

MagElePaint: 多様な素材に簡単に回路プロトタイピングが可能な磁性導電性塗料

山岸 真人* 高田 峻介†

概要. 従来の導電性塗料を用いた回路プロトタイピング手法では、接着剤等を介して電子部品を接続するため着脱が難しく、また塗布対象が紙などに限られていた。そこで本研究では、鉄粉とボンド等の乾燥により硬化する液体を混合した磁性導電性塗料「MagElePaint」を用いた回路プロトタイピング手法を提案する。MagElePaintは、インジェクタを用いて紙、布、皮膚など多様な素材に自在に塗布でき、磁性を有するため磁石を介して電子部品を簡単に着脱できる。本論文にて、MagElePaintの材料の種類や混合比、塗布対象の素材による、抵抗値の経時変化を調査した。さらに紙、布、皮膚上での回路プロトタイピングを試みた。

1 はじめに

電子回路を作製するためには、電子部品のはんだ付けや配線、基板の設計を必要とするため、初学者にとって難易度が高い。そのためブレッドボードを用いたプロトタイピングが広く用いられているが、サイズが限定的であり、どこが接続されているか見通しが悪い。そこで導電性塗料を用いて家庭用2Dプリンタやペンなどで回路の配線を描くプロトタイピング手法が研究されている [5][11][18][19]。導電性塗料は描いた箇所が配線となり導電性接着剤を介して電子部品と接続できる一方で、塗布できるものが紙などに限られる。また、ホワイトボード用途など壁面に磁性を付与するための磁性塗料が市販されている [9]。磁性塗料は水性/油性の基材を混合しており、平面に一樣に塗布できるが、布や皮膚のように変形するものには適用が難しい。鉄粉とボンドを用いた磁性導電性塗料の研究 [17] は、特性評価などは行われておらず、柔軟性が低いなどの問題もあった。

そこで、本研究では紙や布、皮膚に回路を描くことのできる磁性導電性塗料「MagElePaint」を提案する。柔軟な磁性導電性塗料の研究 [13][14] は行われているが、MagElePaintを構成する素材はこれらの手法に用いられる素材よりも安価で、製作が容易である。MagElePaintは磁性/導電性を有する鉄粉を、ボンドや液体ゴムといった基材に混合した塗料である。また、塗料は他の金属粉末を添加することで抵抗値をコントロールできる。MagElePaintは、従来手法と比べて布や皮膚上でも回路プロトタイピング可能であり、さらに磁性を有するため磁石を用いて電子部品を容易に着脱できる。導電性塗料の回路端に磁石を埋めておいて素子を接続する方法や、紙の回路の裏側に磁石を貼り付ける方法も考え

られるが、それらの方法では素子を接続できる場所が磁石取り付け部のみに限定される。それに対し、MagElePaintは、塗布された塗料のどこでも磁石を介して接続可能である。本論文にてMagElePaintの材料の検討、および様々な材料上で回路プロトタイピングを行った結果を報告する。

2 関連研究

関連研究として、導電性塗料を用いた回路プロトタイピング、布上の回路プロトタイピング、皮膚上の回路プロトタイピングを述べる。

2.1 導電性塗料を用いた回路プロトタイピング

導電性塗料を用いて回路プロトタイピングを行う研究が挙げられる [5][10][11][13][14][18][19]。Instant inkjet circuits[5]は、家庭用の2Dプリンタで紙に印刷可能な導電性の塗料である。この手法はプリンタを用いて正確に紙に印刷できる一方、紙以外の素材では利用できない。これらの手法に対し、MagElePaintでは、紙や木材以外にも布や皮膚など様々な場所に塗布可能である。

また、Matsuhisaらの研究 [10] および Electric Paint[2]は、柔軟な素材に塗布可能な導電性ペーストである。これらの手法に対し、MagElePaintは磁石を介して容易に電子素子を接続できる点で異なる。

Pradhanらの研究 [13] や Singhらの研究 [14] では、磁性/導電性を有する柔軟な塗料を製作しており、柔軟な素材への塗布が可能である。さらに、Pradhanらの研究 [13] では、磁石を介して容易に電子素子を接続できる。これらの手法で用いる素材に対し、MagElePaintで用いる素材（液体ゴム、鉄粉、銅粉）は安価であり、容易に磁性導電性塗料を作製できる点で異なる。さらに、MagElePaintは粘度が高く分厚く塗布することが可能である。分厚く塗布した塗料は押下などで断面積などが変化するため、センシングできる点で異なる。

Copyright is held by the author(s).

