加工プロセスにおける非接触電導度自動計測システムの開発[†]

乙部和紀*・杉山純一**

Non-invasive Conductance Monitoring System for Food Processing
by Using a Non-contact Conductance Meter (NCM)

Kazunori OTOBE* and Junichi SUGIYAMA**

* National Agriculture Research Center, 3-1-1, Kannondai,
Tsukuba-shi, Ibaraki 305** Tohoku Agriculture Research Center, 50, Harajuku-minami, Arai,
Fukushima-shi, Fukushima 960-21

An apparatus which can facily and sanitarly be installed in food processing equipment because of electrodeless detection has been developed. It comprises a radio-frequency LC resonant circuit, a solenoid coil as a detection cell and a personal computer for control and measurement on the circuit. Resonance magnitude (I_r) of the circuit, which reflects electromagnetic loss of conductive materials put into the cell, was measured by NCM and used as an index of specific conductance (κ) of samples. Twelve detection cells having different configuration, dimension and resonance frequency were made. Their I_r - κ curves in the resonance frequency ranging from 8.1 MHz to 44.1 MHz were investigated by measuring NaCl solutions with various concentrations. It was found that location and magnitude of the minimum peak in I_r - κ curves were influenced by resonance frequency, passage diameter, coil diameter and turns of coils. Based on this result, cell configuration for high-resolution detection of conductance had been determined, and was applied for a detector of cultivation process of *Bacillus subtilis* AR42 in liquid culture medium. Amount of the bacteria was monitored on the medium extracted by I_r measured with the optimized detection cell and by absorbance. From this experiment, it was shown that changes in I_r were in good agreement with those of the absorbance.

(Received Aug. 2, 1996 ; Accepted Nov. 22, 1996)

食品の品質を表す指標として、誘電率やインピーダンス、電導度などの電気的特性が広く用いられており¹⁾²⁾、なかでも電導度測定は、成分の簡便な定量法として様々な用途に利用されている。しかし、従来の電導度測定法では、電極と試料が接触した状態で測定しなければならないため、電極と試料の電気化学的な相互作用（分極、電解など）が測定に大きく影響する。また、測定のたびに電極の洗浄が必要なため、迅速性や簡便性に劣る、電極に付着した異物・微生物が試料に混入し、汚染する恐れがある、などの問題点があった。特に汚染は、コンダ

クタンス（インピーダンス）法³⁾などの電極を用いた微生物量測定器において重大な問題である。

前報⁴⁾において著者は、ラジオ周波数（RF）領域で発振状態にあるLC発振回路⁵⁾のコイルを検出器として用い、ディスポーザブル試験管にいれた試料水溶液について、試験管の外から比電導度に対応する指標を得ることができることを報告した。これに続いて本報では、醸造やバイオリアクタ、廃水処理などのプラントで扱われる液状食品や排水中に含まれる灰分や有機酸量などの変動をインラインで簡便に定量する手法として、上記手法

[†] 高周波回路を用いた非接触電導度測定に関する研究（第2報）（前報，文献4）

* 農林水産省農業研究センター（〒305 茨城県つくば市観音台 3-1-1）

** 農林水産省東北農業試験場（〒960-21 福島県福島市荒井字原宿南 50）

を応用するための基本特性に重点を置いて検討した。すなわち、上記プラント中に組み込まれる計測器ではメンテナンス性も重要な要素であり、導入が容易で、検出部の摩耗などによる特性変化が生じないことが求められている。本手法は、検出部の構成が単純であり、かつ検出部が測定対象物と非接触であるため、上記の要件を満たす検出器を構成する上で有効な特徴を備えていると考えられる。以上の観点から、フロー型の非接触電導度測定用セルを製作し、基本特性の検討を行った。特に、コイルを測定セルに用いていることからコイル形状、巻線数などの構造的な違いが測定精度などに大きく影響する可能性があるため、測定セルの構造的な違いによる特性変化を重点的に検討した。さらに応用例として、微生物培養中の液体培地のモニタリングを実施し、微生物の増殖量との関連を調べた。

