

# マイクロ接触センサアレイの構造設計

杜立群\*・権貴龍\*・新井史人\*・福田敏男\*・糸魚川貢一\*\*・塚原靖典\*\*

## Structure Design of Micro Touch Sensor Array

Liqun DU\*, Guiryong KWON\*, Fumihito ARAI\*, Toshio FUKUDA,\*

Kouichi ITOIGAWA\*\*, Yasunori TUKAHARA\*\*

**Abstract:** The micro touch sensor array is fabricated by Ti substrate and PZT thin film. PZT thin film is synthesized by hydrothermal method and used as both micro sensor and micro actuator. Micro touch sensor array is not only simple to suit for miniaturization, but also robust against the disturbance. It will have numerous areas of application instead of conventional switch based on the mechanical contact. In this study, structure design of micro touch sensor array is presented. The main focus of structure design is on improving the sensitivity of micro touch sensor array. A mathematical model, which is used to optimize structure design of micro touch sensor array, is derived. According to cantilever beam theory, the frequency response to electric output of micro touch sensor unit has been discussed. The effects of changing physical parameters such as the location of the electrodes of PZT actuation and sense layer, and the length of the electrodes of PZT layers are studied. Based on the maximum output of micro touch sensor unit, the optimal structure has been obtained from both sides of analysis and experiment.

**Keywords:** optimal design, hydrothermal method, piezoelectric thin film, micro touch sensor, sensitivity

### 1. はじめに

近年、マイクロマシンに関する研究が活発化し、多くの小型集積化されたメカニカルデバイスが提案されている。マイクロマシンに用いられる機能性材料のうち、PZT(lead zirconate titanium) 圧電薄膜は非常に魅力的な材料である。これは電気機械結合係数が高く、電圧を加えることによって機械的な歪を発生し、逆に機械的な歪を加えられると電荷を発生する。この機械的な歪は比較的大きく、特に共振条件で駆動すると大きな変位を得ることができるため、マイクロアクチュエータとして利用されてきた。PZT が有する圧電・電歪特性がマイクロセンサやマイクロアクチュエータとして利用できる。

PZT 圧電薄膜アクチュエータの駆動特性はその基板と PZT 薄膜及び電極の位置によって決まる<sup>1)</sup>。これまで、PZT 薄膜を有する構造体の静的・動的特性を解析するためのモデルが提案されてきた。例えば、Crawley and de Louis による static pin-force model<sup>2)</sup>や、Dimitriadis らによる 2次元の平板モデル<sup>3)</sup>や多くの有限要素法に基づくアプローチが知られている<sup>4)</sup>。

PZT 圧電薄膜アクチュエータの応用例として、我々は水熱合成法によりチタン基板の表面に合成した PZT 薄膜を用いたマイクロ接触センサアレイを提案した。この特性は文献 5), 6)で報告した。

本論文では、このマイクロ接触センサの感度を向上するための方法を示す。我々は PZT 薄膜センサ・アクチュエータの効率を改善するために、まずマイクロ接触センサアレイの

基本要素の構造設計に着目し、その解析モデルを導出する。ここで扱う数学モデルは減衰のない Euler-Bernoulli 梁とした。最適化の評価としては、入力エネルギーを同一とする条件のもとで、マイクロ接触センサユニットの電圧出力が最大となることを指針とした。シミュレーションおよび実験の結果から、マイクロ接触センサの計測特性は基板に対する PZT 駆動層および PZT 計測層の有効長さや位置に依存することが明らかになった。これは、駆動用および計測用の電極長さおよび位置が感度アップにおいて重要であることを意味しており、マイクロ接触センサユニットの感度向上に構造最適化が大きく寄与することを意味している。

### 2. マイクロ接触センサアレイ

#### 2.1 接触検出の原理

我々は PZT 薄膜によるマイクロ接触センサアレイを試作した。これは、アレイ上の機械的圧力分布を計測できる。Fig.1 にこの基本概念図を示す。

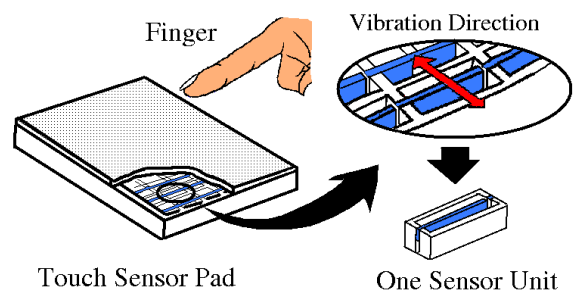


Fig. 1 Concept scheme of micro touch sensor

ひとつのセンサユニットは、片持ち梁の構造をしており、その両面に PZT 薄膜を水熱合成法により成膜してある。片面は逆圧電効果によって片持ち梁を共振させるためのマイクロアクチュエータとして利用され、もう片方の面は圧電効

\*名古屋大学大学院工学研究科 マイクロシステム工学専攻 名古屋市千種区不老町 1

\*\* (株)東海理化

Dept. of Micro System Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University

\*\*TOKAI RIKKA CO.,LTD.

