一対の圧電セラミック素子による一様媒質中の対象の 3つのパラメータの推定

清水 俊彦*・木本 晃*・信太 克規*

Estimation of Three Parameters of an Object in Homogeneous Medium
by a Pair of Piezoelectric Ceramic Transducers

Toshihiko SHIMIZU*, Akira KIMOTO* and Katsunori SHIDA*

In this paper, three parameters of an object, which is inserted between a pair of piezoelectric ceramic transducers in the homogeneous medium, - a position, diameter, and relative permittivity, - are estimated. In our proposed method, time of flight is measured by each piezoelectric ceramic transducer, and capacitance between a pair of piezoelectric ceramic transducers is also measured by using each piezoelectric ceramic surface electrode. Therefore, the ultrasonic and electrical properties are simultaneously obtained by the proposed sensing method. In the experiment, a column was inserted between a pair of piezoelectric ceramic transducers which were arranged inside the cylindrical equipment filled with distilled water, and time of flight and capacitance were measured. Three kinds of columns - polyvinyl chloride (relative permittivity ϵ_s :2.25), polyoxymethylene (ϵ_s :3.5), and polyvinylidene fluoride (ϵ_s :6.8) -, were prepared. In addition, three types of diameters - 30, 35, and 40 mm -, each with column were used. The position of the column, diameter, and relative permittivity were estimated from time of flight and capacitance.

Key Words: piezoelectric ceramic transducer, capacitance, time of flight

1. はじめに

現在、パイプラインを含めた工業プロセスにおいて、非侵襲モニタリングシステムは重要な技術の1つであり、盛んに研究されている¹⁾。そのモニタリング手法として、電気インピーダンスイメージング^{2)~4)}、超音波イメージング^{5)~7)}、 γ 線を用いたイメージング⁸⁾などが報告されている。さらに、測定精度および検出能力の向上を目指し、2種類の手法、たとえば、 γ 線と静電容量測定による複数断面でのマルチイメージングシステムの研究も行なわれている^{9)~11)}。

この状況において、本研究の目的は、イメージングの分解能の向上を図るための同一断面でのマルチイメージングシステムを確立することである。そのために、圧電セラミック素子をもとにした電気・超音波統合型センサを提案した^{12), 13)}。本手法は、一対の圧電セラミック素子により、超音波の透過および反射波の測定に加え、表面に塗布されている電極を用いることにより、電気特性としてのコンダクタンスおよび静電容量の測定をしようとするものである。よって、提案セン

サにより、同一空間内における対象の超音波特性と電気特性を同時に測定することが可能である。また、イメージングに関しては、測定対象の一断面に配置された複数の提案センサ、すなわち、圧電セラミック素子により、複数の組み合わせで超音波および電気特性を測定し、得られた測定値から同一空間内の対象の超音波特性と電気特性を再構成しようとするものである。

本稿では、本手法の有用性を示すための基礎的検討として、一対の圧電セラミック素子により、一様媒質中に挿入された測定対象としての円柱の位置、直径および比誘電率の推定を試みたので報告する。

2. センシング原理

Fig. 1 に提案センサによる対象の超音波および電気特性の測定手法を示す。Fig. 1 に示すように一対の圧電セラミック素子間を媒質 I と II で満たした場合を考える。Fig. 1 (a) に示すように、一方の圧電セラミック素子に電気信号を与えることにより振動させ、媒質 I, II 間で反射した振動あるいは、もう一方の圧電セラミック素子に伝わった振動を電気信号に変換することで、測定対象の超音波特性を得ることができる。また、Fig. 1 (b) に示すようにそれぞれの圧電セラミック素子表面の電極により、電極間の電気特性を測定することが可能である。よって、一対の圧電セラミック素子を用いることに

* 佐賀大学大学院工学系研究科 佐賀市本庄町 1

* Faculty of Science and Engineering, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga

(Received February 26, 2007)

(Revised August 23, 2007)

Fig. 1 Proposed sensor using piezoelectric ceramic transducers: (a) Measurement of ultrasonic property, (b) Measurement of electrical property

