

単層音響整合材による空中用P(VDF/TrFE)トランスデューサの開発と評価*

○高橋貞幸 (山形大学)

1 はじめに

現在水中で使用される超音波探傷器の超音波周波数は、微細な情報を得るため MHz 帯域が利用される。最近、この超音波探傷の分野で、空气中で直接物質内部の構造を観察できるようになってきた。この空中超音波方式は、ウォータバスが不必要であるため、超音波による非破壊検査には非常に望ましい。現在、この方式で用いられる超音波周波数は kHz 帯域が殆どである。この理由は次の2点为主である。①超音波を送受信する圧電体と空気との境界で大きく減衰する。例えば、超音波の圧電素子で良く用いられる PZT の場合、約 86dB 減衰する。②圧電振動子からの音波は空气中では大きく減衰する。この減衰は周波数の2乗に比例して大きくなる。2MHz の超音波の場合は、約 6dB/cm であり、水 (20°C) と比較して約 1/1000 と極度に減衰する。加えて対象物による減衰も加算されるため、受信信号は微弱になり検出は困難である。このため、空气中および対象物で減衰が小さい kHz 帯域を用いる。しかし kHz 帯域では波長の関係から分解能は cm 単位である(40kHz の場合で約 1cm)。そこで①及び②の理由から高効率のトランスデューサは必要不可欠になる。

空气中で 1mm 以下の分解能を得るためには、MHz 帯域で動作する高効率の圧電振動子が必要であるが、現在、空気の音響インピーダンス値に近く、高効率で動作する圧電材料は未だ発見されていない。筆者らは、この問題に対処するため、できるだけ空気の音響インピーダンス値に近い圧電高分子の P(VDF/TrFE)を用い、加えて音響整合層を付加することで MHz 帯域で動作する超音波トランスデューサの開発とその評価を行った。

2 P(VDF/TrFE)の音響整合層について

2MHz 用 P(VDF/TrFE)圧電振動子に、音響整合層としてポリエステル(厚み約 100 μ m)が

有効であることは判明していた[1,2]。本研究では更に高効率の P(VDF/TrFE)トランスデューサとするため、シリコーン材(ゴム)を音響整合層に用いた場合の動作と評価を行なった。

Figure 1 に ϕ 23mm 中心周波数 2.56MHz(厚み 300 μ m の銅板バッキングプレート)P(VDF/TrFE)圧電振動子上に、前述のポリエステルとシリコーンゴム(厚み約 100 μ m)を音響整合層としたときの Admittance-Phase/Frequency の動作特性(接着層を含む実測値)をそれぞれ示した。

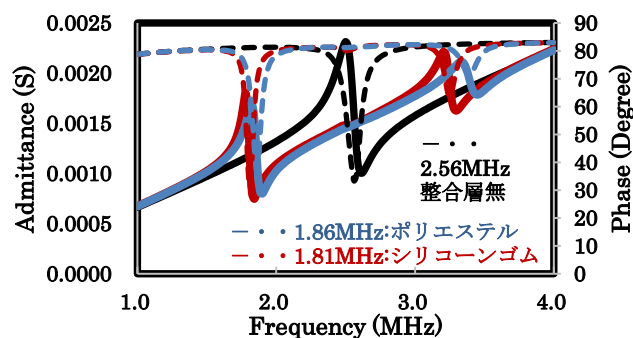


Figure 1. Observed the admittance (s)- Phase (Deg) / Frequency response curves of the P(VDF/TrFE) piezoelectric element.

Black-line is normal P(VDF/TrFE) :Blue-line polyester film and Red-line silicone rubber.

Fig.1 の結果から約 1.8MHz 付近に中心周波数が移動し、多少シリコーン材の方が性能向上していることが分かる(Phase 値で 7° 向上)。

2.1 シリコーン材(ゴム)による音響整合層について

Fig.1.の結果から、同様に 2.6MHz(ϕ 23)に動作中心周波数もつ P(VDF/TrFE)圧電振動子の Admittance-Phase/Frequency の実測値と Mason の等価回路から計算したシミュレーション結果を Fig.2 に示した。実測値と計算値は良く一致する。Figure 3 に、Fig.2 に示した圧電振動子上にシリコーンゴムを音響整合層に用いた

* Development and evaluation of air coupled-P(VDF/TrFE) transducers with a single additional acoustic matching layer, by TAKAHASHI, Sadayuki(Yamagata University).

