

令和元年6月17日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13635

研究課題名（和文）飛翔中焼結によるインクジェット金属ナノ粒子の革新的配線形成に関する研究

研究課題名（英文）Research on innovative fabrication technology of inkjet interconnects by sintering during flight of metal nanoparticle ink

研究代表者

吉田 泰則 (Yoshida, Yasunori)

山形大学・大学院理工学研究科・研究員

研究者番号：80601822

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：飛翔中のインクジェットインク液滴に白色スポット連続光を照射し、基材に液滴が着弾する前にインクの乾燥・焼結過程を進行させることで、濡れ広がり抑制工程および焼結工程を不要とし、あらゆる基材に対して金属ナノ粒子配線の直接形成が行えるようにすることを目指した。第一に、インクジェット印刷配線の焼結による導電性向上に成功した。第二に、直接形成時に特に問題となるインクジェット吐出安定性の改善に関して、計算値として客観的に評価できる手法を新たに提案した。第三に、白色スポット連続光を照射できるインクジェットシステムを開発し、これにより印刷と光焼結を同一のシステムで実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の成果は、インクジェットを用いたプリントドエレクトロニクスにおいて、濡れ広がり抑制工程および焼結工程を不要とし、あらゆる基材に対して金属ナノ粒子配線の直接形成が行えるようにするための重要なステップとなった。これまで、濡れ広がり抑制工程と焼結工程が追加で必要となり工程数が多く、インクジェットの強みである低コスト性、高効率性、高生産性を損ねる原因となっていたが、直接形成の実現は、これらのマイナス要因をほぼ全て打ち消す。本研究課題のさらなる推進は、エレクトロニクス製造の裾野を広げ、「電子回路は家庭で印刷して作る」ことが当たり前になるほどに発展・普及する可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：We aimed to enable the direct fabrication of metal nanoparticle interconnects on any substrate by advancing the drying and sintering process of the ink before the droplets reach the substrate with irradiating xenon light to the ink droplets in flight. Firstly, we succeeded in improving the conductivity of inkjet printed interconnects. Secondly, a new method has been proposed that can be evaluated objectively as a calculated value for the improvement of the ink jet ejection stability, which is a problem particularly in direct fabrication. Thirdly, we developed an inkjet system that can emit xenon light, thereby realizing printing and light sintering in the same system.

研究分野：印刷エレクトロニクス

キーワード：インクジェット 光焼結

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクス製造プロセスに印刷技術を応用することで生産性を大幅に向上させることを目指したプリントエレクトロニクスにおいて、版が不要なインクジェットは特に有望な印刷方法として研究開発が進められている。しかしながら、インクジェットに用いられるインクは粘度が低く、印刷直後の濡れ広がりを抑制する必要があり、さらに、印刷後に導電性を発現させるために焼結工程と呼ばれる高温の熱処理も必要となる。これまで、濡れ広がり抑制工程と焼結工程は別々に行われていたため、工程数が多くなってしまい、インクジェットの強みである低コスト性、高効率性、高生産性を損ねる原因となっていた。

2. 研究の目的

飛翔中のインクジェットインク液滴に白色スポット連続光を照射し、基材に液滴が着弾する前にインクの乾燥・焼結過程を進行させることで、濡れ広がり抑制工程および焼結工程を不要とし、あらゆる基材に対して金属ナノ粒子配線の直接形成が行えるようにする。また、インクジェットの液滴吐出安定性を改善することで、光の照射に起因する吐出の乱れを効果的に防ぐとともに、液滴吐出現象の学術的裏付けを行うことで、様々な状況で使用されるインクジェットの吐出安定性向上に関する指針を提供する。

3. 研究の方法

第一に、インクジェット印刷配線の焼結による導電性向上を目指し、印刷と炉焼結を繰り返して配線を形成する研究を行った。第二に、インクジェット動作中にピエゾ素子が発するノイズを抑制することで液滴吐出安定性の向上を図り、その学術的裏付けとして等価回路モデルによるインクジェット解析について研究を行った。第三に、白色スポット連続光を照射できるインクジェットシステムを開発し、これにより印刷と光焼結を同一のシステムで実現することを目指した研究を行った。

4. 研究成果

(1)インクジェット印刷と炉焼結を繰り返して配線を形成する研究においては、繰り返し数 N を $N = 10, 30, 50$ と設定して配線形成を行った。結果は図1のとおりである。繰り返し数が増えるほど、基板エッジ部のカバレッジが向上し、厚い配線が形成できていることがわかる。また、同条件における配線の 10mm あたりの抵抗値を図2に示す。抵抗値は N が大きいほど小さくなり、 $N = 50$ では $12\text{m}\Omega$ という印刷配線としては非常に小さい値となった。これらの結果から、インクジェット印刷で用いられる金属ナノ粒子インクは、配線用として十分に高いポテンシャルを有していることを明らかにすることができた。得られた成果の位置付けは、用いた基材が通常の2D平面ではなく、立体的な3D立体物であったことが特に新規な事柄である。インクジェットで立体的な3D立体物に高性能な配線を直接形成することはこれまでに例がなく、国内外において十分なインパクトを有するものである。

