

食パンのレオロジに関する基礎的研究 (第1報)*

—クラムの圧縮性と弾性係数—

王 益平**・森嶋 博**・瀬尾康久**
相良泰行**・芋生憲司**

要 旨

本研究は食パンの力学的特性をレオロジの観点から考察することを目的とする。本報では、食パンの圧縮性及び弾性特性について検討した。実験結果によれば、変形量が厚みの25%に達するまでの圧縮力-変形率曲線は初期不安定状態、弾性部分、過渡部分及び破壊部分の4ステージの挙動を示した。クラム構造及び強度的性質は方向によって異なり、異方性体であることが判明した。更に、弾性体として考えた食パンの比例限界、等価ヤング率及び等価ポアソン比を求めた。第2報以降では破壊特性、粘弾性特性について報告する。

Studies on Rheology of White Bread (Part 1)*

—Compressibility and Elastic Moduli of Bread Crumbs—

Yiping WANG**, Hiroshi MORISHIMA**, Yasuhisa SEO**,
Yasuyuki SAGARA**, Kenji IMOU**

Abstract

An investigation for mechanical properties of white bread has been performed by using an uniaxial compression testing machine developed, and the compressibility as well as elastic properties of the crumb have been discussed from the rheological point of view.

For the range of deformation rates up to 25%, a force-deformation curve was found to consist of the four stages which were defined as (1) initial toe, (2) proportional stage, (3) transition and (4) breaking regions, respectively. The experimental results indicated that the structure and mechanical strength of the crumb changed by directions showing its anisotropy. The values for proportional limit, equivalent Young's moduli and Poisson's ratios of elasticity were also determined within the proportional stage at which the crumb could be assumed to be an elastic body.

The results on breaking behavior and viscoelasticity will be reported in subsequent studies.

[Keyword] white bread, rheology, compressibility, anisotropy, Young's modulus, Poisson's ratio

* 平成2年4月第49回農業機械学会年次大会(宮崎大学)にて講演

** 東京大学農学部 (〒113 東京都文京区弥生1-1-1 ☎03-3812-2111内線5363) Faculty of Agriculture, The University of Tokyo, Tokyo, 113 Japan

I 緒 言

食品のレオロジ特性は食品としての構造認識並びに品質管理などの面で重要である。パンなどの

食品の評価には物理的な測定による客観的方法のほか、経験者の判断による感覚的・主観的方法が依然として用いられている¹⁾。

食品のレオロジ特性に関する研究は多く²⁾³⁾⁴⁾、ゲルのレオロジ測定法、応力-歪測定、クリープ測定、非線形の力学模型⁵⁾、ゲルの気泡分散系を一樣な等方性線形(粘)弾性体と仮定しポアソン比を求めたもの⁶⁾、不均一系食品に関するもの等がある⁷⁾。

パンのレオロジについての報告は必ずしも多くなく、ベーカ・コンプレシメータなどの機器を用いた食パンのかたさの測定⁸⁾⁹⁾などがみられるに留まる。テクスチャの評価には主観的な手段が用いられ、力学的な特性は必ずしも明かではない。食パンが気泡分散系・半固体の食品であることがその研究を困難にしているものと思われる。

筆者らは食パンのレオロジ特性を究明することを目的として、弾性特性、粘弾性特性及び破壊特性の視点から検討を行ってきた。本報では圧縮試験を行い得られた圧縮力-変形率曲線を解析した。さらに弾性特性を中心に食パンの比例限界、等価ヤング率及び等価ポアソン比の各弾性係数を検討した。

II 実験方法

供試試料として中種法¹⁰⁾による角型食パンを焼成した。小麦粉基準の生地配合は表に示したとおりで、原料は強力粉のほか、水・イースト・イーストフード・食塩・砂糖・脱脂粉乳及びショートニングである(表1)。製パン工程(図1)は原料の秤量、中種混合、生地混合、分割・丸め、成

表1 小麦粉基準の生地配合
Table 1 Sponge dough formulation on flour basis

Ingredients	%
Flour(12.5% protein)	100
Water	68
Compressed yeast	2
Yeast food	0.1
Salt	2
Sugar	6
Nonfat dry milk	2
Shortening	3

