

## 食パンのレオロジ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—

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含水率の変化と圧縮破壊特性(かたさと破壊エネルギー)との関係を明らかにした。焼成直後, クラム中心部の含水率はほぼ一様で, クラストを含む周辺部より高いが, 保存中の水分勾配に起因する水移動により, 中心部と周辺部の含水率差が減少する。かたさと同様に, 破壊エネルギーは焼成後の経過時間や含水率の減少につれ増大する。

更に, 載荷条件や試料の状態について, 標準試験法を確立する観点から検討を行った結果, 破壊特性は変形速度とプランジャのサイズ及び形状により影響を受け, 適切な変形速度は5 mm/s~10mm/s, プランジャの接触面表面積はスライス表面積の8~20%であると考えられた。また, 載荷面以外の周辺部を切除した試料の破壊エネルギーは除かないものの約2/3でありクラストを含む周辺部の影響が大きいことを明らかにした。

## Studies on Rheology of White Bread (Part 3)\*

—Effect of the Change in Moisture Content of Loaf during Storage  
and Testing Conditions on the Breaking Characteristics of Crumb—

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

## Abstract

Experimental study has been carried out on the relationships between breaking characteristics of white bread and its moisture content during storage, considering appropriate conditions for a standard firmness testing method for white bread.

After baking of white bread a uniform distribution of moisture content was observed at the central position of a loaf, showing higher values of moisture content than those at outer position including crust, and then the moisture

was found to move from the center of a loaf to crust during the period of storage. The breaking energy of crumb has a tendency to increase as

\* 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, Tokyo, 113 Japan

the moisture content in a loaf decreased during storage.

The breaking characteristics were affected by deformation rate, size as well as the shape of plunger and the preparation of sample. Under our experimental conditions, the deformation rate ranging from 5 to 10 mm/s and the disk-type plunger whose cross sectional area is 8 to 20% of that of slice are recommended for measuring more universal data of breaking characteristics.

[Keyword] white bread, rheology, firmness, breaking energy, moisture content, testing condition

## I 緒 言

食パンのレオロジ特性はその品質評価の指標として重要なファクタと考えられている。著者らは食パンの力学的性質をレオロジの観点から究明することを目的とし、クラムの弾性特性、粘弾性特性および破壊特性について一連の実験・検討を行い、その結果を報告した<sup>1)2)</sup>。そこでは、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クラムを弾性体と見なせる領域での比例限界、等価ヤング率及びポアソン比などの物性値を求めた。更にクラムのかたさとその経時変化を検討し、併せて生地成形方法・ローフの比容積・焼成温度・焼減率及び保存温度などの製パン・保存条件に関する諸要因とクラムのかたさ及びその経時変化に関する定量的データを報告した。

一般に食パンの含水率はクラムの力学的性質に影響を及ぼすものと考えられており、例えば山形食パンのローフでは、中心部の含水率が周辺部より高いが、保存中に低下すると報告が見られる<sup>3)</sup>。しかし、クラムの含水率とその力学的性質の関係はまだ明らかにされていない。

クラムのかたさとその測定条件に関する研究結果はいくつか見られる。例えば、(1)プランジャのサイズについて、クラムの圧縮時、圧縮力は変形速度よりもプランジャのサイズから大きな影響を受け、プランジャが小さくなると共に大きくなる<sup>4)</sup>。(2)プランジャの形状については、歯形、ディスク型及びくさび型では、ディスク型のプランジャを用いたときの圧縮力が小さくなる<sup>5)</sup>。(3)クラストを除いた試料と除かないもののかたさは、ともに変形率依存性が大きく、測定結果は変動する<sup>6)</sup>などが挙げられる。また、固体状食品のテクスチャを評価するには、破壊特性としてかたさ以外

に破壊エネルギーを知る必要があることが指摘されているが<sup>7)</sup>、これについての研究例は少ない。

本報では、食パンの保存中における含水率変化と圧縮破壊特性の関係を明らかにした。更に、破壊特性に影響を及ぼす要因と考えられる圧縮試験時の変形速度・プランジャのサイズ及び形状などの載荷条件、クラストを含む周辺部の有無などの試料の状態について、標準試験法を確立する観点に立って検討を行った。

