Article

Relationship between Physical Properties of Bread Dough Secondly Fermented in Several Conditions and its Baking Characteristics

Shoichi IWASE^{*†}, Makoto MIURA^{**}, and Shoichi KOBAYASHI^{**}

^{*}The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University,
3-18-8, Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

^{**}Department of Agro-bioscience, Faculty of Agriculture, Iwate University,
3-18-8, Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

Bread dough exhibits unique viscoelastic behavior, and the relationships between the properties of bread dough and the quality of final products have not been clear. The objectives of this study are to predict the baking characteristics using physical properties of bread dough. Several kinds of dough were prepared at three levels of second fermentation time (35, 50 and 65 min at 38 °C), which seriously affects baking characteristics. Breads were made from these kinds of bread dough. Specific gravity and pH of the dough decreased with increasing time of the second fermentation. The bread dough with 50 min of second fermentation time had the lowest value of mechanical loss tangent of 0.87 ± 0.03 . Dielectric loss tangent of the dough increased with increasing second fermentation time. The non-linear multiple regression models using the values of physical properties of the dough as independent variables provided a good prediction of the loaf volume ($R^2 = 0.87 \sim 0.94$).

Key Words: Bread dough / Physical properties / Baking characteristics / Non-linear multiple regression model

2 次発酵条件を変化させたパン生地の物性と製パン特性との関連性

岩瀬 祥一^{*†}, 三浦 靖^{**}, 小林 昭一^{**}

(原稿受理: 2005年11月2日)

1. 緒 言

日本で1年間に消費される食品用途の小麦は、2001年度に約408万トンに達し、わが国は世界でも有数の消費国である。¹⁾小麦を利用する場合に穀粒のままで食用することは少なく、そのほとんどが製粉された後に種々の食品に加工される。例えば、ベーカリー製品であるパンやクッキー、麺類であるうどんや素麺などの加工食品があげられる。これらでは、小麦粉に水を加えてせん断を加えることにより生地を形成している。すなわち、小麦粉に水を加えて混捏すると、小麦タンパク質の主要成分であり分子量が約5万の球状タンパク質でありその水和凝集体が著しく粘性を示すグリアジンと、分子量が約50万の繊維状タンパク質でありその水和凝集体が高い弾性を示すグルテニンとがグルテンと呼ばれる複合体を形成して網目構造を呈し、独特の粘弾性を発現する。パン生地の力学特性は、製造工程（混捏、発酵、分割、成形など）において重要な制御因子であり、最終製品の品質にも強く影響していることが経験的に知られている。そこで、パン生地の力

学特性を測定する試験機として、パドルで生地を混捏したときの抵抗の経時変化を測定するフェリノグラフ^{2,4)}、混捏時の攪拌子の回転軸に掛かるトルクを測定するミキソグラフ^{5,7)}、生地の伸展性を評価するエクステンシグラフ^{8,9)}などが従来から用いられてきた。しかし、これらの試験機は、その測定値が装置固有のものであるばかりでなく、パン生地の力学的挙動を詳細に解析するためには十分な情報を与えず、パン生地の工程管理に直接に測定値を用いるのには不十分であった。¹⁰⁾近年では、微小な正弦応力または正弦ひずみを種々の周波数で試料に負荷し、ひずみまたは応力を測定する動的粘弾性測定が多く用いられるようになった。¹¹⁻¹³⁾また、力学特性を測定する以外にも生地の膨張力や二酸化炭素ガス発生量を測定する方法などもある。^{14,15)}さらに、電磁気学的特性である誘電率を計測することで、ガス発生量を測定したり¹⁶⁾、パン生地の水分含量などの配合条件とガラス転移温度の変化との関連性¹⁷⁾を検討するなど、誘電特性を食品の計測に利用する動きがある。¹⁸⁾しかし、混捏や発酵の操作終点の判断をいまだに目視で行うという伝統的あるいは職人的な技法の占める割合が依然として大きい。また、多くの試験機が開発され、そして数多くの理化学的測定が行われているにもかかわらず、小麦粉生地が複雑な多成分の不均一混合系であるために、小麦粉製品の生地物性と製品特性との関連性は十分

* 岩手大学大学院連合農学研究科
〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

** 岩手大学農学部農業生命科学科
〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

† E-mail: u7506002@iwate-u.ac.jp, Tel: +81 19-621-6148

に解明されていない。最近では、タンパク質-ラウリル硫酸ナトリウム (SDS) 沈降法により食パンのローフ体積を予測すること^{19,20)}や、ミキソグラフを用いて食パンのローフ体積を予測する手法^{21,22)}が報告されている。ところが、SDS沈降法は測定時間が長く、しかも熟練が必要であるために誰しもが一定の値を取得しにくい。また、パン生地のみキソグラムとローフ体積との決定係数 ($R^2=0.51$ または 0.65) が低かったり、決定係数が高い場合は重回帰分析に用いる変数の独立性について検討していない場合が多々見られた。²³⁾ さらに、ミキソグラムでは生地混捏特性しか得られない。したがって、食パン製造の全工程中におけるパン生地の物性変化を測定できる手法が求められている。

そこで、本研究ではパンの理化学的性状を生地調製の段階で制御することを目標として、パン生地の混捏や発酵の条件がパン生地物性と製パン特性 (ローフ体積, 比容積, 焼減率, 内相の硬さ, 気孔構造) に大きな影響を与えていることに着目し、まず製パン工程中の2次発酵時間を3水準に設定してパン生地を意図的に作り分け、これらのパン生地物性と製パン特性との関連性について検討した。

2. 実 験

2.1 試料

食パンの原材料には、一等強力小麦粉 (「イーグル」, Lot. 020327AE6, 日本製粉㈱), 食塩 (「塩」, 財塩事業センター), グラニュー糖 (「テーブルシュガー」, 日新製糖㈱), ショートニング (「ナチュラル・ショートニング」, 月島食品工業㈱), 脱脂粉乳 (「ローヒット」, 森永乳業㈱), ドライイースト (「saf-instant」, S. I. Lesaffre社), イースト (「Cオリエンタルフード」, 組成: 塩化アンモニウム20.0 (% w/w), 硫酸カルシウム20.0 (% w/w), 炭酸カルシウム10.0 (% w/w), L-シスチン2.0 (% w/w), α -アミラーゼ1.0 (% w/w), プロテアーゼ1.0 (% w/w), L-アスコルビン酸0.6 (% w/w), その他に小麦粉, トウモロコシデンプン, NaCl, 麦芽粉末が45 (% w/w), オリエンタル酵母工業㈱), 脱塩水を用いた。試料の被覆剤にはn-ヘキサデカン (特級, 和光純薬工業㈱), 比重測定での媒体にはn-ヘキサン (一級, 和光純薬工業㈱) をそれぞれ用いた。

