

電気インピーダンス法を用いる青果物および穀物組織の  
物性評価に関する研究

安藤 泰雅

システム情報工学研究科

筑波大学

2014年3月



# 目次

<b>第1章 序 論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
<b>第2章 電気インピーダンス法の原理および青果物組織のモデル化</b>	<b>7</b>
2.1 はじめに	7
2.2 計測原理	7
2.3 青果物組織のモデル化	11
2.4 ま と め	18
<b>第3章 乾燥過程における電気インピーダンス特性の変化</b>	<b>19</b>
3.1 はじめに	19
3.2 実験方法	20
3.3 実験結果および考察	24
3.4 ま と め	36
<b>第4章 乾燥前処理が細胞構造に及ぼす影響および乾燥速度との関係</b>	<b>37</b>
4.1 はじめに	37
4.2 実験方法	38
4.3 実験結果および考察	39
4.5 ま と め	43
<b>第5章 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を検出</b>	<b>45</b>
5.1 はじめに	45
5.2 実験方法	46
5.3 実験結果および考察	48
5.7 ま と め	52

<b>第6章 結 論</b>	<b>53</b>
6.1 研究成果 . . . . .	53
6.2 将来の展望 . . . . .	54
<b>謝 辞</b>	<b>55</b>
<b>参考文献</b>	<b>57</b>
<b>著者論文</b>	<b>65</b>
<b>著者紹介</b>	<b>69</b>

# 目 次

<b>Fig. 1-1</b>	青果物の一般的な流通経路	1
<b>Fig. 1-2</b>	玄米の一般的な流通経路	2
<b>Fig. 1-3</b>	本論文の構成	4
<b>Fig. 2-1</b>	$R$ - $C$ 並列回路および Nyquist 線図	8
<b>Fig. 2-2</b>	$CPE$ のインピーダンスおよび位相差における Bode 線図	9
<b>Fig. 2-3</b>	$R$ - $CPE$ 並列回路および Nyquist 線図	10
<b>Fig. 2-4</b>	細胞構造の模式図	12
<b>Fig. 2-5</b>	等価回路	12
<b>Fig. 2-6</b>	細胞群の模式図および等価回路	13
<b>Fig. 2-7</b>	シミュレーションにより求めた細胞群のインピーダンス特性	14
<b>Fig. 2-8</b>	実験値と等価回路モデルの近似結果	17
<b>Fig. 3-1</b>	実験系の概略	21
<b>Fig. 3-2</b>	針状電極	21
<b>Fig. 3-3</b>	2 端子法および 4 端子対法の比較	23
<b>Fig. 3-4</b>	乾燥過程における含水率の経時変化	24
<b>Fig. 3-5</b>	60°C 乾燥過程における Bode 線図の変化	25
<b>Fig. 3-6</b>	青果物組織および電流の流れの模式図	26
<b>Fig. 3-7</b>	60°C 乾燥過程における Nyquist 線図の変化	27
<b>Fig. 3-8</b>	未乾燥試料のインピーダンス特性と等価回路モデルの近似結果	28
<b>Fig. 3-9</b>	含水率 0.21 (dry basis) の乾燥試料のインピーダンス特性と等価回路モデルの近似結果	29
<b>Fig. 3-10</b>	乾燥過程における含水率と等価回路パラメータの関係	30
<b>Fig. 3-11</b>	乾燥過程における試料中心温度の経時変化	31
<b>Fig. 3-12</b>	乾燥過程における $R_0/R_1$ 比の経時変化	31
<b>Fig. 3-13</b>	吸水過程における等価回路パラメータの変化	34

<b>Fig. 4-1</b>	実験系の概略	39
<b>Fig. 4-2</b>	前処理試料の乾燥過程における含水率の経時変化	40
<b>Fig. 4-3</b>	前処理試料の Nyquist 線図	41
<b>Fig. 4-4</b>	乾燥速度定数 $k$ と $R_0/R_1$ 比の関係	42
<b>Fig. 5-1</b>	実験系の構成	47
<b>Fig. 5-2</b>	平行平板電極	47
<b>Fig. 5-3</b>	貯蔵過程における玄米の Nyquist 線図の経時変化	48
<b>Fig. 5-4</b>	通常玄米における含水率と等価回路パラメータの関係	50
<b>Fig. 5-5</b>	カビ発生玄米における含水率と等価回路パラメータの関係	51

# 表 目 次

<b>Table 2-1</b>	実験値および各等価回路モデルの近似精度 . . . . .	17
<b>Table 3-1</b>	未乾燥試料における実験値および各等価回路モデルの近似精度 . . . . .	28
<b>Table 3-2</b>	含水率 0.21 (dry basis) の乾燥試料における実験値および各等価回路モデルの近似精度 . . . . .	29
<b>Table 4-1</b>	指数モデルの各定数値 . . . . .	40
<b>Table 4-2</b>	各前処理試料における修正モデルのパラメータ値 . . . . .	41





# 第1章

## 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 青果物および穀物の流通・加工

青果物は組織内に多量の水分を含んでおり<sup>1)</sup>、また、収穫後も呼吸作用や蒸散作用による成分変化がみられることから貯蔵性が低い<sup>2)</sup>食品素材であると言える。そのため、保存性、輸送性の向上を目的とした青果物の加工は古くから行われてきた。Figure 1-1 に一般的な青果物の流通経路を示す。一般に、生産者によって収穫された青果物は生鮮品として流通する場合と加工品として流通される場合に分けられる。生鮮品として流通する場合は、生産者から農協等の出荷団体における貯蔵、選別を経て消費者や外食産業に運ばれる。一方、加工品として流通する場合は、生産者から直接工場に運ばれ加工される場合が多く、加工により生鮮品と比較し、より保存性の高い食品として流通する。貯蔵、輸送技術の発展した現代における青果物加工の意義は、保存性の向上だけではなく、食味を向上させることによる嗜好性の付与や調理上の利便性向上にもあると言える<sup>3)</sup>。

食品の加工は食品衛生法<sup>4)</sup>およびJAS<sup>5)</sup>(日本農林規格協会)により定義され、

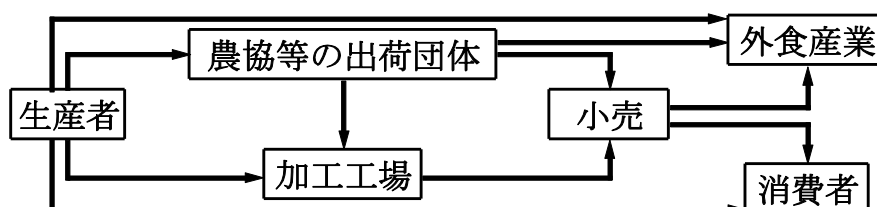


Fig. 1-1 青果物の一般的な流通経路

食品衛生法では「ある物に加工を加えて、その物の本質を変えないで形態だけを変化させること」、JAS では「あるものを材料としてその本質は保持させつつ、新しい属性を付加すること」とされる。それぞれに当てはまる加工として、切断、混合、冷凍、製粉、乾燥、加熱、塩蔵等がある。

このような青果物加工の一つに乾燥がある。青果物乾燥の意義は含水率を低下させることにより水分活性を低下させることにある<sup>6)</sup>。これにより、微生物汚染を抑止し保存性を向上させるとともに変質を防止することができる<sup>7)</sup>。また、独特の食感、風味などを付与する嗜好性の向上なども青果物乾燥の大きな意義である<sup>6)</sup>。

青果物の乾燥は通常、高温条件下に曝露することによる熱風乾燥や、天日乾燥により処理される<sup>8)</sup>。しかしながら、このような乾燥下では高温条件下に長時間晒されることにより、色彩、栄養成分、テクスチャ等の化学的・物理的性質が大きく変化することが知られている<sup>9)-12)</sup>。そのため、適切な加工条件を設定するために、これらの品質をリアルタイムに評価できる技術が求められている。また、青果物の乾燥においては、適切な乾燥条件の設定のため、乾燥速度の把握が極めて重要とされており、多くの先行研究において青果物の乾燥速度に関する報告がなされている<sup>13)-15)</sup>。現在の乾燥青果物の製造現場では、人の経験的な知見によって乾燥時間を設定している。そのため、乾燥前における青果物の乾燥速度を推定することができれば乾燥処理の自動化や簡略化に貢献できると考えられる。

一方、我が国において代表的な穀物である米は、基本的に年に1回しか収穫できないことから、周年供給のために年単位の長期貯蔵が行われる。**Figure 1-2**に米の一般的な流通経路を示す。一般に、生産された米は農協等の出荷団体に集積され、小売業者を介し消費者あるいは外食産業に運ばれる。一部の米は災害時の非常用として政府備蓄米として政府保有の倉庫において貯蔵される。通

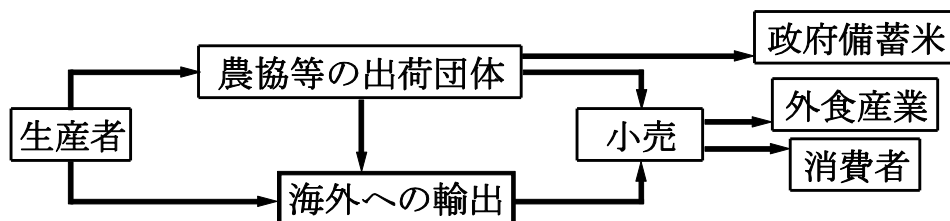


Fig. 1-2 玄米の一般的な流通経路

常の場合、米は玄米の状態では貯蔵されるが、玄米の品質には含水率が大きく関与しているとされている。含水率が高い場合、呼吸作用の活発化<sup>16)</sup>および酵素反応の活性化により食味が低下し、カビの発生リスクも高まる<sup>17)</sup>。また、含水率が低い場合、ひび割れ等の品質劣化が起こるため<sup>18)</sup>、玄米の貯蔵過程では含水率を適切な範囲に保つことが重要とされている。また、近年では農産物の貿易の活発化に伴い、玄米の船舶での輸送量が増加している。その際、船舶が熱帯地域等の高温高湿地域を通過する際、玄米の含水率が大きく変動しやすいことが問題となっている。そのため、我が国においては玄米を輸入する際には港湾においてカビ検査を実施することを義務付けている。現状の玄米の含水率測定、カビ検査は抜き取り測定や目視による検査に依存している。ここで、モニタリングによる含水率測定およびカビ発生検出が可能になればフィードバック制御による空調管理の最適化やカビ検査の簡略化に貢献できると考えられる。

### 1.1.2 電気インピーダンス法の利用

本研究における提案手法である電気インピーダンス法はインピーダンスの周波数特性から対象の性質を推定する手法であり、燃料電池の評価、体組成計、エマルジョン溶液の評価などに応用されている<sup>19)-21)</sup>。計測対象が細胞構造を持つ生体組織である場合、細胞の状態を推定することができる。電気インピーダンス法の利点として、リアルタイム計測が可能であり、対象の持つ特性のモニタリング、簡易評価に適することが挙げられる。青果物や穀物等の植物組織は多数の細胞の集合体から成立しており、これらの細胞の状態は組織の物理的特性に大きく関与する。そのため、電気インピーダンス法を用いることで、乾燥過程における青果物組織の物理的な特性の評価を行える可能性がある。また、玄米組織の細胞の状態を推定することにより、含水率の変動、カビ発生の検出をリアルタイム計測することで、モニタリング手法として活用できると考えられる。本研究では、上記の青果物、穀類の品質推定のため、電気インピーダンス法の利用を検討した。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は青果物および穀類の加工、流通過程における電気インピーダンス特性の変化から、青果物および穀物組織内の細胞構造の変化を推定し、物理的品質の評価法を確立することにある。まず、電気インピーダンス法を適用するために、青果物および穀物組織の等価回路モデルの構築を行う（目的①）。

また、構築した青果物および穀物組織の等価回路モデルを利用し、青果物の乾燥過程における細胞構造の変化をできインピーダンス法により推定し、物理的特性評価のための知見を得る（目的②）。また、電気インピーダンス特性から青果物の細胞の状態を推定し、乾燥速度との関係性を評価することで、乾燥速度の予測および乾燥速度改善を目的とした前処理法の検討のための基礎的な知見を得る（目的③）。さらに、玄米の含水率の変動およびカビ発生による電気インピーダンス特性の変化を評価し、簡便かつリアルタイム計測に応用可能な原理を確立する（目的④）。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を Fig. 1-3 に示し、以下にその内容について述べる。

第2章では電気インピーダンス法の基本原理および青果物組織の等価回路の構築に関して述べる。先行研究により提案されている生体組織の等価回路モデルを基に青果物および穀物組織に適用可能なモデルの構築を検討する。また、等価回路モデル中のパラメータの算出方法について述べると共に、複数の細胞から成る組織の電気インピーダンス特性をシミュレーションにより予測する。

第3章では乾燥過程における青果物組織の物理的特性の推定のための基礎的

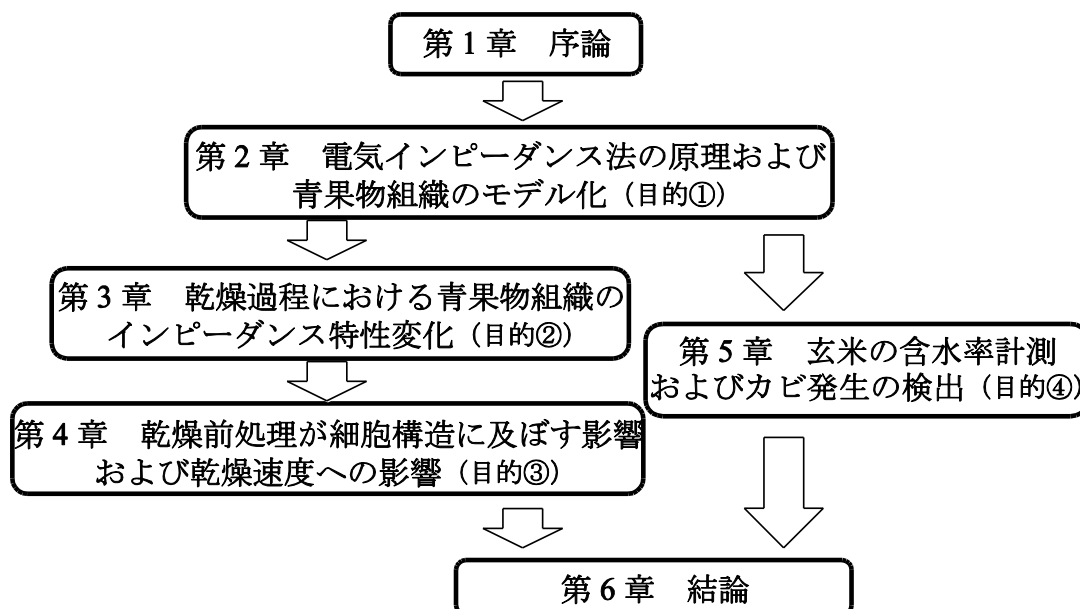


Fig. 1-3 本論文の構成

な知見を得るため、乾燥過程における青果物組織の電気インピーダンス特性の変化について実験により検証する<sup>22)</sup>。また、第2章で構築した等価回路モデルを基に乾燥試料のインピーダンス特性を解析し、評価を行う。さらに、算出した等価回路パラメータの関係から対象組織内の細胞膜の損傷の指標を定義する。また、含水率がインピーダンス特性にどのように影響するかを確認するために乾燥試料の吸水過程におけるインピーダンス特性の変化についても調査を行う。

第4章では、第2章で構築した等価回路および第3章で定義した細胞膜損傷の指標を用い、乾燥前処理による細胞膜の損傷が乾燥速度に及ぼす影響について検討する<sup>23)</sup>。青果物の乾燥過程における含水率変化から乾燥速度定数を算出し、第3章で定義した細胞膜損傷の指標と比較することでこれらの関係について知見を得る。

第5章では、代表的な穀物である玄米に着目しその等価回路モデルの構築を行う。また、その電気インピーダンス特性から玄米の貯蔵過程における含水率の計測およびカビ発生の検出を行う<sup>24)</sup>。

第6章では本研究で得られた成果をまとめ、将来の展望について述べる。



## 第2章

# 電気インピーダンス法の原理および 青果物組織のモデル化

### 2.1 はじめに

電気インピーダンス法はインピーダンスの周波数特性から対象の物理的な状態を推定する手法である。この手法は迅速かつ簡便な手法であることから様々な生体組織の状態推定に用いられてきた。電気インピーダンス特性を評価するために、一般的に等価回路解析が用いられる。等価回路解析を用いることで、対象の特性を定量的に把握することが可能になる。本章では、まず、電気インピーダンス法の原理および等価回路解析の手法について述べる。次に、細胞の等価回路を基にした青果物組織の等価回路モデルを構築する。さらに、青果物組織のモデルであるジャガイモ切片のインピーダンス特性を実験により計測し構築したモデルの妥当性を検証する。

### 2.2 計測原理

#### 2.2.1 電気インピーダンス法の原理

電気インピーダンス法は、計測対象に交流電圧を印加し、得られたインピーダンスの周波数特性から対象の状態を推定する手法である。計測対象へ印加する交流電圧  $E(\omega)$  と応答電流  $I(\omega)$  の比からインピーダンス  $Z(\omega)$  を計測する。複素数であるインピーダンス  $Z(\omega)$  は、以下の式によって表記できる。

$$Z = \frac{E}{I} = |Z| e^{j\theta} = Z' + jZ'' \quad (2-1)$$

$E$  と  $I$  の大きさの比からインピーダンス  $|Z|$  が、位相差  $\theta$  からインピーダンスの実数部  $Z'$  と虚数部  $Z''$  がそれぞれ得られる。これらの計測を周波数を走査しながら

行うことでインピーダンスの周波数特性が得られる。一般に、インピーダンス特性の図示には、複素平面上に周波数軌跡をプロットした Nyquist 線図が用いられる。

## 2.2.2 等価回路モデル

### (1) R-C 並列回路

計測した実験値を基に、等価回路モデルを構築し、等価回路の各パラメータを算出する。例として、最も基本的な等価回路である抵抗  $R$  と容量  $C$  の並列回路 (Fig. 2-1) を挙げて説明する。R-C 並列回路の合成インピーダンス  $Z_{R-C}$  は以下の式によって表される。

$$Z_{R-C} = \frac{R}{1 + j\omega CR}. \quad (2-2)$$

ここで、 $\omega$  は角周波数である。これを実数部と虚数部に分離すると、

$$Z_{R-C} = Z' + jZ'', \quad (2-3)$$

$$= \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} + j \frac{\omega CR^2}{1 + (\omega CR)^2}, \quad (2-4)$$

となり、 $Z'$  と  $Z''$  はそれぞれ、

$$Z' = \frac{R}{1 + (\omega CR)^2}, \quad (2-5)$$

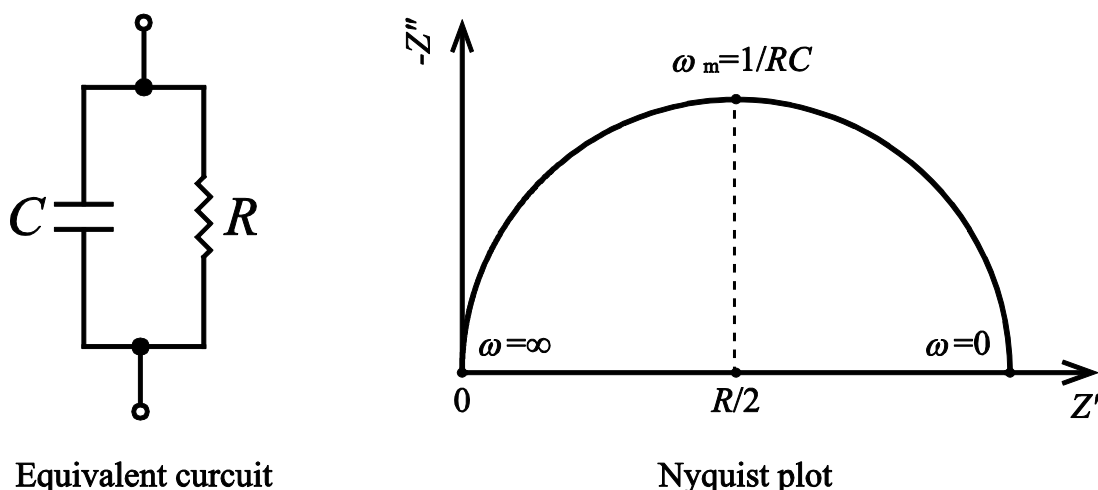


Fig. 2-1 R-C 並列回路および Nyquist 線図



$$Z'' = \frac{\omega CR^2}{1 + (\omega CR)^2}, \quad (2-6)$$

となる。Eqs. (2-5), (2.6)をまとめ $\omega$ を消去し、整理すると、

$$\left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 + Z''^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2, \quad (2-7)$$

