

# 解説

## レーザービームの偏向・走査法

小野 雄 三

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒213 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1986年8月1日受理)

### Laser Beam Deflection and Scanning

Yuzo ONO

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,  
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 213

#### 1. はじめに

レーザービームを情報処理機器をはじめとする種々の用途に応用するためには、これを制御する手段が必要である。ここでは、光ビームの空間的位置や方向を制御する光偏向、走査技術について、素子およびその光学系を中心に述べる。光偏向器は、光を空間的時系列的に制御する素子と定義されている。一方、空間光変調器は、光を空間的に並列に制御する素子であるが、最近のマイクロエレクトロニクス技術の発達によって光偏向器が空間光変調器におきかえられようとしている応用分野もある。

歴史的には、1960年代から1970年代初めの光エレクトロニクスの萌芽期に、光メモリ等への応用を狙いとして、電気光学結晶と複屈折結晶とから成るデジタル光偏向器<sup>1)</sup>と音響光学結晶を使った超音波光偏向器<sup>2)</sup>の研究が行なわれた。しかし、当時の磁気光学メモリやホログラムメモリは、応用されるに至らなかったため、これらも研究開発レベルの域を出なかった。70年代後半になると、レーザー光走査技術と電子写真技術とを組み合わせたレーザービームプリンタが開発されて<sup>3)</sup>、回転多面鏡と  $f\theta$  レンズとトロイダルレンズから構成される走査系が実用された。また、70年代後半には、新しい方式の光偏向素子として、ホログラフィックレーザーキャナが、その低収差化技術の改良によって実用された<sup>4,5)</sup>。

#### 2. 光偏向器の原理の概要

レーザービームを偏向するには、レーザー発振器内部

で行なう方法もあるが<sup>6,7)</sup>、発振器外で行なうためには、表1に示すように何らかの媒体を用いて、光を透過させ、またはその界面を用いて、反射、屈折、回折、複屈折、干渉等の物理光学的な現象を利用して実現される。そして、これらの現象が、また何らかの物理光学効果によって制御されなければならない。この制御は、図1に示すように物質の屈折率や吸収係数(おのおの、複素誘電率の実数部および虚数部)または物質界面の位置や角度を、外場によって変化させ、物質を透過または反射させる光のもつ物理的なパラメータ(振幅、位相、偏波)の変化を介して、物理光学現象の変動を生じさせることによって実現される。加える外場と変化する誘電率の要素との関係を結びつけるのが、表2に示す物理光学効果である。

これらのうち、実用されているものは、機械的な回転や変位を利用する方法と音響光学効果を用いる方法である。機械的な偏向器は、一般に大きな偏向角度と多数の偏向点数が得られるという特徴をもっており、本質的には走査形の偏向モードで動作する。このためファクシミリやプリンタのような記録装置やレーザーディスプレイ装置などの表示装置、バーコードリーダー装置のような読取り装置では、ほとんど機械的な光偏向器が使われる。回転多面鏡、ガルバノミラー、ホログラフィックキャナなどはすでに広く実用されている。音響光学効果を使った光偏向器は、ランダムな高速偏向が可能である点にその特徴があるが、機械的な偏向器に比べて偏向点数は少ない。現在実用されているものは変調器としての用途や、補助走査手段としての用途である<sup>8)</sup>。

表 1 光偏向器の種類

| 物理光学現象 | 偏向原理                            | 制御手段                                       |
|--------|---------------------------------|--|
| 反射     | ミラー、プリズムの回転、または傾きを変えて反射角を変える。   | モーター (回転多面鏡)、ガルバノ鏡、圧電素子 (電歪素子)、磁歪素子等が使われる。 |
| 屈折     | 媒体に屈折率の変化、または屈折率の勾配を作り、屈折角を変える。 | 音響光学効果 (定在波)、電気光学効果、フ란ツ・ケルディッシュ効果、熱光学効果    |
| 回折     | 媒体中に回折格子を作り、格子周期を変えて回折方向を変える。   | 音響光学効果 (進行波)、空間周波数分布格子の移動 (ホログラムの回転)       |
| 複屈折    | 複屈折物質を通過する常光、異常光で屈折率が異なることを利用   | 常光、異常光の選択には偏光スイッチ (電気光学効果) を用いる。           |

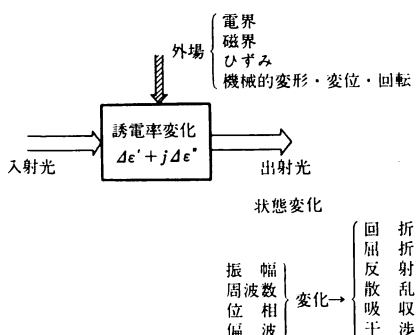


図 1 光偏向の概念的原理

表 2 物理光学効果

| 外場  | 誘電率変化                                   | 効果                                  |
|-----|---|-------------------------------------|
| 電界  | $\Delta\epsilon'$<br>$\Delta\epsilon''$ | 電気光学効果 (ポッケルス, カー)<br>フ란ツ・ケルディッシュ効果 |
| 磁界  | $\Delta\epsilon'$                       | 磁気光学効果<br>(ファラデー, カー, コットンムートン)     |
| ひずみ | $\Delta\epsilon'$                       | 音響光学効果<br>光弾性効果                     |
| 熱   | $\Delta\epsilon'$<br>$\Delta\epsilon''$ | 熱光学効果                               |

