

周辺に段差を持つ圧電バイモルフ振動板の振動特性*

牧野 昭二・一ノ瀬 裕**

(NTT 電気通信研究所)

(昭和 61 年 7 月 2 日受理)

1. まえがき

近年の電子技術の進歩に伴い、電話機回路の中に小型・高性能な増幅器を経済的に組み込むことが容易になった。その結果、送話器、受話器、サウンドなどの電話機用電気音響変換器は、従来のように高感度に設計する必要性が少なくなり、薄形で低価格なものが実用化され、デザインの多様化を指向した電話機用として役立てられている。このような変換器の一つに、圧電板と金属板を接着したバイモルフ構造の振動板を用いた圧電形電気音響変換器がある。

このバイモルフ構造の振動板(圧電バイモルフ振動板)は、平板のたわみ振動を利用しており振動板全面が変形する。このため、振動板の周辺をクランプする際のクランプ径やクランプ圧力などの微小な変動によって感度、共振周波数のばらつきが大きくなる欠点がある¹⁾。この欠点を除くには、従来の電話機用の電磁形・炭素形の電気音響変換器^{2), 3)}に用いられている振動板(成形振動板)と同様、周辺に階段状の段差を設けることが良いと考えられる。しかし、成形振動板の段差の効果はもとよりバイモルフ振動板の段差の効果についても検討は行われていない。

従来、周辺に段差を持たない圧電バイモルフ振動板については、薄い平板の曲げ理論⁴⁾を適用した振動解析が行われてきた^{5), 6)}。これは、バイモルフ部と金属円環部で運動方程式を立て、境界条件を満足するように変位を求める解析手法である。この解析手法を周辺に段差を持つ圧電バイモルフ振動板の解析に適用するためには、段差を定式化して表現することが必要となるが、これは困難である。そこで、任意の形状の物体に適用することが可能な有限要素法を用いて、周辺に段差を持つ圧電バイモルフ振動板の振動特性を解析し⁷⁾、同時に実験を行い段差の効果を明らかにすることを試みた。その結果、送話器、受話器、サウンドのいずれの動作においても、

圧電バイモルフ振動板の周辺に段差をつけその外側をクランプすることにより、クランプ条件の変動に対する感度、共振周波数のばらつきを著しく小さくできることが明らかになった。

2. 圧電バイモルフ振動板を用いた電気音響変換器の感度

2.1 送話器感度

Fig. 1(a)に示すように振動板に音圧 p_T が加わり出力電圧 V_T が得られるときに、送話器の感度 q_T を(1)式で定義する。

$$q_T = 20 \log_{10} \frac{V_T/V_0}{p_T/p_0} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ただし、 V_0 : 基準電圧(V)、 p_0 : 基準音圧(Pa)

この出力電圧 V_T は圧電板に生じる電荷 Q 及び圧電板の静電容量 C を用いることにより、(2)式で与えられる。

$$V_T = Q/C \quad (2)$$

ここで、 Q 及び C は(3)、(4)式で与えられる⁸⁾。

$$Q = \frac{1+h_1/h_2}{1+E_1h_1/E_2h_2} \pi h_2 d_{31} \frac{E_1}{1-\mu_1} r \left. \frac{dw}{dr} \right|_{r=b} \quad (3)$$

ただし、

r : 径方向距離

d_{31} : 圧電定数

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s \pi b^2}{h_1} \quad (\text{静電容量}) \quad (4)$$

ただし、

ϵ_0 : 真空中の誘電率 (8.855×10^{-12} F/m)

ϵ_s : 圧電板の比誘電率

圧電板と金属板の材料定数及び寸法は Table 1 に示す記号で表している。

2.2 受話器感度

Fig. 1(b)に示すように入力電圧 V_R が印加され出力音圧 p_R が得られるときに、受話器の感度 q_R を(5)式で定義する。

$$q_R = 20 \log_{10} \frac{p_R/p_0}{V_R/V_0} \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

ここで、入力電圧 V_R を印加したときに圧電板の周端に

* Vibration characteristics of a piezoelectric bimorph diaphragm with a step-shaped edge.

