

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20539

研究課題名（和文）生体模倣型次世代振動センサの開発と社会実装

研究課題名（英文）Development and Social Implementation of Bio-mimetic Next-Generation Vibration Sensors

研究代表者

野田 祐樹（Noda, Yuki）

大阪大学・産業科学研究所・特任助教（常勤）

研究者番号：30784748

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,400,000円

研究成果の概要（和文）：劣化したコンクリート構造物を多点・常時観測を行なう為の新しい動作原理に基づく2種の振動センサの開発を行なった。摩擦帯電ナノ発電型振動センサにおいては安定な金ナノワイヤを素子の電極として用いることで、摩擦帯電の原理を応用した振動センサを開発した。金ナノワイヤ表面のみに有機高分子をコーティングする技術を開発したことで摩擦帯電の原理に基づく機械的動作-電気信号変換が可能であることを示した。共振型振動センサにおいては共振現象を振動センサの動作原理とすることで、高い加速度線形性と低いカップリング誤差を実現した。さらに従来の圧電素子と比較して極めて高い信号純度を有する振動情報を獲得することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した摩擦帯電ナノ発電型、共振型振動センサの2種の振動センサは動作原理の観点で新規性が高いのみならず、社会実装を前提として安定、安全、安価な材料を用いて創成された。摩擦帯電ナノ発電型振動センサにおいては金からなるナノワイヤを電極として活用することに成功し、これにより長期安定性と低い環境負荷を満たしたセンサの実現が期待できる。共振型振動センサにおいては加速度の線形性やカップリング誤差など、振動センサに求められる基本性能を満たすだけでなく、1000円以下の安価な材料費で作製することができる。これらによりコンクリート構造物の劣化状況を常時モニタリングできる高度な情報化社会の実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed two types of vibration sensors based on new operating principles for multi-point and continuous monitoring of deteriorated concrete structures. For the triboelectric nanogenerator-type vibration sensor, we developed a sensor applying the principle of frictional electrification by using stable gold nanowires as the electrodes of the element. By developing a technique to coat only the surface of the gold nanowires with an organic polymer, we demonstrated the possibility of mechanical operation-electrical signal conversion based on the principle of frictional electrification. In the resonant-type vibration sensor, we achieved high acceleration linearity and low cross axis sensitivity by adopting resonance phenomena as the operating principle of the vibration sensor. Furthermore, compared to conventional piezoelectric elements, we were able to obtain vibration information with extremely high signal purity.

研究分野：材料科学

キーワード：振動 生体模倣 摩擦帯電 ナノワイヤ コンクリート構造物 社会実装

1. 研究開始当初の背景

東京オリンピックが開催された 1964 年に整備されたほとんどのコンクリート構造物は、今日までに 50 年以上が経過しており、経年劣化による倒壊に対する対策が急務となっている。現状のコンクリート構造物の劣化診断は人が定期的に診断するスタイルが主流であるが、構造物の数と検査にかかる時間的コストを考慮すると、予めセンサを多点設置し、劣化の進行状況を常時モニタリングすることが望ましい。しかし既存の PZT を始めとする無機圧電体からなる加速度ピックアップは高性能であるものの、一点約 10 万円と非常に高価で経済的コストの面で実現が困難である。そのため多点・常時観測が可能な高度モニタリング社会を実現するためには、安価で高精度な新しい振動センサが求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、建築物や交通インフラにおけるコンクリート構造物の劣化を診断するための新しい振動センサを、社会実装を目指して安定、安全、安価な材料を用いて創成することである。具体的には生体の聴覚を司る蝸牛殻のワイヤ状有毛細胞からなる特異なメゾスコピック構造と、共振に基づく能動的な信号増幅機構を模倣した次世代型の振動センサを開発する。

3. 研究の方法

研究代表者は異なる動作原理に基づく以下の 2 つの振動センサを開発した。

(摩擦帯電ナノ発電型振動センサ)