本稿では、回転多面鏡スキャナとその光学系、ホログラフィックスキャナ、超音波光偏向器を中心に解説し、その他の素子については空間光変調器を含め、簡単にふれる程度にとどめる。

### 3. 回転多面鏡スキャナ

一般に鏡による偏向を用いたビーム走査光学系には、図 2 に示すように鏡が結像レンズの後に配置されているポスト・オブジェクト型 (post objective または exit scanning) と、結像レンズの前に配置されているプレ・オブジェクト型 (pre objective または entrance scanning) の 2 種類がある。前者は、図 2 に示すように像面湾曲を生じる欠点があるが、レンズは口径を要しないし、像面のビーム径が大きい場合は、像面湾曲を無視して使用できる。一方、後者は、後述の  $f \cdot \theta$  レンズと組み合わせられて用いられるのが通常である。この場合、走査面は平面で、しかも走査速度も一定化されるが、かなり口径の大きい  $f \cdot \theta$  レンズを必要とする。

回転多面鏡への入射ビームは、レーザープリンタのように走査線の湾曲が問題となるような応用では、回転軸に垂直な面内で入射し、走査ビームも同一平面内で走査する配置がとられる。このため、入射ビームと反射ビームを同一平面上で分離できる光学配置が必要である。一方、バーコードリーダーのような記号読取り装置では、多方向の走査を要することから、反射面が回転軸に平行でない多面鏡も用いられる。

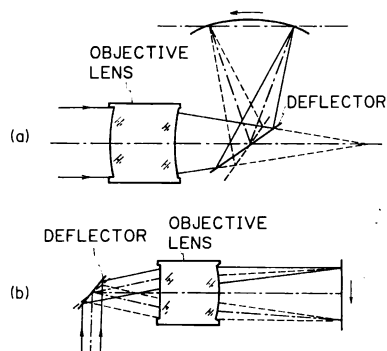


図 2 光ビーム走査光学系 (a)ポスト・オブジェクト型、(b)プレ・オブジェクト型

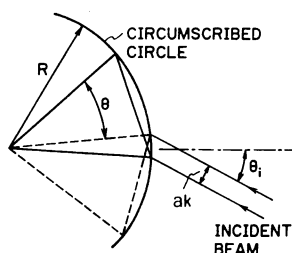


図 3 回転多面鏡の有効回転角

回転多面鏡の形状パラメータは、面数  $n$ 、外接円半径  $R$ 、厚さ  $t$  であるが、これらは次のように決定される。回転多面鏡への入射ビーム直径を  $a$ 、反射面端(稜部分)でのビーム・トランケーションに対する安全係数を  $k$  とすると、有効回転角  $\theta$  は図3から

$$2R \sin \{(2\pi/n - 2\alpha - \theta)/2\} = ak/\cos \theta_1 \quad (1)$$

より求めることができる。ここに、 $2\alpha$  は稜部分の無効角、 $\theta_1$  は反射面中心にビームが入射したときのビーム入射角である。前述のように、入射ビームと反射ビームが同一平面上で分離されなければならないので、入射ビームと反射ビームの最接近角を分離角  $\beta$  として設計に入れる必要がある。反射面中心にビームが入射した場合の反射ビームをほぼ走査中心に、光ビームは走査角  $\pm\theta$  走査されるので、分離角  $\beta$  は反射面中心にビームが入射した場合の入射角  $2\theta_1$  と走査半角  $\theta$  とから

$$\beta = 2\theta_1 - \theta \quad (2)$$

となる。(1)、(2)式から回転角  $\theta$  を求めると、

$$\theta = \pi/n - \alpha - \beta/2 - \sin^{-1} \{ak/R - \sin(\pi/n - \alpha + \beta/2)\} \quad (3)$$

となる。この回転角  $\theta$  に対して反射ビームは  $2\theta$  振れるので、焦点距離  $f$  の  $f \cdot \theta$  レンズと組み合わせると走査長は  $y = 2f\theta$  となる。また、ビーム直径  $a$  に対するフェー・フィールド角から、走査面上のビームスポット直径  $\varphi$  は、

$$\varphi = 4\lambda f / (\pi a) \quad (4)$$

となる。(3)、(4)式から走査長は次式となる。

$$y = 2f[\pi/n - \alpha - \beta/2 - \sin^{-1} \{4k\lambda f / (\pi R a) - \sin(\pi/n - \alpha + \beta/2)\}] \quad (5)$$

実際の設計では、走査長  $y$  と走査ビーム径  $\varphi$  が与えられて、他のパラメータを決定することになる。このためには、(5)式を用いて焦点距離  $f$  に対して走査長  $y$  をプロットすることで、面数  $n$  の上限と外接円半径  $R$  の下限を決定できる。トランケーションの安全係数  $k$  としては、通常 1.2~1.5 程度がとられる。光学系をコンパクトにするためには、焦点距離  $f$  を短く回転角  $\theta$  を大きく、すなわち面数  $n$  を小さくとるほうが有利である。最近、走査角が  $100^\circ$  という光学系も実用された<sup>9)</sup>。しかし、焦点距離  $f$  を短くすると、走査速度の要請からポリゴンの回転数を大きくしなければならなくなり、回転多面鏡の機械的強度と駆動パワーが問題となる。回転多面体の周囲流体に対する風損は、回転角速度の3乗に比例し、また面数  $n$  の-1.6乗(実験値)、外接円半径  $R$  の4乗に比例する<sup>10,11)</sup>。駆動パワーの低減には、外接円半径  $R$  を小さくすればよいが、そうすると反射面

