

# Leaf Circuits: 金属箔とレーザープリンタを用いた回路作成の応用と評価

加藤 邦拓<sup>1,a)</sup> 真鍋 宏幸<sup>2,b)</sup> 川原 圭博<sup>1,c)</sup> 瀬川 典久<sup>3,d)</sup>

**概要:** 導電性インクの印刷による回路作成手法の登場により、紙などの柔軟な素材を用いた様々なセンサやインタラクティブオブジェクトの開発が進められてきた。一方、導電性インクにより印刷された回路は特定の用紙上にしか作成できない、耐久性に欠けるなどの問題を抱えていた。こうした問題を解決するため、我々はこれまでに金属箔とレーザープリンタを用いた新しい回路作成手法“Leaf Circuits”を提案し、その応用事例を示してきた。Leaf Circuitsにより作成した回路は、導電性インクの印刷に比べ高い耐久性を持ち、普通紙や厚紙などの様々な印刷用紙上に作成することができる。またトナー転写シートを用いることで布や木材などの素材上での回路作成を実現した。本稿では Leaf Circuits の耐久性についての性能評価を実施し、紙や布上に作成した回路が折曲げや引伸ばしに対する耐久性を持つことを確認した。また学生を対象としたワークショップを実施し、Leaf Circuits が 1 時間未満の練習だけで習得でき、ユーザは自らがデザインした回路を自由に作成できることを確認した。更に本稿では新規に 3 種類のアプリケーションを示し、Leaf Circuits の有用性について議論する。

## 1. はじめに

機能的なデバイスの開発やプロトタイピングを目的として、数多くの電子回路の作成手法が存在している。中でも導電性インクを用いた印刷による回路作成 [10] は、昨今の HCI 分野における最も一般的な技術として普及してきた [2], [14]。導電性インクと家庭用のインクジェットプリンタを用い、紙や PET などの基板上に印刷するだけで、センサやインタラクティブデバイスなどの機能的なものを高速でかつ容易に作成可能となった。また印刷により作成された回路は、その柔軟性から切る・折り曲げるといった加工が容易に可能である。しかしその一方で、導電性インクの印刷による回路作成はいくつかの制約がある。第一に、導電性インクを印刷する基板として使用可能な素材が少なく、特殊な専用紙に限られてしまう。第二に、導電性インクで印刷された回路は折り曲げに対する耐性が低く、紙の基板を強く折り曲げると回路が断線してしまう [23]。こうした制約はユーザのクリエイティビティを阻害し、表現力豊かな製作の可能性を奪うことに繋がると考えられる。

これらの問題を解決するため、著者らはこれまでに金属箔とレーザープリンタを用いた回路の作成手法である“Leaf Circuits”を提案し、その活用事例を示してきた [19], [24]。この手法ではレーザープリンタを用いて印刷されたトナーの上に金属箔を乗せ、上からアイロンがけを行うだけで回路の作成が完了する。我々は応用例の試作を通し、Leaf Circuits が既存の手法に比べ、より堅牢な回路を様々な素材の基板上に作成できることを確認してきた。しかしながらこの手法についての詳細な耐久性評価は行われていなかった。また回路パターンの印刷に加え、金箔を貼り付ける工程を含む本手法を、一般ユーザが活用できるかについても未知であった。本研究はこれらを明らかにすることを目的とし、性能評価とユーザスタディを実施した。また新たに 3 種類のアプリケーションを示し、Leaf Circuits の有用性について議論する。

## 2. 関連研究

### 2.1 電子回路のファブリケーション

電子回路の作成手法に関する研究はこれまでに数多く提案されてきた。近年、最も多く活用されている手法の一つとして、導電性インクを用いた回路の作成手法がある。2013 年に Kawahara らが提案した Instant Inkjet Circuits は家庭用インクジェットプリンタに充填した導電性インクを印刷し、紙や PET の上に回路を作成する技術である [10]。

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>2</sup> 芝浦工業大学

<sup>3</sup> 京都産業大学

a) kkunihir@acm.org

b) manabehiroyuki@acm.org

c) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

d) sega@acm.org

Kawahara らの提案以降、この手法を用いてセンサ [2] やディスプレイ [15]、スピーカ [9]、アクチュエータ [21]、インタラクティブデバイス [14] など、紙を用いた機能的なモノ作りが実現されている。導電性インクを用いた回路は、インクジェットプリンタによる印刷だけでなく、専用のペンを用いた手書きスケッチでも作成できる [7], [16]。また、アルコールを含ませたメラミンスポンジにより作成した回路を消すこともでき、回路作成の試行錯誤が容易にできる [13]。更に、従来の PCB やブレッドボードを用いた回路作成と組み合わせた手法も提案されており、プロトタイピングのための補助ツールとしても活用されている [6], [22]。Khan らの Soft Inkjet Circuits では導電性インクの印刷によって、高い引き伸ばし耐性を持つ柔軟な素材上に回路や絶縁層を形成する手法を提案している [11]。しかし、Soft Inkjet Circuits は Instant Inkjet Circuits とは異なる導電性インクを使用しており、印刷後に焼結処理を行う必要がある。インクジェットプリンタを用いた手法の他、スクリーン印刷による回路作成 [15] や水圧転写による立体物上への回路作成 [3] などの手法も提案されている。

導電性インク以外を用いた回路の作成として、銅テープを用いた手法がある。この手法は導電性インクが普及する以前から HCI 分野において多く活用されている。Savage らは銅テープを用いた回路作成のための補助ツールである Midas を提案している [18]。Midas システムでは、ユーザがコンピュータ上でデザインした自由形状のタッチセンサと共に、マイコンに接続される配線部が自動で生成され、パターンとして出力される。生成されたパターンをもとに、カッティングプロッタによって銅テープがカットされる。ユーザはそれをスマートフォンなどの日用品に貼り付けることで、追加のタッチインタフェースとして活用できる。Varun らの提案した Printem は、銅テープと家庭用プリンタを用いた回路の作成手法である [1]。Printem の手法では、銅テープの上に UV 照射で硬化する接着層を重ね、その上にインクジェットプリンタを用いた印刷によるマスクキングを行う。その後 UV 照射を行うことで、マスクングが施されていない箇所が接着され、基板上に定着する。最後に UV 接着層を剥離することで、印刷パターンの銅テープのみが残り、回路として活用できる。Yamaoka らの提案した FoldTronics は、折り曲げたプラスチックシートと銅テープを用いることで機能的な立体オブジェクトを作成する手法である [23]。Midas の手法と同様にカッティングプロッタを用いており、プラスチックシートを折り曲げて作ったハニカム構造上に銅テープによる回路を形成している。Yamaoka らは銅テープを用いる前の段階で、導電性インクを用いて紙の基板上に回路を直接印刷する手法を試していたが、折り曲げによる断線が発生することから、耐久性の高い銅テープを採用したと述べている。

