

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360136

研究課題名(和文) 強誘電体を用いた不揮発的共振制御と振動型MEMSデバイス高機能化への応用

研究課題名(英文) Resonant behavior control through ferroelectric polarization and its applications to vibratory MEMS devices with improved functionality

研究代表者

山下 馨 (Yamashita, Kaoru)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授

研究者番号：40263230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：強誘電体の圧電性と分極履歴特性を利用して振動型のMEMS(微小電気機械システム)デバイスの高性能化を図った。圧電体層を含む平板形状の振動体において、まず電界印加により生ずる逆圧電効果による応力を利用して振動体の共振周波数を制御し、また振動体の形状が共振周波数制御性に与える影響を明らかにした。次いで電界印加が逆圧電応力による振動体の形状変化と分極整列による圧電性向上を通してMEMSセンサデバイスとしての性能に与える影響を明らかにした。これらを踏まえて、具体的MEMSデバイスとして超音波アレイセンサを取り上げ、感度の向上手法と共振周波数制御による超高分解能計測手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Functionalities of vibratory MEMS (micro-electro-mechanical systems) devices have been improved using piezoelectricity with ferroelectric polarization of the ferroelectric material in the device. Resonant frequency control has firstly been investigated through converse-piezoelectric stress by applying external voltage, and it has been clarified that the frequency controllability by the stress and the effect of the shape of the vibrating plate to the controllability. The effects of the applied voltage to the performance of MEMS sensors have next been revealed through static deformation of the device plate due to the converse-piezoelectric stress and improvement of piezoelectric properties through alignment of ferroelectric polarization. We have finally dealt with ultrasonic array sensor and its array as instances of the vibratory MEMS device to apply the results of the investigation and proposed an improvement method of their sensitivity and measurement technique with super-resolution.

研究分野：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 MEMS 共振 分極 応力

## 1. 研究開始当初の背景

乗用車や航空機から家電・家庭用ゲーム機やスマートフォンまで、現代の社会生活を支える役割を担う様々な機器に、微小電気機械システム(MEMS; Micro-electro-mechanical Systems) 技術を用いて機能するデバイスが組み込まれている。これら MEMS デバイスにおいては微小立体構造により機能を発現するものがほとんどであり、今後の更なる高機能化の要求に対して、サイズの微小化に伴う寸法誤差の拡大が問題となる。すなわち微細加工の絶対精度には技術的限界があるため、デバイスに対して要求される最小寸法が微小化されるほど、相対的に誤差が拡大されることになる。特に振動型 MEMS デバイスでは、微細な構造体の共振現象を利用しているものが多く、構造寸法の誤差に起因して共振周波数が設計値からずれることにより、そのパフォーマンスが大きく低下する。これは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、微細加工技術やデバイスの制御技術に大きなブレー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、空中超音波による三次元計測とこれを利用した空間認識把握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 (Sensors and Actuators A, vol. 97-97, 2002, pp. 302-307 他)。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の不均一が生じやすい。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致命的な障害となる。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・機械結合を通じての共振周波数制御の方法 (Sensors and Actuators A, vol. 114, 2004, pp. 147-153) を開発しており、特に後者においては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法を確立した。センサの使用前に一旦直流電圧を印加して所望の共振周波数が得られる分極状態に調整した後、センサとしての使用時にはこの保持された分極により電圧印加無しでも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 構造体の組み合わせによる不揮発的共振制御の可能性が示された。一方 MEMS 圧電ダイアフラム型アクチュエータに直流バイアス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連邦工科大 EPFL の Muralt らによっても報告されている (Sensors and Actuators A, vol. 53, 1996, pp. 398-404) が、10 V の印加で彼らの結果ではシフト量は 3%程度、研究代表者の結果では 15%以内であり、また両者の結果は印加電圧に対する共振周波数シフトの方向 (上