環境に無害で安定な元素のみから構成される電極と絶縁体からなる振動センサの開発を行った。過去の先行研究においては金属のナノワイヤを電極材料として活用した例は存在するが、そこでは銀や銅など、環境中で硫化や酸化などの劣化が進行する元素が用いられてきた。しかし常時モニタリングを担う振動センサは安定に存在できる元素から構成される必要がある。そこで安定な金で構成されるナノワイヤを合成し、これをネットワーク化することで振動センサの電極として活用した。

ここでは振動による機械的な運動を効率よく電気信号に変換するための手段として、聴覚の外有毛細胞からヒントを得てナノスケールの直径と数十マイクロスケール長さをもつ、金からなるナノワイヤのネットワーク構造を作製しこれを電極として活用した。振動を電気信号に変換する原理は、材料自由度の高い摩擦帯電発電の仕組みを採用した。具体的には、溶液法による新規金ナノワイヤネットワーク電極の作製手法の確立、高い伸縮性、柔らかい電子デバイスへの応用、摩擦帯電と静電誘導による電荷観測を行うことに成功した。

(共振型振動センサ)

劣化検査で用いられる圧電型振動センサは振動センサの動作原理として一般的であるが、任意の振動数以外の周波数情報を誤検出することがあり、解析精度向上の妨げの一因となる。そこで聴覚の外有毛細胞が行なう共振に基づく能動的な信号増幅機構からヒントを得て、センサ構造を任意の周波数で共振させ、外部振動で変化する共振周波数を検出する共振型振動センサを提案した。

ここでは共振の励起と検出を担う材料として圧電体のフッ素系高分子 PVDF を用いた。これを誘電体層として励起電極、検出電極およびグランドからなる 3 極子キャパシタ構造を金属ダイヤモンド上に搭載した。任意の周波数でセンサ構造を共振させ、外部振動を与えた後にその共振信号を復調することで振動情報を得ることができる。本研究で開発した共振型振動センサは圧電型振動センサと比較して、与えた外部振動に相当する周波数のみを高感度に検出することができた。

4. 研究成果

摩擦帯電ナノ発電型振動センサ

(金ナノワイヤネットワーク電極の作製と伸縮特性)

直径 30-80 nm、長さ 10-20 μm の金ナノワイヤの合成を行い、ろ過で用いられるろ紙にワイヤ分散水溶液を滴下することでナノワイヤのネットワーク構造を作製した。このときろ紙にフォトリソグラフィ法による幾何学的な凹凸構造を作ることによって、ワイヤが集積する場所を任意に調整することができた。例えばへび型の構造を作ることによって図 1(a) のように 150% の引張ひずみを与えてもその抵抗変化が 10% 以下に抑制できる伸縮性電極を作製することができた。これはそれまでに報告された金属ナノワイヤ電極の伸縮特性と比較してもトップクラスの性能を有していた。また、開発した金ナノワイヤネットワーク構造はトラン

ジスタのような能動素子としても活用できることを明らかにした。

(ナノワイヤのレーザーアニールによるシート抵抗の低減)

金ナノワイヤネットワーク構造は伸縮性能は高いものの、シート抵抗値が高い傾向にある。これはワイヤ間を電子がトンネル伝導もしくはホッピング伝導するときの抵抗が律速になるためである。そこでワイヤ間を「溶接」することでワイヤ間伝導の抵抗を低減した。ここでは波長 532 nm のパルスレーザー光を照射することでワイヤ間の溶接を試みた。結果、図 1(a) に示すように、照射前と照射後のワイヤ交点と比較すると、ワイヤ間に瘤状の構造が形成されていることが確認できたことからワイヤ間が溶接されたことが示唆される。実際に 4 探針法で金ナノワイヤのシート抵抗を計測したところ、レーザー処理前 (141 Ω/sq) から、レーザー照射後 (31 Ω/sq) で最大約 78% も抵抗を抑制できることが明らかとなった。これらの結果から作製した金ナノワイヤネットワーク電極はレーザーを用いることでワイヤ間の溶接が可能であり、これにより電子の伝導パスが形成されることでシート抵抗を低減できることが明らかとなった。

