

インクジェット技術の将来像と 研究開発の狙いどころ

藤井 雅彦

富士ゼロックス（株）研究技術開発本部マーキング技術研究所 研究主席

〒243-0494 神奈川県海老名市本郷 2274 Tel: 046-238-3111 Fax: 046-237-1643

E-mail: Masahiko.Fujii@fujixerox.co.jp



《PROFILE》

略歴：

1985年	富士ゼロックス（株）に入社
同年から	連続噴射型インクジェットプリンタのインク滴飛翔制御の研究に従事
1989年より	研究、技術開発、商品開発部門でサーマルインクジェットプリントヘッドの研究・開発に従事
2002年より	各種インクジェット方式の研究・開発に従事
現在	マーキング技術研究所にて、インクジェットシステム技術の研究、インクジェット応用に関する研究に従事

日本画像学会インクジェット技術部会主査, DF技術部会委員
IS&T DF2009 ~ 2012 Program Chair, 2013 ~ 2014 Publication Chair

1 はじめに

インクジェット技術は長い間、紙上に文字や画像をプリントする用途、すなわちプリンタとしての研究、開発活動が主に行われてきた。しかしながら、これまで大きなインクジェットの市場であったコンシューマ向けプリンタにおいては、主要基本性能である画質やプリント速度はすでに多くのユーザーの要求水準を達成している。基本性能の改善は今なお進んでいるが、大幅に向上させるための技術導入は、この市場で受け入れられるコストや装置サイズを考えると非常に難しい。従ってこの数年、付加機能の充実は図られているものの、コンシューマ向けプリンタの基本性能は大きく上がっていない¹⁾。

このような状況の中、インクジェット技術が持つ特徴、詳しく言えばインクジェットプリントプロセスが持つ原理的な特徴を、他の応用分野に活かせるのではないかというインクジェット技術研究・開発側からのシーズ、また他分野からのニーズが沸きあがっている。

インクジェット技術を電子デバイス作成プロセスとして利用するプリンテッドエレクトロニクス分野もその一つである。本稿では、インクジェット技術の特徴を改めて整理するとともに、この特徴からインクジェット技術を各種応用に使用する場合の狙いどころや課題、課題解決のアプローチ案について説明する。また今後のプリンテッドエレクトロニクスやデジタルファブリケーションにおけるインクジェット技術の進展に対する私見を述べる。

2 インクジェット技術とは

インクジェット技術はプリントプロセスから以下のように定義できる¹⁾。

「色材、機能材料を含む液体（インク）を液滴に分離し、画像信号（パターン形成信号）に応じて記録対象（メディア、基板）に向けて噴射し、色材・機能材料を対象物に付着、伝達させるマーキング方式」。

インクジェット技術がプリンタに用いられた場合、紙やフィルム上に色情報を記録し、文字や画像を表示するための機能性材料が必要であり、これが染料や顔料であり、液体はインクと呼ばれる。プリンテッドエレクトロニクス分野における機能性材料とは、例えば導電性材料、半導体材料、絶縁体材料、各種反応性材料等、基板上で電気的、電子的な機能を発現する材料になる。このようにインクジェットは機能材料を液体に保持させ、液滴に分離して移動させる手段であると考えれば、より応用の発想が広がるはずである。

さて、上述したプロセスの定義から、インクジェットの特徴を以下の4つにまとめることができる²⁾。

① 小型、低コストに向けたマーキング技術であり、プロセス安定性（ロバスト性）が高い。

マーキングを完成させるための構成要素技術が少なく、マーキングプロセスがシンプルなことからこの特徴が生まれる。

② マーキング対象、すなわち記録対象（媒体／基板）の選択範囲が極めて広い。

記録対象に向けてインクの液滴を直接噴射するため、記録対象に非接触である。この特徴は、プリンタ用途においてメディア選択性を広げるだけでなく、様々な基板、記録対象が存在する応用においては極めて重要である。

③ 大面積へのマーキングを容易に実現できる。

インクを噴射させる構成要素はプリントヘッドのみであり、コンシューマ用プリンタに見られるように容易にキャリッジ等の移動手段に搭載でき、広範囲に移動して、液体を噴射できる。

