

総

説

食品の加工・調理への遠赤外線の利用

清水 賢* 渡辺 敦夫**

はじめに

最近では、スーパー等の食料品店に一步足を入れてみると、多種多様な食品素材あるいは加工食品が店内に一杯陳列されている。これら食品素材や加工食品が、一家団らの夕食の食卓の上に料理として、食べ物の状態で並べられるまでのプロセスを考えてみることも有意義なことである。

スーパー等で加工食品を眺めていると包装され、保存できるよう充分品質管理された品物が多量にある。これら食品素材あるいは加工食品が家族の栄養、嗜好等を考慮し、さらには経済的で一家団らを期待して主婦によって料理され、夕食の食卓を楽しい雰囲気にする基である。このように、食品素材あるいは加工食品から料理された食品（食べ物）にいたるまでのプロセスを考えてみると、図1のように食品加工プロセスと食品調理プロセスに分離して考えられる。前者は工場等での多量生産に適しており、自動化がかなり容易な分野である。この分野では化学工学的思考方法がかなり取り入れられ成功をおさめている。一方後者は自動化が難かしく必ず人の手を必要とする分野である。

化学工業の分野では多量生産から少量生産の方向に移

行してきており食品加工分野でも多種加工食品を少量生産するようになってきている。このためには省スペース、省エネルギーで食品加工プロセスを組立てることが必要となってくる。また食品加工プロセスの中で加熱・乾燥の単位操作は重要な位置を占めているので、この加熱・乾燥操作を省スペース、省エネルギー的に操作できるよう検討することが望ましい。

食品調理プロセスにおいて、和食、洋食あるいは中華食等を作るプロセスはお互いに異っていてもそれぞれの個々の諸操作（例えば洗う、切る、混ぜる、煮る、焼く、炊く、ゆでる、揚げる、炒める等々）に着目してみると、かなり共通な要素がある。（しかし、食品素材と調理をする諸条件はかなり異っているように思う。）またこれら共通の要素のうちで、加熱・冷却といった熱の出入りに関係した諸操作が重要な部分を占めている。

化学工業の分野で、20世紀の初め頃、化学工業は雑然とした化学実験室の延長であった。このような状況から一歩前進するためには、原料から製品にいたるまでの諸工程を整理し、原料から製品にまでスムーズに物が流れていくように工程の順序配列を検討することが必要であった。さらに一歩前進するためには、全工程の中の各単位工程を工学的に研究することであった。これらの単位工程（ユニットプロセス）を形成しているのは、エネルギー伝達、分離、反応などのユニットである。これらは伝統的にユニット・オペレーション（単位操作）と呼ばれている。したがってプロセス全体に入る前に、その基礎として単位操作の研究があった。しかし、この単位操作を見てみるとその基になっているのは流体の動き、伝熱、拡散、反応といった物理的あるいは物理化学的な現象である。最近では生物学的現象をも含めて考えられている。このような現象の研究とこれを基としたプロセス設計を基盤にして近代化学工場へと発展してきた。

ところで、食品調理プロセスを経て料理された食べ物

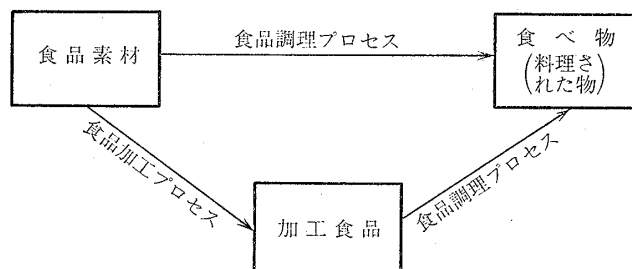


図1. 食品加工プロセスと食品調理プロセス

* 東京農工大学工学部化学工学科 教授

** 農水省食品総合研究所プロセス工学研究室長

は、人間の官能的立場から検査され評価されるところに、化学製品との著しい差異がある。この官能的评价是省スペース、省エネルギーの立場だけではとても解決できる問題ではない。この官能側面に加熱源としての遠赤外線利用が、どれ程有効であるかについては現在までのところ明らかでない。今後の重要な研究テーマではあるが、ここでは熱移動の立場から遠赤外線の利用を考えてみる。

