事例紹介

印刷エレクトロニクス技術

Printed Electronics Technology

川 原 圭 博* *東京大学大学院情報理工学系研究科
Yoshihiro Kawahara* *The University of Tokyo

1. 印刷による回路作成技術

デジタル技術を用いたプロトタイピング技術は単なるブームを超え、今では商品開発にとっては欠かせないプロセスとなった。この背景には低価格の3D プリンタが数多く登場し、高機能でありながら無償で利用可能なCAD (Computer-aided Design) が登場したことなど、ハード、ソフト両面からのものづくりツールの充実が寄与している。ただしIoT (Internet of Things) 機器のプロトタイピングを行うとき、Arduino や Raspberry Pi といったマイコンボードを接続するための回路基板は、ブレッドボードやユニバーサル基板を用いたりプリント基板を外注することで対応するしかないのが現状である。昨今では、電気伝導性の良好なインクやペーストが一般に容易に入手できるようになったことで電子回路やセンサ、アンテナを印刷により手軽に作成できるようになってきた。本稿ではこうした印刷エレクトロニクス技術を紹介し、ロボットなどのプロトタイピングに役立てる方法について解説する。

2. 印刷エレクトロニクス技術

プリント基板とは、様々な電子回路部品を電氣的に接続するための部品であり、絶縁体の平板の上に銅などで配線パターンを形成したものが主流である。「プリント」と呼ばれるものの、その作り方は印刷を用いたものは主流ではない。多くの場合は絶縁体の板の上に銅箔などを貼り付け、不要なパターンを化学薬品を用いて取り去るエッチングによる手法が主流である。金属箔の多くの部分は廃棄物になってしまうほか、廃液処理も手間が掛かり手軽な試作手段とは言い難い。

これに対し、印刷エレクトロニクスは導電材料などの機能材料であるインクを基材となる層の上に直接「置いていく」ようなプロセスである。通常の文字や写真の印刷のように、その方法は版を用いる凸版、凹版印刷やスクリーン

印刷のほか、版を作成する必要のないインクジェット印刷が利用できる。エッチングによる基板製造と異なり、必要な材料を特定の場所に必要な分量だけ定着させるため材料の利用効率が高く無駄がない。また、高速、低コスト化、大面積化にも適した手法であると言える。導体だけでなく、半導体材料や透明な導電インク、発光材料など多種多様な機能材料が開発されている。

次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合 (JAPER) ではこれまでにセンサやディスプレイなどのフレキシブル入出力デバイスを多品種変量生産可能にするための研究開発を実施しており、これまでに全印刷型フレキシブル TFT 等産業上重要な意味を持つ回路を作成し発表している [1]。東京大学の染谷教授のグループは、印刷エレクトロニクスを含む、フレキシブルエレクトロニクスという文脈で数多くの技術を提案してきた。2013 年には世界最薄・最軽量の有機薄膜回路技術を発表した [2] (図 1)。この回路は薄さ $2\text{ }\mu\text{m}$ というキッチン用ラップの 5 分の 1 程度の厚みの中に金属配線だけでなくトランジスタを実装したもので、曲げ半径は $5\text{ }\mu\text{m}$ と小さく、すなわち、くしゃくしゃに丸めても回路としての機能を損なわない点の特徴としている。半導体集積回路の歴史を紐解けば、加工プロセスの微細化を背景とした小型化、高性能化こそが技術革新の最も重要なポイントであった。印刷エレクトロニクスはこうした風潮のかならずしも延長にない、薄く、曲げられるそして大面積に向けた回路実装技術として産業応用の新たな潮流をもたらすものと見なされてきた。

図 1 東京大学染谷グループが発表した世界最薄・最軽量の有機トランジスタを用いたフレキシブル回路 [2]

原稿受付 2017 年 1 月 4 日

キーワード: Printed Electronics, Instant Inkjet Circuit

*〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

図2 インスタントインクジェット回路による回路プリンタ [3]

図3 Arduino 用片面基板の印刷結果 [3]

