

銅薄膜マイクロコルゲーション塑性加工による 次世代フレキシブルデバイス用伸縮性配線の研究開発

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
准教授 高松 誠一

(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019017-B2)

キーワード：銅薄膜，マイクロコルゲーション，塑性加工

1. 研究の目的と背景

近年のIoTデバイス・センサの普及に伴い人に取り付け可能なデバイスが求められており、人の動きに合わせて伸縮可能なストレッチャブルデバイスの開発が必要とされている。ストレッチャブルデバイスの作製方法として、デバイスの大部分を占めるのは配線であるため、配線部分に伸縮性を持たせることでデバイスに伸縮性を持たせる方法が提案されている。

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波状に加工した金属配線に大別され⁽¹⁾、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る。横波構造の波状金属配線は加工が容易であり、100%の高い伸縮性を示すものも報告されているが⁽²⁾、高い伸縮性を持たせるためには1 mm近い太い配線幅が必要になり、配線の占める面積が大きくなってしまふ。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が、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、基板の戻る力を用いて縦波構造を作製するというプリストレッチ法が主流であり、安定して作製することが難しかった。またプリストレッチ法によって作製した縦波構造を持つ金属配線の伸長率は、高いものでも100%程度であり⁽³⁾、また伸長率を高くするために金属薄膜を薄くし抵抗値が高く(数10~数100Ω)なっているものも見受けられた⁽⁴⁾。

縦波構造を形成する方法として、我々は銅箔を歯車により曲げ加工するコルゲート加工を提案してきた⁽⁵⁾。コルゲート加工では波の形状は歯車の形状・歯車間の距離によってコントロールできるため、縦波形状を安定して作製することができる。一方、コルゲート加工により作製した配線の伸長率は40%程度であり、伸縮性の改善が求められていた。

そこで本研究では、高い伸長率を持つ縦波構造を安定して作製するため、コルゲート加工によって予め金属膜を曲げ加工した上で、プリストレッチした基板に取り付けるといふ、新規手法を提案する。まず、コルゲート加工における銅箔の厚みの影響を調べ、用いる銅箔の厚みを決定した。次に、基板をプリストレッチする量を変え、コルゲート加工にプリストレッチ法を組み合わせることによる伸縮性の改善について検証した。最後に、提案手法を用いてストレッチャブルデバイスを試作した。

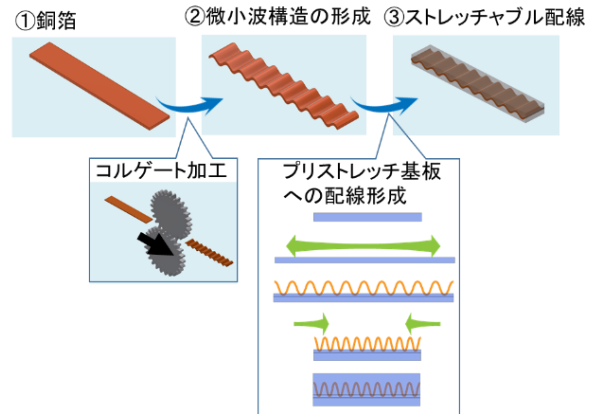


図1 本研究で提案するコルゲート加工とプリストレッチ法を組み合わせた縦波構造を持つ伸縮性金属配線の作製方法。

2. 提案手法と伸びの予測モデル

本研究で提案する縦波構造を持つストレッチャブル配線作製手法を図1に示す。まず短冊状に切った銅箔を一對の歯車に送り、コルゲート加工によって縦波構造を形成する。コルゲート加工の様子を図2に示す。次に加工した銅箔をプリストレッチしたシリコンゴム基板上に接着・硬化させた後、基板を元の長さに戻す(プリストレッチ法)。最後に、配線全体をシリコンゴムで被覆し、脱型する。