より、超音波および電気特性を得ることが可能となる。さらに、超音波特性としての伝播時間と電気特性としての静電容量は媒質 I, II により変化するゆえ、一対の圧電セラミック素子で測定されたそれらの測定値より、媒質の状態を検出できる可能性を有しているといえる。

たとえば、センサ間の媒質 I に対して媒質 II の幅 d , 位置 p および比誘電率 ε_s を変化させたとき、各圧電セラミック素子を振動させることにより媒質 I, II の反射波から得られる伝播時間 t_1, t_2 と圧電セラミック素子表面電極間で得られる静電容量 C は変化する。それらの関係は、

$$t_1 = f_1(d, p) \quad (1)$$

$$t_2 = f_2(d, p) \quad (2)$$

$$C = f_3(d, p, \varepsilon_s) \quad (3)$$

で表わすことができる。一般に、(1) 式、(2) 式あるいは (3) 式のみ、すなわち、伝播時間あるいは静電容量の測定のみでは、媒体 II の幅、位置および比誘電率を推定することは困難である。しかしながら、それぞれの式が独立で、かつ (4) 式～(6) 式のような逆関数を有するならば、3 つの測定値 t_1, t_2 および C を用いることにより、その幅、位置および比誘電率を求めることが可能となる。

$$d = g_1(t_1, t_2) \quad (4)$$

$$p = g_2(t_1, t_2) \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = g_3(t_1, t_2, C) \quad (6)$$

さらに、超音波特性としての透過波や振幅、電気特性としての静電容量や周波数特性等を利用することにより、密度などの複数の情報を検出できる可能性を有しているといえる。

3. 実験方法

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。また、Fig. 3 に測定シ

Fig. 2 Schematic diagram: (a) Experimental equipment, (b) View of piezoelectric ceramic transducer

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

Table 1 Property of each measurement material

	PVC	POM	PVDF
Relative permittivity	2.25	3.5	6.8
Density [g/cm ³]	1.35-1.45	1.41	1.78
Modulus of elasticity [10 ⁴ kg/cm ²] (Young's modulus)	2.5-4.2	2.8	2.1

システムを示す。実験装置は、内径 160 mm、厚さ 5 mm、高さ 195 mm のアクリルで作製された。また、電気的な周囲の影響を防ぐためにアースに接続された内径 180 mm、高さ 210 mm の真鍮のシリンダに挿入された。実験装置の内側側面全体に、共振周波数 2 MHz の長方形板の圧電セラミック素子 (10×30×1 mm) を中心に有する高さ 185 mm のステンレス電極一対を 1 mm の間隔をもって貼り付けた。Fig. 2 に示すように、圧電セラミック素子はアクリル内側湾局面に沿って貼り付けることが困難であったので、アクリル板に埋め込み、それを湾局面にシリコン接着剤で固定した。今回、ステンレス電極は、圧電セラミック素子間の静電容量をできるだけ理想的な平行平板コンデンサとして測定するための補助電極として用いた。よって、静電容量の測定は、一方の圧電セラミック素子 (PZT-I あるいは PZT-II) およびステンレス電極を LCR メータ (Agilent 4284A) の高電位側 (H 側) に、もう一方の圧電セラミック素子 (PZT-II あるいは PZT-I) を低電位側 (L 側) に接続し、その周囲のステンレス電極を直接アースに接続することで行なわれた。

実験は、測定容器の電極部分 (高さ 185 mm) を一様媒体としての蒸留水で満たし、測定試料として、高さ 190 mm の円柱を一对の圧電セラミック素子間に挿入し、PZT-I 側を基準 (0 mm) として 35 mm~125 mm の間を 15 mm 間隔で移動させ、静電容量と伝搬時間を測定した。測定試料として、3 種類の比誘電率を準備するために、塩ビ樹脂 (PVC)、アセタール樹脂 (POM) およびポリフッ化ビニリデン樹脂 (PVDF) の 3 種類の円柱を用意した。Table 1 に各測定試料の特性を示す。また、それぞれの試料について、直径 30, 35 および 40 mm の 3 種類の円柱を用意した。

