

インクジェットによる微小液滴発生原理と 微量混合への応用

前田 憲宏

1. はじめに

カラープリンタに使われているインクジェット技術は、パソコン用の出力装置としては40年以上の歴史を有し、完成度の高い技術と言える。しかし、カラーインクの代わりに様々な材料を液体化し、その液材料を安定的に吐出させ精度良くパターンニングし、乾燥後に目的とする形状や機能膜を得るとなると話は別である。これら一連のプロセスではインク技術、インクジェットヘッド技術、装置制御技術、パターンニングデータ生成技術、濡れ・乾燥制御技術などが必要とされ、全体が最適化されて初めて、目的とするアウトプットを得ることができる。

インクジェット技術はデジタル印刷分野において、益々その存在感を増しているが、近年では印刷技術としてだけでなく、微小液滴によるデジタル塗布技術としてエレクトロニクス、バイオ分野などの幅広い分野で応用され、研究開発が進んでいる。また、3Dプリンタ分野への応用にも注目が集まっており、インクジェット技術による新しいものづくりの時代が到来したと言える。本稿では、インクジェット技術とその応用について紹介する。

2. インクジェット技術について

2.1 インクジェットの種類

インクジェット技術は、**図1**のように連続的に液滴を形成するコンティニュアス型と必要な時にのみ液滴を形成できるオンデマンド型に大別される。更に、現在主流のオンデマンド型は液滴形成の方法により複数の方式に分かれて

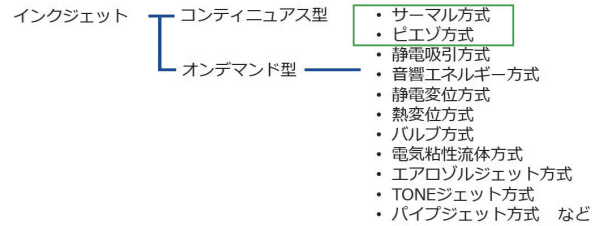


図1 インクジェット技術の分類一覧

おり、その中でもプリンタで活用されているサーマル方式とピエゾ方式の2つがメインとなっている。サーマル方式は高温の膜沸騰現象を利用してバブルを発生させ、その時発生する力を利用して液滴の吐出をおこなう。それに対し、ピエゾ方式は圧電材料であるピエゾ素子を用いて機械的な変位を発生させ、それにより発生した圧力波を用いて吐出をおこなう。

本稿では、オンデマンド型の中で最も普及しているピエゾ方式について説明する。

2.2 ピエゾ方式の液滴発生原理

ピエゾ方式のインクジェットヘッドでは、圧電体の分極の方向、圧電体に印加する電界の方向、電界を印加した結果生じる変形の方向により、様々な構造を持ったヘッドが考案されている。これらのヘッドに共通することは、PZT(チタン酸ジルコン酸鉛 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$)のような圧電材料の逆圧電効果を利用して電気エネルギーを機械的な微小変位に変換し、この機械的な微小変位を利用してインク圧力室に圧力波を発生させ、この圧力波の伝搬によりオリフィス(ノズル)と呼ばれる直径数十 μm の微細孔より液滴を吐出させることである。ここでは、ヘッド構造の中でも最も基本的な構造を持つ、撓みモード(カイザー型、バンド型)のヘッド構造を例に原理を説明する。**図2**に撓みモード型ヘッドの代表的な構造を示す。

図2に示すように、容器からヘッドに流入した液は共通インク室へと流れ込み、ここから圧力を発生させるための各圧力室へと分岐する。各圧力室上部には振動板を介してピエゾ素子が貼られており、このピエゾ素子に電圧を印加することにより、**図中①**の方向にピエゾ素子が変位し、こ

Principle of Micro-Droplet Generation by Inkjet and Its Application to Micro-Mixing

