インクジェット印刷の科学

甘利 武司*・鈴木 健司**

1. はじめに

インクジェットプリンターは安価、多色化が容易であるといった観点から注目され、パソコンのアウトプットなどに広く使われている印刷方式である。インクジェット印刷の印刷工程は細いノズルからインク滴を吐出させる「インク滴形成工程」、プリンターヘッドから被印刷体までの「インク滴飛翔工程」、被印刷体に接触してから浸透乾燥しパターンを形成する「インク浸透工程」に分けて考えることができる。それぞれの工程は力学、界面科学、物理化学、レオロジー等さまざまな基礎科学が関わっている。本稿では満足な印刷画像を得るためにそれぞれの工程においてどのような性質が要求されるか、基礎的な科学に準拠して解説する。

インクジェット記録については原理的にはかなり古くから知られていた。ジェット形成のメカニズムは1878年の Rayleigh の研究¹⁾にまでさかのぼるが、インクジェット記録方式として工業化されるのは1950年代になってからである。1960年代には Sweet によって荷電制御型の連続方式のプリンター²⁾が、1970年代には Hertz によってピエゾ素子を用いたオンデマンド型のプリンター³⁾が開発され、その後 Zoltan⁴⁾, Sears, Kyser ら⁵⁾によって種々のオンデマンドプリンターが開発され、工業化された。デバイスの簡便さ、信頼性からオンデマンド型が広く用いられるようになって行ったが、不十分な印刷適性やプリンターヘッドにおけるノズ

ルの目詰まりなどの問題点から汎用プリンターとして用いられるには至らなかった。しかし1979年、キヤノン(株)による熱変換方式のバブルジェットの開発、ヒューレットパッカード社によるカートリッジタイプのプリンターヘッドの開発により、インクジェット方式は確実に汎用プリンターとしての地位を確立し、1980年代後半から1990年代にかけてのパソコンの爆発的な普及と相まって、手ごろなアウトプットデバイスとして、ドットプリンターや熱転写型プリンターに代わって広く用いられるに至っている。インクジェット記録方式が今日のように広くパソコンのアウトプットデバイスとして用いられるようになったのは、プリンターヘッドの改良のほかに、貧弱な印刷適性を満足な段階までに引き上げたインクや紙などの材料の改良があった事を無視するわけには行かない。デバイスとメディアの両面からの研究開発がインクジェット記録方式を更に発展させる要件となる。

〔氏名〕あまり たけし
〔現職〕千葉大学工学部教授
〔趣味〕写真撮影
〔経歴〕昭和41年3月千葉大学工学部卒業
昭和42年3月東京大学生産技術研究所助手
昭和53年4月千葉大学講師、同55年6月助教授
平成2年より現職

〔氏名〕すずき けんじ
〔現職〕千葉大学大学院自然科学研究科在学中
〔趣味〕ドライブ
〔経歴〕平成6年3月千葉大学工学部卒業
同年4月千葉大学工学研究科修士課程進学
平成8年4月千葉大学大学院自然科学研究科博士課程進学

平成11.9.13受理

Basic Science for Ink Jet Printing
Takeshi AMARI and Kenji SUZUKI

* 千葉大学工学部情報画像工学科

** 千葉大学大学院自然科学研究科

千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 (〒263-8522)

表-1 インクジェットプリンターの分類

2. インクジェットプリンター

プリンターの型はインク滴の形成方法、噴射エネルギーの発生方法によって表-1のように分類される。インク滴を連続的に吐出し、必要な滴の運動のみを電界で制御して所定の記録体に導く連続方式と、印字に必要なときだけインク滴を吐出させるオンデマンド方式とに分けられる。

