

プリンテッドエレクトロニクスと材料技術

菅沼 克昭^{†a)} 能木 雅也[†]

Printed Electronics and Its Materials Technology

Katsuaki SUGANUMA^{†a)} and Masaya NOGI[†]

あらまし プリンテッドエレクトロニクス技術は、様々な機能性ナノインク（金属ナノ粒子インク、炭素系ナノ物質や有機半導体インク）を用い印刷でエレクトロニクスを製造する新たな巨大市場を形成する。製造プロセスの低温化や省資源化にも大きく寄与し、環境調和技術としても魅力が大きい。配線として用いられる金属ナノインク技術では、ナノ粒子を溶媒に分散させる技術と金属塩をインク化する手法があるが、いずれも低温配線を可能とする技術が開発されている。また、可撓性ばかりでなく伸張性のフレキシブル配線技術も注目され、プリンテッドエレクトロニクス技術の用途拡大が期待されている。

キーワード プリンテッドエレクトロニクス、ナノインク、印刷

1. ま え が き

印刷を用いたエレクトロニクス製造技術が、今、世界で注目を集めている。新聞や雑誌を刷るように、印刷により大量に高速に電子部品や機器を製造する新技術であり、その対象となる製品群は極めて幅広い。エレクトロニクス機器の生産において、印刷技術を利用する歴史は長い。1940年ごろには、実装基板の配線形成に印刷技術が試みられた例もあるが[1]、量産に印刷技術が実用化されたのは、1960年ごろの写真製版の技術を応用したブラウン管のシャドウマスク製造であろう。これを契機に印刷技術がエレクトロニクス製造領域への展開を広げ、今日、液晶ディスプレイのカラーフィルタや配向膜の製造、あるいは、プラズマディスプレイの電極形成や蛍光体塗布には欠かせない技術に育っている。

プリンテッドエレクトロニクスは、最新の印刷技術に加えてナノインク技術の成熟が重なることで生まれる新たな市場である。ナノテクノロジーの技術開発が多岐にわたる中で、有機材料も含め様々なナノ材料の合成が可能になっている。有機の単分子や高分子はもとより、金属、半導体、化合物など、あらゆるものが

ナノレベルのサイズに合成できる。ナノサイズの粒子になることでインク化が容易になるとともに、例えば金属であれば、粒子表面の不安定さから室温においてさえ配線やデバイス形成が実現する。これは、物質の体積が小さくなると結晶内部に対し表面の比率が大きくなり融点降下するためで、その例として、図1に金ナノ粒子の融点に及ぼす粒径の影響を示した[2]。金の融点は1064°Cであるが、粒径を小さくし10nmの粒径を下回ると、急激に融点が低下している。

さて、プリンテッドエレクトロニクス技術の拡大によって、今後、10年ごとに1けた以上の市場規模拡大が期待されている[1]。単に配線を形成するだけでなく、必要に応じて半導体、表示デバイスなどの能動

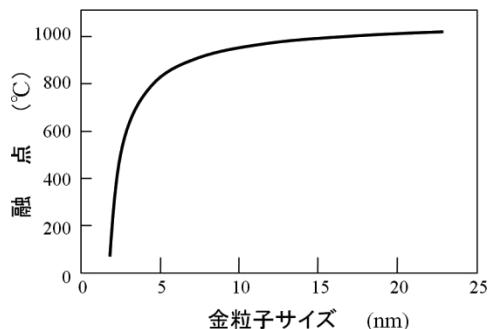


図1 金粒子の融点に及ぼす粒子サイズの効果 [2]
Fig.1 Melting temperature as a function of particle size [2].

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨木市

Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki-shi, 567-0047 Japan

a) E-mail: suganuma@sanken.osaka-u.ac.jp

部品，抵抗，コイルやコンデンサなどの受動部品，電池，ソーラー，センサ，アンテナまでが印刷可能となり，オール印刷によるエレクトロニクス機器の製造も夢ではない．本論文では，これから拡大が期待されるプリントエレクトロニクス技術に関し，その現状を概観する．

2. 印刷技術

今日，文字や画像の印刷に用いられている技術は，ほとんどがプリントエレクトロニクスに適用可能である．ただし，それぞれの特性はかなり異なるので，インクや基材の特性との相性や，印刷の詳細さ，生産速度などを考慮して，適切な印刷法を選択しなければならない．

