

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500753

研究課題名(和文) 高温焼成で発生するタンパク質由来有害因子の軽減を目指した加熱調理の最適制御

研究課題名(英文) Prediction of various changes in food material during thermal processing.-Optimally control cooking to reduce the harmful substances

研究代表者

福岡 美香 (FUKUOKA MIKA)

東京海洋大学・海洋科学部・准教授

研究者番号：10240318

研究成果の概要(和文)：畜肉や魚肉を加熱調理する場合、加熱し過ぎは、品質を損ね、ヘテロサイクリックアミンなど新たな有害物質を生成する可能性がある。よって、伝熱に基づいて食品に生じる様々な反応を予測し、調理を最適に制御することは重要である。肉の品質(テクスチャーや水の状態)に対するタンパク質の熱変性度の影響を明らかにするために、3次元有限要素熱伝導解析および反応速度論に基づいて加熱に伴う変性度の変化を予測した。また、伝熱が先行する食品表面の焦げ色の変化は、調理進行の指標および過加熱のモニタリングとなることから、焦げ色の変化に及ぼす加熱方法の影響を赤外線および過熱水蒸気加熱によって調べた。また、過熱水蒸気とともに乾燥空気、窒素を用いて、熱媒体の違いが呈色変化へ及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the case of meat or fish meat cooking under the high temperature, lack of heating can result in the proliferation of microorganisms harmful to humans, while excessive heating may lead to the production of new harmful substances that is a heterocyclic compound. Thus it is important to predict various changes that may occur in food materials based on heat transfer phenomena, and to optimally control cooking. To clarify the influences of the protein denaturation degree on the cooked meat qualities, namely, the texture and the state of water, we predicted changes of denaturation degree during heating based on the 3D finite element heat transfer analysis and reaction kinetics. Moreover, changes in browning color at the surface of the food play an important role in quantifying the degree of cooking process and for the monitoring of excessive heating. The influence of the heating medium on the browning color during the grilling process of the fish samples was analyzed by the use of two different heating systems: far-infrared radiation (FIR) and SHS heating, as well as three heating mediums: SHS, Dry-air, and Nitrogen (N₂). Comparison of estimated color, using same surface temperature under FIR and SHS heating, resulted in a slower reduction of L* value using SHS than FIR.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：生活科学・食生活学
キーワード：食品、調理工学

1. 研究開始当初の背景

食品における危害因子は、微生物や重金属の混入といった外因性のものから、もともとその食品に含まれる特有な成分、例えば天然毒やアレルギー物質といった内因性のものまで幅広い。これら危害因子を検出・分析する手法は、近年、特に必要とされ、発達している研究分野と言える。一方で、危害因子の検出・分析手法に基づき、原材料や加工工程において厳密な管理がなされていても、その後の加工、調理において適切な処理が施されなければ、その過程において人が食する上で危害因子となり得る様々な因子を生み出す可能性が高い。中でも熱的操作を伴う加工・調理は、その可能性が高く、可食のために施す熱的操作が適切でないと、食品は過度に変性し、本来有する栄養成分を減少させるだけでなく、ヒトにとって危害となる成分を生じる。近年、畜肉、魚肉を高温で調理した食品から変異原物質としてヘテロサイクリックアミン類が同定、定量され、注目されている。また、異なる調理方法で得られた食品は、変異原物質の量が異なり、変異原性も異なることが欧米において報告されている。よって、加熱加工・調理における熱的操作を最適に制御することは、重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、加熱調理における食品内の伝熱・水分移動を解析し、その過程において生じる素材の変化を検出し、これらを数学モデルによって記述することを目的とした。数学モデルが構築されれば、熱処理条件が異なる場合であっても、最適値を予測によって提示できるようになる。

