

片持ち圧電板振動子に関する研究

職業能力開発総合大学校東京校 栗山好夫
 笹川宏之
 本多浩

Study on the Cantilever Piezoelectric Plate Resonator

Yoshio KURIYAMA, Hiroyuki SASAGAWA and Hiroshi HONDA

要約 本研究は群馬県内にある電子機器メーカーとの共同研究から始めたものである。企業では携帯電話の発音体に圧電板振動子を用いているが、様々に要求される仕様に対し、実物モデルを多数の試作と実験により対応している。これらの開発に際し、開発期間の短縮とコストの低減を目的にCAEによる試作が期待されている。

この発音体に求められているのは高音圧化（振動の振幅を大きくすること）と低周波数化（振動子の固有振動数を下げること）である。この発音体に用いられている振動子は2つの圧電セラミックスに挟まれた薄い金属板で構成され、この固有振動数とそのモードを制御することが重要となる。そのため、圧電板振動子とこれに拘束条件を与えるシリコンゴムを設計対象として、このモード解析および周波数応答解析で評価することにより性能を予測することができる。

本報告はこの発音体の主要構成要素である圧電板振動子部分について、シリコンゴムを外した片持ち状態での圧電板振動子モデルのモード解析を行い、実測値と比較して良好な結果が得られたので、これを報告する。

はじめに

携帯電話等に用いる圧電発音体（圧電レシーバ等）において、圧電板振動子を用いるにあたりこれを簡易に支持する必要がある。この支持方法の一つとしてシリコンゴムを主成分とする接着剤により固定する方法があるが、その支持部の形状が発音体の性能に大きく影響を及ぼすことはあまり知られていない。この部位の解明のためには、シリコンゴムの荷重に対する挙動と圧電セラミックスの挙動を合わせて解析する必要がある。また、その他の圧電応用デバイスにおいてもシリコンゴムによる支持方法が用いられているが、近年の軽量化や高精度化にともないこれらの挙動解析が望まれている⁽¹⁾。

図1に製品化されている圧電レシーバの例を示す。また、この圧電レシーバの振動モードをレーザホログ

ラフィシステムにより測定した振動モードを図2に示す。

圧電レシーバの性能は、人間の可聴範囲の周波数をSPL（音圧レベル）dBで評価して行われているが、設計上は図3に示される2つの圧電セラミックスに挟まれた薄い金属板で構成された圧電板振動子の固有振動数とそのモードを制御することが重要となる。そのため、圧電板振動子とこれに拘束条件を与えるシリ

