

# 講 座

## 加 熱 調 理 (II)

——加熱すると熱はどのように伝わり、  
温度はどのように上昇するか——

飯 渕 貞 明\*

今までの議論で、加熱という操作でなぜ温度が上がるのかわかりました。次の問題は、それぞれの加熱方法（前号の 2-1, 2, 3）によって、熱源から食品にどのように熱が伝わるのかということです。それがわかると最後の問題は、伝わった熱エネルギーによる温度の上昇のしかたということになります。加熱調理という表題からすれば、温度が上ると食品成分がどのように物理的・化学的变化をして、それが味、香り、色、栄養、食感とどう係ってくるかという問題につながらなければならないのですが、はじめにお断りしたように、その点は私の任ではありませんので本稿ではふれません。

### 1. 流体 $\longleftrightarrow$ 固体間の熱移動による加熱

流体 $\longleftrightarrow$ 固体間の熱移動は最もよく使われる加熱調理法です。流体と固体のどちらが高温でも同じことですから、仮に流体が高温で  $T_f$  [°C]、固体表面が低温で  $T_s$  [°C] とします。前述したように両者の温度差が大きい程効率よく熱が移動するので、 $t$  秒間に流体から面積  $S$  [m<sup>2</sup>] の固体表面に移動した熱量  $Q$  [J] は次のように表わすことができます。

$$Q \propto S(T_f - T_s)t \quad (1)$$

比例定数を  $h$  [J/(m<sup>2</sup>·°C·s)] とすれば

$$Q = hS(T_f - T_s)t \quad (2)$$

あるいは 1m<sup>2</sup>、1 秒間当りの熱移動量を  $q$  [J/(m<sup>2</sup>·s)] とすれば

$$q = Q/St = h(T_f - T_s) \quad (3)$$

(2), (3) 式が流体 $\longleftrightarrow$ 固体間の熱移動の関係式です。比例定数

$h$  を熱伝達率とか伝熱係数と言います。よく似た語に、後に出てくる固体内熱移動の係数としての熱伝導率がありますが、これと混同しないで下さい。

熱伝達率  $h$  は厄介な値で、流体の性質だけでは決まりません。固体表面にどれくらいの割合で流体分子がぶつかるかで決まるのです。従って  $h$  は流体の性質（粘度、比熱、熱伝導率、密度）、攪拌の強さ、固体表面の大きさや形などで大きく違ってきます。ですから  $h$  を正確に見積ることは容易ではありません。大変おお雑把なことを言いますと、沸騰している水とその中の固体食品表面の間の熱伝達率は 1~5 [kJ/(m<sup>2</sup>·°C·s)]、空気と食品で (1~10) × 10<sup>-4</sup> [kJ/(m<sup>2</sup>·°C·s)] くらいです。

さて、上の  $h$  の値はあまりにいいかげんですから、もう少しましな推定式を紹介しておきます。但し、この式を使っても  $h$  のオーダーの見当がつくくらいで、正確な値は実際の系を使って実測する以外ありません。まずヌッセルト数  $Nu$ 、プラントル数  $Pr$ 、グラスホフ数  $Gr$ 、

第1表 対流伝熱に関する物理量

| 記号      | 意 味             | 次 元                    | 100°C の時のおよその値       |                     |                      |
|---------|-----------------|------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
|         |                 |                        | 水                    | 油                   | 空 気                  |
| $h$     | 流体と食品表面間の熱伝達率   | J/m <sup>2</sup> ·s·°C | —                    | —                   | —                    |
| $D$     | 固形食品を最もよく代表する長さ | m                      | —                    | —                   | —                    |
| $k$     | 流体の熱伝導率         | J/m·s·°C               | 0.7                  | 0.1~0.2             | 0.03                 |
| $\rho$  | 流体の密度           | kg/m <sup>3</sup>      | 960                  | 900                 | 0.9~0.95             |
| $\mu$   | 流体の粘度           | kg/m·s                 | 2.8×10 <sup>-4</sup> | ~7×10 <sup>-4</sup> | 2×10 <sup>-5</sup>   |
| $C$     | 流体の定圧比熱容量       | J/kg·°C                | 4.2×10 <sup>3</sup>  | 2×10 <sup>3</sup>   | 1×10 <sup>3</sup>    |
| $\beta$ | 流体の体積膨張率        | °C <sup>-1</sup>       | 8×10 <sup>-4</sup>   | 7×10 <sup>-4</sup>  | 2.7×10 <sup>-3</sup> |
| $T_f$   | 流体の温度           | °C                     | —                    | —                   | —                    |
| $T_s$   | 固形食品の表面温度       | °C                     | —                    | —                   | —                    |
| $g$     | 重力加速度           | 9.8m/s <sup>2</sup>    | —                    | —                   | —                    |