対象としたタンパク質を主成分とする食品（畜肉、魚肉）の加熱調理では、加熱によって、まずタンパク質の加熱変性が生じる。よって伝熱によって食品内に形成される温度分布変化とともに、加熱変性分布の変化を記述できるようにすることを第一の目的とした。さらに、危害因子の生成しやすい高温焼成での伝熱と、反応の進行の指標となる食品表面での呈色（焦げ）変化を記述できるようにすることを第二の目的とした。焼き色の変化および焦げ発生の予測のために、化学分析手法に代わる色差計測等によるモニタリングが可能か否かの検討を行い、加熱工程の進行に伴う変化の簡便な検出法を目指した。また、高温焼成では、熱媒体に過熱水蒸気を用いた比較実験を行い、危害因子抑制の可能性の有無を検討することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) タンパク質変性速度

熱分析法（DSC法）により、主要筋肉タン

パク質であるミオシン、アクチンの加熱変性に基づく吸熱ピークを観測し、非等温実験であるダイナミック法を用いて反応速度定数の温度依存性を決定した。試料は、畜肉（牛肉、豚肉、塩漬豚肉）、魚肉とした。

(2) 伝熱解析並びに反応速度解析

伝熱解析は、フーリエの熱伝導方程式に従い、タンパク変性並びに呈色反応は1次反応速度式を適用し、いずれも有限要素法による数値計算を行った。

(3) 加熱によるタンパク質変性と品質評価

筋肉タンパク質の加熱変性が、品質に及ぼす影響を明らかにするため、テクスチャー解析①と、MRI測定②によって食品内部に保持される水の状態変化を調べた。

①テクスチャー解析

畜肉試料片(1.5×2.0×2.0 cm³)を恒温水槽内で等温処理した。本試料の変性度は、3次元伝熱計算並びに変性速度定数の温度依存性を用いて、予測計算によって決定した。レオメーター(YAMADEN RE-3305S)に直径40 mmの円形プランジャーを装着させ、圧縮率30%、圧縮速度5mm/sec、保持時間3minの条件で、応力緩和測定を行い、得られた弾性率を硬さの指標とした。

②MRI測定

テクスチャー解析と同じ条件で調整した試料をMRI測定に供した。核磁気共鳴画像システムは、BrukerAV400WB（ブルカー・バイオスピン（株）、9.4テスラ）を使用した。直径30 mmのラジオ波コイルで、2次元¹Hマルチスライスマルチエコー法によって、横緩和時間T₂画像を取得した。

(4) 高温焼成実験

魚切り身（マダイ）を試料として、遠赤外線ヒーターによる焼成、および各種流体（過熱水蒸気（以後SHS）、乾燥空気、窒素）を熱媒体とした焼成実験を行った。図1は、熱媒体となる流体を、細管を通過させて試料へ吹き付ける焼成装置を示している。SHSを熱

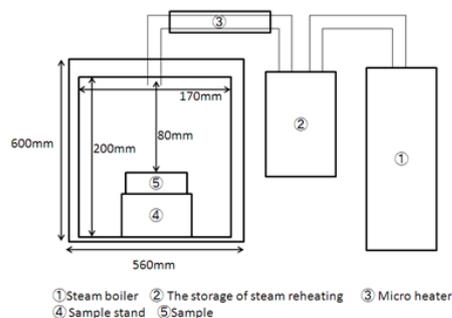


図1. 高温焼成装置

媒体に使用する場合、図1-①のボイラーで発生させた水蒸気は、②および③に設置した

加熱ヒーターによって100℃以上の過熱水蒸気となる。乾燥空気を熱媒体とする場合は、コンプレッサーで生成させた圧縮空気を、②へ導入して再加熱する。乾燥窒素の場合も同様である。

焼成中の試料表面温度をK型熱電対で、焼成後の表面の色彩値を、簡易分光色差計(NF333、日本電色工業(株))を用いて計測した。

4. 研究成果

(1) タンパク質変性速度

DSC ダイナミック法によって決定した変性速度パラメーターを表1にまとめた。速度パラメーターが得られたことから、非正常に進行する温度変化に伴って、各タンパク質の変性度の進行を予測することが可能となった。