* 神戸市立工業高等専門学校 専攻科 電気電子工学専攻

† 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科

2.2 布上の回路プロトタイピング

布上に回路プロトタイピングを行う研究が挙げられる。Sketch&Stitch[4], Lovellらの研究[7], および LilyTiny in the Wild[8] は、導電繊維を布に縫い付けることによる回路プロトタイピングである。布素材に自在に回路を設計できる一方、回路を縫い付ける必要があるため回路の拡張や電子部品の着脱は容易ではない。

一方, MagElePaint では、塗料自体に磁性があるので、電子部品接続用の追加手順を必要とせず、磁石を介して電子部品を容易に着脱できる。

2.3 皮膚上の回路プロトタイピング

皮膚上に導電性塗料を塗布し、回路を構成する研究が行われている。BodyPrinter[3], Soft Inkjet Circuits[6], Body-Stylus[12], Lotio[15] は、皮膚上で回路プロトタイピングを行う研究である。構成された皮膚上の回路では、塗布した部位またはその周囲を動かすことによって抵抗値などが変化する。

これらの研究は、電子部品や計測用回路をスナップボタンや接着剤を介して接続するため、素子の付け外しが困難である。MagElePaint は磁性を有するため、磁石によって簡単に電子部品や回路を着脱できる。

3 MagElePaint の検証

MagElePaint は、磁性・導電性を有する鉄粉を、ボンドやゴム、シリコンといった紙や布に塗布可能であり硬化すると柔軟性を持つ基材に混ぜた塗料である。また、鉄粉よりも導電性の高い銅粉や銀メッキ粉末を混合することで導電性を高めることができる。一方で、金属粉末の酸化等により抵抗値が上昇する問題がある。

そこで、MagElePaint の素材の種類や、素材の混合比による導電性の経時変化特性を調査する。まず、基材による特性の違いを調査するために、4種類の基材を用いて作製した塗料の特性を調査した。次に、銅粉や銀メッキ粉末の混合による特性を評価した。さらに、塗布可能な紙や布などの塗布対象ごとの特性を調査した。

3.1 基材の検証

基材ごとの MagElePaint の特性を調査する。鉄粉には協和純業工業株式会社の鉄粉#300(46 μm) を使用した。基材には、液体ゴム(株式会社ユタカメイク, クリア色), 布用ボンド(コニシ株式会社, 裁ほう上手), シリコンコーク(コニシ株式会社) および速乾シリコンコーク(コニシ株式会社) を用いた。混合は、全ての材料を容器に入れた状態でマドラーを用いて約5分間攪拌することにより行った。鉄粉: 基材の混合比は6:4(重量比)とした。これは、実験の結果、液体ゴムを基材として用いた場合にひび割

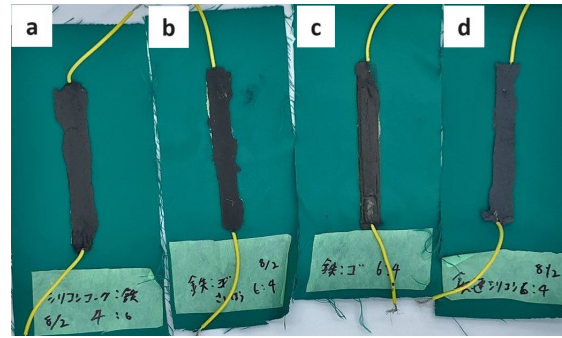


図 1. 基材を変えて作製した MagElePaint (a: シリコンコーク b: 布用ボンド c: 液体ゴム d: 速乾型シリコンコーク)

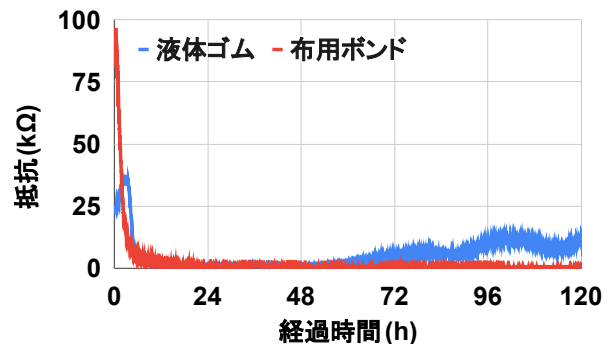


図 2. 液体ゴムと布用ボンドを使用した MagElePaint の時間経過による抵抗値の変化の比較

れや断線を起こさず、かつ最も抵抗が低くなった比率である。また、どの基材においても鉄粉の比率をこれ以上にすると塗料がうまく硬化しない、柔軟性がなくなるといった問題が生じた。

塗料の経時による抵抗変化を観察するために、3Dプリンタで作製した厚さ1mm、縦8cm、横1cmの型を布生地(化学繊維)に固定した状態で塗料を流し込み、塗布した(図1)。塗布時から1分ごとの抵抗値の変化を5日間記録した。2種類のシリコンコークはほぼ絶縁状態であったため、液体ゴムと布用ボンドの結果のみを図2に示す。各塗料は時間経過とともに固まり、同様に抵抗値が減少した。図2より、液体ゴムと布用ボンドは数時間で完全に固まり、抵抗値が1k Ω 前後と小さくなったが、液体ゴムは3日目あたりから抵抗値が大きくなり始めた。これらの結果より、液体ゴムと布用ボンドの特性が良かったため、基材として用いる。