3. ラピッドプロトタイピング向け印刷エレクトロニクス技術

3.1 インスタントインクジェット回路

前述の一般的な印刷エレクトロニクス、フレキシブルエレクトロニクス技術は研究開発の最前線に位置付けられるものであり、これらの技術を一般のユーザが利用するにはまだ敷居が高い。しかし昨今では魅力的な材料が開発されておりその一部は様々な企業により一般販売が開始されている。

2013年に筆者らのグループは、家庭用のインクジェットプリンタに銀ナノインクを装填し誰でも気軽に電子回路やセンサなどの印刷を可能にするインスタントインクジェット回路技術を米国のジョージア工科大学とマイクロソフトリサーチと共同で発表した [3] (図2)。同技術は、実験室や特殊な設備を用いずとも市販品の組み合わせで誰でも手軽に回路を作成できる点を最も重要視した組み合わせであることが最大の特徴である。ユビキタスコンピューティング分野の主要国際会議 Ubicomp2013にて Best Paper Award を受賞するなど、国際的に高い注目を浴びた。

それまでも回路補修用の導電性ペーストやカーボンペースの導電性ペンキが存在したが、いずれも導電性材料の粒径が大きく、また容易に沈降するためインクジェット印刷することが不可能であった。また、インクジェットプリントに対応した金属インクも存在したが、印刷直後のパターンはそのままでは導電性が発現せず、100°C以上の熱処理などの後処理を経て導電性を発現させる必要があり、プロトタイピング用途に用いることは難しかった。これは金属ナノ粒子がインク中で凝集しないよう、有機物で粒子表面を覆っていることによる。熱処理などはこの有機物を除去し、粒子同士を融着させるためのプロセスである。しかし、三菱製紙が開発したナノインクを用いると特殊な装置を用いることなく印刷直後から導電性が発現する。このインクは銀ナノインクを化学的に融合させることが可能な導電性発現剤を含む多孔質層の組み合わせにより実現される。専用紙を用いる必要が生じるが塗布後に直ちに回路の配線として機能することはプロトタイピング用途には大変有効で

ある。

導電性はシート抵抗値で約 $0.19 [\Omega/\square]$ である。厚みが変わらないのでシート上の導電パターンの抵抗値は単位面積当たり $0.19 [\Omega]$ であることを意味している。 $1 \times 10 [\text{mm}]$ の長方形パターンであれば $1.9 [\Omega]$ であり銅箔などを用いた通常の基板と比べれば導電パターンの厚みが薄いことも相まって高めの数字であるが多くの場合は線幅を太くし、線長を短くするなどの工夫をすることで許容できる程度とできる。

回路プロトタイピングに適したインクとメディア（レジンコート紙、PET (Polyethylene Terephthalate) フィルム）は株式会社 AgIC から一般販売されており、市販のインクジェットプリンタを用いることで回路印刷が可能になる [4]。印刷に用いるソフトウェアはプリンタへの印刷機能を有するものであればなんでもよく、一般的な回路設計ソフトやイラスト用のドローツールなどを用いることができる。図3はオープンソースで公開されている Arduino の基板パターンをダウンロードし、そのまま印刷したものである。

3.2 部品の接着

電子部品と導電パターンの接着には通常金属ハンダが用いられるが、ハンダの融点は通常 200°C 以上であり紙やプラスチックフィルムは溶けたり燃えたりしてしまう。低温での接着方法としては導電性の接着剤を用いることができる。導電性接着剤は1液式のものや2液を混合して塗布するものがある。銀ペーストなどを主成分とするものが多く常温焼成できるもの、熱をかけることで短い時間で硬化と導電性が発現するものなどがある。セメダイン社の ECA-48 は良好な導電性を有しながらも伸縮性と柔軟性を持ち合わせており、銀ナノインクにプリントしたパターンに部品を固定できるだけでなく、ディスペンサなどを用いることでテキスタイル上に直接導電パターンを描くのに用いることもできる [5]。そのほか、たくさんの端子を平面上で一度に接着するのに便利な異方向性導電両面テープと呼ばれるフィルムも存在する。これは一見両面テープに見えるが、圧力をかけることでテープの厚み方向のみ電流を通すようになり、テープの長さ方向の2点は絶縁性が保たれる。実際に

