

咀嚼による食品破壊の統計的性質

中央大理工 小林奈央樹、松下貢
鶴見大歯・生理 塩澤光一
農研機構食総研 神山かおる

1. 対数正規分布

2. 咀嚼実験

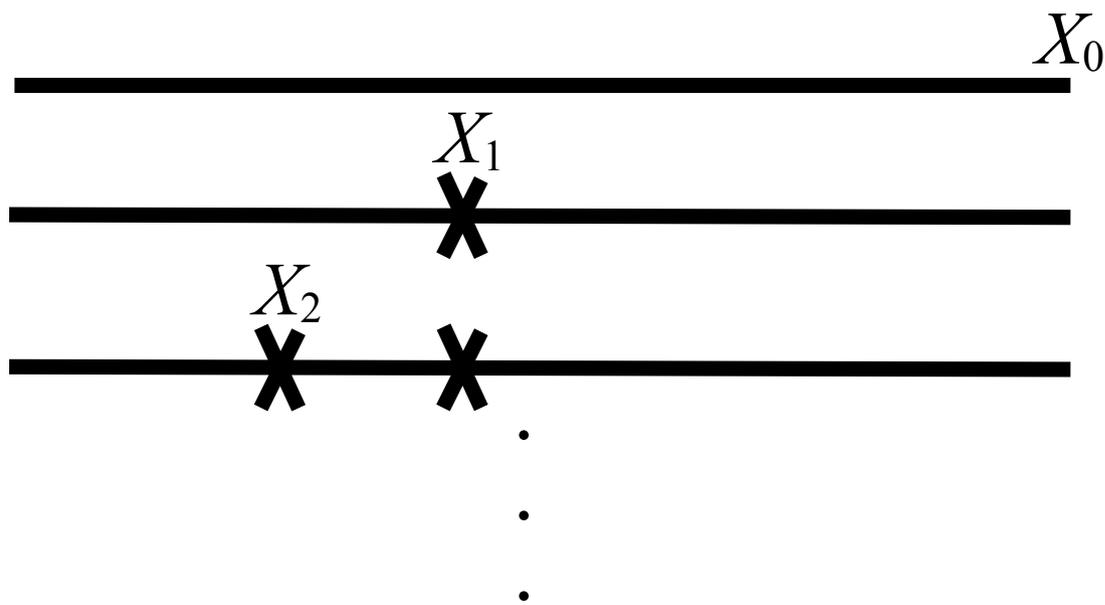
3. 食片解析

4. 参考文献

ランダム乗法的確率過程

1. 対数正規分布

Kolmogorov, 1941.



$$X_1 - X_0 = R_1 X_0$$

$$X_2 - X_1 = R_2 X_1$$

⋮

⋮

⋮

$$X_n - X_{n-1} = R_n X_{n-1}$$

R_n : 0 ~ -1 のランダム変数

$$\sum_{n=1}^N \frac{X_n - X_{n-1}}{X_{n-1}} = \sum_{n=1}^N R_n.$$

中心極限定理から正規分布

$$\int_{X_0}^{X_N} \frac{dx}{x} = \log X_N - \log X_0 = R_1 + \cdots + R_N.$$

対数正規分布

1. 対数正規分布

確率密度分布

$$n(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 s}} \exp\left[-\frac{(\log(s/\bar{s}))^2}{2\sigma^2}\right],$$

累積分布

$$N(s) = \frac{N_T}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\log(s/\bar{s})}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right).$$

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

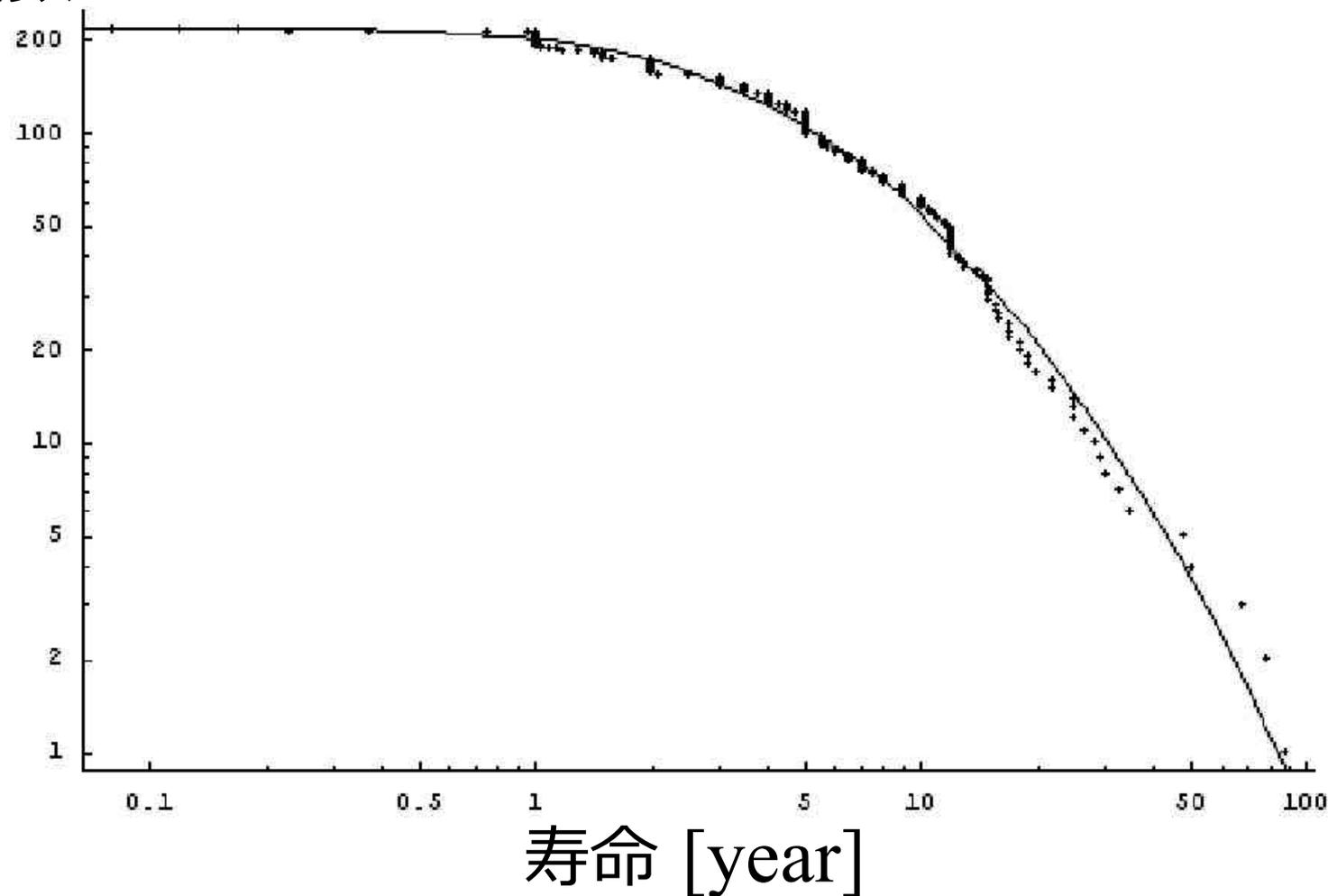
過去の履歴に影響を受ける様々な現象が対数正規分布によって記述できる可能性がある。

cf. 成長現象等.