(ナノワイヤ表面の高分子コーティングとそのキャラクタリゼーション)

摩擦帯電素子においては金属表面にコーティングされた絶縁体に電荷が蓄積され、振動等の機械的動作による静電誘導により金属に電荷が誘起され外部回路で検出することができる。一方で環境負荷の低い素子を実現するためには、絶縁体にも環境適合性を有する材料を用いる必要がある。そこで本研究では正電荷を蓄積する傾向がある絶縁体として甲殻類の殻を構成するキトサンのオリゴマーを、負電荷を蓄積する傾向がある絶縁体としてコンタクトレンズ等に用いられるシリコンの一種であるポリジメチルシロキサン (以降 PDMS) を採用した。レーザー処理を行なった後の金ナノワイヤに、これらの各高分子溶液を塗布することで金ナノワイヤネットワーク表面に絶縁体のコーティングを行った。

コーティングのキャラクタリゼーションをフーリエ変換赤外分光法の一つである高感度反射法 (FTIR-RAS) と電子顕微鏡を用いた元素分析 (SEM-EDS) で行った。FTIR-RAS は p 偏光した赤外光を金属表面に照射することで表面から数 nm の分子の情報を得ることができる極めて表面敏感な分光法である。図 1(b) に示す通り、コーティング前の金ナノワイヤは特に主立ったピークが観測されない一方で、コーティングした金ナノワイヤはそれぞれキトサンオリゴマー、PDMS の分子振動に由来するピークを観測することができた。

さらに SEM を用いて元素分析マッピング EDS 分析を行なった (図 1(b))。結果、形状像で示すナノワイヤの位置に金ナノワイヤ由来の金と、それぞれの高分子の構成元素であるキトサンオリゴ糖の酸素、PDMS のケイ素の信号を確認することができた。これら FTIR-RAS と SEM-EDS の結果から高分子は確かに金ナノワイヤの表面に存在し、即ち今回開発した方法でナノワイヤ表面に絶縁体をコーティングできることが明らかとなった。

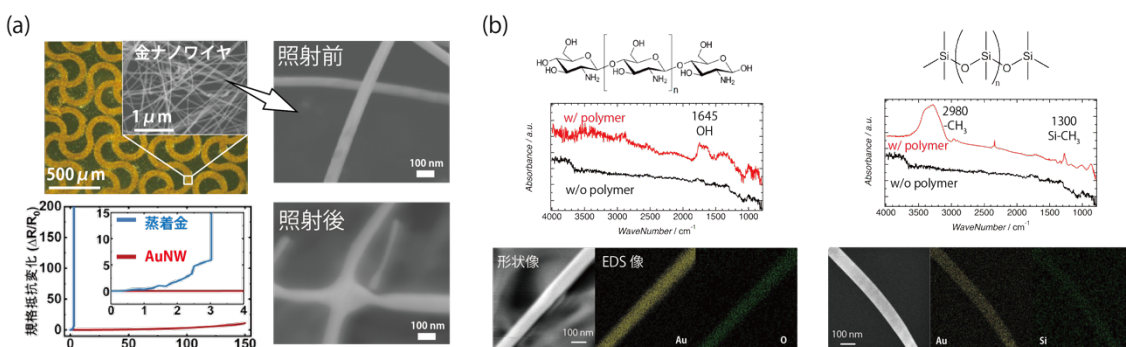


図 1. (a) 摩擦帯電ナノ発電型振動センサ用電極の作製 (b) 2 種の絶縁体コーティング前後の FTIR-RAS の比較と SEM-EDS によるキャラクタリゼーション

