

食パンのレオロジに関する基礎的研究 (第4報)*

— クラムのクリープ試験と粘弾性モデル —

王 益平**・森嶋 博**・瀬尾 康久**

相良 泰行**・芋生 憲司**

要 旨

食パンの保存中における粘弾性特性の経時変化を把握するために、まずクラムを対象としたクリープ試験から再現性のある結果を得るための標準的載荷条件を実験的に明らかにした。次にこれらの条件下で得られた典型的クリープ曲線に基づく粘弾性挙動を理論的に表現するために、4要素モデルを適用し、各粘弾性係数を求めた。これらの係数には異方向性が認められ、生地成形法などによっても影響を受けることが分かった。更にこれらの粘弾性係数はいずれも焼成後の経過時間に比例して増大する傾向を示し、特に焼成後12時間までの変化速度が大きく、また保存温度が低温であるほど大きくなることを明らかにした。

Studies on Rheology of White Bread (Part 4)*

— Viscoelastic Characteristics of Crumb —

Yiping WANG**, Hiroshi MORISHIMA**, Yasuhisa SEO**,

Yasuyuki SAGARA** Kenji IMOU**

Abstract

Viscoelastic characteristics have been investigated for white bread by means of compressive creep test with special reference to their dependences on storage time and temperature as well as moulding method of dough.

An optimum loading condition for crumb samples was established experimentally, and a four-element mechanical model appeared to be appropriate for describing the viscoelastic behavior of crumb. The viscoelastic coefficients of the model were determined by a simple graphic method.

Anisotropy was observed among those coefficients depending on the directions of compression or stress. All of the coefficients increased with increasing storage time, indicating marked change within 12 hours after baking, and with decreasing storage temperature. The coefficients were also affected by the moulding methods of dough.

[Keyword] white bread, rheology, creep test, mechanical model, anisotropy, viscoelastic coefficient, storage temperature

* 平成2年8月農業機械学会第26回関東支部年次大会
(全農農業技術センター)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, 113 Japan

I 緒 言

著者らは食パンの弾性、粘弾性及び破壊特性などの力学的性質をレオロジーの観点から究明することを目的とし、コントロールした製パン・測定条件下で一連の実験検討を行い、その結果を報告した^{1)~3)}。ここでは、食パンの圧縮力-変形率曲線の特徴を明らかにし、クラムが力学的異方体であることを指摘すると共に弾性領域における比例限界、等価ヤング率及び等価ポアソン比などの物性値を求めた¹⁾。更に成形方法、ローフの比容積、焼成温度と焼減率などの製パン条件、保存温度条件とクラムのかたさ及び経時変化に関する定量的データを報告したほか²⁾、測定時の変形速度・プランジャのサイズ及び形状などの測定条件、水分の変化やクラストの有無などの試料状態について検討を行った³⁾。

一般に食品の粘弾性特性は品質の評価や構造・成分などの状態変化に関連する基礎的指標として重要視されている⁴⁾。多くの食品は多成分を含む不均一な粘弾性体と考えられ、その特性に関する研究が数多くみられる。例えば、食品ゲルのレオロジー特性、クリープと応力緩和、動的粘弾性などの測定法や非線形の力学モデル⁵⁾⁶⁾、ゼリー状食品⁷⁾、脂肪性食品⁸⁾、ケーキ類⁴⁾⁹⁾のレオロジカルな性質、米飯及び餅に関するもの¹⁰⁾などがその例である。

しかし、食パンの粘弾性については、クラムの粘弾性測定¹¹⁾¹²⁾など幾つかの研究にとどまり、その粘弾性挙動に関する資料は数少なく、またクラムの粘弾性を測定解析する方法も確立されていない現状にある。

本報では、まず比例領域におけるクラムのクリープ試験において、安定した測定結果を得るための標準的载荷条件を実験的に明らかにした。次にこれらの測定条件に基づく粘弾性挙動を理論的に表現するために、4要素モデルを適用し、各々の粘弾性係数を求めた。またローフの保存中における老化の特性をレオロジー的観点から検討するために、各要素の粘弾性係数について、その経時変化を求めた。更に、クラムの力学的異方性、保存温度及び生地成形方法などの諸条件が粘弾性係数に与える影響について検討を行った。