端でのビームのトランケーションが増大し、有効偏向角がとれなくなる。 $R$  を大きくせずに有効偏向角を増す方法として、補助偏向器を用いて入射ビームを入射面内で反射面を追うように移動させるビームウォポリング方式も用いられる<sup>12)</sup>。ビームウォポリングでは、原理上有効偏向角を  $4\pi/n$  にできる。

回転多面鏡の加工精度としては、1) 各面の分割角度精度、2) 回転軸に対する各面の傾き(いわゆる倒れ角)、3) 鏡面の面精度がある。用途にもよるが、1) は数十秒以内、2) は後述の補正系を併用する場合数十秒以内、使用しない場合数秒、3) は  $\lambda/4$  以上を必要とする。材質は回転時の応力および歪を考慮して決められる<sup>13,14)</sup>。ガラス材料では加工は研磨によるが、金属材料の場合は、切削により高精度な面が作られる<sup>15,16)</sup>。この切削技術の開発が、レーザービームプリンタの商用化を可能にしたと言っても過言ではない。このほか、レプリカ方式を用いた製作方法もある<sup>17-19)</sup>。

#### 4. 走査用レンズと補正光学系

回転多面鏡による走査ビームは等角速度で走査されるので、これを走査平面上で等速化し、収束するのが走査用レンズで、フィールド・フラッタ・レンズとも呼ばれる。回転多面鏡用には  $f \cdot \theta$  レンズが使用される。ガルバノ鏡を偏向器とする場合、正弦波駆動ではアークサインレンズが、鋸歯状波駆動では  $f \cdot \theta$  レンズが用いられる。角速度  $\omega$  で回転する回転多面鏡による走査ビームの偏向角は、 $\theta_p = 2\omega t$  で、また正弦振動するガルバノ鏡の偏向角  $\theta_g$  は、 $\theta_g = 2A \sin \omega t$  で与えられる。走査面上で一定の線速度を得るためには、走査位置(レンズの像高)  $y$  はおのおの

$$y_p = f \cdot \theta \quad (6)$$

$$y_g = 2AfA \sin^{-1}(\theta_g/2A) \quad (7)$$

とならなければならない。通常のレンズの像高は  $f \tan \theta$

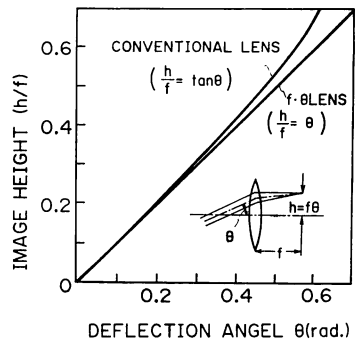


図4  $f \cdot \theta$  レンズの像高

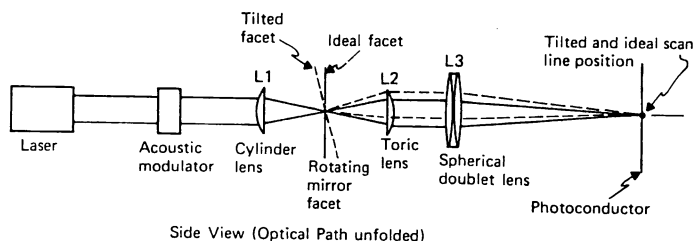


図 5 倒れ角補正の基本原理

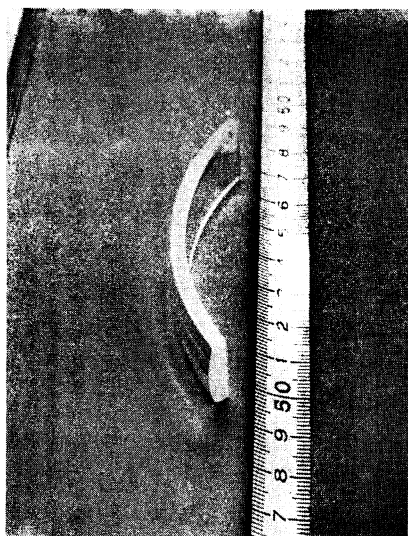


図 6 トロイダルレンズの一例

半導体レーザーを走査に同期して光軸方向に移動することで、 $f \cdot \theta$  レンズを用いなくて平面走査を行なう光学系も試作されている<sup>27)</sup>。