となる。すなわち、Fig. 2-1 に示すように  $R$ - $C$  並列回路のインピーダンスの周波数軌跡は、Nyquist 線図上で中心  $(R/2, 0)$ 、半径  $(R/2)$  の半円を描く。ここで、インピーダンスの虚数部が最大となる周波数は中心緩和周波数と呼ばれ、

$$\omega_m = \frac{1}{RC}, \quad (2-8)$$

で表され、この式から容量  $C$  を決定することができる。このように、Nyquist 線図上におけるインピーダンス軌跡の形状から、等価回路モデルを構築することが可能である。

## (2) 定相要素の導入

計測対象あるいは電極表面が電氣的に不均一である場合、そのインピーダンス特性は Nyquist 線図上で虚数軸の負方向に歪んだ円弧形状を示すことがある。そのような計測対象のモデル化には定相要素 (Constant phase element: CPE) が利用される<sup>25)</sup>。CPE を利用することで、不均質な対象を簡便にモデル化することができるため、様々な研究において利用されてきた<sup>26)-28)</sup>。CPE のインピーダンスは、以下の式により表記できる。

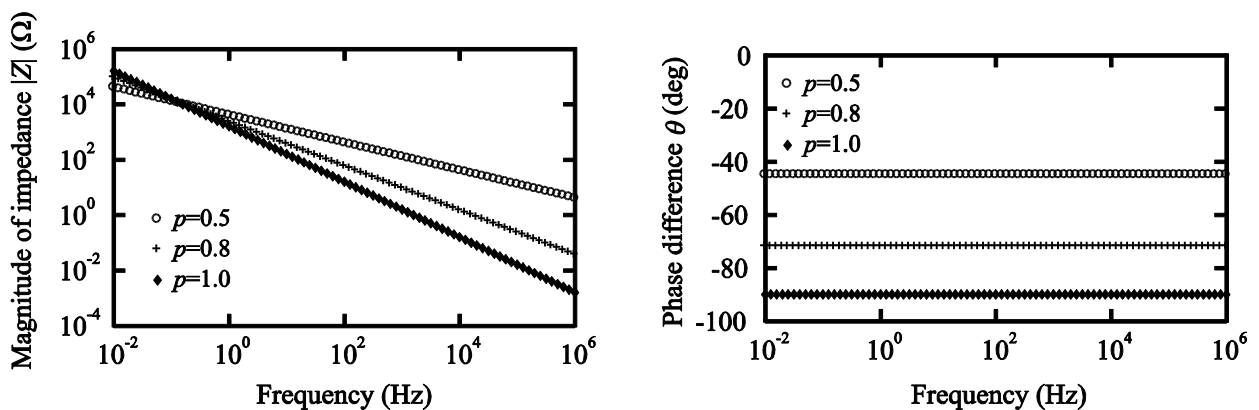


Fig. 2-2 CPE のインピーダンスおよび位相差における Bode 線図

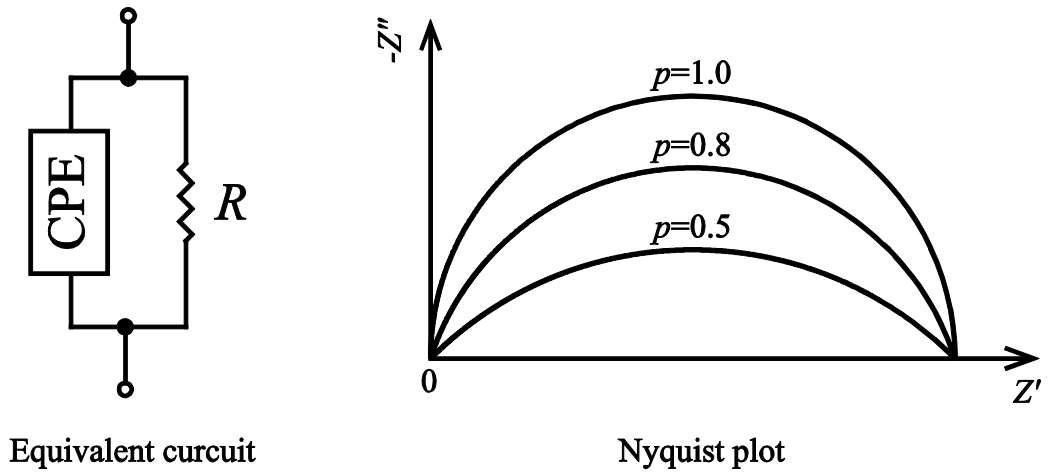


Fig. 2-3 R-CPE 並列回路および Nyquist 線図

$$Z_{\text{CPE}} = \frac{1}{(j\omega)^p T}, \quad (2-9)$$

$$= \frac{1}{\omega^p T} \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) - j \frac{1}{\omega^p T} \sin\left(\frac{\pi}{2} p\right). \quad (2-10)$$

ここで、 $p$  は CPE 指数、 $T$  は CPE 定数である。 $p$  は 0-1 の値をとり、 $p=1$  のとき  $T$  は通常の容量と等価となる。Figure 2-2 に  $Z_{\text{CPE}}$  の絶対値および位相差の Bode 線図を示す。 $Z_{\text{CPE}}$  の絶対値は周波数の対数に対し、 $p$  の傾きを持って減少し、位相差  $\theta$  は  $-(\pi/2) \cdot p$  で一定となる。このように、位相差が周波数に依存せず、任意の値で一定である素子であることから定相要素と呼ばれる。Figure 2-3 に  $R$  と CPE の並列回路の Nyquist 線図の例を示す。 $p$  の値を変化させることで、歪んだ円弧形状にも対応することができる。 $R$ -CPE 並列回路の合成インピーダンスは、以下の式によって表される。

$$Z = \frac{\omega^p TR^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + R}{(\omega^p TR)^2 + 2\omega^p TR \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1} + j \frac{-\omega^p TR^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} p\right)}{(\omega^p TR)^2 + 2\omega^p TR \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1}. \quad (2-11)$$

CPE 定数  $T$  の単位には  $p$  の値が含まれるため、 $T$  の値は  $p$  によって変動する。そのため、計測対象の容量成分を正確に比較するためには  $T$  の単位を修正する必要がある。 $T$  は中心緩和周波数が一定であるという仮定の下で、以下の式によ

り見かけの  $C$  に変換することができる<sup>29)</sup>.

$$C = T^p (R)^{\frac{1-p}{p}}. \quad (2-12)$$

$T$  を見かけの  $C$  に変換することで合成インピーダンスの容量成分のみを抽出することができる.

### (3) 複素非線形最小二乗法

構築した等価回路モデル中の回路素子の値を個別に求めることで、計測対象の部位別の情報を得ることができる. 等価回路素子の値を算出するには複素非線形最小二乗法<sup>30)</sup> (Complex non-linear least square: CNLS) を用いる. これは、各周波数における残差平方和、すなわち、

$$S = \sum_{i=1}^N [Z'_e - Z'_t(\omega_i; Q)]^2 + [Z''_e - Z''_t(\omega_i; Q)]^2, \quad (2-13)$$

が最小になるように各パラメータの値を決定する手法である. ここで、 $S$  は残差平方和、 $\omega$  は測定角周波数、 $Q$  は等価回路モデルのパラメータを表す. また、下付き文字の e および t は、それぞれ実験値および理論値を表す.  $S$  の最小値を求め、各パラメータ値を決定する際には、Levenberg-Marquardt 法<sup>31)</sup>により数値的に求める.

## 2.3 青果物組織のモデル化

### 2.3.1 細胞の等価回路モデル

**Figure 2-4** に細胞の模式図を示す. 植物組織は細胞の集合体として成り立っているが、この細胞一つに着目すると、細胞膜を隔てて電解質濃度の異なる細胞外液と細胞内液が存在する構造を持っている. 細胞膜の構造は脂質二重膜構造と呼ばれており、リン酸と脂質から成るリン脂質により構成されている. 親水性のリン酸が外側、疎水性の脂質が内側となるように整列することで細胞内の液と細胞外の液を隔てている. この構造は電氣的にみると非常に高い抵抗と静電容量を持つことが知られている.

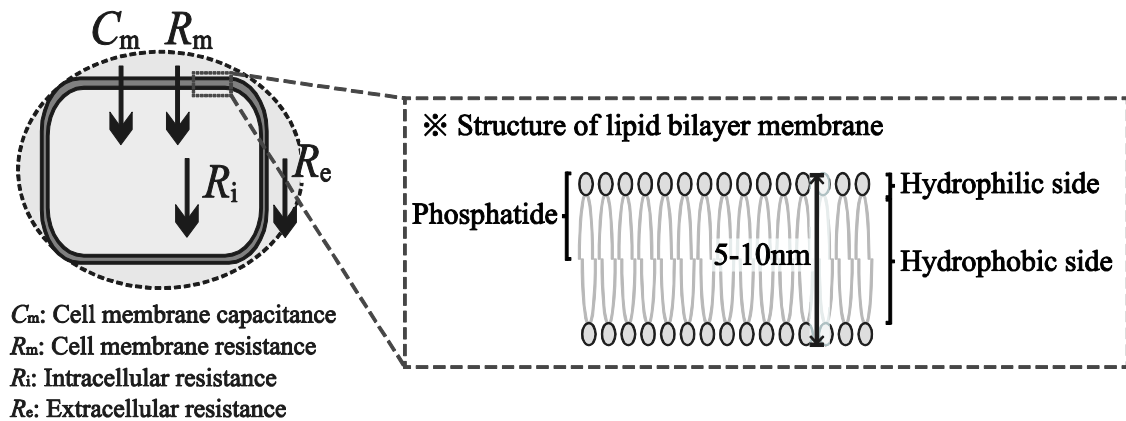


Fig. 2-4 細胞構造の模式図

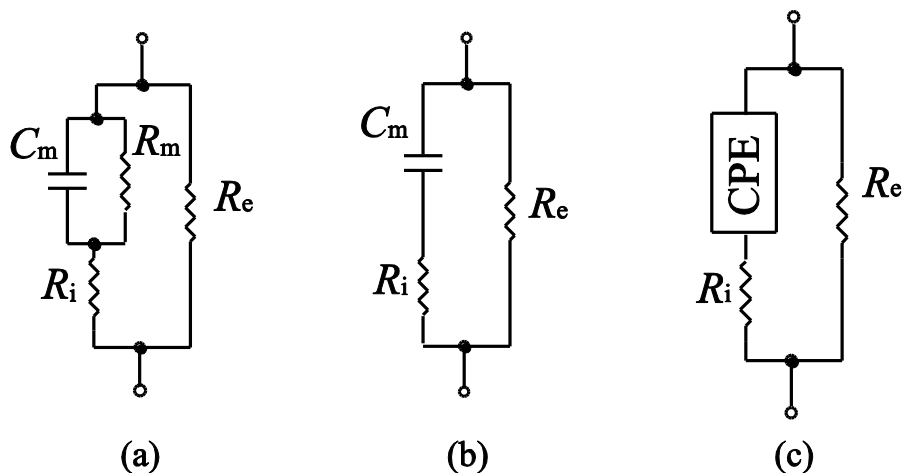


Fig. 2-5 等価回路

現在までに、このような細胞構造の特性に基づいた生体の細胞組織の等価回路として細胞膜の抵抗および容量  $R_m$ ,  $C_m$ , 細胞内液抵抗  $R_i$ , 細胞外液抵抗  $R_e$  を考慮した Hayden モデル<sup>32)</sup>が提案されている (Fig. 2-5 (a)). ここで,  $R_m$  は非常に高い抵抗を持つ絶縁体とみなせるため,  $R_m$  は省略することができる<sup>33),34)</sup> (Fig. 2-5 (b)). これらのモデルは生体組織のインピーダンス特性から細胞の状態を推定するために、様々な研究において利用されている。

### 2.3.2 青果物組織のインピーダンス特性の予測

前項で述べた Hayden モデルおよび簡略化 Hayden モデルは一つの細胞を対象

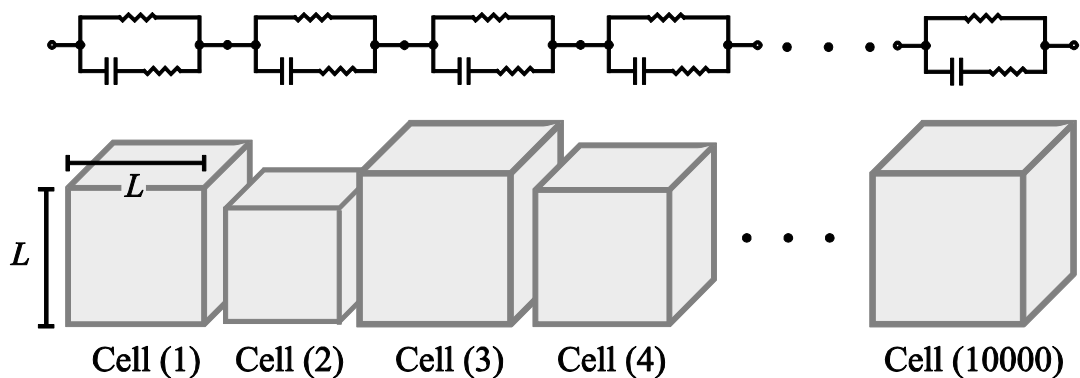


Fig. 2-6 細胞群の模式図および等価回路

にした等価回路であるが，複数の細胞の集合体である青果物組織を対象とした場合，個々の細胞の等価回路パラメータ値はばらつきを伴うと考えられる．そこで，ばらつきを持つ細胞群がどのようなインピーダンス特性を持つか検証するため，次に示すシミュレーションを行う．**Figure 2-6**に細胞群の模式図および等価回路を示す．図に示すように，複数の細胞が一行に整列したモデルを考える．各細胞は一辺  $L$  の立方体であり，細胞膜容量，細胞内液抵抗および細胞外液抵抗の値はすべて細胞の大きさに依存すると仮定する．等価回路中の各パラメータの値はそれぞれ，以下の式により算出する．

$$C_m = 6L^2C. \quad (2-14)$$

$$R_i = \rho_i L / L^2. \quad (2-15)$$

$$R_e = \rho_e L / L^2. \quad (2-16)$$

ここで， $C$ は細胞膜の静電容量 ( $=10^{-2} \text{ F/m}^2$ )， $\rho_i$ は細胞内液の導電率 ( $=1 \text{ } \Omega/\text{m}$ )， $\rho_e$ は細胞外液の導電率 ( $=10 \text{ } \Omega/\text{m}$ )をそれぞれ表す． $C$ ， $\rho_i$ および $\rho_e$ の値は文献値を参考にしている．10000個の細胞を想定し，一つひとつの細胞における $L$ の値として，一様分布の疑似乱数を与え，その値に幅を持たせたときの合成インピーダンスの周波数特性を計算により求める．**Figure 2-7**にシミュレーションにより求めた青果物組織の周波数特性を示す．なお，インピーダンスの値は実数部

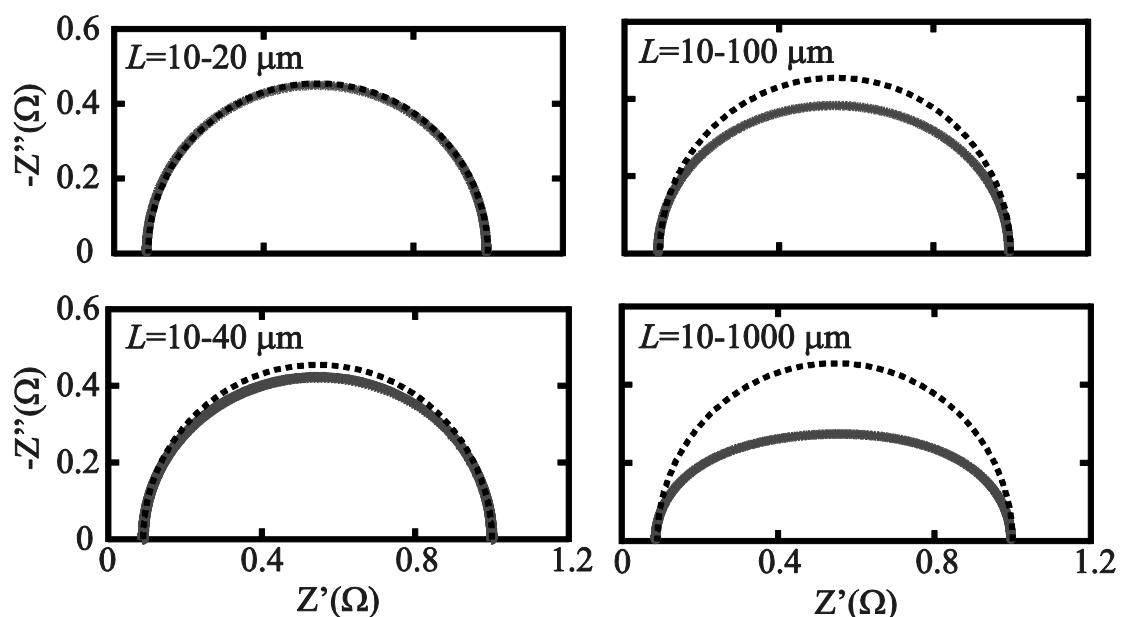


Fig. 2-7 シミュレーションにより求めた細胞群のインピーダンス特性

の最大値で正規化している．図中の破線は正確な半円，すなわち Hayden モデルによるインピーダンスの周波数特性を示している．図より各細胞における  $L$  の値のばらつき幅が大きいほど Nyquist 線図上の周波数特性が実数軸方向に向かって歪んだ形状になることがわかる．この結果から，青果物組織のモデルを構築する際には，各細胞の電気的特性のばらつきによる，円弧の歪みを考慮する必要がある．そこで，細胞膜容量  $C_m$  を CPE に置換した修正モデルを提案する (Fig. 2-5 (c))．次項において青果物組織のモデルを用いた実験により修正モデルの妥当性の評価を行う．

### 2.3.3 青果物組織を用いた実験による修正モデルの妥当性の検証

前項において，シミュレーションの結果より，青果物組織のインピーダンス特性が Nyquist 線図上において歪んだ円弧形状になることが示唆されたため，細胞膜容量  $C_m$  を CPE に置換した修正モデルを提案した．本項では，青果物組織のモデルとしてジャガイモ切片を用い，そのインピーダンス特性に提案した修正モデルを適用することでモデルの妥当性を検証する．

ジャガイモを  $25 \times 20 \times 20$  mm の直方体に成形し，これを試料として用いる．インピーダンスアナライザ (HP4194A, Hewlett-Packard) およびステンレス製の針状電極を用いて試料のインピーダンス特性を計測する．測定条件は，測定周

波数 100Hz–1MHz, 印加電圧 0.5V とする. **Figure 2-8** にジャガイモ切片の Nyquist プロットを示す. インピーダンスの周波数軌跡には細胞構造に起因する円弧領域と電極-試料界面における分極インピーダンスに起因する直線領域が確認された. 円弧領域は個々の細胞の不均一性によって虚軸の負方向へ歪んだ形状をしていることがわかる. 実験により得られたインピーダンスの周波数特性に修正モデルを適用する. 修正モデルの合成インピーダンスの計算式は以下に示される.

$$Z = \frac{R_e \left[ 1 + \omega^p T \left\{ (2R_i + R_e) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + \omega^p T R_i (R_e + R_i) \right\} \right]}{\left\{ \omega^p T (R_e + R_i) \right\}^2 + 2\omega^p T (R_e + R_i) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1} - j \frac{\omega^p T R_e^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} p\right)}{\left\{ \omega^p T (R_e + R_i) \right\}^2 + 2\omega^p T (R_e + R_i) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1}. \quad (2-17)$$

修正モデルの妥当性を評価するために CNLS を用い, Eq. (2-17) を実験値に対して近似し, その精度の評価を行う. 実験値とモデルの近似精度は, 各測定周波数における実験値と近似値の標準偏差  $SD$ , インピーダンスの実数部  $Z'$  および虚数部  $Z''$  のそれぞれにおける決定係数  $R^2_{Z'}$ ,  $R^2_{Z''}$  により評価を行う.  $SD$ ,  $R^2_{Z'}$  および  $R^2_{Z''}$  は以下の Eqs. (2-18) – (2-20) により定義する.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left\{ (Z'_i - \hat{Z}'_i)^2 + (Z''_i - \hat{Z}''_i)^2 \right\}} \quad (2-18)$$

$$R^2_{Z'} = 1 - \frac{\sum_i (Z'_i - \hat{Z}'_i)^2}{\sum_i (Z'_i - \bar{Z}')^2}. \quad (2-19)$$

$$R^2_{Z''} = 1 - \frac{\sum_i (Z''_i - \hat{Z}''_i)^2}{\sum_i (Z''_i - \bar{Z}'')^2}. \quad (2-20)$$

ここで,  $N$  は測定点数,  $\hat{Z}'$  および  $\hat{Z}''$  はそれぞれ,  $Z'$  および  $Z''$  の近似値,  $\bar{Z}'$  および  $\bar{Z}''$  はそれぞれ,  $Z'$  および  $Z''$  の平均値を表す.

