

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05232

研究課題名（和文）セキュアIoTデバイスに向けたMEMS自壊設計技術の開発

研究課題名（英文）Development of MEMS Self-Destruction Design Technology for Secure IoT Devices

研究代表者

山根 大輔（Yamane, Daisuke）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：70634096

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：
・電解めっきを用いたMEMS（微小電気機械システム）技術により、所望のNi系合金マイクロ配線を試作した。また、自壊素子に向けた合金マイクロ配線の可動構造化のため、犠牲層除去のためのドライエッチングの条件を見出した。
・MEMS自壊素子の等価回路モデル構築のため、SPICE系回路シミュレータ内に可動電極の等価回路モデルを作成した。
・本研究で得た知見をもとに、めっき金属製マイクロ可動構造を用いた新たなデバイスとして、荷電処理不要の静電型MEMS環境振動発電素子とその等価回路モデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本課題では、MEMS自壊素子について世界に先駆けて研究を着手した。研究期間内には、デバイス試作・設計環境構築、および、MEMS自壊素子に関する特許申請も行い、今後の研究展開の基盤技術を構築した。また、水平展開として、これまで未到達であったMEMS環境振動発電素子と電子回路をワンチップ化の見通しを得た。
社会的意義：電解めっきを用いたMEMSデバイスと電子回路の集積化について、センサやアクチュエータに加えて発電素子も集積できる新たな応用技術の可能性を示すことができた。これは、小型センサの数が莫大に増加している昨今、小型無線IoTセンサの電源供給問題の解決に向けた技術進歩である。

研究成果の概要（英文）：The target Ni-based alloy micro-interconnections were fabricated by MEMS (micro-electro-mechanical systems) technology using electroplating. In addition, conditions for dry etching to remove the sacrificial layer were found to create movable structures of the alloy interconnections for self-destructive devices.

To construct equivalent circuit models of MEMS self-destructive devices, we created equivalent circuit models of movable electrodes in a SPICE-based circuit simulator.

Based on the findings of this study, a new device using plated metal micro-movable structures, an electrostatic MEMS vibration energy harvester without charging processes and its equivalent circuit model were developed.

研究分野：ナノマイクロシステム

キーワード：MEMS 合金 可動配線 電解めっき IoT 自壊 セキュア

1. 研究開始当初の背景

近年、あらゆるモノがインターネット網を通じて情報交換を行う仕組みである IoT (Internet of Things : モノのインターネット) の開発が進み、今後は小型 IoT デバイス (例 : 環境埋込型無線 IoT センサなど) を大量に利用する社会の到来が予想されている。そのような IoT デバイス数は 1 兆個を超えると言われており、電子デバイスの性能向上・小型化・低消費電力化・低コスト化とともに、第三者による情報操作を防ぐセキュリティ対策の向上が必要である。

従来、小型 IoT デバイスのセキュリティ対策はソフトウェア側 (例 : 通信の暗号化など) が主に検討されていた。大量の IoT デバイスが環境に拡散する場合、ソフトウェア改ざん操作を回避し、かつ、メンテナンスフリー・回収不要なシステムの実現にはソフトウェア命令な不要なハードウェアの自律的セキュリティ対策が必要不可欠であるが、そのような研究はこれまでに報告例がない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型 IoT デバイスにおけるハードウェア寿命の設計技術の確立とした。自壊素子の寿命は材料・構造設計のみで決定することで、第三者によるソフトウェア改ざん (破壊解除命令の執行など) を防ぐ。

3. 研究の方法

本研究では、マイクロ可動配線の自壊寿命をモデル化し、自壊時限をハードウェア側で設計可能とする。マイクロ可動配線の実現には MEMS (Microelectromechanical Systems : 微小電気機械システム) 技術を用いる。

