

揚げ加熱中の食品の伝熱

長尾慶子

はじめに

我々は調理において加熱することにより食品を可食状態にするが、その食品の状態を解析するには伝熱、特に熱伝導を調べる必要がある。どれ位の温度でどれだけ加熱すれば可食状態になるのか、あるいはそのときの食品の硬さや強さはどうなるのか等が伝熱を調べることにより判明する。揚げ加熱状態は、周囲温度（油の温度）を一定とすることにより、比較的容易に解析出来る。その場合に、熱伝導率や比熱などの物性値を求めることが重要になるが、これは割に難しい。なぜなら周囲条件をコントロールすることが難しいためである。

ここではまず成書を参考にして、食品加熱時の伝熱現象を一般論として述べ、その中で揚げ加熱中の伝熱現象の最も代表的な例として、一定温度の油の中に置かれた球状食品の熱伝導の解を引用し、これを元に中心部、及び表面の温度変化を示した。さらに熱伝導率、温度伝導率及び比熱の測定法について述べ、揚げ加熱中の食品の熱伝導の解を用いて、ドーナツ及びコロケの場合に応用した結果を報告する。

伝熱理論及び実験方法

1. 食品の熱伝導

あらゆる固体は次の熱伝導方程式を満たす。

$$\rho c \cdot \partial T / \partial t = (\partial / \partial x) (\lambda \cdot \partial T / \partial x) + (\partial / \partial y) (\lambda \cdot \partial T / \partial y) + (\partial / \partial z) (\lambda \cdot \partial T /$$

$$\partial z) + A \dots \dots (1.1)$$

ただし、 λ : 熱伝導率 ($W / (m \cdot K)$)

ρ : 密度 (kg / m^3)

c : 比熱 ($J / (kg \cdot K)$)

A : 発熱量 (W / m^3)

T : ある基準から測った温度 ($^{\circ}C$)

である。

これは、単位体積内のこの物質中に流入する熱量と発熱量が、この物質のその部分の温度上昇をもたらすことを示す式である。

一般には発熱量 A は 0 としてよく、また λ もある瞬間にはほぼ一定かつ一様とみなしてよいので、その場合には上の方程式は次のように書くことができる。

$$\partial T / \partial t = a (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) \dots \dots (1.2)^{1)}$$

ただし、 $a = \lambda / \rho c$ (m^2 / s) は熱拡散率または温度伝導率と呼ばれる。

この方程式を解くと、あらゆる場所でのあらゆる時刻における温度分布がわかる。しかし、これを解くためには一般に初期条件（時刻 $t = 0$ における状態）及び境界条件（物質の周囲の境界での状態）が与えられなければ解くことは出来ず、またこれらが与えられても複雑で解けない場合が多い。

そこで、ここではまず完全に解が求められている半径 R の球の場合について考えてみる (Fig. 1)。

この場合内部の温度 T 、油温（周囲温度）を T_0 とすると、任意点 r ($0 \leq r \leq R$) の温度 T は

$$T = T_0 + (2RT_0 / \pi r) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (1/n) \sin(n\pi r / R) \exp(-an^2\pi^2 t / R^2) \dots \dots (1.3)^{1)}$$

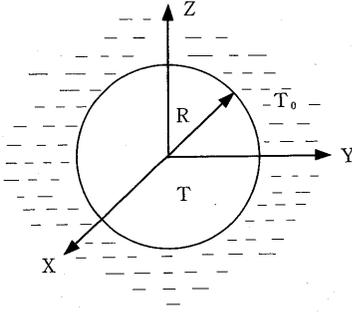


Fig. 1 Sphere with radius R in medium of temperature T_0 (const)

により与えられ、中心温度 T_c は

$$T_c = (RT_0 / (\pi at))^{1/2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-(2n+1)^2 R^2 / (4at)) \dots \dots \dots (1.4)$$
 で与えられる。

これを図示すればFig. 2のようになる。

そうすれば中心温度は

$$T_c = F(at/R^2) \dots \dots \dots (1.5)$$

とおくことができる。たとえば、

$$\begin{aligned} T_c &= 80^\circ\text{C} \text{で可食温度であるとする、} \\ T_0 &= 160^\circ\text{C, 初期温度} 20^\circ\text{C, } (T_c - T_1) \\ &/ (T_0 - T_1) = (80 - 20) / (160 - 20) \\ &= 3/7, \end{aligned}$$