**Figure 2-9** に実験値への近似結果を示す. **Table 2-1** に示す指標が表すように, 修正モデルはインピーダンスの実数部および虚数部に対して Hayden モデルと比

較し，高い近似精度を示した．以上の実験より CPE を導入した修正モデルを用いることで不均一性を持つ青果物組織のインピーダンス特性を良好にモデル化できることが明らかとなった．



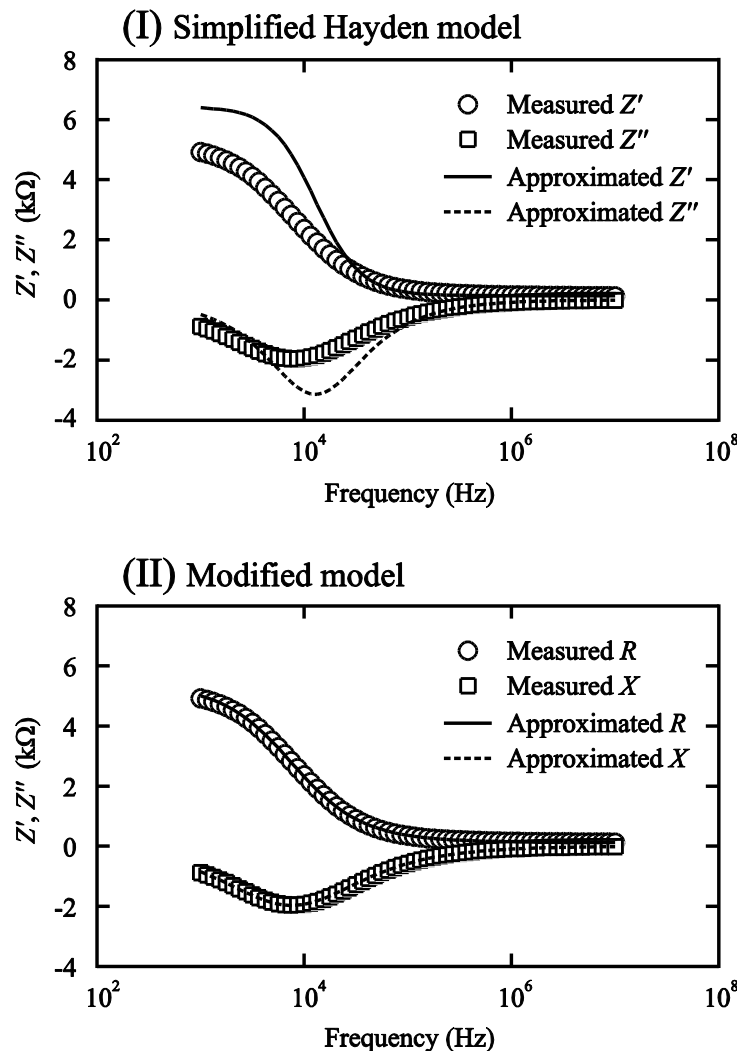


Fig. 2-8 実験値と等価回路モデルの近似結果

Table 2-1 実験値および各等価回路モデルの近似精度

Model	$R^2_{Z'}$	$R^2_{Z''}$	$SD (\Omega)$
Modified model	0.9993	0.9925	3719.27
$R_e$ -CPE parallel circuit model	0.9992	0.9914	4014.53

## 2.4 まとめ

本章では、電気インピーダンス法の基本原理について述べ、等価回路解析の意義について解説を行った。また、複数の細胞から成る植物組織のインピーダンス特性をシミュレーションにより予測した。その結果を基に、細胞の等価回路である Hayden モデルを基に定相要素を導入した修正モデルの構築を行った。さらに、ジャガイモ切片を用いた実験により修正モデルの妥当性を評価した。その結果、修正モデルは実験値と良好な近似精度を示し、不均一な構造を持つ青果物組織のモデルとして適用できることを示した。

## 第3章

# 乾燥過程における電気インピーダンス特性の変化

### 3.1 はじめに

乾燥は最も一般的な青果物加工法の一つである。乾燥の基本的な目的は微生物による汚染を抑止し、製品の貯蔵期間を延長させることにある。食品の乾燥方法には様々な方法があるものの、経済的な側面から青果物の乾燥には熱風乾燥が最も一般的である<sup>35)</sup>。しかしながら、熱風による乾燥過程では、青果物は熱ストレスに長時間曝露されるため、変色、栄養成分の損失、物理的変化を伴う。

これらの品質変化の中でも物理的な特性は乾燥製品のテクスチャ等の品質に影響を及ぼす重要な要素である。このような物理的特性は細胞構造の状態に大きく依存しているとされている。例えば、細胞膜内の膨圧および細胞膜の状態が青果物組織の物理的特性に及ぼす影響について報告がなされている<sup>36)-39)</sup>。Blahovec ら<sup>40)-42)</sup>はジャガイモ組織の動的機械分析を行い、70°C以上の温度域における生理学的な特性の変化はデンプンの糊化に伴う細胞内膨圧の上昇によるものであることを明らかにした。また、Laza ら<sup>43)</sup>はジャガイモ組織の貯蔵弾性率および硬度が60°Cの加熱による細胞中葉、細胞壁および細胞膜の分解によって減少することを報告した。

以上のように、多くの研究において熱および脱水ストレスによる細胞組織の状態変化が青果物の物理的特性に及ぼす影響について報告している。青果物の乾燥過程においても同様に、テクスチャ等の物理的パラメータは品質に影響を与える重要な指標とされており、その過程におけるテクスチャの変化が報告されている<sup>44)-46)</sup>。これらの変化は熱および乾燥ストレスによる細胞の状態変化に起因している可能性がある。そのため、乾燥過程における細胞の損傷等の状態

変化を定量化し、指標を設けることは乾燥青果物の物理的な品質を評価するための有効な手段になると考えられる。

乾燥過程における青果物組織の状態推定には、第2章で述べた電気インピーダンス法を用いる。類似の手法として誘電解析法があり、電気インピーダンス法としばしば混同される。しかし、誘電解析法では100 MHz–10 GHz程度の高い周波数帯が用いられる点で異なっており、一般に誘電解析法は含水率やかさ密度等の推定のために用いられる<sup>47)–52)</sup>。細胞構造に基づく電気的特性が現れるのは約100 Hz–10 MHzの周波数帯域であり、電気インピーダンス法にはこの周波数が用いられる。そのため、本研究では細胞の状態を推定するために電気インピーダンス法を用いる。電気インピーダンス法は原理的に比較的簡便であり、迅速な計測が可能であることから、様々な生体組織の生理学的な状態を推定するために広く用いられてきた<sup>53)–56)</sup>。電気インピーダンス法においては一般に、実験により得られたインピーダンスの周波数特性を特徴づけるために計測対象の電氣的等価回路が用いられる。すなわち、等価回路パラメータの変化に着目することで、対象の物理的特性を定量化することができる。本章における乾燥青果物のモデル化には第2章で構築した修正モデルを用いる。

現在までに、多くの植物組織における電気インピーダンス解析に関する研究では、自然生理学的特性の推定に焦点があてられてきたが、乾燥などの一般的に用いられる加工過程における青果物の電気インピーダンス特性の変化に関する研究は少ない。電気インピーダンス法を用い、細胞の生理学的な状態を推定することで、乾燥青果物の物理的品質に関する有用な情報を与えることができると考えられる。

本章では、青果物のモデル組織としてジャガイモ切片を用い、いくつかの温度条件下の乾燥過程における細胞の状態変化を電気インピーダンス法により推定する。また、含水率がインピーダンス特性にどのように影響するかを確認するために乾燥サンプルの吸水過程におけるインピーダンス特性の変化についても検討を行う。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 実験試料および処理方法

ジャガイモの組織は内部が均質であるため、植物組織のモデルとして一般的によく用いられる。そのため、本研究においても実験試料としてジャガイモ切片を選定した。使用したジャガイモ (*Solanum tuberosum* L.) はつくば市内の小売

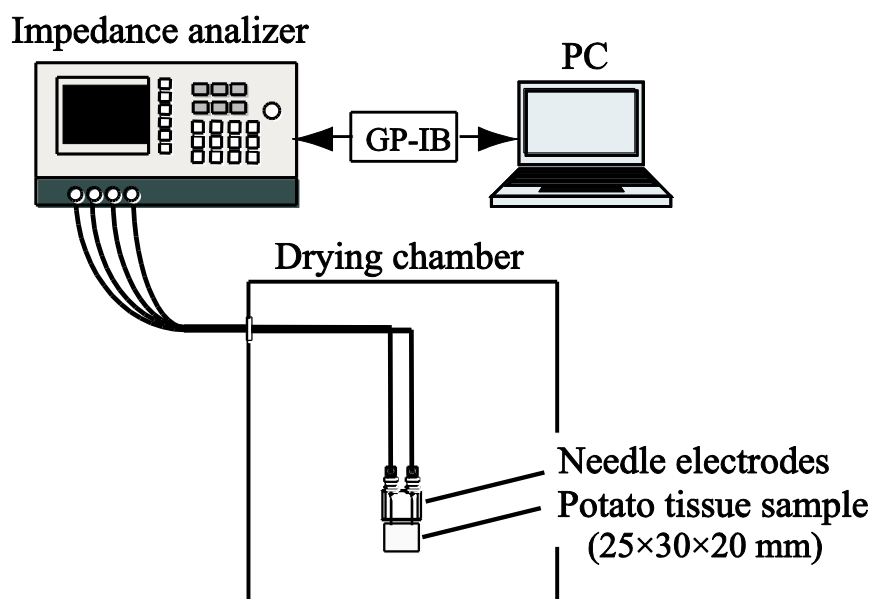


Fig. 3-1 実験系の概略

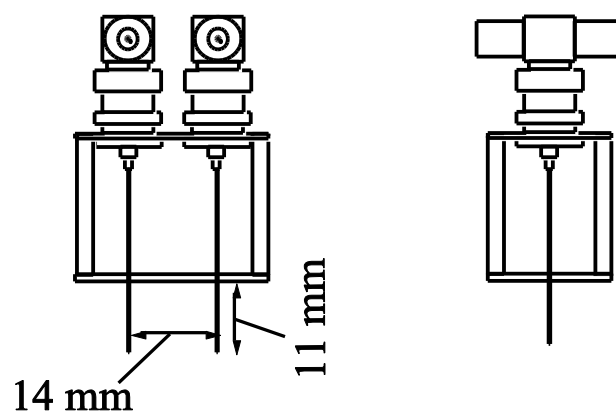


Fig. 3-2 針状電極

店で購入し，実験に供試するまでの間，室温下で保存する．ジャガイモは 25×20×20 mm の直方体に成形し，これを試料として用いる．試料の平均初期含水率は 4.30 (dry basis) であった．

Figure 3-1 に実験系の概略を示す．試料は 50°C で 12 h, 60°C, 70°C 及び 80°C で 10 h の条件下において恒温槽 (SH-241, ESPEC) 内で乾燥し，それぞれの温度条件において 5-7 試料のデータを取得，平均化を行う．すべての乾燥温度条件

下において乾燥中の相対湿度は 10 % 以下であった。乾燥過程において一定時間毎に試料の質量を計測し、乾量基準含水率 (dry basis) に換算する。この際、乾燥過程における質量の減少は全て水分の蒸発によるものとみなす。吸水実験は各温度条件で乾燥した試料を 30°C、200 ml の蒸留水中に浸漬することで行う。吸水時における含水率は乾燥時と同様に質量変化から求める。温度を一定に制御したウォーターバスに試料を入れたビーカーを静置することで温度調整を行う。吸水過程において一定時間毎に試料を取り出し、余剰水分を吸水紙で除去した後、質量を計測し、乾量基準含水率に換算する。吸水実験は 3-4 回の反復を行い、実験値は平均化する。試料の乾量基準含水率  $M$  (dry basis (g/g)) は、以下の式により決定する。

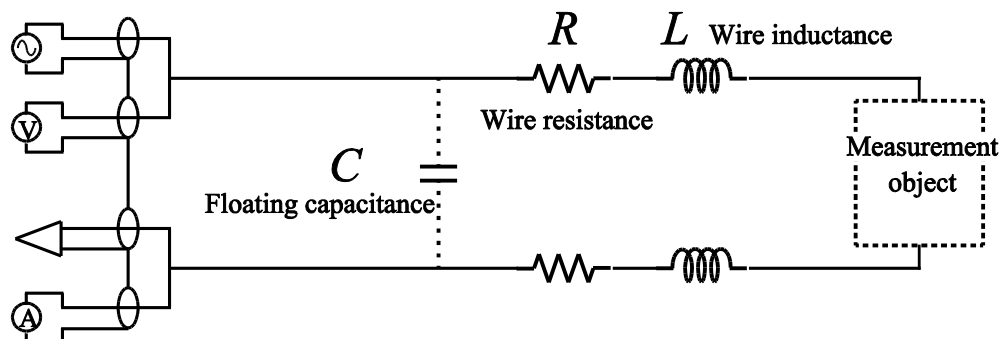
$$M = \frac{w}{W_d}. \quad (3-1)$$

ここで、 $w$  は試料中の水分質量、 $W_d$  は試料の乾物質量を表す。乾物質量は実験終了後の試料について、60°C に設定した恒温槽内で 12 h 乾燥し、その後、ミルで粉碎、さらに加熱乾燥式水分計 (MS-70, A&D) で 100°C、30 min 乾燥することで求める。

### 3.2.2 インピーダンス計測

試料のインピーダンス計測にはインピーダンスアナライザ (HP4194A, Hewlett-Packard) および針状電極 (Fig. 3-2) を用いる。電極は 4 端子対法<sup>57)</sup>に基づき同軸ケーブルを用いてインピーダンスアナライザに接続する。Figure 3-3 に 2 端子法および 4 端子対法の比較を示す。最も簡便な端子接続法として 2 端子法が広く用いられるが、この方法は多くの誤差要因を含んでいる。すなわち、2 本の導線間の浮遊容量、導線抵抗、導線インダクタンスによるインピーダンスが測定結果に含まれるため、正確にインピーダンスを測定できる周波数範囲が限定される。これらの誤差要因を軽減するため、本研究では 4 端子対法を用いる。4 端子対法では導線ではなく内部導体と外部シールドから成る同軸ケーブルを用いるため、浮遊容量の影響を軽減できる。また、測定ケーブルの内部導体を流れる電流とシールド導体を流れる電流が同じ大きさであり、かつ逆向きに流れるため、内部導体の電流により発生する磁界をシールド導体の電流による磁界で相殺できる。従って、測定ケーブルの外に磁界が発生しないため、電圧検出ケーブルと信号電流ケーブルとの誘導結合が起こらない。以上の理由より、4 端子対法では広範な周波数帯域におけるインピーダンスを正確に測定することができる。本実験では、100Hz-1MHz 間の 81 点におけるインピーダンスの大きさ  $|Z|$  および位相差  $\theta$  の値を吸水および乾燥過程において一定時間ごとに取得、

## Two-terminal configuration



## Four-terminal pair configuration

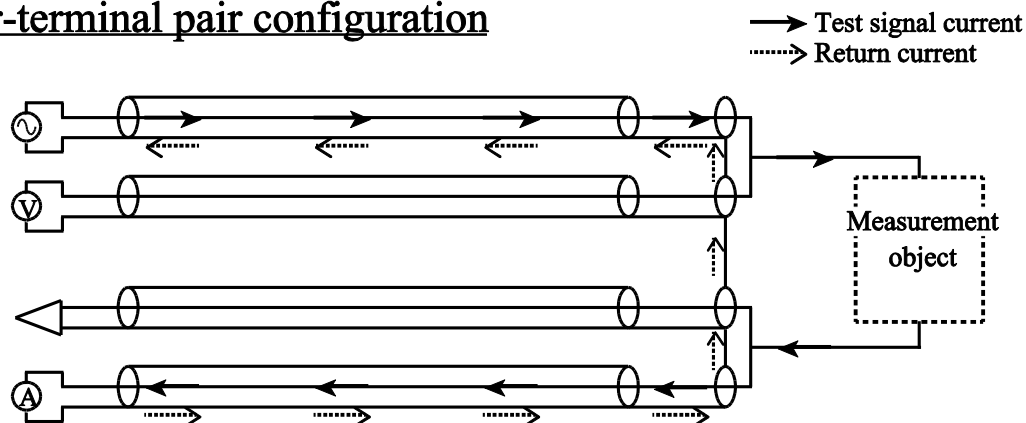


Fig. 3-3 2端子法および4端子対法の比較

GPIB インターフェースを介し、コンピュータに自動的に保存する。乾燥実験の各温度条件におけるインピーダンス計測はそれぞれ 5-7 回、吸水実験におけるインピーダンス計測はそれぞれ 3-4 回の反復を行う。

### 3.2.3 等価回路モデルおよびカーブフィッティング

実験試料の等価回路モデルとして、第 2 章で構築した修正モデル (Fig. 2-5 (c)) を適用する。実験によって得られた計測値に CNLS を用いて修正モデルを近似させ、細胞膜容量  $C_m$ 、細胞外液抵抗  $R_e$ 、細胞内液抵抗  $R_i$  の値を求める。

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 乾燥過程におけるインピーダンス特性の変化

Figure 3-4 に 50, 60, 70 および 80°C の乾燥過程における含水率の経時変化を示す。それぞれの乾燥温度において時間の経過に伴い含水率が低下し、温度が高いほど乾燥の速度が高いことがわかる。ここで、便宜上、初期含水率から含水率 1.0 までの期間を前期乾燥期間、含水率 1.0 以下の期間を後期乾燥期間と定義する。

Figure 3-5 に 60°C 乾燥過程における Bode 線図を示す。0–240 min の乾燥時間において 30 min 間隔で取得したインピーダンス特性、および 520–600 min の乾燥時間において 10 min 間隔で取得したインピーダンス特性を示している。Fig. 3-5 (a) に示した未乾燥試料 (0 min drying) に着目すると、インピーダンスが  $10^4$  と  $10^6$  Hz の間で急激に低下していることがわかる。このような周波数の増加に対してインピーダンスが低下する現象は分散と呼ばれる。細胞組織と電流の流れの模式図を Fig. 3-6 に示す。低周波域では、細胞膜が高い電気容量を持つため、電流は細胞内液を流れず比較的高い抵抗を持つ細胞外液のみを流れる。しかしながら、高周波域では、電流が比較的低い抵抗をもつ細胞内液を流れることが