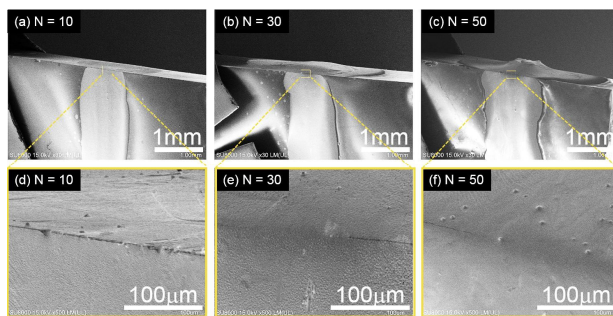


図1 印刷焼成繰り返しによるインクジェット印刷配線

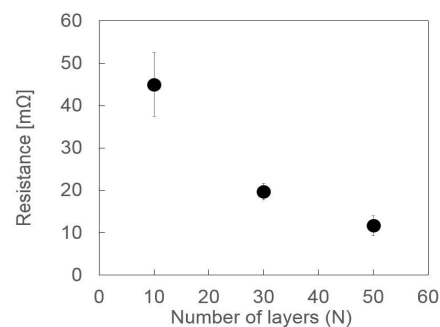


図2 繰り返し数と抵抗値

(2)インクジェットにおける液滴吐出安定性を向上させる研究においては、ピエゾ素子に入力するパルス電圧波形の形状を工夫することで安定性を向上させることに成功した。図3(a),(c)は、ピエゾ素子に入力される電圧およびインクジェットヘッド内部のダイアフラム振動変位の実測値であり、図3(b),(d)は、等価回路モデルでダイアフラム振動変位を再現した計算結果である。図4は、本研究で新たに提案した等価回路モデルである。上段の図3(a),(b)は、パルス電圧の立ち上がりが急峻な場合、下段の図3(c),(d)は、パルス電圧の立ち上がりが緩やかな場合の結果である。図3(a)に示す振動変位の実測値、および図3(b)に示す振動変位の計算値を比較すると、振動のオーバーシュートをうまく再現できていることがわかる。さらに、パルス電圧の立ち上がりを緩やかにした場合にオーバーシュートの振幅が小さくなる挙動についても、よく再現できていることがわかる[図3(c),(d)]。このような新しいモデルでインクジェットの吐出挙動を表すメニスカス振動を調べると、従来のモデルでは再現できなかった現象をよく再現できることが分かった。本研究の成果は、新たに提案した等価回路モデルによって解析することで、今までは再現が難しかった安定吐出条件を探索することができ、光焼結との併用という厳しい条件の元でも安定して吐出ができる可能性をさらに高めることができる点である。なお、インクジェットの安定吐出は、研究の場だけでなく産業応用においても最重要な要請であり、この点で基礎を固める成果を上げることができたのは非常に大きな意義を有する。

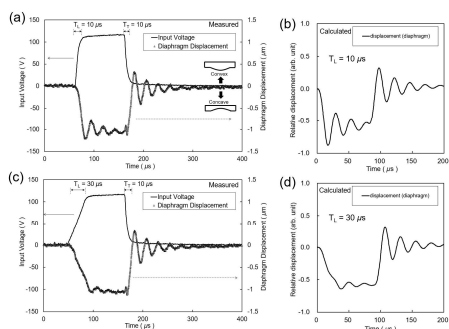


図3 振動変位の実測値と計算値

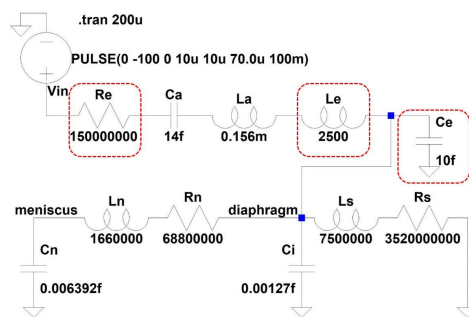


図4 提案した等価回路モデル

(3)白色スポット連続光を照射できるインクジェットシステムについては、我々のインクジェットシステムに新たにキセノンランプユニットおよび光集束レンズを追加し、インクジェットシステムと連携して動作させる機構およびプログラムを新たに開発することで実現された。当該システムを図5に示す。キセノンランプユニットで発生した白色光は、光ファイバーを通して集束レンズまで導かれ、スポット状に集束されてインクジェット印刷配線に照射される。集束されたキセノン光はインクジェット印刷配線を効果的に焼結し、導電性を発現させる。なお、当初の目的は、飛翔中のインクに集束光を照射することで飛翔中の乾燥・焼結を目指すものであったが、予備実験の結果、集束光のサイズ、エネルギー密度、インクの飛翔速度の要因から、十分な乾燥・焼結が得られなかったため、印刷後に光照射するという手段に変更した。図6に、基板の素材別に同条件で光焼結した後のインクジェット印刷配線の体積抵抗率を示す。ガラス基板では、光だけでは十分に焼結せず、追加のホットプレート加熱を必要とした。一方、樹脂材料 (ABS, アクリル) については、光だけで十分に焼結した。この結果は、インクジェット印刷配線の光焼結において、基材の熱伝導率が非常に重要になることを示している。