このとき、

$$at/R^2 = C_0 \dots \dots \dots (1.6)$$

となるとすれば、

$$t = C_0 R^2 / a \dots \dots \dots (1.7)$$

にて可食状態となる。

球の場合はこのようになるのであるから、たとえばドーナツやコロッケのように球でない場合においては、

$$t = K_1 \cdot C_0 R^2 / a \dots \dots \dots (1.8)$$

ただし、 K_1 は形状に特有の定数(形状係数)であり、個々の実験より求められる。

2. 熱伝導率の測定

温度伝導率、熱伝導率は具体的な温度変化を解析する上に重要と考えられる。

熱伝導率は外から熱を受け取る能力であり、物体の熱伝導の良否を表す量である。一方、

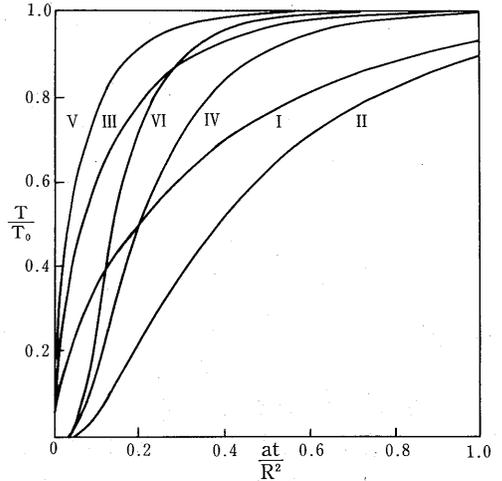


Fig. 2 Centre and average temperatures for a plate of thickness $2R$ (curves II and I); for an infinite circular cylinder of diameter $2R$ (IV, III); and for a sphere of diameter $2R$ (VI, V). Initial temperature zero and surface temperature T_0 (Ref. 1), p102)

温度伝導率は物体中で熱を伝える性能の良否を表すもので、温度の伝播の良否を表す量である²⁾。

以下にその測定法について述べる。

東京大学、伊藤光男氏製作の熱伝導率測定装置を借用して、ドウ生地及びコロッケ内容物の熱伝導率を測定した。測定装置の概略をFig. 3に示す。

下に熱源、上部に冷却装置をつけ、熱伝導率既知のシリコンゴムの平板と、未知の材料とを重ねさせて、それぞれの温度差から算出するものであり、この方法は熱量の測定が不用であるのと、中央部で測定するから簡単に正確なデータが得られるなど信頼度は高い。

以下に熱伝導率の算出式を示す。

$$\lambda_1 = \lambda_2 \cdot (S_1/S_2) \cdot (T_2 - T_3) / (T_1 - T_2) \dots \dots \dots (2.1)$$

ただし

- λ_1 : 未知の物質の熱伝導率(W/m·K)
- λ_2 : 既知の平板の熱伝導率(W/m·K)

