

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 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500728

研究課題名（和文） 最適調理を支援するための可視化ツールの開発

研究課題名（英文） Development of the visualization tool for supporting the optimal cooking

研究代表者 酒井 昇

(SAKAI NOBORU)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：20134009

研究成果の概要（和文）：肉や魚を調理する過程においては、加熱されると同時に水分の移動と蒸発、タンパク変性に伴う収縮、さらに呈味成分の変化などが起こり、その過程は極めて複雑であるため、最適な条件を設定することは容易ではない。そこで本研究は、これを支援するために、調理・加工過程で進行する伝熱、それに伴う素材の変化を、定量的に記述するとともに、その結果を、コンピュータを用いて可視化する手法を開発した。具体的な調理としては、ローストビーフおよび焼き魚を取り扱った。ローストビーフ調理においては、反応速度論に基づいて加熱に伴うタンパク質および呈味成分の変化予測と可視化を行った。また、焼き魚過程においては、加熱に伴うタンパク質変性、呈色反応を定量化し、表面温度変化との関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：During meat or fish meat cooking, physical and chemical changes occur, that is, moisture transfer, water evaporation, the denaturation of protein, the decomposition of umami components, and so on. Thus, because this process is very complicated, it is difficult to set up the optimal cooking conditions. In this investigation we described quantitatively these phenomena which occur during cooking, in order to support the optimal cooking conditions. And we also developed the methods to visualize the results obtained by computer simulation by using commercial software. Roast beef and grilling fish were dealt with as cooking process. In the case of roast beef cooking, prediction and visualization of protein and umami ingredients were performed, based on reaction kinetics. And in the case of grilling of fish, protein denaturation and browning reaction were described quantitatively, and they were correlated with the surface temperature of fish.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012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：調理工学、シミュレーション工学、可視化、魚の焼成、肉の低温調理、タンパク質変性

1. 研究開始当初の背景

我々が食品を摂取する際、多くの場合、何らかの加熱処理を施す。加熱によって、タンパク質の変性やデンプンの糊化といった主要な構成成分の変化が生じ、それによって分解生成物発生や水や油の移動、構造変化による力学物性の変化など、様々な現象が誘発され、食品素材の有する特性は大きく変化する。個々の食品素材が有する特性と、その特性が様々な調理、加工で施される加熱によって“変化”する現象を理解し、さらにこれを制御するという事は、「食」においても最も重要な点と考えられるが、実際には、家庭・産業を問わず、その多くが、経験や伝承に基づき調理・加工操作を行っているのが現状である。しかしながら、食品産業においては、「食」に関する正しい情報の提示が、また消費者にとっては、「食」に関する正しい知識の習得とこれに基づき正しく「食」を選択することが求められている現代において、経験や伝承を科学的な背景に基づき提示し、相互理解することが必要不可欠である。

2. 研究の目的

食品の加熱調理・加工は加熱とともに水分変化、成分変化、収縮・膨張が起こり、極めて複雑な現象であるため、最適な条件を設定することは容易ではない。そこで本研究は、これを支援するために、調理・加工過程で進行する伝熱、それに伴う素材の変化を、定量的に記述するとともに、その結果を、コンピュータを用いて可視化し、3次元的に非定常に進行する現象として示すことを目的とした。また、食品の美味しさは感覚的なもので個人差があり、定量化は難しいことから、プロの料理人の経験と勘に基づいた判断基準を定量化し、調理過程の可視化ツールに組み込むことを目的とした。

3. 研究の方法

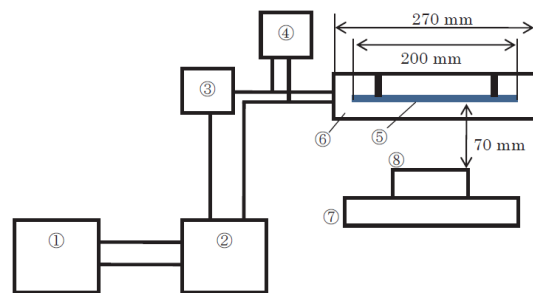
本研究で対象とした、魚焼成過程と肉類調理過程に分けて以下に示す。

(1) 魚焼成過程の可視化

試料としては、白身魚のマダイを使用した。マダイは愛媛県産養殖の刺身用切り身を実験当日に購入し、皮や骨を取り除いて幅4cm、長さ5cm、厚さ2cmに成形した。試料の初期含水率は約75%であった。

