



漆回路のための水圧転写技術と 箔押しを組み合わせた配線手法の検討

A Wiring Method for Lacquer Circuits Using Hydroprinting and Foil Transfer

今西三四郎¹⁾, 橋本悠希²⁾

Sanshiro IMANISHI, Yuki Hashimoto

1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, s2420720@u.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 湾曲面への漆回路実装を可能にするため, 水圧転写技術と箔押しを組み合わせた配線手法を提案する. 漆回路は配線手法の制約により, お椀やお盆の淵のような湾曲面への実装は困難であった. 加えて, 漆回路に求められる熱・紫外線・応力を用いず, 安全な湾曲面配線手法も未開発である. そこで本研究では, 容易に配線が可能な箔押しと, 複雑な形状に模様を転写できる水圧転写技術を組み合わせることで湾曲面への配線を可能にし, より多様な対象物への漆回路の実装を目指す. 本発表では, この手法の実現可能性と有効性について検証した結果を報告する.

キーワード: 水圧転写, 箔押し, 漆回路

1. はじめに

1.1 研究背景

近年の電子機器の発展により, 我々は電子機器に囲まれて生活している. 特に, 携帯端末やウェアラブルデバイス, IoT 製品の普及により, 人間と電子機器の関係は密接なものとなっている. そのため, 電子機器には高い耐久性や安全性, デザイン性が求められる.

本研究では漆の, 電気絶縁性, 汗や衝撃に強い耐久性, 人体に対しての安全性, 日本の生活に親しまれている文化的価値などの特徴に注目した. そして, 漆を電子基板における絶縁体, 構造体, コーティング剤として用い, 配線や電子部品を漆の塗膜内に内包する「漆回路」が提案された[1]. その内部構造を図 1 に示す.

漆と電子回路を組み合わせた「漆回路」を用いることで, 既存の身近なものの表面に電子回路を構築し, 機能を付加することができる. そうすることで, 既存のものを扱う動作そのものが入力となる自然なインタラクションが可能となり, 新たなデバイスを購入することなく従来の生活空間や生活様式を保ったまま新たな機能へアクセスできる社会を実現できる.



図 1: 漆回路の構造

さらに, ものに応じた機能のカスタマイズ性や愛着のあるものを買い替えることなく長く使い続けられるよう耐久性を付与することができ, 環境負荷を減らすことができるという従来の技術にない利点を持つ.

1.2 先行研究

これまでの研究では, 不明な点が多い漆の電气的特性の検証や, 漆回路の実装手法の確立や高機能化を目指す技術開発, 実用的なアプリケーションの試作によってその有用性の検証が行われてきた. まず, 基礎研究によって電气的特性が明らかにされてきた[2][3][4]. 次に, 手作業で行われていた工程の機械化[5]や, 限られた実装面積でも高機能化を実現するため漆回路の多層化による解決が試みられてきた[6]. また, 漆芸の伝統的な技法である金属箔や銀粉を用いて加飾を行う蒔絵を参考にした外観が美しい配線手法の開発が行われ[7][8], タッチインタフェース[8]や漆 NFC[9]などの応用の試作により漆回路の実装技術は進展している. タッチインタフェースを図 2 に, 漆 NFC を図 3 に示す.

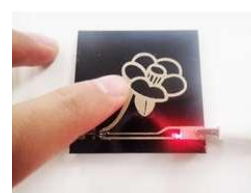


図 2: タッチインタフェース[8]



図 3: 漆 NFC[9]

しかし、先行研究では湾曲面への実装手法が確立されていないことが課題として挙げられる。理由として、既存の配線手法ではレーザー加工やシルクスクリーン、箔転写機を用いた工程が平面にしか対応できないためである。しかし、日常生活で使用されている多くのものは湾曲面を持つため、本研究の目標である既存のものに漆回路を実装するには湾曲面への実装手法の確立が必要である。

そこで本研究では、漆回路の実装可能な対象物を増やすために、湾曲面への漆回路実装手法を確立することを目的として検証を行う。本稿では、箔押しと水圧転写を組み合わせた新たな配線手法を提案し、その実現可能性の検証を行った結果について報告する。

