

咀嚼による食品破壊の統計則

中央大理工、鶴見大歯・生理^A、農研機構食総研^B

小林奈央樹、塩澤光一^A、神山かおる^B、松下貢

Statistical Laws for Food fragmentation by Human Mastication

Naoki Kobayashi, Kouichi Shiozawa, Kaoru Kohyama and Mitsugu Matsushita

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])。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 ([2], [3])。

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 [4] 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。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 ([6])。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説明する ([5])。

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 ([7])

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

と、伸張型指数分布関数 ([8])

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

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。

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

中央大学理工白門祭 (2007 年 11 月 2,3 日) 研究室公開資料。

統計物理学・数理物理学研究室 (香取研究室) <http://www.phys.chuo-u.ac.jp/j/katori/>

対数正規分布は、破壊点がそれ以前の破片のサイズに乘法的に依存している確率過程によって生じる ([7], [9])。その意味で、物理的起源が明確なのが特徴である。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 ([10])。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 ([11], [12])。過去の研究では、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 ([13])。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。

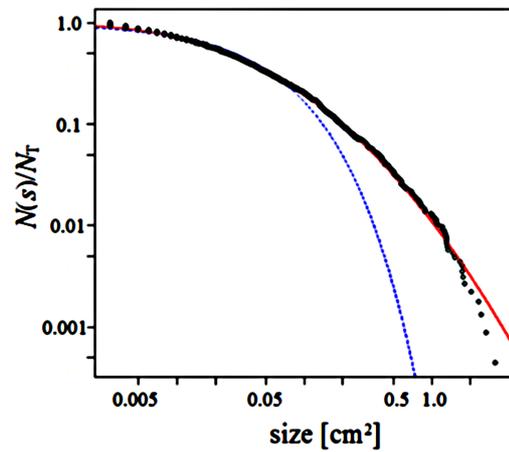


図 1: 咀嚼回数 5 回の時の食片サイズ分布 (生ニンジン)。実線: 対数正規分布、破線: 伸張型指数分布。

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 (*ca.* 2 g) 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、画像解析により食片ごとの表面積サイズを測定した。本研究では咀嚼回数をそれぞれ 5 回、10 回、自然な嚥下までに要した回数 (threshold number, 15-25 回程度) の場合を考察した。また被験者数は歯の状態が正常な 5 名である。以下の結果は断りがない限り、ある 1 名の被験者の実験結果を示すが、グラフの概形などマクロな構造は他の被験者でもほぼ同様の結果が得られている。

4 実験結果及び考察

図 1 は生ニンジン片を 5 回咀嚼したときの累積食片サイズ分布である。ただし図 1 の縦軸は食片総数 N_T で規格化されている (以下の図も同様)。このグラフから、咀嚼回数 5 回の場合には伸張型指数分布よりも対数正規分布で食片サイズ分布がよくフィットされていることが分かる。このことから咀嚼破壊は大きな衝撃エネルギーが生じるような連続破壊ではなく、食片サイズが履歴に影響を受けている対数正規的な破壊現象であるとみなすことが出来る。

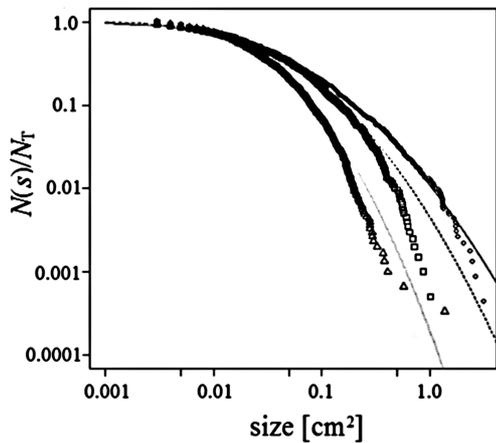


図 2: 咀嚼回数に対する食片サイズ分布の依存性。5 回: 丸印、10 回: 四角印、threshold number: 三角印。実線、破線、点線はそれぞれ各咀嚼回数ごとの対数正規分布。

図 2 は生ニンジンを咀嚼したときの咀嚼回数に対する分布形の依存性を示したものである。図 2 を見ると、咀嚼回数の多さに関係なく 90 %以上の食片が対数正規分布でよくフィットされており、少なくとも嚥下直前までは対数正規的な破壊過程を経ていることが分かる。