\* 和洋女子大学

第2表 自然対流のa, b<sup>1)</sup>

| 系                  | 代表径   | Pr×Gr                            | a         | b    |
|--------------------|-------|----------------------------------|-----------|------|
| 円柱<br>(水平, 垂直)     | 直径    | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>8</sup> | 0.47      | 0.25 |
|                    |       | >10 <sup>9</sup>                 | 0.10      | 0.33 |
| 垂直壁                | 高さ    | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>8</sup> | 0.56      | 0.25 |
|                    |       | >10 <sup>9</sup>                 | 0.12      | 0.33 |
| 水平に置かれた<br>四角い板の上面 | 一辺の長さ | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>8</sup> | 0.54      | 0.25 |
|                    |       | >10 <sup>9</sup>                 | 0.14      | 0.33 |
| 垂直壁の間を流体が流れるとき     | 壁間距離  | <10 <sup>3</sup>                 | 1         | 0    |
|                    |       | 10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup> | 0.15      | 0.33 |
|                    |       | >10 <sup>6</sup>                 | 実測によって定める |      |

第3表 強制対流のa, b, c<sup>1)</sup>

| 系          | 代表径                     | a     | b   | c     |
|------------|-------------------------|-------|-----|-------|
| 円管内流れ      | 管径                      | 0.023 | 0.8 | 0.4   |
| 単一円管に直角な流れ | 管径                      | 0.26  | 0.6 | 0.3   |
| 流れに平行の平板   | Re<8×10 <sup>4</sup>    | 0.664 | 0.5 | 0.333 |
|            | Re>8×10 <sup>4</sup>    | 0.036 | 0.8 | 0.333 |
| 球と空気       | 17<Re<7×10 <sup>4</sup> | 0.37  | 0.6 | 0     |

レイノルズ数  $Re$  を次のように定義します。これらはいずれも無次元数で、その中に含まれている各記号の意味とおよその値は第1表にまとめて示すとおりです。

$$Nu \equiv hD/k \quad (4)$$

$$Pr \equiv C_p \mu / k \quad (5)$$

$$Gr \equiv D^3 \rho^2 g \beta (T_f - T_s) / \mu^2 \quad (6)$$

$$Re \equiv D \rho v / \mu \quad (7)$$

上の無次元数の間には次のような関係があります。

(1) 自然対流 (流体を攪拌しない) の場合

$$Nu \equiv hD/k = a(Pr \cdot Gr)^b \quad (8)$$

(2) 強制対流 (流体を攪拌する) の場合

$$Nu \equiv hD/k = a(Re)^b(Pr)^c \quad (9)$$

a, b, c の値<sup>1)</sup> は第2, 3表に示しました。定性的に言えば、流体の粘度が小さく、密度、比熱、熱伝導率が大きく、攪拌の程度が強ければ  $h$  が大きくなります。また(2), (3), (6)式で温度差  $T_f - T_s$  が時間と共に変化する場合には近似値として相加平均値  $(\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min})/2$  か対数平均値  $(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})/(2.3 \log \Delta T_{\max}/\Delta T_{\min})$  を使えばよいでしょう。

## 2. 赤外線による加熱

食品と赤外線源が向き合っていて、発射された赤外線はすべてお互いの表面に到達している場合を考えましょう。赤外線源はオープン壁、炭火、燃焼ガス、赤外線ヒーターなどですが、とにかく  $E_1$  という赤外線エネルギーを発射しているとします。食品自体も多少なりとも赤

第4表 熱放射率<sup>2)</sup>

| 物質     | 温度 [°C] | 熱放射率 $\epsilon$ [-] |
|--------|---------|---------------------|
| 水      | 0~100   | 0.95~0.96           |
| 氷      | 0       | 0.65~0.67           |
| 牛肉     | 常温      | 0.73~0.74           |
| 凍結乾燥牛肉 | "       | 0.75                |
| 酸化鉄    | 400~600 | 0.85                |
| 酸化銅    | 600     | 0.8                 |
| 磁器     | 常温      | 0.7~0.75            |
| 塗料 黒   | "       | 0.9                 |
| 白      | "       | 0.7~0.9             |

外線  $E_2$  を出していますから、食品が受け取るネットの赤外線エネルギー  $\Delta E$  は

$$\Delta E = E_{1 \rightarrow 2} - E_{2 \rightarrow 1} \quad (10)$$

ただし  $E_{1 \rightarrow 2}$  は  $E_1$  のうち食品に吸収されたエネルギーという意味です。 $E_{2 \rightarrow 1}$  も同じ。では  $E_{1 \rightarrow 2}$ ,  $E_{2 \rightarrow 1}$  はどれくらいの値でしょうか。