2. 提案手法

2.1 水圧転写技術と箔押しを組み合わせた配線手法

本研究では、湾曲面への漆回路の実装手法を確立するために、箔押しと水圧転写を組み合わせた配線手法を提案する。箔押しとは、図柄を転写したい面にホットスタンピング箔を置き、図柄の場所に熱と圧力を加えることで箔を転写させる技術である。本研究では箔転写機として半導体レーザー式箔転写機(DGSHAPE: LD-300)、導電性のホットスタンピング箔として導電箔(村田金箔: MG-85)を用いた。水圧転写技術とは、水の圧力を利用して転写フィルムに印刷された模様を立体物の表面に転写する技術であり、水面の動きを物理シミュレーションすることで複雑な形状や湾曲面に対して 1.5~2.0mm 以内の精度で転写することも可能である[10]。この技術を組み合わせることで、実装対象物を破壊してしまう可能性がある熱・応力、漆を劣化させる紫外線を使うことなく配線が可能になり、従来の平面に限られていた漆回路の実装手法に比べ、湾曲面や複雑な形状を持つ物体にも漆回路を実装可能になる。

2.2 実装方法

実装方法と工程を図4に示す。

1. 水圧転写用フィルムに配線パターンを箔押し
2. 実装対象物に配線パターンを水圧転写
3. 漆でコーティングし、回路を保護

3. 実験 1：工程による抵抗値の変化

3.1 目的

本章では、箔押しおよび水圧転写を用いた配線工程において、それぞれの工程が配線の導電性に与える影響を評価する。特に、水圧転写を用いた配線手法が、平面への漆回路の実装に用いられた配線手法と同等の電気的性能を有するかについて、抵抗値の観点から検証することを目的とする。

3.2 実験方法

本実験では、水圧転写用フィルムに箔転写機を用いて配線を行った後、このフィルムを用いてアクリル板(100 mm×100



図 4: 水圧転写を用いた配線の工程

mm×5 mm)に水圧転写することで配線を行った。使用した配線パターンは、10 mm × 40 mm の長方形パターンである。導電箔として、ホットスタンピング箔(村田金箔: MG-85, 以下導電箔と記す)を使用した。導電箔は箔押し工程の前に、アルコールを含ませたペーパータオル上に静置し、全体を湿らせた後、十分に乾燥させた。水圧転写フィルムには箔押しを行う前に、インクジェットプリンター(Brother:MFC-J6997CDW)を用いて黒色顔料インクを印刷した。これらの前処理は、導電箔の定着性向上を目的としている。箔押し工程では、箔押しを黒色顔料インクが印刷された面に対して輪郭デザインを 1 回行った後、輪郭と塗りつぶしの両方を 2 回繰り返して行った。配線の導電性は、長辺方向の 30 mm 間において、テスター(HIOKI:3244-60)のプロブを両端に接触させて抵抗値を測定することで評価した。各試料につき 3 回測定を行い、その平均値を代表抵抗値とした。評価は以下の 3 条件で実施した。

- ① 導電箔を長方形パターンにカッターナイフを用いて切り出したもの(10 個)
- ② 水圧転写用フィルム上に箔押し機を用いて配線したもの(10 個)
- ③ アクリル板に水圧転写を用いて配線したもの(10 個)

実験手順の様子を図5に、手順を以下に示す。

1. 水圧転写用フィルムに箔転写機を用いて配線パターンを転写する。ここで配線の抵抗値を検証する。
2. フィルムの配線パターンを転写した面に、配線パターンが水に溶けてしまうことを防ぎ保護するため、保護スプレーを塗布する。
3. 20~30 分乾燥させ保護膜の乾燥を確認した後、フィルムを 30~35 °C の水を張った水槽に浮かべる。
4. フィルムを水面に浮かべてから 1 分半~2 分ほど、フィルムが溶けるのを待つ。
5. 水面にデザイン結合スプレーを塗布する。
6. フィルムに艶が出ていることを確認した後、配線を実装する対象物を水面に沈めていき、転写を行う。
7. 水中から引き揚げ対象物の表面のぬめりをシャワーで洗い流す。その後、十分に乾燥させたのち抵抗値を検証する。

