◆◆◆ 解説 (2017 年度日本食品工学会学会賞) ◆◆◆

食品加熱操作における熱・水分移動・反応の工学的研究

酒 井 昇

東京海洋大学

Study of Heat and Moisture Transfer and Reaction in Food Thermal Processing

Noboru SAKAI

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

The author has conducted engineering research on thermal food processing (TFP) using various heating methods to intend optimal operations. In this paper the following four themes related to TFP were reviewed. (1) Heat and moisture transfer and shrinkage deformation: Theoretical analysis of heat and moisture transfer, which are the most basic phenomena in TFP, was reviewed, and the strain-stress analysis was introduced to reveal the mechanism of shrinkage deformation and crack formation of foods during drying or roasting processes. (2) Heat transfer with convection: When convection occurs in a container or a vessel, the heat transfer rate becomes much larger than that of heat-conductive food, and it is necessary to consider the natural convection in the fundamental equations. A method to predict the temperature history of liquid food using its apparent viscosity was developed. In addition, an analysis of natural convection in a pan heated by induction heating (IH) and gas range using Computational Fluid Dynamics was outlined. (3) TFP with internal heat generation: During microwave heating, radio-frequency heating, and ohmic heating, foods can be heated faster than conventional heating methods because of the internal heating, but uneven heating is a crucial problem. A computational method was introduced for predicting the temperature distributions in food by coupling an analysis of the electromagnetic field and the heat transfer. (4) Chemical reaction accompanying heating: Various chemical reactions occur with heating, which affects the quality of foods. Kinetic analysis of protein denaturation and color change due to Maillard reaction during fish grilling was outlined.

Keywords: Thermal food processing, Heat and moisture transfer, Natural convection, Microwave heating, Chemical reactions

1. は じ め に

殺菌をはじめとして乾燥、調理、解凍などの食品の加熱操作は食品産業において重要なプロセスである。殺菌プロセスを考えると、加熱不足による殺菌不足は食中毒を引き起こす恐れがあるため、絶対に避けなければならないが、殺菌不足を恐れるあまり加熱し過ぎると栄養成分や呈味成分の分解などの品質の低下を招く。また、食品の加熱調理においては、加熱に伴い肉・魚ではタンパク質の変性による収縮と脱水がおこり、加熱しすぎると固くなって不味くなる。逆に澱粉食品では加熱による澱粉の糊化に伴い吸水・膨潤するが、吸水しすぎると食感が悪くなり不味くなる。したがっ

て、食品の加熱操作においては、食品の安全性と食品の品質を考慮した最適な操作条件を決めることは極めて重要となる。さらに、従来の加熱法に加えて、通電加熱やマイクロ波・高周波加熱などの食品内部から加熱する方法も食品産業において取り入れられ、加熱法の違いによっても、その操作条件は異なる。そのため、企業の商品開発においては、製造プロセスの種々の条件は試行錯誤的に決められ、多くの時間とコストを必要としてきた。理論的・解析的な研究をもとにコンピュータシミュレーション技術が開発できれば、試行錯誤による時間的・コスト的ロスを抑えることが期待できる。このような背景のもと、筆者は最適な加熱操作の検討を目的として、種々の加熱法を用いた食品の加熱操作について工学的に研究を行ってきた。本稿では、その研究内容の一部を概説する。

(受付 2018 年 3 月 1 日, 受理 2018 年 5 月 14 日)

〒 108-8477 東京都港区港南 4-5-7

† Fax: 03-5463-0622, sakai@kaiyodai.ac.jp

2. 熱・水分移動と収縮変形

食品の殺菌、焼成、調理、乾燥などの加熱操作において、そのプロセスを定量化する場合、まず熱移動が基本となる。また、食品の乾燥や焼成過程においては、熱移動と同時に水分移動が起こり、さらに水分移動によって食品自体の収縮や変形が起こるため、プロセスを定量化する上で水分移動も基本的な現象となる。最初に熱移動と水分移動の取り扱いについて述べる。

2.1 熱移動

固体食品の乾燥や焼成を考えると、食品内部の熱移動は主に伝導伝熱が支配的となり、その基礎式は熱伝導方程式で表される。熱伝導方程式は直交座標系、円筒座標系、球座標系で表記されるが、後述の物質移動、缶内対流も含めて統一的に表記するために、ここでは円筒座標系について記述する。

$$\rho_b C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} - H_L V_e + Q \quad (1)$$

ここで、 V_e は内部蒸発速度、 H_L は水分蒸発潜熱である。 Q は食品内部の発熱量で、後述するように、マイクロ波加熱、通電加熱などの食品内部で発熱する加熱においてはこの値をいかに求めるかが重要となる。また、遠赤外線加熱を熱源とした場合、遠赤外線が食品内部にまで浸透し、おいしく調理されると喧伝されることもあるが、水分の多い食品では遠赤外線の浸透性は低く、以下の境界条件中に放射伝熱項として組み込まれる [1]。

$$-k \text{grad}(T) \cdot \mathbf{n} = -H_L h_m (C_w - C_{we}) + h_t (T_a - T) + \phi \sigma_s (T_h^4 - T^4) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{n}$ は法線方向単位ベクトルである。また、右辺第1項は食品表面での水分蒸発による蒸発潜熱を表し、 h_m は水の境膜物質移動係数、 C_{we} は平衡水分濃度である。第2項は周りの高温流体からの熱伝達を表し、 h_t は熱伝達係数、 T_a は周りの高温流体温度である。第3項は周りに高温物体がある場合の放射伝熱を表す。 T_h はヒーター温度あるいはオープンであれば壁面温度、 ϕ は総括放射伝熱係数、 σ_s はステファンボルツマン定数である。

冷凍食品を解凍する場合、解凍過程において融解潜熱を必要とし、物性値も解凍前後で変化するため、温度予測を行うためには潜熱および物性値の変化も考慮する必要がある。解凍（凍結）モデルは融解（凝固）潜熱の取り扱いによって、いくつか提案されているが、代表的なものに見かけ比熱モデル [2,3] がある。潜熱は見かけ上比熱の変化として与えられ、基礎式は単純な熱伝導方程式で与えられる。

$$\rho_b C_{app} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + Q \quad (3)$$

上式は式(1)と同じ形をしているが、見かけ比熱 C_{app} は潜熱を含んでいるため、凍結点近傍で大きな値となる。また、熱伝導率 k 、密度 ρ も温度によって値が変化するが、とくに相変化前後に物性値は大きな変化がみられる。例えば、氷の熱伝導率は水の熱伝導率の4倍である。解凍過程の計算を行うためには、熱物性値を数式として表現する必要がある。多くの場合は実測値に基づいた実験式あるいは半理論式で表される。

2.2 水分移動

食品の多くは水分を含み、加熱操作中に水分移動および水分蒸発が起こる。水分移動は、水分濃度勾配を駆動力とする拡散により起こるとすると、水分流束 $\mathbf{j}_m$ は、フィックの拡散法則により次式で表される。

$$\mathbf{j}_m = -D_w \text{grad}(C_w) \quad (4)$$

ここで、 D_w は拡散係数、 C_w は水分濃度である。この式を基に、食品内で水の物質収支をとると、基礎式として次式を得る。

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_w r \frac{\partial C_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w r \frac{\partial C_w}{\partial z} \right) \right\} - V_e \quad (5)$$

ここで、 V_e は内部蒸発速度である。

加熱対象食品が単一素材の場合、水分移動の駆動力は上式のように水分濃度で表される。しかし、吸水性が異なる食材から構成される場合は、同じ水分濃度でも吸水性の大きい物質へ水分が移動するため、食材間の界面で水分濃度にギャップを生じ、上式では表すことができない。このような吸水性の異なる複合素材からなる食品を取り扱う場合には、水分濃度の代わりに物質移動ポテンシャル ϕ (ケミカルポテンシャル) を用いることにより、見かけ上単一の食材として取り扱うことができる [4,5]。

$$\phi = \mu_{0w} + RT \ln a_w \quad (6)$$

ここで、 μ_{0w} は純水のケミカルポテンシャル、 R はガス定数、 a_w は水分活性である。水分濃度は吸着等温線を通して水分活性から求められる。計算した物質移動ポテンシャルは常に高いほうから低い方へ移動するが、物質移動ポテンシャルから水分濃度を逆算すると、界面での水分のギャップを表現でき、水分濃度の低い方から高い方へ移動する計算も可能となる。

米やパスタなどの澱粉食品においては、澱粉の糊化によって澱粉粒子の水分保持能力が大きく変わるため、水分移動は単純なフィックの法則では表されない。このような糊化過程を含む澱粉食品の水分移動には、澱粉の最大水分保持量（上限含水率）と実際の含水率の比の勾配を水分移動の駆動力とする水分移動方程式を用いることで現象を表現できる [6]。

$$\rho_s \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_w W^+ r \rho_s \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W}{W^+} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w W^+ r \rho_s \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{W}{W^+} \right) \right) \right\} \quad (7)$$

ここで、 W は含水率、 W^+ は上限含水率、 ρ_s は固体密度である。澱粉の糊化・分散度によって上限含水率は変化するが、澱粉の糊化・分散による水の拡散係数の変化も考慮する必要がある [6]。

以上の水分移動においては、基本的には水分濃度勾配を水分移動の駆動力としている。一方、タンパク質変性などの構造変化が起こり、食品内部に圧力が発生するような場合は、圧力勾配を駆動力として水分移動が起こる。この場合、水分流束 j_m は、ダルシーの法則により次式で表される。

$$j_m = -\frac{\lambda_w}{\mu_w} \text{grad}(P) \quad (8)$$

ここで、 λ_w は透過係数、 μ_w は粘度、 P は食品内圧力である。この式を基に、食品内で水の物質収支をとると、基礎式として次式を得る。

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda_w}{\mu_w} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\lambda_w}{\mu_w} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\} - V_c \quad (9)$$

脂身の多い肉の調理においては、水分と同時に脱油も起こる。油の移動についてもダルシーの法則に基づいた式 (9) と同じ移動方程式で表され、油分と水分のどちらが排出されやすいかは、移動係数 (λ_w/μ_w , λ_o/μ_o) の大小によって決まる。圧力に関しては、水・油2成分について以下のように数式化できる。肉の構造をタンパク質でできた容器の中に水と油が分散していると考え、タンパク質の熱変性によって容器が収縮すると中の水と油の圧力が増大すると仮定する。体積要素は固形分 (タンパク質) と水分、油分から構成されるとし、全体、水分および油分の初期体積をそれぞれ V_i , V_{wi} , V_{oi} とする。タンパク質変性によって全体の体積が V に収縮し、水分および油分の体積は V_w , V_o に変化する。圧力は、固体の体積に対する (水分+油分) の体積比に比例すると仮定すると次式で表される [7]。

$$P = P_i \frac{V_i}{V} \frac{V_w + V_o}{V_{wi} + V_{oi}} = P_i \frac{1}{S_v} \frac{V_w + V_o}{V_{wi} + V_{oi}} \quad (10)$$

ここで、 S_v は固体の体積収縮率である。

上記の基礎式を無次元化したのち、数値計算を行うことにより、食品内の温度分布、水分分布、油分分布の経時間変化を求めることができる。計算例として、和牛ヒレ肉を過熱水蒸気で調理したときの結果 [7] を Fig. 1 に示す。図中のプロットは実測値であり、実線が計算値である。なお、計算には収縮の計算も含まれているが、収縮の計算については後述する。計算においては、過熱水蒸気温度 250℃、試料の大きさを半径 2 cm、高さ 2 cm の円筒形として、水分分布と油分分布の経時間変化を求め、トータル水分・油分変化として

Fig. 1 Comparison of calculated results with experimental ones for moisture content and oil content in super-heated steam heating of beef.