現在最も広く利用されている半導体集積回路である CMOS-LSI (CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor 相補型金属酸化膜半導体、LSI : Large Scale Integration 集積回路) 上に作製可能な電解めっき合金のマイクロ可動配線について、利用環境に応じた応力設計を行い、自壊寿命を設計する。本研究では、受動変位と能動変位を用いた自壊を検討する。これにより例えば、デバイス設置時間やイベント回数による自壊寿命の設計が可能である。応力設計に向けて、具体的には、はじめに電解めっきで作製するマイクロ機械構造のプロセス条件と設計精度を評価する。MEMS デバイスの設計や信頼性評価では、バルク材料の機械特性に加えて、マイクロ/ナノ領域の機械特性も考慮する。そこで、マイクロ可動構造の設計に必要な実効ヤング率を評価するためのマイクロ構造体 (評価サンプル) を試作する。評価サンプルをカンチレバー構造とすることで、構造寸法と共振周波数の関係より、実効ヤング率を評価可能である。また、評価サンプルの試作プロセスは、フォトリソグラフィでパターニングしたフォトレジストを犠牲層として、Ni 系合金の電解めっきを用いる。提案プロセスは低温プロセスのため、将来は、CMOS-LSI を形成したシリコン基板へのマイクロ可動構造の作製を目指す。次に、マイクロ構造体を電気配線として利用した場合の応力を構造体の特定箇所で発生させることで、自壊を設計する。また、マイクロ構造体を等価回路としてモデル化し、回路シミュレータに実装することで電気-機械の統合設計を可能とする。統合設計環境とは、デバイスの機械的挙動と電氣的挙動を同一回路シミュレータ上で同時解析する技術である。これにより、機械構造と電気回路の設計パラメータを用いた自壊寿命設計環境を構築する。

4. 研究成果

(1) マイクロ構造体の設計

電解めっきで作製した微小カンチレバーの実効ヤング率評価には先行研究がある。そこで、本研究では先行研究の一つを参考にして、マイクロカンチレバー構造のめっき厚の仕様を 10 μm 程度とした。また、カンチレバーの幅はその厚さよりも十分に大きく設計することで、特性評価に必要な近似的な解析モデルを適用可能とした。カンチレバーの長さは 0.1 mm ~ 1 mm として、静電駆動用の電極をカンチレバー下部に空気層を介して配置した。次に、評価装置の性能から、共振周波数の上限と、カンチレバー先端変位の下限を決定した。さらに、解析式を用いた解析結果と有限要素法シミュレータ (COMSOL Multiphysics) の計算結果を比較検討して、設計の妥当性を確認した。

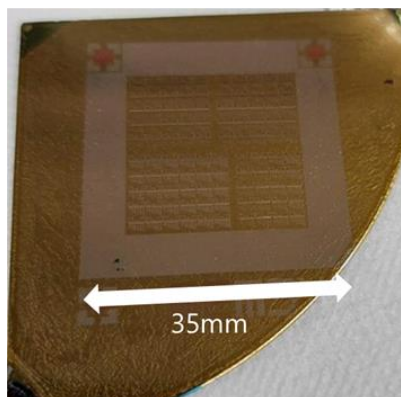


図1 めっき用モールドの試作結果

(2) マイクロ構造体の試作プロセスの開発

はじめに、電解めっきを用いた Ni 系合金のマイクロカンチレバーの実現に向け、カンチレバーとその対向電極、および、電解めっき用の電極のフォトマスクを製造し、フォトリソグラフィと薄膜堆積技術を用いて、めっき用モールドの試作プロセス開発を行った。試作プロセスでは、犠牲層（可動構造を形成するためにプロセス最終工程で除去する層）であるフォトレジストをドライプロセスで除去することで、カンチレバーと基板の固着を防ぐことができる。めっき用モールドを単結晶シリコン基板上に形成した様子を図 1 に示す。次に、試作しためっき用モールドを用いて、Ni 系合金 (Ni, Ni-Co など) のマイクロ可動配線を試作した。電解めっきを用いた結果、所望の Ni 系合金厚膜めっき (約 7 μm) を達成した。さらに、フォトレジストで形成した電解めっき犠牲層を除去するためのドライエッチングの条件出しも行った。RIE (Reactive Ion Etching : 反応性イオンエッチング) で酸素プラズマを用いること、および、温度やガス流量、パワーを調整することで、犠牲層除去の条件を見出した。

