

漆文化に根ざした電子情報機器の社会実装に関する研究

代表研究者	橋本 悠希	筑波大学 システム情報系 助教
共同研究者	花田 信子	早稲田大学 先進理工学部 講師
共同研究者	山口 佳樹	筑波大学 システム情報系 准教授
共同研究者	志築 文太郎	筑波大学 システム情報系 准教授
共同研究者	小泉 直也	電気通信大学 情報理工学研究科 助教

1 はじめに

本研究は、日本に根ざした文化である漆と情報通信技術を組み合わせることで、美しく安心・安全な電子情報機器を創り出し、幅広い年齢層に対して情報通信技術の普及を推進することが目的である。

膨大な情報が容易に手に入るようになった現代では、情報の利用者である人にかかる負荷が著しく増大している。これを解決するには、人と情報を繋ぐ役割を担うインタフェースが人に優しく、生活空間と調和し、直感的な操作が可能であることが求められる。しかしながら従来のインタフェース技術では、新たな機能を求める度に新たなデバイスを用意する必要があった。このため、モノの増加による生活空間の圧迫や、増えた機能の利用によって他の活動時間が奪われる時間損失が大きな問題となり、日常生活がデバイスに振り回されることが懸念される。これに対して我々は、日常生活で最も多く触れ合っている情報デバイスとほぼ無縁だった木工品、陶器、家具、家屋などに塗料を塗り、その塗膜内に電子回路を作り込むことで機能を付加する手法を提案する。本手法は、既にあるモノが機能化されるため空間圧迫の問題は解決し、これまでのモノを扱う所作を入力とした自然なインタラクションを実現できる。したがって、日常生活における日々の行動がそのまま情報と繋がるという関係が構築され、これまでと同様の生活空間・生活様式を保ったまま新たな機能にアクセスできる人に優しい情報化社会が実現できる。さらには、モノに応じた機能のカスタマイズ性や、愛着のあるモノを長く使い続けられることによる環境性能の高さなど、モノに塗り込む情報インタフェースは従来には無い利点と高い自由度がある。

本手法の実現に向けて、我々は漆に着目した。漆は、最先端の合成物質にも劣らない耐久性、人への安全性、美しさや心地よい手触りなどの付加価値を備えた唯一無二の存在である(表1)。これらの特徴は、常に身の回りにおいて人と直接触れ合う機会が多いモノを対象とする本研究にとって最適な素材の一つだと考えられる。また、再生産可能な天然樹脂であるため環境負荷も低く、現代社会の重要な課題である「自然との共生」に適する。漆を精製するには高度な技術が必要だが、幸い日本はその技術を脈々と受け継いでおり、地の利を生かすことと本研究の成果を基に我が国発のオリジナル技術として世界に発信できる。以上から本研究は、漆を用いた電子回路構築技術の構築およびインタフェースの開発に取り組んだ。

表1. 漆の特性[1]

水・湿気	強い防水・耐水強度
薬品	ほぼ全ての薬品に溶けない
電気	ゴムと同等の絶縁性
錆、腐食	防錆、防腐性を有する
硬さ	鉄と同等の硬度
虫・菌	虫や菌を寄せ付けない
熱	約300℃
環境	有害物質は一切発生しない
対人	硬化後はアレルギー反応なし

2 漆膜上への電子回路構築手法

本研究では、漆を絶縁材として漆膜上への電子回路を構築する手法を基盤技術とし、漆器を情報機器として利用することを目指している。我々はこれまで、漆膜上に回路が構築されたものを漆回路(図 1)と呼び、回路構築を実現するための手法として、紫外線レーザーを用いた漆膜加工を開発してきた。本研究期間では、本手法の高精度化および安定的な加工を実現するための試みを行った。



図1. 漆回路の構成

2-1 回路を内蔵した漆基板の構築手法

(1) 紫外線レーザーによる漆膜加工

我々はこれまでに、漆が紫外線に分解されるという特性を利用して、紫外線レーザーによる漆膜の微細加工手法を提案した[3]。提案手法の概要を図 1に示す。

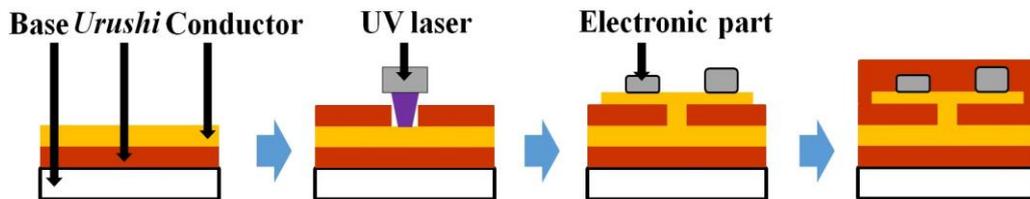


図1. 紫外線を用いた局所的な漆膜除去手法を用いた漆回路の構成方法

本手法の安定性を高め、高精度化を実現することで、スルーホール作成、溝の作成など、回路の多層化に欠かせない技術として昇華させるため、紫外線レーザーを用いた漆分解モデルを構築し、その有効性を検証した。また、構築した漆分解モデルを用いた漆膜加工システムを試作し、その有効性を検証した。