図4 幽霊のイラスト（左）とペーパークラフト（右，Myamo氏によるデザイン）

は微細な金属ワイヤが垂直方向にたくさん埋め込まれており、圧力をかけることでテープの両面を貫通し導電性を発現する。こうした金属ワイヤの束はある程度距離を置いて配置されているため、接着する面積はある程度大きな領域である必要がある。

4. 印刷エレクトロニクスの活用事例

大きな設備投資をすることなく大面積なフレキシブル回路を作成することが可能になったことにより、多くの活用事例が生まれている。多くの人にとって最も親しみやすく人気の例は、ワークショップ形式での手書きによる回路作成体験である（図4）。導電インクを装填したフェルトチップのペンを用いて思い思いの絵を描いてもらう。絵の一部を後から意図的に断線させ、電池の＋極からLED（Light Emitting Diode）を通してさらに－極に至るパスを上手に作ることで電気回路を作る。通常LEDを点灯させるためには、適切な値の抵抗を挿入して過電流が流れないようにするが、銀インクを用いた導電パターンは適度な抵抗をもつため厳密な抵抗計算をせずとも一時的であれば問題なく点灯する。また底面に電極をもつ表面実装用のLEDを用いればLEDの上からセロハンテープなどで仮に固定するだけで十分に回路として動作する。

回路として成立させるためには銀インクを用いてパターンを描けるだけでは不十分であり、消して書き直せることが必要になる。化学焼成タイプの銀ナノインクを用いた場合は多孔質層表面に形成された数百ナノメートルの導電層を削り取ることが必要となる。ただし導電性発現剤まで含めて削り取ってしまった場合、書き直しを行うことが不可能になる。我々はこうした消去と繰り返しの書き直しを可能にする溶剤と消去材の組み合わせに関しても研究を実施した。ペンタイプの消去材はAgIC社から一般販売されている[4]（図5）。

また、複数のLEDを同時に点灯したい場合などは、テストなどを用いて各線路の抵抗値を逐次測定する必要がある。一般家庭でテストを所有していることは稀である。そこで、

図5 AgIC社 Circuit Eraser と回路を消去している様子

図6 ConductARによりタブレット端末で回路の抵抗を解析することで三つのLEDを同輝度で点灯させるための線幅を決定している様子

図7 インカントリーペーパー（東京大学苗村研究室）

導電インクを用いた電子回路ではシート抵抗値がほぼ一定であることを利用し、スマートフォンなどで導電パターンを撮影し、画像から有限要素法を用いて任意の点の間の抵抗を求めるソフトウェアConductARを開発した[6]。本手法を用いることで通常では設計が難しい、異なるLEDを同時に点灯させることが可能になったり、電流が集中し断線が起こりやすい箇所を特定することなども可能になる（図6）。

東京大学苗村研究室が開発したインカントリーペーパーは、銀ナノインクで印刷したパターンをタッチセンサと熱源として同時に利用した例である[7]（図7）。タッチは一般的なマイコンを用いて静電容量の変化を検知することで読み取り可能になる。また銀ナノインクのパターンに高めの電圧をかければ抵抗値に応じてジュール熱が発生する。熱によって色が変わるサーモクロミックインクを活用することで、いわば簡単なディスプレイを実現できる。これら二つを組み合わせることで触ると色が変わるようなペーパーアイテムを実現することができる。

明治大学の加藤氏、宮下教授らは導電性インクを用いて

図 8 Milbox Touch とその内部の銀インクによるタッチセンサ拡張部 [9]

静電容量式のタッチセンサの反応領域を拡張する ExtensionSticker を発表している [8]. スマートフォンやタブレットなどに用いられるタッチパネルディスプレイに導電性インクでパターンを形成したステッカーを貼り付けることで、ユーザはタッチパネルに直接触れずともステッカー上の模様をタッチすることでディスプレイにタッチイベントを発生させることができる。Milbox Touch はこのアイデアを利用した紙製の VR (Virtual Reality) ゴーグルである [9]. スマートフォンのスクリーンを使用した簡易型の VR ゴーグルでは画面に直接指を触れることができない。ExtensionSticker を用いることでゴーグルの側面に配置したダイヤルに触れるだけで画面上にタッチイベントを生成することが可能になる (図 8)。