例えば，印刷において考慮すべき項目として，まず，インクの粘度がある．インクジェット印刷を例にとると，インクジェットノズルから吐出可能なインクの粘度は 10 cP (mPa·s) 程度に限られる．一方，オフセット印刷やスクリーン印刷では，より高粘度のインクを用いることが可能になる．印刷技術は，一般にアスペクト比の高い印刷は苦手とする．最終的に描画される配線やデバイスの厚さは数百 nm から数 μm の範囲になるが，スクリーン印刷などでは 100 μm 程度までの厚さが可能になる．

印刷の詳細性と印刷速度は裏腹の関係にあるが，図 2 には両者の関係をだまかにプロットした [3]．無版オンデマンドを特徴とするインクジェットでは，20 μm 程度の線幅/スペースを実現するが，印刷速度はオフセットやグラビア印刷には及ばない．スクリーン印刷は，中間的な印刷速度になるが，ロータリー型の印刷速度は速く，RFID のアンテナなどの膨大な量の印刷で実

用化されている．オフセット印刷でも特に高詳細さをねらった技術も開発されており [4]，ディスプレイなどへの応用も期待されている．数 μm 以下の超微細印刷技術では，生産速度には限界があるが，ナノインプリント， μCP (Micro-contact Printing)，あるいは静電吐出型のインクジェット印刷などが開発されている．

印刷した配線やデバイスの基板上のぬれ広がり・ぬれ戻り，基板に垂直方向の平坦性は，望みの電気特性を得る上で十分に制御することが望まれる．印刷後のインク乾燥の条件により，最終的に得られる配線やデバイスの断面形状が影響される．基板上のぬれ広がりの制御には，基板の撥液処理などの化学的なものと，表面多孔質化（受理層），バンク形成などの物理的な手法がある．図 3 には，典型的な印刷配線の断面形状を示す．高粘度のインクをスクリーン印刷すると，(a) の形の断面が得られ，これは，従来の配線やデバイスの形に近い．しかし，粘度の低いインクが基材に印刷され配線形成すると，溶媒の乾燥が影響し，その断面はかまぼこ型 (b) になるか，あるいは低粘度液体でよく生じるコーヒーリング効果 [5] で液滴周囲が高く中央が窪んだ形状 (c) になる．後者の形状は電気設計が難しく欠陥を生じやすいので，何らかのぬれ性と溶媒乾燥の制御が必要になる．民生用の高詳細印刷でしばしば用いられる受理層形成は，プリントエレクトロニクス技術においても有効である．図 4 には，銀ナノ粒子インクのインクジェット印刷における受理層の効果を示しているが，受理層のない場合に比較して，専用の受理層を形成することで配線のにじみが抑えられていることが見て取れる．

生産において問題となるのが印刷機のメンテナンス性であり，例えば，インクジェット印刷機のヘッドは，目詰まりが課題となるが，各社，構造だけでなく材質が異なり，それぞれのノウハウとしてブラックボックスになっている．特に，インク溶媒との反応性には留意しなければならない，ヘッド構成材料との相性を確認する必要がある．インク溶媒との化学的相性は，オフセットやフレキソなどの接触型の印刷技術も同様で，

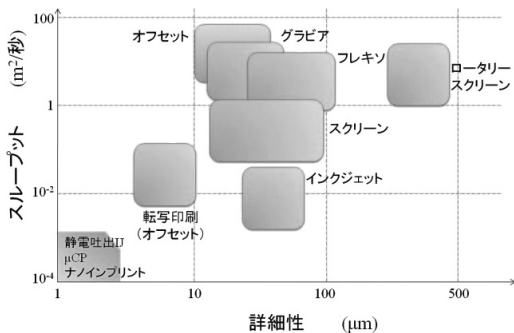


図 2 印刷技術の詳細性とスループット [3]

Fig. 2 Fine pitch capability and throughput of various printing methods [3].

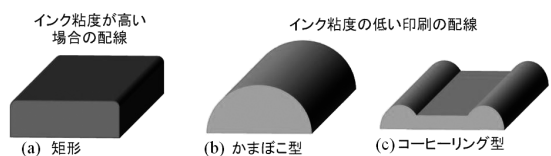


図 3 印刷配線の断面形状 [1]

Fig. 3 Typical cross section shape of printed line [1].

