

小さな試料断片を用いたジャガイモの 熱拡散率の算出に関する研究

呂 聯 通・久保田 清・鈴木 寛一

広島大学生物生産学部, 東広島市 724

1990年4月16日 受付

要 旨 食品を加熱, 冷却処理する各種装置, プロセスを最適設計, 操作計算するためには, 各種食品の熱拡散率を求めておくことが必要となる。前報において, 球状¹⁾, 平板状²⁾, 直方体と円柱状³⁾ならびにゲル状⁴⁾食品の熱拡散率の測定に関する研究を行ってきた。

前報^{1~3)}に示したように, 小さな形状の食品では, 大きな試料断片を切り取ることができなく, 精度が良い結果が得られていない。この原因は, 熱電対の先端を小さな試料断片の中心部に精確に挿入することが困難なためである。

そこで本研究では, 小さな試料断片に挿入した熱電対の先端がずれることによる補正の研究をすることを目的として, 熱電対の先端位置を変えて測定と計算を行った。試料には, 比較的安定した均質のものが得られ, 年中入手ができるジャガイモを用いた。

ジャガイモの熱拡散率は, 温度 10~60°C において, $(0.01728t+6.867) \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$ (ここで, t は温度 [°C]) となった。これは, 前報³⁾で温度の影響が求められなくて得られた平均値 $0.0840 \text{ cm}^2/\text{min}$ よりも精度が良い結果である。その理由は, 熱電対の先端を薄い平板状試料の中心に挿入できないが, 真の先端位置の推定を, 誤差が最小になる位置と仮定することによって求めることができたためである。

緒 言

食品加工処理は, クッキング, 殺菌, 冷凍, 解凍, 乾燥などのように, 加熱や冷却を伴って伝熱を考慮しなければならない操作が多い。食品の各種加工処理における速度論的研究^{5~7)}を行う場合に, 伝熱物性が必要になってくる。各種食品の比熱を含む水率関係式で表わして推算⁸⁾をしたり, 熱伝導度を主成分から推算する方法⁹⁾が報告されるなどしているが, 食品は, 多種多様で, 複雑な成分よりなるものが多く, また加工処理, 保藏中に含水率, 気泡率が変化するなどして物性値が大きく変化するため, 伝熱物性を実験によって得るための簡便な方法についての検討が必要となる。

食品の加工処理における速度論的研究の中で, 球状ジャガイモのクッキング速度式を求める研究¹⁰⁾を行ってきている。そこで熱拡散率を考慮した伝熱速度式の設定を合わせて行うことが必要となり, 熱拡散率の測定に関する研究も合わせて行ってきている。熱拡散率の測定は, 一般に定常法と非定常法とに大別でき, 各種の方法が提案されてきているが¹¹⁾, 筆者らは, 後者の中で最も実験が簡便な方法を採用してきている^{1~4)}。試料を一定温度の媒体中から, 異なった温度の媒体中に移して, 中心温度の経時変化を測定して熱拡散率を求める簡単な方法であるが, 次々といろいろな問題が生じてきて, 研究を進展させてきている。

前報において, 球状¹⁾, 平板状²⁾, 直方体と円柱状³⁾ならびにゲル状⁴⁾食品の熱拡散率の測定に関する研究を行ってきた。前報^{1~3)}に示したように, 小さい形状の食品では, 大きな試料断片を切り取ることができないため, 精度が良い値が得られないことが問題になっていった。この原因は, 熱電対の先端を小さな試料断片の中心部に挿入することが困難なためである。

そこで本研究では, 小さな試料断片に挿入した熱電対の先端がずれることによる補正の研究をすることを

目的として、熱電対の先端位置を変えて測定と計算を行った。試料には、比較的安定した均質のものが得られ、年中入手ができるジャガイモを用いた。試料は、基礎伝熱方程式の解析解が利用できる平板状に製形して、熱拡散率は、最小二乗法の原理に基づいてマイクロコンピュータを用いて算出した。

実験方法

試料 市販のジャガイモを使用した。試料の製形には定規つき枠型を自作して使用した。試料は、含水率を安定させる目的で常温の水浴中に3時間以上浸漬して使用した。試料の厚さ、長さおよび幅は、ノギスを使用して測定した。

実験装置 前報²⁾に図示したものと同様な実験装置を組み立てて使用した。試料温度の経時変化を、試料を低温と高温の水浴中を移動しあって測定するため、2つの恒温槽を用いた。恒温槽は、攪拌羽根つきサーモユニット(大洋科学工業製ミランダ Jr 型)を用いたものである。低温のものには、投込式冷却機(大洋科学工業製クールパイプ300L型)を合わせて使用した。

温度変化の測定 試料温度の経時変化の測定には、クロメル・アルメル熱電対(線径 0.16 mm, ステンレス保護管径 1.0 mm)を使用し、自動記録により行った。記録計に描かれた曲線から15~20点を読みとり、実験データとして後で述べる計算に使用した。記録計は、横河電機製3056-22型を使用した。試料の中心部付近に熱電対の先端を挿入して温度変化の測定をした。熱電対は、先端に挿入時に無理がかかって曲がらないように、事前に熱電対より僅かに径の小さい針でガイドの穴を作ってから挿入した。

熱電対を挿入した試料は、所定温度 t_0 [°C] にした恒温槽中で一定温度にさせて、次いで、もう一つの所定温度 t_∞ [°C] にした恒温槽中にすばやく移して、温度変化の経時変化の測定に供した。試料は、前報と同様に、境膜伝熱抵抗の影響が無視できるように攪拌羽根の近くに固定した。

伝熱方程式と計算方法

伝熱方程式 厚さ $2l_x$ [cm] に比較して十分に大きな長さ $2l_y$ と幅 $2l_z$ をもつ平板において、厚さ方向のみに温度分布が生じると考えると、基礎伝熱方程式は、次式で表わされる。

$$\partial t / \partial \theta = \alpha (\partial^2 t / \partial x^2) \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \alpha = k / (C_p \cdot \rho) \quad (2)$$

ここで、 t は温度 [°C], θ は時間 [min], x は厚さ方向の中心からの長さ [cm], α は熱拡散率 [cm²/min], k は熱伝導度 [cal/cm·min·°C], C_p は比熱 [cal/g·°C], ρ は密度 [g/cm³] である。

