

平成 30 年 4 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14156

研究課題名（和文）電気回路印刷技術の融合による紙流体チップの革新的高機能化

研究課題名（英文）Improvement of paper-based analytical device by combining inkjet electric circuits printing technique

研究代表者

松田 佑（Matsuda, Yu）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：20402513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：新しい携帯型生化学分析用の流体チップとして注目されている紙流体チップの高機能化を目指した研究を実施した。具体的には紙流体チップに電気回路を組み込むことで、単体の紙流体チップでは実現が困難であった分析の実現を目指した。特に紙への電気回路印刷技術に着目することで、安価、軽量、低体積といった紙流体チップの利点を損なうことなく高機能化を実現することを目指した。本研究では、電気回路印刷技術によって紙上へ導電性インクの塗布を行い電気素子として機能させた。また紙上での電気泳動による物質分離手法の開発を実施した。これにより紙流体チップ単体では難しかった分析を大きな周辺機器を使用せずに実現できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：Paper-based analytical devices (PADs) have attracted a lot of attention, since they are cost efficient, disposable, and portable. In this study, we proposed the addition of printed electric circuits to PADs in order to improve their applications without the loss of the properties of PADs such as low cost, disposability, and portability. We fabricated electric circuits by printing a conductive ink using an inkjet printer. We developed the separation technique on PAD based on the electrophoresis. Our proposed method is simple and will improve PADs without the loss of the properties.

研究分野：流体工学

キーワード：紙流体チップ 紙製マイクロ流体デバイス マイクロ流体

1. 研究開始当初の背景

新しい携帯型生化学分析用の流体チップとして、2007年に Whitesides らが紙流体チップ/紙製マイクロ流体デバイス (μ PAD: microfluidic paper-based analytical device) を提案して以降、本技術は大きな注目を集め盛んに研究が行われている。紙流体チップは、ろ紙上に流路パターンを形成し、この流路上で生化学分析を可能としたデバイスである。特に材料が「紙」である点から、安価、軽量という利点がある。さらに毛細管現象による試料流体の輸送が可能のため、ポンプなどの送液機構が不要であり、システム全体の体積を小さくできるという利点もある。このように、紙流体チップは、従来のガラスや樹脂製のマイクロ流体チップに取って代わる検査ツールになりうる利点を数多く有している。しかし一方で、紙のみでは実現できる機能が大きく制限される。例えば、毛細管現象により送液される試料液体の流れを制御することが難しい、試料を染み込ませるためにそれらを分離するのが難しい、弁などを用いてアクティブに流れや反応を制御することが難しいといった欠点がある。これらの問題を解決するために、外部装置を取り付けることが考えられるが、これでは紙流体チップの安価、軽量性や低体積といった利点が損なわれてしまう。以上の背景のもと、紙流体チップの優位性を失うことなく、高機能化することが強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、紙流体チップの機能を向上させるために、紙上への電気回路印刷技術に着目し、単体の紙流体チップでは実現が困難であった分析の実現を目指した。具体的には、導電性インクをインクジェットプリンタによって紙上に塗布して電気回路を印刷する技術に着目した。特に印刷後のアニーリング処理の不要な導電性インクを用いることに

より、電気回路の導入による追加の製作工程を必要最小限にした。また、USB 端子形状に電極を印刷することで、電源を PC やモバイル機器からとることが可能となり、追加の機器類も必要最小限とすることができる。

また本研究では、単体の紙流体チップでは実施することができない電気泳動を紙上で実現することを目指した研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、導電性インクのインクジェットプリント塗布による電気回路の印刷技術および紙上での電気泳動を用いた物質分離手法の開発を実施した。

導電性インクには、市販の銀ナノ粒子のインクを利用し、市販のイラストレーションソフトで設計した回路パターンの印刷が可能かどうか、またパターンの分解能、印刷条件に関して調査を行った。

電気泳動による物質分離に関しては、まずは市販の電気泳動層による電気泳動において観測されるバンド幅と紙流体チップ上でのバンド幅の比較を行った。また、高い物質分離能を実現するために等電点電気泳動による分離手法に関しても研究を実施した。特に等電点電気泳動において重要となる pH 勾配の形成手法に関して重点的に研究を実施した。

4. 研究成果

電気回路のプリント技術

イラストレーションソフトウェアで設計した回路パターンに導電性インク（銀ナノ粒子インク）をインクジェットプリンタによって紙上へ印刷した。このとき、プリントする線幅を調整することで導電性パターンの電気抵抗値を変化させられることを確認した。すなわち、細かいパターンではその中に含まれる導電性インクのインクジェットドット間の重なりが小さくなるために抵抗値が上が

