

### 3. 各テーマの成果詳細

#### 3.4.3 MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発

##### (1) 研究概要

近年、歩行ロボットの研究成果の発表などにより「ロボットの世紀」としての近未来がリアリティーを増すと共に、人間型自律ロボットの実現普及が期待されている。そのようなロボットを実現する上で重要な技術として、人間の手と同様な機能を備えたロボットハンドによる高度なハンドリング技術が挙げられる。これを実現するための3つの要素技術として、ロボットハンド機構、センサ、情報処理/制御技術がある。この中でセンサはハンド作業する上で必要な環境の情報を得るものと、器用な作業をこなすための感覚情報を計測するものがある。本研究は感覚情報を計測するための触覚センサについて、ロボットハンドの指先センサにも搭載可能な柔軟接触部を有する柔軟な指先触覚センサの開発に関するものである。

これまで、本研究グループでは、複雑な運動や作業を可能とする制御技術に用いる6軸フォースセンサの研究開発を行ってきた。6軸フォースセンサとは、X-Y-Zの軸方向に作用する力の3成分と各軸回りのモーメント3成分を検出するセンサである。例えばヒューマノイドタイプロボットなど、比較的小型のロボットの複雑な運動を検出するためには、検出対象への影響を可能な限り少なくする小型のセンサが必要となる。ロボットの動作環境等によっては、分布的に配置し計測する必要があるため、従来の大きさに比べ格段に小さい6軸フォースセンサを開発し、ロボット制御研究に供し、その有効性を評価することに重点を置き進めてきた。

本研究は、国内のMEMSファウンドリー試作サービスを活用し、これまでの数個～数十個単位の研究試作から数百個～千個のオーダーの実用試作を実施することも目的にしている。そのための製作プロセス上の課題の抽出とその解決に関する検討も重要なテーマである。ここで得られた結果は、国内MEMSファウンドリーの技術力の向上のみでなく、試作個数の数増しによって、ロボット応用研究の範囲拡大と促進につながるものである。

本研究では、MEMSファウンドリー試作サービスを活用し、これまで本研究グループが開発してきた6軸フォースセンサのチップ寸法を3mm角から2mm角にさらに縮小したチップの開発を行った。また装着が容易で計測が安定なパッケージ構造を採用しロボットハンド用柔軟指先触覚センサの実用化試作を行った。センサの半球接触部に印加された力( $F_x'$ ,  $F_y'$ ,  $F_z'$ )とモーメント( $M_z'$ )の4成分を検出可能である。本研究の評価として指先触覚センサをロボットグリッパーに搭載し、物体の把持実験を行いロボット用触覚センサとしての有用性を確認した。本研究で得られた成果は、今後、ロボット産業のみならずネットワークセンシングやユビキタスセンシングなどへの応用展開も含め広く産業に貢献するものと考える。

## (2) 成果詳細

### ① 目的

触覚センサの歴史は長く、導電ゴム式、ピエゾ電気式、磁気式、静電容量式、音響式など様々な種類の原理のセンサが開発されてきた[1]、[2]、[3]。1980代には産業用ロボットへの応用を目的とした多くの触覚センサに関する研究成果が発表されている。世界的に見ても品質の良い工業製品を大量に生産することで高い収益を得ようとしていた時代であり、安定した効率の良い作業を産業用ロボットに行わすため、部品の把持、運搬、はめ込みなどの自動化が必要とされていた。しかし、触覚センサを用いたロボットハンドは産業用ロボットに応用されることには少なかった。その理由は触覚センサそのものの開発およびそれを用いたハンドリング技術を利用するよりは作業部品の構造、作業工程、環境の改良の方が簡単確実であったためである。1990年代の初めには多品種少生産の時代になり、一台のロボットにより様々な作業を実現させたいという要求が多くなり、人間の末端器のような触覚センサによるセンシングを利用した高度なハンドリング技術の応用が注目されたが、多くのロボット開発者は視覚センサや制御技術によってこれを解決しようとした。ロボットによって作業させるアプローチとして必ずしも人間の作業を模倣させる必要はなく、むしろロボット特有の作業方法を模索するといった手法が一般的にとられていた。ところがここ10年、触覚センサを取り巻くそのような環境は変わりつつある。産業分野では多品種少量生産に対応するため、ロボットハンドによる高度なハンドリングの研究が盛んになっている。その背景には、作業によって有利なハンド機構に取り替える、いわゆる「付け替え型ハンド」[4]は限界になっており、触覚センサを組み込んだハンド機構の必要性が認識されはじめている。福祉分野では日本をはじめとする先進諸国では高齢化が進んでおり介護ロボットのニーズが高まっている。介護ロボットのような人間の居住空間で作業する場合、人間や周りの環境に危害を加えないよう触覚を全身で覆う必要がある[5]。医療分野においては近年ロボットハンドによる手術の実現[6]、自律型カテーテル、内視鏡による低侵襲手術[7]の研究が行われているが、この技術における現在課題は、接触表面の硬さや材質、テクスチャなどの触覚情報を得ることである。現段階では手術は視覚情報を基にロボットハンドを用い手術を行っているが、手術における力覚情報のフィードバックがあることが望ましい。

ロボットに触覚センサを使用する目的は表1.1に示すように大きく二つに分けられる[8]。第一の目的は被把持物の同定であり、暗所や遮へい物の影など視覚情報を得ることのできない状況、環境での物体の形状認識、および硬さや材質など接触して初めてわかる被把持物に関する情報を得ることである。第二の目的はロボットハンドが物体を把持し操作する際に、安定した制御を行うための制御を行うための情報を得ることである。これらの情報としては、被把持物に加わる把持力、被把持物とハンドの間に生じるすべり、被把持物の自重によりハンドに及ぼすモーメントなどがある。

それぞれの目的に応じて触覚センサに対する要求事項も異なり、第一の目的に対しては高感度、高密度、広い面積といった要求が、また第二の目的に対しては3分力検出が可能、リード線が少ない、高速処理といった要求が触覚センサに対してなされている。

表1.1 触覚センサの使用目的と要求事項

目的	触覚センサ情報	触覚センサへの要求事項
被把持物の同定	形状、硬さ、材質	高感度、高密度、広い面積
安定な把持力制御	把持力、すべり、モーメント	多軸力・モーメント検出、安定なコンタクト、軽い、少ないリード線 高速処理

本研究の目的は第二の目標に対し物体の安定な把持を目的としたロボットハンド用「指先触覚センサ」を開発し、その有用性を検証することである。

本プロジェクトでは単結晶シリコンを構造材料とし、ピエゾ抵抗効果を検出原理とした2ミリ角の力・モーメントセンサチップを半球状の柔軟な接触部で覆うことで実装後の大さき（センシング部）が $5 \times 5 \times 3.3\text{mm}$  の超小型触覚センサの開発を行う。本センサは並進3軸の他に接触力の周りのモーメントの検出が可能である。接触周りのモーメントが検出可能であれば把持物体の重心までの距離情報を得られるため、3軸力センサより安定な把持制御が可能になる。本研究ではさらにこれをロボットハンドに搭載、物体の把持を行うことでロボット用触覚センサとしての有用性を検証する。

## 引用文献

- [1] 小俣徹：“器用な手”、日本ロボット学会、vol.18、no.6、pp.2-4、2000
- [2] H.R.Nicholls and M.H.Lee: “A survey of robotto tactile sensing technology ,Int .Robotics research,”vol.8,no.3,pp3-30,1989
- [3] M.H.Lee and H.R.Nicholls: “ Tactile sensing for mechatronics –a state of art survey,”Mechatronics vol.9,pp1-31,1999
- [4] 齋藤史倫、永田和弘：“ポータブルマニピュレーションシステムの研究－单駆動力可変駆動ハンドシステムの提案” 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.937-938,1999
- [5] Takayuki Hoshi,Hiroyuki Shinoda: “A Tactile Element Based on Nonlinear Elasticity to Sense Contact Area” Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Sensor Symposium,pp.375-379,2005
- [6] G.S.Guthart and J.K. Salisbury, Jr.: “The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application,” Proc.IEEE Int.Conf. on Robotics and automation, pp.618-621,2000
- [7] オリンパス光学工業：“カテーテル”マイクロマシン/MEMS応用デバイス、2003マイクロマシン/MEMS技術大全 pp.38-40、2003
- [8] 小林光男、鷺沢忍：“シリコンを構造材料とする3軸触覚センサ”、電子情報通信学会論文誌、C-II,vol.J74-C-II、vol.5、pp.427-433,1995

## ② 指先センサの構造と把持原理

### ②-1 指先センサの構造

図2. 1は指先センサの構造図である。図に示すように指先センサはセンシングエリアとコネクタから構成される。全体のサイズは  $5 \times 11 \times 3.3 \text{ mm}^3$ (幅×長さ×厚み)である。センシングエリアは、サーキットボード (図中 PCB—Printed circuit board) 多軸検出可能なマイクロフォースモーメントセンサ (MFMS)、過負荷保護用ベース(Overload protection base)、力伝達用ピラー(Transmission pillar)、ケース(Case)、柔軟な半球体接触部 (Soft hemisphere force-receiver) で構成されている。コネクタはマイクロフォースモーメントセンサ (以下センシングチップ) とフレキシブルワイヤーの接続を行う役割を果たす。フレキシブルワイヤーは外部機器とセンシングチップへの電圧の入出を行っている。物体の把持や接触により、半球体接触部に力やモーメントが印加されるとそれらは力伝達用ピラーを介してセンシングチップに伝達する。センシングチップは印加された力やモーメントを電圧の変化量に変換する特性をもっており、その変化量や変化したチャネルによって印加した力やモーメントの量及び方向を検出することができる。

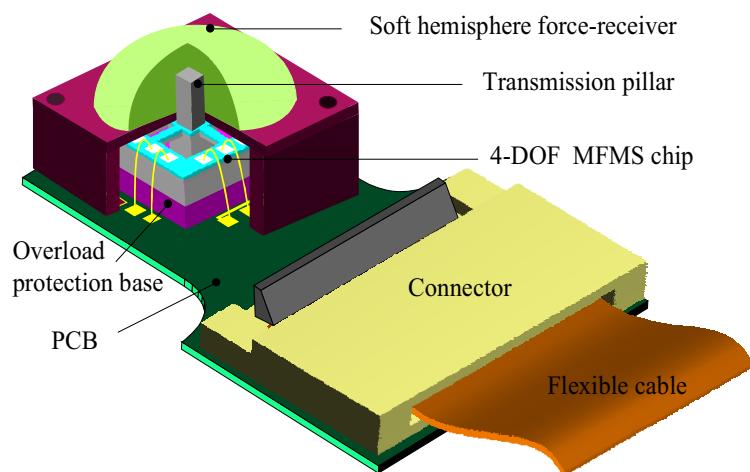


図2. 1 指先触覚センサの構造図

### ②-2 指先センサ把持原理

#### ②-2-1 ロボットハンドによる物体の把持

ロボットハンドによって質量、摩擦係数が未知の物体を把持するという課題に対して多くの研究が行われている[17]～[19]。これらは視覚センサが使用できないような状況において、触覚センサからのフィードバックを基に物体の安定な物体の把持が行えるかについて物体の把持力と摩擦力の関係について言及している[20]。本研究ではこれに対し、把持物体の重心と把持点の距離、把持時の傾斜角について2つの指先センサを用いることによってこれら検出する方法を示す。把持物体の重心と把持点の距離を認識できれば把持点周りのモーメントをゼロにすべく制御することが可能であるし、把持時の指先センサの傾斜角が検出できれば傾きを伴う把持動作に必要な情報も複雑なシステムを構成することなく得ることができる。ここでは図2. 2に示すように2つの指先センサがそれぞれ向き合うようにロボットハンドの2指に装着され、物体を把持するときの力の釣り合いを考える。ここで物体は一様な質量を持つ剛体の直方体とする。

ロボットハンドにより指先センサ物体を接触面に対して垂直な把持力  $F_{grip}$  で把持するとき、反作用の力  $Fn'$  (接触面に対して垂直な力) が指先センサに対し作用する。

面に摩擦があるときはさらに摩擦力  $Ft$  が接触面の接線方向に働く。(  $Ft$  は接触面内で、  $Ftx'$ 、  $Fty'$  に分解できる) その大きさは  $F_{grip}$  に関係する。物体が動き出そうとしているとき、 $\mu_0$  を静止摩擦係数とすると  $Ft' \leq \mu_0 F_{grip}$  である。(  $Ft' = \mu_0 F_{grip}$  は最大摩擦力) また物体の質量を  $M$ 、重力加速度を  $g$  とするとき、 $Ft' = Mg$  である。ここでは物体を把持している状態すなわち、 $F_{grip} \leq \mu_0 Mg$  の把持力が物体に作用しているものとする。また、ロボットハンドによる把持点と物体の重心の距離が  $l$  である場合、把持点まわりにモーメント  $Mn' (=Mg \times l)$  が発生する。

これら指先センサに印加された  $Fn'$ 、  $Ftx'$ 、  $Fty'$ 、  $Mn'$  の 4 成分は変換マトリックスを用いて次のように電圧  $V_{Ftx}'$ 、  $V_{Fty}'$ 、  $V_{Fn}'$ 、  $V_{Mn}'$  としてそれぞれ独立に検出することができる。

$$\begin{pmatrix} V_{Ftx}' \\ V_{Fty}' \\ V_{Fn}' \\ V_{Mn}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{Ftx'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{Fty'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{Fn'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{Mn'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ftx' \\ Fty' \\ Fn' \\ Mn' \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

または

$$(V) = (S)(F) \quad (2.2)$$

$(V)$ 、 $(F)$  は一階のテンソルでそれぞれ電圧テンソル、力・モーメントテンソルである。 $(S)$  は 2 階の感度テンソルである。また式 (2.1) は

$$(F) = (S)^{-1}(V) \quad (2.3)$$

であるから、センサ出力電圧( $V$ )によって指先センサに印加された力・モーメント( $F$ )を求めることができる。

このとき把持物体の質量  $M$ 、ロボットハンドの把持力  $F_{grip}$ 、把持点と物体の重心までの距離  $l$  はそれぞれ次のように求められる。

$$Mg = 2 \times Fty' \quad (Ftx' = 0) \quad (2.4)$$

$$F_{grip} = Fn' \quad (2.5)$$

$$l = 2 \frac{Mn'}{Mg} = \frac{Mn'}{Fty'} \quad (2.6)$$

式 (2.3) より、式 (2.7) ~ (2.9) が得られる。

$$Mg = 2 \times S_{Fty'}^{-1} V_{Fty'} \quad (2.7)$$

$$F_{grip} = S_{Fn'}^{-1} V_{Fn'} \quad (2.8)$$

$$l = \frac{S_{Mn'}^{-1} \times V_{Mn'}}{S_{Fty'}^{-1} \times V_{Fty'}} \quad (2.9)$$

よって 2 つの向かい合う指先センサによって物体を把持したとき、その出力電圧 ( $V$ ) により、物体を把持する力  $F_{grip}$ 、質量  $M$ 、把持点から物体の重心までの距離  $l$  を求めることができる。

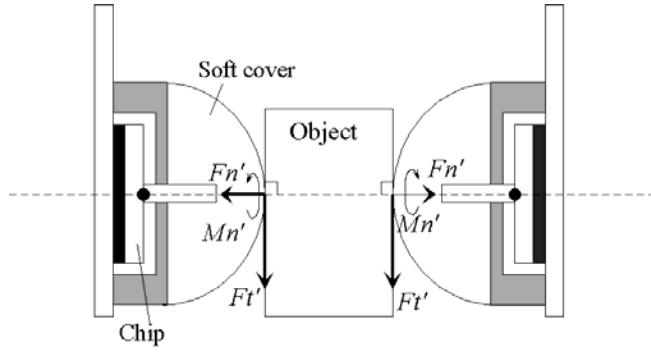


図2. 2 2つの指先センサを用いた把持原理

次に図2. 3のように設定した  $O\text{-}x\text{-}y\text{-}z$  座標系において  $x$  軸周りに  $\phi$ 、 $y$  軸周りに  $\theta$  傾斜した状態での把持動作について考える。向かい合う 2 つの指先センサ（指先センサ  $i$  ( $i=1,2$ )）のそれぞれの力モーメント-電圧特性は以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} F_{tx_i}' \\ F_{ty_i}' \\ F_{n_i}' \\ M_{n_i} \end{pmatrix} = (S_i)^{-1} \begin{pmatrix} V_{Ftx_i}' \\ V_{Fty_i}' \\ V_{Fn_i}' \\ V_{Mn_i} \end{pmatrix} \quad (i=1,2) \quad (2. 10)$$

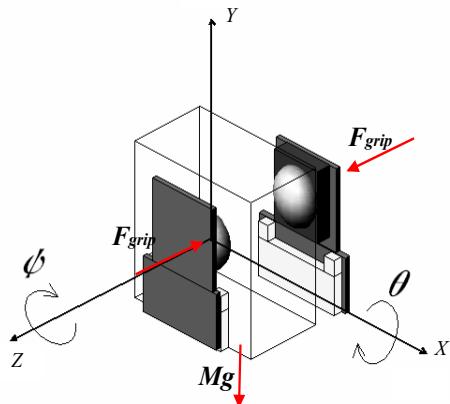


図2. 3  $Z$  軸周りに  $\phi$  傾斜した状態での把持動作

$Z$  軸から  $\phi$  傾いた場合（図2. 4）、向かい合うセンサに及ぼす  $X$ 、 $Y$  方向の力  $F_{tx}'$ 、 $F_{ty}'$  はそれぞれ等しく、式 (2. 11) (2. 12) のように表すことができる。

$$F_{tx_i}' = \frac{1}{2} Mg \cos \phi \quad (i=1,2) \quad (2. 11)$$

$$F_{ty_i}' = \frac{1}{2} Mg \sin \phi \quad (i=1,2) \quad (2. 12)$$

よって  $\phi$  は式 (2. 13) のように求められる。

$$\phi = \arctan\left(\frac{F_{ty_i}'}{F_{tx_i}}\right) \quad (i=1,2) \quad (2. 13)$$

また式(2.11), (2.12)より式(2.14)が得られる。

$$Ft'_i = \sqrt{Ftx_i'^2 + Fty_i'^2} \quad (i=1,2) \quad (2.14)$$

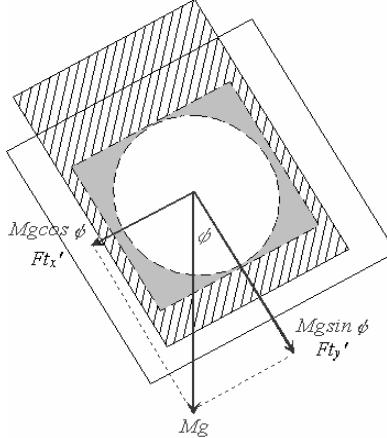


図2.4 Z軸から $\phi$ 傾いた場合の力のつりあい

以上をまとめると、Z軸まわりの傾斜角 $\phi$ 、及び把持物体の質量 $M$ 、ロボットハンドの把持力 $F_{grip}$ 、把持点と物体の重心までの距離 $I$ はそれぞれ式(2.10)より以下のように求められる。

$$F_{grip} = S_{Fn'}^{-1}(V_{Fn_1'} + V_{Fn_2'})/2 \quad (2.15)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{S_{Fty_i'}^{-1} \times V_{Fty_i'}}{S_{Ftx_i'}^{-1} \times V_{Ftx_i'}}\right) \quad (i=1,2) \quad (2.16)$$

$$M = 2S_{Ftxi'}^{-1} \times V_{Ftxi'} / g \cos(\phi) \quad (i=1,2) \quad (2.17)$$

$$I = 2 \frac{Mn'}{Mg} \quad (2.18)$$

よって2つの向かい合う指先センサによって物体を把持したとき、その出力電圧により、把持物体を把持する力 $F_{grip}$ 、質量 $M$ 、傾斜角 $\phi$ 、把持点から把持物体の重心までの距離 $I$ を求めることができる。

