

研究の動向

調理シミュレーションの構築方法と活用事例

岐阜大学 教育学部 家政教育講座 柴田(石渡) 奈緒美

1. はじめに

女性のさらなる社会進出、核家族化、単独世帯の増加に伴う食の個食化といったライフスタイルの変化から、外食・中食産業、そして冷凍食品や調理済加工食品を生産している食品産業は現代社会において大きな役割を担っていると考えられる。現在および今後、食品産業が目指す方向性は以下のように整理されている¹⁾。

- 1) 食品の高品質化（美味しい、安全、健康増進機能）
- 2) 特定の対象者別食品（高齢者、嚥下困難者、メタボ、健常者、乳幼児）
- 3) 6次産業化（生産地加工、一次加工）に貢献できる技術
- 4) 品質の見える化（信頼性、品質管理）や後継者不足などに対応した生産管理工程
- 5) 環境負荷軽減（流通・加工時の農産物ロスの軽減、CO₂低減化、省エネ）や生産性向上に寄与する加工システム

以上に示した項目より、食品産業は、ヒトが食事に対して求めている「美味しく、安全で、身体に良い」製品のみを製造するのではなく、品質の見える化や環境負荷軽減を見据えた目標を設定していることが伺える。このような問題を解決する方法のひとつに、対象食材の変化を予測し可視化するシミュレーション手法が挙げられる。しかし、複数の成分で構成され、かつ産地や品種によって品質が異なる食材の変化を厳密に予測することは難しいため、現在も畜肉・魚肉、デンプン系食品および野菜を対象とした加熱処理過程の変化を記述可能とするモデル化の検討が行われている。筆者はなかでも“加熱調理過程におけるシミュレーション”に着目し、食材を加熱した際の伝熱現象に基づき生じる変化を予測することで、

科学的根拠に基づいた品質・安全性を考慮した加熱処理条件の提示を目指した研究を行っている。

本稿ではとくに殺菌が重要であるハンバーグと、色彩、食感、保存性など複数の品質項目を同時に予測した生おからを用いた加工食品をシミュレーションした例を紹介する。

2. ハンバーグ調理における伝熱・形状変化・殺菌価の予測

畜肉食品の中でもハンバーグは人気があり、家庭においても頻繁に調理されるメニューのひとつである。しかしハンバーグはミンチ肉、卵、タマネギなど複数の食材を混合し成形しているため、微生物の混入・繁殖の危険性が高い食品でもある。そのため国内では厚生労働省（2009）が「中心温度75℃ 1分間の加熱」を指導しているが、ハンバーグは焼成に伴い形状が変化するため、中心点が最低温度とは限らない。すなわち、試料全体の温度と温度に基づき殺菌予測をする必要性が挙げられる。そこでハンバーグを片面から焼成し、一度反転させた際のハンバーグ1個体における伝熱解析、形状変化および殺菌価を提示するシミュレーションの構築を行った。

(1) ハンバーグの焼成実験

シミュレーションを行うにあたり、重要項目のひとつに実験値の取得が挙げられる。実際に対象とする食材を調理し、その際の温度、重量、体積変化などの品質測定はシミュレーションの有効性を検証する際に必要となる。そこでまずハンバーグを調理し、初期中心点、上面および底面の3箇所における温度履歴、形状変化ならびに温度上昇に伴う体積変化率を実測した。

ハンバーグの材料および配合割合は、牛ひき肉38%、豚ひき肉16%、豚脂13%、ソーテ玉ねぎ20%、塩、卵白、牛乳、パン粉、香辛料とした。全ての材料を混合後、1個の重量を90g、厚さ17mm、高さ82mmの円筒形に成形した。熱源はIHクッキングヒーターを、焼成器具は直径220mmの多層構造フライパンを用いた。フライパンを温めたのち、ハンバーグ1個を中心位置に投入し、

Naomi SHIBATA-ISHIWATARI

岐阜大学教育学部家政教育講座、助教

〔著者紹介〕（略歴）東京海洋大学大学院博士後期課程修了。海洋科学博士。専門分野は加熱調理過程に伴う食材変化の品質予測（調理シミュレーションの構築）。簡便性と品質を担保した調理法の探索など。近年は学校給食における食物アレルギー代替食のあり方について検討を行っている。

