

特別賞

断線を自己修復する電気配線

— 設計原理の解明とフレキシブルエレクトロニクスへの応用 —

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 機械科学専攻
博士課程3年

古志 知也

1. 緒言

1.1 研究の背景

近年、曲げたり伸ばしたりできる柔らかなシート状のエレクトロニクスである、フレキシブルエレクトロニクスの研究が盛んに行われており [1, 2]、人の肌に貼り付けて生体情報をセンシングするデバイス [3-5] などが世界中の研究グループによって開発されている。人の肌のように、複雑な曲面や繰り返しの伸縮変形が生じる表面にデバイスを貼り付けて用いることを考えると、フレキシブルエレクトロニクスにとって伸縮耐性は特に重要な性質である。伸縮耐性を実現するための従来手法としては、センサなどの硬く伸びない小さな電子部品を、伸び縮み可能な電気配線で相互に接続することで、デバイス全体としての伸縮耐性を実現しようとする手法 [4, 5] がある。伸び縮み可能な電気配線としては、配線の材料を導電性のあるエラストマに工夫した導電性エラストマ配線 [6] や、金属配線の形状をバネのように伸び縮みできる波形状に工夫した波形状金属配線 [7] が代表的である。しかしながら、導電性エラストマ配線は金属配線と比較すると導電性が低く (銅の導電率が $5.9 \times 10^7 \text{ S/m}$ なのに対して 2017 年時点の最高峰の研究報告 [6] で $4.0 \times 10^5 \text{ S/m}$)、波形状金属配線は過度や繰り返しの伸縮変形によってき裂が生じ、断線しやすいという問題がある。そこで本研究では、従来の材料工夫や形状工夫のアプローチではなく、導電性が高いが断線しやすい金属配線に断線の自己修復機能を付与するという新しいアプローチを用いることで、導電性と伸縮耐性を兼ね備えた電気配線を実現することを考えた。

1.2 研究の目的

本研究では、断線を自ら修復する金属配線、およびそれを用いたフレキシブルエレクトロニクスを実現することを目的とする。

断線の自己修復には、マイクロ・ナノスケールにおいて特有の物理現象である金属ナノ粒子の誘電泳動現象を用いる。図1に本研究で提案する自己修復型金属配線の概要図を示す。柔らかなエラストマシート上に形成された金属配線を、金属ナノ粒子分散液で覆った構造としている。この構造において、配線に断線が生じた場合に配線に電圧を印加すると、断線箇所生じる電界によって、断線箇所付近の粒子に誘電泳動力が生じ、粒子が断線箇所にトラップされる。トラップされた粒子は断線箇所を架橋する構造体を形成し、配線が電氣的に修復される。これにより、デバイスを使用する側が断線の生じた位置をわからなくとも、配線に電圧を印加するだけで断線箇所のみを選択的に修復することができる。また、繰り返しの伸縮変形によって一度修復した箇所で再び断線が生じたとしても、配線に電圧を印加さえすれば粒子が再びトラップされるため、何回でも繰り返して修復することができる。

1.3 研究の課題とその意義

本研究の目的を達成するための課題は、①断線箇所に粒子架橋構造が形成される条件の解明、および②金属配線のき裂発生形態の決定要因の解明である。

①の課題に関して、従来研究において金属ナノ粒子の誘電泳動現象は、電極間の微小なギャップに粒子架橋構造を形成させてその電氣的特性を調べること [8-10] に用いられる場合が多く、粒子架橋構造が形成される条件自体の議論は十分になされていなかった。また、従来研究において粒子を架橋させる距離は数十 nm から数 μm 程度の場合が多く、特に架橋

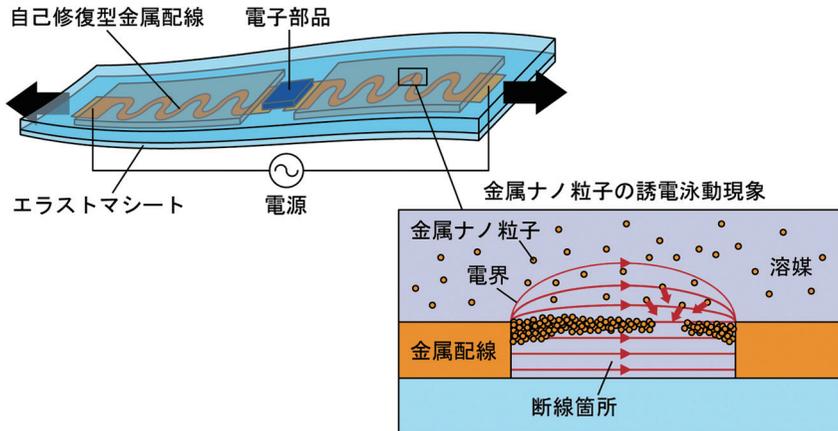


図1 本研究で提案する自己修復型金属配線を用いたフレキシブルエレクトロニクス。右下の図はデバイスの断面図であり、金属ナノ粒子の誘電泳動現象を用いることで配線に生じた断線が自己修復される。

