

資 料

樹脂成形立体配線および伸縮性配線に関する研究

井上 淳*・金山 真宏*

1. 目 的

印刷による電気回路形成の歴史は古く、1970年代にはすでに基本技術が確立されており50年以上の歴史を持つ¹⁾。現在では、パーソナルコンピューターのキーボードや家庭用電子機器のスイッチの多くに、プラスチックフィルムに印刷技術を用いて回路形成したメンブレンスイッチが内蔵されている。2000年代になると微細配線の描画や有機材料を用いたデバイス開発に関する研究が数多く行われた^{1)~3)}。これらはプリントドエレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス、オーガニックエレクトロニクスなどと呼ばれ、島根県産業技術センターでも2013年から2018年にかけて行われた先端技術イノベーションプロジェクト（第1期）において、印刷による各種センシングデバイス開発、フレキシブル回路形成、印刷技術の高度化等に関する研究が行われた^{4)~6)}。

プラスチックフィルムを基材に用いたフレキシブルプリント基板（Flexible Printed Circuits：FPC）は柔軟性を有するため、湾曲させたり巻き付けたりすることが可能であり、さらに、フィルムを複雑な形状にしたり切り込みを入れたりすることによって、部材の筐体に沿わせて配置し、立体的な利用をすることができる。しかしながら、FPCは球のような非展開面に隙間なく沿わせて配置することはできない。この課題を解決するため、近年、熱可塑性樹脂基板に印刷を用いて回路形成し、その後、基板を印刷回路ごと熱成形することで立体的な電気回路を形成する技術の研究開発が行われている⁷⁾。本技術は、これまでに作製することが困難であった形状の回路形成が可能であることに加えて、樹脂基板をそのまま部材の筐体として利用できるため、部材の軽量化、省スペース化、部品点数や製造工程の削減等が期待でき、自動車のインストルメントパネルやオーバーヘッドコンソール、家電等への応用が検討されている^{8), 9)}。

一方で、近年、身体の動きや心拍等の情報をセンサにより取得するウェアラブルデバイスに関する研究が行われている¹⁰⁾。ウェアラブルデバイスには身体の動きや形状の変化に柔軟に追従することが必要であるため、基板伸長時

にも断線することのない伸長性を有する配線材料が必要とされる。また、伸長性を有する配線は屈曲にも耐性を持つため、折り曲げて使用することも可能である。その際の基板としてはプラスチックフィルムの他、紙なども利用できる。

こうした情勢を鑑み、島根県産業技術センターでは2018年4月から開始された先端技術イノベーションプロジェクト（第2期）において、成形性銀ペーストを用いた立体配線部材および伸縮性銀ペーストを用いた配線部材に関する研究開発を行っている。本資料では、これまでに当センターで行った試作事例を中心に紹介する。

2. 方 法

2.1 成形性銀ペーストを用いた配線部材

基板は主にアクリロニトリルブタジエンスチレン樹脂（オージェイケイ株式会社）を用いた。基板の厚みは0.2~0.4mmである。ペーストには成形性銀ペースト（DuPont, ME602）および絶縁性ペースト（DuPont, ME772）を用いた。また、必要に応じてインサート成形用一液型スクリーンインキ（帝国インキ, ISXシリーズ, TOCシリーズ）による加飾印刷を行った。

印刷はスクリーン印刷機（株式会社マイクロテック, MT-320TV）により行い、各ペーストの印刷後には送風定温乾燥機（ADVANTEC, DRM620TA）により所定の温度・時間での加熱乾燥を行った。その後、導電性接着剤（DuPont, ME902）によりLED, 抵抗, コンデンサ等を基板上へ手実装し、再び電気炉にて導電性接着剤の加熱乾燥を行った。

真空成形は小型真空成形機（株式会社ラヤマパック, V.former）にて行った。真空成形で使用する型は3Dプリンター（ANYCUBIC, i3 Mega）により作製した。

