トースト内部の水分分布に及ぼすヒータの 放射波長特性の影響

佐藤秀美・畑江恵子・島田淳子

Water Distribution in a Bread under Toasting by Radiative Heaters

Hidemi SATO*, Keiko HATAE* and Atsuko SHIMADA*

* Ochanomizu University, 2-1-1 Otuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112

Distribution of water concentration in a bread under toasting by radiative heaters has been studied experimentally and the effects of the radiative characteristics on it has been discussed. A white bread was employed whose water content was 45.0%. Three kinds of electric heaters, whose radiative characteristics were different each other, were used. After toasting of predetermined period, the bread was divided by three parts; the crust layer, the upper half part of the crumb, and the lower half part of the crumb. The water content of these parts were measured by a constant pressure drying method. The experimental results show that as the toasting time is increased, the water content of upper and lower parts of crumb decreases, takes a minimum, increases, and then goes beyond the initial water content of the bread. In this process, the water content of the upper part changes faster and the extent of value change is larger than that of the lower part. The radiative characteristics of the heaters affects the water distribution history in the bread. If the bread is toasted by the heater with longer wave length, the water content both of crumb parts becomes higher, and the difference of these values are larger.

(Received Feb. 23, 1995)

緒 言

食パンは現代の日本人の食生活に欠くことのできない食品であり、一般に、トーストにして食される場合が多い。トーストの美味しさには、焼き色、味、匂いと並んで、テクスチャーが大きく影響する。トーストとして好ましいテクスチャーとは、「表面がカリッとしていて中が柔らかい状態」という言葉で表現されるように、クラスト層、すなわち加熱により生じる硬化部分とクラムと呼ばれるしっとりと柔らかい内層との対比によって特徴づけられる。両者のテクスチャーには食パン内部の水分分布が大きく影響すると考えられる。

一般に、食パンを加熱すると表面から水分が蒸発し、それに伴い、内部の水分も加熱面に近いほど低くなることが予想される。しかし、著者らは、クラム層全体の水分

分含量は加熱開始直後に一旦低下するものの、その後時間の経過に伴い加熱前よりも高くなること、また、この程度は赤外線波長により異なることを、先に実験的に明らかにした¹⁾。このことは、食パン内部の水分が、加熱過程において一般的に予想されるのとは異なり特異な分布を示すこと、およびその分布は赤外線波長の影響を受けることを示唆している。しかし、食パンの水分分布の加熱による変化に関しては、表面部分、すなわちクラスト部分について報告²⁾があるのみで、クラムを含む食パン内部全体の水分分布についてはこれまで全く検討されていない。

そこで本研究では、特にクラムの水分含量に着目し、食パン内部の水分分布が加熱によりどのように変化するかを明らかにするとともに、この水分分布に及ぼす赤外線波長の影響について検討した。

* お茶の水女子大学 (〒112 東京都文京区大塚 2-1-1)

実験方法

1. 実験装置

実験装置の概要は、前報¹⁾とほぼ同様である。すなわち、電気入力が 300 W のヒータ 2 本を並べて合計 600 W とし上部から試料を加熱した。実験には、放射波長特性が異なる 3 種類のヒータを使用した。放射波長特性は、前報¹⁾と同様で、図 1 に示す通りである。すなわちヒータ A は可視光領域に、ヒータ B は近赤外線から遠赤外線にかけて全般に放射し、ヒータ C は遠赤外線領域に放射ピークがあるという特徴を持っている。試料に向けて放射される放射伝熱量はヒータの放射波長特性の違いにより異なる³⁾。また、この伝熱量はヒータ・試料間の距離によっても異なる。そこで、ヒータの放射波長特性の違いにかかわらず放射伝熱量が $1.13 \times 10^4 \text{ J/m}^2 \cdot \text{h}$ 一定となるようにヒータ・試料間の距離を 4.8~6.0 cm の間で変化させて、実験を行なった。なお、放射伝熱量の測定は、前報²⁾と同じように、放射率が約 1.0 の黒色塗料で塗装した直径 50 mm、厚さ 5 mm のアルミブロックの受熱量から算出した。

2. 試料の調製

試料として、実験日前日に製造された厚さ 14 mm の市販の食パンを用いた。食パンの水分含量は 105℃ の定圧乾燥法⁴⁾により測定した結果、 $45.0 \pm 0.1\%$ (w/w) であった。

図 1 ヒータの放射波長特性

A; ハロゲンヒータ, B; シーズヒータ, C; 遠赤外線ヒータ
放射率(%): ヒータと同一温度の黒体の放射エネルギー強度に対するヒータの放射エネルギー強度の割合を百分率で表示