** Shoji Makino and Yutaka Ichinose (NTT Electrical Communications Laboratories, Yokosuka, 238)

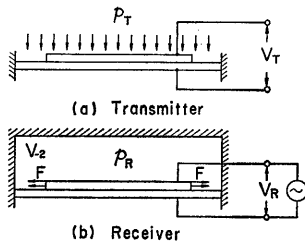


Fig. 1 Electroacoustic transduction of piezoelectric bimorph diaphragm.

Table 1 Symbols for material constants and dimensions.

	Young's modulus	Density	Poisson's ratio	Thickness	Radius
Ceramic	E_1	ρ_1	μ_1	h_1	b
Brass	E_2	ρ_2	μ_2	h_2	a

作用する径方向の力 F は⁵⁾,

$$F = d_{31} \frac{V_R}{h_1} \frac{E_1}{(1-\mu_1)} \quad (6)$$

であり、また振動板の体積変位 U は、変位 w を振動板の全周にわたって積分することによって(7)式のように求められる。

$$U = \int_0^a 2\pi r w dr \quad (7)$$

このとき容積 $V-2$ の気室内に生じる音圧 p_R は(8)式で求められる。

$$p_R = \kappa U / V-2 \quad (8)$$

ただし、

κ : 空気の体積弾性率 (1.42×10^6 N/m)

感度の計算式から明らかのように、クランプ径の変化による感度の変化を知るには、振動板の変位 w を知ることが重要となる。本報告では、この w を第1章で述べた理由により、有限要素法を用いて求める。なお、サウンドは受話器と同じ動作をするため省略し、送話器及び受話器について計算と実験を行うこととした。

3. 有限要素法を適用する場合の要素分割方法と計算精度

有限要素法⁶⁾を適用する場合には、要素の種類、要素分割の方法及び分割数が計算結果に大きな影響を与える。そこで、圧電板がない場合(すなわち周辺固定の単純な円板)について要素分割数と計算精度との関係について検討を行った。要素としては、最も単純な3角形断面を持つ1次の環状要素を用いた。

圧電板がない振動板に等分布荷重が加わった場合、円板の曲げ理論から、原点から r の距離の点の変位 w 及び中心部変位 w_0 は、

$$w = \frac{3(1-\mu_2^2)}{16 E_2} p_T \frac{(a^2-r^2)^2}{h_2^3} \quad (9)$$

$$w_0 = \frac{3(1-\mu_2^2)}{16 E_2} p_T \frac{a^4}{h_2^3} \quad (10)$$

で与えられる⁴⁾。

次に、有限要素法を用いて、(9)、(10)式に対応する変位 w_F, w_{0F} を求めた。厚み方向の分割数を2もしくは4として、径方向の分割数を変化させたときの3角形断面の縦/横比 (l_v/l_H) に対する w_F/w_0 を Fig. 2 に示す。また、中央部変位で正規化した変位分布 $w/w_0, w_F/w_{0F}$ を Fig. 3 に示す。

Fig. 2, 3 から、環状要素の断面の縦/横比がほぼ1となるように分割すれば板厚に関係なく、1) w_{0F} は、 w_0 の約90%の値に飽和すること、2) 変位分布は平板の曲げ理論に基づく結果とほぼ一致すること、が分かる。これより、厚み/半径が $1/150$ になるような振動板の場合には、厚み方向に4分割、径方向に600分割して計算すればクランプ径の影響を調べるにはほぼ十分と考えられる。今回検討した圧電バイモルフ振動板では、周辺部の板厚は中央部の約 $1/2$ であり、中央部で4分割した場合

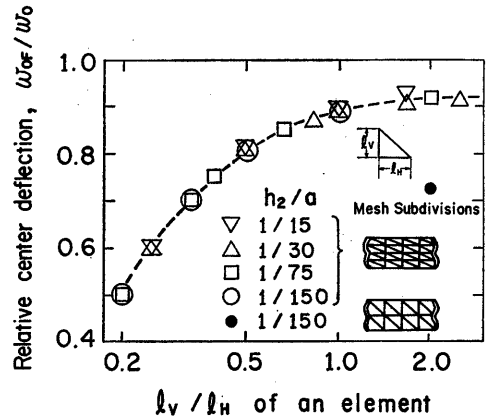


Fig. 2 Relationship between l_v/l_H of an element and relative center deflection. Diaphragm dimensions; a : radius, h_2 : thickness.