(3) マイクロ構造体の等価回路の開発

MEMS 自壊素子の等価回路モデル構築に向けて、マイクロ可動構造体の等価回路モデルを SPICE 系回路シミュレータ環境に実装した。開発した等価回路モデルを自壊素子へ適用する前の検証実験として、マイクロ可動構造を適用した MEMS デバイスへ適用した。今回は、我々が新たに開発した MEMS-VEH (VEH : Vibration Energy Harvester 環境振動発電素子) について、提案技術を用いて等価回路モデルを構築した。回路シミュレータ上で等価回路を実装することで MEMS-VEH の機械的な特性と電気的な特性を統合した解析環境を作成した。回路シミュレータとして、オープンソースのソフトウェアである LTspice を利用した。MEMS-VEH の誘導電流波形の実測値とシミュレーション値を比較することで、提案等価回路モデルの有効性を確認できた (文献①)。

(4) めっき金属製マイクロ可動構造を用いた新デバイスの開発

本研究で得た知見をもとに、技術の水平展開として、めっき金属製マイクロ可動構造を用いた新たなデバイスとして、荷電処理不要の静電型 MEMS 環境振動発電素子を開発した (文献②)。従来の静電型 MEMS 環境振動発電素子は、エレクトレットの荷電処理 (コロナ放電、電子線照射、X 線照射、高温処理など) のため、MEMS の設計・製造や、MEMS と電子回路の集積化に制約が多いことが課題であった。本研究では、めっきマイクロ可動電極を犠牲層プロセスで製造する際に必要なスルーホールに着目し、真空蒸着のみで形成可能な有機 EL 素子用材料からなるエレクトレットを、MEMS 可動電極製造後にスルーホールを介して MEMS 構造内に成膜した。その結果、荷電処理を行わずに静電型 MEMS 環境振動発電素子を世界で初めて実現した。本技術の大きな利点は、MEMS 発電素子と CMOS-LSI のモノリシック集積 (ワンチップ化) を可能にする点である。MEMS 環境振動発電素子は、MEMS 発電素子の後段の電子回路 (整流回路、蓄電回路など) との集積化により小型化・高性能化・生産性向上が可能になる。従来技術では、エレクトレット荷電処理が制約となり、静電型 MEMS 環境振動発電素子と CMOS-LSI のモノリシック集積は未踏領域であった。提案技術では、室温の成膜工程のみでエレクトレットを形成できるため、既存の半導体製造プロセスに組み込みやすく、静電型 MEMS 環境振動発電素子と集積回路を同一基板上にモノリシック集積することも可能である。また、今回使用したエレクトレットの表面電位はエレクトレット膜厚に比例するため、エレクトレット厚膜化による発電量のさらなる増大も可能である。したがって本技術により、MEMS 環境振動発電素子の小型化・高性能化・生産性向上が加速すると期待する。さらに、今回使用したエレクトレットは MEMS 自壊素子へも応用できるため、本研究期間に開発しためっきマイクロ可動構造の等価回路を用いてシミュレーションを実施中である。

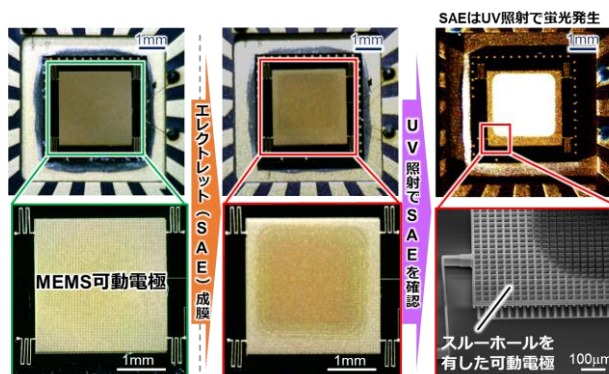


図 2 荷電処理不要の静電型 MEMS 振動発電素子の試作結果

<引用文献>

- ① 永縄 卓大, 川島 康介, 栢口 英之, 石井 久夫, 田中 有弥, 山根 大輔, 「電気回路シミュレータを用いた SAE-MEMS エナジーハーベスタ解析環境の検討」 応用物理学集積化 MEMS 技術研究会 第 12 回集積化 MEMS 技術研究ワークショップ, 2022 年 2 月 10 日, オンライン開催. (口頭+ポスター)
- ② Daisuke Yamane, Hideyuki Kayaguchi, Kosuke Kawashima, Hisao Ishii, and Yuya Tanaka,

