

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20425

研究課題名（和文）マイクロコルゲーションプロセスによる縦波型ストレッチャブル微細配線の開発

研究課題名（英文）Development of vertical wavy structured stretchable microscale interconnects fabricated by micro-corrugation process

研究代表者

山本 道貴（Yamamoto, Michitaka）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：10963225

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高密度に集積可能な微細なストレッチャブル配線の実現のため、垂直方向に波状に加工した金属箔の上に、絶縁層を介して微細な電気配線を形成した新規ストレッチャブル構造を提案した。また同構造を実現するため、金属基板上に絶縁膜・微細配線を形成した後、コルゲート加工（歯車による連続曲げ加工）によって伸縮性を有する縦波構造を付与するプロセスを検討し、50%程度の伸張性を備えた、線幅100  $\mu\text{m}$ 程度の微細配線の形成に成功した。また同構造の応用として、センサの集積化についての検討も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、微細なパターンの形成・パターンのコントロールが難しかった縦波構造型のストレッチャブル配線に対して、数10～数100  $\mu\text{m}$ 程度の任意形状パターンの形成が可能な新たなプロセスを提案した。今回確立した作製プロセスは、今後のストレッチャブルデバイスにおける高密度集積化に資する期待される。

研究成果の概要（英文）：To realize high-density stretchable interconnects, a new structure of stretchable microscale patterned interconnect, which is formed on a vertical wavy structured metal substrate with an insulating layer, was proposed. To realize the proposed structure, the insulating layer and microscale patterned interconnects were formed on the metal substrate and then micro-corrugated to fabricate a vertical wavy structure. Our proposed process succeeded in fabricating vertical wavy structured interconnects with 100  $\mu\text{m}$  width, and fabricated microscale interconnects sustained a strain of over 50%, and further discussion about the sensor integration was performed.

研究分野：実装工学

キーワード：ストレッチャブルエレクトロニクス ストレッチャブル配線 コルゲート加工 センサ集積化

### 1. 研究開始当初の背景

近年、人や動物の体の表面に直接張り付ける、あるいは体内に直接埋め込むタイプのデバイスが提案されている。将来、機能を向上させるためには複数の種類の電子デバイスを集積化する必要があり、高密度に配線できる微細なストレッチャブル配線が必要になると考えられる。

ストレッチャブル配線の作製方法は”導電性ゴムを用いるもの”と”金属を波状に加工したもの”に大別され、電気的な安定性の点で後者の方が優れている。金属を波状に加工する場合、基板の面内方向に波を形成した横波構造と、基板の垂直方向に波を形成した縦波構造の2種類の構造が考えられ、高密度化の観点においては縦波型構造の方が優れていた。

一方、縦波構造を持つ金属配線は高密度な配線が作製できるものの、縦波構造の作製には予め伸長した基板の上に金属膜を載せ、基板の戻り力を用いて縦波構造を作製するプレストレッチ法が主流であり、安定した作製が難しかった。

そこで我々の研究グループでは、安定した縦波構造の作成のため、歯車で金属箔を連続曲げ加工することで縦波構造を形成する、マイクロコルゲーションプロセスを提案し、60%の伸長性を有する縦波構造を持つ電気配線を作製するとともに、伸縮性を兼ね備えた光る腕輪型デバイス等の作成にも成功してきた。一方、配線同士の接続・電子部品の実装は依然として手作業で行う必要があったため、サブ mm オーダーの配線幅が限界であり、配線の微細化・高密度化には課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、垂直方向に波状に加工した金属箔の上に、絶縁層を介して微細な電気配線を形成した新規構造を提案し、人の皮膚の動きに追従できる30%以上の伸縮性を持つ、ストレッチャブル微細配線を開発することを目的とする。

従来手法と提案手法の違いを図1に示す。従来手法では、金属箔部分に伸縮性と電気配線という2つの役割を担わせてきたため、微細化に限度があったと考えた。そこで今回、金属箔部分に伸縮性の実現という役割のみを負わせ、配線部分を別途形成することを考えた。新規構造が実現できれば、配線を任意の線幅・ピッチで形成できるようになり、配線の微細化、さらには実装機による電子デバイスの実装が可能になり、人や動物の皮膚に直接貼り付ける、あるいは体内に埋め込む小型デバイスの開発へと繋がると期待される。