昇・下降) が逆であった。研究代表者は、周波数シフト特性の差異の原因特定とシフト量の増大を目指して平成 20 年度採択基盤研究(C)による科研費を得て研究を行った結果、ダイアフラムの座屈形状を制御することによりシフト方向の逆転を再現した。また電極構造の工夫により、10 V 以下において周波数降下で-50%、周波数上昇で+200%と、従来結果の十倍以上にシフト量を増大することに成功した (Ferroelectrics, vol. 408, 2010, pp. 48-54)。この結果から、単に周波数ばらつきを押さえるための微調整に留まらず、積極的に共振周波数を変えることで振動型 MEMS デバイスを飛躍的に高機能化する着想を得た。

## 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。特にデバイス応用の観点からは、電圧印加により、逆圧電応力を生じることが振動型 MEMS デバイスの振動振幅 (センサ応用においては感度に直接関わる) に与える影響や、さらに分極状態の変化を通して圧電的性能全体に及ぼす影響も重要である。本研究では、圧電ダイアフラム型構造体を採用し、センサ応用として超音波センサを想定した高機能化に着目して、以下の点について研究を進めた。

## (1) 圧電ダイアフラム構造の作製法と形状および共振周波数シフトの関係解明

電圧印加に対する共振周波数の上昇・下降の方向がダイアフラムの撓み形状により異なり、平坦なセンサでは W 形 (強誘電体の電界誘起歪み特性に類似)、撓んだセンサでは M 形 (強誘電体の誘電率-電界特性に類似) という結果を得ていたが、従来の作製方法では両者において、撓み形状以外にダイアフラムの積層構造も異なるものとならざるを得なかった。本研究では新たな作製方法により、同一の積層構造において撓み形状の異なるダイアフラムを作製し、共振周波数シフトとダイアフラム形状の関係をより明確にする。

## (2) 振動型 MEMS デバイス高機能化への適用可能性

単なる周波数ばらつき調整ではなく、積極的に周波数を変更しながら使用することで従来の振動型 MEMS デバイスの飛躍的高機能化を図る。具体的なデバイスとして、超音波アレイセンサを取り上げる。共振型素子をアレイ化した超音波センサにおいて、同一アレイにて複数の周波数に対応できるデバイスを適用し、異なる周波数における測定結果を合成することにより従来の限界を超える高分解能を実現する計測方法を検討する。

## (3) 共振周波数制御性の最適化の考察

逆圧電応力による共振周波数チューニングだけでなく、圧電センサデバイスにおいて

感度を向上する手段であるポーリングによる影響を含めて、共振周波数可変能力を向上するための最適な制御方法を検討する。特に前項で得られる実デバイスへの応用に必要な性能を確保するための制御法を明らかにする。

#### (4) 逆圧電応力が振動型 MEMS デバイスのパフォーマンスに与える影響の評価

振動型圧電 MEMS 構造体への電界印加が、逆圧電応力による共振周波数変化を始めとして、同応力による構造体の静的変形や分極揃いによる圧電性の向上まで含め、本手法により総合的に MEMS デバイスの性能に与える影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 圧電ダイアフラム型 MEMS 振動構造体の作製と評価

従来、 $\text{SiO}_2$  ダイアフラムで平坦な構造を作製しており、撓んだ構造を作製するには脆弱な  $\text{SiO}_2$  のみではプロセスに耐えず破損してしまうため SOI ウェハを用いたシリコンダイアフラム構造を採用していた。そのため、共振周波数バタフライカーブの上下反転が撓み形状だけでなくダイアフラムの構造材料に影響を受ける可能性を排除できなかった。今回、表面保護が容易な ICP-RIE によるドライエッチングを利用して、表側に PZT キャパシタを形成した後にシリコン裏面からの深掘りによりダイアフラムを形成するプロセスを可能にした。ダイアフラムを撓ませる要因は  $\text{SiO}_2$  の圧縮応力であり、ゾル・ゲル法により製膜する圧電体 PZT 膜の引張応力との組み合わせでダイアフラム全体の残留応力を制御できる。シリコン深掘り前に表側へ製膜しておく PZT の厚さを制御することにより、完成したダイアフラムの撓み形状を制御することを試みる。そのようにして作製した、積層構造が同一である平坦ダイアフラムと撓みダイアフラムについて、電圧印加による周波数変化を測定し評価する。