銅テープは導電性インクによる回路作成に比べ、抵抗値

が低く、折り曲げに対しても高い耐久性を持ち、更に基板となる素材を選ばないという利点を持つ。一方、任意形状の回路作成のためにはカッティングプロッタなどの機器によりカットを行い、不要な箇所を剥離するといった作業が必要となる。Printem の様に回路パターンを印刷によって作成することもできるが、UV 照射による接着層の硬化などの特殊な手順が必要となる。また、作成できる回路の大きさはカッティングプロッタの可動領域に依存してしまう。

これに対し Leaf Circuits では、レーザープリンタを用いてパターンを印刷し、金属箔を貼り付けることで回路を作成する。Leaf Circuits によって作成した回路は時間経過による劣化や折り曲げに強く、高い耐久性を持つことを確認している。また普通紙を含む様々な用紙に適用可能であるといった利点を持つ。更にトナー転写用紙を用いることで、レーザープリンタで印刷可能な用紙サイズに依存せず、より大きなサイズの回路を作ることも可能となる。

## 2.2 金属箔を用いた回路作成

インタラクティブデバイスの作成のため、金属箔を使用した回路作成に関する研究も存在している。Saul らは、機能的な紙製オブジェクトの設計のためのシステムである Interactive Paper Devices を提案している [17]。この応用の一つとして、レーザーカッターで作成したマスクとスプレー接着剤を用いたステンシルによって金属箔を貼り付け、回路作成を行う例を示している。Kao らは金箔を用いて人間の皮膚上に回路を作成する手法である DuoSkin を提案しており、タッチセンサ、温感提示、NFC タグによる無線通信の 3 つのアプリケーションを示している [8]。DuoSkin は Interactive Paper Devices と同様に、ステンシルとスプレー接着剤を用いることでタトゥーシート上に回路を作成し、皮膚に転写することで実現していた。これらの研究に対し Leaf Circuits は、特殊な機材や技能を必要とせず、レーザープリンタと家庭用アイロンを使用するだけで容易に作成可能である。そのため、ラボセッティングだけでなく家庭環境であっても、回路の作成が行える。

レーザープリンタと金属箔を用いた回路作成の先行事例として、Srimongkon らは紙製基板に作成した電極を用いた細菌の検出に関する研究を行っている [20]。レーザープリンタで印刷した回路パターン上に金箔を乗せ、アイロンがけを行うことで電極を作成している。Srimongkon らの研究と Leaf Circuits との違いの一つは、使用できるマテリアルのバリエーションである。本研究ではレーザープリンタによって回路パターンを紙の基板上に印刷するだけでなく、転写手法を用いることで木材、布、PCB など様々なマテリアル上に回路を作成する手法を示した。また使用する金属箔も、金箔だけでなく銀箔、銅箔を用いた回路作成を行う。

### 3. Leaf Circuits

Leaf Circuits は金箔などの金属箔を導電性素材として用い、回路を作成する手法である。レーザプリンタによってパターンを紙に印刷し、その上に金属箔を貼り付けることで回路を作成する。これにより作成した紙製回路は、従来の導電性インクの印刷によって作成された回路に比べ耐久性が高く、折り曲げても断線しづらいという利点を持つ。またトナー転写用紙を用いることで、紙だけでなく木材や布、PCB などの素材上にも回路を作成できる。

本研究では導電性素材として、金箔、銀箔、銅箔の 3 種類を用いる。表 1 に各金属箔の仕様を示す\*1。金属箔は Aliexpress\*2 などのオンラインショッピング上でそれぞれ 30 mm<sup>2</sup> あたり 3 ドル以下の価格で購入することができる。金箔・銀箔に比べ銅箔は厚く、抵抗値が低い性質を持つ。しかし Leaf Circuits による回路の作成手法は箔が薄いほど貼り付けやすく、銅箔は他 2 種類に比べ剥がれやすいため、比較的回路作成が難しい。そのため、作成した回路を折り曲げるなどの加工が必要な場合は金箔・銀箔の使用が適している。一方で銅箔は金箔・銀箔に比べ厚みがあることから、はんだ付けによる電子パーツの接着が可能であるという利点を持つ (詳細は 4.3 節にて述べる)。

表 1 金属箔の仕様.

素材	価格 (USD/cm <sup>2</sup> )	厚さ (μ m)	抵抗値 (Ω/cm <sup>2</sup> )
金箔	0.27	0.12	0.20
銀箔	0.0017	0.3	0.05
銅箔	0.0002	30	$5.3 \times 10^{-5}$

#### 3.1 作成手順

(Step 1) ユーザは作成したい回路のパターンを PC 上のソフトウェア (Eagle, Adobe Illustrator, Microsoft PowerPoint など) を用いて作成し、市販のレーザプリンタで印刷する。この際、印刷に使用するトナーは特殊なものを用意する必要はなく、標準的なものを用いる。本研究では DocuPrint C3350 (Xerox Co.) を使用した。一般的なレーザプリンタに使用されているトナーは、プラスチックベースのポリマーの粒子を含んでいる [25]。このポリマーは 80-100°C の熱を加えることで溶け始め、190°C で完全に融解する [4], [5]。レーザプリンタ内部にあるローラにより熱と圧力を加えることで、融解したポリマーが紙の繊維に入り込み定着する (図 1 左)。Leaf Circuits ではこのトナーの性質を用いることで回路の作成を行う。

(Step 2) 次に金属箔の貼り付けを行う。(Step 1) で印刷した回路パターンが隠れる様に金属箔を乗せ、更にその上に保護用の薄い紙 (普通紙) を被せる。その後、保護用の紙の上から約 160°C に熱したアイロンで約 10 秒間 (銅箔で

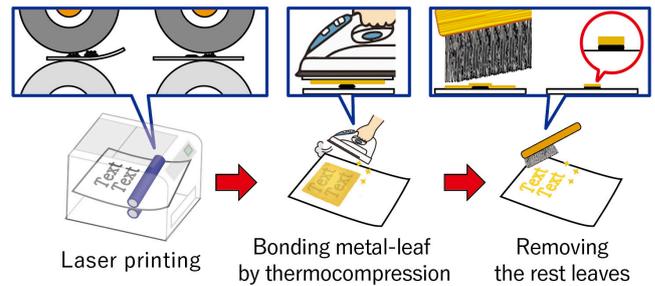


図 1 Leaf Circuits の作成手順.

