荷電制御型インクジェットプリンタにおける
インク粒子飛翔安定化*松 本 章 吾^{*1}, 井 上 智 博^{*1}
松 野 順 一^{*1}, 佐 野 清^{*2}

Flight Stability of Droplets in an Electrostatic Ink-Jet Printer

Shyogo MATSUMOTO, Tomohiro INOUE,
Junichi MATSUNO and Kiyosi SANO

We describe the flying stability of droplets in an electrostatic ink-jet printer. Results of observations of flying droplets, measurements of charges in droplets, and numerical analysis explain the cause of droplet placement errors. This analysis includes electrostatic repulsion effects and interactions resulting from aerodynamic forces. In this study, a way to reduce the droplet placement error is also discussed, and its effectiveness is confirmed.

Key Words: Information Processing Equipment, Measurement and Control, Positioning, Modeling, Wake, Numerical Analysis, Electrostatic Ink-Jet Printer, Droplet, Interaction, Droplet Placement Error

1. 緒言

荷電制御型インクジェットプリンタ(以下IJPと略す)は、非接触で被印字物までの距離(印字距離)を大きくとれ、様々な材質の被印字物への印字が行えるといった特徴を有している。この為、生産ライン上で飲料缶などに製造年月日を印字する産業用マーキング装置として利用されている。近年では、生産ラインの省力化・高速化を図るため、IJPも従来以上の高速・高画質化が要求されるようになってきている。

本方式のIJPは、Fig.1に示す様に常にノズルから噴出しているインクを圧電素子の振動により粒子化し、印字を行うものである。この際、印字情報に対応した電圧が帯電電極に印加され、インク粒子を帯電させる。さらにインク粒子は、所定の電圧の印加された偏向電極間を飛翔する間に偏向力を受けて偏向し、被印字物の所定の位置に印字される。又、印字に用いないインク粒子は帯電されずに直進し、ガターで回収、再利用

される。

この様にインク粒子は荷電粒子であるため、飛翔中にFig.2に示す様々な力を受ける。帯電時には先行粒子の影響で理想的な帯電量より低く帯電する帯電誤差が生じる。さらに飛翔中には、インク粒子の相互干渉に起因した空気抵抗の差、静電反発力等を受ける。これらが複合して理想の印字位置に対して実際の印字位置がずれる印字歪が生じる。こういったインク粒子間の相互干渉はインク粒子の配列などにより変化してしまうため、印字歪の対策は難しいものとなっていた。従来は印字に用いるインク粒子の間に印字に用いない非印字粒子を飛翔させてインク粒子間の相互干渉を低減させていた⁽¹⁾。しかし、印字の高速化に伴い発生する

Fig.1 Schematic view of IJP

* 原稿受付 1995年8月24日。

*¹ 正員、(株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町502)。*² (株)日立製作所電化機器事業部 (〒316 日立市東日立多賀町1-1-1)。

全てのインク粒子を印字に用いる必要が生じてきたため、このような粒子を用いることが難しくなってきた。相互干渉防止用のインク粒子を飛翔させずにバーコードを印字した場合、Fig.3のような印字歪（ライン反り）が生じる。このような印字歪が生じると、見た目に煩わしいだけではなく、印字内容を正確に読み取ることができなくなる恐れが生じる。

印字歪みを効果的に低減させる為には、飛翔形態と印字品質を統一的に評価することが極めて有効である。しかし、現在までの検討は粒子化メカニズムを中心に局部的な現象を取り扱っているものがほとんどであった⁽²⁾⁻⁽³⁾。この為印字歪みに対しては、実験的に補正係数を求めることによって対応していることが多く⁽⁴⁾、漢字や新規パターンに対する汎用性が極めて低いものになっていた。

本研究ではこの問題を解決するために印字評価、インク粒子の飛翔観察、帯電電荷量の測定を行うと共に、インク粒子の運動を簡便な系でモデル化して、統一的にインク粒子の飛翔シミュレーションを行う事により、印字歪の発生メカニズムを解明し、高速・高画質化を図る事とした。