## ②-2-2 半球接触部とセンシングチップの力学的関係

次に指先センサ接触部に印加された力・モーメントとセンシングチップに伝わる力・モーメントの関係について示す。図2.5に示すように、指先センサ接触部に印加された $Fn'$ 、 $Ftx'$ 、 $Fty'$ 、 $Mn'$ の4成分はそれぞれ $Fnz$ 、 $Mty$ 、 $Mtx$ 、 $Mnz$ としてセンサチップに印加される。ここで接触部に印加された並進力 $Ftx'$ 、 $Fty'$ はピラーハンド側面に作用することによってそれぞれy軸まわり、x軸まわりのモーメントとしてセンシングチップに印加されることに注意されたい。このとき半球接触部に加わる力及びモーメントとチップに加わる力は式(2.19)で表される。

$$\begin{pmatrix} F_{tx}' \\ F_{ty}' \\ F_{n'} \\ M_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} My \\ Mx \\ Fz \\ Mz \end{pmatrix} \quad (2. 19)$$

または

$$(F') = (C)(F) \quad (2. 20)$$

ここで  $(F')$ ,  $(F)$  は接触部、センシングチップの中心それぞれに印加する一階の力モーメントテンソル。 $(C)$  は 2 階の変換マトリックスである。

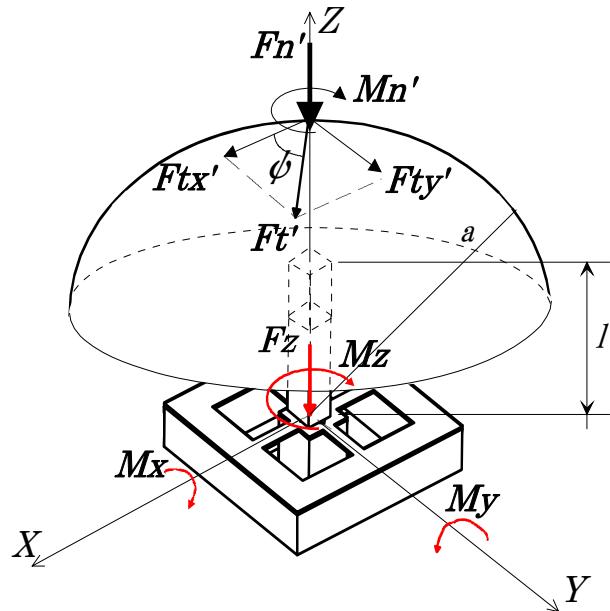


図 2. 5 指先センサ接触部に印加された力、モーメントのセンシングチップへの伝達

これ以降、簡単のため指先センサ接触部に印加される力  $F'n'$ ,  $F'tx'$ ,  $F'ty'$ ,  $Mn'$  はそれぞれ  $Fz'$ ,  $Fx'$ ,  $Fy'$ ,  $Mz'$  と表記する。また、センシングチップに印加される力  $Fnz$ ,  $Mty$ ,  $Mtx$ ,  $Mnz$  は、 $Fz$ ,  $My$ ,  $Mx$ ,  $Mz$  と表記する。

## 引用文献

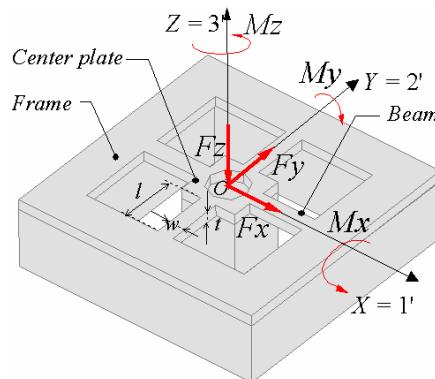
- [9] 山田元：“把持までのセンシング戦略” 日本ロボット学会、vol. 11, no. 7, pp. 959–965, 1993
- [10] 山田元：“触覚センサ研究の新しい展開”、機構論、no. 96-2, B, pp. 1505–1508, 1996.
- [11] G. Canepa, D. D. Rossi et al: “Detection of Incipient Object Slippage by Skin-Like Sensing and Neural Network Processing”, IEEE Trans. system, Man, Cybernetics-Part B, vol. 28, no. 3, pp. 348–356, 1998
- [12] 前野隆司：“曲面状弹性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御”、日本ロボット学会誌、vol. 19, no. 1, pp. 91–99, 2001

### ③ センシングチップの構造と検出原理

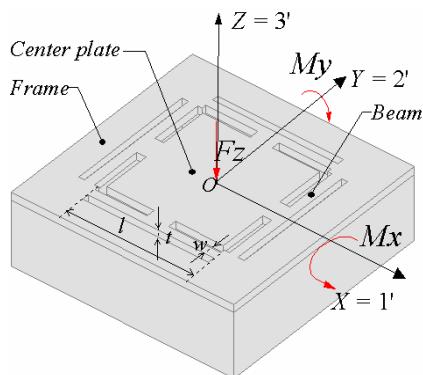
#### ③-1 センシングチップの構造

図3. 1に示すのはそれぞれ構造の異なる単結晶シリコンを構造材料とした小型センシングチップである。単結晶シリコンは小型化に有利、バッチプロセスが可能、ヒステリシスが極めて少ない（完全弾性体）、ICプロセスとの親和性が良いなどの触覚センサの構造材料として優れた特性を持っている。センシングチップはセンタープレート、フレームとサイズ（長さ  $l$ 、幅  $w$ 、厚み  $t$ ）の等しい4つのビームから構成されそれぞれビーム上にはピエゾ抵抗素子が拡散されている。ビームはセンタープレート及びフレームに固定されている。ビームの厚みはセンタープレート及びフレームの厚みに比べ十分薄くなっているため、力やモーメントを印加するとビームに応力が集中する。このときビーム上に形成されたピエゾ抵抗素子の抵抗変化率が変化する。これをピエゾ抵抗素子に接続されたブリッジ回路により電圧の変化として検出する。

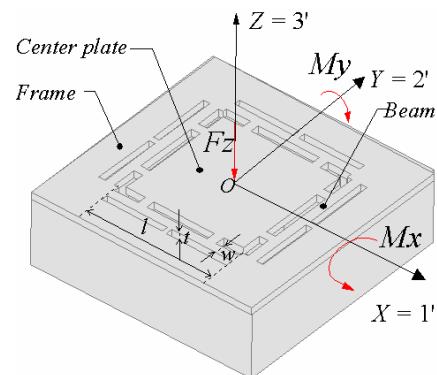
FMS-1 はビームの片方がセンタープレートにもう片方がフレームに固定されている。FMS-2 は一つのビームの両端がフレームに固定され、さらにビームの中央部がセンタープレートに固定されている。FMS-3 はビームの両端は FMS-2 と同様に一つのビームの両端はフレームに固定されているが、その他にセンタープレートに2箇所、フレームに1箇所固定されている。各センサとも X 軸、Y 軸に対して対称な構造になっている。FMS-1 は 6 軸 ( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ ) の独立した出力電圧を検出するため 6 つのブリッジ回路が、FMS-2, FMS-3 は ( $F_z, M_x, M_y$ ) の独立した出力電圧を検出するため 3 つのブリッジ回路がセンシングチップの表面に形成されている。各センサは単結晶シリコンの(100)面を使用している。



(a) FMS-1



(b) FMS-2



(c) FMS-3

図3. 1 センシングチップの構造

### ③-2 センシングチップの構造解析

#### ③-2-1 構造解析の目的

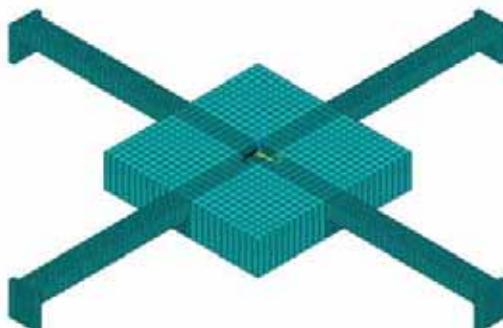
ビームの上にピエゾ抵抗素子の最適な位置及び最大印加力及び最大印加モーメントを調べるためにセンサチップの構造解析をおこなった。ここで最大印加力及び最大印加モーメントとはビーム部にかかる最大応力(Von misses stress[ 2 1 ])がシリコンの限界破壊応力の約 1/2 であるになるときの力( $F_{x_{\max}}$ ,  $F_{y_{\max}}$ ,  $F_{z_{\max}}$ )及びモーメント( $M_{x_{\max}}$ ,  $M_{y_{\max}}$ ,  $M_{z_{\max}}$ )である。

#### ③-2-2 構造解析の方法

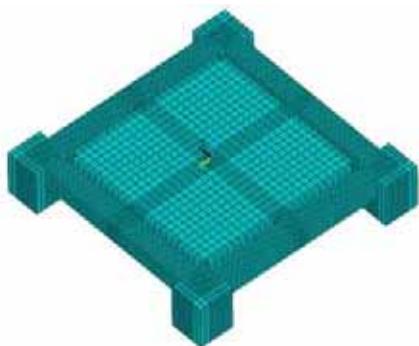
弾性力学の解析は、応力－ひずみ関係式、つり合い方程式およびひずみの適合方程式を与えられた境界条件のもとで解くという偏微分方程式の問題に帰着される。限られた場合には、その解は解析的に求められるが、一般的には、解析解を閉じた形で求めることは困難である場合が多い。そこで、近似的な数値解を求める手法として有限要素法(FEM)を用いる。

FEMは解析対象物を有限な大きさの任意の形状の要素の集合体とみなし、そこで成立する偏微分方程式を代数方程式で近似して、弾性的な近似問題を数値的に解く方法である。ここでの有限要素は三次元であるので直方体を用いる。この有限要素の集合体に対する代数方程式を導く手順は、数学的には変分法に基づいている。本研究では有限要素解析は ANSYS7.0 により FEM 解析を行った。

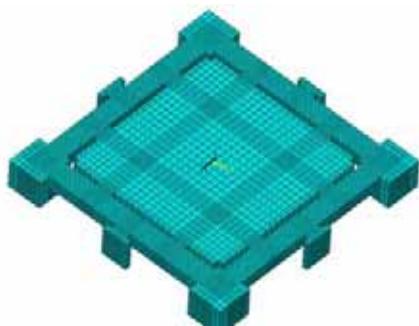
図3. 2 に作成した FMS-1～3 の FEM 解析モデルを示す。ここで解析モデルのビーム部の寸法は  $l \times w \times t = 500 \times 60 \times 45 (\mu m^3)$  である。(I, w, t は図3. 1 参照)



(a) FMS-1



(b) FMS-2



(c) FMS-3

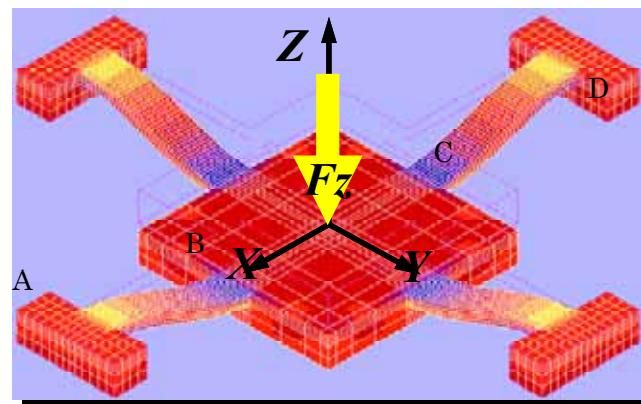
図3. 2 有限要素モデル

境界条件の設定については、固定端の設定を行う。ここではビームの端を固定端とするため指定したエリアの全ての並進変位および回転変位を拘束する。

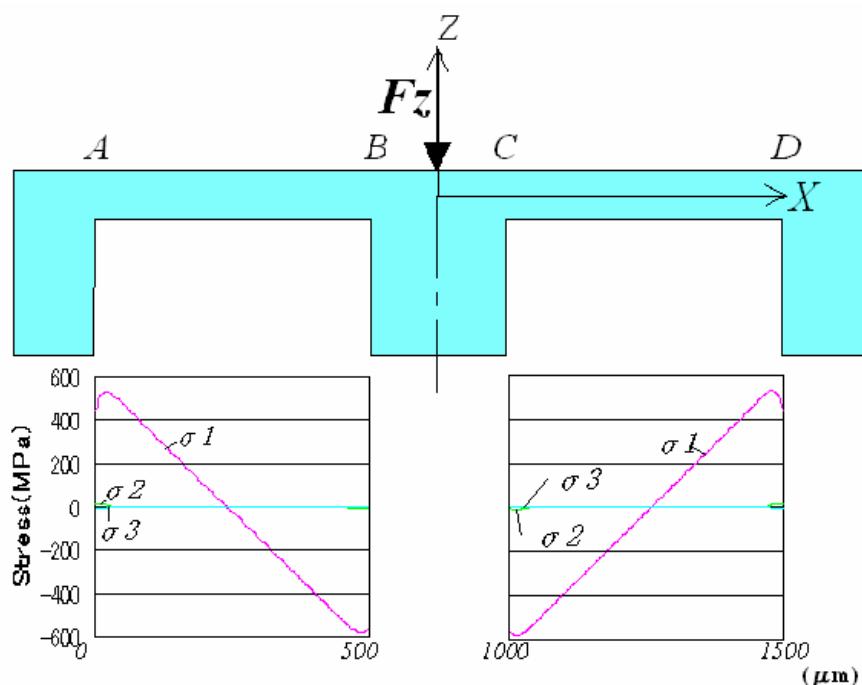
次、力・モーメントの印加作成したモデルに力を印加する。センサチップセンタープレート中央部のキーポイントを指定し力やモーメントの大きさ向きを指定する。

最後にFEMによる応力解析を行った。

図3. 3にFMS-1に $F_z$ を印加したときのセンシングチップビームの変形の様子、図3. 4に $M_y$ を印加したときのセンシングチップビームの変形の様子をそれぞれ例として示す。

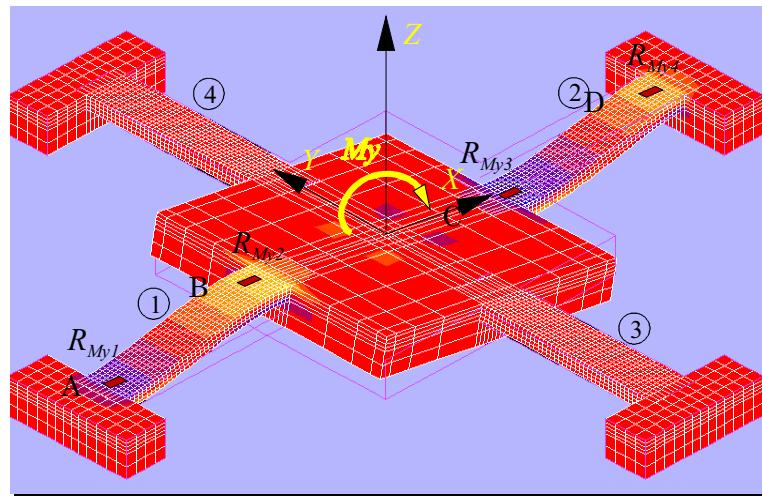


(a)

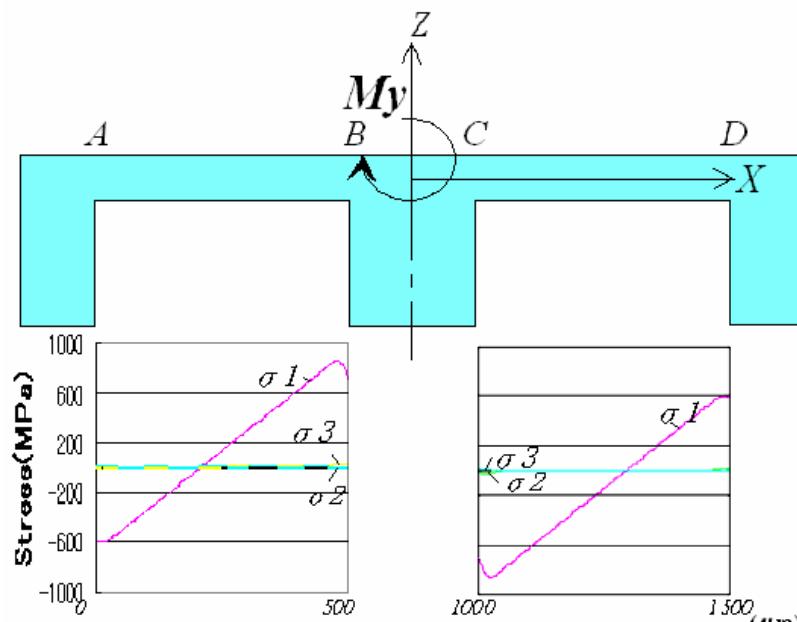


(b)

図3. 3 (a)FMS-1に $F_z$ を印加したときのセンシングチップビームの変形(b) $F_z=200\text{mN}$ を印加したときのビームにかかる真応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$



(a)



(b)

図3. 4 (a)FMS-1に $My$ を印加したときのセンシングチップビームの変形 (b)  $My=120N\mu\text{m}$ を印加したときのビームにかかる真応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$

構造解析によって得られたFMS-1～3のビーム部にかかる最大応力(Von misses stress)がシリコンの限界破壊応力の約1/2である500MPaになるときの印加力、モーメントを表3. 1に示す[22]。

表3. 1 最大印加力、最大印加モーメント (FMS-1～3)

Sensing-chip	Force ( $m\text{N}$ )			Moment ( $N \cdot \mu\text{m}$ )		
	$F_x_{\max}$	$F_y_{\max}$	$F_z_{\max}$	$M_x_{\max}$	$M_y_{\max}$	$M_z_{\max}$
FMS-1	1000	1000	200	80	80	100
FMS-2			800	110	110	
FMS-3			1600	240	240	

### ③-3 ピエゾ抵抗効果

半導体に圧力を加えると結晶にひずみを生じてエネルギー構造体が変わり、キャリア数や移動度が変化することで結果的に抵抗値が変化する。この電気的特性変化のことをピエゾ抵抗効果という。この効果は金属に比べ30~100倍大きく、異方性が極めて高い。本研究ではセンサチップに印加された力やモーメントは図3. 5に示すように、電流密度ベクトル  $J$ 、電界ベクトル  $E$  が同方向の2つのターミナルを持つピエゾ抵抗素子によって検出される。この場合ピエゾ抵抗効果は式(3. 1)のように表される。(式(3. 1)の導出は付録C参照)

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_{j=1}^6 \pi_{1j} \sigma_j, \quad (j = 1, \dots, 6) \quad (3. 1)$$

ここで  $\Delta R/R$  は比抵抗、 $\sigma_j$  は応力及びせん断応力、 $\pi_{1j}$  は結晶方位によって決定されるピエゾ抵抗係数である。

表3. 2は(100) (110) (111) (112)面における長手方向及び横手方向のピエゾ抵抗係数を表したものである。本研究では単結晶シリコンの結晶面(100)面上の<011>及び<011>を長手方向あるいは横手方向とするため表3. 2より、式(3. 1)は式(3. 2)のように簡略化できる。

