

畜肉加工食品を対象とした安全かつ高品質な食品製造を支援する 品質設計ツールの構築

東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科

石渡 奈緒美

1. 研究の目的と背景

畜肉食品は現在も食中毒問題は根絶されていないため、品質の低下を見越したうえで過加熱処理を施す場合が多い。しかし、加熱により畜肉はタンパク質が熱変性して収縮し、それに伴い、水分・油分といったドリップとして呈味成分の流出が生じるため、過度な加熱処理は品質低下を招く危険性がある。そのため現在、食品産業において、高い品質を保持しつつ、適切な殺菌効果を満たす最適な加熱処理条件が求められている。そこで本研究は伝導解析に基づき、加熱過程における畜肉の塊を対象とした殺菌評価および、畜肉の主要旨味成分（核酸関連物質のイノシン酸（以後、IMP）と水溶性アミノ酸のグルタミン酸（以後、Glu））の濃度分布を予測する手法の提案を目的とした。

2. 研究の方法

本研究は、①加熱過程における IMP および Glu の現象把握、②反応速度パラメータの算出、③伝熱解析に基づく各因子の予測計算・内部分布の可視化、の3項目にわけ、実施した。

3. 研究内容

加熱過程における IMP および Glu の残存量を定量することで、加熱過程における主要旨味成分の減少把握を行った。次に、得られた定量結果に基づき、予測計算時に要する速度パラメータの算出、および数学モデルの構築を行った。そして最後に、畜肉食品の塊（マクロな系）を対象とした伝熱解析と反応速度パラメータ（IMP および Glu）を組み合わせ、畜肉中に残存する各因子の予測ならびに内部分布の可視化を行った。

4. 研究の実施経過

加熱処理を行った試料中に残存する Glu 残存率（未加熱試料中に含まれる Glu 量に対して、無次元化した値）と、試料の加熱処理前後から算出した残重量率を比較した結果を Figure 1 に示した。Figure 1 より、タンパク質の変性の進行に伴い、Glu 残存率が徐々に低下すること、さらに残重量率の減少傾向と類似していることが明らかとなった。すなわち、旨味成分のひとつである Glu は、タンパク

質の熱変性に伴い生じる流体（ドリップ）と共に系外に流出するとみなせることから、物質移動解析により Glu 残存率の予測が可能であると明らかとなった。また、畜肉を対象とした物質移動解析は、内部に生じる圧力勾配を駆動力とする、ダルシーの法則が適用できることが示唆された。

一方、IMP は畜肉中に既存する IMP 分解酵素により分解され、減少すると報告されていることから、等温加熱処理を行った試料に残存する IMP 量を HPLC（High Performance Liquid Chromatography）法で実測した。未加熱試料中に含まれる IMP 量に対して、各加熱処理後に試料中に含まれる IMP 量を無次元化した値（IMP 残存率）を Figure 2 に示した。Figure 2 より、加熱処理温度 35～60℃ は加熱時間の経過に伴い、IMP 残存率が徐々に低下することが確認できた。また、なかでも 40℃ 試料は全ての加熱時間において IMP 残存率は最も低下していることが明らかとなった。このような挙動の原因として、IMP 分解酵素の失活に伴う IMP 分解の抑制が挙げられる。そこで、IMP 分解反応の温度依存性を調べ、IMP 分解反応速度および IMP 分解酵素の温度依存性を推算した。その結果、IMP は加熱処理温度 40℃ より高い温度では、IMP 分解酵素の酵素活性が低下するため、IMP 残存率の低下が抑制されると判明した。また、IMP 分解酵素と加熱処理温度の相関を式であらわすことができた。

