

小径ビーム走査光学系の画質への効果

The Effect on Image Quality of a Laser Scanning System with a Narrow Beam

河合直利* 稲垣義弘* 長坂泰志*
Naotoshi KAWAI Yoshihiro INAGAKI Yasushi NAGASAKA

要旨

プロダクションプリント領域で事業を拡大するには電子写真方式の更なる高画質化と画質の安定性向上が求められる。それらを達成する技術の一つとして、書き込み光学系の小径ビーム化が有効とされるが、実際に試作してその効果を確認した報告は少ない。我々は、小径ビームが画質に与える影響を把握するため、A3幅全域でビーム径を30 μm に絞った光学系を試作して画質評価を行った。

本稿では、その試作光学系の構成および性能を説明するとともに、小径ビームが画質に与える影響の一例として、電子写真プロセスの変動により発生する色差に対する抑制効果について報告する。

Abstract

Further improvement in image quality and the stability of image quality is required if electrophotographic systems are to find a greater place in the production print market. But although a beam having a narrower diameter in a writing optical system has promised to be effective achieving that higher image quality and greater stability of image quality, there are few reports of actual prototypes built or of the effects studied. To verify the effect of a narrow beam diameter on image quality, we built a prototype optical unit which focused a 30-micrometer-diameter beam across the full width of A3 paper, after which image quality was evaluated.

This report describes the configuration and performance of our prototype optical system, and, as an example of the effect of the narrow beam on image quality, it reports a reduction effect on the color difference caused by fluctuation of the electrophotographic process.

1 はじめに

小ロット印刷物の短納期化やバリエーションデータへの対応などの特徴を活かして、電子写真方式をはじめとするデジタル印刷機器群で構成されるプロダクションプリント市場が形成されており、オフセット印刷との代替、競争が進められている。電子写真方式がプロダクションプリント領域で事業を拡大するには、オフセット印刷品質と同等性能が求められ、更なる高画質化と画質の安定性向上を目指す必要がある。

デジタル画像の画質の決定要因として、画素密度と画素毎の階調ビット数が代表される。デジタル電子写真方式においてはレーザースキャンなどによる書き込み光学系の設計仕様が重要となる。従来、レーザ走査光学系においては小径ビーム化が画質の向上に有効とされるが¹⁾、主に、孤立線や孤立ドットの再現性について議論され、総合的な画質の評価は行われていない。また、実際に小径ビームの効果を確認した報告²⁾³⁾では、数例の画像を拡大写真の比較によって定性的に示されているのみで、小径ビーム光学系設計の実際についても記載がない。

そこで、母体機として既に製品化された作像システムを流用した新規な小径ビーム光学系を試作し、母体機の持つ、検証に耐えうる優れた操作性をそのまま利用することで、必要な画像を効率よく採取し、それらの画質評価結果から小径ビーム化の効果を定量的に示す検証を行った。

本稿では、その検証に用いた試作光学系の設計内容と性能評価結果、そして、その試作光学系を用いて採取した画像の画質評価より求めた、電子写真プロセスの変動により発生する色差に対する抑制効果について報告する。

2 試作光学系の設計

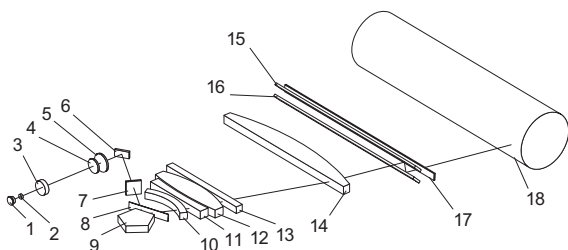
2.1 光学系の特徴

Fig. 1 に、試作光学系の概略図を示す。今回の試作光学系は、ビーム径変更時の画像への影響の検証を目的として設計された。主な設計要件は以下の3点である。

- ①30 μm から60 μm の範囲の小径ビームに自在に絞ることができること(検証範囲の確保)
- ②ビーム径の変更は一部のユニットの差し替えのみでできること(ビーム径の変更の操作性の確保)
- ③感光体以降は母体機を流用して画出し実験できること(画像確認の操作性の確保)