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi'_{11} \sigma_1 + \pi'_{12} \sigma_2 + \pi'_{13} \sigma_3 \quad (3. 2)$$

$$(\pi'_{11} = 72, \pi'_{12} = -66, \pi'_{13} = -1)$$

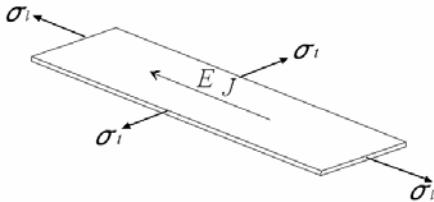


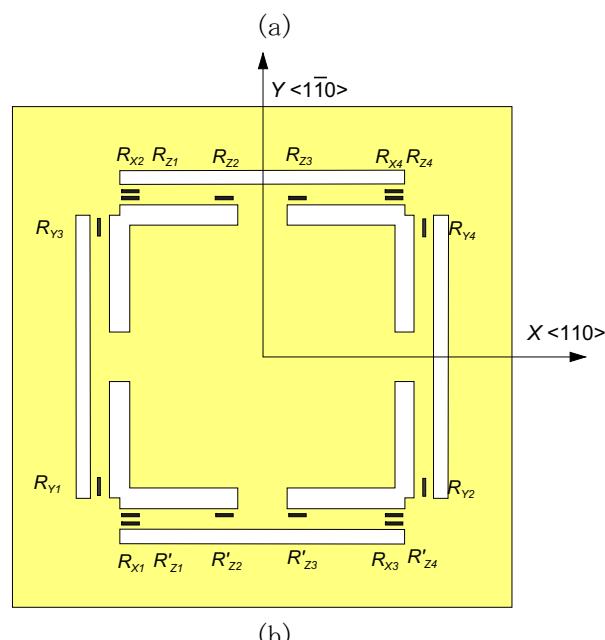
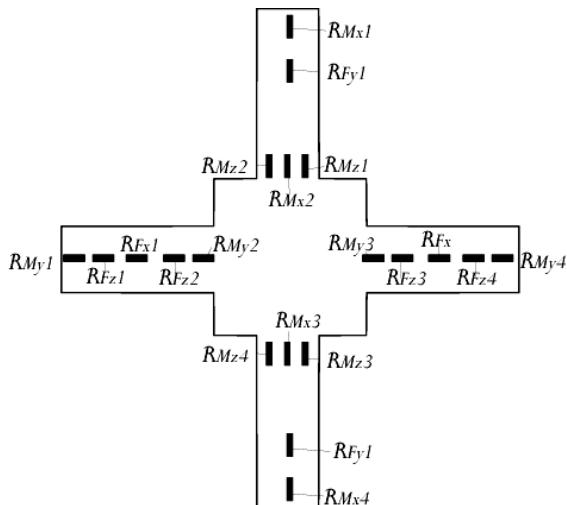
図3. 5 ピエゾ抵抗素子に加わる応力

表3. 2 結晶方位とピエゾ抵抗係数

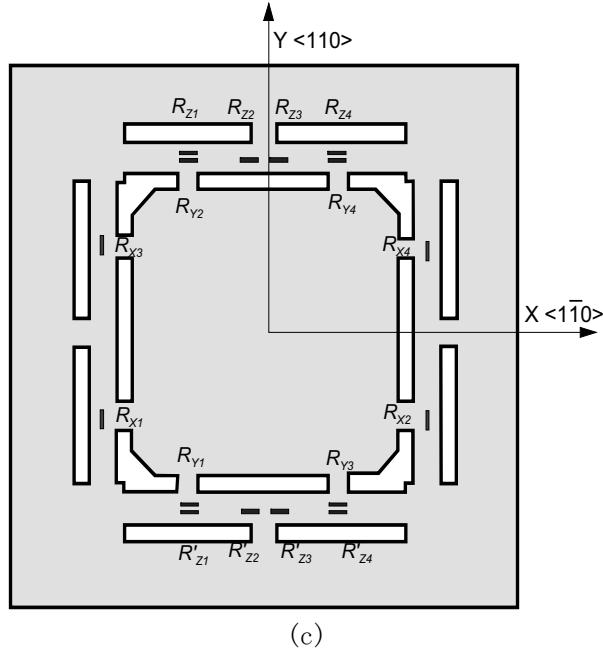
結晶方位			ピエゾ抵抗係数 $\times 10^{-12} (cm^2 / dyne)$					
面	1軸	2軸	$\pi'_{11}$	$\pi'_{12}$	$\pi'_{13}$	$\pi'_{14}$	$\pi'_{15}$	$\pi'_{16}$
100	010	001	7	-1	-1	0	0	0
	011	<u>011</u>	72	-66	-1	0	0	0
110	<u>110</u>	00 <u>1</u>	72	-1	-66	0	0	0
	001	<u>110</u>	7	-1	-1	0	0	0
	<u>111</u>	<u>112</u>	94	-45	-45	0	0	0
	<u>112</u>	<u>111</u>	72	-45	-23	0	0	61
111	<u>110</u>	<u>112</u>	72	-23	-45	-61	0	0
	<u>112</u>	<u>110</u>	72	-23	-45	0	-61	0
211	<u>111</u>	<u>011</u>	94	-45	-45	0	0	0
	<u>011</u>	<u>111</u>	72	-45	-23	-61	0	0

### ③-4 ピエゾ抵抗素子の配置

図3.6はそれぞれFMS1～3のセンサチップのビーム上のピエゾ抵抗素子の配置を表している。FMS-1では6成分 ( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ ) を検出するため、 $R_{F_x1}, R_{F_x2}$  ( $F_x$ 検出用)、 $R_{F_y1}, R_{F_y2}$  ( $F_y$ 検出用)、 $R_{F_z1}, R_{F_z2}, R_{F_z3}, R_{F_z4}$  ( $F_z$ 検出用)、 $R_{M_x1}, R_{M_x2}, R_{M_x3}, R_{M_x4}$  ( $M_x$ 検出用)、 $R_{M_y1}, R_{M_y2}, R_{M_y3}, R_{M_y4}$  ( $M_y$ 検出用)、 $R_{M_z1}, R_{M_z2}, R_{M_z3}, R_{M_z4}$  ( $M_z$ 検出用) の計22個のピエゾ抵抗素子が配置されている。FMS-2, 3では3軸 ( $F_z, M_x, M_y$ ) を検出するため、 $R_{F_z1}, R_{F_z2}, R_{F_z3}, R_{F_z4}$ 、 $R_{F_z'1}, R_{F_z'2}, R_{F_z'3}, R_{F_z'4}$  ( $F_z$ 検出用)、 $R_{M_x1}, R_{M_x2}, R_{M_x3}, R_{M_x4}$  ( $M_x$ 検出用)、 $R_{M_y1}, R_{M_y2}, R_{M_y3}, R_{M_y4}$  ( $M_y$ 検出用) の計16個のピエゾ抵抗素子がそれぞれ配置されている。これらはFEM解析の結果に基づき、力、モーメントの印加時、ビーム上において最も大きな応力が発生する位置に配置した。



(b)



(c)

図3. 6 ピエゾ抵抗素子の配置

## ③-5 検出回路

## ③-5-1 FMS-1 の検出回路

各成分を独立して検出するため図3. 7のようにFMS-1では6つの独立したブリッジ回路が形成されている。( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 検出用はハーフブリッジ回路  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ はフルブリッジ回路)  $F_y$ ,  $M_y$ -検出用回路はそれぞれ  $F_x$ ,  $M_x$ -検出用回路と同じ構成であるため省略した。

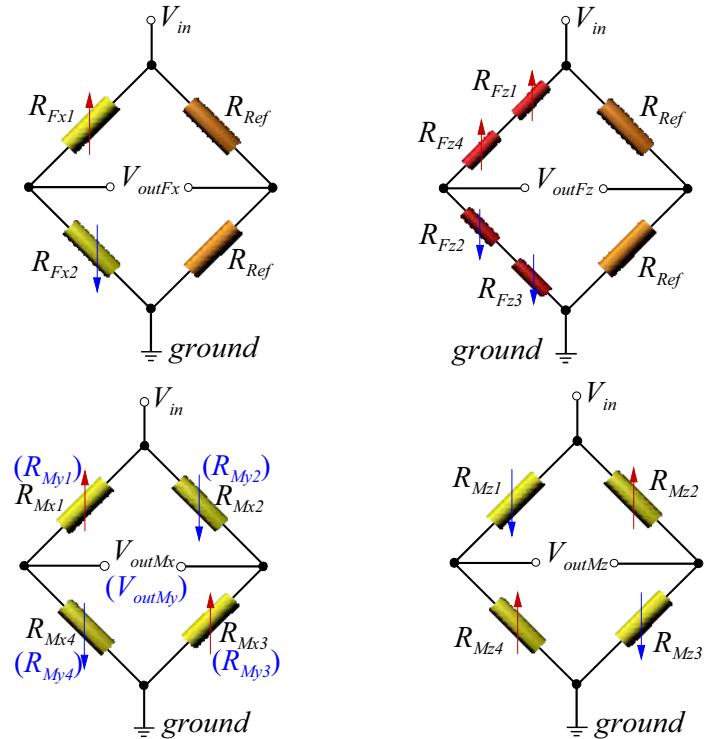


図3. 7 FMS-1 のブリッジ回路

このとき、 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ の検出用ブリッジの出力電圧  $V_{outF_x}$ 、 $V_{outF_y}$ 、 $V_{outF_z}$ 、 $V_{outM_x}$ 、 $V_{outM_y}$ 、 $V_{outM_z}$

$V_{outM_z}$  はそれぞれ式 (3. 3) ~ (3. 8) で表される。

$$V_{outF_x} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{F_x1}}{R_{F_x1}} - \frac{\Delta R_{F_x2}}{R_{F_x2}} \right) V_{in} \quad (3. 3)$$

$$V_{outF_y} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{F_y1}}{R_{F_y1}} - \frac{\Delta R_{F_y2}}{R_{F_y2}} \right) V_{in} \quad (3. 4)$$

$$V_{outF_z} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{F_z1} + \Delta R_{F_z4}}{R_{F_z1} + R_{F_z4}} - \frac{\Delta R_{F_z2} + \Delta R_{F_z3}}{R_{F_z2} + R_{F_z3}} \right) V_{in} \quad (3. 5)$$

$$V_{outM_x} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{M_x1} + \Delta R_{M_x3}}{R_{M_x1} + R_{M_x3}} - \frac{\Delta R_{M_x2} + \Delta R_{M_x4}}{R_{M_x2} + R_{M_x4}} \right) V_{in} \quad (3. 6)$$

$$V_{outM_y} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{M_y1} + \Delta R_{M_y3}}{R_{M_y1} + R_{M_y3}} - \frac{\Delta R_{M_y2} + \Delta R_{M_y4}}{R_{M_y2} + R_{M_y4}} \right) V_{in} \quad (3. 7)$$

$$V_{outM_z} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{M_z1} + \Delta R_{M_z3}}{R_{M_z1} + R_{M_z3}} - \frac{\Delta R_{M_z2} + \Delta R_{M_z4}}{R_{M_z2} + R_{M_z4}} \right) V_{in} \quad (3. 8)$$

表 3. 3 に FMS-1 のピエゾ抵抗素子の抵抗値の増減表を示す。表中 ‘+’、‘-’ はそれぞれ増、減を表し、‘0’ は変化がないことを示している。表中の網掛け部は、それぞれのブリッジ回路において出力があることを示している。

表 3. 3 ピエゾ抵抗素子の抵抗値の増減表 (FMS-1)

	$F_x$ -Bridge		$F_y$ -Bridge		$F_z$ -Bridge				$M_y$ -Bridge				$M_x$ -Bridge				$M_z$ -Bridge			
	$R_{F_x1}$	$R_{F_x2}$	$R_{F_y1}$	$R_{F_y2}$	$R_{F_z1}$	$R_{F_z2}$	$R_{F_z3}$	$R_{F_z4}$	$R_{M_y1}$	$R_{M_y2}$	$R_{M_y3}$	$R_{M_y4}$	$R_{M_x1}$	$R_{M_x2}$	$R_{M_x3}$	$R_{M_x4}$	$R_{M_z1}$	$R_{M_z2}$	$R_{M_z3}$	$R_{M_z4}$
$F_x$	+	-	0	0	+	+	-	-	+	+	-	-	0	0	0	0	+	-	-	+
$F_y$	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	-	-	-	-	-	+
$F_z$	+/-	+/-	+/-	+/-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-
$M_y$	0	0	0	0	+	-	+	-	+	-	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_x$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	+	-	-	-	+	+
$M_z$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+

この表によって各印加力とモーメントの検出は下記のように説明する。

### ③-5-1-1 $F_x(F_y)$ の検出

印加力  $F_x$  がセンタープレート部に加わった場合、 $F_x$  検出用ブリッジ回路の 2 つのピエゾ抵抗素子に作用する応力は次のように表される。

$$\sigma_{R_{Fx1}} = -\sigma_{R_{Fx2}} \quad (3.9)$$

よって  $F_x$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{Fx1} = -\Delta R_{Fx2} \quad (3.10)$$

となり、以下に示す出力を得ることができる。

$$V_{outFx} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{Fx1}}{R_{Fx1}} V_{in} \quad (3.11)$$

このとき、センサチップ上における対称な配置とセンサチップの構造から  $F_y$  検出用ブリッジ回路の

$\Delta R_{Fy1}$  と  $\Delta R_{Fy2}$  は等しくため、 $F_y$  検出用ブリッジ回路の出力はゼロになる。同様に、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、そして  $M_z$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{Fz1} = \Delta R_{Fz2} = -\Delta R_{Fz3} = -\Delta R_{Fz4}, \quad \Delta R_{Mx1} = \Delta R_{Mx4} = \Delta R_{Mx2} = \Delta R_{Mx3},$$

$$\Delta R_{My1} = \Delta R_{My2} = -\Delta R_{My3} = -\Delta R_{My4}, \quad \Delta R_{Mz1} = \Delta R_{Mz3} = -\Delta R_{Mz2} = -\Delta R_{Mz4}$$

となり、それぞれ式 (3.3) ~ (3.8) より  $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  検出用ブリッジ回路の出力はそれぞれゼロとなる。

$F_y$  については  $F_x$  と同様の検出方法である。

### ③-5-1-2 $F_z$ の検出

印加力  $F_z$  がセンタープレート部に加わった場合、 $F_z$  検出用ブリッジ回路の 4 つのピエゾ抵抗素子に作用する応力は次のように表される。

$$\sigma_{R_{Fz1}} = -\sigma_{R_{Fz2}} = -\sigma_{R_{Fz3}} = \sigma_{R_{Fz4}} \quad (3.12)$$

よって  $F_z$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{Fz1} = -\Delta R_{Fz2} = -\Delta R_{Fz3} = \Delta R_{Fz4} \quad (3.13)$$

となり、以下に示す出力を得ることができる。

$$V_{outFz} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{Fz1}}{R_{Fz1}} V_{in} \quad (3.14)$$

このとき、 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、そして  $M_z$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化はそれぞれ、 $\Delta R_{Fy1} = \Delta R_{Fy2}$ 、

$$\Delta R_{Fy1} = \Delta R_{Fy2}, \quad \Delta R_{Mx1} = \Delta R_{Mx2} = \Delta R_{Mx3} = \Delta R_{Mx4}$$

$\Delta R_{My1} = \Delta R_{My2} = \Delta R_{My3} = \Delta R_{My4}, \quad \Delta R_{Mz1} = \Delta R_{Mz2} = \Delta R_{Mz3} = \Delta R_{Mz4}$  となり、それぞれ式(3. 3)～(3. 8)より  $Fy, Fz, Mx, My, Mz$  検出用ブリッジ回路の出力はそれぞれゼロとなる。

### ③-5-1-3 $My(Mx)$ の検出

印加力  $My$  がセンタープレート部に加わった場合、 $My$  検出用ブリッジ回路の4つのピエゾ抵抗素子に作用する応力は次のように表される。

$$\sigma_{R_{My1}} = -\sigma_{R_{My4}} = \alpha \sigma_{R_{My2}} = -\alpha \sigma_{R_{My3}} \quad (3. 1 5)$$

よって  $My$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{My1} = -\Delta R_{My4} = \alpha \Delta R_{My2} = -\alpha \Delta R_{My3} \quad (3. 1 6)$$

となり、以下に示す出力を得ることができる。

$$V_{outMy} = \frac{1}{2} \frac{(1+\alpha)\Delta R_{My1}}{R_{My1}} V_{in} \quad (3. 1 7)$$

このとき、 $Fx, Fy, Fz$  そして  $Mz$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は全てゼロであり、回路の出力はゼロである。 $My$  検出用ブリッジ回路は  $\Delta R_{My1} = -\Delta R_{My4}, \quad \Delta R_{My2} = -\Delta R_{My3}$  となり、出力はゼロである。 $My$  については  $Mx$  と同様の検出方法である。

### ③-5-1-4 $Mz$ の検出

印加力  $Mz$  がセンタープレート部に加わった場合、 $Mz$  検出用ブリッジ回路の4つのピエゾ抵抗素子に作用する応力は次のように表される。

$$\sigma_{R_{Mz1}} = \sigma_{R_{Mz3}} = -\sigma_{R_{Mz2}} = -\sigma_{R_{Mz4}} \quad (3. 1 8)$$

よって  $Mz$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{My1} = \Delta R_{My3} = -\Delta R_{My2} = -\Delta R_{My4} \quad (3. 1 9)$$

となり、以下に示す出力を得ることができる。

$$V_{outMy} = \frac{\Delta R_{Mz1}}{R_{Mz1}} V_{in} \quad (3.20)$$

このとき、 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_z$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化はそれぞれ  $\Delta R_{Fx1} = \Delta R_{Fx2}$ 、 $\Delta R_{Fy1} = \Delta R_{Fy2}$ 、

$\Delta R_{Fz1} = \Delta R_{Fz2} = \Delta R_{Fz3} = \Delta R_{Fz4}$ 、 $\Delta R_{Mx1} = \Delta R_{Mx2} = \Delta R_{Mx3} = \Delta R_{Mx4}$ 、 $\Delta R_{My1} = \Delta R_{My2} = \Delta R_{My3} = \Delta R_{My4}$  となり、それぞれ式 (3.3) ~ (3.8) より  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_z$  検出用ブリッジ回路の出力はそれぞれゼロとなる。

### ③-5-2 FMS-2, FMS-3 の検出回路

FMS-2, 3 では図 3.10 のように 3 つの独立したフルブリッジ回路が形成されている。 $M_x$ -ブリッジは  $My$ -ブリッジと同じ構成であるため省略した。

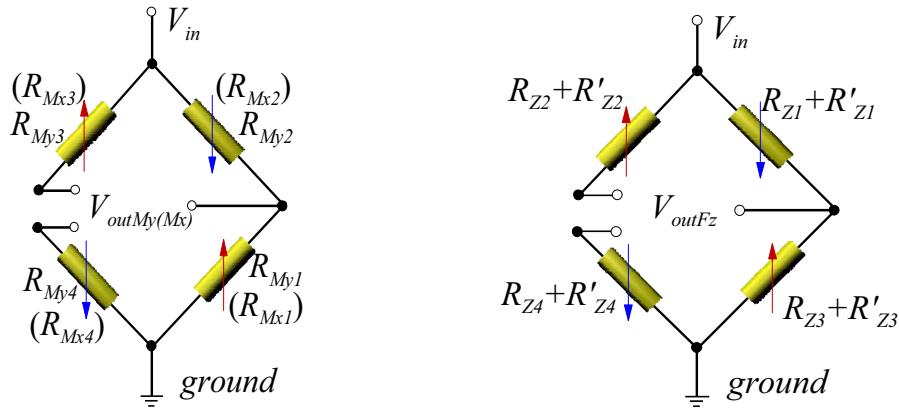


図 3.8. ブリッジ回路

このとき、 $F_z, M_x, My$  の検出用ブリッジの出力電圧  $V_{outFz}$ 、 $V_{outMx}$  はそれぞれ式 (3.21) ~ (3.23) で表される。

$$V_{outFz} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{Fz1} + \Delta R'_{Fz1}}{R_{Fz1} + R'_{Fz1}} + \frac{\Delta R_{Fz3} + \Delta R'_{Fz3}}{R_{Fz3} + R'_{Fz3}} - \frac{\Delta R_{Fz2} + \Delta R'_{Fz2}}{R_{Fz2} + R'_{Fz2}} - \frac{\Delta R_{Fz4} + \Delta R'_{Fz4}}{R_{Fz4} + R'_{Fz4}} \right) V_{in} \quad (3.21)$$

$$V_{outMx} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{Mx1}}{R_{Mx1}} + \frac{\Delta R_{Mx3}}{R_{Mx3}} - \frac{\Delta R_{Mx2}}{R_{Mx2}} - \frac{\Delta R_{Mx4}}{R_{Mx4}} \right) V_{in} \quad (3.22)$$

$$V_{outMy} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_{My1}}{R_{My1}} + \frac{\Delta R_{My3}}{R_{My3}} - \frac{\Delta R_{My2}}{R_{My2}} - \frac{\Delta R_{My4}}{R_{My4}} \right) V_{in} \quad (3.23)$$