試料表面の液境膜の伝熱抵抗が、試料内部の伝熱抵抗に比較して無視できる場合には、式(1)は、次の初期および境界条件を用いて解くことができる。温度 t , 時間 θ および長さ x を、下記のように初期温度 t_0 , 到達温度 t_∞ , 試料の半厚さ l_x を用いて無次元化温度 T , 無次元化時間・係数 f_x , 無次元化長さ X として示す。

$$T = (t - t_\infty) / (t_0 - t_\infty) \quad (3)$$

$$f_x = \alpha \theta / l_x^2 \quad (4)$$

$$X = x / l_x \quad (5)$$

初期条件:

$$\theta = 0, \quad -l_x \leq x \leq l_x \quad : t = t_0$$

境界条件:

$$\theta \geq 0, \quad x = \pm l_x \quad : t = t_\infty$$

$$\theta \geq 0, \quad x = 0 \quad : \partial t / \partial \theta = 0$$

$$\theta = 0, \quad -l_x \leq x \leq l_x \quad : t = t_\infty$$

以上から、

$$T_X = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2n-1} \exp \left[- (2n-1)^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 f_X \right] \cdot \sin \left[(2n-1) \pi (1-X) / 2 \right] \right\} \\ = \sum_{n=1}^{\infty} B_n(X, f_X) \quad (6)$$

熱拡散率の計算方法 温度 t または無次元温度 T と時間 θ との関係として得られる実験データから、式(6)に含まれる熱拡散率 α を求める方法として、線図を用いる方法^{12,13)}、数表を用いる方法¹⁴⁾などが採用されてきている。これらの方法は、手数を要し、精度の良い結果を得るのが困難であるため、前報^{1~4)}では、非線形最小二乗法を用いて、FORTRAN プログラムを作成して、 α の値をデジタル計算機を用いて計算により求めてきている。伝熱方程式の解が上記のように簡単に得られてくる場合には、最小二乗法の原理に基づいて BASIC プログラムを作成して、 α の値をマイクロコンピュータを用いて計算により簡便に求めることができる。

次に示す標準偏差 $\sigma[-]$ の値が最小になるようにして、 α の値を計算する。

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (T_{bi} - T_{ci})^2 / N \right]^{0.5} \quad (7)$$

ここで、 N はデータ数である。また、 T_{bi} および T_{ci} は、それぞれ時間 θ_i における無次元温度の測定値と計算値を示す。計算機は、日本電気製マイクロコンピュータ PC-9801 型を使用した。

解析結果および考察

解析式の収束 式(6)の解析式は無限級数となっている。級数の収束に対して、 X の値は影響が少なく、 f_X の値が著しい影響を示す。 f_X の値が十分に小さく、例えば、 $f_X=0.0001$ であると収束をする。この値よりもいくらか大きな値をとってもよいと考えられる。参考までに、 $X=0$ 、 $B_n \leq 10^{-7}$ として、 f_X の値を変えて計算を行ってみた。その結果を Table 1 に示す。式(6)の級数の収束は大へん速く、マイクロコンピュータを用いて、 α の値の計算を簡便に行うことができることがわかる。

試料の長さ、幅と厚さの比の影響 式(1)ならびに式(6)が利用できる基本的な条件として、試料の長さ $2l_Y$ と幅 $2l_Z$ が厚さ $2l_X$ に比較して十分に大きいということがある。試料を製形する時に厚さに対して、長さや幅とをどの程度にすると、長さや幅の方向からの伝熱の影響が無視できるかが興味深い問題点となる。3次元方向からの伝熱を考慮する場合に対しては、簡便な次に示すニューマンの式^{15,16)}が利用できる。

$$T_{XYZ} = T_X \cdot T_Y \cdot T_Z \quad (8)$$

上式を前述の級数の形で表わすと次式となる。

$$T_{XYZ} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n(X, f_X) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n(Y, f_Y) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n(Z, f_Z) \quad (9)$$

$$\text{ただし、} f_Y = \alpha \theta / l_Y^2, \quad f_Z = \alpha \theta / l_Z^2 \quad (10)$$

$$Y = y / l_Y, \quad Z = z / l_Z \quad (11)$$

Table 1 Calculated values of the dimensionless thickness-parameter by Eq. (4) f_X and the dimensionless temperature by Eq. (6) T_X

$f_X[-]$	$n[-]$	$B_{n+1}[-]$	$T_X[-]$
0.0001	107	8.22 E-08	1.000
0.0201	9	4.46 E-08	1.000
0.0401	7	5.36 E-09	0.999
0.0601	6	-1.87 E-09	0.992
0.0801	5	1.58 E-08	0.975
0.1001	5	2.90 E-10	0.949

上式は、中心温度だけを考慮 ($X=Y=Z=0$) する場合には、次のように表わされる。

$$T_{XYZ} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n(0, f_X) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n(0, f_Y) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n(0, f_Z) \quad (12)$$

ここで、簡単化を目的として、更に、長さと同幅と同じ長さに製形 ($l_Y=l_Z$) するとすると、次のように表わされる。

$$T_{XYZ} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n(0, f_X) \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} B_n(0, f_X/W^2) \right]^2 \quad (13)$$

$$\text{ただし, } W=l_Y/l_X \quad (14)$$

式(13)において、 T_{XYZ} ($X=Y=Z=0, l_Y=l_Z$) の値は、 f_X と W だけの関数として表わされることになる。

式(13)における T_{XYZ} の値を測定値として、式(6)による T_X の値を計算値として、最小二乗法の原理に基づいて、 α の値に対する次に示す誤差 M_W [%] の値を求めることができる。

$$M_W = [(\alpha_{XYZ} - \alpha_X) / \alpha_X] \times 100 \quad (15)$$

参考までに、 W の値を変えて計算を行った。その結果を、Table 2 に示す。ここで示す計算結果は、 $n=1\sim 20, f_X=0.0\sim 4.0$ に対する値である。 $W \geq 3$ 位になると、 M_W の値がかなり小さくなるのがわかる。

ジャガイモを試料として W の値を変えて温度範囲 $10\sim 50^\circ\text{C}$ で行った実験結果から求めた M_W の値を Fig. 1 に示す。ここで、試料の数は90個である。 M_W の値は、 $W \geq 6.0$ の29個の α の値の平均値 0.0748

Table 2 Calculated values of the thermal diffusivity deviated percentage by Eq. (15) M_W for the thickness-width ratio by Eq. (14) W

$W[-]$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0
M_W [%]	46.0	15.8	5.9	2.2	0.9	0.3	0.0	0.0