(2) 漆分解モデルの構築

先行研究によって、紫外線強度と漆分解量が比例関係にあることが示唆されている[3]。そこで、漆分解モデルを $y = ax + b$ (x : 紫外線強度, y : 漆分解量) とし、傾き (a) を求めることとした。漆は生漆を用い、十分に濾して不純物を取り除いた上で銅板に均一に塗布し、試験片とした。実験は定盤の上で行い、紫外線レーザーと試験片の距離を厳密に固定した。紫外線レーザー(波長 405nm, 出力:200mV)は出力を固定した上で、照射径 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm それぞれについて検証した。単位面積当たりの紫外線強度は紫外線レーザー出力が一定であれば、照射面積に反比例する。よって、「単位面積当たりの紫外線強度: 照射面積 = 漆分解量: 照射時間」が成り立つことから、照射径 1.0mm においてある漆分解量に達するまでの照射時間 (= 60s) を基準とした各照射径に基づく照射時間を 1 試行と定めた(表 2)。計測はレーザー変位計(KEYENCE: LK-G30) (繰り返し精度: 0.05 μ m)を用いて行い、1 試行分の紫外線レーザー照射からレーザー変位計での計測までを 1 試行回数とした。各照射径において、計 12 試行回数分を実験 1 回とし、合計 4 回実験を実施した。実験前後の試験片の様子を図 3に示す。

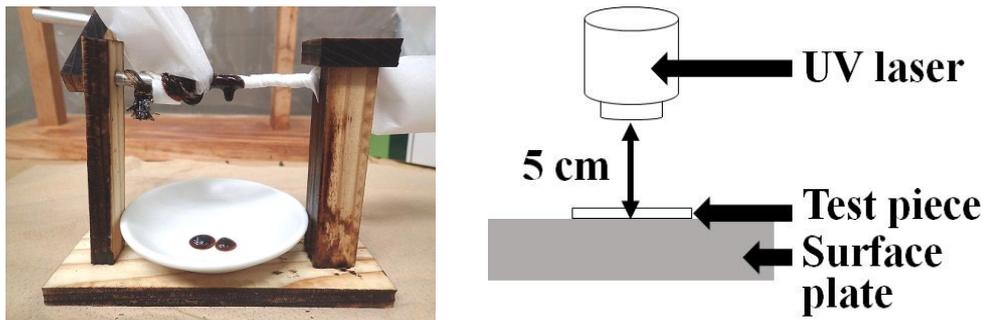


図2. 左: 漆を濾している様子 右: 実験セットアップ

表2. 各照射径における1 試行あたりの照射時間

Irradiation spot diameter (mm)	1.0	1.5	2.0
Area (mm ²)	1π	2.25π	4π
Irradiation duration per trial (s)	$60 \times 1 = 60$	$60 \times 2.25 = 135$	$60 \times 4 = 240$

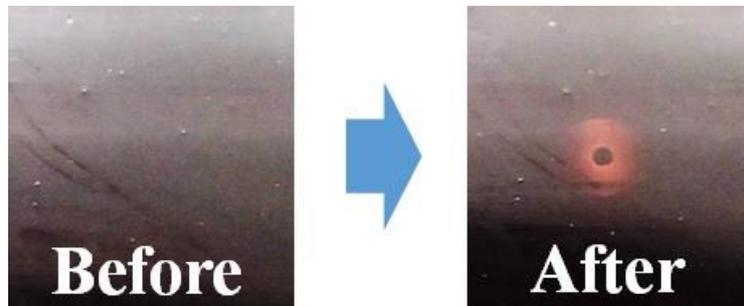


図3. 紫外線照射前後の試験片の状態

まず、4 回の実験において、それぞれの試行あたりの分解量の変化について評価した。今回の実験では、統計誤差や偶然誤差が存在するため、許容誤差の範囲を、 $\pm SD_{av}$ ($\pm 0.24\mu\text{m}$) 以内に収まる値が2 つ以上続き、かつ漆内の不純物の影響で値が大きく変化する可能性を考慮し、それ以降の試行回数で $\pm 2SD_{av}$ ($\pm 0.47\mu\text{m}$) を越えない (= はずれ値が存在しない) 場合と定めた。解析結果 (図 4) から、全ての実験で第3 試行目から許容誤差の範囲内に収束することがわかった。これにより、許容誤差の範囲内において照射径に関わらず、試行あたりの分解量は一定であるといえる。したがって、照射径に関わらず、累積分解量に基づく線形近似が可能となった。上記の結果を受け、求めた全て (実験 4 回 \times 照射径 3 つ) の累積分解量の平均をとり、線形近似を行った結果、傾きが $1.71\mu\text{m}/\text{試行}$ となった。これを実験結果の1 つに反映させた (図 5)。

