

乾式電子写真による高精細レーザープリンター

高島 正武*・小俣 公夫**・藤井 寛一*

*茨城大学大学院工学研究科生産科学専攻 〒316 日立市中成沢町 4-12-1

**荏原総合研究所 〒251 藤沢市本藤沢 4-2-1

High-Resolution Laser Printer by Means of Dry System Electrophotography

Masatake TAKASIMA,* Kimio KOMATA** and Kan-ichi FUJII*

*Graduate School, Ibaraki University, 4-12-1, Naka-narusawa, Hitachi 316

**Ebara Research Co., Ltd., 4-2-1, Honfujisawa, Fujisawa 251

We have succeeded to develop a high resolution laser printer with electro-photographic dry process. This prototype machine has a scanning mechanism with variable speed which was enabled by newly developed air spindle as well as original $f\theta$ lens. For reproduction of high resolution dot, we employed photoreceptor with high gamma characteristics, small particle toner ($4.5 \mu m$) and original digital imaging process. Consequently, beam spot size is produced smaller than $26 \mu m$ at whole scanning range on the photoreceptor drum. Thus the resolution of 1693 dpi is obtained by means of separated dot image on photoreceptor drum. Such real 1693 dpi image has to be fascinating in the professional high resolution printing field.

1. はじめに

ここ数年、パソコンは、高速化、大メモリー化がめざましく、文書処理、画像処理の能力は、商業印刷に匹敵する組版処理を可能にしている。パソコンで加工される高い品質のデータを出力するレーザープリンターは、いっそうの高精細化が要求されており、1200 dpi (dot per inch)* の機器も実用化されている。しかし、現在、乾式電子写真の画像形成能力は、800 dpi 程度であり、高精細性の要求を満たすため、電子的なポジショニングによって疑似 1200 dpi としている。

このような疑似 1200 dpi では、濃淡画像を表現する網点の再現において、ハイライト部分の飛びや暗い部分のつぶれが生じ、意図通りの出力にならない。そこで、印刷のオリジナルとしての版下の出力は、今なお、より解像力の高い銀塩写真方式を用いている。

しかし近年、写真廃液処理の問題がクローズアップされて、印刷業界において、写真処理液を使わないプロセスの開発が要求されている。現在の電子写真プリンター

を印刷版下に使えるほどに高精細化するには、①微小スポットの光学系、②高精度の走査系、③ガンマ値の高い感光体の 3 つの要素の開発が必要である。

電子写真技術の発展段階では、主な用途がコピー装置であったため、中間調を忠実に再現できる感光体が要求された。その結果、従来の感光体は露光量に比例して表面電位が下がる特性を示す。このような感光体によるデジタル画素（微小ドット像）では、露光部と非露光部の境界に、ドットの径に影響するほどに広い中間電位の領域が発生する。近接する微小なドットの間には、それぞれのドットが形成する中間電位領域が重なり合って、孤立点として再生することができなくなる。そこで、微小ドットの形成には、ガンマ値（露光量に対する表面電位の変化する割合）の高い感光体が要求されることになる。画像に対する両者の特徴を Fig. 1 に示す。

我々は、これらの要素技術の開発に成功し、それとの関係学会で発表した^{1,2)}。また、これらの要素技術を高精細電子写真装置として実用化するために、高ガンマ値感光体に適した電子写真プロセスを開発した。本技術報告ではこれらの研究のために製作した試作装置と、それぞれの要素技術の特性および像形成能力を報告する。

*電子写真によるレーザープリンターでは一般的に画素密度の表現に inch 当たりの密度を用いている。本論文でも他の論文と直接対比可能なように画素密度に関する表記は inch 当たりの密度を用いた。

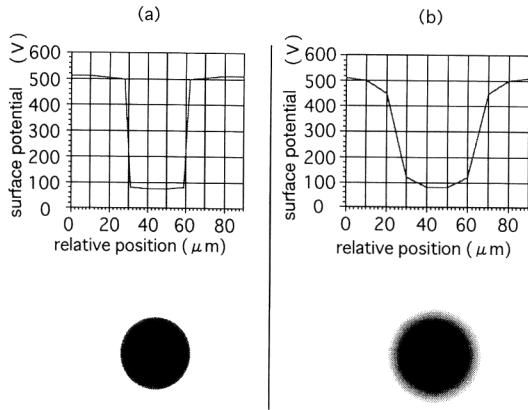


Fig. 1. Comparison of image on photoreceptor, (a) high gamma, and (b) low gamma. Upper part: photosensitive curve. Bottom part: illustration of printed image.

