

27. 食パン焼成プロセスにおける熱および物質移動のメカニズム

相良 泰行* Yasuyuki SAGARA

1. はじめに

1.1 食パン焼成プロセスの現状

大規模工場生産におけるパンの焼成は、生産現場の神様と称される職人が「エジプト文明以前から家内工業的に行われてきた」と説明する経験的条件をオーブン内で再現する方法が採られている。

このように、焼成条件はパンの種類に応じて、長年に渡る経験の積み重ねにより培われてきたが、生産規模の大小にかかわらず、加熱温度および焼成時間ともに一定の条件下で行われる場合が多い。たとえば、食パンの焼成条件は「加熱温度220℃、焼減率10%」であることが知られている。この条件を実現する基本的操作は、「オーブン内のパン生地 contacts 加熱媒体の温度を220℃に保ちながら焼成を続け、生地の初期重量に対する重量減少率、すなわち焼減率が10%に達した時点で終了する」ことになるが、焼成温度および時間は生地の主原料である小麦粉の種類や原料の配合割合などにより変化させる必要がある。ただし、どのように変化させれば最適な条件が得られるかは、経験豊富な熟練技術者のノウハウとなっている。

いずれにせよ、この最適で温度・時間一定の焼成条件はオーブン内で実現する必要がある、このために必要なオーブンの容積は巨大であり、また、必要エネルギーも製造工程中最大と推算されている。たとえば、大規模生産に適しているといわれている中種法で、1hr当り6000斤の食パンを生産している製造プラントでは、食パン1kgを生産するのに、約2.06 MJのエネルギーを消費している。このうち焼成工程の主設備であるオーブンでは約0.8 MJ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⁾。

筆者らは食パン製造プラントの省エネルギー法を探索する研究に関連して、オーブンの熱収支を明らかにするとともに²⁾、廃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リサイクリング法を提案した³⁾。しかし、省エネルギーや製品品質の設計法を確立するた

めには、焼成プロセスにおける熱および物質移動のメカニズムを解明してオーブンの改良・開発と焼成温度プログラムを検討するための基礎資料を得る必要があると考えられた。特に、加熱条件に対応した食パン生地の焼成特性、すなわち、焼成条件が食パンのどの部分に、どのように影響を及ぼすのかを把握する必要があると考えられたが、文献探索の結果、このようなもっと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)}は数少ないことがわかった。

1.2 焼成プロセスの3段階

一般に食パンの焼成プロセスにおける生地の外相および内相の変化、すなわち、食パンの“耳”と称されているクラスト層およびこの内部の白色を呈しているクラム層に生ずる変化は、大まかに次に示す3段階に分けられる⁶⁾。

- 1) オーブン・スプリングと称される焼成初期における生地の急速な膨張
- 2) 焼成中期におけるクラムの糊化、すなわちクッキング
- 3) 焼成中後期におけるクラストの形成と着色

また、前述したように、優れた品質の食パンを得るための実用操作条件は、生地の特性に応じて変化し、加熱温度範囲210～230℃、焼減率10%前後となっている。焼減率の提唱値はクラムのマトリクス構造がグルテンの凝固と澱粉の糊化により固定化するのに要する時間、すなわち、生地の形状や大きさに関係なく、適正な焼成時間を知るための指標である。しかし、消費者の多様な嗜好を満足させる食パンを製造するためには、生地の原料配合割合に応じた加熱温度プログラムや焼成時間を探索する必要がある、前述した焼成条件もこれらの操作法を開発するための標準的焼成法、すなわち、操作の目安として認識されている。

1.3 本講座の目的

本講座の目的は、異なる焼成条件下で食パンの焼成特

* 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5月2日

性を計測し、主に熱および物質移動の観点から焼成現象のメカニズムを解明した研究成果について概説することにある。この研究では、標準的な原料配合割合と生地作成法によって製作した食パン生地の供試材料とし、異なる焼成温度条件下の焼成プロセスにおける生地の質量、温度・含水率・空隙率分布およびクラスト厚さなどの経時変化を計測した。また、得られたデータに基づき、焼成メカニズムの特性を標準的乾燥特性曲線と比較して明らかにし、さらに、これらの特性の焼成温度依存性について検討した。本稿では、これらの研究成果の概要を紹介するが、さらに、今回の講座では、食パン生地の表面着色プロセスを「着色特性曲線」として解明した結果について概説する。

