

## 2. 製造技術・品質評価法の動向

## 2.1 食パンの破断特性および粘弾性計測法

## Measuring Methods for Breaking and Viscoelastic Characteristics of White Bread

キーワード：食パン，粘弾性，圧縮，クリープ，標準試験法  
White bread, Viscoelastic property, Compression, Creep, Standard testing method

相良 泰行\* Yasuyuki SAGARA

## 1. はじめに

一般に食品の力学的物性は品質評価と管理，特にテクスチャーとの関係において重要と考えられ，数多くの研究がなされてきた．その中でも本稿で対象とした食パンについては，クラムの硬さ測定に関する研究<sup>1-5)</sup>が挙げられる．しかし，硬さの定義や測定条件が研究者によって異なるため，必ずしも一般性を持つ測定結果が得られているとは限らない．また，粘弾性特性については，レオロジーの理論に基づいて研究した例は数少なく，食パンの力学的性質は系統的に把握されていない現状にある．

筆者らは食パンの弾性，破壊特性および粘弾性などを明らかにすることを目的とし，コントロールした製パン条件下で作成した試料を対象として，一連の圧縮破壊試験を行い，圧縮力-変形率曲線に基づく力学的性質とその保存中における経時変化を明らかにした．次に，製パン条件（成形方法，ローフの比容積，焼成温度および焼減率）や保存温度条件および試料の状態（含水率やクラムの有無）などとクラムの力学的性質を明らかにしたほか，測定条件（変形速度，プランジャーのサイズと形状）について，標準的測定法を確立する観点に立って検討を行った．さらに，クラムの比例領域におけるクリープ試験曲線に4要素粘弾性フォークトモデルを適用して粘弾性係数の値を求めた．本稿ではこれらの研究成果について，その要点を概説する．

なお，食パン焼成プロセスに関する移動速度論的考察や<sup>12)</sup>，食品を対象とした機器計測データから人が感じるテクスチャーの官能評価スコアを予測する方法などについては，これまでに本誌「最新食品工学講座」の「食感性工学」<sup>8-11)</sup>に関する講座として紹介しているので参照されたい．

## 2. 製パン法と圧縮試験装置

製パン法には大規模生産プラントで標準的に用いられ

ている中種法を採用し，得られた角形食パンを供試材料とした．表1に小麦粉を100%とした場合の原料配合割合を，図1には製パンプロセスの流れ図を示す．この中で，生地成形には棒状（One-loaf），N状（N-shape）およびツイスト状（Twist）成形の3種類の方法を採用した（図2）．

表1 標準的原料配合割合

原料	%
小麦粉 (12.5% タンパク質)	100
水	68
イースト	2
イーストフード	0.1
塩	2
砂糖	6
脱脂粉乳	2
ショートニング	3

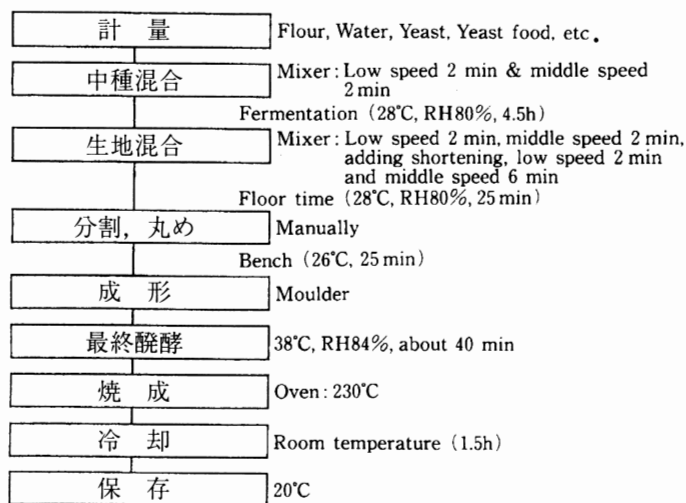


図1 食パン焼成プロセス（中種法）

\* 東京大学 大学院農学生命科学研究科 農学国際専攻  
Dept. of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Life and Agricultural Sciences, The University of Tokyo  
原稿受理 2005年3月14日

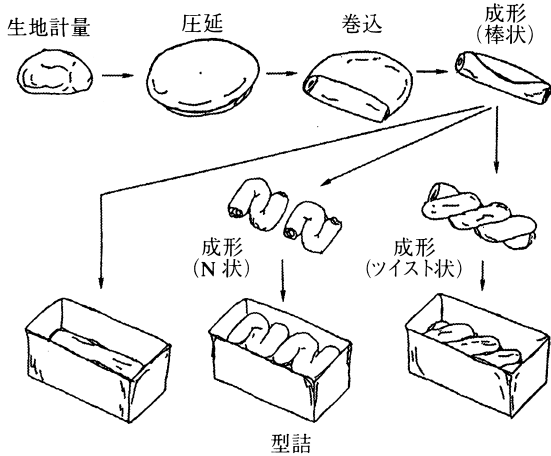


図2 3種類の生地成形法

圧縮試験に供したローフのサイズは16×8×8cm(小型, 生地質量260g)と21×9×9cm(中型, 生地質量430g)の2種類とし, 標準焼成条件を焼成温度230℃, 焼減率(生地の初期質量に対する焼成中の水分質量減少率)10%として, 1ロット当たり6~12本のローフを焼成した。焼成後のローフを1.5h放冷後, ポリエチレン袋に包んで20℃の恒温室に保存し, 物性測定に供した。

図3に2種類のサンプル, すなわちクラム・スライスおよびブロックの採取部位とその圧縮方向を示す。焼成したローフの比容積は約 $3.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ であり, 市販のものとはほぼ同様である。クラムの気孔率はクラムの容積をノギスで測定後, 円筒状の容器に入れてピストンにより気孔率が0%となるまで圧縮し, 圧縮前後の容積差から算出した。ポアソン比はクラム・ブロックの圧縮による変形量を読み取り顕微鏡で測定することにより算出した。含水率は試料を65℃で6h調整後, 105℃3hの炉乾法で測定した湿量基準含水率(単位% w.b.)に相当する。圧縮試験は図4に示す, 一般にレオメーターと称されている汎用測定装置を用い, 変形速度を5mm/sに設定して圧縮力をロードセルで検出した。

