

レーザービームプリンター用反射型走査光学系

飯塚 隆之

1979年にキヤノンから半導体レーザーを光源とした小型プリンターが発表されて以来¹⁾、市場を拡大しつつ20年が経過した。その間レーザービームプリンター用光学系は、小型化と低価格化の要求に伴い、その形態を変えながら発展してきた。本報告では、レーザービームプリンターや小型普及機の光学系における世代交代と、それぞれの世代に用いられた構成・非球面形態の変遷を振り返るとともに、筆者らが開発した曲面ミラーを用いた走査光学系の収差補正について解説する。

1. レーザービームプリンターの基本的な光学系

図1は今日のレーザービームプリンター光学系の原形となったIBM3800の構成を示している。この図を用いて走査光学系についての基本的な説明をすることにする。光源としてHe-Neレーザー、変調器には音響光学素子を用いているが、現在の小型レーザービームプリンターでは自己変調可能な半導体レーザーが利用されていることは周知のとおりである。図のように偏向器を結像レンズの手前に配置する形態は、pre-objective型²⁾と呼ばれポリゴンミラーの回転により感光体上をレーザービームが移動する。走査光学系において、偏向動作によるレーザービームの走査に対応する方向は主走査方向、それに垂直でプリンターの紙送りに対応する方向は副走査方向と呼ばれることが付け加えておく。

pre-objective型の走査光学系に用いられる結像レンズは $f\theta$ レンズと呼ばれ、①光の集束、②像面の平坦化、③等速走査という基本的機能に加え、④面倒れ補正機能が要求される²⁾。①②は走査全域に対して均一なレーザースポ

ットを形成するための要求であり、光学設計においては、像面湾曲と波面収差の低減が図られる。③は偏向器の回動特性からくる要求である。ポリゴンミラーの回転によりレーザービームは等角速度で偏向されるので感光体上を等速度で移動するレーザービームに変換する必要がある。通常の $f\tan\theta$ で表現される結像特性をもつレンズを用いた場合、走査の中心部に比べて周辺部でのスポットの移動が速くなるため、 $f\theta$ で表せる結像特性を与える必要がある。この働きが $f\theta$ レンズと呼ばれる由縁であり歪曲収差を発生させることにより実現している。④はポリゴンミラーの加工に対する要求精度を緩和するためのものである。ポリゴンミラーの各反射面間で副走査方向に相対的な面倒れがあると、走査線ピッチが不均一になってしまう。そのため反射面の倒れによって生じた光束のずれを補正する必要がある。副走査方向においてポリゴンミラーの反射面と走査面を共役関係にする方式が一般的であり、主走査方向と副走査方向の焦点距離を異ならせるためのいわゆるアナモフィックなレンズ構成が必要になる。そのため図の例ではポリゴンミラーの手前にシリンドリカルレンズを配置して反射面上に線像を形成し、ポリゴンミラーと $f\theta$ レンズの間にトロイダルレンズを設けることで、球面レンズ2枚からなる $f\theta$ レンズの①～③の働きを妨げることなく面倒れ補正を実現している。

2. 従来の走査光学系

小型普及機第1の世代を担った走査光学系は、図2に示すような、ガラスのアナモフィック $f\theta$ レンズであった。その一例として図中のレンズは、第1レンズがシリンドリカル面と球面で構成される負レンズ、第2レンズが平面とトーリック面から構成される正レンズで、主走査・副走査とも第2レンズのトーリック面で発生する像面湾曲を第1

旭光学工業(株)研究開発センター光学研究部(〒174-8639 東京都板橋区前野町2-36-9)
E-mail: t.iizuka@aoc.pentax.co.jp