1. 遠赤外線放射体と放射エネルギー

赤外線は電磁波の一種であり、可視光線より波長は長く、マイクロ波よりは短い $0.75\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の波長域である。この波長域の電磁波が物体に吸収されると物体は熱せられるので熱線とも呼んでいる。ところが物体にはそれぞれ特色があり、すべての波長域の赤外線エネルギーを万遍なく一様に吸収するものではなく、特定の波長域のエネルギーのみを吸収する吸収帯がある。しかし、他の波長域は全く吸収しないかといえ、そうではなくて少しは吸収する。もし物体が充分厚くなれば、赤外線を殆んどすべて吸収する。この厚さは物体によって異なるが水では数 mm の厚さになると殆んどすべての赤外線は吸収されると考えてよい。

赤外線は我々の身の回りのすべての物体から射出されている。また同時にその物体は周囲の雰囲気から、同じだけのエネルギーを吸収している。そして一定の温度に保たれている。物体から射出される赤外線エネルギーのうちで、一番沢山エネルギーを射出している波長を λ_{max} としその物体の温度を T (絶対温度で表わす) とすると、つぎの関係が成り立っている。

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898$$

この関係式は、物体が黒体であるときに正確に成り立つが、我々の身の回りの物体は黒体ではないので正確に成り立つとはいえない。いま物体が室温たとえば 15°C であると $T(=273+15=288)$ は 288K となり、 $\lambda_{\text{max}} \approx 10\mu\text{m}$ となる。すなわち、 15°C の物体からは波長が $10\mu\text{m}$ 程度の赤外線エネルギーが一番沢山射出されていることになる。勿論その他の波長の赤外線も射出されていることは当然である。物体が 400°C に加熱されていると $\lambda_{\text{max}}(=2890/673)$ は約 $4\mu\text{m}$ となり、 $4\mu\text{m}$ 程度の赤外線エネルギーが一番沢山射出される。

最近開発されている遠赤外線放射体は、遠赤外波長域 ($4\sim 5\mu\text{m}$ 以上) で黒体の 9 割程度の放射エネルギーを射出し、近赤外波長域では黒体の 2～5 割程度しか放射エネルギーを射出しないようなものである。一方、近赤外線放射体は近赤外波長域で黒体の 9 割近くを射出し、遠赤外波長域で 2～5 割程度しか射出しないものである。図 2 に遠赤外線放射体 (S-1) と近赤外線放射体 (T-1)

