

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01274

研究課題名（和文）切り紙構造を利用した特性可変光学メタマテリアル

研究課題名（英文）Kirigami metamaterials for tunable optical properties

研究代表者

菅 哲朗（Kan, Tetsuo）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30504815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、切り紙構造を利用することで、光学的な特性を大幅に変調可能なMEMS光学メタマテリアルを実現することを目的としている。光学メタマテリアルにおいて、従来から光共鳴構造の3次元形状変化や、フレキシブル基板の引っ張りによる共鳴体の配置間隔変化を利用した動的な特性変調方法が研究されているが、限界があり実用的なデバイスに必要な変調機能は得られていない。そこで、2次元平面から立体構造を自由度高く作ることができる切り紙構造と融合し、構造的な制約をなくし、可変自由度が飛躍的に高い光学メタマテリアルを実現するための基礎技術を確立することを目的として実施する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、回折格子を備えたEMS構造にナノサイズの切り紙構造を作製することで、外力により格子ピッチを大幅に変形可能とする構造の作製に取り組み、ピッチ変形量100%可変な構造を試作した。試作の結果構造の破断などがみられるため、十分な格子としての機能は実現できなかったが、限定的に100%変形可能な格子構造の実現が可能であることを確認した。また、アクリルプレートに螺旋状の構造を形成し、大きな大変形を誘起可能なスパイラル型のメタマテリアル構造を作製し、ラージスケールモデルにおいてGHzで円偏光の変調可能性を確認した。これらは、光学素子設計論の新しい可能性を開拓するものであり、大きな実用的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to realize MEMS optical metamaterials with significantly modulated optical properties by utilizing kirigami structures. Traditional methods for dynamically modulating the properties of optical metamaterials have involved three-dimensional shape changes of optical resonance structures and changes in the spacing of resonators through stretching flexible substrates. However, these methods have limitations and do not provide the modulation functions required for practical devices. Therefore, by integrating kirigami structures, which allow for high degrees of freedom in creating three-dimensional structures from two-dimensional planes, we aim to eliminate structural constraints and establish the foundational technology for realizing optical metamaterials with vastly enhanced modulation capabilities.

研究分野：MEMS

キーワード：メタマテリアル 切り紙 MEMS

1. 研究開始当初の背景

本研究は、切り紙構造を利用し、特性を大幅に変調とする光学メタマテリアルの提案である。材料の光学的な特性は、基本的に誘電率や透磁率など材料物性のみにより決まる。これに対し、コイルやロッド形状の光学共鳴構造を作製してアレイ状に並べることにより、誘電率や透磁率などを目的の値にチューニングすることができるのが、メタマテリアルである。共鳴構造を電磁波の波長より小さく作ることによって、電磁波からは個々の構造が見えない均一な媒質として振る舞う。メタマテリアルにおいて、光学応答は、個々の共鳴体の立体構造、そして、共鳴体がアレイ配置されるときの間隔や配向方向が性能を規定する。材料物性ではなく、構造によって光物性を調整できるという点に、大きな自由度を持つ技術である。一方で、構造が電磁波の波長よりも微細であることを要求することから、半導体加工技術などの利用が必須であり、構造が2次元となる制約があった。最適構造は実際には3次元なので、構造形成法により探索可能な次元が制限されることは、機能性の拡大を阻んでいた。これは特に、光学共鳴体構造を動的に変更して光学メタマテリアルの特性を変調する、可変メタマテリアルの研究において顕著な問題である。例えば、MEMS 静電アクチュエータにより共鳴体の構造自体を可変とする研究は、盛んに研究されてきた。しかし、従来の MEMS 静電アクチュエータなどでは、ストロークが充分とれないうえに、変形方向が平面内に限定される問題がある。さらに、アクチュエータ自身がデバイス面積を占有するので、基板内で光学素子として作用するアクティブエリアが小さくならざるを得ない。また、近年フレキシブル基板上に光学共鳴体を配置し、基板の伸長により共鳴体の間隔を変えて、レンズ焦点距離などを可変とする研究が盛んに進められている[2]。しかし、フレキシブル基板を伸長させる方法については、一様な基板を一軸方向に引っ張ると、ポアソン比の影響で、直交する軸に縮んでしまう問題がある。仮に、2軸方向に均等に引っ張ったとしても、歪分布は面内で均一にはならず、基板にゆがみが生じてしまい、実用性に問題がある。こうした問題は、光学メタマテリアルの特性変調という目的に対し、アクチュエーションや基板材料物性の面で限界があらわになったことを意味する。基板材料の制約から解かれた光学共鳴体の特性変化の方法は無いのか、というのが本研究の中心的問いである。そして、(1) 広いアクティブエリア、(2) 広い変調レンジ、そして、(3) 素子が構成される基板材料に制約されない変調の実現、以上を達成できれば、薄型軽量小型で焦点位置を自在に変えられる薄型レンズ、ダイナミックに透過偏光状態が変わる極薄モジュレータ、大面積可変ホログラム投影装置など、光学メタマテリアル無しでは実現できない、実用上魅力的な光操作デバイスが実現できる。

