

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03868

研究課題名(和文)折り紙エレクトロニクス

研究課題名(英文)Origami electronics

研究代表者

岩瀬 英治 (Iwase, Eiji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70436559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、折り紙・切り紙構造を用いた伸縮可能なフレキシブル電子デバイスに関して、構造および学理の探求からself-folding技術の確立、デバイスへの実装・評価まで一貫して行った。構造および学理の探求に関しては、引張力による自己折りを起こす新規切り紙・折り紙構造を発見した他、大きな均一変形を有する切り紙構造を実現した。Self-folding技術の確立に関しては、厚い銅配線基板の大曲率自己折り上げおよび、熱溶融積層3Dプリンタを用いたself-folding後に弾性を有するヒンジを実現した。さらに、デバイスへの実装・評価に関しては、折り紙構造による自己形状認識デバイスを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、有機材料やゴム材料を用いた伸縮可能なフレキシブルデバイスの研究が盛んに行われている。これに対して、本研究は、硬く高性能な電子素子や電気配線用いながらも、折り紙構造や切り紙構造を用いることでデバイス全体としては伸縮変形を可能とすることで、伸縮耐性と電子デバイスとしての性能とを両立する研究である。研究成果として、電子デバイスに有用な新規の折り紙・切り紙構造を発見・考案した他、自己形状認識デバイスなどでの実証実験も行っており、学術的にも社会的にも意義のある成果を挙げている。

研究成果の概要(英文)：In this project about stretchable flexible electronic devices based on origami and/or kirigami structures, we have investigated the structures and theories, established self-folding technology, and implemented and evaluated the devices. For the investigation of the structures and theories, we found a novel kirigami and origami structure that self-folds under tensile force and realized a kirigami structure with a large uniform deformation region. For the establishment of self-folding technology, we achieved a self-folding of a thick copper conductor film with large curvature and realized an elastic hinge after self-folding by FDM-3D printing. Furthermore, for device implementation and evaluation, we have realized a self-shape recognition device with an origami structure.

研究分野：フレキシブル電子デバイス

キーワード：折り紙 切り紙 フレキシブルデバイス 機械的メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

近年、曲げられるディスプレイやセンサ、太陽電池などの研究が盛んに行われている。しかしながら、これらのデバイスの多くは曲げ変形は可能であるが、伸縮変形はできないのが実情である。その本質的な理由として、曲げ変形には圧縮ひずみも引張ひずみもかからない“中立面”が存在するのに対し(図1(a))、伸縮変形ではひずみがゼロの領域が全く存在しない(図1(b))ためであると我々は分析した。すなわち、発光部やセンサ部、配線部を薄く作り、基板の中立面に配置すれば曲げ変形可能なフレキシブルデバイスは実現できる。一方で、伸縮変形には中立面が存在しないため曲げ変形可能なフレキシブルデバイスを実現したアプローチでは解決できない。しかしながら我々は、曲げ変形可能なデバイスは実現が容易であることを逆手に取り、局所的には曲げ変形をすることで、デバイス全体としては伸縮させることができるのではないかと考えた。このような考えに基づくと、折り紙のような折り畳み変形を、“中立面を有した伸縮変形”と捉えることができる(図1(c))。これは切り紙の変形に関しても同様の捉え方ができる。本研究は、折り紙や切り紙を新たな解釈で捉えなおすことで、曲面への貼付や伸縮変形が可能なフレキシブル電子デバイスの設計の学理を新たに切り開くものである。

