

## 第2節 インクジェット技術を活用した研究開発テーマの発掘

富士ゼロックス株式会社 マーキング技術研究所 研究主席 藤井 雅彦

- このシーズが狙い目の企業
  - ・材料分散のコア技術を保有している
  - ・印刷手法を活用している
  - ・極微量液体の移動を扱っている
- 想定される応用先
  - ・様々な材質、形状の対象物にパターンニングをする応用
  - ・極微量の液体移動を制御する応用

### 2. 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、開発活動が主に行なわれてきた。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。もちろん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<sup>1)</sup>。

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。

本節では、インクジェットのプロセスに起因する特徴をまとめるとともに、これらの特徴を活かした応用例を紹介する。また、プリンタ用途ではあまり大きく捉えられていなかった技術課題や、従来のインクジェット技術者にとっては当然と考えていた現象なども、新しい応用や、それに取り組む技術者、研究者にとっては重要な課題に成り得る可能性がある。このような課題と一般的な解決方法を紹介するとともに、新規応用、すなわちこれからの研究、開発テーマ発掘につなげるためのポイントを解説する。

### 2.1 インクジェット技術の定義と特徴

インクジェット技術をプリントプロセスから以下のように定義できる<sup>1)</sup>。

「インクジェット記録方式とは、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（プリント信号）に応じて記録対象（メディア）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」である。

液体中には噴射後、あるいは付着後になんらかの機能を発現する材料を含ませることができる。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る。これが染料や顔料といった色材であり、液体はインクと呼ばれる。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だろう。

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<sup>2)</sup>。以降、インクジェットのプリンタ以外への応用を考慮し、機能性材料を付着させることをプリントではなくマーキング、あるいはパターンニングと記載する場合もある。

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、プリント用途にインクジェットを用いる場合の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産業応用においては極めて重要である。また記録対象の表面が平らでなく、曲面や凹凸など立体的でも良い。

③ 大面積へのマーキングを容易に実現できる。

これは定義からはわかりにくいですが、構成要素が少ない、すなわち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±5%以内。厳しい管理をすれば±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。これだけの微量液体の移動を高速に制御できる方法はインクジェット技術以外にない。

### 2.2 インクジェットの特徴を利用した応用例

ここでは上述した特徴を活かし、現在実現されている応用例、あるいはアイデアが提案されている実例をいくつか取り上げて説明する。

図1は、応用例のマップであり、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<sup>1)</sup>。★はすでに製品化済み、☆は製品化

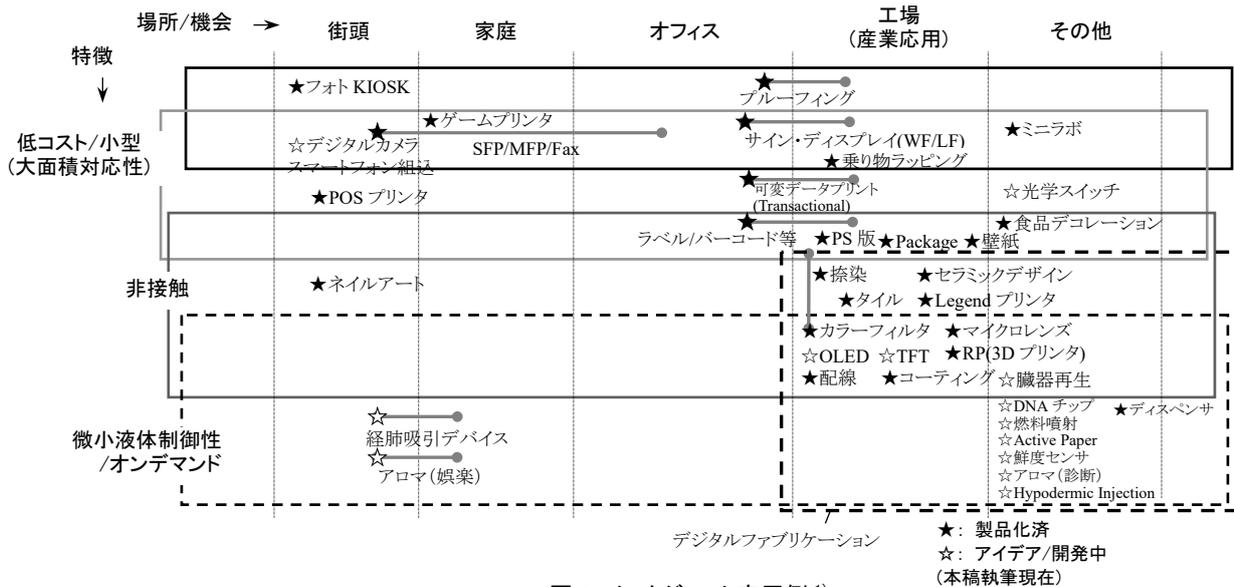


図1 インクジェット応用例<sup>1)</sup>

されていない応用例である。応用例の中には単一の特徴だけでなく、複数の特徴を活かしたものもあり、可能な限り縦軸の分類の枠で囲っているが、全てを説明できているわけではない。