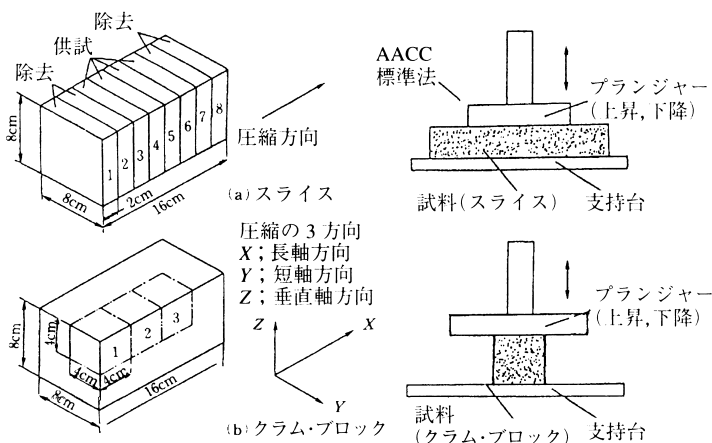


図3 サンプルの採取部位と圧縮方法

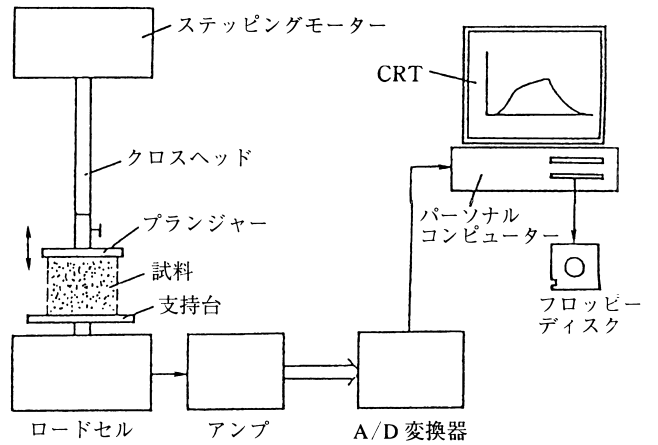


図4 圧縮試験装置

### 3. 圧縮力-変形率曲線

図5は直径55mmの円形プランジャーを用いて, 圧縮速度5mm/sでクラム・ブロックを圧縮して得られる典型的圧縮力-変形率曲線を示す。この曲線の初期部分ab(I)は載荷直後の不安定な状態を示し, この部分の曲線はサンプルとプランジャーの両表面間の接触状態により影響を受ける。すなわち, 両表面の平行度およびサンプル表面の凹凸などによる部分的接触破壊などにより影響を受けていることが観察される。この期間を過ぎて比例段階bc(II)に至ると(変形率4~12%), 試料は弾性的挙動を示す。変形率が約40%に至る次の区間cd(III)では, 曲線の勾配が小さくなり, クラムの空隙を構成する固相の網状マトリクスが変形して次第に破壊されるため, この区間をコラプス段階と称することになっている。変形率がさらに大きくなると圧密段階de(IV)に至り, ここでは空隙が消滅して組織が高密度化され, これを圧密するために必要な圧縮力は急激に増大する。これらの挙動は口腔内でクラムを1回だけ噛んだとき, すなわち1バイト(bite)の応力-歪みの関係を表わしているものと考えられる。

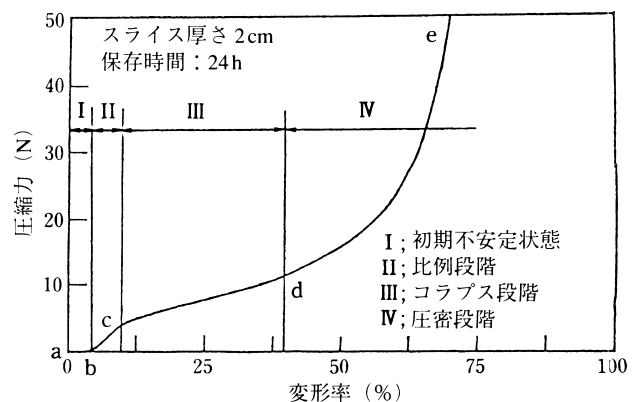


図5 食パンの典型的圧縮力-変形率曲線

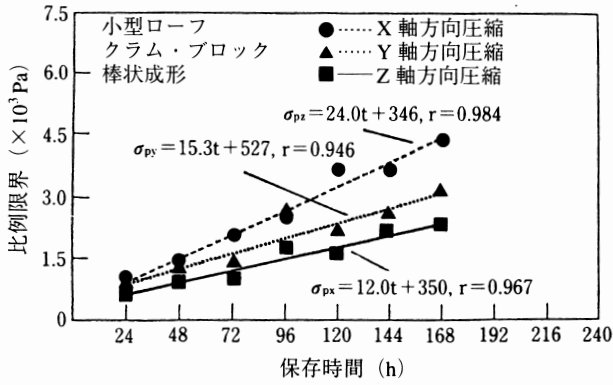


図6 クラム保存中における比例限界値の経時変化

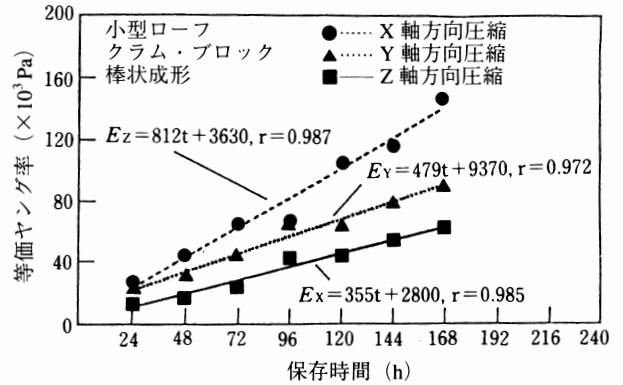


図7 クラム保存中における等価ヤング率値の経時変化

## 4. 弾性係数

### 4.1 比例限界

比例限界、等価ヤング率および等価ポアソン比などの弾性に関するパラメーターは、前節の方法によって得られた圧縮力-変形率曲線(図5)のステージIIにおいて求めた。比例限界には同曲線の勾配が変化し始めるc点を採用した。図6に圧縮方向をパラメーターとし、保存中における棒状成形クラムの比例限界 $\sigma_p$ の経時変化を示す。図中のプロットは4個のサンプルに対する実測値の平均値を示し、直線はその一回帰直線である。比例限界は保存時間の経過に伴って次第に大きい値をとるが、圧縮方向によっても異なり、ローフの長手(X)、左右(Y)および上下(Z)方向の順に大きい値を示すことが分かる。