2. 研究の目的

本研究は、折り紙や切り紙の特性を機械工学的に捉えなおした独自のアプローチにより、曲面に貼付可能な電子デバイスおよび伸縮可能なフレキシブル電子デバイスの設計論の体系化から実際のデバイス実証まで行うことを目的としている。折り紙や切り紙では、素材自体には伸縮性有していない紙を用いて伸縮変形を実現している。この特性を、“局所的な曲げ変形によるデバイス全体の伸縮変形”と捉えたり、マクロな構造・形状により本来単一の素材では持ちえない機械物性(ヤング率や曲げ剛性の異方性、負のポアソン比など)を有することができるという点から“機械的メタマテリアル”と捉えたりすることができる。これらの基礎学理から、実際に曲面に貼付可能な電子デバイスや伸縮可能なフレキシブルへの応用までを一貫して行うことにより、「折り紙エレクトロニクス」と銘打った新たな学術領域の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、前述した「折り紙エレクトロニクス」と銘打った新たな学術領域の確立のために、3つの大きな柱に分けて研究を遂行する。1つ目の柱は、「(1) 折り紙・切り紙構造および学理の探求」であり、折り紙・切り紙構造に関して、電子デバイスとして有用な新規構造の探求やその構造の理論的解析を行うものである。2つ目の柱は、「(2) 折り紙デバイスのための self-folding 技術の確立」であり、折り紙エレクトロニクスの実現のために技術的に重要な課題である薄膜に対して複数の折り線のある self-folding (自己折り上げ) 技術を検討する。3つ目の柱は、「(3) フレキシブル電子デバイスへの実装・評価」であり、実際に折り紙・切り紙構造を用いた電子デバイスを作製し、繰り返し伸縮耐性や、折り紙・切り紙構造に特異的な特徴の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 折り紙・切り紙構造および学理の探求:

① 引張力による自己折りを起こす新規切り紙・折り紙構造の発見と形状探索:

微細な折り紙構造を有するデバイスにおいて、「折り上げ」の工程が課題となる場合が多くある。そこで、図2に示すようなデバイス全体に引張力を加えると、局所的な面外座屈

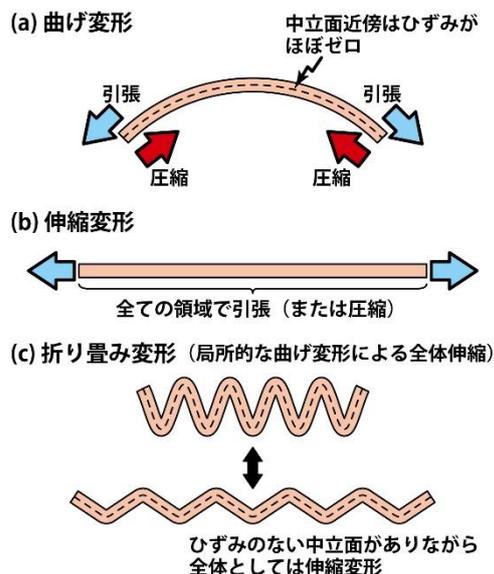


図1 本研究のコアとなるアイデア
曲げ変形(a)と伸縮変形(b)の違い、および
本研究で提案する折り畳み変形(局所的な曲
げ変形)を利用した伸縮(c)

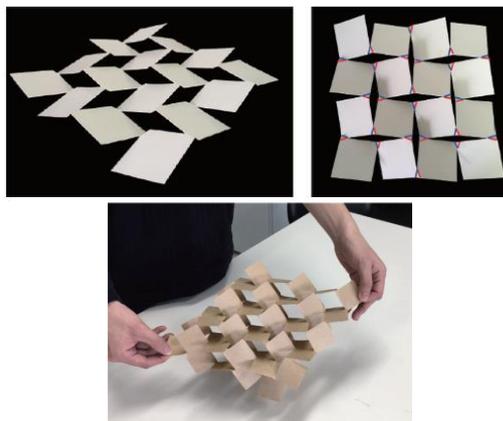


図2 引張りによって立体変形する切り紙。
下段は積層構造。

により自己折りを起こす切り線と折り線を有する構造を提案した。変形勾配テンソルの特異値を用いて変形を解析することで、折り線の配置(角度)を調節することで全体変形の挙動が変化し2方向伸長、伸長と収縮の混合、2方向収縮の挙動が変化できる材料が作れることを示した。さらに、この切り紙構造を複層化させる新規構造を提案し、実験を通して自己折りが安定して発生することを確認した(図3)。

