

機関番号：14303  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560299  
 研究課題名(和文) 強誘電体のメモリ保持特性を利用した振動型MEMS構造体の不揮発的共振制御  
 研究課題名(英文) Non-volatile resonant frequency control of vibratory MEMS structures using ferroelectric polarization  
 研究代表者  
 山下 馨 (YAMASHITA KAORU)  
 京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授  
 研究者番号：40263230

## 研究成果の概要(和文)：

共振型のMEMS(微小電気機械システム)構造体において、圧電体を利用してその共振周波数を制御する方法を提案し、構造体の形状と周波数制御性の関係を明らかにした。また圧電体の電極を含む構造を最適化して、共振周波数変化率を従来の十倍以上に向上した。この結果を用いて、アレイセンサによる超音波計測において大きく測定精度を向上する新たな測定法を提案した。

## 研究成果の概要(英文)：

Frequency control technique of resonant MEMS (micro-electro-mechanical systems) structures using piezoelectric materials has been proposed. The role of a static deflection of the piezoelectric diaphragm structure has been clarified in the relationship between the piezoelectrically generated stress and the resonant behavior. The results have led a novel ultrasonic measurement technique with much higher accuracy than a conventional one.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：電子デバイス工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 電子・電気材料工学

キーワード：圧電体、強誘電体、分極、MEMS、共振

## 1. 研究開始当初の背景

近年のMEMS(Microelectromechanical Systems)に代表される、微細立体構造により機能を発現するデバイスでは、サイズの微小化に伴いその寸法誤差の拡大が問題となる。すなわち、微細加工技術の絶対精度には限界があるため、デバイスサイズが微小化されるほど相対的に誤差が拡大される結果となる。振動型デバイスであるジャイロや加速度センサ、あるいはアコースティックエミッション

センサやプローブ顕微鏡などでは、マイクロ構造体の共振現象がデバイス動作の要となるが、構造寸法誤差に起因する共振周波数の設計値からのずれが大きな問題となる。半導体集積回路などでは、微細化に伴う誤差・特性ばらつきへの対策として、近接した領域に対称な回路を作り込むことにより誤差を相殺する等の手段をとることができるが、機械的構造部材であるMEMSデバイスにおいてこのような手段を用いるのは現実的ではない。その

ため、デバイス完成後のポストプロセスとして個々の素子について形状・質量等のトリミングが必要となる。このことが生産コストを押し上げる結果となり、また多数の素子をアレイ化して使用する応用が事実上不可能となる。

一方、純粋シリコンのみで作られるデバイスに対して、圧電体を用いた構造体が特に振動型デバイスにおいて近年盛んに研究開発されているが、やはりこれらをアレイ化したデバイスはほとんど実現されていない。これは、シリコンテクノロジーのみで作製可能なデバイスに比べ、圧電デバイスではシリコンとは異質な圧電材料(強誘電体材料)を扱うため、デバイス構造中の力学的特性を均一化することが難しく、多素子化を妨げていることが原因である。これらの問題は、純粋に幾何学的寸法精度と加工技術の関係で決定されるので、デバイスの更なる微細化が求められる中で本質的に不可避な状況であり、微細加工技術あるいはデバイスの制御技術に大きなブレイクスルーが強く求められている。

