

28. 食パン焼成プロセスの着色特性曲線とその予測法

相良 泰行* Yasuyuki SAGARA

1. はじめに

パンの表面色は、その品質を評価するための指標の一つとして重要視されている。しかし現在、製パン工場ではこの焼色を規定する客観的基準は無く、主に熟練工の視覚による主観的評価によって焼成色が評価され、試行錯誤的方法により最適な焼成色を得るための焼成条件などが決められている。

食パンの焼成色に影響を及ぼす主な要因は、生地 の 製 作 に 用 いる 原 料 の 種 類 と そ の 配 合 割 合 お よ び 焼 成 条 件、すなわち、焼成温度と時間などであると考えられる。焼成時間の指標には生地 の 大 き さ に 依 存 し な い 指 標 と し て 定 義 さ れ る 焼 減 率、すなわち、生地 の 初 期 質 量 に 対 す る 焼 成 中 の 質 量 減 少 量 の 割 合 が 用 い ら れ て い る。こ の よ う に、焼成色に影響を及ぼす要因は数多く存在し、また、これらの要因の相互関係も複雑である。焼成中に生ずる主な着色反応には、メイラード反応やカラメル生成反応などが含まれることが指摘されているが²⁾、これらの反応の進行に伴って生ずる表面色の変化を組織的に計測し、その変化特性に及ぼす焼成条件の影響を定量的に明らかにした研究報告は数少ない現状にある³⁻⁸⁾。しかし、焼成プロセスにおける焼成条件と表面色変化の関係やその変化の予測法に関する研究は、品質設計の観点から食パンの最適な焼成方法を確立し、オーブンの合理的設計法や操作法を検討するために不可欠であると考えられる。

本講座では筆者らの研究により提唱した「着色特性曲線 (Characteristic coloring curve)」とこれの予測法について概説する。具体的には、まず、食パンの焼成プロセスにおける表面色の変化を計測して加熱温度条件と表面色との関係を定量的に把握し、次に、加熱条件を表わす新しい操作因子を導入することにより、表面色の変化を予測する方法を提唱する。

2. 試料および計測方法

2.1 生地 の 製 作 法

食パン生地 の 製 作 法 に は、前 回 の 講 座¹⁾ で 紹 介 し た 中

表1 原料配合割合

成 分	小麦粉100に対する各成分の配合割合
小麦粉	100.0
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

種法を用い、また、原料配合割合も同様である(表1)。製作した質量266gの生地をパン型(内径:80×80×170mm)に詰め、蓋をして焼成に供した。また、最終発酵が終わった時点での生地 の 体 積 は 潘 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。

2.2 焼成温度および時間

本研究に用いた電熱加熱方式のデッキオーブンと計測システムの概略図を図1に示す。生地重量変化および生

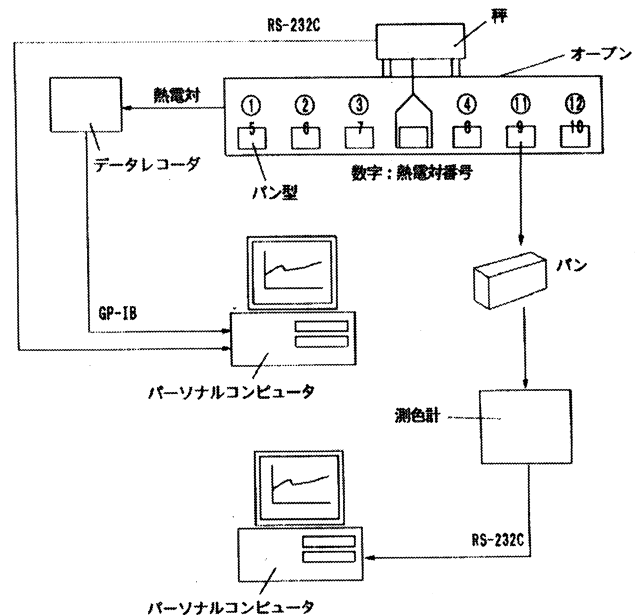


図1 表面色計測システムの概略図

* 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6月6日

表2 実験区：焼成温度・時間と測定回数

実験区	焼成温度	焼成時間 (min)							回数
		30	45	60	70	80	90	100	
1	140℃	30	45	60	70	80	90	100	3
2	180℃	20	30	40	50	60	70	80	3
3	220℃	10	15	20	23	25	30	35	3
4	220℃	40	50	60	70	80	90	100	2
5	260℃	10	15	20	25	30	35	40	3
6	300℃	10	15	20	25	30	35	40	3

