数種類の粒状食品の破壊硬度分布に関する実験*

山城光雄** 湯浅泰伸**

An Experiment of the Breaking Hardness Distribution for Several Kinds of Granular Foods

by
Mitsuo YAMASHIRO†, Yasunobu YUASA†

In this study, an experiment related to the breaking hardness of various granular foods is performed using two kinds of hardness testers. The values at the instant when each sample is broken completely are defined as the breaking hardness. The mean, standard deviation, maximum and minimum breaking hardness and its range are evaluated. Furthermore, the histograms of the breaking hardness for all samples are depicted. It is found that those histograms can be expressed approximately as a normal distribution. First, the result is investigated to see whether it could or could not be regarded as a normal distribution using normal probability paper and the χ^2 -test method.

Next, the Weibull probability paper and the χ^2 -test method are applied to see whether it could or could not be regarded as a Weibull distribution. It is clearly shown that the degree of fitness of a normal distribution of the breaking hardness is better than that the Weibull distribution.

1. 緒 言

物体の硬さに関して、金属材料に対しては J I S に試験方法と試験機が、ゴムや木材に対しては試験方法がそれぞれ規定されており、鉱物に対しては古くから引掻き硬さを目安とした 1 (滑石) から 10 (ダイヤモンド) の計 10 個の鉱石からなるモースの尺度が用いられている¹⁾。また、日常生活において身近に多く使用されている粒状食品、例えば菓子、角砂糖、錠剤、穀類などの硬さに対しては、試験方法と試験機が統一されておらず、各社が数種類の硬度計を製作し、硬さの大小に応じし選択するようになっている。粒状食品の硬さを測定することは、製造過程および製品の品質を管理する上で非常に大切なことである。さらに、測定データのバラツキや分布の形状なども考慮して、硬さ

について知ること重要と思われる。これに関して、粒状食品の硬さとは異なるが、加瀬ら²⁾はセラミックスの強度やゴムの引張強さに対して得られた信頼性データのヒストグラムから、二重指数分布の応用を提唱している。

本研究では、粒状食品の破壊硬度に関する基礎実験として、最大加圧 4 kg と 20 kg まで測定できる 2 種類の硬度計を使用して、試料が完全に破壊したときの値を硬さの定義としてとらえて、“破壊硬度”と呼び、常温(平均 22℃)のもとで測定し、それらの平均、標準偏差、正規確率紙およびワイブル確率紙と χ^2 適合度検定を用いて、破壊硬度の分布の形状について検討する。

2. 実験装置および試料

Fig. 1(a)は最大加圧 4 kg 以下の硬度測定に用いられる簡易粒体硬度計(筒井理化学器械(株))で、その仕様は大きさ 20×40×28(cm)、重量 6.3 kg、1 目盛 20 g、加圧面の直径 3.6 cm、試料台の直径 2.3 cm、試料の最大高さ 3.7 cm である。Fig. 1(b)には最大加圧 20 kg 以下の場合の木屋式硬度計を示し、その仕様は器械の大き

昭和 59 年 9 月 7 日受付

* 粉体工学会春期研究発表会にて(1984. 5 大阪市立大)

