

解 説

日本画像学会と関連技術の歩み
—インクジェット技術の進展と今後の展望—

藤井 雅彦*

(2008.6.5 受理)

Footstep and Future Prospect of Ink Jet Technology

Masahiko FUJII*

History of ink jet technology is recollected by summarizing researches leading invention of ink jet, research and development activities on ink jet and past products. Prospects on performance advances and application possibilities of ink jet are also described based on recent technology trends. Expected functions or performances when ink jet was born in the middle part of the 20-century seem to be mostly satisfied now. Low cost and small size color ink jet printer has become the exclusive province of personal market.

Many efforts on ink jet, which improve performances, have been attempted and new function as marking technology has been exploited at the present day. Ink jet application to fabrication process (Digital Fabrication), which never imagined at the invention of ink jet, has been also developed. These novel activities will face tough problems and need revolutionary approaches. A great innovation by ink jet will be expected when success is achieved.

Keywords: Ink Jet, History, Contemporaneity of Invention, Technology Trend, Innovation, Technological Prospect, Improvement of Performances, Digital Fabrication

インクジェットの誕生につながる研究をはじめとし、インクジェットの研究、開発活動、および製品動向をまとめることでインクジェットの歴史を振り返った。また最近の技術動向から、今後のインクジェットの性能向上や応用などの進展について展望を述べた。現在のインクジェット技術は20世紀中ごろの発明当初に期待されていた性能、役割をほぼ満たしていると思われ、小型カラープリンタとしてその特徴は十二分に開花した。

現在、インクジェットはその性能を一段と向上させ、マーキング技術としての新しい役割を担おうとしているだけでなく、デジタルファブリケーションなど、全く異なる用途への展開も図られようとしている。そこには高いハードルとこれまでにないアプローチの必要性が予想されるが、その先にはインクジェットが引き起こす大きなイノベーションが期待できる。

キーワード: インクジェット、歴史、発明の同時性、技術トレンド、イノベーション、技術展望、高性能化、デジタルファブリケーション

1. はじめに

日本画像学会の前身である電子写真学会が発足した1958年から10年後、インクジェット方式のプリンタが登場し、その後日本画像学会の歩みとともに発展を遂げてきた。インクジェットの記録プロセスは単純であるが故、その可能性、発展性は限りなく広い。インクジェットの研究者・技術者は早くからそれに気づき、今日まで様々な方向へとその可能性を伸ばし続け

てきた。その最も結実した例が小型、高画質という特徴を活かしたパーソナル市場を中心に展開されているカラープリンタであり、これによって個人で気軽にプリント文化を享受することができるようになった。私がインクジェットに携わり始めたのは20年以上も前であるが、写真や高精細なドキュメントを個人で気軽にプリントできることは、当時ではとても考えられなかった。

そして今また、当時全く考えも及ばなかった方向へもインクジェットは進もうとしている。例えばインクジェットによるものづくり「デジタルファブリケーション」である。20年前の私が今日のインクジェットプリンタ市場の繁栄を想像できなかったのと同様に、将来、生産技術に大革新が起きるのかもしれない

* 富士ゼロックス株式会社
〒243-0494 神奈川県海老名市本郷 2274
* Fuji Xerox Co., Ltd.,
2274 Hongo, Ebina, Kanagawa, 243-0494, Japan

ない。

このように先人達の努力によりインクジェットが広く普及し、さらなる進化を遂げようとしている現在、そして日本画像学会創立 50 周年を迎えるこの機会に、歴史を含め技術の変遷を中心としたこれまでのインクジェットの歩みと、今後のインクジェットの展望、行く末について私見を交えまとめてみたい。

2. インクジェットの歴史

本稿の執筆依頼には 50 年間における技術の変遷についてまとめてほしいとあったが、この機会を借りてインクジェットの歴史全体を振り返ってみたい。これまで様々な文献や書籍などでインクジェットの歴史についての記述が見られ、また私も機会があるごとに紹介してきた。今回 50 周年記念として発刊される書籍¹⁾の執筆にあたり、古い資料（中には 1700, 1800 年代の文献や特許も含まれる）を取り寄せ、改めて自分なりにインクジェットの歴史を整理してみた。

歴史の振り返りの中でインクジェットの発明についても取り上げるが、「もの」の発明を特定するには、最初に「もの」の定義が必要である。話は逸れるが「自動車の発明をしたのは誰か？」という問いに答えるには、まず「自動車とは何か？」という定義が必要である。普通に答えればドイツのベンツ（Karl Benz）、あるいはダイムラー（Gottlieb Daimler）になるだろう。しかし「動物以外の動力で地上を移動し、人によってその動きが制御できる乗り物」と定義すれば、ガスエンジン搭載の乗り物を発明したフランスのルノワール（Jean-Joseph Étienne Lenoir）や、さらに 1700 年代までさかのぼって蒸気エンジンによるキュニョ（Nicholas Joseph Cugnot）を挙げることができよう。しかし今日では当然と考えられるガソリンエンジンという要件を加えた場合がベンツかダイムラーになる。このように定義はそのときの時代背景などにも左右され、その結果発明者も変わり得る。ちなみにプライドの高いフランス人は、自動車がドイツ人による発明ということには異を唱えているらしい²⁾。

ではベンツかダイムラーのどちらか？の議論は他の機会に譲って話を戻すが、このため私はインクジェットを以下のように定義している³⁾。

「色材、機能材料を含む液体（インク）を液滴に分離し、画像信号（プリント信号）に応じ、記録対象（メディア）に向けて吐出し、色材・機能材料を対象物に付着、伝達させるマーキング方式」。

単純なプロセスゆえ他に表現しようもないと思われるが、注意すべき点が 2 つある。1 つは「液滴に分離し」であり、2 つめはそれに続く「画像信号に応じ……」である。前者はインクであっても連続流による記録は除くことを意味し、後者は液滴に分離するという定義とともに、その液滴そのものの噴射や軌道を制御することを意味している。これはインクジェットを今日の「デジタルマーキング技術」として位置付けるためには重要でかつ不可欠な要件である。もちろん他の定義があっても良いが、現在のインクジェットを取り巻く背景を反映させた定義だと考えている。そしてこの定義が後に紹介するインクジェッ

トの発明を特定する上でも意味を持つことになる。

インクジェットの定義に触れたついでにこれも自明のことだが、インクジェットの特徴についても改めてまとめておこう。インクジェットの特徴は記録対象に向けてインク滴を直接吐出するだけで記録が行えるため、

- ・プロセスが単純で、小型化、低コスト化に適しており、高いプロセス安定性が得られる。
- ・記録対象に非接触で、記録対象を広範囲に選べ、大面積や平面でない場所へのプリントに対応することができる。

これらの特徴を活かし、様々な市場でマーキング方式としてのインクジェット、すなわちインクジェットプリンタが展開されていることは言うまでもない。さらに最近のインクジェットにおける吐出液滴の微小化によりもうひとつ特徴を加えるべきであり、それは