地内温度分布の計測法は前回の講座で示したものと同様であるが、焼成温度と時間の条件が食パンの表面色変化に及ぼす影響を検討するために、表2の実験区に示すように、オーブンの加熱温度を140, 180, 220, 260, 300℃の5段階に、焼成時間を10～100minの範囲に設定した。特に、標準的焼成温度220℃の実験区では、パン型のオーブン収納数に制限があることから、焼成時間を2分して表面色の測定回数を増やした。また、オーブン内に収納したパン型蓋直上部空間の温度を測定し、それぞれの試料についてオーブン温度－試料表面温度－表面色の関係が正確に得られるよう配慮した。

2.3 表面色測定法

焼成直前の生地の表面色を計測した後、図1に示すように、同一の焼成温度条件下で7本の試料を焼成した。これらの試料の中で、重量測定用試料を除いた残り6本

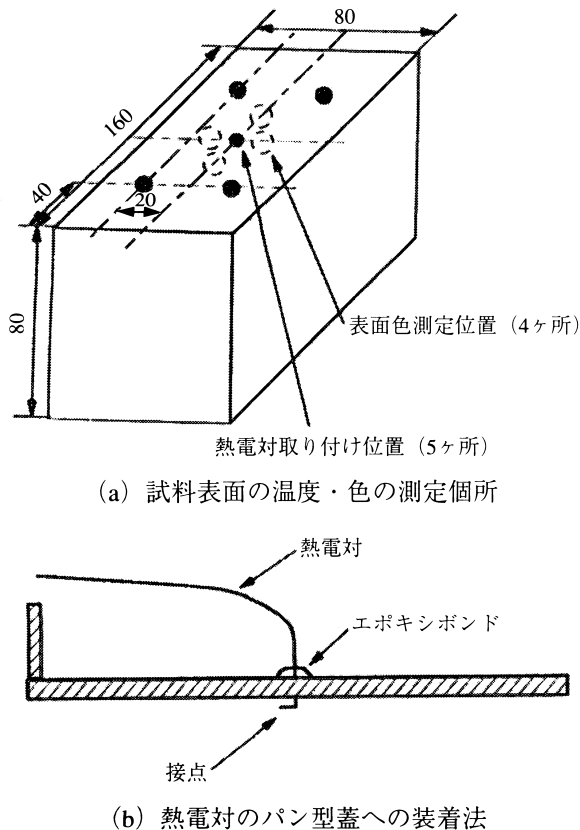


図2 試料表面温度分布および表面色測定箇所

の試料を表面色測定に供した。表面色の測定は、焼減率が5%進むごとにオーブンから各1本の試料を取り出し、表面色撮影後、図2(a)および(b)に示すように上表面中央部の熱電対装着個所の周囲4個所の表面色を測色色差計で測定した。このように測定箇所を選択した理由は、予備実験により試料表面の温度分布を測定した結果、上表面が側面および下面に比べもっとも速く着色が進行し、また、上表面の中央部分は周辺部分に比べて比較的均一に着色することが確認されたためである。さらに、消費者の目に触れやすいのは上表面であることが予測されたためでもある。表面色測定は表面温度測定個所近傍のクラストを厚さ15mm程度にスライスして採取し、その表面を測色色差計の測定孔部に置き、さらに試料の上に黒色平板状の重りを載せて測定を行った。これはクラスト表面を直径10mmの測定孔部分に密着させるとともに、試料を通過する外部光による外乱を防止するために採った方法である。また、測定結果の表示にはHunter表色系¹¹⁾を用いた。