回転多面鏡の加工精度のうち、回転軸に対する各面の傾き、いわゆる倒れ角は走査線のピッチむらを生じる。この補正には光学的な方法が種々提案されており<sup>3,19,20,28)</sup>、円筒レンズ-トロイダルレンズ方式が主に用いられている。この補正方式の開発によって回転多面鏡スキャナがレーザープリンタ用に実用になったといっても過言でない。トロイダルレンズ方式の倒れ角補正の基本原理を図 5 に示す。回転多面鏡で生じた倒れ偏向ビームは、トロイダルレンズで光軸に平行にコリメートされ、 $f \cdot \theta$  レンズによって走査面上では同一走査線上に収束され、面倒れに起因する走査線のピッチむらを補正する。トロイダルレンズは図 6 に示すように 2 軸性レンズである。図 5 のトロイダルレンズ  $L_2$  が円筒レンズであると、走査ビームは走査角の増大とともに円筒レンズを斜めに横切るためフォーカルパワーが増大し、 $L_1$  で収束し発散されたビームをコリメートできない。このため円環状のトロイダルレンズを用いるわけであるが、回転多面鏡の回転による反射点移動で光路長変化が生じるので、これが最小になるようにトロイダルレンズの曲率および回転多面鏡との位置関係が設計される。通常、倒れ角補正率は数十~80 程度にできるので、回転多面鏡の倒れ角は 1 分ぐらいでも許容される。

である。(6), (7)式を満たすためには、わざと歪曲収差を導入した特殊レンズが設計される。これらがおのの  $f \cdot \theta$  レンズ、アークサイン・レンズである。図 4 に  $f \cdot \theta$  レンズと通常のレンズの像高の比較を示す。これらレンズの設計については、系統的な詳細な研究がある<sup>20-23)</sup>。プリンタ用 (ビームスポット径  $100 \mu\text{m} \phi$  程度) には 2 枚構成で実用可能である。 $f \cdot \theta$  レンズの仕様決定において、偏向点 (レンズの入射瞳) とレンズ入射端までの距離は、後述するトロイダルレンズを用いた倒れ角補正率を決めるうえで重要なパラメータで、長いほうが倒れ角の補正率を大きくとれる。

像面湾曲は大きい、平凸レンズ 1 枚構成の  $f \cdot \theta$  レンズや放物面鏡を用いた  $f \cdot \theta$  ミラーもある<sup>24,25)</sup>。また、倒れ角補正用のトロイダルレンズを  $f \cdot \theta$  レンズの構成要素として、凹凸レンズ 1 枚とトロイダルレンズで構成した光学系も実用されている<sup>9)</sup>。同じく凹凸レンズ 1 枚で構成した  $f \cdot \theta$  レンズとして、倒れ角補正用の円筒レンズを  $f \cdot \theta$  レンズの構成要素としたものもある<sup>26)</sup>。ポスト・オブジェクト型光学系を用いて、光源である

### 5. ホログラフィックスキャナ

ホログラフィックスキャナ (日本語ではホログラムスキャナといわれることが多い) は、ホログラフィの手法で製作した周期分布格子を移動 (主に回転) することにより、または単純格子を回転することにより回折光を走査する素子である。このうち、ゾーンプレート型の周期分布をもつホログラフィックスキャナは、走査に加え、走査ビームを走査面上に収束する機能をもっており、走査光学系が簡便になる。

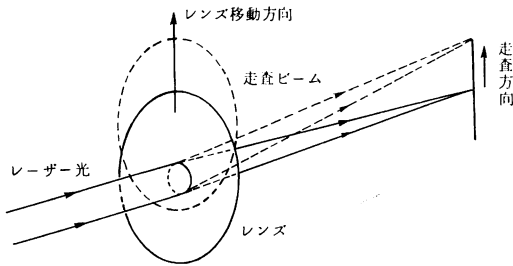


図7 ホログラフィックスキャナの走査原理

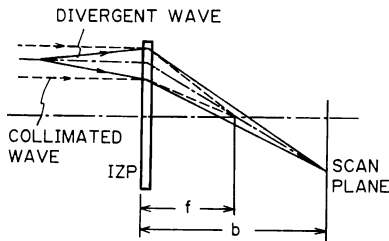


図8 ホログラフィックスキャナの走査長を拡大するための拡大投影法

図7に示すようにホログラフィックレンズに照射されたレーザー光は、ホログラフィックレンズ焦点に回折されるので、ホログラフィックレンズを移動するとレーザー光が走査される。これが走査原理で、実際にはホログラムの直接透過光があるので、ホログラフィックレンズの軸外し部分がいられる。このようなホログラフィックレンズの基本的なものは、発散球面波と平面参照波の干渉で製作した干渉型ゾーンプレート (interferometric zone plate, IZP) である。しかし、実際の応用には限られたホログラムサイズで必要な走査幅を得るために図8に示すように走査面をホログラムの焦平面よりも遠方に設定し、走査光が走査面上に収束するように発散波でホログラムを照射する。この場合、照射波面が記録時の波面と異なるため走査ビームに収差を生じる。最も問題となるのは非点収差である。