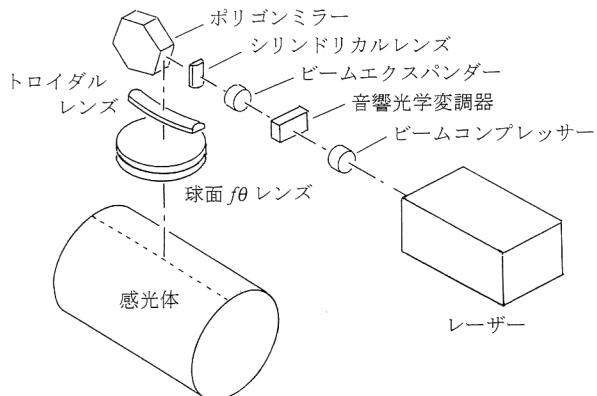


図1 IBM3800の光学系。

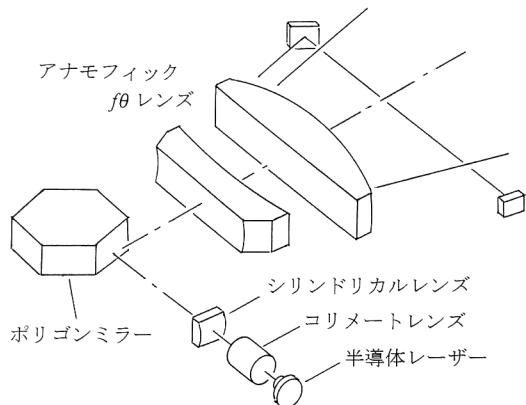


図2 第1世代の走査光学系。

レンズの凹面を用いて低減している。図1の光学系では面倒れ補正のためだけに働くレンズを $f\theta$ レンズの手前に設ける pre- $f\theta$ lens 型²⁾ と呼ばれる面倒れ補正配置にしているのに対して、 $f\theta$ レンズの面形状としてアナモフィックな面を採用する in- $f\theta$ lens 型²⁾ と呼ばれる方式を採用して機能の集積を図っている。また1次元方向の走査に特化して、不要な副走査方向に対応する部分を切り落としたスライスレンズ形状にすることで小型化が図られた。

この世代のトーリック面は図3のように、副走査断面に定義した円弧を主走査方向の曲率中心を回転軸とした回転体の一部として形成されるものであった。回転運動によるガラスレンズの研磨という加工上の制約から、トーリック面もシリンドリカル面も副走査断面の曲率半径が均一な回転体として形成されていることがこの世代のアナモフィック面の特徴である。

しかし、このようなアナモフィックガラス $f\theta$ には材料コスト・加工時間といった課題が残されていたため、その後 $f\theta$ レンズは急速にプラスチック化され第2の世代を築くことになった。金型にプラスチックを充填してレンズを形成するモールド技術によって、複雑な面形状をもつレン

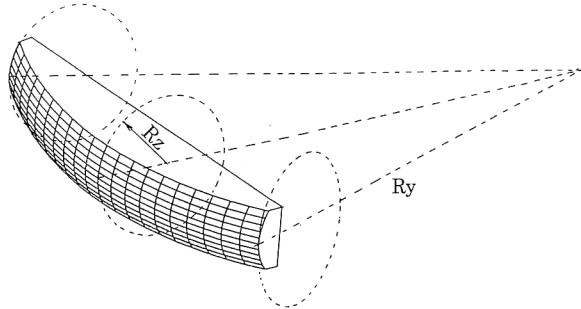


図3 トーリック面。

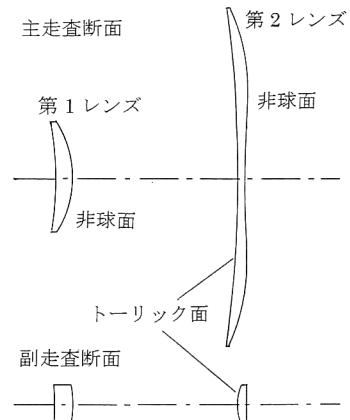


図4 プラスチック $f\theta$ レンズ。

ズの量産性の向上とコストの低減が可能となった。

プラスチックレンズへの移行の過程で大きな障害となつたのが諸特性の環境に対する不安定性であった。プラスチックレンズでは、屈折率の温度依存性、熱膨張、樹脂の吸排湿に伴う内部屈折率分布などによって大きな焦点移動が発生するため、お互いに強いパワーをもつ正レンズと負レンズの組み合わせによって収差補正する第1世代のアプローチの適用は好ましくない。そこで負レンズを含まない図4に示すような $f\theta$ レンズが用いられるようになった^{3,4)}。

共役結像方式の面倒れ補正機能をもつアナモフィック $f\theta$ レンズの場合、副走査方向に強いパワーが必要とされ、特に第1世代で主流となった in- $f\theta$ lens 型では副走査方向の結像倍率が高く、温度変化による焦点移動が深刻な問題となる。そのためこの光学系では、面倒れ補正レンズを主走査方向のパワーを負担するレンズから分離し走査面の手前に配置する post- $f\theta$ lens 型²⁾ と呼ばれる形態により副走査の結像倍率を低減し、焦点移動を許容範囲内に収めている。

