

4章 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

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高性能化技術として、高画質化と高速化の改善アプローチを紹介する(4.2章, 4.3章)。さらに4.4章では高画質化、高速化共通の課題となるプリントヘッドの高効率化について詳しく解説する。また4.5章ではサーマルインクジェットの新しいメンテナンス技術を紹介する。

4.2. 高画質化アプローチ

高画質化への課題とアプローチを考える場合、出力するメディアの種類に分けて考えるべきである。すなわちインクジェット専用紙へビクトリアル画像を出力する場合と、普通紙にビジネス文書を出力する場合では、それぞれ解決すべき課題が異なるため、そのアプローチ、そして評価方法が大きく変わってくる。

4.2.1 インクジェット専用紙における高画質化

近年のインクジェット高画質化技術の進展により、専用紙における画質は電子写真を超え、銀塩写真に迫る勢いである。今後さらにこの画質を向上させるための課題をまとめると、

- a. ダイナミックレンジ(特にシャド一部での階調性)
- b. 色再現域の拡大
- c. プロセス安定性(繰り返し安定性、ページ内均一性)
- d. 光沢性
- e. 粒状性
- f. 保存安定性

このうち特にプリントヘッドに改善が期待されるのはプロセス安定性である。プロセス安定性のうち繰り返し安定性には、温度や湿度などの環境依存性を低減させることと、経時による特性劣化を低減させるものや、インク背圧依存を低減させることがある。温度依存性については、発熱体からノズルまでのインクを全て噴射し温度依存性を低減した MicroFine Droplet Technology[®][1]が導入されている。経時劣化への対応については、各種検出方式と組み合わせたプリントヘッドの駆動条件へのフィードバック機構が採用されているほか、発熱体上のコゲを除去し、コゲーションによる特性劣化を回復させる方法[2]も導入されている。

ページ内の均一性、すなわち各ノズルの噴射特性の均一性(作製精度)を高めるため、半導体プロセスにおけるフォトリソグラフィ[3]や、マイクロマシニング技術[4][5]などがプリントヘッドの発熱体基板のみならず流路作製にも用いられてきている。これらの作製方法は、さらなるインク滴量の微小化、ノズル配列の高解像度化にも対応し、粒状性の改善、ダイナミックレンジ拡大に寄与する。

4.2.2 普通紙における高画質化

普通紙におけるインクジェット画質の改善も、近年著しいが、電子写真と比較するとまだ大きな差があり、インクジェットがオフィス市場に浸透できない一因となっている。普通紙における高画質化への課題は

- g. にじみ(Feathering, ICB:Inter-Color Bleeding)
- h. 濃度向上
- i. 色再現域の拡大
直接的な画質課題ではないが、
- j. カール, カックル
- k. 定着性(耐擦過性)
- l. (高速印字時の)乾燥性、及び両面印字
があげられる。

最も大きな課題であるにじみの改善や濃度向上には、例えばインク間の反応による紙上での色材凝集の利用や[6][7]、高粘度インクの使用など、インクによるアプローチが主である。他の課題もインクによる改善効果が大きく、注力されている。プリントヘッドとしてはこのような機能付加されたインクのハンドリング、すなわち高い信頼性や、さまざまなインクを噴射できる高い噴射力が求められる。

4.3. 高速化の課題とアプローチ

サーマルインクジェットプリントヘッドにおける高速化は、すなわち単位時間当たりに記録媒体上に到達させるインク滴を増加させることにほかならない。これを具現化するプリントヘッドのアプローチとしては以下の4つがある。

- m. 駆動周波数(インク滴噴射繰り返し周波数)の向上
- n. ノズル数の増加(印字幅の増加)
- o. (印字に要する)ヘッドスキャン回数の低減
- p. メンテナンス時間の短縮、頻度の低減