実験方法

1. 非接触電導度測定システム概要

(1) 測定原理

本システムは、誘導加熱⁶⁾と同様の原理に基づいている。発振回路に接続されて発振状態にあるコイルの空芯部に導電性の物体をいれると、交番磁界により物質内の荷電粒子（イオンなど）の運動が誘起されるため、それにとまってエネルギー損失が生じる。このエネルギー損失は電気抵抗による電氣的エネルギーの損失と等価であることから、荷電粒子の数、ならびに粒子の運動抵抗の関数となる⁷⁾。そのため、荷電粒子の運動により生じたエネルギー損失は発振回路の等価的な抵抗を増加させ、回路のQ値（発振効率）の低下と、それとともなう発振電圧の減少となって現れる。荷電粒子運動の誘導は、誘導コイルと試料の間に空間や絶縁性の物質があっても可能であるため、この現象を利用することにより、試料に直接触れずに電気抵抗に対応する指標が得られる。

原理的には古くから知られており、化学分析の分野においては、高周波分析法⁸⁾として1940～1950年代にかけて盛んに研究が行われたが、電導度測定法としての研究はなされていない。著者らは、比電導度と発振特性変化との関係に着目し、この対応関係が電解質の種類によらないことを見だし、発振特性変化から比電導度を求める装置を考案した⁴⁾。

(2) 装置構成

高周波 LC 発振回路には、コンデンサの容量を変えることにより、任意の発振周波数に設定できるコルピツ

型 LC 発振回路⁹⁾を用いた。本研究では、電圧制御型可変コンデンサを用い、制御電圧を印加することにより、任意の発振周波数ならびに発振強度に設定できる回路を製作した。測定用セルは、前報⁴⁾と同様に空芯ソレノイド型コイルを自作して用いた。

Fig. 1 に示したように、本システムはパーソナルコンピュータ (PC-386 NAR, エプソン)、拡張ボックス (ANE-351, アドテックシステムサイエンス)、マルチ入出力ボード (MFU 98-401 F, マイクロサイエンス) および前述の発振回路で構成されている。発振電圧は直流に変換され、マルチ入出力ボードのアナログ/デジタル変換器（以下、AD コンバータと呼ぶ）を経由してコンピュータで計測できる。また、発振電圧はデジタル/アナログ変換器（以下、DA コンバータと呼ぶ）出力により、任意の値に設定できる。発振周波数は、マルチ入出力ボードのデジタル出力（4 ビット）とトランジスタ回路を利用して、電圧制御型可変容量コンデンサへの入力電圧を3段階に切り替えることにより、3種類の周波数に設定可能である。ただし、本システムでは設定可能なコンデンサ容量が決まっているため、発振周波数は用いた測定セルに応じて決まる。なお、制御ならびに計測用ソフトウェアは、オペレーティングシステムとして MicroSoft Windows バージョン 3.1 を用い、MicroSoft Visual Basic バージョン 2.0 で作成したプログラムにより、マルチ入出力ボードの制御ならびにデータ収集を行った。また、MicroSoft Excel バージョン 5.0 に付属するマクロ言語でデータ収集・解析プログラムを製作し、測定と同時に自動的に Excel 形式のファイルにデータを取り込むようにした。このファイルの中には、LAGRANGE の補間法⁹⁾を用いて検量線を生成するプログラムと、検量線から比電導度を推定するプログラムを組み込み、前述のプログラムとリンクして動作させ、測定と同時に比電導度の推定値を表示できる。

Fig. 1 Schematic diagram of the non-contact conductance meter (NCM)

測定用セルは、セル形状と発振電圧-比電導度特性との関係を調べるため、流路径、コイル径、ならびにコイル長の異なるフローセルを12種類作製した (Table 1)。用途として、試験管を試料容器に用いる回分測定用 (No. 5) およびインライン測定を目的としたフローセル (No. 1~4, No. 6~8) を想定して作製した。各セルは、表に示した内径および外径に切削したアクリル樹脂製ボビン (巻線支持材) の外周に絶縁被覆銅線 (直径 0.52 mm) を隙間なく巻きつけて、シアノアクリレート系瞬間接着剤で固定した。ただし、No. 1~4 については、流路径の異なるアクリル樹脂製の中子 (外径 10 mm) を作製し、外径 20 mm、内径 10.1 mm のアクリル樹脂製コイル (巻数: 10 および 20 ターン) に挿入してセルを構成した。セルの作製にあたり、発振周波数の可変範囲はセルのインダクタンスに依存するため、セルによって設定周波数が極端に異なることがないように巻数を調整した。

