

# インクジェットヘッドの構造と吐出安定化

富士ゼロックス株式会社 藤井 雅彦

## 7.1. インクジェットヘッドの構造と吐出安定化

この節ではインクジェットヘッドにおけるインク滴吐出不良を引き起こす原因と、その対応策、すなわち吐出安定化策について説明する。

### 7.1.1 インクジェットヘッドの基本構造

現在のインクジェットにおけるインク滴吐出、インク滴飛翔制御につながる研究は1700年代後半から始まった<sup>1)</sup>。これ以降、数多くのインクジェット方式が提案され実用化されてきたが、現在使われている方式はわずかに数種類にすぎない。

ここではオンデマンド型に分類され、プリンタのみならず様々なインクジェット応用に使われているピエゾインクジェット方式とサーマルインクジェット方式、高粘度液体や極微小インク滴を吐出できる静電吸引方式のヘッド基本構成と吐出原理を説明する。

図 7.1 にピエゾインクジェットヘッドの概略構成図を示す。プリントヘッドに付設されたピエゾ素子(PZT)に電圧を印加して

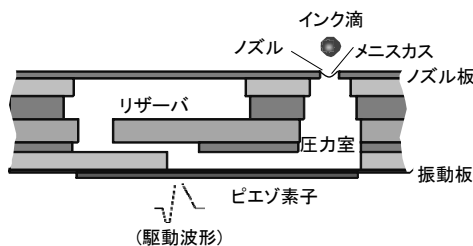


図 7.1 ピエゾインクジェットヘッド (撓みモード)

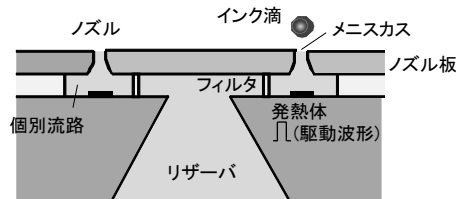


図 7.2 サーマルインクジェットヘッド (ルーフシューター)

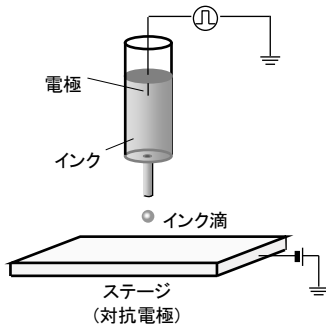


図 7.3 静電吸引方式

変形させ、その変形によって発生する音響波(圧力波)をメニスカスに到達させてノズルからインク滴を吐出させる。機械的な変形でインク滴を吐出するため、使用できるインク組成の自由度が高い。

図 7.2 はサーマルインクジェットヘッドの概略構成図である。個別流路内に付設された発熱体(ヒーター)にごく短い矩形波状電圧を印加することで、発熱体温度を急激に上昇させ、保護層を介して接したインクを沸騰させ、発生した蒸気泡の圧力でインク滴をノズルから吐出させる。小さな発熱体からインク滴を吐出可能な十分の大きさの蒸気泡を発生させることが出来るので、ノズルの高解像度化が可能である。

図 7.3 は静電吸引方式のインク滴吐出原理を示す概略図である。電極からインクに電荷を注入し、対抗電極との間に形成された電界により帯電したインクをステージ上の記録メディア側に吸引する。インク滴はノズルから吐出された後も対抗電極方向に吸引され続けるため、空気抵抗の影響が大きくなる微小インク滴でも安定して記録メディアに到達させることが出来る。また、比較的大きなノズル(開口)から小さなインク滴を吐出できるため、流体抵抗が高くならずピエゾインクジェットやサーマルインクジェットに比べ、高粘度の液体を吐出することが出来る<sup>1)</sup>。

### 7.1.2 吐出不良検出方法

インク滴の吐出不良、すなわち不吐出、液滴サイズ・吐出速度の変化、吐出方向性曲がりなどを検出することは、これら吐出不良に起因するプリント不良を防止、あるいは吐出不良から早期に回復する上で極めて重要である。ここでは代表的な吐出不良検出方法について説明する。