## II 実験方法

中種法により棒状成形の角形食パン<sup>1)</sup>を標準的焼成条件(焼成温度230°C、焼減率10%)で焼成し、焼成後1時間半自然放冷した後、ポリエチレン袋に包装して20°Cの恒温室に保存した。ローフ(16cm×8cm×8cm)を厚さ2cmにスライスし、その両端2枚ずつを捨て、残りのスライスを破壊特性試験の供試サンプルとした。

圧縮試験は米国穀物化学者協会(AACC)<sup>8)</sup>の標準測定法に基づき、第1、2報に報告した改造型のTPU(Texture profile unit)<sup>1)</sup>に図1-(a)に示すように基準条件として直径30mmの円形プランジャを装着し、変形速度5mm/sで行った。ただし、プランジャのサイズ・形状、変形速度などが破壊特性に及ぼす影響を調べるために、上記基準法以外の測定条件も併用した。更にプランジャ圧縮面以外のクラストを含む周辺部の影響を評価するために、図1-(b)に示すようなクラム・サンプルと同じ表面積を持つプランジャを用いる圧縮試験を行い、その結果をクラストの単純圧縮試験結果と比較した。

含水率の測定には、加熱乾燥法<sup>9)</sup>を用いた。すなわち圧縮試験とは別に同一焼成条件の食パンを準備し、図2に示すようにスライスの断面から10個の試片をサンプリングし、65°Cで6時間の調整

