

LiNbO₃を用いた音響コム型デジタル式 AE センサの開発—センサの設計・製作・検証について—

武藤 一夫[†]・三浦 幸廣^{††}・今井 彰^{†††}・谷内 雅紀^{††††}

Development of an acoustic comb type digital AE sensor using LiNbO₃
- About the design, manufacture and verification of the developed sensor-

Kazuo MUTO[†], Yukihiro MIURA^{††}, Akira IMAI^{†††} and Masanori YACHI^{††††}

ABSTRACT

In this paper, the following three things are mainly studied and reported.

- 1) Research and development process of Acoustic Emission (AE) sensor so far (Development of broadband type AE sensor with fast response over DC-10 MHz and development of digital AE sensor with small cantilever by Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) technology)
- 2) Outline, design and simulation method of high performance developed acoustic comb type AE sensor using LiNbO₃ (lithium niobate) material
- 3) Production process of LiNbO₃ integral type cantilever array of AE sensor
- 4) Comparison of design calculation values and basic characteristics of the acoustic comb type digital type digital AE sensor, and evaluation method such as its electrical characteristics.

Key Words: acoustic emission, sensor, LiNbO₃, digital detection, cantilever array, measurement

キーワード: アコースティックエミッション, センサ, LiNbO₃, デジタル式検出, カンチレバーアレイ, 計測

1. はじめに

材料が外力の作用で変形，破壊に至る際に発生する音をアコースティックエミッション（音響放射，以下，AE (Acoustic Emission)と略す。）

という。このAEを検出することで，非破壊方式でかつIn Situ で自動車やCNC 工作機械等で使われる軸受等のトライボロジー現象の把握や寿命推定，ほかに各種金属材料の塑性変形中の材料モニタリング等を実現できる。材料中を伝搬してきたAE の検出は，材料表面に取り付けたAE センサによって行うが，従来，圧電材料としてはPZTが主体であり，特定の共振点のみを付与したセンサ構造となっているため幅広い周波数特性を解析することが困難である。一方，広帯域型においては，計測した信号に対して周波数解析をする必要があり，信号処理装置を含め大がかりな装置構成が必要となる。

平成 29 年 11 月 27 日 受付

平成 29 年 12 月 25 日 受理

[†] 工学部機械情報技術学科・准教授

^{††} 広和計装㈱・社長

^{†††} 多摩川モバイル電装㈱・課長

^{††††} 多摩川精機㈱・部長

これまでの研究^{9)~8)}では、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用い、AE の周波数特性を広帯域でデジタル的に分解・検出可能とするための機械構造体および電氣的検出素子を集積化したデジタル式AE センサの開発を行い、試作およびその電氣的特性の評価を行い、その信憑性を検証した。

本研究^{9)~11)}では、複雑な構造を持ったMEMS 式 AE センサの代替として、高額な半導体装置を使用せずとも比較的安価な装置で製作・製造することができるLiNbO₃ (ニオブ酸リチウム、以下、LN と略す。) 材による、高性能な音響コム (櫛) センサの開発を行うものである。本論文では、まず、センサの概要、設計およびそのシミュレーション方法について報告する。つぎに、そのセンサのLN 一体型カンチレバーアレイの製作工程について報告し、最後に、設計計算値と基本特性との比較および、その評価方法について報告する。

2. LN を用いた音響コム型センサ

LN を用いた高性能な音響コム型AE センサ(以下、LN 音響コムセンサと略す。)の開発では、一般的に高額な半導体装置を使用し、複雑な構造を持ったMEMS 方式のAE センサの代替として、次の事項について着想した。

- 1) 材料等の変形やトライボロジー中のモニタリングをInSituかつリアルタイム計測を実現すること
- 2) 比較的安価な装置で製造すること
- 3) シンプルな構造で、高信頼性・実用性を実現にすること

さて、LN の主な特性¹²⁾は、三方晶系結晶で、その融点は約1250°C、密度は4.64 g/cm³、熱的には極めて安定な強誘電体で、圧電性が比較的大きい。キュリー温度は1140±5°C で、融点は1255±5°C、常温では強誘電ヒステリシスを与えない。化学的には安定である。一般的なAE センサではPZT を材料に使用する場合もあるが、LN は単結

晶のため、PZT に比較して、倍以上一桁近く共振先鋭度 (Q) が高く、アレイ化 (コム型) 周波数分散型弁別器としての使用を考えた場合、共振での信号強度を高め、SN 向上が期待できることから、本報ではLN を基板材料として選択している。