測定は以下のように行なった。まず、圧電セラミック素子 PZT-I および PZT-II の表面電極をそれぞれ H 側と L 側または L 側と H 側に接続したとき、すなわち、スイッチ A を ON し、A-I または A-II を ON したときの静電容量を、LCR メータにより、印加電圧 10 V、周波数 500 kHz で測定した。つぎに、スイッチ B を ON し、B-I または B-II を ON することで、それぞれの圧電セラミック素子により伝播時間を測定した。伝播時間は、送信波と受信波の時間差から得られた。Fig. 4 に直径 $d=35$ mm、比誘電率 $\epsilon_s=3.5$ の測定試料を位置 $p=80$ mm に挿入したときの送信波と受信波を示す。送信波は、ファンクションジェネレータにより作成された周波数 2 MHz、振幅 10 V の 5 波の正弦波からなるバースト波とし、受信波は、測定対象の表面での反射波とした。送信および受

Fig. 4 Sample waves: (a) Transmitted wave, (b) Received wave

信波は、デジタルストレージスコープで測定された。今回、トリガレベルとして、送信波は、一発目の波形の最大電圧とし、受信波は、最大電圧とした。よって、静電容量と伝搬時間について、それぞれ 2 種類の測定値が得られた。得られた測定値から一对のセンサ軸に対する測定試料のずれおよび対称性が確認され、測定試料の位置、大きさおよびその比誘電率が推定された。また、測定試料を一对の圧電セラミック軸上から回転させたときの静電容量および伝播時間とその回転角との関係を調べた。なお、実験は 25°C 一定で行なわれた。

4. 実験結果

Fig. 5 に測定結果を示す。Fig. 5 (a) は塩ビ円柱 (比誘電率 $\epsilon_s:2.25$) の直径 d と位置 p におけるそれぞれの圧電セラミック素子 PZT-I および PZT-II で得られた伝搬時間 t_I, t_{II} を示す。Fig. 5 (b)(c) には、測定対象の直径 d と位置 p における各圧電セラミック素子 PZT-I および PZT-II を H 側に接続したときの静電容量 C_I, C_{II} を示す。Fig. 5 (b) の y 軸は、一様媒質としての蒸留水での静電容量 $C_{I(w)}, C_{II(w)}$ と、蒸留水中に測定対象として、塩ビ円柱 ($\epsilon_s:2.25$) を挿入したときの各直径および位置で測定した静電容量 C_I, C_{II} の比をそれぞれ示す。同様に、Fig. 5 (c) の y 軸は、一様媒質としての蒸留水での静電容量 $C_{I(w)}, C_{II(w)}$ と、蒸留水中に直径 35 mm の測定対象を挿入したときの各位置および比誘電率で測定した静電容量 C_I, C_{II} の比をそれぞれ示す。静電容量の測定値は、1 回の設定で 10 個のデータを取り、それを 3 回繰り返した合計 30 個のデータの平均と標準偏差で示した。また、伝播時間は、1 回の設定で 3 個のデータを取り、それを 3 回繰り返した合計 9 個のデータの平均と標準偏差で示した。

Fig. 5 (a) の結果より、塩ビ円柱の直径および位置において伝搬時間 t_I と t_{II} は、それぞれ変化し、塩ビ円柱を中心に挿入したときの伝播時間を基準として対称であることがわかる。

Fig. 5 Measurement results: (a) Time of flight in the inserted the column with ϵ_s of 2.25, (b) Capacitance values in the inserted column with ϵ_s of 2.25, (c) Capacitance values in the inserted column with a diameter of 35 mm

また、今回の実験結果から、測定対象の比誘電率に対しては、ほとんど伝播時間に変化は見られなかった。Fig. 5 (b)(c) の結果より、静電容量は、測定対象の位置、直径および比誘電率により変化し、測定対象が L 側の圧電セラミック素子に近づくとき蒸留水の比誘電率よりも小さい測定試料の比誘電率の影響を強く受けるため、小さくなることがわかる¹⁴⁾。また、

測定対象が L 側の圧電セラミック素子に近づくほど静電容量の変化が大きくなり、中心より H 側の圧電セラミック素子に近づくほど変化が小さくなっていることがわかる。今回、測定対象を中心から左右に移動させたときの静電容量 C_I と C_{II} の変化量は対称性に関して不十分であった。これは、挿入した円柱の位置が一对の圧電セラミック素子の軸上からずれたことにより生じたものであると考える。