本システムでは、セルと試料との位置関係の精度が測定の再現性に影響を及ぼす。フローセルでは上記の問題はないが、回分測定用セルでは、試料を容器にに入れて容器ごと測定するため、位置決めにズレが生じる可能性が高い。そのため、回分測定用の容器として、樹脂成形によりほぼ一定の外形寸法が得られるディスポーザブル試験管を用いた。さらに、ボビン内径の上端から下端に向かって、試験管の外形にあわせた勾配をわずかにつけ、試験管の外径が多少変動してもボビンに密着するように工夫した。ただし、試験管の肉厚等にわずかな変動が存在する可能性があるため、10% (w/v) の塩化ナトリウ

ム水溶液 (比電導度: 129.6 mS/cm) の発振強度を測定し、一定値が得られた試験管を選抜して試料容器として用いた。

2. 試料

(1) 電解質水溶液

前報⁴⁾において、発振強度-比電導度特性は電解質の種類に依存しないことが示されたことから、本システムの特性の確認には、塩化ナトリウムをイオン交換精製水 (比電導度: 2 μ S/cm 以下) に溶解した水溶液を用いた。

(2) 菌 株

微生物量のモニタリング実験には、桿菌の一種である *Bacillus subtilis* AR 42 株を用いた。

3. 測定方法

(1) 発振強度 (I_r)

発振周波数および発振強度は用いるセルに依存することから、異なるセルを用いる場合には、同一条件で測定するためにキャリブレーションが必要である。そのため、セルを発振回路に取り付けた際に、試料をセルにいない状態で、各設定周波数における I_r が 2 500 mV になるように DA コンバータの出力を設定し、設定値をコンピュータに記憶させた。また、各セルの発振周波数の確認は、セルを本システムに取り付けて発振状態に設定し、Q-ディップメータ (DMC-230 S, 三田無線研究所) により確認した。測定プログラムは、発振条件設定ルーチン、自動測定ルーチン (周波数の切り替え・AD コンバータによる測定データの電圧値への変換・ I_r の記録)、初期化ルーチンから構成されている。このプログラムにより、発振回路を制御し、セルに試料をいれた時点で自

Table 1 Configuration and dimension of the detection cells

No.	D (mm)	d (mm)	N* (turn)
1	20	5	10(20)
2	20	3	10(20)
3	20	2.1	10(20)
4	20	1.5	10(20)
5**	15	11	20
6	8	1.5	35
7	5.2	3.1	48
8	2.3	1.2	58

* Turns of the wire wound around a bobbin

** A cell for batch measurement

動的に I_r の測定・記録・解析が実行されるため、測定は数秒で終了する。また、従来の電導度測定のように電極反応の安定時間や攪拌、洗浄などが必要ないため、試料交換に時間を要しないのが特徴である。

回分測定用セルの場合、供試水溶液約 5 ml をスチロール製ディスポーザブル試験管（内径約 11 mm、外径約 13 mm、長さ 80 mm）にいれて密閉した状態で測定した。測定に際しては、試験管に試料をいれてから温度調節器にいれて $25.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ に保ち、試料温度が変化しないように迅速に測定を行った。測定中の試料温度は、温度計による電磁気的な影響を避けるために放射温度計（THI-500 S、タスコジャパン）を用いて確認した。

一方、フローセルによる測定では、Fig. 2 のようなフローシステムを構成した。電極による比電導度の測定と同時に試料ビーカー中の試料をシリンジにより吸引し、試料がフローセルを通過した時点で自動的に I_r の測定が開始されるようにした。また、配管にはテフロンチューブを用い、シリンジと三方活栓の操作により試料の吸引・排出・洗浄操作を行った。

(2) 比電導度 (κ)

温度補償機能付き電導度計（AOL-40 型、電気化学計器）に白金黒付電極（2112 型、セル定数 0.950）を組み合わせて用いた。電極を浸してからよく攪拌し、約 1 分間静置して測定値が安定してから κ を記録した。

(3) 微生物量モニタリング

コンダクタンス（インピーダンス）法³⁾と同様に、菌体の増殖にともなって生じる培地中の有機酸由来イオン量の増減に起因する、培地電導度の変化を検出することを想定して実験を行った。

Fig. 2 Schematic diagram of conductance measurement by using a flow system with NCM

培養は、純水 200 ml に Nutrient Broth（日水製薬）6.0 g を溶解した液体培地を用いて行った。培地の比電導度は (2) の電導度計で測定したところ、 10.73 mS/cm であった。この培地 10 ml を試験管にとり、菌体を接種して 37°C の振とう培養器にて 16 時間培養した。続いて、300 ml 容の三角フラスコに培地 50 ml をとり、前述の培養液 50 μl を加えて 37°C の振とう培養器にて培養し、モニタリングを行った。本培養開始後、30 分ごとに 2 ml の培養液を採取し、そのうち 1 ml を 10 倍希釈して吸光度 (660 nm) を測定して菌体量の指標とした。