2. 研究の目的

本研究は、ユニークな機械的変形を示すことで知られる切り紙を光学メタマテリアル技術と融合することにより、特性変調の自由度を大幅に拡張する光学メタマテリアルの実現が目的である。切り紙構造とは、紙に見立てた平面薄膜に切り込みパターンを加えて変形させることで、自由度の高い立体構造形成を実現する方法である。近年盛んに研究されており、これと光学メタマテリアルを統合する。

3. 研究の方法

研究の方法論として、ミリメートル～MEMS スケールの光学メタマテリアルの金属共鳴体形状変化を高い自由度で生み出すことが可能な方法を確立する。ミリメートルサイズにおいては、レーザ加工などによりメタマテリアルを構成する基板に切込みを入れ、その上に成膜された金属パターンの変形を大幅に拡張できる構造の実現をはかる。そして、ミリメートルサイズで実証した設計論を MEMS スケールに適用し、光学共鳴体を切り紙基板上にアレイ配置して、共鳴体同士の間隔と配向を自由に可変とする方法の確立を目的とする。ミリメートルサイズの構造として、既に研究実績を有しているスパイラル型のメタマテリアル構造の試作検証を行った。また、MEMS スケールの実験においては、ピッチを大幅に変調可能な回折格子の実現に取り組んだ。さらに、これらの2次元的なメタマテリアルの応用展開の一例として、GHz で機能する環境センシング用のメタマテリアルについて取り組んだ。

4. 研究成果

円偏光変調特性を有するスパイラル型メタマテリアル

ミリメートルサイズの実証のために、螺旋状にスパイラルを形成したメタマテリアルを試作検証した。ターゲットするテラヘルツ帯は光と電波の中間領域であり、多くの工学的応用が期待されている周波数領域として近年注目されている。現在、物質の解析のために可視光から赤外光領域で使用されている円偏光二色性測定や分光エリプソメトリーなどの分光分析方法がテラヘルツ周波数領域でも利用可能となれば、物質の結晶多形などの比較的大きな構造に対して非破壊で解析が可能となるため、製薬分野をはじめとして新たな定量分析方法として期待されている。しかし、テラヘルツ周波数領域においては、一般的に分光分析に必要とされる動的に偏光状態を大きく変調できる実用的な素子は存在しない。そのような素子として様々な形状のメタマテリ

アルが報告されている。中でも、直径 150 μm 程度の平面らせんを面外方向に伸ばして三次元構造に変形させたメタマテリアルは、円二色性が大きく、極性の反転が可能であるため、分光分析に用いる偏光変調素子として期待されている。らせん構造は面外方向に変形した際に外周部が大きく変形し、内周部はほとんど変形しないような不均一な変形をする。数値計算による予備検証を行ったところ、面外方向への均一な変形をした際には、不均一な変形をした際と比べてより広い周波数帯で大きな円二色性を示すことが分かってきた。このように、均一な変形の実現により更なる光学応答が見込まれるため、本研究では実際のデバイス試作を行い、メタマテリアルを利用したデバイスの偏光変調機能の向上の実証に取り組んだ。本研究の最終目標は、テラヘルツメタマテリアルにおける機能向上の実現であるが、テラヘルツ帯で機能するらせん構造はマイクロスケールと小さく、半導体加工技術を必要とするため、形状の異なる複数パターンの試作が困難である。そこで、本研究ではレーザ加工機により容易に製作可能なミリスケールのらせん構造を製作し、均一な変形となる表面形状及び実験においてラージスケールの構造におけるらせん構造の変形形状と光学応答の関係について研究したのが、もう一つの研究目的である。そのため、ギガヘルツ帯のアンテナによる送受信により、透過特性の評価を実施した。