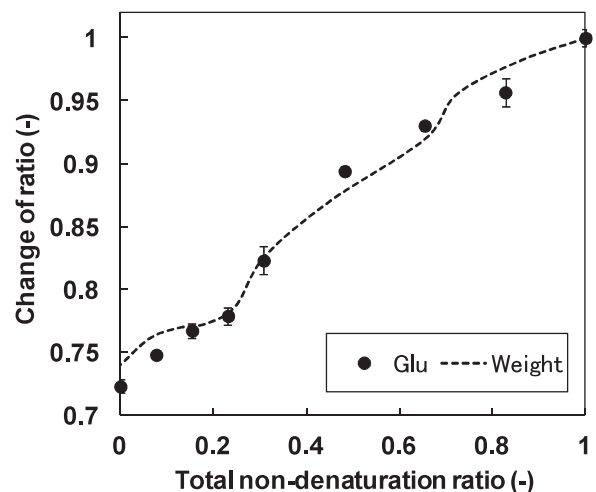


Figure 1 Glu 残存率と残重量率の比較。横軸はタンパク質変性度を表し、1 は未加熱試料を、0 は畜肉タンパク質がすべて熱変性したことを意味する

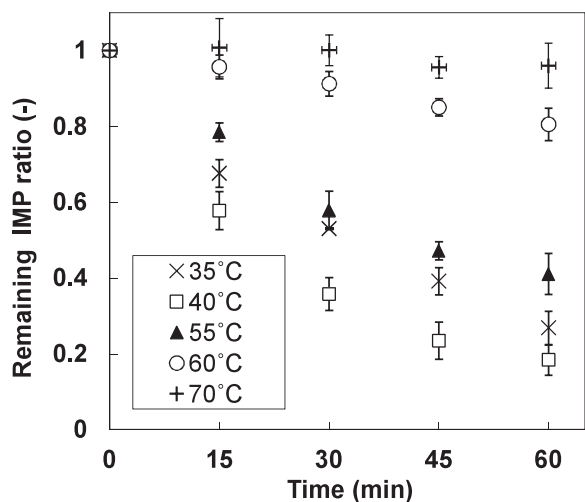


Figure 2 等温加熱処理した試料中に残存するIMP残存率の変化

加熱処理過程における、肉内部に残存するGluならびにIMPの挙動把握ならびに予測計算時に要する速度パラメータの算出、および数学モデルを構築したことから、50℃もしくは70℃で等温加熱処理を想定した両旨味成分の予測と比較を試みた。この際、解析モデルは直径20 mm、高さ20 mmの円筒形、初期温度は15℃とし、解析モデル中心横断面（底面に対して垂直）における温度と両旨味成分分布の時間変化をFigure 3およびFigure 4に示した。ここで、Figure 3は50℃で加熱処理した場合、Figure 4は70℃で加熱処理した場合の結果である。

Figure 3より、試料温度は表面から徐々に温度が上昇している様子が見て取れる。またGluも温度上昇に伴いタンパク質変性が進行するため、温度分布と同様に試料表面から徐々に減少し、常に試料表面よりも内部の残存率が高い不均一な分布となっていることがわかる。これに対してIMPは50℃加熱の場合、加熱開始直後は温度上昇の遅れる中心部位は温度が低いことから、IMP分解速度が遅く、その結果、中心部は初期含量を保っているが、加熱時間の経過に伴い、中心内部も徐々に残存率が低下する様子が見て取れる。そして、加熱開始5分後以降はGluと同様に、試料表面よりも内部の残存率が高い分布を形成していることが明らかとなった。

これに対して70℃で加熱処理した結果(Figure 4)では、Gluは50℃で加熱処理した場合と同様に、試料表面よりも内部の残存率が高い分布となっている。しかし、加熱時間10分ではほぼ均一なGlu残存率分布となった。これは、試料のタンパク質変性度の状態に起因する。Glu残存率は、ダルシーの法則に基づく物質移動解析に基づき予測している。ダルシーの法則は、タンパク質変性に伴い試料が収縮することで内部に生じる圧力勾配を駆動力としているが、70℃で10分間加熱処理をした場合、試料全体のタンパク質の変性は終了している。したがって、試料が保持出来なくなった流体は全て系外に排出されるため、50℃で加熱処理した結果と比較して、均一なGlu残存率になっている

と考えた。これに対してIMPは、試料表面は加熱開始直後にIMP分解酵素が失活するため、調理終了時まで常に初期含量を保っていること、内部は前述したように一時的に減少するが、失活温度に到達後は一定値を示すことが見て取れ、50℃で加熱処理した際のIMP残存率分布や、Glu残存率分布が著しく異なり、試料表面よりも内部の残存率が低い不均一な分布となることが明らかとなった。