連続方式の場合、50～100kHz程度の圧電振動子で加圧し、インキ粒子を連続的に発生させる。印字にかかわるインク粒子を制御する方式には幾つかあるが、一般には帯電電極、偏向電極で粒子の飛行方向を上下または左右に振ることにより記録が行われる。不要インクは回収されインクタンクに戻される。比較的高速で印字することができる。オンデマンド方式は、ピエゾの変形によりインク滴を吐出させる電気-機械変換方式、熱による気泡の発生でインク滴を吐出させる電気-熱変換方式、静電的吸引力によりインク滴を吐出させる静電吸引方式に分類される。オンデマンド型は記録速度に制限（約30kHz）があるが、構造が簡単で小型、マルチヘッド化が可能でカラー印刷に有利なこともあって、インクジェット記録として最も多く採用されている。ピエゾ変換方式は使われるピエゾ素子の種類、取り付け位置、インキ室の構造によって、種々に分類されるが、圧力パルスを受けて所定のインク滴を発生させる機構に変わりはない。熱変換方式も加熱板の位置によって分類される。静電吸引方式の一つに電界制御型静電加速方式がある。インキに微小圧力を加え、ノズル中にインキのメニスカスを形成し、これに静電引力を加えノズルから引き出す方式で、電荷を帯びたインク滴は加速電極で加速され、偏向電極によって方向が定められる。

3. インクジェットインク

現在、パソコンのアウトプットとして用いられている

インクジェットインクは、直接染料、酸性染料を用いた染料インクが主体で、基本的に水溶性インクである。インクジェットインクは直径数10μmの小さなノズルからインク滴として瞬時に吐出しなければならないので、様々な要件が必要とされる。インクには均一な液滴を形成すること、記録濃度が高いこと、浸透乾燥の迅速性、退色が少ないこと、ノズルの目詰まりを起こさないことなどの性質が要求されている。多くの場合、染料の水溶液に表面張力を制御する界面活性剤、多価アルコールを加えて用いる。多価アルコール類は保湿性が良い、毒性が少ない、普通紙への浸透が速い、染料の溶解性がよいなどの特長があり、滲みが少なく、高濃度の印字が期待できる溶剤である。また用途、システムに応じて水溶性高分子、ノニオン系界面活性剤、防かび剤等が加えられる。

インクジェットインクの粘度は1～10mPa.s、表面張力は0.03～0.06N/mが一般的である。インク液滴の形成過程は極めて短時間であり、従ってインクのタイムスケールの短いダイナミックな性質が重要となる。一般にインクジェットインクのような低粘度液体は普通的生活感覚ではニュートン流体とみなして差し支えないが、高速現象では対応するタイムスケールの動的粘弾性の影響を無視することは出来ない。ノズルから吐出する動作形態からはインクの伸張粘度も関係してくる。

一方、最近では顔料系のインクジェットインクも開発されており、印刷適性、高品位画像の点から注目されている。顔料インクの場合、ノズルの目詰まり、顔料の沈降（Settling）が差し当たっての問題と考えられる。分散媒中の顔料粒子に働く力として、他の粒子との相互作用を無視して、重力、浮力、ストークスの粘性力のみを考えると、その沈降速度 v は式1のように表される。

$$v = 2(\rho_s - \rho)gr^2 / 9\eta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし ρ_s 、 ρ はそれぞれ粒子および分散媒の密度、 r は粒子半径、 η は分散媒粘度、 g は重力加速度である。こ

こから粒子径を小さくし、分散媒粘度を高くすると Settling 防止に有利となるが、ジェットインクとしては分散媒粘度はあまり高くできないので、分散粒子を小さくしてやるのがポイントである。分散粒子を小さくするとブラウン運動が活発となり、コロイド的性質が顕著となる。分散粒子が小さくなると分散・凝集がより重要な問題となる。分散安定化をはかるために顔料粒子はブラウン運動によるランダムな拡散、分散剤による良好な濡れ性、静電的な反発力を保持することが肝要である。微粒化は粒子設計、合成段階からの対応も考えられるが、0.1mm 以下の小粒径のアルミナ、ジルコニアミル等の分散メディアを使って得られる。微粒化することにより、ブラウン運動も一層活発化することが期待される。分散剤としてはメタクリル酸、マレイン酸、アルカリ可溶性樹脂等の高分子分散剤、ノニオン系、アニオン系界面活性剤等の使用が考えられる。