2.2 食パン生地および食パンの調製

Table Iに示したホワイトブレッド配合で、Fig. 1に示したストレート生地製法により2次発酵時間を35, 50, 65分間の3段階に変化させて山型食パンを調製した。すなわち、室温20 °C

でミキサー (SKミキサー SK20C, エスケーミキサー㈱) を使用してショートニングを除く全材料を低速 (100 rpm) で3分間, 中速 (200 rpm) で2分間, 高速 (280 rpm) で3分間混捏した後にショートニングを添加し, 再び低速で3分間, 中速で2分間, 高速で2分間混捏した。捏り上げ温度27 °Cになるように混捏したパン生地をユニットオープン (UFK-8-1-2-2, 共立プラント工業㈱) の発酵器部にて庫内温度27 °C, 庫内湿度75 %RHで90分間 (60分間後にパンチを実施) だけ1次発酵させた。ここで、パンチとは1次発酵工程において発酵器からパン生地を取り出し, 三つ折に畳んでから再び発酵器に戻す操作をいい, 大きな気泡を除去および細分化することならびにパン生地中に空気を供給してパン生地の中心部と表層部の発酵状態を均等化することを目的にしている。続いて、パン生地をケッパーで310 gに分割し, 27 °C, 75 %RHで15分間だけ生地を静置した (ベンチタイムと呼ばれている)。そして、U字型ステンレスパイプ (直径8 mm) の間にパン生地を置き, 生地の厚さが8 mmになるよう麺棒で板状に伸ばしてから手作業で丸めて成形した。成形したパン生地をワンローフ型パン焼成型 (アルタイト食パン型, 上面: W 187 mm×D 95 mm, 底面: W 182 mm×D 90 mm, H 90 mm) に入れ, ユニットオープンの発酵器部を使用し, 38 °C, 85 %RHで35分間, 50分間および65分間という3水準で2次発酵を行った。最後に、ユニットオープンの焼成器部を用いて上火設定180 °C, 下火設定260 °Cで25分間だけ焼成した。

Fig. 1. Preparation procedure of white pan bread.

Table I. Formula for white pan bread.

Ingredient	Flour basis [% w/w]
Wheat flour	100.0
Salt	2.0
Granulated sugar	5.0
Shortening	5.0
Non-fat dry milk	2.0
Dry yeast	1.2
Yeast food	0.5
Water	66.0

2.3 パン生地の物性測定

(1) 比重

パン生地の物性変化を詳細に把握するため、上記の2次発酵時間の3水準に加えて0, 95分間を追加した5水準で調製したパン生地について比重を測定した。固体比重測定装置(XS105DU, メトラー・トレド㈱)を用いてアルキメデス法による密度を測定して比重を算出した。²⁴⁾なお、パン生地の一部をハサミで切り取って試料を採取したが、試料中へのn-ヘキサン浸入を防ぐために試料断面に露出した気泡を指でつまんで接合させて閉じた。また、300 ml容積のガラス製ビーカーに試料の上面より10 mm以上液面が高くなるように20 °Cのn-ヘキサン(密度0.6667 g·cm⁻³)を満たした。

(2) pH

食品用pH電極(6252-10D, ㈱堀場製作所)を装着したpH測定装置(F-23, ㈱堀場製作所)を用いて焼成型に入れたままで生地のpHを測定した。

(3) 動的粘弾性

定格トルク容量1.96×10⁻² N·mで、定格荷重容量19.6 Nの荷重変換器を装着した動的粘弾性測定・解析装置(MR-500, ㈱ユービーエム)を用いてパン生地の動的粘弾性を測定した。平行平板(上部板:φ20 mm, 下部板:φ40 mm)に隙間が発生しないように1.0 mmの間隔でパン生地を挟み込んだ。^{25,26)}なお、せん断速度は平行平板の間隔が広いと減少し、使用した動的粘弾性測定・解析装置ではトルク出力がフルスケールの0.2%未満であると動的粘弾性測定の信頼性が失われるために平行平板の間隔を1.0 mmにすることにした。²⁷⁾そして、試料からの水分揮散を防止するために、試料側面の露出部分をn-ヘキサデカンで覆った。さらに、パン生地を測定治具に装着する際に負荷されたひずみを緩和するために38 °Cで5分間静置してから動的粘弾性の周波数依存性試験を行った。

i) 応力-ひずみの線形範囲

それぞれのパン生地の応力-ひずみの線形範囲を測定し、周波数依存性試験で試料に負荷する一定ひずみを決定した。すなわち、試料温度が38 °C、ひずみが1.7×10⁻⁵~1.7×10⁻⁴(振動角範囲0.01~0.1 deg)、周波数が1 Hzで動的粘弾性のひずみ依存性試験を行い、貯蔵弾性率(*G'*) [Pa] から線形範囲を判断した。

ii) 動的粘弾性の周波数依存性

パン生地の高分子物体としての粘弾性挙動を特徴づけるため、上記i)で求めた弾性限界ひずみから定めた一定ひずみを負荷し、試料温度38 °C、周波数10⁻²~10 Hzで*G'* [Pa]、損失弾性率(*G''*) [Pa] および力学的損失正接($\tan \delta_g = G''/G'$) [-]を測定した。

(4) 誘電緩和

誘電率分析装置(DEA2970, TA Instruments社)を用いてパン生地の誘電緩和測定を行った。測定センサにはセラミック製平行板(W 25 mm×D 25 mm×H 1.5 mm)を用い、前述した方法と同様にして試料を採取して測定センサに装着し、平行板間隔を1.0 mmに設定した。ここで、パン生地は流動性がある複雑な多成分不均一混合系であるため、平行板との密着性が低いと正確な値を得ることができない。このため、平行板

間隔を1.0 mmに設定した。試料温度38 °C、周波数10~10³ Hzにおける誘電率(ϵ') [-]、誘電損失率(ϵ'') [-] および誘電損失正接($\tan \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$) [-]を測定した。