### 2.2.1 小型、低コスト

言うまでもなく、ここはプリンタとしての応用例が多い。特に小型化、低コストが望まれるコンシューマ向けではカラープリント方法としては独壇場であり、小規模オフィスにも浸透している。小型化をさらに活かした応用としてデジタルカメラ、スマートフォンやカーナビにカラーインクジェットシステムを組み込んだ提案もあり、デモが実施されている。しかしプリント自体の需要低下もあり、いまだに製品化はされていない。

また大面積対応容易性と合わせ、ワイドフォーマット(WF)、あるいはラージフォーマット(LF)とよばれるプリンタは、壁紙やサイン・ディスプレイ、乗り物ラッピングと呼ばれるプリント用途に用いられ、最大で8m幅をプリントできる装置もある。

### 2.2.2 広い記録対象選択性

平面へのプリントとしては、布地を記録対象とした捺染(テキスタイル)があり、大面積対応容易性からも、従来のスクリーン印刷からの置き換えが欧州を中心に進んでいる。単にプリント技術をデジタル化しただけでなく、版を不要とするオンデマンド性により、物流やビジネスモデルを変革する方法としての期待や効果もある。

曲面へのプリントとしてネイルアートや卵殻へプリントする装置はすでに発売されており、その他ペットボトル、ダンボールへのプリントや各種建材のデザインなど、身近にインクジェットの応用を見ることができる。

半導体基板、フレキシブルなフィルム材料に、回路やデバイスを作成するいわゆる Printed Electronics への応用も盛んである。それぞれの機能を発現する液体を噴射し、パターン

ングすることにより、トランジスタ(TFT)、絶縁体、配線、レジスタ、コンデンサ、メモリ、アンテナやセンサまで作成されている。また、従来のフォトリソグラフィープロセスの中で、エッチャントやレジスト液を噴射、パターンニングする Hybrid なプロセスも検討されており、太陽電池作成プロセスの一部に取り入れられている例がある。

### 2.2.3 大面積対応

液晶ディスプレイのガラス基板の大型化に伴い、スクリーン印刷に代わるカラーフィルタ作成技術として採用されている。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 の発光素子の作成にも用いられている。印刷用の版(刷版、特にPS版)をインクジェットで作成するシステムも販売されている。

### 2.2.4 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、耐ウィ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。

立体物を形成する、いわゆる 3D プリンタは複数の方式があり、噴射液体を固化して積層する方式、粉体を接着する液体を噴射する方法が実用化されている。3D プリンタのさらなる応用として、異なる幹細胞を噴射、積層する臓器再生や、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も試みられている。UV 硬化性の光学用樹脂液を噴射、硬化することでマイクロレンズ(球面レンズ)の作成も行われている。

### 2.3 インクジェットの応用を広げる、あるいは実用化する上での課題

フォトリソグラフィ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(パターンニングのための機能性材料、フォトレジスト、エッチャント等)は大幅に削減できる。フォトマスクも不要であり、大がかりな真空、高温環境も必要ない<sup>3)</sup>。このため電力消費も大幅に低減可能である。このように書くと、インクジェットは夢のようなパターン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時、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しなければならない課題(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。

#### 2.3.1 液体材料への要求仕様

機能材料を混ぜた液体を作成し、インクジェットプリントヘッドで噴射すればすむことではない。インクジェットヘッド内の液体が流れる流路や、インク滴が噴射される開口、すなわち