収差補正のアプローチとしては、負レンズを用いた打ち消しによる補正ではなく非球面を用いて正レンズの曲率半径を連続的に変化させ収差の発生そのものをコントロールすることで最小限のパワーの配分にとどめ、収差と焦点移

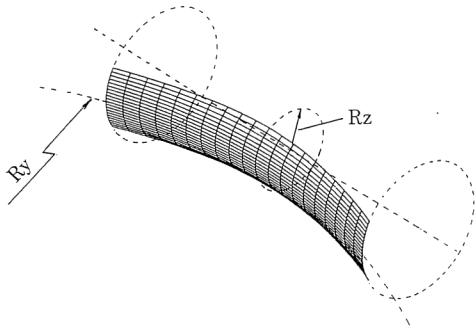


図5 面倒れ補正レンズのトーリック面。

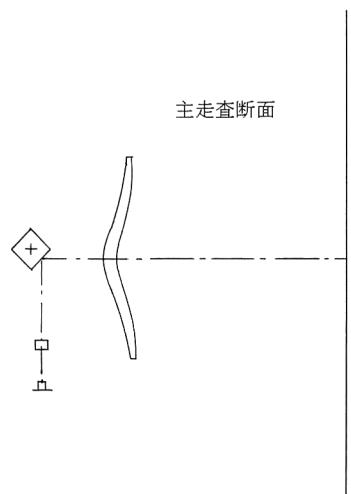


図6 非球面単レンズ。

動の発生を低減している。図5は第2レンズの入射側に用いられている面形状を示している。トーリック面の回転軸を主走査方向に取ることで主走査断面のサグが副走査方向の曲率半径の変化として副走査像面の平坦化に寄与している。

前述のとおり副走査方向がカットされた $f\theta$ レンズ系においては、光軸方向に厚いレンズは、吸排湿に伴う屈折率分布の影響を受けやすい。そのため主走査方向のパワーを負担するレンズを2枚にしてレンズ厚を分割したり、副走査方向のカット量を少なくする例があるが、部品点数が増えたりレンズの体積が増えるため、ともにコストアップの要因となる。非晶質ポリオレフィンに代表される低吸湿性材料も解決策の選択肢となつたが、PMMA (polymethylmethacrylate) と比較すると価格面の問題があり、コスト的にすぐれた解決策が望まれた。

3. 新しい走査光学系の形態

第2世代においては機能の集約を一步後退させることでプラスチックレンズを用いた走査光学系を実現したが、近年では機能配置の見直しにより部品点数を削減し、小型化

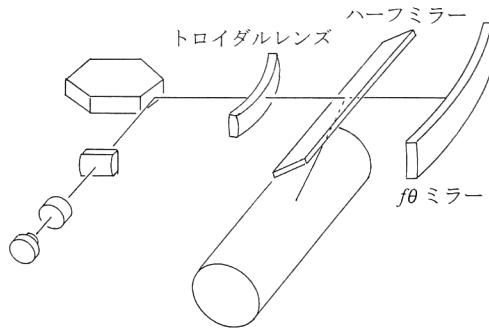


図7 特開平1-200221の光学系。

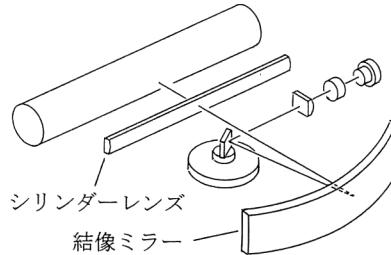


図8 特開平6-123844の光学系。

とコストダウンが図られた。図6は、このような第3の世代におけるひとつの形態としてpost-objective型走査光学系²⁾の利点を取り入れた光学系の一例⁵⁾を示す。入射光を集束光にすることで、レンズの光軸方向の厚さを抑え、収差の補正に特化したプラスチックレンズとして好適な形状を与えている。また1枚のレンズに主副像面の湾曲補正を集約させるため、副走査方向の曲率半径を光軸からの距離の関数として主走査断面形状に依存しない変化をもたせている。このような面形状の走査光学系への利用は、特開昭60-133416でpost- $f\theta$ lens型の面倒れ補正レンズに適用され、特開昭62-139520では1枚の $f\theta$ レンズへの集約のために利用されるなど、アイデアとしては古くから存在していたが、近年の加工機械の性能向上に伴い多くの走査光学系で現実のものとなつていった。