このほかにも、ミシガン州立大学の Cao らは銀ナノインクを用いて印刷した指紋パターンを用いてスマートフォンの指紋認証センサを不正に突破できるという報告をしている [10]. AgIC 社の銀ナノインクを用いて撮影した指の指紋パターンを反転印刷し、指紋センサに押し当てることによって Samsung S6 と Huawei Honor 7 のスマートフォンセンサの認証を解除することができたという。従来スキャンした指紋をゴムや木工用接着剤を用いて凹凸を復元した 2.5 次元の指紋パターンをセンサに押し付けることで認証を不正に解除した報告があるものの、本手法はそれに比べてより手軽で短い時間で認証を突破できるという。

5. 今後の展望

3D プリンタやレーザカッターが一般的な工作ツールとして受け入れられつつあるように、銀ナノインクを用いた印刷エレクトロニクス技術はユーザインタフェースをはじめとして様々な分野での活用が始まっている。電子回路基板はこれまでどちらかというと裏方の存在であったが、銀ナノインクを用いた回路試作の応用例を見ると、人が手で回路を描いたり、鑑賞したり、直接触れるインタフェース

として利用するケースのほうが多いことが分かる。

ウェアラブルコンピューティングへの期待の高まりにより、布やタトゥーシール上に回路を形成する試みも多く報告されるようになってきた [11]. 3D プリンタの構造内部に直接電子回路を埋め込むことで筐体と電子回路配線を同時にプリントする試みもあるが、樹脂と導電性材料の熱収縮率の違いなどによりまだ少し実用レベルには達していない。今後材料の改良が進めば、ロボットなどのプロトタイプングにおいて筐体と電子回路を同時にプリントするなどの用途の展開が期待できるだろう。

参考文献

- [1] 次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合, <http://japera.or.jp>
- [2] M. Kaltenbrunner, et al.: “An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics,” *Nature*, no.499, pp.458–463, 2013.
- [3] Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang and G.D. Abowd: “Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices,” *The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2013)*, pp.363–372, 2013.
- [4] AgIC 株式会社, <https://agic.cc/ja/>
- [5] 低温硬化形フレキシブル導電性接着剤 [SX-ECA48], <http://www.cemedine.co.jp/product/industry/sx-eca.html>
- [6] K. Narumi, S. Hodges and Y. Kawahara: “ConductAR: An Augmented Reality Based Tool for Iterative Design of Conductive Ink Circuits,” *Proc. of ACM UbiComp 2015*, pp.791–800, 2015.
- [7] T. Tsujii, N. Koizumi and T. Naemura: “Inkantatory Paper: Dynamically Color-changing Prints with Multiple Functional Inks,” *Adjunct Proc. ACM UIST2014*, pp.39–40, 2014.
- [8] K. Kato and H. Miyashita: “Extension Sticker: A Method for Transferring External Touch Input Using a Striped Pattern Sticker,” *Adjunct Proc. ACM UIST2014*, pp.59–60, 2014.
- [9] みるボックスタッチ, <http://milbox.tokyo/milboxtouch/>
- [10] K. Cao and A.K. Jain: “Hacking Mobile Phones using 2D Printed Fingerprints,” *MSU Technical Report, MSU-CSE-16-2*, 2016.
- [11] C.H. Kao, C. Holz, A. Roseway, A. Calvo and C. Schmandt: “DuoSkin: Rapidly Prototyping On-Skin User Interfaces Using Skin-Friendly Materials,” *Proc. IEEE ISWC’16*, pp.16–23, 2016.

川原圭博 (Yoshihiro Kawahara)

2005 年東京大学大学院博士課程修了。博士 (情報理工学)。2005 年より東京大学助手。助教、講師を経て 2013 年より同准教授、現在に至る。家庭用インクジェットプリンタを用いて電子回路を試作する Instant Inkjet 回路技術を学会発表したことがきっかけとなり、同技術を実用化する大学発ベンチャー AgIC 株式会社が設立。同社技術アドバイザー。IEEE, ACM, 情報処理学会, 電子情報通信学会会員。