

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20377

研究課題名(和文) 可逆的アクチュエーションによって自律的に駆動する印刷紙ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of a printed paper robot driven autonomously by reversible actuation

研究代表者

重宗 宏毅 (Shigemune, Hiroki)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40822466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：申請者は簡便な構造形成手法として、インクジェット印刷によって紙が自律的に折れ曲がる手法を提案した。本研究では、湿度応答性材料をインクに混合することで、湿度変化によって可逆的に駆動するアクチュエータを開発した。構造形成を促進するインクに高湿度応答性材料を混合することによって繊維間に湿度応答性材料をドーブした。結果的に、自律構造形成した紙を変化する湿度環境下に置くことで可逆的に駆動することに成功した。さらに、湿度応答性材料を混ぜ複数の溶液を同時に印刷することで紙の自動折曲に順序を付けることに成功した。これまで難しかった袋折りやスライドロック機構などのより複雑な構造体の自動折曲が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3Dプリンタやオープンソースハードウェアなど、機械要素・電子要素を簡便に作製する手法が台頭している。本研究では、湿度応答性材料をインクに混合することで、湿度変化によって可逆的に駆動するアクチュエータを開発した。可逆的アクチュエータの開発は、1枚の紙に構造とアクチュエータを同時に印刷して人の手を借りずに動く印刷紙ロボットの開発に繋がる。湿度応答性も塩の濃度やインク量によって調整できるため、印刷によってセンサ値や制御量をプログラムできる。従来エレクトロニクスが行ってきたものと同等またはそれ以上の情報処理を、湿度応答といった物理現象によって代替する点も情報工学の面から学術的創造性が高いと考える。

研究成果の概要(英文)：As a simple self-folding method, the applicant proposed a method in which paper self-folds by inkjet printing. In this study, a humidity-responsive material was mixed with solution to develop an actuator that is reversibly driven by humidity changes. Humidity-responsive materials were doped between the fibres by mixing highly humidity-responsive materials into the solution, which promotes self-folding. As a result, the self-folded paper was successfully driven reversibly by placing it in a changing humidity environment. Furthermore, by simultaneously printing multiple solutions mixed with humidity-responsive material, the paper was successfully ordered into self-folding. The self-folding of more complex structures such as bag-folds and slide-lock mechanisms, which had previously been difficult, is achieved.

研究分野：機械工学

キーワード：ソフトロボット Electronics free robot スマートマテリアル 折り紙技術 ペーパーメカトロニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、持続可能な社会の実現に向けた研究が多く進められている。特に環境から得られる自然エネルギーを動力源とするデバイスの開発はエネルギーハーベスト技術として大いに期待されている。その中でも湿度応答型アクチュエータは自然環境中の湿度変化によって駆動し、持続可能な社会の実現への貢献が期待されている。応用例にはスポーツウェア、カーテンなどの生活用品が挙げられる。我々は従来研究にて紙を自律的に構造形成させる技術を開発した。インクを紙に印刷することで自律的に立体構造を形成できる。本研究ではインクに吸湿性材料を添加することで湿度応答型アクチュエータの開発を試みた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、紙の自律構造形成を用いた湿度応答型アクチュエータの開発である。紙の自律構造形成に用いるインク中に吸湿性材料を混合することによって紙に湿度応答性を与える。湿度変化によって紙の自律構造形成が繰り返され、湿度応答型アクチュエータとなる。湿度変化によって紙の自律構造形成はどの程度変化するのは先行研究でも明らかになっていない。本稿では湿度応答型アクチュエータが受ける湿度影響を構造形成角度の変化によって調査した。また、湿度変化によって発生する紙のたわみの影響を無くす調査方法として、曲率変化での調査も行った。この2つの調査によって湿度変化が紙の自律構造形成にどのような影響をもたらすのかを明らかにした。

### 3. 研究の方法

図1に紙の自律構造形成のメカニズムを示す。紙がインクを線状に印刷した箇所を谷折りにして自律的に折れ曲がる。印刷した線に沿って紙が折れ曲がるため、直感的に立体構造を形成できる。インクジェットプリンタによって狙った箇所に印刷することで、多様な立体構造を迅速に作製できる特徴を持つ。構造形成時間にはサイズ依存性があり、10 cm四方の紙ではおおよそ5分で構造形成が完了する。

この自律構造形成を引き起こす薬液に吸湿性材料を添加することによって湿度応答型アクチュエータの開発を試みた。吸湿性材料の湿度応答を利用することで、湿度変化に伴う自律構造形成の可逆運動を可能にする。湿度を上げることで構造形成は元の状態に戻り、湿度を下げることで構造形成が促進する。