#### ■ 光学的検出

ノズルから吐出され飛翔するインク滴に(レーザー、あるいはLED から)光を照射し、その反射光の有無や強弱を検出することで、不吐出や吐出方向性曲がりを検出する。

#### ■ チェックパターンプリント

全ノズルからのインク滴によるプリントが識別できるよう、記録メディアのプリント領域外に各ノズルからタイミングをずらしてインク滴を吐出し、チェックパターンをプリントする。スキャナ等でこのチェックパターンを読み取り、不吐出や方向性曲がり(プリント位置ずれ)を検出する。

#### ■ ピエゾ素子による検出

ピエゾインクジェット方式ではピエゾ素子の逆圧電効果を利用し、電圧を印加することでピエゾ素子を変形させ、発生する圧力波によりインク滴を吐出する。インク吐出のために発生させた圧力波は圧力室内で反射されるが、この反射波によるピエゾ素子の変形を圧電効果により電圧信号に変換することが出来る。後述する様々な原因によりインク滴の吐出不良が

起これば、反射波の状態が正常時と異なり、反射波の電圧信号波形から吐出不良を検出することが出来る<sup>2)</sup>。

吐出しないタイミングでピエゾ素子に周波数を Sweep させて正弦波状電圧を入力し、電圧に対する電流の位相差測定(アドミタンス特性)を行うことで、吐出不良の有無だけでなく、吐出不良を起こしている原因まで特定できる場合もある<sup>3)</sup>。

### 7.1.3 メンテナンス動作と実施タイミング

インクジェット吐出プロセスは他のマーキング方式に比較し単純であり、それ故プロセス安定性(繰り返し吐出安定性)が非常に高い。すなわちインク滴吐出状態は、外乱等の影響を比較的受けにくい。しかしながら安定したインク滴吐出を持続するため、あるいは吐出不良からの復帰のために、ヘッドのメンテナンスが必要である。ここでは代表的な 5 つのメンテナンス動作について説明する<sup>1)</sup>。各メンテナンス動作の効用や目的については 7.1.4 以降で説明する。

#### ①ダミージェット(予備吐出)

プリント、あるいはパターン形成のためではなく、ヘッド内のインクを(少量)排出するためにインク吐出を行う。通常はプリント領域からはずれた場所で行うが、一部のプリンタでは記録メディア上に行うこともある。その場合はプリント品質を落とさないように、吐出周波数を低く、ノズル間隔をあけて実施する必要がある。

#### ②ページ(バキューム)

インク供給側からの加圧、またはノズル側からの吸引によりヘッド内のインクを強制的にノズルから排出する。吐出不良からの回復性は高いが、大量のインクを消費するため頻度はあまり高くできない。

#### ③ワイピング

ノズル面をゴム部材等で拭き、ゴミやインクを除去する。

#### ④キャッピング

ノズル面を塞いで(密封して)、ノズルからのインク(揮発性溶媒)の蒸発を防止する。

#### ⑤メニスカス揺動(フラッシング)

インク滴が吐出しない程度の低い電圧波形でピエゾ素子を実連続的に振動させ、圧力室内のインクを攪拌する。上記①

～④のメンテナンス動作はサーマルインクジェット方式にも適用されるが、このメニスカス揺動はピエゾインクジェット方式のみで実施可能である。

メンテナンス動作には含まないが、吐出安定性維持のため図 7.4 に示すようにヘッドに供給したインクを再びヘッド外に戻す、いわゆるインク循環が行われている。インク循環の目的についても 7.1.4 以降で説明する。

上記①～④のメンテナンス動作を組み合わせると、以下 A～D に記載する 4 つのタイミングでメンテナンスが実施される。⑤はプリント中やプリント休止時にも実施される。

#### A: ユーザーメンテナンス

プリンタのユーザー(オペレータ)が、プリントの異常を検出(発見)して実施する。

#### B: スケジュールメンテナンス

プリント開始、あるいは電源 ON から一定の時間経過後、または一定数のインク滴を吐出後に実施する。後述する経時要因で起こる吐出不良を事前に防止するために実施される。

