

## FFTによるインピーダンスの迅速測定法

誌名	神戸大学農学部研究報告 = The science reports of Faculty of Agriculture, Kobe University
ISSN	04522370
著者	豊田, 浄彦 児島, 初男
巻/号	21巻1号
掲載ページ	p. 87-92
発行年月	1994年1月

# FFTによるインピーダンスの迅速測定法

豊田 浄彦\*・児島 初男\*

(平成5年8月10日受理)

## A Method of Measuring Impedance Fast using FFT

Kiyohiko TOYODA and Hatsuo KOJIMA

### Abstract

An impedance measuring system based on the fast Fourier transform(FFT) algorithm was constructed by application of only commercially available interfaces and C language available for an personal computer PC-9801.

A modification of the sampling system is effective for reducing errors: the aliasing is much reduced because of the Nyquist frequency being doubled by using a programmable anti-aliasing filter; the moving averaging and cumulative averaging also reduced the noisy variation. This modification enables us to acquire accuracy data and successful results in the Bode diagram and the Cole-Cole plot for a tested dummy cell. The modified impedance measurement using the FFT algorithm may be applicable to a plant cell and the measurement time to get frequency spectra may be made extremely shorter than with an impedance meter.

### I. はじめに

農産物を含む植物、動物等の生体組織は、細胞構造を持ち、更に細胞内にミトコンドリアや液胞等の器官を持つという構造を有している。このような組織を対象に種々の操作を行う場合、その物理的、或いは生理的な情報を得ることが必要となる。これに適した測定法の一つとして電気インピーダンス測定がある。

電気インピーダンスの測定はColeらの研究以来、生体情報の計測に用いられているが、刺激に対する神経細胞膜の応答やイオン流れの解析など、生物学分野に限られた研究に利用されてきた<sup>2, 7, 11)</sup>。しかし、最近では医用工学分野において肺形状の推定への応用<sup>4)</sup>、農業分野において青果物の品質評価<sup>15)</sup>や鮮度判定<sup>5)</sup>、物理的損傷の検出への利用等<sup>12)</sup>が試みられ、応用範囲が徐々に広がりつつある。

インピーダンスの測定は、一般に、インピーダンスメーターにより周波数を掃引し、各周波数でのインピーダンスを測定し行われることが多いが、この方法では加熱<sup>14)</sup>や乾燥等の環境変化に伴う短時間の現象には、掃引に要する時間のため、測定速度の点で十分に対応でき

ない。そのため、FFT(高速フーリエ変換法)を利用した迅速なインピーダンス測定法が提案されている<sup>8)</sup>。

ノイズFFT法はFFTによる「多重化の利点(multiplex advantage)」を利用し、種々の周波数の信号を個々に印加するのではなく、それらの合成信号として白色雑音(ホワイトノイズ)を印加し、その応答信号の周波数成分をFFTにより求める方法であり、入出力信号の演算により、各周波数のインピーダンス応答を同時に求めるものである。本研究ではノイズFFTインピーダンス法による迅速な測定に適した①ハードウェアの構築、および②データ処理アルゴリズムの確立を目的とした。

### II. 生体の電気インピーダンス特性

多細胞生物の細胞組織は、電気的には、脂質から成る電気絶縁性の高い細胞膜により、細胞内外の電解質成分が分離された組織と見做すことができる。すなわち、電解質-絶縁物(細胞膜)-電解質といった構造から、細胞組織は細胞内外の抵抗成分と細胞膜の容量成分より成る一種の電気回路と等価と見做すことができ、特有の電氣的性質を示すことが知られている<sup>16)</sup>。

この特性を利用して、細胞組織に電極を介して交流信号を印加し、電気インピーダンスの周波数応答を測定、

\* プロセス工学研究室

更に、細胞組織の等価回路モデルを用いて解析することにより、細胞内外や細胞膜の物理的、或いは生理的状态を知ることができる。等価回路としては図1に示すHayden modelが知られている<sup>3)</sup>。

Haydenらは細胞組織の等価回路として、細胞膜に電気伝導性があることを考慮し、細胞外抵抗 $R_a$ 、細胞膜容量 $C_m$ 、膜抵抗 $R_m$ 、細胞内抵抗 $R_s$ の4つの素子からなる回路を作成した。そして、一般に $R_m$ が $R_s$ 、 $R_a$ に比べて非常に大きいことから、 $R_m$ を省略可能とし、図1(b)の単純化したモデルを得た。