無脊椎動物の寿命分布

1. 対数正規分布

累積度数

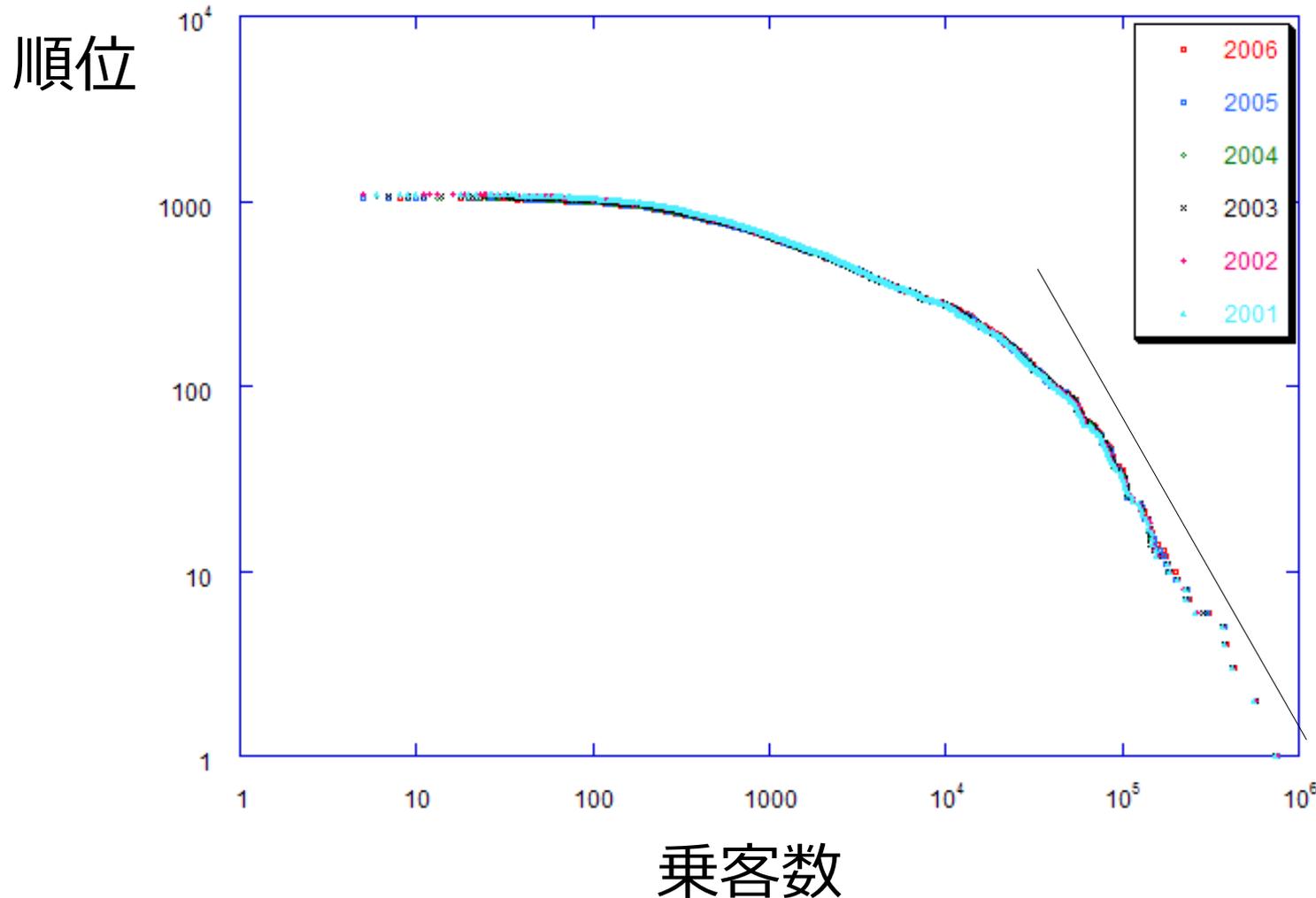


N. Kobayashi *et al.*, 2006

single lognormal distribution

JR 東日本の駅の乗客数分布

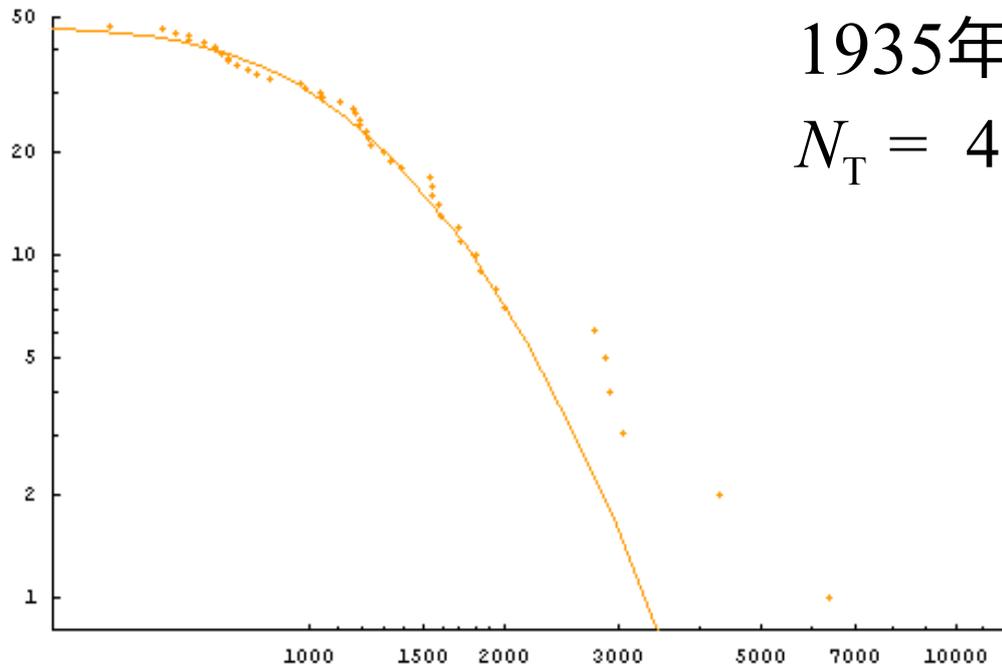
1. 対数正規分布



JR 東日本 HP (<http://www.jreast.co.jp/passenger/>) より.