④ ごく微量の液体の移動を高速に制御できる。

低価格のコンシューマ用プリンタでさえ、最少 1pl (10^{-12} リットル) のインク量を、極めて安定して（ばらつきは例えば士 5% 以内。厳しい管理をすれば士 1% 以内）、高い繰り返し周波数で（～数十 kHz）噴射を ON/OFF することができる。これだけ微量の液体移動を高速に正確に制御できる方法はインクジェット技術以外にはない。

3 インクジェットの特徴を利用した応用例

現在、上述した特徴を利用して実現されている応用、あるいは提案されているアイデアを、プリンテッドエレクトロニクス以外の分野も含め図 1 に示した。この図の縦軸は応用の中に活かされているインクジェットの特徴、横軸はこれらの応用が使われる場所を示している¹⁾。★はすでに製品化済み、☆は製品化されていない応用例である。家庭、オフィス以外での応用が圧倒的に多いことがわかる。

3.1 小型、低コスト

小型、低コストの特徴を活かした応用は従来のインクジェットプリンタであり、特に小型、低コストが望まれるコンシューマ向けのプリンタとしては独壇場である。

プリンテッドエレクトロニクスにおいてパーティングデバイスが小型であるということは、後述する大面積対応容易性につながり、ディスプレイ等、大面積デバイスの作製に活かされる。

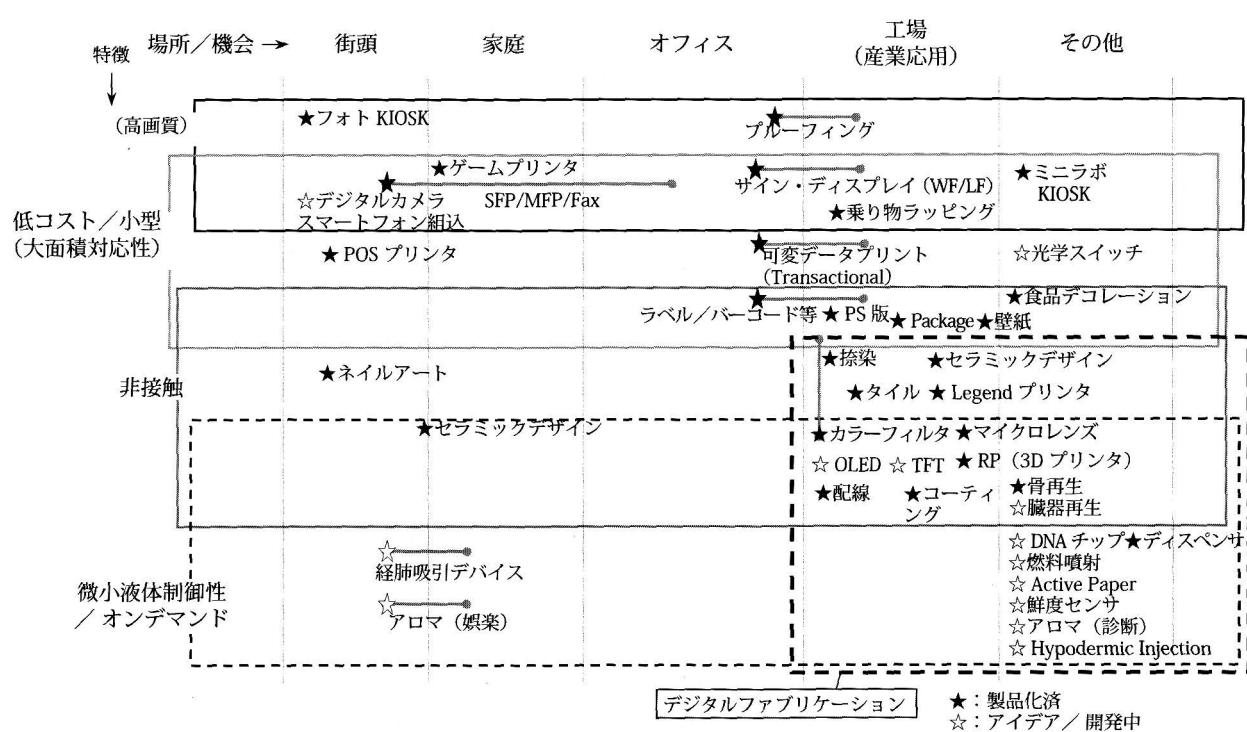


図 1 インクジェット応用例¹⁾

3.2 広い記録対象選択性

これはプリンテッドエレクトロニクスへの応用において大きなメリットである。基板に非接触なため、基板材料の選択性が広がるだけでなく、平面のみならず、曲面や凹凸部へのパターニングが可能になる。