距離が数十 μm 以上のような長い距離の場合の粒子架橋構造の形成条件は明らかではなかった。この架橋距離が数十 μm というオーダーは、フレキシブルエレクトロニクスに用いられる金属配線に生じる断線箇所の幅として、十分にありうる架橋距離である。そこで本研究では、粒子架橋構造が形成される条件を明らかにすることで、断線箇所の幅が数十 μm オーダの場合においても粒子架橋構造を形成し、断線の修復が生じるようにすることとした。

②の課題に関して、従来研究においてフレキシブルエレクトロニクスに用いられる金属配線は、幅が数百 nm から数 μm 程度の小さなき裂が数多く発生して断線したり [11]、幅が数十 μm から数百 μm 程度の大きな単数のき裂が発生して断線したりすることが報告されており [7]、それぞれのき裂発生形態における配線の抵抗計測が行われていた。しかしながら、これらの研究はそれぞれのき裂発生形態における計測に着目しており、き裂発生形態を決める要因自体は明らかではなかった。金属ナノ粒子の誘電泳動を用いた断線の自己修復において、断線箇所の個数や幅は重要なパラメータとなる。小さい複数のき裂が発生する形態によって配線の複数個所で断線が生じた場合は、修復時の印加電圧が大きくなったり、電位が不定になったりするために、断線箇所を修復することが難しいといえる。一方、大きな単数のき裂が発生する形態によって配線の1箇所断線が生じた場合は、修復時の印加電圧が比較的小さくなるため、小さな複数のき裂が発生する形態よりも断線箇所を修復しやすいといえる。そこで本研究では、このき裂発生形態を決める要因を明らかにすることで、き裂発生形態を大きな単数のき裂が発生する形態に設計可能にすることとした。

①の課題は自己修復型金属配線に印加する電圧・電流を決定する課題、②の課題は自己修復型金属の構造・寸法を決定する課題であり、それぞれの課題がすなわち自己修復型金属の電氣的・機械的設計原理の解明であるといえる。本研究では、①と②の課題で得られた成果をもとに、③自己修復型金属のフレキシブルエレクトロニクスへの応用として、自己修復型金属配線を用いたフレキシブルデバイスの製作・評価を行うこととした。

2. 粒子架橋構造の形成条件の解明 (電気的設計原理の解明)

2.1 理論的解析

まず、断線箇所にて粒子架橋構造が形成される条件の理論的解析を行った。断線箇所にて粒子架橋構造が形成されるプロセスは、(i)断線箇所にて粒子がトラップされるプロセス、および(ii)トラップされた粒子が断線箇所を架橋するプロセスに分解することができる。

図2は断線箇所にて粒子がトラップされるプロセスの概要図である。断線箇所が金属ナノ粒子分散液で覆われた構造において、配線に電圧を印加した場合に断線箇所付近の粒子に働く合力は、主にファンデルワールス力、静電反発力、および誘電泳動力で構成されていると考えることができる。ファンデルワールス力は粒子と断線箇所の表面間に働く引力、静電反発

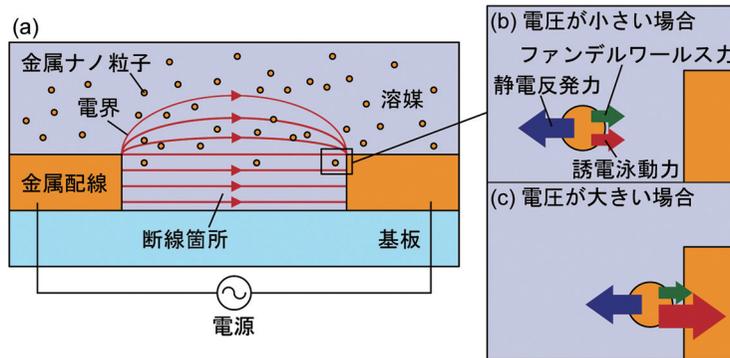


図2 (a) 断線箇所にて粒子がトラップされるプロセスの理論的解析。(b) 配線への印加電圧がある一定の値よりも小さい場合は、粒子と断線箇所の表面間で生じる合力が斥力になるため、粒子がトラップされない。(c) 印加電圧がある一定の値よりも大きい場合、合力が引力となり粒子がトラップされる。

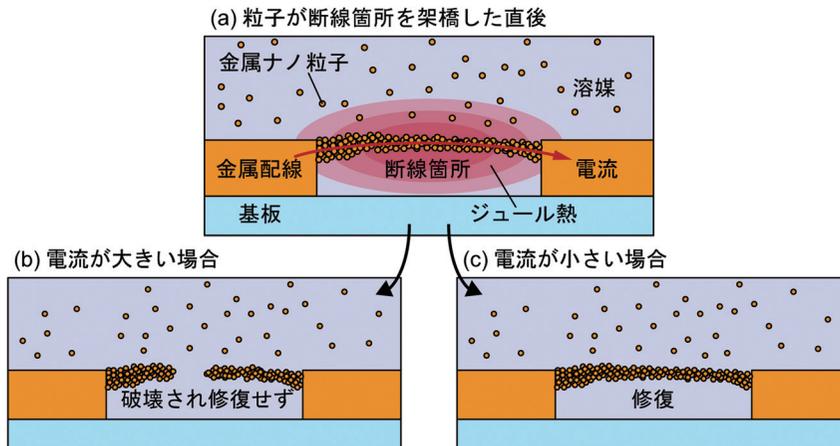


図3 (a) 粒子が断線箇所を架橋するプロセスの理論的解析。粒子が断線箇所を架橋した直後に電流によるジュール熱が生じる。(b) 電流がある一定の値よりも大きいとジュール熱によって架橋構造が破壊され修復が生じない。(c) 電流がある一定の値よりも小さいと断線が修復される。