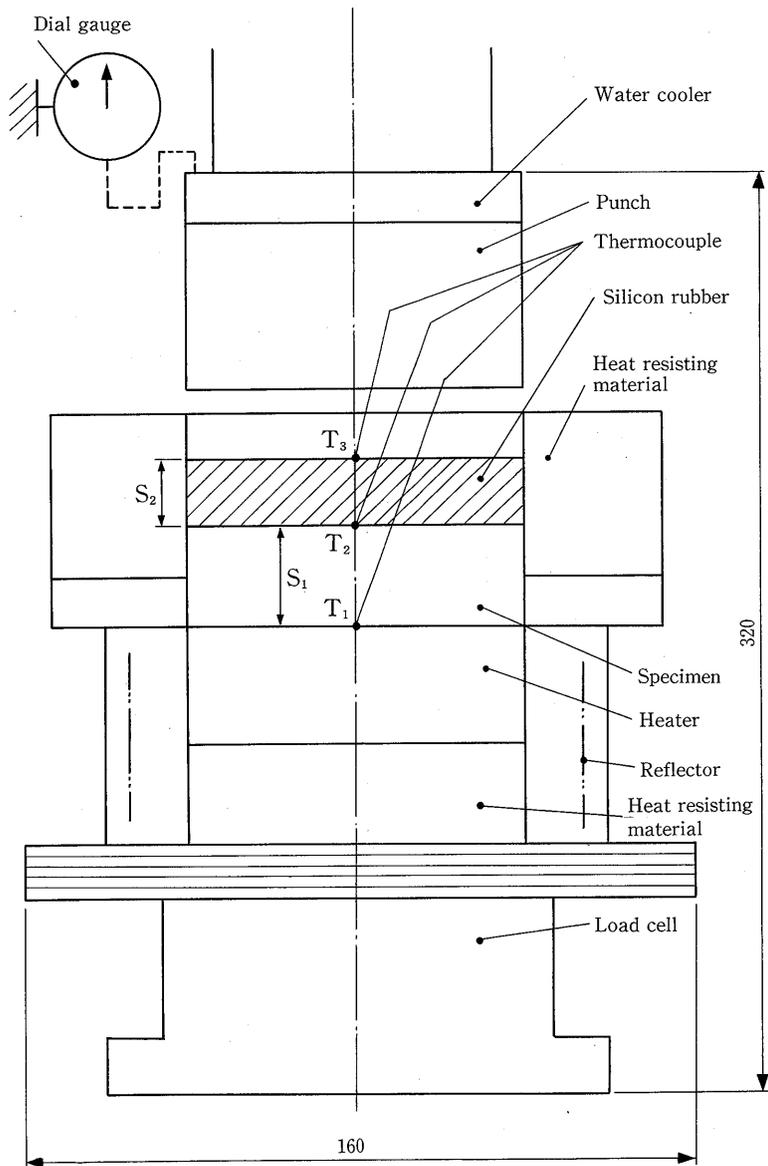


Fig. 3 Apparatus for measurement of thermal conductivity

T_2, T_3, T_1 : それぞれの温度($^{\circ}\text{C}$)

S_1, S_2 : それぞれの平板の厚さ(m)

である。

測定試料は調製後、0、1及び2時間放置後に測定した。

加熱温度は、 T_1 (熱源)の温度を 50°C 、 75°C

及び 100°C に設定したときの熱伝導率を測定比較した。

3. 熱流束の測定

加熱法の違いは、境界条件、特に熱伝達係数及び熱流束にその特徴が現れると考え、特に熱流束を詳しく測定することにした。その

測定の考え方及び方法について述べる。

熱流束とは単位面積当りの単位時間内での熱流量（熱の移動量）である。

以下にその求め方を示した。

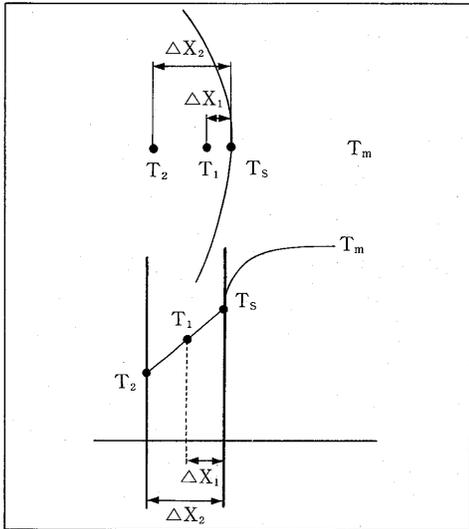


Fig. 4 Temperature distribution near the surface and heat flux.

ある面を通過する熱流束（単位面積当り，単位時間当りの熱の通過量） Q は

$$Q = -\lambda \cdot \partial T / \partial x \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (3.1)$$

（フーリエの法則）

で表される（ λ は熱伝導率）。

従って，Fig. 4のように表面温度 T_s ，表面より Δx 入ったところの温度が T_1 とすると，

$$\partial T / \partial x = (T_s - T_1) / \Delta x$$

として温度勾配が出る。したがって，熱伝導率がわかっておれば，

$$Q = -\lambda \cdot (T_s - T_1) / \Delta x \dots\dots\dots (3.2)$$

として熱流束が求められる。

しかし，表面の温度そのものは測定が難しいので，表面から Δx_1 の深さの温度 T_1 （ここでは1 mm）と，表面から Δx_2 の深さの温度 T_2 （ここでは3 mm）を測定するとすると，

$$Q = \lambda \cdot (T_1 - T_2) / (\Delta x_1 - \Delta x_2) \dots\dots\dots (3.3)$$

