技術論文

インピーダンス計測によるレトルト殺菌工程中の 米飯の硬さの推定

桑原悠史¹, 川井清司^{1,2}, 羽倉義雄^{1,2*}

¹ 広島大学大学院生物圏科学研究科

² 広島大学大学院統合生命科学研究科

Estimation of Hardness of Cooked Rice during Retort Sterilization by Electric Impedance Measurement

Yushi Kuwahara¹, Kiyoshi Kawai^{1,2} and Yoshio Hagura^{1,2*}

¹ Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University,
1-4-4 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528

² Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University,
1-4-4 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528

Since retort pouch food is sterilized under high temperature and high pressure, the physical properties are supposed to change with the progression of sterilization. However, an adequate technique to measure the state of food during sterilization has not yet been established. In this study, we measured the electrical impedance of rice samples (rice-water system) in a tray-type retort container continuously throughout the sterilization process. In addition, we measured the hardness of rice grains in retort pouches that were sterilized for various sterilizing times using a material tester. We found that the impedance vector locus for the samples was plotted linearly, and the slope of the regression line of the vector locus was evaluated as an indicator of the changes in the sample. During the heating process (13 minutes at room temperature to 120°C of retort chamber temperature) and sterilization process (30 minutes at 120°C of retort chamber temperature), the slope value decreased with processing time. After the sterilization process started (after 13 minutes from the start of the heating process), the central temperature of the sample was almost constant, but the slope value continued to decrease. We thought that the change in the slope value represented some kind of physical and/or chemical change in the sample. Samples with different sterilizing times showed decreasing hardness of rice grains as well as decreasing slope values as the sterilizing time increased. It was determined that there is a high correlation ($R^2=0.693$) between the slope value and the hardness of rice grains. The results showed that the above is one possible method to non-destructively and continuously measure how the hardness of retort-packed rice changes during sterilization and to evaluate changes with slope values used as an indicator of hardness. (Received Jan. 17, 2019; Accepted Jun. 27, 2019)

Keywords : electric impedance, cooked rice, retort sterilization, hardness

キーワード : 電気インピーダンス, 米飯, レトルト殺菌, 硬さ

レトルト食品は保存性や簡便性に優れていることから広く一般家庭で利用されており、生産数が増加している^{1)~3)}。また、近年では保存性に加え、おいしさという付加価値を与えたレトルト食品の開発も盛んに行われている。一方で、レトルト殺菌装置内は高温・高圧状態になっていることから装置内での計測が難しく、殺菌中の食品の状態については詳しく計測されていない²⁾。しかし、レトルト殺菌中の食品は、高温・高圧下にあるため、その物性は殺菌の進行とともに大きく変化していることが予想される⁴⁾。所定の殺菌効果を得ようとした際に食品の品質が変化すること

も知られている⁵⁾。殺菌中の食品の物性変化をモニタリングすることが出来れば、適切な殺菌条件（殺菌温度、殺菌時間）を設定することが可能となる。そこで、本研究では、レトルト殺菌中の食品（特に、レトルト米飯）の殺菌中の物性変化を計測するための新たな方法の検討を行った。

米飯の物性測定には、木村ら⁶⁾や清水ら⁷⁾によるテクスチャアナライザを用いた計測例や、辻⁸⁾によるテンプレッサーを用いた計測例、また、川村ら⁹⁾による近赤外分析法による物理化学特性の計測などの例がある。しかし、どの計測例も、米粒を取り出し直接測定していることから、

^{1,2} 〒739-8528 広島県東広島市鏡山 1-4-4

*連絡先 (Corresponding author), hagura@hiroshina-u.ac.jp

レトルト米飯の物性変化を殺菌装置内で連続的に測定するには適していない。そこで、本研究では、レトルト米飯の殺菌装置内での物性変化を非破壊・連続的に計測する手段として、電気物性測定（特に、電気インピーダンス法）に注目した。

食品に対する電気物性の測定例には、Dejmek ら¹⁰⁾ によるジャガイモ組織に対する誘電率と導電率の測定や熊谷ら¹¹⁾ による誘電緩和法を用いたガラス転移の解析、中村と宮脇¹²⁾ によるジャガイモ加熱処理中の電気インピーダンス測定、志塚と田川¹³⁾ によるカット野菜に対する電気インピーダンスを用いた細胞膜の評価、河野ら¹⁴⁾ による乾燥シイタケの電気インピーダンスを用いた含水率の測定などの多くの研究報告がある。しかし、高温・高圧下でのレトルト殺菌装置内での電気物性の測定例はない。