は 30 秒程度) 圧力を加える (図 1 中央)。

(Step 3) 最後に余分な金属箔を取り除く。回路全体が十分に冷めたことを確認し、保護用の紙を取り外す。その後、指もしくはブラシを用いて回路パターン上をこするだけで、余分な金属箔を容易に取り除くことができる (図 1 右)。

Leaf Circuits による回路作成は、レーザプリンタで使用可能な様々な用紙に対して適用できる。現状では普通紙、厚紙、フォト用紙、耐洗紙、転写用紙などの用紙が使用できることを確認した。一方で OHP シートや PET 用紙など熱に弱く、アイロンがけができない用紙には適用できない。

#### 3.2 トナー転写によるオブジェクト上への回路作成

Leaf Circuits はトナー転写用紙を用いることで、紙以外の様々な素材の上に回路を作成することができる。図 2 にトナー転写手法によって、木材 (酒柀) の上に回路を作成する手順を示す。まず 3.1 節の (Step 1) と同様に回路パターンを用意する。この際、トナー転写を行った後に作成される回路パターンが左右反転することに注意する必要がある。その後、レーザプリンタを使用して回路パターンをトナー転写用紙に印刷する (図 2 a)。次にユーザはトナー転写用紙を裏返し印刷面を下にした状態で酒柀の上に乗せ、上からアイロンがけを行う (図 2 b)。この際、木材の角の部分に転写用紙を押しさえつける様にアイロンがけを行えば、異なる面上への配線も可能である (図 2 c, h)。

トナー転写用紙が十分に冷めたことを確認した後、転写用紙をゆっくりと剥離することで、用紙に印刷されたトナーが転写される (図 2 d)。最後に 3.1 節の (Step 2) と同様に金属箔を転写された回路パターン上に乗せ、再度アイ

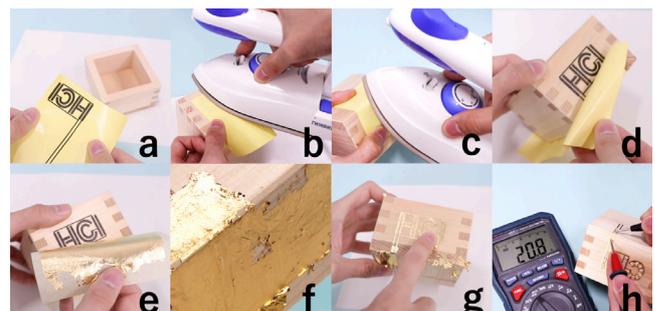


図 2 トナー転写手法の作成手順.

\*1 表 1 は著者らが 2018 年に Aliexpress 上 (販売元: China Gold Leaf Factory) で購入した金属箔の仕様に基づいており、価格は販売元により変動する。

\*2 <https://www.aliexpress.com>

ロンがけを行うことで回路が完成する (図 2 e, f, g). 金属箔の貼り付け後, 導電性の接着剤を用いることで, LED などの電子パーツを貼り付けることができる.

本手法により紙だけでなく, 硬い素材, 柔軟な素材など様々なオブジェクト上に回路を直接構築することを実現した. しかし, トナー転写手法が適用できない素材も確認されており, アクリルやガラスなど表面が滑らかな素材には適用できないという制約がある. またアイロンがけによる金属箔の貼り付け処理が必要となるため, 高温に耐えることのできない素材や, 凹凸の激しい物体などに対しても適用が難しい.

## 4. アプリケーション

### 4.1 立体的な折り紙への適用

ここでは Leaf Circuits の高い折り曲げ耐性を活かし, 機能を持つ立体的な折り紙を作成した例を示す. 内部に LED を点灯させるための回路を持つ, インタラクティブな折り紙のペン立てを作成した (図 3a). ペン立ての内部には LED 及びボタン電池が配置されており, 回路の一部を折り曲げることで単純なスイッチの機構を作成した. 折り紙にペンを挿すことで内部のスイッチが押され, ボタン電池に接触し LED を点灯させる. 内部の回路の他, 折り紙の外側には装飾のための金箔が貼り付けられている. 従来手法である導電性インクの印刷回路は, 樹脂でコーティングされた専用紙, もしくは光沢のあるフォト用紙にしか適用できないという制約があった. 一般に導電性インクの専用紙やフォト光沢紙は通常の紙よりも厚く, 折り曲げにくい性質を持つ. そのため本節で示した様な複雑な形状の折り紙の作成は非常に困難である. また折り曲げにより回路が断線してしまうため, 折り目が見つからない様に軽く曲げる程度が限界であった. これに対し Leaf Circuits は折り紙など, 紙の折り曲げを前提としたアプリケーションの開発のための技術として大きく貢献できる.

### 4.2 ウェアラブルタッチインタフェース

Leaf Circuits の特徴の一つとして, 転写用紙を用いることでユーザが日常的に活用するオブジェクト上に回路を後付けできるという利点がある. ここでは市販のシャツに Leaf Circuits を用いたタッチセンサを作成した例を示す. このタッチセンサを用いて, 音楽プレイヤーを操作するインタフェースを実装した (図 3b). 回路はシャツの胸ポケット内側に格納されたマイクロコンピュータ (mbed TY51822r3, Switch Science) に接続されており, タッチ入力を検出する. この様に Leaf Circuits は水圧転写による回路作成を行う ObjectSkin [3] に比べ, 硬い物体だけでなく, 布などの柔軟な素材への適用が容易にできるという利点を持つ.

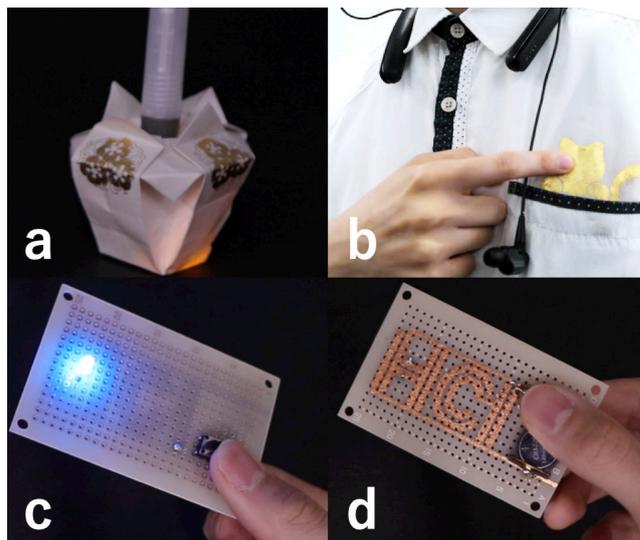


図 3 アプリケーション. (a) 光る折り紙ペン立て, (b) ウェアラブルタッチインタフェース, (c, d) はんだ付けによって作成した LED ライト.

### 4.3 銅箔回路上のはんだ付け

ここでは Leaf Circuits と従来のはんだ付けによる電子工作を組み合わせた例を示す. トナー転写手法を用いて片面のユニバーサル PCB 上に銅箔回路を作成し, その上に LED, ボタン電池, タクトスイッチをはんだ付けした (図 3c). スイッチを押すと通電し LED が点灯する.

従来手法である導電性インクによる回路作成は, 回路上的のはんだ付けが不可能であった. これに対し Leaf Circuits は, 銅箔の回路パターン上に直接はんだ付けができる (図 3d). 通常はんだ付けは加熱され融解したはんだが金属表面に付着し, 合金を形成することで接着される. そのため, 金箔や銀箔など非常に薄い金属箔上にはんだ付けを行うと, 融解したはんだに接触した金属箔が全て溶け込んでしまい, 回路の断線が発生する. 一方, 銅箔は金箔・銀箔に比べ十分な厚さを持つため, 一部がはんだに溶け込んでも基板上に銅箔が残り, 電子パーツの接着が可能になる.

