

一般論文

電気インピーダンス測定によるレトルトパウチ内の 食肉の熱変性過程の捕捉

久本 高央*、川井 清司**、羽倉 義雄***

Capturing the Thermal Denaturation Process of Meat in a Retort Pouch by Electrical Impedance Measurement

Takahiro KUMOTO*, Kiyoshi KAWAI** and Yoshio HAGURA***

本研究では、パウチ内の豚肉の熱変性に伴う状態変化の捕捉をインピーダンス測定により試みた。パウチに入れた豚肉を電極に挟みシリコンオイル中でそれぞれ 65°C、75°C、85°C、95°C で一定時間加熱した。処理前後のインピーダンスの値の差を $\Delta|Z|$ として表すことで、加熱強度に応じて $\Delta|Z|$ の値が大きくなっていることが示された。そこで、インピーダンスの測定と同条件で調製した各試料を DSC で熱容量を計測した結果、未変性のタンパク質が残ると考えられる 65°C 処理の試料では、他の試料に対してエンタルピーの値が大きく表れた。さらに、材料試験機を用いて各試料の硬さを測定したところ、未変性のタンパク質が残存すると考えられる、65°C で処理した試料のみ明瞭な降伏点が認められず、弾力に富む状態であることが示された。以上の結果から、インピーダンス測定により、パウチ内の食肉の加熱による状態の変化を捉えることができる可能性が示唆された。

In this study, we attempted to capture the state change of pork in the retort pouch due to thermal denaturation by impedance measurement. We sandwiched a retort pouch containing pork between electrodes, and heated it in silicon oil at 65°C, 75°C, 85°C, or 95°C in a stainless steel pan. The difference between the impedance values before and after heat treatment was expressed as $\Delta|Z|$. The results showed that the $\Delta|Z|$ increased with increasing temperature. Next, we measured the heat capacity of each sample by DSC (Differential Scanning Calorimetry). The enthalpy value was larger in the sample treated at 65°C, in which non-denatured protein was considered to remain, than in the other samples. In addition, to clarify the relationship between the actual texture of the meat and the $\Delta|Z|$, the hardness of each sample was measured using a material tester. Only the sample treated at 65°C did not show a clear yield point, indicating that it was highly elastic. The above results suggest that impedance measurements enable the determination of changes in the state of meat due to heating.

キーワード：レトルトパウチ、食肉、熱変性、電気インピーダンス、低温調理

Keywords : retort pouch, meat, thermal denaturation, electrical impedance, low temperature cooking

* 広島大学大学院生物圏科学研究科

** 広島大学大学院統合生命科学研究科

*** 連絡者 (Corresponding author), 広島大学大学院統合生命科学研究科 (〒739-8528 広島県東広島市鏡山 1-4-4), Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University (1-4-4 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8528), TEL:082-424-7938, FAX:082-424-7938, Email: hagura@hiroshima-u.ac.jp

1. 緒言

社会の発展と環境への配慮は反するものとして語られることが多い。この課題に対し、2015年に国連において、経済発展と環境保全を両立することを目標として、SDGs (Sustainable Development Goals) が採択された。一方、多くのレトルト食品の製造工程では、現在でも品質確認のためポイントピクによる状態確認、検品が行われており、1回の製造で数万食を製造する場合、数十個以上のサンプルが開封、検品され、廃棄されている。そこで、インピーダンス測定を利用し、未開封・非破壊による検品を即時且つ簡便に行うことが可能となれば、検品による廃棄を削減させ、さらに全数検査も可能となる。これはSDGsの目標のうち、製造者の責任として、廃棄食品の削減に寄与するものと考えられる。

食肉の加熱において、筋線維等を構成する様々なタンパク質は、各々の変性温度において熱変性が起こり、その構造を変化させるが、その変化は変性温度に達した際に瞬時に発生するものではなく、時間をかけて徐々に変化していく¹⁾。このことから、タンパク質の変性を捉えるためには、食肉の熱変性過程の変化を一定温度で長時間測定することで、熱変性の進行度を詳細に捕捉することができると考えた。そこで、低温で長時間加熱することで、食肉に含まれる一部のタンパク質のみを変性させ、特有の柔らかさを保ったまま調理する低温調理法に着目した。