4.3.1 駆動周波数の向上

図4.1はサーマルインクジェットプリントヘッドにおける駆動周波数の伸びを示している。駆動周波数を向上させるには、インク滴噴射後のリフィル(インクの再供給)を早める必要がある。これにはリフィルを阻害する流体抵抗をいかに減少させ、リフィルの原動力になる毛管力をいかに増大させるか、さらに隣接流路とのクロストークを防止するかというインク流路設計上の課題改善と、リフィルされるインク量の減少、すなわち近年の噴射インク滴体積の減少傾向が寄与している。

サーマルインクジェットにおいては入力された電気エネルギーの大部分が熱に変換されるため(4.4章で詳細を記述する)、駆動周波数の増加はプリントヘッド蓄熱の問題をさらに大きくする。プリントヘッドの温度が一定以上になると、画質欠陥を生じるため、印字を休止し温度が低下するまで待つ必要が

最大駆動周波数 (kHz)

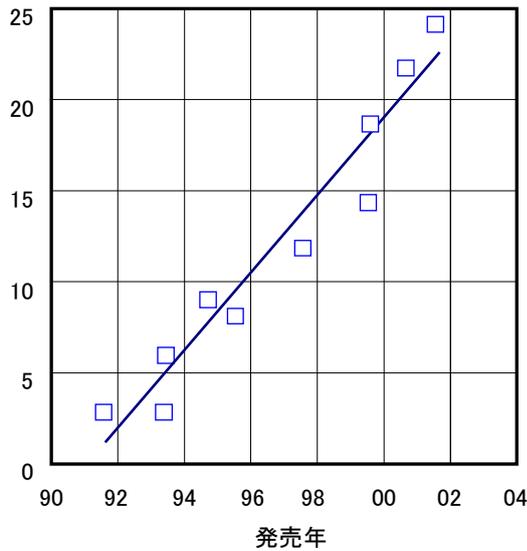


図4.1. サーマルインクジェットプリンタの駆動周波数向上傾向

相当印字速度 (ppm)

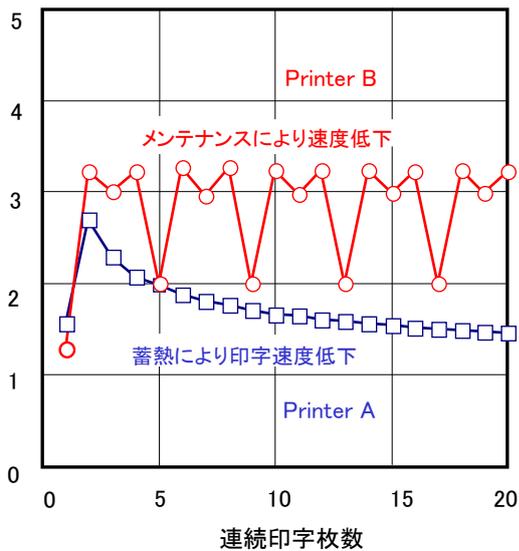


図4.2. 連続印字における印字速度低下

あり、結果的に印字速度の低下につながる。

この例を図 4.2 に示す。高密度画像を連続的に印字した場合、プリンタ A は印字開始直後には高い生産性を示しているが、徐々に印字速度が低下している。これはヘッドの温度上昇による印字停止時間が徐々に長くなっているためである。(この図におけるプリンタ B の印字速度低下については 4.3.4 章で説明する。)

このためさらなる駆動周波数の向上にはリフィルの改善だけでなく、この蓄熱改善が不可欠となる。これは無駄な熱の発生をいかに少なくするか、すなわち入力される電気エネルギーをいかに効率よく(印字に必要な)インク滴の運動エネルギーに変換するかというエネルギー変換効率向上に取り組ま

なければならない。

4.3.2 ノズル数の増加

図 4.3 はノズル数の増加と、一度に印字できる最大幅である Swath 幅の伸びを示している。ただしこの図は、コンシューマー向けのインクジェットプリンタについてであり、産業向けプリンタのヘッドは含まれていない。

