

加熱調理の最適制御

Control of thermal processing during cooking

東京海洋大学・海洋科学部・食品生産科学科・食品熱操作工学研究室 教授：酒井昇・准教授：福岡美香
Tokyo University of Marine Science and Technology, Department of Food Science and Technology
Laboratory of Food Thermal Processing

本研究室では、調理・加工・貯蔵における熱的操作を制御し、安全かつ高品質な食品を生産することを目指している。その手法は、伝熱解析をベースに、デンプン系食品から魚肉蓄肉に至るまで、対象食品の熱操作による変化の記述までを視野に入れた研究を展開している。加熱手法も過熱水蒸気加熱、マイクロ波加熱、IH(Induction Heating、誘導加熱)、ジュール加熱と多岐に渡り行っており、その研究成果の一旦を紹介する。調理・加工工程における熱媒体の挙動、素材の伝熱・物質移動・反応を予測するためのモデルが提供されることで、高品質な調理ができる加熱機器の設計や制御に役立ち、また必要十分な加熱処理を行うことで調理・加工における省エネルギー化も可能になる。

A. 魚焼きにおける“焼き色”のシミュレーション

【はじめに】

焼き魚は惣菜や弁当でよく見かける。ちょうどよい焦げが付いた魚はおいしく感じられるが、焦げがなかったり黒く焦げすぎたりしているものはおいしくない。焼き調理は焦げを付けるタイミングが難しいと考えられる。そこで、魚の切り身を赤外線ヒーターで焼成し、焼き色の解析を試みた。

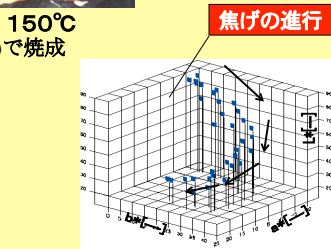
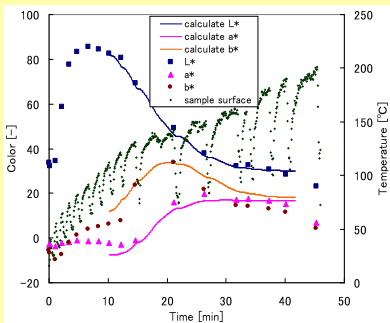
【焼成実験】

試料は身の色が白い魚の切り身(タイ、ブリ、サワラ)を用い、皮と骨を除いて幅4cm×長さ5cm×厚さ2cmに切った。赤外線ヒーターは試料の約7cm上に設置した。ヒーターは操作応答が早く、電圧の調節によって温度をすぐに変えることができる。試料の焼成中に、試料焼成面の温度、色彩 $L^*a^*b^*$ を測定した。焼成は、ヒーターに印加する電圧を調節して試料焼成面の温度を一定に保った場合と、電圧を一定に保った場合で行った。

【結果】 試料表面の温度および焼成時間が増加すると L^* は単調に減少し、 a^* および b^* は複雑に変化した。 b^* (黄色味)が最も大きな値をとるとき、 L^* の値は約50となり、こんがりとしたきつね色となった。魚種による違いは、ブリ>サワラ>タイの順に焦げが付きやすかったが、 a^* および b^* の L^* との相関性は同様であることがわかった。



100°C 120°C 150°C
試料の表面を所定温度(100、120、150°C)で焼成



図B 色彩の3次元グラフ(タイの場合)

←図C 生から焼成したときの焼成時間に対する $L^*a^*b^*$ の実測値、計算値、試料表面温度

【焼き色の解析】

焼成における色の变化を、色彩計で計測される L^* を指標として、速度解析を行った。 L^* は a^* 、 b^* と相関関係はあることから、表面温度の変化に従って、焼き色が変わる様子をシミュレーションすることが可能になった。

●焦げは、試料表面の物質Aが加熱によって、焦げた物質Pに変化して起こるとする。 L^* を焦げの指標とし、 L^* は焼成時間に対して1次式に従って変化するとみなす。

●これら速度式はアレニウスの式に従うとする。活性化エネルギーEを仮定し、試料表面温度から L^* を計算し、実測値と計算値の誤差が最小になるような頻度因子 k_0 を黄金分割法によって求めた。