また、N状成形のローフから得られたサンプルについても、棒状成形のものと同様の傾向が観られた。全体的にみて、これらのサンプルの比例限界は $(0.3 \sim 4.5) \times 10^3 \text{ Pa}$ の程度であることがわかった。

これらの結果から、焼成後の保存時間が長くなると、同じ変形をクラムに生じさせるのに必要な圧縮力は次第に大きくなり、すなわち触覚では食パンが硬く感じられ、また、焼成直後のローフに生ずる力学的異方性は、保存期間を通じて存続し、保存期間に依存して顕著になることがわかった。

### 4.2 等価ヤング率

棒状成形ローフから得られたサンプルの等価ヤング率Eの経時変化を図7に示した。図中のプロットは4個の実測値の平均値で、直線はその一回帰直線である。ただし、この計算ではサンプル中に圧縮方向の応力のみが存在するものと仮定した。また、圧縮時のサンプル横断面の面積変化の割合は初期面積の2%前後と推定され、等価応力の変化も2%前後に過ぎなく、等価ヤング率に与える影響は小さいと考えられたため、この変形量を無視した。

図に示したように、等価ヤング率は保存時間の経過につれて増大し、その値の大きさもZ方向、Y方向、X方向の順序であることがわかった。また、N状成形ローフの等価ヤング率も棒状成形のものと同様な傾向を示すが、比較的広い範囲の値を示すことが認められた。

本研究では大きさの異なる2種類のローフについて、等価ヤング率 $(0.5 \sim 15) \times 10^4 \text{ Pa}$ を得たが、この値はMuller<sup>7)</sup>らの報告値 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ と良好に一致し、また工業材料のフォーム・ラバーの $10^4 \text{ Pa}$ に相当する。

### 4.3 等価ポアソン比

焼成後48h経過したクラムの等価ポアソン比の値を図8に示す。この図では、縦軸に等価ポアソン比の値を、横方向にポアソン比の種類を示している。図中の数値は実測値の平均値(mean)と標準偏差値(SD)を示している。各々の等価ポアソン比の測定値は0.03~0.31の範囲に分布した。これらのデータに対する分散分析の結果、これら6種類の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、ここでもクラムが異方性体であることが確認された。

Muller<sup>7)</sup>は弾性範囲内の圧縮において、食パンのような組織では圧縮方向に対する直角方向の変形が観られ

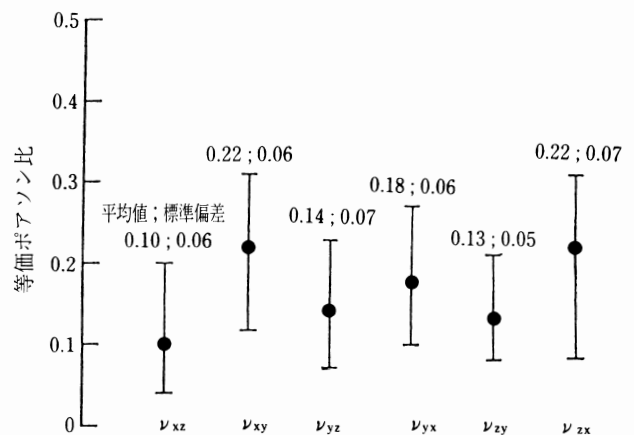


図8 6種類の等価ポアソン比

ず、ポアソン比も0.0であると報告している。しかし、本研究ではクラムが圧縮方向に直交する方向、つまりローフの横断面方向に膨張することを定量的に確認しており、精密には食パンローフの等価ポアソン比は0.0とはなりえないといえる。

## 5. 硬さに影響を及ぼす製パン要因

### 5.1 硬さと破壊エネルギーの定義

本研究では厚さ2cmのスライス(図3(a))をサンプルとして、変形率25%における等価応力を硬さ(Firmness:  $F$ )、この硬さの定義点に達するまでに必要なエネルギーを破壊エネルギー(Breaking energy:  $E$ )とそれぞれ定義した。この定義はBaker<sup>2,3)</sup>らの提案でもあるが、筆者らの計測結果からも、すべてのサンプルについて、変形率25%の点は例外なく圧縮力-変形率曲線のコラプス段階にあることが確認された。したがって、ここで採用した定義点はテクスチャーの指標としての意味を持つことになると考えられる。

図9に硬さ $F$ と破壊エネルギー $E$ のローフ保存中における経時変化を示した。なお、この図以降、図中のプロットは10個以上の実測値の平均値であり、その回帰直線を示している。この図に示されるように、硬さと破壊エネルギーは、いずれも焼成後12hまでとそれ以後との2本の回帰直線で近似された。また、回帰直線式の時間 $t$ の係数に示されるように、焼成後12hまでの硬さと破壊エネルギーは、それ以後の3.5倍以上の増加速度で急増する。硬さを例にとれば、焼成後12h以内の硬化量は全保存期間における硬化量の1/5にも相当する。

これらの結果から、食パンの軟らかさを保つためには、焼成後のできるだけ早期に、何らかの処理方法を適用することが必要と考えられる。

### 5.2 成形方法

図2に示した3種類の生地成形法がローフの硬さに及ぼす影響を測定した結果、いずれの成形法を用いても、

ローフは焼成後の経過時間の増大につれて硬くなり、その長手方向に沿って硬さの分布が認められた。図10は48h保存した中型ローフについて、横軸にスライス番号(図3)をとり、成形法ごとにローフ長手方向の硬さ(圧縮力)分布を示した例である。棒状およびツイスト状成形のローフはN状成形に比べて硬い傾向にあり、また、中央部が両端部より硬い傾向を示すことがわかった。

他方、クラム中心部の気孔率はローフ長手方向にほぼ一定の値(84%)を示した。この結果より、スライスの硬さは成形法により形成されるポアの形状や分布にも依存する傾向が実測された。ポアの形状や分布を含むローフ組織の幾何学的構造と硬さなどの力学的パラメーターの関係については、機器測定結果とテクスチャーの相互関連性を明らかにする上で貴重な情報を提供するものと考えられ、今後、両者間のデータ解析モデルに関する研究の進展が期待されている<sup>8-11)</sup>。