lognormal + lognormal + power-law tail

1935, 1945 年の都道府県人口分布



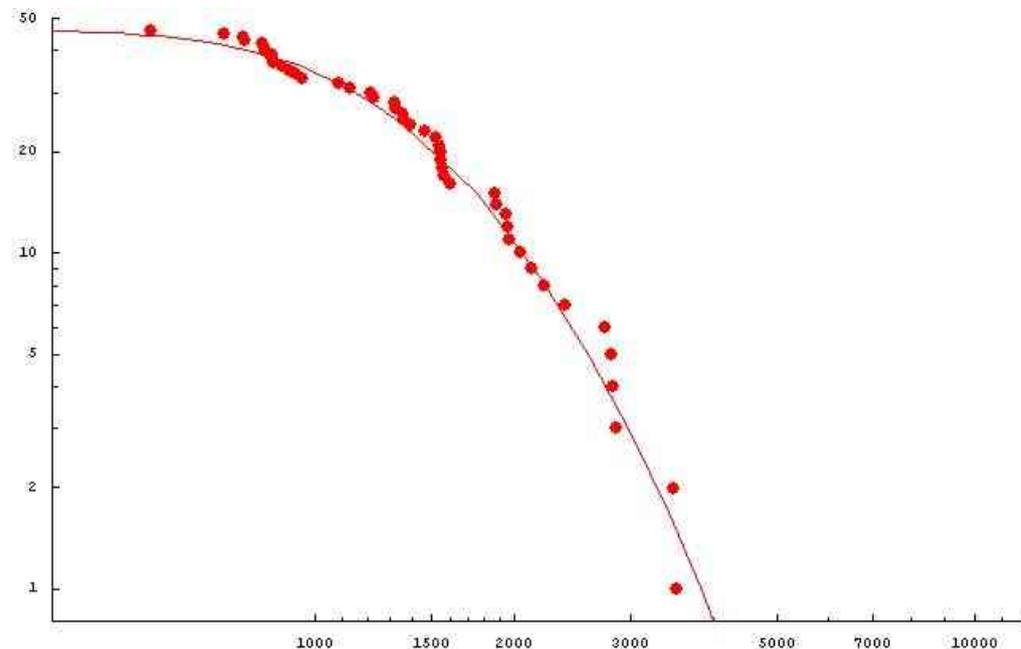
1935年

$$N_T = 47, T = 1200, \sigma = 0.5.$$

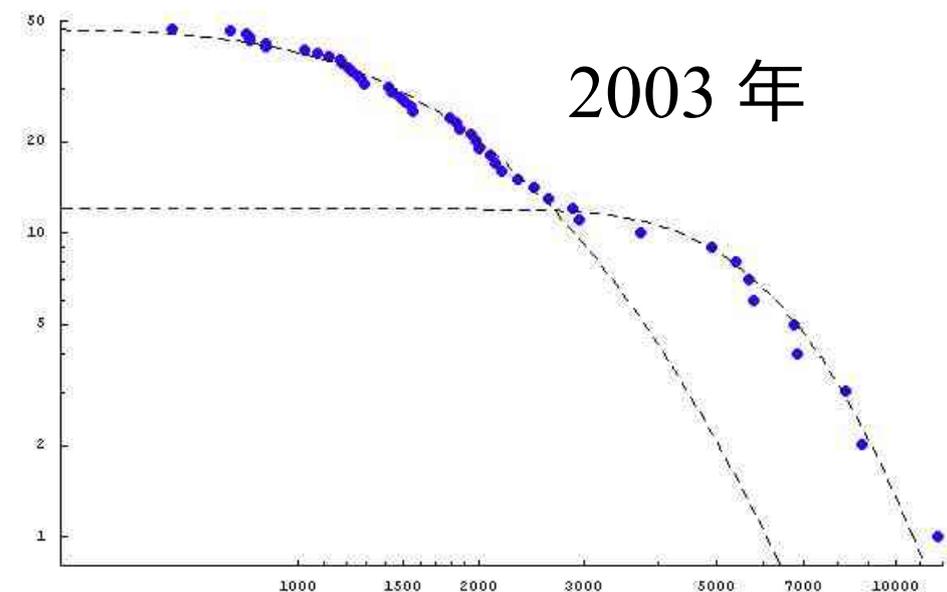
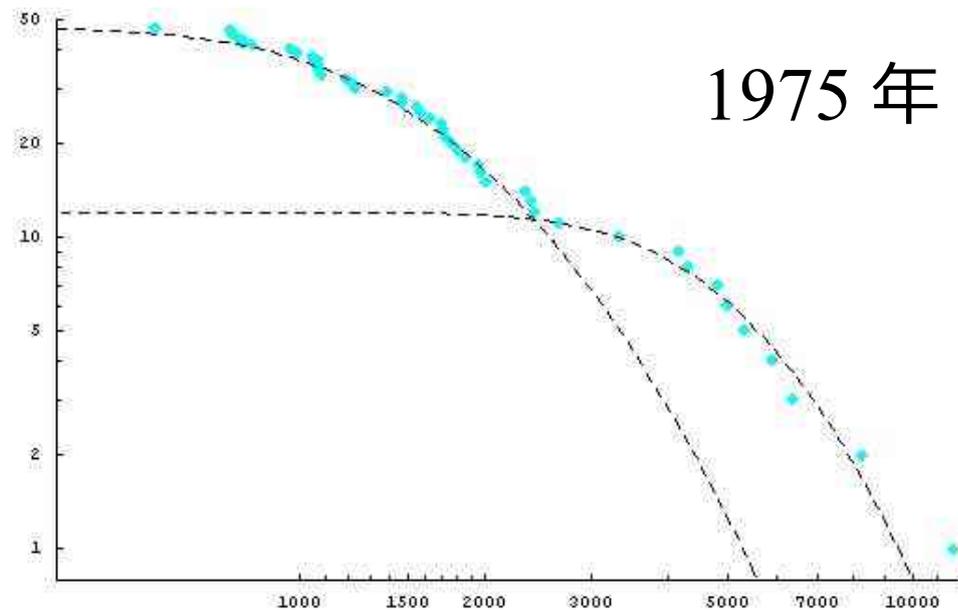
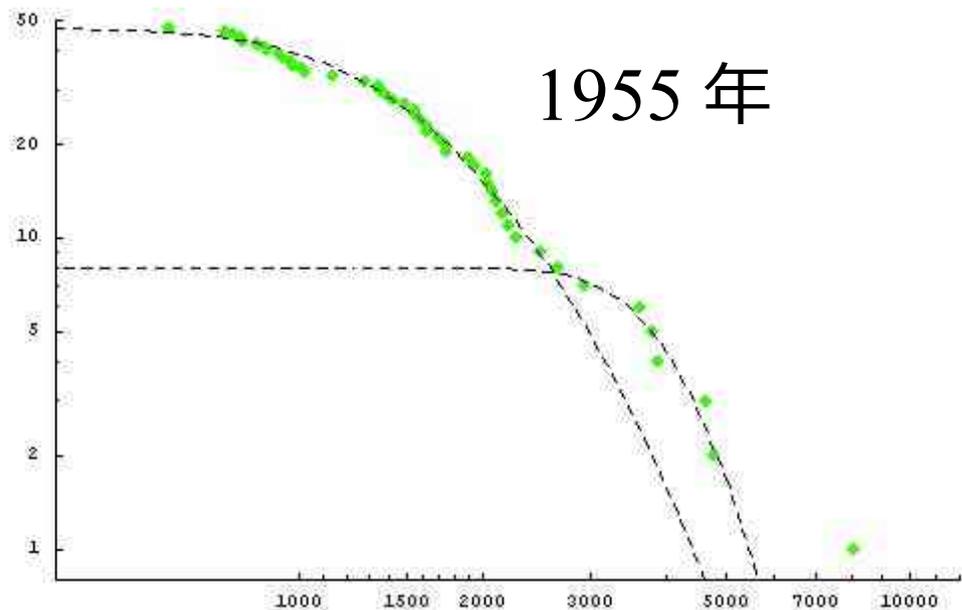
N. Kobayashi *et al.*, 2006