- ・極微量の液体吐出、及び移動、塗布を正確に制御できる、
- である。これはマーキング技術だけでなく、ほかの技術でも見られない優れた特徴であり、これによってインクジェットの応用はマーキング以外の領域、例えばデジタルファブ리케이션や医療・バイオへも広がりがつつある。

2.1 インクジェットの基礎研究期

話を再び歴史に戻そう。インクジェット方式はプリントプロセスが単純であるにも関わらず、プロセスで見られる種々の現象の発見や解析がすぐにインクジェットの発明につながったわけではない。従って周辺技術についての歴史から紹介する必要がある。インクジェットには様々な方式があるが、最も古くから関連する技術領域の研究が進んでいたのは連続噴射型である。その中で現在も用いられている荷電偏向制御型における重要な技術領域として、インクの液滴化と帯電偏向のプロセスをあげることができる。これに関する最も古い研究として見つけることができたのは 1749 年にフランスのノレット（Abbé Nollet）によりなされた液滴流への静電気の影響についてであり、私がインクジェットの歴史を語るとき、最近ではこれを最初に登場させている。電子写真方式に関わりが深いと思われる静電潜像による可視像（リヒテンベルグ図形）が発見されたのは 1777 年であり、両方式の原点を同じような時期に見つけることができる。さらにそれから 100 年あまりが経過し、1867 年にはケルビン（Lord Kelvin）によって液滴への帯電実験が行われている。後に紹介するが、ケルビンはこのときインクジェットプリンタの祖先ともいえる液体噴射による記録装置を発明、開発している。

液滴化に関しては、1833 年にサヴァール（F. Savar）により連続液体流の不安定性（液滴分離）についての研究が行われている。この現象の詳細な理論解析が 1856 年にプラトー（J. Plateau）、そして 1878 年にレイリー（L. Rayleigh）によりなされた。特にレイリーは円筒モデルによりくびれの成長や分離についての理論を確立し、後の連続噴射型インクジェットプリンタの誕生や開発に大きく貢献したため、インクジェットの歴史に関する記述はこのレイリーから始まるものが多い。

液滴化の積極的な実現に関しては、1938 年に K. Genschmer により電極間の放電による空気膨張を利用してインクを吐出する方法が提案されている。また、1958 年にウィンストン（C.R.

Winston) はノズルに対向して設置された加速電極に高電圧を印加し、静電気力によって導電性インクをノズルから引き出し液滴化する方法を提案した。これは後の静電吸引方式に発展するが、当初は偏向制御を伴った連続噴射型として、次にオンデマンド型として開発が進むことになる。

このように1900年代中頃までは、ケルビンによる記録装置が見られるものの、まだインクジェット方式による装置は出現しておらず、その後のインクジェットプリンタの誕生や開発につながる種々の理論解析や基礎実験がなされた、いわば基礎研究期と位置付けることができる。

2.2 各種方式の提案と製品化

2.2.1 連続噴射型

噴射されるインクをマーキングに応用する記録法の具体的な記述は、先に述べたケルビンによる1867年の英国特許「Receiving or Recording Instruments for Electric Telegraphs」に見ることができる。この発明は、大西洋を横断する通信ケーブルによる電報システムの出力部としてケルビンが考案し、開発した「Siphon Recorder」がもとになっている。この装置では連続的にインク流を噴出するヘッド部を、伝送された電気信号に基づいて検流計 (galvanometer) の原理で左右に動かし、移動する連続紙上に信号を記録するものである。Siphon Recorderには多くの改良型があり、最初のものではないが初期の写真を Fig. 1 に示す。最初に記載した私のインクジェットの定義からすると、連続流を用いたこの装置はまだインクジェ

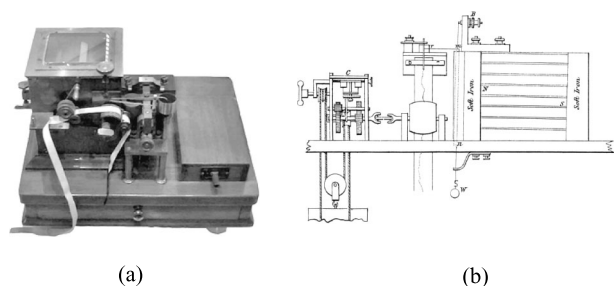


Fig. 1 Siphon recorder invented by L. Kelvin. Left photo shows early modified siphon recorder exhibited in Hunterian Museum, University of Glasgow. Photo was provided by Matthew Trainer. Right figure was reprinted from G. B Patent 2147.

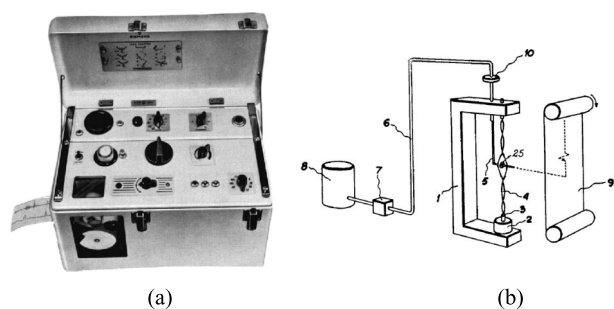


Fig. 2 Mingograph 21 developed by R. Elmqvist. Left photo was provided by Siemens-AG. Right figure was reprinted from USP 2,566,443.

ットではない。

1929年、ハンセル (C. Hansell) は帯電したインク流を電界により偏向する記録装置を提案したが、この形では実用化されなかった。

1948年にスウェーデンの R. Elmqvist が提案した方式は、1952年に Siemens-Elma より製品化された医療用記録計 Mingograph (Mingograf) に組み込まれた (Fig. 2)。これはガラス管よりインクを噴出した際、レイリーの理論に基づいた液滴化が起こり、検流計の原理で入力電気信号によりガラス管を偏向させるものである。ケルビンの装置とは異なり分離したインク滴によって記録を行うものであるが、液滴ごとにプリント/非プリント、あるいは軌道 (偏向) を制御しているものではなく、これも定義に従えばまだ最初のインクジェットとは呼べない。このときの液滴化の周波数は 1.25 kHz といわれており、水とグリセリンによる水性染料インクが使用された。

連続噴射型のさらなる提案として、1963年にスタンフォード大学のスウィート (R. G. Sweet) が、磁歪振動子、あるいは圧電素子の振動により液滴化のタイミングや分離状態を積極的に制御し、液滴分離と偏向のための液滴への帯電を同期させる、いわゆる荷電偏向制御型インクジェットの特許を出願した (Fig. 3 に荷電偏向制御型の基本原理を示す)。この荷電偏向制御型は1968年に A. B. Dick から Videojet 9600 として製品化された。Videojet 9600 ではインク滴1滴ごとにプリント信号に基づいて紙への到達や11レベルの偏向 (位置) を制御しており、定義に基づけばこれが製品化された最初のインクジェットプリンタとみなすことができる。この後 REI から蛍光インクを用いたバーコードプリンタが開発され、1973年に市場導入されている。日本でも1973年にシャープと日本電信電話公社 (現 NTT) が共同でカナ文字もプリントできる Jetpoint を発売している。荷電偏向制御型は IBM によっても開発が進められ、1976年に IBM6640 が発売された。IBM はコンピュータの処理能力の高まりに伴い、高速な出力装置の必要性を強く認識していたはずであり、当時荷電制御型のみならず複数の方式による出力装置の研究・開発にかなりのリソースを投入していた。このときの研究結果をまとめ1977年に発行された IBM J. Res. Dev. (Vol. 21, No. 1) は、後の連続噴射型インクジェット

