



炒め調理過程の伝熱モデル

渡辺 学[†], 三堀友雄, 酒井 昇

東京海洋大学海洋科学部海洋食品科学科

Modeling of Heat Transfer Characteristics in Stir-frying Processes

Manabu WATANABE[†], Tomowo MIHORI and Noboru SAKAI

*Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology
4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan*

Though many kinds of machineries are needed for the automated food processing, the designing method for food machineries is not well developed. This is due to the complexity of the heat transfer characteristics in foodstuff, and the stir-frying process is the most complicated one that includes simultaneous heat and material transfer. In this article, heat transfer mechanism in stir-frying process is studied in detail. Temperature distribution in static bulk of sprouts is measured and the obtained data reveal the fact that the temperature hardly rise in the pieces that do not touch the heating surface. This fact notice us the stirring operation has an extremely important roll even in heat transfer since it substitute the thermal diffusion by its material dispersion. On the basis of these disclosures, thermal characteristics of a static bulk is estimated by introducing 2 parameters; one-layer thickness and fraction of contacting pieces. In addition, thermal diffusion due to stirring operation is modeled by introducing the parameter named stirring frequency. These enabled to establish the calculation method that can predict the temperature rise in stir-fried bulk. From one of calculation results, heat transfer coefficient between bulk and heating surface is estimated as $155 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Key words: Heat transfer, Stir-Frying, Model calculation, Food machinery, Thermal design

1. 緒 言

機械化による食品製造工程の自動化は、大量処理と省力化によるコストダウンばかりでなく、衛生管理が容易になることと操作が安定することによる品質面での利点も期待できるため、食品産業全般において盛んに推進されているところである。しかし、そのための機械設計にあたっては、適切な方法論が確立されていないのが現状であり、人手による作業からの類推とトライアンドエラーに頼らざるを得ない。このため、装置のスケールアップや最適操作条件の探索に際しては、多大な労力、時間、コストを強いられることが一般的であり、それはまた試行の段階で多量の廃棄物が発生するという問題をも生ぜしめる。実は、このことは食品機械の設計に限った問題ではなく、人手による調理においても同様の問題は存在している。例えば、魚や

肉を上手に焼くとか、野菜炒めを上手に作るということは、一般人にとって難しいことであり、プロの調理人が作ったものには遥かに及ばないということが日常良く経験される。

以上のような問題が生じる原因は、最適な操作条件が定量的に把握されていないことにある。いわゆる料理本を見ても、調味料の分量については「大さじ3杯」などのように明確に定量化ができているのに対し、加熱操作については「強火」などのあいまいな表現しかなされておらず、最も重要であるはずの加熱終了点の判断についても、極めて不明確な記述しかされていない。熟達した調理人は、優れたセンスと豊富な経験に基づいて、食材の種類や分量に応じた最適な操作条件を見出すことができるが、これを体得するためには長い時間をかけた試行錯誤の反復が必要と考えられる。そうであれば、一般人がこの感覚を体得することは非常に困難であるし、ましてや機械設計への応用となれば不可能といっても過言ではない。

従来、このような問題の解決は調理学の分野に委ねられてきたものであるが、定性的傾向に関しては多く

(受付 2005 年 4 月 19 日, 受理 2005 年 9 月 16 日)

〒 108-8477 東京都港区港南 4-5-7

Fax: 03-5463-0617, E-mail: mwat@s.kaiyodai.ac.jp

の知見が得られているものの、定量評価という観点に立つと実用レベルの成果は少ないと言わざるを得ない。野菜炒めの調理を例にとれば、「強火で手早く」という定性的な指針は示されているが、具体的な入熱量や温度上昇速度に関する数値情報はほとんどない。野菜や中華麺を実際に炒めて、その際の温度変化を測定した実験例はあるが [1,2], これを元にして分量などを変えた場合の温度変化を予測することは極めて難しい。このように、被加熱食品の種類や分量を決めてしまえば、それに対する最適操作条件を数値で表すことはそれほど難しくないと考えられるが、機械設計とは与えられた条件に対して最適必要諸元を割り出すことであるから、そのためには汎用性を備えた計算モデルが不可欠である。汎用性を持たせるためには、最も本質的な量同士の関係について定量化を図るべきで、加熱調理の場合には温度を仲立ちとして、食品の品質と温度履歴の関係、加熱操作と温度変化の関係、の2つに問題を分離することが有効と考えられる。前者についてはさらに問題を分離すべきなのであるが、これについては別報にゆずることとし、本稿では後者について検討する。

食品加熱時の温度変化については、古くから伝熱工学的アプローチによる研究が多く行われており、非常に単純な系であれば食品材料の熱物性値だけの問題に帰着させられるため、すでに現場で実用可能な段階にまで解明が進んでいるケースもある。しかし、炒め調理というのは激しい物質移動を伴う加熱操作であるため、伝熱現象としては大変に複雑なものである。このことは、炒め調理が調理操作として特に難しいものであるということと大きく関係している。現象が複雑であるから、その熱移動と温度変化を適確にコントロールすることが難しいのであり、当然ながらその操作方法を言葉や文章で表現することはきわめて困難である。本稿では、この炒め調理過程を取り上げ、その温度変化を定量的に評価するための基礎となる伝熱モデルを提案することを目的とする。

2. 炒め調理過程の伝熱学的考察

炒めるという操作は、高温の加熱面に、多数の食材小片を塊として載せ、攪拌しながら加熱するものである。当然ながら、各小片の温度はそれぞれ異なった値となるが、これらの小片1つ1つの温度変化を追跡することは、少なくとも現時点では現実的でない。本研究では、加熱面の上に置かれた小片の塊を「バルク」として扱い、このバルクの温度を予測することを試みる。