縦横各 90 mm 厚さ 0.5 mm の透明アクリル板を、レーザ加工機を用いて先述の 3 パターンのらせん形状にカットし、カットしたらせん部分のみに対して真空蒸着装置を用いてアルミニウムを製膜した。今回はらせん直径が 34.1 mm であったため 90 mm 四方のアクリル板には縦横各 2 列、合計 4 つのらせんを同じ向きに加工した。次に同じ縦横寸法のアクリル板をもう一枚用意し、らせんの中央のみをアクリル用接着剤で接着し、アクリル板の四隅に配した支柱でらせんを伸ばした状態で保持できるようにした。伸びの大きさは 0、16.5、33、49.5、66 mm の 5 種類で固定できるような支柱のアタッチメントを作成した。この最大の伸びの 66 mm という値は参考文献に基づく予備計算において、300 μm 程度の面外変形が実現できれば実用レベルの偏光変調能力が得られるという試算に基づいている。製作した 3 種類のらせんについて、一定の伸びで固定したらせん構造に対して、可視光レーザを用いてらせん構造の方位角 $\theta/2$ ごとの高さを計測した。この際、レーザ光の意図しない方向への反射を防ぐために、アルミが成膜されていないらせん構造を対象に実験を実施したが、アルミ膜は母材に対して数 100 nm と薄いため剛性への寄与は僅少であり、変形に影響はないと判断した。ビーム幅が一定のらせんの伸びの大きさを 33 mm、49.5 mm、66 mm と変え、それぞれのらせんに対して各方位角における伸びの量を測定した。なお、直径 155 μm のデータは参考文献と同様の構造に対してレーザ顕微鏡を用いて計測した。結果から、らせんの伸びの量に依存せず、らせんの伸びの量をノルム化したとき、らせんの変形特性は一致した。また、スケール倍した構造において材質の違いや構造の大きさによらず、同様の変形形状を示すことが分かった。

次にビーム幅比 a/b を変化させたときのらせんの変形特性を比較した。らせん幅比 a/b が大きくなるにつれてらせんの変形は均一な変形に近づくことが確認できた。ただし、らせん幅比 $a/b = 3$ と $a/b = 4$ のらせんを比較すると、らせん幅比 $a/b = 1$ と $a/b = 3$ のらせんを比較したときのような大きな差が見られなかった。これは、らせんの最大ビーム幅の関係で、らせん幅比 $a/b = 1$ のらせんとらせん幅比 $a/b = 3$ の最外部のらせんの断面極二次モーメントの比が 20 倍以上の差があった一方で、 $a/b = 3$ と 4 の最外部の断面極二次モーメントの比は 1.40 程度の差にとどまったためである。したがって、らせん幅比 a/b が 3 以上において、変形に対する影響は小さいと考えられる。

応答測定は一般に Wi-Fi などによく使用されている 2.4 GHz 前後の周波数帯域を使用するため、スマートフォンの発する電波などの外部の影響を最小限にするために電波暗室内で行った。電波の発信と受信はベクトルネットワークアナライザとアンテナを使用して 2~3 GHz の範囲 200 点の計測点を測定した。発信側の電波は直線偏波、送受信アンテナ間距離は 195 mm、発信側のアンテナとデバイス間距離は 80 mm の条件に固定して計測を行った。また、アンテナの送受信アンテナは偏波方向が直行するように配置した。ビーム幅比一定 ($a/b = 1$) となるらせんを変形量 0、16.5、33、49.5、66 mm で固定し、変形量の異なるらせんにおいて測定を行った。らせんの伸びが大きいほど捻じれた偏波の強度が強くなっていることから、らせんの伸びの増加により偏光効果の増加が確認された。これにより、ラージスケールのらせんにおいても、マイクロスケールのらせんと光学応答が同様の傾向を示すことが確認された。

