

金彩技法を用いた陶磁器表面への回路作成

坂田 亮一^{1,a)} 吉松 駿平^{2,b)} 星川あすか^{3,c)} 加藤 邦拓^{4,d)}

概要：本稿では金彩技法を用いた陶磁器表面への回路作成手法を報告する。本手法では金液を用いて、皿や器といった市販の陶磁器表面に任意形状のパターンを施す。金液を乾燥させた後に、陶芸窯を用いて焼成することで磁器の表面上にパターンを定着させる。定着したパターンは導電性を持ち、マイコンを接続することでセンサや配線として機能させることができる。本稿では、金彩技法を用いた回路作成によって実装したタッチセンサ、および電気味覚提示用酒器の2種類の応用例を実装した。また予備実験として実装した、マーカーペン式金液を用いて作成した回路トレースの抵抗率の計測についても報告する。

1. はじめに

金彩は、金液や金箔を用いることで、着物や陶磁器に装飾を施す伝統工芸技法のひとつである。本稿第一著者はこれまでに、金彩技法によって陶磁器表面に電極を作成する手法である「電-磁器」を考案し、陶磁器を用いたインタラクティブな電子楽器作品を開発してきた [19]。電-磁器を活用した作品の一例として、寿司などの含有水分量が多く導電性のある食品を乗せることで様々な音を鳴らす皿型の電子楽器や、お茶を注いでいる間だけ音や光を発する茶器・急須型の電子楽器を実現してきた。

本稿では、この金彩技法を用いた陶磁器表面への回路作成手法と、それを使った新たな応用の可能性について報告する (図 1)。また予備調査として、マーカーペン式金液を用いた手法により作成した回路トレースの抵抗率の計測を行った。

2. 関連研究

2.1 導電性素材を用いた回路作成

Human-Computer Interaction (HCI) 分野において、導電性の素材を用いて紙 [9] や木材 [4], 布 [22], アクリル [23], 球面や凹凸面のある立体物 [2] など様々なモノの上に電気回路を作成することによる、センサやインタラクティブデバイスのプロトタイプング手法が数多く提案されてきた。



図 1 金彩技法を用いた回路を持つ陶磁器.

例えば Midas[13] や FoldTronics[17] では、カッティングプロッタを用いて銅箔テープを切り出し、回路のパターンを作成している。また Instant Inkjet Circuits[9] では、導電性インクとインクジェットプリンタを用い、専用の紙や PET フィルムなどの上に任意形状の回路を印刷することを可能とした。薄く、柔軟な素材である紙や PET フィルムは、切る、折り曲げるなどの加工が容易であることから、様々なセンサ [1] やスピーカ [8], アクチュエータ [15] などの様々なファブリケーションに応用されている。また導電性インクを用いた手法はインクジェット印刷のほか、導電性インクペンを用いた手描きによる回路作成 [5] も可能としており、その試行錯誤を支援するためのツールも提案されている [10], [11]。

導電性の素材を用い、内部、あるいは表面に回路を持つインタラクティブな立体物のファブリケーション手法も提案されている。Capricate[14] では、導電性と非導電性の樹

¹ キンミライガッキ現代支部

² 電化工藝

³ 無所属 (画家, 陶芸家)

