

食パンの焼成プロセスにおける熱及び物質移動特性

呉 計春*・相良泰行**・瀬尾康久**・森嶋 博***

Heat and Mass Transfer Characteristics of White Bread during Baking Process

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

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

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

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

In order to investigate the heat and mass transport phenomena during baking process of white bread, variations in mass, temperature and moisture distribution of bread were measured during baking under various oven temperatures ranging 140–300°C, using the samples made by the same manner of a sponge-dough method. The thickness of the crust and the porosity distribution were also measured for the bread after baking. The temperature of the crumb asymptotically tended to an equilibrium temperature at about 100°C without regard to the baking temperatures. Considering the baking process as drying phenomena, the process started from the pre-heating period and terminated during the constant-rate period of drying. The constant drying rate appeared to be determined by the transfer rate ratio of heat to water-vapor across the crust and increased with an increase in the baking temperature. Moisture content of the crust layer decreased with increasing the baking loss ratio, which was defined as the percentage of mass lost during baking to the initial, while that of the crumb was maintained at an initial moisture content. The crust layer was separated from the crumb by an evaporation front of water, and its thickness increased proportionally with an increase in the baking loss ratio. No marked temperature dependence of porosity profile was observed, and its profile seemed to be fixed after the oven-spring of the dough. (Received Apr. 2, 1996)

パンの焼成技術は長年に渡る経験の積み重ねによって
培われてきた。特に、商業的大規模生産における焼成条
件はパンの種類に応じて家内工業的に行われてきた経験
的条件をオープン内で再現する方法が採られており、加
熱温度・焼成時間共に一定の条件下で行われる場合が多
い。このためオープンに必要なエネルギーと容積は製造プ
ラントの中で比較的大きな割合を占める。例えば、1時

間に約6000斤の食パンを中種法で生産しているプラ
ントでは、食パン1kgを生産するのに約2.06MJのエネ
ルギを消費しており、この内オープンでは約0.8MJを
必要とし、これは全消費エネルギーの約40%に相当す
る¹⁾。筆者らはオープンの省エネルギー法に関連して、そ
の熱収支を明らかにするとともに²⁾、排熱をその後の冷
却工程用熱源として再利用するためのエネルギーサイク

* 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)

** 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)

*** 日本大学生物資源科学部 (〒252 神奈川県藤沢市亀井野1866)

リング法を提案した³⁾。他方、省エネルギーや品質設計の観点から焼成温度プログラムを検討してオープン型の改良・開発に役立てるためには、加熱条件に対応したパン生地の焼成特性を把握すると共に、熱及び物質移動のメカニズムを解明する必要があると考えられる。しかし、最も基礎的な資料となる焼成特性を組織的に計測・評価した例⁴⁾⁵⁾は数少ない。

一般に食パンの焼成プロセスにおける生地の外観的及び内相的变化、すなわち、食パンの“耳”と称されるクラスト層およびこれ以外のクラム部分に生じる変化は、大まかに次に示す3段階に分けられる⁶⁾。すなわち、1) 焼成初期における生地の急速な膨張、すなわちオープン・スプリング⁷⁾、2) 焼成中期におけるクラムの糊化、3) 焼成後期におけるクラストの形成とその着色である。また、最も優れた品質の食パンを得るために提唱されている適正な焼成条件は、加熱温度範囲210~230℃、焼減率10%とされている。焼減率は生地の初期質量に対する焼成中の質量減少量の割合で、提唱されている値はクラムの構造がグルテンの凝固とデンプンの膠化により固定化するのに要する時間、すなわち、生地の大きさに関係なく、適正な焼成時間を知るための指標と考えられている。しかし、加熱温度のプログラムと焼成時間は消費者の嗜好などによって異なることが知られており、上述した焼成条件も標準的焼成法の目安として認識されている。

本研究の目的は異なる焼成条件下で食パンの焼成特性を計測し、主に熱及び物質移動の観点から焼成現象のメカニズムを解明するための基礎資料を得ることにある。

このために、標準的な原料の配合割合と生地製法によって製作した生地を試料とし、異なる加熱温度条件下の焼成プロセスにおける生地の質量、温度・水分・空隙率分布、クラストの厚さ等の変化を計測した。また、得られたデータに基づき焼成現象のメカニズムや、加熱温度が食パンの焼成特性に及ぼす影響を検討したので以下に報告する。