1945年

$$N_T = 46, T = 1400, \sigma = 0.5.$$

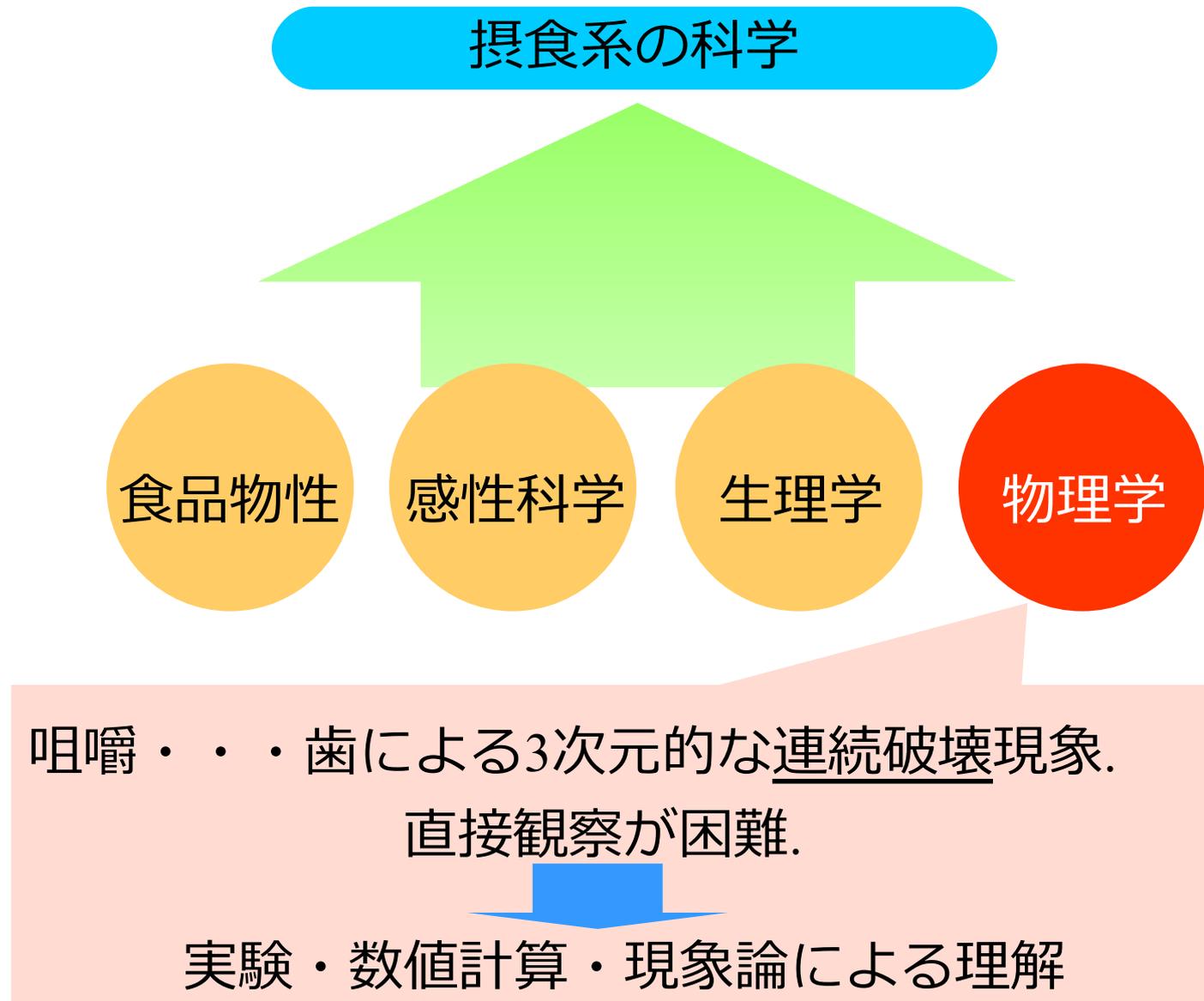


戦後の都道府県別人口分布の推移



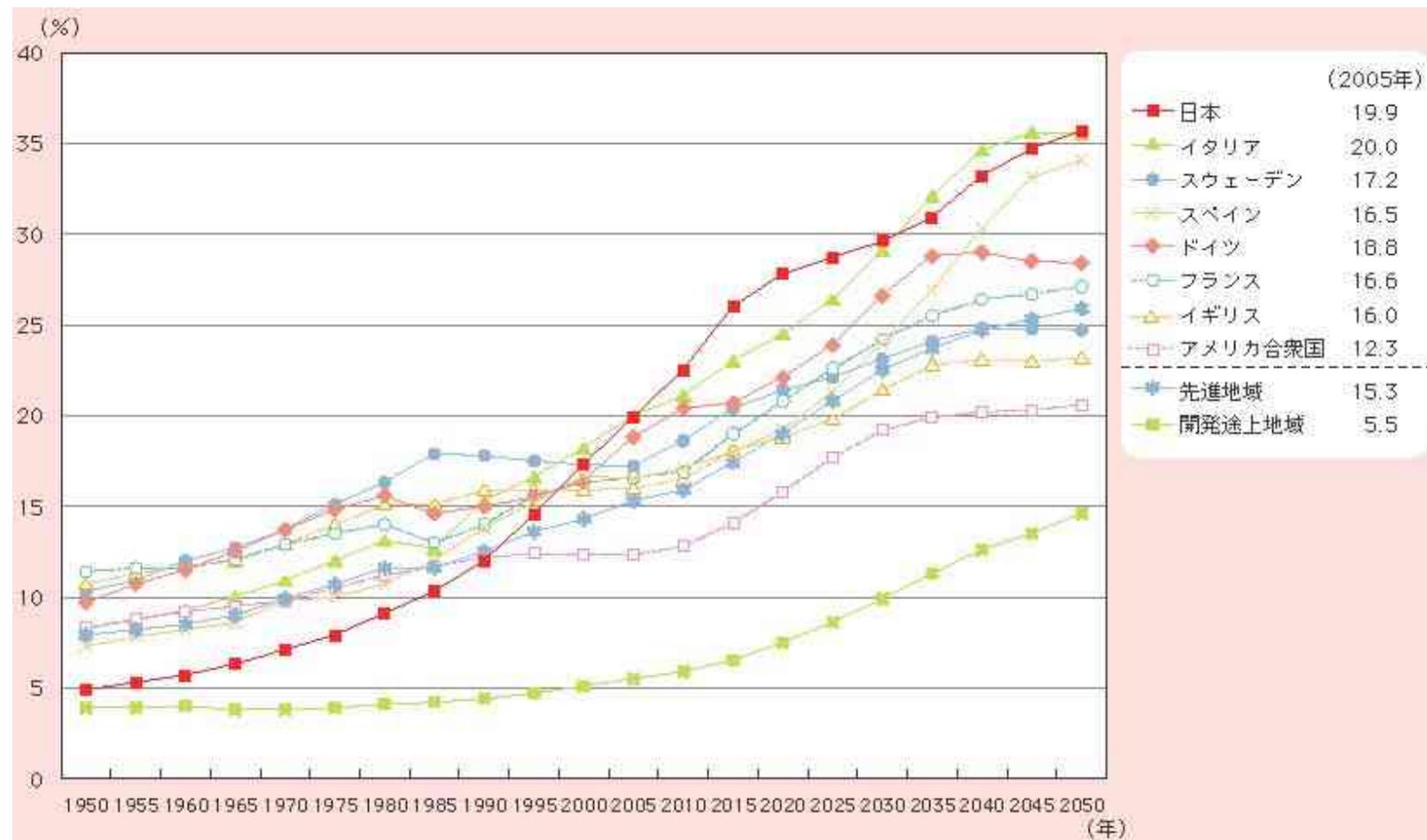
2 lognormal distribution

year	N_{small}	\bar{s}_{small}	σ_{small}	N_{large}	\bar{s}_{large}	σ_{large}
1945	46	1400	0.50			
1955	39	1400	0.37	8	3900	0.33
1965	35	1300	0.35	12	3900	0.49
1975	35	1360	0.33	12	5100	0.45
1985	35	1430	0.34	12	5800	0.45
2003	35	1450	0.34	12	6100	0.42



研究目的

2. 咀嚼実験



平成18年 高齢社会白書より

高齢社会に関する研究は社会の需要が高い (cf. 年金、介護)

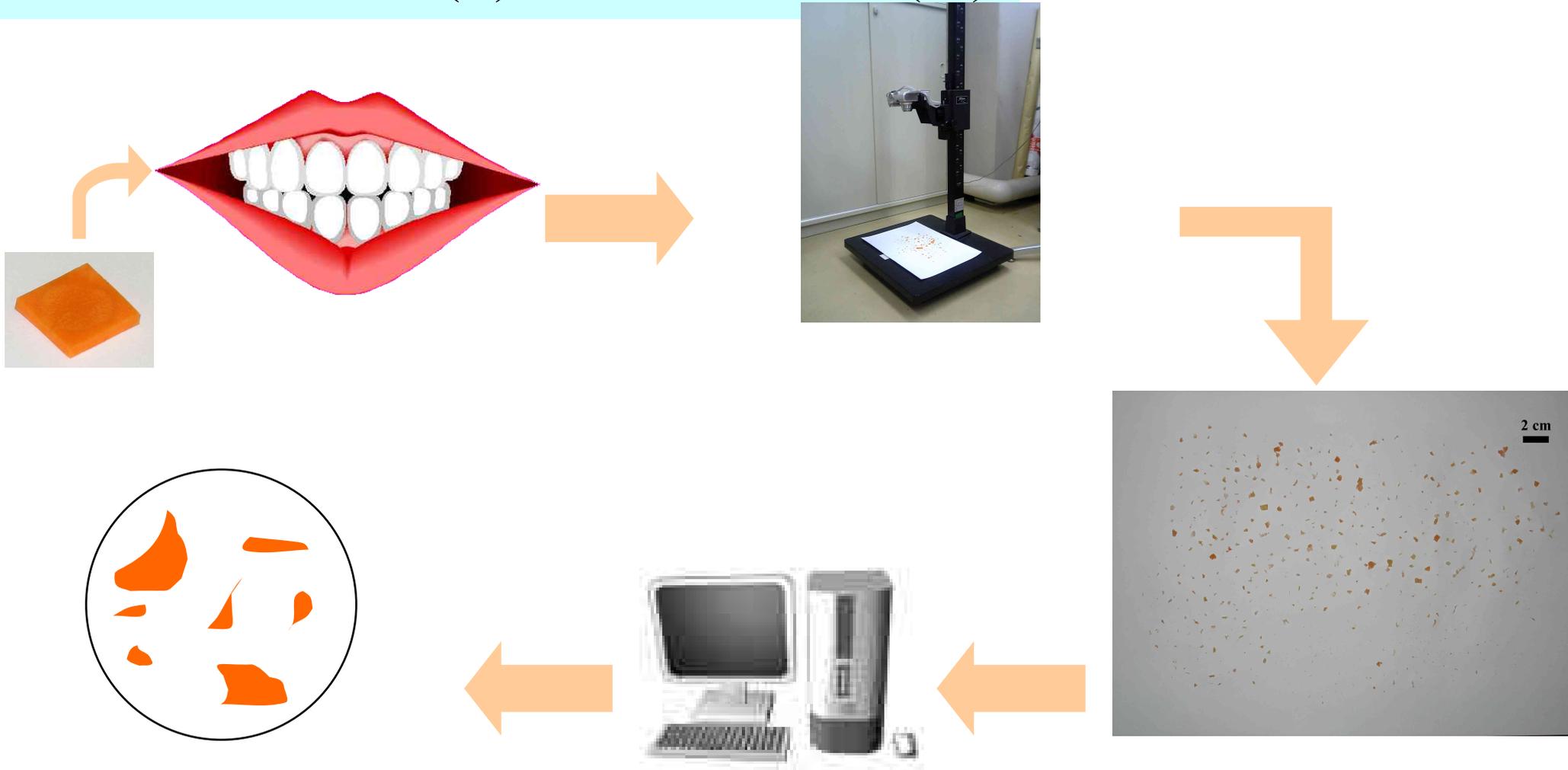
咀嚼実験

2. 咀嚼実験

サンプル: Fish sausage (7 g).

被験者: 7名.

咀嚼回数: 嚥下直前 (L), およびその半分 (M).



