

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

2021年 3月

小林 彰人

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

小林 彰人

システム情報工学研究科

筑波大学

2021年 3月

目次

| | |
|--|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 本研究の目的・構成 | 5 |
| 第2章 食肉の電気インピーダンス測定原理 | 6 |
| 2.1 はじめに | 6 |
| 2.2 電気インピーダンス法の原理 | 6 |
| 2.3 食品の等価回路モデル | 7 |
| 第3章 Hayden モデルを用いる加熱された食肉の電気インピー ダンス特性と物性 | 13 |
| 3.1 はじめに | 13 |
| 3.2 実験方法 | 13 |
| 3.2.1 試料 | 13 |
| 3.2.2 加熱条件 | 14 |
| 3.2.3 電気インピーダンス計測 | 14 |
| 3.2.4 調理損失 | 15 |
| 3.3 実験結果および考察 | 15 |
| 3.3.1 食肉の加熱過程における Hayden モデルの等価回路定数変化 | 15 |
| 3.3.2 食肉の加熱過程における調理損失変化 | 18 |
| 3.3.3 細胞外液抵抗 R_e と調理損失 | 18 |
| 3.4 まとめ | 19 |
| 第4章 加熱された食肉の電気インピーダンス値と調理損失およ び破断特性, 試料中心温度 | 20 |
| 4.1 はじめに | 20 |
| 4.2 実験方法 | 20 |
| 4.2.1 試料 | 20 |
| 4.2.2 加熱条件 | 20 |
| 4.2.3 電気インピーダンス特性 | 21 |

| | |
|--|----|
| 4.2.4 調理損失 | 21 |
| 4.2.5 破断特性 | 21 |
| 4.2.6 中心温度 | 21 |
| 4.3 実験 1 : 温度一定下での加熱された食肉の電気インピーダンス特性 | 21 |
| 4.3.1 加熱条件に対する電気インピーダンス特性 | 21 |
| 4.3.2 250 kHz の電気インピーダンス値 Z と調理損失 | 27 |
| 4.3.3 加熱温度に対する破断特性 | 28 |
| 4.3.4 調理損失と破断特性 | 30 |
| 4.4 実験 2 : 間欠加熱での加熱された食肉の電気インピーダンス特性 | 33 |
| 4.4.1 試料中心温度と電気インピーダンス特性 | 33 |
| 4.4.2 温度補正した電気インピーダンス特性による調理損失および破断特性の推定 | 36 |
| 4.5 まとめ | 40 |
| 第 5 章 結論 | 42 |
| 謝辞 | 44 |
| 参考文献 | 46 |
| 論文目録 | 52 |

目次

| | |
|--|----|
| 図 1 食肉を構成するタンパク質..... | 4 |
| 図 2 電気インピーダンス法による食肉の品質評価に関する先行研究..... | 4 |
| 図 3 等価回路と電気インピーダンス特性の関係..... | 10 |
| 図 4 細胞構造および電気二重層と等価回路素子..... | 10 |
| 図 5 Hayden モデルと改良型 Hayden モデル..... | 11 |
| 図 6 改良型 Hayden モデルの Cole-Cole プロット例..... | 11 |
| 図 7 食肉の等価回路と Cole-Cole プロットとの関係..... | 12 |
| 図 8 試料の作成..... | 13 |
| 図 9 恒温水槽を用いた湯煎加熱システム..... | 14 |
| 図 10 電気インピーダンス計測システム..... | 15 |
| 図 11 加熱時間に対する細胞外液抵抗 R_e | 16 |
| 図 12 加熱時間に対する細胞内液抵抗 R_i | 17 |
| 図 13 加熱時間に対する細胞膜容量 C_m | 17 |
| 図 14 加熱過程における調理損失 CL | 18 |
| 図 15 細胞外液 R_e と調理損失..... | 19 |
| 図 16 各加熱温度にて加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 22 |
| 図 17 加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロットの変化..... | 23 |
| 図 18 各加熱温度にて 5 分間加熱後、冷却した状態での..... | 23 |
| 図 19 各加熱温度にて 10 分間加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 24 |
| 図 20 各加熱温度にて 20 分間加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 24 |
| 図 21 湯煎（温度 50 °C）で加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 25 |
| 図 22 湯煎（温度 60 °C）で加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 25 |
| 図 23 湯煎（温度 70 °C）で加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 25 |
| 図 24 湯煎（温度 80 °C）で加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 26 |
| 図 25 湯煎（温度 90 °C）で加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット..... | 26 |
| 図 26 電気インピーダンス値（周波数 250 kHz）と調理損失の関係..... | 28 |
| 図 27 各加熱温度における試料の破断特性..... | 29 |
| 図 28 破断特性の特徴量..... | 29 |
| 図 29 調理損失と破断変形率（%）..... | 30 |
| 図 30 調理損失と変形率 50%における破断荷重..... | 32 |
| 図 31 加熱時間と試料中心温度の関係..... | 33 |
| 図 32 調理損失と加熱直後の電気インピーダンス値（周波数 250Hz）..... | 34 |
| 図 33 総加熱時間 15 分の各試料の Cole-Cole プロット..... | 35 |
| 図 34 中心温度が変化した際の Cole-Cole プロットの変化..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 図 35 調理損失と電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)..... | 37 |
| 図 36 電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と調理損失..... | 38 |
| 図 37 電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と破断変形率..... | 39 |
| 図 38 電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と変形率 50 %の破断力..... | 39 |
| 図 39 中心温度が変化した際の Cole-Cole プロットの変化..... | 41 |

第1章 序 論

1.1 研究背景

食品の美味しさは、味や香りといった化学的要素と、温度、テクスチャー、外観、音といった物理的要素、そして食品を口にする人間の生理的要素や心理的要素、環境的要素などで決定されるといわれる(大羽, 2005). その中でも食肉は加熱温度や加熱時間といった加熱条件によって水分量や食感が大きく変化することが経験的に知られている. つまり、食肉の最終的な価値は加熱調理によって決定されることから、適切な加熱条件の設定が重要となる.

加熱された食肉の美味しさを決める物理的要素として、テクスチャーが挙げられる. テクスチャーは人間の五感のうち、触覚を指す言葉であるが、食品の場合、食物を口腔内の歯や喉などの皮膚感覚を通じて感じることから、食感とも呼ばれている. 食肉の食感の変化は加熱に伴い、食肉を構成するタンパク質は熱変性することによって起きる. そこで図 1 に食肉を構成するタンパク質について示す. 食肉は様々なタンパク質で構成されており、主に筋線維タンパク質と結合組織タンパク質に大別される. 筋線維タンパク質は細胞液の筋漿タンパク質、細胞小器官を構成するタンパク質、および筋原線維タンパク質に分類され、熱変性温度が異なることが報告されている. 筋線維タンパク質は主にミオシン、アクチン、結合組織タンパク質はコラーゲンで構成されており、ミオシンは 40~60 °C、アクチンは 66~73 °C、コラーゲン 56-62 °C と異なる温度帯で熱変性することが報告されている (Martens et al., 1982 ; Lepetit et al. , 2000). また、コラーゲンは 65°C で収縮し、コラーゲンは 70~75 °C でゼラチン化し、筋線維同士の結合が脆弱になる (Christensen et al., 2011). このタンパク質の熱変性による収縮により、食感としての硬さが増加、ミオシンとアクチンが収縮することで食肉内の水分が締め出され、食肉外へ流出する現象が起きる.

このような加熱時の食肉の食感の変化は、調理損失(質量変化)、破断特性(力学特性)を測定することで定量的に評価することができる (Vaudagna et al., 2002). 調理損失は、加熱前後の食肉から流出した水分、脂質、タンパク質の質量変化を計測する. 破断特性は、試料を

取り出し、破壊的に力学的特性を計測する。調理損失は非破壊検査であるため、ライン上で評価できるのに対し、破断特性は破壊検査であるため、実際の製品や加熱工程中での評価の実施は難しく、サンプリング検査で実施される。また、実際の製造現場での加熱条件の指標として、熱電対等の温度センサーを試料に挿入し食肉の中心温度を測定し、計測された試料の中心温度と加熱時間の履歴を用いる。そのため、有限要素法解析を用いて、食肉試料内部の温度、タンパク質の変性度合いを計算し、試料の品質を推定する研究もなされている（石渡ら、2013）。しかしながら、実際の加熱工程にて変化し続ける食肉の品質を計測し評価できる技術は確立されていない。

そこで本研究では、「電気インピーダンス法」の利用により、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する。電気インピーダンス法の詳細な原理は後述するが、本手法の利点として、製品内部の品質変化をリアルタイムに計測可能であること、対象に電極を接触させることにより非破壊で連続的な計測が可能であることが挙げられる。そのため、食肉の加熱中に商品価値を失うことなく調理損失および破断特性の評価を行うことができ、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繋がると期待できる。

本研究で加熱過程の食肉の調理損失および破断特性の評価に用いる電気インピーダンス法は、家庭に普及している体組成計に用いられている技術でもある。研究用途での電気インピーダンス特性の計測機器は周波数帯が数百 Hz～数十 MHz と幅広く高い計測精度が求められるため、比較的大型で高価な製品が多い。しかしながら推定したい調理損失および破断特性と相関のある特定の周波数が本研究にて明らかになれば、体組成計と同様に、安価かつ小型な製品を開発することは可能である。そのため、電気インピーダンス値を計測する電極を食肉に挿入して使用する中心温度の測定を目的とした温度計に搭載することも可能である。また、近年、家電調理器具の IoT 化、自動調理化にも貢献できる。現在の家電調理器具はインターネット接続による通信を通じて、ユーザーが選択した好みの調理レシピを用いた自動調理を試みる製品が数多く販売されている。一般的に、レンジやオーブンといった調理器具では、赤外線センサーおよび温度センサーによって食品の表面温度、調理器具内の加熱温度を計測し、加熱条件の自動制御を行っている。そのため、加熱対象の調理損失や破断特性といった食品

の価値を決める物性値を直接計測し、加熱条件を最適化する製品は確認できていない。このような家電調理器具に電気インピーダンス法を用いることで、加熱工程の食肉の品質評価が実現できたならば、ユーザーが求める多種多様な調理のニーズに応えられると考えている。さらに、ユーザーがアップロードした加熱条件および調理結果のデータをネットワーク接続により共有できるようになる。すなわち、誰でもどこでも「三ツ星の美味しさ」や「家庭の味」など、より高いレベルで再現することが可能となり、これは新しい食体験サービスの実現ではないかと期待している。

食品分野における電気インピーダンス法に関する研究は、水耕方式におけるヒマワリやキュウリの生育環境の評価（船田ら，1977）、キュウリの低温障害モニタリング（前澤ら，1996）、玄米の含水率計測やカビ発生の検出（安藤ら，2013）、乾燥加工時の野菜の細胞構造の評価（Ando et al., 2014）、凍結やブランチング等の前処理工程が野菜の乾燥工程に与える影響（Ando et al., 2016）、茶葉の粗揉工程の評価（水上ら，2006）、白米炊飯時の状態評価（竹内ら，2000）など様々な農業や食品分野の品質評価について研究が行われている。そして、食肉の電気インピーダンス特性に関する研究については、図2に示すように屠体の体組成推定（Bohuslavsek, 2002; Velazco et al., 1999）、屠体の熟成モニタリング（Damez et al., 2007）、熟成時の電気インピーダンスと機械的強度の関係（Lepetit et al., 2002）、畜肉の脂肪含量の測定（池田，1993; 鎌田ら，2014）、異常肉検出やドリップ損失の評価（Pliquett et al., 2003）、保水力と導電率の関係（Lee et al., 2000）などが研究されている。しかし、これらの研究の多くは、食肉以外の食品や、非加熱状態の食肉（生肉）に関するものである。一部では、加熱により鶏肉の電気インピーダンス特性が変化することが報告されている（加藤，1997）が、食肉の最終的な品質に影響を与えている、調理損失および破断特性との関係性までは触れられていない。このように、本研究で扱う最終的な商品価値を決定する「加熱調理」という工程を電気インピーダンス法によって品質評価する研究は少ない。

加熱過程の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の関係が明らかになれば、加熱中の食肉への電気インピーダンス CT の適用も可能となる。電気インピーダンス CT とは 16 個や 32 個といった複数電極を対象に接触させて、各電極間電位差を計測する。計測された電位差から有限要素法などの数値解法を用い、逆問題を解くこ

とで、対象の電気インピーダンス特性の分布を推定し可視化できる。食品内部の分布の可視化や異物検出への応用例も報告されている(池田, 1993; 豊田ら, 2002; 豊田ら 2004)。食肉においても CT 法による加熱過程での電気インピーダンス特性の分布推定ができれば, 試料全体の平均的な電気インピーダンス値ではなく, 試料内部の局所的な電気インピーダンス値を推定することができ, 調理損失や破断特性の分布を可視化することができる。対象の内部の分布を知ることができれば, 一部だけ過加熱, 内部は加熱不足といった問題を避けることができる。このような背景から, 電気インピーダンス法を用いることで加熱工程における食肉の調理損失および破断特性を推定する技術の確立を目指す。

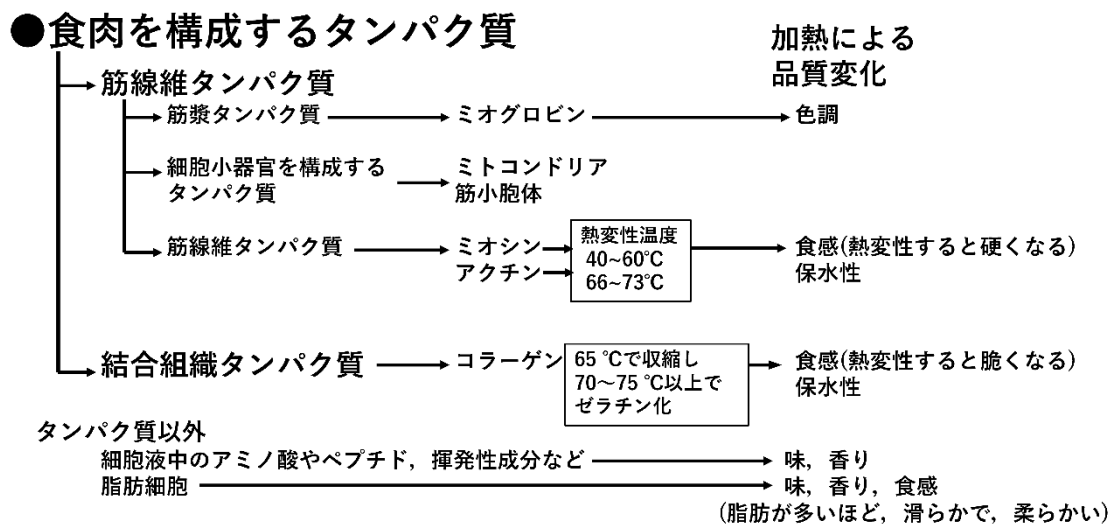


図 1 食肉を構成するタンパク質

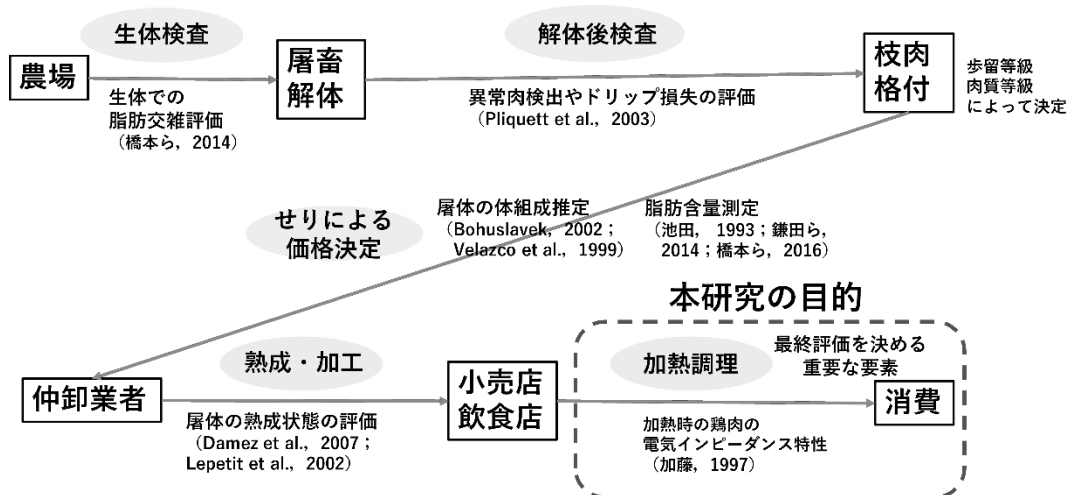


図 2 電気インピーダンス法による食肉の品質評価に関する先行研究

1.2 本研究の目的・構成

本研究では、「電気インピーダンス法」の利用により、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する。そのために、電気インピーダンス法による試料の調理損失、破断特性、中心温度の推定を想定した研究を実施してきた。現在までに、電極形状や配置、電極間距離を変化させることで試料の表面または内部等の任意領域の電気インピーダンス値の計測を実現可能なこと、加熱後における電気インピーダンス特性と破断特性などの破断特性や調理損失との関係、およびこれらの加熱中の経時変化、また電気インピーダンス特性の α 分散から試料中心温度を推定する方法について調査を進めてきた (Kobayashi et al., 2013; 小林ら, 2013a; 小林ら, 2013b; 小林ら, 2014; 小林ら, 2015a; 小林ら 2015b)。さらに電気的特性の計測精度を向上させ、より実用性を高めるためには、安定的な条件で計測した基準となるデータが必要となる。そこで本研究では、針状電極での破壊試験により電気的特性と中心温度を取得し、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、試料温度が電気インピーダンスに与える影響を報告する。