研究代表者は従来から、シリコンの微細加工によるマイクロ構造体と強誘電体薄膜の良好な圧電性を組み合わせて、空中超音波を用いた三次元計測のためのマイクロ超音波アレイセンサの研究を行ってきた。空気中では水中や固体中に比べて超音波の伝搬速度が遅いためリアルタイム計測のためには機械的にセンサを走査することができず、多素子によるアレイを構成して全素子からの信号を電子的に走査することにより三次元計測を行っている。しかしながら、空中超音波用のセンサでは、水中用に比べて使用周波数が低く振動体の構造を薄く作る必要があり、厚み方向の寸法ばらつきの影響から共振周波数不均一が生じ易い。これは、アレイ各素子の出力信号を電子走査して三次元情報を再構成する際に重大な障害となる。研究代表者はこの問題を解決するために、ポストプロセスとしての質量付加、および圧電体の電気・機械結合を通じた共振周波数制御の方法を試みてきた。圧電体を含むダイアフラム構造に対して、直流バイアス電圧を印加することによる共振周波数シフトについては、スイス EPFL の Muralt らによって報告されているが、研究代表者はこの 5 倍以上のシフト量を実現している。また研究代表者の応用では構造体をセンサとして使用するため、電界を印加しながら使用することが困難であった。そのため、強誘電体の分極保持特性を利用して、ポーリングによる共振周波数制御を試みた。センサの使用前に一旦直流バイアスを印加して共振周波数を所望の値に調整した後、センサとしての使用時にはこの保持された分極によりバイアス印加無しで調整後の共振周波数を保つことを確認した。これにより、強誘電体薄膜と MEMS

構造体に組み合わせによる不揮発的共振周波数制御の可能性が示された。

## 2. 研究の目的

強誘電体による MEMS 構造体の共振制御について、基礎的な現象は確認されたが、そのメカニズムの詳細と実デバイスへの応用のための制御性については未だ十分に明らかにはなっていない。本研究では次の点について研究を進める。

### (1) 共振周波数シフトメカニズムの解明

バイアス電圧印加による圧電ダイアフラムの共振周波数シフトは Muralt らおよび研究代表者らにより確認されているが、両者の結果は印加電圧に対するシフトの傾向が逆転している。周波数変化は圧電体に生ずる応力変化が起源と推測されてはいるが、まだそのメカニズムは十分に明らかではない。本研究で、振動構造体の形状の差異に対する共振周波数シフトの変化を詳細に観測することにより、本現象の起源を解明する。

### (2) 共振制御性についての検討

これまでのところ、10V 程度の電圧印加に対しての周波数シフトは、Muralt らによる結果では 3%程度、研究代表者による結果で 15%以内である。振動構造体アレイの周波数均一化補正の意味からは10%内外の変化でも実用になるが、数十%以上の大きなシフト量が得られれば、さらに様々な応用の可能性が開かれる。これを確かめるために、制御性良く大きな周波数シフトが得られる構造について検討し、本技術の適用限界を見極める。

### (3) 新たな MEMS 共振制御デバイスの提案

得られた共振周波数制御性を最大限活用して、従来の共振型 MEMS デバイスの特性向上を図る。具体的には、センサ出力信号から共振周波数を割り出し目標周波数との誤差を小さくする方向に自動補正が可能なデバイスや、あるいは複数素子の共振周波数を一斉に変化させることにより高度なセンシングを可能とするデバイス等を検討する。

## 3. 研究の方法

圧電ダイアフラム型 MEMS 振動構造体を作製し、バイアス電圧印加下での共振挙動を測定する。これにより共振周波数のシフトメカニズム解明を図ると共に、共振制御の最適構造を検討する。

### (1) ダイアフラム撓みに対する共振挙動の解明

強誘電体に対して自発分極と逆向きに電界を印加する場合、抗電界に達するまでは厚み方向に収縮し面内方向に伸長するのに対し、高電界を越えて分極と印加電界が同方向になると厚み方向に伸長し面内方向に収縮する。したがって、撓みの無いダイアフラムの場合には抗電界以下で面内引張応力が緩和、抗電界

以上で引張応力が増加するのに対し、撓みのあるダイアフラムの場合は抗電界以下で面内圧縮応力が増大、抗電界以上で圧縮応力が緩和することになる。一般に、撓みの無い構造では引張応力に対して共振周波数が上がり、圧縮応力に対して共振周波数が下がる。しかし圧縮応力が大きくなり座屈して静的撓みを持つようになると、さらなる圧縮応力の増大に対して再び共振周波数が上昇することが報告されている。共振周波数シフトが圧電体層での面内応力変化によるものと仮定すれば、ダイアフラムが持つ静的撓みの違いから、定性的には以上によりこの現象が説明される可能性がある。

