

応力緩和試験と3要素粘弾性モデルによる 食パンのレオロジー的評価

呉 計春*・森嶋 博**・瀬尾康久***・相良泰行***

Rheological Evaluation of White Bread Using a 3 Elements Viscoelastic Model and Stress-Relaxation Test

Kazuharu KURE*, Hiroshi MORISHIMA**, Yasuhisa SEO***
and Yasuyuki SAGARA***

* Ajinomoto System and Technology Inc., 1-1, Suzuki,
Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210

** College of Bioresource Sciences, Nihon University, 1866, Kameino,
Fujisawa-shi, Kanagawa 252

*** Graduate School of Agriculture and Agricultural Life Sciences, The
University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113

A 3 elements mechanical viscoelastic model based on stress-relaxation curve was applied to evaluate the rheological characteristics of crumb of white bread under a wide variety of baking conditions and the storage time after baking. It was found that the rheological characteristics of crumb changed mainly with the elapse of the storage time rather than the baking temperature or the baking loss ratio defined as the percentage of the mass lost during baking to the initial. During the storage period of 1 hour no remarkable changes in the hardness and relaxation time of crumb were recognized with the different baking conditions. With the elapse of the storage time the relaxation time of crumb decreased rapidly and reached an equilibrium state after 12 hours. For the same mass lost the equilibrium values of the relaxation time indicated higher values with increase in baking temperature. The hardness of crumb increased exponentially with the elapse of storage time. And the maximum value of the hardness was shown for the crumb baked with the standard baking temperature of 220°C.

(Received Apr. 23, 1996)

食パンのレオロジー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おり¹⁾、その客観的評価法の確立が望まれている。一般に、クラムのレオロジー特性は圧縮、クリープ、応力緩和などの試験法やテクスチュロメータの測定により計測されてきたが、その研究例は数少なく^{4)~6)}、また、測定条件や適用された粘弾性モデルが異なるために、報告された結果の評価・比較が困難な現状にある。とくに、官能検査の主観的評価とこれらの客観的測定法によって得ら

れる結果とが矛盾する場合もある。筆者らはクラムから採取した試料を対象にして圧縮試験とクリープ試験を行い、食パンの保存中におけるレオロジー特性の経時変化を明らかにした^{1)~3)}。また、クリープ曲線に基づく粘弾性挙動を明らかにするために、4要素モデルを適用し、要素の値を評価することによって、生地成形法、保存期間と温度などが老化の進行におよぼす影響を明らかにした。

一方、客観的測定結果を食パンの製造や保存に関する

* 味の素システムテクノ株式会社 (〒210 神奈川県川崎市川崎区鈴木町 1-1)

** 日本大学生物資源科学部 (〒252 神奈川県藤沢市亀井野 1866)

*** 東京大学大学院農学生命科学研究科 (〒113 東京都文京区弥生 1-1-1)

操作法などの検討に役立てるためには、簡便な試験法により得られた結果に、可能な限り少ない要素数の粘弾性モデルを適用してそれらの値を決定し、その値と焼成条件や保存時間との関係を検討することが必要と考えられる。この場合に、モデルの要素数を増やすことにより、測定された曲線の近似精度は高められるが、逆に得られた要素の値からレオロジー的挙動の原因などを検討することは困難となる。すなわち、要素数はクラムの粘弾性的挙動を直感的に把握できる程度に限られるべきである。

本研究の目的は比較的簡単な測定法として知られている応力緩和試験の結果に 3 要素粘弾性モデルを適用し、得られた要素の値から焼成条件が保存中の食パンのレオロジー特性におよぼす影響を検討することにある。

実験装置および方法

1. オープンと加熱温度

本研究に用いた実験装置の概略図を図 1 に示す。電熱加熱方式のデッキ型オープン（三鈴工機製、DOE-02 型）の壁面に設置されたヒーターの容量は 5.5 kW で、温度設定範囲は 50～300℃ である。本研究では加熱温度条件が食パンの保存中におけるレオロジー特性におよぼす影響を検討するために、オープンの加熱温度を 140, 220 および 300℃ の 3 段階に設定し、焼成温度とした。この設定温度は温度センサでオープン内壁表面温度を検出しながら制御されるため、オープン内部の雰囲気温度に温度勾配が生じることが予測された。そこで、図 1 に示すように生地を詰めた 6 個のパン型をオープン内中央部に並べ、上記の焼成温度条件ごとに予備実験を行い、オープン壁