### 5.3 ローフ比容積

同一の焼き型(16×8×8cm)に詰める生地の量を、標準量(260g)とその前後(220g, 300g)の3段階に変えて異なる比容積のローフを焼成し、保存期間中のローフ比容積と硬さ $F$ の関係を測定して図11に示した。こ

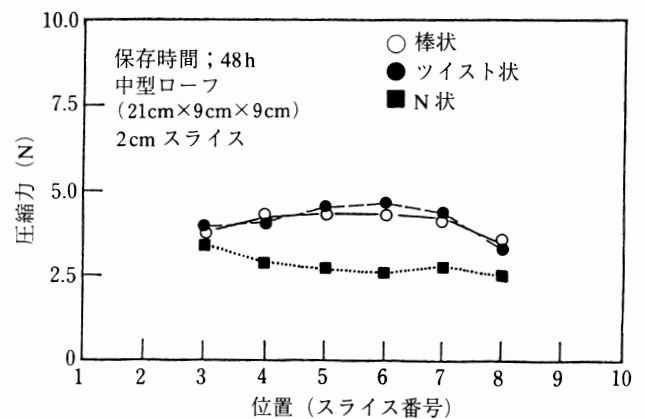


図10 ローフ内の硬さ分布

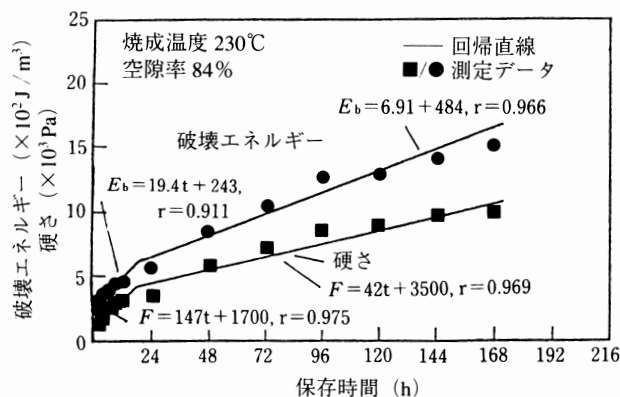


図9 硬さと破壊エネルギーの経時変化

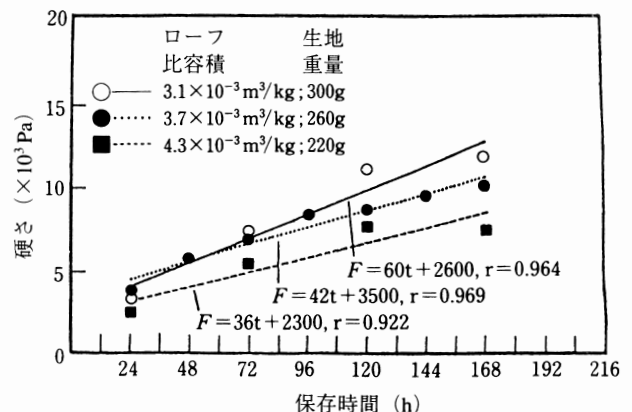


図11 ローフ比容積が硬さに及ぼす影響

の結果はAxfordらも述べているように<sup>5)</sup>、比容積の大きいローフは軟らかく、硬化速度も遅くなる傾向を示した。

製パン工場の現場では、発酵により形成されたローフ内気孔数は、その後の工程でもほとんど変化せず、生地質量当たりの気孔数はほぼ一定に保たれると経験的にいわれている。したがって、比容積の小さいローフを得るために、焼き型に生地を多く詰めると、焼成後のローフに含まれる気孔サイズは小さくなり、その数は多くなる。気孔を構成する網状の固形分マトリクスは、外力を受ける際に気孔の変形に対する抵抗力および復元力を増すように働く。このため、気孔サイズが小さく、その数が増えるとローフ全体としての強度は大きくなり、さらに保存中の硬化も速くなる傾向を示すことが予測される。この予測を定量的に実証するためには、グルテンを含む固形分マトリクスの3次元計測法の開発が望まれている。

#### 5.4 焼成温度と焼減率

焼減率を10%に設定した条件下において、焼成温度を標準焼成温度の230℃を中心に、180℃および300℃と変化させて焼成温度がクラムの硬さに及ぼす影響を調べたが、クラム硬さの焼成温度依存性は認められなかった。これは焼成温度がオーブンの雰囲気温度であり、この温度が変化しても、その影響は主にクラストの形成と着色速度に限定され、通常、焼成中を通じてクラムの温度は約100℃に保たれる<sup>12)</sup>。したがって、クラム構造の形成はクラストを除いた生地内部温度、すなわちクラム自身のクッキング温度と時間に依存するものと考えられている<sup>12)</sup>。

図12は標準焼成温度(230℃)の条件下で、焼減率10%および12%で焼成したローフの硬さFを保存中の経時変化として示したものである。両ローフ間において、焼成直後の硬さに顕著な差異は認められないが、保存時間の経過に伴い焼減率12%のローフは10%のものに比べて徐々に硬くなり、硬化速度も大きくなる傾向を示した。これはクラムの硬さが焼減率にも依存すること、すなわ