このように半導体プロセスをベースにしているサーマルインクジェットプリントヘッドでは、2 のべき乗に対しリニアな関係が見られる。ここからノズル数は約 37 ヶ月で 2 倍、Swath 幅は約 66 ヶ月で 2 倍の増加傾向を読み取ることができる。

ヘッド当たりのノズル数を増加させるときの課題は以下のとおりである。

- q. ヘッド全般にわたる(噴射特性の)均一性の確保
- r. ヘッドの反りやひずみ低減
- s. 蓄熱改善

均一性の改善については 4.2 章で述べた高精度な流路作製プロセスが有効である。またこれらの作製方法においては流路が形成された部材(基板)と発熱体基板の接合に接着剤を使用しておらず、また材料の熱膨張の違いについても考慮され、長尺化における反りやひずみに対するの改善が見られる。ただしコンシューマー向けのプリンタにおいては、これ以上のノズル数(Swath 幅)の増加は、システム全体のバランスをくずすため、今後もこの増加傾向が維持されるとは限らない。

4.3.3 ヘッドスキャン回数の低減

ノズルごとの噴射特性(インク滴量)ばらつきや、噴射方向性による画質低下を改善するため、分割印字方法(マルチスキャン)が使用されている。プリントヘッドの噴射均一性をより高めることができれば、分割数の低減を行なうことができ、印字速度の向上を図ることができる。これも高精度なプリントヘッド作製方法に期待されるものである。

ノズル数/ヘッド Swath幅 (インチ)

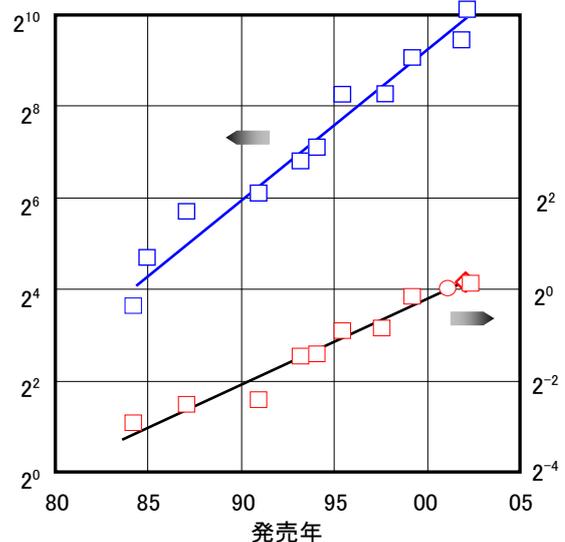


図4.3. プリントヘッド当たりノズル数とSwath幅の増加傾向 (コンシューマー向け製品)

またヘッドスキャン方向の色重ね順による色差の問題を回避するため、高画質モードでは片側方向のみの印字が行なわれることが多いが、各色を対称に配列したヘッド構成[2]の採用により高画質モードにおいても両方向印字が可能になり、高速化が図られている。

4.3.4 メンテナンスの低減

図 4.2 のプリンタ B における印字速度低下は、4 枚に 1 枚の割合で起きており、明らかに蓄熱による低下傾向と異なる。これは定期的に(印字と印字の間に)メンテナンスを行なっているためであり、メンテナンスの中身はスピitting(空噴射)、プライミング(インク吸引)、ワイピング等である。この操作は噴射しないノズルにおける増粘したインクを排出することや、ノズル面に付着する紙粉などを取り除くために行なわれる。ピエゾインクジェットでは、噴射しない間メニスカスを微小振動させ、インクの増粘を抑制する方法[8]が用いられているが、サーマルインクジェットでは増粘したインクに影響されない高い噴射力が要求される。

メンテナンスに要する時間、および間隔を減らすことは印字速度向上に寄与する。これについては 4.4 章、4.5 章でも触れる。

4.4. サーマルインクジェットプリントヘッドの高効率化

サーマルインクジェットプリントヘッドを、電気エネルギーをインク滴の運動エネルギーに変換するエネルギー変換素子として考える。図 4.4 はプリントヘッドに印加された電気エネルギーがインク滴噴射エネルギーに変換されるまで、どこでエネルギー損失が生じるかを示したものであり、以下の 5 つ過程にわけることができる[9]。