ビーム幅の比 a/b が 1、3、4 のものを 66 mm 伸ばした状態で計測を行った結果、2.5 GHz 以上において $a/b = 1$ のものに比べて $a/b = 3$ のものは電波強度が 10 dB 程度大きくなっていることが分かった。一方でビーム幅の比 $a/b = 3$ と 4 のらせんを比較したところ、大きな差は確認できなかった。これは、らせんの伸びの均一度に大きな差がなかったため、光学応答にも大きな差が出なかったと考えられる。以上から、ミリスケールのらせんにおいて、らせん形状が均一に近づくほど偏光効果の光学応答の特性が良くなることが実験値より確認された。

この取り組みではテラヘルツメタマテリアルの変形形状について着目し、ラージスケールで検証を行った。らせんの厚さ 0.5 mm、ビーム幅を線形変化させる条件下では、内周部ビーム幅に

対して外周部のビーム幅を 3 倍程度大きくするような表面形状が均一に近い変形と強度を両立するために適当であることを示した。また、均一な変形のらせんに近づくにつれて、偏光効果が大きくなることを実験値より確認した。以上のことから、マイクロスケールのらせんを切り紙の方法で製作することによりキラルメタマテリアルの性能向上が見込まれることが判明した。

間隔を大幅調整可能な微細回折格子構造

次に、MEMS スケールでの切り紙構造の検証を行った。ターゲットとなる構造は、回折格子である。回折格子は様々な分野で応用されている非常に一般的な光学素子である。特に、回折格子のピッチを調整することが可能なデバイスは、回折角や分散の度合いなどを変化させることが可能であり、1つのデバイスで異なる光学特性を得ることができる。したがって、回折格子のピッチを調整できるデバイスは、多くの光変調素子やセンサに応用することができる。しかし、これまでのピッチが調整可能な回折格子構造にはいくつかの問題があった。例えば、ピッチ可変回折格子構造が、変形を許容するためにゴムなどの弾性材料基板上に形成された報告例が多い。しかし、ピッチ調整のために基板を引っ張ると、弾性材料のポアソン比の分だけ、回折格子基板が引っ張り方向に対して垂直方向に歪む問題がある。回折格子の破断や歪みをもたらすので、回折格子内でピッチの変化にばらつきがでてしまい、光学特性を正確に調整することが難しくなる。さらにもう1つの問題として、1ピッチ当たりの変化率が 0.1%以下と比較的小さいことも課題である。デバイスの光学特性の変調の度合いは、調整できるピッチの範囲に依存するため、十分なピッチの変化率が必要である。これらの問題を解決し、格子間隔の変調方向以外に歪みを生じず、さらにピッチ調整可能な範囲が飛躍的に拡大した回折格子構造の実現が、デバイスの光学的性能を向上する上で重要である。

そこで本研究では、切り紙構造を用いたピッチ間隔を調整可能な回折格子構造を提案する。回折格子のピッチを大きく調整させるために、ナノスケールの切り紙蛇腹構造に着目した。提案構造の略図を示す。回折格子の間に高アスペクトの切り紙構造を導入することで、回折格子を歪ませることなく、ピッチ間隔を大きく調整することが可能である。切り紙構造は外力方向に細く、直交する厚さ方向には厚い蛇腹構造を連続させた高いアスペクト比を持つ構造である。本研究では、1ピッチ当たりの変化率を 100%以上大きくしても破断しないナノ幅切り紙蛇腹構造を、シミュレーションを用いて設計し、変形実験を行い製作した回折格子構造が、破断せずにピッチ変化率 100%以上を達成することが十分可能であるかを確認した。

提案構造の設計のために有限要素計算を行った。計算には有限要素法をベースとした総合シミュレーションソフトである COMSOL Multiphysics ver6.0 を使用した。厚さ $2\ \mu\text{m}$ のシリコン基板を用いてピッチ $3\ \mu\text{m}$ の回折格子を線幅 $0.3\ \mu\text{m}$ 、長さ $100\ \mu\text{m}$ の切り紙構造による蛇腹で接続するモデルを作成した。蛇腹構造のヒンジの部分には応力を逃がすために、外径 $0.9\ \mu\text{m}$ の角 R をつけた。回折格子の間に切り紙蛇腹構造を形成することで、蛇腹構造の外力方向にのみ変形する特性を活用し、回折格子に不要な歪みが作用せずに格子間隔を変化させることが可能である。また、回折格子のピッチ p 、切り紙構造の蛇腹の長さ L 、蛇腹の線幅 w 、基板の厚さ t を変化させ、変形時に構造に加わる応力分布、格子間隔の変化量、構造の自重によるたわみ量の計算を行った。