図1：紙の自律構造形成メカニズム

### 4. 研究成果

評価測定のために作製したアクチュエータを図2に示す。図2左に示す角度変化測定では、印刷箇所の中央とアクチュエータの両端の3点がなす角度を測定し、 $180^\circ$ からその角度を差し引いた起き上がり角度を結果に用いた。図2右に示す曲率変化測定では、曲率半径を測定し曲率を算出した。印刷するインク濃度は低濃度と高濃度の2種類であり、湿度は約20~50%で変化するように調整した。湿度の調整についても自動湿度調整機を開発し、2時間程度で $20 \pm 5\%$ 、 $50 \pm 5\%$ 内に収まるように密閉容器内を調整する手法を開発した。

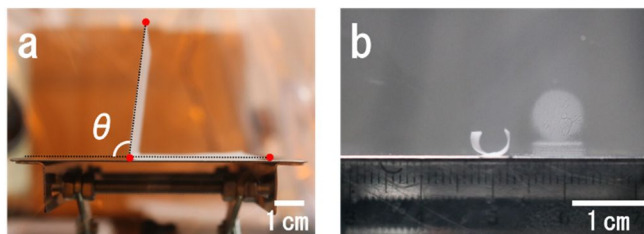


図2：(左)角度測定の様子 (右)曲率測定の様子

#### (1) 角度変化による湿度応答性能評価

図3に角度変化による測定結果を示す。図3左上に示す低濃度の場合、印刷した直後から構造形成が始まった。その後、湿度が20%となる120分後までの間、角度は $154^\circ$ まで増え続けた。湿度が上がら始め、50%となる240分後までの間では、角度は $135^\circ$ まで減った。このことから、このアクチュエータは湿度に応答していると言える。しかし、150~180分後、湿度の上昇中に角度が一時的に増加した。これは、湿度の上がり幅に対して応答した分の構造形成が終わり、湿

度に関係ない構造形成が再開したためだと考えられる。240 分後以降の湿度変化にも同様な角度変化が見られた。

図 3 左下に示す高濃度の場合、最初の 120 分間で角度は  $10^\circ$  程度増加した。120 分後から 240 分後までの湿度上昇中に、アクチュエータは印刷面に対して山折りに曲がった。この状態の角度は負として処理し、 $-3^\circ$  まで減少した。240 分後から再び湿度が下がると角度は  $54^\circ$  まで増えた。360 分後以降の湿度上昇では、角度は  $11^\circ$  まで減ったが逆方向までは曲がらなかった。0~240 分後と 240~480 分後の角度変化を比較すると、0~240 分後の変化量が小さいことが分かる。これは、高濃度での構造形成に時間がかかり、最初の 120 分間で構造形成が完了していなかったからだと考察できる。今後は低濃度と高濃度で異なる自律構造形成時間の影響も考慮し、さらに詳細な湿度応答性の調査を行う。

## (2) 曲率変化による湿度応答性能評価

角度変化測定では紙のたわみを無視している。紙も湿度応答性材料のため、湿度変化によってたわみ量が変形し角度測定に影響を与える。紙のたわみと分離して湿度応答性能を評価するため、曲率変化による測定を行った。図 3 右に曲率変化による測定結果を示す。低濃度と高濃度どちらの場合でも湿度が下がると曲率は増え、湿度が上がると曲率は減った。これは角度変化の測定結果と対応する。図 3 右上に示す低濃度の場合、曲率は  $4.0 \sim 4.6 \text{ cm}^{-1}$  付近で増減を繰り返した。図 3 右下に示す高濃度の場合、角度変化測定の時と同様に、120~240 分後の湿度上昇中、アクチュエータは印刷面に対して山折りに反った。この状態の曲率は負として処理し、 $-0.7 \text{ cm}^{-1}$  まで減少した。また、240~480 分後の曲率は  $2.5 \sim 3.4 \text{ cm}^{-1}$  の幅で増減した。これは低濃度と比べ変化量が大きく、高濃度の方が小さい湿度変化で大きい曲率変化を起こし、湿度応答性材料を添加することによって湿度応答性能を向上することに成功した。

以上の様に、紙と塗布した薬液の湿度応答性を利用することで、印刷によって作製される湿度応答型アクチュエータの開発に成功した。図 4 に図 3 の測定に用いた実際の実験中の様子を示す。角度測定、曲率測定どちらの場合も除湿によって構造形成が促進され、加湿によって逆進し、これらを可逆的に駆動することに成功した。今後はより詳細な駆動性能の調査による制御性の向上と、具体的な応用例に向けた構造の設計を進める。

