

バタースポンジケーキの最大圧縮応力曲線の解析

川 染 節 江, 石 間 紀 男*, 山 野 善 正**

(香川県明善短期大学, * 農林水産省食品総合研究所, ** 香川大学農学部)

平成元年6月23日受理

Statistical Analysis of the Maximum Compression Stress Curve of Butter Sponge Cake

Setsue KAWASOME, Toshio ISHIMA* and Yoshimasa YAMANO**

Kagawa-ken Meizen Junior College, Takamatsu 760

** National Food Research Institute, Tsukuba 305*

*** Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki-cho, Kagawa 761-07*

Rheological property was examined for butter sponge cake with different contents of butter by using repeated compressing tests with a rheometer. Maximum compression stress decreased exponentially with an increase of biting trial. Experimental equation $y = An^C e^{Bn}$ for the relation between the maximum value of stress (y) and biting trial (n) was derived by multiple regression analysis. Parameters A , B and C were elucidated to be overall hardness, to be rate of breakdown (shortness) and to be resistance to breakdown (springiness), respectively.

The value of A was the minimum for the cake with butter of 80%. The value of B increased with an increasing butter content and that of C decreased with the content. The cake containing 80% of butter was judged to be the best organoleptically, and the cake seemed to have moderate rate of breakdown and moderate resistance to breakdown.

It is concluded that rheological property of butter sponge cake can be explained successfully by maximum compression stress value of biting trials.

(Received June 23, 1989)

Keywords: butter sponge cake バタースポンジケーキ, rheological property レオロジカル特性, repeated compressing test 連続圧縮試験, compression stress curve 圧縮応力曲線, experimental equation 実験式, sensory evaluation 官能評価.

1. 緒 言

Friedman ら¹⁾によりテクスチュロメーターが開発されて以来、プランジャーの上下運動による圧縮変形応力を経時的に記録するタイプの測定機器が、食品物性の研究のために多用されるようになってきている。この種の機器により得られたデータは、Szczesniak²⁾による「食品テクスチャーの分類およびその定義」に基づいて解析されることが多い。このような解析方法では、測定結果として得られる波形の圧縮曲線の全情報を用いているわけではなく、単に波形曲線の面積やピークの高さなどをパラメータとして解析しているにすぎない。また、Szczesniak ら³⁾はこのようなパラメータおよびその組合

せと心理的な口内レオロジー感覚との間に高い相関関係のあることを報告しているが、両者の間に単調増加の関係があることを示しているにすぎず、物理的な根拠は明白にされていない。

この種の機器のもう一つの利用法は、圧縮操作を多数回くり返し、「毎回の最大応力の作る曲線図形」(以下、最大圧縮応力曲線とよぶ)から試料のレオロジカルな特性を理解することである。西澤および辻⁴⁾はこのような試験を「多重バイト試験」とよんでいるが、この方法により得られた試料間の差がどのような物理的意味をもつかを明らかにする方法は開発されていない。

著者らは、すでにバタースポンジケーキのテクスチャ

ーが、材料の配合比および生地調製法によりどのような影響をうけるかを、レオメーターによる圧縮試験と官能評価の結果を用いて明らかにしてきた⁵⁾⁻¹⁰⁾。本研究ではバター添加量の異なる4試料を用い、レオメーターによる、連続10回の圧縮試験から得られる「最大圧縮応力曲線」をほぼ完全に説明できる数式モデルを導き、物理的意味(ただし、物理的ディメンションをもつことを主張しない)をもつ、より少数のパラメータから試料のレオロジー特性を理解する方法を検討した。

2. 実験方法

(1) 試料の調製

材料および材料配合比は既報⁵⁾⁻⁹⁾に準じ、卵白130g、卵黄70g、上白糖100g、薄力粉100g、ベーキングパウダー0.5gを基本とし、バターは小麦粉に対し0、40、80および120%の4段階で添加した。生地調製は既報⁵⁾⁻⁹⁾に準じた。すなわち、卵液と砂糖をハンドミキサーで8分間攪拌し(800rpm)、次に、小麦粉を加え30秒間、バター(液状、40℃)を加えさらに30秒間攪拌(330rpm)した。この生地180gを長方形(17×8×6cm)のアルミケースに注入して170℃の電気オーブンで30~32分間焙焼し、ケーキは一夜密閉保存し圧縮試験と官能検査に供した。