(単極子の特性)

絶縁体をコーティングした電極素子は単極子の摩擦帯電素子として考えることができる。即ち外部振動に伴う素子-グランド間の電圧の変動を単極子素子の特性として評価できる。ここではレーザー処理後の金ナノワイヤをキトサンオリゴマー、PDMS でコートした単極子素子を作製し出力特性を検討した。1 軸加振器を用いて、変位距離 1 mm、接触周波数 1、3、10 Hz において接触分離動作を行なった。周波数においては人の肘や膝間接の一般的な動作周期帯を参考に選定した。

金ナノワイヤ-キトサンオリゴマーからなる単極子素子の結果を図 2(a) に示す。ここでは素子の接触材料として電極のない PDMS シートを用いた。結果、電極構造に関わらず接触周波数が 1、3、10 Hz と高速になるにつれ出力電圧が向上する様子を確認できた。実質的な発生電圧を示す電圧実効値を比較すると 10Hz においては照射後は 0.327V であり、レーザー照射前の 0.121 V と比較すると約 170% 向上することが明らかとなった。同様に 1 Hz、3Hz

においてもそれぞれ 57%, 96%の電圧実効値の向上を確認できた。金ナノワイヤ-PDMS からなる単極子素子の結果を図 2 (b)に示す。(a)と同様に接触周波数が 1, 3, 10 Hz と高速になるにつれ出力電圧が向上する様子を確認できた。キトサンオリゴマーと同様にレーザー照射前後の電圧実効値を計算すると、1, 3, 10Hz でそれぞれ約 24%, 30%, 44% 向上することが明らかとなった。

キトサンオリゴ糖、PDMS のいずれの場合においてもレーザー照射前後で電圧の向上が確認できた。これは、レーザー照射により金ナノワイヤネットワークの交点が溶接されシート抵抗が下がることで、摩擦の過程で発生した電荷が外部回路に取り出される際のロスが減少したことによるものと考えられる。

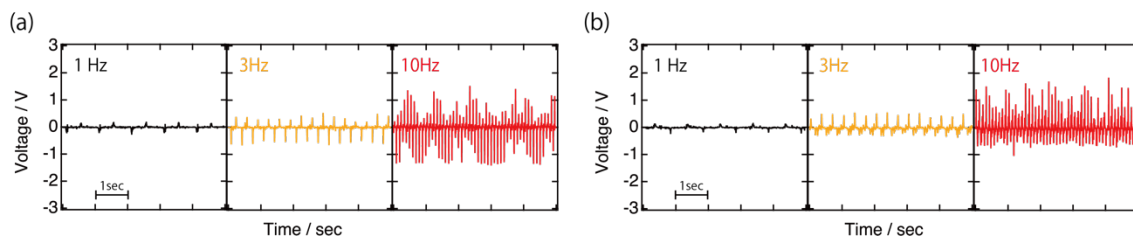


図 2. 単極子素子の振動特性(a)キトサンオリゴマー被覆金ナノワイヤ (b)PDMS 被覆金ナノワイヤ

共振型振動センサ

(共振型振動センサの動作原理)

PVDF を誘電体層として励起電極、検出電極およびグランドからなる 3 極子キャパシタ構造をダイヤフラム上に搭載した(図 3 左)。励起電極にファンクションジェネレータで任意の高周波を印加することで、素子構造を反映した共振状態にすることができる。共振状態では電極間のダイヤフラムが高周波で機械的に振動しており、検出電極でそれを検知することで共振状態の周波数を検出することができる。素子に差圧(ゲージ圧)を加えた時の共振スペクトルの変化の様子を図 3 の右に示す。黒色の 0 Pa は大気圧下でのスペクトルを示し、そのピークが 12.9 kHz にあることから、この素子の共振点は 12.9 kHz であることが判る。次に素子に外部から ± 2000 Pa の静圧を印加したときの共振点の推移を評価した。結果、圧力の大きさと符号に応じて共振点が 12.4 kHz から 13.3 kHz まで線形に変化することが明らかとなった。これは素子に外部振動を加えたときにその振動の周期に応じて共振点が増減することを意味している。これらの結果により提案した構造が外部振動の情報を獲得できる共振型振動センサになりうることを示唆された。