Fig.1 にLN 音響コムセンサの概要図を示す。

このLN 音響コムセンサは、異なる共振周波数 (長さにより制御) を有した複数のカンチレバーをアレイ状に形成することで各共振周波数に応じた変位を離散的に検知する。比較的安価な装置で製造し、かつシンプルな構造で、高信頼性、実用性を実現できることから、従来技術の課題である計測後の信号処理回路が簡略化できるため、センサシステムの小型化が可能となる。このことから局所計測、In Situ 計測が実現可能である。

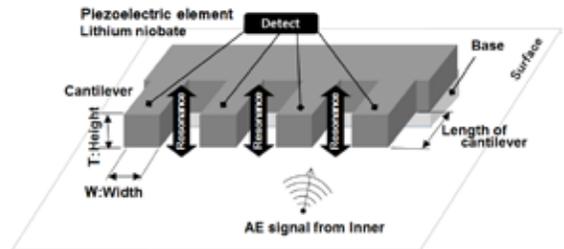


Fig.1 Schematic of digital AE sensor

本LN 音響コムセンサの共振の狙いとして、900MHz 帯無線通信の2 次中間周波数に使用された455kHz を上限に0.1~1 倍程度の周波数にての試作を考えている。なぜなら、無線化を考えた場合、ハードウェアに汎用性と自由度を持たせたい事と、もう一点設計製造の容易性と実現可能性を高めたいためである。上記設計指針より、LN の弾性定数より設計パラメータを計算すると、 $W \times T$ を $300 \times 200 \mu\text{m}$ とすると、**Fig.1** に示すようにカンチレバー長は $600 \sim 900 \mu\text{m}$ で設計できる。LN はシリコンに比べて加工が難しいことが知られているが、既に車載用ジャイロとして生産されており、 $1 \mu\text{m}$ レベルの加工精度を実現している実績を有する。そこで、LN 音響コムセンサは、

多摩川精機において自動車用旋回検出などで音さジャイロとして現在量産されているLN のカンチレバーをアレイ化することにより実現する。

3. LN 音響コムセンサの設計

まず、この LN を基板材料として選定することについて、その特長と留意すべきポイントについて説明する。音響コムセンサは、Fig.1 に示すようなカンチレバーをくし型にアレイ化する構造であり、カンチレバーの共振周波数を用いる。LN はシリコンなどの MEMS 材料に比較し、構造体として Q が高く、挟帯域で高安定な物性を持っている。これをアレイ化することで、幅広い離散周波数成分を持った出力信号が得られる。これにより信号処理に頼らずとも高い分解能で分別できる可能性が期待できる。機械共振特性は構造により決定される。一般的な MEMS と違い、材料に LN を用いる場合、化学的に高安定な物性を持っているため一般的な MEMS プロセス加工は使えない。そのため、マシニングプロセスを併用する。したがって、構造体を設計する場合、できるだけシンプルな形状にすることを考えた。LN は周波数濾過器としての使用実績が多数あり、RF 帯の SAW フィルタとして一般的に知られている。また、共振先鋭度 (Q) の高さを利用したセンサとして、LN 音叉ジャイロなども量産製品となった実績がある¹²⁾。今回の LN 音響コムセンサについても、同様の設計手法が用いることができる。設計時に留意しなければならないポイントは、まずは材料の持っている異方性特性である。PZT など圧電膜を用いる場合、成膜の後に分極処理を行えば、任意の方向性特性が作り出せるが、LN の場合、分極を形成するキュリー温度が $1140 \pm 5^\circ\text{C}$ と高いため、結晶育成の時点で分極処理を行う。このため、でき上がったウェハの結晶方位に特性の依存性があり、特に機械特性を電気特性に変換する、いわゆる電気機械結合係数 (k) は $0 \sim 50\%$ まで、異方性により変化する (Fig.2)。

この結合係数は高いほどエネルギー効率が高い、すなわちセンサ感度が高くなるということである。そこで結合係数の高い方位を選択することになる。今回は、カンチレバーの屈曲振動を検出するため、屈曲変位に対する電界発生方向 (≡ 電極間電界方向) に対し垂直方向の運動エネルギー (≡ k_{23}) を計算した。