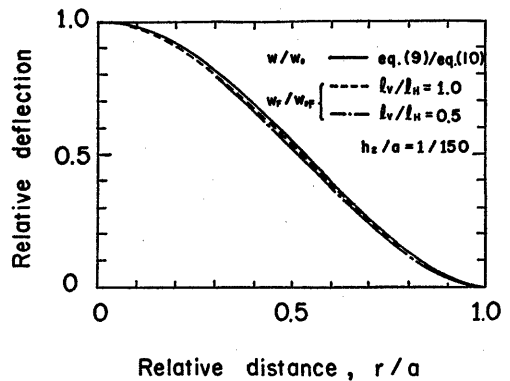


Fig. 3 Relative deflection of a simple uniform diaphragm under simple uniform pressure.

周辺部では2分割にしかならず、誤差は大きくなると考えられる。しかし、厚み方向の分割数を増加させることは、今回使用した計算機の記憶容量・計算時間の制約上困難であることと、中央部変位で正規化すれば有限要素法によって得られた結果は(9)式の結果と良く一致していることから、周辺に段差をつけることの効果を明らかにできると判断した。

4. 計算と実験

振動板のクランプ条件の変動要因としては、クランプする材料のクランプ径、傾き、偏心、クランプ圧力の不均一などが考えられる。ここでは、計算し易さの点でクランプ径を取り上げ、クランプ径を軸対称性を保ったまま変化させ、振動板の変位分布、感度及び共振周波数がどのように変化するかを検討した。

使用した振動板の形状を Fig. 4 に示す。type A は周辺が平坦な場合（「段差なし」）、type B, type C は周

辺に段差を設けた場合（「段差あり」）であり、type B と type C とでは、圧電板の接着方向と段差の方向が逆になっている。

振動板の材料定数を Table 2 に、有限要素法を用いる際の要素分割例を Fig. 5 に、感度及び共振周波数の測定系を Fig. 6 に示す。感度の測定は、共振周波数（約 1 kHz）よりも十分に低い周波数（0.2 kHz）で行った。なお、計算及び実験には次の寸法の振動板を使用した。

$$a = 14.5 \text{ (mm)}$$

$$\Delta a = 0 \sim 1.5 \text{ (mm)}$$

Table 2 Material constants.

	Young's modulus N/m ²	Density kg/m ³	Poisson's ratio
Ceramic	6.5×10^{10}	7.7×10^3	0.33
Brass	10.5×10^{10}	8.4×10^3	0.37

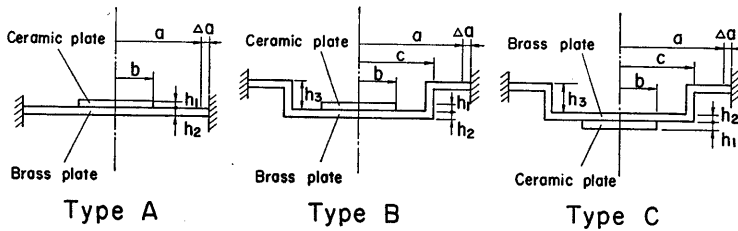


Fig. 4 Configuration of piezoelectric bimorph diaphragm.

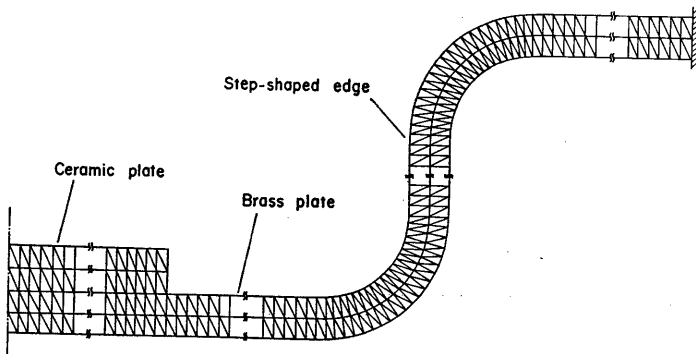


Fig. 5 Mesh subdivisions.

