報 文

球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する研究

久保田 清*・藤本真紀子*・鈴木 寛一*・高崎かほる*・保坂 秀明*

A Study on the Thermal Diffusivity of Spherical Root Vegetables

Kiyoshi KUBOTA*, Makiko FUJIMOTO*, Kanichi SUZUKI*,
Kahoru TAKASAKI* and Hideaki HOSAKA** Department of Applied Biological Science, Faculty of Applied Biological Science,
Hiroshima University, Fukuyama-ken 720

In previous papers^{1,2)}, we have studied the cooking-rate of root vegetable slices. In order to design various cooking apparatuses, it is necessary to measure the thermal diffusivity which must be used for cooking of large root vegetables. In this paper, we studied the thermal diffusivity of the root vegetables curved spherically. The values of thermal diffusivity of popato, sweet potato, carrot and radish were obtained to be 0.097, 0.101, 0.103 and 0.101 cm²/min, respectively.

(Received July 15, 1980)

前報^{1,2)}において、薄片の根菜類系食品のクッキング速度に関する研究を行ってきた。試料が薄片の場合には、試料温度がすぐに所定温度まで加熱され一定になるが、試料が大きくなってくると、試料温度が経時変化する。クッキング装置設計のためには、熱拡散率を求めておくことが必要となる。

本報では、根菜類系食品について、熱拡散率の測定を行なったので報告する。

実 験 方 法

1. 試料

市販のジャガイモ、サツマイモ、ダイコン、ニンジン球形(半径1.5~2.0 cm)に整形したものを使用した。いずれも5℃の冷蔵庫で保管したものを、使用前に含水率を安定させる目的で室温の水浴中に3~4時間浸漬し、生試料として使用した。また、整形した試料を沸騰湯浴中で10分間加熱処理し、水浴中に浸漬したものを、加熱処理試料として使用した。

2. 温度変化の測定

試料温度の測定は、クロメル・アルメル熱電対(ステ

ンレス保護管の外径1.0 mm)を試料に挿入し、自動記録により測定した。記録紙に描かれた曲線から、10~20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。

熱電対の試料に挿入されない部分には、円柱状の発泡スチロール(外径2.4 cm, 長さ6.0 cm)を突き通し、熱電対の伝導伝熱による測定温度に対する誤差が少なくなるようにした。

試料温度の経時変化は、一定温度にした試料を、攪拌羽根つきサーモユニット(大洋科学工業製ミンダー Jr)を用いた恒温槽(横30 cm, 縦45 cm, 深さ15 cm)の中に投入し、加熱することにより測定した。常温以下の温度にする場合には、投込式冷却機(大洋科学工業製クールパイプ 300 L)を用いた。

伝熱方程式と計算方法

1. 伝熱方程式

試料が球状の場合の伝熱方程式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (1)$$

* 広島大学生物生産学部生物生産学科(〒720 福山市緑町 2-17)

ここで、 t は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 θ は時間 (min)、 r は中心からの距離 (cm)、 α は熱拡散率 (cm^2/min) 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、境界条件を用いて解くことができる。試料中心部に対して式(2)、中心部以外に対して式(3)が得られる。

初期条件

$$\theta = 0, \quad r > 0 : t = t_0$$

境界条件

$$\theta = \infty, \quad r > 0 : t = t_c$$

$$r = 0, \quad \theta > 0, \quad t = \text{finite}$$

$r = 0$ の場合:

$$Y_c = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \exp(-n^2 \pi^2 X) \quad (2)$$

$r \neq 0$ の場合:

$$Y = 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right)}{n\pi r} \exp(-n^2 \pi^2 X) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } X = \alpha \theta / R^2 \quad (-)$$

$$Y = (t - t_0) / (t_0 - t_c) \quad (-)$$

$$Y_c = (t_c - t_0) / (t_0 - t_c) \quad (-)$$

ここで、 R は試料の半径 (cm)、 t_0, t_c, t_c は、それぞれ初期温度、到達温度、試料の中心温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。