また、レトルトパウチ内の食材の状態をパウチの外側から評価する試みとしては、筆者らの電気的方法¹⁵⁾ や力学的的方法¹⁶⁾ を用いた測定例があるが、いずれも常温・常圧での測定に留まっている。

本研究では、まず、レトルト米飯用トレーに密封したレトルト殺菌前後の吸水米-水系試料のインピーダンスについて加熱媒体の影響を受けない状態で測定を行い、レトルト殺菌による電気インピーダンスのベクトル軌跡を確認した。次に、防水処理を行った電極内の試料に対して中心温度の変化を確認した。その後、レトルト殺菌装置内に設置した電極間にトレーに密封した吸水米-水系試料を挿入し、装置外部に設置した LCR メータを用いて試料のインピーダンスの周波数依存性を測定した。得られた電気インピーダンスのベクトル軌跡を解析した。同時に、レトルト米飯の力学的な物性として米粒の硬さ測定を行った。その上で、試料の力学的物性変化と電気物性との関係を明らかにすることにより、レトルト殺菌工程中の米飯の品質評価の可能性を検討した。

実験方法

1. 試料

実験試料として生米（平成 28 年産コシヒカリ、無洗米、全国農業協同組合連合会広島県本部、広島市、日本）を用いた。生米は、使用する 2 倍量の水に 1 時間以上浸漬¹⁷⁾¹⁸⁾ させ、重量が約 1.3 倍になったものを用いた。吸水生米と水道水の比率を変化させ、吸水生米 70 g と水道水 100 g で調製した試料を「基準試料」、吸水生米 105 g と水道水 65 g で調製した試料を「水減量試料」、吸水生米 170 g のみで調製したものを「吸水生米試料」とした。これらの試料を、トレー状レトルト容器（封入部：135 mm×110 mm×深さ 20 mm、シール部：155 mm×130 mm）に封入し、家庭用アイロン（NI-S55, Panasonic 製、大阪府、日本）を用いてヒートシールした。トレー状レトルト容器の封入部（トレー）は、ポリプロピレン（PP）を主材料としたエチレン-

ビニルアルコール共重合樹脂（ECO）との複合材料であった。また、シール部（蓋）はポリアミド（PA）を主材料としたポリプロピレン（PP）との複合材料であった。

2. レトルト殺菌装置

本研究では、トレー入り米飯をレトルト殺菌するために実験用の小型レトルト殺菌装置（H60-C50-S・WR・SHW・P・SD・AR-T、東洋製罐製、東京都、日本）を用いた。レトルト殺菌時の殺菌温度、殺菌時間などは、レトルト殺菌装置に内蔵されたコンピュータにより制御した。蒸気殺菌方式により殺菌操作を行った。蒸気殺菌方式は、高温・高圧の状態で蒸気を送り込むことにより、蒸気を熱媒体としてレトルト食品の殺菌を行う殺菌方式である。また、一次加熱、予熱、二次加熱、殺菌、冷却の工程に従って殺菌を行った。殺菌時間に関しては実験ごとに設定した。

3. 中心温度測定

基準試料、水減量試料、吸水生米試料に対して、中心温度の測定を行った。米飯試料封入用の容器に浸漬米飯試料を入れる際に、高温用温度データロガー（スーパーサーモクロン、KN ラボラトリーズ製、大阪府、日本）を試料の中心に設置し、ヒートシールを行った。このデータロガーは指定した時間から温度測定を開始し、測定後にソフトウェア（Rh Manager, KN ラボラトリーズ製、大阪府、日本）を用いて温度履歴を取り出すことが出来る。データロガーを封入した試料を電極間に挿入し、殺菌装置内に静置した。データロガーの測定開始と同時に一次加熱を開始し、冷却終了までの試料の中心温度を 1 分ごとに測定した。殺菌は 120℃ 30 分間の条件で行った。本測定は電気物性測定とは別に行った。

4. 電気物性測定

(1) フッ素樹脂加工パンチング電極

予備実験において、2 枚のステンレス製電極板を用いてレトルト殺菌装置内でのインピーダンス計測を行ったところ、電極板表面に付着した水滴の影響により電極間の短絡（ショート）が起り、安定した計測値が得られなかった。次に、2 枚のステンレス製電極板をポリエチレン製のプラスチックバックにそれぞれ入れ、スパーサーで電極板間を一定に保ち、水中でインピーダンスの計測を行ったところ、安定した計測値が得られた。そこで、耐熱性と電気絶縁性を有するフッ素樹脂を電極板表面にコーティングすることにより、レトルト殺菌装置内でのインピーダンス計測が可能になると考えた。