#### (2) 超音波超解像度計測のための複数周波数最適化設計

アレイセンサによる超音波計測において、複数周波数における計測結果を合成することにより超解像度を得る。前項のプロセスにて作製した圧電ダイアフラムデバイスにおける周波数可変範囲を考慮して複数周波数を選択し、角度分解能とサイドローブによる虚像影響を数値解析シミュレーションにより評価する。それらの結果を通して最適な周波数比の選択を求めるとともに、現状デバイスの周波数可変能力に基づく計測性能を評価し、実デバイスの設計にフィードバックできる指針を得る。

#### (3) 電圧印加による逆圧電応力を利用した周波数制御性の向上評価

圧電ダイアフラム型超音波センサにおいて、共振周波数制御（チューニング）用の電極に電圧印加を行うこととともに、超音波の

センシング電極へも電圧印加（強誘電的ポーリング）を行うことにより、共振周波数制御性と感度の向上を両立する方法を検討する。ポーリングを併用したチューニングにおけるセンサデバイス特性の基本的な振る舞いを評価し、特に前項で明らかにした最適周波数比を実現するための周波数制御性を確保した上で、センサ感度を向上する電圧印加法を求める。

#### (4) 強誘電体への電界印加が多重電極付圧電ダイアフラム型超音波センサの性能全般に与える影響の評価

共振周波数チューニング用電極と超音波センシング用電極双方への電圧印加を併用して、超音波センサとしての感度と共振周波数変化を評価する。特に静的撓みを持つダイアフラムにおいて、逆圧電応力が撓み形状に与える影響も含めて評価を行う。チューニング電圧とポーリング電圧を二次元のパラメータとして双方ともステップ状に変化させ、強誘電体の分極ヒステリシス特性を考慮して処女状態から最高・最低電圧を経て最高電圧までの  $5/4$  周分のループの電圧印加を行う。各印加電圧の組み合わせにおいて、パルス超音波を印加して、センサの出力波形から共振周波数と感度を算出し、センサとしての全般的な性能を評価すると共にダイアフラムの静的撓み形状を測定しその影響を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 圧電ダイアフラム型 MEMS 振動構造体の作製と評価

作製した構造体の模式図を図 1 に示す。シリコン熱酸化による  $\text{SiO}_2$  ダイアフラム上に PZT キャパシタを形成している。キャパシタの上部電極は、センシング用の中央部とチューニング用の外周部に分割している。ダイアフラムを形成するための基板裏面からのシリコン深掘りを始める前に、基板表側に PZT 膜を形成しておくことで、ダイアフラム全体の座屈を制御できる。PZT 膜厚に対する最終的なダイアフラムの撓み量の変化を図 2 に示す。全厚  $1 \mu\text{m}$  の PZT を形成してからエッチングを行うと、ダイアフラム部のトータル面内力が座屈限界を超えないため、平坦なダイアフラムとなる。一方、 $600 \text{ nm}$  程度