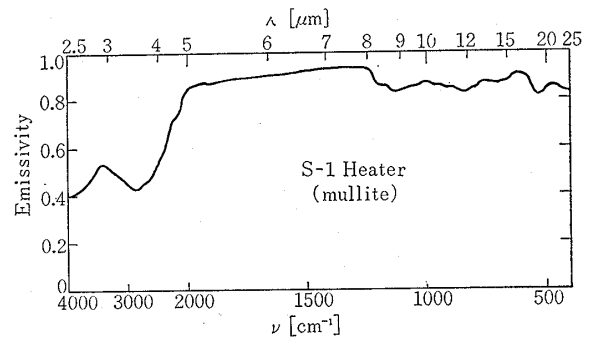


図 2(a). 遠赤外線放射体の放射率

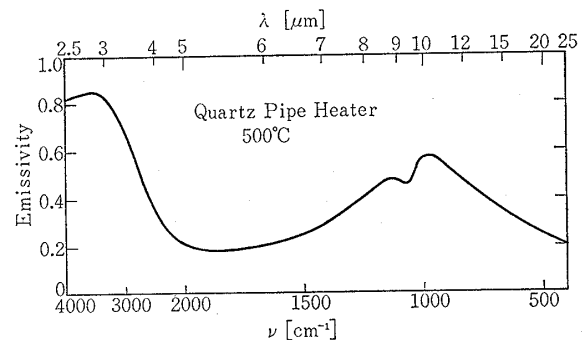


図 2(b). 近赤外線放射体の放射率

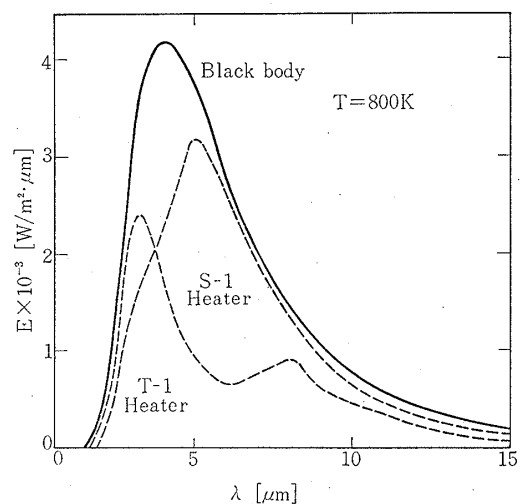


図 3. 遠赤外線放射体および近赤外線放射体から射出される放射エネルギー分布

の放射率 ϵ の波長依存性の一例を示した。放射率はつぎのように定義されている。

$$\epsilon = \frac{\text{放射体から射出される放射エネルギー}}{\text{黒体から射出される放射エネルギー}}$$

図 2 に示した両放射体が、例えば 800K に加熱されたとき、両放射体から射出される放射エネルギーを図 3 に示した。黒体から射出される放射エネルギーと比較してみると、遠赤外線放射体 (S-1) は長波長域に、近赤外線放射体 (T-1) は、短波長域にエネルギー分布がシフト

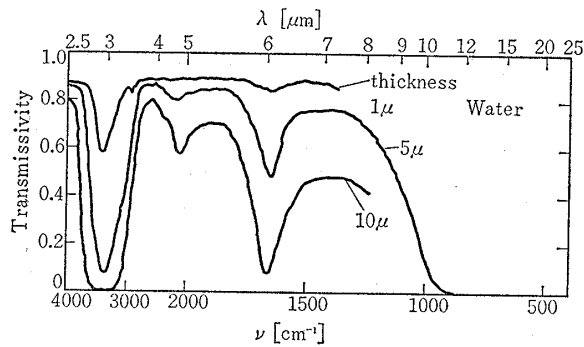


図 4. 水の赤外吸収スペクトル

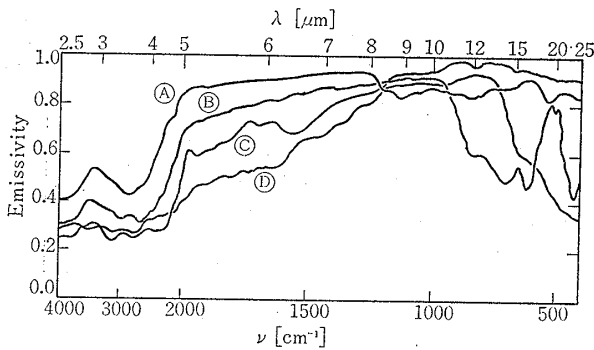


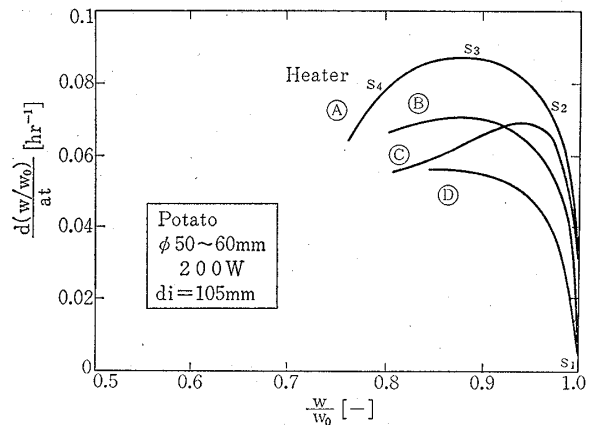
図 5. Emissivity of Heaters

していることがわかる。同一温度に加熱されているにもかかわらず、S-1 ヒーターに比べて T-1 ヒーターの放射エネルギーの最大値が異なるのは、放射率の相異によると考えられる。

