

食品の放射加熱における波長分布の影響

杉山 久仁子, 宮崎 靖子*, 渋谷 祥子

(横浜国立大学教育学部)

平成4年12月18日受理

Effects of Spectral Distribution on Radiative Heating of Food

Kuniko SUGIYAMA, Yasuko MIYAZAKI* and Shoko SHIBUKAWA

Faculty of Education, Yokohama National University, Yokohama 240

The effects of the spectral distribution in the infrared ray range on radiative heating of food were studied. Baking tests were carried out in closed (oven) and open systems with two types of heaters; a far-infrared ray heater (N1) and a seathed heater (EM) which radiates relatively short wave rays. For the samples, bread and food model which was made of wet filter papers were used. After baking, the moisture loss, the surface temperature, the center temperature were measured.

The result in closed system, of which the surface temperature of heater was controlled at 400°C, showed the heat receiving rate of bread from N1 was faster than that from EM. Measured moisture distribution of food model indicated that the moisture loss rate at the inside was faster than that at the surface in the case of EM. The EM heating in open system resulted in lower surface temperature and thicker crust of bread than N1 heating.

These results suggest that the short wave rays penetrated deeper through the food surface than the long wave rays.

(Received December 18, 1992)

Keywords: radiative heat transfer 放射伝熱, infrared rays 赤外線, far-infrared rays 遠赤外線, heater ヒーター, wavelength 波長, emissivity 放射率.

1. 緒 言

食品の焙焼は、主にヒーターなどの放射体による放射伝熱、熱せられた空気による対流伝熱により行われる。著者らは、これまでオープン加熱において放射伝熱と対流伝熱の割合の異なる加熱条件を設定し、食品の焙焼成績を検討した結果、特に食品表面の焼き色形成に放射伝熱が有効であることを明らかにし、その効果は赤外線が食品表面に浸透するためであると推察した¹⁾²⁾。従来、電熱の調理用加熱機器の放射体としてはシーズヒーターが利用されていたが、近年、近赤外線領域の放射率の高いハロゲンヒーターや遠赤外線領域の放射率の高い遠赤外線ヒーター等、放射波長の異なる放射体が注目を集めている。ヒーターからの放射波長が異なると、食品表面への赤外線の浸透深度が異なり、焙焼成績、焙焼時間、

消費電力等に差を生じると考えられる。

これまでの赤外線加熱の近赤外線領域に関する研究は、食パン、じゃがいもおよび豚肉を試料とした Dagerskog ら³⁾⁴⁾の報告、クッキーを試料とした Wade⁵⁾の報告がある。一方、遠赤外線領域については、水とジュースを用いた渡辺⁶⁾の報告、さつまいもを試料とした橋本⁷⁾の報告がある。これらの研究により、近赤外線領域で数ミリ、遠赤外線領域で数百マイクロメートル程度の赤外線の食品表面での浸透があると推定されているが、食品を用いた浸透深度に関する研究は少ない。渋谷⁸⁾は、遠赤外線ヒーターの取り替え可能なオープンを作成し、遠赤外線ヒーター数種と、従来の電気オープンでの食品の焙焼比較実験を行い、庫内温度一定の場合、従来の電気オープンよりも遠赤外線ヒーターを取り付けたオープンの方が焙焼時間が短縮されること、また、焙焼時間の短縮の程度は食品の種類やヒーターの分光放射