* コニカミノルタビジネステクノロジーズ(株)
開発本部 要素技術開発センター PFデバイス開発部

なお、ここで言うビーム径は、ベストフォーカス位置においてピークの1/e²の光量で見た幅である。



- | | | |
|-------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 Laser diode | 7 Cylindrical lens | 13 fθ lens 4 |
| 2 Collimator lens | 8 Window 1 | 14 fθ lens 5 |
| 3 Expander 1 | 9 Polygon mirror | 15 Mirror 2 |
| 4 Expander 2 | 10 fθ lens 1 | 16 Freeform surface mirror |
| 5 Expander 3 | 11 fθ lens 2 | 17 Window 2 |
| 6 Mirror 1 | 12 fθ lens 3 | 18 Photoconductive drum |

Fig. 1 Schematic of new laser scanning optics.

上記③の特徴を満たすため、今回の光学系では母体機と同じ波長(780nm)のレーザーを使用した。その条件下でビーム径を30μmまで絞るためには、光学系の収差補正レベルを上げることに加えて、温度変化時の性能変化を小さくすることが必要となる。その理由を以下に説明する。

同一の光学系で開口のみを広げると、開口幅とビーム径は概ね反比例の関係にあるため、収差やケラレの影響が無ければビームをより絞ることができる。そこで、開口を広げた場合の収差の影響を考えるために、波面収差を次式で示す⁴⁾。

$$w = \sum \sum a_{ij} y^i z^j$$

w: 波面収差

a_{ij}: yの次数がi次, zの次数がj次の係数

この式ではyとzは開口のエッジで規格化しており、そのとき係数が同じならば、結像状態に対する影響は同じになる。この式より、同じ光学系で開口幅だけ、y, zともk倍に広げると、係数はk^{i+j}倍になることがわかる。従って、小径ビームでは、より高いレベルの収差補正が必要となる。

次に、温度変化時の性能変化について説明する。ビームを小径化すると、温度変化で生じる光学素子の屈折率や形状の変化により発生するデフォーカスが最も問題となる。Fig. 2 にデフォーカスに伴う集光状態の変化の計算値を示す。デフォーカス時は光量の分布が相似形で無い変化をするため、ここでは、集光状態の表現として、光量で重み付けした重心からの距離の平均値を用いた。

ビーム径が小さいと集光状態の変化が激しく、デフォーカスの許容量が小さくなることがわかる。従って、小径ビームでは、より高いレベルの温度変化時の性能変化抑制が必要となる。

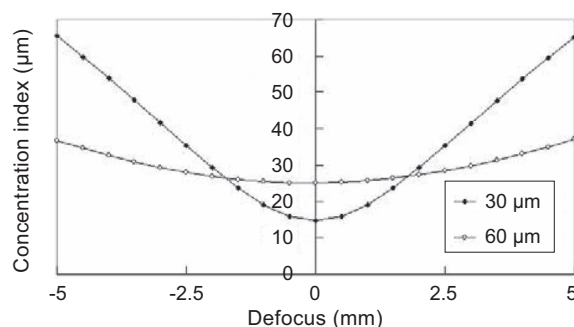


Fig. 2 Calculated results of concentration index fluctuation with defocusing distance. Concentration index is expressed in the intensity-weighted averaging distance from the center of gravity. The smaller the beam size, the smaller the defocus allowance.

2.2 ポリゴンミラー以降の光学系

Fig. 3 に、試作光学系のポリゴンミラー以降の光路図を示す。Fig. 3 (a)は横断面で、画像両端及び中央の3つの光路を重ね描きしている。Fig. 3 (b)は縦断面である。