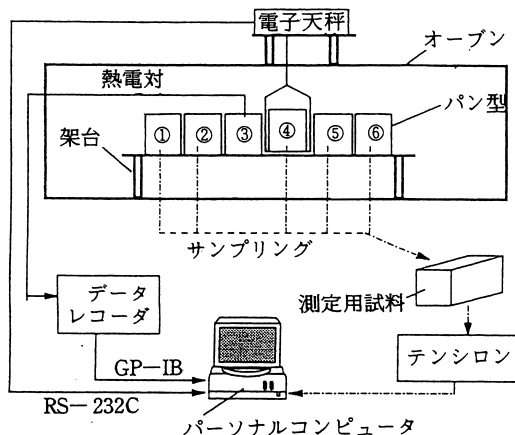


図 1 実験装置の概略図

面温度と各パン型上面から 10 mm 離れた場所の雰囲気温度を測定した。その結果、パン型を設置したオープン中央部の雰囲気温度はそれぞれの加熱温度条件下でほぼ均一となることが確認された。

2. 供試材料

生地原料の標準的配合割合と中種法により製作した¹⁾質量 0.266 kg の生地を角形パン型（内径： $8 \times 10^{-2} \times 8 \times 10^{-2} \times 17 \times 10^{-2}$ m）に収納して焼成した。また、最終発酵が終了した時点での生地の体積はパン型の約 8 割を占め、焼成直前の生地の含水率は 47.1% w/w であった。なお、本研究では広い範囲の焼成条件によるクラムの粘弾性特性を把握するために、試験用ローフの焼減率、すなわち、生地の初期質量に対する焼成中に失われた質量の割合を 5, 10 および 15% の 3 段階に設定した。

したがって、試料は上述したそれぞれ 3 種類の焼成温度と焼減率の実験条件を組み合わせると計 9 回焼成した。また、1 回の焼成実験で 5 本のローフを製作し、それぞれ焼成後 1, 6, 12, 24 および 48 時間を経過した時点で応力緩和試験に供した。

なお、焼成後のローフは原型のまま室温 22℃ の環境下で自然冷却し、その後プラスチック製の袋に入れて同温度で保存した。図 2 に示すように試料はこのローフのクラストを切り取った残りのクラム部分から採取し、整形したもので、その形状は 1 辺が 0.06 m の立方体であった。

3. 計測方法

(1) 生地の質量と焼減率

図 1 に示したように、焼成はオープン内中央部に 1 ロット当たり 6 個の試料を並べて行い、この内 1 つのパン型をオープン上部に設置した電子天秤（Mettler, PE 3 600 型、精度 ± 0.01 g）に吊り下げて、その質量の経時

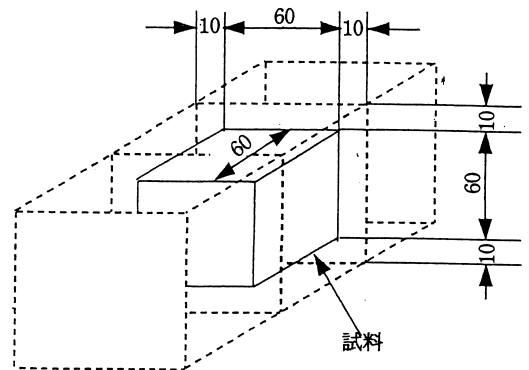


図 2 試料の採取箇所

変化を測定した。また、質量測定用試料と他の試料の加熱条件を等しくするために、他のパン型も上記の間隔幅を保つようにしてL型アングルを組合わせて製作した架台上に配置した。電子天秤の出力は、RS232 C ボードを介して6秒ごとにパーソナルコンピュータ (NEC製, PC-9801) に送り、焼減率を次式により計算した。

$$S = \left(\frac{m}{m_0} \right) \times 100 \quad (\%)$$

ここで、S (%) は焼減率、m (kg) は水分蒸発量、および、 m_0 (kg) は初期の生地重量である。

(2) 試料内温度分布

試料内温度分布の経時変化を計測するために、図3に示す熱電対のネットワークを作成し、質量測定用パン型に隣接したパン型の中央横断面に装着した。これらは素線径 0.0001 m の K 型 (銅-コンスタンタン) 熱電対で、ガラス繊維で被覆断熱したものを使用した。温度の記録にはデータレコーダ (安立計器社製, AM-7001 型) を3台用いた。この装置は熱電対の出力を最大6チャンネルまで一定時間ごとに測定し、メモリに蓄える機能を有しており、本実験では10秒間隔で測定した。データ処理は、測定終了後にメモリの内容をパーソナルコンピュータに転送して行った。

