

交流インピーダンス法による 非侵襲(非破壊)な果実の品質判定

東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科
准教授 片山 昇

2025年11月11日

どちらかのバナナを落としてしまいました。



どちらが落としたバナナかわかりますか？

衝撃を加わったバナナはすぐ腐る



2日後

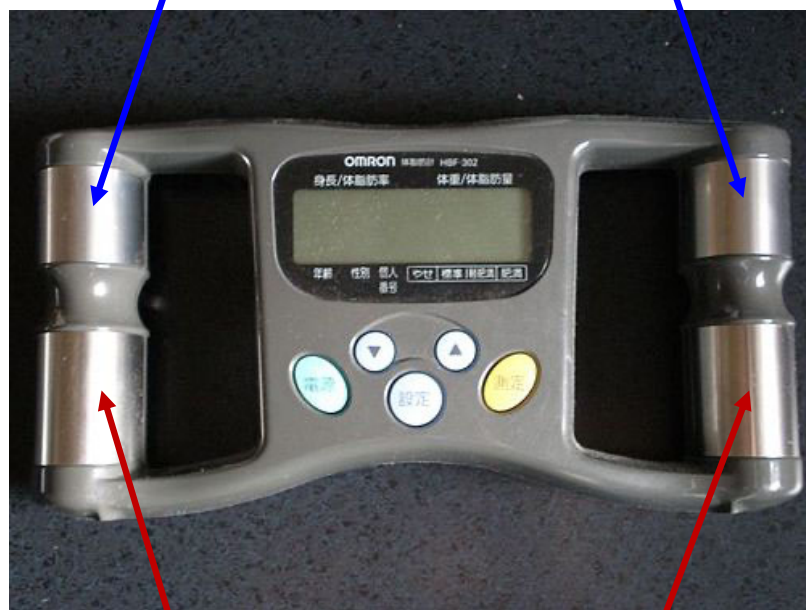


2日後



体脂肪計の原理

身体の交流電圧を測定する端子

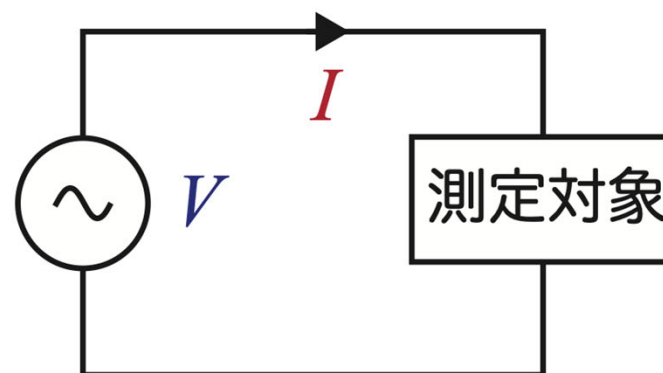


身体に交流電流を流す端子

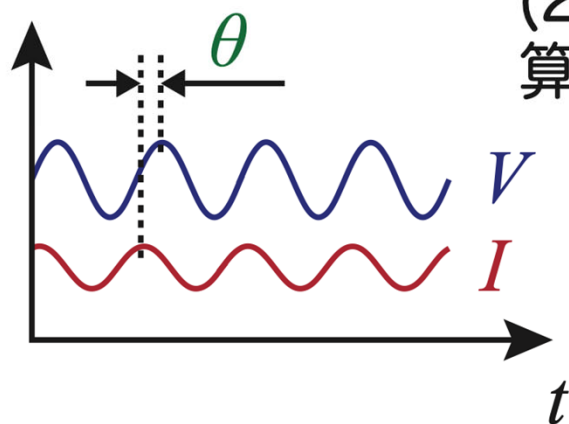


交流インピーダンス法の原理①

(1) 交流電圧を印加し
電流応答を測定する。



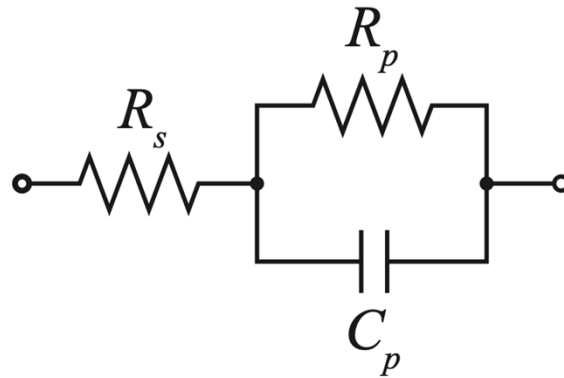
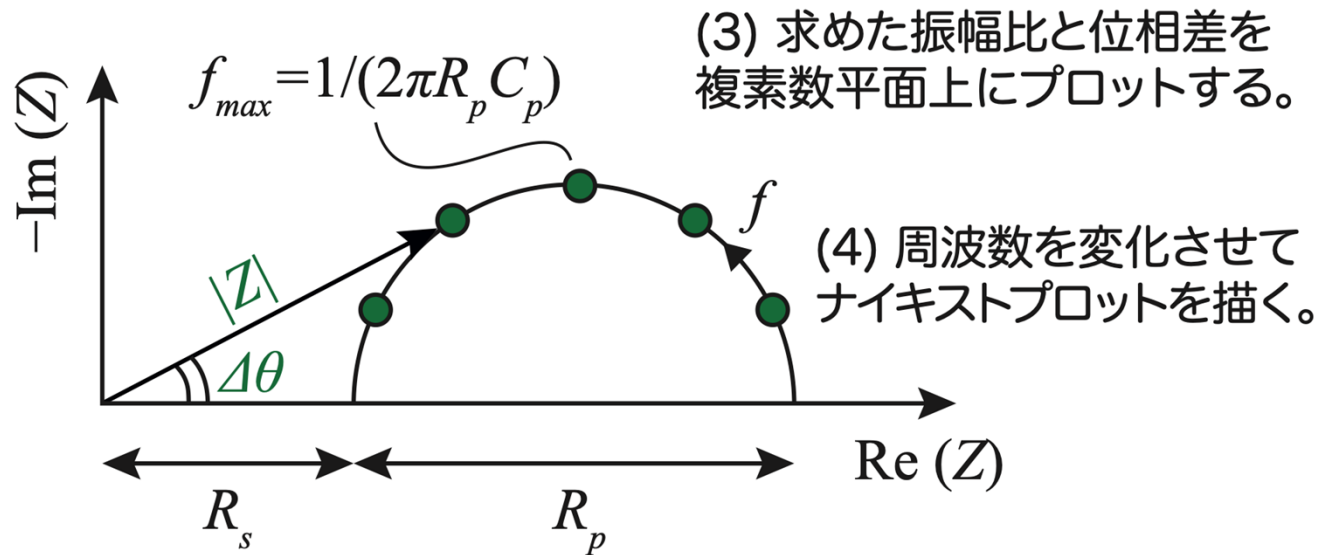
(2) 電圧と電流の振幅比と位相差をそれぞれ
算出しインピーダンスを求める。