** 足別工業大学経営工学科(〒326 栃木県足利市大前町 268-1)
TEL 0284-62-0605(内 318)

† Department of Planning Technology, Ashikaga Institute of Technology

(a) Simple hardness tester for granular materials

(b) Kiya's hardness tester

Fig. 1 Hardness tester

Table 1 Sample

Maximum pressure (kg)	Sample No.	Goods	Materials	Maker
4	1	Haigaboro	potato starch, embryo of flour, powdered hatomugi , animal calcium honey, refined sugar, egg	A
	2	Eiseiboro	refined starch, refined sugar, egg, honey, skim milk, vitamin B ₁ , B ₂ , Ca	B
	3	Tohato sugar biscuit	flour, shortening, sugar, skim milk, salt, inflating agent, perfume	C
	4	Ball corn snack	salt, green dried laver, natural calcium, embryo of flour, corncritz, plant oil, takoyaki taste condiment	D
	5	Tohato sugar biscuit	flour, shotening, sugar, skim milk, salt, inflating agent, perfume	E
	6	Kasumi rappi Ca	poncalcium, shell of oyster, marine calcium, embryo of wheat, seaweeds, powdered liver, honey, been yeast	F
20	7	Boro	—————	G
	8	Meiji marble chocolate	sugar, kakaomas, plant fat and oil, sum fat milk, starch, milk sugar, cocoabutter, calcium carbonate, skim milk, emulsifier, natural coloring matter, shulack, perfume	H
	9	Ptisweet sugar	granulated suger	I
	10	Cut price	grape sugar, corn starch, organic acid, perfume, synthetic coloring matter, bleaching agent	J
	11	New Viofermin	fercalis germ, ajidofiels germ, saccharified germ	K

Table 2 Size and weight of sample

Sample No.	Size (mm)	Height (mm)	Weight (g)
1	φ 14.1	9.9	0.51
2	φ 12.7	9.5	0.47
3	19.4 × 19.3	9.1	0.74
4	φ 20.1	21.0	0.54
5	39.4 × 9.3	6.5	0.81
6	φ 10.0	7.0	0.59
7	19.4 × 15.4	14.3	1.19
8	φ 14.4	6.5	0.98
9	10.1 × 10.1	10.1	1.40
10	φ 10.0	5.5	0.39
11	φ 8.1	4.2	0.25

さ 26 × 15 × 29 (cm), 重量 3.25 kg, 1 目盛 200 kg, 加圧面の直径 0.5 cm, 試料台の直径 2.5 cm, 試料の最大高さ 1.5 cm である。

Table 1 は実験に用いた試料の商品名, 使用原料を示し, **Table 2** は各試料を10個ずつランダムに抽出したものの平均の大きさと重量を示す。

3. 実験方法

Fig.1(a), (b)の両装置共に, 最初指針の目盛を 0 kg の位置に調整した後, 加圧用のハンドルを廻し, 加圧棒を上昇させて試料の高さより大きい間隔にする。ピンセットを用いて試料を台にのせ, ハンドルを廻しながら加圧棒を徐々に下降させ, 試料上面の中心部に加

圧棒が接触するようにする。次に, 指針を見ながらハンドルを廻していくと, 補助指針は指針に押さえていくが, 試料が完全に破壊した時点で指針が戻り, その瞬間, 補助指針はその位置に止まり, この時の目盛の読みが試料の破壊硬度を表わす。

4. 実験結果および考察

Table 3 は実験データを整理したもので, データ数, 平均破壊硬度, 標準偏差 (分散の平方根), 最大および最小破壊硬度, 範囲 (最大破壊硬度から最小破壊硬度を引いた値) を示す。平均破壊硬度 $\bar{x}$ と標準偏差 s はそれぞれ次式を用いて計算した。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

ここで, x_i は i 番目の測定値, n はデータ数を表わす。この表から, 試料の種類により破壊硬度の平均, バラツキの度合がかなり異なっていることがわかる。

Fig. 2(a)~(k)は試料 No. 1 ~ 11に対して, 度数 f_i と破壊硬度 x (kg) との関係をヒストグラムで表わしたものである。これらの図から, 各試料とも破壊硬度にかなりのバラツキを生じていることから, 金属材料や非金属材料に対して硬さを求める場合のように数個の平均だけで処理するのは適切でないように思われるので, **Table 3** にみられるように標準偏差と範囲についても計算した。

Table 3 Total experimental results

Sample No.	Number of data n	Mean breaking strength $\bar{x}$ (kg)	Standard deviation s (kg)	Maximum break- ing strength $x_{\max}$ (kg)	Minimum break- ing strength $x_{\min}$ (kg)	Range $R (x_{\max} - x_{\min})$ (kg)
1	200	1.75	0.23	2.52	1.02	1.50
2	164	1.56	0.30	2.33	1.00	1.33
3	200	2.55	0.42	3.67	1.73	1.94
4	154	3.14	0.35	3.91	2.29	1.62
5	200	2.41	0.45	3.47	1.43	2.04
6	200	2.52	0.43	3.84	1.45	2.39
7	200	3.2	0.8	5.4	1.6	3.8
8	200	3.5	0.6	5.3	2.3	3.0
9	200	14.5	2.8	20.0	8.9	11.1
10	200	10.0	2.1	16.3	5.2	11.1
11	120	2.4	0.8	5.5	0.7	4.8

