

## 博士学位論文内容要約

専攻 Major	応用生命科学	氏名 Name	石渡 奈緒美
論文題目 Title	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		

本研究は、伝熱解析に基づき、畜肉加熱処理時に生じる現象を予測可能とする調理シミュレーションの構築を行うことを目的とした。そのため、畜肉加熱処理時に生じる、品質に影響を及ぼす因子の反応モデルの決定と、予測に必要となる速度パラメーターの取得を試みた。

第1章では、現代社会における食品産業が担う役割とシミュレーションを行う意義、そして畜肉を対象としたシミュレーションが現在に至るまで発展してきた内容について、4つの分類に分けて説明した。そして、調理の目的と意義および本研究の目的について述べた。

第2章では、食感や重量変化等の品質に大きな影響を及ぼすと考えられる、畜肉の主要成分であるタンパク質の熱変性速度定数の温度依存性を DSC-Dynamic 法により実測した。その結果、DSC-Dynamic 法により、食感や重量変化に大きな影響を及ぼす筋原線維タンパク質であるミオシンとアクチンの変性速度定数パラメーターを得た。また、タンパク質の熱変性速度は未変性のタンパク質濃度に比例する一次反応と仮定することで、任意の温度変化におけるミオシン、アクチンそれぞれのタンパク質未変性率、ならびに DSC 測定で計測した各タンパク質の熱変性に要したエンタルピー量の比率より、畜肉タンパク質全体を考慮した total タンパク質未変性率を予測することが可能となった。

第3章では、タンパク質変性度が及ぼす畜肉品質との関係を考察すべく、あらかじめタンパク質変性度の分布を予測した試料を用いて、弾性率、重量損失率、および MRI 法を用いて試料内部に残存する横緩和時間  $T_2$  を測定した。まず畜肉サイズ  $15 \times 20 \times 20$  mm の直方体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い、解析モデル中心点と、恒温水槽で等温加熱処理した畜肉試料の中心点を比較した結果、温度履歴は良好に一致した。伝熱解析の妥当性について確認できたことから、伝熱解析値を用いて、ミオシン、アクチンそれぞれのタンパク質未変性率ならびに total タンパク質未変性率を予測したところ、加熱処理温度 ( $50$  °C,  $70$  °C) によって、変性率の時間変化が大きく異なることが明確となった。また、弾性率はアクチンの変性に伴い、著しく増大すること、中心位置におけるタンパク質未変性率の値が同じであっても、total タンパク質未変性率の平均値  $\mu$  が異なる場合、弾性率は異なる値を示すことが明らかとなった。そして重量損失率は、アクチンのみならず、ミオシンの変性も影響を及ぼすが、アクチンの方が影響力は大きいこと、タンパク質の変性の進行は、水の運動性を反映する

T<sub>2</sub> 値の低下させるため、変性の進行に伴い短い横緩和時間 T<sub>2</sub> の占める割合が高くなることが示された。

第 4 章では、畜肉加熱時の物質移動解析に着目をした。畜肉の物質移動現象は、試料内部に生じる圧力勾配を駆動力とするダルシーの法則に基づき説明できると考えた。ダルシーの法則には透過係数と粘度がパラメーターとして用いられる。そのため、これらのパラメーターを実測する必要があると考え、加熱に伴う畜肉構造の変化を反映した透過係数および粘度の決定と、物質移動モデルおよび決定したパラメーターの有効性について検証を行った。得られた結果は以下のようによまとめられる。まず、比重法により加熱に伴う体積変化（収縮率）を実験的に求めた結果、total タンパク質未変性率と収縮率の相関式を式であらわすことができた。透過係数は、顕微鏡法を利用して計測した筋繊維の直径と、NMR 法により観測した拡散係数より推算し、total タンパク質未変性率と透過係数の相関を式であらわすことができた。粘度は、流体中に存在する水溶性タンパク質の加熱変性率とアンドレードの式より、任意の温度における値を推測することが可能となった。これら実験より得た値を用いて、二次元物質移動解析を行った結果、実測値と解析値で多少、数値の差はあるものの、傾向が一致したことより、物質移動モデルおよび実験的に決定したパラメーターは妥当であると判断した。しかし、今後、より厳密な物質移動解析を行うためには、ダルシーの法則のみならず、フィックの法則を考慮する必要があると示唆された。また、MRI 測定で観測した T<sub>2</sub> 値と残重量率について校正曲線を作成し、マクロな試料における残重量率の分布と解析値を比較した。その結果、MRI 測定で算出した値（実測値）と解析値で多少、数値の差はあるものの、試料内部に形成される水分分布の傾向が一致した。

第 5 章では、畜肉呈味成分のうち、旨味の発現に寄与する遊離グルタミン酸とイノシン酸に着目した。試料中に残存する呈味成分の定量を行い、加熱処理に伴う呈味成分の消長を把握し、定量結果より各成分を予測するための反応モデルを検討した。その後、二次元円筒形モデルを対象とし、同一条件下で加熱処理した際の両成分の残存量を予測するとともに、畜肉内部に形成される両成分の分布を比較した。その結果、Glu 残存率と残重量率の減少傾向は同程度であることから、残重量率を算出すること、すなわち物質移動解析により Glu 残存率を予測することが可能であること、IMP 残存率を予測するためには、IMP 分解反応と、IMP を分解する酵素の酵素活性低下反応の 2 種類を考慮した反応モデルを構築する必要があること、IMP を分解する酵素の酵素活性度は、加熱処理温度に依存し、かつ、加熱開始直後に各加熱処理温度の平衡値に到達すると仮定した反応モデルが適していることが明らかとなった。また、Glu と IMP は同じ条件で加熱処理を行った場合においても、加熱処理温度によって、試料内部に形成される残存率分布が異なることが示された。

第6章は、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、各章で取得した反応モデルならびに速度パラメーターを用いて、タンパク質未変性率、呈味成分、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、伝熱解析値をもとにタンパク質変性度分布を異なる3つのレシピにおいて予測したところ、ミオシンは全て変性完了していたが、アクチンは表面部のみ変性している共通点があった。また、低い温度で加熱処理を行うレシピについては、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。呈味成分分布は、IMPは、表面よりも内部のIMP残存率が低い、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った。また、それぞれの呈味成分の残存率はともに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。

以上述べたとおり、熱移動現象に伴い変化する物理的、化学/生化学的変化のモデル構築および速度パラメーターの取得を行うことで、品質に寄与するタンパク質未変性率の変化、呈味成分の消長および微生物死滅数について予測ならびに可視化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。