3.2 導電性材料の検証

3.1節の検証後、液体ゴムを用いた塗料をさらに1週間(合計12日間)静置した際の抵抗値変化を図3aに示す。図3aより、時間経過とともに抵抗値が上昇していることがわかる。これは塗料内部の鉄粉

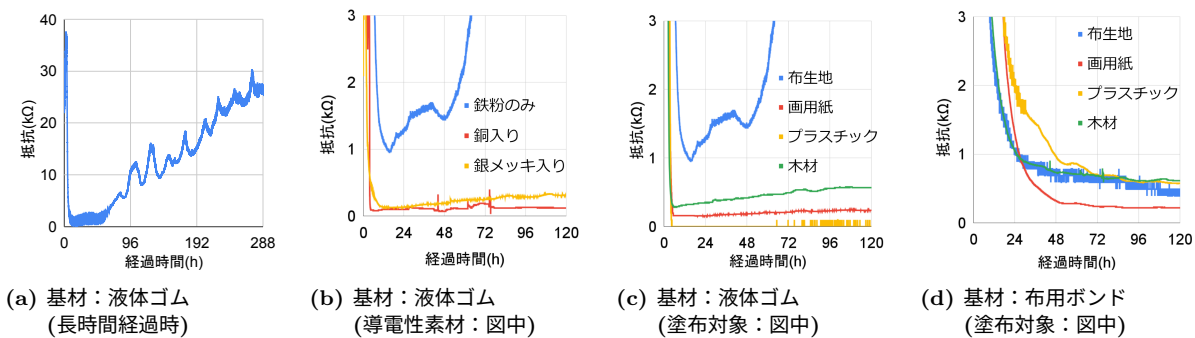


図 3. 基材や導電性材料、塗布対象を変更した MagElePaint の時間経過による抵抗値変化

の酸化や基材の水分の蒸発が原因と考えられる。

この問題を解決するために、鉄粉より安定で抵抗率の低い銅粉末や導電繊維（銀メッキ）を細かく刻んだもの（以下、銀メッキ粉末）の配合を試みた。MagElePaint は磁石による電子部品の接続を行うことを目標としているため、磁性を有する鉄粉をベースとして他の金属を混合する。鉄の抵抗率は 0-100 °C で $8.9 \times 10^{-8} - 14.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であるのに対し、銅の抵抗率は 0-100 °C で $1.55 \times 10^{-8} - 2.33 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ と 1/6 程度である [1]。ここで、3.1 節と同様に鉄粉には協和純薬工業株式会社の鉄粉 #300 (46 μm) を使用し、銅粉には林純薬工業株式会社の銅粉 #325 (43 μm) を使用した。基材にはより柔軟性の高かった液体ゴムを使用した。銅粉入り塗料は鉄: 銅: 液体ゴムを 2:3:5 とし、銀メッキ粉末入り塗料は、鉄: 液体ゴムが 6:4 の塗料に 15 cm ほどの導電繊維（FUJIX, Smart-X）を 1 mm ごとに細かく切って混ぜて制作した。液体ゴムを用いた MagElePaint と同じように厚さ 1 mm、縦 8 cm、横 1 cm の型に入れて布生地に塗布し、1 分ごとの抵抗値の変化を 5 日間記録した結果を図 3b に示す。

図 3b に示すように、銅や銀メッキ粉末を混ぜた MagElePaint は液体ゴムを用いた MagElePaint よりも抵抗値が小さくなった。特に銅を混ぜた MagElePaint は時間経過による抵抗値の上昇もほとんど見られず、常に 100 Ω 前後の抵抗値を維持していた。さらに銅、銀メッキ粉末どちらも混ぜた場合も、抵抗値が安定するまでの時間が短縮された。

3.3 塗布対象の素材の検証

布生地に MagElePaint を塗布した場合、布に MagElePaint が染み込むという事象が確認された。この事象が抵抗値の増加に関係しているのではないかと考え、塗布する素材の変更を行った。重量比が鉄: 基材 (液体ゴム, 布用バンド) = 6:4 の塗料を、布生地以外に画用紙、プラスチック板、木材に塗布し、抵抗値の変化を記録した。液体ゴムを使用した MagElePaint の抵抗値変化を図 3c、布用バンドを使用した MagElePaint の抵抗値変化を図 3d に示す。

