

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18702

研究課題名（和文）変形加工による「うごく」超微細機能表面の創成

研究課題名（英文）Development of forming process for micro actuation surfaces

研究代表者

津守 不二夫（TSUMORI, Fujio）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：10343237

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：微細表面パターンによる機能表面は広く応用されている。超撥水・超親水表面や無反射構造は工業的な応用例として既に一般的である。これらの機能表面は「静的な」（すなわち固定された）微細構造により実現されている。本研究では、機能を「動的に」変化させるため、微細パターン自体の、構造・形状を変化させることを考えた。このような微細加工を磁性柔軟材料を用いて実現する手法を提示した。ミリメートルスケールの表面駆動構造を作ることにより実証し、マイクロメートルスケール構造についても、作製手法を提示できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微生物の表面に見られる繊毛構造のような「うごく」表面構造を実現できれば、さまざまな機能を実現できる。しかしながら、駆動表面構造を実現する手法は確立されていなかった。本研究では磁場駆動型ピラー構造をアレイ状に配置することでこのような機能表面を実現した。試作構造はミリメートルスケールのピラーであるが、微生物生体に近いマイクロスケールのピラーアレイ構造を実現するための手法も提示した。これらの技術は、微細管路内でのマイクロポンプや防汚表面といった工学的な応用につながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Functionally patterned surfaces using microscale surface patterns have been widely applied in industrial fields. Examples of industrially common applications include superhydrophobic, or superhydrophilic surfaces, and antireflection structures. These functional surfaces are achieved through "static" microstructures, meaning fixed patterns. In this study, we propose a method to dynamically alter the microscale patterns by manipulating the structure and shape of the micro-patterns themselves. We demonstrate the feasibility of creating surface-driven structures at the millimeter scale and provide a fabrication method for microscale structures as well.

研究分野：微細加工，ソフトロボティクス

キーワード：人工繊毛 ソフトアクチュエータ 磁性粒子

### 1. 研究開始当初の背景

微細表面パターンによる機能表面は広く応用されている。超撥水・超親水表面や無反射構造は工業的な応用例として既に一般的である。これらの機能表面は「静的な」(すなわち固定された)微細構造により実現されている。本研究では、機能を「動的に」変化させるため、微細パターン自体の、構造・形状を変化させることを考えた。

その背景には生物界の自在に変化する微細パターンがある。研究代表者が以前より取り組んできた繊毛はまさに「うごく」微細構造の代表である。また、コウイカはその表皮の色細胞の大きさを変化させるのみならず、表面形状(テクスチャ)を大胆に変化させ外界にカムフラージュ可能である。このように自然界における微細構造の動的変化を眺めると、さまざまな工学応用価値が見いだされる。

### 2. 研究の目的

一方で、代表者はこれらを人工的に具現化するための最大の課題は「実現方法がない」ことであると気づいた。そして、これまで代表者が行ってきた2つの異なる研究テーマを結びつけることでこの課題を解決できることに至った。具体的には「微細圧印加工プロセス」と「磁性柔軟アクチュエータ」とを融合した動的機能表面生成システムである。本研究では成形・駆動手法を確立し、応用することを目的とする。

### 3. 研究の方法

代表者は「ナノインプリント成形」「磁性エラストマ(ゴム)材料」研究に取り組んできた。前者は、加熱した熱可塑性材料に対し微細な金型(モールド)を圧印することにより、モールドパターンを転写する手法である。ナノレベルの転写性能を有する。特に、2層以上の材料に対し複数回の転写を行う独自技術を開発しており、この技術がキーとなる。後者は磁性粒子を分散したエラストマ(ゴム)を外部磁場により変形する技術である。

図1は、梁の一本一本に磁気異方性を設定することにより、高速でかつ可逆的な折り畳みを実現している例である。しかしながらこの手法では微細化に限界があり、大面積へのプリントについても現実味がない。そこで提案するのが以下の手法である。

図2は繊毛駆動構造のためのもっともシンプルな例である。磁性ゴム繊毛の一本一本にそれぞれ違う磁化方向を設定するために、まず、熱可塑性樹脂材料を塗布しピラー構造を固定する。そして、粗いモールドを用いたパターンを転写する。その結果、繊毛の変形を一時的に固定できる。この状態でピラーに着磁する。図では縦方向に磁場印加しており、内部の粒子もこの方向に着磁される。最後に熱可塑性樹脂を溶媒により除去する。ここで注意したいのは、ピラー構造は弾性変形により初期形状に戻るが、各ピラー内部の磁性粒子の着磁方向はそのまま残っていることである。その結果、駆動用磁場の印加により各ピラーが異なる変形挙動を示す。