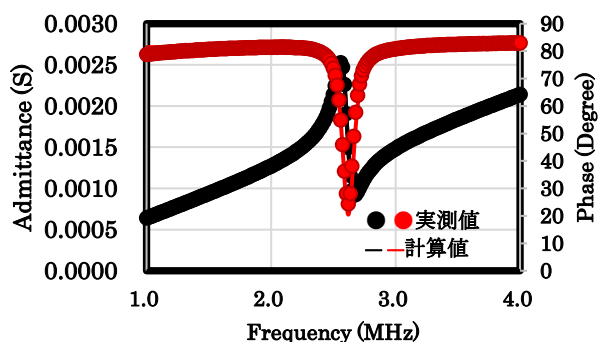


Figure 2. Observed the admittance-Phase/Frequency response curves of P(VDF/TrFE) and calculated from Mason's equivalent circuit based.

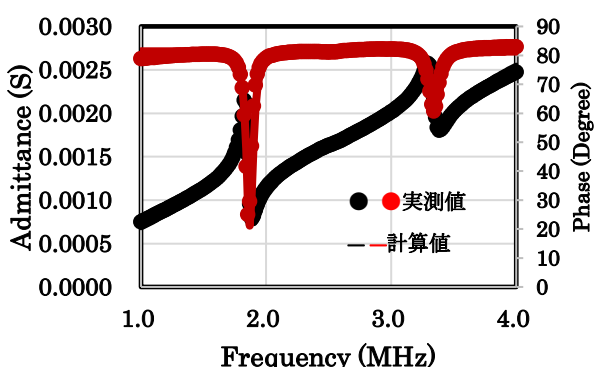


Figure 3. Simulation and observed the admittance-Phase/Frequency response curves of P(VDF/TrFE) with add an acoustic matching layer of Si-rubber sheet (Including adhesive).

動作特性を示した。実測値および計算値共よく一致する。この計算に用いた主要ファクターを Table.1 に示した。接着層はメーカー公表の一般的な数値と計算値から算出した。

Table 1. Electromechanical properties of P(VDF/TrFE)(75mol%VDF) and Silicon rubber sheet.

	P(VDF/TrFE)	Si-rubber sheet
Density (10^3kg/m^3)	1.89	1.1
Sound speed (km/s)	2.40	1.1
Acoustic-impedance ($10^6\text{kg/m}^2\text{s}$)	4.53	1.21
Stiffness-constant $C^D(10^9\text{N/m}^2)$	11.3	
Coupling factor k_t	0.23	
Dielectric constant ϵ^s/ϵ_0	6.0	
Mechanical loss tangent $\tan \delta_m$	0.03	0.03
Dielectric loss tangent $\tan \delta_e$	0.15	

2.2 シリコンゴム音響整合層 P(VDF/TrFE) トランスデューサ

Figure 3 の圧電振動子から平面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサを2つ製作し、それぞれ送信用・受信用の送受信分離方式で挿入損失を測定した(対面式:間隔 $d=12\text{mm}$)。このトランスデューサの動作特性(挿入損失)を Figure 4 に示した。50dB(1.84MHz)程度の高効率トランスデューサであることが判明した。

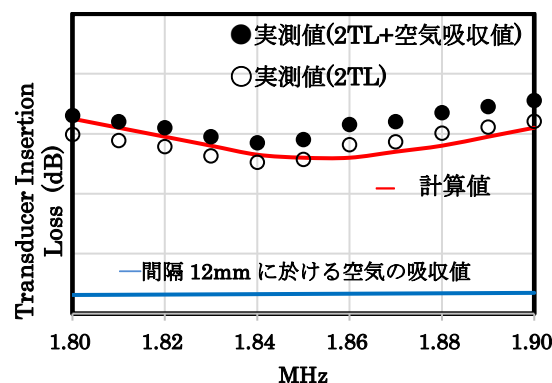


Figure 4. Measured [closed circles (2TL+AL) and open circle (2TL)] and calculated (line-red) frequency dependence of two-way insertion loss (2TL) for (PVDF/TrFE) transducers.

3 おわりに

本研究では、高性能化のための P(VDF/TrFE)トランスデューサの音響整合層として有効と予想したシリコン材による、トランスデューサの開発を行い実証した。

これまでの研究経過で、ポリエステル材も音響整合層として有効である。この二つの相違は Fig.1 に示した。本稿には記載していないが、Fig.1 から計算したポリエステル材によるトランスデューサの性能は、シリコン材と比較して 3dB の低下に過ぎなかった。しかし、数 dB の効率でも空気中では必要である。また、接着剤の影響も本研究から判明した。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科学研究費補助金基盤研究 C(課題番号:22K04118)の援助下で行われた。

参考文献

- [1] 高橋貞幸, 音響論 (秋), 51-52, 2021.
- [2] 高橋貞幸, 音響論 (秋), 15-16, 2023.