

# 過熱蒸気による牛肉の焼成および 解凍—加熱プロセスの最適操作条件

今泉 貴雅、片岡 裕司、荒木 徹也、相良 泰行\*

東京大学 大学院農学生命科学研究科 農学国際専攻 国際情報農学研究室

## 1. 緒言

食品の解凍・加熱プロセスにおける操作条件を最適化するためには、操作時間を短縮すると同時に、消費者による最終製品の「おいしさ」に関する評価値を最大化することが必要となる。しかしながら、過熱蒸気による食品の解凍・加熱特性および焼成後に得られる材料の品質と官能評価特性を定量的に測定・評価し、これらの結果に基づき、材料内部の熱移動プロセスを把握すると共に加熱装置の最適設計・操作法を提唱した研究例は数少ない現状にある。

本研究の目的は、形状が均質であり、さらに通常加熱のみにより調理済みとなる食品の代表として牛肉を試料に選び、その加熱特性と焼成試料の物理化学的特性および官能試験結果間の相互関連性を検討した結果に基づき、過熱蒸気オーブンの最適加熱操作条件を探索し、さらに解凍—加熱連続操作時における材料内の熱および物質移動のメカニズムを移動速度のレベルで解明することにある。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料および実験装置

供試材料には100mmφ×20mmの牛ロース肉を用いた。試作した実験用過熱蒸気オーブンを図1に示す。このオーブンは、1)飽和蒸気生成ユニット、2)蒸気制御・送気ライン、3)過熱蒸気生成ユニット、4)オーブンで構成されている。以下に各ユニットの機能について説明する。

#### 1) 飽和蒸気生成ユニット

水道水を貯留タンク内に水面一定レベルで貯留し、ポンプ②により小型電気ボイラー③に輸送し、内部ヒータ(0.9kW×6本)により飽和蒸気を生成する。

#### 2) 蒸気送気ライン

本ラインは蒸気の使用に応じて、飽和蒸気供給、飽和蒸気間断供給および過熱蒸気供給ラインに分かれており、各ラインの切替は電磁弁④により制御される。図1に示した過熱蒸気供給ラインでは、過熱

蒸気をオーブン内に安定供給するために、減圧弁⑤を設けて過熱蒸気生成ユニットに送気する蒸気圧力を一定に制御すると共に、フローメータ⑥と流量調節用ボールバルブ⑦を設けた。さらに、スケールフィルタ⑧を設けることにより、水道水に含まれる不純物が蒸気とともに輸送され、過熱蒸気生成ユニット内の電気ヒータ⑩に付着することによる熱交換効率の低下を抑止した。なお、これらの計測機器および弁類は放熱による飽和蒸気温度の低下を防止するために断熱処理を施した。

他方、別途に設けた飽和蒸気間断供給ラインは、加熱操作間の装置待機中に飽和蒸気を大気中に間欠的に放出するラインである。本ラインの設置により過熱蒸気生成ユニットへの蒸気流入を遮断し、内部電気ヒータ⑩温度を一定値に制御した。なお、飽和蒸気供給ラインは、オーブン内の洗浄等に用いられる。

#### 3) 過熱蒸気生成ユニット

本ユニットでは、内部に設置したスーパーヒータ(電気ヒータ:0.35kW×6本)⑩により飽和蒸気を200~300℃に加熱した。本ユニットの出口には温度検出センサを設け、スーパーヒータ通過直後の過熱蒸気温度をモニターした。

#### 4) オーブン

本オーブン⑪は、流入する過熱蒸気と内部の電気ヒータ(0.18kW×6本)⑬を併用し、材料の加熱処理を行う加熱炉の機能を有している。また、過熱蒸気は庫内直前で上段・下段用に分配してオーブン⑪内に流入させ、オーブン内蒸気供給管に複数設けた噴出孔により試料表面近傍に噴霧した。

オーブン側面には熱電対挿入口を設け、オーブン上部には後述する電子天秤⑭を設置した。ここで、天秤をオーブン部のケーシングに直接載せると、吊下げ糸用の細孔から漏れる蒸気に触れて損傷する恐