表3. 4にFMS-2、3のピエゾ抵抗素子の抵抗値の増減表を示す。表中‘+’、‘-’はそれぞれ増、減を表し、‘0’は変化がないことを示している。表中の網掛け部は、それぞれのブリッジ回路において出力があることを示している。

表3. 4 ピエゾ抵抗素子の抵抗値の増減表 (FMS-2、3)

	$R_{Mx1}$	$R_{Mx2}$	$R_{Mx3}$	$R_{Mx4}$	$R_{My1}$	$R_{My2}$	$R_{My3}$	$R_{My4}$	$R_{Fz1} + R'_{Fz1}$	$R_{Fz2} + R'_{Fz2}$	$R_{Fz3} + R'_{Fz3}$	$R_{Fz4} + R'_{Fz4}$
$Mx$	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-
$My$	+	+	-	-	+	-	+	-	0	0	0	0
$Fz$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-

### ③-5-2-1 $Fz$ の検出

印加力  $Fz$  がセンタープレート部に加わった場合、 $Fz$  検出用ブリッジ回路の8つのピエゾ抵抗素子に作用する応力は次のように表される。

$$\sigma_{R_{Fz1}} = \sigma_{R'_{Fz1}} = \sigma_{R_{Fz4}} = \sigma_{R'_{Fz4}} = -\sigma_{R_{Fz2}} = -\sigma_{R'_{Fz2}} = -\sigma_{R_{Fz3}} = -\sigma_{R'_{Fz3}} \quad (3. 24)$$

よって  $Fz$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{Fz1} = \Delta R'_{Fz1} = \Delta R_{Fz4} = \Delta R'_{Fz4} = -\Delta R_{Fz2} = -\Delta R'_{Fz2} = -\Delta R_{Fz3} = -\Delta R'_{Fz3} \quad (3. 25)$$

となり、以下に示す出力を得ることができる。

$$V_{outFz} = \frac{\Delta R_{Fz1}}{R_{Fz1}} V_{in} \quad (3. 26)$$

このとき、 $Mx$ 、 $My$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化はそれぞれ、 $\Delta R_{Mx1} = \Delta R_{Mx2} = \Delta R_{Mx3} = \Delta R_{Mx4}$ 、

$\Delta R_{My1} = \Delta R_{My2} = \Delta R_{My3} = \Delta R_{My4}$  となり、それぞれ式 (3. 21) ~ (3. 23) より  $Mx$ 、 $My$  検出用ブリッジ回路の出力はそれぞれゼロとなる。

### ③-5-2-2 $Mx$ の検出

印加力  $Mx$  がセンタープレート部に加わった場合、 $Mx$  検出用ブリッジ回路の4つのピエゾ抵抗素子に作用する応力は次のように表される。

$$\sigma_{R_{Mx1}} = \sigma_{R_{Mx3}} = -\sigma_{R_{Mx2}} = -\sigma_{R_{Mx4}} \quad (3. 27)$$

よって  $M_x$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化は

$$\Delta R_{Mx1} = \Delta R_{Mx3} = -\Delta R_{Mx2} = -\Delta R_{Mx4} \quad (3. 28)$$

となり、以下に示す出力を得ることができる。

$$V_{outMx} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{Mx1}}{R_{Mx1}} V_{in} \quad (3. 29)$$

このとき、 $F_z$ 、 $My$  検出用ブリッジ回路の抵抗変化はそれぞれ、

$$\Delta R_{Fz1} + \Delta R'_{Fz1} = \Delta R_{Fz4} + \Delta R'_{Fz4} = \Delta R_{Fz2} + \Delta R'_{Fz2} = \Delta R_{Fz3} + \Delta R'_{Fz3} = 0 \quad \sigma_{R_{My1}} = \sigma_{R_{My2}} = -\sigma_{R_{My3}} = -\sigma_{R_{My4}} \text{、とな}$$

り、出力はゼロである。 $My$ についても  $Mx$ と同様の検出方法である。

### ③-6 感度の計算

③-5 検出回路において、FMS-1～3 の各軸の出力電圧をビーム部にかかる応力により算出した。よって FEM 解析で求めたセンサに印加した力及びモーメントとそのときのビームに発生する応力値の対応によって式 (3. 30) (3. 31) に定義するような力感度  $S_F$ 、モーメント感度  $S_M$  を求めることができる。

$$S_F = \frac{V_{outF}}{F} \quad (3. 30)$$

$$S_M = \frac{V_{outM}}{M} \quad (3. 31)$$

表 3.5 は式を用いて求めた FMS1～3 の各軸の感度である。入力電圧  $V_{in}$  は 5V として計算を行っている。

表 3.5 構造解析を基に算出した FMS1～3 の感度  $l \times w \times t = 500 \times 60 \times 45 (\mu m^3)$ 、 $V_{in} = 5(V)$

	$SF (mV/mN)$		$SM (mV/N\mu m)$	
	$SFx, SFy$	$SFz$	$SMx, SMy$	$SMz$
FMS-1	0.05	4.81	31.6	2.04
FMS-2		1.61	9.85	
FMS-3		0.41	2.83	

### ③-7 考察

図3. 9は表3. 1で示した最大印加力、モーメント、表3. 5で示した感度を基にFMS1～3の特性を比較したものである。 $F_z$ 、 $My(Mx)$ とともにFMS-3、FMS-2、FMS-1の順に印加できる力（ビームに発生する最大応力が500MPaするときの $F_z$ ）が大きくなっている。FMS-3の $F_{z_{\max}}$ は1600mN、 $My_{\max}$ （ $Mx_{\max}$ ）は240N $\mu$ mと3つの中では最も大きな値を示した。また、 $F_z$ 、 $My(Mx)$ の感度とともにFMS-1、FMS-2、FMS-3の順に感度は高くなっている。FMS-1の $F_z$ 感度（ $V_{in}=5V$ ）は4.81mV/mN、 $My(Mx)$ 感度は31.6mV/N $\mu$ mと3つの中で最も高い感度が得られた。

これらの結果から同じビームの寸法でかつ最も応力の発生する位置にピエゾ抵抗素子を配置したとき、そのビームの支持点数の増加に伴い最大印加力（モーメント）は増加し、また感度は低下する。つまり、最大印加力（モーメント）と感度はトレードオフの関係にあるといえる。

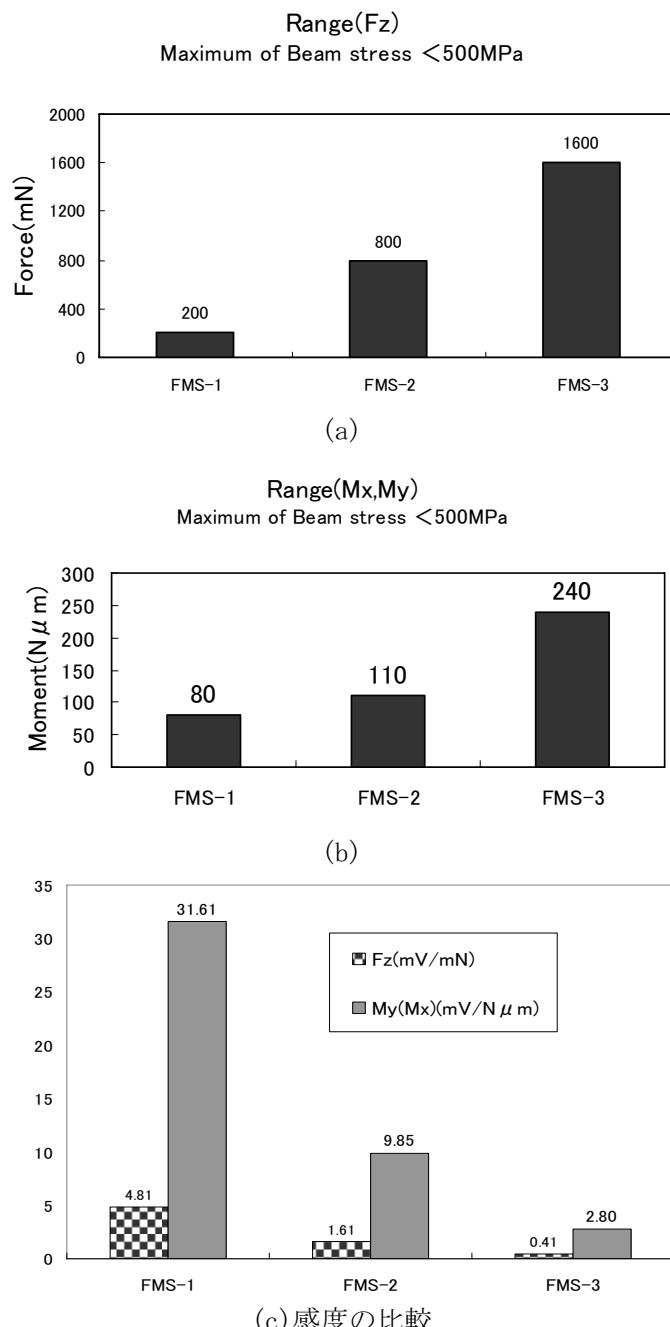


図3. 9 FMS-1～3の最大印加力(a)・最大印加モーメント(b)、感度(c)の比較

### ③-8 再設計

これまでセンサの構造による性能比較のため FMS-1~3 のビーム寸法をそれぞれ等しく  $l \times w \times t = 500 \times 60 \times 45 (\mu\text{m}^3)$  としていた。ここで求めた最大印加力、最大印加モーメント、感度を基に再設計を行った。表 3. 6、表 3. 7 に再設計した FMS-1~3 の最大印加力・最大印加モーメント、感度を示す。また、付録 F. 1 に再設計した FMS-1~3 の図面を示した。

表 3. 6 再設計したセンサの最大印加力・最大印加モーメント

Sensing-chip $l \times w \times t, (\mu\text{m}^3)$	Force ( $\text{mN}$ )		Moment ( $\text{N} \cdot \mu\text{m}$ )	
	$F_x_{\max}, F_y_{\max}$	$F_z_{\max}$	$M_x_{\max}, M_y_{\max}$	$M_z_{\max}$
FMS-1 ( $500 \times 120 \times 80$ )	2000	1000	240	300
FMS-2 ( $800 \times 100 \times 80$ )		800	200	
FMS-3 ( $1000 \times 100 \times 80$ )		5000	800	

表 3. 7 再設計したセンサの感度  $V_{in} = 5(V)$

Sensing-chip $l \times w \times t, (\mu\text{m}^3)$	$SF(\text{mV}/\text{mN})$		$SM(\text{mV}/\text{N}\mu\text{m})$	
	$SF_x, SF_y$	$SF_z$	$SM_x, SM_y$	$SM_z$
FMS-1 ( $500 \times 120 \times 80$ )	0.005	0.4	4.7	0.19
FMS-2 ( $800 \times 100 \times 80$ )		0.5	9.85	
FMS-3 ( $1000 \times 100 \times 80$ )		0.2	2.83	

### 引用文献

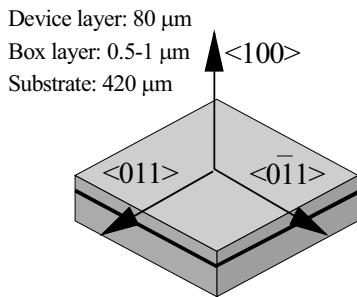
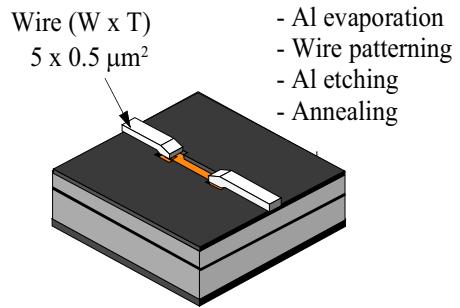
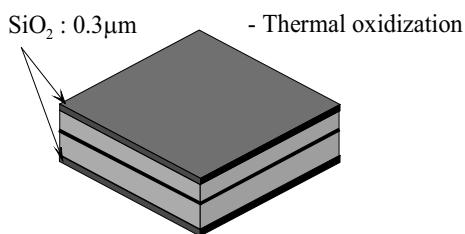
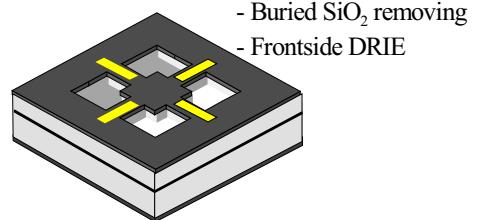
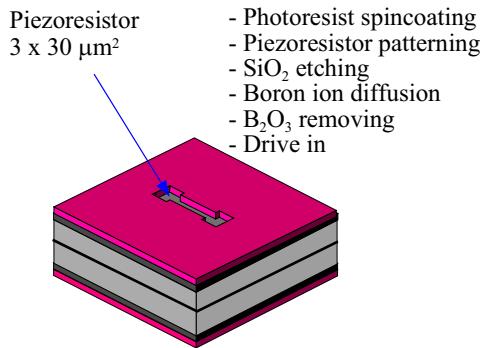
- [13] F.Brinson: Engineered Materials Handbook Vol3 , ASM International, 1990
- [14] A.S.Tetelman: Fracture Of Structural Materials, Wiley & Sons, 1967

## ④ センサチップの製作と評価

### ④-1 製作プロセスの流れ

図4. 1はセンシングチップの製作プロセスの流れ、表4. 1に製作プロセスの工程を示す。図4. 2は製作したセンサの写真を示す。

- (1) 基板には 100 面のデバイス層  $80 \mu\text{m}$ 、酸化層  $1 \mu\text{m}$ 、基板  $420 \mu\text{m}$  の SOI ウエハを用いる。
- (2) 熱酸化によって  $0.3 \mu\text{m}$  厚の SiO<sub>2</sub> を表面の上に形成する。
- (3) 結晶方位  $\langle 011 \rangle \times \langle 011 \rangle$  が主軸となるように SiO<sub>2</sub> にピエゾ抵抗素子のパターンニングを行う。ボロンの 2段階拡散（デポジションとドライブイン）により p-型ピエゾ抵抗素子を形成する。)
- (4) ピエゾ抵抗素子と Al 配線配線をコントタクトするためにコンタクトホールをパターンニング、エッチングにより形成する。
- (5)  $0.6 \mu\text{m}$  厚の Al 配線を真空蒸着、フォトリソグラフィ及びエッチャリングによって形成する。Al 配線とピエゾ抵抗素子のオーミック接触を得るために、N<sub>2</sub> 霧囲気中でシンタリングを行う。
- (6) ウエハの前面をパターンニング、現像し、ドライエッチャリング用のマスクを形成し ICP-RIE によってデバイス層のビームを形成する。
- (7) ウエハの背面を（6）と同様に ICP-RIE によって基板層をエッチャリングすることによってビームを形成する。
- (8) RIE によって酸化層を除去する。
- (9) パイレックスガラスをパターンニング、エッチャリングする。
- (10) (9) で製作したガラスを（8）の背面に陽極接合する。

**SOI wafer:****1. Starting material****5. Wiring (interconnection)****2. Oxidization****6. Crossbeam formation****3. p-type piezoresistor formation  
(boron ion diffusion)**

- Photoresist spincoating on glass
- Overload protection hole patterning
- $\text{SiO}_2$  etching
- Anodic Bonding

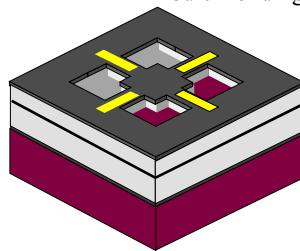
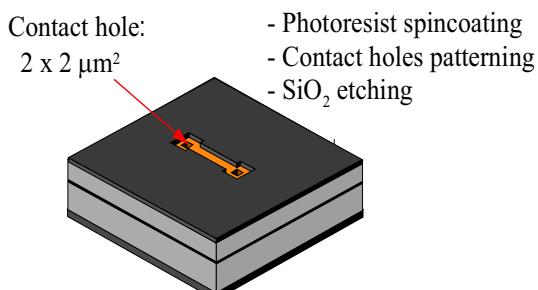
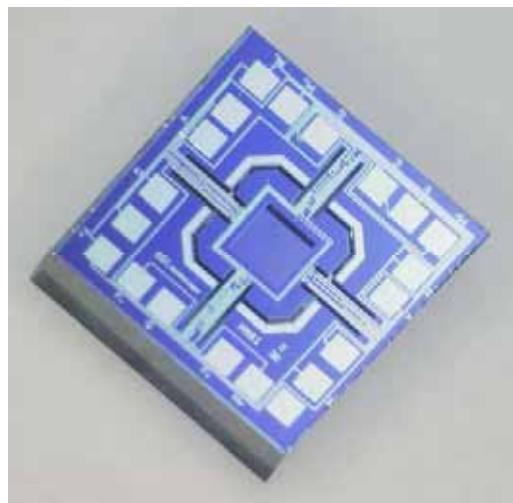
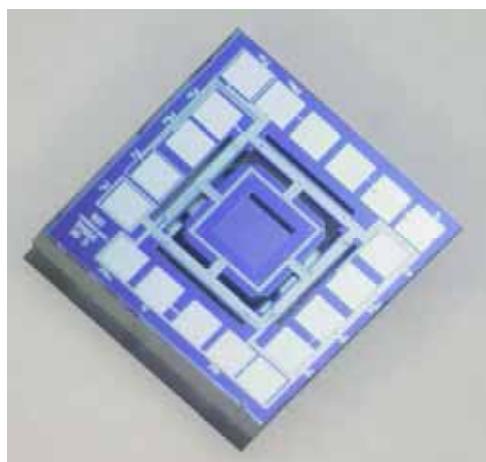
**7. Glass bonding****4. Contact hole opening**

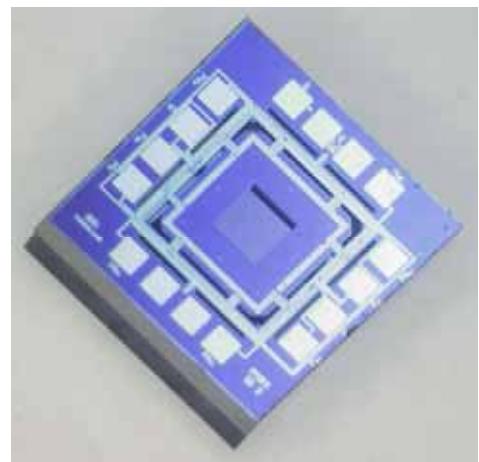
図4. 1 センシングチップの製作プロセス



(a) F M S - 1



(b) F M S - 2



(c) F M S - 3

図4. 2 製作したセンシングチップ

同じウェハ内のピエゾ抵抗素子の抵抗値の分布（測定点数：100点）

ピエゾ抵抗層の深さ：約  $1.2 \mu\text{m}$ , 表面濃度： 約  $5E18 / \text{cm}^3$

抵抗値

平均値： 931.2 Ω  
(設計値： 1 k Ω)

標準偏差 ( $\sigma$ )： 16.5 Ω  
(1.77%)  
 $3\sigma = 5.3\%$

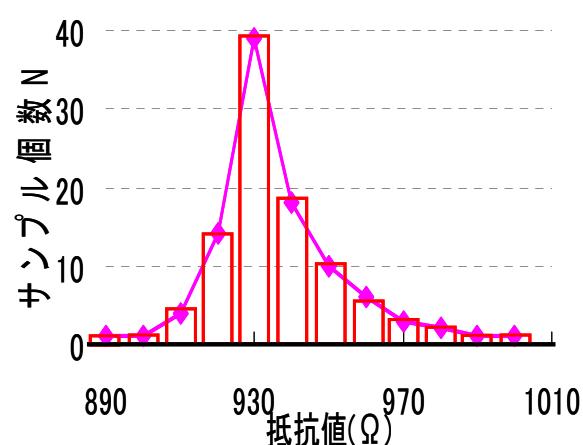


図4. 3 抵抗値の分散

#### ④-2 センシングチップの計測システム

図4. 3(a)はセンサチップの評価に用いた計測システムの構成図を(b)はその写真である。センサチップ(図中に示す Sensor chip)に所望の力を印加させるために図4. 4に示す島図製微小圧縮試験機 HMV2000 (Micro Indenter) で力を印加しセンサチップからの出力電圧を keyence 製アナログデジタルコンバータ NR-250(A/D converter) でアナログからデジタル信号へ変換したものを NEC 製 PC, LAVIE-NX, LW40H/1(Computer)によりモニタリングした。