今回の測定精度を測定データから評価すると、伝播時間に関しては、 $\pm 0.4 \mu s$ 以下で、静電容量に関しては、 $\pm 0.03\%$ 以下であった。測定誤差の主な原因は、挿入した測定対象の毎回の設定誤差や溶液のわずかな状態の変化によるものであると考える。よって、測定対象の設定の精度を向上させ、測定環境を改善することで測定精度および測定値の対称性の向上を図ることが可能であると考えられる。

これらの結果より、伝搬時間と静電容量の測定を行なうことで、測定対象の位置、直径および比誘電率の推定の可能性を有しているといえる。まず、各圧電セラミック素子で測定された伝搬時間を用いることにより、測定対象の位置と直径を推定する。つぎに、測定対象が中心より L 側の圧電セラミック素子の近くに置かれているときの静電容量 C_I あるいは C_{II} を用いることによって測定対象の比誘電率を推定することが可能である。

5. 推定方法および結果

実際に、測定結果を用い、近似多項式を導出することで測定対象の位置、直径および比誘電率の推定を行なった。まず、(7) 式、(8) 式により測定対象の直径 d および位置 p の推定を行なった。

$$d = 160 - (l_I + l_{II})/2,$$

$$l_I = k_1 t_I + k_2, \quad l_{II} = m_1 t_{II} + m_2 \quad (7)$$

$$p = l_I + d/2 = l_{II} + d/2 \quad (8)$$

ここで、 l_I および l_{II} はそれぞれの圧電セラミック素子から測定対象表面までの距離を示す。 t_I および t_{II} は各圧電セラミック素子で得られた伝搬時間を示す。また、 k_1, k_2, m_1, m_2 は最小二乗法により導かれた係数を示す。それぞれの係数は(9) 式に示す実際の設定値と推定(計算) 値との誤差が最小になるように導出された。

$$\sum_{i=1}^{63} \frac{1}{2} (l_{Ii} - l_{Imi})^2 \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i=1}^{63} \frac{1}{2} (l_{IIi} - l_{IImi})^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

ここで、 i はそれぞれの圧電セラミック素子で得られた伝播時間のデータ数を示す。また、 l_{Imi} および l_{IImi} は実際の設定値である。すなわち、(10) 式に示すように、それぞれの係数で(9) 式を偏微分し、それが 0 となる係数を(11) 式の逆行

列を計算することで求めた。

$$\sum_{i=1}^{63} \frac{\partial}{\partial k_j} \frac{1}{2} (k_1 t_{1i} + k_2 - l_{1mi})^2 = 0,$$

$$\sum_{i=1}^{63} \frac{\partial}{\partial m_j} \frac{1}{2} (m_1 t_{1i} + m_2 - l_{1mi})^2 = 0 \quad (j = 1, 2) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{63} \begin{pmatrix} t_{1i}^2 & t_{1i} \\ t_{1i} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^{63} \begin{pmatrix} l_{1mi} t_{1i} \\ l_{1mi} \end{pmatrix},$$

$$\sum_{i=1}^{63} \begin{pmatrix} t_{1i}^2 & t_{1i} \\ t_{1i} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^{63} \begin{pmatrix} l_{1mi} t_{1i} \\ l_{1mi} \end{pmatrix} \quad (11)$$

今回、 k_1 および k_2 はそれぞれ 0.7490, 1.7498 で、 m_1 および m_2 はそれぞれ 0.7490, 1.9869 であった。

つぎに、伝播時間により推定された直径と位置および圧電セラミック素子間の静電容量を用いて、(13) 式により、測定対象の比誘電率 ε_s の推定を行なった。

$$C = (a_1 \varepsilon_{s0} + a_2)(b_1 d^2 + b_2 d + b_3)(c_1 p^2 + c_2 p + c_3) \quad (12)$$