2.4 パン生地の不凍水含量の測定

グルテンの水和状態の変化は、パン生地の流動化を起こす主要因の一つである。よって、パン生地中の不凍水含量からグルテンの水和状態の変化を捉え、それがパン生地の粘弾性に及ぼす影響を検討した。すなわち、パン生地をアルミニウム製簡易密封型試料容器(10μl, 容器:900793.901, 蓋:900794.901, TA Instruments社)に採取して密封した。空のアルミニウム製簡易密封型試料容器を対照とし、示差走査熱量計(2920型MDSCセルベース, TA-5200型熱分析システム, TA Instruments社)を用いて、30 °Cで5分間保持して試料の初期温度を平衡化してから-55 °Cまで温度勾配5 °C·min⁻¹で冷却し、その温度で5分間保持してから30 °Cまで温度勾配5 °C·min⁻¹で加熱するプログラムでDSC曲線を取得した。凍結水量は、示差走査熱量測定により氷の融解に伴うエンタルピー変化から測定できるが、不凍水含量はDSCでは測定できない。そこで、全含水量と凍結水量との差から間接的に不凍水量を測定し、次式(1)および(2)により不凍水含量 [% , w/w]を算出した。

$$W_{ufw} = W_{tw} - \Delta H_f \cdot W_s / L_f \quad (1)$$

$$(W_{ufw} / W_{tw}) \times 100 \quad (2)$$

ここで、 W_{ufw} は不凍水量 [kg]、 W_{tw} は試料の全含水量 [kg]、 W_s は試料の質量 [kg]、 ΔH_f は試料の融解潜熱 [kJ·kg⁻¹]、 L_f は実測した水の融解潜熱330 [kJ·kg⁻¹]である。なお、 W_{tw} はAACC標準法44-15A²⁸⁾に準じた常圧加熱乾燥法(103 °C, 30 h)で恒量になるまで試料を乾燥して求めた。

2.5 パン生地のマルトース含量

小麦粉に含まれるマルトース量は痕跡程度にすぎないが、小麦粉に水を添加すると、損傷デンプンにβ-アミラーゼが作用して非還元末端からグルコース2分子単位で加水分解されるために急速に増加する。これらのマルトースは、製パンにおける2次発酵後期に始まるマルトース発酵において不可欠な基質である。²⁹⁾マルトース発酵の際には、このマルトース発酵による二酸化炭素ガス発生量の増加、パン酵母(*Saccharomyces cerevisiane*)や乳酸菌が産生する有機酸の増加によるパン生地の比重の低下、グルテン網目構造の構造緩和による抗張力の低下と伸展性の増加などが考えられる。そこで、2次発酵におけるパン生地中のマルトース含量を測定し、マルトース発酵とパン生地の粘弾性との関連性を明確にすることを試みた。すなわち、2次発酵を5水準に変えて調製したパン生地について、フェノール-硫酸法³⁰⁾でパン生地中のマルトース含量を定量した。

2.6 製パン特性

(1) ローフ体積

2次発酵時間を3水準に変えて調製した山型食パンについて、AACC標準法72-10³¹⁾に準じ、ナタネ(農林16号, カネコ

種苗(株)とポリメチルアクリレート樹脂製水槽(W 200 mm×D 200 mm×H 200 mm)を用いたナタネ置換法でローフ体積(パン体積)を測定した。

(2) 比容積

ローフ体積[m³]をパン質量で除して比容積[m³·kg⁻¹]を求めた。なお、山型食パンではこの数値が品質にとって重要であり、一般的に普通約5.0×10⁻³m³·kg⁻¹以上を示す必要があるとされている。³²⁾

(3) 焼減率

焼減率は次式(3)で定義されるパンの焼成中に蒸発する水分量とパン生地質量比のことであり、一般的に10%前後であるとよいとされている。³²⁾

$$\text{焼減率}[\%, \text{w/w}] = \frac{\text{パン生地質量}[\text{kg}] - \text{パン質量}[\text{kg}]}{\text{パン生地質量}[\text{kg}]} \times 100 \quad (3)$$

なお、パン生地質量は310 gであり、パン焼成後に室温で30分間だけ静置して粗熱を除去した後にパン質量を測定した。

(4) 内相の硬さ

最大力19.6 Nのロードセルおよび円柱状プランジャー(No.3, φ16 mm×H 25 mm)を装着した単軸圧縮・引張型レオメータ(RE-33005, 株式会社山電)を用いて内相の硬さを測定した。すなわち、山型食パンをパンスライサー(1枚切りスライサーFK21型, 富士島工機(株))を用いて、ローフ両端部を厚さ20 mmずつ取り除いた。そして、一方の末端から他方の末端に向かって厚さ10 mmと厚さ25 mmに交互に切断し、厚さ25 mmの3枚のスライスを実験に供した。試料の切断面の内相部分を外皮層が入らないように9領域(3列×3段)に分割し、上段の左側からT1(Tはtopを意味する), T2およびT3, 中段の左側からM1(Mはmiddleを意味する), M2およびM3, 下段の左側からB1(Bはbottomを意味する), B2およびB3と命名した。予備検討の結果、これらの領域の硬さに試料の違いによる明確な差異が見られたT1, M2およびB3の3領域を対象とした。試料温度20 °C, 距離分解能0.01 mm, 圧縮速度1.0 mm·s⁻¹, 試料の厚さの80%を変形上限として単軸圧縮を行い、ひずみ0.25のときの応力を硬さ³³⁾と定義した。

(5) 内相の気孔構造

厚さ10 mmの3枚のスライスを試料にしてT1, M2およびB3の3領域を対象とし、パーソナル画像処理・解析システム(DA-5000S, 王子計測機器(株))を用いて内相の気孔構造をデジタル画像解析した。まず、原画像に対して濃度値の範囲を0~255の256(8 bit)階調に拡大する濃度階調変換を行った後、3×3マトリックスの4近傍についての強調フィルタ処理を施して画像を鮮鋭化した。そして、多重二値化イメージング法³⁴⁾で前処理画像を2値化した。すなわち、前処理画像の濃度値ヒストグラムピークのピークに相当する濃度値をしきい値5とする。この濃度値ピークの画素数の10%に当たる画素数を有する濃度値領域のうち濃度値の小さい方の境界の濃度値をしきい値1, 大きい方の境界の濃度値をしきい値9とした。さらに、ピーク濃度値から最も低い濃度値および高い濃度値の両

側の範囲をそれぞれ4等分してさらに6個のしきい値(しきい値2, 3, 4, 6, 7, 8)を設定した。各しきい値で2値化した図形から外枠に接している気孔図形を除去した図形の論理和を求め、気孔構造を表す図形を得た。そして、画像解析・計測ソフト(Image-Pro Plus Ver. 5.0, 日本ローパー)を用い、気孔面積率[%], 気孔数[-], X軸フェレ径[mm], Y軸フェレ径[mm], 楕円率[-]を測定した。