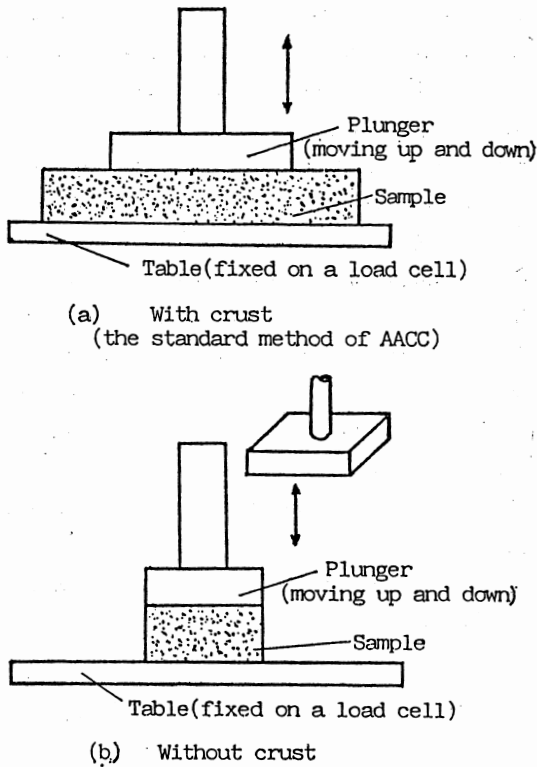


図1 圧縮中におけるサンプルとプランジャとの関係

Fig. 1 Relation between sample and plunger in compression

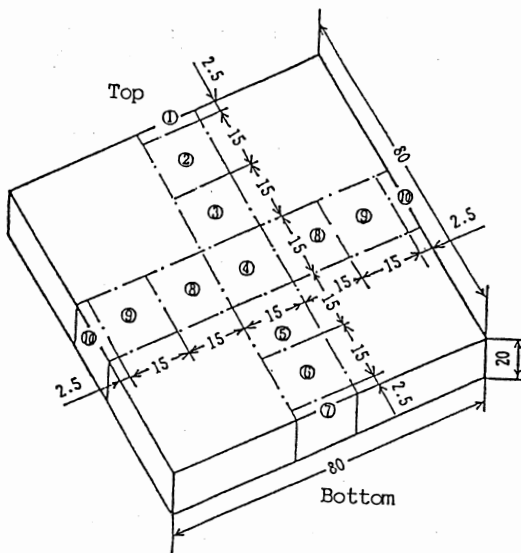


図2 スライス中のサンプルの位置

Fig. 2 Measuring locations of moisture content and specimen in a slice

(予備乾燥)後, 105°Cで3時間炉乾燥を行って試料の含水率を求めた。

各項目の測定は焼成後24時間毎に, 7日間(168時間)行った。

### III 実験結果及び考察

#### 1. 含水率の変化及び水移動

図3はローフ断面の含水率分布の一例として焼成後20°Cで48時間保存したローフから切り出したスライスの含水率分布を示したものである。図中の「Top」及び「Bottom」はそれぞれローフの焼成中における上部及び底部, 番号は図2に示した試片の部位に相当する。また, 垂直軸は含水率を, 太い実線は含水率分布を表す。全体的傾向としてローフ断面については, 焼成直後クラム中心部の直径4 cm程度の範囲では含水率分布はほぼ一様で, その値はクラスト部より高く約46.5%であった。クラストの含水率については, 横方向⑩—⑩では両端のクラスト部分(試片番号⑩)の含水率がほぼ同じで31%を示し, 縦方向①—⑦については, 底部(試片番号⑦)が高く, 上部(試片番号①)が低い傾向にあった。なお, この傾向はすべての試料につき共通に見られた。

図4は保存中のローフから切り出したスライスの含水率分布の経時変化を調べたもので, 各プロ

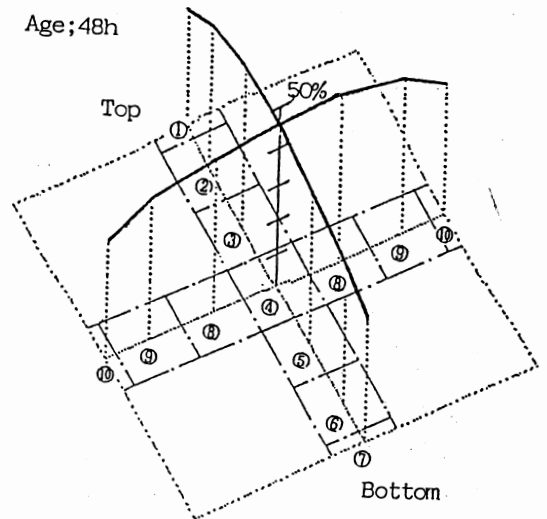


図3 スライスにおける含水率分布

Fig. 3 Distribution of moisture content in a slice

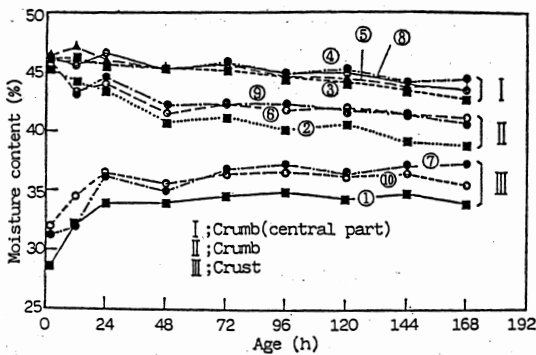


図4 保存中における含水率分布の経時変化  
Fig. 4 Change of the distribution of moisture content during storage

ットは10個のデータの平均値を示す。含水率変化の特徴は図中に示した三つのグループのデータから把握できるものと考えられた。グループIはクラムの中心部(試片番号③, ④, ⑤, ⑧)で、焼成直後の含水率は46.5%と高い値を示し、その後保存時間の経過につれて低下し、168時間経過した時点では43.5%に減少した。グループIIはクラムの周辺部(試片番号②, ⑥, ⑨)で、含水率の初期値はグループIとほぼ等しいが、グループIに比べ保存中の減少が大きく、焼成後168時間では41%となった。グループIIIはクラスト部分(試片番号①, ⑦, ⑩)で、この部分の含水率は前に述べた両グループとは逆に焼成直後は低く、保存中に増加する傾向を示した。一方、含水率測定とは別に保存中におけるローフ質量の経時変化を測定した結果、図には示さなかったが、ローフ質量は焼成後経過時間にほぼ比例して減少し、焼成直後230gであったものが168時間後には220g前後になり、約4%の減少を示した。