### 3. 研究の方法

#### ①ストレッチャブル微細配線の形成

本研究で提案した作製プロセスを図2に示す。まず、金属基板を準備し、その上に絶縁膜、続いて微細配線を形成する。その後、マイクロコルゲート加工によって縦波構造を付与する。最後に、必要に応じてチップ実装・リード線の取付け等を行った後、配線をハンドリングしやすくするため、シリコンゴムに埋め込む。なお参考までに、実際のコルゲート加工の様子を図3に示す。

#### ②センサの集積化手法の検討

コルゲート加工により作成した縦波構造の上にセンサを集積化する手法として、予め金属箔の上に薄膜センサを形成した上で、コルゲート加工によって伸張性を付与することを試みた。

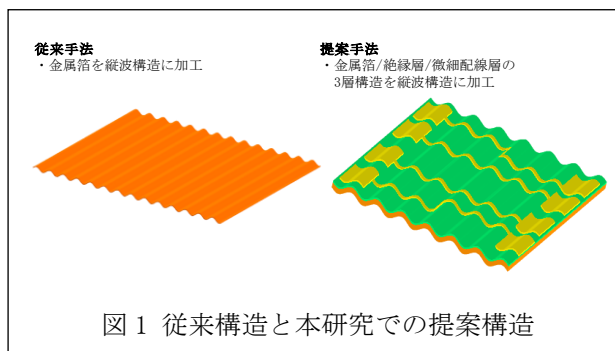


図1 従来構造と本研究での提案構造

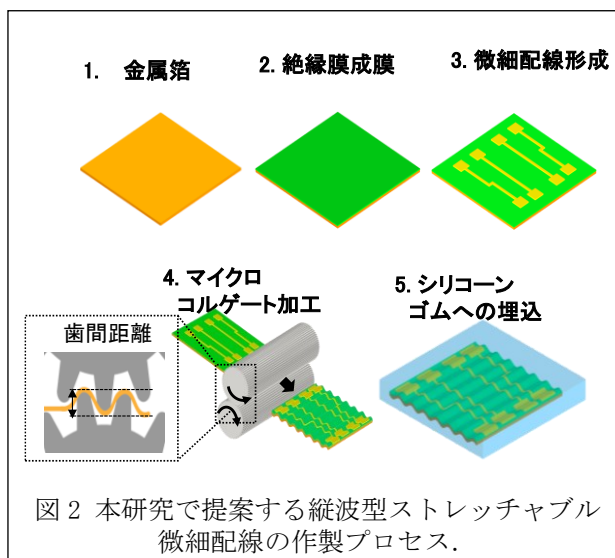


図2 本研究で提案する縦波型ストレッチャブル微細配線の作製プロセス。

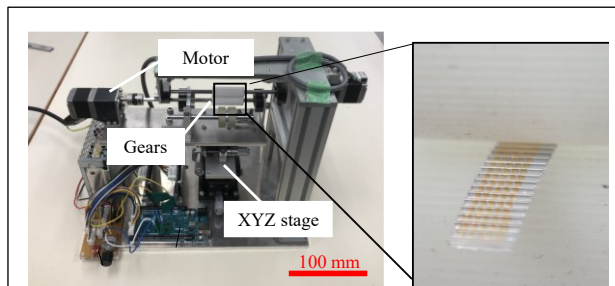


図3 コルゲート加工の様子。

#### 4. 研究成果

##### ①ストレッチャブル微細配線の形成

作製したストレッチャブル微細配線の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を図 4 に示す。なお今回は、微細配線の形成に、メタルマスクを用いる方法、フォトリソグラフィを用いる方法の 2 種類について検討しており、図 4(a) ~ (d) はメタルマスク

