

## 研究論文

# 空中超音波送波器の音響整合層のための粒子分散型複合材料の設計とその音響的特性

齋藤和樹\*, 西平守正\*, 今野和彦\*

Design and experimental study on acoustic properties of (0-3) composite materials for acoustic matching layer of air-coupled ultrasonic transducer

Kazuki SAITO†, Morimasa NISHIHARA†, Kazuhiko IMANO†

The acoustic properties of (0-3) composite materials for acoustic matching layer of MHz-range air-coupled ultrasonic transducer are studied experimentally. The composite materials are formed from a mixture of silicone rubber and hollow thermoplastic microspheres. The acoustic properties of the composite materials are measured and compared with Reuss model, which is theoretical model for elastic properties of composite materials. The measured values of velocity and characteristic acoustic impedance of the composite materials agreed well with the theoretical estimation up to 10% weight fractions of hollow thermoplastic microspheres. The optimal value of characteristic acoustic impedance for acoustic matching layer of air-coupled ultrasonic transducer was calculated using transmission line model. The acoustic matching layer having the optimal value was obtained from the composite material, for which the weight percentage of hollow thermoplastic microspheres is 5%. Transmission of air-coupled ultrasonic wave of 1 MHz using piezoceramic transducer with the acoustic matching layer is demonstrated, and the sensitivity of transmission was improved by 10 dB using the optimal composite material.

**Key Words**: composite material, hollow thermoplastic microsphere, acoustic property, acoustic matching layer, MHz-range air-coupled ultrasonic transducer, Reuss model

## 1. はじめに

非破壊検査などで超音波を利用する場合、欠陥検出能を向上させるために、超音波を送受波する探触子と検査対象物との間に音響結合材を介在させる。この音響結合材としては、水やグリセリンなどの流動性を持つものや、超音波探触子を検査対象物に密着固定できる固体が多用される。水槽中に浸漬させる水浸法も検査対象物の精査には便利な方法であるが、適用可能な検査対象物は水没が禁忌ではなく水槽中に配置可能な大きさであることなどが条件となる。このように超音波を用いた非破壊検査では、超音波探触子と検査対象物との間から空気を排除することが常識となっている。これは、液体や固体の中へ超音波を放射する場合に比較して、空気中における超音波の送受波効率が著しく低いためである。

超音波探触子から音響媒質中へ超音波を効率よく放射させることを考えた場合、探触子と音響媒質との間の音響特性インピーダンスの整合性が重要となる。例えば、圧電セラミック振動子（音響特性インピーダンス $30 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ）から水（同 $1.5 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ）または空気（同 $0.0004 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ）へ超音波を放射

させたとしても、水の場合は約10%が振動子から放射されるが、空気に対してはわずか約0.003%しか超音波が振動子から放射されない。このため、距離計測などに用いられている空中超音波用送受波器では圧電セラミック振動子の屈曲振動とコーン型共振子を組み合わせ、空気中における超音波の送受波効率を実用レベルに高めている。しかしながら、このような空中超音波用送受波器の利用可能な周波数は、その動作原理的制約から高々100 kHz程度に留まっている。これに対し、MHz帯の空中超音波を実用的な送受波効率で利用できれば、水などの音響結合材を必要としない非接触の超音波非破壊検査への応用という点で有用な技術となることが期待できる。超音波を空気中へ効率よく放射させるためには、圧電セラミック振動子と空気との間の音響的不整合を軽減することが必要となる。MHz帯における解決策の一つとして、音響整合層を振動子の音響放射面に配置する方法が考えられる。

音響整合層は、振動子と音響媒質との間の音響特性インピーダンスの差に起因する音響的な不整合を軽減させる目的で使用される。音響整合層を圧電振動子の音響放射面に配置することで、圧電振動子内での音波の反射を抑制でき、圧電振動子と音響媒質との間の音響的な整合性が改善し、音響媒質に対して音波を効率よく放射させることが可能となる。音響整合層を用いる方法は、水中で超音波を効果的に利用する目的でこれまで数多くの研究があり、音響整合層の最適特性値の求め方<sup>1-4)</sup>や、音響整合層用材料の作製方法<sup>5-7)</sup>および実験的検討<sup>8-9)</sup>などが報告されている。一方、空中超音波に適した音響整合層に関して

平成18年6月15日受付；平成18年10月25日受理

\*秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科  
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

†Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, 1-1 Tegata Gakuen-cho, Akita City, 010-8502, Japan.