本論文は、序論である本章を含めた第 5 章で構成される。第 2 章で食肉の電気インピーダンス法の原理、食品への適用例を説明する。第 3 章では温度一定下にて加熱された試料の電気インピーダンス特性に対して食肉の細胞組織を表現した等価回路「Hayden モデル」を構成する等価回路素子を算出し、調理損失との関係を説明する。第 4 章では実験 1 によって温度一定下にて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示す。さらに実験 2 によって試料温度が電気インピーダンス特性に与える影響を示す。そして温度補正を実施することで電気インピーダンス特性から調理損失、破断特性が評価できることを説明する。第 5 章結論では第 3 章から第 4 章の実験結果および考察を踏まえての本論文のまとめである。全 5 章を踏まえて、電気インピーダンス法を用いることで、加熱工程の食肉の調理損失および破断特性を精度よく推定できることを示した。

第2章 食肉の電気インピーダンス測定原理

2.1 はじめに

本研究で加熱過程の食肉の調理損失および破断特性の評価を目的とし適用を試みる「電気インピーダンス法」の原理，また食品の等価回路として用いられる「Hayden モデル」について説明する．

電気インピーダンス法の原理と，Hayden モデルについて説明する．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の計算式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．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，等価回路素子の変化から計測対象で起きている現象を推定できる技術である．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，数百 kHz より高周波では食肉の細胞構造の電气的特性が確認できる．食肉にはこの高周波での細胞構造を模した等価回路 Hayden モデルを用いることが一般的である．この Hayden モデルは絶縁体である細胞膜による容量成分 C_m 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 R_e ， R_i の 3 つの等価回路素子で食肉のインピーダンス特性は表現できる．

2.2 電気インピーダンス法の原理

電気インピーダンス法とは，交流信号を対象に印加した際の応答から対象の電気インピーダンス特性として計測する方法である．複素数であるインピーダンス Z は，以下のように表記できる．

$$Z = R + jX = |Z| \exp j\theta \quad (1)$$

この式(1)で $\theta(\text{rad})$ は位相， $|Z|(\Omega)$ はインピーダンスの絶対値， $R(\Omega)$ は抵抗， $X(\Omega)$ はリアクタンスである．複数の周波数において電気インピーダンス Z を計測し，電気インピーダンススペクトルを得る．そしてインピーダンススペクトルの表示には複素平面上に周波数応答軌跡を描いた Cole-Cole プロットが用いられる．また計測されたインピーダンススペクトルに，予め対象を構築した等価回路モデルの計算式をカーブフィットさせることで，各等価回路定数として分離することができる．算出した等価回路定数と対象の状態変化を関連付けることで，

対象で起きている現象を推定できる．試料の電気抵抗 $R(\Omega)$ は，一般的な断面積 $S(\text{cm}^2)$ ，長さ $d(\text{cm})$ の円柱状の形をしているとした場合，以下の式で表現できる．

$$R = \rho \frac{d}{S} \quad (2)$$

このように電気抵抗 $R(\Omega)$ は断面積 S に反比例し，長さ d に比例するため，形状や寸法によらない形や大きさによらない物質定数である抵抗率 $\rho(\Omega \cdot \text{m})$ を用いる．抵抗率の逆数 $\sigma = 1/\rho$ を導電率もしくは電気伝導率 (S/m) としている．抵抗率 ρ は電気の流れにくさ，導電率・電気伝導率 σ は電気の流れやすさを表わす値として用いられる．

この抵抗率は物質の種類や温度など，様々な条件で変化する．この性質を利用し，電気インピーダンス法では対象の状態の推定を行う．人間の生体組織は約 $170 \sim 400 \Omega \cdot \text{cm}$ ，脂肪は約 $3.85 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ，骨は $17.6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ より高い抵抗率を示す (Faes, T. J. C., 1999)．牛肉の筋線維の抵抗率は $345 \sim 365 \Omega \cdot \text{cm}$ である (Mahapatra, A. K., 2010)．

2.3 食品の等価回路モデル

電気インピーダンス法により，対象から計測された電気インピーダンス特性は，抵抗成分と容量成分の等価回路として表現することが可能となる．抵抗成分のみの場合，複素平面には X 軸，実軸上の $R(\Omega)$ 離れた座標に点としてプロットされる．点であるのは周波数に依存しないためである．一方で，容量成分 C は，Y 軸，虚数軸上に周波数軌跡として周波数が 0 に近いほど，原点 0 より遠い座標に，周波数が高くなるほど，原点 0 に近い値としてプロットされる．抵抗成分と容量成分の直列回路，並列回路は図 3 のとおりである．直列に抵抗成分が接続された場合は実軸上を $R(\Omega)$ 分平行移動した軌跡となり，並列に抵抗成分が接続された場合は，低周波では実軸上を $R(\Omega)$ 離れた点を示し，周波数が高くなるに伴い，円弧上の軌跡を描きながら，原点に近づいていくような特性を示す．

電気インピーダンス法を食肉の加熱過程における物性計測に適用するには，電気インピーダンス特性を抵抗成分と容量成分にて表現する必要がある．つまり，食肉の物性を適切に表現できる等価回路モデルを構築する必要がある．電気インピーダンス法により加熱前の食肉のインピーダンス特性を測定した場合，図 4 の右図のような複素平面上に Cole-Cole プロットと呼ばれる周波数軌跡が得られる．加熱前の食肉では，Cole-Cole プロット 上には 3 つの周波数帯で誘電分散に起因

する円弧形状が確認できる。100 Hz -10 kHz 周波数帯の円弧は α 分散，10 kHz - 数 MHz 周波帯の円弧は β 分散，10 MHz 以上の高周波数帯の円弧は δ 分散の一部に起因するものと考えられている。このうち低周波の α 分散は電極と試料との界面に形成される電気二重層に起因するものである。この α 分散は，電荷移動抵抗 R_a と界面容量 C が並列に接続した等価回路で表現できる。一方で β 分散は食肉の細胞組織に由来する分散である。細胞膜は高い絶縁性を持っており，膜によって隔てられた細胞内部と細胞外部が伝導性の高い電解質溶液で満たされているため分散が現れる。そのため，この周波数帯では，細胞膜の絶縁性，細胞内外の電解質溶液の特性がインピーダンス特性として計測される。 β 分散におけるインピーダンス特性の等価回路として，細胞膜容量 C_m ，細胞内液抵抗 R_i ，細胞外液抵抗 R_e の 3 つの素子から構成される Hayden モデルが使用されることが多い。低周波は細胞外液の特性が支配的となり，高周波になるに伴って，細胞内部の特性の影響を受けやすくなる。このような細胞組織に由来するインピーダンス特性は，様々な食品において確認されており，食肉の物性との関係も報告されている (Bohuslavsek, 2002; Velazco et al., 1999; Damez et al., 2008; Lepetit et al., 2002; Pliquett et al., 2003; Lee et al., 2000)。これらの先行研究から，加熱後の食肉の物性評価への応用が期待できる。

食肉の物性評価に利用される β 分散に対して，10 MHz 以上のより高周波で確認される δ 分散は，細胞のよりミクロな構造の影響を受けて生じるものと考えられている。Asami et al. (1996) は，細胞内に存在するミトコンドリアや液胞などの膜器官による分散であると説明している。また，15 MHz にて確認される分散は細胞内部を満たす細胞質内のヘモグロビンやイオンの特性を示すという報告もある (Gimsa et al., 1996)。このようにインピーダンス特性は食品の細胞構造からさらにミクロな構造の特性までを反映することが確認されている。

本研究では，先行研究により食肉の物性との関係が数多く報告されている周波数 10 kHz から 1 MHz の β 分散に着目し，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することを目的とする。

図 5 に β 分散を表現した等価回路 Hayden モデルとその修正モデルを示す。先にも説明した通り， β 分散に現れる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, R. I. et al., 1969)。Hayden モデルは細胞膜容量 $C_m(F)$ ，細胞内液抵抗 $R_i(\Omega)$ ，細胞外液抵抗 $R_e(\Omega)$ の 3 つの回路素子で構成されている。このような Hayden モデル細胞組織の

インピーダンス特性は円弧状の Cole-Cole プロットとして表される． Hayden モデルは 1 つの細胞を表現しており， Cole-Cole プロットは正確な半円になる． しかし実際は細胞組織の大きさ， 細胞膜の厚さなどが異なる不均質性を有する細胞の集合体であるため， Cole-Cole プロットでは歪んだ円弧として確認される． この歪みを表現できるように Hayden モデルを修正した． そこで本研究では図 5 に示す定位相要素 CPE を用いた修正モデルで対応する (Zoltowski, P., 1998)． 下記に CPE のインピーダンス式を式 (3) に示す．

$$Z_{\text{CPE}} = \frac{1}{(j\omega)^p T} \quad (3)$$

式(3)における ω (rad/s)は角周波数， T は CPE 定数， p は CPE 指数である． 図 6 に CPE における p を変化させた場合の修正モデルの Cole-Cole プロットを示す． この p は CPE 指数であり， 位相角を決めるパラメータである． $p=1$ の時， CPE はコンデンサとして作用し， $p=0$ の時， CPE は抵抗として作用する． Hayden モデルで表現されるようにひとつの同一の細胞の集合体のように均質な場合は $p=1$ で表現できるが， 不均質性が増すほど， $p=0$ に近づいていくことが知られている． T は CPE 定数であり， 要素の大きさを示す． また下記に T および p からキャパシタンス C_m への変換式を示す．

$$C_m = T^{\frac{1}{p}}(R_e + R_i)^{\frac{1-p}{p}} \quad (4)$$

各等価回路定数は実測されたインピーダンス特性に対して， 等価回路の理論式を用いた複素非線形最小二乗法 (CNLS 法) によるカーブフィットを行い， 算出した (Macdonald, J. R., 1992)．

図 7 に食肉の等価回路と Cole-Cole プロットとの関係を示す． α 分散は電荷移動抵抗 R_a と界面容量 C が並列に接続した等価回路で表現でき， β 分散は食肉の細胞組織に由来する分散である． β 分散におけるインピーダンス特性の等価回路として， 細胞膜容量 C_m ， 細胞内液抵抗 R_i ， 細胞外液抵抗 R_e の 3 つの素子で表現できる． また α 分散と β 分散の境は， 細胞外液抵抗 R_e の値となり， β 分散の円弧左端は細胞内液抵抗 R_i ， 細胞外液抵抗 R_e の並列抵抗で表現できることがわかる． この食肉の電気インピーダンス特性が加熱工程でどのような変化を示すのかを明らかにすることで， 調理損失および破断特性を推定することを試みた．

| | | | | |
|------|--|---|---|---|
| 等価回路 | 抵抗成分 R | 容量成分 C | 直列回路 C R | 並列回路 C R |
| 複素平面 | $X = Z \sin \theta$ 周波数に依存せず $R(\Omega)$ $R = Z \cos \theta$ | $X = Z \sin \theta$ 周波数 $\omega = 0$ 周波数 $\omega = \infty$ $R(\Omega)$ $R = Z \cos \theta$ | $X = Z \sin \theta$ 周波数 $\omega = 0$ 周波数 $\omega = \infty$ $R(\Omega)$ $R = Z \cos \theta$ | $X = Z \sin \theta$ 周波数 $\omega = \infty$ 周波数 $\omega = 0$ $R(\Omega)$ $R = Z \cos \theta$ |