4. インク滴形成過程

Hue P. Le によるとサーマル方式のプリンターヘッドにおけるインク滴形成過程は図-1 のようである⁶⁾。インクチャンバー下部の加熱板に信号が与えられると $5 \mu \text{sec}$ 以内に気泡が発生し、 $10 \mu \text{sec}$ 程度でバブルは最大限に膨張する。バブルがはじけインク滴が吐出されるのはおよそ $20 \mu \text{sec}$ 程度である。このようにインク滴形成のタイムスケールは極めて短く、インク物性も対応したタイムスケールでの情報が必要とされる。ピエゾ方式もまたこれと同じか、さらに短時間における動的挙動がインク滴形成に関わっていると思われる。

図-2 はノズル近傍のインク滴形成過程をマイクロビデオモニタリング装置で観測した結果を経時的に示したものである⁷⁾。ノズルから吐出されたインクは、まず最初に定在波を持つインク柱を形成する。そしてインク柱のくびれは、表面張力によって、ノズルからの距離に従って振幅が大きくなってゆき、ある位置に達するとインク滴を形成する。その際に、サテライトと呼ばれる不必要な小径粒子が発生してしまう場合がある。この現象はインクジェット印刷の品質と大に関わりがある。図のビデオ画像からインク滴およびサテライトの吐出速度、インク滴のサイズ、インク柱の長さなどを量的に評価することができる。

一般的にインクの粘度が低いとインクの吐出速度は速くなるがサテライトが発生しやすくなり、逆にインクの粘度が高いとサテライトの発生は抑制されるが、吐出速

図-1 バブル型におけるインク滴形成過程

度が遅くなってしまう、必然的に印字速度も遅くなってしまうという矛盾が生じる。サテライトが紙面に付着すると印字品質が低下するという事は明らかなことであるが、それを機械的に解消する方法も既に提案されている。電荷を与えることによってインクの飛翔方向を制御し、サテライトのみを回収してしまう方法や、逆にサテライトのみを紙面に到達させ、より解像度の高い印刷物が得られるマイクロドットと称する方法などが良い例である。しかし両者ともにコスト面や機械の規模などの点からあまり実用化されていない。やはりインク設計の際にサテライトの発生しないインク調整を行うことが最優先課題といえるであろう。

ところで細いノズルからインク滴が吐出する現象を検討する際に、レイノルズ数 Re のような流体力学パラメータを導入すると便利である。インク滴吐出時の速度および粘度から、ノズル先端部におけるレイノルズ数を2式を用いて算出することができる。

$$Re = V \cdot D \cdot \rho / \eta \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

(V :吐出速度 D :ノズルの直径 ρ :密度 η :粘度)

マイクロビデオモニタリング装置

図-2 ノズル近傍のインク滴形成過程

図-3 流体の管内流動とレイノルズ数

レイノルズ数は管内流動における慣性力と粘性力の比を表すもので、ジェット形成には重要なパラメータである。レイノルズ数と管内流動の概念図は、図-3 のようである。その値が1以下の場合、流動は完全に層流であるが、値が大きくなるに従って流動は不安定になって行き、渦を形成し始める。このような流動状態の変化、例えばその際に発生する渦流れがインク滴の形成過程に大きく関与しているものと考えられる。

図-4 は試料インクに粘度や表面張力調整剤としてのエチレングリコール (PEG) やイソプロピルアルコール

□ : PEG M200 ● : PEG M400 ● : PEG M600 ▲ : IPA 10%Aq.