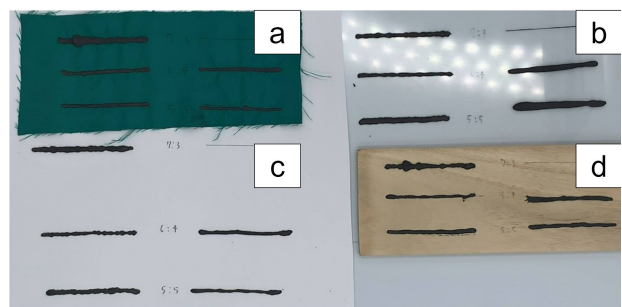


図 4. インジェクタを用いて MagElePaint を塗布した様子 (a: 布生地 b: プラスチック板 c: 紙 d: 木材)

液体ゴムを使用した MagElePaint では、布生地以外の素材の抵抗値の上昇はそれほど顕著に現れなかった。しかし、図 3c より、布生地以外の素材も時間経過により抵抗値が微増していることがわかる。

布用バンドを使用した MagElePaint では、全ての素材において同じような抵抗値の変化が得られた。図 3d より、全ての素材において抵抗値が安定してからの上昇はなく、抵抗値が微減している。しかし、どの素材に塗布した場合においても塗布してから抵抗値が安定するまでの時間は液体ゴムを用いた MagElePaint よりも長くなり、抵抗値も大きくなった。

4 インジェクタを用いた細配線の検証

実際の回路プロトタイプングでは、3 章の検証のように分厚い板形状ではなく、細長い配線で描く。そこでインジェクタ (2 mm 径, 2.5 ml) を用いて塗布した際の特性を調査した。

4.1 鉄粉のみを用いた塗料の検証

基材には液体ゴムと布用バンドを使用した。重量比は鉄: 基材が 7:3, 6:4, 5:5 について調査した。塗布する素材には画用紙、木材、布生地、プラスチック板を用い、各素材を 5 cm 塗布した。インジェクタを用いて塗布した様子を図 4 に示す。塗布した

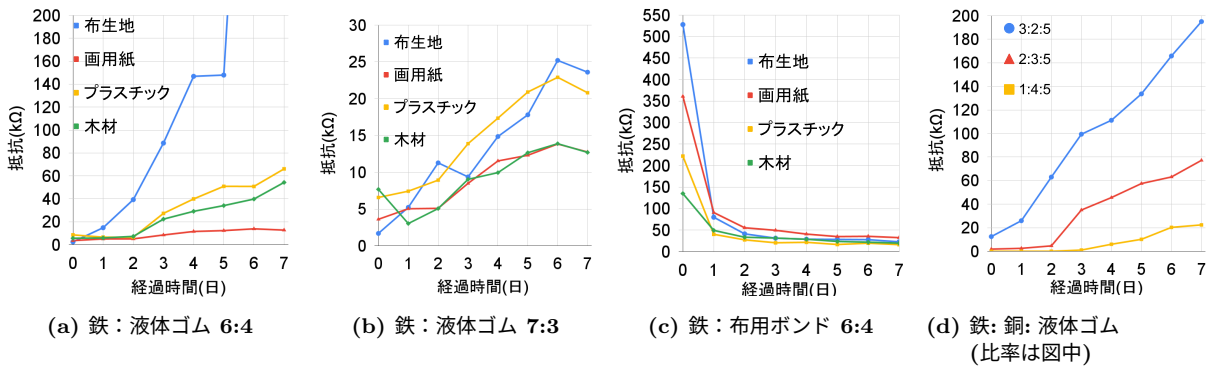


図 5. 様々な MagElePaint をインジェクタを用いて塗布した場合の時間経過による抵抗変化

MagElePaint の抵抗値を 1 日ごとに 1 週間計測した。液体ゴムを使用した重量比 5:5 の MagElePaint はどの素材に塗布した場合も 7 日を持たずして絶縁した。よって液体ゴムを使用した MagElePaint について図 5a(重量比 6:4), 図 5b(重量比 7:3) に示す。布用ボンドを使用した MagElePaint の重量比 7:3 は粘度が高すぎたためインジェクタに入れることができず、重量比 5:5 は全ての素材に塗布した場合も 1 日目から絶縁した。よって、布用ボンドを使用した MagElePaint(重量比 6:4) を図 5c に示す。

図 5a および 5b の結果より、液体ゴムを使用した MagElePaint は図 5c の結果と比較して抵抗値の上昇が顕著であった。さらに、5 cm の配線で数十～数百 kΩ と高い抵抗値であり、配線抵抗が無視できないほど高いことが分かった。

図 5c の結果より、布用ボンドを使用した MagElePaint はどの素材に塗布した場合も時間経過によって抵抗値が減少した。しかし初期の抵抗値が高いため、時間が経過しても抵抗値は数十 kΩ オーダーであった。そのため、液体ゴムと同様に配線抵抗が無視できないほど高いことが分かった。