まずは食材小片の内部およびバルクの外部を無視して、バルク内で起こっている伝熱現象について考えてみたところ、Table 1のように非常に様々なものが挙げられることが判った。このときの攪拌は、経験上、ランダムなものと考えられるので、バルク内部各点の温度には、不規則なばらつきはあっても特定の傾向を持った分布はないと考えるべきであろう。このような系においては、バルク内温度分布の空間平均値をバルクの代表温度（以下、バルク温度 T_B と称する）として良いと考えられるので、バルク内の温度を均一と仮定した0次元近似のモデル化を行うことが可能となる。

0次元近似の伝熱モデル（熱バランス）として一般的

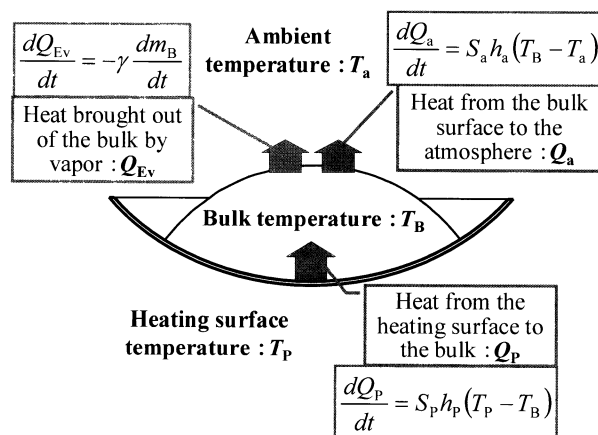


Fig.1 Heat balance for the bulk

Table 1 Thermal phenomena concerning to stir-frying process

Location	What occurs in the location
Inner surface of a pan	Conductive heat transfer due to pan-to-piece contact
	Convective heat transfer between air (or vapor) and pan
	Irradiation between pieces and pan
Inside of the bulk	Conductive heat transfer due to piece-to-piece contact
	Convective heat transfer between air (or vapor) and pieces
	Evaporation of water contained in pieces
	Condensation at the surface of pieces
	Moving of pieces due to stirring
Surface of the bulk	Convective heat transfer between pieces and ambient air
	Vapor dissipation to ambient air

なのは Fig.1 のようなものである。このモデルでは、加熱面温度とバルク温度の差 ($T_P - T_B$) に対して定義される伝熱コンダクタンス G [W/K] を評価しなくてはならないが、ここで考察の対象としているバルクは、非常に多くの小片を含み、かつそれらが攪拌によって激しく移動しているため、バルク全体をあたかも流体であるかのようにみなすことができると考え、本来は対流熱伝達に対して適用されるべき「熱伝達率」を用いた定式化を行っている。これより T_B に関して式(1)なる微分方程式が導かれるが、これではまだ複雑なので、ここではさらに水蒸気の蒸散と空気への放熱を無視する。このような近似は、まだバルク温度が低い加熱初期段階ではそれほど非現実的ではないと思われる。この下で式(2)なる解が得られる。

$$m_{BCB} \frac{dT_B}{dt} = S_P h_P (T_P - T_B) - S_a h_a (T_B - T_a) + \gamma \frac{dm_B}{dt} \quad (1)$$

$$\ln \frac{T_P - T_B}{T_P - T_{B,0}} = - \frac{S_P h_P}{m_{BCB}} t \quad (2)$$

式(2)において、 t と T_B 以外は定数で、 T_P 、 $T_{B,0}$ 、 S_P 、 m_B は設計・操作パラメータとして設定可能な値であるし、 c_B も比較的容易に値を見積もることができる。すなわち、 h_P の値を決めることができれば、式(2)によって任意の t における T_B の予測が可能となる。しかし、逆にこのことは、Table 1に挙げたような、バルク内部で起こる様々な現象の全てが h_P の値に影響を及ぼすことを意味する。すなわち、汎用性の有る h_P の相関式を得るためには、実機スケールでの莫大な実験データが必要となるため、少なくとも現段階では、あまり実用的な方法とは言い難い。そこで本稿では、最小限の実験データによって T_B の予測が可能となるような、汎用性を備えた伝熱モデルの構築を試みる。

ここで参考のために、一般的な強制対流熱伝達率の相関式について考えてみると、それらの多くは Nusselt 数を Prandtl 数と Reynolds 数の関数として表現したものであることがわかる。つまりこれらは、熱拡散による流体内部への熱浸透をベースに、対流による伝熱促進効果を組み合わせたものと解釈できる。このことから、炒め調理過程の伝熱機構のモデリングにあたっては、まず、攪拌を伴わない静止状態のバルク内部における熱浸透性を調べることが有効であると考えられる。そこで次章では、バルクを攪拌しないで加熱を行い、その際に生ずる静止バルク内部の温度分布（熱浸透性）について、計算および実験による検討を行った結果について述べる。

3. 静止バルクにおける伝熱機構

3.1 計算による予備的検討

実験に先立って、まずは簡単な計算による予備的検討を行った。Fig.2に示すような系における1次元の熱拡散方程式は式(3)で表される。ただし、バルクの熱拡散率 a は位置 z によらず一定とする。境界条件は、加熱面側については実験に合わせて熱流束を一定とし、空気側は空気温度を一定とした。バルク表面と空気の間では自然対流が起これると考え、熱伝達率を $4.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした。バルクと加熱面の境界では、Table 1に示した通り、3種類の伝熱現象が同時に起こっていると考えられ、その伝熱コンダクタンスを見積もることは難しいので、ここでは適当に 1 m^2 あたり 50 W/K とした。

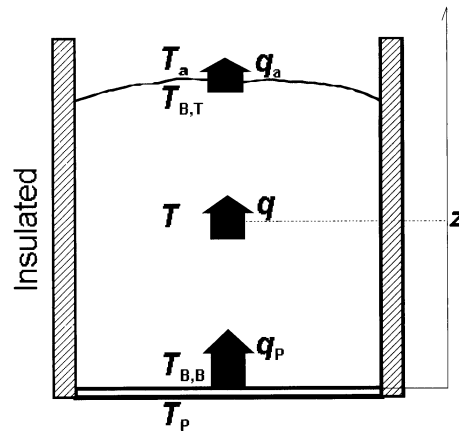


Fig.2 One-dimensional heat transfer model

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

熱拡散率 a [m^2/s]の推算にあたっては、バルクを固体（食材小片）と気体（空気）の混合物であると考えた。さらに、小片の物性値は水と同じだと考え、空気、水の物性値には、Table 2に示す 0.1 MPa 、 340 K の値を用いた。