表している。熱源として過熱水蒸気を用いており、加熱初期には水蒸気の凝縮が起こる。凝縮潜熱が大きいため、表面温度は 60 秒ほどで 100℃ に到達する。この付近で水分増加が最大値となり、その後凝縮が蒸発に転ずるため水分増加率は減少していることがわかる。また、タンパク質変性による収縮により内部の水分が排出され、重量増加率は加熱途中からマイナスとなっている。油分についても加熱初期から徐々に減少し、平衡に到達するのに時間がかかっていることがわかる。同図に実測値を合わせて示したが、実測値と計算値の傾向は良好に一致し、計算結果は現象をほぼ再現しているといえる。

2.3 熱・水分移動に伴う収縮・膨潤

食品の乾燥、焼成などの熱操作においては加熱にともない水分が蒸発・減少し、食品は収縮する。また、タンパク質食品ではタンパク質の変性による内部圧力の増加により脱水が起こり収縮する。一方、澱粉食品では加熱に伴い糊化・吸水により膨潤する。このときの収縮・膨潤の基礎式は、(1) 応力-ひずみ関係式、(2) ひずみ-変位関係式、(3) 応力に関する平衡方程式あるいは仮想仕事の原理で表される。収縮と膨潤の基礎式は同じであるので、収縮を例に円筒座標系について以下に示す。

(1) 応力-ひずみ関係式

食品が収縮したときの局所的なひずみ増分 $d\varepsilon$ は、弾性によるひずみ増分 $d\varepsilon_s$ と水分減少によるひずみ増分 $d\varepsilon_i$ の和で表されると仮定する。食品の多くは粘弾性体と考えられるが、粘性によるひずみ増分は水分減少によるひずみ増分に含まれていることになる。

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_s\} + \{d\varepsilon_i\} \quad (11)$$

弾性のひずみを考えると、次のように軸対称構成方程式 (応力-ひずみ関係式) は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= \begin{Bmatrix} d\sigma_r \\ d\sigma_z \\ d\sigma_\theta \\ d\tau_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{E_y(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{sr} \\ d\varepsilon_{sz} \\ d\varepsilon_{s\theta} \\ d\gamma_{srz} \end{Bmatrix} \\ &= [D_M] \{d\varepsilon_s\} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで, σ , E_y , ν はそれぞれ応力, ヤング率およびポアソン比である.

また, 水分減少に基づくひずみ増分は水分蒸発・脱水による体積減少に関係付けられる.

$$\{d\varepsilon_i\} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{ri} \\ d\varepsilon_{zi} \\ d\varepsilon_{\theta i} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} dS_r \\ dS_z \\ dS_\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

ここで S_r , S_z , S_θ は各方向の収縮率で, 収縮が等方性の場合は体積収縮率 S_v を用いて,

$$S_r = S_z = S_\theta = S_v^{1/3} \quad (14)$$

で表される.

(2) ひずみ-変位関係式

軸対象を仮定すると, θ 方向の変位はゼロとして, ひずみ-変位関係式は次式で表される.

$$\{d\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du_r \\ dv_z \end{Bmatrix} = [A_M] \{dU\} \quad (15)$$

ここで $[A_M]$ はひずみ-節点変位マトリックス, $\{dU\}$ は変位ベクトルである.

(3) 仮想仕事の原理

応力に関する平衡方程式および力学的境界条件の代わりに仮想仕事の原理を用いることができる. 外部から力および圧力がかからないとして, 仮想仕事最小の原理を適用すると次式が得られる.

$$\int_V \delta \{d\varepsilon\}^T \{d\sigma\} dV = 0 \quad (16)$$

有限要素法を用いる場合, 有限要素内部の変位増分ベクトル $\{dU\}$ は節点変位増分ベクトル $\{da\}$ を用いて

$$\{dU\} = [N_M] \{da\} \quad (17)$$

で表される. ここで $[N_M]$ は形状関数マトリックスである. 式(17)を式(15)に代入すれば要素内のひずみ増分ベクトル $\{d\varepsilon\}$ は次式で表される.

$$\{d\varepsilon\} = [A_M] \{dU\} = [A_M][N_M] \{da\} = [B_M] \{da\} \quad (18)$$

ここで $[B_M]$ はひずみ-変位マトリックスである.

また, 式(11)と式(12)から応力-ひずみ関係式は

$$\{d\sigma\} = [D_M] \{d\varepsilon - d\varepsilon_i\} \quad (19)$$

式(16)に式(17)~式(19)を代入することにより次式を得る.

$$\int_V [B_M]^T [D_M] [B_M] dV \{da\} = \int_V [B_M]^T [D_M] \{d\varepsilon_i\} dV \quad (20)$$

式(20)を積分することにより得た代数方程式を解いて, 節点の変位が求まり, 収縮変形が計算できる. さらに, 式(15), (17), (19)から食品内の応力が求まる.

食品加熱時の収縮によってもたらされる食品の構造変化に起因する問題として, 筆者らはクラック生成 [8] と変形 [9-14] について解析を行ってきた. ここでは, 馬鈴薯乾燥時の変形を取り扱った研究 [12-14] について説明する.

試料は生の馬鈴薯を切断して, 円筒形 (直径 30 mm, 高さ 15 mm) に成形したものを使用した. この試料を 65℃ の通風乾燥機に入れて乾燥し, 重量変化および中心温度変化を測定した. 乾燥途中の試料を取り出し, 形状を写真撮影した結果を Fig. 2 に示す. 乾燥時間 1 時間の試料をみると, 角の部分の乾燥速度が大きいため, まず角の部分が収縮する. 乾燥時間が 3 時間になると上面の中心部が収縮し始め, さらに時間が経過していくと, 上面および側面の中心部が収縮し凹んでいくことがわかる. この観察結果から, 乾燥とともに変形が進行し, 乾燥後期では元の円筒形を維持していないことがわかる.

Fig. 3 は試料の外形変化を数値計算したときの結果 (試料断面の 1/4 の形状) である. 収縮率は水分移動方向によって異なるため, 収縮率を水分移動方向の関数としている. 乾燥初期では, 角の部分が先に収縮するが, 時間の経過とともに中心部の収縮が大きくなり, 変形していく様子がわかる. 収縮率の等方性を仮定すると, 乾燥初期には角の部分が先に収縮するものの, 乾燥時間の経過とともにその形状は元の円筒形に戻る. したがって,

Fig. 2 Photograph of potato shape change during drying.

Fig. 3 Predicted shape on one quarter of cylindrical sample with non-isotropic shrinkage coefficient.

収縮変形は収縮率の異方性に起因するといえる。

Fig. 4 に試料を粘弾性体と仮定したときの、乾燥時間 6 min における主応力分布の計算結果を示す。図中の線の長さは応力の大きさを、線の方向は応力の方向を示す。また、太い実線が引張り応力、細い実線が圧縮応力である。応力分布図から試料表面近傍で、引張り応力が働いていることがわかる。乾燥時間 6 min においては、試料の周辺部で水分分布の勾配が大きいことから、水分減少が大きい領域で、引張り応力が働いているといえる。水分移動方向と同方向の収縮率は大きいことが実験から確認されているが、ここに示したように、水分移動方向と直角に引張り応力が働くためと考えられる。また、食品の素材は一般に圧縮力よりも引張り力に弱い。そのため、乾燥過程においても強く引張り応力が働いている領域にクラックが発生すると考えられる [8]。

3. 対流を伴う食品の加熱操作

3.1 容器内自然対流

加熱対象が液状食品の場合、食品が対流するか否かでその伝熱速度は大きく異なり、使用する基礎式も異

Fig. 4 Predicted principal stress distribution at 6 min drying.

なる。とくに、殺菌を想定した場合、自然対流の有無で操作条件は大きく変わるので、注意を要する。例えば、豆腐製造時の豆乳は、加熱初期には粘性が低いいため容器内で自然対流が起こりそうである。しかし、実際には対流が起こる前に凝固が始まるため、熱の伝わりは遅く、熱伝導食品としての取り扱いとなる [15]。

食品の対流が起こる場合について、缶や鍋などの容器内に入った液状食品を外部から加熱したときの、自然対流熱伝達現象について考える。円筒形容器を想定し、加熱の軸対称性を仮定する。また、浮力以外の物性値の温度依存性がないと仮定すると、基礎式（円筒座標系）は以下の式で表される [16]。

・連続の式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (21)$$

・運動量収支式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g\beta(T - T_0) \quad (23)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (24)$$

・エネルギー収支式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (25)$$

一方、液状食品でも対流が起こらず、熱伝導が支配的な場合の基礎式は前述の熱伝導方程式（熱収支式）のみで表され、熱物性値に温度依存性がないと仮定すると次式で表される [16]。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (26)$$

対流がある場合には、見かけ粘度と熱拡散率が、対流がない場合には熱拡散率の値がわかれば、上式を用いて食品内温度変化を予測することが可能となる。しかし、水や牛乳などの低粘度の飲料を除いて、液状食品の多くは非ニュートン流体であり、対流の速度によって見かけ粘度が変わるため、自然対流下での見かけ粘度を実測することは難しい。そこで、加熱時の見かけ粘度を予測し、その見かけ粘度を用いて温度予測が可能か検討を行った [16]。概略を以下に示す。

検証実験に用いた液状食品（飲料）は(1)オレンジジュース、(2)キャロットジュース (Mix juice 1)、(3)野菜ミックスジュース (Mix juice 2)、(4)トマトジュースの4種類である。

これらの液状食品を内径 7 cm、高さ 10.8 cm の缶に充填し、95℃に設定した恒温槽で加熱した。缶の中心および半径の 1/2 ($R_{1/2}$) における温度測定結果を Fig. 5 に示す。野菜ミックスジュースまでは中心と $R_{1/2}$ に

Fig. 5 Comparison of calculated temperatures with experimental ones for juices.

(1) Orange juice, (2) Mixed juice 1, (3) Mixed juice 2, (4) Tomato juice.