(Received September 27, 2002)

果によって生成された電荷を計測するためのマイクロセンサとして利用される。片持ち梁に圧力が加わると、生成される電荷量が変化する。この変化を計測することによって、接触状態が計測される。

### 2.2 接触センサユニットの構造

接触センサアレイの一部の構造を Fig.2 に示す。Fig.2 の例では、接触センサユニットが3つ並んだ例を示してある。Fig.3 は一つのセンサユニットの概略図を示している。接触センサユニットは駆動部分と計測部分からなる。接触センサユニットは片持ち梁であり、その断面は長方形である。Fig.3 において、梁の上側は駆動部分で、下側は計測部分である。基板はチタンで、その表面には PZT 薄膜が水熱合成法によって成膜してある。また、駆動部分と計測部分の表面にはアルミニウムの電極が蒸着してある。

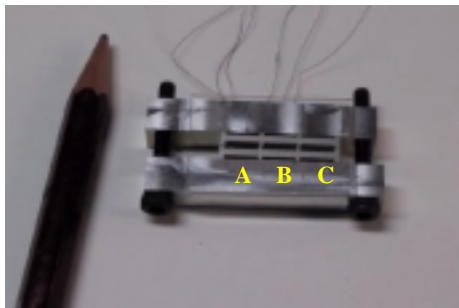


Fig. 2 Photograph of three micro touch sensor units

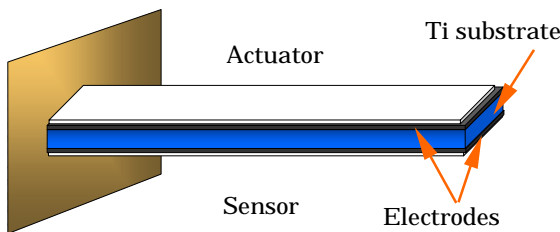


Fig.3 Configuration of one sensor unit



Fig. 4 Concept photo of micro touch sensor application

### 2.3 応用例

マイクロ接触センサアレイは小型化に向いており、ノイズに対してロバストである特徴を有している。このセンサの応用例として、例えば、Fig.4 に示すような自動車内のスイッチ表面に設置する接触センサが考えられる。圧電デバイスは

比較的高温化でも動作することが可能であり、試作デバイスは 80 度前後でも共振特性を有することが確認できている<sup>5)</sup>。

### 3. PZT 薄膜の成膜

PZT 薄膜の成膜方法に関してはこれまで様々な方法が試みられてきた。物理的な手法としてはイオンビームスパッタリングや、RF マグネトロンスパッタリング<sup>7)</sup>や、DC マグネトロンスパッタリングなどが試みられている<sup>8)</sup>。また、それ以外にもゾルゲル法<sup>9)</sup>、MOCVD<sup>10)</sup>、ディップコーティング、スクリーンプレスなどが知られている。これらの方法では反応温度が 500 以上となるが、水熱合成法を用いると反応温度を低くすることができる。大場ら<sup>11),12),13)</sup>と樋口ら<sup>14)</sup>は水熱合成法に関する成膜結果を報告した。水熱合成法の利点として、三次元構造物表面に成膜することが可能である。著者らは水熱合成法を利用した応用例を文献 5),6),15) で述べた。

水熱合成法では、PZT 薄膜は 2 つの反応ステップにより成膜される。第 1 のステップは、チタン基板と Pb および Zr イオンを含む KOH 溶液内での PZT 結晶の核づけプロセスである。チタン基板からのチタン供給により、Pb と Zr が溶液中で反応し、PZT 結晶が基板表面に析出する。第 2 のステップは Pb および Zr イオンを含む KOH 溶液内でチタン基板上に核付けされた PZT 結晶の結晶成長プロセスである。これらのプロセスの概略を Fig.5 に示す。ここで、KOH は触媒の役割を果たす。