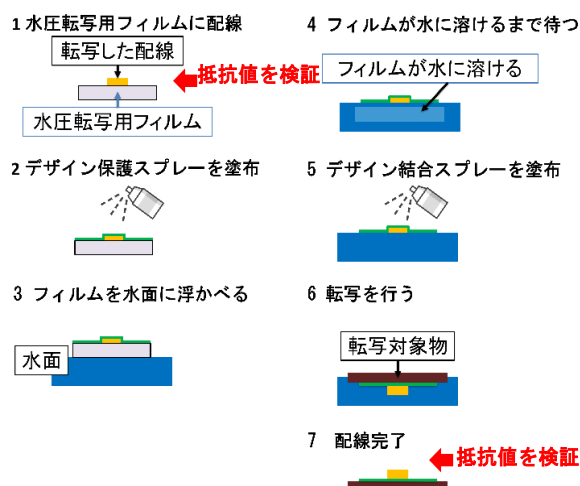


図 5: 実験手順

3.3 実験結果・考察

水圧転写用フィルムへの箔転写機による配線を行った概観を図 6 に、水圧転写を用いて配線を行ったアクリル板の概観を図 7 に示す。箔押し、水圧転写を用いた配線のどちらにおいても、導電素材が実装対象物に定着していることが確認できた。しかし水圧転写後の配線において、個体により配線にしわや欠損が見られた。

次に、表 1 に各工程における中央抵抗値をまとめる。また、各工程における配線パタンの抵抗値を図 8 に示す。

導電箔を直接切り出した場合の抵抗値の中央値は $0.92\ \Omega$ 、箔押し後では $0.73\ \Omega$ 、水圧転写後では $1.25\ \Omega$ となった。また、水圧転写後の試験片 10 個のうち 6 個は $1.50\ \Omega$ 以下であり、製品である導電箔を切り出したものと同等の抵抗値になることが確認できた。この結果により、予備実験より平面へ漆回路を実装し動作を確認した箔押しによる同様の配線パターンを行った際の抵抗値 $0.63\ \Omega/\text{cm}$ に対して、今回の水圧転写後の配線抵抗は、 $0.42\ \Omega/\text{cm}$ となり、水圧転写後の配線が漆回路に利用可能な電气的性能を有していることが確認された。各工程について、箔押し工程においては、導電箔が圧縮されることで内部の導電粒子間の接触面積が増加し、抵抗値が低下する傾向が見られた。一方、水圧転写後の配線では、個体差が大きく、一部では $2.00\ \Omega$ を超える抵抗値が観測された。これは、水圧転写工程において発生した配線のしわや欠損、密着不良などが、導電経路の接触不良を引き起こしたためだと考えられる。なお、すべての条件において通電は確認され、水圧転写を用いた配線においても導電性は維持されていることがわかった。工程ごとの抵抗値の変化について、導電箔を切り出した状態と比較して、箔押し後の配線では個体ごとの抵抗値のばらつきが拡大していた。これは、箔押し工程における圧力や温度条件のわずかな違いが、導電性に大きく影響することを示唆している。

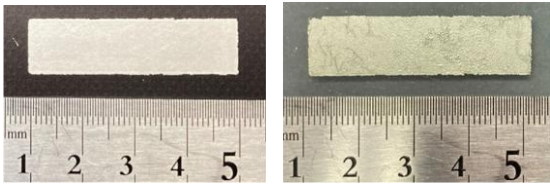


図 6: 箔押し後の配線 図 7: 水圧転写後の配線

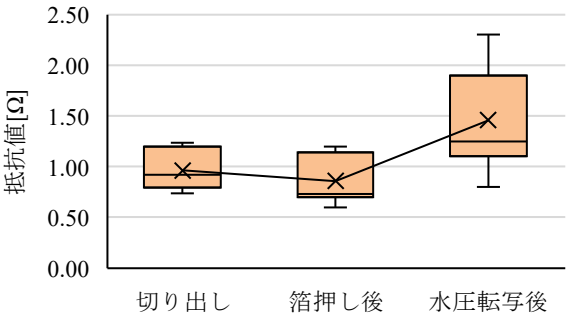


図 8: 各試料の各工程における抵抗値の変化

表 1: 各工程の配線抵抗の中央値 [Ω]

	切り出し	箔押し後	水圧転写後
抵抗値[Ω]	0.92	0.73	1.25

4. 実験 2：湾曲面への配線

4.1 目的

本章では、平面だけでなく湾曲面への配線が可能であるかを検証する。特に、水圧転写用フィルムに箔転写機を用いて配線を施した後、湾曲面に対してその配線を貼り付けた場合と、水圧転写で配線を行った場合のそれぞれの抵抗値を比較することで、湾曲面への配線手法としての水圧転写の特性と有用性を評価することを目的とする。