II 実験方法

(1)供試材料；中種法により角形食パン¹⁾を標準的焼成条件（焼成温度230°C，焼減率10%で焼成し，1時間半自然放冷した後，ポリエチレン袋に包装して約20°Cの恒温室に保存した。この食パンを使い，ローフ（16cm×8cm×8cm）の中心部から切り出した4cm×4cm×4cmのクラム・ブロック（図1）をクリープ試験の供試サンプルとした。試料の形状や切断面の性状が測定値に与える影響をできるだけ小さくするように試料の作成精度に留意したが，サンプルを立方体に仕上げることが難しく，実際供試したクラム・ブロックの各辺は4.0~4.2cmであった。クラムの圧縮方向は図1に示す3方向であり，本稿ではX方向を長手方向，Y方向を横方向，Z方向を垂直方向と

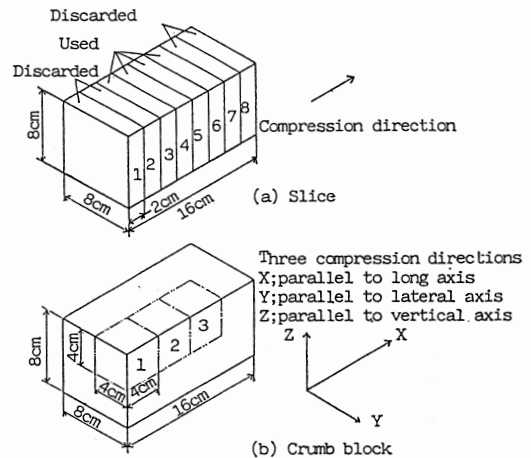


図1 サンプルと測定方向

Fig.1 Samples and the measuring directions

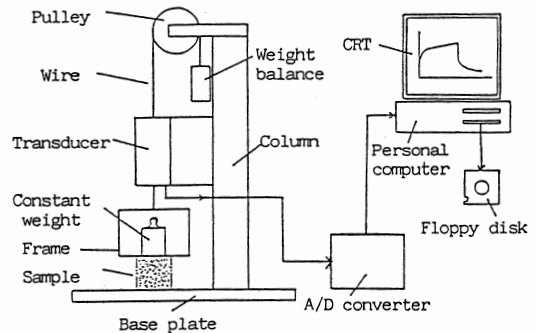


図2 クリープ装置

Fig.2 Diagram of the creep measuring system

称することにした。

(2)試験装置；クリープ試験は一定応力下における歪の変化を観る実験と定義されるが、本実験では近似的に一定荷重下におけるサンプルの変形量を測定した。このために試作したクリープ試験装置を図2に示した。この装置はサンプルに静荷重を加えないとき、ウェイトバランスにより載荷フレームが任意の位置に安定する機構を有している。クリープ試験では分銅により静荷重を加えてサンプルに一定量の変形を与え、その圧縮変形量を差動トランス（新光電子製 DCP 10 LTH）で検出し、A/D変換器（カノーブス製 ADT-98E）を介して、データをマイクロコンピュータ（NEC製 PC 9801 UV）に転送した。測定結果はCRT上に図示するとともにフロッピディスクに格納した。装置の摩擦力は主に差動トランスの心棒によるもので、約 1.47×10^{-2} N程度である。

クリープ試験は、温度変化が少なく（ $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ）、無風状態の室内で行った。また、測定中に試料が乾燥して変性するのを避けるため、測定装置全体をプラスチックカバーで覆い、測定装置付近において加湿器で周囲空気の湿度をほぼ一定に保つように配慮した。一連の測定は焼成後12時間までは2時間毎に、その後24時間毎に、7日間（168時間）行った。

III 実験結果及び考察

1. 荷重と歪量及び測定時間

測定条件のうち、特に荷重・変形条件はクラムのクリープ測定を線形領域において行うのに予め設定しておかなければならないファクタである。この条件を以下に示す手順で実験的に設定した。

(1)初期荷重；クラムを供試する場合、フレーム載荷面の接触開始時にサンプル表面に接触破壊が生じ、またサンプルの作成精度に依ってはサンプル表面と載荷面とを均一に接触させることが困難であった。このため、載荷直後に不安定な変形量が検出された¹⁾。この問題を排除・軽減するため、試料とフレーム載荷面との接触条件を一定に維持するために初期荷重（5g）を加えることにした。

