OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	低環境負荷・低温エレクトロニクス製造技術の開発
Author(s)	能木, 雅也
Citation	大阪大学低温センターだより. 2014, 161, p. 12-16
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27390
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

低環境負荷・低温エレクトロニクス製造技術の開発

産業科学研究所　能木　雅也
E-mail: nogi@eco.sanken.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在の多くの電子デバイスを製造するには、300-500℃程度の加熱プロセスや過酷な化学試薬を用いた薬品処理、高真空処理などが必要である。したがって、ディスプレイや携帯電話など多くの電子機器は、ガラスやシリコン基板といった重くて剛直な基板の上に作製されている。

印刷技術によって電子部品や機器を製造するプリンテッド・エレクトロニクス技術は、薬品処理・高温真空加熱など複雑なプロセスを必要としないため、低環境負荷・低温プロセスとして期待されている。さらにフレキシブル基板を用いると、電子デバイスを連続的なロールトゥーロールプロセスで製造することができるため、デバイスの低コスト化が可能である。さらに、軽くて持ち運びしやすく・しなやかで曲面といったデザイン性の高い電子デバイスも実現できる。そこで、新たな基板材料として、厚み100 μm以下の超薄板ガラスが開発されている。このガラス基板は高耐熱性・低熱膨張性といった非常に優れた特性を持っているが、割れやすくハンドリングが困難であり、さらに非常に高価である。高いフレキシブル性と扱いやすく低コストという面から、プラスチックフィルムも注目を集めている。しかも、最近のプリンテッド・エレクトロニクス技術の進展により、プロセス温度が300-500℃から150～200℃付近まで下がっており、使用可能なプラスチックフィルムも徐々に種類が増えつつある。しかしながら150～200℃という加熱温度は、多くのプラスチックフィルムにとっては熱膨張性や耐熱性の面からまだまだハードルが高い。

紙の原料であるセルロースは、250-300度まで熱分解しない高耐熱性材料であり、150～200℃というプリンテッド・エレクトロニクスのプロセス温度を考えると、紙は非常に有望な材料である。しかも、紙は地球上で最も豊富で、持続的供給可能な資源である樹木から製造される。したがって、石油資源ベースのプラスチック基板と異なり、人類は恒久的に紙を使用し続けることができる。さらに、紙基板は軽量・折り畳み可能といった特徴を有するため、これまで電子デバイスへの応用が数多く報告されている。しかし、直径15-50 μmのセルロースパルプ繊維を用いた従来の紙は、表面が非常に粗いため、低いデバイス性能しか得られない。また白色不透明な紙基板は、その外観によって、デバイスにおける用途が大きく制限される。

私達は、2009年に、非常に細いセルロースナノファイバーを用いて、紙を再発明した。３世紀頃の中国で発明されて以来、紙はずっと白色不透明であったが、セルロースナノファイバーを用いた紙（ナノペーパー）はその表面が非常に平滑であり、そして高い透明性を示す。さらに、軽量・高耐熱性・折り畳み可能といった紙本来の特徴も保持しながら、ガラス並みの低熱膨張性も有する。これまで私達は、この透明ナノペーパーの開発ならびにプリンテッド・エレクトロニクス技術の開

発、そして、それらの融合を押し進めてきた。本稿では、プリンテッド・エレクトロニクス技術の研究開発（２章)、電子デバイス用基板としてのナノペーパーに関する研究成果（３章)、両者の技術を融合したペーパーエレクトロニクスに関する研究成果（４章）を紹介する。

2. 印刷技術を用いたデバイス作製技術の開発

2.1 導電性配線作製のためにインクジェット印刷技術の開発

微細な高導電性配線を印刷する技術は、プリンテッド・エレクトロニクスの実現に向けて非常に重要な課題である。そこで私達は、銀ナノ粒子インクをインクジェット印刷して、微細な高導電性配線を印刷する技術を開発した(引用文献１－３)。

インクジェット用インクは粘度がとても低いため、印刷配線の幅が細くなると、コーヒーリング効果によって配線の体積抵抗率が大きくなる。そこで、体積抵抗率が小さくそして微細な配線が作製するために、印刷インクをゆっくり加熱するという新たな配線焼結技術を開発した（図１)。さらに、銀ナノ粒子インクのインクジェット印刷特性を向上させるために、撥液ポーラスタイプと溶媒吸収タイプの受理層の開発も行った。その結果、ポリマー系の受理層を印刷基板に塗布すると、受理層がインク溶媒を吸収するため、急激に加熱しても、体積抵抗率の小さな細い配線ができることを明らかにした（図２)。そして、撥水性の多孔質コート層を印刷基板に作製すると、同じ印刷機、同じインク、同じ基板を使っても、５倍近く電気をよく流す配線ができた（図３)。

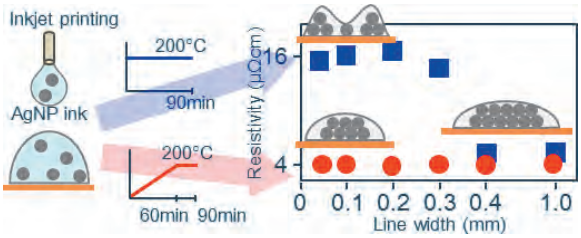

図１　インクジェット印刷した導電性配線の加熱方法に関する研究.