#### C: 電源 ON/OFF メンテナンス

電源の ON 時に定まったシーメンスに基づいてメンテナンス動作を実施した後、プリントを開始する。また、電源を OFF 時、すぐに電源をシャットダウンせず、一定のメンテナンス動作を行った後に電源をシャットダウンする。

#### D: 異常検出時メンテナンス

7.1.2 で説明した各種検出方法により吐出不良が検出された場合に実施する。A のユーザーメンテナンスより早いタイミングでメンテナンスを実施することが出来る。

### 7.1.4 吐出に影響を与える因子と対応策

#### ■ 温度

プリンタが設置されている環境の温度変化、あるいは駆動によるヘッド、プリンタ温度変化により吐出するインクの温度が変化する。インクの温度変化はインク物性(主に粘度)変化を起しインク滴吐出状態を変える。温度変化(上昇)によって起こるインクからの気泡の析出が原因で吐出不良を引きこすこともあるが、これについては後述する。サーマルインクジェットでは発熱体上に発生した蒸気泡内圧力も温度により変化するため、吐出状態(吐出量、吐出速度)が変わる。

温度変化によるインク物性値の変化を受けにくくするため、インクタンクやヘッドを(室温より)高く維持することも行われるが、インクの劣化を早めることがある。インク温度を検出し、温度によって駆動波形を変えて一定のインク吐出量を維持することも行われている。サーマルインクジェットでは、温度によらず吐出インク量を一定に保つヘッドも開発されている。

#### ■ 気泡

気泡によるトラブルは大きく分けて 2 種類ある。1 つは狭いインク供給流路中に滞在した気泡によりインク供給が妨げられる場合である。2 つ目はピエゾインクジェットの圧力室内で気泡が停滞すると、インク滴吐出のためのピエゾからの圧力波が気泡に吸収され減衰し、インク滴が吐出されない場合である。前者はサーマルインクジェットにおいてもピエゾインクジェット

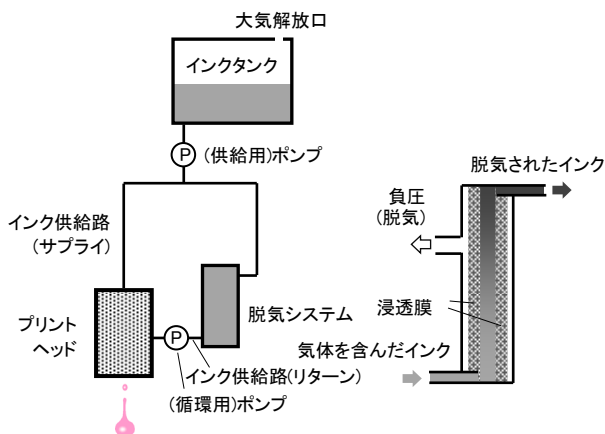


図 7.4. インク循環経路と脱気システムの一例

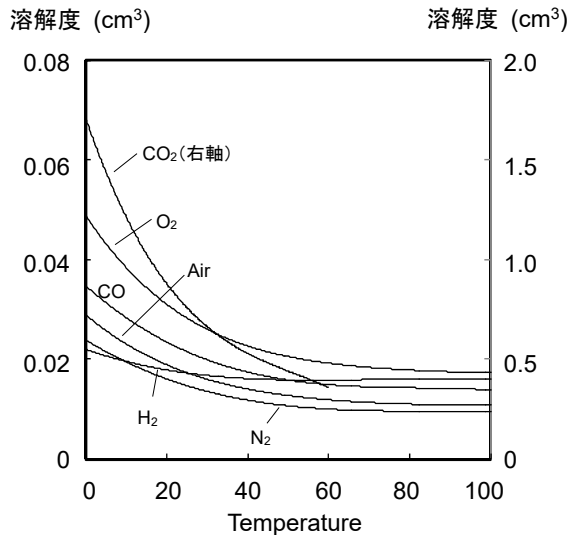


図 7.5. 各種気体の水への溶解度  
 (参考文献 4 記載の数値をグラフ化したもの)

