

特集 : 高精細デジタル画像を支えるテクノロジー 解説

デジタルプリントシステムの現状と将来への期待

Present State and Prospect of Digital Printing Systems

阿部 隆夫*

Takao ABE*

要旨 デジタルプリンタは、今日カラー画像をプリントするとき、ごく普通に使われている。種々のデジタル画像プリント技術の中で、染料インクを用いるインクジェット記録方式と染料熱転写記録方式は、特に画質に優れており、従来の写真と比べて一見ほぼ同じに見える画像を作り出す。しかし、これらの方式でプリントした画像の保存性は、まだ写真より劣っていて、重大な改善課題となっている。今後、画像保存性が改良されたとき、デジタル画像プリント方式はますます現在の写真市場を奪っていくことになる。本稿では、デジタルプリント技術の現状について述べ、さらに、写真調デジタルカラー画像市場の広がりを考えてみる。

Abstract Digital printers are now common place for printing color images. Among the many kinds of digital printing methods, ink jet and thermal dye transfer methods produce high-quality results, similar to those of silver halide photographs. As these two digital methods improve their image stability performance, they will continue to gain market share currently enjoyed by silver halide photographs. This paper describes the present state of digital printing technologies and discusses the expanding market for digital color pictures.

キーワード : デジタル画像プリントシステム, インクジェット, 染料熱転写, 静電記録, 写像性

Key words: digital image printing system, ink jet, thermal dye transfer, electrostatic printing, clarity

1. はじめに

デジタル画像プリントシステムは、コンピューター出力、デジカメ画像のプリント、デジタルカラー複写機など個人的用途のほか、医療現場での検体撮影記録、交通機関等の各種のチケット発行、科学計測器のプリント、工場における工程記録などのさまざまな産業分野でも稼動している。総じてこれまで、画質、画像保存性、出力速度、取り扱い安全性、保守管理性、環境への負荷、コストなどの観点から性能の向上および改善が図られてきた。

プリントの画質は、画像データの入力装置、データ処理技術の発達もあって、非常に高度なレベルに達している。今日では、現像所のような専門家に依頼することなく、自分の部屋でインクジェットプリンタや染料熱転写プリンタを用いて、従来の写真と同等水準の画質を得ることができるようになった。一方、画像の保存性に関しては、染料熱転写記録にしてもインクジェット記録にしても、銀塩写真と同等以上であると完全に言い切れる状態にはなく、ことに画質と画像保存性を両立させるために、両記録法ともまだ改良しなければならない課題を抱えている。

まだ完全でないにせよ、デジタル画像プリントシステムは写真市場に大きく入り込んできている。その影響を受けて、写真業界のビジネスの形態に変化が起り、組織や業態の再編が実際に進んできた。比較的限られた人々により動かされてきた写真の業界は、新しい技術の進展に起因する市場の急速な変化に対して、早急に対応することを迫られている。写真市場の関係者は、デジタル画像プリントシステムに対して、焦ってそれをライバル視したり、あるいは、過大評価したりせず、現在の技術レベルを冷静に評価し、さらに将来の到達レベルを予測して、自分たちのビジネス計画を策定する必要がある。

筆者は、1980年代から「デジタル・ドライ・フルカラー」をキーワードとして、主に熱転写記録方式とインクジェット記録方式のプリント材料の製品開発に関わり、デジタル画像プリントシステムの技術および市場の発展状況を見てきた。そこで、以下ではこれらの記録技術を中心に、デジタル画像プリントシステムの発展経緯に簡単に触れ、技術上の特徴を整理し、現状の課題と、将来に向けて望まれることを考えてみたい。

2. 主なデジタル画像プリント方式

デジタル画像記録方式には多くの種類がある¹⁾。各種の技術方式のうち、階調性、解像度、多色化についてのポテンシャルから、カラー写真に匹敵する画質のプリントを得る可能性を持つ方式としては、インクジェット、熱転写、静電記録が挙げられる²⁾。