低温調理とは主に食肉等をレトルトパウチ等の耐熱袋に入れ、比較的低温である60℃から70℃程度で長時間加熱することにより、食肉の柔らかさや旨味を損なわずに調理する手

法である²⁻⁴⁾。低温調理も含め食肉の加熱調理では、含まれる成分によって食肉中において様々な変化が起こる⁵⁾。その中でも大きな部分を占める反応がタンパク質の熱変性である。この熱変性は加熱調理の中心となるものであるが、複雑な反応で構成されており全容を明らかにすることは難しい^{6) 7)}。そこで本研究では、このタンパク質の熱変性の経時変化をインピーダンス測定により捉えることを試みた。

食品に対するインピーダンス測定は非破壊の計測手法として、電気物性計測⁸⁾に分類され、分光分析^{9) 10)}等とともに食品の内部の状態を把握する評価技術として広く利用されており、例えば、畜肉、魚介類の鮮度及び脂肪量の計測、農産物の品質評価などに電気インピーダンス法が用いられている¹¹⁻¹⁴⁾。しかし、インピーダンス測定により食肉の状態を捉えた研究は少なく、屠畜直後の枝肉の状態変化の研究^{15) 16)}や、食肉に直接電極を刺して加熱調理に伴う状態変化を評価した研究¹⁷⁾などが代表的なものである。また、包材の外部から食品の状態の変化を捉えた研究事例(レトルトパウチに封入した酵素処理牛肉の硬さの推定¹⁸⁾、非金属製容器内の食品の加工状態の推定¹⁹⁾など)はさらに少ない。

本研究は、前述の「インピーダンス計測によるレトルトパウチに封入した酵素処理牛肉の硬さの推定」¹⁸⁾に続く、インピーダンス測定を利用することにより、未開封・非破壊でパウチ内の食品の状態を捕捉する研究の一つである。本研究では、パウチ内の豚肉の熱変性に伴う状態変化を、パウチの外側からインピーダンス測定により捉えることを目的とし

た。豚肉をパウチに入れ一定温度（65℃、75℃、85℃、95℃）で長時間加熱し、パウチ内の豚肉のインピーダンスの経時変化をパウチの外側から測定した。併せて、インピーダンス測定と同条件で調製した試料に対して、DSC 測定及び材料試験機を用いた硬さの測定を行い、インピーダンスの変化とタンパク質の熱変性度及び硬さの関係を整理した。

2. 実験方法

2.1 パウチ入り豚肉試料の調製

試料には、スーパーマーケットで購入した未加熱の豚肉（国産、ヒレ肉）を使用した。試料に筋や脂肪が多く含まれていた場合、それらの構成成分（コラーゲンや脂質）の熱変化がインピーダンスの変化として検出されてしまうため、筋や脂肪の部分をトリミングし、赤身の部分のみを使用した。試料の厚さは微細な変化が捉えられる 5mm とし、切断面が筋線維と垂直となるようにスライスした。約 50g の豚肉を 100mm×100mm となるようにパウチに敷き詰めた (Fig.1)。さらに 2 枚の電極板（間隔 5mm）で挟み込むことで豚肉を均一な



Fig. 1 Photo of pork in a pouch

厚さに整えた (Fig.2)。本研究では、レトルトパウチ (NCF2-6、3 方シール袋、ナイロン 15 μ m/ポリプロピレン 60 μ m、120mm×200mm、カウバック株式会社、愛知県岩倉市) の開放部を切り取り、120mm×150mm の袋状にして使用した。レトルトパウチの外側中央部に温度測定用の熱電対を両面テープで張り付けた。豚肉の側面の温度と中心の温度は、今回の実験では同一とみなした。

2.2 インピーダンス測定装置

本研究で使用したインピーダンス測定装置の概略を Fig. 3 に示した。本装置は LCR メータ (3532-80、日置電機株式会社、長野県上田市)、平行平板電極 (縦 150mm×横 120mm×厚さ 2mm、ステンレス製 ϕ 6mm パンチング板、開孔率 40.2%)、ステンレス鍋、加熱用電熱器、記録用パソコンから構成されている。2 枚の電極板の 4 隅をテフロン製のスペーサ (高さ 5mm) で固定し、電極板間隔 5 mm の平行平板電極を作成した。ステンレス鍋にはシリコンオイル (KF-96-50CS、信越化学工業株式会社、東京都千代田区) を入れ、ステンレス鍋と電熱器にアース線を接続し、外部からのノイズを除去した。レトルトパウチに入れた