\*いまいずみ たかまさ、かたおか ゆうじ、

あらき てつや、さがら やすゆき

●住所 [〒113-8657] 東京都文京区弥生 1-1-1

●電話 03-5841-7536

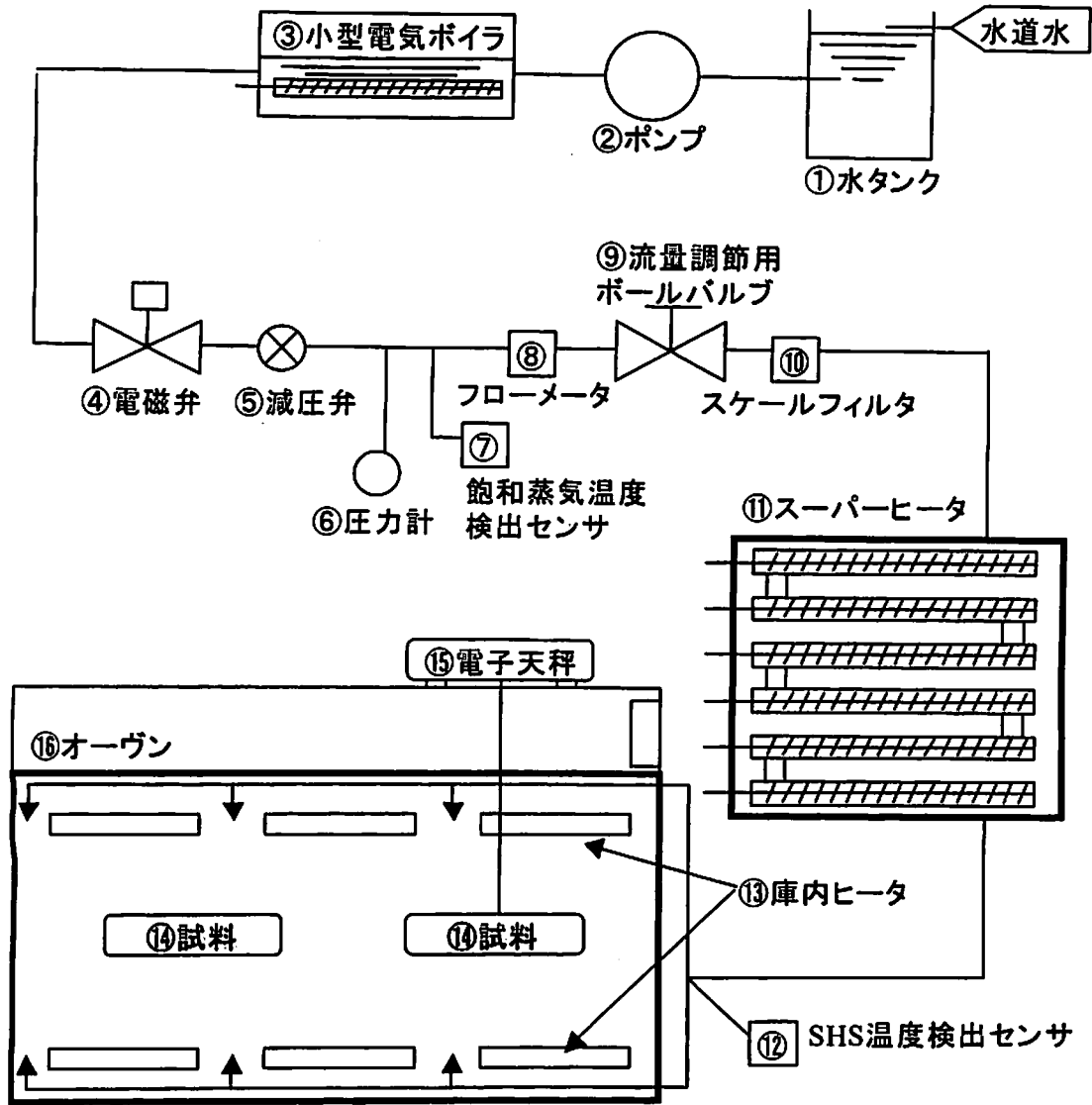


図1 試作した実験用過熱蒸気オーブンの概略図

れがあったため、ケーシングと電子天秤用荷台の間に 120mm の空間を設けた。

## 2.2 操作条件および加熱特性計測

操作条件は中心複合計画法により、オーブン内雰囲気温度 ( $T_{oven}$ ) 200~300℃、蒸気質量流量 ( $V$ ) 3~9kg/h および焼減率 ( $S$ ) 10~30% の範囲において 15 条件を設定した。

解凍-加熱連続操作では、あらかじめ -40℃ の冷凍庫内雰囲気下で凍結した試料を、オーブン内雰囲気温度 250℃、蒸気質量流量 6kg/h の条件下で加熱した。なお、これらの操作条件は、未凍結試料の加熱操作によって得られた焼成試料の粘弾性計測と官能評価スコアのデータ解析から得られた最適条件に相当する。また、いずれの操作条件下でも、試料両面から 5mm 間隔で挿入した熱電対 (K タイプ) (図 2) で試料内温度分布および試料重量の経時変化を電子天秤⑮でそれぞれ測定した。なお、試料の加熱変形

を考慮して操作終了後に熱電対の位置をノギスで測定して確認した。

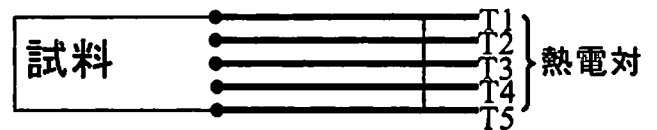


図2 試料内熱電対の配置

## 2.3 焼成試料の品質計測と官能評価法

加熱直後の焼成試料表面色を簡易型分光色差計で測定後、粘弾性測定としてクリープ試験を行った。また、20代の男性8名、女性3名の研究室パネルにより官能評価を実施し、表面色、香り、風味、テクスチャ、味および総合的「おいしさ」などの評価項目について、7点尺度法による評価スコアデータを入手した。