本研究では電極として、2 個のフッ素樹脂のコーティング加工を施したステンレス製のパンチング水切りトレー（NR3037、フロンケミカル株式会社、大阪府、日本）を使用した（図 1）。2 個のトレーの底部を向い合せてテフロン製のスパーサーを介して固定し、電極とした。フッ素樹脂加工パンチング電極（以下、電極）は測定部が縦 220 mm×横 175 mm、電極板間距離 30 mm であった。

本研究で用いた電極の表面は、フッ素樹脂でコーティングしてある。このため、2枚の電極板間での短絡等の水の影響を防止できる構造になっている。電極板と同軸ケーブル芯線との接続部では、電極板のフッ素樹脂コーティングを $\phi 5\text{mm}$ 程度剥がし、自作のPEEK樹脂製のケーブルコネクタを介して電極板とケーブルを接続した。ケーブルコネクタへの水の流入を防ぐため、ケーブルコネクタと同軸ケーブルおよび電極板との接続部分にはシリコンゴム製のOリングを使用した。また、レトルト殺菌中に凝縮水が試料容器のトレーに付着すると計測値に影響を与えることがあった。そこで、電極の上部にステンレス製深型パット(縦 $400\text{mm}\times$ 横 $280\text{mm}\times$ 深さ 90mm)を覆い被せるように設置した。さらに、同軸ケーブル内を伝い、LCRメータに蒸気や水が逆流することを防ぐために、中継用のターミナル(中継板)を設けた。

(2) 電気物性測定方法

LCRメータ(3532-80, HIOKI製, 長野市, 日本), 電極, 同軸ケーブルを用いて電気物性測定を行った。レトルト殺菌装置内で試料を電極間に挿入した。この時, 試料下部は電極に接触しており, 試料上部と電極の間には 5mm のスペースがあった。同軸ケーブルを介して電極とLCRメータを接続し, 電極間の試料の電気インピーダンスの測定を行った(図2)。LCRメータと電極との接続はレトルト殺菌装置のサービスポートを使用した。また, LCRメータのアース部分とレトルト殺菌装置本体の金属部を接続し, これによって外部からのノイズを遮断した。LCRメータに

よって得られた測定値をコンピュータを用いて記録した。

測定開始1時間以上前にLCRメータの電源を入れ, ウォーミングアップを行った後, 試料を電極間に挿入し, レトルト殺菌装置内で殺菌を行いながら電気物性を測定した。殺菌操作時の温度プログラムは, 室温 $\rightarrow 103^\circ\text{C}$ (5分; 一次加熱), 103°C (5分; 予熱), $103^\circ\text{C}\rightarrow 120^\circ\text{C}$ (3分; 二次加熱), 120°C (30分; 殺菌工程)とした。殺菌終了後, 冷却水シャワーにより常温(約 25°C)まで冷却した。

電気物性測定は, 一次加熱開始と同時に, 対数間隔で $50\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$ の間の200点もしくは, $3\text{kHz}\sim 10\text{kHz}$ の間の52点の周波数で2分ごとに行い, 冷却終了まで継続した。印可電圧は, 1V であった。全ての試料について各5回の測定を行った。また, 基準量試料については, 冷却後再加熱を行った。この操作では, 試料に対し前述の条件で殺菌を行った後に1時間室温で冷却し, 再び同じ殺菌条件で電気物性測定を行うことにより, 米-水系試料の加熱殺菌による変化が電気物性に及ぼす影響を検討した。

(3) 電気物性の解析方法

本研究では電気物性の測定として, インピーダンス計測^{19)~21)}を行った。LCRメータからは, 複素インピーダンス $|Z|$ と位相角 θ が得られる。そこで, 次式を用いてインピーダンスの実数成分 Z' (抵抗, Ω)と虚数成分 Z'' (リアクタンス, Ω)を求めた。

$$Z = Z' - jZ'' \quad (1)$$

$$Z' = |Z| \cos \theta \quad (2)$$

$$Z'' = |Z| \sin \theta \quad (3)$$

米-水系試料のインピーダンスの測定結果からナイキスト線図(Cole-Coleプロット)を作成したところ, そのインピーダンスのベクトル軌跡は直線的な挙動もしくは, 極めて大きな円弧の一部が現れていた。特に, 高周波数領域($3\text{kHz}\sim 10\text{kHz}$)では直線による回帰が可能であった。そこで, インピーダンスの実数成分 Z' を独立変数, 虚数成分 Z'' を従属変数とする回帰直線の傾きを本研究におけるレトルト殺菌中の試料の変化の指標とした。殺菌に伴う回帰係数の変化を用いて, レトルト殺菌中の試料の変化を評価