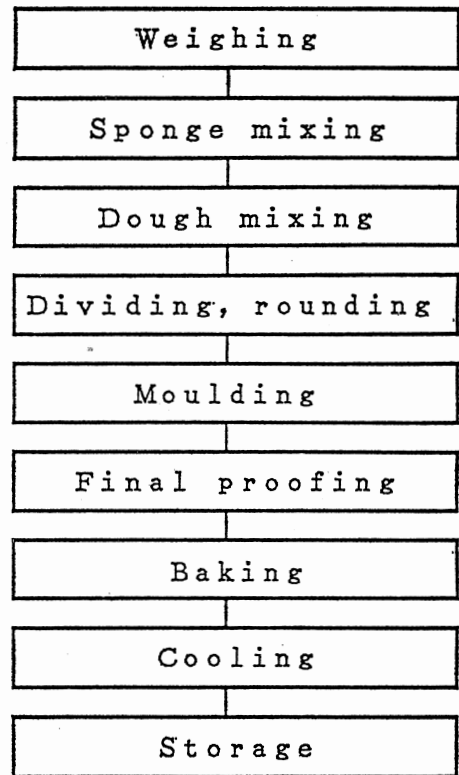


図1 製パン工程
Fig. 1 Process of breadbaking

形、焙炉及び焼成などから成る。

成形には棒状成形及びN状成形の2種類の方法(図2)を採用した。棒状成形は、分割した生地を薄く伸ばし、それを巻いて棒状に成形し、そのまま焼き型に入れる方法である。N状成形では棒

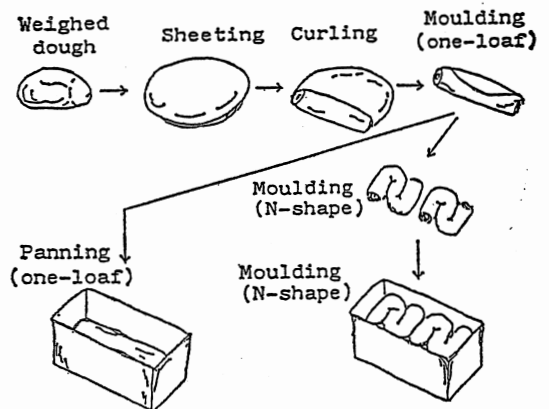


図2 二種類の成形法
Fig. 2 Two kinds of moulding methods

状生地を更にN字形に折り曲げ焼き型に詰める。

発酵後の生地を260gに分割し、8cm×8cm×16cm（小型）の焼き型に入れて蓋をし、230°Cで焼成した。一回の焼成で6本から12本の小型ローフ*を作製した。焼減率**は10%を基準とし、焼成直前の生地重量と焼成後20分のローフの重量から求めた。焼成したローフ比容積***は $3.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ で市販のものとはほぼ同様である。

焼成後、食パンを1時間半冷却し、内部温度がほぼ室温まで下がってからローフのままポリエチレン袋に包装し、20°Cの恒温室において測定まで保存した。

圧縮力-変形率の関係を得るための圧縮試験に用いたサンプルは、スライスとクラム・ブロックの2種類（図3）である。スライスはローフを厚さ2cmに切り両端2枚ずつを捨てたもので、クラム・ブロックはローフの中心部から4cm×4cm×4cmのクラスト（耳の部分）を含まない部分を切り出したものである。各サンプルに対し圧縮試験を行い、サンプルの変形量が初期厚さの25%になるまでに生じた現象を検討した。

圧縮試験に使用した装置は、定速圧縮方式の

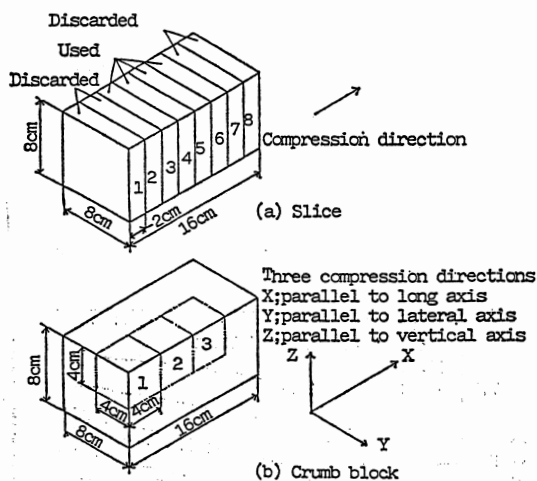


図3 サンプルと圧縮方向
Fig. 3 The samples and the compression directions

* ローフは焼き型から抜いた状態のパンである。
** 焼減率とは焼成中の生地重量減少の生地重量に対する比と定義され、焼成損失を意味する。
*** ローフ比容積は焼き型から抜いた状態のパンの容積と質量の比である。