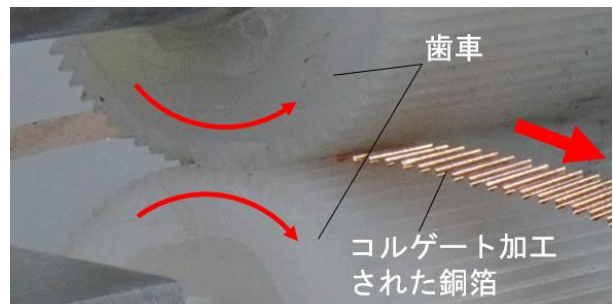


図2 コルゲート加工のイメージ写真。

コルゲート加工とプリストレッチ法を組み合わせることの利点として、以下の2点が考えられる。まず、従来研究におけるプリストレッチ法では、平板な金属薄膜をランダムに座屈させて縦波構造を形成させていた。ゆえに形成

される縦波波形のコントロールが困難であり、作製安定性に難があった。そこで本提案手法のようにコルゲート加工と組み合わせることで、あらかじめ金属箔にいわば「折目」を付けた後、波形のピッチを縮めるためにプリストレッチ法を利用することができ、波形形状を安定させた状態で配線を作製することが出来る。また、従来研究でのプリストレッチ法では座屈を発生させて縦波構造を形成するため、金属薄膜は数 nm から数十 nm 程度であることが多かった⁽⁴⁾⁽⁶⁾。そのため、抵抗値が高くなり、配線として応用するには限定的であった。一方、コルゲート加工では、厚み数十 μm の銅箔でも作製可能であり、コルゲート加工と組み合わせることで抵抗値の低い配線を実現することが可能であると考えられる。

波状配線は波形状が直線に戻るまでの距離だけ伸びることができると考えれば、配線の伸長率 S は配線の波形における 1 周期分の曲線長さ L とピッチ p を用いて、以下の式(1)により予測することが出来る。

$$S = L/p \quad (1)$$

ここで、1 周期分の曲線長さ L を求めることを考える。コルゲート加工後の波形状を図3のような円弧と直線から成る曲線モデルとして考える。ピッチ p ・高さ h ・角度 θ が分かれば、円弧の半径 R と直線部の長さ l はモデルの幾何関係より以下の式(2)と式(3)を用いて計算することができる。

$$R = \frac{p \sin \theta - 2h \cos \theta}{4(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

$$l = \frac{h \sin \theta}{1 - \cos \theta} - \frac{p}{2} \quad (3)$$

また 1 周期分の曲線長さ L は R, θ, l を用いて以下の式(4)のように書くことが出来る。

$$L = 4R\theta + 2l \quad (4)$$

式(1)から(4)より、コルゲート加工後の波形状のピッチ p ・高さ h ・角度 θ が分かれば、配線の伸長率 S を予測できる。さらにコルゲート加工とプリストレッチ法を組み合わせた場合を考える。コルゲート加工により銅箔が波状になり配線長さが a 倍($0 < a \leq 1$)され、その後プリストレッチ法によって配線長さが b 倍($0 < b \leq 1$)された場合、初期長さと比較して最終的に配線長さは $a \times b$ 倍となるため、コルゲート加工とプリストレッチ法を組み合わせた場合の配線の伸長率 S' は

$$S' = \frac{1}{a \times b}$$

となると考えられる。伸長率はコルゲート加工、あるいはプリストレッチ法をそれぞれ単独で用いた場合に比べて、積で影響すると考えられる。

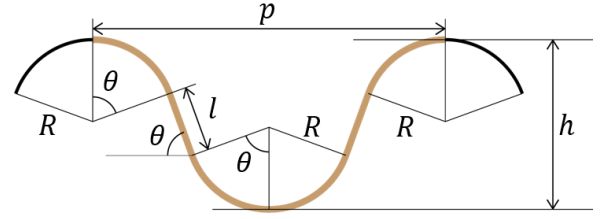


図3 波状配線の伸縮性を予測するための幾何モデル。

3. 実験方法

コルゲート加工において銅箔の厚みが伸縮性に与える影響を調査するため、銅箔の厚みが 2, 5, 10, 20, 40 μm のサンプルを作製した。コルゲート加工にはモジュール 0.15 のギアを用い、歯車間のクリアランスは 40 μm とした。なお銅箔の長さは 100 mm, 幅 3 mm とし、コルゲート加工後に PDMS 基板(信越化学工業株式会社製, KE-1316)に埋め込んだ。なおプリストレッチ基板の伸長率は 0% とした。