として熱流束を求めることが出来る。

なお，表面の温度 T_s は

$$\begin{aligned} T_s &\doteq T_1 - \{(T_1 - T_2) / (\Delta x_1 - \Delta x_2)\} \Delta x_1 \\ &\doteq (T_1 \Delta x_2 - T_2 \Delta x_1) / (\Delta x_1 - \Delta x_2) \\ &\dots\dots\dots (3.4) \end{aligned}$$

として推定できる。

表面の熱伝達係数， α の求め方は以下のようにして算出する。

単位面積当りの熱流入量 Q は

$$\begin{aligned} Q &= \alpha (T_m - T_s) \\ &= -\lambda (T_1 - T_2) / (\Delta x_2 - \Delta x_1) \dots\dots\dots (3.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= -\lambda (T_1 - T_2) / (\Delta x_2 - \Delta x_1) \\ &\div (T_m - T_s) \dots\dots\dots (3.6) \end{aligned}$$

となるのでそれぞれ実験データを代入して求める。ただし T_m は周囲温度である。

4. 温度伝導率の測定

半径 R の試料を一定温度 T_0 。（たとえば，180℃の油中，試料の初期温度を0とする，たとえばこれが20℃なら， $T_0 = 180 - 20 = 160^\circ\text{C}$ ）で加熱し，その中心温度の変化を計測する。

これをFig. 2の理論式と対比する。

中心温度 T_c が

$$T_c / T_0 = F(at / R^2)$$

として表されているとする。もし， $t = 1$ 分，2分，3分における T_c の値をそれぞれ， T_{c1} ， T_{c2} ， T_{c3} とすれば，これは実験で求められる。

これを理論曲線にあてはめて，

$$T_{c1} / T_0 = F(at_1 / R^2),$$

$$T_{c2} / T_0 = F(at_2 / R^2),$$

$$T_{c3} / T_0 = F(at_3 / R^2)$$

とおいて， a をそれぞれ求める。

つまり，Fig 2から， T_{c1} ， T_{c2} ， T_{c3} に相当する at / R^2 を求める。

この時， $t = 1$ 分，2分，3分であり， R は既知であるから，それぞれの a の値が計算できる。

そのときのそれぞれの値を a_1 ， a_2 ， a_3 とする。

$$a = (1/3) \cdot (a_1 + a_2 + a_3) \text{ として，この3つ}$$

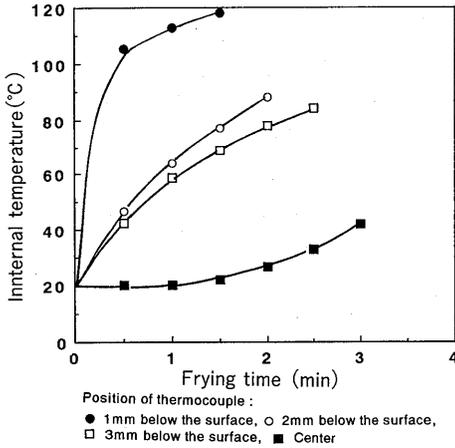


Fig. 5-1 Inner temperature of a croquette during frying

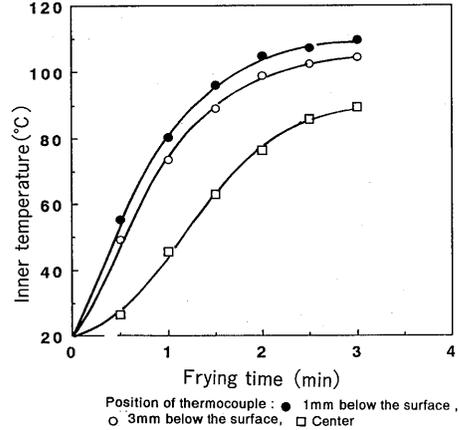


Fig. 5-2 Inner temperature of a doughnut during frying

の値の平均値をaの値とすればよい。

cの直接測定は熱の遮断などのコントロールが難しいので以下のようにして算出する。

$a = \lambda / \rho c$ なので、 $c = \lambda / \rho a$ として比熱cを逆算するとよい。

実験結果及び考察

1. 内部温度測定結果

ドーナツ及クロquetteの揚げ加熱中の内部温度結果をFig. 5-1~Fig. 5-2に示した。

中心部のほかに表面から1mm, 2mm, 3mm内側部の経時変化を示した。

2. 熱伝導率測定結果

Table 1に熱源温度を変えて測定した結果を示した。

また圧力がかかっている状態 (37gf/cm²)での熱伝導率を設定温度別にグラフに示した (Fig. 6)。熱伝導率はある物質の物性値を示すものであるが、そこに含まれる分子の動きやすさ、すなわち温度により変化していることが分かる。