においても起こるトラブルであるが、後者はピエゾインクジェットにおいてのみ起こるトラブルである。

気泡発生原因の1つは、インク中に溶存していた気泡の温度上昇による析出である。図 7.5 は各種気体の水への溶解度を示している<sup>4)</sup>。溶解度とは、1気圧の気体が1cm<sup>3</sup>の水に溶解する時の容積を、0°C、1気圧時の容積に換算した値である。インクの温度上昇によりインクに溶存している気体の運動エネルギーは大きくなり、インク中に溶存できる気体体積(溶解度)は液体の温度上昇とともに減少する。このためインクに溶解できない気体は気泡となってインク中に析出する。発生した気泡はさらにインクの温度上昇や整流拡散により成長する<sup>5)</sup>。

気泡が発生した場合の対処として、気泡を含んだインクを強制的にヘッドから排出するページが有効である。しかし前述したようにページは大量のインクを消費するため、近年、図 7.6 に示すようにインク循環に対応した(帰還流路を備えた)ヘッドを導入した循環システム(図 7.4)が採用され、気泡によるトラブルの未然防止、あるいは気泡除去が行われている。図 7.4 の循環路の途中に脱気システムを設置し、溶存気泡を除去して気泡析出を事前に防止する。また、気泡の浮力を利用して気泡をトラップする機能を持たせることもできる。

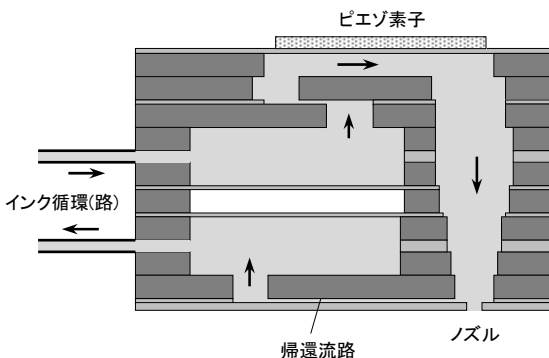


図 7.6 インク帰還流路を備えたインクジェットヘッド<sup>6)</sup>

### 7.1.5 経時的要因

#### ■ノズルからのインク蒸発

プリント休止中や、プリント中でもインク滴を吐出していないノズルから揮発性溶媒(水性インクでは水)が蒸発し、ノズル内のインク粘度が上昇する。ピエゾインクジェット、サーマルインクジェットでは安定吐出できる粘度上限があり、これを超えると吐出が不安定(低吐出速度、小インク滴量)になる。さらに粘度が上昇するとインク滴を吐出できなくなる。このため、粘度上昇による吐出不良が起きる前にダミージェットにより高粘度インクを排出する。ダミージェットで吐出できないまでに増粘、あるいは固化した場合には、ページでインクを排出する。

プリント休止中にピエゾインクジェットのメニスカス揺動を実施すると、圧力室内のインクが攪拌されるため、水が蒸発してもノズル近傍のインク粘度の急激な上昇が抑えられる。このため吐出不良を起こすまでの時間を長くでき、ダミージェットの間隔を長くすることができる。

上述したインク循環において、図 7.4 に示すように帰還流路をノズル近傍に設置したヘッドでは、蒸発による粘度上昇の影響を小さくできる<sup>6)</sup>。

#### ■コゲーション、キャビテーション

サーマルインクジェットでは、長期間の使用により発熱体上へのインクのコゲつき、いわゆるコゲーションや、発熱体上の同一場所での気泡の消滅による発熱体へのキャビテーション(ダメージ)で、インク滴の吐出不良や、不吐出が起きることがある。発生したコゲを発熱体から除去する方法も導入されたが<sup>7)</sup>、コゲが起きにくくするインク組成で対応することが一般的である。キャビテーションを防止することは難しいが、発熱体上の保護層により実用的な使用期間に問題が起きることはほとんどない。