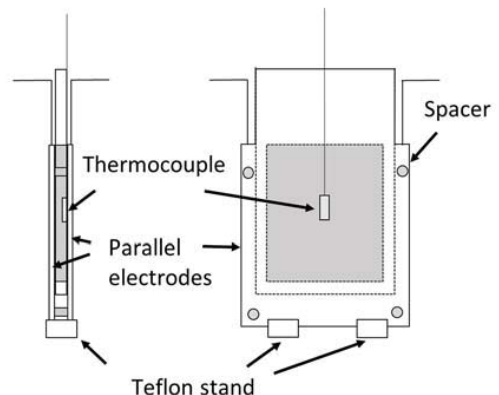


Fig. 2 Schematic diagram of electrodes and pouch

試料を電極板間に挟み込み、インピーダンス ($|Z|$; Ω) を測定した。LCR メータの測定値を LCR メータ付属のデータ測定用のサンプルプログラムを使用してパソコンに記録した。

2. 3 周波数固定による定温加熱処理豚肉のインピーダンス変化の連続測定

パウチに入れた豚肉試料を平行電極板間に挟み込み電極間の距離が一定になるよう整え静置し、インピーダンス ($|Z|$) の測定を測定間隔 30 秒で行った。測定周波数の設定では、測定値が安定し、且つ豚肉試料の変化が明瞭に現れた 24370Hz を選択した。電熱器を用いて目的の温度に達するまで加熱した後 6 時間温度を維持し、その後、電熱器による加熱を停止することで降温させた。本測定は約 25°C の実験室内で行った。各試料についてそれぞれ 3 回の測定を行った。

2. 4 DSC による定温加熱処理豚肉のエンタルピー変化の計測

インピーダンス測定に用いた定温加熱処理した豚肉をパウチから取り出し、示差走査熱量計 (DSC) により、この豚肉のエンタルピー変化の計測を行った。試料約 20mg をアルミ製耐圧パンに封入し、DSC (DSC-60Plus、株式会社島津製作所、京都府京都市) にセットした。DSC の温度校正には蒸留水およびインジウムを、熱量校正にはインジウムをそれぞれ用いた。基準物質には α -アルミナを用いた。本測定では温度範囲を 20~100°C とし、昇温速度を 5°C/min に設定した。試料の熱履歴が DSC 昇温曲線に及ぼす影響を調べるため、一定温度まで昇温測定 (1st スキャン) 後、5°C

まで冷却し、再び昇温測定 (2nd スキャン) した。各試料についてそれぞれ 3 回の測定を行い、得られた結果を DSC 付属のソフトウェア (LabSolutions TA、株式会社島津製作所、京都府京都市) によって解析した。

2. 5 定温加熱処理豚肉の硬さ測定

インピーダンス測定に用いた定温加熱処理した豚肉をパウチから取り出し、この豚肉の硬さの測定をプランジャー貫入試験により行った。プランジャー貫入試験では、小型の材料試験機 (EZ-SX、株式会社島津製作所、京都府京都市) を用いた。材料試験機のロードセル (感圧部) に直径 5mm の円柱形のプランジャーを取り付け、10mm/min で試料のスライス面 (試料の筋線維方向) にプランジャーを貫入させた。各試料についてそれぞれ 10 回の測定を行った。荷重-変位曲線から降伏点に達するまでの面積を算出し、弾性ひずみエネルギーとして試料の硬さの評価に使用した。得られた結果は材料試験機付属のソフトウェア (TRAPEZIUM X、株式会社島津製作所、京都府京都市) によって解析した。

