

インクジェット法による 回路基板製造技術

The Printed Circuit Board Manufacturing Using Ink Jet Technology

酒井真理



Abstract

導電体、半導体や絶縁体等の機能性材料を含むインクを用いて、インクジェットプリンタで電子デバイスのパターンを印刷する革新的製造技術の研究開発が進められている。金属ナノ粒子を含む微小な液滴で線を描画し焼成することで、回路基板上に金属配線パターンを作製できる。マスクレス・非接触ダイレクトパターンニングにより、凹凸基板やフレキシブル基板にオンデマンドで、かつ材料を除去することなくパターンを形成できるインクジェット法は、環境に優しい21世紀の新しい製造技術として期待されている。

キーワード：インクジェット、デジタルファブ리케이션、液体プロセス、回路基板

1. はじめに

印刷機という大層な表現ではあるが、インクジェットプリンタという印刷機が家庭に行き渡り、個人のニーズに応じた多様な印刷物を必要なときに必要なだけ自らの手で製造することが可能となっている。近年このように身近になったデジタル印刷技術、特に家庭で使われているインクジェットプリンタの技術をエレクトロニクス製造に応用する研究開発が積極的に進められている。プリンタにおける色材を含むインクと紙の代りに、有機・無機・金属の導電性材料、半導体材料、絶縁体材料などの機能性材料を含むインクとガラスやプラスチックなどからなる基板とを組み合わせ電子デバイスをプリントすることができる⁽¹⁾。大形の印刷機を備えた印刷所で行われている印刷物製造から、卓上のプリンタでオンデマンド印刷（必要なときに必要なだけ印刷）とバリエーション印刷（1枚1枚異なるデータ可変印刷）が可能になった印刷革命のように、電子デバイス製造においてデジタルファブ리케이션の製造革命が起きようとしている。

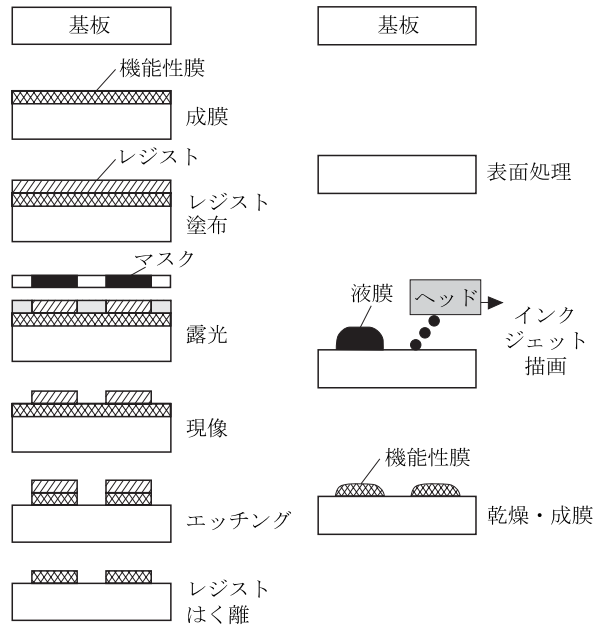
以下本稿では、インクジェット法の特徴と、インクジェット法の中核であるインクジェットヘッドと機能性

インクの概要と、応用例として回路基板製造への適用事例を幾つか紹介し、最後に現状と将来展望を述べる。

2. インクジェット印刷技術の特徴

インクジェット印刷技術はインクジェットヘッドから微小なインク液滴を噴射し、デバイスのパターンに応じて基材上の必要な場所に液滴を着弾させ、機能性材料を含む液体パターンを描画する。図1(a)に示すフォトリソグラフィを用いた従来プロセスでは、スピコート法、スパッタ・蒸着法等により基材全面に機能性膜を形成する工程と、機能性膜上にパターンに応じたレジスト膜を形成する工程と、エッチングにより不要部分を除去する工程とからなっている。これに対して図1(b)に示すインクジェットプロセスでは、ヘッドのノズルから吐出したインク液滴は、ヘッドと基材との間の空間を飛ばしてヘッドと対向する基材に着弾する。次に着弾した液滴は基材とインクの界面エネルギーに従って基材上を流動しぬれ広がる。最後にインクの溶媒を蒸発させて機能性材料からなる膜パターンが得られる。このようにインクジェット法は非接触なダイレクトパターンニング技術であり、材料を除去していく減法プロセスではなく、必要な所へのみ材料を付加していく加法プロセスである。インクジェットを成膜・パターンニング装置として見たときのキーワードと主な特徴を以下にまとめる。

