

## 炭焼き加熱特性の解析 (第1報) 熱流束一定条件下での伝熱特性の比較

辰口直子, 阿部加奈子\*, 杉山久仁子\*\*, 渋川祥子\*\*\*

(食と暮らし研究舎, \*東京都墨田区立外手小学校,  
\*\* 横浜国立大学教育人間科学部, \*\*\* 聖徳大学人文学部)  
原稿受付平成 15 年 7 月 5 日; 原稿受理平成 16 年 7 月 16 日

### Characteristics of Broiling over Charcoal (Part 1)

#### Comparison of Heat Transfer Characteristics under Constant Heat Flux from Different Heat Sources

Naoko TATSUGUCHI, Kanako ABE,\* Kuniko SUGIYAMA\*\* and Shoko SHIBUKAWA\*\*\*

*Laboratory for Food and Livelihood, Ota-ku, Tokyo 146-0092*

*\* Sotode Elementary School, Sumida-ku, Tokyo 130-0004*

*\*\* Faculty of Education and Human Sciences, Yokohama National University, Yokohama 240-8501*

*\*\*\* Faculty of Humanities, Seitoku University, Matsudo 271-8555*

Charcoal is generally considered to be a good heat source for broiling foods. This study was carried out to clarify the cooking characteristics of charcoal. A gas burner (gas ring), a metal broiling plate heated on a gas ring and an electric heater were used as heat sources to compare with charcoal. After the heat flux from each heat source had been regulated to be the same, the ratio of radiative heat transfer to total heat transfer was measured. Food samples (hanpen, chicken and salmon) were broiled over these four heat sources for fixed times (2, 10 and 13 min). The surface temperature, burn color (*G* value), moisture loss, moisture content in the surface layer and hardness of the broiled samples were each measured. When the burning state of the charcoal (binchoutan) became stable, the highest temperature on the surface was about 750°C, and the heat flux from the heat source was  $1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  at a distance of 100 mm above the burning charcoal. The ratio of radiative heat transfer to total heat transfer of the charcoal was about 75%. The radiative heat from the gas burner was very low, but than from the other two heat sources was approximately equal to that from charcoal. In the case of food broiled over charcoal, the surface temperature was higher, surface color was darker and moisture content was less than the effects from gas burner broiling. Additionally, in the case of food broiled over the broiling plate and electric heater, the quality of the cooked food was similar to that from charcoal broiling.

(Received July 5, 2003; Accepted in revised form July 16, 2004)

**Keywords:** charcoal 炭, broil 直火焼, radiation 放射, broiling plate 焼き網, burn color 焼き色, cooking quality 調理成績.

### 1. 緒 言

焼き加熱には、鍋や鉄板、オーブン等を使用する間接焼きと、食品を直接熱源にかざして焼く直火焼きがある。日本人の食生活では魚の塩焼きや串焼き等、直火焼きの調理を行うことが比較的多い。この時の熱源として炭火を使用するとよい成績のものが得られると従来からいわれ、炭を使用することは着火の手間や灰

の後始末等不便であるにもかかわらず一部では使い続けられている。炭火の伝熱形態は放射伝熱の比率が高く、遠赤外線を含む幅広い波長領域の赤外線の放射率が高いことが明らかになっている<sup>1)</sup>。炭火焼きがおいしいといわれる理由として、この赤外線加熱の効果によるという説、木炭燃焼時に生じる灰の付着や燃焼ガスの影響によるという説<sup>2)</sup>もある。しかし、炭火と他

の熱源で食品を焙焼した経験的な結果では、熱流束など条件が異なり、調理成績の違いが何に起因するものなのか明らかでないし、科学的な実験データもほとんどない。

焼き調理での伝熱方式の調理成績に対する影響については、放射伝熱の割合や放射波長が、食品の表面のこげ色の生成に影響しているという報告<sup>3)~9)</sup>があるが、これらは直接炭火に結びつく実験結果ではない。

本研究では、炭火加熱の特性を明らかにすることを目的として、まず炭火からの熱流束を調べ、その結果を基に炭火と他の熱源の熱流束が同じになる条件下で放射伝熱の割合を算出した。さらに、熱流計で測定される熱流束が一定となる条件で一定時間食品を焙焼し、その調理成績（表面の着色や水分蒸発量など物理的性質）を比較することとした。

炭火を熱源として用いることの特徴を明らかにできれば、炭火以外の熱源で同様な効果を持つものを工夫することができ、現代の生活に合った便利で安全な加熱機器で炭火と同様の好成績の調理品を作ることができると考え本研究を行った。