2.7 統計処理・解析

2次発酵時間の長短が、パン生地の物性および製パン特性に与える影響を明確にするためにTukey³⁵⁾の多重比較法(SPSS 12.0.2J for Windows, エス・ピー・エス・エス(株))で有意水準5%における検定を行った。また、パン生地の物性と製パン特性との関連性を検討するために重回帰分析を行った。

3. 結果および考察

3.1 パン生地の物性

(1) 比重

パン生地の比重は、2次発酵95分間のパン生地を除いて2次発酵時間が長くなるにつれてパン酵母が形成する二酸化炭素ガス気泡の体積分率が增加することを反映して減少した(Table II)。一方、2次発酵95分後のパン生地では、気泡の保持性が著しく低下し、試料を採取する段階で破泡してしまったと考えられる。

(2) pH

混捏直後にpH 5.80であったパン生地は、1次発酵、分割、丸め、ベンチタイム、成形という工程を経て2次発酵を開始する際にはpH 5.31に低下し、さらに2次発酵時間の経過にしたがって95分間後にはpH 4.80にまで低下した(Table III)。発酵の進行に伴うパン生地のpH低下は、小麦粉や製パン用酵母に存在する有機酸産生菌(主に乳酸菌)による有機酸の産生、イーストフードに配合されているアンモニウム塩からの有

Table II. Specific gravities [-] of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time.

2nd fermentation time [min]*				
0	35	50	65	95
0.70±0.01 ^a	0.49±0.01 ^b	0.45±0.01 ^c	0.42±0.00 ^d	0.42±0.01 ^d

Mean ± standard deviation (n=3)

*Values in the row followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

Table III. pH of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time.

2nd fermentation time [min]*				
0	35	50	65	95
5.31±0.03 ^a	5.17±0.02 ^b	5.06±0.01 ^c	4.95±0.01 ^d	4.80±0.01 ^e

Mean ± standard deviation (n=3)

*Values in the row followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

機酸の生成 (NH_4Cl からは HCl が生成), パン酵母が産生する二酸化炭素が水に溶解することによる炭酸の生成に起因すると言われている.³⁶⁾そして, パン生地での二酸化炭素ガス気泡の保持性は, パン生地pHが5.0を下回ると急激に低下すること³⁶⁾が知られており, 2次発酵65分後 (pH 4.96) のパン生地では比重測定後に, 数分間で破泡してしまった. したがって, 本実験における2次発酵50分間までは, 発生した二酸化炭素ガス気泡がパン生地中に有効に保持されているが, それ以降はpH低下ならびにパン酵母が産生するエタノールによりパン生地の網目構造の連続相を形成しているグルテンの水和性や高次構造が変化するために連続相の弾性が低下し, 相対的に粘性が増加して二酸化炭素ガス気泡の保持性が低下したと考えられる.

(3) パン生地の動的粘弾性

パン生地における応力-ひずみ線形範囲の上限ひずみは, それぞれ2次発酵開始時のパン生地で 5.1×10^{-5} , 35分間のパン生地で 5.6×10^{-5} , 50分間のパン生地で 7.9×10^{-5} , 65分間のパン生地で 4.7×10^{-5} , 95分間のパン生地で 4.9×10^{-5} であった. 動的粘弾性の周波数依存性試験を行う際に試料に負荷する一定ひずみには, 試料の個体差により弾性限界が多少は変動したとしても, 動的粘弾性測定が応力-ひずみの線形範囲を逸脱しないようにするため, 本実験ではそれぞれの弾性限界80%に相当する値を用いることにした. いずれの試料でも G' および G'' は, 測定周波数が低周波から高周波になるのにしたがって増加し, $\tan \delta_g$ の値は逆に減少した (Fig. 2). 特に, 各試料の $\tan \delta_g$ に明確な差異が見られたのは, 本実験における低周波領域にある 10^{-2} Hzにおいてであった. すなわち, $\tan \delta_g$ の値は, 2次発酵開始時のパン生地で 1.12 ± 0.04 , 2次発酵35分後のパン生地で 1.37 ± 0.04 , 2次発酵50分後のパン生地で 0.87 ± 0.03 , 2次発酵65分後のパン生地で 1.17 ± 0.04 , 2次発酵95分後のパン生地で 1.04 ± 0.06 であり, 2次発酵50分後のパン生地で最低であった.

Ferryによれば, 角周波数 $10^{-5} \sim 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲における G' , G'' , $\tan \delta_g$ の変化パターンから高分子は7種類に大別できると述べている.^{37, 38)}本研究での動的粘弾性測定の周波数範囲は, $10^{-2} \sim 10 \text{ Hz}$ (角周波数 $10^{-3.6} \sim 10^{-1.8} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$) というようにFerryが議論している周波数領域の一部にしかすぎないために断言できないが, 非晶性鎖状高分子に似た動的粘弾性挙動を呈した. 2次発酵時間が異なるパン生地の $\tan \delta_g$ の値に差異が見られたのは, 主にグルテン網目構造の変化に起因すると考えられる. すなわち, 成形直後のパン生地では, 加工硬化のために内部ひずみが最大となり, パン生地は強く引き締められた状態にあると考えられる. しかし, 発酵時間が長くなるにしたがってこの内部ひずみは徐々に緩和され, しかも成形操作によってパン生地同士が接合した部分ではタンパク質分子内および/または分子間の水素結合, 静電結合, ジスルフィド (SS) 結合ならびに疎水性相互作用などによって架橋領域が増加して粘弾性に富むグルテン網目構造が形成される. したがって, パン生地の抗張力が適度に低下して伸展性の良好なパン生地に変化していくと考えられている.³⁹⁾一方, 2次発酵時間35分間にしたパン生地では, 発酵時間が短いために小麦粉中に存在する β -アミラーゼによる損傷デンプン粒の加水分解が進行しつつも生地に加えられたひずみが十分に緩和せず, しかも架橋領域が少ないために抗張力が低いと考

えられる. したがって, 粘性に比べて弾性の寄与割合が低いために $\tan \delta_g$ の値が高くなったと思われる. 一方, 2次発酵50分後のパン生地では, 発酵時間が長くなることで内部ひずみの緩和が十分に進行し, しかも架橋領域が増加するため, 粘性に比べて弾性の寄与割合が高くなって $\tan \delta_g$ の値が低くなったと考えられる. そして, 2次発酵時間を65分間および95分間にしたパン生地では, パン酵母や乳酸菌などが産生する二酸化炭素や有機酸によるパン生地のpH低下, タンパク質分子内/分子間のSH-SS交換反応⁴⁰⁾などが過度に進行してしまうために弾性に比べて粘性の寄与割合が高くなって $\tan \delta_g$ の値が再び増加したと考えられる.

