

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560088

研究課題名（和文） MEMS共振子の熱弾性振動減衰特性の解明

研究課題名（英文） A study on thermoelastic damping properties of MEMS resonators

研究代表者

松本 敏郎 (MATSUMOTO TOSHIRO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10209645

研究成果の概要：

本研究では、MEMS やマイクロ SAW 共振子が振動する際の熱と弾性変形の連成振動エネルギーの減衰特性を数値計算により明らかにした。1次元の振動状態を想定してモデルに対して選点法と有限要素法により周波数応答を解析した。その結果、熱の連成を考慮しない場合と比べて共振峰のピークが右側にずれることが分かった。また、その理由を微分方程式に戻り理論的に説明した。また、Q値が最小になる物体サイズが存在することが分かった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：電子デバイス・機器，マイクロ・ナノデバイス，MEMS共振子

## 1. 研究開始当初の背景

共振器，フィルタなどの振動する MEMS 機器においては，振動エネルギーの損失が共振子，センサ，高周波通信機，ジャイロスコップなどにおける実用上の障害となる。したがって，MEMS 機器の振動エネルギー損失の支配的な要因を見出すことは重要なテーマとなっている。エネルギー損失の指標としては，共振ピーク Q 値が用いられる。Q 値を低下させるエネルギー損失の要因として，連成あるいは非連成の熱弾性損失が大きな要因の一つと考えられている。現在広く用いられている SAW（弾性表面波）共振子を超小型にした

マイクロ SAW 共振子においても同様の連成の熱弾性が振動減衰に及ぼす影響を解明する必要がある。これらの影響は，振動子の寸法が大きい場合には無視できるが，マイクロあるいはナノ・スケールの振動子については無視できない可能性があり，実際にマイクロ SAW 共振子においても，原因不明の Q 値の低下が観察されている。したがって，平板モデルやバルクモデルに対する数値解析を実行して，熱弾性損失の寄与について評価する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、MEMS 共振器およびマイクロ SAW 共振子振動の熱弾性減衰特性を圧電連成熱弾性振動理論に基づき評価し、高性能な MEMS デバイスの設計に有益な情報を与えることにある。具体的に列挙すると以下のようになる。

(1) 異方性圧電連成熱弾性体の周波数応答解析を行うための解析理論とソフトウェアを開発する。

(2) 異方性圧電連成熱弾性体の周波数応答解析を行い、共振峰のドリフトについて従来の等方線形弾性体の非連成の熱弾性理論に基づく 1 次元梁モデルから得られる結果との違いを調べる。

(3) 異方性圧電連成熱弾性体の単純な解析モデルとバルクモデルに対して、有限要素法により  $Q$  値を解析し解析対象の代表寸法との関係を調べる。

### 3. 研究の方法

以下の手順で研究を行った。

(1) 異方性圧電連成熱弾性体に 1 次元方向の振動状態を有する境界値問題を考え、運動微分方程式を導出する。さらに、この解を単項式の線形結合で近似した時の解を選点法で求める解析プログラムと、2 次アイソパラメトリック要素で離散化したときの有限要素法の解析プログラムを開発する。

(2) 一端を拘束、側面をローラー支持し、もう一端に調和加振力を作用させた場合について、変位の周波数応答を選点法と有限要素法で計算し、共振峰を求める。共振峰のドリフトを選点法の結果、有限要素法の結果について非連成の場合の結果と比較する。

(3) 三次元モデルに対する有限要素法ソフトウェアの開発も同時に行い、上記(2)と同じ解析を試みる。

(4) さまざまな寸法のモデルについて  $Q$  値を計算し、寸法と  $Q$  値の関係から共振子を設計する上で  $Q$  値が最小になる寸法が存在するかどうかを調べる。