- (1) 電極や駆動素子における電氣的損失(IR Drop)
- (2) 発熱体周囲での熱伝導
- (3) インクへの熱伝導、およびバブル発生・成長
- (4) インク流路における圧力伝播
- (5) インク滴の形成

これら(2)から(4)までの過程において、どの程度印加エネルギーが失われているか(熱に変換されているか)を示したものが図 4.5 である[10][11][12]。このようにサーマルインクジェットヘッドにおいては、非常にわずかのエネルギーしか最終的にイ

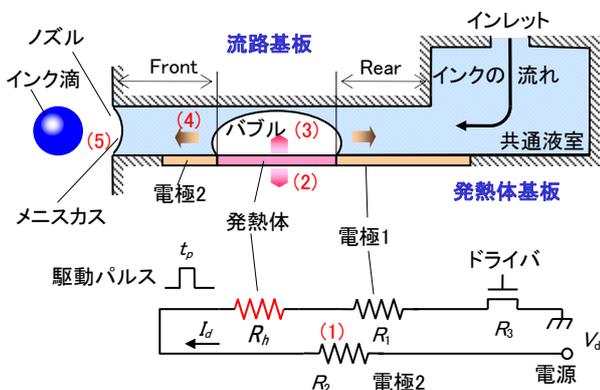
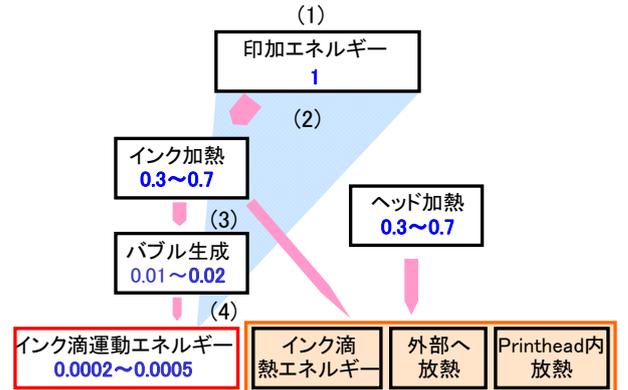


図4.4. サーマルインクジェットプリントヘッドにおけるエネルギー損失



Printhead構成、印字密度、環境温度により異なる

図4.5. 印加エネルギーの損失

ンク滴の運動に変換されておらず、ほとんど熱になっていることがわかる。

4.4.1 発熱体周囲での熱伝導：過程(2)

発熱体で生じた熱を、インクが存在する上方に効率よく伝播させることが重要であり、発熱体周囲の層構成に依存する。これは発熱体直下に存在する蓄熱層の厚み、熱伝導率による下方への熱伝導の低下と、発熱体直上に存在する絶縁層、保護層の厚み、熱伝導率による上方への熱伝導向上により行われる。しかし、下層による改善は、現行製品に搭載されているプリントヘッドですでにその効果が飽和する領域(蓄熱層厚)に達している。また保護層をなくし、インクへの熱伝導性をさらに向上させる構造、およびそのときの発熱体材料もいくつか提案されている[13][14]。この場合、バブル消滅時のキャビテーションダメージへの対応としては、バブルが大気と連通するMFDT^{*1}との組み合わせが考えられる。下方のみならず、発熱体周囲に熱バリアを形成するなどして横方向への熱伝導を防止する策[15]も提案されている

4.4.2 バブル発生：過程(3)