* 現三菱電機(株)生活システム研究所

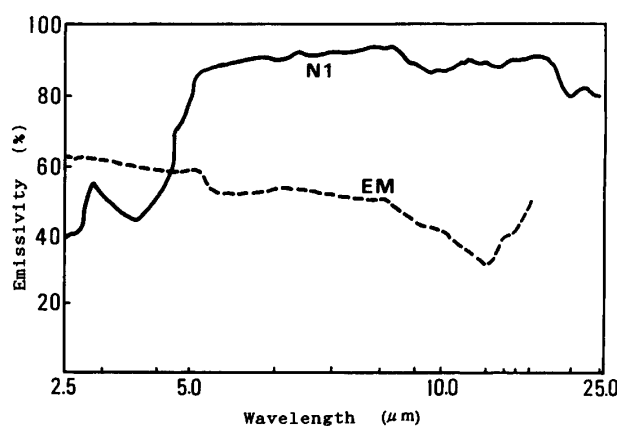


Fig. 1. Spectral emissivity of heater

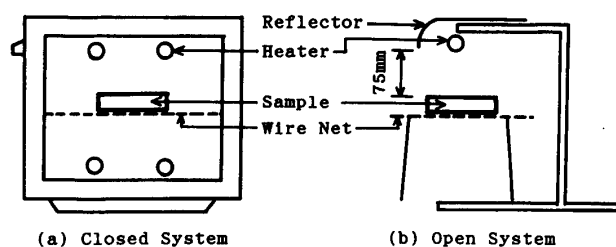


Fig. 2. Diagram of experimental apparatus

率によっても異なることを報告している。しかし、この実験においては遠赤外線ヒーターとシーズヒーターの形状、庫内の材質や大きさが異なっていた。一方、佐藤ら⁹⁾は赤外線全領域において放射波長領域の異なる数種の同形のヒーターを用いて食品の焙焼実験を行い、庫内温度一定の時、遠赤外線のヒーターは放射伝熱量が小さく、食品の焙焼時間はその放射伝熱量に依存するという結果を報告している。しかし、庫内温度一定の条件ではヒーターの表面温度が異なり、ヒーターからの放射熱量の違いは放射率に起因するか否か明らかではない。赤外線領域の加熱の有効性を更に明らかにするには、条件を限定する必要がある。

そこで本研究では、赤外線領域の放射波長の食品表面への浸透度や水分移動に対する影響をより一層明らかにすることを目的として、波長特性の異なる遠赤外線ヒーターとシーズヒーターを用い、ヒーターの形状やヒーターの表面温度を一定にし、多孔質食品の例として食パンを試料として焙焼実験を行った。

2. 実験方法

(1) 実験装置

使用したヒーター：本研究では、ヒーターは従来から電気オープンで使用されていたシーズヒーター（以下

EM と示す）、および遠赤外線ヒーター（以下 N1 と示す）の 2 種類を使用した。ヒーターは出力 300W、直径 15 mm、管長 200 mm の棒状のものを使用した。使用した遠赤外線ヒーターは、ニクロム線をセラミック管（酸化アルミナ系）で覆ったヒーターで著者らがこれまでの実験で数種の遠赤外線ヒーターを用いて食品の焙焼実験を行った結果⁸⁾、より効果的な結果を得たものである。それぞれのヒーターの分光放射率を Fig. 1 に示す。ヒーター N1 は波長 5 μm 以上の比較的長波長領域で放射率の高い、典型的な遠赤外線放射体である。なお、後半の開放系の実験においてはヒーターの放射波長の影響をより明確にするために、EM よりも更に可視光に近い短波長領域で放射率の高いハロゲンヒーター（以下 HG と示す）を使用した。ただし、このヒーターは出力 300W、直径 8 mm、管長 75 mm の棒状のものを使用したため結果は参考データとした。

閉鎖系加熱装置：閉鎖系での実験装置を Fig. 2(a) に示す。閉鎖系の実験では市販のオープン改造し、ヒーターを取り替えられるようにした。庫内の上部と下部にヒーターを各 2 本ずつとりつけ加熱した。上部手前のヒーターの表面温度を CA 熱電対（直径 0.3 mm）を接触させることにより測定し、温度制御器（東邦電子 TM-48）によって 400°C に制御した。試料は、庫内中央部の金網の上に設置し加熱した。庫内温度は庫内中央に設置した CA 熱電対（直径 0.3 mm）により測定し、庫内温度が安定してから試料の加熱を行った。

開放系実験装置：開放系での実験装置を Fig. 2(b) に示す。ヒーターは 1 本、放射体上部には反射板をとりつけ、放射体表面から試料表面までの距離は 75 mm とした。ヒーターの供給電圧は変圧器をとりつけ電圧計により確認しながら 100 V に調節した。試料は足付きの金網にのせ加熱した。ヒーターの表面温度をヒーター表面に接触させた CA 熱電対（直径 0.3 mm）により測定し、表面温度が安定してから試料の加熱を開始した。

(2) 熱流量の測定

開放系加熱装置で加熱時のヒーターからの熱流束を測定した。熱流束の測定装置を Fig. 3 に示す。アルミブロック（100×100×25 mm）にソーダガラス（100×100×2.89 mm）を両面に張り付け、図のように直径 0.1 mm のアルメル線（Al）、クロメル線（Ch）を Al-Ch-Al の順に接続することにより、ソーダガラスの表と裏の温度差を経時的に測定した。ソーダガラスの表面には黒色塗料（放射率約 1.0）を塗布し、測定器側面には熱の流入を防ぐために断熱材を巻いた。測定された温度差より、