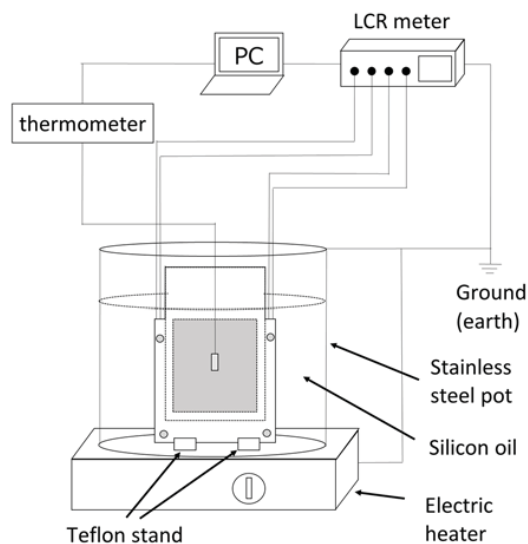


Fig. 3 Schematic diagram of impedance measuring

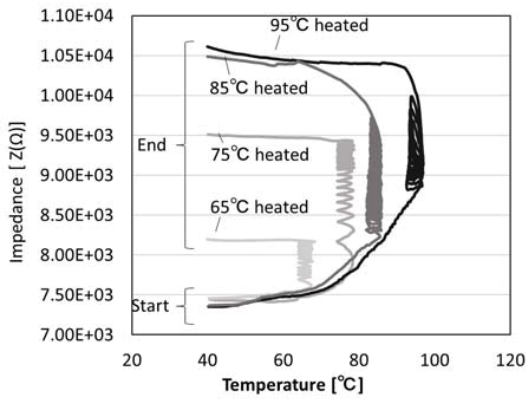


Fig.4 Impedance comparison at each processing temperature over time

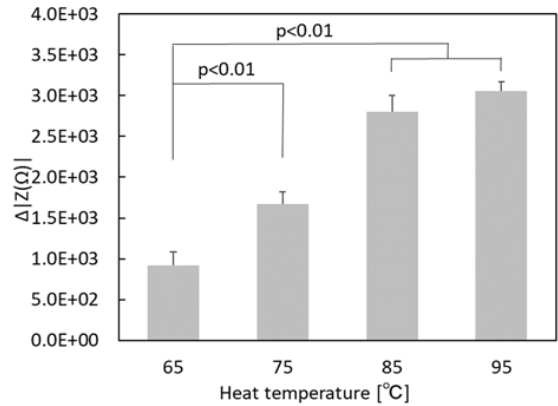


Fig.5 $\Delta|Z|$ comparison at each processing temperature (n=3)

2. 6 統計処理

有意差検定 (t 検定)、及び相関係数の検定には Microsoft 365Apps (Excel) を使用した。

3. 実験結果および考察

3. 1 定温加熱処理豚肉のインピーダンス ($|Z|$) の経時変化

パウチに入れた豚肉試料をステンレス鍋のシリコンオイル中に静置し、24370Hz におけるインピーダンス ($|Z|$) の経時変化を測定した。測定では常温から加熱を開始し、設定温度 (65°C、75°C、85°C、95°C) に達した後、設定温度で 6 時間維持し、その後冷却した。

インピーダンスの測定結果の一例を Fig.4 に示す。65°C で処理した試料では、65°C に達温したのちに時間の経過とともに少しずつインピーダンスが上昇したが、ある程度の値で上昇は鈍化した。75°C、85°C、95°C の試料においても、設定の温度に達温した後インピーダンスは 65°C で処理した試料と同様に徐々に上昇し、この上昇の幅は処理温度が高くなるほど大きくなった。物質の電気物性は測定温度依存性がある。そこで、加熱処理前と加熱処

理後の 40°C でのインピーダンスの差を $\Delta|Z|$ とし処理温度によるインピーダンスの増加の程度を評価した (Fig.5)。その結果、処理温度が高くなるに従い $\Delta|Z|$ は大きくなる傾向を示した。一般に食肉のインピーダンスは構成する細胞の劣化、破壊により低下する傾向があり²⁰⁾、食肉を酵素で処理した場合もインピーダンスは低下する¹⁸⁾ が今回の測定結果は逆の傾向を示した。上記の既往の研究では、インピーダンス低下の要因は、食肉の細胞の破壊やタンパク質の酵素分解であったが、本研究におけるインピーダンス増加の要因は、熱変性に伴うタンパク質の凝集と考えられる。