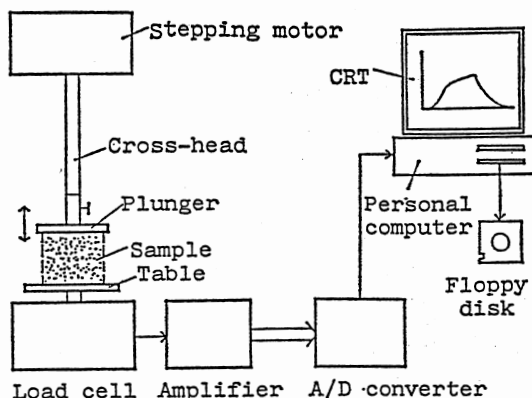


図4 計測システムの概略
Fig. 4 Diagram of the measuring system

TPU (Texture Profile Unit 株式会社製) を次のように改造したものである（図4）。ステッピングモータによりクロスヘッドに取り付けたプランジャが定速で下方に動き、サンプルを圧縮した。圧縮力をロードセルにより検出し、増幅、A/D変換の後、パソコンに転送した。測定結果をCRT上に図示しフロッピーディスクに格納した。供試したプランジャは円形で、スライスには直径30mm、クラムブロックには直径55mmのものをを用いた。圧縮変形速度は5mm/sとした。

1回に6～12本のローフを焼成し、各々を同一のもののみなし焼成後24時間ごとに1本ずつ取り出して圧縮試験を行い、7日間にわたり各弾性係数の経時変化を観察した。

ローフの容積は菜種置換法*で測定した。クラムの気孔率**は、クラムの容積をノギスで測定してから、円筒圧縮装置***で空気を排除し容積を測り、圧縮前後の容積差から求めた。ポアソン比はクラム・ブロックを圧縮した際に生じた変形を両方向からカメラで写真に撮り、読取顕微鏡（株式会社製読取精度0.01mm）で測定算出した。

* 菜種置換法は一定容積の容器に被測定物を入れ菜種を充填しその菜種の体積から被測定物の体積を測定する方法である。
** 気孔率はクラムに含まれる気孔空隙の総体積とクラムの体積の比であり、空隙率、孔隙率とも言われるが、食品の場合には、気孔率がよく用いられている。
*** 円筒圧縮装置は円筒状の容器に被測定物を入れピストンにより圧縮し空隙を0として被測定物の体積を測定する装置である。

III 実験結果及び考察

1. 圧縮力-変形率曲線

圧縮試験の際、応力-歪曲線を出すのが一般的である。食品のような物理的性質が複雑なものに対しては、真の応力や真の歪を計算することが困難なため、いわゆる金属などで用いられる応力-歪関係という用語を使うことが必ずしも適当とは思われない¹¹⁾ため、かわりに圧縮力-変形率(Force-Compression) 関係を調べた。

スライスについて行った2000回以上、クラム・ブロックについて行った200回以上の圧縮試験の結果から、圧縮力-変形率曲線は四つのステージから成る考えられた。変形量が厚みの25%に達するまでの代表的な圧縮力-変形率曲線の一例を示すと、図5のようになる。この場合、サンプルはスライスであって、棒状成形、焼成後72時間経過した小型ローフから切取ったものである。横軸は変形率(初期厚さに対する圧縮量の比)で、縦軸は圧縮のため加えた力である。

ステージI(ab)は、プランジャ面がサンプル面と接触し、载荷開始直後の初期状態を示す。この段階では、試験片の作成時に表面付近のポアが切断されて不整形となり、部分的にそのポアが破壊され、初期不安定現象をもたらす。また、クラムが柔らかく試験片を理想な幾何形状に仕上げるのが難しく、圧縮開始時に、試験片の表面とプランジャ面とを平行に接触させることが難しい¹²⁾。このステージはだいたい変形率が2~4%になるまで続いた。

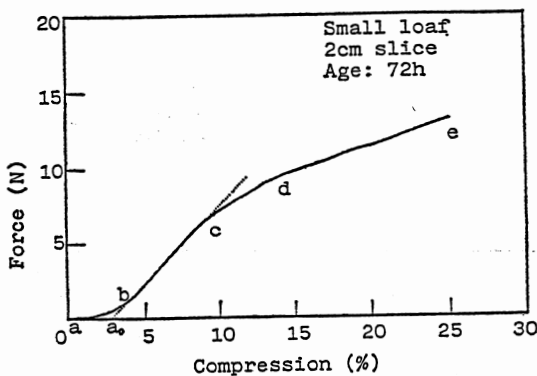


図5 食パンの代表的な Force-Compression 曲線
Fig. 5 A typical force-compression curve for white bread