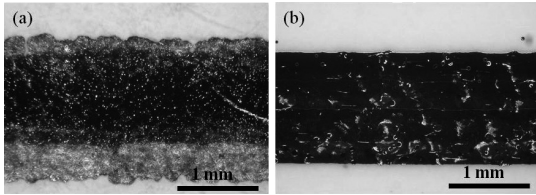


図 4 銀ナノ粒子インクの紙基材へのインクジェット配線に及ぼす受理層形成の効果 (a) 受理層なし, (b) 受理層あり

Fig. 4 Improvement of IJ line shape by acceptance layer on paper. (a) without acceptance layer, (b) with acceptance layer.

インクと転写ロールに用いるシリコン・ゴムなどの反応性や吸湿性などをよく理解しておかねばならない。

3. インク技術

印刷に適した配線材料, デバイス材料の開発も, 盛んに行われている。プリントドエレクトロニクス技術で今後の大きな技術的革新と成長が必要とされ, また期待されるのは様々な有機材料である。実際に有機半導体・導体の技術革新は目覚ましい。例えば, 有機半導体の中でも代表的なペンタセンやチオフェンの電荷移動度は, 既にアモルファス・シリコンの特性に到達しており, 印刷に必要な大気中の安定性も改善されつつある。単結晶ではあるが $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を超える物質も開発されている [6]。一方, 有機導電材料としては PEDOT/PSS (Poly-3,4-ethylenedioxythiophene poly-styrenesulfonate) が最も広く用いられているが, これも特性は年々向上しており, 導電率で 1000 S/cm を超えることも可能になり, いずれ ITO (Indium Tin Oxide) を置き換える可能性も見え始めている。有機導電材料の導電性改善の鍵は, π 共役結合をもつ分子構造そのものと, 分子間の接続をいかに密にするかである。また, 半導体特性を向上させるには, 電極との界面における仕事関数の制御も忘れてはならず, 界面のもつ意味が重要になってくる。

一方, 配線材料としては金属ナノ粒子を溶媒に分散させたナノ粒子インクが欠かせず, 有機導電材料には達成できない低抵抗配線を実現するものとして大きな役割を担う。今日, 銀系のナノ粒子インクが主体に開発が進んでいるが, ナノ粒子を保護する分子膜を設けることで保存性が確保され, 200°C 以上のキュアを行うと $10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ のオーダの優れた低抵抗率が得られる。銀は, 金属中最も低抵抗で熱伝導率も高くエレクトロニクス配線材料として多用されているが, 一方で, 銀

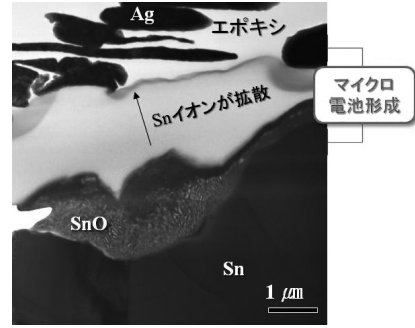


図 5 $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ -1000 時間放置で Ag-エポキシ導電性接着剤/Sn めっき界面に生じるガルバニック腐食 (TEM)

Fig. 5 Interface between Ag-epoxy/Sn plating exposed $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ for 1000 h showing Galvanic corrosion (TEM).

ゆえの信頼性への懸念もある。その懸念材料とは, 錫との相性の悪さ, イオンマイグレーション, ガス腐食などである。錫は, 今日の電子部品や基板のほとんどのに用いられる電極材料であるが, 銀と接触する界面では, 高温劣化と高湿劣化に注意しなければならない。このうち, 高温劣化は 150°C 程度の高温で生じる錫の銀への一方向拡散であり [7], 車載機器への用途では問題になるが, 実用温度が低いプリントドエレクトロニクスではほとんど問題にはならない。一方, 高湿環境での劣化現象は, 十分に注意する必要がある。この劣化は, 局部電池の形成により生じる [8]。高湿環境では, 高分子や紙は必ず吸湿するが, 例えば吸湿したポリマーの中で銀と錫が接触すると, ミクロなサーキットが界面近くに形成される。界面では, 電子のやり取りから錫がイオン化して溶解する。この反応により, 外部から電場を掛けなくても連続的に錫の溶解が継続し, 界面の腐食, 錫の酸化が進行する。図 5 には, 導電性接着剤を高温高湿環境に置いた場合の界面組織を示すが, まさにこの反応が進行している。銀は確かにイオンマイグレーションを生じやすい電極として知られているが, 銅も決して安心はできない電極である。エレクトロニクス機器の中で, これらの金属を露出して使うことは基本的に避けなければいけない。