(2)最大歪；予備実験の結果、初期試料厚みの6～12%の範囲では応力と歪はほぼ比例関係にある

ことが分かった。また、食パンは多成分を含む不均一な構造を有し、一定荷重に対する試料の変形もその採取部位により異なるため、最大歪量を一定値に設定することは不可能であった。これらの理由から、本実験では最大歪量を上記の範囲に採ることとした。

(3)荷重 クラムは保存中に次第に硬化するため^{1)~3)}、試料に同一の変形を与えるためには、焼成後の経過時間に対応して静荷重を変える必要があった。更に、上に述べたようにクリープの最大歪を応力との比例範囲に設定したため、静荷重は結果的に0.49～3.92Nの範囲となった。

(4)測定時間；クリープ試験における測定時間は応力・歪の設定と同等に重要である¹³⁾¹⁴⁾。特に食品材料では、測定時間が短かすぎると、その性質は完全に現れない場合がある。逆に測定時間を長くすると試料の自重による変形や乾燥などによる変性を招く等の問題を生じている。通常測定時間の設定にあたっては、できるだけ短い測定時間の範囲で、定常流動部（ニュートン流体と同様に変形が一定速度で増大する部分）の継続時間が測定時間の1/2以上になるようなクリープ曲線が得られるように考慮することが望ましい¹⁴⁾。予備実験により得られたクリープ曲線を観察した結果、大部分の曲線が測定開始後の約40秒（図3参照）から定常流動部を示すことから、測定時間を100秒に設定した。

2. クリープ曲線

上記の荷重・変形条件に基づき行ったクリープ試験の実験結果から、クラムのクリープ曲線には一般に瞬間変形部、遅延変形部及び定常流動部と称されている三つの領域が含まれていることが明らかになった。その代表的なクリープ曲線を図3に示す。図中のab部分は瞬間変形部で、試料はこの区間においてフックの法則に従う弾性的挙動を示す。区間cdは定常流動部であり、試料はニュートン流体と同様に、時間に比例した歪の増加を示す。残りの区間bcは遅延変形部であり、この領域では粘性と弾性の複合作用による挙動が示される。

これと同様な結果は食品ゲル⁵⁾、ゼリー食品⁷⁾及び脂肪性食品⁹⁾について報告されているが、各領域が全変形量に占める割合はそれぞれの食品で

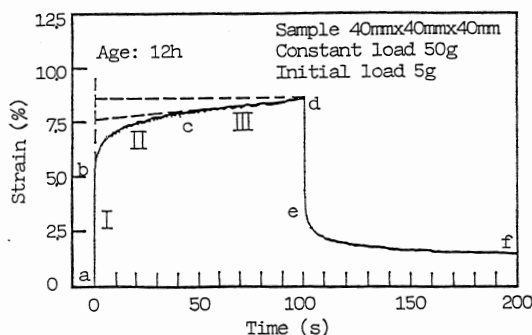


図3 クラムの代表的なクリープ曲線
Fig.3 A typical creep curve of bread crumb

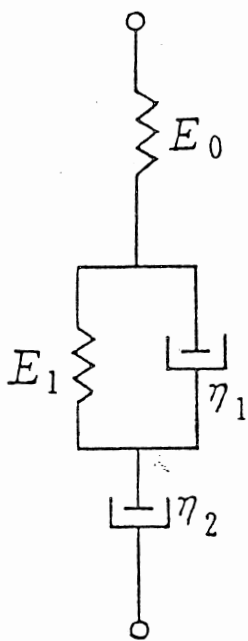


図4 4要素モデル
Fig.4 Four-element model

異なる。クラムの瞬間変形部は全変形量の約64%に相当し、遅延変形部は約24%、定常流動部は約12%を占めるが、この瞬間変形部はゼリー食品の約50%などに比べて大きな割合を占めることが分かった。