本報では、インク粒子飛翔観察、帯電電荷量測定、及びインク粒子飛翔シミュレーションについて報告し、さらに高速バーコード印字における印字歪の低減法について検討する。

2. インク粒子飛翔観察

2.1 観察装置 印字歪の発生原因を究明するため、Fig.4に示した飛翔観察装置を製作し、インク粒子の飛翔形態を観察した。本観察装置では、帯電電極へ電圧を印加する時刻に同期してストロボを発光させて各時刻におけるインク粒子の飛翔過程を観察している。更にそのデータを処理する事により、インク粒子の速度など様々な情報を得る事が出来る。

2.2 飛翔形態と印字歪の関係 インク粒子飛翔観察装置により観察したバーコード印字時のインク粒子の飛翔形態をFig.5に示す。図中上下に偏向電極が配置され、インク粒子は右手方向に飛翔している。この図より、先頭の粒子が2番目の粒子に追いつかれて合体し、最後尾粒子が大きく遅れていることが分かる。さらに、インク粒子は理想的にはほぼ直線状に配列して飛翔するべきところを、大きく湾曲して飛翔していることが確認できる。

これは、1ライン内で粒子の飛翔速度に差が生じる為で、この結果被印字物に到達するまでの時間にも差

Fig.2 Electrostatic repulsion and aerodynamic interaction effects

Fig.3 Drop placement error

Fig.4 Schematic view of inkjet observation apparatus

Fig.5 Drop placement during vertical line printing (observation)

が生じ、印字結果にそりが生じるものと考えられる。

この観察結果より速度分布を求め、印字状態を予測すると、Fig.3に示したバーコード印字結果と良く一致する事が確認できた。そこで次に、インク粒子にこのように速度分布が生じる理由の検討をFig.5に示した印字条件を中心に進める事とした。Table 1に本IJPの基本仕様を示す。

3. 帯電量の測定

3.1 測定装置 帯電時の相互干渉による帯電誤差は、直接印字形態に影響を与えるため、この度合いを把握する事は重要である。そこでこの帯電歪みを評価するため、微小電荷測定装置を製作し、各印字条件での一粒子ごとの帯電電荷量を測定した。本測定装置では、グラウンドに接地されたシールドカバーに覆われたインク粒子捕捉部にインク粒子を捕らえ、この時の電流を測定して帯電量を求めている。なおここでは、電流増幅にハイインピーダンスで入力バイアス電流の小さいオペアンプを用いることにより、1粒子ごとの帯電電荷量を測定可能にしている。また、予め容量の分かっているコンデンサをインク粒子補足部に接続することにより、出力電圧と、入力電荷量の検定を行っている。

3.2 帯電誤差の測定 帯電誤差を評価するため、インク粒子2粒子を飛翔させ、インク粒子間距離 x_d を変化させた場合の帯電電荷量を測定した。結果をFig.6に示す。ここでは、インク粒子間距離 x_d をノズル径 d_j で無次元化して示した。また帯電誤差率は、先行粒子の帯電量と、注目粒子の帯電量の理想帯電量からの誤差の比で定義している。この図より、インク粒子間隔が狭まるほど帯電誤差が大きくなる事が分かり、粒子間に干渉防止用粒子の入れられない高速印字ほど印字歪が増大する事が理解できる。ただし、帯電誤差による印字歪みは、帯電誤差分だけ予め見込んで帯電制御を行えば対応が可能で、数粒子前までの情報とFig.6から補正データを求めることができる。

4. インク粒子飛翔解析

4.1 解析法 印字歪発生メカニズムの見通しを良くし、効果的な歪低減策を講じるために、インク粒子飛翔解析法を検討した。インク粒子飛翔解析の流れをFig.7に示す。まず、プリンタ寸法などの印字条件からインクの吐出速度、インク粒子径及び帯電誤差を考慮した帯電量を求める。さらに、この帯電粒子に作用す

Table 1 IJP specifications

Diameter of nozzle d_j	65 μ m
Frequency f	68 kHz
Initial velocity of droplet v_0	20.2 m/s
Deflecting electric field E	0.9 kV/mm

Fig.6 Relationship between charge error ratio and drop placement

Fig.7 Flow of analysis

る加速度を微小時間ごとに求め、全飛翔過程にわたり積分することにより、飛翔経路を算出した。以下、各項目の評価法について述べる。

4.1.1 粒子径 ノズル付近のインク柱部分の質量流量と飛翔しているインク粒子部分の質量流量について質量保存則を適用すると、ノズル径 d_0 とインク粒子径 d の間に次の関係

$$d = A_1 d_0 \left\{ (3/2)(\lambda/d_0) \right\}^{1/3} \quad \dots(1)$$

が得られる⁽⁶⁾。ただし、 λ はインク粒子間隔、 A_1 は補正係数である。Table 1の条件での飛翔観察により d を

測定し, $A_1 = 0.931$ を得た.