収差の補正方法として、平面参照波の代りに球面波を使用する方法(球面参照波法)<sup>29)</sup>、球面参照波法を繰り返して  $N$  個の球面波に適用してホログラムを作成する方法<sup>30)</sup>が開発された。球面参照波を基にした収差補正方法は、ホログラフィックゾーンプレートの干渉縞の周期分布を制御して収差補正する方法で、球面レンズの設計に類似した一般性のある方法である<sup>31)</sup>。IZP に記録されている同心円干渉縞の  $n$  番目の半径は、

$$r_1(n) = \sqrt{2n\lambda F + (n\lambda)^2} \quad (8)$$

で表わされる。一方、幾何学的ゾーンプレート (geo-

metric zone plate, GZP) と呼ばれるフレネルゾーンプレートの干渉縞の分布は、

$$r_G(n) = \sqrt{2n\lambda F} \quad (9)$$

である。走査面を焦平面より遠方に設定すると、IZP では走査角(回折角)の増加とともにビームは走査面より遠方に収束するようになるのに対して、GZP では走査面よりもホログラムよりに収束するようになる。このことは、フォーカルパワーが IZP では  $r$  方向に減少し、GZP では逆に増加していることを意味する。そこで、これを補正するためには、(8)式根号内第2項が GZP の場合のゼロより大きく、IZP の場合の  $(n\lambda)^2$  より小さい必要がある。これを実現したのが一般化した球面参照波法で、 $N$  個の球面波を用いた場合、干渉縞の分布は、

$$r_N(n) = \sqrt{2n\lambda F + (n\lambda/N)^2} \quad (10)$$

となり、非点収差を補正できる。本方法を用いて、走査角  $\pm 20^\circ$  以上のスキャナが実現された。ホログラムの移動は、ホログラムをディスク円周に配置して回転する形態がとられており、このようなホログラムディスクは、POS (point of sale, 販売時点情報管理) 用バーコード読取り装置に应用されている<sup>32,33)</sup>。

レーザープリンタ等に应用するためには、走査線が直線である必要がある。上で述べた  $N$  個の球面波を用いて製作したホログラムは、ディスクへの特定のホログラム配置をすることで直線走査ができる<sup>34)</sup>。しかしながら、ホログラムレンズを用いた方式の直線走査用スキャナでは、走査面上で走査線のピッチ誤差精度を満たすためには、ディスク回転軸に対するホログラムレンズの配置精度が  $\mu\text{m}$  オーダーで必要となる欠点がある。このため、空間周波数分布の小さいホログラムを用いる方式も提案されている<sup>35,36)</sup>。ホログラムに収束機能をもたせなければ、空間周波数分布が不要となり、走査線のピッチ誤差を生じない。この考えで、単純格子で直線走査を実現した方式がある<sup>37,38)</sup>。格子への入射角を  $\theta_i$ 、格子のピッチを  $D$ 、使用波長を  $\lambda$  とすると、直線条件は、

$$\sin \theta_i = \lambda/D - D/\lambda \quad (11)$$

である。回折角を  $\theta_a$  として、回折の関係式

$$\sin \theta_i + \sin \theta_a = \lambda/D \quad (12)$$

に代入すると、直線条件は、

$$1 \leq \lambda/D \leq 1.618 \quad (13)$$

となるが、ディスクの面振れに対して走査光の走査方向と直交方向の変位が最小となる  $\lambda/D = \sqrt{2}$ 、すなわち、 $\theta_i = \theta_a$  の条件で用いられる。この条件下では格子密度が高く、表面レリク型格子でもブラッグ格子として作用し、70% 以上の回折率が得られることが知られてお

り、この方式の特徴の一つになっている。

ホログラフィックスキャナの製造上の特徴は、レプリカ法によって容易に複製を製作できることである<sup>31,39)</sup>。ホログラフィックスキャナには、このほか種々のタイプがあり、多方向の走査線を発生できるのも特徴の一つである<sup>40)</sup>。

### 6. 超音波光偏向器

固体媒体中に励起された音波は、媒体中に密度分布を引き起こすため屈折率分布が誘起され、媒体は位相格子の役目をなす。この位相格子による光の回折角を音波の周波数を変化させて制御するのが音響光学効果を使った光偏向器 (超音波光偏向器) の原理である。構造を図 9 に示す。偏向される角度  $\Delta\theta$  は、

$$\Delta\theta \approx \Delta f \cdot \lambda / v \quad (14)$$

で与えられる。ここに、 $v$  は媒体中の音速、 $\lambda$  は空気中の光波長、 $\Delta f$  は偏向器の利用できる周波数幅である。偏向点数  $N$  は、

$$N \approx D \cdot \Delta f / v = \tau \cdot \Delta f \quad (15)$$

となる。ここで  $D$  は偏向器に入射する光ビームの径で、一様強度分布を有する場合を示す。 $D/v = \tau$  は、光ビームを音波が過ぎるのに要する時間であり、超音波光偏向器のアクセス時間を与える。偏向点数を多く得るためには、入射ビーム径を大きくすることが必要である。一方、ビーム径を大きくするとアクセス時間が増大し、さらに光ビームの断面内で音波の減衰が増して、偏向点数はビーム径に比例して増加しなくなる。超音波光偏向器で得られる偏向点数は最大 1,000~2,000 点程度と見積もられている。