食品の放射加熱における波長分布の影響

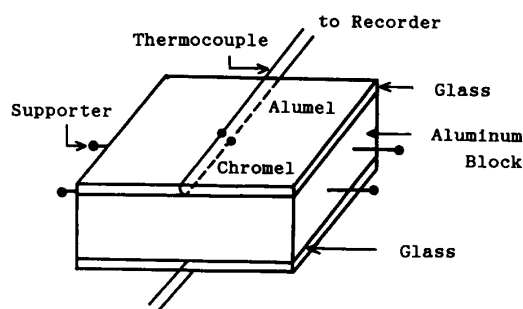


Fig. 3. Diagram of device to measure heat flux

次式を用いて熱流束を算出した。

$$q = -k \cdot \Delta T / \Delta x$$

q は熱流束 (W/m^2), k はソーダガラスの熱伝導率 ($W/m \cdot K$), ΔT は温度差 (K), Δx はソーダガラスの厚み (m) を示す。 $k=1.065 W/m \cdot K$, $\Delta x=0.00289 m$ として計算した。

(3) 食品の焙焼

均一な品質の得られ易い多孔質食品として市販の食パン(山崎製パン)を試料に供した。閉鎖系では厚さ16 mm, 開放系ではクラスト層を測定するために厚さ25 mmにスライスしたものを使用した。庫内温度, およびヒーターの表面温度の安定した状態で食パンの加熱を開始した。

(4) 食品焙焼後の成績測定

閉鎖系では水分蒸発量と表面の焼き色を測定し, 実験は10回繰り返して行った。開放系では水分蒸発量, 表面の焼き色, 内部温度, クラスト層の厚さおよび表面温度を測定し, 実験は30回繰り返して行った。

水分蒸発量は最小目盛り0.01 gの電子天秤を用いて焙焼前後の重量を測定し, その差より算出した。表面の焼き色は直径30 mmの範囲を2カ所取り, 測色色差計(日本電色工業, ND-101 DP)を用いて L 値を測定し, その平均値を求めた。内部温度は, 試料の中心にCA熱電対を差し込み, レコーダーに記録させた。クラスト層の厚さは, 焙焼後の試料を二等分し, 硬化している部分をクラスト層とし, その厚さをノギスを用いて測定した。表面温度は, 焙焼直後に試料をヒーターの真下からずらし, 1秒以内に放射温度計(日本アビオニクス, TVS-3400)により測定した。放射温度計の测温部は試料から0.4 mの位置に設置し, 試料の放射率は1.0とした。この方法により, 食パンの表面全体の温度を測定し, 試料の端から1 cm内側の部分の平均温度を付属のソフトウェアを用いて算出した。

(5) 水分蒸発量の測定

赤外線透過度の違いを明らかにするために, 食品モ

デルとして重ねた濾紙に水分を含ませて閉鎖系実験装置で焙焼し, 各層における水分蒸発量を測定した。

重量が $\pm 0.005 g$ の範囲で等しく, 厚さ0.26 mm, 直径110 mmの円形濾紙(東洋濾紙, No. 2)を5枚重ね4カ所をクリップで止め重量を測定した後, シャーレに入れ, 蒸留水20 mlを全体にかけ5分間放置する。放置後, 上下を板ではさみ水分が滴り落ちない程度に水を切り, 再び, シャーレの中で5分間放置後取り出し, 重量を測定する。吸水前後の重量差より吸水量を算出し, 吸水量が $13.00 \pm 0.50 g$ のものを試料とする。試料は, 庫内温度の安定した状態で, 一定時間焙焼し, 速やかに取り出し, ピンセットを用いて一枚ずつはがし, 重量を測定する。焙焼前後の重量差より蒸発量を算出する。