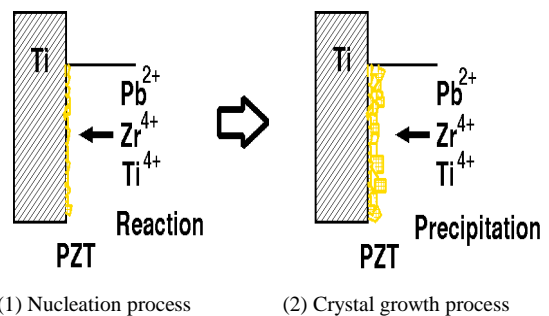


Fig. 5 Schema of the hydrothermal method for PZT thin film

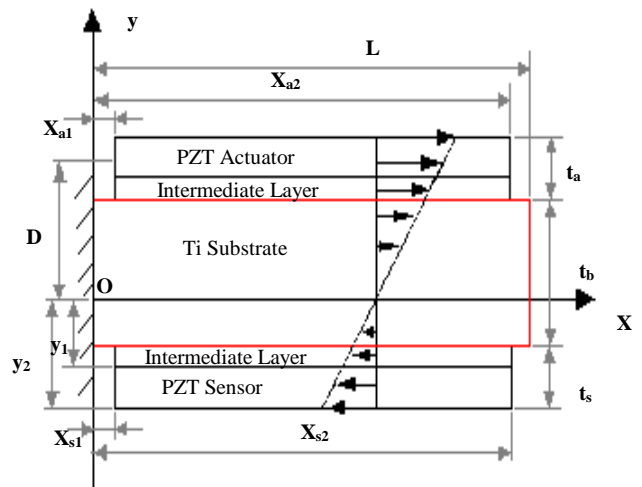


Fig. 6 Cantilever beam model

#### 4. センサユニットの解析モデル

一つのセンサユニットは駆動部分と計測部分を有する片持ち梁である。合成された梁モデルを Fig.6 に示す。梁は基板、駆動層、計測層、中間層からなるものとし、中間層の影響は無視できるものとする。ここで、中間層は核付けプロセスで成膜された圧電定数の低い層である<sup>12)</sup>。駆動層、計測層は結晶成長プロセスによって成膜された PZT 結晶が成長した層である。記号  $L, X_{s1}, X_{s2}, X_{a1}, X_{a2}$  はそれぞれセンサユニットの長さ、計測部分電極の始点、終点、駆動部分電極の始点、終点である。 $t_b, t_a, t_s$  はそれぞれ基板、駆動層、計測層の厚みである。 $D$  は PZT 駆動層の中心から片持ち梁の中立軸までの距離である。 $X$  軸は中立軸である。 $Z$  軸は  $X$  と  $Y$  の直交する軸である。

##### 4.1 駆動方程式

ここでは、PZT 層と基板との作用を記述する静的弾性モデルを導出する。ここではモデル化にあたって、以下の仮定を設ける。

中間層では純粋な 1 次元のせん断力が存在するものとする。

PZT 成長層とチタン基板には純粋な引張と圧縮応力が存在するものとする。

PZT 層の両端は完全にチタン基板に固定されているものとする。

組成は均質であるとする。

中心軸の長さは変化しないものとする。

梁は PZT 薄膜の引張と圧縮によってのみ曲がるものとする。

PZT 薄膜の変形は圧電効果によるものとする。

中間層の厚みは無視できるものとする。また、それぞれの層の歪分布は厚みの方向において、線形的に変化するものとする。つまり、歪は中立軸から  $y$  方向に線形的に変化するものとする。

基板、駆動層、計測層それぞれの歪は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= y \cdot \kappa \\ \varepsilon_a &= y \cdot \kappa - \Lambda \\ \varepsilon_b &= y \cdot \kappa \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\kappa$  は中立軸の曲率である。 $\Lambda$  は PZT 駆動層による歪である。 $\varepsilon_a, \varepsilon_s, \varepsilon_b$  はそれぞれ PZT 駆動層、PZT 計測層、基板の歪である。 $y$  は中立軸上の  $y$  方向変位である。

$x$  軸方向の力のつりあい方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} E_b \int_{-(t_b + \frac{t_a}{2})}^{D - \frac{t_a}{2}} \kappa \cdot y dy + E_s \int_{-(t_b + \frac{t_a}{2} - D)}^{-(t_b + \frac{t_a}{2} - D + t_s)} \kappa \cdot y dy \\ + E_a \int_{D - \frac{t_a}{2}}^{D + \frac{t_a}{2}} (\kappa \cdot y - \Lambda) dy = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$x$  軸方向のモーメントのつりあい方程式は以下になる。

$$\begin{aligned} E_b \int_{-(t_b + \frac{t_a}{2})}^{D - \frac{t_a}{2}} \kappa \cdot y^2 dy + E_s \int_{-(t_b + \frac{t_a}{2} - D)}^{-(t_b + \frac{t_a}{2} - D + t_s)} \kappa \cdot y^2 dy \\ + E_a \int_{D - \frac{t_a}{2}}^{D + \frac{t_a}{2}} (\kappa \cdot y - \Lambda) \cdot y dy = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $E_b, E_a, E_s$  はそれぞれ基板、駆動層、計測層のヤング率である。また、 $\Lambda$  は

$$\Lambda = \frac{d_{31}}{t_a} \cdot V_i \sin \omega t \quad (4)$$

であり、 $d_{31}$  は圧電定数、 $V_i \sin \omega t$  は入力電圧である。

PZT 駆動層による曲げモーメントは以下になる。

$$M(\omega, t) = \Lambda \cdot E_a \cdot t_a \cdot b \cdot D \quad (5)$$

ここで、 $b$  は基板の幅である。また、 $D$  は以下ようになる。

$$D = \frac{E_b t_b^3 + 6E_s t_s t_b^2 + 4E_s t_s^2 + 9E_s t_s^2 t_b + E_a t_a^3 + 3E_s t_s^2 t_a + 3E_s t_s t_a t_b}{6E_b t_b^2 + 6E_s t_s^2 + 6E_s t_s t_a + 6E_b t_b t_a + 12E_s t_s t_b} + \frac{t_b + t_a}{2} \quad (6)$$