E-mail:saito@imano-lab.ee.akita-u.ac.jp

は、ほとんど検討がなされていない。このような現状は、圧電セラミック振動子に比較して空気の音響特性インピーダンスが5桁も小さく、極端な音響的不整合に利用可能な音響整合層用材料が単体としては存在しないということが背景にあるものと考えられる。そのため、空中超音波の中でも特にMHz帯に適した音響整合層を得るためには、整合層の満たすべき条件を解析的に明らかにした上で、その条件に適合する整合層用材料を新たに作製する必要がある。

本研究ではMHz帯空中超音波の送受波に適した音響整合層の開発を目指している。本報告では、MHz帯空中超音波送波器の送波効率の向上を目的として、音響整合層の最適特性を数値解析から求め、その特性を持つ音響整合層用材料の作製方法を示す。さらに、作製した音響整合層用材料を空中超音波の送受波実験で評価した結果について述べる。

## 2. 空中超音波送波器用音響整合層条件の数値解析

### 2.1 解析方法

超音波の送波系は、超音波を発生する振動子とそれを駆動する電源、および超音波の伝搬媒体である音響媒質、の三つの要素から構成される。振動子から発生した超音波の音響媒質中における伝搬挙動に関しては、KLM等価回路<sup>8)</sup>やMasonの等価回路<sup>9)</sup>などのように電気的等価回路を用いた数値解析法がいくつか提案されている。本研究では、空中超音波の時間波形の振幅値が最大となる音響整合層の条件を求めることを目的としているため、時間および周波数領域において有効な解析法として知られる伝送線路モデルを用いた電気的等価回路<sup>14)</sup>を用いた解析手法を採用する。すでに筆者らは、この方法を用いて、水中における音響整合層の解析を行っており<sup>4)</sup>、その有効性が明らかになっている。

解析対象とする空中超音波の送波系はFigure 1に示すように、圧電振動子とそれを駆動する電源、音響整合層、バックング(エポキシ樹脂)、音響媒質(空気)から構成されるものとする。圧電振動子の振動面は2面あるが、空気と接し音響放射面とする側に音響整合層を、その反対側には機械的共振尖鋭度である $Q$ 値を下げて周波数特性を広帯域化するためのバックングを、それぞれ配置している。この空中超音波送波系を有限長伝送線路モデルとして電気的等価回路で表現するとFigure

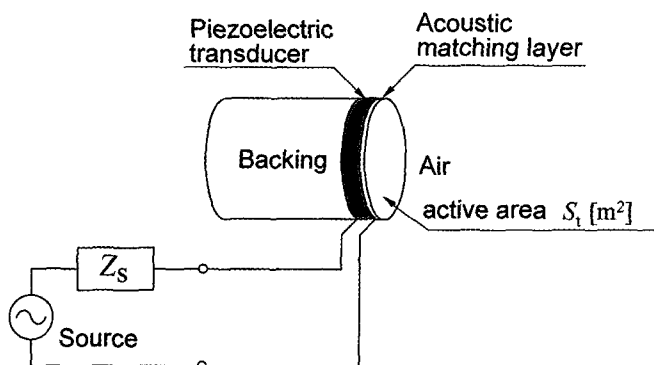


Figure 1 Air-coupled ultrasonic transmitting system with an acoustic matching layer.  $Z_s$  is the electrical source impedance [ $\Omega$ ].

2のようになり、さらにT型等価回路を利用してFigure 3のように表すことができる。これをFigure 4のように二端子対回路として扱おうと、四端子定数は同図に示すようになる。この回路の伝達関数 $H(\omega)$ は、電気的入力端子0-0'に印加される駆動電圧 $E_i(\omega)$ と、機械的出力端子3-3'での機械的出力 $F(\omega)$ との比から、四端子定数を用いて次式(1)のように算出することができる。 $(\omega$ は角周波数)。

$$H(\omega) = \frac{F(\omega)}{E_i(\omega)} = \frac{\phi}{\left(1 + \frac{Z_s}{Z_{11}}\right) \left(A_1 + \frac{B_1}{Z_{22}}\right) \left(A_2 + \frac{B_2}{Z_{a1}}\right)} \quad (1)$$

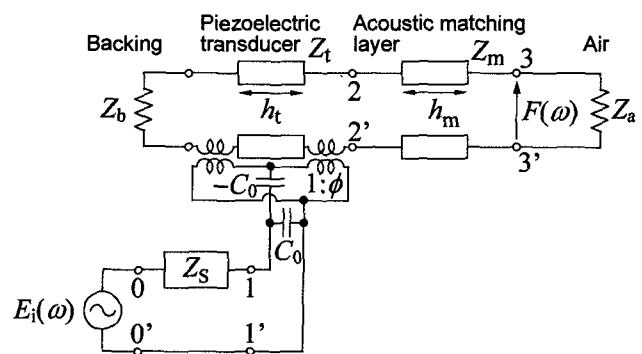
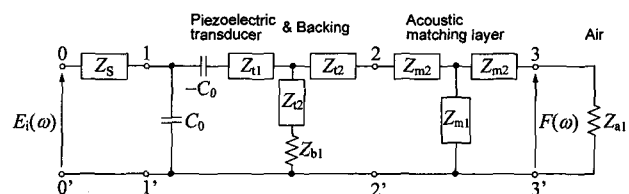


Figure 2 Electrical equivalent circuit of Figure 1 using transmission lines.