蓋をした状態で焼成した。途中、試料中心温度が目的温度（30、40および50℃の3種類）に到達後、ただちに1回反転させ、中心温度が75℃以上、1分間経過するまで焼成した。また焼成過程における直径ならびに厚みを測定し、調理過程における形状変化の把握を行った。

体積変化率の測定は、 $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ の穴をあけたシリコンにハンバーグを充填し、シリコン全体をプラスチックフィルムで充填後、20～90℃に設定した恒温湯槽で10分間等温加熱処理した。試料を十分に冷却した後、比重瓶法を用いて、体積を算出した。その結果、20℃では体積変化は生じず、30～70℃では徐々に体積が収縮していったが、80℃と90℃では同一の変化率となったことから、30～80℃の範囲において、加熱処理温度に応じた体積変化率の近似式を取得した。得られた式を式（1）に示す²⁾。

$$S_v = 1.54 \times 10^{-6} T^3 - 2.56 \times 10^{-4} T^2 + 8.87 \times 10^{-3} T + 8.87 \times 10^{-1} \quad (1)$$

$$(T < 20, S_v = 1, T \geq 90, S_v = 0.74)$$

ここで、 S_v は体積変化率（-）、 T は温度（℃）をあらわす。

(2) 伝熱、形状変化ならびに殺菌価の予測

伝熱解析値の有効性を検証するため、中心温度30℃反転の解析値と実験値の比較を図1に示した。実測した中心温度は焼成時間の経過に伴い徐々に上昇したのに対し表面温度（上面、底面）は、フライパンに接した直後に100℃付近まで温度上昇したが、100℃において試料中に存在する水分が蒸発するため、100℃付近に到達以降は緩やかな温度上昇となった。実験値と解析値を比較すると、反転直後の底面の温度のみ約15℃の差が生じたが、これは実験の際、反転に10～20秒要したため、試料の温度が低下したことが原因として挙げられる。その他の焼成過

程では実験値と解析値は同じ値であることから、今回行った伝熱解析値は妥当であると判断した。

次に得られた伝熱解析値と実験より取得した体積変化率の近似式（式（1））を用いて、30℃反転試料の形状変化の比較を行った。図2に示した実験値から半径は時間の経過に伴い収縮するが、厚みは増大することが見て取れる。また変化率を算出すると、直径と厚みの変化率の数値は異なることから試料は等方的に形状変化しないことが明らかとなった。また解析値は実験値の減少を良好に再現していることから、形状変化についても解析値は妥当であると判断した。

このように、伝熱ならびに形状変化において実験値を良好に再現できたことから、最後に得られた伝熱解析値を用い、大腸菌 O157:H7を対象とした殺菌価を算出した。

殺菌価算出にあたり用いた式は式（2）であらわされる。

$$F = \int_{t_0}^{t_f} 10^{\frac{T(t)-T_r}{Z}} dt \quad (2)$$

ここで、 F は殺菌価（分）、 Z は対象菌の Z 値（℃）を表し、 Z 値には 6.54°C ⁴⁾を用いた。また日本では、厚生労働省（2009）が食品を取り扱う際の注意の中で、「中心温度75℃1分間の加熱」を指導している。そのため基準温度 T_r には75℃を採用した。

各反転温度における試料中心75℃以上1分経過した際の殺菌価分布の中心断面図ならびに、試料全体が殺菌価1分を満たすまでに要した時間を図3にまとめた。殺菌価分布において、黒い部分（白以外）は75℃、1分相当の加熱に満たしておらず、殺菌不十分を意味する。