光偏向は、励振音波周波数を変えて行なうが、偏向点数は圧電変換素子の帯域と、光学的な帯域、すなわち、

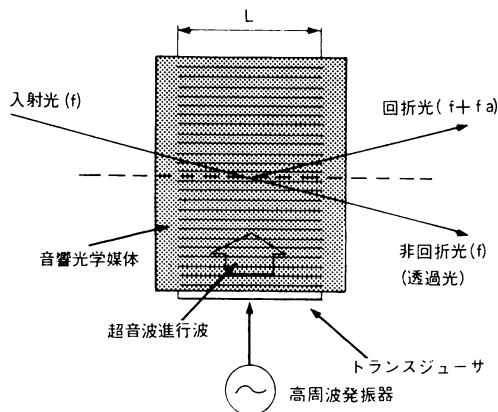


図 9 超音波光偏向器の構造

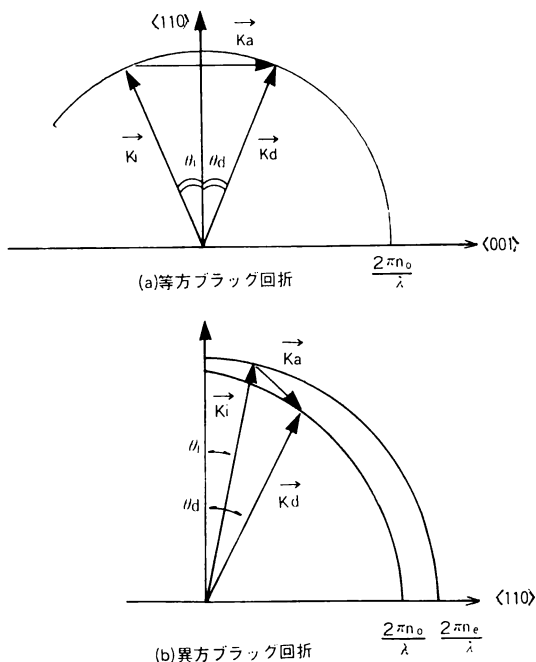


図 10 ブラッグ回折での波数ベクトルの整合 (a)等方ブラッグ回折, (b)異方ブラッグ回折

ブラッグ回折条件が保たれ、高回折効率が得られる帯域とで決まる。光学的帯域を拡大する方法には、トランスジューサを分割して位相を選ぶことで音波の波面を周波数によって傾ける方法と<sup>2)</sup>、異方性ブラッグ回折を用いる方法がある<sup>41)</sup>。TeO<sub>2</sub> 結晶を使った異方性ブラッグ回折での波数ベクトルの関係を図 10 (b) に示す。図 10 (a) に示す等方ブラッグ回折では、 $\theta_i$  (入射角) =  $\theta_d$  (回折角) の 2 等辺三角形になるが、異方性ブラッグ回折では、超音波の波数ベクトルが楕円から離れず、ブラッグ条件が広帯域に満たされる。音響光学媒体としては、TeO<sub>2</sub> のほか、PbMoO<sub>4</sub> が主に用いられている。

実用装置へ超音波光偏向器を利用した例はあまり多くない。その理由は偏向角度が数度以下と小さいため、偏向幅を広くとりたい場合に拡大光学系が複雑で大きくなる、偏向点数が記録装置に用いるには不十分である、広い帯域にわたって高速に周波数の変化する駆動回路を必要とすることなどによると考えられる。多くの装置では主走査は機械的な光偏向器によっている。補助走査手段として利用して、レーザー記録装置の記録速度や記録画質を向上させている例がある<sup>8,42)</sup>。

導波路型の音響光学光偏向器も研究されている<sup>43,44)</sup>。音波としては弾性表面波が用いられている。媒体としては、超音波光偏向素子材料としての性能指数は小さい

が、低損失の光導波路が Ti 拡散で容易に作れること、トランスジューサとして電気機械結合係数が比較的大きいことから LiNbO<sub>3</sub> が用いられている。

## 7. その他の光偏向器と空間光変調器型 走査素子

その他の光偏向器として、カルバノ鏡<sup>13,45,46)</sup>、バルク型電気光学光偏向器<sup>47-50)</sup>、導波路型電気光学光偏向器<sup>51)</sup>、ピエゾスキャナ<sup>52)</sup>、熱光学偏向器<sup>53)</sup>があるが、ここでは文献をあげるにとどめる。以上述べた光偏向器は、光ビームの角度偏向であるから、位置偏向を得るためには、光路長と広い空間を必要とし、応用装置の小型化には相反する欠点をもっている。これに対して、光を偏向しないで電気的時系列駆動によって光点走査を行なう固体光走査デバイスが提案され、実用されはじめている。いわゆる空間光変調器と呼ばれるもので、それ自身の開発の歴史は古く、また、応用もディスプレイや、将来の光コンピュータ用素子と広い。プリンタ、ディスプレイを目的に開発されているものは、LED アレイ<sup>54-57)</sup>、液晶シャッタアレイ<sup>57)</sup>、電気光学空間光変調器<sup>58,59)</sup>、熱光学空間光変調器<sup>60)</sup>、磁気光学シャッタアレイ<sup>61)</sup>があるが、名称をあげるにとどめる。

## 8. む す び

ここでは、現在実用されている機械的偏向素子と光学系を中心に、その原理と応用を概説した。光情報機器では、特殊なものを除き、光源が半導体レーザーに変わってきており、半導体レーザーに見合った大きさ、重さの光学素子の開発が必要である。これは光偏向素子においても今後の課題である。また、すでに、光偏向によらない並列光源やシャッタアレイを用いたプリンタも実用化されているとおり、光偏向によらずマイクロエレクトロニクス技術で解決されていく応用、また、将来技術である光集積回路技術が解決する応用もあるであろう。