これを確認するために必要となる、静的撓みをもつ圧電ダイアフラム構造を作製する技術を開発する。振動体のマイクロダイアフラム構造は、表面を熱酸化した SOI (silicon on insulator) ウェハないしシリコンウェハの異方性エッチングにより形成する。ダイアフラム構造上に下部電極の Pt/Ti 薄膜を rf マグネトロンスパッタリング法で、圧電体層として PZT ( $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ) 薄膜をゾル・ゲル法で、上部電極の Au 薄膜をスパッタリングないし抵抗加熱真空蒸着法により製膜する。シリコン熱酸化膜は圧縮応力、ゾル・ゲル製膜による PZT は一般に引張応力を生じる。Pt 薄膜は製膜条件により応力の方向を制御可能であるが、ここでは圧縮応力層として用いる。上部電極はダイアフラム面積の一部分のみに形成するので、応力の影響を極力排除するために Au の極薄膜ないし応力の小さな抵抗加熱蒸着膜とすることを検討する。これら各層の膜厚を調整することによりダイアフラム全体に生ずる応力を制御することが可能となる。さらに、ダイアフラム構造をリリースするタイミングとゾル・ゲル PZT 薄膜を形成するタイミングを調整することにより、構造全体を座屈させるかどうかを選択できる可能性がある。これらの構造制御およびプロセス制御技術を駆使して、応力状態が制御された圧電マイクロダイアフラム構造を作製することを試みる。

#### (2) 振動体構造による共振制御性の比較

研究代表者らおよび EPFL グループの結果の比較より、周波数シフト量がシリコン部分の厚みに大きく依存していることが示唆され、シリコン部分が薄くなるほど同じ印加電圧に対するシフト量が大きくなっている。本研究で作製するダイアフラム構造は、EPFL グループの構造に比べて十分薄く、また作製プロセス上歩留まり良く形成できる限界の厚みに近いところまで来ているので、厚みに関しては現段階ではある程度最適化されている状況である。次に着目する点として、電界印加電極の構造の最適化を試みる。振動型アクチュエータを構成する場合は、ダイアフラムの振動体全面に電極が設置されている状態が最も効率

が良いが、振動歪みから圧電効果により信号を取り出すセンサとしての用途の場合は、振動時の面内歪みの位相分布を考慮した電極配置にする必要がある。振動体全面に電極を配置すると、センサとしての感度が低下し、最悪の場合出力が得られなくなる恐れがある。このことから、上部電極を複数部分に分割する構造が望ましい。この場合、センサとしての出力を取り出す役割の電極は、歪み振動の符号が一定である範囲内のみをカバーするように設計する。このようにして電極分割した構造について、前項の撓み形状を制御した構造体作製プロセスを適用し、分割電極を持つ平坦及び座屈したダイアフラム構造を作製する。それら構造体において、印加電界に対する共振周波数シフト量を評価し、電極構造配置が共振周波数制御性に与える影響を考察する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 圧電ダイアフラム構造体の作製と評価

前節で示した方法に従い、応力印加電極を持つ圧電ダイアフラム構造センサを作製した。

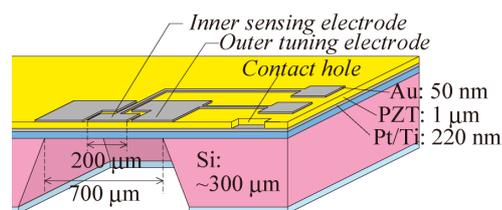


図1 二重電極をもつ圧電ダイアフラム構造体の模式図。

センサ構造の模式図を図 1 に示す。一边  $700 \mu\text{m}$  の正方形ダイアフラムについて、振動時の分極分布を考慮した電極配置としては、センシング電極の一边の長さが約  $400 \mu\text{m}$  以下であれば良い。一方、センシング電極周囲の領域が応力発生電極を設置できる部分であるが、共振周波数変化を大きくするために逆圧電的な発生力を大きくすることが単純には有効と考えられるため、この応力発生電極は極力大面積としたい。先行研究により電極サイズ  $200 \mu\text{m}$  程度まではセンサとして顕著な感度低下が見られないことが示されていたので、本デバイスの設計ではセンシング電極を  $200 \mu\text{m}$  とした。図 1 において PZT キャパシタ下部の構造を詳述していない。この部分はプロセスにより構造が変わるが、いずれの場合でも圧縮応力を有するシリコン熱酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) 層を含む。完成後のダイアフラムの撓み形状を制御するため、平坦ダイアフラム用と撓みダイアフラム用の作製プロセスを開発した。それらのプロセスの概要を図 2 に示す。