表1. タンパク質変性速度パラメーター

		Onset (°C)	Peak (°C)	Endo (kJ/mol)	Z (min)
Beef	Myosin ^{*)}	45.2 ± 1.46	56.3 ± 0.28	240.9 ± 7.66	4.69 × 10 ⁴⁶
	Actin ^{*)}	68.2 ± 0.22	73.2 ± 0.12	380.3 ± 27.5	8.17 × 10 ²⁵
Fish (Red sea bream)	Myosin ^{*)}	41.0 ± 0.46	47.2 ± 0.01	319.97	1.11 × 10 ²⁷
	Actin ^{*)}	70.1 ± 0.16	74.0 ± 0.01	259.62	3.65 × 10 ¹⁹

^{*)} Ishiwatari et al., submitted to J. Food Eng., (2012). ^{**)} 投稿準備中.

(2) 変性度と品質との関係

① テクスチャー

あらかじめ変性度を予測した加熱試料の弾性率 (Elastic modulus) の変化を、重量損失率 (weight-loss ratio) とともに図2に示した。図中の横軸は、テクスチャー測定用の試料中心部の変性度を示している。未加熱の試料を基準として加えた。図から、中心部のミオシンが50%変性するまで加熱処理した試料(myosin0.5)は、未加熱試料とほぼ同じ弾性率を示した。また、重量損失もほとんど見られなかった。中心部において、ミオシンの変

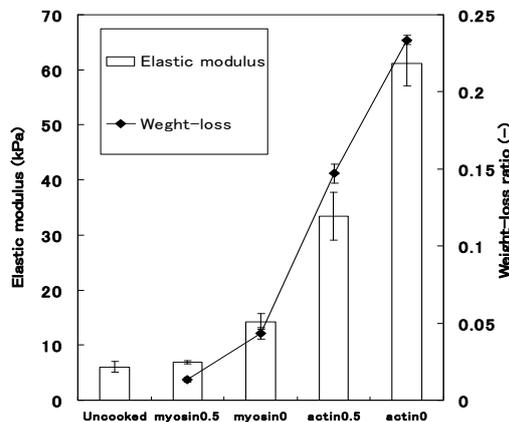


図2. 変性度と弾性率および重量損失

性が完了しても (myosin0)、弾性率および重量損失の上昇は小さいことが示された。一方、アクチンの変性が開始すると、弾性率は急激に増加し、それに伴い、重量損失も増大する様子が示された。

② MRI 測定

テクスチャー解析と同じ条件で調整した

試料の2次元MRIから横緩和時間(T₂)を計算し、画像を構成する全要素のT₂値をヒストグラムで表わした(図3)。加熱変性の進行に伴って、T₂値が低下し、かつヒストグラムの形状がシャープになる様子が示された。タンパク質の変性によって水分保持能力が低下し、収縮によって系内より移動度の高い水(運動性の高い水)が排出された結果、低いT₂値を有する水の量比が増加し、ヒストグラ