図1 フッ素樹脂加工パンチング電極

図2 レトルト殺菌装置概略図

した。

5. 硬さ測定

基準試料、水減量試料、吸水生米試料の米粒の硬さ測定を行った。硬さ測定用の試料の調製では、昇温、冷却時の温度プログラムおよび殺菌温度を電気物性測定と同じになるように設定し、昇温開始からの時間を18分、23分、28分、31分、33分、35分、38分、41分、43分と変化させた。殺菌後の米飯試料の硬さ測定には、小型材料試験機（EZ-SX、島津製作所製、京都市、日本）を使用した。基準試料、水減量試料、吸水生米試料について殺菌終了後、直ちに30℃の恒温槽内でトレー未開封の状態で保存した。1時間経過後に恒温槽からトレーを取り出し、測定用の容器（アルミカップ、内径40mm、高さ15mm）に試料3粒を放射状に並べ、小型材料試験機を用いて、直径20mmのプランジャーで1mm/secの速度で歪み20%の圧縮試験を行い、その最大荷重を硬さの代表値とし、評価に使用した²⁾。測定したデータはソフトウェア（TRAPEZIUMX、島津製作所製、京都市、日本）を用いて解析を行った。全ての試料について各5回の測定を行った。この殺菌時間の異なる米の硬さを電気物性の経時変化と比較した。

実験結果および考察

1. レトルト殺菌前後での試料のインピーダンス変化

レトルト殺菌中、試料の電気物性は昇温、降温時の温度変化の影響を受ける。特に、米-水系試料は加熱に伴い澱粉の糊化等の変化が生じる。そこで、これらの影響を受けない条件でレトルト殺菌前後の基準試料のインピーダンスのベクトル軌跡の変化を確認した。すなわち、レトルト殺菌前後の基準試料（未加熱の吸水米試料と加熱殺菌後の炊飯試料）について、温度一定の条件（室温）で試料の電気物性測定を行い、インピーダンス計測によるトレー状のレトルト容器外部からの内容物の物性変化の検出の可能性を

図3 レトルト殺菌前後の基準試料の室温でのインピーダンスのベクトル軌跡

検討した。

殺菌前後の基準試料を30℃の恒温槽で1時間静置した後、直ちに電極の間に挿入し、50Hz~1MHzの周波数でインピーダンス測定を行った。室温で測定したレトルト殺菌前後の試料のインピーダンスのベクトル軌跡を図3に示す。ベクトル軌跡は、測定した周波数範囲で直線的な挙動を示した。この挙動は、大きな円弧の左端（高周波数側）の一部が表れていると考えられる。殺菌前後の米飯のベクトル軌跡は、その軌跡が大きく異なっていた。

測定した全周波数領域について測定値を直線回帰すると、殺菌前試料では $Z'' = 50.644Z' - 4E+06$ であったのに対し、殺菌後試料では $Z'' = 5.6608Z' - 2E+06$ であった。殺菌前の試料に比べ殺菌後の試料は、回帰直線の傾きが1/10程度小さくなっていた。殺菌前の試料は、吸水のみを行った未加熱の米と水の状態であるのに対し、殺菌後の試料は、加熱と殺菌が行われた炊飯米の状態に変化している。従って、レトルト殺菌により米-水系試料の物理的な構造が変化し、以下のような電気物性の変化が生じたことに由来すると考えられる。すなわち、米粒内の澱粉の糊化により、澱粉粒が崩壊し、米粒内の電気抵抗が減少する。さらに、米粒間に存在していた空隙が、米粒の膨張に伴い減少する。また、澱粉が米粒外に流失することにより、米粒間の電気抵抗が減少する。これらの変化に伴い、試料全体の電気抵抗が減少し、その結果、円弧が収縮し、ベクトル軌跡の傾き（大きな円弧の左端を直線近似した際の接線の傾き）が減少したと考えられる。

2. レトルト殺菌過程における試料の中心温度変化

レトルト殺菌過程における各試料（基準試料、水減量試料、吸水生米試料）の中心温度および庫内温度の変化を図4に示す。全ての試料において温度変化に大きな差は認められなかった。各試料の温度上昇は、通常のレトルト殺菌

図4 レトルト殺菌過程の庫内温度と米飯試料の中心温度の変化

殺菌時の温度プログラム（庫内温度）：①一次加熱（室温→103℃：5分）、②予熱（103℃：5分）、③二次加熱（103℃→120℃：3分）、④殺菌（120℃：30分）、冷却（120℃→約25℃：10分）