以上の結果より、保存の間に水分はクラムの中心からクラスト方向に移動し、その一部はクラストにより吸収され、残りはクラスト外に蒸散するものと推定された。

## 2. 破壊エネルギーとかたさの関係

食品の破壊特性を表す指標としてかたさのほかに、破壊エネルギーがよく用いられる。破壊エネルギー  $E_b$  ( $J/m^3$ ) は試料を破壊するに要するエネルギー(仕事量)と定義される<sup>7)</sup>。本研究では、第2報<sup>2)</sup>で定義したかたさと同様にサンプルの変形率が25%に達するまでのエネルギーを破壊エネルギーとし

た。図5は20°Cで保存したローフについて破壊エネルギーの経時変化を示したものである。図中の●は10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6, 7, 9, 11, 12の中のプロットも10個以上のデータの平均値である。図に示されるように、破壊エネルギーの変化は焼成後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。破壊エネルギーはローフ保存中の老化が進行するのに伴って増加する傾向にあり、回帰式の  $t$  の係数に示されるように焼成後12時間まではそれ以降の約3.8倍の増加速度で急増した。この傾向は第2報<sup>2)</sup>で報告したかたさの変化と同様である。

図6は図5に示した破壊エネルギーとかたさの関係を示したもので、かたさは破壊エネルギーに正比例して増加することから、一方から他方を精度よく予測することができることが分かった。

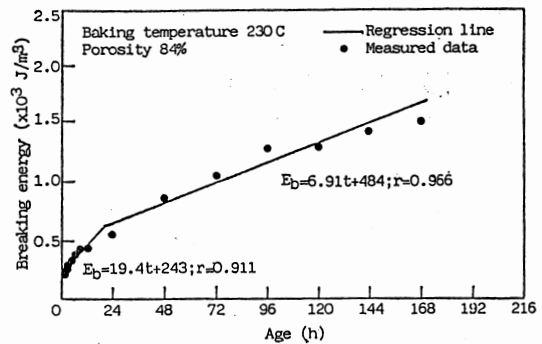


図5 保存中における破壊エネルギーの経時変化  
Fig. 5 Change in the breaking energy of crumb during storage

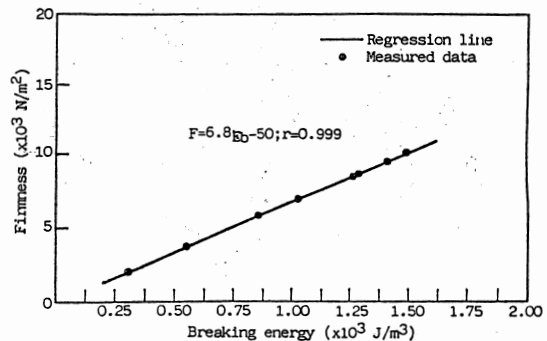


図6 かたさと破壊エネルギーの関係  
Fig. 6 Relation between firmness and breaking energy of crumb

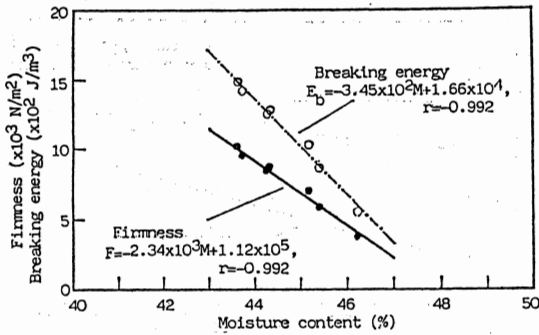


図7 かたさ、破壊エネルギーと含水率との関係  
Fig. 7 Relations between moisture content and firmness, and breaking energy