図 2(a) は平坦ダイアフラムの作製プロセスを示している。工程(i)においてシリコンを裏面から TMAH (tetra-methyl-ammonium

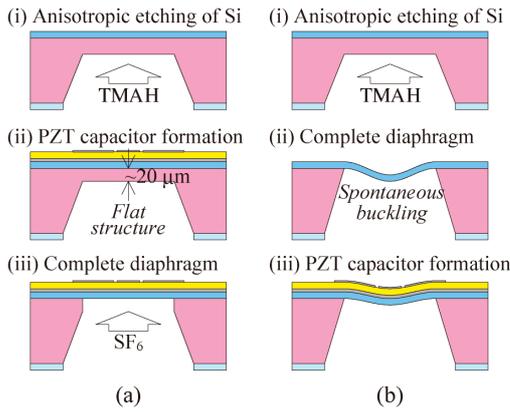


図2 平坦及び撓みダイアフラムの作製プロセス。

hydroxide)を用いてエッチングしてゆき、残厚が20 μm程度と表面がまだ平坦な状態で一旦エッチングを停止する。その後工程(ii)において表側のPZTキャパシタを形成し、最後に工程(iii)で残ったシリコンをRIE (reactive ion etching)により除去する。キャパシタ下のSiO<sub>2</sub>の残留応力が解放されるが、平坦な構造上に製膜されたPZTの引張り応力のためダイアフラム全体の応力が座屈限界以下となり、最終的に平坦な構造が実現される。

図2(b)は撓みダイアフラムの作製プロセスを示している。工程(i)においてシリコンを裏面からエッチングするが、今度は途中で停止せず工程(ii)に示すように完全にシリコンを除去する。この状態でSiO<sub>2</sub>の残留応力が解放されてダイアフラムが座屈し撓み形状を呈する。その後工程(iii)において表側のPZTキャパシタを形成する。この場合は撓んだ形状の上にPZTが製膜されるため、引張り応力のため多少撓みが緩和されるものの最終的に構造