赤外線源がオープン壁や炭火といった固体の場合、その固体の温度が  $T_1$  [K] であれば固体表面からは  $1\text{m}^2$ , 1秒当り次式の電磁波エネルギーが発射されています。

$$E_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4 \text{ [kJ/m}^2 \cdot \text{s]} \quad (11)$$

この電磁波は殆どが赤外線領域ですから ( $\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  の  $\lambda_m$  をほぼ中心とした波長分布), ここでは単に  $E_1$  の赤外線が出ていると考えます。 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数で(12)式の値,  $\epsilon$  はそれぞれの固体表面に特有の定数で熱放射率と呼ばれ第4表の値を持っています。

$$\sigma = 5.68 \times 10^{-11} \text{ [kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4] \quad (12)$$

さて(11)式で表わされる赤外線が食品表面に到達すると一部は吸収されて熱に変わり、一部は反射されるのですが、その吸収率は食品の熱放射率  $\epsilon_2$  に等しいと考えてよい。従って食品表面  $1\text{m}^2$  が1秒間に受取る赤外線エネルギーは

$$E_{1 \rightarrow 2} = \epsilon_2 E_1 = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma T_1^4 \quad (13)$$

食品自体も、その温度  $T_2$  に対応する赤外線を発散し、それが高温の壁面に吸収されているので、ネットの赤外線受取量  $\Delta E$  は

$$\Delta E = \epsilon_2 E_1 - \epsilon_1 E_2 = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (14)$$

ここで(3)式と(14)式を比べてみましょう。オープンでパンかビスケットを焼くとき、オープン壁も空気も  $200^\circ\text{C} = 473\text{K}$ , 食品表面を  $100^\circ\text{C} = 373\text{K}$  とします。空気から(3)式に従って対流伝熱で食品に伝えられる熱量  $q$  は

$$q = h(473 - 373) = 100h \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \quad (15)$$

オープン壁からの赤外線は

$$\Delta E = \epsilon_1 \epsilon_2 \times 5.69 \times 10^{-11} (473^4 - 373^4) \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \quad (16)$$

## 加熱調理(II)

今, 仮に  $h=1 \times 10^{-8} \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon_1=\epsilon_2=0.8$  とすると  
 $q=0.1 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s}$   
 $\Delta E=1.1 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s}$

となります。つまり熱放射で受取るエネルギーの方が、空気から受取る量より大きいのです。両者の差は  $T_1$  と  $T_2$  の差が開くと急激に大きくなります。高温のオーブン内では赤外線が加熱の主役だというわけです。

今の話は、まわりを高温壁にとり囲まれた食品という状況、あるいは高温壁から出る赤外線はすべて食品表面に到達するという場合の話ですが、一般には高温壁と食品は平行に向かい合ったり、斜めや直角に相対していたりします。その時は全赤外線が食品に到達するわけではありませんから、割引率を考えなければなりません。割引率はたとえば化学工学便覧(丸善)などに載っています。

次にガス炎からの赤外線です。結論から言えば、普通の調理条件ではガス炎からの赤外線は考慮しなくてもよいでしょう。一般に気体は赤外線に対して透明ですから( $\epsilon=0$ ) 気体からの熱放射はありません。しかし燃焼ガスは大部分  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  で、この両者は赤外領域に吸収帯がありますから、高温になるとその吸収帯で熱放射します。その波長は  $\text{CO}_2$  で 2.0, 2.7, 4.3,  $15\mu\text{m}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  で 1.4, 1.9, 2.7, 6.3,  $20\mu\text{m}$  です。ただ、その熱放射率は小さいので、通常の加熱調理の小さな炎では問題にしなくてよいのです。

最後は赤外線ヒーターです。これについては筆者は全く無知なのです。調理用の赤外線ヒーターがどのような波長の赤外線をどれくらいの割合で発射しているのか知りません(よく見かける細長くて赤くなる発熱体は、石英管内でタングステンが2500Kくらいになっているのだと聞いたことがあります。それだと  $1\mu\text{m}$  を中心にした赤外線になります)。それくらい家電会社で調べて来いとおっしゃるでしょうが、まあそれくらい読者の方で調べて下さい。そして、その赤外線の何割が食品表面に直接到達し、何割が壁を暖めたのち二次的に到達するのか、あるいは、どの波長の赤外線がどの調理に向くのかなどを調べて下されば、赤外線調理器具の発達に貢献するのではないのでしょうか。