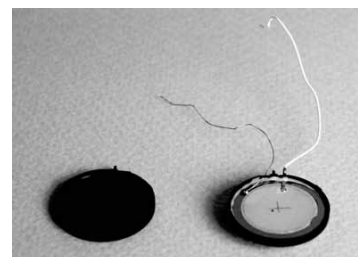


図1 圧電レシーバ

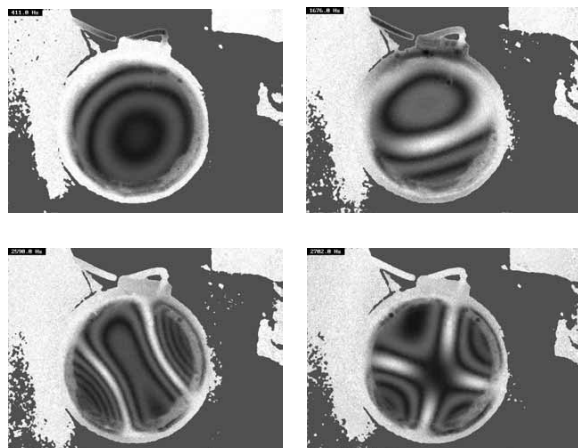


図2 圧電レシーバの振動モード

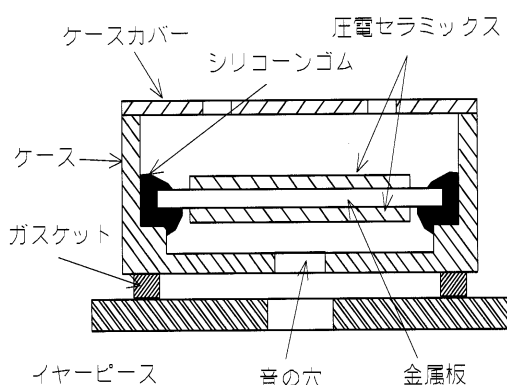


図3 圧電レシーバの基本構造図

コーンゴムを設計対象として、このモード解析および周波数応答解析で評価することにより性能を予測することができる。

そこで著者らは、この数値計算モデルを段階的な実験を経て順次作成することと、他の圧電応用デバイスへの適用も考慮して、実物の円形状の圧電板振動子ではなく、より普遍性のある一般的な長方形の圧電板振動子を用いて、これをシリコンゴムにより支持した実験モデルを作成して、電圧を負荷したときの変位分布をレーザホログラフィシステムにより求めた。また、このモデルで有限要素静的解析を行い実験結果と比較したところ、良好な結果が得られた⁽²⁾。このときの実験用圧電板振動子を図4に示す。

さらにこのモデルでの動的解析を進めるにあたり、シリコンゴムによる動的特性が明確でないため、こ

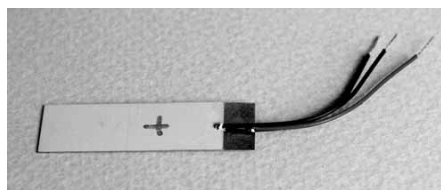


図4 実験用圧電板振動子

の影響を避けたモデル、すなわちシリコンゴムをはずした圧電板振動子のみで、支持条件が単純な本研究の片持ち支持構造を検討することにした。また、この構造はアクチュエータの使用例としてカメラのシャッター、圧電リレー、圧電ファン、圧電ポンプなどがあり、圧電ポンプなどでは負荷電流の周波数を共振周波数に一致させ、大きな駆動力を得る構造にするため精度の良い動的解析技術が必要とされているモデルでもある。

実験用圧電板振動子

図5に示す実験モデルは、薄い金属板（長さ35mm×幅W×厚さ0.05）の上下面を圧電セラミックス（長さ30×幅W×厚さ0.155）2枚で挟んだ長方形のバイモルフ形状にして、この圧電板振動子をセラミックスメーカー（富士セラミックス社）に依頼して製作した。なお、各セラミックスの上下両方のXY面には膜厚が約8μmの銀電極が塗布してあり、この電極に半田付けにより各セラミックス端部に1本づつ、計2本のリード線を付けた。また、金属板（りん青銅板）の端部にも1本のリード線を付けた。このりん青銅板と2つのセラミックスは、エポキシ系の接着剤により平均膜厚が数μmで表面あらさにより部分的に金属接触状態を保つように熱と圧力で接合されている。なお、各セラミックスの厚さ0.155は、この電極とエポキシ系の接着剤を含む状態で測定してある。また、この振動子では電極面の法線（Z軸）方向に分極（高電界印加により特定方向に揃え圧電性を与える）処理をしている。

実験用圧電板振動子は、幅Wを3種類（W=10、20、30）に変えたものを図5（a）と（b）に示すように拘束して片持ち状態にした。このモデルを順にW10CANT、W20CANT、W30CANTモデルと名称する。なお、図5（a）に示す構造図では、リード線、電極および接着剤の表示を省略している。

図6は本実験に用いたバイモルフ振動子の屈曲原理図である。図に示すようにこのバイモルフ振動子の構造は、2枚の圧電セラミックスの間にシムと呼ばれる金属板などの補強材を挿入して機械的強度を増すようにしている。また、この振動子は電気的な接続方法によりシリーズ型とパラレル型があり、前者は高感度であるが、静電容量範囲が小さく、後者は静電容量範囲が大きく高容量であるため大きな変位が得られる。本構造の振動子ではリード線による結線方法によって図

