

研究の動向

食物の経口プロセスとレオロジー特性

十文字学園女子大学 森高 初恵

1. 緒言

食物の美味しさは、テクスチャー、味と香り、視覚的な外観を含む複数の因子の組合せによって成り立つ。食物の味と香りに対する経口プロセスの重要性は、食物の咀嚼による破壊と風味成分の放出との間に正の相関があることから、多くの研究者により明かにされてきた。経口プロセスは中枢神経系によって制御される生理学的プロセスと、食品の力学的特性や幾何学的特性によって調節される物理学的プロセスから構成される。生理的要因は年齢、性別、歯や健康状態などであり、物理的要因は食物の性質である。ここでは、食物が口腔内でどのように変化していくのか、レオロジー特性と経口プロセスとの関係から述べさせていただく。

2. 咀嚼

(1) 最初の咬合

食物に対する最初の咬合が、通常口腔（咀嚼）プロセスの開始とみなされる。最初の咬合から受け取った知覚は、硬さ、付着性や凝集性を含む幅広いテクスチャー特性をカバーする。最初の咬合時に加えられる力は、食物の力学的性質や幾何学的性質に大きく依存する。適用された咬合力と食物の力学的性質の関係は、Mioche and Peyron¹⁾により明かにされた。彼らは、弾性体の食物ではほぼ対称的な咬合力が生じ、最大まで上昇するが、食品が破損されていない状態でゼロに戻り、咬合の長さは約0.8秒であったことを報告した。塑性体の食物では、咬合力は食物が流動し始める降伏点まで上昇し、食物の一噛みには1.8秒を要した。脆い食物の一噛みでは弾性体の食物よりさらに短い時間であった。過去の多くの研究から、食物の弾性や塑性などの力学的性質と降伏応力などの力学的強度の両方が、咬合パターンおよび咬合

の長さに大きな影響を与えることが示されている。

食物の幾何学的形状も、咀嚼動作に大きく影響する。Kohyama et al.²⁾は多点センサーシートを用いた実験で、硬く脆いニンジンではより厚い食物において、接触面積に対する力の比、ピーク力および接触面積がより大きいことを報告し、柔らかくて丈夫な魚肉ゲルでは、厚さが増加するに従い接触面積に対する力の比はほぼ変化しないが、ピーク力や接触面積が増加することを述べた。しかし、Agrawal and Lucas³⁾は、食物のジオメトリが最初の咬合に及ぼす影響は、力の大きさではなく、作業量と関係し、より厚い試料ではより大きな破壊エネルギーを必要とするとして述べた。咬合時にヒトが感じる硬さが、使用される力の大きさによるのか、仕事量に基づいているのか、あるいは単位時間当たりの仕事量に基づいているのかについてはまだ明確ではない。

(2) 口腔における選択と咀嚼

口腔内選択と咀嚼は、固形や半固形食物を破碎するための主要な経口プロセスである。これらのプロセスでは、まとまった、滑らかな食塊を形成するために食物粒子を細かくし、かつ食物マトリックスから呈味成分や香り成分を放出し、味や香りの強度を増強させる。従って、咀嚼はテクスチャー感覚のプロセスだけでなく、味や香りを賞味するプロセスでもある。

口腔内選択は独立した口腔操作ではなく、咀嚼と同時に起こり、食物の粒子サイズの縮小操作の一部である。選択プロセスでは舌が重要な役割を果たし、舌は適切なサイズに噛まれた食物粒子を口腔後部へと移動させ、大きな粒子サイズをさらに縮小するために選択する。著者らの研究⁴⁾では、一辺が15 mmの立方体アガロースゲルの咀嚼において、破壊されて小さくなった粒子は対数正規分布に適合し、大きなサイズ粒子は指数分布に従った (Fig. 1)。この指数分布領域に存在する大きなサイズの粒子が、口腔内では優先的に選択されて、破壊されると考えられる。Lucas et al.⁵⁾は、粒子が歯に接触する機会を表すための選択関数を用いたモデルを提案した。こ

Hatsue MORITAKA

十文字学園女子大学、東京家政大学大学院（客員教授）、昭和女子大学名誉教授、昭和女子大学女性健康科学研究所
 [著者紹介] (略歴) 昭和女子大学大学院生活機構研究科退職後、日本女子大学非常勤講師を勤める。
 [専門分野] 食物レオロジー、咀嚼・嚥下特性、テクスチャー特性。