3. 測定項目および方法

試料をヒータで所定の時間加熱した後試料中央部のクラスト、すなわち加熱により剥離できる硬化部分を採取し、その厚さおよび水分含量を測定した。クラスト剥離後のクラム部分は上下 2 層に分け、それぞれの水分含量を測定した。なお、クラスト形成前は、試料表面から底面までの全体をクラムとみなして分割した。測定方法は、前報¹⁾と同様で、クラスト層の厚さはノギスで、クラストおよびクラムの水分含量は 105℃ の定圧乾燥法で測定した。また、加熱中の試料の表面および表面から 2, 4, 6, 10 mm の深さの地点の温度測定には直径 0.05 mm の CA 熱電対を用いた。表面温度は、熱電対の感熱部を食パン表面にある気泡の膜に内側から接するように設置し測定した。また、食パンの厚みは加熱により若干変化するが、食パン内部の温度はその変化にかかわらず、表面から 2, 4, 6, 10 mm の点で測定した。

全ての測定は 5~10 回繰り返して行い、結果はその平均値で表した。

実験結果および考察

1. 食パン内部の水分分布の経時変化

加熱過程における食パンのクラムの水分挙動を明らかにするため、クラスト層を剥離した後のクラムを上下 2 層に分け、それぞれの水分含量を加熱初期には 10~15 秒ごとに、加熱後期には 3 分ごとに測定した。図 2 にヒータ B で加熱した場合の例を示す。上層および下層ともに水分含量は加熱直後に一旦低下し、その後加熱前よりも高くなった。この程度は、加熱面に近い上層において、より顕著であった。すなわち上層の水分含量は加熱直後に急激に低下し、30 秒後に 42.2% (w/w) と最低値を示した後速やかに増加し、加熱開始約 45 秒後に加熱前の値を越え、それ以降、時間の経過とともにさらに上昇した。本実験ではクラムを 2 層に分割可能な時点である 12 分まで加熱したが、この時の上層の水分含量は 47.4% (w/w) に達した。これに対し、下層の水分含量の変化は上層のそれよりも緩やかであり、最低値は加熱 45 秒後で 44.3% (w/w) であった。また、加熱 12 分後の水分含量は 45.8% (w/w) にとどまった。放射波長特性の異なる他のヒータで加熱した場合においても、これとほぼ同様の傾向が認められた。これらの結果から、クラムの水分含量は熱源の放射波長特性にかかわらず、熱源に近い上層において下層よりも早く、しかも大きく変化することが明らかになった。

このようなクラムの水分含量の変化が、クラスト層の

図2 クラムの水分含量の経時変化

○: クラム上層 (加熱面側), ●: クラム下層 (底面側)

熱源: ヒータ B, 加熱前の食パンの水分含量: 45.0% (w/w)

厚さおよびその水分含量の変化とどのように関わっているかを検討した。その結果を図3に示す。クラストは加熱開始30秒後に形成され、その後加熱時間に伴い厚くなった。一方、水分含量は加熱時間と共に低下した。クラストの形成が認められる時間は、クラム上層の水分含量が最低値をとる時間(図2)と一致している。このことは、クラストの形成とクラムの水分含量の変化が密接に関係していることを示唆している。

そこで、食パン表面および内部の温度を測定し、これらと図2および図3のデータを合わせて食パン内部の水分が経時的にどのように変化するかを考察した。その結果を図4に模式的に示した。

加熱開始時においては、図4(a)に示すように、水分含量は45.0% (w/w)、温度は25.0℃と厚み方向に一定である。加熱が開始されると食パンの表面温度は上昇し、それに伴い表面から水分が蒸発する。表面の水分含量が蒸発により低下するに従い、内部の水分は表面に向かって移動するため、徐々に低下する。クラスト層は、水分含量が約17%以下の硬化した層²⁾であり、加熱開始30秒後に認められる(図3)ようになる。また、この時、クラム上層の水分含量が最低値をとる(図2)ことから、食パン内部の水分分布は図3(b)のようになる。すなわち、この時点まで、食パン内部において水分の蒸発面は表面近傍付近に存在し、そこから蒸気は容易に食パン表面に向け拡散し大気中に逃げていく。加熱時間30

図3 クラストの厚さおよび水分含量の経時変化

○: クラストの厚さ, △: クラストの水分含量

熱源: ヒータ B

(a) 加熱開始時 (b) 30秒加熱 (c) 9分加熱

図4 食パン内部の温度分布および水分移動状態の模式図

— 水分含量, ---- 温度

..... クラストとして認められるようになる時の水分含量約17% (w/w)

熱源: ヒータ B, 加熱前の食パンの水分含量 45.0% (w/w)

食パンの厚さ: 14 mm

秒を経過すると、クラストは急激に厚く(図3)なり、これにともない、クラストとクラムの境界面に存在すると考えられる蒸発面は食パン内部に移動することになる。このような状態になると、境界面で蒸発した水分は食パン内部に向かっても移動するようになる。この時の水分移動状態および食パン内部の水分分布は模式的に図4(c)のように示される。食パン内部の温度は約80~67℃とそれほど高くないので、内部に移動した蒸気は凝縮し食パンに水分を付加する。すなわちクラストができるよ