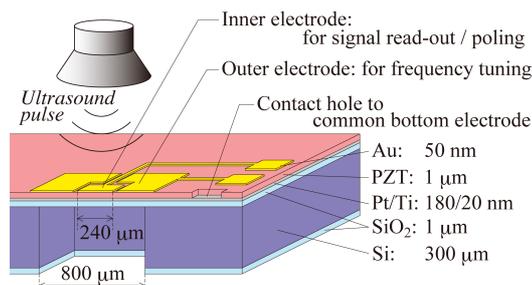


図 1 圧電ダイアフラム型 MEMS 振動構造体（超音波センサを想定）の模式図。

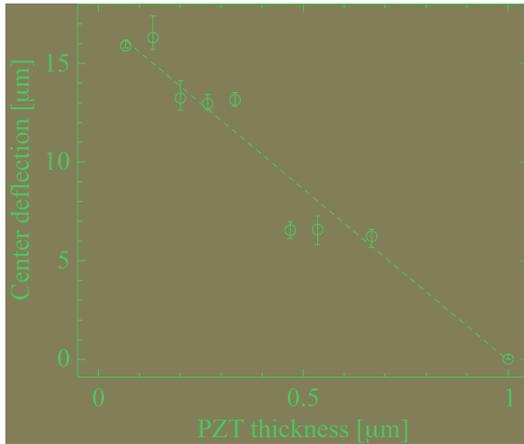


図 2 表側に形成した PZT の膜厚に対するシリコン深掘りエッチング後のダイアフラム撓みの変化。

以下の PZT を形成しておく、座屈して静的撓みを生じた状態でダイアフラムが完成する。その後、PZT を追加製膜して必要厚  $1 \mu\text{m}$  とすることで、静的撓みを持つセンサを完成した。これら両センサでチューニング電極への電圧印加による共振周波数変化を測定したところ、平坦、撓み、いずれのダイアフラムを持つセンサにおいても、共振周波数パターファイが W 形の形状をとることが分かった。このことから、パターファイの W 形/M 形を決定している要因が、単にダイアフラムの静的撓みではなく、ダイアフラムの積層構造に依存している可能性が示された。これ以降の実験では、センサの感度が高く測定データを処理しやすいという観点から、座屈して静的撓みを持つセンサに対して実験を行うこととした。

## (2) 超音波超解像度計測のための複数周波数最適化設計

現実的な設計のアレイとして素子数 16、素子周期 2 波長を想定して複数周波数計測法のシミュレーションを行った。従来の計測法におけるアレイの指向性計算値を図 3 に示す。このアレイの例では、従来測定法に鑑みれば 4 倍の素子周期を持つので角度分解能が 4 倍に鋭くなっている。しかしながら、指向角が  $30^\circ$  であるにもかかわらず、 $0^\circ$  と  $-30^\circ$  にも強い感度（グレーティングローブ）を持ち、しかも  $0^\circ$  の方が本来の指向角よりも感度が高くなっている。これに対して第 2 の周波数を追加し、まず (a) 第 1 周波数  $f_1$  でのグレーティングローブに第 2 周波数  $f_2$  の零点を合わせるように設計する。この段階で次に影響が大きい (b) メインローブに隣接するサイドローブを削減する。これにも同様の手続を用いて  $f_2 = f_1/1.5$  とするのが最も効率が良い。ところが両周波数がこのような簡単な整数比の場合、(c) 指向角によっては両者のグレーティングローブが重なり合う状態が生ずる。そこで条件 (a) を満たしつつ条件 (c) を生じない範

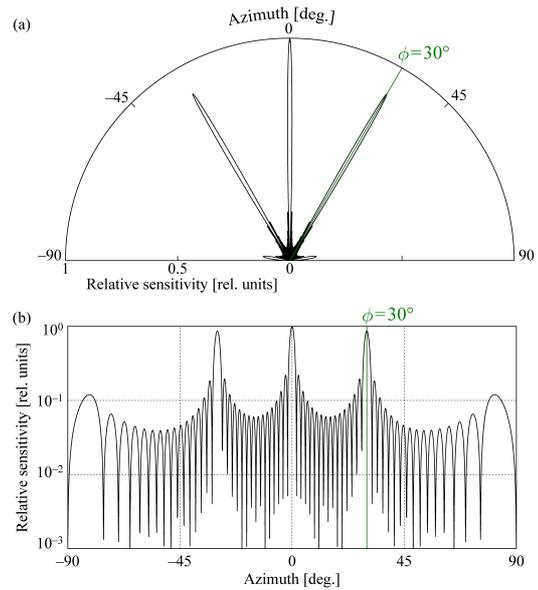


図 3 素子数 16、素子周期 2 波長のアレイにおける指向角  $30^\circ$  での指向性パターン。(a) 線形の極座標表示、(b) 縦軸を感度の対数で表示。