力は粒子と断線箇所の表面間に働く斥力である。この2つの力は粒子や溶媒の物性によってのみ決定される[12]。一方で、誘電泳動力は不均一な電界によって粒子内部が分極されることで生じる引力であり、電界強度の2乗の勾配に比例する[13]。これはつまり、誘電泳動力は印加電圧によって決定されることを示している。図2(c)に示すように、粒子に働く合力が引力になるある一定以上の大きさの電圧を配線に印加した場合に、粒子が断線箇所にトラップされることが考えられる。

図3はトラップされた粒子が断線箇所を架橋するプロセスの概要図である。上記の解析によると、断線箇所の幅が大きくとも、比較的大きい電圧を配線に印加すれば粒子が断線箇所にトラップされることが考えられる。しかしながらこの場合、粒子が断線箇所を架橋した瞬間に流れる電流によって各粒子でジュール熱が発生することが考えられる。単位時間あたりに発生するジュール熱が粒子から溶媒へ放熱される熱量よりも大きい場合、ジュール熱によって粒子架橋構造が破壊され断線箇所の修復が生じないことが考えられる(図3(b))。一方で、単位時間あたりに発生するジュール熱が粒子から溶媒へ放熱される熱量よりも小さい場合、粒子の架橋構造が形成され断線箇所が修復されることが考えられる(図3(c))。各粒子で生じるジュール熱は粒子の抵抗値と電流値の2乗の積で表すことができ、粒子の抵抗値は粒子の粒径によって決定される。したがって、電流値にしきい値が存在し、粒子が断線箇所を架橋した瞬間に流れる電流がある一定以下の大きさの場合に、断線箇所に粒子架橋構造が形成されると考えられる。

上記2つの解析結果をまとめると、断線が生じた配線にある一定以上の大きさの電圧を印加し、かつ粒子が断線箇所を架橋した瞬間に流れる電流がある一定以下の大きさになる条件下であれば、架橋距離が数十 μm 以上の場合においても、粒子架橋構造が形成されることが考えられる。

2.2 解析結果の検証実験

次に、上記の解析結果の検証実験を行った。この検証実験においては、あらかじめ断線させたガラス基板上の金属配線を製作し、それを用いて断線箇所に粒子の架橋構造が形成されるかどうかの検証を行った。断線箇所の幅は $10\ \mu\text{m}$ とし、金属としては金を、金属ナノ粒子分散液としては直径 $150\ \text{nm}$ の金ナノ粒子分散液を用いた。ガラス基板上の金配線の製作にはフォトリソグラフィプロセスを用いており、ガラス基板上に厚さ $0.5\ \mu\text{m}$ の金を蒸着したあとに、金を断線が生じた配線形状にエッチングすることで製作した。製作した金配線に直列に抵抗を接続し、交流電源を用いて金配線と抵抗に $100\ \text{kHz}$ の交流電圧を印加した。抵抗の抵抗値の大きさと交流電源の電圧の大きさの組み合わせを変えることで、断線箇所に生じる電圧と架橋直後に流れる電流を変化させ、断線箇所に粒子架橋構造が形成されるかどうかの観察を行った。

図4に検証実験の結果を示す。図4(b)に示すように、断線箇所に生じる電圧が $6.1\ \text{V}_{\text{rms}}$ 以上かつ架橋直後に流れる電流が $15\ \text{mA}_{\text{rms}}$ 以下の場合においては、断線箇所に粒子架橋構造が形成されることを確認した。一方で、電流が $15\ \text{mA}_{\text{rms}}$ よりも大きい場合においては、図4(c)に示すように、粒子の構造体が形成されたが架橋は生じていなかった。粒子の構造体の一部の粒子は融解して塊状になっている様子も確認されており、このことは粒子の構造体がジュール熱によって破壊されたことを示していると考えられる。電圧が $6.1\ \text{V}_{\text{rms}}$ よりも小さい場合においては、図4(d)に示すように粒子がトラップされていなかった。