3.3 大面積対応

プリンタとしては既に7m幅に対応するものがある。プリンテッドエレクトロニクスでは、液晶ディスプレイのガラス基板の大型化に伴い、G6/G8対応のカラーフィルタ作成技術として採用された。液晶の配向膜やバックライト用のレンズもインクジェットで作成されたものがある。また、OLEDの発光素子の作成への応用も検討された。

3.4 微小液体の移動制御

臭気性材料の噴射量を制御して、嗅覚の感受性を評価することによる病気診断や、インシュリンを微滴化した経肺治療デバイスも提案されている。エンジンへの正確

な燃料供給システム(Injector)としての活用も検討されている。酸素に反応する材料を食品パッケージ内面に塗布し、鮮度センサとして用いる例もある。また、耐ウイルス性の薬剤をマスクなどに塗布するActive Paperも実用化が検討されている。特定の物質に対して反応する材料を正確な量を塗布しセンサを形成する用途には、この特徴を活かすことができる。

2013年に盛り上がりを見せた立体物を形成するいわゆる3Dプリンタは、インクジェット技術を利用した方が複数ある。3Dプリンタのさらなる応用として、異なる幹細胞を噴射、積層する臓器再生が試みられており、リン酸三カルシウムをインクジェットで噴射した接着剤で固めた人工骨の形成は実用化が近い。

4 インクジェットの応用を広げる、あるいは実用化するまでの課題

フォトリソグラフィーは材料の引き算により、インクジェットは足し算によりパターンを形成する(図2)。このためインクジェットでは使用する材料(パターニングする機能性材料、フォトレジスト、エッチャント等)を大幅に削減できる。フォトマスクも不要であり、大