$Z_t$ : characteristic acoustic impedance of piezoelectric transducer [ $\text{Ns/m}^2$ ];  $h_t$ : thickness of piezoelectric transducer [ $\text{m}$ ];  $Z_m$ : characteristic acoustic impedance of acoustic matching layer [ $\text{Ns/m}^2$ ];  $h_m$ : thickness of acoustic matching layer [ $\text{m}$ ];  $Z_a$ : characteristic acoustic impedance of air [ $\text{Ns/m}^2$ ];  $Z_b$ : characteristic acoustic impedance of backing [ $\text{Ns/m}^2$ ];  $C_0$ : damped capacitance [ $\text{F}$ ];  $\phi$ : force factor [ $\text{N/V}$ ];  $E_i$ : electrical input voltage function in frequency domain [ $\text{V}$ ];  $F$ : mechanical output force function in frequency domain [ $\text{N}$ ]



$$Z_{11} = \frac{-jZ_t S_1}{\phi^2 \sin 2\theta_1}, \quad Z_{12} = \frac{jZ_t S_1}{\phi^2} \tan \theta_1, \quad \theta_1 = \frac{\omega h_t}{2c_t}$$

$$Z_{m1} = \frac{-jZ_m S_1}{\phi^2 \sin 2\theta_2}, \quad Z_{m2} = \frac{jZ_m S_1}{\phi^2} \tan \theta_2, \quad \theta_2 = \frac{\omega h_m}{2c_m}$$

$$Z_{a1} = \frac{Z_a S_1}{\phi^2}, \quad Z_{b1} = \frac{Z_b S_1}{\phi^2}$$

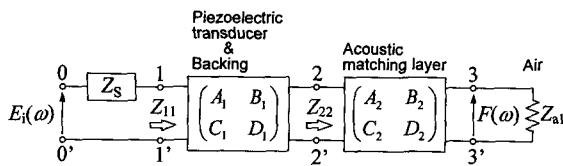
Figure 3 Electrical equivalent circuit of Figure 2 using T-type two-terminal pair circuit.

$c_t$ : velocity of piezoelectric transducer [ $\text{m/s}$ ];  $c_m$ : velocity of acoustic matching layer [ $\text{m/s}$ ]

圧電振動子を任意の電圧  $E(\omega)$  で駆動したときの機械的出力スペクトル  $G(\omega)$  は、この伝達関数  $H(\omega)$  と駆動電圧  $E(\omega)$  との積から算出することができ、その逆フーリエ変換から超音波送波波形  $g(t)$  が得られる。空中超音波送波器の音響整合層の音響特性インピーダンス  $Z_m$  に対する時間波形  $g(t)$  の振幅特性を算出すれば、空中超音波の送波効率を最も高くするための音響整合層の条件を求めることができる。

## 2.2 解析結果

空中超音波送波器の音響整合層の音響特性インピーダンス  $Z_m$  に対する空中超音波振幅値の依存特性を Figure 5 に示す。解析条件として、バックングをエポキシ樹脂 ( $Z_b = 3.0 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ )、音響整合層の厚さ  $h_m$  を超音波の波長  $\lambda$  の  $1/4$ 、また電源インピーダンス  $Z_s$  は一般的によく用いられる発振器を仮定して  $50 \Omega$  として計算した。同図の縦軸は音響整合層が無いときの出力振幅値で、横軸は、圧電振動子  $Z_t (= 30 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3)$  と空気  $Z_a (= 0.0004 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3)$  の音響特性インピーダンスの幾何平均インピーダンス  $Z_g = \sqrt{Z_t \cdot Z_a}$  ( $= 0.11 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ) で正規化している。一般的に知られている音響整合層の条件では、その厚さが超音波の  $1/4$  波長であり、音響特性インピーダンス  $Z_m$  が幾何平均インピーダンス  $Z_g$  に等しいが、これは圧電振動子と音響媒質が半無限長である場合と仮定した場合に得られる条件である。しかし、音源となる圧電振動子は有限長の共振系であるため、この点を考慮した本研究の解析結果から、必ずしも  $Z_m/Z_g = 1$  の条件が音響整合層の最適条件とならないことが Figure 5 から読みとれる。最大振幅が得られる音響整合層の条件は  $Z_m/Z_g = 0.9$  であることが確認できるが、その変化は緩やかであり、 $Z_m/Z_g = 0.4 \sim 2.3$  の範囲で出力振幅値がほぼ一定と見なせる。したがって、空中超音波送波器のための音響整合



$$A_1 = \frac{1}{Z_2 + Z_{b1}} \left[ (Z_{11} + Z_2 + Z_{b1}) - \frac{1}{j\omega C_0} \right],$$

$$B_1 = \frac{1}{Z_2 + Z_{b1}} \left[ 2Z_{11}Z_2 + Z_{b1}(Z_{11} + Z_2) + Z_2^2 - \frac{1}{j\omega C_0}(2Z_2 + Z_{b1}) \right],$$