発熱体形状(アスペクト比)と、駆動パルス長をパラメータにして、発熱体に印加された電気エネルギーとバブルの仕事量との関係が求められている[16]。これは発熱体に印加された電気エネルギーを E_h 、バブルの仕事量を E_b としたときの変換効率、

$$EF_h = \frac{E_b}{E_h} \quad (1)$$

を実験や計算によって調べたものである。

これによれば(最適値は存在するものの)アスペクト比が小さく、パルス幅が長いときに効率が高い。アスペクト比が 1 に近いほど、発生したバブルの表面張力は最少になり、よりバブルは膨張しやすくなると考えられる。パルスが長い効果は、バブルが発生し、断熱に近い状態が生じるまでに発熱体から離れた場所に存在するインクまで熱を伝播させることができ、過熱領域としてバブルの発生・成長に寄与するためだと考えられる。

バブルを発生させるメインパルスに先立って微小パルスを(複数)印加する(マルチ)プレパルス駆動と同様の効果である。

4.4.3 インク流路における圧力伝播：過程(4)

ここではインク流路設計において、どのようにすれば発生したバブル圧力をインク滴が吐出されるノズル方向へ効果的に伝播させることができるかを論じる。このためまず発熱体に印加された電気エネルギーがインク滴の運動エネルギーへ変換される効率 EF を式(2)のように定義し、インクジェットプリントヘッドの流路形状、寸法とどのように関係しているかを考える。

$$EF = \frac{E_d}{E_h} \quad (2)$$

ただし E_d はインク滴の運動エネルギー、 E_h は発熱体に印加された電気エネルギーである。

液体が流路を流れるときに生じる圧力損失は、流量を q とすれば式(3)のように記述できる[17].

$$\Delta p = L \cdot \frac{dq}{dt} + R \cdot q \quad (3)$$

ここで L は流路イナータンス、 R は流路抵抗である。バブルの発生でインクが噴射される場合には、短時間に急激なインクの移動(過渡流れ)が生じるため、式(3)においてイナータンス項が支配的になる。そこで式(4)で定義するバブルの発生点である発熱体前後のイナータンスの比 K が、ノズル方向への圧力伝播効率に大きくかわかると考えられる。

$$K = \frac{L_r}{L_f + L_r} \quad (4)$$

添え字の f はフロント(ノズル側)、 r はリア(共通液室側)を意味する。

さまざまな形状、寸法を持つインクジェットプリントヘッドについて(サイドシュータータイプ、ルーフシュータータイプ含む)、流路寸法を測定し、イナータンス前後比 K を計算した。また同一のインクを用い、一定の駆動条件下で噴射されたインク滴の質量と速度を測定し、インク滴の運動エネルギーを算出した。これによりエネルギー効率 EF を求め、イナータンス前後比 K との関係性を調べたものが図 4.6 である。(この実験においては、過程(2)(3)による差はできる限りなくし、その影響を無視している)

図 4.6 から明らかなように、イナータンス前後比とエネルギー効率が非常に高い相関を持つことがわかる[9].

実際の流路設計において、イナータンス前後比を高める場合、インクリフィルを阻害する流路抵抗の増大を回避しなければならない。したがって、噴射されるインク滴の体積と速度に対し支配的であるノズル部と、これに対向するリザーバーからインク流路入り口のみで高いイナータンス比を保ち、他の流路を可能な限り広げる設計が考えられる。

またフロント側の流路長を短くし、イナータンス比を高めることもできる。MicroFine Droplet Technology^{*1} はこの点においてもエネルギー効率の高い構造といえる。

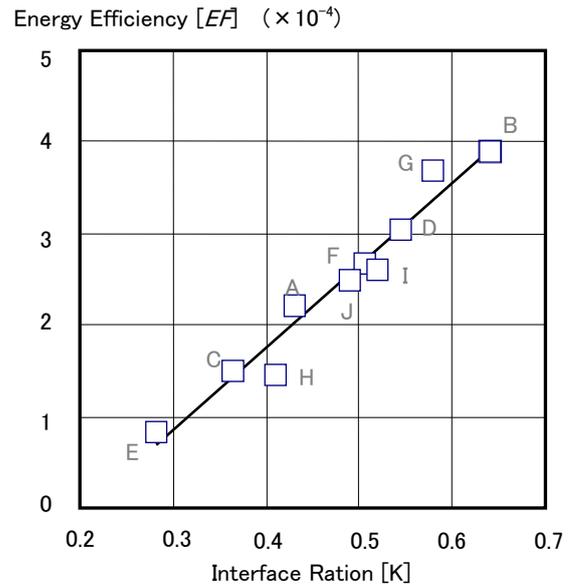


図4.6. イナータンス前後比[K]とエネルギー効率[EF]