### 3. 加熱特性および乾燥特性曲線

#### 3.1 加熱特性

過熱蒸気による加熱プロセスにおける過熱蒸気流入温度 ( $T_{SHS}$ )、庫内ヒータ表面温度 ( $T_h$ ) および雰囲気温度 ( $T_{oven}$ )、試料重量 ( $m$ ) および試料内温度分布 ( $T_1 \sim T_5$ ) の経時変化の典型例を 図 3 に示した。すなわち、庫内温度と蒸気流入速度の組み合わせにより設定した操作条件 c ( $T_{oven} = 300^\circ\text{C}$ ,  $V = 9\text{ kg/h}$ ) 下で得られた試料の重量および温度分布を加熱特性として示した。

試料重量は加熱初期に蒸気の凝縮により一時的に増加する。これは過熱蒸気を加熱媒体として用いる加熱処理の特徴として一般的に観察され、材料表

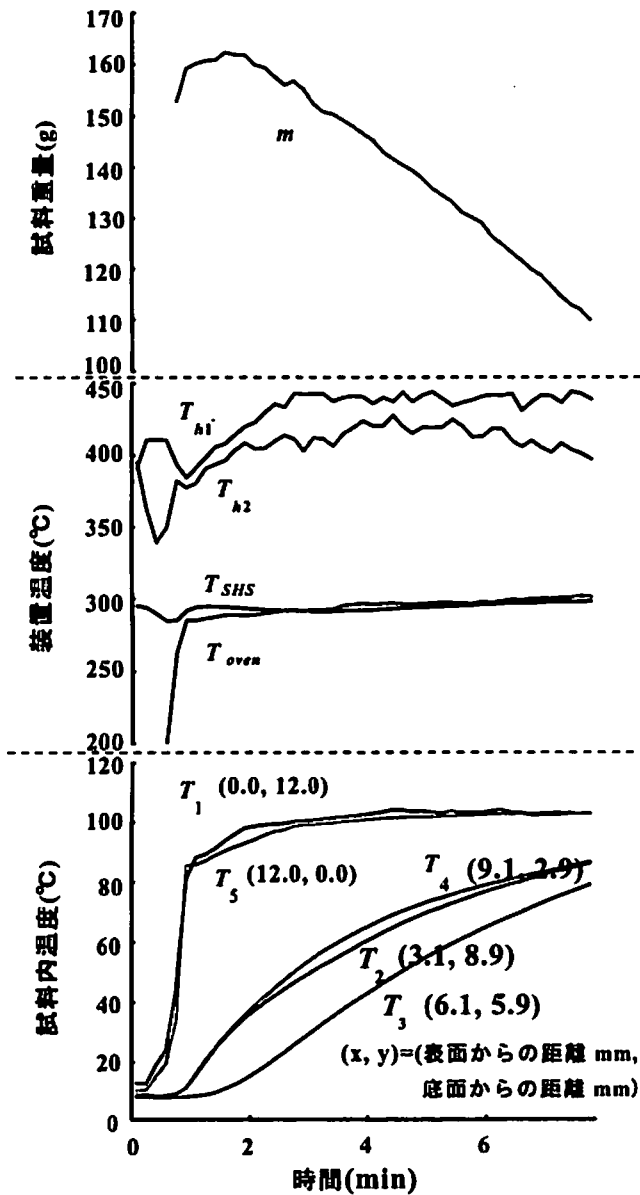


図 3 操作条件 c ( $T_{oven} = 300^\circ\text{C}$ ,  $V = 9\text{ kg/h}$ ) における生牛肉の加熱特性

面における蒸気の初期凝縮に起因するものと考えられている。この初期凝縮現象により試料両面温度 ( $T_1, T_5$ ) は  $100^\circ\text{C}$  まで急速に上昇し、その後は両面共に  $100^\circ\text{C}$  近傍でほぼ一定に維持されることが分かった。また、試料両面に近い温度測定部位 ( $T_2, T_4$ ) の経時変化もほぼ等しい変化を示すことから、試料両面に流入する熱量はほぼ等しく推移すると考えられた。

#### 3.2 乾燥特性

試料の焼成操作を乾燥操作と見なし、さらに、試料重量の経時変化は、「水分蒸発のみによる」との仮定の下に乾燥特性曲線を作成して 図 4 と 図 5 に示した。図 4 は過熱蒸気流量を  $6\text{ kg/h}$  とし庫内雰囲気温度を変化させた場合、図 5 は庫内雰囲気温度を  $250^\circ\text{C}$  とし過熱蒸気流量を変化させた場合の乾燥特性曲線をそれぞれ示す。両図に共通して観られる特徴の一つは熱供給速度に依存する減率乾燥期間の存在である。すなわち、図 4 の操作条件 (d) に示すように、蒸気流入速度一定の条件下では操作温度が、他方、図 5 の (h および ctrl) に示すように加熱温度一定条件下では蒸気流入速度の低下がそれぞれ減率乾燥期間存在の主要因であることが分かった。さらに、これら以外の操作条件下では、熱供給量に依存して乾燥速度が上昇し続ける傾向が観られた。すなわち、湿潤材料の熱風乾燥プロセスの計測より得られる標準的乾燥特性曲線の定率乾燥期間は存在せず、乾燥速度は「予熱期間」の終了と共に、いわば「熱供給速度依存乾燥期間」に移行することが分かった。