(3) 応力緩和曲線の測定装置

応力緩和試験に用いた測定装置 (東洋ボールドウィン社製, RTM-1 T 型) は一般にテンシロンと称されている汎用型の圧縮・引張り試験機であり、マイクロコン

ピュータにより、クロスヘッドの速度を一定に制御することが可能である。なお、この装置のクロスヘッドは、直径 0.15 m の円盤状のものである。

(4) 応力緩和曲線の測定条件

PELEG ら⁷⁾⁸⁾の報告によると、粘弾性材料の応力の変化は歪みの量だけでなく、圧縮速度にも関係する。とくに圧縮速度が速いほど、圧縮過程における試料のレオロジー的特徴が現れにくくなる。そのため、本研究においては他の食品の試験例⁹⁾¹⁰⁾と比較してかなり遅い圧縮速度に相当する 1.667×10^{-4} m/s を採用した。

また、歪みの量を定めるためにクラムの歪みと応力の関係を調べた。このために、1辺が 0.06 m の立方体形状のクラムを用いて、上面のクラストを切り取った面を上にして垂直方向から 1.667×10^{-4} m/s の速度で圧縮試験を行った。なお、この試験に用いたクラムは標準的焼成条件、すなわち、焼成温度 220°C、焼減率 10% で焼成したもので、焼成後の保存時間は1時間であった。

これにより得られた歪み-応力曲線の典型的例を図4に示した。この図に示されるように、歪み-応力曲線の特徴は3つの段階に分けて考えることができる。すなわち、歪みが 0~0.35 までの第一段階では、歪み-応力の間には上に凸の曲線で示される関係が存在し、これは多くの食品素材に見られる歪み-応力の非線形性を示すものである⁸⁾¹⁰⁾。しかし、歪みが 0.35~0.55 の範囲では、曲線の傾きはほぼ一定となり、圧縮によるクラム内部の網目構造の破壊が連続して起きていることが観測された。この段階を第二段階とした。さらに歪みが増えると応力は顕著に増加し始め、これは圧縮が進むにつれて生じた

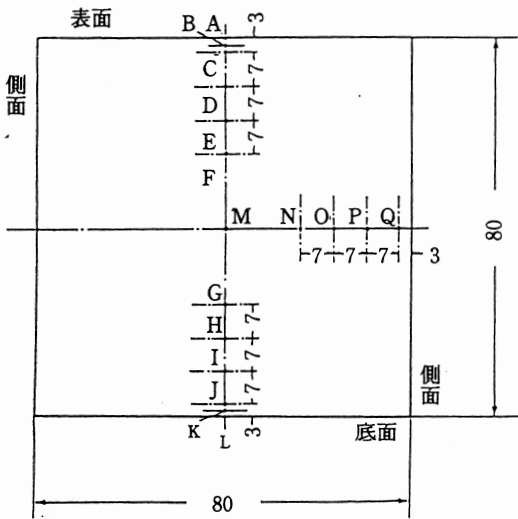


図3 熱電対のネットワーク (A~Q: 熱電対番号, 単位: mm)

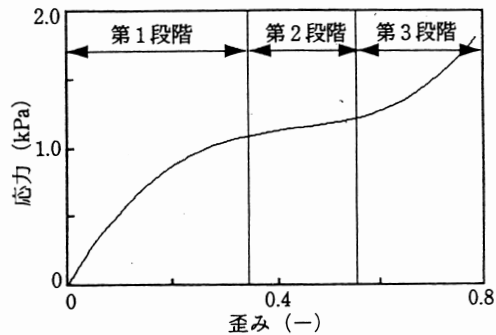


図4 クラムの歪みと応力の測定例

試料の焼成・保存条件: 焼成温度 220°C、焼減率: 10%、焼成後保存時間: 1時間
測定条件: 試料の高さ 0.06 m、断面積 3.6×10^{-3} m²

空隙の減少によってクラムの密度が大きくなったためと考えられ、これを第三段階とした。

試料の内部構造の破壊が顕著に起きる以前に圧縮を止めて応力緩和試験に移行すべきとの観点から、本研究では圧縮段階での試料に与える歪みを30%程度に設定した。

なお、予備分析の結果、応力緩和試験データをつぎに述べる3要素モデルに代入して非線形最小自乗法によってモデルの各要素の値に対する収束値を得るためには、480秒間以上の応力緩和データが必要であった。そこで、本研究では応力緩和試験の測定時間を600秒前後とした。

(5) 3要素モデルの数式表現

本研究ではクラムの応力緩和特性を分析するために、図5に示すマックスウェル要素に弾性要素を並列に組み合わせた3要素粘弾性モデルを採用した。

図5に示したように、マックスウェル要素側の応力を σ_1 、弾性要素側の応力を σ_2 とすると、圧縮・応力緩和過程における系全体の応力 σ はつぎのように表される。