$$|Z| = |V| / |I|$$

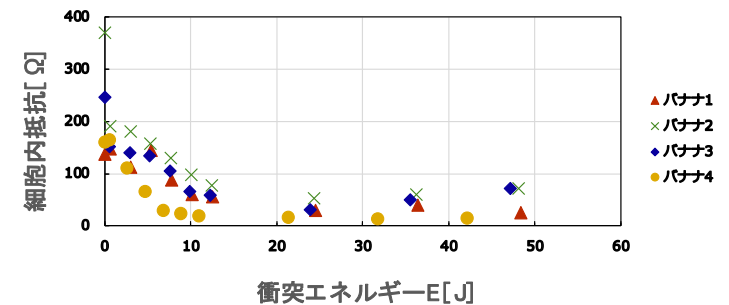
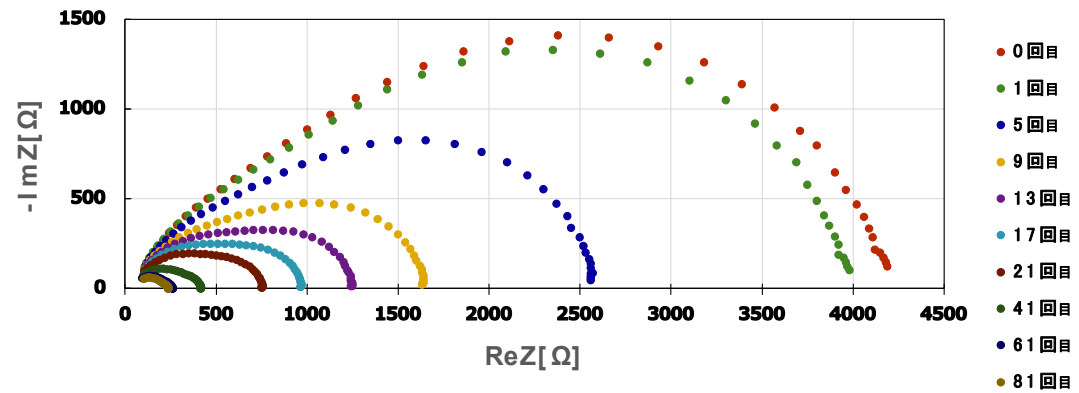
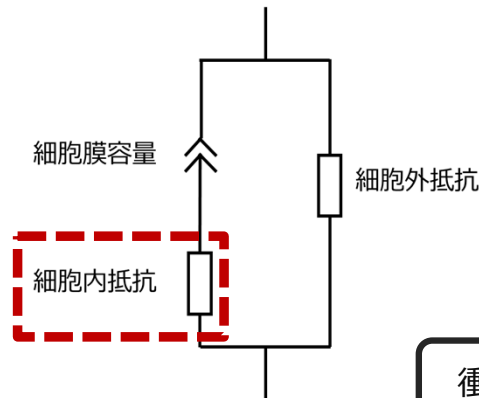
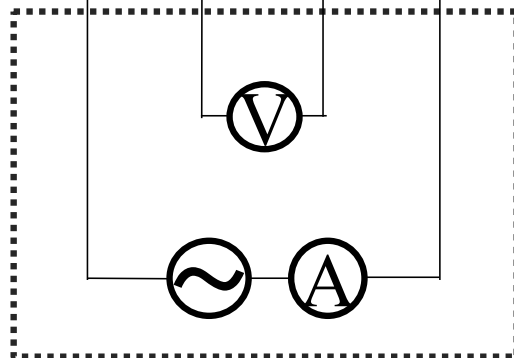
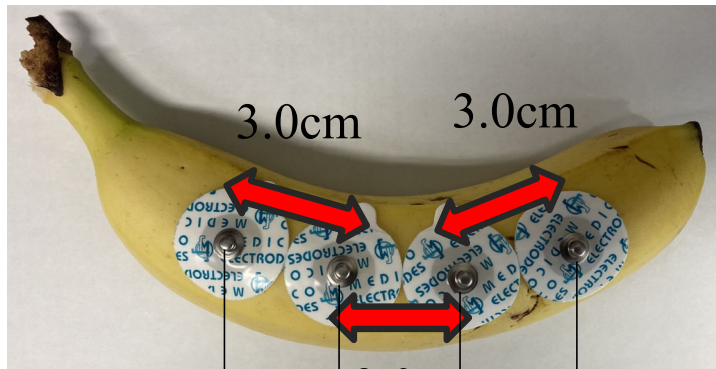
$$\theta = \text{Arg } V - \text{Arg } I$$

交流インピーダンス法の原理②



(5) ナイキストプロットより等価回路が得られる。

インピーダンスでバナナの細胞の状態がわかる



衝撃が加わったバナナは細胞内抵抗が減少する。

交流インピーダンス法のバイオ分野への応用例

<体脂肪計の原理例>



微弱な交流電流を流し、インピーダンス $Z[\Omega]$ を算出し、次の推定式を用いて脂肪の割合を算出する



$$\text{FFM}[\text{kg}] = 0.518 \frac{H^2}{R_{50}} + 0.23W + 0.13X_{c50} + 4.23s - 4.10 \quad [1]$$

(FFMは除脂肪量、Hは身長、Wは体重、sは性別、 R_{50} は50kHzでの抵抗、 X_{c50} は50kHzでのリアクタンス)

[1] T. A. Fahim and Md. S. Anower, "Mathematical Models for Fat Free Mass Measurement Based on Bioelectrical Impedance Analysis,"

[2] 久保久美子, 長崎県総合水産試験場 水産加工開発指導センター <https://www.pref.nagasaki.jp/shared/uploads/2018/11/1542692049.pdf> 最終アクセス2025年1月26日

<その他>

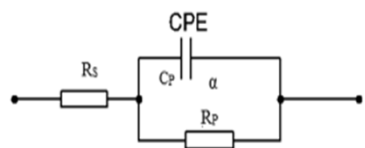
魚用品質状態判別装置
(フィッシュアナライザ) [2]

- ・植物のモニタリング
- ・血中のグルコースセンサー
- ・魚の脂肪量推定

研究背景

交流インピーダンス法の食品分析への応用

<オレンジの熟成>



オレンジの等価回路モデル [3]

<梨の落下衝突>

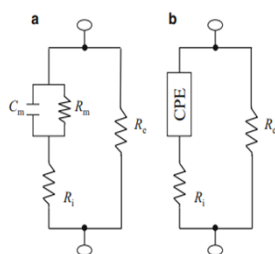
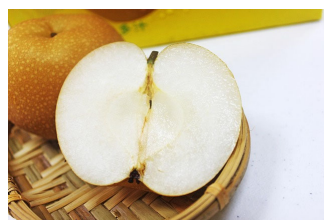


Fig. 2 Equivalent circuit models based on cell tissues. a Hayden model. b Modified Hayden model. C_m is cell membrane capacitance; R_m is cell membrane resistance; R_i is protoplasm resistance; R_e is apoplasmic fluid resistance; and CPE is the constant phase element

日本梨の等価回路モデル [4]

<交流インピーダンス法の利点>

- 非破壊で簡易に測定可能
- CTスキャンやMRIに比べて安価でデータの処理時間が短い
- 近赤外線分光法などの光センサに比較して内部の情報を取得することが可能と考えられる



食品の状態(熟成、解凍、落下衝突)を非破壊かつリアルタイムに推定するための研究が行われているが実用化には至っていない

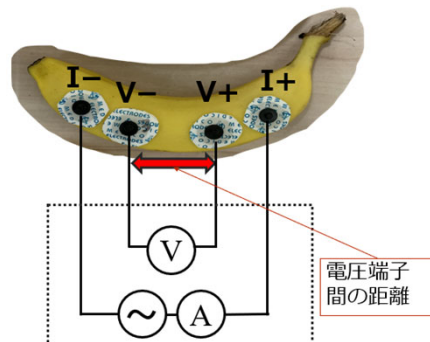
[3] Chowdhury, et al., 「Electrical Impedance Spectroscopic Study of Mandarin Orange during Ripening」. Journal of Food Measurement and Characterization 11, no. 4 (2017年12月): 1654–64. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9545-y>.

[4] Watanabe, et al., 「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, no. 11 (2018年11月): 2125–29. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2173-7>.