$$= \alpha_1 \varepsilon_{s0} d^2 p^2 + \alpha_2 \varepsilon_{s0} d^2 p + \alpha_3 \varepsilon_{s0} d^2 + \alpha_4 \varepsilon_{s0} d p^2$$

$$+ \alpha_5 \varepsilon_{s0} d p + \alpha_6 \varepsilon_{s0} d + \alpha_7 \varepsilon_{s0} p^2 + \alpha_8 \varepsilon_{s0} p + \alpha_9 \varepsilon_{s0}$$

$$+ \alpha_{10} d^2 p^2 + \alpha_{11} d^2 p + \alpha_{12} d^2 + \alpha_{13} d p^2 + \alpha_{14} d p$$

$$+ \alpha_{15} d + \alpha_{16} p^2 + \alpha_{17} p + \alpha_{18} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{s0} = \ln \varepsilon_s$$

ここで C は各圧電セラミック素子表面電極間で得られた静電容量を示す。また、 a_j ($j=1\sim2$), b_j ($j=1\sim3$), c_j ($j=1\sim3$) および α_j ($j=1\sim18$) は、比誘電率、直径および位置からなる関数の係数を示す。ここで、比誘電率の推定に用いた静電容量は、あらかじめ位置が推定されているゆえ、測定対象が中心より L 側に置かれている静電容量を用いた。また、今回、静電容量の変化は、測定対象が L 側に近づくにしたがって急激に変化するため、測定対象の位置 p が $65 \text{ mm} \leq p \leq 95 \text{ mm}$ のときと $95 \text{ mm} \leq p \leq 125 \text{ mm}$ のときで、それぞれ (13) 式のような近似式を導出した。よって、 α_j ($j=1\sim18$) は、27 点の測定データを用いてそれぞれ導出された。また、(13) 式の近似式は、(12) 式に示すように測定した静電容量と測定対象の位置、直径および比誘電率のそれぞれの関係において、次数が低く比較的近似誤差の小さい多項式から導出された。よって、静電容量と位置および直径に関してはそれぞれ 2 次の多項式とした。比誘電率に関しては対数として用い、1 次の多項式とした。

今回、比誘電率の推定は、反復法であるニュートン法により行なった。すなわち、推定された位置および直径から (13) 式の静電容量は比誘電率の 1 変数関数 $C(\varepsilon_s)$ となるゆえ、測定された静電容量から比誘電率の初期値を 2 として (14) 式を繰り返し、反復条件として、計算から求めた静電容量 $C_{cal}(\varepsilon_s^{(n)})$ と実際の測定容量 C_m との差異 $\frac{C_{cal}(\varepsilon_s^{(n)}) - C_m}{C_m}$ の大きさが 0.0003 以下となったときの比誘電率 $\varepsilon_s^{(n)}$ を推定値とした。

Fig. 6 Estimated results: (a) Estimated error of position, (b) Estimated error of diameter, (c) Estimated error of relative permittivity

$$\varepsilon_s^{(n+1)} = \varepsilon_s^{(n)} + \Delta \varepsilon_s, \Delta \varepsilon_s = -\frac{C_{cal}(\varepsilon_s^{(n)}) - C_m}{C'_{cal}(\varepsilon_s^{(n)})} \quad (14)$$

ここで、 $C'_{cal}(\varepsilon_s^{(n)})$ は $\varepsilon_s^{(n)}$ による微分を示す。

Fig. 6 に、実験データを式に代入して得られた推定値と実際の設定値との差を示す。Fig. 6 の横軸には各パラメータの設定値、縦軸には各パラメータの設定値 (d, p, ε_s) と推定値 ($d_{est}, p_{est}, \varepsilon_{s, est}$) の誤差を示す。結果から、今回の伝播時間および静電容量の測定精度を考慮した上で、現段階では、測定対象の位置、直径および比誘電率はそれぞれ $\pm 0.3 \text{ mm}$, $\pm 0.6 \text{ mm}$, および ± 0.9 程度の検出能力をもって推定可能であることがわかる。