実験装置及び方法

1. 試料の準備

食パン生地の代表的発酵法には、直捏法、液種法及び中種法とがあるが⁸⁾、本研究では大規模生産プラントで標準的に採用され、また比較的容易に均一な生地を作れる中種法を選択した。原料配合割合は小麦粉を100とすると、水68.0、イースト2.2、イーストフード0.1、塩2.0、砂糖5.0、脱脂粉乳2.0、ショートニング5.0とした。また

図1に生地製作プロセスの概略図を示す。なお、パン型(内径:80×80×170 mm)1個につき266 gの生地を詰めた。また最終発酵が終了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.b.であった。

2. 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2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焼成特性に及ぼす影響を検討するために、オープンの加熱温度を140, 180, 220, 260及び300℃の5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、壁面と内部雰囲気温度との間に温度勾配が生じることが予測された。そこで、図2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毎に予備実験を行い、オープン壁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、各壁面中央部の温度と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ほぼ一定と

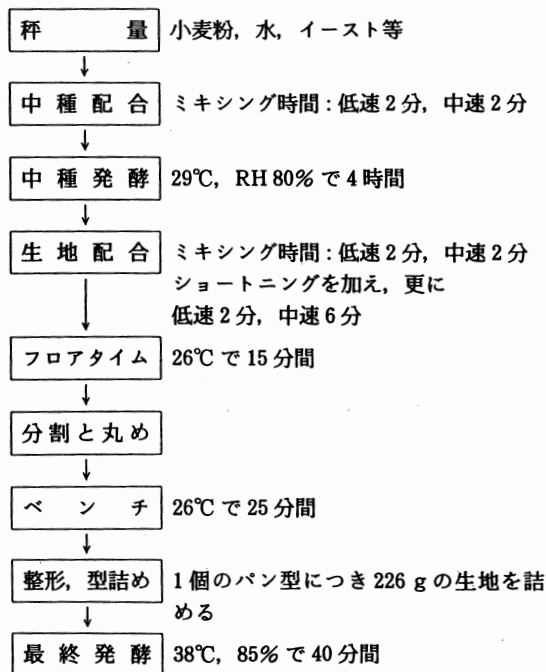


図1 生地製作プロセスの概略図

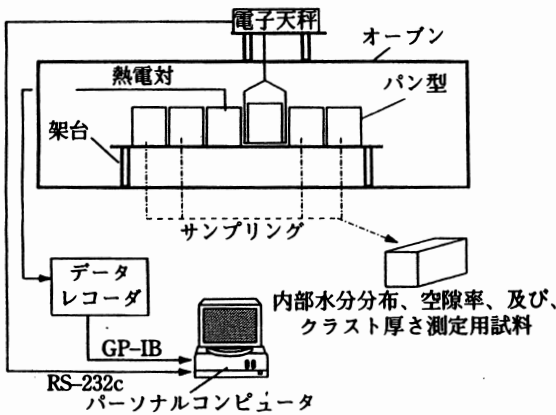


図 2 実験装置の概念図

なり、雰囲気平均温度は、本実験条件の範囲内において、壁面温度から次式により予測されることが分かった。

$$T_a = -21.1 + 1.10 \times T - 5.34 \times T^2 \quad (^\circ\text{C})$$

ここに、 T_a と T はそれぞれ雰囲気平均温度と壁面温度である。

3. 計測方法

(1) 生地質量と焼減率

図2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 3600型, 精度 ± 0.01 g) に吊り下げて、その質量の経時変化を測定した。このためにオープン上部壁の中央部に内径10mmのパイプを貫通させ、これにピアノ線を通してパン型を吊り下げた。吊り下げに当たっては、パン型底面とオープン内床面とが平行を保ち、さらにパン型がオープン内空間の中央部に位置するように両者の距離を調整した。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、RS232Cボードを介して6秒毎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。

$$S = (m/m_0) \times 100 \quad (\%)$$

ここで、 S (%) は焼減率、 m (g) は水分蒸発量、及び、 m_0 (g) 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0.1mm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) 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毎に測定し、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。また、オープン内雰囲気代表温度として、このパン型の表面中央部から10mm離れた空間の温度を熱電対で測定した。

