

インクジェットの高性能化と先端応用技術

田沼, 千秋

(出版者 / Publisher)

法政大学イオンビーム工学研究所

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学イオンビーム工学研究所報告 / Report of Research Center of Ion Beam Technology, Hosei University

(巻 / Volume)

35

(開始ページ / Start Page)

3

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2016-02-15

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030313>

1. 解 説

インクジェットの高性能化と先端応用技術

田沼 千秋

1. はじめに

インクジェット印刷システムは、インクジェットヘッドのノズルから吐出したインク液滴が、記録媒体に着弾して画像などを形成する非常に単純な機構のため、装置の主要部を小さくすることができる。また、無版印刷のためバリエーションデータに対応可能なオンデマンド印刷方式として、請求書など個々に異なるデータのフォーム印刷などに応用されている。インクジェット印刷に用いられるインクは、水、油、有機溶剤、モノマーなどの媒体に、染料、顔料などの色材粒子を分散させた比較的低粘度の液体を用いる。さらに、色材に替えて金属ナノ粒子などの機能性材料をインク化（機能性インク）することで、革新的なモノづくりの技術への応用展開が期待されている。機能性インクは、回路基板の導体形成、フラットパネルディスプレイのカラーフィルタの形成、有機トランジスタの形成など電子部品、電子機器の製造方法として様々な取組が行われている。3Dプリンタには様々な方式があるがインクジェット技術を用いる方式は、デザインの確認のためのモデル作成、医療（再生医療）分野における術前検討のためのモデルの作成や皮膚、骨、臓器などの再生技術として応用が進められている¹⁻⁵⁾。

本稿では、インクジェット印刷技術を俯瞰し、用途の拡大に重要なインクジェットヘッド技術を中心に概説する。

2. インクジェット技術の基礎

図1に、インクジェット方式の分類を示す。インクジェット印刷は、インク液体の小滴を生成し、基板上の正確な位置にそれを着弾させて画像を印刷形成する方式である。インク液滴の生成のための多くの方法が考案されている。インクジェット印刷のためのインク液滴の生成吐出方法は、連続方式とドロ

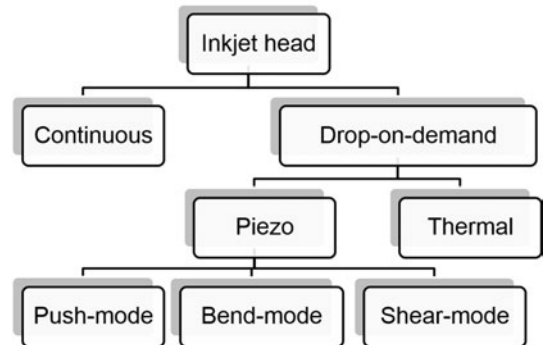


図1 Classification of inkjet technologies

ップ・オン・デマンド方式がある。

連続方式インクジェット（CIJ）は、実用化されたインクジェットの技術の一つであり、捺印の代替技術として発展してきた。

圧力ポンプ、超音波振動子、荷電電極、偏向電極、ガター等から構成される。

圧力ポンプによってインクジェットヘッドのノズルから押し出されたインク流は、超音波振動によって微小なインク液滴となる。インク液滴は荷電電極によって電荷が与えられ、印字に応じて偏向電極で軌道を曲げられて印刷媒体に着弾する。偏向電極で曲げられなかったインク液滴はガターと呼ばれる回収口に取り込まれ、インクタンクに戻り再利用される。印刷していないときもインク液滴は常に連続的に吐出されている。

ポンプによる高い圧力でインクを押し出すので高粘度のインクが使用でき、また連続的にインクを押し出すことから速乾性のインクも使用できるなどインク種を選択幅が広い。インク液滴の吐出速度が速い（約30 m/s）ため、ノズルと記録媒体の距離を広くとることができる。さらに超音波振動で作られるインク液滴は毎秒100万滴以上で生成することが

可能である。高速であるが構造が大がかりで小型化が難しく、マルチヘッド化も困難であるなどの欠点がある。工業用のマーカー（生産ラインで部品に製造番号などを記入する）として利用されている。

ドロップオンデマンド型 (DOD) は、サーマル型と圧電型に分類される。サーマル型では、インクジェットヘッドは、小さなヒーターと圧力室から構成される。各圧力室のヒーターに、パルス電流を流して、圧力室内のインクを急速に加熱して気泡を形成し、大きな圧力上昇を引き起こすことでインク液滴を飛翔させて記録媒体に着弾させる。

圧電型は、圧力室と圧電素子などから構成される。圧電素子にパルス電圧を印加すると、圧電素子に変形して、圧力室内のインクに圧力が加えられ、ノズルからインク液滴が吐出する。サーマル方式と比較して、コゲーション対策が不要であるため、インクの制約が少ないことが特徴である。しかし、圧電素子を用いるために、インクジェットヘッドの製造コストが高くなる。