推定精度に関して、測定精度の向上を図ることやより多くのデータベースのもとで最適な近似関数を用いることで、精度の向上を図ることが可能であると考え。比誘電率の推定に関して、今回、反復法における比誘電率の初期値は、測定対象の比誘電率の最小値をもとに、反復条件は、測定精度をもとにそれぞれ設定したが、これらは近似式や推定パラメータ等により変更する必要がある。また、有限要素法による解

析を行ない、反復法を用いて、静電容量から比誘電率の推定を行なうことで、精度の向上を図ることが可能であると考えられる。今後、検討する予定である。

6. 考 察

今回、一对の圧電セラミック素子軸上における測定対象の位置、直径およびその比誘電率について推定を試みたが、一様媒質中における測定対象の推定の可能性について検討する。Fig. 7 に一对の圧電セラミック素子を基準軸としたときの測定試料の回転角度と静電容量および伝播時間との関係を示す。Fig. 7 (a) は測定試料の回転角度 θ の定義を示す。Fig. 7 (b) の縦軸は、PZT-I を H 側にしたときの一様媒質としての蒸留水の静電容量 $C_{I(w)}$ と測定対象 ($\epsilon_s:2.25, d:35\text{ mm}$) を中心から 30 mm 離れた位置に挿入したときの静電容量 C_I との比を示す。Fig. 7 (c) の縦軸は、一様媒質中に測定対象 ($\epsilon_s:2.25, d:35\text{ mm}$) を中心から 30 mm 離れた位置に挿入したときの PZT-I で得られた伝播時間 t_I を示す。また、Fig. 7 (b)(c) の横軸は、測定対象の回転角度を示す。結果より、静電容量は、L 側の圧電セラミック素子 (PZT-II) に測定対象が近づいたときに大きく変化しており、伝播時間は、圧電セラミック素子軸上に測定対象が位置したときに変化していることがわかる。よって、一様媒質中に測定試料が挿入されたときに、まず、測定装置を回転させながら静電容量および伝播時間を測定する。静電容量および伝播時間の変化から一对の圧電セラミックス素子軸に対する測定試料の回転角度を得ることができる。そのときの静電容量および伝播時間を用いることで測定対象の位置、直径および比誘電率を検出することが可能となる。よって、一对の圧電素子を回転させ、伝播時間と静電容量を測定することで一様媒質中の異種媒体の 3 種類のパラメータの推定が可能である。

本手法を用いた電気および超音波特性のイメージングに関しては、測定容器内側に複数の圧電セラミック素子を配置して、圧電セラミック素子の複数の組み合わせで静電容量と伝播時間を測定することで、一断面の電気特性と超音波特性を再構成することが可能であると考えられる。また、超音波に関しては、反射波による伝播時間のみでなく、透過波や波形の減衰率を測定することや電気特性に関しては静電容量に加え、コンダクタンスやそれらの周波数特性を利用することで情報量を増やすことが可能であるゆえ、より複数の情報を検出することが可能であると考えられる。

7. ま と め

本稿では、一对の圧電セラミック素子を用い、一様媒質中に挿入された測定対象の 3 つのパラメータの検出を試みた。本手法は、一对の圧電セラミック素子により超音波特性としての伝播時間のみでなく、それぞれの圧電セラミック素子の表面の電極を用いて電気特性としての静電容量を測定しようとするものである。実験として、一様媒質中の一対の圧電セラミック素子間に測定対象を挿入し、素子間で移動させ、そ

Fig. 7 Experimental results: (a) Definition of angle, (b) Relationship between capacitance and angle, (c) Relationship between time of flight and angle

れぞれの圧電セラミック素子での伝播時間と圧電セラミック素子間の静電容量を測定した。今回、測定試料として、3種類の比誘電率の円柱、すなわち、塩ビ樹脂 (比誘電率: 2.25)、アセタール樹脂 (3.5) およびポリフッ化ビニリデン樹脂 (6.8) を用意した。また、それぞれの円柱について、30, 35 および 40 mm の 3 種類の直径を用いた。測定結果から、測定対象の位置、直径および比誘電率の推定を試みた。結果として、一对の圧電セラミック素子による伝播時間と静電容量の測定から一对の圧電セラミック素子軸上における測定対象の位置、直径および比誘電率の推定の可能性を示した。また、測定容器を回転させながら一对の圧電セラミック素子で伝播時間と静電容量を測定することで一様媒質中の異種媒体の 3 種類のパラメータの検出の可能性を示した。今後、提案センサ