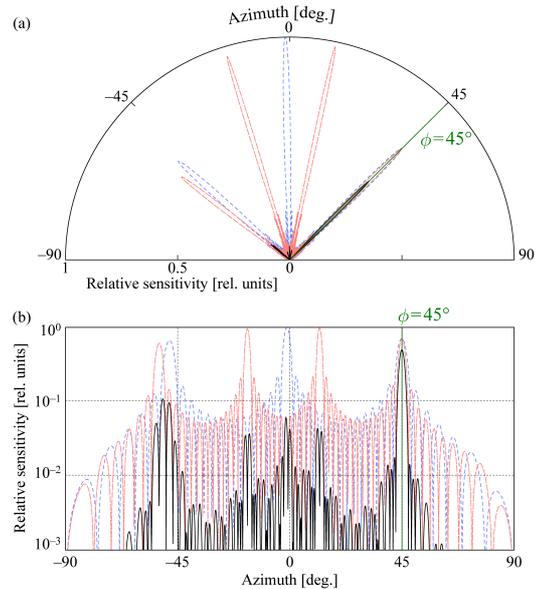


図 4 素子数 16、素子周期 2 波長のアレイにおいて  $4/3$  倍の波長を持つ第 2 周波数を併用した時の指向角  $45^\circ$  における指向性パターン。a) 線形の極座標表示、(b) 縦軸を感度の対数で表示。

囲でできるだけ効果的に条件 (b) を実現する。このための周波数比が  $f_2 = 0.75f_1$  と与えられることが分かった。この状態での指向性パターンを図 4 に示す。これにより最大のサイドローブを 13.9% まで削減することができた。一方、分解能では従来の 4 倍を達成できている。これらの結果から、現実的なセンサ素子

を用いたアレイにおいては、周波数比 133% (=1/0.75) を越えることを一つの達成目標とすることができた。

### (3) 電圧印加による逆圧電応力を利用した周波数制御性の向上評価

センシング電極へのポーリングが共振周波数チューニング特性に与える影響について評価を行った。チューニング電極への電圧印加を±6 V としたときの、ポーリング前後の共振周波数バタフライカーブの比較を図 5 に示す。ポーリングは室温にて直流 8 V を 1 s 印加した後に高インピーダンス入力のアンプに接続し直してパルス超音波に対する応答を測定し、出力波形から共振周波数を算出したものである。センシング電極へのポーリングにより残留分極値が向上し、ダイアフラム全体へ逆圧電応力が静的に追加されたために、バタフライカーブが全体的に高周波側へシフトしていることが分かる。ポーリングによりセンサとしての感度は 10 倍程度向上したが、共振周波数の高周波側へのシフトのため、周波数変化率が 183% から 164% へと相対的に低下している。しかしながら、シフト前の低チューニング電圧下での最低周波数とシフト後の高チューニング電圧下の最高周波数を組み合わせることができれば、さらに共振周波数変化率を拡大できる可能性があることが分かる。

実際の計測においては、異なる二周波数間で繰り返し分極状態をスイッチして使用することになる。この際、強誘電体の分極疲労を避けるためには分極反転しないように電界の印加方法を工夫する必要がある。具体的には、電界の印加方向を変えずに低電界と高電界間を遷移させることになる。図 5 の結果からチューニング電圧を 1 V と 6 V の間で遷移することが最も効率が良い。そこで、共振周波数チューニングはこの電圧間で遷移し、ポーリングに関しては (a) 0 V のまま変化させない場合と (b) 0 V と 8 V の間で遷移させる場合で共振周波数変化率を比較した。その結果を図 6 に示す。ポーリング電圧印加を併用した場合において 10% の共振周波数制御