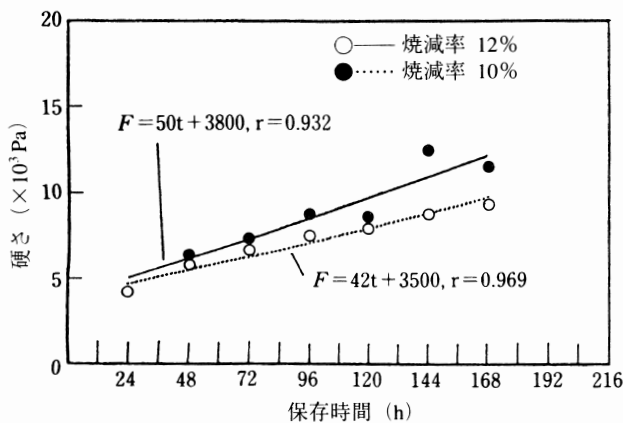


図12 焼減率が硬さに及ぼす影響

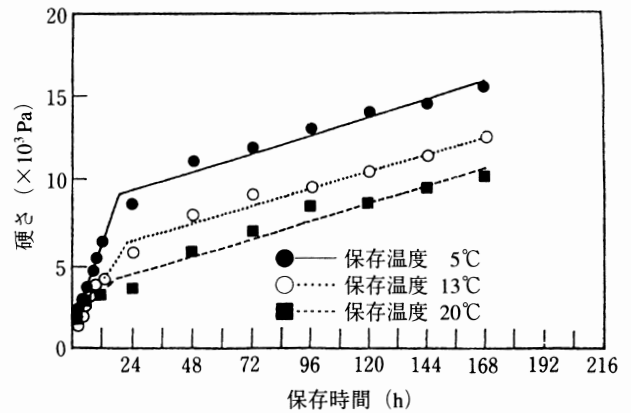


図13 保存温度が硬さに及ぼす影響

ち、保存中の力学的特性は組織の構造だけでなく、焼減率によって決定されるローフの初期含水率に依存することを示している。したがって、焼成工程の焼減率は焼成後のクラムの含水率だけでなく、保存中の硬さを調整するための操作要因としても重要であるといえる。

#### 5.5 保存温度条件

焼成したローフを5℃、13℃および20℃の温度条件下で保存し、老化に伴うクラム硬さFを測定し、その経時変化を図13に示した。保存初日の内に、クラムの硬さには保存温度の影響により顕著な差異が生じ、これ以後も保存温度条件に依存する一定速度で硬化が進行することがわかる。

とりわけ、焼成後12h以内の硬化速度は20℃の147 Pa/h、13℃の230 Pa/hおよび5℃の416 Pa/hとなり、保存温度条件が室温から冷蔵温度へ低下するのに伴い、硬化速度は急激に速くなることが分かった。このことは、焼成直後のローフを取り巻く環境温度条件が、ローフの冷却・老化に伴うクラムの硬化速度をコントロールする重要な因子であることを示している。

一般にクラム硬化の主要因は澱粉の結晶化速度にあると考えられている。澱粉の結晶は保存温度の低下に伴って速くなり、特に温度2~4℃、含水率30~60%の条件下で顕著に促進される<sup>13)</sup>。

#### 5.6 保存中の含水率分布

##### 5.6.1 含水率変化の様相

ローフの保存期間中にスライスの断面から10個の試片をサンプリングして(図14)得られた含水率分布の経時変化を図15に示した。図中の各プロットは試片3個の測定結果の平均値を示し、また、番号は図14に示した試片番号に相当する。

含水率変化の特徴は3つのグループデータから把握される。グループIはクラムの中心部(試片番号③④⑤⑧)の含水率で、焼成直後46.5%と高い値を示したが、保存期間の経過に伴って低下し、168h後には43.5%に減少

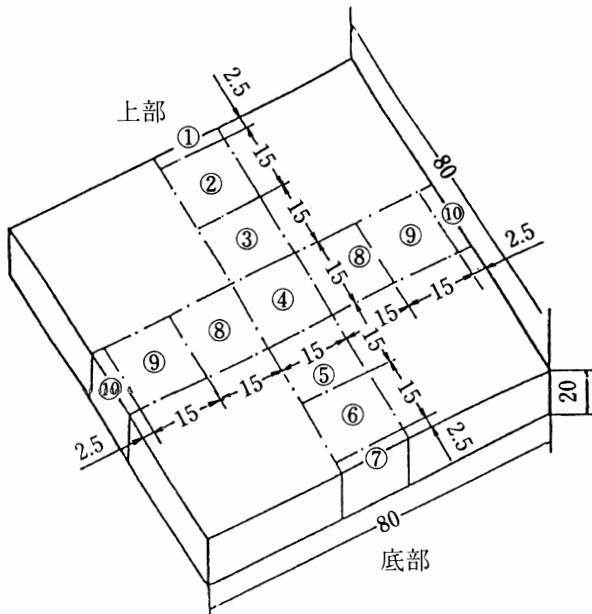


図14 保存中における含水率測定用サンプルの採取部位

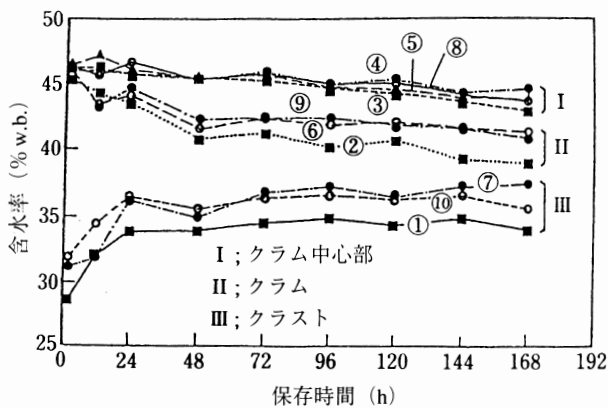


図15 保存中における含水率分布の経時変化

した。グループIIはクラム周辺部（試片番号②⑥⑨）の含水率で、それらの初期値はグループIとほぼ等しいが、保存中の減少率が大きくなり、168h後には41%まで低下した。グループIIIはクラスト部分（試片番号①⑦⑩）の含水率で、この部分の含水率は前に述べた両グループの変化傾向とは異なる。すなわち、焼成直後の含水率約30%が保存中に増加する傾向を示した。

他方、保存中におけるローフ質量の経時変化を測定した結果から、ローフ質量は焼成後の経過時間にはほぼ比例して減少し、焼成直後230gであったものが168h後は220g前後になり、約4%の減少率を示した。これらの結果から、ローフ保存中に水分はクラム中心部からクラスト方向に移動し、その一部はクラストに吸収され、残りはクラスト外に蒸散するものと推定される。