3. 温度伝導率及び比熱の算出

- 1) ドーナツ試料Aの場合: $R=10\text{mm}$,
 $=0.01\text{m}$, $T_s=160^\circ\text{C}$, $T_0=20^\circ\text{C}$, $T=90^\circ\text{C}$ のとき,
 $Y = (T - T_0) / (T_s - T_0)$

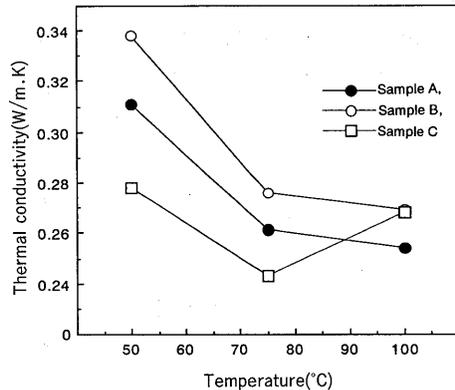


Fig. 6 Thermal conductivity of doughnuts

$$= (90 - 20) / (160 - 20) = 0.5$$

このとき、 $t=180\text{s}$ (実験曲線から)
 理論曲線から、 $Y=0.5$ のとき、 $Z=0.14$,
 $Z = at / R^2 = 0.14$

$$a_1 = R^2 Z / t = 0.01^2 \times 0.14 / 180 \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$= 7.8 \times 10^{-8} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$T=75^\circ\text{C}$ のとき、同様にして、 $a_2 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$

$T=45^\circ\text{C}$ のとき、同様にして $a_3 = 1.3 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$

$T=39^\circ\text{C}$ のとき (50s), 同様にして $a_4 = 1.4 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$

$T=27^\circ\text{C}$ のとき (30s), 同様にして $a_5 = 2.0$

Table I Measured thermal conductivity

Croquettes	Heater temp.	(°C)	50	75	100	125
	Thermal conductivity (W/(m·K))		0.679	0.723	0.808	0.264
	(cf. Water ²⁾)		0.642	0.664	0.682	(vapour, 0.0235)
Doughnut A						
butter, sugar, egg, milk, flour (%)		①	0.298	0.266	0.256	
0 19.42, 10.79, 13.14, 55.0		②	0.323	0.255	0.252	
		③			0.282	
		④			0.283	
		⑤			0.280	
Doughnut B						
butter, sugar, egg, milk, flour (%)		①	0.325	0.270	0.271	
5.0, 8.47, 7.48, 17.25, 60.0		②	0.353	0.281	0.267	
		③			0.295	
		④			0.280	
		⑤			0.276	
Doughnut C						
butter, sugar, egg, milk, flour (%)		①	0.278	0.237	0.265	
10.0, 17.98, 12.72, 7.81, 50.0		②	0.278	0.248	0.270	
		③			0.289	
		④			0.281	
		⑤			0.255	

- ① : Pressed by the weight of attachment of apparatus, 1hr, after frying. ② : Ditto, 2hr after frying
 ③ : Without pressure, 1hr after frying. ④ : Ditto, 2hr after frying ⑤ : Just after adjustment
 ①② : Pressed by the total weight of the attachment of apparatus 1073g (37g/cm²)
 ③④ : Without the pressure, only pressed by the weight of dialgauge 268g (9.9g/cm²)

$$\times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$a = \lambda / \rho c$ から c (比熱) を求めるのであるが、試料B及びCが、70秒以降は亀裂を生じて測定不能であるため、3試料共同時間帯のデータで平均することにした。

$$a = 1.6$$

$\lambda = 0.31 (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$: 50°Cの実験値平均

$$\rho = 1.02 (\text{g}/\text{cm}^3) = 1.02 \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$c = \lambda / a\rho = 0.31 / (1.6 \times 10^{-7} \times 1.02 \times 10^3) = 1.90 \times 10^3 (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})) = 1.9 (\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$$