“MEMS post-processed self-assembled electret for vibratory energy harvesters,”
Applied Physics Letters, Vol. 119, 254102, Dec. 20, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0072596>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 山根 大輔、田中 有弥	4. 巻 -
2. 論文標題 IoT電源への期待 環境振動発電素子の小型化・高出力化とEMC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 科学情報出版 月刊EMC	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 山根 大輔、田中 有弥	4. 巻 31
2. 論文標題 荷電処理不要の静電型MEMS振動発電素子	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本工業出版 クリーンエネルギー	6. 最初と最後の頁 35 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Omura Taro, Chen Chun-Yi, Chang Tso-Fu Mark, Yamane Daisuke, Ito Hiroyuki, Machida Katsuyuki, Masu Kazuya, Sone Masato	4. 巻 436
2. 論文標題 Effect of current density on micro-mechanical property of electrodeposited gold film evaluated by micro-compression	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Surface and Coatings Technology	6. 最初と最後の頁 128315 ~ 128315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfcoat.2022.128315	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 Yamane Daisuke, Kayaguchi Hideyuki, Kawashima Kosuke, Ishii Hisao, Tanaka Yuya	4. 巻 119
2. 論文標題 MEMS post-processed self-assembled electret for vibratory energy harvesters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 254102 ~ 254102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0072596	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 Yukiya Tohyama, Hiroaki Honma, Hiroshi Toshiyoshi, and Daisuke Yamane	4. 巻 -
2. 論文標題 Bandwidth Broadening of MEMS Vibration Energy Harvesters by Voltage-Boost Rectifier Circuit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tohyama Yukiya, Honma Hiroaki, Sekiya Hidehiko, Toshiyoshi Hiroshi, Yamane Daisuke	4. 巻 141
2. 論文標題 Energy Harvesting from Non-Stationary Vibrations Using a Low-Threshold Voltage-Boost Rectifier Circuit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 228 ~ 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.141.228	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 Watanabe Hitomi, Chang Tso-Fu Mark, Schneider Michael, Schmid Ulrich, Chen Chun-Yi, Iida Shinichi, Yamane Daisuke, Ito Hiroyuki, Machida Katsuyuki, Masu Kazuya, Sone Masato	4. 巻 2
2. 論文標題 Effective Young 's Modulus of Complex Three Dimensional Multilayered Ti/Au Micro-Cantilevers Fabricated by Electrodeposition and the Temperature Dependency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrochem	6. 最初と最後の頁 216 ~ 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electrochem2020015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jiang Yiming, Chen Chun-Yi, Chang Tso-Fu Mark, Luo Xun, Yamane Daisuke, Sone Masato	4. 巻 2
2. 論文標題 Electrodeposition of Ni-Co Alloys and Their Mechanical Properties by Micro-Vickers Hardness Test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochem	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electrochem2010001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Chien Yu-An, Chang Tso-Fu Mark, Chen Chun-Yi, Yamane Daisuke, Ito Hiroyuki, Machida Katsuyuki, Masu Kazuya, Sone Masato	4. 巻 1
2. 論文標題 Co-Electrodeposition of Au?TiO2 Nanocomposite and the Micro-Mechanical Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochem	6. 最初と最後の頁 388 ~ 393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electrochem1040025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Kosuke, Chang Tso-Fu Mark, Hashigata Ken, Asano Keisuke, Chen Chun-Yi, Nagoshi Takashi, Yamane Daisuke, Ito Hiroyuki, Machida Katsuyuki, Masu Kazuya, Sone Masato	4. 巻 10