Norihiro MAETA

2009年 国立大学法人横浜国立大学工学部卒業

現在 (株)マイクロジェット技術営業グループ

連絡先: 〒399-0732 長野県塩尻市大門五番町79-2

E-mail mj-sales@microjet.co.jp

2023年12月27日受理

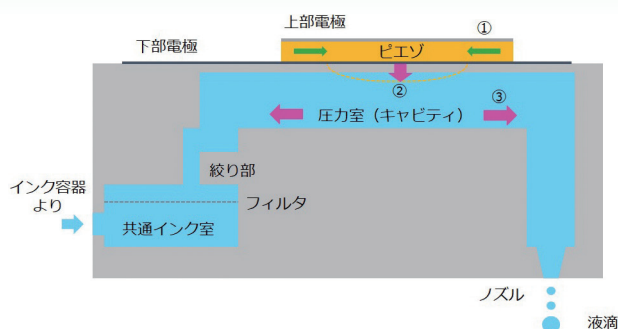


図2 ピエゾ方式ヘッド概略図

の変位により撓み②が発生する。その撓みにより圧力室の体積を減少させることで圧力波③を発生させ、微小な開口穴(ノズル)より液滴を吐出する。

また、ノズル部にはメニスカスと呼ばれる液と大気との界面が存在する。ヘッドの非駆動時には圧力室内部の圧力が僅かに負圧に保たれているため、メニスカスは図3のように内側に凹の形状となる。負圧に保たれている理由は、メニスカスに正圧がかかった状態では、メニスカスはノズル面より外側に凸形状となり、この状態ではメニスカスが壊れやすいためである。図3にキャピラリー型の構造を持つインクジェットヘッドにおけるピエゾ素子の形状変化と液滴の吐出状態を示す。

図3の駆動方式は引き打ち法と呼ばれ、①の待機状態においてはピエゾ素子に電圧が印加されている。このため振動板上に貼られたピエゾ素子は圧電効果により収縮し、バimetalの原理で圧力室内部側に撓んだ状態となっている。液を吐出するタイミングの直前に、ピエゾ素子に印加されている電圧の印加を停止し、電荷を放電させるとピエ

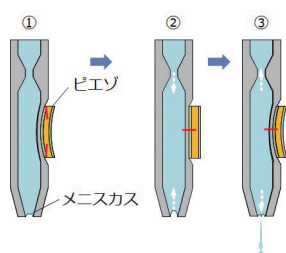


図3 ピエゾの動きと吐出挙動の関係

ゾ素子は本来の撓みの無い状態②へと戻る。この時、圧力室内部の体積が増加するため、大きな負圧が発生し、ノズル部のメニスカスは内部へと引き込まれる。この際にヘッド内部で圧力振動が発生し、発生した負圧が正圧に反転する。この正圧に反転したタイミングに合わせてピエゾ素子に再度電圧を重畳し、再び③のように変形させることで、より大きな正圧を発生させることができる。この圧力波によりノズルより液滴を高速で吐出させることができる。

図4にピエゾ式インクジェットによって吐出された液滴の吐出過程画像を示す。ピエゾ素子により発生した圧力波によって、ノズル先端に存在する液が柱状に吐出され、飛行中に複数の液滴に分離する。先頭を飛行する液滴をメイン液滴、後方を飛行する液滴をサテライト液滴と呼ぶ。この複数の分離した液滴が対象となる基材に順次着滴し、1個の液滴の塊を形成する。

この1回の駆動波形によって吐出された複数の液滴の総量を1滴の吐出量と定義した場合、現在のプリンタではこの吐出量が最も少量のもので1 pL(1滴の球として直径を計算すると約12 μmとなる)を実現している。なお、ピエゾ式によるインクジェットヘッドにおいて、吐出可能な液の粘性はインクジェットヘッドの種類によって異なるが、一般的には粘性20 mPa・s以下が吐出可能な液粘性範囲である。これ以上の粘性の液を吐出させる場合は、ヘッド内部に液の加熱用のヒーターを設け加温し、液粘性を低下させ吐出させる。

2.3 インクジェット液滴の挙動

インクジェットは、1~数百pLの液滴を微小なノズルから飛行速度約10 m/sで吐出する。この技術により生成された液滴は直径12~100 μm程度である。一般的に直径100 μm以下のサイズの微小液滴は、質量に比べ表面エネルギーの影響が非常に大きいため、プリンタのように対象物に着滴させる場合、着滴する場所の表面状態により挙動が変化する。例えば、局所的な濡れ性の違いにより、同じ表面処理をした表面でも接触角がばらつくことがある。更に、液滴量が小さいため、濡れ広がりや浸透、乾燥などの現象の速度が非常に速く、現象は数μs~msオーダーで極

