

## 4章 微細化、高速化のためのプリントヘッド作製技術と噴射安定化技術

富士ゼロックス株式会社 IJ 技術開発センター マネージャー 藤井 雅彦

### 4.1. はじめに

本章では、サーマルインクジェットプリントヘッドの微細化、高速化のための課題とその対応策についてまとめる。さらにこれら課題の対応策の1つとしてマイクロマシニング技術によるプリントヘッドの作製を紹介する。またプリントヘッドの性能維持(噴射安定化)を阻害する要因を挙げ、これらの対応技術についても言及する。画像形成に寄与しない微小液滴(ミスト)による特性劣化と、サーマルインクジェットの新しいメンテナンス技術についても説明する。

### 4.2. プリントヘッドの微細化と高速化の課題

プリントヘッドはこれまで、噴射インク滴量の微小化、ノズル・インク流路の高密度化、さらに高速化に対応すべき技術開発が進められてきた。しかしながら少なくともコンシューマー市場向けプリンタにおいては、その効果(粒状性改善等)が飽和領域に達しはじめ、インク滴量の微小化傾向は鈍ってきた。また今以上の高速化においては、普通紙上の乾燥と画質の両立が難しくなり、プリントヘッドの技術開発だけでなくインク、及びマーキング方式そのものの技術的ブレイクスルーが必要になってきた。

もちろん特殊市場や応用においては、さらなる液滴の微小化が必要になってくることも考えられる。また専用紙を用いれば高速化においてまだ乾燥と画質両立の余裕は残されており、これらの性能をさらに高めていくことも引き続き重要なプリントヘッドの開発課題である。一方でこのような背景の中、これらの性能を安定して精度よく発揮できるプリントヘッドを、しかも低コストで提供することも重要な開発課題になってきている。

ここでは高密度で微小なインク滴を、精度良く高速に噴射できるサーマルインクジェットプリントヘッドの作製技術を紹介する。

#### 4.2.1 プリントヘッドの高精度作製技術

プリントヘッドの作製に要求される特性は、微細な流路、ノズルを高密度に、長尺ヘッド全幅にわたり精度よく作製できるか、また長尺化した場合に、(作製プロセスや熱により生じる)歪、応力を避けることができるかである。また高密度化、長尺化、駆動周波数の向上に伴いプリントヘッドの消費電力増大、蓄熱の問題が大きくなるため、エネルギー効率の高い流路設計が必要になる。

サーマルインクジェットプリントヘッドの発熱体基板は、基板上に信号処理のためのロジック回路や、駆動のためのドライバーを搭載しており、従来からもフォトリソグラフィを用いた半導体プロセスをベースにしている。近年、インク流路やノズルまでフォトリソグラフィによって作製したプリントヘッドが導

入されている<sup>1)</sup>。これらのプロセスにおいては、微小な流路を精度良く、高密度に作製することができ、また発熱体基板と流路作製部材を接着剤を用いることなく一体的に形成することができる。

別な作製方法として、インク流路形成、発熱体基板と流路基板の接合にマイクロマシニング技術を応用するプリントヘッドも商品化されてきた。ここではこのマイクロマシニングによるプリントヘッドの作製技術を詳しく紹介する。

#### 4.2.2 マイクロマシニング技術によるプリントヘッドの設計と作製

図1は、ノズル、インク流路が形成される流路基板の作製プロセスを示している。基板材料には発熱体基板と同じシリコンが用いられている。2つの基板で同じ材料を用いるため、接合後も、熱伝導率の違いによるひずみやはがれの問題を回避でき、プリントヘッドの長尺化に適している。インクを導入するためのインレットと共通液室(Reservoir)は、エッチングレートが高く生産性に優れるODE(Orientation Dependence Etching)により形成される。次に共通液室と流路部を連結するバイパス部と、流路抵抗を低減するためのチャンネルピット部が(2nd)ODEにより形成される<sup>2)</sup>。個別のインク流路とフィルタ部は、高い形状自由度と精度を有するRIE(Reactive Ion Etching)により形成される<sup>3)</sup>。この流路作製方法は非常に高い解像度に対応可能であり、インラインで800dpiの製品が実現されており<sup>4)</sup>、1600dpi以上への対応も可能である。図2はこのように作製された流路基板を示している。