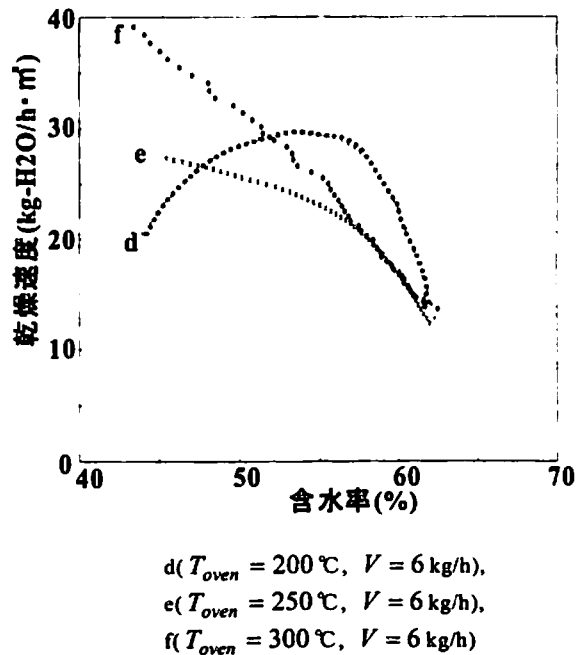
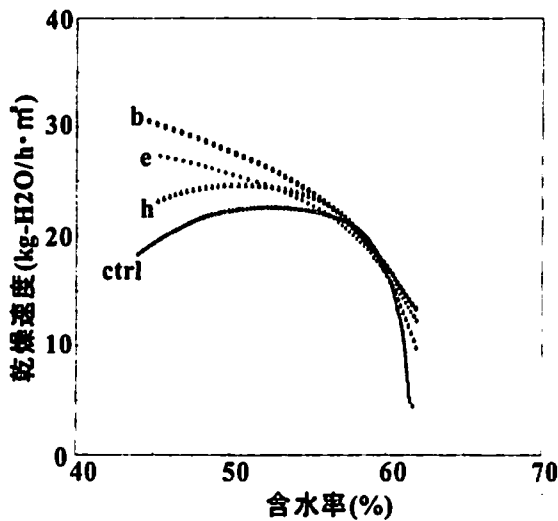


図 4 乾燥特性曲線 (加熱条件: d, e, f)



b( $T_{oven} = 250^\circ\text{C}$ ,  $V = 9 \text{ kg/h}$ ),  
 e( $T_{oven} = 250^\circ\text{C}$ ,  $V = 6 \text{ kg/h}$ ),  
 h( $T_{oven} = 250^\circ\text{C}$ ,  $V = 3 \text{ kg/h}$ ),  
 ctrl( $T_{oven} = 250^\circ\text{C}$ ,  $V = 0 \text{ kg/h}$ )

図5 乾燥特性曲線  
 (加熱条件: b, e, h, ctrl)

このことは、材料表面の水分蒸発速度に相当する材料内部からの水分供給速度が維持されている期間、すなわち、実用的操作の範囲では、全乾燥プロセスの乾燥速度が材料の移動物性値と熱供給速度に依存することを意味している。すなわち、加熱操作条件により乾燥速度の制御が可能であると言える。他方、操作条件による試料内含水率分布の相違が顕著になり、焼成材料の主要な品質決定要因、特にテクスチャが操作条件により影響される度合いが大きくなると考えられた。

これらの知見を総合的に検討した結果、過熱蒸気によるクッキング操作条件は乾燥速度と焼成材料の品質を直接制御する主要因であるため、操作条件の設定に当たっては、焼成材料の品質評価により最適条件を探索することが望ましいと考えられた。また、このための手法として、筆者らが提唱している「食感性工学の方法論と手法」の適用が有用であると考えた。

#### 4. 焼成試料の粘弾性特性

図6にクリープ試験により得られた焼成試料の典型的なクリープ曲線を示す。一般に食品材料のクリープ曲線には瞬間変形部、遅延変形部および定常流動部と称される3つの領域が含まれるが、焼成牛肉のクリープ曲線も同様であることが確認された。すなわち、図中のa-b部分は瞬間変形部で、試料はこの区間においてフックの法則に従う弾性的挙動を

示す。区間c-dは定常流動部であり、試料はニュートン流体と同様に、時間に比例した歪の増加を示す。残りの区間b-cは遅延変形部であり、この領域では粘性と弾性の複合作用による挙動が示される。

このクリープ挙動を官能評価による「おいしさ」、特にテクスチャ評価結果と関連づけて、最適操作条件を探索するためには、可能な限り少ない要素数の粘弾性モデルを適用してそれらの値を決定し、官能評価スコアとの関係から検討することが必要と考えられる。なぜならば、モデルの要素数を増やすことにより測定された曲線の予測精度は高められるが、逆に得られた要素の値からテクスチャと関連するレオロジ的挙動の原因などを検討することが困難になるからである。すなわち、粘弾性モデルの要素数は牛肉のクリープ挙動を直感的に把握できる程度に限られることが望ましい。