電気インピーダンス特性の図示には、①インピーダンスの絶対値の対数 $\log|Z|$ と印加電圧-電流間の位相角 $\phi$ を、それぞれ周波数 $f$ の対数に対してプロットした線図(一般に、制御工学分野で用いられる表現との類似性から、Bode線図と呼ぶ)と②複素平面上に複素インピーダンスの周波数応答軌跡を描いた線図、所謂、Cole-Coleプロットとがある。Bode線図とCole-Coleプロットの植物細胞組織についての測定例を図2に示す。

植物組織のインピーダンス特性の特徴として、①Cole-Coleプロットにおいて円弧状の周波数応答が見られ、また、②円弧は半円状ではなく、中心が $Z'$ 軸の

下方にあり、更に、③低周波側( $f \leq 1$  MHz)と高周波側( $f > 1$  MHz)にそれぞれ円弧が現れることが挙げられる。

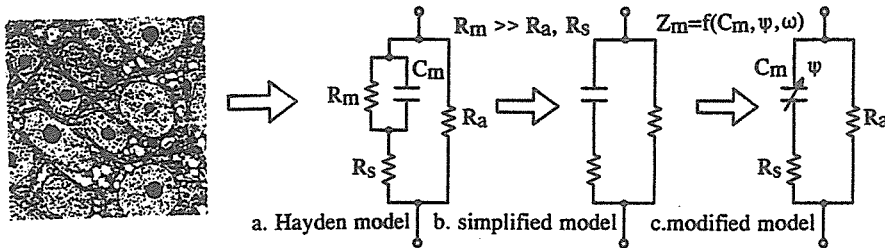
このうち、Cole-Coleプロットの円弧状の周波数応答は、Haydenが仮定したように、細胞組織の電気的特性が電解質-絶縁膜-電解質の構造を持つことを示している。また、Hayden modelでは、円弧中心は $Z'$ 軸上にあり、軌跡は半円となるので、上記の②とは異なるが、これは組織を構成する細胞の分布が影響したものと考えられ<sup>10)</sup>、Hayden modelの修正モデルとして、容量成分が周波数依存性を持つモデル(図1(c))により表現できる<sup>13)</sup>。修正モデルのインピーダンス $Z$ の式を以下に示す。

$$Z = \frac{1}{1/R_a + 1/(R_s + Z_m)}$$

$$= Z' + j \cdot Z''$$

$$Z_m = \frac{(\cos \phi + j \cdot \sin \phi)}{C_m \cdot f}$$

ここで、 $Z'$ 、 $Z''$ は各々、複素インピーダンス $Z$ の実部と虚部、 $Z_m$ は細胞膜の複素インピーダンス、 $f$ は周波数、 $\phi$ はCole-Coleプロットの円弧の中心角であり、



$R_a$  : apoplasmic resistance,  $R_s$  : symplasmic resistance,  $R_m$  : membrane resistance,  $C_m$  : membrane capacitance,  $\psi$  : constant-phase-angle,  $\omega$  : frequency

図1 植物細胞組織の等価回路モデル(Hayden model)

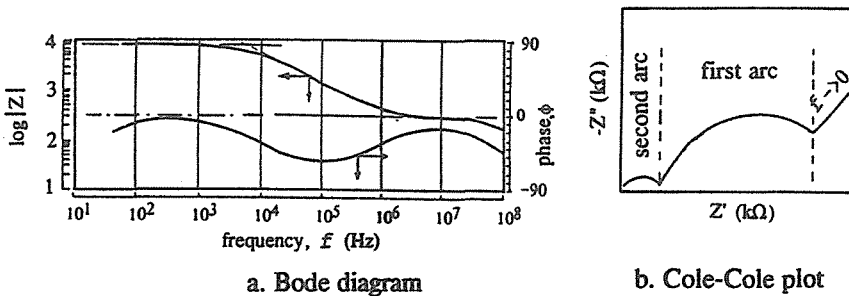


図2 植物組織の電気インピーダンス特性(Bode線図およびCole-Coleプロット)