微小圧縮試験機はダイヤモンドを材料とするビックアース压子によって 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 2000mN の力の印加が可能であり、アライメントテーブル上のセンサを X, Y 方向に移動させることで、力を印加する位置決めを行った。テスト1として、センサのセンタープレート中央部にセンサチップの面に対して垂直な力を印加したものを  $F_z$  とし、このときのセンサチップの出力電圧を計測した。次にテスト2としてセンサチップのセンタープレートの端(中心部から  $250\mu\text{m}$ )の位置にセンサチップの面に対して垂直な力を印加することで、 $F_z$  と  $M_x$ (または  $M_y$ )を同時に印加した。

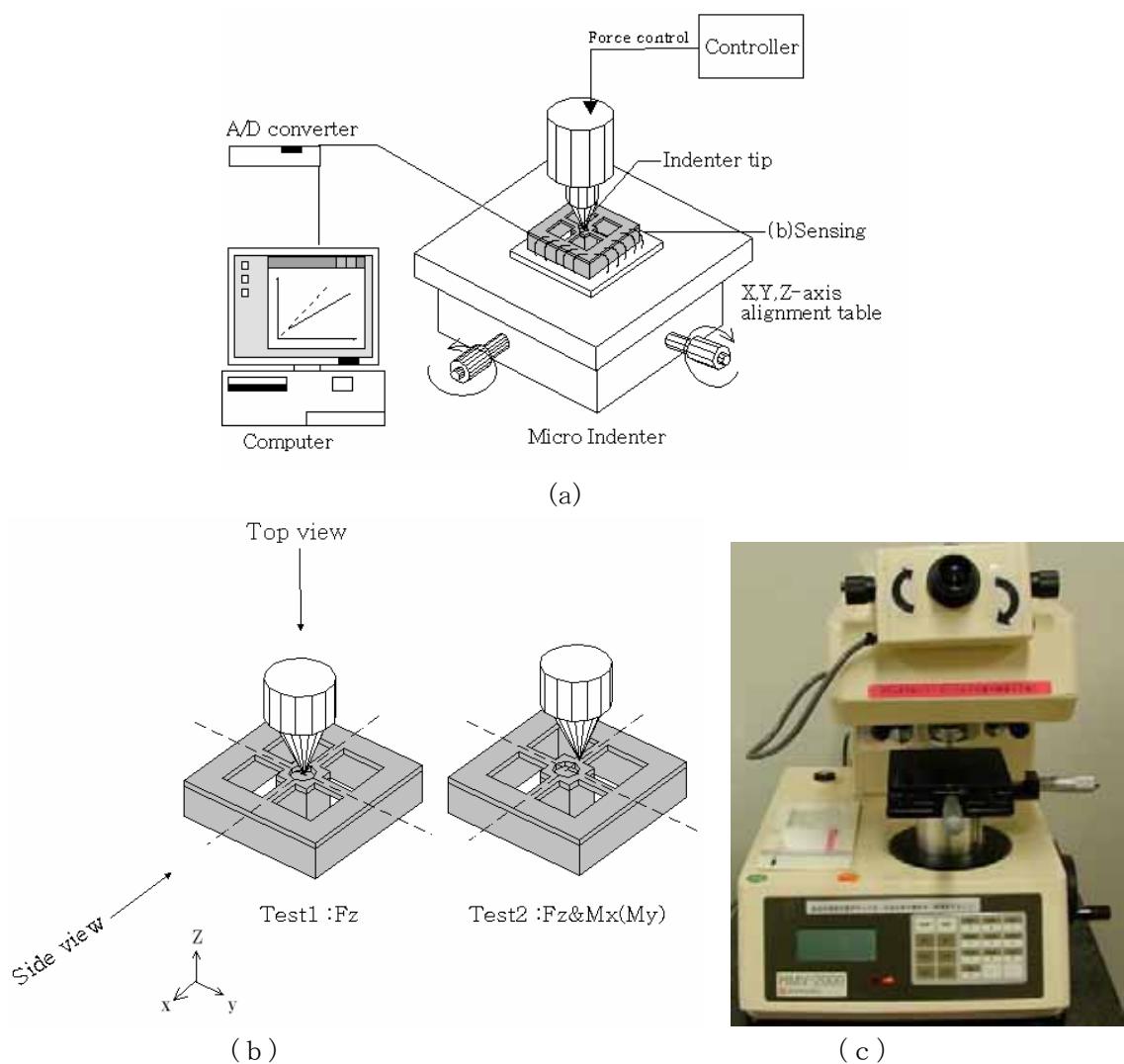


図4. 3 センシングチップの計測システム(a)、力の印加方法(b) 島図製微小圧縮試験機 HMV-2000(c)

#### ④-3 計測結果

##### ④-3-1 FMS-1 の計測

###### ④-3-1-1 $F_z$ の計測

$F_z$  の計測はセンシングチップの中央部にインデンターにより直接力を印加することによって行う(図4.4)。印加する力は 100mN から 500mN まで 100mN のステップで増加させる。

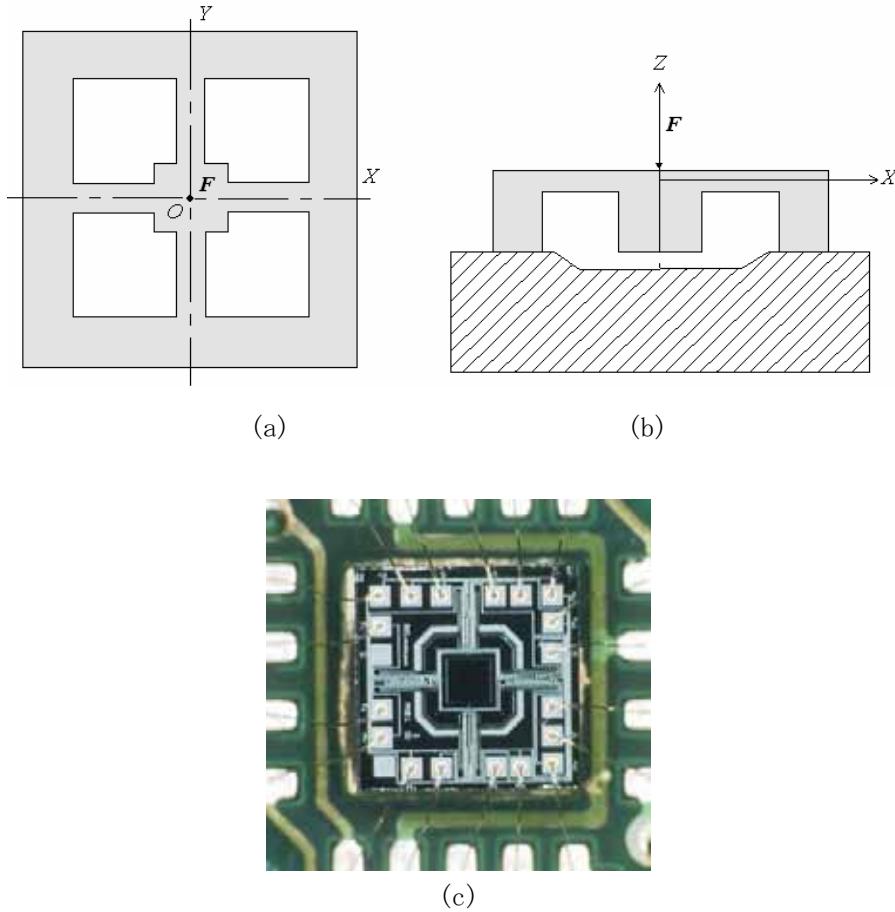


図. 4. 4 FMS-1 への  $F_z$  の印加方法 (a) Top view (b) Side view  
(c) 計測時のセンサチップの様子

図4.5 は計測結果である。ここでは入力電圧を 2V として計測を行った。この図から  $F_z$  ブリッジ回路の出力電圧  $V_{outFz}$  は線形であり、他のブリッジ回路に比べ大きな出力を確認できる。また  $Mx$  ブリッジ回路の出力電圧  $V_{outMx}$ 、 $My$  ブリッジ回路の出力  $V_{outMy}$  は、 $V_{outFz}$  に比べ非常に小さな出力であることが確認できる。このとき、 $F_z$  の感度およびクロストークは以下のように計算できる。

$$S_{Fz} = \frac{V_{Fz}}{Fz} = 0.14(\text{mV/mN}) \quad (4.1)$$

$$\xi_{Fz}^{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{Fz}}, \quad \xi_{Fz}^{My} = \frac{V_{My}}{V_{Fz}} \quad (4.2)$$

ここで  $\xi_{Fz}^{Mx}$ 、 $\xi_{Fz}^{My}$  はそれぞれ  $F_z$  を印加したときの  $M_x, M_y$  ブリッジ回路のクロストークである。 $F_z$  印加時のクロストークの最大値は  $\xi_{Fz}^{My\ max} = V_{My}/V_{Fz} = 1.12/32.3 \times 100 = 3.63\%$  である。

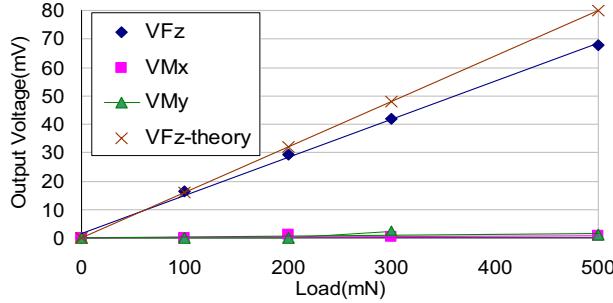


図4.5 印加力と出力電圧 ( $F_z$  の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

#### ④-3-1-2 $M_y$ ( $M_x$ ) の計測

モーメント  $M_y$  を計測するために、センサ中心部から  $x$  方向に  $250 \mu m$  の位置に  $F$  を印加した(図4.6)。このとき、Y 軸周りのモーメント  $M_y$  と  $F_z$  がセンサ中央部センタープレートに加わる。 $F_z$  の計測と同様に印加する力  $F$  は  $100mN$  から  $500mN$  まで  $100mN$  のステップで増加させる。このとき、 $M_y$  は  $F \times 230(mN \mu m)$  として計算することができる。

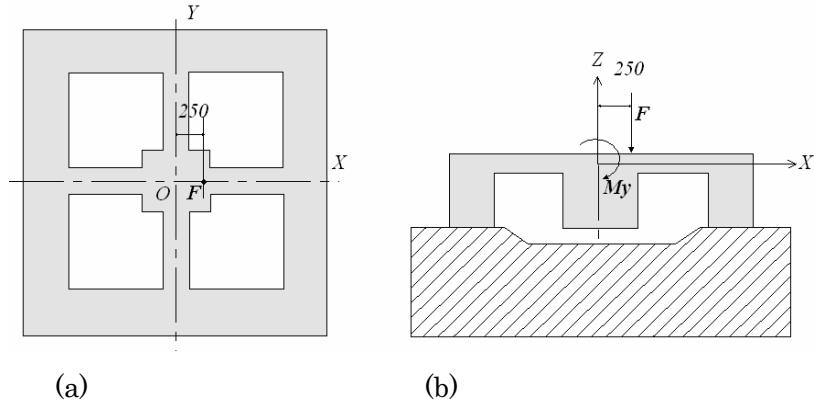


図4.6 FMS-1 への  $M_y$  の印加方法

(a) Top view (b) Side view

図4.7 に計測結果を示す。 $V_{outFz}$ 、 $V_{outMy}$  は  $V_{outMx}$  に比べ大きな値を示す。このとき、 $M_y$  の感度および  $M_y$  印加時の  $M_x$  のクロストーク最大値  $\xi_{My\ max}^{Mx}$  は次のようになる。

$$S_{My} = \frac{V_{My}}{My} = 1.76(\text{mV/N } \mu \text{ m})$$

$$\xi_{My \max}^{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{Fz}} \times 100 = 4.49(\%)$$

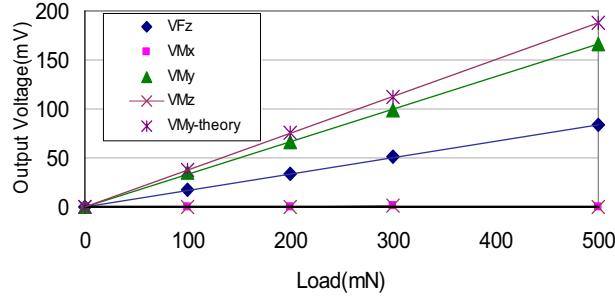


図4. 7 印加力と出力電圧 ( $My$ の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

モーメント  $Mx$  の計測は  $My$  と同様にセンサ中心部から Y 方向に  $230 \mu \text{m}$  の位置に  $F$  を印加した。このとき、X 軸周りのモーメント  $Mx$  と  $Fz$  がセンサ中央部センタープレートに加わる。 $Fz$  の計測と同様に印加する力  $F$  は  $100\text{mN}$  から  $500\text{mN}$  まで  $100\text{mN}$  のステップで増加させる。 $Mx$  は  $F \times 230(\text{mN } \mu \text{m})$  として計算することができる。図4. 8 は計測結果である。 $V_{outFz}$ 、 $V_{outMx}$  は  $V_{outMy}$  に比べ大きな値を示す。このとき、 $Mx$  の感度  $S_{Mx}$  およびクロストーク最大値  $\xi_{Mx \ max}^{My}$  は次のようになる。

$$S_{Mx} = \frac{V_{Mx}}{Mx} = 1.66(\text{mV/N } \mu \text{ m})$$

$$\xi_{Mx \ max}^{My} = \frac{V_{My}}{V_{Mx}} \times 100 = 1.39 (\%)$$

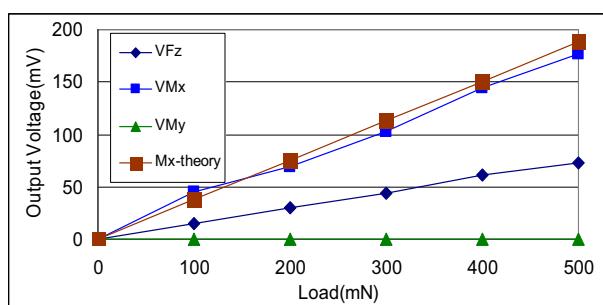


図4. 8 印加力と出力電圧 ( $Mx$  の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

#### ④-3-2 FMS-2 の計測

##### ④-3-2-1 $F_z$ の計測

$F_z$  の計測は FMS-1 と同様に 100mN から 500mN までセンシングチップの中央部にインデンターにより直接力を印加することによって行う(図 4. 9)。

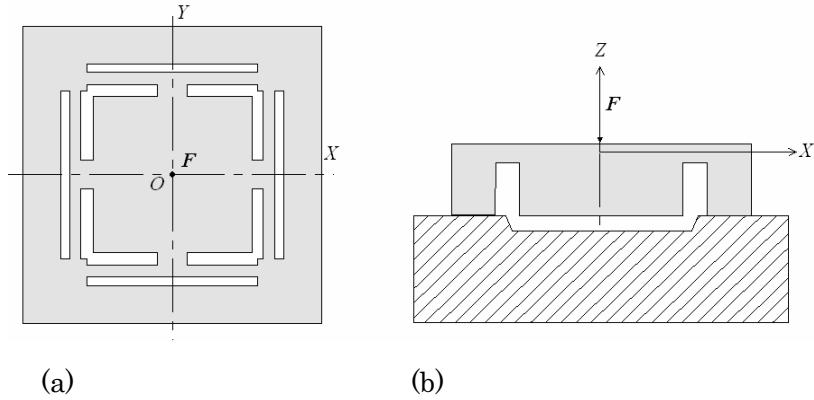


図 4. 9 FMS-2 への  $F_z$  の印加方法

(a) Top view (b) Side view

図 4. 10 に  $F_z$  の計測結果を示す。ここでは入力電圧を 2V として計測を行った。この図から  $F_z$  プリッジ回路の出力電圧  $V_{outFz}$  は線形であり、他のプリッジ回路に比べ大きな出力を確認できる。

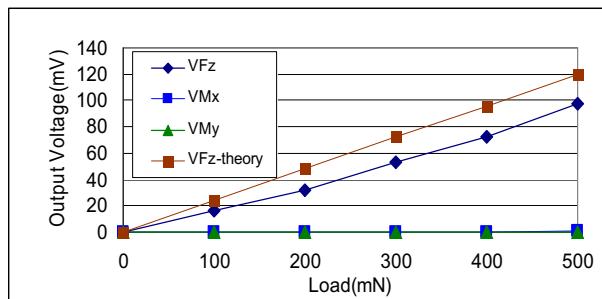


図 4. 10 印加力と出力電圧 ( $F_z$  の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

$F_z$  の感度およびクロストークは以下のように計算できる。

$$S_{Fz} = \frac{V_{Fz}}{Fz} = 0.18(\text{mV/mN})$$

$$\xi_{Fz \text{ max}}^{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{Fz}} \times 100 = 0.76\%$$

##### ④-3-2-2 $My$ ( $Mx$ ) の計測

モーメント  $My$  を計測するために、図 4. 11 に示すようにセンサ中心部から X 軸上 270μm の位置に  $F$  を印加した。このとき、Y 軸周りのモーメント  $My$  ( $F \times 270\mu\text{m}$ ) と  $F_z$  がセンサ中央部センター プレートに加わる。印加する力  $F$  は 100mN から 500mN まで 100mN のステップで増加させる。

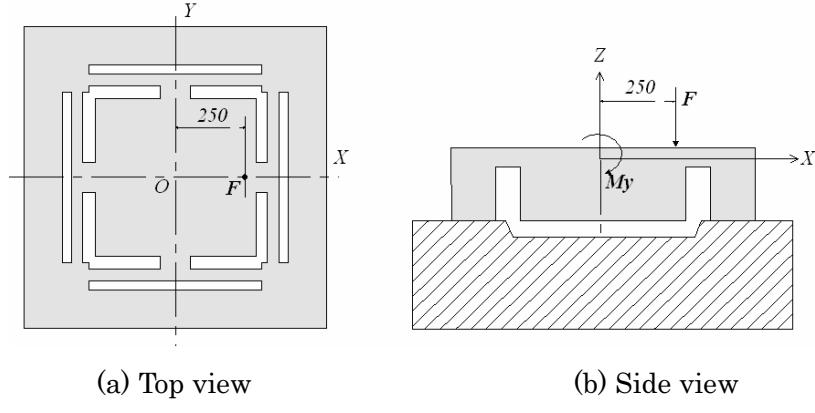


図4. 1 1 FMS-2への $M_y$ の印加方法

図4. 1 2は計測結果である。 $V_{outFz}$ 、 $V_{outMy}$ は $V_{outMx}$ に比べ大きな値を示していることが確認できる。

このとき、 $M_y$ の感度および $M_y$ 印加時の $M_x$ のクロストーク最大値 $\xi_{My\ max}^{Mx}$ は次のようになる。

$$S_{My} = \frac{V_{My}}{V_{My}} = 1.70 \text{ (mV/Nμm)}$$

$$\xi_{My\ max}^{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{My}} \times 100 = 1.43\%$$

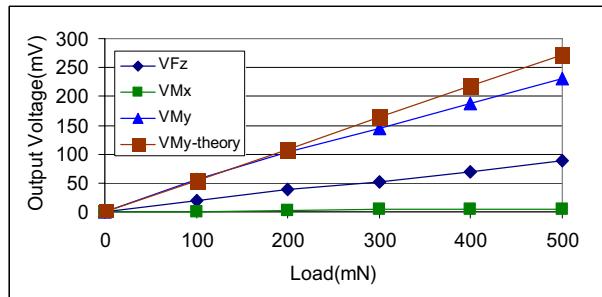


図4. 1 2 印加力と出力電圧 ( $M_y$ の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

モーメント $M_x$ の計測は $M_y$ と同様にセンサ中心部からY方向に270μmの位置に $F$ を印加する。このとき、X軸周りのモーメント $M_x(F \times 270)$ と $F_z$ がセンサ中央部センタープレートに加わる。図4. 1 3