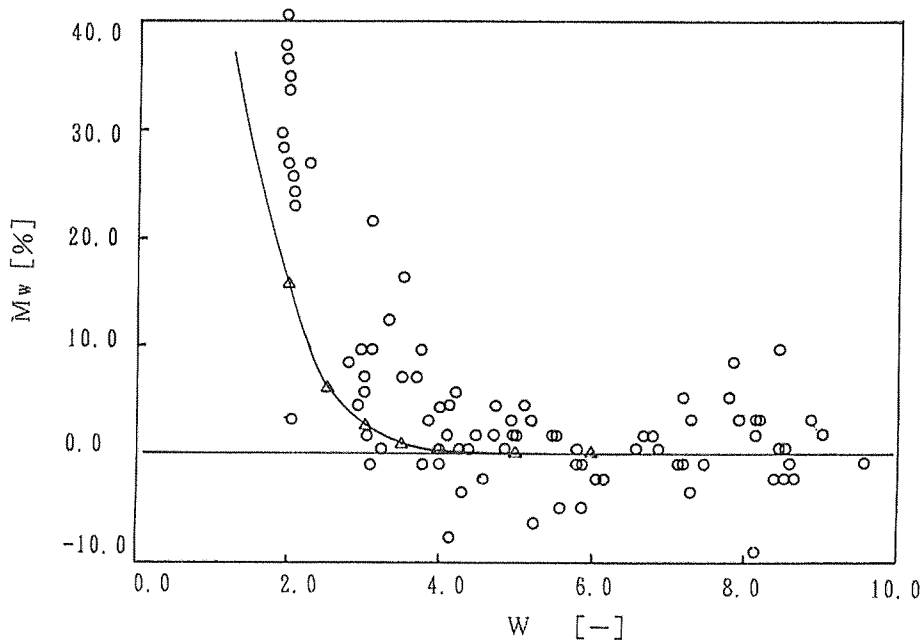


Fig. 1 Relations among the thermal diffusivity deviated percentage by Eq. (15) M_W [%] and the thickness-width ratio by Eq. (14) W [-]

○: observed data of potatoes; △: model data

Table 3 Calculated values of the thermal diffusivity deviated percentage by Eq. (16) M_X and the dimensionless length (sheath deviated length-half thickness ratio) X_j

$X_j[-]$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$M_X[\%]$	1.0	4.0	9.2	17.3	29.4	46.9	72.7	112.8	184.8

cm²/min を真の値として算出したものである。この実験結果からは、 W の値が3のあたりでは、 M_W が10%を越えるものが僅かながらみられる。 $W \geq 4$ 位にするとよいと考えられる。

熱電対の先端のずれによる影響 熱電対の先端が試料の中心になるように挿入することは、非常に困難なことである。試料が大きい場合にはそのずれが無視できるが、試料の厚さが小さくなっていく場合には、熱電対の先端のずれによる誤差が問題となる。

$T_X = \Sigma B_n(X_j, f_X)$ の値を測定値として、 $T_X = \Sigma B_n(0, f_X)$ の値を計算値として、最小二乗法の原理に基づいて、 α の値に対する次に示す誤差 $M_X[\%]$ の値を求めることができる。

$$M_X = [(\alpha_{Xj} - \alpha_0) / \alpha_0] \times 100 \quad (16)$$

参考までに、 X_j の値を変えて計算を行った。その結果を、Table 3 に示す。ここで示す計算結果は、 $n=1 \sim 20$ 、 $f_X=0.0 \sim 4.0$ に対する値である。 $X_j \geq 0.3$ 位になると、 M_X の値がかなり大きくなって問題となる。試料が小さいとこの程度まで熱電対の先端がずれることは多々あると考えられる。

先端のずれの補正の計算 試料が小さくて熱電対の先端が中心からずれて挿入された場合は、 α の値と同時に X_j の値も算出して、標準偏差 σ の値が小さくなる点での α の値を求めるとよいと考えられる。

先端が中心からずれる場合の標準偏差 σ_α は、次式で表わされる。

$$\sigma_\alpha = \left[\sum_{i=1}^N \left\{ T_b - \sum_{n=1}^{\infty} B_n(0, f_X) \right\}_i^2 / N \right]^{0.5} \quad (17)$$

ここで、 $\partial \sigma_\alpha / \partial \alpha = 0$ として、 α の値を求めることになる。上式において、 σ_α の値が最小になるような α の値を求める。

また、 X_j も α も同時に計算するとした場合の標準偏差 $\sigma_{\alpha X}$ は、次式で表わされる。

$$\sigma_{\alpha X} = \left[\sum_{i=1}^N \left\{ T_b - \sum_{n=1}^{\infty} B_n(X, f_X) \right\}_i^2 / N \right]^{0.5} \quad (18)$$

ここで、 $\partial \sigma_{\alpha X} / \partial \alpha = 0$ 、 $\partial \sigma_{\alpha X} / \partial X = 0$ として、 α の値を求めることになる。上式において、 $\sigma_{\alpha X}$ の値が最小になるような α の値を求める。

式(17)と式(18)の計算は、非線形最小二乗法を用いて FORTRAN プログラムで行うのが良いが、本研究では、簡単な BASIC プログラムを用い、マイクロコンピュータを使用して、繰り返し計算を行って α の値を求めた。

以上の計算の手法が有用であるかどうかを確認するために、モデル計算を行ってみた。 $2l_X = 0.50$ cm ($2l_1, 2l_2 \gg 2l_X$) の $\alpha = 0.075$ cm²/min を想定した試料をモデルとして、熱電対が $X=0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6$ の位置にあるとして式(6)を用いて測定値を算出し、式(17)と式(18)とを用いて、 α の値を求める計算を行った。式(17)による計算結果を Fig. 2 に、また、式(18)による計算結果の数例をあげて Fig. 3~6 に示す。Fig. 2~6 のコンピュータ図面に示す記号は、本文の記号と次のように対応している。

x : 無次元厚さ ($X, x/l_X$)

y : 熱拡散率 (α)

z : 標準偏差 (σ)

また、測定点数 $N=14$ 、時間 $\theta_{14}=4.5$ min、 $B_n \leq 0.0001$ として計算を行った結果である。

Fig. 2 の計算結果から、熱電対の先端が中心にあるとして α の値を求めると、中心からずれるほど、 α の値が大きくなり、 σ の値が大きくなることわかる。また、Fig. 3~6 の計算結果を比較してみると、熱