うになると、蒸発面から蒸気が内部にも移動するようになり、クラムの水分含量は高くなる。この場合、クラム上層は下層と異なり、蒸発面に隣接しているので、下層より水分が多く付加される。

2. 放射波長特性の影響

これまで、クラムの水分含量に対し、ヒータの放射波長特性の違いが影響を与えることが明らかにされている。このことは、ヒータにより、食パン内部の水分分布が異なることを示唆している。そこで、放射波長特性が異なるヒータ3種で加熱した時の食パン内部の水分分布を検討した。表1は食パンを9分間加熱した時のクラストの厚さとその水分含量およびクラム上下層の水分含量の測定結果である。ヒータの種類の違いにより、クラムおよびクラストの水分含量に違いが認められた。遠赤外線領域を主に放射するヒータCで加熱した場合、クラスト層は厚く、その水分含量は低かった。また、クラム全体の水分含量は高く、さらに、上層と下層におけるその差は大きかった。短波長領域から長波長領域の全般を放射するヒータBで加熱した場合には、クラスト層の厚さおよびクラム下層の水分含量はヒータCとの間に有意差は認められなかった。しかし、クラスト層およびクラム上層の水分含量については、ヒータBの方がヒータCよりもクラスト層では有意に高く、逆にクラム上層のそれは有意に低かった。これに対し、可視光領域に放射ピークのあるヒータAで加熱した場合、クラストは薄く、その水分含量は高かった。また、クラムの水分含量は、全体的に低く、上層と下層のその差は小さかった。特に、下層の水分含量は、加熱前よりも1.6% (w/w) 低くなっており、この点において他のヒータとは全く異なった。

以上の結果から、長波長領域の赤外線を放射するヒ-

ータで加熱した場合ほど、食パン内部の水分含量は部位によって大きく異なる傾向にあることがわかった。すなわち、クラストの水分含量は低く、クラムのそれは高く、しかもクラム上層の水分含量は下層よりも顕著に高い。このように、ヒータの放射波長特性の違いにより、内部の水分分布の違いが現われたのは、ヒータの放射特性の違いにより内部の温度分布が異なることに起因していると考えられる。そこで、試料の表面および内部の温度分布を測定した。

図5に、各ヒータで加熱した時の表面および内部の温度を示した。加熱時間が長くなると表面温度は高くなりそれに伴い内部温度も高くなるが、ヒータにより、その温度分布は異なった。ヒータAで加熱した場合、温度は試料表面から内部にかけて緩やかに低下した。これに対し、ヒータCの場合、温度は、試料表面から内部にかけ

図5 食パン内部の温度

加熱時間：○2分，△6分，□10分，●15分

食パンの厚さ：14 mm

ヒータA：可視光領域を主に放射

ヒータB：近赤外線～遠赤外線を放射

ヒータC：遠赤外線領域を主に放射

表1 放射波長特性の異なるヒータで加熱した食パン内部の水分含量およびクラストの厚さ

ヒータ	クラストの厚さ (mm)	水分含量 (% (w/w))		
		クラスト	クラム上層	クラム下層
A	3.4±0.1 a	6.5±0.2 c	44.2±0.1 f	43.4±0.3 i
B	4.3±0.2 b	4.5±0.4 d	46.6±0.1 g	45.4±0.7 j
C	4.4±0.2 b	3.2±0.7 e	47.3±0.3 h	45.0±0.5 j

1.13×10⁴J/m²h 9分間加熱，食パンの水分含量：45.0% (w/w)

ヒータA：可視光領域を主に放射，ヒータB：近赤外線領域～遠赤外線領域を放射，ヒータC：遠赤外線領域を主に放射

小文字：異なる場合は、危険率1%以下で有意差有り。

て急激に低下した。ヒータ B で加熱した時の表面および内部の温度は両ヒータの間にあった。これらの違いをさらに比較するため、各ヒータで加熱した時の表面温度と表面から 6 mm 地点の温度を示したのが図 6 である。試料の表面温度は、ヒータ C で加熱した場合が最も高く、次いでヒータ B が高く、ヒータ A で加熱した場合が最も低かった。また、表面温度の差は、時間の経過に伴い大きくなった。逆に、6 mm 地点の温度は、ヒータ A で加熱した場合が高く、ヒータ C が低かった。特に、加熱初期においてその差が大きかった。ヒータ B で加熱した場合の温度は両ヒータの間にあった。さらに、クラストの厚さおよび内部温度の測定結果にもとづいて表したクラストとクラムの境界面の温度を比較した(図 7)。ここでは、境界面を剥離できるクラスト層とクラム層の間の接触部分とした。従って、横軸のクラストの厚さは表面から境界面までの距離に相当する。境界面の温度は、試料の内部温度の経時変化(図 5)とクラスト層の厚さの経時変化(図 3)から内挿して求めた。ヒータの放射波長特性の違いにより、境界面の温度が異なった。ヒータ A で加熱した場合が高く、次いでヒータ B、ヒータ C の順に低くかった。ヒータ A、C 間のその差は 10℃ 以上あることがわかった。このように、試料内部の温度分布に違いが生じたのは、放射波長により赤外線の食品への浸透の程度が異なるためである。ヒータ C から主に放射される長波長領域の赤外線は、食品表面付近でほとんど吸収される⁹⁾。従って、表面温度は速く上昇する反面、内部の