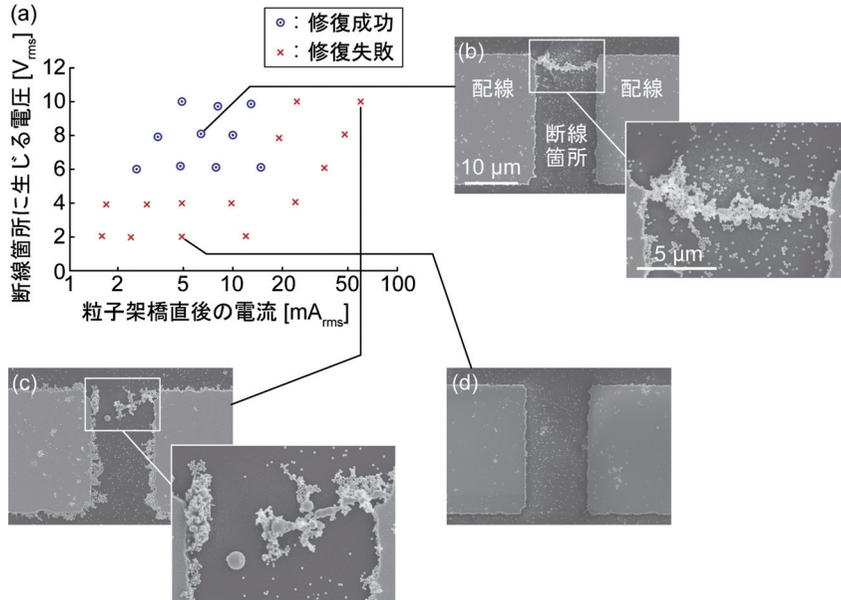


図4 (a)断線箇所に粒子架橋構造が形成されることの検証実験の結果。電圧が6.1 V_{rms} 以上かつ電流が15 mA_{rms} 以下の場合にのみ粒子架橋構造が形成され修復が生じた。(b)電圧が6.1 V_{rms} 以上かつ電流が15 mA_{rms} 以下の場合の断線箇所の写真。(c)電圧が6.1 V_{rms} 以上かつ電流が15 mA_{rms} より大きい場合の断線箇所の写真。粒子架橋構造が破壊され修復は生じなかった。(d)電圧が6.1 V_{rms} より小さい場合。粒子が断線箇所にトラップされていなかった。図4は参考文献[14]に掲載された図をもとに作成。

これにより、断線箇所における粒子架橋構造の形成条件が、断線が生じた配線にある一定以上の大きさの電圧を印加し、かつ架橋直後に流れる電流をある一定以下の大きさにすることを明らかにした。

3. き裂発生形態の決定要因の解明(機械的設計原理の解明)

3.1 理論的解析

まず、金属配線に生じるき裂発生形態を決める要因の理論的解析を行った。図5に示すように、エラストマシート上の金属配線に微細なき裂が生じている構造を考える。この構造において、き裂が生じている部分のひずみを ε_A 、き裂が生じていない部分のひずみを ε_B とし、図5 (b, c) の応力ひずみ線図に示す関係にあるとする。配線とエラストマシートの断面積を A_{metal} 、 A_{elast} 、金属の破断応力を σ_{metal} 、エラストマシートのヤング率を E_{elast} としたとき、き裂が生じている断面とき裂が生じていない断面における力のつり合いは、

$$\varepsilon_A E_{\text{elast}} A_{\text{elast}} = \sigma_{\text{break}} A_{\text{inter}} + \varepsilon_B E_{\text{elast}} A_{\text{elast}} \quad (1)$$

と表すことができる。式(1)を ε_A と ε_B について整理すると、以下の式を得る。

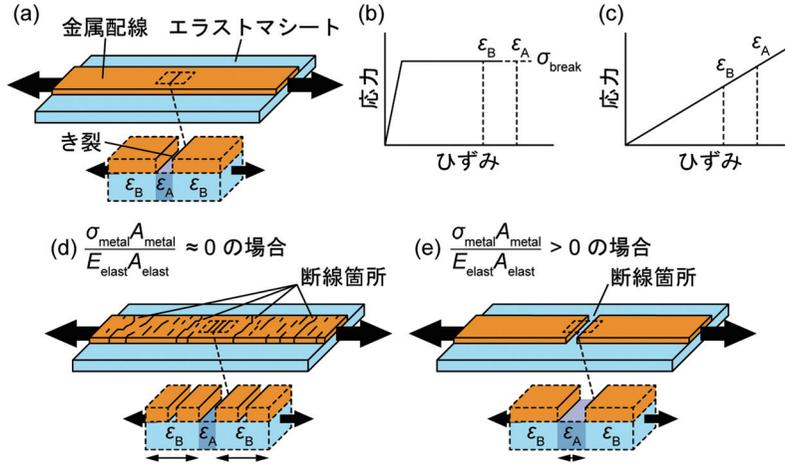


図5 (a) エラストマシート上の金属配線に生じるき裂発生形態の理論的解析。(b, c) 金属配線、およびエラストマシートの応力ひずみ線図。(d) 複数き裂発生形態による断線。配線の複数箇所断線が生じる。(e) 単数き裂成長形態による断線。配線の一箇所断線が生じる。図5は参考文献[21]に掲載された図をもとに作成。

$$\varepsilon_A - \varepsilon_B = \frac{\sigma_{\text{break}} A_{\text{inter}}}{E_{\text{elast}} A_{\text{elast}}} \quad (2)$$