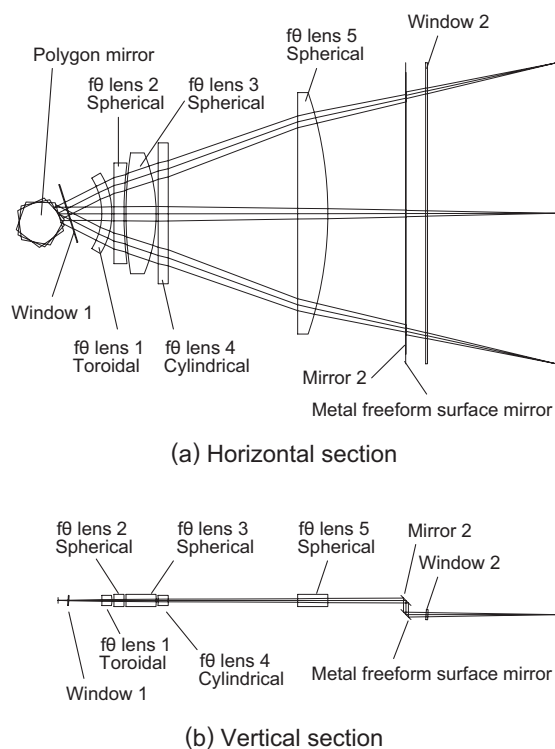


Fig. 3 Schematic of light path after polygon mirror.

レーザー走査光学系では、光学素子の材料として、ガラスと樹脂が使われる。樹脂は形状の自由度が高いという利点がある一方で、ガラスに比べて温度変化時の屈折率や形状の変化が大きい。そこで、温度変化に伴う性能変化の抑制のため、樹脂の使用を避け、ガラスレンズと金属自由曲面ミラーで構成した。ガラスレンズは、トロイダルレンズ1枚、シリンダリカルレンズ1枚、球面レンズ3枚の計5枚で、金属自由曲面ミラーは1枚である。金属自由曲面ミラーは長手方向については曲率を持っていない。多数のレンズとミラーを設けることにより、高いレベルでの収差補正も可能にした。

2.3 ポリゴンミラー以前の光学系

Fig. 4 に、試作光学系のポリゴンミラー以前の光路図を示す。(a)(b)はビーム径 $30\mu\text{m}$ 用、(c)(d)はビーム径 $60\mu\text{m}$ 用である。また、(a)(c)は横断面、(b)(d)は縦断面である。なお、光路中の平面ミラーは省略している。

今回の光学系は、レーザーダイオードからの光を平行光にするコリメーターレンズと、平行光をポリゴンミラー近傍で縦方向のみ集光するシリンドリカルレンズの間に、平行光の幅を変えるエキスパンダーを配置した構成となっている。ビーム径の変更は、このエキスパンダーとシリンドリカルレンズを差し替えのみで可能にするため、差し替えによりレーザー光の利用効率と、複数ビームの感光体上での間隔を維持するように設計した。

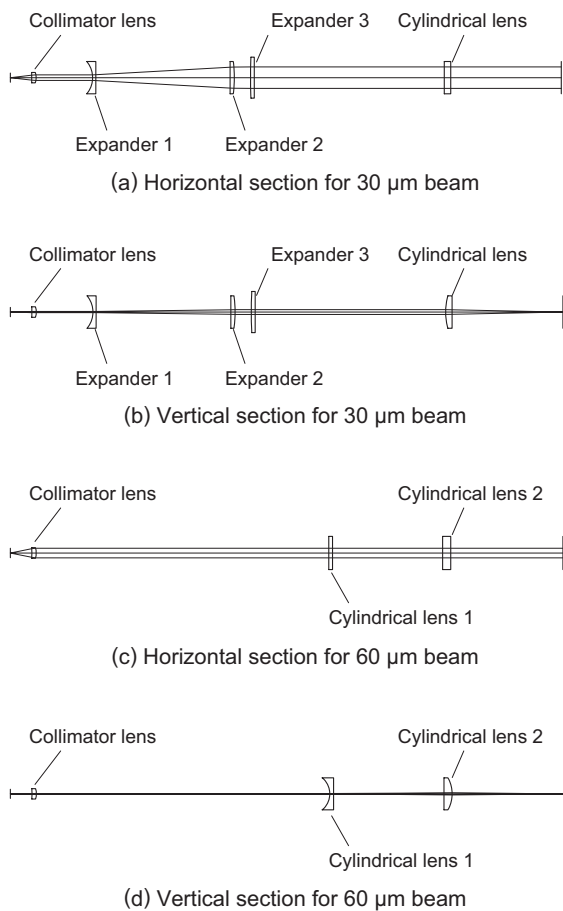


Fig. 4 Schematic of light path before polygon mirror.

