

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 松久直司

ゴムシートのように伸び縮みするエレクトロニクスが活発に研究されている。医療・ヘルスケア、スポーツ、介護・福祉、ロボット分野など様々な応用が期待されている。例えば、装着するだけで心電や体中の筋電を計測できるセンサスーツはスポーツのフォームの改良やリハビリテーションに非常に有用であるし、ロボットの関節部にセンサがあればより高度な制御が可能になる。人の関節部においては 100%を超える大きな伸長性が必要であることが知られており、人を超える性能を持つように設計されるロボットではさらに大きな伸長性が必要である。そのような伸縮性電子デバイスを実現する上で不可欠となるのは伸縮性の配線技術である。これは十分に小さいリジッドな電子チップを伸縮性配線で接続するだけで伸縮性のデバイスとして用いることができるからである。伸縮性の配線技術として、バネのような構造体を用いる技術や、ガリウムとインジウムからなる合金液体金属を用いる技術などが開発されている。中でも伸縮性のあるゴムと金属粉などの導電フィラーのコンポジットを用いる技術は大面積に印刷形成ができる、価格が安い、といったメリットがあるため盛んに研究がおこなわれている。これまでに  $10,000 \text{ S cm}^{-1}$  を超える高い導電率を持つ材料や 500% 以上の高い伸長性を持つ材料が開発されてきた。しかしながら、導電率と伸長性はトレードオフの関係にあり、100%を超える高い伸長率において  $100 \text{ S cm}^{-1}$  を超える導電率を持つ材料は報告されていなかった。本研究では、高い伸長性 (>100%) と高い導電性 (> $100 \text{ S cm}^{-1}$ ) を併せ持ったプリンタブル伸縮性導体を開発することを目的とした研究を進めた。

第一章では、伸縮性エレクトロニクスの背景と本研究の目的について述べている。

第二章では、これまで開発されてきた伸縮性配線技術と、それを用いた伸縮性デバイスについて説明している。

第三章では、今回の開発に用いた材料と、評価手法について説明している。

第四章では、本研究で開発した二種類の伸縮性導体インクの内的一本である相分離型伸縮性導体インクについて述べている。伸縮性導体インクは、銀フレーク、フッ素ゴム、メチルイソブチルケトン、フッ素界面活性剤水溶液を混ぜて作製される。フッ素界面活性剤を添加することによって、伸長性が 25% から 215% に大幅に改善された。さらに、大きな伸長性を維持したままで導電率は  $182 \text{ S cm}^{-1}$  と非常に高い値を達成した。これはこれまで報告されてきたプリンタブル伸縮性導体の中では世界最高の値となる。

第五章では、より高い導電性と伸長性を実現するために相分離型伸縮性導体インクの見直しを行い、フッ素ゴムの分子量・界面活性剤・インクの乾燥プロセスについて詳細に検討を行った。その結果、銀フレーク・フッ素ゴム・フッ素界面活性剤・メチルイソブチルケトンからなるインクを印刷するだけで、元々は含まれなかった銀ナノ粒子がゴム中に *in situ* 合成されることが分かった。作製された伸縮性導体は伸長を掛けないときの導電率が  $6,168 \text{ S cm}^{-1}$ 、400%伸長したときの導電率が  $935 \text{ S cm}^{-1}$  と非常に高い値を示した。これは第四章で開発した伸縮性導体の特性を上回るもので、100%以上の伸長領域で世界最高の性能となった。さらに、銀ナノ粒子生成のメカニズムは、フッ素ゴム中に銀フレークの銀がイオンとして溶け出し、界面活性剤が還元剤として働いてそのイオンを銀ナノ粒子として析出させることによることを解明した。

第六章では、伸縮性導体中での銀ナノ粒子が生成する効果について更なる実験を進めている。まず、銀ナノ粒子乾粉を伸縮性導体インクに加えることで、同様の特性改善がみられるかどうか調査を行った。その結果、銀ナノ粒子を後から加える手法では、十分に分散しなかった銀ナノ粒子がクラックの起点となって材料の伸長性を劣化させることが分かった。

第七章では、伸縮性導体を用いて完全印刷プロセスの伸縮性圧力・温度センサを作製した。圧力・温度センサはそれぞれシリコンゴム・ニッケル粉、アクリル高分子・グラファイトのコンポジット材料で、加えられた圧力・温度によって抵抗が 4 桁以上変化する。これらを伸縮性導体によって配線することで伸縮性のセンサを実現した。センサ部分は伸縮時の歪による抵抗変化を抑えるために、前もって印刷形成した非伸長性のレジスト層上に形成した。作製したセンサは 250%伸長しても安定して動作することが確認された。さらに作製されたセンサ回路はホットメルトを用いることで自由表面に貼り付けることが可能で、テキスタイル基材に貼り付けて 120%伸長しても動作した。

第八章は本論文のまとめである。

以上を要するに、本研究では、銀ナノ粒子をゴム中に *in situ* で合成する手法によって、高い伸長性と高い導電性を併せ持つプリンタブル伸縮性導体を作製し、テキスタイル型の筋電・圧力・温度センサを作製することに成功し、伸縮性エレクトロニクスの新しい可能性示したもので、電子工学における貢献は大きい。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格であると認められる。