タンパク質は変性により電気伝導度が低下する、すなわちインピーダンスが上昇することが知られている²¹⁾。また、電極に対する筋線維の方向によりインピーダンスが変化することも報告されており^{22) 23)}、筋線維に対して平行に通電させた方が、垂直に通電するよりもインピーダンスは低下するとされる。これは、通電方向と筋線維方向が一致している場合、低インピーダンスの状態を示すが、熱変性により筋線維構造が凝集、変質することで、通電方向と筋線維方向との間に差異が生じた場合、インピーダンスが増加する可能性

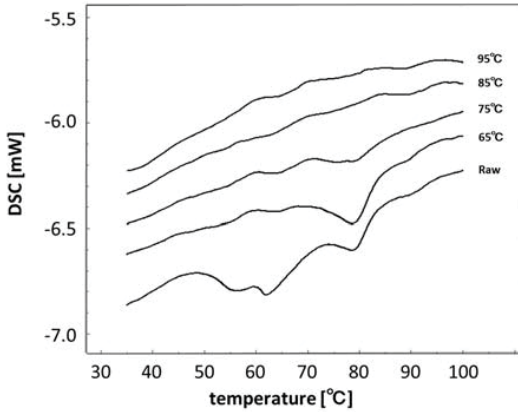


Fig.6 DSC measurement result

を示している。これらの結果から $\Delta|Z|$ は、食肉の熱変性の程度を示す可能性が示唆された。

3. 2 DSC による定温加熱処理豚肉の組成変化の測定

未加熱及び加熱処理（65°C、75°C、85°C、95°C）した豚肉試料について DSC 測定を行い、豚肉の加熱による変化について検討を行った（Fig. 6）。未加熱の試料では約 50°C からタンパク質の変性を示す吸熱反応が認められ、50~70°C の間で 2 山の大きなピークを示し 70~85°C の間に 2 つ目のピークが表れている（Fig. 6-Raw）。低温側の 2 山のピークは、40~60°C で変性するとされるミオシンと、55~65°C 程度で変性するとされる肉基質タンパク質（コラーゲン、エラスチン）に由来し、高温側のピークは、65~75°C で変性するアクチンに由来すると考えられる²⁴⁾。

一方、65°C で加熱処理した試料は 50~70°C のピークの大半が消失しており、ミオシンや肉基質タンパク質等の多くが変性済みであるが、70~85°C のピークは残っておりアクチン等の一部タンパク質は未変性であると考えられる。75°C で加熱処理した試料は 50~70°C のピークのほぼ全体と、70~85°C のピークの大

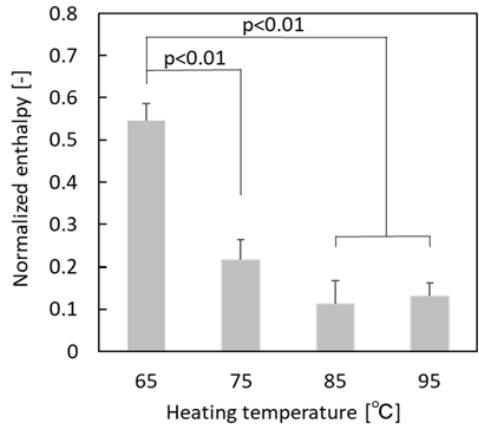


Fig.7 Enthalpy at each processing temperature normalized by the enthalpy of un heated sample (n=3)

部分が消失しており、アクチン等のタンパク質の一部がわずかに未変性で残っている状態と考えられる。85°C と 95°C で加熱処理した試料はほぼ全てのピークが消失している。

加熱処理温度（65°C、75°C、85°C、95°C）ごとに 40~100°C における吸熱反応のエンタルピーを算出し、未加熱試料のエンタルピーで除した結果（規格化エンタルピー）を Fig. 7 に示した。

65°C 処理試料の規格化エンタルピーは他の試料に対して大きな値を示し、処理温度の上昇とともに低下した。また、85°C と 95°C の間では有意な差は認められなかった。これらの結果からも、85°C の処理ですでに豚肉を構成するタンパク質はほぼ変性していると判断できる。

3. 3 加熱温度の違いによる豚肉の硬さ（破断エネルギー）の変化とインピーダンスの関係

DSC 測定により、低温調理で用いられる 60~65°C という温度帯では弾性線維である肉基質タンパク質の一部やアクチンが変性温度に達しておらず、故に低温調理の特徴である柔