図 6 試料の表面および深度 6 mm の温度の経時変化

食パンの厚さ: 14 mm

熱源: ●ヒータ A: 可視光領域を主に放射

▲ヒータ B: 近赤外線～遠赤外線を放射

■ヒータ C: 遠赤外線領域を主に放射

図 7 クラストとクラムの境界面の温度

食パンの厚さ: 14 mm

熱源: ●ヒータ A: 可視光領域を主に放射

▲ヒータ B: 近赤外線～遠赤外線を放射

■ヒータ C: 遠赤外線領域を主に放射

温度上昇は遅い。一方、ヒータ A から主に放射される短波長領域の赤外線は、吸収係数が小さいため、食品内部に深く浸透する⁹⁾。このため、表面温度の上昇が遅い反面、内部の温度上昇は速い。境界面の温度から、ここで蒸発しクラム方向へ向かった水分の移動状態が推察できる。すなわち、境界面の温度が低いということはクラム上層の温度が低いことを示唆している。この場合、クラム側へ移動した水分はクラム上層部で早く凝縮するため、クラム上層における水分の付加量は比較的多くなると考えられる。逆に、境界面の温度が高い時、すなわちクラム上層の温度が高い場合には、クラム上層における水分の凝縮量は比較的小さいと考えられる。

以上の結果より、ヒータの放射波長特性と試料内部の水分分布の関係は、図 8 のように模式化できると考えられる。食パンを加熱すると、水分が蒸発し、クラストが形成される。クラストの形成に伴い、水分の蒸発面は表面からクラストとクラムの境界面に移動する。この境界面で蒸発した水分は、クラスト側、クラム側の両方向に向かって拡散する。クラスト側に向かった水分は、食パンから大気中に抜けていく。一方、クラム側に向かった水分は、クラムの温度が低いいため、一部凝縮し、クラムに水分を付加することになる。

短波長領域を主に放射するヒータで加熱した場合、食パン内部の温度分布は比較的緩やかで、内部の温度はある程度高い。クラム上層の温度がある程度高いことから境界面で蒸発した水分の上層における凝縮量は少ないため、クラム内部の水分は比較的なだらかな分布になる。一方、クラスト層に関しては、表面温度が比較的低いた

図 8 食パン内部の水分分布に及ぼす赤外線の波長の影響

め、その水分含量は高めになる。これに対し、長波長領域の赤外線を主に放射するヒータで加熱した場合、境界面から内部に向かって移動した水分は、クラムの温度が低いため、すぐに凝縮することから、クラム上層の水分含量は高くなる。このため、クラム内部の水分含量の格差は大きくなる。また、クラスト層の表面温度が、比較的高いため、クラスト層の水分含量は低くなる。

要 約

食パンを赤外線ヒータで加熱した時の内部の水分分布が経時的にどのように変化するかを、特にクラムに着目

し、調べるとともに、この水分分布の変化に及ぼすヒータの放射波長特性の違いの影響を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 上下2層に分けて測定したクラムの水分含量はともに、加熱直後に一旦低下し最低値をとった後、加熱前の水分含量よりも高くなった。この加熱過程において、上層の方が下層よりも水分含量は早く、しかも大きく変化した。

(2) ヒータの放射波長特性は食パン内部の水分分布に影響を及ぼした。長波長領域の赤外線を放射するヒータで加熱した場合ほど、食パンの部位により、水分含量は大きく異なった。

文 献

- 1) 佐藤秀美・畑江敬子・島田淳子：食科工，**42**，248（1995）。
- 2) 佐藤秀美・畑江敬子・島田淳子：日食工誌，**39**，784（1992）。
- 3) 佐藤秀美・畑江敬子・島田淳子：食科工，**42**，643（1995）。
- 4) 日本食品工業学会食品成分分析法編集委員会：食品成分法（光琳，東京），p. 4（1981）。
- 5) 清水 賢：セラミックス，**23**，305（1988）。
- 6) 甲藤好郎：伝熱概論，第12版（養賢堂，東京），p. 348（1974）。

（平成7年2月23日受理）