第3世代のもうひとつの流れが反射面の利用である。反射面は収差の低減に適した性質と光路の折り返しによる装置の小型化のメリットに大きな魅力がある。また反射面では内部の屈折率による影響を受けないのでプラスチックの屈折率の温度依存性や吸湿による屈折率分布の影響を克服するには好都合であった。そのため、光軸方向に厚くなりがちな主走査方向の屈折力を負担するレンズが反射面への置き換えの対象になった。

図7は早い時期に反射型走査光学系を具現化した例^{6,7)}を示している。ポリゴンミラーと $f\theta$ ミラーの間に面倒れ補正のトロイダルレンズを設けている。図8は面倒れ補正レンズを $f\theta$ ミラーと像面の間に配置した例⁸⁾であるが、

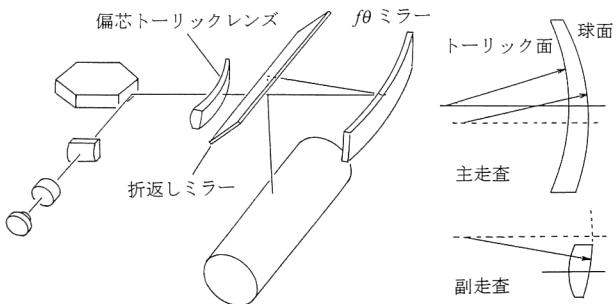


図9 偏芯トーリックレンズを用いた走査光学系。

面倒れ補正レンズが大型化してしまう反面、面倒れ補正レンズにプラスチックを用いることを考えた場合には、温度変化による焦点移動を小さくできる点では図7の光学系よりも有利である。

このような曲面ミラーを利用した走査光学系の例は古くからみられるが、反射型走査光学系における最大の障害は走査線の湾曲である。曲面ミラーへの入射光と反射光を分離する必要があり、曲面ミラーを副走査方向に傾けた場合、走査されたレーザービームが円弧状の軌跡となる。この走査線湾曲という課題に関しては、もう1枚の曲面ミラーを付加して相殺する方法⁹⁾、音響光学偏向器を設けて副走査方向へ光を振ることでアクティブに補正する方法¹⁰⁾などが提案されていた。図7の光学系では、この問題の解決策としてハーフミラーを利用している。つまり、曲面ミラーを傾けずに入射光と同一平面内に戻しているために、走査線の湾曲を根本的に解消できる。しかし、ハーフミラーを2回通過するための光量損失が大きく、迷光の処理なども必要になるなど実装上の課題も多い。図9はそのへんの改良を加えて、 $f\theta$ ミラーの傾きによって入射光と反射光を分離し、トロイダルレンズ後面（球面）の副走査方向への偏芯により走査線湾曲の低減を図ったものである。また同時に主走査方向への偏芯も導入し、偏向点変化に伴う非対称性を改善している¹¹⁾。

4. 反射型走査光学系における収差補正¹²⁾

筆者らが開発した反射型走査光学系の収差補正について説明する。図10はその基本構成を示しており、ポリゴンミラー以降の光学系は、プラスチックにアルミコートを施した非球面ミラーとpost- $f\theta$ lens型の面倒れ補正レンズの2枚構成となっている。主走査方向のパワーを負担するレンズをミラー化することで1枚の光学素子にパワーを集中しながらもレンズの厚肉化を防ぎ、その材料的欠点を克服している。またpost- $f\theta$ lens型の面倒れ補正レンズにより副走査方向の結像倍率を低く設定し、プラスチック面倒れ

