

小麦粉ドウの伝熱特性に及ぼす加熱法の影響

Effect of Heating Methods in the Process of Heat Transfer Characterized with Wheat Flour Doughs

長尾慶子* 畑江敬子** 島田淳子**
 (Keiko Nagao) (Keiko Hatae) (Atsuko Shimada)

A series of preliminary studies were made to obtain fundamental information on the process of heat transfer from heating media to foodstuffs in the ordinary cooking procedure. Three different techniques of cooking such as steaming at 100°C, frying at 180°C, and baking at 200°C were applied to wheat flour doughs, while an attempt was made to compare the thermophysical characteristics of a thermally stable brass-sphere with those of the doughs in the same heating conditions. The results obtained can be summarized as follows:

(1) Either magnitude of the rate of increasing temperature in the doughs and the heat flux from the heating media in the procedure could be ranked with the heating systems as frying>steaming>baking irrespective of temperature in the heating media.

(2) The values for the rate of increasing temperature, heat flux and heat transfer coefficient evaluated with the brass-sphere were comparable with each other during frying and steaming, while the values appeared in a low magnitude in the baking system.

(3) The results obtained consequently suggested that the role of affinity between the vapour in the steaming and the moisture in the foodstuffs or the condensed vapour on the surface of brass-sphere may be significant for obtaining better efficiency of heat exchange at the interface between them. In the case of frying system, the stirred flow of heated oil near the surface of foodstuffs seemingly played an important role in an acceleration of heat exchange between the medium and the food sample due to the vaporization of moisture together with an effect of permeation of heated oil into the inner phase of foodstuffs.

キーワード：加熱調理 Cooking；加熱法 Heating Method；熱伝達 Heat Transfer；小麦粉ドウ Wheat Flour Dough；ビオ数 Biot Number；ヌッセルト数 Nusselt Number

1. 緒 言

調理における加熱は、その対象となる食品の外観、テクスチャー、あるいはフレーバー等に影響する重要な操作の一つであるので、それぞれの食べ物について最適な摂食状態を実現するための多様な加熱法が、多

くの経験に基づいて実施されている。筆者ら¹⁻⁹⁾は、加熱にともなって食品材料に発生する亀裂現象が、材料内部の圧力の増大と外皮部の力学物性の変化との微妙な拮抗作用に関係することを定量的に明らかにしたが、さらに加熱による食品材料の物性変化の詳細を解析するためには、熱媒体と加熱材料との間の伝熱現象に関する正確な情報を得ることの重要性を認識した。

食品材料の伝熱現象を出来るだけ普遍的に理解するためには、熱移動現象における速度論的な取り扱いの有効性を検討する必要があると考えられる。すなわち、

* 文教大学女子短期大学部

(Women's College, Bunkyo University)

** お茶の水女子大学生生活科学部

(School of Human Life and Environmental Science Ochanomizu University)

小麦粉ドウの伝熱特性に及ぼす加熱法の影響

材料固有の物性値である熱伝導率や比熱等を基礎的な情報として、加熱中の材料内部における温度分布の変化から材料表面の熱流束や熱伝達率を定量的に把握し、それらを無次元パラメーターを用いて評価しながら、伝熱現象を加熱法の違い、被加熱材料の種類と形状の多様性等を越えて一般化すること¹⁰⁾である。松本¹¹⁾は材料を複雑な分散系と位置づけ、その粘性流動に対するこのような取り扱いの可能性について既に論述しているが、加熱調理を対象にこのような方法論を検討した研究の事例はこれまでにない。あるいは、比較的低温領域で熱変性が生じる生体高分子が水や油脂と混在するような材料の熱伝導率や熱容量の温度変化を一律に取り扱うことの危険性は容易に予測できるが、このことを実験的に明らかにした研究例も見られない。

このような状況の中で、理想的には、膨化や水分の移動の起きないモデル食品を調整し、異なる熱媒体中における伝熱現象を統一的にまとめることが望ましいのであるが、本研究では先の亀裂の実験に試料とした同じドーナツ小麦粉ドウをあえて試料とし、伝熱の基本比較系として膨張および水分および成分変化のない黄銅球を対照として実験を行った。本報告は、食品内部の中心温度を基に概算されていた従来の伝熱係数の算出に対し、表面付近の温度を測定することでより正確な伝熱現象の把握を試みた点と、被加熱体が材料、物性共に複雑に変化する食品に対し、黄銅との対比で加熱法の違いを明確に出せる点を特徴とするものであり、食品材料の伝熱現象を普遍的にとらえるために試みた基礎実験である。

