

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05767

研究課題名(和文) LiNbO₃材を用いた高性能な音響コム型アコースティックエミッションセンサの開発研究課題名(英文) Development of an high-performance acoustic comb type digital AE sensor using LiNbO₃

研究代表者

武藤 一夫 (Muto, Kazuo)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90530874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、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検討した。
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検討し、試作した。
最後に、試作したその音響コム(櫛)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検証し、実用化した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we firstly touched upon the research and development process of the 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 MEMS technology) The outline, design and its simulation method of high performance developed acoustic comb type AE sensor using LiNbO₃ (lithium niobate) material were studied.
Next, We studied the fabrication process of LiNbO₃ integral type cantilever array of the AE sensor and made it prototype.
Finally, we compare the designed calculation value of the prototype acoustic comb (comb) type digital type digital AE sensor with the basic characteristics and verified the evaluation method such as its electrical characteristics and put it into practical use.

研究分野：設計工学・機械要素・トライボロジー

キーワード：安全・安心設計 非破壊検査 アコースティック・エミッション センサ ニオブ酸リチウム カンチレバー デジタル式 振動・変位検出

1. 研究開始当初の背景

アコースティック・エミッション(AE, 音響放射)とは、材料が外力によって変形あるいは破壊に至る際に発生する音であり、モノづくりの現場で使われる CNC 工作機械における軸受の初期破損や余寿命の推定、各種金属材料の塑性変形中の材料モニタリングを In Situ かつ非破壊で実現可能とするものである。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、従来の AE センサはアナログ式で、PZT のような圧電材料を用いたものが主であり、共振型では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。

これまでの研究^{1)・8)}では、MEMS (Micro Electro Me-chanical 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気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、デジタル式 AE センサの試作およびその電気的特性の評価を行い、その信憑性を検証した。

2. 研究の目的

本研究では、高額な半導体装置を使用し、複雑な構造を持った MEMS 式アコースティック・エミッション・センサの代替として、比較的安価な装置で製作・製造することができ、かつシンプルな構造にすることができる LiNbO₃(ニオブ酸リチウム)材を用いた高性能な音響コム(櫛)型デジタル式 AE センサの開発を行うものである。

本報告では、まず、主にその音響コム(櫛)型デジタル式 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する、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(櫛)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、その評価方法について報告する。

3. 研究の方法

3.1 本センサの特徴

Fig.1 にその概要図を示す。これは、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製造して、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デジタル的に検知し、その周波数特性の分解・検出(デジタル化)を可能とする。これは比較的安価な装置で製造することができ、かつシンプルな構造で、高信頼性・実用性を実現にすることができることから、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、センサの小型化が可能となることから局所計測・In Situ 計測が実現可能であ

る。第一に、音響コム型デジタル式 AE (振動検出) センサには、電気 機械エネルギーの変換効率が高く、高分解能が期待できるニオブ酸リチウムを使用する。

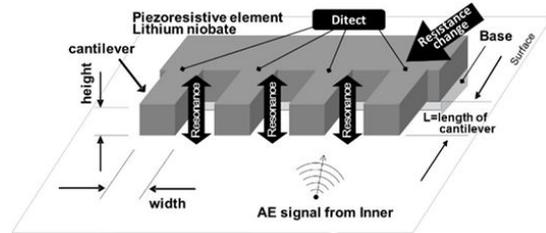


Fig.1 Schematic of digital AE sensor

本音響コム型デジタル式 AE センサの共振の狙いであるが、900MHz 帯無線通信の 2 次中間周波数に使用された 455kHz を中心に 0.5~2 倍程度の周波数にての試作を考えている。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ためである。上記設計指針より、ニオブ酸リチウム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.2 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。

本音響コム型デジタル式 AE センサは現在、自動車用旋回検出などで音さジャイロとして量産されているニオブ酸リチウムのカンチレバーをアレイ化することにより実現する。

ニオブ酸リチウム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、上記多摩川精機では年産数十万台の車載用ジャイロを生産しており、 $1 \mu\text{m}$ レベルの加工精度実績を有する。

3.2 LiNbO₃ を用いた音響コム型デジタル式アコースティック・エミッション・センサの設計

まず、この LiNbO₃ 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。LiNbO₃ はシリコンなどの MEMS 材料に比較し、構造体として共振先鋭度(Q)が高く、狭帯域で安定な物性を持っている。これをアレイ化することで、幅広い周波数成分を持った AE 周波数を、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 LiNbO₃ 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ことになる。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なければならない。