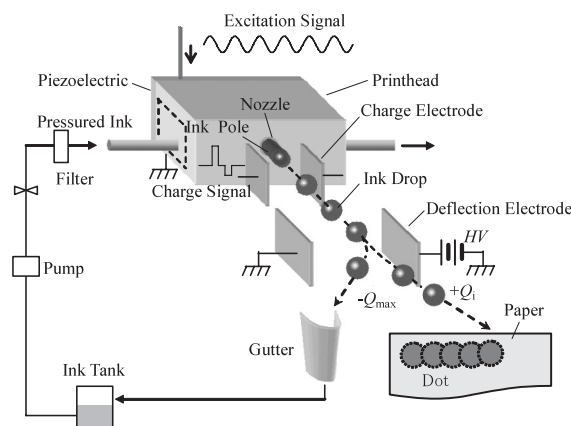


Fig. 3 Basic configuration of continuous ink jet printer (Sweet's type, multi-deflection).

プリンタ技術者にとって教科書ともいえるもので、私も入社後に配属された研究所の輪講会で読まれたものである。

ここまで紹介した連続噴射型の製品は複数の偏向レベルを持つ多値偏向型であるが、スイートは2値偏向型も提案している。この方式は1973年にMeadからDIJITという製品が発売された。解像度は100 dpiと低かったが、512個のノズルを有し、5インチ幅を120 ips（インチ/秒）でプリントする高速性を有していた。

一方、連続型でもハーツ型とも呼ばれる発散型は、1966年にルンド工科大学（スウェーデン）のハーツ（C.H. Hertz）から特許が出願された。この方式は1977年にApliconから3色（Y, M, C）のノズルを持ち、125 dpi相当のカラー画像をプリントできる世界初のカラープリンタ（プロッタ）CP5586-M16として製品化された。

ウinstonの提案をベースにした静電吸引方式は、TeletypeよりInktronic Page Printerが1960年代終盤か1970年頃に発売されている。この製品ではインク滴は連続的に噴射されたため、帯電したインク滴の水平方向、垂直方向への偏向制御が行われ、紙上でのドット位置制御とともにプリントに使用しない滴を大きく偏向しマスク部材に衝突させていた。またカシオによって偏向方法に改良が加えられ、1971年にこの方式のインクジェット記録部を備えた電卓JP-1とタイプライターTyputerが発売された。ビジコンからも同年、タイプライターとしてジェットライタが発売された。

この頃のインクジェットはノズルの目詰まりをはじめとする信頼性の大きな問題を抱えており、新しいマーケティング方式として期待されながらも市場では十分には受け入れられていなかった。

2.2.2 オンデマンド型

オンデマンド型の代表的な方式のひとつであるピエゾインクジェット方式の誕生につながる重要な発見が1880年になされている。マリー・キュリー（Marie Curie）とともにノーベル賞を受賞したピエール・キュリー（P. Curie）とその弟のジャック・キュリー（J. Curie）による圧電現象の発見である。この発表論文ではじめて使われたギリシャ語の“圧す”を意味する“piezein”がピエゾの語源になっている。

1900年代中頃からはオンデマンド型インクジェットの具体的な構成の提案（特許出願）が盛んになった。1946年に連続噴射型でも登場したハンセルより、ピエゾディスクの変形によりインクを吐出させるピエゾインクジェット方式の先駆けともいえる特許が出願された。また1962年にはナイマン（M. Naiman）により、インクを加熱して発生する蒸気の圧力でインクを加圧し、チューブ端の開口に設けられた電極で吐出を制御する方式が提案されている。

1970年代はその後の製品に使用されたオンデマンド型の特許出願が相次ぐ歴史的に重要な時期である。まずピエゾインクジェット方式では1970年にカイザー（E.L. Kyser）がシングルキャビティー型を、その2か月後にゾルタン（S.I. Zoltan）は圧搾型（Squeezed Tube）の特許を出願している。翌1971年にはステンメ（N.G.E. Stemme）がダブルキャビティー型を出願している。ステンメはこの特許の中でインク滴の吐出手段

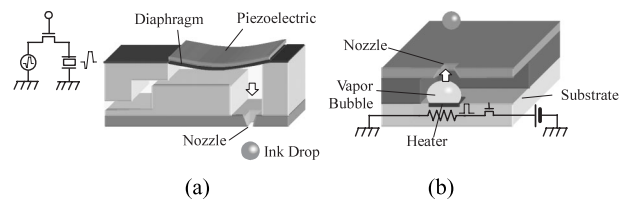


Fig. 4 Basic structure of piezoelectric ink jet printhead (bending mode) and thermal ink jet printhead (roof shooter).

として、インクを直接加熱して蒸気を発生させて吐出する方法についても開示している。Fig. 4(a)に現在のピエゾインクジェットプリントヘッドの基本構成（撓みモード）を示す。サーマルインクジェット方式の発明は、実験中に注射器の針がハンダごてに触れて水が飛び出したというエピソードが有名であり、1977年にキヤノンの遠藤らから特許が出願されている。これより3日前にリコーの小夫から出願された特許は、発熱体でインクを加熱して蒸気を発生させるものの、冷却手段が必要と記載している。また遠藤らの出願から約8か月後に、信州精器の斎藤がマルチノズル構成を出願している。またヒューレットパッカード（以後HPと表記する）も1979年をはじめにはサーマルインクジェット方式の研究に着手し、1982年にJ. Vaughtらが特許を出願している。Fig. 4(b)にサーマルインクジェットプリントヘッド（ルーフシューター）の基本構成を示す。放電方式（スパークジェット）も1977年にMichele Bivioらから特許出願された。

オンデマンド型の重要な2方式の具体的な構成がともに1970年代に考案されているのも興味深い。それぞれの方式について短期間に複数から特許が出願されているのはさらに興味深い。同じような発明が同じ時期になされることを私は「発明の同時性」と呼んでおり、他にも多くの例がある。（「発明の同期性」と呼んでいる人もいる²⁾）。この「発明の同時性」が起こる要因はいくつか考えられるが、例えばその発明を必要とする時代のニーズがあり（あるいは予想でき）、それを実現する発明の基盤技術、周辺技術が揃ったときに必然的に起こる。1960年代からコンピュータの発展に伴い、出力をプリントするといったニーズを満たすことは当時の重要な技術テーマであったはずである。機会があれば基盤技術や周辺技術の整備状況も含め、この1970年代のインクジェットに起きた同時性の背景を分析したいと考えている。