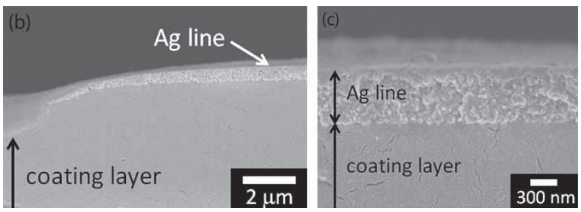

図２　インクジェット印刷した導電性配線のポリマー系コート層に関する研究.

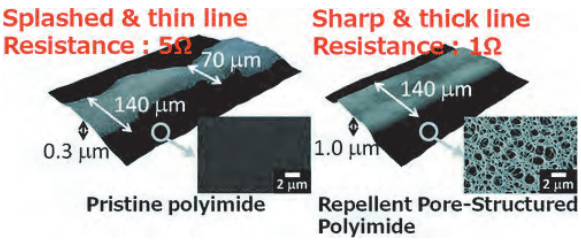

図３　インクジェット印刷した導電性配線の多孔質系コート層に関する研究.

2.2 印刷アンテナの開発ならびに性能評価

私達は、100℃以下の加熱で高い導電性を発現する銀ナノワイヤ印刷ペーストを開発した。このペーストを印刷したアンテナ配線は、従来の銅箔配線よりも優れた高周波特性を示した。さらに、プラスチック基板に印刷した銀ナノワイヤアンテナを使って、ラジコンカーを遠隔操作することにも成功した（図４、引用文献４)。さらに、アンテナ配線のうえに銀塩インクを重ね塗り印刷する

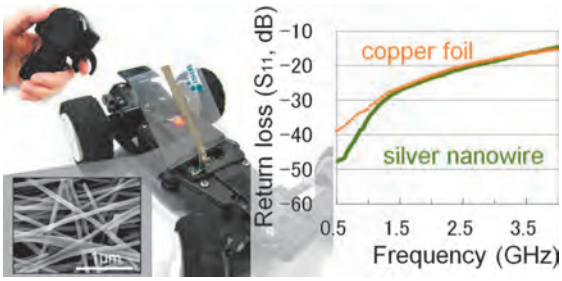

図４　高感度な銀ナノワイヤ印刷アンテナ.

と、アンテナ特性が大幅に向上することを明らかにした。インクジェット印刷で重ね塗りするため、どんな複雑なパターンもトレース可能である。また、銀塩インクは低温焼結可能なので、既存のアンテナデバイスへ熱ダメージを与えない。そこで、この技術を市販の無線LANアダプターに適用すると、ファイルのダウンロードスピードが20%近く向上された（図５、引用文献５）。

図５　インクジェット重ね塗り印刷によるアンテナの感度向上.

3. セルロースナノペーパー：透明・低熱膨張性・折り畳み可能

セルロースナノファイバーとは、木材をはじめとする植物細胞壁の基本骨格であり、その幅はわずか４-15nmである。さらに、その機械的特性も優れており、弾性率と引張強度はそれぞれ約150GPa、約２- ３GPaと超高強度合成繊維であるアラミド繊維に匹敵し、その線熱膨張率は0.1ppm/Kと石英ガラス並みに極めて小さい。

図６　白い紙（左）と透明な紙（右）.

私達は、木材細胞壁から取り出した幅15nmのセルロースナノファイバーを高充填化し、透明な紙（ナノペーパー）を作製した（図６、引用文献６）。現在我々が用いている紙は、幅数十マイクロのパルプ繊維の集合体であり、シート内部に大きな空隙が多数存在し、そこで光散乱を生じるため、白色の紙として見えている（図６右）。これに対して、ナノペーパーは、パルプ繊維を機械的処理で解繊して得たナノファイバーを漉いてシート化したものである。従来の紙とは構成成分は既存の紙と全く同じであり、構成される繊維が細くなって繊維間の空隙が極めて小さくなり、その結果、高い透明性を発現している（図６左）。

図７　折り畳み可能な透明な紙.