縦軸は k_{23} を示し、横軸は結晶方位を表している。計算は A.W.Warner¹³⁾ の材料定数と、そのオイラー角を用いた座標変換を、汎用数値計算ソフトで記述することで、容易に行える。結果的には Fig.2 に示すように 140° 付近に結合係数 k_{23} の最大があることから、この方位を使うことにした。

機械共振特性は、カンチレバーの形状により決定され、上記と同じく Warner の物性定数のうち弾性係数 (E) を用いて、式 (1) により共振周波数 (f_n) を計算により求めることができる。

f_n は n 次の固有振動周波数を示す。

$$f_n = \frac{kn^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$

ここで、 E : 弾性係数、 I : 断面二次モーメント、 A : 断面積、 L : 長さ、 ρ : 密度、 k_n : 境界条件の λ (境界条件で決まる係数) である。

構造体の基板の設定、構造体の加工形状は、式中の (1) A と L により所望の周波数を設計することができる。 L を変化させた場合の共振周

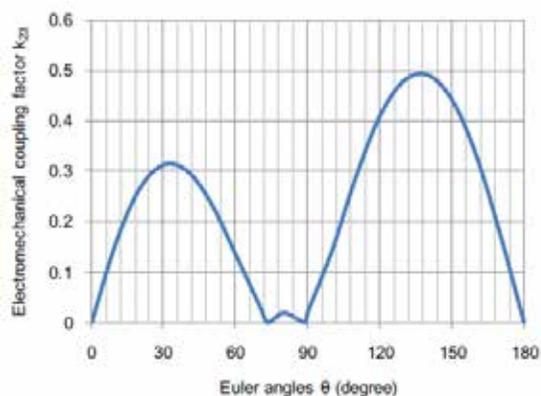


Fig.2 Electromechanical coupling factor of Y cut LN

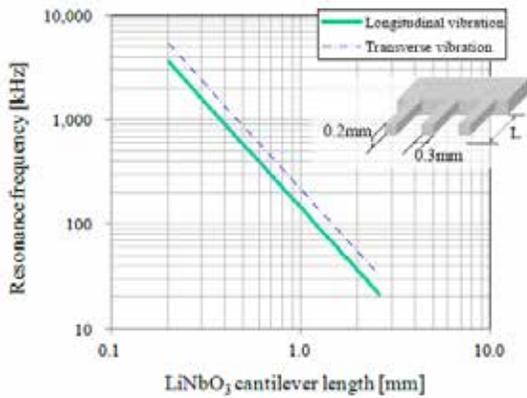


Fig.3 Resonance frequency of LN cantilever

波数計算結果をFig.3 に示す。

4. LN 出力特性の電気的等価回路への変換とそのシミュレーション

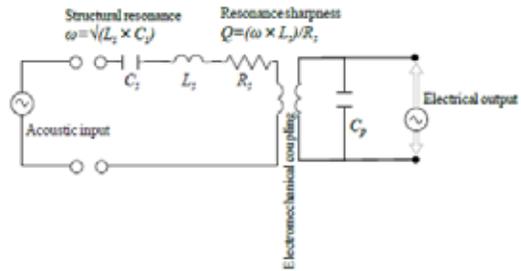
つぎに、LN の電気機械結合係数から電気的入出力特性について計算してみる。この入出力特性は検出回路を設計する上で、重要である。機械的インピーダンス特性は、電気的インピーダンス特性に変換することで、検出回路の設計が容易になることから、弾性波素子振動論など、広く知られている方法である。

ここで、先の Warner の定数を使って、誘電率 ϵ や弾性率を基点に各電気回路定数に置き換えていく。一般的に機械共振は直列共振系で説明されるが、LN は強誘電体であり、その誘電率 ϵ が大きいことから、並列共振を無視することはできない。したがって、これらの直列共振と並列共振を等価回路に置き換えると、次の Fig.4 のように示すことができる。

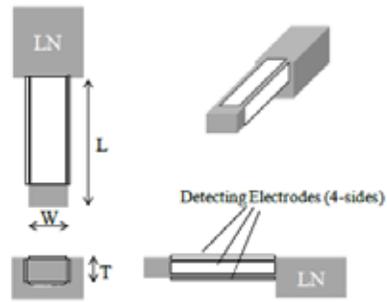
Fig.3 で示した共振の振動モードは横振動モード (Transverse) 縦振動モード (Longitudinal) の 2 種類があり、このうち縦振動モードが取れるように電極の設計を行った。構造と電極配置図を Fig.4 (b) に示す。またベースからの音響入力により発生する縦方向屈曲によって Fig.4 (c) のような矢印のような厚み方向で反転する電界が発生す