### 4. 研究成果

(1) 定常振動状態を仮定した、連成の圧電熱弾性振動の支配微分方程式は、次のように書くことができる。

$$\omega^2 \rho u_i + C_{ijkl} u_{k,lj} + e_{kij} \phi_{,ij} - \lambda_{ij} \theta_{,j} = 0 \quad (1)$$

$$e_{ikl} u_{k,lj} - \varepsilon_{ij} \phi_{,ji} + p_i \theta_{,i} = 0 \quad (2)$$

$$i\omega(\lambda_{ij} u_{i,jj} - p_i \phi_{,ii} + \alpha \theta_{,i}) - \frac{\kappa_{ij}}{\Theta} \theta_{,ji} = 0 \quad (3)$$

ただし、 $\omega$  は角振動数、 $\rho$  は密度、 $C_{ijkl}$  は弾性定数テンソル、 $u_i$  は変位ベクトル、 $e_{kij}$  は圧電定数テンソル、 $\phi$  は電位、 $\lambda_{ij}$  は弾性定数

と線膨張係数によって定まる熱応力係数、 $\theta$  は基準温度からの温度差、 $\varepsilon_{ij}$  は誘電率テンソル、 $p_i$  は焦電係数、 $\kappa_{ij}$  は熱伝導率テンソル、 $\Theta$  は基準温度であり、物体の比熱を  $C_p$  としたとき、 $\alpha = C_p \rho / \Theta$  である。

これに対して、図 1 に示すような解析モデルを考えると、異方性の圧電熱弾性振動問題においても振動状態は  $x_1$  方向のみとなる。したがって、この問題は次のような 1 次元の連立常微分方程式に帰着する。

$$\omega^2 \rho u_1 + C_{1111} u_{1,11} + e_{111} \phi_{,11} - \lambda_{11} \theta_{,1} = 0 \quad (4)$$

$$e_{111} u_{1,11} - \varepsilon_{11} \phi_{,11} + p_1 \theta_{,1} = 0 \quad (5)$$

$$i\omega(\lambda_{11} u_{1,11} - p_1 \phi_{,11} + \alpha \theta_{,1}) - \frac{\kappa_{11}}{\Theta} \theta_{,11} = 0 \quad (6)$$

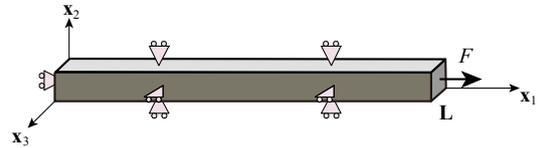


図 1. 振動状態が 1 次元となる解析モデル

この問題に対して、材料を ST カット水晶とし、単項式を基底関数とする近似解を構成して選点法で周波数応答を求めた結果を図 2 に、また 2 次要素による有限要素法により同様の解析を行った結果を図 3 に示す。いずれも、図の△印が、熱の問題との連成を考慮した場合の応答、○印は熱を考慮しない圧電体とした場合の応答である。このことから、熱圧電の連成を考慮すると共振峰のピークが右側にドリフトすることが分かった。したがって、共振子を設計する場合に熱による損失のみならず、その使用周波数の熱による影響を考慮しなければならないことが分かった。

(2) 熱による減衰の程度を比較するために、有限要素法による解析結果から  $Q$  値を計算して、その寸法による違いを調べた。図 4 には図 1 モデルにおいて寸法  $L$  を様々に変化させたときの  $Q$  値の逆数をプロットしたものを示す。この図から、寸法の違いにより  $Q$  値の逆数に最大値が存在することが分かる。したがって、共振子の設計において熱の損失を考慮した場合  $Q$  値が低下する寸法が存在することが見出された。