図2に、圧電型インクジェットヘッドの代表的な機構を示す。プッシュモード型は、ノズルの後ろに配置された圧力室の容積をダイヤフラムの変形によって変化させる。低電圧駆動のために、積層型圧電アクチュエータが用いられることが多い。バンドモード型は、圧力室の一部に圧電素子板あるいは膜を接合させた構造（ユニモルフ構造）である。圧電素子板の両面に形成された電極に電圧を印加してたわみを発生させ、インク液滴を吐出する。シアモードでは、インク圧力室は、それぞれ反対の分極方向に互いに結合された2つの圧電セラミック板によって形成された圧電素子壁から構成される。駆動電

圧パルスは、インク圧力室の両側の圧電素子壁に印加される。このため、シアモード変形が圧電素子壁に発生し、インク圧力室が変形してインク液滴がノズルから吐出する。

インクジェットプリンタの応用拡大には、生産性と高画質化が重要な課題である。インクジェットヘッドの生産性は以下のように定義される。

$$P = \frac{1}{T} V_0 n$$

生産性は、インク液滴の生成時間の逆数、インク滴の大きさおよび単位当たりのノズル数の積に依存する。ここで、 P は、インクジェットヘッドの生産性、 V_0 は、インク滴の体積は、 T は、インク滴の生成の時間であり、 n は単位当たりのノズル数である。一方、画質は、インク液滴の大きさに依存する。従って、画質を向上させるために、より小さいインク液滴が必要となる。次のようにインク液滴の量が定義される。

$$V_0 \propto \pi r^2 v / 2\omega$$

ここで、 V_0 は、インク液滴の体積、 r は、ノズルの直径、 v はインク滴の吐出速度であり、 ω は、インク室内の圧力波の共振周波数である。

小さいインク液滴を生成するためには、ノズルの小径化とインク室内のより高い共振周波数の圧力波が必要である。インク圧力室内に発生する圧力波の共振周波数を高くするためにインク室の構造設計が重要となる。最新のインクジェットヘッドは、シミュレーションにより、最適なインク室の構造を決定する。

図3は、インクジェットヘッドのノズルから吐出

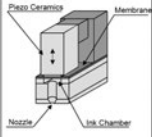
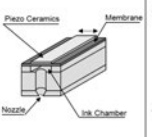
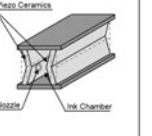
	Push-mode	Bend-mode	Shear-mode
Structure			
Feature	<ul style="list-style-type: none"> •Large generative force •Complicated in structure •Large consumption electricity 	<ul style="list-style-type: none"> •Simple structure •Small generative force •Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> •Good drive efficiency •High-density nozzle •Division drive is necessary

図2 Configurations of drop-on-demand piezo inkjet print-head

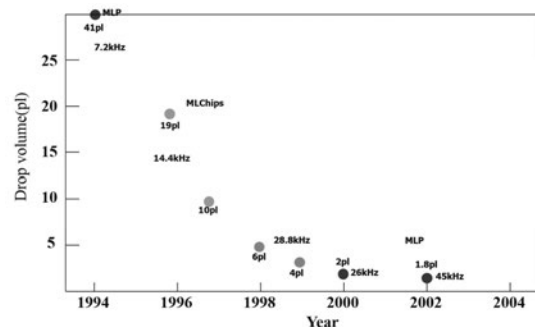


図3 Trend of droplet size ejected from nozzle in inkjet head

される液滴サイズの微細化の推移を示す。1994年には、革新的な高精度カラーインクジェットプリンタが市場に登場した。この時インク液滴の体積は41 pLであった。さらに、画像品質の向上のために、インク液滴量の微細化が促進された。2002年には、インク液滴の体積は1 pLに微細化し、印刷画像は、銀塩写真と同等のレベルまでに品質が向上した。

人間の目は、色の濃度として視覚限界以下の点を認識する特性を有している。

保坂の研究⁶⁾によると、記録媒体から離れた300 mm明視野では、人間の目は色の濃度として、0.5 mmの間隔で記録用紙上にスポット直径0.023 mmのドットを認識する。これは、視覚限界と呼ばれる。1 pLの液体の直径は約0.013 mmである。ノズルからのドットが記録用紙に着弾した時のドットの直径は、およそ二倍の約0.026 mmになる。画像形成が1 pLのインク液滴で行われる場合、銀塩写真とほぼ同等の画質が得られることになる。