ステージIIの比例部分(bc)では、試料がフックの弾性理論に従い弾性的な挙動を示した。比例範囲はスライスでは変形率の6%から10%前後、クラム・ブロックでは変形率の4%から8%前後までの区間であった。その間、圧縮力の増加率(単位時間あたりの圧縮力の増加)が最も大きい値を示す。比例範囲の最大限界として圧縮曲線の傾きが変わり始める点を取った。c点はこの比例限界であり、試料とした食パンの各等価弾性係数をこのステージにおいて求めた。

ステージIIIの過渡部分(cd)では圧縮曲線の勾配が漸次変化し次のステージに移り変わる。一般には、破壊は応力が急激に下がったときに起きることがよく知られているが、応力-歪曲線の勾配が徐々に変わったときにも破壊が生じる¹³⁾。ここでは大きな圧縮力低下が生じる降伏点は見られないが、圧縮力-変形率曲線の勾配が徐々に変わるのでポアの微小構造が壊れ始めたと思われる。試料内部では、塑性変形が始まり曲線の線形性がなくなる。

ステージIVの破壊部分(de)では、試料のポアが大きく変形し、ミクロな構造の破壊が続き、マクロな構造の破壊も目で確認された。破壊は前のステージより進む。連続破壊の結果、変形抵抗が小さくなり、圧縮の進行に従い圧縮力は緩慢に増加する。

2. クラムの異方性

図6にはクラム・ブロックの三方向につき変形量が厚みの25%に達するまでの圧縮曲線を示す。横軸は変形率で縦軸は圧縮力である。圧縮方向は

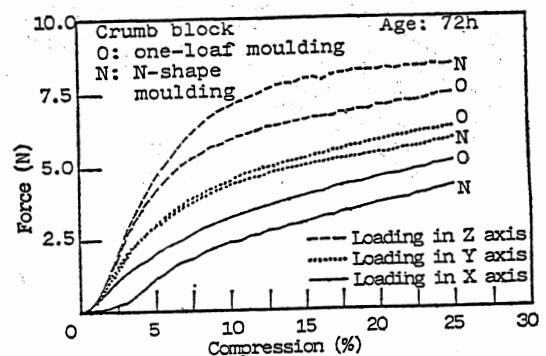


図6 3方向におけるクラムの圧縮性の差異
Fig. 6 Difference of the compressibility of crumb in 3 directions

図示したとおりである。

同じ変形をさせるのに必要な圧縮力は、Z方向に沿って外力を加える場合が最も大きく、Y方向がそれに次ぎ、X方向に圧縮する場合が最も小さい。圧縮力が急激に増加するステージI，ステージIIでは、Z方向の圧縮力の増加速度はほかの両方向の倍以上もあり、X方向の荷重上昇が一番遅い。比例限界を超えると、それまでとは異なり各方向の曲線の傾きは逆転し、X方向は他の2本の曲線に比べ、明らかに上昇を続けることが認められた。

焼成後保存時間が長くなると、クラムに同じ変形をさせるのに必要な力は次第に大きくなる。すなわち食パンはかたくなるが方向性は相変わらず存在し構造上強弱の順には変わらない。

棒状成形とN状成形の両方法について成形方法の影響を調べた結果、同様な現象（図5）が現れ方向性が成形方法の如何にかかわらず存在するものと認められた。これらから、食パンは方向によって異なる構造を有し異方性のものであると言える。異方性の点について、食パンは木材¹⁵⁾に似たような性質を持つと思われるが、その構造が形成する理由については以下の点が考えられる。まず、製パン中、生地がモルダ（整形機）によって圧延を繰り返され、さらに棒状に巻いて成形されるときに異方性構造が生じたものと思われる¹⁴⁾。次に、焙炉（二次発酵）・焼成の段階において、生地の気泡が焼き型の中で拘束・干渉されながら膨張した結果、複雑かつ等方でない構造が形成したものと考えられる。