3 レーザー走査光学装置の構成

Fig. 5 に本装置の構成を示す。光学素子を保持するホルダーの材料は全てアルミニウムとし、 $f\theta$ 光学系を構成する各素子は板バネで3方向から弾性固定した。

電子写真の書き込み光学系は、評価面を走査するビームのサイズを全域で均一にすることが重要である。そのためには、デフォーカス量を抑えることが必要であり、本装置では、評価面を走査するビームの走査開始側端部をビームA、走査終了側端部をビームBとした時、それぞ

れのデフォーカス量を個別に調整する機構を設けた。今回の $f\theta$ 光学系のデフォーカス量は、両端の変化に対して中間は概ね直線的に変化するので、前述の調整機構で評価面全域のデフォーカス量を抑えることが出来る。主走査方向は $f\theta$ レンズ3のZ軸周りの回転、副走査方向は金属自由曲面ミラーのZ軸周りの回転でデフォーカス量を調整する。ここで、主走査方向とは評価面をビームが走査する方向を意味し、副走査方向は主走査方向に対して垂直な方向を意味する。

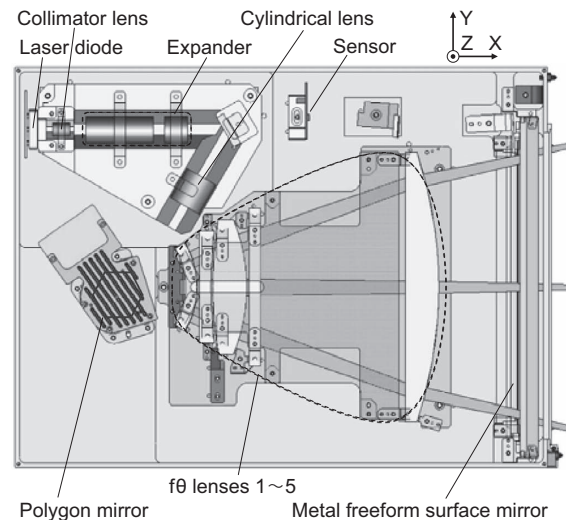


Fig. 5 Schematic of new laser scanning unit.

4 レーザー走査光学装置の性能

Fig. 6 に試作光学系の単位画素露光径の測定結果を示す。単位画素露光径とは、評価面をビームが単位画素分走査した時の積算光量分布のピークの $1/e^2$ の光量で見た幅である。ここでは1200dpiで測定しており、単位画素分は約 $21\mu\text{m}$ である。横軸は評価面上の主走査方向の位置を示し、ビームの走査方向をプラス側、走査幅の中央を0とし、測定は10mm毎に実施した。

この結果より、主走査方向、副走査方向ともに単位画素露光径は概ね均一になっていることがわかる。

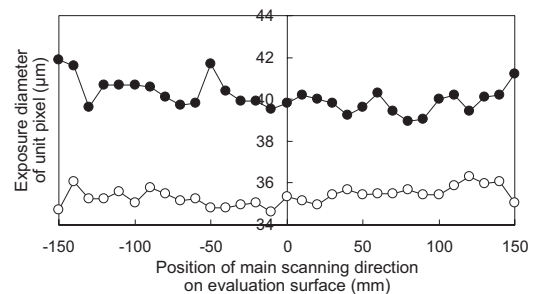


Fig. 6 Measured profile of exposure diameter of unit pixel on the evaluation surface (●: Main scanning direction, ○: Sub scanning direction). Exposure diameter of unit pixel means $1/e^2$ width of integral intensity distribution on the evaluation surface when the beam is scanned in unit pixel length.

次に、Fig. 7 に評価面上の両端のビーム A とビーム B のデフォーカスに伴う単位画素露光径の変化を示す。ビーム A、ビーム B 共に主走査方向と副走査方向の単位画素露光径が最小となる位置はデフォーカス量が 0~0.4 mm の狭い範囲に調整出来ている。

以上の結果より、評価面全域でデフォーカス量が抑えられており、試作光学系が、30 μm までビームを小径に絞っても、A3 画像領域にわたって均一なビーム形状で露光可能な性能を有していることがわかる。