5.6.2 硬さおよび破壊エネルギーへの影響

図16にクラム中心部（図14の試験片番号③④⑤⑧）の

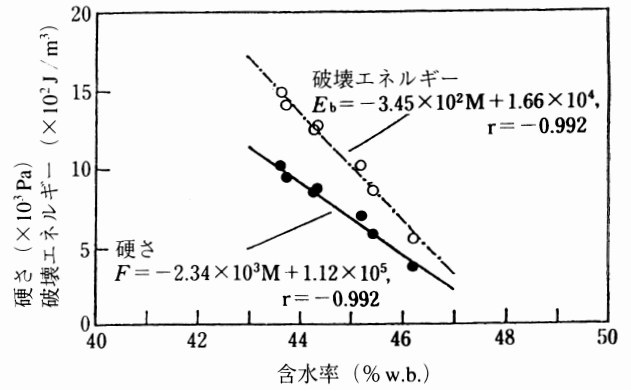


図16 含水率と硬さおよび破壊エネルギーの関係

平均含水率Mと硬さFならびに破壊エネルギーEbとの関係を示した。この図に示すように、硬さと破壊エネルギーはともに含水率の減少に伴って減少し、含水率が破壊特性に影響を及ぼす重要な要因であることが実証された。これらの結果より、ローフは保存中の老化によって硬化するが、これを促進させる因子が保存温度と含水率の減少にあることがわかった。特に、クラムの圧縮試験に際しては、サンプル含水率の同時測定を実施することが肝要であると考えられる。

6. 硬さに影響を及ぼす測定条件

6.1 変形速度

食品を対象とした圧縮破壊試験では、変形速度を0.3～8.3 mm/sの範囲に設定する例が多い。たとえば、クラムの変形速度を増大させた場合に計測される圧縮力は、変形速度の増大に伴って大きくなる傾向が確認されている。本研究では、変形速度を2.5 mm/s、5.0 mm/sおよび10.0 mm/sに設定して変形速度がクラムの硬さに及ぼす影響を調べ、その結果を図17に示した。変形速度5.0 mm/sと10.0 mm/sの間には、変形率に依存する圧縮力の変化は認められないが、2.5 mm/sでは圧縮力が変形率の全領域に亘って高い値を示す傾向が確認された。また、変形

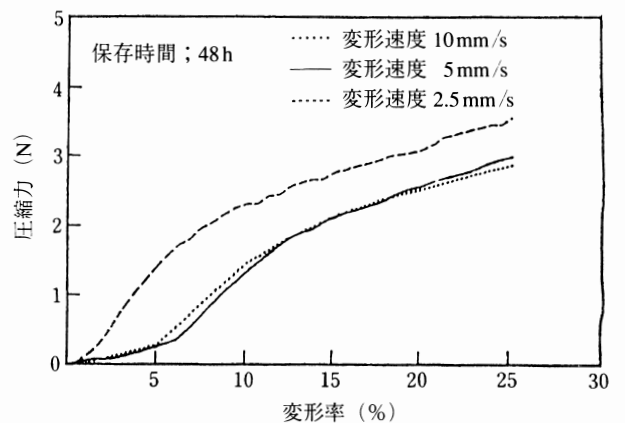


図17 圧縮変形速度が硬さに及ぼす影響

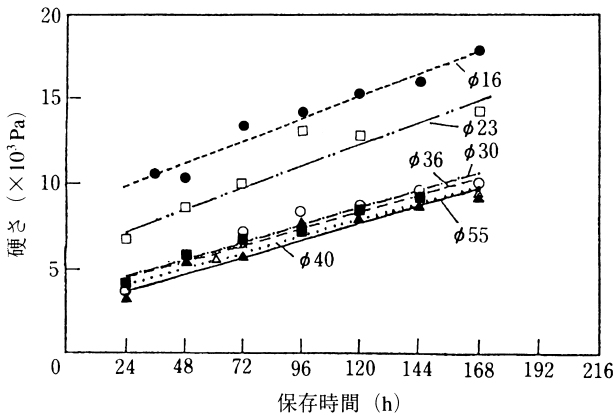


図18 プランジャーサイズが硬さに及ぼす影響

速度を5.0 mm/sから10.0 mm/sの範囲で一定値に設定すると、サンプルの変形率15%以上の領域で、変形率と圧縮力の間にはほぼ一定の比例関係が得られることがわかった。ここに示したプランジャーの変形速度条件と測定結果の関係は、クラムの標準的圧縮破壊試験法を確立するのに有用と考えられる。

### 6.2 プランジャーのサイズ

AACC<sup>1)</sup>の標準法によると、クラムの硬さ測定には、スライスサンプルの断面よりも小さいプランジャーが用いられる(図3)。本研究では、断面80×80 mmのサンプルに対して使用する円盤状プランジャーの直径を16 mmから55 mmの範囲で変化させて、硬さのプランジャーサイズ依存性を明らかにした(図18)。この図に示されるように、プランジャーの直径が小さくなるにつれて、クラムの硬さは大きい数値を示した。特に、直径が30 mmから16 mmに変わると、測定値は2倍程度増大した。これと同様に、Bakerらは直径11 mmから23 mmのプランジャーを用いてクラム・スライスを圧縮した結果、その硬さの測定値が直径の減少に伴って増大することを指摘している<sup>2)</sup>。

クラスト近傍のクラム組織は中心部のそれとは異なり、破壊特性も異なるため、プランジャーの最大直径はクラム組織の構造が均一な領域に制限される。これらの点を考慮すると、再現性の高い測定結果を得るためのプランジャー表面積はサンプル表面積の8~20%に相当する範囲にある。

### 6.3 プランジャーの形状

文献探索によると、従来、クラム硬さの測定には直径30 mmの円盤状プランジャーまたは一辺32 mmの角型プランジャーが用いられている。これらのプランジャーの形状差による測定結果への影響を調べるために、同一接触面積(1000 mm<sup>2</sup>)の円盤状プランジャー(直径30 mm)と角型プランジャー(一辺32 mm)による破壊エネルギー測定結果を比較して図19に示した。

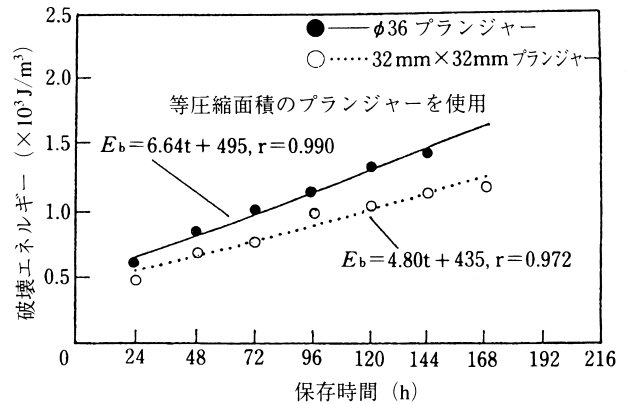


図19 プランジャー形状による破壊エネルギー測定値の差異

角型による測定値は円盤状による測定値よりも小さい値を示し、クラムの網状マトリクス構造の変形・破壊挙動がプランジャー形状に依存することが確認された。これは、たとえば角型プランジャーでは、その角部分における応力の集中や接触面下の不均一な応力分布が生じ、せん断による破断も生じやすくなるためと考えられる。