るため、これにあわせた 4 面電極構成および配線とした。この等価回路定数は LN カンチレバー上に設けた電極設計に依存し、たとえば静電容量 C_p は電極間容量を示し、電極面積 S と誘電率 ϵ の積を電極間距離 d で割ったものに比例する ($=\epsilon S/d$)。 C_s は C_p との比すなわち容量比 $\gamma(C_p/C_s)$ によって決定し、概ね圧電定数および電気機械結合係数に比例する。 L_s は機械固有共振周波数 ω により決定し、 $L_s = 1/(\omega^2 C_s)$ で計算できる。

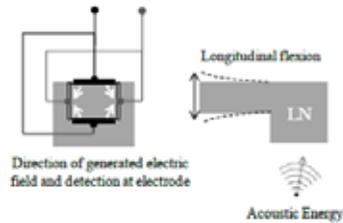
また、 R_s は共振先鋭度 Q に反比例し、 $R_s = j\omega L_s / Q$ で計算できる。また、アセンブリによる音響損失は考慮せず、LN 材料 Q は固定し計算した。



(a) Equivalent circuit



(b) Structure and electrode



(c) Generated electric field and extraction

Fig.4 Equivalent circuit and construction of LN cantilever

説明が重複するが、ここで先の構造共振 (f_n) と上記の電気回路共振周波数は、 ω (=電気共振: $2\pi f$) = $1/\sqrt{L_s C_s}$ とみなすことができる。また、 C_p は誘電率 ϵ と対向する電極面積 S に比例し、電極間距離 d に反比例するため、 $C_p \propto \epsilon S/d$ と表すことができ、電気機械結合係数より、 $k_{23} \propto C_s / C_p$ の関係となっているため、これらを計算するとカンチレバー一本当たりの電気特性がシミュレーションできるようになる。(縦軸 $Y = 1/Z$ アドミッタンスはインピーダンスの逆数) これをアレイ化すれば、Fig.5 のように汎用の電気回路シミュレータなどで、機械共振系とアンプ回路を含めた統合的な電気特性の計算をすることができるようになる。具体的には、Fig.4 のカンチレバー形状 (アーム長さ) を変化させ、1 本ずつの L_s 、 C_s 等価回路、定数を求め Fig.5 のような個々

のカンチレバーセンサの等価回路モデルを使って特性の見積もりすることが出来る。

また、Fig.5 のようなカンチレバー等価回路を組み合わせ、それぞれのカンチレバーの等価回路定数を入れてアレイ特性を計算することも出来る。たとえば同右図は並列接続した場合の LN センサアレイの特性計算モデルを示している。

つぎの Fig.6 にはこれらのアドミッタンス (Y_L) 特性を計算した結果を示す。

5. LN 音響コムセンサの作製

Fig.7, Fig.8 は LN コム型 AE センサのセンサ素子 (エレメント) の製作工程のフローを示す。

LN は難削材であり、チップングやクラックが発生しやすく加工が難しい。このため、Fig.7, Fig.8 のような、MEMS 製造においてよく使用される犠牲層による保護と機械加工のマシニングプロセスを併用することにより、センサ素子を製造することが肝要となる。

LN ウェハは精密ラップ盤にて、ウェハの表裏両面を厚さ 350 μ m、面精度 2 μ m 以内に精密ラッピング加工を行い、そのウェハをやと用ダミーウェハと積層し、一括して所定の幅・長さのカンチレバーを得るべく、短冊形状にダイシング切断する。この加工による最終形状が設計に影響を与えることはないことを付記しておく。

そして、音響コムに相当するカンチレバーアレイを作成するために短冊の幅手方向に、高精度スライサを用いて、所定の長さの溝を形成させる。その後やといを外し、アームのベースを作り、仕上げにフッ酸と硝酸の混酸液でエッチング処理することにより、加工歪の除去を行う。

つぎに、Fig.8 に示すように、コム型 AE センサのカンチレバー素子一つ一つに表裏両側面に、信号取り出すための電極パターンニングを施し、このセンサ素子をアレイ化してダイシング切断し、選択する周波数にあわせて、カンチレバーの長さを調整することにより、センサエレメントが完成する。