## 2. 実験方法

### (1) 炭の燃焼条件

ウバメガシ白炭（備長炭）、カシ黒炭、ナラ黒炭、クヌギ黒炭を使用した。炭は直径約 30 mm、長さ 70 mm 程度のものを約 10 本使用し、合計重量が 500 g 程度となるようにした。これらをガスバーナーで約 20 分着火した後、七輪（品川燃料株式会社）の中に炭の 1 本を中心軸とし、他の炭をそれに立て掛けるように配置した。なお、試料焙焼の際は温度の安定時間の長いウバメガシ白炭を燃料として用いた。

### (2) その他の熱源の条件

炭火との比較熱源として、対流伝熱の割合が多いガスバーナー（リンナイ株式会社：1 口ガスこんろ RTS-1DA）、放射伝熱量の割合を増やすためにガスこんろで金属製の魚焼網（株式会社ワイ・ヨット：銅板（厚さ 0.9 mm）ホーロー加工・耐熱仕上げ（黒色）、幅 263 mm 奥行き 210 mm）を加熱したもの、ミラクロンヒーター（松下電器産業株式会社、300 W 直径 12 mm 長さ 250 mm 4 本を 22 mm 間隔で設置）の 3 種を使用した。ガスバーナーはガスこんろの炎を熱源とし、焼網を使用する場合はガスこんろで加熱した網を熱源とみなした。焼網は、東京都立工業技術センターに分光放射率の測定を依頼し、遠赤外線領域の放射率

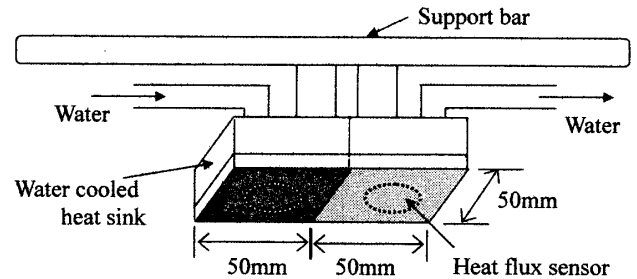


Fig. 1. Diagram of the device to measure the heat flux

が高いことを確認している（私信）。ミラクロンヒーターについては、メーカーが遠赤外線領域の放射率が高いと報告しているセラミックヒーターである。なお、ガスこんろの火加減は、ガス流量を乾式ガスメーター（株式会社シナガワ：DC-1A）で測定しながら一定になるよう調整した。

### (3) 熱流束の測定方法と放射伝熱の割合の算出方法

炭火の伝熱特性を明らかにするために、熱流計（京都電子工業株式会社：水冷ヒートシンク付熱流束複合センサ（試作品））を用いて熱流束の測定を行った（Fig. 1）。この熱流計の測定表面は、放射率が異なる 2 つの面（黒色面および銀色面）からなり、それぞれ黒色熱流センサ（E500B-20）、銀色熱流センサ（E500 S-20）が取り付けられている。両センサから得られる熱流束のデータから、黒色面および銀色面の受熱量を算出し、放射伝熱の割合を求めることができる。

以下に放射伝熱の割合の算出方法を示す。

黒色面および銀色面が熱源から受ける熱量は、以下の式で表すことができる。

$$Q_b = Q_{br} + Q_{bc} \quad (1)$$

$$Q_s = Q_{sr} + Q_{sc} \quad (2)$$

ここで、 $Q$  は熱量 [W]、添え字  $b$  と  $s$  は黒色面および銀色面、 $r$  と  $c$  は放射伝熱および対流伝熱を示す。放射伝熱による熱量は、熱源の放射率が 1 であると仮定すると、次のように表すことができる<sup>10)</sup>。

$$Q_{br} = \frac{\sigma(T_h^4 - T_b^4)}{\frac{1}{A_h F_{hb}} + \frac{1 - \epsilon_b}{\epsilon_b A_b}} \quad (3)$$

$$Q_{sr} = \frac{\sigma(T_h^4 - T_s^4)}{\frac{1}{A_h F_{hs}} + \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s A_s}} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma$  はステファンボルツマン定数 =  $5.67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]、 $T$  は表面温度 [K]、 $A$  は表面積 [m<sup>2</sup>]、 $\epsilon$  は放射率 [1]、 $F_{hb}$  および  $F_{hs}$  は各受熱面と熱源と