理想的な容量成分の場合、 $-\pi/2$ となる。

また、高周波側の円弧は細胞内の膜を持つミトコンドリアや液胞等の器官の構造により生じるものであり、二重構造モデル (double shell model) により説明できるとされている<sup>17)</sup>。

### III. 実験装置および方法

#### 1. ハードウェア構成 (図3)

雑音発生部 (NG) において、M系列信号 (2 値) をローパスフィルターを通して、アナログ擬似雑音 ( $f_{max} \approx 20$  kHz) を作成する。更に、アッテネータ (ATT) により、約  $\pm 0.5$  V に信号を減衰し、ポテンショスタット (PS、日厚計測製 NPOT-2501) を介して、測定対象へ信号を印加する。測定対象に加えた電圧信号  $e(t)$  と応答電流信号  $i(t)$  はポテンショスタットの出力として得られるが、エイリアジング (aliasing) を避けるため、プログラマブル・ローパスフィルター (LPF2) に通し、帯域を制限する。デジタル・オシロスコープ (DOS、横河電気製 DL1200E) により同時サンプリングされた  $e(t)$  と  $i(t)$  の信号を GPIB を介してパソコン (PC) に DMA 転送する。サンプリング周波数は擬似雑音と LPF2 のカットオフ周波数に対するナイキスト標準化周波数を考慮し、50 kHz とした。パソコンにより、FFT 等の演算を行い、インピーダンス  $Z$  と位

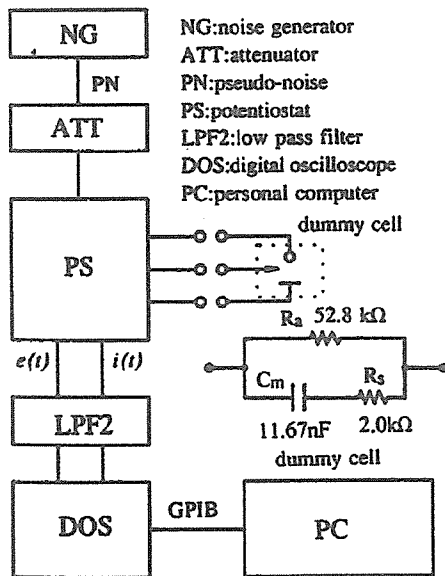


図3 ハードウェア構成

相  $\phi$  の Bode 線図、Cole-Cole プロット等を求め、ディスプレイに表示する。

なお、今回の実験では、測定方法の確立を目的としているため、測定対象として植物組織ではなく、再現性に適したダミーセル (図3) を用いた。なお、ダミーセルの素子構成は等価回路モデルの図1 (b) に相当する。

#### 2. 信号処理アルゴリズム (図4)

①測定した電圧・電流信号データ ( $2^{12}$ 点  $\times$  2) にハニングウィンドウを掛け、サンプリングデータの不連続性による影響を抑制した<sup>1)</sup>。②高速フーリエ変換により、電圧・電流信号を周波数領域に変換し、振幅スペクトル  $E(f)$ 、 $I(f)$  を得た。更に、LPF2 で設定した周波数以上 ( $f > 20$  kHz) の部分を除去した。また、変動の大きい 60 Hz 以下の領域も同様に除去した。③  $E(f)$ 、 $I(f)$  より複素インピーダンス  $Z$  と位相  $\phi$  を算出し、Bode 線図を作成した。その際、移動平均 (11 点) により、量子化誤差、雑音等による変動を抑制した。更に、時間領域の 10 周期分について積算平均を行い、測定精度の向上を図った。④インピーダンスの複素平面表