⁴ 東京工科大学

a) contact@kinmiraigakki.com

b) s.yoshimatsu919@icloud.com

c) itoohoshi@gmail.com

d) kkunihir@acm.org

脂を交互に造形可能な熱溶解積層方式 (FDM) 3D プリンタを用いることで、機能を持つインタラクティブな立体物を造形する手法が提案されている。ObjectSkin[2] では、表面の滑らかな球体や、凹凸のある石など身の回りに存在する様々な立体物の表面上に、水圧転写によって電気回路を作成する手法を提案している。また Zheng は、陶磁器の表面上に回路を作成する手法 [18] を提案している。Zheng らの手法では、サンドブラストを用いて陶磁器表面の釉薬層を削り、露出した磁器土の層に導電性インクを塗布することで回路を作成している。本稿では Zheng らの手法 [18] と同様に陶磁器の表面に回路を作成する手法を報告するが、本手法では伝統工芸技法のひとつである金彩を活用する。本手法では金液を筆やマーカーペンを用いて、食器などの市販の陶磁器表面に任意形状のパターンを作成する。その後、焼成をすることで陶磁器表面に金液が定着し、センサや配線として機能する。焼成を必要としない Zheng らの手法とは異なり、長時間の作成工程を要するが、陶磁器本体を傷つけず、高い耐久性の回路を作成できる利点を持つ。また金彩という伝統工芸技法を採用していることから、美しく、工芸的鑑賞性の高い磁器として日常利用することも可能となる。

このほか、日用品の上に回路を作成する手法として、導電性ラッカーを用いて家具や壁面上にタッチセンサを作成する手法 [16]、レーザカッターを用いて木材表面を炭化させ回路を作成する手法 [4] などが報告されている。

2.2 金の特性を活かした回路作成

金は化学的に非常に安定した素材であり、人体に対して無害でアレルギーのリスクも低く、安全性の高い素材として様々な用途に活用されている。また抵抗率が低く、優れた導電性を持つことから、金を用いた回路作成やインタラクティブなデバイスのプロトタイピング手法が提案されてきた。Leaf Circuits[22] では、レーザプリンタを用いて印刷されたのトナーのパターン上に金箔を乗せ、アイロンがけより熱圧着することで、普通紙を含む様々な用紙上に回路トレースを作成する手法を提案している。また Leaf Circuits では、トナーの転写用紙を用いることで、紙だけでなく布や木材、プリント基板 (PCB) といった様々な素材の上に回路作成を可能とした。

また金の人体に対する安全性を活かし、DuoSkin[6] では金箔を人体の皮膚表面に貼り付けることで、ウェアラブルな入出力インタフェースを実現している。FoodSkin[7] では、食用金箔を用いて、乾燥食品上に回路を作成する手法を提案している。食用金箔を含む無味無臭の可食素材のみを用いることで、元の食品の味や食感を阻害せず、多様なディスプレイ/センシング機能を乾燥食品上に実装し、様々な食体験の拡張手法を提案している。

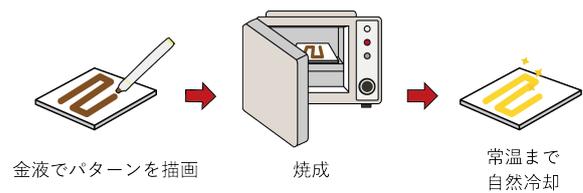


図 2 作業工程. 金液を使い陶磁器表面にパターンを描画し、陶芸窯を使って焼成する。その後自然冷却させ、金液が陶磁器表面に定着したら回路として機能する。

漆回路 [20] では、金箔を含む金属箔を用いることで、金属特有の光沢感のある美しさと機能性を両立した漆面上への回路作成手法を提案している。また漆の絶縁性を利用し、多層の回路を作成することで 2 次元のタッチセンサ [3] や NFC タグ [12] の実装も可能としている。

これらの研究では主に、シート状の素材である金箔を様々なモノに貼りつけることで回路作成を実現していた。一方で、金箔は非常に薄く、脆い素材であるため扱いが難しい [7]。これに対し本稿では、金液を用いた回路の作成を行う。金液は、筆による塗布のほか、マーカーペンを用いることで、サインペンで線を描画する感覚で容易に回路トレースの作成が可能となる。また焼成工程を経ることで、作成に長時間がかかるものの、耐久性の高い回路トレースの作成を可能とした。

3. 金彩技法を使った回路作成

本手法では、金彩技法を用いて陶磁器表面に回路を作成する。図 2 に本手法の作業工程を示す。まず、陶磁器表面をアルコールを含ませた脱脂綿で拭き取る。これにより陶磁器表面に含まれる油分を取り除き、金液の定着や仕上がりを高めることができる。