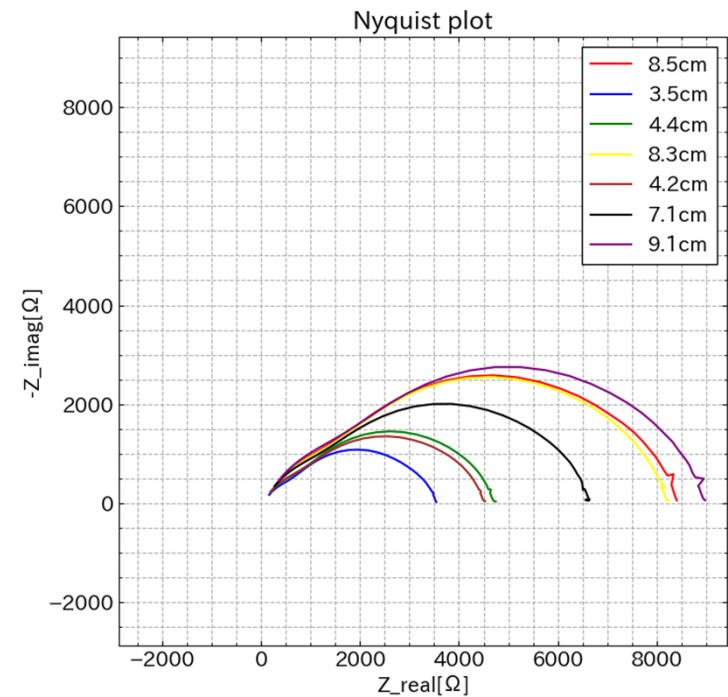
本研究で解決する課題

課題

- 等価回路モデル法の課題を持つ(詳しくは次ページ)
- 電極を貼りつける際の距離の検討が不十分

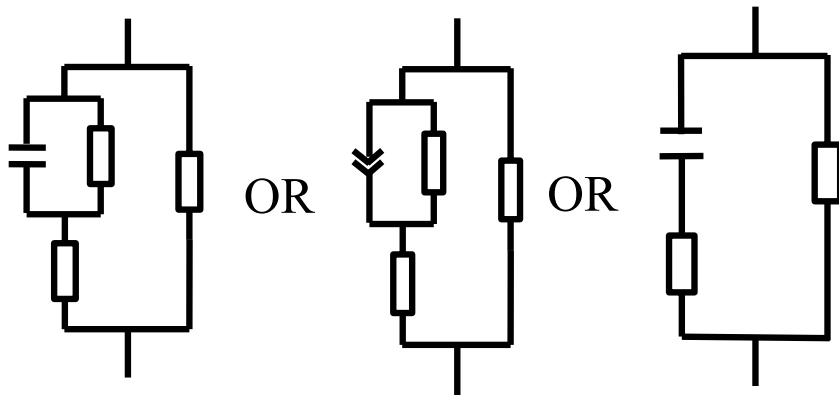


電極の取り付け位置によってインピーダンスは大きく変化する

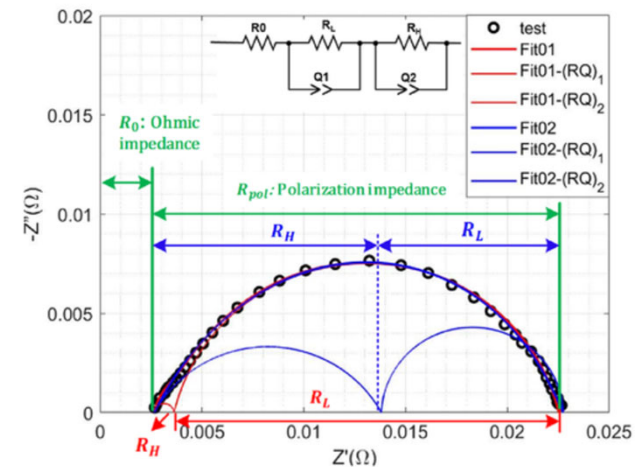


解決する方法

等価回路モデル法の一般的な課題



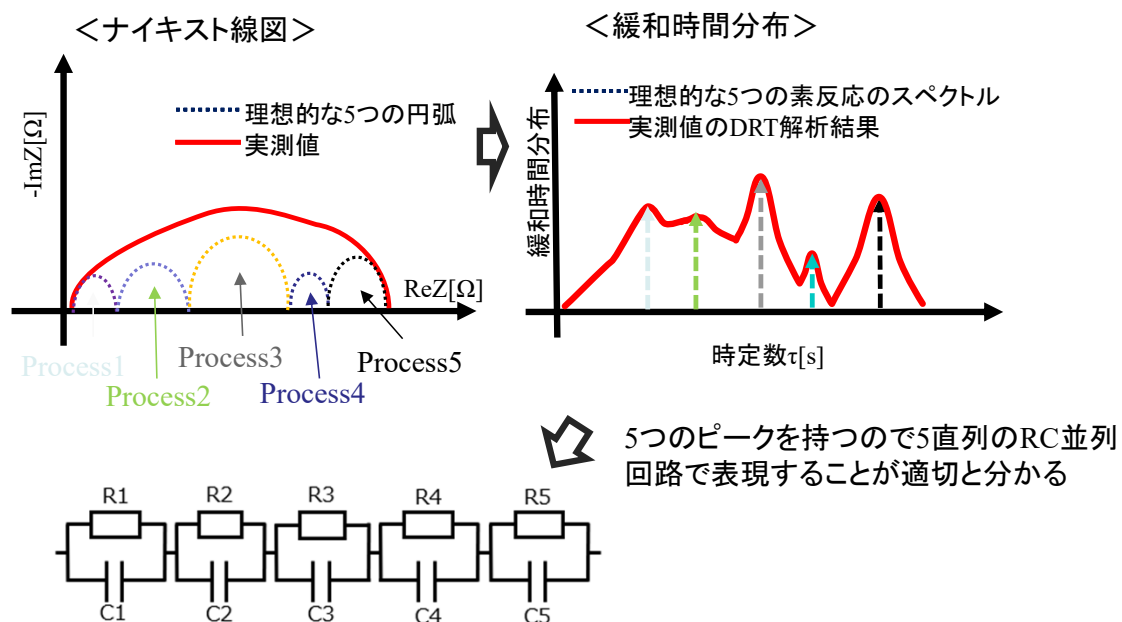
等価回路モデルは選択肢が複数存在するので適切なモデルを選択する必要がある



曲線フィッティングの際複数の解があり、初期値に依存する例 [5]

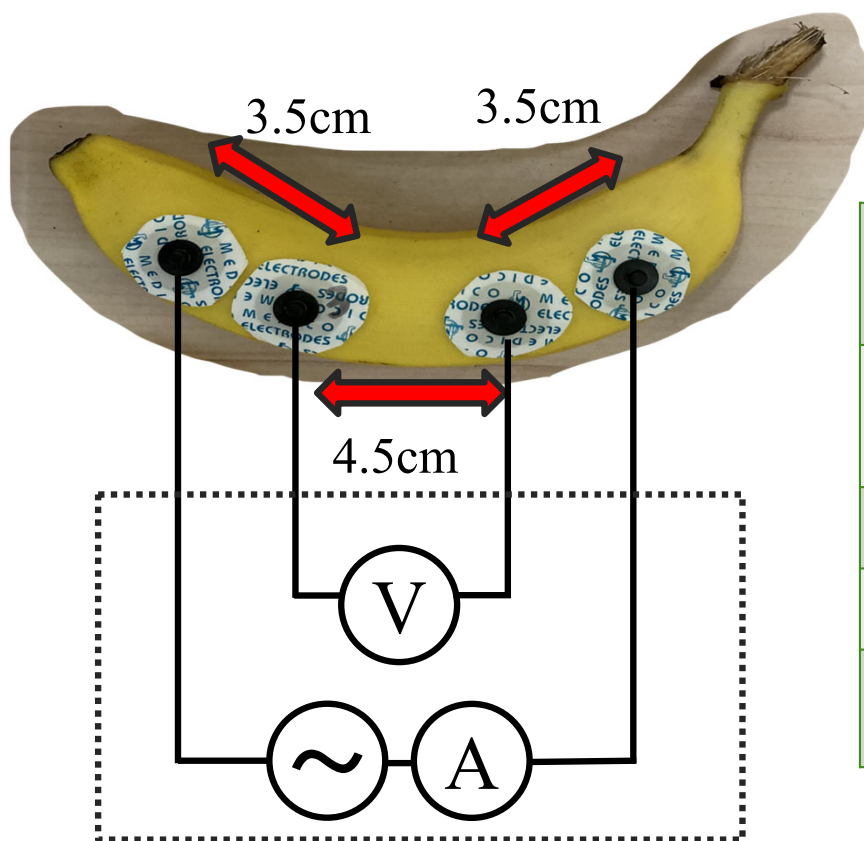
時間緩和分布法(DRT法)