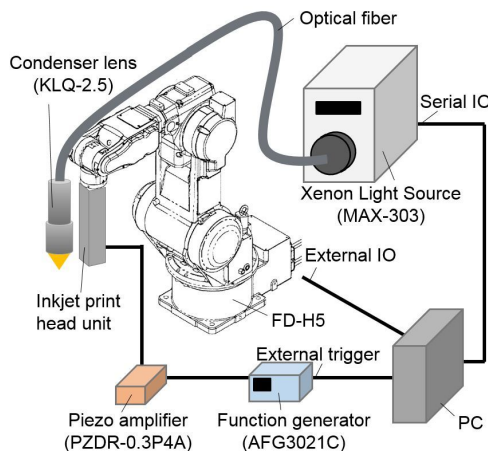


図5 光焼結を組み込んだインクジェットシステム

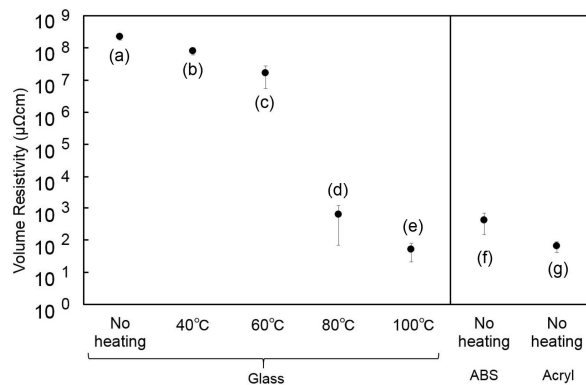


図6 基材別光焼結後体積抵抗率

これらの研究成果は、インクジェットを用いたプリントエレクトロニクスにおいて、濡れ広がり抑制工程および焼結工程を不要とし、あらゆる基材に対して金属ナノ粒子配線の直接形成が行えるようにするための重要なステップとなった。第一に、インクジェット印刷配線の焼結による導電性向上に成功した。第二に、直接形成時に特に問題となるインクジェット吐出安定性の改善に関して、計算値として客観的に評価できる手法を新たに提案した。第三に、白色スポット連続光を照射できるインクジェットシステムを開発し、これにより印刷と光焼結を同一のシステムで実現した。なお、当初予期していなかったこととして、比較的安価なキセノンランプユニットの電力（300W）では、照射エネルギーが十分ではなく飛翔中焼結には不足していたことが挙げられる。これは、当初の目的を達成するための重要な知見であるといえる。今後の展望としては、さらに大出力のキセノンランプユニットを利用することがキーポイントとなるだろう。そして、その際には、本研究課題の成果である上記3点が、課題解決を推進するための重要な指針となると考えられる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

Yasunori Yoshida, Konami Izumi, and Shizuo Tokito, "A push-mode piezo inkjet equivalent circuit model enhanced by diaphragm displacement measurements", AIP Advances, 査読有, 9 (2019) 025319

<https://doi.org/10.1063/1.5088384>

Yasunori Yoshida, Hikaru Wada, Konami Izumi, and Shizuo Tokito, "Three-dimensional interconnect layers inkjet printed on plastic substrates using continuous-wave xenon light sintering," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 58 (2019) 016507

<https://doi.org/10.7567/1347-4065/aaf05a>

Yasunori Yoshida, Hikaru Wada, Konami Izumi, and Shizuo Tokito, "Highly conductive metal interconnects on three-dimensional objects fabricated with omnidirectional ink jet printing technology," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 56 (2017) 05EA01

<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.05EA01>

〔学会発表〕(計 4件)

吉田泰則, 和田輝, 泉小波, 時任静士「連続波キセノン光焼成によるプラスチック基板に対する密着性の高い3次元インクジェット印刷配線の形成」, 第28回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 2018

吉田泰則, 和田輝, 泉小波, 時任静士「全方向インクジェット(OIJ)印刷技術による樹脂製立体物表面への印刷配線形成」, 第27回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 2017

吉田泰則, 和田輝, 泉小波, 時任静士「全方向インクジェット(OIJ)印刷技術による立体物両面エッジ乗り越え大電流配線形成」, 第26回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 2016

Yasunori Yoshida, Hikaru Wada, Konami Izumi, and Shizuo Tokito, "Highly Conductive Metal Interconnects on Three-Dimensional Objects Fabricated with Omnidirectional Ink Jet Printing Technology", The International Conference on Flexible and Printed Electronics, 2016

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

時任・熊木・関根研究室

<https://tokitolabo.yz.yamagata-u.ac.jp>

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。