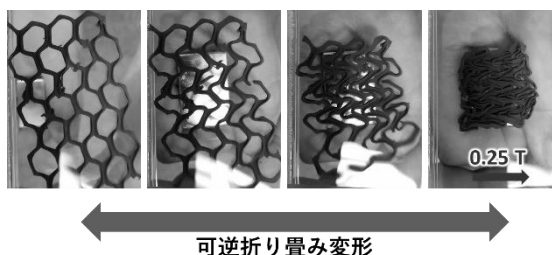


図1 磁場による柔軟駆動体の例 (MNC2020 発表)。

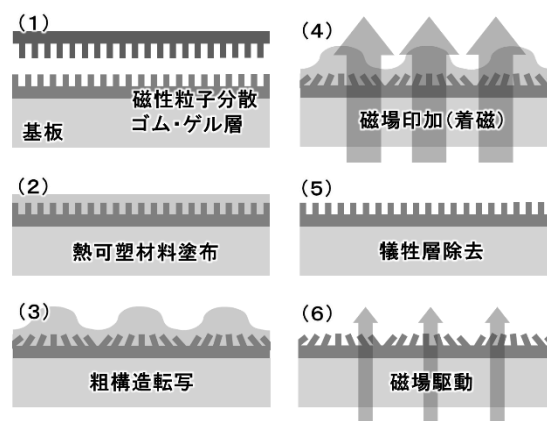


図2 提案する変形加工を組み込んだ磁化パターンニング技術の流れの一例。

### 4. 研究成果

#### (1) ミリメートルスケール構造の変形・着磁・駆動実験

まず、ミリメートルスケールでの繊毛群の作製を試みた。厚さ4 mmの亚克力板にレーザー加工を施した型を準備し、ここに磁性粒子分散シリコン材料を流し込み固化させた。図3に示

すように、2 mm ピッチで太さ 0.3 mm 程度の磁性柔軟ピラー群を作製した。この構造に加熱して溶かしたワセリンを流し込み固定後、図 4 に示すように型を使い変形させた。ワセリンは容易に変形可能であるが、柔軟なピラー構造はワセリンに沿って変形が固定される。固定された状態で、サンプルを着磁コイル内に装填し、1.5 T の磁場を印加しピラーを着磁した。その後、ワセリンを加熱除去することで、図 3 (b) と見た目同じピラー群を得た。

ピラー群の見た目は同じであるが、各ピラーは着磁時の変形に応じ、異なる方向に着磁されている。よって、このピラー群に磁場を印加すると、一様な磁場であってもそれぞれ異なる方向に変形する。図 5 に駆動例を示す。3 種類の型を用意し変形させた。その際、中央部にサイズの異なる円形の空洞を用意し、ピラーが変形しない領域を変化させている。駆動実験結果を見ると、中央部と周辺部位で異なる変形が確認される。3 種類のサンプルでこれらの駆動領域のサイズが変わっている点もわかりやすい。