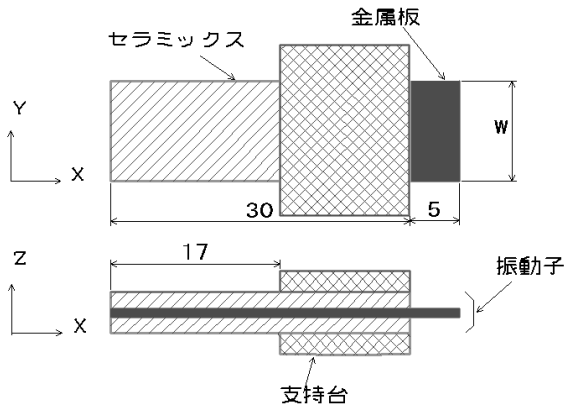


図5 (a) 実験用モデル

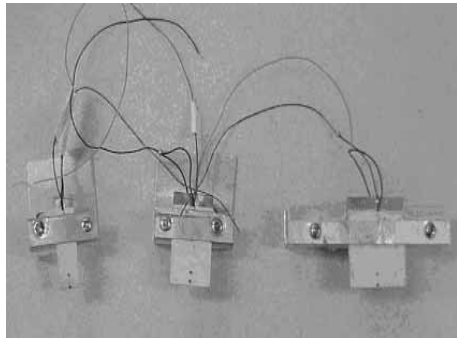


図5 (b) 実験用モデル

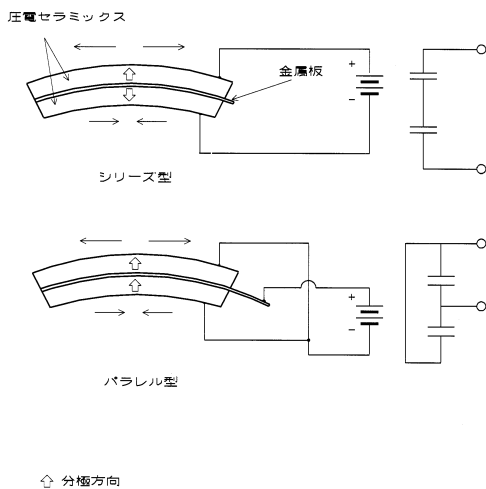


図6 バイモルフ振動子の屈曲原理

6のようにシリーズ型とパラレル型に分けられ、得られる変位量が異なるが、図中で示すように分極方向を定めてから接合するため、結線方法だけで得られるわけではない。また、シリーズ型での中央部の金属板の役割は、結線の必要がないため使われないこともあるが、通常は補強を目的としてパラレル型と同じ構造をしている。本モデルはパラレル型として製作しているので、各セラミックスの外表面の電極を結線し、これとりん青銅板と接触している電極の間を電圧で負荷して変位や固有振動数を測定した。なお、セラミッ

スの耐電圧は材料によって決まり、実験に用いた富士セラミックス社で開発されたC-6(材料名)は、セラミックスの厚さに対して450V/mmである。よって、本実験のセラミックスは約70Vとなり、バイモルフ形状でも約70Vである。

有限要素法による圧電体解析

1 圧電体解析

実験に用いた圧電板振動子形状での電圧と最大変位との関係および固有振動数を推定する概算式⁽²⁾が、支持条件や非線形性などの補正係数を考慮することにより与えられている。

従来の設計ではこの概算式により設計指針を得ていたが、複雑な設計形状や支持方法の変更については対応できない問題が生じている。

圧電セラミックスは、機械系と電気系が空間的に結合している弾性体である。この機械-電気系という異なる系間のエネルギー変換を伴うため、エネルギー関数の形で書かれる汎関数の適用を基本とする有限要素法の利用は有用な分野の一つである。

圧電体解析の有限要素定式化は、Allik と Hughes⁽³⁾によりなされ、その後 ANSYS などに汎用コード化されて、トランスデューサの3次元解析⁽⁴⁾などの検証が行われている。