3. 比例限界

圧縮力-変形率曲線（図5）で曲線の勾配が変わり始めるc点の値を比例限界とした。図7には棒状成形ローフの3方向につき求めたクラムの比例限界を示す。横軸は焼成後経過時間を、縦軸は比例限界を表す。○または●は4個の実測値の平均で、直線または点線は一回帰線である。比例限界を σ_p (N/m²)、焼成後経過時間をt(h)とすると、方向別の比例限界 σ_p は次の式で表せた。

$$X \text{ 方向} : \sigma_{px} = 12.0t + 350, r = 0.967 \quad (1)$$

$$Y \text{ 方向} : \sigma_{py} = 15.3t + 527, r = 0.946 \quad (2)$$

$$Z \text{ 方向} : \sigma_{pz} = 24.0t + 346, r = 0.984 \quad (3)$$

比例限界は焼成後時間の経過に伴い、次第に大

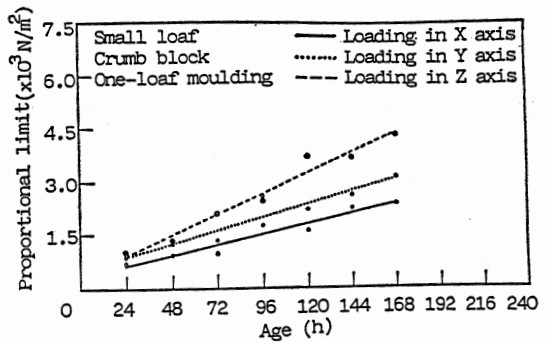


図7 方向別のクラムの比例限界（棒状成形）
Fig. 7 The proportional limits of crumb of one-loaf bread in different directions

きい値をとり硬化することが知られた。両者の間には線形関係が認められた。比例限界の保存時間依存性は、食パンの力学的特性が焼成後の経過時間によって変化することを意味する。

比例限界も方向に依存する。任意の焼成後の経過時間においても、上下（Z）方向の比例限界が一番大きく、左右（Y）方向のが次となり、長手（X）方向の数値が最も小さい。これは図6の結果と一致する。

N状成形により焼成した食パンの比例限界（図8）についても棒状成形のものと同様な傾向がみられた。方向別の比例限界 σ_p は次の式で表せた。

$$X \text{ 方向} : \sigma_{px} = 8.8t + 407, r = 0.834 \quad (4)$$

$$Y \text{ 方向} : \sigma_{py} = 13.7t + 649, r = 0.946 \quad (5)$$

$$Z \text{ 方向} : \sigma_{pz} = 28.7t + 549, r = 0.996 \quad (6)$$

棒状成形のパン及びN状成形のパンの比例限界はみな小さく、 $(0.3 \sim 5) \times 10^3$ N/m²の程度であった。ちなみにゴム¹⁹⁾は 8×10^6 N/m²である。

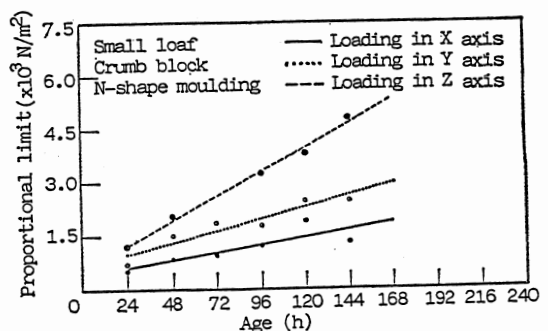


図8 方向別のクラムの比例限界（N状成形）
Fig. 8 The proportional limits of crumb of N-shape bread in different directions

4. 等価ヤング率

物体による弾性の性質の相違を定量的に言い表すのに弾性係数を用いる。实用弾性係数には体積弾性率 κ 、剛性率(せん断弾性率) G 、ヤング率 E とポアソン比 ν がある。等方性物体ならそのうちで独立に二つを決めれば物体の弾性的性質は一義的に決まる。もしヤング率 E とポアソン比 ν が分かれば体積弾性率 κ と剛性率 G はそれぞれ下記のように求められる¹⁵⁾。

$$\kappa = E/3(1-2\nu) \quad (7)$$

$$G = E/2(1+\nu) \quad (8)$$

食パンは方向によって異なる弾性や強度的性質を示す異方性体である。この異方性体は近似的に直交異方性体とみなすことができる。等方性物体の独立弾性係数が2個しかないのに対し、直交異方性体の場合は独立した弾性定数が9個存在する¹⁵⁾。ヤング率は3個、ポアソン比は6個(そのうち3個が独立)、剛性率は3個ある。