2. 遠赤外線放射体による野菜・果物の乾燥

野菜・果物は80～90%が水分である。したがって、水に赤外線を照射したときの熱移動の状況を知ることが、野菜・果物の乾燥を調べる際重要である。図4に水の赤外線吸収スペクトルを示した。水層の厚さが1μm程度であると波長が3μmの所で若干の吸収はみられるが、その他の波長域ではかなり透過している。水層厚さが5μm程度になると3μm前後、10μm以上の波長域の放射エネルギーは著しく吸収される。さらに水層厚さが厚くなり、10μm程度になると3μm前後、9μm以上の波長域の放射エネルギーは全部吸収され、6μm程度の波長域でもかなり吸収される。一方2.5μm以下の近赤外波長域と4μm近傍の波長域の放射エネルギーは透過され易い。このことから、遠赤外波長域のエネルギーは水に殆んど吸収されると考えてよい。したがって、野菜・果物を乾燥する場合遠赤外線放射体を利用することは、エネルギー利用の立場から有益と考えられる。

遠赤外線放射体にも色々の種類がある。具体例として図5に4種の遠赤外線放射体の放射率を示した。A放射体は5～25μmの波長域で放射率が高く、B放射体は5

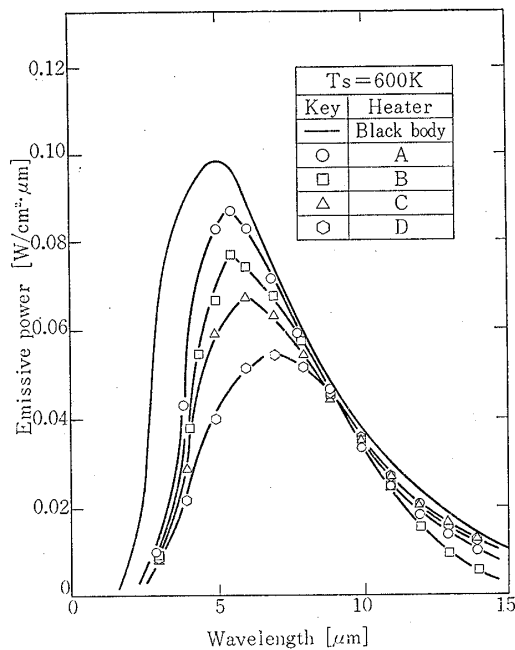
図 6. Curve of drying rate²⁾

～10μmの波長域で放射率が高く、C放射体は7～13μmで放射率が高く、D放射体は8～25μmで放射率が高い。

この様にそれぞれ放射率特性の異った放射体で、ジャガイモの乾燥実験を行ってみた。各放射体の表面温度はほぼ同一の325°Cであり、その他の実験条件もすべて同一である。実験結果を図6に示した。この図は乾燥速度曲線と呼ばれるもので、縦軸にはジャガイモの含水率比(=含水率(ω)/初期含水率(ω₀))の減少速度、横軸にはジャガイモの含水率比をとった。乾燥の始まる時点では含水率ωは初期含水率ω₀に等しいので、 $\omega/\omega_0=1$ となり横軸の右端の点 $\omega/\omega_0=1$, $\frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)=0$ が出发点である。いまA放射体の乾燥速度曲線に着目してみる。乾燥実験開始では上述の出发点S₁にあるが、乾燥実験が進み、ジャガイモの表面から水分が水蒸気として蒸発するに伴って、ジャガイモの水分は減少し、 ω/ω_0 は1から段々小さくなる。

一方、蒸発速度は増加しS₂状態を経てS₃の状態に達する。S₃状態では蒸発速度すなわち乾燥速度が最大になる。さらに乾燥実験を進めるとジャガイモの水分は減少し、ジャガイモの表面が乾いてくるため、表面からの蒸発速度も低下し、乾燥速度は減少する。すなわち、乾燥はS₁→S₂→S₃→S₄の順路をたどって進行する。図からわかるように、4種の放射体のうちで一番乾燥速度の大きいのはA放射体である。ついでB放射体、C放射体、D放射体と減少していく。B放射体とC放射体による乾燥速度の最大値は同程度であるが、全体としての乾燥速度はB放射体の方が大きい。どうして、このように乾燥速度の差が生じたかを調べてみる。