## 3. 高周波、マイクロ波による加熱

前号の第2図をみて下さい。図は高周波加熱の模式図ですが、このとき食品内部で発生する熱量  $P$  は(15)式で与えられます。

$$P=(V/d)^2 f(S/d) \epsilon_r \tan \delta \quad (15)$$

但し  $P$ : 食品内部で発生する熱量  $[\text{J/s}]$

$V$ : 極板間電圧  $[\text{V}]$

$d$ : 極板間距離=食品厚み  $[\text{m}]$

$f$ : 周波数  $[\text{Hz}]$

$S$ : 極板(食品)面積  $[\text{m}^2]$

$\epsilon_r$ : 真空の誘電率  $8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$  を1としたときの食品の誘電率。周波数、食品組成、温度で変る。[-]

$\tan \delta$ : 損失タンジェント。食品をコンデンサーと考えると、かけられた電気エネルギーのうち食品成分(水分子)を電場の向きに配向させるために消費されたエネルギー(熱になる)と、それ以外のエネルギーの比。周波数、食品組成、温度によって変る。[-]

(15)式を見れば、 $P$  を大きくするためには  $V, f, S$  を大きくし、 $d$  を小さくすればよいことがわかります。しかし実際にはいろいろな制約があります。 $S$  と  $d$  は食品自体の形状で決まります。 $V/d$  をあまり大きくすると食品の絶縁を破って電流が流れるでしょう。 $f$  をむやみに大きくしても、食品内部の電気的雙極子の配向が追従できなくなるでしょう。そのようなわけで高周波加熱では  $V$  はせいぜい 15kV,  $d$  は絶縁が破れない程度、 $f$  は 27 MHz といったところです。 $\epsilon_r$  は温度や周波数で異なるのですが水78, 水の多い食品40~80, 油3, 空気1くらいです。食品の  $\tan \delta$  は 0.01~0.1 くらいかと思われませんが、私の不勉強のためにここに示すことができません。測定例がありましたら御教示下さい。

マイクロ波加熱は極板間に食品をはさむのではなくて、マイクロ波の充満している空間に食品を置くのです。そうするとマイクロ波は食品内に浸透しますから、食品内のある一点を見ると、その電場の向きや強さが変化する。その変化に同調できる分子が回転して、やはり(15)式に従って発熱するということになります。基礎式は(15)式ですが、マイクロ波は四方八方から食品内に浸透しているわけですから、電場の強さ( $V/d$ )や表面積  $S$ , 食品厚み  $d$  を高周波加熱の時のように明確にすることはできません。従って発生熱量  $P$  を(16)式のように考え、比例定数  $C$  をマイクロ波発生装置の出力(家庭用は 500~2kW), 容積, 内部の電磁波密度, 食品の大きさや形状等々の函数として把握するのが実用的ではないでしょうか。

$$P=Cf\epsilon_r \tan \delta \quad (16)$$

高周波加熱とマイクロ波加熱を比べると、後者にはいくつかの利点があります。まず  $f$  を大きくできるので発生熱量が大きい。 $\epsilon_r \tan \delta$  も  $f$  と共に大きくなるので、やはり  $P$  が大きくなる。食品の形や大きさが自由である等です。周波数  $f$  は大きい程よいとは言っても、水分子が

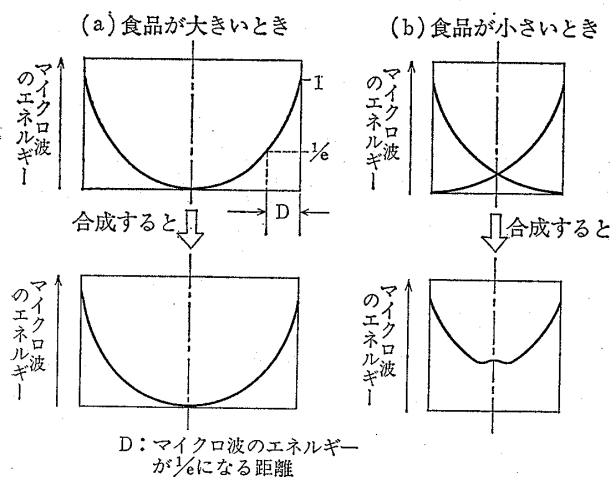
第5表 食品成分の双極子能率<sup>3)</sup>

| 物 質                              | 双極子能率 Debyeunit=1×10 <sup>-18</sup> Fr·cm |
|----------------------------------|-------------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O                 | 1.84                                      |
| CH <sub>3</sub> COOH             | 1.6                                       |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 1.7                                       |
| オリーブ油                            | 2.3                                       |
| Gly                              | 15                                        |
| di-Gly                           | 26                                        |
| tri-Gly                          | 32                                        |
| 蛋白質                              | 数 百                                       |