4.1.2 帯電電荷量 正に帯電している2枚の帯電電極を無限平板とし, インク粒子を直径 d のインク柱で近似すれば, 帯電電極部でインク粒子に与えられる電荷 q は, 近似的に次式で与えられる¹⁰⁾.

$$q = 2\pi A_2 \epsilon_0 \lambda V_s / \ln(4d / \pi d) \quad \cdots(2)$$

ただし, ϵ_0 は真空の誘電率, V_s は帯電電圧, d は帯電電極板間距離, A_2 は補正係数である. 帯電量の測定により q を求め, $A_2 = 1.054$ を得た.

4.1.3 偏向力 帯電電極部で電荷 q を与えられたインク粒子は, 偏向電極部の電界内を飛翔する間, 次式で与えられる偏向力 F_i を受ける.

$$F_i = qE \quad \cdots(3)$$

ただし, E は偏向電極間の電界強度である.

4.1.4 クーロン力 IJPでは, インク粒子が帯電しているため飛翔中にインク粒子間に次式で示されるクーロン力 F_c が働く.

$$F_c = q_1 q_2 / (4\pi \epsilon_0 r^2) \quad \cdots(4)$$

ただし, r は粒子間距離である.

4.1.5 空気抵抗 インク粒子は空気中を飛翔するため空気抵抗を受ける. インク粒子を直径 d の球と考えたときの空気抵抗 F_a は, 次式で与えられる¹¹⁾.

$$F_a = C_d (1/2) \rho v^2 \pi / 4d^2 \quad \cdots(5)$$

ここで, C_d は抗力係数 ρ は空気の密度である. レイノルズ数が1以下の領域については, Oseenの式などが知られている. しかしIJPで用いるレイノルズ数200程度の領域では C_d 値との理論的な関係は無い. ここでは後の解析の便宜上, 粒子速度 v の高次の項を無視することとし, Oseenの式に習い次のように表す事にする.

$$C_d = A_3 (B_1 / \text{Red} + B_2) \quad \cdots(6)$$

ここで, B_1 , B_2 は Red により異なりそれぞれ, $\text{Red} \leq 1$ の時 $B_1 = 24$, $B_2 = 4.5$ (Oseenの式), $1 < \text{Red} \leq 2$ の時 $B_1 = 27$, $B_2 = 1.5$, さらに $2 < \text{Red} \leq 200$ の時 $B_1 = 60$, $B_2 = 0.5$ である. ただし, $\text{Red} = vd/\nu$ であり, ν は空気の動粘性係数である.

ここで飛翔観察から A_3 を求めることを考える. 空気抵抗と偏向力のみを受ける荷電粒子を考えると, 式(3)~(6)より,

$$dv/dt = -G(v^2 + 2Q_1 v + Q_2) \quad \cdots(7)$$

を得る. なお G , Q_1 , Q_2 は印字条件で定まる定数である. ただし Q_2 には粒子の飛行方向を示す変数が含まれる. ここでは簡単のため Q_2 を定数とみなし, 変数分離して微分方程式を解けば, 時間 t と粒子速度 v の関係を A_3 を用いて表すことができる. 飛翔観察により, 時間 t と粒子速度 v が得られるので, A_3 を求めることがで

きる. 飛翔観察より, $A_3 = 1.116$ を得た.

4.2 空気抵抗における粒子相互干渉の取扱い

インク粒子を連続して飛翔させる場合, 前項に示した空気抵抗は先行粒子により影響を受ける. ここでは, ベース粒子群と, 先行粒子の影響について考える.

4.2.1 ベース粒子群の影響 未印字時のインク粒子または, 印字に寄与しないインク粒子は帯電されずに飛翔し, ガターで回収される. このベース粒子群近くの空気は, これらのインク粒子の流れにひきづられて速度分布を有している. ここでは, この流れを定常的なものとして扱い, 近似的に平板上の境界層流れにより, この速度分布を求める.