2) ドーナツ試料Bの場合：亀裂が生じるので、70s, 50s, 30sの3点を計算した。

$$R = 10\text{mm}, = 0.01\text{m}, T_s = 160^\circ\text{C}, T_o = 20^\circ\text{C},$$

$$T = 55^\circ\text{C}$$

$$\text{のとき}, Y = (T - T_o) / (T_s - T_o) = (55 - 20) / (160 - 20) = 0.25$$

このとき、 $t = 70\text{s}$ (実験曲線から)

$$\text{理論曲線から}, Y = 0.25 \text{ のとき}, Z = 0.094, Z = at / R^2 = 0.094$$

$$a_1 = R^2 Z / t = 0.01^2 \times 0.094 / 70 (\text{m}^2/\text{s}) = 1.3 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$T = 42^\circ\text{C} \text{ のとき (50s), 同様にして}, a_2 = 1.6 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$T = 30^\circ\text{C} \text{ のとき (30s), 同様にして}, a_3 = 2.1 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$a_1, a_2, a_3 \text{ を平均して}, a = 1.7 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$\lambda = 0.34 (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$: 50°Cでの実験値平均

$$\rho = 0.96 (\text{g}/\text{cm}^3) = 0.96 \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$c = \lambda / a\rho = 0.34 / (1.7 \times 10^{-7} \times 0.96 \times 10^3) = 2.08 \times 10^3 (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})) = 2.08 (\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$$

3) 試料Cの場合：

$$R = 10\text{mm}, = 0.01\text{m}, T_s = 160^\circ\text{C}, T_o =$$

$$20^\circ\text{C}, T = 50^\circ\text{C}$$

$$\text{のとき}, Y = (T - T_o) / (T_s - T_o) = 50 - 20 / 160 - 20 = 0.21$$

このとき、 $t = 70\text{s}$ (実験曲線から)

$$\text{理論曲線から}, Y = 0.21 \text{ のとき}, Z = 0.085, Z = at / R^2 = 0.085$$

$$a_1 = R^2 Z / t = 0.01^2 \times 0.085 / 70 (\text{m}^2/\text{s}) = 1.2 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$T = 38^\circ\text{C} \text{ のとき (50s), 同様にして}, a_2 = 1.5 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$T = 30^\circ\text{C} \text{ のとき (30s), 同様にして}, a_3 = 2.1 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$a_1, a_2, a_3 \text{ を平均して}, a = 1.6 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$\lambda = 0.278 (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$; 実験値平均

$$\rho = 1.11 (\text{g}/\text{cm}^3) = 1.11 \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$c = \lambda / a\rho = 0.278 / (1.6 \times 10^{-7} \times 1.11 \times 10^3) = 1.57 \times 10^3 (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})) = 1.57 (\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$$

以上の温度伝導率 a の時間変化をFig. 7に示すと、経時的に少なくなっていることが分かる。

これは外側部分で油と水の交代が起こり物性が変わるので、熱が中まで伝播するのが遅くなったためと考えられる。実験結果から亀裂は0.5~1分付近で起きているので、正確な内部温度測定が出来る50~30°C付近の温度伝導率を算出した。

またこの測定装置は物質の温度変化に対応した膨張量もダイヤルゲージで測定出来るようになっているので、その経時変化をFig. 8に示した。

これは1kgの重量(37gf/cm²)がかかっている場合で、熱源温度を100°Cに設定して実験を開始してから、実験終了1時間までのデータである。揚げ加熱中に外側が硬化していく場合、内部は膨張が抑えられて圧力がかかっているのと同じ状態であるので、圧力ありの方が膨張の様子は実際とよくあっているかと

思われる。

4) コロッケの場合

$R = 15\text{mm}, = 0.015\text{m}, T_s = 180^\circ\text{C}, T_o = 20^\circ\text{C}, T = 27^\circ\text{C}$ のとき,

$$Y = (T - T_o) / (T_s - T_o) = (27 - 20) / (180 - 20) = 0.04$$

このとき, $t = 120\text{s}$ (実験曲線から)

理論曲線から, $Y = 0.04$ のとき, $Z = 0.047$,

$$Z = at / R^2 = 0.047$$

$$a_1 = R^2 Z / t = 0.015^2 \times 0.047 / 120 \text{ (m}^2/\text{s)} = 0.88 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$T = 41^\circ\text{C} \text{ のとき (180s), 同様にして, } a_2 = 0.88 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$T = 65^\circ\text{C} \text{ のとき (240s), 同様にして, } a_3 = 0.94 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$a_1, a_2, a_3 \text{ を平均して, } a = 0.90 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$\lambda = 0.679 \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$: 50°C での実験値平均

$$\rho = 1.063 \text{ (g/cm}^3) = 1.063 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3)$$

$$c = \lambda / a\rho = 0.679 / (0.9 \times 10^{-7} \times 1.063 \times 10^3) = 7.1 \times 10^3 \text{ (J/(kg}\cdot\text{K))} = 2.08 \text{ (kJ/(kg}\cdot\text{K))}$$