真空成形前後の配線抵抗は、ソースメーター（Keithley, 2400）により端子間に電圧を印可した時の電流を測定することにより算出した。

2.2 伸縮性銀ペーストを用いた配線部材

2.2.1 伸縮性基板

伸縮性基板は市販のシリコン変性熱可塑性ポリウレタンエラストマーフィルム（厚み0.15mm）を用いた。ペーストは伸縮性銀ペースト（DuPont, PE874）および絶縁性ペースト（DuPont, PE773）を用い、成形性銀ペースト

* 多様な形状・材料への曲面印刷技術開発プロジェクトチーム

トを用いた場合と同様に印刷および加熱乾燥を行った。その後、一液低温硬化型フレキシブル導電性接着剤（セメダイン株式会社，SX-ECA48）でLEDおよび抵抗を基板上へ手実装し加熱乾燥を行い、チップの剥離を抑制するため、チップ電極部に弾性強力接着剤（セメダイン株式会社，スーパー X）を塗布した。

伸縮試験は導体抵抗測定システムを備えた卓上型耐久性試験機（ユアシステム機器，DMLHP-ST）により行った。試験に用いた印刷配線の幅は3mm，長さは100mm，試験実施前の抵抗値は約6Ωである。伸長率は10%，繰返し速度は10rpm，繰返し回数は1000回とした。

2.2.2 紙基板

作製方法は、基板に紙クリエイター和紙タイプ中厚口（プラス株式会社，IT-324J）を用いたこと以外は、2.2.1で記載した伸縮性基板の場合と同様とした。紙基板上への回路印刷および部品実装後、紙を折り曲げることにより立体化させた。