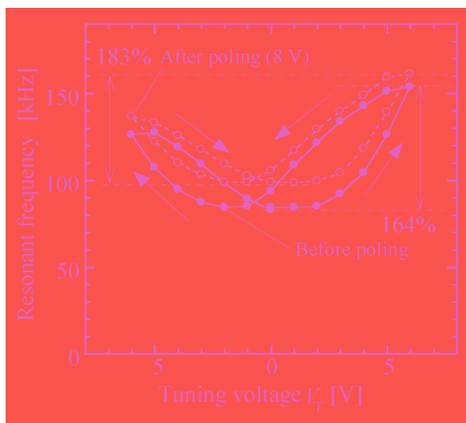


図 5 センシング電極へのポーリング前後の共振周波数バタフライカーブの変化。実線黒丸はポーリング前、点線白丸は室温でのセンシング電極への 8 V, 1 s のポーリング後。

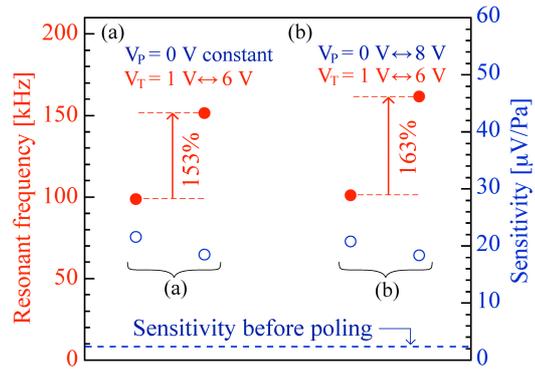


図 6 ポーリング電圧との組み合わせにおける共振周波数制御性と感度の比較。(a) ポーリング電圧 8 V で一定の場合。(b) チューニングに合わせてポーリング電圧を 0 V と 8 V 間で遷移させた場合。

性の向上が見られることが分かる。またこの時のセンサ感度はポーリング前に比べて 10 倍程度の向上を維持できている。最後に、実際の二周波数計測を想定して、二周波数間の遷移を繰返した際の、共振周波数変化率と感度の安定性を確認した。結果を図 7 に示す。目安となる 133% の共振周波数変化率は十分に確保できているものの、電圧印加を繰返すことにより共振周波数変化率が若干低下してゆくことが分かる。これは、同一方向への電圧印加を繰返すために分極が固定化され共振周波数がわずかに高周波側にシフトするためと考えられた。そこで、10 回の計測の後、チューニング電極へ強誘電的ヒステリシス一周分の電圧を印加してリフレッシュを図ったところ、図 6 の第 11 回目以降に示すように再び共振周波数変化率を元に戻すことができた。しかもリフレッシュ後は共振周波数変化率の低下が大きく低減できていることが分かる。全体を通して、センサ感度はポーリング前の 10 倍程度を維持することができており、高感度化と安定的な二周波数計測が両立できていることが分かる。