2. 生地の製法と加熱温度条件

2.1 生地の製法

食パン生地の代表的醗酵法には、直捏法、液種法および中種法などがあるが⁸⁾、本研究では大規模生産プラントで用いられ、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。生地は小麦粉100gに対して水68.0g、イースト2.2g、イーストフード0.1g、塩2.0g、砂糖5.0g、脱脂粉乳2.0g、ショートニング5.0gを加えて作成した。この原料配合割合は、多数の著作物に「標準配合」として紹介されている割合であるが、実際の生産には食パンの特徴を創出するための多様な添加物が配合される。

図1には中種法による生地製作プロセスのフローを示す。なお、パン型（内径：80×80×170mm）1個につ

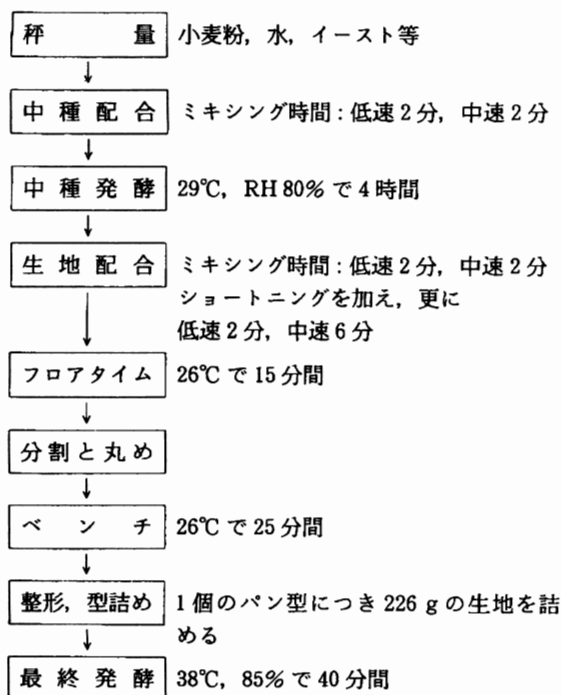


図1 生地製作プロセスの概略図

き、266gの生地を詰めた。また、図中に示した最終発酵を終了した時点における生地の体積はパン型の約8割を占め、焼成直前の含水率は47.1% w.b.であった。

2.2 オーヴンと加熱温度条件

図2に本研究用に改造した電熱加熱方式デッキ型オーヴンの概略図を示す。このオーヴンの壁面に設置された電熱ヒータの容量は5.5kWであり、温度設定範囲は50～300℃である。本研究では、加熱温度条件が生地の焼成特性に及ぼす影響を検討するために、オーヴン温度を140, 180, 220, 260および300℃、すなわち、焼成温度条件として標準焼成温度の220℃を中心に40℃幅で変化させ、5段階に設定した。この設定温度は温度センサでオーヴン内壁表面温度を検出しながら制御されるため、内壁面と内部雰囲気との間に温度勾配が生ずるものと予測された。そこで、あらかじめ、温度設定条件に対応する無負荷状態のオーヴン内空間の温度分布を計測して、オーヴン内中央部空間において均一な温度分布が得られることを確認した。さらにこの結果に基づき、図2に示すように、生地を詰めたパン型6個をオーヴン中央部に並べ、上記焼成温度条件ごとに予備焼成実験を行い、内壁面温度と各パン型上面から10mm離れた空間の雰囲気温度を測定した。その結果、オーヴンを構成する各壁面中央部分の温度とパン型を設置したオーヴン中央部の雰囲気温度はそれぞれほぼ一定値となり、その平均雰囲気温度 T_a は本研究の設定温度条件の範囲において、壁面温度 T_w から次式により予測されることがわかった。