この材料は、地球上で最も豊富なバイオマスであるセルロースナノファイバーを原料としており、その製造プロセスもこれまでの製紙プロセスとほぼ同じである。しかし、このナノペーパーは、ガラスのように高透明・低熱膨張性でありながら、紙のように折り畳める（図７、引用文献７）。したがって私達は、バイオナノファイバー基板こそが「脱ガラス基板」の本命であると考えている。

4. プリンテッドペーパーデバイスの開発

本節では、ナノペーパーのうえにプリンテッド・エレクトロニクス技術を用いて電子部品を搭載する技術を紹介する。ナノペーパーは、金属ナノインクを印刷しても滲まず、大気中で200℃数十分加熱しても、変色や変形などの熱劣化を生じない。したがって、金属ナノ粒子や金属塩インクの

印刷、スパッタ処理などで、ナノペーパーのうえにLEDライトを点灯する回路をつくることができた（図８、引用文献８）。銀ナノワイヤインクをナノペーパーへ印刷すると、折り畳める導電性配線（図９左、引用文献９）が作製できる。さらに、印刷技術を用いてパターン形成すると、高感度なアンテナとして動作する。このナノペーパーアンテナは、折り畳んで送受信周波数を調整することも可能である（図９右、引用文献９）。さらに、NHK放送技術研究所との共同研究において、透明な紙のうえに有機トランジスタを搭載することに成功した（図10、引用文献10）。この成果は、ペーパーディスプレイの未来に向けた大きな一歩であり、将来は紙を使ったペーパースマートフォンが登場し、紙のうえでテレビや映画が楽しめるであろう。

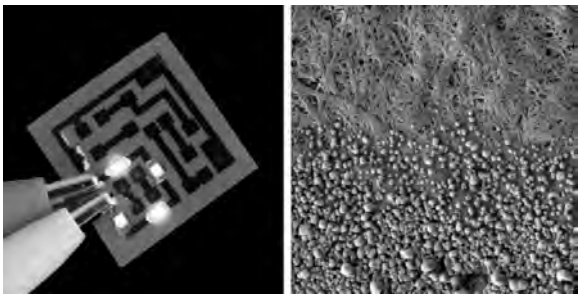

図８　ナノペーパーのうえに作製した導電性配線.

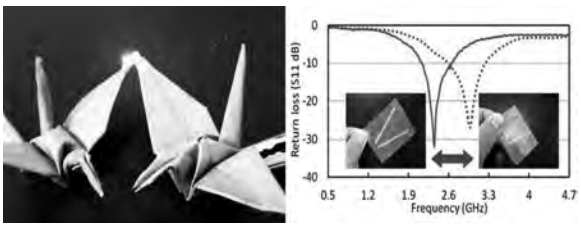

図９　折り畳めるナノペーパーアンテナ.

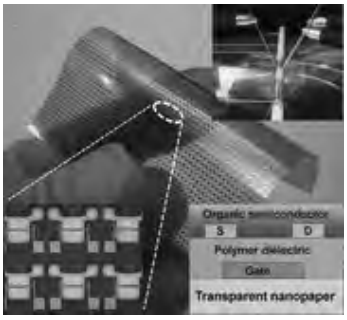

図10　NHK放送技術研究所との共同研究において開発したペーパートランジスタ.

参考文献

1. C. Kim, M. Nogi* *et al.* “Electrical conductivity enhancement in inkjet-printed narrow lines through gradual heating” Journal of Micromechanics and Microengineering 22 (2012) 03501.
2. C. Kim, M. Nogi* *et al.* “Inkjet-printed lines with well-defined morphologies and low electrical resistance on repellent pore-structured polyimide films” ACS Appl. Mater. Interfaces 4 (2012) 2168–2173.
3. C. Kim, M. Nogi* *et al.* “Absorption layers of ink vehicles for inkjet-printed lines with low electrical resistance” RSC Advances 2 (2012) 8447-8451.
4. N. Komoda, M. Nogi* *et al.* “Printed Silver Nanowire Antennas with Low Signal Loss at High-Frequency Radio” Nanoscale 4, (2012) 3148-3153.

5. N. Komoda, M. Nogi* *et al.* “Highly sensitive antenna using inkjet overprinting with particle-free conductive inks”ACS Appl. Mater. Interfaces 4 (2012) 5732–5736.
6. M. Nogi* *et al.* “Optically transparent nanofiber paper” Adv. Mater. 21 (2009) 1595–1598.
7. M. Nogi* *et al.* “High thermal stability of optical transparency in cellulose nanofiber paper” Applied Physics Letters 102 (2013) 181911.
8. M. Hsieh, M. Nogi* *et al.* “Electrically conductive lines on cellulose nanopaper for flexible electrical devices” Nanoscale 5 (2013) 9289-9295.
9. M. Nogi* *et al.* “Foldable nanopaper antennas for origami electronics” Nanoscale 5 (2013) 4395-4399.
10. Y. Fujisaki*, M. Nogi *et al.* “Transparent Nanopaper-Based Flexible Organic Thin-Film Transistor Array” Advanced Functional Materials (2013) DOI: 10.1002/adfm.20130302.