$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) \quad (1)$$

とくに、歪みが一定である時間 t_1 以降の応力緩和では、(1)式はつぎのように書ける¹²⁾。

$$\sigma = \sigma_1(t_1) \exp[-a(t-t_1)] + \sigma_2(t_1) \quad (2)$$

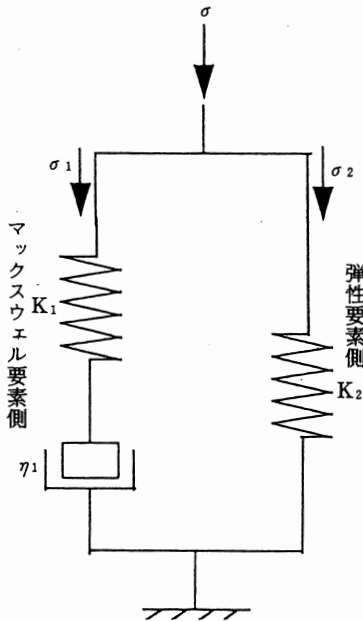


図5 3要素粘弾性モデル

ただし、 $\sigma_1(t_1)$ 、 $\sigma_2(t_1)$ はそれぞれ応力緩和の初期、すなわち、時刻 $t=t_1$ におけるマックスウェル要素側の応力と弾性要素側の応力である。これらは、試料を一定の圧縮速度 V で時間 t_1 まで圧縮して到達した応力の値であり、この圧縮過程も近似的に同じ3要素モデルで表せると仮定すれば、 σ_1 、 σ_2 は、それぞれつぎのように表せる⁷⁾。

$$\sigma_1(t_1) = K_1 \exp\{a(b-t_1)\} \left\{ \ln \frac{b}{b-t_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-a)^n [b^n - (b-t_1)^n]}{n \cdot n!} \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_2(t_1) = K_2 \ln \frac{b}{b-t_1} \quad (4)$$

ここで、

$$a = K_1/\eta_1, \quad b = H_0/V$$

K_1 ; マックスウェル要素の弾性率 (Pa)

K_2 ; 弾性要素の弾性率 (Pa)

η_1 ; マックスウェル要素の粘性係数 (Pa·s)

H_0 ; 試料の初期の高さ (m)

V ; 圧縮速度 (m/s)

t_1 ; 応力緩和の開始時刻 (s)

t ; 時間 (s)

σ ; 応力 (Pa)

なお、(2)式に含まれる、 K_1 、 K_2 、 η_1 は要素のパラメータで、その他は実測値である。これらのパラメータは応力緩和実験から得られる $\sigma(t)$ の時系列データを(2)式に代入し、非線形最小二乗法¹³⁾を適用することによって算出した。

実験結果および考察

1. 水分蒸発量の経時変化

焼成プロセスにおける試料の質量変化は水分の蒸発によるものと考えられ、その水分蒸発量の経時変化を焼成温度条件をパラメータにして図6に示した。また、図中に焼減率5%ごとのラインを示した。本焼成実験では各焼成温度条件ごとに焼減率の異なる3本の水分蒸発曲線が得られたが、これらの曲線は互いにほぼ一致することが確認されたので、図中には焼減率15%以上の曲線のみを示した。応力緩和試験に用いたローフの焼成時間は水分蒸発量曲線と各焼減率のラインが交差する点で示される。たとえば、標準的な食パンの焼成時間はオープン温度210~230°Cの範囲で焼減率が10%に達する時間とされている。この条件に相当する焼成時間は焼成温度

220℃の水分蒸発量曲線と焼減率10%のラインが交差する点から求められ、約23分であることが示される。

2. クラムの温度変化

図7に焼成温度が140, 220および300℃で行った焼成実験で試料温度の経時変化を焼成温度条件をパラメータにして示した。なお、図中の曲線は図6と同様に焼減率15%以上の曲線のみを示した。

図に示した温度変化は図3の温度分布測定用熱電対ネットワークの測定個所DとM、すなわちクラムの周辺部と中心部で検出されたものである。クラムの温度は表面に近い部分から順次上昇し、その上昇速度は焼成温度が高いほど速くなるが、いずれの場合にも約100℃に到達すると、それ以降はこの温度に維持された。