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

3. 焼成特性計測法の概要

3.1 生地の質量と焼減率

図2に示したように、焼成はオーヴン内中央部に6個の試料を並べて行い、これらのうち、1つのパン型をオーヴン上部に設置した電子天秤（秤量3.6kg、測定精度

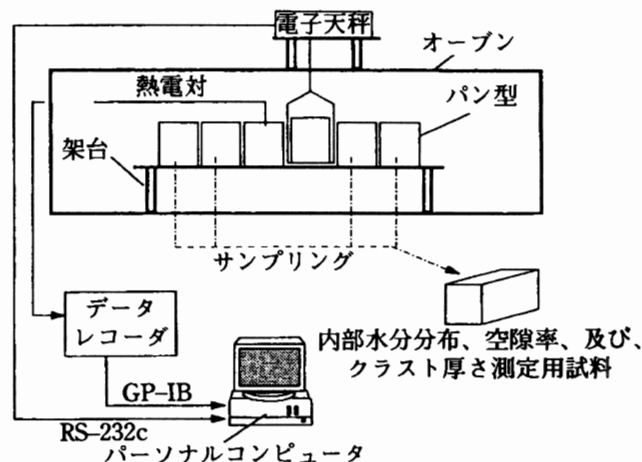


図2 計測システムの概略図

±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、オーヴン上部壁中央部に内径10mmのパイプを貫通させ、このパイプ内にピアノ線を通してパン型を吊り下げた。試料の吊り下げに当たっては、パン型底面とオーヴン内床面とが平行を保ち、さらにパン型がオーヴン内空間の中央部に位置するように、両者間の距離を調整した。また、電子天秤の底面とオーヴン外壁との間に空間を設け、パイプ内を上昇する熱風により、電子天秤が破損するのを予防した。さらに、質量測定用試料とほかの試料の加熱条件を等しくするために、ほかのパン型もL型アングルを組み合わせて製作した架台上に配置してパン型底面とオーヴン内床面との距離を一定に保った。電子天秤の出力はRS232Cボードを介して6sごとにパーソナルコンピュータに収録し、焼減率を次式により計算した。

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

ここで、 $S (\%)$ は焼減率、 $m (g)$ は水分蒸発量、 $m_0 (g)$ は生地の初期質量である。

3.2 試料内温度分布

ローフ横断面における試料内温度分布の経時変化を測定するために、図3に示すような熱電対ネットワークを作成し、質量測定用試料に隣接したパン型の中央断面に装着した。使用した熱電対はガラス繊維で被服した素線直径0.1mmのK型(銅-コンスタンタン)である。温度の記録にはデータレコーダ3台を用いた。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処理した。また、オーヴン内雰囲気代表温度として、試料内温度分布計測に供したパン型の上表面中央部から10mm離れた

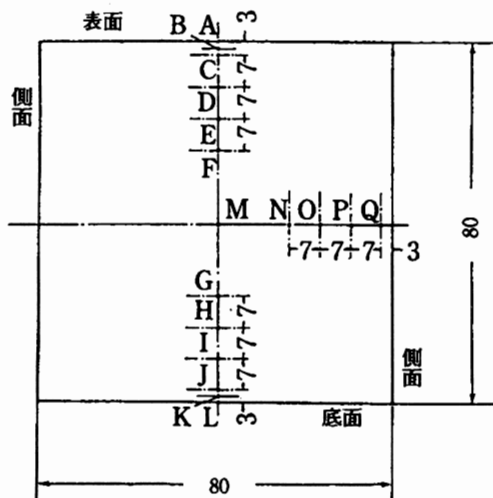


図3 熱電対のネットワーク (A~Q:熱電対, 単位:mm)

空間の温度を同型熱電対で測定した。

3.3 含水率分布とクラストの厚さ

含水率分布は焼成の途中で質量測定用試料の焼減率が5%進むごとに、パン型を順次1本ずつオーヴンから取り出し、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、クラムの含水率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含む6mm厚さの外層を分離し、さらに、刷毛を用いてクラスト層に付着したクラムを取り除き、残った層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含水率測定に供した。なお、含水率測定には105℃、24時間の炉乾法を用いた。