無限遠方の速度が u_∞ の流れの中に, 流れと平行に置かれた平板上の境界層は, 次式で表せる¹²⁾.

$$u/u_\infty = (1/2) f(\eta) \quad \cdots(8)$$

ただし,

$$f(\eta) = \alpha \eta / 1! - \alpha^2 \eta^4 / 4! + 11 \alpha^3 \eta^7 / 7! - \cdots \quad \cdots(9)$$

ここでは, TopferがKuttaの方法で数値積分して求めた値 $\alpha = 1.32824$ を採用する¹³⁾. また, 飛翔観察によるインク粒子が空気抵抗を受け始める位置の測定から, $u/u_\infty = 1/2$ とする. 式(8)より, $f(\eta) = 1$ となるので, 式(9)より, $\eta = 0.77192$ を得る. よって,

$$\begin{aligned} \delta \epsilon &= 2\eta(\nu x / u_\infty)^{1/2} \\ &= 1.54384(\nu x / u_\infty)^{1/2} \end{aligned} \quad \cdots(10)$$

となる.

本検討では, 式(10)で得られる厚さ $\delta \epsilon$ の境界層内の空気速度を, ベース粒子群のインク飛翔速度 $v (= u_\infty)$ に等しいと考える. この境界層内を飛翔するインク粒子に加わる空気抵抗を, 飛翔しているインク粒子の速度と, 境界層内の空気速度の差から求める事により, ベース粒子群の影響を考慮する事とした.

4.2.2 後流の影響 インク粒子が飛翔した背後にはFig.8に示すような後流が形成される. 飛翔インク粒子を球とみなせば, 後流の幅 b は $x_w^{1/2}$ に比例して増加し, 最大速度欠損 u_{max} は $x_w^{-3/2}$ に比例して減少する¹⁴⁾. そこでここでは,

Fig.8 Wake

$$b = d(1 + A_1 x_1)^{1/3}$$

$$u_{\text{max}} = v \left\{ \frac{2d}{2d + A_2 x_2} \right\}^{2/3} \quad \dots(11)$$

と置く事にする。ただし、 A_1 , A_2 は実験により求める係数である。ここでは先ず2粒子を同じ経路上を飛翔させたときの飛翔観察から4.1.5項で述べたのと同様にして、後続粒子のCdを求め、先行粒子により形成される u_{max} を仮定することにより A_2 が得られる。さらに、後続粒子の帯電量を変化させた時の2粒子の合体の有無から A_1 を求めることができる。2粒子を連続して飛翔させた際の観察から、 $A_1 = 0.05$, $A_2 = 1.00$ を得た。

本検討では、幅bの後流内の流速を u_{max} とみなし、4.2.1項の場合と同様にして、後流の影響を考慮する事とした。

4.3 解析条件 前節までの検討に基づき、インク粒子の飛翔解析を行った。ここではFig. 5の印字条件と一致させ、Table1に示した条件で解析を行った。

4.4 2粒子の相互干渉 インク粒子を連続的に飛翔させた場合、インク粒子間の相互干渉により、インク粒子同士が合体するマージや、反発してはじき飛ばされるスキヤックが生じる非線形領域が存在する。この領域ではインクの挙動を制御できず、印字品質の改善は難しい。そのため、非線形領域の把握は装置設計上重要な課題となっている。そこで、この領域を把握するために、帯電電圧を様々に変化させた先行粒子と、帯電電圧を248Vで一定にした後続粒子の二粒子を連続して飛翔させる印字実験ならびに飛翔解析を行った。ここでは、偏向量により相互干渉の度合いを評価した。結果をFig.9に示す。この図より、後続粒子の偏向量が帯電誤差によりほぼ直線的に減少しているほか、帯電量がほぼ等しい領域で2粒子が合体(マージ)し、更にその近傍で2粒子がはじきあう(スキヤック)といった非線形の現象が再現できていることが確認できる。そこで、この手法を用いて1ライン飛翔シミュレーションを行うこととした。

4.5 1ライン飛翔時の解析

4.5.1 飛翔・印字形態 前述の手法のシミュレーションにより求めたインク粒子の飛翔形態並びにバーコード印字形態をFig.10に示す。インク粒子の飛翔形態については、飛翔観察結果と同様な様相を示しており、第1, 第2粒子が合体し、最後尾粒子が他の粒子に比べて遅れて飛翔している。また、結果として1ラインが湾曲して飛翔している様子が得られている。さらに、その結果得られるバーコード印字形態も先ほど示した印字結果と良く一致することが確認できる。以上により、本解析で印字歪の現象を再現できることが確認できた。