従来の自己折りが、複層構造を必要とし駆動部が大きく複雑にならざるを得なかったのに対し、本構造を適用することで2方向に伸縮可能な立体構造を引張り力のみで引き起こすことができるため、デバイス製作上のアドバンテージが期待できる。

② 切り紙パターンの工夫による大きな均一変形を有する切り紙構造の実現：

切り紙構造も、折り紙構造と同じく「素材自体には伸縮性有していない基板を用いて伸縮変形を実現」できる構造である。図4(a)は日本では「七夕飾り」として知られている従来最も一般的な切り紙構造であるが、これは伸長した際に、両端部の切り込みは開かない領域があるなど、切込みの開口量に着目すると中央部の一部のみが均一な変形をしており、広域な不均一変形領域を有する。これに対し、切り紙構造における両端構造を工夫することで、均一変形領域を増加させる、新たな切り紙構造について検討した。具体的には、図4(b),(c)に示すように切り紙構造の両端の領域を伸長時に長方形から台形に変形させることで均一変形領域を増加させる方法を提案した。両端部の分離線の長さの最適化や、均一変形領域の評価を行った。図5は、ひずみ $\epsilon = 0.5$ のときに均一変形領域が大きくなるように設計した切り紙構造である。ひずみが設計値より小さな $\epsilon = 0.3$ の際には、あまり均一に変形していないが、設計値の $\epsilon = 0.5$ の際に均一変形領域(図4の緑色領域)が大きくなっているだけでなく、設計値より大きなひずみ $\epsilon = 0.9$ でも大きな均一変形領域が得られることが分かった。

これらを基に、図6に示すように、フィルム状の電子基板に対し、提案した両端構造を持つ切り紙構造を適用した基板に無機のLEDを実装したLEDアレイを製作した。図6(b)に示すように通常の切り紙構造では、伸長した際にLEDの配置が歪むのに対し、図6(c)に示すように両端構造を持つ切り紙構造ではLEDの配置が歪むことなく均等なまま伸長できていることが見て取れる。新たに発見・提案した切り紙構造は、伸縮可能なセンサアレイやディスプレイデバイスなど、伸長した際にも素子間隔が均等な電子デバイスに対して非常に有効な構造である。