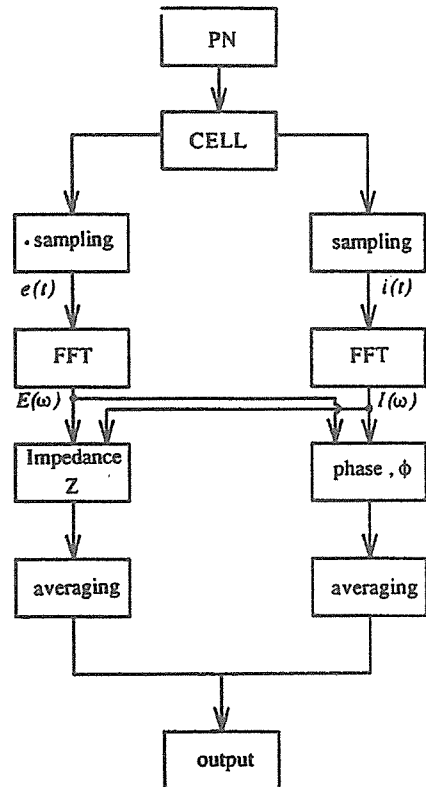


図4 信号処理アルゴリズム

示 (Cole-Coleプロット) を作成、表示した。

これらデータのサンプリングやDMA転送等のDOSの制御、FFT演算<sup>6)</sup>およびグラフ表示のためのプログラムをQuick-C (MicroSoft社製、Ver.2.0)により作成、供試した。またデータ整理のため、オフライン処理によりMacintosh SE/30上のMATLAB (Mathwork.Corp., Ver.3.5)を使用した。

### 3. ノイズFFTインピーダンス法の測定原理<sup>9)</sup>

理解を助けるため、測定原理を以下に述べる。測定対象を線形、時間不変なシステムと仮定すると、印加信号  $e(t)$  と応答信号  $i(t)$  との関係は線形応答理論から、インパルス応答関数  $h(t)$  により記述できる。

$$i(t) = h(t) * e(t) \quad (3)$$

ただし、\* は畳込み積分 (convolution) を表わす。これは、 $h(t)$  をフーリエ変換して得られる伝達関数  $H(f)$  によっても表現される。

$$I(f) = H(f) * E(f) \quad (4)$$

ここで、 $I(f)$ 、 $E(f)$  は、 $i(t)$ 、 $e(t)$  をそれぞれフーリエ変換したものである。

いくつかの周波数に対する応答を測定したい場合、「多重化の利点」を利用して、印加信号として、以下の様に正弦波の重畳した信号を考える。

$$e(t) = \sum_k A_k \exp\{j(2\pi f_k t + \theta_k)\} \quad (5)$$

$\theta_k$  は各周波数に対する位相で、 $\theta_k$  が0から  $2\pi$  までランダムに割り振られている時は白色雑音を表わす。 $A_k$  は各周波数に対する重みである。この応答は次式で表わされる。

$$i(t) = \sum_k A_k H(f_k) \exp\{j(2\pi f_k t + \theta_k)\} \quad (6)$$

$H(f_k)$  を求めるためフーリエ変換を行うと、

$$I(f_k) = A_k H(f_k) e^{j\theta_k} = H(f_k) \cdot E(f_k) \quad (7)$$

$$H(f_k) = I(f_k) \cdot E^*(f_k) / \{E(f_k) \cdot E^*(f_k)\} \quad (8)$$

ここで、 $I(f_k) \cdot E^*(f_k)$  および  $E(f_k) \cdot E^*(f_k)$  は相互相関関数 (cross-power spectrum) および自己相関関数 (auto-power spectrum) である。これより、アドミッタンスは  $H(f_k)$ 、インピーダンスは  $H(f_k)^{-1}$  として各々表される。

## IV. 実験結果および考察

電圧信号  $e(t)$  と電流信号  $i(t)$  [図5.a,b]、 $E(f)$  と  $I(f)$  のパワースペクトル [図5.c,d]、インピーダンス  $|Z|$  と位相  $\phi$  のBode線図 [図5.e,f]、インピーダンスのCole-Coleプロット [図5.g]を図5に併せて示す。

電圧信号  $e(t)$  は、一見意味を持たない波形に見えるものの、そのパワースペクトルから、ホワイトノイズと見做せるほぼ平坦なスペクトルをもつことが確認された。一方、 $I(f)$  では、低周波領域 ( $f < 5$  kHz) でダミーセルのコンデンサー成分  $C_m$  に由来する増加傾向が確認された。また、 $E(f)$  と  $I(f)$  共、LPF 2 による帯域制限の効果が  $f > 20$  kHz の範囲で確認された。