一方、発振強度変化のモニタリングには、Fig. 2 のフローシステムを用いた。ただし、採取した試料は微量であるため、従来法による電導度測定はできないことから、上記システムから電導度計を除いたシステムを用いた。また、微量の試料でも測定できるように、今回作製した中で流路径が最も小さいフローセル No. 8 を用い、採取した培養液の残りの 1 ml を原液のまま測定に供試した。測定にあたっては、試料が微量で共洗いが困難なことから、測定前には純水で十分に流路洗浄を行い、流路中の水分をなくしてから測定を行った。また、 I_r の測定に供試した試料は、採取してから測定時点までの待ち時間を考慮して、菌の増殖を抑制するために氷温に保持しておき、測定直前に室温に戻して供試した。

なお、上記 (1) (2) (3) の測定は全て周囲温度 $25.0 \pm 0.6^\circ\text{C}$ の条件下で実施した。

結果および考察

1. 各セルの発振周波数

セルを発振回路に取り付け、試料をいれない状態で発振周波数を測定した結果を Table 2 に示した。f1～f3 は発振回路に内蔵された周波数切り替えスイッチ番号を表し、切り替えにより設定される周波数がセルにより異なっていることがわかる。ただし本システムでは、No. 8 を除いたセルに関して 8～20 MHz の範囲で発振周波数を設定可能であった。また、No. 1～4 および No. (1)～(4) は中子を交換することにより流路径を変えているが、発振状態で中子を交換した場合でも、発振周波数および発振強度の変化は認められなかった。

2. I_r - κ 特性

回分測定用セルの特性を Fig. 3 に示した。前報⁴⁾と同様に、特性曲線は極大点と極小点を有し、発振周波数が高くなるにつれて高電導度側にシフトすると同時に、極小点のピークが増大する傾向が見られた。一方、No. 7（フローセル）の特性曲線（Fig. 4）では、No. 5 と同様

Table 2 Resonance frequencies of the detection cells

No.	f 1(MHz)	f 2(MHz)	f 3(MHz)
1	13.8	17.4	19.7
2	13.8	17.4	19.7
3	13.8	17.4	19.7
4	13.8	17.4	19.7
(1)	8.1	10.7	12.1
(2)	8.1	10.7	12.1
(3)	8.1	10.7	12.1
(4)	8.1	10.7	12.1
5	10.9	14.1	16.1
6	11.1	14.1	16.2
7	15.9	20.6	23.5
8	29.5	38.2	44.1

The cells from No. (1) to (4) had the same bobbins as those from No. 1 to 4, respectively, but they had 20-turn coils.

に、発振周波数が高くなるにつれて極小点の高電導度側へのシフト、および極小点ピークの増大が観察された。ただし、No. 5で観察されたような極大点は現れなかった。また、Fig. 3の16.1 MHzとFig. 4の15.9 MHzの特性曲線について比較した場合、後者の極小点は前者よりも、より高電導度側にシフトしているとともに、極小点ピークの大きさにおいても約4倍の違いが見られた。

本システムにより比電導度推定を実施する場合、特性曲線の極値近傍では κ に対する I_r の変化率がゼロに近づくために分解能が低下する。また、極小点ピークが大きいほど発振強度あたりの比電導度の分解能が大きくなる。したがって、精度よく測定したい比電導度の範囲が既知であれば、極値の位置がその範囲から外れており、かつ極小点ピークが大きい周波数を選択することにより、推定精度を向上させることができる。その方法の一つとして、Fig. 3および4より明らかなように、発振周波数を変えることにより極値をシフトさせる方法がある。もう一つの方法としては、適当な形状のセルを用いて極値をシフトさせ、同時に大きなピークを得る方法が考えられる。

以上のように、特性曲線の極値の挙動は重要な意味を持ち、セル形状と発振周波数とその挙動に影響を与えることが判明したことから、以下では I_r - κ 特性の極小点の挙動について検討を行った。

Fig. 3 Conductance dependence of the resonance magnitude measured with No. 5 cell at three different frequencies

—□—, 10.9 MHz; —△—, 14.1 MHz; --○--, 16.1 MHz.

Fig. 4 Conductance dependence of the resonance magnitude measured with No. 7 cell at three different frequencies

—□—, 15.9 MHz; —△—, 20.6 MHz; --○--, 23.5 MHz.

