

## 粒子分散型複合材料による空中超音波送波器用音響整合層の試作 Experimental study on composite materials of acoustic matching layer for air-coupled ultrasonic transducer

斎藤 和樹\*, 西平 守正\*, 今野 和彦\*  
Kazuki Saito\*, Morimasa Nishihira\*, Kazuhiko Imano\*

\*秋田大学 工学資源学部  
\*Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード: 空中超音波送波器(air-coupled ultrasonic transducer), 音響整合層(acoustic matching layer),  
複合材料(composite materials), 中空プラスチック球状粒子(thermoplastic microspheres),  
相互相関関数(cross correlation function)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科  
斎藤和樹, Tel: (018)889-2494, Fax: (018)837-0406, E-mail: saito@imano-lab.ee.akita-u.ac.jp

### 1. はじめに

超音波を利用した非破壊検査では, 多くの場合, 超音波を送受波する探触子と検査対象の間に水などの液体や密着性を向上させるために固体を介在させている. 探触子を測定対象に固着させたい場合を除いては, 非接触検査への期待から液体や固体を介在させずに空気中での超音波利用が望まれるが, 水を介在させた超音波非破壊検査と比較すると空気中での超音波利用は少ないのが現状である. その理由として, 空気中での超音波の送受波効率の低さが挙げられる.

超音波を発生させる圧電振動子から音響媒質に超音波を伝搬させる場合, 圧電振動子と音響媒質の音響特性インピーダンスの差が大きいと, 境界面で生じる音響的不整合が過大となり, 圧電振動子から音響媒質へ放射される超音波は極めて

小さくなってしまふ. すなわち圧電振動子の音響特性インピーダンスは約  $30 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  であるのに対し, 水は約  $1.5 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ , 空気は約  $0.0004 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  であり, 音響特性インピーダンスの差より, 水中に放射される超音波は全体の約 10% となるのに対し, 空気中に透過される超音波は全体の約 0.003% と送波効率が非常に低くなる. これに加え, 空気は周波数に依存する伝搬減衰が水と比べて非常に大きいため, 超音波が空気中を伝搬して圧電振動子で受波されるまでに大きく減衰してしまい信号の S/N が低くなる. このような理由から, 現在では空中超音波は送受波効率が低く利用分野に制限されている.

空中超音波の送受波効率の低さを改善する方法の一つとして, 音響整合層の利用がある. これは, 圧電振動子と超音波の音響媒質との間に, 最

適な特性を持つ音響整合層を挿入することによって、超音波の送受波効率を向上させる方法である。超音波音響媒質を水とした場合の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>)などに関しては既にいくつかの報告がなされている。しかし、音響媒質が空気の場合の音響整合層に関しては、その音響特性インピーダンスが小さいためほとんど検討されていないのが現状である。

本研究では、MHz帯における空中超音波送波器に最適な音響整合層について検討している。最初に、空中超音波送波器の音響整合層の最適特性を数値解析で求めた後、粒子分散型の整合層用材料の試作について述べる。さらに、試作した音響整合層用材料を用いて空中超音波の送受波実験を行い、送波効率に対する試作材料の効果について述べる。

## 2. 空中超音波送波器用音響整合層の数値解析

### 2.1 解析方法

空中超音波送波器のための音響整合層に最適な音響特性インピーダンスを数値解析から求める。超音波を発生する振動子と、その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、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。その中で、時間領域および周波数領域の両領域において有効な解析法として知られている伝送線路モデルに基づいた電気的等価回路<sup>1-4</sup>)を本研究では解析法として用いる。

圧電振動子とそれを駆動する電源、音響整合層、バックリング(空気)および超音波音響媒質(空気)からなる超音波送波系を Fig.1 に示す。図中の圧電振動子、音響整合層はいずれも超音波の波長に比較して無視できない長さであるため、電気的等価回路では分布定数回路として扱う必要があり、こ

の点を考慮して Fig.1 の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すと Fig.2 のようになる。

同図の伝送線路モデルをT型等価回路を用いた4端子回路で表すとFig.3のように表される。この回路の0-0'の電気端子に加えられる入力電圧 $E_i$ に対する機械的出力端3-3'での機械的出力 $F$ の比から伝達関数 $H(\omega)$ を算出する。Fig.3の4端子回路の伝達関数 $H(\omega)$ は(1)式で表される。

$$H(\omega) = \frac{F}{E_i} = \frac{\phi}{\left(1 + \frac{Z_0}{Z_{i1}}\right) \left(A_1 + \frac{B_1}{Z_{a1}}\right) \left(A_2 + \frac{B_2}{Z_{p1}}\right)} \quad (1)$$