図4に、粘度の異なる2種類のインクがインクジェットヘッドのノズルから吐出され、記録媒体に到達するまでの飛程を示す。図4(a)は、インクの粘度が10 mPa・sの場合を示し、主液滴は、最終的にノズルから分離し長い尾を引いていく。ノズルに近いインク液滴の尾は、それぞれ分離する。同時に主液滴に近い長い尾は、先頭の主液滴に向かって引っ張

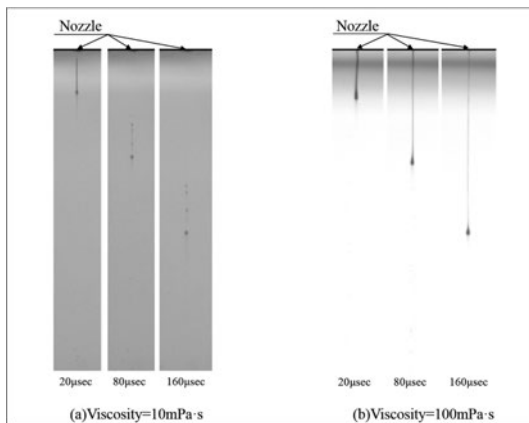


図4 Images of the jet of two different kinds of ink viscosity ejected from the nozzle of an inkjet head traveled to the bottom. (a) The case where the viscosity of ink is 10 mPa·s. (b) The case where the viscosity of ink is 100 mPa·s.

られる。

一方、図4(b)は、インクの粘度が100 mPa・sの場合を示す。主液滴の長い尾は、ノズルから分離されない。インクの粘度が上昇した場合、インク液滴は、インクジェットヘッドのノズルから切り離し、かつ画像を形成することが困難となる。高粘度のインクを使用するためには、インクジェットヘッドのインク材料の改善と制御技術が課題となる。

3. インクジェット印刷技術の産業応用

工業用インクジェット印刷とは、印刷または堆積プロセスのためのインクジェット技術を意味する。これは、インクジェットプリンタで文書を印刷することと全く同じであるが、印刷のスケールが大きく異なる。全てのインクジェット技術は、基板上にインクジェットヘッドからインク液滴をデジタル制御して記述することができるが、多くの工業製造分野での利点として、非接触かつ高速パターンが可能であることが利点とされている⁷⁾。

図5は、インクジェット印刷技術の適用分野を示す。

インクジェット印刷が適用される分野は、衣類、看板、医療、印刷エレクトロニクス、商業印刷、電子回路、フレキシブルデバイス、再生医療のプロトタイプ、可変データの印刷、立体造形物の試作などである⁸⁻¹²⁾。

本稿では、インクジェット方式を中心に、立体造形(3Dプリンタ)について説明する。

立体物を作成する場合、多くの方法は、素材の一部を削り取って目的の形状を作り出す方法と、金型などに溶融した材料を流し込んで、冷却し目的の構造物を得る方法がある。3Dプリンタは、デジタルデータに基づき、素材を加えながら立体構造物を作

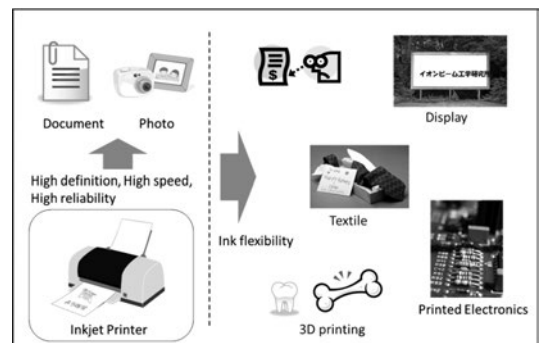


図5 Applicable field of inkjet printing technology.

成する方法である。つまり、従来の2次元 (2D) プリントは、二次元 (xおよびy軸) に紙にデジタル情報を印刷するが、3Dプリントは、3次元 (x、y、およびz軸) に印刷する機能が付加されている。3Dプリントは、マイクロシートを積層して、立体物を形成する方法が主流である。主な形成方法は、「熱溶解積層システム」、「インクジェット方式」、および「液体光重合系」である。インクジェット方式は、インクジェットヘッドからの微粒子の樹脂を噴射し、薄層形成して積層する。紫外線をモノマーに照射することにより、薄層を積層して立体物を形成する方法もある。現在、3Dプリントで使用する材料は、プラスチック、ポリマー、金属、および複合材料などである。3Dプリントは、医療分野への応用が期待されており、既に幾つかの応用が実用化されている。骨の損傷や、変形などの疾病の治療に用いられる人工骨の研究では、すでに、実用化の段階に来ているものもある。人工骨は、リン酸三カルシウム (α -TPC) を硬化して作製する。移植のための人工骨の開発は、自分の骨に変換されることを最終目標としている¹³⁾。実験段階ではあるが、人工骨の構造を工夫するなど方法で、その一部を自分の組織として再生、成長させる技術の開発が進んでいる。