ヤング率は単位の変形を起こすのに必要な力という物理意味を持つ。単軸荷重の場合、単位断面積あたりの力(等価応力)は $\sigma_n = P/S$ 、単位長さあたりの変形(等価歪)は $\epsilon_n = (h-H)/H$ である。等価ヤング率 E は次式で求められる¹⁶⁾。

$$E = \sigma_n / \epsilon_n \quad (9)$$

ここで P は圧縮力、 S は断面積、 h は変形後の高さ、 H は試料の初期高さを表す。真の応力及び真の歪の計算が非常に困難であることを考慮し、 E を求めるのに二つの仮定を設けた。その一は使用したプランジャが試料のクラム・ブロックより大きいいため、試料の中では圧縮応力しか起きないと仮定したことである。その二は多孔質の食パンが圧縮される時起きる横断面膨張が縦変形に比べ非常に小さく¹⁷⁾、(食パンの場合、横断面の面積の変化は元の横断面の2%前後と推定され、等価応力 σ_n の変化も2%前後に過ぎない)、等価ヤング率に与える影響は小さく、無視し得ると仮定した。

比例限界の場合と同様な試験条件で2種類の成形法を用いて焼成した食パンについて調べた。図9には棒状成形の食パンの等価ヤング率を示す。横軸は焼成後経過時間、縦軸は等価ヤング率を表す。○または●は4個の実測値の平均で、直線または点線は一回帰線である。方向別に等価ヤン

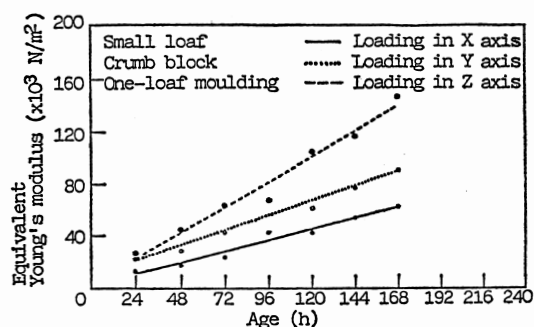


図9^a 方向別のクラムの等価ヤング率
Fig. 9 The equivalent Young's moduli of crumb in different directions

グ率 $E(N/m^2)$ と焼成後時間 $t(h)$ の関係はつぎの式で表せた。

$$X \text{ 方向: } E_x = 335t + 2800, \quad r = 0.985 \quad (10)$$

$$Y \text{ 方向: } E_y = 479t + 9370, \quad r = 0.972 \quad (11)$$

$$Z \text{ 方向: } E_z = 812t + 3630, \quad r = 0.987 \quad (12)$$

食パンの等価ヤング率も焼成後経過時間や方向に依存する。等価ヤング率の全体傾向は、比例限界の場合と同様に時間の経過につれ徐々に大きくなり、時間の線形関数となる。そしてその値の大きさもZ方向、Y方向、X方向の順である。

N状成形の食パンの等価ヤング率も棒状成形のものと同様な傾向にあり、棒状成形よりやや広い範囲を示した。

本実験では2種類の食パンについて、等価ヤング率 $(0.5 \sim 20) \times 10^4 N/m^2$ を得たが、Muller¹¹⁾は $2 \times 10^4 N/m^2$ という値を出している。

ちなみにこの食パンの値はフォーム・ラバー¹⁶⁾の $10^4 N/m^2$ と同程度である。

5. 等価ポアソン比

各辺の長さがそれぞれ a 、 b 、 c の直方形異方性試料(図10)を考える。試料のZ軸に垂直な面にZ方向の力 P を加えるとZ方向に微小量 Δc (伸長は正、収縮は負)だけ変形し、X、Y方向にそれぞれ微小量 Δa 、 Δb だけ変形したとすれば、各等価歪は、