固気混合物の特性を表す量として、空隙率 ϵ （バルク全体の体積に対する気体体積の割合）と気体質量割合 χ （バルク全体の質量に対する気体質量の割合）を求める。具体的に、小片としてモヤシを用いた場合の値の例を示す。モヤシ 1 kg を 245 mm 四方の角柱状容器に入れたところ、バルク高さはおよそ 50 mm となった。これより混合物の密度 ρ_M は 333.2 kg/m^3 となる。混合

Table 2 Properties used in this estimation

	λ [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK]
Water	0.6569	979.48	4188
Air	0.029	1.024	1009

物の密度を式(4)で表すことができるとすれば、これより逆算して空隙率 ϵ が 0.6605 と求められる。

$$\rho_M = \epsilon \rho_g + (1 - \epsilon) \rho_s \quad (4)$$

また、 χ と ϵ の定義より、これらの間に式(5)なる関係が導かれる。これより χ は 0.002030 と求められる。

$$\frac{1}{\chi} - 1 = \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \frac{\rho_s}{\rho_g} \quad (5)$$

比熱は、各成分の質量割合を掛けて加算すればよいので、式(6)より 4181 J/kgK となる。

$$c_M = \chi c_g + (1 - \chi) c_s \quad (6)$$

被加熱体であるバルクは、小片と空気の混合物であるから、これを連続体とみなしたときの有効熱伝導率は非常に小さいと推察される。熱伝導率は非加成性であるため、混合物の熱伝導率を見積もるためには構造モデルが必要となる。ここでは、文献[3]中の充填層有効熱伝導率の式から、流体は静止、ふく射の影響は無視という仮定の下で式(7)を用いた。なお、式中の ϕ は「粒子接触点近傍の有効膜厚さ/粒径」で、 ϵ と λ_s / λ_g の値より文献[3]中の図を用いて約 0.13 となる。これより $\lambda_M = 0.08091$ W/mK が得られる。この λ_M 、 ρ_M 、 c_M の値よりバルクの熱拡散率は 5.807×10^{-8} m²/s と求められ、これは空気の 2.806×10^{-5} m²/s、水の 1.601×10^{-7} m²/s よりもさらに小さい値である。

以上より、炒め過程における被加熱物をバルクとみなした場合、そのバルク内における熱拡散率は非常に小さいと考えられることがわかった。この値を用いて式(3)の計算を行った結果は、実験結果と合わせて Fig.6 に示す。

$$\lambda_M = \lambda_g \left(\epsilon + \frac{1 - \epsilon}{\phi + \frac{2\lambda_g}{3\lambda_s}} \right) \quad (7)$$

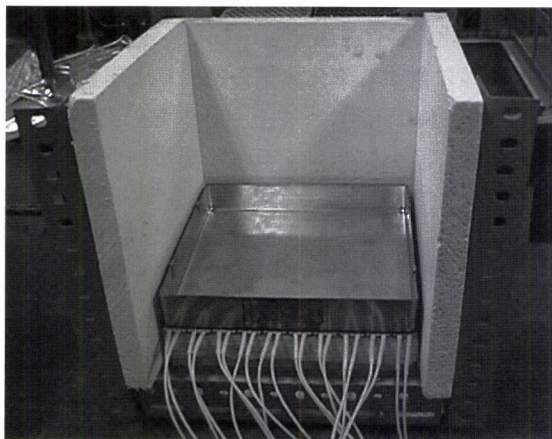


Fig.3 A photograph of assembled heating unit

3.2 実験装置

実験に用いた加熱装置の写真を Fig.3 に示す。この図では撮影のために一方の壁を外してあるが、実際には四方を断熱材の壁で囲んで、バルクから横方向への放熱を抑えている。これによりバルク内の熱流は 1 方向、すなわち Fig.2 に示した 1 次元の計算モデルに近いものとなり、計算値との比較を行うことができる。自作のヒータユニットは、1 辺が 245 mm の正方形である銅角鍋の裏側に電気ヒータをほぼ隙間なく取り付けただけで、加熱面裏側の 3 箇所に T 型熱電対をハンダ付けして加熱面温度を測定できるようにしてある。加熱面温度はどうしても端の方で低くなるため均一とは言えないが、面積が大きいので中央部付近ではほぼ均一とみなせる。したがって、加熱面温度とバルク内温度の測定は全て中央部で行うこととした。

次に、バルク内温度分布の計測法について説明する。前節の結果より、バルク内の熱拡散率はかなり小さいと考えられるため、等温面を横切る方向にセンサが貫通して設置されていた場合、センサ内部の熱伝導により測定誤差を生じてしまう。そこで、Fig.4 に示すゲート型のセンサユニットを採用した。フレームの材料には、熱拡散率の小さいベークライトの薄板を用いた。これに、図のように T 型熱電対の素線を取り付け、中央位置で接点をハンダ付けした。加熱面から 3 点の温度測定点までの距離は約 2 mm, 22 mm, 48 mm としているが、熱電対素線はどうしてもたるみがちである。2 mm がたるむと加熱面に触れてしまうため、これを張らせることを優先して、他は意識的に若干ゆるめに取り付けた。このため、 ± 5 mm 程度は容易に測定位置がずれてしまうので、測定間隔をあまり小さくすることはできなかった。