A diaphragm is divided into 4856 triangular elements.

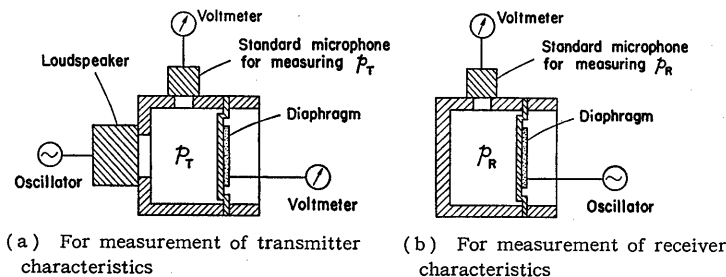


Fig. 6 Measuring system configurations.

- $b=11.5$ (mm)
- $c=14.1$ (mm)
- $h_1=0.12$ (mm)
- $h_2=0.1$ (mm)
- $h_3=0.9$ (mm)

5. クランプ径の影響

5.1 感度への影響

クランプ径の変化に対する感度の変化 Δq を (11) 式のように定義する。

$$\begin{aligned} \Delta q_T &= q_{T(a+\Delta a)} - q_{T(a)} \text{ (dB)} \\ \Delta q_R &= q_{R(a+\Delta a)} - q_{R(a)} \text{ (dB)} \end{aligned} \tag{11}$$

ただし、

Δa : クランプ径の変動量

送話器及び受話器について、 Δq と $\Delta a/a$ ($0 < \Delta a/a < 0.1$) との関係を計算と実験により求めた。結果を Fig. 7 に示す。

送話器及び受話器のいずれの動作においても、クランプ径が10%変動したときに、「段差なし」の場合 Δq は 2~3 dB であるのに対し、「段差あり」の場合 Δq は 1 dB 以下となることが分かる。また、実験値の標準偏差 ($N=10$) も「段差なし」に比べて「段差あり」で半減している。すなわち、段差を設けてその外側をクランプすることがクランプ径の変動による感度のばらつきを小さくするのに有効であることが分かる。

5.2 変位分布への影響

中央部変位で正規化した変位分布の計算結果を Fig. 8 に示す。 $\Delta a/a=0$ と $\Delta a/a=0.1$ における変位分布は、「段差なし」では、クランプ径の差がそのまま変位分布の差となって現れている。これに対して「段差あり」ではほとんど変化なく、あたかも段差部がクランプされているように振動することが分かる。

クランプ径を変化させたときの「段差なし」と「段差あり」の感度変化の違いは、両者のこのような変位特性

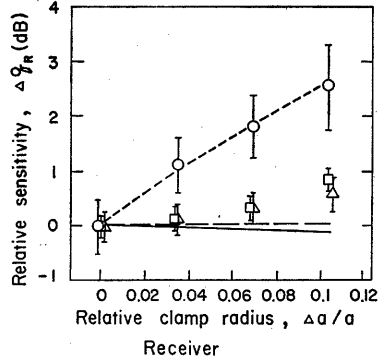
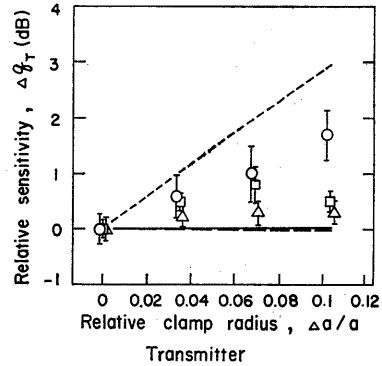


Fig. 7 Relationship between relative clamp radius and relative sensitivity. Calculated values are shown for Type A (.....), Type B (—), Type C (---), and experimental values for Type A (O), Type B (□), Type C (Δ). I: Standard deviation ($N=10$).