これらのうち最初に製品化されたのはピエゾインクジェット方式の圧搾型で、1977年にSiemensからPT-80というプリンタが発売された。シングルキャビティー型はSilonicsから1978年にQuietypeという製品が発売された。サーマルインクジェット方式の最初の製品はピエゾインクジェットより遅れること7年、1984年にHPからDisposable（使い切り型）プリントヘッドを搭載したモノクロプリンタThinkJetが発売された。キヤノンは1985年にPermanentプリントヘッドを搭載したBJ-80を発売した。続く1986年にはHPがカラー化を行い、PaintJetを発売した。キヤノンは1981年のグランドフェアに、紙幅（208 mm）のプリントヘッドを持ったラインタイ

ブのプリンタ（複写機）を展示しており、その後石油探索機にも搭載された。ピエゾ方式の1つであるシアモードは1987年にXaarより特許が出願され、1997年に他社プリンタに搭載され始めた。放電方式は1982年にOlivettiから最初の製品が発売された。

当初、連続噴射型として採用されていた静電吸引方式は、この頃はオンデマンド型としての開発が進み、1979年には東芝からこの方式をプリント部に用いたファクシミリ COPIX3000が発売された。また目詰まりへの対応として、ノズルではなくスリットからインクを吐出する方式も提案され、研究が進んだ。

オンデマンド型のカラー化に関しては1970年代後半からピエゾ方式を中心に開発が進められていたが、最初に製品化されたのは1980年に入ってからであり、PrintaColorから3色（Y, M, C）のインクにより8色を再現するISO8001が\$6,000で発売された。また国内では三洋電機、さらに松下グループによってもカラー化が行われている。この1970年終わりからのカラー化への本格的な取り組みと同時に、にじみ防止や発色性を改善したインクジェット専用紙の開発も始まった。

1990年以降、現在までのインクジェットプリンタの性能向上には目を見張るものがあるが、これらについては次章の高性能化への取り組みの中で取り上げてみたい。1968年のVideojet発売以降、インクジェットプリンタ製品化の大きな傾向として、初期はプロセスの単純さを生かし、他のマーキング方式より小型化や低コスト化を図った特徴が見られる。次に用紙開発やインクの多色化（淡インク、2次色インク、特色インク）も進み、高画質を特徴とした製品が登場してきた。さらに2003年以降、ラインプリントヘッドを搭載し、高速性を特徴としたラインタイプのインクジェットプリンタが様々な市場向けに発売されてきている。

2.3 歴史を振り返って

これまで様々なインクジェット方式が提案され、現在もなお新方式の開発は続いている。しかし現在も市場に残っている方式はわずかであり、製品化されないか、製品化されても継続しないものがほとんどである。しかし最初に述べたようにインクジェットの応用範囲は大きく広がり、目的も多様化している。

パーソナル、あるいはオフィスといった市場では成功しなかった方式でも、その方式が持つ特徴を活かし、今後ますます広がっていく、あるいは生まれてくる市場で再び見直される可能性もあるだろう。

さて、現在我々が使っている「インクジェット」（「Ink Jet」あるいは「Inkjet」）という言葉であるが、いつ、誰が使い始めたのだろうか。古い文献や、特許からの調査結果を紹介すると、1867年のケルビンの特許にはまだ登場していない。1946年のハンセルや1948年のElmqvistの特許では「Liquid Jet」という表現が使われている。1962年にアスコリ（E. Ascoli）から出願された静電吸引方式の特許や、1963年のスウィートの特許には「Ink Jet」という言葉が登場している。生みの親はまだ特定できていないがこの頃から使われ始めたようである。

限られた時間の中で歴史を紐解いていくのは極めて難しく、まだまだ不十分で不明確ことが多い。今後も時間を見つけてさらに真実を追究し、まとめて行きたいと考えている。本稿、ならびに冒頭に紹介した50周年記念として発刊する書籍¹⁾に記載したインクジェットの歴史に対する指摘や新たな情報があれば、ぜひともお寄せ願いたい。

3. インクジェットの高性能化への取り組み

ここからはインクジェットの高性能化への取り組みについて、1990年以降の製品動向も交え紹介する。またこれをもとに今後のインクジェットの進展についても触れてみたい。

Fig. 5は最初に述べたインクジェットの特徴を活かし、どのような場所でインクジェット技術が展開（応用）されているかをまとめたものである³⁾。まだ製品になっていないものもあるが私たちの生活の様々なところで応用され、インクジェットによるプリント物を目にし、触れていることがわかるであろう。

話はまた脱線するがシカゴに「MOTO」というレストランがある。ここではインクジェットプリンタを使った料理がメニューにあるらしい。食品のデコレーションには古くからインクジェットは使われてきた。しかしこのレストランでは「Sushi-Paper」と呼ばれるでんぶんから作った紙（？）に様々な食品のエキスを抽出したインク（？）で料理の絵をプリントし、食

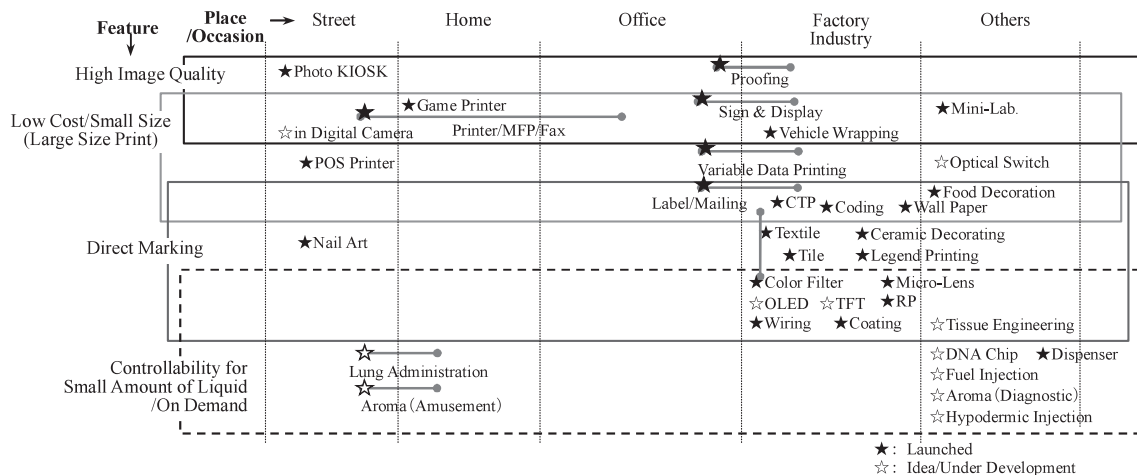


Fig. 5 Map for ink jet applications.