と同様に、庫内温度変化に十分追従しており、電極板等を設置していても十分な殺菌効果が得られていた。吸水生米試料の温度上昇がやや遅い理由として、容器内に液体が入っていないことから、液体の対流による伝熱の促進効果が得られていないことが考えられる。基準試料では、殺菌開始時(13分)の中心温度は109℃であり、殺菌工程中(13分～43分)に中心温度は緩やかに庫内温度(120℃)に近づいていった。また、28分(殺菌開始15分)の時点で中心温度は119℃、33分～43分の間中心温度は120℃で一定となっていた。

3. 米-水系試料の殺菌過程における電気物性変化

試料のインピーダンスの時間変化の一例として、50 Hz～1 MHzの周波数で測定した基準試料のインピーダンスのベクトル軌跡の一部(2, 16, 30, 44分)を図5(a)に示す。50 Hz～1 MHzのインピーダンスのベクトル軌跡は、昇温中(2分)および冷却中(44分)では虚数軸方向に立ち上がり、インピーダンスもばらつく傾向が見られた。これは、急激な温度変化の影響を受けているものと考えられる。一方、殺菌工程(16分, 30分)では、ほぼ直線的な挙動を示した。また、殺菌過程が進行するに従って、この直線の傾きが小さくなる傾向が認められた。

図5(a)の3 kHz～10 kHzの測定周波数部分を拡大したものを図5(b)に示す。インピーダンスのベクトル軌跡を直線近似した際の回帰直線の傾き(以後、回帰直線の傾き)は、加熱開始時から時間の経過(2分→16分→30分)とともに減少し、冷却時(44分)に増加していた。本研究では、

この回帰直線の傾きが試料の物性などの状態変化を表す指標になると考えた。そこで以後の解析では、殺菌中(13分～43分)のインピーダンス変化のみに注目し、測定値が安定していた、3 kHz～10 kHzの周波数のインピーダンスのベクトル軌跡を評価に用いることにした。また、この測定周波数範囲では、直線近似の相関は極めて良好であった。図5には示していないが、二次加熱開始時(10分)の付近で、傾きの減少が急激になり、殺菌途中で再び傾きの減少が緩やかになっていた。さらに、冷却開始(44分)から冷却終了まではインピーダンスのベクトル軌跡が不連続になることがあった。冷却過程では、殺菌庫内上部から冷却水がシャワー状に流下するため、冷却水の飛沫等が電極部に付着し、計測に影響を与えた可能性がある。そこで、安定した計測が可能であった、殺菌中(13分～43分)のインピーダンスのベクトル軌跡の変化に本研究では注目することにした。

電気物性には温度依存性²³⁾があることから、昇温工程(庫内温度：室温→120℃、0分～13分)の回帰直線の傾きの変化には、試料の大幅な温度変化(試料中心温度：約20℃→109℃)に伴う電気物性変化の情報も含まれている可能性がある。しかし、注目している殺菌工程(13分～43分)では、試料の中心温度変化(109℃→120℃)は僅かであることから、13分以降の回帰直線の傾きの変化には温度変化の寄与は少ないと考えられる。また、試料の中心温度が120℃で一定に保たれていた33分～43分での基準試料の回帰直線の傾きを詳しく見ると(実験結果の一例を図6に示す)、一定温度においても傾きの低下が引き続き起こっており、この傾きの低下は試料の状態の変化を表していると考えられる。

そこで、殺菌工程の回帰直線の傾きについて更なる検討を行った。図7に殺菌中(13分～43分)の基準試料、水減量試料、吸水生米試料のインピーダンスの回帰直線の傾き

図5 基準試料のインピーダンスの時間変化

- (a) 50 Hz～1 MHzにおけるインピーダンスのベクトル軌跡
(2分： $R^2=0.8845$, 16分： $R^2=0.9696$, 30分： $R^2=0.9956$, 44分： $R^2=0.4934$)
(b) 図aの3 kHz～10 kHz部分の拡大図
(2分： $R^2=0.9987$, 16分： $R^2=0.9968$, 30分： $R^2=0.9914$, 44分： $R^2=0.9982$)

図6 基準試料の中心温度と回帰直線の傾きの変化
(殺菌工程の20分から45分の変化の一例)

図7 基準試料, 水減量試料, および吸水生米試料のインピーダンスのベクトル軌跡の回帰直線の傾きの時間変化 (mean±SD, $n=5$)

図9 基準試料および水減量試料の硬さとインピーダンスのベクトル軌跡の回帰直線の傾きの関係 (図中の数字は時間を示す) (mean±SD, 傾き $n=5$) (mean±SD, 硬さ $n=5$)