4.2 実験方法

使用した配線パターンは、実験 1 と同様に $10\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ の長方形形状であり、水圧転写用フィルム上に配線を施したものをを用いた。配線パタンの作成方法も実験 1 と同様である。

実装対象物として、曲率 30 R (直径 60 mm)、曲率 22.5 R (直径 45 mm)、曲率 15 R (直径 30 mm) および曲率 7.5 R (直径 15 mm) の円筒形状を持つ湾曲面モデルを FDM 方式の 3D プリンタを用いて作製した。造形材料には PLA を用い、各条件につき 5 個ずつ、40 個の試料を作製した。

評価は以下の 3 条件で実施した。

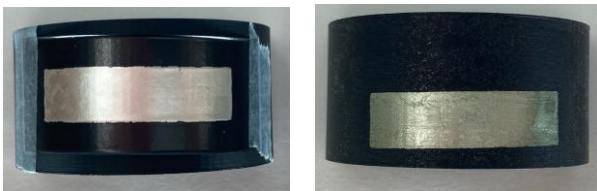
- ① 水圧転写用フィルム上に箔押しを用いて配線したもの (40 個)
- ② 配線済みフィルムを湾曲面に直接貼り付け、マスキングテープで固定したもの (4 条件、各 5 個、計 20 個)
- ③ 水圧転写によって湾曲面に配線を実装したもの (4 条件、各 5 個、計 20 個)

各試料について、配線の長辺方向における 30 mm 間の抵抗値をテスターで 5 回測定し、平均値を代表抵抗値とした。

4.3 実験結果・考察

湾曲面に対してその配線を貼り付けた場合と、水圧転写で配線を行った場合のそれぞれの配線の概観をそれぞれ図 9(a)、(b) に示す。図 9 より、湾曲面へ実装後も断線することなく実装することができた。特に図 9(b) より、水圧転写を用いた配線手法によって、湾曲面に導電素材が実装対象物に定着していることが確認できた。そのため、湾曲面に対して水圧転写を用いて配線が可能であることが確認できた。位置精度については、実装対象物に対して資料ごとにばらつきがあった。

次に、各工程における抵抗値を図 10、箔押し後から湾曲面へ配線後の抵抗値の変化量を図 11 に示す。また、表 2 に各工程における抵抗値の中央値をまとめる。図 10 より、すべての試料で抵抗値が $1.00\ \Omega$ 以下となり、平面で漆回路として利用可能だった配線パタンの抵抗値 ($0.63\ \Omega/\text{cm}$) と比較しても、水圧転写による湾曲面への実装は、表 2 より中央値が一番高かった曲率 7.5 R で $0.19\ \Omega/\text{cm}$ であり、漆回路に利用可能な電气的性能を示していることが確認された。試料ごとの抵抗値の



(a): 貼り付け (b): 水圧転写

図 9: 30R の湾曲面に貼り付けて配線した配線の外観

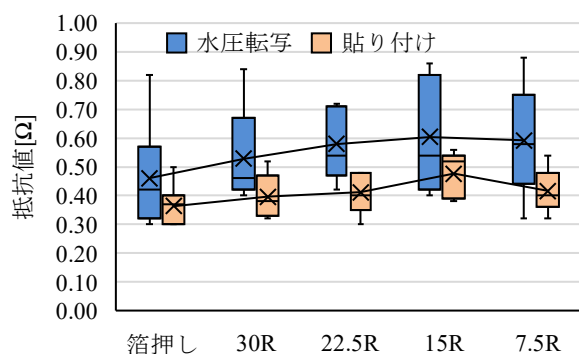


図 10: 水圧転写と張り付けた場合の配線の抵抗値

表 2: 各条件における抵抗の中央値[Ω]

	水圧転写	貼り付け
箔押し	0.42	0.37
30R	0.46	0.38
22.5R	0.54	0.40
15R	0.54	0.52
7.5R	0.58	0.40