3. レオロジー特性

(1) 計測データの処理結果

図8に焼成温度220℃、焼減率10%、保存時間1時間後における試料の応力緩和データの実測値と式(2)によ

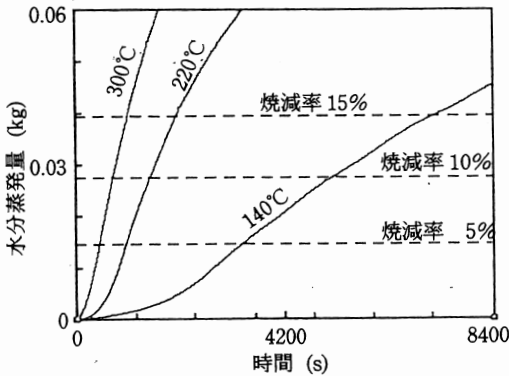


図6 焼成時間と水分蒸発量の関係

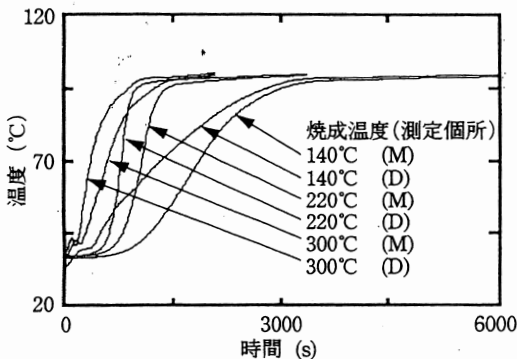


図7 試料温度の経時変化

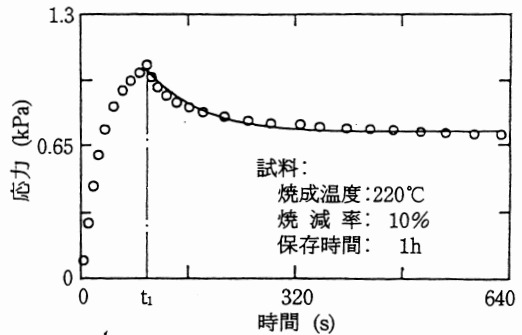


図8 応力緩和試験の測定値と計算値の比較例 (プロット: 測定値, 曲線: 計算値)

り計算して得られた曲線を比較して示した。図示したように、 $t > t_1$ の領域において両者は良好に一致した。また、式(2)において、時刻 $t = t_1$ のマックスウェル要素側の応力 σ_1 と弾性要素側応力 σ_2 をそれぞれ式(3)と(4)で近似したにもかかわらず、 $t = t_1$ における計算値と実測値との差は微小であった。これらの結果より、採用した3要素粘弾性モデルおよびその計算式はクラムの応力緩和特性を表すのに有効であると判断された。

各焼成条件および保存時間について得られたパラメータの値を表1に示した。

(2) パラメータ値の円滑化

表1には保存時間の経過に伴う各パラメータの値の変化を次式で円滑化した場合の係数A, B, Cの値も併せて示した。次式のYは各パラメータ、すなわち $K_1 + K_2$, K_2 および η_1/K_1 を表し、係数A, BおよびCの値は最小自乗法によって求めた。

$$Y = A + B \cdot \exp(-C \cdot t) \tag{5}$$

この式に示すように、係数Aは保存時間t(h)の経過に伴いYが最終的に到達する平衡値であり、係数Cはその平衡値に接近する速度を表す。なお、図9~11に焼成温度220℃における各パラメータの値と(5)式による円滑値とを比較して示した。図に示されるように、実測した各パラメータの時間的変化を(5)式によって良好に表現できることが分かった。そこで、次項の考察には実測値の代わりに円滑値を用いて各パラメータの特徴を検討することにした。

(3) 焼成条件と保存時間の影響

3要素モデルにおけるパラメータの平滑値と保存時間の関係を図12~14に示した。図12に示されるように、 $K_1 + K_2$ の値は焼成条件よりも保存時間に依存する度合いが大きいことが分かった。たとえば、焼成温度220℃、