3. 焼成条件と着色パターン

図3に標準焼成温度条件、すなわち、オーブン温度を220℃に設定した場合の焼成プロセスにおける表面色変

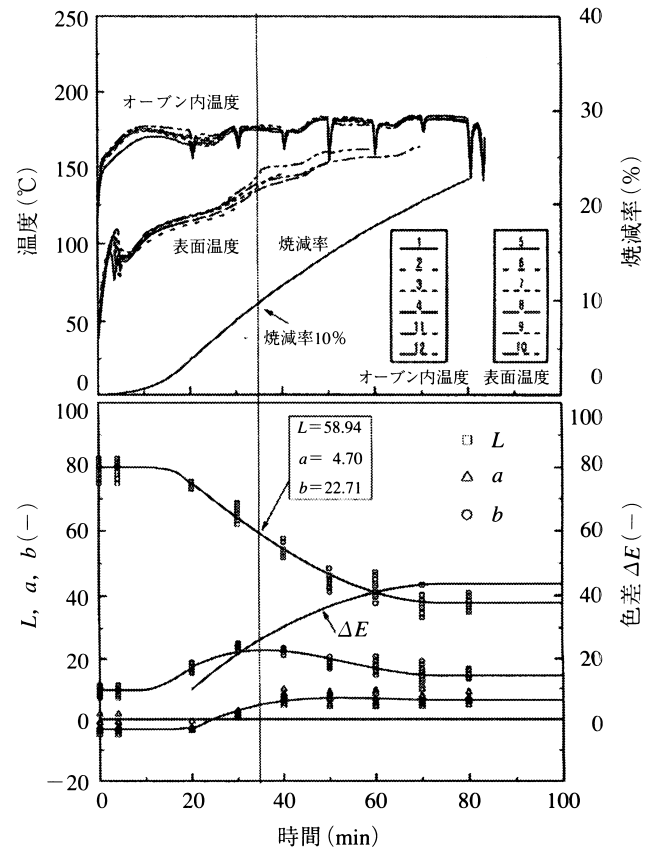


図3 標準焼成プロセスにおける表面色の変化 (オーブン設定温度：220℃)

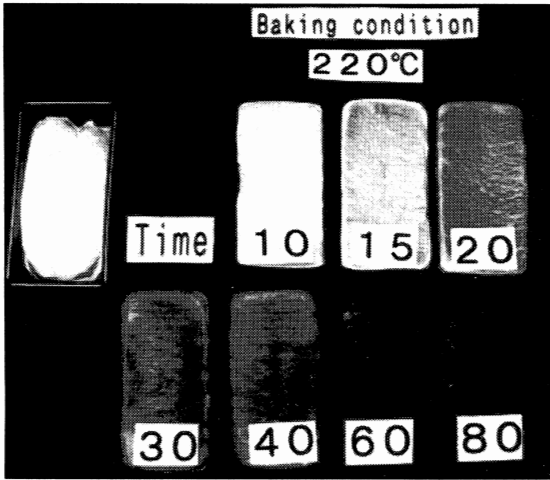


図4 標準焼成温度 (220°C) における表面色の变化

化の測定結果を示す。この図には焼成特性に関するデータとして、オーブン内温度、試料表面温度、焼減率曲線および焼減率10%のラインを示し、着色特性として表面色と色差の変化、さらに、焼減率が10%に達した時点の表面色データを示した。色差は焼成前の生地表面色を規準としている。図4に示すように、生地表面色の明度を示すL値は初期値の白色に近い色から黒色へと指数関数的に減少するが、焼成時間が50minに至ると焼成温度条件に対応する平衡値に達することがわかった。しかし、この時点以降もaおよびb値は変化し続け、表面

