

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K15352

研究課題名（和文）電気化学的アプローチによる加工青果物の品質特性評価技術の確立

研究課題名（英文）Electrical assessment methods for qualities of processed fruit and vegetables

研究代表者

渡邊 高志 (Watanabe, Takashi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門・研究員

研究者番号：60760767

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電気的手法に基づく加工青果物の品質評価法開発に取り組んだ。リンゴの細胞組織の電気インピーダンスデータを実数部と虚数部に分離し、その関係性を示すCole-Cole plotを作製した。細胞組織をベースとした等価回路解析の応用理論を基に、細胞外液の電気抵抗値変化の指標として、Cole-Cole plotの円弧頂点から原点までの距離を示すLTOを算出した。LTOにより、低温加熱中に起こる細胞内液の漏出、すなわち細胞の破壊をモニタリングした。LTOの変化と、細胞組織の力学特性やジューシネスの変化には相関関係が確認され、電気的手法によりそれら特性の変化が評価できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

青果物のおいしさには、咀嚼時のかたさなどの品質が大きく影響する。特に青果物の加工過程においては、それらの品質が大きく変化するため、そのモニタリングが可能となれば、高品質な青果物の加工条件選定に有用である。本研究では、簡易な方法で細胞の破壊を推定できる電気的手法を応用し、細胞破壊が力学特性とジューシネスに影響する結果を示すことで、咀嚼時に感じる青果物の品質が、電氣的に推定できる可能性を示すことができた。電気的手法を用いた、加熱青果物の力学特性、ジューシネスの推定については、これまでに例が少ないため、学術的な新規性が高く、農業工学・食品工学、両分野においてトップクラスの国際誌へ掲載された。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is development of electrical impedance methods to assess the qualities of processed fruit and vegetables. Cole-Cole plot was obtained from the relationships between real and imaginary parts of electrical impedance data in apple tissues. Based on the application theory of cell-tissue based equivalent circuit model analysis, we calculated an electrical parameter, LTO (the length of the coordinate at the top on circular arc of Cole-Cole plot from the origin) as an indicator of electrical resistance values outside the cells. Using the LTO, we monitored the leaking of intracellular fluids to the outside, i.e., cell destructions in apple tissues during heating at 40-80 °C. When the LTO was decreased, mechanical and juiciness properties of apple tissues were also changed. From the results, these property changes during heating may be estimated using electrical impedance methods and the LTO values.

研究分野：農業工学

キーワード：電気インピーダンス テクスチャー リンゴ 低温スチーム加熱

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

青果物のおいしさには、咀嚼時のかたさなどの品質特性が大きく影響する。特に青果物の加工過程においては、それらの品質特性が大きく変化するため、そのモニタリングが可能となれば、高品質な青果物の加工条件選定に有用である。

電気インピーダンス測定は、簡便かつ低コストでのモニタリング技術として着目され、青果物の電気特性解析について多くの研究がなされてきた。また、電極界面や細胞膜の性質を鑑みると、青果物組織の電気特性解析を行う際には、幅広い測定周波数帯における周波数特性解析が必須である。しかしながら、加工、特に加熱中における青果物組織の電気特性を解析した例は少なく、未だ固定周波数による解析も散見されるのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究においては、青果物組織の電気インピーダンス周波数特性を解析することにより、加工中における組織破壊のモニタリングを行い、また、青果物の品質特性として有用な力学特性などとの関係性を整理することで、電気による加工青果物の品質特性評価技術の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料

細胞組織が比較的均一であり、取り扱いやすいリンゴをモデルとした。加工に向くとされるリンゴ品種‘紅玉’を市場で購入した。購入したリンゴは、試験に用いるまで、4°Cの冷蔵庫で保蔵した。試験に用いる際には、試料温度を実験室温度に調整するため、20°Cのインキュベータ(CN-25、三菱電機エンジニアリング)内に一晚静置した。リンゴは赤道面から分断し、下部を試験に用いた。本研究では、一片15mmで、赤道面を上部とするキューブを切り出し、加工や品質評価用の試料とした。

#### (2) 加工方法

近年、細胞組織への負荷を可能な限り減少させる低温加熱法が着目されている。そのため、本研究では、リンゴ試料に対する加工方法として、低温スチーム加熱を試みた。3つのリンゴ試料を、スチームオープン庫内(ER-PD4000、東芝)の中央部分に静置し、設定温度40、60、80°Cで、それぞれ2、5、10min加熱した。尚、庫内温度の上昇ムラを抑制するため、実験の直前には、庫内に対して10minの予備加熱を行った。加熱された試料の品質測定は、20°Cのインキュベータ内に試料を30min静置し、試料温度を調整してから行われた。