さて, 銅ナノ粒子インクは, 銀ナノ粒子インクに代わる配線インクとして期待されている。そのメリットは, 素材価格の差, イオンマイグレーション耐性, 耐ガス腐食性などにある。しかし, 残念ながら銅は酸化の影響を受けるため, ナノ粒子の合成時から酸化対策を必要とし, 焼成においても酸化を避けるための策が

必須になる．銅ナノインクを用いた配線の焼成には 200°C 以上の温度を要し，雰囲気は不活性雰囲気になければならない．また，ナノ粒子インクの製造では，さほどコストメリットが出ないことも留意しなければならない．

4. 配線形成の低温化：銀塩技術

プロセス温度の最適化も重要な項目となる．200°C の処理温度は多くの有機材料には高すぎる温度であることから，キュア温度の低温化も積極的に進められている．PET (Polyethylene Terephthalate) や紙などの安価な基板に有機デバイス形成するためには，130°C 以下のプロセス条件を確立しなければならない．インク材料そのものの低温キュア化が必要になるゆえんである．筆者らでは，配線形成の低温化を目標として， β -ケトカルボン酸系銀塩を利用した 100°C 程度の配線形成材料を開発した [9]．

銀塩を用いた銀の形成は，古くは硝酸銀水溶液をアルカリ処理し還元反応の際に銀を析出させる銀鏡反応として知られ，広く鏡面の形成に用いられてきた．この考え方をもとにすれば，適当な金属塩を熱分解するか還元反応により銀を形成することが可能になるはずである．例えば，硝酸銀 (AgNO_3) を熱処理すれば銀が生成するが，残念ながら分解温度は 400°C 以上になるので，プリントエレクトロニクス配線にはそのままでは用いることはできない．水酸化ナトリウムなどの強力な還元剤を作用させればよいが，プリントエレクトロニクスでは大量生産を考慮するので，危険な薬品や信頼性に影響を及ぼす可能性のある薬品を用いることは避けなければならない．

詳細は明らかにされていないが，英国や韓国の大学やベンチャー企業がキュアの低温化を目指して金属塩インクを開発している．図 6 はその中でも，明確なデータを示しているものであるが，150°C キュアでようやく $10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$ の抵抗値が得られている [10]．200°C を切る温度ではあるが，汎用基板に対しては低温化が十分ではない．筆者らの研究室では，PET フィルムや紙への配線形成を可能にするように，130°C を目標に全く新たな銀塩化合物の設計を試みた．その結果として，一連の β -ケトカルボン酸銀塩を得ることができた [9]．この銀塩は，図 7 に示す基本構造をもつもので，R1, R2 に適当な置換基を置くことで，分解温度を 100~200°C に設定できる．

図 8 には，150°C で焼成した組織を示すが，数十

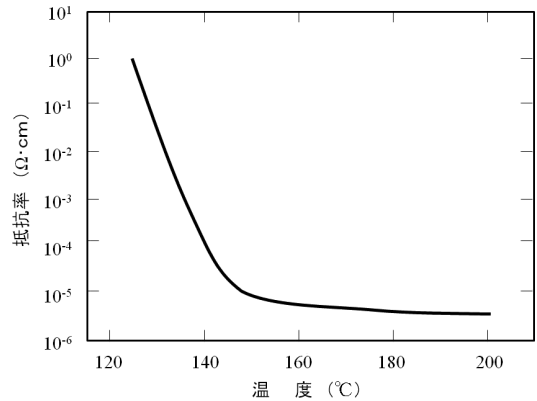


図 6 銀塩インクを用いた抵抗値の焼成温度による変化 [10]
Fig. 6 Resistivity of Ag complex printed line as a function of curing temperature [10].