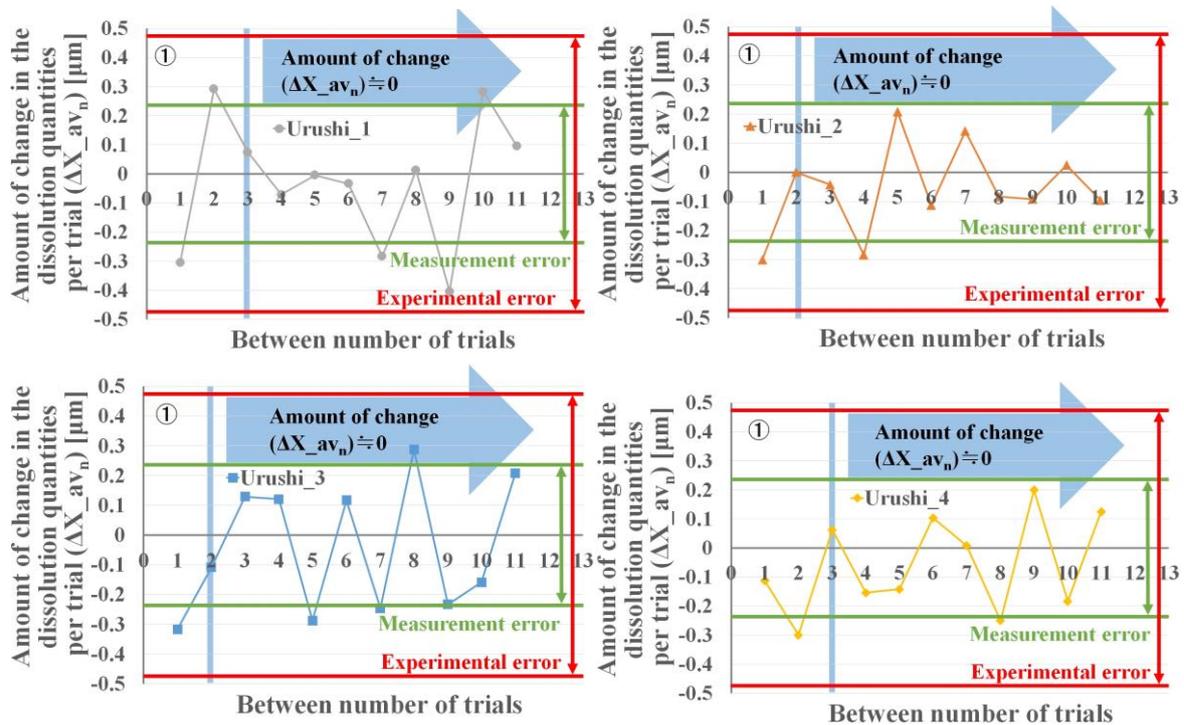


図4. 4 回の実験における試行あたりの分解量の変化量

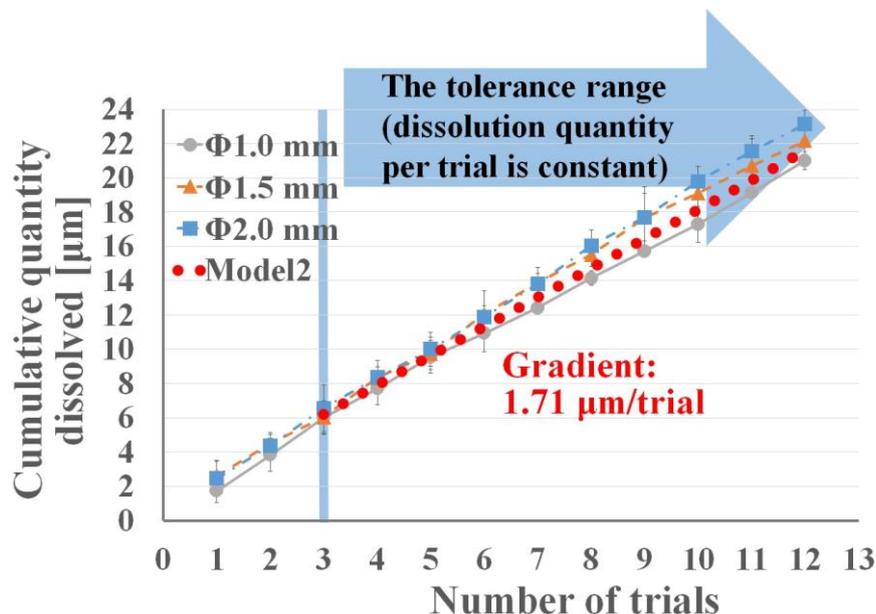


図5. 実験結果の線形近似による漆分解モデル

(3) 漆分解モデルの検証

(2)で構築した漆分解モデルの有効性を検証した。まず、上記実験から算出した傾き $1.71\mu\text{m}/\text{試行}$ を基に目標値に対する照射時間を求めた(表3)。実際に漆膜に照射して分解量を計測した結果, 表層である $1.92\mu\text{m}$ 以外は誤差 10%未満となった(表3右)。この結果から、モデルの有効性が確認できた。目標値 $1.92\mu\text{m}$ 時に誤差が大きく現れた原因は、試験片表面における塗りムラや塵の付着であると推測されるため、その層を予め研磨して除去するなどの対策を行うことで、安定した加工が可能だと考えられる。

表3. 左：算出した照射時間 右：照射結果

Target value (μm)	Irradiation spot diameter			Target value (μm)	Irradiation spot diameter		
	$\Phi 2.0\text{ mm}$ (min)	$\Phi 1.5\text{ mm}$ (min)	$\Phi 1.0\text{ mm}$ (min)		$\Phi 2.0\text{ mm}$ (%)	$\Phi 1.5\text{ mm}$ (%)	$\Phi 1.0\text{ mm}$ (%)
1.92	4.51	2.53	1.13	1.92	22.89	43.70	41.75
3.84	9.01	5.07	2.25	3.84	2.73	7.29	4.36
5.77	13.51	7.60	3.38	5.77	6.20	2.30	-0.73
7.69	18.02	10.14	4.51	7.69	0.62	9.08	3.55
9.61	22.53	12.67	5.63	9.61	5.21	-3.64	5.99