発熱体基板は従来どおり半導体プロセスにより形成される

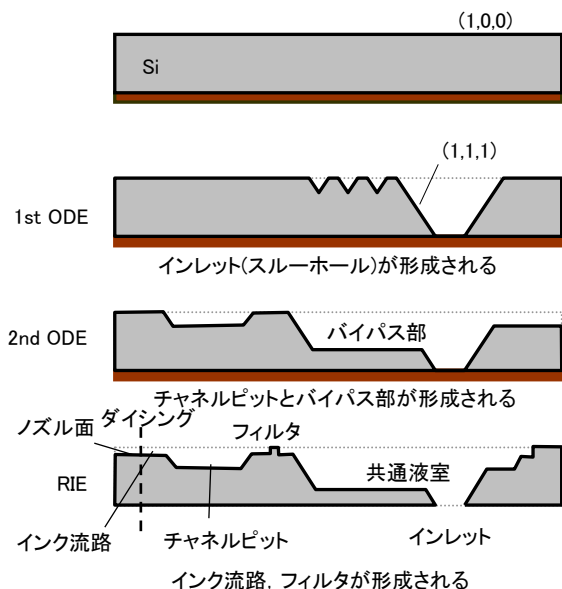


図1. 流路基板作製プロセス<sup>2)</sup>

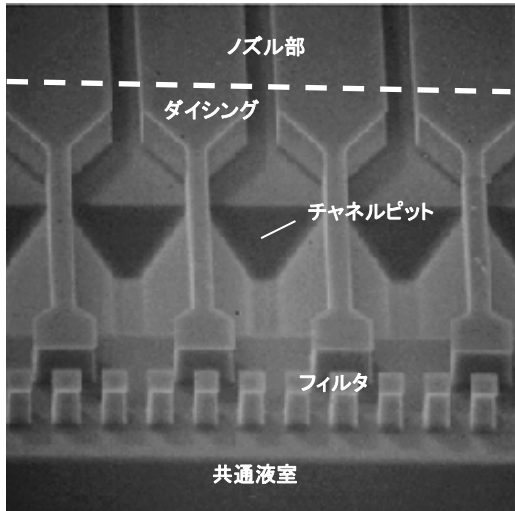


図 2. シリコン流路基板

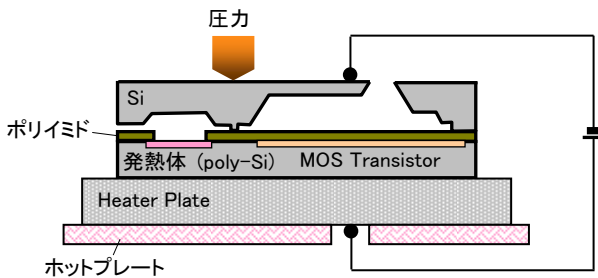


図 3. 流路基板と発熱体基板の直接接合<sup>3)</sup>

が、インクからの保護層であり、発熱部を開口するポリイミド層のパターニングは、高解像度に対応できるよう RIE によるドライプロセスで行われる<sup>2)</sup>。このように作製された流路基板と発熱体基板は、それぞれの最上層であるポリイミドとシリコンの直接接合により接合される(図 3)<sup>2,3,5)</sup>。直接接合においては、接合圧力、基板温度、電流、そして接合面積が基板同士の接合状態を決める主要パラメータとなる。図 4 は接合温度による接合

接合特性(強度、形状、耐久性)