表 1 パラメータの計算結果

| パラメータ | 焼成温度 (°C) | 焼減率 (%) | 保 存 時 間 (h) | | | | | 回帰式 ($Y=A+B \cdot \exp(-C \cdot t)$) の係数 | | |
|--------------|--------------|------------|-------------|------|------|-------|-----------|--|------------|------------------------------------|
| | | | 1 | 6 | 12 | 24 | 48 | A | B | C |
| K_1+K_2 | 140 | 5 | 3.36 | 4.54 | 5.82 | 5.63 | 7.20(kPa) | 7.43(kPa) | -4.03(kPa) | 6.29 ($\times 10^{-2} \times h$) |
| | | 10 | 3.09 | 4.92 | 7.22 | 10.98 | 15.48 | 22.14 | -19.49 | 2.46 |
| | | 15 | 3.86 | 6.23 | 9.41 | 14.01 | 17.84 | 21.63 | -18.57 | 3.81 |
| | 220 | 5 | 3.28 | 5.17 | 6.00 | 10.19 | 14.12 | 20.31 | -17.45 | 2.20 |
| | | 10 | 3.84 | 5.48 | 7.87 | 13.92 | 16.96 | 20.41 | -17.76 | 3.72 |
| | | 15 | 3.56 | 6.03 | 9.72 | 14.99 | 19.41 | 22.86 | -20.31 | 3.98 |
| | 300 | 5 | 2.88 | 4.16 | 6.31 | 7.81 | 12.74 | 34.59 | -31.53 | 0.82 |
| | | 10 | 2.86 | 4.57 | 7.05 | 10.00 | 16.37 | 45.00 | -39.29 | 0.94 |
| | | 15 | 3.36 | 5.63 | 8.31 | 10.98 | 18.62 | 59.18 | -55.71 | 0.69 |
| K_2 | 140 | 5 | 2.06 | 2.69 | 3.23 | 3.25 | 3.95(kPa) | 3.91(kPa) | -1.91(kPa) | 6.64 ($\times 10^{-2} \times h$) |
| | | 10 | 1.89 | 2.84 | 3.94 | 5.39 | 7.32 | 9.19 | -7.52 | 2.88 |
| | | 15 | 2.41 | 3.36 | 4.66 | 6.65 | 8.24 | 9.56 | -7.55 | 3.73 |
| | 220 | 5 | 1.95 | 2.80 | 3.22 | 4.96 | 5.95 | 7.00 | -5.27 | 3.48 |
| | | 10 | 2.29 | 3.07 | 4.25 | 6.65 | 7.56 | 8.54 | -6.77 | 4.41 |
| | | 15 | 2.16 | 3.40 | 4.94 | 7.34 | 8.20 | 8.87 | -7.29 | 5.55 |
| | 300 | 5 | 1.52 | 2.36 | 3.32 | 4.25 | 6.07 | 7.91 | -6.49 | 2.58 |
| | | 10 | 1.73 | 2.70 | 3.79 | 4.50 | 6.94 | 10.98 | -9.22 | 1.69 |
| | | 15 | 2.00 | 3.26 | 4.04 | 4.99 | 8.27 | 46.16 | -44.00 | 0.31 |
| η_1/K_1 | 140 | 5 | 10.05 | 6.70 | 6.35 | 6.35 | 5.88 (s) | 6.17 (s) | 5.72 (s) | 38.5 ($\times 10^{-2} \times h$) |
| | | 10 | 10.47 | 6.76 | 6.17 | 5.17 | 4.88 | 5.00 | 6.47 | 19.7 |
| | | 15 | 10.47 | 6.70 | 5.41 | 5.00 | 4.65 | 4.72 | 6.76 | 25.1 |
| | 220 | 5 | 9.64 | 6.06 | 6.12 | 5.61 | 5.49 | 5.51 | 5.94 | 36.9 |
| | | 10 | 9.47 | 6.41 | 5.94 | 5.31 | 5.12 | 5.12 | 5.23 | 20.5 |
| | | 15 | 10.05 | 6.12 | 5.35 | 4.96 | 4.70 | 4.82 | 6.99 | 21.5 |
| | 300 | 5 | 8.29 | 6.17 | 5.00 | 5.64 | 5.00 | 5.23 | 4.06 | 26.3 |
| | | 10 | 9.53 | 5.94 | 6.64 | 5.41 | 5.06 | 5.64 | 5.82 | 40.9 |
| | | 15 | 9.35 | 5.70 | 6.47 | 5.70 | 4.65 | 5.59 | 6.76 | 58.4 |

焼減率 10% で焼成した試料の場合、焼成後 24 時間経過した時点での値は焼成 1 時間後のそれより 3 倍以上増大した。また、140°C、5% で焼成した場合の保存時間の経過に伴う K_1+K_2 の値の変化は焼成後 24 時間でほぼ平衡状態になるが、その他の焼成条件では、焼成後 48 時間を経過してもなお増大し続けることが明らかになった。とくに、焼成温度 300°C、焼減率 10% あるいは 15% で焼成した場合、その値は保存時間にほぼ正比例して増大する傾向が示された。

また、 K_1+K_2 は、同じ焼減率では標準的焼成温度である 220°C で焼成した試料の場合にその値が最も大きく、逆に同一の焼成温度では焼減率の増大に伴って大きい値を示した。