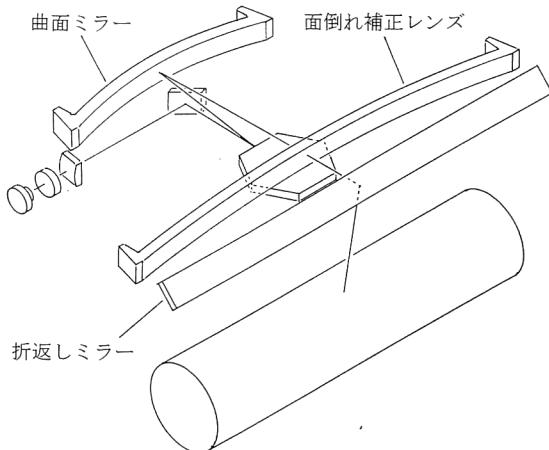


図10 反射型走査光学系。

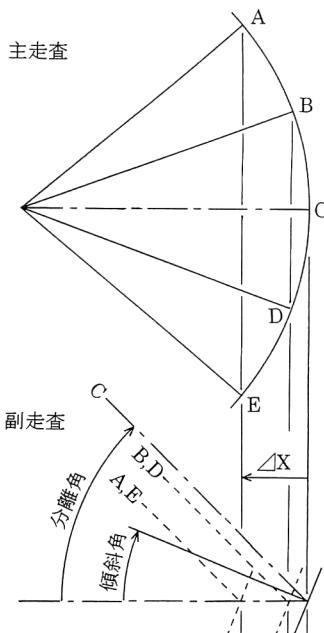


図11 走査線湾曲発生の仕組み。

補正レンズの温度変化に起因する焦点移動を低減している。

走査の等速性、主走査像面の平坦化は曲面ミラーと面倒れ補正レンズの主走査断面非球面形状を利用し、副走査像面の平坦化は面倒れ補正レンズの副走査方向曲率変化を利用しておおり、 $f\theta$ レンズの基本的機能の確保に関しては、第2世代の収差補正のアプローチを踏襲している。

図11は曲面ミラーの傾きによる走査線湾曲発生の仕組みを模式的に示している。ミラーの主走査形状から決まるサグ ΔX とミラーの傾斜角から反射光に副走査方向へのずれが生じることになる。この走査線湾曲の補正手段として着目したのがポリゴンミラーである。通常の走査光学系ではポリゴンミラーの回転軸に垂直な平面内で入射光を配

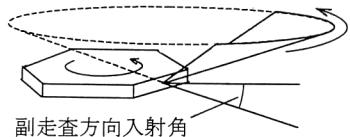


図 12 ポリゴンミラーの反射光の軌跡。

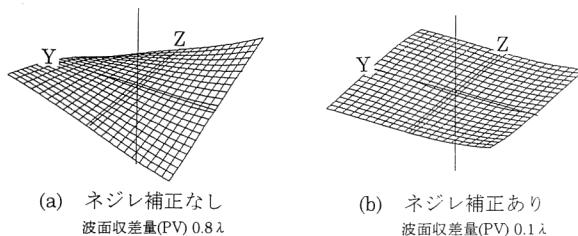


図 13 波面収差図。

置するため、ポリゴンミラーで偏向された光線も同じ平面内で走査されることになる。この場合、ポリゴンミラーによる副走査方向への作用はない。そこで図 12 に示すように入射光を副走査方向に傾けた場合、偏向点変化を無視すればポリゴンミラーからの反射光の軌跡は円錐状になる。このポリゴンミラーと入射光の関係による走査線湾曲と曲面ミラーの傾きによる走査線湾曲を逆向きに発生させることで像面上での湾曲を低減することができる。

この副走査方向への自由度をもたせた配置は走査線湾曲の補正には効果的であったが、波面収差上の副作用があった。ポリゴンミラーへの入射光は面倒れ補正のために副走査方向に集光され反射面近傍に線像を形成している。また、曲面ミラーと像面の間に配置した面倒れ補正レンズは主走査方向のパワー負担がきわめて小さく、副走査方向にのみ結像作用をもっている。つまり、主走査方向の線像だけが像面上で点像として形成される構成となっている。しかし、ポリゴンミラーへの入射方向を反射面に対して副走査方向に傾けて配置すると、ポリゴンミラーの回転に伴い線像の方向が旋回してしまい、線像方向と面倒れ補正レンズの母線方向とにねじれが発生する。図 13(a) は線像の旋回により生じた走査開始位置での波面収差の鳥瞰図を示しており、図中 Y・Z で示される方向がそれぞれ主・副走査方向に対応している。主走査・副走査対応方向の波面収差は小さいがスクュー方向に波面のねじれが発生していることが理解できる。この波面のねじれが走査位置（偏向角）によって変化するため、像面湾曲が平坦化されているにもかかわらず集光状態が不均一になってしまっているのである。