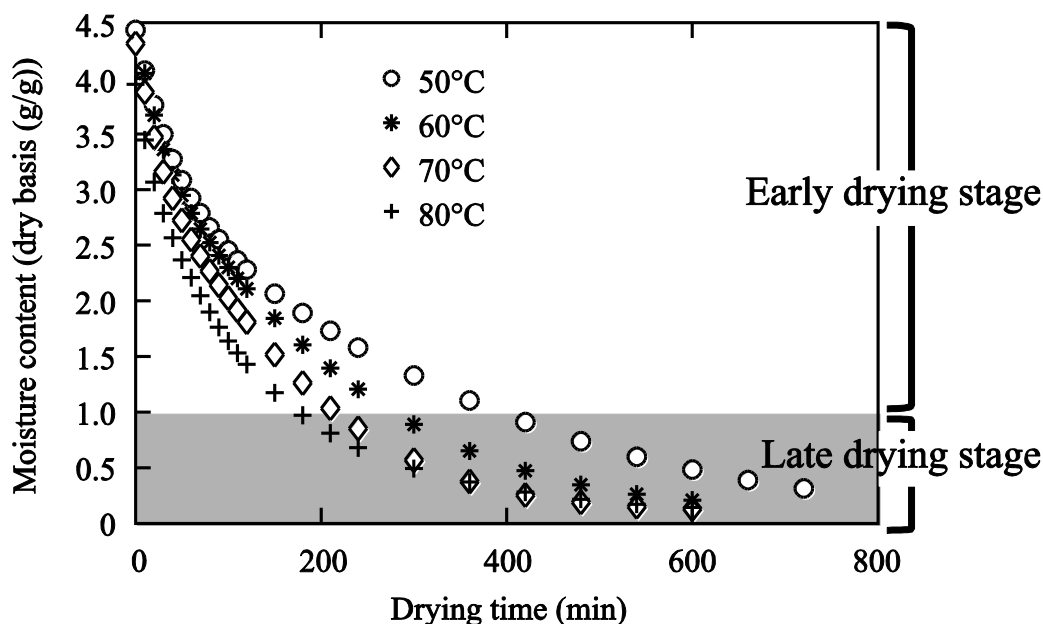
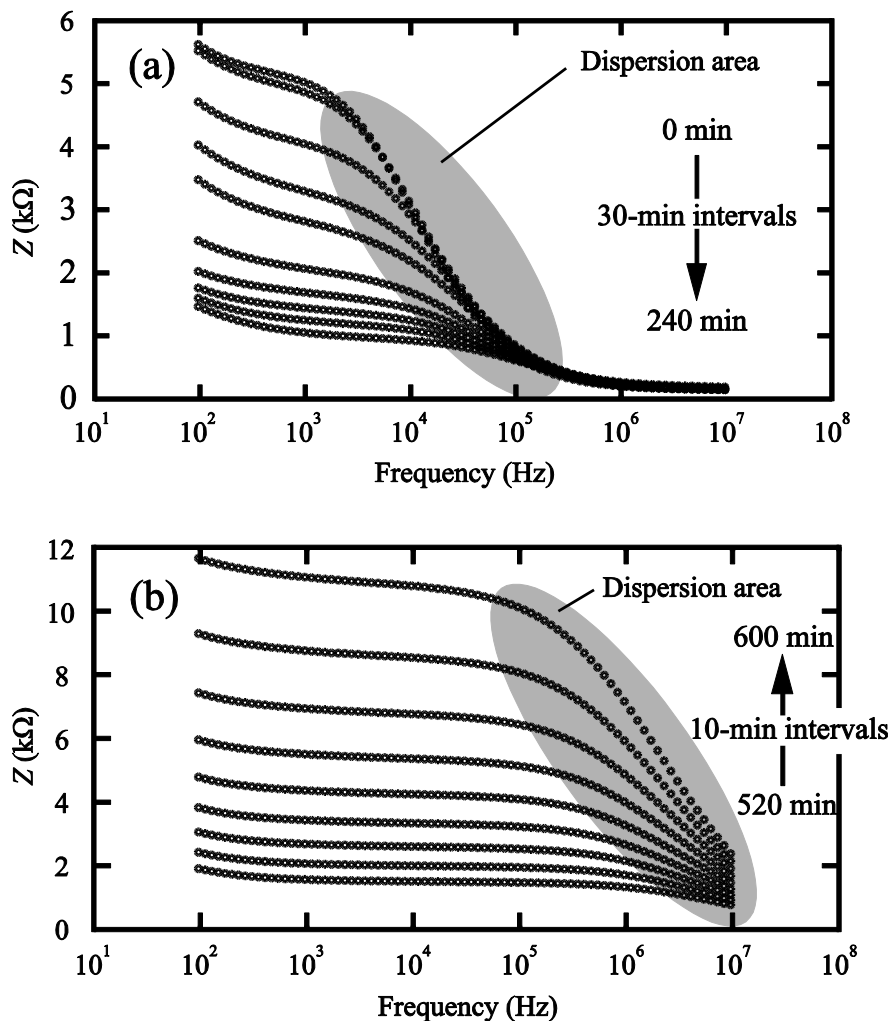


Fig. 3-4 乾燥過程における含水率の経時変化





**Fig. 3-5** 60°C 乾燥過程における Bode 線図の変化

できるため、インピーダンスは急激に減少する。このような生体組織における細胞構造に基づく分散は $\beta$ 分散として知られており<sup>58)</sup>、本実験で観察された分散もこの $\beta$ 分散であると考えられる。前期乾燥期間では、低周波域におけるインピーダンスは乾燥の進行とともに減少する傾向が見られた (Fig. 3-5 (a)). この結果は細胞外液抵抗の減少を示唆している。Figure 3-5 (b) に示す後期乾燥期間では、乾燥の進行に伴いインピーダンスの値が急激に増加した。また、前期乾燥期間と比較し分散が生じる周波数帯域が低周波域に遷移していることがわかる。この結果は乾燥試料における電気容量が変化していることを示唆している。

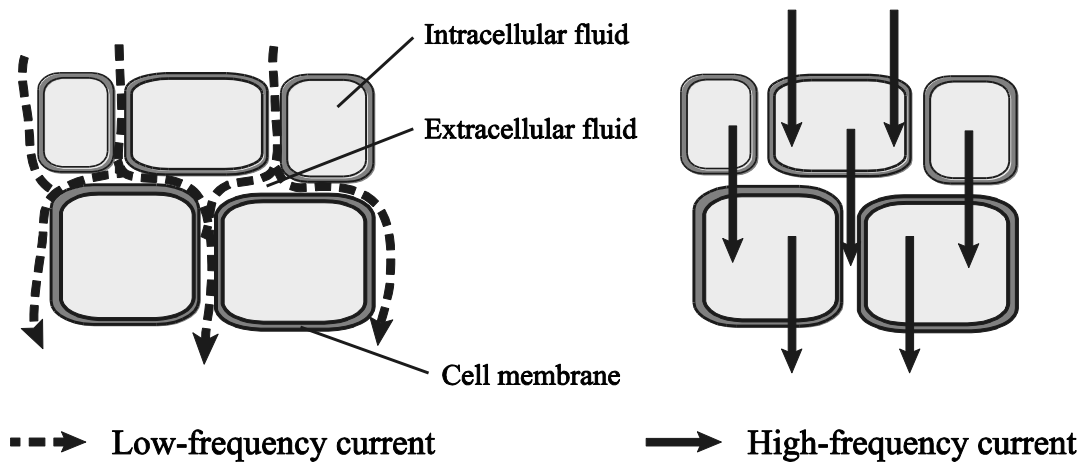


Fig. 3-6 青果物組織および電流の流れの模式図

Figure 3-7 に 60°C 乾燥過程における Nyquist 線図の変化を示す. それぞれの円弧の右側が低周波域, 左側が高周波域を示している. 低周波域におけるインピーダンスの直線部分は分極インピーダンスとして知られている. この現象は電極と試料の接触界面における分極によって生じる現象である<sup>59),60)</sup>. 従って, このインピーダンス領域は細胞構造とは関与しないため, モデルのフィッティングの際にはこの領域を除去することとした. 前期乾燥期間では周波数特性を表す円弧が乾燥の進行にしたがって収縮する傾向が見られた(Fig. 3-7 (a)). このようなインピーダンス特性の変化は青果物組織の凍結過程<sup>33),34),61)</sup>および加熱過程<sup>62),63)</sup>における細胞膜の損傷により起こることが報告されている. 乾燥過程では試料組織は熱および乾燥ストレスに晒される. このことから, 本研究においても細胞組織が損傷を受け, 円弧の収縮として表れたものと推察される. 一方, 後期乾燥期間では含水率の低下に伴い円弧が急速に増大する傾向が見られた(Fig. 3-7 (b)). Stamm<sup>64)</sup>は木材において, 含水率 0.3 (dry basis) 以下では直流抵抗と含水率に指数関数的な関係が成立するが, 含水率がそれ以上高まるとこの関係は成り立たなくなることを報告した. 乾燥野菜は木材と同様に多孔質構造を持つため, 本研究においても同様の関係が存在し, それによって低含水率域においてインピーダンスが急激に増大したものと考えられる. これらの結果より, 後期乾燥期間においてはインピーダンス変化の支配的な要因は含水率であることが推察される.

Figure 3-5, 3-7 に示した乾燥過程におけるインピーダンス変化を定量化するため, 実験値に対し等価回路を用いた解析を行った. 等価回路モデルの妥当性を

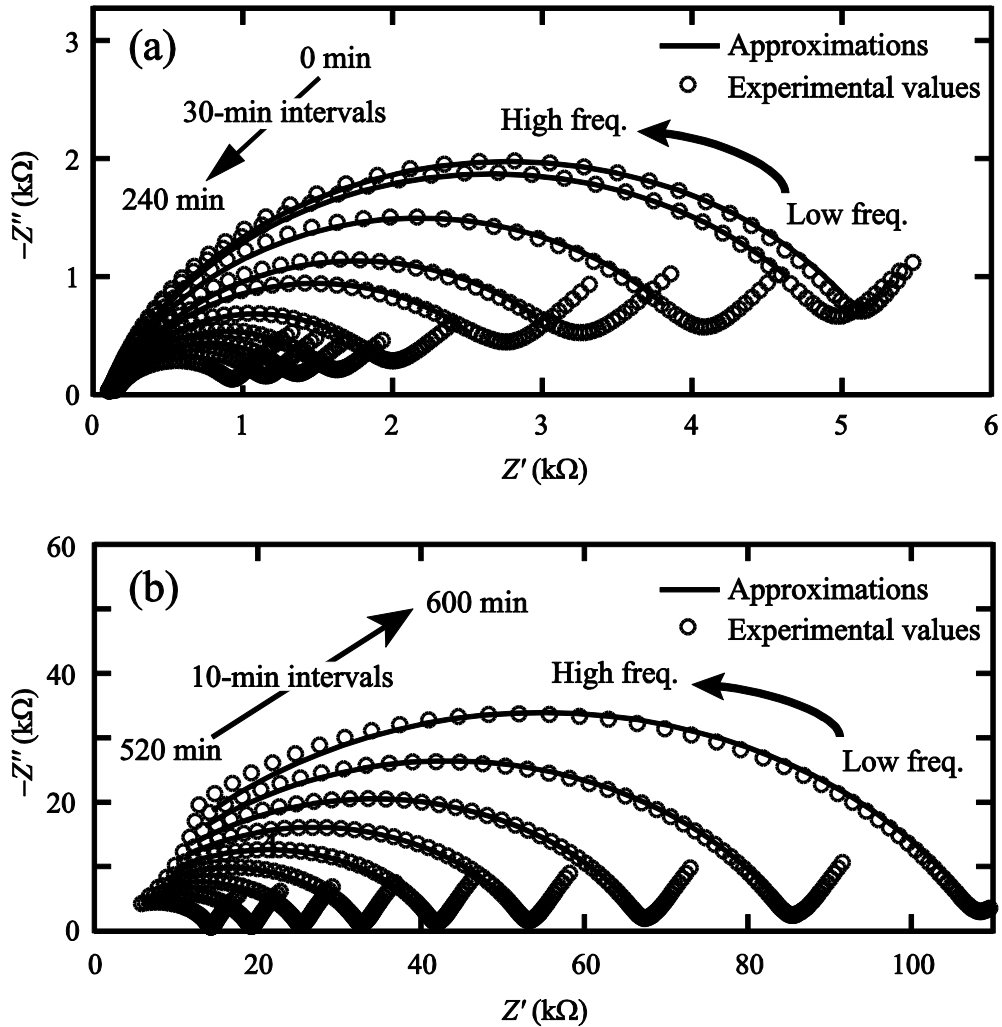


Fig. 3-7 60°C 乾燥過程における Nyquist 線図の変化

評価するため, CNLS を用いたフィッティングを行い, 決定係数の算出を行った. **Figure 3-8** に等価回路モデルと未乾燥試料における実験値の近似結果を示す. **Table 1** に示す通り, Hayden モデルと比較し, 修正モデルにおいて  $Z'$ ,  $Z''$  共に高い近似精度が得られた. 修正モデルでは, CPE を用い細胞膜容量  $C_m$  の位相差を任意の値に変化させることで試料の不均一な組織のインピーダンス特性を表現できたものと考えられる. 前期乾燥期間 (初期含水率~含水率 1.0) の期間における乾燥試料もすべて同様の傾向であった. **Figure 3-9** に修正モデルおよび  $R$ -CPE 並列モデルと含水率 0.21 の乾燥試料における実験値の近似結果を示す. また, **Table 2** に近似精度の指標を示している. 修正モデルおよび  $R$ -CPE 並列モデルそれぞれにおいて, ほぼ同値の高い近似精度が得られた. 修正モデルは

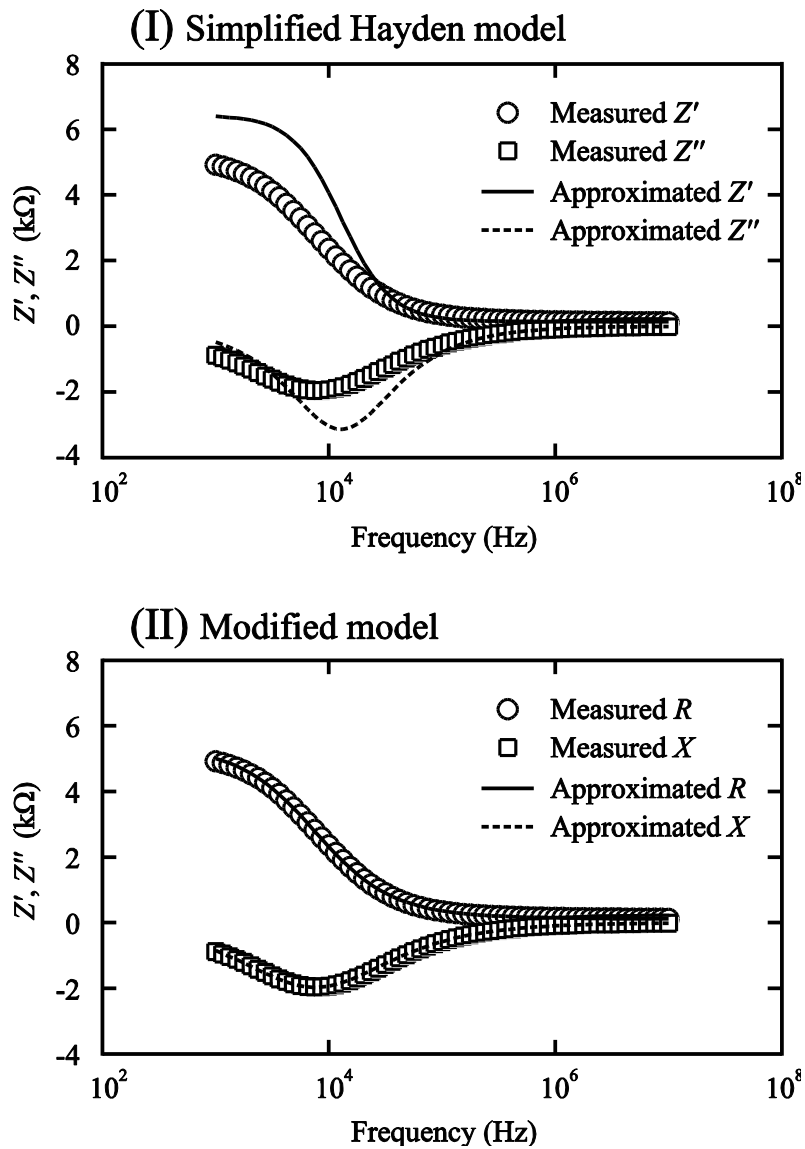
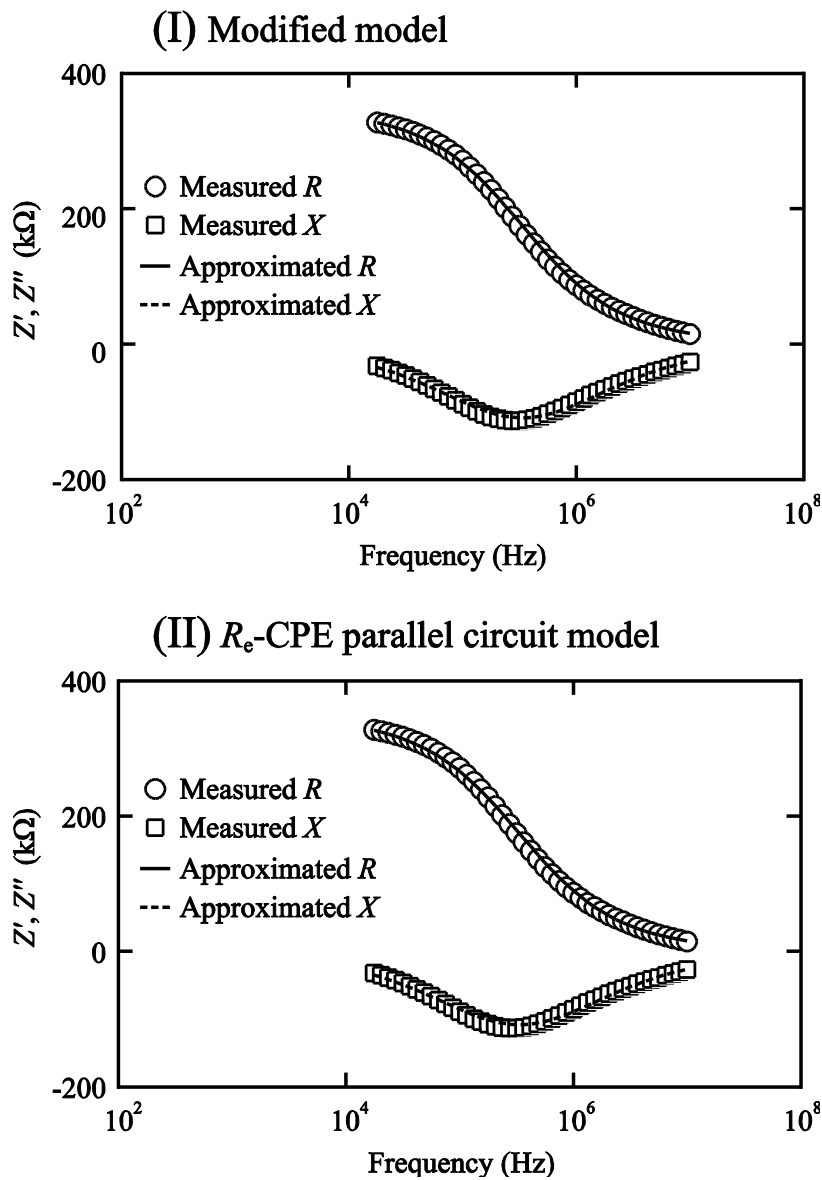


Fig. 3-8 未乾燥試料のインピーダンス特性と等価回路モデルの近似結果

Table 3-1 未乾燥試料における実験値および各等価回路モデルの近似精度

Model	$R^2_{Z'}$	$R^2_{Z''}$	SD ( $\Omega$ )
Simplified Hayden model	0.6278	0.4411	1129.80
Modified model	0.9998	0.9995	28.00



**Fig. 3-9** 含水率 0.21 (dry basis) の乾燥試料のインピーダンス特性と等価回路モデルの近似結果

**Table 3-2** 含水率 0.21 (dry basis) の乾燥試料における実験値および各等価回路モデルの近似精度

Model	$R^2_{Z'}$	$R^2_{Z''}$	$SD (\Omega)$
Modified model	0.9993	0.9925	3719.27
$R_e$ -CPE parallel circuit model	0.9992	0.9914	4014.53