この手法にはいくつかの制約も存在する. まず融解したはんだを長時間接触させてしてしまうと, 金箔・銀箔と同様に全ての銅箔がはんだに溶け込んでしまい, 回路の断線に繋がるため注意が必要である. また, 一般的な  $200^{\circ}\text{C}$  以上の温度で融解するはんだを使用すると, 銅箔が接着されているトナー層も溶解し, 銅箔が剥がれてしまう. 従って  $90\sim 150^{\circ}\text{C}$  の低温度融解のはんだを使用する必要がある. 本論文の環境では融点  $141^{\circ}\text{C}$  のはんだ (LEO-F2-L20-0.8-D50G, 千住金属工) 及び融点  $80^{\circ}\text{C}$  のはんだ (SMD-B05, サンハヤト) を使用している.

## 5. 性能評価

### 5.1 性能評価 1: 折り曲げ評価

紙などの素材を基板として使用できる Paper electronics

の研究において、回路の柔軟性は重要な特性の一つであり、これを活かした数多くのアプリケーションが示されてきた。しかし、現在の主流の技術である導電性インクの印刷によって作成された回路は、折り曲げによる耐久性が低いという欠点が報告されている。Yamaokaらは導電性インクで印刷した回路パターンは折り曲げることで容易に断線してしまうと述べている [23]。これまでも導電性インクを印刷した回路を折り曲げて使用するアプリケーションがいくつか示されてきたが、それらは全て折り目がつくほどの鋭い折り畳み箇所を持たず、用紙が反る程度の軽い折り曲げ [9] や、90° 程度の折り曲げ [14] に限定されていた。これに対し著者らは、Leaf Circuits の応用例の試作 [19] を通して、回路が折り曲げに強く、折り目がつくほど強く折り曲げても断線しにくい傾向を確認してきた。しかしながら、耐久性についての詳細な評価は行われていなかった。ここでは本研究で使用する金属箔の内、最も薄くトナーに貼り付きやすい金箔を対象とし、折り曲げの耐久評価を行う。

### 5.1.1 予備調査

予備調査として Leaf Circuits 及び導電性インクで作成した回路の抵抗値の比較を行った。サンプルとして長さ 50.0 mm、幅 0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm、5.0 mm、8.0 mm の回路パターンを使用する。それぞれ  $n = 10$  のサンプルを作成し、抵抗値の計測を行った。なお 1 回の測定についてサンプルの両端に 3 回ずつデジタルマルチメータをあて、その平均値を計測データとして採用した。

表 2 に測定結果を示す。抵抗値は全ての条件で Leaf Circuits の方が高いことがわかる。また Leaf Circuits は導電性インクに比べ標準偏差が大きい傾向にあった。これは、高い精度で印刷が可能なインクジェットプリンタによる回路作成に対し、Leaf Circuits は手作業での導電性素材の貼り付けが行われるため、個体差が生じたと考えられる。標準偏差は線が太くなる程小さくなる傾向があり、2.0 mm 以上であれば 1  $\Omega$  程度になることがわかる。折り曲げ実験では、事前調査の結果から標準偏差が 1  $\Omega$  程度であり、中間の値である幅 2.0 mm の回路パターンを対象として評価を行う。

表 2 金箔と導電性インクの抵抗値比較。

Width	Gold-leaf		Conductive ink	
	Ave.( $\Omega$ )	S.D	Ave.( $\Omega$ )	S.D
0.5 mm	51.7	8.26	14.0	1.28
1.0 mm	27.7	3.14	7.7	0.34
2.0 mm	16.1	1.31	4.0	0.21
5.0 mm	7.0	1.04	1.8	0.09
8.0 mm	4.8	0.89	1.3	0.07

### 5.1.2 実験手順

本実験では紙の基板上に作成した回路を折り曲げ、抵抗値の変化を計測する。折り畳み方は 90° 及び 180° とし、それぞれ山折り方向 (回路パターンが外側になるよう) に

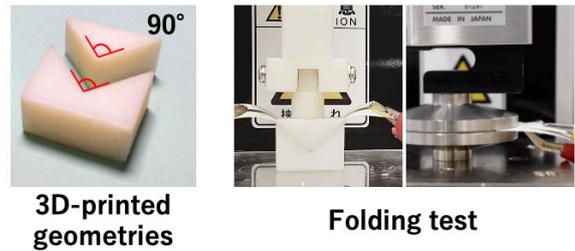


図 4 実験 1: 折り曲げ性能評価。(左) 90° 折り曲げに使用する 3D オブジェクト、(右) 90° 及び 180° 折り曲げ実験の様子。

折り曲げた場合の抵抗の変化を計測する。実験ではフォーステスタ (MCT-2150, A&D) を使用して、一定の圧力を加えることで折り曲げを行った。90° の折り曲げ評価では、図 4 左に示す様な 2 つのブロックで構成される 3D オブジェクトを使用した。この 2 つのブロックで評価用の回路パターンを挟み込み、50 N の圧力を加えることで 90° の角度に折り曲げを行った。180° の折り曲げではフォーステスタに固定した 2 つの円盤で回路パターンを折り曲げた状態で挟み、50N の圧力を加えた (図 4 右)。

抵抗値の測定は (1) 折り曲げる前の状態、(2) 折り曲げた状態、(3) 折り曲げた回路パターンを開き、平らにも戻した状態で行った。また、繰返しの折り曲げに対する耐久性を評価するため (2)、(3) の回路パターンを折り曲げ状態から平らに戻す操作を繰返し行った後に、再度計測を行った。繰返しの耐久性評価では、折り曲げを (4) 5 回、及び (5) 10 回行った状態で計測をする。(1)~(5) までの計測を 1 試行とし、各試行につき 1 枚の回路パターンを使用する。用紙条件の比較を行うため、厚さ約 0.09 mm の普通紙 (リサイクル PPC, 大王製紙株式会社)、及び厚さ約 0.19 mm の厚紙 (JP-EM1NA4N-50, サンワサプライ) の上に金箔回路を作成した。また導電性インクとの比較を行うため、銀ナノ粒子インク (NBSIJ-MU01, Mitsubishi Paper Mills) 及び厚さ約 0.14 mm の専用 PET 用紙 (NB-RC-3GR120, Mitsubishi Paper Mills) を用いた回路を作成した。なお本実験は各条件につき、それぞれ  $n = 5$  のサンプルに対して測定を行った。

### 5.1.3 結果

図 5 はタスク後に断線せずに使用可能であった回路パターン数の割合を示す ( $Reliability\ rate = 100\%$  は  $n = 5$  のサンプル全てが断線していないことを示す)。実験の結果、90° の折り曲げ条件に比べ、180° の折り曲げを行った回路の方が断線しやすい傾向が見られた。導電性インクの印刷回路に着目すると、折り曲げ条件が 90° の場合、5 回の繰返しではサンプルの 80% が、10 回の繰返しでも 60% が断線しない結果となった。一方 180° の折り曲げには耐えられず、一度の折り曲げで全てのサンプルが断線している。このとき導電性インクの回路の表面を観察したところ、印刷用紙のレジコート層ごと裂け目が生じており、折り目部分の導電性インクが剥離していることが確認された。

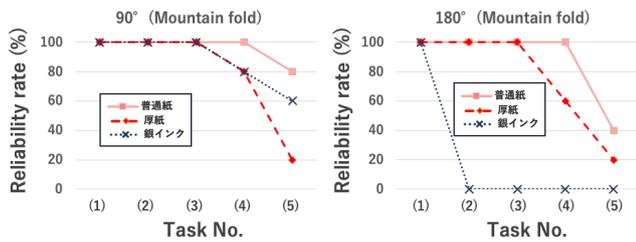


図 5 折り曲げ実験結果 (山折り方向).