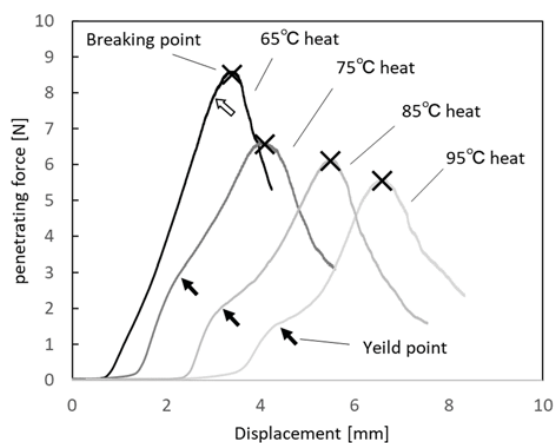


Fig.8 Load (penetrating force) - displacement curves of sample at each processing temperature

らかく弾力に富む食感を生み出していると考えられる。そこで、弾性線維やアクチンの変性状態を明らかにするため、各温度で処理した試料に対して材料試験機を用いて試料の貫入試験を行い、各試料の硬さ（破断エネルギー）の測定を行った。各試料の荷重－変位曲線の一例を Fig.8 に示す。

65°Cで処理した試料は顕著な降伏点が認められず、弾性を示す直線的な荷重の増加の後、ピークトップ（破断点、図中の×印）直前でわずかな降伏（図中の白抜き矢印）を示した後、直ちに試料の破断（プランジャーの貫入）

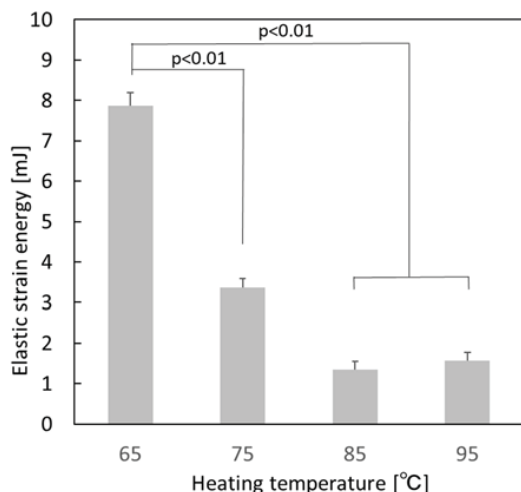


Fig.9 Elastic strain energy comparison at each processing temperature (n=10)

が起こった。75°Cで処理した試料では明瞭な降伏点（図中の矢印）が見られ、85°C、95°Cで処理した試料では降伏点が顕著に表れた。一般的な材料では、降伏点までは弾性的な変形を示し、荷重を除くと元の状態に戻る。降伏点を越えて荷重を加えると塑性変形が起こり、最終的には破断に至る。65°C処理の試料では破断点までの破断エネルギー（Fig.8の荷重－変位曲線の破断点までの面積）と弾性ひずみエネルギー（Fig.8の降伏点までの面積）がほぼ同じである一方、75°C、85°C、95°C処理の試料では、破断エネルギーに占める弾性ひずみエネルギーが小さく弾性に乏しい性質を示している。そこで、豚肉の力学的な物性の指標として弾性ひずみエネルギーに着目し、各処理温度での弾性ひずみエネルギーを整理した（Fig.9）。

65°Cで処理した試料は85°C、95°Cで処理した試料よりも有意に弾性ひずみエネルギーが大きいことがわかる。これは、65°Cで加熱した試料はコラーゲンやエラスチンなどの肉基質タンパク質が残り、アクチンが熱によって変性しておらず、弾性に富む状態であることを示している。ところが、85°C、95°Cで処理した試料では、肉基質タンパク質やアクチンなどの線維が不可逆的に変性するとされる温度よりも高い温度で処理しているため、それらに変質し弾力が失われ、弾性ひずみエネルギーが大きく減少している。

食肉の熱変性の程度を示す可能性が示唆された $\Delta|Z|$ と弾性ひずみエネルギーの関係をFig.10に示す。加熱処理温度が高い試料では $\Delta|Z|$ が大きくなり弾性ひずみエネルギーは小さくなる傾向を示し、 $\Delta|Z|$ と弾性ひずみエネルギーに負の相関があることが明らかになっ