に基づくものと考えられる。

6. 共振周波数への影響

「段差あり」では上記のように、クランプ径が変化しても変位分布がほとんど変化しない。このことは、等価質量、等価スチフネス更に共振周波数もほとんど変化しないことを示唆している。クランプ径の変化に対する共

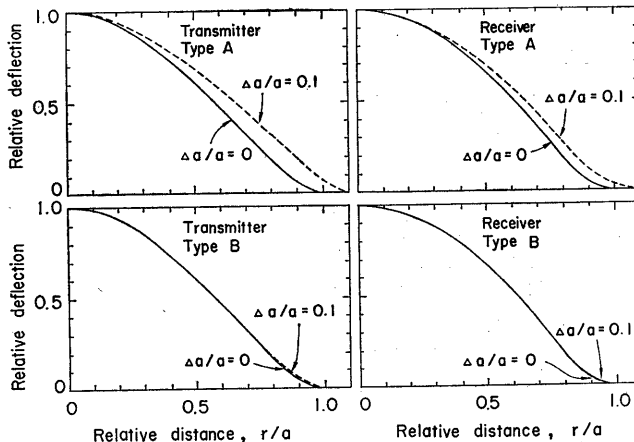


Fig. 8 Calculated curves of relative diaphragm deflection.

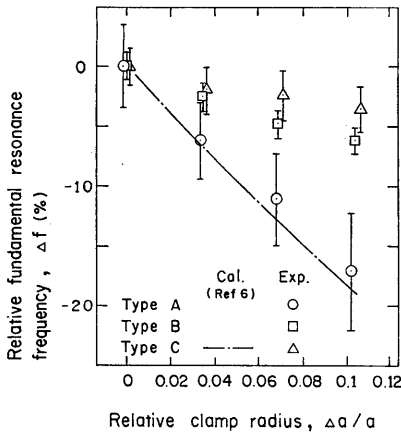


Fig. 9 Relationship between relative clamp radius and relative fundamental resonance frequency. I : Standard deviation (N=10).

振周波数の変化 Δf を(12)式のように定義する。

$$\Delta f = \frac{f_{(a+\Delta a)} - f_{(a)}}{f_{(a)}} \quad (12)$$

Δf と $\Delta a/a$ ($0 < \Delta a/a < 0.1$) との関係の実験結果及び type A について文献 6) の式を用いて計算した結果を、Fig. 9 に示す。クランプ径が10%変動したときに、「段差なし」の場合 Δf は15~20%であるのに対し、「段差あり」の場合 Δf は約5%となることが分かる。また、実験値の標準偏差 ($N=10$) も「段差なし」に比べて「段差あり」で半減している。すなわち、段差を設けてその外側をクランプすることがクランプ径の変動による共振周波数のばらつきを小さくするのにも有効であることが分かる。

7. 考 察

以上の計算及び実験結果から、振動板の周辺に段差を設けることによりクランプ径が変化した場合の感度及び共振周波数の変化を著しく小さくできることが明らかになった。この原因である段差の振舞いの詳細とその影響

について以下に述べる。圧電バイモルフ振動板を送話器、受話器として動作させたときの振動板の変形形状を拡大して Fig. 10 に示す。

送話器の場合には、振動板に音圧が加わり圧電板側に曲率中心を持つように変形したとき、中立面の外側に位置する金属板が伸びるため、振動板の外周(段差)部分には外向きの力が作用する。反対側に変形したときには、これと逆方向の力が作用する。これに対して受話器の場合には、圧電板に電圧が加わり圧電板が縮むことにより圧電板側に曲率中心を持つように変形したとき、金属板も圧電板に引っ張られて縮む。この縮みは、振動板が変形するのに伴って生ずる伸びよりも大きいため、振動板の外周(段差)部分には内向きの力が作用する。負の電圧が加わった場合にはこれと逆の動作をする。

このように、送話器、受話器のいずれの場合でも、振動板の外周部には径方向の力が作用し、「段差なし」の場合にはこの力を周辺クランプ部で支えることとなる。これに対して、「段差あり」の場合には、段差が径及び軸方向に振動し、また回転することによりこの力を吸収し、あたかも段差のすぐ外側でクランプしたようになり、段差内部の振動と外部の振動が分離され、クランプ部の影響を受けにくくなるものと思われる。

なお、段差部は、外向きの力が作用すれば外・下側に、内向きの力が作用すれば内・上側に変位するので、type B と type C では振動板の変形と段差の変形の相対関係は逆になる。しかし、この違いによる $\Delta q, \Delta f$ の差はほとんど認められず、実用上はどちらのタイプでもよいと考えられる。