これが断線の原因となったと考えられる。普通紙上に作成した Leaf Circuits は折り曲げ条件が 90° の場合、10 回の繰返しでサンプルの 80% が断線せず、また 180° の場合でも 5 回程度の繰返しであれば全てのサンプルが断線しないことが確認された。これに対し、厚紙上に作成した Leaf Circuits は普通紙に比べ、耐久性が低い傾向にあった。折り曲げ条件 90° の場合、5 回の繰返しでは 80% であったが、10 回の繰返しでは 20% まで減少している。折り曲げ条件が 180° の場合でも同様の傾向が見られ、5 回の繰返しでは 60%、10 回の繰返しでは 20% が断線しない結果となった。今回、幅 2 mm の回路パターンのみを対象に計測を行ったが、線の幅が広くなるにつれ、回路が断線する確率が下がる傾向を確認している。

#### 5.1.4 折り曲げ方向による影響

これらの実験結果は、紙の折り曲げ向きによって変化することが見込まれる。それぞれの回路を谷折り方向に折り曲げた場合の実験を再度実施した。なお (2) 回路を折り曲げた状態の計測を行う際、内側に折り曲げられた回路同士との接触を防ぐため、間に厚さ 0.1 mm 以下の普通紙を挟んだ状態で計測を行った。

実験の結果、回路にかかる負荷が大きい場合 (紙が厚い、折り曲げ角度が大きい、折り曲げの繰返し回数が多いなど) に、山折りに比べ谷折りのほうが、耐久性が低下する傾向が見られた (図 6)。一部、厚紙上に作成した Leaf Circuits が 180° の折り曲げ条件において、10 回の繰返し後にも 60% が断線しない結果となっていた。しかしこれは 90° に比べ、180° の折り曲げを行った回路の方が断線しやすいという全体の傾向に反しており、作成した Leaf Circuits の個体差によって生じたものであると考えられる。実験に使用するサンプル数を増やすことで、同様の傾向が得られる可能性がある。また回路にかかる負荷が小さい場

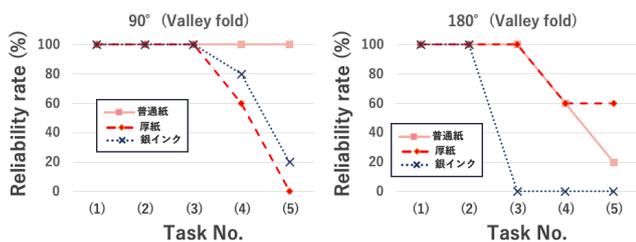


図 6 折り曲げ実験結果 (谷折り方向).

合 (紙が薄い、折り曲げ角度が小さい、折り曲げ回数が少ないなど) に、山折りに比べ谷折りのほうが、耐久性が向上する傾向が見られた。普通紙上に作成した Leaf Circuits では 90° の折り曲げ条件の場合、10 回の繰返し後にも全てのサンプルが断線していない。導電性インクの印刷回路では 180° の折り曲げ条件の場合、一度の折り曲げを行っても全てのサンプルが断線しない結果となった。これについては、谷折りは外側に折り曲げられる山折りに比べ、回路にかかる負荷が小さく、裂け目が生じなかったためであると考えられる。

#### 5.1.5 考察

これらの実験の結果から、Leaf Circuits は導電性インクの印刷回路よりも高い耐久性を持つことが示された。特に普通紙上に作成した Leaf Circuits は、導電性インクの印刷回路が一度の 180° の折り曲げだけで断線してしまうことに対し、5 回程度であれば繰返しの折り曲げを行っても断線せず使用可能である。普通紙は比較的薄く、折り曲げやすいことから、提案手法は特に 4.1 節に示した様な折り紙による立体的な回路の作成に適した技術だと言える。

また、印刷用紙の厚さが Leaf Circuits 回路の繰返しの折り曲げ耐性に影響を与えることが分かった。これは基板となる紙の厚みが増すほど、折り曲げの際に金属箔にかかる負荷が大きくなるのが原因であると考えられる。この影響は折り曲げ回数が増えるほど大きくなり、山折り・谷折り共に 90° の折り曲げ条件でも、厚紙上に作成した Leaf Circuits は 5 回の折り曲げから断線が始まり、10 回では殆どのサンプルが断線している。これは導電性インクの耐久性を下回る結果となった。本実験では繰返しの折り曲げ回数を最大 10 回までとしたが、薄い普通紙を使用する場合でも、折り曲げ角度に依らず、繰返し回路の開閉を続けると断線に繋がるのが予想される。そのためスイッチなど繰返し折り曲げを必要とする箇所を作成する場合、配線を太くする、折り曲げ角度を狭くする、回路表面を薄いテープでコーティングするなど、劣化を抑える工夫が必要となる。なお本手法は Soft Inkjet Circuits [11] の様に、焼結など回路の耐久性を向上させるための後処理を行う手法と比べると耐久性は低い。そのため製品レベルでのより高い耐久性・信頼性を要する場合は別の手法を利用する必要がある。

また Leaf Circuits は導電性インクの印刷に比べ抵抗値が高く、個体差が生じやすいという制約を持つ。予備調査の結果から、作成時の個体差を小さくするためには、幅 2.0 mm 以上の配線を作成することが望ましい。また、より小さい抵抗値が必要な場合は、銀または銅箔を使用することで対応可能である。今回、金箔のみを対象として実験を実施したが、今後は銀箔や銅箔を使用した場合、トナー転写によってその他の用紙上に作成した回路に対しても評価を実施する。

## 5.2 実験 2: 引き伸ばし耐性評価

実験 1 ではレーザープリンタで印刷した紙の基板上に直接作成した回路の耐久性評価を行った。これに加え、トナー転写手法を用いて布上に作成した回路を対象とし、引き伸ばし耐性評価を行う。

### 5.2.1 実験手順

布には、シワができにくい性質を持つサテンを使用した。実験には、長さ 50.0 mm、幅 0.5 mm、1.0 mm、2.0 mm、5.0 mm、8.0 mm の線を持つ回路パターンを使用する (図 7 左)。各回路パターンには、両端にテストを接続するための 2 つの円を持つ。引き伸ばし操作はフォーステスタ (MCT-2150, A&D) を使用して行う。デジタルマルチメータはラップトップ PC に接続され、計測したデータを自動的に記録する。布基板上的回路パターンをクリップで固定し、フォーステスタを使用して 10.0 mm/min (最大 500 N) の速度で引き伸ばす操作を行った (図 7 右)。なお、本実験は経糸方向に引き伸ばしを行うものとする。