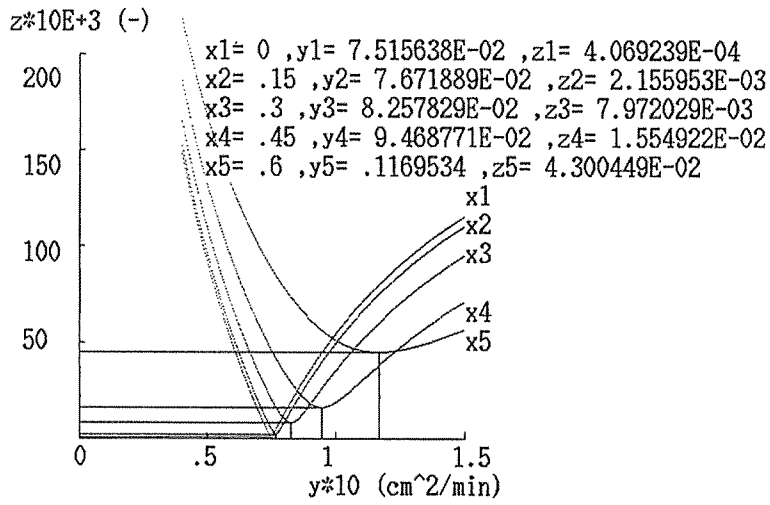


Fig. 2 Relations among the standard deviation $z[-]$ and the thermal diffusivity $y[cm^2/min]$ for the various dimensionless length (sheath deviated length-half thickness ratio) $x_i[-]$

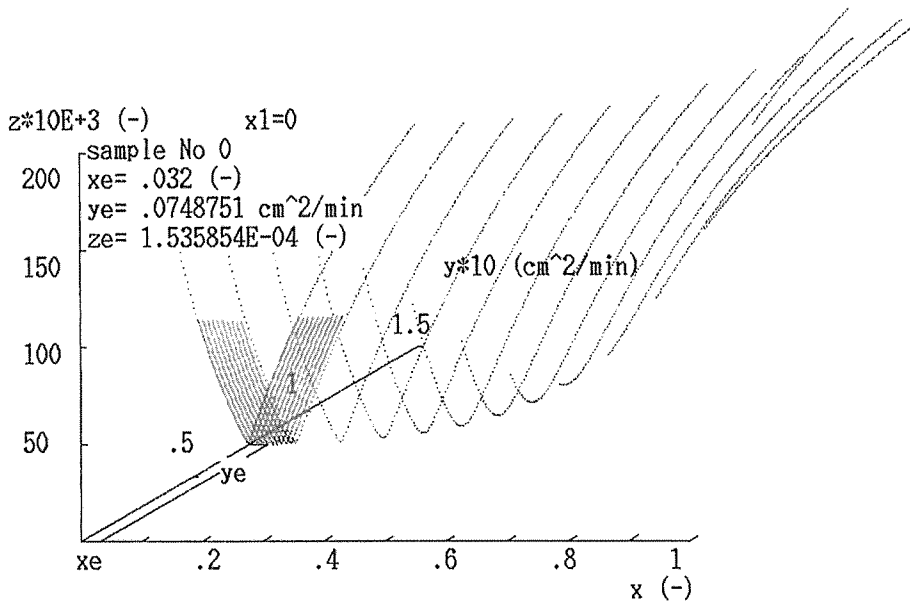


Fig. 3 Relations among the standard deviation $z[-]$, the thermal diffusivity $y[cm^2/min]$ and the dimensionless length $x[-]$ for model data of $X_j=0.0$

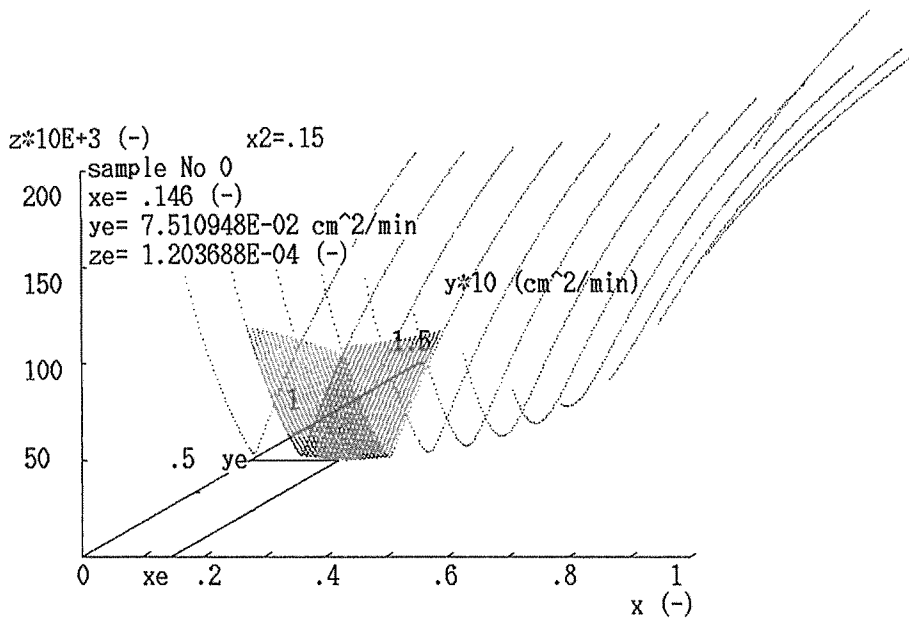


Fig. 4 Relations among the standard deviation $z[-]$, the thermal diffusivity $y[\text{cm}^2/\text{min}]$ and the dimensionless length $x[-]$ for model data of $X_j=0.3$

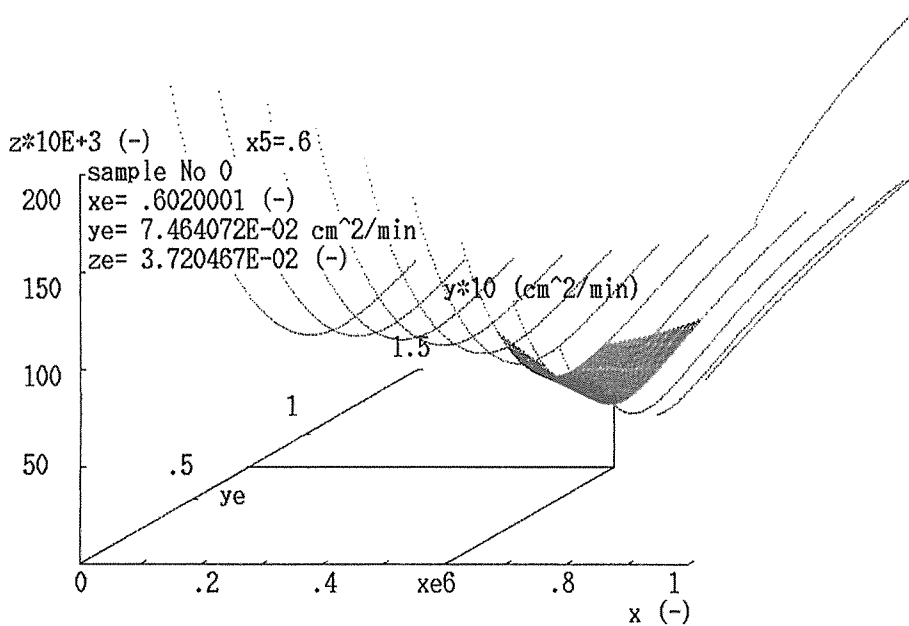


Fig. 5 Relations among the standard deviation $z[-]$, the thermal diffusivity $y[\text{cm}^2/\text{min}]$ and the dimensionless length $x[-]$ for model data of $X_j=0.6$