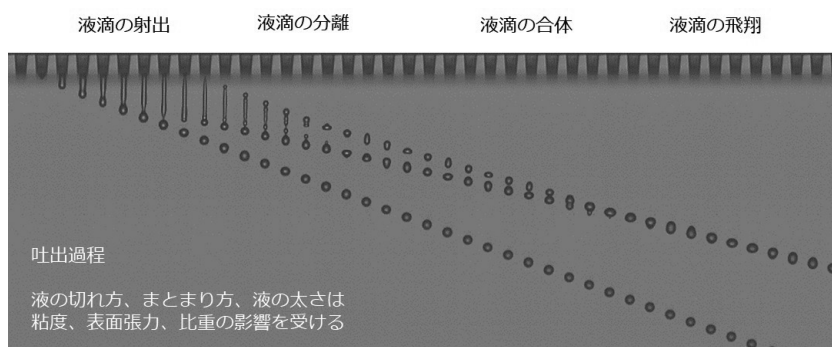


図4 吐出挙動

めて短時間で完結するため、現象を捉えるには高速度カメラが必須となる。

プリンタの場合は紙などの液吸収メディアを使用するが、電子デバイスを印刷により形成する多くの場合、表面はシリコンやフィルムなどの非吸収面となる。そのため、液の着滴の順番や乾燥または硬化を的確に制御する必要があり、着滴した液滴の濡れ広がりや、乾燥過程の観察が益々重要になっている。具体的なケースとしては、液晶のカラーフィルタやバイオ分野におけるバイオチップ基板等の凹んだ微小バンク内への液滴着滴時の濡れ広がり、乾燥過程の観察、微小部位の接触角測定や紙・フィルムへの浸透過程の観察などである。当社ではこのような現象を捉える機器を実現し、着滴現象の研究をおこなっている。

3. インクジェット液滴による混合評価

インクジェットヘッドを複数使用することで、2種類以上の液滴の混合などを制御することも可能である。例えば、**図5**のようにインクジェットヘッドを2個使用し、異なる2種類の液を吐出させることで、ピコリットルオーダーでの液滴混合が可能となり、更にインクジェットヘッドの駆動条件を調整することで液滴量や液滴速度を制御し、タイミングなども併せて調整することにより、微小液滴の混合を実現できる。これに高速度カメラを加えることにより、これまで観察が困難であった微小液滴の反応や混合過程を可視化し測定できるので、印刷用インクやメディアの

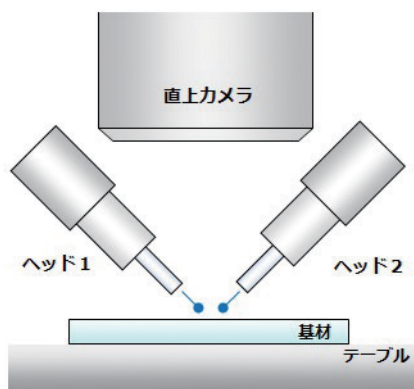


図5 インクジェット2液混合系

開発及び2種反応液の反応過程の解析にインクジェットを活用することが可能である。

例えば、カラープリンタにおいては複数色のインクを混ぜ合わせることでフルカラーの画像印刷を実現しているが、その混色のプロセス解析は高画質の画像を得るために重要となる。**図6**は普通紙の上でマゼンタとシアンの2色のインクを着滴位置とタイミングを制御しながら着滴させた画像である。

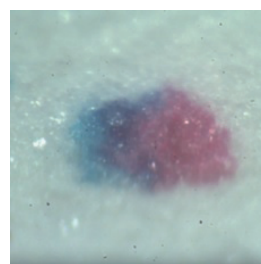


図6 紙上におけるシアンインクとマゼンタインクの混合

図7は2つのヘッドから液滴を同期させて吐出し、空中で合体させた場合の画像である。再現性の高いインクジェットヘッドによる吐出を用いると、この状態を連続的に起こすことが可能である。微量な液での2液の化学反応は、大容量でおこなわれる反応とは異なる現象も予想され、今後インクジェット技術を応用した研究がおこなわれていくであろう。