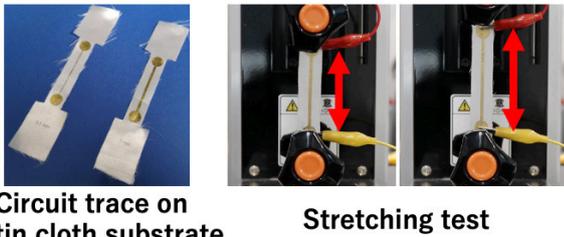


図 7 実験 2: 引き伸ばし性能評価。(左) 実験サンプル, (右) 引き伸ばし実験の様子。

### 5.2.2 結果と考察

図 8 左に実験の結果を示す。グラフから全ての条件の抵抗値は、張力が増加するにつれて高くなるのが分かる。張力が約 200 N を超えた時点で布が完全に破断し、同時に回路が断線したことを確認した。このとき布は約 20 mm (元のサイズの 40%程度) 引き伸ばされていた。このことから布上に作成した Leaf Circuits は経糸方向の引っ張りには強く、回路が断線しにくいことが分かる。一方、布上に作成した Leaf Circuits は斜め方向に対する耐久性が著しく低いことを確認している。一般的な布は経糸方向には伸びにくく、斜め方向に最も伸びやすいことが知られている。そのため、斜め方向に引き伸ばされた際に、布上の金属箔に裂け目が生じることが断線の原因となったと考えら

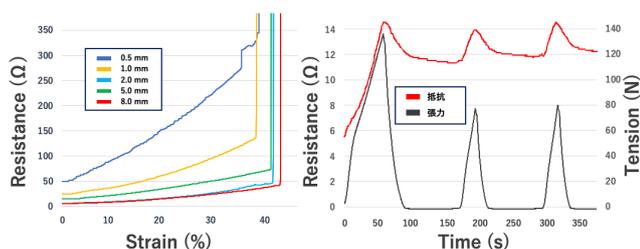


図 8 (左) 引き伸ばし実験結果, (右) 繰返しの引き伸ばし実験結果。

れる。実験に当たり、布の斜め方向に回路パターンを配置したサンプルも作成したが、殆どが作成段階で断線していたため、評価対象としなかった。このことから 4.2 節で示した様なウェアラブルタッチセンサの様に意図的に引き伸ばすことを前提としない使用法が望ましいと考えられる。

次に布上に作成した Leaf Circuits を繰返し引き伸ばした際の抵抗値の変化を調査した。ここでは図 8 左の結果から、最も抵抗値の変化が少なかった 8.0 mm 幅の回路パターンを対象として計測を行う。繰返しの回数は 3 回とし、10.0 mm/min の速度で引き伸ばしを行う。引き伸ばし距離の上限は、使用した布が破断する距離の約半分である 10.0 mm とした。結果、引き伸ばされ上昇した抵抗はある程度は戻るが、初期状態までは戻らないことが示された (図 8 右)。ここで、フォーステスタで計測された布にかかる張力に着目すると、最初の引き伸ばしでのみ約 140 N の力を要し、その後は約 80 N で 10.0 mm の引き伸ばしが行われていることが分かる。これは布の引き伸ばしに際し、ある一定の距離で布を構成する経糸の繊維が破断し、元の長さまで戻らない状態になっていることが考えられる。このことから Leaf Circuits により布上に作成した回路の抵抗値変化は経糸の伸縮性に依存し、糸の長さが戻る範囲であれば、同様に上昇した抵抗値も戻ることが分かる。

現状、著者らは布 (サテン) 及び耐洗紙上に作成した金箔回路を洗濯機に入れて洗っても断線せずに使用できることを確認している。今後は使用できる布のバリエーション (特に異なる伸縮性の布の調査) や、布ごとの回路の耐久性について詳細な評価を実施する。また、繰返しの引き伸ばし耐性の限界についても今後実験を行う。

## 6. ユーザ実験

Leaf Circuits による回路の作成手法が、電子工作の経験のない一般ユーザでも簡単に行えるかについて調査することを目的とし、ユーザ実験を実施した。本実験は練習と自由制作の 2 つのセッションから構成される。参加者は 18 歳から 24 歳 (平均年齢: 20.1 歳, *SD*: 2.0) までの学部生及び大学院生 8 名であり、2 名が女性、6 名が男性である。参加者は電子工作の経験の有無に関わらず無作為に集められたが、その内 3 名の参加者 (D, G, 及び H) が電子工作の経験があると回答した。また全ての参加者は Leaf Circuits による回路作成の経験がない。参加者には事前に研究の目的と概要、予想される所要時間、及びタスクの目標 (自分で設計した簡単な LED 回路を作成) を説明し、それらのデータ収集を行う。実験は大学のファブリケーションスペースで実施した。実験に使用する金属箔及び基板材料は著者らで事前に用意し、参加者はそれらを自由に使用することができる。金属箔には L サイズの金箔 (93 mm × 93 mm)、S サイズの金箔 (43 mm × 43 mm)、銀箔 (95 mm × 95 mm) を使用した。

## 6.1 練習セッション

(練習 1) 本セッションでは、参加者はまず Leaf Circuits の基本的な回路作成 (3.1 章参照) の練習を行う。Leaf Circuits の作成手順の説明を行った後に、著者らが回路作成の実演を行った。練習セッションでは予め印刷した回路パターンを用意し、その上に S サイズの金箔を貼り付ける作業を行う。作業後、参加者はデジタルマルチメータを使用して、作成した Leaf Circuits が導電性を持ち、回路として機能することを確認する。

(練習 2) 練習 1 の後に、トナー転写手法による回路作成 (3.2 章参照) の練習を行う。練習 1 と同様に作成手順の説明を行った後に、著者らが回路作成の実演を行った。参加者はトナー転写用紙を用い、布 (サテン) の上に回路パターンを転写し、練習 1 と同様に金箔の貼り付けを行う。作業後、参加者はデジタルマルチメータを使用して、作成した Leaf Circuits が導電性を持ち、回路として機能することを確認する。練習セッションの作業時間は 2 つの練習を通して 1 時間を目標とした。実験中、参加者は用意された金箔を何枚使用しても良いものとする。また金箔の貼り付けに失敗したり、回路パターンが印刷された基板用紙や転写用紙が破けるなど使用できなくなった場合、自由に交換して良いものとする。

## 6.2 自由制作セッション

2 つの練習セッションの後、参加者は回路の自由制作を行う。本セッションでは、参加者に LED を点灯するための簡単な回路パターンの作成を課題として与えた。まず初めに、参加者は自分が作成したい回路のデザインを行う。回路パターンの作成方法は PC 上のソフトウェアの使用や、手書きしたものをスキャンするなどの各自の持つスキルに応じて自由に選択することができるものとした。セッション中、参加者は事前に用意された 3 種類の金属箔を自由に使用し制作を行うことができる。トナー転写手法の使用を希望した参加者には、基板材料として木材 (MDF) または布 (サテン) を提供した。デザイン及び、金属箔の貼り付けを終えた参加者は、導電性接着剤 (NO SOLDER, エレファンテック株式会社) を使用して表面実装 LED を取り付け、回路を完成させる。LED の点灯には Arduino Uno 及び、LED Blink プログラムを使用して動作を確認する。全ての作業が完了した後、参加者に対しアンケートを実施した。