おける温度はほぼ同時に上昇するが、トマトジュースの中心温度は $R_{1/2}$ における温度に比べて遅れが生じ、昇温速度も他のジュースに比べてかなり遅くなっていることがわかる。これはトマトジュースの伝熱は熱伝導が支配的なのに対して、他のジュースは自然対流伝熱が支配的なためである。このことを検証するために、各ジュースをビーカーに入れ、缶と同様に恒温槽中で加熱を行った。その際、インクをトレーサーとしてビーカー内側面に注入し対流の様子を観察した。その結果、トマトジュースの場合、トレーサーはほぼ同じ位置に静止していたのに対し、他のジュースの場合、トレーサーは容器側面を上昇したのち上面で中心部に移動し、中心部で吸い込まれていく様子が観察された。

加熱初期の中心温度データを用いて見かけ粘度または熱拡散率を推定し、加熱後期の缶内温度変化を予測した結果を Fig. 5 中の実線で示す。見かけ粘度または熱拡散率の推定にあたっては、まず熱伝導を仮定して、

初期温度の実測値と計算値が一致するように熱拡散率を推定する。推定した熱拡散率が水の値の2倍を超えた場合は、自然対流が起こっているとして、見かけ粘度を推定した。その際、見かけ粘度はアンドレードの式(式(27))に従うとして、活性化エネルギー E_a および定数 A を推定している。

$$\mu_{ap} = A \exp(E_a/RT) \quad (27)$$

図の結果においては、トマトジュースのみが熱伝導と推定され、他は自然対流が発生すると予測された。計算した温度履歴は加熱の後半部分においても実測値と良好に一致し、推定した見かけ粘度、熱拡散率より温度予測が可能であるといえる。

推定した見かけ粘度がどの程度の値であるかを確認するために、B型粘度計を用いて、ロータの回転速度を変えて見かけ粘度を測定した。結果を Fig. 6 に示す。粘性の低いオレンジジュースは、ロータの回転速度を変えても見かけ粘度の実測値は変化せず、ニュートン流体の性質を示している。一方、その他のジュースはロータの回転速度が大きいほど見かけ粘度は小さくなり、非ニュートン流体の性質を示している。初期温度上昇から推定した見かけ粘度を図中の実線で示した。野菜ミックスジュースの推定した値はもっとも回転速度の遅い 0.8 s^{-1} の値よりも大きく、自然対流の速度はより遅いと考えられる。Fig. 6 (3) Mix juice 2 の図中にトマトジュースの測定値も示した。ミックスジュースとトマトジュースで見た目に大きな差はなかったが、わずかな見かけ粘度の差が対流の有無を生じ、結果的に温度上昇に大きな差を生じている。

以上、高粘性液体食品の缶内対流について、見かけ粘度を推定することにより、温度計算が可能であることを示した。一方、液体食品の中には多種多様なものがあり、固液混合充填物のものも製造されている。固形物入りの液体缶詰で、混合粒子の大きさが比較的小さい場合

Fig. 6 Comparison of estimated apparent viscosities with experimental ones for juices.

には、加熱時系内に生じる自然対流により熱移動が行われると考えられる。この種の缶詰内の固液混合物をひとつの仮想流体と考え、固液混合物の見かけ物性値を用いることで、同様のシミュレーションにより缶内自然対流および殺菌時間の推算が可能であることを示した [17]。さらに、粒子が缶詰容器に多く充填されている固液混合缶詰においては、粒子は充填層あるいは多孔質層を形成し、粒子は移動せずに液体は粒子間を流れる。このような粒子間を流れる自然対流については、前述の運動方程式にダルシーの法則を適用することにより、同様の理論解析が可能となる [18]。

3.2 CFD を用いた対流の計算

以上の計算においては、有限差分法や有限要素法を用いてプログラムを作成し、基礎式を解いている。プログラムを作成して数値計算を行う場合、物性変化などの種々の条件をプログラムに独自に組み込むことができるため、自由度は大きい、プログラミングの知識とそれなりの労力・時間を要する。現在では PC の発達とともに、種々のアプリケーションソフトが市販されるようになり、対流の計算も CFD (Computational Fluid Dynamics) を取り入れた流体解析ソフトを使って行うことができ、食品の分野でも多く使われている。筆者らは、過熱水蒸気庫内の対流の解析 [19]、IH (Induction Heating) およびガス加熱時の鍋内対流の解析 [20] に CFD を用いてきた。ここでは、CFD を用いた鍋内対流の解析について、以下に概説する。

IH とガス加熱では、鍋を加熱したときに加熱される場所が異なるため、鍋内の対流の速度や方向が異なり、昇温速度および調味液などの浸漬速度に影響し、結果的に食品の味やテクスチャーに影響を与えるといわれている。しかし、加熱法の違いが鍋内対流、ひいては食品の調理にどのように影響するか科学的には検証されていない。そこで、両加熱方式の伝熱特性解析を実験的に行うとともに、流体解析ソフトを用いて鍋内対流の解析を行い、加熱方式の違いが対流にどのように影響するかを検証した。

まず、鍋 (直径 390 mm, 高さ 250 mm) を両加熱方式で加熱したとき、鍋のどこが加熱されるかを確認するために、放射温度計を用いて鍋空焚き時の温度分布測定を行った。15 秒間加熱し、鍋上部から鍋内部の温度分布を観察した結果を Fig. 7 に示す。ガス加熱では鍋底と側面が高温になり、比較的均一に加熱されている。一方、IH ではコイルの直上が加熱されるため、底面にドーナツ状の高温領域が存在し、側面はほとんど加熱されないことがわかる。実際に鍋に水を入れたときの鍋に入ってくる熱量を測定するために、鍋底面および側面内側に熱流束センサーを取り付け、加熱時の熱流束を測定した。ガス加熱においては、得られた熱

(a) IH

(b) Gas range heating

Fig. 7 Temperature distribution of the pan collected by the radiation thermometer heated after 15 s.

流束分布は底面では比較的フラットに、側面では鍋下部が高い結果となった。側面下部の熱流束が高いのは炎が鍋を包み込むように上昇するためである。一方、IH においては、コイル上部の熱流束が高く、底面中心部と端部は低い値となったが、その分布の様子は赤外線放射温度計で測定した温度分布と相関していた。また、側面の熱流束はマイナスの値となり、時間が経過し、お湯の温度が上昇するほどマイナスの値は大きくなった。これは、側面において鍋から外気へ放熱が起こり、IH において鍋側面は冷却面であることを示す。したがって、IH とガス加熱では鍋内の加熱・冷却部位が大きく異なるといえる。

この加熱面の違いがどのように対流に影響するかを検討するために、トレーサー粒子を用いて、加熱時の対流を観察した [21]。トレーサー粒子に関しては、人工イクラの作製法を模擬することで、任意の大きさ、密度をもつトレーサー粒子を作製する方法を考案し、直径 2.5 mm, 密度 1.0 g/cm³ のトレーサー粒子を作製した。鍋 (直径 390 mm, 高さ 250 mm) に 20 L の水とトレーサーを入れて、両加熱方式で加熱した。その際、ガス全火力で加熱したときの水の温度上昇速度と IH で

加熱したときの温度上昇速度が等しくなるように IH の出力を調節している。また、鍋上部と鍋内にカメラを設置し、2 方向からの撮影により、3 次元でのトレーサー粒子の運動を定量化した。IH 加熱とガス加熱での流速・方向の比較を行った結果、加熱初期では IH 加熱の方がガス加熱よりも対流は速く、IH では外側から内側へ、ガスでは内側から外側へ対流が起ることを確認した。

以上の自然対流観察結果を検証・可視化するために、汎用流体解析ソフト CFD2000 を用いて鍋内対流の解析を行った。直径 0.39 m、高さ 0.25 m の鍋に 20 L の水が入っていることを想定し、鍋（3 層）、水、空気で作成されるモデルを作成した。1 つのモデルに対象となる流体が 2 種類存在することで計算は複雑になり、計算時間がかかるため、鍋上層部の空気層においては熱伝導のみが起るとした。また、使用している鍋が円筒形で加熱も軸対称性が仮定できるため、鍋の全周のうち 10 度を抽出して計算領域とした。

自然対流解析を行う際の境界条件として、境界面における熱流束や温度の値が必要となる。ガス加熱においては、三層（ステンレス／アルミ／ステンレス）鍋のもっとも外側のステンレスに実測した熱流束値を設定した。IH においては、電磁界解析ソフトウェア JMAG Studio を用いて鍋に発生する発熱分布を求め、これを発熱密度として与えている。IH により鍋底面が加熱される場合、表皮効果により、プレートと接している極薄い領域のみが発熱される。鍋に使われているステンレスの表皮厚さ（電磁界強度が表面の $1/e$ になる厚さ）を計算したところ、約 0.08 mm となった。そこで、鍋発熱層の厚みを 0.08 mm とし、底面のステンレス層をさらに二層に分け、最底面ステンレス層に計算により得られた発熱密度を設定した。

実際の解析では、IH 調理器のコイル・フェライト・筐体や鍋などの形状・電磁気的特性情報から三次元の有限要素モデルを作成し、周波数応答電磁界解析により鍋底に発生するジュール損失発熱密度分布を求めた。求めた鍋の底面半径方向発熱量分布を Fig. 8 に示すが、鍋の中心部および端部の発熱量が小さく、山形となっている。これは、前述したようにコイルの直上部分の発熱が大きいためである。また、鍋を空焚きしたときの、放射温度計による底面温度分布を同図にプロットで示した。両分布の形はほぼ一致しており、温度分布は発熱量分布を反映していることがわかる。

以上の対流解析モデルおよび境界条件を用いて、鍋内の自然対流を計算した結果を Fig. 9 に示す。図においては、対流の向きと大きさを矢印で表現している。また、計算結果はアニメーションとして表示が可能で、アニメーション化することにより、対流の様子が可視化される。IH 加熱 (Fig. 9(A)) において、加熱 10 秒では大きな対流は起きていないものの、加熱 60 秒、

Fig. 8 Heat generation distribution of the bottom of the pan determined by electromagnetic field analysis. The white slab dots are the temperature measured.

360 秒では鍋中心付近から上昇し、側面方向へ移動する、内側から外側への対流が起きている。この上昇する位置は、コイルが鍋下部に存在する場所で、Fig. 8 の鍋底発熱量がもっとも大きい位置とほぼ一致している。一方、ガス加熱 (Fig. 9(B)) において、加熱 10 秒ではほとんど対流が起らず、加熱 60 秒、360 秒では IH に比べて鍋の外部で上昇流が発生し、その速度も小さい結果となっている。

以上の計算で求めた鍋内対流の挙動は前述のトレーサー粒子の運動とほぼ同様の傾向を示した。また、可視化実験で求めた粒子の各時間、各位置での流速も計算値とほぼ一致した。以上のことから、鍋あるいは容器内の自然対流を予測するのに CFD を用いた計算は有効な手法といえる。

4. マイクロ波・高周波加熱および通電加熱における熱移動解析

マイクロ波・高周波加熱や通電加熱などの食品を内部から加熱する方法においては、食品の形状が大きく、伝熱に時間を要するものでも、従来の加熱法よりも短時間で加熱できるため近年、食品産業においても使われている。しかし、これらの加熱法においては、被加熱性を決める物性値（誘電物性、電気物性）が不均一な食品では、加熱むらが大きく、より有効に利用するためには加熱むらの軽減が重要となる。そこで、筆者の研究室において、誘電物性、電気物性の測定とその物性値に基づく熱移動解析を行ってきた。以下にその概要を記す。

4.1 マイクロ波・高周波加熱

マイクロ波加熱において、加熱むらが起る原因として、以下の要因が考えられている。

Fig. 9 Calculated convection flow in the pan heated by IH (A) and GRH (B).

i) 加熱庫（電子レンジ）内の電界強度が不均一である。
 ii) 食品（容器）の形状・大きさによってマイクロ波の集中の様子が変わる。
 iii) エネルギー吸収性（誘電特性）は食品素材によって変わり、温度によっても変化する。
 これらの要因によってどのように加熱むらが発生するのかを明らかにするために、筆者らは食品の誘電物性を測定するとともに熱移動解析を行ってきた。

(1) 食品の誘電物性

多くの食品は誘電体であり、誘電体は多数の双極子の集合体とみなされる。この誘電体にマイクロ波が照射されると、電界は周期的にその極性が変わるため、双極子（水分子）は回転し、そのさい衝突したり、摩擦しあったりして発熱する。このときの発熱量 Q は次式で表される。

$$Q = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon' \tan \delta |E|^2 = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 \quad (28)$$

ここで、 f は周波数、 ε_0 は真空中の誘電率、 ε' は誘電率、 ε'' は誘電損率、 $\tan \delta (= \varepsilon''/\varepsilon')$ は誘電正接、 E は電界強度である。式 (28) は、発熱量は誘電物性に依存し、誘電損率が大きいものは発熱が大きいことを示す。

食品の誘電物性は水分や塩分および温度によって変

化し [22-24]、とくに解凍過程においては凍結状態から融解状態へ移行するときに大きく変化する [25-27]。誘電物性の温度依存性の例として、周波数 2,450MHz における各種食品の測定結果を Fig. 10 に示す。水分を多く含む食品（マグロ赤身、牛肉、ニンジン）では、食品の種類に限らず、誘電物性の値に大きな差がないことがわかる。しかし、チーズやマグロ大とろのように水分が少ない食品は水分の多い食品に比べて融解状態での誘電率は小さくなる。また、すべての食品について凍結温度範囲で誘電率と誘電損率の値は融解状態に比べて小さくなる。これは凍結状態では食品内の水分子間の束縛力が大きく、自由に回転できないので誘電体損が減少するためである。融解するに従い、水分子の自由回転能力も増大し、誘電率と誘電損率は急激に大きくなる。このことは解凍とともに発熱が大きくなることを意味し、この誘電物性の温度依存性が大きいことが、一部は凍っているのに融解した部分がより高温になる、いわゆる「ランナウェイ現象」を起こす原因となっている。

食品のマイクロ波・高周波加熱において、エネルギーの浸透性は加熱特性を決めている重要な要因である。電磁波の浸透性を表す指標として、次式の浸透深さ d (エ

(a) Dielectric constant

(b) Loss factor of foods

Fig.10 Dielectric properties of foods.

