インクジェットプリンタにおける機械技術

高野 陸男*, 小林 正人**
Rikuo TAKANO Masato KOBAYASHI

Key Words: Business Equipment, Ink Jet Printer, Fluid Vibration

1. ま え が き

最近の情報処理技術ならびに通信技術の進展は、データ通信システムをいっそう高度化させており、文字、図形、画像、音声など多様なサービスを可能としている。とくに、これらの情報をハードコピーとして出力するプリンタは、今後ますます重要な役割をになってきている。

プリンタには、活字やワイヤの機械的衝撃を用いるインパクト方式と電子的な方法により記録を行うノンインパクト方式があるが、近年低騒音で高速記録が可能なノンインパクトプリンタが急速に普及しつつある。

ノンインパクト方式の中でもインクジェット記録方式は、きわめて低騒音で高速・高精細な記録が可能なほか、安価な普通紙が使える、現像・定着を必要としないなど優れた特長を有している。また、漢字、図形、カラーなど記録の融通性にも優れており、今後の多様な要求にこたえるものとして期待されている。最近では、ワードプロセッサ用高品質漢字プリンタやファクシミリなど各種のハードコピー装置として使用され始めており、ノンインパクト方式の主要記録方式の一つとなっている。

インクジェットプリンタは、機械工学、電子通信工学のほか、物理、化学、金属などの各分野を加えた一つの総合技術であり、とくにプリンタの性能を支配する記録機構については、流体力学、振動工学などの機械技術に負うところが大きい。

本解説では、まず最初に各種インクジェット記録方式の概要について解説する。つぎに、機械技術とのかかわり合いについて簡単に触れ、機械技術を応用した代表的なものとして、インクジェットの粒子化機構について流体力学的立場から述べる。最後に、インクジェット記録方式の応用面も含めて今後の展望について述べる。

2. インクジェット記録方式の概要

インクジェット記録は、19世紀の Rayleigh による噴流の粒子化理論⁽¹⁾を端緒としてその基礎が確立されている。さらに、今世紀中ごろにはいつて研究開発が活発化し、現在では各種の方式に基づくプリンタが実用化されている。表1は各種方式をインク粒子の発生方法および制御方法から分類したものである。以下にそれらの記録原理を解説する。

2.1 加圧振動方式 加圧したインクをノズルから連続的に噴出させ、これに超音波振動を与えて粒子化する方式であり、各粒子の制御方法によって以下の3方式に分類される。

(1) 荷電制御形 1964年 Adams⁽²⁾ および Sweet⁽³⁾ が考案したものであり、記録原理を図1に示す。インクに3~4 kg/cm²の圧力を加え、超音波振動しているノズルからジェットを噴出させてインクを規則的に粒子化し、粒子に与える荷電量を制御し、一定電界中を通過させることにより偏向させて記録を行う方式である。また、荷電量による制御の代わりに、一定荷電された粒子を電界の強さによって偏向させる電界制御形についても開発された例があるが、原理的に記録速度が遅いため現在ほとんど実用に供されていない。

(2) 2値制御形 1968年 Sweet⁽⁴⁾ が考案し

* 日本電信電話公社横須賀電気通信研究所 (☎ 238-03 横須賀市武1-2356)。

** 正員、日本電信電話公社横須賀電気通信研究所 (☎ 238-03 横須賀市武1-2356)。

たもので、粒子に与える荷電量をデジタル的に制御して記録する方式である。ノズルを多数個密に並べて記録するため、超高速記録が可能であり、最近注目されている方式である。

(3) 散乱角制御形 1968年 Hertz⁽⁵⁾ が開発したもので、記録原理を図2に示す。インクに30 kg/cm²程度の超高压を加え、超音波振動している微細ノズルからジェットを噴出させ、微細化したインク粒子に荷電し、粒子間の静電的な反発散乱を利用して階調記録を行う方式である。散乱角は荷電電圧によって制御する。