### 3. 含水率と破壊特性の関係

図7は保存期間中におけるクラム中心部（図3の試片番号③，④，⑤，⑧）の平均含水率MとかたさF，並びに破壊エネルギーE<sub>D</sub>との関係を示したものである。図に示されるようにかたさと破壊エネルギーは，ともに含水率の減少と共に増大し，含水率が破壊特性に影響を及ぼす重要なファクタであることがわかった。

これらの結果より，ローフは保存中の老化に伴って硬化するが，これを促進させる重要な因子が含水率の減少にあることが分かった。このため，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に留意する必要があると考えられた。

### 4. 変形速度

変形速度（または圧縮速度）は破壊特性の影響要因として知られており，標準測定法を検討する上で重要と考えられている。食品のテクスチャ測定に関連する圧縮試験では変形速度0.3~8.3mm/sの範囲で設定される場合が多い<sup>4)10)11)</sup>。例えば，クラムについては変形速度を50mm/min (0.83mm/s)，100mm/min (1.67mm/s)及び200mm/min (3.33mm/s)に選んだ場合，圧縮力は変形速度の増加に伴いやや大きくなり，寒天ゲルの破壊特性値は変形速度0.4~4.0cm/min (0.67mm/s~6.67mm/s)の範囲で，変形速度の増大とともに増加する傾向があることを指摘した報告がある<sup>4)11)</sup>。本実験ではTPUの切り替え速度を考慮して，変形速度を2.5mm/s，5mm/s及び10mm/sに選び，変形速度が破壊特性に及ぼす影響を調べた。図8は変形速度をパラメータにし，スライスの圧縮力-変形率曲線の一例を示し

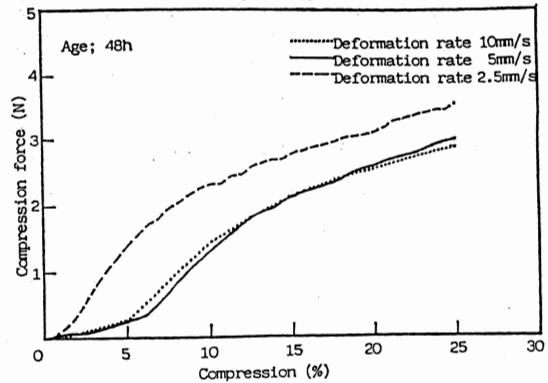


図8 変形速度が圧縮力に及ぼす影響  
Fig. 8 Effect of deformation rate on compression force

たものである。変形速度5mm/s，10mm/sの圧縮特性はほぼ同様であるが，2.5mm/sでは圧縮力が変形率の全領域にわたって高い値を示す傾向を示した。また変形速度を5mm/sから10mm/sの間に選択し，試料の変形率を15%以上にすると，ほぼ一定の比例関係が得られることが分かった。ここに示した実験条件は，クラムの標準破壊特性試験法を確立するのに有用と考えられる。

### 5. プランジャのサイズ及び形状

(1) プランジャのサイズ；AACC<sup>®</sup>の標準法によると，クラムのかたさ測定には，試料のスライスより小さなプランジャが用いられる。本実験では断面80mm×80mmのスライスに対して，使用する円形プランジャの径を16mmから55mmの範囲に変え，プランジャのサイズが測定値に及ぼす影響を調べ，その結果を図9に示した。

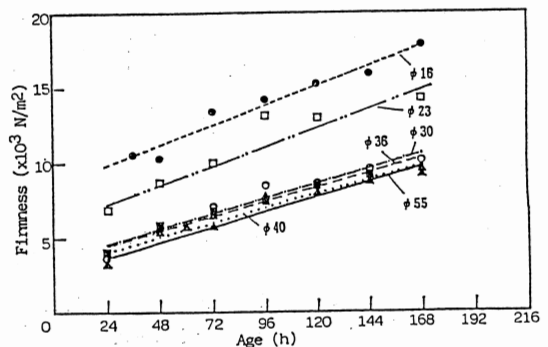


図9 プランジャのサイズがかたさに及ぼす影響  
Fig. 9 Effect of the size of plunger on firmness

図から分かるように、プランジャの直径が小さくなるにつれ食パンのかたさは大きい数値を示した。特にプランジャ直径が30mmから16mmに変わると測定値は2倍程度大きくなった。これと同様に、Bakerら<sup>4)</sup>は11~23mmのプランジャを用いてスライスを圧縮し、その測定値がプランジャ直径の減少につれ大きくなることを指摘し、筆者らの測定結果と同様な傾向を報告している。