なお、温度測定には江藤電気(株)製のデータロガー

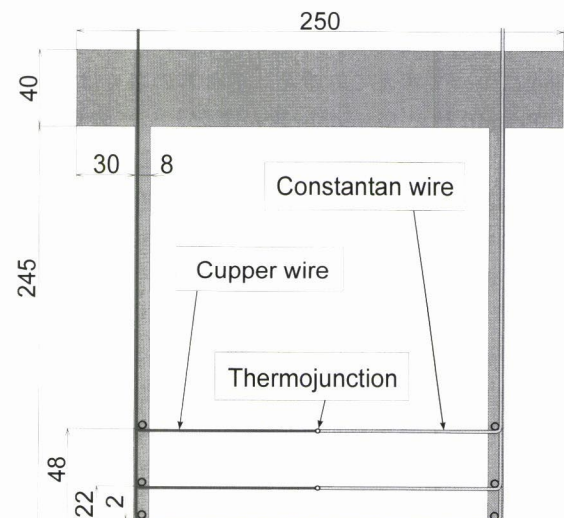


Fig.4 Gate-type sensor unit (unit : mm)

THERMODAC-E 5001A を用い、これに RS-232C インタフェースを介して PC を接続し、データの記録を行った。データ計測間隔は 2 sec である。

3.3 静止バルク内の温度分布測定

前節で述べた実験装置を用いて、実際に野菜小片のバルクによる実験を行い、攪拌を行わずに加熱した時の温度変化を調べた。サンプルにはモヤシを用い、加熱時に油は使用しなかった。Fig.4 からわかるように、ゲート型ユニットはバルクの中に後から挿入することができないので、予めこれを仕込んだ状態でバルクを形成しなければならない。これには多少時間がかかるため、前もって加熱面を高温にしておいては、測定開始時の条件を一定にすることができない。そこでこの実験では、予めバルクを形成してから加熱を開始した。

ヒータ入力 $\dot{Q}_H=600 \text{ W}$ ($q_P=10 \text{ kW/m}^2$) の実験結果を Fig.5 に示す。加熱面温度 T_P はヒータ入力開始後すぐに上昇を始める。やや遅れて $z=2 \text{ mm}$ における温度が上昇を始め、170 sec ほど経ったところで $z=22 \text{ mm}$ が上昇を開始するが、 $z=48 \text{ mm}$ では 500 sec 以上経過するまでほとんど温度変化がみられない。

そして $t=250 \text{ sec}$ 辺りから温度データが小刻みな変動を始め、それと同時に $z=22 \text{ mm}$ における温度上昇速度が速くなる傾向がみられた。このとき、加熱面温度はおよそ 100°C となっており、実験中にジュージュと音が聞こえ始めたということも考えると、ちょうどこの頃から加熱面での水分蒸散が盛んになり、これがバルク上方へと移動することで、バルク内の熱移動が促進されていたものと考えられる。高温部で蒸気が発生し、それが低温部で凝縮することで熱が輸送されるという、サーモサイフォン式ヒートパイプと同様の現象が野菜バルクの中で起っているということは興味深い。しかし、このときバルク内部には水蒸気が充満し

ており、もはや蒸している状態に近いと考えられ、炒め調理としては失敗である。もちろん、今回の実験はバルク内部への熱浸透性を調べることが目的であり、この加熱条件は炒め調理に適したものではないが、実際の炒め調理においても、攪拌が不十分で火力が弱ければこのような状況になり得る。このことから、上手な炒め調理のコツとして知られる「強火で手早く」というのは、バルク内に蒸気が充満するような状況を作らずに調理を完了させるべきである、という意味だと解釈できる。

Fig.6 には、3.1 節で説明した計算の結果と実験結果とをまとめて示した。この図は、ある時間におけるバルク内の温度分布を示したもので、実験において T_P が 100°C を越えた $t=300 \text{ sec}$ のデータを太線で表示している。 $z=22 \text{ mm}$ に注目すると、水蒸気の発生が顕著でない $t=200 \text{ sec}$ までは計算・実験の両者ともほとんど温度が上昇していないことがわかる。すなわち、野菜バルクの熱拡散率は極めて小さく、バルク上方への熱移動はほとんど生じないことが明らかとなった。計算に用いた熱拡散率の推算値もかなり小さい値であったが、 $z=2 \text{ mm}$ のデータをみると、実際の熱拡散率はさらに幾分か小さいものと考えられる。以上より、適正な炒め過程においては、攪拌を行わない状態での熱浸透性は極めて小さいことがわかった。そこで次に、加熱面から数 mm の領域における熱浸透性について、さらに詳しく調べるための実験を行うことにした。

この実験では、2 本のモヤシにシース径 $\phi 0.5 \text{ mm}$ の T 型シース熱電対を差し込み、1 本は加熱面に接触させ、もう 1 本はおよそ $z=2 \text{ mm}$ の位置に保持して温度を測定した。結果の 1 例を Fig.7 に示す。図中に“Contact”と示されたものが接触させたモヤシの温度で、以降これを T_C と記す。同様に“Non-contact”と示されたのが接触させないもので、これを T_N とする。図より、 T_C