## 炭焼き加熱特性の解析 (第1報)

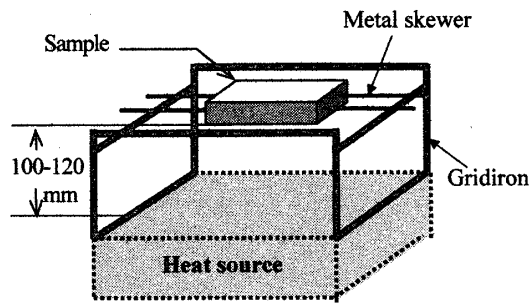


Fig. 2. Broiling method for a food sample

の形態係数 [1] である。添え字  $h$  は熱源を示す。

一方、対流伝熱による熱量は、次のように表すことができる。

$$Q_{bc} = HA_b(T_a - T_b) \quad (5)$$

$$Q_{sc} = HA_s(T_a - T_s) \quad (6)$$

ここで、 $H$  は熱伝達率 [ $W/m^2K$ ]、 $T_a$  は受熱面近傍の空気温度 [ $K$ ] である。両受熱面の表面積は等しいので、(5) および (6) 式から、(7) 式を得る。

$$Q_{bc} = \frac{T_a - T_b}{T_a - T_s} Q_{sc} \quad (7)$$

(1) 式および (2) 式に、(3) 式と (4) 式、(7) 式を代入すると (8) 式、(9) 式が得られる。ただし、熱流計の受熱面と熱源間の距離や位置関係が等しいので  $F_{hb} = F_{hs} = F$  とし、各受熱面の表面積は  $A_b = A_s = A$  とした。

$$Q_b = \frac{\frac{\sigma(T_h^4 - T_b^4)}{1 - \epsilon_b} + \frac{T_a - T_b}{T_a - T_s} Q_{sc}}{\frac{1}{A_h F} + \frac{1 - \epsilon_b}{\epsilon_b A}} \quad (8)$$

$$Q_s = \frac{\frac{\sigma(T_h^4 - T_s^4)}{1 - \epsilon_s} + Q_{sc}}{\frac{1}{A_h F} + \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s A}} \quad (9)$$

ここで、 $\epsilon_b$  および  $\epsilon_s$  は、それぞれ 0.9 と 0.33 であり、 $A$  は  $2.5 \times 10^{-3} m^2$ 、 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $T_b$ 、 $T_s$  は熱流計のデータから得ることができ、 $T_h$  および  $T_a$  は実測することのできる値である。従って、(8) 式と (9) 式を連立させ、 $Q_{sc}$  を消去すると、 $A_h F$  の値を加熱条件ごとに計算することができる。

得られた  $A_h F$  を (3) 式に代入して、黒色面が受けた放射伝熱量  $Q_{br}$  を求め、黒色面の総受熱量  $Q_b$  に対する割合を放射伝熱の割合 [%] として計算した。

## (4) 試料の焙焼

試料は、はんぺん (株式会社紀文食品) と鶏肉 (胸肉: 横浜市内精肉店で購入)、生鮭切り身 (横浜市内鮮魚店で購入) を使用した。はんぺんと鶏肉は熱流計

と同形の  $50 \times 100 \times 10 mm^3$ 、鮭は  $50 \times 70 \times 20 mm^3$  に成形し、加熱前の初期温度をそろえるために一定時間冷蔵庫に保存した。成形した試料に金串を平行に 2 本さし、鉄弓を用いて試料表面と熱源との距離を調節できるようにした (Fig. 2)。

試料表面と熱源の距離は 100~120 mm とし、毎回食品を焙焼する前に熱流計を用いて黒色面の熱流束が所定の値になる位置を確認した。試料の加熱時間は、予備実験によりいずれの熱源においても適当に (焦げすぎず、薄すぎず) 焼き色がつくよう設定し、はんぺんは 2 分間、鶏肉は 10 分間、鮭は身側を 13 分間、いずれも片面のみを焙焼した。

## (5) 測定項目および方法

## 1) 試料の表面温度分布

一定時間加熱した試料を瞬時に熱源から離し、放射温度計 (日本アビオニクス株式会社: TVS-2000) で画像を取り込み、試料表面の温度分布を測定した。さらに、付属熱画像解析ソフトを用いて平均温度を算出した。測定条件は以下の通りとした。試料とカメラの距離 400 mm、温度範囲 86~170.48°C、放射率 1、温度分解能 0.33°C である。

## 2) 焙焼後試料の焼き色、焼き色面積

焙焼後の試料加熱表面をビデオカメラ (日本ビクター株式会社: TV-1017) を通して画像処理装置 (日本アビオニクス株式会社: SPICCA) に RGB 入力し、焼き色の濃さの判定に  $G$  値の平均値を用いた。また、焼きむらを見るために、焼き色の付いた部分の面積を算出した。 $G$  値 130 以下を濃い焼き色のついた部分とし、その面積を求め、試料全表面積に対する割合を算出した。画像取り込みの条件は、照度 600 ルクス、試料とカメラの距離 620 mm、カメラのしほり 5.6 とした。

## 3) 硬 さ

焙焼後の試料を 2 等分し、その加熱面中央部の硬さをクリープメーター (株式会社山電: RE-3305) で測定した。測定条件は、ロードセル 2 kgf、測定歪率 40%、測定速度 1 mm/s、プランジャー円柱形直径 3 mm である。