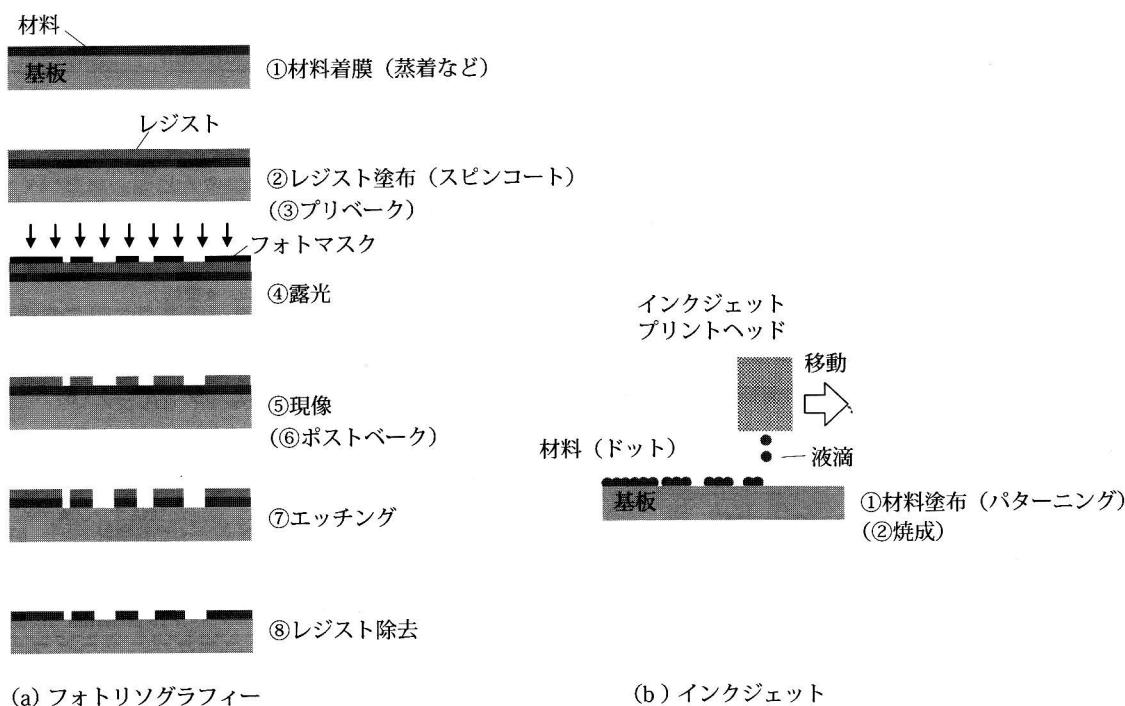


図2 パターニング方法の比較⁴⁾

がかりな真空、高温環境も必要ない。このため電力消費も大幅に低減可能である³⁾。このようにインクジェットは夢のようなパターニング技術のように思われ、事実、産業向けインクジェットの各種応用検討が本格化した2000年代初頭には、ありとあらゆる応用が提案された。

しかし、実際にインクジェット技術を使って検討を始めると、いくつかの大きな解決すべき課題に直面する。とくにこれまでインクジェット技術に精通していなかったニーズ側の研究、開発者は、せっかく良いアイデアを持ちながら、これらの課題を解決できずに断念してしまうこともあったはずである。

以下、インクジェット技術を応用しようとする際に考慮すべき課題（注意点）を述べるとともに、この課題が存在する現状のインクジェットを活用した場合、適用できる応用の条件を最後にアンダーランで示した。

4.1 液体材料への要求仕様

機能材料を混ぜた液体を作成すればインクができるというのではない。インクジェットヘッド内の微細流路やノズルに液体が停滞、通過する際、機能性材料が凝集して大サイズ化し、あるいは沈殿するのを防ぐ高度な分散技術が必要になる。インクジェットで安定的に噴射するために必要な組成や物性範囲もある。現在、プリンタ用途に開発され使用されているインクジェットプリントヘッド（ピエゾインクジェット方式 [PIJ]、サーマルインクジェット方式 [TIJ]）は、安定的に噴射できる液体の物性（粘度、表面張力）範囲に限界がある（図3）。また部材との接液の観点から、pHもほぼ中性が求められる。極めて高い粘度や、強酸、強アルカリに対応できるプリントヘッドも登場しているが、あまり普及していない。

このように従来使われていた材料がそのまま使えないばかりや、インクジェット適性を持った液体に仕上げなければならない。この結果、従来方法や材料に比べ得られたパターン、デバイスの特性が低下することも起こり得る。

インクジェット噴射適性を持った機能性材料を含む液体の設計

インクジェットを使った場合に得られるメリットを重視し、特性低下が許容できる応用

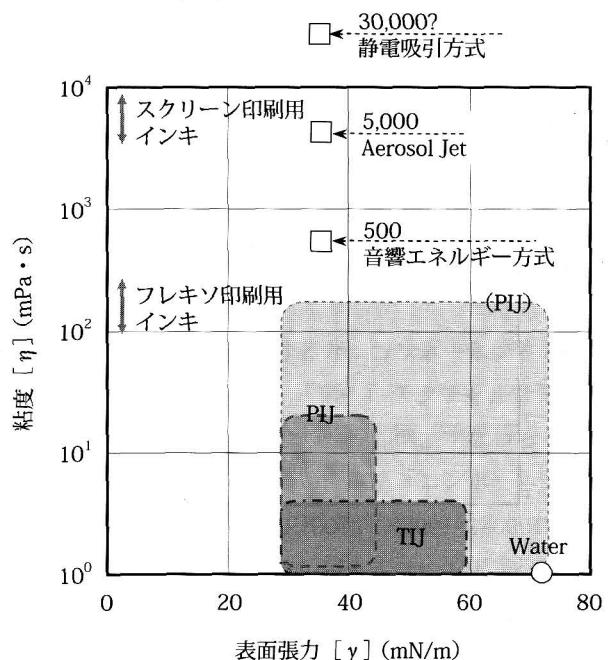


図3 インクジェットで噴射できる液体の物性範囲¹⁾

4.2 パターンサイズ、形状

インクジェットで形成される基板上のパターン最少幅は、フォトリソグラフィーに比べれば桁違いに大きい。コンシューマ向けのインクジェットプリンタでインクの微小化が進んでいるとは言え 1pl であり（図4）、飛翔中のインク滴の直径は 10μm 以上、メディア、基板に着弾した際のパターンサイズ（ドットサイズ）は 20～30μm になる。通常のプリンタとしては使われていない静電吸引方式で 1fl (10^{-15} リットル) 以下の液滴量を噴射できるものがあり、これは着弾すると約 1μm 以下のサイズになる。