1980年代初頭から、静電記録方式（電子写真）、熱転写記録方式、インクジェット記録方式によるデジタル画像プリントシステムの開発および実用化が本格化した。今日オフィスで単にレーザープリンタと言えば静電記録方式のプリンタを指すのが普通であるが、それほどレーザー静電記録は一般に広く用いられている。有機半導体を感光体として用いること、カラートナーの開発、トナーの小粒径化などの材料技術に関する進歩と併せて半導体レーザーまたはLEDアレイを用いるデジタル露光機構部の進歩があって、静電記録方式はアナログ複写機からカラーデジタルプリンタへ応用範囲を拡大した。

熱転写記録方式には二種類ある。そのひとつは、溶融型熱転写である。ワックス系統の素材を主成分とする固体インクを用いるもので、1980年代の後半に日本語ワープロで一時代を築き、今も各種発券機、バーコードプリンタ、普通紙ファクシミリなどで使用されている。もうひとつの熱転写記録方式は、染料熱転写であり、個人用途や病院等で写真調の画像 (pictorial image) の出力に使用されている。1980年代のごく初期には、捺染工業で用いられている分散染料が色材として使用された。アントラセン母核を構造に持つ染料がこのタイプの典型的なものとして知られている。染料は加熱により昇華するという性質を持っており、実際にプリントの過程で昇華の性質を利用して、染料はもともと熱に対して極めて敏感な性質を持つので、出来上がった画像の保存性は極めて悪く、ひと夏を越す間に画像のにじみや褪色が顕著に起こるといった状態であった。その後、カラー写真の画像形成色素と類似の母核が導入されたりして、必ずしも昇華しない染料も使用されるようになった。しかし、昇華熱転写という用語は実際のプリント過程の現象と関係なく、今も使用されている。

インクジェットプリンタは、1980年代前半に電機系の会社を始め非常に多くのところで開発が進められ、漢字プリンタといったセグメントで競うように商品化が行われた。そのときはインクの目詰まりなどの問題が多く起こり、またプリントヘッドの製造工程が複雑であり高価であったため、インクジェットが他の記録方式をおさえて、市場を広く占有するということはなかった。90年以降では、新しい記録ヘッドの開発および改良が進展し、それに伴うプリンタの大幅な価格低下、さらに高性能の記録用紙の開発とデータ処理技術の向上があって、インクジェット記録方式の応用範囲は文字記録から写真のような階調のあるカラー画像まで拡大した。インクジェットプリンタの市場は、パソコンの普及とともに、パーソナルと産業用の両方で伸びて、今日の盛んな状態に至っている。

アナログ画像記録の代表である銀塩写真も、デジタル信号に基づいた露光方式を採用することで、デジタル画像記録を行うことができる。デジタル写真は、データ処理技術を組み合わせることにより、直接の撮影記録では得られなかった特徴のある画像を作成することが可能になっている。このほかに、熱現像型写真感光材料を用いたシステムやジアゾ系化合物を用いたカラー感熱紙などのデジタル画像プリントシステムもある。

3. プリント技術の特徴

デジタル画像の記録では、画像信号に対応して小さな点 (ドット) を記録紙上に置いていく。入力信号のノイズやプリンタの精度に起因する故障は、画質の良否を直接左右する。画質に関係する因子は以下の通りである。

- (1) ドット: ドットの形状の均一さ、大きさ、位置精度が重要。粒状性、バンディング等に影響。バンディングとはプリントヘッドの走査周期に対応して画像に現れる筋のことを言う。特に、画像のハーフトーン部分に出やすい。たとえばインクジェットプリンタでは、記録ヘッドが一方の端から他方に端に向かって動く (走査する) ことにより画像が記録される。このとき、もしドットが小さすぎるとドット同士の重なりが少なくなるため、ヘッド走査の境界で濃度ムラが出やすくなる。通常は、ドットが置かれる位置を正確にするために、用紙の送り精度とヘッドの走査精度を十分に取る。
- (2) 画像エッジ部のキレ: 文字や線画ではくっきりとしたキレの良いプリントが必要である。ゼロか1かという2値画像記録方式で記録して、ドットの周縁部に欠落等に基づく凹凸がないときは、非常に鮮鋭度の高い画像が得られる。溶融型熱転写プリンタを用いて極めて平滑な紙にプリントしたとき、その典型的な状態が見られる。一方、写真調の画像にはある程度のボケが有効である。染料熱転写記録方式では画像のエッジ部分にボケがあり、くっきりとしていない。この特性は、粒状感 (ざらざらした感じ) を目立たなくすることに効果がある。
- (3) 階調性: 面積階調法では階調数と解像度が取り合いになる。
- (4) 解像度: ドットの配置密度、プリントヘッドの素子密度、画像の解像度を区別する必要がある。
- (5) 色再現性: 写真よりも色材を選択するときの自由度が大きいので、一般に色再現範囲を広く取ることができる。
- (6) 濃度: 階調性と関係するので高い濃度が望まれるが、ドットの広がりなどとの絡みで解像度と切り離せなくなる。
- (7) 画像表面の光沢: 特に写真との対比でプリントを鑑賞するとき、注目される因子。