$$Z \text{ 方向の縦歪 } \epsilon_z = \Delta c / c \quad (13)$$

$$X \text{ 方向の横歪 } \epsilon_x = \Delta a / a \quad (14)$$

$$Y \text{ 方向の横歪 } \epsilon_y = \Delta b / b \quad (15)$$

となる。ゆえに、横歪と縦歪の比で定義される等価ポアソン比 $\nu^{15)}$ は、

$$\nu_{zx} = -\epsilon_x / \epsilon_z \quad (16)$$

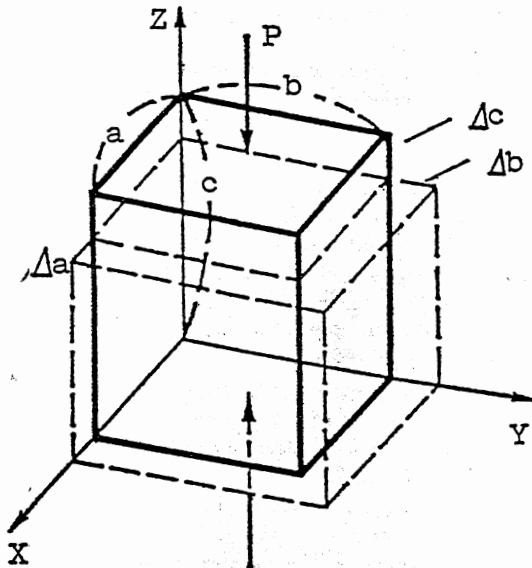


図10 圧縮中における試料の変形
Fig. 10 Deformation of a sample during compression

$$\nu_{zy} = -\epsilon_y / \epsilon_z \quad (17)$$

である。ただし、 ν の第1, 第2添字はそれぞれ応力及び横歪の方向を表す。

同様にY軸方向及びX軸方向に圧縮力を加えると、等価ポアソン比 ν_{yx} , ν_{yz} 及び ν_{xz} , ν_{xy} が求められる。

焼成後48時間経過したときローフから4cm×4cm×4cmのクラム・ブロックを8個ずつ切り出して供試し、等価ポアソン比を求め、その結果を図11に示した。縦軸は等価ポアソン比、横の方に等価ポアソン比の種類を示す。図中には実測値の平均と標準偏差を示してある。各等価ポアソン比の測定値は0.03~0.31の範囲に分布する。分散分析の結果これら6種類の等価ポアソン比の間には1%以下の危険率で有意差があることが確認され、異方性体であることが確かめられた。

Muller¹⁾は弾性範囲内の圧縮では食パンのような組織では圧縮方向に対し直角方向の変形が見られず、したがってポアソン比は0としている。しかし本実験では圧縮方向に直交する方向つまり横に膨張することが確認され、食パンの等価ポアソン比は0でないことが明らかになった。

更に気孔率が等価ポアソン比に及ぼす影響を調べた。同寸法の焼き型に入れる生地の変え気

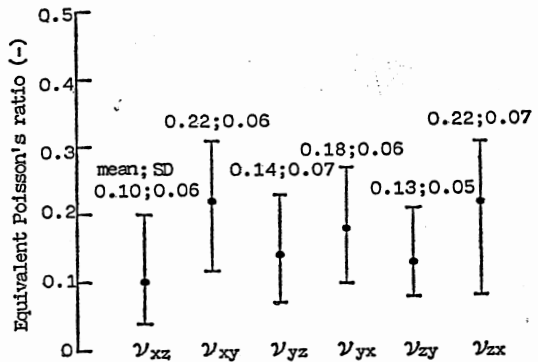


図11 6種類の等価ポアソン比
Fig. 11 Six kinds of equivalent poisson's ratio of crumb

孔率が異なる食パンを8種類焼成し、焼成後72時間が経過したとき、同一気孔率の食パンからサンプルを6個ずつ切り出し圧縮試験に供試した。等価ポアソン比 ν_{xz} の実験結果を図12に示す。等価ポアソン比の平均値は0.14であり、気孔率0.78から0.90までの範囲では、等価ポアソン比に与える影響は小さいと考えられた。

文献によると、工業材料の場合、銅¹⁾のポアソン比は0.3、ゴム²⁰⁾ではほぼ0.5、熔融石英は0.10²⁰⁾、コルクは0.0²⁰⁾という値が見られる。

IV 摘 要

食パンのレオロジ特性の一部として考えられている圧縮特性及び弾性特性を究明するため、食パンのクラムを対象として圧縮試験を行い、圧縮力-変形率曲線及びクラムの異方性について検討し、併せて諸弾性係数についても検討した。その

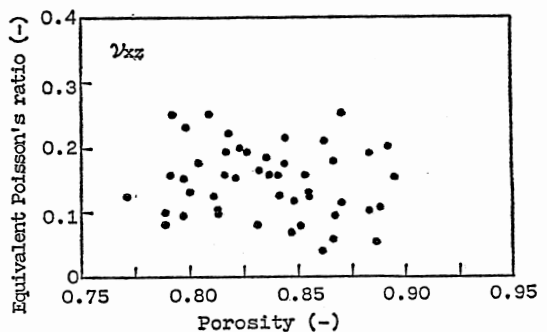


図12 異なる気孔率のクラムの等価ポアソン比 ν_{xz}
Fig. 12 The equivalent poisson's ratios ν_{xz} of crumb with different porosity