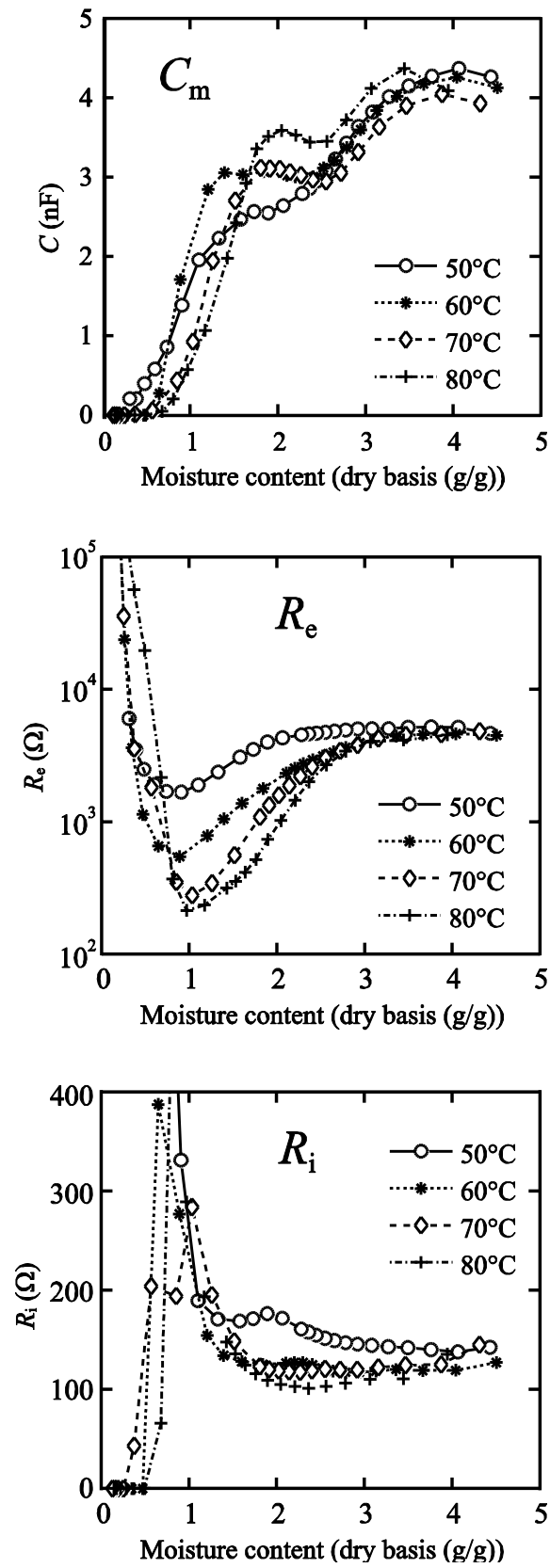


Fig. 3-10 乾燥過程における含水率と等価回路パラメータの関係

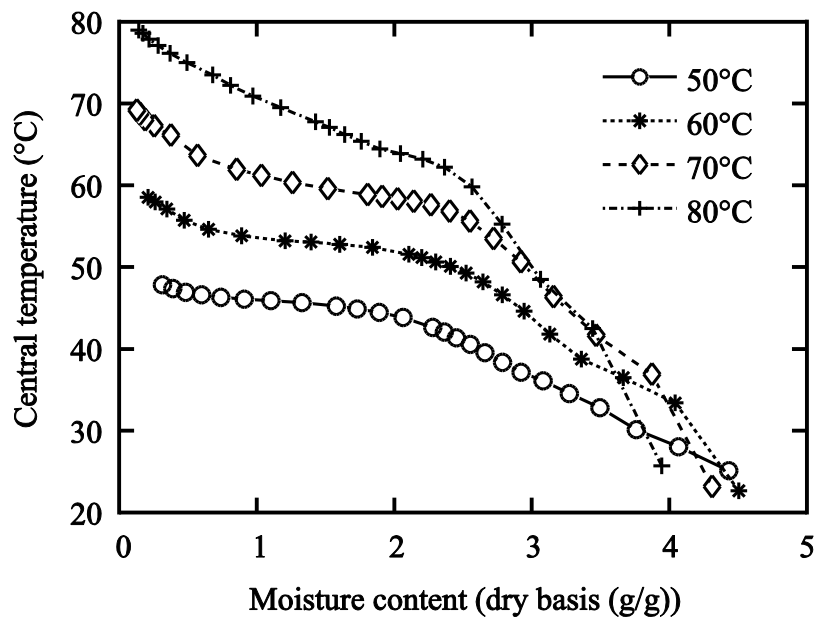


Fig. 3-11 乾燥過程における試料中心温度の経時変化

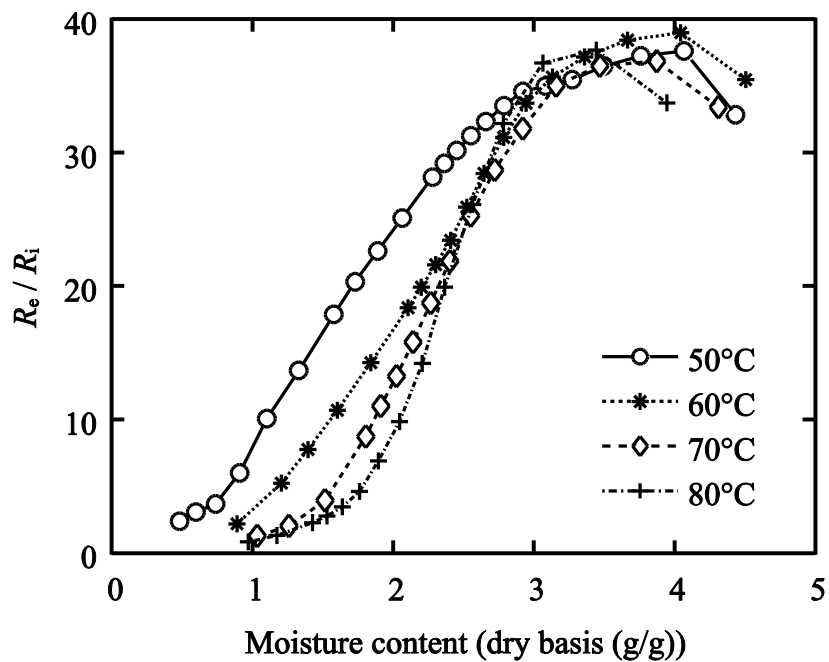


Fig. 3-12 乾燥過程における  $R_e/R_i$  比の経時変化

R-CPE 並列モデルと比較し変数を多く持つため、やや高い精度を持っている。しかしながら、ここでは細胞内液抵抗  $R_i$  が限りなく 0 に近い値となっており、R-CPE 並列モデルを適用することが妥当であると考えられる。このモデルは対象が抵抗と容量成分から成る電氣的に極めて単純な構造になっていることを表している。後期乾燥期間（含水率 1.0 以下）における乾燥試料のインピーダンス特性はすべて同様の傾向であった。そのため、この期間においては、試料のモデルとして R-CPE 並列モデルを適用することとした。R-CPE 並列モデルの複素インピーダンスは以下の式により表される。

$$Z = \frac{\omega^p TR_e^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + R_e}{(\omega^p TR_e)^2 + 2\omega^p TR_e \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1} - j \frac{\omega^p TR_e^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} p\right)}{(\omega^p TR_e)^2 + 2\omega^p TR_e \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1} \quad (3-2)$$

等価回路パラメータの値は第 2 章で述べた CNLS により算出した。Figure 3-7 に示す実線は各モデルによる近似結果を示している。実験値は近似値と概ねよく一致しており、各モデルの妥当性が示されていると言える。各試料における  $R^2_z'$  は 0.956~0.999、 $R^2_z''$  は 0.946~0.999 の範囲内であった。

Figure 3-10 に乾燥過程における試料の含水率と各等価回路パラメータの関係を示す。なお、初期含水率から含水率 1.0 までは修正モデル、含水率 1.0 以下においては  $R_e$ -CPE 並列モデルをフィッティングすることで得た値であり、含水率 1.0 以下における  $R_i$  値は 0 に固定している。前期乾燥期間では、各プロットにおける標準偏差と平均値の比（変動係数）は  $C_m$  において 0.636 以下、 $R_e$  において 0.712 以下、 $R_i$  において 0.664 以下であった。また、後期乾燥期間における変動係数は  $C_m$  において 2.441 以下、 $R_e$  において 2.298 以下であった。前期乾燥期間と比較し後期乾燥期間における変動係数が大きいのは後期乾燥期間におけるパラメータ値の変動が大きいためであると考えられる。

乾燥開始から含水率約 3.5 の期間では、各等価回路素子の値に大きな変動はなく、これは試料内温度が比較的低温に保たれている期間であり、細胞組織が大きな影響を受けなかったためと考えられる。乾燥過程における試料中心温度の変化を Fig. 3-11 に示す。初期含水率から含水率 3.5 の期間では、試料温度は 45°C 以下であり、細胞膜が熱による損傷を受けなかったと考えられる。含水率 3.5 を下回ると細胞膜容量  $C_m$  の値は含水率の低下に伴い減少した。細胞内における水分は膜構造の構造的、機能的整合性を保つのに重要な役割を担っている<sup>65)</sup>。この原因として、乾燥過程における原形質分離に伴う細胞膜面積の減少が関与し



た可能性が考えられる。また、Lew<sup>66)</sup>は細胞の膨圧と細胞膜の電気的特性の関係について調査し、細胞外液の浸透圧変化によって生じる細胞膜を經由したイオン流出が細胞膜の電気的特性に影響を及ぼすことを報告した。このことから、乾燥過程における原形質分離に伴うイオンの移動が細胞膜容量の減少に関与している可能性が考えられる。含水率 2.0 を下回ると  $C_m$  の減少はより顕著になった。Zhang ら<sup>62)</sup>は、植物細胞では熱障害により細胞膜容量の減少が起きることを報告した。本研究でも乾燥後期において、含水率の低下に伴い試料内温度が上昇したことで細胞膜の損傷が生じたと考えられる。

細胞外液抵抗  $R_e$  および細胞内液抵抗  $R_i$  は温度が高いほど低い値となり、この結果はこれらのパラメータが負の温度依存性を持っていることを示している。電解質の電気伝導はイオン伝導によるものである。受け取るエネルギーが大きいほどイオンが活性化し電解質の電気伝導率は増加する。すなわち、電解質の抵抗値は温度が高いほど減少することとなる。含水率 3.5–1.0 の範囲内では含水率の低下に伴い  $R_i$  の値は増加、 $R_e$  の値は減少した。健全な細胞内では、細胞内液は細胞膜により細胞外液よりも高い電解質濃度が保たれている。 $R_i$  および  $R_e$  の変化は熱および乾燥ストレスにより試料組織内の細胞膜が損傷を受け、細胞膜の透過性が変化し細胞内外の電解質濃度差を保てなくなったことが原因であると説明できる。 $R_i$  および  $R_e$  の値が乾燥の進行に伴いそれぞれ近づいていることもこの仮定を支持しているといえる。

以上の結果より、 $R_e$  および  $R_i$  の比率は細胞の健全性を表す指標になり得る。**Figure 3-12** に各乾燥温度条件下における含水率と  $R_e/R_i$  比の関係を示す。 $R_e/R_i$  比は 1 より高い値を示し、値が小さいほど細胞膜の損傷が大きいことを示している。 $R_e/R_i$  比の初期値は 32–35 の範囲であり含水率の低下に伴い減少している。また、乾燥温度が高いほど変化速度が大きいことがわかる。これは、乾燥時における熱ストレスが細胞膜の損傷に強く関与していることを示している。

後期乾燥期間においては、 $C_m$  の値は極めて小さな値となり、 $R_e$  の値は急激に上昇している。この期間において細胞組織の等価回路モデルである修正モデルが適用できないことから、細胞膜が完全に崩壊し  $R_e$  の増加は水分の減少に伴う導電率の低下によるものと考えられる。これは後期乾燥期間では細胞構造を表す修正モデルが適用できないことから推察できる。

### 3.3.2 吸水過程におけるインピーダンス特性の変化

乾燥実験によって前期乾燥期間におけるインピーダンス特性の変化は細胞膜の損傷が原因であり、後期乾燥期間におけるインピーダンス変化が水分減少に伴う導電率の低下であることが推察された。これらの推察の妥当性を確認する

ため、乾燥試料の吸水過程におけるインピーダンス特性の調査を行うことで試料内水分がインピーダンス特性に及ぼす影響について検討した。CNLSによるフィッティング結果より、吸水期間においては  $R_e$ -CPE 並列等価回路が適用できることが明らかになった。これは乾燥過程において損傷を受けた細胞構造が吸水によって復元されないことを示している。Figure 3-13 に吸水過程における含水

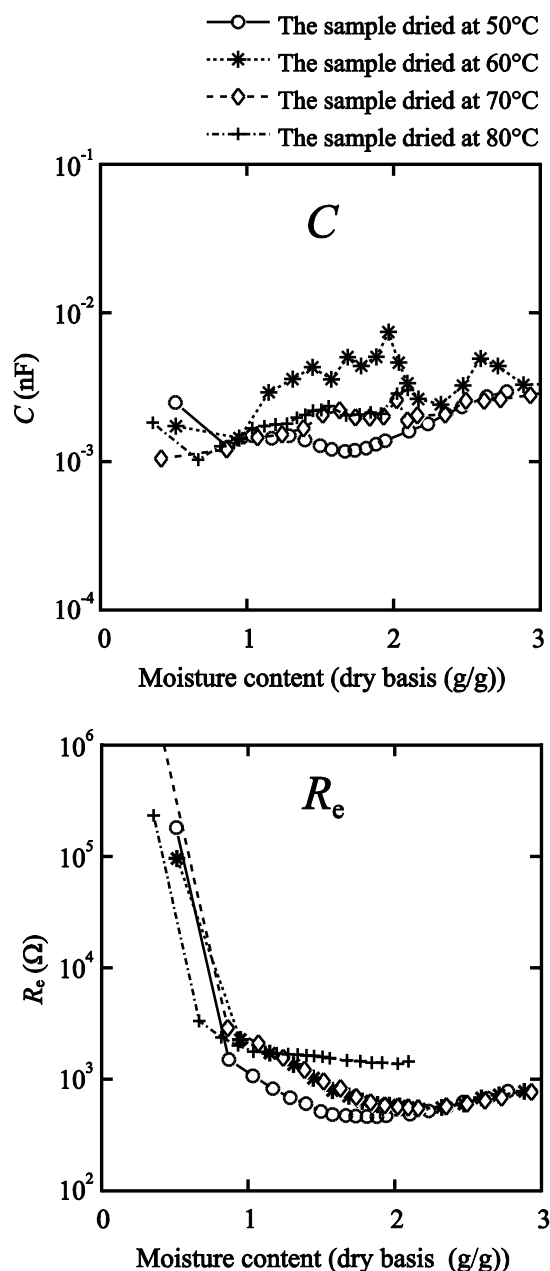


Fig. 3-13 吸水過程における等価回路パラメータの変化

率と  $R_e$ -CPE 並列モデルを適用することで得られた等価回路パラメータの関係を示した。  $R_e$  の各プロットにおける変動係数は 0.004–1.180,  $C$  の各プロットにおける変動係数は 0.011–1.850 の範囲内であった。含水率 1.0 以下の期間においては  $R_e$  の値は吸水開始から急速に減少し, この変化は乾燥期間における変化と一致することがわかる。一方, これよりも高い含水率域では  $R_e$  の値に大きな変化は見られず, 高い含水率域では水分の影響を受けないことがわかる。  $C$  の値は含水率の上昇に伴い  $10^{-3}$  から  $10^{-2}$  (nF) の間で僅かに上昇した。これは, 乾燥試料よりも高い誘電率を持つ水分を吸収したことに起因すると考えられる。吸水過程における  $C$  の変化は前期乾燥期間におけるそれと比較して極めて小さい。これは, 前期乾燥期間における  $C$  の変化が含水率に依存しているのではなく細胞膜の状態に依存していることを示している。以上の結果は前期乾燥期間における等価回路パラメータの変化が水分量による影響には依存せず, 細胞の状態に基づいていることを示唆するものである。

### 3.4 まとめ

本章では, 細胞の生理学的な状態変化を評価するために乾燥過程におけるジャガイモ組織のインピーダンス特性を調査し, 等価回路モデルを用いた解析を行った。前期乾燥期間 (初期含水率~含水率 1.0 (dry basis)) においては, 試料のインピーダンス特性は修正モデルで表現できることが明らかとなった。各等価回路パラメータの変化に着目すると, 含水率の低下に伴う  $C_m$  の減少および  $R_e/R_i$  比の減少がみられた。この結果より, 熱および乾燥ストレスにより, 細胞膜が損傷を受けていることが推察された。後期乾燥期間 (含水率 1.0 (dry basis) 以下) においては, 細胞構造が崩壊していることから  $R_e$ -CPE 並列モデルが試料のインピーダンス特性を表すモデルとして妥当であることが明らかとなった。また, この期間では水分減少による導電率の低下に伴うインピーダンスの急激な上昇が確認された。

さらに, 含水率がどのようにインピーダンス特性に影響を与えるのか把握するため, 乾燥試料の吸水過程におけるインピーダンス特性の変化についても調査を行った。吸水過程における試料の等価回路モデルとして  $R_e$ -CPE 並列モデルが妥当であることが明らかとなった。含水率 1.0 以下の期間においては  $R_e$  の値は吸水開始から急速に減少し, この変化は乾燥期間における変化と一致した。一方でこれよりも高い含水率域では  $R_e$  の値に大きな変化は見られなかった。吸水過程における  $C$  の変化は前期乾燥期間におけるそれと比較して極めて小さく

なる傾向であった。このことから、前期乾燥期間における  $C$  の変化が含水率に依存しているためではなく細胞膜の状態に依存していることが示唆された。

以上の結果より乾燥過程における青果物組織の細胞構造の変化が明らかになったと共に、電気インピーダンス法による細胞膜健全性の評価法としての可能性が見出された。これらの結果は乾燥青果物の製造過程における物理的特性の評価法として有用な知見であると考えられる。

## 第4章

# 乾燥前処理が細胞構造に及ぼす影響および乾燥速度との関係

### 4.1 はじめに

青果物には水分が豊富に含まれるため、その保存期間は著しく短い。そのため、保存性の向上を目的とし、古くから様々な加工が行われてきた。青果物の乾燥は保存性の向上や嗜好性の付与などを目的とした加工法の一つであり、現在でも青果物の加工法として一般的に行われている。そのため、様々な青果物の乾燥特性に関する研究が盛んに行われ報告されており、一般に青果物は乾燥の進行に伴いその乾燥速度が低下することが知られている<sup>67),68)</sup>。そのため、エネルギーコストの削減や生産性の向上させるために、乾燥速度の向上を目的とした様々な研究が行われてきた。ブランチングは青果物組織内に存在し変色、栄養成分の分解等の品質劣化を引き起こす酵素の失活を目的とした一次加工法の一つである。しかし一方で、ブランチングは乾燥速度を向上させるのに効果的であるとされている<sup>35),69)</sup>。また、Eshtiaghi ら<sup>70)</sup> および Dandamrongrak ら<sup>71)</sup>は青果物の乾燥前に凍結解凍処理を施すことによって乾燥速度を向上しうることを報告した。

Nieto ら<sup>72)</sup>はブランチング後の青果物の乾燥特性を調査し、ブランチング試料の乾燥速度の増加は試料組織における細胞構造の崩壊が関与していることを示唆した。しかし、Nieto らの考察は組織構造観察による定性的な評価に基づいている。また、ブランチング等の加熱処理や凍結解凍処理は青果物の細胞膜の透過性を変化させるとの報告があり<sup>73)</sup>、前処理による乾燥速度の向上には細胞膜の状態変化が関与していると考えられる。そのため、乾燥速度と細胞構造の関係の定量的な評価は現象の解明や乾燥速度を改善させる前処理法の検討に貢献し、乾燥製品の生産性の向上に寄与できると考えられる。

本章では電気インピーダンス法を用いることで細胞の状態を推定し、ブランチングおよび凍結解凍処理を施した青果物試料の細胞の損傷を定量的な評価を行う。また、細胞膜の損傷度と乾燥速度との関係を調査し細胞膜の損傷が乾燥速度に及ぼす影響について検討することを目的としている。インピーダンス特性の解析には第2章で構築した青果物組織の等価回路モデルを用い、細胞の損傷の定量化には第3章で定義した  $R_o/R_i$  比を用いる。

## 4.2 実験方法

### 4.2.1 実験試料および調整

実験試料には乾燥品として広く流通するニンジンの切片 (25 mm×30 mm×20 mm) を用いる。ニンジンはずくば市内の小売店で購入し、実験開始まで 10°C に設定した冷蔵庫内で保存したものを用いる。

乾燥前処理としてブランチングおよび凍結解凍処理を行う。ブランチングは 70, 80 および 100°C の温水中で 5 分間の加熱を行った。水温は温度調節器 (BX303, 東邦電子株式会社) により制御する。加熱終了後直ちに氷水中で 20 分間の冷却処理を行う。凍結解凍処理では -20°C に設定された冷凍機内で 12 時間静置し処理を行う。解凍は 15°C の流水に浸漬することで行う。比較対照として無処理の試料を 20 分間氷水中に浸漬したものを用意し前処理試料との比較を行う。