図8 米飯試料の硬さの時間変化 (mean±SD, $N=5$) (基準試料: $R^2=0.9103$, 水減量試料: $R^2=0.7840$)

の時間変化の平均値と標準偏差を示す。全ての試料で23分(殺菌10分)まで傾きが大きく減少し、その後44分(殺菌終了)まで傾きが緩やかに減少する挙動を示した。殺菌開始時には糊化が終了していると考えられることから、この傾きの緩やかな減少は、澱粉粒の崩壊等の物性変化²⁴⁾²⁵⁾の様子を表しているのではないかと予想した。また、吸水生米試料では標準偏差が大きいことがわかる。一方、基準試料と水減量試料では、傾きのばらつきが比較的小さい。そこで、以後の解析では、基準試料、水減量試料に注目し、

回帰直線の傾きの平均値を用いることとした。

4. 米飯試料の殺菌後の硬さ変化と電気物性との関係

図8に各殺菌時間における各試料の米粒の硬さの変化を示す。全ての試料において殺菌時間が長くなるに従って米粒の硬さが減少した。また、同じ殺菌時間で比較すると水分量の多い試料ほど硬さの絶対値は低かった。殺菌時間の増加に伴う試料の軟化は米粒の糊化もしくは米澱粉の崩壊による澱粉構造の変化によるものであると考えられる。これらの結果は、山崎と福場の玄米を用いた研究²⁶⁾とも一致している。

基準試料、水減量試料では、殺菌時間が長くなるに従って硬さの値が直線的に減少する挙動を示した。しかし、吸水生米試料においては直線的な減少傾向は確認されなかった。吸水生米試料では、米粒内の水分量が少ないため十分に糊化が進行しておらず、基準試料や水減量試料とは異なる挙動を示したと考えられる。

図9に殺菌工程中(18分～43分)の基準試料と水減量試料の硬さと回帰直線の傾きの関係を示す。両試料とも、硬さの値が小さくなるほど回帰直線の傾きも小さくなる傾向を示し、硬さと傾きとの間に高い相関があることがわかる。さらに、2試料間では、水の比率が異なっても硬さと傾きの間に比較的良好な相関が見られた。すなわち、浸漬米と水を封入した試料については、水分量が異なっても、インピーダンスのベクトル軌跡の回帰直線の傾きを指標にすることによって殺菌中の硬さを非破壊・未開封で測定できる可能性がある。

要 約

基準試料のレトルト殺菌前後の電気インピーダンスを室温で測定したところ、殺菌前の試料に比べ殺菌後の試料は、回帰直線の傾きが大きく低下していた。レトルト殺菌に

よって試料中の澱粉の構造等の何らかの変化が起こり、この変化がインピーダンスのベクトル軌跡の形状に現れたと考えられる。米-水系試料の殺菌中のインピーダンス変化を、殺菌装置内で連続的に測定した。また、各殺菌時間のレトルト米飯の米粒の硬さの測定を行った。電気インピーダンスのベクトル軌跡は直線的な形状を示した。インピーダンスのベクトル軌跡の回帰直線の傾きを本研究における試料の変化の指標とし、解析を行った。昇温工程および殺菌工程において、基準試料（標準的な米と水の割合の試料）の回帰直線の傾きは減少していた。殺菌工程（13分～43分）では、試料温度はほぼ一定であることから傾きの変化は試料の何らかの変化を表してしている可能性がある。これを澱粉の物性変化に伴う変化であると予想した。また、加水量を変化させた試料の傾きは、加水量が少なくなるに従って、23分（殺菌10分）以降の傾きの減少幅が大きくなっていた。加水量が少ない試料ほど米粒が試料に占める割合が高いため、殺菌過程における澱粉粒の物性変化の影響を強く受けたためであると考えられる。米粒の硬さ測定では、同じ殺菌時間で比較すると、水分量の多い試料ほど硬さの絶対値は低かった。殺菌時間の増加における試料の軟化は澱粉粒の崩壊によるものであると示唆された。回帰直線の傾きと硬さとの間に高い相関（ $R^2=0.6926$ ）が見られた。このことから、米-水系試料の殺菌中の硬さを電気物性によって非破壊・未開封で連続的に測定できる可能性が示唆された。