(3) 水分分布とクラスト厚さ

水分分布は焼成の途中で質量測定用試料の焼減率が5%進む毎に、パン型を順次1本ずつオープンから取り出し、ローフ中央部横断面から切り出した厚さ40mmのスライスを対象にして測定した。予備実験の結果、クラムの水分変化はクラストのそれに比較して小さいことが判明した。このため、図4に示すようにスライスのクラスト部分を6mm厚さに分離し、さらに、クラストに付着したクラムを取り除き、これの厚さをノギスで数カ所測定してクラスト厚さとした。また、残りのクラムを5等分に分割して得られた試片を水分測定に供した。なお、水分測定には105 $^\circ\text{C}$ 、24時間の炉乾法を用いた。

(4) 試料内空隙率

図5に試作した空隙率測定装置の概略図を示す、この装置は円筒シリンダ、ネジ込み・滑走ピストン及び固定台から成り、滑走ピストンと固定台間の空間に試料を挿入し、手動のネジ込みピストンで滑走ピストンを移動させながら試料を圧縮する機構となっている、この装置の特徴はねじ込みピストンの回転方向の力を試料に加えることなく圧縮できる機構となっている点にある。試料に

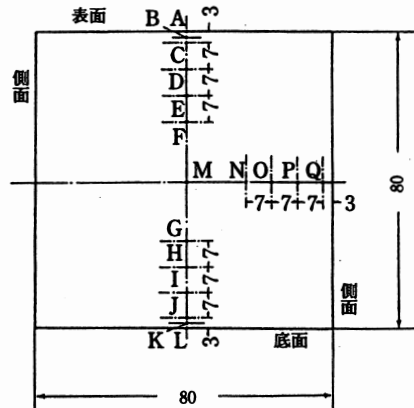


図 3 熱電対のネットワーク

(A~Q: 熱電対番号, 単位: mm)

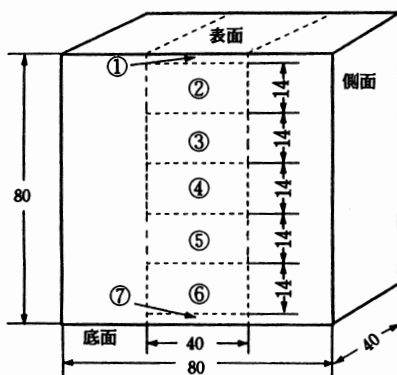


図4 水分分布および空隙率の測定位置
(①～⑦: 試料番号, 単位: mm)

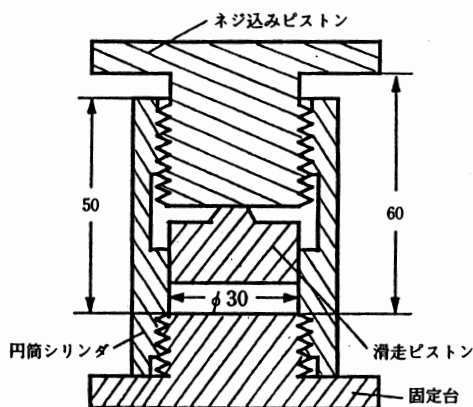


図5 空隙率測定装置の概念図
(単位: mm)

は水分測定用試料と同様にローフ中央部から切り出して分割したものを用了。空隙率はこれらの試料の初期厚さをノギスで測定後、直径30mmのコルク抜き状円筒器具で円盤状試料を作成し、これを手動でネジ込みが不可能となるまで圧縮し、ピストンの移動距離と初期厚さから算出した。

実験結果及び考察

1. 試料内温度分布

図6に標準的焼成温度220℃で試料を焼成した場合に測定された雰囲気温度と生地内温度分布の経時変化を典型例として示す。また、雰囲気温度が数ヶ所急激に低下しているのは、その時点で水分分布や空隙率測定用の試料を順次取り出したためである。図中のA～Mは図3に示した試料内温度分布測定用熱電対ネットワークの温