2. 実験

(1) 試料

本研究に用いた試料は、既報⁷⁾の亀裂現象の実験に用いたドーナツ用の小麦粉ドウで、試料組成(%)は、薄力粉(55)、ベーキングパウダー(1.7)、砂糖(19.4)、卵(10.8)、牛乳(13.1)である。なお試料の水分量は小麦粉量に対し50%である。

材料配合された試料は先報⁷⁾に準じて一定のドウの状態にまで混捏し、重量7.5g、直径2cmの球状に成形し、加熱操作に供した。なお対照とした黄銅球(Cu-35Zn)は直径2.5cmの球である。

(2) 加熱操作

調理における代表的な加熱法である蒸し加熱(湿式加熱)、天火および揚げ加熱(いずれも乾式加熱)の3種類を取り上げた。各加熱操作の時間は、予備実験か

ら得られた試料内部温度が一定になる時間を目安に設定した。その詳細は、以下の通りである。

a) 蒸し加熱: 20cm角の蒸し器の中板上にセルクルを置き、木綿のネット張り木枠を載せ、ネットの中央に一個の試料を加熱水蒸気中で5分間静置した。器内温度は、100°C一定である。

b) 天火加熱: 電気オープン(東芝製 HGR-122 型)の庫内中段に設けたアルミ棒上に麻のネット張り木枠を置き、その中央に一個の試料を載せ、10分間加熱した。

庫内温度はサーモスタットを用い、200°C±4°Cに制御した。

c) 揚げ加熱: 内径23cmの鉄製容器にコーン油3.6kgを注入、電熱器と油用投げ込みヒーターを用いて加熱し、一個の被加熱試料が常に容器中央の油浴内に位置するように、外部から揚げ網で試料を保持した。加熱中のコーン油の温度は、サーモレギュレーターと攪拌機を用いて180°C±5°Cに設定した。

(3) 加熱中の試料内部温度の測定

加熱中の試料内部の温度分布とその時間変化を追跡するため、試料表面から垂直内部方向の1mm、3mmおよび中心部の位置に、外径0.5mmのK熱電対の感熱部を設定し、各位置での温度をマルチチャンネル記録計(アドバンテスト製 TR-2724 型)により2秒間隔で測定記録した。上記の表面下1mm、3mmの2本の熱電対は竹串に固定して両者の間隔が常に2mmとなるようにしたが、試料は加熱中に膨張する。そこで、一定時間ごとに試料を取り出し、表面下1mmに置いた熱電対の位置の変化を測定した。また、長径と短径を計測し、その平均値をその時刻の試料の直径としてその時間変化を調べた。黄銅球については、熱伝導率が大きく球内の温度はほぼ一様となるので、中心部のみ熱電対を設定して温度変化を求めた。

(4) 試料の熱伝導率の測定

試料の熱伝導率は前報¹²⁾と同じ装置と方法で測定

表1. 試料および熱媒体の熱伝導率

	温度(°C)	熱伝導率(W/m. K)
小麦粉ドウ試料 ¹²⁾	50	0.31
	75	0.26
	100	0.25
黄銅 ¹⁴⁾	27	122
油(オリーブ油) ¹³⁾	0	0.17
飽和水蒸気 ¹⁴⁾	100	0.0245
加熱空気 ¹⁴⁾	200	0.0378

した。測定に際し 20°C 一定の低熱源に対して 50°C, 75°C, および 100°C の高熱源を適用し、試料に温度勾配を 1 時間以上与え、それぞれについて試料内部の熱流が定常状態にあるときの測定値を採用した。この熱伝導率測定装置は、加熱中の試料の膨張による変異量に対応して上部のダイヤルゲージが作動し記録されるので、熱源温度に対応した熱伝導率値が求められるようになっている。その結果を表 1 に示す。なお表には参考までに比較球の材料である黄銅、および加熱媒体(油、水蒸気、空気)の熱伝導率の値も示してある。