### 6.4 クラストを含むスライス周辺部

AACCの標準法(図3(a))では、圧縮中のサンプル内部に多様な応力が発生しているものと考えられる。それらは、(1)プランジャー直下の圧縮応力、(2)プランジャー縁部のせん断力、(3)プランジャー周辺部から外周のクラスト方向に向かう引張応力、(4)サンプルとプランジャーおよび支持テーブルとの接触面における摩擦力などであり、実際にはこれらの合力が測定されるものと考えられる。

ここでは、角型(一辺32 mm)プランジャーで、スライスサンプルを圧縮する方法(図3(a))と、プランジャー接触面と同寸法のクラム・ブロックを圧縮する方法(図20)を比較して、クラストを含むクラム周辺部が測定結果に及ぼす影響を調べた。図20は保存中のローフから採取したサンプルの破壊エネルギーの経時変化を示し

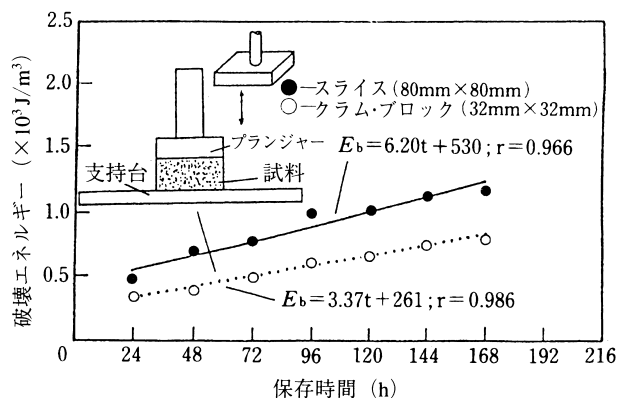


図20 クラストを含む外周部の破壊エネルギーに及ぼす影響

たもので、クラストを含む周辺部を切り除いたブロックの測定値は標準法によるスライスの約2/3であった。すなわち、スライスを圧縮する場合、測定値の1/3がクラストを含む周辺部の影響と判断された。

### 6.5 圧縮試験法の必要条件

これまで述べた結果から食パンの圧縮破壊試験に必要な条件を以下に提唱する。

- ① 供試クラムのサンプルはクラストを含む周辺部位を除いた均質な構造を有する部分とする。
- ② スライスの圧縮には円盤状プランジャーを選択し、接触面積がサンプル表面積の8～20%となるように配慮する。
- ③ 変形速度を5～10 mm/sの範囲で一定値に設定し、変形率が25%に達した時点の等価応力を硬さとする。

## 7. 粘弾性特性の計測・評価法

### 7.1 クリープ試験装置と測定条件

食パンクラムのクリープ試験の原理を説明するために試作したクリープ試験装置を図21に示す。

一般には図4に示した圧縮試験装置がクリープ試験を実施する機能を有しており、汎用装置として広く利用されている。筆者らの試作装置では、図中に示した分銅によりサンプルに静荷重を加えて、一定の変形量を与え、その圧縮変形量の変化を作動トランス (Transducer) で検出し、A/D変換器 (A/D converter) を介してパーソナルコンピューターに収録する。この装置の摩擦力は主に作動トランスの心棒によるもので、約1.5g程度である。

クリープ試験には、乾燥によるサンプルの変形が生じないような環境下において、クラム・ブロック (図3(b)) を供試し、比例領域におけるクリープの全歪を6～12%、焼成後の経過時間によって静荷重 (応力) を300～2500 Paの範囲に選び、また、荷重時間を100sに設定した。さらに、サンプルの接触破壊や成形精度、すなわち、試料表面の平均度および均平度による影響を軽減するために、

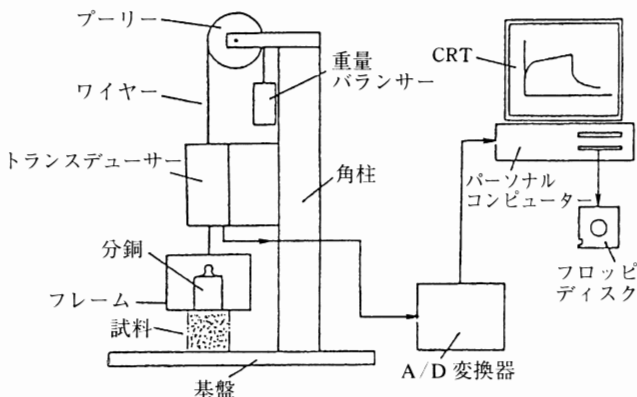


図21 試作したクリープ試験装置

初期荷重5gを荷重した。

### 7.2 クリープ曲線

上述した荷重・変形率設定条件により得られた典型的なクリープ曲線を図22に示す。この図に示すように、クラムのクリープ曲線には瞬間変形部 (ab)、遅延変形部 (bc) および定常流動部 (cd) が含まれる。サンプルは瞬間変形部でフックの法則に従う弾性的挙動を示し、定常流動部では、ニュートン流体と同様に時間に比例する歪の増大を示し、残りの遅延変形部では、弾性と粘性の複合作用による挙動を示す。この測定例では、全変形量に占める各部の変形量の割合は、瞬間変形部が約64%、遅延変形部が約24%、定常流動部が約12%程度となっている。これらの割合をほかの食品と比べた結果、たとえば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わかった<sup>14-17)</sup>。

### 7.3 粘弾性モデル

クラムのクリープ挙動を図22に示すような4要素フォークトモデルで表現することを試みた。 $E_0$ 、 $E_1$ はスプリングの弾性係数を、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ はダッシュポットの粘性係数を表わす。一定応力を $\sigma_0$ 、測定時間を $\theta$ とすると、クリープ歪 $\epsilon$ は次式で与えられる。