染料熱転写記録、および、専用受像紙を用いる染料系インクジェットでは、画像プリント後、染料は受像シートの受像層中に固定される。受像層の表面は、受像層の主成分である高分子化合物からなっており、一般に平滑に仕上げられてい

る。画像（染料）は、そのバインダー成分を通して見ることになる。非画像部分にも同じ高分子化合物があるので、プリントは画像部と非画像部の全体にわたって一様の光沢を有する。この状態は、写真の画像がゼラチンバインダー中に形成されているのと同様である。また、染料が拡散する性質を持つことに基づいて画像の粒状性が目立ちにくいこと、および、特に染料熱転写画像で明らかに見られる豊かな階調性によって、これらのプリント画像の印象は写真と酷似している。

バインダーを通して着色剤を見るという点では、静電記録のトナー画像および溶融型熱転写記録のワックス系インクの画像の場合も同様である。これらの画像では、トナーあるいは熱溶解性固体インクのバインダー成分である高分子化合物を通して着色剤を見ることになる。通常、これらの記録方式では特殊な受像シートを用いないので、記録部と非記録分の表面特性は異なる。仮に高分子化合物を塗布した専用の受像紙を用いたとしても、トナーや熱溶解性固体インクが受像紙の表面に存在するので、特別な後処理を加えない限り、写真と同様の状態、すなわち全面一様な表面特性を持つプリントは得られない。

顔料系インクジェットの場合は、高濃度部分でブロンジングが見られることがある。ブロンジングとは、画像表面が金属のようにきらきら光って見えることを言う。虹のように見えることもある。また、顔料付着部分では、顔料粒子のために表面が凹凸状となり光沢が失われる。顔料粒子をポリマーで包み込むことにより、これらの問題は軽減できるが、完全解決するには至らない。

ドットを無制限に小さくする必要はない。われわれの眼球の大きさと瞳の特性から、瞳径が3mmのときに網膜上に色収差あるいは回折に起因するボケの無い最小の像を結像し、そのときの像の大きさは直径約5 μm である³⁾。網膜上のこの大きさの像は視角1分に相当し、明視の距離では約70 μm になる。そこで、これ以上細かな画像は必要ないということになるが、実際にわれわれが物を見るとき、見えにくいときは目を近づけて見る。また、線分のずれや曲がりを検出するとき、この値より一桁ぐらい細かなところまで我々の目の検出能力が上がるということが知られている⁴⁾。そこで、製品開発においては、70 μm よりも細かに、たとえば40 μm 程度まで画素を小さくして画像の解像度を上げていることが多い。

一つずつのドットに着目すると、通常各ドットはあまり多様な濃度値を取ることができない。そこで、階調性を得るために、ドットを何個か積み重ねて濃度を変化させるか、いくつかのドットを合体させることにより面積を大きくして印刷の網点のように濃度を変化させるという手法をとる⁵⁾。もし40 μm の画素を持つ階調性のある画像を再現よく作るとしたら、この値より小さなドットが必要になる。ドットが小さいほど1画素を構成するドットの数も多く取ることができるので、仕上がり画像の解像度の損失を小さく抑えて階調数を増加させることができる。最近のインクジェットでは、インク滴の大きさを4ピコリットルさらには2ピコリットルと小さくして、着弾後のドットの大きさを小さくしている。ドット