$|Z|$  のBode線図では周波数の増加に伴い、細胞外抵抗に相当する  $R_o$  ( $\approx 52.8$  k $\Omega$ ) から細胞内抵抗  $R_i$  ( $\approx 2.8$  k $\Omega$ ) に遷移する過程が確認できた。しかし、高周波側の平衡値 ( $R_e$ ) は、測定上限周波数を20kHzに制限したため、明確でない。また、位相  $\phi$  は、ダミーセルに対応する周波数応答を示すが、周波数2kHz以下では直線的な変化を示す。このため、Cole-Coleプロット上の  $Z' > 8$  k $\Omega$  の領域で理論値からの偏差が認められた。これは主に、配線、測定部等における環境雑音の混入によるものと考えられ、低周波側でその影響が大きく現れたものと思われる。

今回は、データ処理の一部をオフラインで行ったため、正確な計測所要時間は不明である。しかし、目安として、サンプリング時間約200ms、転送時間約500ms、 $2^{12}$ 点FFT演算11s (Intel80286 + 80287使用時) であった。このように、所要時間はCPUの演算速度により大きく依存するので、より高速なCPUの採用により、所要時間の短縮が可能と考えられる。従来のインピーダンスメーター等による方法との比較は容易でないが、従来法では、周波数の掃引に5~6minを要したのに対し、数秒単位での測定が可能であることが示唆され、迅速な測定が十分可能と判断される。

## V. 摘 要

1. 供試した測定システムのハードウェア構成および信号処理アルゴリズムにより、ノイズFFTインピーダンス法によるインピーダンス測定が可能であり、ダミーセルに対応するBode線図、Cole-Coleのプロットが得られることを確認した。
2. 信号処理に際して、アンチエイリアジング・フィルタ、移動平均、積算平均などの方法がノイズの低減、測定精度の向上に大きく寄与することが分かった。
3. 本研究で示した汎用機器による計測システムでも、従来のインピーダンスメーター等と比べて迅速な測定が可能であることが分かった。