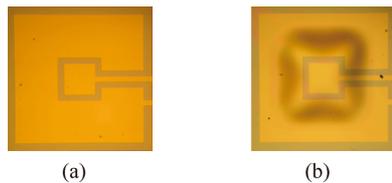


図3 撓み制御プロセス(図2)で作製したダイアフラムの顕微鏡写真。

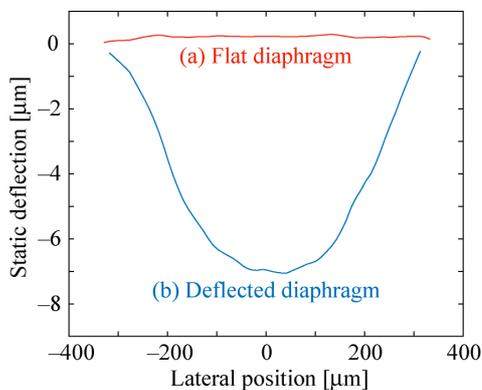


図4 撓み制御プロセスで作製したダイアフラムの断面プロファイル。

全体が撓んだダイアフラムが実現される。

実際のセンサ作製にあたり、図2(a)のプロセスには両面熱酸化した通常のシリコンウェハを用いた。ダイアフラムのキャパシタ下は厚さ1 μmのSiO<sub>2</sub>層のみである。一方図2(b)のプロセスにおいて同様に通常のシリコンウェハで試みたところ、工程(ii)の構造が大変脆弱であり、その後の工程(iii)において大半のダイアフラムが破損してしまった。これを回避するため、(b)プロセスではSOIウェハを用いることとした。この場合工程(ii)においてキャパシタ下には表面熱酸化膜(1 μm)と活性層シリコン(1.5 μm)および埋め込み酸化膜層(0.5 μm)が存在し、十分な強度が得られるため、破損することなく工程(iii)を行うことができた。完成したダイアフラムの写真を図3に示す。図3(a)は図2(a)のプロセス、図3(b)は図2(b)のプロセスで作製したダイアフラムである。プロセスの設計通り平坦なダイアフラムと撓んだダイアフラムを作り分けで来ていることが分かる。これらのダイアフラム部分の断面プロファイルを図4に示す。同様に図4(a)が平坦プロセス、図4(b)が撓みプロセスにより作製したものである。平坦なダイアフラムでは撓み量0.5 μm以下、撓みダイアフラムでは最大で7 μm程度の撓みを実現できている。

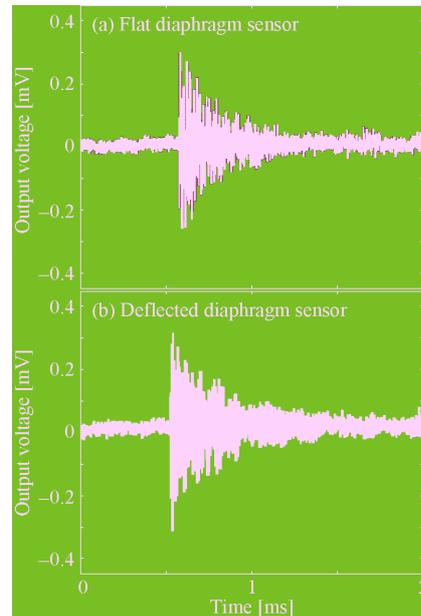


図5 圧電ダイアフラムセンサのパルス超音波に対する応答波形。

## (2) ダイアフラム撓みに対する共振挙動

これらのセンサについて、外側の応力印加電極に直流電圧を印加した状態で、パルス超音波を照射し、センサからの出力波形を用いて共振周波数を評価した。センサからの出力波形の例を図5に示す。平坦・撓みダイアフラム上の両センサとも同程度の感度、共振Q

値を示していることが分かる。 $Q$  値が 100 程度であるため 1 発のパルス超音波に対しても 1 ms 程度継続する減衰振動波形を呈する。この減衰振動部分からダイアフラムの共振周波数を測定した。印加する直流電圧に対する共振周波数の変化を図 6 に示す。PZT は強誘電体であるため電界印加に対して分極がヒステリシスを描く。このため電界により発生する応力も分極ヒステリシスに対応したバタフライカーブを描く。

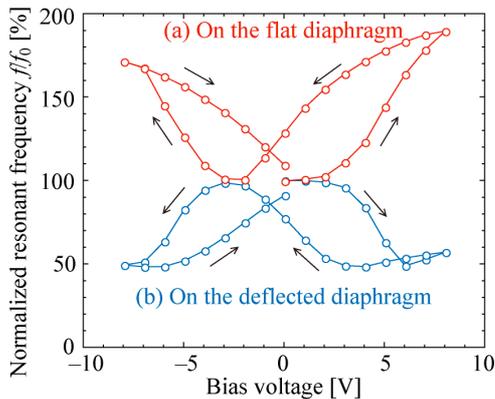


図 6 印加電圧に対する圧電ダイアフラム構造体の共振周波数変化。

図 6 より、まず共振周波数変化率が $-50\%$ ないし $+190\%$ と非常に大きくなっていることが分かる。これは従来の限られた面積のセンシング電極へのポーリングではなく、センシング電極の周囲に最大限の面積の応力印加電極を設けることができたためと考える。さらに、平坦なダイアフラム上のセンサでは電圧印加により共振周波数が上昇し、撓みダイアフラム上のセンサでは電圧印加により共振周波数が降下する特性が得られており、Muraltらと研究代表者の従来の研究結果を再現できていることがわかる。このことから、共振周波数変化の起源として前節で仮定した強誘電体に生ずる圧電的応力と共振周波数変化の関係によりうまく説明できることが示された。