(4) 誘電緩和

各試料の ϵ' および ϵ'' は, 測定周波数が増加するにしたがって低下したが, $\tan \delta_g$ は逆に上昇した (Fig. 3). $\tan \delta_g$ は本実験での高周波領域にある周波数 10^3 Hz で試料間に明確な差異が見られ, 2次発酵開始時のパン生地で 3.83 ± 0.02 , 2次発酵35分後のパン生地で 6.14 ± 0.01 , 2次発酵50分後のパン生地で 7.39 ± 0.20 , 2次発酵65分後のパン生地で 8.48 ± 0.60 , 2次発酵95分後のパン生地で 12.56 ± 0.89 というように2次発酵時間の延長に伴って増加した.

Fig. 2. Frequency dependence of dynamic moduli (G' and G'') and mechanical loss tangent ($\tan \delta_g$) of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time. Values are average $\pm$ standard deviation of three replicates. $\bullet$, fermented for 50 min; Δ , fermented for 35 min; $\square$, fermented for 65 min. The inset shows $\tan \delta_g$ of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time obtained at a frequency of 10^{-2} Hz .

パン生地中の $\tan \delta_e$ の値が2次発酵時間により異なったのは、パン生地内部の不均一構造の変化に起因すると考えられる。パン生地は、主にタンパク質、脂質、デンプン粒、電解質 (NaCl, 遊離アミノ酸、有機酸など)、非電解質 (糖質など) および水からなる導電性のある誘電体かつ粘弾塑性体である連続相に、絶縁体である二酸化炭素ガス気泡が分散した構造であると考えられている。⁴¹⁾ 2次発酵の進行に伴ってパン生地における二酸化炭素ガス気泡の体積分率が増加するので、単位体積当たりのパン生地の導電率は低下する。しかし、パン酵母や乳酸菌によってパン生地中に存在する遊離アミノ酸は代謝されるが、有機酸が産生されるのでパン生地連続相の導電率が増加する。したがって、単位体積当たりのパン生地に起こる電気化学的物性の変化は、導電性のある誘電体の交流電圧・電流現象として捉えることができる。つまり、感応電荷の遅延発生に由来する誘電現象および導電電荷による電流・放電に由来する導電現象とが同時に起きていることになる。

2次発酵時間が50分間までは、二酸化炭素ガス気泡の体積分率の増加によるパン生地の導電率の低下、ならびにパン酵母や乳酸菌が産生する有機酸の増加によるパン生地連続相

の導電率の増加、およびパン生地連続相の弾性と粘性の増加 (力学的損失正接 ($\tan \delta_e$) が小さいので粘性に比べて弾性の寄与割合が大きい) による電荷 (イオン) の移動性の低下が同時に生じていると考えられる。したがって、単位体積当たりのパン生地では、電気抵抗に比べて電気容量が増加するので $\tan \delta_e$ は2次発酵の経時にしたがって増加する。一方、2次発酵時間が65分間に達すると過発酵状態になり、パン生地中に分散している二酸化炭素ガス気泡の増加と合一 (焼成したパン内相の気孔の大きさ分布から推察) によるパン生地の導電率の低下、パン生地連続相のさらなる導電率の増加、およびパン生地連続相の弾性と粘性がさらに増加するが粘性に比べて弾性の寄与割合が低下することによる電荷の移動性の低下が同時に起きていると考えられる。したがって、2次発酵50分間までの場合よりもパン生地の単位体積当たりの電気抵抗に比べて電気容量が増加するので $\tan \delta_e$ が増加する。そして、2次発酵95分後のパン生地でも電気抵抗に比べてさらに電気容量が増加するので $\tan \delta_e$ が増加すると考えられる。

3.2 パン生地の不凍水含量

パン生地中の不凍水含量は2次発酵35分後までは減少したが、それ以降では標準偏差が大きく明確な傾向が見られなかった (Table IV)。パン生地内にはグルテン網目構造によって形成される狭い空隙が多く、水分子の運動は大きく束縛されていなくとも狭い空隙内に捕捉された水は不凍水になる場合もある。⁴²⁾ 2次発酵開始時のパン生地では、成形工程でのせん断により一部が破断されたパン生地の網目構造が接合して架橋領域を形成し、この際に生成したマイクロコンパートメント (微小な空隙) に捕捉された水が一時的に増加したと考えられる。2次発酵35分後では、発酵によって空隙が膨張したために束縛されていた水分子の運動性が増大して自由水としての性質が復活して凍結したと考えられる。

3.3 パン生地のマルトース含量

2次発酵開始時に9.8% (w/w) であったパン生地のマルトース含量は、2次発酵35分後または50分後に9.4% (w/w)、そして2次発酵95分後には7.7% (w/w) にまで減少した (Table V)。よって、マルトース発酵は2次発酵35~50分間で開始したと考えられる。また、小麦粉内在の β -アミラーゼが至適 pH 5.2⁴³⁾ であることから、2次発酵35分後のパン生地 (pH 5.17) と50分後 (pH 5.06) のパン生地ではマルトース発酵によりマルトースが消費されるもののマルトースが生成されるためにパン生地中のマルトース含量が減少しなかったのではないかと考えられる。一方、2次発酵時間が65分間を超えるとパン生地のマルトース含量が急激に減少したのは、小麦粉内在の α -アミラーゼの至適 pH が5.5⁴³⁾ であることから、pH 4.95

Fig. 3. Frequency dependence of permittivity (ϵ'), dielectric loss (ϵ'') and dielectric loss tangent ($\tan \delta_e$) of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time.

Values are average $\pm$ standard deviation of three replicates.

●, fermented for 50 min; △, fermented for 35 min; □, fermented for 65 min.

The inset shows $\tan \delta_e$ of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time obtained at a frequency of 10^3 Hz.

Table IV. Unfreezable water content [% (w/w)] of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time.