3. 力学モデル

クラムのクリープ挙動を図4に示した4要素モデル (Barger モデル) で表現することを試みた。一定の静荷重 (応力) を4要素モデルに加えると、

弾性係数 E_0 のスプリングは瞬間に縮み、次いで中間のスプリング (E_1) とダッシュポット (η_1) を含む要素の変形が徐々に起こり、遅延弾性もしくは弾性余効の現象が現れる。その後、ダッシュポット (η_2) は一定速度でゆっくり縮み始める。载荷後100秒が経過して荷重が除去されると、スプリング (E_0) は直ちに伸びる。その後、中間のスプリングとダッシュポットは徐々に回復し始める。一方、ダッシュポット (η_2) の流動による変形は完全に回復せず残留変形として残る。このようにクラムのクリープ試験における粘弾性挙動は4要素モデルでほぼ完全に記述されるものと考えられた。

一定応力を σ_0 、測定時間を θ とすると、クリープ歪 ε は次式で表される。

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \{1 - \exp(-\frac{\theta}{\tau_{kv}})\} + \frac{\sigma_0}{\eta_2} \theta \quad (1)$$

ただし、 τ_{kv} は遅延時間で、 η_1/E_1 で定義される。この式に含まれる各要素の粘弾性係数を決定するために、逐次残差法及び簡便グラフィック解析法*

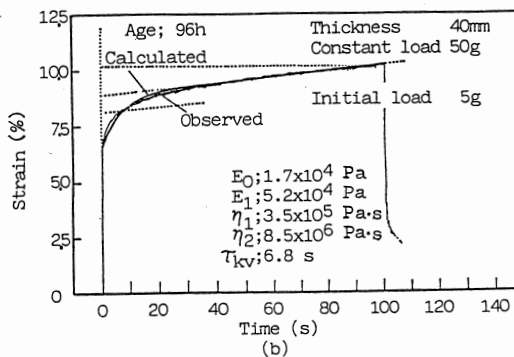
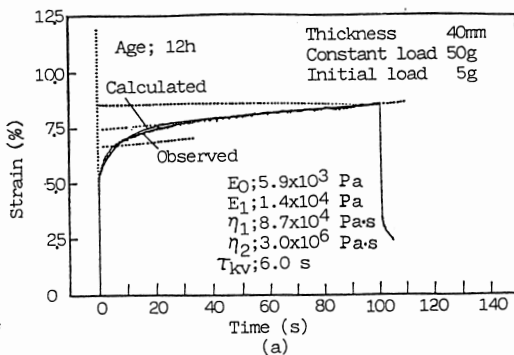


図5 4要素モデルによるカーブフィッティング
Fig.5 Curve fitting by four-element model

*簡便グラフィック解析法の概略をコメント欄に紹介した。

¹⁴⁾を用いて、それぞれの方法の解析精度を検討した結果、解析法の難易度と精度の面で後者の方法が有利であることが分かった。

図5はクリープについて4要素モデルによる簡便グラフィック法の解析結果を実測結果と比較して示したものである。(a)は焼成後12時間、(b)は焼成後96時間の例である。また、図中に各要素の粘弾性係数を示した。図に示されるように、前述したクリープ曲線の三つの部分の挙動は4要素モデルにより良好に再現され、すべての試料に対して全領域の相対誤差を3%以下に納めることが可能であった。

4. 粘弾性係数とその経時変化

図6の(a)、(b)は棒状成形して焼成後20°Cで保存した食パンのクラムについて、保存期間中における長手(X)方向の瞬間弾性係数 E_0 及び粘性係数 η_1 の経時変化をそれぞれ示したものである。図中のプロットは10個以上のデータの平均値、実線はその一次回帰直線である。ここに図示した係数に限

