

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06269

研究課題名（和文）圧電薄膜によるMEMSハプティックデバイスの創製

研究課題名（英文）Development of thin-film based PiezoMEMS haptic devices

研究代表者

神田 健介（Kanda, Kensuke）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20446735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、近年発展が著しい超低消費電力のウェアラブルシステム向けの触覚出力に着目し、半導体製造工程を用いて実現可能な低背・小型・低消費電力な触覚アクチュエータ（人に触覚刺激を与える）の創成を目的とした。Siの半導体製造工程と圧電薄膜を組み合わせた圧電MEMSによって、この触覚アクチュエータを実現した。数mm角、1mm以下の厚さの素子が11 $\mu$ Wの低消費電力で人に触覚刺激を与えうることが分かった。また、多数配列化した素子では複数の触覚刺激パターンを人に認識させることに成功した。この素子と人との間の相互作用についてモデル化を行い、簡単にシミュレーション可能なツールを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

触覚刺激をバッチ製造可能な水準のMEMSによって生み出すことはこれまで困難であった。本研究で実現した圧電MEMSによる触覚アクチュエータは、初期的な実験では低消費電力で人に振動刺激を与えることが可能であることが確認でき、設計上の多くの有益な知見を得た。今後のさらなる改良によって、人体活動モニタリングシステムの人・システム間の相互通信への利用を含め、幅広い応用が期待できると考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the haptic output for wearable systems with low power consumption. It was found that a few mm square and less than 1 mm thick device can give tactile stimulation to a person with a low power consumption of 11 micro-watt. In addition, we have succeeded in making a person recognize multiple tactile stimulus patterns in the array of elements. The interaction between the device and the human was modeled and a simple simulation tool was constructed.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS 圧電薄膜 触覚アクチュエータ IoT

## 1．研究開始当初の背景

従来の触覚刺激を与える素子は、市販品としてはコイルと磁石による電磁式のアクチュエータが主にスマートフォン等において用いられている。スマートフォンの着信や通知では、電磁式のアクチュエータを用いて筐体そのものを振動させて人に触覚刺激を与えている。このような電磁式のアクチュエータによる発生エネルギーは、電流に比例するため、筐体を駆動するには比較的大きな電流を必要とする。一方、近年発展が著しい人体活動モニタリング等の IoT システムは、各種センサによって生体活動や環境情報を取得して外部の基地局に無線送信を行う。今後このような IoT システムの高度化に際しては、情報の即時性や無線送信頻度の抑制などの目的で、一部の情報は人にその場で通知する必要がでてくると考える。この場合の一つの手段として触覚刺激が有用であるが、従来の素子では消費電力の観点や与えられる情報量、サイズなどの点で不十分であるため、現段階ではアクチュエータを搭載した上述のような IoT システムはほとんどない。近年、微細加工を利用した MEMS による触覚刺激用のアクチュエータについても報告があり、空気圧を利用したもの、圧電セラミックスによるもの、形状記憶合金を用いたものなどが提案されている。しかしながら本研究で目的とするようなシステムに適用するには、消費電力、サイズ等の観点で十分な素子はないのが現状である。一方で、本研究者らは、圧電薄膜であるチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を Si ベースの半導体微細加工と融合させた、圧電 MEMS の研究をこれまで行ってきた(R. Sano et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 54, 10ND03 (2015)や K. Kanda et al., Smart Mat. Struct, Vol. 26, 045019 (2017)など)。本研究開始時点においては、シリコンウエハ上に成膜した PZT を微細加工し、さらに樹脂構造体と組み合わせることによって大変位でも破損しない口バスタな MEMS 構造が実現可能であることを確認していた (T. Okubo et al., Proc. IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. 2015, pp.178-181, (2015))。圧電薄膜は低電圧かつ低消費電力で構造体を変位させることができるため、触覚アクチュエータに対しても有用であると考えた。

## 2．研究の目的

PZT を用いた樹脂との積層構造によって、人への触覚刺激を与えることが可能な MEMS 素子が創成可能であるかを検討し、さらにアレイ化することによる多様な触覚刺激を生じさせることの可否について、また、これらデバイスの動作メカニズムを明らかにするとともに設計指針を確立することを研究の目的とした。