べるとその味がするという。シカゴは何度か訪れた街であるがこの店にはまだ行ったことがない。本稿の読者で行かれたことがある、あるいは今後訪れる機会があればぜひとも実際や感想をお聞かせ願いたい。Fig.5のマップに加えたいと思う。

さてFig.5に記載した応用の中でもまずはプリンタとしての高性能化について話を進めたいと思う。プリンタの基本特性は画質とプリント速度であり、Fig.6は現在のインクジェットプリンタ市場をこれらの基本性能によって区分したものである。プリント速度の軸では、低速なパーソナルから高速なトランザクショナルドキュメントまでインクジェットはカバーできている。また画質の軸では、極めて高い品質が要求される写真出力市場にも展開されている。しかしこの2つの軸で描かれる市場区分の右上、すなわちオフセット並みの高画質と高生産性の両立が必要とされる本格的な商業印刷市場への参入は現在まだ見られない。シリアルプリンタでは、マルチパスプリントなどの手法を用いることで画質と速度はどちらかを犠牲にすれば片方は高い性能を得ることができる、いわゆるトレードオフが成り立つ (Fig.6の破線内域)。しかしより高い生産性に答えるためにラインヘッドを搭載すると、通常はマルチパスなどによる画質向上策が取りにくくなる。また印刷市場で一般に用いられているアート紙などの非浸透紙 (緩浸透紙) への対応という大きな課題が立ち上がる。

商業印刷の市場規模は現在インクジェットが主に展開されているパーソナルやオフィス市場に比べ極めて大きい。また技術はその成熟に伴ってより上位のバリューネットワーク (ハイエンド市場) に進んでいく宿命⁵⁾であり、インクジェットのみならず電子写真によっても各社がこの市場への参入を狙っていることは間違いないだろう。長い間空白であったMid/Highのオフィス市場が昨年のHPの参入 (CM8060/8050) によって埋まった。この製品がこの市場で受け入れられるかどうか、あるいは他社が追従するかという疑問は、今後のインクジェットの展開を占う上で極めて重要である。しかしこのマップに残された最後の領域、商業印刷市場にインクジェットがほんとうに参入できるのかという疑問、および期待はそれ以上に強いと思われる。drupa2008でこの領域への参入を明確にしたプリンタが複数出展され、市場導入は1~2年後とされている。いよいよ

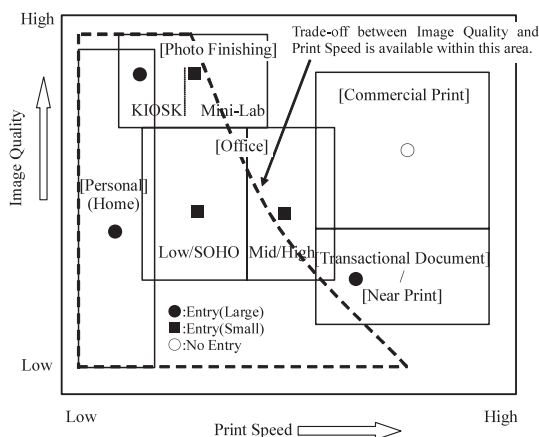


Fig. 6 Market of ink jet printer classified by image quality and print speed.

疑問への答えが出される時期が来たのか、まだ当分時間がかかるのか注目していきたいと思う。

Fig.6で示した区分、すなわち画質や速度だけでは特徴付けできないインクジェット市場、例えばワイドフォーマットによるサイン&ディスプレイやデジタルファブリケーションなどもある。Fig.7はデジタルファブリケーションへのインクジェットの応用について、縦軸に活かされているインクジェットの特性、横軸に目的 (効果) をとったポートフォリオである⁴⁾。今後新たな応用も登場すると思われるが、概ね現在ではII、IV象限、すなわち大面積を低コストで作成する、あるいはオンデマンド性・微小液体制御により高い価値を提供する応用が盛んになっている。技術の進展に伴いポジションが移動する応用もあるはずであり、このポートフォリオは今後の技術、市場の進展を見ながら修正を加える必要があると考える。

画質、プリント速度の向上にはプリンタを構成する様々な技術要素が関係しており、その向上は決して単独技術の進化だけによるものではない。しかしプロセスが単純であるため、各技術の進歩が高性能化を牽引してきたのも事実である。その中心的な役割を果たしてきたいくつかのパラメータのこの10年あまりのトレンドを振り返る事により、今後のインクジェットプリンタの性能向上も併せて考えてみたい。またプリンタの性能向上だけでなく、関連するほかの市場やアプリケーションへの影響や視点からも話をしてみたい。

3.1 高画質化

インクジェットプリンタでは、プリントしたい内容 (情報) によって使用するメディアを使い分けている。これがユーザーにとって当然かどうか、また利点か欠点かはさておきインクジェットの特徴であることには間違いない。写真画像を中心としたインクジェット専用紙における画質向上と、文字やグラフィックが中心となる普通紙における画質向上は、そのアプローチは異なるものが多い。しかしここでは専用紙と普通紙を特に区別せず、画質向上への取り組みをまとめてみる。

3.1.1 インク滴の微小化

画質向上策としてこれまで大きく取り組まれてきたアプローチであり、取り上げられてきた技術トレンドに吐出インク滴の微小化がある。プリンタ仕様の1つにすぎないインク滴のサイ

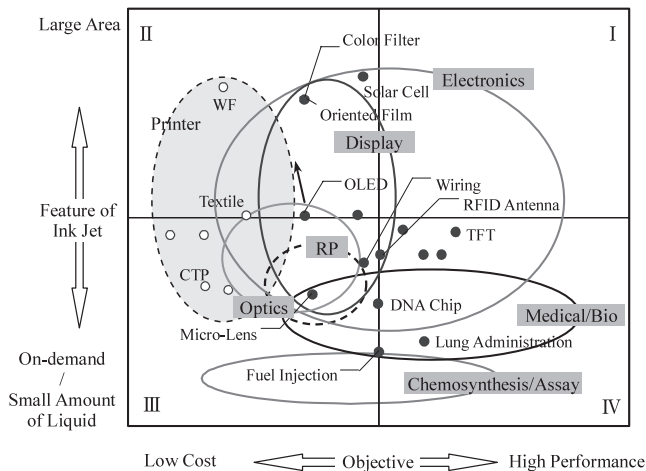


Fig. 7 Portfolio of ink jet application for digital fabrication.

ズがこの10年、技術者だけでなく一般ユーザー向けのカタログや宣伝等でも大きく取り上げられたのはインクジェットの歴史の中でも特異的なことである。しかしそれだけこの間における高画質化へのインク滴微小化の寄与は大きかったといえる。インク滴の微小化は粒状性を低減させるだけでなく、解像度、階調再現の向上においても重要なアプローチであった。1996年に発売されたPM-700Cでインク滴の微小化が一段と進み、淡インクの採用、用紙の改善もあり写真画質が著しく向上した。以降、インクジェットで写真をプリントすることは当たり前のこととして受け入れられるようになり、インクジェットプリンタの目指す方向性の1つを示す起点となった。インクジェットプリンタのカタログにインク滴の大きさ、あるいはドットの大きさが記載されるようになったのも、この頃からではないだろうか。

インク滴の微小化はこの15年で2ケタの微小化が進み、現在では1 pL (10^{-12} l) まで到達している (Fig. 8)。しかしながらこれ以上の微小化は、粒状性改善など画質への主効果はほぼ飽和し、信頼性など付随する課題がますます大きくなると考えられる。従って今後、パーソナル市場での微小滴化傾向は進展が鈍ると予想されるし、この3年以上製品レベルでの微小化は発

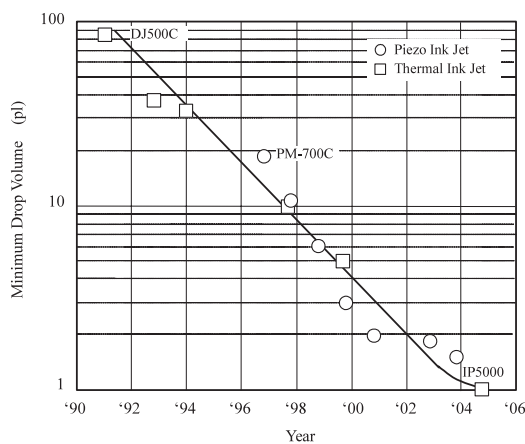


Fig. 8 Minimum drop volume in personal printer (symbol means launched products).