結晶はそれを構成している原子やイオンの対称性により分類され、このうち圧電効果を示す20晶族の結晶を圧電性結晶または圧電体という。圧電体では機械的パラメータである応力 $\{T\}$ およびひずみ $\{S\}$ と電気的パラメータである電界 $\{E\}$ および電気変位 $\{D\}$ とが互いに結合している。圧電定数はこれらの電気機械変換特性を表す定数で、次の圧電応力定数(e 定数と h 定数)と圧電ひずみ定数(d 定数と g 定数)の4つがある。

e 定数は電界 $\{E\}$ が一定の状態でのひずみ $\{S\}$ を与えたときに生ずる電気変位 $\{D\}$ または、ひずみが一定の状態での電界を加えたときに生ずる応力 $\{T\}$ の関係を示すものである。

h 定数は、電気変位 $\{D\}$ が一定の状態でのひずみ $\{S\}$ を与えたときに生ずる電界 $\{E\}$ または、ひずみが一定の状態での電気変位を与えたときに生ずる応力 $\{T\}$ の関係を示すものである。

d 定数は応力 $\{T\}$ が一定の状態での電界 $\{E\}$ を与えたときに生ずるひずみ $\{S\}$ または、電界が一定の状態でのひずみを加えたときに生ずる電気変位

{D} の関係を示すものである。

g 定数は応力 {T} が一定の状態では単位の変位 {D} を与えたときに生ずるひずみ {S} または、電気変位が一定の状態では単位の応力を加えたときに生ずる電界 {E} の関係を示すものである。

通常 d 定数で圧電定数が公開されている。これらの定数は結晶の対称性や分極軸のとりかたによって、材料定数の入力形式で示されるように大変簡単になる。

有限要素解析では式(5)と(6)で示す e 定数を用いた e 形式で構成方程式を示すのが便利である。

2 圧電要素と構成方程式

3次元の圧電要素には、3つの並進自由度と電圧の自由度があり、各要素に関する変位 {u_e} と電気ポテンシャル {φ_e} は式(1)と(2)のように示される。

$$\{u_e\} = [N_u] \{u\} \tag{1}$$

$$\{\phi_e\} = [N_\phi] \{\phi\} \tag{2}$$

ここで、[N_u]と[N_φ]は変位とポテンシャルの形状関数マトリックス、{u}と{φ}は節点変位と節点ポテンシャルベクトルである。

式(1)と(2)に示される各形状関数⁽⁵⁾の微分を通して得られるひずみ 変位マトリックス [B_u]を用いると、機械ひずみ {S} は式(3)のように表わせる。

$$\{S\} = [B_u] \{u\} \tag{3}$$

同様に、電界 {E} は電界 変位マトリックス [B_φ]を用いて式(4)のように表わせる。

$$\{E\} = -[B_\phi] \{\phi\} \tag{4}$$

また、線形材料挙動に関する電気機械構成方程式は、式(5)と(6)のように示される。

$$\{T\} = [c] \{S\} - [e] \{E\} \tag{5}$$

$$\{D\} = [e] \{S\} + [\epsilon] \{E\} \tag{6}$$

ここで、[c]は6×6の弾性マトリックス、[e]は6×3の圧電マトリックス、[ε]は3×3の誘電マトリックスである。なお、{T}は6×1の応力ベクトル、{D}は3×1の電界ベクトル、{S}は6×1のひずみベクトルである。

式(5)の右辺第1項はひずみ-応力関係式で、第2項は加えられた電界によって生じる応力を表している。また、式(6)の右辺第1項はひずみが加えられたことによって電気変位が生じることを表し、第2項は誘電体における電界 電気変位の関係式である。