この伝達関数  $H(\omega)$  を用いて、圧電振動子を駆動する電圧波形の入力スペクトル  $E(\omega)$  との積から出力スペクトル  $G(\omega)$  を求め、逆フーリエ解析することによって出力波形  $g(t)$  を得ることができる。

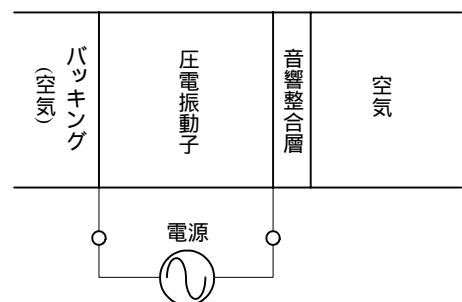


Fig.1 音響整合層を挿入した超音波送波系

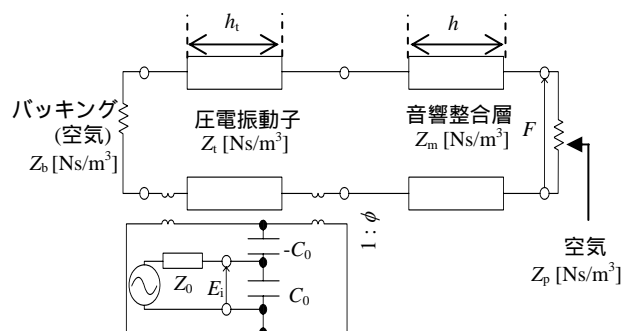


Fig.2 超音波送波系の伝送線路モデル

### 2.2 解析結果

前述した解析法を用いて、音響整合層の音響特性インピーダンス $Z_m$ を変えたときの超音波パル

スの出力振幅の解析結果をFig.4 に示す .同図の縦軸は音響整合層を用いなかった場合の出力振幅で正規化をして表している .また ,横軸は空気と圧電振動子の幾何平均インピーダンスである  $Z_g$  ( $= \sqrt{Z_t \cdot Z_p}$  ( $Z_t, Z_p$ : 圧電振動子, 空気の音響特性インピーダンス))で正規化している .音響整合層の音響特性インピーダンス  $Z_m$  の最適条件は  $Z_m/Z_g = 1.7$  ( $Z_m=0.19 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ )であることが求められたが , Fig. 4 から ,  $Z_m/Z_g=0.4 \sim 2.3$  の範囲においてほぼ一定の感度を得られることが確認できる .そこで本研究では  $Z_m/Z_g=0.4 \sim 2.3$  ( $Z_m=0.05 \sim 0.26 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ )を音響整合層の最適条件とする .

### 3 . 音響整合層材料の試作および特性測定結果

#### 3-1 音響整合層用材料の構成物質

解析から求められた音響整合層の音響特性インピーダンスの条件は ,  $Z_m=0.05 \sim 0.26 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  であるが , Table 1 に示すように ,  $1.0 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  以下の値を有する単一の材料は存在しない .そのため , 本研究では異種の材料を組み合わせで作製される複合材料に着目した .複合材料は , 構造上大きく 3 種類に分類される .その中の一つである粒子分散型複合材料は , 等方性でかつ幅広い音響特性を実現できるため , 超音波探触子に用いられる音響整合層やバックングの材料としての使用例がある<sup>5-7)</sup> .本研究でも音響整合層用材料の作製には , 粒子分散型複合材料を用いる .複合材料の構成物質として , 母体には固体で最も音響特性インピーダンスが小さく , 形状を容易に整形することができるシリコーンゴム (信越シリコーン KE-445-T)を用いる .また , 混合する粒子には , 直径が約 40  $\mu\text{m}$ で密度が非常に小さい(約 24  $\text{kg/m}^3$ ) , 中空プラスチック球状粒子(日本フィライト株式会社)を用いる .中空プラスチック球状粒子の粒子濃度(重量%)を調整して音響特性の異なる複合材料を作製する .