## 6.3 結果

表 3 及び表 4 にユーザ実験の結果を示す。表中「失敗回数」は参加者が金属箔の貼り付けに失敗し、新しい基板用紙 (転写用紙) に交換した回数を示している (「0」は失敗がなく、参加者が最初に提供された基板用紙のみを用いて作成したことを意味する)。練習セッションでは、全て

の参加者が時間内に Leaf Circuits による回路作成に成功した。参加者 A のみが練習 2 にて転写用紙の交換を 2 度行っているが、3 度目の試行で作成に成功していた。自由制作セッションでは、全ての参加者がオリジナルの LED 回路を製作することができた。作業時間は参加者によって異なり、最短で約 80 分、最長で約 5 時間であった。参加者の殆どがレーザープリンタで直接回路パターンを印刷した紙の基板上に LED 回路を作成していた。多くの参加者は Adobe Illustrator や Microsoft PowerPoint などのソフトウェアを使用している。3 人の参加者 (A, E, F) は手描きのイラストをスキャンし、回路パターンを作成していた。参加者の半数が一回以上、回路の作成に失敗し、新しい基板用紙を用いていた。

表 3 ユーザ実験結果 (練習セッション)。

参加者	A	B	C	D	E	F	G	H
金箔の使用枚数	練習 1	2	1	1	1	1	1	1
	練習 2	2	3	1	1	2	1	2
失敗回数	練習 1	0	0	0	0	0	0	0
	練習 2	0	2	0	0	0	0	0

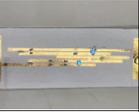
## 6.4 考察

### 6.4.1 作成難易度

ユーザスタディを通して、全ての参加者が Leaf Circuits の制作手順を理解し、タスクを完了していた。参加者全員が 1 時間未満の練習だけで Leaf Circuits による回路作成を習得し、オリジナルの回路作成を達成した。これらの結果から、Leaf Circuits は経験のないユーザであっても容易に実施可能であることが分かった。実験中、殆どの参加者が貼り付け作業に失敗せず、1 枚の基板用紙を使用して回路を完成させた。これに対し各練習タスクにて、参加者の半数以上が複数枚の金箔を使用していた。これは金箔を回路パターンの中央からずれた箇所に配置してしまい、印刷面の全ての領域を覆えていないことが原因であった。参加者は一度金箔の貼り付けを行った後に、再度新しい金箔を使用し、部分的に覆われていない領域の修正を行っていた。この様に一度の金属箔の貼り付け作業で、全ての回路パターンを覆うことができなかつたとしても修正は容易であり、繰り返し作業を行うことで回路を完成させることができる。今回使用した回路パターンは S サイズの金箔一枚で覆うことのできるものであったが、より大きなサイズの回路パターンを作成する場合は、同様に複数枚の金属箔を使用することで作成可能である。

参加者 F は「印刷した回路パターンの上に金箔を貼る手順が難しかった」とコメントしていた。参加者 B 及び E は「金箔は風の影響を受けてめくれやすいため、失敗の数が増えた」と述べている。これは今回実験に使用した金箔と銀箔が 0.3 mm 以下と非常に薄い素材であることが原因である。練習 2 において参加者 B が最も多くの金箔を使用し、回路パターン用紙を 2 回交換していた (表 3)。これ

表 4 ユーザ実験結果 (自由制作セッション).

参加者	A	B	C	D	E	F	G	H
作品								
制作時間	1時間 18分	1時間 20分	3時間 40分	2時間	4時間 25分	4時間 20分	3時間 10分	5時間
金属箔	銀箔: 2	銀箔: 2	金箔 (L): 2 金箔 (S): 9 銀箔: 1	金箔 (S): 4	金箔 (L): 4 金箔 (S): 13	金箔 (L): 2 金箔 (S): 5 銀箔: 3	銀箔: 2	銀箔: 3
基板	厚紙	普通紙	普通紙	厚紙	厚紙	厚紙	厚紙	MDF (転写)
失敗回数 (回)	0	2	4	0	0	4	0	1
電子工作の経験	なし	なし	なし	あり	なし	なし	あり	あり
回路パターン作成方法	手書き	Adobe Illustrator	Inkscape	Inkscape	手書き	手書き Microsoft PowerPoint	Celsys CLIP STUDIO	Microsoft PowerPoint

は参加者 B が室内のエアコンの風の影響を受けやすい位置で作業をしていたことが原因であった。練習セッション中、一時的にエアコンを停止させたところ、参加者 B は回路作成に成功していた。これらのことから、Leaf Circuits による回路作成を行う際は、エアコンなど風の影響を受けにくい場所での作業が推奨される。

自由制作セッションでも同様に、全員が問題なくタスクを完了していた。参加者は制作のために1時間以上の作業時間を費やしていた。しかし全体の作業時間の内、参加者の殆どは回路パターンのデザインやLEDの設置に時間を費やしており、金属箔の貼り付け作業にかけた時間は10~30分程度であった。これらのことからLeaf Circuits による回路作成は学習コストが低く、1時間未満の練習だけで習得できることがわかる。

参加者の殆どが電子工作の経験がなく、中には「LEDが点灯する仕組みを理解していなかった」とコメントしている参加者もいる(参加者C)。また参加者Aは「電気が流れる仕組みを考慮しながらデザインを考えるのが大変だった」とコメントしている。本ユーザ実験の目的は、一般ユーザでもLeaf Circuits による回路作成が実施可能かを確認することであった。そのため参加者にはLED点灯の仕組みの説明など、タスク完了に必要な電子工作に関するサポートを実験中に適宜行った。参加者Fは「設計がショートしやすいものだったのでLEDを設置するのが大変だった」とコメントしている。参加者Fの制作物は手書きでデザインした回路パターンを取り込み、PC上で編集したものの使用していた。しかし、デザインした回路パターンの配線が細すぎたためにLEDの接着が上手くできず、失敗を繰り返していた。そこで回路パターンを拡大し配線が太くなるよう修正した上でLEDの接着作業を行うよう指示した。その結果LEDの貼り付けには成功したが、依然として配線の密度が高いデザインとなっていたため、ショートが起りやすいものとなっていた。参加者Fの作品は元々眼鏡型にデザインされたものであったが、最終的にはLEDをうまく配置できた半分を眼帯型として提出していた。

この様に電子工作の経験が浅く、失敗を繰り返した参加者もいるが、最終的に全員がLED回路として機能する作品を完成させた。本実験を通しLeaf Circuits は未経験者であっても容易に回路パターンを作成できることが示された。一方で電子工作の経験や知識が少ない参加者の一部は意図したLED回路として機能させることができず、デザインの修正に時間を要していた。こうした電子工作の初学者に対しては、ConductAR [12] の様な支援ツールと併用することで改善できる可能性がある。