3 圧電体解析の定式化

圧電体の有限要素解析の定式化は変分原理⁽⁴⁾を用い

て導かれ、{F}を機械的外力ベクトル、{Q}を電荷ベクトルとすると個々の有限要素構成式を組み合わせる形で、圧電体解析については式(7)と(8)のように表される。

$$[M_{uu}] \ddot{u} + [C_{uu}] \dot{u} + [K_{uu}] u + [K_{u\phi}] \phi = \{F\} \tag{7}$$

$$[K_{u\phi}] u + [K_{\phi\phi}] \phi = \{Q\} \tag{8}$$

ここで、

$$[K_{uu}] = \int \int \int [B_u]^T c [B_u] dV$$

$$[K_{u\phi}] = \int \int \int [B_u]^T e [B_\phi] dV$$

$$[K_{\phi\phi}] = - \int \int \int [B_\phi]^T \epsilon [B_\phi] dV$$

$$[M_{uu}] = \rho \int \int \int [N_u]^T N_u dV$$

ここで、ρは密度

$$[C_{uu}] = \alpha [M_{uu}] + \beta [K_{uu}]$$

ここで、αは質量マトリックスの係数

βは剛性マトリックスの係数

3.1 静的解析

静的解析は慣性と減衰効果を除き、式(7)と(8)から次式(9)のように示される。

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \tag{9}$$

式(9)の解から全自由度における変位とポテンシャルが得られ、これらの値はひずみ、電界、応力および電界を得るために各要素の式(3)~(6)に代入される。

3.2 モード解析

モード解析では減衰効果を除き、式(7)と(8)から機械的外力ベクトルと電荷ベクトルを0とおいた次式(10)と(11)から共振周波数、反共振周波数およびモード形状が求められる。共振周波数はショート回路(2つの電極のポテンシャルを0にセットする)によって得られ、反共振周波数はオープン回路(1つの電極だけを接地する)によって得られる。

$$[M_{uu}] \ddot{u} + [K_{uu}] u + [K_{u\phi}] \phi = \{0\} \tag{10}$$

$$[K_{u\phi}] u - [K_{\phi\phi}] \phi = \{0\} \tag{11}$$

ωを固有周波数とすると、式(10)、(11)は次式(12)のようになる。

$$([K] - \omega^2 [M_{uu}]) u = \{0\} \tag{12}$$

ここで、[K]=[K_{uu}]-[K_{uφ}][K_{φφ}]⁻¹[K_{uφ}]^T

3.3 動的応答解析

動的応答解析は、調和(正弦的に変わる)力、電流、変位や電圧の影響下における圧電体構造の特性を調べることができる。変位と電気ポテンシャルは次式(13)と(14)のように表される。

$$\{u(t)\} = \{u\} e^{-j\omega t + \varphi} \quad (13)$$

$$\phi(t) = \phi e^{-j\omega t + \varphi} \quad (14)$$

ここで、 ω は駆動周波数

φ は位相シフト

t は時間

力と電荷は次式(15)と(16)のように表される。

$$\{F(t)\} = F e^{j\omega t + \varphi} \quad (15)$$

$$Q(t) = Q e^{j\omega t + \varphi} \quad (16)$$

$Q(t)$ は電流 I と次式のように関係づけられる。

$$Q(t) = \frac{1}{j\omega} I e^{-j\omega t + \varphi} \quad (17)$$

式(13)~(16)を式(7)と(8)に代入すると次式(18)のようになる。

$$\begin{bmatrix} K_{uu} + j\omega C_{uu} - \omega^2 M_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{F} \\ \frac{1}{j\omega} I \end{Bmatrix} \quad (18)$$

ここで上部の文字“ $\hat{\quad}$ ”は複素マトリクスである。

動的応答解析では圧電体の周波数特性が得られる。例えば周波数の関数としてインピーダンスやアドミッタンスを求めることができる。加えて、動的解析から得られた変位は構造物の変形状態をもとめることができる。よって応力解析も行える。

3.4 材料定数と解析モデル

(1) 材料定数

解析に必要なセラミックス C-6 材の定数は、以下の富士セラミックス社で測定されたものを用いた。解析には FEM 汎用コード ANSYS を用いたため、材料定数の入力形式を e 形式に変換して以下の値を用いた。