図7に4種の放射体が600Kに加熱されたとき、各放射体から射出される放射エネルギー分布図である。実線で描いてあるのは黒体からの放射エネルギーであり、参考までに挿入した。上述の乾燥実験では、放射体の表面

図 7. Emissive power of heaters²⁾

温度はほぼ 325°C であったので、絶対温度にすると 598 K (=273+325) となり、このことから図 7 では 600K をえらんだ。放射体の表面温度が同一温度であるにもかかわらず、射出される放射エネルギーに差が生じている。これは図 5 に示したように放射率特性の差によるものである。各放射体から射出される全放射エネルギーの大きさは $A > B > C > D$ の順であることがわかる。この放射エネルギーの大小関係が、乾燥速度の大小関係と符号している。この実験例から明らかなように、放射率の測定は加熱・乾燥の定量的予測に極めて重要である。

3. 遠赤外線放射体によるみその試醸

最近調理器の一種であるみそ製造器が開発されている。このみそ製造器で米みその試醸実験を行なったので熱移動の立場から考えてみる。

米みその原料は大豆、米および食塩であり、伝統的手法により、みそを醸造する場合、これら 3 原料の配合は任意なものでない。縦軸に麴歩合 (= (米の重量/大豆の重量) × 10) をとり、横軸に塩切歩合 (= (食塩の重量/米の重量) × 10) をとって、過去の伝統的技術により製造された沢山の事例をプロットすると、図 8 のようになる。今回試醸実験で使った原料は、大豆 600g、米麴 600g、食塩 200g であったので図中 A 点に相当する。

みその熟成を支配する要因には、内的要因 (麴のもつ各種酵素による分解作用と微生物の発酵作用) と、外的要因 (対水食塩濃度、麴歩合、温度など) が複雑に作用して熟成が行なわれている。これらのうち、温度管理 1

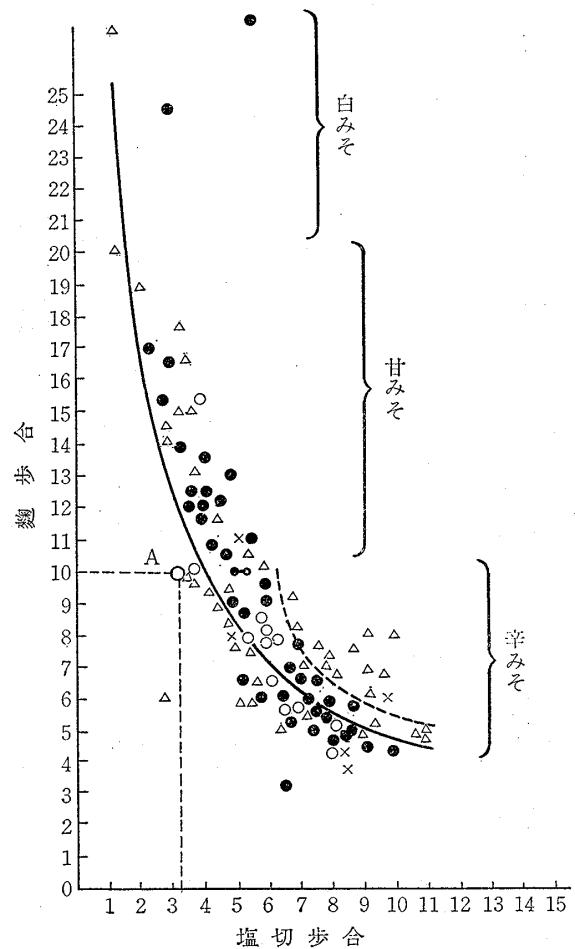


図 8. 米みその原料配合と鑑評成績 (1961年)