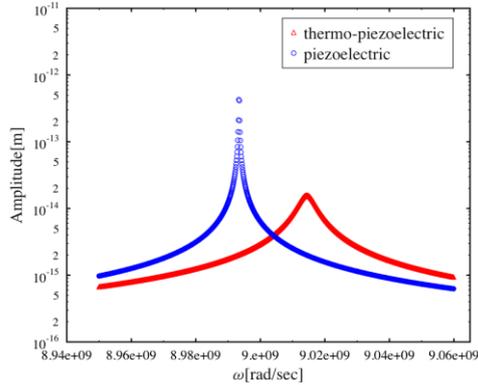


図 2. ST カット水晶に対する選点法による周波数応答

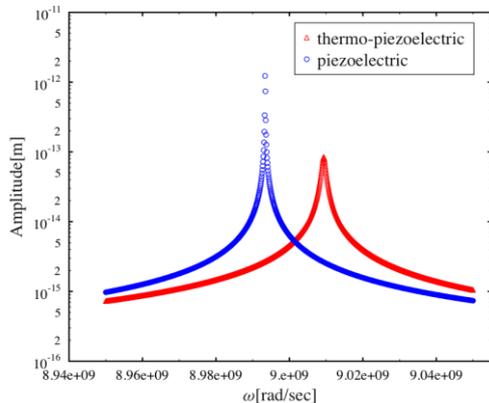


図 3. ST カット水晶似に対する有限要素法による周波数応答

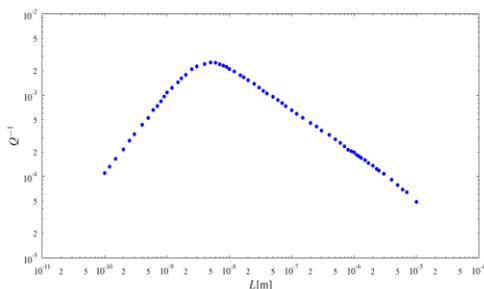


図 4. モデル寸法と  $Q$  値の関係

(3) 以上のような結果は国内、国外ともまだ示されていない新しい知見であり、MEMS あるいはマイクロオーダーの弾性表面は素子の設計において考慮すべきファクターとして重要な情報であると考えられる。しかしなが

ら本研究で示した解析例は、現在までの所バルクモデルの縦波のみを考えた場合の考察であり、今後、表面波を考慮したモデルに対して詳細な解析を行う必要がある。また、より詳細な解析のためには固有振動数の解析が必要であるが、熱による減衰係数が他の材料定数と比較して小さいため現在の所困難であり、固有値の求め方の検討が課題である。

## 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 3 件)

1. M. Takagi, S. Kanna, T. Matsumoto, "Analysis of frequency locations of the in-harmonics in quartz surface acoustic wave resonators using Helmholtz equations", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, pp.1193-1199, (2007), 査読有.
2. 高木道明, 神名重男, 伊藤大徳, 松本敏郎, "圧電体調和振動における 2 次元境界要素法の考察", 計算数理工学論文集, 第 7 巻, pp.41-46, (2007), 査読有.
3. M. Takagi, T. Matsumoto, H. Ito, K. Kamiya, M. Tanaka, "A BEM to time-harmonic vibration analyses of 3D piezoelectric solids", Advances in Boundary Element Techniques VIII, (Eds.) V. Minutolo, M.H. Aliabadi, pp.123-127, (2007), 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

1. 榊裕梨, 高橋徹, 松本敏郎, "弾性表面波素子の熱弾性減衰振動解析", 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 2008 年 11 月 1 日, 琉球大学工学部.
2. T. Matsumoto, T. Takahashi, H. Ito, Y. Sakaki, "Thermoelastic damping analysis of quartz SAW resonator", 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8), 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), 2008 年 6 月 30 日, Venice, Italy.
3. 榊裕梨, 高橋徹, 松本敏郎, "選点法による圧電熱弾性振動解析", 日本計算工学会計算工学講演会, 2008 年 5 月 21 日, 仙台市民会館.
4. 伊藤大徳, 高橋徹, 高木道明, 松本敏郎, 圧電体の 3 次元熱弾性定常振動解析, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会, 2007 年 11 月 27 日, 京都府同志社大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 敏郎 (MATUMOTO TOSHIRO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10209645

### (2) 研究分担者

高橋 徹 (TAKAHASHI TORU)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90360578