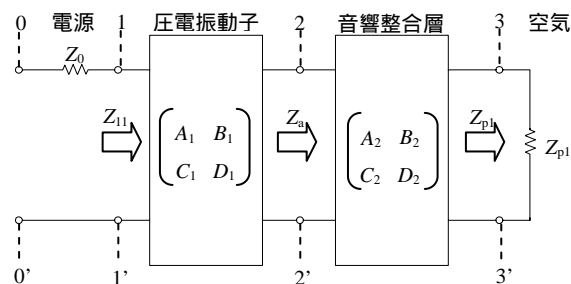


Fig.3 超音波送波系の2端子対回路モデル

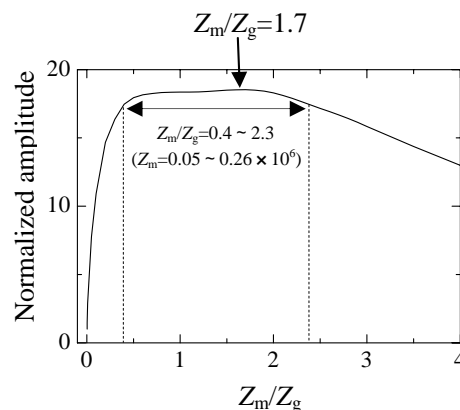


Fig.4 解析結果

Table 1 各種材料の音響特性インピーダンス

Materials	Characteristic acoustic impedance $\times 10^6 \text{ Ns/m}^3$
copper	45
iron	38
magnesium	10
epoxy resin	3.1
water	1.5
silicone rubber	1.0

#### 3-2 複合材料の作製方法

複合材料の作製方法は , 以下に述べるように二種の原料の混合と硬化過程からなる .シリコーンゴムと中空プラスチック球状粒子のそれぞれの重量%を変えて混合し , ハイブリッドミキサー (HM-500 KEYENCE 製)で , 攪拌 , 脱泡する .その後 , 四フッ化エチレン樹脂テープで挟み , 圧力をかけて複合材料の厚さが均一になるように調整する .厚さを均一にした後 , 温度 60 一定の条件のもと , 24 時間かけて複合材料を硬化させる .

### 3-3 複合材料の特性測定

両材料の重量%を調整して作製した複合材料の音響特性インピーダンス  $Z$  の算出を行う。音響特性インピーダンスは、以下の式で求められる。

$$Z = \rho \cdot c \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は複合材料の密度であり、 $c$ は複合材料の音速である。密度は、質量と体積から求める。音速はFig. 5 の測定系を用いて算出する。発振器 (Agilent 33250A)と増幅器(HAS 4101)を用い、周波数 1 MHz、振幅電圧 100 V<sub>p-p</sub>、サインバースト 5 波を送波用振動子に印加する。送波された超音波は、水中を伝搬して受波用振動子で受波される。受波波形をオシロスコープ(Agilent infinium 54845A)で表示し、波形の数値データをパーソナルコンピュータに取り込む。音速  $c$  は、水のみでの超音波伝搬時間と複合材料挿入時の超音波伝搬時間との差を用いて以下の式で求められる。

$$c = \frac{h}{t_0 + \frac{h}{v}} \quad (3)$$

ここで、 $h$ は材料の厚さ、 $t_0$ は伝搬時間差、 $v$ は水の音速である。この伝搬時間差  $t_0$  を精度良く求めるために、水の受波波形と複合材料がある場合の受波波形との相互相関関数を利用することにした。二つのデジタル信号、 $f_i, g_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$  の相互相関関数は、以下に示す式で定義される。

$$R_{fg}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \cdot g_{i+j} \quad (4)$$

この相互相関関数が最大値となる時間から、伝搬時間差  $t_0$  が求められる。

密度、音速を測定し、音響特性インピーダンスを算出した結果をFig.6 に示す。同図から、粒子濃度の増加に伴い、複合材料の音響特性インピーダンスが減少する傾向が確認された。また、粒子濃度を 8% 以上にすることで、音響整合層の条件 ( $Z_m=0.05 \sim 0.26 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$ ) に適した材料を作製することができた。

## 4. 音響整合層の超音波送波感度測定実験

### 4.1 測定方法

作製した複合材料を音響整合層として圧電振動子の送波面に装着し、超音波送波感度実験を行った。粒子濃度 3%、8%の複合材料を音響整合層として用いて送波感度を測定し、音響整合層がない場合と比較する。透過法を用いた測定系を Fig.7 に示す。