なお, 比較のために放射伝熱の割合の小さい強制対流式の電気オーブン(松下電器産業, NE-8410)で同様の実験を行った。

3. 実験結果及び考察

(1) 閉鎖系(オープン)における実験

放射伝熱による受熱量は, 放射体と被加熱物のそれぞれの放射率および表面温度の4乗の差により決まる。通常オープンにおける加熱制御は庫内温度により行われているが, 筆者らのこれまでの研究では, 庫内温度一定の条件でも放射体の種類が異なると, ヒーターの表面温度が大きく異なっていた。したがって庫内温度一定の条件下では, 放射体からの放射熱量の影響と放射率の影響を分離して考えることは難しい。そこで本研究では, ヒーターの放射率の違いによる影響を明らかにするためにヒーターの表面温度を一定に制御し, オープンでの食パンの焙焼実験を行い, 焙焼成績を比較した。ヒーターの表

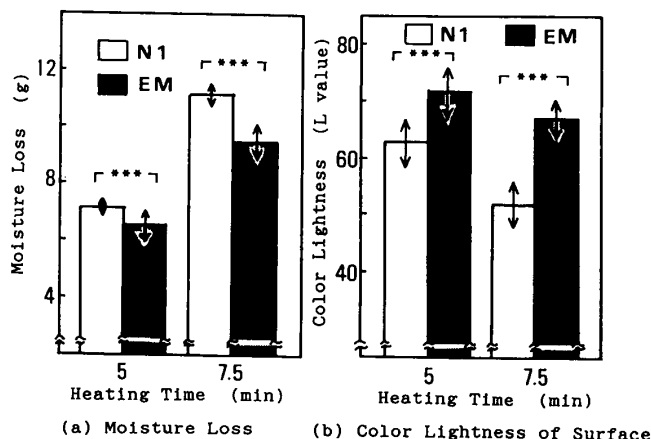


Fig. 4. Baking quality of bread

*** Significant at 0.1% level.

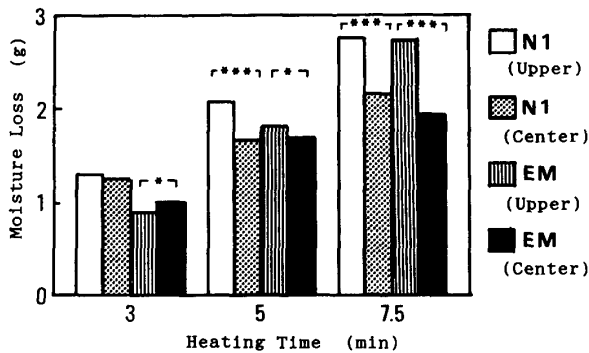


Fig. 5. Moisture loss of a filter paper

*** Significant at 5% and 0.1% levels, respectively.

面温度を 400℃ に制御した結果、庫内温度はヒーター N1 使用時 219℃、ヒーター EM 使用時 209℃ であり、遠赤外線ヒーターを用いた場合の方が庫内温度が僅かに高かった。これは、水の赤外線吸収帯が 3, 6, 10 μm 付近にあるため、庫内に存在する水蒸気が遠赤外線ヒーターでより多くの赤外線を吸収したことや、庫壁の吸収スペクトルの影響で壁温に差が生じたことなどが原因ではないかと推察される。

この条件で食パンを 5 分および 7.5 分焙焼した場合の水分蒸発量を Fig. 4(a) に示す。いずれの加熱時間においても N1 のほうが EM よりも有意に蒸発量が多かった。Fig. 4(b) に表面の焼き色 (L 値) を測定した結果を示す。いずれの加熱時間においても N1 で加熱した方が有意に焼き色が濃くついていた。この結果から、ヒーター表面温度一定の条件下では、庫内温度一定の時と同様、遠赤外線ヒーターの方が食パンの受熱速度が速いと考えられる。庫内温度が 10℃ 異なっていることから、庫壁からの放射伝熱と庫内空気からの対流伝熱による受熱量は N1 で加熱した場合の方が多く、その差は全受熱量の約 5% と推察される。7.5 分加熱の食パンの水分蒸発量から計算される受熱量の差は約 17% であり、さらに表面の焼き色が N1 で加熱した場合の方が濃いことから、表面温度が N1 の方が高くなっていることが考えられ、食パンの受熱量の差は庫内温度が異なることによって生じる受熱量の差よりも大きいと考えられる。また、本実験では定量的には測定しなかったが、食品表面のクラスト層の状態に差が見られた。このため、次に試料表面での赤外線の浸透に対する波長の影響を調べるために、モデルとして水分を含ませた濾紙を 5 枚重ねて焙焼し、水分分布の変化を調べた。