#### 6.4.2 安全性

参加者Aは実験後のアンケートで「好きなデザインの回路が短時間で作れ、安全であるのは良い利点である」と回答している。Leaf Circuits は導電性インクの印刷による回路作成とは異なり、科学薬品を必要としない。特に金箔はDuoSkin [8] の様に、人間の皮膚上に回路を作成する手法が存在していることから、直接手で触れても害はなく安全性も高い。唯一作業中に注意する必要がある点としては、160°C以上に加熱されたアイロンを扱うことである。しかしながら、アイロンがけは日常的な行為であり、使い方を誤らなければ安全性は確保される。今回の参加者は全員が正しくアイロンがけを行っており、火傷を負った者はいなかった。本論文では使用していないが、温度調整が可能なラミネータを使うことで、より安全に回路の作成ができる。

## 7. まとめ

本研究ではレーザープリンタで印刷されたトナーによる接着に着目し、金属箔を使用した回路の作成手法Leaf Circuits を提案した。提案手法により、紙や木材、布など様々な素材の上に、容易・迅速・低コストに耐久性の高い回路の作成を実現した。既存手法である導電性インクの印刷による回路が特殊な専用紙でしか作成できないことに対し、提案手法ではより多くの用紙を適用することができる。これによりユーザーは目的に応じて適した用紙を使用し、アプリケーションが作成できる。また耐久評価を実施し、

Leaf Circuits が既存の導電性インクを用いた回路作成に比べ高い耐久性を持つことを示した。更にユーザ実験を実施し Leaf Circuits は回路の作成経験がないユーザでも短時間で習得可能な技術であり、数時間の作業でオリジナルの回路を作成できることを示した。

謝辞 本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] C, V. P. and Wigdor, D.: Printem: Instant Printed Circuit Boards with Standard Office Printers & Inks, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 243–251 (2015).
- [2] Gong, N.-W., Steimle, J., Olberding, S., Hodges, S., Gillian, N. E., Kawahara, Y. and Paradiso, J. A.: PrintSense: A Versatile Sensing Technique to Support Multimodal Flexible Surface Interaction, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1407–1410 (2014).
- [3] Groeger, D. and Steimle, J.: ObjectSkin: Augmenting Everyday Objects with Hydroprinted Touch Sensors and Displays, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 1, No. 4, pp. 134:1–134:23 (2018).
- [4] Hartus, T.: Adhesion of Electrophotographic Toner on Paper\*\*, *Graphic Arts in Finland*, Vol. 30, pp. 14–19 (2001).
- [5] Hartus, T.: Effect of Toner Fixing Temperature on Print Properties in the Electrophotographic Process, *TAGA Journal*, Vol. 4, pp. 165–177 (2008).
- [6] Hodges, S., Villar, N., Chen, N., Chugh, T., Qi, J., Nowacka, D. and Kawahara, Y.: Circuit Stickers: Peel-and-stick Construction of Interactive Electronic Prototypes, *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1743–1746 (2014).
- [7] Jacoby, S. and Buechley, L.: Drawing the Electric: Storytelling with Conductive Ink, *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '13, pp. 265–268 (2013).
- [8] Kao, H.-L. C., Holz, C., Roseway, A., Calvo, A. and Schmandt, C.: DuoSkin: Rapidly Prototyping On-skin User Interfaces Using Skin-friendly Materials, *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '16, pp. 16–23 (2016).
- [9] Kato, K., Saito, K. and Kawahara, Y.: Origami Speaker: Handcrafted Paper Speaker with Silver Nano-Particle Ink, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. LBW2211:1–LBW2211:6 (2019).
- [10] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B. S., Zhang, C. and Abowd, G. D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, pp. 363–372 (2013).
- [11] Khan, A., Roo, J. S., Kraus, T. and Steimle, J.: Soft Inkjet Circuits: Rapid Multi-Material Fabrication of Soft Circuits Using a Commodity Inkjet Printer, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 341–354 (2019).
- [12] Narumi, K., Hodges, S. and Kawahara, Y.: ConductAR: An Augmented Reality Based Tool for Iterative Design of Conductive Ink Circuits, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '15, pp. 791–800 (2015).
- [13] Narumi, K., Shi, X., Hodges, S., Kawahara, Y., Shimizu, S. and Asami, T.: Circuit Eraser: A Tool for Iterative Design with Conductive Ink, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, pp. 2307–2312 (2015).
- [14] Olberding, S., Soto Ortega, S., Hildebrandt, K. and Steimle, J.: Foldio: Digital Fabrication of Interactive and Shape-Changing Objects With Foldable Printed Electronics, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 223–232 (2015).
- [15] Olberding, S., Wessely, M. and Steimle, J.: PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-film Touch-displays, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 281–290 (2014).
- [16] Russo, A., Yeop Ahn, B., J. Adams, J., B. Duoss, E., T. Bernhard, J. and A. Lewis, J.: Pen-on-Paper Flexible Electronics, *Journal of Advanced Materials*, Vol. 23, pp. 3426–3430 (2011).
- [17] Saul, G., Xu, C. and Gross, M. D.: Interactive Paper Devices: End-user Design & Fabrication, *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pp. 205–212 (2010).
- [18] Savage, V., Zhang, X. and Hartmann, B.: Midas: Fabricating Custom Capacitive Touch Sensors to Prototype Interactive Objects, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 579–588 (2012).
- [19] Segawa, N., Kato, K. and Manabe, H.: Rapid Prototyping of Paper Electronics Using a Metal Leaf and Laser Printer, *The Adjunct Publication of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 99–101 (2019).
- [20] Srimongkon, T., Buerkle, M., Nakamura, A., Enomae, T., Ushijima, H. and Fukuda, N.: Electrical response of culture media during bacterial growth on a paper-based device, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 5S2, pp. 05EC04–1–05EC04–5 (2017).
- [21] Ta, T. D., Umedachi, T. and Kawahara, Y.: Inkjet Printable Actuators and Sensors for Soft-bodied Crawling Robots, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3658–3664 (2019).
- [22] Wang, C., Yeh, H.-M., Wang, B., Wu, T.-Y., Tsai, H.-R., Liang, R.-H., Hung, Y.-P. and Chen, M. Y.: CircuitStack: Supporting Rapid Prototyping and Evolution of Electronic Circuits, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 687–695 (2016).
- [23] Yamaoka, J., Dogan, M. D., Bulovic, K., Saito, K., Kawahara, Y., Kakehi, Y. and Mueller, S.: FoldTronics: Creating 3D Objects with Integrated Electronics Using Foldable Honeycomb Structures, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 628:1–628:14 (2019).
- [24] 角野亜弓, 瀬川典久: 金箔とレーザープリンタ印刷を用いた木材表面に貼り付ける紙回路の試作, 第26回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集 (WISS'18), WISS'18 (2018).
- [25] 日本画像学会: ケミカルトナー, 東京電機大学出版局 (2008).