

# 加熱調理における条件の簡単な近似について

## 第4報 表面状態の近似

中嶋 哲朗, 光藤 静子  
光森 女里, 石原 恒夫

### 1. はじめに

第2報および第3報で加熱調理については、試料の内部状態が熱的に簡単な形で近似し得ることを報告した。他の一つの同様な操作が表面附近の状態についても行なわれることが望ましいので、これに関して得られた二、三の結果をここに報告するが、実用に供する場合、技術的に多少問題が残されている点もあるので、御批判を願いたい。

実際に加熱調理を物理的な条件によつて近似するとき、どのような方法を用いるかが問題となる。最初に加熱調理を加熱用熱源からの加熱法によつて分類すると、第1報ですでに検討したように、二つに大別される。即ち①の表面温度を、一定の高温度に保つように加熱する方法（一定温度による加熱）②表面から一定の熱量が試料内部に供給されるように加熱する方法（一定熱量による加熱）である。

次に調理について筆者の一人が実験した結果は、水の蒸発が起つている深さは調理終了の場合についても、試料の厚さに比べて極めて小さいので、我々の目的に対して、試料の形状を考慮する必要がないことは、伝熱についての知識から直ちに知られる。このことから試料を半無限固体と考へて、その表面から加熱する場合を取り扱かうことによつて、充分実際の場合に関する近似を得ることができらう。我々の仕事はこの近似を求めた後、それを実用化するために生ずるいくつかの問題を明らかにすることである。

### 2. 表面状態の近似

最初に半無限固体の試料に表面から一定熱量を供給して加熱する場合について、表面状態がどのような時間的経過をとるか計算するのであるが、その詳細については、筆者の一人が既に発表した論文にゆづつて、ここではその結果を調理技術に使用しやすいうように変形することだけを記す。

第1に試料全体は、はじめ室温  $U_R$  に保たれていたのであつて、これに表面から一定熱量を加えて加熱すると、表面温度は瞬間的にではなくて、ある時間  $t_0$  の後に水の沸点  $U^*$  にまで上昇する。これは計算によると、次式で与えられる。

$$t_0 = \frac{\pi \lambda^2 (U^* - U_R)^2}{4 \kappa \phi^2}$$

我々の場合について常数を C. G. S. 単位系で  $\lambda = 10^{-3}$ ,  $\kappa = 0.5 \times 10^{-3}$ ,  $U^* - U_R = 80 \text{ deg.}$  とすると

次の形になる。

$$t_0 = 0.25/\phi^2 \text{ (Sec)} \quad (2-1a)$$

この値は  $\phi = 0.1 \sim 1$  である調理の場合については無視し得る程小さいことがわかる。

次に時間的初期においては、表面附近の温度勾配が大きいので、水の毎秒蒸発量は外部から試料に供給される熱量全体がそれに消費されたとしたときの蒸発量よりも小さいが、ある程度の時間  $t_{23}$  以後においては、大体両者は等しいとみなすことが許される。その時間  $t_{23}$  は、次の値をとる。

$$t_{23} = \lambda^2 U^* \pi / 4k\phi^2 \quad (2-2)$$

これに適当な値を入れると、

$$t_{23} = 10.1/\phi^2 \quad (2-2a)$$

この値もあまり大きくないので、実際の調理時間に比べて省略し得ると考える。(実際調理上に加わる誤差は、この時間  $t_{23}$  の約 1/3 程度であることが計算から知られるので、 $t_{12}$  が  $T$  の 1/3 に達したとしても誤差  $T$  は 10% に止まる)。その場合近似は非常に簡単になつて、次の関係式を用いることができる。

毎秒水の蒸発量	$G = \phi/L$	}	(2-3a)
蒸発の起つている深さ	$x_0 = \phi t / G_0 L$		(2-3b)
表面温度	$U_0 - U^* = \phi^2 t / G_0 L \lambda$		(2-3c)

我々の目的に対しては、第3報で示したように、調理時間  $T$  は試料の内部を十分に加熱する必要から、試料が与えられるとそれによつて規定される値をとらねばならない。したがつて上式の  $t$  の代りに調理時間  $T$  を用いると共に、時間の単位を秒から分に移し、常数に数値を入れる。このとき(2-3)式から分るように  $x_0$  は  $\phi$  に比例し  $U_0 - U^*$  は  $\phi^2$  に比例するから  $x_0$  と  $U_0 - U^*$  との値は独立ではなく、一方を最も望ましい値にするような方法で  $\phi$  を定めると、他方はあまり望ましくない値となる可能性が生ずる。このことから、調理に適当な加熱の強さ  $\phi$  を求めるために二つの方法が可能である。