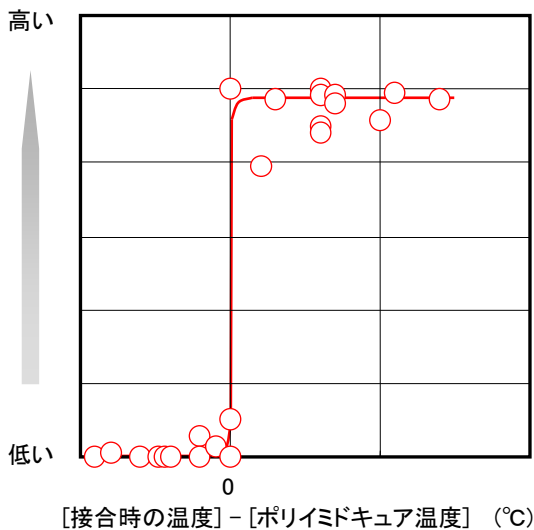


図 4. 直接接合における接合条件(温度)と接合特性<sup>6)</sup>

状態の違いを示しており、この例では接合温度がポリイミドのキュア温度より高い場合に、良好な接合状態が得られることがわかる<sup>6)</sup>。接着剤を用いない直接接合では、隣接流路との距離が極めて短くなった(高密度の場合)でも、ノズルやインク流路に接着剤がはみだす問題が起こらない。このように接合された 2 枚の基板をダイシングにより切断し、ノズル面が形成される。

#### 4.2.3 高効率流路設計

サーマルインクジェットプリントヘッドでは、入力された電気エネルギーのごく一部しかインク滴の運動エネルギーに変換されず、ほとんどが熱に変換される<sup>7)</sup>。したがって高密度化、高速化を進める上で、プリントヘッドの蓄熱改善が不可欠であり、すなわち入力したエネルギーを効率良くインク滴運動エネルギーに変換するプリントヘッド設計が望まれる。サーマルインクジェットプリントヘッドにおける電気エネルギーの損失を、生じる場所、メカニズムで分類すると以下ようになる<sup>8)</sup>

- (1) 電極や駆動素子における電氣的損失
- (2) 発熱体周囲での熱伝導
- (3) バブル発生(インクへの熱伝導)
- (4) インク流路における圧力伝播
- (5) ノズルにおけるメニスカスの表面張力

(1)~(3)もエネルギー効率改善のためプリントヘッドの設計において考慮すべき項目であり、対応策が検討<sup>9)</sup>されているが、ここでは(4)インク流路における圧力伝播、すなわち発生したバブル圧力を、効率的にインク滴が噴射されるノズル方向へ伝播させる流路設計について説明する。

バブル発生によって生じる急激なインクの流れ(過渡流)においては、発熱体前後の流路のイナータンス比が重要になる。すなわち共通液室から発熱体までのリア部のイナータンスに比べ、発熱体からノズルまでのフロント部のイナータンスを小さくすることにより、効率的に発生したバブル圧力をノズル方向に伝播させ、インク滴の運動エネルギーに変換することができる。図 5 はイナータンス前後前後比  $K$  と入力された電気エネルギーがインク滴の運動エネルギーに変換された効率  $EF$  の関係を示している<sup>8)</sup>。

エネルギー変換効率が高くてできれば同じインク滴の運動エネルギーを得るために入力する電気エネルギーを小さくすることができる。インク滴噴射過程に比べ、比較的時間が長い噴射後のインクリフィル過程においては流路抵抗絶対値も重要になるため、イナータンス前後比を高める設計において流路抵抗をなるべく低く保たなければならない。これを実現する設計コンセプトの 1 つとして、噴射インク滴量、速度に大きく影響するノズル部と、共通液室からインク流路への入り口部のみ絞りイナータンスを発生させ、中央部の流路断面積を可能な限り大きくすることが重要である。前述したシリコンのマイクロマシニングによる流路作製技術は、形状自由度が大きく、流路間の隔壁を薄くすることが可能であり、この設計コンセプトを満たすのに適した作製方法である。また 2nd ODE によって作製されたチャンネルピットは、流路抵抗をさらに低減させるのに役立つ