うまく追従して回転しなければならないし、通信の妨害になってもいけませんから、現在は2450MHz が許可されています。

2450MHz のマイクロ波が食品に当たると、そのエネルギーは食品内の水分や、水分子と双極子能率の似た分子に吸収されながら（回転させながら）減衰していきます。いくつかの物質の双極子能率を第5表に示しました。第5表をみると、酢酸、エタノール、油などは水分子と同程度の双極子能率ですから2450MHz のマイクロ波を吸収しますが、両性電解質のアミノ酸や蛋白質は吸収しないことがわかります。

さて、マイクロ波は上のような分子を回転させながら減衰して、大きい食品なら中心に到達する前にエネルギーを失います。その様子を模式的に第1図(a)に示しました。第1図は簡単のために食品の上下から入るマイクロ波は考えていません。(a)の場合は食品は周辺部から昇温することになります。食品が小さいときは第1図(b)のように周囲から入ったマイクロ波は重なりますから、それを合わせると中心もかなり高温になる。条件次第では中心部と周辺部が高温で、その中間が低温ということも起ります。食品のすべての場所で同じエネルギーの強さ



第1図 食品内部へのマイクロ波の浸透

第6表 マイクロ波の浸透深さ<sup>4)</sup>

| 物 質       | 温 度 [°C] | 浸透深さ* [cm] |
|-----------|----------|------------|
| 氷         | -12      | 780        |
| 水         | 1.6      | 0.6        |
|           | 35       | 1.8        |
|           | 75       | 3.2        |
|           | 95       | 4.8        |
| 牛肉 (赤身)   | 14       | 1.8        |
|           | -18      | 7.8        |
|           | -51      | 48         |
| 牛肉 (凍結乾燥) | -18      | 190        |
|           | 60       | 64         |

\* 2450MHz の電磁波のエネルギーが1/eに減衰する距離

という条件が実現できればよいのですが、そのような条件はたとえ存在するとしても、極めて不安定でしょうから実現不可能でしょう。しかし工夫によってはエネルギーの場所による違いを、ある程度の幅に納めることはできるかもしれません。そうなれば電子レンジによる調理が一段と進むわけです。

第1図(a)に示したマイクロ波の浸透深さ、即ち電磁波エネルギーが1/eになる距離  $D$  は(17)式で近似することができます。

$$D \approx \frac{\lambda}{2\pi(\epsilon_r \tan \delta)^{1/2}} \quad (17)$$

2450MHz の波長  $\lambda$  は 12.2cm ですから

$$D \approx 2/(\epsilon_r \tan \delta)^{1/2} [\text{cm}] \quad (18)$$

$D$  の実測例を第6表に示しました。先程食品の  $\tan \delta$  を 0.01~0.1 程度と言ったのは表の  $D$  と(18)式から逆算したのです。第6表を見ると氷は殆んどマイクロ波を吸収しないこと（氷の水分子は回転できない）、水の少ない乾燥食品も  $D$  が大きくなることがわかります。凍結食品を電子レンジにかけると、凍った部分があるにもかかわらず、一部の融けた部分は大変熱くなるというのはよく経験する所です。

#### 4. 加熱によって食品の温度はどのように上るか

##### 4-1. 平均温度の上昇——食品の比熱容量

ある食品  $W[\text{kg}]$  を前節のどれかの方法で加熱した結果、 $Q[\text{J}]$  の熱量が食品に移動し、食品温度が上昇したとします。この  $Q[\text{J}]$  で何度上昇するかという問題ですが、ミルクやスープのような液状食品なら攪拌して全体を均一の温度にして測れば何の問題もありません。固形食品では局部的に温度が異なりますから何度になったかと言われても困ります。そこで、固形食品内部の温度分布は次項で考えるとして、とりあえず平均温度が測れたとして話を進めます。

## 加熱調理(II)

まず食品の最初の平均温度が  $T_i$  [°C], 加熱後は  $T_e$  [°C] とします。この食品の持っている加熱前後の熱エネルギー  $E_i$  と  $E_e$  は前号の(2)式によれば

$$E_i \propto nT_i \quad (19)$$

$$E_e \propto nT_e \quad (20)$$

$$\therefore E_e - E_i = Q \propto n(T_e - T_i) \quad (21)$$

分子数  $n$  は食品重量  $W$  に比例する筈ですから

$$E_e - E_i = Q \propto W(T_e - T_i) \quad (22)$$

比例定数を  $C_p$  と書けば

$$Q = C_p W(T_e - T_i) \quad (23)$$

(23) 式が与えられた熱量  $Q$  と温度上昇幅  $\Delta T = T_e - T_i$  の関係式です。 $C_p$  は食品によって決まった定数で比熱容量と呼ばれ、次元は J/(kg・°C) です。つまり、この食品 1kg を温度 1°C 昇温させる必要な熱エネルギーという意味を持っています。