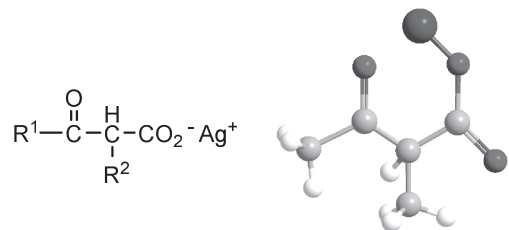


図 7 β -ケトカルボン酸の分子式とモデル
Fig. 7 β -calboxylate Ag complex.

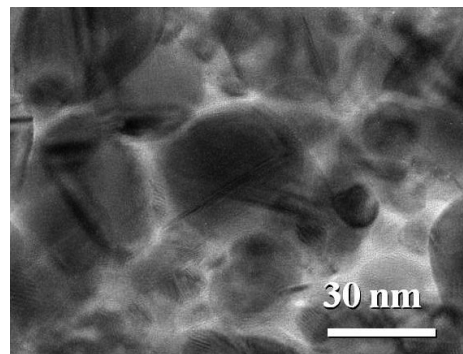


図 8 新銀塩を 150°C で 5 分間焼成した組織 (TEM)
Fig. 8 Sintered microstructure of β -calboxylate Ag at 150°C for 5 min.

nm の大きさの銀結晶粒が成長して互いに結合していることが認められる．図 9 には， β -ケトカルボン酸銀塩を用いてインクジェット配線により紙を基板として形成した回路を示す [11]．紙には受層層がコートされており，インクのにじみを抑えている．ちなみに，このインクは 100°C において数分で $10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$ オーダーの低レベルが確保でき，プロセス温度低温化と同時に

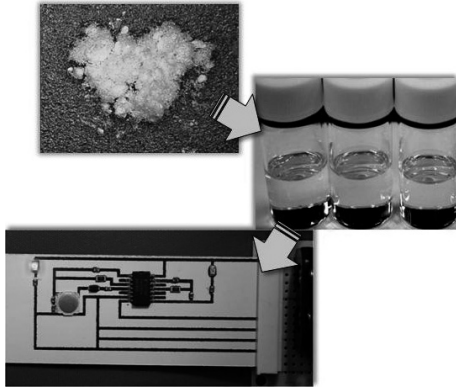


図 9 β -ケトカルボン酸銀塩インクと紙基板ヘインクジェット印刷し 100°C のキュアした配線 [11]
 Fig. 9 β -calboxylate Ag ink and its ink-jet printed circuit fired at 100°C [11].

短時間製造が十分に可能になった。

5. 配線形成の低温化：常温配線

配線処理の低温化には、ナノ粒子を保護しインク中の分散性を確保するための分散剤を何らかの方法で除去すればよい。200°C 以上の温度における熱処理では分散剤が分解し蒸発するが、汎用性を考慮したプリントドエレクトロニクス用の配線技術としては温度が高すぎるので、従来から化学的な処理法が望まれていた。筆者の研究室では、銀ナノ粒子を保護するために用いたアミンがアルコールにより除去できることを見出し、低温配線技術へと展開した [12]。

銀ナノ粒子の保護には、アミン系の分子がよく用いられる。銀ナノ粒子とアミンとの結合はよく理解されていないが、これをアルコールなどの極性溶媒で洗浄すると、短時間でアミンが除去される。実際、数十秒で絶縁状態から通電可能なまでに電気抵抗が低下する。図 10 には、シリコン基板上に形成した銀ナノ粒子インク配線の組織変化を示す。洗浄前の基板では、約 5 nm のサイズのナノ粒子が自己組織化し配列しているが、この状態では絶縁状態である。これが、洗浄後、急激にナノ粒子の配列組織が乱れ粗大化し、2 時間後にはバルクに近い状態にまで粒成長している。非常に簡便で、有害な溶媒を使用する必要がなく、環境調和技術としても優れた特徴をもっている。いくつかの洗浄液を試した中で、最も顕著な効果が得られたのはエタノールで、アミンの洗浄液中の溶解度が大きな影響をもつことが判明している [13]。図 11 は、配線