LiNbO₃ 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、LiNbO₃音叉ジャイロなども量産製品となった実績がある⁹⁾。今回の音響コム型デジタル式アコースティック・エミッション・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いけないポイントとしては、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、LiNbO₃の場合、分極を形成するキュリー温度が1130~1140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0~50%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、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(平行電界に対して伸び縮みK23)を計算した。縦軸は効率を示し、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130~140°付近に変換効率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の物性定数を用いて、次式(1)により計算することができる。

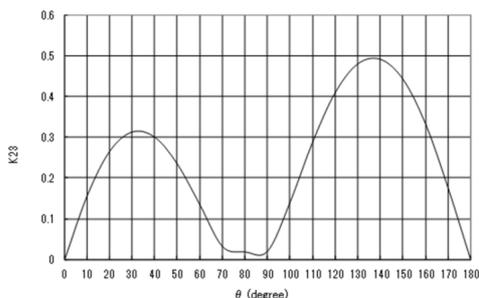


Fig.2 Electromechanical coupling coefficient of Y-CUT LiNbO₃.

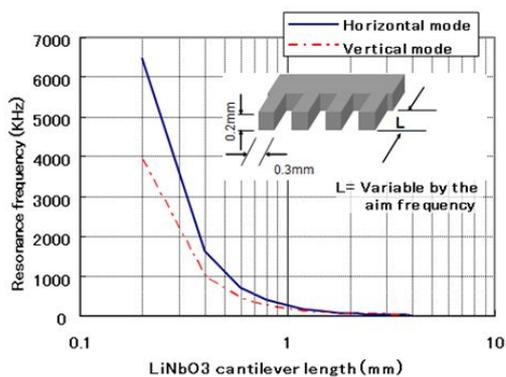


Fig.3 Resonance frequency of LiNbO₃ cantilever

$$f_n = \frac{kn^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \quad \dots (1)$$

ここで、 E :縦弾性係数、 I :断面二次モーメント、 A :断面積、 L :長さ、 ρ :密度、である。構造体の基板の設定、構造体の加工形状は、上述の計算により、所望の周波数を設計することができる。

3.3 LiNbO₃ 弾性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、LiNbO₃の電気機械結合係数から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。ここでも、先のWarnerの定数を使って、誘電率や弾性率を基点に各電気回路に置き換えていく。一般的に機械共振は直列共振系で説明されるが、LiNbO₃は強誘電体であり、その誘電率が大きいことから、並列共振を無視することはできない。したがって、その等価回路はつぎのFig.4のように示すことができる。ここで、先の構造共振(Fr)と上記の電気回路共振周波数は、 $(= \text{電気共振} : 2f) = 1/\sqrt{L_s C_s}$ とみなすことができる。また、 $C_d \propto S/\epsilon$ と表すことができ、電気機械結合係数より、 $K_{23} \propto C_s/C_d$ 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。あとは、これをアレイ化すれば、汎用の電気回路シミュレータなどで、機械共振系を含めた電気特性の計算をすることができ、上記の等価回路を計算すると、Fig.5に示すアドミタンス(Y)特性が計算できる。

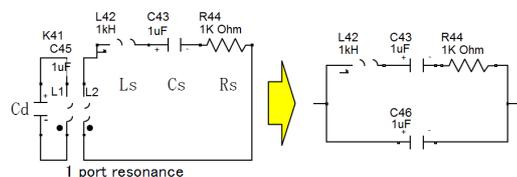


Fig.4 Equivalent circuit of LiNbO₃ beam

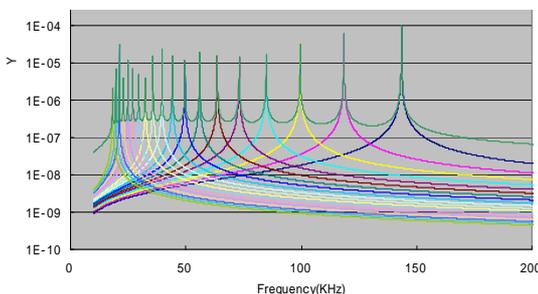


Fig.5 calculation result of LiNbO₃ sensor array characteristics.

3・4 LiNbO₃ を用いた音響コム型デジタル式アコースティック・エミッション・センサのセンサ素子の作製

3・4・1 概要

LiNbO₃ は難削材であり、劈開面を有するため、一般的な MEMS 材料のシリコン材に比べ、チ

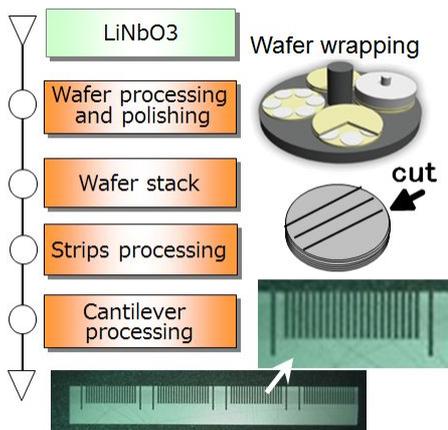


Fig.6 Fabrication process of digital AE sensor manufacturing into cantilever array.