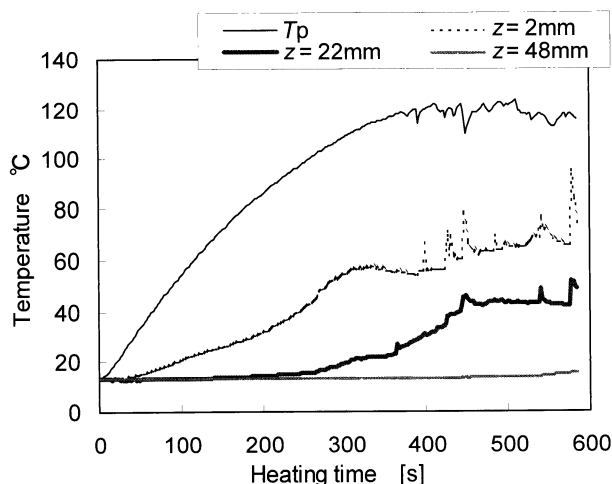


Fig.5 Temperature histories observed at several points in the bulk

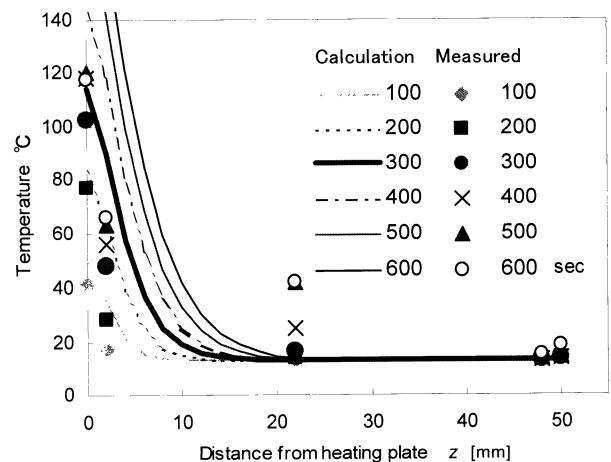


Fig.6 Temperature distribution in the bulk (Conditions: $q_P=10 \text{ kW/m}^2$, $T_{P,0}=T_{B,0}=15^\circ\text{C}$)

の上昇は T_N よりもかなり速いことがわかる. そして $T_p > 100^\circ\text{C}$ となる $t=250$ sec 頃から, T_N の上昇速度が大きくなっているが, 前述の通り, これはもはや炒めていると言える状態ではない. 以上より, 実際に近い炒め調理過程においては, 加熱面からバルクへの伝熱は, ほとんどが加熱面と小片の接触に起因するものであることが明らかとなった.

3.4 本章のまとめ

本章では, 攪拌を伴わない静止バルクの伝熱機構について詳細に調べた. まずバルクを固気混合物とみなした計算を行い, 次に, 同一条件での実験を行った. 適正な炒め調理と考えられる条件においては両者の結果は一致したため, これより, 静止バルクの熱浸透性は極めて低いことが明らかとなった. さらに, 加熱面からバルクへの熱移動のほとんどが加熱面と小片との接触によって生じていることも, 実験的に確かめられた. 攪拌をしなくてもバルクの温度を上昇させることはできるが, それでは適正な炒め調理とは言えないこ

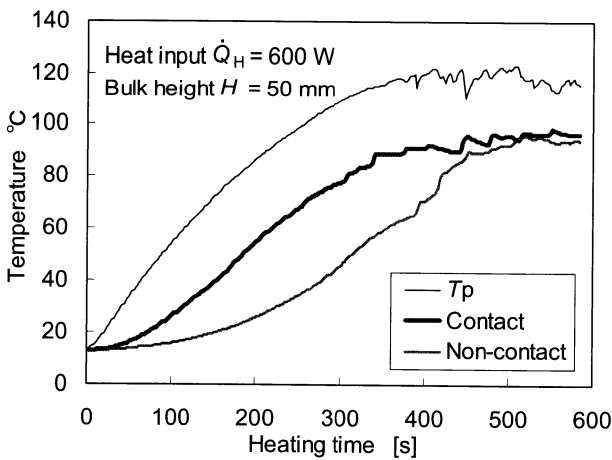


Fig.7 Temperature of the pieces in the vicinity of heating surface

ともわかった. すなわち, 炒め調理過程における攪拌とは, 伝熱特性に対しても支配的な影響を及ぼす, 極めて重要な操作であることが明らかになった.

この理由は, バルクの構造が, 熱伝導率の極めて低い空気連続相中に, 食材小片が分散相として存在するという状態になっているためである. このような分散性の高いバルクにおいて均一な加熱を行うためには, 攪拌によって強制的な物質移動を生じさせ, それをもって熱拡散の代替とさせることが不可欠であると考えられる. このような伝熱機構に対しては, 一般的な強制対流熱伝達のモデルは適用しにくいいため, 次章では, 接触による加熱と攪拌に起因する熱拡散とを組み合わせ, 独自のモデル化を行うことにした.

4. 炒め調理過程における伝熱機構のモデリング

4.1 モデルの概要

前章の結果に基づき, 高分散性バルクの攪拌加熱過程一般に適用可能な計算モデルの構築を試みる. モデリングの前提となる仮定は次の3点である.

- (i) 加熱面からバルク最底部への熱移動は, ほとんどが接触熱伝達のみによる.
 - (ii) 静止状態のバルクでは, 最底部から他の部分への熱移動は起らない (=バルクの熱拡散率を0とする).
 - (iii) 攪拌によって, 最底部に存在した小片は, 完全にバルク内に均一に分布する状態となる. この結果, バルク内における温度分布はランダムなものとなるため, 平均値をもってバルク温度とみなすことができる.
- また, モデリングの前提ではないが, 簡単にするため (iv) を仮定する.
- (iv) 各小片の熱物性値は変わらず, 水蒸気発生も起こらない.

以上の仮定より, 炒め過程が Fig.8 のようにモデル化できる.

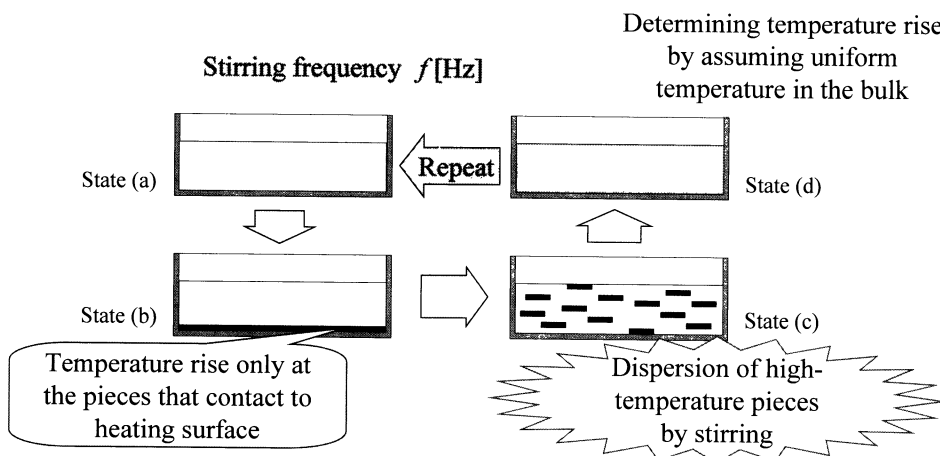


Fig.8 Illustration of proposed model that explains heat transfer in the stir-fried bulk