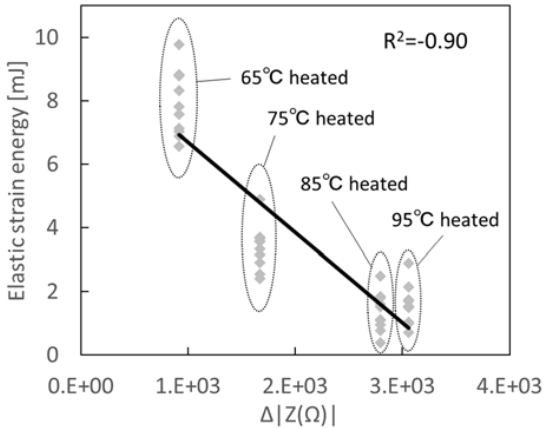


Fig.10 Correlation diagram of $\Delta|Z|$ and elastic strain energy (n=10)

た。これは、加熱強度が増加するほど、弾性ひずみエネルギーが減少する傾向を示し、弾性線維やアクチンの変性が進行していることを示すものである。

実験に使用した豚ヒレ肉は筋や脂肪をトリミングし、ほぼ筋線維のみから構成されている。筋線維は加熱によりまず 45~60°C で線維軸に対して垂直方向に、60~90°C では線維軸に対して平行に収縮が起こる²⁵⁾。材料試験機を用いた硬さ測定では、筋線維に対し平行にプランジャーを貫入させたため、測定される弾力性に大きく関与するのは筋線維方向に対し平行に起こる収縮であると考えられる。そのため、65°C から処理温度が高くなるに従い筋線維方向の収縮度合いは大きくなり、次第に弾力が失われる結果となったことが推察される。これらが要因となり、 $\Delta|Z|$ と弾性ひずみエネルギーが負の相関を示したと考えられる。

4. 結論と今後の課題

加熱処理した試料のインピーダンス測定では、加熱強度の増加に伴い、 $\Delta|Z|$ (加熱処理前後のインピーダンスの差) が大きくなった。すなわち、 $\Delta|Z|$ がパウチ内の食肉の変性の程

度を示す可能性が明らかになった。そこで、DSC 計測により、加熱処理後に残存している未変性のタンパク質を定量した。その結果、加熱強度が増加する ($\Delta|Z|$ が大きくなる) に従い、未変性のタンパク質の割合が減少していることが明らかになった。次に、弾性線維やアクチンの変性状態を明らかにするため、試料の貫入試験を行った。その結果、加熱強度が増加するほど、弾性ひずみエネルギーが減少する傾向を示し、弾性線維やアクチンの変性が進行していることが明らかになった。また、弾性ひずみエネルギーと $\Delta|Z|$ との間には、負の相関があることも明らかになった。

以上の結果は、パウチ内の食肉の加熱処理前後でのインピーダンスの変化 ($\Delta|Z|$) を測定することにより、食肉の加熱による状態変化を容器の外部から非破壊・経時的に把握できる可能性を示している。しかし、今回の測定に使用した食肉は薄く、厚い状態のまま同様に評価する方法や、脂身等のタンパク質以外の成分が多く含まれている場合の評価方法の確立が必要である。また、パウチをシールすることにより、100°C 近くまで加熱した際にはパウチが膨張する問題が生じる。パウチの膨張に影響されない測定方法の確立等については、今後の検討課題である。

<参考文献>

- 1) Lepetit, J., Grajales, A., Favier, R., Modelling the effect of sarcomere length on collagen thermal shortening in cooked meat: consequence on meat toughness., Meat Sci, 54 (3), p239 (2000)