(□) potato, (◇) carrot, (△) beef, (●) cheese, (■) Lean meat tuna, (○) Fatty meat tuna

エネルギー強度が $1/e$ になる距離) が使われる。

$$d = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left[\frac{1}{2\varepsilon'(\sqrt{1+(\tan\delta)^2}-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

ここで、 λ_0 は電磁波の波長である。マグロの誘電率、誘電損率を用いて、上式にしたがって浸透深さを求めると、マイクロ波、高周波とも凍結点以下では浸透深さは大きい、温度の上昇とともに急激に減少し、0℃以上ではほぼ一定となる。このことは解凍とともに表面加熱性が大きくなり、大きな食品では電磁波が中心部まで届かなくなることを意味する。凍結温度域において、マイクロ波の場合、浸透深さは12 cm から2 cm程度に温度上昇とともに変化するが、高周波(13.5MHz)

ではその値は2 m から10 cm程度に変化し、高周波のほうがマイクロ波よりも10倍程度浸透する[28]。このことは、高周波加熱がより大きな食品の均一解凍に利用できることを示唆する。

(2) マイクロ波・高周波の熱移動解析

マイクロ波・高周波加熱において、食品内発熱量は式(28)で表され、食品内電界強度が求まれば、発熱量分布を計算することができる。さらに内部発熱を伴う熱伝導方程式(式(1))を解くことにより、食品内温度分布の計算が可能となる。

食品形状が単純な場合はランバートの法則から Q は次式で求められる。

$$Q = \frac{I_0}{d} \exp\left(-\frac{x}{d}\right) \quad (30)$$

ここで、 x は食品表面からの距離、 I_0 は表面エネルギー強度で、電界強度 E とは次式の関係がある。

$$I_0 = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E^2 \quad (31)$$

ここで、 c は光の速度である。

筆者らはランバートの法則を用いて、円筒形状の小麦粉ドウの熱移動解析とその温度変化に伴う澱粉の糊化速度の解析[29,30]、半円形状のすり身の熱移動解析とその温度変化に伴うすり身座りの解析[31,32]を行い、ランバートの法則を用いて温度分布が計算できることを示した。また、誘電物性が不均一な食品の温度分布解析[33]にもランバートの法則が適用できることを示した。

マイクロ波は電磁波の一種であり、食品内部を伝搬するとき、波動現象として干渉・共振などが起こる。浸透深さに対して食品が十分大きい場合はこの干渉の影響は無視できるが、食品が凍結している場合には浸透深さが大きいため、干渉の影響が無視できなくなることが考えられる。この干渉の影響はランバートの法則では表すことができず、マクスウェルの方程式を電磁波の基礎方程式とする必要がある。電界強度 E 、磁界強度 H 、電流密度 J 、電束密度 D 、磁束密度 B および電荷密度 ρ_e で表すと、マクスウェルの方程式は次のようになる。

$$\nabla \cdot D = \rho_e \quad (32)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (33)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (34)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (35)$$

ここで、 $D = \varepsilon E$ (ε は誘電率)、 $B = \mu H$ (μ は透磁率)、 $J = \sigma E$ (σ は導電率) の関係がある。

マクスウェルの方程式をもとに、印可電流および電荷源がなく、入射マイクロ波を平面波 (x - y plane) としたときの、 z 方向に浸透する一次元波動方程式は次式で表される[34]。

$$\frac{d^2 E_z}{dz^2} + k_z^2 E_z = 0 \quad (36)$$

ここで、 k_z は伝播定数で、次式で表わされる。

$$k_z^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon'') \quad (37)$$

ここで、 $\omega (=2\pi f)$ は角周波数、 μ_0 は真空の透磁率である。

マイクロ波の食品内伝播中のエネルギー損失 Q は次式で与えられる。

$$Q(z) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E(z)|^2 \quad (38)$$

以上の式から求まる発熱量（エネルギー損失）を熱伝導方程式に代入することにより食品内部の温度分布が計算できる。

凍結マグロのマイクロ波解凍を想定して、ランバートの法則とマックスウェルの方程式から発熱量を求めた結果 [34] を Fig. 11 に示す。計算では厚さ 2 cm の凍結マグロの 1 面からマイクロ波を照射したときを想定している。点線がランバートの法則、実線がマックスウェルの方程式から求めた発熱量である。解凍前 (30, 60 秒) においてはマックスウェルの方程式から求めた発熱量は全域で振動し、解凍層が生成されると解凍層でエネルギーが吸収され、解凍層で大きく振動していることがわかる。これは、凍結状態では 1~10 cm の浸透深さがあり、波動の影響が無視できないためである。また、試料の厚さを 4 cm, 8 cm, 16 cm, 32 cm と厚くした計算も行ったが、厚くなるほど両者の発熱量は一致するようになり、32 cm の場合はほとんど一致する [34]。

Fig. 11 と同じ条件下で計算したときの温度分布を Fig. 12 に示す。発熱量分布はランバートの法則とマク

スウェルの方程式とで大きく異なるにもかかわらず、温度分布はほとんど変わらないことがわかる。マックスウェルの方程式による発熱量は融解した層で大きく振動するが、融解層が時間とともに進行するに従い、エネルギーの強い領域が移動していくために発熱量としては平均的なランバートの法則による発熱量と一致するためである。また、同図に実測値を合わせて示したが、両者はほぼ一致しており、解凍の温度分布解析にはランバートの法則が適用できるといえる。

以上の計算においては、食品に入射するエネルギー強度（電界強度）が既知という前提で計算している。

Fig.12 Comparison of measured (plots) and calculated temperature distributions (solid and dotted lines) of the 2.0 cm thick tuna sample.

Solid lines: Maxwell's equations. Dotted lines: Lambert's law.

Heating time $\square$:30s, $\circ$:60s, $\triangle$:90s, $\diamond$:120s.

Fig.11 Microwave power distribution of 2.0 cm thick sample.

Solid lines: Maxwell's equations. Dotted lines: Lambert's law.

しかし、実際に食品を電子レンジに入れて加熱する場合、食品周りの電界強度は不均一で、その分布に応じて食品内部の温度分布が変化する [35]。さらに、電界強度は食品の形状・大きさや誘電物性、さらには電子レンジの大きさや導波管の位置によって変化する。そのため、食品内部の電界強度を予測するためには電子レンジ全体の電磁界解析が必要となる。電子レンジ全体の電界強度分布の計算は市販の電磁界解析ソフトを使って行うことができる。電磁界解析ソフトはいくつか市販されているが、ここでは、PHOTO-WAVEj ω ((株) フォトン) を使用した電子レンジ加熱の例について示す。

現在市販されている電子レンジはフラットテーブル型が主流であるが、家庭ではターンテーブル型の電子レンジも多く使われている。フラットテーブル型電子レンジでは、加熱庫の下にアンテナが設置されており、アンテナが回転することで、庫内電界強度の均一化を図っている。一方、ターンテーブル型は食品を載せたターンテーブルが回転することで、電界強度の均一化を図っている。さらに、マイクロ波の照射口は加熱庫の上部、または側面部に設置されているモデルが多い。筆者らはフラットテーブル型 [36] およびターンテーブル型電子レンジの解析 [37] を行ったが、ここではフラットテーブル型電子レンジの解析を以下に示す。

実験に使用した電子レンジおよび容器の形状をもとに、市販のモデル作成ソフト FEMAP (Siemens PLM Software Inc.) を用いて 3 次元要素モデルを作成した例を Fig. 13 に示す。電子レンジ底部に同軸導波管が設置され、この導波管からマイクロ波は入射される。さらに、導波管上部に回転アンテナが設置され、この回転アンテナを通して電子レンジ庫内にマイクロ波が照射される。図右上に示すように、回転アンテナは特殊

な形状をしており、これが回転することにより電子レンジ庫内の電界強度の均一化が図られている。また、同図下部に示した同軸導波管に、発熱量に応じたマイクロ波の電界強度を荷重条件として与えた。作成した要素モデルを基に PHOTO-series (電磁界解析: Wave-j ω , 熱伝導解析: Thermo, フォトン社製) を用いて電磁界解析モデルおよび熱伝導解析モデルを作成し、それぞれのモデルに初期条件および熱物性値と誘電物性値のパラメータの設定を行っている。

回転アンテナの位置が変わると庫内電界強度が変わるため、モデルにおいても同じようにアンテナを回転させて計算を行った。計算においては最初のステップで、電磁界解析モデルを用いて、電子レンジ庫内の電界強度を計算し、試料内の発熱量分布を算出する。得られた発熱量分布をもとに、熱伝導解析モデルを用いて熱伝導解析を行い、温度分布を求める。次のステップでは、アンテナを回転させて再度電磁界解析および熱伝導解析を行う。この電磁界解析および熱伝導解析を組み合わせた解析を繰り返し行うことで、食品内温度分布の経時変化を求めることができる。

計算結果の妥当性を検証する実験には、模擬食品として (固形分 20% マッシュポテト + 1% NaCl) (試料 A) および固形分 20% マッシュポテト (試料 B) を使用した。NaCl を添加することにより試料の誘電損率は大きくなる。そのため、NaCl を含まないものに比べて、マイクロ波の浸透深さは小さくなり、表面加熱性が大きくなる。内径 60 mm、高さ 72 mm の円筒形の亚克力製容器を作成し、容器内部に上記試料を充填した。電子レンジ加熱後に容器を取り出し、赤外線放射温度計を用いて容器断面の温度分布を撮影した結果を Fig. 14 に示す。両試料とも角の部分に電界が集中するため、角の

Fig.13 Schematic of simplified domestic flatbed microwave oven model with sample and container.

(A) Material A

(B) Material B

Fig. 14 Temperature distributions on central vertical cross sections of material A and material B.