$$C_1 = j\omega C_0 \frac{Z_{11} + Z_2 + Z_{b1}}{Z_2 + Z_{b1}}, \quad D_1 = j\omega C_0 \frac{Z_2^2 + Z_{b1}(Z_{11} + Z_2) + 2Z_{11}Z_2}{Z_2 + Z_{b1}},$$

$$A_2 = \frac{1}{Z_{m1}}(Z_{m1} + Z_{m2}), \quad B_2 = \frac{Z_{m2}}{Z_{m1}}(2Z_{m1} + Z_{m2}), \quad C_2 = \frac{1}{Z_{m1}},$$

$$D_2 = \frac{1}{Z_{m1}}(Z_{m1} + Z_{m2}),$$

$$Z_{22} = Z_m \frac{S_1 \left( \frac{Z_a}{Z_m} + j \tan 2\theta_2 \right)}{\phi^2 \left( 1 + j \frac{Z_a}{Z_m} \tan 2\theta_2 \right)},$$

$$Z_{11} = \frac{Z'_{11}}{1 + j\omega C_0 Z'_{11}}, \quad Z'_{11} = -\frac{1}{j\omega C_0} + Z_{11} + \frac{(Z_2 + Z_{22})(Z_2 + Z_{22})}{2Z_2 + Z_{22} + Z_{b1}}$$

Figure 4 Electrical equivalent circuit of Figure 3 using four terminal network.

Table 1 Characteristic acoustic impedance of various materials

Materials	Characteristic acoustic impedance $\times 10^6 \text{ Ns/m}^3$
Copper	45
Iron	38
Magnesium	10
Epoxy resin	3.0
Water	1.5
Silicone rubber	1.2
Air	0.0004

層を作製するためには、音響特性インピーダンスが  $0.04 \sim 0.26 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  の範囲にある材料を用いれば良いことが分かる。しかしながら、音響特性インピーダンスが  $1.0 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  以下の材料は単体では存在せず、後述のように音速や密度の異なる複合体で作製する必要がある。

## 3. 空中超音波送波器のための音響整合層用材料の作製

### 3.1 音響整合層の構成材料

空中超音波送波器の音響整合層としては、常温において固体で化学的に安定な材料が適している。例としていくつかの物質の音響特性インピーダンスを Table 1 に示す。固体材料で単体としてはシリコンゴムの音響特性インピーダンスが  $1.2 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  と最も小さいが、前節で求めた音響整合層の条件値は  $0.04 \sim 0.26 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  とさらに一桁程度小さい値である。ここで、空気の音響特性インピーダンスが  $0.0004 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  とさらに小さいことに注目すると、超音波の波長に比較して十分小さいと見なせる直径程度の気泡をシリコンゴムに分散混入させれば、巨視的には目的の音響特性インピーダンスを持つ材料となることが考えられる。そこで、熱可塑性プラスチック製の

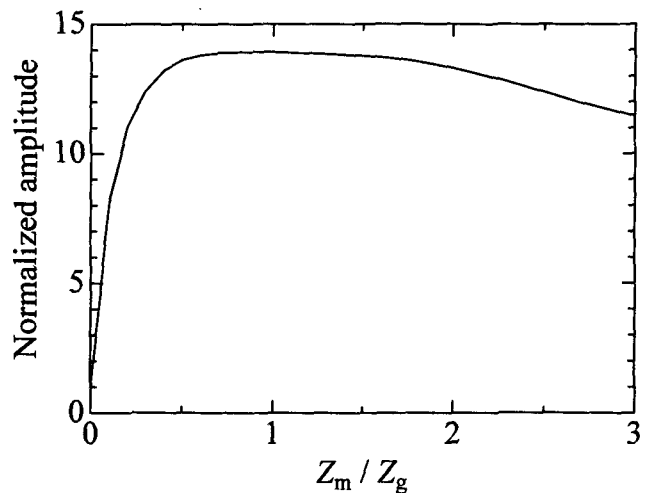


Figure 5 Dependency of air-coupled ultrasonic amplitude on normalized characteristic acoustic impedance  $Z_m/Z_g$  of the acoustic matching layer.

Table 2 Material properties of silicone rubber and hollow thermoplastic microspheres

	Silicone rubber	Hollow thermoplastic microspheres
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1200	50
Velocity [m/s]	1050	350
Bulk modulus [kPa]	920	3.2
Shear modulus [kPa]	300	2.2

中空球形のシェル構造の内部に炭化水素ガスを充填させた、中空プラスチック球状粒子（日本ファイライト株式会社製，商品名 Expancel，グレード 091WE40，平均直径60 μm，標準偏差25 μm）をシリコーンゴム（信越シリコーン，KE-445-T）に分散させる粒子分散型複合材料を空中超音波送波器用の音響整合層として作製することを試みる。