3.4 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

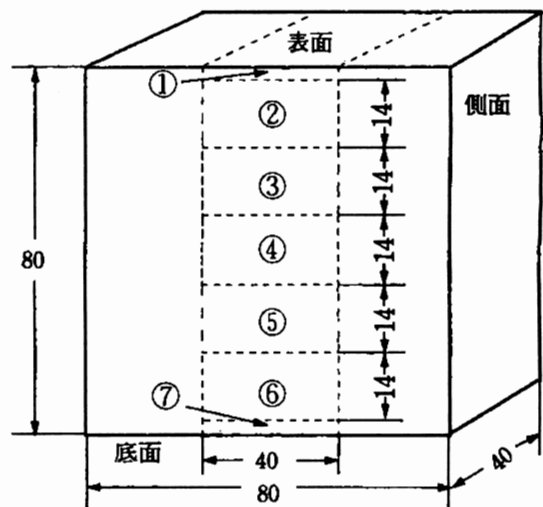


図4 水分分布および空隙率の測定位置 (①~⑦:試料番号, 単位:mm)

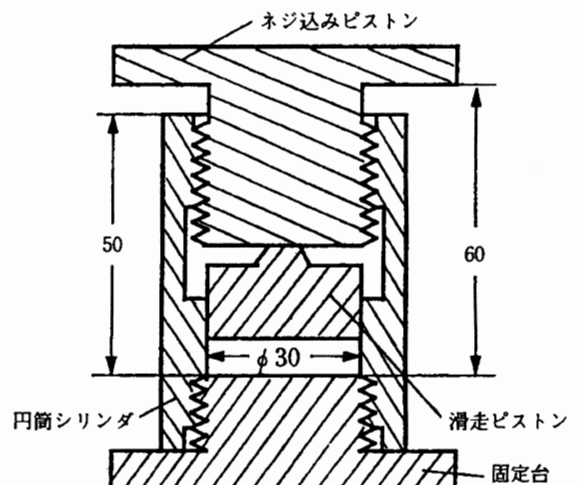


図5 空隙率測定装置の概念図 (単位:mm)

装置は円筒シリンダ、ネジ込み・滑走ピストンおよび固定台から成り、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。この装置の特徴はネジ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。試料には含水率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を用いた。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。

4. 実験結果および考察

4.1 試料内温度分布

図6に試料を標準的焼成温度220℃で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。この図に示されるように、雰囲気温度が数カ所急激に降下しているのは、その時点で含水率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度測定点に対応している。本焼成法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、ほか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ローフ表面の部位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ところから順次上昇し、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

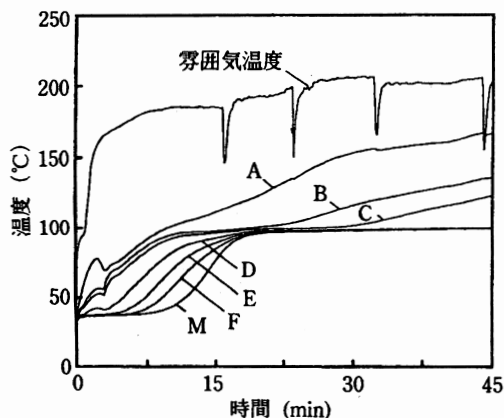


図6 温度分布の経時変化 (焼成温度：220℃，A～M：熱電対番号)

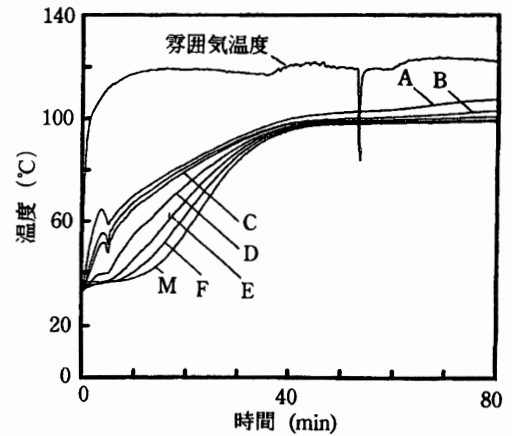


図7 温度分布の経時変化 (焼成温度：140℃，A～M：熱電対番号)