領域の温度が高くなっている。とくに、電界強度の強い下部の角の領域が高温となっている。また、両試料を比較すると、試料 B は比較的電磁波の浸透性があるため、中心部で電界の集中が起こり、中心部も加熱されているが、試料 A は電磁波の浸透性が低く周辺部のみが加熱されていることがわかる。

計算結果を Fig. 14 に合わせて示す。予測計算においては電磁界解析と熱伝導解析を交互に行っているが、毎回両計算を交互に行うと計算に長時間を要する。そこで、電磁界解析のタイムステップを熱伝導解析よりも長くして計算を行っている。実測値と比較すると、マイクロ波の浸透性が大きい試料 B は容器中心部と角が、マイクロ波の浸透性が低い試料 A は容器角の部分加熱され、両者は良好に一致していることがわかる。以上、本解析手法により電子レンジ加熱時の温度分布計算が可能となり、食材配置や容器設計に役立つと考える。

以上、電子レンジを用いた常温食品の加熱時の予測計算について概説したが、冷凍食品の解凍においてはより加熱むらが発生しやすいため、大きな問題となっている。解凍時には食品の熱物性（融解熱を含めた比熱、熱伝導率、密度）と誘電物性が大きく変化するが、これらの変化を解析モデルに組み込むことにより、解凍の解析が可能となる。筆者らは、高周波解凍（周波数 15.6MHz）について電磁界解析および熱伝導解析を組

み合わせた解析を行い、高周波解凍時の温度予測が可能であることを示した [38]。同様の手法により電子レンジ解凍の解析も可能である。また、電子レンジは調理済み食品の再加熱、冷凍食品の解凍のほかにも炊飯や魚・肉類および野菜の調理にも使われている。後述するように、魚・肉類ではタンパク質の変性速度、澱粉食品では澱粉の糊化速度をモデル化し、電磁界解析・熱伝導解析と組み合わせることにより、電子レンジ調理過程の解析も可能である [39]。

4.2 通電加熱

通電加熱は、食品自体に直接電流を流すことによって発生するジュール熱を利用して加熱するもので、ジュール加熱とも称される。電気抵抗体である食品を平行平板電極にはさんで直流電圧 V を印可したときの、発熱量 Q は、ジュールの法則およびオームの法則により次式で表される。

$$Q = I^2 R = \frac{V^2}{R} = \sigma_e \frac{S}{L} V^2 \quad (39)$$

ここで、 I は電流、 R は食品の抵抗、 σ_e は電気伝導度、 S は電極面積、 L は電極間距離である。

一般に直流電源を用いた場合、電流はつねに一定方向に流れ、電極表面では電子の授受が盛んに行われるため、電極の腐食などの問題が生じる。この問題为了避免するため、チタンなどの耐腐食性のある電極を使うか、多くの場合交流電源が使われる。交流電圧を印可したときの電圧と電流の関係は次式で表される。

$$V = IZ, Z = R + jX_c \quad (40)$$

ここで、 Z はインピーダンス、 R は Z の純抵抗成分を、 X_c は容量性成分（容量性リアクタンス）を表す。上式より、 $X_c = 0$ ならば、 Z は純粋な抵抗となり、 $X_c \neq 0$ ならば、 Z は複素数となる。容量性リアクタンスにおいては、電荷の蓄積と放出が交互に行われ、電流位相が電圧より 90° 進むが、電気エネルギーの消費はともなわない。したがって、容量成分が無視できない場合は、発熱量（消費電力）は、 $R = Z$ として式 (39) から求めることができない。その場合、食品の等価回路を抵抗とコンデンサの直列とみなしたときの抵抗値 R_s あるいは並列とみなしたときの抵抗値 R_p から求めることになる。

$$Q = I_{\text{rms}}^2 R_s = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R_p} \quad (41)$$

ここで I_{rms} 、 V_{rms} はそれぞれ電流および電圧の実効値である。

通電加熱において、発熱量は食品の電気抵抗あるいは電気伝導度に依存し、電気伝導度は温度、塩分濃度、周波数によって変化するため、予めその加熱特性を把握することは重要である。食品の例として、ブリの切り身を通電加熱した例 [40] を以下に示す。購入したブ

りを2×2×2-cmの形状にカット・成形し、普通肉および血合い肉の部分をそれぞれ試料とした。この試料を通電加熱したときの中心温度履歴をFig. 15に示す。通電加熱条件は、(電源周波数: 20kHz, 印加電圧: 20V, 電極間距離: 20 mm, 試料初期温度: 15℃)である。魚肉の場合、畜肉と違って肉と肉の間に筋隔膜が存在し、均一ではない。この筋隔膜に平行に通電する場合と筋隔膜を横切って通電する場合ではトータルの電気抵抗が異なる。Fig. 15においては、筋隔膜と平行に通電する場合をParallel, 筋隔膜と直交して通電する場合をSeriesと記している。図から、同じ条件下で普通肉と血合い肉を通電加熱すると普通肉のほうが温度上昇が速いことがわかる。普通肉と血合い肉では組成が異なり、脂肪含量が少なく、含水率の高い普通肉のほうが電気が流れやすく、昇温も速いことが推察される。また、試料に対する通電方向に関しても、筋隔膜と平行に通電するほうが直角に通電するよりも昇温が速いことがわかる。筋隔膜の電気抵抗が肉よりも大きいため、電気が筋隔膜を横切るときにより大きな電気抵抗が生じるためと考えられる。以上から、魚肉を通電加熱した場合、魚肉の部位、通電方向によって加熱特性は変化し、その加熱特性は電気物性によって関係づけられる[40]。また、食品の電気伝導度は温度依存性をもち、温度が高いほど電気伝導度は大きくなる。そのため、Fig. 15からわかるとおり、一定電圧で加熱した場合、温度が高くなるにつれ昇温速度は大きくなる。また、凍結状態と融解状態では電気伝導度の値は大きく変化[41]し、マイクロ波加熱と同じようにランナウェイ現象を起こす原因となる。通電加熱を解凍に適用する場合には、より厳密な電圧のコントロールが必要になる。

均一な食品を加熱する場合、発熱量は食品の電気伝導度に比例し、比較的均一に加熱できる。しかし、不均一な食品を通電加熱する場合、発熱量は食品素材の電気伝導度に比例するとは限らない。不均一食品を通

Fig. 15 Ohmic heating curve of the yellowtail filets.

電加熱したときの温度分布解析例[42]を以下に示す。

試料として、1%NaCl添加のマッシュポテト(素材A)とマッシュポテト(素材B))を用いた。電気伝導度は塩分濃度に大きく依存し、塩分の増加とともに試料の電気伝導度も大きくなる。したがって、食塩を含む素材Aのほうが電気が流れやすい特性をもつ。

電気伝導度の違う食品が不均一に混在している場合を想定し、10 cm×8 cm×5 cmの容器に素材Aおよび素材BをFig. 16のように充填した。電源周波数20 kHz, 印加電圧50 Vで通電し、加熱300秒後に赤外線放射カメラで断面温度分布を撮影した結果を同図に示す。配置Iの場合、電気伝導度の高い素材Aの領域の温度が高くなることがわかる。配置Iの場合、素材Aと素材Bは並列に並んでいると考えられ、各素材に一定の電圧が印加される。完全に並列と考えたときの各素材の発熱量は

$$Q_A = I_A V = V^2 / R_A = \frac{S}{L} \sigma_A V^2 \quad (42)$$

$$Q_B = I_B V = V^2 / R_B = \frac{S}{L} \sigma_B V^2 \quad (43)$$

で表され、発熱量は電気伝導度に比例し、電気伝導度の大きい素材Aのほうが温度上昇は大きくなる。一方、配置IIの場合、素材Aと素材Bは直列に並んでいると考えられ、各層を流れる電流は一定となる。したがって、完全に直列と考えたときの各素材の発熱量は

$$Q_A = I V_A = I^2 R_A = \frac{L}{S} \frac{1}{\sigma_A} I^2 \quad (44)$$

$$Q_B = I V_B = I^2 R_B = \frac{L}{S} \frac{1}{\sigma_B} I^2 \quad (45)$$

で表され、発熱量は電気伝導度に反比例し、電気伝導度の小さい素材Bのほうが温度上昇は大きくなる。配置Iと配置IIは90°回転した関係にあり、構成としては同じと考えられる。このように構成は同じでも、電流の流れる方向、換言すると電極の位置によって発熱分布は逆転することがわかる。

導電率の高い成分が中心にある場合(配置III)、電気伝導度の高い領域の温度がもっとも高くなるのではなく、その前後の電気伝導度が低い領域で最高温度となる。これは、電流が中心部に集中し、中心付近では配置IIのように直列に並んでいると考えられ、電気伝導度の低い領域の温度が高くなる。中心部に電気伝導度が低い素材がある場合(配置IV)は、配置IIIとその傾向は逆になる。すなわち、もっとも温度の高くなる領域は、電気伝導度の低い領域の上下となる。したがって、電気伝導度が高い素材あるいは低い素材が食品内部に存在する場合、その領域の温度が単純に最高温度あるいは最低温度にはならず、その温度分布は複雑となる。

電源周波数を20 kHzとした場合、マイクロ波加熱で示した計算手法が通電加熱にも適用可能である。すなわち、電磁界解析と熱伝導解析を連成することにより通電加熱時の温度分布変化を計算することができる。

Fig. 16 Comparison of the measured temperature distributions and calculated ones from the central horizontal cross-section.

解析条件を実験条件と同じとして、配置 I～IV について温度分布を計算した結果を Fig. 14 に実験結果と合わせて示す。図からシミュレーション結果は実測を良好に再現しており、電磁界解析と熱伝導解析を連成することで通電加熱の予測計算が可能であり、最適な素材の配置や形状を知るうえで強力なツールになり得ると考える。

5. 加熱に伴う化学的变化

加熱調理を例として考えると、食品を加熱すると温度上昇にともない、肉・魚ではタンパク質の変性とメイラード反応による呈色が起こり、ごはんや麺類では澱粉の糊化が起こる。同時に、旨味成分、呈味成分や機能性成分の消長が起こり、さらに、食品によっては酵素反応と酵素の失活が起こる。これらの化学的变化は食品の品質を決める上で極めて重要であり、筆者らは、魚 [43]・エビ [44]・肉 [45-48]・卵 [49] のタンパク質変性、旨味成分の酵素分解 [50]、焼成過程の呈色反応 [51-57]、澱粉の糊化反応 [6,29,30] について、熱移動解析と合わせて速度論的な解析を行ってきた。ここでは、魚焼成過程のタンパク質変性と呈色反応について概説する。

5.1 魚焼成過程のタンパク質変性

プロの調理人による魚の焼成においては、魚の表面は適度に焼けていて、中心温度は 60℃ 程度に仕上げる人が多い。魚の焼成に限らず、ビーフステーキや焼き鳥などの肉類を焼くときも同様である。これは、過度に加熱すると魚や肉はパサついてまずくなるので、中心部はジューシーさを残すように完全にタンパク質

変性を起こさせないためと考えられる。したがって、魚・肉の焼成過程においてタンパク質変性がどのように進行するかを理解することは最適な調理を考えるうえで重要である。

肉や魚のタンパク質が加熱変性するとき、周りから熱を吸収する。肉や魚肉を DSC (Differential Scanning Calorimetry) に供すると、100℃ までにおおよそ 3 つの吸熱ピークが観測される。それぞれのピークは筋原繊維タンパク質を構成するミオシンとアクチン、結合組織のコラーゲン由来であることが同定されている。魚肉の場合、コラーゲン由来の吸熱変化は観測されにくく、40～50℃ でミオシン、さらに 65～75℃ の温度帯でアクチンの熱変性由来の吸熱ピークが検出される。