上部から 1 枚目及び 3 枚目の濾紙の水分の蒸発量を測定した結果を Fig. 5 に示す。3 分間加熱したものは、

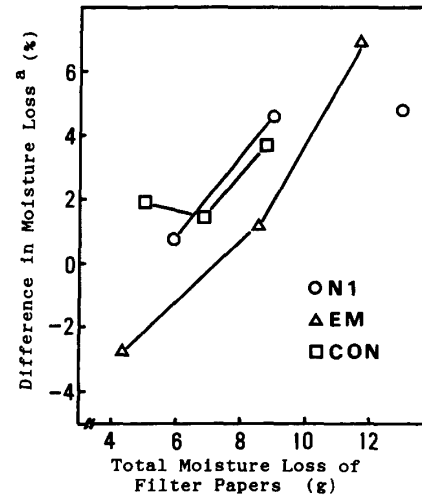


Fig. 6. Difference in moisture loss of each filter paper

^a Difference in moisture loss = $\{[(\text{the moisture loss in the upper paper}) - (\text{the moisture loss in the center paper})] / (\text{the total moisture loss})\} \times 100$

EM で加熱した場合 1 枚目より内部の 3 枚目の方が有意に蒸発量が多く、N1 では有意な差は認められなかった。しかし、加熱時間経過と共に両加熱方法ともに 1 枚目の蒸発量の方が多くなっていった。1 枚当たり約 2.7 g の水分を含んでいるので 7.5 分加熱時において 1 枚目はほぼ乾燥した状態となっていると考えられた。全蒸発量については測定されたどの加熱時間においても、N1 の方が EM に比べて有意に多く、食パン焙焼時と同様、N1 の方が受熱速度が速いことを示している。

一定時間における全蒸発量はヒーターにより差があるので、1 枚目と 3 枚目との蒸発量の差を求め、全蒸発量に対する割合を算出し、全蒸発量との関係に整理した結果を Fig. 6 に示す。比較のために放射伝熱の割合の小さい強制対流式の電気オーブン (以下 CON と示す) で同様に焙焼した結果を示した。全蒸発量が同じであっても N1, CON は EM に比べて、1 枚目の蒸発量が 3 枚目よりも多い。特に加熱初期において EM では顕著に 3 枚目の蒸発が多かった。

内部の水分の分布状態は、表面の蒸発速度と内部から表面への水分の拡散速度により決定される。濾紙に含ませた水のように水分子がより移動し易い条件下では表面での蒸発と共に、水分は内部から表面へ移動する。したがって初期には表面と内部の水分の差は僅かであり、更に加熱が進むと表面の乾燥が進み、表面と内部との水分含量の差は大きくなる。N1 で全蒸発量 13 g において、水分蒸発量の差が全蒸発量 9 g の時と変わらないのは、前者においては 1 枚目の水分がほぼ完全に蒸発した状態

食品の放射加熱における波長分布の影響

Table 1. Heat flux of each heater

	Surface temperature of heater (°C)	Heat flux from upper side (W/m ²)
N1	500	3,436
EM	536	2,991
HG	650	8,992

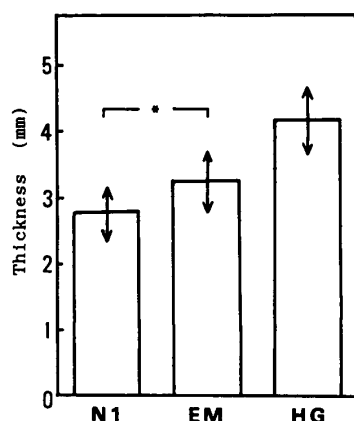


Fig. 7. Thickness of crust

* Significant at 5% level.

で内部の水分の蒸発が起きているためと考えられる。一方、加熱初期においてシーズヒーターで、対流伝熱および遠赤外線ヒーターの加熱に比べて、1枚目と3枚目の差が大きく3枚目の蒸発量の方が大きくなっているのは、短波長領域の赤外線が試料の表面にすべて吸収されるのではなく、一部は内部に浸透して吸収されているためではないかと推察される。対流伝熱での乾燥については、その内部の水分状態に関する研究が行われているが¹⁰⁾、赤外線加熱に関しては詳細な研究は見られないので、更に検討を続ける必要があると考えられる。