図3 等価回路と電気インピーダンス特性の関係

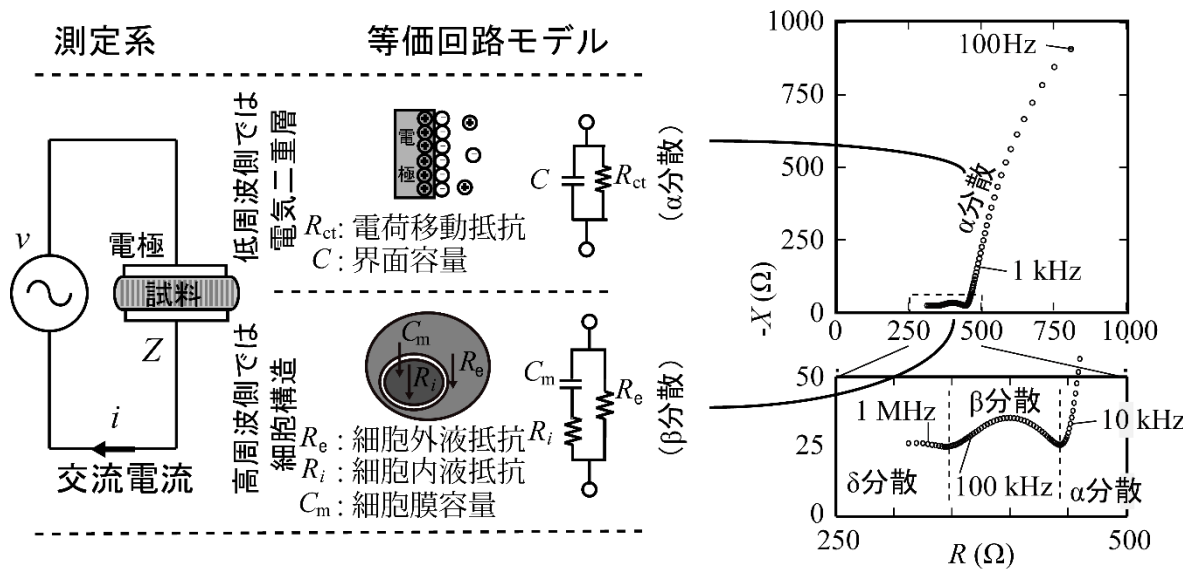


図4 細胞構造および電気二重層と等価回路素子

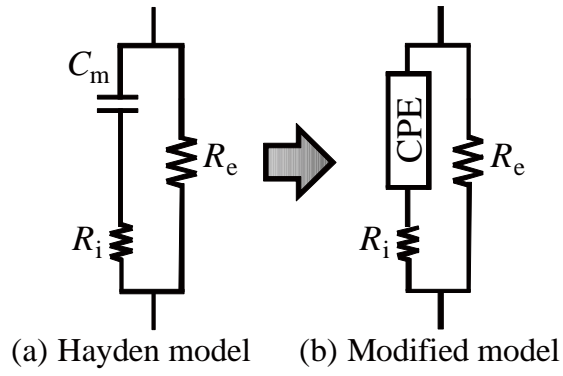


図 5 Hayden モデルと改良型 Hayden モデル

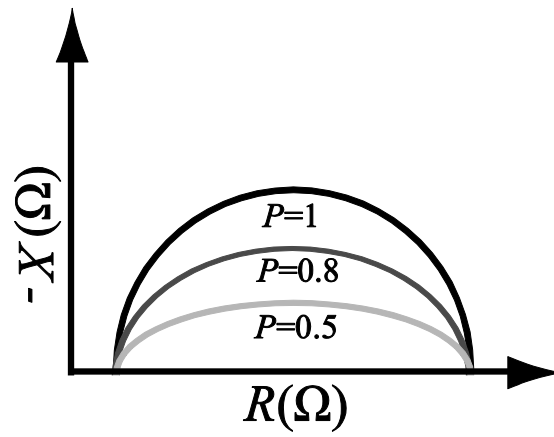


図 6 改良型 Hayden モデルの Cole-Cole プロット例

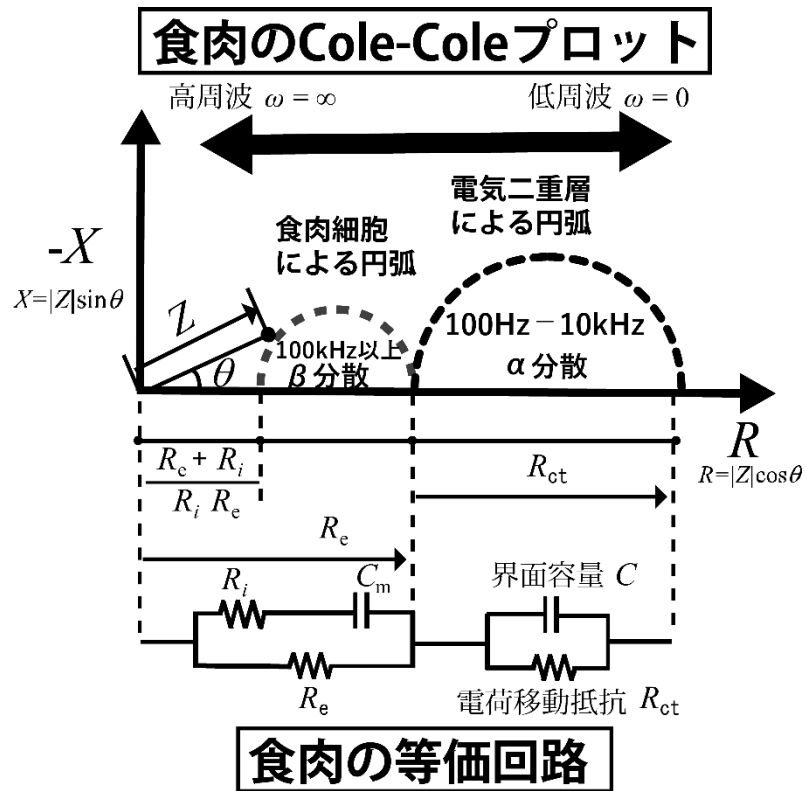


図 7 食肉の等価回路と Cole-Cole プロットとの関係

第3章 Hayden モデルを用いる加熱された食肉の電気インピーダンス特性と物性

3.1 はじめに

第3章は、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かを明らかにする。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恒温水槽を用いて加熱温度 50, 60, 70, 80, 100 °C, 加熱時間 3 分, 6 分, 9 分で加熱された食肉の電気インピーダンス特性を測定し、調理損失との関係についての実験結果および考察を説明する。加熱後、計測し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。各等価回路素子のうち、細胞外液抵抗 R_e と調理損失の間に強い正の相関が確認できた。

3.2 実験方法

3.2.1 試料

試料は、脂身が少ない国産豚ひれ肉ブロックを一般小売店より入手して使用した。図 8 のように豚ひれ肉ブロックを筋繊維に対して垂直方向に厚さ 10 mm になるように切断した。サンプルの大きさは長手方向 60~70 mm (電極間距離 34 mm の方向), 短手方向 35~45 mm 程度であった。各実験に対して、約 30 cm の豚ひれ肉ブロック 1 個から 20~25 サンプルの試料を作製した。

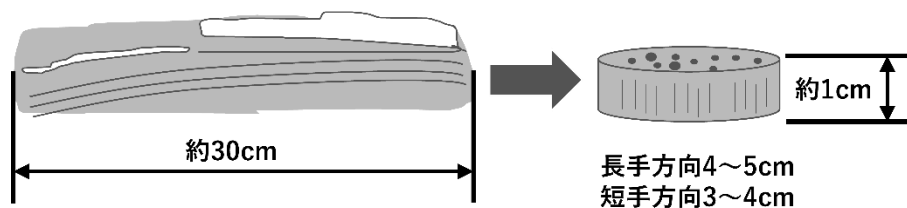


図 8 試料の作成

3.2.2 加熱条件

図 9 に恒温水槽を用いた加熱システムを示す。定温された湯の中に真空パックに入れた試料を沈めて、定温加熱を行った。その際の条件として、加熱温度は 50, 60, 70, 100 °C, 加熱時間は 3 分, 6 分, 9 分で行った。加熱後、すぐに氷水の中で十分に余熱を取り除き、反応を停止させた。

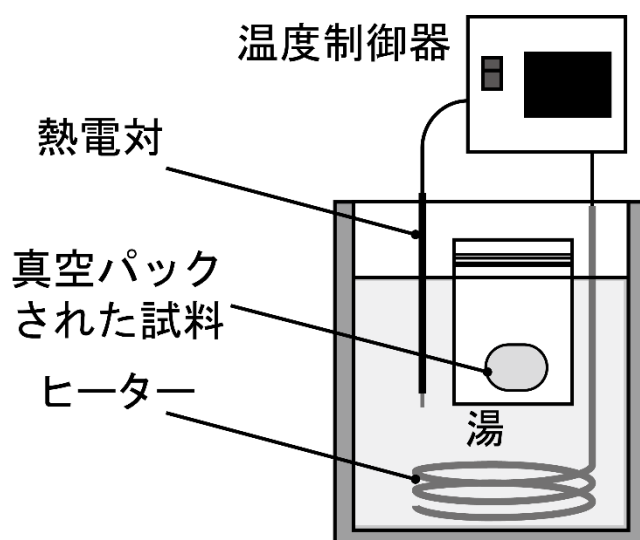


図 9 恒温水槽を用いた湯煎加熱システム

3.2.3 電気インピーダンス計測

図 10 に電気インピーダンス計測システムを示す。インピーダンスアナライザー (HP 4194A, Hewlett-Packard) に接続された針状電極 (電極間距離 34 mm, 挿入長さ 5 mm) を加熱後の試料に挿入し、電気インピーダンス $Z(\Omega)$ と位相 $\theta(\text{rad})$ の計測を行った。計測時の印加電圧は 0.5 mV, 周波数は 100 Hz から 5 MHz の範囲において 100 点の log 掃引とし、各測定において 64 回の平均化処理を行った。

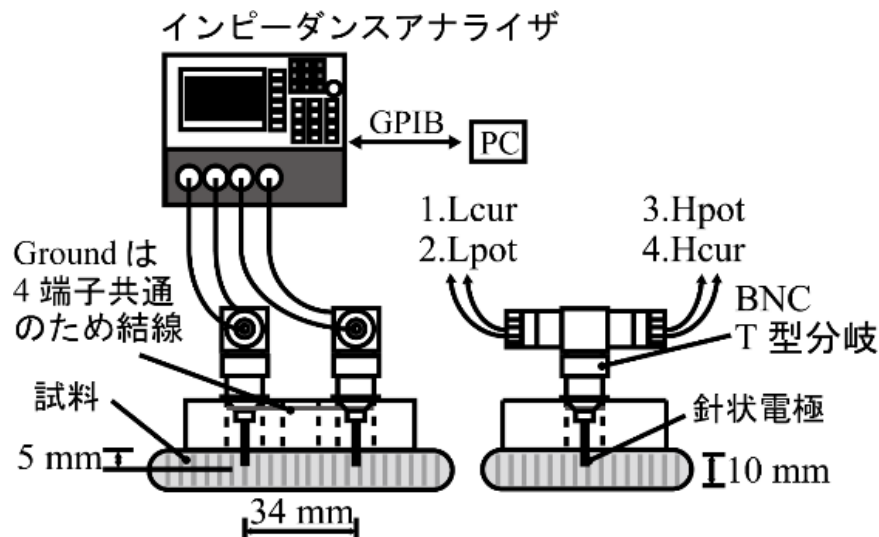


図 10 電気インピーダンス計測システム

3.2.4 調理損失

調理損失 *Cooking Loss (CL)* は加熱時に試料から流出した水分，水溶性タンパク質，脂質などの総質量であり，加熱前後の試料質量比である．加熱時の調理損失 *CL* は以下の式で定義される．

$$\text{Cooking loss} = 100 \times \left(1 - \frac{W_h}{W_r}\right) \quad (\%) \quad (4)$$

W_h は加熱後の試料質量 (g)， W_r は加熱前の試料質量 (g) である．試料の質量計測には電子天秤 (EJ-610，株式会社エーアンドデイ) を使用した．

3.3 実験結果および考察

3.3.1 食肉の加熱過程における Hayden モデルの等価回路定数変化

各加熱温度における豚ひれ肉の電気インピーダンス特性に Hayden モデルを複素非線形最小二乗法により等価回路定数を算出した．図 11 に細胞外液抵抗 R_e ，図 12 に細胞内液抵抗 R_i ，図 13 に細胞膜容量 C_m の変化を示す．

細胞外液抵抗 R_e は各加熱温度で明確な値の変化を示す一方で，細胞内液抵抗 R_i は加熱温度に関わらず増大傾向を示す結果となった．細胞外液抵抗 R_e の増大は加熱条件によって異なる値を示すことから筋線

維を構成するタンパク質の熱変性と関係があると考えられる。加熱温度で食肉を構成する各タンパク質が熱変性する。Lepetit et al. (2000) および Martens et al. (1982) は筋線維の熱変性・収縮はミオシンが 40～60 °C, アクチンが 66～73 °C, 結合組織中のコラーゲンは 56～62 °C の温度帯で変性することを報告している。このように加熱温度 50, 60, 70°C, および 100°C, そして各加熱時間ではミオシン, アクチン, コラーゲンのタンパク質の熱変性の度合いが異なっていると考えられる。

細胞膜容量 C_m は加熱時間の増大につれて減少傾向を示した。特に 50~60 °Cにおける変化が著しく, 60 °C以上の温度にて容量成分がほぼ 0 に近い値を示す。これは細胞膜構造の崩壊に起因していると考えられる。Palka(1999)は細胞膜が主にコラーゲンで構成されており, 56~62 °Cで収縮, 60 °C以上では細胞膜は膜構造を失うことを確認している。そして 70 °C以上でその崩壊した細胞膜はゼラチン化および水分に溶解して試料外へと流出する。このような現象が細胞膜容量 C_m の減少の原因と推察できる。

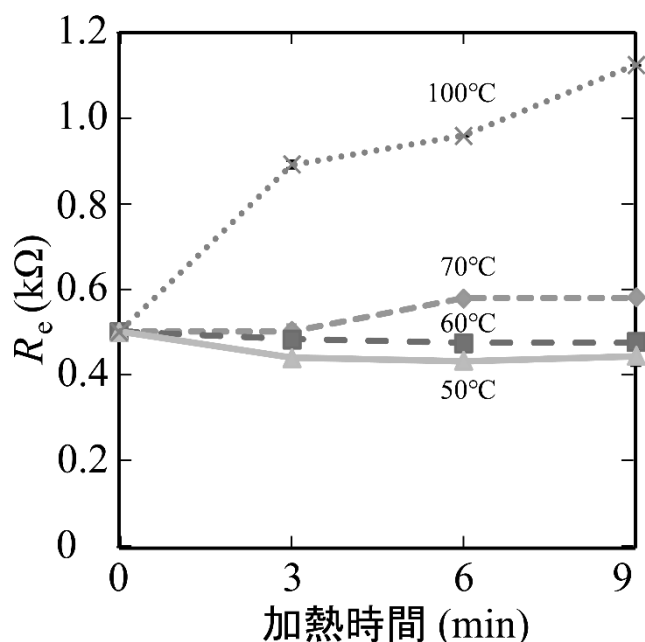


図 11 加熱時間に対する細胞外液抵抗 R_e

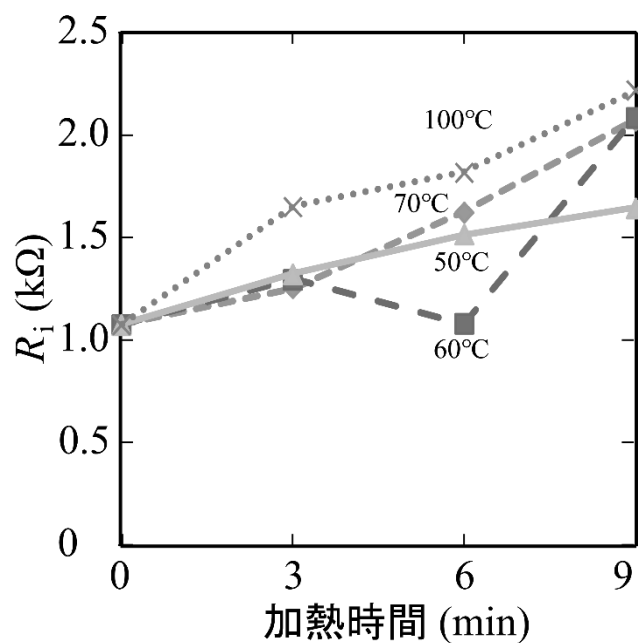


図 12 加熱時間に対する細胞内液抵抗 R_i

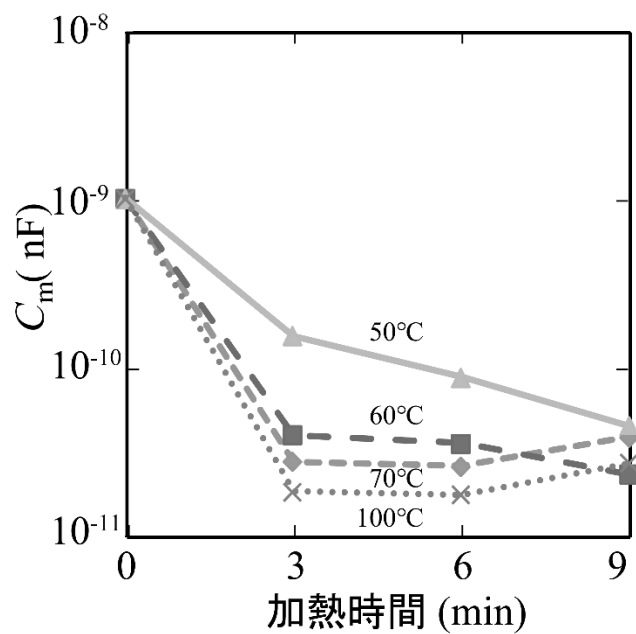


図 13 加熱時間に対する細胞膜容量 C_m

3.3.2 食肉の加熱過程における調理損失変化

図 14 に各加熱温度における豚ひれ肉の調理損失変化を示す。加熱温度および加熱時間が増大するにつれて、調理損失は増大する傾向が確認された。Palka et al. (1999) は調理損失が筋線維や結合組織の熱変性による収縮、構造崩壊によって内部の水分は締め出され、調理損失が増大することを説明している。Martens et al. (1982)は筋線維の熱変性 (ミオシン 40-60 °C,アクチン 66-73 °C), 結合組織の収縮温度 (コラーゲン 56-62 °C)が異なることを確認している。さらに Palka (1999) は加熱温度の上昇によりミオシンとアクチンで構成されるサルコメア長さの減少, Offer et al. (1984) は, 45~60 °Cでは筋線維の短手方向の収縮, 60~90 °Cでは長手方向の収縮し, 食肉内の水を流出させ, 保水力を低下させることを報告している。このように本実験における異なる加熱温度に対する調理損失の変化は,異なる温度で起こる筋繊維・結合線維の熱変性・収縮が原因であると推察できる。

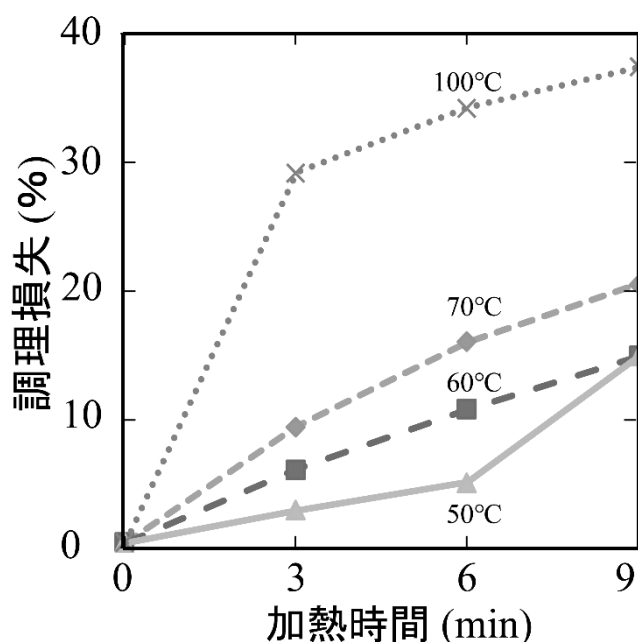


図 14 加熱過程における調理損失 CL

3.3.3 細胞外液抵抗 R_e と調理損失

図 15 に調理損失に対する細胞外液抵抗 R_e の変化を示す。調理損失の増大とともに,細胞外液抵抗 R_e が増大していることが確認できた。

調理損失と細胞外液抵抗 R_e の相関係数を算出したところ、0.875 と等価回路定数の中で最も高い値を示した。この結果から、細胞外液抵抗 R_e の増大は調理損失に含まれる電解質の影響を受けていると考えられ、細胞外液抵抗 R_e から調理損失を推定できる可能性が示された。