Fig.9 Interaction of 2drop-fly

1) Drop placement during line printing

2) Printing image

Fig.10 Drop placement and printing image during line printing (simulation)

4.5.2 インク粒子に作用する力 ここで、印字歪の発生メカニズムを考察するため、インク粒子に加わる力の変化を解析により求めた。Fig.11に先頭粒子並びに最後尾粒子について、ノズル先端からの距離に対するインク粒子に加わる進行方向の力の関係を示す。

先頭粒子はベース粒子群の境界層からでると共に、大きな空気抵抗を受け、減速する。一方、後続粒子は、最後尾粒子の場合と同様、先行粒子の後流内に入ると

め、空気抵抗の小さい状態が続く、速度の低下が先頭粒子よりも小さくなる。更に、最後尾粒子は、この図に示したように、後押しのクーロン力を生じさせる後続粒子がないため、帯電電極で帯電された直後に進行方向とは逆のクーロン力を受け、他の粒子よりも減速する。以上の結果、第2粒子が先頭粒子に追いついて合体し、最後尾粒子は他の粒子よりも遅れが著しいという、実験で観察される現象が良く説明できることが確認できた。

4.5.3 印字歪低減法の検討 以上の結果に基づいて印字歪低減策を検討する。まず、空気抵抗の影響の低減に着目すると、印字歪の低減策としては、インク粒子飛翔距離の短縮、インク粒子径の増大が考えられる。また、クーロン力に着目すると、空気抵抗の大きい先頭粒子を後押しし、なおかつ最後尾粒子に後ろ向きの力が作用しないように、帯電電圧の大きい順に印字するという印字法が考えられる。

各ヘッド並びに印字方式でのラインの反り率を実験並びにシミュレーションで求めたものをFig.12に示す。ここでは、ラインの反りの度合いを直線からのずれとドット径の比で定義したライン反り率で評価している。何れの場合も、実験値とシミュレーション結果は良く一致し、かつ全ての対策を施すことにより、ライン反り率を従来の1/10まで低減できることを確認した。

5. 結言

インクジェットプリンタの高速・高画質化を図る上で問題となっている印字歪の発生メカニズム解明のため、インク粒子飛翔観察手法、一粒子帯電量測定法並びに、インク粒子飛翔解析法を開発した。又、これらの手法により、印字歪発生現象が良く説明できることを確認した。さらに、本解析に基づいて印字歪低減策を検討し、ヘッドの短縮、ノズルの大径化および、クーロン力による後押しの採用により、印字歪を低減できる見通しを得た。

文献

- (1) G. L. Fillmore, W. L. Buehner and D. L. West, Drop Charging and Deflection in an Electrostatic Ink Jet Printer, IBM J. Res. Develop, 21(1977), 37-47.
- (2) K. C. Chaudhary and L. G. Redekopp, The Nonlinear Capillary Instability of a Liquid Jet. Part 1 Theory, J. Fluid. Mech., 96-2(1980), 257-274.
- (3) K. C. Chaudhary and T. Maxworthy, The Nonlinear Capillary Instability of a Liquid Jet. Part 2 Experiments on Jet Behaviour before Droplet Formation, J. Fluid. Mech., 96-2(1980), 275-286.
- (4) 海老・河村、流体ジェットの滴形成に関する数値的研究, Ricoh Tech.Rep., 5(1981), 4-11.
- (5) A. Atten and S. Oliveri, Charging of Drops Formed by Circular Jet Breakup, J. Electrostat., 29(1992), 73-91.
- (6) 浅野、噴出ジェットからの液滴形成と帯電, 静電気学会誌, 18-1(1994), 18-24.
- (7) 富田、水力学, 実教出版, 1982.
- (8) 岡本、応用流体力学, 誠文堂新光社 (1968), 150-152.
- (9) 堀家・海老、インクジェット記録と帯電液滴, 静電気学会誌, 10(1986), 18-24.

Fig.11 Applying force to a droplet (simulation)

Fig.12 Relationship between line-curvature ratio and working distance