攪拌直後は State (a) のようにバルク内温度は均一であり、それが State (b) のように高温の加熱面に接触することにより、バルク最底部のみで温度が上昇する。そして攪拌によって State (c) のように高温の小片がバルク内に分散する。このとき全ての小片の温度を平均したものがバルク温度であるとしたので、State (d) におけるバルク温度は、State (a) よりも高くなっている。これを繰り返すことで、バルク温度が上昇を続ける。

以下、(i), (ii) に基づく静止バルクの伝熱モデル、(iii) に基づく攪拌モデルについて、それぞれの詳細な説明を行う。

4.2 最底部への伝熱量

このモデルに基づいて計算を行うためには、バルクの特性を定量的に表し、加熱面からバルク最底部への伝熱量を定式化する必要がある。

体積 V_B のバルク内に N 個の小片が含まれているとき、小片 1 個当たりの占有体積は V_B/N で表される。これと同じ体積をもつ立方体を考えたとき、その一辺の長さは式 (8) で表される。

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{V_B}{N}} \quad (8)$$

これを 1 層厚さ δ と定義する。容器が小片よりも十分に大きいならば、この δ は容器にはよらず一意に定まると考えられるため、これをバルクの性質を表す特性値として用いる。例えば玉ねぎのスライスを炒める場合、初めは非常にかさ張るが、しだいに小片がしんなりとして体積が小さくなるということは経験的によく知られている。 δ を用いればこのようなバルク特性の変化を定量的に表すことができると考えられる。

次に、加熱面の面積を S とすれば、1 層に含まれる小片数 N は次式で表される。

$$N = S / \delta^2 \quad (9)$$

もし被加熱体である小片が、球形で摩擦のない物体であったとすれば、この球体はバルク内に最密充填の状態となって、最底層に含まれる N 個の球体が全て加熱面に接触すると考えられる。しかし、例えばモヤシのように、細長い形状でしかも互いに引っかかり合うような材料の場合、最底層に含まれる n 個の小片の内、ごく一部のみが加熱面に接触する状態となるであろう。そこで、実際に加熱面に接触している小片の数を ηn とし、 η を接触率と定義する。この η によって、小片の形状に起因するバルクの伝熱特性の違いを定量的に表すことができると思われる。

ここで、仮定(i)を最も簡単に解釈し、この ηn 個の小片の温度上昇に関与した熱量のみを加熱面からバルクへの伝熱量と考えて、その定式化を行う。

小片 1 個の質量および比熱をそれぞれ m_s [kg], c_s

[J/kgK] とすれば、小片 1 個が受ける熱量を Q_s [J] として

$$\frac{dQ_s}{dt} = m_s c_s \frac{dT_s}{dt} \quad (10)$$

が成り立つ。 T_s [°C] は小片の温度で、このとき小片内部での温度分布は考えず均一とする。そして、このときの加熱面と小片の間の伝熱コンダクタンスを G [W/K] とすれば、式 (11) が成り立つ。

$$\frac{dQ_s}{dt} = G (T_p - T_s) \quad (11)$$

式 (10), (11) より T_s に関する微分方程式が得られる。 m_s , c_s , G , T_p は時間 t [sec] に関して一定とし、初期条件を $T_s = T_{s,ini}$: $t = 0$ とすれば、容易に式 (12) のような解が得られる。ただし A は式 (13) で定義される時定数である。

$$T_s = T_p - \exp\left(-\frac{t}{A}\right) (T_p - T_{s,ini}) \quad (12)$$

$$A = \frac{m_s c_s}{G} \quad (13)$$

これにて、初期温度 $T_{s,ini}$ なる小片 1 個の、時間 t における温度 T_s が求められる。

以上のようにして、小片 1 個当たりの伝熱量が求められるので、これに加熱面に接触する小片数 ηn を掛けただけのもので、バルク全体が受ける伝熱量となる。

4.3 攪拌過程のモデル化

本モデルでは、攪拌によってバルク全体の温度が上昇すると考える。仮定(iii)は最も簡単な考え方であり、1 回攪拌されると、それまでにバルク最底部が受けた熱量が瞬時に全体に拡散してバルク全体が等温になる、という計算を行えばよい。Fig.9 は本モデル計算による最底部の温度変化の 1 例である。ただしこの図では、

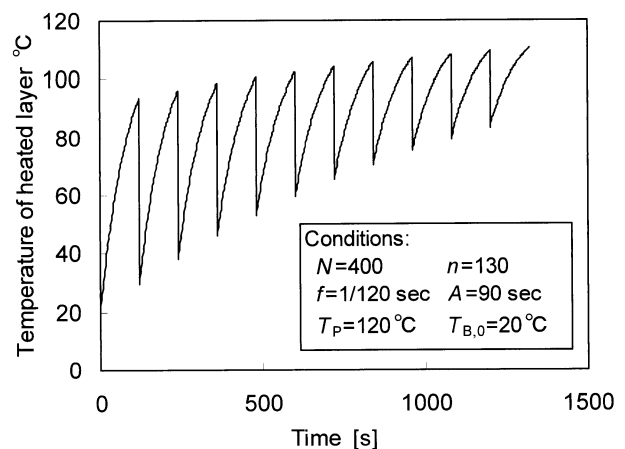


Fig.9 Calculated temperature history in the bottom layer

わかりやすくするために非現実的な計算条件を設定している。以後の説明と対照させれば、図中の上のピークが攪拌直前の温度 T_i を、下のピークが攪拌直後の温度 $T_{B,i}$ を表している。攪拌頻度を f [Hz] とし、 $i-1$ 回目の攪拌直後および i 回目の攪拌直前の最底部の温度をそれぞれ $T_{B,i-1}$ 、 T_i とすれば、その間に最底部が受けた熱量は、前節における考察より

$$\Delta Q = \eta n m_s c_s (T_i - T_{B,i-1}) \quad (14)$$

ここで、式(12)より、

$$T_i = T_P - \exp\left(-\frac{1}{fA}\right) (T_P - T_{B,i-1}) \quad (15)$$

となるから、

$$\Delta Q = \eta n m_s c_s (T_P - T_{B,i-1}) \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{fA}\right)\right) \quad (16)$$