## 3．研究の方法

人の触覚についてはまだ明らかではないことも多いため、片持ちはりの先端に錘を持つ、簡単な構造でデバイスを初期試作し、人に刺激を与えた際の触覚の有無についてのアンケートを取ることで簡易的なデバイス評価とした。初期的な設計に際しては、すでに明らかとなっている人の触覚についての周波数特性を参考にして、100Hz 程度でデバイスを共振振動させ、被験者が人差し指で触れることを想定した。初期試作によって明らかになった課題をもとに、以下の点に着目した実験的研究を実施した。

- ・ デバイスの消費電力や触覚刺激などの性能評価
- ・ 樹脂材料によるデバイス仕上がりへの影響
- ・ 低電圧駆動のための多層 PZT 薄膜の導入
- ・ 動作メカニズム解明のためのセンサの一体集積
- ・ アレイ化による多様な振動刺激発生可否
- ・ 人の振動刺激の大小を定量的に評価可能なアンケート方法

## 4．研究成果

初期試作デバイスでは、4mm角で厚さ500 $\mu$ mの素子を試作し、この素子を共振駆動させた状態において被験者に触れて振動刺激を与えたところ、1.2mm以上の振動振幅がある状態ではほとんどの被験者が触覚を得ることが分かった。この時の消費電力を測定したところ、11 $\mu$ Wであり、背景において述べたようなIoT素子に利用可能な水準であることが確認できた(K. Kanda et al., IEEJ Trans. SM. Vol. 137, No. 9, pp. 284-289 (2017))。この時の素子と人との間の相互作用については、素子の振動をバネマスダンパ、人に触れた際に生じる付加的なバネとダンパによって集中定数系の運動方程式として表し、これを等価回路モデルによって表すことによって定式化を行った。素子の根元に変位センサを組み込んだ素子についても試作し、この定式化したモデルが正しいことを検証した(K. Kanda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 57, 11UF14 (2018))。この等価回路モデルについては、回路シミュレータ(SPICE)によって動作し、設計パラメータと人の皮膚の変位との関係が明らかになるなど、設計上非常に有用であることを確認した。また、樹脂とPZT薄膜の積層構造では、プロセス起因の残留応力が原因で大きな初期たわみが発生し、これが将来的な実装においては問題となりうることから、従来のエポキシ系の感光樹脂の代替としてポリイミドを用いた素子についても試作評価を行った。結果として、初期たわみだけでなく、環境温度に対する共振周波数安定性も向上することが明らかとなった(K. Kanda et al., IEEJ Trans. SM. Vol.139, No.11 pp. 369-374 (2019))。さらに、従来素子では人に刺激を与えるしきい値である1.2mmの変位を得るのに7V程度の全振幅電圧が必要であったが、将来的なマイコンからの直接駆動などを考慮するとより低電圧化することが好ましい。そのため、PZT薄膜の間に複数層の電極を挟んだ多層PZT薄膜を利用した素子についても開発を行った。4層のPZT多層膜では、1.75Vでしきい値となる変位を得られることが確認できた(S. Toyama et al., Int. Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPA 2018), Book of Abstract, p. 78 (2018))。また、多様な情報の伝達を目的とした、アレイ化触覚アクチュエータについても試作した。このアレイ化素子では、人が異なる駆動パターンを認識可能であることが確認でき、また、人に触れる周波数のほうが振幅よりもより触覚能に対して支配的であることが分かった(高原光将ら、第80回応用物理学会秋季学術講演会(2019))。以下に成果を箇条書きにまとめる。

