

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

Electrical and Mechanical Design Principle of  
Self-Healing Metal Interconnect and  
Its Application for Flexible Device

自己修復型金属配線の電氣的・機械的  
設計原理とフレキシブルデバイスへの応用

申 請 者

Tomoya KOSHI

古志 知也

Department of Applied Mechanics, Research on Micro and Nano Mechanics

2019 年 2 月

近年、柔軟な薄いシート状の電子デバイスであるフレキシブルデバイスの研究が盛んであり、人間の皮膚に貼り付ける生体情報モニタリングデバイスなどが提案されている。しかしながら、従来のフレキシブルデバイスにおいては、繰り返しや過度な伸縮変形によってデバイス内の電気配線が断線しやすい問題がある。この問題に対して、本論文では、金属ナノ粒子の誘電泳動によって生じた断線を自ら修復する自己修復型金属配線をフレキシブルデバイスに用いることを提案し、その設計原理の解明と実証を目的として論じている。以下に本論文を構成する各章の概要を示す。

第1章 **General Introduction** では、本論文の背景、目的、および構成を述べている。背景では、フレキシブルデバイスの先行研究において、デバイスに伸縮耐性を付与する手法の調査、分類、比較を行っており、本論文で用いる手法の新規性や優位性を述べている。また、上記の背景を踏まえ、目的を達成するために本論文で取り組むべき課題が、①配線に印加する電圧と電流を決定するための電氣的設計原理の解明、②配線の剛性を決定するための機械的設計原理の解明、および③設計原理に基づく自己修復型金属配線を用いたフレキシブルデバイスの実証であることを述べている。

第2章 **Nanoparticle Chain Formation using Dielectrophoresis** では、電氣的設計原理の解明として、金属ナノ粒子の誘電泳動における粒子架橋構造形成条件の解明を行っている。具体的には、粒子架橋構造形成条件の理論的解析、その解析結果の検証実験、および形成された粒子架橋構造に関する計測を行っている。理論的解析では、粒子が断線箇所にはトラップされる条件、およびトラップされた粒子が断線箇所を架橋する条件をそれぞれ理論的に解析している。その結果、粒子と断線箇所の表面間に生じる合力は主にファンデルワールス力、静電反発力、誘電泳動力で構成されており、この合力が引力になる電圧を印加した場合に粒子がトラップされること、および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生じるジュール熱が、粒子から溶媒への放熱量よりも小さくなる場合に、粒子の架橋構造が形成されるという解析結果を得ている。これはすなわち、断線が生じた配線に一定以上の電圧を印加し、かつ粒子架橋直後の電流が一定以下となる条件であれば、粒子架橋構造が形成されるということである。解析結果の検証実験では、あらかじめ断線させたガラス基板上の金配線を製作し、これを直径 150 nm の金ナノ粒子分散液で覆い、断線箇所に生じる電圧と粒子架橋直後の電流をそれぞれ変化させて、断線箇所に架橋構造が形成されるかの観察を行っている。その結果、断線箇所の幅が 10  $\mu\text{m}$  の場合、断線箇所に生じる電圧が 6.1  $\text{V}_{\text{rms}}$  以上かつ粒子架橋直後の電流が 15  $\text{mA}_{\text{rms}}$  以下の条件下でのみ粒子の架橋構造が形成されることを確認している。粒子架橋構造に関する計測では、粒子架橋構造の最大電流と電気抵抗、および架橋時間の計測を行っている。その結果、最大電流は断線箇所の幅が増加すると一定の値に収束すること、電気抵

抗は断線箇所の幅に比例しかつ架橋時の電流が増加すると低下すること，および架橋時間は断線箇所の幅が増加すると長くなりかつ断線箇所に生じる電圧が増加すると短くなることをそれぞれ明らかにしている．