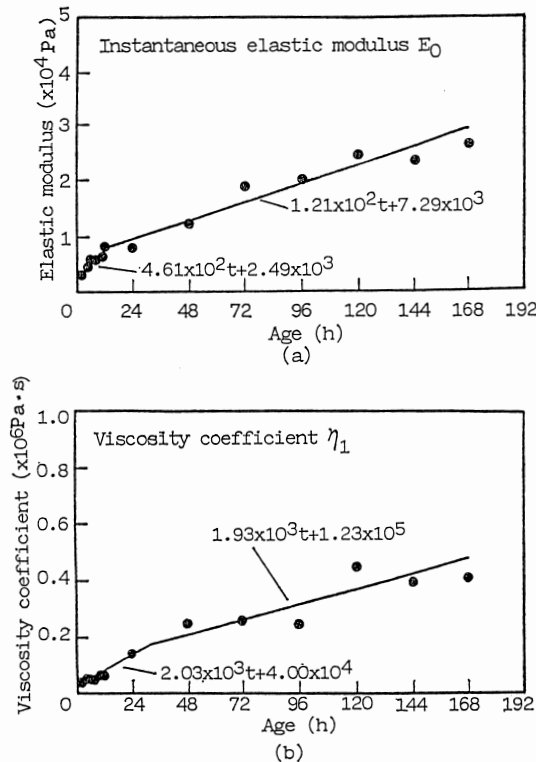


図6 保存中における粘弾性係数の経時変化
Fig.6 Change of the viscoelastic coefficients during storage

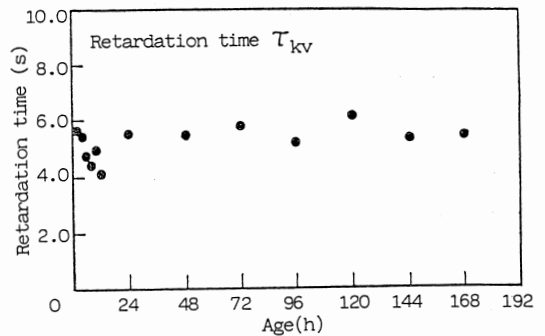


図7 保存中における遅延時間の経時変化
Fig.7 Change of the retardation time during storage

表1 クラムの粘弾性係数

Table 1 The viscoelastic coefficients for bread crumb

Viscoelastic coefficient	Value
E_0 (Pa)	$3.4 \times 10^3 \sim 2.6 \times 10^4$
E_1 (Pa)	$0.8 \sim 8.5 \times 10^4$
η_1 (Pa·s)	$4.0 \times 10^4 \sim 4.1 \times 10^5$
η_2 (Pa·s)	$1.6 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^7$

らず、粘弾性係数はいずれもローフ保存中の老化が進行するのに伴って増大する傾向を示し、その変化はいずれも焼成後12時間までとそれ以降のデータに対する2本の回帰直線で近似できると考えられた。回帰式のtの係数に示されるように粘弾性係数は焼成後12時間まではそれ以降の約3.8倍の増加速度で急増する傾向にあり、この傾向は破壊特性の場合²⁾³⁾と同様に焼成直後の硬化が著しいことを再度裏付ける結果となった。

表1に焼成後168時間以内における粘弾性係数の変化の範囲を示す。また、図7は遅延時間 τ_{kv} の経時変化を示したものであり、全保存期間においてほぼ一定で6秒前後であることが分かった。

表1より弾性係数 E_1 は瞬間弾性係数 E_0 より大きく、定常流動部の粘性係数 η_2 は粘性係数 η_1 より大きい値を示す。この傾向は寒天ゲル、卵白ゲル及び大豆蛋白ゲルなどのゲル状食品の場合⁶⁾にも見られる。また、表1に示した範囲において、全ての粘弾性係数は保存中において増大することにより、クラムは触感としては硬くなることを意味している。このような粘弾性係数の変化は食パ