(2) 圧縮試験

圧縮試験は既報⁵⁾⁻⁷⁾⁹⁾の方法に準じ、レオメーター(RE-3305, 山電機)により次の条件で行った。試料の厚さ:1.5cm, プランジャー:直径1.6cmのアクリル製円柱型, クリアランス:5mm, 圧縮速度:1mm/秒, 圧縮回数:連続10回, 圧縮箇所:試料片の上方(top), 中央(center), 下方(bottom)の3カ所。測定には、1個のケーキから中央部で厚さ1.5cmに切断した試料片(約5.0×6.0cm)5枚ずつ、4~5個分を供し、測定結果はその平均値で示した。

(3) 官能評価

官能検査は既報⁷⁾⁸⁾の方法に準じ、きめのよさ(graininess), 甘味(sweetness), 口あたり(mouthfeel), しっとりさ(Shittorisa)および総合評価(overall acceptability)の5特性に対し、たいへん良いを+3, たいへん悪いを-3とする両極7段階評価尺度(seven point quality judgement scale)により、女子大生30名をパネルとして、圧縮試験と同様に厚さ1.5cmの試料片を用い実施した。

3. 結果および考察

(1) 最大圧縮応力曲線の統計的解析

Fig.1に、4試料の圧縮試験結果を示した。これは、すでに緒言で述べたように、連続した圧縮10回の毎回の応力曲線の最大値を結ぶ曲線であり、「最大圧縮応力曲線」とよぶことにする。

最大圧縮応力曲線は、圧縮部位により形状が大きく異なり、たとえば、バター無添加の試料では圧縮応力は、圧縮部位上方、下方、中央の順に低下した。バター無添加試料の圧縮部位による応力の相違は、バター添加3試料よりも大きく、これは気泡の大きさや、小麦粉の分散などによる組織的な均一性に欠けることを示している。これらの曲線は、すべて圧縮回数(biting trial)の増大に伴って、応力が低下する傾向を示しており、曲線の形状は、試料のなんらかの物理的特性に由来しているものと考えられる。

そこで、これらの曲線を説明する数式モデルを統計的に求めた。最初に最も単純なモデルをあてはめ、順次モデルの修正・改良を行った。最初に想定したモデルは、圧縮による試料の変形を一つの破壊現象とみなし、最大圧縮応力を y 、圧縮回数を n として

$$y = Ae^{Bn}$$

$$(A > 0, B > 0, n = 1, 2, \dots, 10) \quad (1)$$

なる式であるが、最小二乗法によるあてはめの結果、実験値との適合性が悪かった。それは、この圧縮試験を現象的にみると、プランジャーにより試料の上層部が破壊されていくにつれて、最大圧縮応力が低下するが、一方、プランジャーの下部においては、圧縮された部分が、最大圧縮応力を高める役割を果たしているためと考えられる。したがって、(1)式のような単純なモデルでは曲線を説明することはできないと推察されたので、以下のようにモデルの修正を続けた。