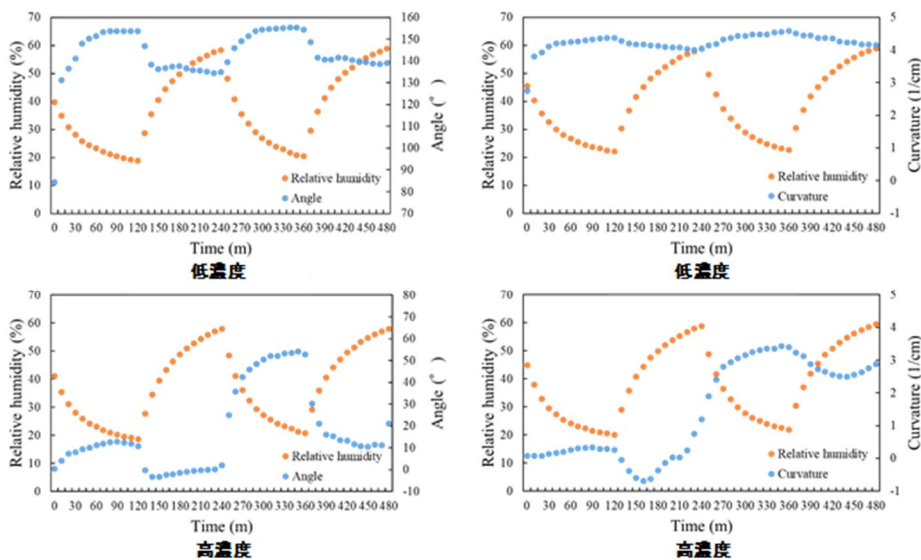


図 3 : (左上) 低濃度時の角度測定結果 (左下) 高濃度時の角度測定結果  
(右上) 低濃度時の曲率測定結果 (右下) 高濃度時の曲率測定結果

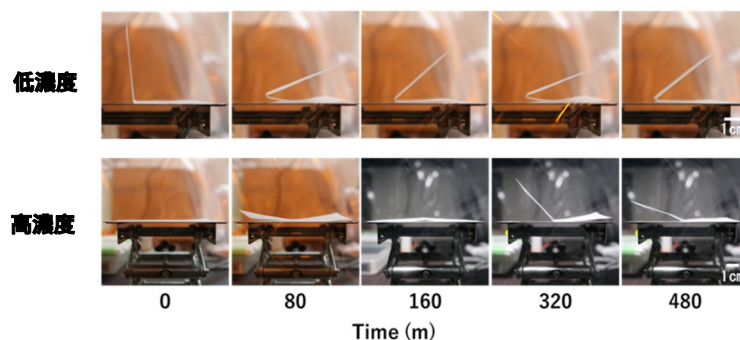


図 4 : 湿度応答型アクチュエータ駆動の様子、角度測定時 (上) 低濃度 (下) 高濃度

#### 国際学術論文誌

1. Fukatsu, Y., & Shigemune, H. (2022). Development of Self Folded Corrugated Structures Using Automatic Origami Technique by Inkjet Printing. *Advanced Intelligent Systems*, 2100260.
2. Shigemune, H., Maeda, S., Iwase, E., Hashimoto, S., Sugano, S., & Sawada, H. (2021). Programming Stepwise Motility into a Sheet of Paper Using Inkjet Printing. *Advanced Intelligent Systems*, 3(1), 2000153.

#### 著書

1. Maeda, S., Shigemune, H., & Sawada, H. (2022). Self-Actuating and Nonelectronic Machines. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 34(2), 249-252.

#### 招待講演

3. 重宗 宏毅、紙の自律構造形成技術にて作製した 折り紙構造体のメカニクス、Dynamics and Design Conference 2021 (D&D2021) 2021-09.
4. 重宗 宏毅、インクジェットプリンタを用いた折り紙メカトロニクスの設計法、日本印刷学会 第145回研究発表会 2021-07.
5. 重宗 宏毅、機能的マテリアルとソフトロボットの知能化への展開、応用物理学会秋季学術講演会講演 2019-09-04.

#### 国際学会

1. Hiroki Shigemune, Hideyuki Sawada, Shingo Maeda, Behavior of active paper in different humidity conditions, International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021-12.
2. Naoya Waragai, Hiroki Shigemune, Control of ink amount to reduce resistance of inkjet-printed wiring, 2nd Green Electronics International Research Center Seminar, 2022-02-25.