#### (3) 電気測定試験

電気インピーダンス測定は、Watanabe et al. (2016)の計測法を改変して行った。幅10mmでセットされた2本のステンレススチール針型電極(0.5mm)を試料底部から10mm挿入した。インピーダンスメータ(3532-50、日置電機)により、測定電圧1V、42Hz-1MHzの範囲で、電気インピーダンスを測定した。電気インピーダンスは下記の式で定義される。

$$Z = R + jX \quad (1)$$

Zは電気インピーダンス、Rは実数成分、jは虚数単位、Xは虚数成分である。また、各測定周波数におけるRとXの関係性をプロットしたものをCole-Cole plotと呼ぶ(図1)。通常、Cole-Cole plotは円弧を描くが、その円弧の頂点から原点までの距離は、細胞膜の破壊とともに小さくなる(Watanabe et al., 2017, 2018)。本研究では、その距離をLTO (Length of the top of coordinate of the circular arc from the origin)として算出し、加熱操作による細胞膜破壊の評価に用いた。

$$LTO = \sqrt{R_{top}^2 + X_{top}^2} \quad (2)$$

$R_{top}$ 、 $X_{top}$ は、それぞれ、Cole-Cole plotに現れる円弧の頂点座標のR、Xの値を示す。

#### (4) 力学測定試験

試料の力学特性評価のため、万能物性試験機(Model 5543、インストロン)による圧縮試験を行った。試料をスチールプレートに静置し、3mmのプローブにより、0.5mm/sの速度で試

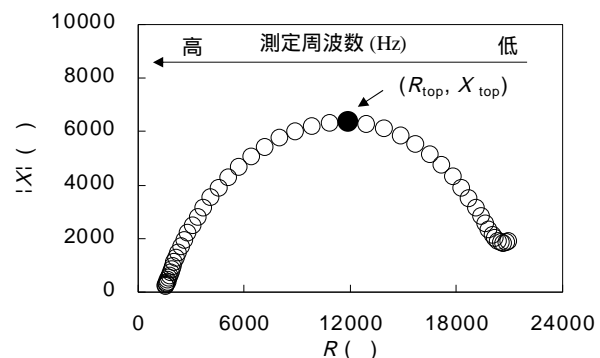


図1 リンゴの代表的な Cole-Cole plot

料高さの 80 %まで圧縮した。表層の破壊点および最大圧力値点に着目し、それぞれにおける応力値とひずみ値を算出して、力学特性変化の評価に用いた。応力値は、圧力値をプローブ面積で除した値であり、ひずみ値は、圧縮時におけるプローブの移動距離を初期試料の高さで除したものとした。

( 5 ) ジューシネス測定：圧縮時の細胞液漏出量推定試験

青果物を圧縮した際に漏出する細胞液量は、ジューシネスの指標となる( Waldron et al., 1997 )。本研究においては、下記の測定により、圧縮時における細胞液の漏出量を推定し、ジューシネスの指標とした。350 ml の純水を入れたビーカー内に、アクリル製テーブルを設置し、試料を静置した。40 mm のプローブにより、試料を 0.5 mm/s の速度で初期試料高さの 80 %まで圧縮し、5 min の間、細胞液を純水中に漏出させた。純水は常にスターラーにより攪拌されており、細胞液は純水中で拡散し、純水中の電気インピーダンス値を低下させるため、その変化をインピーダンスメータで計測することで、細胞液漏出量の目安とした。また、個々の試料内における初期の細胞液保持量の違いによる影響を加味するため、105 °C・4 min のオートクレーブ処理により、完全に細胞内液を放出させた際の純水の電気インピーダンス値も計測し、変数として加えた。

$$ER = \frac{Z_C}{Z_A} \quad (3)$$

ER は電解質漏出比、 $Z_C$  は試料圧縮時における純水のインピーダンス値、 $Z_A$  はオートクレーブ後の純水のインピーダンス値である。すなわち、ER は、試料内部に存在する細胞内液が、何割程度、圧縮時に漏出していたかを示す指標であり、本研究では、ER をジューシネスの指標として用いた。