前号の第1表にいくつかの食品成分の比熱容量が示してあります。大雑把に言って水 4.2, 氷 2.0, 蛋白質 1.3, 炭水化物 1.3, 融けている油脂 2.0, 凝固している油脂 1.6[kJ/(kg・°C)] と考えればよいでしょう。实在食品はこれらの食品成分の混合物ですが、混合物の比熱容量は成分の比熱容量の加重平均値と思えばよろしい。たとえば、水、蛋白質、炭水化物、脂質の重量分率がそれぞれ  $x^w, x^p, x^c, x^f$  の食品があるとすれば(但し  $x^w + x^p + x^c + x^f = 1$ )、この食品の比熱容量は、水や脂質の融点以上の温度では

$$C_p = 4.2x^w + 1.3(x^p + x^c) + 2.0x^f \quad \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad (24)$$

水も脂質も固化している温度では

$$C_p = 2.0x^w + 1.3(x^p + x^c) + 1.6x^f \quad \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad (25)$$

水や脂質の融点付近では潜熱のために、見掛け上比熱容量が大きくなります。水 $\longleftrightarrow$ 氷の潜熱は御存知のように 0°C で 334kJ/kg ですが、脂質の融点と融解潜熱は種類によってずいぶん差があります。第7表に、いくつかの食用油についての値を示しました。表からおよその見

第7表 食用油脂の融点と融解熱(およその値)<sup>6)</sup>

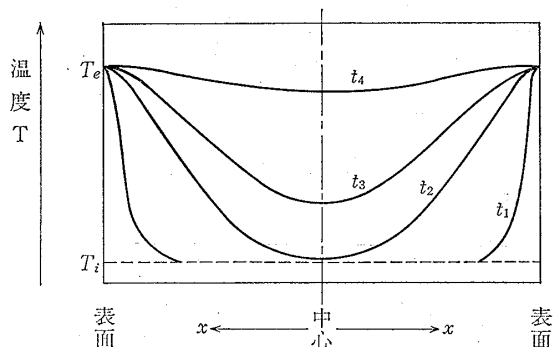
| 食用油脂  | 融点 [°C] | 融解熱 [kJ/kg] |
|-------|---------|-------------|
| 綿実油   | -18~-13 | 85          |
| ナタネ油  | -10~ 5  | 105         |
| ピーナツ油 | -30~ 10 | 150         |
| オリーブ油 | -15~ 10 | 125         |
| ココナツ油 | -14~ 22 | 190         |
| バター油  | -25~ 35 | 200         |
| ラード   | -20~ 50 | 210         |
| 水     | 0       | 334         |

当はつきますが、油脂の融解はある一定温度でシャープに起るわけではないので、油脂の多い食品の融点付近における見掛けの比熱容量が欲しいときは実測するのが確実です。

融解熱の外に比熱容量に関係する要因としては蛋白質の変性、デンプンの糊化、ペクチンの軟化、食品成分の水和、化学反応等々で発生、あるいは吸収されるエネルギーが考えられますが、調理の実用上はこれらのエネルギーもすべてコミにして、初期温度から最終温度までの平均比熱容量を使えばよいでしょう。

## 4-2. 固形食品の温度むら——熱拡散率, 熱伝導率

固形食品を加熱するとき、全体が様に昇温することはありません。熱水、油、加熱ガス、赤外線などの加熱方法でも、表面がまづ熱くなって、内部は遅れて昇温します。高周波やマイクロ波加熱では内部深くまでエネルギーは浸透しますが、それでも一様加熱は不可能で、必ず高温の部分と低温の部分ができます。高温部分と低温部分があれば、熱エネルギー、即ち分子の運動エネルギーは玉突き現象で高温部から低温部へ移動していきます。ですから、たとえば表面から中心に向って熱が伝わる場合の食品内部の温度プロファイルは第2図のようになっているに違いありません。



第2図 食品内部の温度プロファイル  
 $T_i$ : 初期温度,  $T_e$ : 最終温度  
時間  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$

食品のある一点に着目すると、時間  $t$  が進むにつれて温度  $T$  が上りますし、ある時間  $t$  をとってみると食品内の場所  $x$  が変れば温度も変わります。つまり温度  $T$  は場所  $x$  (一般には  $x, y, z$  の3方向) と時間  $t$  の関数です。

$$T = f(x, t) \quad (26)$$

この関数の形は、食品の形状が球、円筒、平板のように簡単な場合にはちゃんとわかっていて、任意の  $x$  と  $t$  を代入すればそれに対応する  $T$  が得られます。たとえば最も簡単な、熱が一方向にのみ流れる場合は(27)式を解けばよいのです。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (27)$$