(i) 表層部の厚さを指定するとき

$$\phi = x_0 / 0.156T \quad (2-4a)$$

(ii) 表面温度を指定するとき、

$$\phi = \sqrt{(U_0 - U^*) / 156T} \quad (2-4b)$$

この結果は、相互間に本質的な優劣がある訳ではなく、例えば外観を主として考えるときは、(ii) の方法が好都合だと思われ、また調理されたものが実際に食用に供されるまでにかかなり長い時間間隔があるような場合には、(i) の方法によつて十分に厚い無水の表層部をつくる方法が、好都合だと考えられる。勿論普通の調理で考えられるように味を重要視するとき、どのような方法がよいかということは、今後に残された問題であるが、従来の調理法は、(ii) の方法に近いものと思われる。

試料を油で揚げるときには、試料の投入後表面温度が油の温度に達するまでの時間は極めて

小さいので、このときは表面を一定温度  $U_h$  で加熱するときをとりあつかえば、近似的な結果が得られる。したがって時間があまり小でないとして前節 (2-3) 式が導出されたと同様な順序で計算を進めよう。今水が蒸発してしまった部分については、近似的に準定常的な温度勾配をもつていると考えても大きな誤差はないから、表層部内を流通する熱量に等しい熱量が表面から供給されるものとして、

$$\phi = \lambda(U_h - U^*)/x_0 \quad (2-5)$$

とおけば、熱量保存側から得られる結果として  $\phi$  の代りに上式を用いて、

$$\frac{dx_0}{dt} = \lambda(U_h - U^*)/x_0 G_0 L$$

これを  $x_0$  について解き、 $t=0$  において  $x_0=0$  とすれば、

$$x_0 = \sqrt{\lambda(U_h - U^*)t/G_0 L} \quad (2-6)$$

数値を代入し、時間を分で表わすと、

$$x_0 = 1.24 \times 10^{-2} \sqrt{(U_h - U^*)T} \quad (2-6a)$$

この関係は (2-4) 式と異つてのようにみえるが (2-4) の両式から  $\phi$  を消去すると、

$$x_0 = 1.24 \times 10^{-2} \sqrt{(U_0 - U^*)T} \quad (2-7)$$

が得られるので結局この両式は同じ形をとつて、相違する点は (2-6a) 式では油の温度は全調理時間中にわたつて  $U_h$  に保たれるのに対して、(2-7) 式では  $U_0$  は時間  $T$  においてのみ表面の温度がそのようになるということである。従つて、形式的に (2-6a) と (2-7) とを同一視して、加熱法の如何にかかわらず、(2-7) 式を用いることとする。そして (2-4) 式の中何れか一方のみを使用すればよいのであるから、我々は (2-7) 式と類似形をもち、また普通の調理法により深い関係をもつだろうと予想される (2-4b) 式を採用することとする。

このように定めると、計算結果を次のように整理することができる。前報で記したように調理に要する全加熱時間が定められた後は、加熱法の如何にかかわらず、調理終了時における  $x_0$  と  $(U_0 - U^*)$  との関係は、常に (2-7) 式で与えられるからこれを別々に調整することは（今考えているような加熱の方法では）できない。そこで調理終了時に表面温度が  $U_0$  となるようにするためには、油で揚げるときは常に油の温度が  $U_0$  となるようにすること、また炭火で焼く時は、(2-4b) 式から計算される加熱の強さが  $\phi$  になるように加熱することである。従つて、この報告で取りあつかう限りにおいて我々の仕事はどのようにして油の温度、あるいは加熱の強さ  $\phi$  を、希望するある一定値に保つかということを決めることに移つてゆかなければならない。もちろん調理法として従来の慣習から解放された新しい方法を使用することも可能であつて、その場合には以上の計算というものは、もはや最善の条件を見出すための補助的手段としての役割を去らねばならぬかも知れない。しかしそのことに関しては、現在の目的から外れるので触れないこととする。