DRT_peak	Frequency	フィッティング誤差
P_{cathode1}	10kHz～100kHz	イオン伝導過程(オーミック抵抗)
P_{anode1}	0.1kHz～10kHz	電荷移動過程とイオン伝導過程
P_{anode2}	20Hz～1000Hz	電荷移動過程とイオン伝導過程
P_{cathode2}	2Hz～200Hz	酸素の表面交換と拡散過程
P_{anode3}	0.5Hz～20Hz	アノード基盤におけるガス拡散過程



初期値の依存性、モデル選択の恣意性といった等価回路モデル法の問題点を
解決できる有効な手段

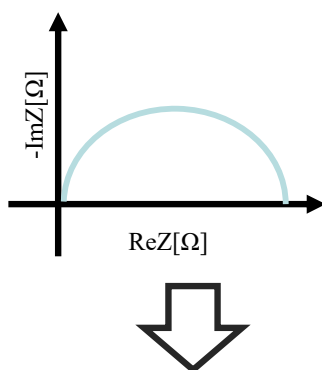
測定例



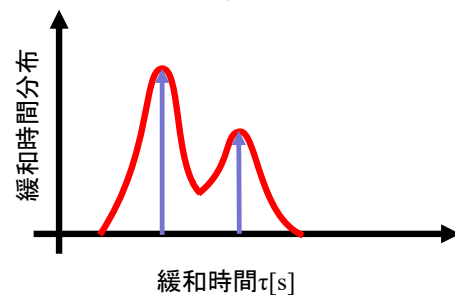
使用したバナナ	ジャイアントキャベンディッシュ×4
測定期間	10日間(24時間ごとに測定)
周波数	200kHz~1Hz
測定点	31点
交流振幅	10mV

DRT法を用いた等価回路解析手順

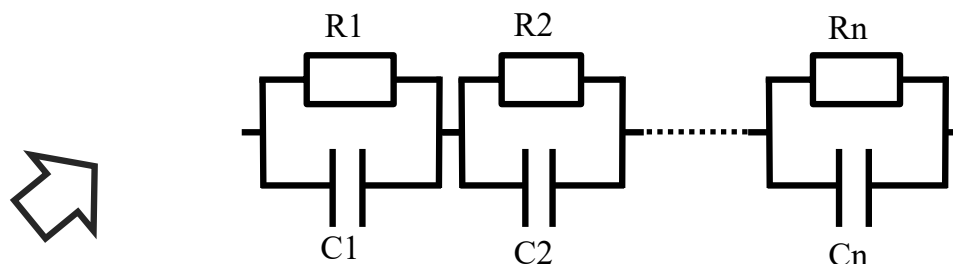
① インピーダンスを測定



② ティホノフ正則化を用いた緩和時間分布の算出



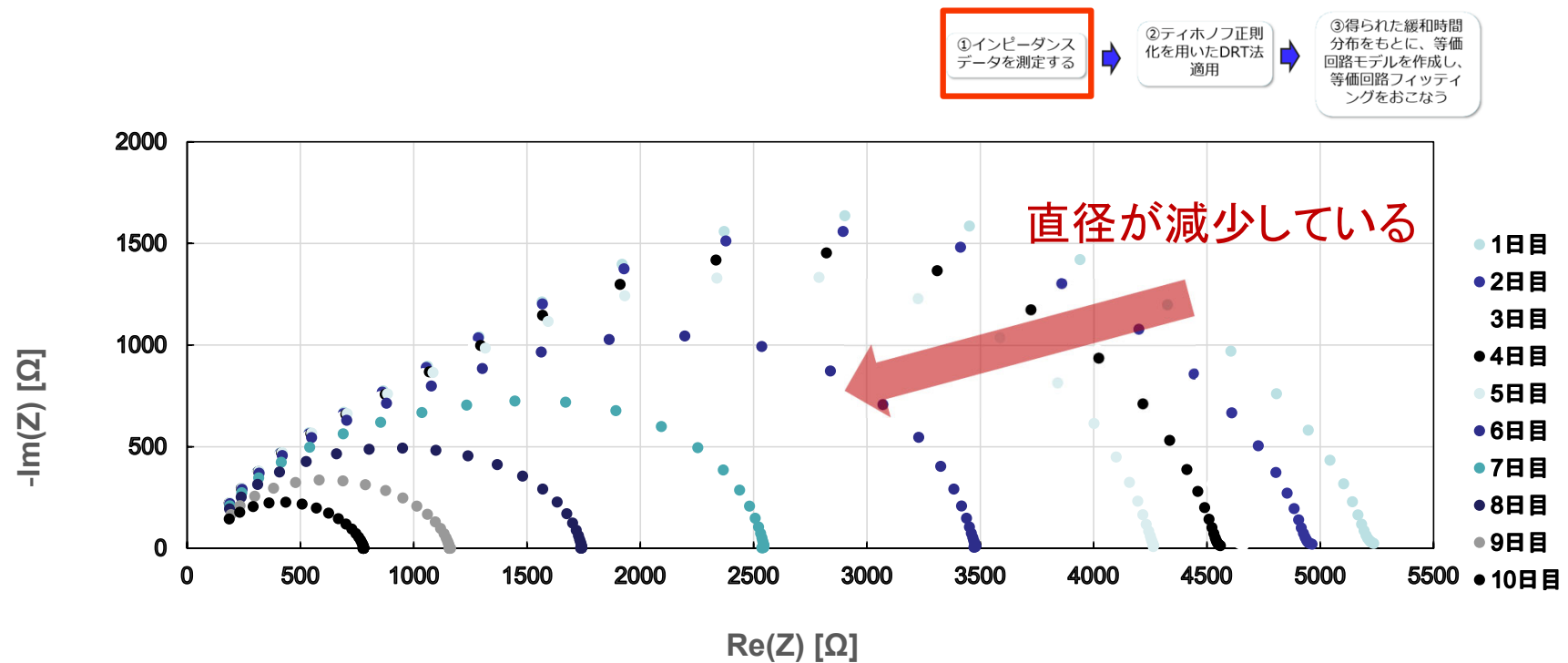
③ 得られた緩和時間分布から等価回路を選択し、算出した初期値をもとにフィッティングをおこなう