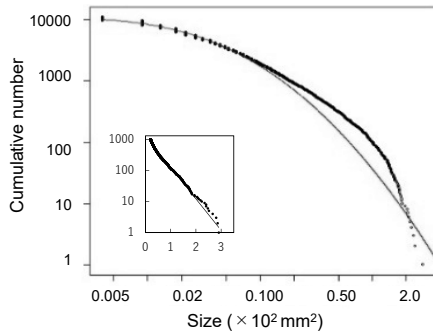


Fig. 1 5回咀嚼で生成した寒天ゲル粒子の累積数と粒子サイズの関係

挿入図は対数正規分布から外れた分布
 実線は対数正規分布
 挿入図の実線は指数分布

のモデルは単純であるために一般的に認められているが、ランダムな性質としての解釈ができないこと、幾何学的性質についての説明がないことなどが指摘されている。

咀嚼の長さや咀嚼回数は食物によって大きく変動する。例えば、一杯のリンゴは7回の咀嚼を経て嚥下可能な食塊となるが、バナナとクッキーではさらに多くの咀嚼が必要であることが示されている。咀嚼速度は異なる食物を食べる場合でも同一の被験者においては極めてよく似ているが、顎の垂直運動は咀嚼のプロセスが進むに従い徐々に減少する。これは恐らく食物粒子のサイズが小さくなるためであろう。咀嚼行動に対する食物レオロジーの重要性は、Engelen et al.⁶⁾によっても実証されている。彼らは、降伏応力と咀嚼回数という2つのパラメータの間に線形関係が成立し、より大きい降伏応力を有する食物はより多くの咀嚼回数を必要とすることを示した。また、他の研究者により、食物の硬さが増加すると、咀嚼回数が増加するだけでなく、咀嚼に要する筋活動の総量もより大きくなり、平均の垂直振幅がより高くなることが報告された。さらに、咀嚼における食物の特徴は、咀嚼の初期に強く表れることも観察された。Foster⁷⁾は、弾性モデル食品（ゼラチンゲル）と可塑性モデル食品（キャラメル）の両タイプについて、50%変形時の硬さが増加するのに伴って、単位時間当たりの咀嚼回数はほとんど変化しないが、咀嚼持続時間、咀嚼回数、筋活動量は有意に増加すると報告した。顎の動きについては、弾性モデル食品では顎の動きの軌跡は繰り返しであるが、可塑性モデル食品では多数の不規則な動きがあることが観察された。しかしながら、不規則な顎の動きが、食物の主要な構造を破壊するために生じるのか、あるいは他の理由によるのかについては不明である。

幾何学的性質は最初の咬合に大きな影響を与えることは知られているが、咀嚼にどのように影響するかはあまり明らかではない。これまでに、食品サイズが小さければ、咀嚼時間が短くなり、咀嚼回数が少なくなり、顎の

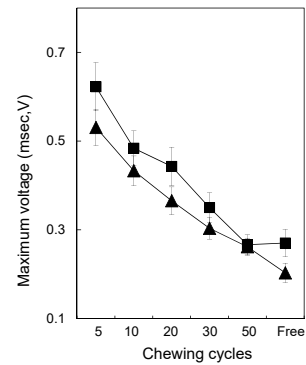


Fig. 2 寒天ゲルの咀嚼における咬筋の最大活動強度

▲：1個の一辺が15 mmの立方体ゲルを咀嚼

■：15 mm立方体ゲルと同量の複数個の一辺が3.5 mmの立方体ゲル

閉鎖筋活動量が低下することが報告されている。一方、著者らのグループ⁸⁾は、摂食量が同じ場合、1個の大きいゲルよりも複数の小さいゲルの方が嚥下までの咬筋活動強度が大きいという結果を得ている (Fig. 2)。食物の咀嚼による破壊の詳細はかなり複雑である。ビデオフログラフィーによる頬と舌の軌跡運動の観察により、咀嚼過程で約10 mmの横方向の動きと20 mm程度の垂直方向の圧縮があることが示され、咀嚼においてはせん断変形が生じることが証明されている。