2nd fermentation time [min]*				
0	35	50	65	110
48.8 $\pm$ 0.8 ^a	45.5 $\pm$ 0.6 ^b	45.6 $\pm$ 0.7 ^b	43.6 $\pm$ 1.6 ^b	44.8 $\pm$ 0.9 ^b

Mean $\pm$ standard deviation (n=3)

*Values in the row followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

である2次発酵65分後のパン生地ではその活性が低下するため、 β -アミラーゼの基質であるデキストリンの生成が減少することに起因すると考えられる。³⁰⁾さらに、マルトース発酵の至適pHが4.5³⁰⁾前後であることから、マルトース消費量が増加することもパン生地中のマルトース含量が急激に減少する要因であると考えられる。つまり、マルトース発酵は2次発酵の中期~後期にかけての35~50分間で開始され、マルトース発酵が進むとともに二酸化炭素ガス発生量やパン酵母などが産生する有機酸が増加したと考えられる。上述したパン生地の理化学的性状を製パン工程の流れに沿ってまとめて示したのがFig. 4である。

3.4 製パン特性

山型食パンのローフ体積、比容積および焼減率は2次発酵時間が長くなるほど有意に増加し (Table VI)、逆に内相の硬さは有意に減少した (Table VII)。したがって、2次発酵時間を3水準に設定することで製パン特性に有意な差異がある山型

食パンを作り分けることができた。内相のT1領域およびB3領域における気孔の楕円率は、2次発酵時間を65分間にして調製した方が35分間にした場合より低くなった (Table VIII)。2次発酵時間を35分間にして調製したパンのT1領域は、気泡数、X・Y軸フェレ径の平均値および標準偏差から気泡の大きさが不均一で粗い気孔構造であった。一方、2次発酵時間を65分間にした場合の気孔構造は、二酸化炭素ガス気泡のパン生地への保持性が低下したためにいったんは膨張した気泡が合一もしくは分断したために楕円率が低くなったと考えられる。また、2次発酵時間を35分間にしたパンのB3領域は、発酵不足のために小さい気泡が密集した状態にあるので単位体積中の気泡数は多い。一方、2次発酵時間を65分間にした場合には生地膨張が進行して気泡が大きくなるために単位体積中の気泡膜の弾性が低下し、気泡の上方に存在するパン生地からの圧力によって気泡が圧縮されて扁平になるために、気泡数は増加するが、Y軸フェレ径は低下すると考えられる。

3.5 パン生地の物性と製パン特性との関連性

製パン特性をパン生地の物性から予測することの可能性を検討するために、パン生地の物性を独立変数、製パン特性を従属変数として重回帰分析を行った。独立変数には、パン生地物性のうち試料間に有意差が見られた周波数 10^{-2} Hzにおける貯蔵弾性率 (以後、 $G'(10^{-2})$ と表記する) と力学的損失正接 (以後、 $\tan \delta_G(10^{-2})$ と表記する)、周波数 10^3 Hzにおける誘電率 (以後、 $\epsilon'(10^3)$ と表記する) と誘電損失正接 (以後、 $\tan \delta_\epsilon(10^3)$ と表記する) およびパン生地比重 (以後、SGと表記す

Table V. Maltose content [% (w/w)] of several kinds of bread dough prepared with different 2nd fermentation time.

2nd fermentation time [min]*				
0	35	50	65	95
9.82±0.06 ^a	9.39±0.15 ^b	9.42±0.12 ^b	8.62±0.12 ^c	7.69±0.15 ^d

Mean ± standard deviation (n=3)

*Values in the row followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

Fig. 4. Changes in physicochemical properties of bread dough during bread making.

Physicochemical properties: ↓, decrease; ↑, increase.

Factor of physicochemical properties change: ↓, decrease; ↑, increase.

る)の5変数を候補とした。また、従属変数には製パン特性のうち2次発酵時間により有意差が見られたローフ体積、比容積および内相(領域T1, M2, B3)の硬さという5変数を候補とした。

まず、これらの独立変数と従属変数について、互いの独立性の有無を確認するために有意水準5% ($p=0.05$) で相関分析を行った。Table IXに示したように従属変数としての候補変数では、すべての組み合わせで独立性がなかった。一方、独立変数としての候補変数の間では $G'(10^{-2})$ と3変数

($\varepsilon'(10^3)$, $\tan \delta_\varepsilon(10^3)$, SG) との間の決定係数が $R^2=0.11\sim0.20$, および $\tan \delta_G(10^{-2})$ と3変数 (ε' , $\tan \delta_\varepsilon(10^3)$, SG) との間の決定係数が $R^2=0.15\sim0.32$ というように独立性が高いことがわかった。よって、従属変数にはローフ体積(以後, LVと表記する)を選択し、独立変数を前述の六つの組み合わせにして、重回帰分析を行うことにした。

次に, LVと独立変数である5変数 ($G'(10^{-2})$, $\tan \delta_G(10^{-2})$, $\varepsilon'(10^3)$, $\tan \delta_\varepsilon(10^3)$, SG) のそれぞれとの線形性を確認した結果, LVと G' , LVと $\tan \delta_G(10^{-2})$ との関係が非線形の2次関数で

Table VI. Physical properties of several kinds of white pan bread prepared with different 2nd fermentation time.

2nd fermentation time [min]	Loaf volume [10^{-6}m^3]*	Specific volume [$10^{-6}\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$]*	Weight loss [% , w/w]*
35	1160±20 ^a	4.29±0.07 ^a	13.0±0.09 ^a
50	1330±30 ^b	4.98±0.13 ^b	13.6±0.35 ^b
65	1440±20 ^c	5.42±0.09 ^c	14.2±0.60 ^b

Mean±standard deviation (n=3)

*Values in the same column followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

Table VII. Crumb firmness [kPa] of several kinds of white pan bread prepared with different 2nd fermentation time.

Region	2nd fermentation time [min]		
	35*	50*	65*
T1	6.86±0.23 ^a	5.45±0.20 ^b	4.16±0.03 ^c
M2	6.73±0.13 ^a	4.45±0.17 ^b	3.92±0.08 ^c
B3	9.78±0.11 ^a	7.54±0.04 ^b	5.25±0.05 ^c

T1, left end region in the upper row

M2, central region in the middle row

B3, right end region in the bottom row

Mean±standard deviation (n=3)

*Values in a row followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

Table VIII. Porous structure of crumbs in T1, M2 and B3 regions of several kinds of bread prepared with different 2nd fermentation time.