インクジェットで形成したパターンの厚膜化も難しい。厚膜を形成する場合には、多層化が一般的であるが、基板に形成した液層をいったん固化させないとその上に積み重ねることはできない。あるいはインク滴を溜める團いを何らかの方法で形成する必要がある。過去には、数百 pl の液滴を噴射するプリントヘッドがあったが、図4に示すようにプリンタにおける技術トレンドは微小化であり、現在では大サイズの液滴を噴射するプリントヘッドを入手することは困難である。液体の粘度を上げれば膜厚は厚くなるが、レベリング（平坦化）性が悪化する。

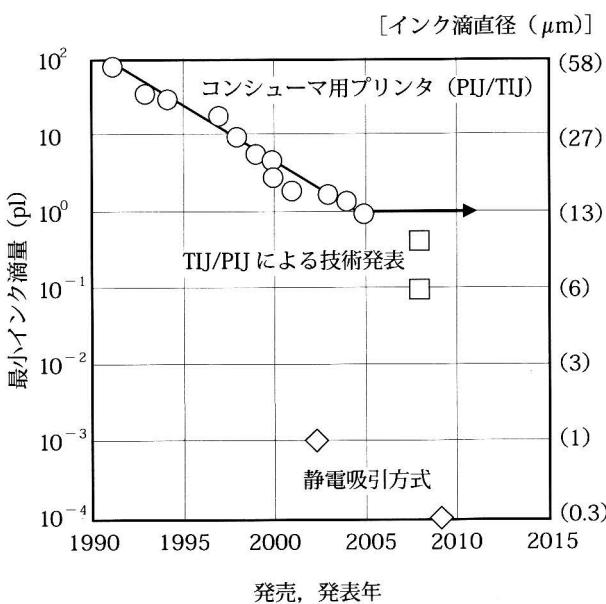


図4 インクジェットにおける液滴の微小化傾向¹⁾

描きたいパターンに対応するよう、プリントヘッド(あるいは基板)を移動させ、液滴の噴射を制御しても、基板に所望の(入力した)パターンがそのまま描けるわけではない。これまでのプリンタで使われている記録媒体のほとんどは、紙に代表されるようにインク受容層を有している。このためインクが着弾した場所にドットが形成され所望のパターンが形成できる。プリントヘッドエレクトロニクスで使われる基板やフィルムの多くは、液体に対し非浸透性であり、また受容層を設けることが困難な場合が多い。特に基板の表面エネルギーが低い場合(撥液性)、着弾し隣接した液滴はお互いに合体し(バルジ)、所望の形状を得ることができない⁴⁾。このため基板全体に前処理(親液処理)を行うことや、インクジェットでパターンを描く場所のみ親液処理することも行われている^{5,6)}。また近接するドットを、時間をずらして形成する方法や、エッジやコーナーなどでは液体挙動によるパターン変化を予め予測して、噴射パターンや液体噴射量を補正することも必要である。

パターンサイズ限界、厚み限界が許容できる応用

基板表面エネルギーの制御によるパターンの高精細化

既存のプリンタ技術に用いられているパターンニング方法の利用

4.3 メンテナンス

インクジェットのプロセスはシンプルであり、このため比較的外乱の影響を受けにくく、プロセス安定性が高い。その分、機能が集中しているプリントヘッドは、丁寧な「世話」をしないと継続した安定液滴噴射ができない。このプリントヘッドの世話をする動作がメンテナンスである。どのような応用においても、このメンテナンス内容や実施タイミングはプリンタで実施されているものと大差はない。各メンテナンス動作の詳細説明はここでは省略するが、インクジェットの適用を考える場合、各動作の意味や内容を十分理解しておく必要がある。