タンパク質変性の速度は、未変性のタンパク質濃度 C_{pn} に比例するとすると、次の一次反応式で表すことができる。

$$\frac{dC_{pn}}{dt} = -k_R C_{pn} \quad (46)$$

ここで、 k_R は反応速度定数で、次のアレニウスの式で表される。

$$k_R = k_0 \exp(-E_a/RT) \quad (47)$$

式中の速度パラメーターである活性化エネルギー E_a と頻度因子 k_0 は DSC-Dynamic 法より算出できる。DSC-Dynamic 法では、一定の昇温速度 β_h で DSC 測定を行った際に観測されるピーク温度 T_{max} が、昇温速度 β_h を大きくすると、高温側へシフトすることを利用したものである。式 (47) を式 (46) に代入し、昇温速度一定として式 (46) を積分すると、昇温速度 β_h とピーク温度 T_{max} の関係式として次式が得られる [54]。

$$\ln\left(\frac{\beta_h}{T_{\max}^2}\right) = \ln\left(\frac{k_0 R}{E_a}\right) - \left(\frac{E_a}{RT_{\max}}\right) \quad (48)$$

上式にしたがって、 $\ln(\beta_h/T_{\max}^2)$ 対 $1/T_{\max}$ をプロット (Ozawa プロット) して直線関係が得られれば、その直線の切片と傾きから、頻度因子 k_0 と活性化エネルギー E_a を決定することができる。

マダイを試料として、昇温速度を $8\sim 20^\circ\text{C}/\text{min}$ で変化させて DSC 測定を行い、Ozawa プロットから活性化エネルギーと頻度因子を求めた。これらの速度パラメーターの値を用いて式 (46) を積分することにより、タンパク質未変性率を計算することができる。 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温速度で試料を加熱した場合のタンパク質未変性率 $X (=C_{\text{pn}}/C_{\text{pn0}})$ の計算結果 [54] を Fig. 17 に示す。温度上昇に伴ってミオシンは $40\sim 50^\circ\text{C}$ 、アクチンは $60\sim 80^\circ\text{C}$ の温度範囲で変性が進行していく様子がわかる。また、未変性率を時間で微分した値が変性速度であり、図中に示した通りピークが得られる。このピークは DSC 測定における吸熱ピークに相当し、変性速度のピーク温度と DSC 測定結果は良好に一致したことから得られた速度パラメーターは妥当であるといえる。

魚を焼成すると温度上昇により、まずタンパク質の変性が起こり、食感が変わると同時に見た目も変わる。白身魚では比較的透明であった肉質が白濁し不透明となる。この白濁化とタンパク質変性の関係について、以下のように解析を行った。白身魚としてマダイの切り身を用意し、遠赤外線ヒーターを熱源とする焼成機を用いて焼成した。焼成中の試料表面温度を熱電対で測定すると同時に所定時間で試料を焼成機から取り出して、色差計により試料表面の $L^*a^*b^*$ 値を測定した。測定した表面温度と $L^*a^*b^*$ 値を Fig. 18 に示す。 L^* は明度を表す値であるが、色差計で半透明な試料を測定した場合、色差計から出た光は試料表面で完全に反射せず一部透過するため、明度が小さいものとして L^* の値は小さくなる。したがって、タンパク質の変性に伴い白濁が起こると、透過していた光が反射されるようになるため L^* の値は大きくなり、 L^* は白濁の指標となると考えられる。

Fig. 17 Calculated changes of the non-denaturation ratio of each protein during heat-scanning at $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

Fig. 18 Measured values of surface color changes during the beginning of far-infrared grilling.

Fig. 18 から、マダイの L^* 値は初期におよそ 40 であったものが、表面温度が 50°C 前後でシャープに増加し、その後緩やかに増加していることがわかる。この変化を初期値 L_0^* と最終値 L_f^* で規格化し次式で表した結果を Fig. 19 にプロットで示す。

$$X_L = \frac{L^* - L_0^*}{L_f^* - L_0^*} \quad (49)$$

同図に、次式で定義したタンパク質トータル未変性率の計算結果を合わせて示す。

$$X_{\text{tot}} = c_1 X_1 + c_2 X_2 \quad (50)$$

ここで、 X_1 , X_2 はそれぞれミオシンとアクチンの未変性率で、Fig. 18 中に示した温度履歴を用いて、式 (46) から計算している。その際に必要となる速度パラメーターは前述の値を使用している。また、 c_1 , c_2 はそれぞれミオシンとアクチンのトータル未変性率への寄与率で、 $c_1 + c_2 = 1$ であり、($c_1 = 1$, $c_2 = 0$) のときミオシンの未変性率 X_1 、($c_1 = 0$, $c_2 = 1$) のときアクチンの未変性率 X_2 となる。図中の線は c_1 を 0 から 1 まで変えて計算したときの X_{tot} である。

Fig. 19 において、 L^* 値から求めた X_L と ($c_1 = 0.7$, $c_2 = 0.3$) としたときのトータル未変性率 X_{tot} はほぼ一致し

Fig. 19 Simulated changes of total non-denaturation ratio X_{tot} in lines, and the color changes X_L in black plots.

ていることがわかる。このことから、筋原線維を構成するミオシン、アクチンが加熱によって順次変性し、白濁が進行するが、構造変化（白濁化）に対する寄与率がミオシン 0.7、アクチン 0.3 程度であることが推察される。

5.2 魚焼成過程の焼き色の解析

魚の焼成において焼き色はおいしさに関わる重要な要因であるが、実際の調理過程では、焼き加減は経験的に決められていることが多く、食品機械としての焼成機においても焼き色についての指針は明確でない。そこで、魚の焼成過程を定量化し、焼成機の開発にあたって指針となることを目的として魚の焼き色の速度論的解析を行ってきた。その結果を以下に示す。

まず、マダイ切り身を試料として、生から黒く焦げるまで焼成を行った。焼成には温度制御が容易な赤外線ヒータ（発熱長 200 mm）を使用し、焼成中の試料焼成面温度および分光色差計（光源 D65, 2 度視野角）により $L^*a^*b^*$ 値を測定した。測定結果を Fig. 20 に示す。表面温度が 100℃ 以下の焼成初期においては、 a^*b^* 値はほとんど変化せず、 L^* 値が上昇している。この期間の $L^*a^*b^*$ 値の変化はタンパク質変性によるもので、前述したとおりである。その後、試料表面の乾燥により L^* 値が若干減少し、引き続きメイラード反応による呈色で L^* 値は減少する。一方、 a^*b^* 値はメイラード反応により褐色となるためいったん増大し、黒褐色になるのに従い再び減少している。この結果を踏まえてメイラード反応による呈色に着目し、実験および解析を行った。

呈色反応による色の変化を詳しく調べるために、試料を短時間蒸してタンパク質変性を終了させたのち、試料表面を所定の温度に保って焼成する実験を行った。マダイ切り身を用いて、焼成表面温度を 110℃～150℃ の一定温度に保持して焼成したときの $L^*a^*b^*$ 値変化を Fig.

21 に示す。各焼成温度において時間が経過すると L^* 値は単調に減少するが、 a^* 値および b^* 値はいったん増大したのちに減少するため、 $L^*a^*b^*$ の 3 次元色空間においてその軌跡はらせん状に変化している。また、各焼成温度において軌跡上の移動速度は異なるものの、同じ軌跡を辿っている。したがって、 L^* 値は単調に減少することから呈色反応進行の指標となり、 L^*-a^* の関係および L^*-b^* の関係を一元的に求めておけば、全体としてどのように焼き色変化が起こるかの推算が可能となる。

焼き色の呈色反応はメイラード反応であり、反応は複雑な系を経て進行するが、定量化するために反応を簡素化して考える。焼き色は試料表面の未反応物質 A が加熱によって呈色物質 B に変化することで起こるとし、B の生成速度は A の濃度に比例すると仮定すれば速度式は次式で与えられる。

$$\frac{dC_B}{dt} = -\frac{dC_A}{dt} = k_R C_A \quad (52)$$

ここで、 C_B は褐色物濃度、 C_A は未反応物濃度、 k_R は速度定数でアレニウスの式で表される。

呈色物質 B の生成、すなわち未反応物質 A の減少に応じて L^* は初期値 L^*_0 から最終値 L^*_f へ濃度に 1 次的に比例して減少すると仮定し、無次元化した L^* 値として Y を次式で定義する。

$$Y = \frac{C_A}{C_{A0}} = \frac{L^* - L^*_f}{L^*_i - L^*_f} \quad (53)$$

式 (53) を式 (52) に代入すると

$$\frac{dY}{dt} = -k_R Y \quad (54)$$

となり、色の変化を Y を用いて表すことができる。

焼成面温度を変えて行った実験の温度データをもとに、式 (54) を数値積分して得た計算値と実測値が一致

Fig. 20 The change in the color and temperature of the sample surface during grilling.
(■ L^* , ▲ a^* , ◆ b^* + sample surface temperature, — calculated value)

Fig. 21 Three-dimensional graph of color change.
(■ 110℃, ▲ 120℃, ● 130℃, ◆ 140℃, * 150℃)

するように、黄金分割法を用いて速度パラメータ（頻度因子 k_0 と活性化エネルギー E_a ）を決定した。得られた速度パラメータを用いて L^* を計算した結果を Fig. 20 中に実線で示す。なお、計算は焼き色が着き始める温度として 110°C 以上で行っている。同図に実測値も合わせて示しているが、両者は良好に一致していることがわかる。また、 L^*-a^* および L^*-b^* の関係式から求めた a^* および b^* の計算値も実線で示したが、実測値と良好に一致している。したがって、表面温度変化にもとづき、表面焼き色の予測が可能といえる。

上記の実験では、熱源として赤外線ヒーターを使用して加熱を行ったが、他の熱源、遠赤外線ヒーター、過熱水蒸気でも焼成時に同じように呈色するかを検討した [56]。マダイ切り身を遠赤外線ヒーター、過熱水蒸気で焼成し、焼成後試料の表面の $L^*a^*b^*$ 値を色差計を用いて測定した。Fig. 21 と同様に、測定結果を $L^*a^*b^*$ 3次元空間にプロットしたところ、その軌跡はほぼ同じものとなり、焼成時の色の付き方は熱源によらないことがわかった。一方、前述の方法で呈色反応の反応速度定数を求めたところ、過熱水蒸気を熱源としたときの反応速度定数は他の熱源よりも小さく、焼き色が付きにくいことが判明した。過熱水蒸気で焼成する場合、試料の周りには水蒸気で満たされるため、他の加熱に比べて酸素濃度が低いことと水が多いことが理由として挙げられる。どちらの要因の影響が強いかを調べるため、乾燥空気、高温窒素および過熱水蒸気を用いて、試料表面が同じ温度になる条件下で焼成実験を行った。その結果、乾燥空気での焼成を行った試料の L^* 値の

変化が他に比べて速い結果となり、低酸素下では呈色速度が遅いことを示した。過熱水蒸気オープンで魚・肉を焼成した場合に他のオープンに比べて焼き色が付きにくいといわれているが、本解析結果はそれを裏付けている。

以上、魚表面温度が経時的に取得できれば、呈色反応に伴う $L^*a^*b^*$ 値の変化が予測可能なことを示した。しかし、 $L^*a^*b^*$ 値の時間変化がわかっても色がどのように変化するかは直感的にわかりにくい。そこで、焼き色変化をディスプレイ上で2次的に可視化する方法を検討した [53]。測定した温度データから $L^*a^*b^*$ 値を計算し RGB に変換しても、表面の色が均一に変化していくため焼き色がついていくようにはみえない。実際には魚表面で温度むらがあり、速く焼けていく部分と遅い部分があるためである。そこで、各点の表面温度にホワイトノイズを与えてばらつきをもたせた。

$$T(x, y) = T_M \times (1.0 + \alpha_M \times R_a) \quad (55)$$

ここで、 $T(x, y)$ は各点の表面温度、 T_M は1点の測定温度履歴である。 R_a は正規乱数で、乱数を発生させるため表面上でどこかの温度が高くなるかは決まっていない。また、 α_M ($0 \leq \alpha_M \leq 1$) はばらつきの大きさを表す係数で、 $\alpha_M = 0$ のとき表面温度は均一となり、 α_M が大きいほどばらつきは大きくなる。

マダイおよびブリを焼成したときの温度測定データから焼き色変化を予測・可視化した結果を Fig. 22 に示す。計算においては、 R_a は $-5 \sim +5$ の値で正規乱数を発生させている。また、 α_M の値については、放射温度計で測定した表面温度分布から、マダイ 0.11、ブリ 0.06

Fig. 22 Comparison of photographs and 3D images of browning color formation of red sea bream and Japanese amberjack.