Region	2nd fermentation time [min]	Cell-total area ratio [%]*	Number of cells [—]*	Feret's diameter X [mm]*	Feret's diameter Y [mm]*	Roundness [—]*
T1	35	42.8±3.7 ^a	114.0±1.0 ^a	1.65±0.19 ^a	1.62±0.11 ^a	3.21±0.11 ^a
	50	40.8±1.8 ^a	125.7±0.6 ^b	1.46±0.02 ^a	1.48±0.04 ^{ab}	2.76±0.07 ^b
	65	38.9±2.0 ^a	124.0±3.0 ^b	1.36±0.06 ^a	1.41±0.03 ^b	2.53±0.07 ^c
M2	35	37.9±2.3 ^a	137.0±7.2 ^a	1.35±0.08 ^a	1.30±0.08 ^a	2.25±0.01 ^a
	50	37.8±4.8 ^a	132.0±1.2 ^a	1.27±0.18 ^a	1.39±0.04 ^a	2.03±0.15 ^a
	65	41.3±2.3 ^a	132.3±1.2 ^a	1.26±0.02 ^a	1.34±0.02 ^a	2.18±0.04 ^a
B3	35	38.4±1.7 ^a	129.3±2.1 ^a	1.33±0.03 ^a	1.39±0.05 ^a	2.43±0.05 ^a
	50	33.0±4.9 ^a	113.3±2.5 ^b	1.34±0.01 ^a	1.47±0.03 ^a	2.50±0.06 ^a
	65	35.5±3.1 ^a	139.0±5.3 ^c	1.34±0.06 ^a	1.25±0.01 ^c	2.13±0.05 ^c

Mean±standard deviation (n=3)

*Values in the same column at the same region followed by the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

Table IX. Correlation matrices among physical properties of white pan bread as candidate dependent variables (A) and bread dough as independent variables (B).

(A)						(B)					
	LV	SV	HR-T1	HR-M2	HR-B3		$G'(10^{-2})$	$\tan \delta_G(10^{-2})$	ε'	$\tan \delta_\varepsilon(10^3)$	SG
LV	1					$G'(10^{-2})$	1				
SV	0.99*	1				$\tan \delta_G(10^{-2})$	-0.91*	1			
HR-T1	-0.97*	-0.97*	1			$\varepsilon'(10^3)$	-0.45	0.57	1		
HR-M2	-0.95*	-0.95*	0.95*	1		$\tan \delta_\varepsilon(10^3)$	0.33	-0.39	-0.85*	1	
HR-B3	-0.98*	-0.99*	0.99*	0.93*	1	SG	-0.33	0.44	0.96*	-0.93*	1

LV, loaf volume; SV, specific volume; HR-T1, crumb firmness of region T1; HR-M2, crumb firmness of region M2

HR-B3, crumb firmness of region B3; $G'(10^{-2})$, storage modulus at 10^{-2} Hz; $\tan \delta_G(10^{-2})$, mechanical loss tangent

$\varepsilon'(10^3)$, dielectric loss; $\tan \delta_\varepsilon(10^3)$, dielectric loss tangent; SG, specific gravity; significant at $p < 0.05$

あった (Fig. 5)．そこで、今回は非線形重回帰分析を用いてモデル式を推定することにした．⁴⁴⁾ 95 % の信頼区間で平方和の収束基準を 1.0×10^{-8} 、パラメータの収束基準を 1.0×10^{-8} とした Levenberg-Marquardt 法⁴⁵⁾ で推定したところ、LV を精度よく予測するモデル式は次式(4)~(9)のとおりであった．

Fig. 5. Relationships between LV and physical properties of several kind of bread dough.
Abbreviations are the same in Table IX.
The symbols (◆) represent the experimental data and the solid lines are the regression lines.

$$LV = -6.6 + 0.7 \tan \delta_{\epsilon} (10^3) + 28.5 \tan \delta_G (10^{-2}) - 13.5 \tan \delta_G (10^{-2})^2 \quad (4)$$

$$(R^2 = 0.94)$$

$$LV = -178.6 - 33.41 SG + 145.0 G' (10^{-2}) - 25.39 G' (10^{-2})^2 \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.93)$$

$$LV = -262.3 + 1.0 \tan \delta_{\epsilon} (10^3) + 188.4 G' (10^{-2}) - 33.07 G' (10^{-2})^2 \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.92)$$

$$LV = 9.7 - 23.7 SG + 27.6 \tan \delta_G (10^{-2}) - 13.0 \tan \delta_G (10^{-2})^2 \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.92)$$

$$LV = 24.2 - 7.1 \epsilon' (10^3) + 45.7 \tan \delta_G (10^{-2}) - 21.2 \tan \delta_G (10^{-2})^2 \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.91)$$

$$LV = -395.7 - 13.5 \epsilon' (10^3) + 337.2 G' (10^{-2}) - 59.8 G' (10^{-2})^2 \quad (9)$$

$$(R^2 = 0.87)$$

ここで、LV の単位は $[10^{-4} \text{ m}^3]$ である．

以上のことから、製パン条件のうちパンの品質に大きな影響を与えることが知られている2次発酵時間を意図的に5水準に変化させて調製したパン生地、およびそれから調製したパンについては、パン生地の物性値を独立変数にした非線形重回帰モデル式により製パン特性（パンのローフ体積）を予測することが可能であると考えられる．今後は、パンの品質に大きく影響を及ぼすもう一つの因子であるパン生地の混捏条件についても同様に検討する予定である．

4. 結 論

パンの品質に大きな影響を及ぼすことが知られている2次発酵時間を5水準（0分間、35分間、50分間、65分間、95分間）に変化させてパン生地を調製し、このパン生地物性（比重、pH、粘弾性、誘電率）、不凍水含量、マルトース含量、およびこれらのパン生地から調製した山型食パンの製パン特性（ローフ体積、比容積、焼減率、内相の硬さ、内相の気孔構造）を測定した．そして、パン生地物性と製パン特性との関連性を検討し、次の結果を得た．

- (1) 2次発酵時間を5水準に変えることにより物性に有意差のあるパン生地、および2次発酵時間を3水準に変えることにより製パン特性に有意差がある山型食パンを作り分けることができた．
- (2) 2次発酵時間が長くなるほどパン生地の比重と pH は低下し、周波数 10^3 Hz での誘電損失正接 $\tan \delta_{\epsilon}(10^3)$ は増加した．周波数 10^{-2} Hz での力学的損失正接 $\tan \delta_G(10^{-2})$ は2次発酵時間50分間で極小値をとった．また、2次発酵後期に盛んになるマルトース発酵によって2次発酵65分後以降にパン生地のマルトース含量が急激に減少した．2次発酵の進行に伴うパン生地の物性変化は、粘弾塑性体と見なせるパン生地の連続相に気泡が分散した構造に及ぼすパン酵母が産生する二酸化炭素ガス気泡ならびにパン酵母と乳酸菌などが産生する有機酸の影響、誘電性のある誘電体と見なせるパン生地で同時に起きている誘電現象および導電現象から説明することができた．
- (3) 2次発酵時間が長くなるほど山型食パンのローフ体積は増加し、内相は柔らかくなり、気泡の楕円率は低下した．
- (4) パン生地の周波数 10^{-2} Hz での貯蔵弾性率や力学的損失正接、ならびに 10^3 Hz での誘電率や誘電損失正接を独立変数にして製パン特性の一つであるローフ体積を精度よく予測する非線形重回帰式を得ることができた ($R^2 = 0.87 \sim 0.94$)．