酒井真理 セイコーエプソン株式会社 OLED 開発センター
E-mail Sakai, Shinri@exc.epson.co.jp
Shinri SAKAI, Nonmember (OLED Development Center, Seiko Epson Corporation, Nagano-ken, 399-0293 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.90 No.7 pp.544-548 2007年7月



(a) フォトリソグラフィプロセス (b) インクジェットプロセス

図1 フォトリソグラフィ法とインクジェット法の比較

(a)従来のフォトリソグラフィ法では、基板全面に膜を形成した後、不要な部分を除去してパターンを得る。(b)インクジェット法では、必要な部分にヘッドで液滴を塗布して液膜パターンを形成した後、乾燥・成膜工程によって機能性パターンを得る。

- (1) 非接触ダイレクトパターンニング
 - ・ 厚い、硬い、柔軟、凹凸など多様な基材に対応
 - ・ デジタル、オンデマンド、バリエブル印刷
 - ・ 付加プロセスによる材料の高利用効率
- (2) 液体プロセス
 - ・ 多様な機能性材料
 - ・ 非真空プロセス
 - ・ 小環境負荷
- (3) スケーラビリティ
 - ・ 広範囲な基材サイズ（数 μm から数m）に対応
 - ・ 広範囲な液滴量（fl（フェムトリットル）からnl（ナノリットル））

3. インクジェットヘッドと機能性インク

図2はセイコーエプソンから上市されたピエゾ方式インクジェットプリンタの最小液滴量の推移を示している⁽²⁾。インク滴量はピコリットル（pl, 10のマイナス12

用語解説

デジチチェーンパターン 複数の層に形成された配線を、A層の配線の一端からB層の配線の一端へ、B層の配線の他端からC層の配線の一端へと、層間を順々に接続する形態。

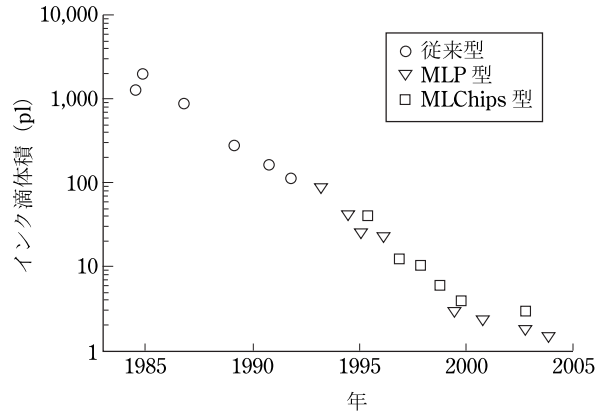


図2 エプソン製ピエゾヘッドの最小インク滴量の推移⁽²⁾ 民生用インクジェットプリンタではインク滴を微小化することで高画質を追求してきた結果、15年でおよそ3けたもの液滴体積の微小化がなされた。1pl（ピコリットル）は直径にしておよそ $12\mu\text{m}$ の液滴である。MLP（Multi-Layer Piezo）型は圧電体と電極とを交互に積層した積層圧電素子を用いている。MLChips（Multi-Layer Ceramic with Hyper Integrated Piezo Segments）型は圧電素子、振動板、流路を一体化積層セラミックス構造体として形成している。

乗リットル、1兆分の1リットル）の単位で表現されることが多い。1plとは一辺が $10\mu\text{m}$ の立方体、球体では直径およそ $12\mu\text{m}$ の液滴である。高画質のプリント出力を追及する中で、15年で3けたもの液滴量の微小化が進められ、民生用のインクジェットプリンタでは1plの微小液滴に到達した。インクジェット法の工業的な応用では、フェムトリットル（10のマイナス15乗リットル）のインクジェット技術⁽³⁾を含めると実に6けた以上の液滴量範囲が利用可能である。