それぞれの MagElePaint において、磁力の強さとひび割れ、断線の有無を調査した。磁力については、MagElePaint に磁石 (1.5g, 220mT) を張り付けた状態で塗布対象を反転させ、磁石が落ちなければ○、落ちれば×とした。ひび割れについては、塗布した MagElePaint が完全に硬化した状態で塗料にひび割れが生じていなかった場合は○、生じていた場合は×とした。画用紙と布に関しては、MagElePaint を塗布した銅線使用した場合などを行い、ひび割れが生じない内部を調査する。調査の結果を表 1 に示す。表 1 を参照して、MagElePaint において、磁力は十分を有する。銅線を使用した MagElePaint を作成したと同時に液体塗布を使用した MagElePaint の塗布対象を銅線が無く、硬化した場合もひび割れが短い液体塗布を使用した。重量比が鉄: 液体ゴムが 6:4 の場合でひび割れが生じたため、今回は液体ゴムの比率を増やし、鉄: 銅: 液体ゴムが 1:4:5, 2:3:5, 3:2:5 について調べた。結果を図 5d に示す。図 5d

表 1. MagElePaint をインジェクタを用いて塗布した際の磁力とひび割れの評価

基材の種類	重量比			塗布対象	磁力	ひび割れ
	鉄	銅	基材			
液体ゴム	6	0	4	画用紙	○	×
液体ゴム	6	0	4	プラスチック	○	○
液体ゴム	6	0	4	木材	○	○
液体ゴム	6	0	4	布	○	×
液体ゴム	7	0	3	画用紙	○	×
液体ゴム	7	0	3	プラスチック	○	○
液体ゴム	7	0	3	木材	○	○
液体ゴム	7	0	3	布	○	×
布用ボンド	6	0	4	画用紙	○	○
布用ボンド	6	0	4	プラスチック	○	○
布用ボンド	6	0	4	木材	○	○
布用ボンド	6	0	4	布	○	○
液体ゴム	1	4	5	画用紙	×	○
液体ゴム	2	3	5	画用紙	○	○
液体ゴム	3	2	5	画用紙	○	○

より、どの重量比においても硬化後 1~3 日間は小さい抵抗値を維持していたが、その後抵抗値が上昇し数十～数百 kΩ となった。これらの結果より、銅を使用した MagElePaint は塗布後 2 日間は内部抵抗を無視できる塗料として使用できると考える。さらに、4.1 節と同様に磁力の強さとひび割れ、断線の有無を確認した(表 1)。表 1 より、鉄: 銅: 液体ゴムが 1:4:5 の場合、磁力が不十分であった。しかし、銅を使用した全ての MagElePaint においてひび割れは生じなかった。よって、鉄: 銅: 液体ゴムが 2:3:5 の MagElePaint は、磁力が十分であり、ひび割れや断線もなく、抵抗値が最も低いため、回路プロトタイピングに適していると結論付けた。

5 アプリケーション例

MagElePaint を用いた紙上/布上/皮膚上の回路プロトタイピング例を示す。すべてのアプリケーション例において、4 章の検証で最も特性の良かった鉄: 銅: 液体ゴムの重量比が 2:3:5 の MagElePaint を使用した。