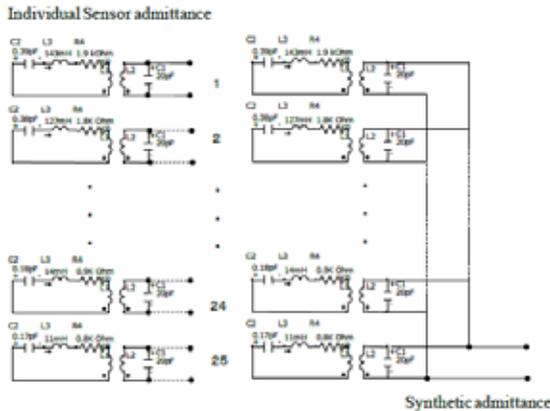


Fig.5 Calculation model of Sensor array

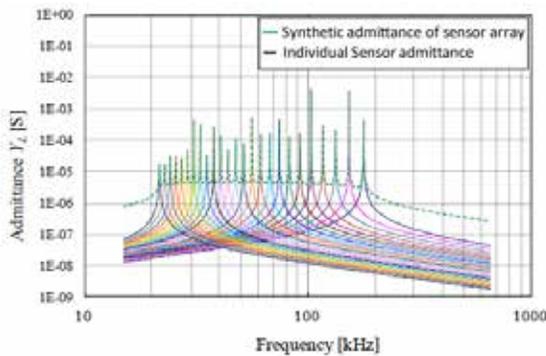


Fig.6 Calculation result of characteristics of sensor array

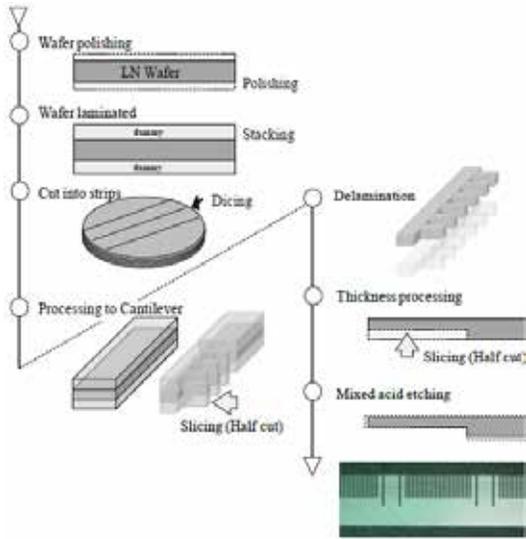


Fig.7 AE sensor manufacturing into cantilever array

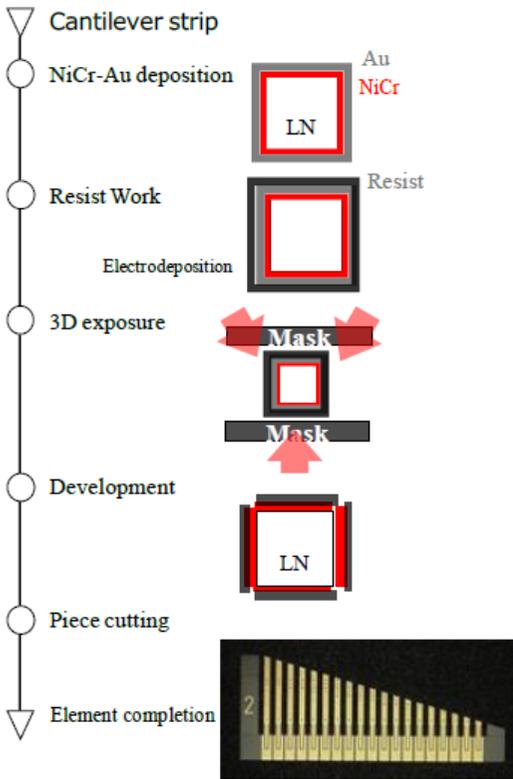


Fig.8 Photolithography process of AE sensor

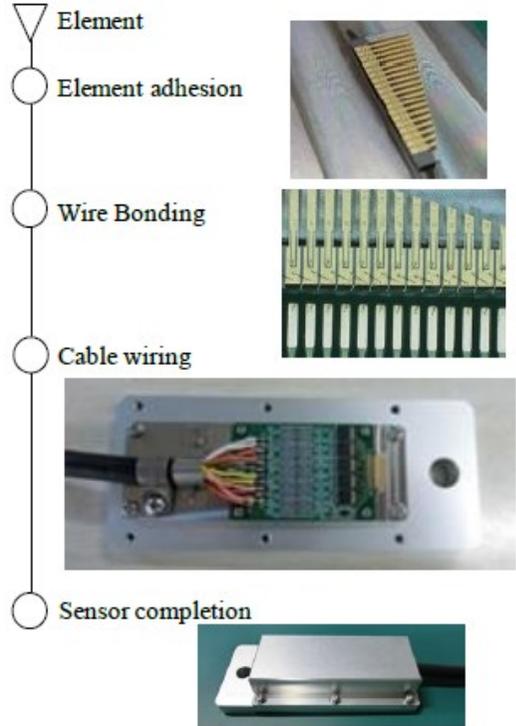


Fig.9 Assemble process of AE sensor

Fig.9 に、組み立てからセンサ完成までの工程フローを示す。センサエレメントは高周波数の音響結合を検出するため、金属台座に直接高硬度の接着剤で固定し、検出回路のプリント基板が音響的に影響しないように考慮した。基板に配置した所定の検出回路との配線のため、ワイヤボンディングによる結線などの半導体組み立てを行い、最後に回路基板にケーブル配線をし、ケーシングすることで、Fig.9 に示すようなAEセンサが完成する。

6. LN 音響コム型センサの計算と実測の差異評価