2. 研究概要

2.1 品質目標の設定

本試作研究は、印刷版下用にドライプロセスの高精細画像出力機の可能性を追求する目的として品質目標を設定した。

印刷画像では濃度の表現に網点を用いる。一般的な印刷物では、2%ステップで濃度を表現できればよいとされている。網点をレーザープリンターで形成する一例を示す。

縦横8ドットの領域を確保し、この領域に濃度に対応させて1~64個のドットを順次増やしていく、黒の点を形成する。この場合、64通りの大きさの点を形成することができるため、1.56%の濃度ステップで0~100%の網点を形成することができる（ただし、1ドットずつが、独立した点として基準のサイズで出力できることが条件となる）。網点の密度は、1インチに並ぶ網点の数を用いて線数で呼ぶ。この例では、1200 dpiのプリンターを用いると、 $1200 \div 8 = 150$ であるから、150線の網点と呼ばれる。また、網点は出力されるドットピッチの整数倍で作られることから、印刷版下のように目的に応じて網線数を変えるには、制限が生じる。

デジタル画像がピッチ T で標本化されている場合、スペクトルは周期性をもつ。再現しようとする画像の周期が標本化のピッチ周期に重なりをもつ場合、信号周期が $1/2T$ 以上のときは再現できない³⁾。すなわち、レーザープリンターでは、画像をドット密度で標本化するのであるから、ドット密度の $1/2$ の解像力しか得られないことになる。

先に述べたように、疑似 1200 dpi とした実用機では、テキストの斜め線の階段形状は感じることができないほどに小さくなり、コンピューター出力用として問題はない。しかし、ドットサイズが大きいため、細密な文字の隙間を重視する印刷版下としては、十分な評価を得ていない。

これらのことからふまえ、本研究では、微小ドットを正確に再現し、リアル 1200 dpi 以上の精細さを得るために、デジタル画像形成に適した電子写真プロセスを開発した。また、デジタル化されたアナログ画像の問題点（網点形成）を解決するため、走査ピッチを可変にすることのできる“可変速ポリゴンキャニングシステム”を開発した。

カラーの印刷では、Y. M. C. K. それぞれの版の網点の角度を変え、版相互に生じるモアレ（ピッチの近接した網点を重ねてできる疑似の周期的濃淡像）を防いでいる。しかし、ドットで網点を形成した場合は、角度の異なる網点を形成する要素が同一の標本化ピッチを有することとなり、モアレの発生を完全に取り除くことはできない。また、ポリゴン走査および感光ドラムの回転において、周期的に発生するピッチ誤差によっても、網点にモアレを生じる。

本試作研究では、網点の計算を簡単にするため、600 dpi を 635 dpi, 1200 dpi を 1270 dpi, 1700 dpi を 1693 dpi として 3種類の画素密度を切り替える機構とした。また、ポリゴン走査精度（水平ピッチ精度）、および感光体ドラムの回転精度（垂直ピッチ精度）は、市販装置の3倍程度に上げることとした。光学系は、設定密度に合わせて1ドットの孤立点を再現できるように、スポット径を切り替えることとした。

このような検討の結果、品質目標を下記に定めた。

- (1) 可変ピッチ、可変走査密度の出力を可能にする。
- (2) ドットピッチ誤差は出力範囲全域で $1/3$ ドット以下とする。
- (3) 1693 dpi で孤立ドットが再現できること。

2.2 開発項目

ペアリングを用いた軸受けでは、回転数を変えると振動の状態が変わり、回転軸の振れが変化する。また、高速回転では熱の発生が大きく、軸受けの圧力が増し、回転むらの原因となる。そこで、可変速の走査機構として、振動の少ない空気動圧軸受けを用いたポリゴンキャナーを開発した。

また、副走査系の速度も可変とすることから、現像装置やクリーナーシステムの負荷変動に耐えるバックラッ

シューのないハーモニックギヤーを用いて、安定した感光ドラムの回転機構を開発した。

開発項目の主なものを以下に示す。

(1) 走査光学系：

- (a) 可変速動圧ポリゴンモーター, (b) 可変スロット走査系, (c) 高速 LD スイッチング回路,
- (d) 良好的な $f\theta$ 特性の光学系