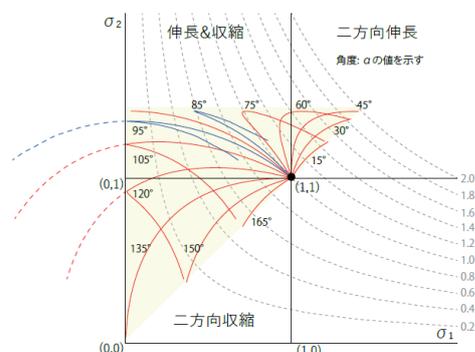


図3 直交2方向の主ひずみ値が(伸長・伸長)(伸長・収縮)(収縮・収縮)まで変化する

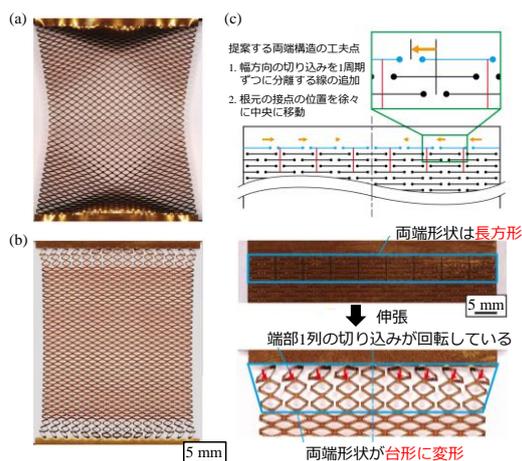


図4 (a) 従来の切り紙構造 (b) 均一変形領域を拡大するための両端部構造工夫を設けた切り紙構造 (c) 両端構造の詳細

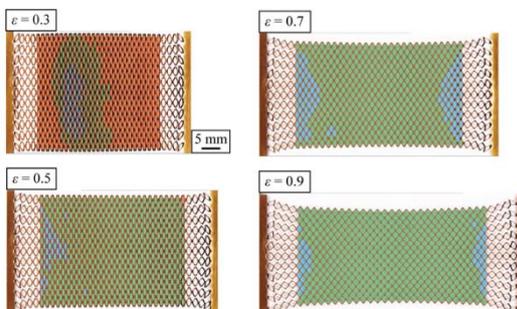


図5 均一変形領域(緑色)の割合の変化。ひずみ $\epsilon = 0.5$ での設計において $\epsilon = 0.9$ でも大きな均一変形領域が得られている。

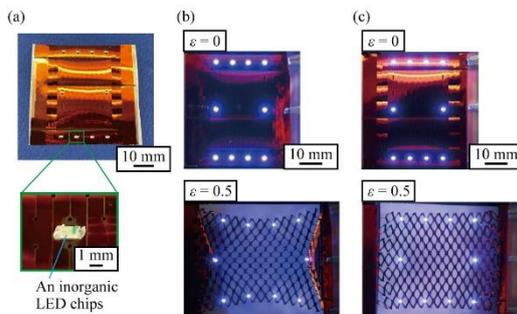


図6 (a) 製作したLEDアレイの写真。LEDアレイを伸長させた際の写真：(b) 通常の切り紙構造を用いたLEDアレイ、(c) 提案した両端構造を持つ切り紙構造を用いたLEDアレイ。

(2) 折り紙デバイスのための self-folding 技術の確立:

① 厚い銅配線基板の大曲率自己折り上げ:

「折り紙エレクトロニクス」において、「折り上げ」工程の重要性は前にも述べたが、電子デバイスであることを考えると、 $10\ \mu\text{m}$ 程度の厚さの銅配線を有していることが想定される。薄膜を自己折り上げする self-folding 技術はこれまでも研究されているが、従来研究からすると、「 $10\ \mu\text{m}$ 程度の厚さの銅配線」は非常に厚く硬いため self-folding が困難な対象である。

そこで、 $10\ \mu\text{m}$ 程度と厚い銅配線を有する電子基板を大曲率で self-folding するためのヒンジ構造について設計した。具体的には、図 7 に示すように、ヒンジを切れ込みを設けた構造とし、梁のねじり変形を用いることで、大曲率自己折り畳みおよび繰り返し変形耐性を実現した。厚さ $10\ \mu\text{m}$ の銅箔と厚さ $12\ \mu\text{m}$ の熱収縮するポリオレフィンシートを用いて self-folding の評価を行った。まず、切れ込みヒンジ構造における切れ込みピッチ p 、切れ込み長さ l 、切れ込み数 n を変化させながら曲率を計測した。その結果、図 8 に結果の一部を示したように、切れ込みピッチ p を小さく、切れ込み長さ l を長くすると、切れ込み数 n を少なく設計大曲率での自己折り畳みを実現できることを明らかにし、最大で $14\ \text{mm}^{-1}$ の大曲率自己折り畳みを実現した。また、実験により 3000 回以上の繰り返し変形耐性を持つことを確認した。さらに LED を実装したデバイスを製作し、図 9 に示すように、伸縮電子デバイスとして利用可能であることを実証した。

② 熱溶解積層 3D プリントを用いた self-folding 後に弾性を有するヒンジの実現:

Self-folding を実現する別の方法として、熱溶解積層 (Fused Deposition Modeling, FDM) 方式の 3D プリントを用いた self-folding の検討を行った。FDM-3D プリントは、フィラメントを加熱し半熔融した状態でヘッドを動かして造形するため、加熱温度やヘッドの送り速度により、3D プリントされた造形物に残留応力が残り、3D プリントされた造形物をお湯に浸漬するなど加熱すると収縮するなど変形することが知られており、これを用いた self-folding も報告されている。