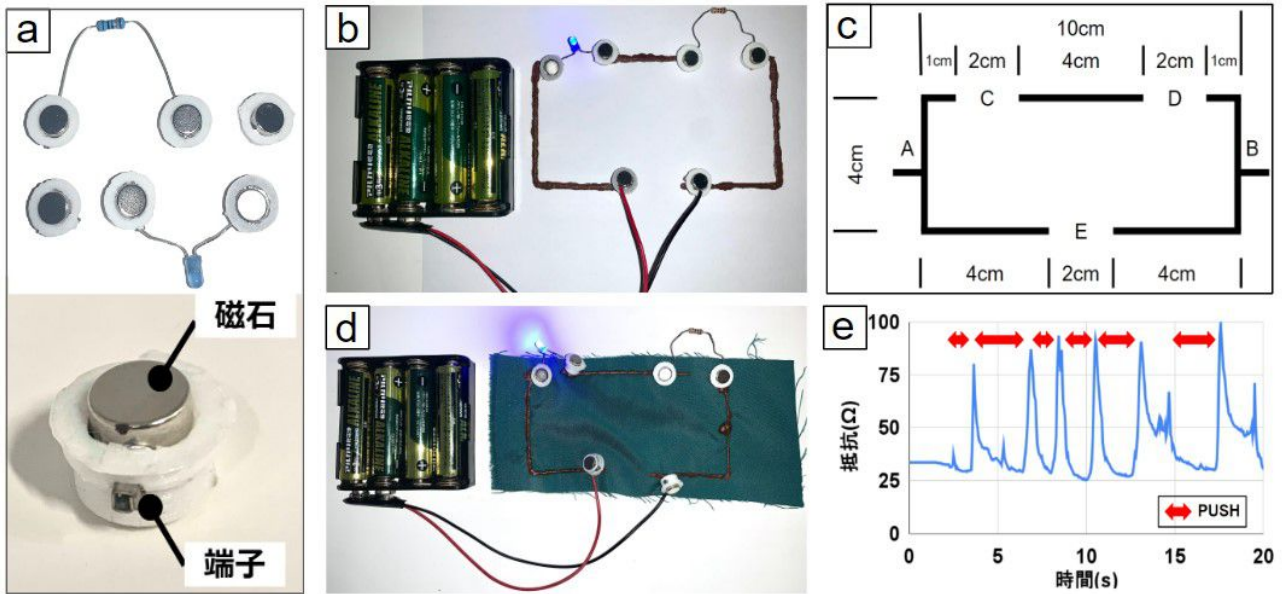


図 6. アプリケーション例 (紙, 布). (a)3D プリンタで作製した電子部品接続用の端子, (b) 紙上への回路プロトタイプリング, (c) 抵抗計測のために用いた回路の模式図, (d) 布上への回路プロトタイプリング, (e) 布に塗布した MagElePaint を押下することによる抵抗値の変化

5.1 紙上への回路プロトタイプリング

市販の電子部品を容易に接続できるように磁石端子を 3D プリンタで作製した. 図 6a に作製した端子を, 図 6b に作製した端子を用いて回路を形成した様子を示す. これらの端子と MagElePaint を用いて回路を構成し, 理論値と実測値を比較した.

比較のため, 2つの抵抗の合成抵抗 (直列, 並列) を求め, 理論値との誤差を調べた. 抵抗計測のために用いた回路の模式図を図 6c に, 理論値と実測値の比較を表 2 に示す. 図 6c の AB にデジタルマルチメータ (sanwa, CD731a) を接続し抵抗値を接続した. 直列時は図 6c の C に表 2 の R_1 , D に R_2 を接続し, E は開放した. 並列時は C に R_1 , E に R_2 を接続し, D は短絡した. 使用した抵抗の許容誤差は全て $\pm 1\%$ であった. 表 2 より, $100\ \Omega$, $1\ \text{k}\Omega$ の抵抗を使用した場合は誤差が抵抗の許容誤差である $\pm 1\%$ を大幅に超えた. しかし, $10\ \text{k}\Omega$, $100\ \text{k}\Omega$ の抵抗を使用した場合は誤差が抵抗の許容誤差である $\pm 1\%$ 前後であった. よって, 回路プロトタイプリングの際, $10\ \text{k}\Omega$ 以上の回路であれば内部抵抗を無視することができるといえる.

表 2. MagElePaint を使用した回路の理論値と実測値の比較

$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	理論値 $[\Omega]$		実測値 $[\Omega]$		誤差 $[\%]$	
		直列	並列	直列	並列	直列	並列
100	100	200	50	265	101	24.6	50.6
1k	1k	2k	500	2.15k	541	6.98	7.58
10k	10k	20k	5k	20.2k	5.08k	0.99	1.58
100k	100k	200k	50k	201k	50.1k	0.70	0.20

5.2 布上への回路プロトタイプリング

布上に MagElePaint を塗布した回路プロトタイプリングを図 6d に示す. 図 6d の通り, MagElePaint の配線上に電子部品を磁石を介して接続することで, LED が点灯した. さらに, MagElePaint を布に塗布し, 配線を押下したときの抵抗値を図 6e に示す. 図 6e より, 配線の押下によって抵抗値が変化するため, 布に塗布した MagElePaint は押下センサとしても利用できることが示唆された.

5.3 皮膚上への回路プロトタイプリング

皮膚上に MagElePaint を塗布した回路プロトタイプリングを図 7a に示す. なお安全のために, 皮膚上から直接塗布するのではなく, フィルム (skinix 社, エアウォール UV) の上から塗布した. 図 7a の通り, LED が点灯したことから, 皮膚上でも回路を作製できることが確認された. さらに, 図 7b のように皮膚上に配線した際に, 腕を弛緩, 緊張させた際の抵抗値を図 7c に示す. 図 7c より, MagElePaint は筋肉の隆起をセンシングできる可能性が示唆された.

6 課題と議論

6.1 MagElePaint が硬化するまでの時間

MagElePaint は硬化すると抵抗値が安定し, 回路として使えるようになる. MagElePaint が硬化するには一定の時間を要する. 様々な素材を用いた MagElePaint をペンのように塗布した場合の硬化するまでの時間を図 8 に示す. 図 8 より, 硬化するまでの時間はそれぞれの素材で 40~100 分程度であ