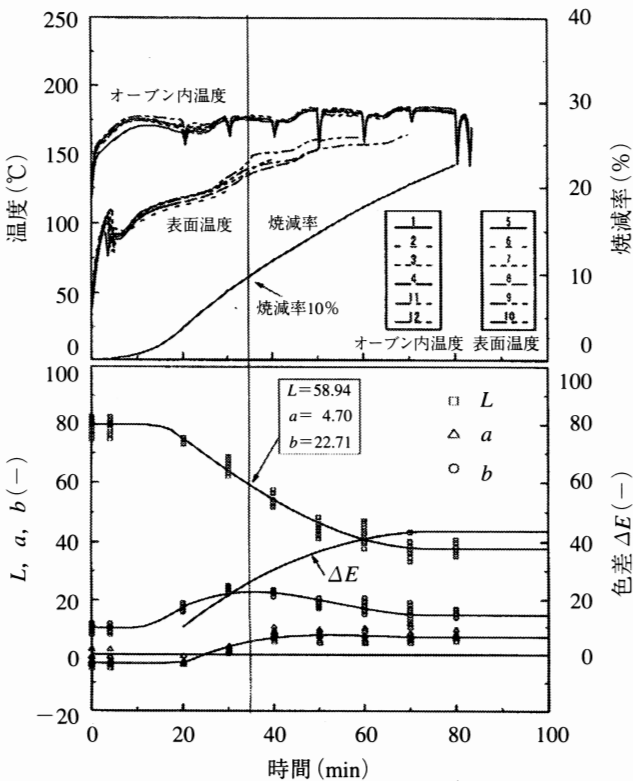


図5 焼成温度180°Cにおける表面色の变化

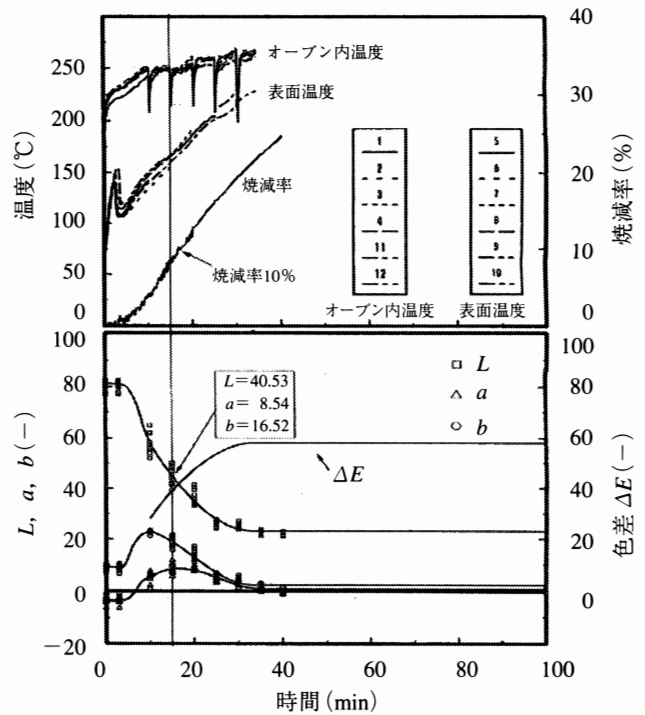


図6 焼成温度260°Cにおける表面色の变化

色は約80minで平衡色に達した。他方、色差の測定値は約50minで平衡に達することから、aおよびb値に比べてL値の変化が色差に及ぼす影響が顕著であると考えられた。図5と6に焼成温度180°Cおよび260°C、すなわち、標準焼成温度±40°Cにおける表面色変化のパターンをそれぞれ示す。これらの図に示されるように、表面色変化のパターンは標準焼成温度条件の場合とほぼ同様であり、変化の速度が焼成温度条件に依存して速くなることがわかった。

4. 試料表面温度および水分蒸発量の変化

4.1 試料表面温度の経時変化

図7に焼成温度条件をパラメータとする試料上表面温

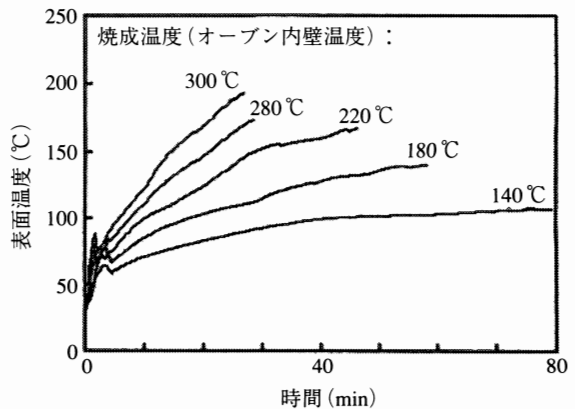


図7 試料表面温度の経時変化

度の経時変化を示す。図に示した温度変化は図2に示した温度分布測定用熱電対装着箇所中央部で検出されたものであり、表面色測定部位の温度変化と見なせる。試料表面温度はいずれの焼成温度条件下でも指数関数的に上昇し、その上昇速度は焼成温度条件が高いほど速くなる傾向を示した。また、これら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、パン生地が膨張し、すなわち、オーヴンスプリングによって膨張したパン生地の表面がパン型蓋下面の熱電対と接触したためである。当実験の焼成温度条件の範囲内では、オーヴンスプリングは焼成開始後2.7～3.8 minに終了し、また、この期間の表面色の変化はほとんど検知されなかった。したがって、クラストの形成と表面色の変化はこの時間帯以後に開始されるものと考えられた。

4.2 水分蒸発量と表面色の測定範囲

図8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、図中に焼減率5%ごとのラインを示した。表面色の時間的測定間隔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条件はオーヴン温度210～230℃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 minであることが示される。また、本研究では広い範囲の焼成条件下における表面色の変化特性を把握するために、表面色はいずれの温度条件下でも焼減率が20%以上に到達するまで測定した。

5. 表面色変化と着色特性曲線

焼成温度と焼減率における試料表面色の測定結果を表3に示す。Hunter表色系では、Lで明度を表わし、ab平面の位置で色相と彩度を表わす。すなわち、 $\alpha = \tan^{-1}(a/b)$ の値は色相の指標であり、彩度は $r = (a^2 + b^2)^{1/2}$ によ