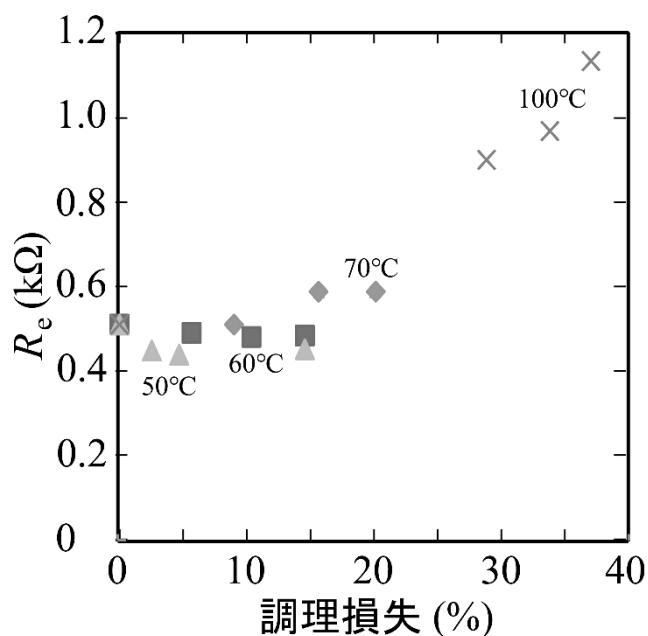


図 15 細胞外液 R_e と調理損失

3.4 まとめ

第 3 章は、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、Hayden モデルの等価回路素子が調理損失とどのような関係を持つかを明らかにする。恒温水槽を用いて加熱温度 50, 60, 70, 80, 100 °C, 加熱時間 3 分, 6 分, 9 分で加熱した。加熱後、計測し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て細胞外液抵抗 R_e , 細胞内液抵抗 R_i , 細胞膜容量 C_m を算出した。各等価回路素子のうち、細胞外液抵抗 R_e と調理損失の間に強い正の相関が確認できた。このことから細胞外液抵抗 R_e から調理損失が推測可能であることが示された。

第4章 加熱された食肉の電気インピーダンス値と調理損失および破断特性，試料中心温度

4.1 はじめに

第3章では Hayden モデルの等価回路素子を算出し，細胞外液抵抗 R_e と調理損失との間に正の相関関係があることを確認した．細胞外液抵抗 R_e は第2章 2.3 で説明した通り，試料と電極の接触面の電気二重層の特性を示す α 分散と，食肉細胞による β 分散の境である．このことから，第4章では細胞外液抵抗 R_e に対応する周波数 250 kHz の電気インピーダンス値を用いて，調理損失および破断特性が推定できることを確認するために2つの実験を実施した．実験1では加熱された食肉の電気インピーダンス特性を温度一定下で測定した．さらに実験2では間欠加熱にて加熱された電気インピーダンス特性から，試料中心温度と電気インピーダンス特性の関係を示す実際の加熱過程の食肉の調理損失と破断特性を電気インピーダンス特性から評価する場合の温度補正について説明する．

4.2 実験方法

4.2.1 試料

試料は，第3章の実験方法同様，脂身が少ない国産豚ひれ肉ブロックを一般小売店より入手して使用して作成した．豚ひれ肉ブロックを筋繊維に対して垂直方向に厚さ 10 mm になるように切断した．サンプルの大きさは長手方向 60～70 mm（電極間距離 34 mm の方向），短手方向 35～45 mm 程度であった．各実験に対して，約 30 cm の豚ひれ肉ブロック 1 個から 20～25 サンプルの試料を作製した．

4.2.2 加熱条件

第3章の実験方法にて用いた恒温加熱装置と同様，図9に示した水槽内の湯を設定温度で一定に保つシステムを用いた．この恒温水槽を利用して，一定温度に制御された湯の中に真空パック内に封入された試料を沈めることで加熱する．後述するが，実験1および実験2では設定した加熱温度，加熱時間で異なる．

4.2.3 電気インピーダンス特性

第 3 章の実験方法「3.2.1 電気インピーダンス計測」に従って電気インピーダンスを計測した。

4.2.4 調理損失

第 3 章の実験方法「3.2.2 調理損失」に従って調理損失を計測した。

4.2.5 破断特性

破断特性とは，試料を一定速度で圧縮し，どの程度の力で変形して破断するのかわかるものであり，食品の食感を表す指標として利用されている。本実験では，テクスチュロメーター（自動サーボスタンド JSV-H1000 およびハンディデジタルフォースゲージ HF-10，日本計測システム株式会社）を用いて測定した。テクスチュロメーターの設定は，破断速度 20 mm/min，プランジヤーはクサビ形とした。破断特性を計測する試料は，電気インピーダンス特性の測定後，厚さ 10 mm，幅 10 mm，長さ 30 mm の形状に成形したものを使用した。試料は，筋線維の長手方向に対してプランジヤーが垂直に挿入されて破断されるように装置テーブル上に設置し，破断特性の計測を行った。圧縮時の変形率に対する荷重値 (N) の変化を破断特性として測定した。変形率は，破断始め（試料に接触した時点）と破断終わり（プランジヤーがテーブルに接触した時点）の全移動距離に対する変形量と定義した。

4.2.6 中心温度

中心温度は，電気インピーダンスの測定のために挿入する 2 本の電極の中間点において，試料表面から 5 mm の深さの点に熱電対を挿入して計測した。

4.3 実験 1：温度一定下での加熱された食肉の電気インピーダンス特性

4.3.1 加熱条件に対する電気インピーダンス特性

図 16 に各加熱温度にて加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロットを示す。低周波と高周波において 2 つの円弧が確認できた。これは第 2 章で説明した α 分散および β 分散による円弧である。また加熱温度の上昇に伴って，電気インピーダンス特性 Z が増大し Cole-Cole プロットにおける 100 kHz から 15 MHz の円弧径の増大が確認できた。

100 kHz から 1 MHz の周波数帯は、 β 分散による細胞組織に由来する電気インピーダンス特性である。そのため、第 3 章でも算出した細胞膜容量 C_m と細胞外液抵抗 R_e 、細胞内液抵抗 R_i の変化で説明ができる、この円弧径の変化は、図 17 に示すように加熱温度および加熱時間の増加に伴い、右側に移動し、かつ円弧径が大きくなっている。つまり、 β 分散による円弧の右端である細胞外液抵抗 R_e の増大が原因と考えられる。

図 18 に加熱時間 5 分、図 19 に加熱時間 10 分、図 20 に加熱時間 20 分の際の各加熱温度で加熱し、冷却した状態での Cole-Cole プロットを示す。また、図 21～図 25 に、各温度で湯煎による加熱後、冷却した Cole-Cole プロットの変化を示す。これらの結果から、細胞外液抵抗 R_e 。加熱温度 50～60 °C では約 0.5 k Ω 、70 °C では約 0.6 k Ω に、加熱時間に依らず、プロットされている。その一方で、加熱温度 80 °C、90 °C が上昇し、加熱時間が増加していくに伴い、円弧径は顕著に増大している。また、加熱温度 80 °C では円弧の右端である細胞外液抵抗 R_e は 0.7～0.9 k Ω 、90 °C では 0.7～1.1 k Ω の範囲で確認できる。このように加熱温度、加熱時間の増加に伴い、細胞外液抵抗 R_e が増大していくのが読み取れる。