## 4) 水分蒸発率

焙焼前および直後の重量を電子天秤で測定した。予備実験の結果、本実験の試料については油脂含量が少なく、加熱中の液汁の流出もごくわずかであったため、加熱前後の重量差を蒸発した水分量と考え、加熱前重量に対する割合を水分蒸発率とした。

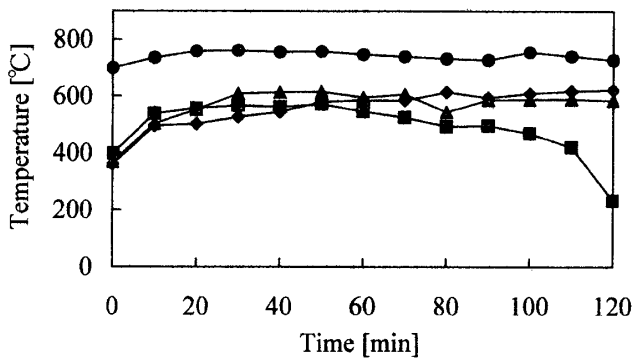


Fig. 3. Surface temperature of burning charcoal

Kinds of charcoal: ● white charcoal (binchoutan), ▲ black charcoal (evergreen oak), ■ black charcoal (oak), ◆ black charcoal (Japanese chestnut oak).

### 5) 表面水分含有率

焙焼後、試料表面から1 mmの厚さを切り取り、赤外線電子水分計（株式会社チョウバランス：PD2-300 WMB）で水分含有率を測定した。

なお、食品の焙焼実験は4~5回繰り返しを行った。

## 3. 結果と考察

### (1) 炭の表面温度

炭の種類によって燃焼状態が違うと考えられたため、白炭としてウバメガシ白炭、黒炭としてカシ黒炭、ナラ黒炭、クヌギ黒炭を使用し燃焼時の表面温度をK熱電対で測定した。炭をガスこんろ上で着火させた後、七輪に移してからの炭の温度を測定した結果をFig. 3に示す。温度は数箇所測定し、最も高い温度を示した部分の温度変化である。温度が安定するまで約20分を要し、炭の種類によって表面温度は異なった。ウバメガシ白炭の場合、700~800°Cの高い温度領域で安定し、この安定時間が他の炭と比較して特に長いことから、試料焙焼ではこの炭を用いることとした。

### (2) 熱流束と放射伝熱の割合

炭の温度が安定している状態で、炭の表面から100 mm上部の熱流束の測定を行った。熱流計で測定される黒色面の熱流束が $1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ であったため、他の熱源でもこの熱流束が等しくなるように実験条件を定めた。ガスバーナーでは、放射伝熱の影響を最小限に抑えるために五徳と汁受け皿を取り外し、ガスリングバーナーから100 mmの位置で熱流束を測定し、ガス流量を調整した。その結果、ガス流量1.2 l/minで炭と同じ熱流束を得ることができた。ガスこんろに焼網をのせた場合には、ガスバーナーによる直火と同

Table 1. Heating characteristics of each heat source

Heat source	Surface temperature of heat source* [°C]	Air temperature near heat flux sensor [°C]
Charcoal	582 <sup>a</sup>	169
Gas ring	398 <sup>b</sup>	447
Broiling plate	502 <sup>a</sup>	145
Electric heater	521 <sup>a</sup>	97

\*The mean temperature was calculated from the temperature distribution measured with radiation thermometer. <sup>a</sup>Within a circle of 12 cm diameter (internal diameter of Shichirin, a Japanese charcoal cooking stove for household purpose). <sup>b</sup>Within a circle of 7 cm diameter (diameter of burner cap).

じガス流量では、熱流束が $0.35 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ と顕著に小さいことが確認された。そこで、熱源との距離を短くして熱流束を測定したが、30 mmまで近づけても熱流束は $0.71 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ と小さく、熱流束を等しくすることができなかった。そのため、焼網からの距離を100 mmにし、ガス流量を調整した結果、5.1 l/minで同じ熱流束が得られた。ヒーターは30分以上通電してヒーターの表面温度を安定させた。ヒーターについては、通常のコンセントから100 Vの供給電圧で実験を行ったため、ヒーター表面からの距離で熱流束を調整した。その結果、120 mmの位置で熱流束が等しくなることが確認された。熱源温度安定後の熱流束は、ガスバーナーの場合はばらつきが大きかったが、熱源間の有意差は認められなかった。