粒子分散型複合材料を用いて所望の特性を持つ水中超音波探触子用のバックングや音響整合層を作製する方法は良く知られており<sup>5,7)</sup>，この中でも音響整合層に関しては，母材-粒子の混合比と音響特性インピーダンスとの関係が理論モデルを用いてある程度予測可能なことが報告されている<sup>5,6)</sup>。次節では，空中超音波送波器用の音響整合層が粒子分散型複合材料で作製可能かどうかについて理論モデルに基づいて検討する。

### 3.2 Reuss モデルによる音響特性インピーダンスの算出

Reuss モデルは，複合材料中の微小粒子が均質な母材中に均等に分散しており，その半径はすべて同一で超音波の波長より十分小さく，さらに複合材料中の応力は一定であるものと仮定して導出されており，弾性率と母材-粒子の混合比との関係が次式で表される<sup>10,11)</sup>。

$$\frac{1}{K} = \frac{v_1}{K_1} + \frac{v_2}{K_2}, \quad \frac{1}{G} = \frac{v_1}{G_1} + \frac{v_2}{G_2} \quad (2)$$

ここで，

$K, G$ ：複合材料の体積弾性率，ずれ弾性率

$K_1, G_1$ ：一様な母材の体積弾性率，ずれ弾性率

$K_2, G_2$ ：球形な含有物の体積弾性率，ずれ弾性率

$v_1, v_2$ ：複合材料中の母材および球形含有物の体積含有率

である。この粒子分散型複合材料中を伝搬する超音波の音速  $c$  は，

$$c = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (3)$$

であり，式(3)中の複合材料の密度  $\rho$  は，母材と含有物の密度をそれぞれ  $\rho_1, \rho_2$  として

$$\rho = \rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 \quad (4)$$

のように構成物質の密度の平均値となる。複合材料の音響特性インピーダンス  $Z$  は，式(3)の  $c$  と式(4)の  $\rho$  との積で求められる。

本論文では母材としてシリコーンゴムを，分散粒子として中空プラスチック球状粒子を用いるが，その諸定数を Table 2 に示す。表中のシリコーンゴムの諸定数および粒子の密度は実測

値であり，粒子の音速は文献<sup>12)</sup>から算出した値である。これらの諸定数を用いて，中空プラスチック球状粒子の濃度に対する複合材料の密度  $\rho$  と音速  $c$ ，および両者の積である音響特性インピーダンス  $Z$  が算出できる。

### 3.3 音響整合層用材料の設計と特性測定

シリコーンゴムと中空プラスチック球状粒子からなる粒子分散型複合材料が空中超音波送波器の音響整合層として利用可能かどうかを検討するため，粒子濃度を1%から10%まで変化させて複合材料を作製した。硬化前の液状シリコーンゴムと中空プラスチック球状粒子を混合し，ハイブリッドミキサー（KEYENCE，HM-500）で十分に攪拌する。攪拌後の材料を四フッ化エチレン樹脂シートで挟み均一な厚さ（0.4 mm）に

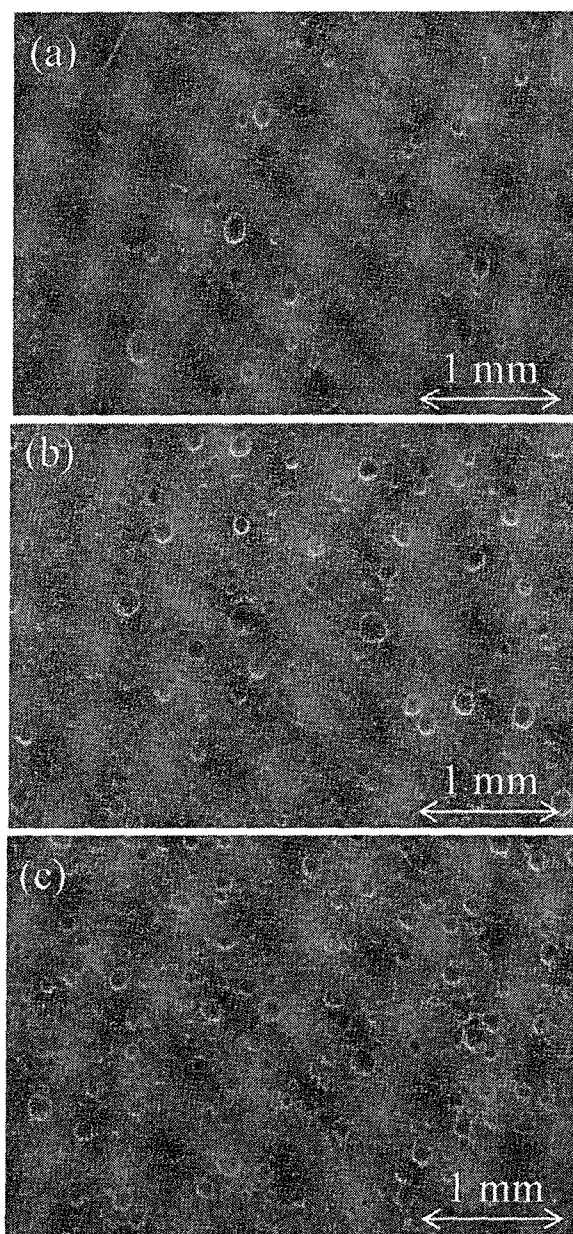


Figure 6 SEM images for composite materials. Weight percent of hollow thermoplastic microspheres (a) 1%, (b) 5%, and (c) 8%, respectively.