試作したセンサアレイは Fig.10 に示すようなディメンションになっており、幅 W と厚み T は一定で長さ L を変えることで共振周波数分散値を持つセンサを作ることができる。周波数の分散

値については、3章で述べたように機械共振特性は、上記形状により決定され、式(1)により計算することができる。

また、同じく機械共振特性＝電気共振特性として、Fig.4 の等価回路モデルから電気特性の計算ができる。この特性の計算結果と実測値の比較評価を行った。AE センサの電気特性モデルは、検出回路と組み合わせると、Fig.5 に示したアレイ回路となる。

この評価方法として、実際に試作したものの特性が、シミュレーション通りの特性を示すか

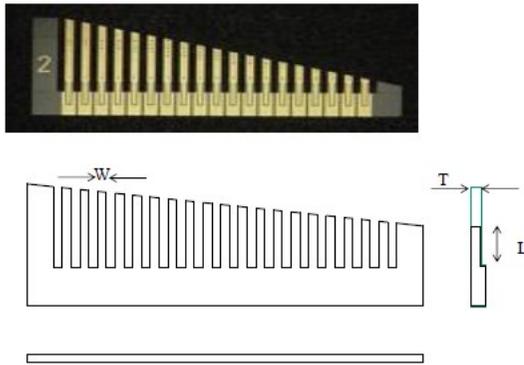


Fig.10 Structure and dimension of LiNbO₃ sensor

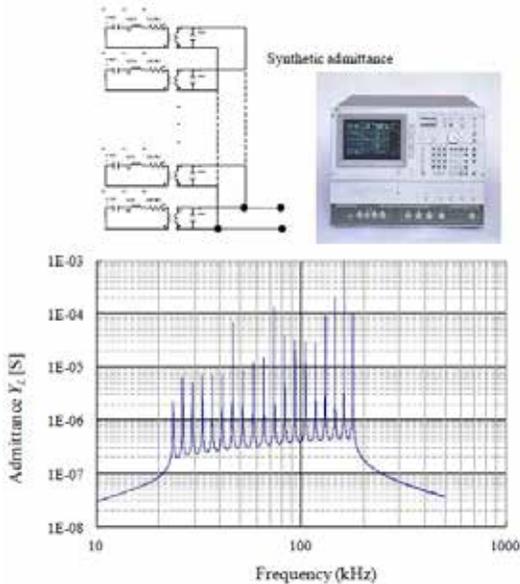


Fig.11 Results of evaluation of the admittance

否か、Fig.11 に示す Key-sight Technologies 社製の 4194A インピーダンス/ゲインフェーズアナライザを用いてアドミタンス特性を確認した。つぎに、計算結果と実際の電気特性の差異比較を行った。Fig.12 に代表例として 100kHz 付近の共振周波数特性の計算値と実測値の差異について示した。計算と実測は共振周波数と最大アドミタンス ($\propto R_s = j\omega L_s / Q$) で、わずかにずれが生じている。