##### 4.2 振動方程式

ここでは、駆動層によって駆動される片持ち梁の動的モデルを導出する。マイクロ接触センサユニットの共振モードを理論的に導出するために、梁理論を導入する。振動解析にあたり、系の減衰は無視すると、片持ちの振動方程式は以下のようになる<sup>16)</sup>。

$$\begin{aligned} \rho(x) A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ E(x) I(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \\ = M(\omega, t) [\delta'(x - x_{a1}) - \delta'(x - x_{a2})] \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $w$  は梁全体のたわみ、 $l$  は梁の長さ、 $\rho(x), A(x), E(x), I(x)$  はそれぞれ、梁の密度、断面積、ヤング率、断面 2 次モーメントである。 $\delta(x)$  はディラックのデルタ関数、 $x_{a1}, x_{a2}$  は駆動層の両端それぞれの座標である。

$$\rho(x) A(x) = \rho_b A_b + \rho_a A_a + \rho_s A_s \quad (8)$$

$$E(x) I(x) = E_b I_b + E_a I_a + E_s I_s \quad (9)$$

モード解析における分離定理を用いて、式(7)において変数分離を行った後、式(7)の両辺にモード関数を乗じて  $x=0$  から  $L$  まで積分し、モード関数の直行条件を用いると、式(7)は以下のように変形できる。

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = M_i(\omega, t) [\Phi'_i(x_{a2}) - \Phi'_i(x_{a1})] \quad (10)$$

ここで、 $q_i(t)$  はモード変数、 $\Phi'_i(x)$  は  $x$  に関するモード関数の

微分,  $\omega_i$  は梁の固有振動数である.

$$\omega_i = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{E(x)I(x)}{\rho(x)A(x)l^4}} \quad (11)$$

ここで,  $\beta_1 l = 1.875$ ,  $\beta_2 l = 4.694$ ,  $\beta_3 l = 7.855$ ,  $\beta_4 l = 10.996$ ,  $\beta_5 l = 14.137$ ,  $\beta_6 l = 17.279$  である.

モード関数は以下ようになる.

$$\Phi_i(x) = \cosh \beta_i x - \cos \beta_i x - C_1 (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x) \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{\sinh \beta_i l - \sin \beta_i l}{\cosh \beta_i l + \cos \beta_i l}$$

(13)

梁のたわみは以下ようになる.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} (\Phi_i \frac{\bar{P}_i}{\omega_i^2 - \omega^2}) \sin \omega t \quad (14)$$

$$\bar{P}_i = M_i(\omega, t) [\Phi'_i(x_{a2}) - \Phi'_i(x_{a1})] \quad (15)$$

### 4.3 計測方程式

圧電効果による圧電方程式は以下のように記述できる<sup>17)</sup>.

$$D_y = e_{31} \cdot S_x = e_{31} \cdot y / R \quad (16)$$

ここで,  $D_y$  は  $y$  軸に関する電気変位,  $e_{31}$  は圧電歪定数,  $S_x$  は  $x$  軸方向の歪,  $y$  は中立軸における変位,  $R$  は中立軸の曲率である.  $R$  は以下ようになる.

$$\frac{1}{R} = \pm \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \quad (17)$$

ここで, ガウスの理論によれば, 以下となる.

$$\sum q = \int D_y dx dz \quad (18)$$

ただし,  $\sum q$  は電荷である.

このため, 計測層での全電荷量は計測層での上面と下面で生成された電荷の平均となり, 全電荷量は以下のように記述できる.

$$\sum_{total} q = \frac{1}{2} (\int D_{y1} dx dz + \int D_{y2} dx dz)$$

$$= \frac{1}{2} b_s \left[ \int_{x_{s1}}^{x_{s2}} e_{31} y_1 \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} dx + \int_{x_{s1}}^{x_{s2}} e_{31} y_2 \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} dx \right] \quad (19)$$

$$= b_s \cdot e_{31} \cdot \left( \frac{t_a}{2} + \frac{t_s}{2} + t_b - D \right) [w'(x_{s2}, t) - w'(x_{s1}, t)]$$

ここで,  $x_{s1}$ ,  $x_{s2}$  は計測層の両端の座標,  $b_s$  は計測層の幅,  $w'(x, t)$  は  $x$  に関するたわみの微分,  $y_1$ ,  $y_2$  は  $y$  方向の計測層の座標である. 出力電圧  $V_0$  は以下ようになる.

$$V_0 = \frac{\sum q}{C_p} \quad (20)$$

$$= b_s d_{31} E_s \left( \frac{t_a}{2} + \frac{t_s}{2} + t_b - D \right) \frac{1}{C_p} [w'(x_{s2}, t) - w'(x_{s1}, t)]$$

ここで,  $C_p$  は PZT 計測層の容量である.