以上、閉鎖系オープン加熱の実験結果より、庫内温度一定の条件下と同様、ヒーター表面温度一定の条件下でも遠赤外線ヒーターの方が受熱量が多いことが確認でき、更に浸透深度が浅いことが認められた。黒体の温度400℃ではプランクの法則¹¹⁾より5μm以上の遠赤外線領域の放射エネルギー割合が約60%を占めることから考えると、両ヒーターのこの領域での放射率の差により、遠赤外線領域の放射量が異なり、加熱状態の差になったものと考えられる。

ただし、以上の実験では庫内温度が異なるため、対流伝熱による影響が存在する。そこで、対流伝熱の影響を最小限にとどめ、放射波長の食品表面への影響を調べるために、開放系で食パンを焙焼した。

(2) 開放系での実験

まず、この装置でヒーターへの供給電圧を一定にして加熱した場合の熱流束を測定した。測定時のヒーターの表面温度、熱流束の算出結果をTable 1に示す。この結果よりN1がEMに比べて表面温度が低いにもかかわらず、熱流束がやや多いことがわかる。そこでヒーターからの放射熱量を理論的に算出することを試みた。まず、ヒーターの表面温度からプランクの公式を用いて特定波長の黒体の放射熱量を算出する。その値にFig. 1で示されるヒーターの分光放射率の値を乗じヒーターの特定波長の放射熱量を算出し、その値を積分することにより全放射熱量を求めた。両ヒーターの分光放射率のデータは2.5~15μmに限られているが、500℃付近ではこの範囲の波長の放射エネルギーは全放射エネルギーの約85%を占めている。この結果、放射体の全放射熱量のN1対EMの比は1:0.87であった。この値は被加熱物の熱流束により算出されるヒーターからの放射伝熱量の比とほぼ等しく、N1の方が表面温度が低くても5μm以上の放射率が高いため、全放射熱量が多いことが確かめられた。また、HGでは他の二つのヒーターよりも表面温度が高く、放射伝熱量が多かった。このヒーターは表面積が小さいために供給電力が一定でも電力密度が大きく、表面温度が高いために、短波長領域の放射率が高いことがより全放射熱量を増加させていると考えられる。

次に、この装置で食パンの焙焼を行った。食パンは厚さ25mmのものを二等分し、10分間焙焼した。Fig. 7にクラスト層の厚さを計測した結果を示す。N1とEMの間に有意な差が認められ、EMの方がクラスト層が厚いことがわかった。クラスト層は食パンの硬化している部分であり、水分の蒸発がより内部まで進行していると考えられることから、表面近傍での温度分布および水分分布に差が生じていたのではないかと予測される。HGはEMよりもさらに有意にクラスト層が厚かった。その他、全体の水分蒸発量、中心温度、焼き色(L値)を測定したが、いずれもN1とEMの間には有意な差は認められなかった。先の閉鎖系の実験では、水分蒸発量および焼き色に有意な差が認められていたが、この開放系実験ではヒーター1本で加熱速度が遅く、閉鎖系の場合と比べて食パンの全受熱量が小さいために差が見られなかったのではないかと考えられる。HGでは他の二つよりも有意に水分蒸発量が多く、内部温度が高かった。次に、表面温度を測定した結果をFig. 8に示す。図中の数字は温度分布の面積を考慮して算出された平均温度を示す。測定は5回ずつ行い、その平均値はN1で91.9℃、EMで