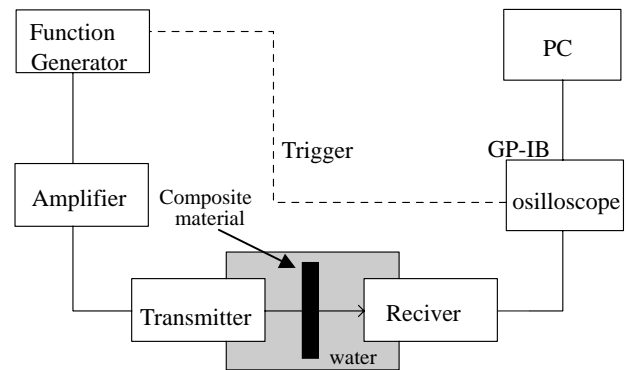


Fig.5 音速測定系

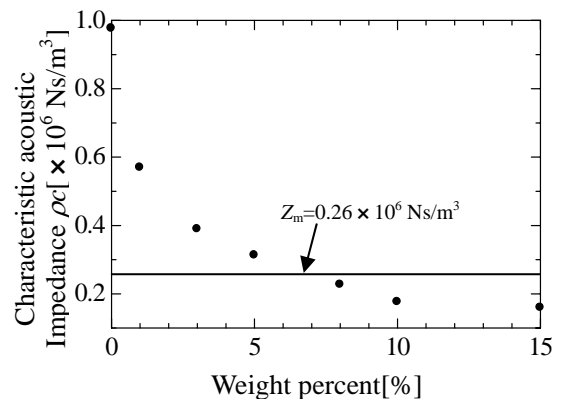


Fig.6 複合材料の音響特性インピーダンス測定結果

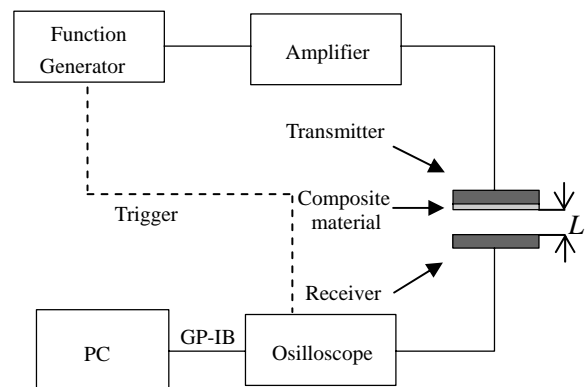


Fig.7 送波感度の測定系

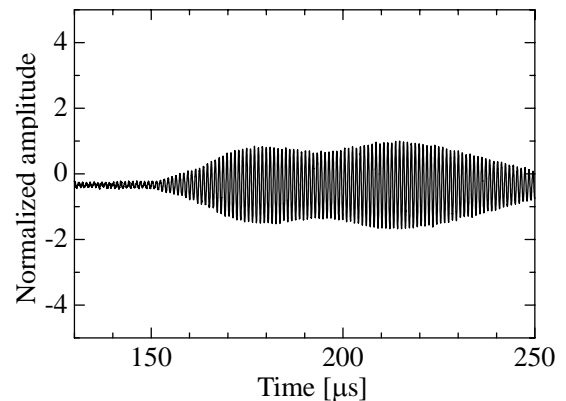
圧電振動子は、送波・受波とも共振周波数 1 MHz のものを使用する。発振器(Agilent 33250A)と増幅器(HAS 4101)を用い、周波数 0.98 MHz、振幅電圧 140 V<sub>p-p</sub>、サインバースト 20 波を送波用振動子に印加する。送波された超音波は、空气中を伝搬して受波用振動子で受波される。受波波形をオシロスコープ(Agilent infiniium 54845A)で表示し、波形の数値データをパーソナルコンピュータに取り込む。本実験では、送波用振動子と受波用振動子間の超音波伝搬距離 $L$ は、空气中の超音波の減衰、多重反射を考慮し 5 cm とした。

#### 4.2 結果および考察

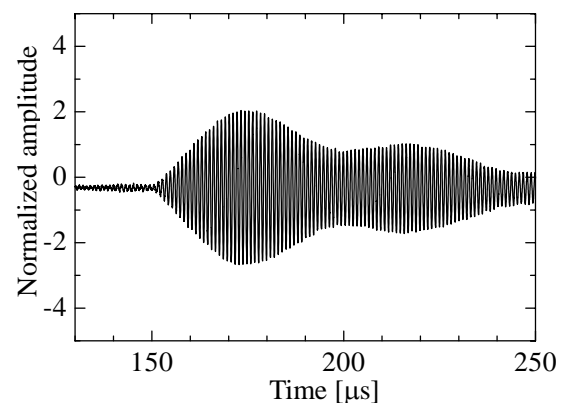
送波用振動子に音響整合層を装着して超音波を送受波した結果を Fig.8 に示す。縦軸は、音響整合層を用いなかったときの最大振幅値でそれぞれ正規化している。いずれの材料でも音響整合層として用いると、送波感度が向上している。また、2 種類の材料間で比較すると、音響整合層の最適条件に近い粒子濃度 8% の材料を用いた方が送波感度がよく、音響整合層を用いなかったときと比べて約 10 dB 向上している。音響整合層の音響特性インピーダンスが超音波の送波感度に大きく関係していることが確認できた。