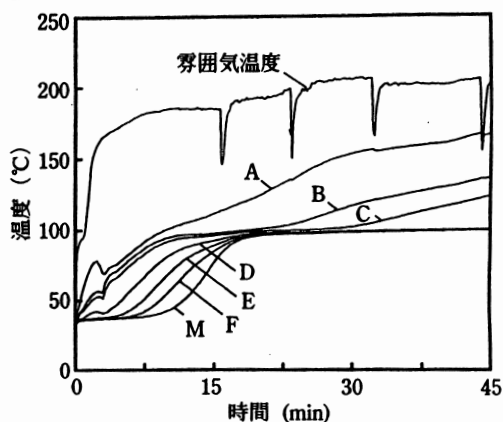


図6 温度分布の経時変化
(焼成温度: 220℃, A～M: 熱電対番号)

度測定点に対応している。本焼成法の条件下ではローフ断面のいずれの表面からもA～Mで示される温度分布が等しく測定されたため、他の測定点のデータを省略した。このことはローフに対する熱の供給が方向に依らずほぼ均一に行われたことを示している。A～Cの温度は全焼成期間を通じて徐々に上昇するが、D～Mの温度は表面に近い処から順次上昇し、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。このことはA～C間、すなわち、試料表面から約3mmの厚さにクラスト層が形成され、また、クラストとクラムは比較的明瞭に区別される熱的性質を持っていることを示していると考えられる。

同様に、焼成温度140℃と300℃の条件下で得られた結果をそれぞれ図7と8に示す。いずれの場合にも、試料内温度分布は図6と同様のパターンを示すが、焼成温度が高くなるにつれて温度上昇速度は速くなる傾向を示した。特に、この傾向はクラスト層において顕著に示された。また、クラムの温度は焼成温度条件に関係なく約100℃に到達し、その後クラム内はこの温度で均一に保たれることが分かった。これ以降、本稿ではこの温度をクラムの「平衡温度」と称することにした。

2. オープンスプリング

図6～8のA～Dの曲線は焼成初期の段階で一時的な温度低下を示した。これは焼成の開始に伴い、パン型内空間より低い温度のパン生地が膨張し、すなわち、オープンスプリングによって熱電対と接触したためである。オープンスプリングの焼成温度依存性を検討するために、焼成初期における温度測定箇所Aの経時変化を、焼成温度条件をパラメータにして図9に示した。この図よ

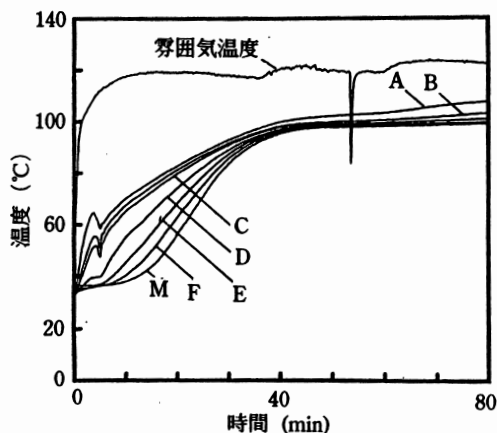


図 7 温度分布の経時変化
(焼成温度：140℃，A～M：熱電対番号)

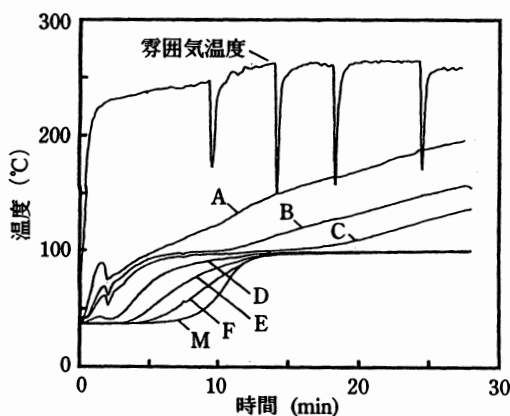


図 8 温度分布の経時変化
(焼成温度：300℃，A～M：熱電対番号)

りオープンスプリングの発生時期は焼成温度が高くなるに伴って早くなり、当実験の焼成温度条件の範囲では、焼成開始後 2.7～3.8 min に終了することが分かった。