3. 結果

3.1 成形性銀ペーストを用いた配線部材

図1 (a) および (b) に試作した樹脂成形立体配線試料の写真を示す。LEDや抵抗を基板上に実装した箇所を真空

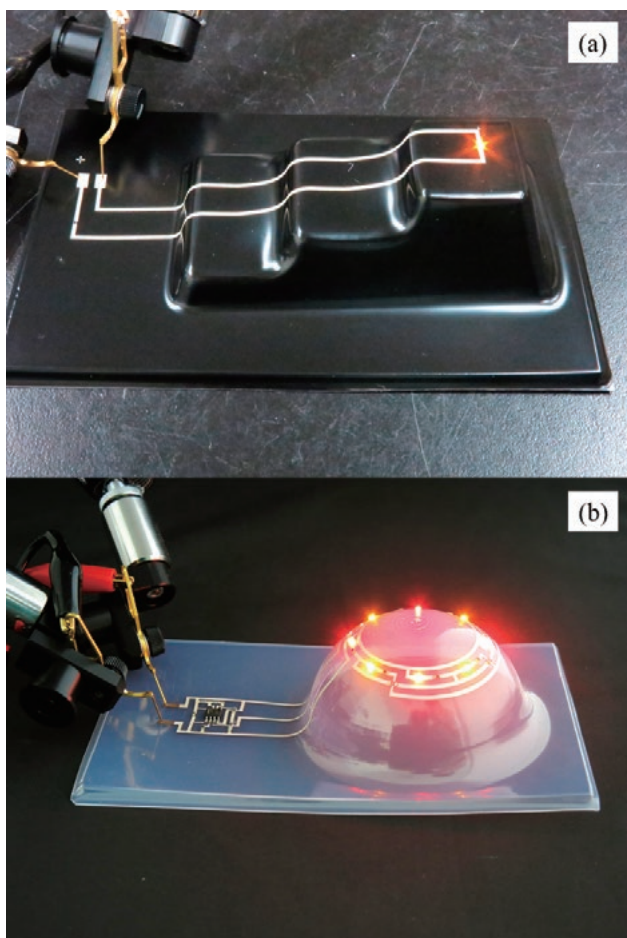


図1 樹脂成形立体配線試料

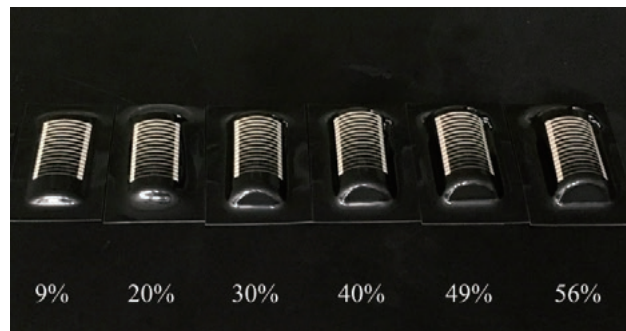


図2 蒲鉾状成形試料

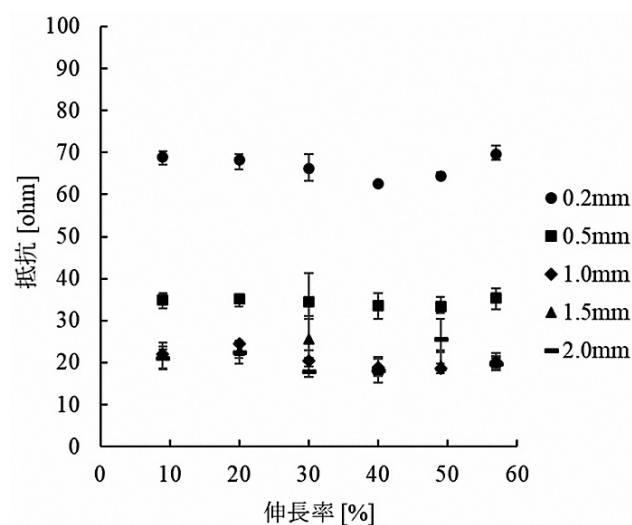


図3 蒲鉾状成形試料の配線抵抗

成形により階段状および半球状に立体化させたが、配線の断線や実装部品の脱離は見られず、配置したLEDが点灯することを確認した。

成形用配線は、熱可塑性樹脂成分中に分散された導電性フィラーがネットワークを形成することにより導電性が発現する。成形時には過熱により樹脂成分が軟化し伸びが生じるが、同時に導電性フィラーネットワークも柔軟に変形することで断線することなく立体配線を形成することができる。

図2に伸長率を8～56%まで変化させて蒲鉾状に成形した試料の写真を示す。成形時の加熱条件は70℃，30sec.とした。配線幅は0.5～2mm，配線長さは40mmである。図3に成形後の配線抵抗値を示す。各配線幅において、伸長率を増加させても抵抗値は大きく変化しないことが確認された。

3.2 伸縮性銀ペーストを用いた配線部材

3.2.1 伸縮性基板

図4に試作した伸縮性配線試料の写真を示す。(a)が無伸長時，(b)が30%伸長時である。30%伸長時においても印刷配線は断線することなく、配置したLEDが点灯し続けることが確認された。