2. 論文標題 Sample geometry effect on mechanical property of gold micro-cantilevers by micro-bending test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MRS Communications	6. 最初と最後の頁 434 ~ 438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/mrc.2020.38	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 Masu Kazuya, Machida Katsuyuki, Yamane Daisuke, Ito Hiroyuki, Ishihara Noboru, Chang Tso-Fu Mark, Sone Masato, Shigeyama Ryo, Ogata Taiki, Miyake Yoshihiro	4. 巻 97
2. 論文標題 (Invited) CMOS-MEMS Based Microgravity Sensor and Its Application	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 91 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09705.0091ecst	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 Nitta Kyotaro, Chang Tso-Fu Mark, Tang Haochun, Chen Chun-Yi, Iida Shinichi, Yamane Daisuke, Machida Katsuyuki, Ito Hiroyuki, Masu Kazuya, Sone Masato	4. 巻 167
2. 論文標題 Alloy Electroplating and Young 's Modulus Characterization of AuCu Alloy Microcantilevers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 082503 ~ 082503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/1945-7111/ab8805	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 Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Teruaki Safu, Hiroshi Toshiyoshi, Masato Sone, Katsuyuki Machida, Hiroyuki Ito, Kazuya Masu	4. 巻 31
2. 論文標題 A MEMS Accelerometer for Sub-mG Sensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2883-2894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2019.2122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Haochun Tang, Tso-Fu Mark Chang, Yaw-Wang Chai, Chun-Yi Chen, Takashi Nagoshi, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone	4. 巻 9
2. 論文標題 Nanoscale Hierarchical Structure of Twins in Nanograins Embedded with Twins and the Strengthening Effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 987-1 - 987-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met9090987	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Keisuke Asano, Tso-Fu Mark Chang, Haochun Tang, Takashi Nagoshi, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone	4. 巻 8
2. 論文標題 High Strength Electrodeposited Au-Cu Alloys Evaluated by Bending Test toward Movable Micro-Components	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 412-415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2.0151908jss	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 Kyotaro Nitta, Tso-Fu Mark Chang, Koichiro Tachibana, Hao-chun Tang, Chun-Yi Chen, Shinichi Iida, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone	4. 巻 215
2. 論文標題 Cu-Alloying Effect on Structure Stability of Electrodeposited Gold-Based Micro-Cantilever Evaluated by Long-Term Vibration Test	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microelectronic Engineering	6. 最初と最後の頁 111001_1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mee.2019.111001	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 Yu-Hong Gao, Yu-Hao Jen, Rongshun Chen, Daisuke Yamane, Cheng-Yao Lo	4. 巻 293
2. 論文標題 Five-fold sensitivity enhancement in a capacitive tactile sensor by reducing material and structural rigidity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors & Actuators: A. Physical	6. 最初と最後の頁 167-177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2019.04.043	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 該当する