表されていない。一方、工業用途としてのインクジェットの応用ではさらなる形成パターン（配線、機能素子など）の微細化が求められており、液滴の微小化はさらに進むと考えられる。既に静電吸引方式により1 fL (10^{-15} l) の液体を吐出した実験や開発状況が報告されている。また、昨年の9月に開催されたIS & TのNIP23やDF2007において、ピエゾインクジェットやサーマルインクジェットでも0.1~0.5 pLの吐出事例が報告されている。デジタルファブ리케이션市場はまだ立ち上がったばかりであり、インクジェットを使ってビジネスが成り立つアプリケーションにどれだけの微細化が必要かはまだ手探り状態である。フォトリソグラフィーと同等レベルの微細化がインクジェットで実用になれば半導体産業に革命が起こるだろうし、またそういう日が現実に来るのかもしれないが、当面はその途中の段階での実用化が様々な応用で進むはずである。またプリンタとしてはインク滴を大きくする方向に進むことは考えにくい。コーティングなどの応用を考えた場合には、より大滴サイズが求められる市場があるかもしれない。

3.1.2 インク色、およびインクの取り組み

インク色（種）の増加もこの10年の高画質化を支えてきた技術トレンドの1つである。Table 1にこれまでに発売された新しいインク色の組み合わせを搭載したプリンタを示した^{1,6)}。淡インク採用の目的は粒状性の改善と階調再現性を高めることであった。しかしインク滴の微小化が進んだ現在、4色でも粒状性はほとんどなくなって十分高い画質を実現できるようになり、淡インクを搭載しないプリンタも再び増えてきた。一方で、さらなる再現色域拡大のためR, G, Bといった2次色を中心としたインクを追加するプリンタも登場している。色材の分光特性から再現しにくい色域を補うため、特色を追加するプリンタも見られる。現在では最大で12色のインクを搭載したプリンタもある。この表には記載していないが、医療写真（X線写真）のプリント用にグレーの階調を向上するためモノクロだけで5段階の濃度のインクを持ったプリンタも過去発売されたことがある。淡インクによる高画質化は非常に効果的であったが、パーソナル市場では消費者への負担増につながる懸念もある。今後は4色のみを搭載した普及機と、より色域を広げた

Table 1 Increase of ink color used in ink jet printer^{1,6)}.

Product	Year	Basic Color				Graininess Improvement				Gray Improvement		Gamut Expanding				Others
		C	M	Y	K	Lc	Lm	Ly	Dy	Lk	LLK	R	G	B	Or	
DW694C	1996	○	○	○	○	○	○									
PM-700C		○	○	○	○	○	○									
BJC-700J	1997	○	○	○	○	○	○	○								PPOP
PM-900C	2000	○	○	○	○	○	○		○							
PM-4000PX	2002	○	○	○	○	○	○			○						
PhotoSmart7960	2003	○	○	○	○	○	○			○	○					
PIXUS990i	2003	○	○	○	○	○	○					○				
PX-G900	2003	○	○	○	○							○		○		GO
PIXUS9900i	2004	○	○	○	○	○	○					○	○			
PX-5500	2005	○	○	○	○	○	○			○	○					
PhotoSmart8753	2005	○	○	○	○	○	○			○	○			○		
IPF5000	2006	○	○	○	K/Mk	○	○			○	○	○	○	○		
PX-G5300	2008	○	○	○	K/Mk							○			○	GO

Mk: Mat Black
LLK: Light Gray

Lc: Light Cyan
R: Red

Lm: Light Magenta
G: Green

Ly: Light Yellow
B: Blue

Dy: Dark Yellow
Or: Orange

LK: Gray(Light Black)
GO: Gross Optimizer

高級機の2極化傾向がさらに強まるのではないだろうか。ところで色材濃度が異なるインクセットを持つことを請求した特許は古く、1981年に荷電偏向制御型を実施例として出願されている。

これまでプリント物の保存性と専用紙上の写真画質は、色材の選択、すなわち染料インクか顔料インクかによりどちらか一方の特性が劣る傾向があった。保存性と画質の両立を狙った動きとしては顔料からのアプローチが早く、顔料の粒径低下やカプセル化による発色性の改善が行われてきた。染料も近年、より耐光性・耐ガス性の高い染料を採用する取り組みが進んでおり、両特性の両立が図られようとしている。

このようにしてインクジェット専用紙上の画質は銀塩写真に引けをとらないレベルにまで向上した。一方で普通紙における画質も、インク滴の微小化によるにじみ改善や顔料インクの導入により向上してきたが、まだ電子写真に比べ大きく劣っている。従来から行われてきたインク物性による浸透性の制御（低浸透性インク）による文字画質などの向上は、低速領域では有用であるが高速化への対応は難しい。このためオフィス市場向けには、高粘度インクを吐出後、溶媒蒸発により急激に粘度上昇（ゲル化）させるプリンタや、透明反応液を最初に塗布し、色材との反応を利用することで色材を凝集、固定し、濃度向上やにじみを改善する取り組みも再び登場してきた。透明インクと色材の反応を使った高画質化（高耐水性化）は1997年にBJC-700Jで初めて採用された。インクジェットは液体を使うため、他のマーキング方式より高性能化のために化学反応メカニズムを利用しやすいはずである。1999年に開催された日本画像学会の関西シンポジウムのテーマは「明日のマーキングは、一粉か液か」というセンセーショナルなものであった。その中で液体のもつ化学反応の多様性でインクジェットが様々な課題を解決して大きく伸びていくという主張があり、私も賛同した。サイン&ディスプレイ市場で多く用いられているUV硬化型インクもこの一例であろう。環境への影響を十分考慮すべきであるが、反応性というキーワードでインクジェットがますます性能や可能性を高めていくことにも期待したい。