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



伸張型指数分布(ワイブル分布)

W. Weibull, J. Appl. Mech., 18, 293 (1951).

対数正規分布

A. N. Kolmogorov, Dokl. Akad. Nauk SSSR. 31, 99 (1941).

D. L. Turcotte, J. Geophys. Res., 91, 1921 (1986).

W. K. Brown and K. H. Wohletz, J. Appl. Phys., 78, 2758 (1995).

$$n(s) = C \int_s^{\infty} n(s') f(s) ds'.$$
$$f(s) = (s/\bar{s})^\gamma$$

一回破壊の統計則がベキ則

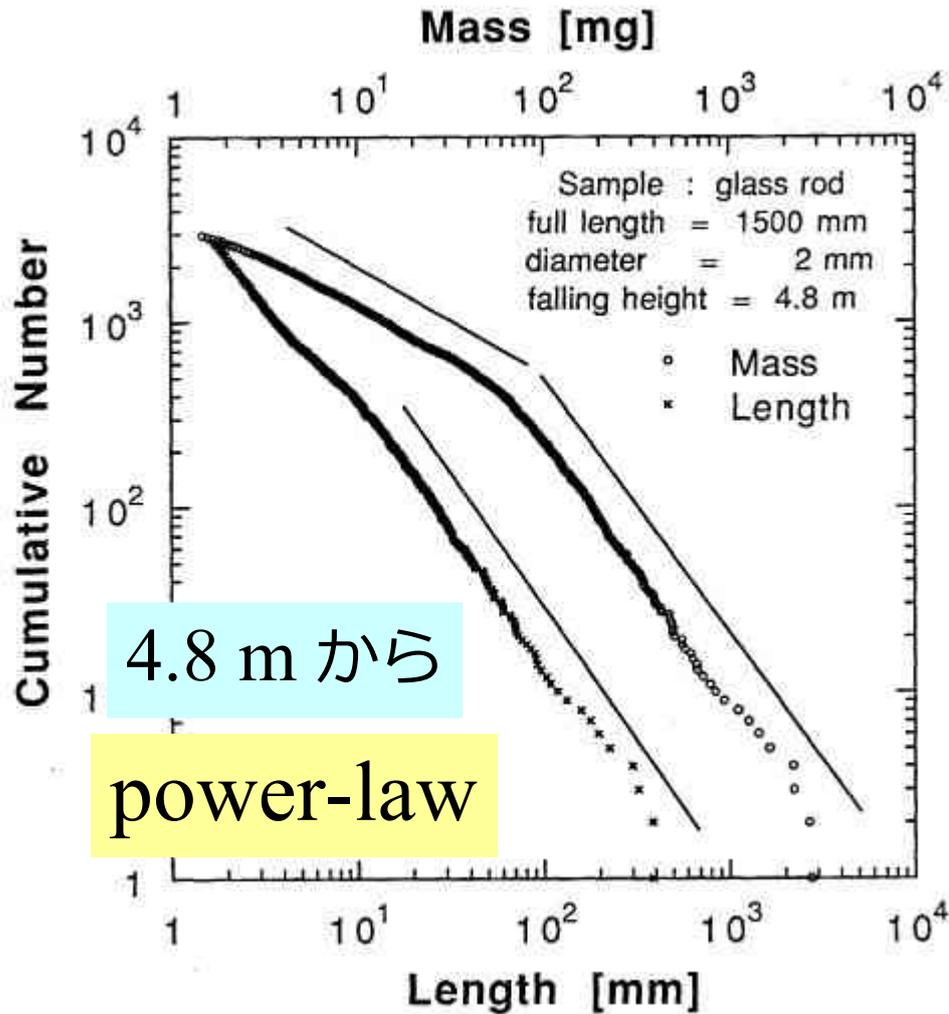


ワイブル分布

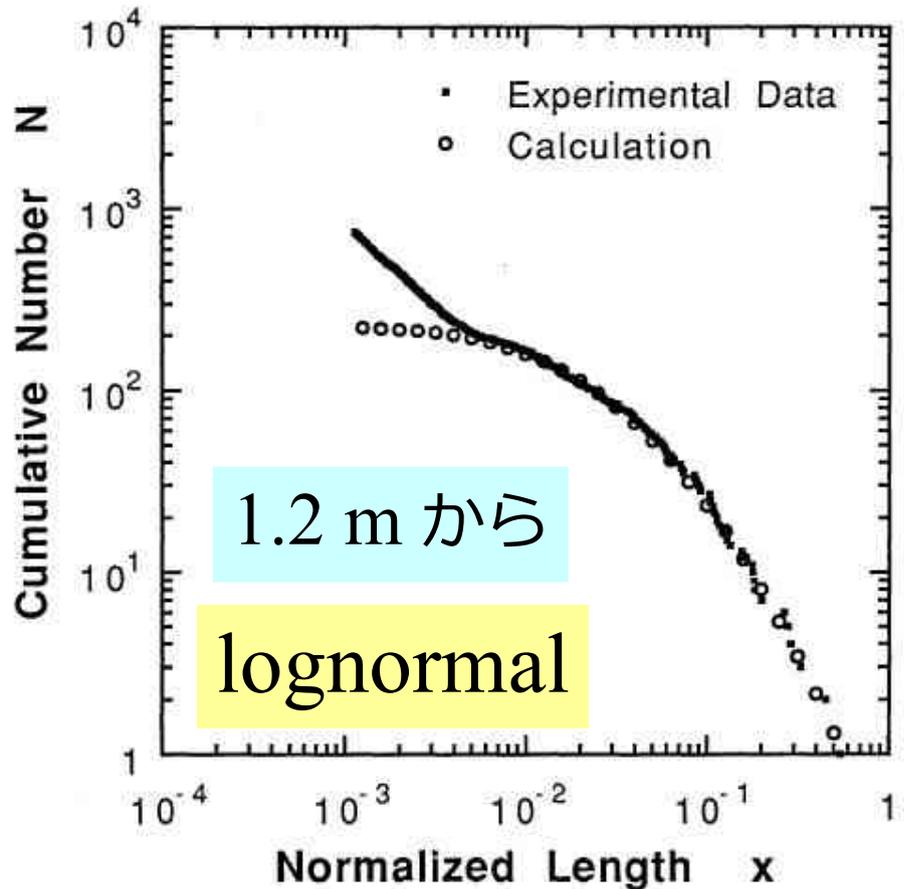
$$N(s) = N_T \exp[-(s/\bar{s})^b].$$

衝撃破壊実験

3. 食片解析



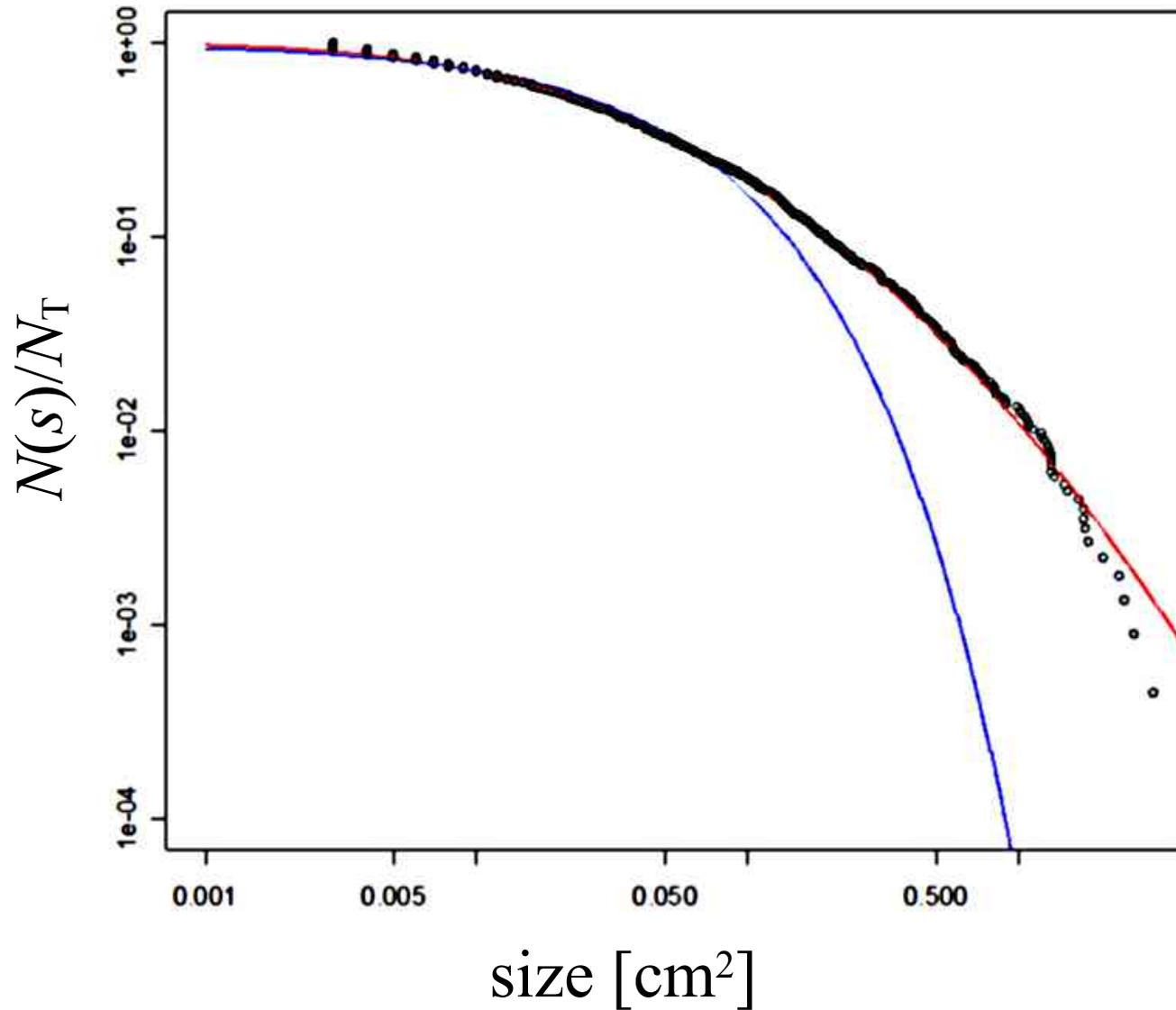
ガラス棒を一定の高さから落として破壊.