次に、陶磁器表面 (釉薬層) に金液を施していく。金液は陶磁器やガラスに金属光沢を施すための、金を含む有機溶媒ベースの塗料であり、筆やマーカーペンを用いて陶磁器表面に模様を施していく。ここではマーカーペン*1を使用した技法について説明する。マーカーペンを使い、サインペンで線を描くように陶磁器の表面にパターンを描画していく。この段階では陶磁器表面に塗布された金液が定着していないため、一度描画した箇所に手が触れないよう注意する必要がある。また、書き直しが必要な場合は、アルコールを含ませた脱脂綿によって拭き取ることができると、容易に試行錯誤が可能である。パターンの描画が完了したら、表面が完全に乾くまで自然乾燥させる (図 3 左)。

乾燥後、焼成を行う。焼成には、タイマー制御により温度を自動調節可能な陶芸窯 (小型電気窯 DMT-01, シンボ株式会社) を用いた。タイマーと温度は、陶芸窯の絵付け用基本プログラムとしてプリセットされているものを使用

*1 陶芸用セラミック・マーカー (ゴールド) (日本金液株式会社, FX-4100)

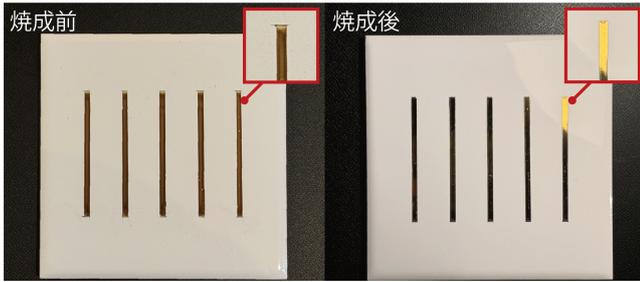


図 3 焼成前後の回路トレース。

した。具体的には、合計で 300 分間かけて温度を 800°C まで昇温させ、焼成が行われる。焼成が完了したら、常温に戻るまで放置し、自然冷却させる。これによって金液が陶磁器表面に定着し、回路として使用可能となる (図 3 右)。

4. 予備調査

予備調査として、本手法により作成した回路トレースの抵抗率を測定した。サンプルとして 20 本の回路トレースを市販のタイルプレート表面に作成し、抵抗値を測定する。タイルプレートの個体差による影響についても調査するため、4 枚のタイルプレートにそれぞれ 5 本ずつの回路トレースを作成し測定を行った。回路トレースは、陶芸用セラミック・マーカー (ゴールド) (日本金液株式会社, FX-4100) を使用し、幅・長さが等しくなるよう定規を当てて直線を描画することで作成した。なおこの際、重ね塗りはしないものとした。回路トレースの長さは 50 mm とし、線幅はペン先の幅である 2.0 mm とした (図 4)。

測定の結果、抵抗率は $0.81 \Omega/\text{sq}$ ($SD = 0.14$) となった (表 1)。既存研究である Instant Inkjet Circuits[9] ($0.21\Omega/\text{sq}$) や Leaf Circuits[22] ($0.64\Omega/\text{sq}$) と比べると、抵抗率はやや高い結果となった。一方、現段階で本手法は、お皿や器、タイルプレートなど市販されている陶磁器に対して回路を作成することを想定しており、極端に大型のものではなければ、センサや配線として十分活用可能な範囲であるといえる。さらに回路トレースを描画する際、重ね塗りをすることで、より低い抵抗率が得られる可能性もあるため、今後より詳細な調査を行う必要がある。