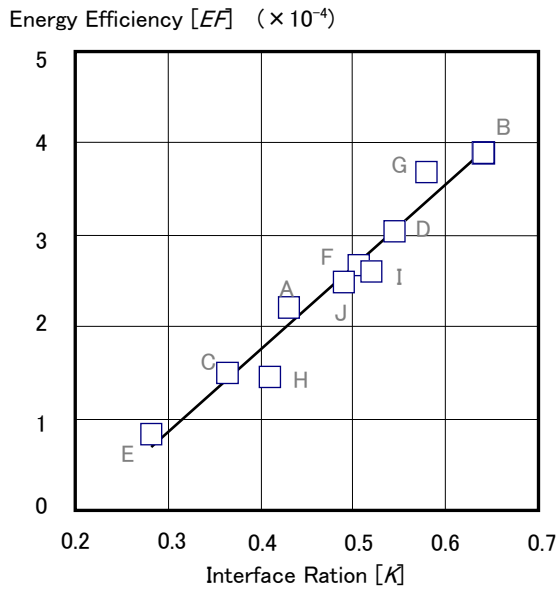


図5. イナータンス前後比[K]とエネルギー効率[EF]

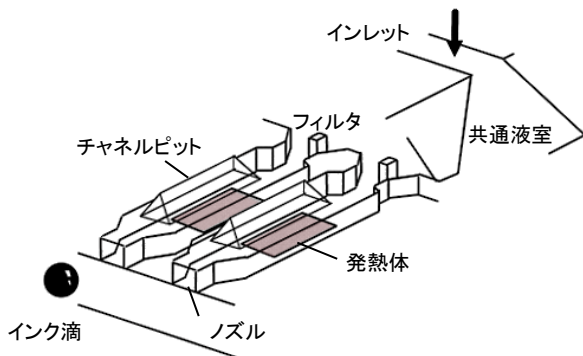


図 6. サイドシューター流路構成概略図<sup>8)</sup>

っている(図6)。

高いエネルギー効率が実現できれば同じ入力電気エネルギーで、より高いインク滴運動エネルギーを得ることもでき、メンテナンス頻度を減らしプリンタの生産性(印字速度)を向上させることができる。またより噴射しにくいインクを扱うことも可能になる<sup>8)</sup>。

#### 4.3. インク滴噴射安定化技術

初期的に高い性能(画質・速度)が得られても、継続的にその性能が維持されなければならない。しかしながらその維持のために、生産性が犠牲になってはいけない。ここでは特にサーマルインクジェットの性能を実現するためのプリントヘッドの噴射特性について、これを変動させる要因を列挙し、この対応策(安定化策)について説明する。

##### ・噴射特性変動要因と対応技術

サーマルインクジェットプリントヘッドの噴射特性を変動させる要因と、それが出現する時期を示したのが図7である。このうち主な変動要因とその対応策を以下に記述する。

##### 4.3.1 温度

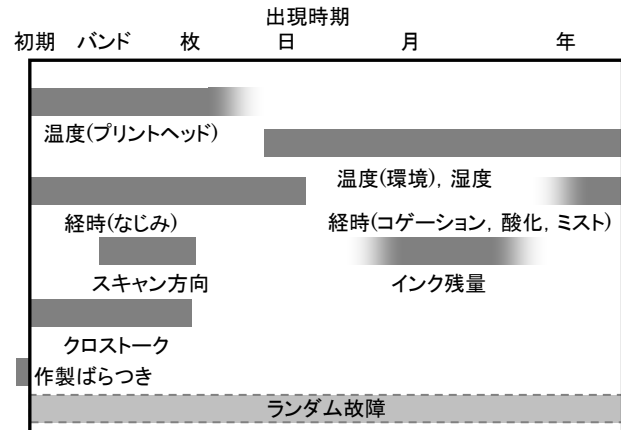


図 7. 噴射特性変動要因と出現時期

サーマルインクジェットにとって、プリントヘッド温度は最も変動しやすく、かつ噴射特性に影響を与える要因である。温度変動によりインク粘度だけでなく、バブル内圧が変化し、噴射されるインク量、速度が変化する。温度変化を以下の3つに分けて考えることができる。

- 中長期： 環境温度変化
- 中期： プリントヘッド蓄熱(ページ内、ページ間)
- 短期： プリントヘッド蓄熱(バンド内)