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、強力小麦粉の入手に便宜をはかって頂いた(株)小松製菓に感謝いたします．

REFERENCES

- 1) The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan, Cereals and the supply and demand of tea~The trend and a prospect, <http://www.kanbou.maff.go.jp/www/jk/koku/15koku/15koku.htm#komugi>
- 2) Watanabe A, Yokomizo K, Eliasson AC, *Cereal Chem*, **80**, 281 (2003).
- 3) O'Brien M, Mueller A, Scannell N, Arendt E, *J Food Eng*, **56**, 256 (2003).
- 4) Cuq B, Yildiz E, Kokini J, *Cereal Chem*, **79**, 129 (2002).
- 5) Edwards NM, Mulvaney SJ, Scanlon MG, Dexter JE, *Cereal Chem*, **80**, 755 (2003).
- 6) Singh N, Bajaj IK, Singh RDH, Gujral HS, *J Food Eng*, **56**, 89 (2003).
- 7) Butow BJ, Gras PW, Haraszi R, Bekes F, *Cereal Chem*, **79**, 826 (2002).
- 8) Sharadanant R, Khan K, *Cereal Chem*, **80**, 764 (2003).
- 9) Bauer N, Koehler P, Wieser H, Schieberle P, *Cereal Chem*, **80**, 787 (2003).
- 10) Szczesniak AS, *Cereal Foods World*, **33**, 841 (1988).
- 11) Ribotta PD, Pérez GT, León AE, Añón MC, *Food Hydrocolloids*, **18**, 305 (2004).
- 12) Schober TJ, Clark CI, Kuhn M, *Cereal Chem*, **79**, 408 (2002).
- 13) Toufeili I, Lambert IA, Kokini JL, *Cereal Chem*, **79**, 138 (2002).
- 14) Campbell GM, Sanchez RH, Rodriguez RP, Merchan ML, *Cereal Chem*, **78**, 272 (2001).
- 15) Collado M, Deleyn ID, *Cereal Food World*, **45**, 214 (2000).
- 16) Ito M, Yoshikawa S, Asami K, Hanai T, *Cereal Chem*, **69**, 325 (1992).
- 17) Laaksonen TJ, Roos YH, *Cereal Sci*, **37**, 319 (2003).
- 18) Hanekura Y, *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **51**, 109 (2004).
- 19) Yoshida C, Yano M, Danno G, *Food Sci Technol Int Tokyo*, **2**, 209 (1996).
- 20) Sapirstein HD, Suchy J, *Cereal Chem*, **76**, 164 (1999).
- 21) Chung OK, Ohm JB, Caley MS, Seabourm BW, *Cereal Chem*, **78**, 493 (2001).
- 22) Dobraszczyk BJ, Schofield JD, *Cereal Chem*, **79**, 607 (2002).
- 23) Chatterjee S, Price B (Sawa T, Kano S), "*Kaikibunseki no Jissai*", p224, (1981), Shin-yo-sha, Tokyo.
- 24) Harashima A, "*Kyoyobuturigaku*", p60, (1992), Gakujutsu Tosho, Tokyo.
- 25) Clarke CI, Schober TJ, Arendt EK, *Cereal Chem*, **79**, 640 (2002).
- 26) Tronsmo KM, Magnus EM, Baardseth P, Schofield D, Aamodt A, Færgestad EM, *Cereal Chem*, **80**, 587 (2003).
- 27) Navickls L, Anderson R, Bagley E, Jasber B, *J Texture Studies*, **13**, 249 (1982).
- 28) American Association of Cereal Chemists, "*Approved Methods of the AACC*", 9th ed Method 44-15A, (1995), The Association: St. Paul, MN.
- 29) Tanaka Y, Matumoto H, "*Seipan no Kagaku I Seipan Process no Kagaku*", p118, (1991), Korin, Tokyo.
- 30) Hukui S, "*Kangento no Teiryoka*", p45, (1985), Japan Scientific Societies Press, Tokyo.
- 31) American Association of Cereal Chemists, "*Approved Methods of the AACC*", 9th ed Method 72-10, (1995), The Association: St. Paul, MN.
- 32) Nippon Pankenkyujo, "*Shikhenho*", p3, (1986), Nippon Pankenkyujo, Tokyo.
- 33) American Association of Cereal Chemists, "*Approved Methods of the AACC*", 9th ed Method 74-09, (1995), The Association: St. Paul, MN.
- 34) Miura M, Elizabeth Arnold Fuji Foundation 1996 Annual Report, p27, (1997).
- 35) Nagata Y, Yoshida M, "*Tokeiteki Tahenryo no Kiso*", p79, (1997), Scientist, Tokyo.
- 36) Tanaka Y, Matumoto H, "*Seipan no Kagaku I Seipan Process no Kagaku*", p106, (1991), Korin, Tokyo.
- 37) Ferry D, "*Viscoelastic Properties of Polymers*", 3rd ed, (1980), John Wiley and Sons Inc, NY, p24.
- 38) Murakami K, "*Rheology Kisoron*", p144, (1991), Sangyo Tosho, Tokyo.
- 39) Tanaka Y, Matumoto H, "*Seipan no Kagaku I Seipan Process no Kagaku*", p86, (1991), Korin, Tokyo.
- 40) Yamauchi H, "*Shokuhin Tanpakushitu no Kagaku*", p92, (1984), Shokuhin Shizai Kenkyukai, Tokyo.
- 41) Hanai T, "*Hukinshitsukozo to Yudenritsu*", p174, (2000), Yoshioka Shoten, Kyoto.
- 42) Murase N, Goda K, *Trans of the JAR*, **3**, 1 (1986).
- 43) Onishi M, Sakano Y, "*Amylase*", p70, p142, (1987), Japan Scientific Societies Press, Tokyo.
- 44) Ishimura S, "*SPSS niyoru Tahenryo Data Kaiseki no Tejun*", p54, (2000), Tokyo Tosho, Tokyo.
- 45) Iri M, Konno T, Tone K, "*Saitekika Handbook*", p58, (1996), Asakura Shoten, Tokyo.