(2) 副走査と紙送り：

- (a) 可変速感光ドラムモーター, (b) 安定した紙送り機構

(3) 電子写真プロセス：

- (a) デジタル高ガンマ値感光体, (b) $4.5 \mu\text{m}$ の重合型トナー, (c) デジタル画像形成プロセス

(4) その他：

- (a) 剛性の高い機構設計

3. 装置の概要

3.1 仕様

本研究における試作装置は下記の仕様とした。この仕様は、印刷業界で要求されるドライプロセス製版版下用出力機としての品質を意図したものである。

- (1) 解像度(3速切替え)：1693 dpi, 1270 dpi, 635 dpi
- (2) 出力網線数：150 線(5~95%)
- (3) 出力サイズ：A3+トンボ(裁断マーク)
(356×500 mm)
- (4) 出力スピード：2 枚/分(A3, 1693 dpi)
- (5) 印字精度：主走査寸法精度 $\pm 0.15 \text{ mm}$ ($L=300 \text{ mm}$), 副走査寸法精度 $\pm 0.2 \text{ mm}$ ($L=420 \text{ mm}$), 直角度 $0.2/300$, 直線性 0.2 mm (直線の基準線からのずれ), 濃度むら ± 0.03 以内
- (6) 出力媒体：専用普通紙, 専用刷版材

3.2 装置の構成

Fig. 2 に装置の構成を示す。上部ユニットに電子写真プロセス、露光機構、定着部、制御ボード、ページバッファメモリー等を収容した。下部ユニットは用紙トレイと集塵装置を収容した。集塵装置は本機が $4.5 \mu\text{m}$ のトナーを使用することから、飛散したり浮遊したトナーを本体の中で回収し、周囲へ出さないためである。

4. 開発試作結果

4.1 ポリゴンスキャナー

ポリゴンミラーを回転させるポリゴンスキャナーモー

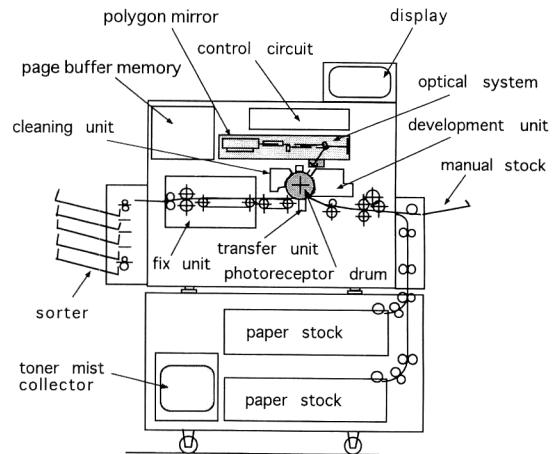


Fig. 2. Schematic diagram of experimental high resolution laser printer.

ターは、セラミックスを用いた空気動圧軸受けを使用した。軸受けのラジアル面とスラスト面には、レーザー加工で、スパイラル溝を設け、摩擦面を空気流で覆う機能をもたせてある。軸および軸受けにセラミックスを用いることにより、温度特性、振動特性の改善ができた。

Fig. 3 にポリゴンスキャナーモーターの構造図を示す。ポリゴンミラーは内接円径 78 mm の大きさの 6 面体を用いた。セラミックス軸への取付けは、シャーリングフィッター(特許出願中)と呼ぶ中間リングを用いて圧入した。圧入後、ミラー面を専用加工機で追加工して、 $\lambda/8$ 程度の面に仕上げた。通常、ポリゴンミラーのような高精度部品は圧入すると、回転中に温度の変化で面精度に悪影響が出る。本装置では、シャーリングフィッターを用いて、温度の影響、および圧入時の歪みを吸収している¹⁾。

ポリゴンミラーの回転速度むらは、出力物の縦線の乱れとして現れる。Fig. 4 に回転速度むら(ジッター)の計測結果を示す。各チャートの縦軸中央に走査原点(starting point)からの時間(ns)を表示し、その上下の数値は偏差値(ジッター)で表した。走査線に沿った 2 点間(356 mm)を通過する時間の差を 10 回転(60 面)計測した値を順次プロットした。変動量は 16 ns 以下に入っている。誤差は 0.003% 以下である。6751 rpm から 18000 rpm まで回転スピードを変化させた場合、それぞれ、誤差が 0.002% から 0.003% の範囲に入っている。