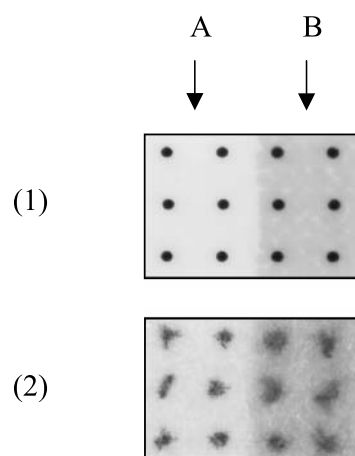


Fig. 1 Dot images printed with an ink jet printer on glossy micro-porous media (1) and plain paper (2). Portion A: Black dots were printed on a fresh surface. Portion B: Yellow dots of a solid pattern were printed and then black dots were printed.

を小さくするとドット間に隙間ができる。この隙間をなくするために、ドットを密に配置しなければならない。カタログ等に1440 dpi, 2400 dpi と表記されているのは、このようにしてドットを並べたときの密度を示しており、仕上がり画像の解像度を示しているのではない。なお、ドットの配置密度を上昇させるとき、プリントヘッド部の走行速度を上げ、同時に画像データの転送および処理の速度も上げることにより、画像の出力速度の低下を可能な限り抑える。

染料熱転写記録の場合、加熱量に対応して染料が分子レベルで移動するので、一つのドットが非常に多くの濃度レベルを取ることができる。1ドットを1画素に対応させることもできる。したがって、多階調を得るために解像度をあまり犠牲にしなくてもすむ。ドットの数が少なくすむということは、画像の出力速度にとって有利である。インクジェットでも、濃度の異なる同色のインクを併用することにより階調数を増やす方法がとられている。

ドットの形状は、画質に大きな影響を及ぼす。静電記録画像ではドット周辺にトナーが散っていることがよくある。しかし、文字を主体とするとき画面全体で見ると、そのようなミクロ的な問題は気にならない。ドットがいつもほぼ円形であり、画面全体で濃度ムラがほとんど無いことがその有力な原因であると考えられる。普通紙にプリントしたインクジェットの画像や、表面があまり平滑でない紙にプリントした溶融型熱転写の画像では、粒状性の悪さが非常に目立つ。プリントしたインクジェットプリンタで普通紙にプリントしたときは、フェザリングと呼ばれる現象が現れて、特に粒状性が悪くなって画像がざらざらに見えることがある。このときドットをルーペでのぞくと、紙の繊維に沿って液体のインクがにじんでいってドットが円形でなくなり勝手な方向に突起が出ている。この現象をフェザリングという。溶融型熱転写記録方式は、軟化または溶融したインクが記録用紙に付着することからプリントが始まる。したがって、記録用紙の平滑度が画質の良否に大きく影響する。通常のコピー用紙のように平滑度があまり高くない紙に対して溶融型熱転写プリン

タで記録すると、インクの転写不良が顕著になる。

プリントの対象が文字から写真のような画像に移ると、トナーの飛び散り、フェザリング、転写不良などは許されなくなる。近年、インクジェットの高画質が非常に良くなったが、プリンタの改良だけでなく、受像紙の影響が極めて大きい。Fig. 1 に多孔質の高光沢インクジェット専用受像紙と普通紙に染料インクを用いてインクジェットプリンタでプリントしたときのドットの形状を示す。専用紙を用いたときは、あらかじめ他のインクでプリントされていた面であっても新鮮な面と同じくドットはほぼ真円形であることがわかる。普通紙上ではフェザリングが顕著に現れている。

4. 課題と対策、応用への期待

課題は用途によって異なるのですべてを一律に論ずることはできないが、デジタル画像プリントシステムでは、高画像保存性と高画質を両立させることが、記録方式や用途によらずほぼ共通の課題であると言える。概観すると、染料熱転写と熱現像型銀塩感光材料のシステムは画質で優れているが画像保存性にまだ問題を残し、一方、静電記録方式と熔融型熱転写のシステムでは画像保存性は良いが写真同等の画質を得ることは困難である。