○…秀 ●…優 △…良 ×…可
A点：試醸に使用した原料配合

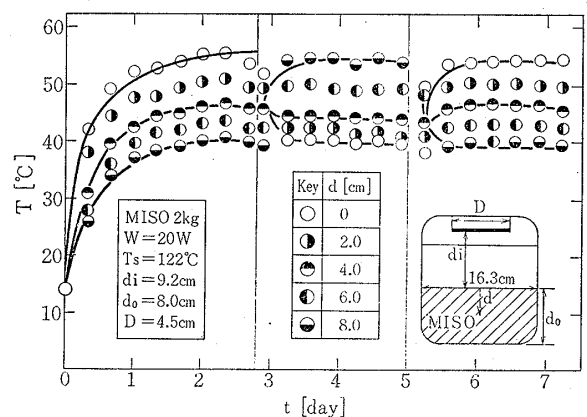
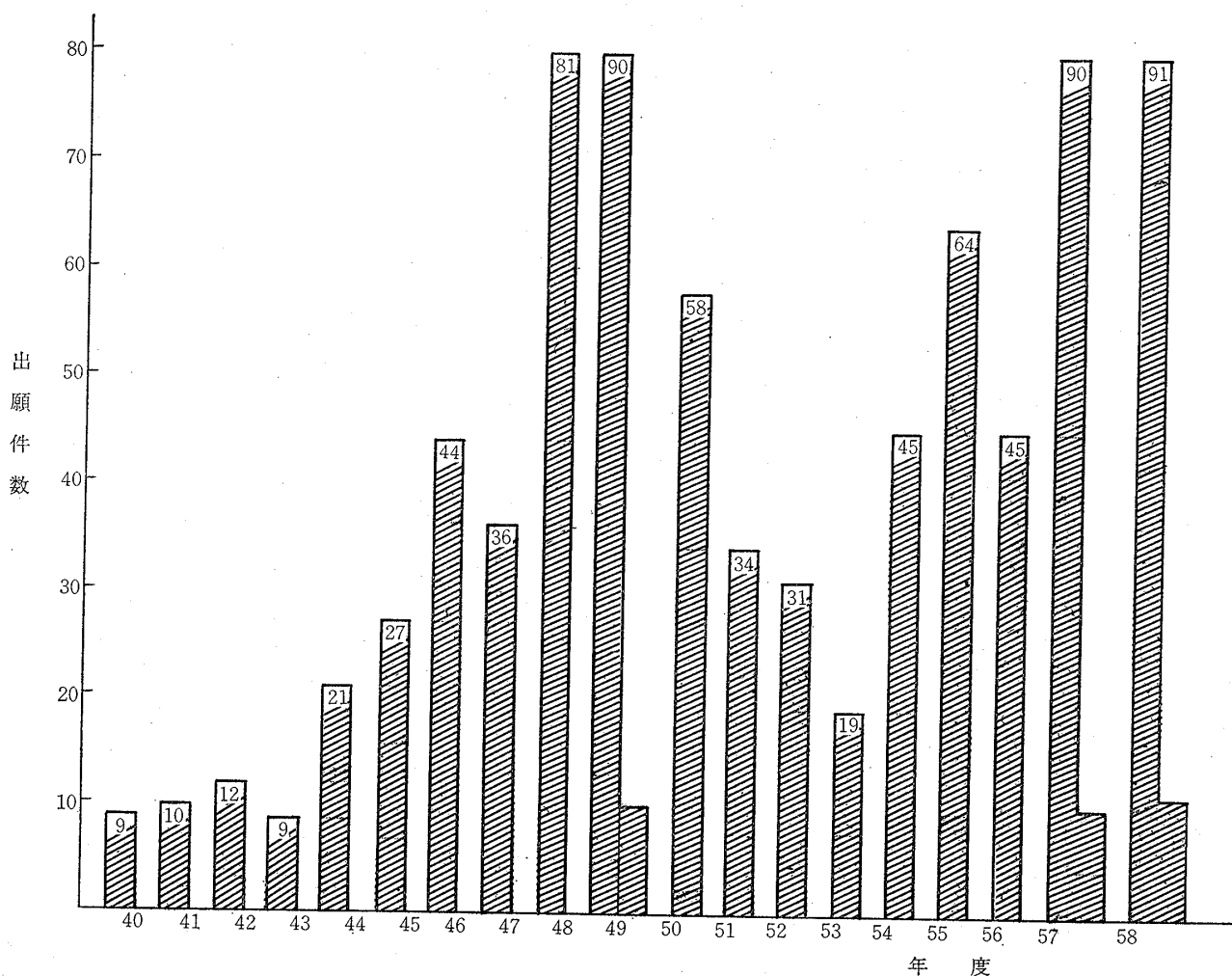