## 5. 結果と考察

### 5.1 構造物の共振周波数の影響

式(20)は, 式(4), (5), (14), (15)とから入力電圧と出力電圧の関係を示している. この式にもとづいて, マイクロ接触センサユニットの応答特性に関して考察する. まず, 解析に用いた構造物の物理パラメータを Table 1 に示す.

Table 1: Physical parameters of sensor unit

	Ti substrate	PZT actuator	PZT sensor
Length (mm)	5.0	5.0	5.0
Width (mm)	2	2	2
Thickness ( $\mu$ m)	25	10	10
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	4.5 $\times$ 10 <sup>3</sup>	15 $\times$ 10 <sup>3</sup>	15 $\times$ 10 <sup>3</sup>
Young's modulus (N/m <sup>2</sup> )	120 $\times$ 10 <sup>9</sup>	200 $\times$ 10 <sup>9</sup>	200 $\times$ 10 <sup>9</sup>
D <sub>31</sub> (m/v)		9.35 $\times$ 10 <sup>-11</sup>	9.35 $\times$ 10 <sup>-11</sup>
C <sub>p</sub> (F)			7.1 $\times$ 10 <sup>-8</sup>
Input volt (V)		10	

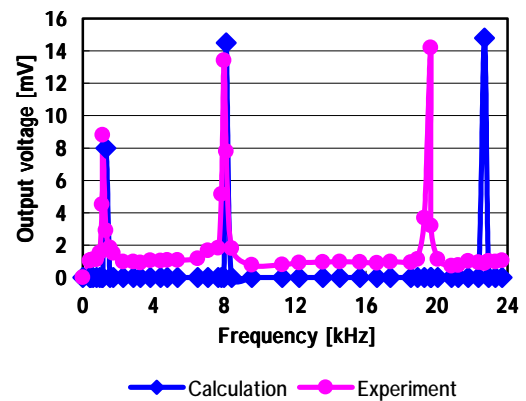


Fig. 7 The relationship between frequency and output voltage

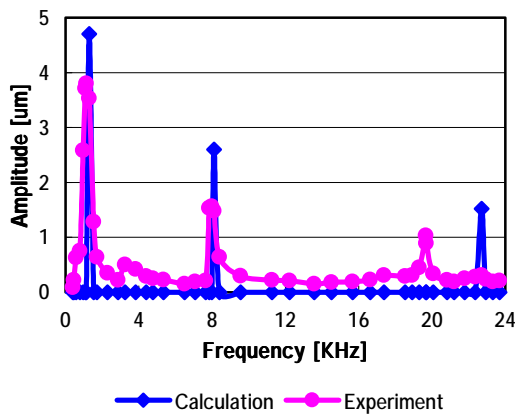


Fig. 8 The relationship between frequency and amplitude

ここでは、入力電圧を一定とし、入力の周波数を変化させた。Fig.7 は入力周波数とそのときの出力電圧との関係を示す。Fig.8 は入力周波数とそのときのマイクロ接触センサユニットの振動振幅の関係を示す。これらの図において、円をつないだ線（ピンク）は出力電圧の実験結果を示し、四角をつないだ線（青）はその解析結果を示す。Fig.7 より、3次モードにおいて、センサ出力が最も高くなることがわかり、マイクロ接触センサユニットがこの共振周波数において、最も感度が高くなることがわかる。これより、励振周波数を適切に選択することで、マイクロ接触センサの感度を向上させることができる。

## 5.2 最適形状

ここでの興味は、PZT 薄膜をアクチュエータおよびセンサとして利用する際に、最も適した構造を決定することである。PZT アクチュエータの位置に応じて構造物の動的応答特性が大きく変化することは知られている<sup>4)</sup>。そこで、以下では駆動層や計測層の有効長さや構造物上の位置などがセンサ出力に与える影響について調べる。

式(20)を使うことで、計測層の有効長さや位置の最適値を探索することができる。ここでは、出力電圧  $V_0$  を最大化する条件を求めることとする。 $V_0$  を最大化するために式(20)から分かるように  $[w'(x_{s2}, t) - w'(x_{s1}, t)]$  が最大になる条件、即ち、以下の式が最大となる条件を求める。

$$\left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial x}\right)_{x_{s1}} = \left[\frac{\partial \Phi_i}{\partial x}(x_{s2}) - \frac{\partial \Phi_i}{\partial x}(x_{s1})\right] \quad (21)$$

$P$  を計測層の中心点座標、 $L_p$  を計測層の長さとし、 $P, L_p$  によって計測層の位置を表すとすると、以下のようになる。

$$x_1 = P - \frac{L_p}{2}, \quad x_2 = P + \frac{L_p}{2} \quad (22)$$

ここで、計測層の長さ  $L_p$  は固定することとし、出力を最大化する  $P$  の最適値を求めることとする。

ここで、以下の関係、

$$\frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial x}\right)_{x_1}^{x_2} = 0 \quad (23)$$

より、次の条件を得る。

$$\frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2}\bigg|_{x_1} = \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2}\bigg|_{x_2} \quad (24)$$

