

咀嚼・嚥下現象の物理学的研究

日大生産工 ○小林 奈央樹, 昭和女子大院生活機構 森高 初恵

触れる予定である。

1 はじめに

口から摂取された食品の咀嚼から嚥下にいたる過程に対して、食品物性、官能評価や生理学的手法など様々な方法によって研究がなされている¹⁾。固体状食品の摂食過程は、捕食 → 口腔の前方から奥歯への移送 → 嚥下可能な形態（すなわち食塊）の形成 → 嚥下、という段階を経る。この中で食塊形成は、食品を嚥下可能状態にする過程であり、この間のダイナミクスを理解し、さらに食塊そのものの物性を調べることはヒトの嚥下機能の理解に欠かすことができない。

物理的な視点から考えると、第一近似として咀嚼は口腔内での食品と歯との衝突による連続破壊現象だとみなすことが出来る。破壊現象は典型的な非線形・非平衡開放系（たとえば参考文献 2）を参照）の現象であり、第一原理的な理論が存在しないため、マクロな構造を現象論的なアプローチで理解することが重要である。特に、咀嚼や嚥下過程は身近な現象であるにも関わらず、直接観察が困難なため、その過程をモデル化し実験との比較を行うことによって現象を理解することが重要であると考えられている^{3,4)}。

破壊過程を解析する際に有用な手法として、破壊片累積サイズ分布が用いられることが多い。累積サイズ分布関数

$$N(s) = \int_s^{\infty} n(s') ds', \quad (1)$$

は分布関数 $n(s)$ よりも統計的な傾向を把握しやすい性質がある。本講演では、咀嚼過程で生じた食片の累積サイズ分布の解析結果を主に紹介する^{5,6)}。また食塊の物性に関して行われた実験的な研究についても報告を行う^{7,8,9)}。それらを踏まえて、食塊物性の評価に関して現在行っている理論的な研究についても

2 対数正規分布と伸張型指数分布

連続破壊過程から生じる代表的な破片の累積サイズ分布関数として、対数正規分布関数¹⁰⁾

$$N_{\ln}(s) = \frac{N_T}{2} (1 - \operatorname{erf}(\frac{\log(s/\bar{s})}{\sqrt{2}\sigma})), \quad (2)$$

と、伸張型指数分布関数¹¹⁾

$$N_{\text{se}}(s) = N_T \exp[-(s/\bar{s})^b], \quad (3)$$

がよく知られている。ここで s は表面積サイズ、 $\bar{s}$ はその平均値に関連したパラメータ、 σ は分散に関連したパラメータ、 N_T は全破片数、 $\operatorname{erf}(x)$ は以下のような誤差関数を表す。

$$\operatorname{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$$

対数正規分布は破壊点がそれ以前の破片のサイズに乗法的に依存している確率過程によって生じる^{10,12)}。その意味で、物理的起源が明快なのが特徴である。それに対して、伸張型指数分布は一回破壊のときの統計則がベキ分布であるとき得られる。破壊の物理学の知識から、破壊サイズ分布においてベキ分布が得られるときは、大きい衝撃エネルギーによって破壊された場合であることが知られている¹³⁾。つまり伸張型指数分布は大きい衝撃エネルギーによる破壊が連続して起こった結果、得られる分布だと考えられる^{14,15)}。先行研究では、この伸張型指数分布によって食片サイズ分布を解析している研究もある¹⁶⁾。以上から、我々は咀嚼によって生じた食片の累積サイズ分布を現すモデルとして対数正規分布モデルと伸張型指数分布を提案し、実験との比較を行った。

Physics of human mastication and swallowing

Naoki Kobayashi and Hatsue Moritaka

3 咀嚼実験

実験試料として、脆性固体的な物性を持つ生ニンジン、魚肉ソーセージ、適当な固さに調整した寒天ゲルを用いた。実験は非常に単純で、適当なサイズの試料を口に含み一定回数咀嚼を行い、吐き出された食片をデジタルカメラで撮影、もしくは直接スキャナーで取り込むことで、画像解析により食片ごとの表面積サイズを測定した。またはき出された食片に関して、物性試験を行った。

4 解析結果

研究の結果、咀嚼回数や個人にほぼ依らず咀嚼された食片の粒度分布は、生ニンジンでは対数正規分布によって評価できることが分かった⁵⁾。一方、魚肉ソーセージは、小さい大部分の食片群が対数正規分布で評価されたのに対し、大きい食片群では指数分布で評価できることが分かった⁶⁾。つまり食品物性により咀嚼過程が影響を受け、粒度分布が変化することが示唆される。

食塊物性に関しても、咀嚼された食品の物性、調理方法、添加物によって、その物性が大きく変化することがわかった。これは、口腔内及び咽頭部での食塊の動態が上であげたようなパラメータにより影響を受けることを示唆するものである^{7,8,9)}。

参考文献

1) M. Bourne, *Food Texture and Viscosity* (Academic Press, London, 2003) 2nd ed.

- 2) 蔵本由紀, 非線形科学 (集英社、2007)。
- 3) J. F. Prinz and P. W. Lucas, Proc. R. Soc. Lond. B **264** (1997) 1715.
- 4) P. W. Lucas, J. F. Prinz, K. R. Agrawal and I. C. Bruce, Food Physics, *Food Qual. Prefer.* **13** (2002) 203.
- 5) N. Kobayashi, K. Kohyama, Y. Sasaki and M. Matsushita, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 083001.
- 6) N. Kobayashi, K. Kohyama, and K. Shiozawa, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 044801.
- 7) A. Sagawa, N. Kobayashi and H. Moritaka, Biosci. Biotechnol. Biochem. **75** (2011) 2015.
- 8) 北出晶美, 檜木宏美, 小林奈央樹, 森 初恵, 日本食品科学工学会誌 **59** (2012) 369.
- 9) 北出晶美, 小林奈央樹, 森 初恵, 日本食品科学工学会誌 (掲載決定).
- 10) *Lognormal Distributions - Theory and Applications*, eds. E. L. Crow and K. Shimizu (Marcel Dekker, Inc., New York, 1988).
- 11) P. Rosin and E. Rammler, J. Inst. Fuel **7** (1993) 29.
- 12) A. N. Kolmogorov: Dokl. Akad. Nauk SSSR. **31** (1941) 99.
- 13) T. Ishii and M. Matsushita: J. Phys. Soc. Jpn. **61** (1992) 3474.
- 14) W. K. Brown and K. H. Wohletz: J. Appl. Phys. **78** (1995) 2758.
- 15) J. J. Gilvarry and B. H. Bergstrom: J. Appl. Phys. **32** (1961) 400.
- 16) L. W. Olthoff, A. van der Bilt, F. Bosman and H. H. Kleizen, Arch. Oral Biol. **29** (1984) 899.