- ・ 圧電薄膜を用いたMEMSにより人に触覚刺激を与えることが可能であることを示した。
- ・ 共振素子と人との相互作用を集中定数系モデルで表した等価回路モデルが設計ツールとして有用可能であることを示した。
- ・ 多層PZT薄膜を利用することで、マイコンで直接駆動可能な電圧で触覚刺激を与えることが可能であることを示した。
- ・ アレイ化した素子では異なる触覚刺激パターンを人に与えることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Kanda, K. Takahara, S. Toyama, T. Fujita, K. Maenaka	4. 巻 57
2. 論文標題 Piezoelectric MEMS with Tactile Stimulation and Displacement Sensing Functions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 11UF14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.7567/JJAP.57.11UF14">https://doi.org/10.7567/JJAP.57.11UF14</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Kanda, S. Hirai, T. Fujita, K. Maenaka	4. 巻 281
2. 論文標題 Piezoelectric MEMS with Multilayered Pb(Zr,Ti)O <sub>3</sub> Thin films for Energy Harvesting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A	6. 最初と最後の頁 229-235
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.018">https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.018</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kanda Kensuke, Toyama So, Takahara Kosuke, Fujita Takayuki, Maenaka Kazusuke	4. 巻 139
2. 論文標題 Tactile Device Based on Piezoelectric MEMS 2 <sup>nd</sup> Report: Structural Improvements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 369 ~ 374
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1541/ieejsmas.139.369">https://doi.org/10.1541/ieejsmas.139.369</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirai Shota, Kanda Kensuke, Fujita Takayuki, Maenaka Kazusuke	4. 巻 58
2. 論文標題 Influence of design parameters on performance of piezoelectric MEMS energy harvesting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SLLD07 ~ SLLD07
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab362f">https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab362f</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanda Kensuke, Okubo Takashi, Shima Masami, Fujita Takayuki, Maenaka Kazusuke	4. 巻 137
2. 論文標題 Tactile Device Based on Piezoelectric MEMS by Using a Polymer/PZT Laminated Structure	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 284 ~ 289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1541/ieejsmas.137.284">https://doi.org/10.1541/ieejsmas.137.284</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計19件(うち招待講演 3件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 S. Hirai, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka
2. 発表標題 MEMS ENERGY HARVESTING BASED ON UNIFORM-STRESS CANTILEVER WITH MULTILAYER PZT THIN FILMS
3. 学会等名 The 18th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Toyama, K. Kanda, K. Takahara, T. Fujita, K. Maenaka
2. 発表標題 MEMS Tactile Device by Using Multilayerd Piezoelectric Thin Film
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Takahara, S. Toyama, K. Kanda, T. Fujita, K. Maenaka
2. 発表標題 MEMS Tactile Device Based on Polymer/Thin-Film PZT Structure -Sensor and Actuator Integration
3. 学会等名 2018 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠山蒼, 高原光將, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 PZT/PI積層構造を用いた圧電MEMS触覚デバイス
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平井翔太, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 多層PZT薄膜を用いた圧電エナジーハーベスタおよび回路シミュレータモデル
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高原光將, 遠山蒼, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 センサ付き圧電MEMS触覚提示デバイスによる接触実験およびそのモデル化
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神田健介
2. 発表標題 多層PZT薄膜および圧電MEMSファブリケーション
3. 学会等名 第16回圧電MEMS研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神田健介
2. 発表標題 MEMSセンサのためのPZT微細加工とその周辺技術
3. 学会等名 電子情報通信学会機能集積情報システム(FIIS)研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神田健介
2. 発表標題 圧電MEMSのDRIEによるデバイス構造作製と3次元化への試み
3. 学会等名 JKA人材育成等補助事業技術セミナー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kanda, T. Ushita, T. Fujita, K. Maenaka
2. 発表標題 Validation of Output Voltage Multiplication by Using Series-Connected Piezoelectric Elements for Physical Sensors
3. 学会等名 The 31st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Nakanishi, K. Kanda, T. Fujita, I. Kanno, and K. Maenaka
2. 発表標題 Multilayer Piezoelectric MEMS Energy Harvester Based on Longitudinal Effect
3. 学会等名 PowerMEMS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 遠山蒼, 神田健介, 大久保昂, 高原光將, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 圧電MEMSによる触覚デバイス試作
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平井翔太, 神田健介, 佐野良, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 多層PZT薄膜によるMEMSエナジーハーベスタ試作
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠山蒼, 神田健介, 大久保昂, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 多層圧電膜によるMEMS触覚デバイス
3. 学会等名 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西亮介, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 多層PZT薄膜による圧電MEMSエナジーハーベスタの提案,
3. 学会等名 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神田健介, 牛田大樹, 横松得滋, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 低消費電力な人体活動モニタリングシステムのための圧電MEMSトリガ
3. 学会等名 電気学会PHS/BMS合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Aiba, S. Hirai, K. Kanda, T. Fujita, and K. Maenaka
2. 発表標題 Series-connected piezoelectric MEMS Energy harvester for voltage multiplication
3. 学会等名 The 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高原光將, ハズワニ B. M. ナシル, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 樹脂/薄膜PZT構造体を用いたMEMS1Dアレイ触覚ディスプレイ
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 饗庭岳, 平井翔太, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介
2. 発表標題 自律センサを指向した電圧増倍による圧電MEMSハーベスタ
3. 学会等名 電気学会交通・電気鉄道/マイクロマシン・センサシステム合同研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 神田健介	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 8
3. 書名 VR / AR技術の 開発動向と最新応用事例 第3章第3節	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	前中 一介  (Maenaka Kazusuke)  (70173721)	兵庫県立大学・工学研究科・教授    (24506)	