次に、Fig.2(a)~(k) のヒストグラムが正規分布、すなわち確率密度関数が

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

で表せるかどうかを調べるために、代表例として試料 No. 1, 2, 7, 8 を選び、横軸に破壊強度の各階級値の上側境界値 x (kg), 縦軸にその境界値までの累積相対度数 $F(x)$ をとり、正規確率紙³⁾ にプロットしたも

Fig.2 Histogram of sample (f_i vs. x)

のをFig. 3(a)~(d)に示す。Fとxとの関係において、(a)は最初の点と後の2点を除くとはほぼ直線上に並び、(b), (c), (d) (最初の1点を除く) は直線関係がみられる。

また、Fig. 3(a)~(d)に対応するヒストグラムと残りのものに対して、ヒストグラムが正規分布とみなせるかどうかを χ^2 適合度検定³⁾から調べた総括表をTable 4に示す。この表から、試料No. 1は有意水準1%, No. 2, 3, 4, 5, 6, 10は有意水準5%で正規分布としてみなして差支えないことがわかるが、他の試料は有意水準1%でみなせなかった。そこで、正規分布

Fig. 3 F vs. x

とみなした場合の期待度数（図中●印で表わす）を、Fig. 2(a)～(k)にプロットした。

さらに、Fig. 2(a)～(k) のヒストグラムがワイブル分布、すなわち確率密度関数 $f(x)$ が、

$$f(x) = \frac{mx^{m-1}}{x_0} e^{-\frac{x^m}{x_0}} \quad (4)$$

(a) No. 1

Table 4 Totalized table of χ^2 -test of goodness (Normal distribution)

Sample No.	Comparison value of χ^2_0 with that of χ^2
1	$\chi^2_0 = 17.28 < \chi^2 (8, 0.01) = 20.1$
2	$\chi^2_0 = 14.13 < \chi^2 (9, 0.05) = 16.9$
3	$\chi^2_0 = 18.25 < \chi^2 (13, 0.05) = 22.4$
4	$\chi^2_0 = 14.32 < \chi^2 (10, 0.05) = 18.3$
5	$\chi^2_0 = 16.70 < \chi^2 (13, 0.05) = 22.4$
6	$\chi^2_0 = 17.18 < \chi^2 (13, 0.05) = 22.4$
7	$\chi^2_0 = 44.37 > \chi^2 (4, 0.01) = 13.3$
8	$\chi^2_0 = 15.19 > \chi^2 (3, 0.01) = 11.3$
9	$\chi^2_0 = 65.73 > \chi^2 (15, 0.01) = 30.6$
10	$\chi^2_0 = 18.47 < \chi^2 (13, 0.05) = 22.4$
11	$\chi^2_0 = 18.06 > \chi^2 (4, 0.01) = 13.3$

で表せるかどうかを、代表例として試料 No. 1, 2, 7, 8 を選び、正規確率紙と同様にワイブル確率紙にプロットした結果を Fig. 4(a)～(d) に示す。F と x との関係を全試料とともに直線関係とみなして、形のパラメータ m と尺度のパラメータ x_0 を求め、これらを使って平均値 $\hat{\mu}$ と標準偏差 $\hat{\sigma}$ を次式⁴⁾

$$\hat{\mu} = x_0^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (5)$$

$$\hat{\sigma} = x_0^{\frac{1}{m}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