実験装置の概略図を図1に示す。熱源は赤外線ヒータ(100V/750W/全長270mm/発熱長200mm、坂口電熱(株))を用いた。ヒータは操作に対する応答が早く、電圧を変えてヒータの温度を自由に変えることができる。試料はアルミホイルの上に乗せ、熱源の下、約7cmに設置した。試料表面の温度はK型熱電対($\phi 0.5\text{mm}$)を用いて計測した。

試料表面の色彩は簡易分光色差計(NF333、日本電色工業(株))を用いて測定した。光源D65、2度視野角に設定し、 L^* 、 a^* 、 b^* について測定した。どの試料も焼成箇所を最低5回測定し、最大値と最小値を除いて平均値を算出した。



① Power-supply unit (100V). ② Power controller. ③ Ammeter. ④ Voltmeter.
⑤ Infrared tube heater. ⑥ Reflection hood. ⑦ Electronic balance. ⑧ Sample.

図1 加熱焼成実験装置

(2) 肉調理過程の可視化

辻学園調理・製菓専門学校の後藤彰宏先生に真空調理法に基づいてローストビーフを調理してもらった。まず市販牛ランプ肉

(71.0×107×59.5mm、398g)の各面をフライパンで焼成した。試料表面に焼き色が形成されたらトレーへと取り出し、ブラスト・チラーにて品温が約10℃以下になるまで冷却した。その後、試料を真空パック専用袋に入れ真空包装機で脱気・密封した後、80℃に設定したスチームコンベクションオーブンで加熱した。試料中心部の温度が58℃に到達した後、直ちに2℃に設定したウォーター・チラーに投入し、芯温が3℃になるまで冷却した。また、加熱前後の重量およびサイズの測定を行い、調理工程中は試料の温度データを取得した。実験室にて、辻学園で行った調理方法に基づき、ローストビーフを調理した。ただし、加熱冷却器具には恒温湯槽を用いた。

また、タンパク質変性の速度定数を求めるために、牛肉のDSC (Differential Scanning Calorimetry) 測定を行った。市販スライス状国産牛モモ肉を試料とし、採取した15mgを耐圧性アルミニウム容器に封入した。DSC装置にて、昇温速度5~20℃/minの条件で5~110℃の温度帯における測定を行った。

4. 研究成果

(1) 魚焼成過程の可視化

試料を焼成したときに、どのように焼き色がつくか調べるために、ヒータの電圧を一定に保って試料を生から焼成し、試料表面が約200℃になるまで焼成した。図2に加熱している時の試料表面温度および焼成による色彩の変化を示した。

一般的に色彩の変化は、(1)タンパク質の

変性、(2)水分蒸発、(3)焦げの反応、(4)炭化反応、の4段階にわかれると考えられる。実験結果から、試料表面温度が約80°Cになるまでにタンパク質が変性して身の色が白く明るくなり、 L^* が最大値をとることがわかる。続いて水分の蒸発によって L^* が緩やかに減少した。試料表面温度が約130°Cに達すると焦げの反応が著しくなり、 L^* の減少が大きくなる。 L^* が約40~50のとき b^* が最大値となり a^* も増加しているため、彩度 C^*

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

が大きくなるので、焼き色が鮮やかなきつね色に感じられた。試料表面温度が180°Cになると、身が黒く焦げ付き、煙が生じて焦げたにおいがした。

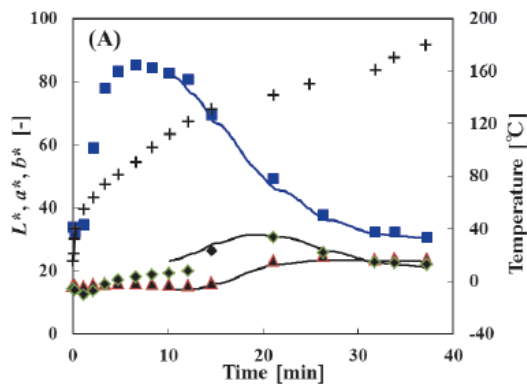


図2 マダイ焼成過程の温度と色の変化
+ : 温度, ■ : L^* , ◆ : a^* , ▲ : b^*
—— : 計算結果

試料表面温度を保持したとき、加熱時間および試料表面温度が増加するにつれて、 L^* は単調に減少したが、 a^* および b^* は複雑に変化し、単純に時間との関係を求めることはできなかった。そこで、 L^* 、 a^* 、 b^* が相互にどのように変化するかを調べた。図3に L^* に対する a^* および b^* を示したが、 a^* および b^* は L^* と相関性があり、 L^* が低下すれば、それに応じて a^* および b^* が変化することがわかる。ここでは実験式として以下の3次関数で L^* との関係を求めた。