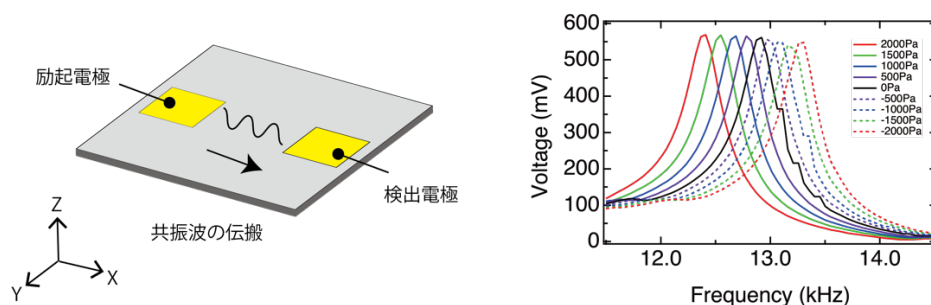


図 3. 共振型振動センサのコンセプト図と Z 方向に差圧を印加した時の共振点の推移

(共振型振動センサの評価)

開発した共振型振動センサの特性を評価し、これを圧電型振動センサ(開発品と市販品)と比較した。共振型振動センサにおいては得られた高周波信号を復調することで加振信号を抽出した。なお、圧電型振動センサ(開発品)の結果は開発した共振型振動センサにて高周波信号なしで検出された信号を、圧電型振動センサ(市販品)は IMV 製加速度ピックアップ VP32 を使って、振動情報を示している。共振型振動センサと圧電型振動センサ(開発品と市販品)の出力信号はいずれも同じ試験において同時に取得した。IMV 製加振器を用いて 10 Hz, 110 Hz, 1010 Hz の振動を加速度 1 m/s^2 で加振した結果を図 4 に示す。黄色の塗りつぶしで示した加振信号に由来するピークに注目すると、赤色で示す共振型振動センサのスペクトルは、いずれの周波数でもノイズが少なく、非常に高い信号/雑音比(SN比)で振動を検知できることが明らかとなった。一方で、圧電型振動センサ(開発品)は 10 Hz の振動が検出できなかった。これは PVDF の圧電性能の低さを反映している。さらに 110 Hz, 1010 Hz においては圧電型は開発品、市販品共に加振信号の他にピークが幾つか観測された。これは圧電型では誤った振動情報を誤検出する可能性があることを示す。その一方で、開発し

た共振型は印加した振動周波数のみを極めて高い純度で検出できた。

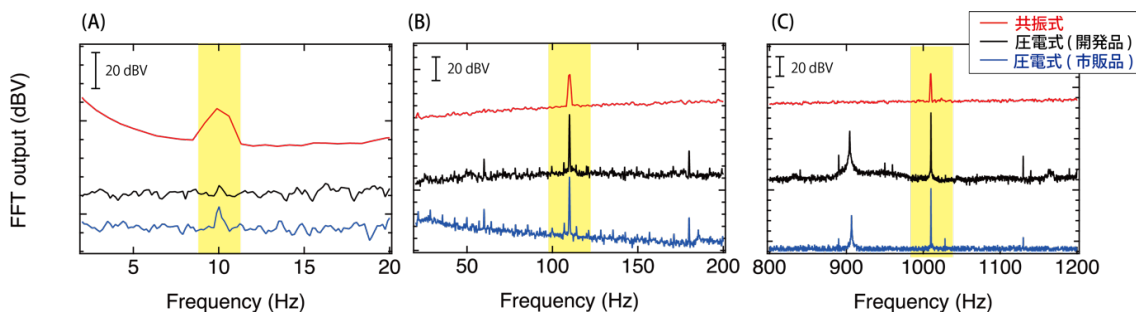


図 4. 各加振周波数におけるセンサの FFT スペクトル比較 (A) 加振周波数 10 Hz (B) 加振周波数 110 Hz (C) 加振周波数 1010 Hz (加速度はいずれも 1 m/s²)