### 4.2.2 乾燥方法および乾燥速度の算出

各前処理を施した試料は 60°C に設定された恒温槽内で 10 時間乾燥する。乾燥過程における試料の質量変化を一定時間毎に計測し、Eq. (3-1) に基づき乾量基準含水率 (dry basis) に換算する。乾物質量は実験終了後の試料について、60°C に設定した恒温槽内で 12 時間乾燥し、その後、ミルで粉砕、さらに加熱乾燥式水分計 (MS-70, A&D) で 100°C, 30 min 乾燥することで求める。

青果物の乾燥における水分移動は主に減率乾燥期間に支配される<sup>74)</sup>。この期間における含水率変化は拡散理論によって表される。この期間における含水率の変化を表現する方程式として、様々な要因による水分移動現象を一つの乾燥速度定数として表した指数モデルが最も一般的である。

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt). \quad (4-1)$$

ここで、 $MR$  は水分比、 $M_e$  は平衡含水率、 $M_0$  は初期含水率、 $k$  は乾燥速度定数である。定数  $k$  および  $M_e$  は Eq. (4-1) を非線形最小二乗法により実験値に当ては

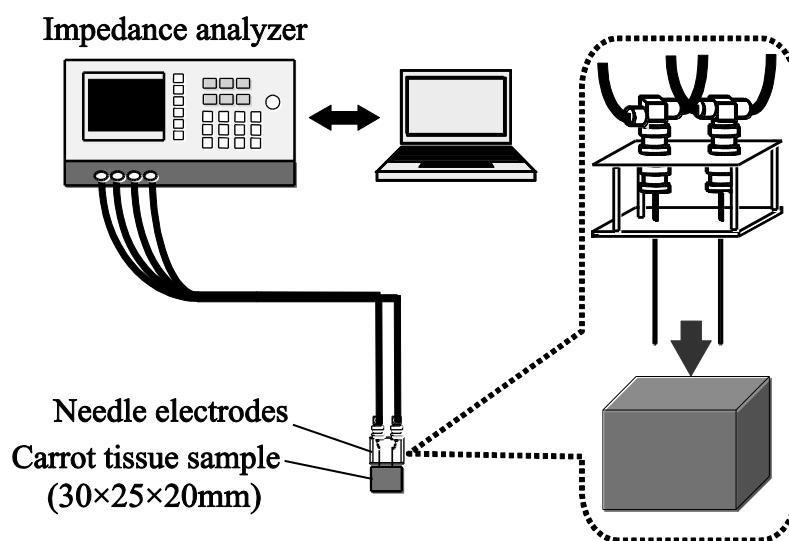


Fig. 4-1 実験系の概略

めることで算出する。

### 4.2.3 インピーダンス計測条件

実験系の概略を Fig. 4-1 に示す。インピーダンス計測にはインピーダンスアナライザ (HP4194A, Hewlett-Packard) および針状電極 (Fig. 4-1) を用いる。電極は4端子対法に基づき、同軸ケーブルによりインピーダンスアナライザに接続する。印加電圧は0.5 V、測定点は100 Hz から10 MHz 間の81点とする。実験試料の等価回路モデルとして、第2章で構築した修正モデル (Fig. 2-5 (c)) を適用する。実験によって得られた計測値にCNLSを用いて修正モデルを近似させ、細胞膜容量  $C_m$ 、細胞外液抵抗  $R_e$ 、細胞内液抵抗  $R_i$  の値を求める。

## 4.3 実験結果および考察

### 4.3.1 乾燥前処理が乾燥速度に及ぼす影響

各前処理試料の乾燥過程における含水率の経時変化を Fig. 4-2 に示す。図中の実線は Eq. (4-1) による近似値を表している。Table 4-1 に Eq. (4-1) 中の各定数値および実験値と近似値の偏差平方和 (RSS) を示す。RSS の値は0.88 以下であり、指数モデルは実験値と比較的良好な近似精度を持つことが示された。乾燥速度定数  $k$  の値に着目すると対照と比較し、ブランチングおよび凍結解凍処理試料

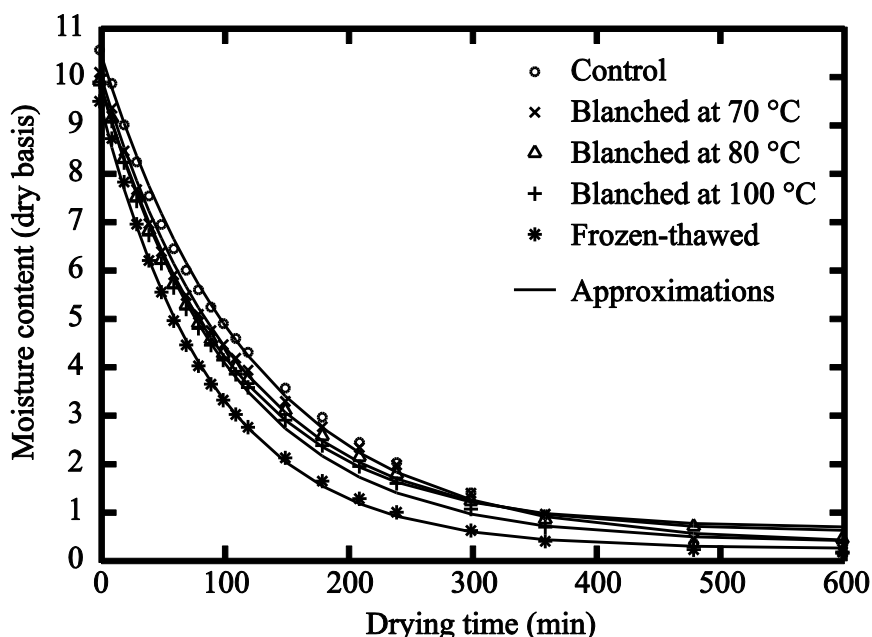


Fig. 4-2 前処理試料の乾燥過程における含水率の経時変化

Table 4-1 指数モデルの各定数値

Pretreatment	$k$	$M_e$	$M_0$	RSS
Control	0.00804	0.31	10.5	0.50
Blanched at 70 °C	0.00896	0.55	10.1	0.88
Blanched at 80 °C	0.00933	0.35	9.9	0.47
Blanched at 100 °C	0.00946	0.63	9.9	0.42
Frozen-thawed	0.01090	0.21	9.5	0.13

における乾燥速度定数  $k$  の値は高くなり、これらの前処理が乾燥速度を向上させる上で効果的であることを示している。凍結解凍試料において  $k$  は最も高い値となり、これは凍結解凍処理が乾燥速度を向上させるために最も効果的であることを示している。ブランチング試料では加熱温度が高いほど  $k$  の値が大きくなる傾向であった。

#### 4.3.2 乾燥前処理がインピーダンス特性に及ぼす影響

各前処理後における Nyquist 線図を Fig. 4-3 に示す。無処理試料におけるイン



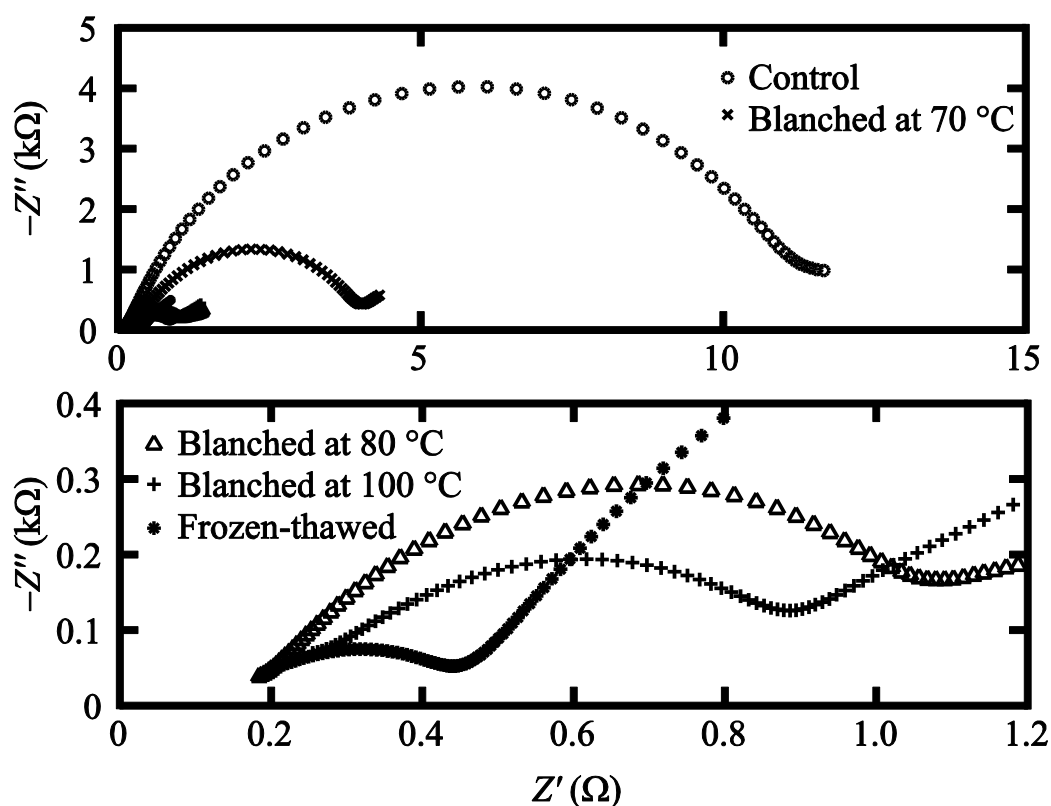


Fig. 4-3 前処理試料の Nyquist 線図

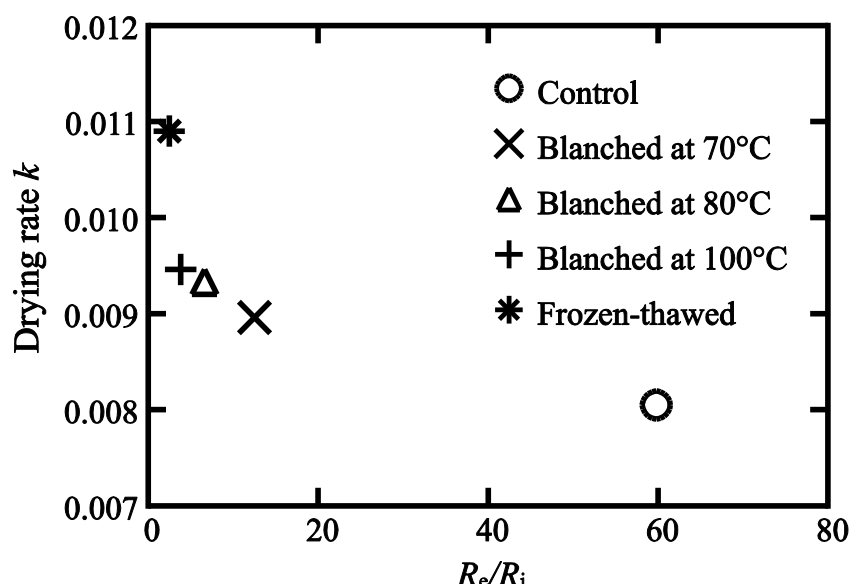
Table 4-2 各前処理試料における修正モデルのパラメータ値

Pretreatment	Equivalent circuit parameters				$R_e / R_i$
	$T$ (nF s $^{(p-1)}$ )	$p$	$R_e$ ( $\Omega$ )	$R_i$ ( $\Omega$ )	
Control	54.8	0.73	10541	185	59.8
Blended at $70^\circ\text{C}$	85.4	0.70	3922	323	12.5
Blended at $80^\circ\text{C}$	738.5	0.56	1108	164	6.6
Blended at $100^\circ\text{C}$	548.4	0.55	787	203	3.8
Frozen-thawed	2570.4	0.47	462	190	2.5

ピーダンスの周波数軌跡はブランチング、凍結解凍試料と比較し明瞭であるものの、ブランチング、凍結解凍試料では、円弧形状が収縮、または消失している。円弧形状の収縮は細胞膜が損傷した際に起きる現象であり<sup>61)</sup>、前処理によって細胞組織が重大な損傷を受けていることがわかる。各試料における周波数軌跡の形状を定量化するため、等価回路解析を行った。等価回路パラメータの値を **Table 4-2** に示す。これらの値の内、 $R_e$  と  $R_i$  の比に着目する。第3章で述べたように  $R_e/R_i$  比は細胞膜の健全性を測る指標であり、その値が小さいほど細胞膜の損傷が大きいことを示している。Table 4-2 より、凍結解凍試料における  $R_e/R_i$  比は最も低い値をとり、細胞膜が大きく損傷していることがわかる。これは凍結処理により細胞内において氷結晶が生成され体積が膨張したことにより細胞膜が損傷を受けたと考えられる。ブランチング試料においては加熱温度が高いほど低い  $R_e/R_i$  比であった。植物組織における細胞膜の損傷は約 50°C 付近から起きるとされている<sup>62)</sup>。そのため、ブランチング処理による  $R_e/R_i$  比の低下は、熱ストレスにより細胞膜が損傷を受け透過性が変化したことに起因すると考えられる。

### 4.3.3 乾燥速度定数と細胞膜損傷の関係

**Figure 4-4** に乾燥速度定数  $k$  と  $R_e/R_i$  比の関係を示す。細胞膜の損傷が大きいほど ( $R_e/R_i$  比の値が小さいほど)  $k$  の値が大きくなる傾向がみられる。これらの結果より、ブランチングおよび凍結解凍による細胞膜の損傷が乾燥速度に影響



**Fig. 4-4** 乾燥速度定数  $k$  と  $R_e/R_i$  比の関係

を及ぼしていることが示唆される。Dick<sup>73)</sup>の報告によると、損傷を受けた細胞膜は高い水分透過性を示す。本研究においても青果物組織における細胞膜の損傷が膜透過性を変化させたことにより、乾燥速度が増大したものと推察された。

#### 4.4 まとめ

本章ではブランチングおよび凍結解凍処理による細胞膜の損傷が青果物組織の乾燥速度に与える影響について調査を行った。実験の結果より、 $R_e/R_i$  比の値が低いほど乾燥速度定数  $k$  の値が高くなる傾向が見られた。このことから、細胞膜の損傷による膜の水分透過性の変化により乾燥速度が向上したことが示唆された。

しかしながら、各加熱温度のブランチング処理試料において乾燥速度と  $R_e/R_i$  比の間に線形的な関係が見られたのに対し、凍結解凍処理試料ではこの関係から外れ、 $R_e/R_i$  比が著しく高い値を示した。この結果は細胞膜の損傷以外にも乾燥速度を向上させた要因が存在することを示しているため、今後詳細に検討する必要があると考えられる。



## 第5章

# 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

### 5.1 はじめに

我が国において米は最も重要な農産物である。しかしながら生産量および消費量は1960年代より減少を続けており、国内における米離れが進んでいる。近年では付加価値の高い国産米を海外に輸出するケースが多く、商業用の米輸出量は2007年から2010年までの3年間で倍増するなど、急激に増加している<sup>76)</sup>。一方で、外食産業等での消費を目的とした低価格の海外米の輸入も活発化している。近年の貿易自由化へ向けた動向に鑑みると、海外からの米輸入量はさらなる増加が見込まれる。これらの背景から、今後米の輸出入の活発化に伴い、米の国際輸送量も大幅に増加することが予想され、その過程における品質の維持が重要になる。一般に米の国際輸送は船舶により玄米の状態で行われるが、長距離・長時間輸送になるほどその品質は劣化しやすい。特に、熱帯あるいは亜熱帯地域の高温高湿度環境下を輸送船舶が通過する場合には、温度、湿度のコントロールが困難となるため、米の含水率の変動に伴う品質劣化、およびカビの発生リスクが増加する。米の含水率は鮮度や味などに深く関わり、米の健全性を決定づける重要な要素の一つとなっている。そのため、古米化を防ぐために玄米の含水率は常に一定に保つことが求められており、輸送中においても適切な温度、湿度管理が要求される。また、カビは悪臭の原因となるうえ、カビが産出するカビ毒により人体の健康を損なう恐れがある<sup>77)</sup>。

現在、米の含水率の簡易計測法として主に電気式水分計が一般に普及している。電気式的水分計には抵抗式と高周波容量式がある。前者は直流抵抗、後者は高周波数における容量値と水分量の関係を利用するものである。一方、従来のカビ検査では、作業者が玄米袋からサンプリングを行い、目視等による官能

評価によりカビ発生の有無を判定している。しかしこれらの方法は個人の経験に頼る部分が多いだけでなく、手間と時間を要するという問題がある。玄米の含水率およびカビの発生状況をリアルタイムかつ定量的にセンシングできる計測法が確立されれば、空調のフィードバック制御による適切な環境維持や、カビ検査の簡易化に貢献できると考えられる。

本章では、電気インピーダンス法により含水率測定とカビの検出を同時に行う手法を提案する。電気式の水分計は単一の周波数における抵抗値あるいは容量値を指標としているのに対し、電気インピーダンス法は広範囲における周波数のインピーダンス特性から対象を特徴づける手法である。そのため、水分量およびカビの有無が玄米のインピーダンス特性に与える影響をそれぞれ分離して取得できる可能性がある。本章では、玄米の含水率とカビについて、簡便かつリアルタイム性の高い計測法を確立し、玄米輸送時におけるモニタリング検査の利便性向上を目指す。そのための基礎実験として、挿入型の電極を介して玄米粒群のインピーダンス特性を取得し、含水率とインピーダンス特性の関係性およびカビの有無が及ぼす影響について調査を行った結果を報告する。

## 5.2 実験方法

### 5.2.1 インピーダンス計測

**Figure 5-1** に実験系の概略を示す。アクリル製円筒容器に約 300 g の試料を加圧せずに充填し、アクリル板の一部にステンレス板を接着した平行平板電極対 (**Fig. 5-2**) を上部から挿入する。電極対は LCR メータ (3532-50, 日置電機) に接続され、計測結果は GP-IB を経由して PC に保存される。予備実験より安定して測定できることが確認されたことから、印加電圧は  $0.5 V_{\text{rms}}$  とする。また、低周波域ではインピーダンスが極端に大きくなるため、計測する周波数範囲は 100 Hz から 1 MHz の範囲とする。この周波数範囲において、81 点の log 掃引を行い、インピーダンス  $|Z|$  と位相差  $\theta$  を計測する。なお、各周波数の測定値について 64 回の平均化処理を行う。

### 5.2.2 含水率の調整

実験に供試した試料はコシヒカリ (平成 22 年, 茨城県産), はるみ, あきたこまち, ゆめひたち (平成 24 年, 茨城県産) の 4 品種である。玄米の含水率を変化させるため、各試料について、約 300 g を調理バットに敷き詰め、 $30^{\circ}\text{C}$ , 相対湿度 90% に設定した恒温恒湿槽 (SH-241, ESPEC) 内に静置し吸湿させる。一定時間ごとに試料を恒温恒湿槽から取り出し、円筒容器に充填し前述の方法で