$$a^* = 4.84 \times 10^{-4} \times (L^*)^3 - 8.7 \times 10^{-2} \times (L^*)^2 + 4.48 \times (L^*) - 54.2 \quad \text{at } 28 < L^* < 90 \quad (1)$$

$$b^* = 4.76 \times 10^{-4} \times (L^*)^3 - 1.14 \times 10^{-1} \times (L^*)^2 + 8.02 \times (L^*) - 141.4 \quad \text{at } 28 < L^* < 90 \quad (2)$$

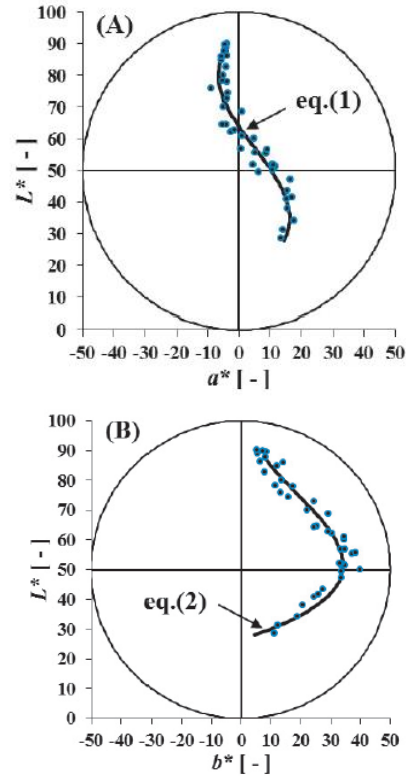


図3 (A) L^* - a^* および (B) L^* - b^* の関係

褐色化反応はメイラード反応の一種であり、アミノカルボニル反応をはじめとした一連の複雑な反応が進行していると考えられている。この反応の素反応を特定し、速度式を組み立て、その速度定数を求めることは困難と考えられる。そこで、ここでは以下のように反応を簡略化して考える。

褐色化反応は、試料表面の未反応物質Aが加熱によって、着色物質Pに変化して起こり、Pの生成速度はAの濃度に比例すると仮定すると速度式は次式で与えられる。



$$\frac{dC_P}{dt} = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (4)$$

褐色物質P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^*_i 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、無次元数 Y を次式で定義する。

$$Y = \frac{C_A}{C_{A0}} = \frac{L - L_f}{L_i - L_f} \quad (5)$$

(5)式を(4)式に代入すると、

$$\frac{dY}{dt} = -kY \quad (6)$$

ここで、 k は速度定数で、その温度依存性はアレニウスの式に従うとする。

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

ここで、 E_a および k_0 は、それぞれ活性化エネルギーと頻度因子であり、本研究においては、測値と計算値が一致するように求めた。求めた値は $E_a=50.7$ [kJ/mol]、 $k_0=8.16 \times 10^3$ [/sec]となった。

生から焼成したときの温度履歴 (図2) に基づいて、 L^* 値の変化をRKG法によって計算した結果を、実線として図2に示す。なお、褐色化反応による色彩の変化を想定しているため、温度が110℃を超えた時点から反応は開始するとしている。図2に実測値も合わせて示しているが、 L^* について良く一致していることがわかる。 a^* および b^* に関しては、 L^* と相関性があり、(1)、(2)式で L^* との関係が求められる。計算した a^* および b^* についても図2に示したが、実測値と計算値は良好に一致していることがわかる。よって、試料表面の温度、焼成時間がわかれば、 L^* の値、さらには a^* および b^* が計算でき、焼成における焼き色の変化の予測が可能である。

以上のように、表面温度上昇に伴う焼き色の変化を L^* 、 a^* および b^* の数値として求めることができた。しかし、 L^* 、 a^* および b^* の数値からは、ダイレクトに可視化することはできない。ここでは市販ソフト「FEMAP」を用いて魚をモデル化するとともに、焼き色の可視化を行った。