### 3. 加熱の強さの測定

前節の結論から我々は炭火焼きなどにおいては加熱の強さ  $\phi$  を、また油で揚げるなどの場合

には油の温度  $U_n$  を測定し、それを一定に保つような方法を見出さねばならない。この点について集団給食などの場合と、家庭料理とについて多少の基本的立場が異なることに注意する、即ち集団給食で充分多くの量を取りあつかう場合には、測定および操作が簡単に行われ、あまり人手を要しないならば、そのための設備に多少の経費を投ずることは支障なく許されるであろう。したがって取付け、使用が簡単であるならば、自動調整装置を用いることが望ましい、また普通の家庭では全くそのような器械を使用することは許されず、日常生活に使用されている材料、器具を使用することのみに依存せねばならない。これら双方の場合について、いずれも検討してみるべきであるが、我々は実験上の都合によつて主として後者の場合を考慮に入れて考える。

加熱の強さ  $\phi$  を測定するためには普通それによつてある物体を加熱したとき、その物体に生ずる温度上昇を測定する方法を用いる。温度測定の方法として、我々の場合には破損しやすいガラス温度計の使用はあまり好ましくないし、他の種類の温度計は家庭での使用を望めない。しかし我々は温度測定を連続的な値について行う必要はなく、物体をある温度から他のある温度まで温度上昇させるという目的からは、上下限の二つの温度を測定すればよい。このとき下限温度を室温にとれば、普通のガラス温度計を使用することが可能であるだけでなく、後に述べるような他の利点も存在するので、我々はこの値を採用しよう。これによつて我々が行わなければならない測定は、上限温度となるただ一つの特定した。しかし選択しうる値を正しく行うということとなる。

直ちに思い出されるように、このような特定温度は、物質の沸点、融点、変質点、などを用いると正確、簡単であつて、特殊な器具を要しない。我々は種々の材料の中から、長期にわたる保存繰返し使用にたえ、損傷の怖れの少ないもの、入手の容易なもの、といつたいいくつかの条件を考慮してえらびだすのであるが、その他に必要なとは云えないが殆んどそれに近い要求、すなわち室温の変化を測定する毎に考慮する不便さをまぬがれる方法はないかということを考えるべきである。このことは上下限間の温度差が、細かい気温の日変化に比べて非常に大きくなっているならば実行することができる。気温の日変化の最大較差は普通  $10 \text{ deg}$  とみてよいかから誤差を  $10\%$  まで許容すれば、上下限の温度差は  $100 \text{ deg}$  程度で充分であつて、調理における他条件の差異に比べればこの誤差は少ない方に属する。従つて我々の使用可能な諸種の物質について二、三の例をあげてみよう。

沸 点	100°C (水)
融 点	180~200°C (ハンダフューズ) 186°C (砂糖)
変 質 点	75°C (サーモペイント)

又熱をうけて温度上昇をおこす物体、すなわち受熱物体としては温度の均一性その他の性質から銅、アルミニウムなどが最もよいが、真鍮、鉄などでも十分であつて、この外の材料を特別に撰択する必要はない。

今受熱物体が密度  $\rho$ 、比熱  $C$  の材料で作られた厚さ  $d$  の板であつて、その温度を室温  $U_R$

から上限温度  $U_t$  まで上昇させるために、加熱の強さ  $\phi$  の火力で時間  $t_h$  を要したとすると、 $t_h$  は次式で与えられる。

$$t_h = \rho c d (U_t - U_R) / \phi \quad (3-1)$$

この中で右辺分子は加熱量測定法を一度決定すると定まる常数であるから、これを  $T_h$  とかいて

$$t_h = T_h / \phi \quad (3-2)$$

$$T_h = \rho c d (U_t - U_R) \quad (3-3)$$

この関係を用いて (2-4b) 式を書き直すと、

$$t_h = T_h \sqrt{156 T / (U_o - U^*)} \quad (3-4)$$

実用に供し得る材料として、いくつかの組合せについて実験を試みたが、その中最も安価で取り扱っても簡単であり、調理材料中に誤まつて混入されても生理的に安全であるという条件を満たすものとして、我々は 0.3 mm の厚さのクロム鍍金を施した鉄板の上に砂糖の粉末を極めて少量散布したものを、用いるが好都合であることを見出した。この場合、砂糖粉末は低温では白色を呈するが融けると直ちに無色となつて状態の変化は非常に明瞭である。また融点は  $186^\circ\text{C}$  であるために室温の変化による影響は非常に小さくなるので、簡単に季節的な変化をも省略することが許される。