回転中のポリゴンミラーが軸振れをおこすと、ミラー面が傾斜(動的面倒れ)してスキャンピッチにむらを生じる。Fig. 5 に 2 点間ジッターと動的面倒れの計測方法

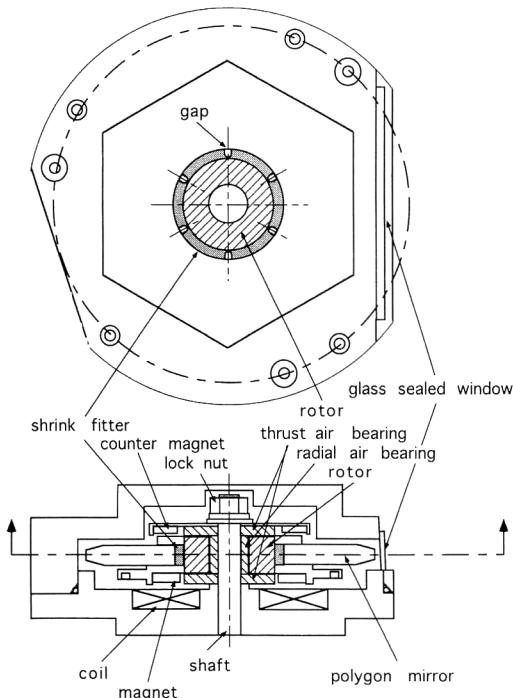


Fig. 3. Scanning motor and polygon mirror.

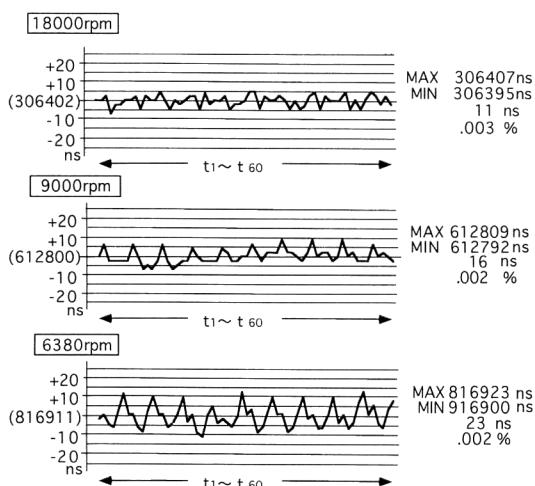
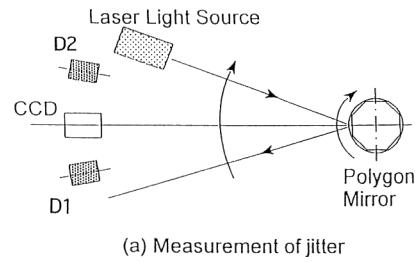
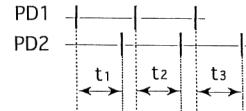


Fig. 4. Dynamic tracking jitter between starting point and ending point. Center of horizontal scales are pointed scanning time from top to end. Positive and negative numbers indicate deviation.

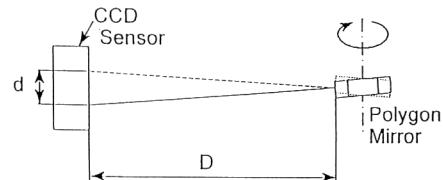
を示す。Fig. 5(a)において、He-Ne レーザーから射出されたレーザー光は被検ポリゴンスキャナーモーターの中に組み込まれたポリゴンミラーで反射され走査光となる。この走査光が受光素子 D1 と D2 を横切る。D1 の



(a) Measurement of jitter



(b) Times for traversing photodiodes



(c) Measurement of tracking accuracy

Fig. 5. Measuring method of jitter and tracking.

出力を PD1, D2 の出力を PD2 とするとき、PD1～PD2 の時間差を連続的に 10 回転計測すると、ポリゴンミラーは 60 面通過し、それぞれ $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{60}$ が得られる。2 点間ジッター値 ΔX は式(1)で計算される。 ΔX を出力物上の走査開始点からの位置ずれに換算すると、約 7 μm (356 mm 幅) となり印字ドットの約 1/3 の誤差である。ただし、 $(\)_{\max}, (\)_{\text{mean}}, (\)_{\min}$ はそれぞれ最大値、平均値、および最小値である。

$$\Delta X = \frac{(t_{2n} - t_{2n-1})_{\max} - (t_{2n} - t_{2n-1})_{\min}}{(t_{2n} - t_{2n-1})_{\text{mean}}} \times \frac{356 \text{ mm}}{(t_{2n} - t_{2n-1})_{\text{mean}}} \quad (1)$$