2滴混合に限らず、1液での着滴直後の観察も重要である。しかし、これを実現しようとする場合、インクジェットヘッドの真上にカメラを置いて撮影する必要があるが、この状態ではヘッドが視野に入るため、真上からの観察は不可能と考えられていた。そこで、当社では**図8**に示すような構成の中で独自の観察系を構築することで、カメラで真上から観察しながら、指定した場所に着滴させ、真上と真横の2方向から同時に観察及び撮影できる観察系を実現した。**図9**はガラス上に水性のマゼンタインクを着滴させた直後の画像であり、コーヒーステイン現象の発生過程が観察できる。

このように、インクジェットヘッドから吐出直後の着滴を真上からも観察可能になったことで、印刷結果という二次情報ではなく、着滴画像データという一次情報を得るこ



図7 インクジェット2液混合吐出の連続画像

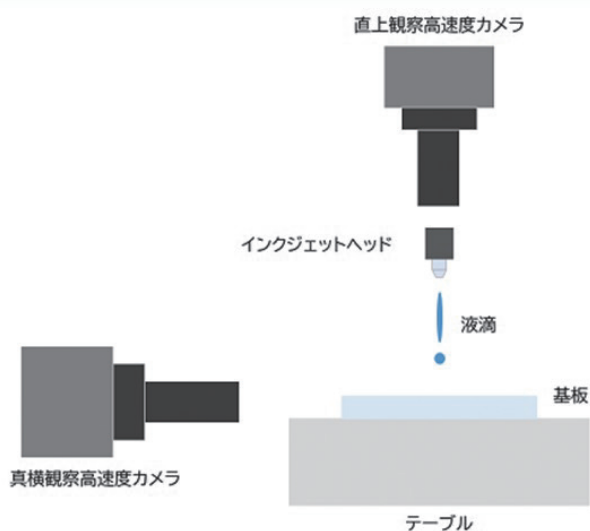


図8 真上・真横2方向からの観察系

とができ、これまで解析が難しかった濡れ・浸透・乾燥のプロセスが定量的に解析可能となった。

4. おわりに

ここまで見てきたように、インクジェット技術はプリンタの技術を超えて、微量液滴の生成と混合を同時におこなえるポテンシャルを持った技術である。一般的なプリンタに使用されているインクジェットヘッドではなく当社が開発した研究開発専用のインクジェットヘッドでは、プリンタ用のヘッドに比べて扱える液の制約が少なく、多様な機能性液材が扱える。これらと今回紹介した微小液滴の混合または観察が可能なシステムにより、化学工学分野におけるマイクロリアクターの1つの手法として、インクジェットによる微小液滴の混合を活用できる可能性があり、今後の研究が期待される。

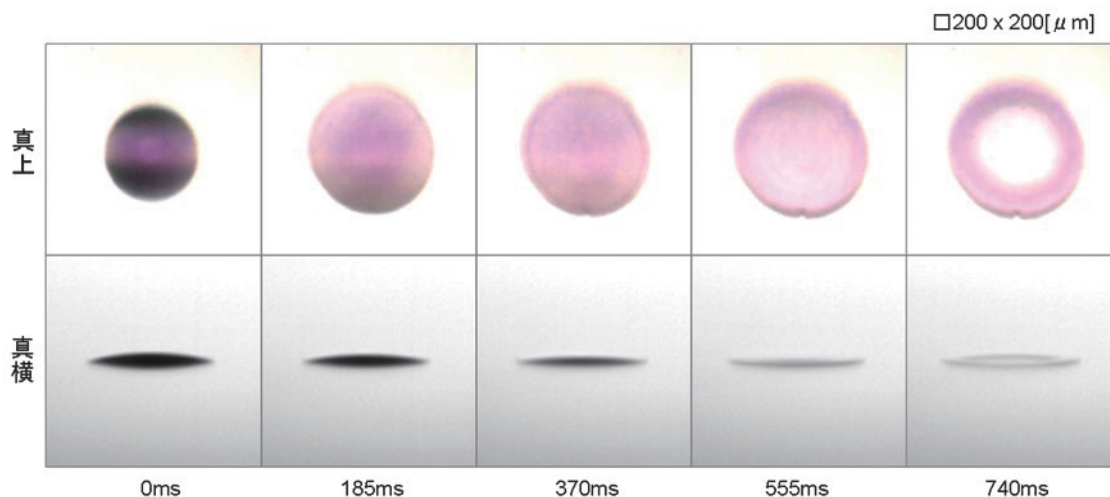


図9 マゼンタインクの乾燥過程(コーヒーステイン現象)