次にこの熱流束が等しい条件下での放射伝熱の割合を比較検討した。この計算のために測定した熱源表面温度 ( $T_h$ )、熱流計周囲空気温度 ( $T_a$ ) の値をTable 1に示す。なお、熱源の温度については、放射温度計（日本アビオニクス株式会社：TVS-2000）を用い、放射率1で測定した。熱源の表面積が異なるため、炭火で使用した七輪の口径（直径12 cm）の面積と同じ範囲内の平均温度を他の熱源においても算出した。ただし、ガスバーナーの場合には、バーナーキャップ（直径7 cm）の表面の平均温度を熱源表面温度とした。熱流計周囲温度はK熱電対で測定した。

これらの値と熱流計によって測定される黒色面および銀色面の熱流束および表面温度のデータから、各加熱条件における $A_h F$ の値を算出し、黒色面が受ける放射伝熱量を算出し、全伝熱量に対する割合を計算し

## 炭焼き加熱特性の解析 (第1報)

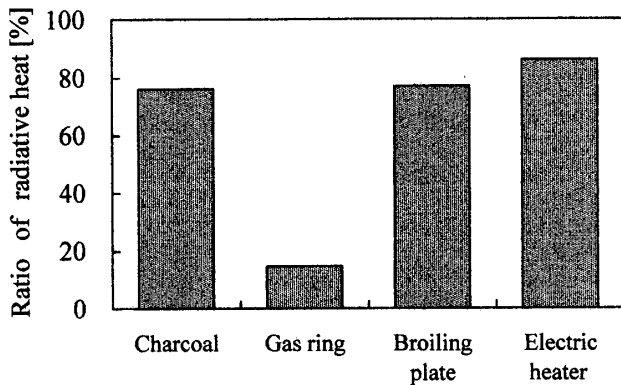


Fig. 4. Ratio of radiative heat transfer to total heat transfer

た。その結果を Fig. 4 に示す。放射伝熱の割合は炭と焼網は約 75%，ヒーターは約 85%であった。一方ガスバーナーの場合は 15%と有意にその割合が小さかった。

この放射伝熱量の計算においては、熱源の放射率を 1 と仮定して計算しているために、放射伝熱量の割合を実際よりも大きめに見積もっている可能性がある。しかし、炭火は黒体に近い放射特性を有していること<sup>1)</sup>、焼網は表面を黒色に加工してあり放射率 0.9 (東京都立工業技術センターに測定依頼) であること、ヒーターは遠赤外線波長領域の放射率が高いものを使用していることから、これらの誤差は小さいものと考えられる。一方、ガスバーナーの場合には、バーナーキャップは真ちゅうであるため、放射率は 0.6 程度であり、ガスの炎からもわずかではあるが放射伝熱があるために、放射伝熱量の割合を少し低めに見積もっている可能性がある。従って、ガスバーナーにおける放射伝熱の割合の値については検討すべき点が残されているが、本実験によって熱流束一定の条件下においてガス直火では炭や遠赤外線ヒーターよりも明らかに放射伝熱の割合が低いことが確認された。また、ガスこんろでは黒色に表面加工を施した金属製の焼網を併用することによって、炭や遠赤外線ヒーターと同程度まで放射伝熱の割合を増やすことが可能であることが明らかになった。

## (3) 試料の焙焼

試料 3 種を各熱源からの熱流束が等しい位置で焙焼し、その調理成績を比較した。所定時間加熱直後の試料表面の平均温度を Fig. 5 に示す。はんぺんおよび鮭については、ガスバーナーで焙焼したものは他の熱源に比べ、有意に表面温度が低く、他の熱源間では有

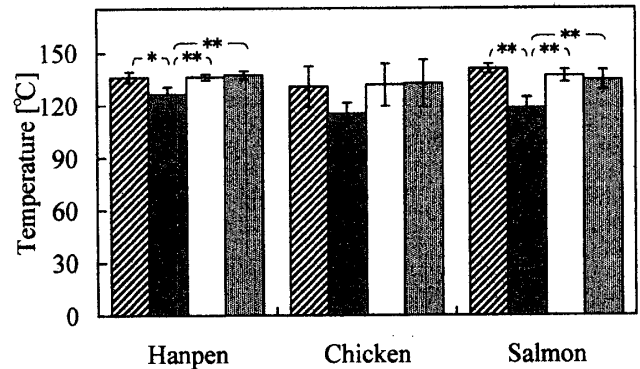


Fig. 5. Average surface temperature of a broiled sample

The vertical line above a bar represents  $\pm$  standard deviation. Heat source: charcoal, gas ring, broiling plate, electric heater. \*, \*\* Significant at the 5% and 1% levels, respectively.