ただし、 n は 1, 2, 3, … 30 である。

動的面倒れは、ポリゴンミラーの回転軸からの傾き角 $\Delta\theta$ として定義され、式(2)で計算される。

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \times \tan^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) \quad (2)$$

ただし、 d は Fig. 5 に示す CCD センサーを用いて測定した走査方向と直角方向の変位の最大値である。また、 D はミラーから CCD までの距離 720 mm である。

Fig. 6 には面倒れの測定結果を示す。縦軸は傾きの角

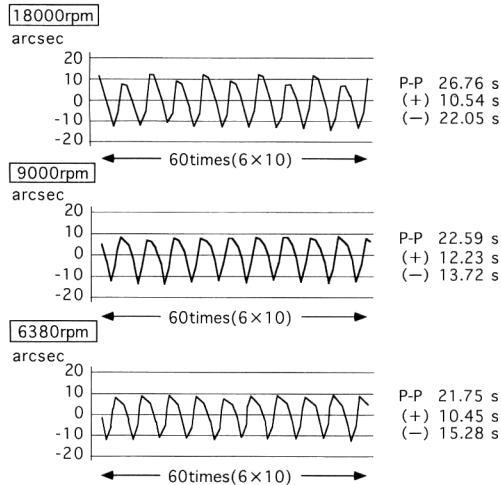


Fig. 6. Dynamic tracking accuracy.

度(秒)である。計測値は、10回転連続的に計測しCCDで読み取った $d_1 \sim d_{60}$ から角度を計算し、順次プロットした。Fig. 6のチャートから、1回転ごとにほぼ相似形に変化し、回転数の変化によらない成分が読み取れる。この成分は、ポリゴンミラーが軸に傾斜して固定されているため生じた誤差と思われる。この取付け誤差は、22.6 s (p-p) 以下である。18000 rpm では若干の軸ぶれがみられるが、その量はほとんど印字精度に影響しない。

光学系には、さらに、結像面近傍に面倒れを補正するレンズ(長尺のトーリックレンズ)を装備した。その結果、この誤差は印字物上で1 μm以下となる。

4.2 露光ユニット

露光ユニットには、ポリゴンミラーとfθレンズによる走査光学系を用いた。光学系は3種の解像度の切替えのためのレンズを装備した。これらのレンズは、ポリゴンモーターの回転数に合わせて切り替わる。以下に光学系の概略仕様を示す。

fθ レンズ

焦点距離	350.14 mm
Fナンバー	19.5 (25 μm スポット時)
走査画角	結像面上の長さ 368 mm
fθ 特性	0.15 %以内
使用波長	780 nm (5 mw LD)

ポリゴンミラー

内接円径	78 mm (6面)
レーザー入射角	58 度
走査角度	±15 度

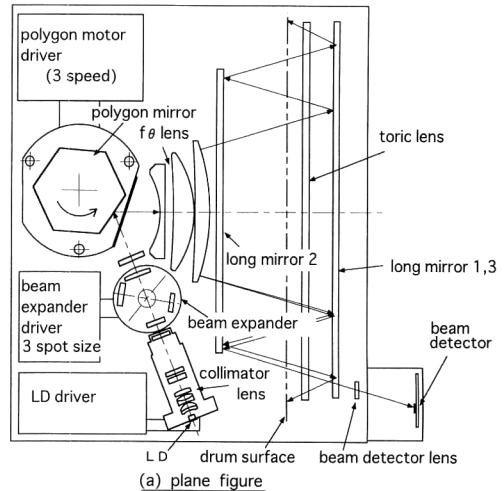


Fig. 7. Configuration of optical system.