弾性定数 (N/m^2) : $c_{11} = 12.3\text{E}10$ 、 $c_{12} = 7.7\text{E}10$ 、
 $c_{13} = 8.0\text{E}10$ 、 $c_{33} = 11.2\text{E}10$ 、
 $c_{44} = 1.9\text{E}10$ 、 $c_{66} = 2.3\text{E}10$

圧電定数 (C/m^2) : $e_{31} = -7.3$ 、 $e_{33} = 17.2$ 、
 $e_{15} = 14.5$

誘電率 (F/m) : $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 9.199\text{E}-9$ 、
 $\epsilon_{33} = 6.632\text{E}-9$

ポアソン比 $\nu = 0.31$

りん青銅板の弾性係数は $10.29\text{E}10\text{N/m}^2$ を、ポアソン比は 0.33 を用いた。

(2) 解析モデル

使用した要素は部分的な形状変更も可能にするため、すべて直方体で 8 節点の 3 次元要素を用いた。

りん青銅板は各節点において並進 3 成分の変位の自由度を有する構造要素、圧電セラミックスには各節点において並進 3 成分の変位の自由度と電圧の自由度を

有する連成場要素を用いた。また、厚さ (Z 軸) 方向の要素数は、圧電セラミックス 2 枚とりん青銅板のそれぞれに 3 要素として曲げ変形に対応できるようにした。面 (X と Y 軸) 方向は厚さで規定される 3 次元要素のアスペクト比が計算精度的に問題が生じないように形成した。なお、電極と接合用接着剤は省略したが、この厚さは圧電セラミックスに含まれている。また、リード線と半田部分はモデルからはずした。

図 5 (a) における平面図の左下角を $X=Y=0$ とし、正面図のりん青銅板厚さの中央を $Z=0$ とするとき、荷重条件として、 $X=0 \sim 30$ で $Z = \pm 0.025$ に存在する節点 (りん青銅板と接触している圧電セラミックスの面の電極) に負荷電圧 V 、 $Z = \pm 0.18$ に存在する節点 (開放されている圧電セラミックスの上下外面の電極) に $0V$ を負荷し、片持ち状態の拘束条件として $X=17 \sim 28$ でかつ $Z = \pm 0.18$ に存在する節点の並進 3 成分の変位を完全拘束 (固定端) とした。

解析と実験

1 静的解析と実験結果

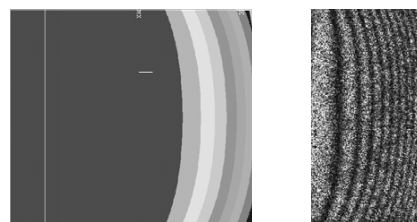
図 7 (a) ~ (c) に W10CANT、W20CANT、W30CANT モデルの $10V$ 負荷時における振動子の X-Y 面から見た変形分布図を、FEM による解析結果を左側に、レーザホログラフィシステムによる実験計測結果を右側に示した。



(a) W10CANT モデル



(b) W20CANT モデル



(c) W30CANT モデル

図 7 モデルの実験結果と解析結果の変形図

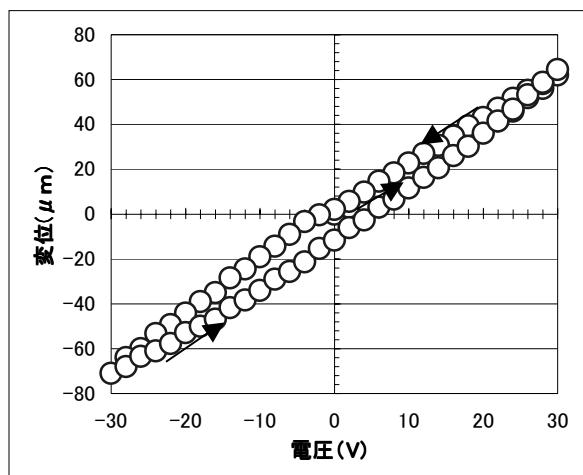


図8 W10CANTモデル中央先端部の電圧と変位の測定結果

またレーザ変位計実験装置を用いて0V 30V 0V -30V 0V 30Vの過程を±2Vの増分でW10CANTモデルの変位 電圧の特性を計測した。このときの測定結果を図8に示す。