成形した上で、温度60°Cの条件下で24時間かけて硬化させる。このようにして、作製した複合材料の断面のSEM（電子顕微鏡）写真を、Figure 6 に示す。同図から、中空プラスチック球状粒子が母材であるシリコンゴムに分散され、作製工程において球状粒子に著しい変形がないことが確認できる。各種構成比で作製した複合材料の密度  $\rho$  と音速  $c$  を測定し、両者の積から音響特性インピーダンス  $Z$  を算出する。

複合材料の密度  $\rho$  は質量と体積の測定値から求めた。音速  $c$  は、複合材料の厚さ  $h$  (0.4 mm) と、Figure 7 に示す装置を用いて測定した超音波の伝搬時間から算出した。同図の装置は水中で超音波を送受波する構成であり、発振器 (Agilent, 33250A) と増幅器 (エヌエフ回路設計ブロック, HAS4101) を用いて、周波数 1 MHz, 電圧 100 V<sub>p-p</sub> のサインバースト 5 波を送波用振動子に印加することで、水中を伝搬した超音波が受波用振動子で受波されるようになっている。超音波が両振動子間 (Figure 7 中,  $L=15$  mm) を伝搬する時間はオシロスコープ (Agilent, infiniium 54845A) で観測されるが、この伝搬路中に複合材料が挿入された場合と水の場合とでは、複合材料と水との音速差から超音波の伝搬時間差  $t_0$  が生じる。水の音速を  $c_w$  とすれば、複合材料の音速  $c$  は、

$$c = \frac{h}{t_0 + \frac{h}{c_w}} \quad (5)$$

から算出することができる。

この複合材料の密度  $\rho$ 、音速  $c$  および音響特性インピーダンス  $Z$  の測定を行った。Figure 8 に測定値を黒丸で、前節で求めた理論値を曲線で示す。いずれの測定量においても、中空プラスチック球状粒子の濃度が高くなるにつれて値が減少する傾向を示し、また良好な一致が確認できる。粒子濃度が 5% 以上では音響特性インピーダンス  $Z$  が  $0.25 \times 10^6$  Ns/m<sup>3</sup> 程度と、空中超音波送波器の音響整合層に適した特性の材料となっている。また、所望の音響特性インピーダンスを持つ材料の混合比を Reuss モデルに基づいて設計可能であることが確認された。

#### 4. 空中超音波送受波実験

上述の手順で作製した複合材料の音響整合層としての効果を確認するために、空中超音波の送受波実験を Figure 9 の装置

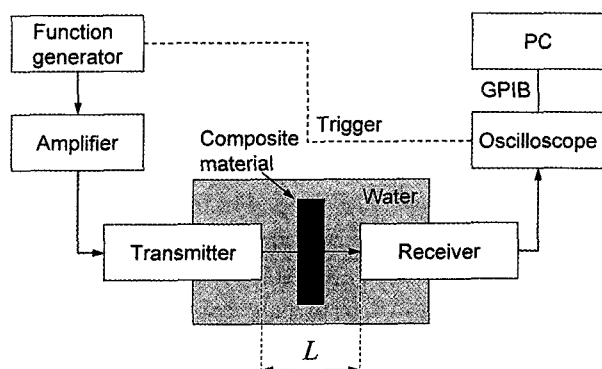


Figure 7 Measurement system for sound velocity in composite material using transmission method.

を用いて行った。空中超音波の送波器と受波器の両者とも、チタン酸鉛系磁器 (PbTiO<sub>3</sub>) の圧電振動子 (直径 15.0 mm, 厚さ 2.2 mm, 共振周波数 1 MHz) にエポキシ樹脂製のバックリングを取り付けたものを使用した。この送波器に前述の複合材料で作製した音響整合層を取り付け、空中超音波の伝搬距離  $L$  が 30 mm となるように送受波器を配置した。送波器の圧電振動子を周波数 1 MHz, 電圧 100 V<sub>p-p</sub> のサインバースト 10 波で駆動することで超音波を空气中に伝搬させた後、受波器で受波された超音波波形をオシロスコープで観測した。受波された超音波波形は、送波器と受波器の両者の特性を含んでいるが、音響整合層の条件のみ変化させて送受波するため、複合材料の音響整合層としての効果を評価できる。