また、産業用の3Dプリントは、外科医療における手術の成功確率を高めるための事前準備のツールとして重要になっている。患者の臓器モデルを作成し、血管の位置、患部の位置などを把握し、止血方法等手術の手順を事前検討する。

近年、直接接着および移植が可能である生体組織を作るために、胚性幹細胞を再生し、プリントでヒト生体組織の作成方法の研究が盛んにおこなわれている。最新の3Dプリントは、これらの研究を支援するために、細胞のハンドリングに適した制御が可能となっている。

中村は、インクジェットプリントの技術を用いた「バイオ印刷」¹⁴⁻¹⁶⁾ と呼ばれる新しい技術を開発して内部臓器の製造を試みている。最終目標は、患者自身の細胞を用いて心臓を作ることである。患者自身の細胞を移植することは、拒絶反応が起こりにくい移植が可能となり、目標としている「健康な心臓」を患者に提供するシステムが構築可能となる。これまでの研究成果として生きた細胞によって2種類チューブ (血管) の作成に成功している。

4. Summary

インクジェット印刷技術と産業応用の現状を概説した。本稿では、インクジェットヘッドの生産性に着目し、インク滴の微細化、高粘度インクのノズルからの液滴の吐出との関係を説明した。また、3Dプリントについて、インクジェット技術の産業応用の現状と合わせて説明した。インクジェット印刷技術の応用拡大には、多様なインクへの対応が必要であり、特に高粘度インクへの対応、生産性の向上など、インクジェットヘッドの開発が必要である。

References

- 1) S. Sakai, *Nihon Gazou Gakkaishi* **41**, 167 (2002) [in Japanese].
- 2) M. Nakamura, Y. Nishiyama, C. Henmi, S. Iwanaga, H. Nakagawa, K. Yamaguchi, K. Akita, S. Mochizuki and K. Takiura, *J. Imaging Sci. Technol.* **52**, 060201 (2008).
- 3) A. Janasak, C. Koopipat, H. Noguchi and S. Kiatkamjornwong, *J. Imaging Sci. Technol.* **51**, 127 (2007).
- 4) G. Beurer and J. Kretschmer, *Proc. 13th IS&T's NIP*, 621 (1997).
- 5) H. J. Manning and R. A. Harvey, *Proc. 15th IS&T's NIP*, 35 (1999).
- 6) Y. Hosaka, *Nihon Gazou Gakkaishi* **47**, 10 (2008) [in Japanese].
- 7) S. Glatzel, Z. Schnepf and C. Giordano, *Angew. Chem. Int. Ed.* **52**, 8, 2355, DOI: 10.1002/anie.201207693 (2013).
- 8) L. S. Dimas, G. H. Bratzel, I. Eylon and M. J. Buehler, *Adv. Funct. Mater.* **23**, 36, 4629, DOI: 10.1002/adfm.201300215 (2013).
- 9) M. S. Mannoor, Z. Jiang, T. James, Y. L. Kong, K. A. Malatesta, Q. O. Soboyejo, N. Verma, D. H. Gracias, and M. C. Mcalpine, *Nano. Lett.* **13**, 2634, DOI: 10.1021/nl4007744 (2013).
- 10) H. Muroi, R. Hidema, J. Gong, and H. Furukawa, *J. Solid Mech. Mater. Eng.* **7**, 163, DOI: 10.1299/jmmp.7.163 (2013).
- 11) C. Ladd, J-H. So, J. Muth, and M. D. Dickey, *Adv. Mater.* **25**, 36, 5081, DOI: 10.1002/adma.201301400 (2013).
- 12) G. Villar, A. D. Graham, and H. Bayley, *Science*

- 340**, 48, DOI: 10.1126/science.1229495 (2013).
- 13) H. Saijo, Y. Kanno, K. Igawa, Y. Mori, K. Kondo, K. Shimizu, S. Suzuki, D. Chikazu, M. Iino, N. Sasaki, M. Anzai, U. Chung and T. Takato, J. Artif Organs **12**, 200 (2009).
 - 14) M. Nakamura, S. Iwanaga, C. Henmi, K. Arai, and Y. Nishiyama, Biofabrication **2**, 014110-6, DOI:10.1088/1758-5082/2/1/014110(2010).
 - 15) F. Guillemot, V. Mironov and M. Nakamura, Biofabrication **2**, 010201-7, DOI:10.1088/1758-5082/2/1/010201 (2010).
 - 16) K. Iwami, T. Noda, K. Ishida, K. Morishima, M. Nakamura and N. Umeda, Biofabrication **2**, 014108-5, DOI:10.1088/1758-5082/2/1/014108 (2010).