プランジャのサイズと測定値の関係をより明確にするため、他の直径のプランジャで得られた値と直径30mmのプランジャで得られたかたさとの比をかたさ比 $R_F$ と定義し、 $R_F$ の全保存期間にわたる平均値とプランジャ直径 $d$ の関係を調べ、図10に示した。図示されるように、プランジャの直径が30mm以上になると、 $R_F$ はあまり変わらず、ほぼ一定の測定値が得られることが分かった。クラスト近傍ではクラム組織の構造が中心部と異なり、破壊特性も異なるため、プランジャの最大直径はクラム組織の構造が均一な範囲に制限される。これらの点を考慮すると、一定の測定値を得るための円形プランジャの接触表面積は試料表面積の8~20%の範囲に相当する。

(2) プランジャ形状；従来、かたさの測定には直径30mmの円形プランジャあるいは一辺32mmの角型プランジャが用いられている<sup>4)8)12)</sup>が、この他に、歯形及びくさび型と円形(直径1.3cm)のプランジャとを比較し、クラムのかたさが円形プランジャでは小さく測定されるなどの報告がある<sup>5)</sup>。図11は同一接触面積(1000mm<sup>2</sup>)の円形プランジャ(直径30mm)及び角型(一辺32mm)

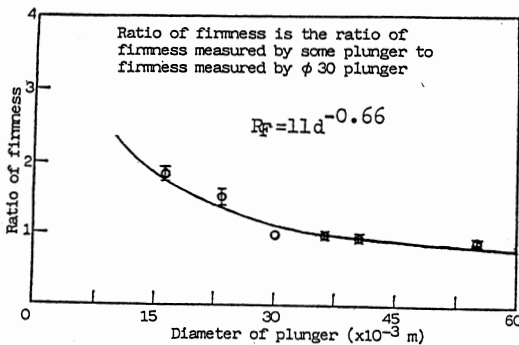


図10 プランジャの直径とかたさ比の関係  
Fig. 10 Relation between the diameter of plunger and the ratio of firmness

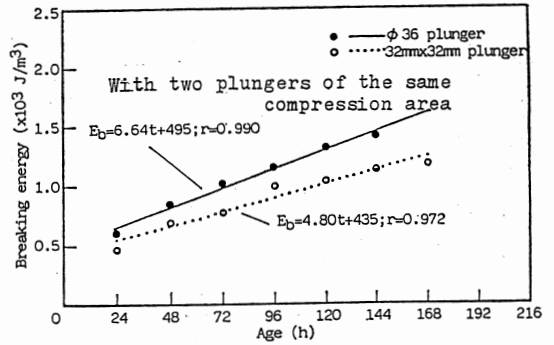


図11 プランジャの形状が破壊エネルギーに及ぼす影響

Fig. 11 Effect of the shape of plunger on breaking energy

プランジャを用いて、その形状が測定結果に及ぼす影響を示したものである。図に示されるように角型プランジャの測定値は円形プランジャの場合より低い値を示し、試料の網状マトリクス構造の変形・破壊挙動がプランジャの形状に依存することが示された。これは、角型プランジャでは、その角部分における応力の集中や不均一な応力分布が生じ、試料が破壊しやすくなり、これに対し、円形プランジャでは、比較的応力集中が避けられるためと考えられた。