(3) 咀嚼に影響を及ぼす生理的要因

生理的要因も咀嚼に重要な影響を与える。最も重要な生理的要因の一つは年齢であろう。年齢の1歳の増加が食事のシーケンス当たり0.3サイクルの平均増加につながるということが明らかにされた。また、Kohyama et al.⁹⁾は、どのような種類の食物でも、若齢者よりも高齢者が咀嚼当たりの筋活動が多いことを見出した。しかし、食物の咀嚼に用いられる筋活動の総量は、若齢者と高齢者の間に有意差は認められなかった。これは、食物をまとまりのある食塊へ変化させるのに、年齢にかかわらず同じ作業量が必要であることを示している。歯の状態は、咀嚼に影響を及ぼす別の生理的要因である。Karkazis¹⁰⁾は、義歯の装着者は食物構造の変化に対する適合度が低いことを観察し、咀嚼機能を高めるためにはより高い咬筋活動量が必要であることを示した。義歯装着者は、たとえ水分量が同程度の食塊であっても、若齢者よりも破壊の程度が低い食塊を飲み込む。このように、咀嚼過程における筋肉の活動並びに顎の動きは、被験者の年齢、性別、歯の状態などの影響を強く受けることが示されている。

(4) 食品の破壊のレオロジー

食物の口腔内破壊のレオロジー研究に関する最も重要な進展は、食物に対する口腔操作性能を反映する定量化可能なパラメーターであろう。破壊関数は、親粒子のサ

イズを基準にして、咀嚼当たりに生成される破砕粒子のサイズ分布として定義される。高い破壊機能を有する食物は咀嚼が容易であり、咀嚼回数が少なくで済むことを意味する。破壊関数は、食物のレオロジー特性と被験者の菌の性能という重要な2つの要因で決定される。食物の力学的性質の僅かな変化は、食物の破壊に顕著な差をもたらす。しかし、一般的に咀嚼によって得られる破壊関数は、硬く脆い食物の口腔内性能を示すにはうまく機能するが、軟質で変形可能な食物のテクスチャー特性を評価するには非常に限られた例でしか適用できないという問題がある。それは、軟質で変形可能な食品では、咀嚼しても破壊されにくく、変形するのに留まることが多いためである。

また、食物の破壊関数やレオロジー特性は、唾液が関与すると著しく変化する。特に、ビスケットやクッキーのように空隙が多く、水分含量の低い食物において、唾液の関与は大きな問題である。液体の添加は乾燥食品の咀嚼を容易にすることが判明しているが、残念なことに水分添加が食物のレオロジー特性に及ぼす影響についての研究は非常に限られている。

破壊測定の問題は、食品成分と酵素との相互作用である。Janssen et al.¹¹⁾ は、咀嚼による破壊と酵素による分解の両方がテクスチャーの知覚において重要な役割を演じることを示した。彼らは、酵素的分解はカスタードの脂肪含量、粗さや粘着性などの知覚に關与する重要な因子であることを見出した。De Wijk et al.¹²⁾ は、唾液アミラーゼによるデンプンの分解がデンプン質食品の知覚に重要な役割を果たすことを報告した。可能であれば、唾液や酵素と食物との相互作用などが機械測定に組み込まれることが望まれる。

3. 嚥下

(1) 食塊の形成

食塊の形成および嚥下の物理的性質や生理的性質に重要な影響を及ぼす因子に、唾液の流量がある。破壊された小さなサイズの粒子は舌により硬口蓋に押し付けられて、しっかりとした食塊を形成する。同時に、唾液が食物粒子の間隙を埋め、食塊の凝集力を増加させる。Prinz and Lucas¹³⁾ はサイズの縮小が食塊の形成には重要であると示し、嚥下の基準は食塊が最大凝集力に達する瞬間であると主張した。この理論は最適嚥下モデルと呼ばれる。このモデルは、適度の唾液が加わり、食物粒子が小さくなり、食物粒子間の距離が短くなるほど凝集力は高くなり、飲み込みが容易になることを示す。しかし、唾液は粒子間の凝集力に対して促進的に作用するだけではない。過度の咀嚼では過度の唾液によって、食物粒子間の距離が長くなり、反対に凝集力が低下して、嚥下を不安定化させる。特に、