従来、中長期の温度変化に対しては、センサで温度を検知しプリントヘッドの駆動条件(パルス幅、プレパルス長・数)をLook-up テーブルに従って変更し、噴射特性を一定に制御していた。しかしバンド内のような短時間変動に対しては、このフィードバックシステムでは対応できず、印字するデータを先読みし、あらかじめ決められた駆動条件を順次適用することもできる<sup>10)</sup>。

発熱体上で発生したバブルを大気と連通させることにより、発熱体からノズルまでのすべてのインクを噴射する方法<sup>11,12)</sup>がある。この噴射メカニズムにおいては、温度によるバブル内圧(体積)変化の影響を受けず、常に一定のインク滴量を噴射することができる。これは MFDT\*においてもこれによりいかなる時間レンジの温度変化に対するフェードバックシステムも不要にできると考えられている。

##### 4.3.2 経時(時間, パルス数)

サーマルインクジェットにおける経時変化の代表的なものにコゲーションがある。コゲーションを起こしにくいインク開発はもちろん、プリントヘッドの対応として、パルス数により駆動条件を変更し、コゲーションによる特性劣化を補正する方法がある。また、微小なバブルを発生させる駆動条件を適用し、堆積したコゲを除去し、噴射特性を回復する技術も採用されている<sup>13)</sup>。

このほか発熱体保護層である Ta の酸化が経時により進行し、熱伝導性の悪化による特性劣化もある。

後述する印字に使用されないミストも経時によりその影響が大きくなるため、経時要因としてとらえることもできる。

インク充填初期にインク流路内面のぬれ性の変化により短

期間に噴射特性が変化することもある。このためプリントヘッドの出荷前にエージングを行い、特性を安定化させることもある。

#### 4.3.3 プリントヘッド間差、プリントヘッド内均一性

噴射安定性維持という観点からははずれるが、プリントヘッド間、プリントヘッド内の特性ばらつきの低減も重要である。色ごとにプリントヘッドが交換できるプリンタにおいては、プリントヘッド間のばらつきが画質に影響を与える。すなわち、プリントヘッド間で噴射インク滴量が異なれば、プリントヘッド交換により単色の濃度だけでなく、2 次色等、色目の変化が生じる。このため上述した作製精度の高いプリントヘッド作製技術が必要である。またプリントヘッドの作製後に、噴射試験を行ない、プリントヘッドを噴射インク滴量によりクラス分けし、その情報をプリントヘッドに記憶させ、プリンタに装着したときにその情報を読み込んで、適切な駆動条件に変更するか色補正を行って、色目を均一にする方法がある。

#### 4.3.4 マルチノズル噴射

(同時に)印字に使用するノズル数により、噴射状態が変化する。これは熱によるものと、クロストークに分けることができる。クロストークはさらに隣接流路への圧力伝播によるものと、インク流(負圧変化)によるものがある。いずれも流路設計において考慮しなくてはならない。またインターレース(飛び越し)駆動方式は、いずれのクロストークを防止する上で有効であり、ほとんどのサーマルインクジェットで採用されている。

#### 4.3.5 湿度

湿度の影響は、噴射特性そのものより紙へのインクの浸透、広がりに影響を与え、一定のインク滴量を噴射しても、結果として画像濃度が異なる。温度と同様、センサにより湿度を検出し、駆動条件を変更する方法がある。

#### 4.3.6 その他(インク負圧、走査方向)

ノズル部でのメニスカス保持(インク流出防止)のため、インクタンクでは負圧を発生させているが、多孔質体をインク保持に用いている場合、インク残量により負圧が変化し、噴射インク滴量が増える場合がある。負圧はインクのリフィル速度に影響を及ぼすため、リフィル周波数を越えた高周波数域でのインク滴量変化が生じることがある。このため駆動周波数に対し、十分な応答性を持たせることが必要になる。

色ごとにプリントヘッドを持つプリンタにおいては、スキャン方向により色重ね順が変わり、色目が増える。同一プリントヘッドを複数分割した場合には、この問題は生じないが、一般的にこのようなプリントヘッドでは、各色事に割り当てられるノズル数が少なくなるので、印字速度が遅くなる。これを防ぐために、各色のプリントヘッドを対象に複数組配置し、スキャン方向によって色重ね順が異なるようにしたプリンタが導入されている<sup>14)</sup>。