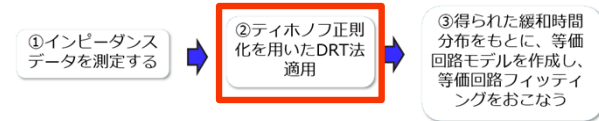
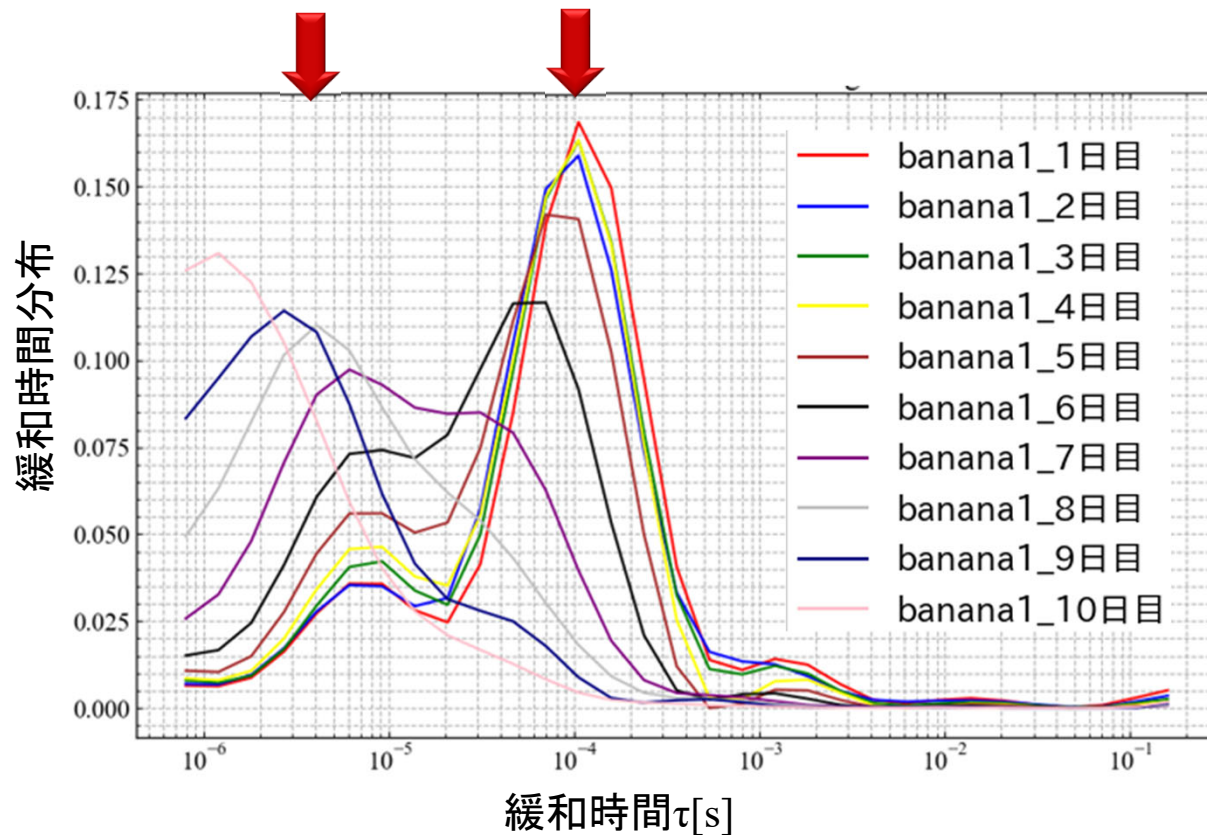
「緩和時間分布のピークの数」=「RC並列回路の数」

「緩和時間分布の分布の面積」×「分極抵抗」=「R の初期値」

測定結果(ナイキスト線図)



解析結果(DRT)①



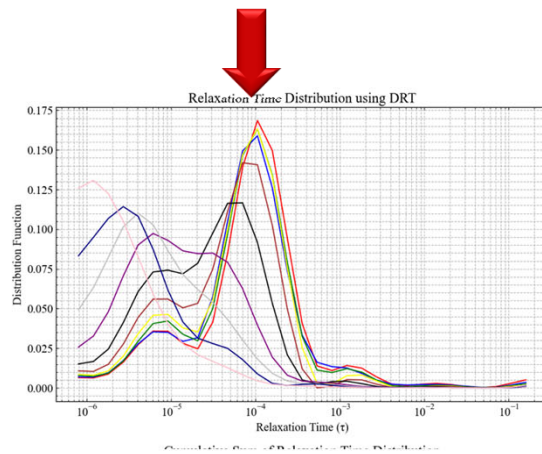
1~10 μ sと10~100 μ s付近に
細胞や電極由来の分極の2つが現れた



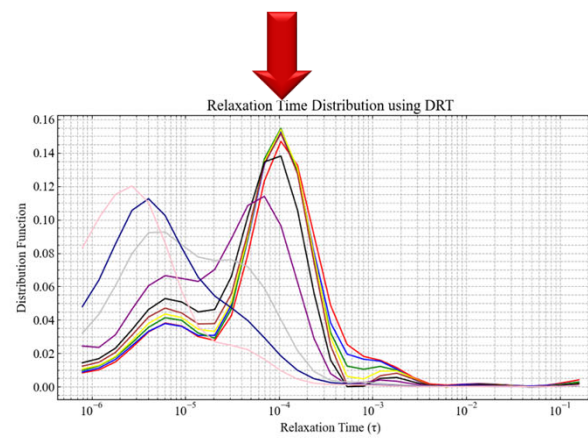
2つのRC並列回路でモデルを作成することが適切

Shi, et al.,「Enhanced Resolution Impedimetric Analysis of Cell Responses from the Distribution of Relaxation Times」, *Biosensors and Bioelectronics* 157, 2020.