まず、試料表面温度が均一に上昇するとして、 L^* 、 a^* および b^* を計算し、可視化を行ったが、表面の色が均一に変化していくため、実際の褐色化とは大きく異なった。実際には表面温度に分布があることが考えられる。そこで、以下のように表面温度に分布を持たせて可視化を行った。

各点における温度があるバラつきを持って変化するように、各点の温度にホワイトノイズを与えた。そのときの各点の温度は次式で与えられる。

$$T_s(x, y) = T \times \left(1.0 + \frac{\alpha \times R_a}{100}\right) \quad (8)$$

ここで、 R_a は正規分布を持つ乱数である。また、 α は係数で α が大きいほどバラつきは大きくなり、 α が0のときバラつきはなくなる。

図2に示した温度変化にホワイトノイズを与えて、焼き色の可視化を行った結果を図4に示す。同図にマダイを焼いたときの写真撮影結果を合わせて示したが、焼き色変化を再現性良く可視化できることがわかる。これにより、種々の条件で焼いたときの最適な条件について検討する有効なツールとなると考える。

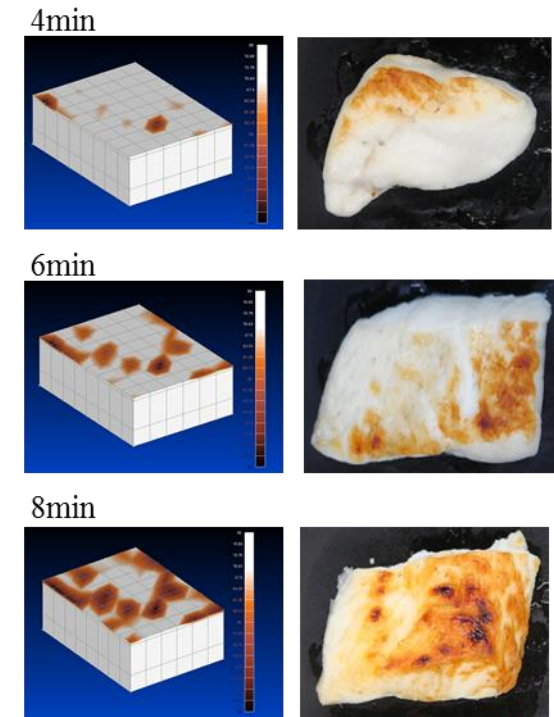


図4 シミュレーション結果の可視化と実測値の比較

(2) 肉調理過程の可視化

調理前の試料サイズをもとに解析モデルを作成し、環境温度変化を想定して熱伝導解析をおこなった結果を図5に示す。図は試料中心および表面における伝熱解析値と、調理中に取得した温度履歴の比較である。図から冷却開始後も中心温度は上昇し、60℃以上に到達していることがわかる。また、加熱工程から冷却工程まで実測値と計算値は良好に一致し、温度履歴を再現していることがわかる。

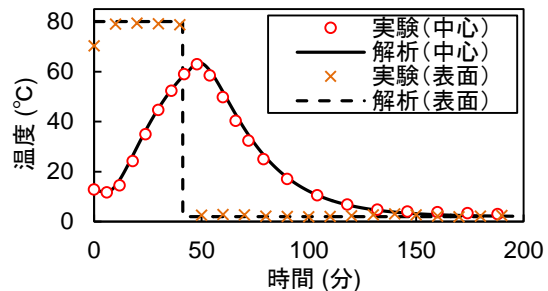


図5 ローストビーフ調理における実験値と計算値の比較

畜肉は加熱処理に伴い、主成分であるタンパク質が熱変性する。タンパク質の熱変性はその種類によって変性する温度帯が異なり、DSC測定によってその温度帯を観察することができる。国産牛モモ肉を試料としてDSC測

定をおこなったところ、40～50℃および65～75℃の温度帯で熱変性に伴う吸熱ピークを観測することができた。この吸熱ピークは前者がミオシン、後者がアクチンの熱変性由来である。