液境膜の伝熱抵抗 $1/h$ (h は液境膜の伝熱係数) と試料内部の伝熱抵抗 R/k (k は試料の熱伝導度) との比 $m = k/hR$ (-) の値がゼロに近い場合に、液境膜の伝熱抵抗が無視でき、上式の利用ができることになる。十分に攪拌された液中の食品では、液境膜の伝熱抵抗が無視できると報告されてきている⁸⁾。試みの計算として、流速 10~20 cm/sec で攪拌されている 50 $^{\circ}\text{C}$ の水浴中に、直径 2.0 cm で熱伝導度 0.46 kcal/m 2 ·h· $^{\circ}\text{C}$ (ジャガイモの 50 $^{\circ}\text{C}$ の値⁹⁾) の試料があるとする、RANZ-MARSHALL の式⁴⁾より、境膜伝熱係数の値が 1.6~2.2 $\times 10^8$ kcal/m 2 ·h· $^{\circ}\text{C}$ となり、 m の値は約 0.03~0.02 となる。

2. 熱拡散率の計算方法

温度 t または無次元温度 Y と時間 θ との関係として得られる実験データから、式 (2), (3) 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¹⁰⁻¹¹⁾ が広く採用されてきている。線図は、Fig. 1 に示すように Y の値が小さいところでは片対数としてほぼ直線関係として得られるが、大きいところでは極端な曲線となり、線図の利用が困難になってくる。山田⁸⁾ は、数表を作成して利用する方法を採用している。

式 (2), (3) の関係を、線図、数表として表わして、 α の値を求める方法は、手数を要し、精度よい結果を得るの

Fig. 1 Central temperature history in a spherical material

が困難である。本報では、式 (2), (3) を数値計算し、非線形最小二乗法のプログラム⁸⁾ を用いて α の値を求めるデジタル計算機プログラムを作成して計算により求める方法について検討した。計算機プログラムの流れ図の概要を Fig. 2 に示す。非線形最小二乗法については、計算例を示した分かりやすい解説⁹⁾ があり、参照されたい。

Fig. 2 Flow chart for calculation of thermal diffusivity

A: Calculation of Eq. (2) or (3)

B: Subroutine for calculation of simultaneous linear equations⁸⁾

熱拡散率 α の値は、次に示す標準偏差 σ (-) の値を最小にするようにして計算する。

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{cal}})^2 / N \right]^{0.5} \quad (4)$$

ここで、 N はデータ数である。三添字 obs, cal は、それぞれ実測値および計算値を示す。

計算機は、名古屋大学大型計算機 センター FACOM M-200 を使用した。

実験結果および考察

1. 実験結果

球状 (半径 R (cm)) に整形し、温度 t_0 (°C) としたジャガイモ、サツマイモ、ニンジン、ダイコンの試料を、温度を変えた恒温槽に投入し、試料中心点 ($r=0$ cm)、中心と表面の間点 ($r=R/2$ cm) における温度変化の測定を行なった。試料温度は、投入した恒温槽の温度まで到達し、投入した恒温槽温度を到達温度 t_e (°C) とすることができた。試料の種類ならびに実験条件を Table 1 に示す。実験結果の一例を、Fig. 3 および 4 に示す。曲線は、後述する Table 1 に示す α の値による計算値である。

デンプン質系の根菜類系食品であるジャガイモとサツマイモは、加熱するとデンプンの α 化が起こると考えられる。前報¹⁾ において、ジャガイモとサツマイモのクッキング速度を、衝撃貫通エネルギーの測定から求め、活性化エネルギーの値が、それぞれ 29.6, 34.1 kcal/mol になる結果を得た。活性化エネルギーの値が大きいことから、加熱処理いわゆるクッキングが吸熱現象では

Fig. 3 Relations between dimensionless temperature and processing time

ないかと考えられる。

ジャガイモ、サツマイモにおいて、 α 化温度付近で著しい吸熱が起こるとすると、試料を一定条件下で連続的に加熱する場合に、温度上昇の経時変化曲線に変曲点が見られることになると考えられる。生試料と加熱処理試

Table 1 Experimental conditions and thermal diffusivity α and standard deviation σ