式(2)は、き裂が生じている部分とき裂が生じていない部分のひずみの差が配線とエラストマシートの伸び剛性の比によって決定されることを示している。 $\varepsilon_A - \varepsilon_B$ がほぼゼロの場合、すなわち配線の伸び剛性が基板の伸び剛性よりも小さい場合は、 ε_A と ε_B の値が同じになるように変形することが考えられる。これはすなわち、最初に生じているき裂の他にもき裂が発生するように変形することが考えられる(図5(d))。このき裂発生形態を複数き裂発生形態とする。一方で、 $\varepsilon_A - \varepsilon_B$ がゼロよりも大きい場合、すなわち配線の伸び剛性が基板の伸び剛性よりも大きい場合は、 ε_A の値が ε_B の値よりも大きくなるように変形することが考えられる。これはすなわち、最初に生じているき裂が進展して大きくなるように変形することが考えられる(図5(e))。このき裂発生形態を単数き裂成長形態とする。

複数き裂発生形態と単数き裂成長形態の境界となる伸び剛性の比の値を求めるため、従来研究において金属配線とエラストマシートの伸び剛性の比とき裂発生形態の関係性の調査を行った。その結果、伸び剛性の比の値が約0.1以下では複数き裂発生形態が、比の値が約1.0以上では単数き裂成長形態をとることが示唆された[7, 11, 15-20]。

3.2 解析結果の検証実験

次に、上記の解析結果の検証実験を行った。この検証実験においては、伸び剛性の比の異なるポリウレタンシートに埋め込まれた直線形状の銅配線を製作し、銅配線を引っ張ることで生じるき裂の観察を行った。銅配線について、配線厚さを0.04 μm から1.17 μm に変化させることで銅配線とポリウレタンシートの伸び剛性の比を0.03から0.78に変化させた。製作した銅配線を可動ステージ上に固定し、可動ステージを動かすことで配線を引っ張り、マ

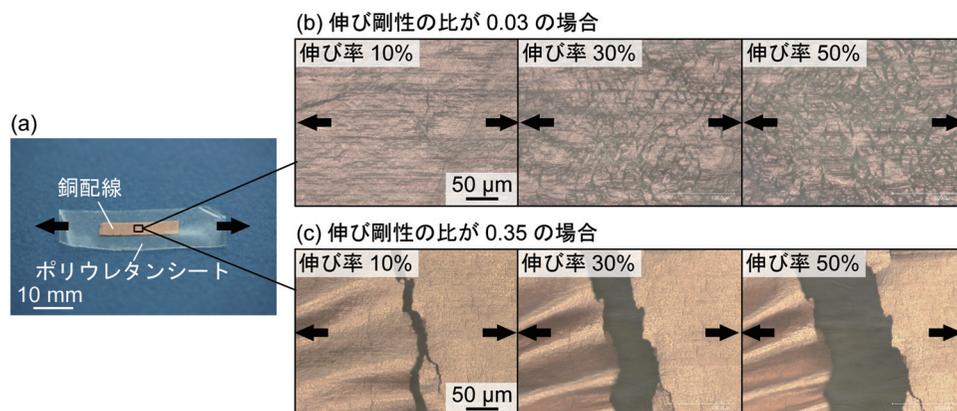


図6 (a) ポリウレタンシート内に埋め込まれた銅配線におけるき裂発生形態の変化の検証実験。(b) 銅配線とポリウレタンシートの伸び剛性の比が0.03の場合に生じたき裂の写真。小さな複数のき裂が発生し断線が生じた。(c) 伸び剛性の比が0.35の場合に生じるき裂の写真。大きな単数のき裂が発生し断線が生じた。図6は参考文献[21]に掲載された図をもとに作成。

イクロスコープを用いて生じるき裂を観察した。

図6に検証実験の結果を示す。伸び剛性の比が0.03の場合、小さな複数のき裂が発生することが観察された。配線の伸び率を大きくしていくと、それぞれのき裂の幅は変わらずに、き裂の個数が増えるように変形した。これは、複数き裂発生形態が生じたことを示している。一方で、伸び剛性の比の値が0.35よりも大きい場合、大きな単数のき裂が発生することが観察された。配線の伸び率を大きくしていくと、き裂の個数は変わらずに、き裂の幅が大きくなるように変形した。これは、単数き裂発生形態が生じたことを示している。

これにより、金属配線に生じるき裂の発生形態を決める要因が金属配線とエラストマシートの伸び剛性の比であり、伸び剛性の比を大きくすることでき裂発生形態が複数き裂発生形態から単数き裂成長形態に変化することを明らかにした。

4. フレキシブルエレクトロニクスへの応用

4.1 デバイスの設計と製作

まず、上記の電気的・機械的設計原理の解明で得られた成果をもとに、自己修復型金属を用いたデバイスの設計と製作を行った。図7にデバイスの概要図を示す。表面実装型LEDと1対の自己修復型金属配線で構成されている。デバイス内において波形状金属配線のみが金属ナノ粒子分散液で覆われた構造とし、金属ナノ粒子分散液はエラストマシートによって封止することとした。エラストマとしてはアクリルフォームを、金属配線としては金配線を、金属ナノ粒子分散液としては直径50 nmの金ナノ粒子分散液を用いることとした。デバイスの機械的設計に関しては、配線と配線が配置されているエラストマシートの伸び剛性の比が1.9になるように設計した。これにより、単数き裂成長形態によって配線の一箇所において断線が生じ、修復時の印加電圧が比較的小さくなるようにした。また、デバイスの電気的設計に関しては、断線箇所に生じる電圧が25 V_{rms}、架橋直後に流れる電流が4 mA_{rms}になる回路をデバイスに接続し、断線箇所の幅が数十 μm の場合でも修復が生じるように設計した。