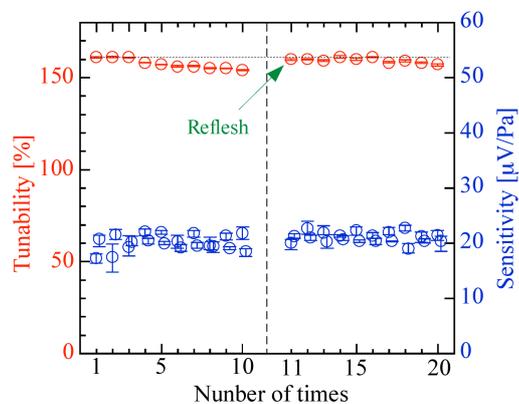


図 7 二周波数計測 (図 6(b) の電圧印加法) を繰返した際の共振周波数変化率と感度の変化。

(4) 強誘電体への電界印加が多重電極付圧電ダイアフラム型超音波センサの性能全般に与える影響の評価

センシング電極へのポーリングを±8 V、チューニング電極へのポーリングを±6 Vの範囲としてセンサ感度、共振周波数とダイアフラム撓み形状の測定を行った。まずポーリングによる感度の変化に着目すると、平坦ダイアフラムにおいてはポーリング電圧の上昇とともに感度が向上し、ポーリングによる強誘電的極揃いの影響がそのままセンサ感度に結び付いていると理解できた。一方、静的撓みを持つセンサにおいては、電圧が低い領域では平坦センサ同様でポーリング電圧の上昇に伴い感度が向上したが、8 V近くまでポーリング電圧を上昇すると感度が低下する現象が見られた。この感度異常前後のポーリング電圧印加状況下において、チューニング電圧に対する感度の変化に着目すると、感度向上領域内では、チューニング電圧を抗電圧以上に上昇させると感度低下が見られた。これは、チューニング電極下において逆圧電的に引張応力を生じることと、ダイアフラム全体の撓み振動に対する剛性が増した結果であり、チューニング電圧に対する共振周波数変化と同じメカニズムによるものと理解できる。一方感度低下領域においては、チューニング電圧の印加により感度が向上する現象が見られた。これは共振周波数変化とは相容れない現象である。

そこでこれら両者の現象が見られる電圧域において、ダイアフラムの形状を詳細に測定した。まず、ポーリングによる感度低下が見られた領域では、当初上向きであったダイアフラム撓みが減少してゆき、最終的に下向きへ反転していることが分かった。これは中央部のセンシング電極への電圧印加により引張の逆圧電応力が生じ、これとダイアフラム固定端付近の座屈モーメントとの組み合わせにより、高ポーリング電圧下において撓みが下向きになったものと考えられる。ポーリングによる感度低下はこのセンシング電極部分の極率符号の反転（上に凸から下に凸へ）によって引き起こされたものであった。次に、チューニング電圧のみを印加した場合には、チューニング電極下であるダイアフラム周辺部分の撓みが減少することが観測された。しかし電圧を印加していないセンシング電極部分の形状はほとんど変化せず、感度の変化はほぼ剛性の変化のみで説明できる。最後に、高い電圧でポーリングを行いセンシング電極部分が下向きに撓んだ状態においてチューニング電圧を印加した場合の撓み形状を計測した。これによると、ダイアフラム周辺部分が引張応力により撓み減少することは前述と同じであるが、中央のセンシング電極部分の下向き撓みも減少し、さらに高電圧を印加することで中央付近が上向撓みへ再反転していることが分かった。これが、チューニング電圧印加により感度が向上し

たメカニズムである。以上のことから、共振周波数制御用に設けた電極への電圧印加が、感度向上のためにセンシング電極へ施したポーリングの副作用を低減して、周波数可変能力以外の観点においても MEMS マイクロデバイスの性能向上に寄与できることを明らかにした。

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. 山下馨, 田中光, 森本篤, 野田実, 圧電ダイアフラム型超音波センサのポーリングによる感度変化とその面内応力の影響, 電気学会論文誌 E, 査読有, vol. 124, 2014, 119-124.

[学会発表] (計 16 件)

1. K. Yamashita, H. Tanaka, A. Morimoto, Y. Yang, M. Noda, Tunability and sensitivity modification by poling on PZT film of frequency-tunable ultrasonic microsensors, UFFC2013, Prague, Czech Republic, July 21-25, 2013, 352-355.
2. K. Yamashita, Y. Yang, H. Tanaka, M. Noda, Multiple-frequency design for high performance ultrasonic measurement by using phased array with reduced number of sensor element, ICETET 2012, Himeji, Japan, November 5-7, 2012, 137-142.
3. K. Yamashita, H. Tanaka, Y. Yang, M. Noda, Spontaneous diaphragm buckling control process on piezoelectric ultrasonic microsensors for high sensitivity, Eurosensors 2012, Kraków, Poland, September 9-12, 2012, 1513-1517.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 馨 (YAMASHITA KAORU)

京都市芸繊維大学・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)

京都市芸繊維大学・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：