ここに示したサンプル以外にも、いくつかの異なる形状の型を使った実験結果がえられている。

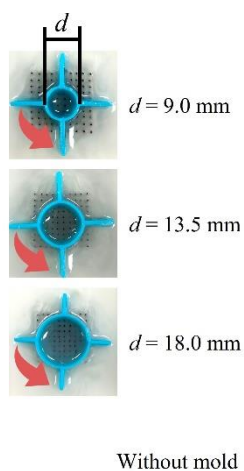


図 3 ミリメートルスケールの磁性粒子分散柔軟ピラー群。

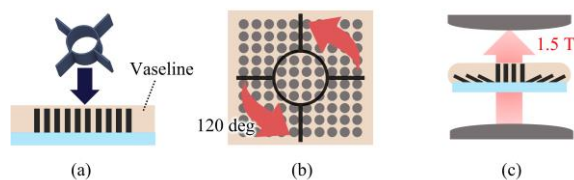


図 4 ミリメートルスケールの磁性粒子分散柔軟ピラー群。

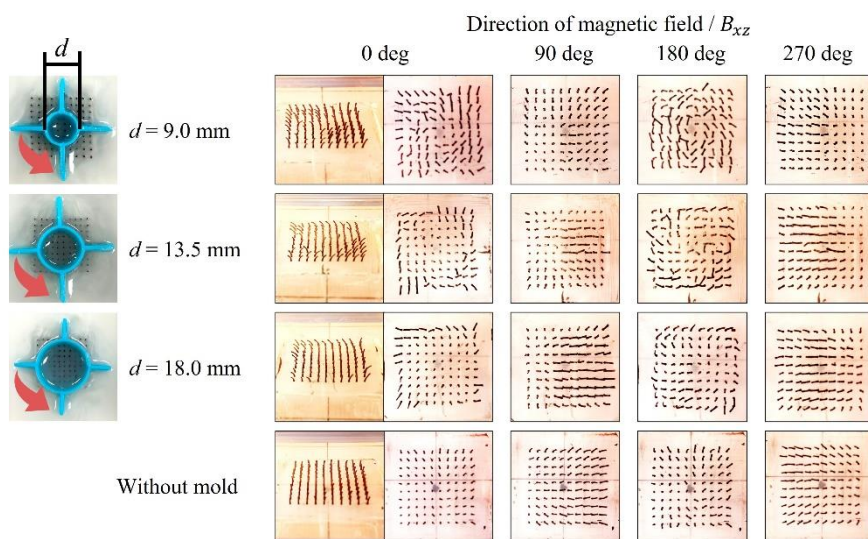


図 5 ピラー群の磁場による駆動例

## (2) 磁場印加システムの開発

サンプルの駆動のために任意方向、任意強度で磁場を印加する 3 軸コイルを作製した。図 6 にコイルの外観を示す。2 つのコイルをペアとし、その中間部に磁場を印加可能である。3 軸制御することにより所望の磁場が得られる。

それぞれの軸のコイルの磁場を高速で変化させるため、モータドライバーを用いた。ロボット等の駆動に用いられるドライバーボードを 3 セット用意し、それぞれをマイコンボードで制御するようソフトウェアも完成させた。この駆動システムは前節の実験にも用いている。

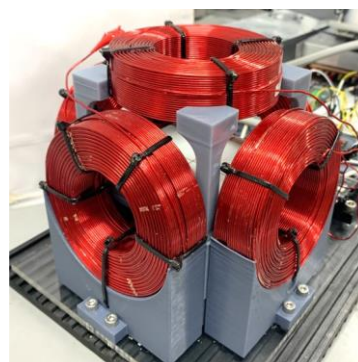


図 6 開発した 3 軸コイル。

## (3) 構造の微細化

前節ではアクリル板へのレーザ加工により型を作製した。さらなる微細化に向けて、ろ過フィルターに利用される Track Etched Membrane を型として利用した。ポリカーボネートの 25  $\mu\text{m}$  フィルムに約 2.0  $\mu\text{m}$  の垂直孔がランダムに配置され

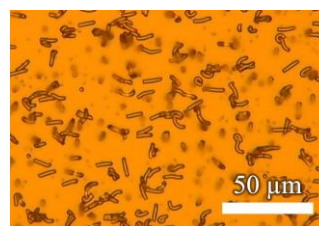


図 7 微細化したシリコンピラー。

ているものである。このメンブレンを型として利用し、シリコンで微細なピラー構造を作製することに成功した（図7）。今後、磁性粒子を分散した材料に適用することで、（1）節で示したものと同様のプロセスを試していきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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<br>Murakami Toshiki, TSUMORI Fujio                 | 4. 巻<br>61                    |
| 2. 論文標題<br>Magnetic driven tentacles for bio-mimic motion | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics             | 6. 最初と最後の頁<br>SD1014 ~ SD1014 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac5a99     | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Taira Ryoma, Tsumori Fujio  | 4. 巻<br>61                    |
| 2. 論文標題<br>Submicron imprint patterning of compound sheet with ceramic nanopowder | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics                                     | 6. 最初と最後の頁<br>SD1011 ~ SD1011 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac5a26                             | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Ninomiya Koichi, Gaysornkaew Suparat, Tsumori Fujio                 | 4. 巻<br>n/a             |
| 2. 論文標題<br>Micro Magnetic Patterning on Extremely Tough Magnetic Gel Actuator | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Proc. IEEE-MEMS2022   | 6. 最初と最後の頁<br>235 ~ 238 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/MEMS51670.2022.9699514                    | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Ninomiya, S. Gaysornkaew, and F. Tsumori  |
| 2. 発表標題<br>Micro Magnetic Patterning on Extremely Tough Magnetic Gel Actuator                                   |
| 3. 学会等名<br>2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>R. Taira and F. Tsumori   |
| 2. 発表標題<br>Sub-micron Imprint Patterning of Compound Sheet with Ceramic Nano Powder          |
| 3. 学会等名<br>34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Murakami and F. Tsumori  |
| 2. 発表標題<br>Magnetic Driven Tentacles for Bio-mimic Motion                                    |
| 3. 学会等名<br>34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)             | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)           | 備考 |
|-------|---------------------------------------|---------------------------------|----|
| 研究分担者 | 斉藤 一哉<br>(SAITO Kazuya)<br>(40628723) | 九州大学・芸術工学研究院・准教授<br><br>(17102) |    |

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 |
|---------|---------|