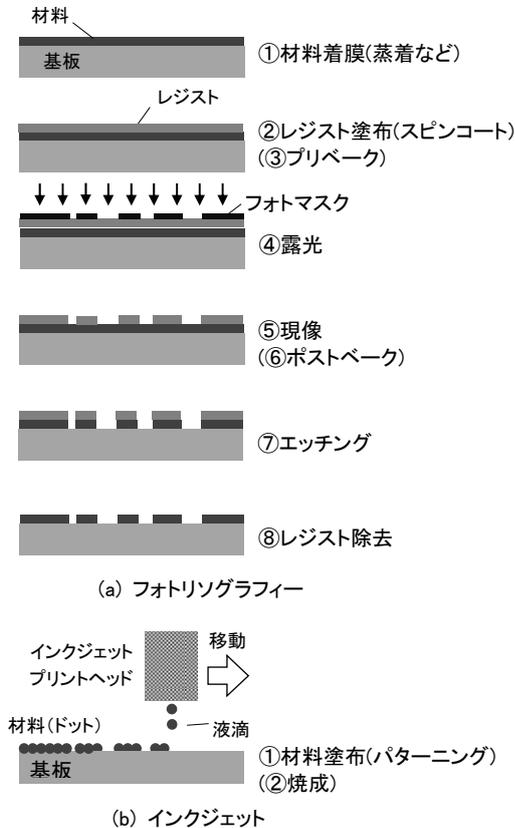


図2 パターンニング方法の比較<sup>4)</sup>

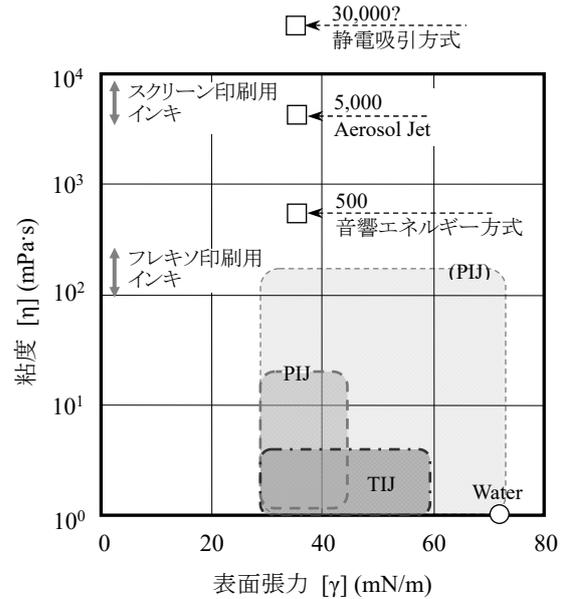


図3 インクジェットで噴射できる液体の物性範囲<sup>1)</sup>

ちノズルのサイズは凡そ10 $\mu$ m前後である。この細い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、あるいは沈澱するのを防ぐ高度な分散技術が必要になる。分散技術として一般的な、材料(粒子)表面に分散剤を保持して分散性を持たせた場合、付着後に分散剤が材料の機能を発現するのを妨げることがある。典型的な例として、導電性を持つ銀ナノ粒子を分散させたインクは、基板に付着後、表面の分散剤を除去するために加熱や化学的な方法が必要であり、これが使用できる基板材料を制限する可能性がある。

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)の範囲が限定されている(図3)。また接液の観点から、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。プリンタのインク同様、ノズルからの低沸点材料(例えば水)の蒸発による目詰りにも十分考慮した液体設計が要求される。

このように従来使われていたパターンング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も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

#### 2.3.2 パターンサイズ、形状

インクジェットで作成される基板上的パターン最少幅は、フォトリソグラフィ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

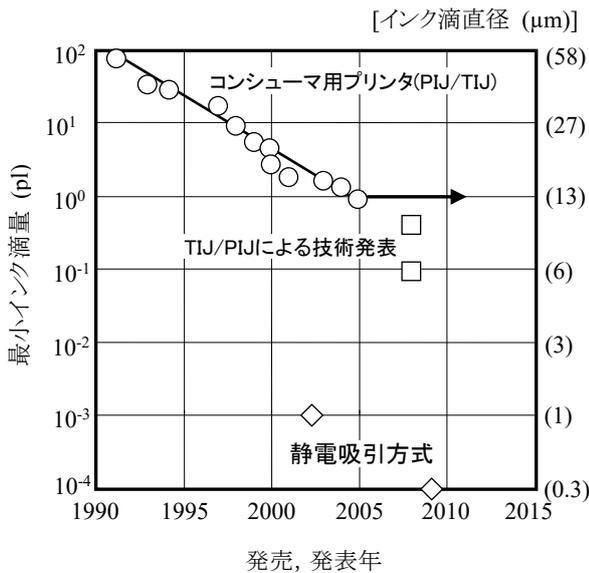


図4 インクジェットにおける液滴の微小化傾向<sup>1)</sup>

言え1plであり(図4)、飛翔中のインク滴の直径は10 $\mu$ m以上ある。これが紙に着弾した際のパターンサイズ(ドットサイズ)は20~30 $\mu$ m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1 $\mu$ m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層(膜)を厚くするのも難しい。厚膜を形成する場合には、何層も重ねることが一般的であるが、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難しい。あるいはインク滴をためる囲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、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も難しくなっている。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。

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、基板などの記録対象に所望の(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表面にインク吸収層を有している。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出来る。新しい応用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<sup>4)</sup>。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。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ソフトウェアも販売されている。

パターンサイズ限界, 厚み限界が許容できる応用

### 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

#### 2.3.3 メンテナンス

インクジェットのプロセス自体はシンプルであり、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ことは特徴の中で述べた。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」をしないと安定した液滴噴射を継続することができない。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。こういった応用においても、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。メンテナンスの基本となる動作は、予備吐出、パーズ、ワイピング、キャッピングの4つと、ピエゾインクジェットでのみ可能なフラッシングである<sup>2)</sup>。各動作の詳細はここでは記載しないが、インクジェットの適用を考える場合、メンテナンスの各動作の意味や内容を十分理解しておくべきである。