まず、 $p = 3\ \mu\text{m}$ 、 $L = 100\ \mu\text{m}$ 、 $w = 0.3\ \mu\text{m}$ 、 $t = 2\ \mu\text{m}$ の条件で構造の端を固定し外力として $20\ \text{nN}$ の荷重を加えた際の応力集中分布、格子間隔の変化量を計算した。次の図に応力分布、変形量の計算結果を示した。最も応力が集中する切り紙構造のヒンジの部分にかかる応力は $30\ \text{MPa}$ 以下であった。また、格子間隔の変化量は $4.8\ \mu\text{m}$ で変化率は 160% である。シリコンの降伏応力が $78.3\ \text{MPa}$ なので、提案構造は破断せずに格子間隔の変化率 100% を達成可能であると確認できた。

次に、蛇腹の長さ L と蛇腹の線幅 w を変化させた際の 1ピッチあたり変化率と構造に加わる最大応力の関係を求めた。まず、基板の厚さ t を $2\ \mu\text{m}$ 、蛇腹の長さ L を $100\ \mu\text{m}$ に固定し線幅 w を変化させた。また、外力は $20\sim 240\ \text{nN}$ 程度の荷重を加えた。結果を示した。蛇腹の線幅が細いほど変化率が大きく、破断することなく変化率 100% を達成可能な蛇腹の線幅 w は $0.3\ \mu\text{m}$ 程度である必要があると確認できた。次に、基板の厚さ t を $2\ \mu\text{m}$ 、蛇腹の線幅 w を $0.3\ \mu\text{m}$ に固定し長さ L を変化させた。また、外力は $8\sim 460\ \text{nN}$ 程度の荷重を加えた。結果を示した。蛇腹の長さが長いほど変化率が大きく、破断することなく変化率 100% を達成可能な蛇腹の長さ L は $50\ \mu\text{m}$ 以上である必要があると確認できた。

さらに、基板の厚さ t を変化させたときの構造の自重によるたわみを計算した。その結果、提案構造におけるたわみの最大変形量は $36.6 \times 10^{-5}\ \mu\text{m}$ と厚さに対して 0.002% であることがわかった。したがって、提案構造において自重によるたわみは無視できると確認できた。

また、提案した回折格子構造における各波長の光学特性を計算した。ピッチ $3\ \mu\text{m}$ の回折格子構造について、各波長における反射率を求めた。その結果、波長 $3094\ \text{nm}$ において反射率のピークを持つことがわかった。ピッチによって固有の反射率のピークを持っているので、ピッチを変化させることで反射する光の波長を変化させることが可能である。

構造の基板にはシリコンのトップ層、ガラスの中間層、シリコンのボトム層の3層からなるSOIウェハを使用した。トップ層の厚さは2 μm である。次にプロセスフローを示した。1インチ角に切り出したウェハを洗浄した後、表面にEBレジストを成膜し、電子線描画装置によるEBリソグラフィによって格子形状のパターニングを行った。その後、レジストをマスクとしRIEで表面のシリコンを垂直方向にエッチングした。

レジスト除去後の構造全体と、切り紙構造と回折格子構造の接続部分を拡大したSEM画像を示す。SOIウェハのトップ層に線幅0.3 μm 、厚さ2 μm の切り紙構造と、それらに接続される回折格子構造が精度よく製作できていることが確認できた。表掘り後、表面と裏面にフォトレジストを成膜し、フォトリソグラフィによって裏面のパターニングを行った。表面のコーティングは構造の保護のために行った。その後、レジストをマスクとしRIEで裏面のシリコンを垂直方向にエッチングした。裏面に製作した穴を用いて中間層のガラス層を、フッ酸蒸気エッチングによって除去した。その後レジストを除去することで、提案構造であるトップ層のみの中空構造を製作した。製作したデバイスの写真を示した。表面と裏面をそれぞれ示した。ウェハの中心に縦に6つ長方形の穴が空いているのが確認できる。そこに構造が両持ち梁のような形で作成されている。構造の周囲にはチップ化させるための溝の形成が確認できる。製作時に一部の構造が破断してしまったが平均35%ほどの構造を製作できた。これは切り紙構造の評価をするには十分な値である。また、設計寸法との誤差は9%以下であることを確認した。