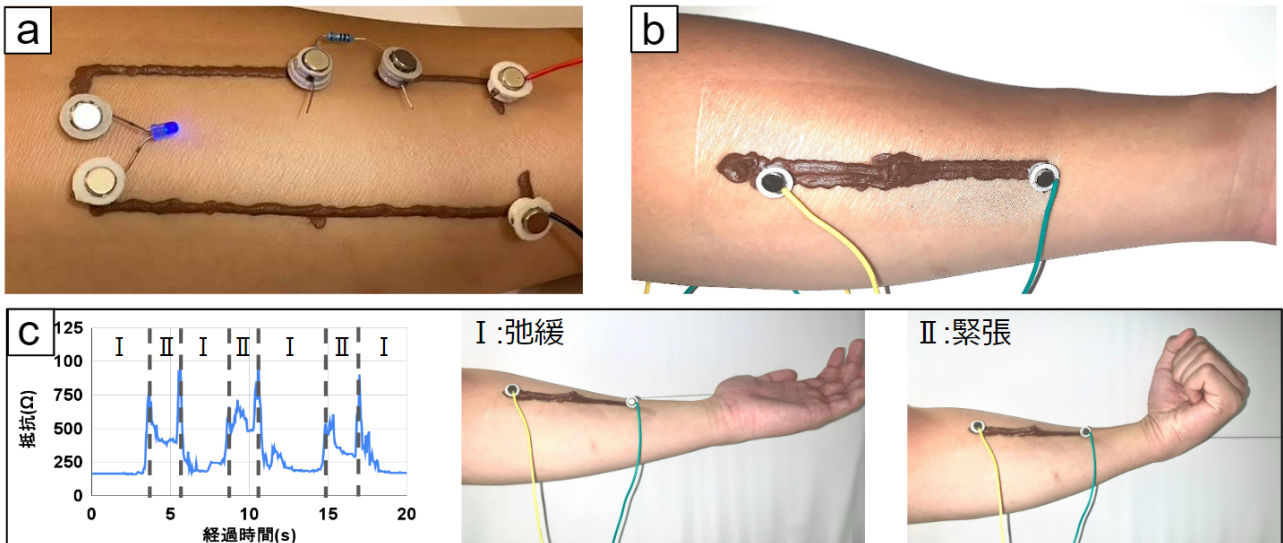


図 7. アプリケーション例 (皮膚). (a) 皮膚上への回路プロトタイピング, (b) 皮膚上に MagElePaint を塗布することによるセンサ, (c) 腕の弛緩, 緊張による抵抗値の変化

ることがわかる. この硬化時間は, 電子回路教育や皮膚上に回路を実装する際に問題となりえる. この問題を解決するためには, より硬化時間の短い素材, 例えば UV ライトですぐに固まるレジンの使用が考えられる. 今後, 柔軟性を有するフレキシブルレジンの使用を検証する.

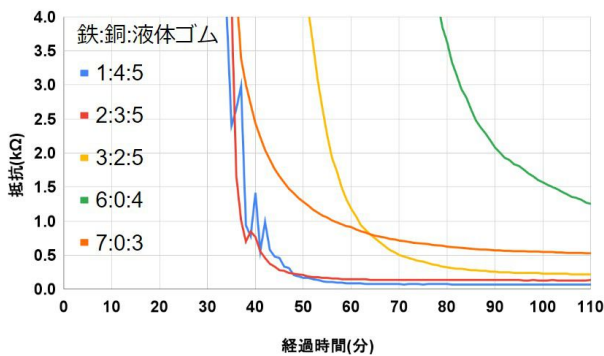


図 8. MagElePaint をインジェクタを用いて塗布した場合の比率ごとの硬化するまでの時間

6.2 経時による抵抗の上昇

MagElePaint は経時によって抵抗が大きくなる. この問題は, 図 1 のようにあらかじめ端子を内部に入れた場合は抑えられることから, MagElePaint の表面の酸化が原因であると考えられる.

また, 図 5d に示すように, 鉄と銅を混合した MagElePaint は 2~3 日後に急激に抵抗値が上昇した. これは液体ゴム中の水分と, 鉄と銅の二種類の金属により電池が形成され, 鉄がイオン化したためであると考えられる [16].

これらの問題を解決するために, 磁性を有するステンレス (SUS430) のように酸化しにくい磁性導電性素材を今後試す.

7 まとめ

本論文では, 導電性/磁性/柔軟性を持った塗料である MagElePaint を提案した. 鉄粉, 基材, 導電性素材の種類や重量比を検証し, 様々な素材に塗布可能かつ抵抗値が低くなるよう調査した. 基材として, 液体ゴム, 布用ボンド, シリコンコークや速乾型シリコンコークを, 導電性素材として, 銅粉や銀メッキ粉末を調査した. さらに塗料をインジェクタを用いて塗布した場合の最適な鉄粉, 基材, 導電性素材の種類や重量比を調査した. その結果, 鉄:銅:液体ゴムの重量比が 2:3:5 の場合, 磁力が十分にひび割れ, 断線が生じず, 最も抵抗値が低かった. アプリケーション例として MagElePaint を用いた紙, 布, 皮膚上での回路プロトタイピングを行った.

今後は MagElePaint が硬化するまでの時間を短縮する, 経時による抵抗の増加を軽減するといった課題に取り組む.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K17941 の助成を受けたものです. また, 本研究の一部は東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究によるものです.