なおW10CANTモデルでは、図7(a)の中央右先端部で解析した変位量は14.7μmであり、図8に示す実験結果では16.9μmが得られた。

2 モード解析と実験結果

図9～11にW10CANT、W20CANT、W30CANTモデルのFEMによる解析結果を左側に、ホログラフィシステムによる実験計測結果を右側にして振動子のX-Y面から見たモード図で示した。図中、frはモード解析で出力された順の固有モードの次数を示している。また、解析と実験ではモデル左端の片持ち板部分の固有モードも存在するが、これらは除いた。

図9～11に示した各固有振動モードにおける実験値feと解析値faの固有振動数frを表1に示す。

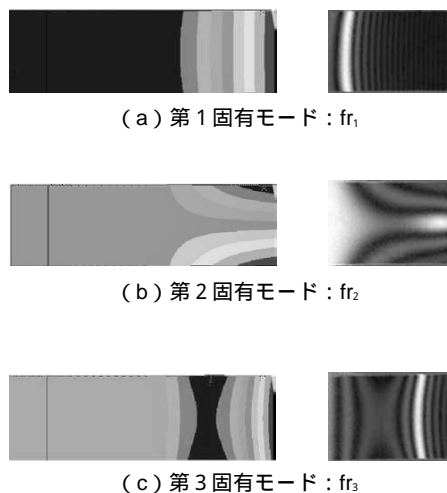


図9 W10CANTモデルの解析と実験結果のモード図

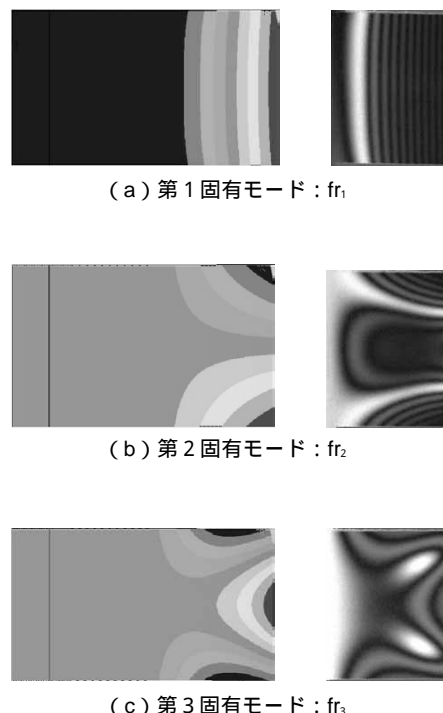
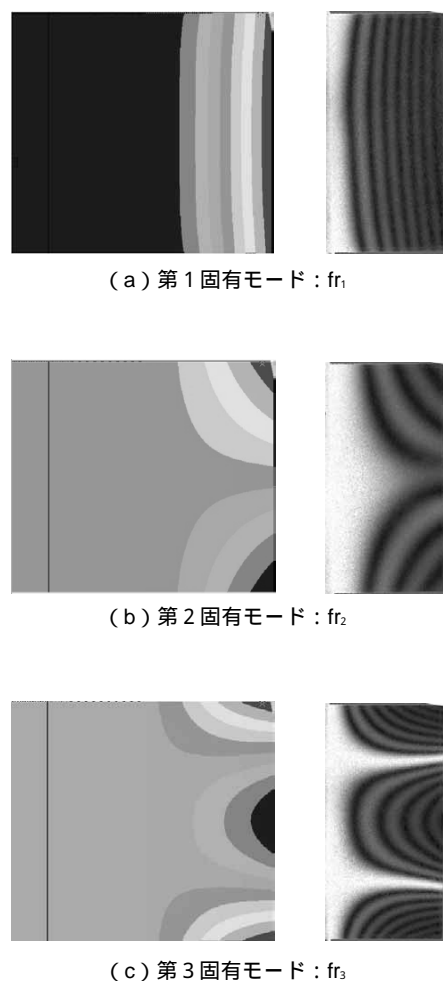