としている。計算・可視化の結果 (3D-images) からブリのほうがマダイよりも均一に焼けていくことがわかる。同図に焼成時の表面観察結果 (Photographs) も合わせて示したが、可視化した結果とその傾向はよく一致している。

Fig. 22 からわかるとおり、同じ白身の魚でも魚種によって見た目の焼き色のつきかたは異なるが、Fig. 21 に示した $L^*a^*b^*$ 空間でその軌跡をみると魚種によらず、ほぼ同じ軌跡をたどる [55]。一方、焼き色のつく速度は魚種によって異なり、脂質含量の高い魚ほど呈色反応の速度定数は大きくなっている [55]。また、脂質含量の高い魚ほど α の値が小さく、焼き色は均一となる。したがって、マダイよりも脂質含量の高いブリのほうが、焼き色が付きやすく、かつ均一に焼けていくことになる。

6. お わ り に

食品加熱操作について工学的な観点から研究を始めて30年が経過した。十年一昔という言葉からすると、遠い昔のことになる。研究を始めたころはFORTRANでプログラムを作成し、大型計算機でバッチ処理をしていた。それが今やわずか750 gのパソコンで同じ計算が短時間でできるようになっている。ハードだけでなくアプリケーションソフトの進歩も目を見張るものがある。初めてCFDソフトを使って対流を可視化できたときには感動したものである。一方、時間が経っても変わらないのは学問体系である。ここで記載した「熱・物質移動論」は、時代とともに遠赤外線加熱、過熱水蒸気、IH、マイクロ波加熱、通電加熱など新しい要素は加わるものの、今も昔も変わらない。今後、AIやCAEの発達によってますます研究のツールは便利になっていくと思われるが、学問としての工学を基礎として、新しいものを取り入れながら食品工学ひいては食品産業の更なる発展を期待する。

謝 辞

筆者が従事した食品熱操作に関する研究は東京海洋大学 (東京水産大学) において行ったものです。研究を進めるのにあたり、学生時代を含めて多くの諸先生にご指導ご鞭撻を賜りました。とくに、東北大学では研究者の卵・ひよことして只木楨力先生、千田佑先生に研究のいろはを一から教わったこと、および米国ラトガース大学では故速川寛一先生の下で食品に関する研究を初めて行ったことは現在の研究の礎になっています。また、東京海洋大学 (東京水産大学) では、同じ研究室で半澤保先生、故三堀友雄先生、渡邊学先生から多大なご支援を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。また、本研究を遂行できたのは、現研究室

とともに研究を行っている福岡美香先生をはじめとして、博士研究員、大学院生ならびに学部学生の協力の賜物です。ここに記して心から御礼申し上げます。

NOMENCLATURE

A_M	: matrix defined by Eq. 15, m^{-1}
a	: nodal displacement vector, m
a_w	: water activity, -
a^*	: color position on red/green axis, -
b^*	: color position on blue/yellow axis, -
B	: magnetic induction, $Wb \cdot m^{-2}$
B_M	: strain nodal displacement matrix, m^{-1}
C_{app}	: apparent specific heat, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_p	: specific heat, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C_{pn}	: protein concentration, $kg \cdot m^{-3}$
C_w	: moisture concentration, $kg \cdot m^{-3}$
C_{we}	: equilibrium moisture concentration, $kg \cdot m^{-3}$
c	: contribution of protein to color change, -
D	: electric displacement, $C \cdot m^{-2}$
D_M	: elastic stress-strain matrix, m^{-1}
D_w	: moisture diffusivity, $m^2 \cdot s^{-1}$
d	: penetration depth of microwave, m
E	: Electric field strength, $V \cdot m^{-1}$
E_a	: activation energy, $kJ \cdot mol^{-1}$
E_y	: Young modulus, Pa
f	: frequency of microwave, Hz
g	: gravitational acceleration, $m \cdot s^{-2}$
H	: magnetic field intensity, $A \cdot m^{-1}$
H_L	: latent heat of vaporization, $J \cdot g^{-1}$
h_m	: convective surface moisture transfer coefficient, $m \cdot s^{-1}$
h_t	: convective surface heat transfer coefficient, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
I	: Intensity of current, A
I_0	: microwave energy at surface, $W \cdot m^{-2}$
J	: current flux, $A \cdot m^{-2}$
j_m	: moisture flux, $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
k	: thermal conductivity, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
k_R	: reaction rate constant, s^{-1}
k_z	: complex propagation constant, m^{-1}
k_0	: frequency factor, s^{-1}
L	: distance between electrodes, m
L^*	: color lightness, -
N_M	: shape function matrix, -
n	: outward normal unit vector, -
P	: internal pressure, Pa
Q	: internal heat generation rate, $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$
R	: electrical resistance, Ω

R_a	: normal random number, -
r	: radial distance in cylindrical coordinates, m
S	: area of electrode, m^2
S_v	: volumetric shrinkage coefficient, -
S_r, S_z, S_θ	: shrinkage coefficients in r, z , and θ directions, respectively, -
T	: temperature, K
T_a	: ambient temperature K
T_h	: heater or wall temperature K
T_M	: measured temperature, K
T_{max}	: maximum peak temperature, K
U	: displacement vector, m
t	: time, s
u, v	: velocity in r and z direction, respectively, $m \cdot s^{-1}$
u_r, v_z	: displacements in r and z direction, respectively, m
V	: voltage, V
V, V_o, V_w	: total, oil, and moisture volume, respectively, m^3
V_e	: internal evaporation rate, $kg\text{-}water \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$
W	: moisture content $kg\text{-}water \cdot kg\text{-}solid^{-1}$
W^+	: maximum moisture content, $kg\text{-}water \cdot kg\text{-}solid^{-1}$
X_c	: reactance, Ω
X_L	: dimensionless color change defined by eq.49, -
X_{tot}	: total non-denaturation ratio of protein, -
X_1, X_2	: non-denaturation ratio of myosin and actin, respectively, -
x	: distance from the surface, m
Z	: impedance, Ω
z	: axial distance in cylindrical coordinates, m

Greek symbol

α	: thermal diffusivity, $m^2 \cdot s^{-1}$
α_M	: magnification function, -
β	: thermal expansion coefficient, K^{-1}
β_h	: heating rate, $K \cdot s^{-1}$
γ	: shear strain, -
ε	: observed strain, -
ε_i	: initial strain (free hydro-strain), -
ε_s	: elastic strain, -
ε_0	: permittivity of the free space, $F \cdot m^{-1}$
$\varepsilon', \varepsilon''$	: dielectric constant and loss factor, respectively, -
λ_0	: wavelength of microwave, m
λ_o, λ_w	: permeability coefficient of oil and water, respectively, $kg\text{-}water \cdot m^{-1}$
μ_0	: magnetic permeability of free space, $H \cdot m^{-1}$
μ_{ow}	: chemical potential of pure water, $J \cdot mol^{-1}$
μ_{ap}	: apparent viscosity, $Pa \cdot s$

μ_o, μ_w	: viscosity of oil and water, respectively, $Pa \cdot s$
ρ, ρ_b	: density of material, $kg \cdot m^{-3}$
ρ_e	: electric volume charge density, $C \cdot m^{-3}$
ρ_s	: density of solid, $kg\text{-}solid \cdot m^{-3}$
σ	: stress $N \cdot m^{-2}$
σ_e	: electric conductivity, $S \cdot m^{-1}$
σ_s	: Stefan-Boltzmann constant, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
τ	: shear stress $N \cdot m^{-2}$
ϕ	: moisture transfer potential, $J \cdot mol^{-1}$
φ	: overall radiant heat transfer coefficient, -
ω	: angular frequency, $rad \cdot s^{-1}$

References

- 1) N. Sakai, A. Fujii, T. Hanzawa; "Heat transfer analysis in a food heated by far-infrared radiation" (in Japanese). Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, **40**, 469-477 (1993).
- 2) N. Sakai, N. Morita, P.Qiu, T. Hanzawa; "Two dimensional heat transfer analysis of the thawing process of tuna by far-infrared radiation" (in Japanese). Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, **42**, 524-530 (1995).
- 3) C. Liu, N. Sakai, T. Hanzawa; Three dimensional analysis of heat transfer during food thawing by far-infrared radiation. Food Sci. Technol. Res., **5**, 294-299 (1999).
- 4) N. Sakai, K. Hayakawa; Two dimensional simultaneous heat and moisture transfer in composite food. J. Food Sci., **57**, 475-480 (1992).
- 5) N. Sakai, K. Hayakawa; Heat and moisture transfer in composite food - Theoretical analysis of influence of surface conductance and component arrangement. J. Food Sci., **58**, 1335-1339 (1993).
- 6) S. Yabe, M. Fukuoka, N. Sakai; Water migration in spaghetti based on the structural change of starch granules during boiling (in Japanese). Jpn J. Thermophysical Prop., **26**, 179-186 (2012).
- 7) T. Kadoma, N. Sakai, C. Nakakado, M. Fukuoka, S. Takami; "Water and oil transfer in meat during the superheated steam cooking" (in Japanese). Sharp Technical J., **94**, 10-15 (2006).
- 8) T. Tsukada, N. Sakai, K. Hayakawa; Computerized model for strain-stress analysis of food undergoing simultaneous heat and mass transfer. J. Food Sci., **56**, 1438-1445 (1991).
- 9) Y. Llave, K. Takemori, M. Fukuoka, T. Takemori, H. Tomita, N. Sakai; Mathematical modeling of shrinkage deformation in eggplant undergoing simultaneous heat and mass transfer during convection-oven roasting. J. Food Eng., **178**, 124-136 (2016).
- 10) N. Ishiwatari, K. Tsutsumi, M. Fukuoka, K. Watanabe, Y. Taguchi, K. Kudou, I. Watanabe, N. Sakai; "Optimal heat sterilization of a hamburger patty during single-sided pan-