デバイスの製作後、構造の変形量計測実験を行った。この実験により、製作した回折格子構造が変形可能かどうかや、構造が設計通り変形するかどうかの確認を行った。実験セットアップを示した。デバイスをアルミ板とネジで固定し、マニュアルプローバを用いて変形させた。プローバの針の先端に接着剤を付着させ、回折格子構造の側壁と接合することで、プローバのマイクロメータによって変形させることが可能とした。実験は防振台の上で行い、構造と針の位置合わせや接着剤の付着などの全ての作業は顕微鏡を用いて確認しながら行った。実験結果を示した。変形前、最大変形時、変形後の様子をそれぞれ示している。変形後、針が接続されていないのは変形の途中で接着剤が剥がれ、構造の弾性力によって変形前の状態に近づいたからである。画像下側の切り紙構造の蛇腹が接着剤を付着させた際に破壊してしまったことや、表面がエッチングしきれず、シリコンが残っていることから蛇腹の1本分の変形のみになっている。しかし、蛇腹が開いている角度を計測したところ38.4°となり、ピッチ変化率100%を達成することが十分可能であると確認することができた。以上の結果から、製作した構造は回折格子を歪めることなくピッチ変化率100%以上を達成することが可能な構造であるといえる。

本研究では、切り紙構造を用いたピッチ間隔を調整可能な回折格子構造を提案した。回折格子のピッチを大きく調整させるために、ナノスケールの切り紙蛇腹構造に着目した。回折格子の間に高アスペクトの切り紙構造を導入することで、回折格子を歪ませることなく、ピッチ間隔を大きく調整することが可能である。切り紙構造は外力方向に細く、直交する厚さ方向には厚い蛇腹構造を連続させた高いアスペクト比を持つ構造である。蛇腹の線幅を厚さで割ったアスペクト比は667%であった。本研究では、1ピッチ当たりの変化率を100%以上大きくしても破断しないナノ幅切り紙蛇腹構造を、シミュレーションを用いて設計し、SOIウェハ上にEBリソグラフィにより製作した。製作時に一部の構造が破断してしまったが平均35%ほどの構造を製作できた。これは切り紙構造の評価をするには十分な値である。また、設計寸法との誤差は9%以下であることを確認した。そして、変形実験を行い製作した回折格子構造が、破断せずにピッチ変化率100%以上を達成することが十分可能であることが確認できた。以上の結果より、本研究による構造は格子間隔の変調方向以外に歪みを生じず、さらにピッチ調整可能な範囲が飛躍的に拡大した回折格子構造といえる。エッチングの際に構造が破壊されないような急な温度変化を防ぐといった点や、表面を正確に掘りきるといった点は今後の課題であるが、エッチングする際にウェハを冷ますなどの対策によって改善できると思われる。

シート状のメタマテリアルを利用したセンサ応用の研究

また、発展的な展開として、シート状のメタマテリアルを利用したセンサを試作した。具体的には広範囲な土壌表面に設置できるシート型の電磁メタマテリアル吸収センサプローブを提案した。デバイスの寸法は有限要素法シミュレーションに基づいて最適化され、製造されたプロトタイプは、方位角に依存することなく高い吸収効率を実現した。また、土壌への設置後の時間経過に伴い、底面のMgが溶解し、デバイスは吸収から反射への機能転換を示した。さらに接地されたMg上にHAをコーティングすることによって、中性土壌において水分からのMgの僅かな保護機能によって、本デバイスは酸性土壌上と中性土壌上において吸収応答から反射応答への偏移時間に僅かな違いが確認された。これらの結果から、土壌pH評価において実用的な潜在能力を有する二次元メタマテリアルが本研究のアプローチで実現可能と分かった。