この熱量が、攪拌によって瞬時に全体に拡散して、バルク温度が $T_{B,i}$ に上昇したとすれば

$$\Delta Q = N m_s c_s (T_{B,i} - T_{B,i-1}) \quad (17)$$

式(16), (17)より、 i 回目の攪拌後のバルク温度 $T_{B,i}$ は式(18)のように求められる。

$$\begin{aligned} T_{B,i} &= T_{B,i-1} + \frac{\eta n}{N} (T_P - T_{B,i-1}) \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{fA}\right)\right) \quad (18) \\ &= T_{B,i-1} \left(1 - \frac{\eta n}{N} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{fA}\right)\right)\right) + T_P \frac{\eta n}{N} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{fA}\right)\right) \end{aligned}$$

ここで

$$\zeta = 1 - \frac{\eta n}{N} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{fA}\right)\right) \quad (19)$$

$$\xi = (1 - \zeta) T_P \quad (20)$$

とおけば

$$T_{B,i} = \zeta T_{B,i-1} + \xi \quad (21)$$

これを $i=0$ における $T_{B,0}$ 、すなわち $T_{B,0}$ で表せば

$$\begin{aligned} T_{B,i} &= \zeta^i T_{B,0} + \sum_{k=1}^i \zeta^k \xi \\ &= \zeta^i T_{B,0} + \frac{\xi (\zeta^i - 1)}{(\zeta - 1)} \quad (22) \end{aligned}$$

ξ を元に戻して、最終的に次式を得る。

$$T_{B,i} = T_P - \zeta^i (T_P - T_{B,0}) \quad (23)$$

4.4 モヤシバルクへの適用例

具体的にモヤシを対象として、バルクの特値を算出してみる。透明なアクリル板に内径 $\phi 250$ mm の円筒を置き、その中に生のモヤシ 800 g を投入したところ、およそ $N=1000$, $H=80$ mm となったため、これより 1 層厚さ $\delta=15.8$ mm, $N=250$ と計算される。Fig.10 は透明な底板の下側から観察した様子であり、これより底面に接触しているモヤシを数えたところ約 67 本だったので、接触率は $\eta=0.34$ となる。

実際に計算を行うためには、小片の加熱の時定数が必要となる。そこで、150°C の加熱面上でモヤシ 1 本を加熱したときの温度変化を測定し、その結果からモヤシ 1 片の時定数を計算したところ $A=28.7$ sec となった。この値は、モヤシと加熱面の間の接触圧力や、周辺の温度・湿度など多くの条件に影響を受けるため、汎用性のある整理を行うためには、実験条件を慎重に検討する必要がある。そもそも、水分を多く含む食品素材の場合、たとえ加熱温度が高くても品温は一旦 100°C で停滞するので、時定数という考え方を適用してよいかどうかという点に疑問が感じられる。しかしながら、これらは今後の課題とし、とりあえず今回は予備実験から求めた値を用いて計算を行ってみる。

4.5 計算結果

計算の結果を Fig.11 に示す。Fig.11 (a) は攪拌頻度 f をパラメータとした計算例である。この結果より、攪拌頻度は、少なくとも伝熱促進という面から言えば、あまり大きくする必要はないことが示唆される。実際に必要な攪拌の頻度は、加熱面への焦げ付きなど、伝熱以外の条件により決定されるものと思われる。Fig.11 (b) は 1 層厚さ δ をパラメータとした計算例である。加熱の進行に伴い各小片がしんなりしてバルクの体積が