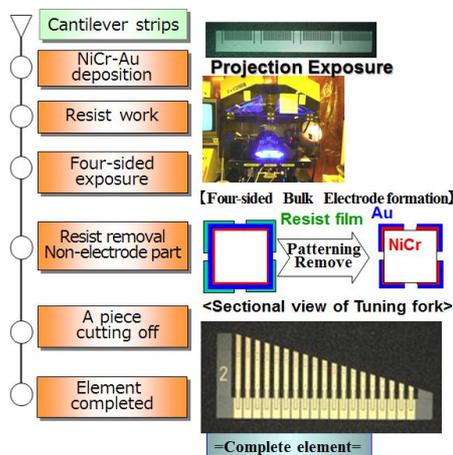


Fig.7 Photolithography process of digital AE sensor with Sensor array.

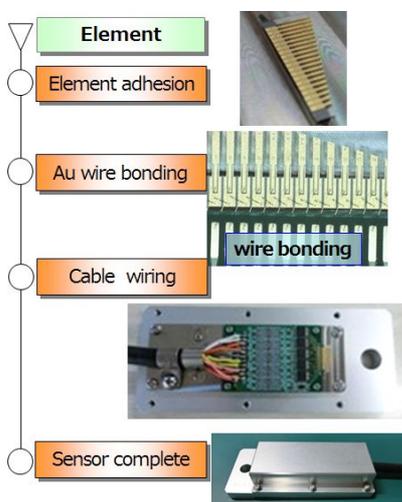


Fig.8 Assemble process of digital AE sensor

ッピングやクラックが発生しやすく加工が難しい。このため、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。

3・4・2 カンチレバーの形成

Fig.6 は本研究の LiNbO₃ を用いた音響コム型デジタル式 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。

使用する LiNbO₃ インゴットは、まずワイヤ・ソーによるスライス加工をし、ウェハの厚さを 500 μm 程度に加工する。その後、精密ラップ盤にてウェハの表裏両面をラッピングし、厚さを 350 μm 面精度 2 μm 以内の仕上げ研磨加工を行う。つぎに、ウェハを積層し、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。

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。これを積層数一括して加工し、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。ここで、音響コム型デジタル式 AE センサのセンサ素子の輪郭形状がほぼ完成し、その精度は ±2 μm 以下とすることができる。

3・4・3 センサ・エレメント形成

Fig.7 に示すように、形状作成された音響コム型デジタル式 AE センサのカンチレバー素子一つ一つに表裏両側面にパターニングを施すことができるようカスタム化された成膜装置を使用する。スパッタ装置は 2 元（ニッケルクロムと金）成膜機を使用する。また、フォトリソグラフについては、4 面が一括してパターニングできるように設計された 3 方向光源を持つ立体露光装置を用いる。これを現像処理して所定電極部にレジスト膜を得る。その後エッチングプロセスにより、無電極部の膜を除去し、最後にレジスト除去することにより、表面処理が完了する。音響コム型デジタル式 AE センサのセンサ素子をダイシング切断し、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。

3・4・4 組み立て～センサ完成

センサ・エレメントは所定回路との配線のため、エレメントダイ・ボンディング、ワイヤ・ボンディング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.8 のような音響コム型デジタル式 AE センサが完成する。

3・5 LiNbO₃ を用いた音響コム型デジタル式 AE センサの電気特性モデルとその電気特性評価

試作したセンサアレイは、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、前述し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 Fig.4 で示したように、機械共振特性 = 電気共振特性として、等価回路モデルから電気特性の計算ができる。上述した特性の計算結果と実測値の比較評価を行った。次章にその評価手法と得られた結果について述べる。

実際の回路と組み合わせると、Fig.5 に示したなアレイ回路となる。この評価方法として、実際に試作したものの特性が、シミュレーションの通りになっているかどうかについて、Key-sight Technologies 社 4194A インピーダンス/ゲイン・フェーズアナライザを用いて確認した。

3.6 計算と実測の差異評価

計算結果と実際の電気特性の差異比較を行った。Fig.12 に共振周波数特性の計算値と実測値の差異について検討した。まず、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。