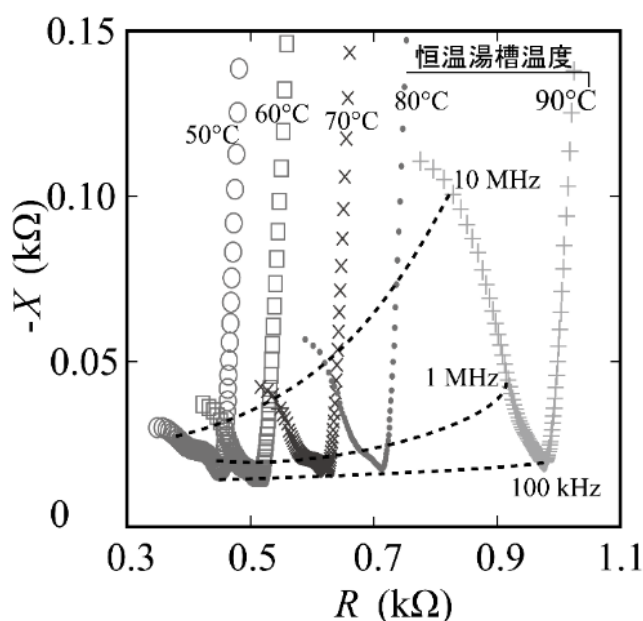


図 16 各加熱温度にて加熱後、冷却した状態での Cole-Cole プロット

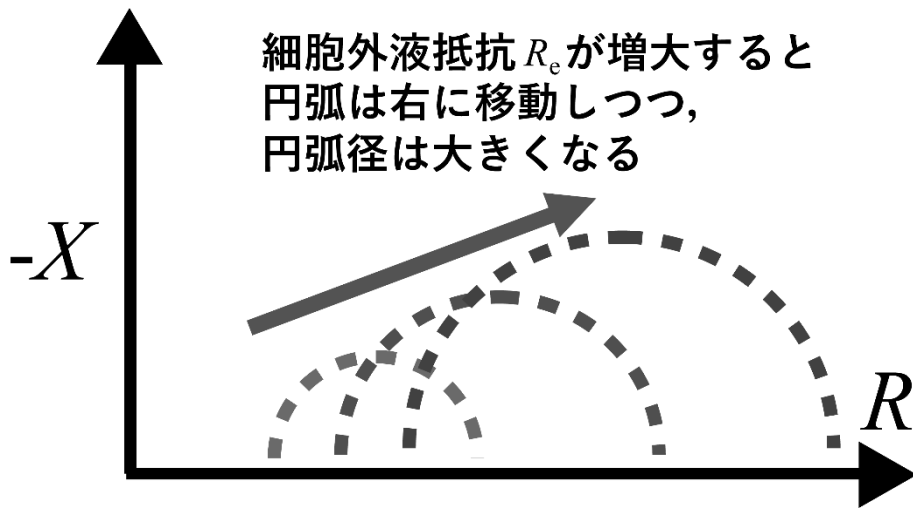


図 17 加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロットの変化

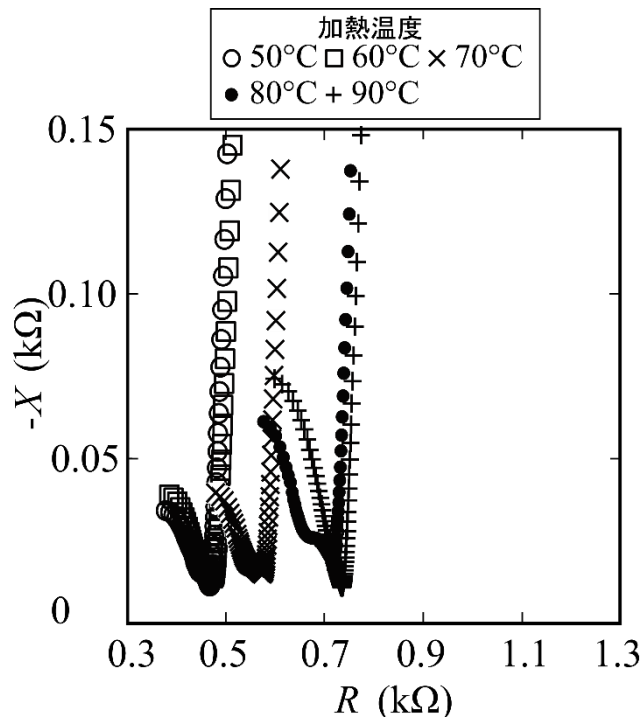


図 18 各加熱温度にて 5 分間加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロット

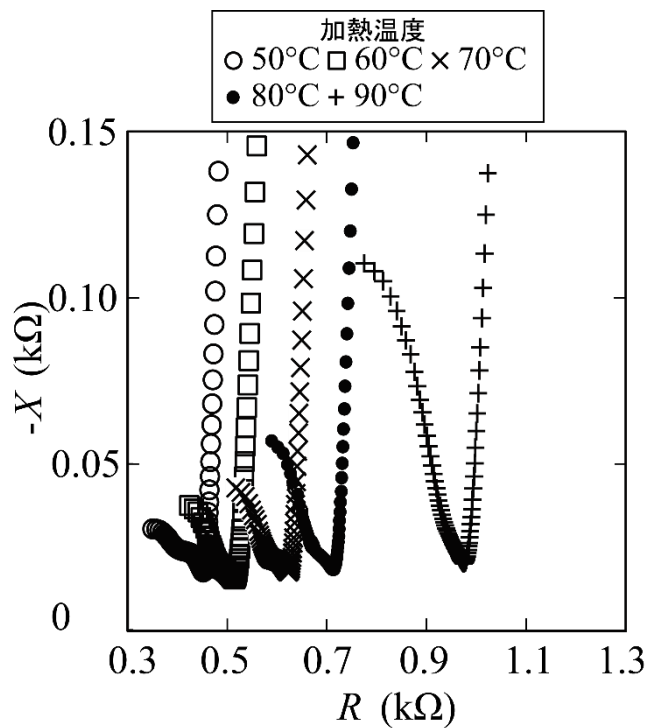


図 19 各加熱温度にて 10 分間加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロット

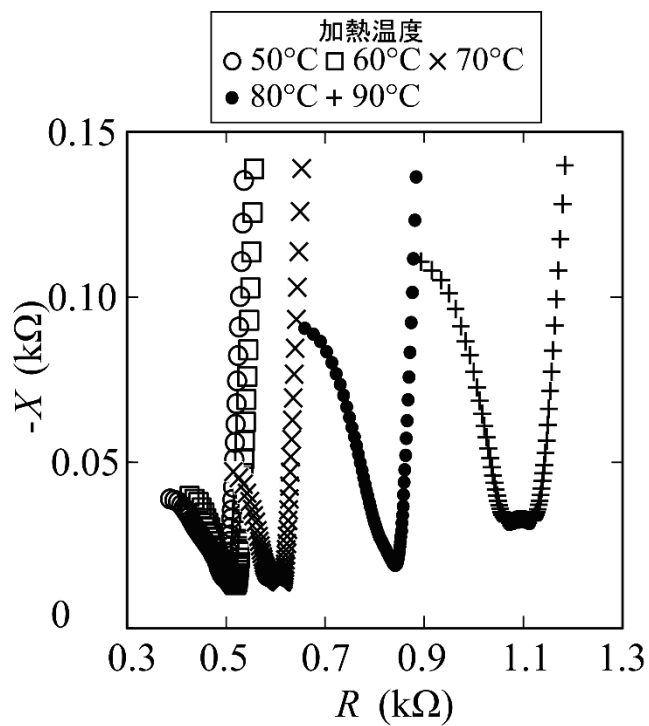


図 20 各加熱温度にて 20 分間加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロット

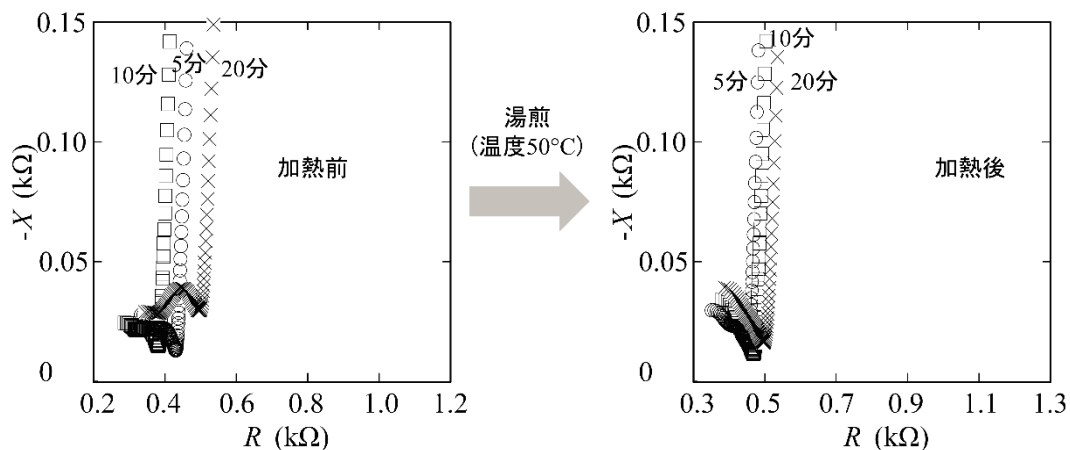


図 21 湯煎 (温度 50 °C) で加熱後, 冷却した状態での Cole-Cole プロット

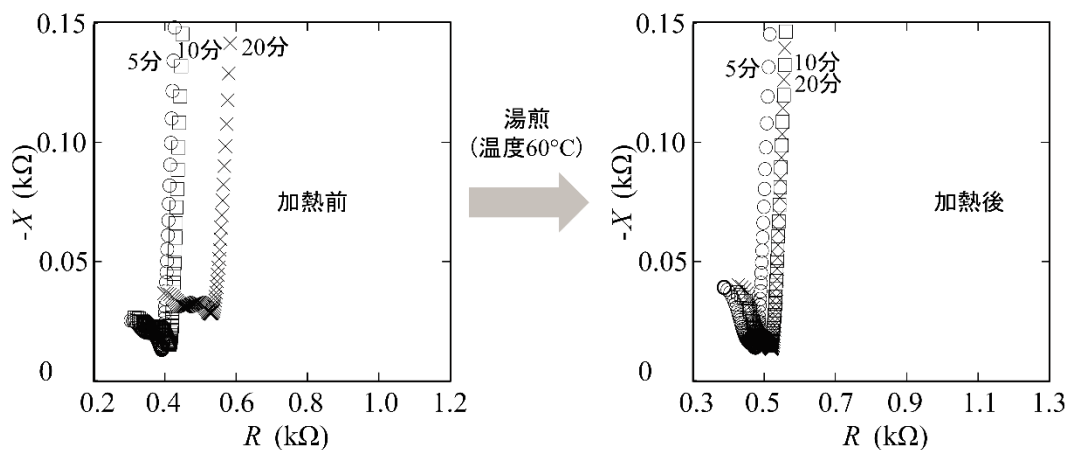


図 22 湯煎 (温度 60 °C) で加熱後, 冷却した状態での Cole-Cole プロット

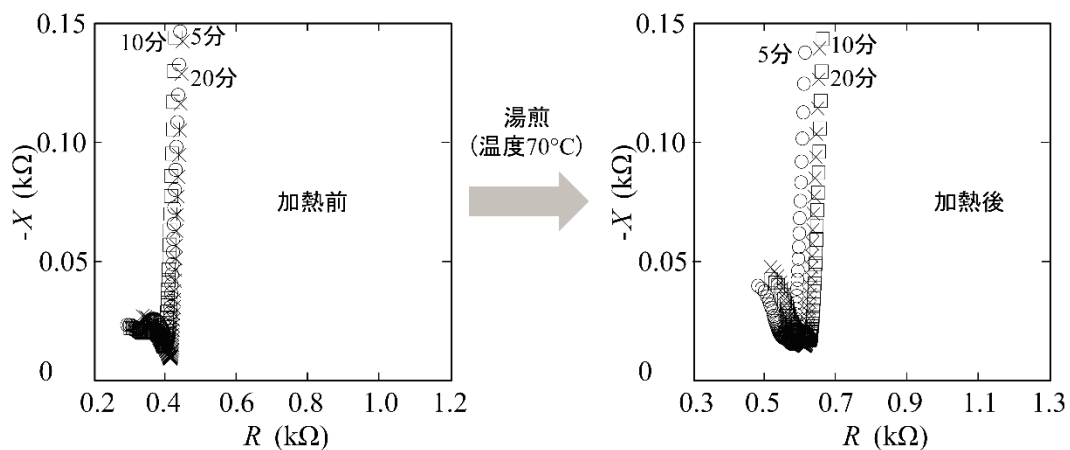


図 23 湯煎 (温度 70 °C) で加熱後, 冷却した状態での Cole-Cole プロット

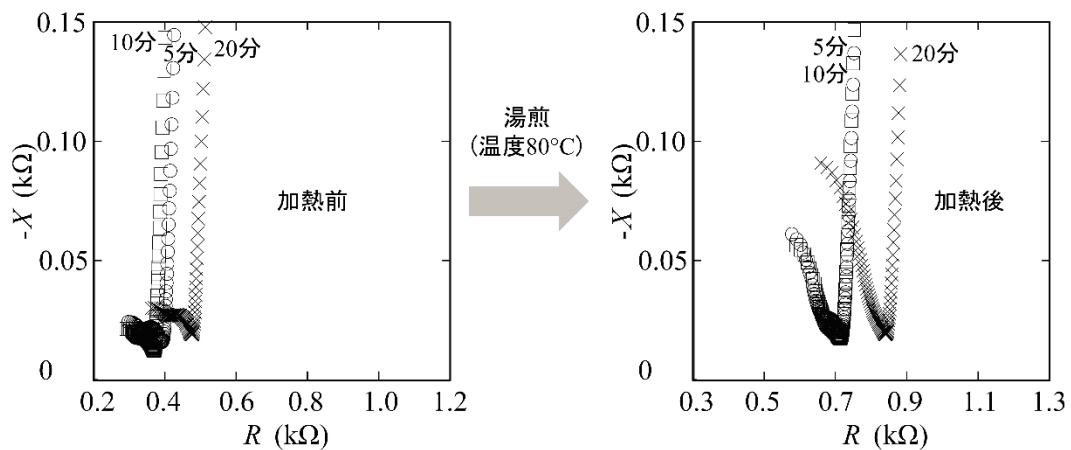


図 24 湯煎（温度 80 °C）で加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロット

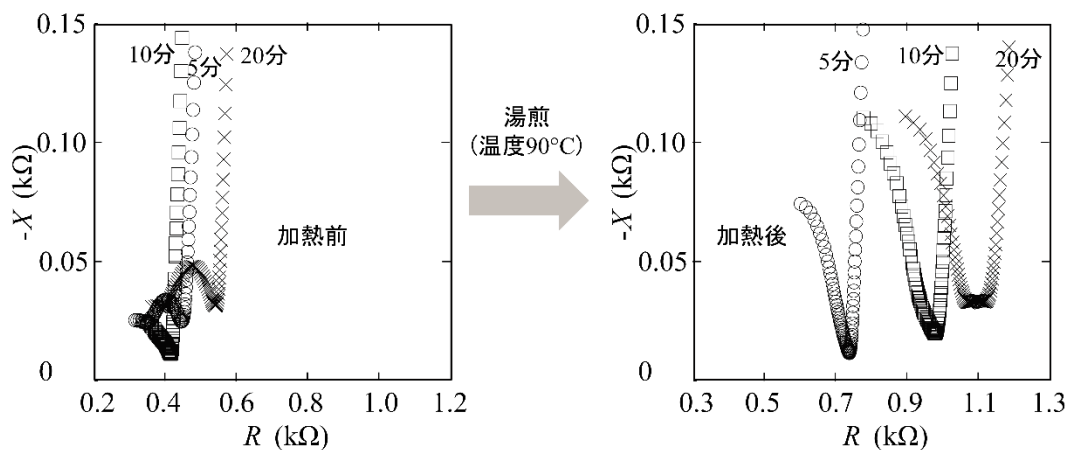


図 25 湯煎（温度 90 °C）で加熱後，冷却した状態での Cole-Cole プロット

4.3.2 250 kHz の電気インピーダンス値 Z と調理損失

図 26 に 250 kHz の電気インピーダンス値と調理損失の関係を示す。第 3 章では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し、各等価回路素子を算出した。しかし、細胞外液抵抗 R_e は α 分散と β 分散が切り替わる周波数の電気インピーダンス値であり、その周波数は 100~250 kHz 前後である。そのため、食肉の細胞外液抵抗 R_e を複素非線形最小二乗法により算出する代わりに、250 kHz の電気インピーダンス値を調理損失との評価に用いる。本来は、同じ試料を用いて 5 分、10 分、20 分の計測を実施すべきであるが、加熱自体が不連続となるため、同じ部位からカットした加熱時間が 5 分用、10 分用、20 分用の試料を準備し計測実験を行っている。なお、図 26 においては、同じ恒温水槽温度の試料を 5 分→10 分→20 分のように示しているが、図 21~図 25 の Cole-Cole プロットに示した通り、同じ試料ではないことを言及しておく。加熱前の試料の 250 kHz の電気インピーダンス値の平均値は 395.41Ω (標準偏差 27.29Ω , サンプル数 15) に対して、加熱後の試料の測定値は、平均値は 602.86Ω (標準偏差 135.47Ω , サンプル数 15) であった。この結果から、加熱前の試料と比較し、加熱後の試料の電気インピーダンス値は増加することが確認された。また、加熱時間および加熱温度が増大するほど、調理損失および電気インピーダンスが増大することも確認できた。電気インピーダンスと調理損失の相関係数は 0.91321 (サンプル数 15) と高い値を示した。加熱温度および加熱時間の増大に伴う調理損失の増大の原因については、第 3 章でも説明した通り、様々な先行研究で報告されている。Lepetit et al. (2000) および Martens et al. (1982) は筋線維の熱変性・収縮はミオシンが 40~60 °C, アクチンが 66~73 °C, 結合組織中のコラーゲンは 56~62 °C の温度帯で変性することを報告している。さらに Palka (1999) は加熱温度の上昇とともにミオシンとアクチンで構成されるサルコメア長さが減少することによる調理損失の増大を確認している。さらに Offer et al. (1984) により、45~60 °C では筋線維の短手方向の収縮、60~90 °C では長手方向の収縮が発生し、試料の保水性が低下することが報告されている。

これらの先行研究から、本実験においても、加熱温度の上昇に伴い、筋線維、結合組織の変性・収縮が進み、調理損失量が増加したと考えられる。このタンパク質の熱変性による調理損失の発生が 100 kHz か

ら 1 MHz の周波数帯の円弧形状および位置の変化の要因となっていると考える．そこで，筋線維および結合組織の熱変性や収縮と関係があるとされる破断特性の計測を実施した．

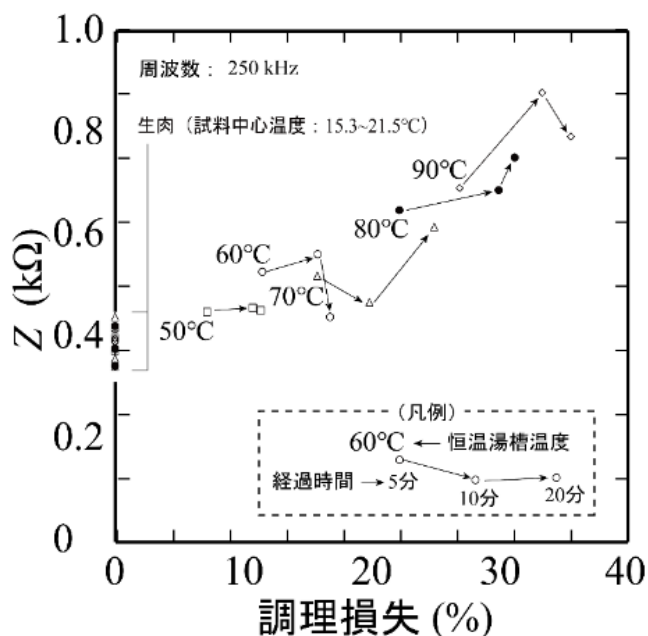


図 26 電気インピーダンス値（周波数 250 kHz）と調理損失の関係

4.3.3 加熱温度に対する破断特性

図 27 に各加熱温度における試料の破断特性の一例を示す．加熱前および 50 °C の破断特性は，変形率の増加に伴い，破断力が増大する傾向が確認された．変形率 0 % から 50 % では，変形率と破断力がほぼ比例関係にある．変形率の増大に伴って，破断力が増大していることから，破断荷重-変形率における傾きが増大するほど，試料が硬くなっていると考えられる．これはばねのような特性である．しかし，加熱温度 60 °C 以上では，変形率の増加に伴い，破断力は単調な増大傾向を示さなくなる点，増加から減少に切り替わる点，すなわち，破断特性のピークである点を破断点とした．この破断点は加熱温度 60 °C 以上では確認することができる．この破断点は，力を加えて圧縮し，変形させ続けた際に，変形に耐えきれず，試料が破断・破壊される点であり，破断する際の変形率と荷重を示している．この破断点は，加熱前と加熱温度 50 °C の試料では明確に観察されないのに対して，加熱温度 60 °C

以上の試料では破断点が明確に観察できるようになる。さらに加熱温度帯 70, 80, 90 °Cでは、加熱温度が上昇することに伴い、より小さい変形率において破断点が観察された。このことから破断特性のうち、図 28 に示す「(a)破断変形率(%)と(b)変形率 50 %における破断力(N)」の 2 つの特徴量に着目した。次の調理損失と破断特性にて考察を記す。

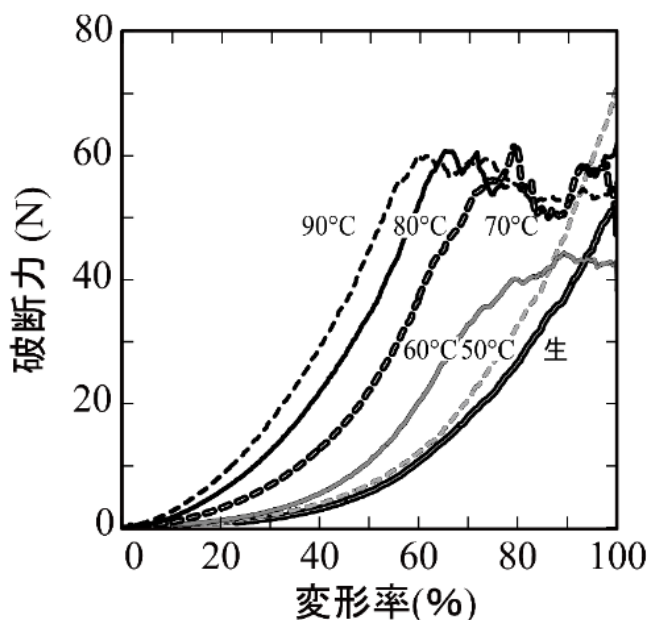


図 27 各加熱温度における試料の破断特性

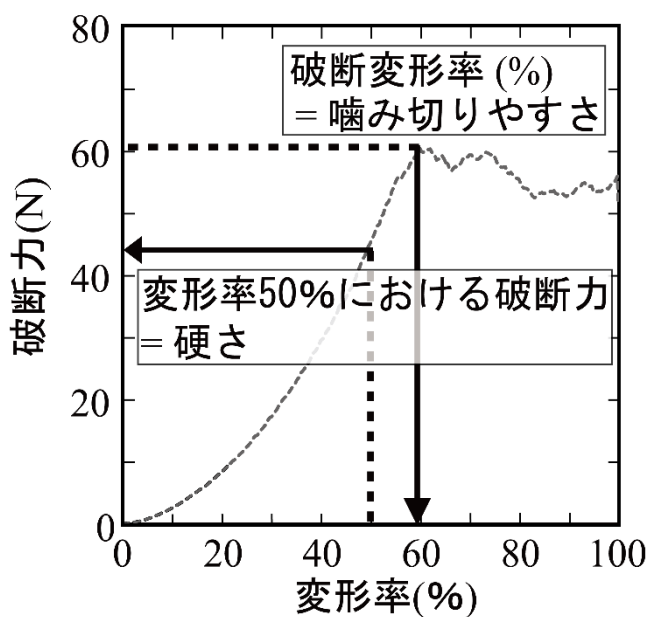


図 28 破断特性の特徴量

4.3.4 調理損失と破断特性

(a)破断変形率 (%)