試料初期中心点が75℃に到達してから1分経過した際の中心断面図より、50℃反転試料は全体が殺菌価1分以

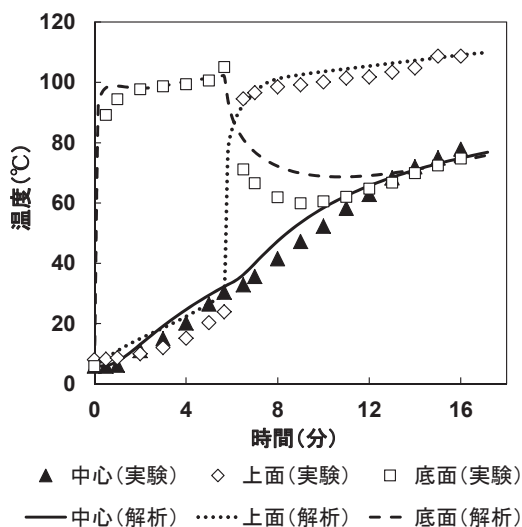


図1. 30℃反転試料の加熱調理過程における実験値と解析値の温度履歴³⁾

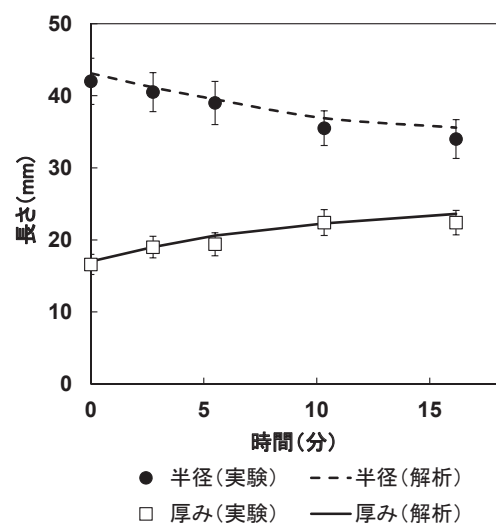


図2. 30℃反転試料の加熱調理過程における実験値と解析値の体積変化

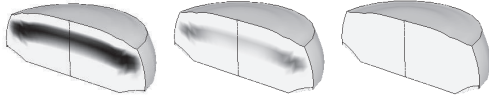
反転時の 中心温度	30℃	40℃	50℃
反転までの時間	5.66分	8.16分	11.6分
75℃, 1分 到達時間	16.0分	16.1分	18.6分
殺菌価分布			
殺菌完了時間	18.5分	17.1分	18.6分

図3. 反転する中心温度の違いに伴う殺菌価分布の比較²⁾

上であったのに対し、他の試料では上面側の一部は殺菌価1分に満たないことがわかる。すなわち、初期中心温度が75℃1分経過時においても、30℃および40℃反転では殺菌不足であることが明らかとなった。また一般的に試料内部の最低温度点（冷点）は中心と想定されるが、加熱調理中に形状が変化するハンバーグの場合、最も低い殺菌価となる位置が、初期中心位置と同一であるとは限らないということが明らかになった。つまり、初期中心点のみをモニタリングすることで安全性を検証することの危険性、ならびに試料全体を対象とした殺菌価分布の算出が重要であることが提示された。

次に、初期中心点が75℃1分経過時に殺菌不十分であると明らかとなった2種類の試料において、試料全体が十分な殺菌価を得るのに要する時間を算出した。その結果、40℃反転は試料全体が十分な殺菌価を得るために必要な時間は17.1分と、他の2種類と比較し最も短くなった。焼成時間への影響は、焼成器具であるフライパンに近い試料下面と、上面で伝熱速度が異なることに起因する。試料であるハンバーグは円筒形だが、厚みに対して直径が大きいことから伝熱支配面は試料上下面であるとみなせる。また、試料上面は主にフライパン内の空気からの熱伝達、下面はフライパンからの伝導伝熱により温度上昇するため、温度上昇速度は下面の方が速いと推察できる。50℃反転試料は反転前までに、初期中心点が基準温度である75℃に近づいているため、反転後、初期中心点が75℃以上1分経過する前に上面（初期時は下面）が殺菌完了に必要な温度域に到達したと考えられる。これに対し40℃反転試料では、厚生労働省の指導基準時点に試料上面の殺菌が不十分であったが、反転前と反転後から殺菌完了に要した時間がほぼ同じだった。つまり、試料上下面がフライパンからの熱伝導による温度上昇と非接触面時の熱伝達による温度上昇が同程度となったため、総合的に焼成時間が最も短くなったと考えられる。

このように、試料全体の安全性を検証することは、製造工程時の省エネルギー化につながるのみならず、過加熱に伴う品質劣化の抑制にもつながると考えられる。ま

た、殺菌が進行する変化をアニメーションとして提示することで、専門知識を有していない消費者に対しても食品の安全性についてわかりやすく説明することができる、教育現場において食材内部の変化について説明することができる等、食品産業のみならず、幅広い分野における活用が期待される。