3. セル形状による極小点の変動

Fig. 5は、各セルの対数流路径 (log d) に対する I_r - κ 特性の極小点における比電導度 ($\kappa_{\min}$) をプロットした図である。ただし、No. 8についてはTable 2に示した

Fig. 5 Relationship between the minimum resonance magnitude and inner diameter of the cells

×, 12.1 MHz by using the cells with 20-turn coils; △, 13.8 MHz by using the cells with 10-turn coils; □, 17.4 MHz by using the cells with 10-turn coils; ●, 15.9~16.2 MHz by using the cells No. 5~7; —, $y = -4670 \ln(d) + 9700$; ---, $y = -3390 \ln(d) + 6800$.

ように、発振周波数が他のセルと大きく異なるため、比較の対象から外した。No. 1~4で周波数が17.4 MHzにおける $\kappa_{\min}$ (□)は $\log d$ (流路径の対数)に比例して減少し、同じセルの周波数13.8 MHzにおける $\kappa_{\min}$ (△), ならびにNo. (1)~(4)の周波数12.1 MHzにおける $\kappa_{\min}$ (×)も同様に、直線的に減少した。一方、中子式でないセル (No. 5, 6, 7) について15.9~16.2 MHzにおける $\kappa_{\min}$ (●)をプロットしたところ、中子式の17.4 MHzと同じ傾向を示した。

以上の結果は、同程度の周波数における特性で比較した場合、 $\kappa_{\min}$ がコイル径にあまり依存せず、流路径に大きく依存することを示唆している。さらに、No. 1~4とNo. (1)~(4)では巻数が2倍異なるにもかかわらず、プロットが同一直線上にあることから、 $\kappa_{\min}$ は巻数に依存しないことを示唆している。

次に、発振強度変化量は、交番磁界により試料内に誘導される電流変化量に関連すると考えられることから、コイルにより形成される磁界の強さ (H) に依存すると考えられる。磁界の強さは巻数 (N)、コイル長 (l)、電流 (I) との間に次式の関係がある¹⁰⁾：

$$H = NI/l \quad (1)$$

セルは巻線をすきまなく巻き付けられていることから、 $l = 0.52$ Nとおけるので、磁界の強さは電流のみの関数で表せる。一方、コイルを流れる電流とコイル両端の電圧 (V) はインダクタンス (L) を用いて次式で表される：

$$V = -L \times dI/dt \quad (2)$$

(2)式より、電流と電圧の実効値で考えた場合、電圧が一定であれば電流はインダクタンスの増加にともなって減少する。ここで、インダクタンスは巻数とコイルの横断面積 (S)、透磁率 (μ) およびコイル長を用いて

$$L = \mu N^2 S/l \quad (3)$$

と表される。上式に $l = 0.52$ Nを代入すると $L \propto NS$ という関係が導かれることから、発振強度変化量は NS の増加にともなって減少すると考えられる。

以上の考え方に基づき、各セルの NS に対して周波数15.9~17.4 MHzの特性における極小点ピークの大きさをプロットした (Fig. 6)。この図から、極小点ピークの大きさは NS の増加にともなって減少することが確かめられ、前述の仮定が部分的にあてはまることが確認された。ただし、No. 1~4 ($NS = 3141$) では NS が一定であるにも係わらず、流路径の減少にともなってピークがわずかに減少する傾向が見られたことから、上記の関係には他の要因も含まれていることが示唆された。

以上の結果から、微生物量モニタリングに用いるセルとして、極小点ピークの大きさと極小点の位置から、流路径およびコイル径の最も小さいNo. 8が適しているこ

Fig. 6 Relationship between the minimum resonance magnitude and product of turn number and cross-section area on the each cell

とが明らかとなった。

4. No. 8 セルを用いた κ の推定

塩化ナトリウム水溶液を用いて測定した No. 8 の I_r - κ 特性を Fig. 7 に示した。極小点ピークの大きさは 3. で予想された通りに充分大きく、さらに極小点の位置が培地の κ (10.78 mS/cm) から充分に離れた特性が得られた。 κ の推定には、特性曲線に対して LAGRANGE の補間法⁹⁾を適用して求めた補間曲線を検量線として用いた。