食品の形がいびつな場合は、なるべくそれに近い簡単な

形状をあてはめれば近似的に $T$ を求めることができます。(27)式を解いた形は別の書物(たとえば, 平田光穂, 化学技術者のための数学, 科学技術社)をみて下さい。ここでは昇温速度  $\partial T/\partial t$  を左右する食品固有の値  $\alpha$  について説明します。(27)式をみると  $\alpha$  が大きければ昇温速度が大きく, 小さければ遅いことがわかります。この  $\alpha$  は熱拡散率(或は温度伝導率)と呼ばれ, 次元は  $\text{m}^2/\text{s}$  です。

$\alpha$  をもっと仔細に見れば次のようなことがわかります。 $\alpha$  が昇温速度を決めているのですから, 熱の伝わり易い食品(玉突き現象の起き易い)ほど  $\alpha$  は大きい筈です。また単位体積当りの比熱容量  $C_p\rho$  が大きければ, 熱が移動してきてもなかなか昇温しないでしょうから,  $\alpha$  は  $C_p\rho$  に反比例するでしょう。そこで, 熱の伝わり易さを表わしている値  $k$  が測定できたとすると  $\alpha$  は次式のようになります。

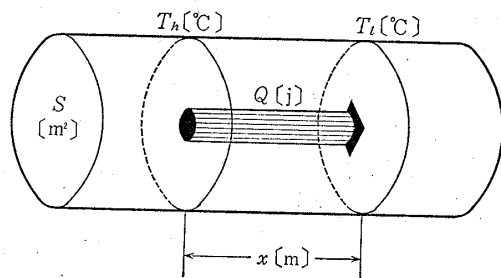
$$\alpha = k/C_p\rho \quad (28)$$

$C_p$  は前項で説明しました。 $\rho$  は密度ですから問題ありません。一応, 念のためいくつかの食品成分の密度を第8表に示しました。実在食品ではこれを  $C_p$  と同じように加重平均すればよろしい。

熱エネルギーの伝わり易さを表わす値  $k$  は熱伝導率と呼ばれ, 次のように定義されます。いま食品の高温部分(温度  $T_h$ ) から低温部分(温度  $T_l$ ) に向かって  $t$  秒間に熱量  $Q$  が流れたとすると,  $Q$  は温度差  $T_h - T_l$ , 伝達面

第8表 食品成分の密度

| 物 質           | 密 度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] |
|---------------|--------------------------------|
| 水             | 1000                           |
| 氷             | 900                            |
| 脂 肪           | 900~970                        |
| 炭水化物          | 1500                           |
| 蛋白質           | 1400                           |
| 空 気 (0~100°C) | 1.3~0.95                       |



第3図 固体内伝導伝熱

温度差  $T_h - T_l$ , 距離  $x$ , 面積  $S$ ,  
流れる熱量  $Q$   
 $Q = kS(T_h - T_l)t/x$

積  $S$  に比例し, 距離  $x$  に反比例する筈です。第3図をみて下さい。温度差が大きい程分子運動の激しさが違って、玉突きの前後の運動量の変化が大きいでしょし、面積  $S$  が大きい程, そこに並んでいてエネルギーのやり取りをする分子数が多くなりますし, 距離  $x$  が大きい程玉突き回数がふえて分子運動が減衰するからです。そこで  $Q$  は (29) 式で与えられます。

$$Q \propto S(T_h - T_l)t/x \quad (29)$$

比例定数を  $k[\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})]$  とすると

$$Q = kS(T_h - T_l)t/x \quad (30)$$

$1\text{m}^2$ ,  $1$  秒当りの熱移動量を  $q[\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  とすると

$$q = Q/St = k(T_h - T_l)/x \quad (31)$$

(30), (31) 式が固体内伝導伝達の関係式です。式からわかるとおり  $k$  が大きい程熱が伝わり易くなります。第9表にいくつかの食品成分と, 加熱調理に関係のある物質の熱伝導率を示しました。