畜肉の美味しさのひとつに、「食感」あるいは「柔らかさ」が挙げられることから、タンパク質変性と「柔らかさ」の関係を以下のように調べた。変性状況の異なる試料を用意し、柔らかさの指標となる弾性率および重量損失率を測定した結果を図6に示す。ミオシン変性試料は未加熱試料とほぼ同等の値であるが、アクチンが変性すると弾性率が著しく増加するとともに脱水により重量が減少する。すなわち、アクチンの変性は過度な硬化を起し、食感の低下をもたらすことが見て取れる。

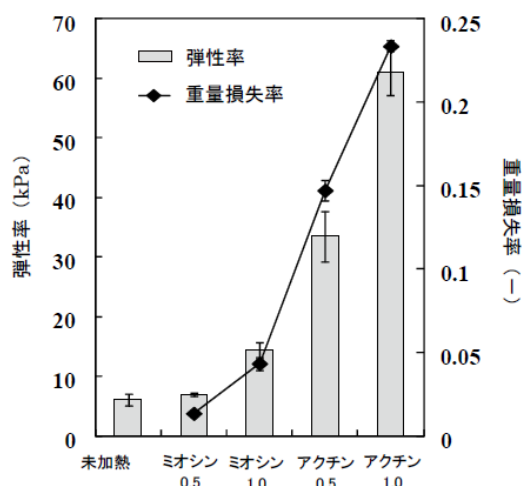


図6 肉の変性率と固さの関係

次に、真空調理法の実環境温度変化に基づいて、畜肉内部のミオシンおよびアクチンのタンパク質変性度分布を予測した。タンパク質変性は未変性のタンパク質濃度に比例する一次反応で表した。また、タンパク質熱変性速度定数 k_p (1/min) の温度依存性は、アレニウスの式に従うと仮定すると、活性化エネルギー E_a (kJ/mol) および頻度因子 Z (1/min) は DSC Dynamic 法より算出できる。

真空調理法に基づいたレシピは複数存在し、Georges Pralus が考案した「プラリュ方式」と、日本で真空低温調理を提案および普及させた谷孝之氏が考案した「谷方式」に大別され、「研究方法」で示した手順はプラリュ方式に該当する。谷方式は食材の希望芯温と熱源の温度を同じ値に設定して、芯温をコントロールするもので、比較的低温 (59℃から65℃) において、肉の重量によって決まった時間加熱し、その後直ちに冷却するものである。谷方式についても同様な予測計算を行い、「プラリュ方式」と比較検討した。

試料中心横断面の冷却工程直前の温度分

布計算値と調理終了時のミオシンおよびアクチンの変性予測分布を図7に示す。冷却工程直前の温度分布では、プラリュ方式の試料表面と内部の温度差が著しいのに対し、谷方式は均一に加熱されている様子がわかる。一方、タンパク質変性度分布は、両方のレシピにおいてミオシンは試料全体が変性終了しているが、弾性率を増大させるアクチンの変性は完全に終了していない。この特徴的な変性分布が真空調理製品の肉が柔らかく仕上がる要因であると考えられる。特に、谷方式2は試料表面においてもアクチンの変性が終了していないことから、プラリュ方式と比較し、肉が柔らかく仕上がるのが推察できる。

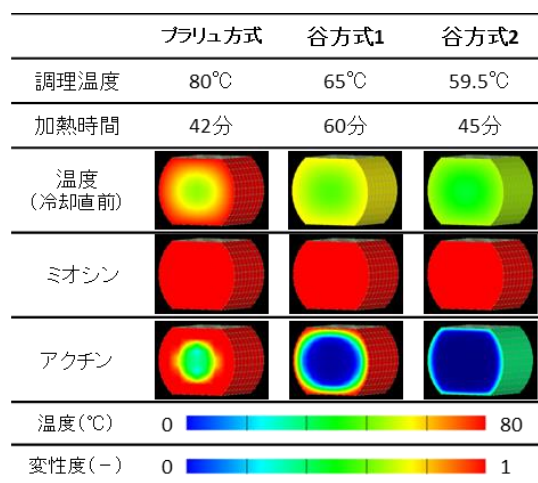


図7 真空調理におけるタンパク質変性の予測

食材の美味しさに呈味成分が大きく関与することは言うまでもない。畜肉の旨味は旨味、こく、まるやかさの3つが挙げられ、このうち旨味の発現にはアミノ酸であるグルタミン酸と、核酸関連物質であるイノシン酸が重要な働きを果たしている。また、グルタミン酸とイノシン酸は相乗効果により、単独に存在するよりも旨味の閾値は大幅に低い値となる。