鉄板の比熱 0.10、密度 7.7、室温  $U_R = 20^\circ\text{C}$  を用いて計算すると (3.2) (3.3) (3.4) 式は

$$\left. \begin{aligned} T_h &= 3.82(\text{sec}) \\ t_h &= 3.82/\phi(\text{sec}) \\ t_h &= 47.8 \sqrt{T/(U_o - U^*)}(\text{sec}) \\ x_o &= 0.596T/t_h \quad (\text{cm}) \end{aligned} \right\} (3-5)$$

ここで時間の単位が  $T$  (min) と  $t_h$  (sec) とについて、異つてとられていることを注意する必要がある。

#### 4. 油の温度の測定

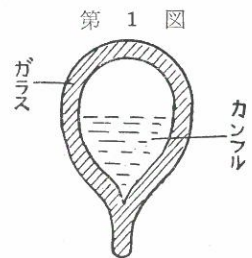
他方油の温度を測定し、それを一定に保つ操作を考える必要がある。勿論油に温度の自動調節装置をつければ、簡単に解決される問題であるが、これは理想論であつて、各家庭において実用となる段階ではないから、人手による温度調節を考える。この場合によく知られているように第一の問題は温度測定であり、第二の問題は火力調節であるが、後者は以下各々について考えてみよう。

温度測定法は、本質的に困難な問題が存在するという訳ではない。実際に我々はこれまでガラス温度計を用いて種々の温度を測定しており、その点に関する限りここで新しく取り上げる必要はないように思われる。しかし日常生活におけるガラス温度計の役割ではなくて、油の温度を調節するという目的に対して考える場合には、かなり考える必要があるのではないだろうか。即ち我々の目的は調理を上手にすることであつて、そのためには直接その問題に影響する操作はできるだけ簡単なものでありたいと同時に、試料の投入、観察、引き上げの各操作が容易に

行い得ることは、第一に満足されなければならない。

この場合にガラス温度計のもつ欠点は、次のようなものである。① こわれ易いこと、② 水銀温度計はこわれると有害であり、アルコール温度計は危険の可能性がある。③ 目盛が任意の位置で自由に読み得ないこと、④ 目盛が細かかすぎて使用に不便である。この点について種々の改良が試みられており、また我々が簡単に改良することのできる点もある。例えば、温度計を金属外管で包んで破壊の可能性を防ぐようにしたものが市販されている。また常時使用する温度目盛の所にはテープを張るなどの方法で、温度目盛を読み易くすることは簡単にできる。しかしもつとも重要な問題点、即ち任意の位置で任意の時間に簡単に温度を測定することができないという点は、このまゝでは解決されない。特に他の操作をしている途中においても、温度が簡単に知られる方法が非常に望ましい訳である。

このような目的に対して二、三の方法を試みた結果、もつとも適当な方法として次の結果を得た。第1図は試作温度計の断面図で外部はガラス製であつて、その中にカンフル（樟腦）が封入してある。空隙が設けられているのは製作上の便のみならず全体としての、みかけの比重を小として油中に浮遊させる目的をもつている。これを油中におくと、温度が約 $179^{\circ}\text{C}$ 以下ではカンフルは白色の細粒であるが、約 $180\sim 184^{\circ}\text{C}$ をこえると透明な液体となり、更にまた $179^{\circ}\text{C}$ 以下となれば直ちに白色の細粒となるから、温度の変化を肉眼で簡単に判定することができる。内部に封入する薬品を適当なものを選ぶことによつて、他の温度の測定も同様に行うことができる。従つて油を高温で使うときは、 $180^{\circ}\text{C}$ 以上となれば油の加熱は弱くし、 $179^{\circ}\text{C}$ 以下となれば加熱を強くすればよい訳である。

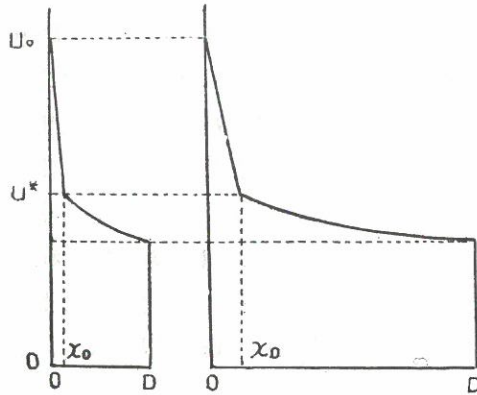


このような器具では構造が球に近いために、非常に丈夫となつてガラス製のものでもほとんど破損の怖れはない。また破損した場合にも、内容物は蒸発し、調理に有害な結果をもたらすことはないように注意されている。また油の表面に浮遊させ得るので、調理操作中でも温度測定には何らの手数を要しないで、加熱操作の要不要を判定できることがもつとも大きな特長である。