水分量が多い食物においては、その傾向が強まる⁴⁾。一方、Hutchings and Lifford¹⁴⁾ は嚥下の三次元モデルを提案した。三次元モデルは、適切なサイズの食物粒子が適切に濡らされ、唾液によって凝集したときに嚥下が起こることを示す。しかし、多くの研究者による広い範囲の食物についての研究では、食物の質感によって粒子サイズは異なることが立証されている。言い換えると、食塊の平均粒子サイズは、食物の機械的性質に依存し、硬く脆い食物ではやや小さく、柔らかい食物ではより大きくなる。この現象をこのモデルでは説明できていない。

(2) 嚥下のプロセス

嚥下は経口期、咽頭期と食道期よりなり、経口期は食塊の形成から始まり、食塊が口腔後部を通過して終了する。咽頭期と食道期は完全に反射過程であり、経口期よりはるかに短い時間で終了する。経口嚥下の段階では、食塊の移動に必要な圧力は、歯を噛み締めて、リップシールを形成することから開始される。舌の先端は硬口蓋前方部に押し付けられ、順次硬口蓋後方へと舌圧を発生させていく¹⁵⁾。嚥下は、咀嚼後の嚥下と口腔や咽頭から食物を取り除くために計2回行われる。嚥下の持続時間は、食塊の量や他の因子により変化する。咽頭期は主に咽頭ポンプ（咽頭収縮によって引き起こされる作用）に依存する。咽頭期の開始は、口腔の後部部の刺激によって引き起こされる。咽頭の圧力は、口腔期で生じる圧力の約3分の2程度である。食道期では、食塊は蠕動運動によって胃へと運ばれる。食塊の嚥下は重力とは無関係であり、宇宙飛行士が重力ゼロの空間で食べたり飲んだりするのに問題がない理由でもある。

(3) 食塊の移送

食塊の移送に関する研究は、これまでに医学および臨床研究者により実施されてきた。Dantas et al.¹⁶⁾ は、食塊のより高い粘度が口腔や咽頭部の輸送速度を遅らせ、咽頭部の蠕動運動の持続時間を長引かせ、食道上部の括約筋の開放時間を延長させることを観察し、食塊の量と粘度の両方が嚥下行動に有意に影響を及ぼすと結論付けた。著者らのグループ¹⁷⁾ は、口腔内で融解するゼラチンゲルの咽頭部における移動速度が少ない摂食量で多い咀嚼回数の場合に有意に速まることを明らかにした (Fig. 3)。これは、ゼラチンゲルの咀嚼によるゾル化のためである。柔らかく半液状の食物は嚥下が容易ではあるが、咽頭部での通過速度が速いために、嚥下困難者にとっては飲み込みにくい食物となる。これは、知覚される嚥下の容易さが食塊の流動性や変形能に影響されることを示唆する。Nicosia and Robbins¹⁸⁾ は、口腔から食塊の半分をクリアするのに要する時間は、粘度や密度の増加と共に

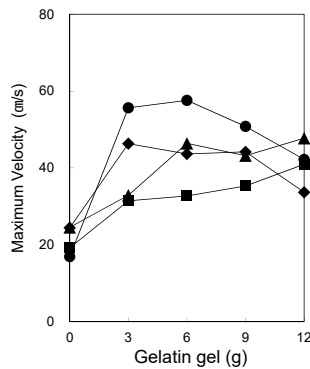


Fig. 3 超音波パルスドップラー法による咽頭部でのゼラチンゲルの最大速度

◆：5回咀嚼，■：10回咀嚼，▲：30回咀嚼，●：50回咀嚼

に増し、加えられる圧力の増加とともに減少すると報告した。同様に、著者ら¹⁵⁾は、野菜ジュースの粘度が低いほど硬口蓋正中部と舌の接触持続時間が有意に短くなり、嚥下に要する総エネルギー量が小さくなり、咽頭部での最大速度は速くなることを見出した。これらは、粘度が低い食物では食塊の厚さが薄くなり、嚥下時の舌圧は弱くなるが、口腔からの食塊の放出が速くなることを意味する。粘度が低く、移動速度が速い水が誤嚥しやすいのは、Dantas et al.¹⁶⁾が述べた理由に加え、乱流を生じやすいためかもしれない。一方、比較的粘度の高い食物は食塊の流れを遅くして、嚥下困難者にとっての嚥下が容易になり、より安全になるという利点を有する。