(4) 漆分解加工システムの開発

紫外線レーザー側を移動させるシステムを構築し、x 軸、y 軸それぞれに対して任意の位置に高精度な位置合わせを可能とするシステムを開発した。ハードウェアは、レーザー加工機 (SMART DIYs: FABOOL Laser Mini) のレーザー部を漆分解用の紫外線レーザーに付け替え、制御回路を増設した。任意位置への移動は、XY ステージの稼働範囲である $(x, y) = (280\text{mm}, 230\text{mm})$ 内をステップモータ (JKONGMOTOR: JK42H34-1334AC) 3つをマイクロコントローラ (STMicroelectronics: ARM 32F205RB) によってベルト駆動で制御している (タイミングベルトの最小移動量: 約 0.186mm)。また紫外線レーザー出力はマイクロコントローラ (NXP Semiconductors: mbed NXP LPC1768) を用いて制御した (図6)。

本システムの x 軸、y 軸それぞれの繰り返し精度を検証した結果、x 軸方向に最大 0.064mm 、y 軸方向に最大 0.078mm となった。多層プリント配線板の基準穴からの部品穴位置許容差は一般的に $0.10 \sim 0.25\text{mm}$ であることから [4]、本システムの繰り返し精度は誤差範囲内であることが確認された。

以上から、漆の安定的かつ高精度な加工のための漆分解モデルから加工システムまでを構築し、漆膜を自

在に加工可能な環境が整った。今後は、紫外線レーザーの照射径や出力の制御も取り入れ、より高速で柔軟な加工システムとして改良していく予定である。

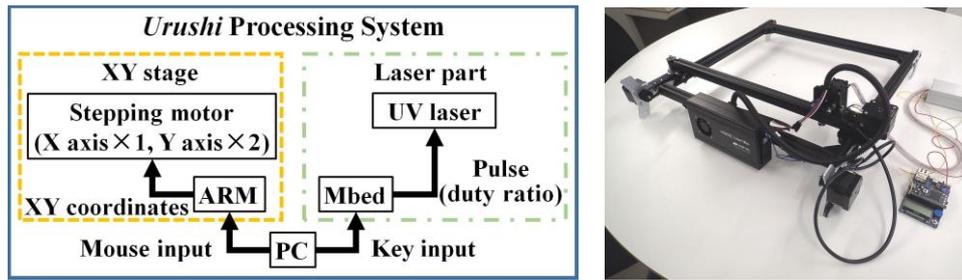


図6. 試作した漆膜加工システム

3 美しさを保った漆回路の作成手法

漆器は、実用性のみならず工芸品としての美しさや高級感が大きな魅力である。そのため、漆回路についても外観の美しさは重要な要素である。本研究期間では、漆器としての美しさ、高級感を保つため2種類の手法を試みた。

3-1 漆膜表面の均一化

刷毛を用いて漆膜を美しく仕上げることは、熟練した塗師の技術がなければ難しい。そこで、滑らかな面に漆を塗布し、硬化後に漆を剥離させる手法に着目した[5]。本手法では、漆との接着力が比較的小さい塩化ビニル上に漆回路を積み上げ、全体が硬化した後、剥離するというものである(図7)。これにより、塩化ビニルの滑らかな面のテクスチャが漆に転写され、均一で艶やかな漆面の生成が期待できる。

本手法を実際に図8左に示した手順で作成したところ、研磨なしで艶のある均一な漆膜が生成できた(図8右)。しかしながら、素地として用いた麻布のテクスチャが時間経過と共に浮き上がってしまうという問題が生じた。麻布ではなく、より決めの細かな布を使用することで滑らかさを出すことは十分に可能であると考えられる。また、素地のテクスチャが浮き出るといことは、意図的にテクスチャを作り出すことが可能であるということでもあるため、漆の表現手法としての利用価値も今後検討していく予定である。

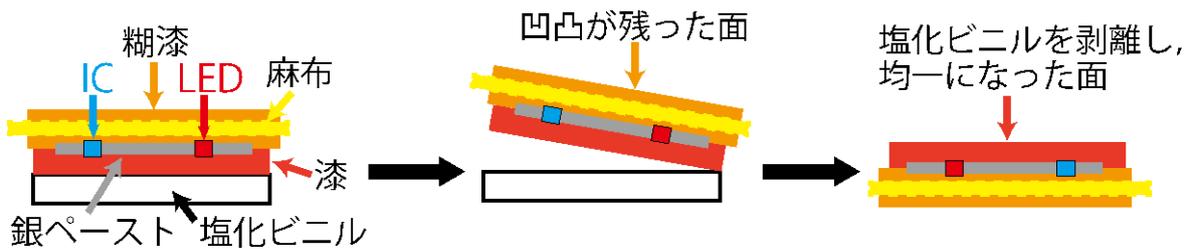


図7. 均一面作成手法の概要



図8. 左：実際の作業手順 右：本手法で作成した漆回路の表面

3-2 金属箔を用いた配線パタンの作成

これまでの配線パターンには、銀ペーストを利用してきた。しかしながら、光沢度が低く、蒔絵のような美しさが生じにくいという問題があった。そこで、金属箔を用いた回路パターンを漆膜上に生成することを試みた。