図10 W20CANTモデルの解析と実験結果のモード図



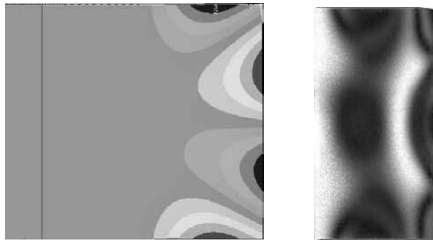
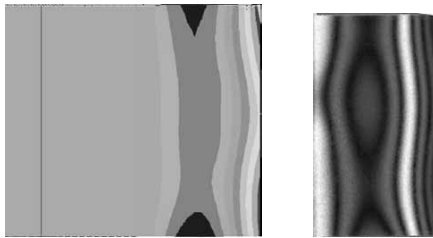
(d) 第4固有モード : f_{r4} (e) 第5固有モード : f_{r5}

図11 W30CANTモデルの解析と実験結果のモード図

表1 片持ち圧電板振動子の実験値と解析値の固有振動数

(f_a : 解析値 f_e : 実験値)

f_r	W10CANT		W20CANT		W30CANT	
	f_a (Hz)	f_e (Hz)	f_a	f_e	f_a	f_e
1	606	610	614	605	618	630
2	2036	2123	1214	1721	942	964
3	3782	3167	3336	3089	1941	1953
4	6931		4022		3859	2776
5	10560		4809		3891	3581

(実験値 f_e は3700Hz まで測定)

図9～11と表1の結果から解析値を基準にした比較では、固有振動数について一部で検討の余地があるが解析値と実験値がほぼ一致し、固有振動モードについてはよく一致した。またレーザーホログラフィシステムによる実験において、解析では得られない固有振動モードらしきものが存在するので、これも検討すべき問題点である。

これらの差異については今後、形状の異なるモデルによる実験等で詳細に検討することとしているが、誤差要因として影響するものは、圧電板振動子の形状、圧電セラミックスの材料定数、モデル化での省略、レーザーホログラフィ計測時の環境や振動子の固定状態等があげられる。

まとめ

圧電発音体等で用いられている圧電板振動子のシリコーンゴムによる支持方法を検討する目的で始めた研究であるが、シリコーンゴムによる動的特性が明確でないため、この影響を避けたモデル、すなわちシリコーンゴムをはずした圧電板振動子だけの片持ち圧電板振動子を検討した。ここでは静的解析とモード解析を行い一部に検討の余地を残しているが、今後の解析に有用な結果が得られた。

今後はこのモデルで、オープン回路による反共振周波数、モード解析で求めた共振周波数付近の変位に関する周波数特性およびアドミッタンス周波数特性を解析し、これらの検証実験を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、太陽誘電(株)の柿沼博美氏と本研究にかかわった制御技術科2年の沼田忠君に深く感謝いたします。

[参考文献]

- (1) 栗山好夫、笹川宏之、柿沼博美：シリコーンゴムにより支持される圧電板振動子に関する研究(負荷電圧と変位分布の関係) 設計工学会誌、37、1(2002-1)29.
- (2) (株)富士セラミックス：圧電セラミックス テクニカル・ハンドブック(1987) 48.
- (3) Allik H. and Hughes. T. J. R. : Finite Element Method for Piezoelectric Vibration, Int. J. for Numerical Methods Eng., 2(1970) 151.
- (4) D. F. Ostergaard and T. P. Pawak : THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENTS FOR ANALYZING PIEZOELECTRIC STRUCTURES, proceedings of the IEEE1986Ultrasonics Symposium, No 86CH2375 - 4 (1986)
- (5) Peter Kohnke : ANSYS User 's Manual Vol . Theory, ANSYS, Inc., Houston, (1995) 12__39.