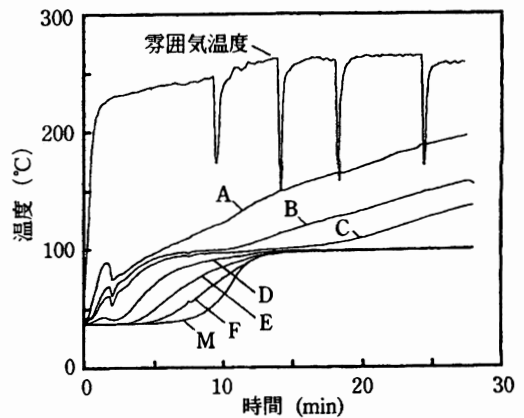


図8 温度分布の経時変化 (焼成温度：300℃，A～M：熱電対番号)

れた。

同様にして、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と図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℃に到達した後は、この温度で均一に保たれることがわかった。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。

4.2 オープンスプリング

図6～8のA～D曲線は焼成初期の段階で一時的に急激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てこれらの熱電対と接触したためである。すなわち、オープンスプリングと称される現象が温度測定用熱電対により検出されたことになる。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個所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

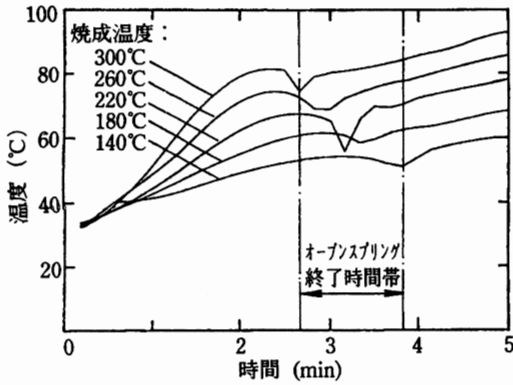


図9 オープンスプリングの発生時期

た. この図よ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速くなり, 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に終了することがわかった.

4.3 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, 焼減率と焼成温度および焼成時間の関係を求めるために, 図中に示した焼減率のレベル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はほぼ比例関係にあることがわかった.

4.4 焼成(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¹⁰⁾, 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的に認識されている. 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の平均含

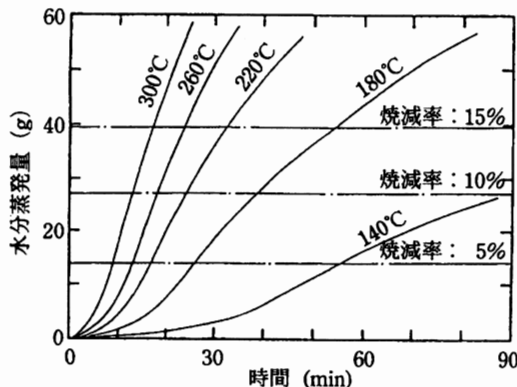


図10 焼成時間と水分蒸発量の関係

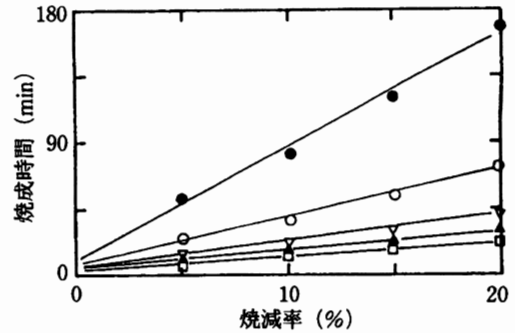


図11 焼成時間と焼減率の関係
焼成温度: ● 140°C, ○ 180°C, ▽ 220°C, ▲ 260°C, □ 300°C

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焼成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, 定率乾燥期間の途中で終結することがわかった. 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, 焼成温度 T と乾燥常数 K ならびに定率乾燥速度 R_0 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 M_0 は生地の初期含水率である.