5. フローセルによる培養モニタリング

培養時間に対して、培養液の吸光度と 44.1 MHz における I_r の変化をプロットしたグラフを Fig. 8 に示した。 I_r から求めた培地の比電導度は No. 8 の I_r - κ 特性曲線から、10~13 mS/cm の間で変化したと推定される。また、6 時間経過した時点で吸光度曲線に変曲点が見られることから、本実験では誘導期から対数増殖期を経て、直線増殖期初期までの変化を捉えていると考えられる¹¹⁾。両曲線の比較から、 I_r の減少傾向が吸光度の増加傾向とほぼ同期しており、 I_r は菌体の増殖にともなう培地組成変化を反映していると考えられる。一方、前報⁹⁾においてグリセリンやエタノール、グルコースなどの高誘電率・高誘電損失を有する物質でも、高濃度で存在しない限り I_r の変化に対する寄与は小さいことが確認されている。したがって、このたび得られた結果においては、菌体の増殖にともなうタンパク質や脂質などの誘電率変化の要

Fig. 7 Conductance dependence of the resonance magnitude measured with No. 8 cell at three different frequencies

—, 29.5 MHz; ---, 38.2 MHz; - · -, 44.1 MHz.

Fig. 8 Changes in the resonance magnitude and optical density (660nm) with fermentation period

○, resonance magnitude; □, optical density.

因となる物質の増加は現れず、有機酸などの弱電解質の増加のみが反映されていると考えられる。

以上のことから、微生物の溶液培養において、本システムにより得られた培養液の発振強度変化を、菌体量増加状態の指標として応用し得る可能性のあることが示された。ただし適用にあたっては、培地や菌株の種類により生成される電解質の種類や量が異なることから、用いる培地と菌株ごとに菌体量と I_r の変化を関連付けた検量線が必要である。

要 約

ラジオ周波数 (RF) 領域の交流電磁場による電解質溶液中でのエネルギー損失特性を利用して、試料の比電導度に対応する指標を試料に非接触で自動測定するシステムを考案した。本システムは空芯ソレノイドコイルと LC 発振回路、発振強度および周波数の制御・測定用コンピュータから構成されている。比電導度の指標として、発振状態にあるコイルの内部に試料をいれた際に生じる発振強度の変化量を用いた。樹脂製試験管のまま測定する回分測定用セルおよびインライン計測用フローセルを作製し、本システムの比電導度-発振強度特性を調べた。流路径、コイル径、コイル長 (巻数) の異なるセルについて、塩化ナトリウム水溶液を用いて上記特性を調べた結果、発振強度が極小となる比電導度は流路径の対数に比例することが判明した。また、極小点でのピークの大きさはインダクタンス (コイル断面積と巻数の積) の減少にともなって増大する傾向のあることが明ら

かとなった。以上の結果をもとに、微生物量モニタリングへの応用実験として、フローセルを用いた *Bacillus subtilis* AR 42 株の増殖状態の観察を行った。菌体量の指標として培地の吸光度を用い、採取した培地の発振強度変化との対応を調べた結果、本システムにより培養初期から対数増殖期における菌体量変化を観察することができることが示された。

最後に、本研究の遂行にあたりましてご協力いただきました農林水産省農業生物資源研究所遺伝資源管理情報科 永井利郎主任研究官に感謝申し上げます。

本研究の一部は、日本食品科学工学会第43回大会(1996, 仙台)において発表した。

文 献

- 1) 杉山純一：日食工誌, **35**, 647 (1988).
- 2) 杉山純一：日食工誌, **35**, 717 (1988).
- 3) EDEN, R. and EDEN, G.: Impedance microbiology (Research Studies Press, England), p. 123 (1984).
- 4) 乙部和紀・杉山純一・菊池佑二：日食工誌, **44**, 38 (1997).
- 5) 電子通信学会ハンドブック委員会編：電子通信ハンドブック (オーム社, 東京), p. 663 (1979).
- 6) 吉沢四郎：電気化学実験法 (いずみ書房, 東京), p. 179 (1975).
- 7) 和田八三久：高分子の電気物性 (裳華房, 東京), p. 27 (1987).
- 8) 本田雅健：化学の領域増刊 18 化学者のための高周波分析—基礎とその応用— (南江堂, 東京), p. 1 (1955).
- 9) 平田光穂・須田精二郎・竹本宣弘：パソコンによる数値計算 (朝倉書店, 東京), p. 12 (1991).
- 10) 熊谷寛夫・荒川泰二：朝倉物理学講座第5巻 電磁気学 (朝倉書店, 東京), p. 156 (1980).
- 11) 中山大樹：環境調査のための微生物学 (講談社, 東京), p. 40 (1975).

(平成8年8月2日受付, 平成8年11月22日受理)