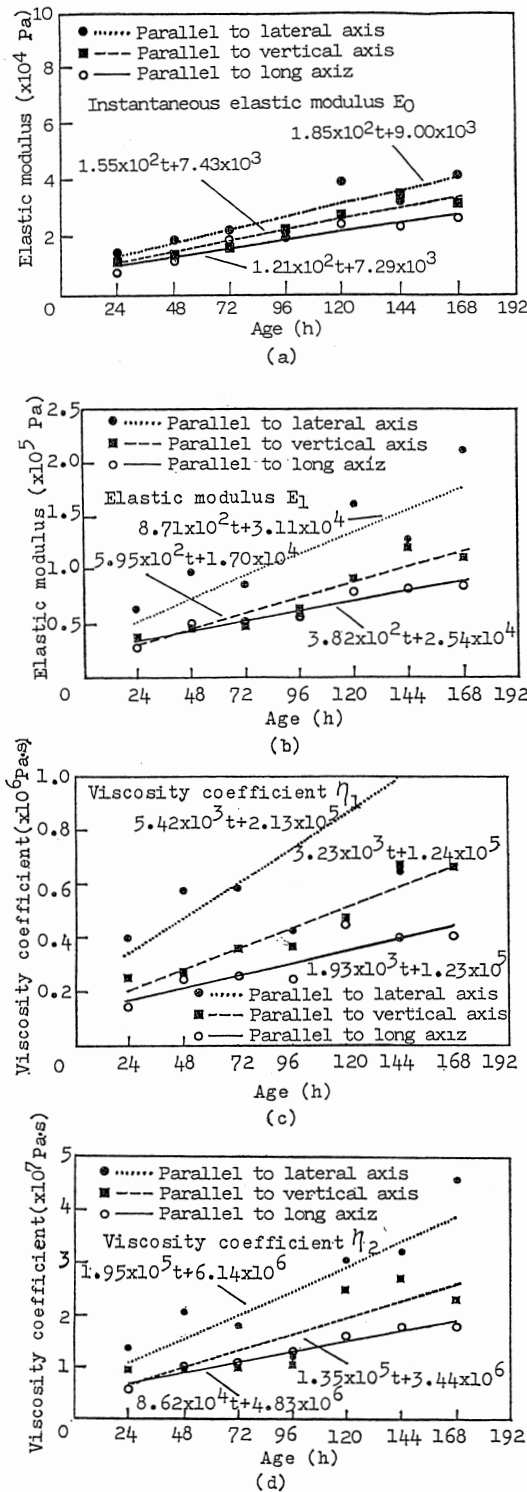


図8 測定方向が粘弾性係数に及ぼす影響
Fig.8 Effect of the measuring direction on the viscoelastic coefficients

ンの老化に伴う硬化程度を反映したものと考えられる。

5. 測定方向の影響

図8は図1に示した三つの異なる方向から荷重を加えてクリープ試験を行い、粘弾性係数がいずれも応力の方向に依存することを示したものである。図中のプロットは6個以上のデータの平均値、実線はその一回帰直線である。後に示す図9、10のプロットも同様である。図示されるように、クラムの粘弾性係数は応力の方向により異なる値を示し、その大きさはすべて横(Y)方向、垂直(Z)方向及び長手(X)方向の順であることが分かった。ここでもクラムの力学的異方性が確認された。この異方性の存在は第1報¹⁾の弾性に関する報告でも確認されているが、両者には若干異なる傾向がみられた。すなわち、弾性係数は垂直(Z)、横(Y)および長手(X)方向の順に大きい値を示した。

以上の結果より、クラムの粘弾性特性には力学的異方性が認められたほか、粘弾性の観点からみたクラムの挙動は弾性の観点から見たときと若干異なることが考えられた。

6. 保存温度の影響

図9は保存温度5°C、13°C及び20°Cについて、保存温度がクラムの粘弾性係数に与える影響をみるため、長手(X)方向の粘弾性係数の経時変化を示したものである。図示されるように、5~20°Cの範囲では、保存温度が低いほど各粘弾性係数は大きな値を示す傾向にあった。

クラムの保存中における粘弾性係数の増大、すなわち硬化は主としてでんぷん中のアミロースとアミロペクチンの結晶化に起因し、その速度が保存温度の低下により促進される¹⁵⁾ためと考えられている。食パンの低温保存はクラムのやわらかさを保つには不利であることが、破壊特性³⁾の点からも粘弾性特性の点からも確認された。

7. 成形方法の影響

生地の成形方法が粘弾性係数に及ぼす影響を実測するために、棒状(one-loaf)、N状(N-shape)及びツイスト状(twist)²⁾の成形試料を対象にしたクリープ試験を実施した。その結果の一例として瞬間弾性係数E₀の経時変化を図10に示した。前にも述べたように、E₀に限らず全ての粘弾性係数は保存時間の経過につれて増大する傾向を示し