そこで、図7に示す、四要素フォークト粘弾性モデルを適用することにより、牛肉のクリープ挙動を近似的に表現することを試み、その近似式(1)を以下に示した。

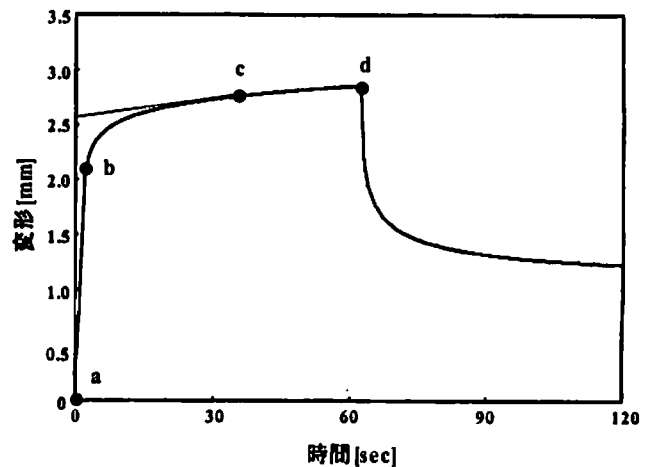


図6 牛肉の典型的なクリープ曲線

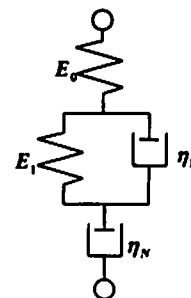


図7 四要素モデル

$$\varepsilon(t) = \frac{P_0}{E_0} + \frac{P_0}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} + \left( \frac{P_0}{\eta_N} \right) t \quad (1)$$

ここで、  $\tau = \frac{\eta_1}{E_1}$

一定の静加重を4要素モデルに加えると、弾性係数  $E_0$  のスプリングは瞬間的に縮み、次いで中間のスプリング  $E_1$  およびダッシュポット  $\eta_1$  を含む要素の変形が徐々に生じ、遅延弾性もしくは弾性余効の現象が現れる。その後、ダッシュポット  $\eta_N$  は一定速度でゆっくりと縮み始める。荷重後60秒が経過して荷重が除去されると、スプリング  $E_0$  は直ちに伸び、その後、中間のスプリング  $E_1$  およびダッシュポット  $\eta_1$  が徐々に回復し始める。一方、ダッシュポット  $\eta_N$  の流動による変形は完全には回復せず、残留変形となる。このように、焼成試料のクリープ試験における粘弾性挙動は、4要素モデルでほぼ記述されるものと考えられた。さらに、全ての加熱操作条件下で得られた焼成試料の粘弾性パラメータを対象にして、マルチスプライン法で補間した結果、任意の加熱操作条件における予測値が算出可能となった。

これらの結果より、いずれの粘弾性パラメータも焼減率の増加と共に増加し、加熱時間が長くなるにつれ、焼成試料は感覚的に硬くなるということが予測された。この典型的結果の一例として、焼減率20%における加熱操作条件（蒸気質量流量と庫内雰囲気温度）と粘弾性パラメータとの関係を応答曲面として図8および図9に示した。図8に示すように、弾性率に関しては、同じ焼減率でも低温で加熱した場合により高くなる傾向にあり、粘性率に関しては低温かつ蒸気流量の大きい条件下で高くなる傾向が見られた(図9)。

これらの3つのパラメータに関しては、1つの値が求められれば他は自動的に求めることが可能と考えられた。よって、最適操作条件の探索に3つのパ

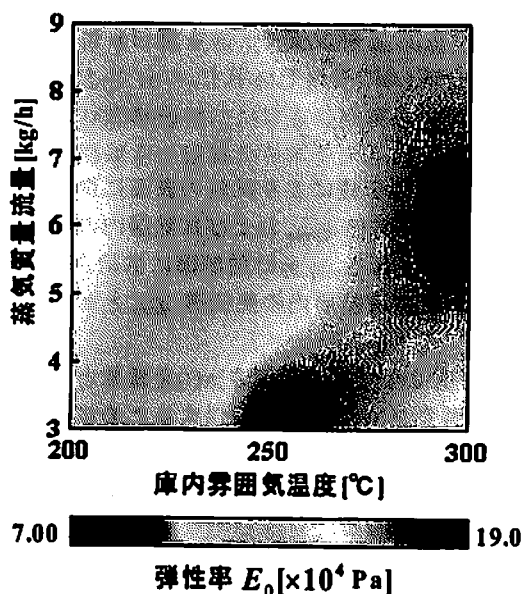


図8 弾性率  $E_0$  (焼減率 20%)