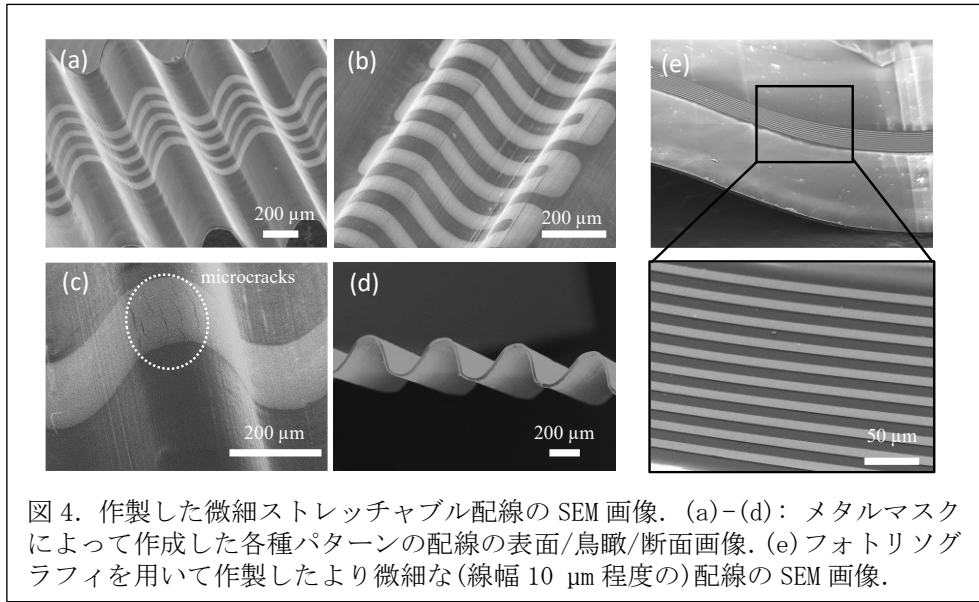


図 4. 作製した微細ストレッチャブル配線の SEM 画像. (a)-(d): メタルマスクによって作成した各種パターンの配線の表面/鳥瞰/断面画像. (e) フォトリソグラフィを用いて作製したより微細な (線幅 10 μm 程度の) 配線の SEM 画像.

を用いた場合、図 4(e) はフォトリソグラフィを用いた場合の SEM 画像である。メタルマスクを用いることで線幅 100 μm 程度、フォトリソグラフィを用いることで、線幅 10 μm までの配線を形成し、かつ、コルゲート加工によって縦波構造へと加工できていることが分かる。なお、図 4(c) からも見取れる通り、コルゲート加工後、配線上にマイクロクラックが生じ、配線抵抗がコルゲート加工前後で上昇する場合は確認された。シミュレーション、並びに実験より、配線抵抗値の上昇はコルゲート加工時に生じる曲げ応力によって配線にクラックが入っているためと考えられ、利用する金属箔基板厚みを 5 μm 程度に薄くすることで、抵抗値の上昇を低減できた。一方、それ以下の厚みにするとスプリングバックの影響が大きくなり、縦波構造を形成できなかった。配線にかかる応力の低減と、塑性変形による変形を両立できる層構成が重要であると考えられる。

メタルマスクを用いて作製したストレッチャブル微細配線について、伸縮性の評価結果の一例を図 5 に示す。図 5 より、50% 程度の伸び量の所で断線している様子が見取れる。このことから、伸び量 50% 程度までの範囲において伸縮性のある微細配線として機能していることが分かる。

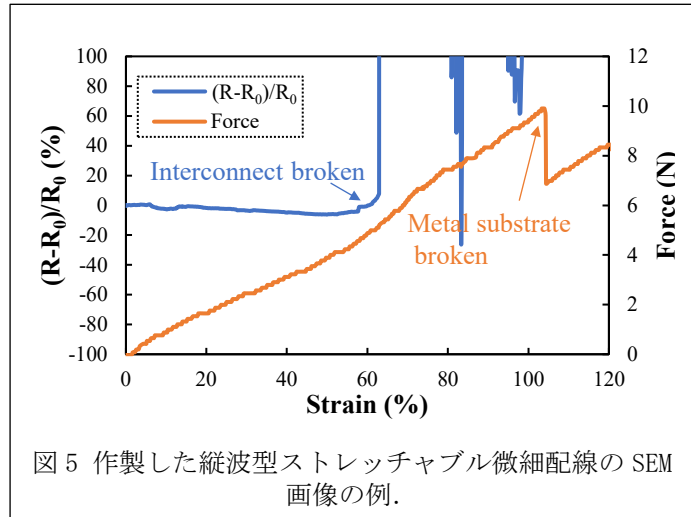


図 5 作製した縦波型ストレッチャブル微細配線の SEM 画像の例.