同様の結果は延性的な物性を持つ魚肉ソーセージの食片サイズ分布解析によっても得られている。図 3 は魚肉ソーセージを嚥下直前まで咀嚼したときの、食片累積サイズ分布を表している。やはりほぼ全体に渡って食片サイズ分布は対数正規分布でよくフィットされていることが分かる。ただし魚肉ソーセージは図 3 で示したような単純な対数正規分布でフィットされるものの他に、被験者によっては対数正規分布

のテイル部分が指数分布で表されるようなサイズ分離の傾向を示す例もあるため、食品物性や個人差 (もしくは咀嚼能力) などの関連性を含めた詳細な解析が必要である ([14])。

以上の結果から、咀嚼破壊のサイズ分布は対数正規分布という特徴的な分布で表され、履歴に依存したような確率過程がその背後の数学的構造として存在していることが実験的に分かった。一見複雑で捉えどころがないと思われる咀嚼過程において、正常な歯を持つ被験者に限定されるが、分布関数の普遍性が確認されることも上のような数学的構造が存在することを示唆している。また Olthoff らの研究 ([13]) で採用されている伸張型指数分布はその物理的な背景から考えると咀嚼破壊においては妥当ではなく、より対数正規分布に基礎をおいた研究が今後必要である。より明確に数学的構造を明らかにしようとするれば、単純な数理モデルを用いて実験との比較を行う

べきであるが、現在までそのような数理モデルは提案されておらず、その構築は今後の重要な課題の一つであるだろう。食品物性や個人の咀嚼能力に対して、食片サイズ分布の概形がどれだけ普遍的なものなのか調べることも応用面での重要な課題の一つである。そのような解析にも本研究の背景にある物理学的な考察は有効である。

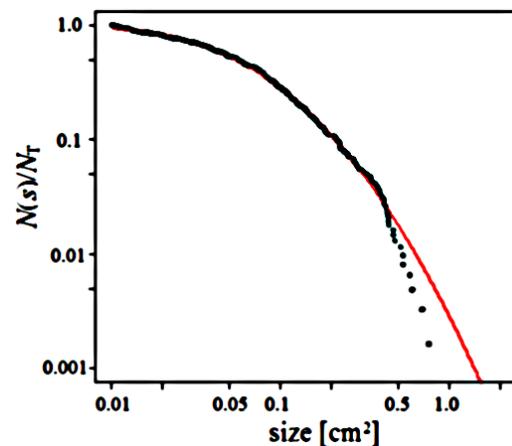


図 3: 嚥下直前まで咀嚼した時 (24 回) の食片サイズ分布 (魚肉ソーセージ)。実線: 対数正規分布。

参考文献

- [1] M. Bourne, *Food Texture and Viscosity* (Academic Press, London, 2003) 2nd ed.
- [2] J. F. Prinz and P. W. Lucas, Proc. R. Soc. Lond. B **264** (1997) 1715.
- [3] P. W. Lucas, J. F. Prinz, K. R. Agrawal and I. C. Bruce, Food Physics, *Food Qual. Prefer.* **13** (2002) 203.
- [4] 蔵本由紀, 非線形科学 (集英社、2007).
- [5] N. Kobayashi, K. Kohyama, Y. Sasaki and M. Matsushita, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 083001.
- [6] *Statistical Models for the Fracture in Disordered Media*, eds. H. J. Herrmann and S. Roux (North-Holland, Amsterdam, 1990).
- [7] *Lognormal Distributions - Theory and Applications*, eds. E. L. Crow and K. Shimizu (Marcel Dekker, Inc., New York, 1988).
- [8] P. Rosin and E. Rammler, J. Inst. Fuel **7** (1993) 29.
- [9] A. N. Kolmogorov: Dokl. Akad. Nauk SSSR. **31** (1941) 99.
- [10] T. Ishii and M. Matsushita: J. Phys. Soc. Jpn. **61** (1992) 3474.
- [11] W. K. Brown and K. H. Wohletz: J. Appl. Phys. **78** (1995) 2758.
- [12] J. J. Gilvarry and B. H. Bergstrom: J. Appl. Phys. **32** (1961) 400.
- [13] L. W. Olthoff, A. van der Bilt, F. Bosman and H. H. Kleizen, Arch. Oral Biol. **29** (1984) 899.
- [14] N. Kobayashi, K. Shiozawa, K. Kohyama and M. Matsushita, *unpublished* (2007).