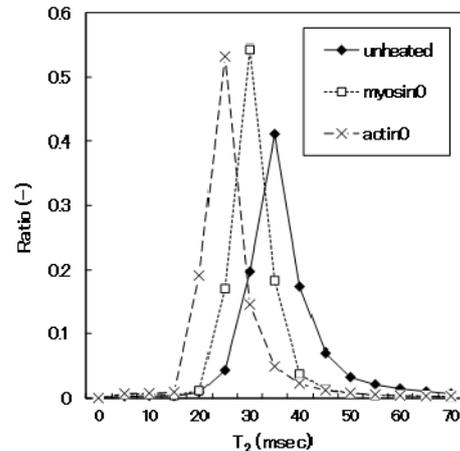


図3. 変性度がT₂値へ及ぼす影響

ムが低T₂値へシフトしたと考えられる。

(4) 異なる加熱媒体を用いた高温焼成実験

① 焼成における呈色変化の解析

焼成実験において、試料(魚肉)表面の色彩変化を経時的に測定すると、100℃付近までは、温度上昇にともなって、L*a*b*色彩系のL*値が上昇し、100℃以降は、低下する様子が示された。すなわち、タンパク質の変性が完了するまでは、L*値が上昇し、それ以降は、温度上昇にともなって焦げ色の呈色が行進し、L*値は低下する。焦げは、試料表面の物質が加熱によって、焦げた物質に変化して起こると考え、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仮定したモデルを設定した。さらにL*値変化の速度定数の温度依存性はアレニウスの式に従うとした。また黄金分割法で求められた頻度因子および活性化エネルギーを用いて表面温度上昇に伴うL*値の解析を行った。a*、b*値については、実測値より求めた次式の関係式(*)を用いた。

$$a^* = 4.84 \times 10^{-4} \times (L^*)^3 - 8.7 \times 10^{-2} \times (L^*)^2 + 4.48 \times (L^*) - 542$$

$$b^* = 4.76 \times 10^{-4} \times (L^*)^3 - 1.14 \times 10^{-1} \times (L^*)^2 + 8.02 \times (L^*) - 1414$$

(*) Food Sci. Technol. Res, 17(6), 471-478(2011)

図4は、赤外線ヒーターを用いて、マダイを焼成した時の表面温度変化と色彩変化の実測値と解析値を示している。解析値は、実測値を良く表わしており、予測計算のために設定したモデルが、焼成における呈色反応を予測する上で有効であると言える。

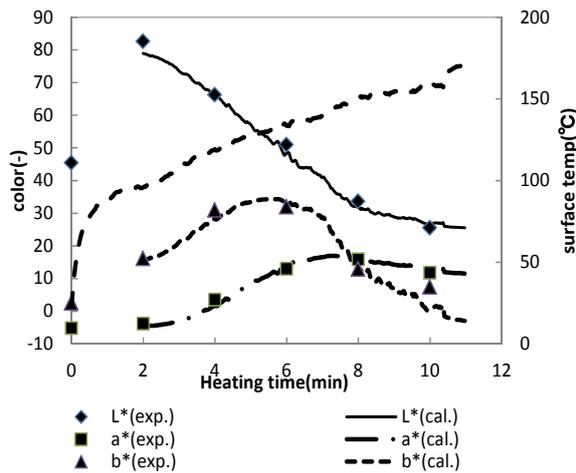


図4. 赤外線加熱における魚表面色彩変化の解析

② 様々な加熱媒体を用いた焼成実験

加熱媒体となる流体の違いが、呈色反応に影響を及ぼすか否かを明らかにするためには、試料表面温度上昇が同様である必要がある。そのため、まず円形のシリコン板(直径 80mm、厚さ 15mm)をモデル試料として、各加熱媒体での焼成条件の設定を行った。試料表面温度履歴はシーズ K 型熱電対(φ0.5mm)で測定した。吹き付け管内流速を 27.4m/s に設定した。この時に同様の温度履歴の得られた条件を魚の焼成条件として採用した。

SHS および高温空気、窒素によって焼成された試料表面の色彩値の時間変化の傾向は、これまでの実験結果と同様であり、焼成媒体の大きな影響は見られなかった。そこで、単調に減少する L* 値に注目し、各加熱媒体で L* 値の時間変化の比較を行なった結果を図 5 に示した。SHS と N₂ での比

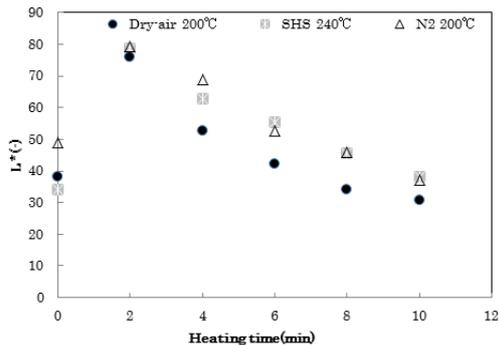


図5. 異なる加熱媒体を用いた焼成における L* 値の変化

較では L* の時間変化に差が生じないことが確認され、乾燥空気と SHS および N₂ の比較では、SHS および N₂ の方が L* 値の減少速度が遅いことが明らかになった。このことから加熱焼成で熱媒体となる流体の種類が、焼き着色へ影響を及ぼし、無酸素下で焼成を行なうと、焼き色がつきにくいことが示唆された