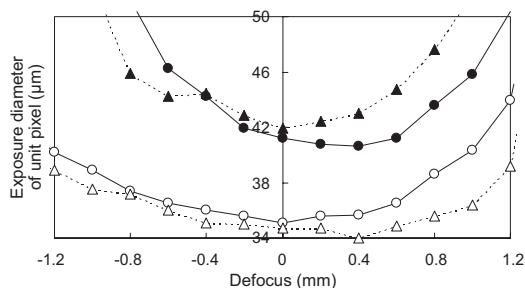


Fig. 7 Experimental results of correlation between defocusing distance and exposure diameter of unit pixel (●: Beam A in the main scanning direction, ○: Beam A in the sub scanning direction, ▲: Beam B in the main scanning direction, △: Beam B in the sub scanning direction). Beams A and B are at both ends on evaluation surface.

5 色差抑制効果

5.1 色差

電子写真では所定の色を繰り返し作像する時、感光体の感度特性や帯電特性の変動による感光体表面電位のムラや、トナー帯電量の経時変化による現像特性の変動等、各電子写真プロセスの変動により色が濃くなったり、薄くなったりする。そのため、1 ページ内の異なる場所や、最初のページと数ページ後といったページ間で色を比較すると色差が発生してしまう。

そこで、電子写真プロセスの変動により発生する色差に対する小径ビームの抑制効果を確認するために、電子写真プロセスに意図的に変動を与えて発生する色差を測定する実験を行った。

5.2 色差抑制効果の確認方法

以下の手順に従い、電子写真プロセスに意図的に変動を与えた時の階調再現性を、ビーム径の異なる 2 条件で測定し、小径ビーム走査光学系の色差抑制効果を確認した。

1. 変動因子の選定と変動量の決定
2. 変動因子と色差の関係把握 (直交実験)
3. 色差抑制効果の確認

5.3 色差抑制効果の確認結果

5.3.1 変動因子の選定と変動量の決定

潜像形成プロセスと現像プロセスにおいて色差の発生に関係する因子を以下のように考えて選定し、変動量を設定した (Table 1 参照)。スクリーンの種類や線数は電子

写真プロセスの変動因子ではないが、プロセスの変動から受ける影響度の違いを明らかにするために因子に加えた。

Table 1 Selected variable factors and their levels: each factor causes color difference in the electrophotographic process.

Levels	Factors	Shape of screen	Number of lines	T/C*	Background margin	Power of laser diode	Developing bias
1		Dot	130 (dot) 150 (line)	4%	-30V	-10%	-30V
2		Line	270 (dot) 200 (line)	5%	Default	Default	Default
3		-	270 (dot) 200 (line)	6%	+30V	+10%	+30V

*T/C: ratio between toner and carrier.

電子写真プロセスにおける階調再現性の変動要因は、温湿度、画像の印字率、連続や間欠等の印字モードの差や長期使用 (耐久) による経時変化などが挙げられる。それらの変化がトナー帯電量、感光体の感度や帯電特性、レーザー発光強度などに影響し、現像特性、露光前の感光体表面電位、露光後の感光体表面電位を変動させる。

上記階調再現性の変動は、さまざまな因子の影響が重なって発生するため、各因子の寄与度の切り分けは困難である。ここでは、現像特性を変動させる因子の一つである現像剤のトナーとキャリアの混合比率 (Table 1 では T/C と記載) と、感光体の帯電特性の変動により変化するかぶりマージンと、露光後の感光体表面電位を変動させる因子の一つであるレーザー発光量を、変動因子として選定した。これらの因子の変動量は、耐久補正や環境補正などのプロセス安定化補正を行わない場合に想定される各プロセスの特性変動を想定し、それらと同等もしくは、大きめの変動量で設定した。

また、現像バイアスは変動する因子ではないが、感光体表面と現像ローラ表面間の距離や、現像ニップに供給される現像剤搬送量の変動など、現像装置のばらつきに起因する変動の代替として、現像バイアス電位の DC 成分の設定値も意図的に変化させた。変動量は仮にかぶりマージンの変動量設定と同等とした。

5.3.2 変動因子と色差の関係把握 (直交実験)

選定した変動因子とその変動量を L18 直交表に割り付けて画像採取と測色を、ビーム径の異なる 2 条件で行った。今回はシアンのみの評価とし、格子状に区切った各領域を異なる階調パッチでそれぞれ塗り分けたシアン画像パターンを測定用画像として採取した (Fig. 8 参照)。