3.1.3 メディアの取り組み

インクジェットはどんな紙にもプリントできることが特徴であり、インクジェットプリンタが登場した1970年代は、インクジェット専用の紙を開発するといった考えはあまりなかった。インクジェットのカラー化が始まった1980年頃になって紙の重要性が認識され始め、インク受容性（乾燥性）、にじみといったインクジェット固有の問題を改善する紙の開発が始まった。インクジェットによる写真プリントが現実になってからは、インクジェットは長い間銀塩写真の画質や質感を目指し、メディアの進化もその方向を1つの指標にしてきた。銀塩の画像品質に比べればインクジェットはまだ劣っている項目も多いが、優れている点もあろう。今後そのギャップを狭めて写真の大先輩の背中を追いかけていくのか、違う方向性で高画質を確立していくのか、別な切り口で言えばインクジェットで出力するカラー画像のデータ供給元が何になるのか、それがどう発展するのかということが、今後の研究・開発の方向を決める重要な要素になっていると思われる。

一方、普通紙はインク受容層や色材との反応機能など、インクジェット画質改善に必要とされる層を積極的に持たないという特徴とともに、特にオフィスでは電子写真のシェアが圧倒的に高い「電子写真方式で使われている紙」というイメージが大きい。インクジェット方式はメディアに非接触であり、プリントできるメディアの自由度は高いが、普通紙に限ると様々な紙に対する画質は電子写真に比べ様ではない。十分なインクジェット適性（にじみ防止など）を持ち電子写真と共用できる紙が広く流通し、コストが下がって入手が容易になり普通紙としての地位を獲得できれば、インクジェットの“普通紙”における画質は飛躍的に向上するはずである。これまでに共用する提案や活動はあったものの大きな流れにはなっていない。このアプローチはユーザーの意識や環境など、インクジェット技術以外の課題も大きい。ぜひとも取り組んで欲しい課題である。

3.2 高速化

プリント速度の向上は、単位時間内に吐出した（できる）インク滴をどれだけ有効にプリントに使用することができるかである。インクジェットである限りこの命題は今も昔も変わらない。したがってシリアルプリンタのプリント速度を決める要因の関係を次式のように表すことができ、SFをSpeed Factorと呼んでいる。

$$SF \approx \frac{f \times Nz}{Pas \times R_p \times Cr} - T_m - X \quad (1)$$

f は駆動（吐出）周波数、 Nz はノズル数、 Pas はマルチパス数、 R_p は解像度である。 Cr はキャリッジ走査に関するもので、双方向プリントを1とすれば片方向は概ね2となる。 T_m はメンテナンスに要する時間であり、 X は他の要因による時間である。ここでは高速化を進める上で、主に上式の第1項に登場するパラメータ、すなわち単位時間に吐出できるインク滴数の向上への取り組みがどのように行われてきたかをまとめる。

3.2.1 駆動周波数 [f]

オンデマンド型ではインク滴吐出後のインクリフィル（再供給）が周波数向上の大きな制限要因になっている。従ってこれまでの駆動周波数の向上にはインク滴の微小化の寄与も大きかった。しかし高画質化で述べたように、今後これ以上にインク滴が微小化される可能性は低いため、駆動周波数もこれまでのトレンドに乗った伸びはできなくなるはずである。

3.2.2 ノズル数 [Nz]

特に半導体プロセスによるサーマルインクジェット方式のプリントヘッドでは、ノズル数は2のべき乗に對しきれいな線形関係に従って増加してきた。駆動周波数とノズル数増加トレンド³⁾から、1つのプリントヘッドが1色当たり1秒間に吐出可能なインク滴数、すなわち式(1)における分子のポテンシャルをこの10年について計算したものがFig. 9である。このように吐出インク滴数の増加は24か月で2倍となり、半導体における集積密度の増加傾向を示したムーアの法則と同じ傾きになる。

しかしノズル数をこれ以上増加（プリントヘッドを大型化）することは、シリアルプリンタでは大型化やヘッド幅分を水平

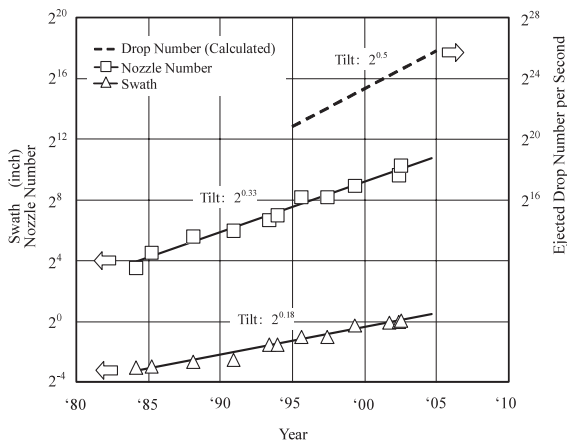


Fig. 9 Nozzle number and printhead's potential to eject ink drops (symbol means launched products).

に維持する用紙搬送などシステムへの負荷が大きくなり、また高速化の効果も小さくなる。このためあるノズル数 (Swath) 以上では増加傾向に不連続性が生じる可能性がある。現在ではほぼ1インチ超でその不連続点が見られ、そこからはいっきに紙幅 (ラインヘッド) になり、実際ラインヘッドを持ったプリンタが高速性を必要とする市場に次々に導入されている。もちろん装置自体が大きいワイドフォーマットやグランドフォーマットプリンタ、ラベルプリンタなどの産業用では、1インチを超えるプリントヘッドも搭載されており、ノズル数はまだ増える可能性はある。またノズルを平面的 (ドラム表面) に配置し、プリントするメディア全面に対応させる提案もある。実現には課題も多いが、印刷の版をオンデマンドで作成することと同じであり、ユニークなアプローチである。

3.2.3 マルチパス数の低減 [Pas], キャリッジ走査 [R_p] など

ノズル数、駆動周波数とも今後は伸びが鈍ってくる可能性がある」と述べた。では今後いかにしてシリアルプリンタの速度を向上させればよいのだろうか。ラインヘッドが搭載できるプリンタの価格を下げ、シリアルプリンタが展開されている市場に投入するのが解決策なのであろうか。プリント速度はラインヘッドのポテンシャルを十分生かしてはなかったが、2004年にソニーはラインヘッド搭載でも小型化できることを実証した。また新興のSilverbrookなどもラインプリンタによる低価格アプローチをしかけている。

別なアプローチとしてプリントヘッドのインク滴を吐出できる能力を十分生かした高速化を考えてみる。例えば高画質を得るためにはマルチパスや片方向プリントは必須になっているが、このマルチパス数 Pas の低減や双方向プリントも高速化につながる。パス数 (分割数) を減らし、かつ画質を維持するには、インク滴の吐出方向ずれのドット位置ずれへの影響を少なくする必要がある。このためにはコックリングなどによるプリントヘッドと紙のこすれなどを起こさずに、プリントヘッドと紙間の距離を短くできるシステム技術の開発や、各ノズルからの吐出特性のばらつきを極めて小さくすることも必要になるだろう。

ラインプリンタでは、高いプリント速度ゆえに用紙の乾燥時間が足りないため乾燥時間を付加して、本来持つスピードファクターを活かしきれていないケースも出てきている。このため熱による乾燥機構を有し、インクジェットの特徴であった低消費電力を多少犠牲にするプリンタも登場している。