結果、以下のことが明らかになった。

(1) 変形量が厚みの25%に達するまでの食パンの圧縮力—変形率曲線は実験条件によらず、初期状態、弾性部分、過渡部分及び破壊部分の4ステージに分けられた。比例範囲は変形率の4~10%の間に現れた。圧縮力が大きく低下するような降伏点は見られなかった。この現象が生地成形の方法に依存しないことが認められた。

(2) クラムについて荷重方向を長手(X)、左右(Y)及び上下(Z)に変えて圧縮試験を行った結果、食パンは等方性の物質ではなく、異方性であることが判明した。上下方向の構造が一番強く、長手方向の構造が最も弱く、左右方向の構造が中間に位した。

(3) 食パンの比例限界は工業材料と比べ非常に小さく、 $(0.3\sim 5)\times 10^8 \text{ N/m}^2$ の程度にあった。比例限界の値は保存時間と荷重方向に依存することが分かった。また、保存時間との線形関係が認められた。

(4) 食パンの等価ヤング率は $(0.5\sim 20)\times 10^4 \text{ N/m}^2$ で、だいたいフォーム・ラバーと同程度であった。等価ヤング率も比例限界と同様に保存時間や荷重方向に依存した。

(5) 食パンの等価ポアソン比は0でないことが明らかになった。異方性体の6つの等価ポアソン比はばらつくが、0.03~0.31に分布する。分散分析の結果、これらの等価ポアソン比の間には1%以下の危険率で有意差があることが確認され、異方性体であることが確かめられた。また気孔率が0.78から0.90までの間では、等価ポアソン比に与える影響が小さい。

参 考 文 献

- 1) Muller H.G.: An introduction to food rheology. Heinemann, London, (Japanese edition, Mastumoto S.), 15—16, 1973
- 2) Szczesniak A.S.: Objective measurements of food texture, *Journal of Food Science*, 28, 410—420, 1963
- 3) Shama F. & Sherman P.: The texture of ice cream (2. Rheological properties of frozen ice cream. *Journal of Food Science*, 31, 699—716, 1966
- 4) Peleg M.: Application of nonlinear phenomenological rheological models to solid food materials, *Journal of Texture Studies*, 15, 1—22, 1984
- 5) 中浜信子: 食品ゲルのレオロジー, 食品の物性(松本幸雄), 5, 29—44, 1979
- 6) Yano M., Shiinoki Y., Miyakawa O. & Sakiyama T.: Instantaneous elastic deformation of a porous gel analysed by the finite element method, *Journal of Food Engineering*, 6, 217—230, 1987
- 7) 堀内久弥: 不均一系食品のレオロジー, 食糧—その科学と技術, 28, 27—48, 1989
- 8) American Association of Cereal Chemists: Cereal Laboratory Methods, Staleness of bread compression test with baker compressimeter, AACC Method 74—10, 1961
- 9) Kilborn R.H. & Tipple K.H. & Preston K.R.: Grain research laboratory compression tester: its description and application to measurement of bread-crumbs properties, *Cereal Chemistry*, 60 (2), 134—138, 1983
- 10) 坂本達雄: 製パン入門, ベーカーズ・タイム社, 103—126, 1982
- 11) Bourne M.C.: Rupture tests vs small-strain tests in predicting consumer response to texture, *Food Technology*, 33(19), 67—70, 1979
- 12) Walker C.E., West D.I., Pierce M.M. & Buck J.S.: Cake firmness measurement by the Universal Testing Machine, *Cereal Foods World*, 32(7), 477—480, 1987
- 13) McLaughlin N.B.: Statistical models for failure of apple tissue under constant-strain-rate loading, *Journal of Texture Studies*, 18, 173—186, 1987
- 14) Hibberd G.E. & Parker N.S.: Measurement of the compression properties of bread crumb, *Journal of Texture Studies*, 16, 97—110, 1985
- 15) 浅野猪久夫: 木材の事典, 朝倉書店, 154—158, 1982
- 16) 中川鶴太郎: レオロジー, みすず書房, 359—360, 1959
- 17) Lee, Y.C., Rosenau J.R. & Peleg M.: Rheological characterization of tofu. *Journal of Texture Studies*, 14, 143—154, 1983
- 18) Fung Y.C.: Continuum mechanics, second edition, Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 167, 216—217, 1977
- 19) 鶴戸口英善: 材料力学(上巻), 日本機械学会, 34, 1957
- 20) 中川鶴太郎: レオロジー(第2版), 岩波全書, 12—41, 1978

(原稿受理平成2年11月7日・質問期限平成4年3月31日)