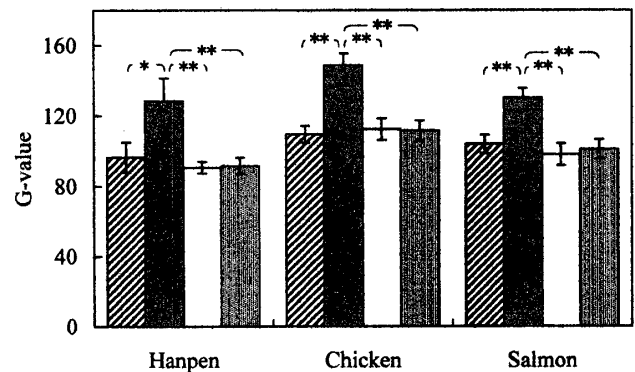


Fig. 6. Average surface color ( $G$  value) of a broiled sample

The vertical line above a bar represents  $\pm$  standard deviation. Heat source: charcoal, gas ring, broiling plate, electric heater. \*, \*\* Significant at the 5% and 1% levels, respectively.

意差は認められなかった。鶏肉では、有意差は無かったが、同様の傾向がみられた。試料表面の温度分布については、炭および焼網、ヒーターで加熱した場合には高温部分が多く、表面全体が均一に加熱されていたが、ガスバーナーで加熱した試料は高温部分の割合が少なく、加熱むらがみられた。

表面の焼き色  $G$  値を測定した結果を Fig. 6 に示す。 $G$  値は値が低いほど色が濃いことを示しており、ガスバーナーで焙焼した試料の  $G$  値は他の熱源に比べ有意に高く、焼き色が薄いことが明らかとなった。他の熱源間では有意差は認められなかった。また、熱源により焼き色の付き方が異なっていたため、濃く焼き色

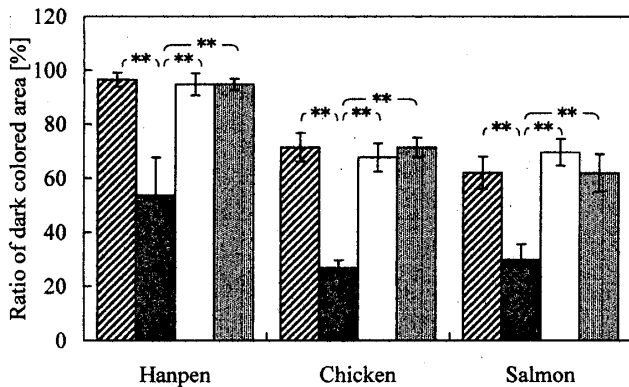


Fig. 7. Ratio of the dark colored area ( $G$  value of less than 130) to the whole sample surface

The vertical line above a bar represents  $\pm$  standard deviation. Heat source: ▨ charcoal, ■ gas ring, □ broiling plate, ▩ electric heater. \*\*Significant at the 1% level.

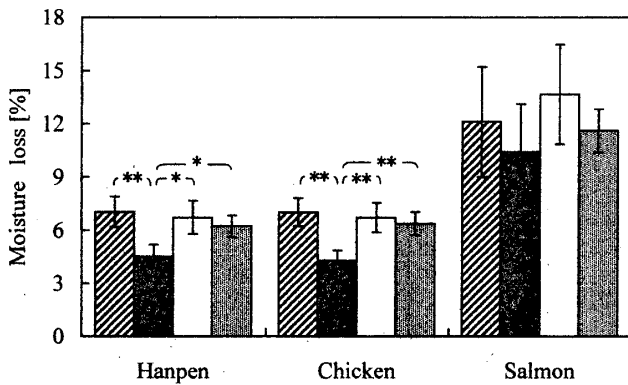


Fig. 8. Moisture loss from a broiled sample

The vertical line above a bar represents  $\pm$  standard deviation. Heat source: ▨ charcoal, ■ gas ring, □ broiling plate, ▩ electric heater. \*, \*\*Significant at the 5% and 1% levels, respectively.

が付いている部分 ( $G$  値 130 以下) の面積が試料表面全体に占める割合を算出した (Fig. 7). ガスバーナーで焙焼した試料では、焼き色が濃く付いている部分もあるが、その面積は他よりも少なく、焼き色にむらがあることが確認された。

以上のことから、家庭用のガスコンロを使ったガス直火加熱では、食品表面への熱の伝わり方にむらがあり、温度上昇の遅い部分の焼き色が付きにくく、焼き色にもむらが出てしまうことが明らかとなった。しかし、焼網を併用することによって、試料表面を均一に加熱することができ、炭やヒーターで加熱した場合と同等の焼き色が得られることが確認された。