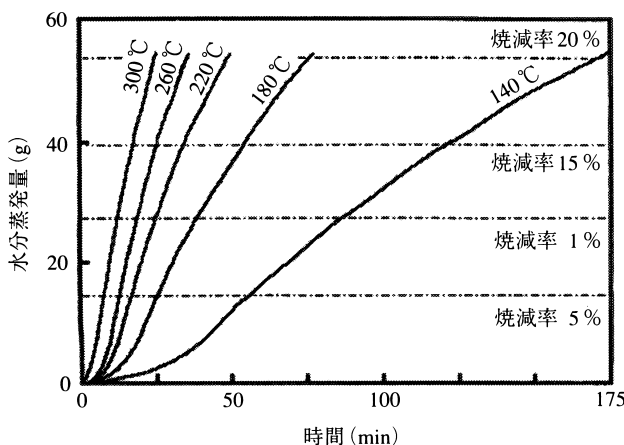


図8 水分蒸発量の経時変化と焼減率

て表示される。図9に焼成条件と表色系のab面における実測値をプロットして示した。焼成前の生地の初期色は個体差によらず一定の値を示し、 $L = 88.1$, $a = 0.305$, $b = 14.8$ であった。また、これらのプロットは焼成温度と焼減率が増加するのに伴い、図中に示した曲線にほぼ沿うように進行する、すなわち、色相と彩度の指標である α と r の値の間に一定の関係が存在することがわかった。そこで、これらの実測値に対して多項式回帰分析を行った結果、その関係は次の3次式により良好に表わ

表3 焼成温度・焼減率と表面色の測定値

焼成温度 (°C)	焼減率 (%)	L	a	b	α (deg)	r
140	5	73.78	1.37	16.07	4.88	16.13
	10	66.18	8.03	24.20	18.36	25.50
	15	58.09	14.25	24.07	30.63	27.97
	20	53.17	16.48	21.54	37.42	27.12
180	5	73.11	2.33	18.24	7.27	18.39
	10	61.94	13.19	24.90	27.91	28.18
	15	54.56	17.65	23.10	37.38	29.07
220	5	71.22	3.55	19.66	10.22	19.98
	10	54.39	15.13	23.75	32.50	28.16
	15	52.68	17.75	21.98	38.92	28.25
260	5	49.53	20.50	11.41	60.90	23.46
	5	55.39	16.44	23.08	35.46	28.34
	10	49.45	18.03	18.48	44.29	25.82
300	15	31.75	22.98	9.28	68.00	24.78
	20	20.03	24.26	-2.50	97.20	24.39
	5	49.39	20.27	20.53	44.63	28.85
300	10	34.01	24.23	11.76	64.11	26.93
	15	27.42	26.02	7.03	74.87	26.95
	20	19.02	22.18	-3.66	99.44	22.48

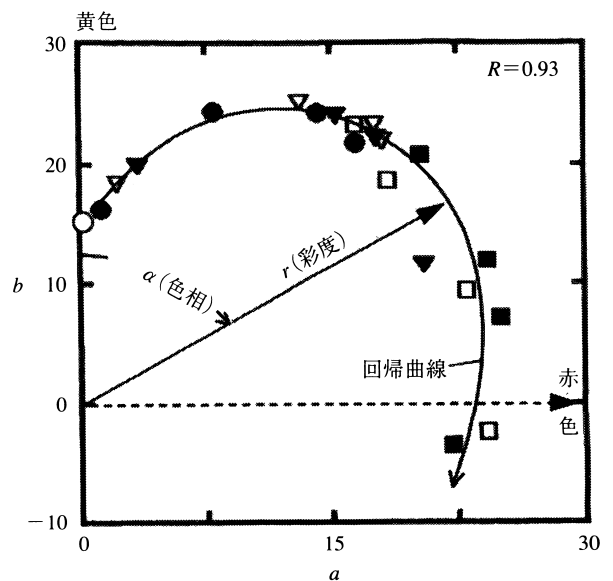


図9 表色系ab面における表面色変化パターン (生地の初期色：○ 焼成温度：●140℃ ▽180℃ ▼220℃ □260℃ ■300℃)