(1) 提案手法

金箔、銀箔、銅箔を回路パターンとして用いている例はすでに存在するため[6]、本研究においてもこの3種類の金属箔について検証を行う。金属箔に直接回路パターンを作ることは箔の繊細さから難しいため、予め加工用シート(図9)を作成し、このシートをカッティングマシンで加工した後に漆膜上に貼り付けることとした。具体的な作業手順を図10に示す。加工用シートには3-1の手法を基に塩化ビニル層を組み込み、シートが剥離できるようにした。

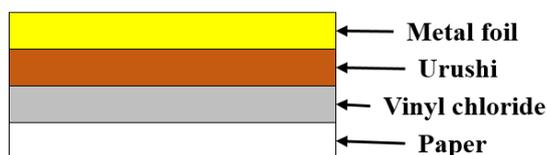


図9. 金属箔加工用シート

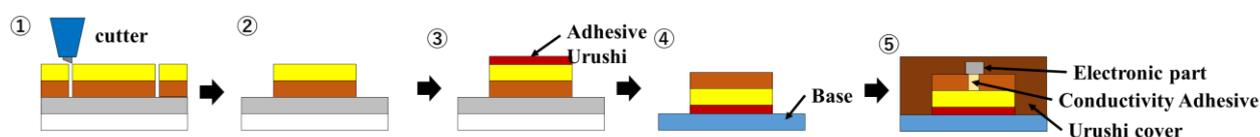


図10. 作業手順

(2) 光沢度の比較

実際に作成した漆回路と従来の漆回路を並べた写真を図11に示す。この写真から、提案手法により光沢度が改善したことが見て取れる。光沢度計(HORIBA:IG-320)を用いて実際に計測したところ、金、銀については銀ペーストを大きく上回る光沢度であった。しかしながら、銅箔については銀ペーストよりも低い値となった。この原因として銅箔と漆の接触部分に変色が見られたことが挙げられる。この変色は、漆の水分に反応した銅の錆だと考えられるため、錆対策を取ることで改善すると考えられる。



図11. 左: 漆回路の比較(左: 金, 右: 銀ペースト) 右: 光沢度の測定結果

以上から、金属箔を用いた回路パターンを漆膜上に作成し、光沢のある漆膜を作ることが実現できた。これらの手法を用いることで、漆の魅力をインタフェースに付加できると考えられる。

3 漆の電気的特性の検証

漆は、フェノール性脂質であるウルシオールという成分が酸化重合した網目構造となっており[2]、高分子材料の一つである。漆が電気絶縁体であることは知られているものの、具体的な電気的特性に関する報告は

乏しく、電子回路に用いるにはこれらの知見が必要となる。そこで、本研究では漆の電気絶縁体としての特性を把握するために、印加電界に対する絶縁抵抗特性を明らかにすることを目的とする。漆膜は吸湿性があることから室温での湿度の違いによる影響も検証した。

3-1 実験方法

銅板(5cm×5cm×0.5cm)に漆を塗布して、200℃で焼き付けを行い、2~3μm 膜厚の漆膜を作製した。銀ペーストを用いて、漆膜上に20mmφの主電極、内径33mmφ、外径38mmφのガード電極を塗布した。また、表面電流を防止するために試験片の端にはシリコンを塗布した(図12左)。対向電極を銅板として正極とし、ガード電極と主電極を負極とした。漆膜試料に対して、自作した漏れ電流(絶縁抵抗)測定の実験装置(図12右)を用いて絶縁抵抗の測定を行った。電圧を0.1V刻みに増加させ50Vまで測定した。各電圧での印加時間を100s、電圧切り替え時間を10sとした。絶縁抵抗値は100sの平均値とした。温度は室温(約25℃)として、設定湿度25%、75%の条件でそれぞれ測定した。

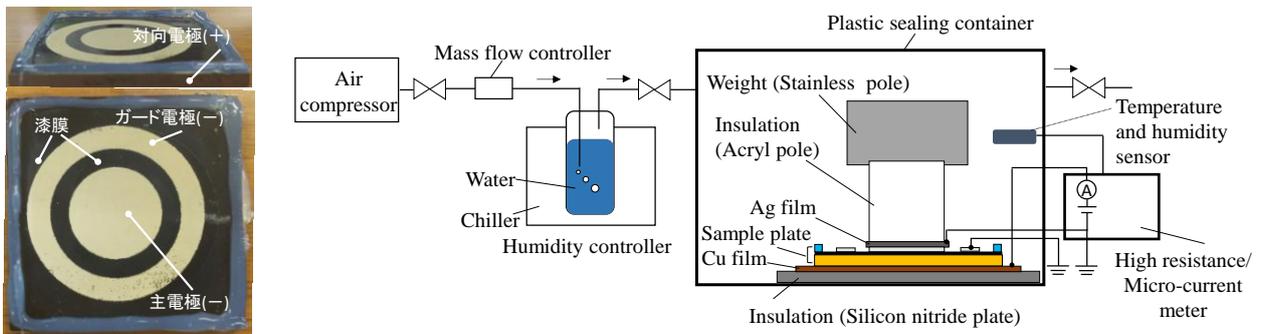


図12. 左：作成した漆膜試料 右：漏れ電流(絶縁抵抗)測定の実験装置

3-2 実験方法

図13に室温、湿度75%および25%での漆膜の印加電界に対する絶縁抵抗を示す。どちらの湿度においても、電界が70kV/cm付近までは、 $1 \times 10^{11} \Omega$ 程度の大きさを保っている。体積抵抗率に換算すると $\sim 2 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ となり、過去文献での値($\sim 8 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$)⁽³⁾に対して1桁程度の違いしか見られなかった。しかしながら、70~80kV/cmにおいて、絶縁抵抗値が $1 \times 10^6 \Omega$ 程度まで5桁低下した。急激な変化であることから、漆内部の構造変化、もしくは成分として含まれている酵素等の不純物が作用したと考えられる。