第3章 Crack Configuration of Metal Interconnect では，機械的設計原理の解明として，伸縮基板に埋め込まれた金属配線におけるき裂発生形態を決める要因の解明を行っている．具体的には，き裂発生形態を決める要因の理論的解析，その解析結果の検証実験，および単数き裂成長形態の波形状金属配線に関する計測を行っている．理論的解析では，微細なき裂が生じた金属配線が伸縮基板に埋め込まれた構造を考え，これを引っ張ったときのき裂の進展について理論的に計算している．その結果，き裂発生形態が配線と基板の伸び剛性比によって決定されることが導出され，基板の伸び剛性が比較的大きい場合は，小さな複数のき裂が生じて断線する複数き裂発生形態に，配線の伸び剛性が比較的大きい場合は，大きな単数のき裂が生じて断線する単数き裂成長形態を示すという解析結果を得ている．また，き裂発生形態が変化する伸び剛性比の値を従来研究において調査したところ，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示すという解析結果も得ている．解析結果の検証実験では，伸び剛性比が異なるポリウレタン基板に埋め込まれた銅配線を製作し，これを引っ張ることで生じるき裂の観察を行っている．この銅配線においては，配線の厚さを変えることで伸び剛性比を 0.03 から 0.78 で変化させている．その結果，比の値が 0.35 以上になると，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確認している．波形状金属配線に関する計測では，断線時伸び率とき裂幅の計測を行っている．その結果，断線時伸び率は配線が厚くなると増加しかつ基板が厚くなると低下すること，および断線時伸び率とき裂の幅がほぼ比例関係にあることをそれぞれ明らかにしている．

第4章 Flexible Device using Self-Healing Metal Interconnect では，第2章と第3章で得られた結果をもとに，自己修復型金属配線を用いたフレキシブルデバイスの実証を行っている．具体的には，配線単体における断線の自己修復の検証と繰り返し伸縮変形下における修復特性の評価，および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と評価を行っている．断線の自己修復の検証と修復特性の評価では，配線と基板の伸び剛性比を 1.9 にして配線が単数き裂成長形態で断線するように，また，断線箇所に生じる電圧が  $20 V_{rms}$  かつ粒子架橋直後の電流が  $3 mA_{rms}$  になる回路を接続して断線箇所に粒子の架橋構造が形成されるように設計し，配線を引っ張ったときの抵抗変化を計測している．その結果，断線後に抵抗値の減少および断線箇所における粒子の架橋構造の形成を確認し，引っ張り変形によって生じた断線の自己修復に成功している．また，同様の計測を繰り返すことで，繰り返し伸縮変形下における修復特性の評価を行っており，断線時伸び率は低下すること，修復後抵抗は増加すること，修復時間は不規則に増減することをそれぞれ明

らかにしている。フレキシブルデバイスの製作と評価では、自己修復型金属配線と表面実装型 LED で構成されたフレキシブルデバイスを製作し、その評価を行っている。このデバイスにおいては、LED の点灯と断線の自己修復における電力の消費が電源の切り替え無しで行われる設計としている。その結果、デバイスを引っ張りつつ電力を印加したところ、電源の切り替え無しでの LED の点灯と断線の自己修復に成功している。

第 5 章 Conclusion では、本論文で得られた結果をまとめるとともに、自己修復型金属配線の今後の展望について述べている。

以上のように、本論文では、自己修復型金属配線の電氣的・機械的設計原理をそれぞれ解明することで、この配線技術を用いたフレキシブルデバイスを実現している。第 2 章、第 3 章で得られた成果は、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伸縮基板に埋め込まれた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、学術的な価値を有していると評価できる。また、第 4 章で得られた成果は、解明した原理をもとにした未だ実現していなかったデバイスの実証であるため、工学的な価値を有していると評価できる。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2019 年 1 月

審査員

主査 早稲田大学 准教授 博士（情報理工学）（東京大学） 岩瀬 英治

---

早稲田大学 教授 工学博士（東京工業大学） 川本 広行

---

早稲田大学 教授 工学博士（早稲田大学） 富岡 淳

---