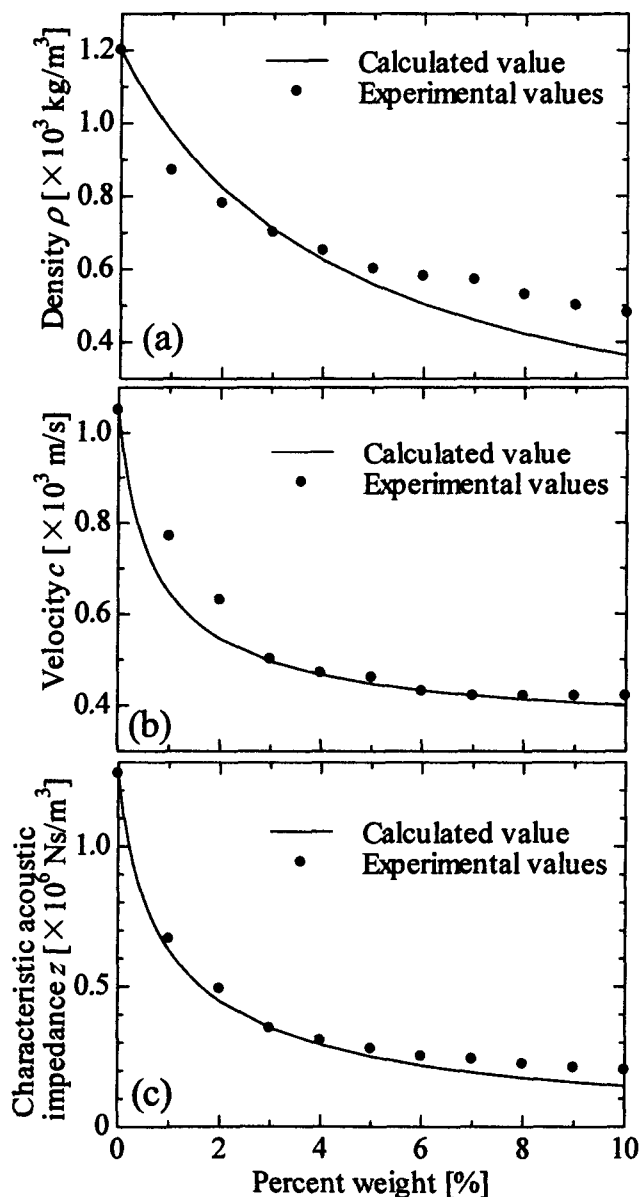


Figure 8 Comparison of measured values of acoustical properties and values predicted by Reuss model for silicone-hollow thermoplastic microspheres composites. (a) density, (b) velocity, (c) characteristics acoustic impedance.

送波用圧電振動子に音響整合層を取り付けない場合と、粒子濃度が1%, 3%, 5%の複合材料の音響整合層を取り付けた場合の空中超音波波形を、それぞれ Figure 10(a)~(d) に示す。同図の縦軸は、音響整合層を取り付けない場合の最大振幅値で正規化した。また、音響整合層の厚さは、すべて0.1mmとした。音響整合層を取り付けた場合の空中超音波の振幅は、粒子濃度の増加に伴い大きくなる傾向にあることが確認できる。このように、空中超音波送波器の音響整合層に適した音響特性インピーダンスを持つ複合材料を用いることで、超音波の振幅を向上できることが確認できたが、Figure 5 の計算値と比較するとその効果は半分以下に留まっている。伝送線路モデルを用いた解析では、音響整合層における超音波の減衰は考慮していないが、シリコンゴムや中空プラスチック球状粒子そのものによる減衰の他に、粒子が超音波の散乱体となっている可能性も考えられ、このような複合材料の超音波減衰特性が計算値と実測値との相違を生じる原因となっていることが推測される。その他の原因としては、音響整合層の厚さ制御の精度が必ずし

も十分ではなかった可能性がある。数値解析では音響整合層の厚さを1/4波長(0.1mm)と設定したが、数%程度の誤差であっても振幅に与える影響が無視できないことが文献<sup>1, 10)</sup>から類推される。さらに、最適な厚さは圧電振動子を駆動する電源の条件にも依存することが指摘されている<sup>4, 13)</sup>。そのため今後は、複合材料の超音波減衰特性を考慮に入れ、音響整合層の最適な厚さについて解析および実験から検討することが必要と考えている。

## 5. おわりに

MHz 帯の空中超音波送波器の送波感度を向上させる音響整合層を作製することを目的として、数値解析から求めた音響特性インピーダンスを持つ音響整合層用複合材料を作製し、その評価実験を行った。空中超音波送波器用音響整合層はシリコンゴムと中空プラスチック球状粒子からなる粒子分散型複合材料で $0.25 \times 10^8 \text{Ns/m}^3$ の音響特性インピーダンスをもつ音響整合層用材料を作製することができ、これら材料の混合比はReussモデルで設計可能であることが、数値解析と実験から明らかになった。さらに、作製した音響整合層を用いて空中超音波の送受波実験を行ったところ、送波感度を約10dB向上させることが可能となった。これらの結果から、シリコンゴムと中空プラスチック球状粒子からなる粒子分散型複合材料はMHz帯空中超音波送波器用音響整合層に有用であり、その設計方法を初めて示すことができた。