インクジェットヘッド（以下ヘッドと呼ぶ）とはインクジェットプリンタにおいて液滴を噴射する中核部品で、液滴はヘッドの直径にして数 μm から数十 μm 程度の開口を持つノズルから噴射される。ノズルはインクで充てんされた微小な圧力室につながっており、この圧力室に極めて大きな圧力を発生させてインクをノズルから押し出すように噴射する。ヘッドはこの液滴噴射の圧力発生様式により種々の方式に分類され、多様な構造のヘッドが実用化されている⁽⁴⁾。民生用プリンタでは、圧力発生源として圧電（ピエゾ）素子を用いたピエゾ方式と、熱による液体の沸騰現象を用いたバブル方式とがあり、工業的な応用ではピエゾ方式のヘッド（以下ピエゾヘッドと呼ぶ）が主に利用される。

ピエゾ方式は、ノズルに接続する微小な圧力室の壁を圧電（ピエゾ）素子で変形させることで圧力室容積を変化させ、圧力室を満たすインクを加圧してノズルからインク液滴を噴射する。図3に示すピエゾヘッド⁽⁵⁾の例では、圧電体と電極とを交互に積層した積層圧電素子が圧力室密度に等しい間隔で切断され、一端をベース基板に固定されたくし形アクチュエータ列を構成している。圧電素子へ電圧を印加すると圧電横効果により圧電素子は

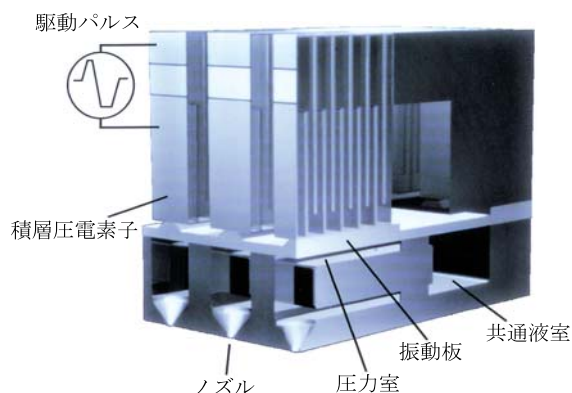


図3 ピエゾ方式のインクジェットヘッド（エプソンMLP型）
 圧電（ピエゾ）素子を駆動パルスで充電すると縦方向に収縮して振動板を押し上げ圧力室を拡張する。続く駆動パルスの放電で振動板を押し下げ圧力室を収縮し、発生する圧力によりノズルからインクを噴射する。

ベース基板を固定端として長さ方向に収縮し、圧電素子の他端に接着固定された振動板を圧力室容積が拡大する方向に変形させる。逆に電圧の解除によって圧電素子は伸長し圧力室容積を縮小させる。この圧電素子の収縮と伸長とを圧電素子の駆動電圧波形パターンで精密にコントロールすることで、インク滴量やインク滴速度を自由に変わることができる。また、粘度等のインク特性に応じた駆動電圧波形を設計することで、多様な機能性インクに対応することができる。

インクジェット法で機能性材料の膜を得るには、初めに機能性材料またはその原材料を含むインクを調合する。ピエゾ方式やバブル方式などのヘッド方式によりインクの制約条件は多少異なるが、ピエゾヘッドでは粘度が数十 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下であることが最低限要求される。それ以外に、実用的にはヘッド内で固化や析出物を出さないことや、微細なノズルで乾燥による目詰まりを起さないことなど、信頼性に関する極めて多くの要求項目を満たさなければならない。もちろん最終的に得られる機能性膜が機能するため、機能性材料自身が適切に設計され、特性に悪影響を及ぼす不純物が除去されていなければならない。

インクジェットの工業応用に用いられる機能性インクを溶媒系で分類すると、無溶媒系と溶媒系に大別される。無溶媒系とは揮発性の溶媒を含まない機能性インクで、インク全体が機能性材料として機能する。この無溶媒系の機能性インクの例として、液晶材料、紫外線硬化樹脂、熱硬化性樹脂、ホットメルト接着剤等がある。ホットメルトは室温で固体の材料をその融点以上にヘッド内で加熱して噴射させる。溶媒系の機能性インクは揮発性の溶媒に機能性材料を溶解または分散させ、溶媒を乾燥プロセスで除去することで機能性材料の固体膜を得る。溶媒系インクは更に溶液系インクと分散系インクとに分類される。溶液系インクでは機能性材料が溶媒中に分子レベ