Ishii-Matsushita, 1992

生ニンジンの場合

3. 食片解析

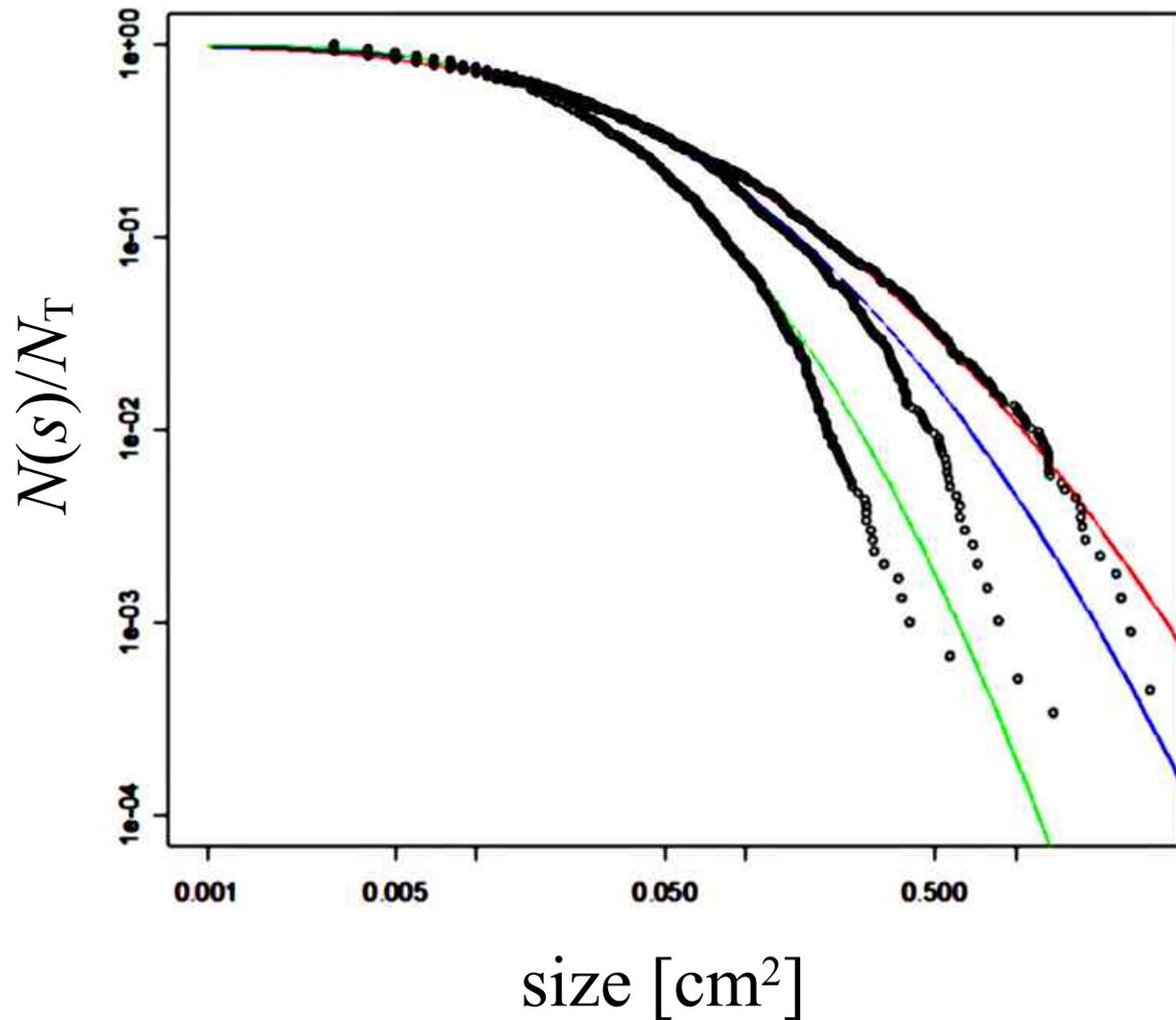


咀嚼回数 5 回

非線形最小二乗法で
フィッティング。
赤 : lognormal,
青 : Weibull.

生ニンジン：咀嚼回数

3. 食片解析

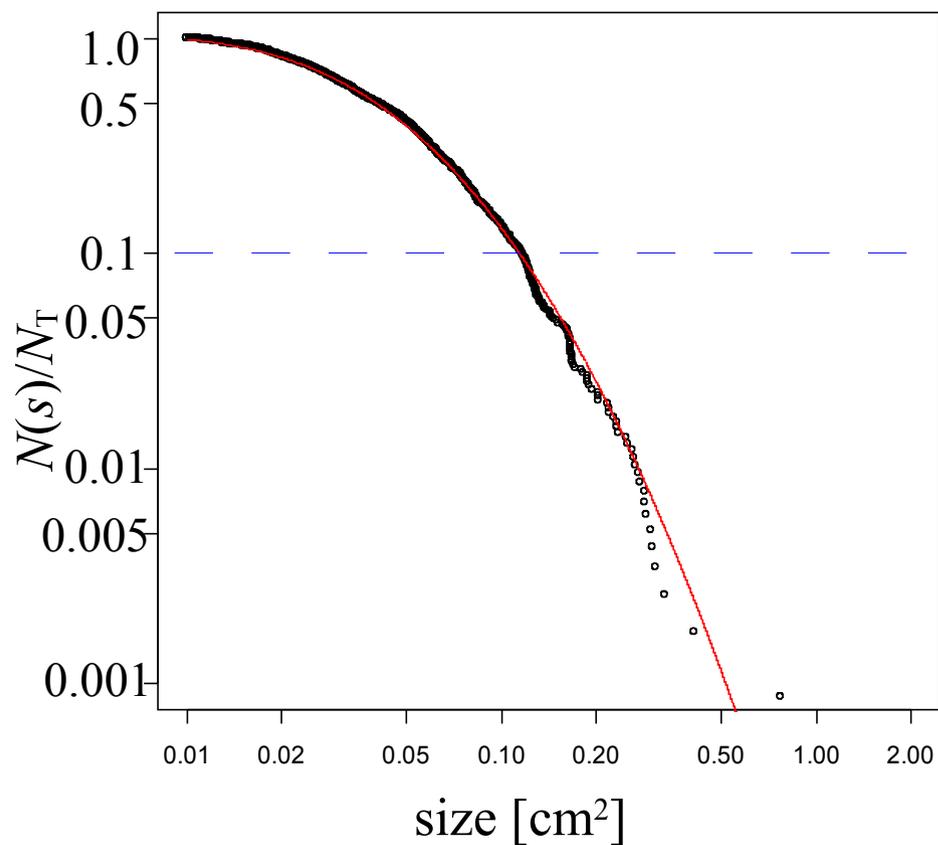


赤: 咀嚼回数 5 回,
青: 咀嚼回数 10 回,
緑: 嚥下直前まで咀嚼.