しかしながら、従来の技術では self-folding 後のヒンジは折れ上がった状態で硬く固定されてしまい、self-folding 後に折り畳み変形をさせることができない。そこで、self-folding 後に弾性を持つヒンジを実現するために、図 9(a) に示すように self-folding するヒンジと self-folding 後にも柔らかく屈曲機能を持つエラストマヒンジから構成される複合ヒンジ構造を考案した。

まずに複合ヒンジの長さを変えることで、自己折り畳み角度の制御性の評価を行った。

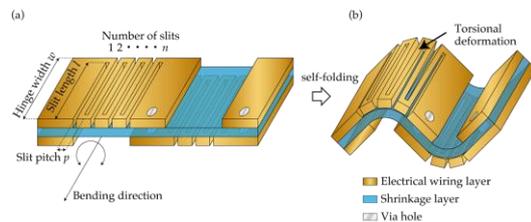


図 7 切れ込み構造を適用したヒンジおよび、ヒンジ幅 w 、切れ込み長さ l 、切れ込みピッチ p 、切れ込み数 n の定義

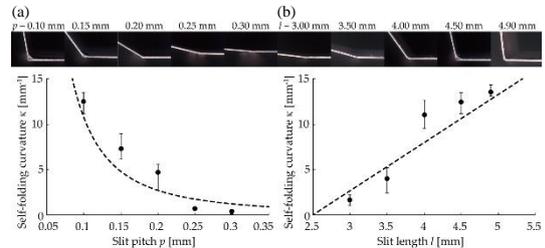


図 8 (a) 切れ込みのピッチおよび (b) 切れ込み長さに対する曲率 (ヒンジ幅および切れ込み数は (a) (b) 共に $w = 5.0\ \text{mm}$ および $n = 2$ 、(a) における切れ込み長さは $l = 4.5\ \text{mm}$ 、(b) における切れ込みピッチは $p = 0.1\ \text{mm}$ で固定)