4 . 研究成果

( 1 ) 加熱による試料細胞膜破壊の電気的モニタリング：LTO の変化

図 2 に各加熱温度における試料の LTO 変化を示す。40 °C では、LTO の値に大きな変化はみられなかったが、60 °C の加熱において、徐々に LTO が低下し始め、80 °C の加熱では、加熱後 2 min で LTO は 0、すなわち Cole-Cole plot の円弧の消失が確認された。

LTO の値は、細胞の破壊に伴って低下する ( Watanabe et al., 2018 )。また、植物の葉における細胞の加熱耐性を確認した文献では、45-50 °C で細胞が破壊され始めたことが報告されている ( Yeh and Lin, 2003 )。これらのことから、本試験結果は、リンゴの細胞は、40-60 °C の間で破壊され始めることを、電気的にモニタリングできた結果であると考えられた。

( 2 ) 加熱による力学特性・ジューシネス変化

図 3 に各加熱温度における試料の力学特性変化を示す。40 °C では、力学特性に大きな変化がみられなかったが、60 °C の加熱において、徐々に力学特性が変化し始め、80 °C では、加熱後 2 min で、力学特性が大きく変化していた。

力学特性の変化傾向は、図 2 に示した電気的指標、LTO の変化傾向と似通る結果となった。代表的な例として、図 4 に加熱試料の LTO と最大応力値の関係性について示す。このように、LTO の値、すなわち細胞の破壊程度と、最大応力値の間には、直線的な関係性がみられた (  $R=0.91$  )。これらは、'紅玉' というリンゴ品種において、細胞の破壊に伴う膨圧の低下が、力学特性に大きく影響していることを示している。

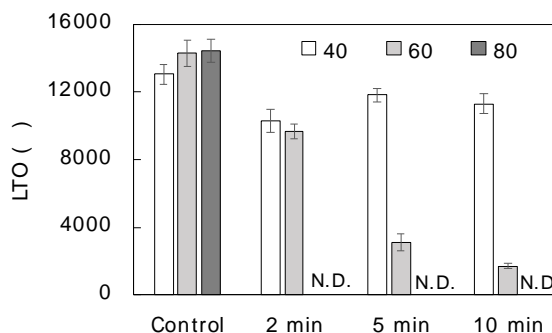


図 2 加熱試料の LTO 変化

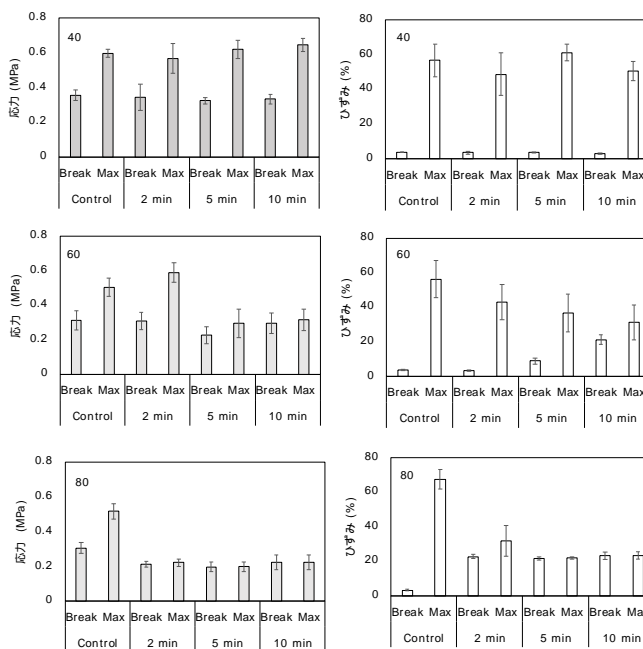


図 3 加熱試料の力学特性変化

図5に、各温度で10 min加熱した試料のLTOとER値の関係性について示す。力学特性ほどではないが、ERもLTOの変化に伴って変化する傾向が得られた(R=0.85)。細胞の破壊が起こると、細胞組織内の水分拡散の抵抗が低くなり、また、細胞内液は細胞外部へ漏出しやすくなる(Bajji et al., 2002, Galindo et al., 2005)。そのため、本実験では、細胞が破壊される、すなわちLTOが低下するに伴い、圧縮時の細胞液漏出量が増大し、ERの値が大きくなったと推察された。

得られた試験結果を総括する。本研究でモデルとしたリンゴ‘紅玉’の果肉の細胞状態について、電気インピーダンス周波数特性の解析により評価したところ、加熱中の細胞破壊をモニタリングすることができた。また、リンゴ細胞の加熱耐性は40-60であることが明らかにされた。また、代表的な品質特性として測定した力学特性およびジューシネスは、細胞の破壊に伴い、変化する傾向が得られ、電気的指標であるLTOと比較的高い相関関係が得られた(R=0.85-0.91)。これらのことから、電気的手法を応用することで、一部の加工青果物の品質特性評価ができる可能性が示された。