文 献

- 清水 潮, 横山理雄 (2006). 「(改訂) レトルト食品の基礎と応用」, 辛書房, 東京, pp. 1-10.
- Sakuma, K., Katoda, H., Fukaya, T., Joh, T., Ito, A., and Watanabe, A. (2007). A study on commercial sterility of cooked rice packed under semi-aseptic condition from the viewpoint of cooking. *Japan journal of food engineering (Nippon Shokuhin Kogaku Kaishi)*, **8**, 295-304 (佐久間欣也, 河東田治彦, 深谷哲也, 城斗志夫, 伊東 章, 渡辺敦夫 (2007). 準無菌包装米飯 (Cooked Rice Packed Under Semi-aseptic Condition) の商業的無菌性確保する炊飯条件の検討, 日本食品工学会誌).
- 横山理雄 (1990). レトルト食品. 日本家政学会誌, **41**, 791-796.
- Takeuchi, Y. and Takahashi, H. (2011). Reserch on the softness of grass prawn *Penaeus monodont* tissue by retort sterilization. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **77**, 887-895 (竹内友里, 高橋英史 (2011). レトルト殺菌によるウシエビ組織の脆弱化原因の研究, 日本水産学会誌).
- Terashima, Y. and Nonaka, Y. (1994). Retort temperature profile and quality changes during thermal processing of conduction heating foods in retortable pouches. *The Society of Packaging Science & technology. Japan (Nippon Hoso Gakkaishi)*, **3**, 152-163 (寺島好己, 野中保雄 (1994). レトルト食品の加熱殺菌におけるレトルト温度プロフィールと品質の変化, 日本包装学会誌).
- Kimura, T., Shimizu, N., Yoshiazaki, S., and Taneya, S. (1996). Experimental studies on rice stickiness in varietal difference (part 1) — direct measurement of cohesiveness and properties of residual cooking liquid for indica and japonica rices. *Journal of the Society of Agricultural Structures. Japan (Nogyo Sisetsu Gakkai)*, **27**, 3-10 (木村俊範, 清水直人, 吉崎 繁, 種谷真一 (1996). 米質評価における米飯の粘りに関する実験的研究 (第1報), 農業施設学会誌).
- Shimizu, N., Kimura, T., Ohtsubo, K., and Toyoshima, K. (1997). Development of rice quality evaluating technique based on physical properties of cooked rice (part 1) — effect of cooked rice properties on texture of cooked rice —, *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery (Nogyo Kikai Gakkaishi)*, **59**, 75-82 (清水直人, 木村俊範, 大坪研一, 豊島英親 (1997). 米飯物性による米の品質評価技術の開発 (第1報), 農業機械学会誌).
- Tsuji, S. (1985). Texture of cooked rice kernels and their changes on staling. *Journal of the Japanese Society of Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kogyogakkaishi)*, **32**, 386-390 (辻昭二郎 (1985). 米飯粒のテクスチャーとその老化にともなう変化の検討, 日本食品工業学会誌).
- Kawamura, S., Natsuga, M., and Ito, K. (2000). Measurement of physicochemical properties of rice by near infrared spectroscopy and evaluation of palatability. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery (Nogyo Kikai Gakkaishi)*, **62**, 293-294 (川村周三, 夏賀元康, 伊藤和彦 (2000). 近赤外分光法による米の物理化学特性の測定と食味評価, 農業機械学会誌).
- Dejmek, P. and Miyawaki, O. (2002). Relationship between the electrical and rheological properties of potato tuber tissue after various forms of processing. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **66**, 1218-1223.
- Kumagai, H. and Kumagai, H. (2008). Physical properties of foods and effect of water on them III analysis of molecular mobility in glassy and rubbery foods by electric and pulse-NMR measurements. *Japan journal of food engineering (Nippon Shokuhin Kogaku Kaishi)*, **9**, 197-206 (熊谷 仁, 熊谷日登美 (2008). 電気物性測定およびパルス NMR を用いたガラス・ラバー状食品中分子の運動性に関する解析, 日本食品工学会誌).
- Nakamura, K. and Miyawaki, O. (2013). Analysis of changes in electrical and rheological properties of agricultural products in heating process. *Japan journal of Food Engineering*, **14**, 155-160.
- Shizuka, J. and Tagawa, A. (2009). Evaluation by measurements of physical and electrical properties on fresh-cut vegetables stored for a long term using partial-freezing method. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kogaku Kaishi)*, **56**, 453-462 (志塚 淳, 田川彰男 (2009). Parallel-Freezing した長期貯蔵カット野菜の物理的, 電気的評価, 日本食品科学工学会誌).