Run	Spherical sample	Radius R (cm)	Initial and terminal temp.		Initial value		Calculated value	
			t_0 (°C)	t_e (°C)	α (cm ² /min)	σ (-)	α (cm ² /min)	σ (-)
1	potato*	1.9	11.0	90.0	0.05	0.291	0.099	0.0204
2	"	1.9***	12.0	"	"	0.237	0.101	0.0369
3	"	1.5	13.5	"	"	0.303	0.106	0.0265
4	"	1.9	"	65.9	"	0.260	0.091	0.0255
5	"	"	41.0	90.0	"	0.221	0.081	0.0081
6	potato**	"	20.0	"	0.05	0.268	0.094	0.0073
7	"	1.9***	16.0	"	"	0.215	0.095	0.0150
8	"	1.5	"	"	"	0.298	0.104	0.0239
9	"	1.9	42.0	"	"	0.312	0.104	0.0239
10	sweet potato*	"	21.0	"	0.05	0.339	0.106	0.0166
11	"	"	14.0	65.0	"	0.265	0.092	0.0193
12	"	"	42.5	90.0	"	0.334	0.108	0.0231
13	sweet potato**	"	23.5	"	0.05	0.253	0.090	0.0054
14	"	"	23.0	65.0	"	0.302	0.104	0.0399
15	"	"	42.0	90.0	"	0.320	0.107	0.0253
16	carrot*	"	13.5	"	0.05	0.337	0.101	0.0269
17	"	1.9***	16.0	"	"	0.270	0.100	0.0261
18	"	1.5	17.5	"	"	0.366	0.108	0.0153
19	radish*	2.0	16.6	95.6	0.05	0.277	0.096	0.0256
20	"	1.5	19.9	96.9	"	0.312	0.105	0.0200

where, *, ** : raw, preheating sample

***, no mark: $r=R/2$, $r=0$ (measuring point)

Fig. 4 Relation between dimensionless temperature and processing time

料の間の比較と、初期温度を変えた場合の比較とができる実験を組み込んで行なった。Fig. 3 の Run 1 と 3, ならびに Fig. 4 の Run 10 と 12 の比較から、試料の加熱処理の有無、初期温度の変化による差異がみられないことから、大きな吸熱現象は起こっていないと考えられる。伝導伝熱されてくる熱は、すべて顕熱に変わっていると仮定して、簡単に温度係数の計算を行なうとよいことになる。

2. 計算結果

熱拡散率 α の値を、非線形最小二乗法により求めた結果を、Table 1 に示す。 α の初期値は、いずれも $0.05 \text{ cm}^2/\text{min}$ として計算を行なった。反復計算による計算結果の収束の傾向を、Run 1 を例として Fig. 5 に示す。反復回数 m が 6 位になると、ほぼ収束する結果になることが分かる。Table 1 に示す α の値が、かなりばらついているが、これは、熱電対の先端が、所定の点になるように固定させることが困難であったこととか、試料にばらつきがあったことが原因として考えられる。

試料の大きさを変えたり、測定点を中心点から中心と表面の中間点に変えるなどして、 α の値が誤差内ではほぼ一致していることから、本実験で採用した試料の大きさなど測定条件が妥当であると考えられる。試料の半径を 1 cm として中心点で測定する場合、試料の半径を 1.5 cm として中心と表面の中間点で測定する場合の実験も行なったが、ばらつきが大きくなりよくない結果となった。試料が小さくなると、熱電対の先端を所定の点に設定するときのずれの影響が大きくなったり、熱電対の

Fig. 5 Relations between thermal diffusivity, standard deviation and iteration number, and between dimensionless temperature and processing time

Calculated results: α vs. m $\diamond$
 σ vs. m ∇

伝導伝熱による測定温度に対する誤差が大きくなるなどのため、試料はできるだけ大きくするのがよいと考えられる。

Table 1 に得られた α の値の平均値は、ジャガイモ、サツマイモ、ニンジン、ダイコンにおいて、それぞれ $0.097, 0.101, 0.103, 0.101 \text{ cm}^2/\text{min}$ となり、よく似た結果となっている。いずれも水分が多い根菜類食品であり、水の α の値に近い結果になっていると考えられる。水の α の値は、 20°C において、密度、熱伝導率、比熱が、それぞれ $0.998 \text{ g/cm}^3, 0.514 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}, 1.000 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ であることから $0.086 \text{ cm}^2/\text{min}$ 、また、 90°C において、 $0.965 \text{ g/cm}^3, 0.582 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}, 1.005 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ であることから $0.100 \text{ cm}^2/\text{min}$ となる。 α の値は、温度の影響を受ける値であり、温度の関数として置くことが望ましいが、本報では、実験データのばらつきが大きいため、関数式として与えることが不可能と考えられ、測定温度範囲内で一定として求めている。

根菜類食品では、密度、熱伝導率、比熱の値が、品種、含水率、温度、気泡の含まれぐあいなどで変わることになる。これらの物性値が十分に得られないため、 α の値の推算が困難である。これらの物性値の既往の値を異なった条件下とはなるが集めて、 α の値の概算を試みると、密度、熱伝導率、比熱が、ジャガイモにおいて⁸⁾、