これらの結果から、畜肉のうま味を発現する、代表的な呈味成分であっても、GluとIMPは加熱処理における消長のメカニズムが異なるため、残存率を予測するために用いる反応モデルが異なる。したがって、同じ条件で加熱処理を行った場合においても、試料内部に形成される残存率分布が異なること、特にIMPは、酵素反応に基づき予測するため、加熱処理温度によって残存率分布が異なることが明らかとなった。

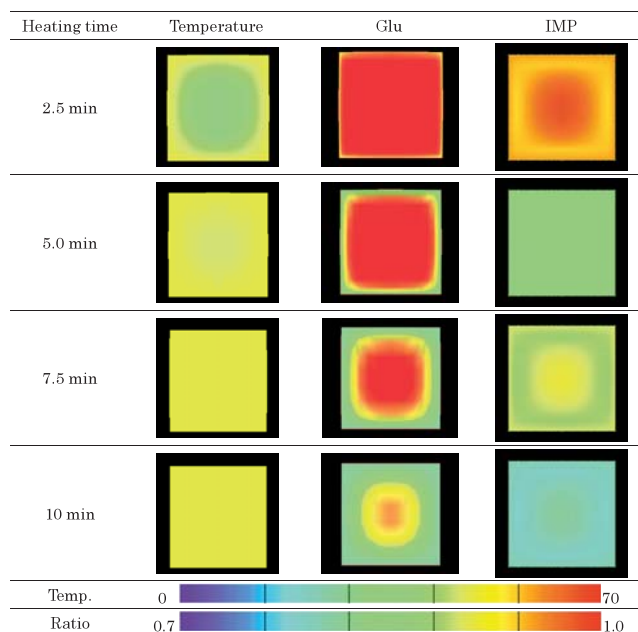


Figure 3 50℃で等温加熱処理を施した際の二次元円筒形試料の中心横断面における温度、Glu残存率およびIMP残存率の可視化

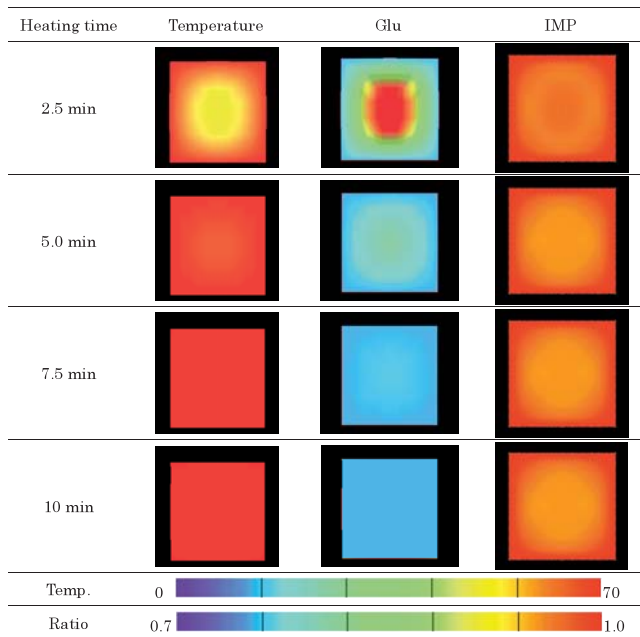


Figure 4 70℃で等温加熱処理を施した際の二次元円筒形試料の中心横断面における温度, Glu 残存率および IMP 残存率の可視化

5. 研究から得た結論・考察

最後に, 実際の調理を想定したシミュレーションとして, レストラン等で実際に用いられている真空調理法によるローストビーフ調理を解析対象とし, 旨味成分, そして食品産業で最も留意されている微生物死滅数のシミュレーションならびに可視化を行った。まず, 真空包装した畜肉サイズを想定した解析モデルを作成し, フーリエの法則に基づく非定常三次元熱伝導解析を行った解析値と, 実際に実験室で調理したローストビーフの中心温度履歴は良好に一致した。そこで, 伝熱解析値に基づき, 試料中心位置における大腸菌 O157:H7 を想定した殺菌価を算出した結果, 肉内部における微生物死滅数は少ないことから, 新鮮な食材を選定すること, さらに調理過程において畜肉表面での微生物の付着ならびに肉内部への侵入と増殖を避けるために, 徹底した衛生管理が必要であることが提示された。解析モデルの中心断面における, 両旨味成分分布の残存率分布を **Figure 5** に示した。IMP は表面よりも内部の残存率が低くなり, 不均一な残存率分布が形成されていたが, Glu 残存率は, 表面から減少し, 常に試料表面よりも内部の残存率が高い不均一な分布であることが明らかとなった。また, それぞれの残存率はともに 0.6 をうわまわっていること, うま味の発現に寄与する Glu 残存率が特に高いことから, 真空調理法により調理したローストビーフは, 著しい旨味の減少を抑制した調理法であると示唆された。

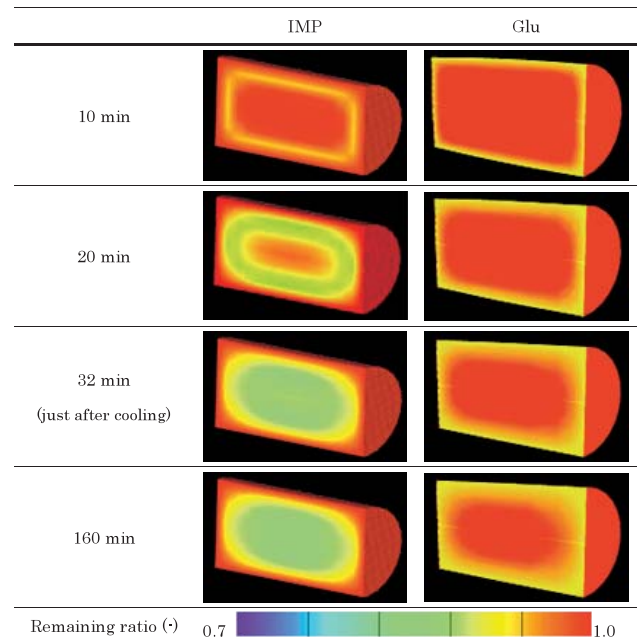


Figure 5 真空調理法におけるイノシン酸とグルタミン酸分布の変化