一方、計測層の中心点座標  $P$  を固定した場合、その長さ  $L_p$  は以下の関係

$$\frac{\partial}{\partial L_p} \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial x}\right)_{x_1}^{x_2} = 0 \quad (25)$$

によって、次の条件を得る。

$$\frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2}\bigg|_{x_1} = -\frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2}\bigg|_{x_2} \quad (26)$$

位置座標  $P$  と長さ  $L_p$  の最適値を得るためには式(24)と(26)がともに満足されなければならない。モード関数の2次微分は歪に比例し、かつ中立軸の曲率に比例する。構造物の連続的な変形により、歪が  $x_1, x_2$  においてゼロになる場所に計測層を置いた場合に大きな出力が得られる。

駆動層の有効長さや位置の最適化に際しては、片持ち梁のたわみ  $w(x, t)$  が最大となる条件を求める。上記と同様な手順に基づいて、同様な結論が式(24)と(26)から得られる。

マイクロ接触センサユニットの感度を向上するように出力  $V_0$  を最大化するためには、駆動層、計測層それぞれの両端が、歪がゼロとなる連続する2点の間にくるようにするとよい。このとき、それらの中心点は歪が最大値となる場所の近くにくることになる<sup>2)</sup>。

解析結果より、接触センサユニットの最適形状は Fig.9 のようになった。

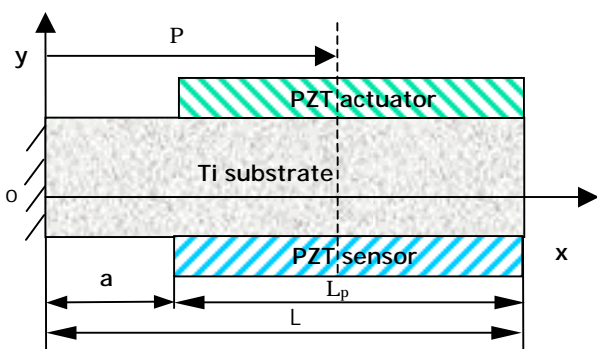


Fig. 9 Optimal shape of micro touch sensor unit

Fig.9 において、 $a$  は固定端から駆動層、計測層それぞれの左端までの距離を表す。 $L$  は片持ち梁の長さを表す。駆動層、計測層の形状設計における最適化の結果を Table 2 に示す。ここで、解析に用いた物理パラメータは Table 1 に示したとおりである。

Table 2: Optimal length of actuation and sense layers

Excited mode	Ratio of length a/L	Output voltage[mV]
1st	0	7.99
2nd	0.215	34.1
3rd	0.5	43.2
4th	0.65	42.5

### 5.3 実験による検証

実験による検証のための装置の写真を Fig.10 に示す。実験では、駆動層と計測層の条件をふるために、チタン基板全体に PZT 薄膜を成膜した後で、条件に応じた部分にだけアルミニウムの電極を蒸着した。チタン基板の片持ち梁の全長  $L$  は全て同一とし、駆動層、計測層の有効長さはそれぞれ  $2[mm]$ ,  $2.5[mm]$ ,  $3[mm]$ ,  $4[mm]$ ,  $5[mm]$  とした。

実験では、入力電圧は一定として、1 次モードから 4 次モードまでの共振周波数にて励振させた。駆動層への入力電圧は  $10V_{p-p}$  とし、片持ち梁は駆動層に与えられた共振周波数に従って振動する。振動する片持ち梁の振動によって生じた歪によって計測層に駆動層の周波数と同じ交流信号が現れる。片持ち梁の振動は接触によって共振条件が変わり、出力信号も変わる。本実験で接触対象物は指である。センサが反応する最低力は約  $3[mN]$  であった<sup>5)</sup>。Fig.11 は駆動層、計測層の場所とマイクロ接触センサユニットの出力の関係を示す。図において、大きな丸い点(赤)は出力電圧の計測値であり、円をつないだ線(青)はその理論解析結果である。また、四角をつないだ線(緑)は理論解析による歪の分布曲線である。

Fig.11 より、駆動層と計測層の有効長さや位置は接触センサの出力に直接影響を及ぼすことがわかる。理論解析と実験結果から、(1)駆動層と計測層の両端点は、歪がゼロとなる連続する 2 点の間に位置することがよく、また、(2)それらの中心点は、歪が最大となる場所の近くに位置することがよいといえる。1 次モードから 4 次モードまでの共振特性を見た限りでは、接触センサユニットの駆動層、計測層の最適形状は  $a/L$  が約 0.5 で、3 次モードで共振させた場合に大きな出力が得られた。

### 6. まとめ

本論文では、マイクロ接触センサの感度を向上するために特性評価のための数学モデルを導出した。モデルに基づき、マイクロ接触センサユニットの出力への励振周波数の影響を調べた。また、センサ出力を向上するための最適な構造を解析および実験により調べた。マイクロ接触センサユニットの駆動層、計測層の有効長さ、位置を適切に設計し、励振周波数を適切に調整することによって、センサ出力を大幅に改善できることを示した。