異なるタイルプレート表面に作成した回路トレースの抵抗率を比較しても、顕著な差は見られなかった。そのためタイルプレートの個体差については影響が少ないことが考えられる。一方で、今回定規を使って幅・長さが等しい回路トレースを描画しているが、手作業による筆圧の変化などによって多少の個体差が生じてしまっている可能性がある。今後は、X-Y プロッタなどによる機械制御によって、一定の幅、長さ、筆圧を保った状態で回路トレースを描画するなど、より厳密な条件下での実験が必要となる。また、今回は同一製品のタイルプレートを複数使用しているため、今後は異なる製品や、表面にテクスチャのある陶磁器に対しても適用可能性の調査、抵抗率の調査を行う。

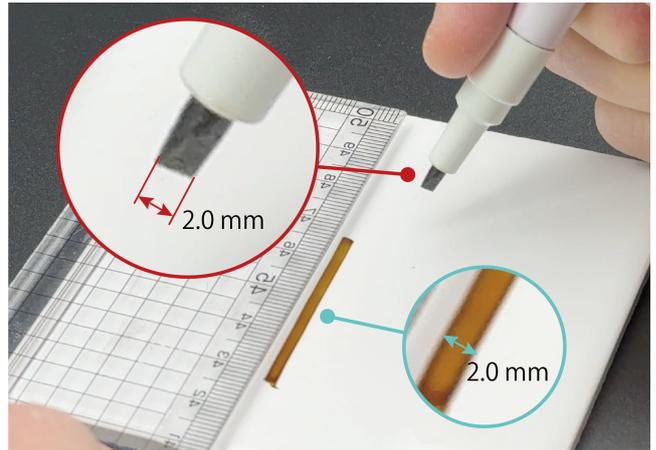


図 4 回路トレースの作成。

表 1 プレートごとの回路トレースの抵抗率。

Plate ID	平均 (Ω/sq)	標準偏差
1	0.83	0.21
2	0.76	0.09
3	0.79	0.14
4	0.86	0.04
全体	0.81	0.14

5. 応用例

5.1 タッチセンサを備えたタイルプレート

市販のタイルプレートの表面に回路トレースを作成し、静電容量方式のタッチセンサを実装した (図 5a)。この例では、タイルプレートの表面にシンプルな線形の回路トレースを作成した。回路トレースの端点にワイヤをつなぎ、マイコンに接続されている。これにより簡易的なタッチセンサとして活用することができる。ユースケースとしては、住宅の壁に設置することで家電のスイッチとして利用したり、床材として使用することでユーザの室内への入室を管理したりと、様々な IoT デバイスとしての利用の可能性が考えられる。

また、食品を乗せるお皿として活用することで、食品が接触している間、あるいは食品が皿から離れたときに外部のスピーカから音を発生させる、LED を発光させるなどのフィードバックを返すインタラクティブな食体験を実現できる (図 5b)。このほか、回路トレースと食品の接触具合から、皿の上に載せられた食品の量をセンシングすることで、ユーザの食品の摂取量や摂取スピードを推定することも可能となる。この例は、須崎らの提案 [21] のように食育への応用も可能であると考えられる。

5.2 電気味覚提示用の酒器

この例では、市販の酒器の表面に回路トレースを作成し、電気味覚提示用の器型デバイスを実装した (図 6)。この器型デバイスは、一極型の電気味覚提示装置 [24] として構築されており、器の内側に作成された回路トレースは、器の

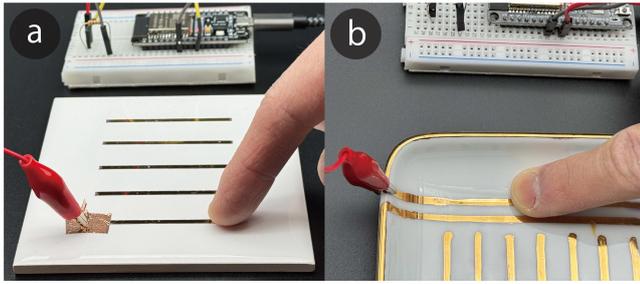


図 5 タッチセンサを備えた (a) タイルプレート, および (b) お皿.



図 6 電気味覚用の酒器.