は計測結果である。 $V_{outFz}$ 、 $V_{outMx}$ は $V_{outMy}$ に比べ大きな値を示す。このとき、 $M_x$ の感度 $S_{Mx}$ およびクロ

ストーク最大値 $\xi_{Mx\ max}^{My}$ は次のようになる。

$$S_{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{My}} = 1.72 \text{ (mV/Nμm)}$$

$$\xi_{Mx\ max}^{My} = \frac{V_{Mx}}{V_{Mx}} \times 100 = 2.05 \text{ (%)}$$

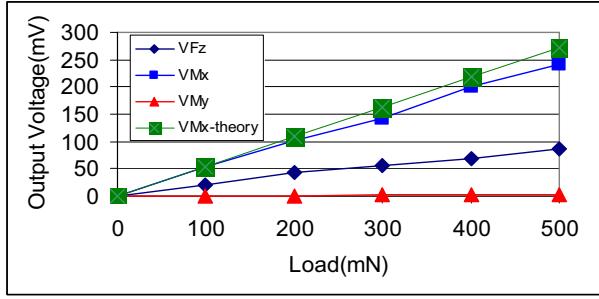


図4. 13 印加力と出力電圧 ( $M_x$ の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

#### ④-3-3 FMS-3 の計測

##### ④-3-3-1 $F_z$ の計測

$F_z$  の計測は FMS-1, 2 と同様に 100mN から 500mN までセンシングチップの中央部にインデンターにより直接力を印加することによって行う(図4. 14)。

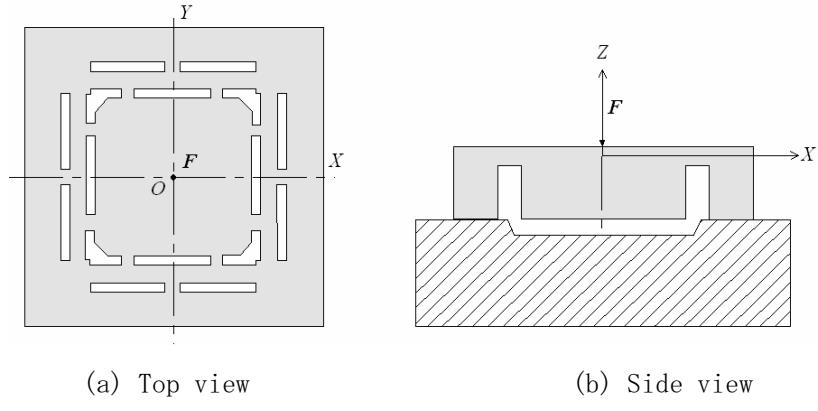


図4. 14 FMS-3 への  $F_z$  の印加方法

図4. 15. は計測結果である。ここでは入力電圧を 2V として計測を行った。この図から  $F_z$  ブリッジ回路の出力電圧  $V_{outFz}$  は線形であり、他のブリッジ回路に比べ大きな出力を確認できる。

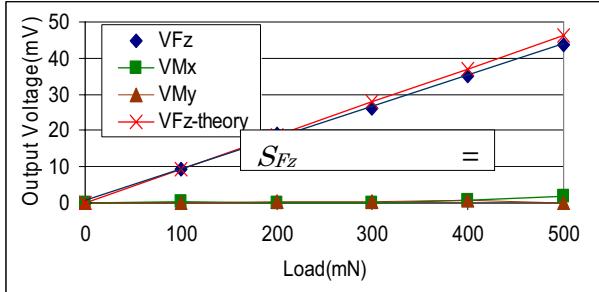


図4. 15 印加力と出力電圧 ( $F_z$  の計測結果) (Bias voltage: 2V).

$F_z$  の感度およびクロストークは以下のように計算できる。

$$S_{Fz} = \frac{V_{Fz}}{Fz} = 0.087(\text{mV/mN})$$

$$\xi_{Fz \text{ max}}^{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{Fz}} \times 100 = 4.52\%$$

#### ④-3-3-2 $My$ ( $Mx$ ) の計測

モーメント  $My$  を計測するために、センサ中心部から X 軸上  $350\mu\text{m}$  の位置に  $F$ を印加した（図4. 1 6）。このとき、Y 軸周りのモーメント  $My$  ( $F \times 350\mu\text{m}$ ) と  $F_z$  がセンサ中央部センタープレートに加わる。印加する力  $F$  は  $100\text{mN}$  から  $500\text{mN}$  まで  $100\text{mN}$  のステップで増加させる。

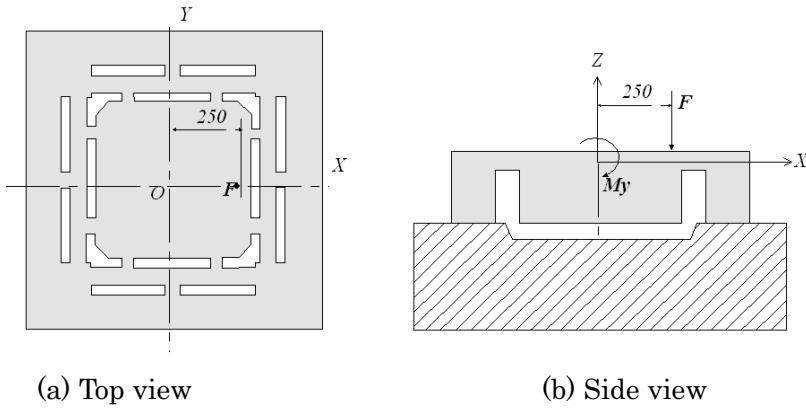


図4. 1 6 FMS-3への  $My$  の印加方法

図4. 1 7 は計測結果である。 $V_{outFz}$  、  $V_{outMy}$  は  $V_{outMx}$  に比べ大きな値を示していることが確認できる。

このとき、 $Mx$  の感度および  $Mx$  印加時の  $My$  のクロストーク最大値  $\xi_{My \max}^{Mx}$  は次のようになる。

$$S_{Mx} = \frac{V_{Mx}}{Mx} = 0.412(\text{mV/N}\mu\text{m})$$

$$\xi_{Mx \ max}^{My} = \frac{V_{My}}{V_{Mx}} \times 100 = 1.87 (\%)$$

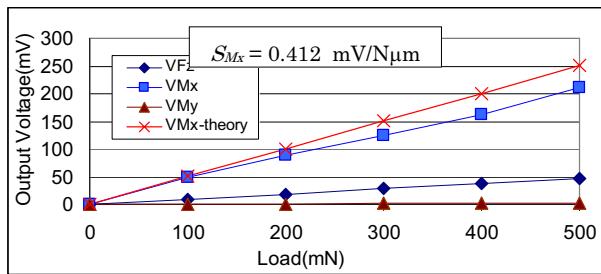


図4. 1 7 印加力と出力電圧 ( $Mx$  の計測結果) ( $V_{in}=2\text{V}$ )

モーメント  $Mx$  の計測は  $My$  と同様にセンサ中心部から Y 方向に  $350\mu\text{m}$  の位置に  $F$ を印加する。このとき、X 軸周りのモーメント  $Mx(F \times 350)$  と  $F_z$  がセンサ中央部センタープレートに加わる。図4. 1 8

は計測結果である。 $V_{outFz}$  、  $V_{outMx}$  は  $V_{outMy}$  に比べ大きな値を示す。このとき、 $Mx$  の感度  $S_{Mx}$  およびク

ロストーク最大値  $\xi_{Mx \ max}^{My}$  は次のようになる。

$$S_{My} = \frac{V_{My}}{My} = 0.412(\text{mV/N}\mu\text{m})$$

$$\xi_{My \max}^{Mx} = \frac{V_{Mx}}{V_{My}} \times 100 = 1.25\%$$

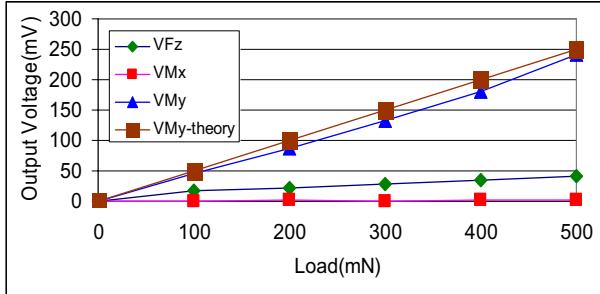


図4. 18 印加力と出力電圧 ( $M_y$ の計測結果)  $V_{in} = 2(V)$

センサチップ FMS-1～3 の計測によって得られた感度を表4. 2 に示す。また、FMS-1～3 の各軸ともクロストークは 5%以内であった。

表4. 2 FMS-1～3 の計測結果から算出した感度  $V_{in} = 2(V)$

Sensing-chip $l \times w \times t, (\mu\text{m}^3)$	$S_F(\text{mV/mN})$	$S_M(\text{mV/N}\mu\text{m})$	
	$S_{Fz}$	$S_{Mx}$	$S_{My}$
FMS-1(500×120×80)	0.14	1.76	1.66
FMS-2(800×100×80)	0.18	1.70	1.72
FMS-3(1000×100×80)	0.087	0.41	0.412

#### ④-4 考察（解析値との比較）

3. 9 再設計で算出した解析値の感度を  $V_{in} = 2(V)$  として表と比較した。このとき解析値によって算出した感度を  $S_{Analysis}$  、計測によって算出した感度を  $S_{Measure}$  し、解析値と計測値の差異の割合  $\Theta$  を

$$\Theta = \left( 1 - \frac{S_{Measure}}{S_{Analysis}} \right) \times 100\% \quad (4. 3)$$

と定義すると、FMS-1～3 の各軸の  $\Theta$  は解析値と計測値の差異の割合  $\Theta$  の平均値は 5%以内であった。

#### ⑤ 指先センサの構造解析

##### ⑤-1 構造解析の目的

第4章で発表したセンサチップは柔軟な半球体接触部を有する指先センサへと実装される。この際、特性に影響する主なパラメーターとしては図5. 1 に示す直方体のトランスマッショントーラーの高さ  $h$

(断面積は  $0.35 \times 0.35 \text{ mm}^2$ )、及び半球体接触部の半径  $a$  である。曲率の一定な半球の中心はセンシングチップ上面の中央部にある。本解析の目的は構造解析により、この二つのパラメーターの最適化を図るとともに、半球体接触部を有した指先センサの感度特性を求ることである。

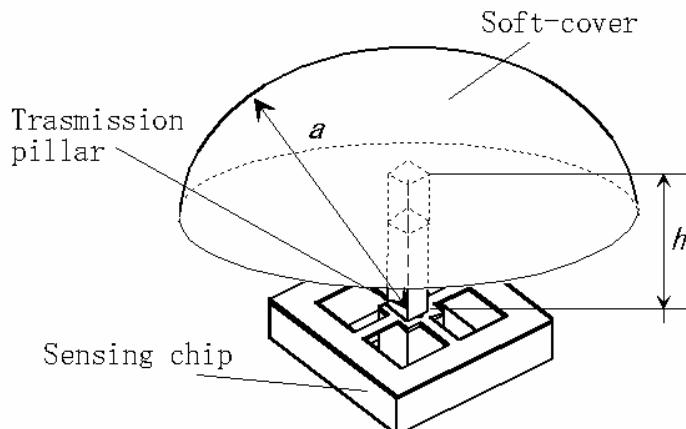


図 5. 1 構造解析のパラメーター  
(トランスマッショニングピラー  $h$ 、半球体接触部の半径  $a$ )

## ⑤-2 解析方法

本研究で製作する半球体接触部のような粘弾性の構造物を解析する場合、シリコンのような弾性体材料（フックの法則に従う）と異なり構造力学における3つの非線形特性である材料非線形、幾何学非線形、接触における非線形を考慮する必要がある。材料非線形とは弾性や粘性の非線形であり、(応力) / (ひずみ) が応力の増加と共に増加する特性である。幾何学非線形とは容易に大変形する材料が有する特性であり、大変形に伴う形状変化と内部応力変化も応力 - ひずみ関係を非線形化させる要因である。接触における非線形とは接触する物体に対する境界条件に関するもので、材料が物体に接触し変化するとき接触する物体に拘束されている状態である。

対象とする構造物3つの非線形特性のいずれか一つにでも該当する場合、非線形解析の対象となり、本センサに用いた柔軟接触部や人間の皮膚などはこれら3つの非線形特性をもつ。本研究では ANSYS 7.0 により非線形 FEM 解析を行った。非線形 FEM 解析の手順としては一般的に非線形特性を有する材料の構造解析を行う場合、その材料特性を得るために試験を行った後、得られた特性を非線形モデルに適応する。

はじめに材料特性を得るために応力 - ひずみの関係は指先センサの柔軟な接触部を形成するものと同じ材料によって図 5. 2 に示すような半径  $r$ 、高さ  $l$  の円柱を作成し、これをマイクロテスターにより圧縮し、 $\Delta l$  変位したときの力  $F$  を随時計測した。 $\Delta l$  変位した後の円柱の半径を  $r'$ 、高さ  $l'$  とすると、変位後の面積  $S'$  は式 (5. 1) のように表される。

$$S' = \pi r'^2 = \pi \left( \frac{l'}{l} r \right)^2 \quad (5. 1)$$

よって、ひずみ  $\Delta l/l = (l'-l)/l$  のとき、円柱が受ける応力  $P$  は式 (5. 2) のように表される。

$$P = \frac{F}{S'} = \frac{F}{\pi r'^2} \left( \frac{l}{l'} \right)^2 \quad (5.2)$$

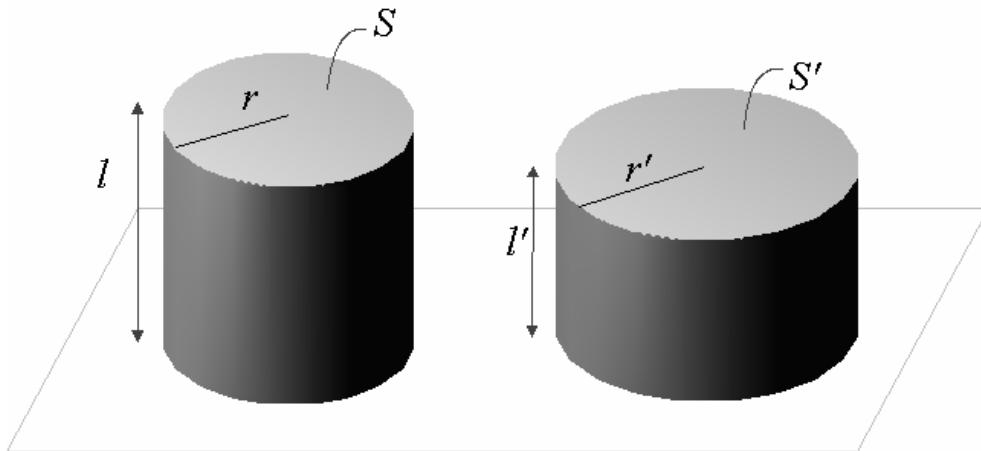


図 5. 2 粘弾性ゴムの圧縮

本試験では半径 1.5mm、高さ 4cm の試験片を用い試験を行い、材料のひずみ一応力特性を求めた。結果を図 5. 3 に示す。

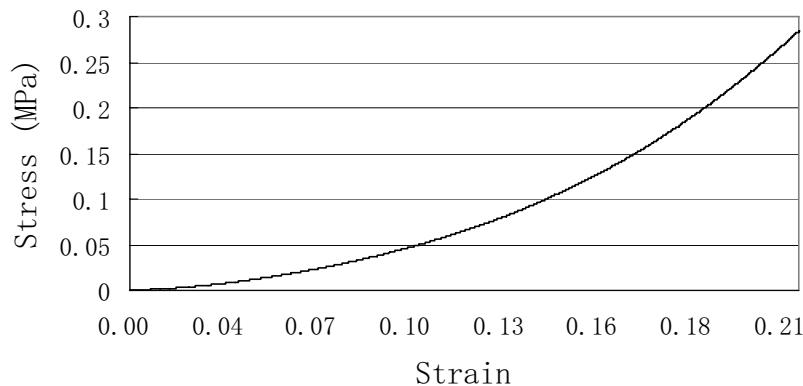


図 5. 3 ひずみと応力の関係

上記の圧縮試験によって求めた応力 - ひずみデータ配列を超弾性体解析に最適な近似曲線に適応することでこれを材料定数とし、解析を行う。近似曲線には Mooney-Rivlin の近似理論を用いたこれは容易に大変形を起こす（引っ張りで 100%、圧縮で 30%程度変化する）物体に対し、最適な近似曲線を適応するものである。解析モデルは図 5. 4 (a) に示すように Si を構造材料としたセンシングチップ及びトランスマッショニングピラーと、圧縮試験で求めた非線形材料特性をもつ弾性体の半球体接触部によって構成されている。半球体接触部の半径、トランスマッショニングピラーの高さはそれぞれ  $a=2\text{mm}$  と  $h=1.6\text{mm}$  であり、トランスマッショニングピラー可動範囲 ( $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ ) を除く半球体接触部の底面は境界条件により拘束される（図 5. 4 (b))。

このモデルに図 5. 5 に示すような剛体の板を半球体のカバー上部に設置し、接触面に対し垂直な力  $F_z$  及び接触面内の力  $F_t$  を印加する。 $F_t$  は第 2 章で示したように  $\phi=\pi/2$  のとき  $F_t=F_y$ 、 $\phi=0$  のとき  $F_t=F_x$  となる。このとき弾性体のカバーは容易に変形することから剛体の板と面で接触することになる。このとき、剛体の板と半球体のカバーの間にすべりはないものとする。また接触の非線形性を考慮すると、カバーの変形により剛体の板は拘束されることから、ANSYS7.0 では 3 次元の接触、TARGET

170,CONTA173 を定義する。

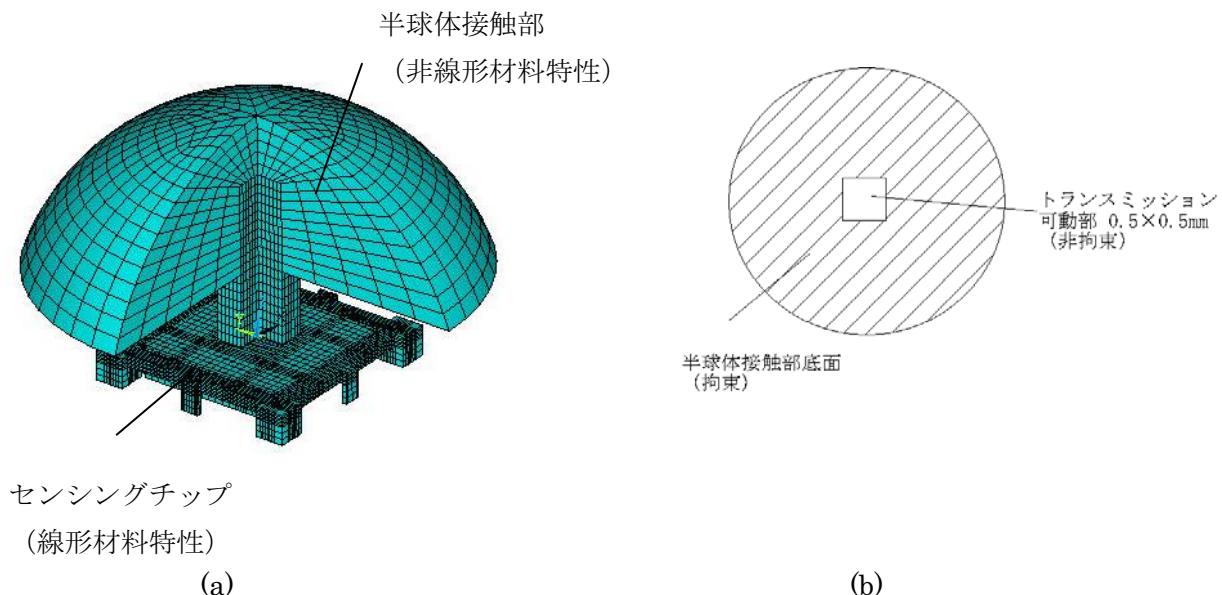


図 5. 4 (a) FEM 解析モデル、(b) 半球体底面の拘束

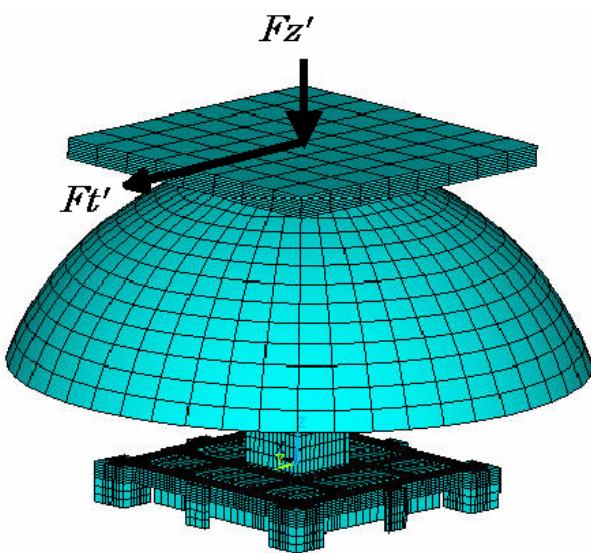


図 5. 5 力の印加方法 (接触面に対し垂直な力  $F_z'$  及び接触面内の力  $F_t'$ )