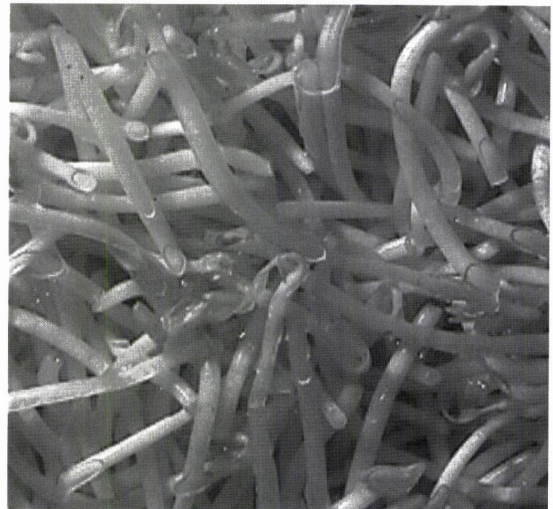


Fig.10 Sprout pieces touching the bottom surface

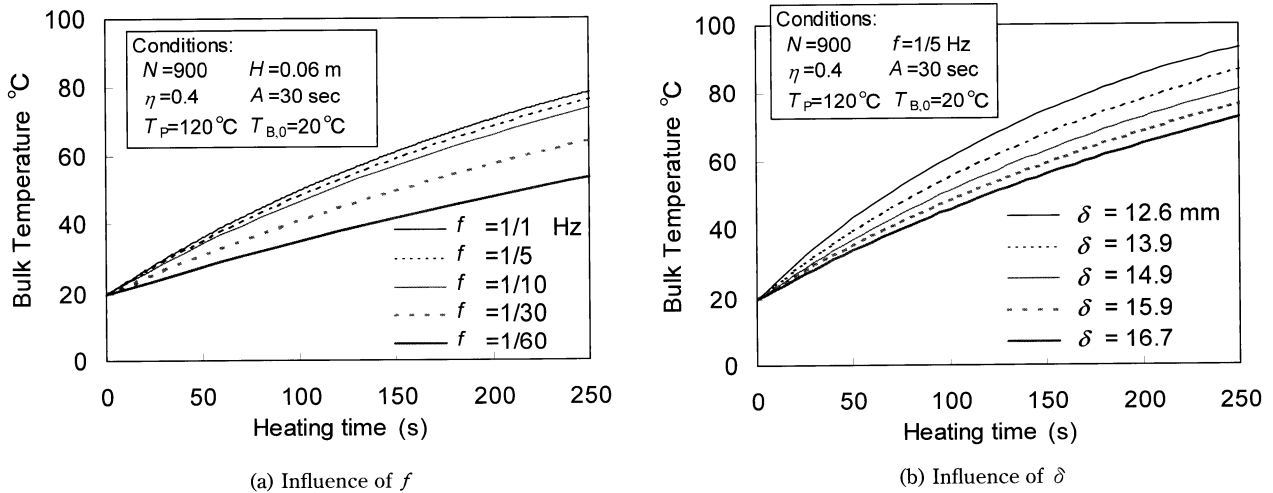


Fig.11 Calculation results

減少すると、伝熱速度が促進されるということが計算の結果から読み取れる。ただし、1層厚さ δ が変化すると接触率 η の値にも影響を及ぼすので、実際にはそれほど単純な傾向にはならないと思われる。

なお、Fig.11 (a)の $f = 1/10$ Hzにおける昇温曲線に対して、式(2)を用いたフィッティングを行ったところ、加熱面とバルクとの熱伝達率は約 $155 \text{ W/m}^2\text{K}$ と見積もられた。フライ調理過程における熱伝達率[4,5]と比較しても、これはまずまず妥当な値と考えられる。

以上、本モデルにより、炒め調理過程の伝熱特性を定量的に評価するための基礎が準備できたと考える。今後は、実測データとの比較を通して、実際の現象に対する適用可能性を高めていくことが必要である。

5. 結 論

炒め調理過程の伝熱メカニズムについて検討した。モヤシを材料に用いて、攪拌を行わない静止状態のバルクにおける温度分布を実測した結果より、静止バルクにおいてはほとんどバルク上部への熱拡散が起こらないことを明らかにし、これより攪拌操作が伝熱現象に強く関与するものであることを見出した。以上の知見に基づいて、バルクの伝熱特性を定量的に評価するための特性値を提案し、伝熱メカニズムのモデル化を行って、バルク温度の時間変化を計算で求める手法を構築した。計算結果の1例より加熱面とバルクとの熱伝達率を推算したところ $155 \text{ W/m}^2\text{K}$ となり、本モデルによる計算値はまずまず妥当な結果を与えていると思われる。本モデルは、炒め調理過程の定量評価に端緒を付けるものであり、今後は実測データとの比較を通してモデルの実用性向上を図って行きたいと考えている。

末筆ながら、本研究は社団法人日本食品機械工業会

からの委託研究（平成11～12年度）の一部として行われたものであることを記して感謝の意を表したい。

記号説明

- A : Time constant for temperature change [sec]
- G : Heat conductance [W/K]
- H : Bulk height [m]
- N : Number of pieces included in a bulk
- Q : Transferred heat amount [J]
- S : Area [m^2]
- T : Temperature [$^\circ\text{C}$]
- V : Volume [m^3]
- a : Thermal diffusivity [m^2/sec]
- i : Number of stirring
- f : Frequency of stirring [Hz]
- t : Time [sec]
- h : Heat transfer coefficient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
- m : Mass [kg]
- n : Number of pieces included in a layer
- c : Specific heat capacity [J/kgK]
- q : Heat flux [kW/m^2]
- z : Vertical position [mm], [m]
- χ : Mass fraction of air
- δ : Thickness of a layer [m]
- ϵ : Porosity
- ϕ : Parameter used in a correlation for effective heat conductivity of packed column
- γ : Latent heat of vaporization [J/kg]
- η : Fraction of pieces touching the heating surface
- λ : Heat conductivity [W/mK]
- ρ : Density [kg/m^3]

Subscripts

s : Solid, g : Gas, M : Mixture, P : Heating
plate, B : Bulk, a : Ambient, ini : Initial state,
C : Contact, N : Non-contact, H : Heater, Ev :
Evaporation

引用文献

- [1] 調理科学研究会編；“調理科学”，光生館，1984，p.57.
- [2] 産業調査会編；“新しい食品加工技術と装置”，産業調査会，1991，p.93.
- [3] 日本機械学会編；“伝熱工学資料(第4版)”，日本機械学会，1986，p.91.
- [4] B. E. Farkas, R. P. Singh, T. R. Rumsey ; Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II, Model solution and verification, *Int. J. Food Engineering*, **29**, 227-248 (1996).
- [5] S. Sahin, S. K. Sastry, L. Bayindirli ; The determination of convective heat transfer coefficient during frying, *Int. J. Food Engineering*, **39**, 307-311 (1999).

要 旨

炒め調理過程の伝熱メカニズムについて検討した。モヤシを材料に用いて、攪拌を行わない静止状態のバルクにおける温度分布の実測を行った結果、加熱面に接触していないモヤシ片ではほとんど温度上昇がみられないことが明らかとなった。このことから、炒め調理における攪拌とは、強制的な物質移動によって熱拡散を代替するための操作であり、伝熱という面でも非常に大きな役割を担っていることがわかった。以上の知見に基づき、様々なバルクの伝熱特性を定量的に評価するために1層厚さ、接触率という特性値を導入し、さらに攪拌頻度をパラメータとして攪拌に起因する熱拡散のモデル化を行うことにより、バルク温度の時間変化を計算で求める手法を構築した。計算結果の1例より、加熱面とバルクの間での熱伝達率を推算したところ $155 \text{ W/m}^2\text{K}$ となり、本モデルによりまずまず妥当な結果を得られることが確認できた。