今回の実験では、ノイズ発生器の最高周波数、ポテンショスタットの応答速度の制約から、測定上限周波数は

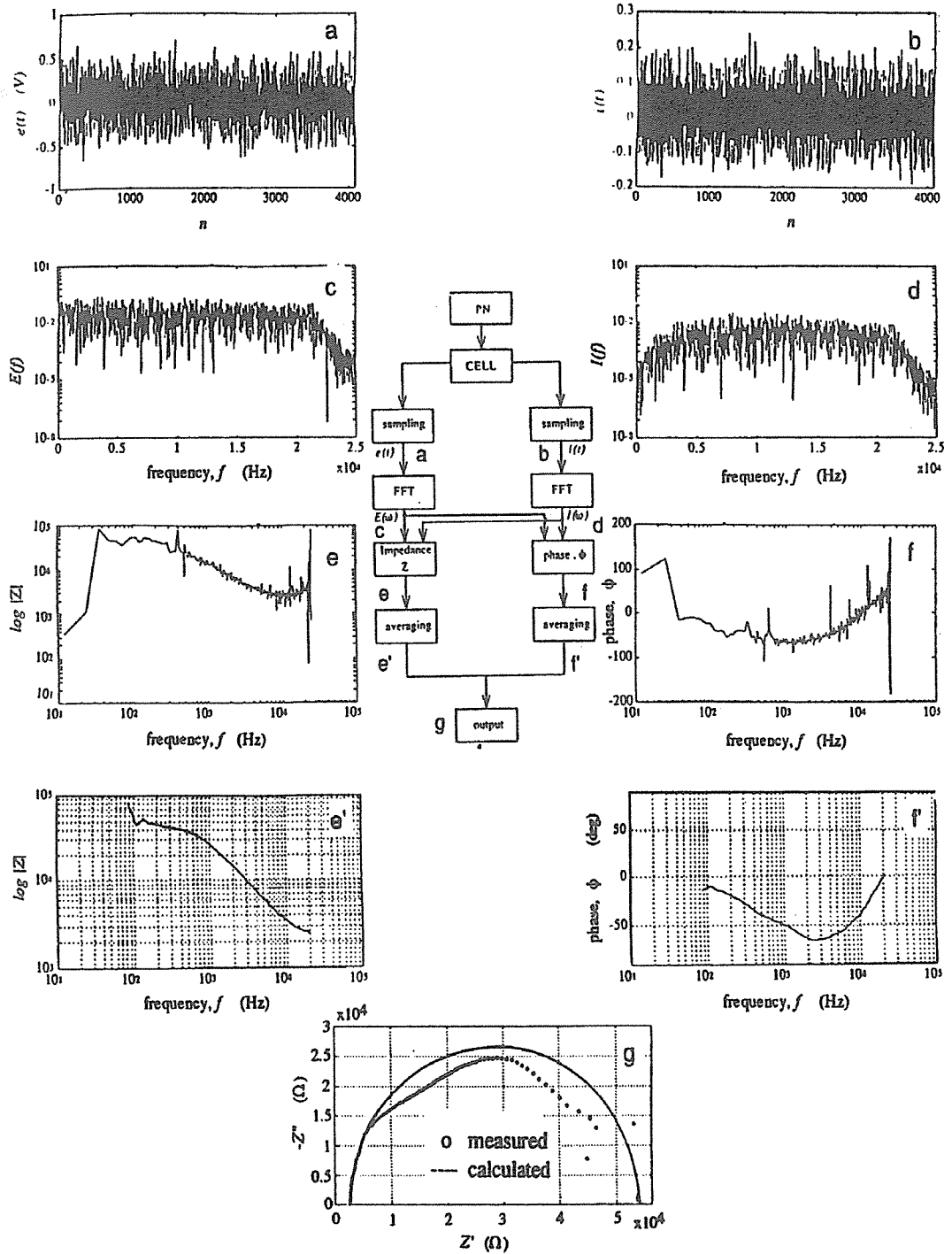


図5 測定信号および解析結果

約20kHzに制限されたが、一般にインピーダンス測定では広帯域が要求されるため、十分な帯域とはいえない。そこで、高周波特性に優れた雑音発生器およびI/V変換アンプ等の導入が必要と考えられる。また、FFT処理は短時間の演算で周波数性を求めるのに適しているが、帯域の拡張に伴い、測定点数が著しく増加するため、計算時間が限界となる。そこでDSP(Digital Signal Processor)等の高速演算を利用した線形予測法の採用も必要と考えられる。現在、これらについて検討を進めている。

### 参考文献

- 1) 江原義郎：ユーザーズデジタル信号処理, 75, 東京電気大学出版局, 東京, 1991
- 2) GRISSELL, R. D., FISHMAN, H. M.: *J. Membrane Biol.*, 46, 1-25, 1979
- 3) HAYDEN, R. I., MOYSE, C. A., CALDER, F. W., CRAWFORD, D. P., FENSOM, D. S.: *J. Experimental Botany*, 20 (63), 177-200, 1969
- 4) 加川幸雄： *Computrol*, 8, 87-100, 1984
- 5) 加藤宏郎： *農業機械学会誌*, 50 (6), 99-107, 1988
- 6) 小池慎一：Cによる科学技術計算, 236, CQ出版社, 東京, 1987
- 7) 岡本 尚, 岸本卯一郎, 柴岡孝雄, 千田 貢, 田沢 仁： *植物電気生理研究法*, 32, 学会出版センター, 東京, 1983
- 8) OSAKA, T., NAOI, K.: *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 55, 36-40, 1982
- 9) 逢坂哲弥, 小山 昇, 大坂武男： *電気化学法・基礎測定マニュアル*, 169, 講談社サイエンティフィック, 東京, 1989
- 10) RAISTRICK, I. D.: *Solid State Ionics*, 18 & 19, 40-49, 1986
- 11) SCHWAN, H. P.: *Biophysik*, 1, 198-208, 1963
- 12) 豊田浄彦, 竹内龍三, 児島初男：第50回農業機械学会年次大会講演要旨(京都大), 381-382, 1991
- 13) 豊田浄彦, 児島初男, 竹内龍三： *農業施設学会平成4年度大会講演要旨*, 424-425, 岩手大, 1992
- 14) TOYODA, K.: *International Congress on Engineering and Foods 6*, Elsevier Sci. Pub., 1993(in printing)
- 15) 鶴岡 久, 高辻正基： *計測自動制御学会論文集*, 22 (9), 994-999, 1986
- 16) ZHANG, M. I. N., STOUT, D. G., WILLSON, J. H. M.: *J. Exp. Botany*, 41 (224), 371-380, 1990
- 17) ZHANG, M. I. N., STOUT, D. G., WILLSON, J. H. M.: *J. Exp. Botany*, 42(244), 1465-1475, 1991