筆者らは、染料熱転写の色材にキレート化反応を組み込むことによって、写真とほぼ同等の画質を得ながら、耐光性、耐熱性に優れた技術を開発し、商品化した⁶⁾。染料熱転写では、プリントした画像の上に高分子化合物からなる保護層(転写箔)を熱転写することにより、画像保存性を高くする技術も開発され、これも商品が市場に出ている。この方法は、画像面を物理的に保護するので、傷などの問題に対しても有利である。

インクジェット記録で、特に染料系のインクと多孔性の専用受像紙を組み合わせる時に、画像の保存性が悪い。耐光性だけでなく、オゾンのような酸化性のガスに触れたときに褪色が急速に起こるといった問題が、市場で顕在化している。この問題に対処するために、インク中の染料の変更および受像紙の改良が進められ、効果が出てきているが、まだ不十分である。染料は、色再現性のほか、インクの安定性、飛翔性、画像のにじみ(ボケ)にも影響するので、簡単に変更することはできない。変異原性の可能性を調べる Ames 試験等の安全性に関する関門をクリアすることも必須である。多孔性専用受像紙の受像層には、 Al_2O_3 または SiO_2 の微小粒子が、比較的少量のポリビニルアルコール等のバインダー成分とともに用いられている (Fig. 2)。剛性の高い空隙構造にインクが浸透するというプロセスを通して、見かけの速乾性、高画質などの特長点を得られるのであるが、インクの溶剤が蒸発した後、染料分子は周囲をあまり保護されること無く、化学活性物質に対して攻撃されやすい状態で存在すると考えられる。この無防備な状態を回避するには、インクを吸収して膨潤する高分子化合物を多く用いればよいことがわかっているが、このような方法をとると、多孔性受像紙本来の長所

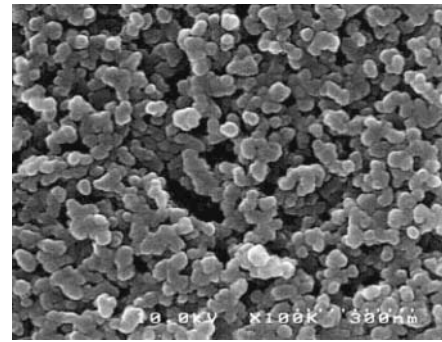


Fig. 2 Electron micrographs of micro-porous ink jet media. An ink absorptive layer consists of silica particles and poly (vinyl alcohol).

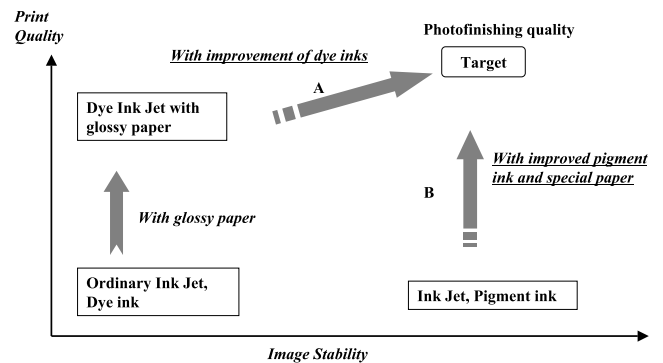


Fig. 3 Routes of ink jet images reach the target for photofinishing application.

が失われてしまうことになる。

インクジェット記録は、安全である、ごみが出ない、保守管理が容易、プリンタが安価、静電記録方式のような予熱システムが不要ですぐにスタートできる、小さなサイズから大きなサイズまで画像および用紙への対応性に優れている、といった多くの特長を持つ。そこで、インクジェットシステムを、現在写真システムで運用しているミニラボやキオスクのような市場に適用する試みがなされている。この市場では、現行の写真システムとの対比で、画質および画像保存性の両立を図った上で、操作性・装置の保守管理・装置価格・生産コスト・仕上がり品質・維持管理の容易性の各項目を主張できるだけのシステムの構築が課題となる。この課題への取り組み方として、現在のインクジェット記録システムの技術状況から見て、二通りの道筋が考えられる。Fig. 3 に示したように、そのひとつは染料系インクジェットの画像保存性を改良するルートで、他の一つは顔料系インクジェットの画質改良を図るルートである。