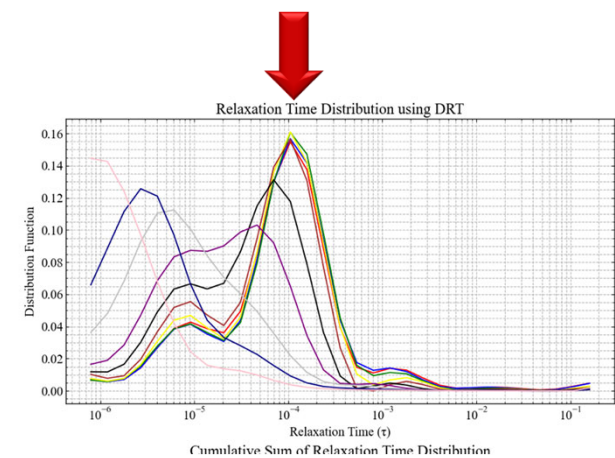
解析結果(DRT)②



バナナ2



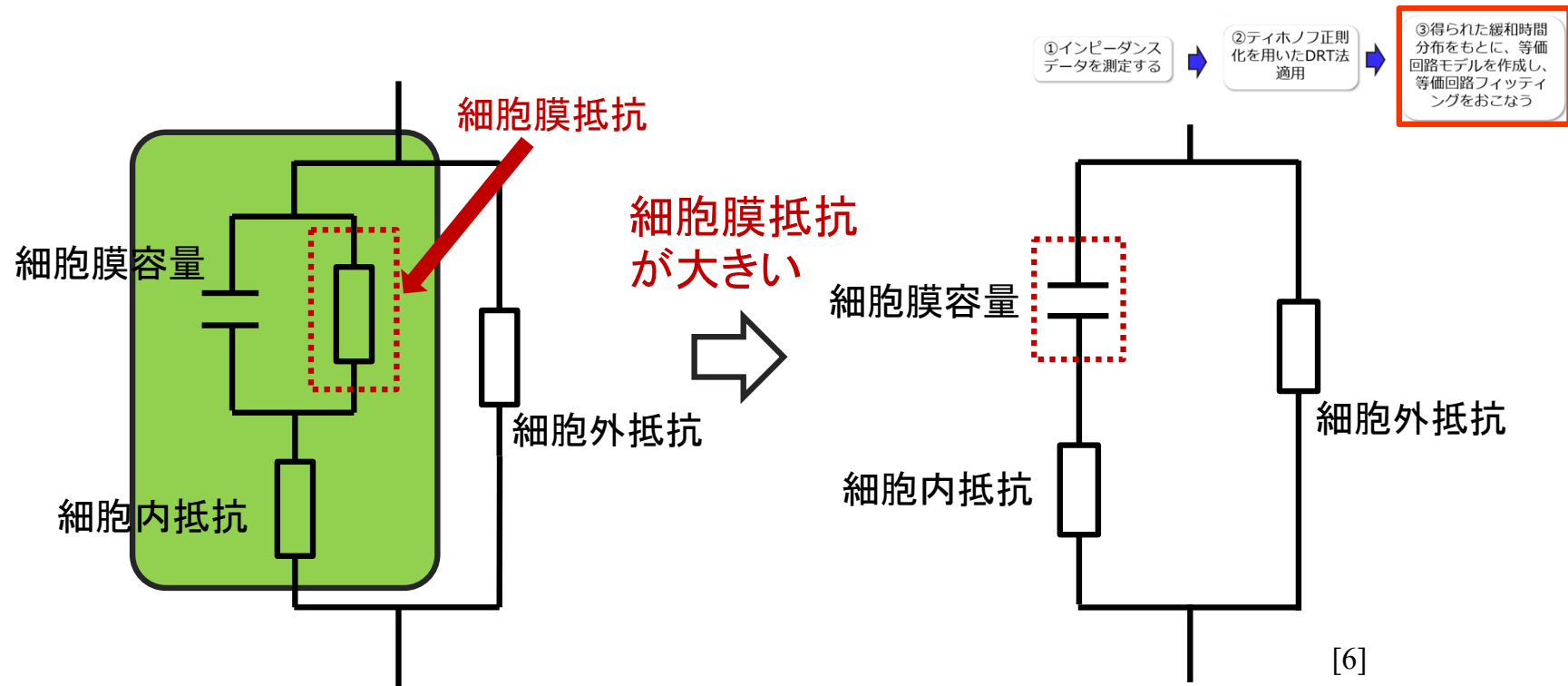
バナナ3



バナナ4

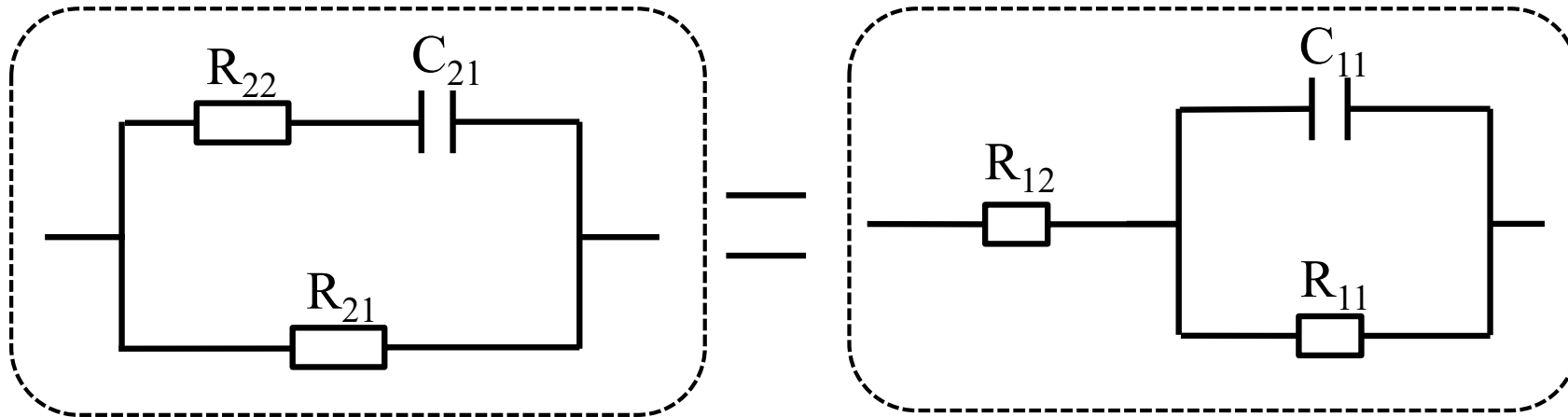
同一品種であれば、異個体であっても1つ目のピークは100us付近に現れる
→ 個体差を除去することが可能

Haydenモデルと簡略化について



[6]M. I. N. Zhang et al.: "The effect of freeze-thaw injury on the electrical properties of potato tuber and carrot root tissues," 1992

回路の等価変換



簡略化されたHaydenモデル

等価なRC並列回路

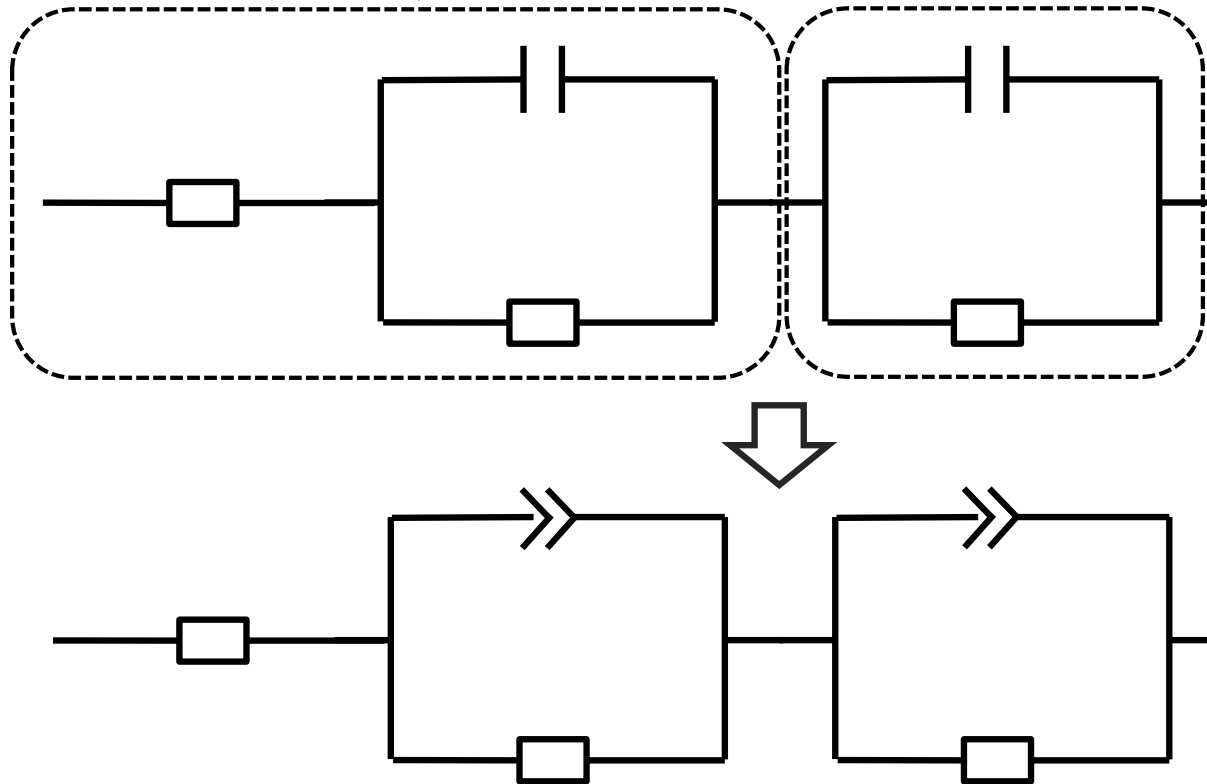
$$R_{21} = R_{12} + R_{11} \quad R_{22} = (R_{12} + R_{11}) \frac{R_{12}}{R_{11}} \quad C_{21} = C_{11} \left(\frac{R_{11}}{R_{12} + R_{11}} \right)^2$$

[7]