魚肉ソーセージ case I

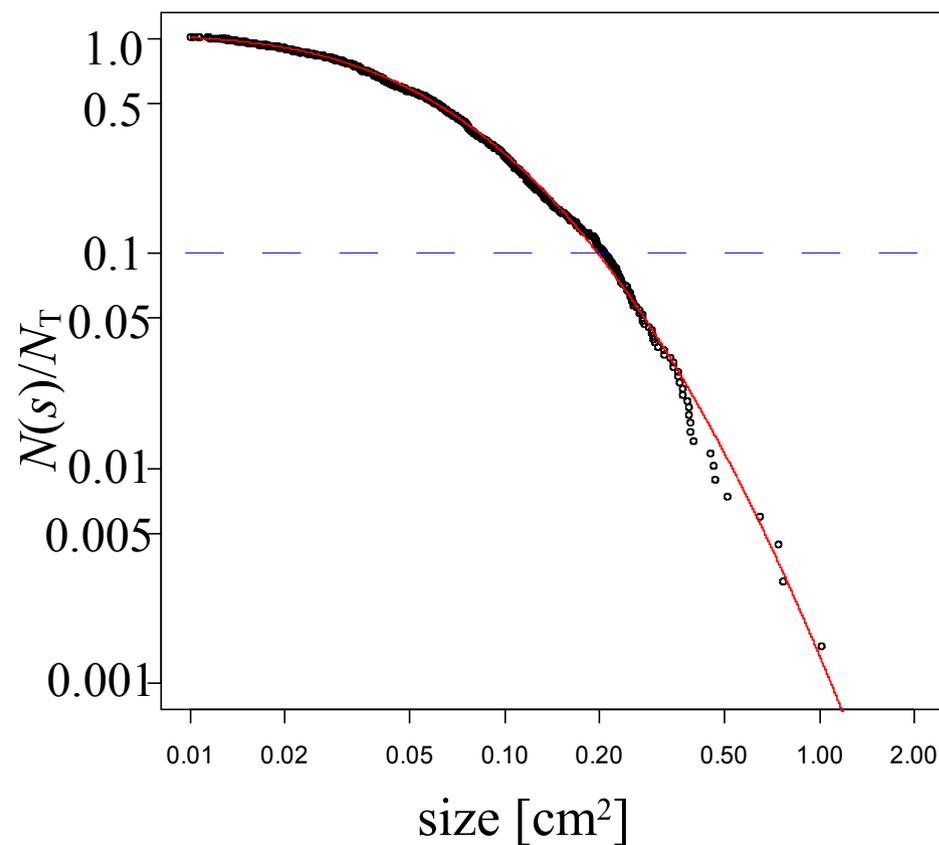
3. 食片解析

1) $m = 32$, Y.S.(26,m) 2.78 ml



$N / N_T = 1.05$, $T = 0.038$, $\sigma = 0.84$.
 $N_T = 1161$.

2) $m = 16$, Y.S.(26,m) 2.78 ml



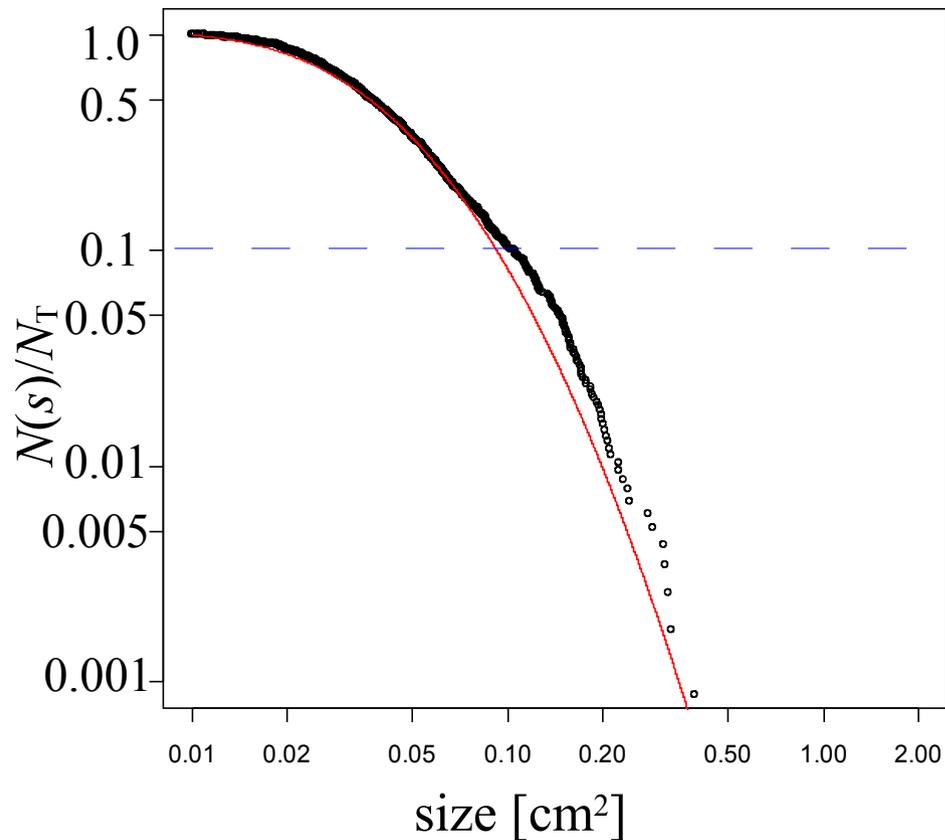
$N / N_T = 1.05$, $T = 0.057$, $\sigma = 0.95$.
 $N_T = 688$.

single lognormal distribution

魚肉ソーセージ case II

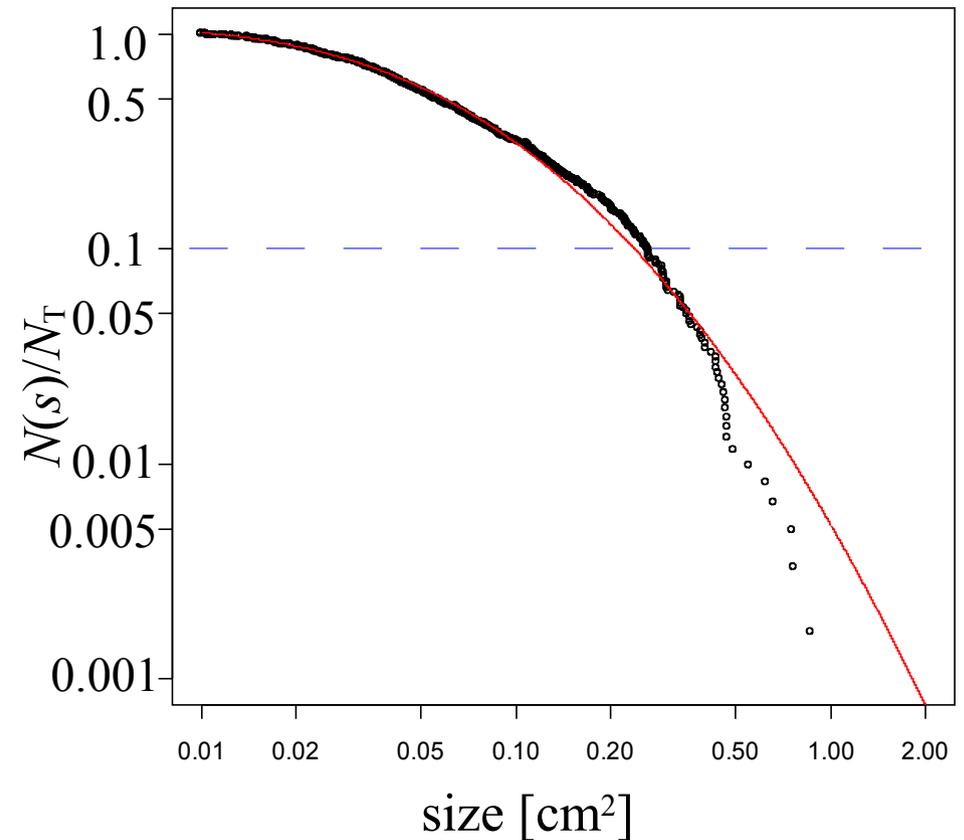
3. 食片解析

3) $m = 58$, T.I.(28,m) 2.12 ml



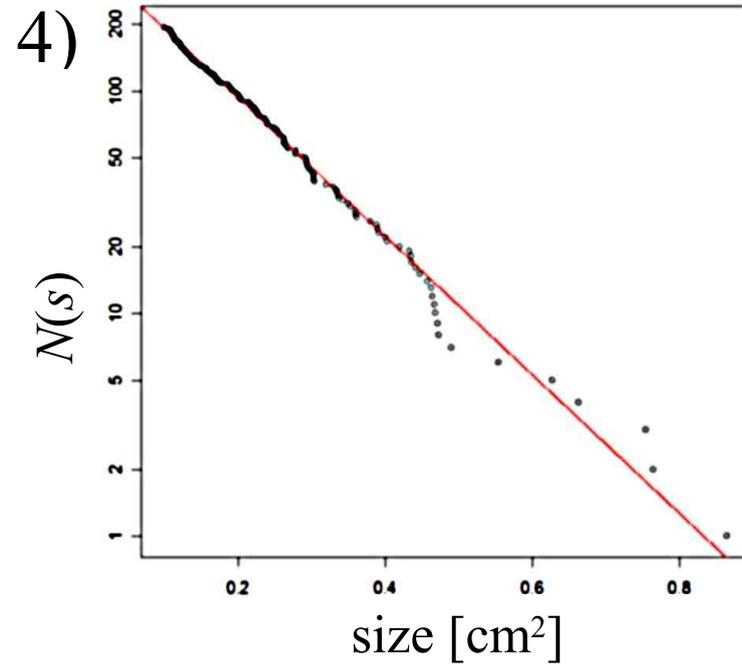
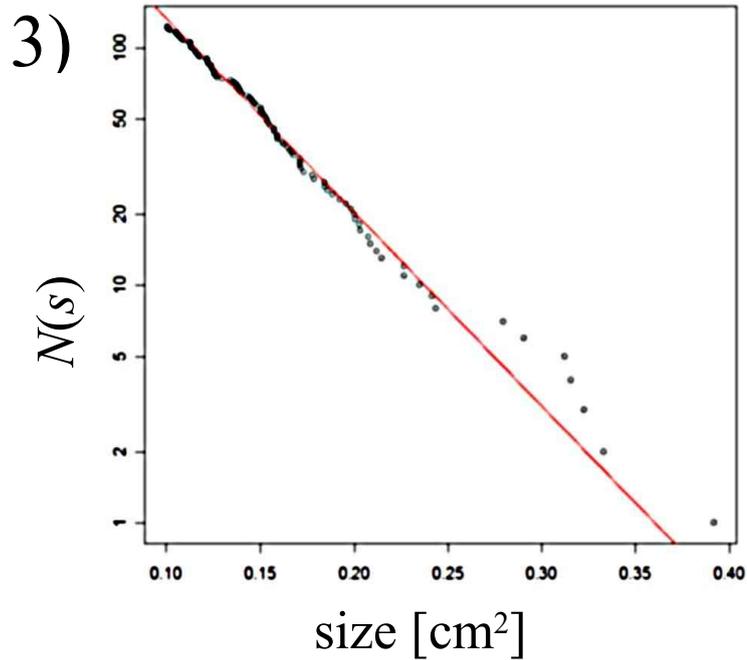
$N / N_T = 1.05$, $T = 0.035$, $\sigma = 0.74$.
 $N_T = 1167$.