顔料系インクジェットでは、色の不透明性、ブロンジング、記録部と非記録部の光沢の違いなどが画質悪化因子として注目される。色を重ねたときの不透明性に関しては、顔料粒子を小さくすることによって透明性を上げることができる。しかし、顔料粒子を小さくしすぎると、耐光性が染料のように悪くなる⁷⁾。色再現に関して、顔料インクの画像は染料系の画像に比べて同等以上のポテンシャルを有する。色再現範囲を Fig. 4 に示す。

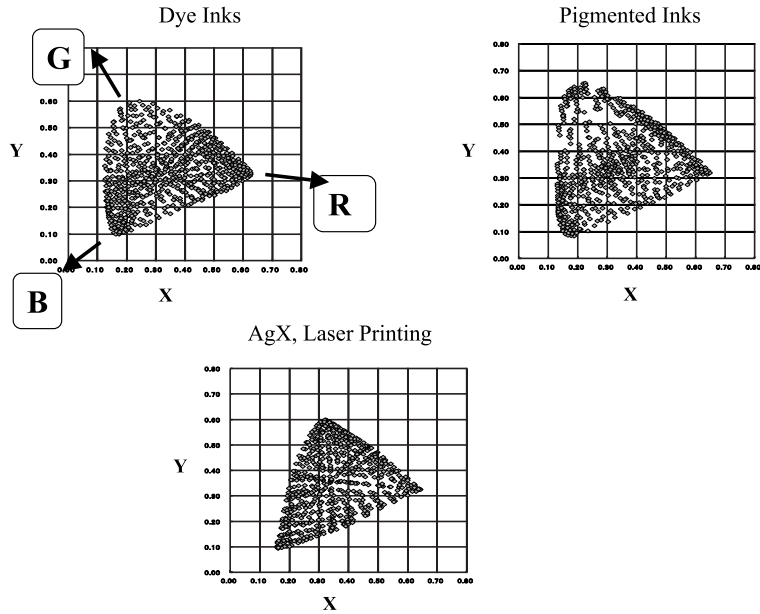


Fig. 4 Color Gamut of ink jet printing and silver halide photographic laser printing.

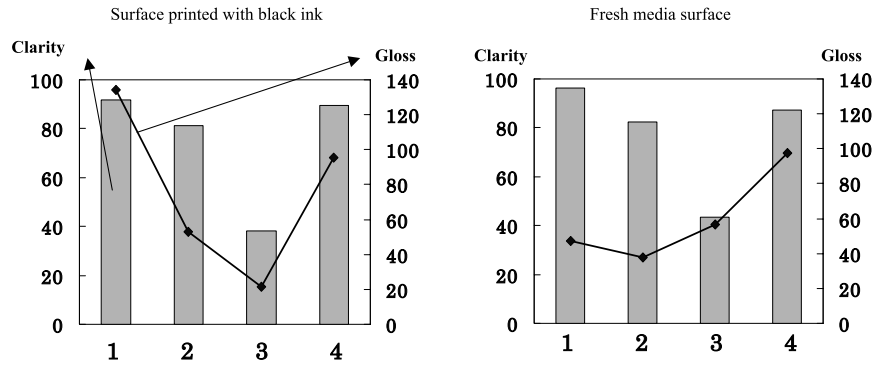


Fig. 5 Clarity and 60-degree glossiness of ink jet images.

(A) Surface printed with black ink. (B) Fresh media surface.

1: Pigmented ink + Special paper, 2: Dye ink + Micro-porous glossy paper, 3: Pigmented ink + Micro-porous satin paper, 4: Color photography (as Reference).