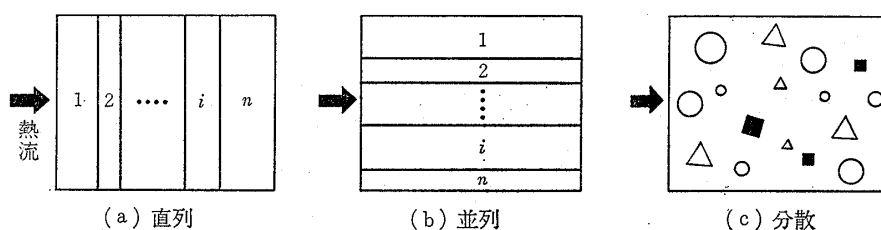
実在食品の熱伝導率が成分組成だけで決まると楽なのですがそうはいきません。たとえ同じ種類の分子が同じ割合で存在していても, その並び方によって分子運動の玉突き現象が起り易いかどうか違うからです。ここで2つの極端な場合を考えてみます。成分  $1, 2, 3, \dots, i, \dots, n$  が熱の流れに対して第4図(a)のように直列に並んでいる場合と, (b)のように並列に並んでいる場合です。このとき実効熱伝導率  $k_e$  はそれぞれ (32), (33) 式のようになります。ここで  $k_i$  は第  $i$  成分の熱伝導率,  $x_i^w$  と  $x_i^v$  は第  $i$  成分の重量分率と体積分率,  $\rho$  は食品全体の密度,  $\rho_i$  は第  $i$  成分の密度です。

$$\text{直列 } k_e = 1/\sum(x_i^v/k_i) = \rho/\sum(x_i^w/\rho_i k_i) \quad (32)$$

第9表 食品成分, 食品, 加熱調理器具材料の熱伝導率

| 物 質           | 熱伝導率 [ $\text{J}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ ] |
|---------------|------------------------------------------------------------------|
| 水             | 0.55~0.65                                                        |
| 氷             | 2.2~2.5                                                          |
| 蛋白質           | 0.2~0.3                                                          |
| 脂 質 (融けている)   | 0.17                                                             |
| 炭水化物          | 0.25                                                             |
| 畜肉・魚肉         | 0.4~0.5                                                          |
| 同 上 (凍結)      | 1.5                                                              |
| 野菜, 果実        | 0.4~0.5                                                          |
| 同 上 (凍結)      | 1~2                                                              |
| 空 気 (0~100°C) | 0.56~0.72                                                        |
| 水蒸気 (100°C)   | 0.55                                                             |
| ガラス           | 1.7                                                              |
| 陶 器           | 2.5                                                              |
| 鉄             | 140                                                              |
| 銅             | 920                                                              |
| アルミニウム        | 500                                                              |

## 加熱調理(II)



第4図 熱の流れと食品成分の配置

$$\text{並列 } k_e = \sum k_i x_i v = \rho \sum (k_i x_i w / \rho_i) \quad (33)$$

実際の食品では第3図(a),(b)のような成分配置は少なく、むしろ(c)のような状態に近いでしょう。实在食品の熱伝導率を推定する式は、理論式、経験式ともに大変たくさん提案されていますが、1つの式で全食品をカバーできるものはありません。そこで大体のことを言いますと、实在食品の  $k_e$  は(32)式と(33)式で得られた値の中間にくる、但し、どちらに近いかはその食品によると思えばよいでしょう。

以上のようにして  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $k$  が推定できれば、(27)式をとくことによって加熱時の温度分布を知ることができるわけです。とは言っても家庭における調理のように小さい食品の内部の温度分布を正確に予言することはまず不可能です。推算と実際の折り合いをどうつけるかということも調理科学の重要な問題でしょう。

## 5. 温度と食品の変化速度

この節はつけ足しの蛇足です。温度が上がると食品内部ではさまざまな物理的・化学的変化が起ります。これらの反応の反応速度は、反応系の物質の濃度に比例するのですが、そのときの比例定数(反応速度定数)はアレニウス式で近似できることが多いのです。

$$\begin{aligned} (\text{反応速度}) &= (\text{反応速度定数}) \\ &\times (\text{反応系の物質濃度}) \end{aligned} \quad (34)$$

$$(\text{反応速度定数}) = A \exp(-E/RT) \quad (35)$$

(35)式の  $A$ ,  $E$  は反応に固有の定数、 $R$  は気体定数です。そこで、いま注目している反応の  $A$ ,  $E$  がわかっていれば、ある温度  $T$  のときの反応速度定数がわかる。ひいては反応速度がわかるから加熱調理の進み具合がわかるということになります。このことについては前述のように本稿では触れませんが、実は加熱調理の最も重要なところはこの部分であることは言うまでもありません。

## 文 献

- 1) たとえば, J. B. Berennan et al., "Food Eng. Operations", 2nd ed., p.505, Appl. Sci. Publishers, London, 1976.
- 2) たとえば, 化学工学便覧, 4th ed., 丸善, 東京
- 3) たとえば, 実験化学便覧, 共立出版, 東京
- 4) 赤星, 食品工業, 5下, 13 (1967); 保坂 "食品工学入門", 化学工業社より
- 5) Cho-Kyun Rha, "Theory, Determinatn. and Control of Physical Properties of Food Materials", p.337 より推算, D. Reidel Publishing Co., Boston, 1975