ラメータの代表として  $E_1$  のみを分析に用いることとした。

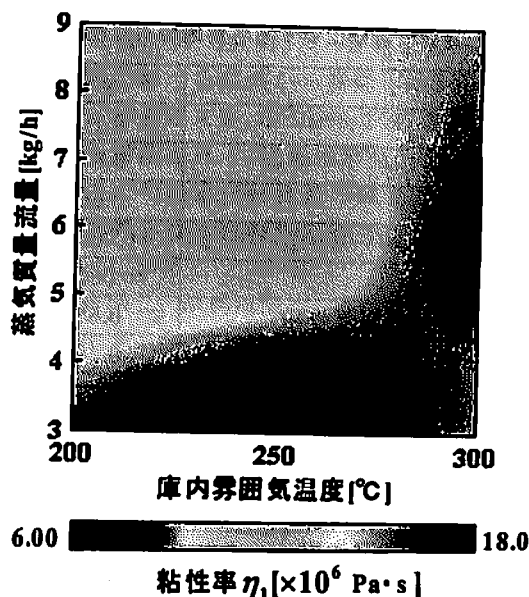


図9 粘度  $\eta_1$  (焼減率 20%)

表1 粘弾性パラメータの相関行列

	$E_0$	$E_1$	$\eta_1$	$\eta_N$
$E_0$	1.000	0.819	0.811	0.737
$E_1$	0.819	1.000	0.997	0.979
$\eta_1$	0.811	0.997	1.000	0.978
$\eta_N$	0.737	0.979	0.978	1.000

## 5. 試料表面色

試料表面色の経時変化には有意な着色特性の相違が認められなかった。また、焼成試料の官能評価スコアにおいても、試料外観評価単独ではおいしさの総合評価に影響しないという結果が得られた。

## 6. 官能評価結果

焼成試料の官能評価スコアデータに分散分析 (ソフトウェア: JMP5.0.1) を適用した結果、表2に示すように「おいしさ」の総合評価に対して「テクスチャ」および「味」が1%水準で有意であり、また、表3に示すようにテクスチャの総合評価に対しては「ジューシー感」が1%水準で有意であることが分かった。

さらに、ジューシー感に対する説明変数を焼成試料の粘弾性パラメータおよび含水率とし、マルチスプライン補間法による応答曲面を求めた。また、各

変数の寄与度を算出したところ、含水率の寄与度が80.4%と最も大きいことが分かった。したがって、最適操作条件の探索には、これらの説明変数を使用することとした。

表2 おいしさ総合評価に対する各要因の有意性

要因	p 値
焼き色総合	0.104
香り総合	0.862
風味総合	0.662
テクスチャ総合	<0.0001
味総合	<0.0001
焼き色と香りの交互作用	0.652
焼き色と風味の交互作用	0.301
香りと風味の交互作用	0.674
焼き色とテクスチャの交互作用	0.008
香りとテクスチャの交互作用	0.061
風味とテクスチャの交互作用	0.439
焼き色と味の交互作用	0.030
香りと味の交互作用	0.008
風味と味の交互作用	0.620
テクスチャと味の交互作用	0.474

表3 テクスチャ総合評価に対する各要因の有意性

要因	p 値
やわらかさ1(噛み切りやすさ)	0.656
やわらかさ(咀嚼性)	0.016
弾力性	0.822
ジューシー感	<0.0001
やわらかさ1と2の交互作用	0.596
やわらかさ1と弾力性の交互作用	0.98
やわらかさ2と弾力性の交互作用	0.791
やわらかさ1とジューシー感の交互作用	0.375
やわらかさ2とジューシー感の交互作用	0.907
弾力性とジューシー感の交互作用	0.979

## 7. 最適操作条件の探索結果

ジューシー感の応答曲面から最大値を与える理想的な説明変数は  $W_c=57.5[\%]$ 、 $E_0=8.40 \times 10^4 [\text{Pa}]$ 、 $E_1=6.94 \times 10^5 [\text{Pa}]$ であった。これら変数の値をできるだけ満足させる操作条件を探索するために、次式(2)により与えられる汎距離関数を用いた。

$$D(x) = \left( \sum w_k \left\{ \frac{fd_k(x) - fo_k(x)}{R_k} \right\}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで  $fo_k(x)$  ;各変数の理想値、 $fd_k(x)$ ;妥協値、

$R_k$ ;標準化のための定数、 $W_k$ ;パラメータの重みである。上述した理想値との差の和  $D(x)$ が最小になる解を求めた結果、最適操作条件は  $T_{oven}=245[^\circ\text{C}]$ 、 $V=3.5 [\text{kg/h}]$ 、 $S=10 [\%]$ であった。本実験装置の操作可能な条件範囲では  $W_c=57.4[\%]$ 、 $E_0=8.54 \times 10^4 [\text{Pa}]$ 、 $E_1=7.25 \times 10^5 [\text{Pa}]$ が実現可能であり、これによって得られる物性値はジューシー感 5.71、おいしさ総合スコア 4.84 であることが推定された。

## 8. 解凍および加熱過程モデル

解凍-加熱操作で得られた試料内温度分布および重量の経時変化を図10に示す。T1~T5は試料内温度を、mは試料重量をそれぞれ示す。T1およびT5は加熱開始直後に  $100^\circ\text{C}$ 近傍に達し、T2およびT4は加熱開始後110秒前後で牛肉の凍結点  $-2^\circ\text{C}$ を通過する(図中A)。試料中心温度T3が  $-2^\circ\text{C}$ を通過するのは230秒であり(図中B)、これより以前を解凍過程(I)、以後を加熱過程(II)と見なした。