インクジェットプリントヘッドは流路内に定在する気泡に弱い。気泡は外部から混入する場合もあれば、液体に溶存していた気体が温度変化やピエゾからの圧力波によって析出する場合もある。気泡は液体の供給を妨げるだけでなく、ピエゾインクジェットの場合、圧電素子から発生した圧力波の伝播を妨げ、液体噴射を阻害する。液体から予め気体を取り除く脱泡も有効であるが効果が持続しないため、長時間液体をシステム内に留めておく場合はシステム内に気泡除去を持つことが必要になる。

メンテナンスをなるべく不要にする考え方としてプリントヘッドのDisposable化がある。特に繰り返し使用による汚染の問題が重視されるバイオ系の応用では、この点からもDisposable化が有用である。比較的プリントヘッドのコストが低いサーマルインクジェットはDisposable化に有利である。

適切なメンテナンスシステムの構築

安価なサーマルインクジェットヘッドによるDisposable化

4.4 ノズル欠陥、TD

このようなメンテナンスを行っても、ノズルからの不吐出を完全に無くすことはできない。プリンタにおける画像なら1ノズル分のドットが抜けても画像としての情報は保持しているが、例えば回路をインクジェットで形成した場合にノズル抜けがあると、デバイスとして致命的な欠陥になる。

ノズルからの液滴噴射状態のモニタリングや、異常が見つかった場合の対応(メンテナンス、別ノズルでの代替、データ変更等)を十分備えておくことが必要である。

モニタリングや対応も、各種プリンタで実施されているものが参考にできる。

TD (Throw Distance) はプリントヘッドから記録対象物までの距離である。プリンタでは、液滴噴射方向ずれのドット位置ずれへの影響を少なくするため、この距離を狭めたい要求がある。一方、インクで濡れた（変形した）メディア搬送の観点から広げたいという要求があり、結果として 0.5 ~ 1.5mm に設定されている。記録対象が紙でなく Rigid なものならこの距離をさらに狭め、位置ずれを小さくすることが可能になる。TD をさらに広げたい場合、噴射方向のずれが着弾位置ずれを大きくするだけでなく、飛翔中に液滴が空気抵抗の影響を受け、さらに大きな着弾位置ずれを引き起こす。最悪の場合記録対象に到達しなくなる。通常のオンデマンド型インクジェットでは、噴射時のみ液滴に運動エネルギーを与えるため、噴射後、液滴は空気の粘性や慣性による抵抗を受け、飛翔速度は低下する。同様の問題はロール to ロールでプリントヘッドと対向する記録対象との相対移動速度が高まった場合や、液滴のサイズが小さくなつた場合に発生する。

静電吸引方式は、噴射後も電荷を帯びた液滴が形成された電場によって加速されるため、この空気抵抗の問題に強く、前述したように微小な液滴を噴射させることが可能である。ノズル（開口）も比較大きくできるため、高粘度液体もハンドリングできる。ただしマルチノズル化は遅れており、生産性向上が課題である。

抜けノズルへの対応

生産性を重視しない場合には静電吸引方式の活用

4.5 オンデマンド性

インクジェットのみならずデジタルマーキング技術をモノつくりに用いた場合、版や型が不要なため、データ変更のみで 1 つ 1 つが異なるものを容易に作成できる。しかしながら現状でカストマイズが活かされている応用は、フィギュアや一部の医療器具等を除けば決して多くない。プリントエレクトロニクスでもこの特徴を必要とするニーズはあるはずである。出力側のオンデマンド性を活かすためにも、入力側における簡易なデータ準備等、データ入手の仕組みを構築する必要がある。

5 おわりに

「コンポーネントな知」と「アキテクチャルな知」という考え方がある。「コンポーネントな知」はシステムを構成するコンポーネント（部品）の性能を高めるために必要な知であり、「アキテクチャルな知」は、コンポーネントを組み合わせて最も性能の高いシステムにまとめあげる知である。