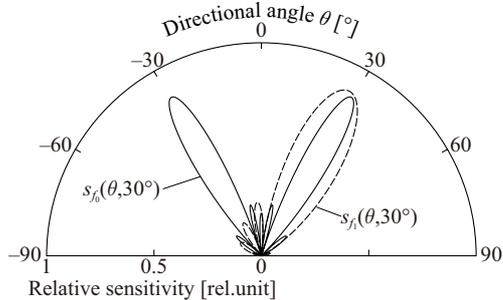


図 7 7 素子リニアアレイを用いた測定における指向性の例。実線の  $s_0$  は素子間隔が一波長に等しくなる周波数、点線の  $s_1$  は素子間隔が半波長に等しくなる周波数での計測をそれぞれ示している。

### (3) 共振制御による新たな測定法の提案

本研究成果により、共振周波数を上昇側・下降側共に 2 倍程度の変化を生ずることができた。これを利用して、超音波アレイセンサの新たな計測法を提案する。

超音波による障害物検知や画像計測においては、パルス超音波の反射波をアレイセンサで受信して反射物体までの距離と方向を検出する。パルスの往復時間で距離を、アレイを構成する各素子に入射する反射波の時間遅れを利用して入射波の角度を算出するが、角度分解能は計測に使用する超音波の波長とアレイ上のセンサの並び方によって決定される。すなわち、角度分解能は波長を単位として測ったアレイの直径に反比例して細くなるが、隣接するセンサ素子の間隔が半波長を超えるとゴーストが生じる。図 7 に単純化した例を示す。同一の配置のアレイにおいて、測定する超音波の周波数を変えた時の指向性パターンを示している。素子間隔が半波長に等しい周波数ではゴーストは生じないがメインローブが広く分解能が低い。一方素子間隔が一波長に等しい周波数ではメインローブが鋭く分解能が高いが、グレーティングローブのためにゴーストが生じている。このため、ゴーストを避けて角度分解能を上げるためには、従来は素子数を増やすことを余儀なくされていた。

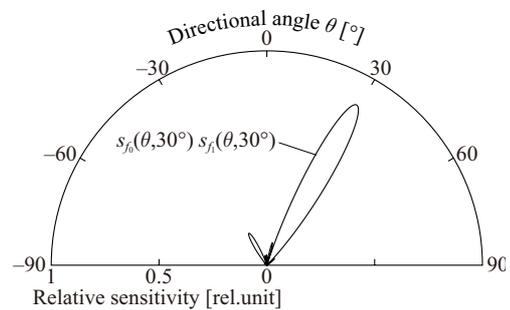


図 8 図 7 における二つの周波数による指向性を合成したパターン。単純に二つのパターンの算術積をとったもの。

一方、もしこれら二つの測定結果の情報を合成することができれば、同一のアレイでより高分解能でゴーストの影響を受けない計測が可能となる。図 8 にその結果を示す。メインローブが鋭くゴーストが大幅に低減されていることが分かる。このような計測を行うためには、従来は二種類のセンサを準備する必要があり結局は素子数の増加は避けられなかった。これに対して、本研究で開発した素子によりアレイを構成すれば、同一の素子で異なる周波数による計測が可能であるため、素子数を増加させずに図 8 の計測を行うことができる。このような二周波数による計測でのゴースト低減効果を図 9 に示す。縦軸はメ

インローブの高さに対する最大のサイドローブの高さの比で表しておりこれが高いほどゴーストの影響が大きいことを示している。横軸は使用する二周波数の比率を表している。この場合、最適な周波数の比率は0.57であり、このときのサイドローブは17.3%である。単一周波数計測による192%に対してゴーストの影響を1/10以下に低減することが可能である。