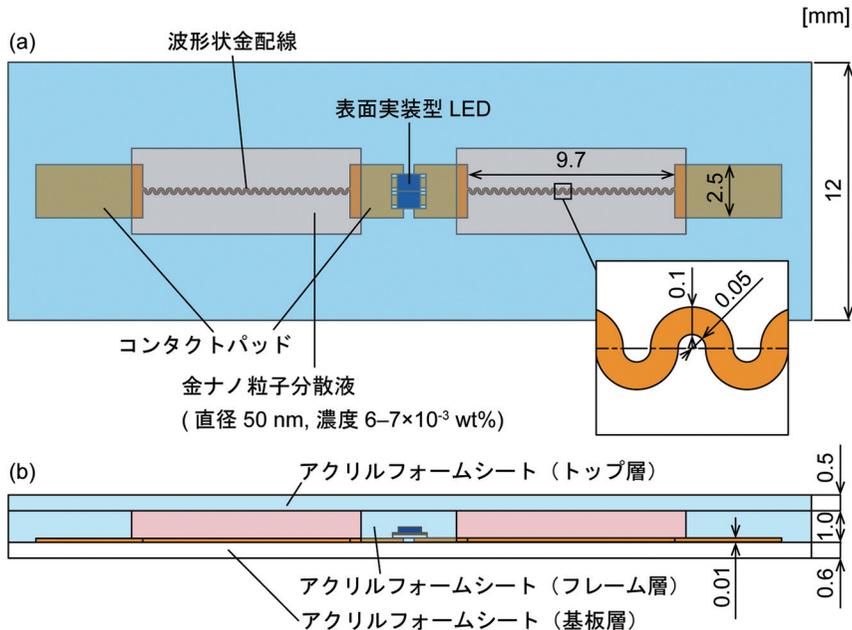


図7 (a) 自己修復型金属配線と表面実装型LEDを用いたデバイスの概要図。(b) デバイスの断面図。デバイス内において金配線のみが金ナノ粒子分散液に覆われている。図7は参考文献 [22] に掲載された図をもとに作成。

デバイスの製作プロセスを以下に示す。弱粘着のシート上に厚さ $10\mu\text{m}$ の金フィルムを張り付け、レーザ加工装置を用いて波形状配線およびコンタクトパッド形状に加工した。次に、金フィルムの不要な部分を剥がし、基板層となる粘着型アクリルフォームシート上に転写した。転写した金フィルムのコンタクトパッド部に表面実装型LEDをはんだ付けし、枠形状に加工したフレーム層となるアクリルフォームシートを貼り付け、金ナノ粒子分散液を滴下した。最後にトップ層となるアクリルフォームシートを貼り付け、金ナノ粒子分散液を封止した。

4.2 デバイスの評価

デバイスの評価のセットアップを以下に示す。製作したデバイスを可動ステージ上に固定し、ステージを動かすことでデバイスを引っ張り断線させた。デバイスに直列に抵抗 ($4.6\text{ k}\Omega$) を接続し、デバイスと抵抗に 100 kHz の交流電圧を印加することで、配線の断線箇所に生じる電圧を 25 V_{rms} 、架橋直後の電流を 4 mA_{rms} にした。デバイスのインピーダンスを電圧計と電流計によって算出し、デバイスのインピーダンス変化を計測した。

図8にデバイスの評価の結果を示す。デバイスの伸び率を徐々に大きくすると、伸び率が約7%のときにデバイス内のLEDが消灯し、デバイスのインピーダンスが急激に増加した(図8(b))。これは、デバイス内の配線が断線したことを示している。デバイスの伸び率を断線が生じた伸び率で固定しておくと、今度はLEDが再点灯し、インピーダンスが急激に減少した(図8(c))。これは、生じた断線が自己修復されたことを示している。また、このデバ