1.07 g/cm³, 0.44 kcal/m·h·°C, 0.78 cal/g·°C, また, ニンジンにおいて¹⁰⁾, 1.04 g/cm³, 0.52 kcal/m·h·°C, 0.94 cal/g·°C となり, いずれも 0.09 cm²/min 位になる。また, α の測定値としては, サツマイモについて¹¹⁾, 30~70°C において 0.06~0.11 cm²/min という報告がある。これらは, Table 1 に得られている結果にほぼ近い値である。

含水率の大きい食品の熱拡散率 α の値が, ほぼ 0.1 cm²/min となることから, $\alpha=0.1$ cm²/min と固定し, 試料の半径が変わった場合に中心温度がどのような経時変化をするかを示したのが Fig. 6 である。試料半径が半分になると, 無次元温度 Y_c が 0.5 に到達する時間が約 1/3 に, また, 0.1 位に到達する時間が約 1/4 になることが分かる。

Fig. 6 Central temperature history in spherical material of $\alpha=0.10$ cm²/min for various values of radius

試料の半径 R の値を 1.5~2.0 cm 以上として, 温度変化を測定して α の値を求めるとよいことから, $R=2.0$ cm と固定し, α の値が変わった場合に温度がどのように経時変化をするかを示したのが Fig. 7 である。実線は中心点における温度変化を示す曲線である。半径 2.0 cm の試料を作り, 中心温度がどのような経時変化を示すかを測定し, Fig. 7 を利用すると, 簡単に α の値の概算値を求めることができる。破線は, 参考として中心と表面の間点における温度変化を示した曲線である。測定点の位置がずれると, α の値が大きくばらつく恐れがあることが分かる。

α の値を概算するには, Fig. 1 を用いるよりは Fig.

Fig. 7 Temperature history in a spherical material of $R=2.0$ cm for various values of thermal diffusivity

7 のような図を作成しておくのが便利である。精度よく求めるには, 本報で示した非線形最小二乗法を用い, デジタル計算機を利用する方法がよい。計算機を利用する方法は, 実験データが精度よく得られた場合, α の値を $\alpha=at+b$ などのように温度の関数式としておいて求めていくことが容易となる特徴がある。また, 熱媒体の温度が経時変化をしても, その温度変化を測定しておけば α の値は簡単に求められる特徴もある。

要 約

前報¹¹⁾において, 薄片の根菜類系食品のクッキング速度に関する研究を行ってきた。試料が大きくなると伝熱律速になると考えられ, クッキング装置設計のためには, クッキング速度パラメータ以外に熱拡散率を求めておくことが必要となる。

本報では, 球状根菜類系食品の熱拡散率の測定を行った。半径 1.5~2.0 cm の試料を用い, 温度の経時変化を熱電対で測定し, 熱拡散率 α の値を求めた結果, ジャガイモ, サツマイモ, ニンジン, ダイコンにおいて, それぞれ 0.097, 0.101, 0.103, 0.101 cm²/min となった。

生試料と加熱処理試料についての比較などを行なったが, 差異がみられなく, ジャガイモ, サツマイモの α 化は, 大きな吸熱を伴っていないと考えられた。

文 献

- 1) KUBOTA, K., OSHITA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.: *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.* **17**, 97 (1978).
- 2) 久保田清・高崎かほる・藤本真紀子・鈴木寛一・保坂秀明：日食工誌，**27**，157 (1980).
- 3) 山田豊一：農化，**44**，587 (1970).
- 4) RANZ, W.E. and MARSHALL Jr, W.R.: *Chem. Eng. Progr.*, **48**, 141, 173 (1952).
- 5) 化学工学協会編：化学工学便覧，改訂4版，(丸善)，p. 287, 267, 264 (1978).
- 6) WILLIAMSON, E.D. and ADAMS, L.H.: *Phys. Rev.*, **14**, 99 (1919).
- 7) GURNEY, H.P. and LURIE, J.: *Ind. Eng. Chem.*, **15**, 1170 (1923).
- 8) 久保田清・鈴木寛一・保坂秀明：食品工業，**20** (16)，60 (1977).
- 9) 久保田清・大西博司・本慶忠敬・宮原浩明：食品工業，**22** (20)，73 (1979).
- 10) 編集委員会編：食品科学便覧，(共立出版)，p. 228, 245, 254 (1978).
- 11) WADSWORTH, J. I. and SPADARO, J. J.: *Food Technol.*, **23**, 219 (1969).

(昭和55年7月15日受理)