破断変形率が小さくなることは、結合組織が脆弱になることを表すと考えられる。結合組織とは、筋線維同士を接着する組織である。図29に調理損失と破断変形率の関係を示す。この図より、加熱温度 50 °C の加熱時間 5～20 分および加熱温度 60 °C 加熱時間 5 分間では破断変形率に変化は見られなかった。しかし、加熱温度 60 °C 加熱時間 10～20 分と加熱温度 70 度以上では、破断変形率の減少が確認できた。また、加熱温度および加熱時間と負の相関がある。

この加熱による破断変形率の減少は様々な先行研究で報告されている。Christensen et al. (2011) は加熱した結合組織について、引張試験における破断強度を調べ、20～50 °C の温度帯において破断荷重が増大傾向を示すのに対し、50～80 °C の温度帯では破断荷重は減少する傾向を示すことを報告した。この変化は、結合組織を構成するタンパク質であるコラーゲンが 65 °C で収縮、70～75 °C 以上でゼラチン化するためであると説明されている。また、Palka (1999) は、70 °C 以上で筋線維の結合度合いが低下することを示した。さらに、筋線維を包み込む結合組織であるコラーゲンの構造変化がこの原因であることを電子顕微鏡観察により確認している。

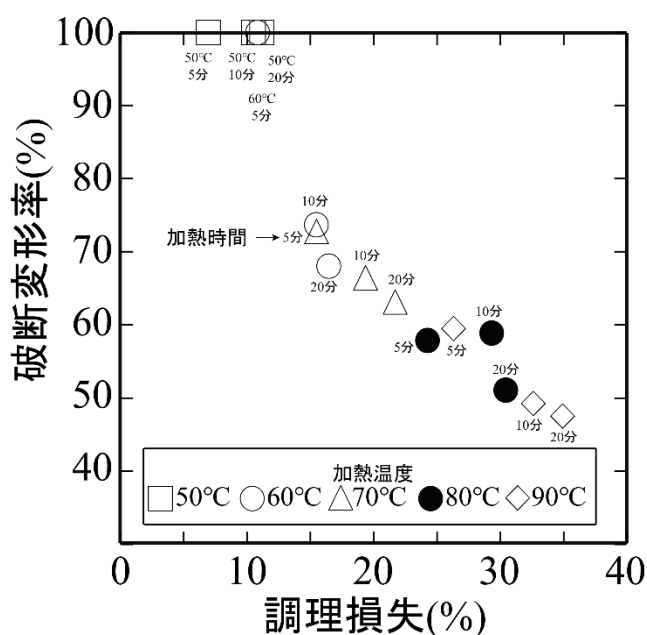


図 29 調理損失と破断変形率 (%)

これらの先行研究から，図 27 において，60 °C以上の加熱で確認される破断変形率の減少は，結合組織のコラーゲンが変性したことによる機械的強度の低下と考えられる．機械的強度の低下は，圧縮に対して結合組織が破断しやすくなり，筋線維の接着が切れ，解れやすくなったためと思われる．この破断変形率の変化は，加熱した食肉の「噛み切りやすさ」に影響すると考えられる．

(b)変形率 50 %における破断荷重 (N)

図 30 に調理損失と変形率 50 %における破断荷重の関係を示す．調理損失が増加するほど，変形率 50 %における破断荷重が増加することが読み取れる．また，加熱温度および加熱時間が増加するに伴い，破断荷重も増加する傾向が確認できた．変形率 50 %における破断荷重の増大は，筋線維タンパク質が熱変性・収縮による硬さの増加が原因であると考えられる．この硬さの増加傾向は，いくつかの先行研究と一致する．Lepetit et al. (2000) の報告によれば，加熱温度の上昇に伴い，破断力が増加する．そして，Palka(1999) は 50～80 °Cの温度帯の加熱温度の上昇に伴う硬さの増大の原因は，ミオシン，アクチンで構成される筋線維の熱収縮であると説明している．さらに Martens et al.(1982) は，筋原線維を構成するミオシンは 40～60 °C，アクチンは 66～73 °C の温度帯で熱変性し，収縮することを示した．また，Lepetit et al.(2000) の報告では，60 °Cを超える加熱温度では，ミオシン，アクチンの収縮が大きいほど，コラーゲンもより熱による収縮が大きくなり，破断荷重が増加することを確認している．これらの先行研究と同様に加熱温度の上昇に伴い増加傾向を示すのが，破断特性における変形率 50 %での破断荷重である．よって，本研究では，変形率 50 %での破断力を，加熱した試料の「硬さ」の指標と捉えることができると考えられる．

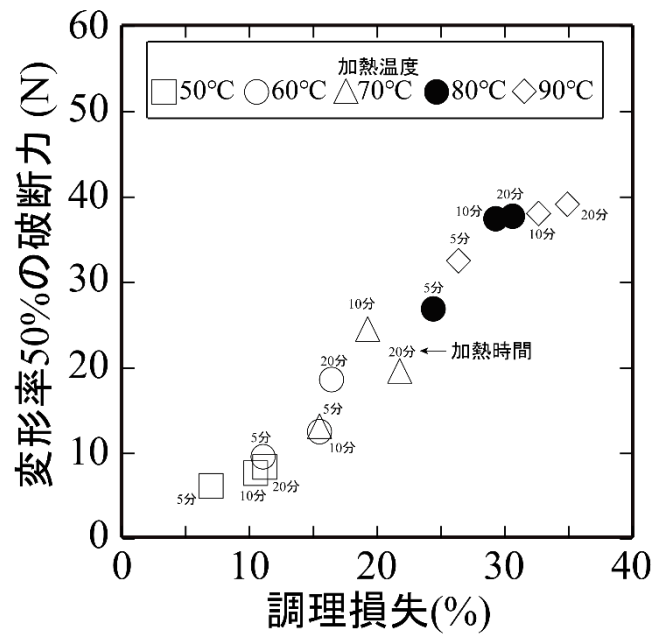


図 30 調理損失と変形率 50 %における破断荷重

4.4 実験 2：間欠加熱での加熱された食肉の電気インピーダンス特性

4.4.1 試料中心温度と電気インピーダンス特性

図 31 に，加熱時間と試料中心温度の関係を示す．試料中心温度は加熱開始から 3 分後にかけて最も急激に上昇した．その後，試料を取り出し，各項目の計測（2 分間）した後，再び試料を真空パックに封入し，加熱を再開するという操作を繰り返した．総加熱時間が 6 分を超えると，試料の中心温度はほぼ一定となった．総加熱時間 6 分以上において，恒温水槽の設定温度と試料中心温度に 5 °C 程度の差があるのは，各項目を計測する 2 分間のうちに中心温度が低下するためである．

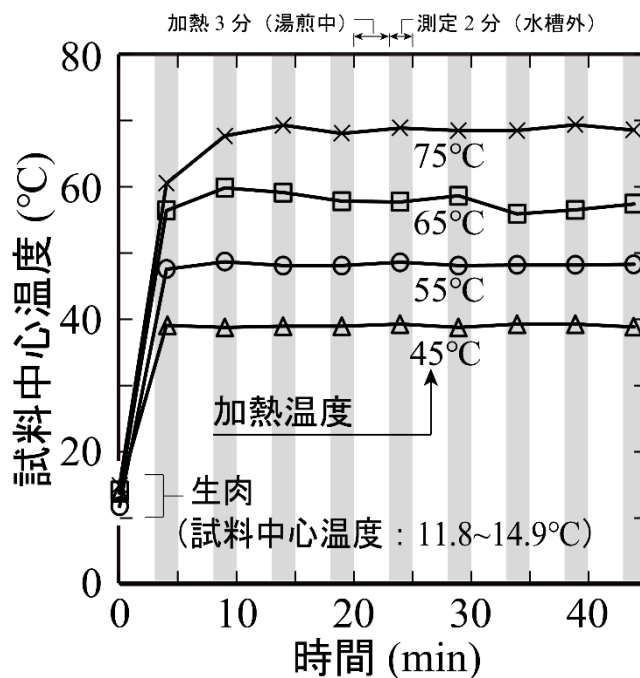


図 31 加熱時間と試料中心温度の関係

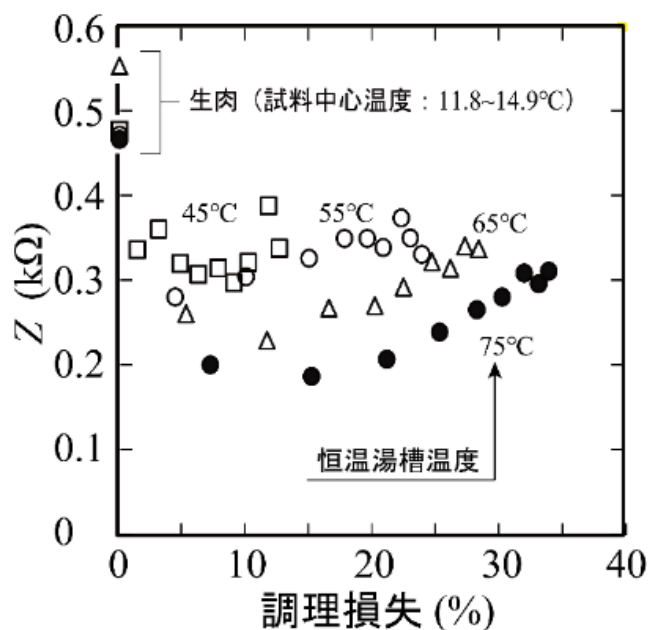


図 32 調理損失と加熱直後の電気インピーダンス値(周波数 250 Hz)

図 32 に調理損失と加熱直後の電気インピーダンス値(周波数 250 Hz) の関係を示す。加熱前の試料の電気インピーダンス値は 400 \square から 600 \square を示した。その一方で、調理損失が 0~10 % の範囲、すなわち加熱初期において電気インピーダンス値が急激に減少した。この加熱前から加熱初期の電気インピーダンス値の減少傾向は恒温水槽による加熱温度が高いほど顕著であった。すなわち、調理損失以外に試料自体の温度が電気インピーダンス値に影響を与えていることが予想される。また、調理損失が 10 % 以上において電気インピーダンス値は増加する傾向を見せた。このときの総加熱時間は 6 分以上であり、中心温度は一定値を示している段階である。すなわち、この段階で見られる電気インピーダンス値の増加は温度以外の要因が関係していると考えられる。

図 33 に総加熱時間 15 分の各試料の Cole-Cole プロットを示す。この Cole-Cole プロットでも、2 つの円弧が繋がった軌跡が確認できる。これは図 4 でも説明した通り、1 つは 100 Hz から 100 kHz の低周波帯に見られ、電極-試料界面における電気二重層に起因する α 分散の円弧であり、2 つ目は 100 kHz から 1 MHz までの高周波帯に見られる細胞構造に起因する β 分散の円弧であると考えられる。この図 33 の Cole-Cole プロットの変化を説明した図を図 33 に示す。図 34 のように α 分散および β 分散の 2 つの円弧径は、試料の中心温度が上昇するに従い、減少する傾向を示した。これは細胞外液抵抗 R_e および細胞内液抵抗 R_i

が中心温度の上昇に伴い、減少しているためである。総加熱時間が長くなるに伴い、低周波帯の α 分散の円弧径は、ほとんど変化しなかった。その一方で、高周波帯の β 分散の円弧径は増大した。 β 分散の円弧径増大は図 17 で説明した調理損失の増加に伴う細胞外液抵抗 R_e の増大であると考えられる。この実験 2 より以下の 2 つの変化が電気インピーダンス特性に影響していると考えられる。

- (a) 総加熱時間の増加にともなう調理損失の増大によって β 分散の円弧径、電気インピーダンス値、細胞外液抵抗 R_e が増大する。
- (b) 試料の中心温度の上昇によって、 α 分散および β 分散の円弧径、細胞外液抵抗 R_e および細胞内液抵抗 R_i が減少する（温度依存性）。

(a) の現象は試料自体の調理損失および破断特性の物性との関係性があると考えられる。そこで、これらの傾向を確認するために、実験 2 で加熱した試料を冷却した電気インピーダンス特性を測定し、温度依存性の影響を取り除き、調理損失および破断特性との関係を考察することとした。

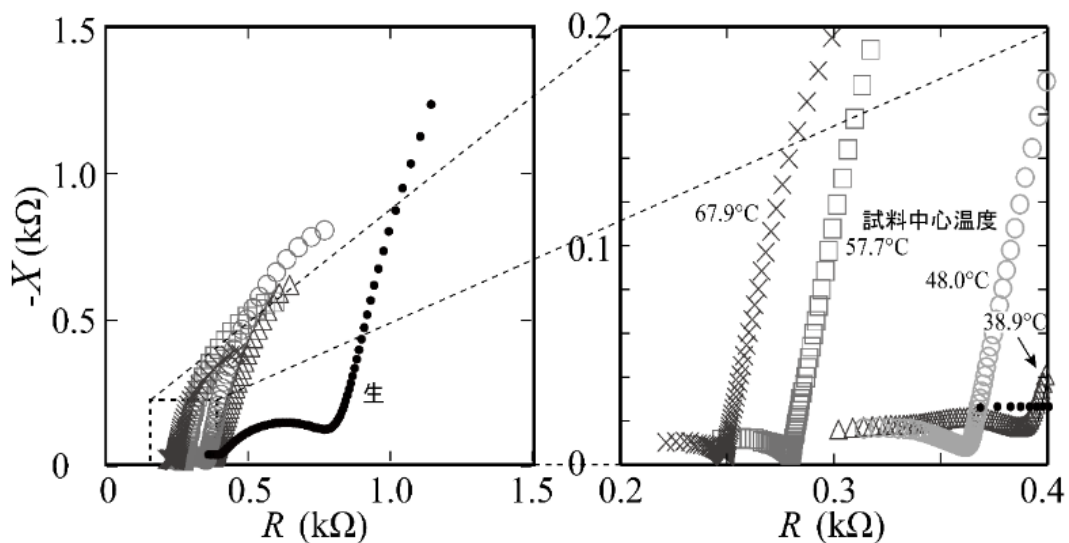


図 33 総加熱時間 15 分の各試料の Cole-Cole プロット

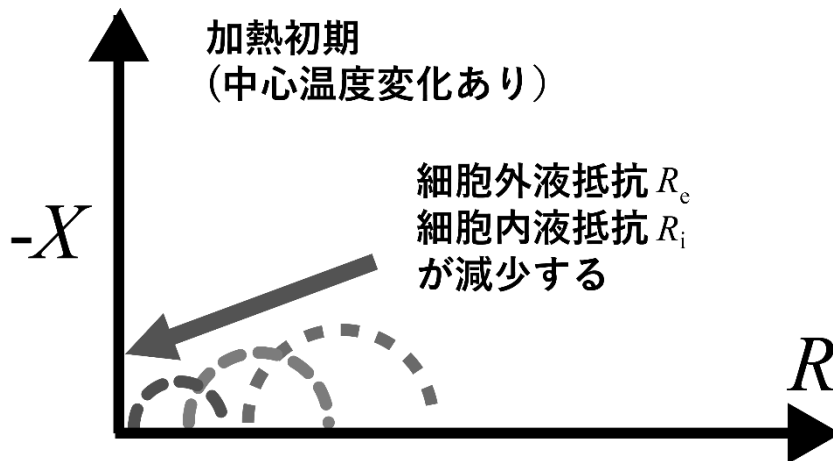


図 34 中心温度が変化した場合の Cole-Cole プロットの変化

4.4.2 温度補正した電気インピーダンス特性による調理損失および破断特性の推定

図 26 に示した調理損失と電気インピーダンスの関係は、実験 1 のように、加熱直後に冷却した試料という条件下、すなわち、電気インピーダンス測定時の試料温度が同じ場合に成り立つと考えられる。

一方、実験 2 のように、試料温度が異なる場合は、図 34 に示した試料の中心温度の上昇に伴う電気インピーダンスの減少の影響を受けるため、図 26 に示した調理損失と電気インピーダンスの相関関係は確認できない。このような試料温度による食肉の電気インピーダンス特性への影響は、先行研究においても報告されている。Zell et al. (2009), Sarang et al. (2008) は、測定環境の気温が上昇するに伴って筋肉の電気伝導性が高くなったことを報告している。鎌田ら (2014) は、牛肉の脂肪含量測定においても気温や湿度といった測定環境が影響を与えていると考察している。このように本実験の試料の温度変化ほどの大きな変化ではないにもかかわらず、測定環境や試料の温度が電気インピーダンス特性に影響を与えていることが先行研究において報告されている。また、小宮ら (2011) は豚肉の電気インピーダンスが試料温度と負の相関があり、温度係数 $-2.6 \sim -1.6 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ 、酒本 (1995) は濃度 0.9 \% の生理食塩水の温度係数と同等の $-2 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ であることを確認した。そこで、本研究では、これらの先行研究より、温度係数を利用するこ