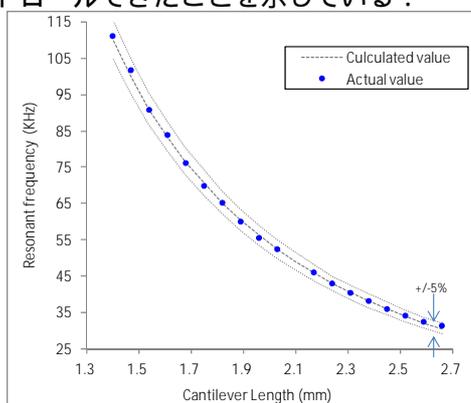


Fig.9 Result of resonant frequency of sensor array

4. 研究成果

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 材を用いた高精度な音響コム型デジタル式 AE センサの開発を目的として、機械共振器となる構造体としてカンチレバーおよび電氣的検出部となる LiNbO_3 を原材料とした piezo 抵抗素子をアレイ化したセンサの試作を行った。音響コム型デジタル式 AE センサのセンサ素子一つ一つを製作した結果、まず、当初の理論計算に基づいた形状が作成できたこと、つぎに、そのセンサ素子一つ一つについて、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ができることを確認した。また、 LiNbO_3 カンチレバー素子としてアレイ化した試作センサの電気特性評価を行った。その音響コム型デジタル式 AE センサの電気特性を確認した結果、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。

今後は、音響コム型デジタル式 AE センサのセンサ素子一つ一つの製作上のプロセスの最適化を図り、作製した音響コム型デジタル式 AE センサを用いた機器のヘルス・モニタリングを行っていく予定である。

<引用文献>

T. Kawashima, A. Matsui, K. Muto, M. Nagai and T. Shibata, "Fabrication of Acoustic Emission Sensor Integrated with Cantilever Array for Detection of Signals Divided into Frequency Domain", Key Engineering Materials, 523-524, pp. 575-580, 2012.

T. Kawashima, A. Matsui, M. Nagai, T. Shibata, K. Muto, "Fabrication of Acoustic Emission Sensor Integrated with Cantilever Array for Detection of Signals Divided into Frequency Domain", The 14th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2012), Hyogo, Japan, 2012. (Key Eng. Mater., Vols.523-524, pp.575-580, 2012)

T. Kawashima, A. Matsui, M. Nagai, T. Shibata, K. Muto, "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 2012 (MNE 2012), Toulouse, France, 2pp, 2012.

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

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 2013 (MNE 2013), London, UK, p. 184, 2013.

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.

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 (ICOMM 2014), 査読有, Singapore, No. 122, 2014.

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, pp.485-486, 2014.

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, pp.243-244, 2016.

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」, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.243-244, 2016.

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」, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.243-244, 2016.

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-CNo. 2pp. 216-224(2004)

A.W.Warner et al; ASA.42.6 (1967)

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)

Kazuo MUTO, Yukihiro MIURA, Akira IMA and Masanori YACHI, Development of Digital Acoustic Emission Sensor used by LiNbO₃, The 16th International Conference on Precision Engineering, 査読有, ICPE 2016Vol.16, 2016, pp.1-6

武藤一夫, 音響コム型デジタル AE センサの開発, 査読無, 自動車技術会誌, 71,2,2017,pp.95-102

武藤一夫, 三浦幸廣, 今井彰, 谷内雅紀, 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 - 八戸工業大学紀要 第 37 巻 (2018), pp1-9

[学会発表](計 4件)

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, pp.243-244, 2016.

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」, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.243-244, 2016.

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」, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.243-244, 2016.

武藤一夫, 三浦幸廣, 今井彰, 谷内雅紀, "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 - , 2017 年日本機械学会 東北支部第 53 期秋季講演会, 210, (2017.9)

[図書](計 5件)

武藤一夫, 技術の新潮流 - カギはセンサ技術 -, 東日本旅客鉄道(株), ジェイアールイースト, 23,6, pp.20 - 21

武藤一夫, LiNbO₃ を用いた音響コム型デジタル式 AE センサの開発, 日本工業出版(株), 工業計測, 44,8, pp.47-52

武藤一夫, 高度モニタリングへの AE 技術の進化 ~ その基礎からデジタルセンサ開発まで(上) - AE 技術の基礎からセンサ / 素子の動向と課題 -, 工業技術社, 計装, 59,7, pp.57-62

武藤一夫, 高度モニタリングへの AE 技術の進化 ~ その基礎からデジタルセンサ開発まで(下) - LiNbO₃ を用いた音響コム型デジタル式 AE センサの開発 -, 工業技術社, 計装, 59,9, pp.47-51

武藤一夫, 図解わかる機械工業計測入門, 共立出版, 2016/10/25, pp.176-180

[産業財産権]

出願状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.hi-tech.ac.jp/lab/kmuto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤一夫 (MUTO, Kazuo)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 9 0 5 3 0 8 7 4

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()