まず、定数 A を An と修正し、

$$y = Ane^{Bn}$$

$$(A > 0, B > 0, n = 1, 2, \dots, 10) \quad (2)$$

により、最大圧縮応力の推定値を求めたが、それでもなお圧縮4回以上で適合性が悪かったので、さらに、 An を An^c と補正した次式について検討した。

$$y = An^c e^{Bn}$$

$$(A > 0, B > 0, n = 1, 2, \dots, 10) \quad (3)$$

この(3)式の対数をとる

$$\log_e y = \log_e A + C \log_e n + Bn \quad (3')$$

とした(3')式により、12種の曲線について $\log_e A, B, C$ を重回帰係数として算出した。Table 1に、求めたパラ

パター sponge ケーキの最大圧縮応力曲線の解析

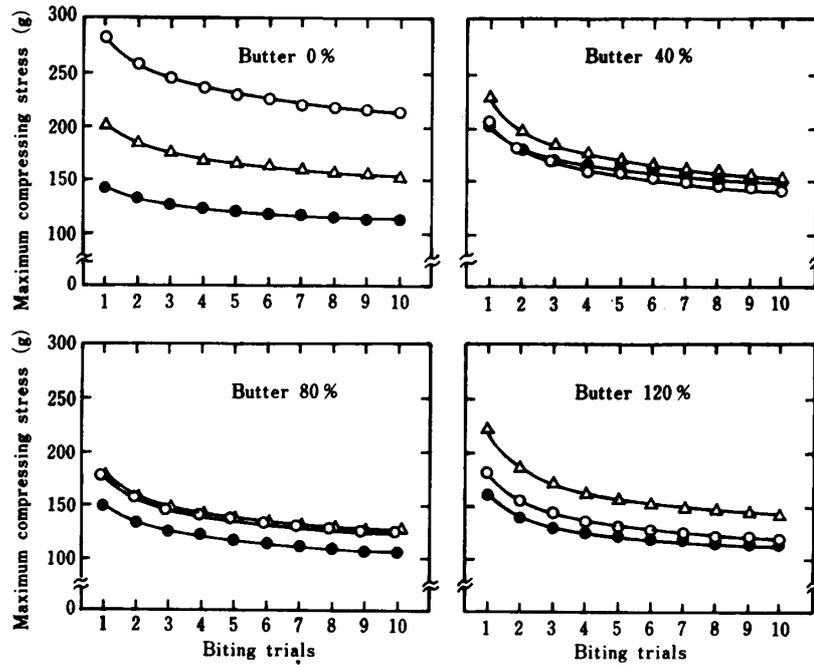


Fig. 1. Changes in maximum compressing stress of top (○), center (●) and bottom (△) of butter sponge cake with biting trials

Table 1. Parameters in $y = An^C e^{Bn}$ obtained by statistical multiple regression analysis

Butter (%)	Compressing point	$\log_e A$	$B \times 10^{-2}$	C	R^{2*}	F^{**}
0	Top	5.64	0.557	-0.1425	0.999	4,072
	Center	4.96	0.222	-0.1108	1.000	8,075
	Bottom	5.31	0.265	-0.1245	0.997	1,274
40	Top	5.32	0.750	-0.1862	0.996	975
	Center	5.29	1.063	-0.1650	0.999	2,563
	Bottom	5.42	1.083	-0.2070	0.999	3,177
80	Top	5.18	0.825	-0.1828	1.000	20,801
	Center	5.01	0.418	-0.1621	0.999	5,581
	Bottom	5.18	1.090	-0.1856	0.999	3,871
120	Top	5.19	1.641	-0.2440	1.000	9,329
	Center	5.06	1.447	-0.2069	0.999	2,863
	Bottom	5.39	1.771	-0.2581	0.999	2,706

* Coefficient of determination. ** Variance ratio.

メータの値、実験値との適合性を示す決定係数 R^2 (ただし、 R は重相関係数)、回帰の分散比 F 値を示した。 R^2 は 0.996 以上、 F 値も 975~20,801 ときわめて大きいことから、(3)式によってすべての「最大圧縮応力曲線」は、ほぼ完全に記述できることが統計的に明らかとなった。

(2) 実験式 $y = An^C e^{Bn}$ の理論的導出とパラメータの解釈

試料は圧縮をくり返すと 3-(1) で述べたように、徐々

に変形が進み、圧縮応力が小さくなる。ある圧縮回数 n における応力の変化率、 $\Delta y / \Delta n$ は、そのときの応力 y に比例する。ここで、 y は不連続な n の関数であるが、連続関数としても本質的な相違はないと考えて $\Delta y / \Delta n \approx dy / dn$ とすれば、

$$dy/dn = By \quad (4)$$

なる式が想定できる。これは、化学反応速度論の最も単純な関係式、「反応生成物の増加速度は基質の量に比例する、 $dy/dn = Ky$ 、 K は反応速度定数」から類推した

ものである。この(4)式を解くことによって(1)式と同じ $y=Ae^{Bn}$ なる曲線のモデルを得る。Aは積分定数として得られ、 y の全体的な大きさを決める値で、「硬さ」を示すパラメータであると考えられる。

Bは、(4)式の型から圧縮変形率、すなわち「変形のしやすさ(もろさ、砕けやすさ)」を示すと解釈できる。しかし、すでに3-(1)で述べたように、このモデルは、実験値との適合性が悪いので(4)式のBを $\{B+(C/n)\}$ と修正する。この修正の意味は、修正の形からもわかるように、 $C>0$ の場合、圧縮変形率Bを大きくすることになり、 $C<0$ の場合はBを小さくすることになる。この場合、Table 1に示した計算結果によれば、Cの値は負であるから|C|の値が大きいほど、変形または破壊を遅延することになる。すなわち、別の表現をすれば|C|は、「変形のしやすさに対する抵抗力(変形回復力)」を示すパラメータであるといえる。