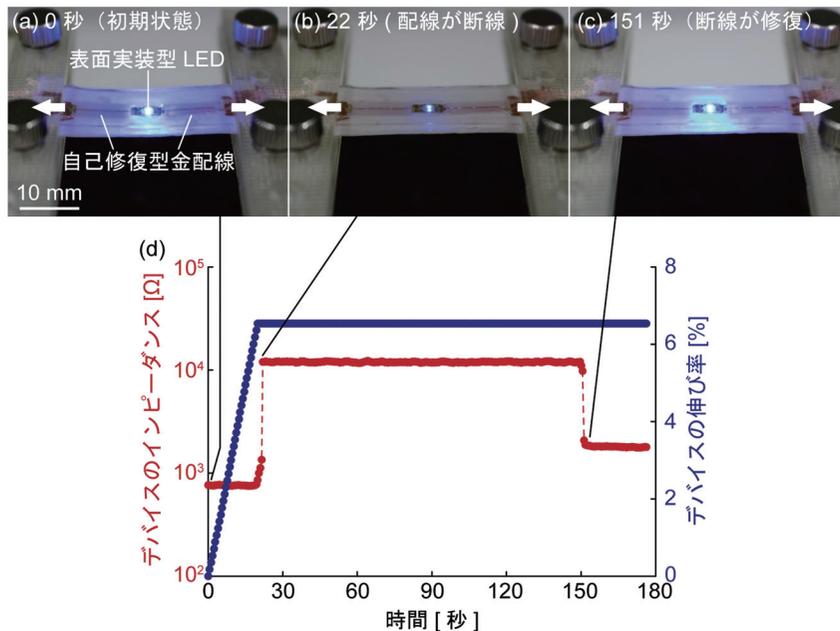


図8 自己修復型金属配線と表面実装型 LED を用いたデバイスの評価。(a) 初期状態 (デバイスの伸び率が0%)。LED が点灯している。(b) 22秒後 (デバイスの伸び率が約7%)。配線が断線し LED が消灯する。(c) 151秒後 (デバイスの伸び率は (c) と同じく約7%)。断線箇所が自己修復され LED が再点灯する。図8は参考文献 [22] に掲載された図をもとに作成。

イスに関しては、電源の切り替えをせずとも、LED 点灯、すなわちデバイスの駆動と、断線の自己修復を行っている点にも注目していただきたい。これにより、自己修復型金属配線を用いたフレキシブルエレクトロニクスを実現した。

5. まとめと今後の展望

5.1 研究のまとめ

本研究では、金属ナノ粒子の誘電泳動現象を用いて断線を自己修復する自己修復型金属配線を提案し、その電氣的・機械的設計原理を解明することで、自己修復型金属配線を用いたフレキシブルエレクトロニクスを実現した。

電氣的設計原理の解明では、断線の修復が生じる電圧・電流条件を解明し、断線箇所に生じる電圧をある一定以上の大きさに、かつ架橋直後に流れる電流をある一定以下の大きさにすることで、幅が数十 μm 以上の断線においても修復が生じることを明らかにした。機械的設計原理の解明では、金属配線に生じるき裂発生形態の決定要因を解明し、配線の伸び剛性をエラストマシートの伸び剛性よりも大きくすることで、単数き裂発生成長形態によって断線が生じることを明らかにした。これらの成果は、自己修復型金属配線にのみ寄与する成果ではなく、金属ナノ粒子の誘電泳動現象やフレキシブルエレクトロニクスに用いられる金属配線のき裂発生現象といったマイクロ・ナノスケールにおける物理現象において、未だ明らか

ではなかった原理の解明であるため、学術的にも意義深い成果だと考えている。上記の機械的・電气的設計原理の解明にもとづき、自己修復型金属配線と表面実装型LEDで構成されたデバイスを製作し、デバイスを引っ張ることで配線に生じた断線の自己修復の評価を行った。その結果、LEDの消灯およびデバイスのインピーダンスの増加のあとに、LEDの再点灯およびデバイスのインピーダンスの低下を確認した。これにより、自己修復型金属配線を用いたフレキシブルエレクトロニクスを実現した。

5.2 今後の展望

本研究で実現した自己修復型金属配線を用いたフレキシブルエレクトロニクスは、用いる電子部品の種類を限定しない技術であるため様々なデバイスへ展開することができ、実用化された際の社会への波及効果は大きいと考えている。具体的には、絆創膏のように人の肌に貼り付けて装着感なく生体情報をモニタリングするデバイスや、コミュニケーション型ロボットの全身を覆う電子皮膚型デバイス、および表示する情報を切り替え可能なディスプレイ埋め込み型衣服デバイスなどが実現できると考えている。また、断線の自己修復技術の有用性はフレキシブルエレクトロニクスに限定されず、断線した配線の交換や修理が困難な回路、例えば人工衛星や潜水艦に用いられる回路や、地面やコンクリートに埋め込まれた回路にも有用であると考えている。

6. 謝 辞

この研究を行うにあたり、お世話になりました皆様に深くお礼申し上げます。特に、早稲田大学の岩瀬英治准教授には、研究室の一期生としてこれまでに数えきれないほどのご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. J. Yu, Z. Yan, M. Han, and J. A. Rogers, "Inorganic semiconducting materials for flexible and stretchable electronics," *Flexible electronics*, vol. 1, 4 (14 pages), 2017.
- [2] M. L. Hammock, A. Chortos, B. C.-K. Tee, J. B.-H. Tok, and Z. Bao, "25th anniversary article: the evolution of electronic skin (E-Skin): a brief history, design considerations, and recent progress," *Advanced Materials*, vol. 25, issue 42, pp. 5997–6038, 2013.
- [3] K. Fukuda, Y. Takeda, Y. Yoshimura, R. Shiwaku, L. T. Tran, T. Sekine, M. Mizukami, D. Kumaki, and S. Tokito, "Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films," *Nature Communications*, vol. 5, 4147 (8 pages), 2014.
- [4] N. Matsuhisa, M. Kaltenbrunner, T. Yokota, H. Jinno, K. Kuribara, T. Sekitani, and T. Someya, "Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications," *Nature Communications*, vol. 21, 7416 (11 pages), 2015.
- [5] S. Xu, Y. Zhang, L. Jia, K. E. Mathewson, K.-I. Jang, J. Kim, H. Fu, X. Huang, P. Chava, R. Wang, S. Bhole, L. Wang, Y. J. Na, Y. Guan, M. Flavin, Z. Han, Y. Huang, and J. A. Rogers, "Soft Microfluidic Assemblies of Sensors, Circuits, and Radios for the Skin," *Science*, vol. 344,