顔料インクの画像でしばしば見られるブロンジングの現象は、顔料粒子をポリマーで覆う方法により、ある程度改良できる。顔料をあらかじめ加工してポリマーで覆い、それをインク調製に用いる方法、インク中にポリマーを添加する方法などが考えられる。しかし、改良の効果が十分でないこと、インクの保存安定性が良くないことといった理由で、まだ究極の改善策が出ていない。

そこで、筆者らは多孔性インクジェット受像紙の上に、顔料インクを定着させるための特殊な層を重ねて設ける方法を試みた。顔料インクでプリントした後、ある条件の下で新設の特殊層の中に顔料インクを取り込む。このような方法で、顔料系インクジェットで、ブロンジングが皆無で、プリント面全体に高い光沢が得られ、色の透明性にも優れた画像が得られることを確認した。Fig. 5に、画像部と非画像部について60度光沢および写像性 (Clarity または Distinctness of Images) を測定した結果を示す。風のない静かな湖面に、前方にそびえている山の姿が鮮明に映っている様子を想像していただき

たい。このときは、写像性が極めて良い状態である。揺れない水面や鏡では、表面が平滑であって物体の反射像が良く見える。しかし、もしきわめて微小な凹凸が表面に一樣にあれば、光沢はある程度高いが、前方にあるものは反射像としてよく見えないということが起こる。このときは、高光沢であっても写像性は良くない状態である。写像性は写真の品位を決める重要な因子のひとつとして知られている。この図に見られるように、顔料インクと特殊層を設けたインク受像紙の組み合わせで、カラー写真同等かあるいはそれ以上の結果が得られた。

染料熱転写方式を用いてミニラボやキオスクのシステムを構築することもできる。しかし、大判プリント対応性、不要な排出物の多寡を考慮するとインクジェット方式の方が将来有望であろう。

次に、医用画像について考えてみる。医用画像の場合は高濃度、高階調性、高速記録が必要とされる。対象とする画像によって、レベルは異なるが、たとえば診断用の画像では3.5

以上の濃度で 10^{10} 以上という階調数が必要とされる。このような高いレベルの濃度と階調を、2 値材料を用いて面積階調法で両立させることは容易でない。高濃度を得ようとするとき、ドットが大きくなり、高い解像度を得ることができなくなって、画像はつぶれてしまう。高階調性を得るために極めて小さなドットを精密に並べていくこと（数千 dpi）と濃度多値化が必要となる。濃度の多値化には、前述のように濃度の異なる同色の色材を用いて記録する方法を用いることも考えられるが、記録速度とコストの観点から現行の銀塩写真システムに対する優位点があいまいになってしまい、実用化は簡単でない。ただし、デジタル画像プリントシステムを参照画像記録に用いることにおいては、上記のミラボのところ述べたのと同様の特長点を活かすことが可能である。実際に、染料熱転写記録方式はすでに胃カメラの撮影画像をプリントするときなど使用されている。

5. おわりに

染料熱転写とインクジェットのプリンタは、誰でも、どこでも取り扱うことができ、保守管理はきわめて容易である。これらのことは、写真感光材料を用いるデジタルプリントシステムおよび静電記録システムと異なっており、大きな特長であると言える。

現在、一般的にデジタル画像プリントシステムは記録速度

が遅いという問題を持っているが、高速の画像データ処理および転送技術の目覚ましい発展が続いている。また、装置面ではライン型の記録ヘッドをプリンタに搭載することにより記録速度の上昇が図られている。熱転写プリンタでは、今やライン型のサーマルヘッドは当然という状態になっている。インクジェットプリンタにおいてもライン型記録ヘッドの採用が進む可能性がある。画像の出力速度が上がると、保守管理の容易なことなどの特長を活かして、デジタル画像プリントシステムはまた一段と従来からの写真の市場を脅かすことになるだろう。

今も 80 年代から引き続いて、デジタル・ドライ・フルカラーのキーワードは生きている。

参 考 文 献

- 1) テレビジョン学会編, “テレビジョン・画像情報工学ハンドブック”, コロナ社, pp. 262-265 (1990).
- 2) (社) 日本写真学会編, “ファインイメージングとデジタル写真”, コロナ社, pp. 198-205 (2001).
- 3) 沢山 昇, 日本画像学会誌, **41**, 343-350 (2002).
- 4) 内川恵三, 日本画像学会誌, **41**, 328-331 (2002).
- 5) 阿部隆夫, 日本写真学会誌, **53**, 245-250 (1990).
- 6) T. Abe, S. Mano, Y. Yamaya, A. Tomotake, J. Imag. Sci. Technol., **43**, 339-344 (1999).
- 7) A. Tomotake, M. Nakamura, T. Abe, Proc. ICIS'02, Tokyo, 547-548 (2002).