### 7.1.6 ランダムな要因等

#### ■フェースフラッディング(インク溢れ)

ノズルからインク滴が吐出された後、メニスカスはいったんノズル奥まで後退し、再び毛管力によりノズルまで復帰する(リフィル)。この際、復帰時のインクモーメントによりノズル外にメニスカスが盛り上がる(オーバーシュート)。通常はこの盛り上がりによりインクがノズル外に溢れることはないが、ノズル周囲に施された表面処理(撥水处理)膜の異常や、インク背圧の異常が起きると、オーバーシュートでノズル周囲にインクの溢れ出しが起き(フェースフラッディング)、ノズルを塞いだり、吐出インク滴を引っ張ることでインク吐出不良を引き起こす。一次的にはワイピングにより溢れたインクをノズル周囲から取り除くが、オーバーシュート時の溢れが起きる原因を取り除かなければ再発する。

#### ■ゴミ

紙粉などの環境ゴミや、インク成分の一部が固化しノズルを塞ぐ、あるいはノズル周囲に付着するとインク滴の吐出状態を悪化させる。ワイピングによりゴミや環境ゴミを除去する。

#### ■表面処理膜劣化、キズ

ワイピングの繰り返しにより表面処理膜の劣化が起きること

がある。また、ワイピングやメディア端との接触により、表面処理膜にキズが生じることもある。いずれも撥水性が落ちるため、前述したようにフェースフラディングを引き起こしやすくなる。フェースフラディングのような大きなインク溢れを起こさないまでも、メニスカス形状の変化を引き起こし、吐出方向性に影響を与えることもある<sup>8)</sup>。

表面処理の劣化を起こしにくいワイブ部材を選択することが必要であり、ゴムではなく、布によりワイブを行うプリンタも登場している。

#### ■混入気泡

インク中からの気泡析出ではなく、衝撃等によりノズルから気泡が混入する場合がある。あるいはインク供給系の気体透過性の高いチューブや、ジョイントを通して外部から気泡が混入する場合がある。気泡がヘッド内に混入した場合にはパージにより気泡を取り除くか、インク循環システムの気泡除去チャンバーなどで取り除く。

### 7.1.7 その他要因

#### ■気流

インク滴が小さいほど、インク滴飛翔状態への空気抵抗の得響が大きくなる。また、ヘッドとメディアの相対移動で生じる気流もインク滴の飛翔経路に大きな影響を与える。図 7.7 はノズルから 1.5mm 離れた位置においてメディアが一定速度  $V_d$  で移動している時に、初速  $VEL$  で吐出されたインク滴の着弾位置ずれ量を示している<sup>9)</sup>。メディア上での位置ずれ量は、相対移動速度( $V_d$ )やインク滴の初速( $VEL$ )の影響を受ける。もちろんインク滴量が小さいほど、ずれ量は大きくなる。

#### ■インク背圧変動

ヘッド内のインクには一定範囲内の背圧(負圧)がかけられ、メニスカスがノズル内部に引き込まれた状態で保持される。この背圧の上限(背圧大)はリフィル速度の低下(毛管力によるメ

ニスカス復帰力の低下)とのバランス、ノズル奥へのメニスカス引きこみ防止から決まり、下限(背圧小)はノズルからインクが溢れない、吐出後に過剰にオーバーシュートしない条件からある範囲内に制御されている。

背圧の制御方法としてパッシブな方法とアクティブな方法がある。パッシブな方法としてはインクタンクの水頭圧を利用するもの、インクタンクの一部を多孔質体で形成し毛管力を発生させるもの、インクタンク内のインク残量によってバネ変形量に変化し、一定の負圧を発生させるものがある。パッシブな方法としては、圧力センサと開放弁による制御、インク循環による負圧発生、インク水準センサによるサブインクタンクの水圧制御がある。

インクタンクからチューブでインクタンクからヘッドにインクを供給している系では、キャリッジ移動に伴うチューブの変形、移動により背圧が許容範囲を超え、上述した吐出不良を引き起こす場合もある。

#### ■クロストーク

インク吐出状態を変化させるクロストークには、流体クロストークと圧力クロストークがある。流体クロストークは、隣接する複数のノズルから同時にインク滴を吐出した場合、リザーバからある一定領域にインクの流れが集中して大きな圧損が生じ、結果的に局所的に背圧が高まることである。圧力クロストークとは、インクを吐出するための圧力源(ピエゾや発熱体)から発生した圧力が、隣接するノズル(流路)に伝播し、吐出状態を変化させてしまうことである。