### ⑤-3 解析結果

解析結果により FMS1～3 を搭載した指先センサの感度を求める。 $Fz'$ 、 $Fx$ ( $Fy$ )を剛体の上部に印加したときの各センシングチップのビームにかかる応力値により 4 章と同様に感度を計算した。入力電圧は 5V である。

表 5. 1 解析結果から計測した感度  $a=2\text{mm}$   $h=1.6\text{mm}$ 、 $V_{in}=5(V)$

Fingertip-sensor	$SF'(mV/mN)$	
	$SFz'$	$SFx', SFy'$
FMS-1P	0.21	1.02
FMS-2P	0.24	1.18
FMS-3P	0.04	0.21

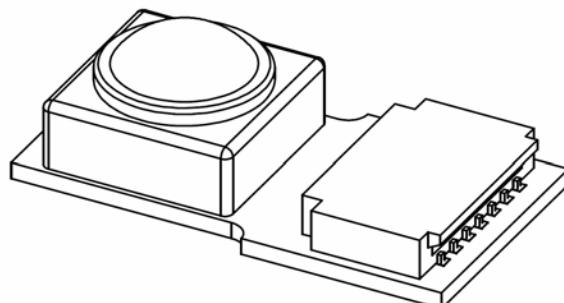
### ⑥ 指先センサの実装と評価

#### ⑥-1 指先センサの実装プロセス

図 6. 1 に指先センサの構造図と寸法を示す。

図 6. 2 と表 6. 1 に実装プロセスの工程と作業方法を示す。

- (1)FR4 材質 4 層基板(図中 Printed circuit board)にセンシングチップを接着する。接着はエポキシ樹脂を用いた。
- (2)センシングチップのボンディングパッドと基板の配線を金線(Au wire)でボンディングする。このとき FMS-1P は FMS-1 の  $Mx$ 、 $My$ 、 $Fz$ 、 $Mz$  計測用ブリッジのみ基盤上の電極に接続する(計 4 軸)。FMS-2P、3P は FMS-2、3 の  $Mx$ 、 $My$ 、 $Fz$ 、計測用ブリッジを基盤に接続する(計 3 軸)。
- (3)プラスチック製ケース(Case)をエポキシ樹脂により接着する。ケースの中央部の穴からトランスマッショントピラー(Transmission pillar)をセンシングチップの中央部センタープレートにエポキシ樹脂により接着する。
- (4)Alignment spacer を接着する。この spacer をトランスマッショントピラー周りに設置し、その上から Soft hemisphere の接触部を接着する。接着は接触部と同材料のポリウレタンで行う。
- (5)基板にコネクタを接着し、コネクタにフレキシブルケーブルを接続するフレキシブルケーブルは計 1 3 チャネルの独立した配線である。以下、センシングチップ FMS-1、FMS-2、FMS-3 を実装した指先センサをそれぞれ FMS-1P、FMS-2P、FMS-3P とする。



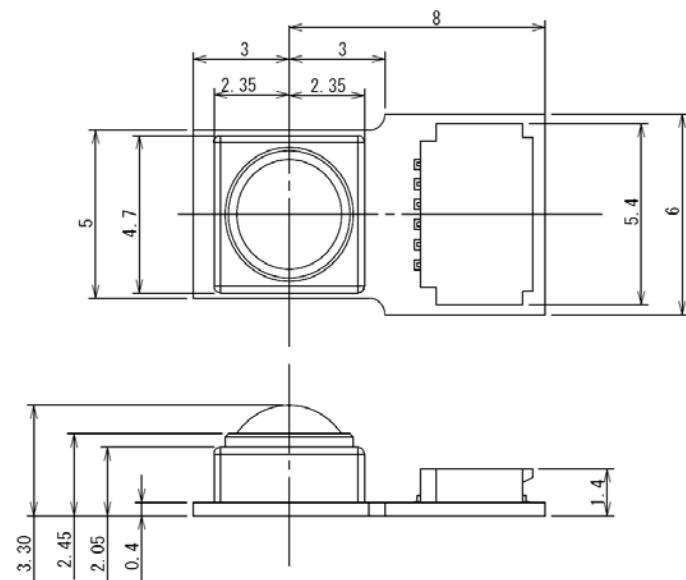


図6. 1 指先センサの構造図と寸法

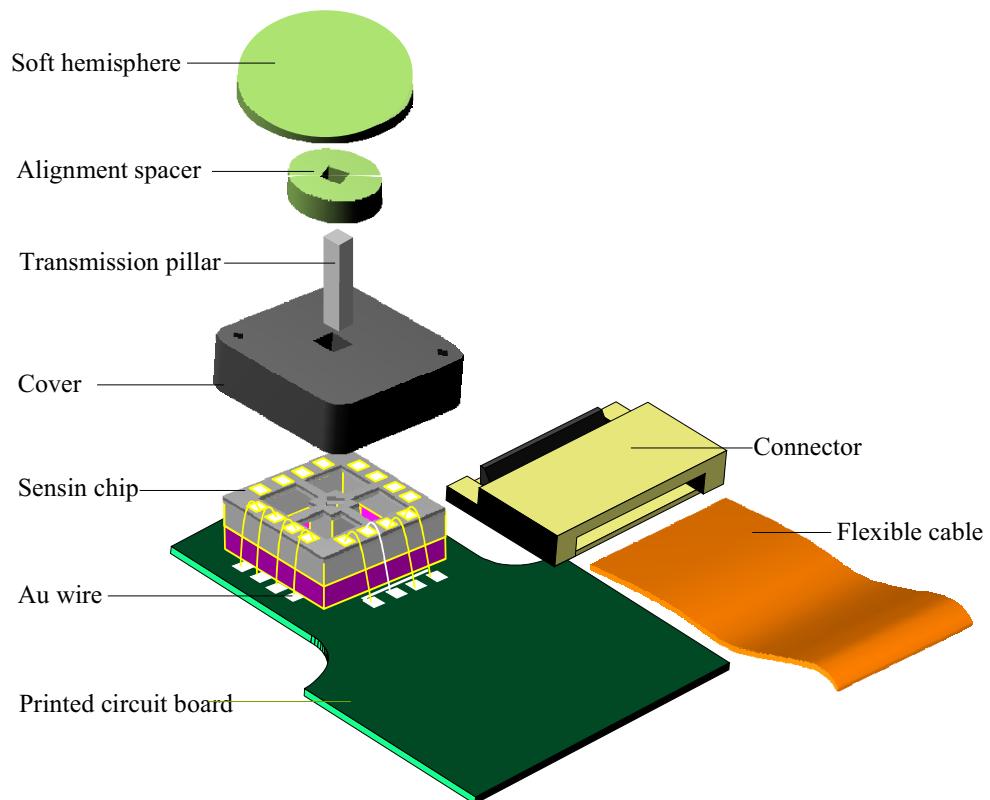


図6. 2 指先センサの実装フロー図

表6. 1 指先センサの実装の工程と作業方法

工程図	工程名	作業方法
↓	センサチップの加工	① センサチップ上にピラーを置く印(0.3mm□)をつける ② ガラスをストッパ構造に加工する(陽極接合)
	ダイシング	① センサチップを供給する ② ダイシング用テープを貼り付ける ③ ダイシングを行い、テープを剥がす
	配線基板へのD/BとW/B	① チップと配線基板(1~2層)を供給する ② 基板へチップのダイボンディングを行う ③ チップ上パッドから基板配線へワイヤボンディングを行う
	ピラー接着	① 基板付チップとSiピラーを供給する ② チップ上のピラー用印上にピラーをエポキシ樹脂で接着する
	ケース接着	① ピラー付チップとケースを供給する ② 配線基板上にケースをエポキシ樹脂で接着する
	カバー接着	① ケース付チップとカバーを供給する ② ケース上にカバーをエポキシ樹脂で接着する
	特性検査	① カバー付チップを手で供給する ② 特性検査を行う

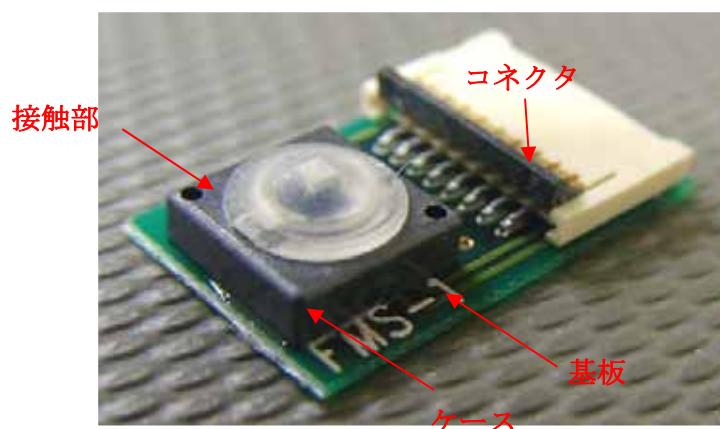


図6.3 製作した指先センサの全体写真

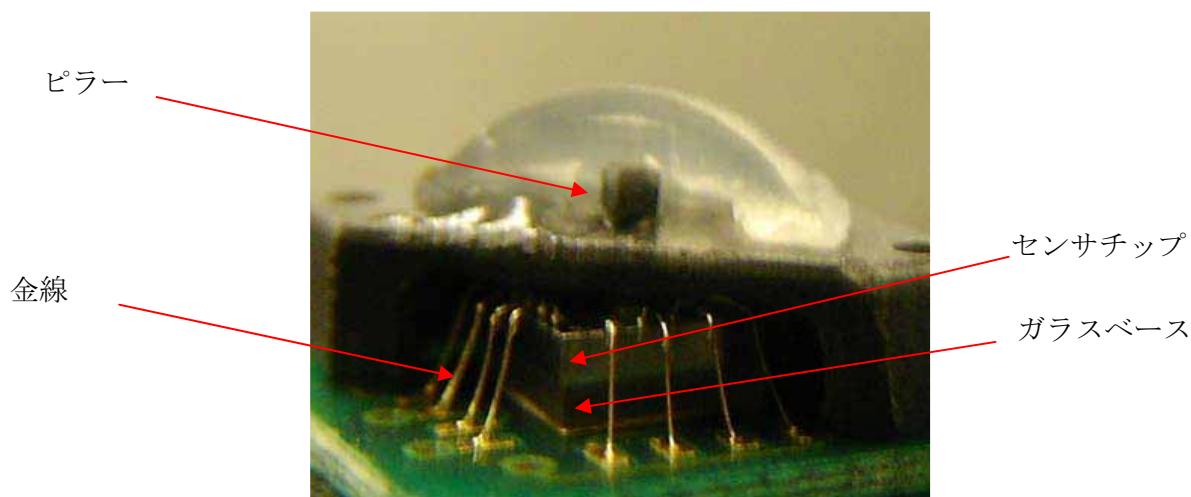


図6.4 製作した指先センサの断面写真

## ⑥-2 $F_z$ の計測

### ⑥-2-1 マイクロテスターを用いた計測システム

図6. 5は製作した指先センサの評価に用いた計測システムの構成図を図6. 6はその写真である。センサチップ(図中 Sensor)に所望の力を印加させるために、インストロン製マイクロテスター(図中 Micro Tester)で力を印加しそれをモニタリングした。マイクロテスターは垂直降下するロッド部、試験片に加わった力を感知するロードセル部、ロッドが試験片に加える力や移動速度などを制御するコントロール部から構成されている。ロードセル部には最大印加可能な応力が10N、分解能が0.01Nのロードセルを用いた。

今回試験に使用した計測用治具はセンサに加える印加ロッド(指先センサの半球体接触部に対し十分大きな接触面を持つ剛体である)、及び $F_z$ 計測用ステージ、 $F_x(F_y)$ 計測用ステージである。 $F_z$ 計測用ステージはセンサをその中央部に固定することでセンサの上部に水平面に対し垂直な力を印加することができる。計測用治具はアルミニウム材を材料とし、10N以下の計測において十分な強度を持つよう設計されている(図6. 6)。

センサ出力電圧を計測した。また、本実験では静的圧縮試験を行うためロッドの速度を0.1mm/secとし、目標印加力に達した後5sec停止後リターンするものとする。

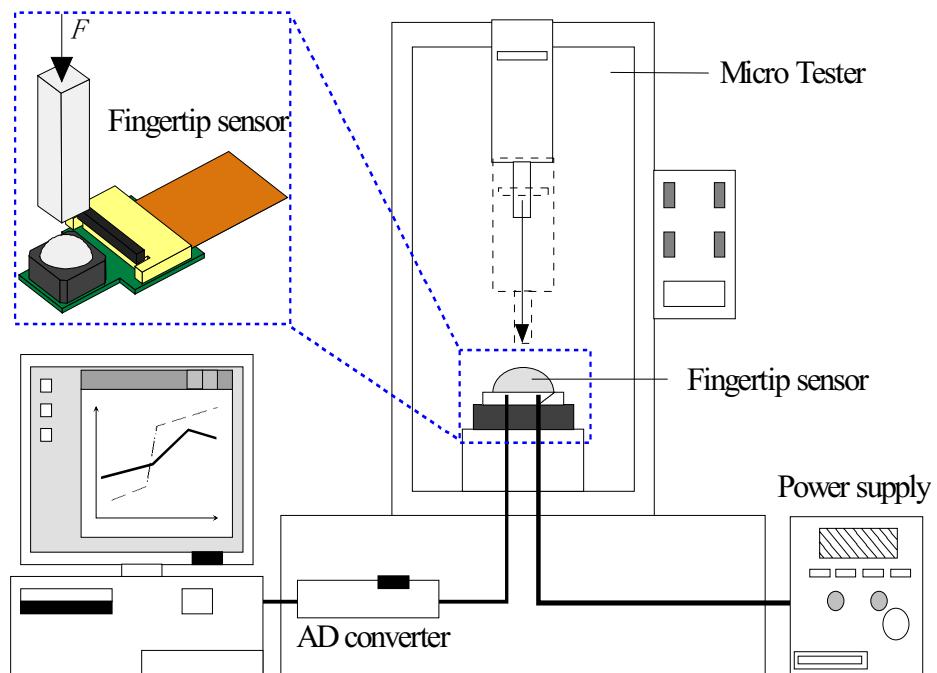


図6. 5 計測システムの概要図

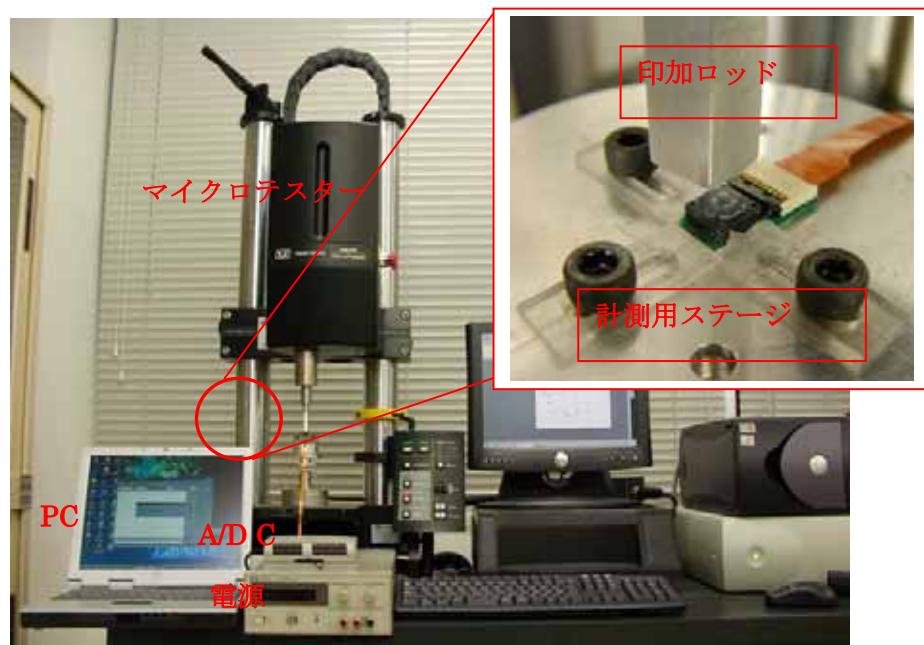


図6. 6 計測システムの写真

#### ⑥-2-2 計測結果

図6. 7～図6. 9はそれぞれFMS1～3のセンシングチップを搭載した指先センサに力100～500mNまで100mNステップずつ印加したときの出力電圧を表している。

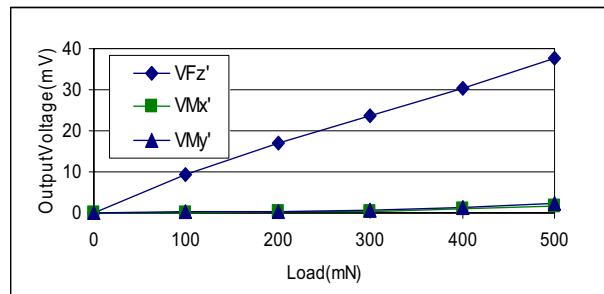


図6. 7 FMS-1P の印加力と出力電圧の関係  $V_{in} = 2(V)$

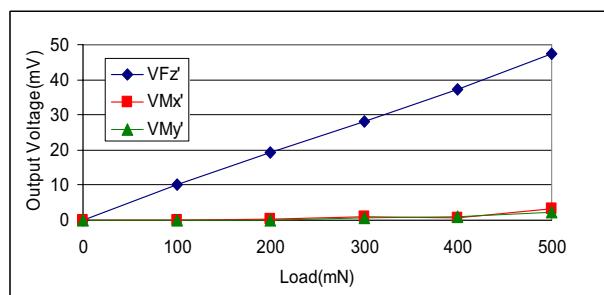


図6. 8 FMS-2P の印加力と出力電圧の関係  $V_{in} = 2(V)$

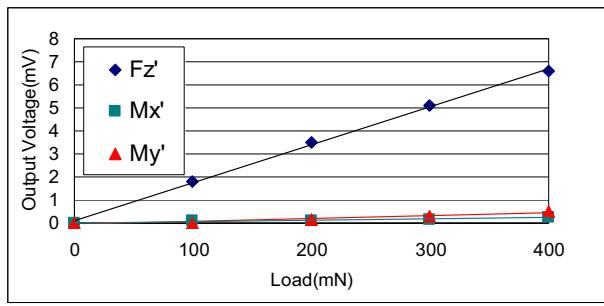


図6. 9 FMS-3P の印加力と出力電圧の関係  $V_{in} = 2(V)$

FMS-1P～3P の  $F_z$  の感度  $SF_z'$  及びクロストークの最大値  $\xi_{Fz \max}$  をまとめたものを表6. 2に示す。

表6. 2 FMS-1P～3P の  $F_z$  の感度 ( $V_{in} = 2(V)$ ) とクロストークの最大値

	$SF_z'$ (V/N)	$\xi_{Fz \max}$ (%)
FMS-1P	0.085	5.9
FMS-2P	0.095	6.6
FMS-3P	0.013	7.3