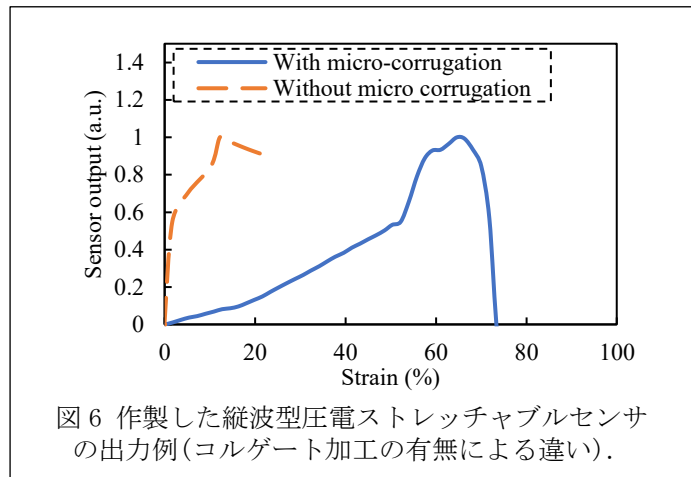


図 6 作製した縦波型圧電ストレッチャブルセンサの出力例 (コルゲート加工の有無による違い).

##### ②センサの集積化手法の検討

縦波構造上へのセンサ集積化の例として、有機圧電薄膜を予め金属箔の上に形成してからコルゲート加工によって縦波構造へと加工することを試みた。結果、50% 以上の伸張率を示す縦波型圧電ストレッチャブルセンサの作製に成功した。センサ出力の例を図 6 に示す。

以上より、本研究では垂直方向に波状に加工した金属箔の上に、絶縁層を介して微細な電気配線を形成した新規構造を提案し、人の皮膚の動きに追従できる 30 % 以上の伸縮性を持つ、ストレッチャブル微細配線を開発することに成功した。また、同配線・同作成プロセスの応用についての知見を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yamamoto Michitaka, Tomita Naoto, Takamatsu Seiichi, Itoh Toshihiro	4. 巻 25
2. 論文標題 Piezoelectric Stretchable Sensor with a Vertical Wavy Structure Fabricated by Combining Dip Coating and Micro-corrugation Process	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1271 ~ 1278
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12541-024-00980-2	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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Michitaka Yamamoto, Naoto Tomita, Seiichi Takamatsu, Toshihiro Itoh
2. 発表標題 Piezoelectric Stretchable Sensor with a Vertical-wavy Structure Fabricated by Combining Dip Coating and Micro-corrugation process
3. 学会等名 International Conference on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing (PRESM2023)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Michitaka Yamamoto
2. 発表標題 Vertical-wavy Structured Stretchable Device Fabricated by Micro-corrugation Process
3. 学会等名 JCK MEMS/NEMS 2023（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Michitaka Yamamoto, Seiichi Takamatsu, Toshihiro Itoh
2. 発表標題 Stretchable Microscale Patterned Interconnects Formed on Micro-corrugated Vertical Wavy Structured Substrate
3. 学会等名 2023 IEEE Sensors（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本道貴, 高松誠一, 伊藤寿浩
2. 発表標題 マイクロコルゲート加工による縦波型ストレッチャブル微細配線の開発
3. 学会等名 第38回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本道貴, 高松誠一, 伊藤寿浩
2. 発表標題 マイクロコルゲート加工による縦波型圧電ストレッチャブルセンサの開発
3. 学会等名 第37回エレクトロニクス実装学会 春季講演大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞 : Michitaka Yamamoto, Naoto Tomita, Seiichi Takamatsu, Toshihiro Itoh, Best Paper Award, "Piezoelectric Stretchable Sensor with a Vertical-wavy Structure Fabricated by Combining Dip Coating and Micro-corrugation process", International Conference on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing (PRESM) 2023, July 20, 2023.  
 受賞 : 山本道貴, 第37回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 研究奨励賞, " マイクロコルゲート加工による縦波型圧電ストレッチャブルセンサの開発 ", 2024.03.

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