側面を通じて裏面まで配線されており, 端点のワイヤを通じて電源装置の陽極に接続されている. また内側に作成された回路トレースの配線と反対側に位置する器の側面部にも独立したトレースが作成されており, 電源装置の陰極に接続されている. ユーザがこの独立した側面の回路トレースを指で触れるように器を把持して飲料を飲むと, 回路トレースに接触した飲料, 口内, 腕を通じて電気回路が接続され, 口内に電気刺激を提示することができる.

6. おわりに

本稿では金彩技法を用いた陶磁器表面への回路作成手法を報告した. 本手法では, 市販の陶磁器の表に金液を施し, 焼成することで回路トレースを作成できる. 予備調査の結果, 抵抗率は $0.81 \Omega/\text{sq}$ ($SD = 0.14$) 程度であり, インタラクティブな IoT デバイスのための様々なセンサや配線として使用可能であることを示した.

参考文献

[1] 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).

[2] 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).

[3] Ikegawa, K., Aoyama, S., Tsuchikiri, S., Nakamura, T., Hashimoto, Y. and Shizuki, B.: Investigation of Touch Interfaces Using Multilayered Urushi Circuit, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, pp. 115–122 (2018).

[4] Ishii, A., Kato, K., Ikematsu, K., Kawahara, Y. and Siio, I.: CircWood: Laser Printed Circuit Boards and Sensors for Affordable DIY Woodworking, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '22, No. 11 (2022).

[5] 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).

[6] 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).

[7] Kato, K., Ikematsu, K., Nakamura, H., Suzaki, H. and Igarashi, Y.: FoodSkin: Fabricating Edible Gold Leaf Circuits on Food Surfaces, *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, No. 358 (2024).

[8] 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).

[9] 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).

[10] 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).

[11] 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).

[12] Saito, K., Nakamura, T., Kamezawa, K., Ikeda, R., Hashimoto, Y. and Shizuki, B.: Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushi-ware, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, pp. 443–451 (2020).

[13] 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).

[14] Schmitz, M., Khalilbeigi, M., Balwierz, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M. and Steimle, J.: Capricate: A Fabrication Pipeline to Design and 3D Print Capacitive Touch Sensors for Interactive Objects, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 253–258 (2015).

[15] 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).

[16] Wessely, M., Sethapakdi, T., Castillo, C., Snowden, J. C., Hanton, O., Qamar, I. P. S., Fraser, M., Roudaut,

- A. and Mueller, S.: Sprayable User Interfaces: Prototyping Large-Scale Interactive Surfaces with Sensors and Displays, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–12 (2020).
- [17] 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).
- [18] Zheng, C., Han, B., Liu, X., Devendorf, L., Tan, H. and Yen, C. C.: Crafting Interactive Circuits on Glazed Ceramic Ware, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23 (2023).
- [19] キンミライガッキ現代支部：電磁器，（オンライン），入手先 (<https://www.kinmiraigakki.com/den-jiki.html>) (参照 2024-12-01).
- [20] 土切匠悟，橋本悠希：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論文集，No. 14E-1 (2018).
- [21] 須崎比奈子，加藤邦拓，池松 香，中村裕美，五十嵐悠紀：食品の摂取量に応じて視覚的なフィードバックを与えるアプリケーション，第 31 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 (WISS 2023) 論文集，No. 1B-6 (2023).
- [22] 加藤邦拓，真鍋宏幸，川原圭博，瀬川典久：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，インタラクシオン 2020 論文集，pp. 96–105 (2020).
- [23] 今井悠平，真鍋宏幸：3D プリンタと転写箔を用いた電子配線印刷手法，日本バーチャルリアリティ学会論文集，Vol. 26, No. 4, pp. 241–253 (2021).
- [24] 中村裕美，宮下芳明：一極型電気味覚付加装置の提案と極性変化による味質変化の検討，情報処理学会論文集，Vol. 54, No. 4, pp. 1442–1449 (2013).