今後は、立体構造を形成することで実用性を有するセンサ応用などを探求する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0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 Nakashima Rihachiro, Takahashi Hidetoshi	4. 巻 365
2. 論文標題 Triaxial tactile sensor utilizing standing laser-induced graphene cantilevers on polyimide film	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 114919 ~ 114919
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2023.114919	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 Maruyama Kohei, Mizuna Miyako, Kosuge Takuya, Takeda Yuki, Iwase Eiji, Kan Tetsuo	4. 巻 14
2. 論文標題 Spiral Chiral Metamaterial Structure Shape for Optical Activity Improvements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1156 ~ 1156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi14061156	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 Sato Soma, Sakabe Ken, Onoe Hiroaki, Kan Tetsuo	4. 巻 2024
2. 論文標題 Electromagnetic Metamaterial Absorbers for Soil Property Evaluation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 999-1002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MEMS58180.2024.10439336	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 Ohara Kei, Nakashima Rihachiro, Takahashi Hidetoshi	4. 巻 2024
2. 論文標題 Pillar-Type Laser-Induced Graphene Airflow Sensor Assembled Via Kirigami / Origami Technique	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 2024 IEEE 37th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 813-816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MEMS58180.2024.10439590	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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 R. Nakashima, N. Nakamura, T. G. Sano, E. Iwase and H. Takahashi
2. 発表標題 LIG-based triaxial tactile sensor utilizing rotational erection system
3. 学会等名 The 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水名京, 岩瀬英治
2. 発表標題 同心円状の周期的な切り込みを持つ切り紙構造による面外変形の定量的評価
3. 学会等名 令和4年度 電気学会E部門 総合研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桐生 敦哉, 古澤 岳, 菅 哲朗
2. 発表標題 切り紙構造を用いた格子間隔可変な回折格子
3. 学会等名 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桐生 敦哉
2. 発表標題 変形後の形状が調整可能な切り紙キラルメタマテリアル構造
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 水名 京
2. 発表標題 同心円状の周期的な切込みを持つ切り紙構造による面外変形の特異性評価
3. 学会等名 日本機械学会マイクロナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 能任史也, 佐藤蒼馬, 尾上弘晃, 菅哲朗
2. 発表標題 スプリットリング共振器上のゲルの膨潤を利用した水分量センシング
3. 学会等名 第14回マイクロナノ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 谷原渉, 佐藤蒼馬, 尾上弘晃, 菅哲朗
2. 発表標題 土壌特性評価のための電磁メタマテリアル吸収体
3. 学会等名 第14回マイクロナノ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 佐藤 蒼馬, 坂部 拳, 尾上 弘晃, 菅 哲朗
2. 発表標題 土壌特性評価のための電磁メタマテリアル吸収体
3. 学会等名 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 K. Ohara, R. Nakashima and H. Takahashi
2. 発表標題 LIG wind velocity sensor based on insect sensory hairs
3. 学会等名 JCK MEMS/NEMS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 中島利八郎, 高橋英俊
2. 発表標題 斜立したLIGカンチレバーを用いた二軸触覚センサの設計における特性評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 中島利八郎, 中村凧, 佐野友彦, 岩瀬英治 高橋英俊
2. 発表標題 RES 構造と斜立したLIG カンチレバーを利用した三軸触覚センサ
3. 学会等名 第40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 2023年～2024年

1. 発表者名 小原慧, 中島利八郎, 高橋英俊
2. 発表標題 斜立したLIGカンチレバーを利用した風速センサ
3. 学会等名 第40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 2023年～2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

菅研究室HP http://www.ms.mi.uec.ac.jp 菅研究室Webサイト http://ms.mi.uec.ac.jp 岩瀬研究室Webサイト https://www.iwase-lab.amech.waseda.ac.jp/ 高橋研究室Webサイト http://www.takahashi.mech.keio.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
研究分担者	神田 夏輝 (Kanda Natsuki) (60631778)	国立研究開発法人理化学研究所・光子工学研究センター・研究員 (82401)	
研究分担者	岩瀬 英治 (Iwase Eiji) (70436559)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	
研究分担者	高橋 英俊 (Takahashi Hidetoshi) (90625485)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授 (32612)	

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