3. 伝熱諸量の計算法

(1) 表面温度と熱流束

a) 黄銅球の場合：黄銅の熱伝導率は約 122 W/(m・K) と大きく、よって被加熱体の温度分布に関連する無次元数のビオ数は小さいため、球内の温度はほぼ一様となる。したがって中心の温度 T_c を測定しておけば、次のバーグラフの式¹⁵⁾から球表面の温度 T_s と熱流束 q が精度良く求められる。

$$T_s = T_c + \frac{1}{6} \left(\frac{R^2}{a} \right) \frac{dT_c}{dt} + \frac{1}{120} \left(\frac{R^2}{a} \right)^2 \frac{d^2 T_c}{dt^2} + \dots \quad (1)$$

$$q = \lambda_s \left\{ \frac{1}{3} \left(\frac{R}{a} \right) \frac{dT_c}{dt} + \frac{1}{30} \left(\frac{R^3}{a^2} \right) \frac{d^2 T_c}{dt^2} + \dots \right\} \quad (2)$$

ここに、 R は黄銅球の半径、 a は熱拡散率 (温度伝導率)、 λ_s は熱伝導率である。上式の右辺の高次微分項は一般に小さいので、2 階微係数の項まで計算すれば十分である。微係数は次の差分公式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_c}{dt} &= \frac{T_c^N - T_c^{-N}}{2\Delta t}, \\ \frac{d^2 T_c}{dt^2} &= \frac{T_c^N - 2T_c + T_c^{-N}}{(\Delta t)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 T_c は計算時刻の中心温度、 T_c^N と T_c^{-N} はその次の時刻と前の時刻の中心温度である。また、 Δt は時間刻みであるが、 Δt はフーリエ数 ($a\Delta t/(\Delta x_1)^2$; Δx_1 は表面と熱電対位置の距離) が 0.3 以上であることが必要¹⁶⁾ である。しかし、今の場合はいずれの加熱法においてもサンプリング時間間隔 2 秒を採用すればこの条件を満足する。

b) ドウの場合：ドウの熱伝導率はあまり小さくなく、したがってビオ数も大きいので内部に温度分布が生じる。そのため、表面温度と熱流束は表面近くに置いた 2 本の熱電対の出力から逆計算する必要がある。球内の温度分布は次の熱伝導方程式で定まる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

ただし、上式は球内の一定位置における温度の満たす式であり、今の場合のようにドウの大きさが時間的に膨張し、球内に置いた熱電対の位置が相対的に移動していく場合には、そのままの形で適用できない。つまり、熱電対 1 の温度 T_1 の温度変化は、時間変化と空間位置変化の成分の和として次式で表される。

$$\frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_1 + \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_1 \left(\frac{dr}{dt} \right)_1 \quad (5)$$

ただし、添字の 1 は熱電対 1 を表し、 $(dr/dt)_1$ は熱電対 1 の移動速度である。式 (5) の右辺第 1 項は式 (4) で表されるので、結局、式 (4)、(5) から次式が得られる。

$$\frac{dT_1}{dt} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)_1 + \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_1 \left(\frac{dr}{dt} \right)_1 \quad (6)$$

これを測定温度 T_1 , T_2 , および表面温度 T_s を用いて差分表示し、それから表面温度を求めると次式となる

$$\begin{aligned} T_s &= T_1 + \left(\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2 - \Delta x_1} \right) \\ &\times \left(\frac{R - (2+A)\Delta x_1}{R - (2+A)\Delta x_1 + (1+A)\Delta x_2} \right) (T_1 - T_2) \\ &+ \frac{\Delta x_1 \Delta x_2}{2} \left(\frac{R - \Delta x_1}{R - (2+A)\Delta x_1 + (1+A)\Delta x_2} \right) \\ &\times \frac{T_1^N - T_1}{a\Delta t} \end{aligned} \quad (7)$$

但し、

$$\begin{aligned} A &\equiv \frac{(R - \Delta x_1)}{2a} \left[\frac{dR}{dt} - \frac{d(\Delta x_1)}{dt} \right] \\ &= \frac{(R - \Delta x_1)}{2a} \left[\frac{R^N - R^{-N}}{2\Delta t} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(\Delta x_1^N - \Delta x_1^{-N})}{2\Delta t} \right] \end{aligned}$$

上式で、 R , Δx_1 共に時間の関数である。上式の右辺第 3 項が非定常成分であり、 A はドウの膨張の影響を示す。上式の a については後述 (4) 項で得られたみかけの熱拡散率で計算した値を用いた。