しかし、解析結果と比較すると送波感度の向上量に違いが見られた。この原因として、複合材料の超音波減衰特性が挙げられる。解析では、音響整合層の減衰特性について考慮していないため、実験から得られた送波感度の向上量が、解析結果ほど得られなかったと考えられる。他の原因としては音響整合層の厚さが挙げられる。送波感度向上には音響整合層の厚さも重要であることが報告されている<sup>7)</sup>。解析では、音響整合層の厚さを一般的に知られている 1/4 波長の厚さ(約 0.1 mm)としているが、実験で用いた音響整合層をその厚さに均一にして振動子に装着することは困難で

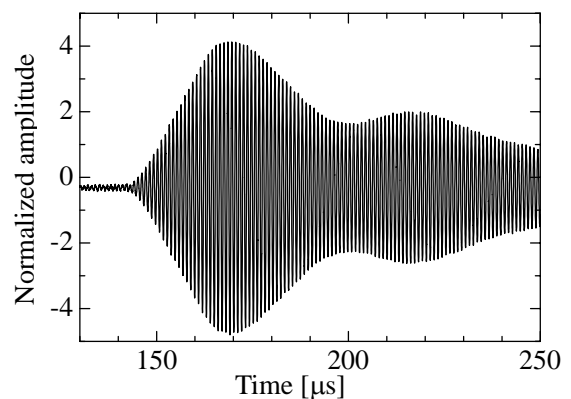
あった。解析と実験において、厚さが異なったことにより、送波感度の向上量に違いが見られたと考えられる。この音響整合層の最適な厚さは、条件によって 1/4 波長と異なると指摘されている<sup>8)</sup>。そのため、今後は複合材料の減衰特性を考慮に入れ、最適な厚さについて解析および実験の両方から比較・検討をおこない、さらなる送波感度向上を目指す。



a) 音響整合層未挿入の受波波形



b) 音響整合層挿入の受波波形(粒子濃度 3%)



c) 音響整合層挿入の受波波形(粒子濃度 8%)

Fig.8 送受波実験の受波波形

## 5. おわりに

本研究では、空中超音波送波器の音響整合層用材料の作製をシリコンゴムと中空プラスチック球状粒子で試みた。その結果、粒子濃度を8%以上に設定することで、解析から得られた音響整合層の音響特性インピーダンスの条件( $Z_m=0.05 \sim 0.26 \text{ Ns/m}^3$ )に適した材料の作製ができた。また、粒子濃度8%時の複合材料( $Z_m=0.23 \text{ Ns/m}^3$ )を音響整合層として用いると、送波感度を約10 dB向上することができた。

今後は、複合材料の減衰特性に関する検討および音響整合層の厚さに関する検討を考えている。

## 参考文献

- 1) M.Nishihira, K.Imano : “Simulation study of acoustic intermediate layer and electrical source impedance in an ultrasonic pulse system”, Acoust. Sci. & Tech. 25,3, pp203-206(2004)
- 2) 河西千広, 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, 第41巻, 第3号, pp237-244 (1972)
- 3) 河西千広, 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”, 電子通信学会論文誌, Vol.56-A, No.3, pp141-147 (1973)
- 4) 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, Vol.J78-C-I, No.11 pp.474-480 (1995)
- 5) J. Souquet, P. Defranould and J. Desbois : “ Design of low-loss wide-band ultrasonic transducers for noninvasive medical application ” , IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-26, pp.75-80 (1979)
- 6) C. S. Desilets, J. D. Fraser and G. S. Kino : “ The design of efficient broad-band piezoelectric transducers ” , IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-25, pp.115-125 (1978)
- 7) R. E. Collin : “ Theory and design of wide-band multisection quarter-wave transformers ” , Proc. IRE, 43, pp.179-185 (1955)
- 8) 河西千尋, 奥山大太郎, 菊池喜充 : “ 1/4 波長の中間層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, 検出 ”, 信学論(A) ,56-A , pp.242-249(1973)