図 9. みそ製造器内の温度分布の経時変化

つとつとも、加温熟成と天然熟成の 2 つに大別されている。また加温熟成でも温度管理方式が色々検討されているようである。

ここでの試醸は加温熟成であり、遠赤外線照射により加温した。みそ製造器内の温度分布の経時変化を図 9 に

図10. 赤外線利用に関する工業権出願数 (816件) の推移³⁾

示した。放射体表面温度は 122°C 、放射体からみそ表面までの距離は 9.2cm であり、加温し始めてから3日目と5日目にみその反転を行った。このため、最初の3日間上端にあったものは、次の2日間下端になり、最後の2日間は再び上端に戻ることになる。例えば、○印は始めはみその表面温度の経時変化を示しているが、3日目からはみその下端（上端から 8.0cm 下の位置）の温度の経時変化を示すことになる。5日目からは、再びみその上端の温度の経時変化を示す。みその層の中心位置（●印）の温度の経時変化をたどってみると、ほぼ 45°C 近くの温度を保っているが、○印のみその層は $55^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow 55^{\circ}\text{C}$ の温度変化を受けている。○印と●印の層が一番大きい温度変化を受けている。

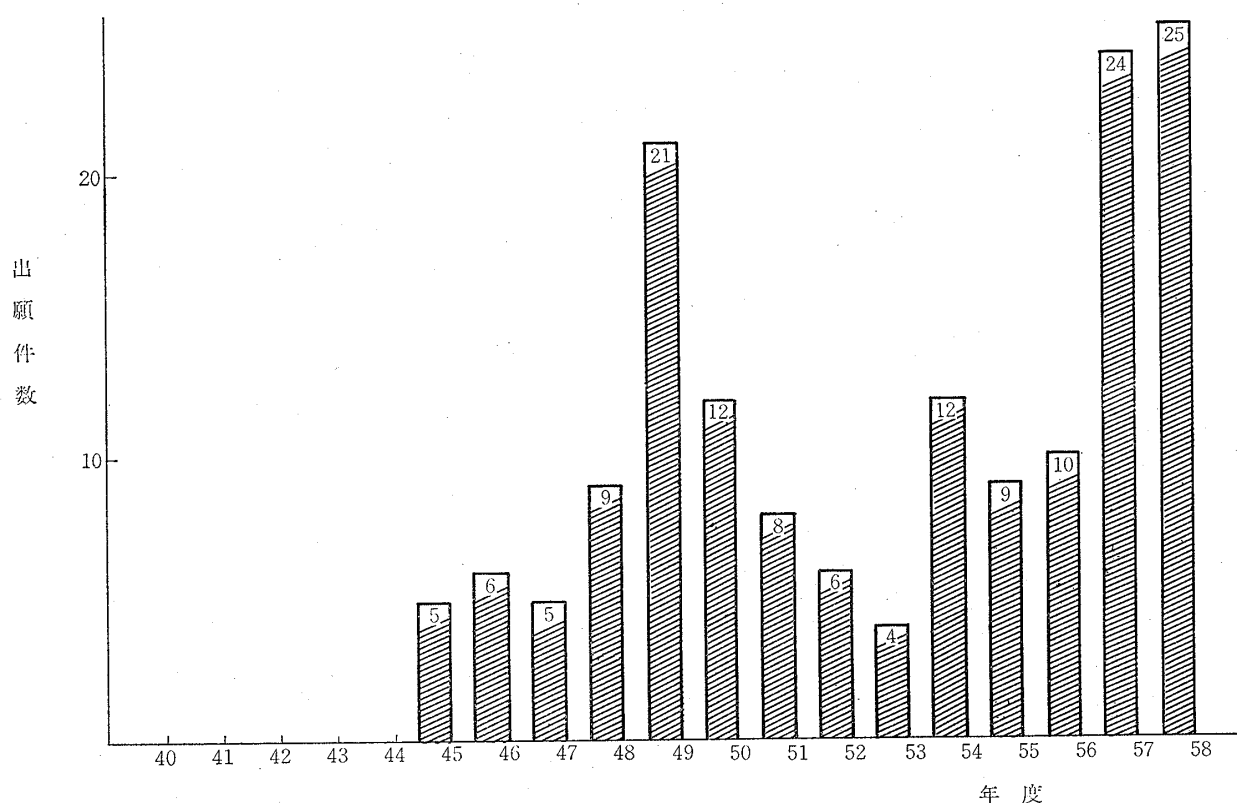
これまでに熟成温度を変えたみその試醸は報告されているが、温度域が $25^{\circ}\text{C} \sim 34^{\circ}\text{C}$ の範囲であり、温度変化幅も $3^{\circ}\text{C} \sim 6^{\circ}\text{C}$ とせまい。またみその内部には温度差がないような条件で、みそ全体の温度を同時に変化さ

