

氏名(本籍)	小林 彰 人		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博 甲 第 9814 号		
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	電気インピーダンス法による加熱過程における食肉の調理損失および破断特性評価に関する研究		
主 査	筑波大学 教授	工学博士	水 谷 孝 一
副 査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若 槻 尚 斗
副 査	筑波大学 准教授	博士(工学)	海老原 格
副 査	筑波大学 助教	博士(工学)	前 田 祐 佳
副 査	筑波大学 助教	博士(工学)	善 甫 啓 一
副 査	筑波大学 教授	博士(農学)	北 村 豊
副 査	農業・食品産業技術総合研究機構 渉外チーム長	博士(農学)	萩 原 昌 司

論 文 の 要 旨

本論文は、電気インピーダンス法を用いて、食肉の加熱工程における調理損失および破断特性の評価を行うことを提案している。電気インピーダンス法は、計測対象に微弱な電流を流し、その電氣的インピーダンスを計測することで内部状態を計測する手法である。電気インピーダンス法は食肉における屠畜、解体、枝肉格付、市場に流通するまでの鮮度、熟成、組成推定などの品質評価としての先行研究は数多く報告されている。しかし、食肉の水分量や食感がダイナミックに変化する加熱工程において、電気インピーダンス法を用いて、調理損失や破断特性の変化を明らかにした研究はあまり見られない。そこで、本論文では、針状電極を用いて、加熱調理中における食肉の電気インピーダンス特性と調理損失および破断特性、試料温度の関係を明らかにすることを目的としている。本論文は全 5 章で構成されており、各章の概要は以下の通りとなっている。

(第 1 章) では、序論として、本研究の背景、および、目的を説明している。まず、背景として、食品分野における電気インピーダンス法に関する先行研究をまとめている。まず、電気インピーダンス法は、食肉の特性計測に適している性質を有している一方で、食肉の水分量や食感がダイナミックに変化する加熱工程において、電気インピーダンス法を用いて、調理損失や破断特性の変化を明らかにした研究はあまり見られないことを示している。そして、針状電極を用いて、加熱調理中の電気インピーダンス特性を計測し、食肉の電気インピーダンス特性と調理損失および破断特性、試料温度の関係を明らかにすることを、本研究の目的として定めている。

(第 2 章) では、電気インピーダンス法の原理と、Hayden モデルについて説明している。交流信号を計測対象に印加し、計測されたインピーダンススペクトルに等価回路モデルを複素非線形最小二乗法

によってフィッティングさせることで、抵抗成分および容量成分の各等価回路定数として分離できること、また、算出した等価回路定数と計測対象の状態変化を関連付けておくことで、計測対象で起きている現象を推定できることを説明している。電気インピーダンス特性は低周波では電極と食肉の接触面に形成される電気二重層の特性であること、そして、数百 kHz より高周波になるに伴い、食肉は細胞組織を有することから、細胞構造の電気的特性をよく表すことが知られている Hayden モデルを用いることが出来ることを説明している。この Hayden モデルは絶縁体である細胞膜による容量成分と電解質を含む溶液で満たされている細胞内外の抵抗成分にて構成されている。

(第 3 章) では、温度一定条件下において、加熱された食肉の電気インピーダンスを計測し、等価回路である Hayden モデルの素子の値が、加熱工程によって失われる質量比である調理損失とどのような関係があるかを明らかにしている。加熱条件による食肉の調理損失の変化は筋線維や結合組織を構成する各タンパク質の熱変性の温度が異なるためであることを説明している。そして、加熱された食肉の電気インピーダンス特性に対して Hayden モデルを用いた等価回路フィッティングを実施し、細胞外液抵抗 R_e 、細胞内液抵抗 R_i 、細胞膜容量 C_m を算出した結果、細胞外液抵抗 R_e と調理損失の間に強い正の相関が見られることを明らかにしている。