さらに、最近の材料技術、半導体技術は、多重量子井戸構造に見られる桁違いに大きいフランツ・ケルディッシュ効果のように、非常にエンハンスされた物理光学効果を出現させてきており、光偏向技術にも大きなブレークスルーを期待したい。

## 文 献

- 1) T. J. Nelson: "Digital light deflection," *Bell Syst. Tech. J.*, **43** (1964) 821-845.
- 2) A. Korpel, R. Adler, P. Desmares and W. Watson: "A television display using acoustic deflection and modulation of coherent light," *Proc. IEEE*, **54** (1966) 1429-1437.
- 3) J. M. Fleischer, M. R. Latta and M. E. Rabedeau: "Laser-optical system of the IBM 3800 printer," *IBM J. Res. Dev.*, **21** (1977) 479-483.
- 4) 池田弘之, 稲垣雄史: "ホログラムスキャナとその応用", *光学*, **8** (1979) 18-26.
- 5) 西田信夫, 小野雄三: "ホログラムスキャナを用いたパコードリーダー", *O plus E*, No. 17 (1981) 77-83.
- 6) R. A. Myers and R. V. Pole: "The electron beam scanlaser: Theoretical and operational studies," *IBM J.*, Sept. (1967) 502-510.
- 7) 矢嶋弘義, 細井洋治, 渡辺正信, 伊藤日出男, 向井誠二, 植草新一郎: "ビーム偏向機能半導体レーザー", *光学*, **14** (1985) 295.
- 8) W. Meye: "Optical character generation for a high-speed non-impact printer," *J. Photogr. Sci.*, **25** (1977) 183-186.
- 9) 箕浦一雄: "超小型レーザープリンタ用走査光学系", *OPTONEWS*, No. 6 (1984) 34-36.
- 10) 吉澤 徹: "高速回転多面鏡の空気抵抗に関する研究", *精密機械*, **40** (1974) 46-50.
- 11) A. J. Lawler and J. Shepherd: "Windage of rotating polygons," *Laser Beam Scanning*, ed. G. F. Marshall (Marcel Dekker, Inc., New York, 1985) pp. 125-147.
- 12) 種田梯一, 龍岡静夫, 愛甲明毅, 佐藤俊夫: "回転多面鏡を用いた光ビーム走査器における有効アパチャーの拡大と不要偏向成分の光学的補正", *NHK 技術研究*, **27** (1975) 20-32.
- 13) 種田梯一, 龍岡静夫, 斎藤利也, 三橋哲雄, 愛甲明毅, 益子 仁: "1125 本方式レーザーカラーディスプレイの基本設計", *NHK 技術研究*, **27** (1975) 115-126.
- 14) T. Hayosh: "Motors and control systems for rotating mirror deflectors," *Proc. SPIE*, **84** (1976) 123-131.
- 15) 薄木雅雄: "ポリゴンミラー加工機について", 第8回光学シンポジウム予稿集 (1983) p. 8.
- 16) 渡辺 智: "金属ポリゴンの切削加工", *光学*, **13** (1984) 505-507.
- 17) H. Weissman and F. Denton: "The scanners for the effort of one," *Proc. SPIE*, **84** (1976) 35-40.
- 18) J. Hizny: "Feasibility of replicated optical scanners," *Proc. SPIE*, **299** (1981) 112-117.
- 19) R. J. Sherman: "Polygonal scanners," *Laser Beam Scanning*, ed. G. F. Marshall (Marcel Dekker, Inc., New York, 1985) pp. 63-123.
- 20) 南 節雄: "レーザー記録 光学技術からみた走査光学系の基礎的問題", 第8回画像工学コンファレンス論文集 (1977) pp. 101-104.
- 21) 箕浦一雄, 南 節雄: "アークサインレンズ", 第28回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 31 a-R-8, (1981) p. 104.
- 22) 箕浦一雄, 南 節雄, 立岡正道: "レーザープリンター用走査レンズの最適設計法", 同上, 31 a-R-9 (1981).
- 23) 箕浦一雄, 立岡正道, 南 節雄: "レーザー走査用レンズの設計", *光学*, **10** (1981) 348-355.
- 24) 丸山修治, 石井 淳: " $f\theta$  レンズの一つの型", *光学*, **11** (1982) 507-510.
- 25) 安部文隆, 松田 忠: "放物面鏡による光ビーム走査偏差補正法", *光学*, **6** (1977) 67-74.
- 26) 佐久間伸夫: "レーザープリンタ用  $f\theta$  レンズの単玉化", *Ricoh Tech. Rep.*, No. 9 (1983) 4-8.
- 27) 蘭 宗樹, 今元雅巳, 村山秀一, 安武 昭, 白幡春雄: " $f\theta$  レンズを使用しないレーザープリンタ用走査光学系",