走査効率 0.5

Fig. 7に光学系の平面図および側面図を示した。fθレンズは3枚構成とした。第1～第3ミラーは露光ユニットの長さを短くするためである。第1ミラーは第3ミラーの上部に傾斜を付けた部分で、一体となっている。走査の開始点の信号(走査原点信号)は、第3ミラーの描画領域の外に設けた透明部を通過した光束を、フォトダイオードで検出し、一定時間遅延させて発生させた。

解像度切替えのためのレンズ(beam expander)は、半導体レーザーと一緒に組み込んだcollimator lensにより広げられた平行光束中に挿入した。レンズの構成は凹、凸2枚構成である。

fθレンズの焦点距離を f 、入射する光束の径を ω 、波長を λ とし M をモードによる係数として、ビームの収束径(スポット径) ω_0 は

$$\omega_0 = \frac{4\lambda f}{\pi\omega} \times M^2$$

であるから、スポット径はレンズに入射する光束の径の逆数に比例する。そこで、beam expanderレンズは、1016 dpiを基準として、635 dpiで0.6倍、1270 dpiで1.25倍、1693 dpiで1.66倍とした。ただし、0.6倍と

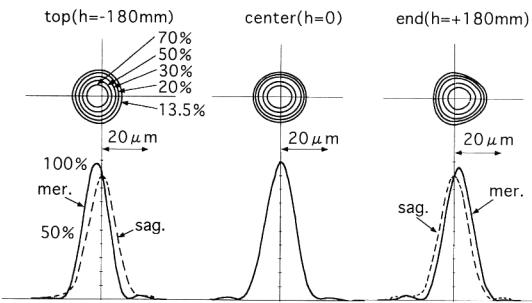


Fig. 8. Calculated shape of beam spot on the drum surface ($\lambda=0.78 \mu\text{m}$).

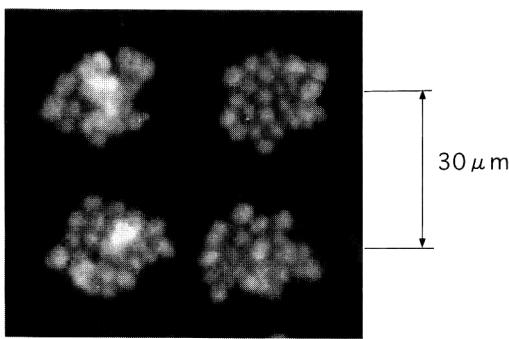


Fig. 9. Toner image on drum surface. Printed conditions are surface voltage: 550 V, exposure condition: 1693 dpi, development voltage: 250 V, toner size: 4.5 μm , polymerized toner.

1.66倍のレンズは、同じレンズ構成で逆に用いている。

このときのスポット径 ($f\theta$ レンズ中央部) は、635 dpi, 1270 dpi, 1693 dpi の順に、 $64 \mu\text{m}$, $32 \mu\text{m}$, $24 \mu\text{m}$ となる。計測値では、635 dpi および 1270 dpi は設計通りであったが、1693 dpi の時は結像面全域で約 25~26 μm となった。

Fig. 8 に本光学系の結像面でのスポット形状（計算値）を示す。図には、最小スポットである 1693 dpi のみを掲載した。目標としたサイズは $1/e^2$ で 24~25 μm である。走査の両端部分においてスポット形状に若干の変形が見られるが、無視できる量である。Fig. 9 に、感光体上のトナー像を示した。像の外径は $26 \mu\text{m}$ で、ほぼスポット径に等しく再現している。

$25 \mu\text{m}$ のスポットはポリゴンミラーによって出力物を水平方向に走査される（主走査）。ポリゴンミラーで走査されたスポットは結像面の両端で速くなる。その結果、ドットのピッチが長くなる現象（等角速度 ω で走査している光束は、結像面上を $\tan \omega$ の速度で移動す

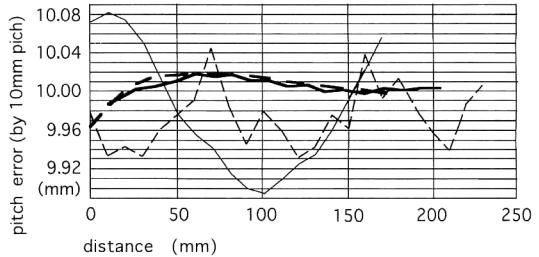


Fig. 10. Supplementary horizontal pitch using prototype $f\theta$ lens, - - - calculated numerical data using $f\theta$ lens and polygon scanner, — prototype system, - - - commercial LBP for printing, — commercial LBP for office.

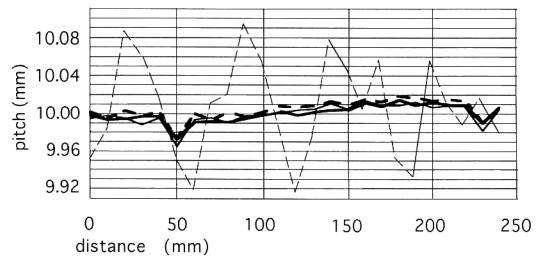


Fig. 11. Vertical pitch using harmonic driving system, — prototype system (right of print), - - prototype system (center of print), — prototype system (left of print), - - commercial LBP for office.