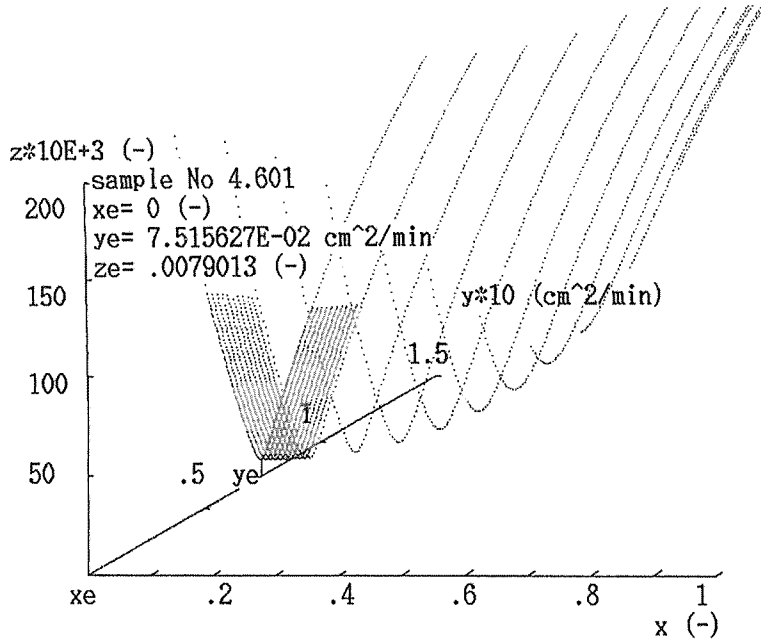


Fig. 6 Relations among the standard deviation $z[-]$, the thermal diffusivity $y[\text{cm}^2/\text{min}]$ and the dimensionless length $x[-]$ for potato data of sample No. 4.601

Table 4 Calculated values of the thermal diffusivity α_0 (assumed sheath at center) and α_{Xj} (assumed sheath at X_j)

Sample No.	4.601	4.602	4.603	4.604	4.605	4.606	4.607
$\alpha_0[\text{cm}^2/\text{min}]$	0.075	0.083	0.110	0.076	0.072	0.106	0.077
$\alpha_{Xj}[\text{cm}^2/\text{min}]$	0.075	0.075	0.076	0.076	0.072	0.077	0.077
$X_j[-]$	0.000	0.290	0.520	0.000	0.000	0.510	0.000

電対の先端が中心からずれた場合には、 σ の値が小さくなる点を求めて、先端がずれていると補正をして α の値を求めると、 σ の値がほぼ一致して得られることがわかる。

ジャガイモを試料として、実際に熱電対を挿入して得られた実験データに対して、熱電対の先端が中心にあるとした場合と、先端が中心からずれているとした場合とに対して計算で得られる α の値を、それぞれ α_0 , α_{Xj} として得られた結果を、Table 4 に示す。 $2l_x=0.60\sim 0.70$ cm, $2l_y=2l_z=4.6$ cm, 温度 $10\sim 50^\circ\text{C}$ で行った実験に対する計算結果の一例である。この計算結果から、 α_0 の平均値は 0.086 cm^2/min , α_{Xj} の平均値は 0.075 cm^2/min となった。熱電対の先端がずれている補正を行わない場合には、 α の値が大きくなる結果となっている。

参考までに、試料 No. 4.601 に対する計算結果を Fig. 6 および 7 に、また、試料 No. 4.603 に対する計算結果を Fig. 8~10 に示す。Fig. 7, 9 および 10 のコンピュータ図面に示す。Fig. 7, 9 および 10 のコンピュータ図面に示す記号は、本文の記号と次のように対応している。

T : 無次元温度 (T)

s : 時間 (θ)

熱電対の先端が中心から目立ってずれている試料 No. 4.603 に対する Fig. 9 と Fig. 10 にそれぞれ示す測定値と計算結果の比較から、 α_0 の値よりも α_{Xj} の値の方が良いことがわかる。

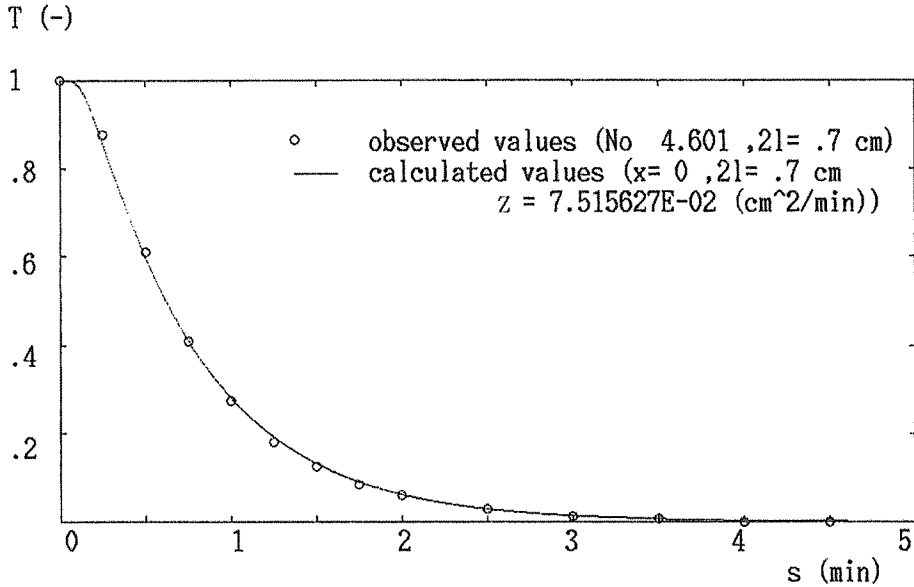


Fig. 7 Relations among the dimensionless temperature $T[-]$ and the process time $s[\text{min}]$ for potato data of sample No. 4.601