#### 4.3.7 ランダム故障

プリントヘッド単独で起こるものだけではないが、ランダム故障として分類すべき要因も噴射特性に影響を与えるものとして、ここに記述する。

ランダム故障として、プリントヘッドノズル面の表面処理へのキズがある。用紙ジャム時に表面処理がダメージを受ける場合や、環境ゴミが付着し、ワイピングによりダメージを与えることになる。最悪の場合はダメージを受けたノズルは噴射不能になることもあるが、多くの場合は方向性不良を引き起こし画質の劣化を引き起こす。流路中への気泡混入による噴射障害もランダム故障である。メンテナンスにおけるプライミングは、気泡混入によるトラブルを事前に防止し、またトラブルからの回復を行なう。しかしこの操作は時間がかかり、生産性を低下させる。また多量のインクを排出する。このため時間を短縮し、インクをほとんど消費しない新しいメンテナンス方法も開発されている(後述)。

#### 4.3.8 噴射異常の検出と対応

また表 1 に示すように、変動要因そのものへの対応ではなく、結果として生じた噴射異常や画質欠陥を検出し、それを補正する方法も多く検討され、プリンタに導入されている。

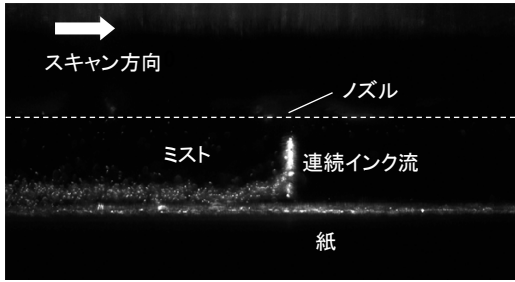
表 1. 不良検出方法と検出後のアクション

不良検出方法	不良検出後のアクション
光学的インク滴検出 記録パターンの読取り(センサ、オペレータ) ヘッド温度、インク滴温度検出 音響的検出 インク導電性検出 圧力変動検出 アクチュエーターの特性検出 (抵抗値、電流値、共振周波数)	メンテナンス動作 代替ノズル(画像処理) Data 変更 印字モード変更 駆動条件変更 (径変調/画処理) 印字中止、警告

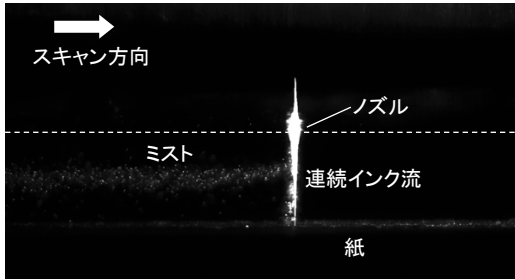
#### 4.4. ミスト解析と対応技術

インクジェットがより高速化し、SOHO、あるいはオフィス内の小ワークグループで共有できるプリンタが実現し、近年、各社この市場へのエントリーがはじまっている。高速化を進める中で、主滴、サテライトに伴って発生し、印字に使用されない微小液滴、いわゆるミストによる性能劣化が着目され、その解析が試みられ、一部で対応策が導入されてきている。ミストはピエゾ方式でも、サーマルインクジェット方式でも見られる現象であるが、現在では挙動、現象の解析<sup>15-17)</sup>が行なわれている。

図 8 は移動するキャリッジに搭載されたプリントヘッドから、連続的にインク滴が用紙に向かって噴射される瞬間をとらえたものである。このようにキャリッジ移動によって生じる気流によって、ミストが紙に到達せず、キャリッジ移動の上流側に流される様子がわかる。浮遊したミストはプリンタ内面を汚染し、あるいは紙に付着し画像を劣化させる。図 8 の(b)はキャリッジ速度が(a)の 2 倍になったもので、ミストはよりノズルに近い位置から連続流束からの離脱をはじめている。ミストが紙に到達できるかどうか(浮遊するかどうか)は、インク連続流束とキャリッジの早さによる気流の状態に依存する<sup>15)</sup>。すなわちこれらの条件により舞い上がるミストの閾速度と径が決まる。図 9 は紙に到