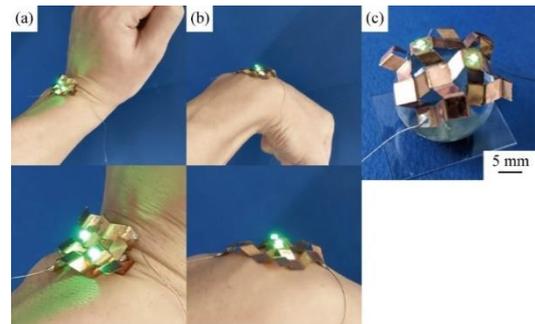


図 9 曲面に貼付した押し出しミウラ折り構造

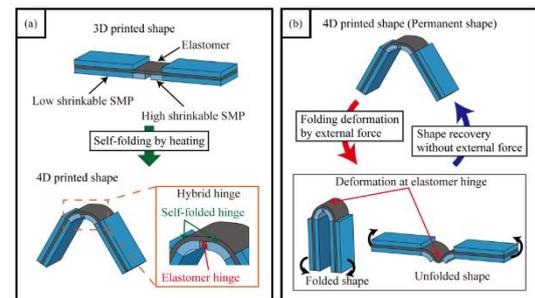


図 10 複合ヒンジ構造を有する FDM-3D プリント self-folding の概略図

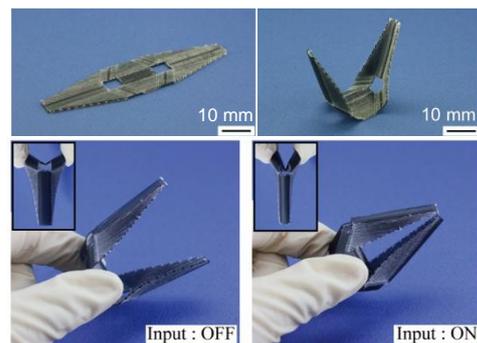


図 11 (上段) self-folding 前後 (下段) 荷重を加える前後の折り紙グリッパの写真

ヒンジ長さを変えることで、山折りでは自己折り畳み角度を 32°から 194°、谷折りでは 20°から 204°まで角度を制御できた。次に、提案するヒンジを有する試験片が self-folding 後に広い弾性域を持つことを確認するために、試験片に対して繰り返しの折り畳み変形をさせた。また、500 サイクルの繰り返しの折り畳み変形試験後、折り畳み角度は試験前の 99%まで回復したため、self-folding 後もヒンジに弾性があることを確認した。さらに、複数の複合ヒンジを有する折り構造としてミウラ折り構造およびコンプライアントメカニズムを利用した折り紙グリッパ (図 11) を製作し、応用可能性を示す実証実験を行った。

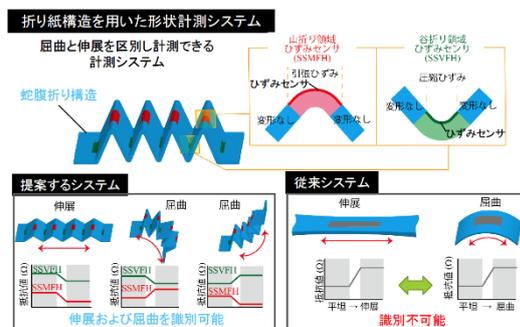


図 12 自己形状認識折り紙デバイス概念図

(3) フレキシブル電子デバイスへの実装・評価:

折り紙・切り紙構造の電子デバイスへの実装・評価は(1)②および(2)①においても行っているが、その成果に関しては各項で記載したため、本項では上記以外の成果について記載する。

① 折り紙構造による自己形状認識デバイス:

シート状のデバイスを対象の表面に直接貼り付け、その形状や変形を計測するシステムはモーションキャプチャや寸法測生体組織のセンシングなど様々な分への応用が期待されている。シート状の形状測システムはこれまでに数多く報告されているが、中でもひずみセンサを用いたシステムは非常に作が簡便であるため多くの注目を集めている。しかしながら、従来のひずみセンサによるシート状の形状測システムでは、計測する対象が伸展した場合と屈曲した場合の変形を区別して計測することができず、正確な形状計測が不可であるため、その応用範囲を狭める大きな要因となっていた。

そこで、図 12 および図 13 に示すように折り紙構造を自己形状計測シートデバイスに応用することで、従来のシステムでは計測できなかった対象も計測可能となる形状計測シートデバイスを作製した。まず、提案するデバイス上で用いる SWCNTs の形成を行い、ひずみセンサを作製した。作製した SWCNTs ひずみセンサに引張ひずみを加えることでゲージ率を計測し、ひずみ ϵ が 0~0.05 の領域でゲージ率が $K = 6.44$ となることを確認した。また SWCNTs ひずみセンサは 10000 回を超える繰り返しの折り曲げによって機能を大きく失わないことが確認された。さらに図 14 に示すように SWCNTs ひずみセンサをフレキシブル折り紙シートに配置することで、自己形状計測シートデバイスを形成し、その形状を計算機による描画システムで再構築するシステムを構成した。ヒンジが 5 つ存在する蛇腹構造を採用し、結果としてソフトウェアによる形状の再構築で算出された伸展量とデバイスの形状の画像から算出した伸展量の差は 5%未満となり、このシステムにより形状認識が実現できることが示された。