### 6. クラストを含む周辺部の影響

AACCの標準測定法(図1-(a))を用いる場合、測定値にはプランジャ面の直下部分の抵抗とその周辺部の影響が含まれ<sup>13)</sup>、サンプルの変形・破壊が進むと共に、その内部には多様な応力が発生するものと考えられる。すなわち、(1)プランジャ直下の圧縮応力、(2)プランジャ縁部のせん断応力、(3)プランジャ周辺部から外周のクラスト方向に向かう引張応力、更に(4)試料とプランジャ及びテーブルとの接触面における摩擦力などで、実際にはこれらの合力が測定されるものと考えられる。

そこで、プランジャ圧縮面以外のクラストを含む周辺部の影響が測定値に占める割合を調べるため、32mm×32mmの角型プランジャで、ローフから切り出したスライスをそのまま圧縮する方法と、図1-(b)に示すようにプランジャ接触面と同寸法のサンプルを圧縮する方法を用いて比較試験を行った。後者の場合、クラムとプランジャの接触面に生じる摩擦力を考慮しなければ、クラム中

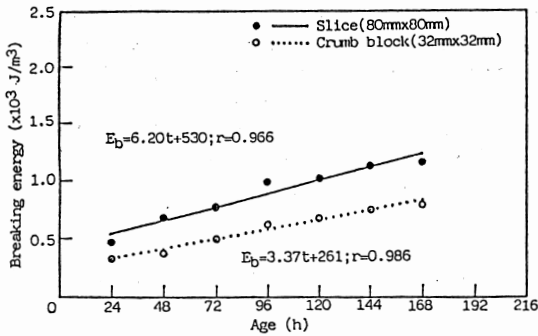


図12 クラストが破壊エネルギーに及ぼす影響  
Fig. 12 Effect of bread crust on breaking energy

には圧縮応力しか働かない。図12はこの二つの実験について、それぞれの試料の破壊エネルギーの経時変化を示したもので、プランジャ載荷面積と同じ表面積をもつ試料、すなわちプランジャ周辺部を切り除いた試料の測定値は、除かないものの約2/3であった。この結果より、単にスライスを圧縮して得られる応力には載荷面以外のクラストを含む周辺部による引張力やせん断力の影響が1/3程度含まれることが予測された。

以上の結果から食パンの圧縮試験法について必要な条件を以下に提唱する。

(1) 供試クラムはクラストを含む周辺部を除いた均質な構造を有する部分とする。

(2) スライスを圧縮するには円形プランジャを用い、プランジャの接触面表面積が試料表面積の8~20%となるように定める。

(3) 変形速度の範囲を5~10mm/s、変形率25%における等価応力をかたさとする。

#### IV 摘 要

本報では食パン内の保存中における含水率変化と圧縮破壊特性の関係を明らかにした。更に標準試験法を確立する観点から、測定条件や試料の状態で破壊特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果を要約する。

(1) 保存中のローフ断面における含水率変化について、焼成直後、クラム中心部の含水率はほぼ一様で、クラスト部より高い値を示し、保存時間の経過につれて低下するが、逆に、クラストの含水率は増加する。すなわち、クラム中心部の水分

は保存中にクラスト方向に移動し、その一部はクラストにより吸収され、残りはクラスト外に蒸散する。

(2) かたさと同様に、破壊エネルギーは焼成後の時間の経過に比例して増加する。特に焼成後12時間まではそれ以降の約3.8倍の速度で急増し、これを促進させる重要な因子が含水率の減少であることが分かった。

(3) 変形速度を5 mm/s から 10mm/s の間に選択し、試料を変形15%率以上圧縮すると、ほぼ一定の圧縮力-変形率関係が得られる。

(4) 角型プランジャを用いて得られるかたさの測定値は円形プランジャのそれに比べて低い値を示し、安定した測定結果を得るためには、プランジャの接触面表面積が試料表面積の8~20%となるような円形プランジャを用いる必要がある。

(5) 載荷面以外の周辺部を切り除いた試料の破壊エネルギーは除かないものの約2/3であり、単にスライスを圧縮して得られる応力には載荷面以外の周辺部による影響が含まれる。