図-4 各種添加剤濃度とインク滴吐出速度

図-5 インク粘度と吐出速度

ル (IPA) を添加し、添加量と吐出速度との関係を検討した結果である。添加量の増加に伴って、どの試料も一様に吐出速度が遅くなっていることがわかる。図-5, -6 は、得られた結果を粘度、表面張力と吐出速度との関係にまとめおいたものである。図-7 はインク滴とサテライトとの速度を PEG 添加量に対して示したものである。PEG の添加量 2% 以下の試料についてはサテライトの速度はインク滴と同等か、やや遅い。また、それ以上の添加量では、インク滴より速い速度のサテライトが発生している。これらの相対速度差とインクジェットプリンタにおけるノズルと記録媒体との距離 (約 1 mm) を考えると、紙面に付着するまでの間にインク滴、サテライトの両粒子が合体し、一つの粒子を形成するのは明らかと思われる。この場合サテライトによ

図-6 インクの表面張力と吐出速度

図-8 インク柱の長さ and レイノルズ数

図-7 インク滴およびサテライトの速度と PEG 添加量との関係

る汚れはない。

インク柱はインク粘度がある値より大きかったり、表面張力が低い場合発生しないこともあるが、インク柱が発生した場合について、インク柱の長さとレイノルズ数との関係を示すと、図-8 のようになる。極低レイノルズ数の場合は、インクの流動は安定したものになる。つまりこのような試料では、インク柱のくびれの成長が遅くなるため、必然的にインク柱の長さが長くなるものと考えられる。これと比較してレイノルズ数が大きい場合では、インクの流動は渦流を伴っており、インク柱のくびれの成長が早いために、あまり長いインク柱は形成されず、インク滴の形成が早まると思われる。このような場合には、プリンタにおけるノズルと紙面との距離を短縮することも可能で、インクの飛翔方向がノズル被印刷物間の環境の影響を受けにくくなる。つまり、空気の流れや温度、湿度等によるインクの飛翔方向のばらつ

き、乾燥を防ぐことができる。よってレイノルズ数の高い方がインクジェットプリンタに適したインクとなっていることが結論される。また、ノズル内で発生した渦流れが、吐出後、つまり気体／液体界面になってからどのように変化するのかは明らかではないが、レイノルズ数がインク柱の長さ等の飛翔状態を決定する有効なパラメータであることは確かである。

5. インクジェット記録用紙

紙は最も簡単には“天然セルロース繊維を水の存在下で薄葉状に成形したもの”と定義される。情報記録媒体としての紙に要求される性質は力学特性（レオロジー的性質）、印刷適性（インキ転移、インキ受理性、浸透性等）、寸法安定性等で、此等は紙の基本的構造を抜きにしては考えられない。一般にセルロース繊維の集合体としての紙の構造はその多重性から複雑である。わずか100 μ m 前後の厚さの内に微結晶部分、非晶質部分が存在して両者の境界面では空気、水、ヘミセルロースより成る空隙部分が存在する。この空隙部分がインキの浸透にとっては非常に重要な役目をする。このような紙の構造は原料パルプの種類ばかりでなく、紙の製造工程における作業条件に依存する。

インクジェットインキは紙に浸透することによって乾燥する。浸透乾燥方式は高速の印刷が要求される新聞インキ、クイックセットインキに採用されている方式であり、浸透現象は物理あるいは物理化学的見地から量的に取り扱うことが可能である。プリンターヘッドより吐出されるインキ液滴の直径は数十 μ m 程度であるが、紙上では倍近く拡がると考えられる。この現象は紙の空隙部分にインキが吸収され浸透が進行し、同時に滲みが発

図-9 17% コーティングカラーを用いた各厚さのコート層におけるドットパターンの拡がり

図-10 10% コーティングカラーを用いた各厚さのコート層におけるドットパターンの拡がり

生ずる。分解能の高い記録を期待する場合は液滴の径が小さいほうが有利であることは論を待たないが、滲みの少ない紙を使用することが肝要である。インクジェット記録における画像の品質を制限しているのが、この浸透、滲みの問題である。

高品位な画像を得るために、コーティングが施された専用紙が用いられる。この場合インクはコーティング層内にトラップされ、滲みの抑制された高精細な画像が得られる。コーティングカラーとしては多孔質シリカ等が用いられる。シリカの体積率が高いほど、累積細孔容積が大なるほど浸透も速く滲みも少ない。