今後は、MHz帯空中超音波の送受波感度の一層の向上をめざして、複合材料の超音波減衰量と厚さを考慮した数値解析と実験を行い、音響整合層の最適条件を明らかにする予定である。

## 参考文献

- 1) 河西千尋, 奥山大太郎, 菊池喜充: 時間領域での解析に適した超音波トランスジューサの等価回路, 東北大学電通談話会記録, **41**(3), 237-244 (1972).
- 2) 河西千尋, 奥山大太郎, 菊池喜充: 端面における反射, 透過を用いた圧電変換器の過渡応答解析, 電子情報通信学会論文誌 A, **56-A**(3), 141-147 (1973).
- 3) 中鉢憲賢, 鎌田弘志: 厚み振動圧電振動子の等価回路の相互関係, 電子情報通信学会論文誌 C-I, **J-78-C-I**(11), 474-480 (1995).
- 4) M. Nishihira and K. Imano: Simulation study of acoustic intermediate layer and electrical source impedance in an ultrasonic pulse system, *Acoust. Sci. & Tech.*, **25**(3), 203-206 (2004).
- 5) K. Sugawara, M. Nishihira and K. Imano: Experimental study of acoustic properties of (0-3) composite materials for intermediate layer or backing of ultrasonic transducers, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**(6B), 4347-4349 (2005).
- 6) Turn N. Nguyen and Marc Lethiecq: Experimental Verification of Theory of Elastic Properties Using Scattering Approximations in (0-3) Connectivity composite Materials, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, **43**(4), 640-645 (1996).
- 7) S. Lees and C. L. Davidson: Ultrasonic measurement of some mineral filled plastics, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*,

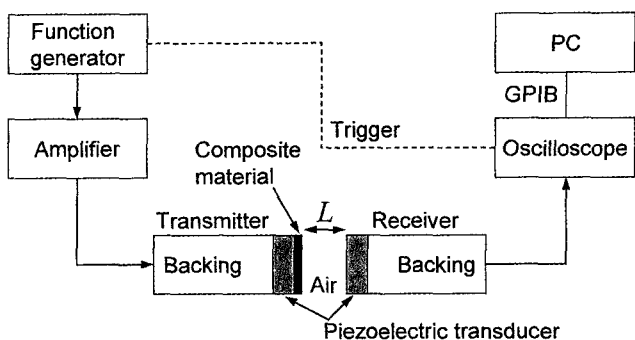


Figure 9 Measurement system for sensitivity of air-coupled ultrasonic wave with composite material using transmission method.

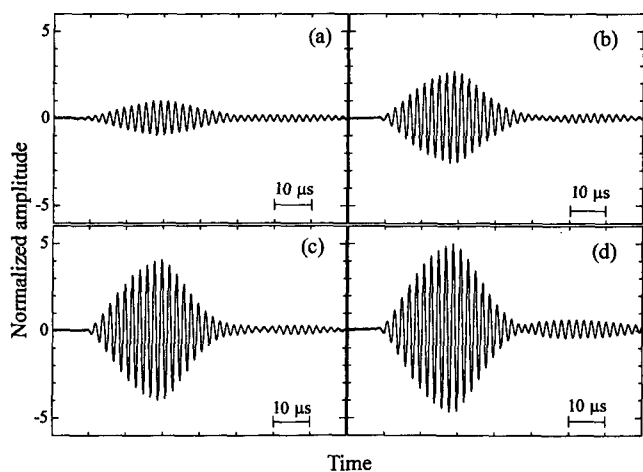


Figure 10 Experimental results of air-coupled ultrasonic wave. (a) Transducer without acoustic matching layer is used. Weight percent of hollow thermoplastic microspheres for acoustic matching layer are (b) 1%, (c) 3%, and (d) 5%, respectively.

- SU-24(3), 222-225 (1977).
- 8) R. Krimholz, D. A. Leedom and G. L. Matthaei: New equivalent circuit for elementary piezoelectric transducers, *Electron. Lett.*, **6**, 398 (1970).
  - 9) W. P. Masson: Electromechanical Transducers & Wave Filters, p. 399, D. Van Nostrand Co (1948).
  - 10) J. G. Berryman: Theory of elastic properties of composite material, *Appl. Phys. Lett.*, **35**(11), 856-858 (1979).
  - 11) L. W. Anson and R. C. Chivers: Effective elastic parameters of random composite, *Appl. Phys. Lett.*, **37**(4), 377-379 (1980).
  - 12) P. L. Chambre: Speed of a plane wave in a gross mixture, *J. Acoust. Soc. Am.*, **26**(3), 329-331 (1954).
  - 13) 河西千尋, 奥山大太郎, 菊池喜充: 1/4波長の間媒質層を有する圧電変換器による短い超音波パルスの発生, 電子情報通信学会論文誌 A, **56-A**(3), 242-249 (1973).