以上から、漆膜の電気絶縁抵抗値は、室温において $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度となり電気絶縁体としての絶縁機能を有することが分かった。湿度による絶縁抵抗特性の湿度依存性は見られず、安定した特性を有していた。一方で、ある一定以上の印加電圧において、絶縁抵抗値が4-5桁減少したことから、高電圧を扱う場合は絶縁抵抗値の違いを考慮する必要がある。また、絶縁抵抗減少時の印加電圧は、試料によってばらつきが見られた。漆液中の混合物の成分量の違いが影響している可能性が高いため、今後は、どの成分がこの結果に寄与しているのかを調査し、成分調整を行うことでばらつきを解消できると考えられる。

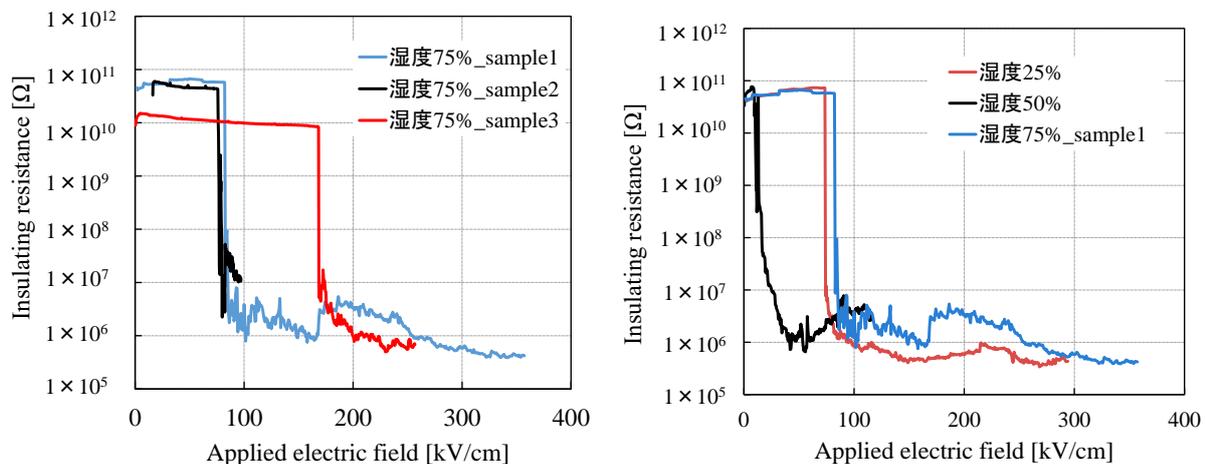


図13. 温度25℃における絶縁抵抗値

4 漆インタフェースの開発

我々は、漆回路を用いたインタフェース案として、漆に触れることのインタラクションを実現するためのタッチインタフェースを検討し、これまでにシングルタッチインタフェースを漆回路で実現した[7]。そこで、本課題では、より複雑な入力が可能となるマルチタッチインタフェースの試作および検証を行った。

4-1 漆回路によるマルチタッチインタフェース

(1) 配線が重なり合う場合におけるマルチタッチ検出

2層の各配線が重なり合う際に、2つのタッチセンサがそれぞれタッチ動作を検出可能かどうか検証した。作成したパターンは4種類で、それぞれ配線の重なり方が異なるものとした(図14)。実験では、指を用いてセンサ部に触れ、Capacitor mater を用いてそれぞれのタッチセンサの出力を計測した。a, b, c, d, eの各点を指で触れた時の出力結果を図14に示す。結果から、タッチセンサ部であるa, bそれぞれを指で触れた際の出力に十分な違いがあった。よって、配線の重なり方によらず、タッチが検出できることが分かった。