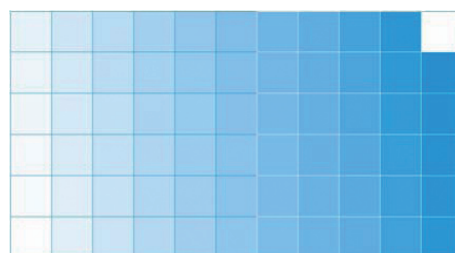
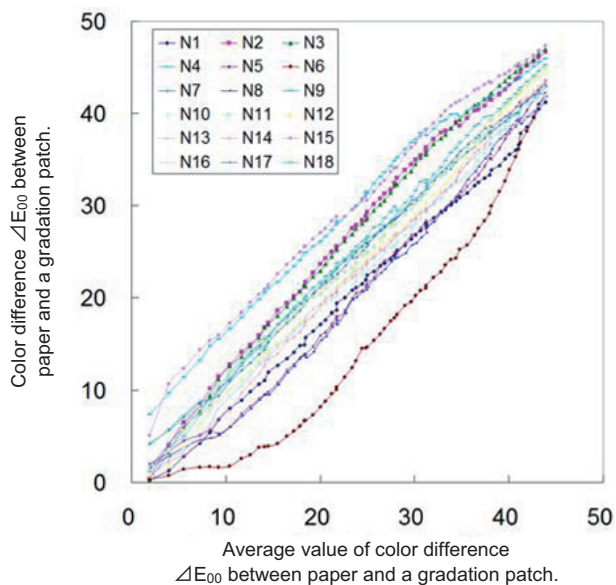


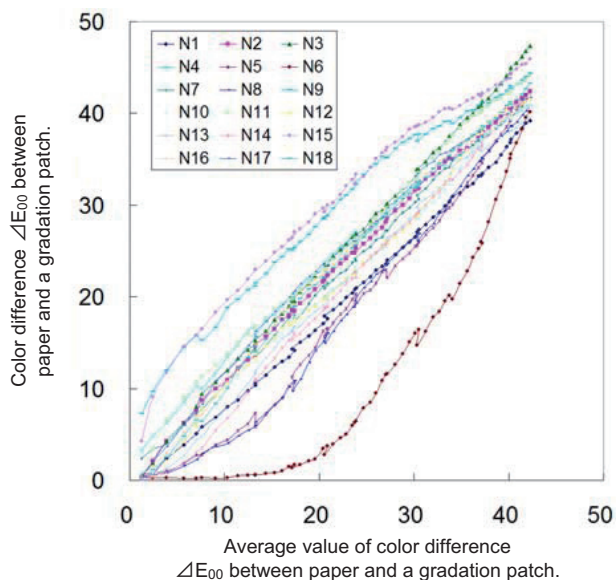
Fig. 8 Evaluation pattern for color difference.

採取した画像を各階調ごとに測色し、各階調と紙との色差を算出した。その結果を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。

Fig. 9 の横軸は今回の測色結果における各階調パッチと紙との色差の平均値、縦軸は各階調パッチと紙との色差を示し、傾き 1 の直線からの乖離が大きい実験条件ほど標準条件との色差が大きいことを意味する。Fig. 9 (a) はビーム径が 30 μm 、Fig. 9 (b) はビーム径が 60 μm の時の結果を示す。この結果より、ビーム径を 60 μm から 30 μm に絞ることにより、プロセスの変動によって生じる色差が抑制されていることがわかる。但し、色差には加法則が成り立たないため、Fig. 9 上で、実験間のプ



(a) 30 μm beam



(b) 60 μm beam

Fig. 9 Results of L18 experiments for evaluation of noise influence, which causes color difference. The larger the deviation from a straight line with a slope of 1, the larger the color difference from standard conditions. The 30 μm diameter beam shows smaller color difference caused by process variation than the 60 μm diameter beam.