#### 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) Czuchajowska Z. & Pomeranz Y.: Differential scanning calorimeter, water activity, and moisture contents in crumb center and nearcrust zones of bread during storage, Cereal Chemistry, 66(4), 305—309, 1989
- 4) Baker A.E. & Doerry W.T.: Instron factors involved in measuring crumb firmness, Cereal Foods World, 31(2), 193—195, 1986
- 5) 赤羽ひろ, 和田淑子: 食品のテクスチャーに及ぼす測定条件の影響, 短大論叢, 関東学院女子短期大学, 78, 49—59, 1987
- 6) Redlinger P.A., Setser C.S. & Dayton A.D.: Measurements of bread firmness using the Instron Universal Testing Instrument: Differences resulting from test conditions, Cereal Chemistry, 62(3), 223—226, 1985
- 7) 赤羽ひろ, 中浜信子: 調理におけるレオロジ測定 (その3), 調理科学, 22(3), 173—182, 1989
- 8) American Association of Cereal Chemists: Cereal laboratory methods, Staleness of bread-compression test with baker compressimeter, AACC

- Method 74-10, 1961
- 9) 小原哲二郎, 鈴木隆雄, 岩尾裕之(監修): 建帛社, 食品分析ハンドブック(改訂版), 7, 17-21, 1982
- 10) Szczesniak A.S.: Physical properties of foods: What they are and their relation to other food properties. Physical properties of foods (Peleg M. & Bagley E.B.), Avi Publishing Company, Inc., Westport, 1-41, 1983
- 11) 大村公仁子, 赤羽ひろ, 中浜信子: 寒天ゲルの破断特性について, 家政学雑誌, 29(1), 22-27, 1978
- 12) Kamel B.K. & Rasper V.F.: Comparison of precision penetrometer and baker compressimeter in testing bread crumb firmness, Cereal Foods World, 31(3), 269-274, 1986
- 13) 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
- (原稿受理平成3年3月27日・質問期限平成4年7月31日)

### お詫びと訂正

第52巻第2号掲載の下記論文に印刷不鮮明の箇所がありました。原文は下記の通りですので、お詫びかたがたお知らせ申し上げます。

玉 益平他: 食パンのレオロジーに関する基礎的研究(第2報)

77頁右列第1行目 「領域は変形率12%前後までで、変形率は小さく曲」

### ＜新しい出版物＞

## シンポジウム

### “野菜・花卉作における育苗のシステム化とその課題”

発行 平成3年10月18日  
造本 B5版 75頁  
定価 2,000円(送料込)

水稻作・一般畑作・畜産とともに、21世紀の日本農業を支える野菜・花卉作は、新技術の投入によって急速な変化を遂げようとしている。これに関連してバイオテクノロジー、水・礫耕栽培、植物工場、プラグ・セル・ポット苗などの成型苗、マルチ栽培、野菜移植・間引機や収穫機の開発などが要求されるが、これらはいずれも高度の技術開発を必要としている。

このシンポジウムは、新しい育苗技術として登場した成型苗の生産から流通と移植までのシステム化を取り上げたものであり、農業機械学会、同北海道支部及び北海道園芸研究談話会の三者の共催で行われてた。

### 内 容

開催に当たって: 「なぜシステム化なのか」	北海道大学農学部	高井 宗宏……………1
システム化された玉ねぎの育苗と移植	北海道立中央農試	竹中 秀行……………7
接木ロボット開発の現状と課題	生研機構	小野田明彦……………17
欧米の育苗生産の現状	北海道農機工業会	村井 信仁……………23
花き生産現場現状と課題	北海道立北見農試	志賀 義彦……………41
野菜生産現場の現状と課題	北海道立中央農試	土肥 紘……………51
ホクレンのプラグ苗事業への取組について	ホクレン	佐伯 憲司……………61

また展示会も同時に開催されたが、出展14社の展示実演機のカatalogを1冊にまとめた

“植苗の流通・システム化に関する機械・施設の展示実演会Catalog資料集”

の価格は800円(送料込)となっている。