3. 生おからを用いた加工食品の品質予測

近年、和食への関心が高まる一方、豆腐の副産物であるおからは栄養価に富むにも関わらず大量に廃棄されている。また、朝食を欠食する子どもが増加している背景から、筆者は生おからを焼成前の生地重量に対して70%使用した、手軽に食することが出来るシリアルに類似した加工食品の開発を行った⁵⁾。ところで、食品の品質は見た目、食感そして安全性の担保と複数の項目を横断しており、総合的に判断されている。また求められる品質は幼児、成人、高齢者など各世代に応じて異なることが予想される。そこで開発した加工食品の品質変化を焼成温度および焼成時間から予測可能とすることで、消費者が求める品質を担保した製品の焼成条件を提示するシミュレーションツールの構築を行った。

(1) 生おからを用いた加工食品の品質定量

柴田ら⁵⁾の作製方法に従い、生おから70%、薄力粉12%、卵10%、砂糖8%の重量割合で配合し、一度に作成した生地の重量は428g（生おから300g）とした。その後ミキサーで全ての材料を投入し攪拌後、直径20mm、厚さ 1.50 ± 0.27 mmの円筒形に成型し、オーブンを用いて焼成した。焼成条件は設定温度100℃で最大120分、120℃で最大90分、150℃で最大30分とした。また焼成過程に伴う品質変化の把握として、オーブン庫内の環境温度、試料の表面温度、色彩値 ($L^*a^*b^*$)、含水率、水分活性そして破断応力を測定した。

オーブン庫内の環境温度は温度を一定に保つため、設定温度の前後10℃の温度帯で上昇下降を繰り返した。試料表面温度は環境温度に対応しながら温度上昇を続けた

が、設定温度100℃は80℃に到達以降、環境温度に依存して上昇下降を繰り返すのみだった。また試料の材料である生おから、小麦粉、砂糖には糖類とアミノ酸が存在するため、焼成に伴いメイラード反応が生じた。その結果、全ての設定温度において L^* は焼成開始直後わずかに上昇したが、その後は時間の経過に伴い減少する傾向、 a^* は L^* が上昇している焼成開始直後はわずかに増加し、 b^* は L^* の低下とともに減少する傾向がみられたことから、 a^* と b^* は L^* と相関があると考えられる。また、含水率と水分活性は焼成時間の経過に伴い数値が低下し、設定温度が高くなるほど減少速度は速くなり、破断応力は全ての設定温度において焼成時間の経過に伴い値は大きくなるとともに、設定温度が高くなると数値の上昇が著しくなった。さらには各設定温度において、含水率が平衡値に到達した時間は水分活性、破断応力が平衡値に到達した時間とおおよそ等しかったことから、水分活性と破断応力は含水率に依存すると考えられる。そこで L^* に対する a^* および b^* のプロット (図4 (A))、含水率に対する水分活性および破断応力のプロット (図4 (B)) を作成し、 L^* から a^* と b^* を算出する近似式、含水率から水分活性、破断応力を算出する近似式を算出した。

$$a^* = -9.34 \times 10^{-5} L^{*3} + 7.77 \times 10^{-3} L^{*2} - 9.55 \times 10^{-2} L^* + 8.1 \quad (3)$$

$$b^* = 3.01 \times 10^{-4} L^{*3} - 5.83 \times 10^{-2} L^{*2} + 3.79 L^* - 5.54 \times 10 \quad (4)$$

(30.6 ≤ L^* ≤ 81.4)

$$A_w = -0.52 M^2 + 1.18 M + 0.37 \quad (5)$$

($M < 0.815$, $A_w = 0.98$)

$$H = 9.95 \times 10^4 M^2 - 3.89 \times 10^5 M + 4.45 \times 10^5 \quad (6)$$

($0 \leq M \leq 1.50$)

ここで、 A_w は水分活性 (－), M は乾物基準含水率 (g-water/g-solid), H は破断応力 (N/m^2) をあらわす。

(2) 色彩値の予測

実験結果から試料表面温度が約80℃に到達した際、 L^* は最大値を示し、その後、緩やかに L^* が減少する際に呈色が行進することが示唆された。そこで本研究における呈色反応は、試料表面温度80℃以上において、試料表面の物質Aが加熱によって呈色した物質Pに変化し、物質Pの濃度と色調 (L^*) の変化が相関すると仮定した速度モデルを設定した。

$$\frac{dC_P}{dt} = -\frac{dC_A}{dt} = -kC_A \quad (7)$$

$$X = \frac{(C_{Pf} - C_P)}{(C_{Pf} - C_i)} = \frac{(L_f^* - L^*)}{(L_f^* - L_i^*)} \quad (8)$$