このように、波面のねじれは走査線湾曲を補正する手段と面倒れ補正の手段の不適合による問題であったが、それ

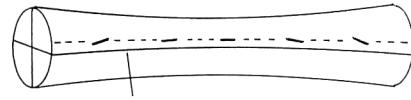


図 14 線像方向の旋回と光線の軌跡。

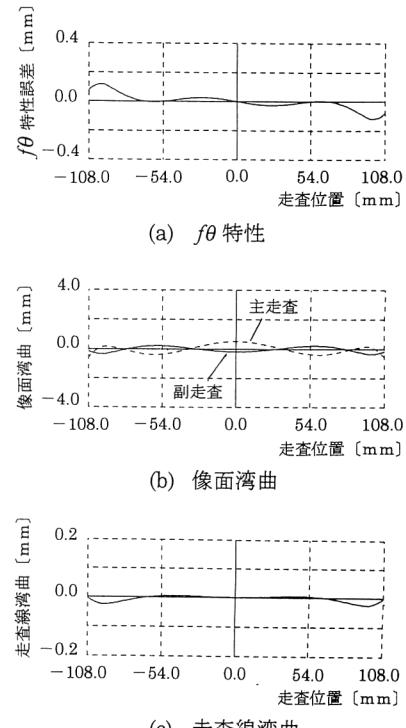


図 15 性能特性図。

を解決したのは面倒れ補正レンズの副走査方向への偏芯であった。図 14 はトーリック面へ入射する光束の軌跡と線像方向の旋回を示した概念図である。図のように副走査方向の曲率半径に変化をもつアナモフィック面が副走査方向に偏芯した場合、入射光に対して副走査対応方向の傾きが走査対応方向の高さに応じて変化するため、波面のねじれを補正する効果が発生するのである。図 13(b) は面倒れ補正レンズの偏芯を利用して補正した波面収差を図 13(a) と同じ走査位置で示したもので、波面のねじれが良好に補正されていることが理解できる。

反射型の欠点である走査線湾曲の発生を抑えるだけでなく、アナモフィック非球面の偏芯を利用した新しい収差補正の形態を採用するとともに、温湿度変化に対して寛容な走査光学系を実現した。図 15 に本反射型走査光学系の性能特性を示す。

5. 反射型における機能集約

曲面ミラーと面倒れ補正レンズの 2 枚構成の収差補正について解説したが、反射型においても機能集約による構成

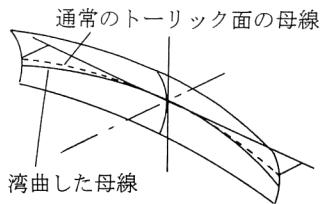


図 16 母線が湾曲したトーリック面。

枚数の削減が課題となっている。温度・湿度・波長変化に有利な反射型で1枚の曲面ミラーに必要な機能すべてを集約しようという究極の形態とも考えられる。このような形態を実現するためには、主走査・副走査の曲率に独立した変化を許すことで屈折レンズ系の大きな進歩に貢献してきた非球面から一步進めて、副走査方向の傾きに変化を加えることのできる非球面が必要になる。

副走査方向の傾きに変化を与えることで照射位置をコントロールするというアイデアは比較的古くから存在し、特開昭62-253116では反射面にねじれを与えて曲面ミラー自身のサグに起因する走査線湾曲を補正する考え方が導入されている。図16は面倒れ補正を含めた具体的な面形状を示したもので、トーリック面の母線を副走査方向に湾曲させることで副走査方向への傾きの変化を与え走査線の湾曲を低減している¹³⁾。しかしこのような手段をもってしても、透過型のレンズ1枚が2面の屈折面で構成されているのに対して、反射型は1面のみであって収差補正上の不利は明らかであり、そのうえ走査線湾曲や波面のねじれといった副走査方向に配置展開した反射型に特有の現象も同時に考慮しなければならない。そのため、すべての収差を許容範囲内に収めようとした場合、曲面ミラーとポリゴンミラーの間隔を大きくする必要があり、曲面ミラーの大型化が避けられない。