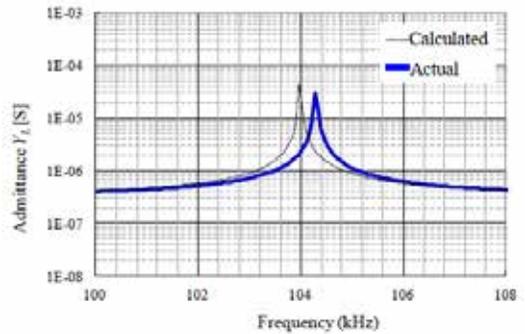


Fig.12 Comparison between actual and calculation
(Expansion around 100kHz)

つぎに、Fig.13 は、共振周波数について差異比較を行った。仮に製造誤差を厚み $\pm 2\mu\text{m}$ 、長さ $\pm 10\mu\text{m}$ で計算すると $\pm 2\%$ の誤差が発生する。このため、許容誤差としては $\pm 5\%$ としたが、実際の共振周波数誤差については 1% 以下で実現している。厚み精度、長さ精度共に上述の誤差の一桁下でコントロールできたことを示している。

つぎに、アドミタンス最大値誤差について差異比較を行った。3章で述べたように、構造共振 (f_m) と電気共振周波数は、 ω (=電気共振: $2\pi f = 1/\sqrt{L_s C_s}$) とみなすことができる。ここから周波数によるアドミタンス増加分 $YL \approx \omega C_s$ が計算できる。

これを実測と比較すると、Fig.13 のようになり、その計算した YL の散布図から線形近似を行うと $YL = 2E^{07}x - 3E^{07}$ と計算でき、これを回帰分析した場合の寄与率は $R^2 = 0.8622$ と高い相関性を示している。これは R_s の誤差影響を比較的抑制で

きた、すなわち実測 Q 値 1000 程度を中心に、そのばらつきが抑えられたことを意味する。

Fig.14 に示すようにアドミタンス最大値特性は AE センサの検出感度に相当し、近似値は $\omega C_p + R_s$ となる。つまり角周波数 ω に対して比例近似した場合の寄与率は $R^2 = 1$ が理想的ということである。これに対し、ばらつきはあるものの、計算での特性のシミュレーションとほぼ合致している。またばらつきのレベルは、カンチレバーのプロセスコントロールによりばらつきの調整が可能なレベルになっているものと考ええる。

今回の試作結果では、 R^2 の差が、計算した電気特性に対する製造ばらつきと考える事ができ、

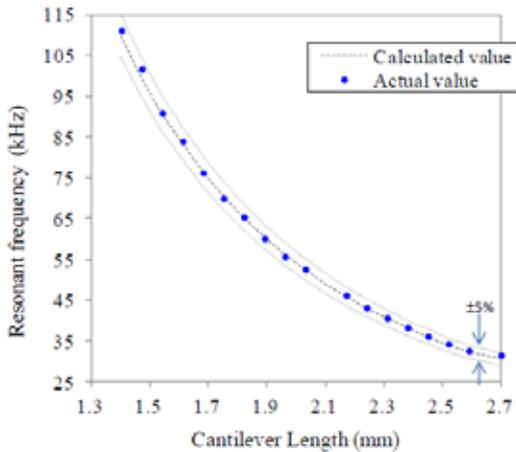


Fig.13 Result of resonant frequency of sensor array

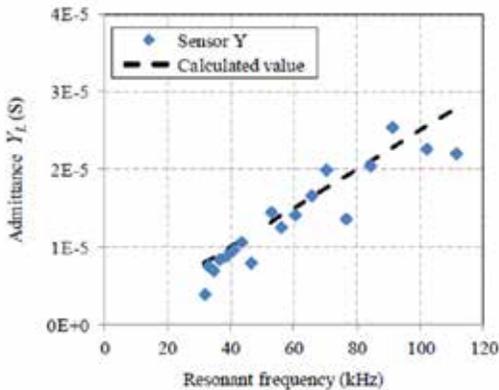


Fig.14 Results of admittance characteristics

その差は13%程度存在するというを意味する。回路のたとえばアクティブフルタを併用し出力するような回路構成と仮定した場合、回路的なゲイン調整の手間を省くためにはもう少し、エレメント形成プロセス、あるいはダイボンディングなどのアSEMBリプロセスのコントロールをして、ばらつきを低減することが望ましいとも言える。

7. 結言

本研究では、AE の周波数特性を広帯域で分解・検出可能とする LiNbO_3 を用いた音響コム型センサの開発を行った。機械構造体として LiNbO_3 を基板としたカンチレバーをアレイ化したセンサとした。設計では、センサ素子について、個々の共振器の特性を等価回路化し、それをアレイ化することで、センサの理論的検証やシミュレーションを確認し、理論計算に基づいた形状が設計できるようにした。