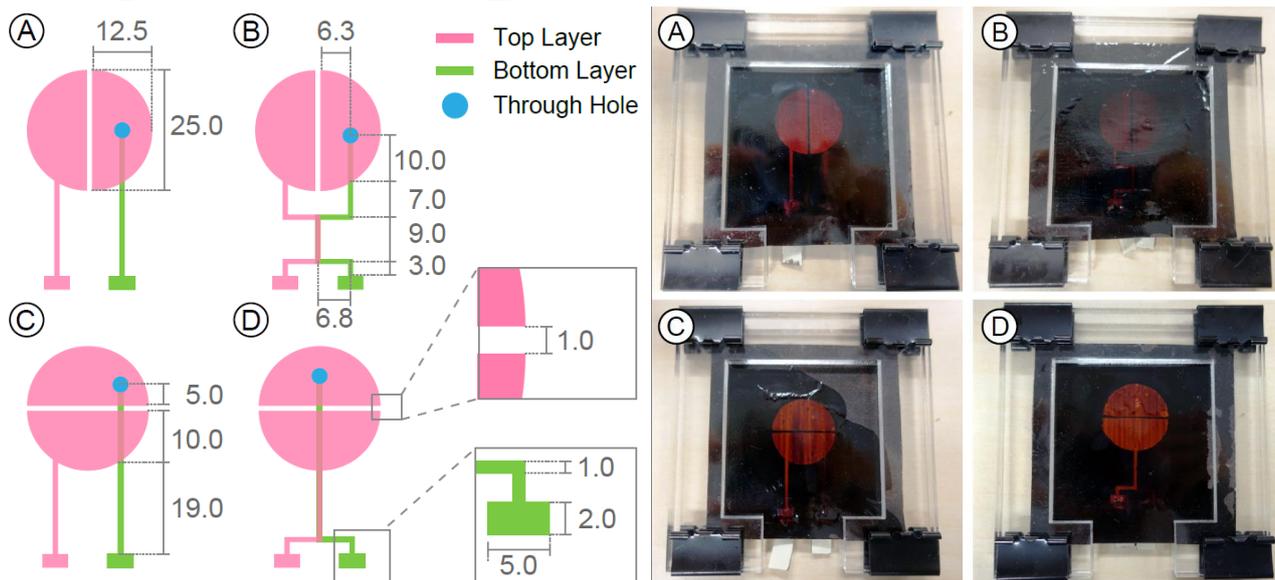


図14. 左：漆タッチ回路パターン 右：実際に試作した漆タッチ回路

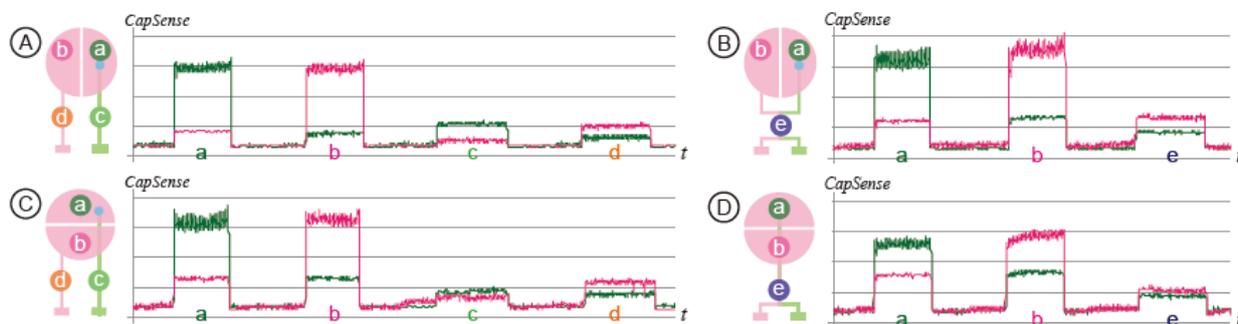


図15. 各漆タッチ回路の出力結果

(2) マトリックス型タッチセンサの検証

次に、マトリックス型のタッチセンサを試作し、各層のセンサ部でタッチ検出が可能であることを確認した(図16, 図17)。以上から、複数のタッチセンサを多層で組み込むことで、回路の総面積を抑えつつ、タッチ位置検出、スワイプ動作の検出など機能が実現できた。このことから、漆回路をインタフェースとして用いる際に応用の幅が広がることが期待される。