食品表面の焼き色の付き方は放射伝熱の割合だけでなく、放射波長が影響し赤外線の中でも波長の長い遠

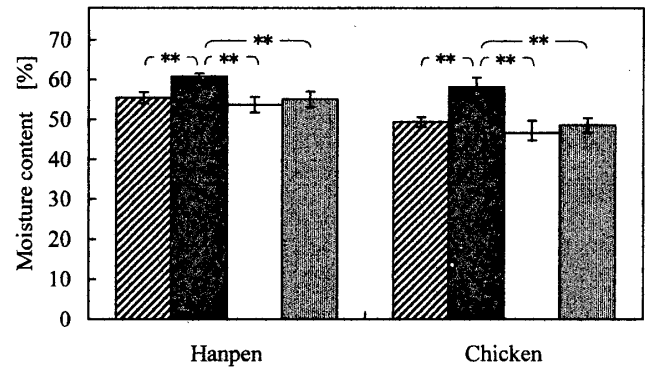


Fig. 9. Moisture content in the surface layer (1 mm depth) of a broiled sample

The vertical line above a bar represents  $\pm$  standard deviation. Heat source: ▨ charcoal, ■ gas ring, □ broiling plate, ▩ electric heater. \*\*Significant at the 1% level.

赤外線がより食品表面に近い部分で効率良く熱に変わるために、表面の着色を促進していると考えられている<sup>4)-9)11)</sup>。炭は、全赤外線波長領域で放射率が高い。本実験で使用した焼網、ヒーターのいずれも遠赤外線領域の放射率は高く、熱源の放射特性が類似していることも焼き色に有意差が認められなかったことに関与していると考えられる。

試料の水分蒸発率の結果を Fig. 8 に示す。はんぺんおよび鶏肉については、ガスバーナーで焙焼したものは他の熱源に比較して水分蒸発量が少なく、有意差が認められた。他の熱源間には有意差はなかった。鮭ではデータのばらつきが大きく、熱源間には有意差が認められなかった。鮭は他の試料に比べて個体差が大きいこと、試料の全体積に対して水分蒸発が起きる試料加熱面の面積が小さいことが影響したと考えられる。

焙焼試料表面 1 mm の部分の水分含有率を測定した結果を Fig. 9 に示す。鮭は焙焼後、表面 1 mm の部分をきれいに切断することが非常に困難であったため、測定できなかった。ガスバーナー以外の熱源で加熱したものは、試料表面の水分含有率が低く、主に加熱表面で生じる水分蒸発が放射伝熱の影響を受けていることが推察できる。熱源からの熱流束が同じ条件では、放射伝熱の割合が高い熱源は、ガス直火に比べ、食品表面の温度上昇が速いために、表面における水分蒸発が促進されたと考えられる。

炭火加熱は焼きあがりの皮の硬さが硬く、パリッとしており、内部は水分が多くジューシーであると一般にいられていることから、噛んだ時の食感を調べる目的でクリープメーターにより、ひずみ率 40% の時の

## 炭焼き加熱特性の解析 (第1報)

荷重を測定した。測定条件をひずみ率40%としたのは、予備実験でこの条件が測定値のばらつきが最も小さかったためである。はんぺんと鶏肉の測定を行った結果、ガスバーナーでの荷重が他の熱源よりも低めの値を示していたが、有意差は認められなかった。

本実験では、熱流計で測定される熱流束が一定の場所で一定時間試料を加熱して調理成績を比較した。試料中心温度の変化については、鶏肉で熱電対を用いて測定した。その結果、熱源間で温度上昇速度に有意な差は認められなかった。このことから、食品の試料の厚さが薄く、温度の測定位置によるばらつきも大きかったが、試料中心はいずれの加熱においてもほぼ同程度に加熱されており、熱源による差は被加熱表面に顕著に現れていると判断された。試料の表面温度上昇の遅いガス直火の場合も中心温度において他と同様な温度上昇が得られたことについては、水分蒸発による熱量損失が少なかったことが関与していると考えられる。

ガスバーナーでの加熱のみが他の熱源よりも表面温度が低く、焼き色が比較的薄いという結果であったが、加熱時間を延長することによって、焼き色については他の熱源に近い仕上がりを得ることができると考えられる。しかし、焼き色のつき方の分布が異なるために全体の焼き色の値を同じにして比較することは困難であった。

以上の結果より、炭火加熱の特性は放射伝熱の割合が約75%を占める伝熱方式であること、他の熱源でも放射伝熱の割合が同程度で放射率が高い熱源を用いれば、熱源からの熱流束・熱流量が一定の条件下では、食品の表面状態や水分蒸発など炭火とほぼ同程度の調理成績が得られることがわかった。一方、対流伝熱の割合の高いガスバーナーによって加熱された食品は異なる状態を示した。