4.4.4 インク滴運動エネルギーと Latency

式(2)で示されるエネルギー効率が低いということは、同じ印加エネルギー下でインク滴の運動エネルギー E_d を向上させることを意味する。

4.3.4 章で高速化のアプローチの1つとしてメンテナンス頻度を減らすことを挙げた。インク滴の運動エネルギーを向上させることが、このメンテナンスの負荷を減らすことができる。

インク滴の噴射が一旦とまると、インク成分の低沸点物質がノズルから蒸発し、ノズル近傍のインク粘度が高くなる[18]。このため長い休止時間を経たあとに噴射されるインク滴は増粘した、あるいは固化したインクにより方向が曲がったり、噴射されなかったりする。

インク滴飛翔時間[1.5mm] (s)

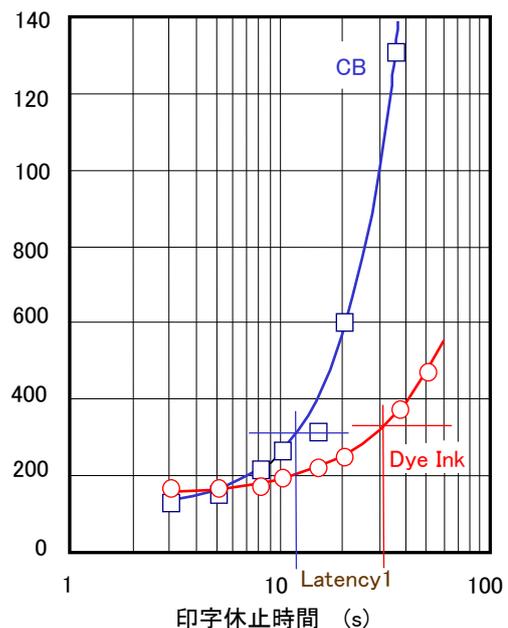


図4.7. インク滴飛翔時間の休止時間による変化

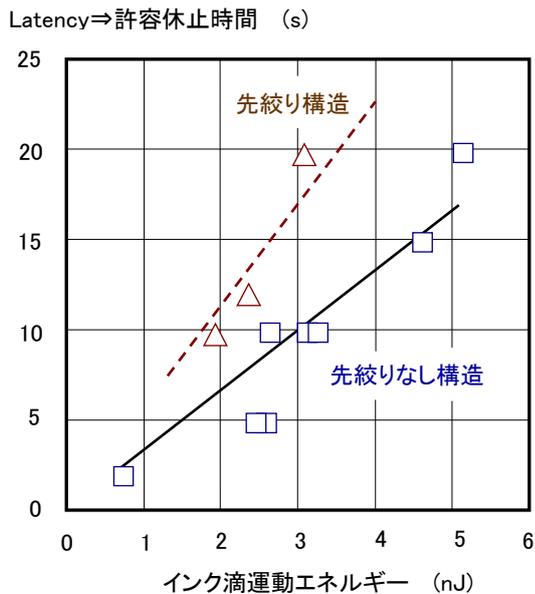


図4.8. Latency²とインク滴運動エネルギー[7]