せるように、温度管理されているのが普通である。今回の試醸では、みその層内に 15°C の温度差があり、しかも温度域は $40 \sim 55^{\circ}\text{C}$ と高く、みその反転による温度変化幅も大きいところで 15°C と広い。このような条件で本当にみそができるものかどうか心配であったが、7日目には赤褐色のみそができ、その味も充分味えるものであった。温度域から考えて、澱粉分解酵素の働きが主である分解型のみそと考えられるが、今後は成分分析および官能検査等による評価が必要である。

4. 赤外線利用食品加工機に関する工業権出願数の推移

よく知られているように、赤外線放射加熱を工業的に利用したのは、フォード自動車会社（1935）である。その後日本でも、自動車修理工場での钣金塗装の乾燥や、家庭用暖房ヒータとして利用された（昭和22～23年頃）。当時のヒータは、フィラメントまたはニクロム線をガラス球や石英管に挿入したもので、現在近赤外線ヒータま

食品の加工・調理への遠赤外線の利用

図11. 赤外線食品加工機に関する工業権出願数（156件）の年代推移³⁾

たはランプと呼んでいるものである。これらのヒータが昭和40年代に入って、比較的低温（ $\leq 600^{\circ}\text{C}$ ）でセラミックスを用いた遠赤外線ヒータに変ってきた。またこれらのヒータを利用した利用技術が発展してきた。

図10は昭和40年から昭和58年までの、赤外線利用に関する工業権の出願状況である。昭和48年、49年の出願数が急増しているのは、昭和48年の石油ショックと深い関係がある。遠赤外線ヒータが加熱・乾燥用熱源として省エネルギー的であると考えられたためである。また、日本でセラミックタイプの遠赤外線放射体の工業権が出願されたのも、昭和47年頃である。最近になって遠赤外線の利用技術が急速に発展している。ことに食品工業関係にその傾向が強い。図11に赤外線を利用した食品加工機に関する工業権出願数の推移を示した。昭和40年代中頃から厨房等に使用されていたが、最近遠赤外線利用の各種機器が開発されてきた。今後もさらに、食品加工工

場から一般家庭に及ぶ広い範囲にわたって、利用技術が開発されていくものと考えられる。

あ と が き

健康志向を背景に、手づくりの味を求めている多くの人々が、添加物を一切使わず、味つけも思いのままに手軽にできるような調理器を望んでいるものと思う。このような分野で、みそ製造器のように遠赤外線を利用した調理器が今後沢山でてくるものと予想される。味と遠赤外線との関係が明らかでない現状において、開発された各種調理器の専門的立場からの検討が強く望まれる。

参 考 文 献

- 1) 高橋真一：私信（1985）
- 2) 正村彰敏：卒業論文（東京農工大学，昭和60年度）
- 3) 前田信秀：私信（1986）