## 5. 加 熱 強 度

これまでの討論において調理における加熱条件を我々の意志に従つて、自由に調整することが技術的に可能となつた。従つてここで我々は、これに必要な操作を簡単に判定するための基準を考えよう。これは第2節、および第3節における結果を実用に便利な形式に表現するまことであつて、第3報における加熱調理時間表に対応して、ここでは加熱強度表と呼ぶものを作ろう。(3-5)式をグラフ図示したものが第3図であつて、これを使用する例について述べる。まず最初に第3報の時間表を用いて所要調理時間  $T$  を求める。第2図で横軸 ( $T$  軸) に、その値  $T$ 、例えば20分をとり、それから上にたどつて希望する表面温度  $U$ 。(例えば $300^{\circ}\text{C}$ ) を表

第 3 図



つてこのときは  $U_0$  として油の温度例えば  $180^\circ\text{C}$  をとつて、それに対応する  $x_0$  の値 (例えば  $T=20$  分に対して  $0.5\text{ cm}$ ) を求めることがきて、それに対応する  $t_h$  の値は求める必要はない。

この結果、もつとも重要な事柄は  $T$  と  $U_0$  とを決定すれば  $t_h$  と  $x_0$  とは、共に一意的に決定されてしまうことである。従つて  $x_0$  を変化させるためには、 $T$  と  $U_0$  との何れか又は両方を変化させなければならない。この理由は簡単に言えば次のようなことである。

調理時間表および加熱強度表を使用して調理した場合に得られる結果は、理論的には試料の如何にかかわらず調理の終了した状態において表面温度を  $U_0$ 、また中心温度を  $U$ 、という希望値にもたらずということである。そしてその状態は第3図に示すように試料の厚さが異つたときは、温度目盛は不変のまま、厚さの目盛だけを横に引き延ばし、あるいは押し縮めたような相互関係である。したがつてこの状態は例えば、全体の試料の中表面の約3%は焦げの状態にあり、次の10%はこげてはいないが  $100^\circ\text{C}$  以上であり、次の20%は  $100\sim 90^\circ$  の範囲、次の30%は  $90\sim 80^\circ$  の範囲、内部の47%が  $80^\circ$  以下というようにして表現することもできる。

## 6. 受熱板の熱損失

加熱の強さの測定に用いる鉄板に関して、総ての熱損失を省略して第3節に取り扱つたが、実際には鉄板は周囲を冷い空気によつて包まれているために、熱損失が存在し、従つて(3-5)式が完全には成立しない。このとき熱損失は鉄板と周囲温度との差  $\theta$  に比例すると考えられるので、鉄板についての微分方程式およびその解は次の形となる。