り、太いパターンではドット間の重なりが大きく抵抗値が低下することを確認した。また、細すぎるパターンを印刷した場合、ドット間の重なりがなくなり電気を流さなくなることを確認した。これによって回路パターンを形成するのに適した線幅、最小の線幅を確認した。

紙流体チップ上での電気泳動

紙流体チップ上での電気泳動に関する実験を実施した。まず、準備した複数の試料が一般的な電気泳動槽において電気泳動が可能であることを確認し、それらの電気泳動後のバンド幅などの確認を行った。その後、それらの試料を紙流体チップ上で電気泳動を実施し、電気泳動の実現性やバンド幅の評価を実施した。このとき、紙上で電気泳動を行う際には、紙の乾燥、温度調整に特に留意する必要があることを確認し、これらの抑止策の検討を実施した。すなわち、樹脂製のフィルムで紙を覆うなどすることで乾燥を防ぐことができることを確認した。ただし、フィルムで紙を覆う際に、フィルム間に隙間があるとその隙間に溶液が毛細管現象で浸透するために液漏れを起こす点に注意が必要であった。これらの適切な処置を施した結果、紙上での試料の電気泳動が実現できることを確認した。ただし、バンド幅は電気泳動槽における電気泳動に比べて太くなってしまい、分離能には劣るという結果であった。これは温度上昇による溶質の拡散が原因と考えられ、適切な電気泳動の動作条件の選定が今後の課題として残っている。

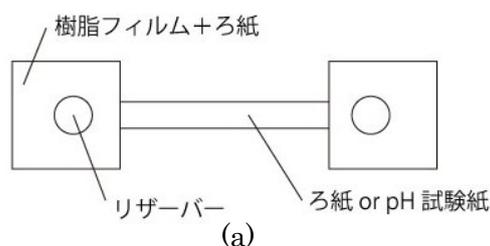
等電点電気泳動

紙流体チップ上において等電点電気泳動を実施した。等電点電気泳動を実現するにあたっては紙上の流路にそって pH 勾配を形成することが極めて重要である。本研究では主に紙流体チップ上に pH 勾配を形成する手法に関して検討を実施した。当初は、流路両サ



図 1 形成された pH 勾配

pH 試験紙両サイドから pH の異なる溶液を浸透させた。pH 勾配は形成されずに両溶液の界面が形成された。オレンジが酸性、緑がアルカリ性を表す。



(b)

図 2 形成された pH 勾配

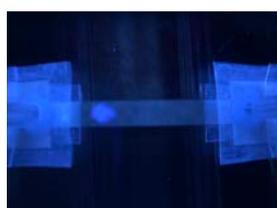
(a) 実験装置概略図

(b) pH 勾配形成実験。ろ紙の代わりに pH 試験紙を用いて pH 分布の測定を実施

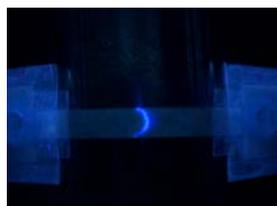
イドから異なる pH 溶液を浸透させることで、pH 勾配の形成を試みたが、両再度から浸透してきた溶液が安定な界面を形成するために溶液の pH や浸透量を調整するだけでは簡便

に pH 勾配を形成することは困難であった(図 1 参照). そこで紙上にそれぞれ異なる pH 勾配を有する溶液を順に滴下することで, 求める pH 勾配を形成する手法を提案した(図 2 参照). 図 2 では pH 試験紙上の 4 点に pH を調整した溶液を滴下している. ただ, この手法では事前に複数の pH を有する溶液を作成し準備する必要があるために, より簡便に pH 勾配を形成する手法の検討が課題として残っている. また形成された pH 勾配は, 通電や紙の乾燥により変化しうるために, 形成した pH 勾配を長時間維持するための手法の開発が必要であることも確認した.

以上の課題点は残るものの, 本研究で提案した手法によって, 紙流体チップ上での等電点電気泳動が実現できることが確認でき(図 3), その有用性を示すことができた.



(a) 泳動前



(b) 電圧印加 15 分後

図 3 等電点電気泳動の様子. ここでは蛍光 pI マーカーを試料に用いて泳動の様子を可視化.

(a) 実験開始前, (b)電気泳動 15 分後
両サイドの四角は樹脂フィルムの蛍光発光. 中央の丸状, 弧状の青蛍光が蛍光 pI マーカーの発光の様子.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 前田日奈美, 松田佑, 山口浩樹, 新美智秀, 紙流体チップ上での物質分離技術の開発, Tokai Engineering Complex 2018.
- ② 松田佑, 電気回路印刷技術と紙流体チップの融合による新機能開拓, エレクトロニクス実装学会関西ワークショップ 2018, 発表決定

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mtfe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 佑 (MATSUDA, Yu)

名古屋大学 未来材料・システム研究所・
准教授

研究者番号 : 20402513