[7]Buteau et al.:「Explicit Conversion between Different Equivalent Circuit Models for Electrochemical Impedance Analysis of Lithium-Ion Cells」, *Journal of The Electrochemical Society* 165, no. 2, 2018

CPE (constant phase element) の導入

等価変換されたHaydenモデル



①インピーダンス
データを測定する

②デイボノフ正則
化を用いたDRT法
適用

③得られた緩和時間
分布をもとに、等価
回路モデルを作成し、
等価回路フィッティ
ングをおこなう

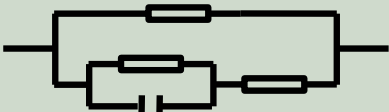
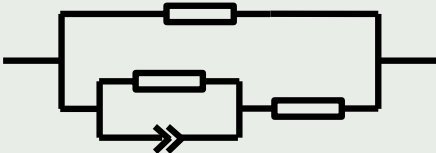

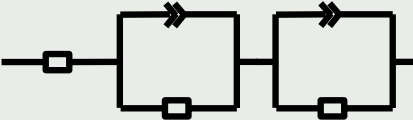
C を CPE に変更するより、細胞や電極の
不均一性を考慮するとともにナイキスト
線図の円の歪を表現できるようになる

実験方法: フィッティングに用いた等価回路

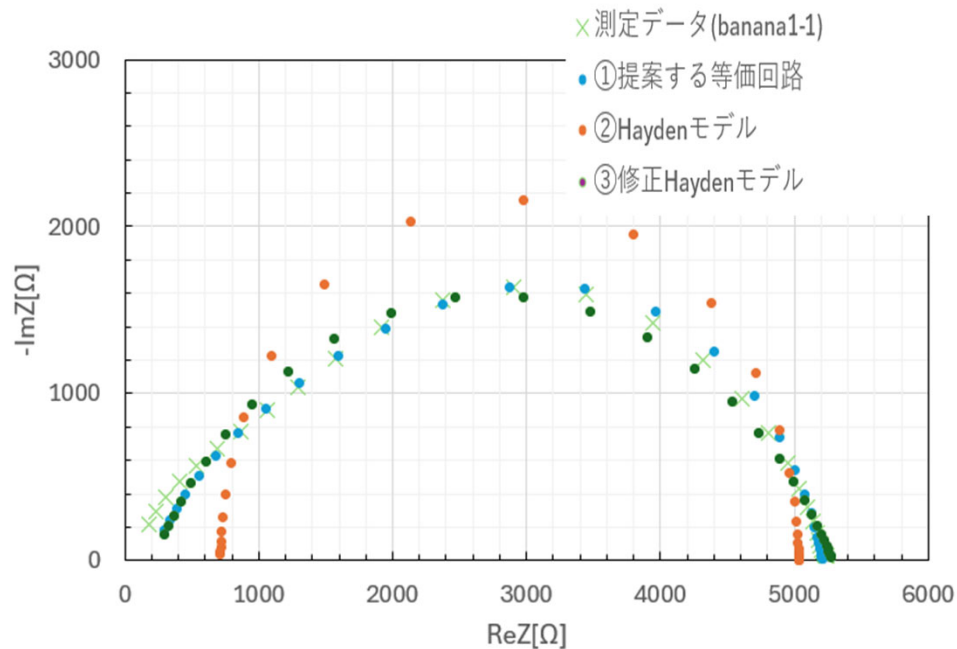
①インピーダンス
データを測定する

②ディホノフ正則
化を用いたDRT法
適用

③得られた緩和時間
分布をもとに、等価
回路モデルを作成し、
等価回路フィッティ
ングをおこなう

	回路図	説明
Haydenモデル		植物の細胞を模擬した古典的なモデル
修正Haydenモデル		HaydenモデルのキャパシタをCPEにして ナイキスト線図の歪を表現可能にしたモデル
簡略化された 修正Haydenモデル		修正Haydenモデルでの細胞膜抵抗を 取り除き、素子数を減らしたモデル
提案法モデル		緩和時間分布から提案するモデル

等価回路解析の結果

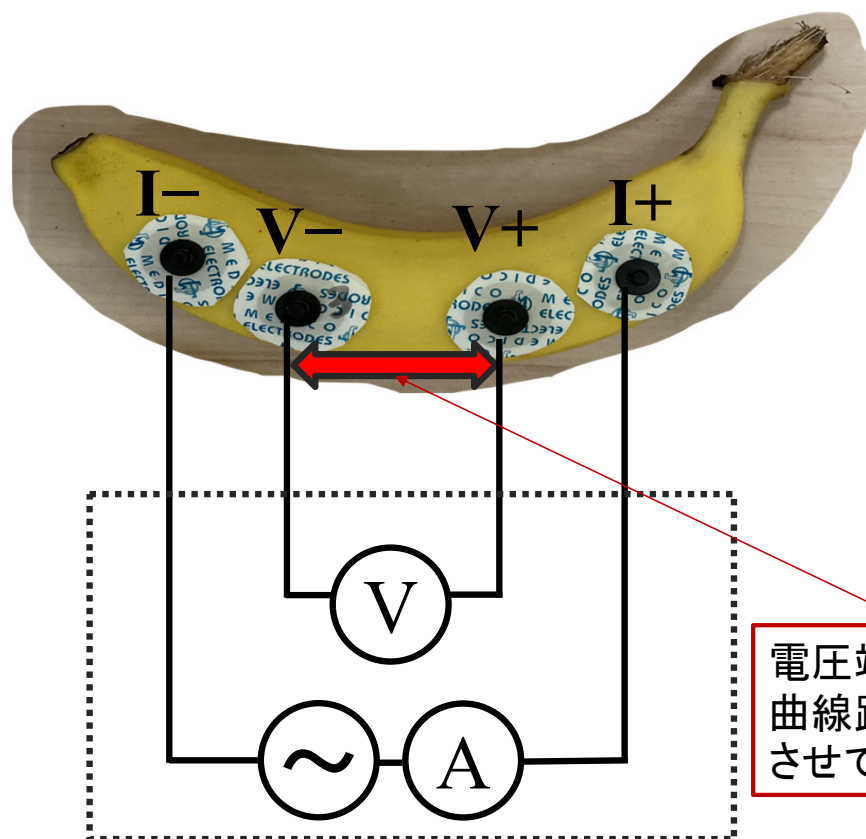


$$\text{フィッティングの誤差}[\Omega] = \sqrt{\frac{|Z_{\text{measured}} - Z_{\text{calculation}}|^2}{Z \text{ の測定点数}}}$$

	回路図	フィッティング誤差
Haydenモデル		341.7
修正Haydenモデル		81.82
簡略化された修正Haydenモデル		81.81
等価変換したHaydenモデル (提案法)		47.61