作製したサンプルの伸長率は、ソースメーター(ケースレー・インスツルメンツ製, 2400 SourceMeter)によって抵抗値を測定しながら引張試験機(アイコーエンジニアリング株式会社製, FTN-3001)によって破断するまでサンプルを伸長させることによって評価した。

プリストレッチ基板の伸長率を 0, 25, 50, 75% と変化させて、破断試験を行うことでプリストレッチ法と組み合わせることによる効果を調べた。伸長したプリストレッチ基板を元に戻す際には銅箔の曲げ剛性は小さい方がサンプル作製上扱いやすいため、サンプル作製に用いた銅箔の厚みは 5 μm とした。なおプリストレッチ基板の伸長率 0% と 75% のサンプルについては、破断試験に加えて 50% 伸びのサイクル試験も行った。

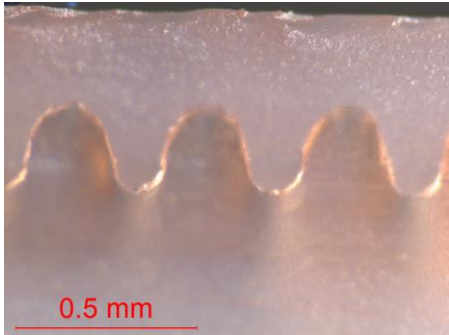
提案手法によるストレッチャブル配線の実用性を示すため、ストレッチャブル配線で LED を接続し、腕輪型のストレッチャブル回路を作製した。LED(3528 白色チップ LED 8000K LP-3528T35XW-8000)は 7 個並列に配置し、LED 端子とストレッチャブル配線の接続には銀ペースト(東洋紡株式会社製, SSP2801)を使用した。

4. 実験結果

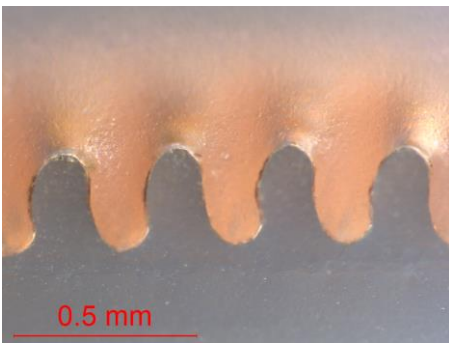
プリストレッチ 0%, 75% として作製したサンプルの、断面の光学写真を図 4 に示す。プリストレッチの有無に関わらず安定した縦波構造が作製出来ており、プリストレッチ法と組み合わせることで、波の高さは変わらず、波のピッチのみが小さくなっていることが分かる。

製作したサンプルの破断試験を行い、伸長率を評価した。結果を図 5 にまとめる。なお図 5 には、波の形状(ピッチ・高さ・角度)から予測した伸び量をプロットしている。波のピッチ・銅箔の厚みが 10 μm のとき伸長率が最大となった。これは、銅箔の厚みが薄いほどコルゲート加工後の波の高さが高くなり伸長率が改善するが、銅箔の厚みが 2, 5 μm のときは銅箔の引張強度が小さくなり、予測した値

に到達する前、つまりは銅箔が平面状に伸び切る前に破断してしまっただけと考えられる。



(a)



(b)

図4 作製したストレッチャブル配線の断面写真
(a)プリストレッチ0% (b)プリストレッチ75%.