(a) スキャン速度:0.57m/s



(b) スキャン速度:1.14m/s

図 8. ミストの発生と浮遊<sup>16,17)</sup>

達できない最大のミスト径と駆動条件(キャリッジ移動速度と連続流束を決める駆動周波数)との関係を、ミストの速度をパラメータにして示している。駆動周波数が高いと(キャリッジ速度も速くなり)キャリッジ移動による気流の大きくなるが、それ以上にインク流束が大きくなる効果でより小さなミストが紙に到達できることを示している。図 10 は噴射時の気流の速度成分を PIV(Particle Image Velocimetry)により測定したものである。プ

ミスト閾径 (μm)

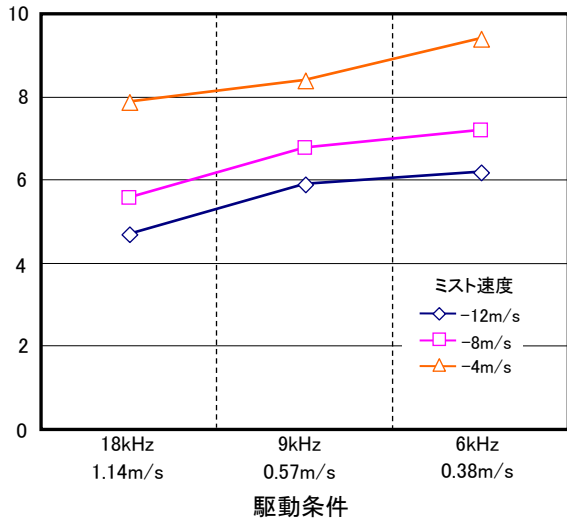


図 9. 紙に到達しないミスト閾径<sup>15)</sup>

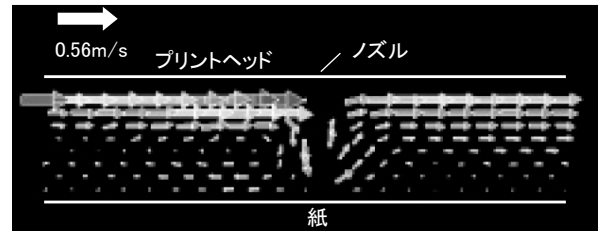


図 10. PIV による気流解析<sup>15)</sup>

プリントヘッドと紙の間よりやや下に、ミストを舞い上げる渦流が生じているのがわかる。

このためプリンタでは、ミストが浮遊する領域にファンによって強制的に気流(負圧)を発生させ、ミストを吸引し、フィルタなどによって回収する対応策が導入されている。またエンコーダ等、ミスト付着によりプリンタ動作が影響を受けやすい部品を、気流解析から、よりミストが到達しにくい場所へ設置する工夫も必要である。

#### 4.5. サーマルインクジェットプリントヘッドの新しいメンテナンス技術

印字結果に画質欠陥が生じると、ユーザーは回復のための(ユーザー)メンテナンスを実施する。しかしこのメンテナンスに要する時間が長いと、生産性(印字速度)が低下することになる。

ここでは SHDJ(Super Heat Dummy Jet)と呼ばれるメンテナンス技術について解説する。

サーマルインクジェットでは、印字によりプリントヘッドの温度が上昇し、インクに溶存した気体が析出し気泡となる。析出した気泡は成長・合体してインク流路や共通液室に停滞し、インクの供給、噴射を阻害する。あるいはプリントヘッド取り付け時等の機械的振動やインクタンクの交換時に外部からインク流路に泡が混入することもある。

このため一般には気泡を含んだインクをノズルからポンプで強制的に吸引・排出(プライミング)することで気泡による欠陥を防止、あるいは回復させる。しかし、この操作で大量のインクを消費し、吸引のための時間もかかる。また排出したインクを収容するスペース(排インク吸収材)も必要となりプリンタの大型化、コストアップにつながる。