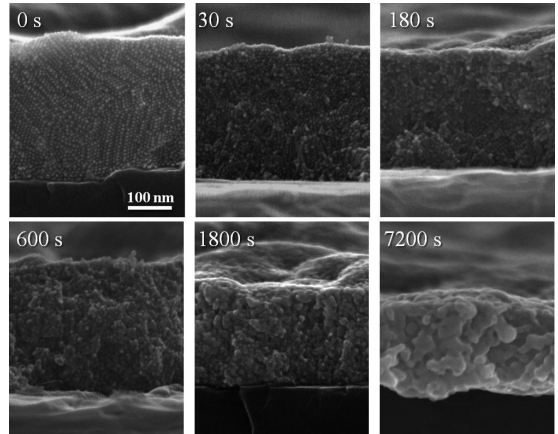


図 10 シリコン基板上のアルコール洗浄した後の銀ナノ粒子配線の常温焼結
 Fig. 10 Microstructure change of printed Ag nanoparticle ink on Si after alcohol washing at room temperature.

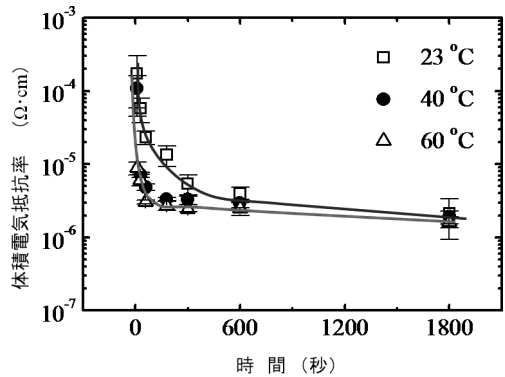


図 11 常温配線抵抗値へ及ぼす洗浄メタノールの温度の影響 [13]
 Fig. 11 Influence of alcohol temperature on resistivity of Ag nanoparticle ink after washing [13].

形成後のメタノール洗浄温度を変化させたときの抵抗値の時間変化を示すが、23°C と 40°C で 300 秒までの初期抵抗変化に明確な差が見られるが、両温度間のアミンのメタノール中溶解度の変化に対応するものである。

6. フレキシブル配線

これまでの電子デバイスは、シリコンやガラス基板などの上に電子部品を搭載しているため、金属配線に対する要求特性は電気抵抗や周波数特性であり、あるいはフレキシブルケーブルなどに見られる曲げに特化したフレキシビリティであった。しかしこの数年、プ

ラスチック基板を用いた連続的なロール・トゥー・ロールプロセスや有機半導体などの柔らかな電子デバイス技術に注目が集まっており、その結果、従来とは異なるフレキシビリティ、すなわち伸長特性が金属配線に求められるようになってきた。可とうかつ伸長フレキシブル配線は、ウェアラブルコンピュータ、フレキシブルデバイスなどの電子デバイス分野のみならず、伸縮性が必要な人工筋肉や人工皮膚などメディカル材料分野においても重要な材料である。そのため、この数年、非常に活発な研究開発が行われており、以下にその一部を紹介する。

初期の伸長フレキシブル配線は、シリコン系ポリマー（ポリジメチルシロキサン：PDMS）の上に、真空蒸着やフォトリソ・電解めっきを用いて金属配線を作製していた。PDMS はおよそ 200% の伸び率（初期長さの 3 倍まで伸長）を示すポリマーであるが、作製した金属配線自体がほとんど伸びないため、連続馬蹄状（二次元湾曲）の金属配線、圧縮した PDMS へ皺状の金属配線作製などの工夫を凝らしても、それぞれ、2~3% 伸ばすと抵抗が 2 倍増、16% 伸ばすと抵抗が 2 けた増加するなど、伸長性フレキシブル性に欠けていた [14]~[16]。

そこで、筆者らでは金属配線に伸長性を付与するために、銀粒子とシリコン系ポリマーの複合化を行った。その結果、高い延伸率 (180%) と低電気抵抗 ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) を示すフレキシブル配線の開発に成功した [17]。更に、この材料のスクリーン印刷を行い、高感度接触センサを作製してロボット用人工皮膚の開発も行った [18]。