6. ジェットインクの紙への浸透

紙などの多孔体へのインクの浸透は Lucas および Washburn⁸⁾によって検討された。彼らは紙中の空隙を毛細管で近似し、インク浸透の駆動力は毛細管力であり、その浸透流れには Hagen-Poiseuille の式が適用できるとして、インクの浸透深さ、 h を求める次の式を導いた。

$$h = \sqrt{rt\gamma \cos \theta / 2\eta} \dots\dots\dots (3)$$

ここで r は毛細管の平均半径、 γ は液体の表面張力、 θ は毛管壁と液体の接触角、 t は時間、 η は液体の粘度を示す。3式は大胆な仮定のもとに出発した式であるが、インクの紙への浸透挙動を量的によく再現している。また塗工紙の場合は、コーティング層の微細な毛管構造が浸透現象に関わると考えられ、この場合も同様に3式が適用できる。

多くのインクジェット専用紙がコート紙であることから、コート層の厚さ、コーティングカラーの濃度とイン

クの浸透との関係が注目される。図-9、-10 は異なったコート層を有するコート紙に $1 \mu\text{l}$ のインクを滴下し、その後のインク滴直径の時間変化を示したものである⁹⁾。インク滴直径は当初時間とともに増加するが10～20秒で平衡値に達する。双方の試料ともコート層の厚さが増すに従い、平衡直径は小さくなっている。また平衡値に達する時間はコート層の厚さ、シリカ粉の濃度、シリカ比表面積の増大に従って短時間側に移行する事が確認された。

インク浸透の駆動力は毛細管力である。毛細管力は毛管径が細いほど有効に作用する。コート紙への印字の場合、インク浸透は主としてコート層内で完結する。これは基質の紙とシリカ粒子の毛管径の違いによって説明される。コート紙上に滴下されたインク滴が浸透を開始し、その先端が基質の紙に到達した場合、インクは基質の紙の繊維が構成する空隙部分に浸透するより、シリカ粒子が充填されているコート層内を横方向に拡がる傾向にある。従ってコート層の厚さが薄いものの方がインク滴の拡がり、平衡径は大になる。一方コーティングカラーのシリカ濃度が大なる場合、インク吸収に係るシリカがより稠密に存在するので、所定量のインクによってもたらされる平衡拡がり直径はより小さなものになる。

7. 印字適性と評価法

インクジェット記録された印刷品質は記録紙上のインクドットのパターンに依存する。図-11 は各種の添加剤を加え、ジェットインクのレイノルズ数を変化させ、得られたドットパターンを、それぞれの添加量、レイノルズ数に対して示したものである⁷⁾。一般にレイノルズ数

Conc.(%)	0	2	4	6	8	10
IPA 10%Aq.						
Re	90	80	70	70	70	70
PEG M200						
Re	90	70	70	60	60	60
PEG M400						
Re	90	70	60	50	50	40
PEG M600						
Re	90	70	60	50	40	30

図-11 各種添加剤濃度によるレイノルズ数の変化とドット形状

図-12 フラクタル解析

が高いほどドット径は広がることが示されている。被印刷体が上質紙の場合、一般にドット形状は不規則な形をとる。このような不規則形状を検討するために、ドット輪郭の真円性、輪郭線のフラクタル解析等を適用することができる。

真円性の評価にはいくつかの方法があるが、ドットパターンの面積と外接円の面積の比で評価されることが多い。

フラクタル解析はドットパターンの縁線を抽出して、そのフラクタル次元を求めるものである。方法としては図-12に示されるように、抽出した縁線を互いに接した半径 r の円で覆ってゆき、縁線を覆い尽くした円の個数 $N(r)$ と円の半径 r との間に4式を適用してフラク

図-13 各種用紙上の印刷ドットのフラクタル次元

図-14 各種用紙上の印刷ドット直径とインク滴直径の比

ル次元 D を決定する¹⁰⁾。 r が小さくなると、縁線のより細部まで円で覆われ、 $N(r)$ も大になる。 D の値が1に近いほど不規則性は少なく、円形が良い。

$$D = -\log N(r) / \log r \dots\dots\dots (4)$$

図-13は上質紙、専用紙に印字した点のフラクタル次元を印刷用紙掃引速度（プリンターヘッドの速度に対応）に対して示したもので、当然のことながら専用紙のフラクタル次元は1.1前後と小さく、上質紙は1.2近い値を示している¹¹⁾。