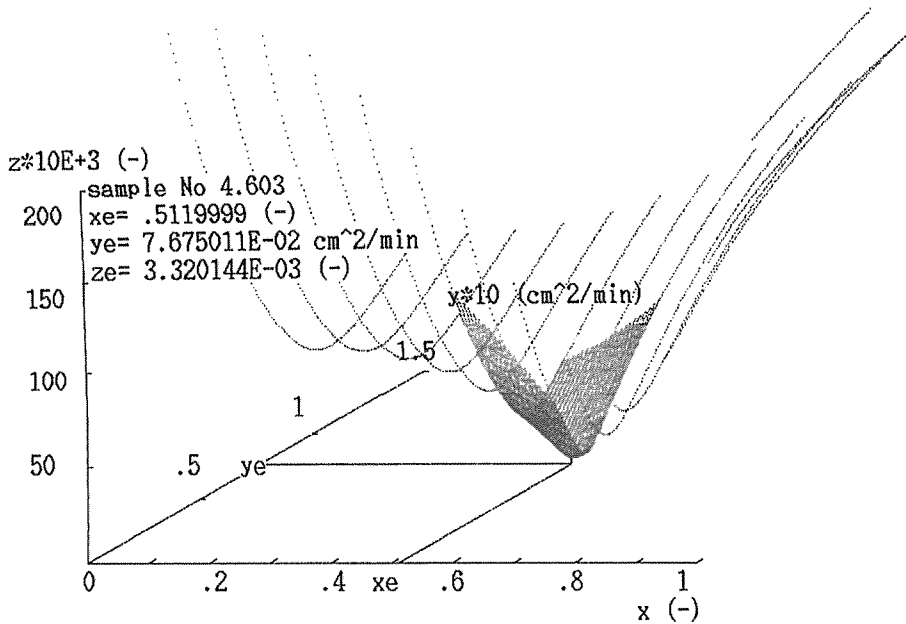


Fig. 8 Relations among the standard deviation $z[-]$, the thermal diffusivity $y[\text{cm}^2/\text{min}]$ and the dimensionless length $x[-]$ for potato data of sample No. 4.603

熱拡散率における温度の影響 熱拡散率 α の値は、温度によって変わると考えられるが、前報¹⁻³⁾では、 α の値が精度よく得られなかったため、例えば、ジャガイモ³⁾において、温度 10~50°C における平均値が 0.0840 cm^2/min であるとして報告してきた。

本研究において、 α の値を精度よく求める方法が検討して得られたので、ジャガイモを試料として、引き続き、 α における温度の影響を求めるための実験を試みた。ジャガイモの試料を50個作って、温度範囲

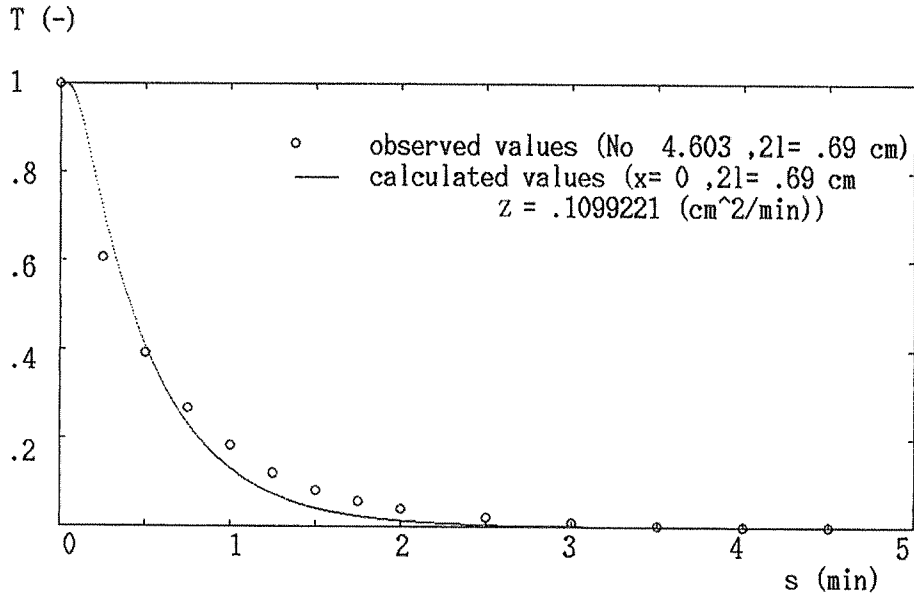


Fig. 9 Relations among the dimensionless temperature $T[-]$ and the process time $s[\text{min}]$ for potato data of sample No. 4.603 by the thermal diffusivity assumed sheath at center

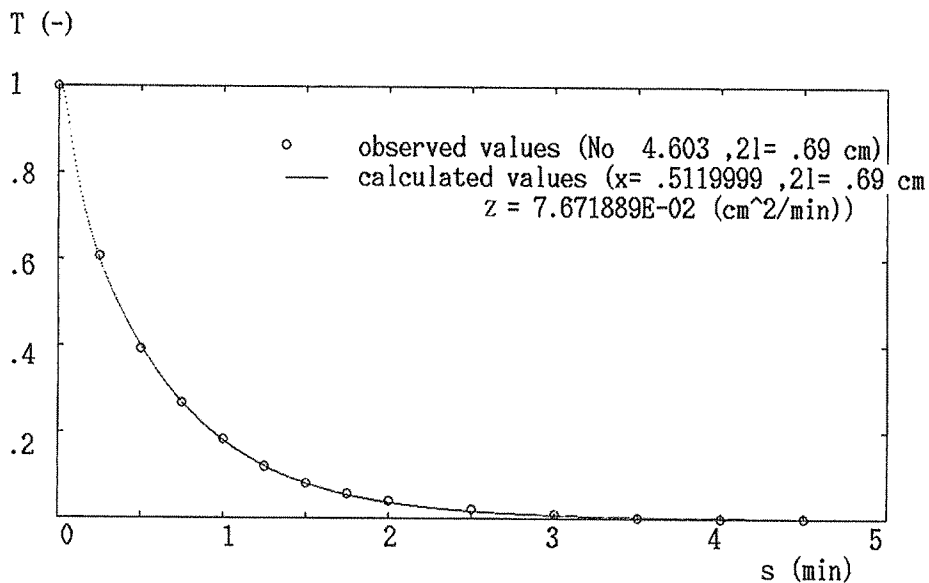


Fig. 10 Relations among the dimensionless temperature $T[-]$ and the process time $s[\text{min}]$ for potato data of sample No. 4.603 by the thermal diffusivity assumed sheath at X_j