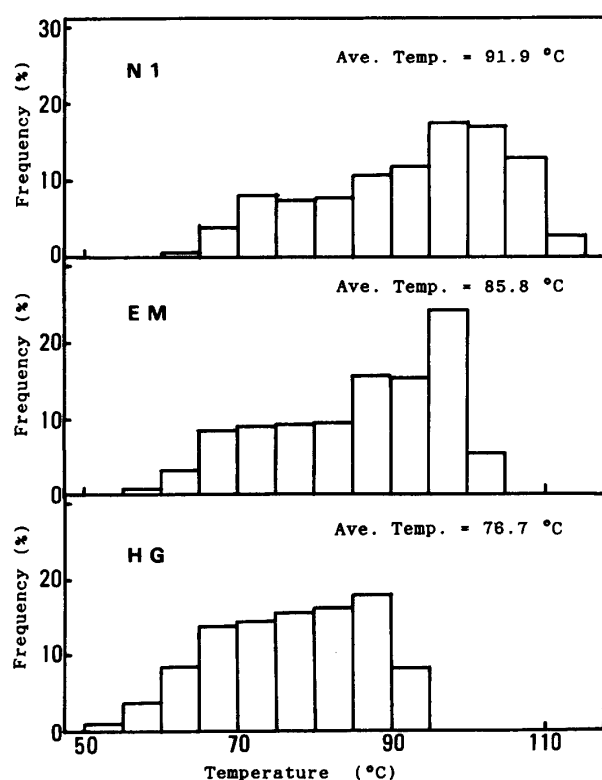


Fig. 8. Histogram of temperature of bread surface

85.8°C と有意に N1 の方が高かった。また、HG では 76.7°C と有意に低い結果を得た。この結果より波長の長いものの方が、食パンの表面温度が高いことがわかった。N1 ではクラスト層が EM よりも薄いことを考慮すると、EM よりも効率よく表面で熱に変えられ、EM では N1 よりもさらに内部で熱に変わっていると推察された。HG では放射熱量が他の二つに比べて多いにもかかわらず、試料の表面温度は低く、中心温度が高いことから、短波長領域の赤外線では、表面だけでなく内部に浸透して熱に変わっている部分も存在することが考えられる。

以上、ヒーターの供給電圧を一定とした開放系の結果より、食品表面においても長波長領域の赤外線が、表面の浅い部分で効率的に熱に変えられていること、一方短波長領域では浸透が比較的深いことが確認された。

従来のオープン加熱の行われている温度範囲では、ヒーターからの放射熱を利用した場合、ヒーターから放射される赤外線の比較的長波長領域の全放射エネルギーに対する寄与が大きいので、この領域の放射率の高い遠赤外線ヒーターが加熱速度に関して有効であると考えられる。一方、放射体の波長の特性は浸透深度が異なるため加熱速度のみならず食品表面の性質に関与することが明らかになった。

4. 要 約

赤外線領域の放射波長の食品表面への影響を明らかにするために、放射波長の異なるヒーターを用い、実験を行った。ヒーター表面温度一定の閉鎖系（オープン）では、食パンとモデルの焙焼を行い、ヒーターへの供給電力一定の開放系では食パンを焙焼し、ヒーターの放射波長の影響を検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) ヒーターの表面温度を一定に制御したオープンでは、遠赤外線ヒーターの方が水分蒸発速度が速く、表面の着色速度が速く、受熱速度が速いことが明らかになった。

(2) 水分を含ませた濾紙を用いたモデル焙焼実験では、近赤外線領域の放射率の高いヒーターの方が加熱初期に表面より内部の水分蒸発速度が速く、これは短波長の赤外線が内部に入った位置でも熱に変わっているためと考えられた。

(3) 対流伝熱の影響を抑え、ほぼ放射伝熱のみで加熱した場合、短波長領域の放射率の高いヒーターの方が長波長領域のものに比べて、食品の表面温度が低くクラスト層が厚く焼け、短波長領域の赤外線の食品表面での浸透が確認された。

終わりに、本実験を行うにあたり実験にご協力くださいました田中可南子さんに感謝します。

この報告の要旨は、平成3年度日本調理科学会で口頭発表した。

引 用 文 献

- 1) Shibukawa, S., Sugiyama, K. and Yano, T.: *J. Food Sci.*, **54**, 621-624, 699 (1989)
- 2) 渋谷祥子, 杉山久仁子: 家政誌, **43**, 1013-1018 (1992)
- 3) Dagerskog, M. and Österström, L.: *Lebensm. Wiss. Technol.*, **12**, 237-242 (1979)
- 4) Dagerskog, M.: *Lebensm. Wiss. Technol.*, **12**, 252-257 (1979)
- 5) Wade, P.: *J. Food Eng.*, **6**, 165-175 (1987)
- 6) 渡辺敦夫: 遠赤外線セラミックスの技術基盤の整備に関する調査研究, 産業研究所, 東京, 53-60 (1989)
- 7) 橋本 篤, 高橋 誠, 本多次太郎, 清水 賢, 渡辺敦夫: 日食工誌, **37**, 887-893 (1990)
- 8) 渋谷祥子: 遠赤外線の食品への利用, 工業技術会, 東京, 8-1-8-6 (1987)
- 9) 佐藤秀美, 渋谷祥子: 家政誌, **40**, 987-994 (1989)
- 10) 化学工学協会: 化学工学便覧 改訂五版, 丸善, 東京, 657 (1988)
- 11) Holman, J.P. (平田 賢監訳): 伝熱工学, プレイン図書, 東京, 283 (1982)