3. 水分蒸発量と焼減率

焼成プロセスにおける生地質の質量減少は水分蒸発に起因するものと仮定し、図 10 に焼成温度条件をパラメータにして水分蒸発量の経時変化を示した。また、焼減率と焼成温度及び焼成時間の関係を求めるために、図中に示した焼減率を示す直線と水分蒸発量曲線との交点から焼成時間の値を求めた。このようにして得られた焼成時間と焼減率との関係を、焼成温度をパラメータにして図 11 に示した。これらの結果から、焼成時間は焼成温度に依存し、焼減率と本実験条件の範囲内で比例関係にある

ことが分かった。

4. 乾燥特性曲線

乾燥特性曲線は材料の含水率に対する乾燥速度の変化を示す曲線であり、この曲線は各種材料の乾燥特性を把握・検討するためのいわば標準的スケールとして一般に認識されている⁹⁾。焼成も材料から水分を除去する操作であり、乾燥操作の一種と考えられる。そこで、図 10 に示した水分蒸発量曲線と初期含水率から生地平均含水率に対応する乾燥速度の値を求めた。これらのデータから得られた乾燥特性曲線の焼成温度依存性を図 12 に示した。図中に示した焼減率 0～20% の範囲に相当するプロットから、焼成はいずれの焼成温度条件下でも、予熱期間から始まり、恒率乾燥期間の途中で終結することが分かった。また、乾燥速度 R と平均含水率 M との関係を示す曲線の式を図中に示した。この式は図中のプロットが指数関数で近似できるものとみなして適用し、焼成温度 T と乾燥常数 K 並びに恒率乾燥速度 R₀ の関係をそれぞれ求めて得られたものである。ただし、式中の M₀

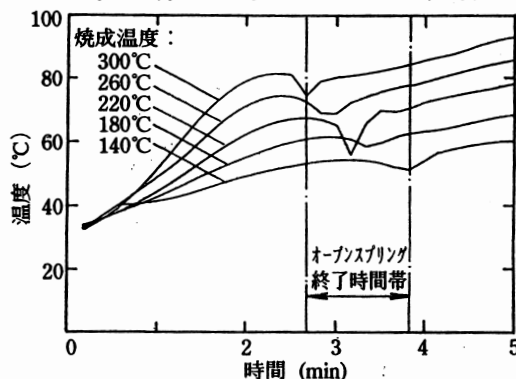


図 9 オープンスプリングの発生時期

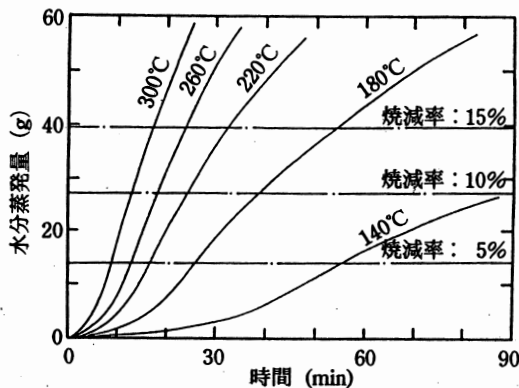


図 10 焼成時間と水分蒸発量の関係

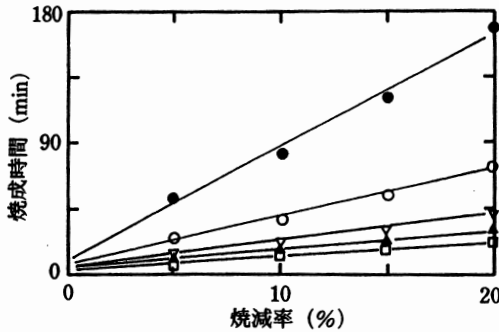


図 11 焼成時間と焼減率の関係

焼成温度：●, 140°C；○, 180°C；▽, 220°C；▲, 260°C；□, 300°C.