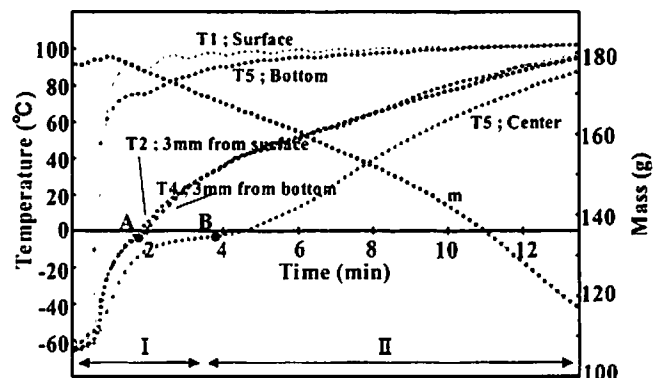


図10 解凍-加熱特性

解凍過程における熱収支モデルを図11に、熱収支バランスを式(3)にそれぞれ示す。

$$q_{cp} = q_{ev} + q_{ml} + q_{cd2} \quad (3)$$

ここで、複合熱伝達により試料の表面に供給された熱  $q_{cp}$ は、蒸発潜熱  $q_{ev}$ および加熱層内の熱伝導  $q_{cd1}$ として消費される。 $q_{cd1}$ は融解面に供給され、融解潜熱  $q_{ml}$ および凍結層内の熱伝導  $q_{cd2}$ として消費される。

式(3)の各項は全て加熱層厚さ  $x(t)$ を変数として含むため、熱移動メカニズムを把握するためにはその推算が不可欠である。そこで、加熱層中の水分勾配が一定であると仮定し、重量変化の曲線から  $x(t)$ の値を推算した(図12)。

図12から、T2およびT4が融解面を通過する加熱開始後110秒における加熱層厚さは2.9mmであり、これは、本モデルにおける加熱層内水分勾配が一定

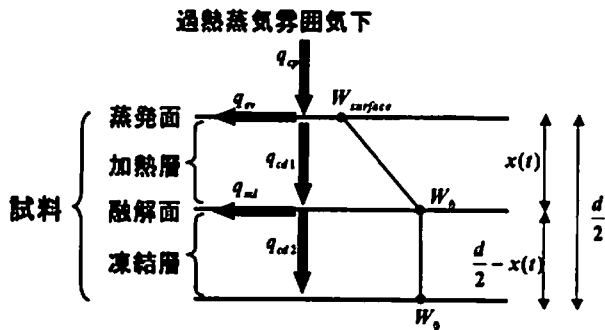


図 11 解凍過程における熱収支モデル

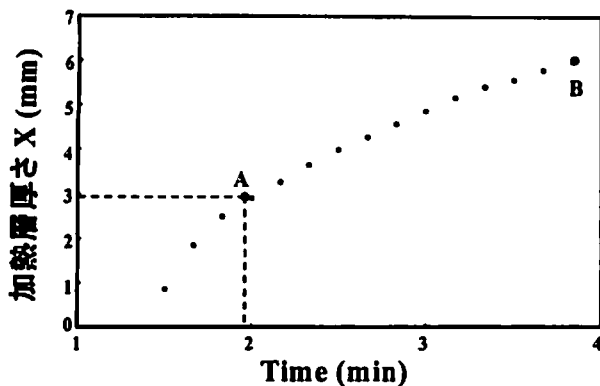


図 12 加熱層厚さの推算結果

であるという仮説の妥当性を支持するものであると考えられた。

## 9. 結論

試作した過熱蒸気オーブンをを用いた牛肉の焼成プロセスにおける加熱操作条件、試料の含水率、粘弾性および官能評価結果の相互関係を把握した。またこれらの関係に汎距離関数を適用した結果、最適操作条件は庫内雰囲気温度 245℃、過熱蒸気流量 3.5 kg/h、焼減率 10 %であることが分かった。さらに、解凍および加熱過程における移動現象モデルを提唱し、加熱層厚さの推算から本モデルの有効性を確認した。