フィッティング誤差が小さくなり、等価回路モデルの精度を向上させることができた

電圧端子間の距離とインピーダンスの実験



ケミカルインピーダンスアナライザ

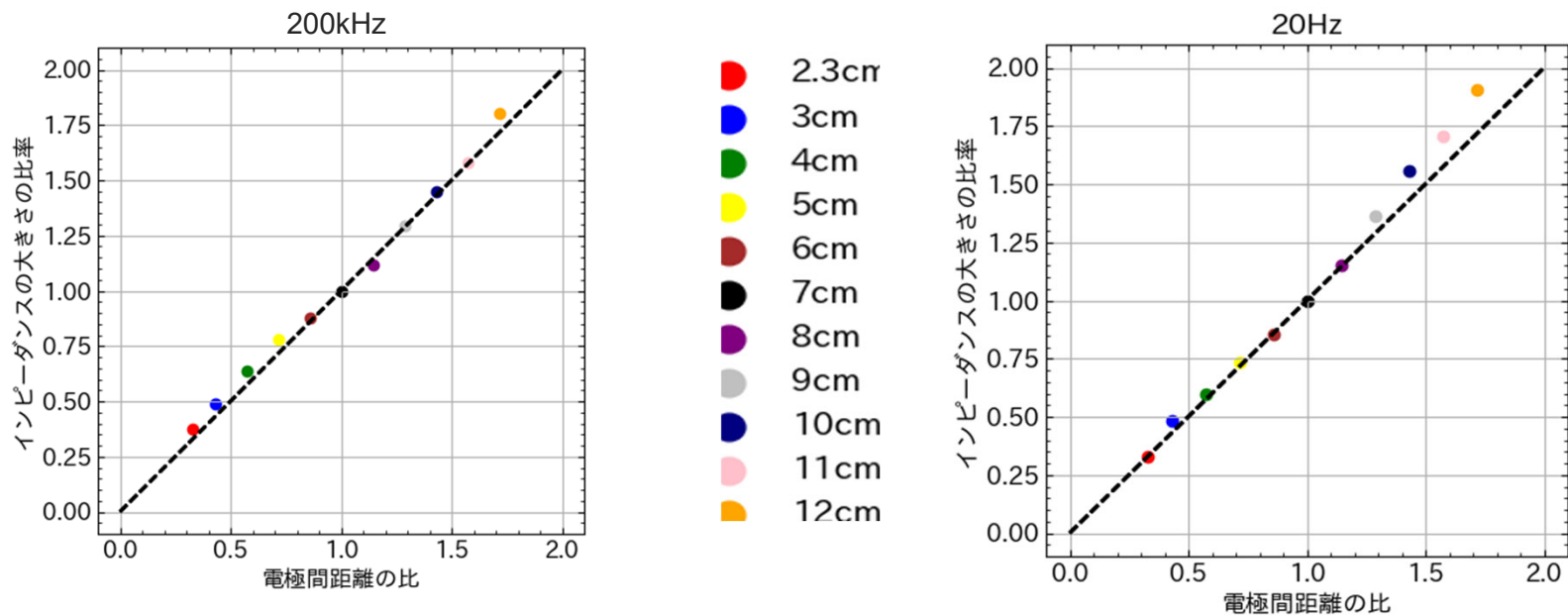
電流端子(I+とI-)を固定し、
電圧端子間の距離を2.3cm~12cmに
変化させインピーダンスを測定

電圧端子間の
曲線距離を変化
させていく

使用したバナナ	ジャイアント キャベンディッシュ
周波数	200kHz~2Hz
測定点	51点
交流振幅	10mV

結果：電極を貼る位置の変化比較

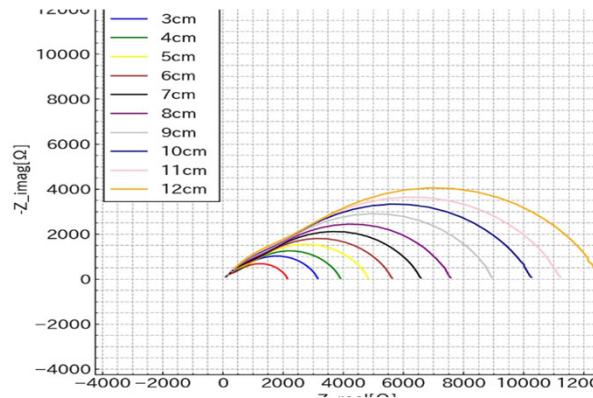
電圧端子間の距離が7.0cmの時の距離のインピーダンスの大きさを基準にした時の電圧端子間の距離の比率とインピーダンスの大きさの比率の周波数ごとのプロット



電圧端子間の距離とインピーダンスの関係が比例関係にあることが確かめられた

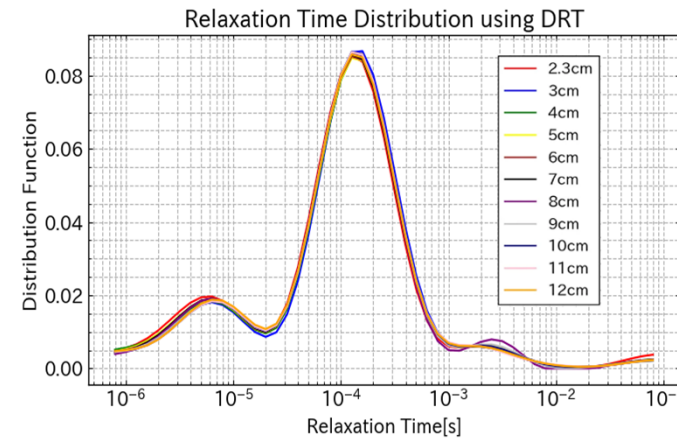
電極貼り付け位置とナイキスト線図・DRTへの影響

<ナイキスト線図>



- ・インピーダンスで評価する際には電極間の距離を正確に測定する必要がある

<DRT>



- ・DRTは、電圧端子間の距離に関わらず、分布が重なった

緩和時間分布法で解析をおこなうことで
電極の貼り付け位置の変化に依存しない測定が可能になった

まとめ

本技術では果実の品質判定における交流インピーダンス法とDRT法の有効性を示した。

- DRTと提案モデルを用いることで、交流インピーダンス法で得られた測定値をより高精度にフィッティングできることを示した。
- 緩和時間分布法を用いることで電極の距離の変化に対するインピーダンスの変化を許容できることがわかった。

従来技術とその問題点

- 近赤外分光法・ガスセンサー法
→ 機器そのものが非常に高価
- 画像処理・超音波法
→ 状態推定の精度が低い

交流インピーダンス法は電氣的な測定により実現可能であるため、
機器が安価に構成でき、精度も高い

新技術の特徴と従来技術との比較

- 非侵襲・非破壊・高精度な**全数検査**が可能
- 個体差の影響を受けにくい**ため品質の均一化**が可能
- 電気化学的な方式であるため検査工程の自動化・省力化で**低コスト**を実現

想定される用途

- 生産者での品質可視化による適切な収穫時期の判断、全数検査で高度な等級分けと出荷ロスの低減
- 流通や卸売業者での検査工程自動化による人手不足対策、客観的な品質データによる等級基準での仕入れ、出荷前の品質確認による取引先とのトラブルリスク低減
- 小売業者での品質の高い果実の安定供給による他の小売業者との差別化と顧客満足度の向上、劣化リスク品の陳列・廃棄で販売や在庫管理向上

実用化に向けた課題

- さまざまな種類の果実やその他の食品での検討・データ蓄積
現在はアボカド・鯖・トマトなどで検証中
- 再利用可能かつ安定性が高い電極開発
現在は心電図用のECG(銀-塩化銀)電極を使用している
- 空間分解能を有するインピーダンス測定

企業への期待

- 耐久性・メンテナンス性が高い電極の開発
- 製品化を見据えたプロトタイプ開発
- プロトタイプを用いた実証試験

社会実装への道筋

- 現在 : 基本原理が完成
- 2025年度 : 電極や回路構成を検討
- 2026年度 : ハードウェアプロトタイプ開発・測定例の蓄積
- 2027年度 : 実証試験開始

企業への貢献、PRポイント

- 交流インピーダンス法をDRT法により果実などの生鮮食品の定量的な品質評価が可能
- 東京理科大学では食品以外にも蓄電池・太陽電池・燃料電池などへの導入・共同研究実績があり、知見やノウハウが豊富

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：果実の状態評価装置および果実の状態評価方法
- 出願番号：特願2025-012237
- 出願人：東京理科大学
- 発明者：片山 昇、山崎 智生

お問い合わせ先

東京理科大学
産学連携機構

T E L 0 3 – 5 2 2 8 – 7 4 4 0

e-mail shinsei_kenkyu@admin.tus.ac.jp