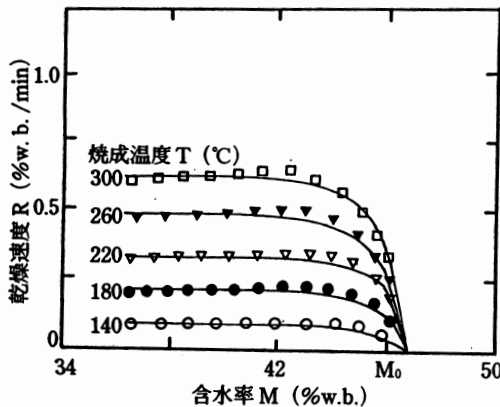


図 12 食パンの焼成プロセスにおける乾燥特性曲線

$$R = R_0 \{1 - \exp[-K(M_0 - M)]\}$$

但し, $R_0 = -0.371 + 3.28 \times 10^{-3} T$
 $K = 1.59 - 1.50 \times 10^{-3} T$
 $r = 0.91$

は生地初期含水率である。

一般的に恒率乾燥では材料表面が水膜で覆われている状態であると解釈されているが、焼成プロセスでは温度分布の経時変化から推測されたように、この期間ではすでに材料表面にクラスト層が形成されて水膜は存在しない。すなわち、標準的な恒率乾燥期間の現象とは異なる。焼成プロセスの恒率乾燥期間はクラストを介して行われる熱と水蒸気移動の逆方向のフラックスの比が一定となる期間であり、いわば“見かけ”の恒率乾燥期間である。また、このフラックスの比によって決定される恒率乾燥速度は焼成温度が高くなるにつれて速くなることが確認

された。

5. 試料内水分分布

図 13 に焼成温度 220°C における試料内部の水分分布を、焼減率をパラメータにして示した。他の焼成温度でもこの図と同様な結果が測定されたので、ここでは標準的焼成温度、すなわち、焼成温度 220°C の場合を典型例として示した。試料表面と底面に形成されたクラスト層の含水率は焼減率の増加に伴って減少するが、クラム層では焼減率が 20% に達しても初期含水率が維持されることが分かった。従って、焼成期間中、水分の蒸発面がクラストとクラムの境界面に存在し、その蒸発面はクラスト層の厚さが増すと共に、生地表面から内部へ移動することが推測された。

6. クラスト厚さと空隙率分布

焼成温度をパラメータにし、クラスト厚さと焼減率との関係を図 14 に示した。図中の回帰直線式に示されるように両者の間には本実験条件の範囲内で線形関係があり、また、焼成温度が高くなるほどクラスト厚さは厚くなる傾向を示した。

図 15 は標準的焼成温度で焼減率 10% まで焼成した試料の空隙率分布を示した。また、図中にこの分布を指数関数近似して得られた回帰式を示した。他の焼成条件の場合にも、オープンスプリング後の試料についてはこの図と定量的にほぼ同様の測定結果が得られた。これらの結果より、空隙率分布は焼成温度によらずオープンスプリング後にほぼ固定化される傾向にあり、クラスト層でもこの分布が保持されることが分かった。

要 約

食パンの焼成プロセスにおける熱及び物質移動特性を

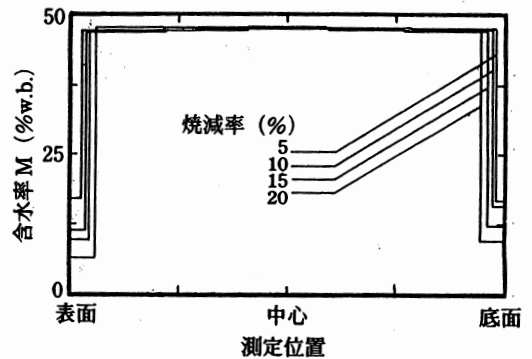


図 13 含水率分布の経時変化
焼成温度：220°C

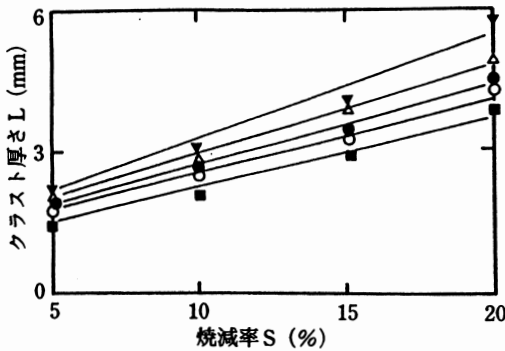


図 14 焼成条件とクラスト厚さの関係

$$L = a + bS$$

但し, $a = 0.618 + 1.82 \times 10^{-3} T$

$$b = 7.78 \times 10^{-2} + 4.47 \times 10^{-4} T$$

$$r = 0.93$$

焼成温度 T : ∇ , 300°C; \triangle , 260°C; \bullet , 220°C;

\circ , 180°C; \blacksquare , 140°C.