図 13 に示した K_2 の焼成条件と保存時間による変化も上に述べた K_1+K_2 の結果とほぼ同様の傾向を示した。

図 14 に示した η_1/K_1 の値は焼成後 12 時間の間に急速に減少し、その後はほぼ一定の平衡値に近づいた。たとえば、焼成温度 220°C の場合、その値は焼成後 6 時間経過した時点ですでに平衡値の約 80% まで、また、12 時間経過したところでは 90% 以上に接近した。焼減率 10% 以上では同一焼成温度で焼減率が低いほど、逆に同一焼減率では焼成温度が高いほど平衡値は大きくなる傾向を示した。しかし、例外的に焼減率が 5% の場合、焼成温度が高いほど、その値は逆に小さくなった。この現象の原因として、焼減率 5% の時点では図 7 に示された

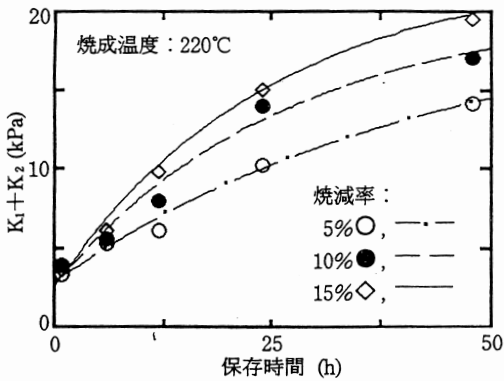


図 9 K_1+K_2 の測定値と円滑値の比較
(プロット：測定値，曲線：円滑値)

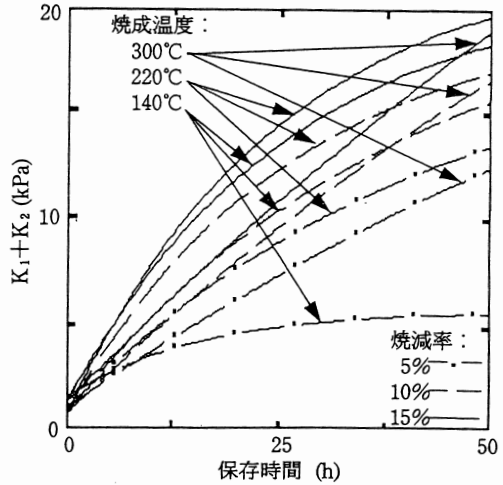


図 12 保存時間と K_1+K_2 の関係

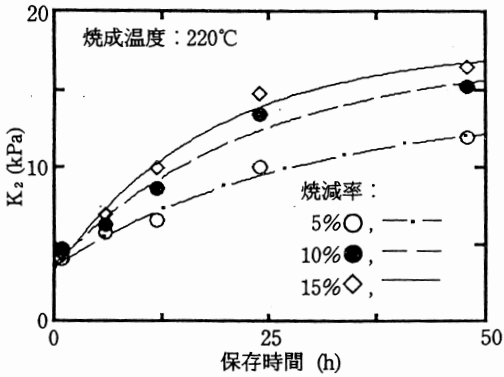


図 10 K_2 の測定値と円滑値の比較
(プロット：測定値，曲線：円滑値)

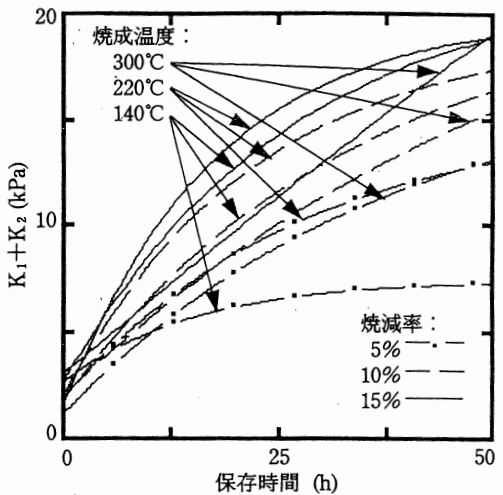


図 13 保存時間と K_2 の関係

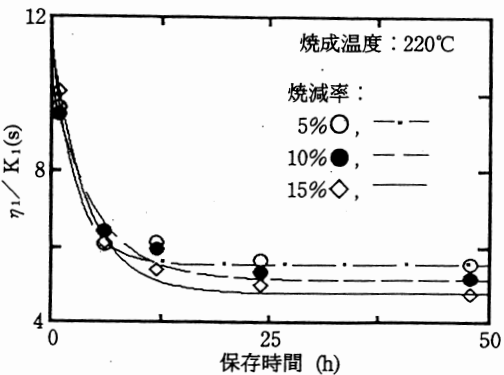


図 11 η_1/K_1 の測定値と円滑値の比較
(プロット：測定値，曲線：円滑値)