ルで分かれて溶解している。一方、分散系インクでは機能性材料が微小な粒子として溶媒中に浮遊した状態で存在する。溶液系インクの例として、有機EL (Electroluminescence) や有機半導体のポリマーや色材の染料の溶液が挙げられる。分散系インクの例として、金属粒子からなる導電性材料やLCD (Liquid Crystal Display) やプリンタで用いられる色材の顔料の分散液が挙げられる。溶媒系の分類では溶媒が水か有機溶媒かで分ける視点もある。水は極めて極性の大きな特殊な溶媒であるため、機能性材料を溶解または分散させる技術が有機溶媒の場合と大きく異なるためである。

4. インクジェット法による回路基板製造

インクジェット法の回路基板への適用例の一つとして、溶融はんだをインクジェットで噴射し高精細パンプ等を製造する技術が挙げられる⁽⁶⁾。一方、近年ナノテクノロジーの進展とともに金属ナノ粒子を用いたインクジェット法配線技術の開発が積極的に行われている。以下では、金属ナノ粒子を用いたインクジェット法による回路基板製造例を幾つか紹介する。

4.1 金属ナノ粒子インク

民生用プリンタのインクジェット顔料インクでは、色材顔料の粒子径は100nm前後であるのに対して、インクジェット法金属配線では粒子径が数nmから数十nmと極めて小さいナノ粒子を用いる。ナノ粒子が用いられる理由として次の二つが挙げられる。一つはインク中での粒子の分散安定性を得ることである。金属は密度が溶媒密度よりはるかに大きいため、重力により沈降し沈殿物を生成しやすい。粒子径を小さくすることで溶媒からの粘性抵抗とブラウン運動を利用して沈降を抑え、極めて安定した分散状態を実現できる。ナノ粒子を用いるもう一つの理由は、焼結温度の低温化にある。金属粒子を微粒化していくと低融点化し、特に粒径が10nm程度を切ると急激に融点降下することが知られている⁽⁷⁾。バルク状態で融点が1,063℃の金や961℃の銀も、ナノ粒子になると300℃以下で焼結し、金属結合した膜になる。1 μm 程度の銀粒子を樹脂バインダ中に分散させた従来の銀ペーストは、粒子同士の物理的かつ確率的な接触により導電経路を形成しているのに対して、ナノ粒子では原子的に結合した金属膜によりバルクの比抵抗に近い導電性が得られる。図4に金属ナノ粒子による配線パターン形成の技術概要を示す。金属ナノ粒子がその高い表面エネルギーのためインク中で互いに結合し粗大粒子を形成してしまうと、分散安定性と低温焼成性が共に低下する。そのため金属ナノ粒子のインク化では、ナノ粒子を有機物でコーティングし粒子同士がインク中で結合しないようにする。有機物のコーティングは焼成過程で分解

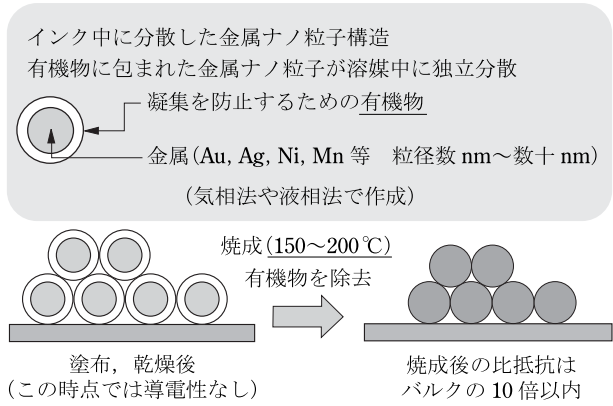


図4 金属ナノ粒子の構造と焼成プロセス 金属ナノ粒子同士がインク中で融着しないよう、粒子表面を有機物で覆うことで分散安定化させる。表面有機物は焼成過程で除去され、ナノ粒子の特徴である低温での融着が発現する。