最近、関谷（東京大学染谷グループ）らは、幅 3 nm × 長さ 1 mm 以上という非常に高いアスペクト比をもつカーボンナノチューブをシリコン系ポリマーと複合化したフレキシブル配線を開発し [19]、スクリーン印刷により幅 100 μm の配線を作製した [20]。Illinois 大学 Rogers グループは、高粘度の銀ナノ粒子インクのディスペンス印刷など様々な技術で作製した三次元立体湾曲配線を、シリコン基板からポリマー基板へ転写してフレキシブル配線の作製を行っている [21]~[23]。また同グループでは、基板を曲げた際に配線断線を抑制するために、基板中立軸に配線を設計する技術（配線の両面をプラスチック基板で挟む）も報告している [24]。Sungkyunkwan 大学と Samsung Advanced Institute of Technology のグループは、ITO の代替材料として注目を浴びるグラフェンをシリコン基板からポリマー基板への転写し、フレキシブル配線を作製

している [25]。この配線は、オングストローム（サブナノメートル）オーダーの非常に薄いグラフェン層を利用しているため、曲げたり伸ばしたり（曲率 0.8 mm 以上、伸び率 20% 以内）しても k Ω オーダーの抵抗を保持し、更に高い透明性も示すことが示されている。

7. む す び

本論文では、近年技術革新が目覚ましいプリントドエレクトロニクスの概要を紹介した。プリントドエレクトロニクスは、高度な技術の蓄積を要する将来の技術であるとともに、数年後には簡単な応用製品によりその扉が大きく開かれる現実の技術でもある。有機半導体・導体や金属ナノインクなどの材料技術、インクジェットやオフセットなどの印刷技術、更には、本論文では紹介できなかったがフィルムやガラス薄膜などの基板や封止技術と表面処理技術など、様々な領域での技術開発が求められている。また、異相界面の問題も大きい。従来のエレクトロニクスでは、気相プロセスによるメタライズ、めっきやはんだ付けなど、コンタクトや金属結合が得やすいプロセス技術が用いられ成熟してきた。プリントドエレクトロニクスでは、比較的低温で有機/無機界面が随所に設けられるので、その特性確保の基準、プロセス条件、更には評価方法さえ新たに考案しなければならない。このように俯瞰すると、プリントドエレクトロニクス技術の実現までの道のりはまだ遠いと感じられそうだが、間違いなく現実の製品は身近にある。一方で、いずれの領域でも世界のデファクト技術ができていない今が、技術者にとって大きなチャンスといえる。プリントドエレクトロニクス市場は、今後 10 年、20 年でそれぞれ 1 けたずつの拡大が見込まれる巨大産業である。その基盤領域を形成する印刷技術と材料技術がそろそろ出そろいつつあり、今後のデファクト獲得のための世界の技術開発競争にいつその拍車が掛かってきたと感じられる。

文 献

- [1] 菅沼克昭, 棚網 宏, プリントド・エレクトロニクス技術, 工業調査会, 2009.
- [2] Ph. Buffet and J-P. Borel, "Size effect on the melting temperature of gold particles," *Phys. Rev. A*, vol.13 pp.2287-2298, 1976.
- [3] White Paper, "OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics 2008" に筆者が加筆.
- [4] T. Okubo, Y. Kokubo, K. Hatta, R. Matsubara, M. Ishizaki, Y. Ugajin, N. Sekine, N. Kawashima, T. Fukuda, A. Nomoto, T. Ohe, N. Kobayashi, K.