また、試作したセンサの電気特性評価を行い、概ね当初の理論計算に基づいた特性の素子が作成できたことを確認した。また特性のばらつきについては、共振周波数や最大アドミタンス特性については、プロセスのコントロールにより、改善できる余地を残している。

今後は、LN 音響コムセンサのセンサの製作上のプロセスの最適化を図り、実際の機器のヘルスマニタリングを行っていく予定である。

謝 辞

本研究は、科研費基盤研究(C)課題番号 15K05767 によって行われたものである。

参考文献

- 1) T. Kawashima et al.: Fabrication of Acoustic Emission Sensor Integrated with Cantilever Array for Detection of Signals Divided into Frequency Domain, Key Engineering Materials (2012)575-580.

- 2) T. Kawashima et al.: Fabrication of Acoustic Emission Sensor Integrated with Cantilever Array for Detection of Signals Divided into Frequency Domain, The 14th International Conference on Precision Engineering, Hyogo, Japan (2012)523-524.
- 3) T. Kawashima et al.: Fabrication of digital acoustic emission sensor integrated with cantilever array and piezoresistive elements", Extended Abstract of The 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, Toulouse, France, (2012)2.
- 4) 松井 淳, 川島貴弘, 永井萌土, 柴田隆行, 武藤一夫:精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2013)347-348.
- 5) T. Kawashima, K. Muto, K. Takahashi, M. Nagai, T. Shibata, "Fabrication of piezoresistive cantilever array for sensing of acoustic emission in frequency domain", Extended Abstract of The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, UK, (2013)184.
- 6) 松井 淳, 高橋賢也, 川島貴弘, 武藤一夫, 永井萌土, 柴田隆行: デジタル式アコースティック・エミッション・センサの開発, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会, 査読無, pp.347-348, 2013.
- 7) T. Kawashima, K. Muto, T. Yamakami, M. Nagai, T. Shibata, "Fabrication and Characterization of Piezoresistive Cantilever Array for Digital Sensing of Acoustic Emission", Proceedings of The 9th International Conference on Micro Manufacturing, Singapore (2014) 122.
- 8) 川島貴弘, 武藤一夫, 山上貴広, 永井萌土, 柴田隆行: デジタル式アコースティック・エミッション・センサの開発, 精密工学会春季大会学術講演会(2014)485-486.
- 9) 武藤一夫, 三浦幸廣, 今井彰, 谷内雅紀: デジタル式アコースティック・エミッション・センサの開発 (第 1 報) —音響コムセンサ (AE センサ) のシミュレーション法—, 精密工学会春季大会学術講演会(2016)243-244.
- 10) 武藤一夫, 三浦幸廣, 今井彰, 谷内雅紀: デジタル式アコースティック・エミッション・センサの開発 (第 2 報) —LiNbO₃ 一体型カンチレバーアレイの作製—, 精密工学会春季大会学術講演会(2016)245-246.
- 11) 武藤一夫, 三浦幸廣, 今井彰, 谷内雅紀: デジタル式アコースティック・エミッション・センサの開発 (第 3 報) —センサの特性評価方法—, 精密工学会春季大会学術講演会(2016)247-248.
- 12) 若月昇, ニオブ酸リチウム及びタンタル酸リチウム圧電単結晶を用いた電子機構デバイス, 電子情報通信学会論文誌 CVol.J87-CN0.2(2004)216-224.
- 13) A.W.Wamer et al; ASA.42.6 (1967).

要 旨

本論文では, まず, これまでの AE センサの研究開発経過 (DC~10MHz に渡る高速応答の広帯域型 AE センサの開発や MEMS 技術による小型カンチレバーによるデジタル式 AE センサの開発) に触れ, 本論では, LiNbO₃ (ニオブ酸リチウム) 材を用いた高性能な開発した音響コム型 AE センサの概要, 設計およびそのシミュレーション方法について報告し, つぎに, その AE センサの LiNbO₃ 一体型カンチレバーアレイの製作工程について報告し, 最後に, その音響コム (楯) 型デジタル式デジタル AE センサの設計計算値と基本特性との比較および, その電気特性など評価方法について報告する.

キーワード: アコースティックエミッション, センサ, LiNbO₃ デジタル式検出, カンチレバーアレイ, 計測