や脱離により除去され、導電性を低下させないように設計されなければならない。

4.2 多層配線基板への応用

インクジェット法による 20 層フレキシブル多層配線基板の製作事例を紹介する。図 5 に示す多層配線は、外形が 20mm 角の基材上に 0.2mm 厚さに積層されている。配線には銀ナノ粒子インクを、層間絶縁膜には樹脂インクを用い、すべてインクジェット法で形成されている。配線の寸法は最小幅 50 μ m、厚さ 2 μ m、最小配線間隔 110 μ m で、層間絶縁膜を挟んだ上下のダイジーチェーンパターン^(用語)配線は銀のポストで接続され、配線層 10 層で総延長 5m もの配線を構成している。また、低温焼成多層セラミックス (LTCC) 基板の配線への適用では、インクが浸透しないよう表面処理を施したグリーンシート上に最小配線幅 30 μ m、ピッチ 60 μ m の配線パターンを描画し、一括積層と同時焼成により製造される⁽⁸⁾。

4.3 IC 実装への応用

IC (Integrated Circuit) 実装への適用では、インクジェット法による非接触ダイレクトパターンニングという特徴

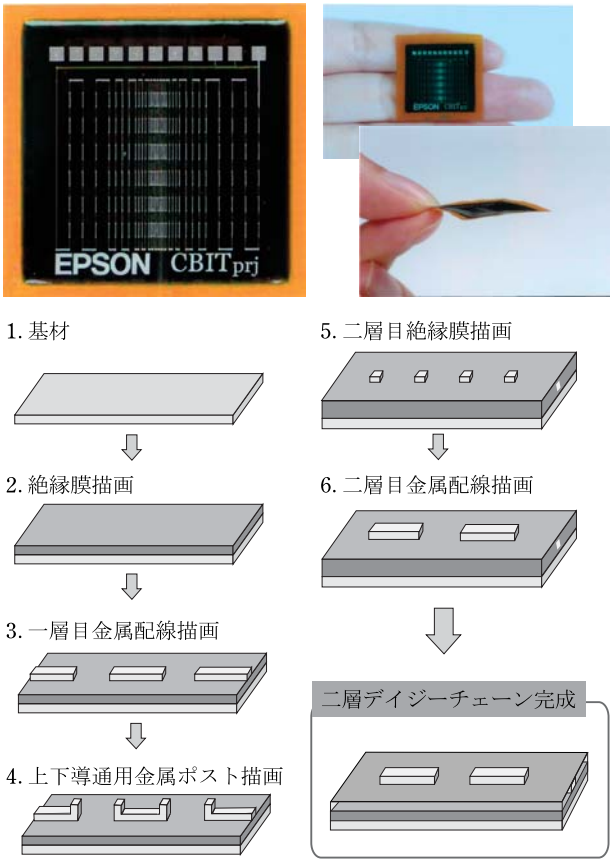


図5 インクジェット法による多層配線基板の例 銀ナノ粒子インクを用いて配線とポストとを描画して配線を形成する。続いてポストの上面が露出した状態で基板上に絶縁膜を描画して層間絶縁膜を形成する。これを 10 回繰り返して多層配線基板が製作されている。

を生かし、凹凸のある基板への描画が行われている。図 6 に示す実装技術では、ワイヤボンディングの代わりにインクジェット法で IC チップと基板の端子間を接続している⁽⁹⁾。厚さ 60 μ m に研磨した IC チップを基板上に接着し、更に IC チップ外縁と基板との間にスロープを形成する。次に密着性向上と絶縁性確保のためにインクジェット法で絶縁膜を塗布した後に、同じくインクジェット法で端子間を銀ナノ粒子インクを用いて配線描

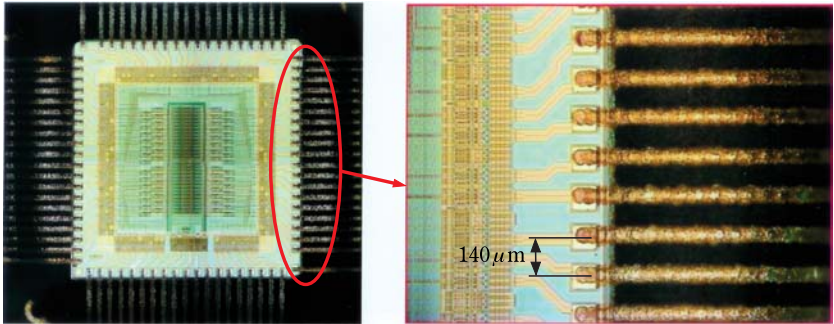


図6 IC 実装への応用事例 IC チップ外縁と基板との間にはスロープが形成されており、このスロープを伝ってインクジェット法で描画した配線が IC チップと基板の端子間を接続している⁽⁹⁾。