とで、加熱直後の電気インピーダンス特性から温度の影響を取り除き、調理損失や破断特性による電気インピーダンス特性の変化を得ることを試みた。温度と電気インピーダンスの関係式は、一般的な電子部品の抵抗素子の温度係数をもとに、以下のように定義した。

$$Z_{CL} = Z_t - Z_s \quad (5)$$

$$Z_s = Z_{raw}(1 - 0.02(T - T_{raw})) \quad (6)$$

実測した加熱前の試料の電気インピーダンス Z_{raw} から、温度係数 $-2\%/^{\circ}\text{C}$ を利用して各温度における電気インピーダンス基準値 Z_s を算出した。その基準値 Z_s と実際に計測された電気インピーダンス Z_t の差を Z_{CL} と定義した。この Z_{CL} から試料の加熱進行度合い（調理損失および破断特性）を推定することが可能であると予想した。

図 35 に調理損失 CL (%) と電気インピーダンス値 Z_{CL} の関係を示す。調理損失が増加するに伴って、電気インピーダンスが増加していることが確認でき、調理損失と高い相関関係にあった（相関係数

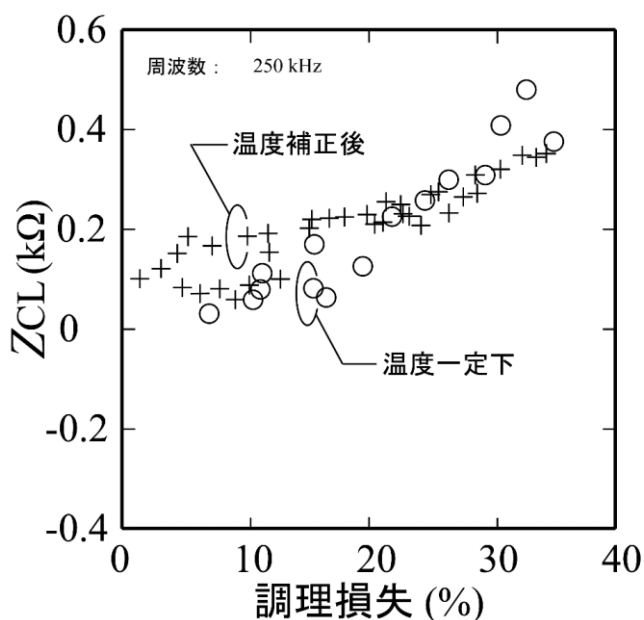


図 35 調理損失と電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)

0.8513). '+' のプロットは実験 2 において図 32 に示した加熱直後に計測された電気インピーダンスを Z_t として、式 (6) を用いて温度補正を行った Z_s を用いて算出した Z_{CL} である。'o' のプロットは実験 1 において、加熱後に冷却された試料電気インピーダンス Z_t と、温度補正を行わず Z_s に Z_{raw} を代入して算出した Z_{CL} である。

図 35 の結果から，いずれの場合も，調理損失の増加に伴い， Z_{CL} の増大が確認された．また，加熱直後に温度補正を行って算出した Z_{CL} は，冷却後の一定温度の場合と，同程度の値を示した．このことから，試料の内部温度や加熱前の試料の電気インピーダンス特性を測定し，温度補正を行うことにより，冷却後の一定温度の場合と同様の電気インピーダンス Z_{CL} を算出可能であることが示された．

そこで，温度補正した電気インピーダンス特性を説明変数，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．その結果として電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と調理損失との関係を図 36，破断変形率との関係を図 37，変形率 50 %の破断力との関係を図 38 に示す．いずれも決定係数が 0.84 以上と高い値を示した．このことから試料中心温度と電気インピーダンス特性によって，電気インピーダンス値 Z_{CL} を算出することで加熱調理中の調理損失および破断特性を推定できることが示された．そして，電気インピーダンス Z_{CL} が調理損失に伴って増加することから，これを利用することで調理損失や破断特性などの物性を推定できる．

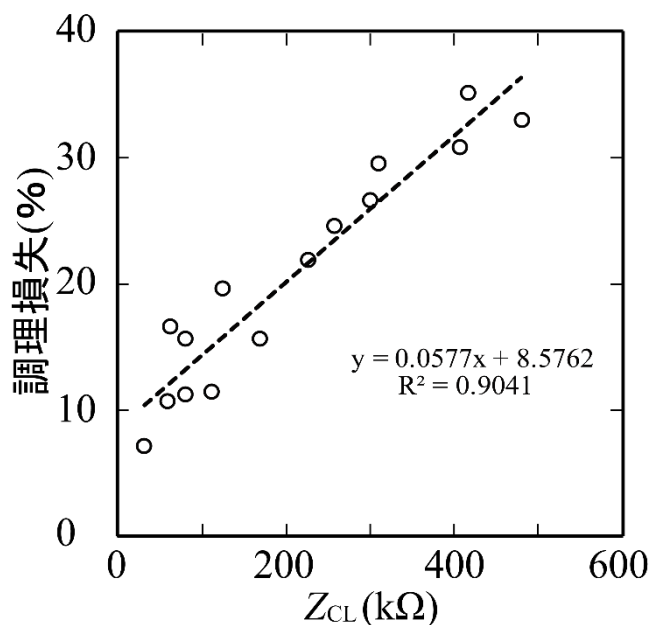


図 36 電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と調理損失

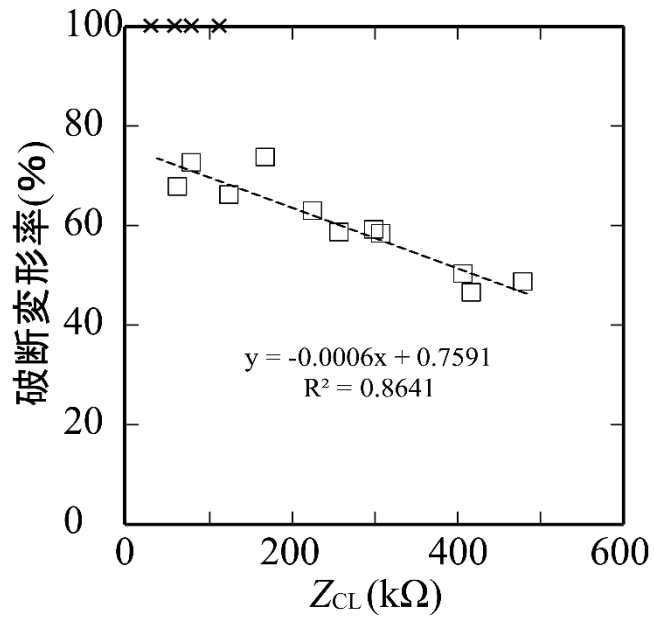


図 37 電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と破断変形率

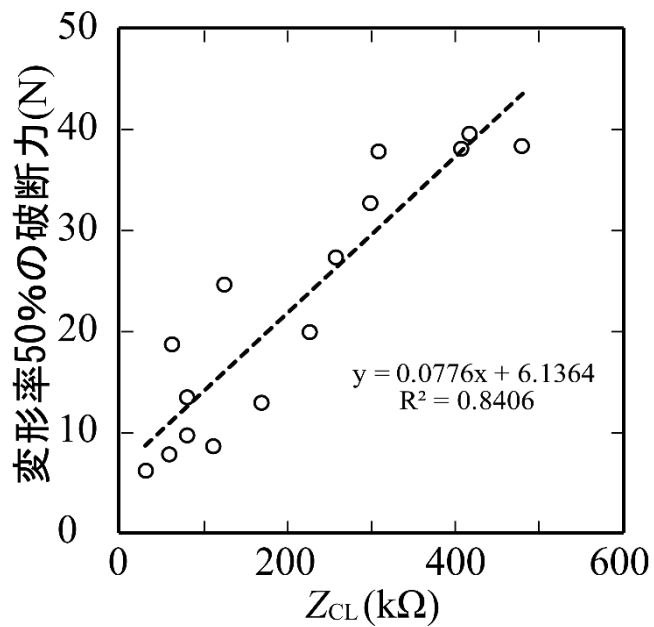


図 38 電気インピーダンス値 Z_{CL} (周波数 250 kHz)と変形率 50 % の破断力

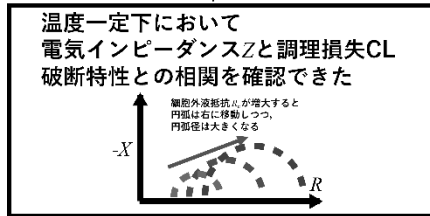
4.5 まとめ

第 4 章では、2 つの実験を実施し、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た。この大まかな流れを図 39 に示した。実験 1 の温度一定下での加熱された食肉の電気インピーダンス特性は加熱後、冷却した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確認した。破断特性は加熱前から加熱温度 50 度と加熱温度 60 °C 以上ではまったく異なり、この破断特性における 2 つの特徴量によって表現できることを確認した。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定義した。変形率 50 % の破断荷重の増加は主にミオシンとアクチンといった筋線維タンパク質、破断変形率は筋線維を繋げるコラーゲンといった結合組織の熱変性の温度帯と関係があった。加熱後、冷却された試料の周波数 250 kHz 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があった。

実験 2 の間欠加熱での加熱された食肉の電気インピーダンス特性では試料中心温度を変化させながら、電気インピーダンス特性の変化を確認した。その結果、試料中心温度が 1 °C 上昇するに伴い、電気インピーダンス特性は 2 % 減少することが確認できた。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ためである。そこで、温度補正した電気インピーダンス特性を説明変数、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、いずれも決定係数が 0.8 以上の値を示した。このことから試料中心温度と電気インピーダンス特性によって、加熱調理中の調理損失および破断特性を推定できることが示された。

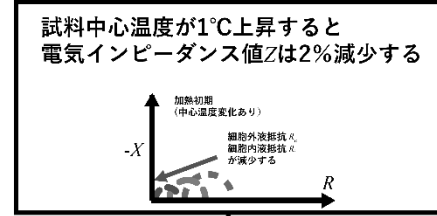
実験1 「一定温度下における加熱された食肉の電気インピーダンス特性」

↓ 実験結果



実験2 「間欠加熱における間欠加熱での加熱された食肉の電気インピーダンス特性」

↓ 実験結果



加熱過程の食肉の電気インピーダンスから調理損失 CL と破断特性が推定するためには試料中心温度で温度補正する必要あり

温度補正した電気インピーダンス値 Z_{CL} から調理損失、破断変形率、破断率50%の破断力を精度よく推定可能

図 39 中心温度が変化した場合の Cole-Cole プロットの変化

第5章 結論

本研究では，電気インピーダンス法の利用による加熱工程における食肉の調理損失および破断特性の評価法を提案した．第3章では電気インピーダンス特性に等価回路 Hayden モデルをフィッティングし，調理損失との関係を説明した．第4章の実験1では温度一定下で加熱中の豚ひれ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た．実験2では加熱直後の試料の電気インピーダンス特性と試料中心温度の関係を示し，温度補正することで，加熱中の食肉の電気インピーダンスから調理損失，破断特性の評価できることを示した．その結果，以下が明らかとなった．

(1) 加熱された電気インピーダンス特性に Hayden モデルを適用した場合に算出される細胞外液抵抗 R_e は調理損失と強い正の相関を示す．

(2) 加熱後，冷却された試料の 250 kHz の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が確認された．(相関係数は，変形率 50 %における破断荷重(N)と 0.8595，破断変形率 (%) と 0.790) これは加熱により熱変性したタンパク質が調理損失を発生させることで電気インピーダンス値の変化として捉えられたと考えられる．

(3) 電気インピーダンス値を決定する支配的な要因である細胞内外液は電解質を含んだ液体であるため， $-2\%/^{\circ}\text{C}$ の温度係数で試料の電気インピーダンス値は変化する．試料中心温度を用いて温度補正することにより算出される電気インピーダンス Z_{CL} は，調理損失，破断変形率，破断変形率 50 %の破断力と高い相関関係にあり，回帰分析を実施したところ，決定係数 0.84 以上と精度よく推定できることを示した．

以上の結果から，本稿では，食肉の電気インピーダンス特性と中心温度を測定することにより，調理損失および破断特性を推定できることを示した．これらの実験結果を踏まえて，電気インピーダンス法を用いて加熱過程の食肉の品質評価に対する今後の課題を述べる．

本研究では真空パックに封入した状態で湯煎による加熱を行う真空調理での実験であった．しかし，加熱した鉄板上やフライパン，オーブンなどでの加熱における問題点もある．真空調理の場合，ある一定時間から試料は湯煎時の加熱温度と同じ温度となり，一定となるが，一般的な加熱方法では試料よりも加熱器具の温度は高温であり，試料

と加熱器具が接する表面から内部にかけて、不均一な温度勾配が発生する。そのため、温度補正する際に試料の中心温度では、適切な温度補正ができない可能性がある。そのため、特定の領域のみの電気インピーダンス値を測定することを目的とした電極配置、形状の設計が必要である。

また、試料の温度により β 分散における細胞外液抵抗 R_e および細胞内液抵抗 R_i の減少を説明したが、温度上昇に伴う α 分散の円弧径の減少、つまり電荷移動抵抗 R_{ct} の減少が確認できた。この電荷移動抵抗 R_{ct} の変化から試料内部の温度を推定することも可能ではないかと考えている。

そして、食肉の部位、保存期間(熟成期間)によつての電気インピーダンス特性の違いである。まず部位や保存期間によつて徐々にタンパク質の等電点である pH5.0 に近づいていき、保水力が低下して、より多くの調理損失が発生することが報告されている。加熱前の下処理として食塩添加、pH を等電点から離れるように調整することで、タンパク質の熱変性の収縮を抑え、調理損失を減らすことができる。本研究では、電気インピーダンス特性と pH の関係については言及していないが、調理損失および破断特性を決定する要素として pH は重要な物理量であり、食肉の pH と電気インピーダンス特性との関係について調査すべきである。また、本研究では試料に挿入して使用する針状電極を用いたが、理想は試料を傷つけず接触により安定して計測できる電極の開発が必要である。しかしながら、上記の課題がありながらも本研究には掲載していないが、実際に調理器具に電極を取り付けることで、加熱中に電気インピーダンス値を計測した実験を実施し、試料中心温度にて温度補正を実施することで調理損失および破断特性を連続的に推定できることは確認しており、非常に有用な評価方法である。

謝辞

本論文は著者が筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻音響システム研究室に所属していた際に実施した研究成果をまとめたものです。

指導教員である筑波大学システム情報系知能機能工学域 教授 水谷孝一先生には、外部研究室から見学に来た私に対し、入学前の入試対策から現在まですべて水谷先生のご指導ご指導の賜物と深く感謝しております。研究における実験の創意工夫、学会発表でのプレゼンの極意、論文構成のご指導は勿論、ティーチングアシスタントやリサーチアシスタント、大規模な研究室運営、さらにデュアルディグリープログラム(DDP)による同研究科社会工学専攻への進学も後押ししてくださいました。これは他研究室では体験できないことばかりで、非常に充実した学生生活でした。このような機会を与えてくださったことに対し、感謝の気持ちを言葉では言い尽くせません。

筑波大学システム情報系知能機能工学域 准教授 若槻尚斗先生には、副指導教員として本研究を進める上で貴重なご意見を頂きました。若槻先生には、「なぜ」を突き詰めるという本質探究、学問の楽しみ方を教えていただきました。ここに深く感謝申し上げます。

筑波大学システム情報系知能機能工学域 助教 前田祐佳先生には、副指導教員として、研究発表や論文執筆でのきめ細やかなご指導をいただきました。前田先生には博士後期課程進学に悩んでいた私に後押しする言葉を送っていただいたことを今も覚えており、今の私があります。ここに深く感謝申し上げます。

筑波大学 システム情報系知能機能工学域 准教授 海老原格先生には、研究の理論展開、論理的思考でご指導いただきました。私の質問に対する海老原先生の明解かつ論理的な回答にはいつも驚かされ、本質探究、研究との向き合い方をご指導いただきました。