$$\rho c \frac{d\theta}{dt} = \phi - a\theta \quad (6-1)$$

$$\theta = \frac{\phi}{a} \{1 - \exp(-at/\rho c)\} \quad (6-2)$$

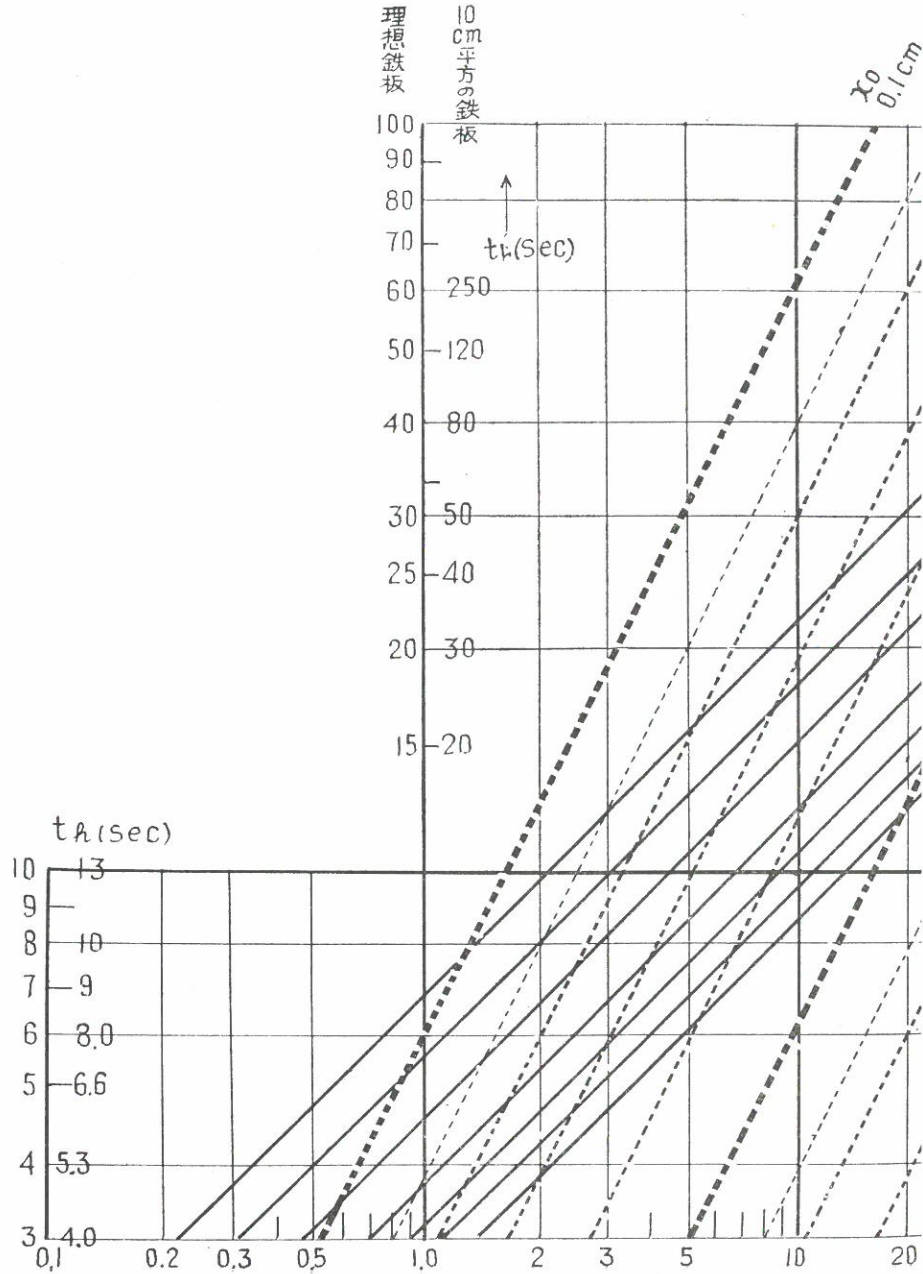
ここに  $a$  は主として鉄板の形状によつて定まる放熱係数で、これが大きい程熱損失が大きい。(6-2)式から  $t \rightarrow \infty$  において  $\theta_\infty = \phi/a$  となるから  $\phi$  と  $\theta_\infty$  とを測定すれば、 $a$  の値を求めることができる。また実験結果から、(6-2)式の成否によつて(6-1)式の仮定の正否を知ることができる。  $30 \times 30\text{ mm}^2$  の鉄板による(6-2)式の成立を第4図に、また正方形鉄板の大

わす斜実線に至る ( $U_0$  の希望値については後に述べる)。この点から左に進んで縦軸 ( $t_h$  軸) の値をよめば求める加熱の強さは、 $t_h$  がその値(例えば15秒)となるような状態である。またこのとき水が蒸発してしまつた部分、すなわち  $100^\circ\text{C}$  以上になつた部分の厚さ  $x_0$  は、斜点線の値から  $0.8\text{ cm}$  であることが知られる。