先にインクジェット画像の先鋭度はインクドットの大きさによることを述べた。数十 μm のインク滴は紙に着いて倍近く広がる。先鋭な画像を得るためにはインク滴自身のサイズを小さくすることも必要だが、紙についての広がりを抑制することも大切である。図-14はインク滴直径とインクドット直径の比を各印刷用紙について示したものである。印刷用紙掃引速度に関係なく専用紙は1.2～1.4の値を示しているが、上質紙では1.9と倍近く広がっているのがわかる。

インクドットの光学濃度も印刷適性上重要なパラメー

図-15 各種用紙上の印刷ドットの光学濃度

タである。各用紙に印刷されたドットパターンをビデオ画像として取り込み、最も暗い部分を1、最も明るい部分を0として規格化した場合の結果を用紙掃引速度に対して示したのが図-15である。専用紙の濃度が高く、上質紙の濃度が低いのがわかる。これはインクの浸透深さによるもので、上質紙の場合、インクは紙の内部に深く浸透しているため、濃度が低くなっているものと思われる。

インクジェット画像の印刷適性を適格に評価するには、フラクタル次元、ドットの拡がり、ドットの濃度などを総合して評価するのが妥当と考えられる。

8. おわりに

インクジェットプリンターの市場はコンピュータ環境が整うにつれ、ここ数年急激に成長し競争が激化している。この傾向は、今しばらく続くものと思われ、要素技術は多くの他の分野の技術革新と連動しさらに発展してゆくものと思われる。一方、印刷品質に関しても改善の努力が為され、高速で再現性の良い、高精細な画像を得るためには、ノズル径を小さくし、吐出回数を多くしたり、マルチノズル化がはかられて行くであろう。それに

ともないインクの物性、ダイナミックスの研究がより重要性を増すと考えられる。インク滴形成過程は最も基本的な問題であり、さまざまな力学的、物理化学的問題が関係しており、その現象に関する的確な理解が技術開発に不可欠となる。

材料面では染料インクに代わって顔料タイプのものが、より一般化し、顔料の分散安定性を中心に作業適性の検討が進められるであろう。さらに記録用紙にしても滲み等を克服した、印刷適性に優れ高解像度、正確な画像再現性を達成する材料が開発されねばならない。今日の家庭用カラーインクジェット製品が比較的低価格、鮮明なカラー画像を提供しているところから、この特徴を維持しつつ、よりサイズを拡大したカラープリンターが普及してゆくと思われる。

文 献

- 1) F. R. S. Rayleigh : *Proc. London Math. Soc.*, **10** (4), 4-13 (1878).
- 2) R. G. Sweet : *Rev. Soc. Instrum.*, **36**, 131 (1965).
- 3) C. H. Hertz and S. I. Simonsson, US Patent 3416153 (1968).
- 4) S. L. Zoltan : US Patent 3683212 (1974).
- 5) E. L. Kyser and S. B. Sears : US Patent 3946398 (1976).
- 6) Hue, P. Le : *J. Imaging Sci. Tech.*, **42**, 49-62 (1998).
- 7) 鈴木健司, 甘利武司 : 色材, **70**, 291~299 (1997).
- 8) R. Lucas : *Kolloid Z.*, **23**, 15 (1918); E. E. Washburn : *Phys. Rev.*, **17**, 273 (1921).
- 9) 兪蔚, 田中恒雄, 甘利武司 : 日本印刷学会誌, **33**, 383~392 (1996).
- 10) 魏先福, 田中恒雄, 甘利武司 : 日本印刷学会誌, **33**, 114~118 (1996).
- 11) K. Suzuki, K. Koseki, and T. Amari : IS&Ts NIP14 ; 1998 International conference on Digital Printing Technologies.