ここで、 C は呈色変化する物質の濃度 (mol/g), k は呈色反応の速度定数 ($1/\text{s}$), t は時間 (s), X は無次元化した L^* の割合 (－), L_i^* は初期 L^* , L_f^* は最終 L^* を示す。

時刻 t における無次元化した L^* の割合 X は式(8)で求めることができ、色彩値変化の速度定数 k の温度依存性は式(9)に示すアレニウスの式に従うと、式(9)は式(11)であらわすことができる。

$$\frac{dX}{dt} = -kX \quad (9)$$

$$k = Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

$$\frac{dX}{dt} = -Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) X \quad (11)$$

ここで、 Z は色彩値変化の頻度因子 ($1/\text{s}$), T は温度 (K), E_a は色彩値変化の活性化エネルギー (kJ/mol), R は気体定数 ($\text{J/(mol} \cdot \text{K)}$) を示す。

アレニウスの式に必要な活性化エネルギーと頻度因子の算出は以下の手法を用いて推定した。まず、活性化エ

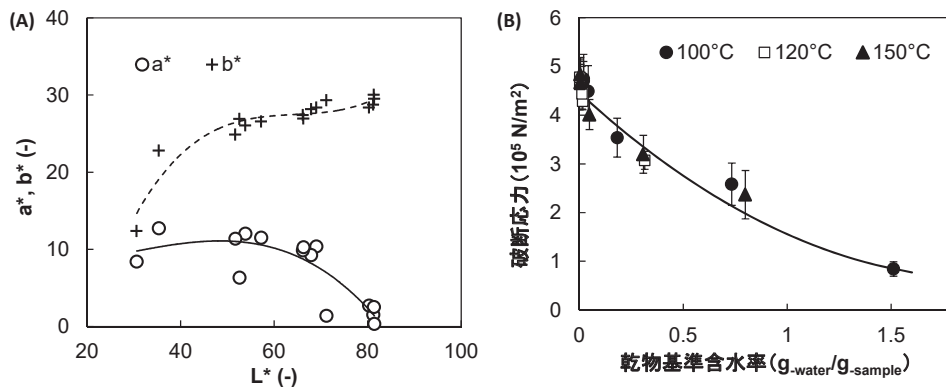


図4. 近似式算出にあたり使用したプロット

(A) L^* と a^* , b^* の相関図 (B) 乾物基準含水率と破断応力の相関図

エネルギーを仮定し、試料表面温度と式 (11) を用いて L^* (予測値) を算出した。またこの際、実測値と予測値の誤差が最小になるような頻度因子を黄金分割法 (Golden Section method) によって求めた。この操作を複数回繰り返すことで、設定温度100~150℃における活性化エネルギー 61.6 kJ/mol, 頻度因子 4.93×10^5 1/s を導出した。

導出した活性化エネルギーと頻度因子, ならびに式 (11) を用いて、設定温度120℃における色彩値の実験値と解析値を比較した (図5)。図5には、予測した L^* から式 (3) と式 (4) を用いて算出した a^* と b^* もあわせて示しているが、全ての色彩値において解析値と実験値を良好に一致していることから、設定したモデルならびに導出した速度パラメータは妥当であると判断した。

(3) 含水率の予測

含水率の変化, すなわち水分移動の予測には、フィッ

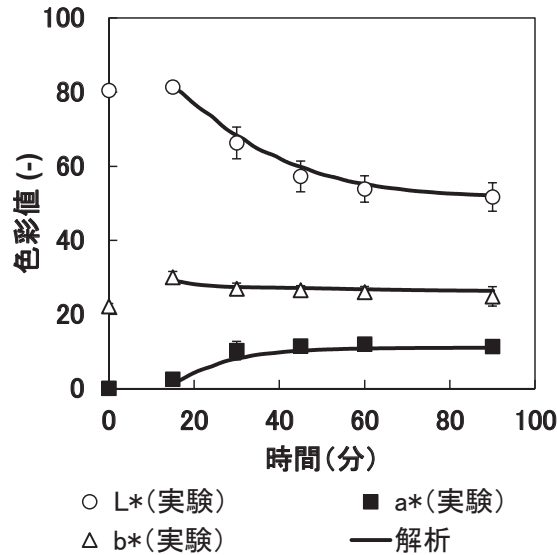


図5. 色彩値の実験値と解析値の比較

クの法則に従った。

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = -\text{div}(J_m) \quad (12)$$