ように焼成温度が高いほど、試料の中心部温度が低くなり、とくに焼成温度 300°C と 220°C の場合、焼減率 5% では中心部の温度は平衡温度に到達せず、クラムが未焼成の状態にあることが考えられた。

保存期間中、試料の温度や含水率の変化、あるいは環境温度の変化はほとんど認められなかったため、保存時間の経過に伴う上述のレオロジー特性値の変化は食パンの老化によるものと考えられた。

要 約

食パンのレオロジー特性を評価する方法として応力緩

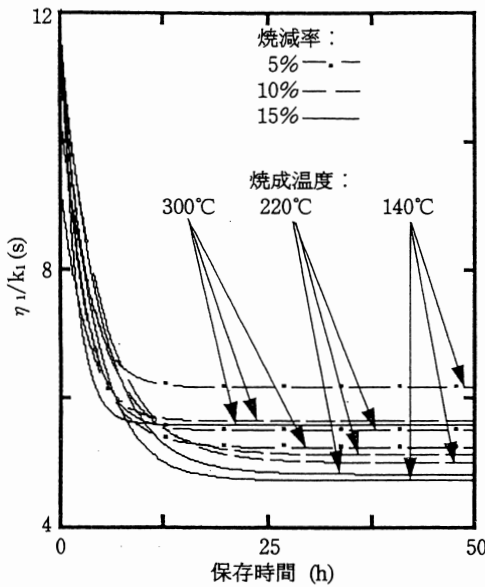


図 14 保存時間と η_1/K_1 の関係

和曲線に 3 要素粘弾性モデルを適用する方法を提唱し、その結果から焼成条件・保存時間とパラメータ K_1+K_2 , K_2 , η_1/K_1 との関係を示した。以下にこれらの結果を要約する。

1) 焼成温度、焼減率などの焼成条件がクラムの粘弾性パラメータ K_1+K_2 , K_2 , η_1/K_1 におよぼす影響は、焼成後 1 時間まではほとんど認められなかったが、その後の保存時間の経過に伴いその影響は顕著に現れた。

2) クラムの η_1/K_1 , すなわち応力緩和時間の値は焼成後の保存時間の経過とともに急速に小さくなり、保存時間約 12 時間後にはほぼ平衡状態となった。焼減率が等しい場合、この η_1/K_1 の平衡値は焼成温度が高くなるほど大きい値を示した。

3) クラムの K_1+K_2 と K_2 , すなわちクラムの硬さの指標は焼成後の保存時間の経過とともに指数関数的に大きくなる。また、標準的焼成温度、すなわち、220°C で焼成したクラムのこれらの値は他の焼成温度条件の場合に比べ最も高い値を示した。

文 献

- 1) 王益平・森嶋 博・瀬尾康久・相良泰行・芋生憲司：農業機械学会誌, 54, 73 (1992).
- 2) 王益平・森嶋 博・瀬尾康久・相良泰行・芋生憲司：農業機械学会誌, 54, 73 (1992).
- 3) 王益平・森嶋 博・瀬尾康久・相良泰行・芋生憲司：農業機械学会誌, 54, 89 (1992).
- 4) BERTRAND, D., LE GUERNEVE, C. and MARRION, D.: *Cereal Chem.*, 69, 257 (1992).
- 5) PERSAUD, J.N., FAUBION, J.M. and PONTE, J.G.: *Cereal Chem.*, 67, 92 (1990).
- 6) PIAZZA, L. and MASI, P.: *Cereal Chem.*, 72, 320 (1995).
- 7) PELEG, M.: *J. Texture Stud.*, 8, 283 (1977).
- 8) PELEG, M. and CALZADA, J.F.: *J. Food Sci.*, 41, 1325 (1976).
- 9) 赤羽ひろ・和田淑子：短大論叢, 関東学院女子短期大学, 78, 46 (1987).
- 10) PELEG, M.: *J. Texture Stud.*, 15, 1 (1984).
- 11) PELEG, M.: *J. Texture Stud.*, 8, 67 (1977).
- 12) MOHSEENIN, N.N.: *Physical Properties of Plant and Animal Materials (Volume I)*, 1st Edition (Gordon and Breach Science Publishers, New York), p. 220 (1970).
- 13) 三浦 功・田尾陽一：計算機のための数値計算法概論, 第 1 版 (サイエンス社, 東京), p. 225 (1972).

(平成 8 年 4 月 23 日受理)