## (謝辞)

本研究は、株式会社ダイキンアプライドシステムズおよび直本工業株式会社との共同研究により実施し、研究成果の公表も快諾して頂いた。さらに、両社からは研究資金と計測装置類の提供を受け、また、株式会社ダイキンアプライドシステムズの中村 隆、針生秀一両氏および直本工業株式会社の山本 正氏からは実験装置の試作や計測システムに関する貴重な助言を得たので、ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Yoshida, T. and Hyodo T.; *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 9-2, 207-214, 1970
- 2) 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘; 過熱水蒸気乾燥における凝縮から蒸発への反転過程, 日本機械学会論文集, B650-66, 2681-2688, 2000
- 3) 伊與田浩志ら; 過熱水蒸気および高温空気気流中での炭水化物食品の乾燥(ジャガイモスライス表面の着色特性), 化学工学論文集, 29(1), 94-99, 2003
- 4) 野村奉弘, 伊與田浩志, 過熱蒸気乾燥; 「最近の化学工学 52」乾燥工学の進展, pp28-34, 2000, 化学工業社
- 5) 呉計春, 相良泰行, 瀬尾泰久, 森嶋博; 食パンの焼成プロセスにおける表面色変化の特性と予測法, 日本食品科学工学会誌, 44(1), 31-37, 1997
- 6) 呉計春, 相良泰行, 瀬尾泰久, 森嶋博; 食パンの焼成プロセスにおける熱及び物質移動特性, 日本食品科学工学会誌, 43(10), 1117-1123, 1996
- 7) 呉計春, 相良泰行, 瀬尾泰久, 森嶋博; 応力緩和試験と3要素粘弾性モデルによる食パンのレオロジー的評価, 日本食品科学工学会誌, 43(12), 1285-1292, 1996
- 8) 相良泰行; 農産物・食品の乾燥特性と実用操作の開発例, 「最近の化学工学 52」乾燥工学の進展, pp64-74, 2000, 化学工業社
- 9) 相良泰行; 食品材料を対象とした熱的操作, 伝熱(日本伝熱学会誌), 38(150), 3-9, 1999
- 10) 伊與田浩志, 野邑奉弘; 過熱水蒸気による食品の乾燥食品と開発, 37(12), 5-7, 2002
- 11) 野邑奉弘, 伊與田浩志; 過熱水蒸気乾燥法, 化学工学, 66(7), 409-413, 2002
- 12) H.Iyota, N.Nishimura, M.Yoshida and T.Nomura; Simulation of Superheated Steam Drying Considering Initial Steam Condensation, *Drying Technology*, 19(7), 1425-1440, 2001
- 13) H.Iyota, N.Nishimura, T.Onuma and T.Nomura; Drying of Sliced Raw Potatoes in Superheated Steam and Hot Air, *Drying Technology*, 19(7), 1411-1424, 2001
- 14) H.Iyota, N.Nishimura, and T.Nomura; Characteristics of Combined Heat Transfer of Superheated Steam Drying (Numerical Study on Coupled Convection and Gas Radiation Heat Transfer), *Heat Transfer Asian Research*, 29(5), 385-399, 2000
- 15) H.Iyota, N.Nishimura, and T.Nomura; A Reverse

- Process of Superheated Steam Drying from Condensation to Evaporation, Heat Transfer Asian Research, 28(5), 352-366, 1999
- 16) 伊與田浩志； 低圧化における過熱水蒸気の非定常凝縮熱伝達とその応用に関する研究, 冷凍, 74-860, 32-33, 1999
  - 17) 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘； 過熱水蒸気乾燥における複合熱伝達特性(気流からの対流とガス熱放射による複合熱伝達の数値計算), 日本機械学会論文集, B64-619, 821-828, 1998
  - 18) 伊與田浩志, 西村伸也, 野邑奉弘； 過熱水蒸気乾燥における凝縮から蒸発への反転過程, 日本機械学会論文集, B63-612, 2764-2770, 1997
  - 19) 雨坪知音, 羽藏義雄, 鈴木寛一； 遠赤外線加熱の併用による過熱蒸気処理の伝熱特性, 日本食品工学会第4回(2003年度)年次大会講演要旨集, 26, 2003
  - 20) 伊佐亜希子, 羽藏義雄, 鈴木寛一； 遠赤外線加熱を併用した過熱蒸気処理による食品の調理・焙煎, 日本食品工学会第4回(2003年度)年次大会講演要旨集, 62, 2003
  - 21) 岡本尚人；凍結・解凍装置の技術的評価, 冷凍, 79(915), 29-33, 2004
  - 22) 平野陽三；「食品設備機器辞典」, pp233-262, 産業調査会, 東京, 2002
  - 23) R.Paul Singh and Dennis R.Heldman； Introduction to Food Engineering, 1984, Academic Press
  - 24) R.Byron Bird, Warren E.Stewart, Edwin N.Lightfoot； Transport Phenomena, 2002, John Wiley & Sons
  - 25) Romeo T. Toledo； Fundamentals of Food Process Engineering, 1991, VAN NOSTRAND REINHOLD
  - 26) Mohsenin, Nuri N 著(林弘通 監訳)； 食品の熱物性, 光琳,1985
  - 27) 熱物性ハンドブック編集委員会； 熱物性ハンドブック, 養賢堂, 1990,
  - 28) Combustion engineering, inc； Superheat engineering data : a handbook on the generation and use of superheated steam and related subjects, The Superheater co.,1927
  - 29) 株式会社ミヤワキ； Engineer's Book (スチームトラップ編), 1991,
  - 30) Bond, J.F., Mujumdar, A.S., van Heiningen, A.R.P. and Douglas, W.J.M； Drying Paper by Impingin Jets of Superheated Steam Part 1:Constant Drying 3. Rate in Superheated Steam, Cnadian. J. Chem. Eng., 72, 446-451, 1994