

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	山形大学 有機エレクトロニクスイノベーションセンター
職 位 または 役 職	准教授 (プロジェクト教員)
氏 名	竹 田 泰 典

1. 研究題目

印刷型微細電極パターンによる平面型アクチュエータの創生

2. 研究目的

印刷法を用いて電極材料や機能性材料を形成し、電子デバイスを作製する印刷エレクトロニクスに注目が集まっている。これは、従来の真空プロセスを基本とする金属膜形成法や化学薬品を用いた電極パターンニング法と比較し、消費エネルギーが少ない、化学薬品の使用量が少ない、材料の利用効率が高いなど、低環境負荷なプロセスであるとして、持続可能な開発目標 (SDGs) が達成可能なプロセスとして期待されている為である。

印刷エレクトロニクスを用いて実現されるアクチュエータとして、PVDF 系強誘電性材料の有機溶媒に可溶という特徴を活かした印刷型アクチュエータ[1]が報告されており、デバイス構造は電極で強誘電体を挟んだ積層型のサンドイッチ構造である (図 1)。強誘電体材料の薄膜化を行うことで電界強度を高めることが可能であり、低電圧駆動化に繋がるが、一般的に印刷法で形成される電極材料や強誘電材料の平坦性は低いため、絶縁破壊を起こし歩留まりの低下が起こる (図 2) という課題があり、歩留まりを向上させるために、強誘電材料層の厚膜化を行うと、駆動電圧が増加してしまうという課題が発生していた。また、電極を図 3 の様に楕型に形成し電極を平面型にした場合でもアクチュエータを構築可能であると考えられているが、これまで電極形成に用いられているスクリーン印刷法等では、電極ギャップが広い場合、分極処理における印加電圧が 10,000V 近く必要であり、デバイス作製自体が困難という課題があった。

これらの課題を解決するために、本研究では狭ギャップ実現可能な反転オフセット印刷法を用いた平面型の印刷型アクチュエータの創生を目的に研究を行う。本印刷法は、1 μm 以下のギャップを実現可能な印刷方法[2]であり、平面型においても積層型以下の低駆動電圧の実現と高い歩留まりを達成することが可能であると考ええる。

本アクチュエータの応用先として、振動デバイスやユーザーが「実際にモノに触れているような感触」を実現する皮膚感覚フィードバック (ハプティクス) デバイスへの応用が期待され、近年課題とな

っている少子高齢化による働き手不足を解決するための AI の活用やデジタル化 (DX) を実現するための重要なキーデバイスへの応用が期待される。

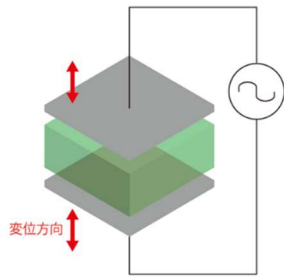


図1. 積層型構造

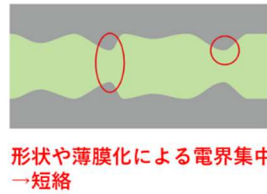


図2. 課題

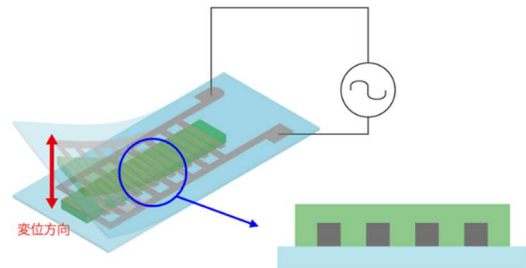


図3. 提案のデバイス構造 (平面型)

【参考文献】

- [1] Y. Shouji, T. Sekine, K. Ito, N. Ito, T. Yasuda, Y.-F. Wang, **Y. Takeda**, D. Kumaki, F. D. D. Santos, A. Miyabo, S. Tokito, Adv. Electron. Mater. 9, 2201040 (2023).
 [2] K. Fukuda, Y. Yoshimura, T. Okamoto, **Y. Takeda**, D. Kumaki, Y. Katayama, S. Tokito, Adv. Electron. Mater., 1, 1500145 (2015).