- 電子通信学会論文誌, **J68-C** (1985) 171-177.
- 28) 岩立不二夫: 特開昭 51-6563.
- 29) 小野雄三, 西田信夫, 阪口光人: “[球面参照波法]で製作したホログラムスキャナ”, 第25回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 29 p-F-9 (1978) p. 189.
- 30) 小野雄三, 西田信夫, 阪口光人: “光波の積演算に基づいたホログラムスキャナの収差補正法”, 第40回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, 2 p-D-7 (1979) p. 76.
- 31) Y. Ono and N. Nishida: “Holographic laser scanners using generalized zone plates,” *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4542-4548.
- 32) 白壁和久, 川俣文男, 宮崎宏之, 山田友久, 山口靖弘, 篠木敏青, 小野雄三, 西田信夫: “ホログラムディスクを用いた POS スキャナ”, *NEC 技報*, **34** (1981) 64-66.
- 33) 宮崎宏之, 白壁和久, 安井邦夫, 山口靖弘, 青木春夫: “組込型 POS スキャナ”, *NEC 技報*, **37** (1984) 49-53.
- 34) Y. Ono and N. Nishida: “Holographic disk scanners for bow-free scanning,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2132-2136.
- 35) S. Hasegawa, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: “Holographic line scanner using different wavelength method,” *ICO-13 Conference Digest* (1984) pp. 692-693.
- 36) 岩岡秀人, 塩沢隆広: “直線・無収差ホログラム・スキャナ”, 電子通信学会技術研究報告, **OQE 84-86** (1984) 25-32.
- 37) C. J. Kramer: “Holographic laser scanners for non-impact printing,” *Laser Focus*, June (1981) 70-82.
- 38) H. Funato: “Holographic scanner for laser printer,” *Proc. SPIE*, **390** (1983) 174-182.
- 39) 西田信夫, 中野正和: “熱プレス法によるディスプレイ用ホログラムの複製”, *光学*, **8** (1979) 211-216.
- 40) Y. Ono and N. Nishida: “Holographic laser scanners for multidirectional scanning,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2128-2131.
- 41) R. W. Dixon: “Acoustic diffraction of light in anisotropic media,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-3** (1967) 85-93.
- 42) S. Matsuyama, K. Kubota and Y. Ohta: “FT-3000 photo facsimile using flat-field laser scanning,” *NEC Res. Dev.*, No. 56 (1980) 106-114.
- 43) R. V. Schmidt and I. P. Kaminow: “Acoustooptic Bragg deflection in LiNbO<sub>3</sub> Ti-diffused waveguides,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11** (1975) 57-59.
- 44) 野崎信春, 栖原敏明, 西原 浩: “光導波路形音響光学プリンタヘッド”, 電子通信学会技術報告, **OQE 85-177** (1985) 43-44.
- 45) S. Reich and H. Bill: “Precision optical scanner for operation in a severe environment,” *Proc. SPIE*, **299** (1981) 133-143.
- 46) J. Montagu: “Galvanometric and resonant low inertia scanners,” *Laser Beam Scanning*, ed. G. F. Marshall (Marcel Dekker, Inc., New York, 1985) pp. 193-288.
- 47) V. J. Fowler and J. Schlafer: “A Survey of laser deflection techniques,” *Proc. IEEE*, **54** (1966) 1437-1444.
- 48) F. S. Chen, J. E. Geusic, S. K. Kurtz, J. G. Skinner and S. H. Wemple: “Light modulation and beam deflection with potassium tantalate-niobate crystals,” *J. Appl. Phys.*, **37** (1966) 388-398.
- 49) R. A. Soref and D. H. McMahon: “Optical design of Wollaston-prism digital light deflectors,” *Appl. Opt.*, **5** (1966) 425-434.
- 50) M. A. Habegger, T. J. Harris and J. Lipp: “Total internal reflection light deflector,” *Appl. Opt.*, **5** (1966) 1403-1405.
- 51) 滝沢國治: “導波路形電気光学光変調器”, *光学*, **11** (1982) 346-355.
- 52) J. K. Lee: “Piezoelectric bimorph optical beam scanners: Analysis and construction,” *Appl. Opt.*, **18** (1979) 454-459.
- 53) M. Haruna and J. Koyama: “Thermooptic deflection and switching in glass,” *Appl. Opt.*, **21** (1982) 3461-3465.
- 54) 立石和義, 星野坦之, 小林正人, 高野 紘, 佐久田昌明: “電子写真式プリンタ用高密度 LED アレイの検討”, 電子通信学会技術報告, **IE81-85** (1981) 1-6.
- 55) 鮫島一博, 大西 勝: “小型 LED ヘッド”, 電子通信学会技術報告, **IE85-86** (1985) 1-5.
- 56) 荒井 久: “第3の光プリンタとして登場する発光ダイオード・プリンタ”, *日経エレクトロニクス*, 5月25日号 (1981) 114-128.
- 57) 福田 昭: “文書や簡易画像の出力機をねらい, 急速に製品が増える卓上型光プリンタ”, *日経エレクトロニクス*, 4月8日号 (1985) 135-157.
- 58) R. A. Sprague, W. D. Turner and L. N. Flores: “Linear total internal reflection spatial light modulator for laser printing,” *Proc. SPIE*, **299** (1981) 68-75.
- 59) W. D. Turner and R. A. Sprague: “Integrated total reflection (TIR) spatial light modulator for laser printing,” *Proc. SPIE*, **299** (1981) 76-81.
- 60) 箕浦一雄, 臼井正幸, 松岡和彦, 馬場 健, 鈴木雅之, 浅井 朗: “熱光学効果を利用した光変調素子”, *MICRO-OPTICS NEWS*, **12** (1984) 11-15.
- 61) B. Hill and K. P. Schmidt: “Fast switchable magneto-optic memory-display components,” *Philips J. Res.*, **33** (1978) 211-225.