1. 著者名 Ken Hashigata, Tso-Fu Mark Chang, Haochun Tang, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone	4. 巻 213
2. 論文標題 Strengthening of micro-cantilever by Au/Ti bi-layered structure evaluated by micro-bending test toward MEMS devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microelectronic Engineering	6. 最初と最後の頁 13-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mee.2019.04.008	査読の有無 無
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44件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 25件)

1. 発表者名 Kentaro Tamura, Keigo Nota, Kazumoto Miwa, Shimpei Ono, and Daisuke Yamane
2. 発表標題 Demonstration of Non-Contact Type Vibrational Energy Harvester with Electric Double Layer Electrets
3. 学会等名 The 20th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yiming Jiang, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Xun Luo, Daisuke Yamane, Masanori Mizoguchi, Osamu Kudo, Ryu Maeda, and Masato Sone
2. 発表標題 Micro-Mechanical Characterization of Electrodeposited Ni-Co Alloys toward Design of MEMS Components
3. 学会等名 Micro and Nano Engineering Conference 2021 (MNE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Akiyama, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, and Masato Sone
2. 発表標題 Micro-Mechanical Property Evaluation of Gold-Nickel Alloys toward Design of MEMS Components
3. 学会等名 Micro and Nano Engineering Conference 2021 (MNE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taro Omura, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, and Masato Sone
2. 発表標題 Effect of Current Density on Mechanical Properties of Electrodeposited Gold Evaluated by Micro-Compression Test
3. 学会等名 Micro and Nano Engineering Conference 2021 (MNE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Fujita, Kosuke Suzuki, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, and Masato Sone
2. 発表標題 Mechanical Property of Gold Micro-Cantilevers for Application in Microelectronics and the Sample Geometry Effect
3. 学会等名 Micro and Nano Engineering Conference 2021 (MNE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本 滯貴, 川島 康介, 栢口 英之, 石井 久夫, 田中 有弥, 山根 大輔
2. 発表標題 自己組織化エレクトレットを用いたMEMS振動発電素子の検討
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田 圭吾, 田村 健太郎, 三輪 一元, 小野 新平, 山根 大輔
2. 発表標題 電気二重層エレクトレットを用いた非接触型面外振動発電の検討
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山 拓海, 簡 佑安, 陳 君怡, Tso Fu Mark Chang, 山根 大輔, 伊藤 浩之, 町田 克之, 三宅 美博, 曾根 正人
2. 発表標題 MEMSデバイスへの応用に向けた金ニッケル合金の微小機械的特性の評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村 太郎, Chun-Yi Chen, Tso Fu Mark Chang, 山根 大輔, 伊藤 浩之, 町田 克之, 三宅 美博, 曾根 正人
2. 発表標題 金めっき材料における機械的特性の電流密度依存性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永縄 卓大, 川島 康介, 栢口 英之, 石井 久夫, 田中 有弥, 山根 大輔
2. 発表標題 電気回路シミュレータを用いたSAE-MEMSエナジーハーベスタ解析環境の検討
3. 学会等名 応用物理学会集積化MEMS技術研究会 第12回集積化MEMS技術研究ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田 一矢, 鈴木 康介, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, 伊藤 浩之, 山根 大輔, 町田 克之, 益 一哉, 曾根 正人
2. 発表標題 金単結晶微小カンチレバーの機械的特性とサンプル形状効果
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Ichikawa, Ken Atsumi, Tatsuya Koga, Daisuke Yamane, Shin-ichi Iida, Hiroyuki Ito, Noboru Ishihara, Katsuyuki Machida, and Kazuya Masu
2. 発表標題 A 100-nG/ Hz-Level Single Au Proof-Mass 3-axis MEMS Accelerometer with Pillar-Shaped Electrodes
3. 学会等名 Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS(DTIP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tso-Fu Mark Chang, Hao-Chun Tang, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題 Electrodeposition of Au-Cu Alloys and the Micro-Mechanical Properties
3. 学会等名 237th ECS Meeting with the 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 端山 航平, 川島 康介, 澤田 宗興, 田村 健太郎, 山根 大輔
2. 発表標題 面内振動型Au-MEMS素子のばね構造の検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根 大輔
2. 発表標題 集積化MEMS振動発電素子に関する研究
3. 学会等名 電気学会 センサ・マイクロマシン部門 マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川島 康介, 澤田 宗興, 田村 健太郎, 端山 航平, 山根 大輔
2. 発表標題 外付エレクトレット型MEMSエナジーハーベスタの小型化の検討