図 4.7 は印字を休止した時間と、休止後に噴射した最初のインク滴の飛翔時間(速度の逆)との関係の一例を示している。

このように休止時間が長くなるほどインク滴速度は低下し、最悪の場合はインク滴が噴射できなくなる。

このためプリンタでは、印字開始前、あるいは印字中でも一定時間毎に、Spitting(空噴射)により増粘したインクを排出している。高いインク滴の運動エネルギーがあれば、増粘インクの噴射への影響を低減でき、メンテナンス(Spitting)間隔を伸ばすことができる。例えばインク滴噴射速度の半分(図 4.7 においては飛翔時間が2倍)になる休止時間をLatencyと定義し、メンテナンス間隔を決める際の目安にできる。また実際の画質劣化を評価し、劣化が許容できなくなる休止時間をLatencyとすることもできる。

図 4.8 はインク滴の運動エネルギーと画質劣化が許容できなくなる Latency との関係の一例である。このようにインク滴の運動エネルギー(噴射速度)が高いほど Latency が長くなり、メンテナンス間隔を広げられることがわかる。また運動エネルギーを高めることにより、速度低下が大きい、噴射しにくいインクを使用することができるため、インクの種類範囲が広がる。(図中、先絞り構造とは 4.4.3 章に記述したノズル先端を絞った流路構造である)

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

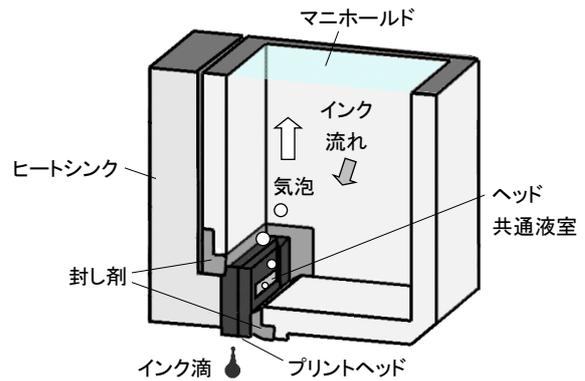


図4.9. SHDJによる気泡の除去

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。

ここでは新たに開発した、SHDJ(Super Heat Dummy Jet)と呼ぶ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停滞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[19](図 4.9 参照)。

表 1 は、SHDJ が搭載された富士ゼロックスのオフィス向けプリンタと、他のインクジェットプリンタにおいて、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[20]。

このように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。

表 1. 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
	(g)		

*1 MicroFine Droplet Technology はキヤノンの登録商標です。

4章の参考文献

1. 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
2. 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)
3. 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)
4. M. Murata, IEICE TRANS. ELECTRON, Vol. E84-C, No. 12 p. 1792 (2001)
5. R. Nyave, IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2003, Kyoto, Japan, p. 456
6. 例えば Looman Steven D, USP5679143 (1997)
7. 例えば高橋, 特開平 7-314886 (1995)
8. 片倉, 電子情報通信学会技術研究報告 VOL.98, NO.623 (EID98-183) (1999)
9. M. FUJII, Journal of Imaging Science and Technology **43**, (1999)
10. 藤井, インクジェットプリントヘッドの高性能化技術, 情報機構電気系セミナーテキスト, p.13 (2003)
11. R. C. Durbeck, Output Hardcopy Devices, Academic Press, Inc, San Diego (1988)
12. 三谷, インクジェット記録の高速化技術, 技術情報協会セミナーテキスト, p.11 (1997)
13. 例えば三谷, 特許 3320825 号 (2002)
14. 例えば當麻, 特許 2866253 号 (1999)
15. 例えば Cathie J. Burke, USP5751315 (1998)
16. Koen Kuk, Research on Micro Heater Efficiency for Thermal Inkjet Head, IS&T's NIP19, p. 298, (2003)
17. Narayan Deshpande, Journal of Imaging Science and Technology **40**, 396, (1996)
18. Peter A Torpey, Evaporation of A Two-Component Ink from The Nozzles of A Thermal Ink Jet Printhead, IS&T's NIP6, p. 453, (1990)
19. K. Oda, Air Bubble Management on a New Thermal Ink Jet Head, IS&T's NIP17, p. 314, (2001)
20. 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