また油で揚げる場合には、加熱の強さは直接関係せず、油の温度だけが問題となる。従

第 2 図 火 力 算 出

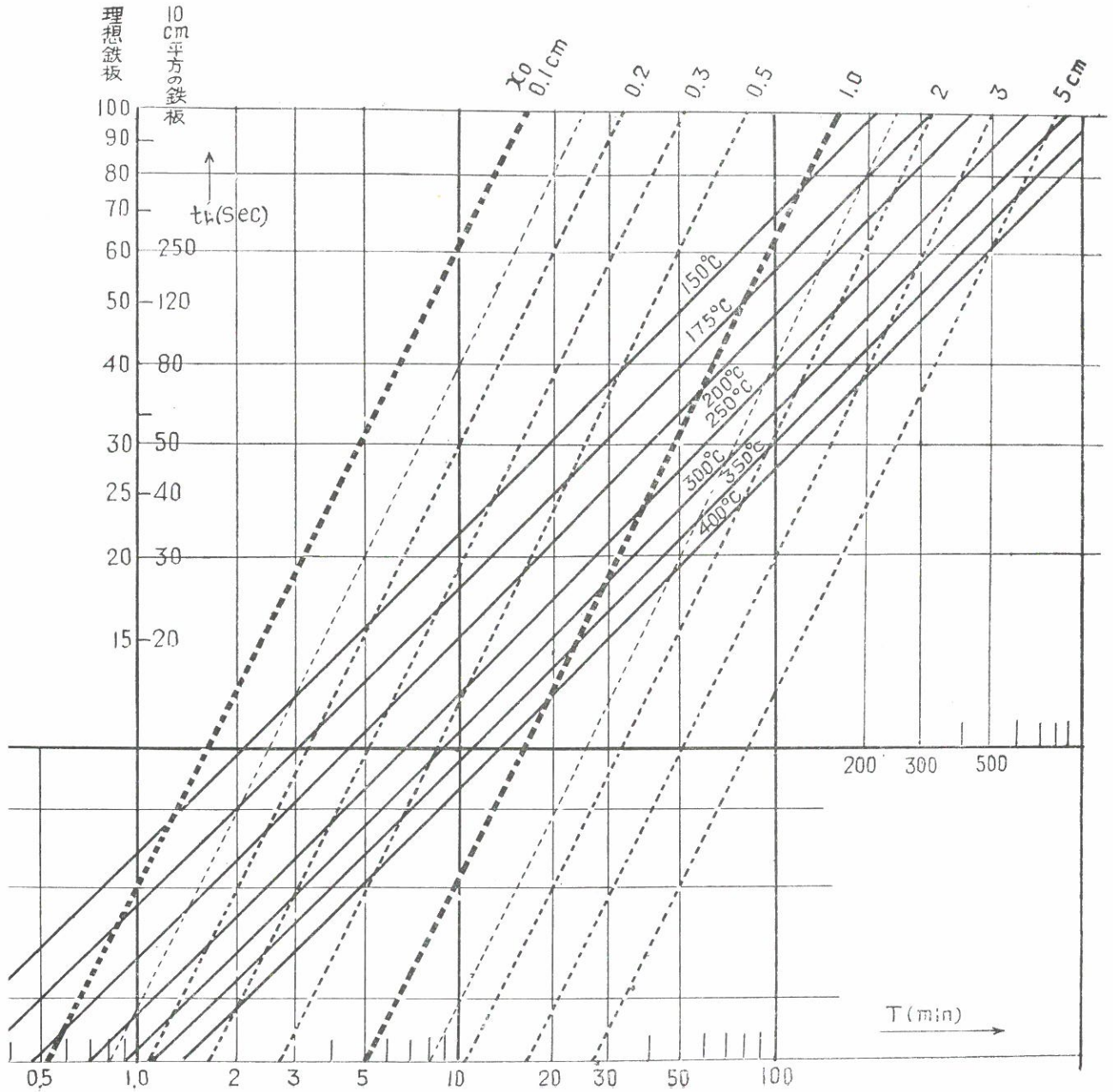
- ① 調理時間表より調理時間  $T$  を求める、(横軸) 但し片面焼の場合
  - ② 表面処理温度を決める、(斜実線)
  - ③ 両者の交点に対応する  $t_h$  および  $x_0$  を求める。
  - ④ 火力が  $t_h$  になるように調整する。
- (註)  $x_0$  は表面附近の  $100^\circ\text{C}$  以上になる部分の厚さ、 $t_h$  は  $0.3\text{ mm}$  がその火力によつて熔けはじめるまでの時間