(第 4 章) では、二通りの実験を行うことで、電気インピーダンス特性と調理損失、破断特性との関係を明らかにしている。まず、温度一定条件の下で、食肉の電気インピーダンス特性と調理損失、破断特性との関係を明らかにしている。加熱前から加熱温度 50 度と加熱温度 60℃以上ではまったく異なる破断特性を示すが、この破断特性における二つの特徴量を用いることにより、加熱中の食肉の食感変化を適切に表現できることを説明している。食肉の破断特性において、変形率 50%の破断荷重は硬さ、破断変形率は噛み切りやすさと主観的な関係があり、それぞれ筋線維と結合組織の熱変性度合と関係があることを説明している。そして、加熱後、冷却された試料の、周波数 250kHz における電気インピーダンス値は、調理損失と変形率 50%の破断荷重、および、破断変形率と高い相関を有することを明らかにしている。次に、試料温度を変化させながら、電気インピーダンスがどのように変化するかを明らかにしている。そして、加熱による食肉の電気インピーダンス特性は細胞内外の電解質溶液の抵抗成分の変化が支配的であることを説明し、1℃の温度の上昇に伴い、電気インピーダンス特性が約 2%減少することを示している。そこで、適切な温度補正を加えることにより、電気インピーダンス特性を説明変数として、加熱調理中の食肉の調理損失、変形率 50%の破断荷重、破断変形率を目的変数として単回帰分析した際に、決定係数が 0.8 を示していることから、精度良く計測できることを明らかにしている。

(第 5 章) は、本研究の総括を行っている。第 2 章から第 4 章までの研究を通じて、電気インピーダンス特性から、加熱調理中の食肉の調理損失や破断特性を短時間かつ間接的に計測できることを明らかにした上で、従来手法では困難であった加熱工程の連続的な特性変化を評価することが可能になると説明している。そのため、HACCP 等で求められる製造ライン工程、および、食肉の加熱工程における適切な温度管理の実現に貢献できたと結論づけている。

審査の要旨

【批評】

美味しさに大きな影響を与える食肉の食感は、調理損失（質量変化）や破断特性（力学特性）を計測することで定量的に評価することができることが知られている。そのため、屠畜から市場に流通するまでの食肉の質量変化や力学特性に関する先行研究がある。しかし、ダイナミックに食肉の特性が変化する最終加工である加熱工程において、それらを計測した例はあまり見られない。本論文で用いられている電気インピーダンス法は、計測対象に微弱な電流を印加することで電気インピーダンス特性を計測し、計測対象の状態変化を評価する技術である。人体の体組成計測にも使われているように比較的、安価かつ短時間で計測できるため、食肉の調理損失（質量変化）や破断特性（力学特性）の評価にも応用できるとしている。

本論文は、電気インピーダンス法を用いて、調理損失や破断特性の変化を明らかにすることを目的としている。まず、温度一定条件下において、加熱された食肉の電気インピーダンスを計測し、等価回路である Hayden モデルにフィッティングした場合の回路素子の値が、調理損失とどのような関係があるかを検討した結果、細胞外液抵抗と調理損失の間に強い正の相関が見られることを明らかにしている。一方、等価回路と完全なフィッティングが容易ではないことも判明したため、細胞外液抵抗に対応する周波数 250kHz の電気インピーダンス値から、調理損失および破断特性を直接推定手法も確立している。加熱した際の食肉の破断特性から、変形率 50%の破断荷重、および、破断変形率の二つの特徴量を用いることで、筋線維や結合組織を構成するタンパク質の熱変性度合を適切に表現できることを実験により明らかにしている。その結果、周波数 250kHz における電気インピーダンス値は、調理損失と変形率 50%の破断荷重、および、破断変形率と高い相関を有することを実験により明らかにしている。また、電気インピーダンス特性は、食肉の温度と負の相関が見られることから、食肉の中心温度を用いて適切な温度補正を加えることにより、電気インピーダンス特性から、加熱調理中の食肉の調理損失、変形率 50%の破断荷重、破断変形率が精度良く計測できることを実験により明らかにしている。この物性推定のための温度補正に関する知見は、細胞内外の電解質溶液が支配的な電気インピーダンス特性を示す食肉以外の野菜や魚など、細胞構造を有する、様々な食品の品質評価にも応用できると考えられる。

本研究は、ダイナミックに食肉の特性が変化する加熱工程において、調理損失や破断特性を計測する技術の確立に成功している。この技術は、食肉に交流電流を印加する電極を加熱調理器具や挿入型プローブとして搭載することが可能である。また、加熱中の食肉の特性を瞬時かつ定量的に評価できるため、HACCP 等で求められる製造ライン工程、および、食肉の加熱工程における適切な温度管理の実現に重要な役割を果たしていく可能性を大いに有している。以上より、本研究の成果は、食品工学の発展に大きく寄与しており、高く評価できる。

【最終試験の結果】

令和 3 年 1 月 28 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。