両者とも隣接するノズルの駆動の時間間隔をあける、いわゆるインタレース駆動によって、影響を低減させることができる。

### 7.1.8 吐出不良原因の切り分けと駆動波形

吐出不良が起きたときにすばやく正常な吐出に戻すために、吐出不良の原因を正しく判断することが極めて重要である。なぜなら吐出不良、例えば不吐出を引き起こす要因は本節で説明したように複数あるが、原因による対処法が異なるため原因の推定を間違ひ、対処法を間違えたと吐出不良が回復しないばかりか悪化させてしまうケースもある。7.1.2 で紹介した吐出不良検出方法で原因を推定できることもあるが、より正しい判断のためにはインク滴吐出状態やノズル周囲の観察等も必要になってくる。さらにはヘッド駆動条件(温度、駆動電圧・波形、駆動周波数、休止時間、背圧等)や画像データ(画像密度など)を変えたプリントで、どのように吐出不良(プリント欠陥)が変化するか/しないのかを評価することも、原因推定の手助けになる。

本節では記載しないが、特にピエゾインクジェットにおける駆動波形の最適化は、インク滴をきちんと(吐出させたいインク滴量で、サテライトの増加や方向曲がりなしに)吐出するために重要である。使用する(吐出させたい)液体によりヘッドの標準的な駆動波形から変更する必要もある、液体の一般的な物性値(粘度や表面張力)だけでなく、粘弾性や組成によっても吐出状態が異なるため、インク滴の吐出状態の観察や、共振

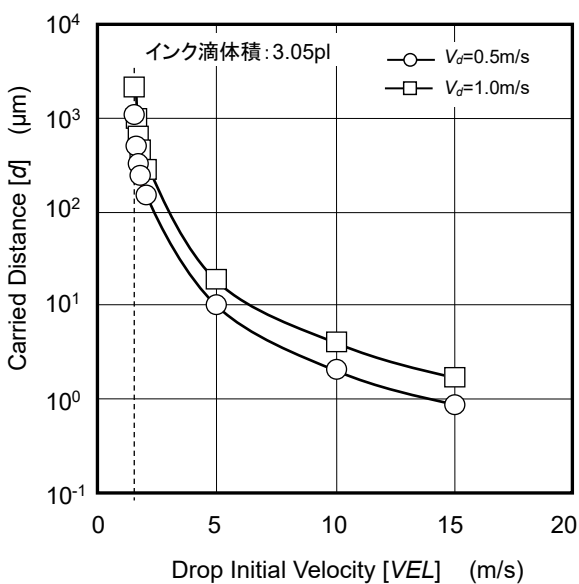


図 7.7 気流によるインク滴の着弾位置ずれ量<sup>9)</sup>

周波数の測定を行うなどして駆動波形を変更する.

#### 参考文献

- 1 藤井雅彦監修 日本画像学会編, インクジェット, 東京電機大学出版局 ((2008)
- 2 佐藤強, 「液滴塗布ヘッド内の気泡検出に関する研究」, 精密工学会誌 Vol.77, No.9 (2011)
- 3 和田友宏, 「マハラノビスの距離」を用いた PIJ ヘッドの吐出評価方法」, 日本画像学会 ICJ2007 (2007)
- 4 国立天文台編, 理科年表 2006(机上版), 丸善出版, 499 (2006)
- 5 気泡・ボイドの発生メカニズムと未然防止・除去技術, 技術情報協会 (2014)
- 6 Susumu Hirakata, 「Improvement of jetting reliability against ink viscosity increase by installation of an ink circulation path」, 日本画像学会 PPIC08 (2008)
- 7 大西一典, 「TIJ ヒーター上インク残渣の除去方法」, 電子情報通信学会論文誌 C-II VOL.J82-C-II NO.5 pp.273-280 (1999)
- 8 長谷部恵, ノズルプレートの撥水膜劣化状態による吐出方向性発現メカニズム, 日本画像学会 ICJ2017 (2017)
- 9 藤井雅彦, インクジェットプリントヘッドから吐出された微小インク滴の挙動解析, 日本画像学会誌 第48巻 第4号 p.244-254 (2009)