## ⑥-3 $F_x(F_y)$ の計測

### ⑥-3-1 ロボットハンドを用いた計測システム

図6. 10に示すように2つの指先センサをそれぞれ向き合うようにロボットハンド(TAKANO BEARING.Co 製 Mu-Gripper RH707)の2指に装着し、質量  $M$  の物体の重心を把持する。このときセンサには把持力に対する反作用の力  $F_z'$  (接触面に対して垂直な力) 及び、物体の自重による力  $Mg$  ( $g$  は重力加速度) による力  $F_t$  が指先センサと物体の接触面内に作用する (第二章を参照すると、 $\phi = \pi/2$  のとき  $F_t' = F_y'$ 、 $\phi = 0$  のとき  $F_t' = F_x'$ 、となる)。指先センサは2対用いられているため一つの指先センサに作用する力は  $F_t' = Mg/2$  である。

把持物体には均一な密度の質量 35.7g のアルミニウムの直方体( $14 \times 14 \times 7\text{mm}$ )を用いた。重力加速度を  $9.8\text{m/s}^2$  とすると、アルミニウムの直方体が2対の指先センサに作用する力は  $35.7 \times 9.8 \approx 350(\text{mN})$  である。よって一つの指先センサに作用する力は  $F_t' = 350/2 = 175(\text{mN})$  である。本試験ではアルミニウムの直方体を計4つになるまで一つずつ増やしていく。 $n$  個のとき、 $F_t' = 175 \times n(\text{N})$  となる。このような試験を  $\phi = \pi/2$ 、 $\phi = 0$  すなわち  $F_t' = F_y'$ 、 $F_t' = F_x$  の二通りについて、FMS1～3P の出力電圧をそれぞれ評価する。

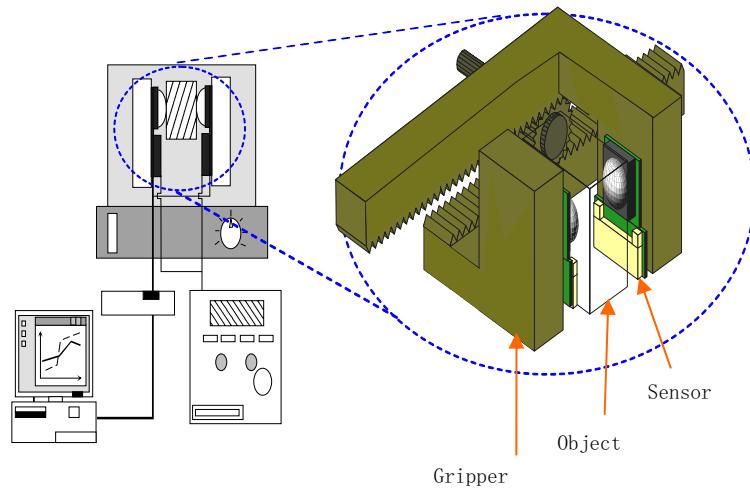


図6. 10 ロボットハンドを用いた計測システム



図6. 11 ロボットハンドに装着の写真

## ⑥-3-2 計測結果

### ⑥-3-2-1 FMS-1P の計測結果

図6. 12、図6. 13にそれぞれ  $\phi=0$ 、 $\pi/2$ のときのFMS-1Pの計測結果のグラフを示す。

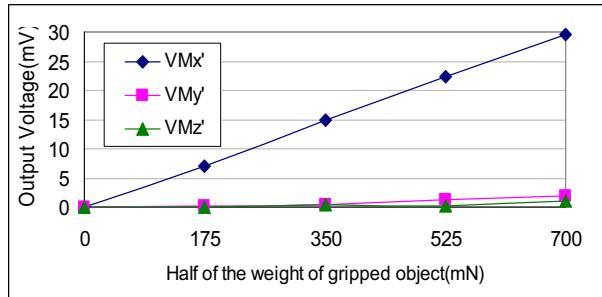


図6. 12 FMS-1P の計測結果  $\phi=0$ 、 $V_{in}=2(V)$

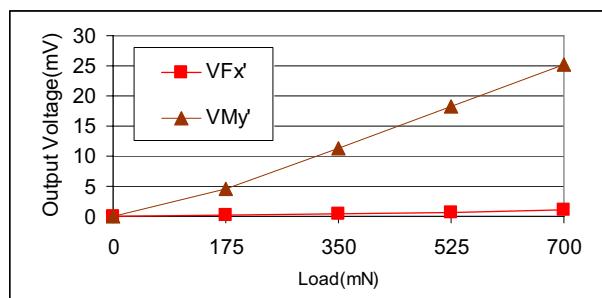


図6. 13 FMS-1P の計測結果  $\phi=\pi/2$ 、 $V_{in}=2(V)$

### ⑥-3-2-2 FMS-2P の計測結果

図6. 14、図6. 15にそれぞれ  $\phi=0$ 、 $\pi/2$ のときのFMS-2Pの計測結果のグラフを示す。

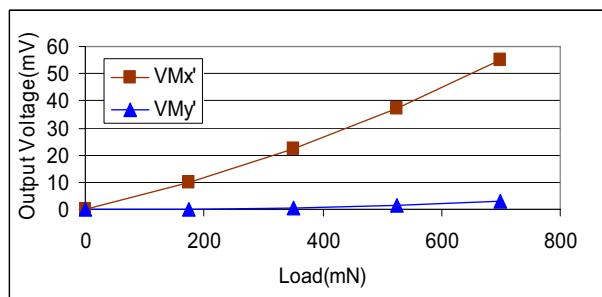


図6. 14 FMS-2P の計測結果  $\phi=0$ 、 $V_{in}=2(V)$

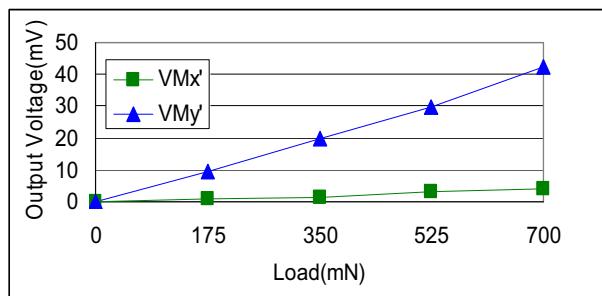


図6. 15 FMS-2P の計測結果  $\phi=\pi/2$ 、 $V_{in}=2(V)$

### ⑥-3-2-3 FMS-3P の計測結果

図6. 16、図6. 17にそれぞれ  $\phi=0$ 、 $\pi/2$ のときのFMS-3Pの計測結果のグラフを示す。

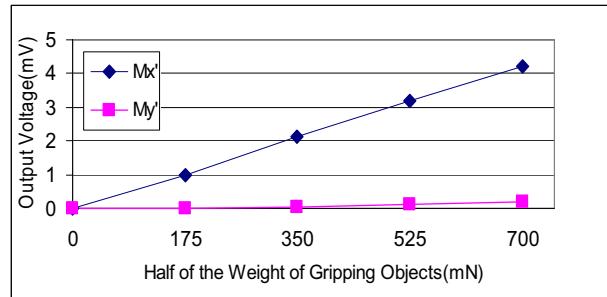


図6. 16 FMS-3P の計測結果  $\phi=0$ 、 $V_{in}=2(V)$

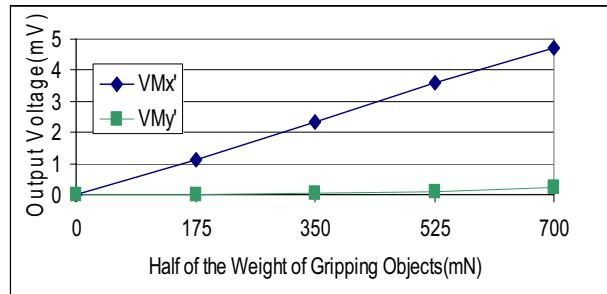


図6. 17 FMS-3P の計測結果  $\phi=\pi/2$ 、 $V_{in}=2(V)$

### ⑥-4 ロボットハンドを用いた $Mz$ の計測(FMS-1Pのみ)

#### ⑥-4-1 計測方法

次に図6. 18に示すようにFMS-1Pによりアルミニウムの重心Gから1の距離のC点を持するとき、 $F_z'$ 、 $F_t$ に加えCの周りのモーメント  $Mz$ がFMS-1Pに作用する。アルミニウムの直方体n個を把持するとき  $Mz'=175 \times n \times l$ である。ここで  $l=12mm$  とする。

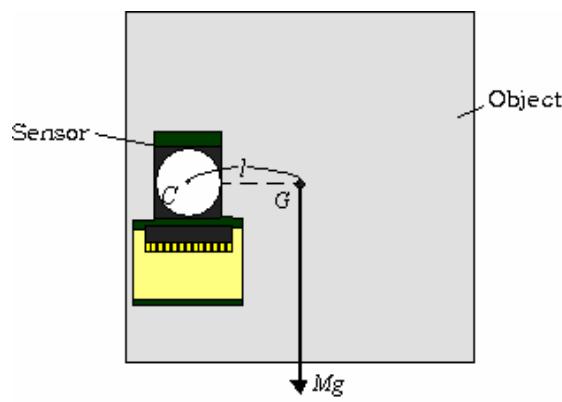


図6. 18 ロボットハンドを用いた  $Mz$  の計測(FMS-1Pのみ)

## ⑥-4-2 計測結果

図6. 1 9 に  $n = 1 \sim 4$  のときの FMS-1P の計測結果を示す。

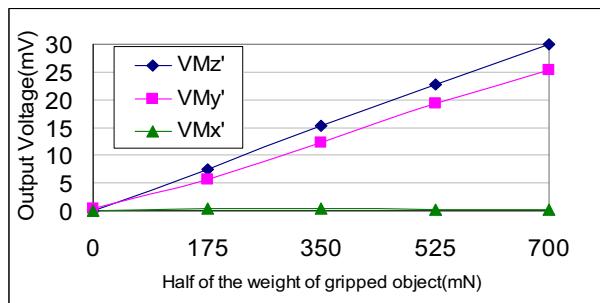


図6. 1 9 FMS-1P の計測結果  $\phi = \pi/2$

## ⑥-5 まとめ

指先センサ FMS-1～3P の計測によって得られた感度を表6. 3 に示す。また、FMS-1～3P の各軸のクロストークの最大値を表6. 4 に示す。

表6. 3 FMS-1～3P の感度  $V_{in} = 2(V)$

Fingertip-sensor	$SF'(mV/mN)$			$SM'(mV/N\mu m)$
	$SF_z'$	$SF_x'$	$SF_y'$	$SM_z'$
FMS-1P	0.085	0.039	0.039	0.004
FMS-2P	0.095	0.031	0.030	
FMS-3P	0.013	0.015	0.016	

表6. 4 FMS-1～3P のクロストークの最大値  $V_{in} = 2(V)$

Fingertip-sensor	$\xi_{Fz \max}$ (%)	$\xi_{Fx \max}$ (%)	$\xi_{Fy \max}$ (%)	$\xi_{Fz \max}$ (%)
FMS-1P	5.9	6.6	7.3	3.2
FMS-2P	6.8	2.4	2.4	
FMS-3P	5.6	9.7	3.8	

## ⑥-6 考察 (理論値との比較)

指先センサの解析で算出した解析値の感度(表5. 1)を  $V_{in} = 2(V)$  として表6. 4 と比較した。FMS-1～3 の各軸の解析値と計測値の差異の割合  $\Theta$  は表6. 5 のようになる。

表6. 5 解析値と計測値の差異の割合  $\Theta$

Fingertip-sensor	$\Theta = (1 - S_{Measure} / S_{Analysis}) \times 100$ (%)		
	$Fz'$	$Fx'$	$Fy'$
FMS-1P	9.57	9.67	9.49
FMS-2P	10.57	6.64	6.33
FMS-3P	8.33	17.84	18.28

表6.5で示したFMS-1P～3Pの解析値と計測値の差異の割合 $\Theta$ の平均値は10.7%であった。また $\Theta$ の標準偏差は4.1%であった。これは4.4で示したセンシングチップの $\Theta$ の標準偏差の約2倍の値を示している。

これは実装プロセスにより個体差が生じ、その結果バラつきが生じたものと考える。

また、表6.3に示した指先センサの感度 $S_{Fx'}$ 、 $S_{Fy'}$ 、 $S_{Fz'}$ 、 $S_{Mz'}$ を式(2.9)～(2.11)に代入することで把持物体の質量 $M$ 、ロボットハンドの把持力 $F_{grip}$ 、把持点と物体の重心までの距離 $I$ (FMS-1Pのみ)と指先センサ出力電圧の関係が明らかになった。

また、指先センサの感度 $S_{Fx'}$ 、 $S_{Fy'}$ 、 $S_{Fz'}$ 、 $S_{Mz'}$ を式(2.22)～(2.26)に代入することで、ロボットハンドに傾きを与えたときの、 $x$ 軸まわり、 $y$ 軸まわりの傾斜角 $\phi$ 、 $\theta$ 、把持物体の質量 $M$ 、ロボットハンドの把持力 $F_{grip}$ 、把持点と物体の重心までの距離 $I$ ( $I$ はFMS-1Pのみ)を2つの指先センサ出力電圧から導出することができる。

## ⑦まとめ

本研究では単結晶シリコンを構造材料とした小型6軸フォースセンサチップを開発し、装着が容易で計測安定なパッケージ構造を採用しロボットハンド用柔軟指先触覚センサの実用化試作を行った。また、開発したセンサをロボットハンドに装着し、物体の把持を行った。本プロジェクトで得られた結果を以下に要約する。

- ①3種類の小型6軸センサチップを考案・設計を行った。ビームの支持点数がそれぞれ異なるセンシングチップFMS-1～3についてFEM解析を行いそれぞれ最大印加力、最大印加モーメント、各軸の感度を比較した。その結果、これらはトレードオフの関係にあることを確認した。
- ②MEMSファンドリーサービスを活用し、ウエハ製作、チップFMS-1～3の製作を行った。  
センサチップ試作数合計1000個
- ③センサチップFMS-1～3の評価を行った。各センシングチップとも線形な結果が得られた。測定感度について理論との比較を行なった。計測値は解析値より平均5.0%小さい結果が得られた。
- ④柔軟指センサFMS-1～3Pのパッケージ構造を設計、製作、評価を行った。パッケージ実装個数合計250個。各センサとも線形な結果が得られた。測定感度について、理論値との比較を行なった。計測値は解析値より平均5.0%小さい結果が得られた。
- ⑤指先センサをロボットハンドに装着し、物体の把持を行うことでロボットハンド用指先センサとしての有用性を検証した。結果、2つの向かい合う指先センサにより物体を把持するとき、指先センサの出力電圧により把持物体の情報(物体把持物体を把持する力、質量、指先センサの傾き角、把持点から把持物体の重心までの距離)を得ることができることを確認した。

今後、本研究試作センサをロボット、FA研究グループへ提供し、開発センサの有用性、ロボットハンドにおける触覚センサ研究、物体把持の研究の進展に資する予定である。

生物を模倣した人工触覚センサの性能は総合的にはまだ到底生物の感性にはほど遠いといってよい。しかしながら、人工物触覚センサは生物よりも一般的に解像度が高く、また定量的な情報を得ることが可能である。このような性質は医療における手術、産業用(特に経験やスキルを必要とする緻密な作業)など、人間が困難としているタスクへ展開可能と考えられる。また、福祉、家庭、アミューズメントな

ど人間親和性が要求されるロボットにおいても柔軟接触部を有する触覚センサは展開可能であると考える。今後進むべき方向としてアレイ化、スマート化、センサフェュージョンへの応用が期待されている。これらの期待に応えるためにはセンサと情報処理技術が融合することが不可欠であり、ますます半導体技術と適合性の良い MEMS 製造技術の活用、進展が重要なであると考える。

### (3) 成果の意義

ヒューマノイドタイプロボットなど、比較的小型のロボットの複雑な運動を検出するためには、検出対象への影響を可能な限り少なくする小型のセンサが必要となる。ロボットの動作環境等によっては、分布的に配置し計測する必要があるため、従来の大きさに比べ格段に小さい 6 軸フォースセンサを開発し、ロボット制御研究に供し、その有効性を評価することに重点を置き進めてきた。

本研究は、国内の MEMS ファウンドリー試作サービスを活用し、これまでの数個～数十個単位の研究試作から数百個～千個のオーダーの実用試作を実施することも目的にした。そのための製作プロセス上の課題の抽出とその解決に関する検討も行った。ここで得られた結果は、国内 MEMS ファウンドリーの技術力の向上のみでなく、試作個数の数増しによって、ロボット応用研究の範囲拡大と促進につながるものである。

本研究では、MEMS ファウンドリー試作サービスを活用し、これまで本研究グループが開発してきた 6 軸フォースセンサのチップ寸法を 3mm 角から 2mm 角にさらに縮小したチップの開発を行った。また装着が容易で計測が安定なパッケージ構造を採用することによって、汎用性の極めて高いロボットハンド用柔軟指先触覚センサの実用化開発を行った。本研究開発によって、投入された予算に見合った十分な成果が得られたと考える。今後、ロボット産業のみならずネットワークセンシングやユビキタスセンシングなどへの応用展開も含め広く産業に貢献するものと考える。

### (4) 特許の取得

本研究開発は研究実施担当者らが既に出願した特許（6 軸力覚センサ：特願2002-199037）の実証およびその実用化を図ったものであり、MEMS ファウンドリー試作サービスを活用した本研究成果によってその目的を十分に果たすことができた。また、関連特許として1件の特許出願を行うことができた。

### (5) 成果の普及

本研究成果を以下の学会および展示会で発表 10 件および展示 7 件を行い広く一般に情報発信を行った。

#### <学会名>

- [1](Transducers'03)The 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, IEEE, Boston, June 8-12, 2003
- [2]The 20th Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems, IEEJ, Tokyo, July 23-24, 2003
- [3](APCOT MNT 2004) Asia-Pacific Conf. of Transducers and Micro-Nano Technology 2004, Sapporo, Japan, July 4-8, 2004
- [4](ICMT2004) The 8th International Conference on Mechatronics Technology, Hanoi, Vietnam, Nov. 8-12, 2004
- [5]The 22nd Symposium on Sensors, Micromachines and Applied Systems, IEEJ, Tokyo, Japan, Oct. 20-21, 2005
- [6](APCOT2006) Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology, IEEE, Singapore, Jun. 25-28, 2006

[7](ISFA2006) 2006 Int'l Symposium on Flexible Automation, ISCIE/ASME-DSC, Osaka, Japan,  
July,10-12,2006

[8]The 23rd Symposium on Sensors, Micromachines and Applied Systems, IEEJ, Takamatsu, Japan, Oct.5-6,2006

[9](IEEE Sensors 2006) The 5th IEEE Conference on Sensors, Daegu, Korea, Oct.22-25, 2006

[10](IEEE MHS 2006) The 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya,  
Japan, Nov.6-8, 2006

<展示会名>

[1] 2005.11.09-11, 第 16 回マイクロマシン展, 東京, 主催:マイクロマシンセンター

[2] 2005.12.07-09, SEMICON Japan 2005, 幕張メッセ, 主催:SEMIジャパン

[3] 2006.06.10-11, 第 5 回産学官連携推進会議, 国立京都国際会館, 主催:内閣府, 総務省, 文部科学省, 経済産業省, 日本経済団体連合会, 日本学術会議

[4] 2006.08.29-09.01, 第 67 回応用物理学会学術講演会MEMS特別展示, 立命館大学びわこ草津キャンパス,  
主催:(社) 応用物理学会

[5] 2006.09.13-15, イノベーション・ジャパン 2006, 東京国際フォーラム, 主催:(独)科学技術振興機構, (独)  
新エネルギー産業技術総合開発機構

[6] 2006.11.07-09, 第 17 回マイクロマシン展, 東京国際フォーラム, 主催:マイクロマシンセンター

[7] 2006.12.06-08, SEMICON Japan 2006, 幕張メッセ, 主催:SEMIジャパン