#### 国内学会

1. 高島 峻、重宗 宏毅 (芝浦工大) 紙の自律構造形成メカニズムに基づいたアクチュエータの湿度応答性能評価、ROBOMECH2022 2022-06-03.
2. 深津 侑希、重宗 宏毅 (芝浦工大) インクジェット印刷による紙の自己強化に紙の厚薄さが与える影響調査、ROBOMECH2022 2022-06-03.
3. 成富 大智、細矢 直基、重宗 宏毅 (芝浦工大) 自己折り畳み切り折り紙ハニカム構造の復元力調査、ROBOMECH2022 2022-06-03.
4. 松下 純士、松本 睦希、阿部 圭太、桑島 悠、重宗 宏毅 (芝浦工大) Electrowetting on dielectric を用いた液体輸送システムによる紙の自律構造形成、ROBOMECH2022 2022-06-03.
5. 山下 翔嗣、重宗 宏毅学 (芝浦工大) 円形切り紙構造の提案と応力解析による破断条件の調査、ROBOMECH2022 2022-06-03.
6. 西村 一紀、細矢 直基、重宗 宏毅 (芝浦工大) 折紙展開機構を利用したスピーカーの検討、電子情報通信学会 2022-03-16.
7. 星野 大地 (芝浦工大) 武者 茜、澤田 秀之 (早大)、重宗 宏毅 (芝浦工大) マーカートラッキングを用いた切り紙レザバールコンピュータの検討-データ取得幅と切り紙動作速度による学習性能差の評価-、情報処理学会 2022-03-03.
8. 深津 侑希、Vito Cacucciolo (École polytechnique fédérale de Lausanne)、重宗 宏毅 (芝浦工大) 印刷パターンによる剛柔さを併せ持つ波状自己強化構造の解析、計測自動制御学会 2021-12-26.
9. 星野 大地 (芝浦工大) 武者 茜 (早大) 西村 一紀 (芝浦工大) 澤田 秀之 (早大) 重宗 宏毅 (芝浦工大) 画像解析を用いた切り紙 Physical Reservoir Computing の検討、ROBOMECH2021 2021-06-29
10. 森脇 航、重宗 宏毅 (芝浦工大) 紙の自律構造形成メカニズムにおけるインク浸透の観察と評価、情報処理学会 第83回全国大会 2021-03-19.
11. 藁谷尚哉、重宗 宏毅 (芝浦工大) インクジェットプリンタによる安定した印刷配線形成手法の検討、日本電子材料技術協会 第57回秋期講演大会 2020-12-04

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Fukatsu Yuki, Shigemune Hiroki	4. 巻 6
2. 論文標題 Development of Self Folded Corrugated Structures Using Automatic Origami Technique by Inkjet Printing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 2100260 ~ 2100260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aisy.202100260	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 Shigemune, H., Maeda, S., Iwase, E., Hashimoto, S., Sugano, S., & Sawada, H	4. 巻 3
2. 論文標題 Programming Stepwise Motility into a Sheet of Paper Using Inkjet Printing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 2000153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aisy.202000153	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 Naoki Hashimoto, Hiroki Shigemune, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda and Hideyuki Sawada	4. 巻 15
2. 論文標題 Self-Assembled 3D Actuator Using the Resilience of an Elastomeric Material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2019.00152	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 Masato Yamada, Hiroki Shigemune, Shingo Maeda and Hideyuki Sawada	4. 巻 9
2. 論文標題 Directional and velocity control of active droplets using a rigid-frame	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 40523-40530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9RA07789H	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8件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 重宗宏毅
2. 発表標題 インクジェットプリンタを用いた折り紙メカトロニクス設計法
3. 学会等名 日本印刷学会 第145回研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重宗宏毅
2. 発表標題 紙の自律構造形成技術にて作製した 折り紙構造体のメカニクス
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Shigemune
2. 発表標題 Behavior of active paper in different humidity conditions
3. 学会等名 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高島 峻
2. 発表標題 紙の自律構造形成メカニズムに基づいたアクチュエータの湿度応答性能評価
3. 学会等名 ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森脇航
2. 発表標題 紙の自律構造形成メカニズムにおけるインク浸透の観察と評価
3. 学会等名 情報処理学会 第83回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藁谷尚哉
2. 発表標題 インクジェットプリンタによる安定した印刷配線形成手法の検討
3. 学会等名 日本電子材料技術協会 第57 回秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Yamada, Hiroki Shigemune, Hideyuki Sawada
2. 発表標題 Stability Analysis of Self-Folding Sheets on Water Surface
3. 学会等名 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重宗宏毅, 前田真吾, 澤田秀之
2. 発表標題 機能的マテリアルとソフトロボットの知能化への展開
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

紙のソフトロボット 構造や動きの印刷に成功  
<https://www.shibaura-it.ac.jp/news/nid00001333.html>

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