食品を炭火で焙焼した時と近い調理成績を実現したい場合、放射伝熱の割合を高くすることが有効であることが明らかになった。私たちは昔から経験的に、ガスこんろと焼網と鉄弓を用いて、「炭火の強火の遠火」の代用としてきたが、本実験によって、この方法が炭火により近い方法の一つであることを確認することができた。食品の焙焼成績についても、機器測定によって物理的な性質を比較検討した結果、有意な差は認められなかった。しかし、「炭火焼きのおいしさ」を正しく評価するためには、化学的な性質である味、香りなどについても比較検討する必要がある。今後は味、香りなどについての官能検査や化学分析などを行い、

炭焼き加熱と他の加熱方法との違いについて、さらに検討を進める予定である。

## 4. 要 約

炭火で加熱した食品はおいしいといわれるが、その特性や理由を明確に説明できる科学的な実験データはほとんどない。炭火と他の熱源で加熱した食品の調理成績の比較が行われている場合でも、熱流束など実験条件が一定ではない。本研究では、熱流計を用いて熱源からの熱流束を測定し、炭火と熱流束が等しくなる加熱方法を他の熱源で設定し、放射伝熱の割合を測定した。さらに、熱源からの熱流束が一定の条件下で一定時間3種類の食品を焙焼し、食品の物理的な性質に着目し、機器測定による比較検討を行った。熱源には、炭火と家庭用ガスこんろのガスバーナー、ガスこんろで加熱した焼網(黒色表面加工したもの)、遠赤外線領域の放射率の高いミラクロンヒーターの4通りの方法を用いた。食品試料ははんぺんおよび鶏肉、鮭を用い、試料の表面温度、焼き色、水分蒸発率、表面部の水分含有率、硬さを測定し比較した。

炭火(ウバメガシ白炭)の燃焼時の安定状態において、炭火から100mmの距離における熱流束は $1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ であった。他の熱源についても熱源からの距離100~120mmで熱流束が炭の場合と等しくなる加熱条件を定め、全伝熱量に対する放射伝熱の割合を比較した。その結果、炭火は約75%が放射伝熱であること、ガスバーナーでは放射伝熱の割合が顕著に低いこと、ガスこんろと焼網を併用したり、ヒーターを使用することによって放射伝熱の割合は炭火と同程度まで高めることができることが明らかになった。

焙焼した食品の調理成績は、放射伝熱の割合の高い炭、焼網、ヒーター間では有意な差は認められず、対流伝熱の割合の高いガスバーナーの結果のみ、食品表面温度や焼き色、水分蒸発率に違いが認められた。しかし、伝熱方式が大きく異なるガスバーナーでも焼網を併用することによって、焙焼した食品の物理的な性質にも有意な差がみられなくなることが明らかとなった。これらの結果から、熱流束および放射伝熱の割合を炭と同程度まで増やすことができれば、食品の焙焼後の焼き色や水分蒸発など物理的な性質に関しては、炭火で加熱したものと近い調理成績を得ることができると考えられる。

本研究を進めるにあたり、研究を助成頂きましたア

サヒビール生活文化研究振興財団，機器を提供して頂きました松下電器産業株式会社に深謝申し上げます。

### 引用文献

- 1) 渋川祥子，杉山久仁子：炭火と調理，*Vesta*, **23**, 28-34 (1995)
- 2) 岸本定吉：『炭』，丸の内出版 (1976)
- 3) Shibukawa, S., and Sugiyama, K.: Effect of Heat Transfer by Radiation on Browning of Cookies at Baking, *J. Food Sci.*, **54** (3), 621-624, 699 (1989)
- 4) 佐藤秀美，渋川祥子：食品の放射加熱に及ぼすヒータの放射特性の影響，*家政誌*, **40**, 987-991 (1989)
- 5) 渋川祥子：オーブンの伝熱機構と食品の焙焼成績との関係，*アサヒ生活文化に関する研究紀要*, **4**, 1-9 (1991)
- 6) 杉山久仁子，宮崎靖子，渋川祥子：食品の放射加熱における波長分布の影響，*家政誌*, **44** (11), 923-928 (1993)
- 7) 渋川祥子：赤外線による食品の加熱に関する基礎的研究，平成5年度科学研究費補助金一般研究C研究成果報告書 (1994)
- 8) 佐藤秀美，畑江敬子，島田淳子：食品のクラスト層形成および着色状態に及ぼすヒータの放射特性の影響—放射伝熱量が一定の場合—，*日食科工誌*, **39** (9), 784-789 (1992)
- 9) 佐藤秀美，畑江敬子，島田淳子：食品のクラスト層の形成および着色状態に及ぼすヒータの放射特性の影響—ヒータへの電気入力一定の場合—，*日食科工誌*, **42** (9), 643-648 (1995)
- 10) 吉田 駿：『伝熱学の基礎』，理工学社，東京，138 (1999)
- 11) 杉山久仁子，渋川祥子：放射加熱における赤外線波長の食品表面への浸透性，*家政誌*, **53**, 323-329 (2002)