新しいシステムが誕生すると、コンポーネントの組み合わせに試行錯誤が続き、「アキテクチャルな知」が必要になる。業界で組み合わせの標準、すなわち「ドミナントデザイン」が固まると、次に「コンポーネントな知」によりコンポーネントの性能を高める競争が始まり、企業の組織やルールもこれに従うように変化する。このような状況ではドミナントデザインを崩すような考えは生まれにくく、ドミナントデザインを崩す新興が現れた場合に対応ができない⁷⁾。

インクジェットは 1960 年代に初めて商品が登場し、1980 年までは各社様々な方式、組み合わせを競ってきた。以降、コンシューマ向けのインクジェットプリンタの形はオンデマンド型として出来上がり、次にシステム性能を高めるために重要なコンポーネントである、ヘッド、インク、（メディア）の性能を高める研究・開発が進んできた¹⁾。

現在、これらコンポーネントの性能はほぼコンシューマ市場の要求仕様に対しマチュアな領域に達し、同時に市場は縮小を始めている。すなわち再び「コンポーネントな知」が求められている状況になっており、インクジェットによるプリントエレクトロニクスも組み合せを変える 1 つの方向である。現在この方向で存在感を示しているのは、これまでのインクジェットプリンタメーカーではなく、小さなベンチャー、ヘッドサプライヤー、材料メーカーである。インクジェットの本質を理解した上で、柔軟な「アキテクチャルな知」で新しい組み合せを考え、様々な領域で新規な市場を切り開けるチャンスである。

プリントエレクトロニクスをはじめとするデジタルファブリケーションが作り出す市場、ビジネス規模は残念ながらまだ大きくない。このためここで使われる用途に特化したインクジェットヘッドを提供するところはほとんどなく、プリンタ向けに設計されたもの、あるいはそれらを基本にしたヘッドを使用しているのが現状で

ある。4.1 で述べたように、これらのヘッドは安定的に噴射できる液体範囲に限界があるため、インクジェット用に液体材料を新たに設計しなければならない。その結果、従来材料や技術と同等の性能が発揮できず、市場が広がらないという負のスパイラルが一部で起きている⁴⁾(図5)。この悪循環を断ち切るのも「アーキテクチャルな知」による新規な組み合せによる市場開拓である。

インクジェット技術の導入は、従来からのパターンング手段を置き換え、作成された製品の性能、コスト、付加価値を向上させるだけにとどまらない。製造場所の選択の自由度が生まれることになり、物流やサプライチェーン全体を変革する大きな生産革命につながる動きになるものと信じている。

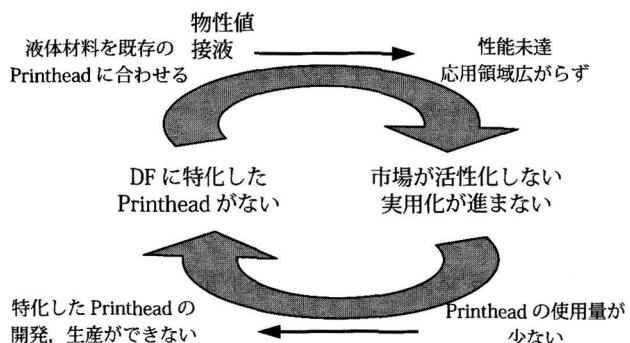


図5 デジタルファブリケーションの現状と課題⁴⁾

参考文献

- 1) 藤井雅彦, インクジェット技術の進展と今後の展望, 日本画像学会誌 Vol. 47, No. 4, pp. 241-250 (2008)
- 2) 藤井雅彦他, インクジェット, 日本画像学会編, 藤井雅彦監修, 東京電機大学出版局, (2008年)
- 3) 藤井雅彦, インクジェット: 可能性と限界から環境を考える, 日本画像学会関西シンポジウム予稿集 (2010)
- 4) 藤井雅彦, インクジェット技術入門, R&D 支援センター, (2012年)
- 5) T. Tano, et al, Novel Fine Electrode Patterning Using Ink-jet Method and Its Application to All-printed Organic TFT Backplane, IS&T's DF2009 (2009)
- 6) Masahiko Fujii, Transactions on The Japan Institute of Electronics Packaging Vol. 3, No. 1, pp. 35-39 (2010)
- 7) 入山章栄, マドンナでもアップルでも, イノベーションの本質は変わらない, 日経ビジネス ONLINE 2013年 11月 19日