- 2) Waki.M, Vacuum cooking method.Science of Cookery.,22,190, (1989)
- 3) Sainen.Y, Shibata.K, and Yasuha.Y, Study on chicken breast meat after vacuum cooking (1) composition of the physical properties and sensory attributes after vacuum cooking and Boiling.Journal of home economics.,54,591 (2003)
- 4) Christensen.L, Gunvig.A, Tørngren.MA, Aaslyng.MD, Knøchel.S, Christensen.M, Sensory characteristics of meat cooked for prolonged times at low temperature. Meat Sci.,90 (2) ,485 (2012)
- 5) Migita.M, Protein and cooking (V) - Changes due to heating of meat (2) , Science of Cookery.,2,92 (1969)
- 6) Suzuki.T, Cooking and protein degeneration.Science of Cookery.,4,22 (1971)
- 7) Hatae.K, Aogaki.S, Yoshimatsu.F, Kawanaka.I, Todome.Y, Effect of heating rate (slow and fast) on physical and chemical properties of cooked chicken leg meat and soup.Journal of home economics.,32,515 (1981)
- 8) Shizuka.J, Tagawa.A, Evaluation by measurements of physical and electrical properties on fresh-cut vegetables stored for long term using partial-freezing method. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology.,56, 453 (2009)
- 9) Uozumi.J, Iwamoto.M, Nondestructive spectroscopic analysis in the food engineering. Journal of the Japan Society of Precision Engineering., 51, 302 (1985)
- 10) Tsuta.M, Research on using fluorescence fingerprints for the evaluation of food quality. Japanese Society for Food Science and Technology., 63, 377 (2016)
- 11) Kato.K, Nondestructive measurement of fruits quality by electrical impedance (Part 1) . Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery., 50, 99 (1988)
- 12) Kawano.T, Kitano.M, Matsuoka.T, Ishikawa.K, Hikida.Y, Electric impedance characteristics of ‘Shiitake’ mushrooms during drying. Journal of SHITA.,18, 206 (2006)
- 13) Kato.K, Sakaguchi.M, Ooi.Y, Maruo.S, Toyoda.K, Measurement of the freshness of fish by impedance spectroscopy. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery., 62, 76 (2000)
- 14) Kubo.K, Matsumoto.Y, Kuwahara.K, Okabe.S, Taniyama.S, Tachibana.K, Murata.M, Nondestructive determination of fat content in yellowtail and horse mackerel by impedance analysis. Nippon Suisan Gakkaishi., 82, 743 (2016)
- 15) Moro.AB, Pires.CC, Silva.LP, Dias.AMO, Simões.RR, Pilecco.VM, Mello.RO, Aguiar.LK, Prediction of lamb body composition using in vivo bioimpedance analysis, Meat Sci., 150,1 (2019)
- 16) 鎌田丈弘, 村元隆行,接触型電極を用いたインピーダンス測定による牛肉中オレイン酸割合の推定,日畜会.,89,227 (2018)
- 17) 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調理損失および

- 破断特性との関係,農業施設.,51 (4) , 112 (2020)
- 18) 羽倉義雄, 岡本拓海, 川井清司, インピーダンス計測によるレトルトパウチに封入した酵素処理牛肉の硬さの推定, 日本食品科学工学会誌, 65 (9) , p.442 (2018)
- 19) 羽倉義雄, 桑原悠史, (国立大学法人広島大学) , 特許第 6915861 号
- 20) Y.Leng, Y.Sun, X.Wang, J.Hou, X.Zhao, Y.Zhang, Electrical impedance estimation for pork tissues during chilled storage, Meat Sci., 161, p.108014 (2020)
- 21) 鈴木啓三, 高圧下におけるタンパク質の変性, 生物物理., 3 (4) , p.194 (1963)
- 22) Damez.JL, Clerjon.S, Abouelkaram.S, LepetitJ, Dielectric behavior of beef meat in the 1-1500kHz range: Simulation with the Fricke/Cole-Colemodel, Meat Sci, 77 (4) , p.512 (2007)
- 23) Lepetit.J, Salé.P, Favier.R, Dalle.R, Electrical impedance and tenderisation in bovine meat, Meat Sci, 60 (1) , p.51 (2002)
- 24) Bertram.HC, Wu.Z, van.den.Berg.F. Andersen.HJ, NMR relaxometry and differential scanning calorimetry during meat cooking, Meat Sci, 74 (4) , p.684 (2006)
- 25) Barbera.S, Tassone.S, Meat cooking shrinkage: Measurement of a new meat quality parameter, Meat Sci, 73 (6) , p467 (2006)

(原稿受付 2021年12月1日)

(採録受理 2022年2月9日)