(b) No. 2

(c) No. 7

(d) No. 8

Fig. 4 $F(x)$ vs. x

から求めた値をまとめてTable 5に示す。Table 3と5から平均値と標準偏差を比較すると、近い値になっていることがわかる。

次に、正規分布と同様に、Table 5から2つのパラメータの値を使って、ワイブル分布に対する χ^2 適合度検定を行なった最終の総括表をTable 6に示す。

Table 6から試料No. 2と5については有意水準5%でワイブル分布とみなして差支えないが、他の全試料

Table 5 Values of two parameters, mean and standard deviation

Sample No.	m	x_0	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
1	9.05	2.45×10^2	1.74	0.229
2	5.80	2.01×10	1.55	0.307
3	6.64	8.98×10^2	2.60	0.457
4	10.42	3.62×10^5	3.25	0.430
5	6.04	3.11×10^2	2.40	0.481
6	6.25	5.90×10^2	2.58	0.482
7	5.02	6.02×10^2	3.29	0.753
8	5.18	1.10×10^3	3.56	0.771
9	5.68	5.84×10^6	14.35	3.023
10	6.63	8.04×10^6	10.27	1.805
11	2.90	2.01×10	2.51	0.936

Table 6 Totalized table of χ^2 -test of goodness (Weibull distribution)

Sample No.	Comparison value of χ_0^2 with that of χ^2
1	$\chi_0^2 = 43.41 > \chi^2 (7, 0.01) = 18.5$
2	$\chi_0^2 = 14.17 < \chi^2 (8, 0.05) = 15.5$
3	$\chi_0^2 = 28.78 > \chi^2 (13, 0.01) = 27.7$
4	$\chi_0^2 = 33.50 > \chi^2 (10, 0.01) = 23.2$
5	$\chi_0^2 = 20.82 < \chi^2 (13, 0.05) = 22.4$
6	$\chi_0^2 = 34.00 > \chi^2 (14, 0.01) = 29.1$
7	$\chi_0^2 = 67.05 > \chi^2 (4, 0.01) = 13.3$
8	$\chi_0^2 = 30.01 > \chi^2 (3, 0.01) = 11.3$
9	$\chi_0^2 = 80.91 > \chi^2 (16, 0.01) = 32.0$
10	$\chi_0^2 = 33.40 > \chi^2 (11, 0.01) = 24.7$
11	$\chi_0^2 = 22.99 > \chi^2 (5, 0.01) = 15.1$

は有意水準1%でワイブル分布とみなせなかった。

5. 結 言

数種類の粒状食品に対して常温のもとで破壊硬度を測定した結果、種類により平均、バラツキの度合いがかなり異なることがわかった。分布の形状については、まず破壊硬度の分布を正規分布と仮定したとき、 χ^2 適合度検定から、最大加圧4kg以下の硬度計を使用した試料の場合、すべて正規分布とみなせたが、最大加圧20kg以下の硬度計の場合、1種類を除いてすべてみなせなかった。次に、ワイブル確率紙を使って2つパラメータを推定し、これらを使って χ^2 適合度検定を行

なった結果、最大加圧 4kg 以下の硬度計を使用した 2 種類を除くすべての試料に対して、ワイブル分布とみなせなかった。

今後の課題として、温度の高低による破壊硬度へおよぼす変化や、加圧棒を押し下げる場合、測定者によって影響の異なる手動でなく、これを改良して自動的

に行なえる装置を開発すれば、測定者が変わっても一定形状の破壊硬度分布が得られるものと考ええる。

謝 辞

本研究に対して、有益な御助言を戴いた川北技研会 長川北公夫博士に謝意を表する。

Nomenclature

f_i	: frequency	[—]	$\bar{x}$	: mean breaking hardness	[kg]
F	: cumulative relative frequency	[%]	x_0	: scale parameter	[—]
m	: shape parameter	[—]	x_i	: i-th data	[kg]
n	: number of data	[—]	x_{max}	: maximum breaking hardness	[kg]
R	: range	[kg]	x_{min}	: minimum breaking hardness	[kg]
s	: standard deviation	[kg]	$\hat{\mu}$	: mean estimate	[kg]
x	: breaking hardness	[kg]	$\hat{\sigma}$	: estimate of standard deviation	[kg]

References

1) Yoshizawa, T.: “Katasashikenho no oyo”, Shokabo (1977).
2) Kase, S.: “Shinraiseidata no matomekata”, Ohmsha (1983)

3) Nakazato, H., Takeda, H.: “Nikokakuritsushi no tsukaikata”, Nikka-gilen (1976).
4) Nikka-gilen-hen: “Shinraiseidata no kaiseki”, Nikka-gilen (1977).