この修正により

$$\frac{dy}{dn} = \left(B + \frac{C}{n} \right) y$$

(B>0, C<0, n=1, 2, ..., 10) (5)

なるBernoulli型の常微分方程式を得る。この式を解くと、統計的方法により得られた結果とまったく同一の方程式 $y=An^C e^{Bn}$ を得る(Aは積分定数として得られる定数)。

(5)式のように最大圧縮応力曲線を微分方程式の形に表現すれば、統計的な方法により得られたモデルのパラメータの意味が明確になり、従来経験的に知られていたバター添加がスポンジケーキの「もろさやしっとりさ」を増すという現象をこのように理論的に説明できると考えられる。さらに、(3)式の $n=1$ としたときの式、 $y=Ae^B$ の値は Fig. 2 に示すように、Szczesniak²⁾ が定義している「硬さ」、つまり、圧縮1回目の最大応力と完

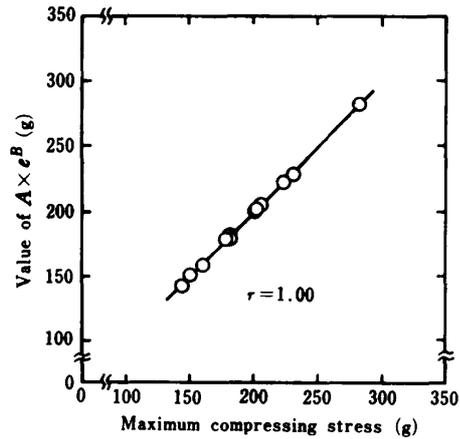


Fig. 2. Correlation between $A \times e^B$ of the experimental equation and measured maximum compressing stress

全に一致しており、この通常の測定法から得られる「硬さ」は、「砕けやすさ」を含むパラメータであることが明確になった。

(3) バター添加量とパラメータとの関係

Fig. 3に、バター添加量と推定されたパラメータA, B, Cとの関係を示した。log_eAは、バターを添加した試料のうちでは添加量80%が低い値となり「やわらかく」なることを示している。この結果は、既報⁵⁾のバター添加量0~120%の試料について圧縮1回により測定した「硬さ」の変化の傾向と一致している。

Bは、バター添加量が増大するほど総体的には高い値となった。バター添加量40%までは急激に、40~80%では圧縮箇所中央部以外はゆるやかに、80~120%ではいずれの部位も再び急激に高くなった。したがって、バター添加量の増大は、スポンジケーキの「砕けやすさ」や「もろさ」を増すことがわかる。試料中央部においては、バター添加量40%までは砕けやすさが増したが、

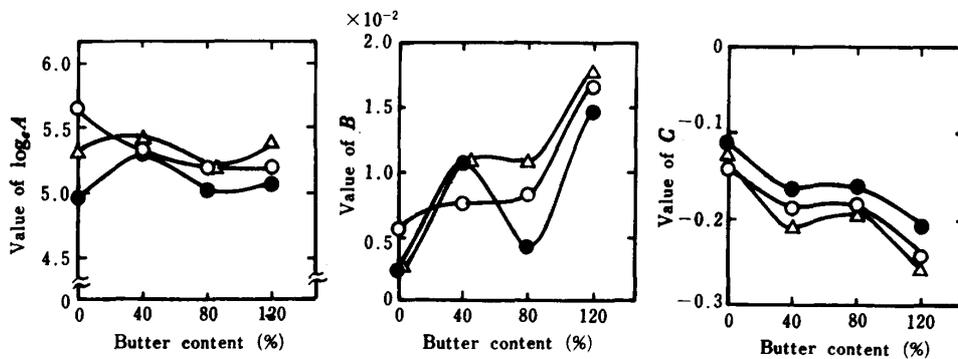


Fig. 3. Relations between parameter values of top (○), center (●) and bottom (△) and butter content