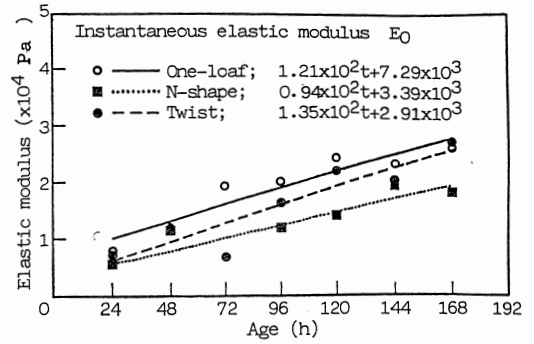
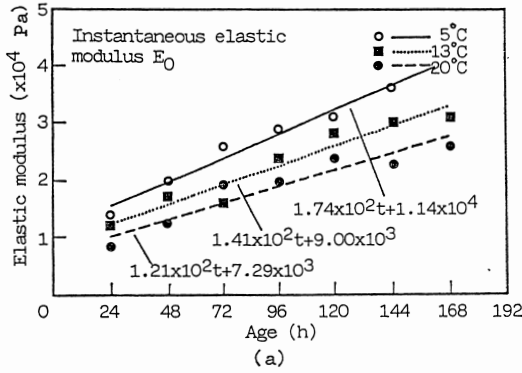
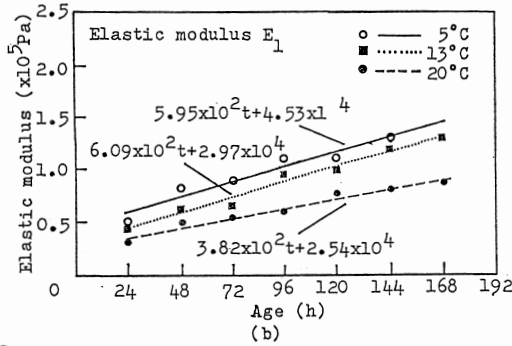


図10 成形方法が弾性係数に及ぼす影響

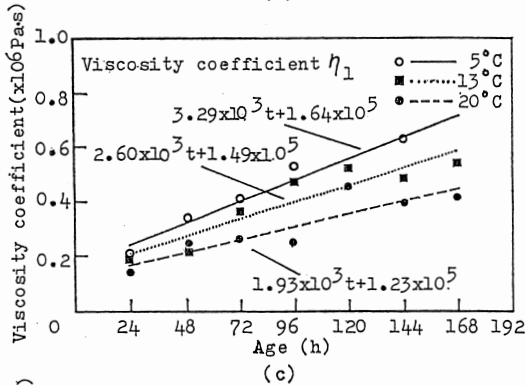
Fig.10 Effect of the moulding method on the elastic modulus



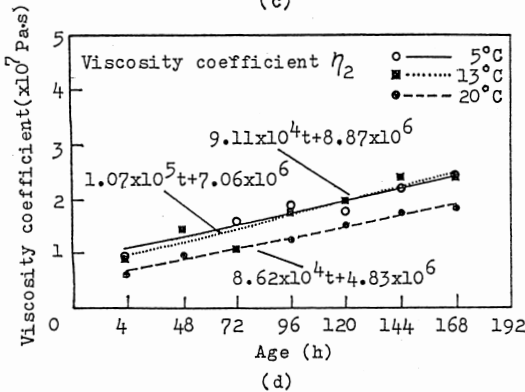
たが、さらに棒状・ツイスト状・N状の順に大きい値を取ることが分かった。この原因はクラム中のポアの形状や分布が成形方法によって異なり、外力に対する挙動も異なるためと考えられた。ここで用いた3種類の成形法の中で、N状成形は弾性に富みソフトな食パンを得るのに有利であることが示された。

IV 摘 要

クラムの粘弾性特性の測定方法を確立することと、保存中における粘弾性係数の経時変化を把握することを目的とし、クリープ試験と解析を行った。その結果を以下に要約する。



(1) 比例領域においてクラムのクリープ試験を行うための測定条件として、クリープの全歪を6~12%の範囲とし、焼成後の経過時間によって応力を300~2500Paの範囲に選び、荷重継続時間を100秒に設定した。また、サンプルの接触破壊や作成精度による影響を軽減するため、初期荷重を加える方法を提唱した。



(2) クラムのクリープ曲線には瞬間変形部、遅延変形部及び定常流動部の三つの部分が含まれ、クラムは粘弾性挙動を示すことが確認された。瞬間変形部は全変形量の約64%を占め、遅延変形部は約24%、定常流動部は約12%の程度であることが分かった。

図9 保存温度が粘弾性係数に及ぼす影響
Fig.9 Effect of the storage temperature on the viscoelastic coefficients