加えて、本課題では、カット加工された生鮮リンゴや、近年高次加工品への応用が期待される原料としてシャインマスカット粒を対象とした試験も試みた。カットリンゴにおいては、微生物増殖に伴う代謝物量の増大が電氣的にモニタリングされ、電気的手法の応用によるカットリンゴの腐敗評価の可能性が示された。シャインマスカット粒においては、リンゴ‘紅玉’と同様に、膨圧の低下に伴うと考えられる力学特性の大きな変化が観測され、上記リンゴと同様に、電気的手法による加工中の力学特性変化の簡易評価が可能であろうと推察された。今後の研究展開としては、より広範囲の加工貯蔵・品目・品種・品質に対する電氣的評価の有効性の確認を行っていき、学術的知見を得るとともに実用性向上に努める。

#### References

- Bajji, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2002). The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. *Plant growth regulation*, 36(1), 61-70.
- Galindo, F. G., Toledo, R. T., & Sjöholm, I. (2005). Tissue damage in heated carrot slices. Comparing mild hot water blanching and infrared heating. *Journal of food engineering*, 67(4), 381-385.
- Waldron, K. W., Smith, A. C., Parr, A. J., Ng, A., & Parker, M. L. (1997). New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science & Technology*, 8(7), 213-221.
- Watanabe, T., Ando, Y., Orikasa, T., Shiina, T., & Kohyama, K. (2017). Effect of short time heating on the mechanical fracture and electrical impedance properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Food Engineering*, 194, 9-14.
- Watanabe, T., Nakamura, N., Ando, Y., Kaneta, T., Kitazawa, H., & Shiina, T. (2018). Application and simplification of cell-based equivalent circuit model analysis of electrical impedance for assessment of drop shock bruising in Japanese pear tissues. *Food and bioprocess technology*, 11(11), 2125-2129.
- Watanabe, T., Orikasa, T., Shono, H., Koide, S., Ando, Y., Shiina, T., & Tagawa, A. (2016). The influence of inhibit avoid water defect responses by heat pretreatment on hot air drying rate of spinach. *Journal of food engineering*, 168, 113-118.
- Yeh, D. M., & Lin, H. F. (2003). Thermostability of cell membranes as a measure of heat tolerance and relationship to flowering delay in chrysanthemum. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(5), 656-660.

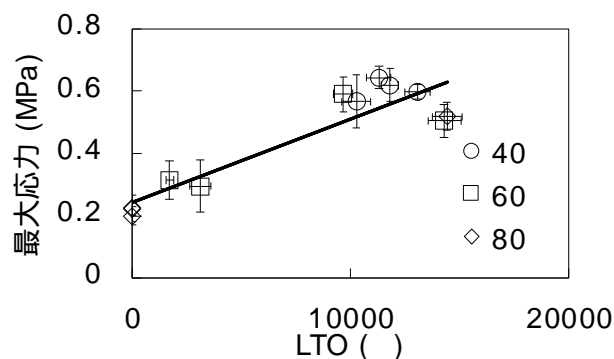


図4 LTOと最大応力値の関係

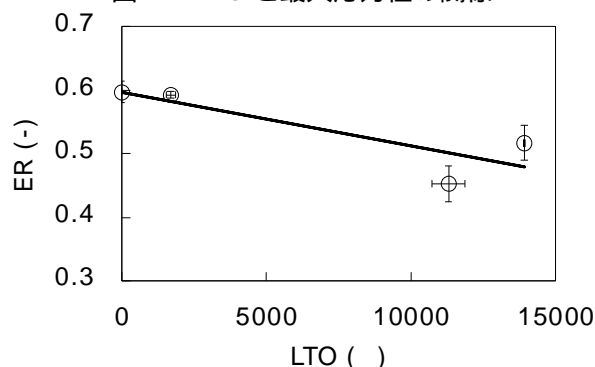


図5 LTOとERの関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Watanabe Takashi, Ando Yasumasa, Nakamura Nobutaka, Oriyasa Takahiro, Shiina Takeo, Nagata Masayasu	4. 巻 261
2. 論文標題 Electric and mechanical detection of changes in heated apple flesh	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Food Engineering	6. 最初と最後の頁 26 ~ 31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.004">https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.004</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----