る）が生じ、補正を必要とする。この補正是、 $f\theta$ レンズの歪曲収差を利用して補正する。Fig. 10 に水平方向のピッチ誤差を示した。結像面で補正された速度で走査して出力された出力物上の残留誤差を、10 mm ピッチを基準とした誤差として計測した。Fig. 10 に $f\theta$ レンズの歪曲収差から計算した補正值（太い点線）との比較を示す。計測結果（太線）はほぼ目標通りに補正されている。残留誤差は 0.02 mm 以内である。

Fig. 11 には、副走査方向（出力物の垂直方向）のピッチ誤差を示した。10 mm ピッチになるように出力した横線を、紙面の左端、中央、右端を測定し、それぞれをプロットした。相対誤差は 0.01 mm 以内となっている。

副走査用の感光ドラムを駆動するモーターユニットは、DC ブラシレスモーターとハーモニックギアを一体になるよう設計した。減速比は 1:160 である。モーター軸には 1000 P/1 回転のエンコーダーを取り付け、紙送り、現像器、および感光ドラムの回転制御の基準とした。

Fig. 10 の主走査方向誤差, Fig. 11 の副走査方向誤差の図には、比較として、市販の LBP 出力物の誤差を書き入れた。本プロトタイプ機の良好な値が読み取れる。

結果として、印刷用版下として十分な性能を有していると考えられる。

4.3 高ガンマ値感光体および高精細電子写真プロセス

電子写真的高ガンマ値感光体は、1991 年の木下の発明⁴⁾によるものである。発表と同時に数社が開発を手がけたが、感光剤である銅フタロシアニンの耐オゾン性の弱さをカバーできず、実用化されなかった。しかし、安定して高精細画像を形成するためには、感光体の高ガンマ特性は必要条件となる。我々は本試作に先駆け高ガンマ値デジタル対応感光体²⁾の開発を行い、目標の性能を得た。感光特性を Fig. 12 に示す。図のごとく、本機に使用した感光体は、 $0.8 \mu\text{J}$ と $2 \mu\text{J}$ の間で急峻な感光特性を示し、ガンマ値は高い。また、 $0.6 \mu\text{J}$ 以下の露光に対しひとんど感光特性を示さない。

構造は、バインダー樹脂中に電荷発生剤を分散した単層型感光体である。この感光体は表層部で感光し、感光層内の横方向の電荷の拡散は少ない⁴⁾。この構造の感光体では、露光された光が表層部の電荷発生層に吸収され、深い部分には達しない。そこで、2 層形 OPC (organic photoconductor) にみられる CTL (charge

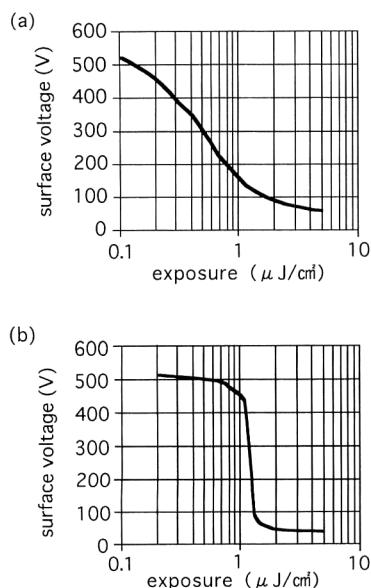


Fig. 12. Photo sensitive curve of commercial photoreceptor (a) and prototype photoreceptor (b). The sensitive curve (b) shows high gamma sensitivity at $1-1.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$.

transfer layer) 層内の光の拡散や反射による画像の乱れではなく、デジタル感光体が高精細画像を形成できる理由のひとつとなっている⁵⁾。

また、この感光体は正帯電で作動するため、主帯電器からのオゾンの発生量は少ない。

感光体表面の静電潜像は露光部と非露光部の電位差が大きいため、高い帶電値のトナーを用いることができた。その結果、非画像部の飛散はほとんどみられなくなった。

4.4 現 像

本試作装置の現像プロセスは、2 成分現像方式を用いた反転現像プロセスである。現像剤は、 $45 \mu\text{m}$ のシリコンコートキャリヤーに、 $4.5 \mu\text{m}$ の球形トナーを分散させ、トナー比は重量で $3.5\sim4.5\%$ とした。また、エッジシャープネスを重視するため、トナーの帶電量を $80 \mu\text{q/g}$ と高くしている。重合法で製作した球形トナーでは帶電分布が均一で、心配された浮遊トナーはほとんど認められなかった。