(3) クラムの粘弾性挙動を簡便グラフィック解析法を用いた4要素モデルで表現し、良い適合性を得た。各要素の粘弾性係数は焼成後の経過時間に比例して増大し、特に焼成後12時間までの増加

が著しい。

(4) 粘弾性係数は測定の方角によって、ローフの長手方向、垂直方向、横方向の順に大きくなる傾向にあり、クラムの粘弾性係数に異方性が存在することが認められた。

(5) 粘弾性係数は保存温度に依存し、5~20°Cの範囲では、保存温度が低いほど、大きくなる傾向を示した。また、生地成形方法も粘弾性係数に影響を与えることが分かり、N状成形で焼成した食パンの粘弾性係数は棒状及びツイスト成形のものに比べて小さな値を示した。

参 考 文 献

- 1) 王 益平, 森嶋 博, 瀬尾康久, 相良泰行, 芋生憲司: 食パンのレオロジーに関する基礎的研究(第1報)——クラムの圧縮性と弾性係数——農機誌54(1), 73—80, 1992
- 2) 王 益平, 森嶋 博, 瀬尾康久, 相良泰行, 芋生憲司: 食パンのレオロジーに関する基礎的研究(第2報)——かたさ及び製パン条件の影響——農機誌54(2), 75—82, 1992
- 3) 王 益平, 森嶋 博, 瀬尾康久, 相良泰行, 芋生憲司: 食パンのレオロジーに関する基礎的研究(第3報)——ローフの保存中における含水率変化及び測定条件が圧縮破壊特性に及ぼす影響——農機誌54(3), 69—76, 1992
- 4) Muller H. G.: An introduction to food rheology, Heinemann, London (Japanese edition, Matsumoto S.), 1—16, 1973
- 5) 中浜信子: 調理におけるレオロジー的研究, 家政学雑誌, 23(1), 18—26, 1972
- 6) 磯崎初恵, 赤羽ひろ, 中浜信子: 寒天ゲルの粘弾性(クリープと応力緩和), 日本農芸化学会誌, 50(6), 265—272, 1976
- 7) 茂木美智子: セリー食品のテクスチャーについて, 調理科学, 8(1), 28—35, 1975
- 8) 種谷真一: やさしいレオロジー工学, 工業調査会, 43—72, 1990
- 9) 越智知子: スポンジケーキの物性, 調理科学, 22(2), 84—93, 1989
- 10) 加藤寿美子: 米飯の力学的性質, 食品の物性第2集(松本幸雄), 食品資材研究会, 59—75, 1976
- 11) Lasztity R.: Rheological studies on bread at the Technical University of Budapest, Journal of Texture Studies, 11, 81—115, 1980
- 12) 呉 計春: 食パンの焼成プロセスに関する基礎研究, 東京大学農学部博士論文, 72—112, 1988
- 13) Mohsenin N. N.: Physical properties of plant and animal materials (Volume I), Gordon and Breach Science Publishers, 88, 1970
- 14) 赤羽ひろ, 中浜信子: 調理におけるレオロジー測定(その1), 調理科学, 21(4), 245—254, 1988
- 15) 久下 喬: デンプンの構造と物性, 食品の物性第3集(松本幸雄), 食品資材研究会, 109—123, 1977

(原稿受理平成3年4月4日・質問期限平成4年9月30日)

＜新しい出版物＞

アクティ21

“農園芸におけるテクノフュージョン”

(アクティ21内のROBIA, BIHAT, BIONIER, および園芸学会小集会「園芸学におけるコンピュータ利用」・「若手の会」の合同ミーティング資料)

編集・発行 農業機械学会 平成4年4月5日
 編集者代表 堀端治夫, 山崎 稔
 造 本 B5版 40頁
 定 価 1,500円(送料込)

内 容

- | | | |
|---------------------|----------|-------|
| 1. 移植の機械化に求められるものは? | 農業研究センター | 大塚 寛治 |
| 2. 低圧力下での植物生育 | 東京大学農学部 | 後藤 英司 |
| 3. 果実の追熟の自動化について | 東京大学農学部 | 川越 義則 |
| 4. 園芸学におけるモデリング手法 | 静岡大学農学部 | 狩野 敦 |