次に検出加速度の線形性とカップリング誤差について評価した。線形性は加速度の定量的な感度を示す一方でカップリング誤差はセンサの振動検出方向の感度を示す指標の一つである。ここでは 110 Hz にて加速度 1, 3, 10 m/s² から評価した。図 5 に各振動センサの結果を示した。赤色で示す Z 方向の線形性は共振型、圧電型（開発品）、圧電型（市販品）いずれも加速度に対して線形に出力が増加することが明らかとなった。さらに共振型(図 5A)においては X 方向のピーク値が Z 方向より約 13 dB 低いことが明らかとなった。これは Z 方向の振動を X 方向より 4 倍感度高く検出でき、低いカップリング誤差を実現したこと示している。一方で、圧電型（開発品）は Z と X の信号強度がほぼ同じである。これは圧電型（開発品）は外部振動の強さを検知できるが、その振動の伝搬方向が区別できないことを示している。これは d₃₃, d₃₂, d₃₁ 方向に比較的近い圧電定数を持つ PVDF の材料固有の特性を反映していると考えられる。これらの結果から PVDF の正圧電効果を利用するのではなく、逆圧電効果を利用した共振型として動作原理を変えることで、振動検出性能が飛躍的に向上することが証明された。

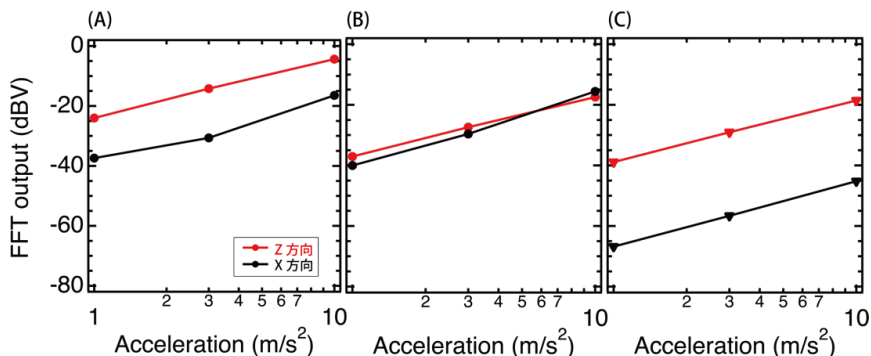


図 5. 周波数 110 Hz における各振動センサの加速度の線形性とカップリング誤差の比較. (A) 共振型振動センサ (B) 圧電型振動センサ（開発品） (C) 圧電型振動センサ（市販品）

総括

劣化したコンクリート構造物を多点・常時観測を行なう為の新しい動作原理に基づく 2 種の振動センサの開発を行なった。摩擦帯電ナノ発電型振動センサにおいては安定な金ナノワイヤを素子の電極として用いることで、摩擦帯電の原理を応用した振動センサを開発することができた。特に本研究で開発された金ナノワイヤネットワーク電極は伸縮時に極めて低い抵抗変化率を示し、世界的にみても機械的な動作に対する高い信頼性を有する電極であった。またナノワイヤ表面のみに有機高分子をコーティングする技術を開発したことで摩擦帯電の原理に基づく機械的動作—電気信号変換が可能であることを示すことができた。共振型振動センサにおいては共振現象を振動センサの動作原理とすることで、高い加速度線形性と低いカップリング誤差を実現した。特に、従来の圧電素子では実現できない極めて高い信号純度を有する振動センサとして動作することが示された。