グルタミン酸とイノシン酸は肉の旨味に大きく寄与する成分であるが、加熱過程における減少のメカニズムは大きく異なる。グルタミン酸は水溶性のアミノ酸であり、加熱によりほとんど分解されないが、加熱により生じるドリップに溶出し、系外に排出され、減少すると考えられる。そこで、残存するグルタミン酸量を予測するために、ドリップの排出量をダルシーの法則に基づく物質移動方程式により計算した。

一方、イノシン酸は畜肉中に既存する分解酵素により分解される。酵素反応は Michaelis-Menten 型の速度式が使われることが多く、Michaelis-Menten 式を基に酵素

活性を考慮した 1 次反応式によりイノシン酸の残存量を計算した。

ブラリュ方式に従い調理した際の環境温度変化に基づき、グルタミン酸とイノシン酸量を計算した結果を図 8 に示す。図は試料中心断面における各物質の残存量変化である。グルタミン酸は試料表面から徐々に減少し、全ての調理過程において表面より内部のグルタミン酸量が多い様子がわかる。これに対してイノシン酸は、試料表面は多く残存しているが、内部は徐々に減少している様子がわかる。これは、加熱処理温度の 80 ℃がイノシン酸分解酵素の完全失活温度よりも高いため、試料表面領域ではイノシン酸は分解されないが、試料内部では酵素活性度が徐々に低下するため、その間にイノシン酸が分解され減少することによる。このように、旨味に寄与する二つの成分の加熱過程における分布は、その減少のメカニズムが違うことから、大きく異なる様子が明らかとなった。

以上、タンパク変性度、旨味成分変化の試料内分布を経時的に実験から求めることは困難であるが、シミュレーション手法を使うことにより、可視化が可能であり、美味しさや安全性の評価および操作条件の最適化に役立つと考えられる。

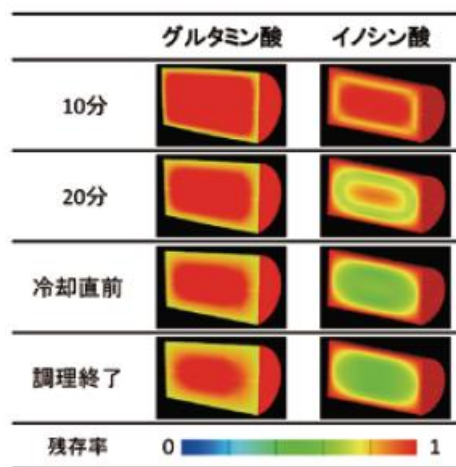


図 8 真空調理法におけるグルタミン酸とイノシン酸変化予測

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 石渡奈緒美、福岡美香、酒井昇、真空調理法に基づく畜肉加熱処理時のタンパク質変性分布および微生物挙動の予測、日本食品工学会誌、14、19 - 28(2013) (査読有)
- ② Mayumi Nakamura, Weijie Mao, Mika Fukuoka, and Noboru Sakai, Analysis of the

color change in fish during the grilling process, Food Science and Technology Research Vol.17, No.6, 471-478(2011) (査読有)

[学会発表] (計 15 件)

- ① Y. Llave, H. Matsuda, M. Fukuoka, N. Sakai, Analysis of the colour change in fish during grilling at high heating temperature, 2012EFFoST Annual Meeting, Montpellier, France, (2012.10. 21st~23rd)
- ② N. Ishiwatari, M. Fukuoka, N. Sakai, Mass transfer analysis of meat cooking which related the preservation of umami component, 2012EFFoST Annual Meeting, Montpellier, France, (2012. 10. 21st~23rd)
- ③ Y. Llave, H. Matsuda, M. Fukuoka, N. Sakai, Influences of heat transfer and heating medium on browning color during fish grilling, 平成 25 年度日本水産学会春季大会、東京、2013 年 3 月 26~30 日
- ④ X. Yu, M. Fukuoka, N. Sakai, Relationship of color changes and protein denaturation of fish during grilling process, 平成 25 年度日本水産学会春季大会、東京、2013 年 3 月 26~30 日
- ⑤ 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 (2011.05)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 昇 (SAKAI NOBORU)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授
研究者番号：20134009

(2) 研究分担者

福岡 美香 (FUKUOKA MIKA)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授
研究者番号：10240318