8. ま と め

圧電バイモルフ振動板の周辺に段差を設ける効果を、有限要素法を用いた数値解析と実験によって確認し、送話器、受話器、サウンドともに、クランプ径が変化しても変位、感度及び共振周波数がほとんど変化しないことを明らかにした。また、これは周辺の段差が径及び軸方

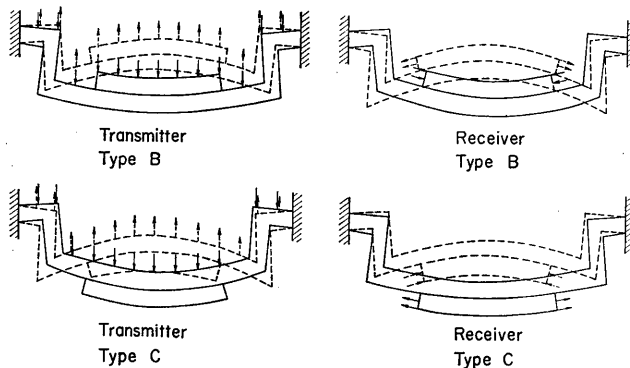


Fig. 10 Behavior of a step-shaped edge.

向に振動し、また回転することによって、あたかも段差部でクランプしたようになり、段差内部の振動と外部の振動が分離されるためであることを、明らかにした。

周辺に段差を持つ圧電バイモルフ振動板は、その振動特性の特徴から、クランプ径の変化だけでなくクランプ圧力の不均一、偏心、クランプ部の傾きなどに対しても有効と思われる。実際の製造では、複数の部品を組み合わせで構成されるクランプ部の位置合わせの精度に比べ振動板の各部寸法は精度良く管理できる。このため、段差を設けることによって、クランプ部の位置合わせの不具合による感度及び共振周波数の変動を小さくおさえられることの工学的意味は極めて大きい。

本検討における段差の寸法は、実際の振動板について製造性等の面から選ばれたものである。最適な段差の寸法、形状は、今後の課題である。なお、周辺に段差を持つ圧電バイモルフ振動板は、すでに電話機^{9),10)}に組み込まれて数多く使用され、感度、共振周波数の偏差が少なく安定に動作することが確認されている。

謝 辞

終わりに、日頃ご指導いただく複合端末研究室川嶋

室長、及川主幹研究員、飛田主任ほかの方々に感謝します。

文 献

- 1) 飛田瑞広, 一ノ瀬裕, “圧電バイモルフ振動板のクランプ条件の影響に関する一検討,” 音講論集 3-4-4 (1981.10).
- 2) 大賀寿郎, 白井誠一, 飛田瑞広, 野村博昭, “601 形電話機用送受話器,” 通研実報 27, 1205-1214 (1978).
- 3) 白鳥嘉勇, 飛田瑞広, 大賀寿郎, “M-71 形電話機用電磁変換器,” 通研実報 28, 851-865 (1979).
- 4) S. P. Timoshenko and S. W. Krieger, *Theory of Plates and Shells* (McGraw-Hill, New York, 1959).
- 5) 富田泰夫, 山口 強, “圧電形受話器の検討,” 通研実報 14, 703-742 (1965).
- 6) 一ノ瀬裕, 飛田瑞広, “圧電バイモルフ振動板の設計,” 音響学会誌 42, 441-446 (1986).
- 7) 一ノ瀬裕, 牧野昭二, “周辺に段差を持つ圧電バイモルフ振動板の振動特性について,” 音講論集 1-6-5 (1983.10).
- 8) O. C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method* (McGraw-Hill, New York, 1977).
- 9) 一ノ瀬裕, 飛田瑞広, “電子化電話機用電気音響変換器の設計,” 通研実報 33, 1285-1293 (1984).
- 10) Y. Ichinose and M. Tobita, “Piezoelectric ceramic transducers for electronic telephone sets,” Proc. I. M. F. 6, J. J. Appl. Phys. 24, Supplement 24-2, 28-30 (1985).