表面の温度 T_s が求まると、差分表示から次のように表面熱流束が計算できる。

$$\begin{aligned} q &= -\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_s \\ &= \lambda_s \left\{ \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2 (\Delta x_2 - \Delta x_1)} T_2 - \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1 (\Delta x_2 - \Delta x_1)} \right. \\ &\quad \times T_1 + \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{\Delta x_1 \Delta x_2} T_s \left. \right\} = \frac{\lambda_s}{(\Delta x_2 - \Delta x_1)} \\ &\quad \times \left\{ \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} (T_2 - T_s) - \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} (T_1 - T_s) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

小麦粉ドウの伝熱特性に及ぼす加熱法の影響

(2) 熱伝達率の計算

表面温度 T_s , 表面熱流束 q , 加熱媒体の温度 T_f (一様) が与えられると, 熱伝達率 h は次式により計算される。

$$h = \frac{q}{T_f - T_s} \quad (9)$$

熱伝達率は加熱法によるドウ表面の熱伝達の大きさを表す重要な物理量であり, 伝熱量が表面の温度と媒体との温度差に比例する場合に特に良い指標となる。

(3) ヌッセルト数とビオ数

熱伝達率などの伝熱特性は, 通常, ヌッセルト数 Nu やビオ数 Bi など無次元の形に一般化して議論される。 Nu は熱伝達に関係した無次元数, Bi は固体 (今の場合ドウ) 内の温度分布 (一様性また非一様性) に関わる無次元数である。これらの無次元数の関係は, 材質とか寸法に関わらず議論できる点で便利であり一般性がある。両者は各々次式で定義される。

$$Nu = \frac{hd}{\lambda_f} \quad (10)$$

$$Bi = \frac{hR}{\lambda_s} \quad \left(\text{または} \frac{hd}{\lambda_s} \right) \quad (11)$$

ここで λ_f は熱媒体の熱伝導率, λ_s は試料の熱伝導率である。

なお, 上記無次元数の定義において, 球の代表寸法は普通直径 d であるが (Nu などの場合), 温度の分布や浸透性の対称性からビオ数の定義は半径 R を用いて定義するのが慣例となっている。

(4) 熱拡散率 (温度伝導率)

定常状態にある物質の熱伝導において, 内部の温度分布を律する物性は熱伝導率 λ_s であるが, 加熱調理のように非定常な状態にある場合には, 熱伝導率 λ_s のほかに物質の熱容量, すなわち密度 ρ と定圧比熱 C_p との積が内部の温度変化に影響する。そのため, 次の関係で示される熱拡散率 α が熱移動の解析に用いられる。

$$\alpha = \frac{\lambda_s}{\rho C_p} \quad (12)$$

しかし, 本研究では各試料の定圧比熱 C_p の実測が困

表 2. 試料の熱拡散率 ($10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$)

Time(sec)	天 火	蒸 し	揚 げ
30	1.6	2.6	4.9
60	1.9	2.1	3.9
90	1.5	2.8	3.9
120	1.7	2.7	4.3
150	1.9	2.7	
180	2.2	2.5	

難であったので, 実験で得られたビオ数の値からハイスラー線図^{17,18)}を用い, 熱拡散率 α を推定した (その結果を表 2 に示す)。

4. 結 果

(1) 加熱法とドウ形状の変化

図 1 に加熱中試料の内部温度の経時変化 ($n=10$ の平均) を示した。黄銅球は中心部温度 (T_c), 小麦粉ドウは 1mm (T_1), 3mm (T_2), および中心部温度 (T_c) の測定結果であるが, 黄銅, 小麦粉ドウ共に, 加熱法の違い, 言い換えれば試料界面での伝熱形態により内部