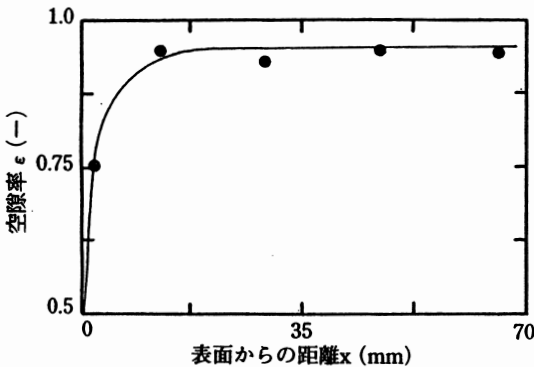


図 15 空隙率の分布

$$\varepsilon = 0.950 - 0.451 \exp(-317.7 X)$$

$$r = 0.98$$

解明するために、同一方法で作成した生地を異なる温度条件下で焼成し、焼成中における生地内温度と水分分布及び質量変化を経時的に計測した。また、焼成されたパンについて空隙率分布とクラスト厚さを測定した。以下にその結果について要約する。

(1) 焼成温度が高くなるにつれて生地の温度上昇速度は速くなる傾向を示した。特に、この傾向はクラスト層において顕著に示された。また、クラムの温度は焼成温度条件に関係なく約 100°C の平衡温度に到達し、その後

クラム内はこの温度で均一に保たれた。

(2) 焼成時間は焼成温度に依存し、焼減率と比例関係にある。

(3) 焼成プロセスを乾燥現象とみなすと、焼成はいずれの焼成温度条件下でも予熱期間から始まり、恒率乾燥期間の途中で終結する。恒率乾燥期間はクラストを介して行われる熱と水蒸気移動のフラックスの比が一定となる期間であり、その速度は焼成温度が高くなるにつれて速くなる。

(4) クラスト層の含水率は焼減率の増加に伴って減少するが、クラム層では初期含水率に維持される。また、水分の蒸発面がクラスト層とクラム層の境界に存在する。

(5) クラスト厚さは焼減率と線形関係にあり、焼成温度が高くなるほど厚くなる。

(6) 空隙率分布は焼成温度によらずオープンスプリング後に固定化され、その分布はクラスト層でも維持される。

本研究を実施するに当たり、山崎製パン(株)中央研究所には食パン生地の製作・焼成に関する研修の実施、生地原料及び機械設備の便宜供与をはかって頂いた。ここに記して深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 瀬尾康久・森嶋 博：農機誌, 49, 555 (1987).
- 2) 松田郁生・森嶋 博・瀬尾康久・相良泰行：農機誌, 52, 75 (1990).
- 3) 松田郁生・森嶋 博・瀬尾康久・相良泰行：農機誌, 53, 67 (1991).
- 4) ZANONI, B. and PERI, C.: *J. Food Eng.* 19, 389 (1993).
- 5) ZANONI, B., PIERUCCI, S., and PERI, C.: *J. Food Eng.* 23, 321 (1994).
- 6) 藤山諭吉：製パンの理論と実際, 第1版(日本パン技術研究所, 東京), p. 103 (1981).
- 7) 松本 博：製パンの科学—パンはどうしてふくれるか, 第1版(日本パン技術研究所, 東京), p. 3 (1980).
- 8) 越後和義：パンの研究—文化史から製法まで, 第1版(柴田書店, 東京), p. 67 (1982).
- 9) 桐栄良三：乾燥装置, 第2版(日刊工業新聞社, 東京), p. 13 (1966).

(平成8年4月2日受理)