により電気および超音波特性のイメージングを試みる予定である。

参 考 文 献

- 1) R.A. Willians and M.S. Beck: Process Tomography: Principles, Techniques and Applications, Oxford, U.K. Butterworth-Heinemann (1995)
- 2) N. Reinecke and D. Mewes: Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography, Meas. Sci. Technol., **7**, 233/246 (1996)
- 3) G.E. Fasching, W.J. Loudin and N.S. Smith: Capacitive System for Three-Dimensional Imaging of Fluidized-Bed Density, IEEE Trans. on Instru. and Meas., **43**-1, 56/62 (1994).
- 4) W.Q. Yang and T.A. York: New-AC based capacitance tomography system, Proc. Inst. Elect. Eng. Sci. Meas. Technol., **146**-1, 47/53 (1999)
- 5) B.S. Hoyle: Process tomography using ultrasonic sensors, Meas. Sci. Technol., **7**, 272/280 (1996)
- 6) H.I. Schlaberg, M. Yang and B.S. Hoyle: Ultrasound reflection tomography for industrial processes, Ultrasonics, **36**, 297/303 (1998)
- 7) L. Xu, Y. Han, L. Xu and J. Yang: Application of ultrasonic tomography to monitoring gas/liquid flow, Chem. Eng. Sci., **52**-13, 2171/2183 (1997)
- 8) W.B. Gilboy, J. Foster and M. Folkard: A tomographic gamma-ray scanner for industrial applications, Nuclear Instruments and Methods, **193**, 209/214 (1982)
- 9) G.A. Johansen, T. Froystein, B.T. Hjertaker and O. Olsen: A dual sensor flow imaging tomographic system, Meas. Sci. Technol., **7**, 297/307 (1996)
- 10) B.S. Hoyle, X. Jia, F.J.W. Podd, H.I. Schlaberg, H.S. Tan, M. Wang, R.M. West, R.A. Willians and T.A. York: Design and application of a multi-modal process tomography system, Meas. Sci. Technol., **12**, 1157/1165 (2001)
- 11) T. Dyakowshi, J.M. Hale, A. Jaworski, N.M. White, A. Nowakowski, G. Meng and S. Rwifa: Dual-Modality Probe for Characterization of Heterogeneous Mixtures, IEEE Sensors Journal, **5**-2, 134/138 (2005)
- 12) A. Kimoto and K. Shida: Proposal of a New Multifunctional Measurement Method Using Piezoelectric Vibrator, JJAP, **40**-1-6A, 4258/4259 (2001)
- 13) 清水, 木本, 信太: 電気・超音波統合型センサによる一様媒質中の異種媒体の位置及び大きさの推定, 電学論 C, **127**-C-1, 76/80 (2007)
- 14) A. Kimoto and K. Shida: Estimation of Position and Relative Permittivity of Dielectric in a Cylindrical Air Condenser by New Capacitance Measurement Method, JJAP, **35**-1-11, 5896/5900 (1996)

木 本 晃 (正会員)

1997年佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程システム生産科学専攻修了。同年同大学理工学部助手, 2001年佐賀大学理工学部講師, 04年佐賀大学理工学部助教授, 現在に至る。センシング・イメージング工学に関する研究に従事。工学博士。日本 ME 学会, IEEE 各正会員。

信 太 克 規 (正会員)

1970年東北大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。同年通産省工業技術院電気試験所(現, 産業技術総合研究所)入所。87年同所標準計測部電気標準研究室長。90年佐賀大学理工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。知能精密電気計測およびセンシングに関する研究に従事。工学博士。応用物理学会, 日本 ME 学会, 日本ロボット学会, IEEE 各正会員。

[著 者 紹 介]

清 水 俊 彦 (学生会員)

2005年佐賀大学理工学部電気電子工学科卒業。同年佐賀大学大学院工学系研究科生体機能システム制御工学専攻修士課程進学, 現在に至る。現在, 同大学研究室にて電気計測に関する研究に従事。