図 5 に示された SHS を熱媒体に用いた場合の温度上昇にともなう L* 値の変化(実測値)に一致するように、黄金分割法によって呈色反応の速度パラメーター(活性化エネルギーと頻度因子)を算出した。SHS における速度パラメーターを、赤外線ヒーターの呈色反応の場合とともに表 2 に示した。

	SHS	赤外線
Ea[kJ·mol ⁻¹]	31.5	50.7
k0[s ⁻¹]	8.2	4759

表2. SHS および赤外線加熱における呈色反応の速度パラメーター

解析における L* 値変化の活性化エネルギーおよび頻度因子は焼成媒体によって異なっていた。

表 2 に示した速度パラメーターを用いて、表面温度上昇が同じであると仮定した場合の両者の呈色変化の予測計算結果を図 6 に示した。赤外線ヒーターによる空気中での加熱は、SHS 加熱に比べて L* 値の変化が早く、焼成環境中の酸素が着色速度に影響することを、予測計算によって定量的に示すことができた。

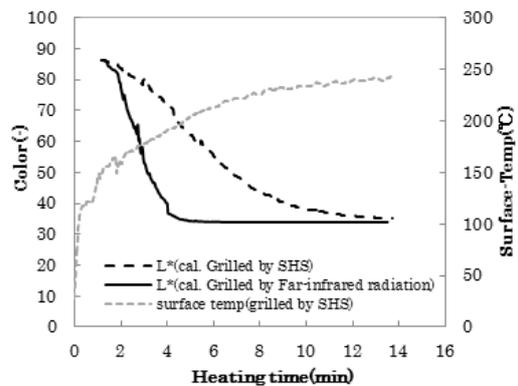


図6. SHS および赤外線ヒーターによる加熱焼成での呈色反応の違い

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① N. Ishiwatari, M. Fukuoka, N. Sakai, Prediction of protein denaturation profile during thermal processing which affects cooked meat quality. Submitted to J. Food Eng.,(2012).査読有.

② H. Matsuda, Y. Llave, M. Fukuoka, N. Sakai, Color changes in fish during grilling at high heating temperature - Influence of the heat transfer and heating medium into browning color. in

preparation.

[学会発表] (計 4 件)

① N. Ishiwatari, M. Fukuoka, N. Hamada, N. Sakai, Heat transfer analysis-based prediction of protein denaturation and umami component of meat during cooking, 11th International Congress on Engineering and Food, Athens, Greece, AFT623, (2011.05.23).

② 松田洋紀、福岡美香、酒井昇、魚の焼成調理シミュレーション～焼き魚の焼き色の解析～、日本食品工学会第 11 回 (2010 年度) 年次大会講演要旨集、p.120(2010.8.4).

③ 石渡奈緒美、福岡美香、酒井昇、畜肉タンパク質の加熱変性予測、日本調理科学会平成 21 年度大会、研究発表要旨集、p.25 (2009.8.28).

④ 石渡奈緒美、福岡美香、松長正見、西山重幸、酒井昇、畜肉タンパク質の加熱変性制御による最適調理、日本食品工学会第 10 回 (2009 年度) 年次大会講演要旨集、p.72 (2009.8.2).

[その他]

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~fukuoka/>

食品熱操作工学研究室、「加熱調理を制御せよ-調理工学によるアプローチ-」FOOMA JAPAN 2010 アカデミックプラザ研究発表要旨集.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福岡 美香 (FUKUOKA MIKA)

東京海洋大学・海洋科学部・准教授

研究者番号：10240318

(2) 研究分担者

酒井 昇 (SAKAI NOBORU)

東京海洋大学・海洋科学部・教授

研究者番号：20134009