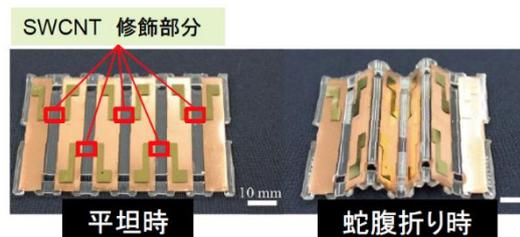


図 13 自己形状認識折り紙デバイスの外観

	画像	再構築形状	r	r'	λ'
I. $\phi = 24$ mm	伸展なし		15.2	14.4	1.00
	伸展付加		15.2	14.3	1.29
II. $\phi = 33$ mm	伸展なし		19.7	19.9	1.00
	伸展付加		19.7	19.5	1.35

Note. r = 寸法により決定された曲率半径 (mm); r' = 描画ソフトから取得した曲率半径 (mm); λ' = 描画ソフトから取得した伸展量 (-); Scale bars = 10 mm

図 14 自己形状認識デバイスによる形状認識の実証実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Taniyama Hiroki, Iwase Eiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Design of a Kirigami Structure with a Large Uniform Deformation Region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 76 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi12010076	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 Yamamura Shunsuke, Iwase Eiji	4. 巻 203
2. 論文標題 Hybrid hinge structure with elastic hinge on self-folding of 4D printing using a fused deposition modeling 3D printer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 109605 ~ 109605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2021.109605	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 Mori Tomoki, Onoe Hiroaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Shape-Recognizable Origami Sheet Device With Single Walled Carbon Nanotube Strain Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Microelectromechanical Systems	6. 最初と最後の頁 234 ~ 242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JMEMS.2020.3047774	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 Taniyama Hiroki, Iwase Eiji	4. 巻 10
2. 論文標題 Design of Rigidity and Breaking Strain for a Kirigami Structure with Non-Uniform Deformed Regions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 395 ~ 395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi10060395	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35件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 仙福孝太郎, 館知宏
2. 発表標題 自己折りする剛体切り紙
3. 学会等名 日本折紙学会 第29回折紙の科学・数学・教育研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunsuke Yamamura, Eiji Iwase
2. 発表標題 4D Printing with Elastic Hinge Using Shape Memory Polymer and Elastomer via Fused Deposition Modeling 3D Printer
3. 学会等名 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Taniyama, Eiji Iwase
2. 発表標題 Kirigami Structure with a Large Uniform Deformation Region
3. 学会等名 the 34th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Mori, Hiroaki Onoe
2. 発表標題 Shape-Measurable Device based on Origami Structure with Single Walled Carbon Nanotube Strain Sensor
3. 学会等名 the 34th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Uchida, Hiroki Yasuga, Eiji Iwase, Hiroaki Onoe
2. 発表標題 Metal Wiring on Flexible Origami Structure for Stable Resistance Value Against Deformation
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science (microTAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Yasuga, Atsushi Eda, Kai Suto, Tomohiro Tachi, Eiji Iwase
2. 発表標題 An Origami-Structured Flexible Electronic Substrate with Faces Parallel to Target-of-Attachment Surfaces
3. 学会等名 The 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Uchida, Hiroki Yasuga, Tomohiro Tachi, Eiji Iwase, Hiroaki Onoe,
2. 発表標題 Self-Folding Acute-Angel Origami driven by Surface Bending Force
3. 学会等名 The 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内田拓也, 尾上弘晃
2. 発表標題 高粘度液体をサポート材に用いた刺激応答性ゲルの3次元印刷
3. 学会等名 日本機械学会 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Nojiri, Eiji Iwase, Michinao Hashimoto
2. 発表標題 Self-Folding of 3D Printed Shape Memory Polymers with High Degree of Shrinkage
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Nojiri, Eiji Iwase, Michinao Hashimoto
2. 発表標題 Self-Assembly of Shape Memory Polymer Printed by Fused Deposition Modeling
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.iwaselab.amech.waseda.ac.jp/ https://origami.c.u-tokyo.ac.jp http://www.onoe.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	尾上 弘晃 (Onoe Hiroaki) (30548681)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	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	舘 知宏 (Tachi Tomohiro) (50586740)	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授 (12601)	

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			
シンガポール	シンガポール工科大学			