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

ここで、 $\tau_{kv}$ は遅延時間であり、 $\eta_1/E_1$ で定義される。クリープ曲線にこの式を当てはめて近似し、各要素の係数を決定する方法には、逐次残差法や簡易グラフィック法などがあるが、現在では市販されているクリープメーターに付属する解析ソフトを利用することが可能である。図22には逐次残差法で決定した粘弾性係数の値とこのモデルによる理論曲線と実験曲線を比較して示した。その結果、このモデルによりクリープ実験曲線が良好に再現され、すべての他の試料に対しても、歪の平均相対誤差を3%以下におさめることが可能であった。このようにクラムのクリープ曲線解析モデルには4要素フォークトモデルを用いることが有効であることを明らか

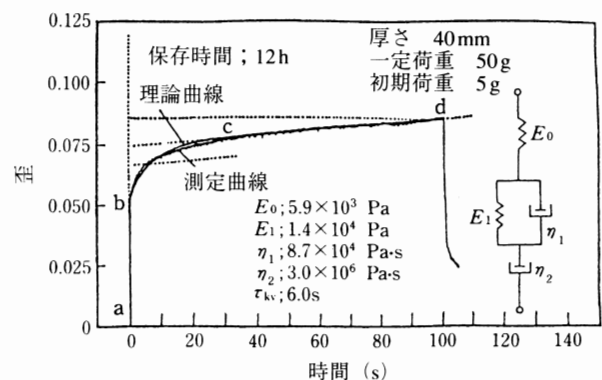


図22 クリープ曲線の測定例とフォークトモデル



にした。

## 8. おわりに

本稿では食パンクラムの力学および粘弾性特性を圧縮試験とクリープ試験により計測する方法を紹介した。サンプルには中種法により焼成したローフのスライスおよびブロックサンプルを供試した。以下に多様な計測結果を総合的に考察して得られた主要な点を挙げる。

- ① 圧縮力-変形率曲線の弾性領域から、比例限界、等価ヤング率および等価ポアソン比の値を求める方法を提唱し、これらの結果からクラムは力学的に異方体であることに留意すべきである。
- ② 硬さと破壊エネルギーは焼成後の保存経過時間に比例して増大するが、特に食パンは焼成後12h以内で急速に硬化することを指摘した。また、破壊特性はクラムの含水率により大きく影響を受ける。
- ③ クリープ試験から得られる曲線は、4要素フォークト粘弾性モデルにより良好に近似可能である。
- ④ 生地成形法、ローフ比容積、焼成温度、焼減率などの製パン条件および保存温度条件が力学的性質に及ぼす影響を明らかにし、変形速度、プランジャーのサイズや形状、サンプルの含水率などが測定結果に及ぼす影響について、標準的な試験法を提唱する観点から考察した。

上述したように機器測定の方法論を力学やレオロジーの基礎理論に立脚して検討し、合理的方法を標準測定法として確立することが重要である。さらに、新商品のテクスチャー開発や設計に当たって、標準測定法に沿った機器測定の結果のみを利用して検討することは危険である。その理由は機器測定によって得られる力学的パラメーターのデータが、消費者を対象とした官能評価によるテクスチャーのスコアと一対一に対応しない場合が多いことである。たとえば酸っぱい食品は硬く、甘い食品は柔らかく感じる<sup>9)</sup>。すなわち、材料を構成する化学成分もテクスチャーの評価に影響を与える。この例のように、今後は機器測定の結果とテクスチャーの相互関連性を定量化してゆく技術開発が肝要であり、著者はそのための方法論を「食感性工学」の主要な領域として提唱している。

## 文 献

- 1) American Association of Cereal Chemists (AACC) : "Cereal Laboratory Methods", AACC Method No.74-10 (1961).
- 2) Baker A.E. & Doerry W.T. : Cereal Foods World, 31 (2), 193-195 (1986).
- 3) Baker A.E., Walker C. E. & Kemp K. : Cereal Chemistry, 65 (4), 302-307 (1988).
- 4) Wasserman L. : "Food Texture and Rheology", Academic Press Inc. 283-289, (1979).
- 5) Axford W.E., Colweel K.H., Cornford S.J. & Elton G.E.H. : J. Science of Food and Agriculture, 19, 95-101 (1968).
- 6) Peleg M., Roy I., Campanella O.H. & Normand M.D. : J. Food Science, 54 (4), 947-949, (1989).
- 7) Muller H.G. : "An Introduction to Food Rheology", 1-16, (1973).
- 8) 相良泰行 : 冷凍, 78 (913), 42-44, (2003).
- 9) 池田岳郎, 相良泰行 : 冷凍, 79 (915), 61-63, (2004).
- 10) 橋本理帆, 相良泰行 : 冷凍, 79 (918), 30-35, (2004).
- 11) 橋本理帆, 相良泰行 : 冷凍, 79 (919), 47-53, (2004).
- 12) 相良泰行 : 冷凍, 79 (921), 56-62, (2004).
- 13) 久下 喬 : 食品の物性, 3, 109-123, (1997).
- 14) Kamel B.K. & Rasper V.F. : Cereal Foods world, 31 (3), 269-274, (1986).
- 15) 中浜信子 : 食品の物性, 5, 29-44, (1979).
- 16) 茂木美智子 : 調理科学, 8 (1), 28-35, (1975).
- 17) 赤羽ひろ, 中浜信子 : 調理科学, 21 (4), 245-254, (1988).

## Summary

Measuring methods of mechanical and viscoelastic properties for the crumb of white bread were presented based on the compressive force-deformation and creep curves. The force-deformation curve was found to consist of the four stages, and the values of proportional limit, equivalent Young's moduli and Poisson's ratio of elasticity were determined within the proportional stage at which the crumb could be assumed to be an elastic body.

The firmness increased with the storage time and changed markedly within 12 hours after baking. The firming of crumb associated with a decrease in storage temperature from 20 °C to 5 °C. The firmness was affected by moulding methods, specific volume, baking temperature, and weight loss during baking.

The deformation rate ranging from 5 to 10 mm/s and the disc-type plunger whose cross sectional area is 8 to 20 % of that of slice are recommended for measuring more universal data of breaking characteristics. An optimum loading condition in compressive creep test was established experimentally, and a four-element mechanical model appeared to be appropriate for describing the viscoelastic behavior of crumb.