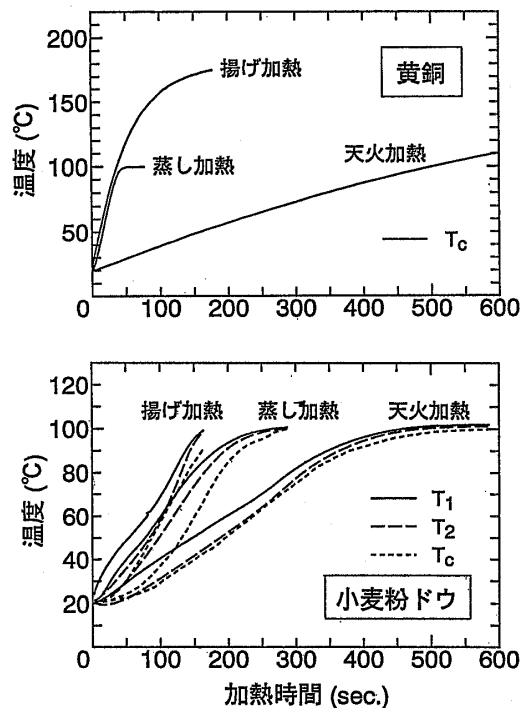


図 1. 加熱中試料の内部温度の経時変化

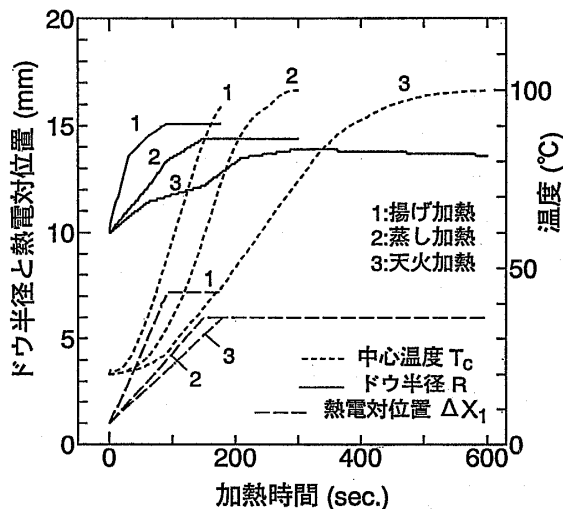


図 2. 加熱法別試料半径と熱電対位置 ΔX_1 の経時変化

温度の上昇速度が異なり、揚げ加熱、蒸し加熱、天火加熱の順に内部温度の上昇速度が低下する状況が見られたが、この順序が熱媒体の温度とは一致しない。すなわち、熱媒体の温度は、実験の部で述べた通り天火加熱の場合には約 200°C であり、次いで揚げ加熱の 180°C、蒸し加熱の 100°C であるのに対し、内部への伝熱効果は蒸し加熱が揚げ加熱とほぼ同等に良好である。これは試料表面における熱交換と試料内部への伝熱状態が、加熱法によって異なることに原因があることは明らかである。この傾向は黄銅、小麦粉ドウ試料共に同様である (図 1)。図 2 は小麦粉ドウ試料における中心部温度と対応させた試料直径の経時変化および 1mm 地点の熱電対の位置変化をみたものであるが、揚げ加熱では温度上昇速度も大で短時間で形状が大きく変化し、蒸し加熱がこれに追従している。天火加熱では温度上昇は緩やかであり、形状の変化も緩やかに進行し、しかもその程度も小さくとどまった。なお、試料ドウの膨張の度合は加熱法の違いによらずほぼ試料温度に対応していることがわかった。

(2) 伝熱諸係数

上述の実測値に基づき、(8)式を用いて計算された黄銅と試料の熱流束 q の計算値 ($N=6\sim 10$) を、各加熱法について表面温度に対してプロットした (図 3-(1)~(3)の q)。単位面積あたり単位時間に熱媒体から試料へ流入する熱量 (熱流束) は天火加熱法が特に低い値を示した。水分の移動のない金属も小麦粉ドウ試料も共に蒸しと揚げ加熱において高い値を示した。油と水の交代が激しく起きるドウ試料の揚げ加熱では測定値毎のばらつきが天火、蒸し加熱に比べて大であった。また揚げ加熱の表面温度は加熱初期から高い値を示し

た。この状況は、加熱による試料内部の昇温速度に定性的に対応するものである。

さらに、(9)式を用いて算出した黄銅とドウ試料の熱伝達率 h を、同様にプロットした (図 3-(1)~(3)の h)。黄銅の揚げ、蒸し加熱の値は 250 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) 程度の大きい値を示したが、天火加熱における値はその 1/10 以下の 20 程度であった。これは渋谷²⁰⁾の天火加熱における銅の複合熱伝達率 20~25 と近い値である。

小麦粉ドウにおいては揚げ加熱が約 20、天火加熱が 10 程度であるが、蒸し加熱の場合は熱移動がきわめて大で 15 から 200 程度まで著しく変化していた。このことは相変化 (水分蒸発) が大きく関わり、蒸し加熱におけるこのような熱伝達率の急上昇には蒸気の凝縮熱伝達に関係していると推察される。また、従来の報告²¹⁾によれば、じゃがいもを用いた加熱実験で、蒸し：