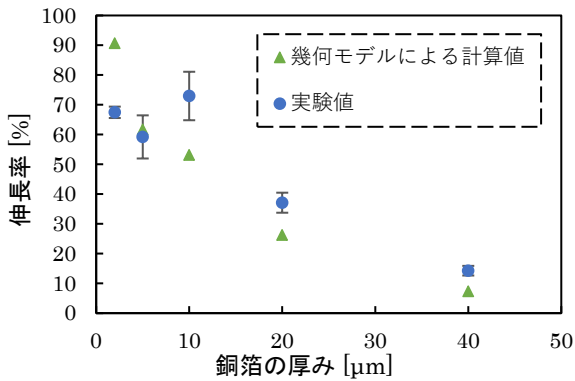


図5 銅箔の厚みによる伸長率の違い。

プリストレッチ法による伸長率の改善

コルゲート加工にプリストレッチ法を組み合わせたサンプルを作製し、破断試験を行った。破断試験の結果の例を図6に、破断試験の様子の一例を図7に示す。また破断試験の結果を図8にまとめる。今回作製したサンプルの全ての場合で抵抗値は1 Ω/cm以下であり、破断するまでの抵抗の変化は±0.1 Ω/cm以下であった。プリストレッチ基板の伸長率を0%にした場合、作製したサンプルの伸長率は102%であったが、プリストレッチ基板の伸長率を大きくすることで、伸長率が最大220%まで改善した。

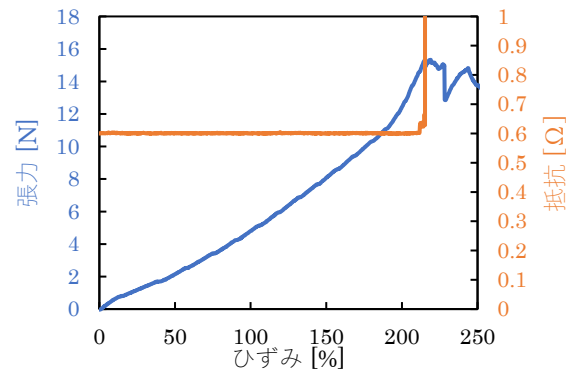
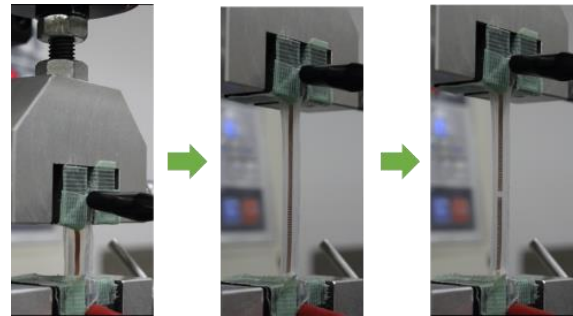


図6 プリストレッチ法を用いて作製したストレッチャブル配線の引張試験の測定例。



(左) 0%伸長 (中央) 200%伸長 (右) 破断時 250%伸長

図7 プリストレッチ法を用いて作製したストレッチャブル配線の引張試験の様子。

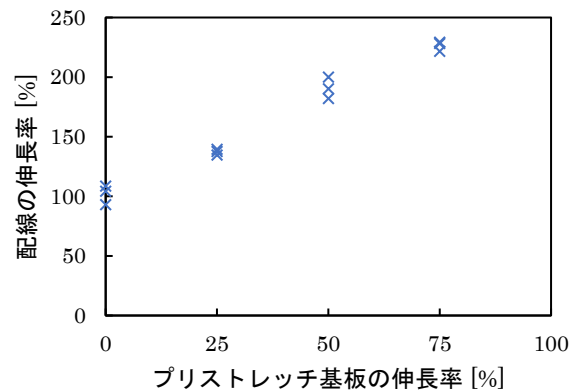


図8 プリストレッチ基板の伸長率による配線の伸長率

50%ひずみまでの伸縮のサイクル試験を行った結果を図9にまとめる。プリストレッチ0%のときの破断までの回数は最小で39回、最大で126回であったが、プリストレッチ75%のときは最小で239回、最大で878回とサイクル試験の結果が改善した。

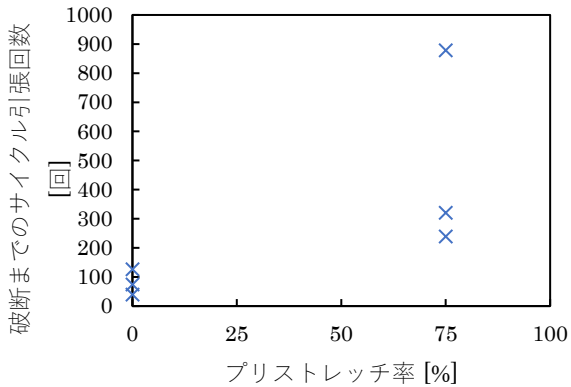


図9 プリストレッチ基板の伸長率による破断までの50%ひずみサイクル試験への影響。

提案手法によるストレッチャブル配線を用いて、腕輪型のストレッチャブル回路を作製した(図10)。作製した回路はLEDを点灯させることができたことから、提案手法はストレッチャブル回路の作製に利用できると期待される。