$a^* \cdot L^*$ および $b^* \cdot L^*$ の相関は、実測値に基づき経験式を立てた。時間ごとに計算で求めた L^* の値をこれらの式に当てはめて、 a^* および b^* を求めた。

$$A \rightarrow P$$

$$\frac{dC_p}{dt} = -\frac{dC_a}{dt} = kC_a$$

$$Y = \frac{C_a}{C_{a0}} = \frac{(L - L_f)}{(L_i - L_f)}$$

$$\frac{dY}{dt} = -kC_{a0}Y = -k'Y$$

$$\ln Y = -k't$$

$$k' = k'_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

B. 低温調理を想定した加熱シミュレーション

【はじめに】

加熱によって食品の素材は大きく変化する。特に肉は、加熱によりタンパク質が変性し、テクスチャー、旨味に大きな変化を与える。そこで、本研究ではタンパク質の加熱変性分布をあらかじめ予測することで、高品質な肉調理加工品・調理方法を設計することを目指した。

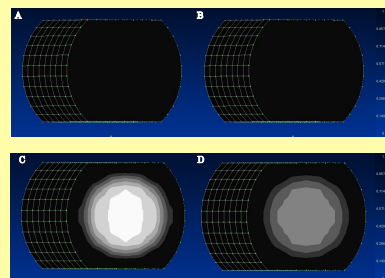
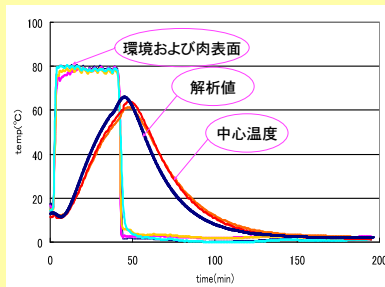


【実験方法】

①調理実験：牛ランプ肉を用いたローストビーフをシェフに調理してもらった。(試料サイズ:71×107×59.5mm,約400g) 試料をフィルムに入れ、真空包装後、80°Cに設定したスチームコンベクションオープンを用いて調理した。芯温が58°Cに到達したら取り出し、2°Cに設定したチラー(水槽)へ投入して冷却した。これら調理工程中、各温度データ(中心、表面、環境)を取得した。

②加熱変性速度解析：試料に国産牛モモ肉を用いて熱分析法(DSC法)を行った。DSC曲線には、3つの吸熱ピークが(Peak I:55°C, Peak II:62°C, Peak III:79°C)が検出され、それぞれは蓄肉タンパク質の主要成分であるミオシン、コラーゲン、アクチンの加熱変性に基づく吸熱変化とみなせた。3つのタンパク質の加熱変性の速度を計算するためには、速度定数の温度依存性を調べる必要がある。このため、DSC-Dynamic法(DSC法曲線から非等温で速度解析する手法)によって、3つのタンパク質それぞれの変性の活性化エネルギー、頻度因子を算出した。さらに、アレニウスの式より目的温度におけるタンパク質の変性速度定数を算出した。

③熱伝導解析およびタンパク質変性解析：3次元非定常熱伝導方程式を有限要素法による数値計算によって解き、温度変化のシミュレーションを行った。さらに②でもとめたタンパク質変性の速度定数の温度依存性から、変性の進行する様子を示した。



試料中心断面位置における調理終了時の変性分布(長さ53.5cm)
(A:ミオシン,B:コラーゲン,C:アクチン,D:全タンパク質)

【結果】 左図は、シェフに牛モモ肉を低温調理手法を用いて実際に調理してもらった時の中心温度の時間変化を示しており、さらに熱伝導解析でシミュレーションした結果を合わせて示した。下図にタンパク質変性の分布を示した。表面は全タンパク質が変性完了しているが、内部のアクチンは殆ど変性していないことがあげられる。応力緩和測定から、アクチンが変性すると弾性率が飛躍的に増加することが判明している。つまり、低温調理はアクチンを変性させない加熱調理であることが、一般的な焼成調理に比べ、肉がジューシーかつ柔らかく仕上がる原因であるといえる。