである．介護食のテクスチャーは，摂食過程で飲み込みやすい食塊を容易に形成しうるよう，ハイドロコロイドを用いて粘弾性を調節しなければならない．本稿では，食品の必須要素としてのテクスチャーの重要性とともに，テクスチャーを改良するための素材としてのハイドロコロイドの有用性について述べる．また，食塊レオロジーおよびテクスチャーの生体計測に関する著者らの最新の研究内容について紹介する．これら一連の研究の目的は，従来のバルクレオロジーおよび感覚評価を補完する方法として，咀嚼および嚥下のしやすさを表す新たな客観パラメータを見出すことにある．