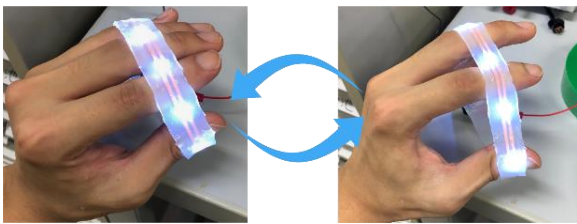


図10 提案手法を用いて作製した腕輪型伸縮性デバイス。

5. 考察

本研究では、コルゲート加工とプリストレッチ法を組み合わせることにより、伸長率220%を超えるストレッチャブル配線を作製することができ、50%ひずみのサイクル試験では引張回数が100回を超えても破断しなかった。

6. 結論

本研究ではコルゲート加工によって縦波構造を作製し、プリストレッチした基板に張り付けることで、高い伸長率(100%以上)をもつ縦波状の金属配線を安定して作製した。先行研究に比べてより伸長率が高く、サイクル試験も良好な結果(50%ひずみで破断まで100回以上引張可能)を示し、かつ抵抗値の低い($<1\Omega/\text{cm}$)配線を作製できた。実際にLEDを点灯させることが出来たことから、ストレッチャブル配線として有用であると考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2019年度一般研究開発助成AF-2019017-B2により行われたものである。支援に感謝します。

参考文献

- 1) John A. Rogers, T. Someya and Y. Huang : "Materials and Mechanics for Stretchable Electronics", Science, Vol. 327, pp. 1603-1607 (2010).
- 2) Gonzalez, M. et al. : "Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits", Microelectron. Reliab, No. 48, pp. 825-832 (2008).
- 3) S. Wagner, S.P. Lacoura, J. Jonesa, P.I. Hsua, J.C. Sturma, T. Lib, Z. Suob : "Electronic skin: architecture and components", Physica E, Vol. 25, pp. 326-334 (2004)
- 4) Jones, J., Lacour, S. P., Wagner, S. & Suo, Z. : "Stretchable wavy metal interconnects", J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film, No. 22, pp. 1723-1725 (2004)
- 5) 唐澤 龍, 高松 誠一, 伊藤 寿浩 : "コルゲート加工による微小波構造を利用したストレッチャブル配線の検討", 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, (2017).
- 6) Lacour, S. P., Jones, J., Suo, Z. & Wagner, S. : "Design and Performance of Thin Metal Film Interconnects for Skin-Like Electronic Circuits", IEEE Electron Device Lett., No. 25, pp. 179-181 (2004).
- 7) Gray, D. S., Tien, J. & Chen, C. S., : "High-Conductivity Elastomeric Electronics", Adv. Mater., No. 16, pp. 393-397 (2004).
- 8) Brosteaux, D., Fabrice Axisa, Gonzalez, M. & Vanfleteren, J. : "Design and Fabrication of Elastic Interconnections for Stretchable Electronic Circuits", IEEE Electron Device Lett., No. 28, pp. 552-554 (2007).
- 9) Marchiori, B., Delattre, R., Hannah, S., Blayac, S. & Ramuz, M : "Laser-patterned metallic interconnections for all stretchable organic electrochemical transistors", Sci. Rep., No. 8, pp. 8477 (2018).
- 10) Jeong, J., Kim, S., Cho, J. & Hong, Y. : "Stable Stretchable Silver Electrode Directly Deposited on Wavy Elastomeric Substrate", IEEE Electron Device Lett., No. 30, pp. 1284-1286 (2009).
- 11) Z. Shen, et al. : "A Soft Stretchable Bending Sensor and Data Glove Applications", 2016 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, 2016, Proceedings Paper 88-93 (2016).