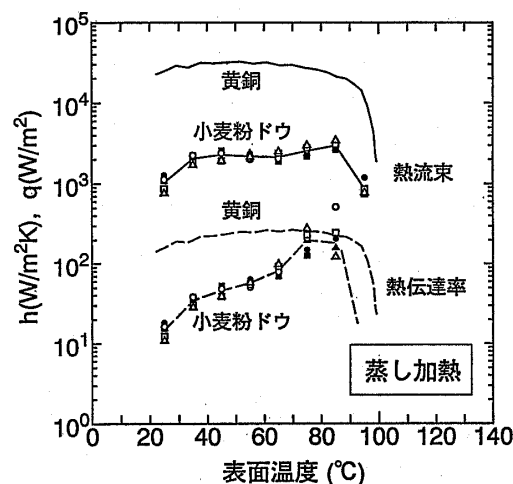


図 3-(2). 熱流束 (q) と熱伝達率 (h) の分布
—蒸し加熱— (図中の記号は各実験値)

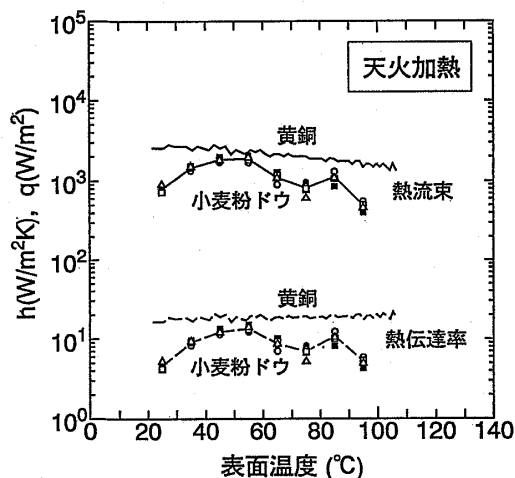


図 3-(1). 熱流束 (q) と熱伝達率 (h) の分布
—天火加熱— (図中の記号は各実験値)

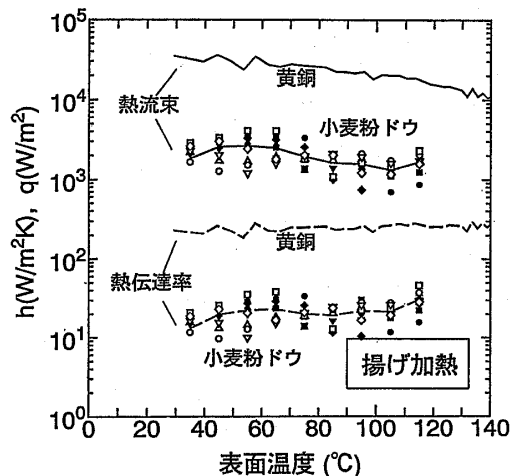


図 3-(3). 熱流束 (q) と熱伝達率 (h) の分布
—揚げ加熱— (図中の記号は各実験値)

小麦粉ドウの伝熱特性に及ぼす加熱法の影響

表 3. ヌッセルト数とビオ数の加熱法別比較

	時間(分)	ヌッセルト数			ビ オ 数		
		天火加熱 (200°C)	蒸し加熱 (100°C)	揚げ加熱 (180°C)	天火加熱 (200°C)	蒸し加熱 (100°C)	揚げ加熱 (180°C)
黄 銅	0.5	11.00	249	35.9	0.00346	0.0509	0.0509
	1	12	—	39.3	0.00379	—	0.0556
	2	13.8	—	—	0.00434	—	—
	3	11.80	—	—	0.00357	—	—
小麦粉ドウ	0.5	3.79	33.7	3.36	0.461	2.66	2.03
	1	6.51	47.6	2.63	0.792	3.98	1.69
	2	8.29	—	4.45	1.051	—	2.9
	3	3.1	—	—	0.427	—	—
	4	6.17	—	—	0.913	—	—
	5	8.58	—	—	1.274	—	—

2,000~6,000(W/m²・K), 揚げ: 30~60(気泡発生時)(W/m²・K)があるが, 揚げ加熱の場合は本実験に近い値であり, 蒸し加熱の場合は大きな違いとなっている。