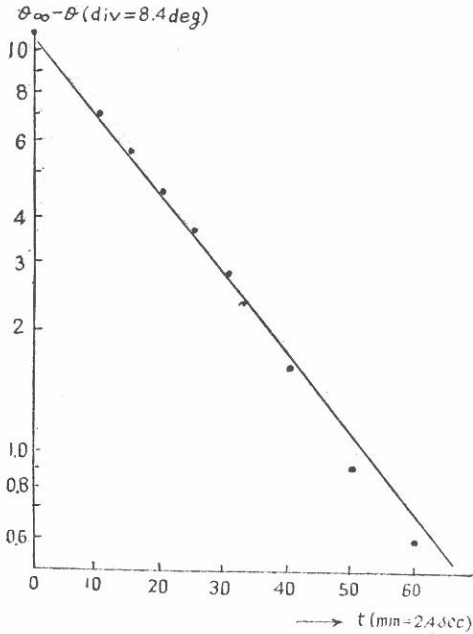
## 第 2 図 火 力 算 出 表

- ① 調理時間表より調理時間  $T$  を求める、(横軸) 但し片面焼のときは  $T/2$  を用いる。
  - ② 表面処理温度を決める、(斜実線)
  - ③ 両者の交点に対応する  $t_h$  および  $x_0$  を求める。
  - ④ 火力が  $t_h$  になるように調整する。
- (註)  $x_0$  は表面附近の  $100^\circ\text{C}$  以上になる部分の厚さ、 $t_h$  は  $0.3\text{ mm}$  厚さの鉄板上に撒布された砂糖がその火力によつて熔けはじめるまでの時間

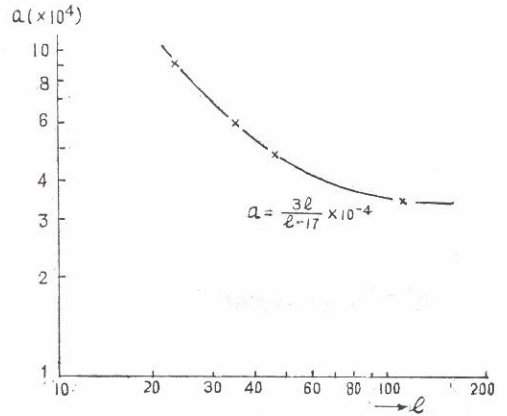


きさによる  $a$  の値の変化を第 5 図に示す。

第 4 図



第 5 図



$\theta_{\infty} = \theta/a$  より  $\phi$  が小で  $a$  が大きいときは、鉄板の温度上昇が例えば砂糖の融点に達しないことも考えられ、そうでなくても測定された  $t_h$  の値が真の  $t_h$  の値よりも非常に大きくなる可能性がある。このためには  $a$  の値は実用上誤差が問題とならない程度に、小さくすることが必要である。我々の実験結果では、鉄板に何らの保護装置もしないで  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  の大きさとした場合に極めて加熱の強さの小さいときを除いては、実用上差支えないことが明らかとなった。この程度であれば、実用には丁度手頃な大きさである。

#### 7. 加熱強度表の使用について

以上に得られた加熱強度表について、それを使用する上にいくつかの問題があることは、前報の調理時間表と同様である。以下これについて少し考えてみよう。

第一に本質的に前報告および本報告の二つの表を使用して、調理することがよいかどうかという問題が提起される。勿論これは未解決の問題であるが前報でも既に述べた如く、これまでの盲目的な調理法を、かなりの程度にまで科学的に基礎づけられた調理法にまで推進させるといふ意味の大きさのみに着目して頂いた後、我々の方法の適不適について今後の問題として御批判を仰ぎたい。

次に加熱強度表において希望する表面温度  $U_0$  を何度に選ぶかという問題は、前報告の中心温度を何度に選ぶかということと全く同様に、経験および統計的な結果を得た後初めて明らかにされることである。この報告に必要な実験では取りあえず  $U_0 = 300^\circ\text{C}$  を用いたが、大体良

好に近い結果が得られた，しかし今後更に検討を続けるつもりである。

最後に通常行われる調理について検討すれば強火といわれるものが大体  $t_h=20 \text{ sec}$  より弱く，弱火といわれるものが  $t_h=60 \text{ sec}$  より強い．このような事実から，我々の計算結果を用いた調理法では成立するような近似が，実際には成立しない場合がありうるということが知られる．例えば， $T=2 \text{ 分}$   $t_h=5 \text{ sec}$  とすべき場合に  $t_h=20 \text{ sec}$  を用いると，(2-2 a) 式における  $t_{23}$  の省暑が不可能となり，それを省暑した計算結果，すなわち第3報の調理時間表の使用が不可能となる．この事実は，加熱強度表の完成以前においてはしばしば起つた問題であつたが，こゝに至つてその原因が明らかにされた，かくして我々は前報告の時間表と本報告の加熱表との併存によつて，調理条件の確立を図ることができることを確信した。

#### 文 献

中峠，坂手：山陽技術雑誌，Vol. 3；101 (1959)

---