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、長時間液体をシステム内に留めておく場合、気泡除去システムを採用することも必要になる。

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

#### 2.3.4 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出来ない。極端な言い方であるが、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、例えば回路等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てできる。

TD(Throw Distance)はプリントヘッドのノズル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、用紙搬送の水平維持限界から(用紙でプリントヘッドを擦らないよう)広げたい要求があり、結果として通常は0.5~1.5mm程度に設定されている。記録対象が紙でなくRigidなものであるならこの距離をさらに狭め、位置ずれを小

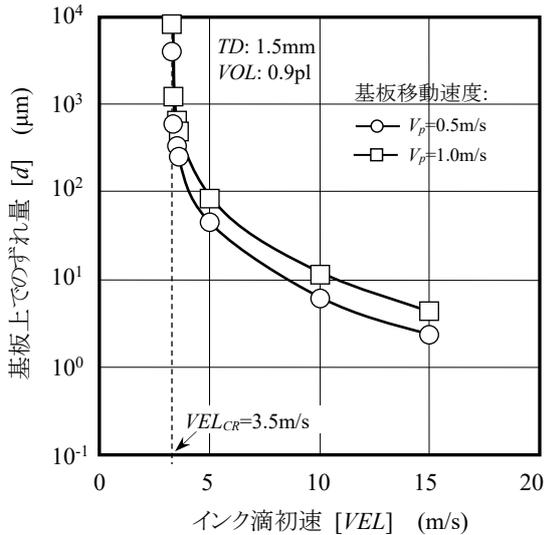


図 5(a) 気流によるインク液滴の位置ずれ<sup>5)</sup>

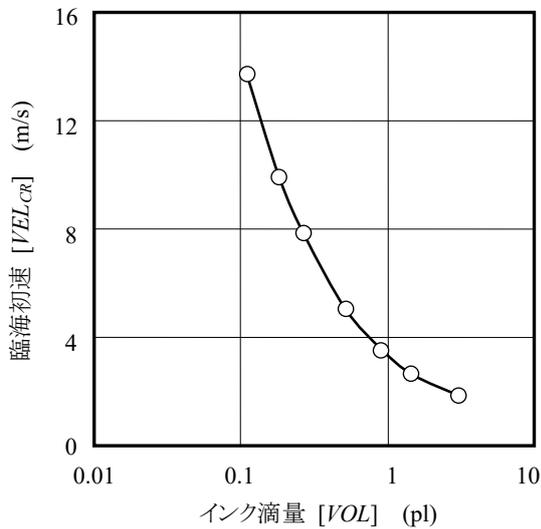


図 5(b) 記録対象に到達するために必要な初速<sup>5)</sup>

さくすることが可能になる。TD をさらに広げたい場合、噴射方向のずれがこの距離に比例して着弾位置ずれを大きくするだけでなく、飛翔中に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の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った場合に発生する。図 5(a) はノズルから 1.5mm 離れた距離にある対象物(基板)が速度  $V_p$  で移動し、対象物とプリントヘッドの間に気流が発生している場合、噴射初速 ( $VEL$ ) による液滴の対象物での位置ずれ量 ( $d$ ) を示している。 $VEL_{CR}$  は対象物に到達できなくなる液滴の初速である。図 5(b) はこの液滴量 ( $VOL$ ) による  $VEL_{CR}$  を示している<sup>5)</sup>。

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、前述した様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

2.3.5 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ケティング技術をモノづくりに用いた場合、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。すなわち Variable な生産に向いている。しかしながら現状の実用化レベルでは、ほんとうにカスタマイズに対応できる市場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。

また、出力側のオンデマンド性を活かすためには、入力側でいかに簡易にデータを準備できるか等、データ入手の仕組みの構築を同時に考える必要がある。

おわりに

以上、インクジェットを各種応用に適用する際の一般的な課題と、それらの課題を前提にして使いこなすためのポイントを説明した。

逆に言えば、これらの課題をブレークスルーできる革新技術を導入できれば、よりインクジェットの応用範囲は広がり、高性能化を実現することができる。新しい応用におけるこのブレークスルー技術の開発は、インクジェット技術者、インクジェットの応用を考える技術者、どちらか一方に課せられているのではなく、両者がお互いの領域に入り込んで理解を深めることにより生まれるものである。

インクジェット技術の導入は、従来からのマーケティ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。

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. Masahiko Fujii, Transactions on The Japan Institute of Electronics Packaging Vol. 3, No. 1, pp.35-39 (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. 藤井雅彦他, インクジェットプリントヘッドから吐出された微小滴の挙動解析, 日本画像学会誌 Vol. 48, No. 4, pp.244-254 (2009)