4) $m = 29$, T.I.(28,m) 2.12 ml



$N / N_T = 1.10$, $T = 0.052$, $\sigma = 1.14$.
 $N_T = 611$.

lognormal distribution + ???



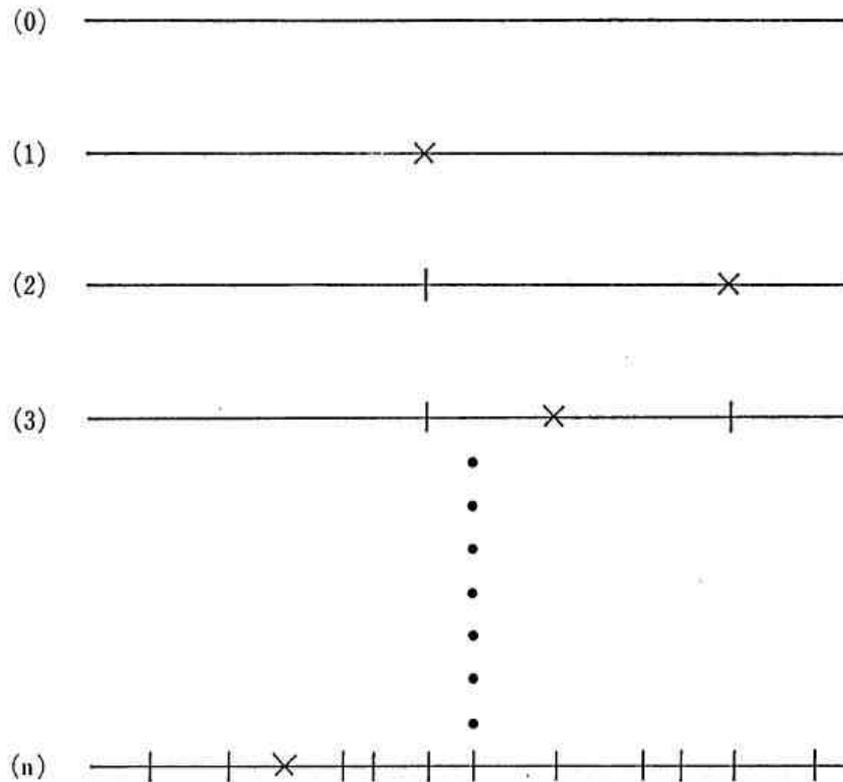
テイル部分の片対数プロットはほぼ直線的.



指数則が成り立っている.

破壊過程における指数則

3. 食片解析

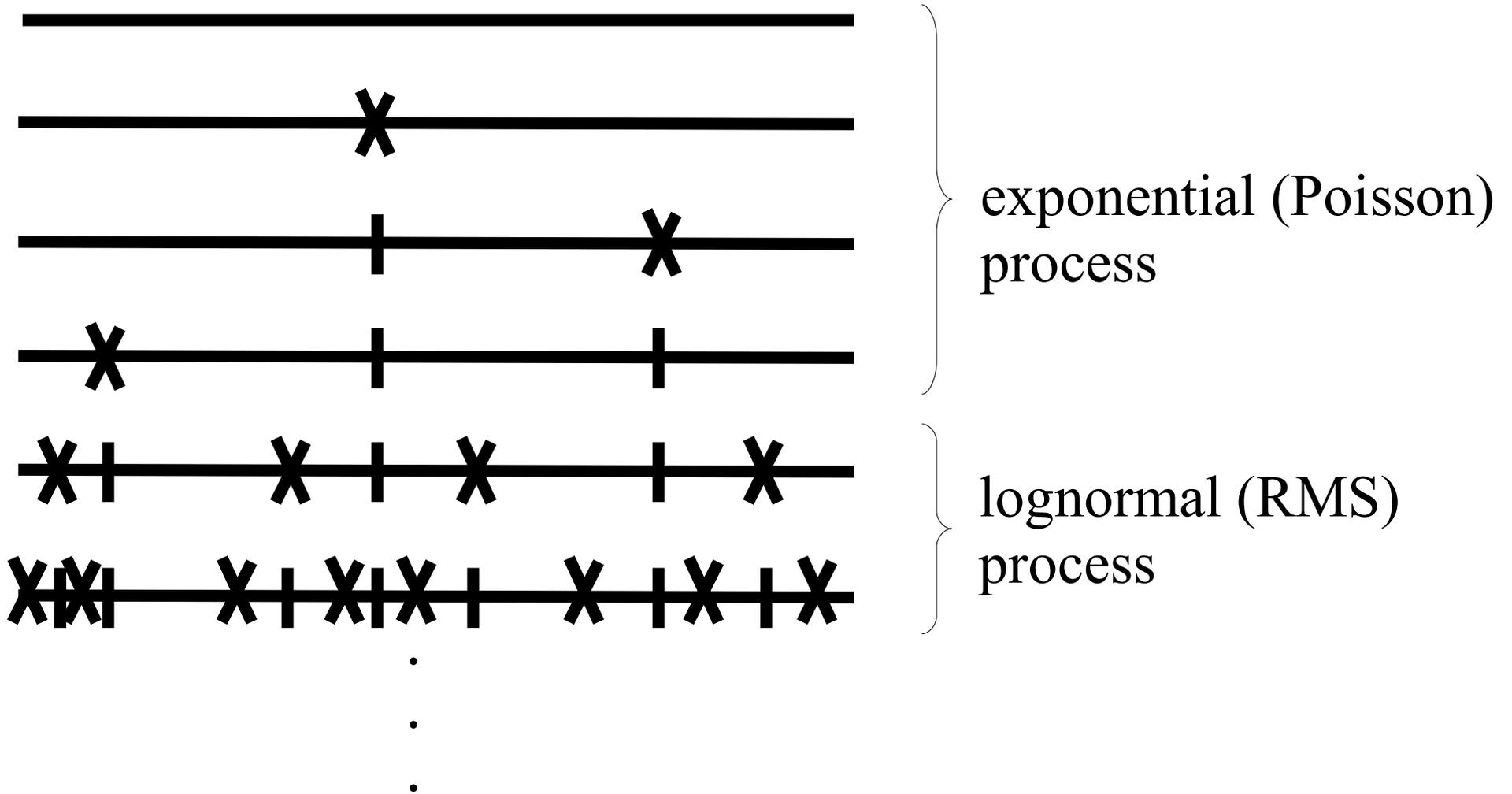


Matsushita-Sumida, 1988.

各ステップごとに完全にランダムに破壊点が決まっていく場合.

Fig. 1. Schematic representation of Model I. At each stage a rod breaks at one place, as indicated by \times . Already broken positions are indicated by small vertical lines.

魚肉ソーセージ破壊過程のイメージ



食品物性の違いによってこのようなサイズ分離が起こっている？
(魚肉ソーセージ: 延性的、*cf.* 生ニンジン: 脆性的)

1. E. W. Montroll and M. F. Shlesinger, J. Stat. Phys. **32**, 209 (1983).
2. N. Kobayashi *et al.*, Nonliner Phonomena in Complex Systems **9**, 276 (2006).
3. P. W. Lucas *et al.*, Food Qual. Pref. **13**, 203 (2002).
4. M. Matsushita and K. Sumida, Bull. Facul. Sci. & Eng. Chuo Univ. **31**, 69 (1988).
5. Y. Sasaki *et al.* , J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 074801 (2007).
6. N. Kobayashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 083001 (2006).
7. N. Kobayashi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 044002 (2007).