一般的に標準的乾燥特性曲線で定義される定率乾燥期間では, 材料表面が水膜で覆われている状態に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いて, 水膜は存在しない. すなわち, 標準的な定率乾燥期間の現象とは異なる. 焼成プロセスの定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

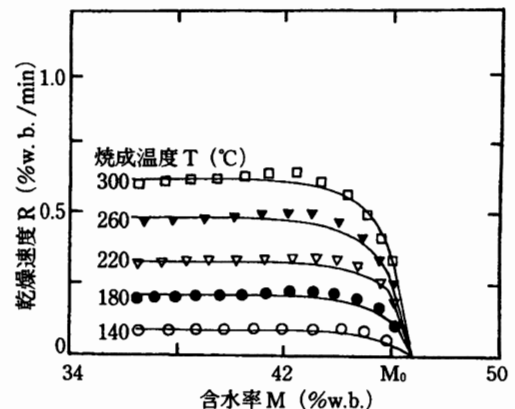


図12 食パンの焼成プロセスにおける乾燥特性曲線
 $R = R_0 \{1 - \exp[-K(M_0 - M)]\}$
ただし, $R_0 = -0.371 + 3.28 \times 10^{-3} T$
 $K = 1.59 - 1.50 \times 10^{-3} T$
 $r = 0.91$

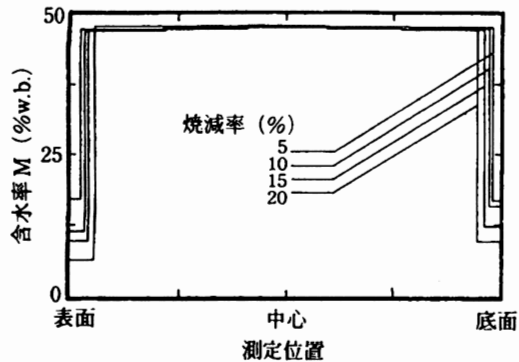


図13 含水率分布の経時変化 (焼成温度: 220°C)

であり、いわば“見かけ”の定率乾燥期間である。また、このフラックスの比によって決定される定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。

4.5 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。ほか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と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わかった。したがって、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ともに、生地表面から内部へ移動することが推測された。

4.6 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層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。ほか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わかった。

5. おわりに

食パンの焼成プロセスにおける熱および物質移動特性を解明するために、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および質量変化を経時的に計測した。また、焼成され

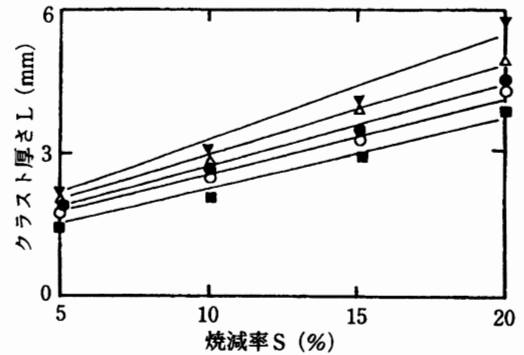


図14 焼成条件とクラスト厚さの関係

$$L = a + bS$$

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

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

$$r = 0.93$$

$$\text{焼成温度 } T: \blacktriangledown 300^\circ\text{C}, \triangle 260^\circ\text{C}, \bullet 220^\circ\text{C},$$

$$\circ 180^\circ\text{C}, \blacksquare 140^\circ\text{C}.$$

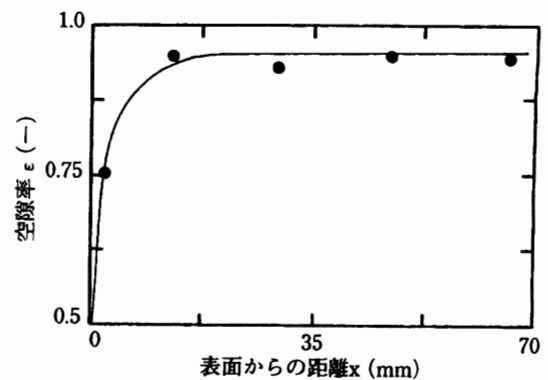


図15 空隙率の分布

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

$$r = 0.98$$

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。

本講座では食パンの焼成プロセスにおける熱および物質移動特性を明らかにした研究成果について概説した。今回は焼成温度条件に依存するクラストの着色現象を「着色特性曲線」として明らかにした研究成果について紹介する。

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，p.103，東京（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，p.3，東京（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，p.67，東京（1982）。
- 9) 桐栄良三：「乾燥装置，第2版」，日刊工業新聞社，p.13，東京（1966）。
- 10) 相良泰行：冷凍，79（920），437-443（2004）。