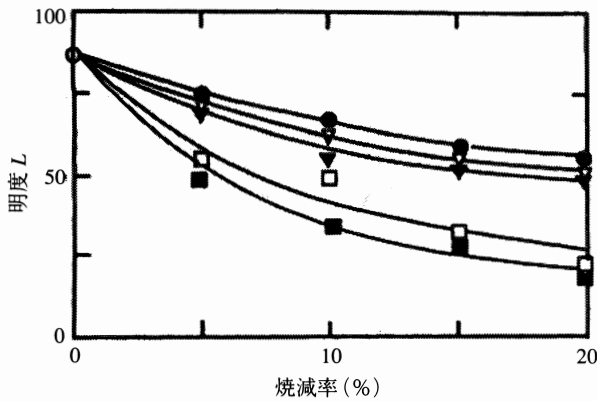


図10 明度Lと焼減率の関係
(生地初期色:○ 焼成温度:●140℃
▽180℃ ▼220℃ □260℃ ■300℃)

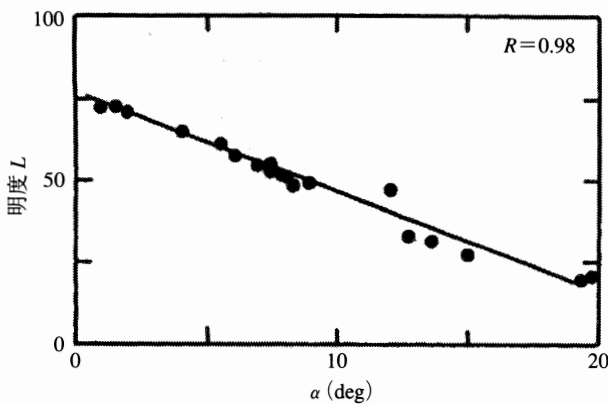


図11 明度Lとαの関係

ることがわかった。

$$r = 12.87 + 8.755 \times 10^{-1} \alpha - 1.523 \times 10^{-2} \alpha^2 + 7.389 \times 10^{-5} \alpha^3 \quad (1)$$

図10に焼成温度をパラメータにして、明度Lと焼減率との関係を示した。明度は図中の回帰曲線に示されるように、焼減率の増加に伴ってほぼ指数関数的に減少するが、その減少の割合は焼成温度条件が高くなるほど大きくなることが確認された。一方、明度Lと色相αおよび彩度rの実測値間の関係を調べた結果、Lとαとの間には図11に示すように明瞭な比例関係が存在することがわかった。その回帰直線式を次に示す。

$$L = 76.7 - 0.602 \alpha \quad (2)$$

これらの結果より、食パンの焼成プロセスにおける表面色を表示する三要素の値には一定の関係が内在していることが明らかになった。この関係をHunter表色系の座標を用いた三次元空間において定性的に示すと、図12に示す1本の曲線によって表わせる。この曲線の矢印の方向に示すように、焼成以前の生地の色は白色に近く明度も大きい。焼成の進行に伴い、生地表面はまず淡い黄色に着色し、次第に赤色を強く呈するようになることも

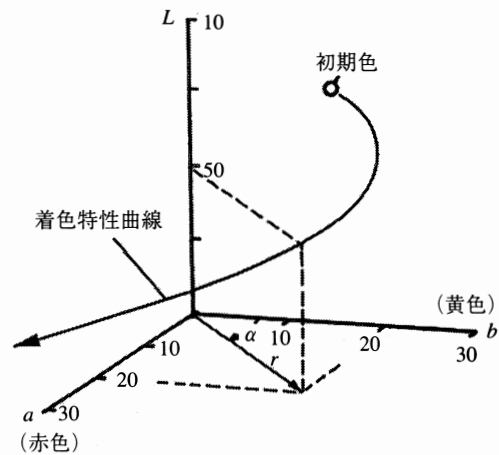


図12 着色特性曲線 (Characteristic coloring curve)

に明度も低下する方向に変化する。筆者らはこの曲線を着色特性曲線 (Characteristic coloring curve) と呼ぶことにした。

6. 着色特性曲線の推算法

6.1 加熱操作因子

前節で定義した着色特性曲線は焼成中に生地表面で生ずる褐変色変化反応の進行状態を示し、これは主に生地の成分と焼成条件に依存するものと考えられる。本研究のように生地の成分が一定の場合には、焼成条件が曲線決定の主要因になるものと思われる。焼成条件は、直接計測が可能な加熱に関する要因を考慮すると、主に次に示す3つの要因で表わせると考えられる。

- 1) 焼成時間, t_b (S)
- 2) 熱源 (オーブン内壁) 温度, T_0 (K)
- 3) 時間 t における生地表面温度, $T_s(t)$ (K)