- frying Part 2: Establishment of a heat and moisture transfer model for pan-frying with an induction-heating cooker" (in Japanese). *J. Cookery Sci. Jpn.*, **45**, 275–284 (2012).
- 11) N. Ishiwatari, K. Tsutsumi, M. Fukuoka, K. Watanabe, Y. Taguchi, K. Kudou, I. Watanabe, N. Sakai; "Optimal heat sterilization of a hamburger patty during single-sided pan-frying Part 1: Establishment of a heat and moisture transfer Model for pan-frying with an induction-heating cooker" (in Japanese). *J. Cookery Sci. Jpn.*, **45**, 265–274 (2012).
 - 12) N. Sakai, H. Yang, M. Watanabe; "Theoretical analysis of the shrinkage deformation in viscoelastic food during drying" (in Japanese). *Jpn. J. Food Eng.*, **3**, 105–112 (2002).
 - 13) H. Yang, N. Sakai; Shrinkage and mechanical characteristics of potato undergoing air convection drying. *Jpn. J. Food Eng.*, **2**, 67–71 (2001).
 - 14) H. Yang, N. Sakai, M. Watanabe; Drying model with shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technol.*, **19**, 1441–1460 (2001).
 - 15) N. Sakai, T. Hagiwara, H. Yang, A. Tojo; "Heat transfer analysis of Tofu coagulation process" (in Japanese). *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **48**, 733–737 (2001).
 - 16) N. Sakai, J. W. Tang, C. M. Liu, M. Watanabe; Predicting temperature during the thermal processing of canned high-viscosity liquid food. *Food Sci. Technol. Res.*, **10**, 79–85 (2004).
 - 17) Q. Wang, N. Sakai, T. Hanzawa; Numerical analysis of heat transfer of canned liquid foods containing fibers or particles during sterilization. *J. Chem. Eng. Jpn.*, **33**, 703–708 (2000).
 - 18) Q. Wang, N. Sakai, T. Mihori; "Heat-induced flow and temperature distribution in canned foods containing liquid and particles" (in Japanese). *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **47**, 355–362 (2000).
 - 19) W. Mao, M. Kato, L. Liu, M. Fukuoka, N. Sakai; Heat transfer analysis of superheated steam by considering the spraying flow rate. *J. Food Process Eng.*, **40**, e12395 (2017).
 - 20) H. Kawakami, Z. Tou, M. Fukuoka, and N. Sakai; "The visualization and quantification of the flow in the pan during induction heating and gas heating" (in Japanese). *Jpn. J. Food Eng.*, **11**, 51–58 (2010).
 - 21) H. Kawakami, Y. Llave, M. Fukuoka, N. Sakai; CFD analysis of the convection flow in the pan during induction heating and gas range heating. *J. Food Eng.*, **116**, 726–736 (2013).
 - 22) S. Liu, M. Fukuoka and N. Sakai; Dielectric properties of fish flesh at microwave frequency. *Food Sci. Technol. Res.*, **18**, 157–166 (2012).
 - 23) N. Sakai, W. Mao, Y. Koshima, M. Watanabe; A method for developing model food system in microwave heating studies. *J. Food Eng.*, **66**, 525–531 (2005).
 - 24) W. Mao, M. Watanabe, N. Sakai; Dielectric properties of Surimi at 915 MHz and 2450 MHz as affected by temperature, salt and starch. *Fisheries Sci.*, **69**, 1040–1045 (2003).
 - 25) Y. Llave, K. Mori, D. Kambayashi, M. Fukuoka, N. Sakai; Dielectric properties and model food application of tylose water pastes during microwave thawing and heating. *J. Food Eng.*, **178**, 20–30 (2016).
 - 26) W. Mao, M. Watanabe, N. Sakai; Dielectric properties of frozen surimi at 915 MHz and 2450 MHz. *Food Sci. Technol. Res.*, **9**, 361–363 (2003).
 - 27) C. Liu, N. Sakai; "Dielectric properties of tuna at 2450 MHz and 915 MHz as a function of temperature" (in Japanese). *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, **46**, 652–656 (1999).
 - 28) Y. Llave, Y. Terada, M. Fukuoka, N. Sakai; Dielectric properties of frozen tuna analysis of defrosting using a radio-frequency system at low frequencies. *J. Food Eng.*, **139**, 1–9 (2014).
 - 29) C. Xue, N. Sakai, M. Fukuoka; Prediction of the degree of starch gelatinization in wheat flour dough during microwave heating. *J. Food Eng.*, **97**, 40–45 (2010).
 - 30) C. Xue, N. Sakai, M. Fukuoka; Use of microwave heating to control the degree of starch gelatinization in noodles. *J. Food Eng.*, **87**, 357–362 (2008).
 - 31) W. Mao, M. Watanabe, N. Sakai; Analysis of temperature distribution in Kamaboko during microwave heating. *J. Food Eng.*, **71**, 187–192 (2005).
 - 32) W. Mao, M. Fukuoka, N. Sakai; Gel strength of Kamaboko gels produced by microwave heating. *Food Sci. Technol. Res.*, **12**, 241–246 (2006).
 - 33) N. Sakai, C. Wang, S. Toba, M. Watanabe; An analysis of temperature distributions in microwave heating of foods with non-uniform dielectric properties. *J. Chem. Eng. Jpn.*, **37**, 858–862 (2004).
 - 34) C. M. Liu, Q. Z. Wang, N. Sakai; Power and temperature distribution during microwave heating thawing, simulated by using Maxwell's equations and Lambert's law. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **40**, 9–21 (2005).
 - 35) N. Sakai, Y. Cheng, F. Shimoda; Effect of incident power intensity on temperature distribution in microwave heated food. *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**, 1432–1438 (2003).
 - 36) S. Liu, M. Fukuoka, N. Sakai; Investigation and modeling of temperature changes in food heated in a flatbed microwave oven. *J. Food Eng.*, **131**, 142–153 (2014).
 - 37) S. Liu, M. Fukuoka, N. Sakai; A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. *J. Food Eng.*, **115**, 49–62 (2013).
 - 38) Y. Llave, S. Liu, M. Fukuoka, N. Sakai; Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods. *J. Food Eng.*, **152**, 32–42 (2015).
 - 39) S. Liu, X. Yu, M. Fukuoka, N. Sakai; Modeling of fish boiling

- under microwave irradiation. J. Food Eng., **140**, 9–18 (2014).
- 40) Y. Jin, Y. Cheng, M. Fukuoka, N. Sakai; Electrical conductivity of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) fillets during ohmic heating. Food Bioprocess Technol., **8**, 1904–1913 (2015).
 - 41) L. Liu, Y. Llave, Y. Jin, D. Zheng, M. Fukuoka, N. Sakai; Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies. J. Food Eng., **197**, 68–77 (2017).
 - 42) W. Guo, Y. Llave, Y. Jin, M. Fukuoka, N. Sakai; Mathematical modeling of ohmic heating of two-component foods with non-uniform electric properties at high frequencies. Innovative Food Sci. Emerging Technol., **39**, 63–78 (2017).
 - 43) Y. Llave, N. Shibata-Ishiwatari, M. Watanabe, M. Fukuoka, N. Hamada-Sato, N. Sakai; Analysis of the effects of thermal protein denaturation on the quality attributes of sous-vide cooked tuna. J. Food Process. Preserv., **42**, e13347 (2018).
 - 44) W. Mao, X. Li, M. Fukuoka, S. Liu, H. Ji, N. Sakai; Study of Ca^{2+} -ATPase activity and solubility in the whole Kuruma prawn (*Marsupenaeus japonicus*) meat during heating: Based on the kinetics analysis of myofibril protein thermal denaturation. Food Bioprocess Technol., **9**, 1511–1520 (2016).
 - 45) N. Shibata-Ishiwatari, M. Fukuoka, N. Sakai; Changes in the viscosity of expressible water in Meat during heating: Description based on the denaturation kinetics of water-soluble proteins. Food Sci. Technol. Res., **21**, 525–530 (2015).
 - 46) N. Ishiwatari, M. Fukuoka, N. Sakai; Effect of protein denaturation degree on texture and water state of cooked meat. J. Food Eng., **117**, 361–369 (2013).
 - 47) N. Ishiwatari, M. Fukuoka, A. Tamego, N. Sakai; “Validation of the quality and microbiological risk of meat cooked with the vacuum-pack cooking method (sous-vide)” (in Japanese). Jpn. J. Food Eng., **14**, 19–28 (2013).
 - 48) S. Kajitani, M. Fukuoka, N. Sakai; Kinetics of thermal denaturation of protein in cured pork meat. Jpn. J. Food Eng., **12**, 19–26 (2011).
 - 49) Y. Llave, S. Fukuda, M. Fukuoka, N. Shibata-Ishiwatari, N. Sakai; Analysis of color changes in chicken egg yolks and whites based on degree of thermal protein denaturation during ohmic heating and water bath treatment. J. Food Eng., **222**, 151–161 (2018).
 - 50) N. Ishiwatari, M. Fukuoka, N. Hamada-Sato, N. Sakai; Decomposition kinetics of umami component during meat cooking. J. Food Eng., **119**, 324–331 (2013).
 - 51) Y. Llave, K. Takemori, M. Fukuoka, T. Takemori, H. Tomita, N. Sakai; Analysis of browning of broiled foods by noncontact techniques: A case study for Japanese eggplant (*solanum melongena*). J. Food Process. Eng., **40** e12347 (2017).
 - 52) Y. Llave, X. Yu, M. Fukuoka, N. Sakai; Analysis of the color developed during carbonization of grilled fish by kinetics and computer imaging. Food Sci. Technol. Res., **20**, 1051–1061 (2014).
 - 53) Y. Llave, X. Yu, G. Wakisaka, M. Fukuoka, N. Sakai; Visualization of browning color formation on grilled fish through a 2D simulation. Food Sci. Technol. Res., **20**, 537–545 (2014).
 - 54) X. Yu, Y. Llave, M. Fukuoka, N. Sakai; Estimation of color changes in fish surface at the beginning of grilling based on the degree of protein denaturation. J. Food Eng., **129**, 12–20 (2014).
 - 55) Y. Llave, H. Matsuda, M. Fukuoka, N. Sakai; Comparison of browning colour formation on the surface of fish samples during grilling. Food Sci. Technol. Res., **20**, 85–91 (2014).
 - 56) H. Matsuda, Y. Llave, M. Fukuoka, N. Sakai; Color changes in fish during grilling – Influences of heat transfer and heating medium on browning color. J. Food Eng., **116**, 130–137 (2013).
 - 57) M. Nakamura, W. Mao, M. Fukuoka, N. Sakai; Analysis of the color change in fish during the grilling process. Food Sci. Technol. Res., **17**, 471–478 (2011).

要 旨

筆者は、最適な加熱操作の検討を目的として、種々の加熱法を用いた食品の加熱操作について工学的に研究を行ってきた。ここでは以下の4つのテーマに分け、その内容を概説した。(1)熱水分移動と収縮変形：加熱操作で最も基本となる熱移動と水分移動の理論的解析を示した。さらに加熱操作時に問題となる食品の収縮変形とクラック生成の解析法を示した。(2)対流を伴う熱移動：容器内で対流が発生すると熱移動速度は伝導食品に比べてはるかに大きくなり、自然対流の計算が必要になる。非ニュートン流体の液状食品でも見かけ粘度を用いることにより温度変化が予測できることを示した。また、CFDを用いた鍋内対流の解析について概説した。(3)内部発熱を伴う加熱操作：マイクロ波加熱および通電加熱では食品の内部から加熱できるため、従来の加熱法よりも速く加熱できるが、加熱むらも発生する。温度分布を予測するための、電磁界解析と熱伝導解析を連成した解析手法を説明した。(4)加熱に伴う化学反応：加熱に伴い種々の化学反応が起こり、食品の品質に影響を及ぼす。ここでは、魚焼成過程のタンパク質変性と焼き色の呈色を例として、反応の速度論的解析について説明した。