コロッケは水分が83%もあるのでドーナツに比べて熱伝導率も大であるが, 形状からドーナツに比べて内部温度の上昇が遅いので温

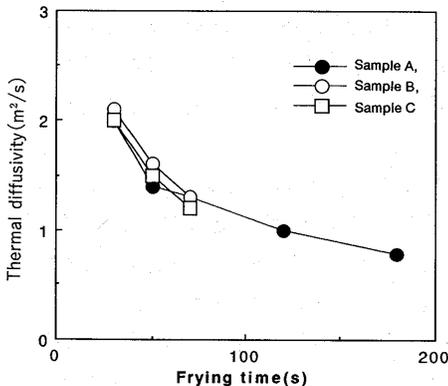


Fig. 7 Thermal diffusivity of doughnuts

度伝導率が小さくなっている。比熱はドーナツの比熱の3倍程度も大であった。

4. 熱流束, 表面温度及び熱伝達係数の算出

1) ドーナツの場合

各温度に対応させた熱伝導率を用いて算出した結果を表2-1に示した。但し50~75°C間及び75~100°Cの間の熱伝導率値はそれぞれ比例式により算出した値を用いた。

2) コロッケの場合

同様にして熱流束及び熱伝達係数をもとめた(表2-2)。

揚げ加熱中に水分と油の交代が起こるが, 水分が急膨張して蒸気になる際に, 食品のまわりの油の対流を強制的に引き起こすような働きをしていると考えられ, そのために熱流束が大きくなると考えられる。コロッケはドーナツに比べて水分量の多い食品であるためその働きがより大となり熱流束が大きくなったものと考えた。

ドーナツの場合, ヌセルト数が2に近いということは, 揚げ加熱中の油の流れが自然対流に近い静かな流れであることを示している。一方, コロッケの揚げ加熱中における場合はヌセルト数が大きいので, 油の動きは強制対流に近い激しい動きをすることが分かる⁴⁾。これは水分量を多く含むコロッケの場合, 油

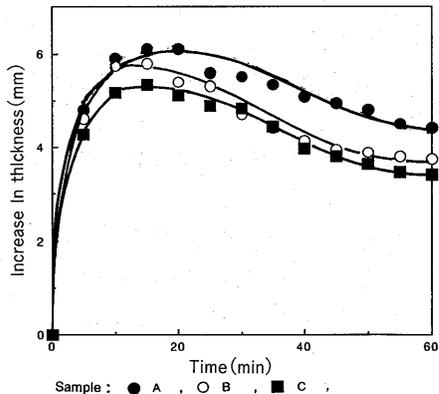


Fig. 8 Changes of increase in thickness of specimen in the measurement of thermal conductivity.

と交代した水分が急速に蒸発し激しい対流を引き起こしたものと考えられると先に述べたが、熱流束や熱伝達係数の違いがヌセルト数の違いからもうなずける。

5. 形状係数の検討

1) ドーナツの場合

可食温度を80℃と設定した場合の球状の T/T_0 : $((80-20)/(160-20)=0.43)$ の $at/R^2=C_0=0.125$ を Fig. 2 より求めた。

ただし、 C_0 は可食時間の無次元表示であり、Fig. 2 の T/T_0 に相当するグラフ上の横軸の値である。

実際のドーナツの形状係数を K_1 としたとき、

$at_0/R^2=K_1C_0$ 、で示される。

よって、 $K_1=at_0/R^2$

この式に、実際の揚げ加減中のドーナツの温度変化より80℃となる時間 $t_0=90s$ 、その時間でのドーナツリング半径（長径と短径の平均値） $R=9.78$ (試料A), 10.97 (試料B), 10.47 (試料C), $a=1.3$ を代入して平均の形状係数 $K_1=1.30 \times 10^{-7} \times 90 / (10.4 \times 10^{-3})^2 \times 0.125=0.87$ を得た。ドーナツの場合、加熱初期において内側に亀裂するので中心部が早く暖まりやすいと考えられる。