10~60°Cにおいて、温度幅 10°Cとして、温度幅域を変えて実験を行った。 α と X_j とを同時計算する方法によって α_{X_j} の値として求めた α の値を、Table 5に一覧して示す。各温度幅域における平均値を末尾の行に示す。 α の値が温度 $t[^\circ\text{C}]$ の上昇に伴って大きく変わっている。本実験条件下では、Fig. 11に示すように、ほぼ直線関係となり、次式で表わされる結果が得られる。

$$\alpha = (0.01728 t + 6.867) \times 10^{-2} [\text{cm}^2/\text{min}]$$

(19)

Table 5 Calculated values of the thermal diffusivity α_x [cm²/min] assumed sheath point at X_j of potatoes

10→ 20°C	20→ 10°C	20→ 30°C	30→ 20°C	30→ 40°C	40→ 30°C	40→ 50°C	50→ 40°C	50→ 60°C	60→ 50°C
0.073	0.077	0.074	0.074	0.073	0.069	0.070	0.081	0.072	0.071
—	—	0.072	0.072	—	—	0.070	0.074	0.071	0.074
0.070	0.075	0.075	0.068	0.075	0.077	—	—	0.079	0.086
0.069	0.065	0.073	0.066	0.078	0.071	0.084	0.080	0.074	0.077
0.072	0.073	0.075	0.069	0.074	0.076	0.070	0.077	0.080	0.085
0.071	0.077	0.072	0.082	0.075	0.075	0.077	0.074	0.079	0.076
0.072	0.070	0.070	0.072	0.077	0.073	—	—	0.077	0.081
0.070	0.071	0.072	0.073	0.079	0.080	0.074	0.073	0.082	0.081
0.073	0.065	0.072	0.072	0.075	0.076	0.076	0.078	0.081	0.077
0.071	0.071	0.072	0.075	0.076	0.077	0.077	0.078	0.082	0.081
0.0714		0.0725		0.0753		0.0758		0.0783	

where, the values of last row: average values

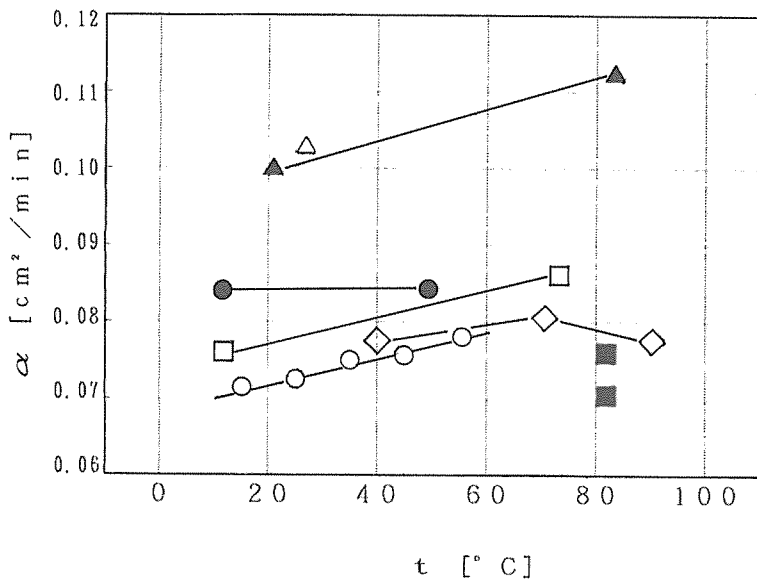


Fig. 11 Relations among the thermal diffusivity α [cm²/min] and the temperature t [°C] of potatoes

○ : this work, ● : previous results³⁾, □ : YAMADA¹⁴⁾, ■ : MATTHEWS et al¹⁷⁾, △ : RAO et al¹⁸⁾, ▲ : LAMBERG et al¹⁹⁾, ◇ : RICE et al²⁰⁾

前報³⁾において、10~50°Cにおいて得られた平均値 0.0840 cm²/min は、上式による 10~50°Cにおける 0.0704~0.0773 cm²/min よりも僅かに大きい。この理由は、Fig. 2 を参照してみられるように、熱電対の先端が中心からずれていたことなどが原因ではないかと考えられる。 α の値は、試料の含水率などによっても変わってくる値である。

これまでに、ジャガイモの α の値を各種の方法で求めている他者の研究結果を列挙すると次のようである。山田¹⁴⁾ が、熱伝導度の測定を行って温度の上昇に伴って大きくなると報告をしている。含水率80%として、概算で密度の値を用いるなどして α の値を推算すると 10~75°C において、0.0762~0.0874 cm²

/min となる。また、MATTHWS¹⁷⁾によると、80°Cにおいて、生ならびに加熱ジャガイモの α の値として、それぞれ0.0701, 0.0753 cm²/minを得ている。RAOら¹⁸⁾は、25°Cにおいて0.102 cm²/minを得ている。LAMBERGら¹⁹⁾は、20~80°Cにおいて、0.0995~0.1104 cm²/minを得ている。RICEら²⁰⁾は、含水率72~79%で実験を行っているが、76.3%に対して、40~70~90°Cにおいて、0.0768~0.0804~0.078 cm²/minになる結果を得ている。本研究の結果は、Fig. 11に示すように、10~60°Cに対して、0.0704~0.0790 cm²/minとなり、ほぼこれらの結果と値の大きさも、温度に対する影響の傾向もよい一致を示している。特に、大きく値が異なっている報告のものは、品種の違いによることなどが原因ではないかと考えられる。

結 言

食品の熱拡散率の測定方法として、非定常状態法は、簡単で有効な方法と考えられる。簡便でよく利用される平板状試料の解析解をマイクロコンピュータを用いて使用する場合、試料の長さや幅は、少なくとも厚さの4倍以上にすることが望ましいことがわかった。それが困難な場合には、ニューマンの式を使って直方体状試料として取り扱うことが必要となる。

また、試料が小片状断片となり、熱電対の先端を試料の中心に精確に挿入することが困難な場合には、熱拡散率の値が大きく得られることになる。この場合、熱拡散率と先端のずれの位置とを合わせて同時計算をして、標準偏差が最小になる点を求めると、真の値に近い熱拡散率の値を得ることが可能であることがわかった。