3. 学会等名 令和2年電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Suzuki, Yu-An Chien, Ken Hashigata, Keisuke Asano, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu and Masato Sone
2. 発表標題 Effects of Sample Geometry and Grain Size on Mechanical Property of Electrodeposited Gold Evaluated By Micro-Bending Test
3. 学会等名 PRiME 2020 (ECS, ECSJ, & KECS Joint Meeting) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 曾根 正人, Tso-Fu Mark Chang, 名越貴志, 町田 克之, 山根 大輔, 伊藤浩之, 益 一哉
2. 発表標題 医用MEMSデバイス応用に向けた 微小貴金属めっき材料の機械的特性評価
3. 学会等名 日本金属学会 2021年春季講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Koga, Takashi Ichikawa, Daisuke Yamane, Shinichi Iida, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, and Kazuya Masu
2. 発表標題 A Gold Proof-Mass Differential MEMS Accelerometer for Micro-G Level Sensing
3. 学会等名 The 7th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems (INERTIAL 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu-An Chien, Tso-Fu Mark Chang, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題 Micro-Mechanical Properties of Electrodeposited Au-TiO ₂ Composite Film
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyotaro Nitta, Hao-chun Tang, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Shinichi Iida, Katsuyuki Machida, Hiroyuki Ito, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題 Electrodeposition of Au-Cu Alloy Micro-Cantilevers and the Young's modulus by Resonance Frequency Method
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Iriya, Kyotaro Nitta, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題 Electroplating of Au-Pd Alloy Films and the Mechanical Properties
3. 学会等名 International Thin Films Conference (TACT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Cheng-Yao Lo, Daisuke Yamane
2. 発表標題 High-Sensitivity Capacitive Tactile Sensor with Vertically Stacked Hollow Structures
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu-Hao Jen, Chia-Tso Mo, Kean Aw, Daisuke Yamane, Cheng-Yao Lo
2. 発表標題 Extensive Sensitivity Enhancement in Stacked Capacitive Tactile Sensors
3. 学会等名 IEEE Sensors 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyotaro Nitta, Hao-chun Tang, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Shinichi Iida, Katsuyuki Machida, Hiroyuki Ito, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題 Fabrication of Au-Cu Alloy/Ti Layered Micro-Cantilevers and the Long-Term Structure Stability
3. 学会等名 IEEE Sensors 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ichikawa, Tatsuya Koga, Daisuke Yamane, Shinichi Iida, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito, Tso-Fu Mark Chang, Masato Sone, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu
2. 発表標題 Shock Characteristics of MEMS Inertial Sensors Developed by Ti/Au Multi-Layer Metal Technology
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tatsuya Koga, Takashi Ichikawa, Naoto Tanaka, Taiki Ogata, Hiroki Ora, Daisuke Yamane, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito, Masato Sone, Katsuyuki Machida, Yoshihiro Miyake, Kazuya Masu
2 . 発表標題 High-Sensitivity Inertial Sensor Module to Measure Hidden Micro Muscular Sounds
3 . 学会等名 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference 2019 (BioCAS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kosuke Suzuki, Ken Hashigata, Keisuke Asano, Chun-Yi Chen, Takashi Nagoshi, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2 . 発表標題 Sample Geometry Effect on Mechanical Property of Electrodeposited Gold Evaluated by Micro-Bending Test
3 . 学会等名 45th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kyotaro Nitta, Hao-Chun Tang, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Shinichi Iida, Katsuyuki Machida, Hiroyuki Ito, Kazuya Masu, Masato Sone
2 . 発表標題 Fabrication and Evaluation of Au-Cu Alloy 3D Structures toward MEMS Movable Components
3 . 学会等名 45th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hitomi Watanabe, Chun-Yi Chen, Tso-Fu Mark Chang, Shinichi Iida, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2 . 発表標題 Effects of Fixed End Structure on Temperature Dependence of Structure Stability of Ti/Au Micro-Cantilever toward MEMS Applications