そこで、着色特性曲線をこれらの要因を用いて予測することを試みた。これらの3要因による加熱効果を表現する指標として、次式に示すような加熱操作因子Eを定義した。

$$E = \int_0^{t_b} [(T_0/1000)^n - (T_s(t)/1000)^n] dt \quad (3)$$

この因子E (単位: $K^4 \cdot s$) はボルツマンの法則¹⁰⁾により、 $n=4$ の場合には熱源 (オーブン内壁面) からパン型 (生地表面) に伝わる放射伝熱量に比例する値をとることになる。この因子と表色系の座標L, α, rの内いずれか1つとの関係がわかればEの値から、すなわち焼成条件から着色特性曲線を定量的に予測することが可能となる。

6.2 焼成色の予測法

加熱操作因子が主に放射加熱に起因すると仮定し、 $n=4$ とにおいて焼成温度条件 (一定値) T_0 および実測した生地表面温度の経時変化 $T_s(t)$ の値を(3)式に代入して

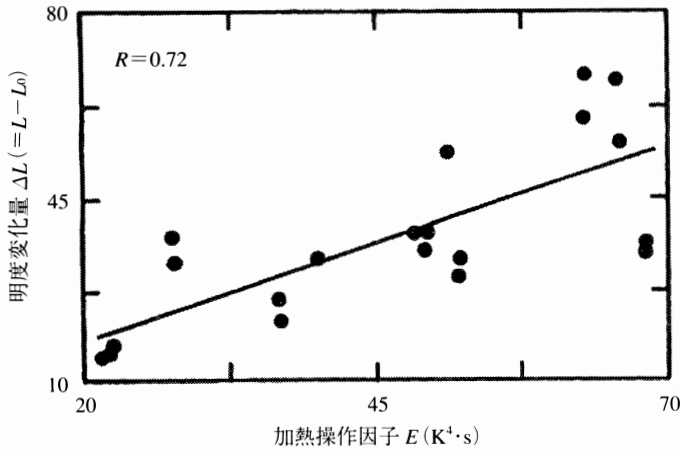


図13 加熱操作因子と明度変化量の関係
($n = 4$, L_0 : 焼成前生地 の明度)

E を求めた結果、図13に示すように、 E と表面色の明度変化 $\Delta L (=L-L_0)$ 、ただし、 L_0 は焼成前の生地 の明度)間にかなり大きな相関関係 ($R=0.72$) が認められた。したがって、輻射伝熱量はパン表面色の明度変化に影響を及ぼす主要因であることが確認された。

しかし、実測結果によると、低い焼成温度で長期間焼いた場合より、高い温度で短期間焼いた方が、輻射伝熱量は少ないものの着色の進行度合いは速くなる。この現象は輻射伝熱量のほかには様々な物理化学的要因が着色の進行に関与していることを示唆している。したがって、焼成条件と着色のメカニズムとの関係をより厳密に把握するためには、これらの各要因を探るとともに、その要因の着色への影響を定量化しなければならない。また、この問題の解決には多くの困難が予想される。そこで、実用的観点から簡便な焼成色 の予測法として、(3)式 の n を輻射伝熱量だけでなく、ほかの要因をも含んだパラメータと想定する方法を試みた。すなわち、 $n=4$ から始めて順次 E と ΔL との相関係数を算出し、その値が最大になるような n を求めた。その結果、図14に示すように、 $n=8$ において相関係数の最大値 ($R=0.97$) が存在することがわかった。そこで、 $n=8$ として(3)式より E を求め、この値と明度差 ΔL との関係を図15に示した。その結果、両者間の相関係数は図10に示した $n=4$ の場合に比べて顕著に増加し、その関係は次式で表わせることがわかった。

$$\Delta L = 7.12 + 7.33E \quad (4)$$

この式により加熱条件と表面色の1つの座標との関係が得られたことになり、先に述べたように、これらの結果を利用して焼成色変化の予測が可能となった。以下にその手順を示す。