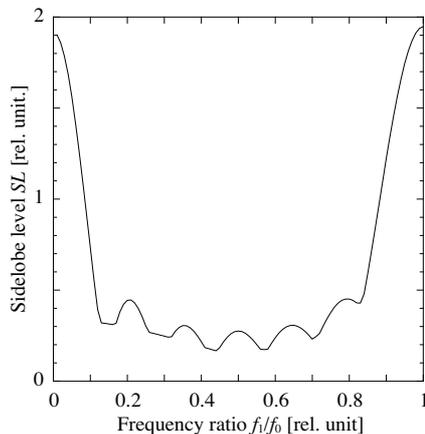


図9 二周波数測定における周波数比に対するサイドローブの変化。角度走査範囲を $\pm 60^\circ$ としたときの最大のサイドローブの高さをメインローブの高さで割って規格化したもの。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

1. K. Yamashita, K. Tomiyama, K. Yoshikawa, M. Noda, Resonant frequency tuning of piezoelectric ultrasonic microsensors by bias voltage application on extra top-electrodes on PZT diaphragms, *Ferroelectrics*, 査読有, vol. 480, 2010, 48–54.

[学会発表] (計9件)

1. K. Yamashita, K. Yoshikawa, K. Tomiyama, P. Lorchirachoonkul, M. Noda, Two-frequency combination in ultrasonic measurement on a sparse array using tunable microsensors, *IEEE Sensors 2010*, Hawaii, USA, Nov. 1–4, 2010, 610–613.
2. K. Yamashita, K. Yoshikawa, K. Tomiyama, M. Noda, Ghost suppressive ultrasonic measurement with a sparse phased array by using multiple frequencies, *WAC/IFMIP 2010*, Kobe, Japan, Sep. 19–23, 2010, IFMIP163.
3. K. Yamashita, K. Tomiyama, K. Yoshikawa, M. Noda, Ghost suppression in ultrasonic measurement with a sparse phased array by using frequency tuning of piezoelectric

microsensors, *Euroensors XXIV*, Linz, Austria, Sep. 5–8, 2010, 754–757.

4. K. Yamashita, K. Tomiyama, K. Yoshikawa, M. Noda, Piezoelectric tunable resonant microsensors for multiple-frequency ultrasonic measurement, *The 8<sup>th</sup> Japan-Korea Conference on Ferroelectrics*, Himeji, Japan, Aug. 3–6, 2010, 104.
5. 山下 馨, 藤井 康信, 良川 慧太, 富山 賢司, 野田 実, 応力印加電極を設けた周波数可変超音波マイクロセンサ, 平成22年電気学会全国大会, 東京, 3/17–19, 2010, 3-168.
6. 良川 慧太, 富山 賢司, 山下 馨, 野田 実, 高分解能・ゴースト低減計測のための周波数可変マイクロ超音波センサ, 第26回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 東京, 10/15–16, 2009, 631–634.
7. K. Yamashita, K. Tomiyama, K. Yoshikawa, M. Noda, Piezoelectric tunable resonant microsensors for high resolution and ghost-suppressive ultrasonic measurement, *Euroensors XXIII*, Lausanne, Switzerland, Sep. 6–9, 2009, 540–543.
8. K. Yamashita, K. Tomiyama, K. Yoshikawa, M. Noda, M. Okuyama, Frequency tuning of ultrasonic microsensors by bias voltage application to extra top-electrodes on PZT diaphragms, *IMF-ISAF-2009*, Xi'an, China, Aug. 23–27, 2009, IO-026.
9. 山下 馨, 良川 慧太, 富山 賢司, 野田 実, 圧電ダイアフラム型超音波マイクロセンサのバイアス電圧印加による共振周波数変化, 平成21年電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 八王子, 7/23–24, 2009, 91–95.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山下 馨 (YAMASHITA KAORU)  
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・  
准教授  
研究者番号：40263230

##### (2) 研究分担者

藤田 孝之 (FUJITA TAKAYUKI)  
兵庫県立大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：50336830

野田 実 (NODA MINORU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授  
研究者番号：20294168

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：