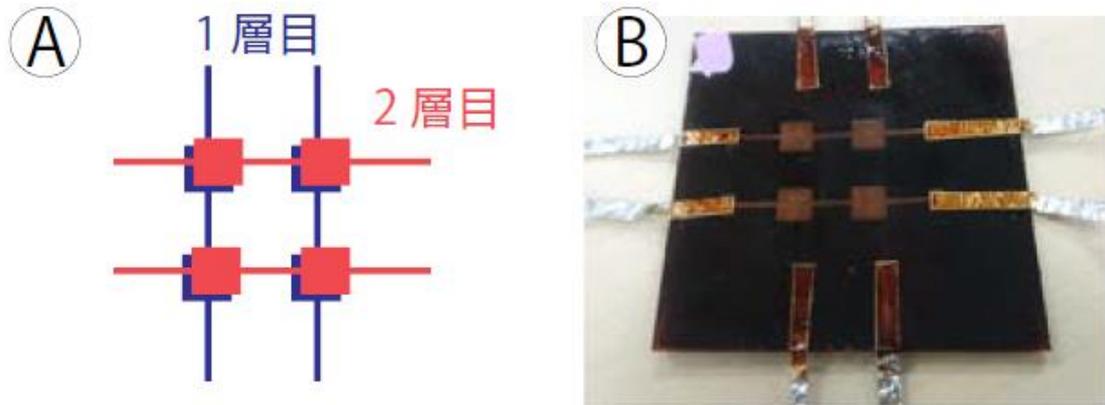


図16. マトリックス型の漆タッチセンサ

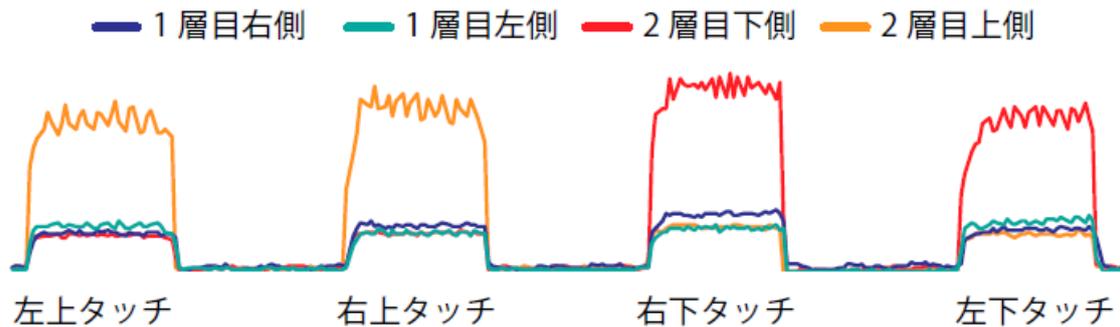


図17. マトリックス型の漆タッチセンサの検出実験結果

4-2 漆インタフェースの試作

(1) 漆タッチモジュール

上記結果を踏まえ、電池を内蔵しスタンドアロンで動作可能な漆タッチモジュールの試作を行った。漆膜内には配線パターン、タッチセンサ、タッチ検出用 IC、LED、チップ抵抗が組み込まれており、布着せという技法によって板状にした。電池との接続は銅箔テープを漆回路から引き出すことで実現した。試作した漆タッチモジュールの構造図および実機を図 18に示す。表面は漆特有の艶を有しており、タッチセンサ部は花の模様としたことで趣を出した。

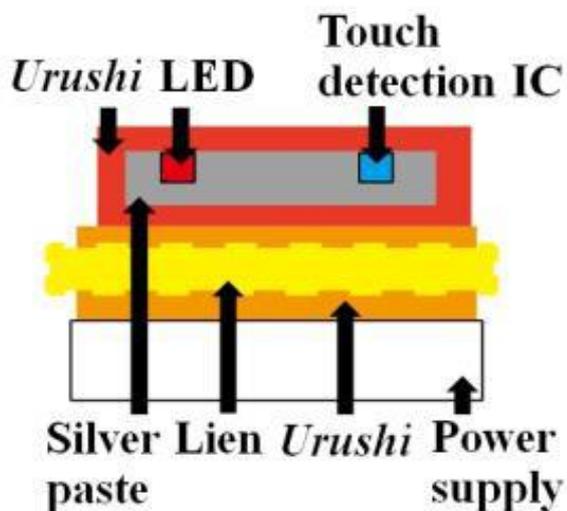


図18. 試作した漆タッチモジュール

(2) モールス信号入力システム

モールス信号入力デバイスを開発している団体[8]と共同で、小紋の絵柄をモチーフにしたタッチインタフェースを設計・製作した(図19)。本プロトタイプは、PCとの接続とコマンド生成を行う回路が外付けとなっている。そのため、装置全体は上述したモジュールと比較して大型である。しかしながら、PCの入力インタフェースとして利用可能であり、実際にモールス信号コマンドを漆タッチインタフェースを介して入力することができた。上述したモジュールと本システムのデモを複数行い、多くの方に体験して頂いたところ、漆を用いることへの新規性や高級感、表面の質感への評価が高かった。しかしながら、LEDの発光が確認しにくい、電池接続部の耐久性が低いなどの細かな問題点が生じた。今後、更なる改良を行い、信頼性の高いインタフェースにしていく所存である。



図19. 左：小紋を用いた回路デザイン 右：試作したモールス信号入力システム

5 おわりに

本研究期間では、漆膜の加工手法、美しさを保った漆回路の作成手法、漆の電気的特性の検証、漆インタフェースの開発という4つの課題を行った。その結果、漆回路の構築技術が大きく進歩し、インタフェースとして用いることができるものが試作できるまでになった。今後の展望として、模様を回路パタンの構成要素として用いる新たな回路デザイン、実際の漆器への組み込み等を行い、より親しみやすく、美しく、使っていて便利な漆インタフェースとなるよう研究を続けていく。また今回、漆特有の電気的特性も発見したことから、新たな用途への応用ができないかどうかとも合わせて検討し、漆の可能性を広げていきたいと考えている。

【参考文献】

- [1] 四柳, “漆 I”, 法政大学出版局, 2006.
- [2] 小川: うるしの科学, 共立出版, 2014.
- [3] 橋本, 小泉, “漆をベースとした電子回路構築手法の基礎的検討”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 1, pp. 64-71, 2015.
- [4] 日本工業標準調査会, “JISC5014 多層プリント配線板”, p4
- [5] Kenji Toki Studio 漆×「・」, <http://kenjitoki.tumblr.com/>
- [6] Kao, Holz, Roseway, Calvo, Schmandt, "DuoSkin: Rapidly Prototyping On-Skin User Interfaces Using Skin-Friendly Materials", ISWC'16, pp.16-23, 2016.
- [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, インタラクシオン 2016, インタラクティブ発表, 2A12, 2016.
- [8] Forethumb LLC, <https://llc.forethumb.com/>

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
紫外線照射法における漆分解モデルの再現性の検証	第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会	2016/9
漆回路の開発およびインタフェースへの応用	, SAT テクノロジー・ショーケース 2017	2017/01
電子回路利用に向けた漆膜の電気絶縁抵抗評価	平成 29 年 電気学会全国大会	2017/01
漆をベースとした回路の構築とインタフェースへの応用	コンバーテック	2017/02
積層漆回路を用いたタッチインタフェースの検討	第 79 回情報処理学会全国大会	2017/03
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	2017/03
金属箔による漆面上へ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	2018/09
Investigation of Touch Interface Using Layered Urushi Circuit	the 12th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction	2018/03