- ① オーブンの内壁温度 T_0 とパンの表面温度 $T_s(t)$ を経時的に測定し、加熱操作因子 E を(3)式によって求める。

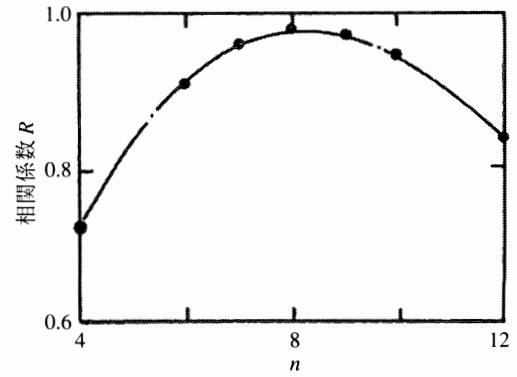


図14 パラメータ n と相関係数 R の関係

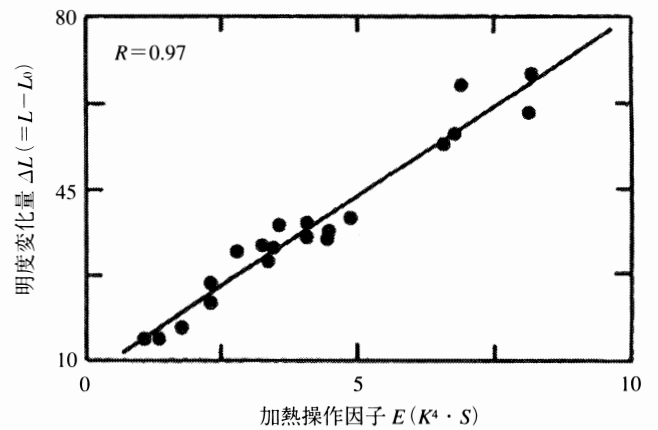


図15 加熱操作因子 E と明度変化量 ΔL の関係
($n = 8$, L_0 : 焼成前生地 の明度)

- ② 明度 L を(4)式より算出する。
- ③ 明度 L から色相 α と彩度 r をそれぞれ(1)、(2)式より求める。

ただし、これらの計算に用いる数式は生地 の成分などにより変化するため、本研究の成果は加熱条件から焼成色を予測する「方法」を提唱していることに留意する必要がある。

7. おわりに

食パンの焼成プロセスにおける表面色変化のパターンは、Hunter表色系のLab3次元空間に於いて描かれる1本の着色特性曲線によって示されることを明らかにした。また、オーブン設定温度が高くなるに伴って、この曲線に沿って変化する表面色変化の速度が速くなり、また、同温度条件に対する平衡表面色の存在が明らかになった。さらに、オーブン内壁温度から着色特性曲線を推算する方法を提唱した。以下に本研究の概要を述べる。

標準的原料配合割合と中種法を用いて製作した食パン生地を用いて、焼成プロセスにおける生地 の表面色、温度分布および質量を加熱温度範囲140~300℃の異なる

温度条件下で計測し、加熱条件および焼減率と表面色変化との関係を明らかにした。また、加熱条件を表わす新しい操作因子を導入することにより、表面色の変化、すなわち着色特性曲線を予測する方法を提唱した。以下にその結果を要約する。

- ① パンの焼成色を表わす色相、彩度および明度の値には一定の関係が存在するため、その変化はHunter表色系の3次元空間において表示される一本の着色特性曲線に沿って進行する。
- ② 焼成色の着色の度合いは加熱温度と焼減率の増加に伴って進行する。
- ③ 輻射伝熱量と焼成色の明度の変化量との間に一定の相関関係が認められた。
- ④ 加熱条件を評価するパラメータとして、新しく加熱操作因子を定義して導入した結果、この因子と焼成色の明度とは直線関係にあることがわかった。
- ⑤ これらの相互関係を用いて、加熱操作因子より焼成プロセスの着色特性曲線を予測する方法を提唱した。

文 献

- 1) 相良泰行：冷凍，80 (932)，23-29 (2005)。
- 2) 藤山諭吉：「製パン理論と実際」，第1版，p.109，日本パン技術研究所，東京 (1981)。
- 3) BOY ACIGLU, M. H. and DAPPOLONIA, B. L. : Cereal Chem., 71, 21 (1994)。
- 4) BOY ACIGLU, M. H. and DAPPOLONIA, B. L. : Cereal Chem., 71, 32 (1994)。
- 5) 洪川祥子：家政誌，37，87 (1986)。
- 6) 佐藤秀美，洪川祥子：家政誌，40，987 (1989)。
- 7) 佐藤秀美，畑江敬子，島田淳子：日食工誌，39，784 (1992)。
- 8) 杉山久仁子，宮崎靖子，洪川祥子：家政誌，44，923 (1993)。
- 9) 越後和義：「パンの研究—文化史から製法まで」，第1版，p.67，柴田書店，東京 (1982)。
- 10) 谷下市松：「工学基礎熱力学」，第9版，p.294，裳華堂，東京 (1985)。
- 11) 川上元郎：「色の常識」，第1版，p.147，日本規格協会，東京 (1974)。