2) コロケの場合

コロケ内容物は事前に加熱済みであるので可食温度を70℃と設定した。

表 2-1 熱流束及び熱伝達係数の算出結果—ドーナツの場合—

揚げ時間(s)	30	60	90	120	150	180
熱流束 (W/m ²)	0.832×10^3	0.871×10^3	0.786×10^3	0.717×10^3	0.578×10^3	0.558×10^3
表面温度(℃)	58.2	83.8	99.2	108.0	109.8	111.8
温度差(℃)	101.8	76.2	60.8	52.0	50.2	48.2
熱伝達係数 (W/(m ² ·K))	8.2	11.4	12.9	13.8	11.5	11.6
ヌセルト数	1.41	1.94	2.20	2.36	1.96	1.99

($Nu=\alpha \cdot d/\lambda'$)、但しヌセルト数 Nu (無次元数) を計算するにあたり、 α は熱伝達係数 (W/m²K)、 λ' は油の熱伝導率 0.117W/mK、 d は球形試料の直径 $2 \times 10^{-2}m$ を用いた。

表 2-2 熱流束及び熱伝達係数—コロケの場合—

揚げ時間(s)	30	60	90	120
熱流束 (W/m ²)	3.0×10^3	3.4×10^3	5.4×10^3	6.8×10^3
表面温度(℃)	56.0	73.0	93.0	108.0
温度差(℃)	124	107	87	72
熱伝達係数 (W/(m ² ·K))	53.8	46.6	58	63
ヌセルト数	13.8	12.0	14.8	18.8

($Nu=\alpha \cdot d/\lambda'$)、但し α は熱伝達係数 (W/m²K)、 λ' は油の熱伝導率 0.117W/mK、 d は試料直径 $3 \times 10^{-2}m$ を用いた。

$T/T_0 : (70-20)/(180-20) = 0.31$ である
ときの $at/R^2 = C_0 = 0.10$ を Fig. 2 より求めた。

実際の揚げ加熱中のコロッケの平均内部温度が 70°C となる時の、平均時間 $t_0 = 200\text{s}$ 、その時間でのコロッケ半径(長径と短径の2倍の平均値) $R = 15.8$ 、温度伝導率 $a = 0.9 \times 10^{-7}$ を代入して $K_1 = 0.9 \times 10^{-7} \times 200 / (15.8 \times 10^{-3})^2 \times 0.10 = 0.72$ を得た。

まとめ

熱伝導の理論式を実際の試料であるドーナツとコロッケに応用して、加熱中の温度上昇に対応させた熱伝導率を測定し、併せて揚げ加熱中の内部温度の測定結果から温度伝導率、熱流束、熱伝達係数等の物性値を算出した。

1) 一般に温度上昇につれて熱伝導率が小さくなるのはその間に水分が蒸発して組成が変化するものと思われた。特に 50°C から 75°C の間の変化が大であった。

2) ドーナツの場合、材料配合による熱伝導率に違いが見られ、 100°C に近づくとつれ低い値に収束していった。

粉の多い $B(60\%) > A(55\%) > C(50\%)$ の順に熱伝導率が小となり、粉が少なくバター、砂糖、卵の多い試料 C が低い値となった。(ドーナツとしては C はきめが粗い製品である。)

3) コロッケは水分量が83%程度と多く存在しているため、熱伝導率は水に近い値でありしかも水のみの場合よりも大であった。

4) ドーナツ試料間の温度伝導率に差がみられなかったことは、ドーナツ内部での熱の伝播に差がないことを示している。

5) 熱流束や熱伝達率からみると、ドーナツよりもコロッケの方が大であるのは、含水量が多いため食品表面での水蒸気の発生量が多く、油の対流を強制的に引き起こすためと考えられる。

終わりにあたり、熱伝導率測定に際し、終始懇切なる御指導をいただきました東京大学伊藤光男氏、並びに試料調製に協力いただきました佐藤智美さんに厚くお礼申し上げます。

<引用文献>

- 1) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. :Conduction of Heat in Solids, Oxford, p233 (1959)
- 2) 日本機械学会編：機械工学便覧A 6, p96 (1985)
- 3) 日本機械学会編：機械工学便覧A 6, p178(1985)
- 4) 日本機械学会編：機械工学便覧A 6, p121-126 (1985)

参考文献

- 1) 横掘進, 久我修共訳：ギート著基礎伝熱工学, 丸善 (1962)