以上のように、口腔プロセスにおける食物レオロジーの動的变化を理解して、定量化することは美味しさや嚥下時の安全性を確保する上で極めて重要であるが、解明されていない点はまだ多い。高齢社会に対応するためにも今後の更なる研究の発展が望まれる。

文 献

- Mioche, L.; Peyron, M. A. Bite force displayed during assessment of hardness in various texture contexts. *Archives of Oral Biology*. 1995, Vol. 40, 415-423.
- Kohyama, K.; Hatakeyama, E.; Dan, H.; Sasaki T. Effects of sample thickness on bite force for raw carrots and fish gels. *Journal of Texture Studies*. 2005, Vol. 36, 157-173.
- Agrawal, K. R.; Lucas, P. W. The mechanics of the first bits. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B. Biological Sciences*. 2003, Vol. 270, 1277-1282.
- Moritaka, H.; Yamanaka, K.; Kobayashi, N.; Ishihara, M.; Nishinari, K. Effects of the gel size before ingestion and agarose molecular weight on the textural properties of a gel bolus. *Food Hydrocolloids*. 2019, Vol. 89, 892-900.
- Lucas, P. W.; Prinz, J. F.; Agrawal, K. R.; Bruce, I. C. Food physics and physiology. *Food Quality and Preference*. 2002, Vol. 13, 203-213.
- Engelen, L.; Fontijn-Tekamp, F. A.; van der Bilt, A. The influence of product and oral characteristics on swallowing. *Archives of Oral Biology*. 2005, Vol. 50, 739-746.
- Foster, K. D.; Woda, A.; Peyron, M.A. Effect of texture of plastic and elastic model foods on the parameters of mastication. *Journal of Neurophysiology*. 2006, Vol. 95, 3469-3479.
- Kitade, M.; Sagawa, A.; Fuwa, M.; Moritaka, H. Properties of the masseter and digastric muscles during swallowing of agar gels of different sizes. *Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*. 2014, Vol. 61, 293-301.
- Kohyama, K.; Miche, L.; Martin, J. F. Chewing patters of various texture foods studied by electromyography in young and elderly populations. *Journal of Texture Studies*. 2002, Vol. 33, 269-283.
- Karkazis, H. C. EMG activity of the masseter muscle in implant supported over denture wearers during chewing of hard and soft food. *Journal of Oral Rehabilitation*. 2002, Vol. 29, 986-991.
- Janssen, A. M.; Terpstra, M. E. J.; de Wijk, R. A.; Prinz, J. F. Relations between rheological properties, saliva-induced structure breakdown and sensory texture attributes of custards. *Journal of Texture Studies*. 2007, Vol. 38, 42-69.
- De Wijk, R. A.; Prinz, J. F.; Janssen, A. M. Explaining perceived oral texture of starch-based custard desserts from standard and novel instrumental tests. *Food Hydrocolloids*. 2006, Vol. 20, 24-34.
- Prinz, J. F.; Lucas, P. W. An optimization model for mastication and swallowing in mammals. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B. Biological Sciences*. 1997, Vol. 264, 1715-1721.
- Hutchings, J. B.; Lifford, P. J. The perception of food texture: the philosophy of the breakdown path. *Journal of Texture Studies*. 1988, Vol. 19, 103-115.
- Moritaka, H.; Mineki, M.; Kobayashi, M.; Ono T.; Hori, K. Effect of carrot puree in vegetable juice on linguo-palatal swallowing pressure. *Journal of Texture Studies*. 2017, Vol. 24, (<https://doi.org/10.1111/jtxs.12315>)
- Dantas R. O.; Kern, M. K.; Massey B. T.; Dodds, W. J.; Kahrilas, P. J.; Bressan, J. G. Cook, I. J.; Lang I. M. Effect of swallowed bolus variables on oral and pharyngeal phases of swallowing. *American Journal of Physiology*. 1990, Vol. 258, G675-G681.
- Inoue, y.; Sasai, M.; Shiga S.; Moritaka, H. Effects of gel amount and mastication on the velocity of agar and gelatin gels passing through the pharynx. *Nippon Shokuhin Kagaku Kaishi*. 2009, Vol. 56, 261-270.
- Nicosia, M. A.; Robbins, J. The fluid mechanics of bolus ejection from the oral cavity. *Journal of Biomechanics*. 2001, Vol. 34, 1537-1544.