3 . 学会等名 45th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名	Yu-An Chien, Tso-Fu Mark Chang, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題	Electrodeposition of TiO ₂ Nanoparticle Reinforced High Strength Au Film for MEMS Applications
3. 学会等名	45th International Conference on Micro & Nano Engineering (MNE2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Kosuke Suzuki, Ken Hashigata, Keisuke Asano, Chun-Yi Chen, Takanshi Nagoshi, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題	Mechanical properties of gold micro-cantilevers with different thickness evaluated by micro-bending test
3. 学会等名	The 2nd International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (MSAM 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Hitomi Watanabe, Takuma Suzuki, Chun-Yi Chen, Takanshi Nagoshi, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Katsuyuki Machida, Hiroyuki Ito, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題	High Structure Stability Ti/Au Multiple Layer Micro-Cantilever and the Temperature Dependence
3. 学会等名	The 2nd International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (MSAM 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Masato Sone, Hao-Chun Tang, Masaharu Yoshiba, Chun-Yi Chen, Takanshi Nagoshi, Tso-Fu Mark Chang, Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu
2. 発表標題	Mechanical properties of electrodeposited gold-copper alloy by micro-compression test
3. 学会等名	The 2nd International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (MSAM 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 Ken Atsumi, Shota Otobe, Tatsuya Koga, Takashi Ichikawa, Daisuke Yamane, Shinichi Iida, Hiroyuki Ito, Noboru Ishihara, Masato Sone, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu
2. 発表標題 Pillar-Shaped Electrodes for 3-axis Gold-Proof-Mass MEMS Capacitive Accelerometers
3. 学会等名 Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS(DTIP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu-an Chien, Tso-Fu Mark Chang, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone
2. 発表標題 Electrodeposited High Strength Au-TiO ₂ Nano Composite Film for MEMS Devices
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入谷 友樹, 新田京太郎, Yu-An Chien, Tso-Fu Mark Chang, 山根 大輔, 伊藤 浩之, 町田 克之, 益 一哉, 曾根 正人
2. 発表標題 Au-Pd合金膜の電気メッキとその機械的特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渥美 賢, 古賀 達也, 市川 崇志, 山根 大輔, 飯田 慎一, 伊藤 浩之, 石原 昇, 町田 克之, 益 一哉
2. 発表標題 ピラー型電極を用いた単一錘3軸MEMS加速度センサの検討
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川 崇志, 渥美 賢, 古賀 達也, 山根 大輔, 飯田 慎一, 伊藤 浩之, 石原 昇, 町田 克之, 益 一哉
2. 発表標題 ピラー型電極による単一Au錘3軸MEMS加速度センサの感度均一化の検討
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古賀 達也, 市川 崇志, 田中 直登, 緒方 大樹, 大良 宏樹, 山根 大輔, 石原 昇, 伊藤 浩之, 曾根 正人, 町田 克之, 三宅 美博, 益 一哉
2. 発表標題 微弱筋音計測に向けた高分解能MEMS慣性センサモジュールの検討
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川 崇志, 古賀 達也, 山根 大輔, 飯田 慎一, 石原 昇, 伊藤 浩之, Chang Tso-Fu Mark, 曾根 正人, 町田 克之, 益 一哉
2. 発表標題 積層メタル技術で作製したMEMS加速度センサの衝撃特性評価
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川 崇志, 乙部 翔太, 渥美 賢, 古賀 達也, 山根 大輔, 飯田 慎一, 伊藤 浩之, 石原 昇, 曾根 正人, 町田 克之, 益 一哉
2. 発表標題 3Dピラー型Au錘MEMS加速度センサ
3. 学会等名 第36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 2019年

1. 発表者名 市川 崇志, 乙部 翔太, 渥美 賢, 古賀 達也, 山根 大輔, 飯田 慎一, 伊藤 浩之, 石原 昇, 町田 克之, 曾根 正人, 益 一哉
2. 発表標題 Au錘3軸MEMS加速度センサのためのSCD電極の検討 (2)
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 市川 崇志, 新島 宏文, 古賀 達也, 山根 大輔, 飯田 慎一, 伊藤 浩之, 石原 昇, 曾根 正人, 町田 克之, 益 一哉
2. 発表標題 3軸Au錘MEMS加速度センサにおける検出電極構造の検討
3. 学会等名 令和元年電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 微細素子の製造方法及び微細素子	発明者 山根 大輔, 田中 有 弥	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-132954	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 自壊素子が組み込まれたデバイス及び自壊素子の設計方法	発明者 山根 大輔	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-189992	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Smart Micro Mechatro Systems Lab 立命館大学 山根研究室 http://www.yamane.se.ritsume.ac.jp/

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------