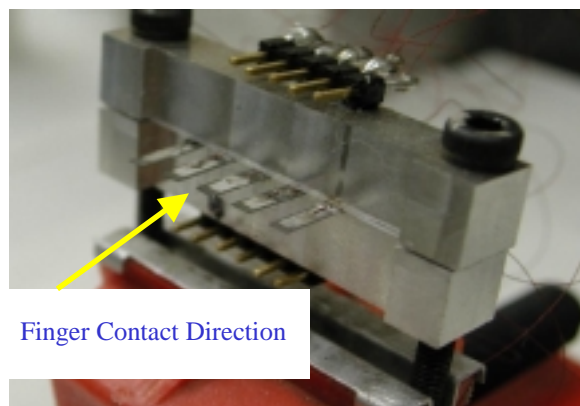
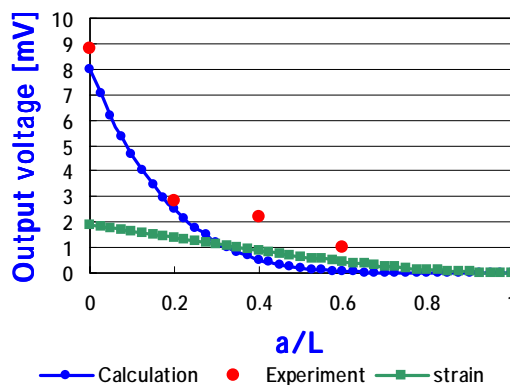
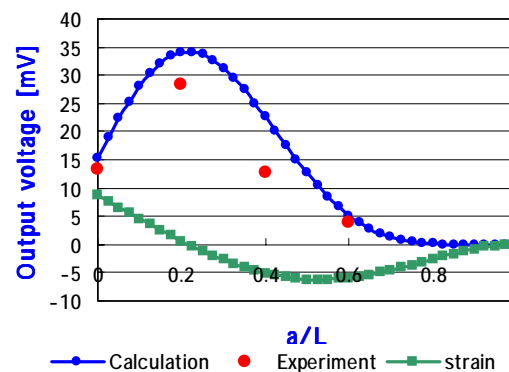


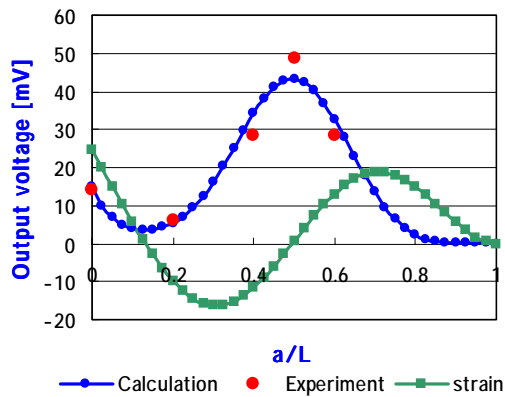
Fig.10 Equipment of verification experiment



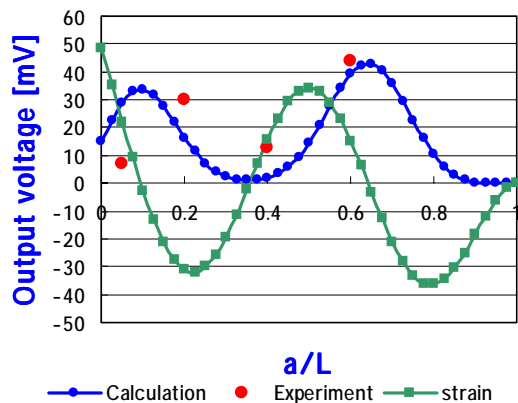
(a) Optimal PZT thin film actuation and sense layer to excite mode 1



(b) Optimal PZT thin film actuation and sense layer to excite mode 2



(c) Optimal PZT thin film actuation and sense layer to excite mode 3



(d) Optimal PZT thin film actuation and sense layer to excite mode 4

Fig. 11 Relationship between location of sense, actuation layers and output voltage

### 参考文献

- 1) Kim-Ho Ip and Ping-Cheung Tse: Optimal configuration of a piezoelectric patch for vibration control of isotropic rectangular plates, *Smart Mater. Struct.* **10**, 395/403, (2001)
- 2) Crawley E F and de Luis J: Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures, *AIAA J.* **25**, 1373/1385, (1987)
- 3) Dimitriadis E K, Fuller C R and Rogers C A: Piezoelectric actuators for distributed vibration excitation of thin plates, *J. Vibrat. Acoustics* **113**, 100/107, (1989)
- 4) Renato Barboni, Alessandro Mannini, Enrico Fantini and Paolo Gaudenzi: Optimal placement of PZT actuators for the control of beam dynamics, *Smart Mater. Struct.* **9**, 110/120, (2000)
- 5) G. Kwon, F. Arai, T. Fukuda, K. Itoigawa and Y. Thukahara: Micro Touch Sensor Array Made by Hydrothermal Method, *Proceeding of the 2001 Int. Sym. on Micromechatronics and*