2.2 静電加速方式 1958年 Winston⁽⁶⁾ が考案したものであり、ノズルと対向電極の間に電圧を印加し、インクを静電引力によりノズルから引き出す方式である。この方式には、一定電荷をもつ粒子を電界の強さによって偏向させる電界制御形と無偏向のまま記録する無電界形の2方式がある。

2.3 圧力パルス方式 1969年 Kyser⁽⁷⁾, 1971年 Stemme⁽⁸⁾ らが考案したものであり、記録原理

表 1 インクジェット記録方式の分類

記 録 方 式		粒子化 周波数 kHz	ノズル 径 μm	インク 圧 力 kg/cm ²
粒 子 発生方式	粒 子 制御方式			
加 圧 振動方式	荷電量制御形	50~120	30~60	3~4
	2値制御形	50~80	40~60	2~3
	散乱角制御形	500~ 1000	10	30
静 電 加速方式	電界制御形	3	100~350	0~0.02
	無 電 界 形			
圧カパ ルス方式	無 偏 向 形	5~20	50~125	0~0.02

表 2 機械技術に関する検討課題

構 成	課 題	内 容
記録機構	インク 粒子化条件	(i) 噴流加振機構 (ii) 粒子発生形態 (iii) ノズル具備条件
	記 録 適 性	(i) インクの紙への拡散特性 (ii) インクのみスト発生形態
インク 供給機構	フィルタ 構 成 法	(i) ノズル目詰まり防止条件
	圧 制 御 法	(i) 定圧性 (ii) 間けつ動作における圧力応答特性

を図3に示す。ノズル後方に圧電振動子を設け、これに電気信号を加えることによって圧力波を発生させ、圧力波のみの力によりノズルから粒子を噴出させ、無偏向のまま記録する方式である。

3. 機械技術の役割

インクジェットプリンタにおいて、技術の中核をなす記録機構の性能は、流体力学、機械振動、機械力学など機械技術の進歩に負っており、今後ますますその役割が大きくなってゆくものと考えられる。

表2はインクジェット記録各種方式に共通な機

図 1 加圧振動方式荷電量制御形の記録原理

図 2 加圧振動方式散乱角制御形の記録原理

図 3 圧力パルス方式の記録原理 (Stemme 形)

械技術に関する主な課題を示す。記録機構については、インクの噴流加振機構に関する機械振動的課題およびインクの粒子化特性や記録用紙へのインク拡散特性など流体力学的課題を含んでいる。また、インク供給機構については、ノズル目詰まりに関与するフィルタ構成法およびインクポンプの圧力制御法など流体力学、機械力学的諸課題を含んでいる。

ここでは、インクジェット記録方式の中でも、現在最も多く実用に供されている加圧振動方式を取り上げ、記録の基本条件であるインクの粒子化機構について以下に述べる。

4. 粒子化機構

4.1 粒子化の基本特性 噴流の粒子化機構については古くから考察されており、1878年 Rayleigh⁽¹⁾ は微小変形理論を用いて噴流の変形条件について解析を行い、噴流の切断現象に関する基本解を与えている。また、1931年 Weber⁽⁹⁾ は同様にナビエ・ストークスの式をもとに、粘性の小さい流体に関し切断現象の解析を行っている。

ここでは、Rayleigh の基本解に基づく噴流の切断特性について述べる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。図4に示すように速度 v なる噴流を加振周波数 f で運動方向に振動させたときの噴流の表面形状を

$$r = a + \sum \alpha_m \cos m\phi \cos kz$$

とすると、振幅 α_m に関し次のような運動方程式が得られる。

$$\frac{d^2 \alpha_m}{dt^2} + \frac{T_s}{\rho a^3} \cdot \frac{ika J'_m(ika)}{J_m(ika)} \times (m^2 + k^2 a^2 - 1) \alpha_m = 0 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 α_m : m 次モードの振幅、 k : 波数、 T_s : 流体の表面張力、 ρ : 密度、 a : ノズル半径である。式(1)において、噴流がくびれ切断する条件は第2項 α_m の係数が負となり発散解をもつ場合である。すなわち、モード $m=0$ 、かつ $(ka)^{-1} > 1$ のとき、噴流はくびれ粒子化する。したがって、0