- Nomoto, and J. Kasahara, "10.5-in VGA all-printed flexible organic TFT backplane for electrophoretic displays," IDW'07, 463, 2007.
- [5] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, and T.A. Witten, *Nature*, vol.389, no.23, p.827, 1997.
- [6] J. Zaumsei, V. Podzorov, E. Menard, R.L. Willett, T. Someya, M.E. Gershenson, and J.A. Rogers, *Science*, vol.303, pp.1644–1646, 2004.
- [7] M. Yamashita and K. Suganuma, *J. Electron. Mater.*, vol.31, no.6, pp.551–556, 2002.
- [8] 菅沼克昭, こまできた導電性接着剤技術, 工業調査会, 2004.
- [9] 菅沼克昭, 山口俊郎, 畑村眞理子, 金属銀の形成材料, それを用いた金属銀の製造方法およびそれを用いた金属銀, 特許第 4452841 号.
- [10] A.L. Dearden, P.J. Smith, D.-Y. Shin, N. Reis, B. Derby, and P. O'Brien, *Macromol. Rapid Commun.*, vol.26, pp.315–318, 2005.
- [11] M. Kawazome, K. Suganuma, M. Hatamura, K.-S. Kim, S. Horie, A. Hirasawa, and H. Tanaami, "Low temperature printing wiring with Ag salt pastes," IMAPS2006, pp.1050–1055, 2006.
- [12] D. Wakuda, M. Hatamura, and K. Suganuma, "Novel method for room temperature sintering of Ag nanoparticle paste in air," *Chem. Phys. Letters*, vol.441, pp.305–308, 2007.
- [13] D. Wakuda, K.S. Kim, and K. Suganuma, "Room temperature sintering process of Ag nanoparticle paste," *Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol.32, no.3, pp.627–632, 2009.
- [14] D.S. Gray, J. Tien, and C.S. Chen, "High-conductivity elastomeric electronics," *Adv. Mater.*, vol.16, pp.393–397, 2004.
- [15] D. Brosteaux, F. Axisa, M. Gonzalez, and J. Vanfleteren, "Design and fabrication of elastic interconnections for stretchable electronic circuits," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.28, no.7, pp.552–554, 2007.
- [16] S-P. Lacour, S. Wagner, A. Huang, and Z. Suo, "Stretchable gold conductors on elastomeric substrates," *Appl. Phys. Lett.*, vol.82, p.2404, 2003.
- [17] M. Inoue, Y. Kawahito, Y. Tada, T. Hondo, T. Kawasaki, K. Suganuma, and H. Ishiguro, "A super-flexible sensor system for humanoid robots and related applications," *Proc. International Conference on Electronics Packaging*, pp.114–119, 2007.
- [18] Y. Tada, M. Inoue, T. Kawasaki, Y. Kawahito, H. Ishiguro, and K. Suganuma, "A flexible and stretchable tactile sensor utilizing static electricity," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.684–689, 2007.
- [19] T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida, and T. Someya, "A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors," *Science*, vol.321, pp.1468–1472, 2008.
- [20] T. Sekitani, H. Nakajima, H. Maeda, T. Fukushima, T. Aida, K. Hata, and T. Someya, "Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors," *Nature Materials*, vol.8, pp.494–499, 2009.
- [21] B.Y. Ahn, E.B. Duoss, M.J. Motala, X. Guo, S.I. Park, Y. Xiong, J. Yoon, R.G. Nuzzo, J.A. Rogers, and J.A. Lewis, "Omnidirectional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes," *Science*, vol.323, pp.1590–1593, 2009.
- [22] D.-H. Kim, Y.-S. Kim, J. Wu, Z. Liu, J. Song, H.-S. Kim, Y.Y. Huang, K.-C. Hwang, and J.A. Rogers, "Ultrathin silicon circuits with strain-isolation layers and mesh layouts for high-performance electronics on fabric, vinyl, leather, and paper," *Adv. Mater.*, vol.21, pp.3703–3707, 2009.
- [23] S.-I. Park, Y. Xiong, R.-H. Kim, P. Elvikis, M. Meitl, D.-H. Kim, J. Wu, J. Yoon, C.-J. Yu, Z. Liu, Y. Huang, K.-C. Hwang, P. Ferreira, X. Li, K. Choquette, and J.A. Rogers, "Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays," *Science*, vol.325, pp.977–981, 2009.
- [24] D.-H. Kim, J.-H. Ahn, W.M. Choi, H.-S. Kim, T.-H. Kim, J. Song, Y.Y. Huang, Z. Liu, C. Lu, and J.A. Rogers, "Stretchable and foldable silicon integrated circuits," *Science*, vol.25, pp.507–511, 2008.
- [25] K.S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S.Y. Lee, J.M. Kim, K.S. Kim, J.-H. Ahn, P. Kim, J.-Y. Choi, and B.H. Hong, "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes," *Nature*, vol.457, pp.706–710, 2009.

(平成 22 年 4 月 15 日受付)



菅沼 克昭

1977 東北大・工卒 . 1982 同大大学院博士課程了 . 現在 , 実装工学分野の研究に従事 .



能木 雅也

1997 名大・農卒 . 2002 同大大学院博士課程了 . 現在 , プリントドエレクトロニクス分野の研究に従事 .