- Human Science (MHS), 81/86, (2001)
- 6) L. Du, F. Arai, G. Kwon, T. Fukuda, K. Itoigawa, and Y. Thukahara: Dynamic analysis of micro touch sensor array synthesized by hydrothermal method, *Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. **2**, 1649/1654, (2002)
- 7) T.Abe and M.L. Reed: RF-magnetron sputtering of piezoelectric lead-zirconate actuator films using composite target, *Proc. IEEE MEMS '94*, 164/169, (1994)
- 8) Paul Muralt: PZT Thin Films for Microsensors and Actuators: Where Do We Stand?, *IEEE trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. **47-4**, 903/915, (2000)
- 9) G. Yi, Z. Wu and M. Sayer: Preparation of Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Thin Film by Sol Gel Processing: Electrical, Optical and Electro-optic Properties, *Jpn. J. of Appl. Phys.* Vol. **64**, 2717/2724, (1988)
- 10) H. Funakubo, K. Imashita, N.Kieda, and N. Mizutani: Formulation of epitaxial Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> film by CVD, *Nippon Seramikkushu Kyokai Gakujyutsu Ronbunshi*, Vol. **99**, 248/250, (1991)
- 11) K. Shimomura, T. Tsurumi, Y. Ohba and M. Daimon: Preparation of Lead Zirconate Titanate Thin Film by Hydrothermal Method, *Jpn. J. of Appl. Phys.* Vol. **30**, 2174/2177, (1991)
- 12) Y. Ohba, M. Miyauchi, T. Tsurumi and M. Daimon: Analysis of bending displacement of lead zirconate titanate thin film synthesized by hydrothermal method, *Jpn. J. of J. Appl. Phys.*, Vol. **32**, 4095/4098, (1993)
- 13) Y. Ohba, K. Arita, T. Tsurumi and M. Daimon: Analysis of interfacial phase between substrates and lead zirconate titanium thin film synthesized by hydrothermal method, *Jpn. J. of Appl. Phys.* Vol. **33**, 5305/5308, (1994)
- 14) T. Morita, M. Kuribayashi, and T Higuchi: A cylindrical micro ultrasonic motor using PZT thin film deposited by single hydrothermal method, *IEEE trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. **45-5**, 1178/1186, (1998)
- 15) T. Fukuda, H. Sato, F. Arai, H. Iwata and K.Itoigawa: Parallel Beam Micro Sensor/Actuator Unit Using PZT Thin Films and Application Examples, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. **2**, 1498/1503, (1998)
- 16) A.A. Shabana: *Theory of Vibration Volume 2 Discrete and Continuous System*, Springer-Verlag, 192/202, (1991)
- 17) Zhen Wu, Xian-Oi Bao, Vijay K Vandan and Vasundara Vvaradan, Renato Barboni: Light-weight robot using piezoelectric motor, sensor and actuator, *Smart Mater. Struct.*, 330/340, (1992)

[ 著 者 紹 介 ]

杜 立 群



1991年中国東北大学大学院機械設計学専攻修士課程修了。同年、東北大学助手。1999年、工学博士（東北大学）。1994年、東北大学講師。1999年、東北大学助教授。主にスマート機構、マイクロセンサ、アクチュエータ等の研究に従事。

権 貴 龍



2000年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム専攻博士課程後期過程入学、現在に至る。水熱法によるPZT薄膜の成膜およびその接触センサへの応用に関する研究に従事。日本ロボット学会会員、日本バーチャルリアリティ学会会員。

新 井 史 人 (正会員)



1989年名古屋大学助手、1993年工学博士（名古屋大学）、1994年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻講師、1998年より助教授、現在に至る。2000年より科学技術振興事業団、さきがけ研究21に従事（兼任）。マイクロ・ナノロボティクス、インテリジェントシステム等の研究に従事。IEEEなどの会員。

福 田 敏 男 (正会員)



1977年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。同年通産省工業技術院機械技術研究所研究員、主任研究官を経て、1979年より東京理科大学工学部講師、助教授を経て、1989年に名古屋大学工学部教授。現在、名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻教授。President of IEEE Robotics and Automation Society (1998-1999), Editor in-chief, IEEE/ASME Trans. Mechatronics (2000-), IEEE Division X Director (2001-)など。ロボット・メカトロニクス、知能システム、マイクロ・ナノシステムなどの研究に従事。IEEEなどの会員。

糸 魚 川 貢 一



1982年日本大学理工学部戦士工学科卒業、同年(株)東海理化に入社。同社技術開発センターにて、半導体プロセス、マイクロマシンに関する研究、開発に従事。電気学会会員、電子情報通信学会会員、応用物理学会会員。

塚 原 靖 典



1998年名古屋大学大学院量子工学専攻修士課程修了。同年(株)東海理化に入社。同社技術開発センターにて、センサ開発に従事。