- Kawano, T., Kitano, T., Matsuoka, T., Ishikawa, K., and Hikida, Y. (2006). Electric impedance characteristics of 'Shiitake' mushrooms during drying. *Environmental Control in Biology (Syokubutu Kankyo Kogaku Kaishi)*, **18**, 206-211 (河野俊夫, 北野雅治, 松岡考尚, 石川勝美, 正田慶夫 (2006). 乾燥中子シイタケ実体の電気インピーダンス特性, 植物環境工学).
- Hagura, Y., Okamoto, T., and Kawai, K. (2018). Indirect measurement of changes in hardness of enzyme-treated beef in retort pouch using an electrical impedance method. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kogaku Kaishi)*, **65**, 442-450 (羽倉義雄, 岡本拓海, 川井清司 (2018). 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).
- 16) Tazoe, Y., Kawai, K., and Hagura, Y. (2018). Nondestructive determination of the rheological properties of liquid food in sealed retort pouches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42:e13651. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13651>.
- 17) Sakamoto, K., Morii, S., and Ueda, M. (2015). Differences in water absorption of rice when soaked in warm and cold water. *Journal of Cookery Science of Japan (Nippon Choriokagaku Kaishi)*, 48, 193–199 (坂本 薫, 森井沙衣子, 上田真理子 (2015). 炊飯における温水浸漬と低温浸漬が米の吸水率に与える影響, 日本調理科学会誌).
- 18) Tomita, H., Sakamoto, K., John, H., and Takemori, T. (2015). Soaking time-related changes in microstructures and texture of cooked rice. *Journal of Cookery Science of Japan (Nippon Tyori Kagaku Kaishi)*, 48, 18–25 (富田晴雄, 坂本薫, John Henderson, 竹森利和 (2015). 浸漬時間の違いによる米飯の構造とテクスチャの関係, 日本調理科学会誌).
- 19) 板垣昌幸 (2008). 「電気化学インピーダンス法 原理・測定・解析」, 丸善, 東京.
- 20) Wu, Long and Ogawa, Y. (2008). Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics. *J. Food Eng.*, 87, 274–280.
- 21) Imaizumi, T., Muramatsu, Y., Orikasa, T., Hamanaka, D., Tanaka, U., Uchino, T., and Tagawa, A. (2014). Effect of soaking treatment in hot water on thermal and electrical properties of tubers and Japanese radish. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi)*, 61, 244–250 (今泉鉄平, 村松良樹, 折笠貴寛, 濱中大介, 田中史彦, 内野敏剛, 田川彰男 (2014). イモ類およびダイコンの熱物性および電気的特性に及ぼす熱湯浸漬処理の影響, 日本食品科学工学会).
- 22) Arai, E. and Watanabe, M. (1994). Improving the cooking properties of indica rice grains by pressurization and enzymatic treatments. *Journal of the Japanese Society of Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kogyo-gakkaishi)*, 41, 619–626 (新井映子, 渡辺道子 (1994). 高圧処理または酵素処理によるインディカ種米の米飯テクスチャー改変, 日本食品工業学会誌).
- 23) Fujita, T., Akibayashi, S., Kitano, K., and Yamamoto, Y. (1997). Basic study on temperature dependence of dry rock resistivity. *Journal of the Geothermal Research Society of Japan (Nippon Tetsu Gakkaishi)*, 19, 85–96 (藤田豊久, 秋林 智, 北野晃一, 山本雄之 (1997). 乾燥した岩石における比抵抗の温度依存性に関する基礎的研究, 日本地熱学会誌).
- 24) Takahashi, T., Shinoda, K., Miura, M., Jin, Z., and Kobayashi, S. (2002). Effect of heat treatment on physicochemical properties of rice flour: utilization for cooking and food processing of heat-treated rice flour part I. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi)*, 49, 757–764 (高橋 徹, 篠田和雄, 三浦 靖, 金哲, 小林昭一 (2002). 加熱処理が米粉の物理化学的特性に及ぼす影響: 加熱処理米粉の調理・加工への利用 (第1報), 日本食品科学工学会誌).
- 25) Hagiwara, S., Ezaki, K., Kitamura, S., and Kuge, T. (1991). Observation by photomicroscopic and X-ray diffraction method of heat-moisture treatment on starch granules. *Journal of the Japanese Society of Starch Science (Denpun Kagaku Gakkaishi)*, 38, 241–247 (萩原滋子, 江崎君子, 北村進一, 久下 喬 (1991). 湿熱処理澱粉粒の顕微鏡観察およびX線回折, 澱粉科学会).
- 26) Yamazaki, T. and Fukuba, H. (1982). Influence of water addition ratio on quality of cooked rice of processed brown rice. *Journal of Cookery Science of Japan (Nippon Choriokagaku Kaishi)*, 15, 184–188 (山崎妙子, 福場博保 (1982). 加工玄米の炊飯に及ぼす加水量の影響, 調理科学).
- (平成31年1月17日受付, 令和元年6月27日受理)