以上の考察の結果を使って、ジャガイモの熱拡散率と温度との関係を求めた。温度 10~60°C の間で直線関係として表わされる温度関係式を得ることができた。

なお、本研究の一部は、平成2年4月6日の名古屋市（名古屋大学）における化学工学会第55年会において報告したものである。

謝 辞

本研究の一部は、1988~1989年度中基研究奨励会のご支援を受けたことを記して、謝意を表します。

使 用 記 号

$B_n(X, f_x)$: 式(6)の定義による値 [-]	T : コンピュータ図面における T の値
C_p : 試料の比熱 [cal/g·°C]	t : 温度 [°C]
f : 式(4), (10)の定義による無次元時間 ・係数 [-]	W : 式(14)の定義による l_y/l_x [-]
k : 試料の熱伝導度 [cal/cm·min·°C]	X, Y, Z : 式(5), (11)の定義による無次元長さ [-]
l : 試料の半分の厚さ, 長さ, 幅 [cm]	x, y, z : 厚さ, 長さ, 幅方向の中心からの長さ [cm]
M : 式(15), (16)の定義による値 [-]	x, y, z : コンピュータ図面における X, α, σ の値
N : データ数 [-]	α : 試料の熱拡散率 [cm ² /min]
s : コンピュータ図面における θ の値	θ : 加熱または冷却の時間 [min]
T : 式(3)の定義による無次元温度 [-]	ρ : 試料の密度 [g/cm ³]
	σ : 標準偏差 [-]

添 字 :

0, ∞ : 初期値および到達値	X, XYZ : 熱が X の一方向および X, Y, Z の三方向から入るとした値
0, X_j : 熱電対の先端が中心および X_j の位置にあると推定した値	X, Y, Z : 厚さ, 長さおよび幅方向の値
b, c : 測定値および計算値	

引用文献

- 1) 久保田清・藤本真紀子・鈴木寛一・高崎かほる・保坂秀明, 1981, 球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する研究. 日食工誌, 28: 68-73.
- 2) KUBOTA, K., TAKASE, Y., SUZUKI, K. and ESAKA, M., 1983, A Study on the Thermal Diffusivity of Potato Slabs in Various Conditions. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 22:141-152.
- 3) KUBOTA, K., 1985, A Study on the Thermal Diffusivity of Rectangular and Cylindrical Potatoes. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 24:1-14.
- 4) 久保田清・高瀬祐美子・鈴木寛一・江坂宗春, 1985, 卵白, 卵黄ゲルの熱拡散率の算出に関する研究. 日食工誌, 32: 51-55.
- 5) 久保田清ほか, 1981, 食品加工処理における速度論的研究法(その1~3). 食品工業, 24(10): 41-45; 24(12): 73-79; 24(14): 73-78.
- 6) 久保田清, 1986, 食品の物性測定と各種加工処理における速度論的研究. ニューフードインダストリー, 28(2): 55-67; 28(3): 72-83; 28(4): 58-67.
- 7) 久保田清, 1986, 食品の物性(松本幸雄・山野善正編), 第12集, 21-52(追補2)頁, 食品資材研究会, 東京.
- 8) 久保田清, 1978, 食品科学便覧(編集委員会編), 244頁, 共立出版, 東京.
- 9) 矢野俊正, 1978, 食品の物性(松本幸雄編), 第4集, 107-125頁, 食品資材研究会, 東京.
- 10) 久保田清・保坂秀明, 1981, 球状ジャガイモの伝熱特性を考慮したクッキング速度式の設定に関する研究. 日食工誌, 28: 181-185.
- 11) MOHSEIN, N. N., 1980, Thermal Properties of Food and Agricultural Materials, Gordon and Breach Sci. Pub., New York; 林 弘通監訳, 1985, 食品の熱物性, 光琳, 東京.
- 12) 化学工学協会編, 1978, 化学工学便覧, 改訂4版, 287, 267, 264頁, 丸善, 東京.
- 13) GURNEY, H. P. and LURIE, J., 1923, Charts for Estimating Temperature Distributions in Heating or Cooling Solid Shapes. *Ind. Eng. Chem.*, 15:1170-1172.
- 14) 山田豊一, 1970, 馬鈴薯の伝熱特性について. 農化, 44: 587-590.
- 15) CHARM, S. E., 1978, The Fundamentals of Food Engineering, 3rd Ed., pp. 156, AVI, Westport, Connecticut.; 細川 明監訳, 1968, 食品工学の基礎, 148-150頁, 光琳, 東京.
- 16) NEWMAN, A. B., 1936, Heating and Cooling Rectangular and Cylindrical Solids. *Ind. Eng. Chem.*, 28:545-548.
- 17) MATTHEWS, F. V. Jr. and HALL, C. W., 1968, Method of Finite Differences Used to Relate Changes in Thermal and Physical Properties of Potatoes. *Trans ASAE*, 11:558-562.
- 18) RAO, M. A., BARNARD, J. and KENNY, J. F., 1975, Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Process Variety Squash and White Potatoes. *Trans ASAE*, 18:1188-1192.
- 19) LAMBERG, I. and HALLSTROM, B., 1986, Thermal Properties of Potatoes and a Computer Simulation Model of a Blanching Process. *J. of Food Tech.*, 21:577-585.
- 20) RICE, P., SELMAN, J. D. and ABDUL-REZZAK, R. K., 1988, Effect of Temperature on Thermal Properties of Record Potatoes. *Int. J. of Food Sci. and Tech.*, 23:281-286.

A Study on the Thermal Diffusivity of Potato by using Small Shape Specimens

Rentsu RO, Kiyoshi KUBOTA and Kanichi SUZUKI

*Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 724, Japan*

In order to obtain the optimum design and operating conditions in the various equipments and process, it is necessary to determine the thermal diffusivity of the food materials. In previous papers, we have studied the thermal diffusivity of spherical root vegetables¹⁾, potato slabs²⁾, rectangular and cylindrical potatoes³⁾, and egg yolk and white gels⁴⁾.

As for small shape food materials, we can not cut them into large shape specimens, as shown in the from first to third papers¹⁻³⁾, therefore, the results in the these papers are very scattered. The reason in that of a thermocouple into the center of the small samples.

Now, in the present paper, we took up the study of the thermal diffusivity of small shape samples under various top point conditions. For this we used potato samples that had uniform tissue and physical properties for the wide portions.

The values of thermal diffusivity of potatoes are considered $(0.01728t+6.867) \times 10^{-2}$ [cm²/min] (where, t is temperature [°C]) at temperature range between 10 and 60°C. These results are better than the average value of 0.0840 cm²/min that we obtained in the previous paper³⁾. The reason for this improvement is that the top point of the thermocouple can not be incert into the center of the small shape samples, but we can obtain the top point position by assuming the true position must have a minimum standard deviation for the calculation results under the various assumed top point positions.