筑波大学システム情報系知能機能工学域 助教 善甫啓一先生、筑波大学生命環境系 教授 北村豊先生、農業・食品産業技術総合研究機構萩原昌司様には、本論文を執筆するにあたり、専門的な見地から様々なご指摘・ご助言をいただきました。本論文および発表内容に関してご指導いただきましたことに深く感謝いたします。

音響システム研究室、通信システム研究室、生体計測システム研究

室，知覚拡張システム研究室の皆様とは，衣食住を共にする大家族のように一緒に研究室生活を過ごしました．博士後期課程では，黒山喬允氏，青柳将史氏，川岸卓司氏，青木拓也氏，千葉裕介氏，藤井郁香氏，小木曾里樹氏，宮本隆典氏，中林大樹氏といった非常に優秀な皆様と切磋琢磨できた時間は一生の財産になりました．特に同期であった安立隆陽氏，角間孝一氏とは，よくご飯を食べながら，研究課題について共に向き合い，悩み，楽しんでいたことを思い出します．

本研究室の卒業生である野呂瀬葉子博士にはデュアルディグリープログラムでの副専攻への進学においてご助言をいただき支えていただきました．野呂瀬博士なしでは，修士（社会工学）修了することはできませんでした．大変感謝しております．

安藤泰雅博士には，筑波大学大学院進学前の研究計画，進学後のゼンマークでの国際会議，査読論文の添削まで何から何まで大変お世話になりました．私は非常に手のかかる後輩であったと思います．安藤博士がいなければ，現在の私はおりません．

最後に，好奇心のまま自由奔放に生きる私を気遣い，長年に渡り支えてくれた母，祖母，そして妻に対し，心から感謝します．ありがとう．

参考文献

- [1]安藤泰雅・藤田務・甘利奈緒美・海老原格・水谷孝一・若槻尚斗：
電気インピーダンス法を用いる玄米の含水率計測およびカビ発生
の検出，電気学会論文誌 A，133(12)，2013. 630-635.
- [2]Ando, Y.Mizutani, K. and Wakatsuki, N. : Electrical impedance
analysis of potato tissues during drying, Journal of Food
Engineering, 121, 2014. 24-31.
- [3]Ando, Y., Maeda, Y., Mizutani, K., Wakatsuki, N., Hagiwara,
S. and Nabetani, H. : Impact of blanching and freeze-thaw
pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in
cell membrane function and cell wall structure, LWT-Food Science
and Technology, 71, 2016. 40-46.
- [4]Asami, K. and Yonezawa, T. : Dielectric behavior of wild-type yeast
and vacuole-deficient mutant over a frequency range of 10 kHz to 10
GHz, Biophysical Journal, 71, 1996. 2192-2200.
- [5]Bohuslavek, Z : Estimation of beef carcass conformation carried out at
a high-performance abattoir line and based on an impedance method,
Czech Journal of Animal Science, 47(4), 2002. 155-159.
- [6]CHENG, CHIN-SHENG, and F. C. Parrish Jr. : Heat-induced changes
in, myofibrillar proteins of bovine longissimus muscle., Journal of
Food Science, 44(1), 1979. 22-24.
- [7]Christensen, M., Ertbjerg, P., Failla, S., Sanudo, C.,
Richardson, R.I., Nute, G.R., Olleta, J.L., Panea, B.,
Alberti, P., Juarez, M., Hocquette, J.F. and Williams, J.L. :
Relationship between collagen characteristics, lipid content and raw
and cooked texture of meat from young bulls of fifteen European
breeds, Meat Science, 87, 2011. 61-65.
- [8]Damez, J.L., Clerjon, S., Abouelkaram, S. and Lepetit, J. :
Dielectric behaviour of beef meat in the 1-1500 kHz range :

- Simulation with the Fricke/Cole-Cole model, *Meat Science*, 77, 2007. 512-519.
- [9] Damez, J.L., Clerjon, S. : Meat quality assessment using biophysical methods related to meat structure, *Meat Science*, 80, 2008. 132-149.
- [10] Faes, T. J. C., Van der Meij, H. A., De Munck, J. C., & Heethaar, R. M. : The electric resistivity of human tissues (100 Hz-10 MHz), a meta-analysis of review studies. *Physiological measurement*, 20(4), 1999. R1.
- [11] 船田周・橋本康・津村光男 : 植物生体計測による水耕の研究(I) - 常時液相ならびに気液二相方式における蒸散の同定 -, *農業施設*, 8(1), 1977. 21-26.
- [12] Gimsa, J., Moller, T., Schnelle, T. and Fuhr, G. : Dielectric spectroscopy of single human erythrocytes at physiological ionic Strength : Dispersion of the cytoplasm, *Biophysical Journal*, 71, 1996. 495-506.
- [13] Hayden, R. I., Moyse, C. A., Calder, F. W. , Crawford, F. P., Fensom, D. S. : Electrical impedance studies on potato and alfalfa tissue. *Journal of Experimental Botany*. 20, 1969. 177-200.
- [14] 池田善郎 : インピーダンス CT による食肉の脂肪分布の測定, *農業機械学会関西支部報*, 74, 1993. 149-150.
- [15] 石渡奈緒美・福岡美香・為後彰宏・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, 2013. 19-28.
- [16] 鎌田丈弘・村元隆行 : 接触型電極を装着した LCR メータを用いたインピーダンス測定による牛肉中脂肪含量の推定, *日本畜産学会報*, 85 (2), 2014. 193-196.
- [17] 加藤宏郎 : 電気特性による食肉の品質判定, *農業機械学会関西支部報*, 82, 1997. 103-104.

- [18]小林彰人・水谷孝一・若槻尚斗：定温加熱過程における食肉の電気インピーダンス特性の変化，日本食品科学工学会，平成25年度関東支部大会講演要旨集，2013a. 23.
- [19]小林彰人・水谷孝一・若槻尚斗・前田祐佳：電気インピーダンス法による加熱過程の食肉物性モニタリング，日本食品科学工学会，第60回大会講演集，2013b. 3Ga4, 216.
- [20]小林彰人・水谷孝一・前田祐佳・若槻尚斗：電気インピーダンス特性による食肉の焼き目評価，日本栄養・食糧学会関東支部第93回シンポジウム・日本食品科学工学会平成26年度関東支部大会講演予稿集，2014. ポスター発表 35, 31.
- [21]小林彰人・水谷孝一・前田祐佳・若槻尚斗・安藤泰雅：加熱調理された食肉の複素インピーダンス計測における電極間距離の影響，農業環境工学関連5学会2015年合同大会，2015. ポスター発表，238.
- [22]小林彰人・水谷孝一・若槻尚斗・前田祐佳(2015)：複素インピーダンス計測による食肉加熱過程の中心温度推定，日本食品科学工学会平成27年度関東支部大会講演要旨集，2015. ポスター発表，23
- [23]Kobayashi, A., Mizutani, K., Wakatsuki, N. and Maeda, Y. : Changes of electrical impedance characteristic of pork in heating process, International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering (IPCBE), Food Engineering and Biotechnology IV, Copenhagen, Denmark, 60, 2013. 74-78.
- [24]小宮秀明・星野友紀・林達也：多周波インピーダンス法による筋肉内部温度の推定（豚肉を用いた基礎的検討），臨床スポーツ医学，28(1)，2011. 85-91.
- [25]Lepetit, J., Grajales, A. and Favier, R. : Modelling the effect of sarcomere length on collagen thermal shortening in cooked meat: consequence on meat toughness, Meat Science, 54(3), 2000. 239-250.

- [26] Lepetit, J., Sale, P., Favier, R. and Dalle, R. : Electrical impedance and tenderisation in bovine meat, *Meat Science*, 60(1), 2002. 51-62.
- [27] Lee, S., Norman, J.M., Gunasekaran, S., van Laack, R.M., Kim, B.C. and Kauffman, R.G. : Use of electrical conductivity to predict water-holding capacity in post-rigor pork *Meat Science*, 55, 2000. 385-389.
- [28] Macdonald, J. R. : Impedance spectroscopy. *Annals of Biomedical Engineering*. 20, 1992, 289-305.
- [29] Mahapatra, A. K., Jones, B. L., Nguyen, C. N., & Kannan, G. : Experimental determination of the electrical resistivity of beef. *Agricultural Engineering International, CIGR Journal*, 12(3-4), 2010. 124-128.
- [30] Martens, H., Stabursvik, E. and Martens, M. : Texture and colour changes in meat during cooking related to thermal denaturation of muscle proteins, *Journal of Texture Studies*, 13, 1982. 291-309
- [31] 前澤重禮・秋元浩一 : キュウリ果実の電気伝導度と低温障害の関係, *農業施設*, 27(3), 1996. 149-154.
- [32] 水上裕造・深山大介・澤井祐典・山口優一 : 粗揉工程における茶葉の電気インピーダンス解析, *日本食品科学工学会誌*, 53(2), 2006. 114-120.
- [33] Offer, G., Restall, D., and Trinck, J. : Water-holding in meat, *Recent Advances in Chemistry of Meat*, The Royal Society of Chemistry, London, 1984. 71-83.
- [34] 大羽和子 : 食べ物のおいしさを考える, *美味技術研究会誌*, 2005(6), 2005. 1-3.
- [35] Palka, K. : Changes in intramuscular connective tissue and collagen solubility of bovine *m. semitendinosus* during retorting, *Meat*

- Science, 53, 1999. 189-194.
- [36]Plaka, K., Daun, H.: Changes in texture, cooking losses, and myofibrillar structure of bovine M. semitendinosus during heating. Meat Science, 51, 1999. 237-243.
- [37]Pliquet, U., Altmann, M., Pliquet, F. and Schoberlein, L. : Py-a parameter for meat quality, Meat Science, 65, 2003. 1429-1437.
- [38]酒本勝之 : インピーダンス CT による生体内部温度イメージング, Medical Imaging Technology, 13(5), 1995. 696-702.
- [39]Sarang, S., Sastry, S.K. and Knipe, L. : Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating, Journal of Food Engineering, 87, 2008. 351-356.
- [40]シャープ株式会社.:「ウォーターオープン ヘルシオ AX-XA10」, <https://jp.sharp/range/products/axxa10/>, (最終閲覧日 : 2020年1月1日)
- [41]竹内龍三・豊田浄彦 : 電気インピーダンスによる炊飯過程のキャラクタライゼーション, 岐阜女子大学紀要, 29, 2000. 155-159.
- [42]豊田浮彦・小川学・中村正輝 : インピーダンス・トモグラフィの食品安全性評価への応用に関する研究. 農業機械学会誌, 64, 2002. 461-462.
- [43]豊田浄彦・本庄良章, 小川学 : インピーダンス・トモグラフィの食品安全性評価への応用に関する研究 (II), 農業機械学会誌, 66, 2004, 323-324.
- [44]Vaudagna, S.R., Sanchez, G., Neira, M.S., Insani, E.M., Picallo, A.B., Gallinger, M.M. and Lasta, J.A. : Sous vide cooked beef muscles : effects of low temperature-long time (LT-LT) treatments on their quality characteristics and storage stability, International Journal of Food Science & Technology, 37, 2002. 425-442.

- [45] Vaudagna, S. R., Pazos, A. A., Guidi, S. M., Sanchez, G., Carp, D. J., & Gonzalez, C. B. : Effect of salt addition on sous vide cooked whole beef muscles from Argentina, *Meat science*, 79(3),2008, 470-482.
- [46] Velazco, J., Morrill, J.L. and Grunewald, K.K. : Utilization of bioelectrical impedance to predict carcass composition of Holstein steers at 3, 6, 9, and 12 months of age, *Journal of Animal Science*, 77, 1999. 131-136.
- [47] Zell, M., Lyng, J.G., Cronin, D.A. and Morgan, D.J. : Ohmic heating of meats : Electrical conductivities of whole meats and processed meat ingredients, *Meat Science*, 83, 2009. 563-570.
- [48] Zoltowski, P. : On the electrical capacitance of interfaces exhibiting constant phase element behavior. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 443, 1998, 149-154.

論文目録

<学位請求申請に関連のある論文>

・査読付雑誌論文

- (J-1) 小林彰人, 水谷孝一, 若槻尚斗, 前田祐佳, 海老原格, 安藤泰雅: “加熱調理された食肉の電気インピーダンス特性と物性評価の関係”, 農業施設, 51(4), p.112-121, 2020.

・査読付国際会議論文

- (P-1) Akihito Kobayashi, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Yuka Maeda: "Changes of electrical impedance characteristic of pork in heating process", International Proceedings of Chemical, Biological & Environment Engineering (IPCBE), Food Engineering and Biotechnology IV, Copenhagen, Denmark, 60, p.74-78, 2013.

<その他の論文>

・査読なし国内講演会等における発表（筆頭著者としてのもの）

- (D-1) 小林彰人, 水谷孝一, 若槻尚斗: “加熱過程における食肉の電気的特性変化”, 日本食品科学工学会, 第59回大会講演集, 3Fp9, p.192, 2012.
- (D-2) 小林彰人, 水谷孝一: “誰でも簡単!電気でわかるステーキの焼き加減 -身近なアレにも使われている計測技術-”, 筑波大学雙峰祭大学院生学際研究フォーラム 2012 "院生プレゼンバトル" 発表予稿集, TGN2012-P-10-A, 2012.
- (D-3) 小林彰人, 水谷孝一: “電気インピーダンス法を用いる食肉の加熱調理モニタリング”, Proceedings of the 9th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 53, p.45, 2012.
- (D-4) 小林彰人, 水谷孝一, 若槻尚斗: “定温加熱過程における食肉の電気インピーダンス特性の変化”, 日本食品科学工学会, 平成25年度関東支部大会講演要旨集, D3, p.23, 2013.
- (D-5) 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格, 前田祐佳, 小林彰人: “電気化学特性を指標とした食肉の加熱調理モニタリング”, FOOMA JAPAN 2013 国際食品工業展, アカデミックプラザ研究発表要旨集, 20, pp.281-284, 2013.

- (D-6) 小林彰人, 水谷孝一, 若槻尚斗, 前田祐佳: “電気インピーダンス法による加熱過程の食肉物性モニタリング”, 日本食品科学工学会, 第 60 回大会講演集, 3Ga4, p.216, 2013.
- (D-7) 小林彰人, 水谷 孝一: “電気でわかるステーキの焼き加減”, 筑波大学雙峰祭大学院生学際研究フォーラム 2013 "院生プレゼンバトル" 発表予稿集, TGN2013-S-02, p.2, 2012.
- (D-8) 小林彰人, 水谷孝一, 前田祐佳, 若槻尚斗: “電気インピーダンス特性による食肉の焼き目評価”, 日本栄養・食糧学会関東支部第 93 回シンポジウム・日本食品科学工学会平成 26 年度関東支部大会講演予稿集, ポスター発表 35, p.31, 2014.
- (D-9) 小林彰人, 水谷孝一, 若槻尚斗, 前田祐佳: “複素インピーダンス計測による食肉加熱過程の中心温度推定”, 日本食品科学工学会平成 27 年度関東支部大会講演要旨集, ポスター発表, No. 23, p.23, 2015
- (D-10) 小林彰人, 水谷孝一, 前田祐佳, 若槻尚斗, 安藤泰正: “加熱調理された食肉の複素インピーダンス計測における電極間距離の影響”, 農業環境工学関連 5 学会 2015 年合同大会, ポスター発表, p238, 2015
- (D-11) 小林彰人, 水谷孝一, 若槻尚斗, 前田祐佳, 安藤泰正: “電気インピーダンスでわかるステーキの焼き加減”, SAT テクノロジー・ショーケース 2016, p90, 2016.

(A) その他(受賞歴等)

- (A-1) 小林彰人: “TYRW Best Award”, The 9th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop (27 November, 2012).
- (A-2) 小林彰人: “優秀ポスター賞”, 日本食品科学工学会平成 27 年度関東支部大会 (14 March, 2015)

社会工学専攻(DDP 副専攻での実績)

- (J-1) Akihito Kobayashi, Hironobu Kawamura: "Evaluation of the texture of wet rice crackers", Journal of Global Tourism Research, 1, 1, p 35 ~ p40, 2016.
- (P-1) Akihito Kobayashi, Hironobu Kawamura: "Food Texture Evaluation of Wet Rice Crackers "Nuresenbei", The 3rd International Workshop on Production and Logistics, 2015.