ここで、 J_m は水分移動流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) を示し、式 (13) であらわされる。

$$J_m = -D \cdot \text{grad}(C_m) \quad (13)$$

ここで、 D は拡散係数 (m^2/s) をあらわす。また拡散係数の温度依存性はアレニウスの式に従うとし、活性化エネルギーと振動因子はTorrez ら⁷⁾ の値 (31.4 kJ/mol , $3.483 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) を用いた。

また、本研究試料は実験結果より含水率は焼成開始直後から焼成時間の経過に伴い、数値が低下することが明らかとなっている。そこで水分移動に関する初期条件と境界条件は以下の式に従うとした。

$$\text{I.C.} \quad C_m = C_{mi} \quad (14)$$

$$\text{B.C.} \quad C_m = C_{meq} \quad (15)$$

ここで、 C_{mi} は水分濃度の初期値、 C_{meq} は水分濃度の平衡値を示す。

式 (13) に従い算出した含水率の変化と実験値の比較を図6 (A) に、予測した含水率から式 (6) を用いて算出した破断応力の解析値と実測値の比較を図6 (B) に示した。図6 (A) より、全ての設定温度において焼成開始直後から最大焼成時間に至るまで、解析値は実験値を良好に再現している様子が見て取れる。また破断応力 (図6 (B)) や水分活性についても同様に実験値と解析値は良好に一致したことから、物質移動解析と実験より取得した近似式から含水率、水分活性、破断応力の3項目を同時に予測できると判断した。

(4) シミュレーション手法を用いた焼成条件の探索

仮定した反応モデルを用いて算出した色彩値, 含水率, 水分活性および破断応力は実験値と良好に一致すること

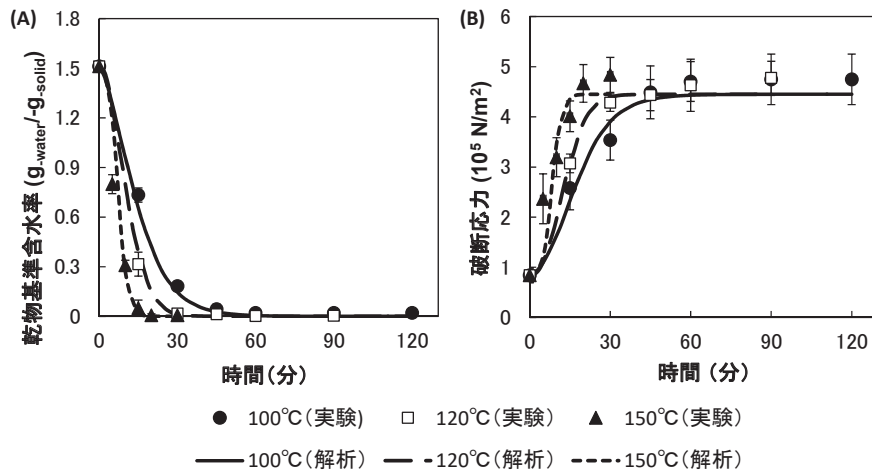


図6. 含水率と破断応力の実験値と解析値の比較

(A) 含水率, (B) 破断応力

表 1. 水分活性0.37に到達するまでに要する焼成時間の算出, ならびに市販品と解析値の色彩値⁵⁾

表面温度	時間 (分)	解析値			市販品 ⁵⁾		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
80℃	58.8	57.9	10.5	27.0	46.4	7.96	24.8
100℃	48.3	51.0	11.1	26.2	±	±	±
120℃	31.6	50.0	11.1	26.0	1.77	0.36	0.95

を確認したが, シミュレーション手法の最終目的は実験値と解析値を一致させることではない。モデルの妥当性を検証後, 消費者の要望に応じた焼成条件を探索する, 同程度の品質をより効率的に生産できる条件を探索するなど活用することに意義がある。そこで今回, 確立した手法を用いて焼成時間の経過に伴う品質変化を予測し, 市販品の品質に近い値を示す焼成条件の検討を行った。仮定した焼成条件は, 開始直後から試料表面温度が80, 100および120℃に到達し, 焼成終了時まで一定であるとした。また今回予測した品質の中で水分活性は保存性の観点から最も重要であると考え, 市販品のブランフレークの水分活性0.37に到達するまでに要した時間と, その際の色彩値, 破断応力を算出した (表 1)。