いずれのセンサも環境に対して安全、安心な元素で構成されており、一点あたり 1000 円以下の安価な材料費で作製することができる。そのため従来の約 10 万円のコストがかかる無機圧電型加速度ピックアップの代替として、多点・常時観測が可能な高度モニタリング社会を実現する新規振動センサとして期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Satoshi Takane, Yuki Noda, Naomi Toyoshima, Takafumi Uemura, Yuki Bando and Tsuyoshi Sekitani	4. 巻 15
2. 論文標題 Gold nanowire electrodes for flexible organic thin-film transistors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 96501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac896a	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 Takane Satoshi, Noda Yuki, Toyoshima Naomi, Sekitani Tsuyoshi	4. 巻 118
2. 論文標題 Effect of macroscale mesh design of metal nanowire networks on the conductive properties for stretchable electrodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243102 ~ 243102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0051935	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 金ナノワイヤを用いた摩擦発電素子の開発
2. 発表標題 大島 元太、野田 祐樹、豊嶋尚美、高根 慧至、関谷 毅
3. 学会等名 第84回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takane Satoshi, Noda Yuki, Toyoshim Naomi, Uemura Takafumi, Sekitani Tsuyoshi
2. 発表標題 Structural Reformation for High-Performance Strechable Gold Nanowire Electrode
3. 学会等名 The 27th SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takane Satoshi, Noda Yuki, Toyoshim Naomi, Uemura Takafumi, Sekitani Tsuyoshi
2. 発表標題 Novel Structural Concept for High-Performance Gold Nanowire Stretchable Electrode Toward Ultra-Flexible Biomedical Applications
3. 学会等名 2023 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takane Satoshi, Noda Yuki, Toyoshim Naomi, Uemura Takafumi, Sekitani Tsuyoshi
2. 発表標題 Performance Enhancement of stretchable Gold Nanowire Electrodes by Structural Reformation
3. 学会等名 7th International Conference on Advanced Electromaterials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Takane, Yuki Noda, Naomi Toyoshima, and Tsuyoshi Sekitani
2. 発表標題 Macromesh-Shaped Gold Nanowire Network Electrodes with Low Resistance under Tensile Strain
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高根慧至, 野田祐樹, 豊嶋尚美, 植村隆文, 坂東勇希, 関谷毅
2. 発表標題 金ナノワイヤネットワーク電極を用いたフレキシブル有機薄膜トランジスタ
3. 学会等名 第17回有機デバイス・物性院生研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高根慧至, 横山創一, 野田祐樹, 植村隆文, 坂東勇希, 関谷毅, 家裕隆
2. 発表標題 ストレッチャブルランジスタに向けたウレタン修飾ジケトピロロピロールのランダム三元ポリマーの合成と物性
3. 学会等名 日本化学会 第102回春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高根慧至, 野田祐樹, 豊嶋尚美, 関谷毅
2. 発表標題 金ナノワイヤネットワークからなる ストレッチャブルマクロメッシュ電極のひずみと導電特性の相関
3. 学会等名 JSAP/SPIE学生チャプター合同研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高根慧至, 野田祐樹, 豊嶋尚美, 関谷毅
2. 発表標題 金属ナノワイヤネットワークからなる伸縮性マクロメッシュ電極のデザインと導電特性の相関
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 野田祐樹
2. 発表標題 コンクリートインフラ構造物ヘルスケアモニタリングにむけた振動センサ開発
3. 学会等名 COMSOL CONFERENCE 2020 TOYKO (招待講演)
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 野田祐樹
2. 発表標題 有機強誘電体・圧電体の科学からインフラ構造物ヘルスケア応用へ
3. 学会等名 2020年度 第4回PE研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 振動センサ及び振動検出システム	発明者 野田 祐樹、関谷 毅、瀬下 雄一、本 田 中	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-179126	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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

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