ロットの差が色差の絶対値を表していない点、注意が必要である。色差抑制効果の絶対値評価は、後述の色差抑制効果の確認にて検証する。

Fig. 10 は L18 直交実験の要因効果図を示す。縦軸は SN 比を示す。SN 比が大きいほど色差が発生しにくいことを意味する。

この結果より、選定した変動因子において、ビーム径を 60 μm から 30 μm に絞ることにより、プロセスの変動により発生する色差が小さくなる傾向があり、その傾向はレーザー発光量の変動(感光体感度の変動)に対して顕著であることがわかる。

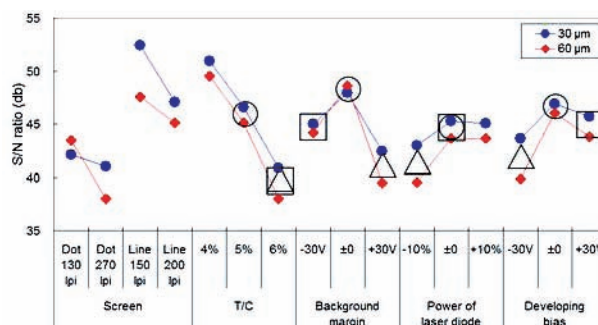


Fig. 10 Factorial effects comparison of 30 μm and 60 μm beam systems. Conditions selected for the next confirmatory experiments C1, C2, and C3 are marked as \circ , \triangle , and \square respectively.

5.3.3 色差抑制効果の確認

スクリーンの種類や線数が Fix された時の、小径ビームによる実質的な色差抑制効果を見積もるため、ドットスクリーンとラインスクリーン、低線数スクリーンと高線数スクリーンの総組み合わせとなる 4 種類のスクリーンそれぞれに対して同じ変動条件を与えたときに発生する色差を確認した。

変動因子の条件は、C1 として中心条件を選定し、C2 として低濃度側に振れる水準、C3 として高濃度側に振れる水準を選定した。C2 と C3 の水準の選定方法は、電子写真プロセスの特徴からそれぞれの濃度側に振れる水準であることと、Fig. 10 に示す要因効果図で SN 比が中心条件より小さくなる条件であることを加味して選定した (Fig. 10 の \circ \triangle \square 参照)。選定した変動因子の 3 条件 C1, C2, C3 を Table 2 に、実験結果を Fig. 11 に示す。

Table 2 Sets of compounded noise factors in the confirmatory experiment.

Factors Levels	T/C	Background margin	Power of laser diode	Developing bias
	C1	5%	Default	Default
C2	6%	+30V	-10%	-30V
C3	6%	-30V	Default	+30V

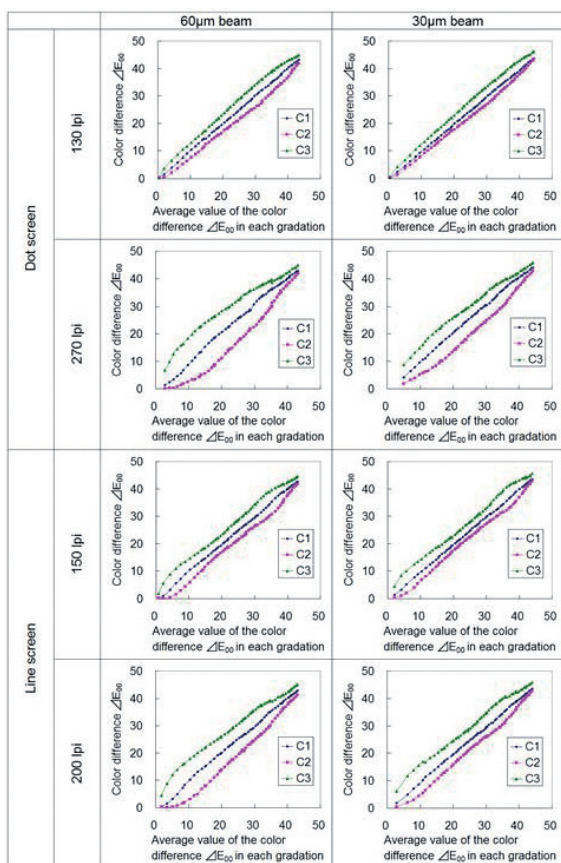


Fig. 11 Influences of compounded noise factors on color difference. Effect on reduction of color difference by decreasing the beam diameter has been observed in 4 types of screen set.