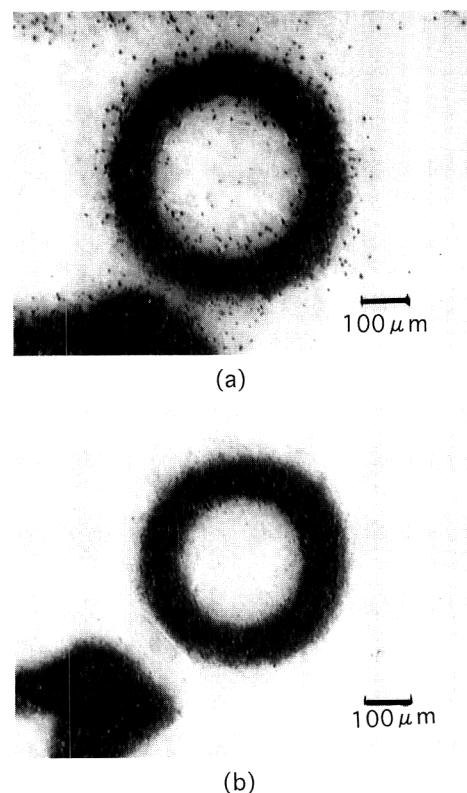


Fig. 13. Enlarged output image of commercial printer (a) and prototype printer (b). There are few scattering toner in the output (b).

しかし、球形の小粒径トナーはクリーニング性が悪く、ブレードではクリーニング不良が発生した。本装置では、クリーニングブレードと導電性ブラシの併用で、クリーニング性を改善した。

本機の現像機構では、現像バイアスを 150 V から 250 V まで変化させてもほとんど像の太りを生じない。この理由は、感光体のガンマ値が高いため、露光部と非露光部の境界の中間電位領域が狭いことを示している。Fig. 13 に出力された文字の一部分を拡大した写真を示す。本試作プリンターの出力物は、文字の境界が明確であり、飛散トナーも少ない。

5. ま と め

感光体上のトナー像を Fig. 9 に示したが、ほぼ 26 μm のスポット像となっており、光源像より 1~2 μm の太りがみられる。この太りがトナー径 4.5 μm の 1/2 であることから、トナー径により生じる画像の太りと、その他の要因による画像の太りは区分けできなかった。

従来、アナログタイプの感光体を用いた乾式プリンターでは、画像の高精細化のために、トナーの帶電特性を安定に保ち、正確に現像バイアス電圧を制御することに努力が払われた。しかし、いまなお、800 dpi 程度が限

界であった。

本実験試作で、高ガンマ値感光体の静電潜像は、2.2 項で説明したようなシャープな 2 値の電位で形成されていることが実証できた。今後、トナーの粒径を小さくしていくとともに転写の精度を改善することで、乾式電子写真方式でも、リストタイプの銀塩感光体にせまる高精細画像を安定して得ることができるものと思われる。

また、本研究試作で実施した、可变速可变ビーム径のプリンターの実現は、現在、印刷技術のデジタル化で難問となっている網点形成手法に、ひとつの解決の手段を提供するものと思われる。

文 献

- 1) 新田 勇, 古川英夫, 小俣公夫, 紺野大介: “シュリンクフィッタを用いたポリゴンミラーの超精細接合”, 日本機械学会第 73 回全国大会講演論文集 4, No. 95-10 (1995) pp. 108-109.
- 2) 高島正武, 中山博文, 鈴木慎一, 小嶋 隆, 深田 崇, 紺野大介, 小俣公夫: “乾式現像法による高精細電子写真装置”, 高分子学会第 4 回ポリマーフォーラム講演要旨集 (1995) pp. 89-90.
- 3) 原島 博: “画像信号処理の基礎”, 画像処理ハンドブック, 尾上守夫編 (昭晃堂, 東京, 1987) pp. 40-41.
- 4) 木下康一: 特公平 5-19140.
- 5) 木下康一: “高解像度化・高画質化: 感光体を中心として”, 第 34 回電子写真学会講習会 (1992) pp. 51-70.