図4 噴流の表面形状

次モードの振幅 α_0 は

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= h_0 e^{\mu t} \\ \mu^2 &= \frac{T_s}{\rho a^3} \cdot \frac{ika J'_0(ika)}{J_0(ika)} (1 - k^2 a^2) \\ &\cong \frac{T_s}{\rho a^3} k^2 a^2 (1 - k^2 a^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

ここに、 μ は振幅成長率であり、その最大値は $(ka)^{-1} \cong \sqrt{2}$ のときである。また、 h_0 は噴流の初期の半径方向の振幅である。なお、 $(ka)^{-1}$ の物理的意味は $(ka)^{-1} = \lambda/2\pi a = v/2\pi a f$ であるので、噴流の波長 λ と円周長 $2\pi a$ の比を意味しており、ここでは噴流の速度 v を基準にとり、比速度と呼ぶ。

式(2)より、噴流の切断時間 T_b (ノズル端面から噴流が切断するまでの時間) は、 $\alpha_0 = a$ と仮定することにより次式で与えられる。

$$T_b = \frac{1}{\mu} \ln \frac{a}{h_0} \quad \dots\dots(3)$$

また、切断距離 L_b は噴流の平均速度を v と仮定して次式で与えられる。

$$L_b = v T_b = \frac{v}{\mu} \ln \frac{a}{h_0} \quad \dots\dots(4)$$

図5は噴流の切断時間特性の一例を示す。理論曲線は、初期振幅条件 a/h_0 を適宜与えたものである。理論と実験は定性的に一致しており、Rayleigh の解が粒子化の基本特性を記述する方程式として有効であることがわかる。図において、比速度が $1 < (ka)^{-1} < 1.4$ では、わずかな噴流の速度変動により切断時間が急激に変化し、きわめて外乱の影響を受けやすい。したがって、均一な大きさの粒子を規則正しく発生するには、比速

図5 切断時間特性

度を $(ka)^{-1} > 1.4$ に設定することが必要である。なお, Weber の解析からも最終的には式 (3) および (4) が得られる。

4.2 粒子の発生形態 噴流の軸方向に小振幅の振動が与えられると, 噴流は均一な間隔をもった粒子に切断されるが, そのような主粒子の間にサテライト (satellite) と呼ばれる相対的に小さな粒子が発生する。このサテライトの発生については, 前述の Rayleigh や Weber の解析からは説明できない。近年ようやくいくつかの解析によってその存在が指摘できるようになり, 代表的なものに Pimbley ら⁽¹²⁾ の研究がある。すなわち, ナビエ・ストークスの式の非線形項を考慮した解析によりサテライトの発生を予測したもので, サテライトの発生を支配する最も重要な基本量は加振振幅と比速度であることを示している。

図 6 はサテライト発生形態の写真撮影を示しており, 主粒子に対して寸法の小さい微小粒子が観察される。それらの発生形態は主粒子に対する相対速度をもって, 低速, 等速および高速サテライトに分類できる。低速サテライトの場合は, 先行する主粒子に与える荷電情報の一部が, このサテライトによりつぎの主粒子に重畳されるため, 記録雑音の原因となる。また, 等速サテライトの場合は, インク粒子の偏向量が粒径に反比例することから, サテライトによるゴースト記録が発生する。したがって, 適正な記録を行うための粒子の

図 6 サテライト発生形態 ($f=120$ kHz, $2a=\phi 30 \mu\text{m}$)

発生形態は, サテライトを発生しない場合または高速サテライトの場合に限定される。

図 7 は比速度 $(ka)^{-1}$ を用いて実験的に求めた粒子化形態の分布図を示す。前述の粒子化形態の考察から, 記録に適した均一なインク粒子を正確な周期で発生させるための粒子化条件は, 比速度 $(ka)^{-1}$ およびノズル加振振幅 h_0/a を図の斜線区域内に設定することである。なお, この領域は記録安定化の基本条件である $(ka)^{-1} > 1.4$ に含まれており, 外乱に対して安定な記録を保証する重要な領域である。