表 3 に, 熱伝達率に関する無次元量であるヌッセルト数とビオ数の加熱法毎の加熱時間による算出値を示した。水分の蒸発のない黄銅球のヌッセルト数がドウ試料のそれに比較して相対的に大である。加熱法でみると, 熱媒体温度が 100°C の蒸し加熱において最大であった。この数値が大であることは前述のように相変化の影響が大であることを示すものである。無次元パラメーターは, 将来的には π 定理 (次元解析) に基づいて関係物理量間の関数として記述されるべきものであるが, 加熱法による影響が顕著に見られることから, さらに試料の物性や試料と熱媒体とが接する界面での熱移動の機構に関する各種の実験を実施することにより, 詳細な解析が可能になることが期待される。

試料の熱伝導率 λ_s と熱容量との比である熱拡散率 α は, 加熱調理のように非定常状態に置かれた試料の内部における温度分布を律する係数であるが, その値が加熱法に影響される状況は表 2 に示した通りである。試料内部の昇温速度に対応して揚げ加熱においてはその値が特に大きく算出されたが, これは油が試料中へ吸収されることにより, 試料自身の熱伝達の上に油の熱伝達も加わった結果によると推察されるが, その原因についてはさらに検討を要する。

5. 考 察

調理における伝統的な技術としての加熱操作を科学的な視点に立って整理し, 記述しようとするとき, 加熱法の多様性と多成分分散系である食材の微妙な熱応答性との起因する困難さに直面せざるを得ない。例え

ば, 相変化を起こさない金属材料に対する熱交換機構を解析する場合とは比較にならない程の複雑な現象が, 調理における加熱操作に内在する。したがって, その解析を試みる場合の方法論として, ① 加熱法の多様性を整理して食材への伝熱機構を普遍的な考察へ導く方法, ② 多様な食材内部での熱移動を可及的に一般化して記述する方法, のいずれかに絞って取り扱う必要があるであろう。本研究は上記のうち, ①の立場に立って, 熱媒体の異なる揚げ加熱, 蒸し加熱および天火加熱における食材の伝熱機構を, 将来同一形式の伝熱係数と無次元パラメーターを用いて比較し, 加熱調理の原則の統一的な理解に資するための一試みである。

その結果加熱温度よりはむしろ熱媒体と試料表面との相互作用が伝熱機構を律する重要な因子であり, 調理における現象もそのような観点から考えるべきである。すなわち, 加熱による試料の内部温度上昇速度および熱流束の最大値は, 揚げ加熱, 蒸し加熱, 天火加熱の順に低下するが, それぞれの熱媒体温度は天火加熱の 200°C, 揚げ加熱の 180°C, 蒸し加熱の 100°C である。また, 熱伝達率 (あるいは無次元パラメーターのヌッセルト数) が, 熱媒体温度が 100°C の蒸し加熱において最大であった。このように, 蒸し加熱に見られる相対的に良好な加熱効果は, 熱媒体である飽和水蒸気の試料表面における凝縮と水分の吸収とが, 試料表面での円滑な熱交換と試料内部への迅速な熱移動をもたらす原因になると考えられる。また, 蒸し加熱による試料の膨化も相対的に顕著であった。

一方, 揚げ加熱の熱媒体である油は試料に含まれる水分との親和性が著しく低いが, 試料表面で気化した水分が気泡として遊離し油中を上昇する際に高温油の

表 4. 界面の伝熱形態の加熱法による違い

加熱法	被加熱体	伝熱形態	水分(油分)	初期表面温度
天火	黄銅	対流(空気)+放射 $q=q_g+q_r$	移動なし	20.0°C
	小麦粉ドウ	対流(空気)+放射+蒸発 $q=q_g+q_r+q_e$	蒸発(水分減少)	21.4°C
蒸し	黄銅	対流(蒸気)+凝縮 $q=q_s+q_c$	移動なし	20.0°C
	小麦粉ドウ	対流(蒸気)+凝縮 $q=q_s+q_c$	凝縮(水分増加)	20.7°C
揚げ	黄銅	対流(液体) $q=q_o$	移動なし	24.3°C
	小麦粉ドウ	対流(液体)+蒸発(発泡) $q=q_o+q_e$	蒸発(水分減少)と油侵入	86.5°C

対流に乱流をもたらし、それが伝熱を促進し、高温の油の浸入も加わって効率の良い熱交換が試料表面に生じると考えられる。その結果、短時間内に試料内部温度が上昇し、したがって観測される熱伝達率も高い。同時に試料水分と熱媒体油との間に成分交換が起こる結果、試料表面には揚げ加熱に特有の外皮形成が見られるようになる。