パター sponge ケーキの最大圧縮応力曲線の解析

80%で減少し、120%では再び増加するという、ケーキの上方や下方部と異なった興味ある現象を示した。

C は、全体的に B の傾向と逆にバター添加量が増大するほど低い値となった。この C の食品学的意味としては、 $|C|$ が「変形に対する抵抗力」を示すことから、この値が大きいほど、ケーキが圧縮破壊された後の、気泡以外の内相組織部分の組織保持が高いこと、すなわち、応力に対するずり速度¹¹⁾(shear rate)が低いことを示している。このことから、 C は、ケーキの「しっとりさ」に関係するパラメータであると解釈される。

上記のようなパラメータ A 、 B 、 C の変化から、たとえば、試料の中央部についていえば、バター無添加の試料は砕けにくく「しっとりさ」が足りない。40%では「しっとりさ」は適度であるものの砕けやすすぎる。80%は0%と同様な硬さ、砕けやすさを示したが、「しっとりさ」は適度である。120%になると「しっとりさ」は高いものの非常に砕けやすいものとなることが容易に理解できる。

(4) パラメータと官能評価との関係

官能検査の試料には、ケーキの内相部全体を供したが、ここでは、圧縮部位中央のパラメータの値を用い官能評価との関係を調べた。Fig. 4に「硬さ」を示す $\log_e A$ との関係を示したが、値が最低値、つまり最もやわらかい試料は評価が極端に悪いが、他の3試料では、値の小さいほうが総じて良い評価を得ることがわかった。Fig. 5

に B との関係を示した。 B の値が最低値、すなわち、「もろさ」がきわめて弱い試料は、評価が極端に悪いが、値のわずかな増大により良いほうに変わり、また、値が大きくなると再び評価は低くなり、「もろさ」は中程度が良い評価を得ている。 C との関係はFig. 6に示したが、 C の値が大きい試料、つまり変形回復力が大きすぎると評価は著しく低下することが明らかとなった。なお、官能検査による「しっとりさ」と直線関係を示していないが、官能検査は心理的測定であり、人の感じる「しっとりさ」は、試料の硬さや砕けやすさなども含め総合的に判断されているためであろうと考えられる。

総合評価の最も高いバター添加量80%の試料は、レオロジー的にやわらかく(A)、砕けやすさ(B)としっとりさ(C)が適度であるという特徴をもつといえる。このように、これまで経験的に知られていたケーキに対する嗜好性を、レオロジー特性として示すことができた。

このような官能評価と機器測定の結果との関係について、Sharmaら¹²⁾は、プランジャー貫入速度により二種の試料の示す応力が逆転する場合のあること、また、青木¹³⁾は、人の官能評価の順とも逆転する場合のあることを報告している。スポンジケーキの物性について越智ら¹⁴⁾は、クリープ試験により弾性率、粘性率などを解析しているが、圧縮試験による解析例はみあたらない。今回試みた「最大圧縮応力曲線」は、従来のテクスチャープロファイルカーブ¹⁾に代わる一つの食品物性の測定法

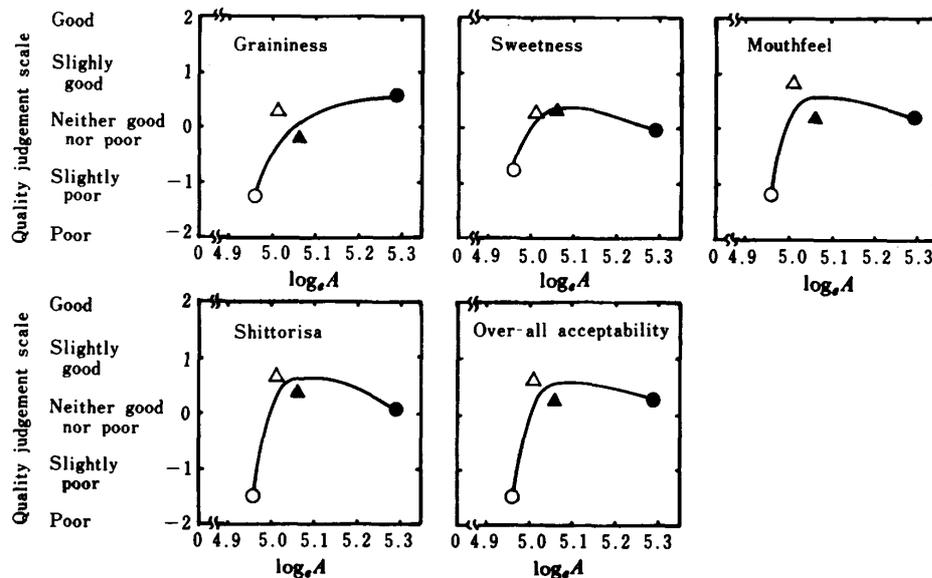


Fig. 4. Relations between sensory values and $\log_e A$ for the cake containing butter 0 (○), 40 (●), 80 (△) and 120 (▲) %