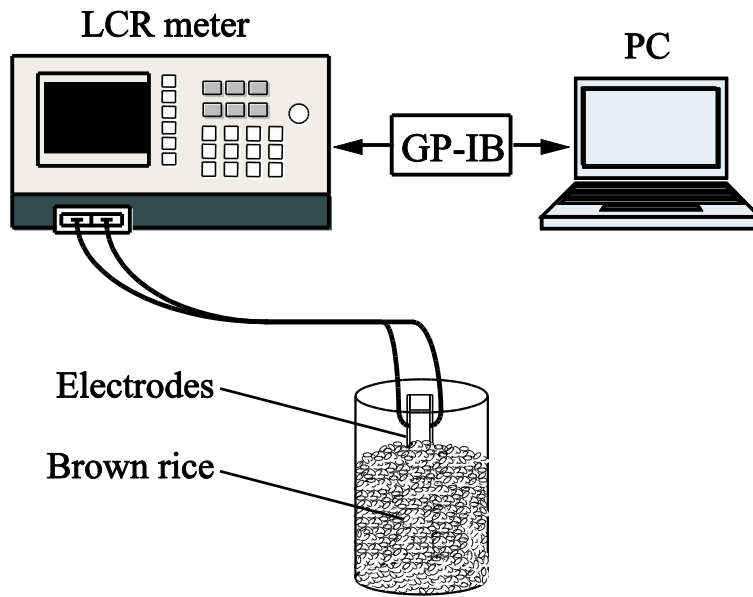


Fig. 5-1 実験系の構成

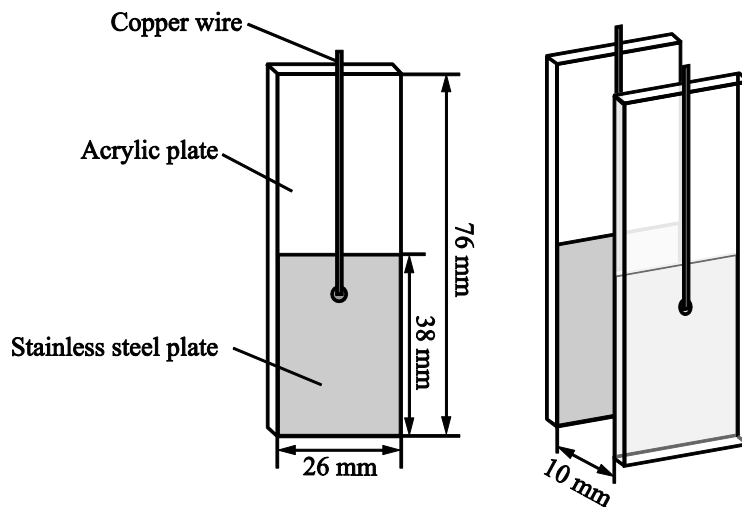


Fig. 5-2 平行平板電極

複素インピーダンスを測定する。その際に試料の質量を電子天秤 (EJ-610, A&D) を用いて測定する。吸湿過程における質量変化から含水率を求める。含水率の算出に必要な試料の乾物重量は、加熱乾燥式水分計 (MS-70, A&D) を用いて測定する。

### 5.2.3 カビ発生玄米の作製

目視で確認できる程度のカビの発生が電気インピーダンスに与える影響につ

いて調査する。実験に供試する玄米は含水率実験と同様とする。30°C、相対湿度 90% に設定した恒温槽内に調理バットに敷き詰めた玄米を 40 日間静置し、意図的にカビを発生させる。その後、恒温恒湿槽の湿度設定を変化させることで含水率の異なるカビ発生玄米試料を用意する。玄米には複数種のカビが発生したが、菌種の特異性は行っていない。複素インピーダンスの測定方法は含水率実験と同様とする。

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 含水率変化

Figure 5-3 に吸湿過程における Nyquist 線図の挙動を示す。それぞれの吸湿時間において、インピーダンスの周波数軌跡は円弧の一部をなしており、吸湿が進み、含水率が高くなるほどその円弧が縮小する傾向がみられる。それぞれの円弧は歪んだ形状になっていることから、玄米のインピーダンス特性のモデル化には  $R$ -CPE 並列等価回路を用いることとした。 $R$ -CPE 並列等価回路の合成インピーダンス計算式は以下の式として示される。

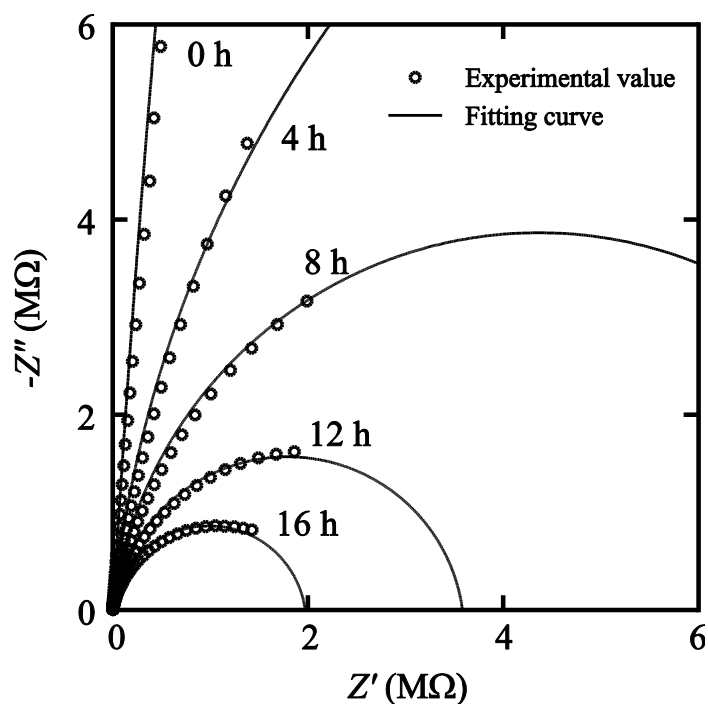


Fig. 5-3 貯蔵過程における玄米の Nyquist 線図の経時変化



$$Z = \frac{\omega^p TR^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + R}{(\omega^p TR)^2 + 2\omega^p TR \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1} + j \frac{-\omega^p TR^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} p\right)}{(\omega^p TR)^2 + 2\omega^p TR \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} p\right) + 1}. \quad (5-1)$$

CNLS を用い、モデル中の各パラメータ ( $R$ ,  $p$ ,  $T$ ) について繰り返し計算を行うことで値を決定した。図中の実線は  $R$ -CPE 並列回路を適用した際の近似曲線を表す。実験値と近似値は概ね良く一致しており、これは  $R$ -CPE 並列等価回路が玄米の等価回路モデルとして妥当であることを示している。Figure 5-4 に含水率と等価回路定数の関係を示す。 $R$  の値は含水率の増加に伴い減少した。実験に供試した 4 品種とも同様の傾向を示し、品種間における差異は見られなかった。抵抗  $R$  は玄米粒群の直流抵抗を表している。 $R$  の増大は水分の増加に伴う導電率の上昇によるものであり、直流抵抗と米の含水率の間には指数関数的な関係があることが知られている<sup>78)</sup>。本研究においても抵抗  $R$  と含水率の間には指数的な関係が見られ、指数近似を行った結果、決定係数はそれぞれの品種において 0.933–0.955 の範囲内であった。全体的にばらつきがやや大きいですが、これは電極を玄米粒群に挿入する際に接触条件に微妙な変化が生じていることが影響していると考えられる。精度を向上させるためには、玄米と電極の接触面積を大きくするなど、電極形状の改善が必要であると考えられる。 $C$  の値は含水率の増加に伴い増加する傾向であった。水分子は玄米に含まれる固形分と比べて高い誘電率を持ち含水率の上昇に伴い容量成分が大きくなったことが原因であると考えられる。

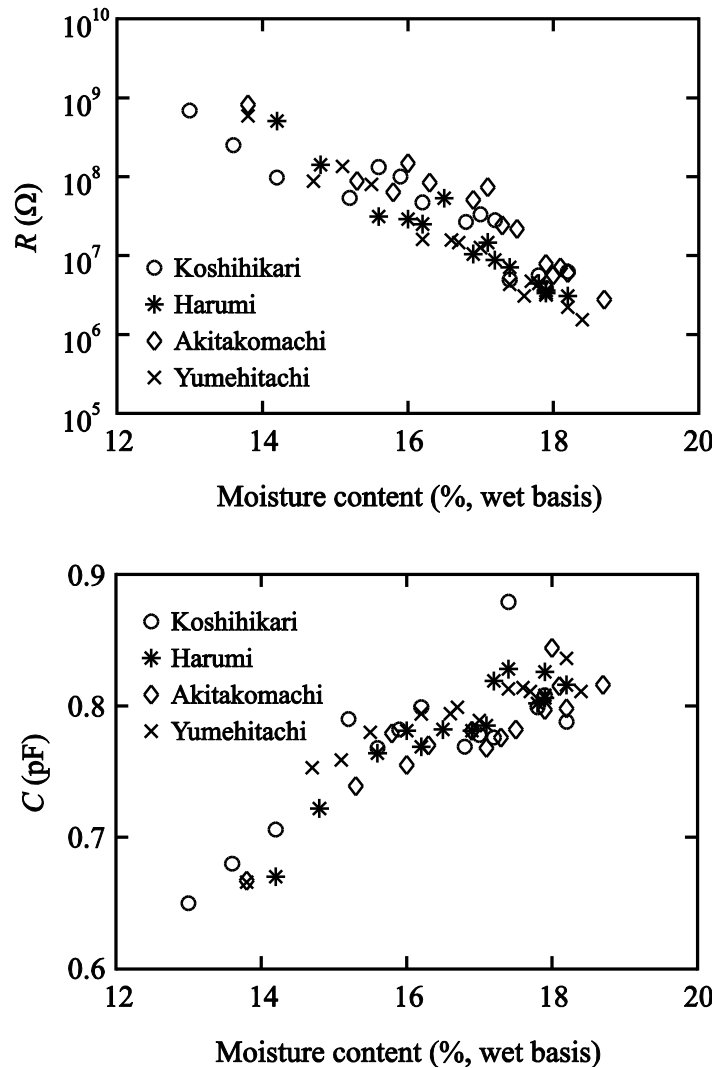
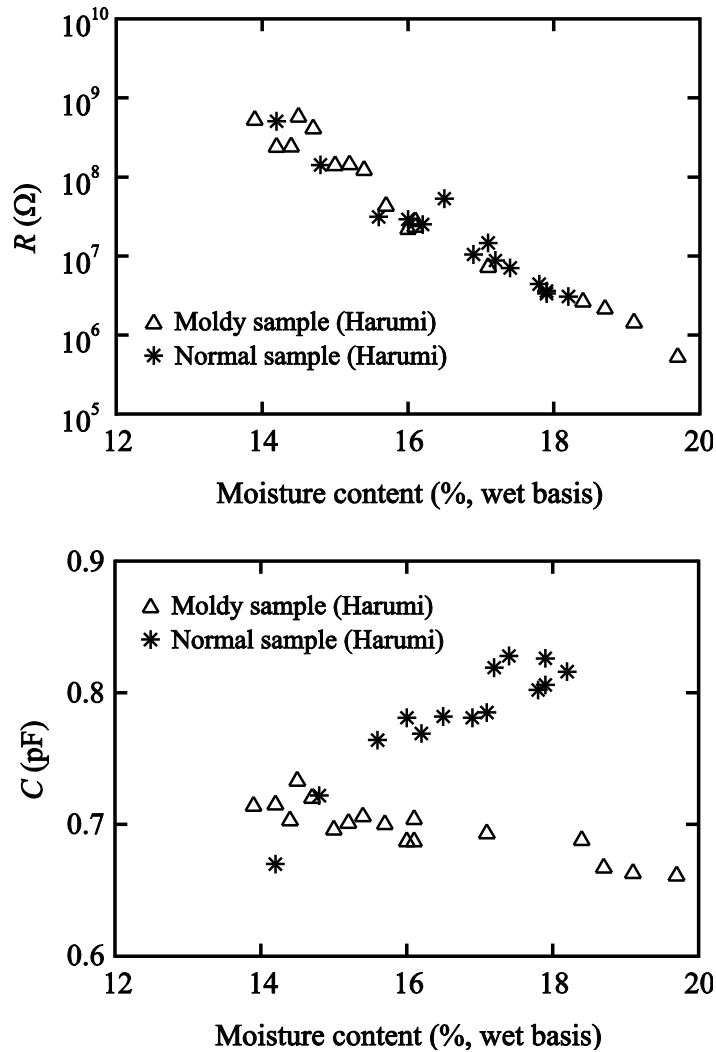


Fig. 5-4 通常玄米における含水率と等価回路パラメータの関係

### 5.3.2 カビ発生玄米のインピーダンス特性

Figure 5-5 にカビ発生玄米および通常玄米における等価回路定数の比較を示す。カビ発生玄米の抵抗  $R$  は通常玄米と同様に含水率が増加するにつれて減少する傾向であり、その変化は通常玄米の変化とほぼ重なる。すなわち、カビの発生が  $R$  の値にはほとんど影響を及ぼさないことがわかる。一方、カビ発生玄米の容量成分  $C$  は通常玄米と異なり、変化量は小さいものの含水率が高いほど低下する傾向がみられた。この現象はすべての品種において確認された。カビは米の表面に付着したのち、菌糸と孢子を形成する<sup>79)</sup>。その過程において呼吸作用による有機物の分解、代謝物の産生などカビの代謝により玄米の組成は変



**Fig. 5-5** カビ発生玄米における含水率と等価回路パラメータの関係

化する.  $C$  と含水率の関係が通常玄米とカビ発生玄米で異なるのは, カビの活動に伴う構造的な変化あるいは組成変化が関与していると考えられるが, この原因については今後詳細に検討する必要がある. 以上の結果より, カビが電気インピーダンスに大きな影響を与える一因であるという知見が得られた. これらの変化を抵抗値  $R$  および容量値  $C$  の変化としてモニタリングすることで含水率の推定およびカビ発生の検出が可能になると考えられる.

## 5.4 ま と め

本研究では、電気インピーダンス法を用いる含水率計測およびカビ検出法の確立を目的とし、玄米含水率の変化およびカビの発生が電気インピーダンス特性に与える影響について調査を行った。温度 30°C、相対湿度 90%の環境下に玄米を貯蔵し含水率を変動させ、その過程における電気インピーダンス変化を挿入型の電極を用いて計測した。玄米の電気インピーダンス特性は抵抗  $R$  と定位相要素 (CPE) の並列回路でモデル化できることが明らかとなった。また、等価回路定数  $R$  の値と含水率の間に指数的な関係、 $C$  の値と含水率に一次関数的な関係性が示されたことから、これらの指標から含水率を推定可能なことが示唆された。カビ発生玄米におけるインピーダンス計測では、通常玄米と同様に含水率の増加に伴い抵抗値  $R$  は減少したものの、容量値  $C$  は低下する傾向であった。これはカビ菌糸の侵食による構造変化および菌の代謝による玄米組成の変化によるものと推察された。これらの結果より等価回路定数  $R$  および  $C$  をモニタリングすることにより含水率の推定およびカビ発生を検知できる可能性が示唆された。今後の課題として、計測精度向上のための電極形状の改善、カビの発生が容量  $C$  の変化に及ぼす影響の原因究明が挙げられる。また、カビの発生過程において実験を行うことで、カビ発生の検出精度の検証を行う必要がある。

# 第 6 章

## 結 論

### 6.1 研究成果

本研究の目的は青果物および穀類の加工，流通過程における電気インピーダンスの特性の変化から対象組織内の細胞構造の変化を推定し物理的品質の評価に適用する手法を構築することであった。第 2 章では，電気インピーダンス法の基本原理について述べ，等価回路解析の意義について解説を行った。また，細胞の等価回路である Hayden モデルを基に定位相要素を導入した修正モデルを構築し，ジャガイモ切片を用いた実験によりその妥当性を評価した。その結果として，修正モデルは実験値と良好な近似精度を示し，不均一な構造を持つ青果物組織のモデルとして適用できることを示した。第 3 章では，乾燥過程における細胞の状態変化を評価することを目的に，ジャガイモ切片の乾燥および吸水過程におけるインピーダンス特性の変化を調査した。前期乾燥期間においては修正モデルが適用され，熱および乾燥ストレスにより，細胞膜が損傷を受けていることが推察された。後期乾燥期間においては細胞構造が完全に崩壊し，水分減少による導電率の低下に伴うインピーダンスの急激な上昇が確認された。また，吸水過程におけるインピーダンス特性の変化から前期乾燥期間におけるインピーダンス特性の変化が水分量の増減とは独立であり，細胞膜の状態変化に依存するものであることが推察された。これらの結果により乾燥過程における青果物組織の細胞構造の変化が明らかになったと共に，電気インピーダンス法による細胞膜健全性の評価法としての可能性が見出された。第 4 章では，細胞膜の損傷が青果物組織の乾燥速度に与える影響について調査を行った。実験結果より， $R_o/R_i$  比の値が低いほど乾燥速度定数値が高くなる傾向が見られ，細胞膜の損傷により膜の透過性が変化したことで乾燥速度が向上したことが示唆された。第 5 章では，代表的な穀物である玄米を対象とし，その品質計測への電気インピーダンス法の適用を試みた。具体的に，電気インピーダンス法を用

いる含水率計測およびカビ検出法の確立を目的とし、玄米含水率の変化およびカビの発生が電気インピーダンス特性に与える影響について調査を行った。その結果、等価回路パラメータと含水率の関係から含水率の推定、カビ発生を検知できる可能性が示唆された。以上の成果より、電気インピーダンス特性に修正モデルを用いた解析を行うことにより青果物組織内の細胞膜の状態を推定できることが明らかとなった。また、対象組織の細胞膜の状態を推定することにより迅速かつ簡便に加工、流通過程における青果物および穀物組織の品質推定が行えると考えられる。

## 6.2 将来の展望

本研究では、青果物および穀物組織の電気インピーダンス特性より、細胞の状態を推定することで、その加工・流通過程における品質評価技術として利用し得ることを示した。本研究で示した等価回路モデルを用いた解析手法は、青果物の鮮度・熟度等の生理学的な状態の計測法として応用できる可能性がある。本研究では、ジャガイモ切片等のモデル組織を用いた実験を行ったが、異なる種の植物組織では、電気的特性に差異を生じている可能性があるため、各青果物あるいは穀物組織における基礎的なデータ収集し、データベース化すること等により、より詳細な品質計測法として利用できると思われる。

# 謝 辞

本論文は、筆者が筑波大学 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主にまとめたものです。本論文の執筆にあたり、多くの方々から様々なご指導とご協力を頂きました。

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、主指導教員として、外部研究室から本研究室に移ってきた私を快く受け入れて下さり、このような研究に携わる機会を与えて頂きました。また、常日頃からのご指導だけでなく研究者として必要な資質を先生から学ばせて頂きました。さらに、学会だけでなく産学連携関係の場における発表、講演や企業との共同研究を行う機会を与えて頂き、貴重な経験を積むことができました。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 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、アドバイスを頂きました。学会発表の原稿や論文の内容のチェックを夜遅くまで見て下さり、常に貴重なご助言を頂きました。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 海老原格先生には、副指導教員として、常に本質をついた意見を頂戴し、原稿のチェックや英文添削の際には紙面が赤くなるほど細やかなご指導を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

また、本論文を執筆するにあたり、筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教授 堀憲之先生、筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教授 藪野浩司先生、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、副査として本論文をご精読頂きました。予備審査を通じて専門的な見地

から大変有益なご指導を頂き、本論文の内容を大いに改善することができました。ここに深く感謝申し上げます。

千葉大学 大学院園芸学研究科 生物資源科学コース 生物生産環境学領域 教授 田川彰男先生には千葉大学学士課程 3 年から博士前期課程までの主指導教員として研究を行うための素養を与えて下さりました。筑波大学の研究室に移る際も快く受け入れて下さり、多くのことを学ぶ機会を与えて頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

千葉大学 大学院園芸学研究科 生物資源科学コース 生物生産環境学領域 教授 小川幸春先生には千葉大学学士課程 3 年から博士前期課程までの副指導教員として実験方法から研究に対する考え方に至るまで貴重なご指導を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

日本学術振興会には特別研究員奨励費 (24・1232) によって本研究の一部を助成して頂き、私が研究に専念するための環境を与えて頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

音響システム研究室及び通信システム研究室、生体計測システム研究室の皆様には、常に充実した研究室生活を送るためのサポート、励ましを頂きました。年に何度もある宴会の場は何よりも楽しく、大切な思い出を作ることができました。また、皆様との水泳やランニングの機会があったことで、運動不足を解消し、健康的な研究室生活を送ることができました。ここに深く感謝申し上げます。

音響システム研究室の博士後期課程に在籍する、小林透氏、茂木貴弘氏、齊藤佑弥氏、野呂瀬葉子氏、青柳将史氏、黒山喬允氏、藤田佑樹氏、卒業生である佐藤裕治氏、宝田隼氏、榎田翼氏、善甫啓一氏には、研究に関する助言のみならず、生活面においてもサポートを頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に、大学院博士後期課程まで進学する機会を与え、私を気遣い支え続けてくれた家族に感謝します。



## 参考文献

- 1) 志塚淳, 小川幸春, 田川彰男, “脱水ダイコンの物理的, “電氣的性質に及ぼす凍結および解凍操作の影響,” 日本食品科学工学会誌, **55**, 158–163 (2008).
- 2) 古賀克也, 富田裕一郎, 福永隆生, 太田直一, 山村隆治, 杉元康志, 食品の加工・貯蔵 (三共出版株式会社, 東京, 1982), p. 112.
- 3) 五十部誠一郎, 西村敏英, 本間清一, 松本信二, 宮尾茂雄, 村田容常, スタンダード栄養・食物シリーズ7 食品加工貯蔵学 第2版 (東京化学同人, 東京, 2011), pp. 3–6.
- 4) “食品衛生法,” 2013年最終改正.
- 5) 一般社団法人日本農林規格協会, <http://www.jasnet.or.jp>. (参照 2014-01-04).
- 6) 木村進, 林弘通, 土田茂, 渡辺敦夫, 石谷孝佑, 乾燥食品事典 (朝倉書店, 東京, 1984), p. 2.
- 7) 高野玉吉, 唯野, 哲男, 食品工業の乾燥 (光琳書院, 東京, 1975), pp. 1–10.
- 8) 岩崎康男, 野崎博, 岡田稔, 食品加工と貯蔵 (東京同文書院, 東京, 1967), pp. 158–162.
- 9) A. Vega-Gálvez, K. Ah-Hen, M. Chacana, J. Vergara, J. Martínez-Monzó, P. García-Segovia, R. Lemus-Mondaca, K. Di Scala, “Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices,” *Food Chemistry*, **132**, 51–59 (2012).
- 10) S. J. Kowalski, D. Mierzwa, “Numerical analysis of drying kinetics for shrinkable products such as fruits and vegetables,” *Journal of Food Engineering*, **114**, 522–529 (2013).
- 11) B. Sturm, A. N. Vega, W. C. Hofacker, “Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples,” *Applied Thermal Engineering*, **62**, 455–460 (2014).