6. 残された問題、今後の課題

以上述べたとおり, 伝導解析に基づき, 加熱過程における畜肉の塊を対象とした殺菌評価および, 畜肉の主要旨味成分(核酸関連物質のイノシン酸と水溶性アミノ酸のグルタミン酸)の濃度分布を予測することが可能となった。しかし, 現在のシミュレーションには, ヒトが実際に食した際の“官能評価”が反映されていない。そのため今後, 官能試験に基づき「ヒトが最適と考える値」について検証すること, そして, 「最適値」となる加熱処理条件を探索可能とするシミュレーションの構築が期待される。さらには, 加熱処理時に要する消費エネルギーの推算をあわせて行うことで, 品質と環境負荷を同時に考慮した, 最適調理の決定が可能となるであろう。このように, 食材を対象としたシミュレーションには残された課題は数多い。しかし本研究で得た知見が, 今後のシミュレーション手法を新しいステージへと導くきっかけとなること, ならびに食品産業や消費者に対して, より高品質かつ安全性を担保した加工食品の生産/提供に寄与されることを願う。

参考文献

1. 石渡奈緒美, 福岡美香, 為後彰宏, 酒井昇 (2013), 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
2. Naomi Ishiwatari, Mika Fukuoka, Noboru Sakai (2013), Effect of protein denaturation degree on texture and water state of cooked meat, Journal of

Food Engineering, 117, 361-369

3. Naomi Ishiwatari, Mika Fukuoka, Naoko Hamada-Sato, Noboru Sakai (2013), Decomposition kinetics of Umami component during meat cooking
4. Naomi Ishiwatari, Mika Fukuoka, Noboru Sakai (2013), Prediction of inosine monophosphate and glutamine acid which are *umami* component of meat during cooking, Proceedings of 13th ASEAN Food Conference 2013, (Ref. No. FEM017)
5. 石渡奈緒美 (2014), 熱・物質移動および反応を考慮したタンパク質食品の調理工学的解析, 東京海洋大学博士学位論文