SHDJ ではインクが噴射しない程度の短いパルスを発熱体に連続的に印加し、共通液室、およびインク流路内のインクを 100℃まで加熱、沸騰させ、大きなバブルを形成する。形成されたバブルは滞在していた泡と合体し、大きな浮力を得てインク流路から離れたマニホールド部へと移動する<sup>18)</sup>(図 11 参照)。

表 2. メンテナンスで消費するインク量と所要時間(クリーニング)

実測値(室温環境)		SHDJ 搭載プリンタ	他プリンタ
所要時間	(秒)	26	144
インク消費量	黒	0.04	1.1
	カラー	0.01	1.0

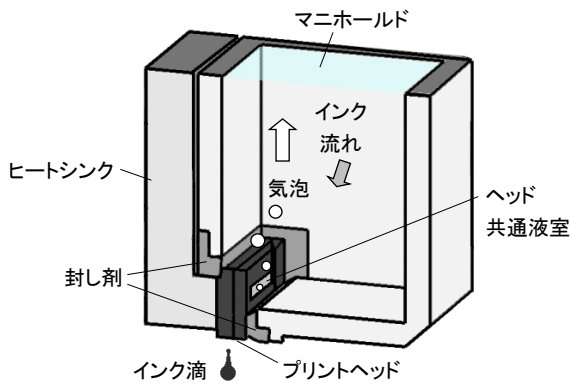


図11. SHDJによる気泡の除去

表2は、SHDJが搭載されたオフィス向けプリンタと、従来のプライミングにより気泡除去を行うプリンタにおいて、メンテナンス(ヘッドクリーニング)1回につき消費されるインク量とメンテナンスにかかる時間を比較したものである<sup>4)</sup>。

このように SHDJ ではインク消費量は非常に少なく、インクを無駄にすることがない。また所要時間も短いため、生産性を大きく低下させることがない。

#### 参考文献

1. M. Kaneko, High Speed High Image Quality Printing on Plain Paper Using Symmetrically Arranged Color Bubble Jet Print Head, IS&T's NIP 19th, p. 354, (2003)
2. R. Nyave, IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2003, Kyoto, Japan, p. 456
3. M. Murata, IEICE TRANS. ELECTRON, Vol. E84-C, No. 12 p. 1792 (2001)
4. 齋藤, プレスリリースに見る OA 機器の技術動向 III

- 3-7 高速印字対応 Inkjet 技術, 事務機器関連技術調査報告書, 2002
5. 例えば片岡, 特開 2001-129799
6. 例えば田中, 特願 2003-174287
7. 藤井, サーマルインクジェットプリントヘッドの高性能化技術, 技術情報協会セミナーテキスト, p. 11 (2004)
8. M. Fujii, Journal of Imaging Science and Technology 43, 332 (1999)
9. Koen Kuk, Research on Micro Heater Efficiency for Thermal Inkjet Head, IS&T's NIP19, p. 298, (2003)
10. 例えば小野, 特開 2002-331649
11. 三谷, 次世代インクジェットプリントエンジン技術, Japan Hard Copy Fall Meeting Vol. 1999, p. 58 (1999)
12. 田鹿, Wonder BJF850 の Digital Photo プリント技術, 日本画像学会 1999 年度第 3 回技術研究会, 1999, 東京, p. 30
13. 大西, 電子情報通信学会論文誌 C-II VOL.J82-C-II NO.5 pp.273-280 (1999)
14. 中島, 対称形カラーバブルジェットによる普通紙高速高画質印字, Japan Hardcopy 2003, 東京, p. 221
15. K. Mori, Journal of Imaging Science and Technology 47, 250 (2003)
16. 廣岡, 第 33 回可視化情報シンポジウム, インクジェット印字ノズルまわりの微小液滴挙動の PIV 計測, A208, 2002
17. N. Hirooka, PIV Measurements of Airflow and Ink Mist Motion around Ink Jet Nozzles, IS&T's NIP19, p. 284, (2003)
18. K. Oda, Air Bubble Management on a New Thermal Ink Jet Head, IS&T's NIP17, p. 314, (2001)