Compressing point: center.

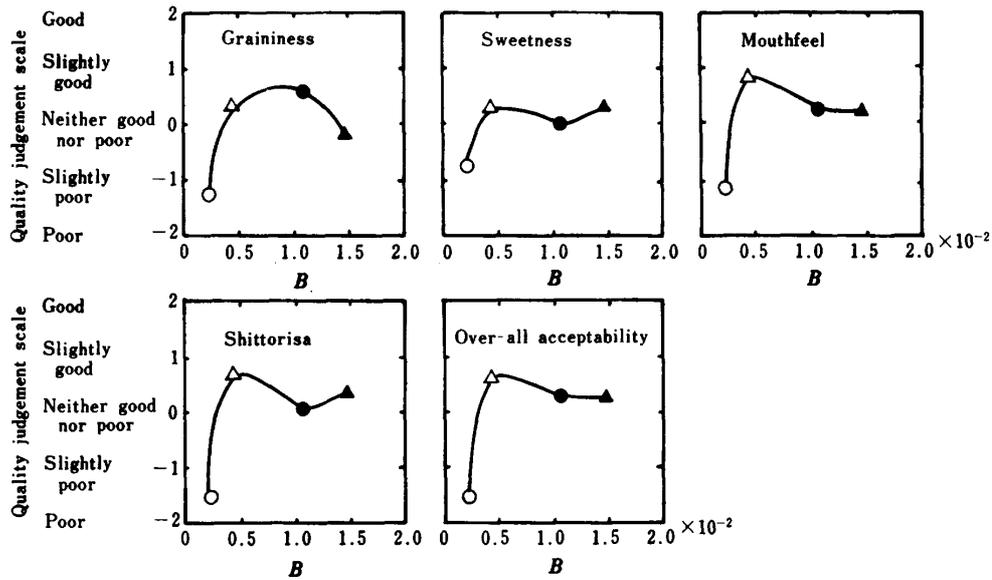


Fig. 5. Relations between sensory values and B for the cake containing butter 0 (○), 40 (●), 80 (△) and 120 (▲) %

Compressing point: center.

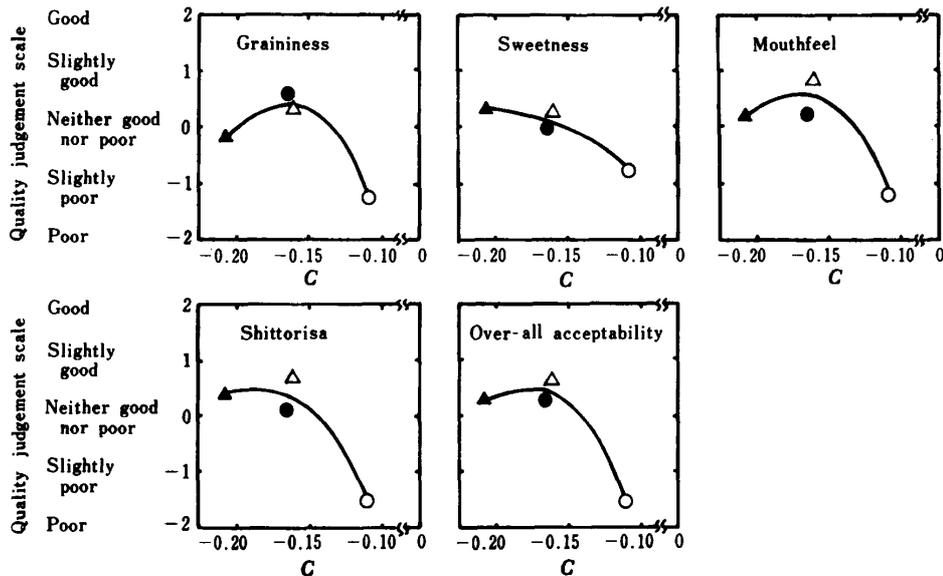


Fig. 6. Relations between sensory values and C for the cake containing butter 0 (○), 40 (●), 80 (△) and 120 (▲) %

Compressing point: center.