これに対し、天火加熱では試料表面からの水分蒸発は起きるが、揚げ加熱のような短時間で激しく起きるものでなく、その形状も蒸気として放散されるので、試料まわりの空気の流れは比較的静かなものと推察される。しかも蒸発潜熱により内部への熱移動は抑制され、天火加熱に特異的な調理結果が現われる。

以上、表 4 に熱媒体の界面での伝熱形態の違いを加熱法別にまとめた。ここに熱流入量 q を、空気の大流による(q_g)、蒸気の大流による(q_s)、油の大流による(q_o)、放射による(q_r)、蒸気の凝縮、蒸発による(q_c)と、熱の出入りの種類を区別して表示した。また参考のために蒸発等がない場合の加熱初期のドウ表面温度²²⁾を示した。

以上のように、加熱法の違いは被加熱試料に対しそれぞれ特徴のある伝熱機構をもたらし、その結果試料の外観にもそれぞれの加熱法に固有の特徴を与えるが、その背景には共通の熱移動現象として理解すべき原則が存在するはずである。このような原則から個々の加熱調理の特質を検討するため、今後試料の熱物性を追跡し明らかにしてゆきたい。

本実験に協力いただいた、田中恭子さん、開地恭子さん、駒井千子さんに厚く御礼をもうしあげます。

《記号一覧》

- a : 熱拡散率 (m^2/s)
 Bi : ビオ数
 C_p : 比熱 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
 d : 試料直径
 h : 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
 λ_f : 熱媒体の熱伝導率
 λ_s : 試料熱伝導率
 Nu : ヌッセルト数
 ρ : 密度 (kg/m^3)
 q : 熱流束 (W/m^2)
 q_g : 空気の大流による
 q_s : 蒸気の大流による
 q_o : 油の大流による
 q_r : 放射による
 q_c : 蒸気の凝縮、蒸発による
 R : 試料半径
 T_c : 試料中心温度
 T_f : 加熱媒体の温度
 T_s : 試料表面温度

文 献

- 1) 長尾慶子, 加藤由美子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **39**, 677 (1988)
- 2) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **40**, 373 (1989)
- 3) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **42**, 523 (1991)
- 4) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **42**, 1059 (1991)
- 5) 長尾慶子, 横川知子, 畑江敬子, 島田淳子: 調理科学, **27**, 25 (1994)
- 6) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **45**, 533 (1994)

小麦粉ドウの伝熱特性に及ぼす加熱法の影響

- 7) Nagao, K., Hatae, K. and Shimada, A.: J. Home Econ. Jpn., **45**, 211 (1994)
- 8) 長尾慶子: 調理科学, **28**, 265 (1995)
- 9) 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子: 家政誌, **47**, 37 (1996)
- 10) 城塚 正, 平田 彰, 村上昭彦: 化学技術者のための移動速度論, pp.1-19, オーム社 (1966)
- 11) 松本幸雄: 食品の物性第1集 (松本幸雄, 山野善正編), pp.9-11, 食品資材研究会 (1975)
- 12) 長尾慶子: 文教大学女子短期大学部研究紀要, 第37集, pp.61-71 (1993)
- 13) 日本機械学会編: 機械工学便覧A6熱工学, p.173 (1986)
- 14) 日本機械学会編: 伝熱工学資料, 日本機械学会, pp.319-331 (1991)
- 15) O. R. Burggraf, "An Exact Solution of the Inverse Problem in Heat Conduction Theory and Applications", ASME J, Heat Transfer, 86 C, pp.373-382 (1964)
- 16) 庄司正弘: 伝熱工学, 東大出版会, p.93 (1995)
- 17) 日本機械学会(編): 伝熱工学資料, 日本機械学会, pp.39-40 (1991)
- 18) 長尾慶子: 文教大学女子短期大学部研究紀要第38集 pp.1-10 (1994)
- 19) Kern, D. Q.: Process Heat Transfer, pp.38-40, McGraw-Hill, New York (1950)
- 20) 渋谷祥子: 調理科学, **22**, 108 (1989)
- 21) 渋谷祥子: 食品加熱の科学, 朝倉書店, pp.115-125 (1995)
- 22) 日本機械学会(編): 伝熱工学資料, 日本機械学会, p.7 (1991)

(平成8年8月6日受理)