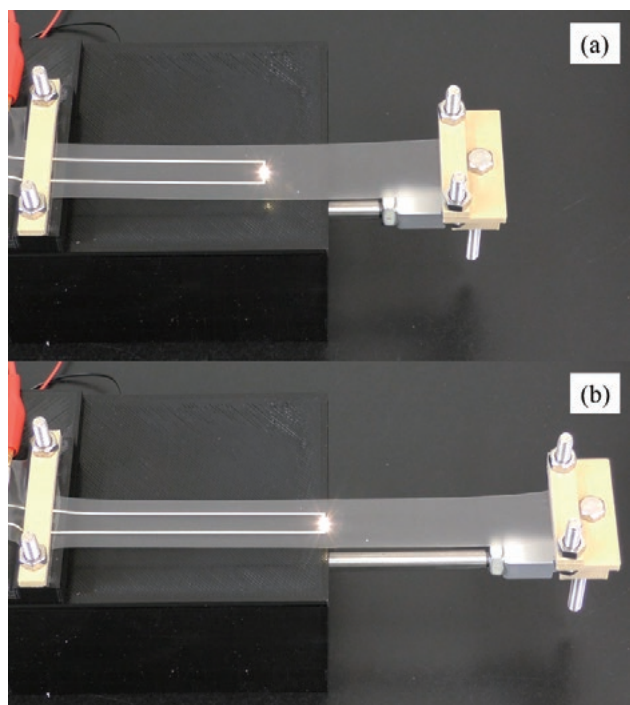


図4 伸縮性配線試料

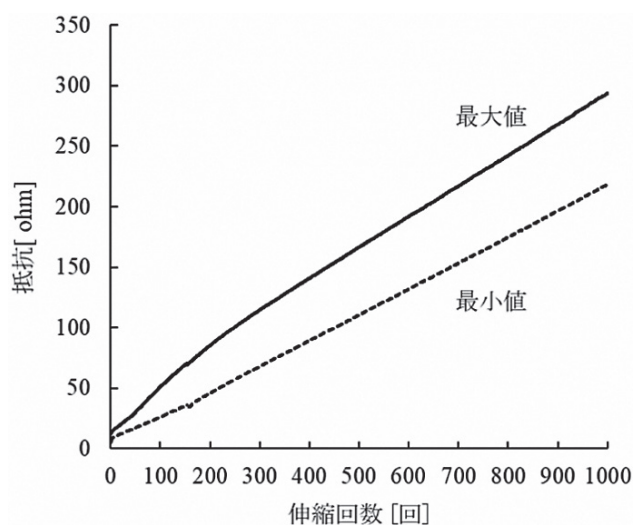


図5 繰り返し伸縮における配線抵抗変化

伸縮性配線はエラストマー成分中に導電性フィラーが分散された構造を持つ。成形用配線では過熱時の伸長において断線が生じないよう材料の調整がなされているが、伸縮性配線は室温における伸長で断線が生じないように各ペーストメーカーでの開発が進められている。

伸縮時の抵抗値変化を測定するため、伸縮試験を実施した。図5に伸縮試験結果を示す。点線は伸縮1サイクルにおける抵抗の最小値、実線は最大値を示している。伸縮試験の結果、伸縮を繰り返すことにより配線抵抗値が次第に増加することが確認された。また、伸縮1サイクルにおける最小値は無伸長時に観察されたが、最大値は10%伸長時ではなく、形状変化割合が大きい伸長および収縮の途中で観

察された。これは、形状変化時に配線中の銀フィラーネットワーク構造が大きく変化するためであると推測される。

繰り返し伸縮時の配線抵抗の変化は伸長率だけでなく、繰返し速度、基板の硬度、基板厚さなどにより影響を受ける。今回の基板フィルムおよび伸縮性銀配線ペーストの組み合わせでは1000回伸縮試験後の抵抗値が300Ωに達したが、基板フィルムや銀ペーストの種類を変えることにより、1000回伸縮試験後の抵抗値を100Ω以下に留めることができることが確認されている。伸長性配線を用いた部材の製品化にあたっては、伸長・屈曲時に配線抵抗値の増加が抑制される組み合わせとなる材料選定が重要である。

3.2.2 紙基板

伸縮性を有する配線は、基板折り曲げ時にも断線することなく柔軟に追従するため、紙基板に印刷し、その後、紙基板を立体的に折り曲げることにより、立体配線部材を形成することができる。立体折り紙の展開図は、筑波大学三谷純教授が考案した「タマゴのラッピング」とした¹¹⁾。図6に試作した紙製立体配線試料の写真を示す。山折りおよび谷折り共に180°の折り曲げを行っても銀配線の断線は確認されなかった。



図6 紙製立体配線試料

3.3 成果PRと製品化に向けた取り組み

これらの成果を広くPRするため、2019年1月および2020年1月に東京ビッグサイトで開催されたコンバーティングテクノロジー総合展に高機能センシング応用製品開発プロジェクトチームと共同で出展した。2020年の展示会出展の様子を図7に示す。展示会では多くの方と意見交換を行い、製品化に向けた情報収集を行った。