である。測定結果を一つの数式として表現すれば、一見複雑に見えるレオロジー特性が、より本質的な少数のパラメータに支配されていることを理解できるとともに、このパラメータにより試料の特性を知ることが可能となる。テクスチャープロファイルカーブの場合も、本質的な物理的パラメータにより方程式化が可能になれば、Shamaら¹²⁾や青木¹³⁾の指摘するような混乱は回避でき

られると思われる。

以上のことから、「最大圧縮応力曲線」の数式化は、パタースポンジケーキのテクスチャー評価に有効であり、その各パラメータは製品のレオロジー特性を説明する良い指標になると結論される。

パター sponge ケーキの最大圧縮応力曲線の解析

4. 要 約

パター sponge ケーキの連続圧縮試験の結果に対し、そのレオロジー的特性を示す実験式を導いた。すなわち、毎回の圧縮で得る応力の最大値を結ぶ曲線を「最大圧縮応力曲線」とよび、数式モデルを最小二乗法により統計的に求め、その後理論的な解釈を試み、パラメータの値と官能評価とを比較した。

(1) 最大圧縮応力曲線は、試料および圧縮部位により形状が異なるが、圧縮回数が増大するほど圧縮応力は指数関数的に低下した。

(2) 最大圧縮応力 (y) と圧縮回数 (n) との関係式として求めた、 $y = An^Ce^{Bn}$ が実験値との適合性がきわめて高かった。パラメータ A は「硬さ」、 B は「変形のしやすさ (もろさ、砕けやすさ)」、 C は「変形に対する抵抗性 (変形回復力、しっとりさ)」であると解釈できる。

(3) A は、バター添加量 80% で総じて低い値を示した。 B は、バター添加量 0% で最低値を示し、バター添加量の増大に伴い値が大きくなり、試料は変形しやすくなった。 C は B と逆の傾向を示し、バター添加量の増大に伴い値は低下し、変形回復力が弱くなることが示され、バター添加により sponge ケーキのもろさや砕けやすさを増すことが理論的に説明できた。

(4) 官能評価は、バター添加量 80% の試料が最も良かった。この試料のパラメータの値は、 A が低く、 B 、 C は中間であり、レオロジー的には、硬さはやわらかめ

で、もろさ、砕けやすさおよびしっとりさは中程度であることを示している。

終わりに、小麦粉を提供していただいた日清製粉(株)に深謝いたします。

本論文の概要は、平成元年度日本家政学会第41回大会において発表した。

引用文献

- 1) Friedman, H., Whitney, J. and Szczesniak, A. S.: *J. Food Sci.*, **28**, 390 (1963)
- 2) Szczesniak, A. S.: *J. Food Sci.*, **28**, 385 (1963)
- 3) Szczesniak, A. S., Brand, M. and Friedman, H.: *J. Food Sci.*, **28**, 397 (1963)
- 4) 辻昭二郎: 家政誌, **36**, 102 (1985)
- 5) 川染節江, 山野善正: 家政誌, **37**, 759 (1986)
- 6) 川染節江, 山野善正: 家政誌, **38**, 559 (1987)
- 7) 川染節江, 山野善正: 家政誌, **39**, 21 (1988)
- 8) 川染節江, 山野善正: 家政誌, **39**, 731 (1988)
- 9) 川染節江, 山野善正: 家政誌, **40**, 151 (1989)
- 10) 川染節江, 田村咲江, 中尾亜里子, 山野善正: 家政誌, **40**, 279 (1989)
- 11) Scott Blair, G. W.: 入門レオロジー (岡 小天, 東健彦訳), 朝倉書店, 東京, 18 (1970)
- 12) Shama, F. and Sherman, P.: *J. Texture Stud.*, **4**, 344 (1973)
- 13) 青木 宏: 日食工誌, **34**, 503 (1987)
- 14) 越智知子, 土屋京子: 家政誌, **38**, 1063 (1987)