5. 今後の展望

インクジェット記録方式は, 漢字, 図形, カラーなど多様なハードコピーが可能であり, その適用領域もプリンタのみならずファクシミリ, プロッタなど広範囲にわたっており, 今後いっそう発展してゆくものと考えられる。とくに, 普通紙へのカラー記録はインクジェット記録方式固有の優れた特長であり, 最近のカラーディスプレイの普及に伴うカラーハードコピー装置やカラーファクシミリなどカラーのニーズをひらく重要技術として, 今後の展開が期待される。

図 8 はカラープリンタの一例として, 高速性および記録品質に優れる荷電制御方式を用いたカラーインクジェットプリンタの記録機構部を示す⁽¹³⁾。図において, 記録ヘッドはイエロ, マゼンタ, シアンおよび黒のカラーインクに対応して, それぞれジェット用ノズル, 加振機構, 荷電電極を一組とした 4 個のユニットと各色共通な 1 個の

図 7 粒子化形態分布図

偏向電極および不要なインクを回収する4個のガターから構成されている。各色の記録動作は以下のようにして行われる。まずポンプにより一定圧力で加圧されたインクは、直径 $30\ \mu\text{m}$ のノズルから一定速度で噴出する。噴流には圧電振動子により $120\ \text{kHz}$ の微小振動が与えられ、振動周期と同期した直径約 $60\ \mu\text{m}$ の規則正しいインク粒子列に分裂する。分裂した粒子には、荷電電極によりカラー情報に基づく一定の電荷が与えられ、一定の高電圧が印加されている偏向電極によって偏向され、記録用紙の所定の位置に衝突して直径約 $100\ \mu\text{m}$ のドットを形成する。カラー画像の形成は、インク粒子の偏向量を32段階のレベルに、記録密度を10ドット/mmとして、4種類のカラーインクの混色により27色のカラー記録と10段階の階調記録を可能としている。

図8 カラーインクジェットプリンタの記録機構部

6. む す び

以上、インクジェットプリンタについて、まず各種方式の概要を解説し、つぎに機械技術の代表例としてインクジェットの粒子化機構について述べ、最後に具体的な応用例も含めて今後の展望について述べた。

インクジェット記録方式は、その優れた特質ゆえ今後広範囲な分野に適用されてゆくものと考えられる。しかし、ノズル製造法、小形定流量ポンプなど解決すべき課題も多く残っており、機械技術者の今後のいっそうの活躍を期待するものである。

終わりに、ご指導いただいた横須賀電気通信研究所 松田亮一部長ならびにご協力いただいた関連研究室の方々に厚く感謝いたします。

(原稿受付 昭和56年6月22日)

文 献

- (1) Rayleigh, L., *Proc. London Math. Soc.*, 10-4 (1873), 4.
- (2) Adams, R.E., 特公昭, 昭 42-4381.
- (3) Sweet, R.G., 特公昭, 昭 42-8350.
- (4) Sweet, R.G. and Cumming, R.C., U.S.P., 3 373 437 (1968).
- (5) Hertz, C.H. and Simonsson, S.I., U.S.P., 3 416 153 (1968).
- (6) Winston, C.R., 特公昭, 昭 36-13768.
- (7) Kyser, E.L., 特公昭, 昭 53-12138.
- (8) Stemme, E., 特公昭, 昭 53-45698.
- (9) Weber, C., *Z. Angew. Math. Mech.*, 11-2 (1931), 136.
- (10) 高野・米川, 電気通信研究所研究発表会論文集, 31 (昭 51), 54.
- (11) 高野・木村, 精密機械, 43-1 (昭 52), 112.
- (12) Pimbley, W.T. and Lee, H.C., *IBM J. Res. Dev.*, 21-1 (1977-1), 21.
- (13) 小林・ほか3名, 昭和56年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, (昭 56), 8-364.