3. 研究内容及び成果

本研究では、反転オフセット印刷法を用いた平面型アクチュエータの創生を目的とし、微細電極パターン形成と強誘電体アクチュエータ構造の実現に向けて研究を進めた。当初計画では、微細電極を形成するために高平坦度ガラスを用いた印刷版を使用する予定であった。しかし、印刷版の製造を依頼していた国内メーカーが突如撤退し、代替メーカーの見積りが極めて高額であったため、従来方式でのガラス印刷版の利用を断念せざるを得なくなった。

この状況を受け、新たなアプローチとして、高解像度 3D プリンター (microArch® S230, BMF) を用いた印刷版の製造を着想した。工学解像度 $2\ \mu\text{m}$ を持つ本装置により、柔軟な設計変更、迅速な製造、低コスト化、環境負荷低減が期待できる。しかし助成者の所属する山形大学内には本装置が存在しないため、海外 (韓国) の研究施設に協力を依頼し、同装置を用いた版製造に着手した。

反転オフセット印刷において、印刷版の表面平坦性は極めて重要な要素である。ブランケット上に形成された銀薄膜の不要部分が印刷版に転写される際、版表面の凹凸が大きいと、ブランケットと接触する／しない領域が生じ、パターンの歪み・欠損が避けられない。したがって、3D プリンター製版の最大の技術的焦点は「高平坦度の実現」である。本研究で取り組んでいる「3D プリンターで作製した印刷版を反転オフセット印刷に適用する手法」は、世界初の試みであり、学術的にも産業的にも大きな意義を持つ。

印刷版設計は 3D CAD により行い、協力機関にて試作を開始した。1 度目の製造トライでは、線幅・線間隔ともに要求仕様が厳しすぎたため、造形が成立しなかった。現在は線幅／線間隔を $10\ \mu\text{m}$ 程度に緩和し、2 度目の製造を進めている段階である (3D プリンターの工学解像度は $2\ \mu\text{m}$ のため、今後さらに微細化が可能)。このプロセス確立は、本研究の根幹となる技術である。

一方、アクチュエータ駆動に必要な高電圧制御を先行して構築するため、購入したピエゾドライバならびに電子部品を組み合わせ、駆動回路を作製済みである。現時点ではデバイスの完成を待っており、試運転は未実施であるが、今後のデバイス統合・評価に向けた基盤が整った。

以上のように、本研究期間では、従来のガラス版方式に代わる「3D プリンターベースの新規印刷版製造プロセス」という、計画を上回る新規性の高い研究方向が確立された。これにより、反転オフセット印刷法を用いた平面型アクチュエータの実現に向けた大きな技術的前進が得られた。

4. 今後の研究の見通し

本研究は 2024 年度の助成により、強誘電体材料の印刷パターンニング条件、平面型アクチュエータの電極設計、ならびに駆動回路の構築といった基盤的要素を整えることができた。また、反転オフセット印刷に用いる従来のガラス製印刷版が入手困難となったことを契機に、高解像度 3D プリンターによる世界初の印刷版製造を着想したことは、本研究の大きな前進である。

今後は、以下の研究を進める予定である。

- (1) 3D プリンターを用いた新規印刷版の実証と高平坦度化
 高精細 3D プリンターを用いて印刷版の製造を本格的に進める
 xy 分解能 2 μm の造形精度を活かし、線幅／線間隔 2-10 μm のパターンを試作
 版表面の平坦性評価(表面粗さ・微小凹凸解析)
 必要に応じて後処理(UV 硬化条件・表面コーティング)を追加し、高平坦度を確保
 3D プリント製版プロセス確立は、反転オフセット印刷法における革新的ブレークスルーであり、成功すれば印刷版のコスト低減・短納期化・環境負荷低減に大きく寄与する
- (2) 3D プリンター製印刷版を用いた微細電極の形成・評価
 3D プリントした印刷版を反転オフセット印刷法に適用し、銀電極を形成
 パターン忠実度、線幅、線間隔、焼成温度と抵抗率の関係などを詳細に評価
 フォトリソ電極と比較することで、3D プリント版の実用性・限界を明確化
- (3) 平面型強誘電アクチュエータの作製
 ディスペンサー塗工条件の再最適化
 山形大学 関根准教授らと協力したポーリング(分極)条件の詳細導出
 3D プリント版／フォトリソ版の双方でアクチュエータを試作し比較
- (4) 駆動特性の測定と動作検証
 ファンクションジェネレータ＋増幅アンプでの駆動試験
 レーザー変位計による変位量・応答速度・駆動電圧依存性の評価
 低電圧化のための電極設計指針の確立
- (5) アレイ化に向けた設計指針の構築
 電極パターンのモジュール化、配線設計、駆動回路の多チャンネル化を検討
 2024 年度に完成したドライバー回路を拡張し、アレイ駆動への展開を図る
 ハプティクスデバイスなど応用先との整合性も検証する
- (6) 成果発表と外部発信
 世界初となる「3D プリンター製印刷版 × 反転オフセット印刷」の実証結果を論文化
 国内外の関連学会・ジャーナルへの投稿を積極的に進める

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

- (1) 2026 年春季応用物理学会学術講演会(予定)