このようなシングルエレメント化における反射型のデメリットに対してレンズの裏面反射を利用した走査光学系が提唱されている¹⁴⁾。レンズの射出側に相当する面に反射面としての処理を施すことにより、ポリゴン側からレンズに入射した光束が裏面で反射した後、再びポリゴン側の面から射出されることになる。つまり、このレンズは1枚の反射型レンズでありながら、2面の屈折面と1面の反射面から構成されることになる。これは前述した曲面ミラー1枚と面倒れ補正レンズ1枚からなる2枚構成の走査光学系と比較しても構成面数上は同等になる。

また、この走査光学系は反射レンズの光軸配置にも特徴がある。図17に示すように透過面と反射面が共通の光軸をもち、その反射レンズの光軸がポリゴンミラーの回転軸

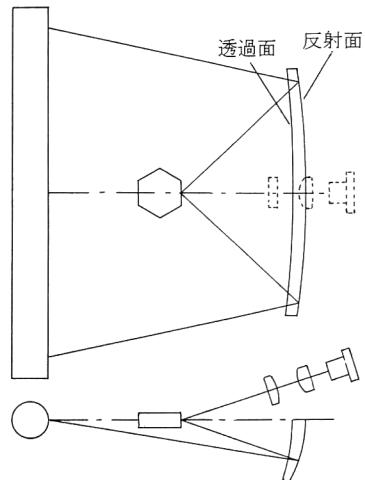


図 17 裏面反射を利用した走査光学系。

と垂直に交わるように配置している。これは通常の透過型の走査光学系とまったく同じであり、透過レンズと反射レンズの違いは別として、異なるのはレンズの光軸から外れたところを通過する光路と、ポリゴンミラーより光源側の構成が副走査方向に傾いていることである。このような光軸配置で反射レンズの光軸上にある像面とポリゴンの反射面との共役関係を保つことで、走査線湾曲の発生を抑制しようと考えられている。これは面倒れ補正の原理を利用し、同じ作用で同時に走査線湾曲も低減しようというものである。また光軸外に光束を通することで曲面ミラーの入射光と反射光の空間的分離を可能にしている。

このように主なパワーを反射面にもたせ、屈折面に収差補正の補助的な役割をさせる表裏面を有効に利用した走査光学系は、プラスチックの欠点を補いながらシングルエレメント化を可能にする形態のひとつであると考えられ、今後の実用化に期待したい。

レーザービームプリンター用光学系の変遷と反射型走査光学系における収差補正について紹介した。超精密加工機械、モールド技術の恩恵にあずかって小型化とコストダウンを果たしてきた走査光学系であるが、今後どのような形態が登場してくるか興味深い。また、印字の高速化を可能にするマルチビーム化やカラープリンターの低価格化に対応するための走査光学系にはどのような構成が適しているかといったところが、次世代の走査光学系の流れを左右すると思われる。

文 献

- 1) 篠浦一雄、鈴木雅之：“スキャナー光学系”，光学，19（1990）283-289。

- 2) 佐久間伸夫：“光走査用素子と光学系”，オプトエレクトロニクス技術'93（日本オプトメカトロニクス協会，1993）。
- 3) 藤田久雄，山崎敬之：“レーザビームプリンターの走査光学系”，Konica Technical Report, 2 Jan. (1989) 36-42.
- 4) 藤田久雄：特開昭 61-120112.
- 5) 牧野 純：特開平 4-50908.
- 6) 黒田宗男，濱田明佳，中村 弘，内貴俊夫：“プラスチック $f\theta$ ミラーを用いたレーザ走査光学系の開発”，Minolta Technical Report, No. 8 (1991) 37- 44.
- 7) 黒田宗男：特開平 1-200221.
- 8) 厚海広道，佐久間伸夫，遠藤 理：特開平 6-123844.
- 9) 安部文隆，高橋英男，松田 忠，堀江政勝：特開昭 53 -

47852.

- 10) 安部文隆，松田 忠，三上知久，桜井文夫，伊丹 敏：特開昭 56-155916.
- 11) 中村 弘，濱田明佳：“偏芯トーリックレンズを用いたレーザ走査光学系の開発”，第16回光学シンポジウム講演予稿 (1991) pp. 31-34.
- 12) 飯塚隆之，小川良太：特開平 6-265810.
- 13) 中村 弘，濱田明佳：特開平 6-281872.
- 14) 関戸 誠：特開平 9-68664.

(1999年8月21日受理)