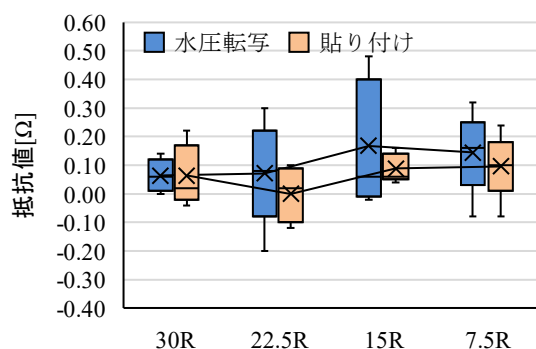


図 11: 湾曲面への配線による抵抗値の変化量

ばらつきは、水圧転写を用いた配線の方が大きかった。これは実験 1 でも見られた、手作業での水圧転写工程において、水面への投入速度・角度が統制できていないため発生した導電経路の接触不良によるものだと考えられる。そのため、水面上のフィルム挙動を物理シミュレーションにより予測し、対象物の姿勢や沈め方を制御することで、最大 1.5~2.0mm の誤差で転写位置の精度を確保できることが示されている Zhang らの先行研究[10]を参考に、物体の投入速度・角度を一定に保ちながら水面上に沈めることができる直動アクチュエータを用いた水圧転写装置を製作し、本研究においても同様の手法を採用することで、水圧転写工程における再現性の向上が期待できると考えられる。

水圧転写後と貼り付け後の抵抗値を比較すると、水圧転写を用いた配線の方が貼り付けたものよりも抵抗値が高くなる結果が得られた。しかし同じ工程で作成したはずの箔押し後ですでに水圧転写の方が、抵抗値が高い傾向が見られることから、湾曲面への配線後に抵抗値が高くなるのが水圧転写を用いた配線の特徴とは言い切れない。

そこで図 11 より、抵抗値の変化量を見ると、水圧転写による配線の方が、増加量が大きくなる傾向がみられた。一方で曲

率ごとでは、貼り付けと水圧転写で同様の傾向が見られることから、水圧転写を用いた湾曲面への配線は、貼り付けて配線を行う場合と同等の性能を有していることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、漆回路の実装対象を平面から湾曲面へ拡張することを目的として、箔押しと水圧転写を組み合わせた新たな配線手法を提案し、その実現可能性と有効性を検証した。その結果、水圧転写を用いた配線は、既存の箔押しによる配線と同等の導電性能を有すること、ならびに曲率の異なる湾曲面に対しても導電素材を定着させられることを確認した。一方で、水圧転写後の配線には、しわや欠損に起因する導電経路のばらつきが生じる場合があり、その抑制が今後の課題として残る。今後は、水圧転写用装置を用いた工程ごとの定量的な再現性向上や、さらなる曲率や複雑形状への対応、漆によるコーティングとの統合に向けた検討を進めることで、より多様な実用場面における漆回路の展開を目指す。

参考文献

- [1] 橋本,小泉, "漆をベースとした電子回路構築手法の基礎検討" 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 1, pp. 64-71, 2015.
- [2] 四柳 嘉章, "漆 I", 法政大学出版社, 2006.
- [3] 小川 俊夫, "うるしの科学", 共立出版, 2014.
- [4] 花田, 三井, 志築, 山口, 橋本, "電子回路利用に向けた漆膜の電気絶縁特性評価," 計測自動制御学会論文集, Vol. 58, No. 1, pp. 61-71, 2022.
- [5] 明神, 橋本, "紫外線照射法を用いた漆膜加工システムの開発," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 1, pp. 31-40, 2017.
- [6] 亀沢, 橋本, "多層漆回路のための実装面平滑化手法," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P2-C08, 2019.
- [7] 明神, 橋本, 志築, 花田, 山口, "漆の美しさや質感を保った漆回路の開発", 情報処理学会 インタラク ション 2016, pp. 519-521, 2016.
- [8] 土切, 橋本, "金属箔による漆面上の文様回路作 成手法の検討", 第 23 回日本バーチャルリアリ ティ学会 大会論文集, 14E-1, 2018.
- [9] K. Saito, T. Nakamura, K. Kamezawa, R. Ikeda, Y. Hashimoto, and B. Shizuki, "Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushi-ware," Proceedings of the 14th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2020), pp. 443-451, 2020.
- [10] Y. Zhang, C. Yin, C. Zheng, K. Zhou, "Computational Hydrographic Printing," ACM Transactions on Graphics, Vol. 34, No. 4, pp. 1-11, 2015.