画する。

インクジェット法は無加圧で行え、ワイヤ部の高さを約5 μm に抑えることができるため、フレキシブル電子デバイスに適合した実装技術を提供できる。

5. 現状の課題と今後の展望

インクジェット法は液体を用いたプロセスである。紙のように液体を吸収する機能を備えない一般的な電子デバイス用基板では、着弾した液滴は基板表面とのぬれ性に依りて基板上で流動し互いに合体して形を変える。従来技術ではパターンに関係なく一定の膜厚が得られるが、液体のダイレクトパターンニングではパターンによって厚さの分布が生じたり、液滴の着弾パターンと乾燥後の膜パターンとが異なったりする。そのため、基板の表面処理や乾燥プロセスの調整で流動を制御する必要がある。膜の密着性も基板とインクの組合せと乾燥プロセスにより変化する。現状では、アプリケーションごとにインク、基板、表面処理、描画方法、そして乾燥とからなるプロセス要素の組合せの最適化を行い、仕様に適合した条件を見いだしていかなければならない。

今後は、適用実績の積み重ねによりプロセス技術の蓄積が図られ、プロセスの標準化や技術のはん用化が進んでいく。ゆっくりではあるが確実にインクジェット法回路基板製造技術が実用的なものとして浸透していくだろう。

6. おわりに

インクジェット法は材料やプロセスが従来技術とは全く異なり、技術の蓄積もまだまだである。液体ゆえの困難さと不確かさも多い。しかしながら、自由度と生産性とが極めて高く、しかも省エネルギー・省資源・省ス

ペースという環境に優しい生産手段であり、21世紀に求められている持続可能な社会を形成するための重要な技術の一つである。一人でも多くの方が興味を持って、この新しい技術の確立に参加されることを期待したい。

文 献

- (1) 井上 聡, 下田達也, “マイクロ液体プロセスの電子デバイスへの応用,” Japan Hardcopy 2005 論文集, pp.61-64, 2005.
- (2) 酒井真理, “ピエゾ方式インクジェットプリンタの技術動向,” 日本画像学会誌, vol.41, no.2, pp.45-51, 2002.
- (3) 村田和広, “インクジェット技術によるパターン形成技術,” エレクトロニクス実装学会誌, vol.7, no.6, pp.487-490, 2004.
- (4) H.P. Le, “Progress and trends in ink-jet printing technology,” J. Imaging Sci. Technol., vol.42, no.1, pp.49-62, 1998.
- (5) 北原 強, “MACH の開発,” Japan Hardcopy 2003 論文集, no.B-15, pp.217-220, 2003.
- (6) H. Fukumoto, Y. Yokoyama, K. Endo, Y. Fujii, and M. Takeda, “Variable droplet size molten solder ejection tool for microelectronics packaging,” IS&T's DF2006, pp.38-41, 2006.
- (7) Ph. Buffat and J-P. Borel, “Size effect on the melting temperature of gold particles,” Phys. Rev. A, vol.13, no.6, pp.2287-2298, 1976.
- (8) 小岩井孝二, 河村裕貴, 永田久和, 山口祥子, 田中哲郎, 佐久間敏幸, 林 琢夫, 桜田和昭, 小林敏之, 和田健嗣, “インクジェット印刷による LTCC 多層配線基板への銀微細配線形成,” MES2005 (第15回マイクロエレクトロニクスシンポジウム) 論文集, pp.245-248, 2005.
- (9) Y. Hagio, H. Kurosawa, W. Ito, and T. Shimoda, “Development of ink jet wiring technology,” Proceedings of ICEP2005 (International Conference on Electronics Packaging), no.TAI-5, pp.106-111, 2005.

(平成19年2月9日受付 平成19年3月14日最終受付)



酒井 真理

1985 東工大大学院修士課程了。同年エプソン(株)に入社。インクジェットのヘッド及び解析技術開発、インクジェット液体プロセスの研究開発を経て、現在インクジェット法による有機ELディスプレイの開発に従事。2005 東工大大学院博士課程了。工博。