また、県内の樹脂製品製造メーカー、電子部品製造メーカー等を訪問し、試作品を提示しながらプロジェクトの取り組みについて説明を行った。これらの取り組みの一部は県内企業と共同での試作が開始されるなど、製品化に向けての開発が加速している。

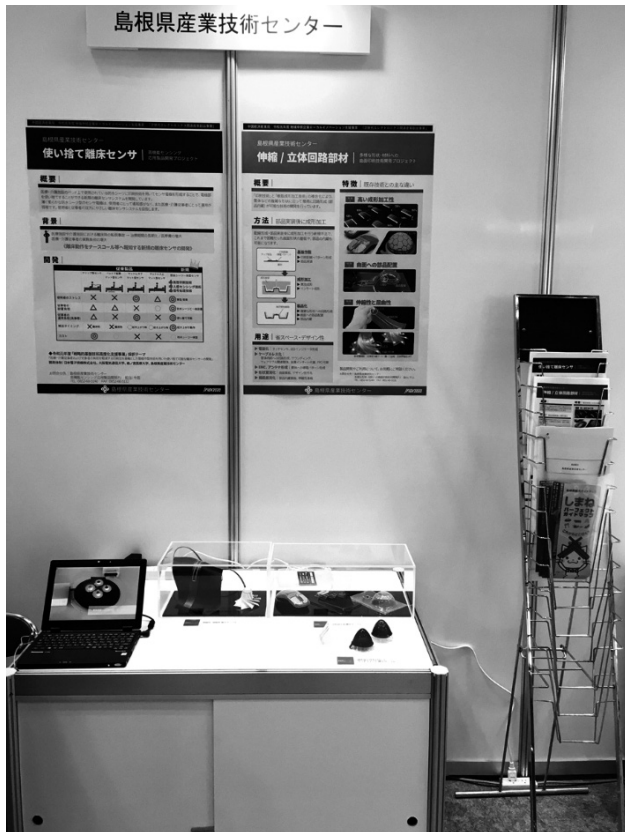


図7 コンバーティングテクノロジー総合展 2020

文 献

- 1) 沼倉研史. よくわかるプリンタブル・エレクトロニクスのできるまで. 初版, 日刊工業新聞社, 2009, 163p.
- 2) 沼倉研史. よくわかるフレキシブル・エレクトロニクスのできるまで. 初版, 日刊工業新聞社, 2010, 197p.
- 3) 佐野康. プリンテッドエレクトロニクス. 初版, 株式会社印刷学会出版部, 2011, 159p.
- 4) 島根県. 国立研究開発法人産業技術総合研究所. 静電容量型センサ. 特許第 6775800 号. 2020-10-9.
- 5) 島根県. 味覚センサ. 特開 2020-56749. 2020-4-9.
- 6) 岩田史郎, 金山真宏, 井上淳, 今若直人, 仁宮敏行, 田中晴之, 玉木健吾, 曾田大輔, 石飛浩一. プリンテッドエレクトロニクスを志向したスクリーン印刷工法におけるコンタクト方法および版離れ機構の検討. 島根県産業技術センター研究報告. 2017, no.53, p.1-6.
- 7) サン ケミカル コーポレーション. 熱成形可能な導電性インクおよびコーティングならびに熱成形デバイスの製造プロセス. 特許 6626501. 2019-12-6.
- 8) NISSHA. 意匠と機能を融合する成形技術 インモールドエレクトロニクス (IME) が生み出す新しいデザイン. https://connect.nissha.com/ime/ime_navi/2020-07-10/. (参照 2021-11-12).
- 9) コーンズテクノロジー. 射出成形構造エレクトロニクス (IMSE) 技術. https://www.cornestech.co.jp/tech/products/products_tactotek_1/ (参照 2021-11-12).
- 10) 野村武史ほか. ウェアラブルデバイスの小型, 薄型化と伸縮, 柔軟性の向上技術. 技術情報協会, 2015, 510p.
- 11) 三谷純. 立体折り紙アート. 初版, 日本評論社, 2015, 137p.