Fig. 11 に示すグラフの横軸、縦軸はFig. 9 と同じで、各スクリーンごとにビーム径によるグラフの違いを比較するために、左の列にビーム径60 μmのグラフを、右の列にビーム径30 μmのグラフを並べた。

この結果より、すべてのスクリーンにおいて、60 μmの結果は30 μmの結果より傾き1の直線から乖離しており、小径ビーム化が色差抑制に効果があることがわかる。また、高線数スクリーンの60 μmの結果は乖離量が大きくて実用レベルから大きく外れているが、30 μmでは実用レベルとなっており、小径ビーム化が高線数スクリーンの実用化を可能とする手段の一つであることがわかる。

次に、小径ビーム化による色差抑制効果を数値化して示すため、Fig. 11のグラフから各スクリーンのSN比を算出し、各スクリーンにおける小径ビーム化の利得を算出した。その結果をFig. 12に示す。

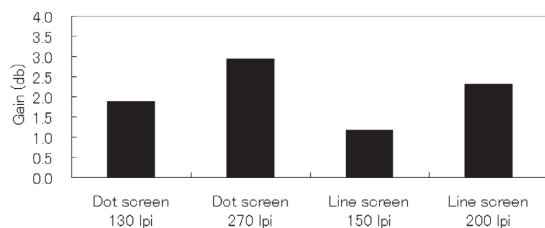


Fig. 12 Experimental gain in color difference by a decreased beam diameter.

この結果より、小径ビーム化の利得は約2db、高線数スクリーンにすると利得はさらに、約1db大きくなることがわかる。

Table 3に4種類のスクリーンで発生した同じ階調パッチ間の色差の最大値を60 μm, 30 μmそれぞれに示すとともに、60 μmから30 μmにした時の最大色差の低減率を示す。最大色差による比較においても高線数スクリーンにおいて抑制効果が大きい結果であった。

Table 3 Measured value of the maximum color difference in each experiment which differs in screen set and beam spot diameter. Declining rate of the maximum color difference by decreasing the beam spot diameter is also calculated.

	60 μm beam	30 μm beam	Declining rate
Dot screen 130 lpi	$\Delta E_{00} = 11.3$	$\Delta E_{00} = 8.6$	24%
Dot screen 270 lpi	$\Delta E_{00} = 19.5$	$\Delta E_{00} = 14.2$	27%
Dot screen 150 lpi	$\Delta E_{00} = 12.0$	$\Delta E_{00} = 10.7$	11%
Dot screen 200 lpi	$\Delta E_{00} = 15.6$	$\Delta E_{00} = 12.7$	19%

6 まとめ

従来の光学系の構成に対して開口を広げることで同波長のビームでも小径化を可能とし、小径ビーム光学系が必要とする、従来より高度な収差補正と温度変化に伴う性能変化の抑制手段については、光学素子の部品点数の増量や、樹脂の使用を避けてガラス用いた光学素子や、デフォーカス調整機構を設ける構成として対応することにより、母体機の流用が可能、かつ、30 μmまでの小径ビームでA3画像領域にわたって均一なビーム形状で露光可能な光学系の試作に成功した。そして、その試作光学系を用いて、母体機を流用して採取した画像の画質評価結果から、電子写真プロセスの変動により発生する色差に対して、小径ビーム化における抑制効果は約20%、その効果は高線数スクリーンほど大きいことを確認した。

●参考文献

- 1) 島田昭, 安西正保, 赤崎鉄郎: “レーザー走査パラメータと画像記録特性”, 第4回ノンインパクトプリンティング技術シンポジウム論文集, 1-4 (1987)
- 2) 渡辺好夫, 川本啓之, 庄司尚史, 鈴木宏克, 岸由美子: “レーザー露光による潜像形成のシミュレーション”, Japan Hardcopy 2000 論文集, 125-128 (2000)
- 3) 岩松正, 豊島哲朗, 東伸之, 武藤吉紀, 中島吉紀: “高解像度潜像形成および現像技術”, シャープ技報 (89), 42-48 (2004)
- 4) 稲垣義弘: “自由曲面ミラーを用いたレーザープリンター”, 光学, 31 (2002) 681-683