

博士学位論文内容要旨
Abstract

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		

核家族化、単独世帯の増加に伴う個食化、女性のさらなる社会進出等をはじめとするライフスタイルの変化に伴い、加工食品や中食・外食を利用する機会が増加している現在、食品産業は社会的に大きな役割を担っている。また、飽食の時代とよばれる今日、食品産業は転換期を迎えており、安全かつ高品質な食品を提供するだけでなく、説明責任や環境負荷の軽減が求められている。これらの課題を解決する方法のひとつに、伝熱解析に基づき食材内部の変化を予測するシミュレーション手法が挙げられる。本研究は、流通している加工食品や、中食・外食での供給が特に多い畜肉の加熱調理を研究例とし、品質に影響を及ぼす因子（タンパク質熱変性、物質移動および呈味成分の消長）の数学モデルの構築と速度パラメーターを実験的に決定し、伝熱解析に基づく調理シミュレーションの基盤構築を行うことを目的とした。このような研究背景・目的、そして調理シミュレーションを行う意義について第1章で述べた。

第2章では、畜肉主要成分のタンパク質の熱変性に着目した。加熱処理に伴うタンパク質加熱変性度の予測を実施するため、変性速度定数の温度依存性を DSC (Differential Scanning Calorimetry) -Dynamic 法により実測した。畜肉そのものを実験試料とし、DSC 測定した結果、50℃ および 70℃ 付近で吸熱ピークを観測でき、既存の研究より前者を筋原線維タンパク質のミオシン、後者をアクチンの熱変性由来と帰属できたことから、本研究ではこの2つのタンパク質に着目し、活性化エネルギーと頻度因子を取得した。このように、任意の温度におけるタンパク質変性度の予測が可能となったことから、第3章では、あらかじめ試料内部に形成されるタンパク質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 (Magnetic Resonance Imaging) 法により試料内部に残存する水分子の横緩和時間 (T_2) 分布の測定を行った。その結果、弾性率はアクチンの変性に伴い、著しく増加することが明らかとなった。また、タンパク質の変性の進行に伴い、短い T_2 値の占める割合が高くなったことから、変性に伴い肉内部に残存する水分子の運動性が低下することが示された。

第4章では、畜肉はタンパク質変性に伴い生じる水分や溶解した油分、水溶性タンパク質の物質移動現象に着目した。畜肉を加熱処理した際、収縮現象が生じることから、試料内部の圧力勾配を駆動力とする、ダルシーの流動法則により説明できると考え、加熱に伴う畜肉構造の変化を反映した収縮率と、流動現象を支配する流体粘度ならびに透過係数の決定を試みた。比重法によって実測した体積変化から収縮率を算出した結果、収縮率はタンパク質変性度の相関を式であらわすことができた。畜肉の構造を反映する透過係数は、透過型顕微鏡法で測定した筋繊維の直径と、パルス磁場勾配 NMR 法により観測した水の拡散係数より推測し、タンパク質変性度と透過係数の相関を式であらわすことができた。流体の動きやすさを反映する流体粘度は、畜肉内に存在する流体中に溶解する水溶性タンパク質の変性度と、液体粘度の温度依存性をあらわすアンドレードの式より、任意の温度の値を推測することが可能となった。これら決定したパラメーターを用いて物質移動解析を行い、実測値と比較した結果、解析値は加熱温度 50℃ では 10 分以降も重量減少し続ける傾向を、70℃ では約 10 分で平衡値に到達する傾向を再現することができた。

第5章では、畜肉の旨味に寄与するグルタミン酸 (Glu) とイノシン酸 (IMP) に着目した。加熱処理を行った試料中に残存する Glu 残存率と、物質移動現象に伴い生じる残重量率を比較した結果、減少傾向が同様であった。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。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、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 °C 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。

このように、畜肉品質に影響を及ぼす因子の数学モデルの構築と速度パラメーターを決定できたことから、第6章にてレストランやホテルで実際に利用されている真空調理法に基づくローストビーフ調理のシミュレーションを行った。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、辻学園調理・製菓専門学校にて実際に行った真空調理法に基づくローストビーフ調理の実測値と比較した結果、解析値の表面温度は加熱処理工程では設定温度である 80 °C、冷却工程では 2 °C に直ちに到達すること、中心温度は目的温度である 58 °C から余熱により 62 °C まで上昇したのち、下降する実測値の傾向を再現することができた。そこで次に、決定した数学モデルと速度パラメーターを用いて、畜肉品質に影響を及ぼす因子の変化を予測した。タンパク質変性度分布は、ミオシンは試料全体で変性が終了していたのに対し、アクチンが完全に変性しているのは表面領域のみで内部は未変性の状態が保たれており、肉塊内に不均一な変性分布が形成されていることが明らかとなった。第3章にて、アクチンの変性は著しい弾性率の増加を招くことがあきらかとなっていることから、真空調理法で調理した肉がよりジューシーで柔らかく仕上がるという特徴は、肉内部でアクチンが未変性の状態となる加熱方法であることに起因すると示唆された。IMP は調理開始直後に試料表面の IMP 分解酵素が失活するため、表面部の IMP 残存率は内部よりも高い値を示した。これに対して Glu は、タンパク質の変性の進行が先行する表面部から減少するため、常に試料表面部よりも内部の残存率が高い値を示した。また、IMP と Glu の加熱途上の変化を予測するための数学モデルが異なるため、同じ旨味成分であっても、試料内部に形成される残存率分布が異なることが明らかとなった。

以上述べたとおり、伝熱現象と共に変化するタンパク質熱変性、物質移動および呈味成分の消長について肉塊全体の3次元分布を予測することが可能となった。これにより、食品産業の安全性確保と品質向上、さらに熱操作に伴うエネルギーの省力化に寄与することが期待される。