3.2.4 並列処理

1つのプリンタに複数のIOT (Image Output Terminal) を備え、複数のプリント物を分担して出力する、いわゆる並列処理も高速化のアプローチであり、写真プリント市場に導入されている。同じ画像を異なるIOTで出力することもあり、IOT間の色差 (ΔE) に対する要求は別々のプリンタ間より厳しい。プロセス安定性が高いインクジェット向きではあるが、写真スタジオに導入されているシステムでは、色調が合うように出力結果を定期的にモニタし、調整することが行われている。

3.3 画質、速度以外の性能向上、展開

プリンタとしては、これまで説明した高画質化、高速化以外にも低コスト化、そして低ランニングコスト化が求められる。低ランニングコスト化はメンテナンス等による消費インクの低減などインク使用効率の向上が必要であり、TCO (Total Cost of Ownership) の観点で考えれば、交換部品の低減や交換期間を延ばすことが望まれる。プリントプロセスが単純であり、可動部品が少ないインクジェットの特徴が活かせるはずである。

本稿ではあまり取り上げなかったが、システム技術の進展もまた画質、速度の基本性能向上だけでなく、様々な機能を追加してプリンタの魅力を高め市場を活性化してきた。例えばふちなしプリントやCD/DVDメディアへのプリント、両面プリント機能、デジタルカメラやメディアからのダイレクトプリント、複合機 (MFP) などである。これらの機能はメーカーとしては消費者のプリンタ購買意欲を高め、消耗品の売り上げを伸ばす手段でもあり、ユーザーとしても創作の可能性が広がり両者にとって有用な提案であった。しかしこれらも現在では当たり前、あるいは各社で差がなくなり、新規に付加できる機能も少なくなってきた。最近ではプリンタそのものではなく、プリンタの使い方を提案するCMなども増えてきた。しかしそれでもまだインクジェットプリンタの多くは年末の年賀状作成シーズンのみ稼働率が高いと良く言われる。私自身は特に写真を趣味としているわけでもなく、自宅でビジネスをしているわけではないが、平日はオフィスの机の上で、週末には自宅のインクジェットプリンタが活躍している。インクジェットの特徴や使い方を一般ユーザーよりは多少理解しているからかもしれないが、プリンタの使い方は年賀状作成の他にもまだまだたくさんあるはずである。プリンタ開発メーカーにはぜひとも今後のライフスタイルやオフィス環境におけるインクジェットプリンタの位置付けを考えた新しい機能や、ライフスタイルを先取りする機能の提案をこれまで以上に期待したい。そして家電と同様に毎日とまではいかなくとも、インクジェットプリンタを活用して生活に「彩り」を添えることができることを願っている。

プリンタ市場以外への応用を考えた場合、画質、速度の軸以外の性能、仕様への要求も高まっている。例えば吐出できる液体の自由度 (粘度範囲、組成範囲、pH範囲) の拡大や、信頼性、使いやすさの向上などもその一例である。こういった要求

からプリンタとしては成功しなかった方式でも、その方式の持つ特徴が再び見直され、選択される可能性があることは最初にも述べた。例えば生産技術への展開においては、高粘度液体の吐出や微小インク滴吐出という特徴から、音響エネルギー方式や静電吸引方式の利用も検討されている。

プロセスが単純であるインクジェットでは、プリンタを構成するシステム技術、プリントヘッド技術、インク技術、画像形成・処理技術、そしてメディア技術など個々の技術進歩がプリンタ性能の向上につながってきたし、今後も必要とされるのは間違いない。過去のインクジェットプリンタの性能向上を、プリンタ技術の1つであるプリントヘッドの仕様トレンドやインク色数で振り返り、今後を展望したものもその例である。

しかしながらインクジェットの画質はこの10年で急速に向上したが、近年向上度合いも鈍ってきており、大きな技術革新が必要とされている。今後も性能向上を継続していくだけでなく、非連続とも言える大幅な性能向上や新規な価値を提供し、より一層インクジェット応用の広がりを生むようなブレークスルーは、単独の技術進歩だけではなく、システム全体で取り組むべき課題にもなりつつある。

インクジェットの単純なプリントプロセスや低消費電力を活かしたまま、これまでにない高い性能、価値を獲得するには、魔法のインクとそれを吐出できるプリントヘッドの開発をすることもアプローチであり、インクジェット技術者は追いつめるべきである。しかしインクジェットの利点とのトレードオフを必要とするような取り組みも必要であり、既に始まっている。

4. おわりに

インクジェット誕生につながる研究をはじめとしてインクジェットの歴史を振り返り、また最近の技術、製品動向から今後のインクジェット技術の進展を展望した。この20年、とりわけこの10年、インクジェット技術は急速に進展し、インクジェット誕生の頃に技術者が描いていた理想像に近づいていると思われる。しかしここからさらに向上させていくための課題への取り組みは、これまで以上に高いハードルが待ち受けているだけでなく、その解決にはこれまでとは全く異なるアプローチも必要になるかもしれない。また、インクジェットを今後どの

方向に発展させていくか、すなわちインクジェットによって解決すべき新たな課題の設定は、単にインクジェット技術に精通しているだけでなく、世の中の技術動向の理解と、それをインクジェットの世界で再解釈することが必要となっている。現在様々な領域からインクジェットへの関心は強くなっており、インクジェット以外の技術者、あるいは日本画像学会外のコミュニティとの接触機会も増してきている。こういった Cross-Industrial, Cross-Academic な交流の中から新しい課題発見や、インクジェット本来の性能向上につながるヒントを見つけることができるのではないかと感じている。

参 考 文 献

- 1) 日本画像学会編、藤井雅彦編著：デジタルプリンタシリーズ インクジェット、東京電機大学出版局（2008年9月発刊予定）。
- 2) 志村幸雄：誰が本当の発明者か、講談社（2006）, p. 52.
- 3) 藤井雅彦：インクジェット技術入門、技術情報協会（2004）, p. 3 他.
- 4) 藤井雅彦：インクジェット技術入門、第63回日本画像学会技術講習会テキスト, 111-125（2007）。
- 5) C.M. Christensen, 伊豆原弓訳：The Innovator's Dilemma（邦題：イノベーションのジレンマ）、翔泳社（2001）。
- 6) 角谷繁明：インクジェットプリンタの現状と将来動向、第57回日本画像学会技術講習会テキスト, 25（2004）。



藤井 雅彦

1985年山口大学理学研究科（応用物理）修了。1985年富士ゼロックス株式会社に入社。同年から連続噴射型インクジェットプリンタのインク滴飛翔制御の研究に従事。1989年からサーマルインクジェットプリントヘッドのプロセスフィジックスの研究を開始。以後、研究、技術開発、商品開発部門でサーマルインクジェットプリントヘッドの研究・開発に従事。現在、インクジェット技術研究所にてインクジェットの応用に関する研究に従事。日本画像学会インクジェット技術部会主査、DF技術部会委員、IS & T 会員。