予測計算を実施するにあたり, 指標とする水分活性を0.37 (－) と固定したため, 含水率に基づいて計算する破断応力の予測値は全ての設定温度において共通の値 ($4.46 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) を示した。また表 1 に示した色彩値の予測値より, a^* と b^* は全ての設定温度でほぼ共通であり, かつ市販品の数値に近い値を示すことが明らかとなった。これに対して L^* の予測値は設定温度が高くなるに従い数値が低下したため, 表面温度を120℃一定で焼成した試料が市販品の L^* に最も近い値を示した。また, 表面温度を80℃では58.8分要したのに対し, 120℃では31.6分と表面温度を40℃上昇させることで, 焼成時間を27.2分短縮できると判明したことから, 表面温度を120℃で焼成する条件が最も効率的であると考えられる。しかし, 一般的に設定温度を高くするとより多くのエネルギー量を要するため, 環境負荷は高くなると考えられる。したがって今後は品質のみを予測可能とするのではなく, 必要となるエネルギー量の推算をシミュレーションに設定することで, 品質のみならず環境負荷を考慮した焼成条件を探索するツールが必要となると考えられる。また今回は市販品の定量値を指標としたが, 官能試験を行い消費者が好む色や硬さを検証し最終値に設定することで, 子どもや成人, 高齢者など, 各世代の嗜好を反映した商品開発につながると期待される。

4. おわりに

本稿では, 伝熱現象に基づき食材の品質や安全性を予

測する手法を紹介した。食品産業や家庭における調理では, これまで多くのレシピや操作が“経験と勘”, “試行錯誤”によって提案されているが, シミュレーション手法を用いることで, 科学的な根拠に基づき, 品質と安全性の担保や消費者の好みに合わせた商品, 焼成時間の短縮に伴う環境負荷の軽減につながる焼成条件を提示することが可能となる。

予測を行う際は, 伝熱解析や反応モデルの設定・計算が必要となるため, 初めてシミュレーション手法に取り組む際は戸惑いや抵抗があるかもしれない。しかし現在, シミュレーションソフトの販売や使用方法の説明会, 勉強会が開催されており, 門戸が開かれている。興味のある方は, ぜひ研究に取り入れてみてはいかがでしょうか。

引 用 文 献

- 1) 五十部誠一郎. これからの食品開発を考える 3 高付加価値化のための加工・流通技術. 食品と開発. 2011, **46**, 12-15
- 2) 石渡奈緒美, 堤一磨, 福岡美香, 渡部賢一, 田口靖希, 工藤和幸, 渡辺至, 酒井昇. 殺菌価を考慮したフライパンによるハンバーグ焼成時の最適調理 (第 2 報) 回転タイミングの違いがもたらす殺菌価への影響. 日本調理科学会誌. 2012, **42**, 275-284
- 3) 柴田 (石渡) 奈緒美, 福岡美香, 酒井昇. 加熱調理過程における畜肉食品の殺菌予測. 冷凍. 2016, **91**, 516-521
- 4) Huang, L. Thermal resistance of *Listeria monocytogenes*, *Salmonella Heidelberg*, and *Escherichia coli* O157:H7 at elevated temperatures. J. Food Prot. 2004, **67**, 1666-1670
- 5) 柴田 (石渡) 奈緒美, 川口恵美, 安藤祥充, 稲川幹夫, 星田博文. 生おからを主原料とした加工食品の開発. 日本調理科学会誌. 2016, **49**, 355-361
- 6) 柴田 (石渡) 奈緒美, 渡邊桃子, 福岡美香, 酒井昇. 生おからを用いた加工食品の品質予測に基づく焼成条件の検討. 日本食品工学会誌. 2017, **18**, 79-86
- 7) Torrez, I. R. M.; Giner, S. A. Drying-toasting kinetics of presoaked soybean in fluidized bed. Experimental study and mathematical modelling with analytical solutions. J. Food Eng. 2014, **128**, 31-39

日本家政学会誌68-7に掲載されています