参考文献

- [1] 金属の電気抵抗. https://www.chip1stop.com/sp/knowledge/007_electric-resistance-of-metal. Accessed 2024/08/30.

- [2] Bare Conductive. Electric Paint. <https://www.bareconductive.com/collections/electric-paint>. Accessed 2024/10/25.
- [3] Y. Choi, N. Ryu, M. J. Kim, A. Dementyev, and A. Bianchi. BodyPrinter: Fabricating Circuits Directly on the Skin at Arbitrary Locations Using a Wearable Compact Plotter. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, pp. 554–564, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [4] N. A.-h. Hamdan, S. Voelker, and J. Borchers. Sketch&Stitch: Interactive Embroidery for E-textiles. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [5] 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. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, pp. 363–372, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [6] A. Khan, J. S. Roo, T. Kraus, and J. Steimle. Soft Inkjet Circuits: Rapid Multi-Material Fabrication of Soft Circuits using a Commodity Inkjet Printer. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 341–354, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [7] E. Lovell and L. Buechley. An e-sewing tutorial for DIY learning. In *Proceedings of the 9th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '10, pp. 230–233, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [8] E. Lovell, L. Buechley, and J. Davis. LilyTiny in the Wild: Studying the Adoption of a Low-Cost Sewable Microcontroller for Computing Education. In *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '23, pp. 282–293, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [9] MagPaint JAPAN. MagnetPaint. <https://www.nsmrp.com/#topProductListWrapper>. Accessed 2024/08/30.
- [10] N. Matsuhisa, M. Kaltenbrunner, T. Yokota, H. Jinno, K. Kuribara, T. Sekitani, and T. Someya. Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications. *Nature Communications*, 6(1):7461, 2015.
- [11] D. A. Mellis, S. Jacoby, L. Buechley, H. Perner-Wilson, and J. Qi. Microcontrollers as material: crafting circuits with paper, conductive ink, electronic components, and an "untookit". In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '13, pp. 83–90, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [12] N. Pourjafarian, M. Koelle, B. Fruchard, S. Mavali, K. Klamka, D. Groeger, P. Strohmeier, and J. Steimle. BodyStylus: Freehand On-Body Design and Fabrication of Epidermal Interfaces. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, pp. 1–15, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [13] S. Pradhan and V. K. Yadavalli. A dual function conductive nano ink for printed electronics connections. *Organic Electronics*, 124:106959, 2024.
- [14] K. Singh, A. Ohlan, P. Saini, and S. K. Dhawan. Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) γ -Fe₂O₃ polymer composite—super paramagnetic behavior and variable range hopping 1D conduction mechanism—synthesis and characterization. *Polymers for Advanced Technologies*, 19(3):229–236, 2008.
- [15] K. W. Song, C. Dierk, S. T. Tung, and E. Paulos. Lotio: Lotion-Mediated Interaction with an Electronic Skin-Worn Display. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [16] 秋山 貴之, 西海枝 恵. 「化学変化と電池のしくみ」. 仙台市科学館研究報告, 31:23–27, 2022.
- [17] 山岸 真人, 高田 峻介. 鉄粉ボンドを手袋に塗布することによる拡張可能なデータグローブの作製. インタラクシオン 2024 論文集, pp. 831–835. 情報処理学会, 2024.
- [18] 酒井 大輔, 木田 彩佳, 原田 建治, 柴田 浩行. 導電ペンと筆ペンで描いて学ぶ電気の基礎. 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), 138(1):30–35, 2018.
- [19] 一条 洋和, 鈴木 大介, 遠藤 健太郎, 宝賀 剛, 佐藤 淳. 導電ペンを使用した電気回路演習. 工学教育研究講演会講演論文集, 2016:126–127, 2016.

未来ビジョン

本研究では、様々な素材に回路プロトタイプングを行うことができる磁性導電性塗料、「MagElePaint」を提案した。MagElePaintは、紙や布、木材、プラスチックなど多くの素材に接着することが可能である。さらに、MagElePaintを用いたセンシングの可能性も示唆された。そこで未来ビジョンとしては、様々な素材に容易に塗布できるセンサを提案する。その結果、一般的な壁や手袋、靴をMagElePaintによってセンサやデータグローブ、スマートシューズに容易にグレードアップできることが期待される。

さらに、現在普及しているウェアラブルデバイスには拡張性が低く、センサを新しく取り付けたり新たなハードデバイスを接続することは困難である。しかし、MagElePaintを用いたウェアラブルデバイスでは、磁石によって容易にデバイスを拡張できることが期待される。例えばMagElePaintを用いたデータグローブであれば、ボタンやジョイスティックなどを磁石で容易に接続できるだろう。

最終的には、MagElePaintによって多くの物がデバイス化、拡張され、ウェアラブルデバイスがより人々によって身近な存在となる手助けとなることを目指したい。