Issue 6179, pp. 70–74, 2014.

- [6] N. Matsuhisa, D. Inoue, P. Zalar, H. Jin, Y. Matsuba, A. Itoh, T. Yokota, D. Hashizume, and T. Someya, “Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes,” *Nature Materials*, vol. 16, pp. 824–840, 2017.
- [7] D. S. Gray, J. Tien, and C. S. Chen, “High-conductivity elastomeric electronics,” *Advanced Materials*, vol. 16, no. 5, pp. 393–397, 2004.
- [8] A. Bezryadin and C. Dekker, “Electric trapping of single conducting nanoparticles between nanoelectrodes,” *Applied Physics Letters*, vol. 71, issue 9, pp. 1273–1275, 1997.
- [9] I. Amlani, A. M. Rawlett, L. A. Nagahara, and R. K. Tsui, “An approach to transport measurement of electronic molecules,” *Applied Physics Letters*, vol. 80, issue 15, pp. 2761–2763, 2002.
- [10] J-S. Na, J. Ayres, K. L. Chandra, C. Chu, C. B. Gorman, and G. N. Parsons, “Conduction mechanisms and stability of single molecule nanoparticle/molecule/nanoparticle junctions,” *Nanotechnology*, vol. 18, no. 3, 035203 (8 pages), 2007.
- [11] I. M. Graz, D. P. J. Cotton, and S. P. Lacour, “Extended cyclic uniaxial loading of stretchable gold thin-films on elastomeric substrates,” *Applied Physics Letter*, vol. 94, issue 7, 071902 (3 pages), 2009.
- [12] J. N. Israelachvili, “Intermolecular and surface forces 3rd ed.,” *Elsevier*, pp. 107–340, 2011.
- [13] T. B. Jones, “Electromechanics of Particles,” *Cambridge University Press*, pp. 5–82, 1995.
- [14] T. Koshi, Y. Nakajima, and E. Iwase, “Voltage and Current Conditions for Nanoparticle Chain Formation using Dielectrophoresis,” *Micro & Nano Letters*, vol. 12, issue 8, pp. 532–535, 2017.
- [15] O. Akogwu, D. Kwabi, S. Midturi, M. Eleruja, B. Babatope, and W. O. Soboyejo, “Large strain deformation and cracking of nano-scale gold films on PDMS substrate,” *Material Science and Engineering: B*, vol. 170, issues 1-3, pp. 32–40, 2010.
- [16] O. Graudejus, Z. Jia, T. Li, and S. Wagner, “Size-dependent rupture strain of elastically stretchable metal,” *Scripta Materialia*, vol. 66, issue 11, pp. 919–922, 2012.
- [17] I. R. Mineev, P. Musienko, A. Hirsch, Q. Barraud, N. Wenger, E. M. Moraud, J. Gandar, M. Capogrosso, T. Milekovic, L. Asboth, R. F. Torres, N. Vachicouras, Q. Liu, N. Pavlova, S. Duis, A. Larmagnac, J. V?r?s, S. Micera, Z. Suo, G Courtine, and S. P. Lacour, “Electronic dura mater for long-term multimodal neural interfaces,” *Science*, vol. 347, pp. 159–163, 2015.
- [18] T. Adrega and S. P. Lacour, “Stretchable gold conductors embedded in PDMS and patterned by photolithography : Fabrication and electromechanical characterization,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, 055025 (8 pages), 2010.
- [19] Y-Y. Hsu, M. Gonzalez, F. Bossuyt, F. Axisa, J. Vanfleteren, and I. D. Wolf, “The effect of pitch on deformation behavior and the stretching-induced failure of a polymer-encapsulated stretchable circuit,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 7, 075036 (11 pages), 2010.
- [20] M. Gonzalez, F. Axisa, M. V. Bulcke, D. Brosteaux, B. Vandeveldel, and J. Vanfleteren, “Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits,” *Microelectronics Reliability*, vol. 48, issue 6, pp. 825–832, 2008.

- [21] T. Koshi and E. Iwase, "Crack-Configuration Analysis of Metal Conductive Interconnect Embedded in Elastomer," *Micromachines*, vol. 9, issue 3, 130 (12 pages), 2018.
- [22] T. Koshi and E. Iwase, "Self-Healing Metal Interconnect for Flexible Electronic Device," *Proceedings of 2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, pp. 291-293, 2019.