- 12) L. E. Kurozawa, I. Terng, M. D. Hubinger, K. J. Park, “Ascorbic acid degradation of papaya during drying: Effect of process conditions and glass transition phenomenon,” *Journal of Food Engineering*, **123**, 157–164 (2014).
- 13) A.S. Kholmanskiy, A. Z. Tilov, E.Y. Sorokina, “Drying kinetics of plant products: Dependence on chemical composition,” *Journal of Food Engineering*, **117**, 378–382 (2013).
- 14) W. J. N. Fernando, A. L. Ahmad, M. R. Othman, “Convective drying rates of thermally blanched slices of potato (*Solanum tuberosum*): Parameters for the estimation of drying rates,” *Food and Bioproducts Processing*, **89**, 514–519 (2011).
- 15) M. Jaros<sup>1</sup>, S. Pabis , “Theoretical Models for Fluid Bed Drying of Cut Vegetables,” *Biosystems Engineering*, **93**, 45–55 (2006).
- 16) 河野常盛, 米穀貯蔵の研究 (河出書房, 東京, 1941), pp. 14–18.
- 17) 古賀克也, 富田裕一郎, 福永隆生, 太田直一, 山村隆治, 杉元康志, 食品の加工・貯蔵 (三共出版株式会社, 東京, 1982), pp. 81–82.
- 18) バウテスタ R. C., 戸次英二, “粳の乾燥における胴割れ: 選択したジャポニカとインデカ種の胴割れ挙動の差,” 農業機械學會誌, **59**, 97–108 (1997).
- 19) 中山将伸, “AC インピーダンス法によるリチウムイオン電池電極反応の素過程解析,” 表面科学, **33**, 87–92 (2012).
- 20) 岸本将史, “燃料電池性能試験における電気化学インピーダンス法の利用,” エネルギー・資源, **32**, 182–187 (2011).
- 21) 佐藤正寿, 阿部一浩, 川端宣幸, 吉原佐知雄, 佐藤栄一, “W/O エマルションインキの交流インピーダンス法による安定性評価,” 日本印刷学会誌, **31**, 124–128 (1994).
- 22) Y. Ando, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, “Electrical impedance analysis of potato tissues during drying,” *Journal of Food Engineering*, **121**, 24–31 (2014).
- 23) Y. Ando, K. Mizutani, and N. Wakatsuki, “Effect of blanching and freeze-thaw treatment on the drying rate and electrical impedance characteristics of carrots,” *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering (IPCBE)*, *Food Engineering and Biotechnology IV*, Copenhagen, Denmark, **50**,

- 39–44 (2013).
- 24) 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**, 630–635 (2013).
- 25) P. Zoltowski, “On the electrical capacitance of interfaces exhibiting constant phase element behavior,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **443**, 149–154 (1998).
- 26) M. Itagaki, A. Taya, K. Watanabe and K. Noda, “Deviations of capacitive and inductive loops in the electrochemical impedance of a dissolving iron electrode,” *Analytical Sciences*, **18**, 641–644 (2002).
- 27) S. Skale, V. Doleček and M. Slemnik, “Substitution of the constant phase element by Warburg impedance for protective coatings,” *Corrosion Science*, **49**, 1045–1055 (2007).
- 28) S. Ricciardi, J. C. Ruiz-Morales and P. Nuñez, “Origin and quantitative analysis of the constant phase element of a platinum SOFC cathode using the state-space model,” *Solid State Ionics*, **180**, 1083–1090 (2009).
- 29) C. H. Hsu and F. Mansfeld, “Concerning the conversion of the constant phase element parameter  $Y_0$  into a capacitance,” *Corrosion*, **57**, 747–748 (2001).
- 30) J. R. Macdonald, “Impedance spectroscopy,” *Annals of Biomedical Engineering*, **20**, 289–305 (1992).
- 31) D. W. Marquardt, “An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters,” *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**, 2, 431–441 (1963).
- 32) R. I. Hayden, C. A. Moyse, F. W. Calder, D. P. Crawford and D. S. Fensom, “Electrical impedance studies on potato and alfalfa tissue,” *Journal of Experimental Botany*, **20**, 177–200 (1969).
- 33) L. Wu, Y. Ogawa, and A. Tagawa, “Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics,” *Journal of Food Engineering*, **87**, 274–280 (2008).
- 34) M. I. N. Zhang and J. H. M. Willison, “Electrical impedance analysis in plant

- tissues: The effect of freeze-thaw injury on the electrical properties of potato tuber and carrot root tissues,” *Canadian Journal of Plant Science*, **72**, 545–553 (1992).
- 35) G. Mazza, “Dehydration of carrots. Effects of pre-drying treatments on moisture transport and product quality,” *Journal of Food Technology*, **18**, 113–123 (1983).
- 36) H. I. Virgin, “A new method for the determination of the turgor of plant tissues,” *Physiologia Plantarum*, **8**, 954–962 (1955).
- 37) S. Falk, H. C. Hertz and H. I. Virgin, “On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. I,” *Physiologia Plantarum*, **11**, 802–817 (1958).
- 38) S. B. Nilsson, C. H. Hertz and S. Falk, “On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. II,” *Physiologia Plantarum*, **11**, 818–837 (1958).
- 39) S. Hiller and G. Jeronimidis, “Fracture in potato tuber parenchyma,” *Journal of Materials Science*, **31**, 2779–2796 (1996).
- 40) J. Blahovec and M. Lahodová, “Storage induced changes of potato properties as detected by DMA,” *LWT-Food Science and Technology*, **50**, 444–450 (2013).
- 41) J. Blahovec and M. Lahodová, “DMA thermal analysis of different parts of potato tuber,” *Food Chemistry*, **133**, 1101–1106 (2012).
- 42) J. Blahovec and M. Lahodová, “DMA peaks in potato cork tissue of different mealiness,” *Journal of Food Engineering*, **103**, 273–278 (2011).
- 43) M. Laza, M. G. Scanlon and G. Mazza, “The effect of tuber pre-heating temperature and storage time on the mechanical properties of potatoes,” *Food Research International*, **34**, 659–667 (2001).
- 44) P. P. Lewicki and E. Jakubczyk, “Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples,” *Journal of Food Engineering*, **64**, 307–314 (2004).
- 45) E. Troncoso and F. Pedreschi, “Modeling of textural changes during drying of potato slices,” *Journal of Food Engineering*, **82**, 577–584 (2007).
- 46) S. E. Cunningham, W. A. M. McMinn, T. R. A. Magee and P. S. Richardson, “Effect of processing conditions on the water absorption and texture kinetics of potato,” *Journal of Food Engineering*, **84**, 214–223 (2008).
- 47) S. O. Nelson, “Measurement of Microwave Dielectric Properties of Particulate

- Materials,” *Journal of Food Engineering*, **21**, 365–384 (1994).
- 48) S. O. Nelson, “Dielectric spectroscopy in agriculture,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, **351**, 2940–2944 (2005).
- 49) M. S. McKeown, S. Trabelsi, E. W. Tollner and S. O. Nelson, “Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in Vidalia onions,” *Journal of Food Engineering*, **111**, 505–510 (2012).
- 50) S. N. Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya, R. Sharma, P. Jaiswal, R. Kumar and R. Bhardwaj, “Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—a review,” *Journal of Food Science Technology*, **48**, 387–411 (2011).
- 51) S. Trabelsi and S. O. Nelson, “Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave permittivity measurements,” *Food Control*, **17**, 304–311 (2006).
- 52) C. V. K. Kandala, S. O. Nelson and K. C. Lawrence, “Non-destructive electrical measurement of moisture content in single kernels of corn,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, **44**, 125–132 (1989).
- 53) Y. Ando, K. Mizutani and N. Wakatsuki, “Electrical impedance analysis of potato tissues during drying process,” *2012 IFT Annual Meeting & Food Expo Technical Program Book of Abstracts*, 077-128, 75–76 (2012).
- 54) J. L. Damez S. Clerjon, S. Abouelkaram and J. Lepetit, “Dielectric behavior of beef meat in the 1-1500 kHz range: simulation with the Fricke/Cole-Cole model,” *Meat Science*, **77**, 512–519 (2007).
- 55) T. Yamamoto and Y. Yamamoto, “Analysis for the change of skin impedance,” *Medical & Biological Engineering & Computing*, **15**, 219–227 (1977).
- 56) C. G. Greenham, “Bruise and pressure injury in apple fruits,” *Journal of Experimental Botany*, **17**, 404–409 (1966).
- 57) Agilent Technologies, “Agilent impedance measurement handbook 4th edition,” <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf> (Jan. 29. 2013).
- 58) R. Pethig and D. B. Kell, “The passive electrical properties of biological systems:

- their significance in physiology, biophysics and biotechnology,” *Physics in Medicine and Biology*, **32**, 933–970 (1987).
- 59) U. Pliquet, “Bioimpedance: A review for food processing,” *Food Engineering Review*, **2**, 74–94 (2010).
- 60) H. Kalvøy, G. K. Johnsen, Ø. G. Martinsen and S. Grimnes, “New method for separation of electrode polarization impedance from measured tissue impedance,” *The Open Biomedical Engineering Journal*, **5**, 8–13 (2011).
- 61) T. Repo, M. I. N. Zhang, A. Ryyppö, E. Vapaavuori and S. Sutinen, “Effects of freeze-thaw injury on parameters of distributed electrical circuits of stems and needles of Scots pine seedlings at different stages of acclimation,” *Journal of Experimental Botany*, **45**, 823–833 (1994).
- 62) M. I. N. Zhang, J. H. M. Willison, M. A. Cox and S. A. Hall, “Measurement of heat injury in plant tissue by using electrical impedance analysis,” *Canadian Journal of Botany*, **71**, 1605–1611 (1993).
- 63) A. Halder, A. K. Datta and R. M. Spanswick, “Water transport in cellular tissues during thermal processing,” *AIChE Journal*, **57**, 2574–2588 (2011).
- 64) A. J. Stamm, “The fiber-saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements,” *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, **1**, 94–97 (1929).
- 65) J. H. Crowe and L. M. Crowe, “Induction of Anhydrobiosis: Membrane changes during drying,” *Cryobiology*, **19**, 317–328 (1982).
- 66) R. R. Lew, “Pressure regulation of the electrical properties of growing *Arabidopsis thaliana* L. root hairs,” *Plant Physiology*, **112**, 1089–1100 (1996).
- 67) A. Maskan, S. Kaya and M. Maskan, “Hot air and sun drying of grape leather (pestil),” *Journal of Food Engineering*, **54**: 81–88 2002, .
- 68) S. J. Babalis, E. Papanicolaou, N. Kyriakis and V. G. Belessiotis, “Rvaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*),” *Journal of Food Engineering*, **75**, 205–214 (2006).
- 69) S. M. Alzamora and J. Chirife, “Some factors controlling the kinetics of moisture

- movement during avocado dehydration,” *Journal of Food Science*, **45**, 1649–1651, (1980).
- 70) M. N. Eshtiaghi, R. Stute and D. Knorr, “High-pressure and freezing pretreatment effects on drying, rehydration, texture and color of green beans, carrots and potatoes,” *Journal of Food Science*, **59**, 1168–1170 (1994).
- 71) R. Dandamrongrak, G. Young and R. Mason, “Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models,” *Journal of Food Engineering*, **55**, 139–146 (2002).
- 72) A. Nieto, D. Salvatori, M. A. Castro and S. M. Alzamora, “Air drying behavior of apples as affected by blanching and glucose impregnation,” *Journal of Food Engineering*, **36**, 63–79 (1998).
- 73) D. A. T. Dick, “Water movement in cells,” In: E. E. Bittar. Membranes and ion transport. London: Wiley Interscience. 1970.
- 74) Y. I. Sharaf-Eldeen, J. L. Blaisdell and M. Y. Hamdy, “A model for ear corn drying,” *Transactions of the ASABE*, **23**, 1261–1265 (1980).
- 75) J. R. Martineau, J. E. Specht, J. H. Williams and C. Y. Sullivan, “Temperature tolerance in soy beans. I. Evaluation of a technique for assessing cellular membrane thermostability,” *Crop Science*, **19**, 75–78 (1979).
- 76) 農林水産省, “商業用のコメ輸出実績,” [http://www.maff.go.jp/j/seisan/boueki/kome\\_yusyutu/kanren.html](http://www.maff.go.jp/j/seisan/boueki/kome_yusyutu/kanren.html) (参照 2013-03-18).
- 77) 小西良子, 杉山圭一, “カビ毒の発生リスクと国際的な動向,” *食品衛生学雑誌*, **49**, 1–10 (2008).
- 78) 上村武, “農業関係における水分検定器について,” *計測*, **7**, 741–747 (1957).
- 79) 眞山眞理, 中居浩美, 浦山弥生, “輸入米と国産米のカビによる汚染実態の比較調査,” *四国大学紀要(B)*, **10**, 35–45 (1998).





## 著者論文

### 公表済み論文（学位請求に関連のある論文）

#### 査読付雑誌論文

- (J-1) Yasumasa Ando, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, Electrical impedance analysis of potato tissues during drying, Journal of Food Engineering, Vol. 121, 24-31 (2014).
- (J-2) 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, Vol. 133 (12), 630-635 (2013).

#### 査読付国際会議論文

- (P-1) Yasumasa Ando, Koichi Mizutani and Naoto Wakatsuki: "Effect of blanching and freeze-thaw treatment on the drying rate and electrical impedance characteristics of carrots," International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering (IPCBE), Food Engineering and Biotechnology IV, Vol. 50, pp.39-44 (2013).

#### 査読付国際会議発表

- (C-1) Yasumasa Ando, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: "Electrical impedance analysis of potato tissues during drying process," The 2012 Annual Meeting of Institute of Food Technologies (IFT), Book of Abstracts, Las Vegas Convention Center, Las Vegas, Nevada USA, 077-128, pp.75-76 (25-28 June, 2012)

## 公表済み論文

### 査読付雑誌論文

- (J-3) 安藤泰雅, 折笠貴寛, 椎名武夫, 五月女格, 五十部誠一郎, 村松良樹, 田川彰男, 調理用トマトの乾燥およびブランチングへのマイクロ波の適用, 日本食品科学工学会誌, Vol. 57 (5), 191-197 (2010).
- (J-4) Takahiro Orikasa, Long Wu, Yasumasa Ando, Yoshiki Muramatsu, Poritosh Roy, Toshikazu Yano, Takeo Shiina, Akio Tagawa, Hot air drying characteristics of sweet potato using moisture sorption isotherm analysis and its quality changes during drying, International Journal of Food Engineering, Vol. 6 (2), Article 12 (2010).
- (J-5) 安藤泰雅, 折笠貴寛, 椎名武夫, 五月女格, 五十部誠一郎, 村松良樹, 田川彰男, ジャガイモのブランチングにおけるカリウムの溶出およびマイクロ波の適用, 日本食品科学工学会誌, Vol. 58 (7), 284-290 (2011).

### 査読付国際会議論文

- (P-2) Takahiro Orikasa, Yasumasa Ando, Takeo Shiina, Itaru Sotome, Seiichiro Isobe, Toshikazu Yano, Akio Tagawa: "Microwave Application for Blanching and Drying of Cooking Tomato," Acta Horticulture, Lisbon, Portugal, Vol. 934, 1223-1228 (2012).

### 査読なし発表論文

- (1) 田川彰男, 安藤泰雅, 折笠貴寛, 椎名武夫, 小川幸春: "ブランチング方法の違いが野菜の品質に及ぼす影響," 日本食品科学工学会, 第 55 回大会講演集, 2Ja5, p. 85 (6 September, 2008)
- (2) 安藤泰雅, 小川幸春, 田川彰男, 折笠貴寛, 椎名武夫: "調理用トマト乾燥へのマイクロ波の適用," 農業機械学会関東支部会, 第 45 回年次報告, B8, pp.

50-51 (11 July, 2009)

- (3) 安藤泰雅, 折笠貴寛, 椎名武夫, 田川彰男, "調理用トマトの乾燥へのマイクロ波の適用"日本食品科学工学会, 第 56 回大会講演集, 2Aa11, p. 61 (11 September, 2009)
- (4) 折笠貴寛, 安藤泰雅, 武龍, ROY Poritosh, 椎名武夫, 矢野歳和, 田川彰男: "サツマイモの熱風乾燥における品質変化の変動解析," 日本食品科学工学会, 第 56 回大会講演集, 2Aa5, p. 60 (11 September, 2009)
- (5) 安藤泰雅, 今泉鉄平, 折笠貴寛, 五月女格, 椎名武夫, 小川幸春, 田川彰男: "ジャガイモのブランチングへのマイクロ波の適用," 日本食品科学工学会, 第 57 回大会講演集, 2Gp2, p.127 (2 September, 2010)
- (6) 今泉鉄平, 安藤泰雅, 折笠貴寛, 小川幸春, 田川彰男: "ナガイモのブランチングへのマイクロ波の適用, 日本食品科学工学会, 第 58 回大会講演集, 2Ha5, p. 69 (10 September, 2011).
- (7) 安藤泰雅, 水谷孝一, 若槻尚斗: "青果物の乾燥過程における電気的特性の変化," 日本食品科学工学会, 第 58 回大会講演集, 3Ha9, p. 106 (11 September, 2011).
- (8) 安藤泰雅, 水谷孝一, 若槻尚斗: "電気インピーダンス法を用いる葉菜類の非破壊鮮度評価," 日本食品科学工学会, 第 59 回大会講演集, 3Fp8, p.191 (31 August, 2012).
- (9) 安藤泰雅, 水谷孝一, 若槻尚斗: "青果物の細胞膜損傷が乾燥速度に及ぼす影響," 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, D2, p.22 (9 March, 2013)
- (10) 安藤泰雅, 水谷孝一, 若槻尚斗, 高塩仁愛: "接触型電極を用いる葉菜類の電気インピーダンス計測および鮮度評価," 2013 年度農業施設学会次大会講演要旨集, P-24, pp.169-170 (29 August, 2013)

## 表彰

- (1) 日本食品科学工学会 第57回日本食品科学工学会誌 論文賞(平成23年9月9日), 対象論文: 安藤泰雅, 折笠貴寛, 椎名武夫, 五月女格, 五十部誠一郎, 村松良樹, 田川彰男, “調理用トマトの乾燥およびブランチングへのマイクロ波の適用“

## 著者紹介



安藤 泰雅（あんどう やすまさ）

昭和 61 年 2 月 19 日東京都目黒区に生まれる。平成 16 年 3 月東京都立新宿高等学校卒業。平成 21 年 3 月千葉大学 園芸学部 生物生産科学科卒業，学士（農学）。平成 23 年 3 月千葉大学 大学院園芸学研究科 環境園芸学専攻 博士前期課程修了，修士（農学）。同年 4 月筑波大学 大学院システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 博士後期課程入学。平成 24 年 4 月日本学術振興会特別研究員。電気的手法を用いる食品の計測技術に関する研究に従事。平成 26 年 3 月同大 大学院システム情報工学研究科 知能機能システム専攻修了予定，博士（工学）。日本食品科学工学会，農業施設学会各会員。